

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7 添-2-067 改1
提出年月日	2020年9月2日

計算機プログラム（解析コード）の概要

2020年9月

東京電力ホールディングス株式会社

計算機プログラム（解析コード）の概要

目 次

1. はじめに	1
別紙1 MakeFRS	2
別紙2 Seismic Analysis System (SAS)	14
別紙3 VIANA	17
別紙4 DAC3N	20
別紙5 GRIMP2	22
別紙6 KSHAKE	24
別紙7 NVK263	26
別紙8 DYNA2E	33
別紙9 NOVAK	39
別紙10 SHAKE	41
別紙11 ST-CROSS	56
別紙12 TDAS	58
別紙13 MSC NASTRAN	60
別紙14 NX NASTRAN	80
別紙15 ADMIT	91
別紙16 LNOVAK	101
別紙17 SHAKE	110
別紙18 DIANA	125
別紙19 NAPISOS	139
別紙20 Soil Plus	141
別紙21 FLIP	165
別紙22 SLOK	168
別紙23 Engineer's Studio	170
別紙24 TDAPⅢ	189
別紙25 KSHAKE	192
別紙26 SHAKE	194
別紙27 NuPIAS	217
別紙28 KANSAS2	230
別紙29 NUPP4	239
別紙30 FRAME	266
別紙31 ANSYS	268
別紙32 FURST	293
別紙33 PRIME	295

別紙 34	ABAQUS	298
別紙 35	SAP-IV	321
別紙 36	NSAFE	324
別紙 37	SOLVER	327
別紙 38	HISAP	330
別紙 39	ISAP	333
別紙 40	NAPF	338
別紙 41	SAP-IV	358
別紙 42	KSAP	361
別紙 43	Super Build/SS7	373
別紙 44	MSAP (配管)	385
別紙 45	WCOMD-SJ	388
別紙 46	Hyper Statics and Dynamics	391
別紙 47	Super Build/SS3	400
別紙 48	N-DAPS3	438
別紙 49	SAP-V	450
別紙 50	STRUCT	465

1. はじめに

本資料は、添付書類V-2「耐震性に関する説明書」において使用した計算機プログラム（解析コード）について説明するものである。

「耐震性に関する説明書」において使用した解析コードの使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

別紙1 MakeFRS

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-1-7	設計用床応答曲線の作成方針	Ver. 1.0.0.1

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	MakeFRS
使用目的	設計用床応答曲線の作成
開発機関	東電設計株式会社, 川崎重工業株式会社
開発時期	2014年
使用したバージョン	Ver. 1.0.0.1
コードの概要	<p>本解析コードは、耐震設計に使用する設計用床応答曲線を作成することを目的としており、加速度応答時刻歴から応答スペクトルを計算する機能、複数の応答スペクトルの包絡値を求める機能、応答スペクトルの拡幅を行う機能を有する。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・別解析コードMSC NASTRANによる応答スペクトルと本解析コードで作成した応答スペクトルを比較し、一致していることを確認している。 ・拡幅機能については、手計算により±10%拡幅した算出値と、本解析コードで作成した算出値を比較し、一致していることを確認している。 ・包絡機能については、手計算により包絡した応答スペクトルと、本解析コードで作成した算出値を比較し、一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回の工事計画認可申請で使用する機能は応答スペクトルの作成機能であるため、同一の入力条件に対する1自由度系の最大応答加速度を固有周期ごとに算定し、別解析コードMSC NASTRANと本解析コードの結果を比較することで、妥当性を確認している。 ・設計用床応答曲線を作成する際、入力とする加速度応答時刻歴の時間刻み幅、データの形式は、上述の妥当性を確認している範囲内での使用であることを確認している。

	<ul style="list-style-type: none">・周期軸方向の拡幅率（±10%），加速度応答時刻歴の時間刻み，固有周期計算間隔は J E A G 4 6 0 1 -1987 に従っており，妥当性に問題ない。・今回の工事計画認可申請における応答スペクトル，加速度応答時刻歴に対し，使用用途及び方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

3. 解析手法

3.1 一般事項

本書は、建物・構築物の地震応答解析から算出される加速度応答時刻歴から応答スペクトルを作成する解析コードであるMakeFRS（以下、「本解析コード」という）の説明書である。

本解析コードは、一定の固有周期及び減衰定数を有する1質点系の、与えられた加速度応答時刻歴に対する最大応答加速度を計算し応答スペクトルを求める。また、求めた応答スペクトルを拡幅し、周期と減衰定数が同一の系で計算された複数の応答スペクトルの包絡値を求めて設計用床応答曲線の作成を行う。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴を下記に示す。

- ・ 加速度応答時刻歴から周期及び減衰定数に応じた応答スペクトルの算出
- ・ 応答スペクトルの周期軸方向への拡幅
- ・ 複数の応答スペクトルを包絡した設計用床応答曲線の作成

応答スペクトルの算出では、1自由度系（1質点）の運動方程式の解を数値積分法により求めるもので、本解析コードでは、ニガム法、ニューマークβ法、ルンゲ・クッタ法の3種類の数値積分法を選択して用いることができる。

3.3 解析手法

3.3.1 ニガム法

質点の相対変位を x ，固有円振動数を ω ，減衰定数を h ，地動の加速度時刻歴を $\ddot{y}(t)$ としたとき系の運動方程式は、

$$\ddot{x} + 2 \cdot h \cdot \omega \cdot \dot{x} + \omega^2 \cdot x = -\ddot{y}(t) \dots \dots \dots (3. 1)$$

と表される。 t は一定時間間隔 Δt ごとに与えられて、 \ddot{y}_i と \ddot{y}_{i+1} の間を直線によって補間し、 t_i を原点とする区間 $t_i \sim t_{i+1}$ 内の局所的な時間を τ ，

$$\Delta \ddot{y} = \ddot{y}_{i+1} - \ddot{y}_i \text{ とすれば，}$$

$$\ddot{y}(t) = \frac{\Delta \ddot{y}}{\Delta t} \cdot \tau + \ddot{y}_i \quad 0 \leq \tau \leq \Delta t$$

と表される。(3. 1)式は区間的に

$$\ddot{x}(\tau) + 2 \cdot h \cdot \omega \cdot \dot{x}(\tau) + \omega^2 \cdot x(\tau) = -\frac{\Delta \ddot{y}}{\Delta t} \cdot \tau - \ddot{y}_i \quad 0 \leq \tau \leq \Delta t$$

となる。

この非同時微分方程式を解いて、区間のはじめ時刻 t_i における初期条件

$$\tau = 0 : x = x_i, \quad \dot{x} = \dot{x}_i$$

を与えれば、区間の終わり $\tau = \Delta t$ (時刻 $t_{i+1} = t_i + \Delta t$) における相対変位応答及び相対速度応答は次のような形で求まる。

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= A_{11} \cdot x_i + A_{12} \cdot \dot{x}_i + B_{11} \cdot \ddot{y}_i + B_{12} \cdot \ddot{y}_{i+1} \\ \dot{x}_{i+1} &= A_{21} \cdot x_i + A_{22} \cdot \dot{x}_i + B_{21} \cdot \ddot{y}_i + B_{22} \cdot \ddot{y}_{i+1} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3. 2)$$

ここで、A, Bは $\omega, h, \Delta t$ が定めれば一意に定まる係数である。 x_{i+1}, \dot{x}_{i+1} が定めれば、絶対加速度応答は(3. 1)式より

$$(\ddot{x} + \ddot{y})_{i+1} = - (2 \cdot h \cdot \omega \cdot \dot{x}_{i+1} + \omega^2 \cdot x_{i+1}) \quad \dots\dots\dots (3. 3)$$

によって求められる。したがって、 $t=0$ における応答の初期値 $x_1=0$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\ddot{y}_1 \cdot \Delta t \\ (\ddot{x} + \ddot{y})_1 &= 2 \cdot h \cdot \omega \cdot \ddot{y}_1 \cdot \Delta t \end{aligned}$$

を与えれば、後は(3. 2)式と(3. 3)式によって応答値が算出される。

3.3.2 ニューマーク β 法

時間に関する関数 $x(t)$ の時間 t_i 周辺でのテイラー展開に基づくと、時間刻みを Δt とし、時刻 $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ における応答値は以下のように近似できる。

$$\begin{aligned} x(t_{i+1}) &= x(t_i) + \frac{dx(t_i)}{dt} \cdot \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \\ &\quad \cdot \frac{d^2x(t_i)}{dt^2} \cdot \Delta t^2 + \beta \cdot \frac{d^2x(t_{i+1})}{dt^2} \cdot \Delta t^2 \\ &\quad \dots\dots\dots (3. 4) \\ \dot{x}(t_{i+1}) &= \dot{x}(t_i) + (1 - \gamma) \cdot \frac{d^2x(t_i)}{dt^2} \\ &\quad \cdot \Delta t + \gamma \cdot \frac{d^2x(t_{i+1})}{dt^2} \cdot \Delta t \end{aligned}$$

ここで、 $\gamma = 1/2, 0 \leq \beta \leq 1/2$ で、各 β の値は Δt 間の加速度の変化と次のような関係がある。

- $\beta = 0$ は加速度が Δt 間で無変化
- $\beta = 1/6$ は加速度が Δt 間で線形に変化
- $\beta = 1/4$ は Δt 間の加速度は t と $t + \Delta t$ の平均値
- $\beta = 1/2$ は Δt 間の加速度は $t + \Delta t$ の値

(3. 4)式と系の運動方程式(3. 1)式の連立方程式の解を反復法により求める。すなわち、時刻 t_{i+1} における加速度 \ddot{x}_{i+1} の値を仮定し、(3. 4)式から時刻 t_{i+1} における変位 x_{i+1} 、速度 \dot{x}_{i+1} を計算、この変位、加速度を(3. 1)式に代入して得られる加速度と、最初に仮定した値との差が許容誤差範囲内になるまで繰り返し計算して解を求めるものである。

3.3.3 ルンゲ・クッタ法

関数の t におけるテイラー展開の4次の項まで合うようにした公式を用いて近似解を求めるものである。 t の関数 x の微分方程式 $\dot{x} = f(t, x)$ に対して、時刻 $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ における近似解は以下の式から求められる。

$$x_{i+1} = x_i + \frac{1}{6} \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4) \dots \dots \dots (3. 5)$$

ここで、

$$k_1 = \Delta t f \cdot (t_i, x_i)$$

$$k_2 = \Delta t f \cdot (t_i + \frac{\Delta t}{2}, x_i + \frac{k_1}{2})$$

$$k_3 = \Delta t f \cdot (t_i + \frac{\Delta t}{2}, x_i + \frac{k_2}{2})$$

$$k_4 = \Delta t f \cdot (t_i + \Delta t, x_i + k_3)$$

以上の公式を運動方程式に適用して加速度応答解を求める。

3.4 解析フローチャート

本解析コードを用いて行う解析フローチャートを図3.4-1に示す。

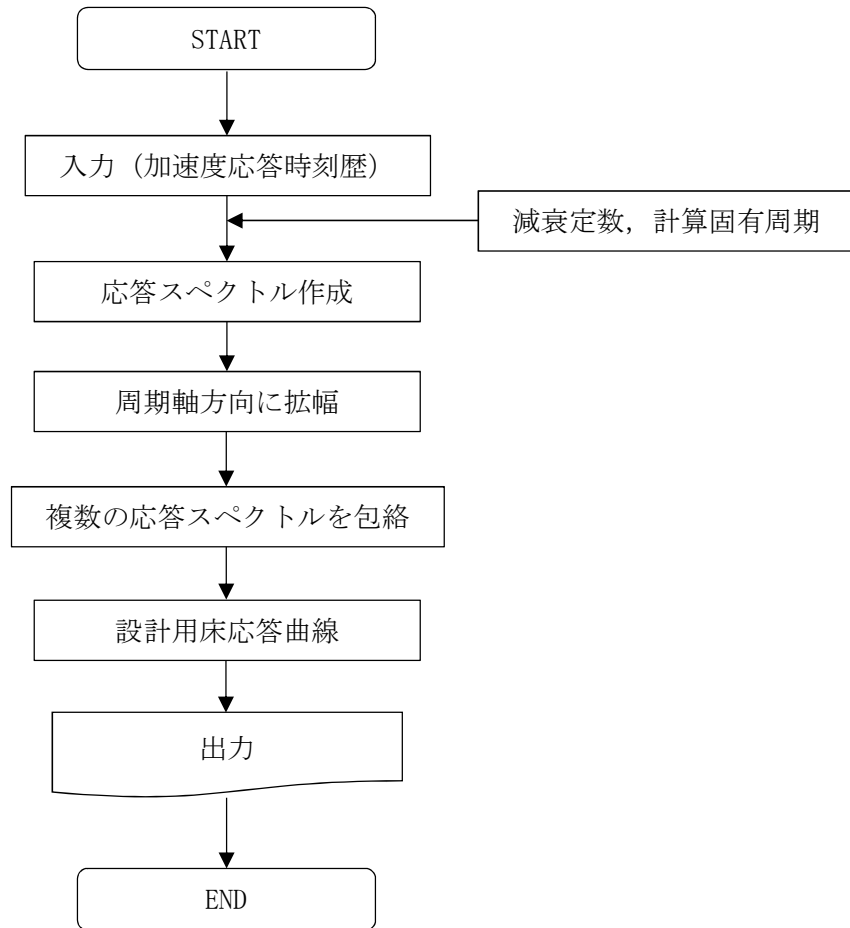


図 3.4-1 解析コード「MakeFRS」を用いた解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

3.5.1 検証 (Verification)

(1) 応答スペクトル作成機能

別解析コードMSC NASTRANによる応答スペクトルと本解析コードで作成した応答スペクトルを比較することで、本解析コードの検証を行った。

検証に用いた加速度応答時刻歴を図3.5-1に示す。また、別解析コードと本解析コードで作成した応答スペクトルを比較したものを図3.5-2に示す。図3.5-2より本解析コードの結果は別解析コードの結果とよく一致していることがわかる。

(2) 拡幅機能

拡幅は、拡幅前の応答スペクトルを周期軸方向に -10% とした曲線と $+10\%$ とした曲線及び両曲線を結ぶ水平線を構成する点、3つの曲線が交わる場合にはその交点を加えて、大きい値を選定して作成する。本解析コードの拡幅機能は、3つの曲線をプロットした図を確認して選定した手計算値と、本解析コードで作成した算出値の比較により検証した。拡幅前の応答スペクトルには(1)で作成したものをを用いた。図3.5-3に本解析コードによる拡幅結果を示すように、正しく拡幅されていることがわかる。

(3) 包絡機能

包絡は、2つの応答スペクトルを構成する点及び2曲線が交わる場合にはその交点を加えて、大きい値を選定して作成する。本解析コードの包絡機能は、2つの曲線をプロットした図を確認して選定した手計算値と、本解析コードで作成した算出値の比較により検証した。包絡前の応答スペクトルには(2)で作成したもの及び別の $\pm 10\%$ 拡幅済み応答スペクトルを用いた (図3.5-4参照, 「包絡前1」及び「包絡前2」)。図3.5-4に本解析コードによる包絡結果を示すように、正しく包絡されていることがわかる。

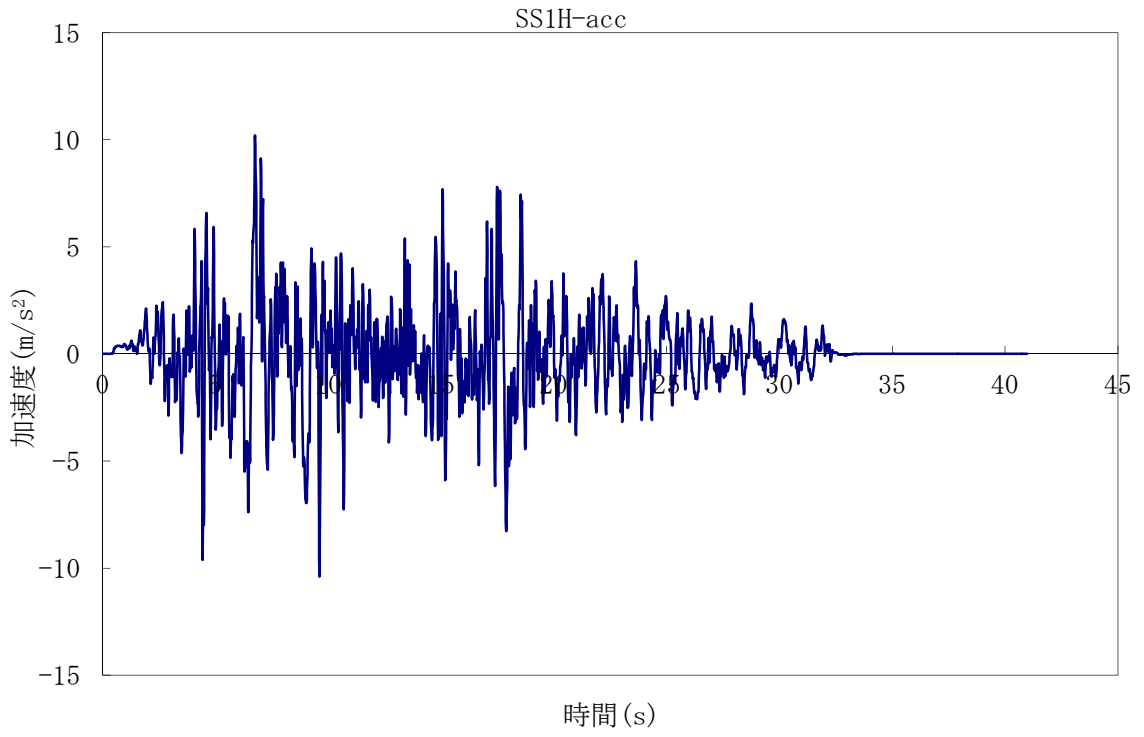


図3.5-1 検証に用いた加速度応答時刻歴の波形

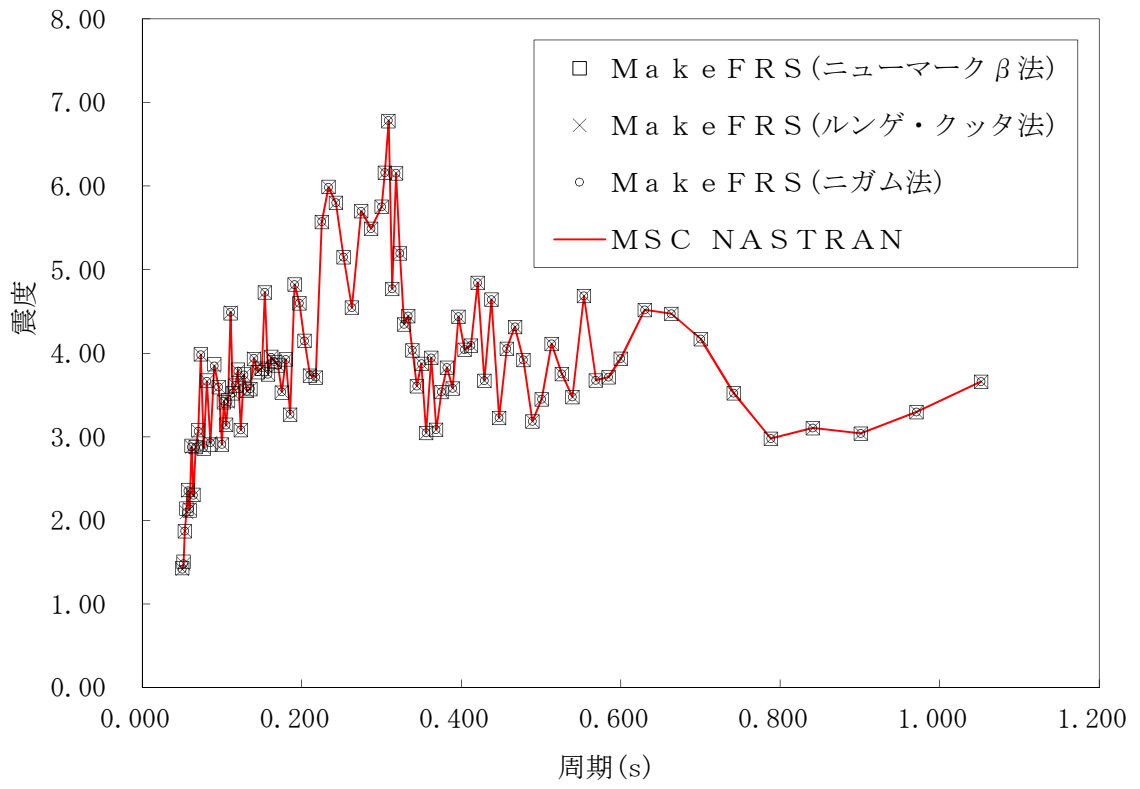


図 3.5-2 応答スペクトルの解析結果比較

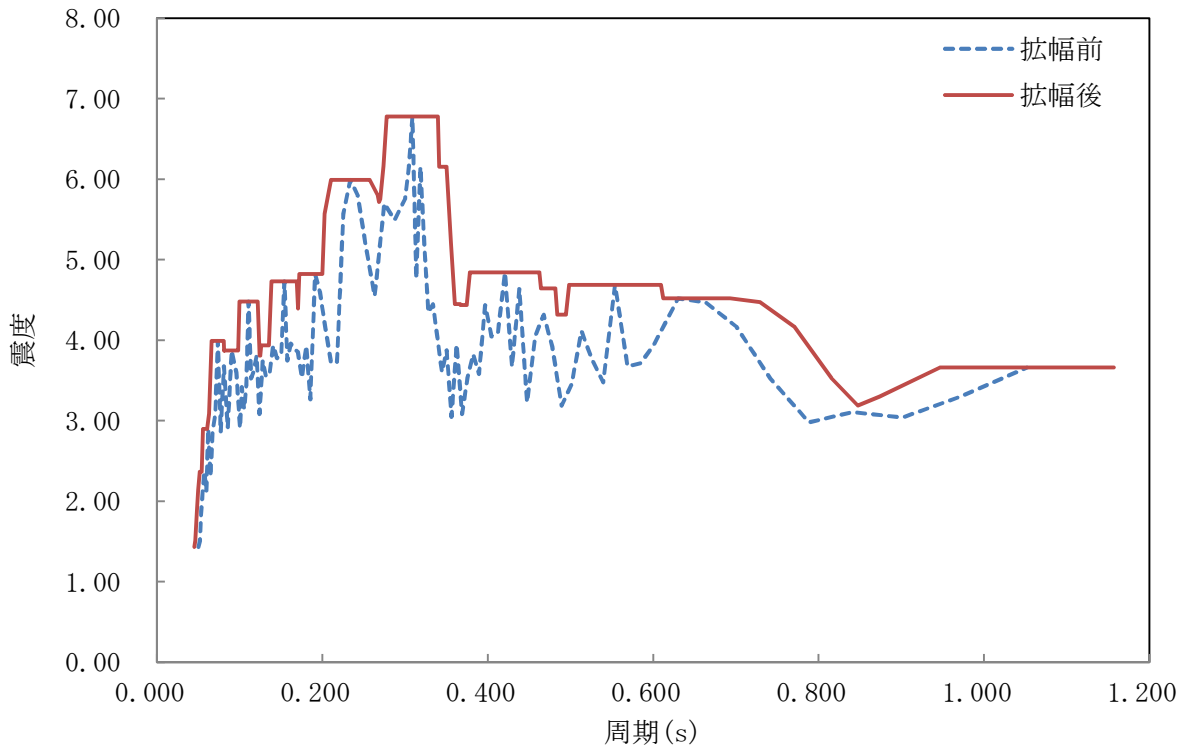


図 3.5-3 拡張結果

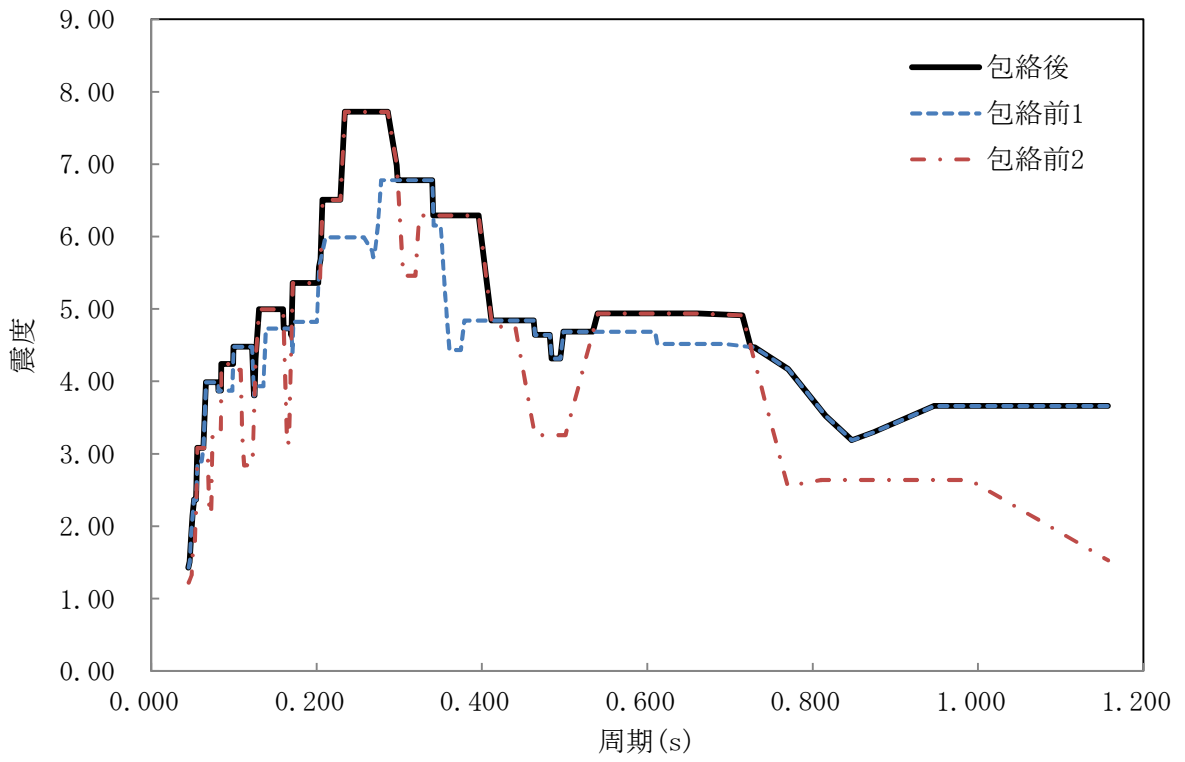


図 3.5-4 包絡結果

3.5.2 妥当性確認 (Validation)

本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。

- ・今回の工事計画認可申請で使用する機能は応答スペクトルの作成機能であるため、同一の入力条件に対する1自由度系の最大応答加速度を固有周期ごとに算定し、別解析コードであるMSC NASTRANと本解析コードの結果を比較することで、妥当性を確認している。
- ・設計用床応答曲線を作成する際、入力とする加速度応答時刻歴の時間刻み幅、データの形式は、上述の妥当性を確認している範囲内での使用であることを確認している。
- ・周期軸方向の拡幅率(±10%)、加速度応答時刻歴の時間刻み、固有周期計算間隔はJ E A G 4 6 0 1 -1987に従っており、妥当性に問題ない。
- ・今回の工事計画認可申請における応答スペクトル、加速度応答時刻歴に対し、使用用途及び方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3.5.3 評価結果

3.5.1及び3.5.2より、本解析コードを使用目的に示す設計用床応答曲線の作成に用いることは妥当である。

別紙2 Seismic Analysis System (SAS)

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-1-7	設計用床応答曲線の作成方針	Ver. 6.1.0

2. 解析コードの概要

項目	コード名	Seismic Analysis System (SAS)
使用目的		設計用床応答曲線の作成
開発機関		日立GEニュークリア・エナジー株式会社
開発時期		2009年
使用したバージョン		Ver. 6.1.0
コードの概要		<p>本解析コードは、耐震設計に使用する条件を作成することを目的に、地震波時刻歴データの波形書式の変換機能、地震波時刻歴データから応答スペクトルを計算する機能、応答分布図や振動モード図の作成機能等、耐震解析プログラムを統合したシステムである。このうち応答スペクトル作成機能を、建屋床応答時刻歴から設計用床応答曲線を作成するために使用する。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)		<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・別解析コードDYN A 2 Eによる応答スペクトルと本解析コードで作成した応答スペクトルを比較し、一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回の工事計画認可申請で使用する機能は応答スペクトルの作成機能であるため、同一の入力条件に対する1自由度系の最大応答加速度を固有周期ごとに算定し、別解析コードDYN A 2 Eと本解析コードの結果を比較することで、妥当性を確認している。 ・設計用床応答曲線を作成する際、入力とする時刻歴データの時間刻み幅、データの形式は、上述の妥当性を確認している範囲内での使用であることを確認している。 ・周期軸方向の拡幅率(±10%)、時刻歴波の時間刻み、固有周期計算間隔はJ E A G 4 6 0 1-1987に従ってお

	<p>り，妥当性に問題はない。</p> <ul style="list-style-type: none">・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。・今回の工事計画認可申請における応答スペクトル，時刻歴データに対し，使用用途及び方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

別紙3 V I A N A

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-1-7	設計用床応答曲線の作成方針	Ver. 1.0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	V I A N A
使用目的	設計用床応答曲線の作成
開発機関	株式会社東芝
開発時期	1983 年
使用したバージョン	Ver. 1.0
コードの概要	<p>本解析コードは、加速度時刻歴から応答スペクトルを作成するプログラムであり、建屋床応答時刻歴から設計用床応答曲線を作成することを目的とする。一定の固有周期及び減衰定数を有する1 質点系の与えられた加速度時刻歴に対する最大応答加速度を計算し、周期と減衰定数が同一の系で計算された複数の応答スペクトルの包絡値を求め、また応答スペクトルの拡幅を行う。本解析コードは、設計用床応答曲線を作成するために開発したハウスコードである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・理論解と本解析コードで作成した応答スペクトルと比較し、一致していることを確認した。 ・拡幅機能については、±10%拡幅した算出値と、本解析コードで作成した算出値を比較し、一致していることを確認した。 ・包絡機能については、包絡した応答スペクトルの最大値と、本解析コードで作成した算出値を比較し、一致していることを確認した。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回の工事計画認可申請で使用する解析機能は、理論モデルをそのままコード化したものであり、妥当性は確認されている。

	<ul style="list-style-type: none">・設計用床応答曲線を作成する際、入力とする時刻歴データの時間刻み幅、データの形式は、妥当性を確認している範囲内での使用であることを確認している。・10%拡幅、時刻歴波の時間刻み、固有周期計算間隔は J E A G 4 6 0 1 -1987 に従っており、妥当性は確認されている。・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

別紙4 DAC3N

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-1	原子炉建屋の地震応答計算書	Ver.97

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	D A C 3 N
使用目的	固有値解析及び地震応答解析
開発機関	清水建設株式会社
開発時期	1997 年
使用したバージョン	Ver. 97
コードの概要	<p>本解析コードは、ばね要素やはり要素等でモデル化された建屋－地盤連成系モデルの固有値解析及び地震応答解析を行うプログラムである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、原子炉建屋について、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する建屋の応答を評価するために使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・既工事計画において実績のある別コード による弾塑性を考慮した多質点系の解析結果と一致することを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり、弾塑性を考慮した多質点系の地震応答について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

別紙5 GRIMP2

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-1	原子炉建屋の地震応答計算書	Ver. 2.5

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	G R I M P 2
使用目的	底面地盤ばね算定
開発機関	清水建設株式会社
開発時期	1988 年
使用したバージョン	Ver. 2. 5
コードの概要	<p>本解析コードは、振動アドミタンス理論により、基礎の水平、上下及び回転に対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、原子炉建屋の水平方向及び鉛直方向の地震応答解析における質点系建屋－地盤連成モデルの基礎底面地盤ばねを評価するために使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードを用いて評価した基礎底面地盤の水平ばね、鉛直ばね及び回転ばねが * の計算結果と良い一致を示すことを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり、基礎底面地盤の水平ばね、鉛直ばね及び回転ばねについて検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

注記* :

別紙6 KSHAKE

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-1	原子炉建屋の地震応答計算書	Ver. 2
V-2-2-13	格納容器圧力逃がし装置基礎の地震応答計算書	Ver. 2

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	K S H A K E
使用目的	入力地震動算定
開発機関	清水建設株式会社
開発時期	1983 年
使用したバージョン	Ver. 2
コードの概要	<p>本解析コードは、米国カリフォルニア大学から発表された S H A K E を基本に開発したプログラムで、1次元重複反射理論に基づく地盤の伝達関数及び時刻歴応答波形を計算するプログラムである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、原子炉建屋及び格納容器圧力逃がし装置基礎の地震応答解析における入力地震動算定において、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する地盤の応答を評価するために使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードを用いて評価した弾性地盤の増幅特性が理論解と一致することを確認している。 ・既工事計画において実績のある別コード による解析結果と一致することを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり、地盤の応答解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

別紙7 NVK263

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-1	原子炉建屋の地震応答計算書	Ver. 1.0

2. 解析コードの概要

項目	コード名 N V K 2 6 3
使用目的	側面地盤ばね算定
開発機関	清水建設株式会社
開発時期	1985 年
使用したバージョン	Ver. 1.0
コードの概要	<p>本解析コードは、に基づき、水平、上下、回転及びねじれに対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、原子炉建屋の水平方向の地震応答解析における質点系建屋－地盤連成モデルの建屋埋込み部分の側面地盤ばねを評価するために使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードを用いて評価した建屋側面地盤の水平ばね及び回転ばねが の計算結果と良い一致を示すことを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり、建屋側面地盤の水平ばね及び回転ばねについて検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは、Novakの論文に基づき、水平、上下、回転及びねじれに対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。本解析コードは、原子炉建屋の水平方向の地震応答解析における質点系建屋－地盤連成モデルの建屋埋込み部分の側面地盤ばねを評価するために使用している。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴を以下に示す。

- ・平面ひずみを仮定した無限地盤にある円形基礎の側面地盤ばねを算定できる。
- ・円形基礎は剛体として扱う。

3.3 解析手法

円形基礎の側面と接する地盤に対する水平，上下，回転及びねじれ加振した場合の力-変形関係から建屋の側面地盤ばねを算定する方法である。

建屋側面地盤の水平ばね K_a 及び回転ばね K_c は，0 次と 1 次の変形ベッセル関数を用いて，(3.1) 式及び(3.2) 式で評価される。

$$K_a = -\pi H_j G_j a_0^2 \frac{4K_1(b_0^*) K_1(a_0^*) + a_0^* K_1(b_0^*) K_0(a_0^*) + b_0^* K_0(b_0^*) K_1(a_0^*)}{b_0^* K_0(b_0^*) K_1(a_0^*) + a_0^* K_1(b_0^*) K_0(a_0^*) + b_0^* a_0^* K_0(b_0^*) K_0(a_0^*)} \quad (3.1)$$

$$K_c = \pi H_j G_j r_0^2 (1 + i \cdot 2h_j) \left[1 + a_0^* \frac{K_0(a_0^*)}{K_1(a_0^*)} \right] \quad (3.2)$$

ここで，

- π : 円周率
- H_j : 建物質点 j の支配高さ
- G_j : 建物質点 j の支配高さにおける地下部外壁に接する地盤のせん断弾性係数

$$a_0 = \omega r_0 / V_s \quad (\text{等価円置換の無次元振動数})$$

$$b_0 = \omega r_0 / V_p \quad (\text{等価円置換の無次元振動数})$$

$$r_0 = \sqrt{B_x B_y / \pi} \quad (\text{等価円半径})$$

- ω : 円振動数
- V_s : 地下部外壁に接する地盤の S 波速度
- B_x, B_y : 建物の辺長
- $K_0(), K_1()$: それぞれ 0 次と 1 次の変形ベッセル関数

$$a_0^* = \frac{a_0}{\sqrt{1+i \cdot 2h_j}} \cdot i, \quad b_0^* = a_0^* / \eta_j, \quad \eta_j = \sqrt{2(1-\nu_j) / (1-2\nu_j)}$$

- h_j, ν_j : 地下部外壁に接する地盤のそれぞれの減衰定数とポアソン比

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3-1に示す。

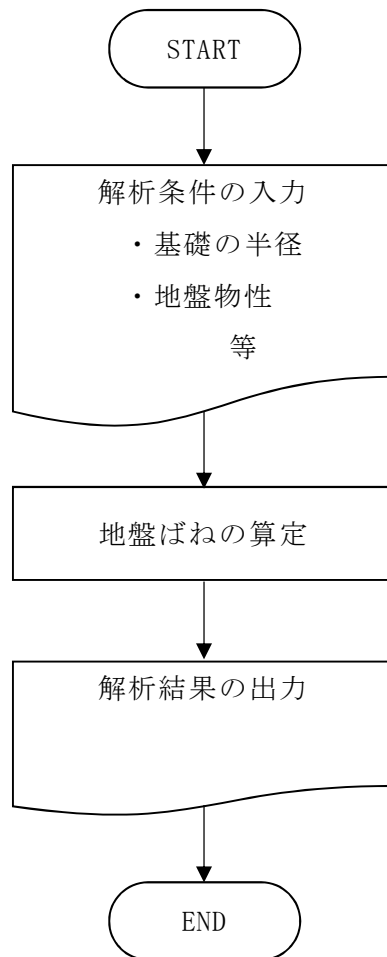


図 3-1 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

3.5.1 文献との比較による検証

以下に示す条件について水平ばね及び回転ばねを評価し、

の計算結果との比較を行う。

- ・地盤のポアソン比は 0.33 とする。
- ・地盤の材料減衰定数は 0.00, 0.05, 0.10 の 3 ケースとする。

水平ばね及び回転ばねの比較結果を図 3-2 に示す。

図 3-2 より、本解析コードの結果は の計算結果と良い一致を示しており、本解析コードが建屋側面地盤の水平ばね及び回転ばねを正しく評価していることが確認できる。

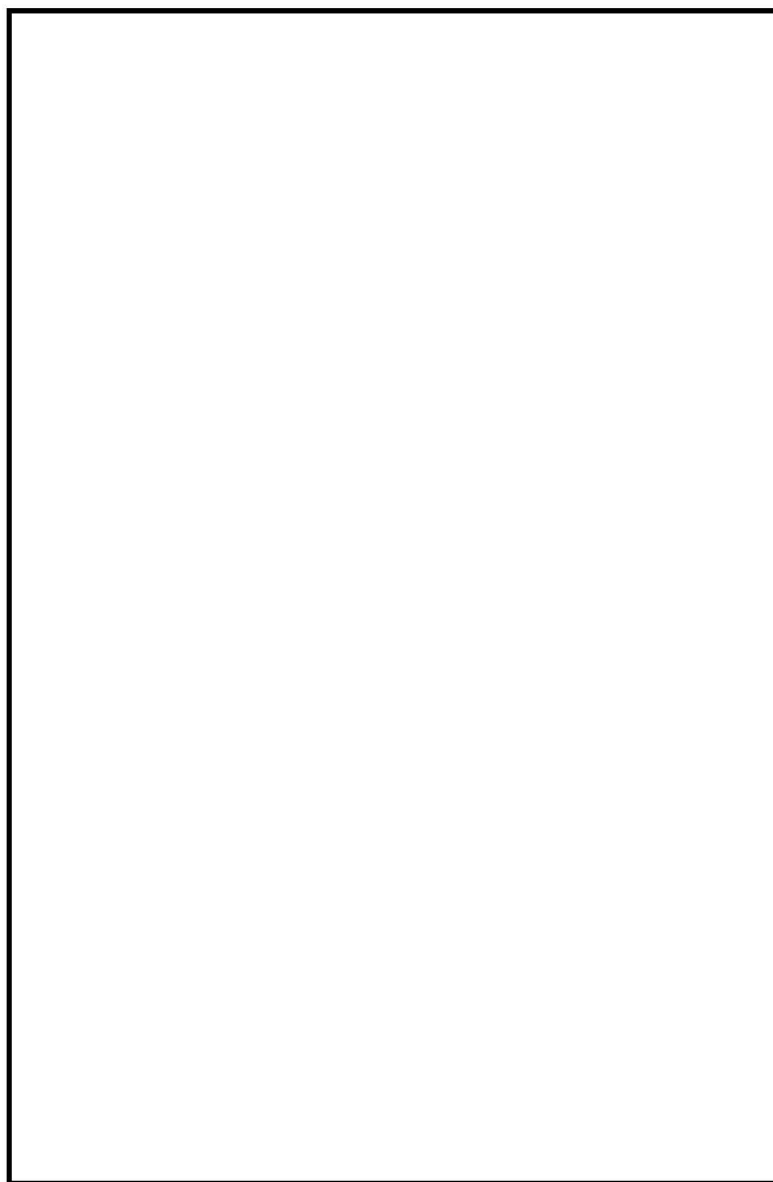


図 3-2 解析結果の比較

3.5.2 使用内容に対する妥当性

原子炉建屋の地震応答解析における側面地盤ばねの算定に本解析コードを使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証されており、妥当である。

- ・検証の内容のとおり、建屋側面地盤の水平ばね及び回転ばねについて検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

4. 引用文献

別紙 8 D Y N A 2 E

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-4	原子炉本体の基礎の地震応答計算書	Ver. 7. 2. 48
V-2-2-7	主排気筒の地震応答計算書	Ver. 8. 0. 4
V-2-2-8	主排気筒の耐震性についての計算書	Ver. 8. 0. 4
V-2-2-9	コントロール建屋の地震応答計算書	Ver. 7. 2. 18
V-2-2-別添 2-2	隣接建屋による影響を考慮した機器・配管系の耐震性についての計算書	Ver. 7. 2. 48
V-2-3-1	炉心，原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物の地震応答計算書	Ver. 7. 2. 48
V-2-7-2-1	主排気筒の耐震性についての計算書	Ver. 8. 0. 4
V-2-9-3-1	原子炉建屋原子炉区域（二次格納施設）の耐震性についての計算書	Ver. 8. 0. 4

2. 解析コードの概要

2.1 D Y N A 2 E Ver. 7. 2. 48

項目 \ コード名	D Y N A 2 E
使用目的	固有値解析, 応答解析
開発機関	伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
開発時期	1972年 (センチュリリサーチセンタ株式会社) 2007年 (伊藤忠テクノソリューションズ株式会社)
使用したバージョン	Ver. 7. 2. 48
コードの概要	<p>本解析コードは, 土木・建築分野における骨組構造*を対象として開発された2次元/3次元応答解析コードであり, 市販されている汎用構造計算機プログラムである。固有値解析並びに静的解析 (線形) 及び動的解析 (線形, 非線形) による応答解析が可能である。以下に示す構造に対し, 3種類の解析を行うことができる。</p> <p>< 構 造 ></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 2次元骨組構造 2. 3次元骨組構造 <p>< 解 析 ></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 固有値解析 2. 静的解析 (線形) 3. 動的解析 (線形, 非線形)
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・一本棒の曲げせん断型モデルについて, 本解析コード及び別解析コードMSC NASTRAN Ver. 2008r1を用いて得られた固有値解析結果及び応答解析結果を比較して検討し, 本解析コードによる解析結果が妥当であることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について, 開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証内容のとおり, 固有値解析及び応答解析について検証していることから, 解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

	<ul style="list-style-type: none"> ・日本原子力発電株式会社東海第二発電所工事計画認可申請書のV-2-3-2「炉心，原子炉压力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」において，固有値解析及び応答解析に使用された実績がある。 ・誘発上下動を考慮する場合の地震応答解析については，「原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4 6 0 1 - 2008（（社）日本電気協会）」を参考に，水平加振により励起される上下応答を評価するために，基礎浮き上がりの評価法，鉛直モデルの諸元及び接地率に応じて変化する回転・鉛直連成ばねについて考慮している。 ・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する固有値解析及び応答解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

注記＊：本解析コードでは，主に曲げせん断はり要素を適用する構造のことをいう。

2.2 D Y N A 2 E Ver. 8. 0. 4

項目	コード名 D Y N A 2 E
使用目的	立体フレームモデルによる応力解析，固有値解析及び地震応答解析
開発機関	伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
開発時期	1972 年（センチュリリサーチセンタ株式会社） 2007 年（伊藤忠テクノソリューションズ株式会社）
使用したバージョン	Ver. 8. 0. 4
コードの概要	<p>本解析コードは，土木・建築分野における 2 次元／3 次元骨組構造物の動的解析を目的として開発されたプログラムである。微小変形理論に基づき，固有値，振動モード，各質点と部材の最大応答値及び各質点の応答加速度時刻歴等が求められる。</p>
<p>検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）</p>	<p>D Y N A 2 E は，原子炉建屋の主排気筒及び屋根トラスの弾塑性地震応答解析に使用している。主排気筒及び屋根トラスの地震応答解析では，部材をはり要素等でモデル化している。屋根トラスでは，部材の圧縮座屈による非線形挙動に対して修正若林モデルによる履歴特性を設定している。</p> <p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・谷口らの論文及び若林らの論文に示される式から算定した履歴曲線と解析結果が一致することを確認している。 ・応答解析については，別の妥当性が確認されている解析コードによる解析結果と一致することを確認している。 ・本コードを用いた 3 次元フレームモデルによる地震応答解析結果と理論解の比較を行い，両者が一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり，非線形挙動及び地震応答解析について検証していることから，解析の目的に照らして

	<p>今回の解析に適用することは妥当である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・電源開発株式会社大間 1 号機第 2 回工事計画認可申請書の IV-2-3「原子炉格納容器及び原子炉建屋の地震応答計算書」において、動的解析に使用された実績がある。 ・地震応答解析に対して、九州電力株式会社川内原子力発電所 1 号機第 1 回工事計画認可申請書の 3-16-1「原子炉格納施設の地震応答解析」において、動的解析に使用された実績がある T D A P III を用いた解析解と、本コードによる解析解を比較した結果、双方の解が一致していることを確認した。 ・3次元フレームモデルに使用する要素及び地震応答解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.3 D Y N A 2 E Ver. 7. 2. 18

項目	コード名 D Y N A 2 E
使用目的	固有値解析及び地震応答解析
開発機関	伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
開発時期	2005 年
使用したバージョン	Ver. 7. 2. 18
コードの概要	<p>本解析コードは，土木・建築分野における 2 次元／3 次元骨組構造物の動的解析を目的として開発されたプログラムである。微小変形理論に基づき，固有値，振動モード，各質点と部材の最大応答値及び各質点の応答加速度時刻歴等が求められる。</p>
<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>本解析コードは，コントロール建屋の地震応答解析に使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・汎用コードである [] [] による解析解と本解析コードによる解析解を比較した結果，双方の解がおおむね一致していることを確認している。 ・汎用コードである [] [] による解析解と本解析コードによる解析解を比較した結果，双方の解がおおむね一致していることを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり，弾塑性を考慮した多質点系の地震応答について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

別紙9 NOVAK

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-5	タービン建屋の地震応答計算書	Ver. 1.0
V-2-2-15	緊急時対策所の地震応答計算書	Ver. 1.0
V-2-11-2-1	サービス建屋の耐震性についての計算書	Ver. 1.0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	NOVAK
使用目的	側面地盤ばね算定
開発機関	株式会社竹中工務店
開発時期	1979 年
使用したバージョン	Ver. 1.0
コードの概要	<p>本解析コードは、Novakの論文*に基づき、水平、上下、回転成分の単位深さあたりの地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。地震応答解析における水平方向の地震応答解析モデルの建屋埋め込み部分の基礎側面地盤の評価に使用する。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、タービン建屋等の地震応答解析における入力地震動の策定において、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する地盤の応答を評価するために使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・他コードとの比較 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり、側面地盤ばねについて検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

注記* : Novak, M, et al. : “Dynamic Soil Reactions for Plane Strain Case” ,The Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1978, pp.953-959.

別紙 10 S H A K E

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-5	タービン建屋の地震応答計算書	Ver. 1.0
V-2-2-11	廃棄物処理建屋の地震応答計算書	Ver. 1.0
V-2-2-15	緊急時対策所の地震応答計算書	Ver. 1.0
V-2-2-別添 2-1	隣接建屋による影響を考慮した地震応答計算及び建物・構築物の耐震性についての計算書	Ver. 1.0
V-2-11-2-1	サービス建屋の耐震性についての計算書	Ver. 1.0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	SHAKE
使用目的	入力地震動算定
開発機関	株式会社竹中工務店
開発時期	1999 年
使用したバージョン	Ver. 1.0
コードの概要	<p>本解析コードは、重複反射理論に基づく地盤の地震応答解析を行うことが可能であり、地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮することができる。</p> <p>本解析コードの主な特徴として、以下の①～③を挙げるることができる。</p> <p>①1次元重複反射理論に基づくプログラムである。</p> <p>②地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮できる。</p> <p>③鉛直動は、S波速度をV_s、P波速度をV_pとして定義することで対応が可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、タービン建屋等の地震応答解析における入力地震動の策定において、基準地震動S_s及び弾性設計用地震動S_dに対する地盤の応答を評価するために使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・理論解との比較 ・他コードとの比較 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子力産業界において、日本原燃株式会社の「ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料加工施設に係る設計及び工事」で、ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料加工施設 (MOX燃料加工施設) のうち燃料加工建屋に対

	<p>する地震応答解析に本解析コードが使用された実績がある。</p> <ul style="list-style-type: none">・ 検証の内容のとおり，入力地震動算定について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

3. 解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは、重複反射理論に基づく地震応答解析を行うプログラムである。本解析コードは1次元地震応答解析(入力地震動算定)に使用している。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴を以下に示す。

- ・ 1次元重複反射理論に基づく解析を行う。
- ・ 地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮する。
- ・ 鉛直動は、S波速度 V_s をP波速度 V_p として定義することで対応できる。

3.3 解析手法

図3-1に示す線形粘弾性系を通過するせん断波による応答を考える。線形粘弾性系は、均質、等方性であり、厚さが h 、密度が ρ 、せん断弾性係数が G 、臨界減衰比が β で定義されているとする。せん断波の伝ばは水平変位 $u = u(x, t)$ のみによる。これは、次の波動方程式を満足しなければならない。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (3.1)$$

波動方程式(3.1)式の解は、振動数 ω に対し、次式で与えられる。

$$u(x, t) = E e^{i(kx + \omega t)} + F e^{-i(kx - \omega t)} \quad (3.2)$$

ここに、

$$k^2 = \frac{\rho \cdot \omega^2}{G + i\omega \cdot \eta} = \frac{\rho \cdot \omega^2}{G^*} \quad (3.3)$$

である。(3.2)の第1項は、 X のマイナス方向(上向き)に伝わる入射波を示し、第2項は X のプラス方向(下向き)に伝わる反射波を示している。また、水平面におけるせん断応力度の定義は次式で与えられる。

$$\tau(x, t) = G \frac{\partial u}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} = G^* \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.4)$$

(3.4)式に(3.2)式を代入すると、

$$\tau(x, t) = ikG^* (E \cdot e^{ikx} - F \cdot e^{-ikx}) \cdot e^{i\omega t} \quad (3.5)$$

となる。

(3.1)式は図3-1の各層にて成り立つ。各層の局所座標系 X で表される第 m 層の最上部 $x=0$ 及び最下部 $x=h_m$ における変位は、第 m 層における厚さを h_m 、密度を ρ_m 、せん断弾性係数を G_m 、臨界減衰比を β_m で定義すると、それぞれ次のように表せる。

$$u_m(0, t) = (E_m + F_m) e^{i\omega t} \quad (3.6)$$

$$u_m(h_m, t) = (E_m \cdot e^{ik_m h_m} + F_m \cdot e^{-ik_m h_m}) e^{i\omega t} \quad (3.7)$$

ここで、任意の m 層と $m+1$ 層の変位及びせん断応力との連続性を考慮すると次の循環公式が求まる。

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m) \cdot e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m) \cdot e^{-ik_m h_m} \quad (3.8)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m) \cdot e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m) \cdot e^{-ik_m h_m} \quad (3.9)$$

ここに、 α_m は複素インピーダンス比と呼ばれる定数で、次式で定義されている。

$$\alpha_m = \frac{k_m G_m^*}{k_{m+1} G_{m+1}^*} = \left(\frac{\rho_m G_m^*}{\rho_{m+1} G_{m+1}^*} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

この複素インピーダンス比 α_m は、周期に対して独立である。自由面におけるせん断応力度 $\tau=0$ と (3.7) 式より $E_1 = F_1$ が得られる。循環公式 (3.8) 式、(3.9) 式を繰り返して用いて、次のような m 層と表層の振幅の関係を導き出すことができる。

$$E_m = e_m(\omega) E_1 \quad (3.11)$$

$$F_m = f_m(\omega) F_1 \quad (3.12)$$

伝達関数 e_m 及び f_m は、単なる $E_1 = F_1 = 1$ に対する倍率であり、 $E_1 = F_1 = 1$ を上式に代入して解けば求まる。

他の伝達関数は e_m 、 f_m から簡単に得られる。 n 層及び m 層表面での変位を関係づける伝達関数 $A_{n,m}$ を次のように定義する。

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} \quad (3.13)$$

(3.13) 式に (3.4) 式、(3.11) 式及び (3.12) 式を代入して整理すると次式を得る。

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)} \quad (3.14)$$

これらの式より、伝達関数 $A(\omega)$ は、系のいかなる2つの層の間においても定められる。

ゆえに、任意の層の動変位が判れば、他の層の動変位も計算できる。(3.2) 式より、加速度 $\ddot{u}(x, t)$ 、ひずみ $\gamma(x, t)$ は次のように得られる。

$$\ddot{u}(x, t) = \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = -\omega^2 (E e^{i(kx + \omega t)} + F e^{-i(kx - \omega t)}) \quad (3.15)$$

$$\gamma(x, t) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = ik (E e^{i(kx + \omega t)} - F e^{-i(kx - \omega t)}) \quad (3.16)$$

振幅 E 及び F は、系全体の層において求めることができるので、加速度及びひずみも求めることができる。

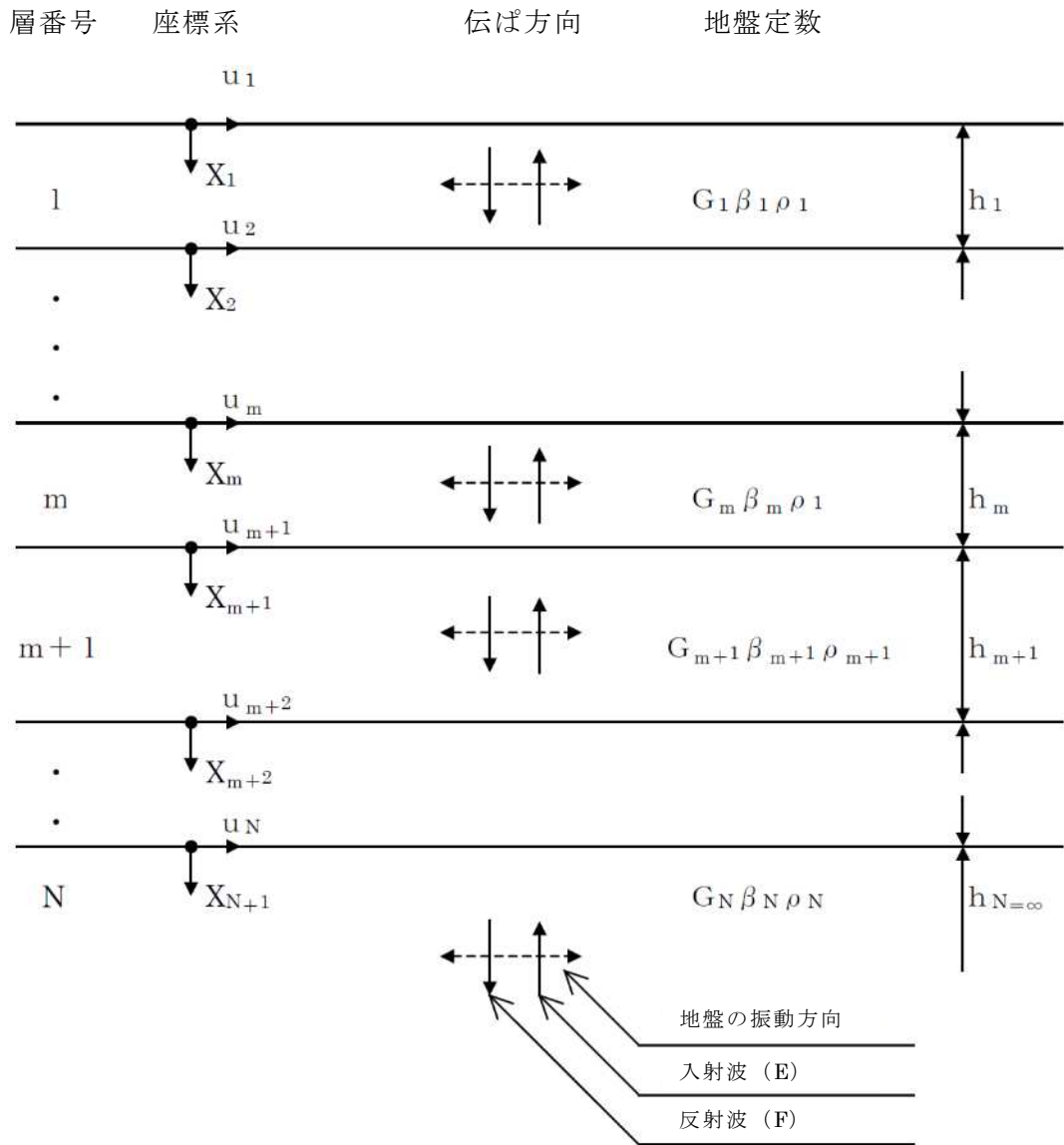


図 3-1 1次元地盤モデル

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図 3-2 に示す。

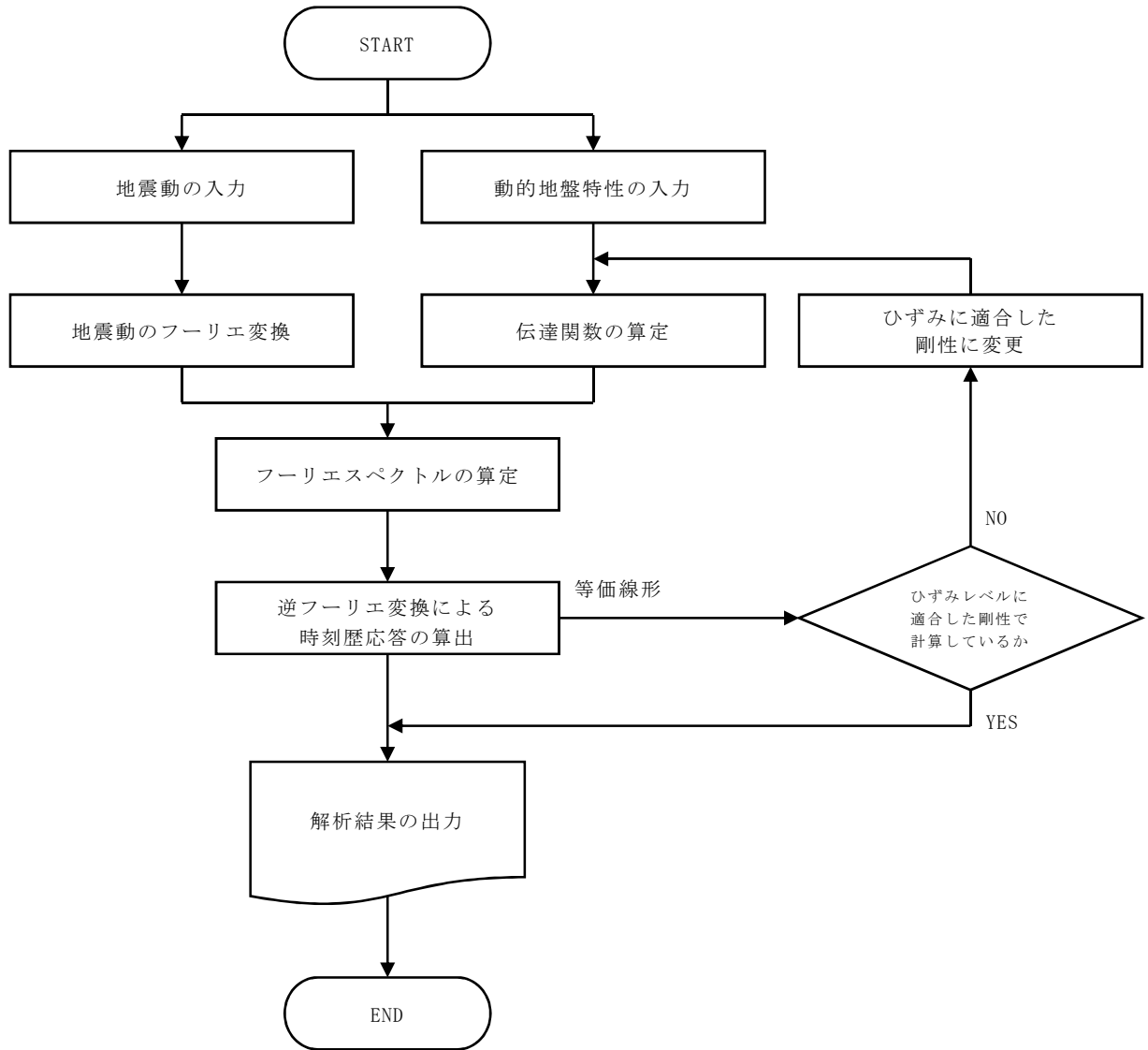


図 3-2 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

3.5.1 理論解との比較による検証

2層のモデル地盤において、1次元重複反射理論に基づく伝達関数の理論解との比較を行った。

(1) 検証モデル及び検討条件

図 3-3 に地盤モデル諸元を示す。

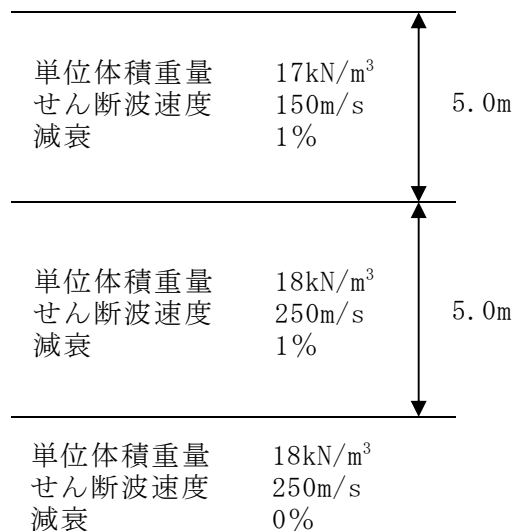


図 3-3 地盤モデル諸元

<検討条件>

- ・重力加速度は 9.80665m/s^2 とする。
- ・検討する振動数は $0\sim 50\text{Hz}$ までとする。

(2) 比較結果

理論解との伝達関数の比較結果を図 3-4 に示すが，本解析コードと理論解の結果は一致していることが確認できる。

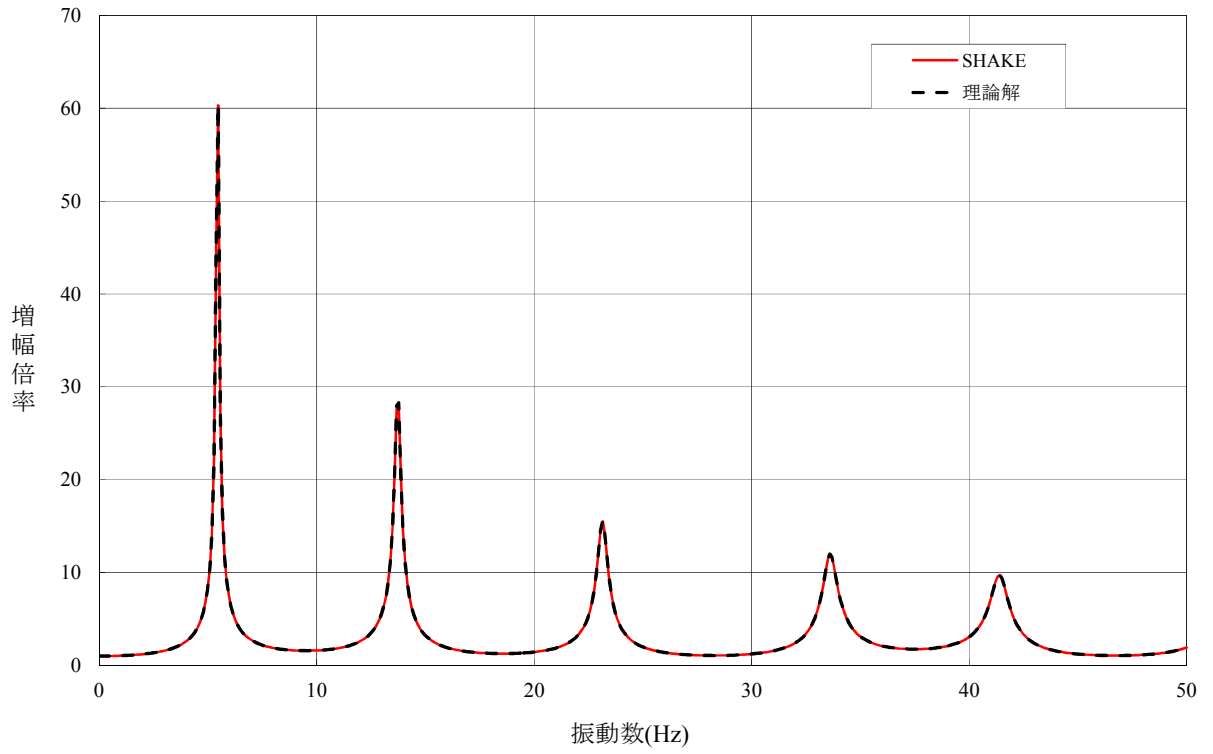


図 3-4 理論解との伝達関数の比較結果

3.5.2 他コードとの比較による検証

市販されている 1 次元地盤の等価線形解析プログラム L i Q S M A R T との比較を実施した。

(1) 検証モデル

表 3-1 に地盤モデル諸元を示し、図 3-5 及び図 3-6 にひずみ依存特性を示す。

表 3-1 地盤モデル諸元

区分	層厚 (m)	分割 (m)	深度 (m)	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断波速度 (m/s)	せん断弾性係数 (kN/m ²)	減衰定数	
第1層	4.00	1.00	1.00	17	110	20976	0.03	
		1.00	2.00	17	110	20976	0.03	
		1.00	3.00	17	110	20976	0.03	
		1.00	4.00	17	110	20976	0.03	
	10.80	1.20	5.20	16	124	25087	0.02	
		1.20	6.40	16	124	25087	0.02	
		1.20	7.60	16	124	25087	0.02	
		1.20	8.80	16	124	25087	0.02	
		1.20	10.00	16	124	25087	0.02	
		1.20	11.20	16	124	25087	0.02	
		1.20	12.40	16	124	25087	0.02	
		1.20	13.60	16	124	25087	0.02	
	第2層	9.60	1.60	16.40	16	162	42818	0.02
			1.60	18.00	16	162	42818	0.02
1.60			19.60	16	162	42818	0.02	
1.60			21.20	16	162	42818	0.02	
1.60			22.80	16	162	42818	0.02	
1.60			24.40	16	162	42818	0.02	
1.20		1.20	25.60	20	286	166817	0.02	
8.00		2.00	27.60	20	252	129512	0.02	
		2.00	29.60	20	252	129512	0.02	
		2.00	31.60	20	252	129512	0.02	
	2.00	33.60	20	252	129512	0.02		
2.00	2.00	35.60	20	375	286795	0.01		
基盤				20	442	398432	0.01	

せん断有効ひずみ (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	2.00
0.0002	0.985	2.30
0.0005	0.930	2.80
0.001	0.880	3.20
0.002	0.819	3.60
0.005	0.729	4.40
0.01	0.648	5.10
0.02	0.578	5.70
0.05	0.459	7.30
0.1	0.381	9.20
0.2	0.300	11.00
0.5	0.198	14.00
1	0.129	16.10
2	0.078	17.60
5	0.028	19.20
10	0.014	20.00

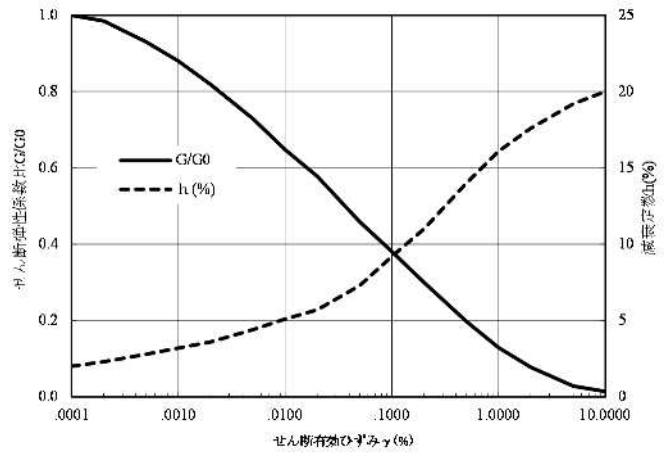


図 3-5 ひずみ依存特性(第 1 層)

せん断有効ひずみ (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	0.00
0.0002	0.991	0.28
0.0005	0.980	0.59
0.001	0.962	1.13
0.002	0.933	2.02
0.003	0.910	2.70
0.005	0.873	3.81
0.01	0.797	6.09
0.02	0.699	9.04
0.03	0.616	11.51
0.05	0.512	14.65
0.1	0.367	18.99
0.2	0.237	22.90
0.3	0.177	24.69
0.5	0.113	26.62
1	0.061	28.18

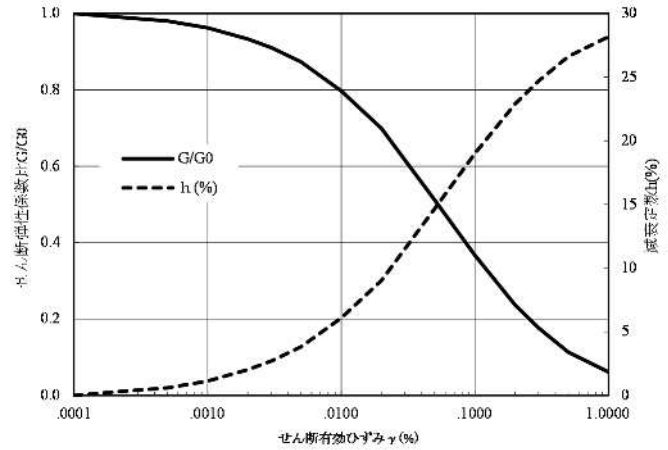


図 3-6 ひずみ依存特性(第 2 層)

(2) 検討条件

以下に、検討条件を示す。

- ・重力加速度は 9.80m/s^2 とする。
- ・等価線形解析とする。
- ・検討する振動数は $0\sim 25\text{Hz}$ までとする。

(3) 入力地震動

入力波水平一方向に入力する。図 3-7 に入力地震動(2E 波)の加速度時刻歴を示す。

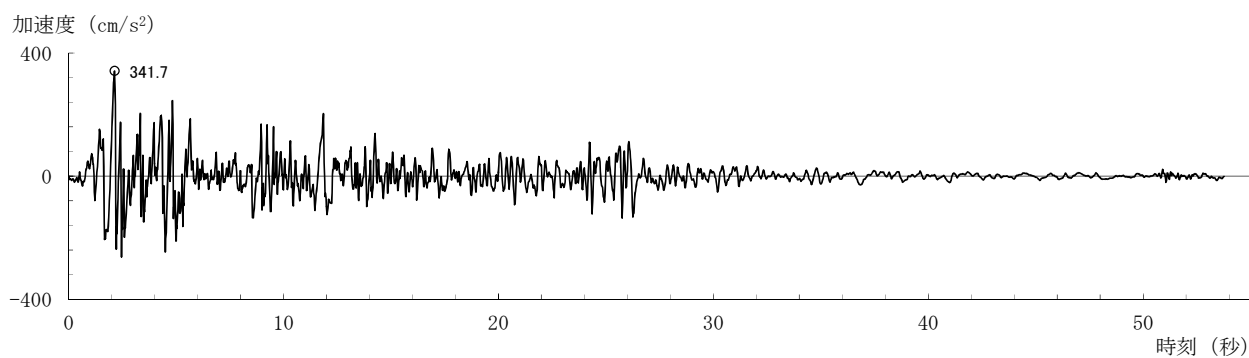


図 3-7 入力地震動加速度時刻歴

(4) 比較結果

伝達関数及び加速度の解析解の比較を図 3-8～図 3-11 に示す。各図より，伝達関数及び加速度の解析解は，一致していることが確認できる。

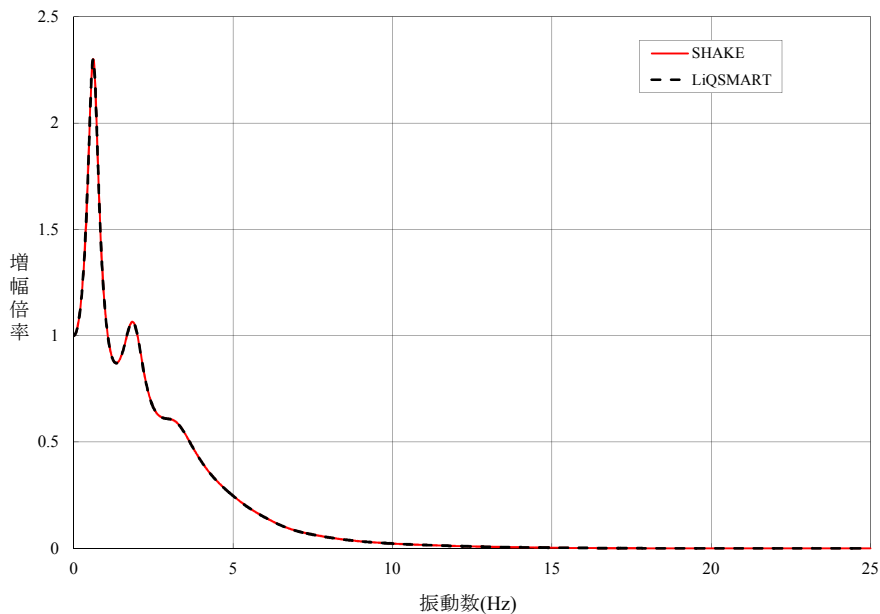


図 3-8 地表面伝達関数比較

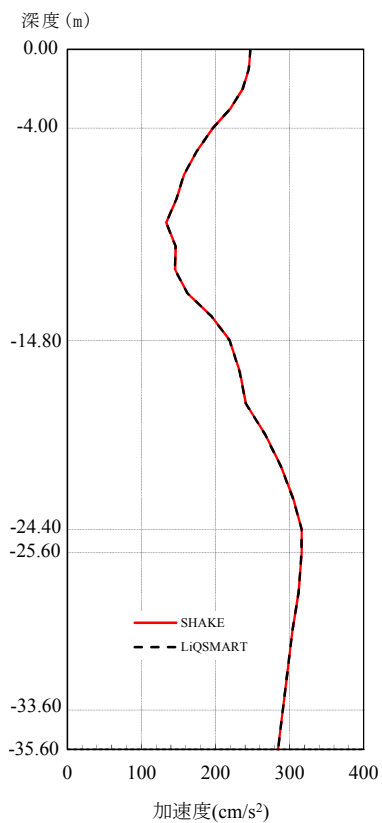


図 3-9 加速度最大分布比較

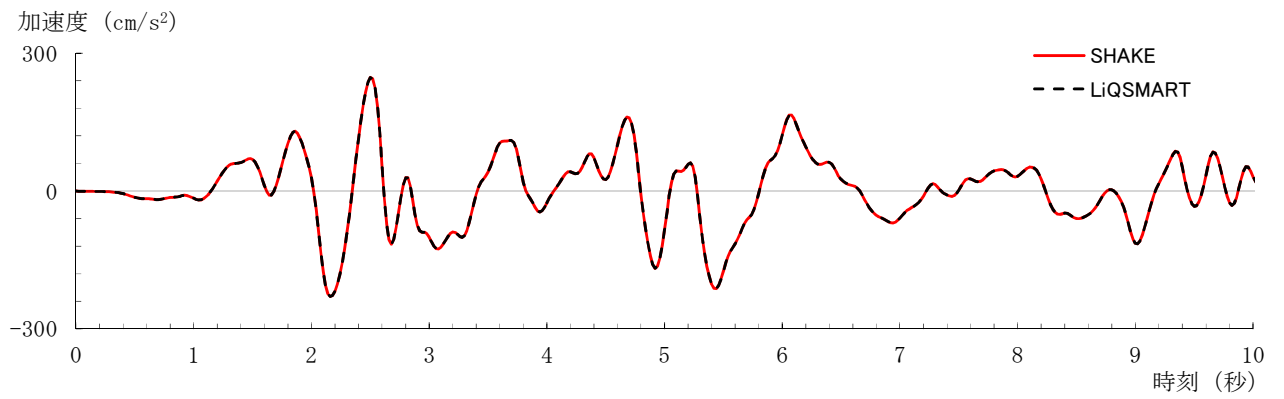


図 3-10 地表面加速度時刻歴比較

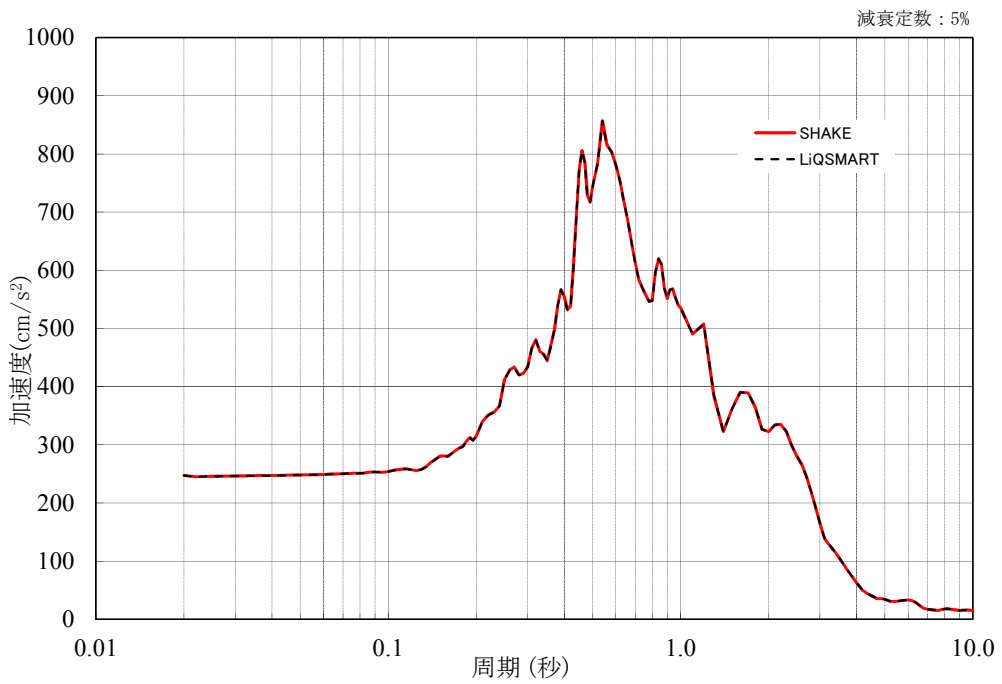


図 3-11 地表面加速度応答スペクトル比較

3.5.3 使用内容に対する妥当性

本解析コードの解析結果と理論解を比較し、理論解と解析解が一致していることを確認した。また、類似解析コードであるL i Q S M A R Tと比較し解析解が一致していることを確認した。したがって、本解析にS H A K Eを使用することは妥当である。

別紙 11 S T - C R O S S

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-5	タービン建屋の地震応答計算書	Ver. 1.0
V-2-2-11	廃棄物処理建屋の地震応答計算書	Ver. 1.0
V-2-2-15	緊急時対策所の地震応答計算書	Ver. 1.0
V-2-11-2-1	サービス建屋の耐震性についての計算書	Ver. 1.0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	S T - C R O S S
使用目的	底面地盤ばね算定
開発機関	株式会社竹中工務店
開発時期	1977 年
使用したバージョン	Ver. 1.0
コードの概要	<p>本解析コードは、はり要素とばね要素からなる多質点系モデルを用いた時刻歴応答解析において、地盤ばね(底面ばね)を算定するプログラムである。半無限均質地盤の地表面点加振解(グリーン関数)を用いて、指定した矩形基礎形状に応じたインピーダンスマトリックスを求める。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、タービン建屋等の地震応答解析における入力地震動の策定において、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する地盤の応答を評価するために使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・理論解との比較 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり、矩形基礎形状に応じた地盤インピーダンスについて検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

別紙 12 T D A S

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-5	タービン建屋の地震応答計算書	Ver. 20121030
V-2-2-11	廃棄物処理建屋の地震応答計算書	Ver. 20121030
V-2-2-15	緊急時対策所の地震応答計算書	Ver. 20121030
V-2-11-2-1	サービス建屋の耐震性についての計算書	Ver. 20121030

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	T D A S
使用目的	固有値解析及び地震応答解析
開発機関	株式会社竹中工務店
開発時期	1988 年
使用したバージョン	Ver. 20121030
コードの概要	<p>本解析コードは、曲げせん断要素及びばね要素で構成される質点系モデルの地震応答解析等を行うことができる。本解析コードの主な特徴として、以下の①、②を挙げることができる。</p> <p>①固有値解析と建屋の基礎浮上りを考慮した非線形地震応答解析ができる。</p> <p>②1次元重複反射理論による地盤の振動解析に基づき、埋め込みを伴う側面地盤ばね位置に入力する地盤応答を算定することができる。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、タービン建屋等の地震応答解析における入力地震動の策定において、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する地盤の応答を評価するため並びに基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する建屋の応答を評価するために使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・理論解との比較 ・他コードとの比較 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり、弾塑性を考慮した多質点系の地震応答について検証していること、また、地盤の応答解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

別紙 13 MSC NASTRAN

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-6	タービン建屋の耐震性についての計算書	Ver. 2012. 1. 0
V-2-2-12	廃棄物処理建屋の耐震性についての計算書	Ver. 2012. 1. 0
V-2-2-14	格納容器圧力逃がし装置基礎の耐震性についての計算書	Ver. 2016. 1. 1
V-2-2-16	緊急時対策所の耐震性についての計算書	Ver. 2012. 1. 0
V-2-2-別添 1-3-7	サブドレンピットの耐震性についての計算書	Ver. 2013. 1. 1
V-2-3-3-2-3	制御棒駆動機構ハウジングレストレントビームの応力計算書	Ver. 2013. 0. 0
V-2-4-2-1	使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの耐震性についての計算書	Ver. 2016. 1. 1
V-2-4-2-5	使用済燃料貯蔵プール監視カメラの耐震性についての計算書	Ver. 2005r2
V-2-4-2-6	使用済燃料貯蔵プール監視カメラ用空冷装置の耐震性についての計算書	Ver. 2005r2
V-2-5-3-1-2	残留熱除去系ポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2006r1
V-2-5-3-1-3	残留熱除去系ストレーナの耐震性についての計算書	Ver. 2013. 0. 0
V-2-5-3-1-4	残留熱除去系ストレーナ部ティーの耐震性についての計算書	Ver. 2013. 0. 0
V-2-5-3-1-5	残留熱除去系ストレーナ取付部コネクタの耐震性についての計算書	Ver. 2013. 0. 0
V-2-5-4-1-1	高圧炉心注水系ポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2006r1
V-2-5-4-1-2	高圧炉心注水系ストレーナの耐震性についての計算書	Ver. 2013. 0. 0
V-2-5-4-1-3	高圧炉心注水系ストレーナ部ティーの耐震性についての計算書	Ver. 2013. 0. 0
V-2-5-4-1-4	高圧炉心注水系ストレーナ取付部コネクタの耐震性についての計算書	Ver. 2013. 0. 0
V-2-5-4-2-3	原子炉隔離時冷却系ストレーナの耐震性についての計算書	Ver. 2013. 0. 0

使用添付書類		バージョン
V-2-5-4-2-4	原子炉隔離時冷却系ストレーナ部ティーの耐震性についての計算書	Ver. 2013.0.0
V-2-5-5-1-2	復水貯蔵槽の耐震性についての計算書	Ver. 2012.1.0
V-2-5-6-1-3	原子炉補機冷却海水ポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2006r1
V-2-6-5-1	起動領域モニタの耐震性についての計算書	Ver. 2018.2.1
V-2-6-7-22	フィルタ装置スクラバ水 pH の耐震性についての計算書	Ver. 2005r2
V-2-6-7-26	静的触媒式水素再結合器動作監視装置の耐震性についての計算書	Ver. 2005r2
V-2-9-2-1	原子炉格納容器コンクリート部の耐震性についての計算書	Ver. 2016.1.1
V-2-9-2-4	下部ドライウェルアクセストンネルスリーブ及び鏡板（所員用エアロック付）の耐震性についての計算書	Ver. 2013.0.0
V-2-9-2-5	下部ドライウェルアクセストンネルスリーブ及び鏡板（機器搬入用ハッチ付）の耐震性についての計算書	Ver. 2013.0.0
V-2-9-2-8	下部ドライウェル機器搬入用ハッチの耐震性についての計算書	Ver. 2013.0.0
V-2-9-2-11	下部ドライウェル所員用エアロックの耐震性についての計算書	Ver. 2013.0.0
V-2-9-3-1	原子炉建屋原子炉区域（二次格納施設）の耐震性についての計算書	Ver. 2005.5.2
V-2-9-3-1-2	主蒸気系トンネル室ブローアウトパネルの耐震性についての計算書	Ver. 2016.1.1
V-2-9-3-4	原子炉建屋基礎スラブの耐震性についての計算書	Ver. 2016.1.1
V-2-9-4-2	ダイヤフラムフロアの耐震性についての計算書	Ver. 2013.0.0
V-2-9-4-3	ベント管の耐震性についての計算書	Ver. 2013.0.0
V-2-9-4-4-1-1	ドライウェルスプレイ管の耐震性についての計算書	Ver. 2013.0.0

使用添付書類		バージョン
V-2-9-4-4-2-1	サプレッションチェンバスペイ管の耐震性についての計算書	Ver. 2013.0.0
V-2-9-4-8-1	下部ドライウェルアクセストネルの耐震性についての計算書	Ver. 2013.0.0
V-2-9-5-5	燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置の耐震性についての計算書	Ver. 2013.1.1
V-2-10-1-2-2-6	管の耐震性についての計算書	Ver. 2008.0.0
V-2-11-2-8	耐火隔壁の耐震性についての計算書	Ver. 2008.0.0
V-2-別添 1	火災防護設備の耐震性に関する説明書	Ver. 2005r2
V-2-別添 2-2	溢水源としない耐震 B, C クラス機器の耐震計算書	Ver. 2008.0.4
V-2-別添 3-4	可搬型重大事故等対処設備のうちポンベ設備の耐震計算書	Ver. 2005r2

2. 解析コードの概要

2.1 MSC NASTRAN Ver.2012.1.0

項目 \ コード名	MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法による応力解析（弾性） はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver.2012.1.0
コードの概要	<p>本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <p>(1) 3次元有限要素法による応力解析（弾性）</p> <ul style="list-style-type: none"> 等分布面荷重を作用させた平板の最大変位について、本解析コードで応力解析を行った解析解と、S.Timoshenkoの理論式による理論解を比較し、解析解と理論解が概ね一致していることを確認した。 材料力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、3次元有限要素法による応力解析を行い、解析解が理論モデルによる理論解と一致することを確認した。 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>(2) はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析</p> <ul style="list-style-type: none"> 構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、本解析コードを用いた

	<p>解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <p>(1) 3次元有限要素法による応力解析 (弾性)</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 応力解析に対して、一般産業界において、全世界40ヶ国、約4,000件の多数のプロジェクトの解析で使用実績のあるMIDASを用いた解析解と、本解析コードによる解析解を比較したベンチマーキングを行った結果、双方の解が概ね一致していることを確認した。 原子力産業界において、日本原燃株式会社の「ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料加工施設に係る設計及び工事」で、ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料加工施設 (MOX燃料加工施設) のうち燃料加工建屋に対する応力解析に本解析コードが使用された実績がある。 検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、検証結果をもって、解析機能の妥当性も確認できる。 今回の工事計画認可申請において、使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。 検証の内容のとおり、応力解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 <p>(2) はりモデルによる固有値解析及び応力解析</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<p>系が同等であることから，検証結果をもって，解析機能の妥当性も確認できる。</p> <ul style="list-style-type: none">・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.2 MSC NASTRAN Ver. 2016.1.1

項目	コード名 MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法による応力解析（弾性） 3次元有限要素法（はりモデル及びシェルモデル）による固有値解析及び地震応答解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2016.1.1
コードの概要	<p>本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>本解析コードは、格納容器圧力逃がし装置基礎、使用済燃料貯蔵プール、原子炉格納容器コンクリート部及び原子炉建屋基礎スラブの3次元有限要素法による応力解析、主蒸気系トンネル室ブローアウトパネルの3次元有限要素法による固有値解析及び地震応答解析に使用している。</p> <p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、3次元有限要素法による応力解析、固有値解析及び地震応答解析を行い、解析解が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p>

	<ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・日本原子力発電東海第二発電所工事計画認可申請書において、原子炉建屋の使用済燃料プール、基礎盤及び原子炉格納容器底部コンクリートマット、緊急時対策所建屋、格納容器圧力逃がし装置格納槽の3次元有限要素法による応力解析及び温度分布解析に使用された実績がある。 ・日本原子力発電東海第二発電所工事計画認可申請書において、固有値解析及び地震応答解析に本解析コードが使用された実績がある。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、検証結果をもって、解析機能の妥当性も確認している。 ・今回の工事計画認可申請において、使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと同じ又は他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンの変更は、計算機能の追加に伴うものであり、今回の使用範囲における解析機能に影響のある変更がおこなわれていないことを確認している。 ・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素、3次元有限要素法の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 ・検証の内容のとおり、応力解析、固有値解析及び地震応答解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.3 MSC NASTRAN Ver. 2013.1.1

項目	コード名 MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（シェルモデル）による応力解析 3次元有限要素法（はりモデル及びシェルモデル）による固有値解析，応力解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2013.1.1
コードの概要	<p>本解析コードは，航空機の機体強度解析を目的として開発された，有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
<p>検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）</p>	<p>【検証（Verification）】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について，本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから，検証結果を持って，解析機能の妥当性も確認できる。

	<ul style="list-style-type: none">・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が 上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.4 MSC NASTRAN Ver. 2013.0.0

項目	コード名 MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル及びシェルモデル）による固有値解析及び応力解析 3次元有限要素法（シェルモデル）による固有値解析及び応力解析 3次元有限要素法（シェルモデル）による応力解析 3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び応力解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2013.0.0
コードの概要	<p>本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野における使用実績を有してお

	<p>り，妥当性は十分に確認されている。</p> <ul style="list-style-type: none">・ 検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから，検証結果を持って，解析機能の妥当性も確認できる。・ 今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.5 MSC NASTRAN Ver. 2005r2

項目	コード名 MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析, 応力解析 3次元有限要素法（はりモデル, シェルモデル）による固有値解析, 応力解析 3次元有限要素法（はり要素）による管の固有値解析及び応力解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2005r2
コードの概要	<p>本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、本解析コードを用いた3次元有限要素法（はり、シェルモデル）による応力解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることが確認されている。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野における使用実績を有してお

	<p>り、妥当性は妥当性は十分確認されている。</p> <ul style="list-style-type: none">・開発機関が提示する使用マニュアルより、今回の工事計画認可申請で使用する有限要素法による応力解析に、本解析コードが適用できることを確認している。・検証した機能・範囲と今回の工事計画認可申請で使用する機能・範囲が同等であることから、検証結果をもって、解析機能の妥当性も確認できる。・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.6 MSC NASTRAN Ver. 2006r1

項目	コード名 MSC NASTRAN
使用目的	はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2006r1
コードの概要	<p>本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にははり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、検証結果を持って、解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

2.7 MSC NASTRAN Ver. 2018.2.1

項目	コード名 MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2018.2.1
コードの概要	<p>本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、はり要素を用いた固有値解析を行い、解析解が論理解と概ね一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用するはり要素を用いた固有値解析結果に本コードが適用できることを確認している。 ・本解析に本解析コードを使用することの妥当性は、前述の検証の中で確認している。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

2.8 MSC NASTRAN Ver. 2005.5.2

項目 \ コード名	MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法による応力解析（弾性）
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2005.5.2
コードの概要	<p>本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
<p>検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）</p>	<p>本解析コードは、大物搬入建屋の3次元有限要素法による応力解析に使用している。</p> <p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・等分布面荷重を作用させた平板の最大変位について、本解析コードで応力解析を行った解析解と、S.Timoshenkoの理論式による理論解を比較し、解析解と理論解が概ね一致していることを確認した。 ・材料力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、3次元有限要素法による応力解析を行い、解析解が理論モデルによる理論解と一致することを確認した。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認した。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子力産業界において、様々な建屋に対する応力解析に本解析コードが使用された実績がある。

2.9 MSC NASTRAN Ver. 2008.0.0

項目	コード名 MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2008.0.0
コードの概要	<p>本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般知見により解を求めることができる体系について、本解析コードを用いた3次元有限要素法による解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、自動車、航空機、土木、造船、海洋油田、工業設備、化学技術、光学、政府調査等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、解析解と理論解の一致をもって解析機能の妥当性も確認している。

2.10 MSC NASTRAN Ver. 2008.0.4

項目	コード名 MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法(はりモデル)による固有値解析及び応力解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年(一般商業用リリース)
使用したバージョン	Ver. 2008.0.4
コードの概要	<p>本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。適用モデル(主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素)に対して、静的解析(線形、非線形)、動的解析(過渡応答解析、周波数応答解析)、固有値解析、伝熱解析(温度分布解析)、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、本解析コードを用いた3次元有限要素法(はりモデル)による応力解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認されている。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることが確認されている。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分確認されている。 ・開発機関が提示する使用マニュアルより、今回の工事計画認可申請で使用する有限要素法による応力解析に、本解析コードが適用できることを確認している。

	<ul style="list-style-type: none">・ 検証した機能・範囲と今回の工事計画認可申請で使用する機能・範囲が同等であることから、検証結果をもって、解析機能の妥当性も確認できる。今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。・ 今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

別紙 14 NX NASTRAN

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-7	主排気筒の地震応答計算書	Ver. 11.0
V-2-2-8	主排気筒の耐震性についての計算書	Ver. 11.0
V-2-4-2-4	使用済燃料貯蔵プール水位・温度（SA 広域）の耐震性についての計算書	Ver. 5mp1
V-2-7-2-1	主排気筒の耐震性についての計算書	Ver. 11.0
V-2-9-4-5-3-1	静的触媒式水素再結合器の耐震性についての計算書	Ver. 8.1
V-2-10-2-4-4	津波監視カメラの耐震性についての計算書	Ver. 11.0
V-2-11-2-2-2	非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の耐震性についての計算書	Ver. 9.0
V-2-11-2-2-3	竜巻防護鋼製フードの耐震性についての計算書	Ver. 7.1
V-2-11-2-2-4	換気空調系ダクト防護壁の耐震性についての計算書	Ver. 7.1 Ver. 9.0
V-2-11-2-2-5	原子炉補機冷却海水系配管防護壁の耐震性についての計算書	Ver. 9.0
V-2-別添 2-2	溢水源としない耐震 B,C クラス機器の耐震計算書	Ver. 5mp1

2. 解析コードの概要

2.1 NX NASTRAN Ver. 11.0

項目 \ コード名	NX NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法による応力解析（弾性） 3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析，応力解析
開発機関	Siemens PLM (Product Lifecycle Management) Software Inc.
開発時期	1971年（The MacNeal-Schwendler Corporation） 2005年（Siemens PLM Software Inc.）
使用したバージョン	Ver. 11.0
コードの概要	<p>本解析コードは，航空機の機体強度解析を目的として The MacNeal-Schwendler Corporation により開発され，Siemens PLM Software Inc. に引き継がれた有限要素法による構造解析用の汎用プログラムであり，MSC NASTRAN と同じ機能を持つ。</p> <p>適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>本解析コードは，主排気筒の応力解析に使用している。主排気筒の応力解析では，部材をはり要素でモデル化した弾性応力解析を実施している。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・既工事計画において実績のある別コード（MSC NASTRAN）によるはりモデルでの応力解析結果と一致することを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。

	<p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none">・ 検証の内容のとおり，はりモデルによる応力解析について，本解析コードによる解析結果が別コードによる解析結果と一致していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。・ 電源開発株式会社大間原子力発電所 1 号機第 2 回工事計画認可申請書の IV-2-9-1「主排気筒の耐震性及び強度に関する計算書」において，応力解析に使用された実績がある。・ 日本原子力発電株式会社東海第二発電所工事計画認可申請書の V-2-別添 3-4「可搬型重大事故等対処設備のうちポンベ設備の耐震性についての計算書」において，応力解析に使用された実績がある。・ はりモデルに使用する要素及び応力解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。・ 今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは，既工事計画において使用されているものと異なるが，バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.2 NX NASTRAN Ver.5mpl

項目	コード名 NX NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析，応力解析 3次元有限要素法（はりモデル）による応力解析
開発機関	Siemens PLM (Product Lifecycle Management) Software Inc.
開発時期	1971年（The MacNeal-Schwendler Corporation） 2005年（Siemens PLM Software Inc.）
使用したバージョン	Ver. 5mpl
コードの概要	<p>本解析コードは，航空機の機体強度解析を目的として The MacNeal-Schwendler Corporation により開発され，Siemens PLM Software Inc. に引き継がれた有限要素法による構造解析用の汎用プログラムであり，MSC NASTRAN と同じ機能を持つ。</p> <p>適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
<p>検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）</p>	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・固有値解析 3次元骨組構造物について，質点および質量の無い弾性メンバーからなる等価な解析モデルを設定し，解析結果が公開文献*により求めた理論解（以下「理論解」という。）及び別コード（SOLVER）による解析結果とNX NASTRANによる解析結果とが同等であることを確認している。 ・応力解析 固有値解析で作成した二層ラーメン構造の解析モデルを使用して自重及び水平1Gを考慮した応力解析を行い，計算された部材応力と支点反力について別コード

(SOLVER)による解析結果とNX NASTRANによる解析結果とが同等であることを確認している。

【妥当性確認 (Validation)】

本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。

- ・理論解とNX NASTRANによる解析結果とが同等であることを確認していることから、今回の解析に適用することは妥当である。
- ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。

注記*：「振動及び応答解析入門」(川井忠彦，藤谷義信共著 179頁 培風館)

2.3 NX NASTRAN Ver. 8.1

項目	コード名 NX NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（シェルモデル及びはりモデル）による固有値解析及び応力解析
開発機関	Siemens PLM (Product Lifecycle Management) Software Inc.
開発時期	1971年（The MacNeal-Schwendler Corporation） 2005年（Siemens PLM Software Inc.）
使用したバージョン	Ver. 8.1
コードの概要	<p>本解析コードは、航空機の機体強度解析を目的として The MacNeal-Schwendler Corporation により開発され、Siemens PLM Software Inc. に引き継がれた有限要素法による構造解析用の汎用プログラムであり、MSC NASTRAN と同じ機能を持つ。</p> <p>適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
<p>検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）</p>	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材料力学分野における一般的な知見により解を求めることができる体系について，3次元有限要素法（3次元シェル及びはりモデル）による固有値解析及び応力解析を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，自動車，航空宇宙，防衛，重機，造船等様々な分野における使用実績を有しており，妥当

	<p>性は十分に確認されている。</p> <ul style="list-style-type: none">・開発機関が提示するマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（シェルモデル及びはりモデル）による固有値解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから，解析解と理論解の一致をもって，解析機能の妥当性を確認している。・今回の工事計画認可申請で行う3次元有限要素法（シェルモデル及びはりモデル）による固有値解析及び応力解析の用途，適用範囲が，上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.4 NX NASTRAN Ver.9.0

項目	コード名 NX NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（シェル及びはり要素）による固有値解析，応力解析
開発機関	Siemens PLM (Product Lifecycle Management) Software Inc.
開発時期	1971年（The MacNeal-Schwendler Corporation） 2005年（Siemens PLM Software Inc.）
使用したバージョン	Ver.9.0
コードの概要	<p>本解析コードは，航空機の機体強度解析を目的として The MacNeal-Schwendler Corporation により開発され，Siemens PLM Software Inc. に引き継がれた有限要素法による構造解析用の汎用プログラムであり，MSC NASTRAN と同じ機能を持つ。</p> <p>適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材料力学分野における一般的な知見により解を求めることができる体系について，3次元有限要素法（シェル及びはり要素）による固有値解析及び応力解析を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，自動車，航空宇宙，防衛，重機，造船等様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。

	<ul style="list-style-type: none"> ・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法(シェル及びはり要素)による固有値解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、解析解と理論解の一致をもって、解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請で行う3次元有限要素法(シェル及びはり要素)による固有値解析及び応力解析の用途、適用範囲が、上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは、既工事計画に置いて使用されているものと異なるが、バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.5 NX NASTRAN Ver. 7.1

項目	コード名 NX NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（シェル及びはり要素）による固有値解析，応力解析
開発機関	Siemens PLM (Product Lifecycle Management) Software Inc.
開発時期	1971年（The MacNeal-Schwendler Corporation） 2005年（Siemens PLM Software Inc.）
使用したバージョン	Ver. 7.1
コードの概要	<p>本解析コードは，航空機の機体強度解析を目的として The MacNeal-Schwendler Corporation により開発され，Siemens PLM Software Inc. に引き継がれた有限要素法による構造解析用の汎用プログラムであり，MSC NASTRAN と同じ機能を持つ。</p> <p>適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
<p>検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）</p>	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材料力学分野における一般的な知見により解を求めることができる体系について，3次元有限要素法（シェル及びはり要素）による固有値解析及び応力解析を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，自動車，航空宇宙，防衛，重機，造船等様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。

	<ul style="list-style-type: none">・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（シェル及びはり要素）による固有値解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、解析解と理論解の一致をもって、解析機能の妥当性を確認している。・今回の工事計画認可申請で行う3次元有限要素法（シェル及びはり要素）による固有値解析及び応力解析の用途、適用範囲が、上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

別紙 15 ADMIT

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-9	コントロール建屋の地震応答計算書	導入時 Ver.

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	A D M I T
使用目的	底面地盤ばね算定
開発機関	東電設計株式会社
開発時期	1984 年
使用したバージョン	導入時 Ver.
コードの概要	<p>本解析コードは、基礎底面地盤ばねを求めるために開発されたプログラムである。振動アドミタンス理論に基づき、地盤を半無限等方均質弾性体として、基礎底面における水平方向、鉛直方向及び回転方向の地盤ばねが求められる。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、コントロール建屋の地震応答解析モデルにおける基礎底面地盤ばねを算定するために使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ・ と本解析コードによる解析解を比較した結果、双方の解がおおむね一致していることを確認している。 ・ 動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 検証の内容のとおり、水平方向、鉛直方向及び回転方向の地盤ばねについて検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは、基礎底面地盤ばねを求めるために開発されたプログラムである。

本解析コードは、コントロール建屋の地震応答解析モデルにおける基礎底面地盤ばねを算定するために、動的インピーダンスの計算を行う。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴を以下に示す。

- ・振動アドミタンス理論に基づき、基礎底面地盤ばねを求めることができる。
- ・任意の振動数に対する動的ばねを求めることができる。
- ・応力分布として一様分布（回転の場合には三角形分布）、また剛基礎を仮定した一様変位分布が選択できる。
- ・解析結果としては、水平方向、鉛直方向及び回転方向の地盤ばねが求められる。

3.3 解析手法

図3-1に示す基礎分割法による地盤ばねを求めるに当たり、荷重、変位関係の式は、以下の式で表される。

$$\left\{ U_j^1 \right\} = \left[D_{ij}^{kl} \right] \left\{ P_i^k \right\} \quad (3.1)$$

ここで、

$\left\{ U_j^1 \right\}$: j要素の1方向変位

$\left\{ P_i^k \right\}$: i要素のk方向に加わる力

$\left[D_{ij}^{kl} \right]$: 柔性マトリックス（各成分はi要素のk方向に単位の加振力が作用した時のj要素における1方向変位を表す）

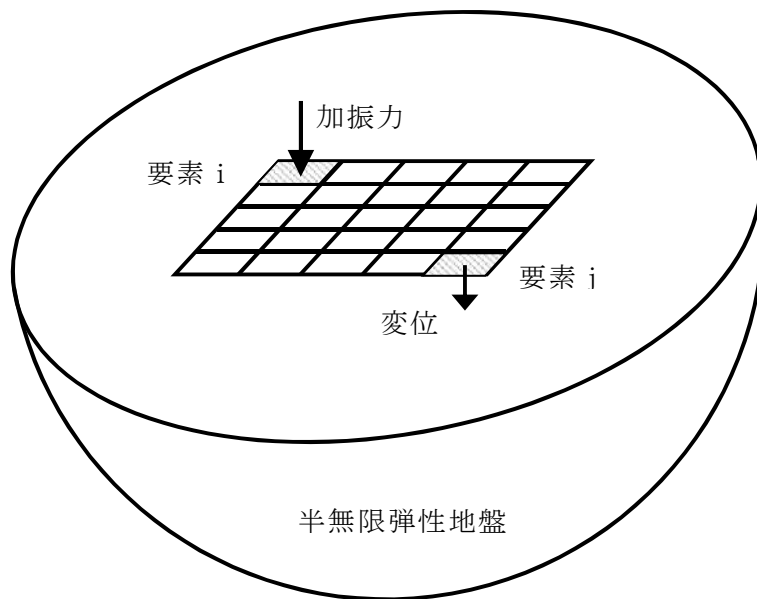


図3-1 基礎分割法による地盤ばねの求め方について

なお、解析当たっては下記の仮定を設けている。

- ・基礎が半無限地盤の地表面上に置かれているものと仮定する。
- ・基礎は無質量の剛体と見なす。
- ・基礎を微小要素に分割する。
- ・各要素内では、変位及び応力は一定であると仮定する。

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3-2に示す。

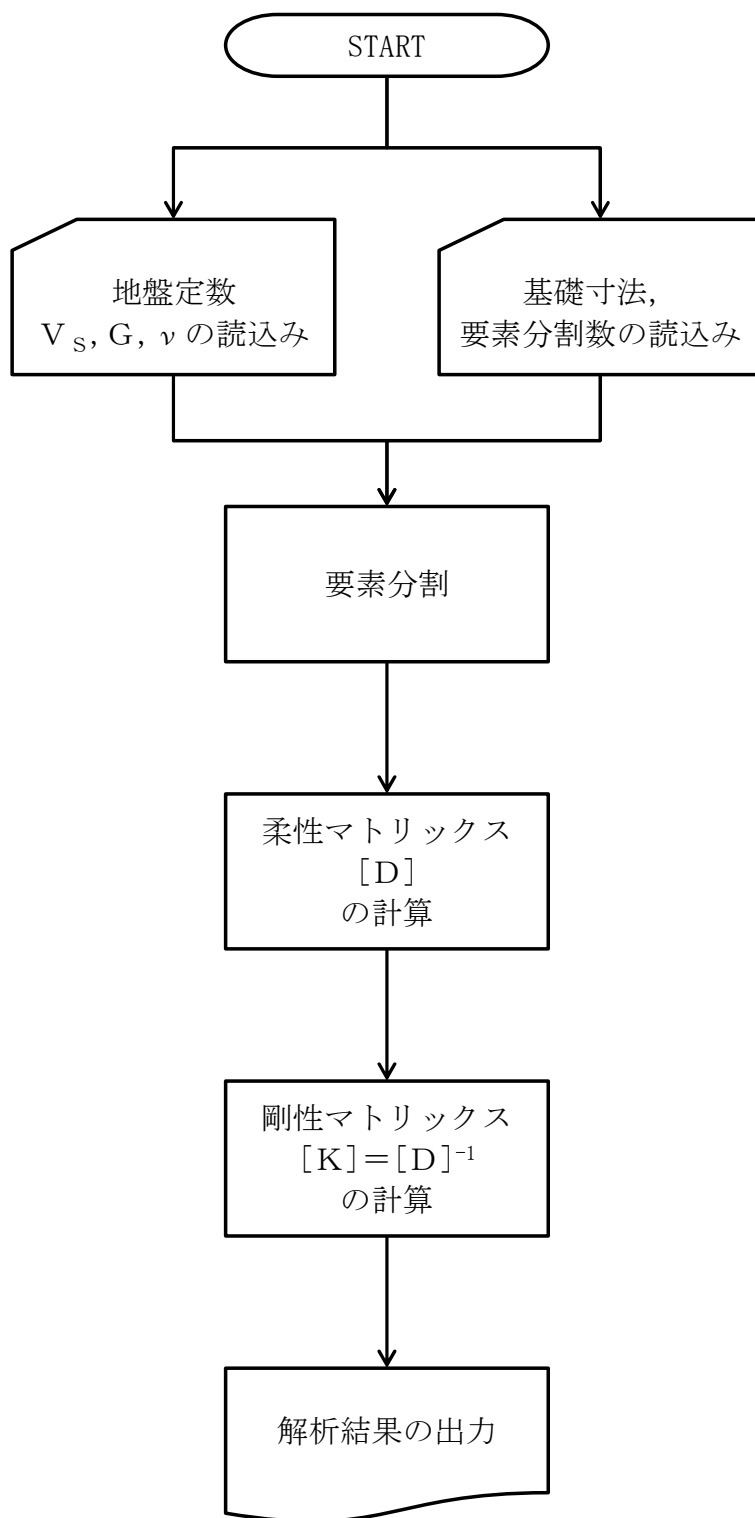


図3-2 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

3.5.1 文献との比較による検証

本解析コードについて、

との比較を行う。

を対象に基礎底面地盤ばねを算定する。なお、解析条件は以下の条件とした。

- ・基礎形状 :
- ・基礎分割数 :
- ・分布仮定 :
- ・基礎下地盤 : せん断波速度 $V_s =$
単位体積重量 $\gamma =$
ポアソン比 $\nu =$
- ・計算振動数 (無次元) :

解析結果の比較を図 3-3～図 3-5 に示す。

図より、本解析コードの結果は

とおおむね一致していることが確認できる。

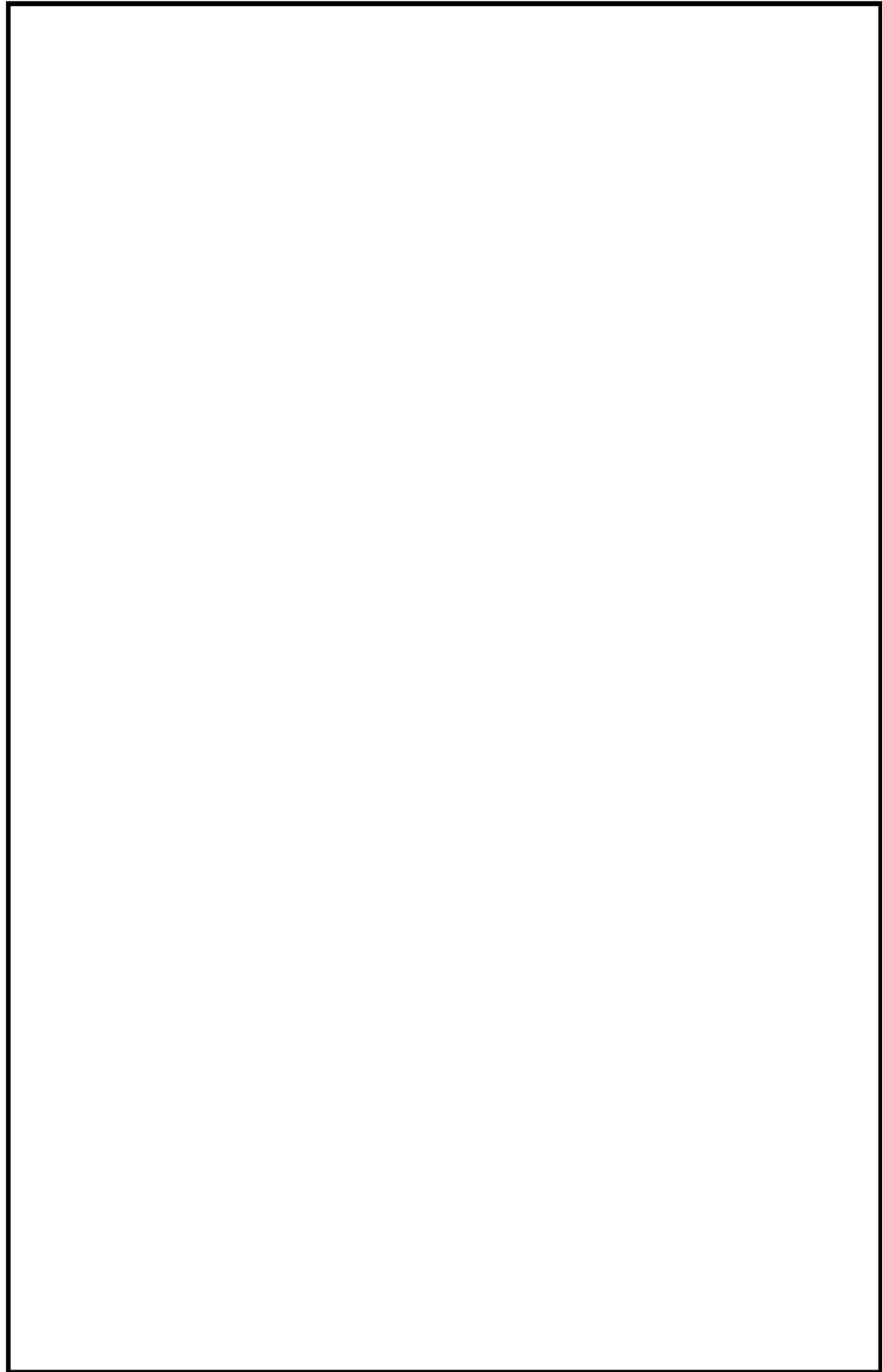


図 3-3 解析結果の比較（水平方向）

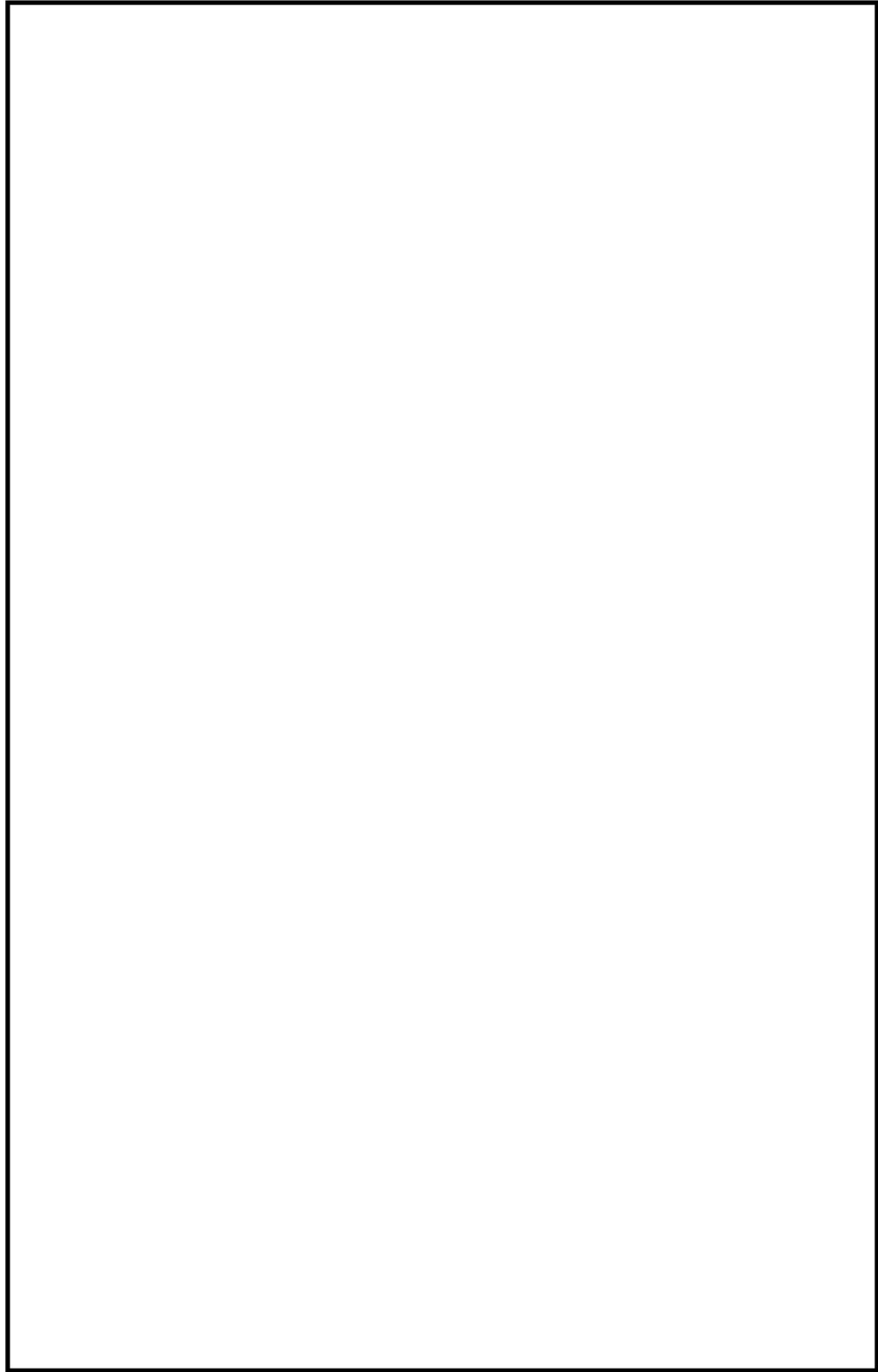


図 3-4 解析結果の比較（鉛直方向）

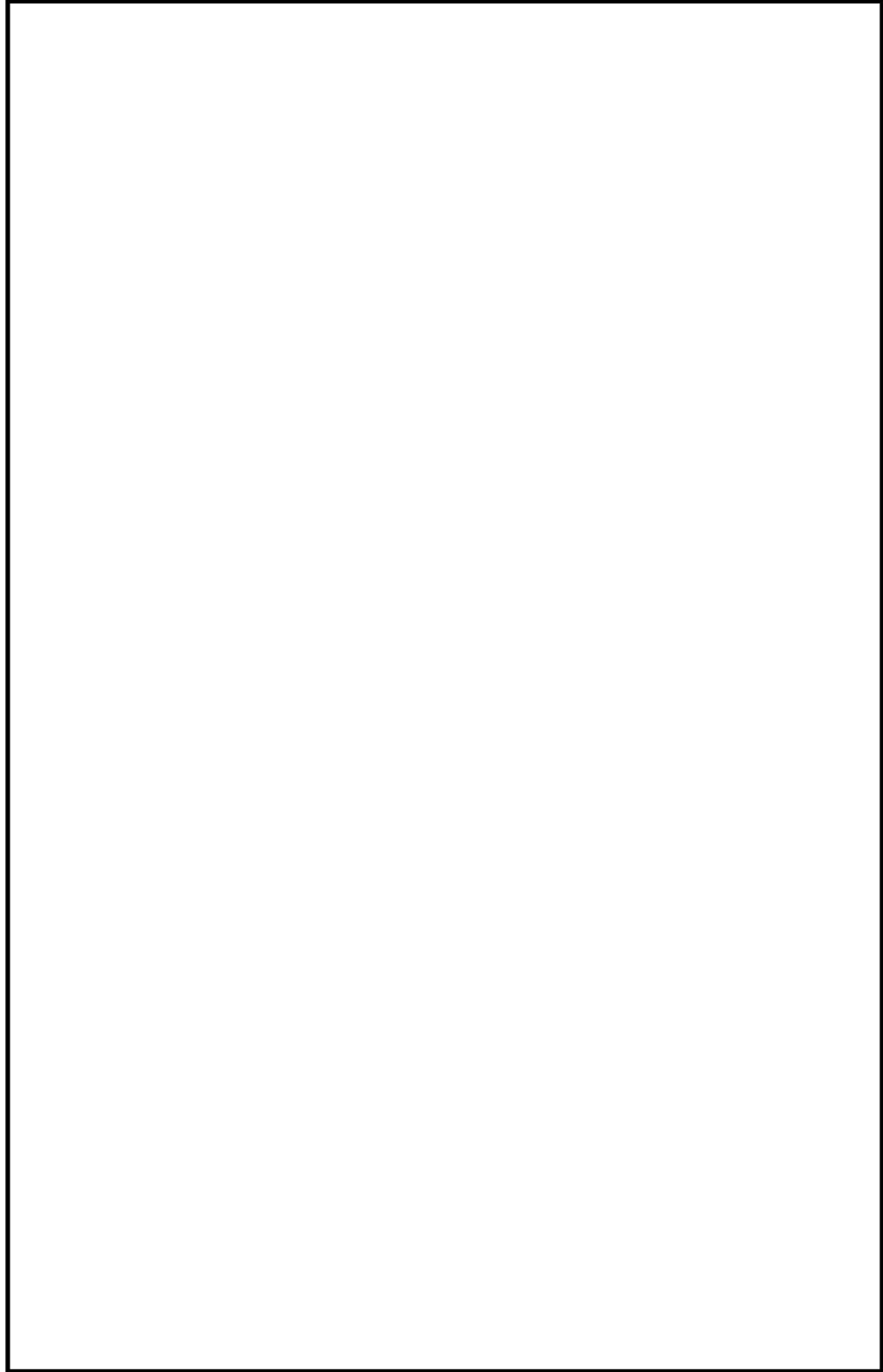


図 3-5 解析結果の比較 (回転方向)

3.5.2 使用内容に対する妥当性

コントロール建屋の地震応答解析モデルにおける基礎底面地盤ばねの算定に本解析コードを使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証されており、妥当である。

- ・検証の内容のとおり、水平方向、鉛直方向及び回転方向の地盤ばねについて検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

4. 引用文献

(1)

--

--

別紙 16 LNOVAK

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-9	コントロール建屋の地震応答計算書	導入時 Ver.

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	LNOVAK
使用目的	側面地盤ばね算定
開発機関	東電設計株式会社
開発時期	1986 年
使用したバージョン	導入時 Ver.
コードの概要	<p>本解析コードは、Novak の方法による側面地盤ばねを求めるために開発されたプログラムである。埋め込み部を等価な円形に置換することで、全無限弾性体中の無質量剛な円盤が定常振動するときのインピーダンスを解析的に求める。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、コントロール建屋の地震応答解析モデルにおける Novak の方法による側面地盤ばねを算定するために使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ・ と本解析コードによる解析解を比較した結果、双方の解がおおむね一致していることを確認している。 ・ 動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 検証の内容のとおり、建屋側面地盤の水平ばね及び回転ばねについて検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは、Novakの方法による側面地盤ばねを求めるために開発されたプログラムである。本解析コードは、コントロール建屋の地震応答解析モデルにおける側面地盤ばねを算定するために、動的インピーダンスの計算を行う。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴を以下に示す。

- ・全無限弾性体中の無質量剛な円盤が定常振動するときのインピーダンスを求めることができる。
- ・水平方向，鉛直方向及び回転方向のばねを求めることができる。
- ・任意の振動数に対する動的ばねを求めることができる。
- ・解析結果としては，任意の振動数に対する水平方向，鉛直方向及び回転方向の地盤ばねが求められる。

3.3 解析手法

図3-1に示す加振を受ける剛な円盤の水平方向のインピーダンス算定式は、以下の式で表される。

$$\widetilde{k}_a = -\pi \cdot G \cdot a_0^2 \cdot \frac{4K_1(b_0^*) \cdot K_1(a_0^*) + a_0^* \cdot K_1(b_0^*) \cdot K_0(a_0^*) + b_0^* \cdot K_0(b_0^*) \cdot K_1(a_0^*)}{b_0^* \cdot K_0(b_0^*) \cdot K_1(a_0^*) + a_0^* \cdot K_1(b_0^*) \cdot K_0(a_0^*) + b_0^* \cdot K_0(b_0^*) \cdot K_0(a_0^*)} \quad (3.1)$$

ここで、

$K_0()$: 0次の変形ベッセル関数

$K_1()$: 1次の変形ベッセル関数

a_0 : $\omega \cdot r_0 / V_s$ で定義される無次元振動数 ($a_0^* = \frac{a_0}{\sqrt{1+i \cdot 2h}} \cdot i$)

b_0 : $\omega \cdot r_0 / V_p$ で定義される無次元振動数 ($b_0^* = \frac{a_0^*}{\eta}$, $\eta = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}$)

回転方向のインピーダンス算定式は、以下の式で表される。

$$\widetilde{k}_c = \pi \cdot G \cdot r_0^2 \left[1 + a_0^* \cdot \frac{K_0(a_0^*)}{K_1(a_0^*)} \right] \quad (3.2)$$



図3-1 加振を受ける剛円盤 (引用文献(2)参照)

なお、解析当たっては下記の仮定を設けている。

- ・ 建屋埋め込み部分を等価な円形と仮定する。
- ・ 建屋埋め込み部分は無質量の剛体と見なす。
- ・ 建屋-地盤間の接触・剥離は考慮しない。

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3-2に示す。

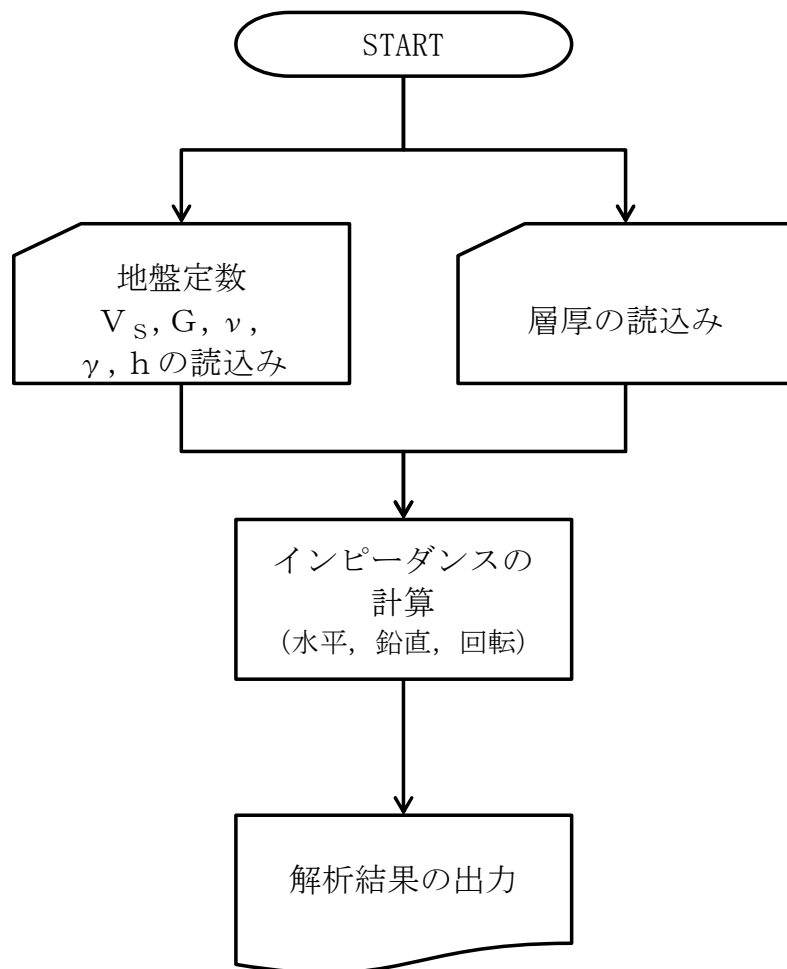


図3-2 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

3.5.1 文献との比較による検証

本解析コードについて、

との比較を行う。

以下の条件下により Novak の方法による側面地盤ばねを算定する。

- ・側面地盤 : せん断波速度 $V_s =$
単位体積重量 $\gamma =$
ポアソン比 $\nu =$
- ・計算振動数 :
- ・層厚 :

解析結果の比較を図 3-3, 図 3-4 に示す。

図より, 本解析コードの結果は

と一致していることが確認できる。

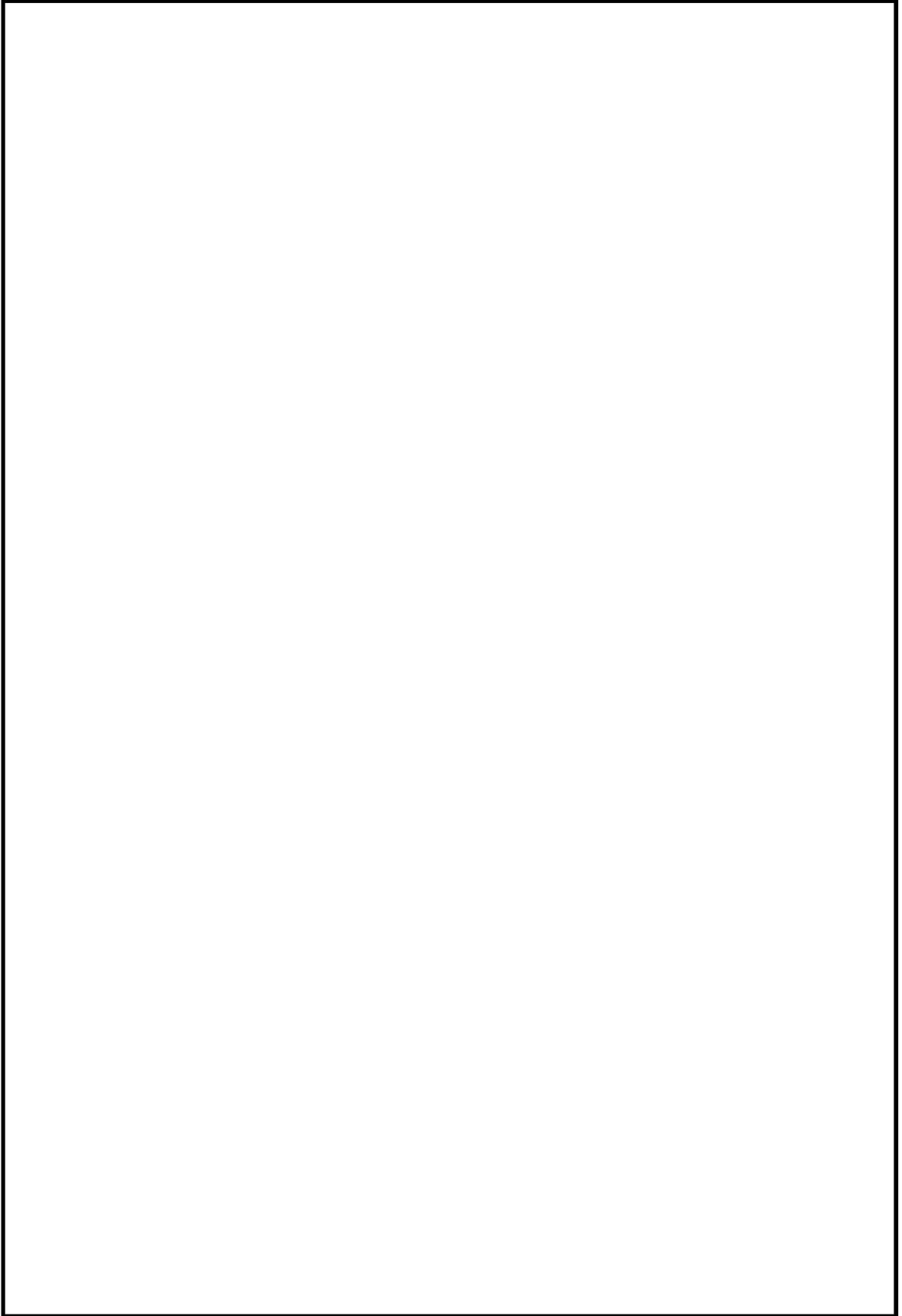


図 3-3 解析結果の比較（水平方向）

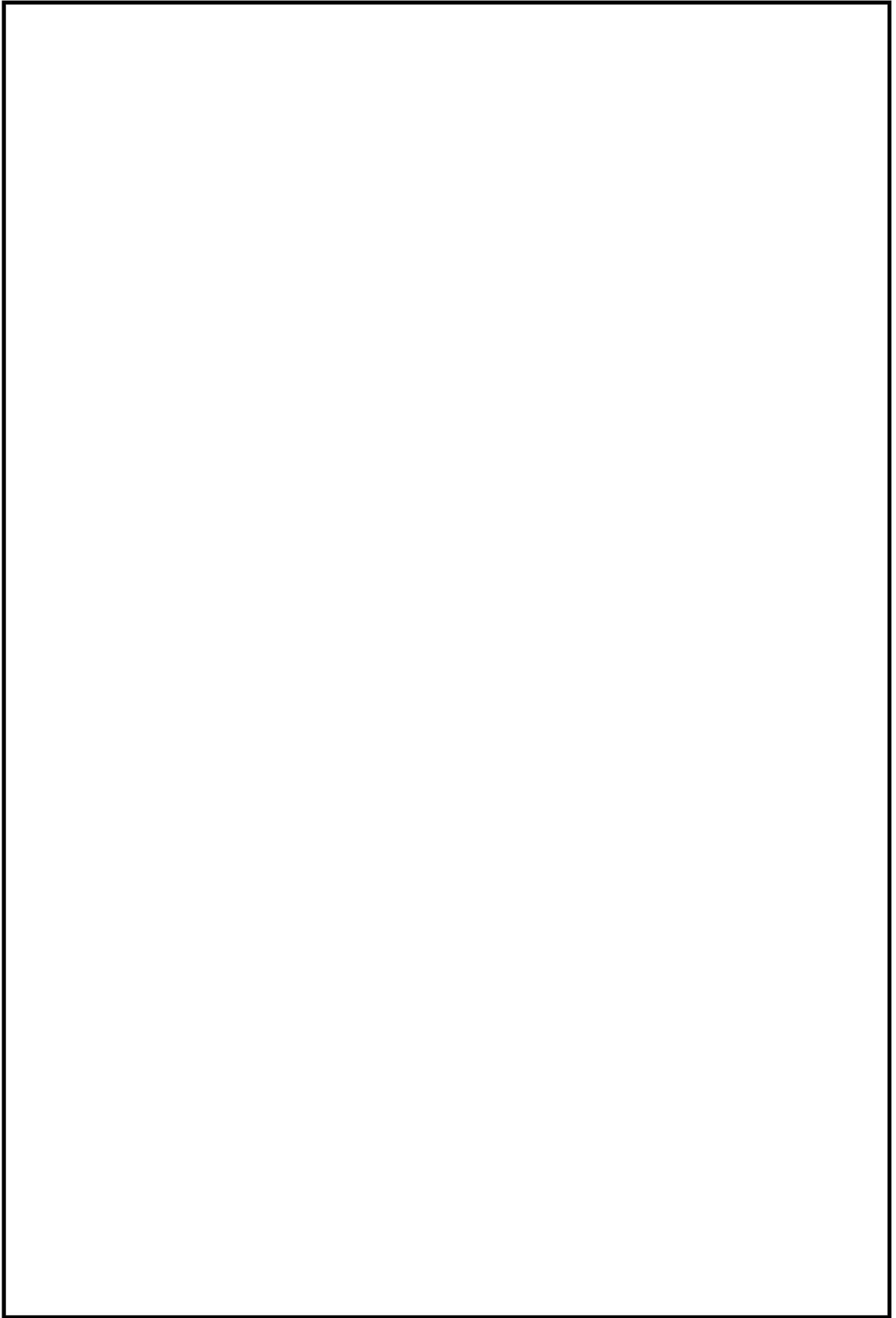


図 3-4 解析結果の比較 (回転方向)

3.5.2 使用内容に対する妥当性

コントロール建屋の地震応答解析モデルにおける側面地盤ばねの算定に本解析コードを使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証されており、妥当である。

- ・検証の内容のとおり、建屋側面地盤の水平ばね及び回転ばねについて検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

4. 引用文献

(1)

(2)



別紙 17 S H A K E

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-9	コントロール建屋の地震応答計算書	導入時 Ver.

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	SHAKE
使用目的	入力地震動算定
開発機関	東電設計株式会社（オリジナル：カリフォルニア大学）
開発時期	1988 年
使用したバージョン	導入時 Ver.
コードの概要	<p>本解析コードは、1次元波動論に基づき、多層地盤の地震応答解析を効率よく行うために開発されたプログラムである。等価線形解析を行うことができ、各層における加速度、応力度、ひずみ度等の伝達関数、応答波形等が求められる。</p>
<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>本解析コードは、コントロール建屋の地震応答解析における入力地震動の策定において、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する地盤の応答を評価するために使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードを用いて評価した弾性地盤の増幅特性が理論解と一致することを確認している。 ・汎用コードである [] <p>[] と本解析コードによる解析解を比較した結果、双方の解がおおむね一致していることを確認している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり、地盤の応答解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは、1次元波動論に基づき、多層地盤の地震応答解析を効率よく行うために開発されたプログラムである。本解析コードは、コントロール建屋の地震応答解析における入力地震動策定のために、多層地盤の地震応答解析を行う。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴を以下に示す。

- ・1次元波動論に基づき、多層地盤の地震応答解析を効率よく行うことができる。
- ・等価線形解析を行うことができる。
- ・解析結果としては、地盤の各層における加速度、応力度、ひずみ度等の伝達関数、応答波形等が求められる。

3.3 解析手法

図 3-1 に示す多層地盤における 1 次元波動方程式は、以下の式で表される。

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \cdot \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \cdot \partial t} \quad (3.1)$$

ここで、

- ρ : 単位体積重量
- G : せん断弾性係数
- u : 変位
- η : 粘性係数

ただし、変位 $u(x, t)$ は次式で表す。

$$u(x, t) = E \cdot e^{i(k \cdot x + \omega \cdot t)} + F \cdot e^{-i(k \cdot x - \omega \cdot t)} \quad (3.2)$$

ここで、右辺第 1 項は上昇波、第 2 項は下降波を示すもので、 k は複素波数と呼ばれ、下式を満足するものである。

$$k^2 = \frac{\rho \cdot \omega^2}{G + i \omega \cdot \eta} = \frac{\rho \cdot \omega^2}{G^*} \quad (3.3)$$

ここで、

- G^* : 複素せん断弾性係数

また伝達関数は、上記の変位の式より求められる m 層と n 層の変位を

$$U_m = E_m(\omega) + F_m(\omega) \quad (3.4)$$

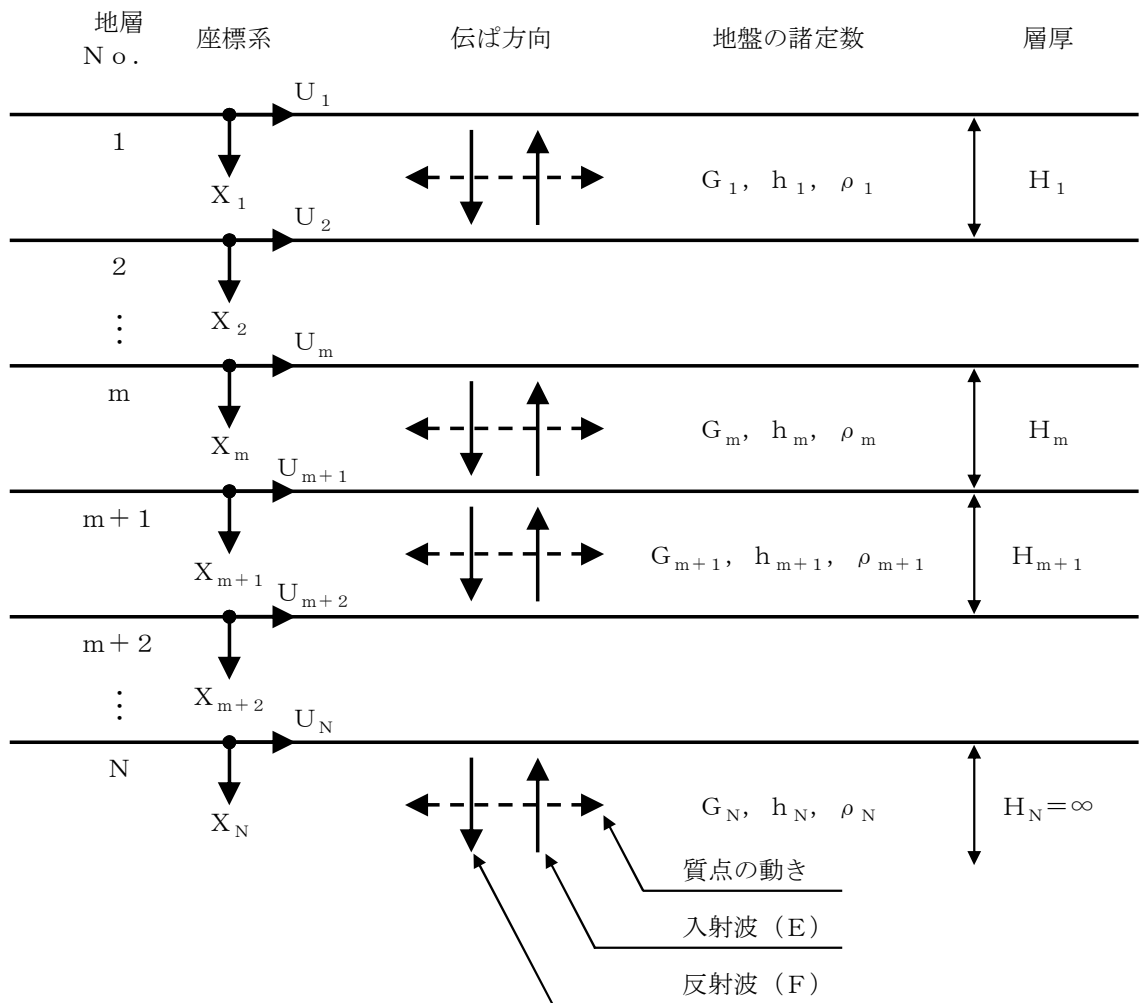
$$U_n = E_n(\omega) + F_n(\omega) \quad (3.5)$$

と表わせば、 m 層と n 層の伝達関数 $A_{n,m}(\omega)$ は次式で求められる。

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{U_m}{U_n} = \frac{E_m(\omega) + F_m(\omega)}{E_n(\omega) + F_n(\omega)} \quad (3.6)$$

なお、解析当たっては下記の仮定を設けている。

- ・地盤を水平成層よりなるものと仮定し、その各層はせん断弾性係数、減衰定数、単位体積重量及び層厚により規定されるものとする。
- ・各層の応答は、鉛直方向に伝ばするせん断波のみにより励起されるものとする。



記号

- G_m : m層のせん断弾性係数
- h_m : m層の減衰定数
- ρ_m : m層の単位体積重量
- H_m : m層の層厚
- U_m : m層の水平変位
- X_m : m層の局所座標

図 3-1 解析対象の多層地盤

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3-2に示す。

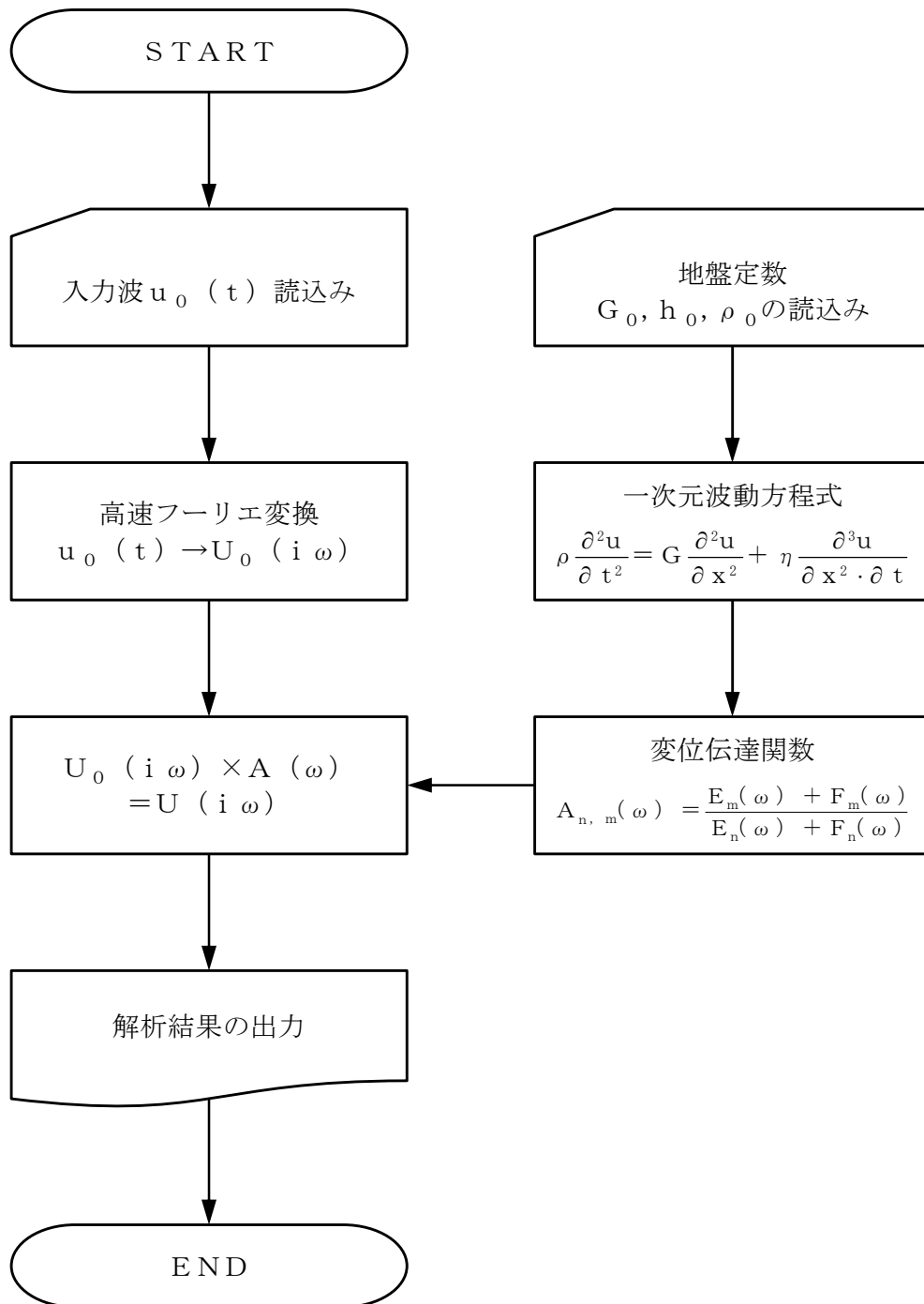


図3-2 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

3.5.1 理論解との比較による検証

本解析コードについて、

の理論解（非減衰時の伝達関数）との比較を行う。

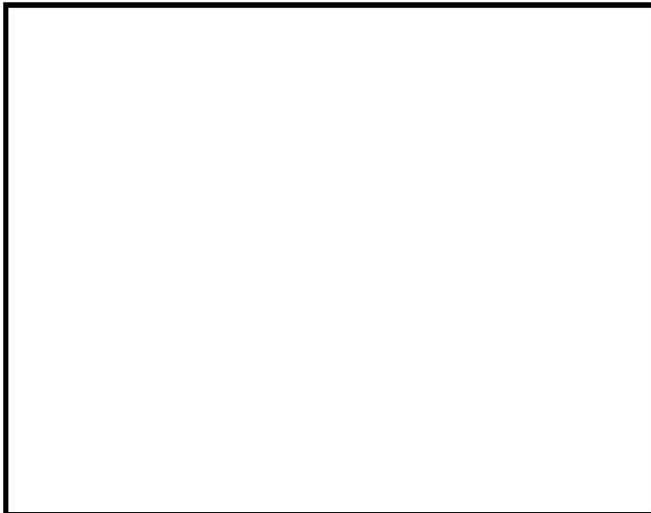
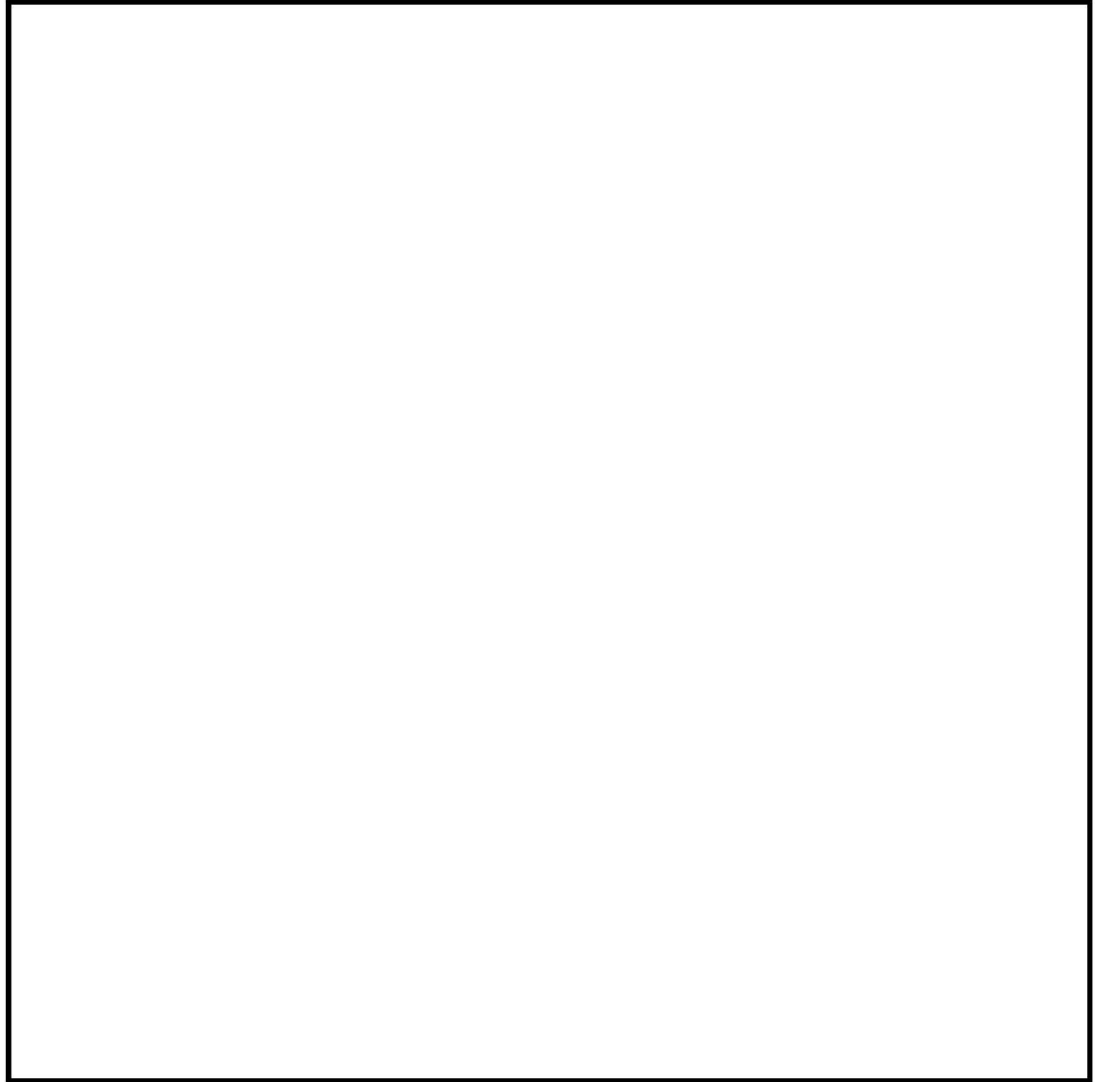


図3-3 検討用地盤モデル

非減衰時における伝達関数の比較を図 3-4 に示す。

図より，本解析コードの結果は理論解と一致しており，地盤応答を正しく評価していることが確認できる。

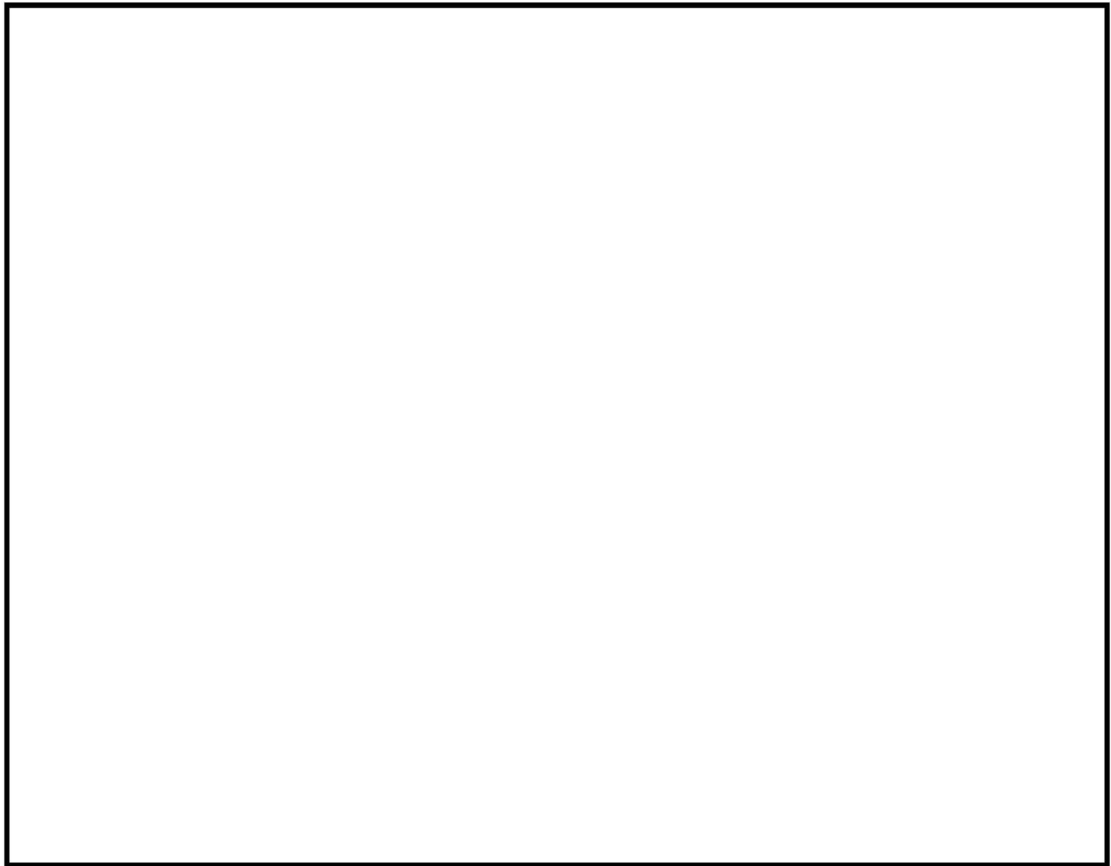


図3-4 伝達関数の理論解との比較

3.5.2 他コードとの比較による検証

本解析コードについて、市販されている 2 次元有限要素法による地盤-構造物連成系の動的相互作用解析プログラム [] と [] との比較を行う。

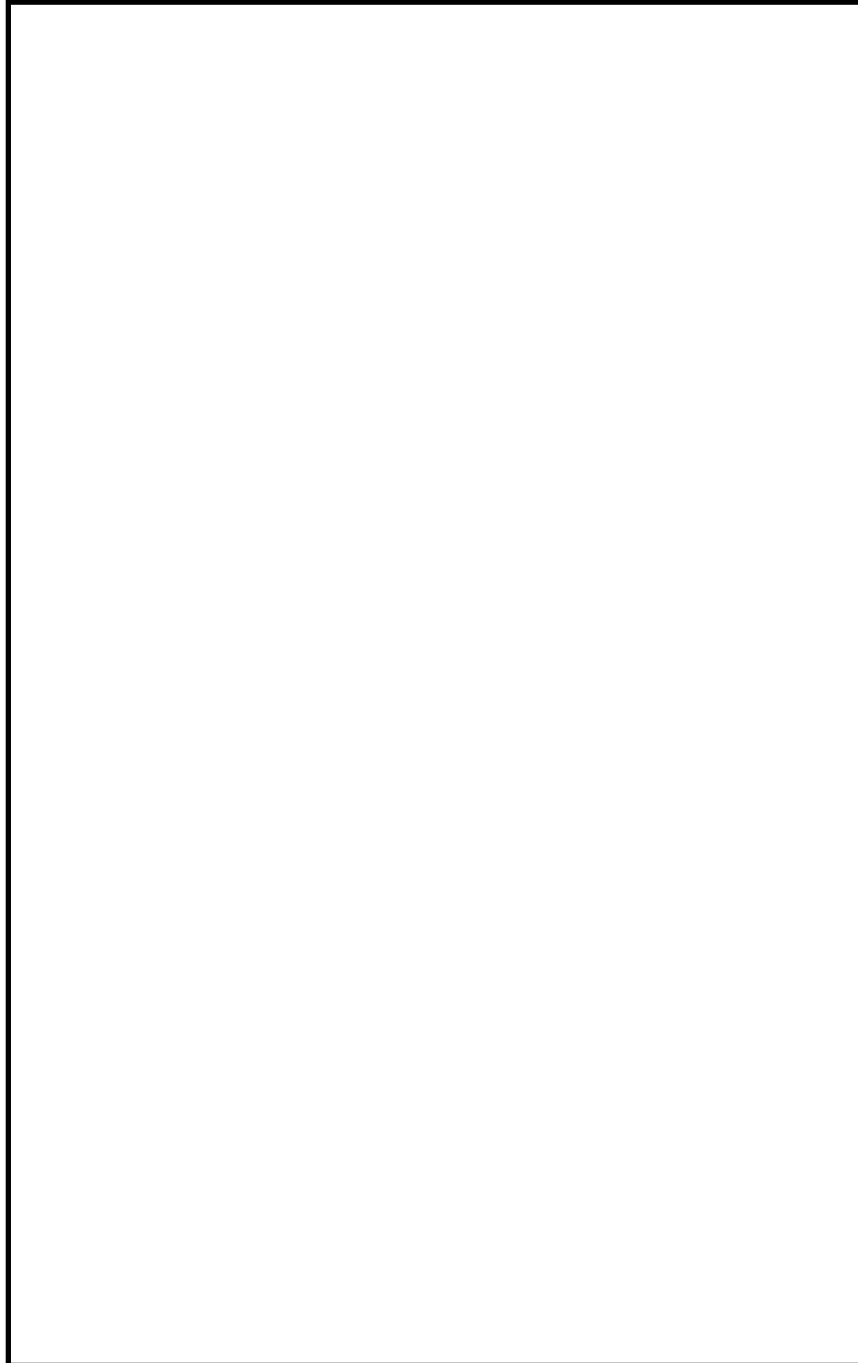
多層地盤を対象に、等価線形解析を実施する。検討用地盤モデルを表 3-1 に、各地層の動的ひずみ依存特性を図 3-5 に示す。図 3-6 に示す入力地震動を [] に基準化した地震動を、モデル下端に 2E 波として入力した。なお、解析条件は以下の条件とした。

- ・考慮する振動数 : []
- ・有効せん断ひずみの算定に用いる係数 : []

解析結果の比較を図 3-7、表 3-2 に示す。

図より、本解析コードの結果は [] による結果とおおむね一致していることが確認できる。

表 3-1 検討用地盤モデル



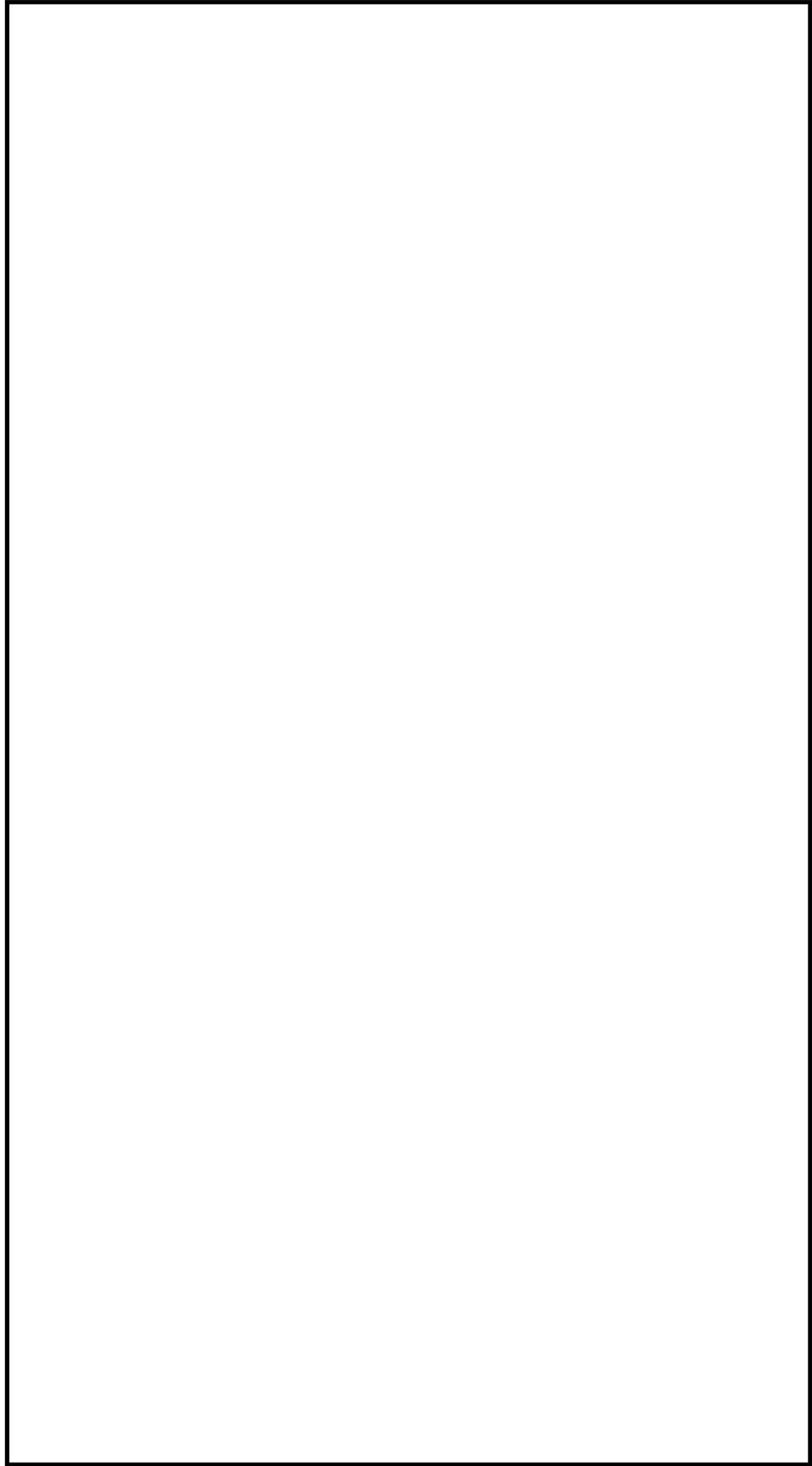


図 3-5 各地層の動的ひずみ依存特性



図 3-6 入力地震動

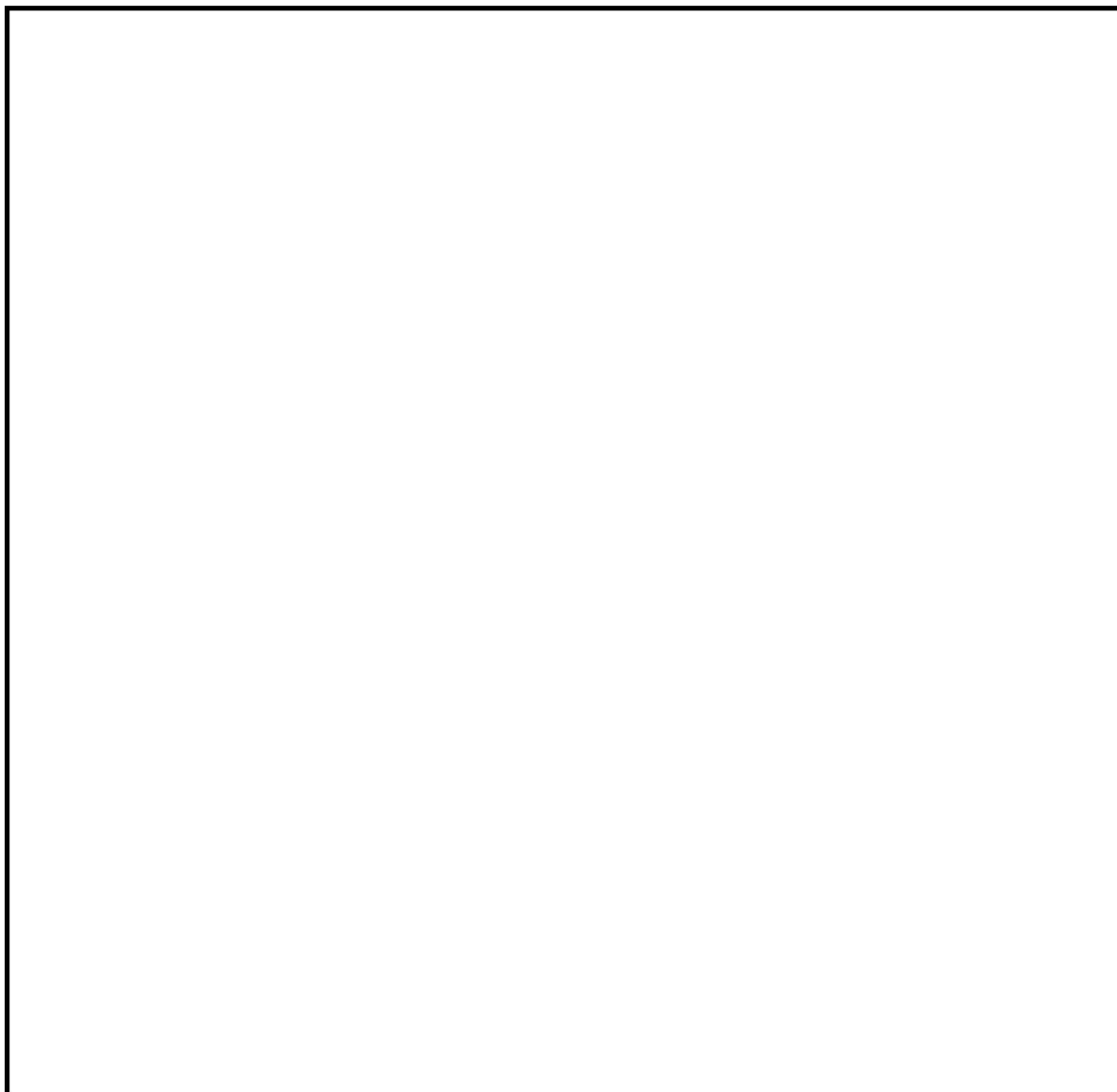


図 3-7 解析結果の比較

表 3-2 解析結果の比較（最大応答加速度）（1/2）

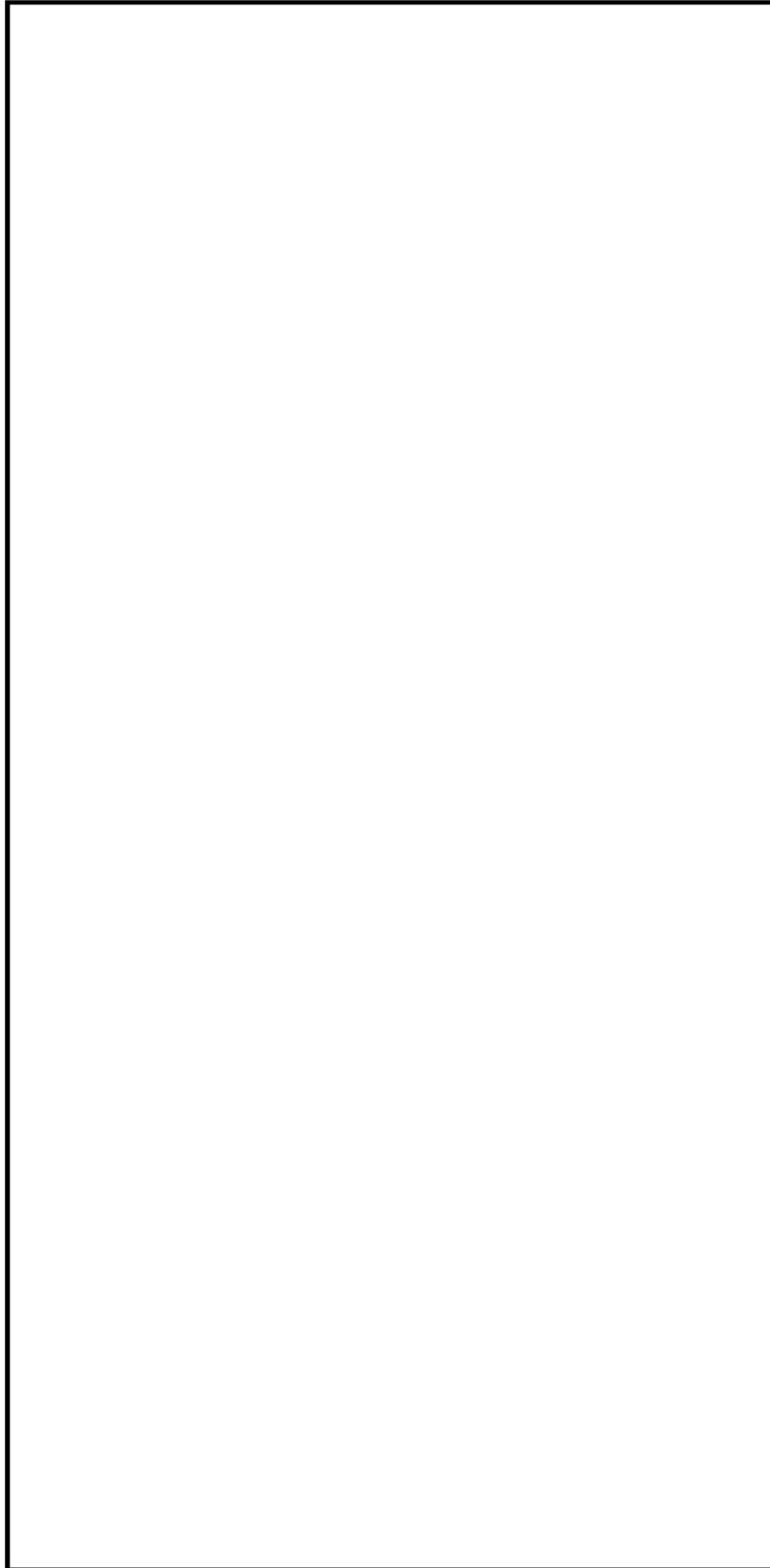
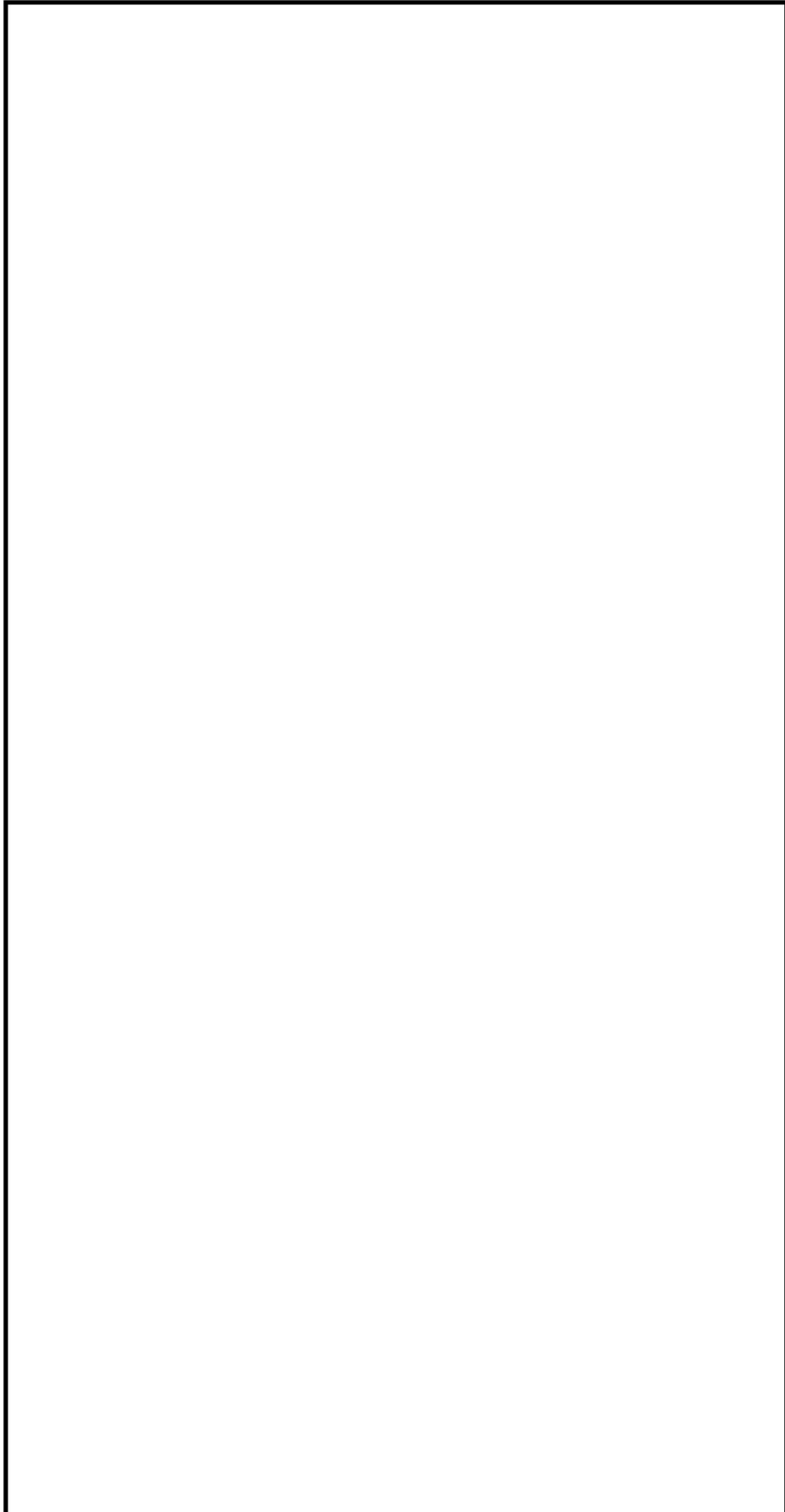


表 3-2 解析結果の比較 (最大せん断ひずみ) (2/2)



3.5.3 使用内容に対する妥当性

コントロール建屋の地震応答解析における入力地震動の策定に本解析コードを使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証されており、妥当である。

- ・多層地盤の地震応答解析について、による解析結果と比較しておおむね一致していることから、解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。
- ・検証の内容のとおり、地盤の応答解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。
- ・評価地盤を水平成層と仮定していることから、1次元重複反射理論の適用範囲である。

4. 引用文献

(1)

別紙 18 D I A N A

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-10	コントロール建屋の耐震性についての計算書	Ver. 10.2

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	D I A N A
使用目的	3次元有限要素法による応力解析（弾塑性）
開発機関	TNO DIANA 社
開発時期	1983 年
使用したバージョン	Ver. 10.2
コードの概要	<p>本解析コードは、TNO DIANA BV（オランダ）により開発され、国内においてはJIPテクノサイエンス（株）により保守されている汎用有限要素法プログラムである。</p> <p>土木及び建築分野に特化した要素群及び材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で、日本国内では、建設部門を中心として、官公庁、大学及び民間を問わず、多くの利用実績がある。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・面外集中荷重を受ける鉄筋コンクリート造平板の実験についてシミュレーション解析を行い、実験結果の荷重－変位関係と解析結果の比較をすることにより、本解析コードの当該解析機能の妥当性を確認した。 ・基礎浮上りに関する例題解析を実施し、解析結果と理論モデルによる理論解が一致することを確認した。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証内容のとおり、コンクリートの応力解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは、有限要素法による汎用非線形構造解析プログラムである。材料非線形性及び幾何学的非線形性を考慮した構造物の静的応力変形解析や動的解析、熱伝導解析、地盤の浸透流、圧密解析が提供されている。また、各分野特有の連成問題（熱応力、構造－流体連成、圧密－浸透流連成等）も解析可能である。本解析コードは、コントロール建屋基礎スラブの地震時の応力解析（弾塑性）に使用している。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴を以下に示す。

- ・非線形構造問題（材料及び幾何学的非線形）に必要な機能が充実している。
- ・数多くの要素及び材料構成則が提供されており、多様な構造物のモデル化が可能である。
- ・連成問題が解析可能である。

また、今回の解析における本解析コードの使用要素はシェル要素及びはり要素である。

3.3 解析手法

3.3.1 有限要素法による評価

有限要素法による評価は，次の手順で行う。

- ① 要素内の変位を仮定し，節点変位を使って要素内任意点の変位を表現する。

$$\{u\} = [N]\{u_e\} \quad (3.1)$$

ここで，

- $\{u\}$: 要素内任意点の変位
- $[N]$: 形状関数マトリックス
- $\{u_e\}$: 節点変位

- ② 上記の変位を微分して，要素内任意点のひずみを節点変位により表す。

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u_e\} \quad (3.2)$$

ここで，

- $\{\varepsilon\}$: 要素内任意点のひずみ
- $[B]$: ひずみマトリックス

- ③ 材料物性から求められる応力とひずみの関係式である(3.3)式より定められる弾性係数マトリックスを用いて，要素剛性マトリックスを(3.4)式より計算する。

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (3.3)$$

$$[K_e] = \int [B]^T [D] [B] dV \quad (3.4)$$

ここで，

- $\{\sigma\}$: 要素内任意点の応力
- $[D]$: 材料の応力-ひずみ接線マトリックス
- $[K_e]$: 要素剛性マトリックス

- ④ 全体の剛性マトリックスを要素剛性マトリックスの重ね合わせによって求め、力の釣合いより静的変位は(3.5)式、また動の変位は(3.6)式より求める。

$$\{f\} = [K]\{\gamma\} \quad (3.5)$$

$$\{f\} = [M]\{\ddot{\gamma}\} + [K]\{\gamma\} \quad (3.6)$$

ここで、

$\{f\}$: 荷重ベクトル
 $\{\gamma\}$: 構造全体の変位

$$\{\gamma\} = \begin{Bmatrix} U_{e1} \\ U_{e2} \\ \vdots \\ U_{en} \end{Bmatrix}$$

$U_{e1}, U_{e2}, \dots, U_{en}$: 各節点の節点変位

$\{\ddot{\gamma}\}$: 構造全体の加速度

$[M]$: 質量マトリックス

$[K]$: 剛性マトリックス

- ⑤ 変位が決まれば、(3.2)式、(3.3)式より各要素の応力が求められる。

3.3.2 基礎浮上りの評価

コントロール建屋基礎スラブの応力解析モデルは、基礎底面に鉛直ばね及び水平ばねを設けている。このばねは、ジョイント要素によりモデル化し、引張力が発生したときに軸剛性及びせん断剛性が 0 になることで基礎浮上りを考慮している。

ジョイント要素に付与する復元力特性は、図 3-1 に示すように仮定する。図 3-1(a) はジョイント面に垂直な方向である鉛直ばね、図 3-1(b) はジョイント面に平行な方向である水平ばねの特性である。垂直方向は、引張りの場合は力の伝達が行われず、圧縮の場合には鉛直ばね係数 k_n を介して構成関係は線形関係にあるものとする。

また、せん断方向は、発生しているせん断応力の絶対値が降伏応力 τ_y に達すると滑動を生じ、それ以下であれば弾性-完全塑性体としての挙動を呈するものと仮定する。垂直方向に剥離が生じた場合には、せん断応力も伝達されない。

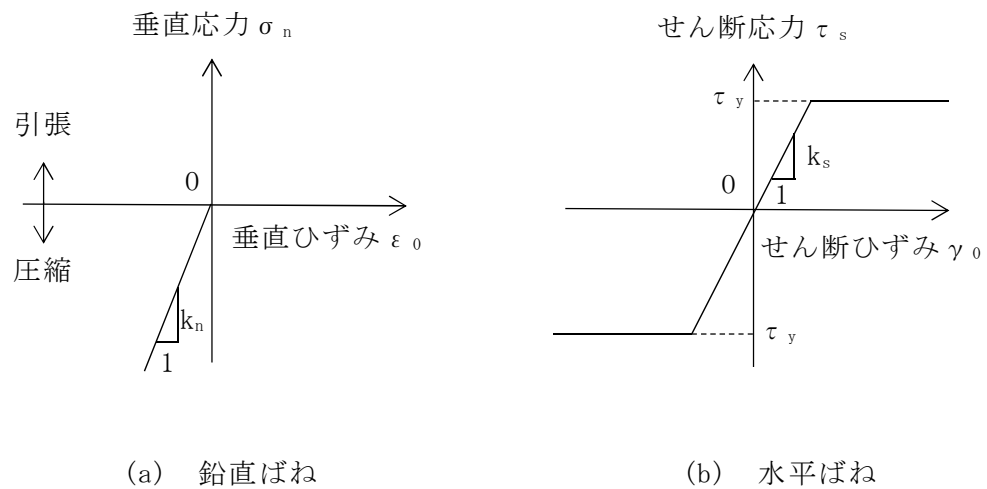


図 3-1 ジョイント要素の復元力特性

3.4 解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを図3-2に示す。

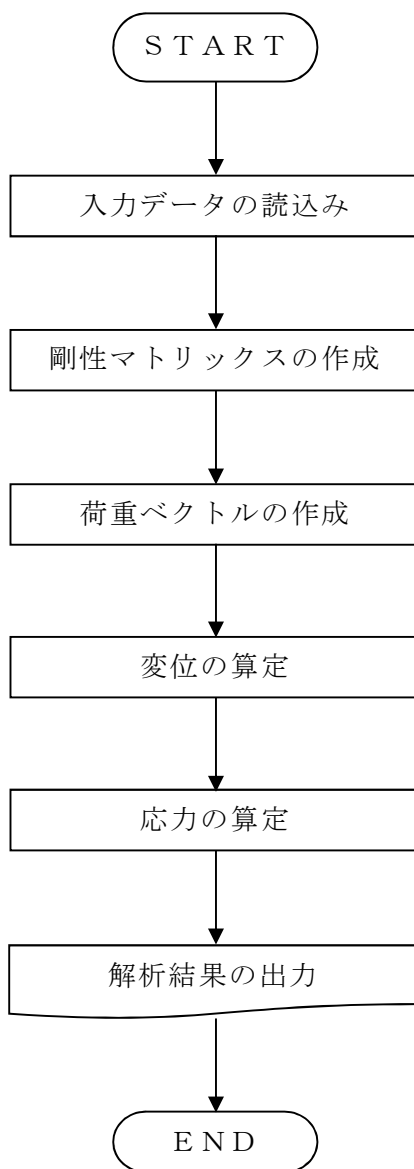


図 3-2 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

3.5.1 実験結果とシミュレーション解析の比較による検証

(1) 検証概要

本解析コードが静的非線形解析において妥当であることを検証する。

文献（引用文献(1)参照）に示される面外方向集中荷重を受ける鉄筋コンクリート造平板の崩壊問題を，シェル要素と鉄筋要素でモデル化し静的非線形解析を行い，実験結果の荷重－変位関係と解析結果の整合を確認する。

(2) 検証モデル

図 3-3 に解析モデルを示す。正方形の鉄筋コンクリート造平板は 4 隅で鉛直方向に支持されており，中央に集中荷重を受ける。スラブは厚さ方向の 75% の位置で，2 方向に配筋されている。鉄筋比（鉄筋の体積/コンクリートの体積）は，各方向に対し 8.5×10^{-3} である。

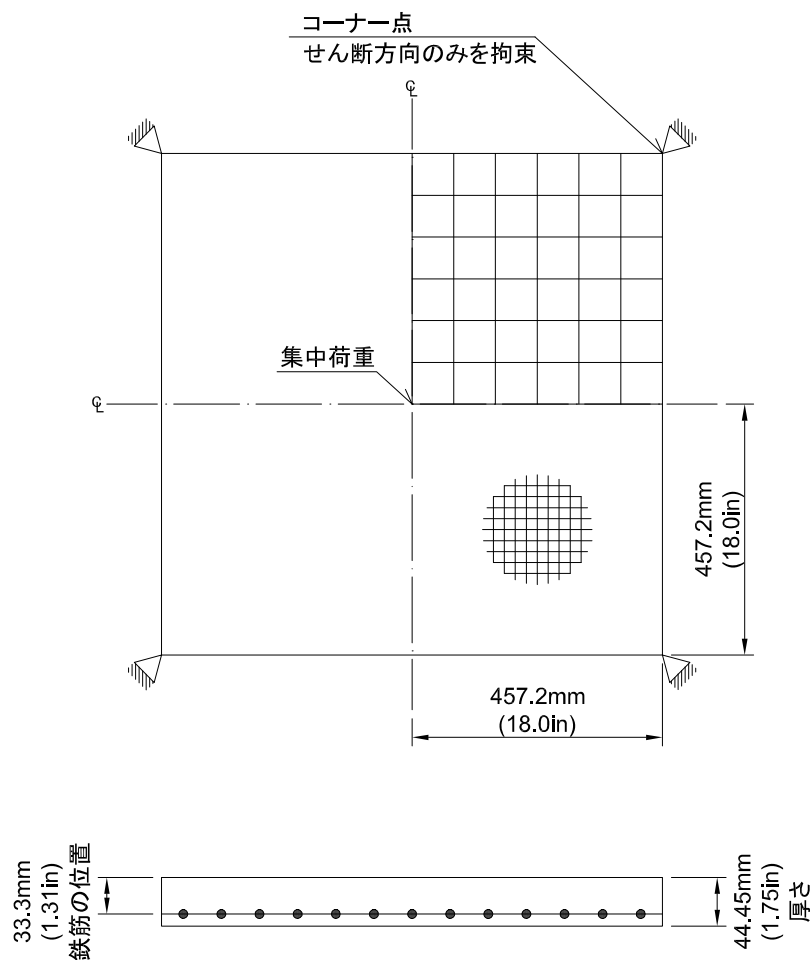


図 3-3 解析モデル

(3) 材料物性値

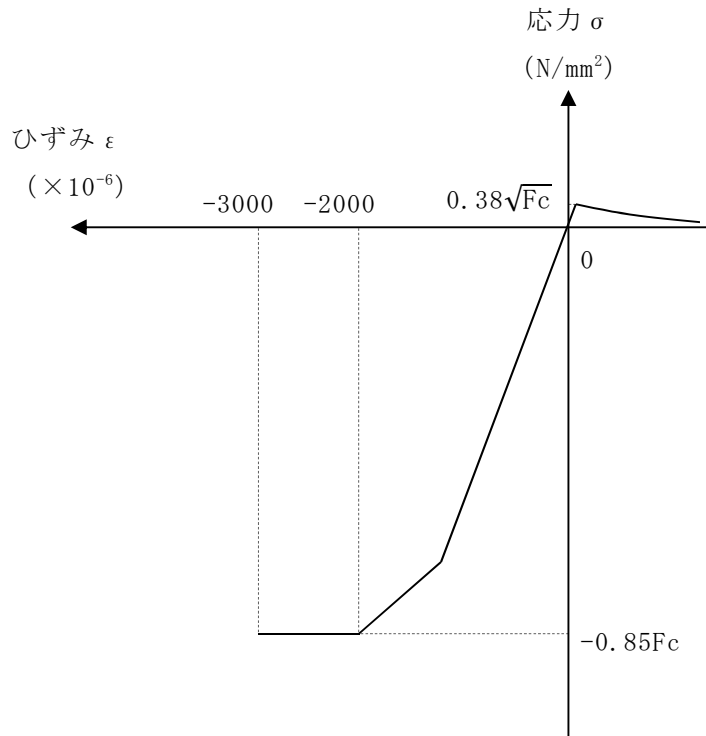
表 3-1 に解析に用いる材料物性値を示す。材料物性値は原則として文献（引用文献(1)及び引用文献(2)参照）に記載の値を用いる。

表 3-1 解析に用いる材料物性値

諸元		物性値
コンクリート	設計基準強度 F_c	37.92 N/mm ² (5500 lb/in ²)
	ヤング係数	2.86×10^4 N/mm ² (4150000 lb/in ²)
	ポアソン比	0.15
鉄筋	降伏強度 σ_y	345 N/mm ² (50000 lb/in ²)
	ヤング係数	2.00×10^5 N/mm ² (29000000 lb/in ²)

(4) 材料構成則

図 3-4 に材料構成則を示す。



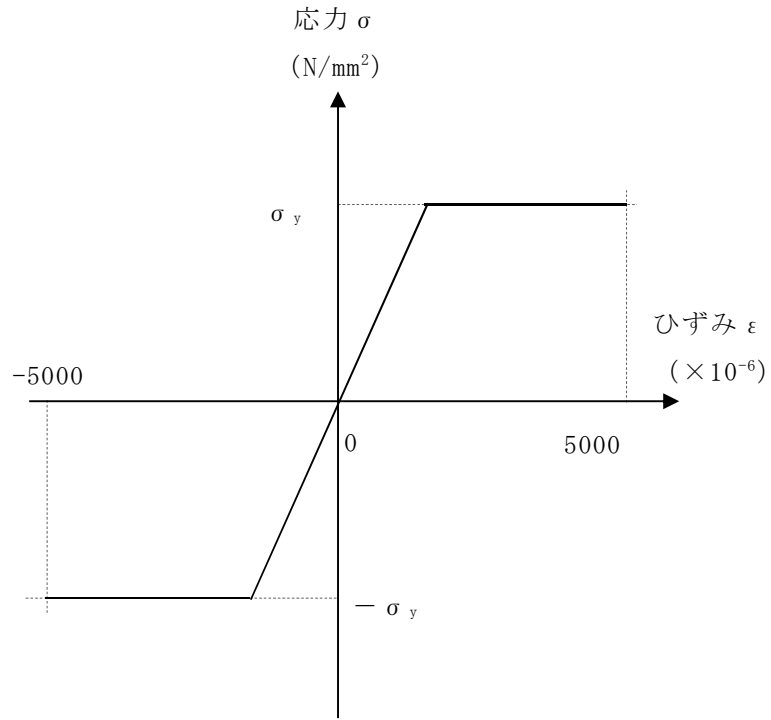
F_c : コンクリートの設計基準強度

項目	設定
圧縮強度	$-0.85F_c$ (CCV 規格)
終局圧縮ひずみ	-3000μ (CCV 規格)
圧縮側のコンクリート構成則	CEB-FIP Model code に基づき設定 (引用文献(3)参照)
ひび割れ発生後の引張軟化曲線	出雲ほか(1987)による式 ($c=0.4$) (引用文献(4)参照)
引張強度	$\sigma_t = 0.38\sqrt{F_c}$ (「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 - (社)日本建築学会, 1999 改定」)

(a) コンクリートの応力-ひずみ関係

図 3-4 材料構成則(1/2)

- ・鉄筋の構成則：バイリニア型
- ・終局ひずみ： $\pm 5000 \mu$ （CCV規格）



σ_y : 鉄筋の降伏強度

(b) 鉄筋の応力-ひずみ関係

図 3-4 材料構成則(2/2)

(5) 解析結果

解析結果の荷重－変形関係を文献の図（引用文献(1)参照）に重ねて図 3-5 に示す。図より両者は概ね一致していることから、解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

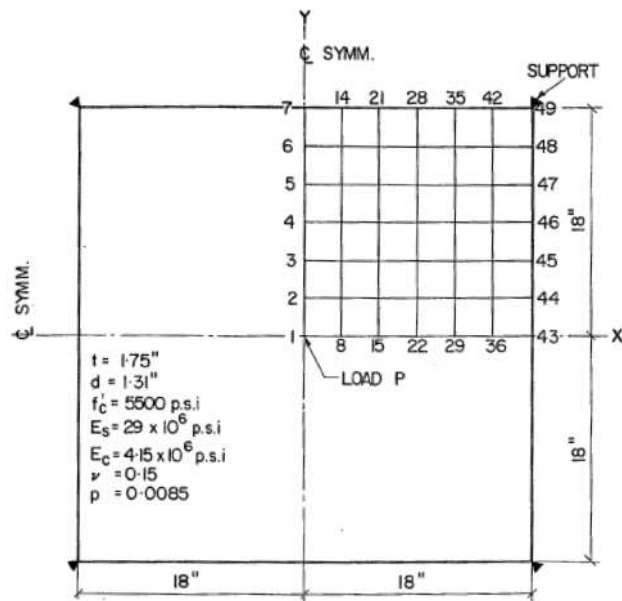
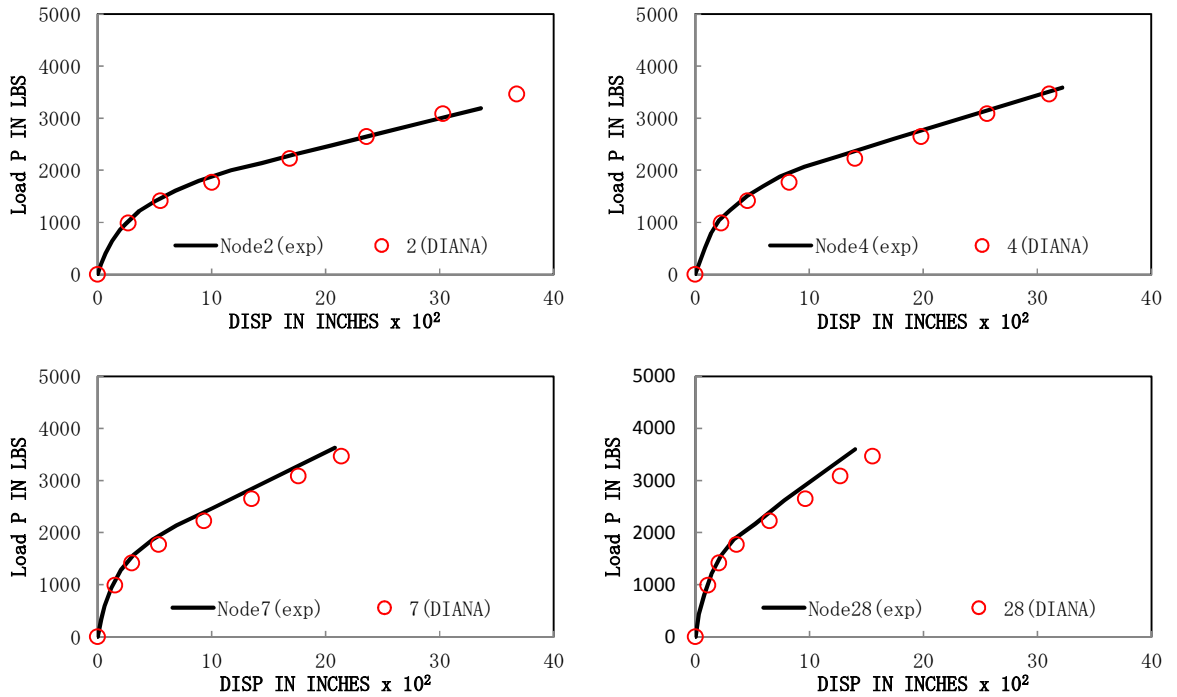


FIG. 7.—CORNER SUPPORTED TWO-WAY SLAB

図 3-5 検証解析結果

3.5.2 基礎浮上りの評価の検証

剛はりを用いて、「3.2 解析コードの特徴」に示す手法による地盤ばねで固定点と連結した図3-6のモデルに対して、鉛直力Nを作用した状態で、転倒モーメントMを漸増させ、接地率を評価し、理論解と比較する。ここで鉛直力Nは5(kN)とする。

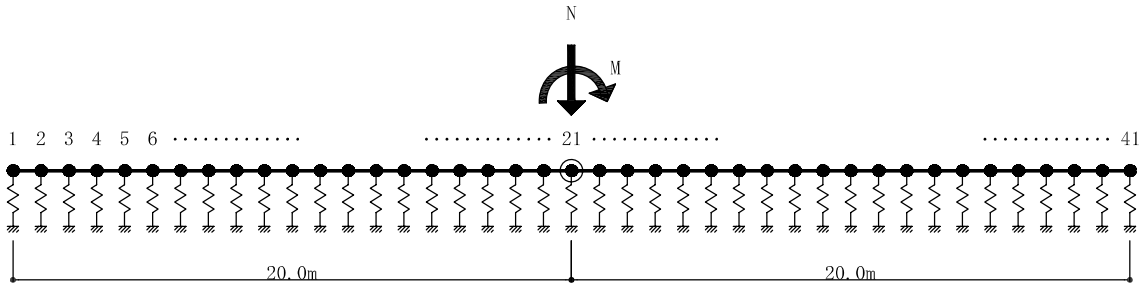


図3-6 解析モデル

(1) 理論解による接地率の評価

浮上り限界モーメント M_0 及び接地率 η は、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（社）日本電気協会」に基づき下式により算定する。

$$M_0 = \frac{N \cdot L}{6}$$

$$\eta = 3 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{M}{N \cdot L} \right)$$

ここで、

M_0 : 浮上り限界モーメント (kN・m)

N : 鉛直力 (kN)

L : 建屋基礎幅 (m)

η : 接地率

M : 転倒モーメント (kN・m)

また、接地率 $\eta = 0$ となる転倒モーメントMは、以下となる。

$$M = \frac{1}{2} \cdot N \cdot L = \frac{1}{2} \times 5 \times 40 = 100 \text{ (kN・m)}$$

(2) DIANAによる接地率の評価

本解析コードによる接地率の解析結果と理論解の比較を図3-7に示す。図3-7より、転倒モーメント M と接地率 η の関係は、理論解と一致することが確認できる。

本解析コードによる接地率は、荷重増分ステップ毎に浮き上がった（軸剛性及びせん断剛性が0の状態）地盤ばねのジョイント要素を確認し、その要素の総支配面積を計算することで算定した。

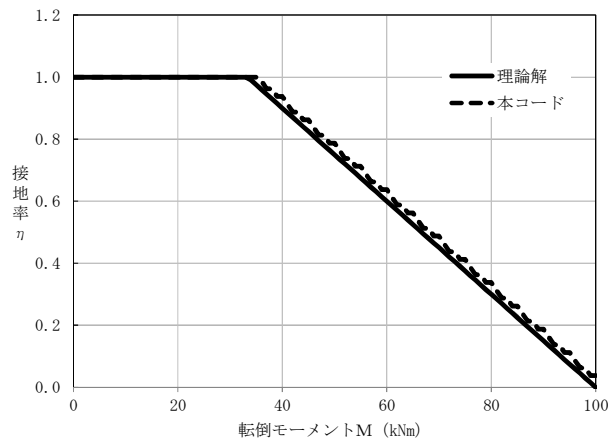


図3-7 理論解と解析結果の比較

4. 引用文献

- (1) Jofriet J. C. & G. M. McNeice : Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Slabs, Journal of the Structural Division, ASCE 1971, Vol. 97, No. ST3
- (2) Gilbert R. I. & R. F. Warner : Tension Stiffening In Reinforced Concrete Slabs, Journal of the Structural Division, ASCE 1978, Vol. 104, No. ST12
- (3) Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP MODEL CODE 1990 (DESIGN CODE) , 1993
- (4) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫 : 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, Vol.25, No.9, 1987.9

別紙 19 N A P I S O S

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-11	廃棄物処理建屋の地震応答計算書	Ver. 2.0
V-2-2-別添 2-1	隣接建屋による影響を考慮した地震応答計算及び建物・構築物の耐震性についての計算書	Ver. 2.0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	N A P I S O S
使用目的	固有値解析及び地震応答解析
開発機関	電力中央研究所，株式会社竹中工務店
開発時期	1996年（使用開始時期）
使用したバージョン	Ver. 2.0
コードの概要	<p>本解析コードは，地盤をソリッド要素で，建屋を非線形積層シェル要素や非線形ビーム要素でモデル化することにより，原子力発電所建屋の地盤建屋連成系3次元非線形地震応答解析が可能である。</p> <p>また，建屋基礎と地盤モデル間に，ジョイント要素を設置することにより，基礎浮上り性状を評価することができる。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・理論解との比較 ・他コードとの比較 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり，地盤（FEM）－建屋（多質点）を連成した地震応答について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・原子力産業界において，関西電力株式会社の大飯3号機の新規制基準適合性審査に係る工事計画認可申請のうち，制御建屋に対する地震応答解析に本解析コードが使用された実績がある。

別紙 20 S o i l P l u s

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-13	格納容器圧力逃がし装置基礎の地震応答計算書	2017 Revision 1 Build2
V-2-9-3-1	原子炉建屋原子炉区域(二次格納施設)の耐震性 についての計算書	2017 Revision 1 Build2

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	S o i l P l u s
使用目的	固有値解析及び地震応答解析
開発機関	伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
開発時期	2005 年
使用したバージョン	2017 Revision1 Build2
コードの概要	<p>本解析コードは、2次元及び3次元の静的・浸透・動的問題を取り扱うことができる総合的な汎用計算機プログラムである。土木・建築分野に特化した要素群、構造部材の非線形モデルを多数準備し、有限要素法のモデル化を容易にしている。</p> <p>解析対象としては、地盤と構造物の連成モデルの地震応答解析に用いられることが多く、橋梁、地下トンネル、上下水道施設、原子力発電所施設、起振実験や静的加力実験等の数値シミュレーション等の解析にも多くの実績がある。</p> <p>また、本解析コードは、直接積分法・モード重ね合わせ法による線形地震応答解析、複素地震応答解析、直接積分法による非線形地震応答解析の機能を持つプログラムである。S o i l P l u s の主な特徴は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 常時応力解析及び地震応答解析の連続解析が可能である。 ② 地震応答解析では、一般的な運動方程式に基づく地震応答解析に加え、地盤の非線形特性を地盤－構造物の連成モデルにおいて考慮することが可能である。 ③ 地盤要素の非線形モデルとして、修正 H-D モデル、修正 GHE モデル及び修正 R-0 モデル、鉄筋コンクリート部材については部材軸力の依存性を考慮した $M-\phi$ 関係に基づく非線形構造モデル等が適用可能である。 ④ はり要素、シェル要素及びソリッド要素等を用いた応力解析が可能である。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、格納容器圧力逃がし装置基礎、大物搬入建屋の固有値解析及び地震応答解析に使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p>

	<p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回の工事計画認可申請で使用する有限要素法による地震応答解析の検証として、先行工事計画認可申請で実績ある他解析コード（T D A P III）と地震応答解析結果が一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、国内の土木・建築分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する有限要素法による地震応答解析に本解析コードが適用できることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請で行う有限要素法による地震応答解析の用途、適用範囲が、上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

3. 解析手法

3.1 一般事項

Soil Plusは、土木・建築向け地震応答解析の汎用プログラムである。土木・建築分野に特化した要素群、構造部材の非線形モデルを多数準備し、有限要素法のモデル化を容易にしている。

解析対象としては、地盤と構造物の連成モデルの地震応答解析に用いられることが多く、橋梁、地下トンネル、上下水道施設、原子力発電所施設、起振実験や静的加力実験等の数値シミュレーション等の解析にも多くの実績がある。

3.2 解析コードの特徴

Soil Plusは、直接積分法・モード重ね合わせ法による線形地震応答解析、直接積分法による非線形地震応答解析の機能を持つプログラムである。Soil Plusの主な特徴は以下のとおりである。

- ①常時応力解析及び地震応答解析の連続解析が可能である。
- ②地震応答解析では、一般的な運動方程式に基づく地震応答解析に加え、地盤の非線形特性を地盤－構造物の連成モデルにおいて考慮が可能である。
- ③地盤要素の非線形モデルとして、修正 H-D モデル、修正 GHE モデル及び修正 R-0 モデル、鉄筋コンクリート部材については部材軸力の依存性を考慮した $M-\phi$ 関係に基づく非線形構造モデル等が適用可能である。
- ④はり要素、シェル要素及びソリッド要素を用いた応力解析が可能である。

3.3 解析手法

3.3.1 直接積分法による地震応答解析

有限要素法による地震応答解析は、任意外力による強制振動の運動方程式を直接積分して、2階の連立微分方程式を解き、解 u を求める方法である。

地震外力による運動方程式は、式(3.1)で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (3.1)$$

ここで、

$[M]$: 構造全体の質量マトリクス

$[C]$: 構造全体の減衰マトリクス

$[K]$: 構造全体の剛性マトリクス

$\{u\}$: 変位ベクトル

$\{\dot{u}\}$: 速度ベクトル

$\{\ddot{u}\}$: 加速度ベクトル

$\{F\}$: 加振ベクトル

式(3.1)について差分法を用いると時刻 $(n+1)\Delta t$ における速度 $\{\dot{u}_{n+1}\}$ 、変位 $\{u_{n+1}\}$ は、式(3.2)及び式(3.3)のように表される。

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + \frac{\Delta t}{2}(\{\ddot{u}_n\} + \{\ddot{u}_{n+1}\}) \quad (3.2)$$

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + \Delta t\{\dot{u}_n\} + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)\Delta t^2\{\ddot{u}_n\} + \beta\Delta t^2\{\ddot{u}_{n+1}\} \quad (3.3)$$

これは、Newmark- β 法と呼ばれる方法で、 β は、Newmark- β 法のパラメータで、その範囲は $0 \leq \beta \leq 1/2$ である。

式(3.2)に $[C]$ 、式(3.3)に $[K]$ を掛けると次のようになる。

$$[C]\{\dot{u}_{n+1}\} = [C]\{\dot{u}_n\} + \frac{\Delta t}{2}[C](\{\ddot{u}_n\} + \{\ddot{u}_{n+1}\}) \quad (3.4)$$

$$[K]\{u_{n+1}\} = [K]\{u_n\} + \Delta t[K]\{\dot{u}_n\} + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)\Delta t^2[K]\{\ddot{u}_n\} + \beta\Delta t^2[K]\{\ddot{u}_{n+1}\} \quad (3.5)$$

一方、式(3.1)に式(3.4)及び式(3.5)を代入すると次の式が導かれる。

$$\begin{aligned} & [M]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [C]\left[\{\dot{u}_n\} + \frac{\Delta t}{2}(\{\ddot{u}_n\} + \{\ddot{u}_{n+1}\})\right] \\ & + [K]\left[\{u_n\} + \Delta t\{\dot{u}_n\} + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)\Delta t^2\{\ddot{u}_n\} + \beta\Delta t^2\{\ddot{u}_{n+1}\}\right] = \{F_{n+1}\} \end{aligned} \quad (3.6)$$

これを整理すると次のようになる。

$$\{\ddot{u}_{n+1}\} = \left[[M] + \frac{\Delta t}{2}[C] + \beta \Delta t^2 [K] \right]^{-1} \times \left[\{F_{n+1}\} - [K]\{u_n\} - ([C] + \Delta t[K])\{\dot{u}_n\} - \left\{ \frac{\Delta t}{2}[C] + \Delta t^2 \left(\frac{1}{2} - \beta \right) [K] \right\} \{\ddot{u}_n\} \right] \quad (3.7)$$

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + \frac{\Delta t}{2}(\{\ddot{u}_n\} + \{\ddot{u}_{n+1}\}) \quad (3.8)$$

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + \Delta t \{\dot{u}_n\} + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \Delta t^2 \{\ddot{u}_n\} + \beta \Delta t^2 \{\ddot{u}_{n+1}\} \quad (3.9)$$

これを順次求めていくのは Newmark- β 法による直接積分法である。線形問題においては、 $\beta = 1/4$ (平均加速度法) が一般的に使われ解も絶対安定となる。

3.3.2 固有値解析

多自由度系モデルの非減衰自由振動の運動方程式は式(3.10)のようになる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (3.10)$$

自由振動は調和振動であるから、変位 $\{u\}$ を次のように仮定する。

$$\{u\} = \{x\} e^{i\omega t} \quad (3.11)$$

ここで、

$\{x\}$: 振動モード

ω : 円振動数

式(3.11)を式(3.10)に代入する。

$$(-\omega^2[M] + [K])\{x\} e^{i\omega t} = 0 \quad (3.12)$$

$e^{i\omega t} \neq 0$ であるから式(3.12)は次のようになる。

$$(-\omega^2[M] + [K])\{x\} = 0 \quad (3.13)$$

$x=0$ でない解が存在するためには、次の関係が成立しなければならない。

$$|-\omega^2[M] + [K]| = 0 \quad (3.14)$$

これを特性方程式と呼ぶ。この行列式を展開すれば ω^2 に関する n 次の代数方程式になり、その根 ω を固有値、 $\{x\}$ を固有ベクトルとする固有値問題になる。

3.3.3 減衰項の策定

粘性減衰は、系をとりまく粘性による減衰で速度に比例する。すなわち、運動方程式の $[C]$ に相当するマトリクスを質量マトリクス $[M]$ 及び剛性マトリクス $[K]$ に比例するものと定義し、式(3.15)～式(3.19)のように表す。この減衰タイプはレーリー型減衰と呼ばれており、一般的に有限要素法の解析で用いられる。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3.15)$$

$$\{x_i\}^T [C] \{x_i\} = \alpha \{x_i\}^T [M] \{x_i\} + \beta \{x_i\}^T [K] \{x_i\} = \alpha + \beta \omega^2 \quad (3.16)$$

$$h_i = \frac{\alpha + \beta \omega_i^2}{2\omega_i} \quad (3.17)$$

$$\alpha = \frac{2\omega_j \omega_k (h_j \omega_k - h_k \omega_j)}{\omega_k^2 - \omega_j^2} \quad (3.18)$$

$$\beta = \frac{2(h_k \omega_k - h_j \omega_j)}{\omega_k^2 - \omega_j^2} \quad (3.19)$$

ここで、

- α : 粘性減衰の質量項に関する係数
- β : 粘性減衰の剛性項に関する係数
- x_i : i 次の固有モードベクトル
- h_i, h_j, h_k : i 次, j 次, k 次のモード減衰定数
- $\omega_i, \omega_j, \omega_k$: i 次, j 次, k 次の固有円振動数

$$\Phi_y = \frac{12EI_z}{GA_y l^2}, \quad \Phi_z = \frac{12EI_y}{GA_z l^2} \quad (3.21)$$

ここで、

- E : はりのヤング係数
- G : はりのせん断弾性係数
- l : はりの長さ
- A : はりの断面積
- I_z, I_y : はりの断面二次モーメント
- A_y, A_z : はりのせん断断面積
- J : はりの捩り剛性

(2) ソリッド要素の要素剛性マトリクス

六面体を考えた場合、要素図心位置を原点とした局所座標系(ξ, η, ζ)と全体直行座標系(x, y, z)との関係は図3-2を仮定する。これより、ひずみ-変位関係及び応力-変位関係は式(3.22)~式(3.26)のように表される。

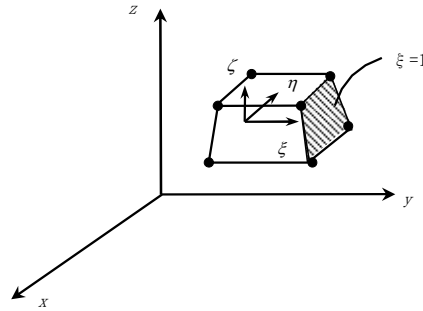


図3-2 8節点六面体要素

・ ひずみ-変位関係

$$\{\varepsilon_e\} = [B]\{\delta_e\} \quad (3.22)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [J]^{-1} & [0] & [0] \\ [0] & [J]^{-1} & [0] \\ [0] & [0] & [J]^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{N'_i\} & \{0\} & \{0\} \\ \{0\} & \{N'_i\} & \{0\} \\ \{0\} & \{0\} & \{N'_i\} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \end{Bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} \{N_i'\} &= \left[\frac{\partial N_i}{\partial \xi} \quad \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \quad \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \right]^T \\ &= \frac{1}{8} \left[\xi_i(1+\eta\eta_i)(1+\zeta\zeta_i) \quad \eta_i(1+\xi\xi_i)(1+\zeta\zeta_i) \quad \zeta_i(1+\xi\xi_i)(1+\eta\eta_i) \right]^T \end{aligned} \quad (3.25)$$

ここで,

- ε_e : ひずみベクトル
- B : 節点変位-ひずみマトリクス
- δ_e : 変位ベクトル
- N_i' : 形状関数
- J : *Jacobi* マトリクス

・ 応力-変位関係

$$\{\sigma\} = [D][B]\{\delta_e\} \quad (3.26)$$

ここで,

- σ : 応力
- D : 弾性係数マトリクス

3.3.5 杭の曲げモーメントー曲率関係

杭については、杭軸力の依存性を考慮した曲げモーメントー曲率関係（以下「M-φ 関係」という。）に基づく非線形構造モデルが適用可能である。杭の M-φ 関係と杭軸力の変動に伴う応答値の乗り移りの概念を図 3-3 に示す。同図に示す通り、杭の M-φ 関係は杭軸力の変動に伴い変化する。このため、時刻 t における杭軸力が N_t であっても、時刻 $t+\Delta t$ で杭軸力が $N_{(t+\Delta t)}$ に変動した場合、応答値は杭軸力 N_t の M-φ 関係から杭軸力 $N_{(t+\Delta t)}$ の M-φ 関係へ乗り移る。時刻 $t+\Delta t$ における乗り移り後の曲率 $\phi_{(t+\Delta t)\text{mod}}$ は、式 (3.27) に示すとおり、時刻 $t+\Delta t$ における乗り移り前の曲率に関する塑性率 $\phi_{(t+\Delta t)}/\phi_{yt}$ が時刻 $t+\Delta t$ における杭軸力 $N_{(t+\Delta t)}$ に変動した後でも同様とみなして乗り移るものとする。

$$\phi_{(t+\Delta t)\text{mod}} = (\phi_{(t+\Delta t)}/\phi_{yt})\phi_{y(t+\Delta t)} \quad (3.27)$$

ここで、

- $\phi_{(t+\Delta t)\text{mod}}$: 時刻 $t+\Delta t$ における曲率（乗り移り後）
- $\phi_{(t+\Delta t)}$: 時刻 $t+\Delta t$ における曲率（乗り移り前）
- ϕ_{yt} : 時刻 t での M-φ 関係における降伏曲率
- $\phi_{y(t+\Delta t)}$: 時刻 $t+\Delta t$ での M-φ 関係における降伏曲率

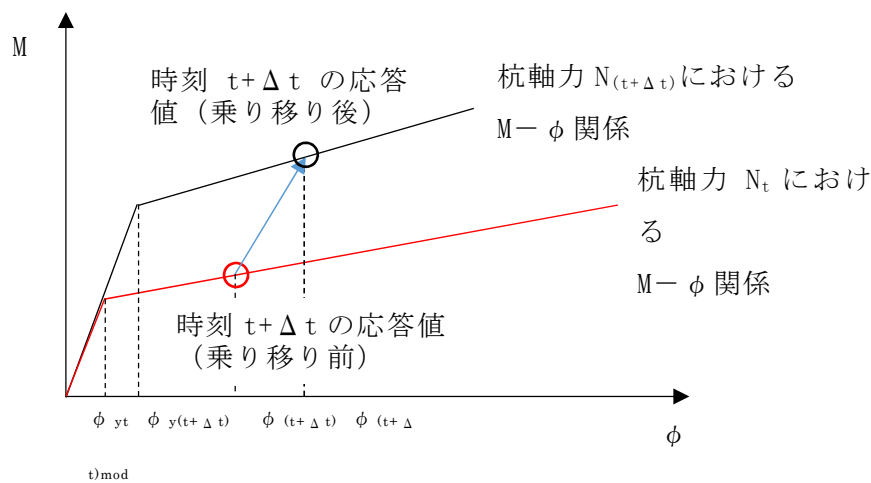


図 3-3 杭の M-φ 関係と杭軸力の変動に伴う応答値の乗り移りの概念

3.4 解析フローチャート

地震応答解析の解析フローチャートを図 3-4 に示す。

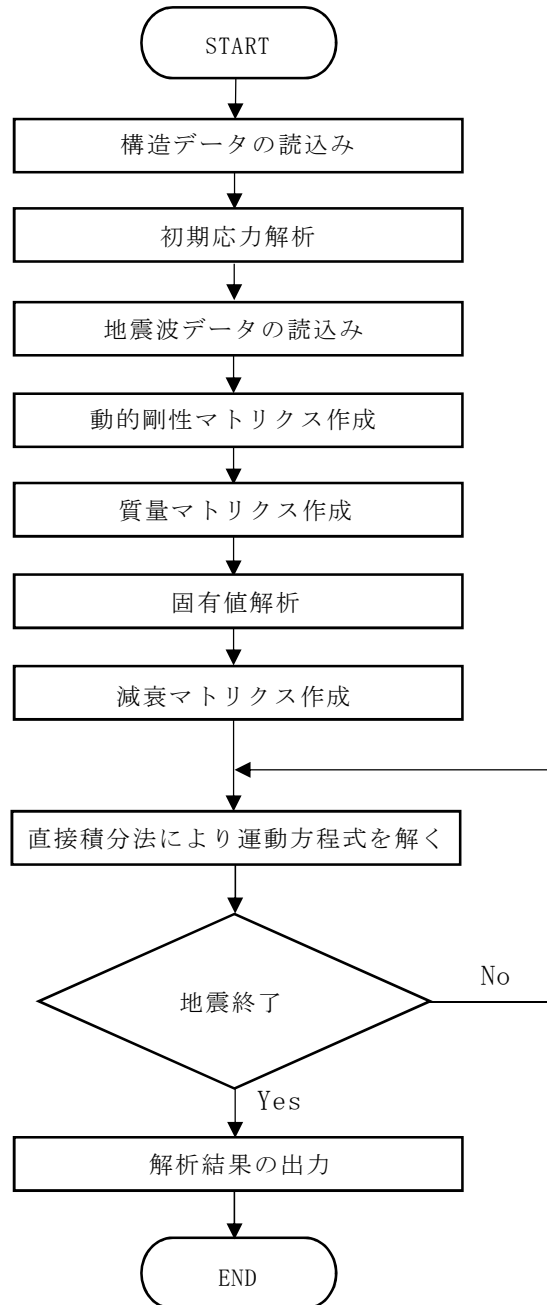


図 3-4 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

本解析コードは、国内の土木・建築分野における使用実績を有しており、解析機能全般について、十分に妥当性が確認されている。

そこで、今回使用する解析機能に特化する形で、実績ある他解析コードとの解析結果の比較を行うことにより、本解析コードの当該解析機能の適切さを改めて確認した。その結果を以下に示す。

3.5.1 概要

Soil Plusによる地震応答解析について、他解析コードとの解析結果の比較を行うことで検証する。

3.5.2 地震応答解析の検証 (他解析コードとの解析結果との比較検証)

(1) 検証の概要

Soil Plusによる地震応答解析の検証については、同一条件下における他解析コードとの解析結果の比較により行う。比較する他解析コードは、既往の工事計画認可で実績のあるTDAPⅢとする。

表3-1に、比較する他解析コードを示す。

表3-1 比較する他解析コード

	内容
コード名	TDAPⅢ
開発機関	大成建設(株)／(株)アーク情報システム
開発時期	1980年代後半
使用したバージョン	Ver. 3.08

(2) 解析条件

a. 解析モデル

解析モデルは図 3-5 に示すとおり，建屋-杭-地盤の 3 次元連成モデルとする。解析モデルのうち，地盤についてはソリッド要素，建屋及び杭は線形のはり要素，基礎スラブは剛なシェル要素でモデル化する。なお，地盤は，下層の岩盤部と上層の表層部の二つを考慮する。境界条件は，側方を周期境界，底面を粘性境界とする。

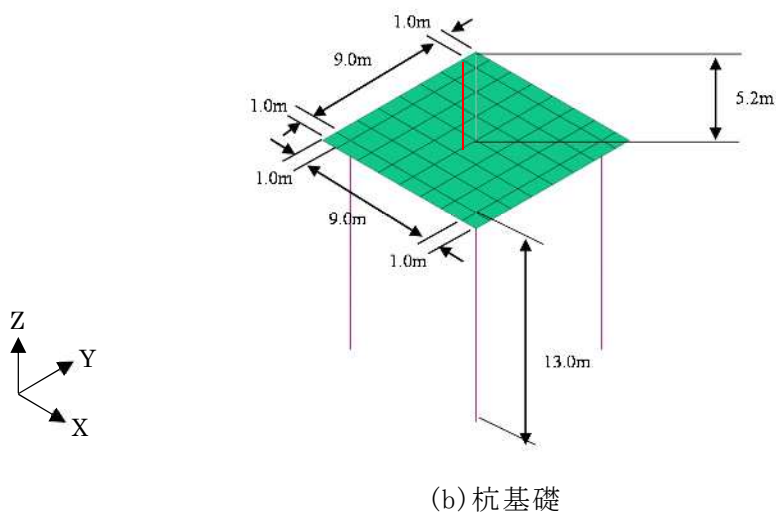
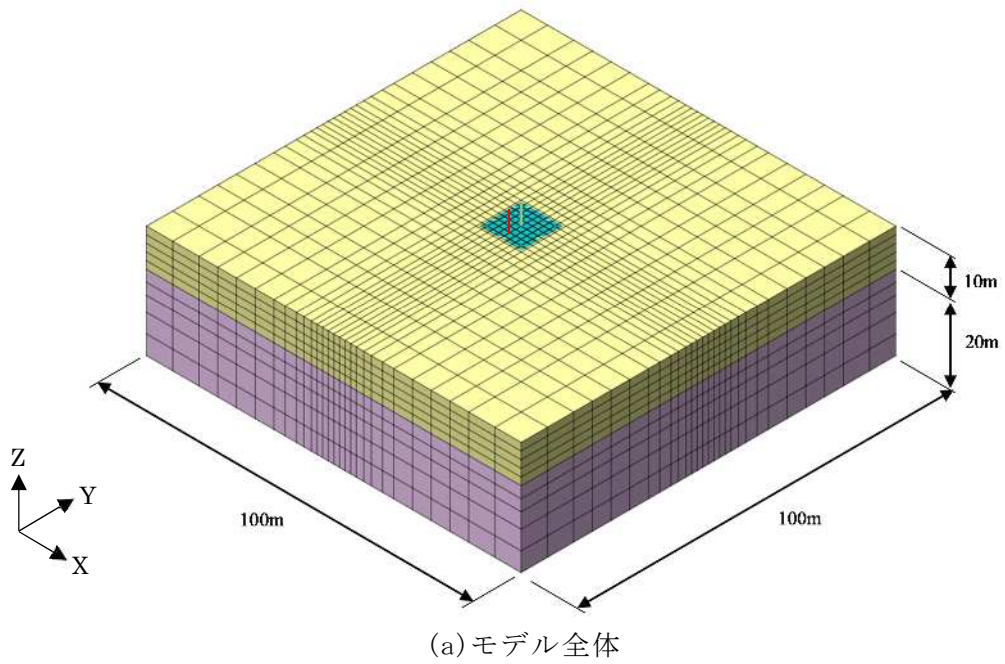


図 3-5 解析モデル

b. 解析用物性値

地盤の解析用物性値を表 3-2 に、建屋の解析用物性を表 3-3 に示す。また、鋼管杭の解析用物性を表 3-4 に示す。

なお、建屋及び鋼管杭は線形材料として取り扱う。

表 3-2 地盤の解析用物性値

地層	層厚 (m)	密度 ρ (t/m ³)	初期 せん断剛性 G_0 (kN/m ²)	ポアソン比 ν	備考
表層	10	1.8	7.2×10^4	0.45	$V_s=200\text{m/s}$ 相当
岩盤	20	2.0	5.0×10^5	0.40	$V_s=500\text{m/s}$ 相当

表 3-3 建屋の解析用物性値

質点 番号	質点重量 W (kN)	回転慣性重 量 I_G (kN·m ²)	軸断面積 A (m ²)	せん断 断面積 A_s (m ²)	断面二次 モーメント I (m ⁴)
1	2640	26600	17.0	8.80	318
2	3700	38300			

注記：建屋のヤング係数 $E=2.27 \times 10^4$ (N/mm²)，ポアソン比 $\nu=0.2$ とする。

表 3-4 鋼管杭の解析用物性値

杭種・杭径	軸断面積 A (mm ²)	断面二次 モーメント I (mm ⁴)	せん断 断面積 A_s (mm ²)
鋼管杭 $\phi 800$ (t=19mm)	4.66×10^4	3.56×10^9	2.33×10^4

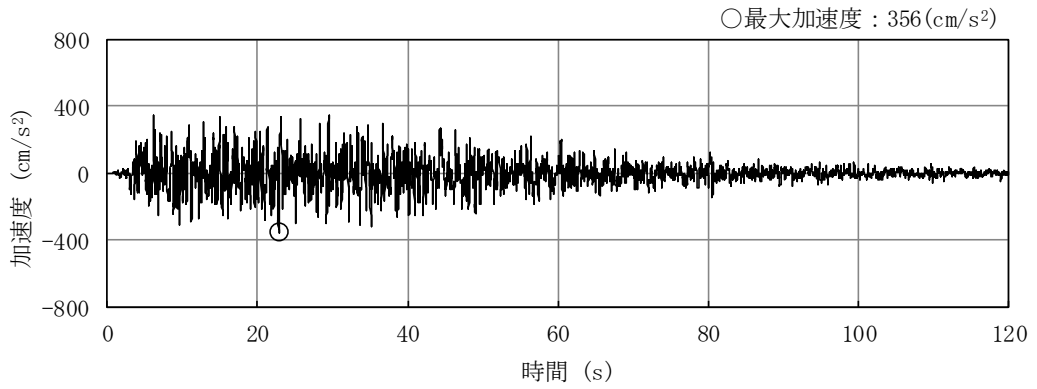
注記：鋼管杭のヤング係数 $E=2.05 \times 10^5$ (N/mm²)，ポアソン比 $\nu=0.3$ とする。

c. 減衰定数

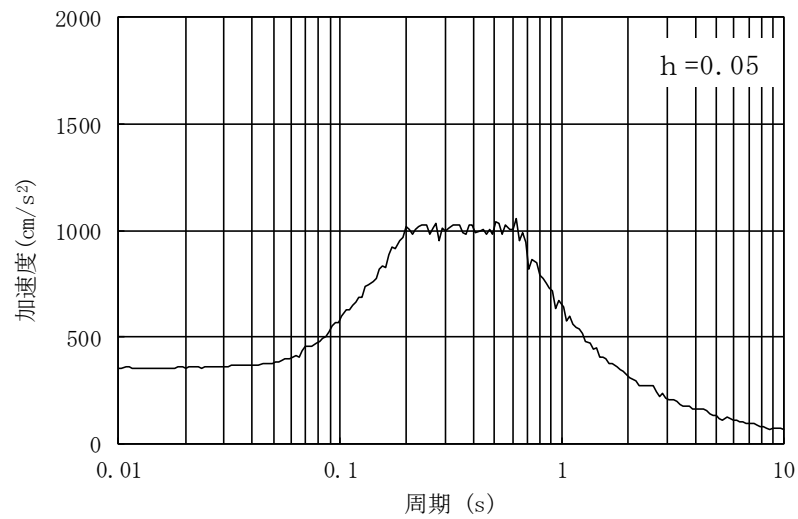
動的解析における地盤及び建屋の減衰定数は、固有値解析から求まる 1 次固有振動数 3.60Hz に対して 3.0%とする剛性比例型減衰を適用する。

d. 入力地震動

GL-30m の岩盤上で定義した入力地震動を図 3-6 に示す。



(a) 加速度波形



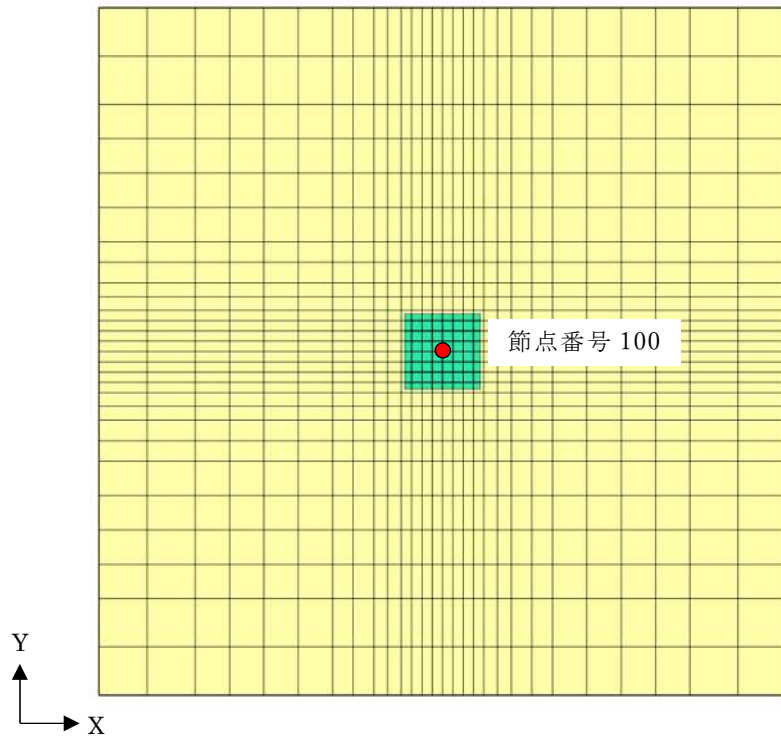
(b) 加速度応答スペクトル

図 3-6 入力地震動

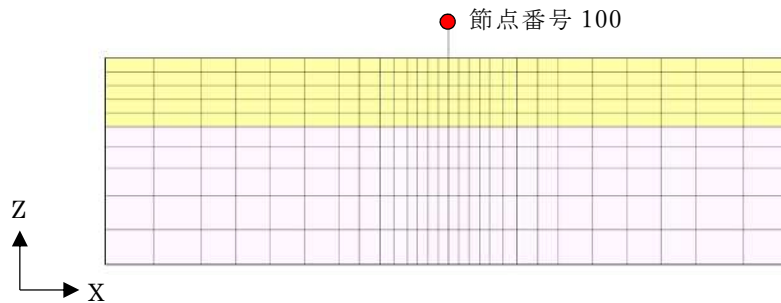
(3) 検証結果

a. 応答加速度の比較

解析モデルにおける応答加速度の抽出箇所を図 3-7 に示す。抽出箇所は建屋頂部（節点番号 100）とし、その応答加速度波形を図 3-8 に、加速度応答スペクトルを図 3-9 に示す。同図には本解析コード Soil Plus と T D A P III の両者を重ね書きしており、両者は同一の解析結果を与えている。

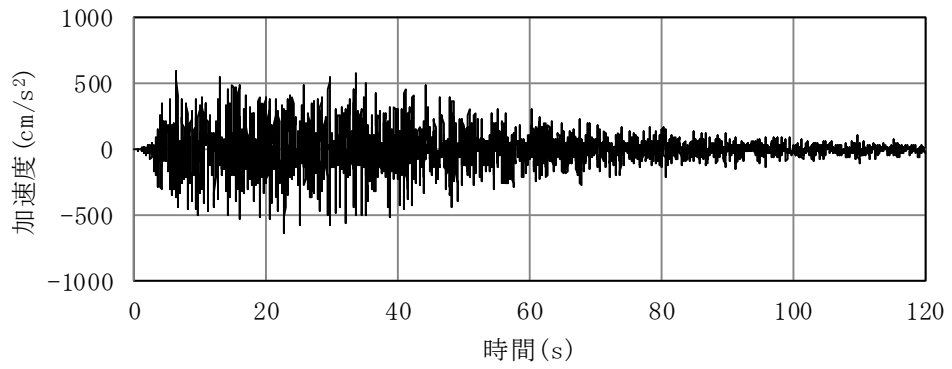


(a) モデル平面

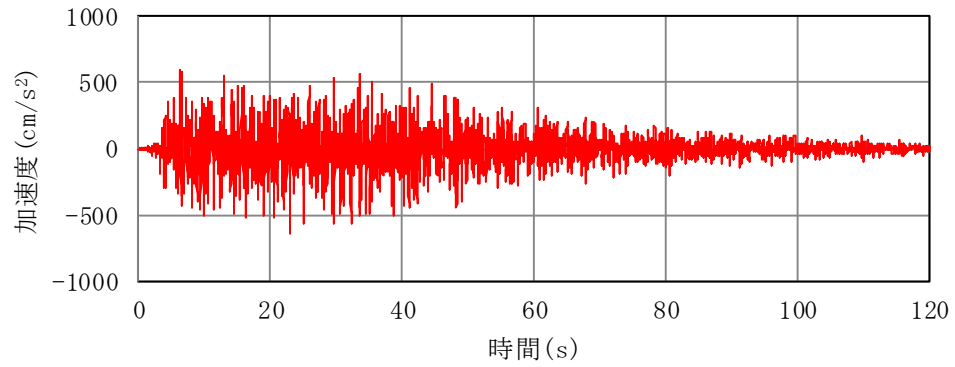


(b) モデル側面

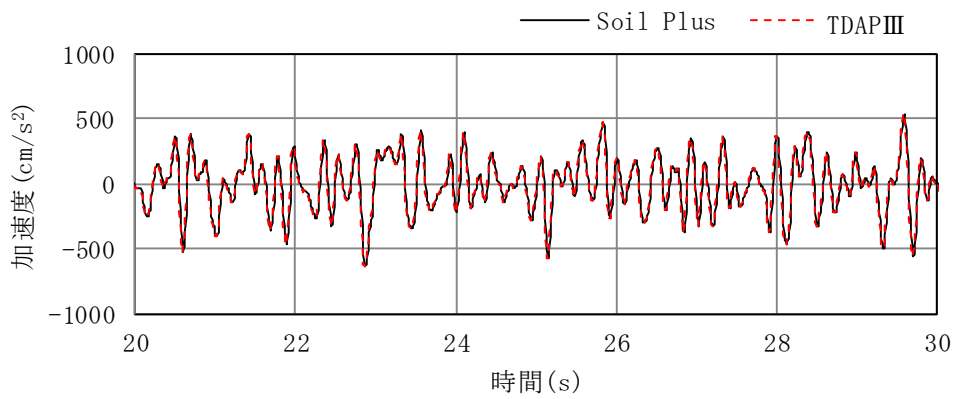
図 3-7 応答加速度の抽出箇所



(a) S o i l P l u s



(b) T D A P I I I



(c) S o i l P l u s と T D A P I I I の重ね書き (20s~30s の区間を拡大)

図 3-8 建屋頂部の応答加速度波形(節点番号 100)

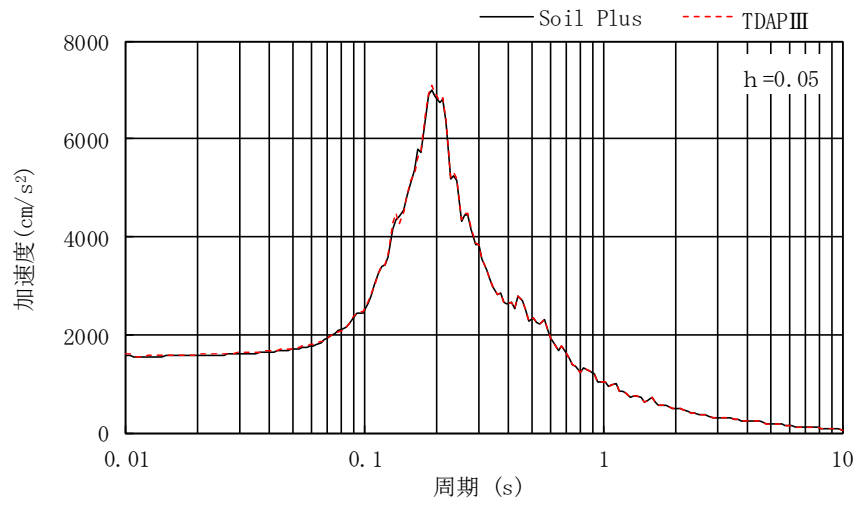


図 3-9 建屋頂部の加速度応答スペクトル (節点番号 100)

b. 建屋の最大応答分布の比較

建屋の最大応答分布を図 3-10 に、最大応答値の比較を表 3-5 に示す。同図には本解析コード Soil Plus と TDAP III の両者を重ね書きしており、両者は概ね一致した解析結果を与えている。

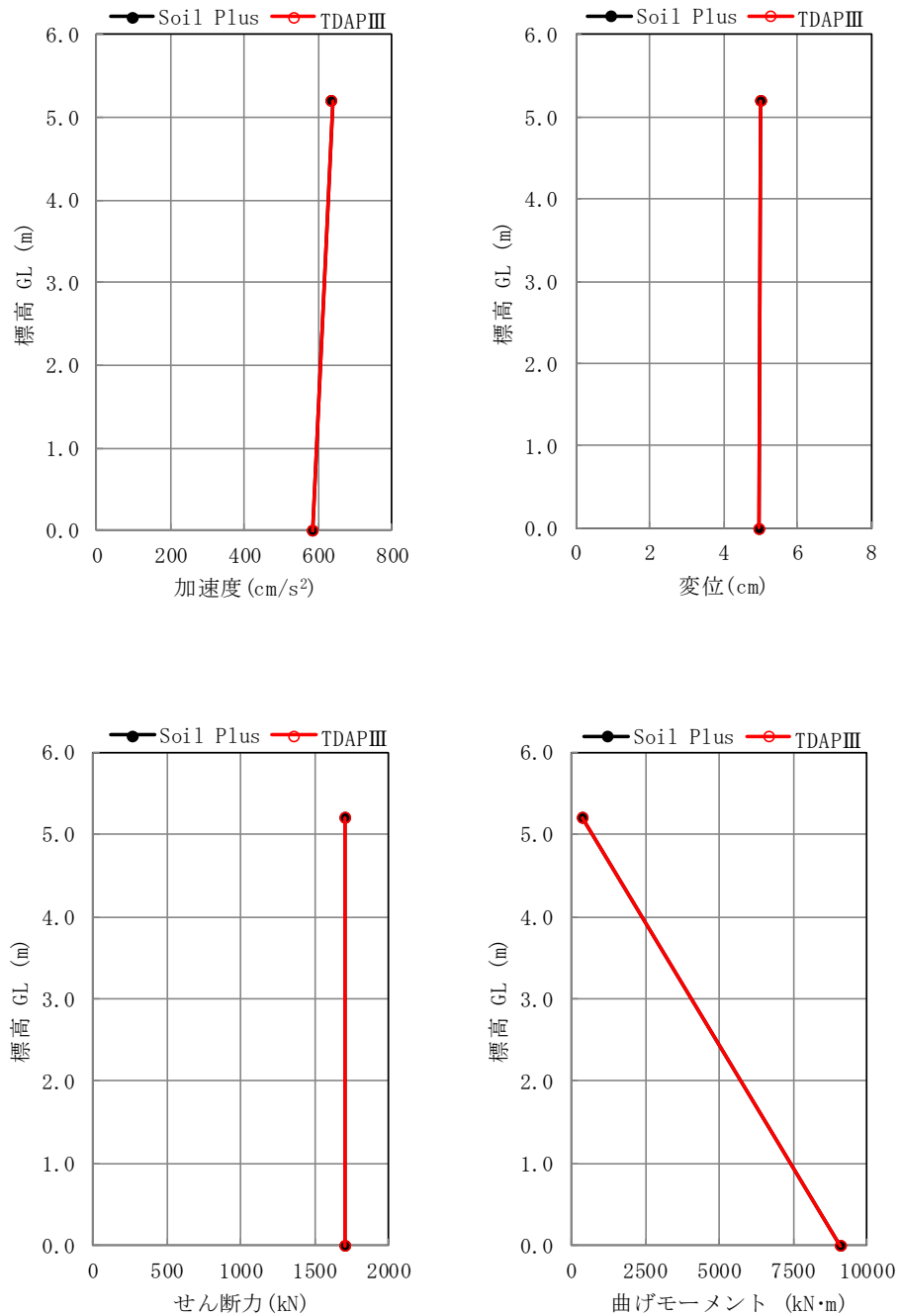


図 3-10 建屋の最大応答分布

表3-5 建屋の最大応答値の比較

(a) 加速度及び相対変位

標高 (m)	加速度 (cm/s ²)			相対変位 (cm)		
	Soil Plus	TDAPⅢ	$\frac{\text{Soil Plus}}{\text{TDAPⅢ}}$	Soil Plus	TDAPⅢ	$\frac{\text{Soil Plus}}{\text{TDAPⅢ}}$
5.2	638.1	638.2	1.000	5.00	5.00	1.000
0.0	584.9	585.0	1.000	4.97	4.97	1.000

(b) せん断力及び曲げモーメント

標高 (m)	せん断力 (kN)			曲げモーメント (kN・m)		
	Soil Plus	TDAPⅢ	$\frac{\text{Soil Plus}}{\text{TDAPⅢ}}$	Soil Plus	TDAPⅢ	$\frac{\text{Soil Plus}}{\text{TDAPⅢ}}$
5.2				391.1	391.6	0.999
0.0	1708	1708	1.000	9116	9118	1.000

c. 鋼管杭の最大断面力分布の比較

鋼管杭の最大断面力分布を図 3-11 に、最大断面力の比較を表 3-6 に示す。同図には本解析コード Soil Plus と TDAPⅢ の両者を重ね書きしており、両者は概ね一致した解析結果を与えている。

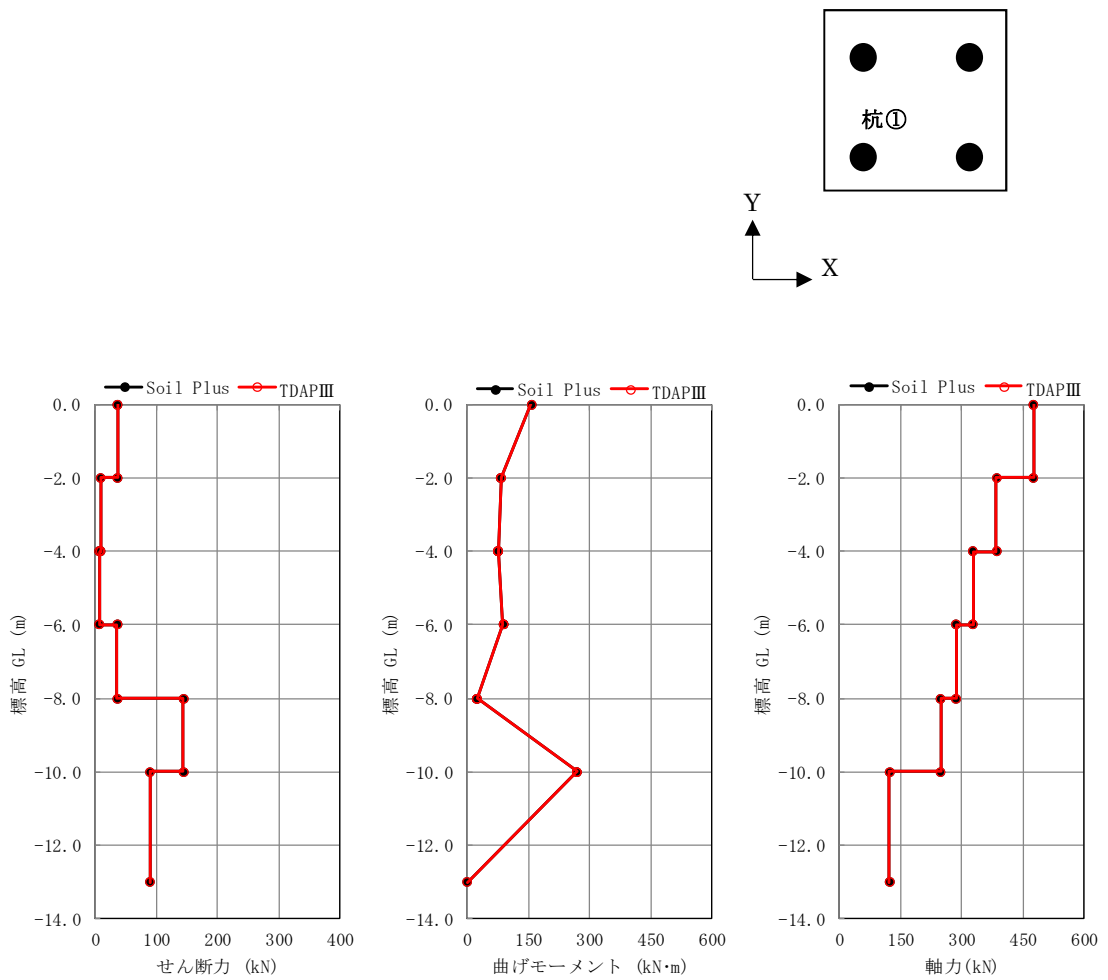


図 3-11 鋼管杭の最大断面力分布

表3-6 鋼管杭の最大応答せん断力及び曲げモーメントの比較

標高 (m)	せん断力 (kN)			曲げモーメント (kN・m)			軸力 (kN)		
	Soil Plus	TDAPⅢ	$\frac{\text{Soil Plus}}{\text{TDAPⅢ}}$	Soil Plus	TDAPⅢ	$\frac{\text{Soil Plus}}{\text{TDAPⅢ}}$	Soil Plus	TDAPⅢ	$\frac{\text{Soil Plus}}{\text{TDAPⅢ}}$
0.0				155.9	155.9	1.000			
	37.04	37.05	1.000				474.8	474.9	1.000
-2.0	8.522	8.523	1.000	82.09	82.11	1.000	384.1	384.2	1.000
	6.95	6.95	1.000	75.20	75.21	1.000	327.0	327.2	1.000
-4.0	6.95	6.95	1.000	75.20	75.21	1.000	327.0	327.2	1.000
	35.06	35.06	1.000	87.84	87.85	1.000	285.5	285.7	1.000
-6.0	35.06	35.06	1.000	87.84	87.85	1.000	285.5	285.7	1.000
	143.1	143.1	1.000	24.56	24.57	1.000	248.3	248.4	0.999
-8.0	143.1	143.1	1.000	24.56	24.57	1.000	248.3	248.4	0.999
	89.49	89.50	1.000	268.5	268.5	1.000	121.9	122.0	0.999
-10.0	89.49	89.50	1.000	268.5	268.5	1.000	121.9	122.0	0.999
				0	0	—			
-13.0				0	0	—			

3.5.3 まとめ

本解析コードに関する知見を以下にまとめて示す。

- ・本解析コードの3次元モデルによる地震応答解析結果が、実績のある他解析コードと概ね一致していることを確認した。
- ・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する有限要素法による地震応答解析に本解析コードが適用できることを確認した。
- ・国内の土木・建築分野における使用実績を有しており、解析機能について十分にその妥当性が確認されている。

これより、本解析コードを格納容器圧力逃がし装置基礎の地震応答解析に使用することは妥当である。

別紙 21 F L I P

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-17	軽油タンク基礎の地震応答計算書	Ver. 7. 4. 1
V-2-2-19	燃料移送系配管ダクトの地震応答計算書	Ver. 7. 4. 1
V-2-2-21	常設代替交流電源設備基礎の地震応答計算書	Ver. 7. 4. 1
V-2-2-23	軽油タンク基礎（6号機設備）の地震応答計算書	Ver. 7. 4. 1
V-2-10-3-1-2-1	海水貯留堰の耐震性についての計算書	Ver. 7. 4. 1
V-2-10-3-1-2-2	取水護岸の耐震性についての計算書	Ver. 7. 4. 1
V-2-10-3-1-3-1	海水貯留堰（6号機設備）の耐震性についての計算書	Ver. 7. 4. 1
V-2-10-3-1-3-2	取水護岸（6号機設備）の耐震性についての計算書	Ver. 7. 4. 1
V-2-10-3-1-4	スクリーン室の耐震性についての計算書	Ver. 7. 4. 1
V-2-10-3-1-5	スクリーン室（6号機設備）の耐震性についての計算書	Ver. 7. 4. 1
V-2-10-3-1-6	取水路の耐震性についての計算書	Ver. 7. 4. 1
V-2-10-3-1-7	取水路（6号機設備）の耐震性についての計算書	Ver. 7. 4. 1
V-2-10-3-1-8	補機冷却用海水取水路の耐震性についての計算書	Ver. 7. 4. 1
V-2-別添 3-2	可搬型重大事故等対処設備の保管場所における入力地震動	Ver. 7. 4. 1

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	F L I P
使用目的	2次元有限要素法による地震応答解析（有効応力法）
開発機関	FLIP コンソーシアム
開発時期	1988年
使用したバージョン	Ver. 7. 4. 1
コードの概要	<p>本解析コードは、1988年に運輸省港湾技術研究所（現：港湾空港技術研究所）において開発された平面ひずみ状態を対象とする有効応力解析法に基づく、2次元地震応答解析プログラムである。主な特徴は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・有限要素法に基づくプログラムである。 ・平面ひずみ状態を解析対象とする。 ・地盤の有効応力の変化を考慮した地震応答解析を行い、部材の断面力や変形量を計算する。 ・土の応力-ひずみモデルとして多重せん断モデルを採用している。 ・有効応力の変化は有効応力法により考慮する。そのために必要な過剰間隙水圧算定モデルとして井合モデルを用いている。
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・マニュアルに記載された例題の提示解と本解析コードによる解析解との比較を実施し、解析解が提示解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは港湾施設の設計に用いられる「港湾施設の技術上の基準・同解説（2007）（日本港湾協会）」において、港湾施設に対して適用性が確認されている解析コードとして扱われており、今回の解析に使用することは妥当である。

	<ul style="list-style-type: none"> ・日本原子力発電株式会社東海第二発電所において、建物・構築物、屋外重要土木構造物等の地震応答解析に本解析コード（Ver. 7.3.0_2）が使用された実績があり、今回の工事計画認可申請で対象とする施設に適用性があることが既に検証されている。 ・バージョン更新により新しい構成則の追加、出力機能の追加が図られたが、今回の工事計画認可申請において使用するバージョン（Ver. 7.4.1）と他プラントの既工事計画で使用されたバージョン（Ver. 7.3.0_2）で使用する機能は同じである。 ・今回の工事計画認可申請における 2次元有限要素法による地震応答解析（有効応力法）の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

別紙 22 S L O K

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-17	軽油タンク基礎の地震応答計算書	Ver. 2.0
V-2-2-19	燃料移送系配管ダクトの地震応答計算書	Ver. 2.0
V-2-2-21	常設代替交流電源設備基礎の地震応答計算書	Ver. 2.0
V-2-2-23	軽油タンク基礎（6号機設備）の地震応答計算書	Ver. 2.0
V-2-10-3-1-2-1	海水貯留堰の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
V-2-10-3-1-2-2	取水護岸の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
V-2-10-3-1-3-1	海水貯留堰（6号機設備）の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
V-2-10-3-1-3-2	取水護岸（6号機設備）の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
V-2-10-3-1-4	スクリーン室の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
V-2-10-3-1-5	スクリーン室（6号機設備）の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
V-2-10-3-1-6	取水路の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
V-2-10-3-1-7	取水路（6号機設備）の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
V-2-10-3-1-8	補機冷却用海水取水路の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
V-2-別添 3-2	可搬型重大事故等対処設備の保管場所における入力地震動	Ver. 2.0

K7 ① V-2 別紙 R0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	S L O K
使用目的	1次元地震応答解析（入力地震動算定）
開発機関	東電設計株式会社
開発時期	1985年
使用したバージョン	Ver. 2.0
コードの概要	<p>本解析コードは、東電設計株式会社によって開発された1次元重複反射理論に基づく地盤の地震応答解析を行う解析コードであり、地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形化法により考慮している。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードによる一層のモデル地盤に対する地震応答解析結果と、1次元重複反射理論に基づく理論解が一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・柏崎刈羽原子力発電所7号機の既工事計画において本解析コード（Ver.0）が使用された実績がある。 ・バージョン更新により機能の追加が図られたが、今回の工事計画認可申請において使用するバージョン（Ver.2.0）と既工事計画で使用されたバージョン（Ver.0）で使用している機能は同じである。 ・今回の工事計画認可申請における1次元地震応答解析（入力地震動算定）の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

別紙 23 Engineer's Studio

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-18	軽油タンク基礎の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.1
V-2-2-22	常設代替交流電源設備基礎の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.1
V-2-2-24	軽油タンク基礎（6号機設備）の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.1
V-2-10-3-1-8	補機冷却用海水取水路の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.1

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	Engineer's Studio
使用目的	3次元有限要素法による静的解析
開発機関	株式会社フォーラムエイト
開発時期	2009年
使用したバージョン	Ver. 8.0.1
コードの概要	<p>本解析コードは、株式会社フォーラムエイトによって開発された3次元有限要素法解析を行う解析コードである。主な特徴は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・土木・建築構造物の部材を、1本の棒に見立てたはり要素や平面的に連続した平板要素でモデル化して構造物の応答解析を行い、断面力及びひずみの算出を行う。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードによる非線形平板要素を用いた解析結果と実験結果が概ね一致することを確認している。 ・本解析コードによる杭頭ばね要素を用いた解析結果と理論解が概ね一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・日本原子力発電株式会社東海第二発電所において、屋外重要土木構造物等に本解析コード (Ver. 6.00.04) が使用された実績があり、線形のはり要素及び平板要素を用いた解析に適用性があることが既に検証されている。 ・バージョン更新により機能の追加が図られたが、今回の工事計画認可申請において使用するバージョン (Ver. 8.0.1) と他プラントの既工事計画で使用されたバージョン (Ver. 6.00.04) で使用している機能は同じである。 ・今回の工事計画認可申請において使用する非線形平板要素及び杭頭ばね要素を用いた解析の適用性を検証している。

	<ul style="list-style-type: none">・今回の工事計画認可申請における 3次元有限要素法による静的解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

3. 解析手法

3.1 一般事項

Engineer's Studioは土木・建築構造物の部位を一本の棒に見立てたはり要素や平面的に連続した平板要素でモデル化して、構造物の非線形挙動を解析できる3次元有限要素法（FEM）解析プログラムである。Engineer's Studioは、軽油タンク基礎、常設代替交流電源設備基礎、補機冷却用海水取水路及び軽油タンク基礎（6号機設備）の3次元有限要素法による静的解析に使用している。

3.2 解析コードの特徴

Engineer's Studioの特徴を以下に示す。

- ・構造物の鉄筋コンクリート部材を平面的に連続した非線形平板要素でモデル化して、応答計算により、断面力及びひずみの算出が可能である。
- ・地盤や杭頭部からの反力は、ばね要素でモデル化することにより考慮することが可能である。

3.3 解析手法

3.3.1 非線形平板要素

Engineer's Studioで用いられているMindlin平板要素は有限要素法（FEM）について記載されている一般的な参考書を参照している。以降は主要な点だけを述べるが、理論の詳細は下記文献に基づいている。

参考文献（1）

Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. The Finite Element Method. Fifth Edition. 2000. Vol. 1 The Basis. ISBN 0 7506 5049 4.

参考文献（2）

The Finite Element Method. Fifth Edition. 2000. Vol. 2 Solid Mechanics. ISBN 0 7506 5055 9.

面内については、一般的な2次元平面応力モデルが適用される。（詳細は、参考文献（1）の4章「Plane stress and Plane strain」を参照）

面外方向については、曲げ及びせん断成分両方を考慮する。面外の曲げは、平板要素の厚みから得られる面内層のひずみを積分したもので、面外せん断モデルは線形弾性であり、その値は要素の厚さを通して全ての層で積分することで得られる。

なお、非線形平板要素には、下記文献に基づく材料の非線形特性が考慮される。

参考文献（3）

Koichi MAEKAWA, Amorn PIMANMAS and Hajime OKAMURA, Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete. 2003. ISBN 0 4152 7126 6.

3.3.2 ばね要素

ばね要素は要素の長さがゼロあるいは無視できる要素に対して適用する。ばね要素両端に接続された 2 節点の変位から計算される要素両端の相対変位を要素変形と定義する。

図 3-1 には要素変形を明確にするため、並進変形と回転変形を分離して示している。

並進変形及び回転変形の成分を求めるために必要となる変位後の要素座標系は、次のように決定する。節点変位と共に回転する要素端 i に設定された要素端座標系が、変位後の他端 j 要素端座標系に一致する回転を求める。この回転の半回転を i 端座標系に与えた回転後の座標系を要素座標系と定義する。並進変形の各成分は 2 節点を結ぶベクトルの要素座標軸成分であり、回転変形は i 端座標系が j 端座標系に一致する回転ベクトルを要素座標軸成分として求めたものになる。

したがって、これら要素変形と仕事の対を成す要素端力は、図 3-2 に示すように、要素座標軸に平行であり要素両端で逆向きとなる 3 つの対をなす並進力と、要素座標軸周りに両端逆向きの 3 対の端モーメントである。要素端に作用するそれぞれ 6 個の力のうち、これら 3 並進力と 3 端モーメントの 6 つの力が独立である。要素端に作用する 12 の力のうち、これら独立な端力を除く 6 つの力は 3 対の並進力に釣り合うべき端モーメントであることは明白であるが、これらの従属する力が要素両端にどのように作用するかは明確ではない。しかし、定義された要素座標系から厳密な適合条件により導かれる要素変形を節点変位により展開することによって、線形の適合条件が導かれるとともに、平衡条件式も同様に得ることができる。結果として、3 並進力に釣り合うべき 3 つのモーメントを両端に均等に配分することにより生じる 6 つのモーメント（回転変形と対を成すモーメントとは異なるモーメント）が、従属な要素端力となる。

この要素座標系の大きな特徴は、ばね要素が接続される 2 節点の均等性が保証されることと、ばね要素長がゼロであっても幾何剛性が算出できる点にある。線要素に単純ばり要素座標系を採用した場合、軸力をその要素長で割る幾何剛性が存在し、これ故に要素長ゼロが発生する要素に対しては単純ばり要素座標系が適用できない。一方、片持ちばり要素座標系では幾何剛性にゼロ割は生じないものの、固定端側に接続される節点と自由端側に接続される節点では、要素内の幾何学的非線形を完全に取り入れられない限り節点間の不均等性が現れ、片持ちばり要素座標系の与え方次第で解は異なることになる。ここで定義した要素座標系はこれらの問題点を解消できるものである。しかしながら、ゴム支承などのせん断変形が卓越し、要素長が確実に保証できる部材にこの要素座標系を適用した場合、せん断変形により見かけ上軸方向の圧縮変形が生じ、本来存在しない圧縮力を生み出すこととなり、実現象に対する精度の悪化は否めない。要素長ゼロの可能性がない要素であれば、曲げ変形に加えてせん断変形を行う線要素として単純ばり要素座標系を使用することが望ましい。本解析で使用するばね要素においては、要素端力は仕事の対として対応する要素変形によってばね定数から独立に決定されるものとし、他の要素変形との連成はないものとする。要素変形と要素端力の関係は非弾性も可能とし、ばねの復元力特性として、バイリニアあるいは一方向のみ復元力がバイリニアとなる非弾性性状を与えることができるものとする。

図 3-3 に示す 2 重節点 (要素両端の変位が 1 つ以上の自由度について一致する節点) は、このばね要素で設定するものとする。非線形解析においては、変位が一致する方向は節点変位と共に変化するため、厳密な適合条件から求めた変位後の要素座標系を使用して、2 重節点における変位が一致する方向を確定する必要がある。

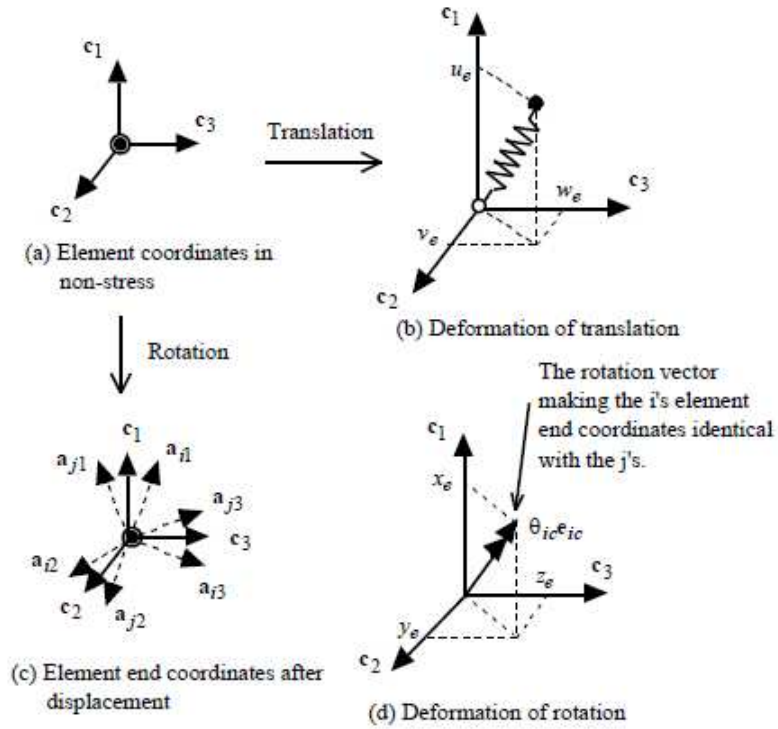


図 3-1 ばね要素の要素変形と要素座標系

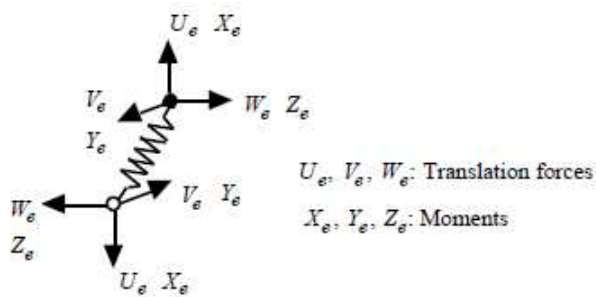


図 3-2 ばね要素の要素端力

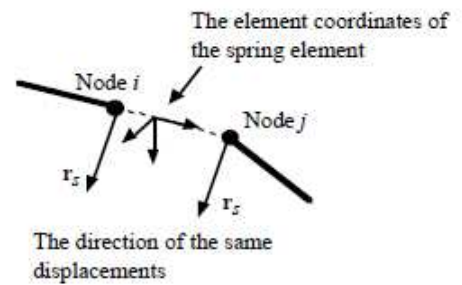


図 3-3 2 重節点

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図 3-4 に示す。

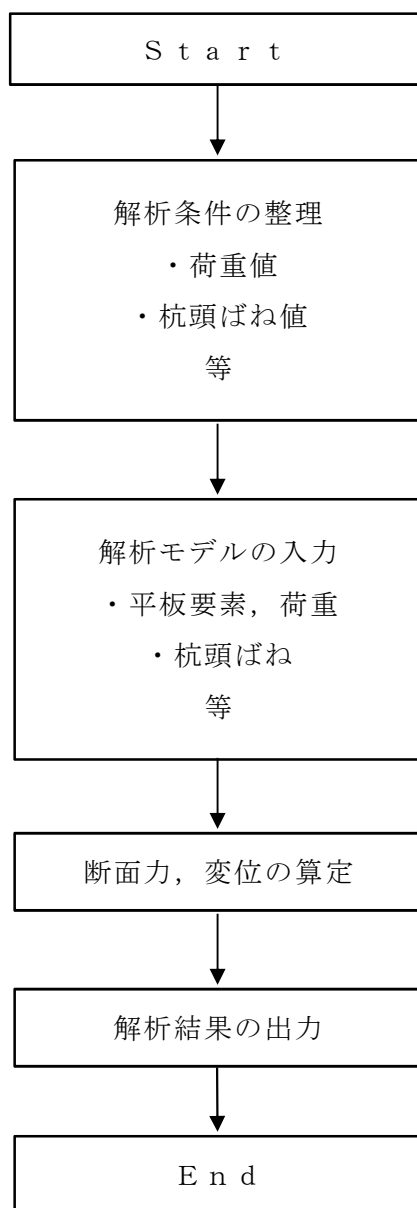


図 3-4 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性 (Validation)

3.5.1 非線形平板要素の適用性の検証

非線形平板要素は、コンクリート及び鉄筋の非線形特性を考慮し、鉄筋コンクリート部材を積層モデルでモデル化する要素である。非線形平板要素を用いた解析の適用性は、単純ばりモデルの荷重－変位関係について、本解析コードによる解析結果と実験結果を比較することで検証する。

(1) 検討条件

a. 実験概要

比較対象とする実験の概念図を図 3-5 に示す。実験では鉄筋コンクリートはりの試験体に対し、試験体天端 2 点に荷重し、試験体中央位置での鉛直変位に関する荷重－変位関係を確認する。

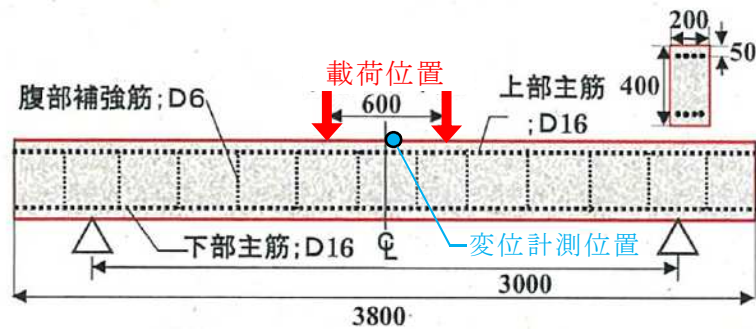


図 3-5 実験概念図

(原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針 (技術資料) (2005 年) より引用)

b. 解析モデル

解析モデルは図 3-5 に基づき、積層シェル要素でモデル化する。積層シェル要素は 8 層とし、上端 2 層及び下端 2 層は鉄筋コンクリート要素で、中央 4 層は無筋コンクリート要素でモデル化する。

解析モデル図を図 3-6 に示す。

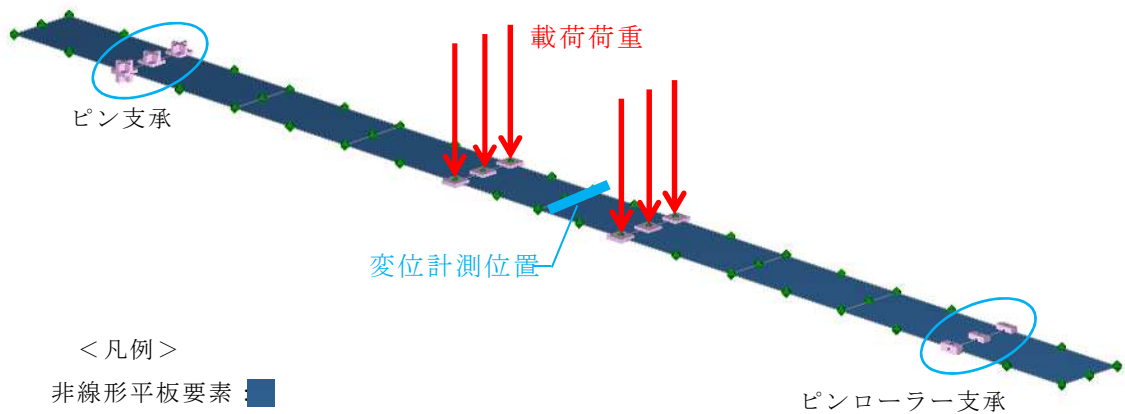


図 3-6 解析モデル図

c. 解析用物性値

解析用物性値を表 3-1 に示す。

表 3-1 解析用物性

コンクリート	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	45.3
	引張強度 f_t (N/mm ²)	3.7
	ヤング係数 E_c (N/mm ²)	3.06×10^4
鉄筋	降伏強度 f_s (N/mm ²)	344
	ヤング係数 E_s (N/mm ²)	1.94×10^5

(原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針 (技術資料) (2005 年) より引用)

d. 解析条件

図 3-5 の載荷位置と同様に、図 3-6 に示す載荷位置に載荷し、モデル中央位置における荷重-変位関係を算出する。

(2) 結果の検証

実験結果と解析結果の荷重－変位関係の比較を図 3-7 に示す。

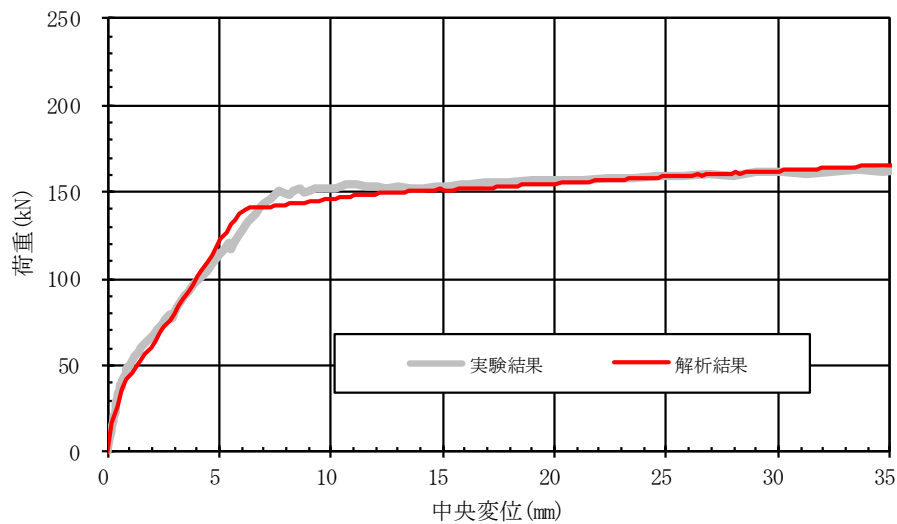


図 3-7 荷重－変位関係の比較

解析結果と実験結果の荷重－変位関係は概ね一致しており，鉄筋降伏時の荷重も概ね同等である。以上より，非線形平板要素を用いた解析の適用性を確認した。

3.5.2 杭頭ばね要素の適用性の検証

杭頭ばね要素は杭軸方向のばね，杭軸法線方向のばね及び回転ばねを設定することで，杭頭反力をモデル化する要素である。

杭頭ばね要素を用いた解析の適用性は，杭基礎構造物の杭頭反力及び変位について，本解析コードによる解析結果と変位法による理論解を比較することで検証を行う。

(1) 検討条件

a. 検討モデル

検討モデルは図 3-8 に示すとおり，杭基礎形式の逆 T 型擁壁とし，フーチングは剛体とする。

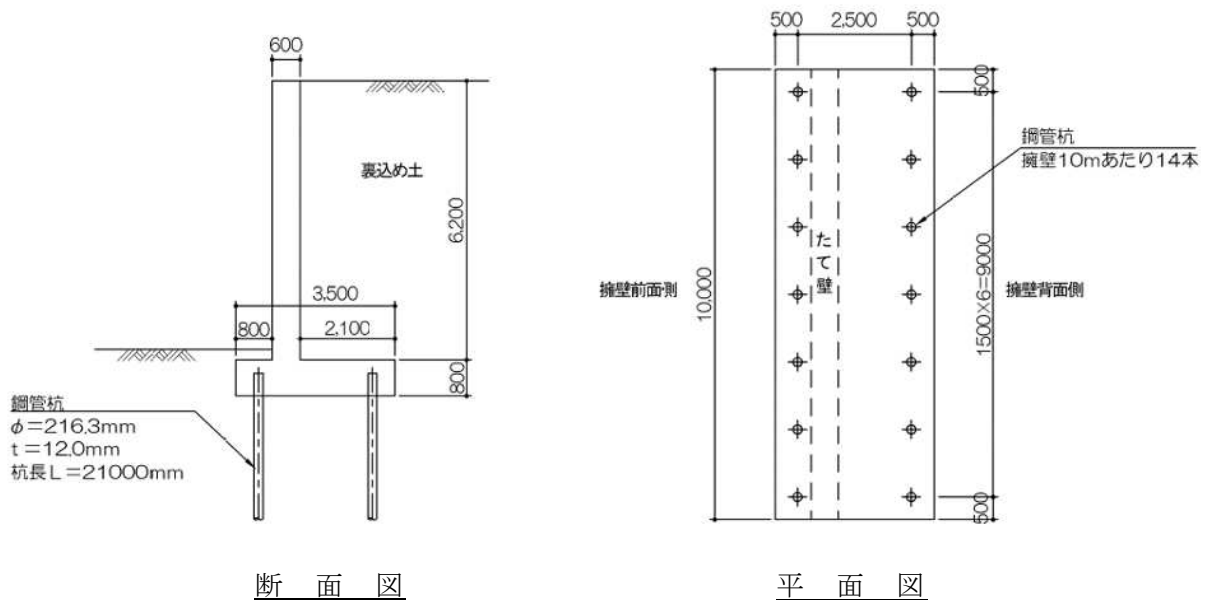


図 3-8 検討モデル

b. 杭頭ばね定数

杭頭ばね定数は、道路橋示方書（I 共通編・IV 下部構造編）・同解説（日本道路協会，平成 14 年 3 月）に基づき算定し，表 3-2 のとおりとする。

表 3-2 杭頭ばね値

名称	区分	単位	ばね定数
軸方向ばね	K_v ：杭軸方向のばね	kN/m	131567
軸直角方向ばね	K_1 ：杭の法線方向ばね	kN/m	27550
	K_2 ：杭の回転ばね	kN/rad	14032
	K_3 ：杭の法線方向ばね (モーメント)	kNm/m	14032
	K_4 ：杭の回転ばね (モーメント)	kNm/rad	14294

c. 荷重条件

荷重条件は、図 3-9 に示すフーチングの中心線に、表 3-2 に示す荷重を分布荷重で作用させるものとする。

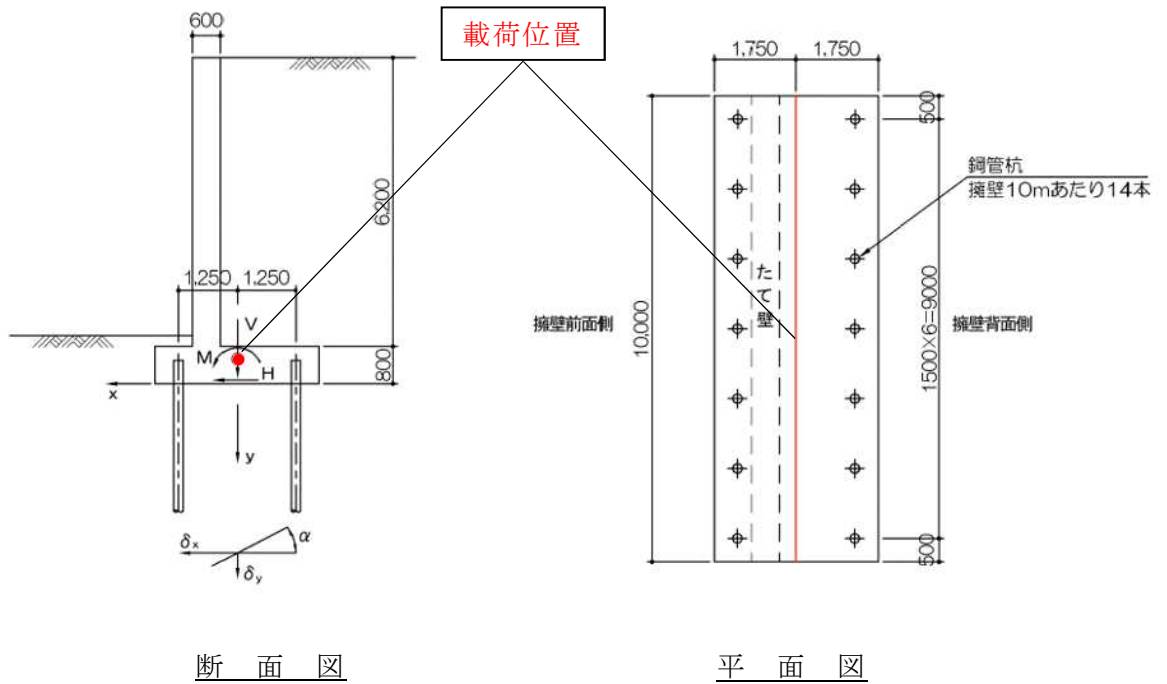


図 3-9 载荷点の位置

表 3-3 荷重値

鉛直荷重 V	水平荷重 H	モーメント M
420 (kN/m)	196 (kN/m)	397 (kNm/m)

(2) 解析結果の算出

本解析コードによる解析モデルを図 3-10 に示す。フーチングを剛板で、杭を杭頭ばね要素でモデル化する。

解析モデルに対して「(1)c. 荷重条件」で設定した荷重を作用させた際の杭頭ばね要素の反力図を図 3-11 に示す。解析で得られた各杭頭ばね要素の反力を表 3-4 及び表 3-5 に示す。また、フーチング軸線の変位を表 3-6 に示す。

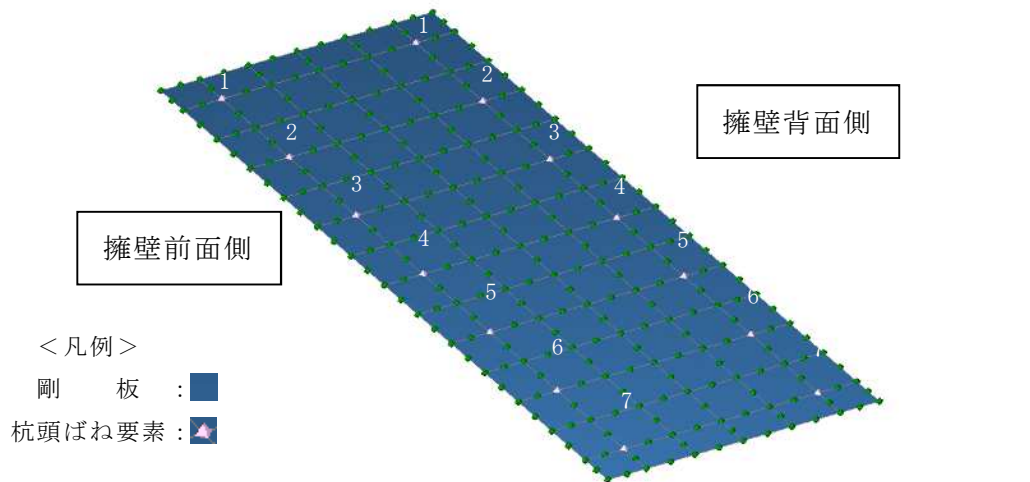


図 3-10 解析モデル図

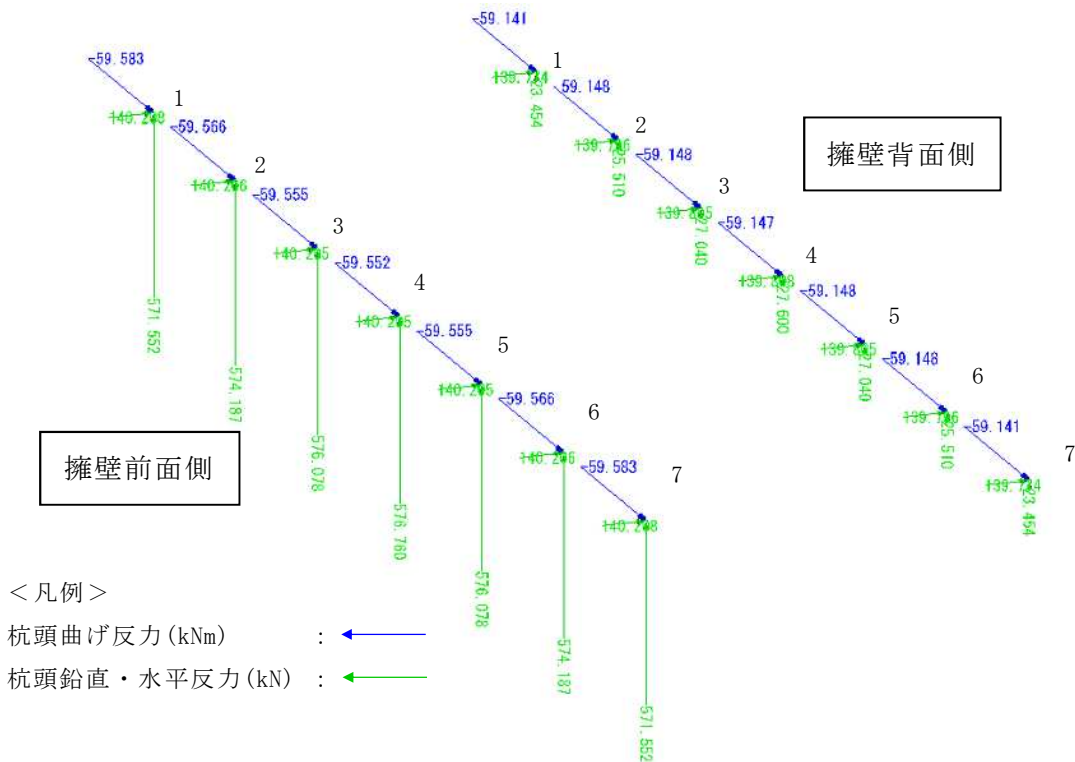


図 3-11 解析結果 杭頭ばね要素の反力図

表 3-4 擁壁前面側の杭頭部の反力

杭頭位置	1	2	3	4	5	6	7	平均値
杭頭曲げ反力M (kNm/本)	59.6	59.6	59.6	59.6	59.6	59.6	59.6	59.6
杭頭鉛直反力 P _v (kN/本)	571.6	574.2	576.1	576.8	576.1	574.2	571.6	574.3
杭頭水平反力 P _H (kN/本)	140.2	140.2	140.2	140.2	140.2	140.2	140.2	140.2

表 3-5 擁壁背面側の杭頭部の反力

杭頭位置	1	2	3	4	5	6	7	平均値
杭頭曲げ反力M (kNm/本)	59.1	59.1	59.1	59.1	59.1	59.1	59.1	59.1
杭頭鉛直反力 P _v (kN/本)	23.5	25.5	27.0	27.6	27.0	25.5	23.5	25.7
杭頭水平反力 P _H (kN/本)	139.8	139.8	139.8	139.8	139.8	139.8	139.8	139.8

表 3-6 フーチング軸線の変位

算定位置	軸線 (平均値)
水平変位 δ_x (mm)	5.93
鉛直変位 δ_y (mm)	2.30
回転角 α (rad)	0.001679

(3) 理論解の算出

変位法によって理論解を算出する。図 3-12 に示すようにフーチングの中心を原点Oとし、外力 V_o 、 H_o 、 M_o を作用させたときの応答値を算定する。

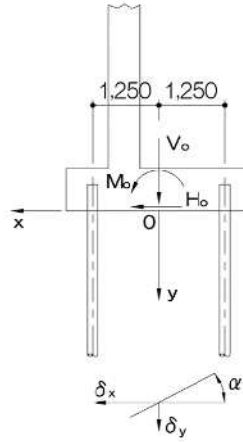


図 3-12 変位法による計算座標

このときフーチング原点の変位は、次の三元連立方程式を解いて求められる。

$$\begin{aligned} A_{xx} \delta_x + A_{xy} \delta_y + A_{x\alpha} \alpha &= H_o \\ A_{yx} \delta_x + A_{yy} \delta_y + A_{y\alpha} \alpha &= V_o \\ A_{\alpha x} \delta_x + A_{\alpha y} \delta_y + A_{\alpha\alpha} \alpha &= M_o \end{aligned}$$

フーチングの底面が水平なため、各係数は次式で求められる。

$$\begin{aligned} A_{xx} &= \sum (K_1 \cos^2 \theta_i + K_v \sin^2 \theta_i) \\ A_{xy} &= A_{yx} = \sum (K_v - K_1) \sin \theta_i \cos \theta_i \\ A_{x\alpha} &= A_{\alpha x} = \sum \{ (K_v - K_1) x_i \sin \theta_i \cos \theta_i - K_2 \cos \theta_i \} \\ A_{yy} &= \sum (K_v \cos^2 \theta_i + K_1 \sin^2 \theta_i) \\ A_{y\alpha} &= A_{\alpha y} = \sum \{ (K_v \cos^2 \theta_i + K_1 \sin^2 \theta_i) x_i + K_2 \sin \theta_i \} \\ A_{\alpha\alpha} &= \sum \{ (K_v \cos^2 \theta_i + K_1 \sin^2 \theta_i) x_i^2 + (K_2 + K_3) x_i \sin \theta_i + K_4 \} \end{aligned}$$

ここに、

- H_o : フーチング底面より上に作用する水平荷重 (kN)
- V_o : フーチング底面より上に作用する鉛直荷重 (kN)
- M_o : 原点Oまわりの外力のモーメント (kNm)
- δ_x : 原点Oの水平変位 (m)
- δ_y : 原点Oの鉛直変位 (m)
- α : フーチングの回転角 (rad)
- x_i : i番目の杭の杭頭のx座標 (m)
- θ_i : i番目の杭の杭軸が鉛直軸となす角度 (度)

以上の計算から、求められたフーチング原点の変位 ($\delta_x, \delta_y, \alpha$) により、各杭頭に作用する杭軸方向力 P_{Ni} 、杭軸直角方向力 P_{Hi} 、およびモーメント M_{ti} は次式で求まる。

$$\begin{aligned}
 P_{Ni} &= K_v \delta_{yi}' \\
 P_{Hi} &= K_1 \delta_{xi}' - K_2 \alpha \\
 M_{ti} &= -K_3 \delta_{xi}' + K_4 \alpha \\
 \delta_{xi}' &= \delta_x \cos \theta_i - (\delta_y + \alpha x_i) \sin \theta_i \\
 \delta_{yi}' &= \delta_x \sin \theta_i + (\delta_y + \alpha x_i) \cos \theta_i
 \end{aligned}$$

ここに、

δ_{xi}' : i 番目の杭の杭頭の軸直角方向変位 (m)

δ_{yi}' : i 番目の杭の杭頭の軸方向変位 (m)

K_v : 杭頭に単位量の軸方向変位を生じさせる杭軸方向力 (杭の軸方向ばね定数) (kN/m)

K_1, K_2, K_3, K_4 : 杭の軸直角方向ばね定数

x_i : i 番目の杭の杭頭の x 座標 (m)

θ_i : i 番目の杭の杭軸が鉛直軸となす角度 (度)

P_{Ni} : i 番目の杭の杭軸方向力 (kN)

P_{Hi} : i 番目の杭の杭軸直角方向力 (kN)

M_{ti} : i 番目の杭の杭頭に作用する外力としてのモーメント (kNm)

以上の計算式による計算結果を表 3-7～表 3-9 に示す。

表 3-7 各係数の計算結果

係数	単位	算定値
A_{xx}	kN/m	385697
A_{xy}, A_{yx}	kN/m	0
$A_{x\alpha}, A_{\alpha x}$	kN/rad	-196450
A_{yy}	kN/m	1841942
$A_{y\alpha}, A_{\alpha y}$	kN/rad	0
$A_{\alpha\alpha}$	kNm/rad	3078153

表 3-8 各杭頭反力の計算結果

算定位置	擁壁前面杭頭	擁壁背面杭頭
杭頭曲げ反力 M (kNm/本)	59	59
杭頭鉛直反力 P_v (kN/本)	574	26
杭頭水平反力 P_H (kN/本)	140	140

表 3-9 フーチングの原点 O の変位

算定位置	原点 O
水平変位 δ_x (mm)	5.93
鉛直変位 δ_y (mm)	2.28
回転角 α (rad)	0.001668

(4) 結果の検証

本解析コードによる解析結果と理論解の比較結果を表 3-10 及び表 3-11 に示す。表 3-10 及び表 3-11 より、杭頭反力及びフーチングの変位が解析解と理論解で概ね一致していることから、杭頭ばね要素を用いた解析の適用性を確認した。

表 3-10 本解析コードによる解析結果と理論解の比較 杭頭反力

算定位置	擁壁前面側杭頭			擁壁背面側杭頭		
	解析結果 (平均値)	理論解	理論解に対する比率	解析結果 (平均値)	理論解	理論解に対する比率
杭頭曲げ反力M (kNm/本)	59.6	59	101.0%	59.1	59	100.2%
杭頭鉛直反力P _v (kN/本)	574.3	574	100.1%	25.7	26	98.8%
杭頭水平反力P _H (kN/本)	140.2	140	100.1%	139.8	140	99.9%

表 3-11 本解析コードによる解析結果と理論解の比較 フーチング変位

算定位置	中心線 (原点O)		
	解析結果 (平均値)	理論解	理論解に対する比率
水平変位 δ_x (mm)	5.93	5.93	100.0%
鉛直変位 δ_y (mm)	2.30	2.28	100.9%
回転角 α (rad)	0.001679	0.001668	100.7%

3.5.3 使用目的に対する妥当性

本解析コードは、非線形平板要素及び杭頭ばね要素を用いた3次元有限要素法による静的解析に使用されている。非線形はり要素を用いた解析の適用性は、3.5.1「非線形平板要素の適用性の検討」において検討している。また、杭頭ばね要素を用いた解析の適用性は、3.5.2「杭頭ばね要素の適用性の検証」において検証している。

以上より、今回の工事計画認可申請における3次元有限要素法による静的解析の使用目的に対し、本解析コードを用いることは妥当である。

別紙 24 T D A P III

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-18	軽油タンク基礎の耐震性についての計算書	Ver. 3.11

2. 解析コードの概要

項目	コード名
	TDAPⅢ
使用目的	静的応力解析
開発機関	大成建設株式会社 株式会社アーク情報システム
開発時期	1994年
使用したバージョン	Ver. 3.11
コードの概要	<p>本解析コードは、2次元、3次元及び軸対称問題に対応可能で、静荷重、動荷重の取り扱いができる構造解析の汎用解析コードである。</p> <p>土木・建築分野の特化した要素群、材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で、日本国内では、建設部門を中心として、官公庁、大学、民間問わず、多くの利用実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・マニュアルに記載された例題の提示解と本解析コードによる解析解との比較を実施し、解析解が提示解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・橋梁・橋脚、地盤・構造物連成、地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており、十分な使用実績があるため、信頼性があると判断できる。 ・日本原子力発電株式会社東海第二発電所において、建物・構築物、屋外重要土木構造物等の静的応力解析に本解析コード (Ver. 3.08) が使用された実績があり、今回の工事計画認可申請で対象とする施設に適用性があることが既に検証されている。 ・バージョン更新により新しい構成則の追加、出力機能の追加が図られたが、今回の工事計画認可申請において使用するバージョン (Ver. 3.11) と他プラントの既工事計画で使用され

	<p>たバージョン (Ver. 3.08) で使用している機能は同じである。</p> <ul style="list-style-type: none">・今回の工事計画認可申請における静的応力解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

別紙 25 KSHAKE

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-別添 1-2-1	地下水排水設備設置位置の地盤応答	Ver. 6.2
V-2-2-別添 1-3-1	地下水排水設備設置位置の地盤応答	Ver. 6.2

2. 解析コードの概要

項目	コード名
	K S H A K E
使用目的	原子炉建屋地下水排水設備設置位置における地震応答解析
開発機関	株式会社構造計画研究所
開発時期	1997年
使用したバージョン	Ver. 6.2
コードの概要	<p>K S H A K Eは株式会社構造計画研究所により開発・公開された汎用市販コードである。一次元重複反射理論に基づく等価線形解析法により、成層地盤の地震応答解析を行う。</p> <p>以下に本解析コードの主な特徴を挙げる。</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 重複理論による等価線形解析により、地盤の非線形を考慮した解析が可能である。 (2) 従来型・改良型の複素剛性を選択できる。 (3) 地盤材料の動的変形特性として、土研式、港湾式等の歪依存特性をサポートする。 (4) 各層の加速度や相対変位等の最大応答分布図や時刻歴波形、並びに応答スペクトル図や地盤物性表等が出力可能である。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・作成した検討用地盤モデルを対象とし、本解析コードによる地震応答解析結果と、一次元重複反射理論に基づく理論解が一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・作成した検討用地盤モデルを対象に本解析コードによる地震応答解析結果と、汎用市販地震応答解析ソフトである地震工学研究所「microSHAKE-3D Ver2.3」による地震応答解析結果の比較を行い、解析結果が一致することを確認した。 ・原子力産業界において、原子力発電所の地盤・斜面評価などの解析に本コードが使用されており、十分な使用実績があるため、信頼性があると判断できる。

別紙 26 S H A K E

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-別添 1-2-1	地下水排水設備設置位置の地盤応答	Ver. 1. 6. 11
V-2-2-別添 1-3-1	地下水排水設備設置位置の地盤応答	Ver. 1. 6. 11

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	S H A K E
使用目的	地盤の地震応答解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1971 年
使用したバージョン	Ver. 1. 6. 11
コードの概要	<p>本解析コードは、米国カルフォルニア大学から発表された S H A K E（最新公開版は S H A K E - 9 1）（以下「S H A K E - 9 1」という。）を基本に開発されたもので、1次元重複反射理論に基づく地盤の伝達関数や時刻歴波形を算出するプログラムである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、地盤の地震応答解析に使用している。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証は以下のとおり実施している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本解析コードによる弾性地盤の増幅特性の解析結果と公開文献*の理論解を比較し、両者が概ね一致することを確認している。また、S H A K E - 9 1による解析結果と概ね一致することを確認している。 ・ 動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 同じ理論解に基づく S H A K E - 9 1 を用いた解析解と本解析コードの解析解のベンチマークを行った結果、概ね一致していること確認した。 ・ 今回の工事計画認可申請で行う 1次元重複反射理論による地盤の応答解析の用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 <p>注記* : 最新耐震構造解析 柴田明德著 231 頁, 232 頁 森北出版株式会社 第 3 版</p>

3. 解析手法

3.1 概要

本解析コードは、米国カルフォルニア大学バークレイ校（UCB）でSchnabelとLysmerらにより開発されたSHAKE-91を基本に開発されたプログラムである。本解析コードは、水平方向に半無限に広がりのある均質、粘弾性のいくつかの層からなる土層でのせん断波の鉛直方向伝播に対する応答計算を行う。

3.2 本解析コードの特徴

- (1) 1次元波動論に基づき、多層地盤の地震応答を行う。
- (2) 解析結果として、地盤の各層における加速度、応力度、ひずみ度等の伝達関数及び応答波形が求められる。
- (3) 本解析コードは、次の仮定を設けて地震応答解析を行っている。
 - ・ 地盤は、水平方向に半無限に広がっているものとする。（水平成層地盤）
 - ・ 応答は、地震動の解析基盤からの鉛直伝播により起こるものとする。
 - ・ 地盤物性は、各層の密度、せん断波速度又はせん断弾性係数（あるいは、P波速度）及び減衰定数を入力することで定義する。
- (4) 等価線形解析を行うことができる。

3.3 解析理論

解析理論において、図 3-1 に示す線形粘弾性系を通過するせん断波による応答を考える。各層は、均質、等方性であり、厚さ h 、密度 ρ 、せん断弾性係数 G 及び減衰定数 β で定義される。

図 3-1 に示される系を通過するせん断波の伝播は、水平変位 $u=u(x, t)$ による以下の式で表わされる。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \dots\dots\dots (3. 1)$$

ここで、

η : 粘性係数

水平変位 $u=u(x, t)$ を、以下の(2)式で表わされる振動数 ω に対する調和振動と考える。

$$u(x, t) = U(x) \cdot e^{i\omega t} \dots\dots\dots (3. 2)$$

ここで、

i : 虚数単位

(3. 2)式は、波動方程式の一般解として(3. 3)式で表わされる。

$$u(x, t) = E \cdot e^{i(kx + \omega t)} + F \cdot e^{-i(kx - \omega t)} \dots\dots\dots (3. 3)$$

$$k = \sqrt{\frac{\rho \omega^2}{G + i\omega \eta}} = \sqrt{\frac{\rho \omega^2}{G^*}} \dots\dots\dots (3. 4)$$

ここで、

E, F : 積分定数

G^* : 複素剛性

(3. 3)式の第一項は、 X のマイナス方向（上向き）に伝わる入射波を示し、第二項は X のプラス方向（下向き）に伝わる反射波を示している。

ここで、任意の m 層と $(m+1)$ 層の変位とせん断応力との連続性を考え、更に自由表面ではせん断応力 $\tau=0$ の境界条件を導入し、以下の関係を導く。

$$E_m = e_m(\omega) E_1 \dots\dots\dots (3. 5)$$

$$F_m = f_m(\omega) F_1 \dots\dots\dots (3. 6)$$

伝達関数 e_m 及び f_m は、それぞれ E_1 及び F_1 に対する倍率であり、 $E_1=F_1=1$ を上式に代入すれば決まるものである。

他の伝達関数は、 e_m 及び f_m から得られ、 n 層及び m 層表面での変位を関連づける伝達関数 $A_{n, m}$ は次のように定義する。

$$A_{n, m}(\omega) = u_m / u_n \dots\dots\dots (3. 7)$$

$$A_{n, m}(\omega) = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)} \dots\dots\dots (3. 8)$$

これらの式より、伝達関数 $A(\omega)$ は、系のいかなる 2 つの層の間においても定められる。伝達関数が定まれば、フーリエ変換により入力動のフーリエスペクトル $F(f)$ を求め、それに伝達関数 $A(f)$ を乗じてフーリエスペクトル $R(f)$ を算定し、それをフーリエ逆変換することにより時刻歴応答が求まる。

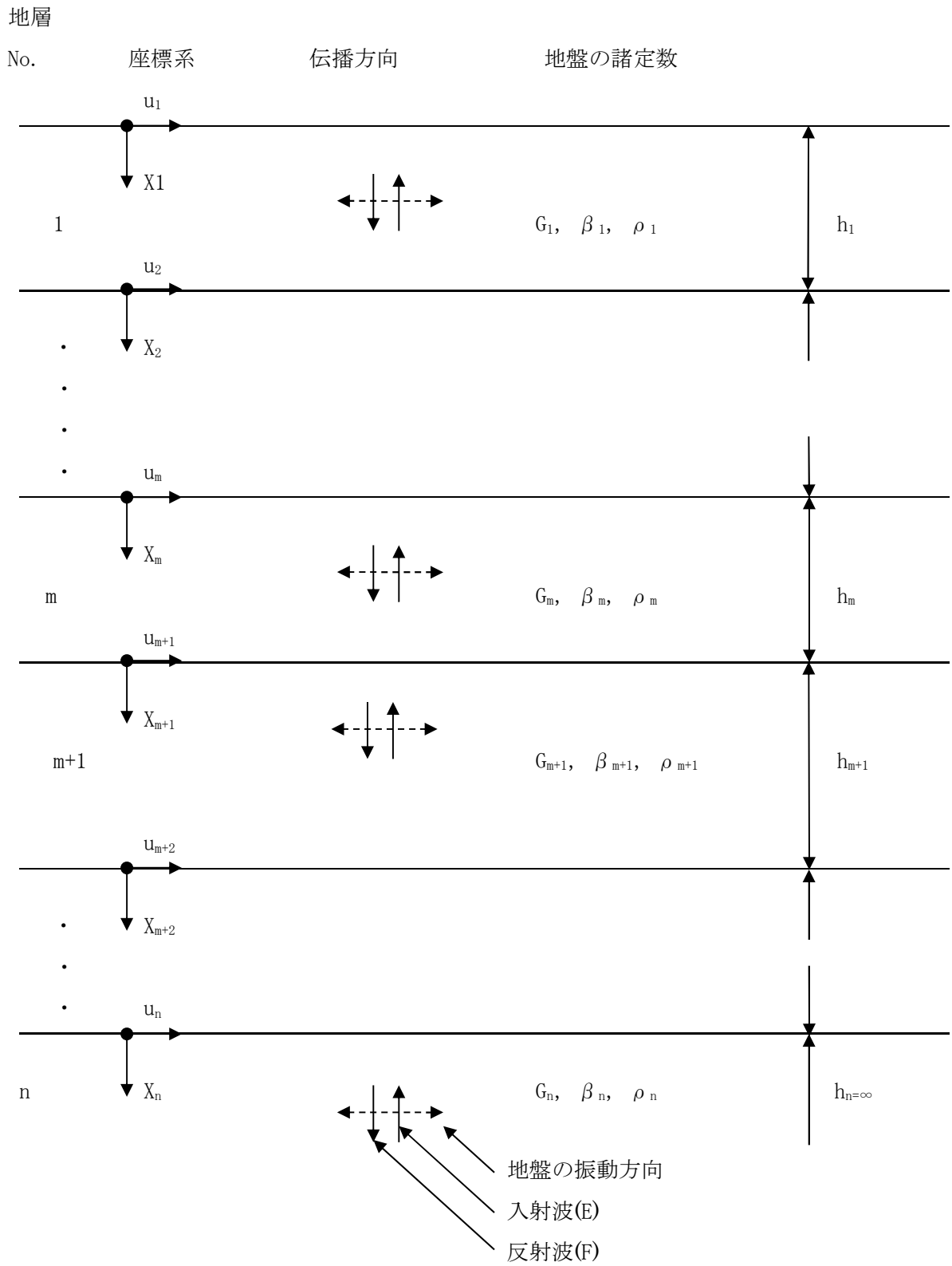
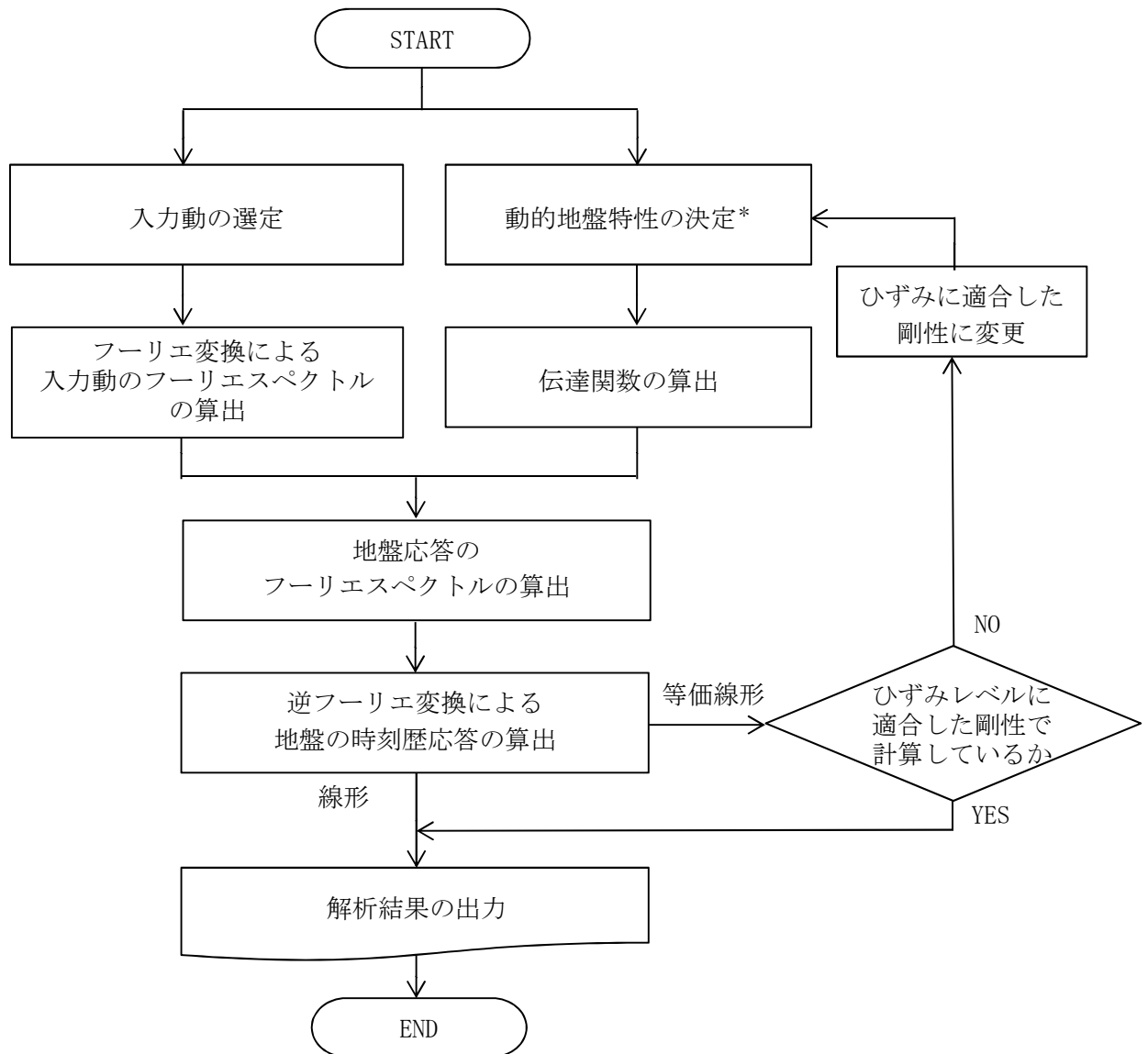


図 3-1 1次元地盤の波動伝播

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを以下に示す。



K7 ① V-2 別紙 R0

注記*：入力データとして密度，せん断弾性係数，減衰定数及び等価線形化法に用いるひずみ依存性を選定する。

図 3-2 解析フローチャート

3.5 検証(Verification)と妥当性確認(Validation)

本解析コードは、「3.3 解析理論」に示した一般性を有する理論モデルそのままに構築されたものである。よって、解析解の適切さは、公開文献*により得られる理論解との比較をもって確認可能である。また、複素応答と1次元重複反射理論に基づき構築された計算機コードSHAKE-91の解析結果との比較により、本解析コードの当該解析機能の適切さを確認した。

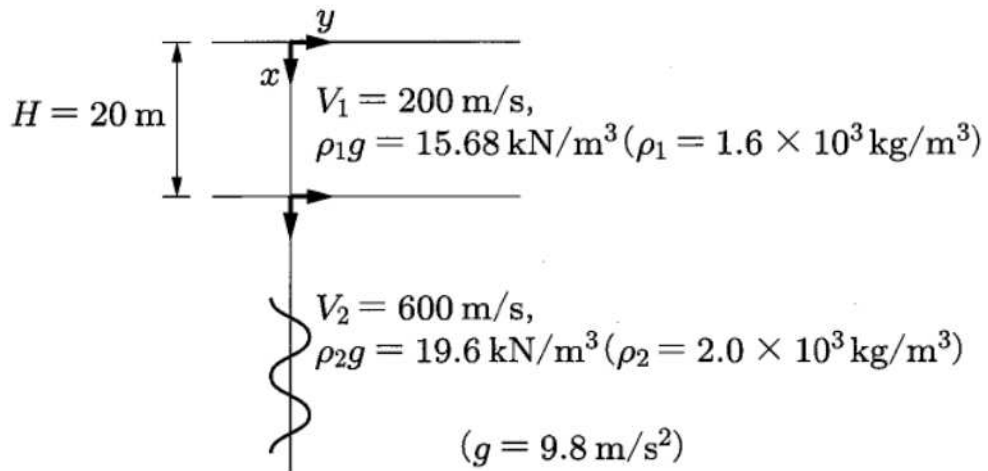
注記*：最新耐震構造解析 柴田明德著 231頁，232頁 森北出版株式会社 第3版

3.5.1 理論解との比較による検証

検証は、2層のモデル地盤を対象として、本解析コードの解析解と公開文献により得られる理論解の比較を行う。

(1) 地盤モデル及び検討条件

検証を行う解析モデル及び解析諸元を図3-3に示す。



地盤減衰は、履歴減衰として0%と5%の二種とする。

図3-3 解析条件及び解析モデル

<検討条件>

- ・重力加速度は、 9.80 m/s^2 とする。
- ・検討する振動数は、文献に合わせ0~15Hzとする。

(2) 比較結果

基盤層（第2層境界層）に対する地表の応答倍率（伝達関数）の理論解と解析解の比較を図3-4及び表3-1に示す。

また、本解析コードのバージョンの違いによる解析解の比較を表3-2及び表3-3に示す。

図3-4及び表3-1より理論解と解析解は十分な精度で一致しており、本解析コードが応答波を正しく評価していることが確認できる。

また、本解析コードの解析結果にバージョンの違いは見られない。

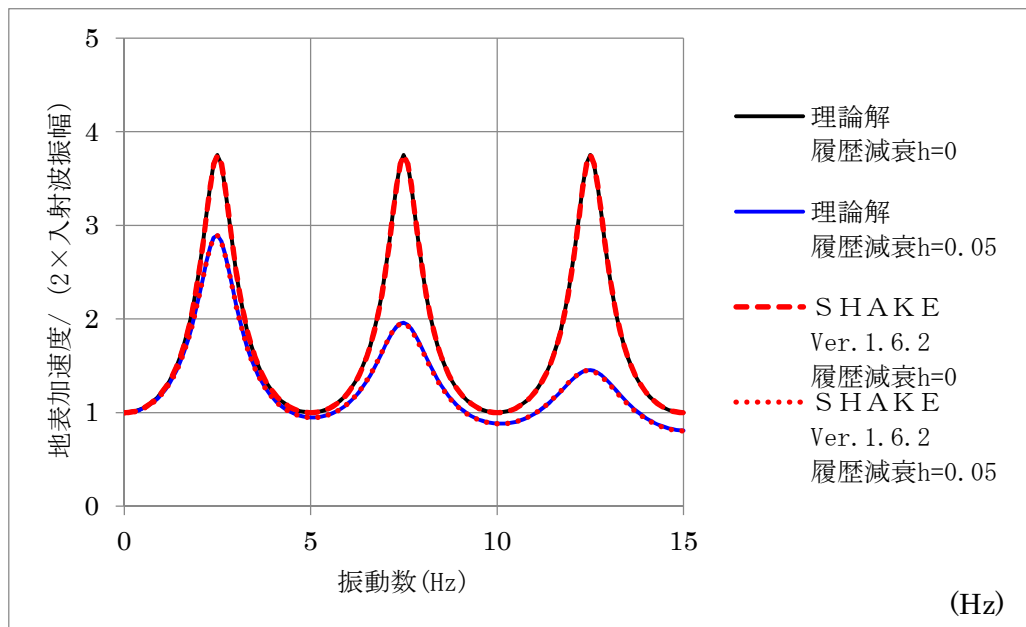


図3-4 公開文献の理論解とSHAKE (Ver. 1.6.2) による加速度伝達関数

表 3-1 公開文献の理論解と SHAKE (Ver. 1.6.2) による加速度伝達関数

振動数 (Hz)	履歴減衰 h=0			履歴減衰 h=0.05		
	理論解	SHAKE ver. 1.6.2	理論解/SHAKE Ver. 1.6.2	理論解	SHAKE ver. 1.6.2	理論解/SHAKE Ver. 1.6.2
0.0	1.0000	1.0000	1.000	1.0000	1.0000	1.000
0.5	1.0475	1.0475	1.000	1.0423	1.0425	1.000
1.0	1.2135	1.2135	1.000	1.1962	1.1973	0.999
1.5	1.5971	1.5971	1.000	1.5385	1.5419	0.998
2.0	2.5015	2.5015	1.000	2.2363	2.2445	0.996
2.5	3.7500	3.7500	1.000	2.8930	2.8892	1.001
3.0	2.5015	2.5015	1.000	2.1532	2.1387	1.007
3.5	1.5971	1.5971	1.000	1.4802	1.4717	1.006
4.0	1.2135	1.2135	1.000	1.1510	1.1463	1.004
4.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9987	0.9964	1.002
5.0	1.0000	1.0000	1.000	0.9488	0.9484	1.000
5.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9789	0.9806	0.998
6.0	1.2135	1.2135	1.000	1.0965	1.1012	0.996
6.5	1.5971	1.5971	1.000	1.3345	1.3438	0.993
7.0	2.5015	2.5015	1.000	1.7119	1.7237	0.993
7.5	3.7500	3.7500	1.000	1.9585	1.9534	1.003
8.0	2.5015	2.5015	1.000	1.6739	1.6546	1.012
8.5	1.5971	1.5971	1.000	1.2909	1.2766	1.011
9.0	1.2135	1.2135	1.000	1.0511	1.0427	1.008
9.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9271	0.9228	1.005
10.0	1.0000	1.0000	1.000	0.8822	0.8811	1.001
10.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9012	0.9033	0.998
11.0	1.2135	1.2135	1.000	0.9849	0.9906	0.994
11.5	1.5971	1.5971	1.000	1.1407	1.1502	0.992
12.0	2.5015	2.5015	1.000	1.3456	1.3542	0.994
12.5	3.7500	3.7500	1.000	1.4534	1.4484	1.003
13.0	2.5015	2.5015	1.000	1.3230	1.3063	1.013
13.5	1.5971	1.5971	1.000	1.1052	1.0901	1.014
14.0	1.2135	1.2135	1.000	0.9400	0.9300	1.011
14.5	1.0475	1.0475	1.000	0.8443	0.8389	1.007
15.0	1.0000	1.0000	1.000	0.8060	0.8042	1.002

表 3-2 本解析コードバージョンの違い (加速度伝達関数 履歴減衰 h=0)

振動数 (Hz)	SHAKE V. 1. 6. 2	SHAKE V. 1. 6. 3	SHAKE V. 1. 6. 4	SHAKE V. 1. 6. 5	SHAKE V. 1. 6. 6	SHAKE V. 1. 6. 7	SHAKE V. 1. 6. 8	SHAKE V. 1. 6. 9
0.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.5	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475
1.0	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135
1.5	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971
2.0	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015
2.5	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500
3.0	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015
3.5	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971
4.0	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135
4.5	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475
5.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5.5	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475
6.0	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135
6.5	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971
7.0	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015
7.5	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500
8.0	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015
8.5	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971
9.0	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135
9.5	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475
10.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
10.5	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475
11.0	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135
11.5	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971
12.0	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015
12.5	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500
13.0	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015
13.5	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971
14.0	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135
14.5	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475
15.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

表 3-3 本解析コードバージョンの違い (加速度伝達関数履歴減衰 h=0.05)

振動数 (Hz)	SHAKE V. 1. 6. 2	SHAKE V. 1. 6. 3	SHAKE V. 1. 6. 4	SHAKE V. 1. 6. 5	SHAKE V. 1. 6. 6	SHAKE V. 1. 6. 7	SHAKE V. 1. 6. 8	SHAKE V. 1. 6. 9
0.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.5	1.0425	1.0425	1.0425	1.0425	1.0425	1.0425	1.0425	1.0425
1.0	1.1973	1.1973	1.1973	1.1973	1.1973	1.1973	1.1973	1.1973
1.5	1.5419	1.5419	1.5419	1.5419	1.5419	1.5419	1.5419	1.5419
2.0	2.2445	2.2445	2.2445	2.2445	2.2445	2.2445	2.2445	2.2445
2.5	2.8892	2.8892	2.8892	2.8892	2.8892	2.8892	2.8892	2.8892
3.0	2.1387	2.1387	2.1387	2.1387	2.1387	2.1387	2.1387	2.1387
3.5	1.4717	1.4717	1.4717	1.4717	1.4717	1.4717	1.4717	1.4717
4.0	1.1463	1.1463	1.1463	1.1463	1.1463	1.1463	1.1463	1.1463
4.5	0.9964	0.9964	0.9964	0.9964	0.9964	0.9964	0.9964	0.9964
5.0	0.9484	0.9484	0.9484	0.9484	0.9484	0.9484	0.9484	0.9484
5.5	0.9806	0.9806	0.9806	0.9806	0.9806	0.9806	0.9806	0.9806
6.0	1.1012	1.1012	1.1012	1.1012	1.1012	1.1012	1.1012	1.1012
6.5	1.3438	1.3438	1.3438	1.3438	1.3438	1.3438	1.3438	1.3438
7.0	1.7237	1.7237	1.7237	1.7237	1.7237	1.7237	1.7237	1.7237
7.5	1.9534	1.9534	1.9534	1.9534	1.9534	1.9534	1.9534	1.9534
8.0	1.6546	1.6546	1.6546	1.6546	1.6546	1.6546	1.6546	1.6546
8.5	1.2766	1.2766	1.2766	1.2766	1.2766	1.2766	1.2766	1.2766
9.0	1.0427	1.0427	1.0427	1.0427	1.0427	1.0427	1.0427	1.0427
9.5	0.9228	0.9228	0.9228	0.9228	0.9228	0.9228	0.9228	0.9228
10.0	0.8811	0.8811	0.8811	0.8811	0.8811	0.8811	0.8811	0.8811
10.5	0.9033	0.9033	0.9033	0.9033	0.9033	0.9033	0.9033	0.9033
11.0	0.9906	0.9906	0.9906	0.9906	0.9906	0.9906	0.9906	0.9906
11.5	1.1502	1.1502	1.1502	1.1502	1.1502	1.1502	1.1502	1.1502
12.0	1.3542	1.3542	1.3542	1.3542	1.3542	1.3542	1.3542	1.3542
12.5	1.4484	1.4484	1.4484	1.4484	1.4484	1.4484	1.4484	1.4484
13.0	1.3063	1.3063	1.3063	1.3063	1.3063	1.3063	1.3063	1.3063
13.5	1.0901	1.0901	1.0901	1.0901	1.0901	1.0901	1.0901	1.0901
14.0	0.9300	0.9300	0.9300	0.9300	0.9300	0.9300	0.9300	0.9300
14.5	0.8389	0.8389	0.8389	0.8389	0.8389	0.8389	0.8389	0.8389
15.0	0.8042	0.8042	0.8042	0.8042	0.8042	0.8042	0.8042	0.8042

3.5.2 SHAKE-91との比較

本解析コードによる地震応答解析結果と、SHAKE-91による地震応答解析結果の比較を実施した。

比較に用いるSHAKE-91は、米国カリフォルニア大学バークレイ校（UCB）が有償配布している複素応答と重複反射理論に基づいた1次元地盤の等価線形解析プログラムであり、世界各国で広く用いられているSHAKEの最新バージョンである。なお、本解析コードのSHAKE（Ver. 1.6.2及びこれ以前のVersion）は既工認での使用実績を数多く有する。

(1) 検討条件

a. 地盤モデル

検証を行う地盤モデル諸元を表3-4に、図3-5～図3-6に地盤のひずみ依存特性を示す。

なお、地盤モデルは、SHAKE-91の例題に添付されている等価線形モデルである。このため長さはfeet、重さはpond、重力加速度は 32.2feet/s^2 である。

b. 入力地震動

基盤への入力地震動を図3-7に示す。

入力地震動もSHAKE-91の例題に添付されているものであり、メキシコ地震のロマ・プリータで記録された地震波を $0.1G$ (0.980665m/s^2) に基準化したものを用いる。

c. 等価線形解析時の解析条件

SHAKE-91の例題で用いられている主な解析条件を以下に示す。

- ・地盤の有効ひずみは、最大応答ひずみの0.5倍とする。
- ・収束回数は、8回までとする。
- ・収束誤差判定は、1%とする。（SHAKE-91では考慮していない）

表 3-4 地盤モデル諸元

区分	層厚 ft	深度 ft	湿潤単位体積重量 kpd/ft ³	せん断波速度 ft/s	減衰定数
砂質土	5	5	0.125	1000	0.05
	5	10	0.125	900	0.05
	10	20	0.125	900	0.05
	10	30	0.125	950	0.05
粘性土	10	40	0.125	1000	0.05
	10	50	0.125	1000	0.05
	10	60	0.125	1100	0.05
	10	70	0.125	1100	0.05
砂質土	10	80	0.130	1300	0.05
	10	90	0.130	1300	0.05
	10	100	0.130	1400	0.05
	10	110	0.130	1400	0.05
	10	120	0.130	1500	0.05
	10	130	0.130	1500	0.05
	10	140	0.130	1600	0.05
	10	150	0.130	1800	0.05
基盤	—	—	0.140	4000	0.01

γ	粘性土 G/Go	γ	粘性土 h
0.0001	1.000	0.0001	0.0024
0.0003	1.000	0.0003	0.0042
0.0010	1.000	0.0010	0.0080
0.0030	0.981	0.0030	0.0140
0.0100	0.941	0.0100	0.0280
0.0300	0.847	0.0300	0.0510
0.1000	0.656	0.1000	0.0980
0.3000	0.438	0.3000	0.1550
1.0000	0.238	1.0000	0.2100
3.0000	0.144	3.1600	0.2500
10.0000	0.110	10.0000	0.2800

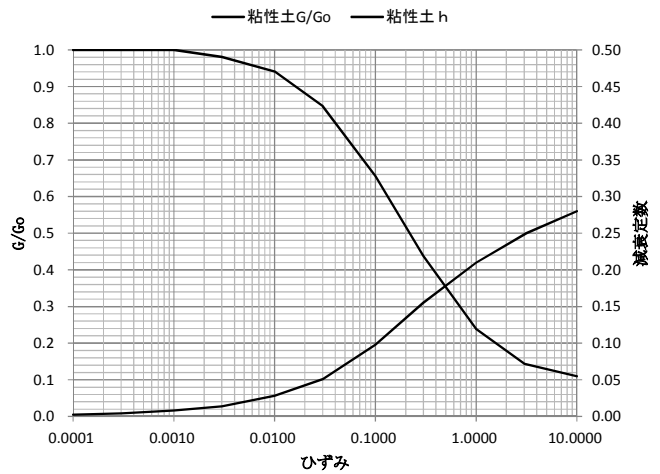


図 3-5 粘性土の非線形特性

γ	砂質土 G/Go	γ	砂質土 h
0.0001	1.000	0.0001	0.0024
0.0003	1.000	0.0003	0.0042
0.0010	0.990	0.0010	0.0080
0.0030	0.960	0.0030	0.0140
0.0100	0.850	0.0100	0.0280
0.0300	0.640	0.0300	0.0510
0.1000	0.370	0.1000	0.0980
0.3000	0.180	0.3000	0.1550
1.0000	0.080	1.0000	0.2100
3.0000	0.050	3.0000	0.2500
10.0000	0.035	10.0000	0.2800

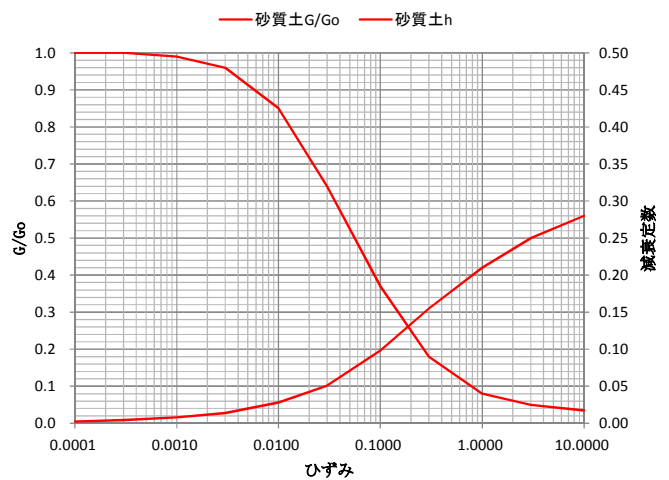


図 3-6 砂質土の非線形特性

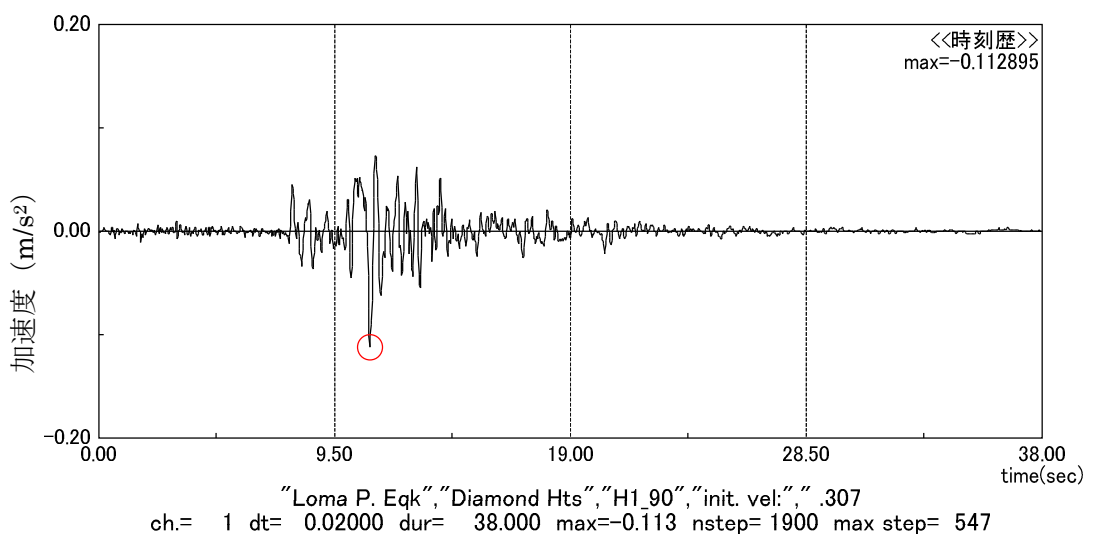


図 3-7 入力地震動

(2) 解析結果

本解析コードによる地震応答解析結果と、SHAKE-91による地震応答解析結果のうち、地盤の最大加速度分布を図3-8、地盤の等価せん断ひずみ分布を図3-9、地表の加速度応答スペクトルを図3-10に示す。

なお、SHAKE-91の加速度出力(重力加速度単位)は重力加速度 $G=9.80665\text{m/s}^2$ を用いて cm/s^2 に変換して比較する。

また、本解析コードのバージョンの違いによる解析解の比較を表3-5及び表3-6に示す。

これらによれば、本解析コードとSHAKE-91の解析結果は十分な精度で一致しており、本解析コードの等価線形解析は検証された。

また、本解析コードの解析結果にバージョンの違いは見られない。

深さ (ft)	SHAKE - 9 1 (G)	SHAKE - 9 1 (cm/s^2)	SHAKE (Ver. 1. 6. 2)	SHAKE - 9 1 /Ver1. 6. 2
0	0.19040	186.7	186.6	1.001
5	0.19006	186.4	186.3	1.001
10	0.18873	185.1	185.0	1.001
20	0.18258	179.0	179.0	1.000
30	0.17209	168.8	168.7	1.001
40	0.15947	156.4	156.4	1.000
50	0.14288	140.1	140.1	1.000
60	0.12653	124.1	124.1	1.000
70	0.11049	108.4	108.3	1.001
80	0.09839	96.5	96.5	1.000
90	0.08997	88.2	88.2	1.000
100	0.08268	81.1	81.1	1.000
110	0.08559	83.9	84.0	0.999
120	0.08546	83.8	83.8	1.000
130	0.08201	80.4	80.4	1.000
140	0.07769	76.2	76.2	1.000
150	0.07616	74.7	74.7	1.000

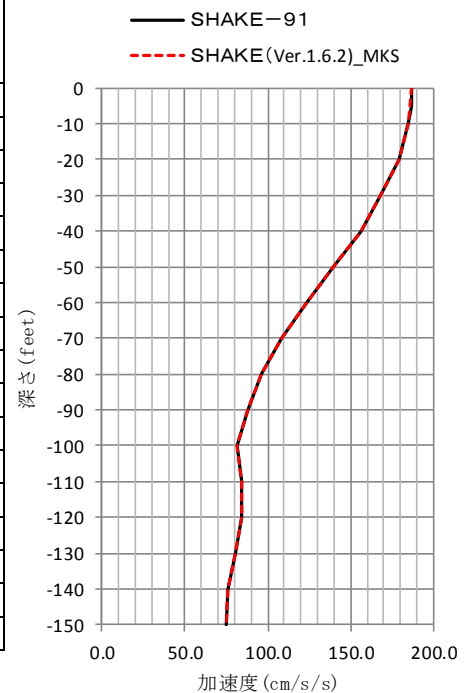


図3-8 地盤の最大加速度分布

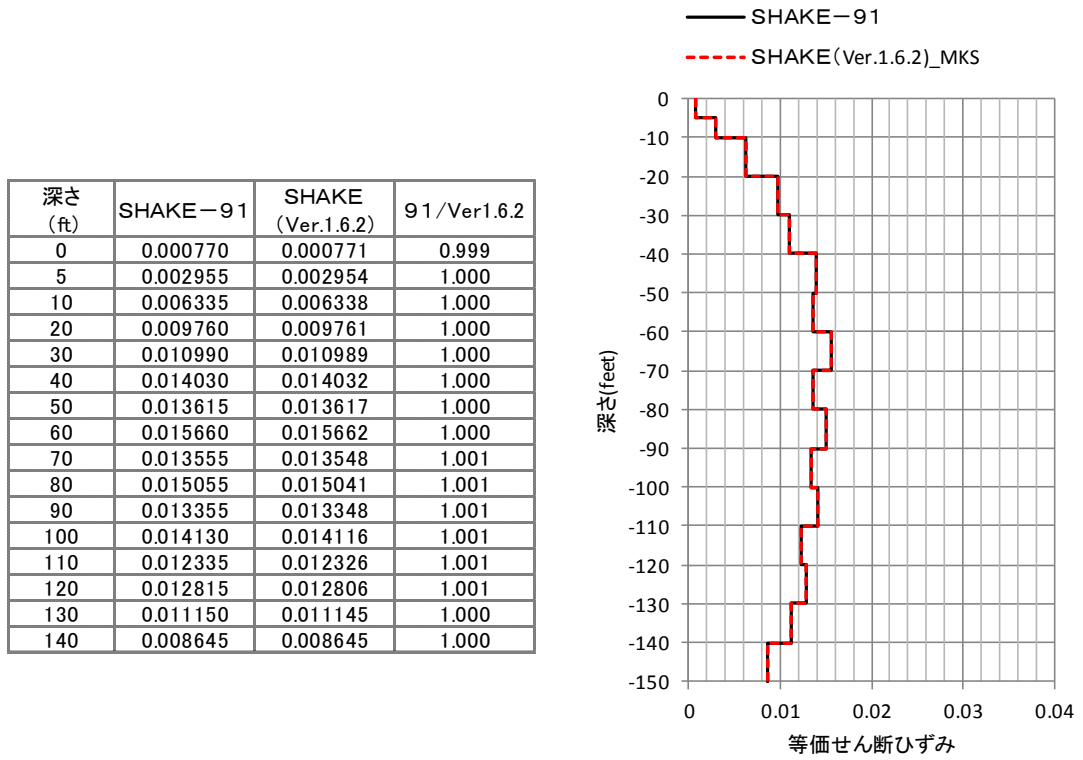


図 3-9 地盤の等価せん断ひずみ

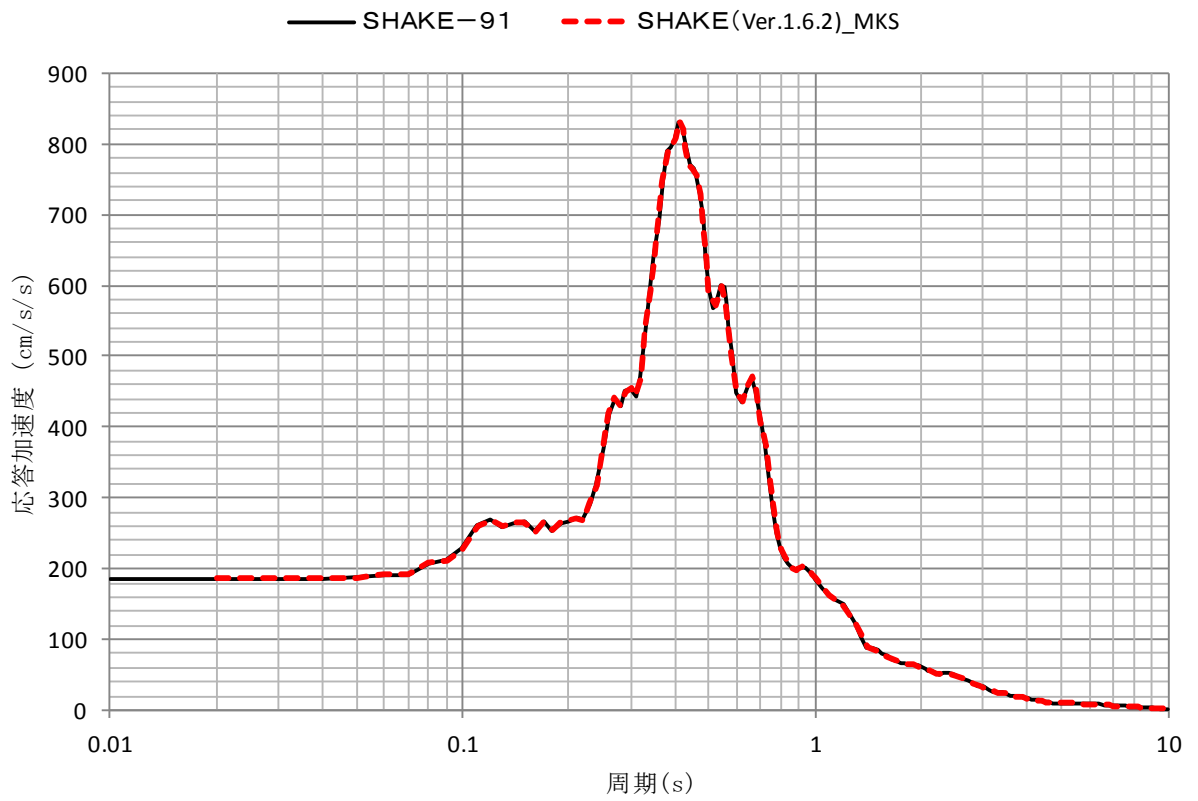


図 3-10 地表の加速度応答スペクトル (h=0.05)

表 3-5 本解析コードバージョン比較 (地盤の最大加速度分布)

深さ (ft)	SHAKE V. 1. 6. 2	SHAKE V. 1. 6. 3	SHAKE V. 1. 6. 4	SHAKE V. 1. 6. 5	SHAKE V. 1. 6. 6	SHAKE V. 1. 6. 7	SHAKE V. 1. 6. 8	SHAKE V. 1. 6. 9
0	186.6	186.6	186.6	186.6	186.6	186.6	186.6	186.6
5	186.3	186.3	186.3	186.3	186.3	186.3	186.3	186.3
10	185.0	185.0	185.0	185.0	185.0	185.0	185.0	185.0
20	179.0	179.0	179.0	179.0	179.0	179.0	179.0	179.0
30	168.7	168.7	168.7	168.7	168.7	168.7	168.7	168.7
40	156.4	156.4	156.4	156.4	156.4	156.4	156.4	156.4
50	140.1	140.1	140.1	140.1	140.1	140.1	140.1	140.1
60	124.1	124.1	124.1	124.1	124.1	124.1	124.1	124.1
70	108.3	108.3	108.3	108.3	108.3	108.3	108.3	108.3
80	96.5	96.5	96.5	96.5	96.5	96.5	96.5	96.5
90	88.2	88.2	88.2	88.2	88.2	88.2	88.2	88.2
100	81.1	81.1	81.1	81.1	81.1	81.1	81.1	81.1
110	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0
120	83.8	83.8	83.8	83.8	83.8	83.8	83.8	83.8
130	80.4	80.4	80.4	80.4	80.4	80.4	80.4	80.4
140	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2
150	74.7	74.7	74.7	74.7	74.7	74.7	74.7	74.7

表 3-6 本解析コードバージョン比較 (地盤の等価せん断ひずみ)

深さ (ft)	SHAKE V. 1. 6. 2	SHAKE V. 1. 6. 3	SHAKE V. 1. 6. 4	SHAKE V. 1. 6. 5	SHAKE V. 1. 6. 6	SHAKE V. 1. 6. 7	SHAKE V. 1. 6. 8	SHAKE V. 1. 6. 9
0	0.000771	0.000771	0.000771	0.000771	0.000771	0.000771	0.000771	0.000771
5	0.002954	0.002954	0.002954	0.002954	0.002954	0.002954	0.002954	0.002954
10	0.006338	0.006338	0.006338	0.006338	0.006338	0.006338	0.006338	0.006338
20	0.009761	0.009761	0.009761	0.009761	0.009761	0.009761	0.009761	0.009761
30	0.010989	0.010989	0.010989	0.010989	0.010989	0.010989	0.010989	0.010989
40	0.014032	0.014032	0.014032	0.014032	0.014032	0.014032	0.014032	0.014032
50	0.013617	0.013617	0.013617	0.013617	0.013617	0.013617	0.013617	0.013617
60	0.015662	0.015662	0.015662	0.015662	0.015662	0.015662	0.015662	0.015662
70	0.013548	0.013548	0.013548	0.013548	0.013548	0.013548	0.013548	0.013548
80	0.015041	0.015041	0.015041	0.015041	0.015041	0.015041	0.015041	0.015041
90	0.013348	0.013348	0.013348	0.013348	0.013348	0.013348	0.013348	0.013348
100	0.014116	0.014116	0.014116	0.014116	0.014116	0.014116	0.014116	0.014116
110	0.012326	0.012326	0.012326	0.012326	0.012326	0.012326	0.012326	0.012326
120	0.012806	0.012806	0.012806	0.012806	0.012806	0.012806	0.012806	0.012806
130	0.011145	0.011145	0.011145	0.011145	0.011145	0.011145	0.011145	0.011145
140	0.008645	0.008645	0.008645	0.008645	0.008645	0.008645	0.008645	0.008645

3.5.3 使用内容に対する妥当性

地盤の地震応答解析にSHAKEを使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証されており、妥当である。

- ・ 検証の内容のとおり、地盤の応答解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。
- ・ 評価地盤を水平成層と仮定していることから、次元重複反射理論の適用範囲である。

付表-1 本解析コードバージョンの違い (加速度伝達関数 履歴減衰 h=0)

振動数 (Hz)	SHAKE V. 1. 6. 2	SHAKE V. 1. 6. 10	SHAKE V. 1. 6. 11	SHAKE V. 1. 6. 13
0.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.5	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475
1.0	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135
1.5	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971
2.0	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015
2.5	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500
3.0	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015
3.5	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971
4.0	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135
4.5	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475
5.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5.5	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475
6.0	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135
6.5	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971
7.0	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015
7.5	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500
8.0	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015
8.5	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971
9.0	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135
9.5	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475
10.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
10.5	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475
11.0	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135
11.5	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971
12.0	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015
12.5	3.7500	3.7500	3.7500	3.7500
13.0	2.5015	2.5015	2.5015	2.5015
13.5	1.5971	1.5971	1.5971	1.5971
14.0	1.2135	1.2135	1.2135	1.2135
14.5	1.0475	1.0475	1.0475	1.0475
15.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

付表-2 本解析コードバージョンの違い (加速度伝達関数履歴減衰 h=0.05)

振動数 (Hz)	S H A K E	S H A K E	S H A K E	S H A K E
	V. 1. 6. 2	V. 1. 6. 10	V. 1. 6. 11	V. 1. 6. 13
0.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.5	1.0425	1.0425	1.0425	1.0425
1.0	1.1973	1.1973	1.1973	1.1973
1.5	1.5419	1.5419	1.5419	1.5419
2.0	2.2445	2.2445	2.2445	2.2445
2.5	2.8892	2.8892	2.8892	2.8892
3.0	2.1387	2.1387	2.1387	2.1387
3.5	1.4717	1.4717	1.4717	1.4717
4.0	1.1463	1.1463	1.1463	1.1463
4.5	0.9964	0.9964	0.9964	0.9964
5.0	0.9484	0.9484	0.9484	0.9484
5.5	0.9806	0.9806	0.9806	0.9806
6.0	1.1012	1.1012	1.1012	1.1012
6.5	1.3438	1.3438	1.3438	1.3438
7.0	1.7237	1.7237	1.7237	1.7237
7.5	1.9534	1.9534	1.9534	1.9534
8.0	1.6546	1.6546	1.6546	1.6546
8.5	1.2766	1.2766	1.2766	1.2766
9.0	1.0427	1.0427	1.0427	1.0427
9.5	0.9228	0.9228	0.9228	0.9228
10.0	0.8811	0.8811	0.8811	0.8811
10.5	0.9033	0.9033	0.9033	0.9033
11.0	0.9906	0.9906	0.9906	0.9906
11.5	1.1502	1.1502	1.1502	1.1502
12.0	1.3542	1.3542	1.3542	1.3542
12.5	1.4484	1.4484	1.4484	1.4484
13.0	1.3063	1.3063	1.3063	1.3063
13.5	1.0901	1.0901	1.0901	1.0901
14.0	0.9300	0.9300	0.9300	0.9300
14.5	0.8389	0.8389	0.8389	0.8389
15.0	0.8042	0.8042	0.8042	0.8042

付表-3 本解析コードバージョン比較 (地盤の最大加速度分布)

深さ (ft)	SHAKE V. 1. 6. 2	SHAKE V. 1. 6. 10	SHAKE V. 1. 6. 11	SHAKE V. 1. 6. 13
0	186.6	186.6	186.6	186.6
5	186.3	186.3	186.3	186.3
10	185.0	185.0	185.0	185.0
20	179.0	179.0	179.0	179.0
30	168.7	168.7	168.7	168.7
40	156.4	156.4	156.4	156.4
50	140.1	140.1	140.1	140.1
60	124.1	124.1	124.1	124.1
70	108.3	108.3	108.3	108.3
80	96.5	96.5	96.5	96.5
90	88.2	88.2	88.2	88.2
100	81.1	81.1	81.1	81.1
110	84.0	84.0	84.0	84.0
120	83.8	83.8	83.8	83.8
130	80.4	80.4	80.4	80.4
140	76.2	76.2	76.2	76.2
150	74.7	74.7	74.7	74.7

付表-4 本解析コードバージョン比較 (地盤の有効せん断ひずみ)

深さ (ft)	SHAKE V. 1. 6. 2	SHAKE V. 1. 6. 10	SHAKE V. 1. 6. 11	SHAKE V. 1. 6. 13
0	0.000771	0.000771	0.000771	0.000771
5	0.002954	0.002954	0.002954	0.002954
10	0.006338	0.006338	0.006338	0.006338
20	0.009761	0.009761	0.009761	0.009761
30	0.010989	0.010989	0.010989	0.010989
40	0.014032	0.014032	0.014032	0.014032
50	0.013617	0.013617	0.013617	0.013617
60	0.015662	0.015662	0.015662	0.015662
70	0.013548	0.013548	0.013548	0.013548
80	0.015041	0.015041	0.015041	0.015041
90	0.013348	0.013348	0.013348	0.013348
100	0.014116	0.014116	0.014116	0.014116
110	0.012326	0.012326	0.012326	0.012326
120	0.012806	0.012806	0.012806	0.012806
130	0.011145	0.011145	0.011145	0.011145
140	0.008645	0.008645	0.008645	0.008645

別紙 27 N u P I A S

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-別添 1-2-3	管の耐震性についての計算書	Ver. 6. 1. 3c
V-2-2-別添 1-3-3	管の耐震性についての計算書	Ver. 6. 1. 3c
V-2-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 6. 1. 3c
V-2-8-3-1-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 6. 1. 3c
V-2-8-3-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 6. 1. 3c
V-2-9-4-5-1-2	管の耐震性についての計算書	Ver. 6. 1. 3c
		Ver. 6. 1. 4
V-2-9-4-6-1-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 6. 1. 3c
V-2-9-4-7-1-2	管の耐震性についての計算書	Ver. 6. 1. 3c
V-2-9-5-2	管の耐震性についての計算書（格納容器圧力逃がし装置）	Ver. 6. 1. 3c
V-2-別添 1	火災防護設備の耐震性に関する説明書	Ver. 6. 1. 3c

2. 解析コードの概要

2.1 NuPIAS Ver. 6.1.3c

項目 \ コード名	NuPIAS
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル）による管の固有値解析，応力解析
開発機関	東電設計株式会社，川崎重工業株式会社
開発時期	2000年
使用したバージョン	Ver. 6.1.3c
コードの概要	<p>本解析コードは，配管の強度解析を目的として開発された計算機プログラムである。本解析コードは，汎用構造解析コードSAP-Vをメインプログラムとし，応力評価プログラム及びそれらのインターフェイスプログラムのサブプログラムから成る。</p> <p>任意の1次元，2次元あるいは3次元形状に対し，静的解析，動的解析を行うことが可能で，反力・モーメント・応力，固有値・刺激係数等の算出が可能である。</p> <p>原子力の分野における使用実績を有している。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・配管系応力解析プログラム *1の計算データと本解析コードによる計算結果を比較し，よく合致していることを確認している。 ・応力評価プログラムについては，メインプログラムの出力結果（軸力，モーメント）から，適用技術基準（JSME *2，JEAG *3等）に基づいて応力評価が正しく計算されていることを確認している。 ・サブプログラムについては，インターフェイスチェックシートを用いて，単位，桁数，符号が変換前後で正しく処理されていることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子力の分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。

	<p>・今回の工事計画認可申請で行うはりモデルによる管の応力解析の用途，適用範囲が，上述の妥当性確認範囲にあることを確認している。</p>
--	-----------------------------------------------------------------------

注記*1:

*2: 発電用原子力設備規格（設計・建設規格(2005年版(2007年追補版含む。))
J S M E S N C 1 -2005/2007) (日本機械学会2007年9月)

*3: 原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1
・補-1984, J E A G 4 6 0 1 -1987及びJ E A G 4 6 0 1 -1991 追補版）
(日本電気協会 電気技術基準調査委員会 昭和59年9月, 昭和62年8月及び平成3年6月)

2.2 NuPIAS Ver. 6.1.4

項目	コード名 NuPIAS
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル）による管の固有値解析，応力解析
開発機関	東電設計株式会社，川崎重工業株式会社
開発時期	2000年
使用したバージョン	Ver. 6.1.4
コードの概要	<p>本解析コードは，配管の強度解析を目的として開発された計算機プログラムである。本解析コードは，汎用構造解析コードSAP-Vをメインプログラムとし，応力評価プログラム及びそれらのインターフェイスプログラムのサブプログラムから成る。</p> <p>任意の1次元，2次元あるいは3次元形状に対し，静的解析，動的解析を行うことが可能で，反力・モーメント・応力，固有値・刺激係数等の算出が可能である。</p> <p>原子力の分野における使用実績を有している。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実績のあるNuPIAS Ver. 6.1.3c から本解析で使用したNuPIAS Ver. 6.1.4 までのバージョンアップにおいて，本解析で使用するコマンドに関して解析結果に影響するプログラム変更がないことを各バージョンのリリースノートより確認した。 ・最新バージョンへの改訂において，解析結果に大きな影響を与える不具合に伴う改訂が行われていないことを確認した。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・バージョンの差分は，解析結果から得られる節点の加速度及び変位を整理するものであり，今回の使用範囲における解析結果に影響を及ぼさない。 ・本解析における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3. NuPIAS Ver. 6.1.3c, Ver. 6.14の解析手法

3.1 一般事項

本解析コードには、3次元トラスやビーム、平面応力など数多くの要素が用意されており、それらを用いて1次元、2次元あるいは3次元の静的解析及び動的解析を行う。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードの処理能力は主に解析する問題の総節点数と必要となる固有値の数（動的解析の場合）に依存し、要素数、荷重条件数、剛性マトリックスの次数やバンド幅などに特別の制限はない。

各節点は、0から6自由度まで設定することができる。

構造マトリックスの誘導は静的解析、動的解析共に同様である。静的解析では釣合い方程式を解いた後、要素の応力を算出する。動的解析では次の選択ができる。

- (a) 固有値解析
- (b) 時刻歴応答解析
- (c) 応答スペクトル解析

3.3 解析手法

3.3.1 運動方程式

節点の運動方程式を以下に示す。

$$[m] \cdot \{\ddot{u}\} + [c] \cdot \{\dot{u}\} + [k] \cdot \{u\} = \{R\} \dots\dots\dots (3. 1)$$

ここで $[k]$, $[c]$, $[m]$ は剛性, 減衰及び質量マトリックスであり $\{u\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{\ddot{u}\}$, $\{R\}$ は変位, 速度, 加速度及び荷重ベクトルを表す。構造マトリックスは要素マトリックスを直接合成して得られる。

例えば

$$[k] = \Sigma [k_m] \dots\dots\dots (3. 2)$$

ここで, $[k_m]$ はm番目の要素の剛性マトリックスである。

本解析コードでは、上記方程式の解法として質点系モデル(lumped Mass)による解析を採用している。したがって、系の質量は、個々の要素の質量マトリックスに、節点に付加している集中質量を加えた対角マトリックスとなる。また、減衰はレイリー減衰 (Rayleigh Damping: $[c] = \alpha [m] + \beta [k]$, α

及び β は比例定数) を採用している。

3.3.2 静的解析

静的解析では(3. 1)式において $\{\ddot{\mathbf{u}}\} = \{\dot{\mathbf{u}}\} = 0$ とした次の釣合い方程式を解き、各要素の応力を算出する。

$$[\mathbf{k}] \cdot \{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{R}\} \cdots \cdots \cdots (3. 3)$$

本解析コードでは、方程式の解である節点の変位を正定値行列によるガウスの消去法にて求め、次に応力一ひずみマトリックスより要素の応力を求める。

3.3.3 固有値解析

固有値解析では、(3. 1)式において $[\mathbf{c}] = \{\mathbf{R}\} = 0$ とした以下の固有方程式を解き、固有値と振動モードを求める。

$$[\mathbf{k}] \cdot \{\phi\} = [\mathbf{m}] \cdot \{\phi\} \cdot \omega^2 \cdots \cdots \cdots (3. 4)$$

ここで、 ω は固有角振動数、 $\{\phi\}$ は固有ベクトルを表す。

本解析コードでは、 p 次までの固有値及び固有ベクトルが必要であると仮定している。したがって、(3. 5)式は下式にて表される。

$$[\mathbf{k}] \cdot [\Phi] = [\mathbf{m}] \cdot [\Phi] \cdot [\Omega^2] \cdots \cdots \cdots (3. 5)$$

ここで、 $[\Omega^2]$ は対角ベクトルである $[\Omega^2] = \text{diag}(\omega_1^2)$ 、かつ $[\Phi]$ は直交する固有ベクトル $\{\phi_1\}$ 、 $\{\phi_2\} \cdots \{\phi_p\}$ を列に持つマトリックスである。

(3. 5)式を解く方法として2つの方法があり、ひとつは $[\mathbf{k}]$ の次数及びバンド幅が小さい時の解法である行列式探索法 (Determinant Search Method) , もうひとつは $[\mathbf{k}]$ の次数及びバンド幅が大きい時の解法であるサブスペース法 (Subspace Method) が用意されている。

3.3.4 動的応答解析

動的応答解析は、次の方程式で表される。

$$[\mathbf{m}] \cdot \{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{c}] \cdot \{\dot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{k}] \cdot \{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{R}(t)\} \cdots (3. 6)$$

ここで、 $\{\mathbf{R}(t)\}$ は時間依存荷重又は基準面の動きより生じる荷重のベクトルである。特に地震による動的応答計算の場合のように基準面が動く場合

は、構造物が一様な基準面の加速度 $\{\ddot{u}_g\}$ を受けているとして、下式のごとく表される。

$$[m] \cdot \{\ddot{u}_r\} + [c] \cdot \{\dot{u}_r\} + [k] \cdot \{u_r\} = - [m] \cdot \{\ddot{u}_g\} \dots\dots\dots(3. 7)$$

ここで、 $\{u_r\}$ は基準面に関する構造物の相対変位量、即ち $\{u_r\} = \{u\} - \{u_g\}$ である。

本解析コードでは、(3. 6)式及び(3. 7)式を時刻歴応答解析法、(3. 7)式を応答スペクトル法にて解くことができ、どちらもモードの重ね合わせ（モーダル解析）を使用している。

(1) モーダル解析法による時刻歴応答解析

モーダル解析法では、構造物の応答は p 次 ($p \ll n$) までの振動モードで表現できると仮定している。ここで、 n は全自由度を示す。

$\{u\} = [\Phi] \cdot \{X\}$ ($[\Phi]$ は、その列が p 個の直交する固有ベクトル $\{\phi_1\}$, $\{\phi_p\}$ を列に持つマトリックス) の変換を行い、

$[\Phi]^T \cdot [m] \cdot [\Phi] = [1]$ として正規化して(3. 6)式に代入すると次のようになる。

$$\{\ddot{X}\} + [\Delta] \cdot \{\dot{X}\} + [\Omega^2] \cdot \{X\} = [\Phi]^T \cdot \{R\} \dots\dots\dots(3. 8)$$

ここで、 $[\Delta] = \text{diag}(2 \cdot \omega_i \cdot \xi_i)$, $[\Omega^2] = \text{diag}(\omega_i^2)$ である。

また、 ω_i は i 次モードの固有角振動数、 ξ_i は i 次モードの減衰比を示し、減衰マトリックス $[c]$ は次のような直交条件を満たすと仮定している。

$$\{\phi_i\}^T \cdot [c] \cdot \{\phi_j\} = 0 \quad (i \neq j) \dots\dots\dots(3. 9)$$

したがって、(3. 8)式は p 個の非連成2次の微分方程式を表している。この微分方程式は、ウィルソンの θ 法にて解かれる。

(2) 応答スペクトル解析

応答スペクトル解析では、(3. 7)式における基準面の加速度を以下にて記述する。

$$\{\ddot{u}_g\} = \{\ddot{u}_{g_x}\} + \{\ddot{u}_{g_y}\} + \{\ddot{u}_{g_z}\} \cdots \cdots \cdots (3. 10)$$

ここで、 $\{\ddot{u}_{g_x}\} + \{\ddot{u}_{g_y}\} + \{\ddot{u}_{g_z}\}$ は、 x, y, z 方向への基準面の加速度である。したがって、 r 次のモードにおける応答式は下式として表される。

$$\begin{aligned} \{\ddot{X}_r\} + 2 \cdot \xi_r \cdot \omega_r \cdot \{\dot{X}_r\} + \omega_r^2 \cdot \{X_r\} \\ = \{r_{r_x}\} + \{r_{r_y}\} + \{r_{r_z}\} \cdots \cdots \cdots (3. 11) \end{aligned}$$

ここで、 X_r は r 次における $\{X\}$ の要素であり、かつ

$$\begin{aligned} \{r_{r_x}\} &= -\{\phi_r\}^T \cdot [m] \cdot \{\ddot{u}_{g_x}\}, \\ \{r_{r_y}\} &= -\{\phi_r\}^T \cdot [m] \cdot \{\ddot{u}_{g_y}\}, \\ \{r_{r_z}\} &= -\{\phi_r\}^T \cdot [m] \cdot \{\ddot{u}_{g_z}\} \end{aligned}$$

(3. 11) 式から、 x 方向への最大の r 次の変位は、

$$\{u_{r_x}\}_{max} = \{\phi_r\} \cdot \beta_{r_x} \cdot S_x(\omega_r) \cdots \cdots \cdots (3. 12)$$

ここで、 β_{r_x} は r 次モードにおける刺激係数であり、

$$\beta_{r_x} = \frac{\{\phi_r\}^T \cdot [m] \cdot \{I_x\}}{\{\phi_r\}^T \cdot [m] \cdot \{I_r\}}$$

$S_x(\omega_r)$ は固有角振動数 ω_r に対応する x 方向のスペクトル変位であり、 I_x は x 方向のみ1で他は0のベクトルである。同様に

$$\{u_{r_y}\}_{max} = \{\phi_r\} \cdot \beta_{r_y} \cdot S_y(\omega_r) \cdots \cdots \cdots (3. 13)$$

$$\{u_{r_z}\}_{max} = \{\phi_r\} \cdot \beta_{r_z} \cdot S_z(\omega_r) \cdots \cdots \cdots (3. 14)$$

である。

本解析コードでは、1次から p 次までの振動による最大変位と応力を二乗和平方根法 (Square Root of the Sum of the Square) にて計算する。

3.4 解析フローチャート

本解析コードを用いて行う評価フローチャートを図3-1に示す。

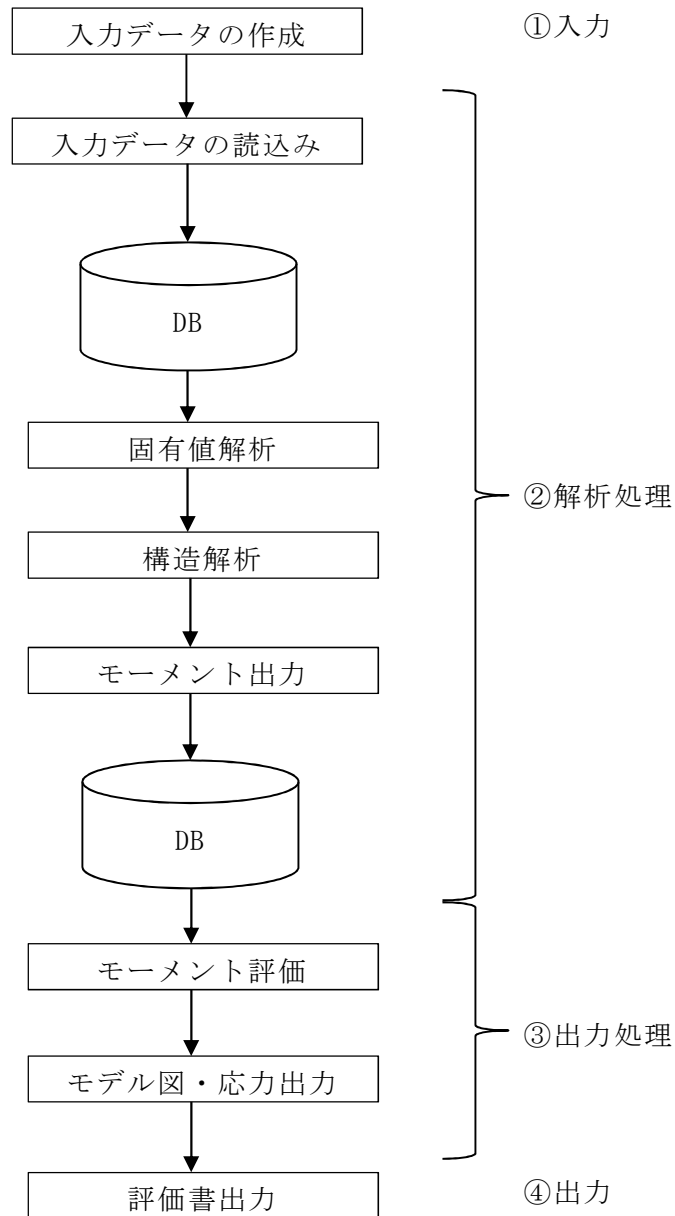
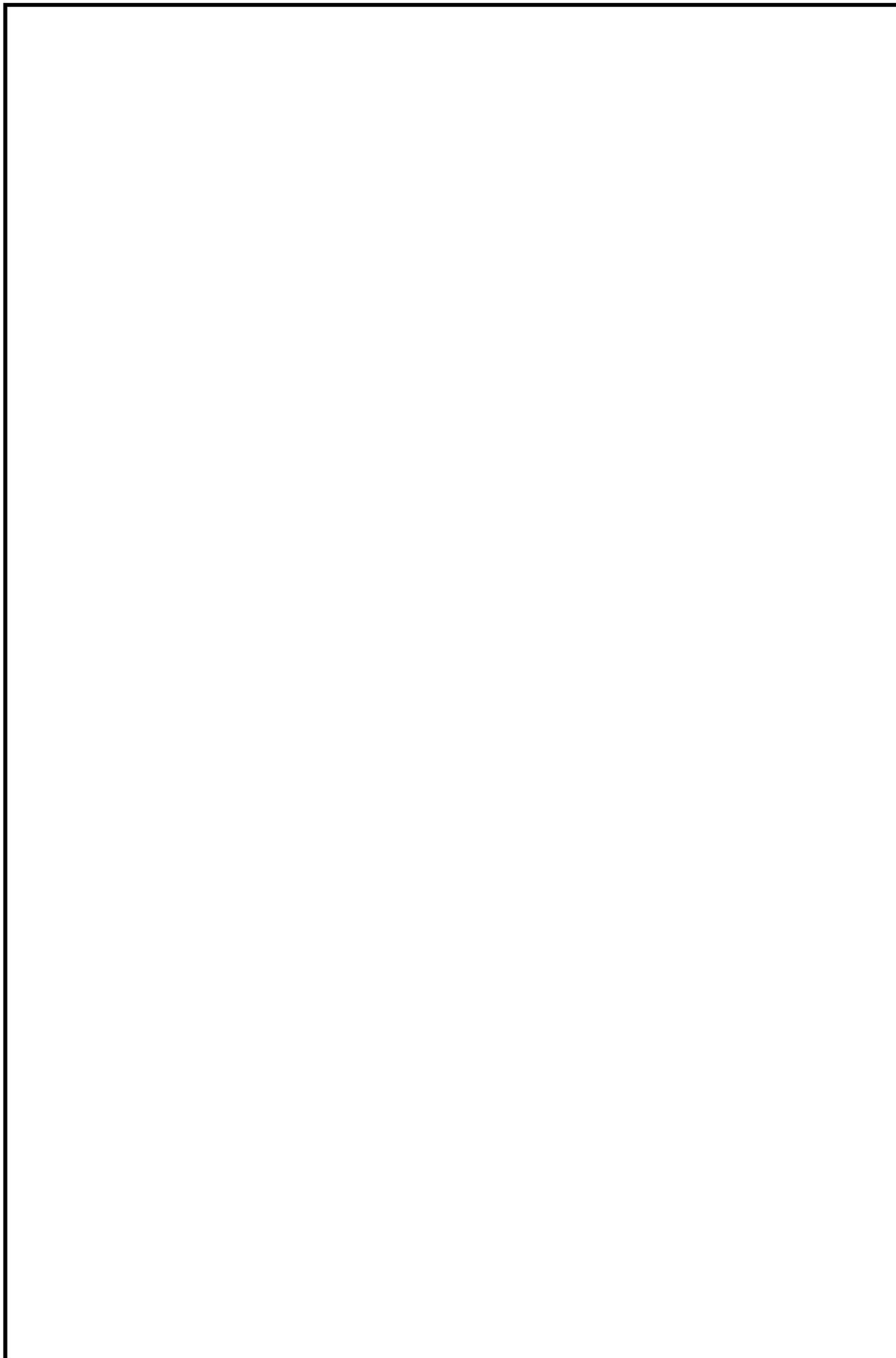
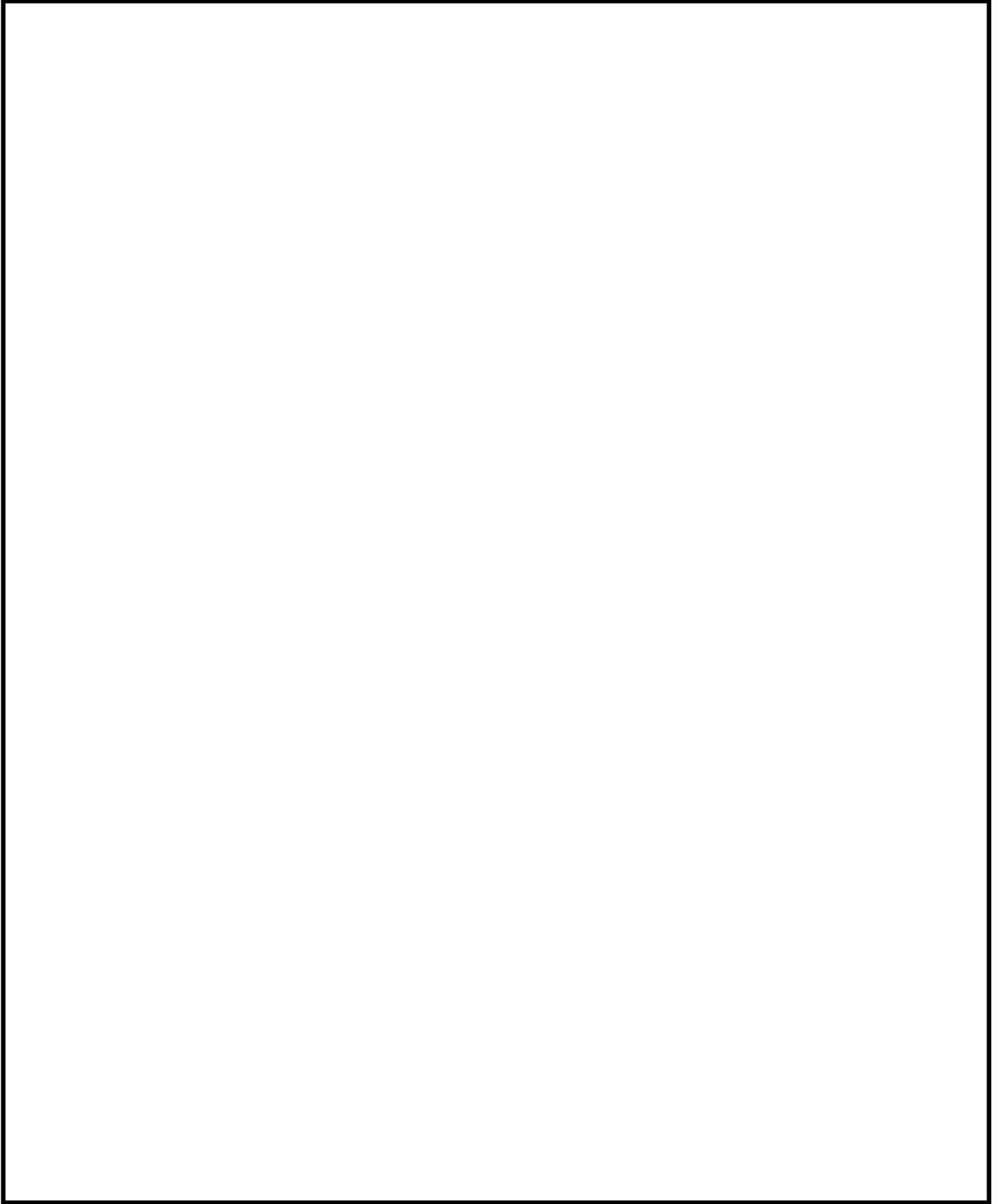


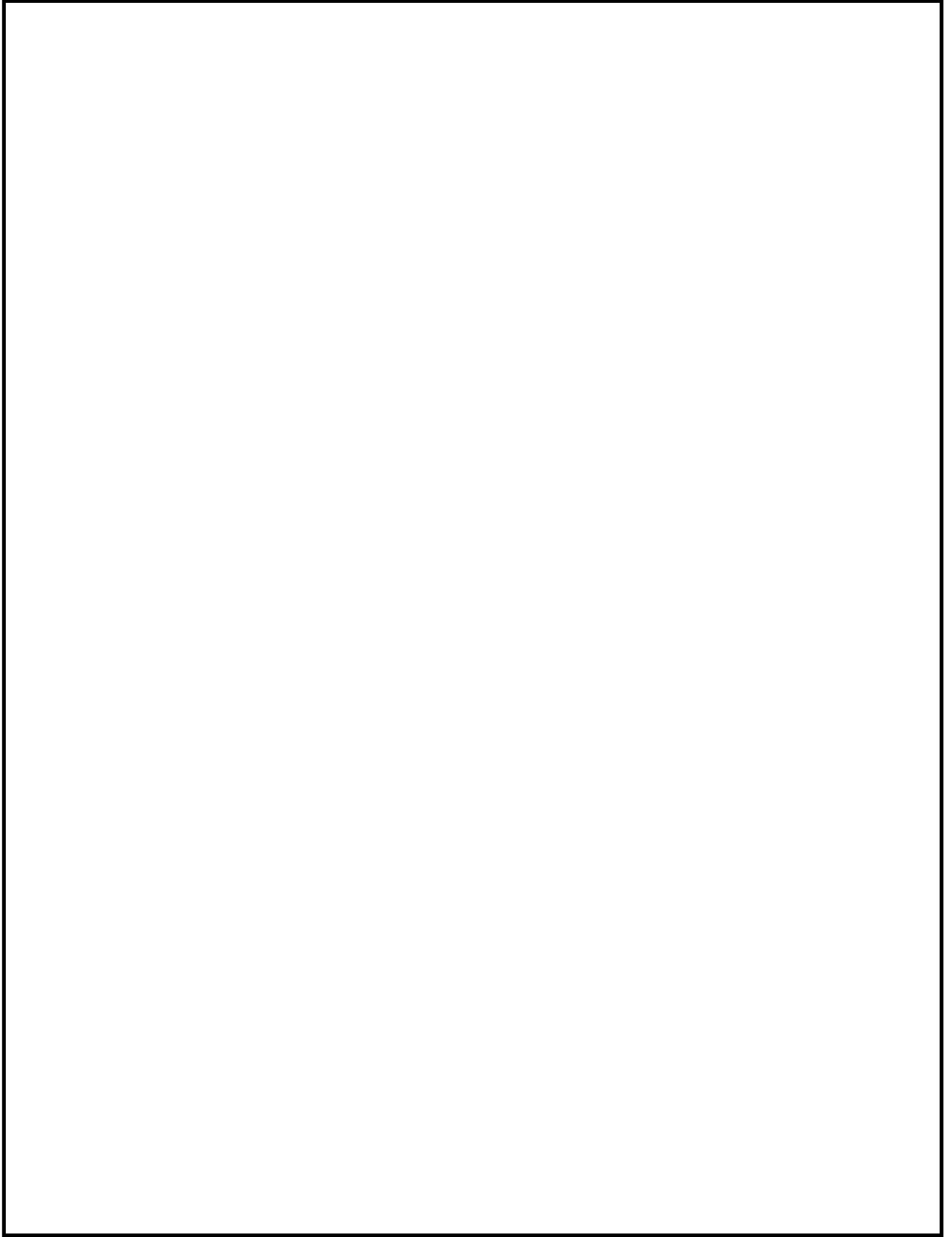
図3-1 計算機コード「N u P I A S」を用いた評価フロー

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

3.5.1 他コードとの比較による検証







3.5.2 使用内容に対する妥当性

本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。

- ・原子力の分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。
- ・今回の工事計画認可申請で行うはりモデルによる管の応力解析の用途，適用範囲が，上述の妥当性確認範囲にあることを確認している。

4. 参考文献

別紙 28 K A N S A S 2

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-別添 1-2-6	サブドレンシャフトの耐震性についての計算書	Ver. 6.01
V-2-2-別添 1-3-6	サブドレンシャフトの耐震性についての計算書	Ver. 6.01

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	KANSAS2
使用目的	はりモデルによる静的応力解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	2004年
使用したバージョン	Ver. 6.01
コードの概要	<p>KANSAS2（以下「本解析コード」という。）は、鹿島建設により開発された3次元応力解析（FEM要素含む）の計算機コードである。</p> <p>本解析コードは、微小変位理論による変位法を用いて、3次元骨組（FEM要素含む）の断面力・変位を算出するための構造解析プログラムである。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>本解析コードは、サブドレンシャフトの応力解析に使用している。</p> <p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、一般建築分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・はり要素を用いた応力解析について、本解析コードによる解析結果と文献（「4. 引用文献」参照）による一般構造力学による理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは、鹿島建設株式会社で開発した3次元骨組構造を対象としたプログラムであり、微小変位理論による変位法を用いて骨組モデルの応力・反力を算出するための構造解析プログラムである。

また、本解析コードは、サブドレンシャフトのはりモデルにおける静的応力解析に使用している。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴を以下に示す。

- ・3次元問題を対象として、はり要素、ばね要素、シェル要素等が用意されており、原子力発電所建屋他の骨組モデル解析に用いることができる。
- ・部材荷重、節点荷重及び強制変位を外力として指定できる。
- ・大規模問題も取り扱うために、入力データが簡素化されている。
- ・解析する座標及び拘束方法は、取り扱う問題にあったものを選ぶことができる。
- ・解析に用いる単位系は、SI単位系である。

3.3 解析理論

本解析コードの解析部分は微小変形理論に基づいており、節点変位を未知数とする多次元連立方程式を解くことによって所要の変位・応力・反力を算出する。

この連立方程式は、構造データから決定される剛性マトリックスと荷重データから決定される荷重ベクトルから構成される。

検討に用いた静的応力解析で使用する基本方程式は (1) 式で表される。

$$[\mathbf{K}]\{u\} = \{F\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$[\mathbf{K}]$: 剛性マトリックス

$\{u\}$: 変位ベクトル

$\{F\}$: 荷重ベクトル

3.4 解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを図3-1に示す。

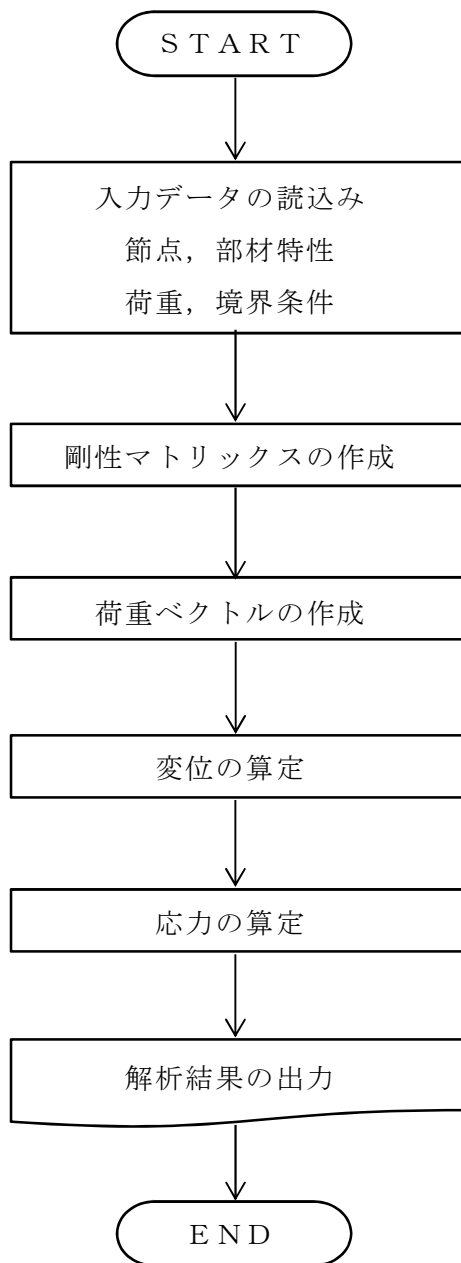


図 3-1 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

本解析コードは、「3.3 解析理論」に示した一般性のある理論に基づき構築された解析コードであり、「3.4 解析フローチャート」に示したプログラム構造を持っている。

本解析コードは、日本国内の数多くの原子力施設の工事計画認可申請における解析に使用された実績があるため、解析機能全般について十分な妥当性が確認されている。

こうした特徴を踏まえ、今回の解析機能に特化する形で、一般構造力学による理論解（以下「理論解」という。）と本解析コードによる解析解を比較し、本解析コードの解析機能の適切さを確認している。

3.5.1 検証 (Verification)

本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。

3.5.2 妥当性確認 (Validation)

(1) 妥当性確認方法

本解析コードによる妥当性確認は、はり要素による応力解析（門型ラーメン）を実施し、解析結果と理論解（「4. 引用文献」参照）が一致することの確認をもって行う。

(2) 解析条件

検証を行う梁部材の解析条件及び解析モデルを図 3-2 に、部材緒元を表 3-1 に示す。

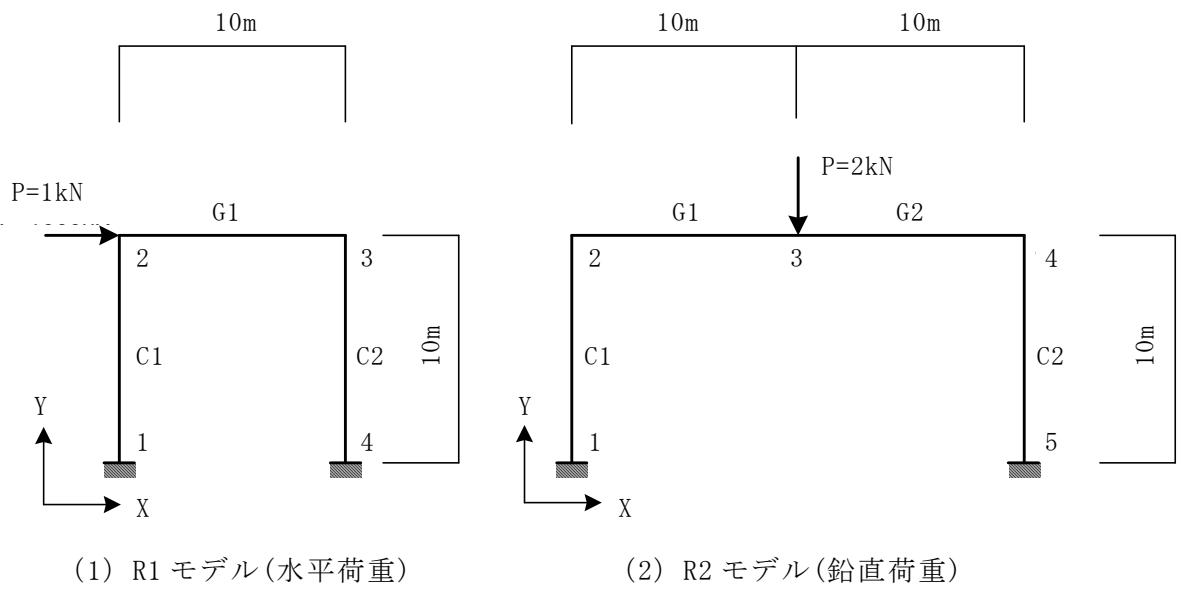


図 3-2 解析条件及び解析モデル

表 3-1 部材緒元

モデル	部材	断面積 A(cm ²)	断面 2 次モーメント I(cm ⁴)	備考
R1	C1, C2	1200	250000	水平荷重
	G1	1200	250000	
R2	C1, C2	1200	250000	鉛直荷重
	G1, G2	1200	500000	

注：ヤング係数 E=1kN/cm²

(3) 妥当性確認結果

荷重点の節点変位及び要素応力について、本解析コードによる解析結果と理論解（「4. 引用文献」参照）を比較して、水平荷重時を表 3-2、鉛直荷重時を表 3-3 に示す。

表 3-2 及び表 3-3 より、いずれのケースも両者は一致しており、本解析コードが発生変位及び応力を正しく評価していることを確認できる。

表 3-2 水平荷重時の解析結果の比較 (R1 モデル)

項目		本解析コード	理論式
変形	u_2 (cm)	238.095	238.095
	θ_2 (rad)	0.142857	0.142857
曲げ モーメント (kN・cm)	M_1	-285.714	-285.714
	M_2	214.286	214.286
	M_3	-214.286	-214.286
	M_4	285.714	285.714
反力 (kN)	H_1	0.5	0.5
	H_4	0.5	0.5
	V_1	-0.428571	-0.428571
	V_4	0.428571	0.428571

表 3-3 鉛直荷重時の解析結果の比較 (R2 モデル)

項目		本解析コード	理論式
変形	θ_2 (rad)	0.333333	0.333333
	v_3 (cm)	333.333	333.333
曲げ モーメント (kN・cm)	M_1	166.667	166.667
	M_2	-333.333	-333.333
	M_3	666.667	666.667
反力 (kN)	H_1	0.5	0.5
	V_1	1.0	1.0

3.5.3 まとめ

以上のとおり，本解析コードについては，原子力発電所において十分な使用実績を有しており，解析機能全般について，十分妥当性が確認されている。構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる簡素な体系について，はり要素を用いた静的応力解析結果と理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認した。

従って，本解析コードの当該機能は適切である。

また，上記に加えて，使用マニュアルにより，今回の工事認可申請で使用するはり要素を用いた静的応力解析に，本解析コードが適用できることを確認している。

従って，本解析コードを，静的応力解析に使用することは，妥当である。

4. 引用文献

成岡昌夫，服部正他：コンピュータによる構造工学講座Ⅱ-1-B，日本鋼構造協会編，骨組構造解析，培風館，昭和46年6月，pp.20～33

別紙 29 N U P P 4

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-別添 1-2-6	サブドレンシャフトの耐震性についての計算書	Ver. 1. 4. 11
V-2-2-別添 1-3-6	サブドレンシャフトの耐震性についての計算書	Ver. 1. 4. 11

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	N U P P 4
使用目的	はりー地盤ばねモデルによる時刻歴応答解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1967 年
使用したバージョン	Ver. 1. 4. 11
コードの概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子力発電所建屋の地震応答解析用として開発された質点系モデルによる解析計算機コードである。 ・ 静荷重（節点荷重）及び動荷重（節点加振力，地震入力）を，扱うことができる。 ・ 地震応答解析は，線形解析及び非線形解析を時間領域における数値積分により行うほか，線形解析を周波数領域で行うことが可能である。
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>本解析コードは，サブドレンシャフトの応答解析に使用している。</p> <p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本解析コードの計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。 ・ 本解析コードの運用環境について，動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認は，以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固有値解析，弾性地震応答解析については，一般産業界において使用実績のある D Y N A 2 E *¹ を用いて，同一諸元による解析を行い，本解析コードによる解析結果とほぼ一致することを確認している。 ・ 弾塑性地震応答解析については，既設工事認可申請時に確認されている（財）原子力発電技術機構の報告書*² による解析結果と概ね一致することを確認している。 ・ 今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

	<p>注記*1 : D Y N A 2 E : 販売元 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社</p> <p>*2 : 質点系モデル解析コード SANLUM の保守に関する 報告書 平成 10 年 3 月 (財)原子力発電技術機構 原子力安全解析所</p>
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

3. 解析手法

3.1 概要

本解析コードは、鹿島建設株式会社で開発した原子力発電所建屋を対象としたプログラムであり、時間領域並びに周波数領域における質点系はりモデルによる動的応答解析プログラムである。

本解析コードは、日本国内の原子力施設の工事計画認可申請において多くの利用実績のある地震応答解析コードNUPP及びNUPPⅡをバージョンアップしたものである。

3.2 本解析コードの特徴

本解析コードは、直接積分法・モーダル解析法による弾性解析及び直接積分法による弾塑性解析ができる解析コードである。以下に、今回の解析に使用する弾性及び弾塑性解析の機能を示す。

- (1) 本解析コードの解析機能の一例を以下に示す。
 - ・動的解析
 - ・静的解析
 - ・実固有値解析及び複素固有値解析
- (2) 2次元問題を対象として、はり要素、ばね要素、ダンパー要素等が用意されており、原子力発電所建屋他の構造物の解析に用いることができる。
- (3) 大規模問題も取り扱うために、入力データが簡素化されている。
- (4) 自由度の拘束方法は、取り扱う問題に合ったものを選ぶことができる。
- (5) 解析に用いる単位系は、ユーザが任意に統一して用いることができる。

3.3 解析理論

3.3.1 運動方程式

多自由度系の運動方程式は一般に(3.1)式で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、

- [M] : 質量マトリックス
- [C] : 減衰マトリックス
- [K] : 剛性マトリックス
- { \ddot{u} } : 加速度ベクトル
- { \dot{u} } : 速度ベクトル
- {u} : 変位ベクトル
- {F} : 荷重ベクトル

3.3.2 固有値の解法

(3.1)式は、荷重ベクトルを{0}とし、減衰項を除けば、(3.2)式に示す非減衰自由振動を表す方程式となる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

(3.2)式で変位{u}に調和振動を仮定すれば、(3.3)式が得られる。

$$(-\omega_s^2[M] + [K])\{\phi_s\} = \{0\} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

(3.3)式で固有ベクトル $\{\phi_s\} \neq \{0\}$ を満たす条件が固有値問題であり、(3.3)式を解くことにより固有値 ω_s と対応する固有ベクトル $\{\phi_s\}$ が得られる。

3.3.3 減衰項の策定

減衰項として、系の粘性減衰はひずみエネルギー比例型モード減衰を用いており、減衰定数は以下で表される。

$$h_s = \frac{\{\phi_s\}^T [H_K] \{\phi_s\}}{\{\phi_s\}^T [K] \{\phi_s\}} = \frac{\{\phi_s\}^T [H_K] \{\phi_s\}}{\omega_s^2 \{\phi_s\}^T [M] \{\phi_s\}} \dots\dots\dots (3. 4)$$

ただし

$$[H_K] = \sum_e^{\text{Element}} h_e [K_e]$$

ここで、

- h_s : s 次のモード減衰定数
- $\{\phi_s\}$: s 次のモードの構造全体のモードベクトル
- h_e : 要素 e の減衰定数
- $[K_e]$: 要素 e の全体座標系の局所剛性マトリックス
- $[K]$: 構造物全体の剛性マトリックス

h_e は、要素ごとに入力値として与え、 $\{\phi_s\}$ は、コードによる固有値解析により評価する。 $[K_e]$ は、入力した各要素の剛性を元に、コードにより評価される。

3.3.4 直接積分法による解法

直接積分法は、連立の微分方程式を直接積分するもので、時間を Δt 毎に分割し、時間ステップごとに、順次解を求めていく方法である、今回の解析で用いた Newmark- β 法 ($\beta = 1/4$) について以下に示す。

(3. 1) 式の運動方程式を増分形式で表すと (3. 5) 式となる。

$$M\{\Delta\ddot{u}\} + C\{\Delta\dot{u}\} + K\{\Delta u\} = -M\{1\}\Delta \alpha \dots\dots\dots (3. 5)$$

n ステップの変位 $\{u_n\}$ 、速度 $\{\dot{u}_n\}$ 、加速度 $\{\ddot{u}_n\}$ が既知の場合、次の n+1 ステップの変位増分、速度増分は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \{\Delta u_{n+1}\} &= \{u_{n+1}\} - \{u_n\} = \Delta t \left(\frac{\{\dot{u}_{n+1}\} + \{\dot{u}_n\}}{2} \right) \\ &= \Delta t \left(\frac{(\{\dot{u}_n\} + \{\Delta \dot{u}_{n+1}\}) + \{\dot{u}_n\}}{2} \right) = \Delta t \left(\{\dot{u}_n\} + \frac{\{\Delta \dot{u}_{n+1}\}}{2} \right) \dots\dots\dots (3. 6) \end{aligned}$$

$$\{\Delta \ddot{u}_{n+1}\} = \Delta t \left(\{\ddot{u}_n\} + \frac{\{\Delta \ddot{u}_{n+1}\}}{2} \right) \dots\dots\dots (3. 7)$$

(3. 6)式, (3. 7)式より

$$\{\Delta \dot{u}_{n+1}\} = \frac{2}{\Delta t} \{\Delta u_{n+1}\} - 2\{\dot{u}_n\} \dots\dots\dots (3. 8)$$

$$\{\Delta \ddot{u}_{n+1}\} = \frac{4}{\Delta t^2} \{\Delta u_{n+1}\} - \frac{4}{\Delta t} \{\dot{u}_n\} - 2\{\ddot{u}_n\} \dots\dots\dots (3. 9)$$

(3. 8)式, (3. 9)式を (3. 5) 式に代入し, $\{\Delta u_{n+1}\}$ に関して解く。

$$\begin{aligned} &M \left(\frac{4}{\Delta t^2} \{\Delta u_{n+1}\} - \frac{4}{\Delta t} \{\dot{u}_n\} - 2\{\ddot{u}_n\} \right) + C \left(\frac{2}{\Delta t} \{\Delta u_{n+1}\} - 2\{\dot{u}_n\} \right) + K \{\Delta u_{n+1}\} = -M\{1\} \Delta \alpha \\ \Rightarrow &\left(M \frac{4}{\Delta t^2} + C \frac{2}{\Delta t} + K \right) \{\Delta u_{n+1}\} = -M\{1\} \Delta \alpha + M \left(\frac{4}{\Delta t} \{\dot{u}_n\} + 2\{\ddot{u}_n\} \right) + C(2\{\dot{u}_n\}) \\ \Rightarrow &\{\Delta u_{n+1}\} = \left(M \frac{4}{\Delta t^2} + C \frac{2}{\Delta t} + K \right)^{-1} \left(-M\{1\} \Delta \alpha + M \left(\frac{4}{\Delta t} \{\dot{u}_n\} + 2\{\ddot{u}_n\} \right) + C(2\{\dot{u}_n\}) \right) \\ &\dots\dots\dots (3. 10) \end{aligned}$$

(3. 10)式を解くと, n+1 ステップの変位増分が得られる。また, (3. 8)式, (3. 9)式を用いて n+1 ステップの速度増分及び加速度増分が得られる。

3.4 解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを図 3-1 に示す。

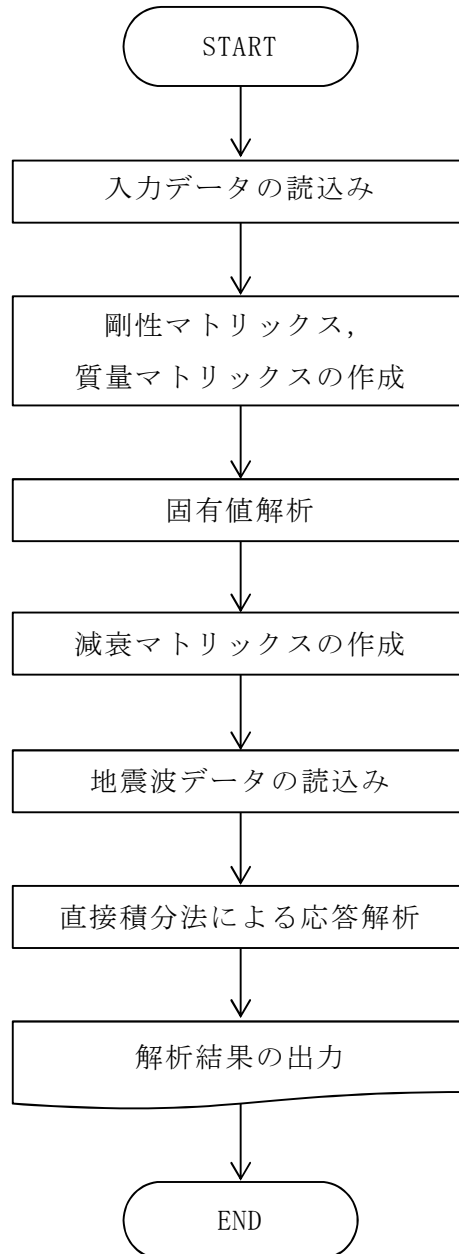


図 3-1 解析フローチャート

3.5 検証(Verification)と妥当性確認(Validation)

本解析コードは、「3.3 解析理論」に示す一般的な理論モデルに基づき構築された解析コードであり、「3.4 解析フローチャート」に示したプログラム構造を持っている。

本解析コードは日本国内の原子力施設における建築物の地震応答解析において数多くの工事計画認可申請に使用されているNUPP及びNUPPⅡについて使用計算機(OS)の変更に伴うカスタマイズを施したものであり、解析に係る部分は変更していないため、解析機能全般について十分な妥当性が確認されている。

このような特徴を踏まえ、本解析コードのうち今回使用する解析機能に特化する形で、一般産業界において多数の解析で使用実績のあるDYNAGE^{*1}及び(財)原子力発電技術機構が保有していた解析コードSANLUMの報告書^{*2}(以下「原機構」という。)とのコードベンチマークを行うことにより、本解析コードの解析機能の適切さを確認した。

原機構は、解析技術の高度化に合わせて、建屋の非線形履歴特性、浮上り非線形等へのコード改良が実施されており、解析コードの保守に関する報告書として公開されている。

注記*1 : DYNAGE : 販売元 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

*2 : 質点系モデル解析コードSANLUMの保守に関する報告書

平成10年3月 (財)原子力発電技術機構 原子力安全解析所

3.5.1 検証(Verification)

本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。

3.5.2 妥当性確認(Validation)

(1) 固有値解析

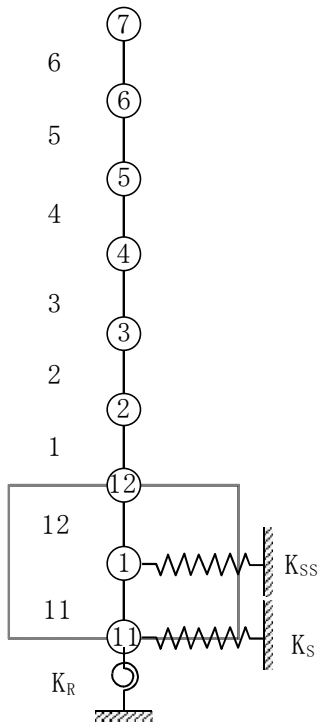
a. 妥当性確認方法

本解析コードによる固有値解析の妥当性確認は、地盤ばねを有する多質点系はりモデルを対象として、本解析コードによる解析結果とDYNAGEによる解析結果が一致することにより行う。

また、本解析コードのバージョン毎の解析結果についても確認する。

b. 解析条件

解析モデル及び解析条件を図3-2に示す。



建屋系減衰定数 $h=5\%$

解析条件

Newmark- β 法積分
ひずみエネルギー比例型減衰

質点番号	高さ (m)	重量 (tf)	せん断面積 (m ²)	断面2次モーメント (m ⁴)	要素番号
7	62.5	2517			
6	51.8	3762	46.3	0.3143×10^5	6
5	45.3	23087	74.1	0.6005×10^5	5
4	34.3	46042	256.3	2.325×10^5	4
3	26.5	45609	447.3	5.137×10^5	3
2	17.5	84535	589.4	9.689×10^5	2
12	2.5	—	763.1	11.03×10^5	1
1	0.0	—	1.0×10^6	1.0×10^9	12
11	-2.5	124597	1.0×10^6	1.0×10^9	11
11	回転慣性 (tf・m ²)	1.7287×10^8	ヤング係数 : 2.1×10^6 tf/m ² せん断弾性係数 : 0.9×10^6 tf/m ²		

ばね定数・減衰定数

$K_S = 4.445 \times 10^7$ tf/m $h_S = 20\%$
 $K_{SS} = 1.559 \times 10^7$ tf/m $h_{SS} = 10\%$
 $K_R = 6.987 \times 10^{10}$ tfm/rad $h_R = 7.5\%$

図 3-2 解析モデル及び解析条件

c. 妥当性確認結果

本解析コードとD Y N A 2 Eにおける各次数の固有周期及びモーダル減衰の解析結果を表 3-1 に示す。本解析コードとD Y N A 2 Eの解析結果は同一条件、同一手法による結果であり、両者は一致していることから、本解析コードは正しく評価していることが確認できる。

また、表 3-2 に示す本解析コードのバージョン毎の解析結果に違いがないことが確認できる。

表 3-1 固有値解析結果 (D Y N A 2 E との比較)

次数	固有周期 (秒)		モーダル減衰 (%)	
	N U P P 4	D Y N A 2 E	N U P P 4	D Y N A 2 E
1	0.245	0.245	8.84	8.84
2	0.107	0.107	11.52	11.52
3	0.084	0.084	5.98	5.98
4	0.067	0.067	7.17	7.17

表 3-2 バージョン毎の固有値解析結果

固有周期 (秒)

次数	バージョン 1.4.6	バージョン 1.4.7	バージョン 1.4.8	バージョン 1.4.9	バージョン 1.4.10	バージョン 1.4.11	バージョン 1.4.12
1	0.245	0.245	0.245	0.245	0.245	0.245	0.245
2	0.107	0.107	0.107	0.107	0.107	0.107	0.107
3	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084
4	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067

モーダル減衰 (%)

次数	バージョン 1.4.6	バージョン 1.4.7	バージョン 1.4.8	バージョン 1.4.9	バージョン 1.4.10	バージョン 1.4.11	バージョン 1.4.12
1	8.84	8.84	8.84	8.84	8.84	8.84	8.84
2	11.52	11.52	11.52	11.52	11.52	11.52	11.52
3	5.98	5.98	5.98	5.98	5.98	5.98	5.98
4	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17

(2) 弾性地震応答解析

a. 妥当性確認方法

本解析コードによる弾性地震応答解析の妥当性確認は、(1)固有値解析と同じモデルについての本解析コードによる解析結果とD Y N A 2 Eによる解析結果が一致することにより行う。

また、本解析コードのバージョン毎の解析結果についても確認する。

b. 解析条件

解析モデル及び解析の諸条件を以下に示す。

- ・解析モデル : 固有値解析と同様 (図 3-2 参照)
- ・モデル諸元 : 固有値解析と同様 (図 3-2 参照)
- ・応答解析手法 : 直接積分法
- ・積分手法 : Newmark- β 法 ($\beta=1/4$: 平均加速度法)
- ・積分ステップ : 入力動時間刻み $\Delta t=0.01$ 秒
- ・減衰評価 : ひずみエネルギー比例型減衰
- ・入力地震動 : 高地震帯用の近距離地震 (エルセントロ波位相 : M7.0, 震源距離 20km) (図 3-3 参照)。

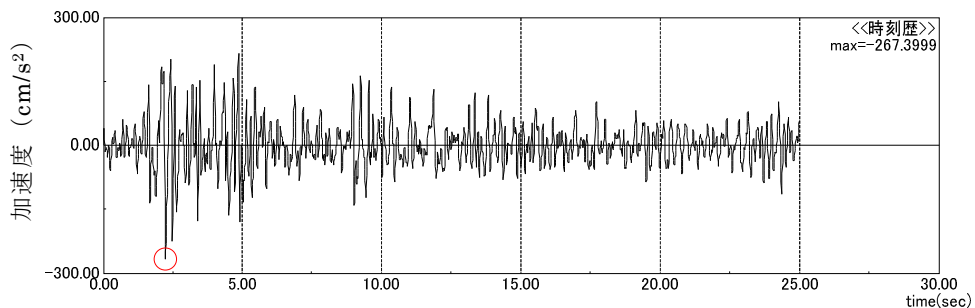


図 3-3 入力地震動の加速度時刻歴波形

c. 妥当性確認結果

本解析コードとD Y N A 2 Eにおける最大応答加速度，最大応答変位，最大応答せん断力及び最大応答曲げモーメントの解析結果を表 3-3 及び表 3-4 に示す。本解析コードとD Y N A 2 Eの解析結果は同一条件，同一手法の結果であり，ほぼ一致していることから，正しく評価していることが確認できる。

また，表 3-5 及び表 3-6 に示す本解析コードのバージョン毎の解析結果に違いがないことが確認できる。

表 3-3 弾性地震応答解析結果：節点応答値（D Y N A 2 Eとの比較）

質点	最大応答加速度 (cm/s ²)		最大応答変位 (cm)	
	N U P P 4	D Y N A 2 E	N U P P 4	D Y N A 2 E
7	1660.0	1659.7	1.818	1.818
6	1312.3	1312.3	1.578	1.578
5	1077.5	1077.5	1.411	1.411
4	753.5	753.5	1.120	1.120
3	594.1	594.2	0.902	0.902
2	524.3	524.3	0.677	0.677
11	386.8	386.8	0.275	0.275
12	370.8	370.8	0.305	0.305

表 3-4 弾性地震応答解析結果：部材応答値（D Y N A 2 Eとの比較）

要素	最大応答せん断力 ×10 ⁴ (tonf)		最大応答曲げモーメント ×10 ⁵ (tonf・m)	
	N U P P 4	D Y N A 2 E	N U P P 4	D Y N A 2 E
6	0.421	0.420	0.45	0.45
5	0.912	0.912	1.04	1.04
4	3.430	3.430	4.81	4.81
3	6.855	6.855	10.16	10.16
2	9.374	9.374	18.60	18.59
1	12.377	12.377	37.16	37.16

表 3-5 バージョン毎の応答結果：節点応答値
最大応答加速度 (cm/s²)

質点	バージョン 1.4.6	バージョン 1.4.7	バージョン 1.4.8	バージョン 1.4.9	バージョン 1.4.10	バージョン 1.4.11	バージョン 1.4.12
7	1660.0	1660.0	1660.0	1660.0	1660.0	1660.0	1660.0
6	1312.3	1312.3	1312.3	1312.3	1312.3	1312.3	1312.3
5	1077.5	1077.5	1077.5	1077.5	1077.5	1077.5	1077.5
4	753.5	753.5	753.5	753.5	753.5	753.5	753.5
3	594.1	594.1	594.1	594.1	594.1	594.1	594.1
2	524.3	524.3	524.3	524.3	524.3	524.3	524.3
11	386.8	386.8	386.8	386.8	386.8	386.8	386.8
12	370.8	370.8	370.8	370.8	370.8	370.8	370.8

最大応答変位 (cm)

質点	バージョン 1.4.6	バージョン 1.4.7	バージョン 1.4.8	バージョン 1.4.9	バージョン 1.4.10	バージョン 1.4.11	バージョン 1.4.12
7	1.818	1.818	1.818	1.818	1.818	1.818	1.818
6	1.578	1.578	1.578	1.578	1.578	1.578	1.578
5	1.411	1.411	1.411	1.411	1.411	1.411	1.411
4	1.120	1.120	1.120	1.120	1.120	1.120	1.120
3	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902
2	0.677	0.677	0.677	0.677	0.677	0.677	0.677
11	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275
12	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305

表 3-6 バージョン毎の応答結果：部材応答値

最大応答せん断力 ($\times 10^4 \text{tonf}$)

要素	バージョン 1.4.6	バージョン 1.4.7	バージョン 1.4.8	バージョン 1.4.9	バージョン 1.4.10	バージョン 1.4.11	バージョン 1.4.12
6	0.421	0.421	0.421	0.421	0.421	0.421	0.421
5	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912
4	3.430	3.430	3.430	3.430	3.430	3.430	3.430
3	6.855	6.855	6.855	6.855	6.855	6.855	6.855
2	9.374	9.374	9.374	9.374	9.374	9.374	9.374
1	12.377	12.377	12.377	12.377	12.377	12.377	12.377

最大応答曲げモーメント ($\times 10^5 \text{tonf} \cdot \text{m}$)

要素	バージョン 1.4.6	バージョン 1.4.7	バージョン 1.4.8	バージョン 1.4.9	バージョン 1.4.10	バージョン 1.4.11	バージョン 1.4.12
6	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
5	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
4	4.81	4.81	4.81	4.81	4.81	4.81	4.81
3	10.16	10.16	10.16	10.16	10.16	10.16	10.16
2	18.60	18.60	18.60	18.60	18.60	18.60	18.60
1	37.16	37.16	37.16	37.16	37.16	37.16	37.16

(3) 弾塑性地震応答解析

a. 妥当性確認方法

本解析コードによる弾塑性地震応答解析の妥当性確認は、本解析コードによる解析結果と原機構による解析結果が一致することにより行う。

b. 解析条件

原機構の解析モデル及び解析の諸条件を以下に示す。

- ・解析モデル : 図 3-4 参照
- ・モデル諸元 : 表 3-7～表 3-10 参照
- ・応答解析手法 : 直接積分法
- ・積分手法 : Newmark- β 法 ($\beta=1/4$: 平均加速度法)
- ・積分ステップ : 入力動時間刻み $\Delta t=0.01$ 秒の 1/10
- ・減衰評価 : ひずみエネルギー比例型減衰
- ・入力地震動 : 基準地震動 S_2 の 2 倍
(図 3-5 及び図 3-6 参照)
- ・復元力特性 : せん断非線形 ($\tau - \gamma$), 曲げ非線形 ($M - \phi$) を考慮, 地盤の非線形は考慮しない。
- ・スケルトンカーブ : トリリニア型 (図 3-7 及び表 3-11～表 3-13 参照)
- ・履歴特性 : 最大点指向型 (図 3-7 参照)

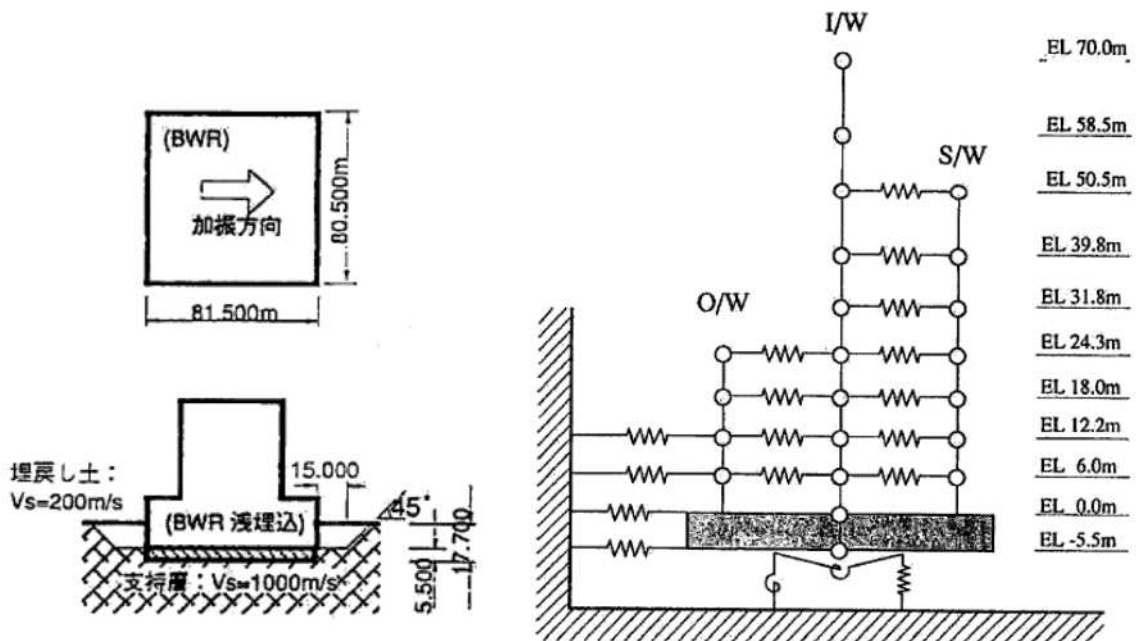
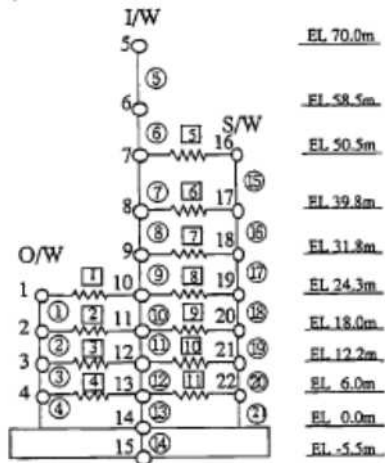


図 3-4 解析モデル

表 3-7 建屋解析諸元 (水平方向)

建屋	質点番号	レベル (m)	重量 (ton)	回転慣性 $10^6 (t \cdot m^2)$	要素番号	せん断 断面積 $A_s (m^2)$	断面2次 モーメント $I (\times 10^4 m^4)$
O/W	1	EL. 24.3	2440	2.497	1	189.8	24.54
	2	EL. 18.0	8470	8.271	2	214.8	27.50
	3	EL. 12.2	7590	7.256	3	244.2	31.45
	4	EL. 6.0	6850	5.320	4	244.2	31.45
I/W	5	EL. 70.0	3520	0.730	5	54.6	2.97
	6	EL. 58.5	4050	0.840	6	70.8	3.76
	7	EL. 50.5	9990	3.032	7	95.8	4.96
	8	EL. 39.8	15200	4.696	8	140.8	7.18
	9	EL. 31.8	11810	6.426	9	175.2	8.84
	10	EL. 24.3	15260	9.663	10	282.3	14.56
	11	EL. 18.0	23050	13.899	11	291.6	14.58
	12	EL. 12.2	20890	10.536	12	290.0	14.58
	13	EL. 6.0	17840	10.421	13	290.0	14.58
	14	EL. 0.0	67460	37.44	14	1.0×10^6	1.0×10^8
S/W	15	EL. 50.5	5210	0.130	15	89.0	0.33
	16	EL. 39.8	14130	1.442	16	65.8	0.81
	17	EL. 31.8	7720	0.641	17	76.2	1.25
	18	EL. 24.3	7500	1.124	18	85.7	1.77
	19	EL. 18.0	15310	2.530	19	91.8	2.43
	20	EL. 12.2	6400	0.593	20	91.8	2.43
計			320450		21	91.8	2.43
					1	74.9	
					2	118.0	O/W - I/W ($\times 10^5 t/m$)
					3	65.3	
					4	52.4	
					5	16.0	
					6	43.1	I/W - S/W ($\times 10^5 t/m$)
					7	42.5	
					8	35.0	
					9	103.0	
					10	86.7	
					11	56.3	



水平方向モデル

表 3-8 建屋解析諸元 (鉛直方向)

質点番号 (ノ.層)	質点重量 W (t)	要素番号 (ノ.層)	軸断面積 A _n (m ²)	要素番号	上下繋ぎばね k _s (×10 ⁵ t/m)
1	4554	1	445.76	1	20.2
2	15807	2	445.76	2	38.7
3	14165	3	508.16	3	38.4
4	12784	4	508.16	4	39.1
(L.層)	W (t)	(L.層)	A _n (m ²)	5	21.2
5	3520	5	61.02	6	23.8
6	4050	6	81.20		
7	9990	7	161.12		
8	15200	8	297.90		
9	11810	9	374.30		
10	13146	10	374.30		
11	15713	11	374.30		
12	14315	12	374.30		
13	11906	13	374.30		
14	67460	14	6560.75		
15	43300				
(S.層)	W (t)	(S.層)	A _n (m ²)		
16	5210	15	97.53		
17	14130	16	131.44		
18	7720	17	152.45		
19	7500	18	171.25		
20	15310	19	183.67		
21	6400	20	183.67		
22	6460	21	183.67		
計	320450				

表 3-9 材料定数

ヤング係数 E(t/cm ²)	せん断弾性係数 G(t/cm ²)	コンクリート圧縮強度 Fc(kg/cm ²)	減衰定数 (%)
230	99	240	5

表 3-10 地盤ばね定数

せん断波速度	部位	ばね剛性		減衰係数	
		K (t/cm)	K (t/cm /rad)	C (t/cm s)	C (t/cm s/rad)
V _s 1000m/s	側面ばね	EL.12.2	6977E+03	4930E+02	
		EL.6.0	1553E+04	9701E+02	
		EL.0.0	3195E+04	1592E+03	
		EL.-6.5	2351E+04	1215E+03	
	底面ばね	水平	4360E+05	1092E+04	
		回転	8065E+12	4493E+10	
		上下	2985E+05	2151E+04	

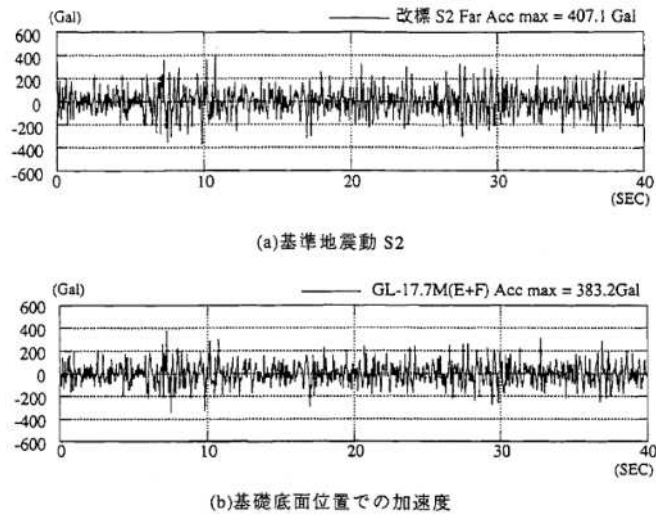


図 3-5 基準地震動 S₂ 及び基礎版底面位置での加速度波（解析は 2 × S₂）

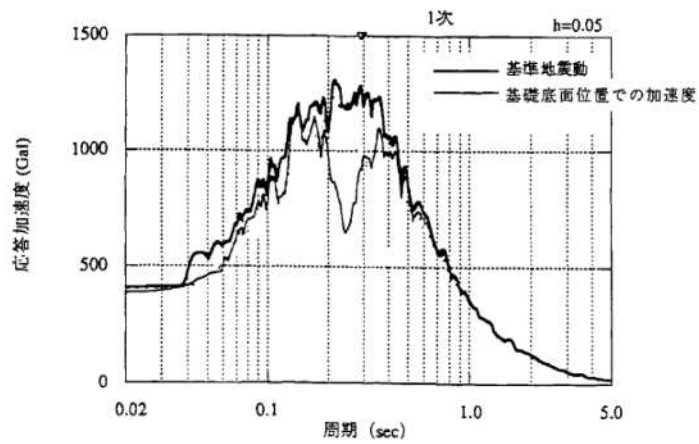
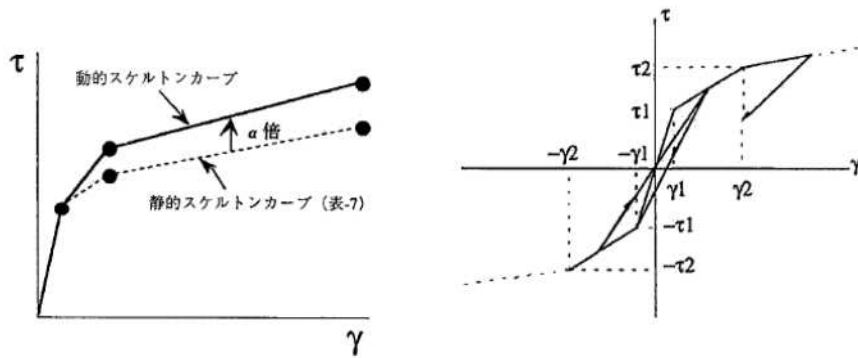


図 3-6 基準地震動 S₂ の加速度スペクトル



動的効果考慮 ($\tau - \gamma$)

最大点指向型履歴ループ

図 3-7 解析に用いる耐震壁の復元力特性

表 3-11 $\tau - \gamma$ 関係

	要素番号	$\tau - \gamma$ 関係					
		第 1 折点		第 2 折点		第 3 折点	
		τ_1 kgf/cm ²	γ_1 ×10 ⁻⁴	τ_2 kgf/cm ²	γ_2 ×10 ⁻⁴	τ_3 kgf/cm ²	γ_3 ×10 ⁻³
O/W	1	15.995	1.620	21.593	4.870	56.532	4.000
	2	17.628	1.790	23.798	5.370	57.293	4.000
	3	18.581	1.890	25.084	5.660	57.020	4.000
	4	19.602	1.990	26.462	5.970	58.041	4.000
I/W	5	18.148	1.840	24.500	5.520	58.577	4.000
	6	19.607	1.990	26.469	5.970	58.812	4.000
	7	20.220	2.050	27.297	6.150	59.898	4.000
	8	20.257	2.060	27.348	6.170	60.076	4.000
	9	20.603	2.090	27.814	6.270	56.255	4.000
	10	21.883	2.220	29.543	6.660	55.277	4.000
	11	23.322	2.370	31.485	7.100	53.160	4.000
	12	24.559	2.490	33.155	7.470	53.735	4.000
	13	25.543	2.590	34.483	7.770	56.591	4.000
S/W	15	17.965	1.820	24.252	5.470	61.344	4.000
	16	21.631	2.190	29.201	6.580	62.028	4.000
	17	22.693	2.300	30.636	6.910	64.379	4.000
	18	23.508	2.380	31.736	7.150	67.196	4.000
	19	25.702	2.610	34.698	7.820	69.612	4.000
	20	26.733	2.710	36.090	8.140	69.714	4.000
	21	27.732	2.810	37.438	8.440	69.714	4.000

表 3-12 M - ϕ 関係

	要素番号	M - ϕ 関係					
		第 1 折点		第 2 折点		第 3 折点	
		M_1 ×10 ³ tm	ϕ_1 ×10 ⁻⁴ m ⁻¹	M_2 ×10 ³ tm	ϕ_2 ×10 ⁻³ m ⁻¹	M_3 ×10 ³ tm	ϕ_3 ×10 ⁻⁴ m ⁻¹
O/W	1	15.443	2.736	37.948	2.464	52.863	4.928
	2	18.235	2.883	42.070	2.524	57.539	5.047
	3	22.640	3.130	50.641	2.563	68.714	5.126
	4	24.884	3.440	53.919	2.603	72.455	5.206
I/W	5	2.728	3.994	5.965	3.978	7.314	7.955
	6	4.144	4.792	8.577	4.060	10.439	8.121
	7	8.614	7.551	18.451	4.138	22.616	8.275
	8	15.544	9.412	33.490	4.163	41.434	8.326
	9	19.524	9.603	37.612	4.139	46.235	8.278
	10	21.773	6.502	40.520	4.218	49.396	8.436
	11	24.460	7.294	43.976	4.310	53.155	8.621
	12	26.908	8.024	47.106	4.393	56.559	8.786
	13	28.945	8.631	49.695	4.461	59.376	8.923
S/W	15	0.972	12.800	3.102	13.210	4.376	17.039
	16	2.512	13.484	6.371	10.251	8.586	12.145
	17	3.742	13.014	9.811	9.072	13.131	9.437
	18	5.143	12.634	13.814	8.247	18.389	7.660
	19	7.381	13.206	17.720	7.480	22.914	6.312
	20	7.944	14.214	18.493	7.592	23.592	5.923
	21	8.511	15.228	19.268	7.704	24.249	5.566

表 3-13 $\tau - \gamma$ 関係の動的効果を考慮した割増率 α

	5	1.1903			
	6	1.2020			
	7	1.2149	15	1.1715	
	8	1.2141	16	1.2045	
	9	1.2124	17	1.2001	
1	1.1772	10	1.1732	18	1.1844
2	1.1891	11	1.1798	19	1.1869
3	1.1896	12	1.1889	20	1.1871
4	1.1997	13	1.1918	21	1.1927

c. 妥当性確認結果

本解析コードと原機構における最大応答加速度, 最大応答せん断力及び最大応答曲げモーメントを図 3-8~図 3-10 に示す。また, 浮上り非線形として回転地盤ばね (ダンパー減衰力含む) の曲げモーメント-回転角関係を図 3-11 に示す。

本解析コードと原機構の解析結果は同一条件, 同一手法の結果であり, 概ね一致していることから, 正しく評価していることが確認できる。

また, 本解析コードのバージョン毎の最大応答値を表 3-14~表 3-16 に示す。これらは全て一致しておりバージョンの違いがないことが確認できる。

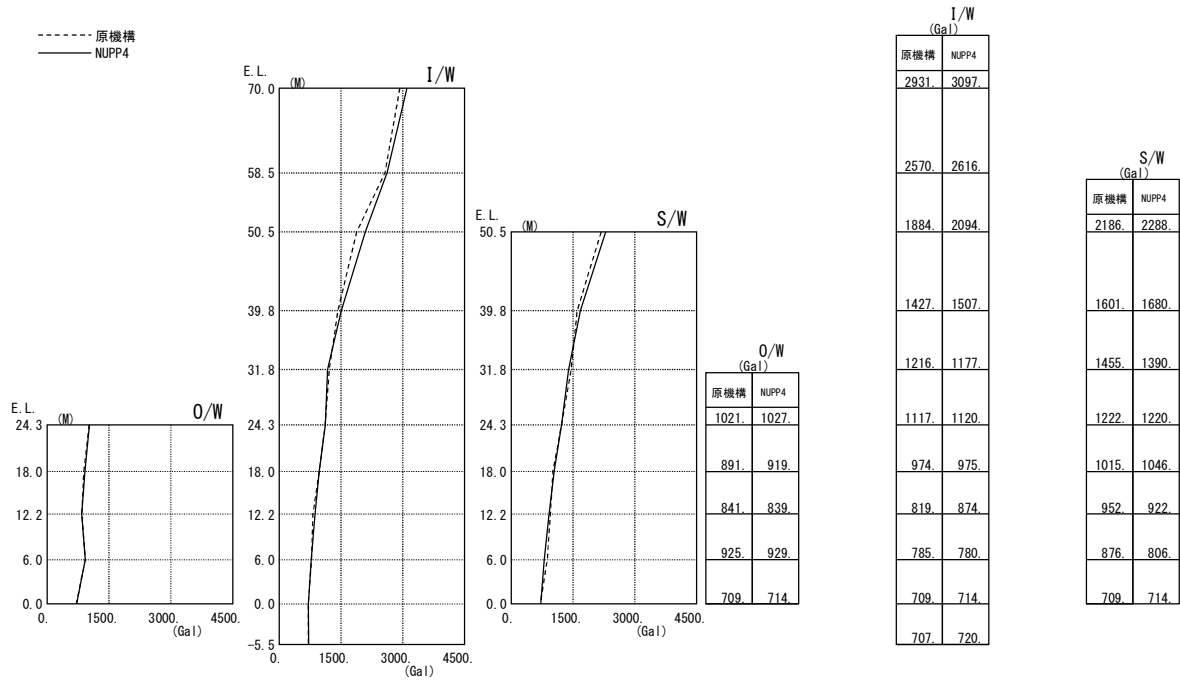


図 3-8 弾塑性地震応答解析結果 (最大応答加速度)

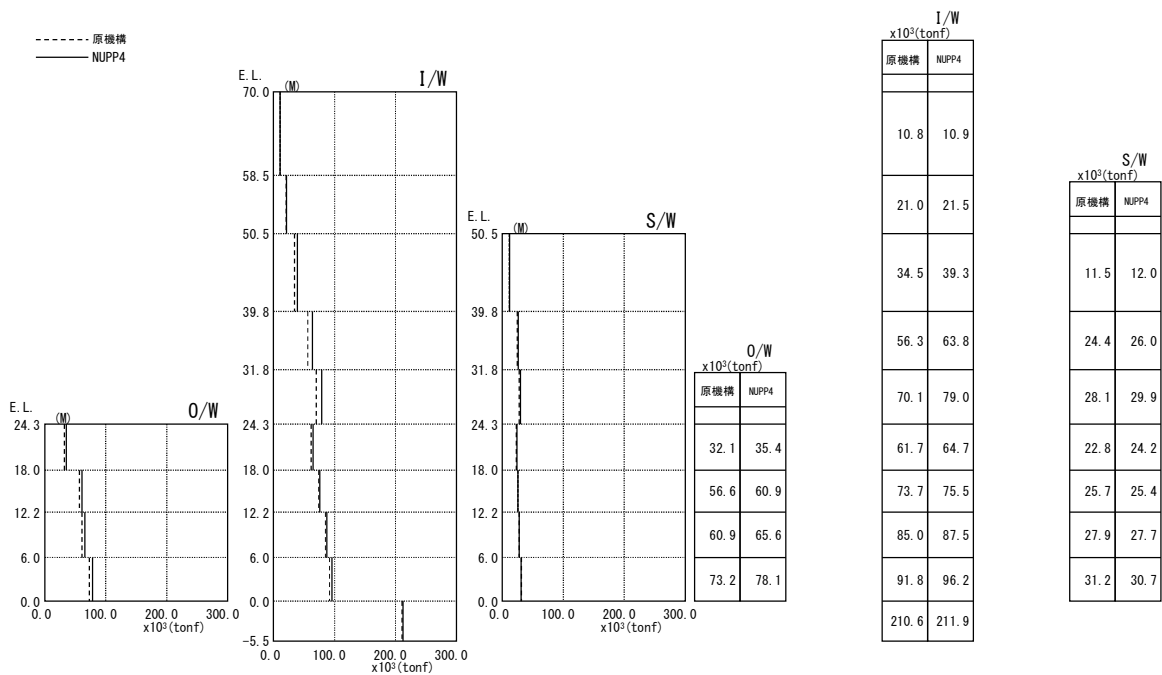
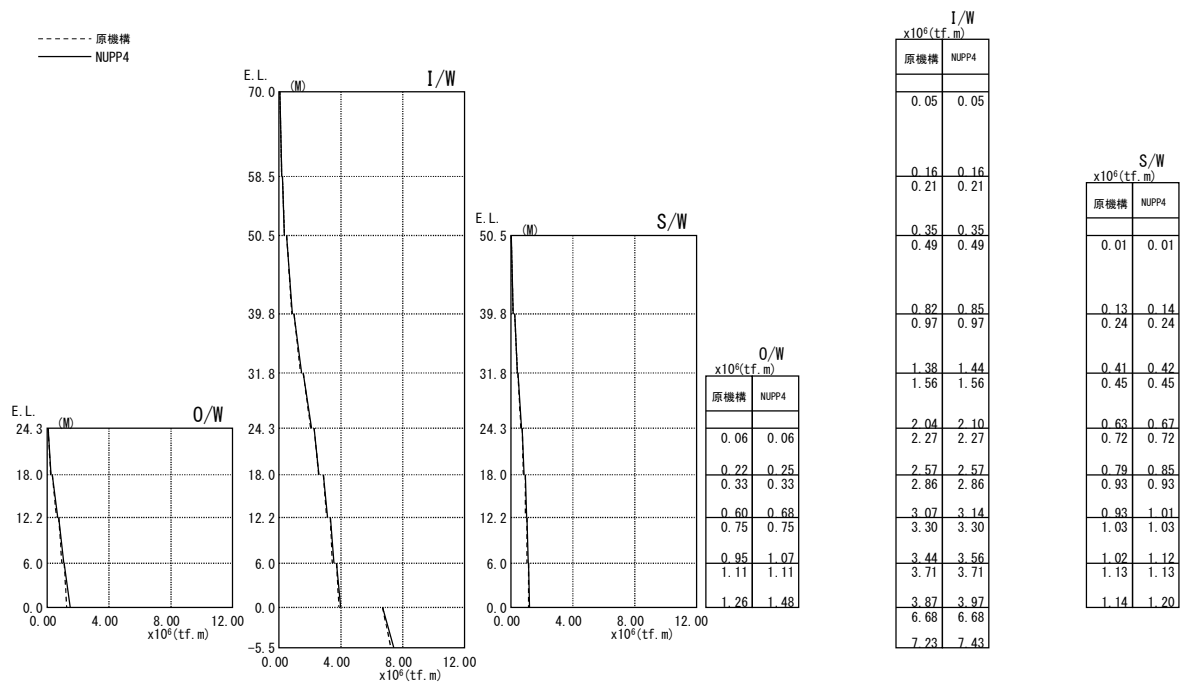
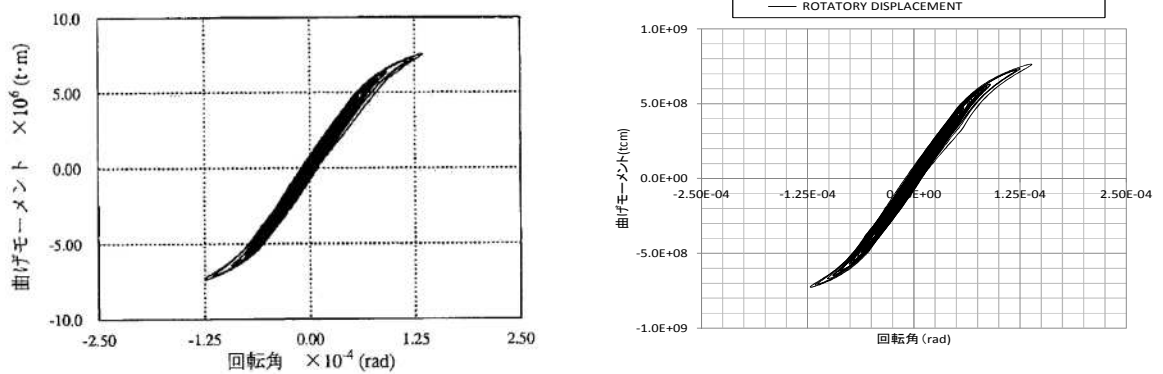


図 3-9 弾塑性地震応答解析結果 (最大応答せん断力)



原機構の部材上部曲げモーメントは公開資料にないためNUPPの値を用いて図化している。

図 3-10 弾塑性地震応答解析結果 (最大応答曲げモーメント)



原機構 (接地率 63.5%)

NUPP4 (接地率 62.9%)

図 3-11 回転地盤ばねの履歴

表 3-14 バージョン毎の応答結果（原機構解析モデル）

最大応答加速度（ cm/s^2 ）

質点	バージョン 1.4.6	バージョン 1.4.7	バージョン 1.4.8	バージョン 1.4.9	バージョン 1.4.10	バージョン 1.4.11	バージョン 1.4.12
0/W							
1	1027	1027	1027	1027	1027	1027	1027
2	919	919	919	919	919	919	919
3	839	839	839	839	839	839	839
4	929	929	929	929	929	929	929
I/W							
5	3097	3097	3097	3097	3097	3097	3097
6	2616	2616	2616	2616	2616	2616	2616
7	2094	2094	2094	2094	2094	2094	2094
8	1507	1507	1507	1507	1507	1507	1507
9	1177	1177	1177	1177	1177	1177	1177
10	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120
11	975	975	975	975	975	975	975
12	874	874	874	874	874	874	874
13	780	780	780	780	780	780	780
14	714	714	714	714	714	714	714
15	720	720	720	720	720	720	720
S/W							
16	2288	2288	2288	2288	2288	2288	2288
17	1680	1680	1680	1680	1680	1680	1680
18	1390	1390	1390	1390	1390	1390	1390
19	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220
20	1046	1046	1046	1046	1046	1046	1046
21	922	922	922	922	922	922	922
22	806	806	806	806	806	806	806

表 3-15 バージョン毎の応答結果（原機構解析モデル）

最大応答せん断力（ $\times 10^3 \text{tonf}$ ）

部材	バージョン 1.4.6	バージョン 1.4.7	バージョン 1.4.8	バージョン 1.4.9	バージョン 1.4.10	バージョン 1.4.11	バージョン 1.4.12
O/W							
1	35.4	35.4	35.4	35.4	35.4	35.4	35.4
2	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9
3	65.6	65.6	65.6	65.6	65.6	65.6	65.6
4	78.1	78.1	78.1	78.1	78.1	78.1	78.1
I/W							
5	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
6	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5
7	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3	39.3
8	63.8	63.8	63.8	63.8	63.8	63.8	63.8
9	79.0	79.0	79.0	79.0	79.0	79.0	79.0
10	64.7	64.7	64.7	64.7	64.7	64.7	64.7
11	75.5	75.5	75.5	75.5	75.5	75.5	75.5
12	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5
13	96.2	96.2	96.2	96.2	96.2	96.2	96.2
14	211.9	211.9	211.9	211.9	211.9	211.9	211.9
S/W							
15	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
16	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0
17	29.9	29.9	29.9	29.9	29.9	29.9	29.9
18	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2
19	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4
20	27.7	27.7	27.7	27.7	27.7	27.7	27.7
21	30.7	30.7	30.7	30.7	30.7	30.7	30.7

表 3-16 バージョン毎の応答結果（原機構解析モデル）

最大応答曲げモーメント（ $\times 10^6 \text{tonf} \cdot \text{m}$ ）

部材	バージョン 1.4.6	バージョン 1.4.7	バージョン 1.4.8	バージョン 1.4.9	バージョン 1.4.10	バージョン 1.4.11	バージョン 1.4.12
O/W							
1	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
2	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
3	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
4	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48
I/W							
5	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
6	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
7	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
8	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44
9	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
10	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57
11	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14
12	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56
13	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97
14	7.43	7.43	7.43	7.43	7.43	7.43	7.43
S/W							
15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
16	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
17	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
18	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
19	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
20	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
21	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20

3.5.3 使用内容に対する妥当性

サブドレンシャフトの時刻歴応答解析にNUPP 4を使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証されており、妥当である。

- ・ 本解析コードの前バージョンNUPP及びNUPP IIは原子力発電所の建物などの工事認可申請における使用実績を有しており、本解析コードは使用計算機（OS）の変更に伴うカスタマイズを施したものであり、解析に係る部分は前バージョンから変更していないため、解析機能全般について、十分妥当性が確認されている。

別紙 30 FRAME

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-別添 1-2-8	集水管の耐震性についての計算書	Ver. 5.0.4
V-2-2-別添 1-2-9	サブドレン管の耐震性についての計算書	Ver. 5.0.4
V-2-2-別添 1-3-8	集水管の耐震性についての計算書	Ver. 5.0.4
V-2-2-別添 1-3-9	サブドレン管の耐震性についての計算書	Ver. 5.0.4

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	F R A M E
使用目的	2次元骨組構造解析
開発機関	株式会社フォーラムエイト
開発時期	1998年
使用したバージョン	Ver. 5.0.4
コードの概要	<p>本解析コードは、株式会社フォーラムエイトで開発された平面骨組構造解析の汎用市販コードである。</p> <p>本解析コードは微小変位理論に基づく変位法を用いて、2次元平面骨組モデルの断面力・変位・反力を算出するための構造解析プログラムである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>F R A M Eは汎用市販コードであり、集水管及びサブドレン管の断面力算出に使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードを用いて静的解析を行った解析結果と、構造力学公式集に記載の理論式による理論解を比較し、両者がおおむね一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・円形断面の検討用平面骨組モデルを対象に、本解析コードによる構造解析結果と、汎用コード「T-FRAME」による構造解析結果の比較を行い、解析結果が一致することを確認している。 ・原子力産業界において、プラント構造物や地中埋設構造物等の多数の解析に本コードが使用されており、十分な使用実績があるため、信頼性があると判断できる。

別紙 31 ANSYS

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-3-2-1	炉心の耐震計算結果	Ver. 14.0
V-2-6-7-15	統合原子力防災ネットワークを用いた通信連絡設備 (テレビ会議システム, IP-電話機及び IP-FAX) の耐震性についての計算書	Ver. 15.0

2. 解析コードの概要

2.1 ANSYS Ver.14.0

項目 \ コード名	ANSYS
使用目的	有限要素法による下部端栓溶接部応力評価
開発機関	アンシス
開発時期	1970年
使用したバージョン	Ver. 14.0
コードの概要	<p>本解析コードは、スワンソン・アナリシス・システムズ（現、アンシス）により開発された有限要素法による計算機プログラムである。</p> <p>本解析コードは、広範囲にわたる多目的な有限要素法による計算機プログラムであり、伝熱、構造、流体、電磁界、マルチフィジックス解析を実施するものである。</p> <p>本解析コードは、ISO9001 及び ASME NQA-1 の認証を受けた品質保証システムのもとで開発され、アメリカ合衆国原子力規制委員会による 10CFR50 並びに 10CFR21 の要求を満たしており、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、機械、建築、土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されている。また、9×9 燃料（B 型）の下部端栓溶接部の応力評価にも利用されている。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、開発元のリリースノートの例題集において、多くの解析例に対する理論解と解析結果との比較により両者が一致することで検証されている。 ・本解析コード配布時に同梱された ANSYS Mechanical APDL Verification Testing Package を入力とした解析により、上記例題集の検証を再現できることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発元から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、航空

	<p>宇宙，自動車，機械，建築，土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，原子力分野では，原子炉設置（変更）許可申請書における応力解析等，これまで多くの構造解析に対し使用実績があり，9×9燃料（B型）の原子炉設置（変更）許可申請書や燃料体設計認可申請書における下部端栓溶接部の応力評価に対し使用実績があることを確認している。 ・本解析コードは既認可の下部端栓溶接部応力解析において使用実績のあるMARCと同等な解析条件（有限要素モデル，ペレットやジルカロイ被覆管の物性値，荷重条件及び境界モデル）を設定可能なこと，MARCと本解析コードとで同等な解析結果となることを確認している。
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.2 ANSYS Ver. 15.0

項目	コード名 ANSYS
使用目的	3次元有限要素法（ソリッド要素）による固有値解析，応力解析
開発機関	アンシス
開発時期	1970年
使用したバージョン	Ver. 15.0
コードの概要	<p>本解析コードは，スワンソン・アナリシス・システムズ（現，アンシス）により開発された有限要素法による計算機プログラムである。</p> <p>本解析コードは，広範囲にわたる多目的な有限要素法による計算機プログラムであり，伝熱，構造，流体，電磁界，マルチフィジックス解析を実施するものである。</p> <p>本解析コードは，ISO9001及びASME NQA-1の認証を受けた品質保証システムのもとで開発され，アメリカ合衆国原子力規制委員会による10CFR50並びに10CFR21の要求を満たしており，数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，機械，建築，土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの検証は，開発元のリリースノートの例題集において，多くの解析例に対する理論解と解析結果との比較が実施されている。 ・本解析コードが適正であることは，コード配布時に同梱されたANSYS Mechanical APDL Verification Testing Packageにより確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発元から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，機械，建築，土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。

	<ul style="list-style-type: none">・本解析コードは、原子力分野では、原子炉設置（変更）許可申請書における応力解析等、これまで多くの構造解析に対し使用実績があることを確認している。
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

3. 解析手法

3.1 ANSYS Ver. 14.0 の解析手法

3.1.1 一般事項

本解析コードは、スワンソン・アナリシス・システムズ（現、アンシス）により開発された有限要素法による計算機プログラムである。

本解析コードは、ISO9001 及びASME NQA-1の認証を受けた品質保証システムのもとで開発され、アメリカ合衆国原子力規制委員会による10CFR50 並びに10CFR21 の要求を満たしている。

3.1.2 解析コードの特徴

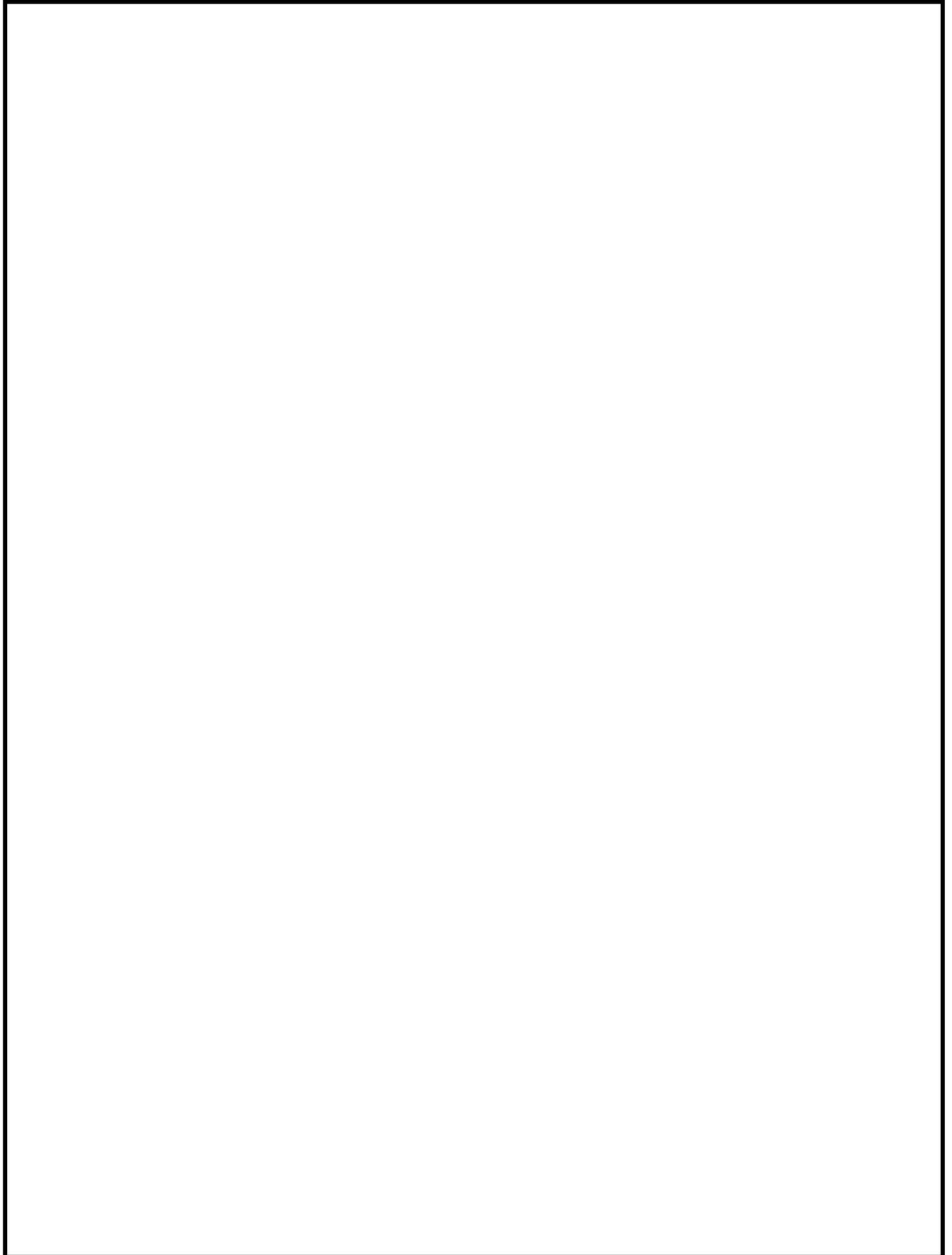
本解析コードは、広範囲にわたる多目的な有限要素法による計算機プログラムであり、伝熱、構造、流体、電磁界、マルチフィジックス解析を実施するものである。

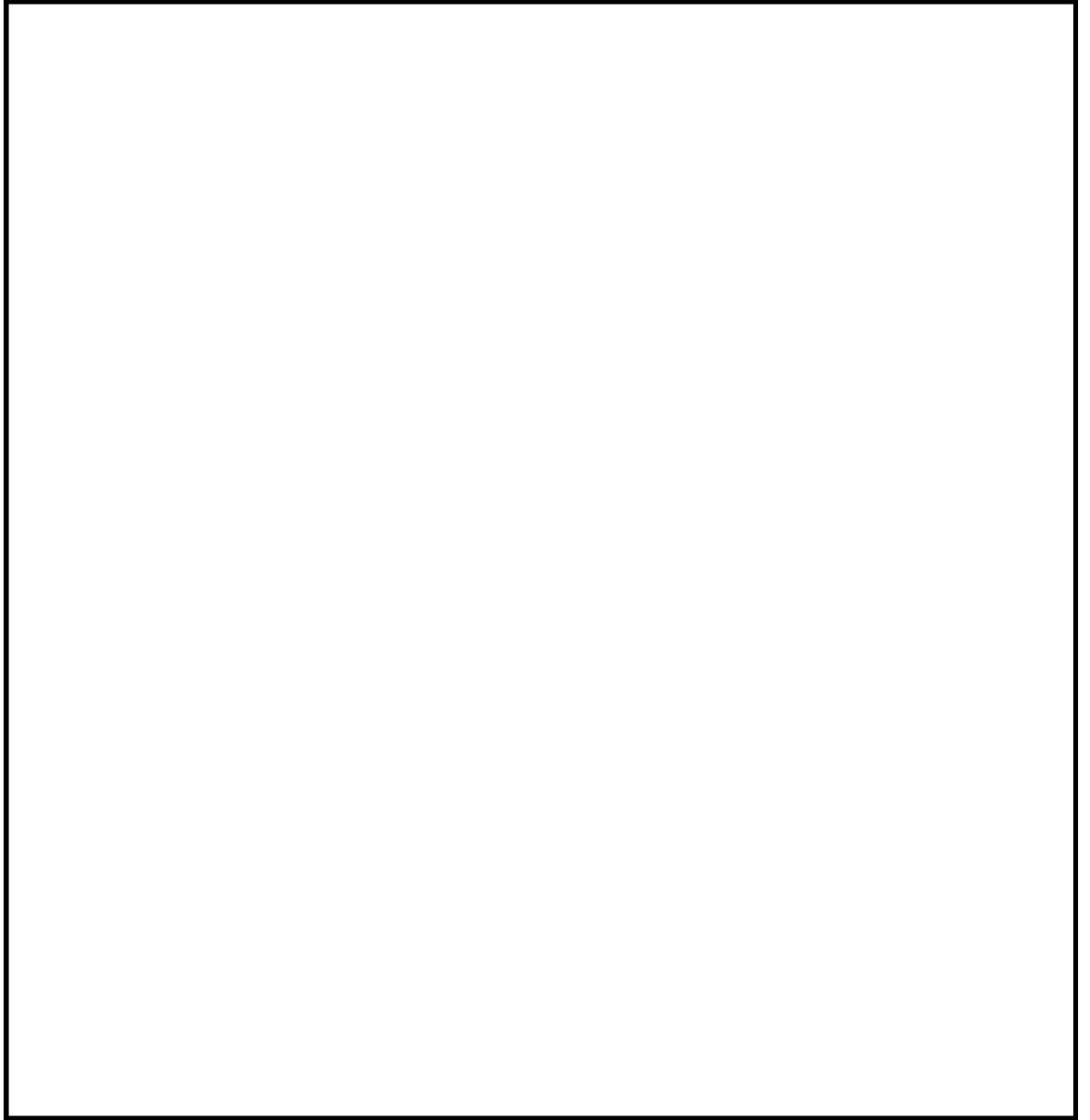
3.1.3 解析手法

本解析コードの機能の内、下部端栓溶接部応力評価に用いる伝熱解析及び構造解析における解析手法について以下に記載する。

(1) 伝熱解析

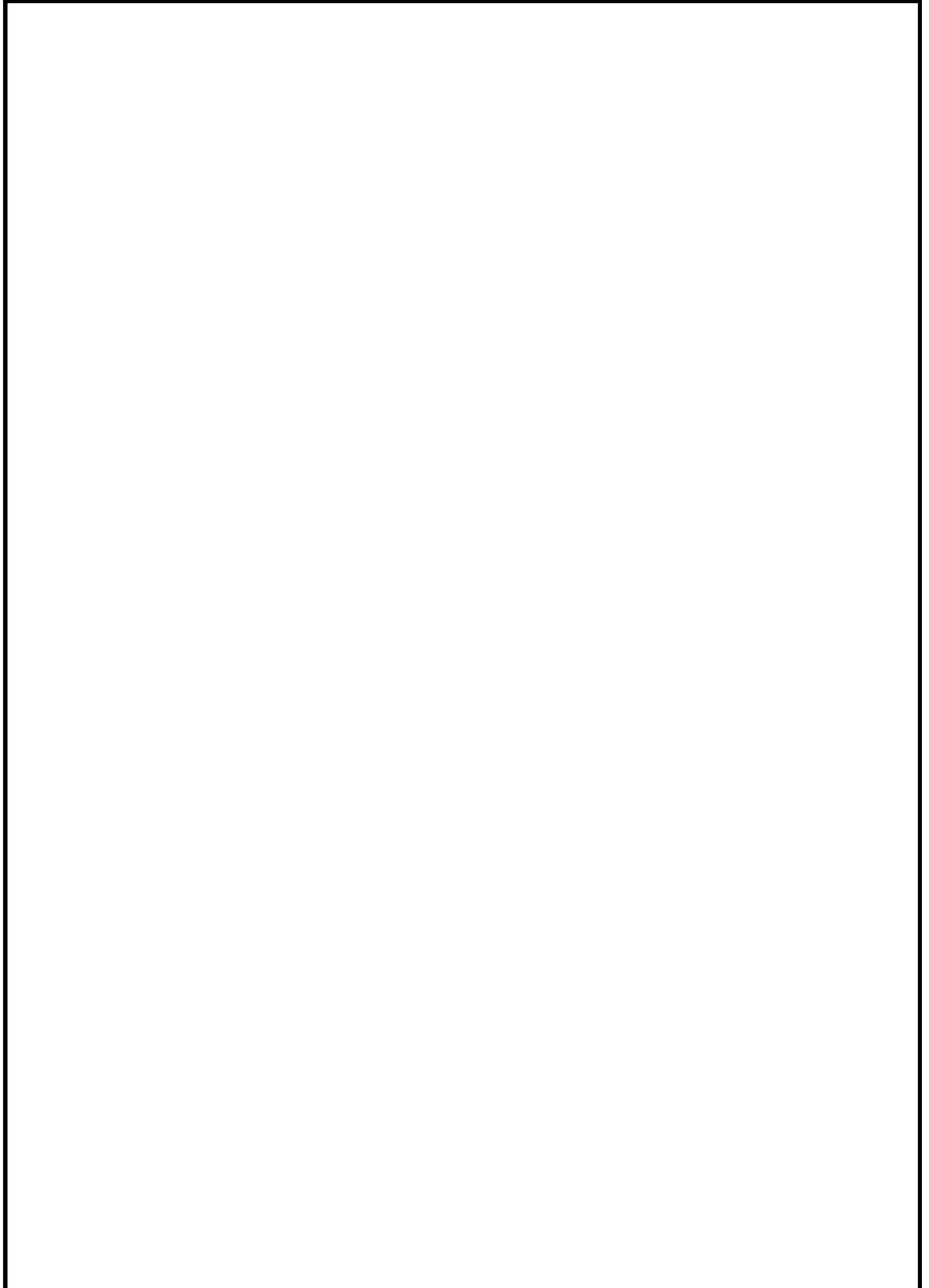
伝熱解析においては、熱力学の第一法則であるエネルギー保存の法則に基づき、単位体積における微分形式で表した次式に基づいた解析を実施する。

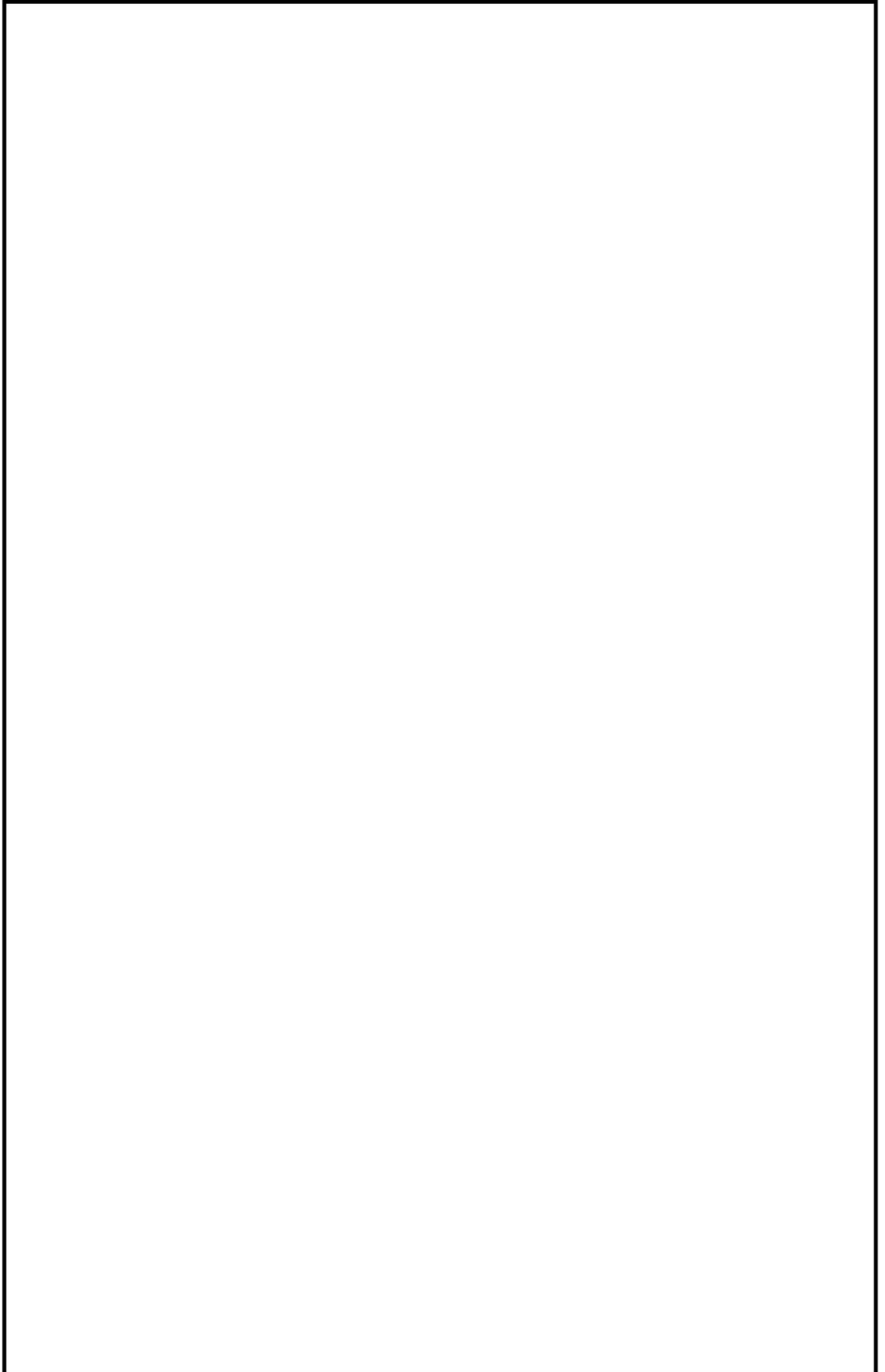


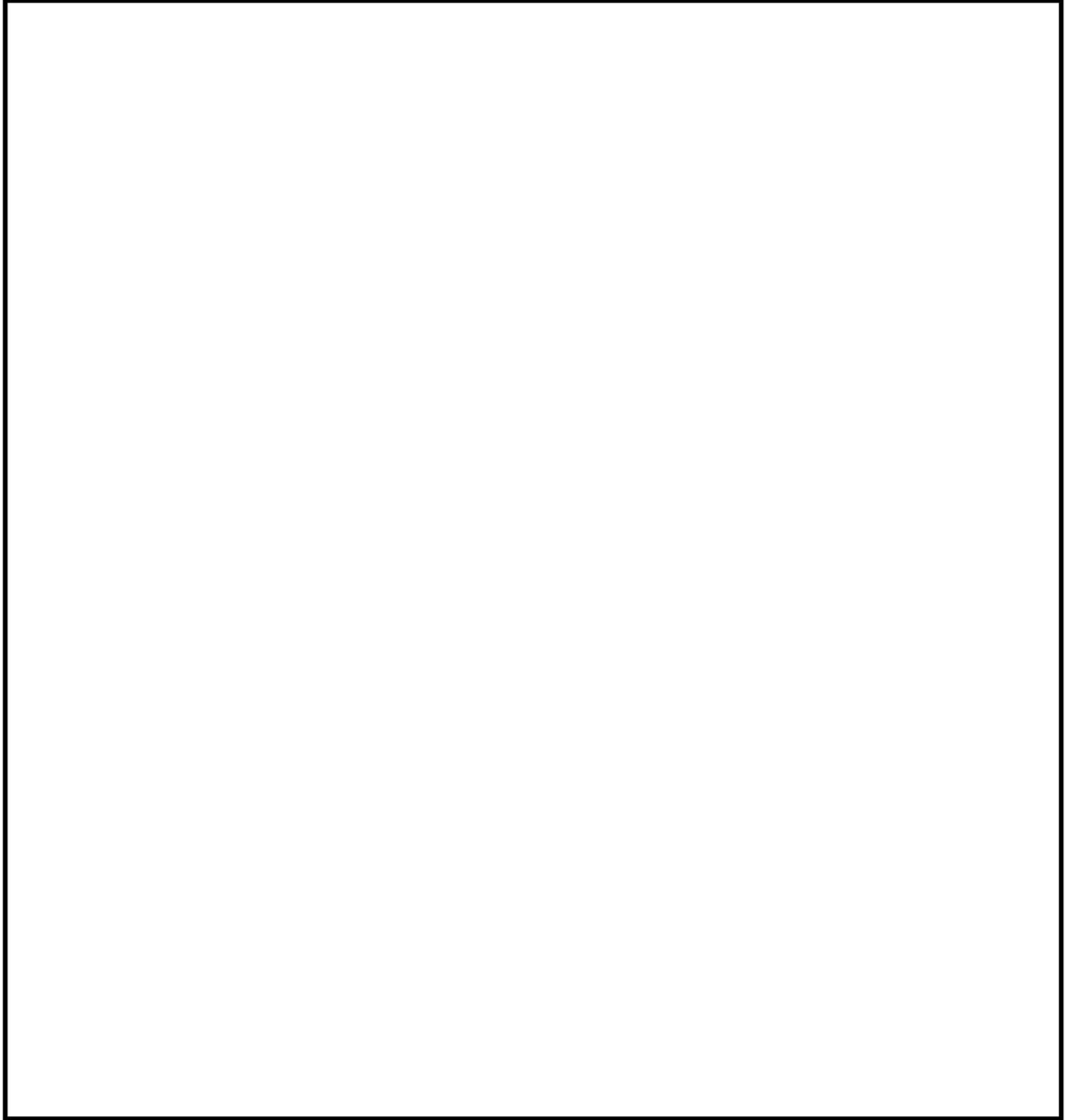


(2) 構造解析

構造解析においては、線形材料を対象として、歪と応力の関係を示した次式に基づいた解析を実施する。







3.1.4 解析フローチャート

(1) 伝熱及び構造解析

伝熱及び構造解析における解析フローチャートを図3-1に示す。

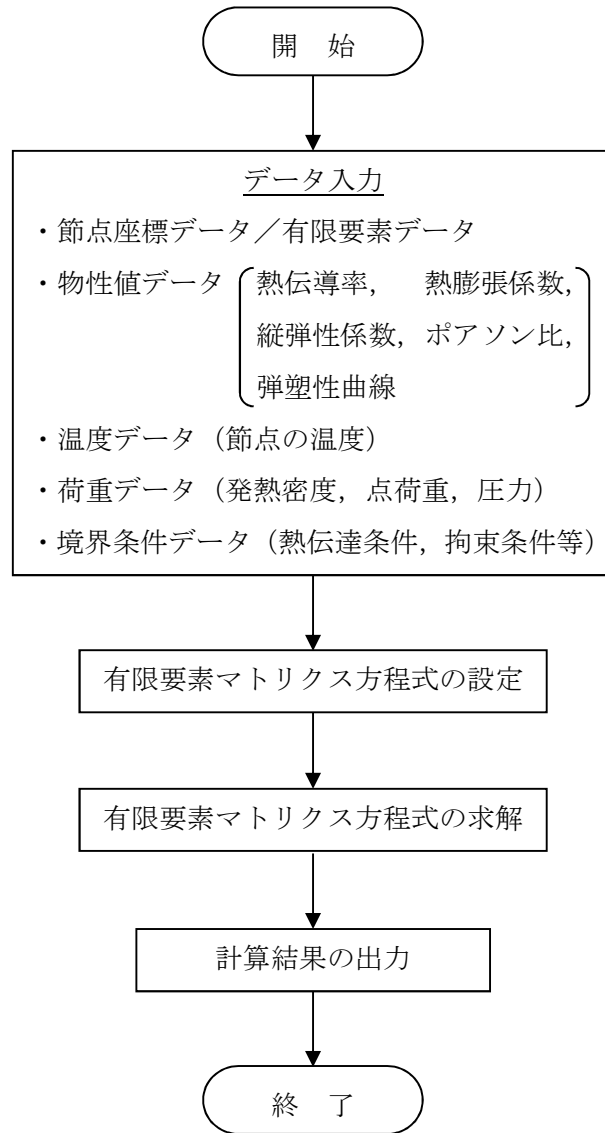


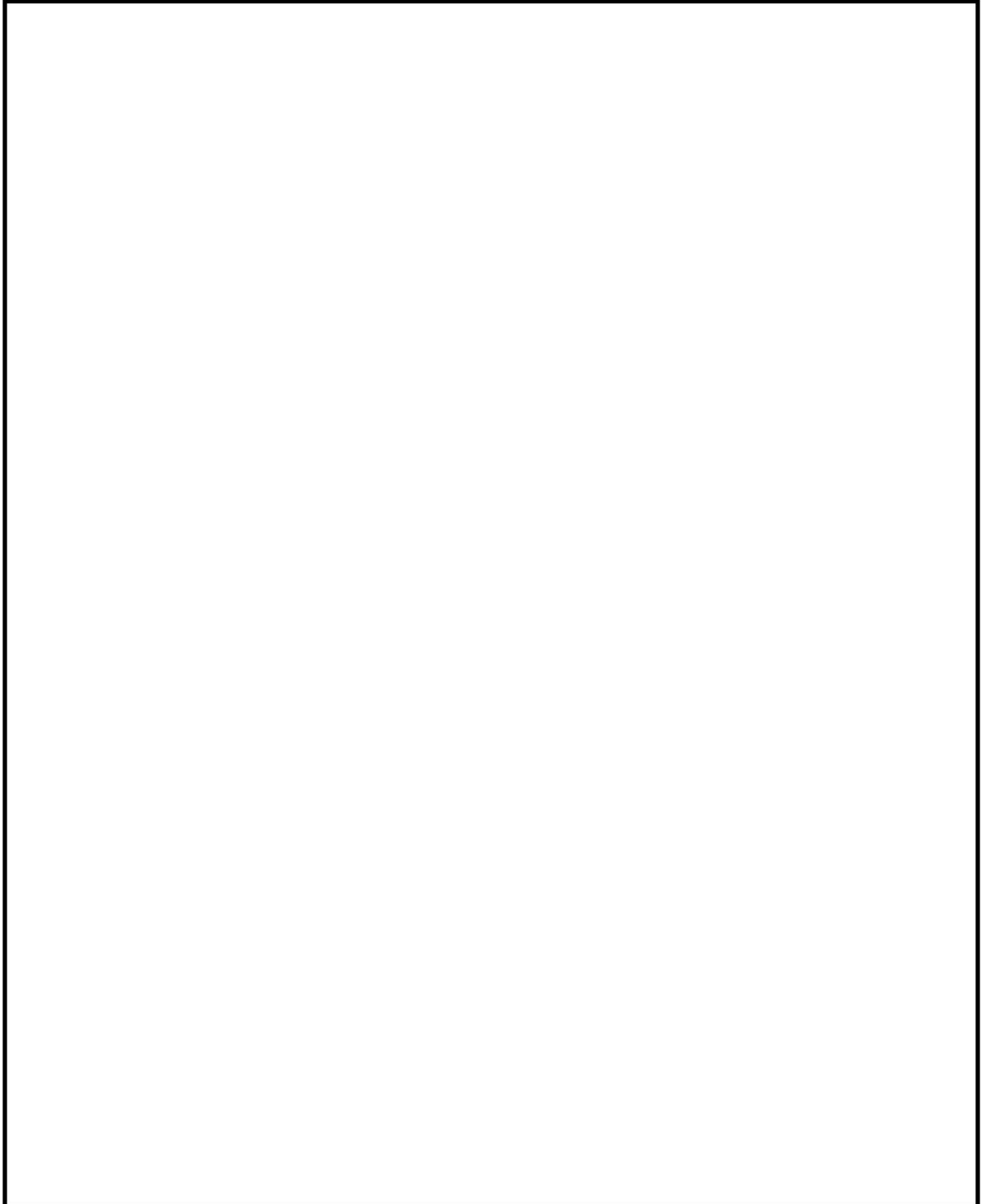
図 3-1 伝熱及び構造解析における解析フローチャート

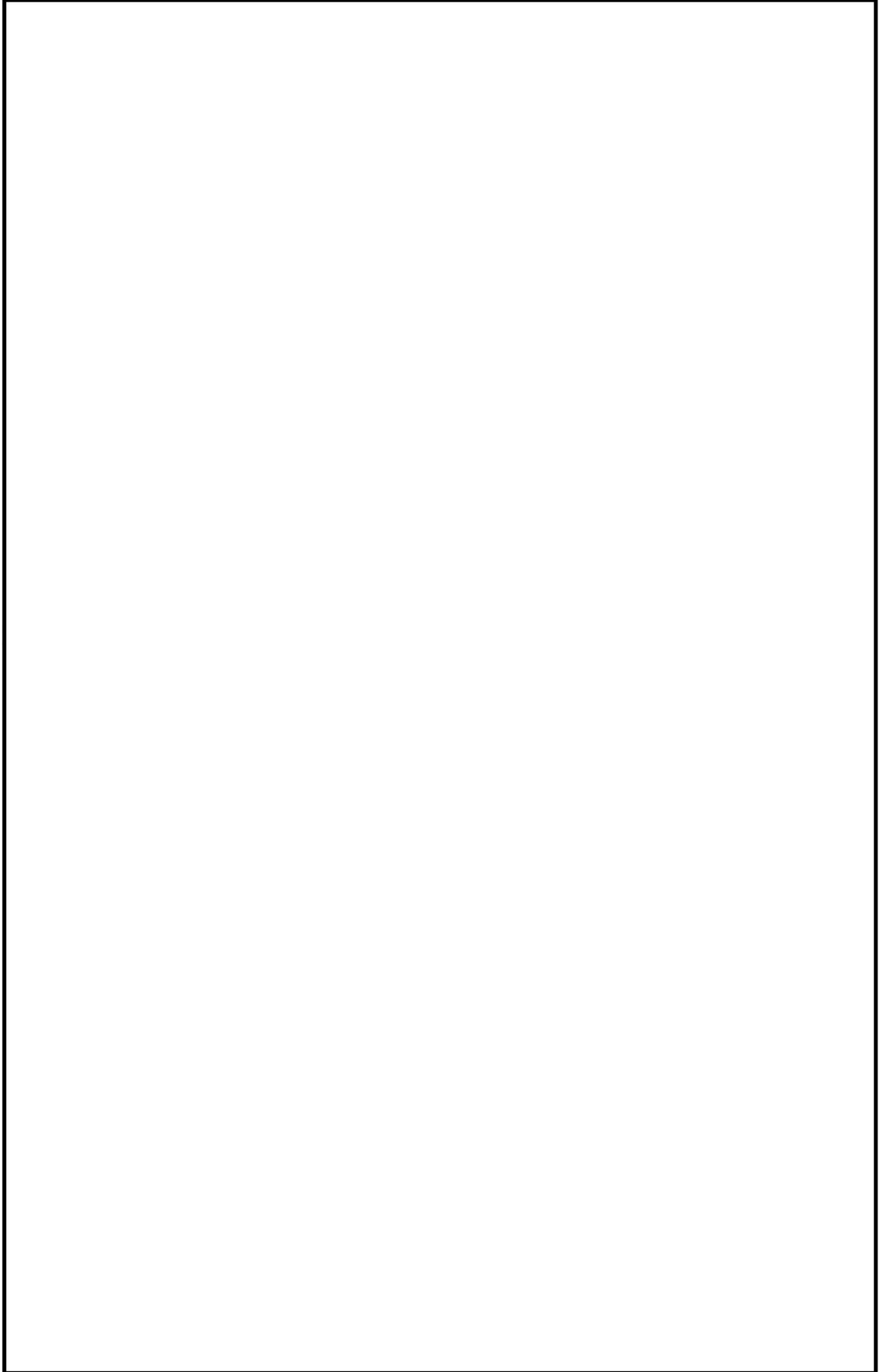
3.1.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

(1) 検証 (Verification)

本解析コードの検証として、開発元のリリースノートの例題集において、多くの解析例に対する理論解と解析結果との比較が実施されており、解析例の入力データに基づく本解析コードの解析結果と理論解を比較して検証を実施した。その検証の例を以下に示す。

a. 解析ケース





(2) 妥当性確認 (Validation)

本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。

- ・本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、機械、建築、土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。
- ・本解析コードは、原子力分野では、原子炉設置（変更）許可申請書における応力解析等、これまで多くの構造解析に対し使用実績があり、9×9 燃料（B 型）の原子炉設置（変更）許可申請書や燃料体設計認可申請書における下部端栓溶接部の応力評価に対し使用実績があることを確認している。
- ・本解析コードは既認可の下部端栓溶接部応力解析において使用実績のあるMARCと同等な解析条件（有限要素モデル、ペレットやジルカロイ被覆管の物性値、荷重条件及び境界モデル）を設定可能なこと、MARCと本解析コードとで同等な解析結果となることを確認している。

(3) 評価結果

(1) 項及び(2) 項より、本解析コードを使用状況一覧に示す燃料集合体の耐震性についての計算書における下部端栓溶接部応力解析に用いることは妥当である。

3.2 ANSYS Ver. 15.0 の解析手法

3.2.1 一般事項

本解析コードは、スワンソン・アナリシス・システムズ（現、アンシス）により開発された有限要素解析プログラムである。

本解析コードは、ISO9001 及びASME NQA-1 を取得し、アメリカ合衆国原子力規制委員会による10CFR Part 50 並びに10CFR21 の要求を満たしている。

3.2.2 解析コードの特徴

本解析コードは、広範囲に亘る多目的有限要素解析プログラムである。本解析コードは、構造、マルチフィジックス、流体、陽解法による動的、電磁界及び流体力学のシミュレーション並びに解析を実施するものである。

3.2.3 解析手法

解析は線形構造静的解析及びモーダル解析を実施する。

本解析手法は線形構造を想定している。

線形構造静的解析に対する全体的な平衡方程式は以下のとおり。

$$[K]\{u\} = \{F\}$$

又は

$$[K]\{u\} = \{F^a\} + \{F^r\}$$

ここで、

$$[K] = \text{全剛性マトリクス} = \sum_{m=1}^N [K_e]$$

$$\{u\} = \text{節点変位ベクトル}$$

$$N = \text{要素数}$$

$$[K_e] = \text{要素剛性マトリクス}$$

$$\{F^r\} = \text{反力荷重ベクトル}$$

全負荷荷重ベクトル $\{F^a\}$ は以下で定義される。

$$\{F^a\} = \{F^{nd}\} + \{F^{ac}\} + \sum_{m=1}^N (\{F_e^{th}\} + \{F_e^{pr}\})$$

ここで、

$$\{F^{nd}\} = \text{負荷節点荷重ベクトル}$$

$$\{F^{ac}\} = -[M]\{a_c\} = \text{加速度荷重ベクトル}$$

$$[M] = \text{全質量マトリクス} = \sum_{m=1}^N [M_e]$$

$$[M_e] = \text{要素質量マトリクス}$$

$$\{a_c\} = \text{全加速度ベクトル}$$

$$\{F_e^{th}\} = \text{要素伝熱荷重ベクトル}$$

$$\{F_e^{pr}\} = \text{要素圧力荷重ベクトル}$$

モーダル解析は、固有振動数及びモード形状の決定に使用される。

構造物には一定剛性及び質量効果があるものとして行列表記法で記述された、減衰しない系の運動方程式は以下のとおり。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\}$$

線形システムの場合、自由振動は以下の形式の周波数応答となる。

$$\{u\} = \{\varphi\}_i \cos \omega_i t$$

ここで、

$$\{\varphi\}_i = i\text{番目の固有振動数のモード形状を示す固有ベクトル}$$

$$\omega_i = i\text{番目の固有円振動数 (単位時間あたりのラジアン)}$$

$$t = \text{時間}$$

これにより，運動方程式は以下のとおり。

$$(-\omega_i^2[M] + [K])\{\varphi\}_i = \{0\}$$

この等式は， $\{\varphi\}_i = \{0\}$ 又は $([K] - \omega^2[M])$ のいずれかの行列式がゼロの場合に満たされる。

3.2.4 解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを図3-5に示す。

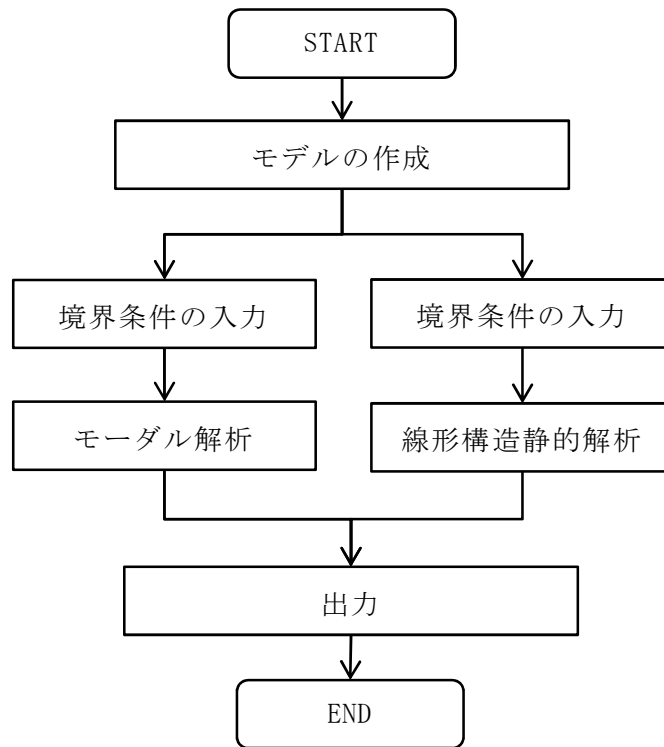


図3-5 解析フローチャート

3.2.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

(1) モーダル解析

a. 検証の概要

本解析コードについて、固有値解析の解析結果と理論解を比較し検証を行った。

b. 解析モデル

解析モデルを図 3-6 に、解析条件を表 3-3 に示す。ソリッド要素を用いて作成し、拘束はせず、両端自由の解析モデルとした。

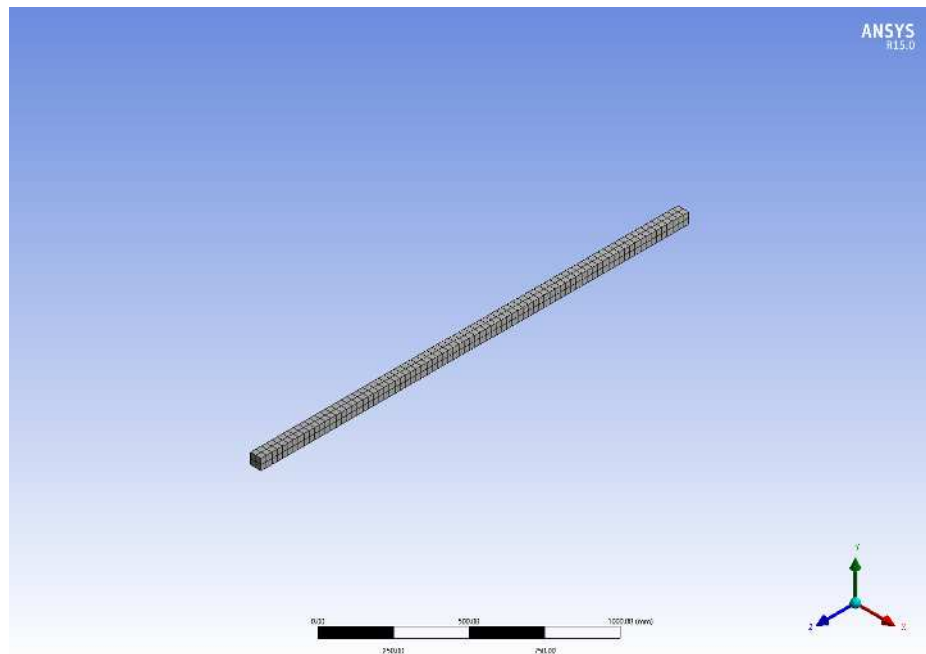


図 3-6 解析モデル (ソリッド要素)

表 3-3 解析条件

諸元	記号	入力値	単位
長さ	L	2000	(mm)
断面積	A	2500	(mm ²)
断面二次モーメント	I=I1=I2	5.2083E+05	(mm ⁴)
ねじり定数	J	8.80E+05	(mm ⁴)
せん断面積係数	K=K1=K2	0.833	(-)
縦弾性係数	E	2.00E+05	(N/mm ²) = (MPa)
ポアソン比	ν	0.30	(-)
密度	ρ	7.93E-09	(ton/mm ³)

c. 解析結果と理論解との比較

解析結果と理論解の固有振動数の比較を表 3-4 に示す。また、各次数におけるソリッド要素の解析結果（モード図）を図 3-8～図 3-10 にそれぞれ示す。なお、理論解は式 3.4 及び図 3-7 に基づき導入した。表 3-4 に示すとおり解析結果と理論解はよく一致しており、本解析コードの妥当性が確認された。

表 3-4 固有振動数の解析結果と理論解の比較

次数	固有振動数 [Hz]	
	理論解	解析結果
		ソリッド要素
1 次	64.53	64.39
2 次	177.86	176.79
3 次	348.73	344.60

・固有振動数 $f = \frac{\lambda^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$ [Hz] … (式 3.4)

振動数 $f = \frac{\lambda^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$ Hz, L : 長さ m, E : 縦弾性係数 Pa, I : 断面二次モーメント m^4
 ρ : 比重 kg/m^3 , A : 断面積 m^2 .

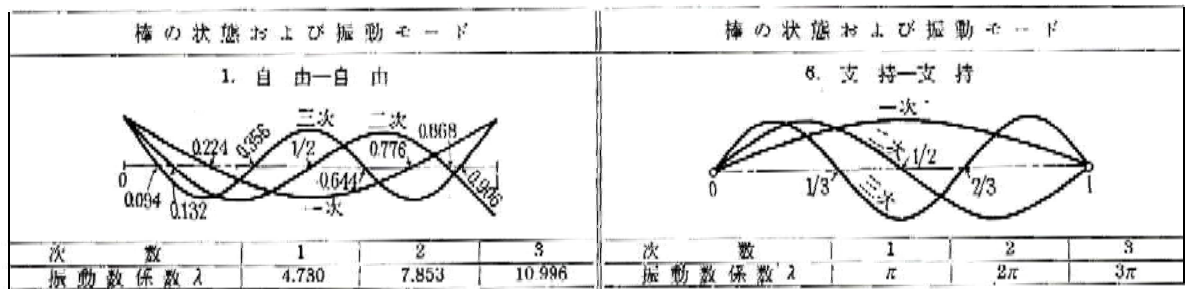


図 3-7 一様断面はりの横振動（出典：機械工学便覧）

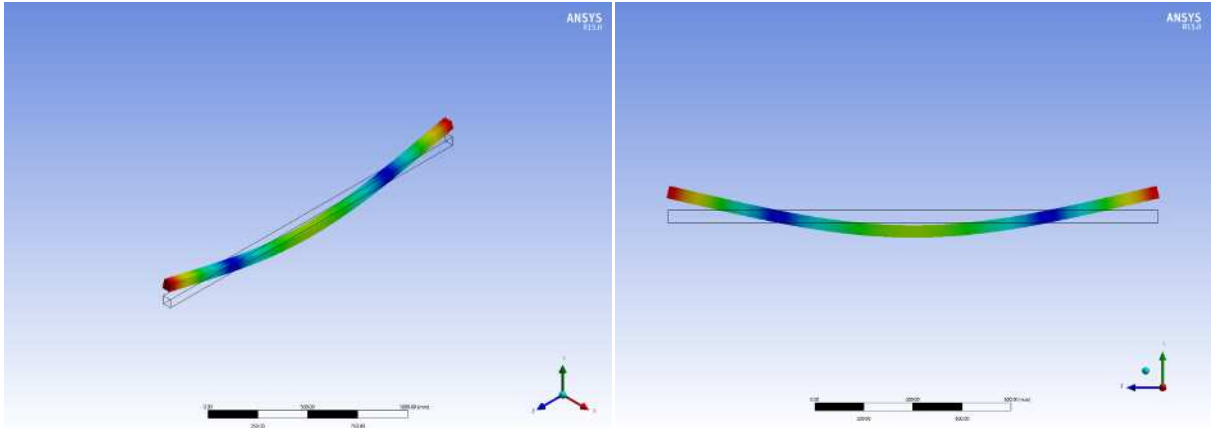


図 3-8 モード図-1次 (ソリッド要素)

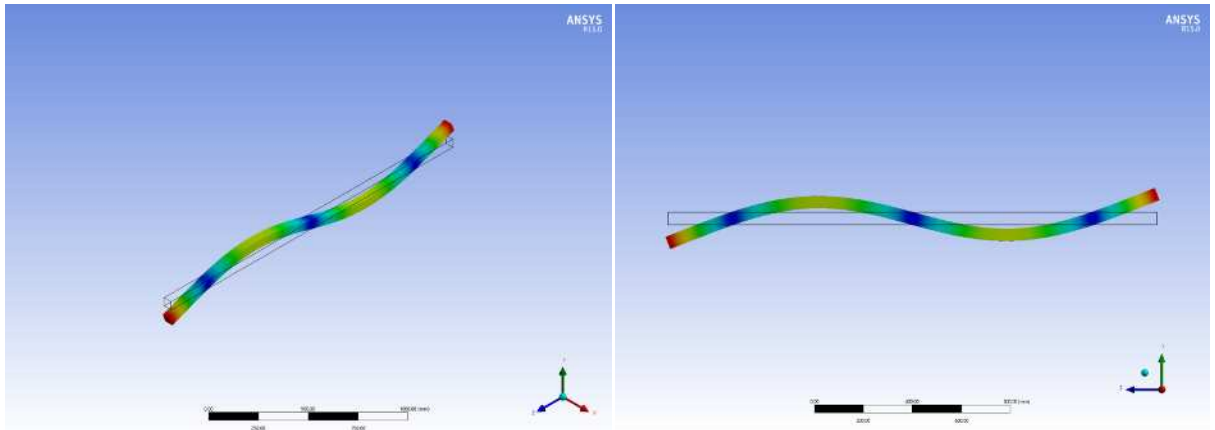


図 3-9 モード図-2次 (ソリッド要素)

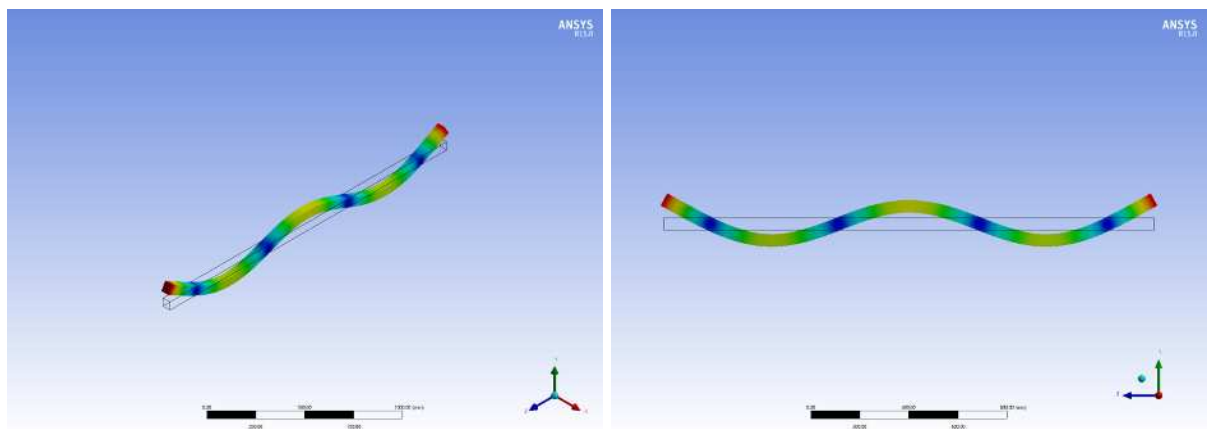


図 3-10 モード図-3次 (ソリッド要素)

(2) 線形構造静的解析

a. 検証の概要

本解析コードについて、線形構造静的解析の解析結果と理論解を比較し検証を行った。

b. 解析モデル

解析モデルを図 3-11 に、解析条件を表 3-5 に示す。ソリッド要素を用いて作成し、片側の端点又は端線、端面を全拘束して $1G$ (9806.6mm/s^2) の静的加速度を等分布荷重として Y 方向に付加した。

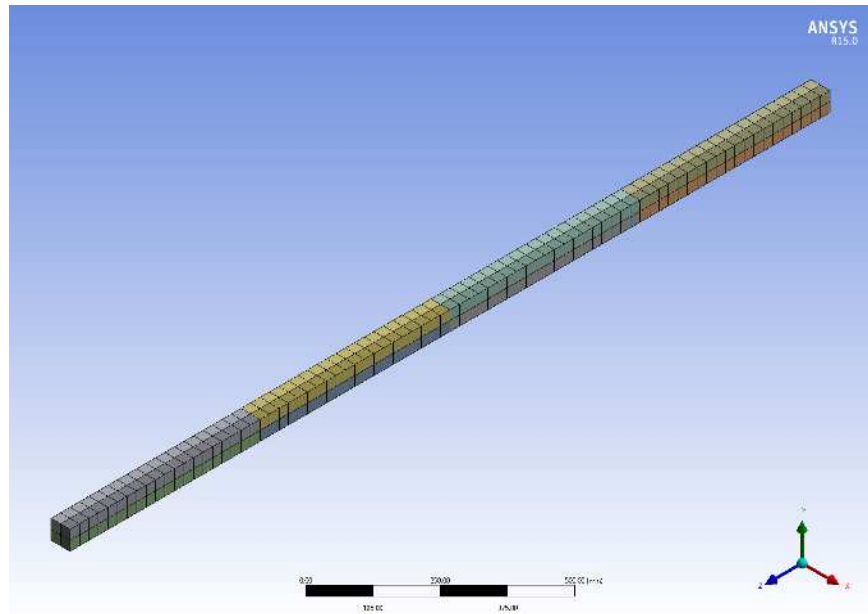


図 3-11 解析モデル（ソリッド要素）

表 3-5 解析条件

諸元	記号	入力値	単位
長さ	L	2000	(mm)
断面積	A	2500	(mm^2)
断面二次モーメント	$I=I1=I2$	$5.21\text{E}+05$	(mm^4)
ねじり定数	J	$8.80\text{E}+05$	(mm^4)
せん断面積係数	$K=K1=K2$	0.833	(-)
縦弾性係数	E	$2.00\text{E}+05$	(N/mm^2) = (MPa)
ポアソン比	ν	0.30	(-)
密度	ρ	$7.93\text{E}-09$	(ton/mm^3)

c. 解析結果と理論解との比較

表 3-6 に理論解と解析結果のたわみ量の比較を示す。また，ソリッド要素の解析結果（変形図）を図 3-14 に示す。なお，理論解は静的加速度を等分布荷重（ $\rho \times A \times 1G$ ）に換算し，式 3.5 及び式 3.6，図 3-12 に基づき導入した。また，算出位置は図 3-13 示す 5 点とした。表 3-7 に示すとおり解析結果と理論解はよく一致しており，本解析コードの妥当性が確認された。

表 3-6 たわみ量の解析結果と理論解の比較

軸方向距離 Z (mm)	たわみ量 Y (mm)	
	理論解	解析結果
		ソリッド要素
0	0.000	0
500	0.394	0.390
1000	1.322	1.314
1500	2.493	2.481
2000	3.733	3.716

・ 等分布荷重 $w = \rho \times A \times 1G = 7.93E - 09 \times 2500 \times 9806.6$
 $= 0.19442 \left[\frac{N}{mm} \right] \dots\dots\dots$ (式 3.5)

・ たわみ方程式

$y = \frac{w}{24EI} \{ (L-z)^4 - 4L^3(L-z) + 3L^4 \} \text{ [mm]} \dots\dots\dots$ (式 3.6)

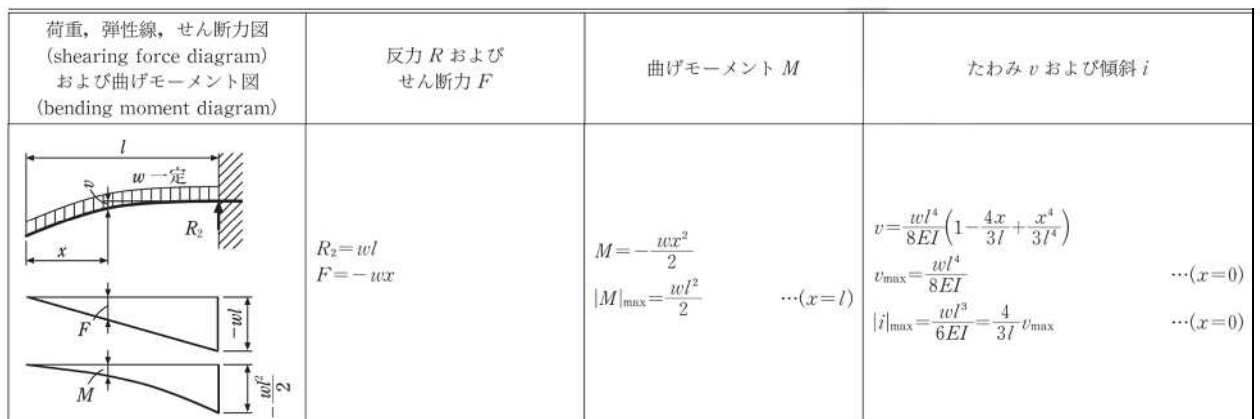


図 3-12 はりのたわみ（出典：機械工学便覧）

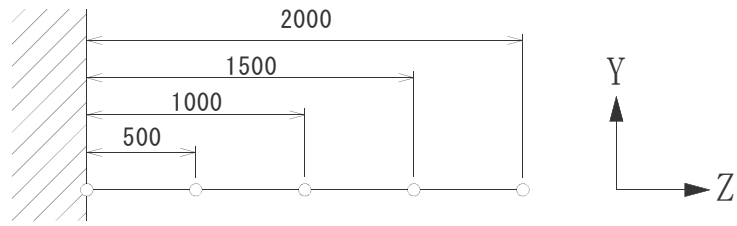


図 3-13 モデル概略図

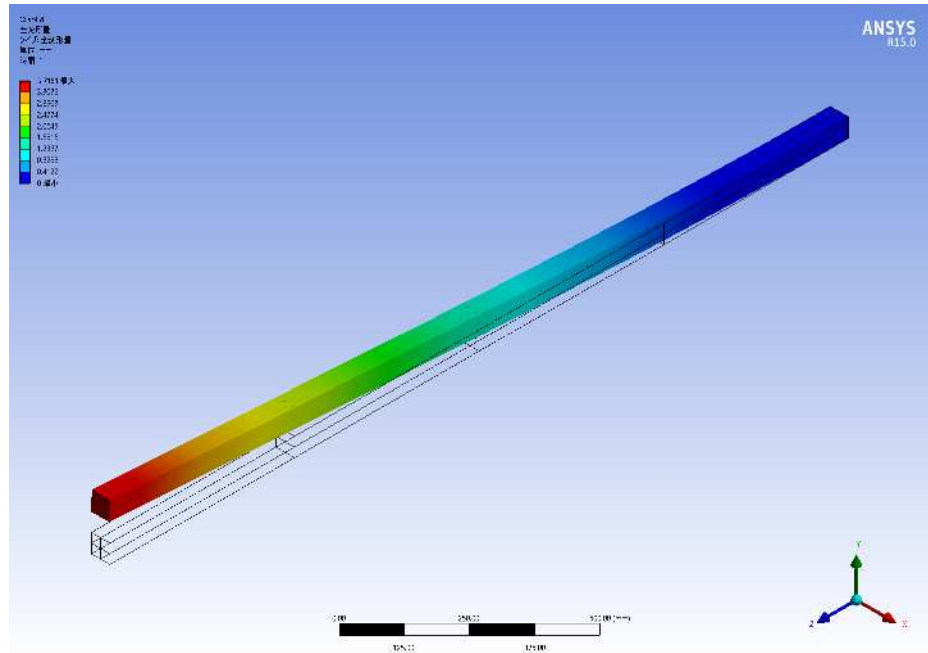


図 3-14 変形図（ソリッド要素）

(3) 結論

以上より，解析結果の検証を行い，本解析コードにおける妥当性を確認した。

別紙 32 F U R S T

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-3-2-1	炉心の耐震計算結果	Ver. 5

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	FURST
使用目的	弾性解析による被覆管応力解析
開発機関	ゼネラル・エレクトリック社
開発時期	1978 年
使用したバージョン	Ver. 5
コードの概要	<p>本解析コードは、ゼネラル・エレクトリック社により開発された被覆管応力解析コードである。</p> <p>本解析コードは、燃料被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、燃料棒寸法及び許容応力の統計的分布を考慮し、被覆管の支持格子間及び支持格子接触部の応力評価をモンテカルロ法により統計的に実施する。地震時には、通常運転時及び過渡時に被覆管に発生する応力の他に、水平及び鉛直地震加速度により被覆管に発生する応力を考慮する。</p> <p>本解析コードは、高燃焼度 8×8 燃料、9×9 燃料及び MOX 燃料の設計・許認可に適用された実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・被覆管の応力計算式 (厚肉円筒) がコードに正しく組み込まれていることを、本解析コードによる解析結果が別法計算による解析結果と一致していることにより確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コード検討会等規制機関による確認 *1,*2,*3 が実施されていることを確認している。

注記 *1 : 沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について (平成 10 年 2 月 株式会社日立製作所 HLR-033 訂 1)

*2 : 沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について (平成 10 年 1 月 株式会社東芝 TLR-045 改訂 1)

*3 : 原子炉安全基準専門部会報告書, 発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について (昭和 63 年 5 月 12 日 原子力安全委員会了承)

別紙 33 P R I M E

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-3-2-1	炉心の耐震計算結果	Ver. 1

2. 解析コードの概要

項目	コード名
	P R I M E
使用目的	燃料棒の熱的挙動及び機械的挙動の評価
開発機関	ゼネラル・エレクトリック社，株式会社 東芝，株式会社 日立製作所（メーカ共同開発）
開発時期	1985 年
使用したバージョン	Ver. 1
コードの概要	<p>本解析コードは，ゼネラル・エレクトリック社，株式会社 東芝及び株式会社 日立製作所で共同開発された燃料棒熱・機械設計コードである。</p> <p>本解析コードは，出力履歴に対応したペレット-被覆管のギャップ幅変化とガスの熱伝導率をもとにペレットと被覆管のギャップ熱伝達係数を求め，燃料棒の熱的挙動を評価すると同時に，軸対称有限要素法（FEM）により，ペレットと被覆管の相互作用等の機械的挙動を評価する。</p> <p>本解析コードは，高燃焼度 8×8 燃料，9×9 燃料及び MOX 燃料の設計・許認可に適用された実績がある。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ハルデン炉の試験燃料データ，商業炉燃料棒の照射後試験データ等に基づいてペレット中心温度，核分裂生成ガス放出率，燃料棒内圧及び被覆管直径変化を対象とした計算値と測定値の比較^{*1,*2}が実施され，コードに組み込まれた個々の解析モデルが正しく機能していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ハルデン炉の試験燃料データ等との比較における計算値と測定値のばらつきがコード予測の不確かさとして考慮^{*1,*2}されていることを確認している。 ・コード検討会等規制機関による確認^{*1,*2,*3}が実施されていることを確認している。

注記*1：沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について（平成10年2月 株式会社
日立製作所 HLR-033 訂1）

*2：沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について（平成10年1月 株式会社
東芝 TLR-045 改訂1）

*3：原子炉安全基準専門部会報告書，発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について
（昭和63年5月12日 原子力安全委員会了承）

別紙 34 A B A Q U S

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-4-2-1	使用済燃料貯蔵プール及びキャスクピットの耐震性についての計算書	Ver. 6.14-6
V-2-9-2-1	原子炉格納容器コンクリート部の耐震性についての計算書	Ver. 6.14-6
V-2-9-3-4	原子炉建屋基礎スラブの耐震性についての計算書	Ver. 6.14-6
V-2-9-4-7-1-1	ドレンタンクの耐震性についての計算書	Ver. 2017
V-2-9-5-3	遠隔手動弁操作設備の耐震性についての計算書	Ver. 2017
V-2-10-2-4-3	取水槽水位の耐震性についての計算書	Ver. 6.5-4
V-2-11-2-4	原子炉建屋クレーンの耐震性についての計算書	Ver. 6.5-4
V-2-別添 3-4	可搬型重大事故等対処設備のうちポンベ設備の耐震計算書	Ver. 6.5-4

2. 解析コードの概要

2.1 ABAQUS Ver. 6.14-6

項目 \ コード名	ABAQUS
使用目的	3次元有限要素法による応力解析（弾塑性）
開発機関	ダッソー・システムズ株式会社
開発時期	1978年（Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc） 2005年（ダッソー・システムズ株式会社）
使用したバージョン	Ver. 6.14-6
コードの概要	<p>本解析コードは、米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc (HKS 社) で開発され、ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機コードである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素，連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流束，温度，集中荷重，分布荷重，加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等の様々な分野で利用されている実績を持つ。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは，使用済燃料貯蔵プール，原子炉格納容器コンクリート部及び原子炉建屋基礎スラブの3次元有限要素法による応力解析に使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・面外集中荷重を受ける鉄筋コンクリート造平板の実験についてシミュレーション解析を行い，実験結果の荷重－変位関係と解析結果の比較をすることにより，本解析コードの当該解析機能の妥当性を確認している。 ・基礎浮上りに関する例題解析を実施し，解析結果と理論モデルによる理論解が一致することを確認している。

	<ul style="list-style-type: none"> ・既往知見におけるプレストレストコンクリート製格納容器の耐圧実証試験及びシミュレーション解析の荷重－変位関係により，本解析コードの当該解析機能の妥当性を確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等の様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（積層シェル要素）による応力解析に，本解析コードが適用できることを確認している。 ・検証内容のとおり，鉄筋コンクリートの応力解析について検証しており，今回の工事計画認可申請において適正な材料構成則を設定していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.2 A B A Q U S Ver. 2017

項目 \ コード名	A B A Q U S
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析，地震応答解析
開発機関	ダッソー・システムズ株式会社
開発時期	1978年（Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc） 2016年（ダッソー・システムズ株式会社）
使用したバージョン	Ver. 2017
コードの概要	<p>本解析コードは，米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc（HKS 社）で開発され，ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機コードである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素，連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流束，温度，集中荷重，分布荷重，加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等の様々な分野で利用されている実績を持つ。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回使用する適用要素（はり要素）について，解析結果が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。 ・最新バージョンへの改訂において，計算結果に大きな影響を与える不具合に伴う改訂が行われていないことを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p>

	<ul style="list-style-type: none">・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。・<div data-bbox="703 383 1469 432" style="border: 1px solid black; height: 22px; width: 100%;"></div><div data-bbox="703 439 1469 488" style="border: 1px solid black; height: 22px; width: 100%;"></div><div data-bbox="703 495 954 544" style="border: 1px solid black; height: 22px; width: 157px;"></div>において、3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び地震応答解析に本解析コード（Ver. 6.5-4）が、使用された実績がある。・本評価における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンの変更において、本解析の使用範囲の結果に影響の無いことを確認している。
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.3 A B A Q U S Ver. 6. 5-4

項目 \ コード名	A B A Q U S
使用目的	3次元有限要素法（シェル要素，はり要素）による固有値解析及び応力解析 はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析
開発機関	Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc
開発時期	1978年
使用したバージョン	Ver. 6. 5-4
コードの概要	<p>本解析コードは，米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc (HKS 社) で開発された有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機コードである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素，連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流束，温度，集中荷重，分布荷重，加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木等の様々な分野で利用されている実績を持つ。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードによる地震応答計算結果と振動試験結果を比較して，検証*が実施され，本解析コードが検証されたものであることを確認した。 ・今回使用する適用要素（シェル要素及びはり要素）について，解析結果が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，数多くの研究機関や企業において，

	<p>様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・使用する解析モデルは、既工事計画及び耐震評価にて実績のある関連規格及び文献を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用するはりモデルによる固有値解析及び地震応答解析、3次元有限要素法（シェル要素、はり要素）による固有値解析及び応力解析に、本解析コードが適用できることを確認している。
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

注記*：独立行政法人 原子力安全基盤機構「平成 19 年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査」動的上下動耐震試験（クレーン類）に係る報告書

3. ABAQUS Ver. 6.14-6 の解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは、有限要素法による汎用非線形構造解析プログラムである。材料非線形性、幾何学的非線形性及び接触問題を含む境界非線形性を考慮した構造物の静的応力変形解析、動的解析、熱伝導解析、音響解析機能等が提供されている。また、各分野特有の連成問題（熱応力、構造－流体連成等）も解析可能である。本解析コードは、使用済燃料貯蔵プール、原子炉格納容器コンクリート部及び原子炉建屋基礎スラブの3次元有限要素法による応力解析（弾塑性）に使用している。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴を以下に示す。

- ・非線形構造問題（材料及び幾何学的非線形）に必要な機能が充実している。
- ・数多くの要素及び材料構成則が提供されており、多様な構造物のモデル化が可能である。
- ・連成問題が解析可能である。

また、今回の解析における本解析コードの使用要素は複合シェル要素（積層シェル要素）、はり要素、トラス要素（ロッド要素）及びギャップ要素である。

3.3 解析手法

3.3.1 有限要素法による評価

有限要素法による評価は、次の手順で行う。

- ① 要素内の変位を仮定し、節点変位を使って要素内任意点の変位を表現する。

$$\{\mathbf{u}\} = [\mathbf{N}]\{\mathbf{u}_e\} \quad (3.1)$$

ここで、

$\{\mathbf{u}\}$: 要素内任意点の変位
 $[\mathbf{N}]$: 形状関数マトリックス
 $\{\mathbf{u}_e\}$: 節点変位

- ② 上記の変位を微分して、要素内任意点のひずみを節点変位により表す。

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = [\mathbf{B}]\{\mathbf{u}_e\} \quad (3.2)$$

ここで、

$\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$: 要素内任意点のひずみ
 $[\mathbf{B}]$: ひずみマトリックス

- ③ 材料物性から求められる応力とひずみの関係式である(3.3)式より定められる弾性係数マトリックスを用いて、要素剛性マトリックスを(3.4)式より計算する。

$$\{\boldsymbol{\sigma}\} = [\mathbf{D}]\{\boldsymbol{\varepsilon}\} \quad (3.3)$$

$$[\mathbf{K}_e] = \int [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] dV \quad (3.4)$$

ここで、

$\{\boldsymbol{\sigma}\}$: 要素内任意点の応力
 $[\mathbf{D}]$: 材料の応力-ひずみ接線マトリックス
 $[\mathbf{K}_e]$: 要素剛性マトリックス

- ④ 全体の剛性マトリックスを要素剛性マトリックスの重ね合わせによって求め、力の釣合いより静的変位は(3.5)式、また動変位は(3.6)式より求める。

$$\{f\} = [K]\{\gamma\} \quad (3.5)$$

$$\{f\} = [M]\{\ddot{\gamma}\} + [K]\{\gamma\} \quad (3.6)$$

ここで、

$\{f\}$: 荷重ベクトル
 $\{\gamma\}$: 構造全体の変位

$$\{\gamma\} = \begin{Bmatrix} U_{e1} \\ U_{e2} \\ \vdots \\ U_{en} \end{Bmatrix}$$

$U_{e1}, U_{e2}, \dots, U_{en}$: 各節点の節点変位

$\{\ddot{\gamma}\}$: 構造全体の加速度

$[M]$: 質量マトリックス

$[K]$: 剛性マトリックス

- ⑤ 変位が決まれば、(3.2)式、(3.3)式より各要素の応力が求められる。

3.3.2 基礎浮上りの評価

原子炉建屋基礎スラブの応力解析モデルは、基礎スラブと底面地盤との間に底面地盤を表現するギャップ要素を設け、基礎スラブと底面地盤との間の剥離（基礎スラブの浮上り）を考慮している。

ギャップ要素は、図 3-1 に示すように仮定する。図 3-1(a)は地盤面に垂直な方向である鉛直ばね、図 3-1(b)は地盤面に平行な方向である水平ばねの特性である。垂直方向は、引張りの場合は力の伝達は行われず、圧縮の場合には鉛直ばね係数 k_n を介して構成関係は線形関係にあるものとする。

また、垂直方向に剥離が生じた場合には、せん断応力も伝達されない。

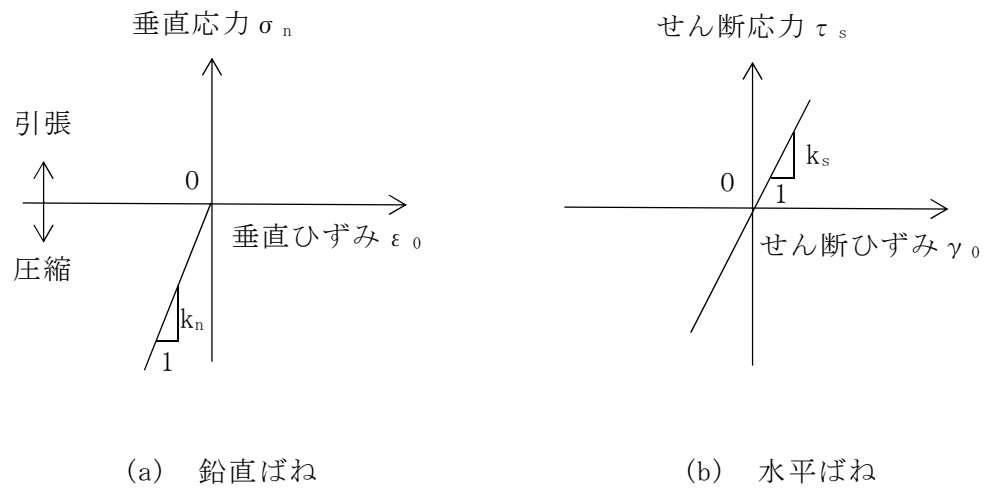


図 3-1 ギャップ要素の復元力特性

3.4 解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを図3-2に示す。

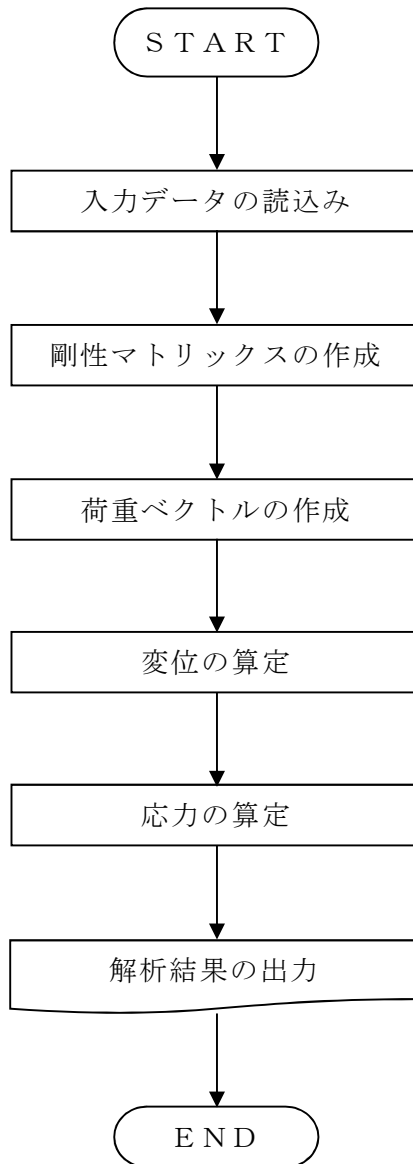


図 3-2 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

3.5.1 実験結果とシミュレーション解析の比較による検証

(1) 検証概要

本解析コードが静的非線形解析において妥当であることを検証する。

文献 (引用文献(1)参照) に示される面外方向集中荷重を受ける鉄筋コンクリート造平板の崩壊問題を, 鉄筋の層を埋め込んだシェル要素でモデル化し静的非線形解析を行い, 実験結果の荷重-変位関係と解析結果の整合を確認する。

(2) 検証モデル

図 3-3 に解析モデルを示す。正方形の鉄筋コンクリート造平板は 4 隅で鉛直方向に支持されており, 中央に集中荷重を受ける。スラブは厚さ方向の 75% の位置で, 2 方向に配筋されている。鉄筋比 (鉄筋の体積/コンクリートの体積) は, 各方向に対し 8.5×10^{-3} である。

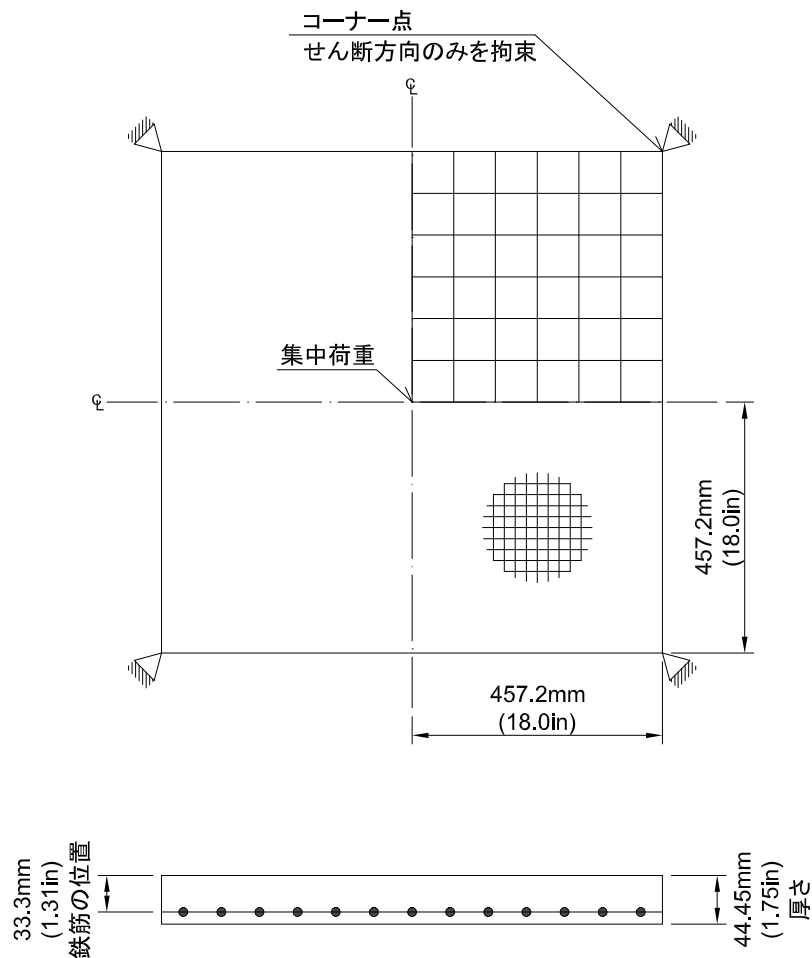


図 3-3 解析モデル

(3) 材料物性値

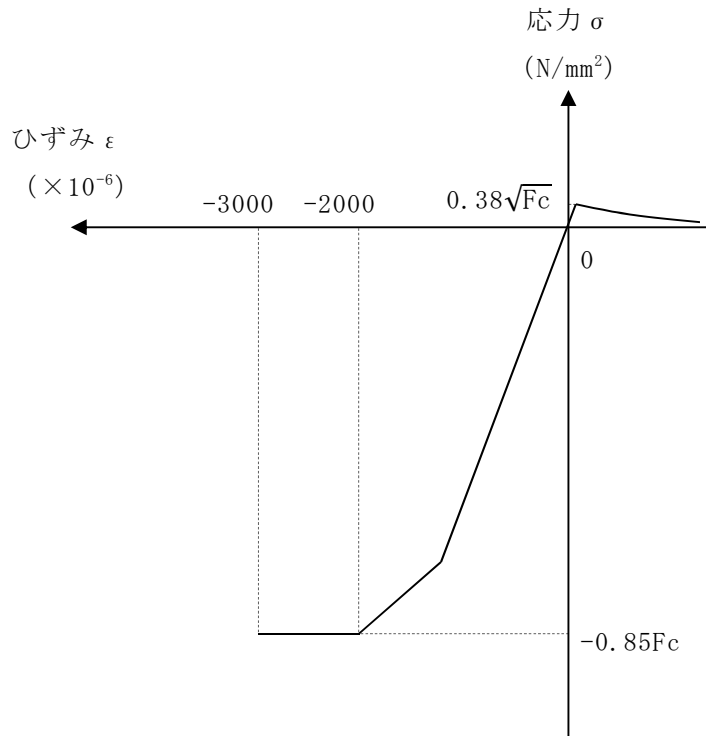
表 3-1 に解析に用いる材料物性値を示す。材料物性値は原則として文献（引用文献(1)及び引用文献(2)参照）に記載の値を用いる。

表 3-1 解析に用いる材料物性値

諸元		物性値
コンクリート	設計基準強度 F_c	37.92 N/mm ² (5500 lb/in ²)
	ヤング係数	2.86×10^4 N/mm ² (4150000 lb/in ²)
	ポアソン比	0.15
鉄筋	降伏強度 σ_y	345 N/mm ² (50000 lb/in ²)
	ヤング係数	2.00×10^5 N/mm ² (29000000 lb/in ²)

(4) 材料構成則

図 3-4 に材料構成則を示す。



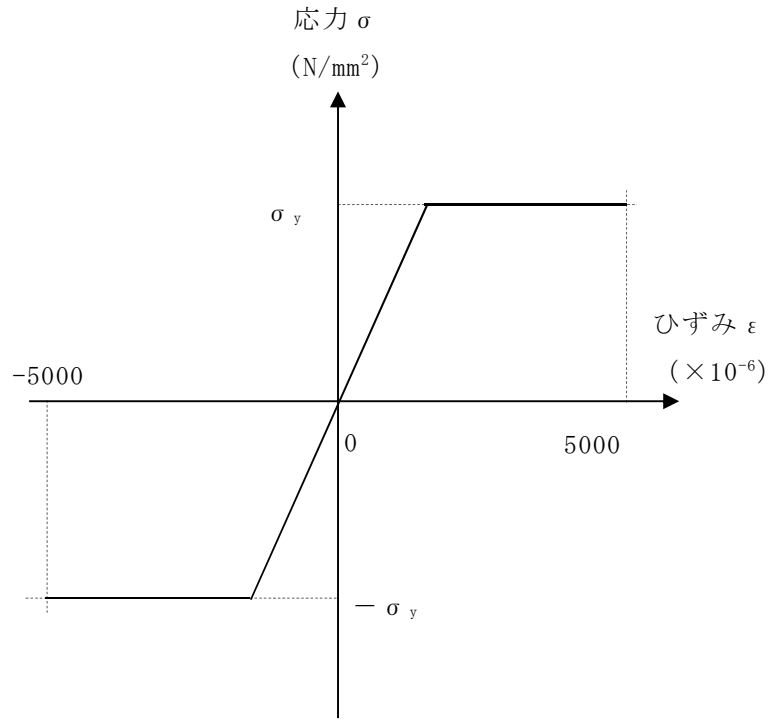
F_c : コンクリートの設計基準強度

項目	設定
圧縮強度	$-0.85F_c$ (CCV 規格)
終局圧縮ひずみ	-3000μ (CCV 規格)
圧縮側のコンクリート構成則	CEB-FIP Model code に基づき設定 (引用文献(3)参照)
ひび割れ発生後の引張軟化曲線	出雲ほか(1987)による式($c=0.4$) (引用文献(4)参照)
引張強度	$\sigma_t = 0.38\sqrt{F_c}$ (「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 - (社)日本建築学会, 1999 改定」)

(a) コンクリートの応力-ひずみ関係

図 3-4 材料構成則(1/2)

- ・鉄筋の構成則：バイリニア型
- ・終局ひずみ： $\pm 5000 \mu$ （CCV規格）



σ_y : 鉄筋の降伏強度

(b) 鉄筋の応力-ひずみ関係

図 3-4 材料構成則(2/2)

(5) 解析結果

解析結果の荷重－変形関係を文献の図（引用文献(1)参照）に重ねて図 3-5 に示す。図より両者は概ね一致していることから、解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

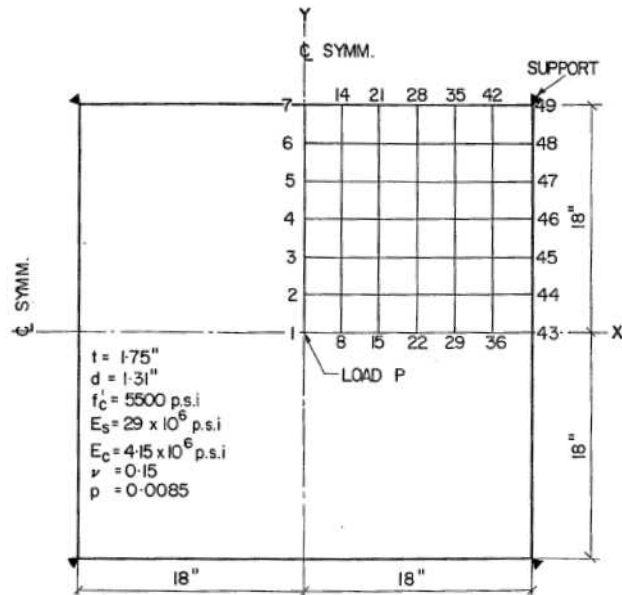
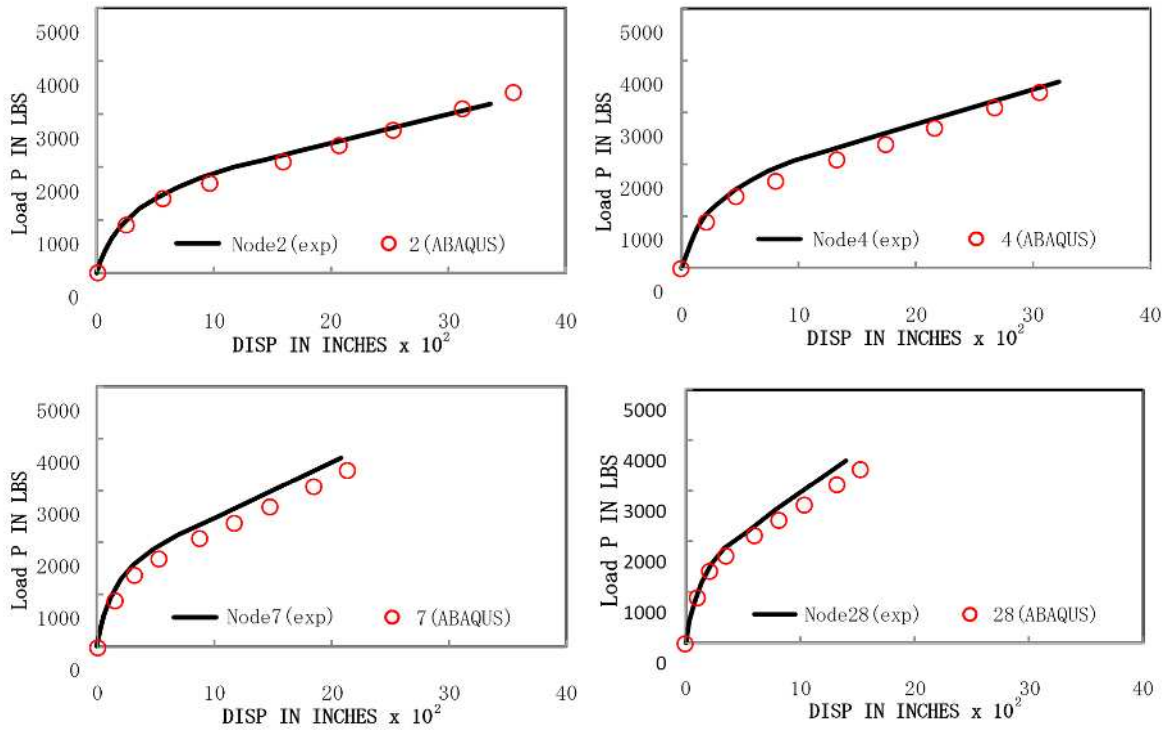


FIG. 7.—CORNER SUPPORTED TWO-WAY SLAB

図 3-5 検証解析結果

3.5.2 基礎浮上りの評価の検証

剛はりを用い、「3.2 解析コードの特徴」に示す手法による地盤ばねで固定点と連結した図3-6のモデルに対して、鉛直力Nを作用させた状態で、転倒モーメントMを漸増させ、接地率を評価し、理論解と比較する。ここで鉛直力Nは5(kN)とする。

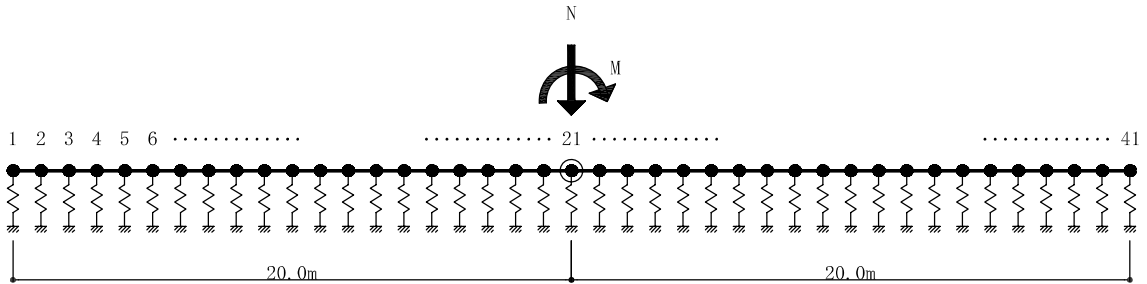


図3-6 解析モデル

(1) 理論解による接地率の評価

浮上り限界モーメント M_0 及び接地率 η は、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（社）日本電気協会」に基づき下式により算定する。

$$M_0 = \frac{N \cdot L}{6}$$

$$\eta = 3 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{M}{N \cdot L} \right)$$

ここで、

M_0 : 浮上り限界モーメント (kN・m)

N : 鉛直力 (kN)

L : 建屋基礎幅 (m)

η : 接地率

M : 転倒モーメント (kN・m)

また、接地率 $\eta = 0$ となる転倒モーメントMは、以下となる。

$$M = \frac{1}{2} \cdot N \cdot L = \frac{1}{2} \times 5 \times 40 = 100 \text{ (kN・m)}$$

(2) ABAQUSによる接地率の評価

本解析コードによる接地率の解析結果と理論解の比較を図 3-7 に示す。図 3-7 より、転倒モーメント M と接地率 η の関係は、理論解と一致することが確認できる。

本解析コードによる接地率は、荷重増分ステップ毎に浮き上がった（軸剛性及びせん断剛性が0の状態）地盤ばねのギャップ要素を確認し、その要素の総支配面積を計算することで算定した。

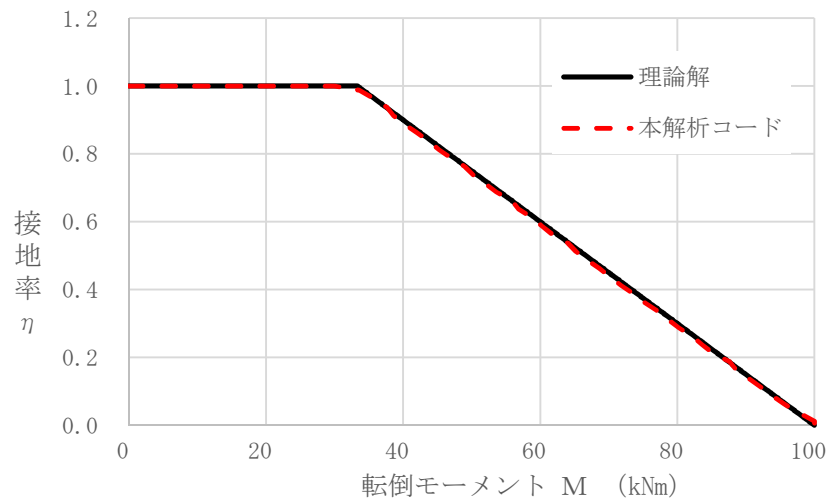


図 3-7 解析結果と理論解の比較

3.5.3 既往知見による検証

(1) 概要

本解析コードが静的非線形解析において妥当であることを検証する。

財団法人 原子力発電技術機構 (NUPEC) の原子炉格納容器信頼性実証事業において実施された、プレストレストコンクリート製格納容器 (以下「PCCV」という。) の耐圧実証試験及びシミュレーション解析 (引用文献(5)参照) により、試験結果の荷重-変位関係と解析結果の整合を確認する。

(2) PCCV の耐圧実証試験及びシミュレーション解析

図 3-8 に試験体外形図と主要諸元を、図 3-9 にシミュレーション解析モデルを示す。基礎版、円筒胴部及びドーム部より構成される PCCV 構造の 1/4 縮尺モデルを用いて、高压室素ガスを準静的に注入することにより、躯体限界圧挙動及びライナの限界圧時の漏えい挙動を実験的に把握することを目的として試験が行われている。

シミュレーション解析は、本解析コードを用いて実施しており、コンクリート及びライナは積層シェル要素、鉄筋は積層シェル内に鉄筋層、テンドンについては要素軸方向の剛性のみ有するはり要素としてモデル化されている。材料は表 3-2 に示す構成則が用いられており、PCCV の耐圧実証試験と同様に終局状態まで載荷し弾塑性挙動を確認している。

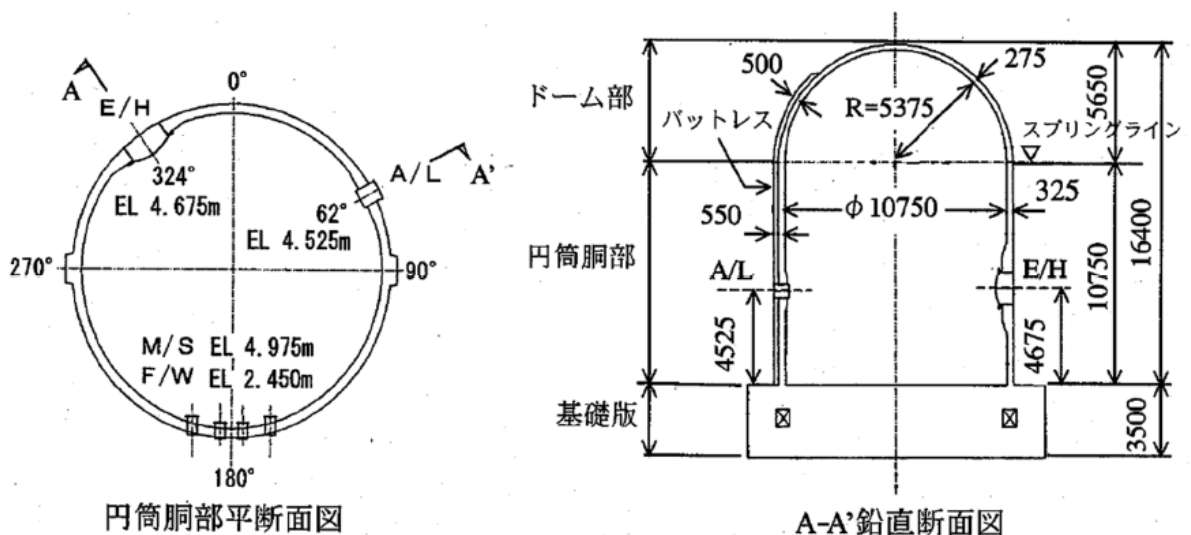


図 3-8 試験体外形図と主要諸元 (引用文献(5)より引用)

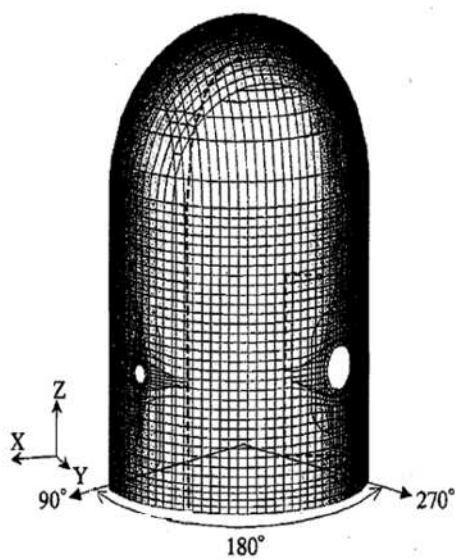


図 3-9 シミュレーション解析モデル (引用文献(5)より引用)

表 3-2 シミュレーション解析における構成則

項目		設定
コンクリート	圧縮側のコンクリート 構成則	修正 Kent&Park に基づき設定 (引用文献(6)参照)
	ひび割れ発生後の引張 軟化曲線	出雲ほか (1987) による式 ($c=0.4$) (引用文献(4)参照)
鉄筋	応力-ひずみ関係	バイリニア型

(3) 解析結果

解析結果の内圧－半径方向変位関係を図 3-10 に示す。実験と解析による載荷挙動を比較すると、最大圧力に至るまでの試験結果の変位挙動が良好に模擬されており、適正な材料構成則を使う限りはほぼ妥当な評価ができ、実機の評価において本解析コードを適用することは妥当であるとされている。

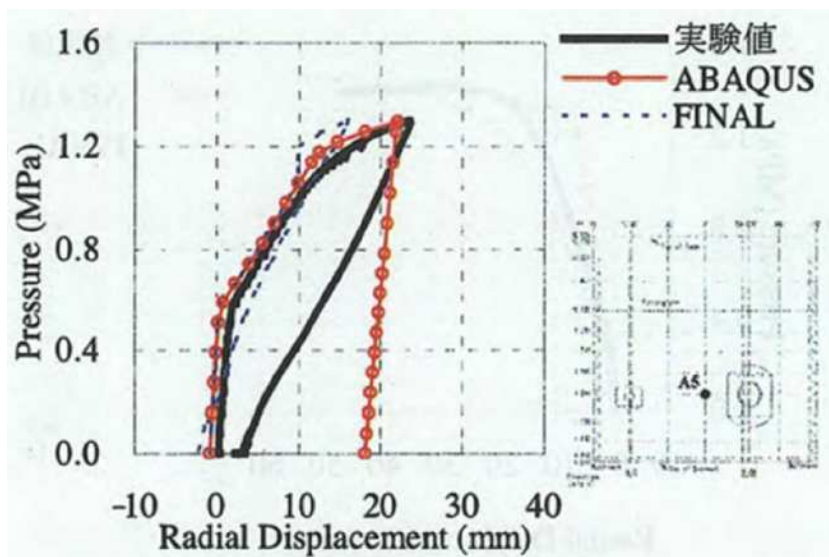


図 3-10 内圧－半径方向変位関係（引用文献(5)より引用）

3.5.3 妥当性確認

本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。

- ・本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。
- ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
- ・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（積層シェル要素）による応力解析に、本解析コードが適用できることを確認している。
- ・検証内容のとおり、鉄筋コンクリートの応力解析について検証しており、今回の工事計画認可申請において適正な材料構成則を設定していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3.5.4 評価結果

3.5.1, 3.5.2, 3.5.3及び3.5.4より、本解析コードを使用状況一覧に示す解析に用いることは妥当である。

4. 引用文献

- (1) Jofriet J. C. & G. M. McNeice : Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Slabs, Journal of the Structural Division, ASCE 1971, Vol. 97, No. ST3
- (2) Gilbert R. I. & R. F. Warner : Tension Stiffening In Reinforced Concrete Slabs, Journal of the Structural Division, ASCE 1978, Vol. 104, No. ST12
- (3) Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP MODEL CODE 1990 (DESIGN CODE) , 1993
- (4) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫 : 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, Vol. 25, No. 9, 1987. 9
- (5) 財団法人 原子力発電技術機構 : 重要構造物の安全評価 (原子炉格納容器信頼性実証事業) に関する統括報告書, 平成 15 年 3 月
- (6) Park, R., Priestley, M. J. N. and Gill, W. D. : Ductility of Square-Confined Concrete Columns, J. Struct. Div., ASCE, Vol. 108, No. ST4, PP. 929-950, 1982

別紙 35 S A P - IV

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-4-2-2	使用済燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算書	
V-2-6-3-2-1-1	水圧制御ユニットの耐震性についての計算書	
V-2-6-5-1	起動領域モニタの耐震性についての計算書	
V-2-6-5-2	出力領域モニタの耐震性についての計算書	
V-2-11-2-5	燃料取替機の耐震性についての計算書	

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	S A P - IV
使用目的	3次元有限要素法（シェルモデル）による固有値解析及び応力解析 3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び地震応答解析 3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析
開発機関	株式会社日立製作所
開発時期	1973年（米国カリフォルニア大学） 1990年（株式会社日立製作所）
使用したバージョン	[Redacted]
コードの概要	本解析コードは、[Redacted] [Redacted] [Redacted] [Redacted] [Redacted] [Redacted] [Redacted] [Redacted] 本解析コードは、機械工学，土木工学，航空工学等の分野において，多くの実績を有している。
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。 <ul style="list-style-type: none"> ・両持ちはりの単純支持円筒モデルについて，本解析コードによる解析結果と理論解とを比較して検討し，解析解と理論解が一致していることを確認している。 ・平板のモデルについて，シェルモデルによる固有値解析及び応力解析を行い，本解析コードによる解析結果と理論解とを比較して検討し，解析解と理論解が一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。

	<ul style="list-style-type: none">・本解析コードは、機械工学，土木工学，航空工学等の分野において，多くの実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。・本解析コードのマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（シェルモデル）による固有値解析及び応力解析並びに3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び地震応答解析に，本解析コードが適用できることを確認している。・今回の工事計画認可申請における構造に対して使用する要素及び解析については，既工事計画において使用された実績がある。・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは，既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

別紙 36 N S A F E

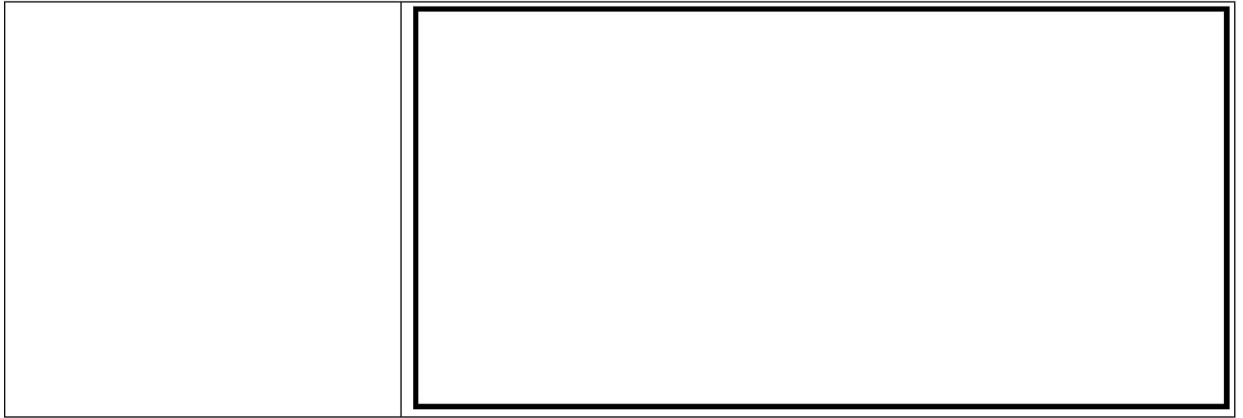
1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-4-2-3	使用済燃料貯蔵プール水位・温度 (SA) の耐震性についての計算書	Ver. 5
V-2-6-1	計測制御系統施設の耐震計算結果	Ver. 5
V-2-6-5-21	ドライウエル雰囲気温度の耐震性についての計算書	Ver. 5
V-2-6-5-22	サプレッションチェンバ気体温度の耐震性についての計算書	Ver. 5
V-2-6-5-23	サプレッションチェンバプール水温度の耐震性についての計算書	Ver. 5
V-2-6-5-26	格納容器内水素濃度 (SA) の耐震性についての計算書	Ver. 5
V-2-6-5-30	格納容器下部水位の耐震性についての計算書	Ver. 5
V-2-8-2-1-4	耐圧強化ベント系放射線モニタの耐震性についての計算書	Ver. 5
V-2-8-3-1-1-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 5
V-2-8-5-1	中央制御室外気取入れ・排気ダクトの耐震性についての計算書	Ver. 5
V-2-11-2-3	中央制御室天井照明の耐震性についての計算書	Ver. 5

K7 ① V-2 別紙 R0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	N S A F E
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル）による支持構造物の固有値解析，応力解析
開発機関	株式会社日立プラントコンストラクション
開発時期	1982年
使用したバージョン	Ver. 5
コードの概要	<p>本解析コードは，支持構造物の強度解析を目的として開発された計算機プログラムである。本解析コードは，汎用構造解析コード をメインプログラムとし，応力評価プログラム及びそれらのインターフェイスプログラムのサブプログラムから成る。</p> <p>任意の1次元，2次元あるいは3次元形状に対し，静的解析，動的解析を行うことが可能で，反力・モーメント・応力，固有値・刺激係数等の算出が可能である。</p> <p>原子力の分野における使用実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <div style="border: 2px solid black; height: 150px; margin: 5px 0;"></div> <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <div style="border: 2px solid black; height: 40px; margin: 5px 0;"></div>



注記*1：日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」

*2：原子力発電所耐震設計技術指針

別紙 37 SOLVER

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-4-2-4	使用済燃料貯蔵プール水位・温度（SA 広域）の耐震性についての計算書	Rev 02.05
V-2-10-1-2-2-6	管の耐震性についての計算書	Rev 02.05
V-2-別添 2-2	溢水源としない耐震 B,C クラス機器の耐震計算書	Rev 02.05

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	S O L V E R
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析
開発機関	株式会社東芝
開発時期	1988年
使用したバージョン	Rev 02.05
コードの概要	<p>本解析コードは，構造物の静的及び動的解析のメインプログラムである「SAP」を基に作られている。「SAP」は，米カリフォルニア大学にて開発された計算機プログラムである。</p> <p>任意の3次元形状に対し，有限要素法により静的解析，動的解析を行い，反力・モーメント・応力，固有振動数・刺激係数等の算出が可能である。</p> <p>本解析コードは，原子力の配管設計において，多くの実績を有している。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードと世界的に使用実績及びクライアント数の多い配管解析プログラムの一つである解析コード <div style="border: 1px solid black; height: 15px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 15px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 15px; width: 100%;"></div> <p>による解析結果を比較し，結果が合致することを確認している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，他プラントの既工事計画において使用実績があることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請で行うはりモデルの固有値解析，地震応答解析及び応力解析の使用目的に照らして，用途及び適用範囲が上述の妥当性確認範囲であること

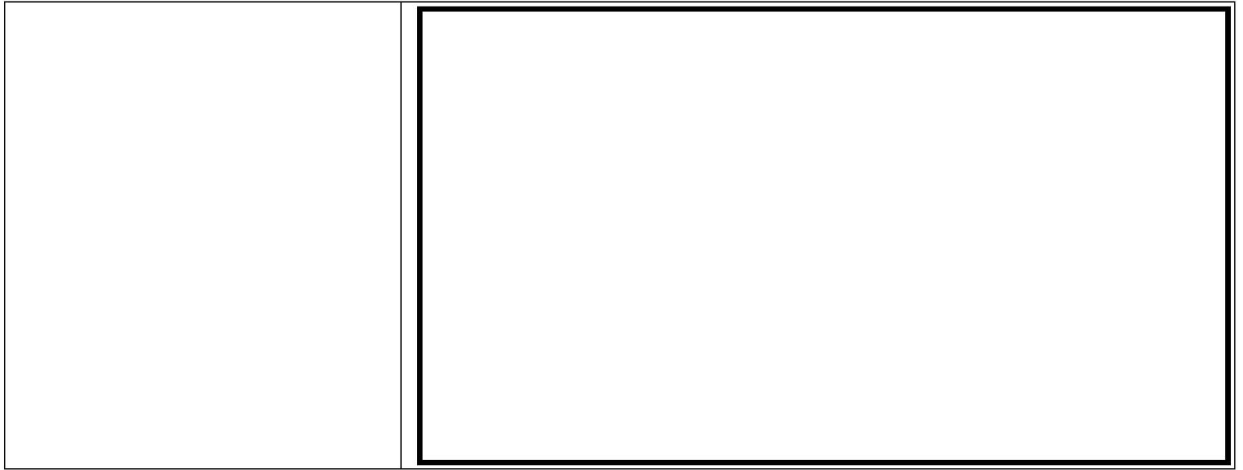
	<p>を確認している。</p> <ul style="list-style-type: none">・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-4-3-1-3	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-5-1	原子炉冷却系統施設の耐震計算結果	Ver. 52
V-2-5-2-1-2	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-5-3-1-6	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-5-4-1-5	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-5-4-2-5	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-5-4-3-2	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-5-4-4-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-5-5-1-3	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-5-6-1-6	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-5-6-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-6-3-2-1-2	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-6-4-1-3	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-6-6-1-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-6-6-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-7-1	放射性廃棄物の廃棄施設の耐震計算結果	Ver. 52
V-2-9-4-4-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-9-4-4-3-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-9-4-5-1-2	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-9-4-5-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-9-4-5-4-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-9-4-6-1-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-10-1-2-1-7	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-10-1-2-2-6	管の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-10-2-4-3	取水槽水位の耐震性についての計算書	Ver. 52
V-2-別添 2-2	溢水源としない耐震 B, C クラス機器の耐震計算書	Ver. 52

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	H I S A P
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル）による管の固有値解析，応力解析
開発機関	株式会社日立製作所
開発時期	1978年
使用したバージョン	Ver. 52
コードの概要	<p>本解析コードは，配管の強度解析を目的として開発された計算機プログラムである。本解析コードは，汎用構造解析コード をメインプログラムとし，応力評価プログラム及びそれらのインターフェイスプログラムのサブプログラムから成る。</p> <p>任意の1次元，2次元あるいは3次元形状に対し，静的解析，動的解析を行うことが可能で，反力・モーメント・応力，固有値・刺激係数等の算出が可能である。</p> <p>原子力の分野における使用実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <div style="border: 2px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div> <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <div style="border: 2px solid black; height: 40px; width: 100%;"></div>



注記*1：日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」

*2：原子力発電所耐震設計技術指針

別紙 39 I S A P

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-5-4-5-1	管の耐震性についての計算書	ISAP-III
V-2-10-1-2-2-6	管の耐震性についての計算書	ISAP-III
V-2-別添 2-2	溢水源としない耐震 B,C クラス機器の耐震計算書	ISAP-IV

2. 解析コードの概要

2.1 I S A P ISAP-III

項目 \ コード名	I S A P
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析
開発機関	株式会社 IHI
開発時期	1988 年
使用したバージョン	ISAP-III
コードの概要	<p>本解析コードは，汎用構造解析コード「S A P - V」を基につくられている。「S A P」は，米カリフォルニア大学にて開発された計算機プログラムである。</p> <p>任意の3次元形状に対して，有限要素法により静的解析，動的解析を行い，反力・モーメント・応力，固有周期・刺激係数等の算出が可能である。</p> <p>本解析コードは，原子力の配管設計において，多くの実績を有している。</p>
<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードと世界的に使用実績及びクライアント数の多い配管解析プログラムの一つである解析コード <p></p> <p></p> <p>による解析結果を比較し，結果が合致することを確認している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，既工事計画において使用実績があることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請で行うはり要素の固有値解析，地震応答解析及び応力解析の使用目的に照らして，用途及び適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確

	<p>認している。</p> <ul style="list-style-type: none">・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.2 I S A P ISAP-IV

項目	コード名 I S A P
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析
開発機関	株式会社 IHI
開発時期	1988年
使用したバージョン	ISAP-IV
コードの概要	<p>本解析コードは，汎用構造解析コード「S A P - V」を基につくられている。「S A P」は，米カリフォルニア大学にて開発された計算機プログラムである。</p> <p>任意の3次元形状に対して，有限要素法により静的解析，動的解析を行い，反力・モーメント・応力，固有周期・刺激係数等の算出が可能である。</p> <p>本解析コードは，原子力の配管設計において，多くの実績を有している。</p>
<p>検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）</p>	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードと世界的に使用実績及びクライアント数の多い配管解析プログラムの一つである解析コード による解析結果を比較し，結果が合致することを確認している。 <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，既工事計画において使用実績があることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請で行うはり要素の固有値解析，地震応答解析及び応力解析の使用目的に照らして，用途及び適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。

	<ul style="list-style-type: none">・開発機関が提示するマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する３次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

別紙 40 N A P F

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-8-2-1-3	フィルタ装置出口放射線モニタの耐震性についての計算書	ver. NAPFS-201 9-A-01
V-2-8-4-7	配管遮蔽の耐震性についての計算書	ver. NAPFS-201 9-A-01
V-2-9-5-4	遠隔手動弁操作設備遮蔽の耐震性についての計算書	ver. NAPFS-201 9-A-01
V-2-別添 1	火災防護設備の耐震性に関する説明書	ver. NAPFS-201 9-A-01
V-2-別添 3-4	可搬型重大事故等対処設備のうちポンベ設備の耐震計算書	ver. NAPFS-201 9-A-01

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	N A P F
使用目的	<p>3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析 配管支持構造物の強度評価</p> <p>3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び応力解析</p>
開発機関	日本発条株式会社
開発時期	1980年
使用したバージョン	ver. NAPFS-2019-A-01
コードの概要	<p>本解析コードは、骨組構造の静的構造解析及び動的解析を行うことを目的として、配管系等の支持構造物の設計用に開発された計算機プログラムである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材料力学の数式を用いた結果と本解析コードの結果を比較した。なお、モデルは材料力学上の計算結果と容易に比較可能なものとして片持ちはりに自重による分布荷重が作用するものとした。 <p>この結果、本解析コードの結果が良好に一致していることを確認した。</p> <p>他の解析コード（）及びMSC NASTRANの解析結果と本解析コードの解析結果を比較し、良好に一致していることを確認している。</p> <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子力の分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・検証の内容により、今回の工事計画認可申請で行う固有値解析及び応力解析の使用目的に照らして今回の解析に使用することが妥当であることを確認している。

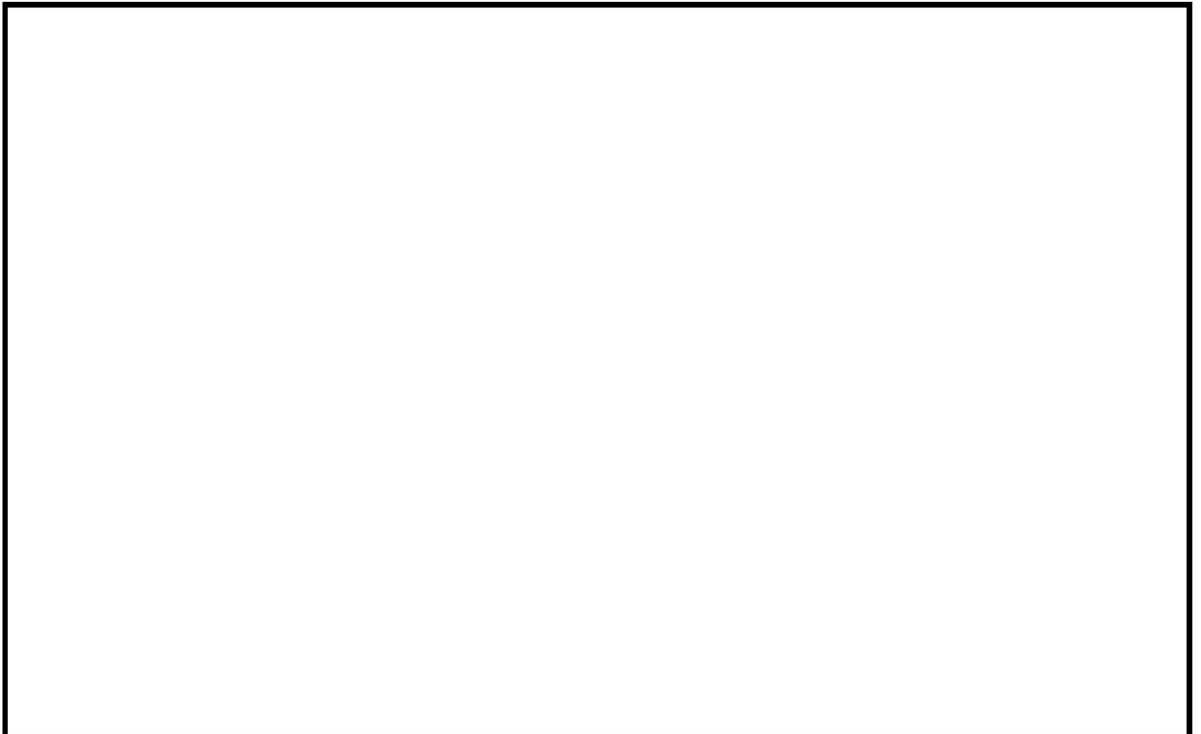
3. 解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは骨組構造の静的構造解析を行うためのものであり、配管系等の支持構造物の設計用として 日本発条株式会社で開発し、保守・運用している。変形は線形かつ微小変形であり、部材についてはフックの法則が成り立っていること、及び荷重に対しては重ね合わせの原理が成り立つことを前提としている。



3.2 解析コードの特徴



3.3 解析手法

3.3.1 静的解析

図 3-1 に示す骨組構造の元となる要素の i, j 端に加わる荷重（材端力）とそれに伴う変位（たわみ）の関係は、

$$\begin{Bmatrix} f_i^* \\ f_j^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ij} \\ K_{ji} & K_{jj} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_i^* \\ u_j^* \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (3. 1)$$

と表す事ができる。

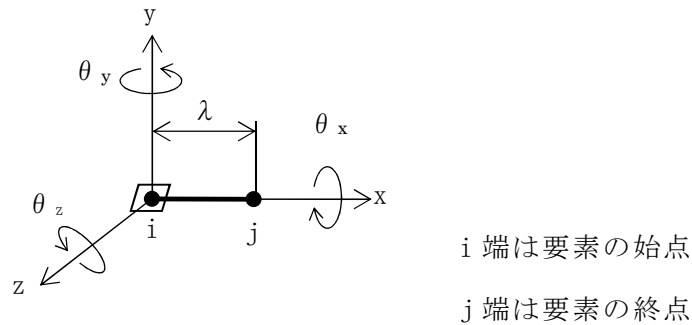


図 3-1 要素座標系における定義

材端力の成分 $(f_i^*, f_j^*)^T$ は釣り合い条件より、

$$\{f_i^*\} = -[H] \cdot \{f_j^*\} \dots \dots \dots (3. 2)$$

と表される。

ここで、[H]は釣り合いマトリクスで、要素 x 軸を要素の両端を結ぶ線に一致する様に座標系をとると、

$$[H] = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ 0 & 1 & & & 0 & \\ 0 & 0 & 1 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & & \\ 0 & 0 & -\lambda & 0 & 1 & \\ 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3. 3)$$

となる。ここで、 λ は i, j 間の要素長である。

i 端の変形による影響を除外した j 端の変位を $\{u_j\}$ とし、この要素単体の剛性マトリクスを [K] とすると材端力 $\{f_j^*\}$ は、

$$\{u_j\} = -[H]^T \cdot \{u_i^*\} + \{u_j^*\} \dots \dots \dots (3. 4)$$

$$\{f_j^*\} = [K] \cdot \{u_j\} \dots \dots \dots (3. 5)$$

となる。

ここで、[K]の各成分は下記のとおりである。

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{\lambda} & & & & & \\ 0 & \frac{12EI_z}{\lambda^3(1+\phi_y)} & & & & \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{\lambda^3(1+\phi_z)} & & & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{\lambda} & & \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{\lambda^2(1+\phi_z)} & 0 & \frac{(4+\phi_z)EI_y}{\lambda(1+\phi_z)} & \\ 0 & \frac{-6EI_z}{\lambda^2(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\phi_y)EI_z}{\lambda(1+\phi_y)} \end{bmatrix} \quad \text{Symmetric}$$

(3. 4), (3. 5)式を(3. 2)式に, (3. 4)式を(3. 5)式にそれぞれ代入し, 整理すると材端力と変位の関係式は,

$$\begin{Bmatrix} f_i^* \\ f_j^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H \cdot K \cdot H^T & -H \cdot K \\ -K \cdot H^T & K \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_i^* \\ u_j^* \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (3. 6)$$

と表される。

ここで,

$$[K^*] = \begin{bmatrix} H \cdot K \cdot H^T & -H \cdot K \\ -K \cdot H^T & K \end{bmatrix}$$

とする。

[K*]の各成分を図3-2に示す。

[K*]は要素座標系における要素剛性マトリクスであるが, 全体座標系から要素座標系への座標変換マトリクスを[T]とすると, 全体座標系における要素剛性マトリクス[k*]は次のとおりになる。

$$[k^*] = [T]^T \cdot [K^*] \cdot [T] \dots \dots \dots (3. 7)$$

(3. 7)式で求められた剛性マトリクスを結合状態に応じて全要素にわたって合成する事により, 系全体の剛性マトリクス[k]が得られる。

よって, 外力ベクトル{f}が与えられるとき, 変位{u}は次式により求められる。

$$\{f\} = [k] \cdot \{u\} \dots \dots \dots (3. 8)$$

$\frac{EA}{\lambda}$										
0	$\frac{12EI_z}{\lambda^3(1+\phi_y)}$									
0	0	$\frac{12EI_y}{\lambda^3(1+\phi_z)}$								
0	0	0	$\frac{GJ}{\lambda}$							Symmetric
0	0	$\frac{-6EI_y}{\lambda^2(1+\phi_z)}$	0	$\frac{(4+\phi_z)EI_y}{\lambda(1+\phi_z)}$						
0	$\frac{6EI_z}{\lambda^2(1+\phi_y)}$	0	0	0	$\frac{(4+\phi_y)EI_z}{\lambda(1+\phi_y)}$					
$-\frac{EA}{\lambda}$										
0	$\frac{-12EI_z}{\lambda^3(1+\phi_y)}$									$\frac{EA}{\lambda}$
0	0	0	0	0	$\frac{-6EI_z}{\lambda^2(1+\phi_y)}$	0	$\frac{12EI_z}{\lambda^3(1+\phi_y)}$			
0	0	$\frac{-12EI_y}{\lambda^3(1+\phi_z)}$	0	$\frac{6EI_y}{\lambda^2(1+\phi_z)}$	0	0	0	$\frac{12EI_y}{\lambda^3(1+\phi_z)}$		
0	0	0	$\frac{-GJ}{\lambda}$							$\frac{GJ}{\lambda}$
0	0	$\frac{-6EI_y}{\lambda^2(1+\phi_z)}$	0	$\frac{(2-\phi_z)EI_y}{\lambda(1+\phi_z)}$	0	0	0	$\frac{6EI_y}{\lambda^2(1+\phi_z)}$	0	$\frac{(4+\phi_z)EI_y}{\lambda(1+\phi_z)}$
0	$\frac{6EI_z}{\lambda^2(1+\phi_y)}$	0	0	0	$\frac{(2-\phi_y)EI_z}{\lambda(1+\phi_y)}$	0	$\frac{-6EI_z}{\lambda^2(1+\phi_y)}$	0	0	$\frac{(4+\phi_y)EI_z}{\lambda(1+\phi_y)}$

図 3-2 要素剛性マトリクス [K*]

(3. 8) 式を効率的に解くために変形コレスキー法を用いる。

全体剛性マトリクス [k] を上部三角行列 [k[^]] と、下部三角行列 [k[^]]^T に分解して、

$$[k] = [k^{\wedge}]^T \cdot [k^{\wedge}] \quad \dots \dots \dots (3. 9)$$

次に [k[^]] の各行をその対角成分の平方根で除したものを改めて [k[^]] とおくと、

$$[k] = [k^{\wedge}]^T \cdot [D] \cdot [k^{\wedge}] \quad \dots \dots \dots (3. 10)$$

となる。ここで、[D] は対角行列で、以下のとおりである。

$$[D] = \begin{bmatrix} (k_{11}^{\wedge})^{-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & (k_{22}^{\wedge})^{-1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & (k_{nn}^{\wedge})^{-1} \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (3. 11)$$

また、[k] の上部三角行列 [k[^]] 内の各数値は、以下のとおりとなる。

$$\left. \begin{aligned} k_{1b}^{\wedge} &= k_{1b} \\ k_{ab}^{\wedge} &= k_{ab} - \sum_{\gamma=1}^{a-1} \frac{k_{\gamma a}^{\wedge} \cdot k_{\gamma b}^{\wedge}}{k_{\gamma \gamma}^{\wedge}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3. 12)$$

$$\left(\begin{aligned} a &= 2, 3, \dots, n \\ b &= a, a+1, \dots, n \end{aligned} \right)$$

(3. 10)式を(3. 8)式に代入すると、

$$\{f\} = [k']^T \cdot [D] \cdot [k'] \cdot \{u\}$$

となる。ここで、

$$\{f'\} = [k'] \cdot \{u\} \quad \dots \dots \dots (3. 13)$$

とすると、

$$\{f\} = [k']^T \cdot [D] \cdot \{f'\}$$

となり、変形すると、

$$\{f'\} = [D]^{-1}([k']^T)^{-1}\{f\}$$

となる。ここで、 $[D]^{-1}([k']^T)^{-1}$ は下部三角行列である。

つづいて、前進消去過程により $\{f'\}$ を求めることができる。 $\{f'\}$ 内の各数値は、以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} f_1' &= f_1 \\ f_a' &= f_a - \sum_{\gamma=1}^{a-1} \frac{k_{\gamma a}'}{k_{\gamma \gamma}'} \cdot f_{\gamma}' \quad \dots \dots \dots (3. 14) \\ &(a = 2, 3, \dots, n) \end{aligned}$$

得られた $\{f'\}$ を(3. 13)式に代入し、後進代入過程を行えば $\{u\}$ を求めることができる。

これは全体座標系における変位を示し、これと剛性マトリクスから、任意の要素の要素座標系における材端力（内力） $\{f_i^*\}$ 、 $\{f_j^*\}$ を求めることができる。

$$\begin{Bmatrix} f_i^* \\ f_j^* \end{Bmatrix} = [K^*] \cdot [T] \cdot \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} \quad \dots \dots \dots (3. 15)$$

各方向の応力は、(3. 15)式によって得られた $\{f_i^*\}$ 、 $\{f_j^*\}$ を用いて i 端、j 端ごとに(3. 16)式にて求める。

$$\left. \begin{aligned} \text{軸応力} : \sigma_x &= F_x/A \\ \text{せん断応力} : \tau_y &= F_y/A_{sy}, \quad \tau_z = F_z/A_{sz} \\ \text{ねじり応力} : \tau_x &= M_x/Z_x \\ \text{曲げ応力} : \sigma_y &= M_y/Z_y, \quad \sigma_z = M_z/Z_z \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3. 16)$$

ここで、

F_x : 軸力

F_y, F_z : せん断力

M_x : ねじりモーメント

M_y, M_z : 曲げモーメント

である。

次に拘束点の反力を求める。

ある拘束点の反力 $\{R\}$ は、その点に隣接されている要素 n 個分の反力の合計となる。

m 番目の隣接要素の反力 $\{R_m\}$ は(3. 1)式より、

$$i \text{ 端が固定端の場合} : \{R_m\} = -([K_{ii}]\{u_i^*\} + [K_{ij}]\{u_j^*\})$$

$$j \text{ 端が固定端の場合} : \{R_m\} = -([K_{ji}]\{u_i^*\} + [K_{jj}]\{u_j^*\})$$

$$\{R\} = \{R_1\} + \{R_2\} + \dots + \{R_m\} + \dots + \{R_n\} \quad \dots \dots \dots (3. 17)$$

で与えられる。

3.3.2 固有値解析

骨組構造物をばね-質量要素からなる多質点系振動モデルとして取り扱い、固有値解析を行う。

各要素の質量 m 、変位 u とすると、自由振動の方程式は、

$$\left. \begin{aligned} m_1 \cdot \ddot{u}_1 + k_{11} \cdot u_1 + k_{12} \cdot u_2 + \dots + k_{1n} \cdot u_n &= 0 \\ m_2 \cdot \ddot{u}_2 + k_{21} \cdot u_1 + k_{22} \cdot u_2 + \dots + k_{2n} \cdot u_n &= 0 \\ \dots \dots \dots & \\ \dots \dots \dots & \\ m_n \cdot \ddot{u}_n + k_{n1} \cdot u_1 + k_{n2} \cdot u_2 + \dots + k_{nn} \cdot u_n &= 0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3. 18)$$

と表現される。

(3. 18)式の解を

$$u_1 = \phi_1 \cdot e^{i\omega t}, \quad u_2 = \phi_2 \cdot e^{i\omega t} \dots$$

とする。ここで、 ϕ は固有ベクトル、 ω は固有角振動数である。

$$\ddot{u}_1 = -\omega^2 \phi_1 \cdot e^{i\omega t}, \quad \ddot{u}_2 = -\omega^2 \phi_2 \cdot e^{i\omega t} \dots$$

となり、これらを(3. 18)式に代入して整理し、マトリクス表現すると、

$$[k] \cdot \{\phi\} = \omega^2 \cdot [M] \cdot \{\phi\} \quad \dots \dots \dots (3. 19)$$

となる。ここで、 $[k]$ は全体剛性マトリクス、 $[M]$ は全体質量マトリクスとする。

$[k]$ は 3.3.1 項と同様の方法で作成する。次に、各要素の質量 m_i を各節点に集中させて $[M]$ を作成する。 $[k]$ 、 $[M]$ を(3. 19)式に代入し、サブスペース法による固有値解析により(3. 19)式を満足する固有値 ω^2 と固有ベクトル $\{\phi\}$ を求める。

記号説明

- {f_i*} : 要素 i 端の材端力
 - {f_j*} : 要素 j 端の材端力
 - {u_i*} : 要素 i 端の変位ベクトル
 - {u_j*} : 要素 j 端の変位ベクトル
 - {u_j} : 要素 j 端の変位ベクトル (i 端の変形による影響を除去したもの)
 - [H] : 釣り合いマトリクス
 - [K] : 部分剛性マトリクス
 - λ : i, j 間の要素長
 - [T] : 全体座標系から要素座標系への変換マトリクス
 - [K*] : 要素座標系における要素剛性マトリクス
 - [k*] : 全体座標系における要素剛性マトリクス
 - {f} : 全体座標系における外力ベクトル
 - [k] : 全体剛性マトリクス
 - [k[∧]] : 上部三角行列
 - {u} : 全体座標系における変位ベクトル
 - k_{ij} : 全体剛性マトリクスの各成分
 - {R} : 拘束点反力
 - E : 縦弾性係数
 - A : 軸方向断面積
 - I_y, I_z : 断面二次モーメント
 - G : 横弾性係数
 - J : ねじり定数
 - φ_y, φ_z : せん断変形に関するパラメータ
- $$\phi_y = \frac{12EI_z}{GA_{sy} \lambda^2}, \quad \phi_z = \frac{12EI_y}{GA_{sz} \lambda^2}$$
- A_{sy} : y 方向変位に対する有効せん断断面積
 - A_{sz} : z 方向変位に対する有効せん断断面積
 - Z_y, Z_z : 断面係数
 - Z_x : ねじり断面係数
 - [M] : 全体質量マトリクス

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3-3に示す。

マトリクス構造解析の流れ

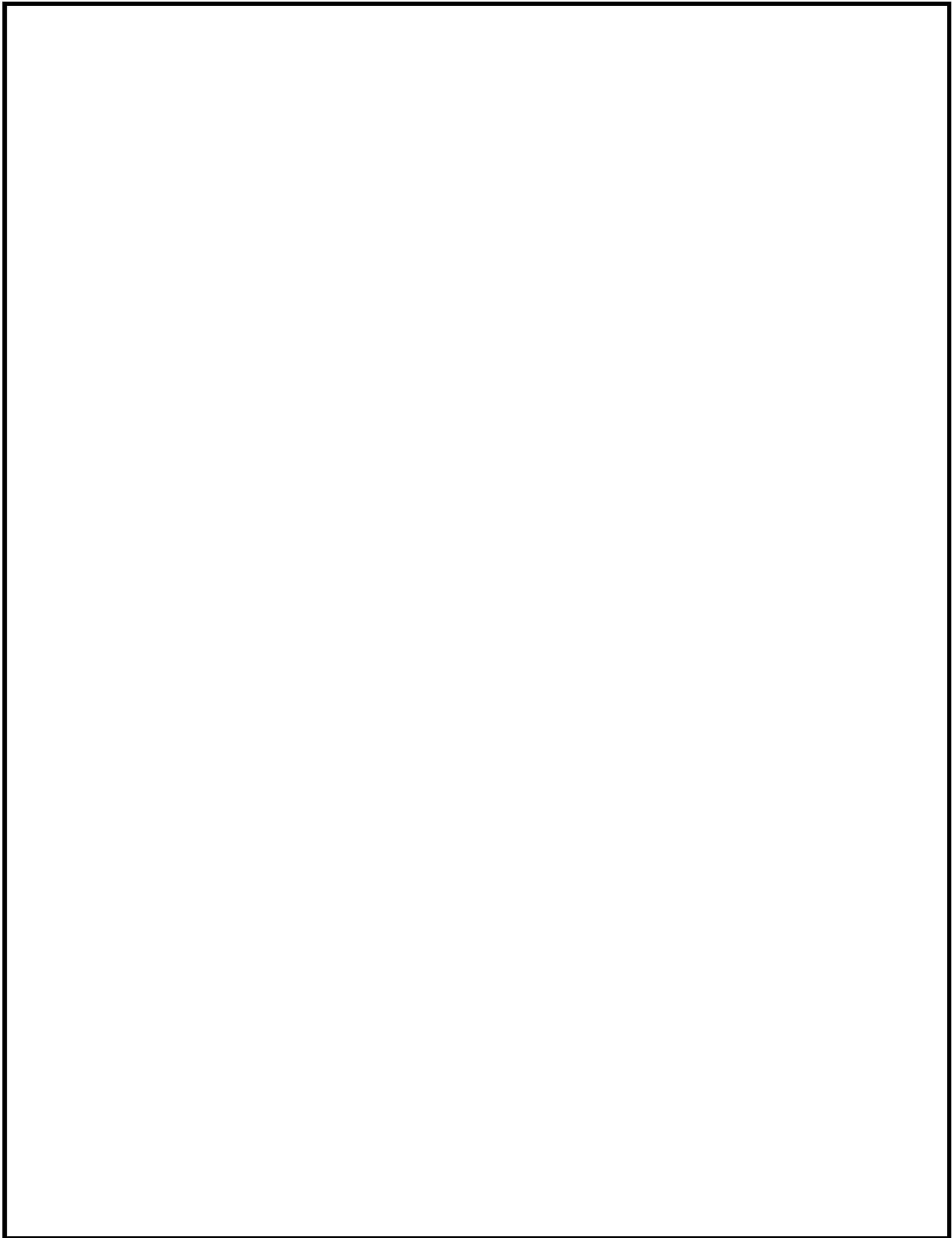


図3-3 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

3.5.1 材料力学上の計算値との比較による検証

- (1) 方法：材料力学の数式を用いた結果と本解析コードの結果を比較し，その正当性を検証した。なお，モデルは材料力学上の計算結果と容易に比較可能なものとして片持ちはりに自重による分布荷重が作用するものとした。

(2) 判定基準：

(3) 比較結果

材料力学の数式を用いた結果とNAPFの解析結果を比較した。

a. 解析モデルの形状

下図のような片持ちはりとする。

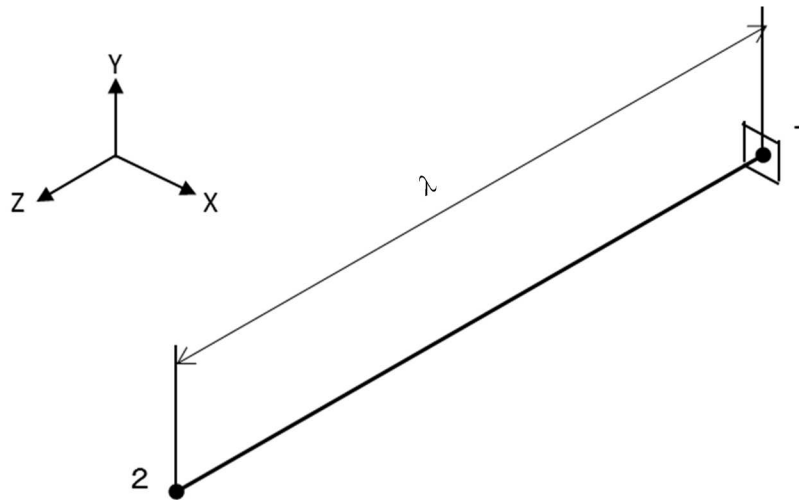


図 4-1 解析モデル形状

b. 断面定数及び物性値

縦弾性係数：E	$0.1995 \times 10^6 \text{MPa}$
断面 2 次モーメント：I	$0.498 \times 10^8 \text{mm}^4$
単位長さ当たりの重量：w	0.6659N/mm
長さ：λ	1000mm

c. 解析条件

w による分布荷重がかかった時の自由端のたわみ U，固定端の反力 R 及びモーメント M を比較する。

なお，材料力学上の計算式と合わせるため，せん断によるたわみは考慮しないこととした。

d. 材料力学による解析結果

$$U = w \cdot \lambda^4 / (8 \cdot E \cdot I) = 0.00838 \text{ mm}$$

$$R = w \cdot \lambda = 665.9 \text{ N}$$

$$M = w \cdot \lambda^2 / 2 = 332.95 \text{ N} \cdot \text{m}$$

e. 材料力学による解析結果とNAPFによる解析結果の比較

	材料力学による 解析結果	NAPFによ る解析結果	差分	比率 (%)	判定
	①	②	③(①-②)	③/①×100	
たわみ(mm)	0.008380				合格
反力(N)	665.9				合格
モーメント(N・m)	332.95				合格

以上の結果より，判定基準を満足した。

3.5.2 他の解析コードとの比較による検証

- (1) 方法：3種類のモデル（片持ち，門型，門型斜め部材付）を本解析コード及び2種類の汎用プログラム（*1及びMSC NASTRAN*2）で解析し，これらの結果と本解析コードの解析結果を比較することにより本解析コードの妥当性を確認した。

注記*1：

*2： MSC NASTRAN (ver. 2018)

- (2) 判定基準：下記のいずれかを満足した場合に合格する。



- (3) 比較結果

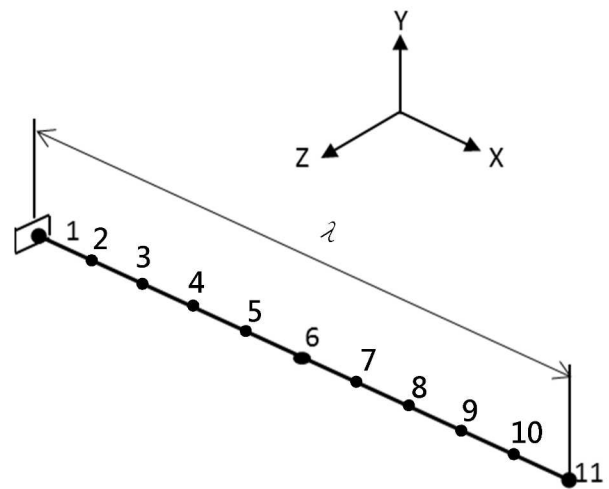
3種類のモデルについてそれぞれMSC NASTRAN及びの解析結果とNAPFの解析結果を比較し妥当性を確認した。

a. 解析モデルの形状

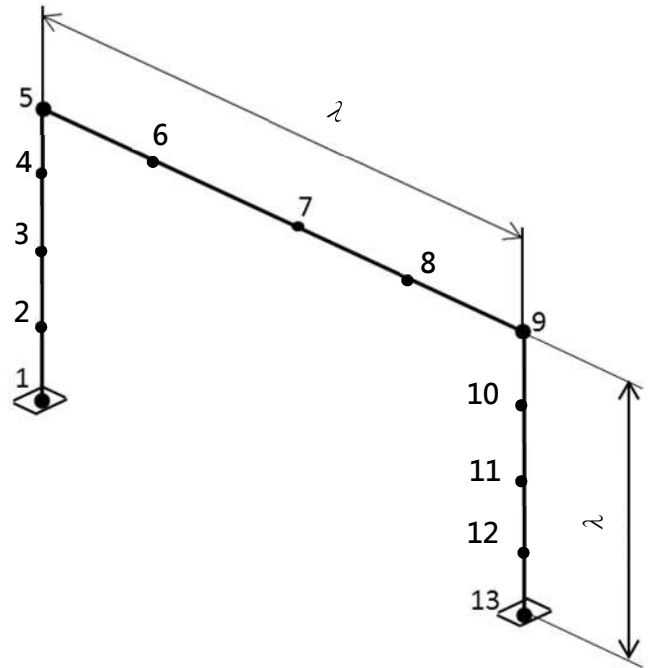
(a) モデル No. : KTMC-A

形状：片持ち

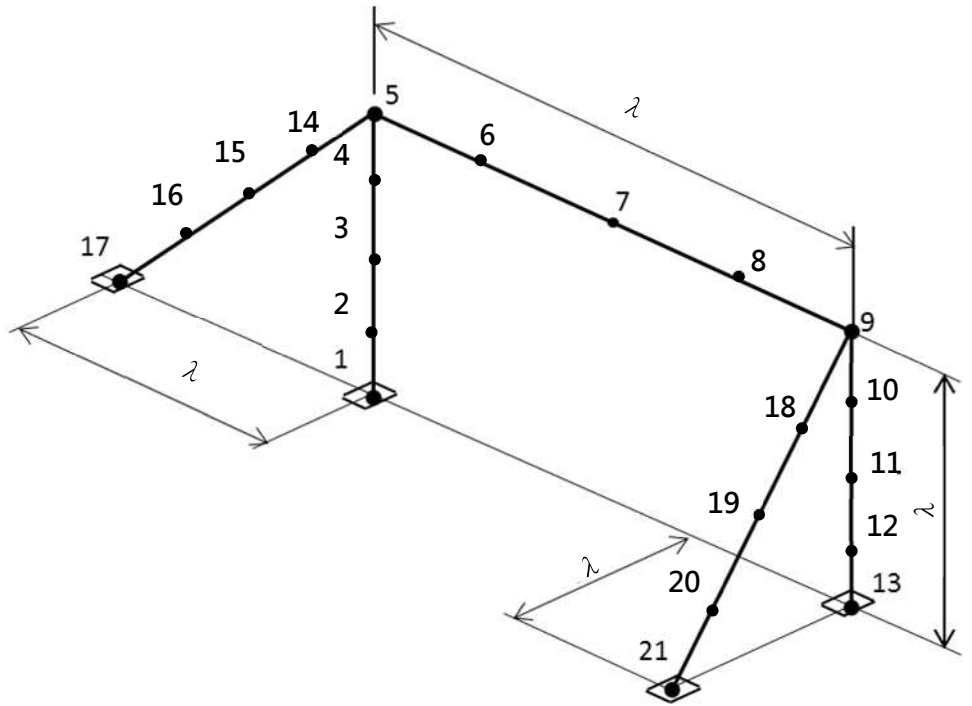
固定端：節点1



- (b) モデル No. RYOTN-A
 形状：門型
 固定端：節点 1, 13



- (c) モデル No. BRC-A
 形状：門型に斜軸ブレースを追加したもの
 固定端：節点 1, 13, 17, 21



b. 断面定数及び物性値

材質		STKR400
縦弾性係数 : E		$0.1995 \times 10^6 \text{MPa}$
単位長さ当たりの重量 : w		0.1667N/mm
総断面積 : A_x		2163mm^2
有効せん断断面積	Y 軸方向 : A_y	1080mm^2
	Z 軸方向 : A_z	1080mm^2
断面 2 次モーメント	X 軸周り : I_x ねじり	$0.498 \times 10^7 \text{mm}^4$
	Y 軸周り : I_y	$0.311 \times 10^7 \text{mm}^4$
	Z 軸周り : I_z	$0.311 \times 10^7 \text{mm}^4$
長さ : λ		1000mm

c. 解析条件

モデル No.		静的解析	要素数
		固有値解析	
1	KTMC-A	静的解析	10
		固有値解析	
2	RYOTN-A	静的解析	12
		固有値解析	
3	BRC-A	静的解析	20
		固有値解析	

d. 解析結果の比較

(a) モデル No. KTMC-A

	節 点 No.	方 向	各プログラム別解析結果					判定 結果		
			①	②	③	④差分	⑤差分		⑥比率	⑦比率
			N A P F		M S C N A S T R A N	①-②	①-③		④/① %	⑤/① %
反力 (N)	1	F _X						合格		
		F _Y						合格		
		F _Z						合格		
モーメ ント (N・m)	1	M _X						合格		
		M _Y						合格		
		M _Z						合格		
変位 (mm)	11	X						合格		
		Y						合格		
		Z						合格		
角度 (rad)	11	θ _X						合格		
		θ _Y						合格		
		θ _Z						合格		
固有 振動数 (Hz)	1次	合格								
	2次	合格								
	3次	合格								

(b) モデル No. RYOTN-A

	節 点 No.	方 向	各プログラム別解析結果					判定 結果		
			①	②	③	④差分	⑤差分		⑥比率	⑦比率
			NAPF		MSC N A S T R A N	①-②	①-③		④/① %	⑤/① %
反力 (N)	1	F _X						合格		
		F _Y						合格		
		F _Z						合格		
モーメ ント (N・m)		M _X						合格		
		M _Y						合格		
		M _Z						合格		
反力 (N)	13	F _X						合格		
		F _Y						合格		
		F _Z						合格		
モーメ ント (N・m)		M _X						合格		
		M _Y						合格		
		M _Z						合格		
変位 (mm)	5	X						合格		
		Y						合格		
		Z						合格		
角度 (rad)		θ_x						合格		
		θ_y						合格		
		θ_z						合格		
変位 (mm)	7	X	合格							
		Y	合格							
		Z	合格							
角度 (rad)		θ_x	合格							
		θ_y	合格							
		θ_z	合格							

	節 点 No.	方 向	各プログラム別解析結果					判定 結果		
			①	②	③	④差分	⑤差分		⑥比率	⑦比率
			NAPF		MSC N A S T R A N	①-②	①-③		④/① %	⑤/① %
変位 (mm)	9	X						合格		
		Y						合格		
		Z						合格		
角度 (rad)		θ_x						合格		
		θ_y						合格		
		θ_z						合格		
固有 振動数 (Hz)	1次							合格		
	2次							合格		
	3次							合格		

(c) モデル No. BRC-A

	節 点 No.	方 向	各プログラム別解析結果					判定 結果		
			①	②	③	④差分	⑤差分		⑥比率	⑦比率
			N A P F		MSC N A S T R A N	①-②	①-③		④/① %	⑤/① %
反力 (N)	1	F_x						合格		
		F_y						合格		
		F_z						合格		
モーメ ント (N・m)		M_x						合格		
		M_y						合格		
		M_z						合格		
反力 (N)	13	F_x						合格		
		F_y						合格		
		F_z						合格		

	節 点 No.	方 向	各プログラム別解析結果					判定 結果		
			①	②	③	④差分	⑤差分		⑥比率	⑦比率
			N A P F		M S C N A S T R A N	①-②	①-③		④/① %	⑤/① %
モーメント (N・m)	13	M _x						合格		
		M _y						合格		
		M _z						合格		
反力 (N)	17	F _x						合格		
		F _y						合格		
		F _z						合格		
モーメント (N・m)		M _x						合格		
		M _y						合格		
		M _z						合格		
反力 (N)	21	F _x						合格		
		F _y						合格		
		F _z						合格		
モーメント (N・m)		M _x						合格		
		M _y						合格		
		M _z						合格		
変位 (mm)	5	X						合格		
		Y						合格		
		Z						合格		
角度 (rad)		θ_x						合格		
		θ_y						合格		
		θ_z						合格		
変位 (mm)	7	X	合格							
		Y	合格							
		Z	合格							
角度 (rad)		θ_x	合格							
		θ_y	合格							
		θ_z	合格							

	節 点 No.	方 向	各プログラム別解析結果						判定 結果	
			①	②	③	④差分	⑤差分	⑥比率		⑦比率
			N A P F		M S C N A S T R A N	①-②	①-③	④/① %		⑤/① %
変位 (mm)	9	X							合格	
		Y							合格	
		Z							合格	
角度 (rad)		θ_x							合格	
		θ_y							合格	
		θ_z							合格	
固有 振動数 (Hz)	1次	合格								
	2次	合格								
	3次	合格								
	4次	合格								
	5次	合格								
	6次	合格								
	7次	合格								
	8次	合格								

以上の結果より，判定基準を満足した。

3.5.3 使用内容に対する妥当性

本解析コードによる計算結果は，材料力学上の計算値及び他の解析コードによる計算結果と比較してよく合致していることから，妥当であることを確認した。

別紙 41 S A P - IV

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-8-5-1	中央制御室外気取入れ・排気ダクトの耐震性についての計算書	Ver. 1.00

2. 解析コードの概要

項目	コード名 S A P - IV
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析
開発機関	新日本空調株式会社
開発時期	1973年（米国カリフォルニア大学） 2004年（新日本空調株式会社）
使用したバージョン	Ver. 1.00
コードの概要	<p>本解析コードは、カリフォルニア大学が開発したS A P - IVをベースに、インターフェースの追加を目的として新日本空調がカスタマイズした計算機プログラムである。任意形状の3次元モデル（主にはり要素及びシェル要素）に対して、有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行うもので、主として、機器の固有値計算並びに自重、運転時荷重及び地震力による応力計算等に用いる。</p> <p>本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学等の分野において、多くの実績を有している。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・入力されたデータはインプットデータとして解析結果とともに出力され、入力データと一致することを確認している。 ・片持ちばりの自重による固定端モーメント及び自由端たわみ、固有振動数を本解析コードの静的解析結果及び固有値解析結果と理論解を比較して検討し、解析解と理論解が一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。

	<ul style="list-style-type: none">・原子力産業界において、工事計画認可申請範囲外の支持構造物に対する耐震性評価に本解析コードの使用実績があることを確認している。・今回の工事計画認可申請で行うはりモデルの固有値解析及び静的解析という解析の使用目的に照らして、用途及び適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。・開発機関が提示するマニュアルにより今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

別紙 42 K S A P

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-9-1	原子炉格納施設の耐震計算結果	VERSION 6.3

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	K S A P
使用目的	<p>3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析</p> <p>3次元有限要素法（シェル要素）による固有値解析</p>
開発機関	川崎重工業株式会社
開発時期	1984年
使用したバージョン	VERSION 6.3
コードの概要	<p>本解析コードは，配管の強度解析を目的として開発された計算機プログラムである。本解析コードは，汎用構造解析コードS A P - Vをメインプログラムとし，応力評価プログラム及びそれらのインターフェイスプログラムのサブプログラムからなる。</p> <p>任意の1次元，2次元あるいは3次元形状に対し，静的解析，動的解析を行うことが可能で，反力・モーメント・応力，固有値・刺激係数等の算出が可能である。</p> <p>原子力の分野における使用実績を有している。</p>
<p>検証 (Verification)</p> <p>及び</p> <p>妥当性確認 (Validation)</p>	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードと世界的に使用実績及びクライアント数の多い配管解析プログラムの一つである解析コード <div style="border: 1px solid black; height: 15px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 15px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 15px; width: 100%;"></div> による解析結果を比較し，結果が合致することを確認している。 ・応力評価プログラムについては，メインプログラムの出力結果（軸力，モーメント）から，適用技術基準（J S M E *¹，J E A G *²等）に基づいて応力評価が正しく計算されていることを確認している。 ・サブプログラムについては，インターフェイスチェックシートを用いて，単位，桁数，符号が変換前後で正しく処理されていることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示さ

	<p>れた要件を満足していることを確認している。</p> <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子力の分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・検証の内容により、今回の工事計画認可申請で行う固有値解析，地震応答解析及び応力解析の使用目的に照らして今回の解析に使用することが妥当であることを確認している。
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

注記*1：日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」

*2：原子力発電所耐震設計技術指針

3. 解析手法

3.1 一般事項

本解析コードには3次元トラスやビーム，平面応力等数多くの要素が用意されており，それらを用いて1次元，2次元あるいは3次元の静的及び動的解析を行う。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードの処理能力は主に解析する問題の総節点数と必要となる固有値の数（動的解析の場合）に依存し，要素数，荷重条件数，剛性マトリクスの次数やバンド幅等に特別の制限はない。

各節点は，0 から 6 自由度まで設定することができる。

構造マトリクスの誘導は静的解析，動的解析共に同様である。静的解析では釣合い方程式を解いた後，要素の応力を算出する。動的解析では次の選択ができる。

- (a) 固有値解析
- (b) 時刻歴応答解析
- (c) 応答スペクトル解析

3.3 解析手法

3.3.1 運動方程式

節点の運動方程式を以下に示す。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = R \quad (3.1)$$

ここで K ， C ， M は剛性，減衰及び質量マトリクスであり， u ， \dot{u} ， \ddot{u} ， R は変位，速度，加速度及び荷重ベクトルを表す。構造マトリクスは要素マトリクスを直接合成して得られる。例えば

$$K = \sum K_m \quad (3.2)$$

ここで， K_m は m 番目の要素の剛性マトリクスである。

本解析コードでは，上記方程式の解法として質点系モデル（lumped Mass）による解析を採用している。したがって，系の質量は，個々の要素の質量マトリクスに，節点に付加している集中質量を加えた対角マトリクスとなる。また，減衰は比例減衰を採用している。

3.3.2 静的解析

静的解析では (3.1) 式において $\ddot{u} = \dot{u} = 0$ とした次の釣合い方程式を解き、各要素の応力を算出する。

$$Ku = R \quad (3.3)$$

本解析コードでは方程式の解である節点の変位を正定値行列によるガウスの消去法にて求め、次に応力-ひずみマトリクスより要素の応力を求める。

3.3.3 固有値解析

固有値解析では、(3.1) 式において $C = R = 0$ とした以下の固有方程式を解き、固有値と振動モードを求める。

$$K\phi = \omega^2 M\phi \quad (3.4)$$

ここで、 ω は固有角振動数、 ϕ は固有ベクトルを表す。

本解析コードでは、p 次までの固有値及び固有ベクトルが必要であると仮定している。したがって、(3.4) 式は下式にて表される。

$$K\Phi = M\Phi\Omega^2 \quad (3.5)$$

ここで、 Ω^2 は対角ベクトルである $\Omega^2 = \text{diag}(\omega_i^2)$ 、かつ Φ は直交する固有ベクトル $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ を列に持つマトリクスである。

(3.5) 式を解く方法として 2 つの方法があり、ひとつは K の次数及びバンド幅が小さい時の解法である行列式探索法 (Determinant Search Method)、もうひとつは K の次数及びバンド幅が大きい時の解法であるサブスペース法 (Subspace Method) が用意されている。

3.3.4 動的応答解析

動的応答解析は、次の方程式で表される。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = R(t) \quad (3.6)$$

ここで、 $R(t)$ は時間依存荷重又は基準面の動きより生じる荷重のベクトルであ

る。特に地震による動的応答計算の場合のように基準面が動く場合は、構造物が
 一様な基準面の加速度 \ddot{u}_g を受けているとして、下式のごとく表される。

$$M\ddot{u}_r + C\dot{u}_r + Ku_r = -M\ddot{u}_g \quad (3.7)$$

ここで、 u_r は基準面に関する構造物の相対変位量、即ち $u_r = u - u_g$ である。
 「K S A P」では、時刻歴応答解析法（(3.6)式又は(3.7)式）及び応答スペクトル法（(3.7)式）にて解くことができ、どちらもモードの重ね合わせ（モーダル解析）を使用している。

(1) モーダル解析法による時刻歴応答解析

モーダル解析法では、構造物の応答は時間依存荷重又は基準面の動きより生
 じる荷重の周波数成分に関連して、 p 次 ($p \ll$ 全モード数 n) までの振動モード
 で十分に記述しようと仮定している。

$u = \Phi X$ (Φ は直交する固有ベクトル $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ を列に持つマトリクス)の変換を行い、(3.6)式に代入すると次のようになる。

$$\ddot{X} + \Delta\dot{X} + \Omega^2 X = \Phi^T R \quad (3.8)$$

ここで、 $\Delta = \text{diag}(2\omega_i \xi_i)$; $\Omega^2 = \text{diag}(\omega_i^2)$

また、 ω_i は i 次モードの固有角振動数、 ξ_i は i 次モードの減衰比を示し、減
 衰マトリクス C は次のような直交条件を満たすと仮定している。

$$\phi_i^T C \phi_j = 0 \quad (3.9)$$

したがって、(3.8)式は p 個の非連成二次の微分方程式を表している。この微
 分方程式は、ウィルソンの θ 法にて解かれる。

(2) 応答スペクトル解析

応答スペクトル解析では、(3.7)式における基準面の加速度を以下にて記述する。

$$\ddot{\mathbf{u}}_g = \ddot{\mathbf{u}}_{gx} + \ddot{\mathbf{u}}_{gy} + \ddot{\mathbf{u}}_{gz} \quad (3.10)$$

ここで、 $\ddot{\mathbf{u}}_{gx}$, $\ddot{\mathbf{u}}_{gy}$, $\ddot{\mathbf{u}}_{gz}$ は、X, Y, Z 方向への基準面の加速度である。したがって、r 次のモードにおける応答式は下式として表される。

$$\ddot{x}_r + 2\xi_r \omega_r \dot{x}_r + \omega_r^2 x_r = r_{rx} + r_{ry} + r_{rz} \quad (3.11)$$

ここで、 x_r は r 次における X の要素であり、かつ

$$r_{rx} = -\phi_r^T M \ddot{\mathbf{u}}_{gx}, \quad r_{ry} = -\phi_r^T M \ddot{\mathbf{u}}_{gy}, \quad r_{rz} = -\phi_r^T M \ddot{\mathbf{u}}_{gz}$$

(3.11)式から、X 方向への r 次の変位は、

$$u_{rx}^{(\max)} = \phi_r \left| \phi_r^T M I_x \right| S_x(\omega_r) \quad (3.12)$$

ここで、 $S_x(\omega_r)$ は固有振動数 ω_r に対応する X 方向のスペクトル変位であり、

I_x は X 方向のみ 1 で他は 0 のベクトルである。同様に

$$u_{ry}^{(\max)} = \phi_r \left| \phi_r^T M I_y \right| S_y(\omega_r) \quad (3.13)$$

$$u_{rz}^{(\max)} = \phi_r \left| \phi_r^T M I_z \right| S_z(\omega_r) \quad (3.14)$$

である。

本解析コードでは、一次から p 次までの振動による最大変位と応力を二乗和平方根法(Square Root of the Sum of the Square)にて計算する。

3.4 解析フローチャート

本解析コードを用いて行う評価フローチャートを図 3-1 に示す。

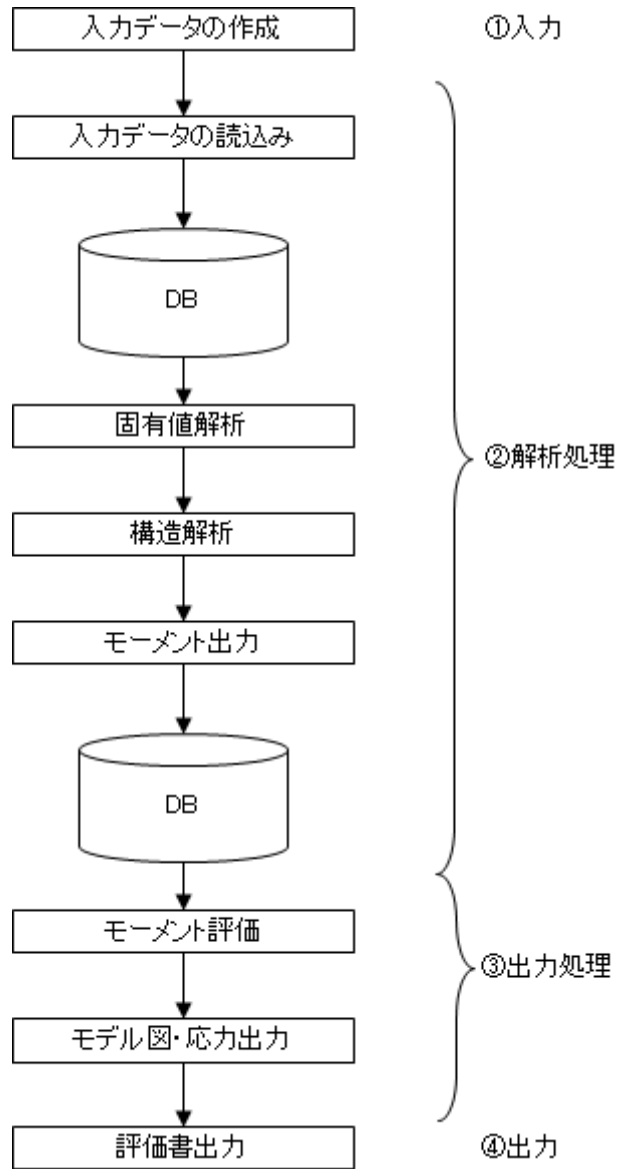
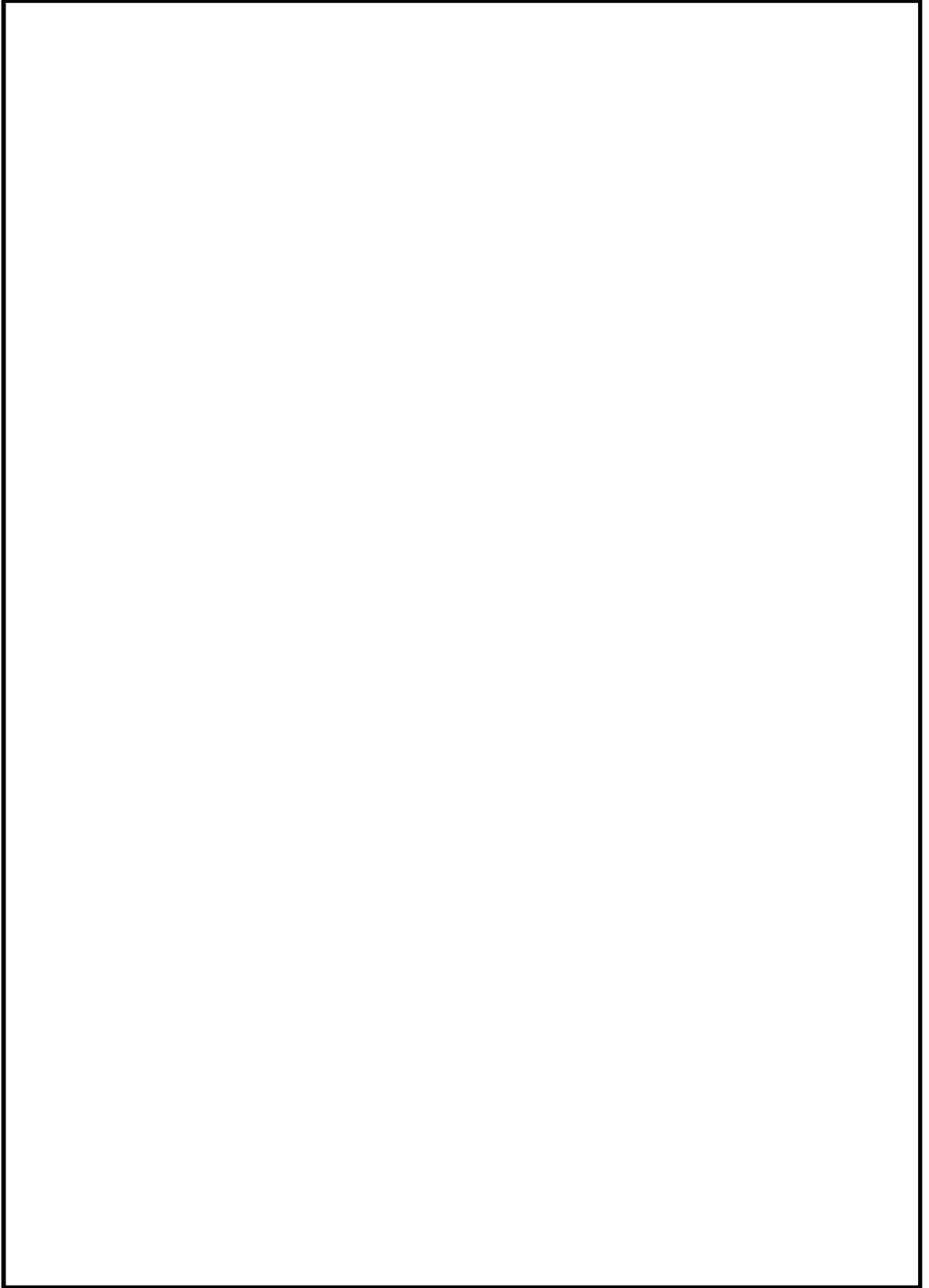


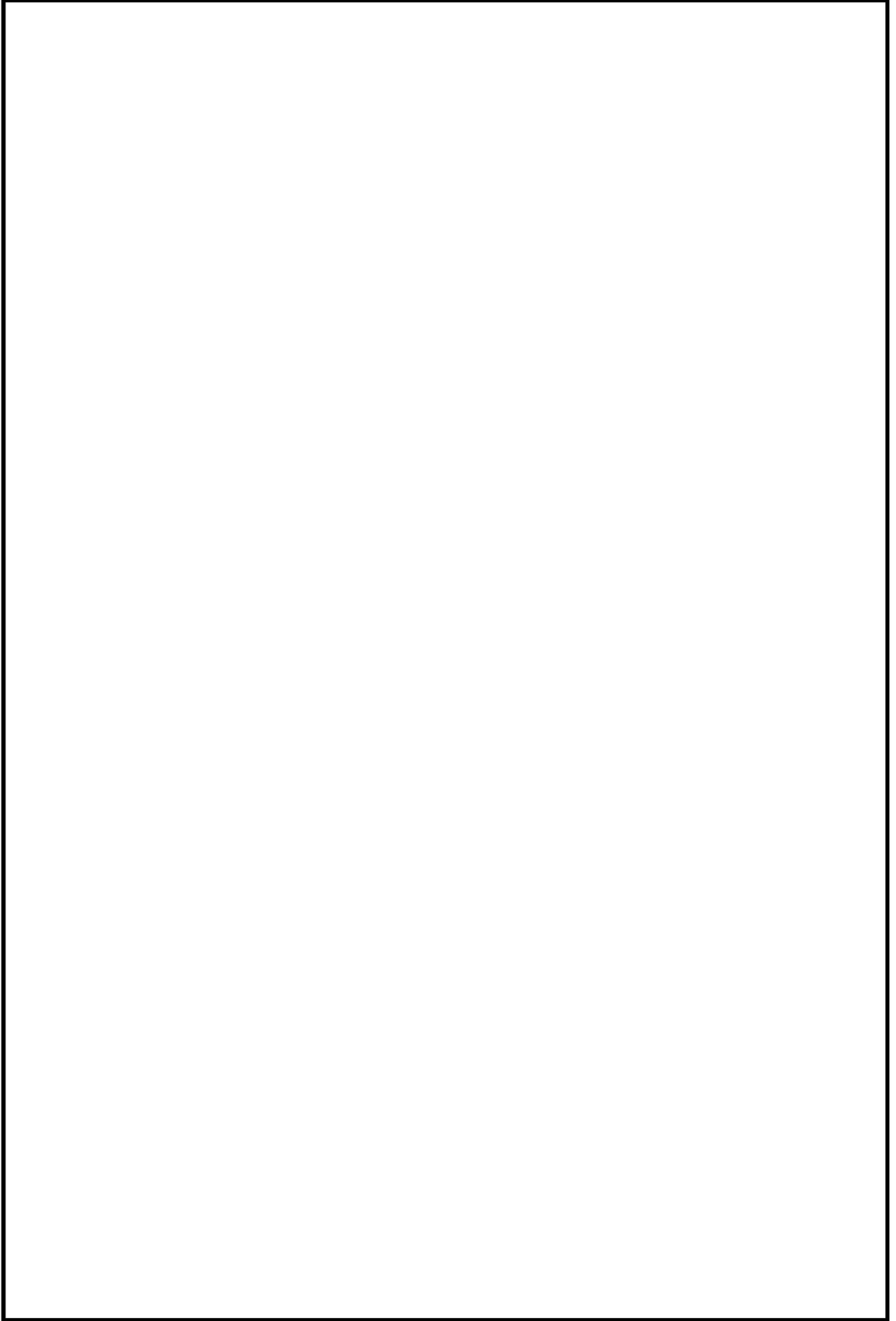
図 3-1 計算機コード「K S A P」を用いた評価フロー

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

3.5.1 他コードとの比較による検証







3.5.2 使用内容に対する妥当性

4. 参考文献

別紙 43 Super Build / SS7

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-9-3-1	原子炉建屋原子炉区域（二次格納施設）の耐震性 についての計算書	Ver. 1.1.1.11

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	Super Build / SS7
使用目的	立体フレームモデルによる応力解析
開発機関	ユニオンシステム株式会社
開発時期	2016年
使用したバージョン	Ver. 1.1.1.11
コードの概要	<p>本解析コードは、建物の諸定数（部材性能、荷重）を入力として、個材の非線形性を算定し、荷重漸増解析を行う。また、弾塑性応答解析による骨組み又は縮約モデルの弾塑性領域の動的挙動の算定を行う。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、大物搬入建屋における3次元フレームの応力解析に使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で、せん断耐力を理論解と比較して確認している。なお、今回の解析は、静的応力解析であるため、静的応力解析を対象とした検証を行っている。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・静的応力解析について、N A S T R A N 及び H y p e r S t a t i c s a n d D y n a m i c s を用いた解析結果と比較して、双方の結果が一致していることを確認した。 ・検証の内容のとおり、応力解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3. 解析手法

3.1 一般事項

Super Build/SS7（以下、「SS7」という。）は、3次元フレームの応力解析に使用する解析コードである。

3.2 解析コードの特徴

SS7の主な特徴を以下に示す。

- ・静的解析，動的解析など適用範囲が広く，多くの解析機能を有している
- ・多くの要素が用意されており，種々のタイプの構造物の解析を行うことができる。
- ・多自由度を有する大規模問題を効率よく解析することができる。
- ・大規模問題を取り扱うために，入力データが単純化されている。
- ・プロット機能の機能が準備されており，モデルの確認，解析結果の図形処理を簡単に行うことができる。
- ・解析する座標系，拘束方法は，取り扱う問題にあったものを選ぶことができる。

3.3 解析手法

静的応力解析は、次の手順で行われる。

- (1) 要素内の変位を仮定し、節点変位を使って要素内任意点の変位を表現する。

$$\{u\} = [N]\{u_e\} \quad (3.1)$$

ここで、

- $\{u\}$: 要素内任意点の変位
- $[N]$: 形状関数マトリクス
- $\{u_e\}$: 節点変位

- (2) 上記の変位を微分して、要素内任意点のひずみを節点変位により表す。

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u_e\} \quad (3.2)$$

ここで、

- $\{\varepsilon\}$: 要素内任意点のひずみ
- $[B]$: ひずみマトリクス

- (3) 材料物性から求められる応力とひずみの関係式 ((3.3)式参照) より定められる弾性係数マトリクスを用いて、要素剛性マトリクスを(3.4)式により計算する。

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (3.3)$$

$$[K_e] = \int [B]^T [D] [B] dV \quad (3.4)$$

ここで、

- $\{\sigma\}$: 要素内任意点の応力
- $[D]$: 材料応力-ひずみ接線マトリクス
- $[K_e]$: 要素剛性マトリクス

- (4) 全体の剛性マトリクスを要素剛性マトリクスの重ね合わせによって求め、力の釣合いより静的変位を(3.5)式より求める。

$$\{f\} = [K]\{\gamma\} \quad (3.5)$$

ここで、

- $\{f\}$: 荷重ベクトル
- $\{\gamma\}$: 構造全体の変位
- $[K]$: 剛性マトリクス

- (5) 変位が決まれば、(3.2)式、(3.3)式より各要素の応力が求められる。

以上が有限要素法の評価手順である。

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図 3-1 に示す。

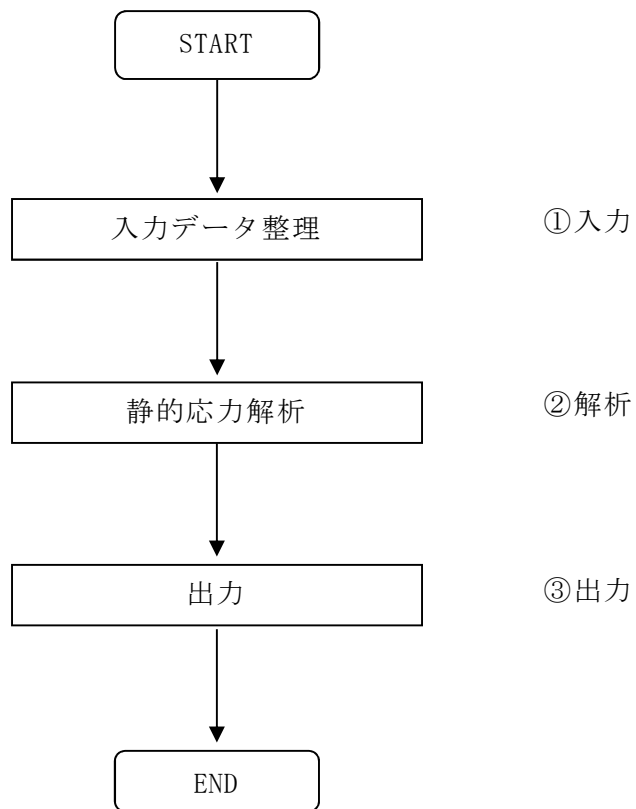


図3-1 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

3.5.1 フレーム解析の検証

(1) 検証の概要

X・Y方向1スパン，高さ1階のラーメン構造モデルの応力解析をSS7により行い，汎用3次元構造解析コードNASTRANと比較して同一結果となることを確認することにより検証を行った。

図3-2に解析モデル図を示す。表3-1に部材諸元を示す。

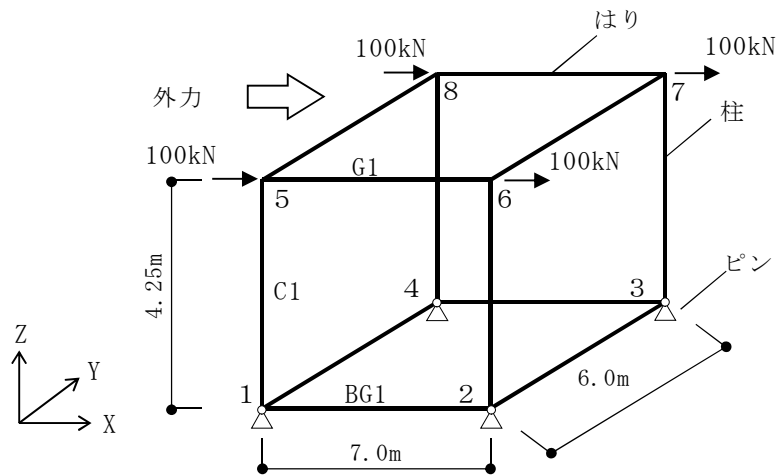


図3-2 解析モデル

表3-1 部材緒元

部材		B (mm)	D (mm)
柱	C1	700	700
基礎梁	BG1	400	1200
梁	G1	400	700

(2) フレーム解析結果

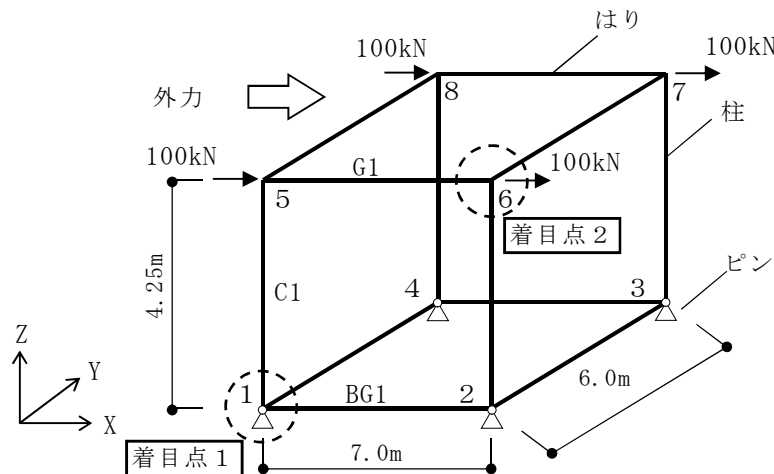
曲げモーメントおよびせん断力について、SS7およびNASTRANによる解析結果の比較を表3-2及び表3-3に示す。両者の誤差は1%以下で、解析結果は良く合致している。

表 3-2 曲げモーメント

	部材	着目点	SS7	NASTRAN	SS7
					—————
					NASTRAN
曲げ モーメント (kNm)	C1	1	265	2.648305E+02	1.0006
		2	161	1.601695E+02	1.0052
	BG1	1	265	2.648305E+02	1.0006
		2	161	1.601695E+02	1.0052

表 3-3 せん断力

	部材	着目点	SS7	NASTRAN	SS7
					—————
					NASTRAN
せん断力 (kN)	C1	1,2	100	1.000000E+02	1.0000
	BG1	1	76	7.566585E+01	1.0044
	G1	2	46	4.576272E+01	1.0052



(3) 内容に対する妥当性

SS7の解析結果とNASTRANを比較し解析解が一致していることを確認した。したがって、本解析にSS7を使用することは妥当である。

3.5.2 荷重漸増解析の検証

(1) 類似プログラムによる検証

ラーメン構造モデルの荷重漸増解析を本計算機コードSS7により行い、理論解と別計算機コード『Hyper Statics and Dynamics』（以下、「HyperSD」という。）と比較して同一結果となることを確認することにより検証する。

図3-3に解析モデル図を示す。X・Y方向1スパン、高さ1階の3次元フレームモデルに、表3-4の部材諸元を与え、各方向の荷重漸増解析を行う。

それぞれの解析コードで得られた各方向（X・Y方向）のQ- δ 関係を図3-4に、せん断耐力の比較を表3-5に示す。Q- δ 関係はよく一致しており、せん断耐力は理論解及び両解析コードと比較して誤差は1%以下で、解析結果は良く整合している。

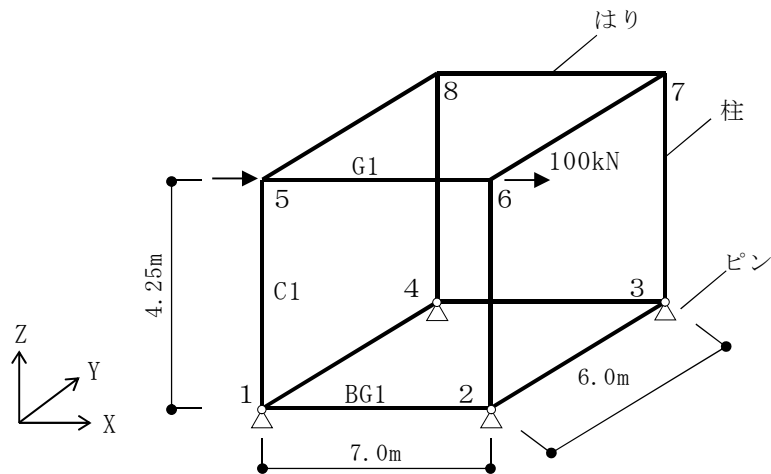




図3-3 解析モデル

表 3-4 部材諸元

(a) 柱 (C1)

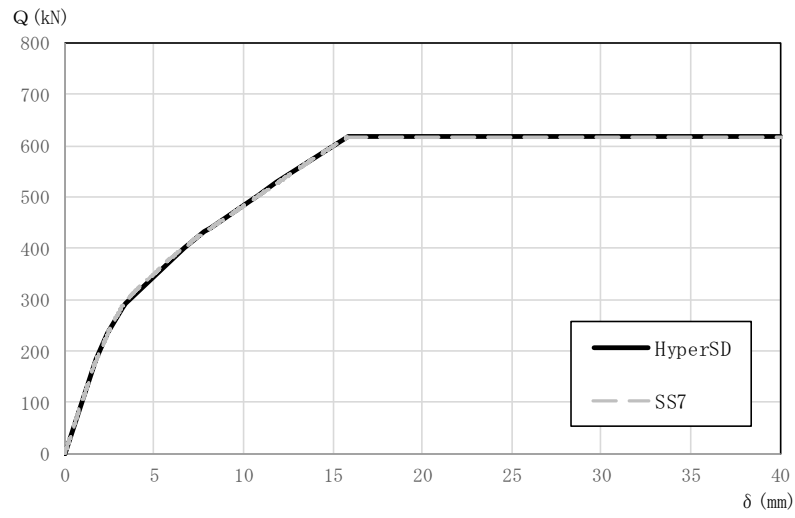
		C1	
符号名		1C1	
断面			
1 階	コンクリート	Dx × Dy	
	主筋	X	700 × 700 (Fc21)
		Y	5-D32
		材料	5-D32
	dt1	mm	SD390
帯筋		60	
	材料	2-D13@100	
		SD345	

(b) 基礎はり (BG1)

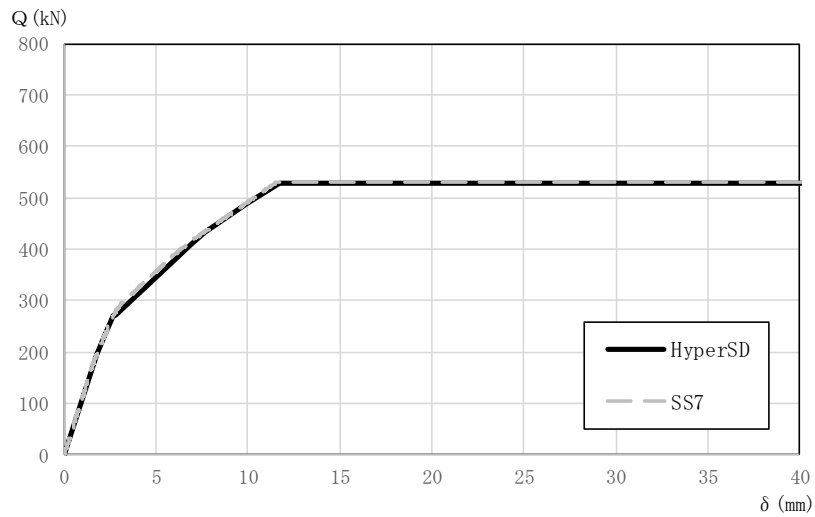
		GX1		
		全断面		
符号名		1GX1		
断面				
1F 層	コンクリート	b × D		
	主筋	上端	400 × 1200 (Fc21)	
		下端	3/3-D22	
		材料	上端	3/3-D22
			下端	SD345
	dt1	mm	SD345	
あばら筋		60		
	材料	3-D13@200		
		SD295A		

(c) はり (G1)

		GX1		
		全断面		
符号名		RGX1		
断面				
RF 層	コンクリート	b × D		
	主筋	上端	400 × 700 (Fc21)	
		下端	3-D22	
		材料	上端	3-D22
			下端	SD345
	dt1	mm	SD345	
あばら筋		60		
	材料	3-D13@200		
		SD295A		



(a) X方向



(b) Y方向

図 3-4 Q - delta 関係

表 3-5 せん断耐力

	X 方向	Y 方向
理論解	617.6	529.4
SS7	617.9	529.6
SS7 / 理論解	1.0005	1.0004
HyperSD	617.2	529
SS7 / HyperSD	1.0011	1.0011

(2) 内容に対する妥当性

SS7の解析結果と類似解析コードであるHyperSDと比較し解析解が一致していることを確認した。また、理論解によるせん断耐力を比較し、解析解が一致していることを確認した。したがって、本解析にSS7を使用することは妥当である。

別紙 44 M S A P (配管)

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-10-1-2-2-6 V-2-別添 1	管の耐震性についての計算書 火災防護設備の耐震性に関する説明書	□

2. 解析コードの概要

項目	コード名 MSAP (配管)
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析，構造解析及び応力算出
開発機関	三菱重工業株式会社
開発時期	[REDACTED]
使用したバージョン	[REDACTED]
コードの概要	<p>本解析コードは，[REDACTED]</p> <p>[REDACTED]</p> <p>[REDACTED]</p> <p>[REDACTED]</p> <p>[REDACTED]</p> <p>対話方式による入力及び構造解析の出力データを基に規格基準の算出式に従った評価が可能である。</p> <p>[REDACTED]</p> <p>[REDACTED]</p>
<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの [REDACTED] について，開発元より発行されている例題集の中で，モデル要素ごとに静的及び動的解析の例題に対して，解析結果と理論モデルによる理論解又は他の解析コードでの計算結果と一致していることを確認している。また，サンプルモデルに対する固有値解析結果が，理論計算と一致することを確認している。 ・対話方式により入力されたデータはインプットファイルとして出力され，入力データと一致していることを確認している。 ・入力データが正しく構造解析に受け渡されていること，構造解析データが正しく規格計算に受け渡されていることをそれぞれ確認している。 ・構造解析結果として出力されたデータを規格基準に従い，発生応力，疲労累積係数を算出しており，その過程

<p style="text-align: center;">検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>が理論解を再現できることを確認している。</p> <ul style="list-style-type: none">地震動の組合せ処理は，本解析コード内で処理しており，アウトットファイルと理論計算結果が一致することを確認している。本解析コードの適用制限として使用節点数・要素数があるが，適用範囲内であることを確認している。本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none">J E A G 4 6 0 1 -1987 6.5.2 項の加圧水型原子力発電設備における 1 次冷却ループの多質点 3 次元はりモデルによる解析の妥当性確認として，加 [] <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <p>[]</p> <ul style="list-style-type: none">上記妥当性確認を行ったのは加圧水型原子力発電設備における 1 次冷却ループの 3 次元はりモデルであるが，1 次冷却ループに含まれる 1 次冷却材管は今回解析する配管と幾何学的に類似しており，同様の 3 次元はりモデルを用いてモデル化している。今回の工事計画認可申請で行う 3 次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析，構造解析，応力算出の用途，適用範囲が，上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。
------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

別紙 45 WCOMD - S J

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-10-3-1-4	スクリーン室の耐震性についての計算書	Ver. 7.2
V-2-10-3-1-6	取水路の耐震性についての計算書	Ver. 7.2
V-2-10-3-1-7	取水路（6号機設備）の耐震性についての計算書	Ver. 7.2

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	WCOMD-SJ
使用目的	2次元非線形有限要素法（応力解析）
開発機関	東京大学
開発時期	1987年
使用したバージョン	Ver. 7.2
コードの概要	<p>本解析コードは、東京大学で開発された鉄筋コンクリート構造物の2次元有限要素法解析を行う解析コードである。</p> <p>コンクリートに関する数多くの実験と理論的検討結果に基づいた高精度の構成則を用いており、ひび割れを生じた様々な鉄筋コンクリート構造物の2次元非線形動的解析・静的解析を行う。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・せん断耐力式によるせん断耐力と解析によるせん断耐力が概ね一致していることを確認している。また、鉄筋コンクリートはりの載荷試験の結果と解析結果が概ね一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、九州電力株式会社川内原子力発電所1、2号機において、取水路に汎用市販コード（UC-win/WCOMD Ver. 2）が使用された実績がある。 ・汎用市販コード（UC-win/WCOMD Ver. 2）では新しい構成則の追加、出力の機能追加が図られているが、今回の工事計画認可申請において使用するバージョン（Ver. 7.2）で使用している機能は同じである。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する2次元非線形有限要素法解析（応力解析）に、本解析コードが適用できることを確認している。

	<ul style="list-style-type: none">・今回の工事計画認可申請における2次元非線形有限要素法解析（応力解析）の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

別紙 46 H y p e r S t a t i c s a n d D y n a m i c s

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-11-2-1	サービス建屋の耐震性についての計算書	Ver. 2.57

2. 解析コードの概要

項目	コード名 Hyper Statics and Dynamics
使用目的	立体フレームモデルの荷重漸増解析
開発機関	株式会社竹中工務店
開発時期	2007 年
使用したバージョン	Ver. 2. 57
コードの概要	<p>本解析コードは、建物の諸定数（部材性能、荷重）を入力として、個材の非線形性を算定し、荷重漸増解析を行う。また、弾塑性応答解析による骨組み又は縮約モデルの弾塑性領域の動的挙動の算定を行う。一般建築における構造設計や構造解析に、数多く使用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、サービス建屋における 3 次元フレームの応力解析に使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で、せん断耐力を理論解と比較して確認している。なお、今回の解析は、静的応力解析であるため、静的応力解析を対象とした検証を行っている。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・静的応力解析について、Super Build / SS 7 を用いた解析結果と比較して、双方の結果が一致していることを確認した。 ・検証の内容のとおり、応力解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3. 解析手法

3.1 一般事項

Hyper Statics and Dynamics (以下、「HyperSD」という。)は、3次元フレームの応力解析に使用する解析コードである。

3.2 解析コードの特徴

HyperSDの主な特徴を以下に示す。

- ・静的解析，動的解析など適用範囲が広く，多くの解析機能を有している。
- ・多くの要素が用意されており，種々のタイプの構造物の解析を行うことができる。
- ・多自由度を有する大規模問題を効率よく解析することができる。
- ・大規模問題を取り扱うために，入力データが単純化されている。
- ・プロットングの機能が準備されており，モデルの確認，解析結果の図形処理を簡単に行うことができる。
- ・解析する座標系，拘束方法は，取り扱う問題にあったものを選ぶことができる。

3.3 解析手法

静的応力解析は、次の手順で行われる。

- (1) 要素内の変位を仮定し、節点変位を使って要素内任意点の変位を表現する。

$$\{u\} = [N]\{u_e\} \quad (3.1)$$

ここで、

$\{u\}$: 要素内任意点の変位

$[N]$: 形状関数マトリクス

$\{u_e\}$: 節点変位

- (2) 上記の変位を微分して、要素内任意点のひずみを節点変位により表す。

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u_e\} \quad (3.2)$$

ここで、

$\{\varepsilon\}$: 要素内任意点のひずみ

$[B]$: ひずみマトリクス

- (3) 材料物性から求められる応力とひずみの関係式（(3.3)式参照）より定められる弾性係数マトリクスを用いて、要素剛性マトリクスを(3.4)式により計算する。

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (3.3)$$

$$[K_e] = \int [B]^T [D] [B] dV \quad (3.4)$$

ここで、

$\{\sigma\}$: 要素内任意点の応力

$[D]$: 材料応力—ひずみ接線マトリクス

$[K_e]$: 要素剛性マトリクス

- (4) 全体の剛性マトリクスを要素剛性マトリクスの重ね合わせによって求め、力の釣合いより静的変位を(3.5)式より求める。

$$\{f\} = [K]\{\gamma\} \quad (3.5)$$

ここで、

$\{f\}$: 荷重ベクトル

$\{\gamma\}$: 構造全体の変位

$[K]$: 剛性マトリクス

- (5) 変位が決まれば、(3.2)式、(3.3)式より各要素の応力が求められる。

以上が有限要素法の評価手順である。

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図 3-1 に示す。

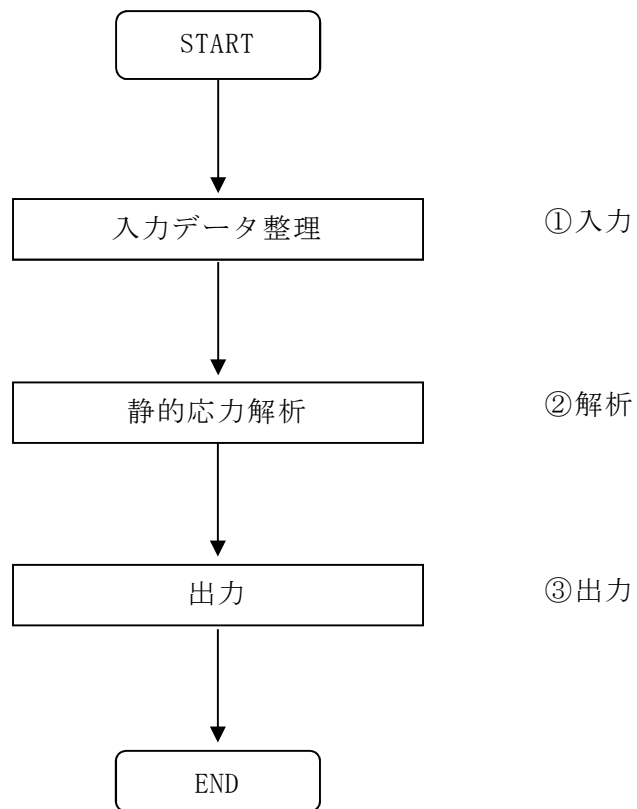


図3-1 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

3.5.1 類似プログラムによる検証

ラーメン構造モデルの荷重漸増解析を本計算機コード『HyperSD』により行い、理論解と別計算機コード『Super Build/SS7』（以下、「SS7」という。）と比較して同一結果となることを確認することにより検証する。

図3-2に解析モデル図を示す。X・Y方向1スパン、高さ1階の3次元フレームモデルに、表3-1の部材諸元を与え、各方向の荷重漸増解析を行う。

それぞれの解析コードで得られた各方向（X・Y方向）のQ- δ 関係を図3-3に、せん断耐力の比較を表3-2に示す。Q- δ 関係はよく一致しており、せん断耐力は理論解及び解析コードと比較して誤差は1%以下で、解析結果は良く整合している。

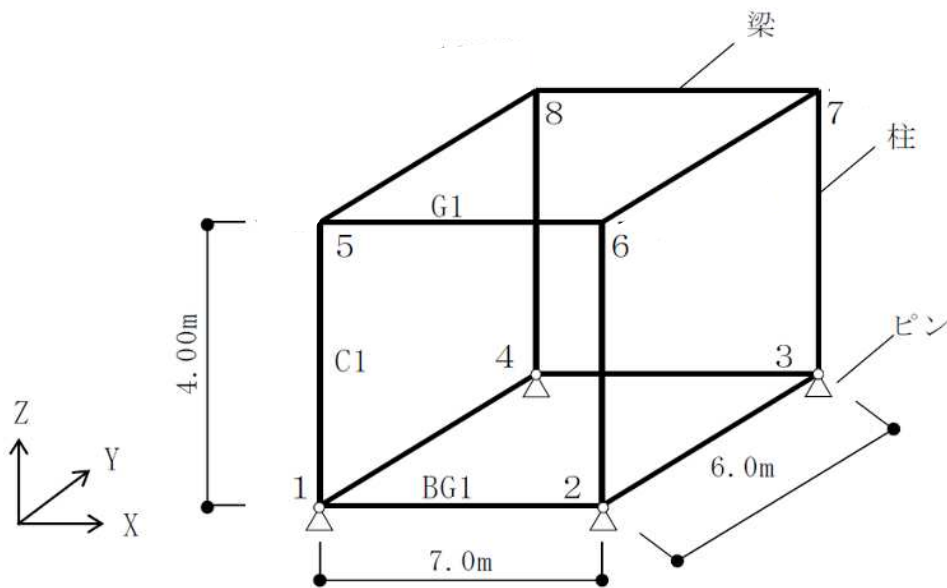




図3-2 解析モデル

表 3-1 部材諸元

(a) 柱 (C1)

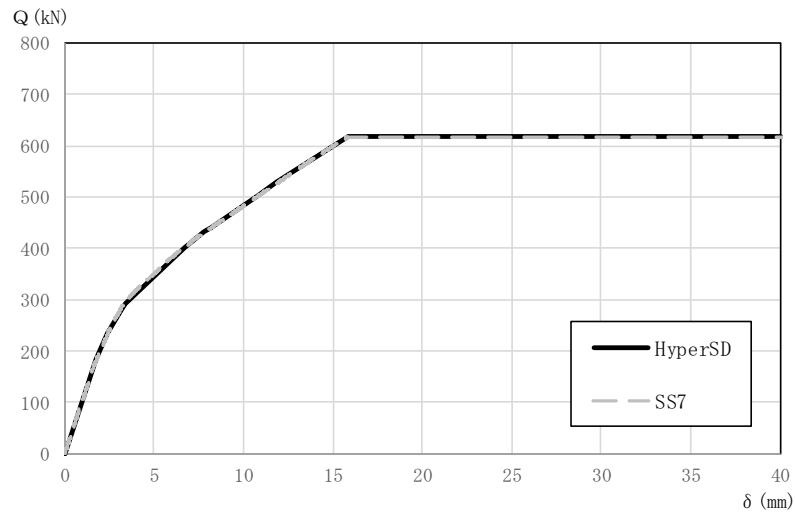
		C1		
1 階	符号名	1C1		
	断面			
	コンクリート	Dx × Dy	700 × 700 (Fc21)	
	主筋	X	5-D32	
		Y	5-D32	
		材料	SD390	
	dt1	mm	60	
帯筋		2-D13@100		
	材料	SD345		

(b) 基礎梁 (BG1)

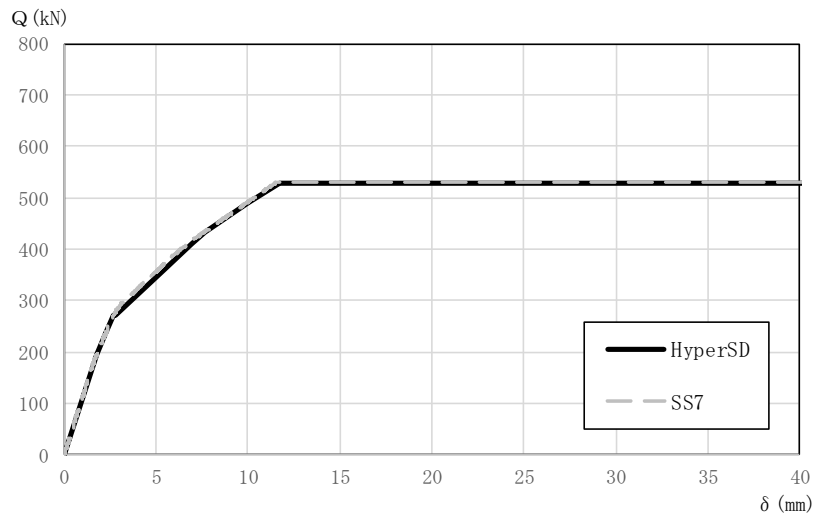
		GX1		
		全断面		
1F 層	符号名	1GX1		
	断面			
	コンクリート	b × D	400 × 1200 (Fc21)	
	主筋	上端	3/3-D22	
		下端	3/3-D22	
		材料	上端	SD345
			下端	SD345
	dt1	mm	60	
あばら筋		3-D13@200		
	材料	SD295A		

(c) 梁 (G1)

		GX1		
		全断面		
RF 層	符号名	RGX1		
	断面			
	コンクリート	b × D	400 × 700 (Fc21)	
	主筋	上端	3-D22	
		下端	3-D22	
		材料	上端	SD345
			下端	SD345
	dt1	mm	60	
あばら筋		3-D13@200		
	材料	SD295A		



(a) X方向



(b) Y方向

図 3-3 Q - δ 関係

表 3-2 せん断耐力

	X 方向	Y 方向
理論解	617.6	529.4
HyperSD	617.2	529.0
HyperSD/理論解	0.9994	0.9992
SS7	617.9	529.6
HyperSD/SS7	0.9989	0.9989

3.5.2 使用内容に対する妥当性

H y p e r S Dの解析結果と類似解析コードであるS S 7と比較し解析解が一致していることを確認した。また，理論解によるせん断耐力を比較し，解析解が一致していることを確認した。したがって，本解析にH y p e r S Dを使用することは妥当である。

別紙 47 Super Build / SS3

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-11-2-2-1	非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ防護板の耐震性についての計算書	Ver. 1. 1. 1. 48

2. 解析コードの概要

項目	コード名 Super Build / SS3
使用目的	静的応力解析
開発機関	ユニオンシステム株式会社
開発時期	2008 年
使用したバージョン	Ver. 1. 1. 1. 48
コードの概要	<p>本プログラムは、建築基準法に基づき、RC 造、S 造、SRC 造、CFT 造及びこれらが混合する構造物について、許容応力度計算から保有水平耐力計算までを一貫して行う構造計算ソフトウェア（プログラム）である。</p>
<p>検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）</p>	<p>【検証（Verification）】 本解析コードの検証内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードを用いた立体フレームモデルの応力解析結果が、先行審査にて使用実績のある類似解析コード（T D A P Ⅲ）による解析結果と概ね一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足することを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回の工事計画認可申請における使用目的である建屋構造の応力解析について、本解析コードの適用の妥当性を検証している。 ・建築分野の構造計算及び建築確認申請では広く使用されているプログラムであり、建屋構造計算では十分な実績を有している。 ・今回の工事計画認可申請における建屋構造の応力解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本プログラムは、建築基準法に基づき、RC造、S造、SRC造、CFT造及びこれらが混合する構造物について、部材剛性の計算、各荷重計算（固定荷重・積載荷重・積雪荷重・風圧力・地震力）、部材応力の計算、計算ルートの合否判定、断面検定、保有水平耐力の検討、崩壊形保証のためのクライテリアの検討、終局時せん断力に対する再検討までを一貫して行う構造計算プログラムである。

3.2 解析コードの特徴

本プログラムは、建築分野において豊富かつ幅広い適用実績を有しているとともに、確認申請においては主要なプログラムの1つである。本解析コードの主な特徴を以下に示す。

- ・複雑な平面形状の計算が可能である。
- ・柱主軸の回転が可能である。
- ・剛床解除，多剛床，反剛床，床ブレースを考慮できる。
- ・立体弾性解析，立体弾塑性解析を行うことができる。
- ・各種部材耐力式が適用できる。
- ・建築物の構造関係技術基準解説書に対応している。

3.3 解析手法

3.3.1 部材剛性マトリクス

(1) 座標系と正方向

荷重，変位を示す記号を以下のとおり定める。

δ : 鉛直変位, 水平変位

θ : 回転角

P : 鉛直力, 水平力

M : モーメント

部材座標系を図 3-1 に示すように定め，回転の方向は進行方向に対して時計回りをプラスとする。



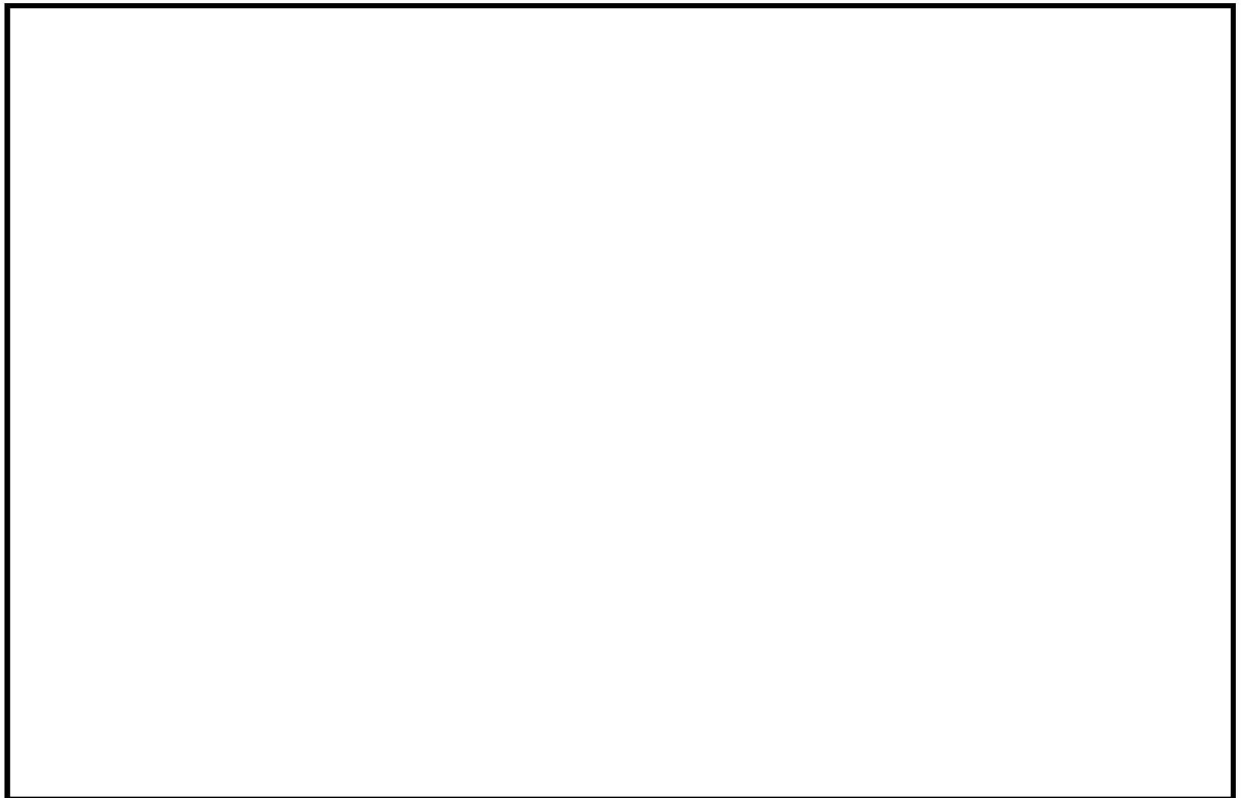
(2) はり, 柱, ブレース, 壁柱の荷重－変位関係

「x 軸方向の荷重－変位関係」, 「x-z 面の荷重－変位関係」, 「x-y 面の荷重－変位関係」は, 互いに影響し合わないものとし, 独立に考慮する。

a. x 軸方向の荷重－変位関係 (軸力, 振りモーメント)

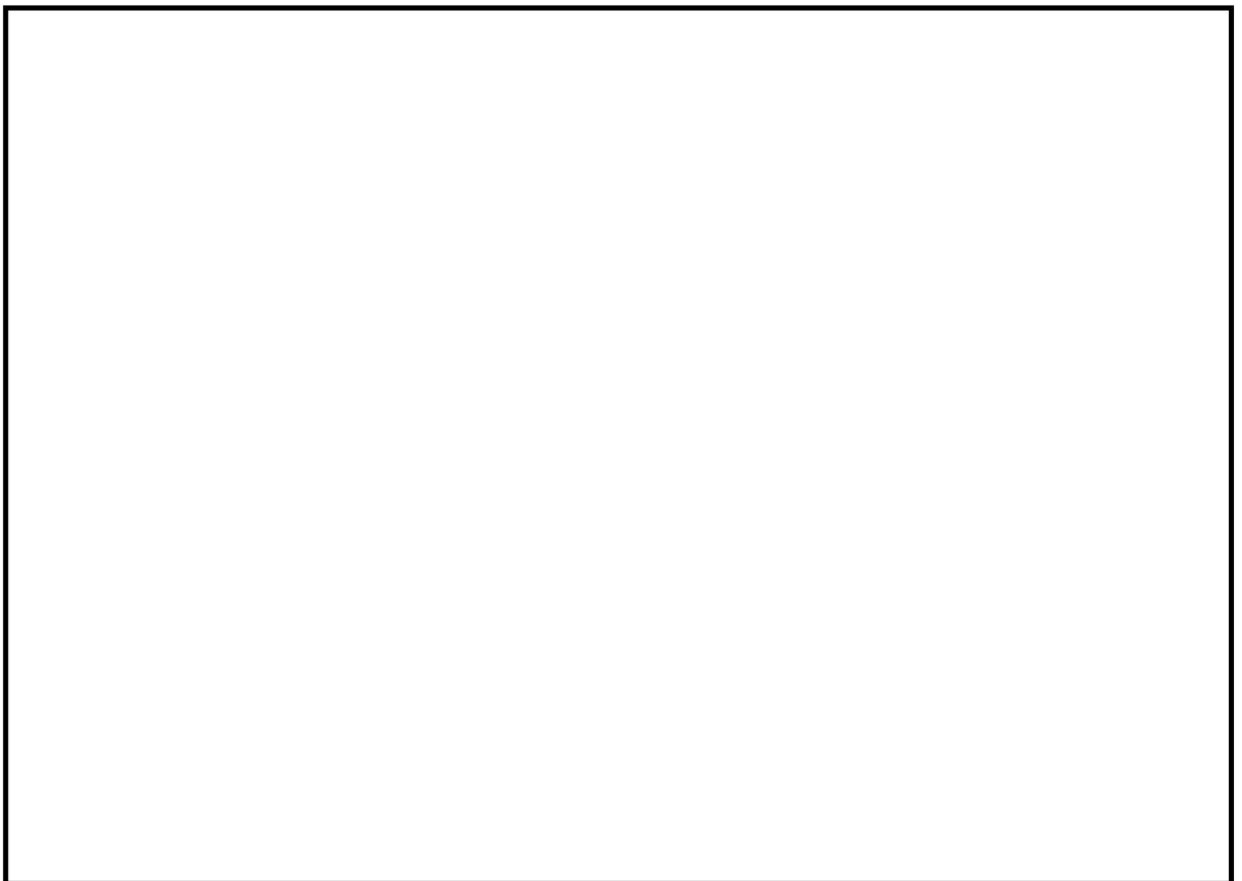
考慮する荷重及び変位の概念図を図 3-2 に示す。x 軸方向の荷重－変位関係は, 式 (3.1) のとおり算出する。

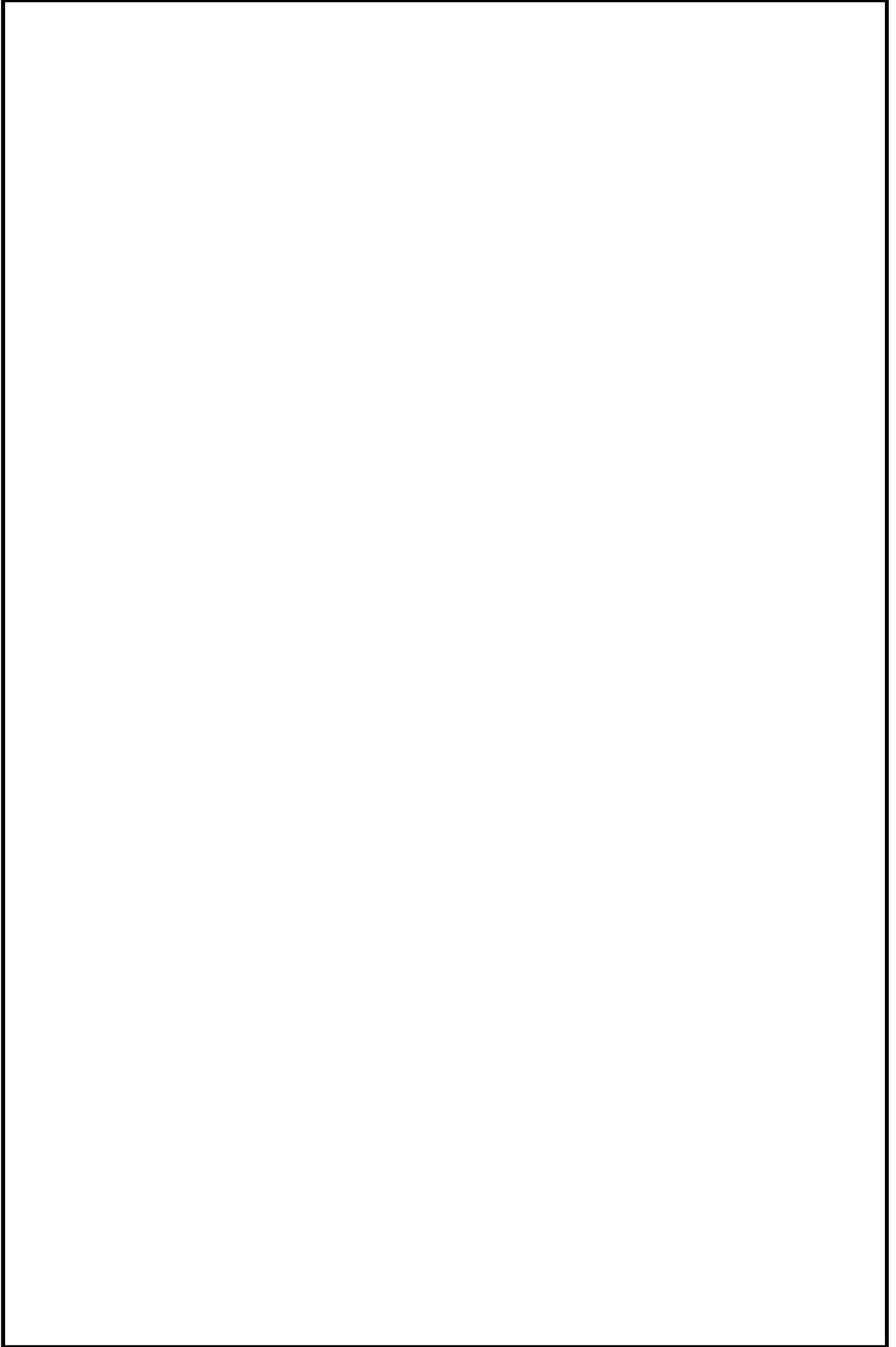




b. $x - z$ 面の荷重－変位関係（せん断, 曲げモーメント）

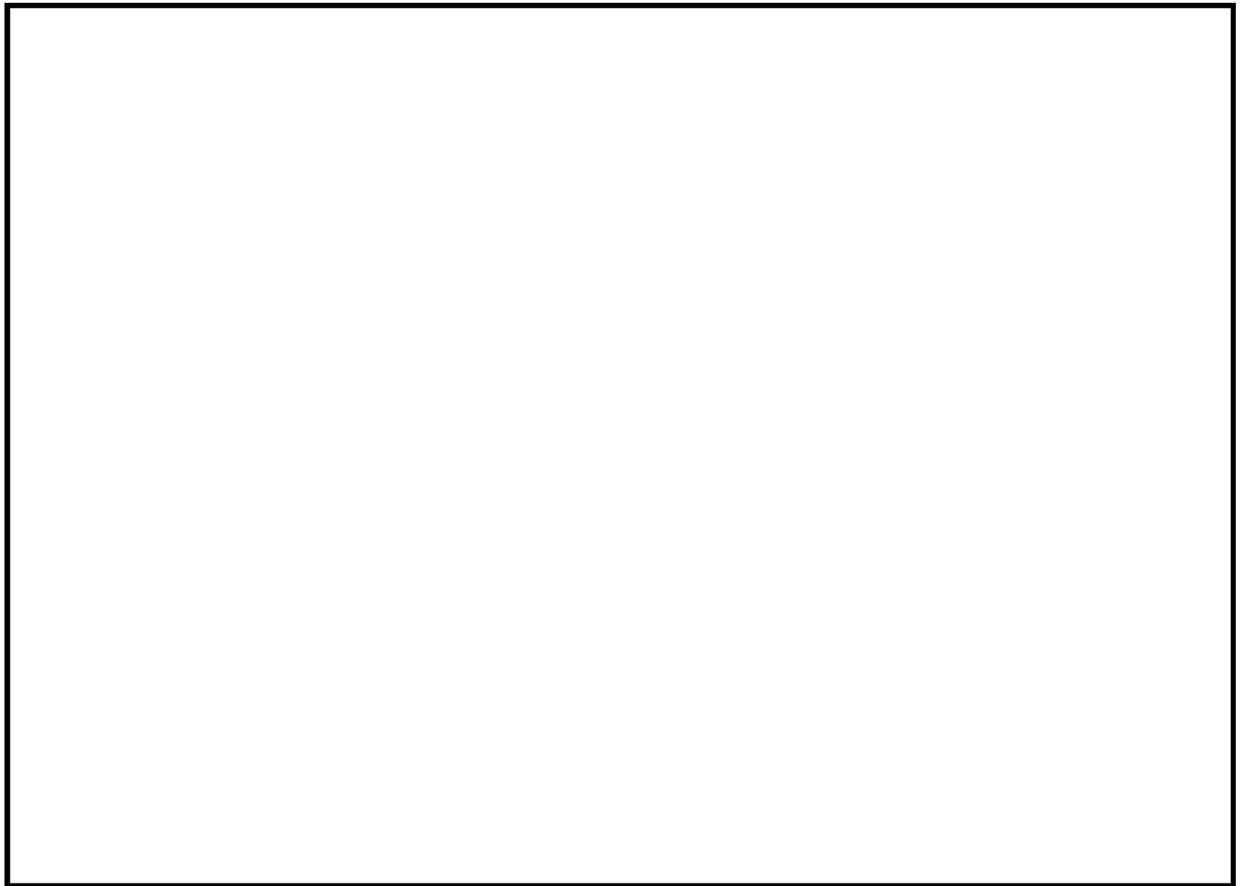
考慮する荷重及び変位の概念図を図 3-3 に示す。 x 軸方向の荷重－変位関係は, 式 (3.2) のとおり算出する。







c. $x - y$ 面の荷重-変位関係 (せん断, 曲げモーメント)

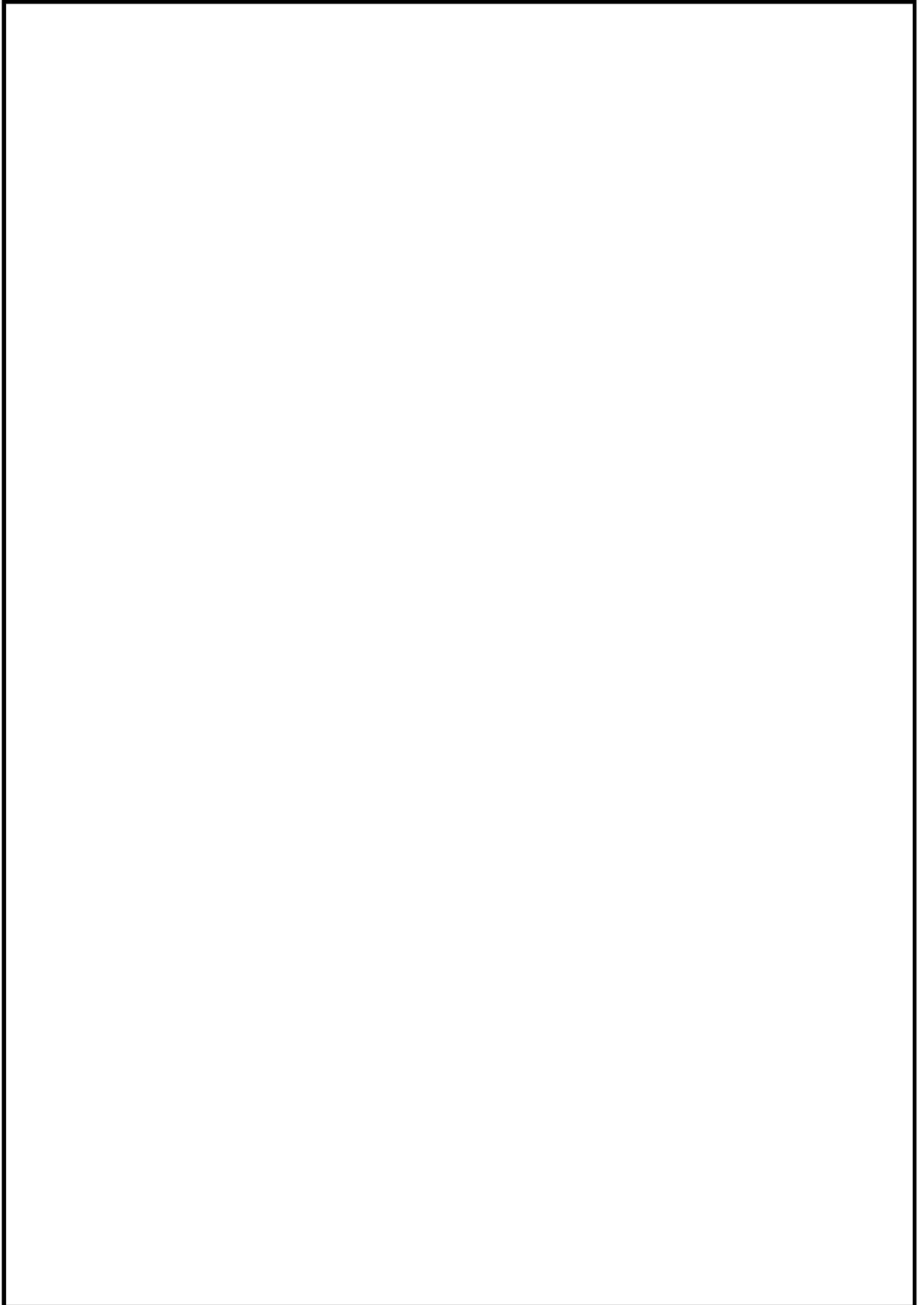


(3) 支点



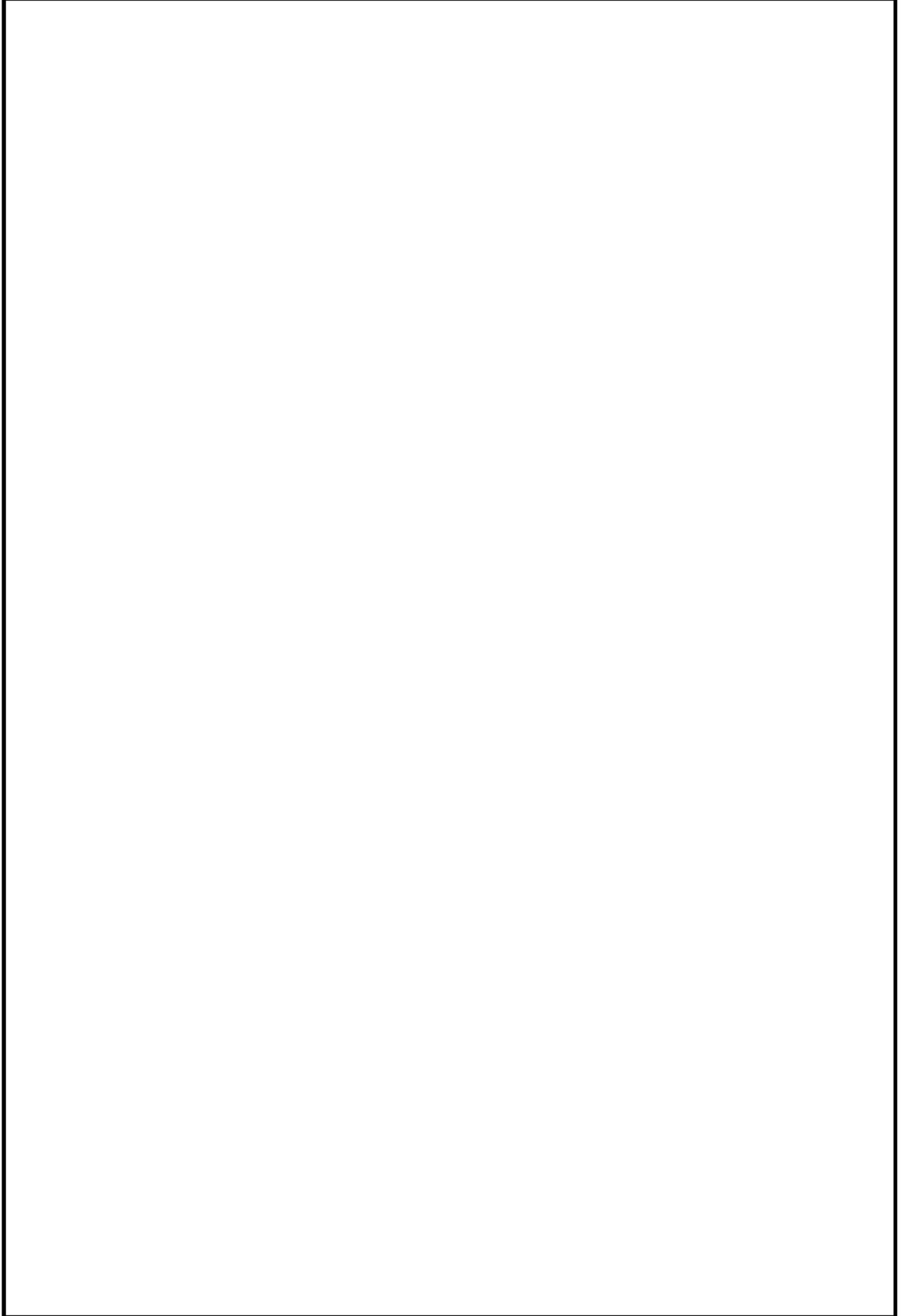
3.3.2 全体剛性マトリクス

(1) 全体座標系変換



(2) 剛床変位変換

K7 ① V-2 別紙 R0



(3) 全体剛性マトリクスの組立て

求められた全体座標系の（剛床に含まれる水平成分は代表点で表される）
個々の部材の荷重－変位式を合成し，建物全体の荷重－変位式を組み立てる。

4. 解析フローチャート

解析フローチャートを図 4-1 に示す。

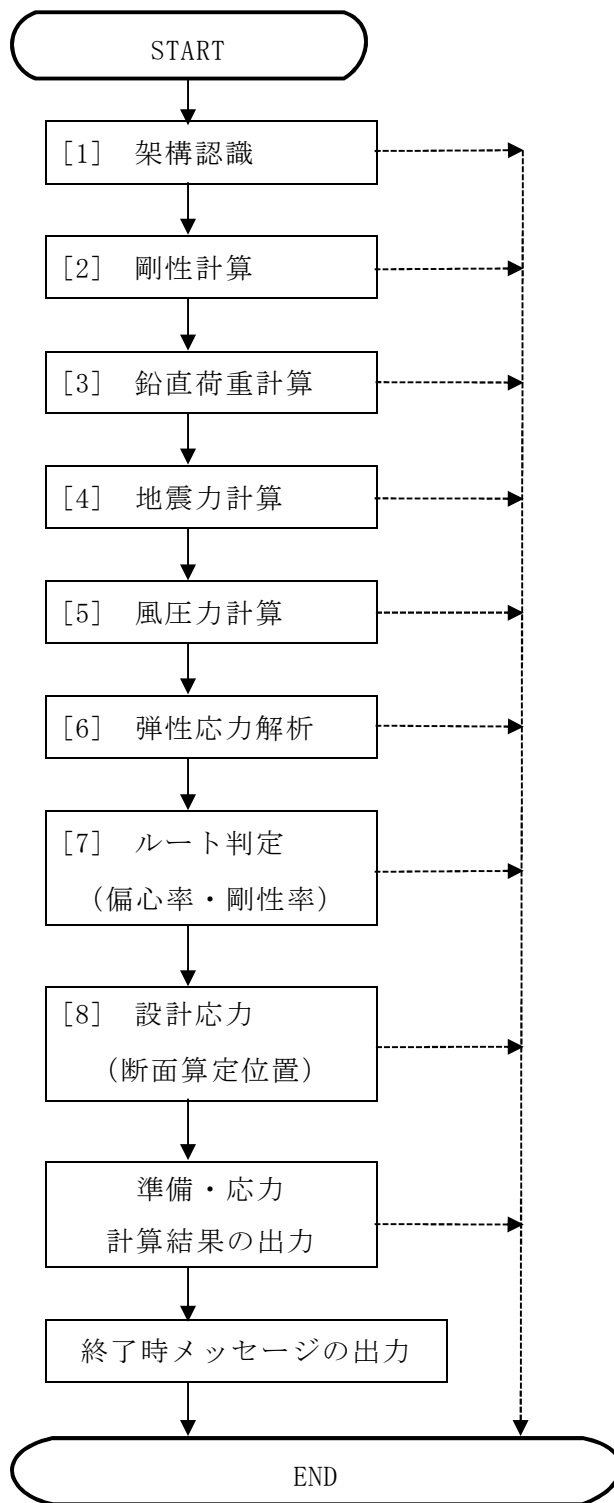


図 4-1 解析フローチャート

5. 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

5.1 解析結果の比較による検証

本解析コードの解析結果について、本解析コードの類似解析コードである「TDA P III (大成建設株式会社, 株式会社アークシステム)」の解析結果と比較し、本解析コードの適用性を検証する。TDA P IIIは [REDACTED] 等、先行の工事計画認可申請で使用実績があり、建設部門を中心として官公庁、大学、民間でも広く使用されている解析コードである。

検証内容は、以下のとおりとする。

- ・長期荷重時の応力解析について、本解析コードとTDA P IIIの結果を比較する。
- ・水平荷重時の応力解析について、本解析コードとTDA P IIIの結果を比較する。

5.1.1 解析モデル

解析モデルを図5-1に示す。解析モデルは、1層の1スパン×2スパンの鉄骨架構モデルとする。柱と大はりとはラーメン架構とし、Y方向にブレースを2面配置する。柱脚は固定、ブレースの材端はピンとする。荷重条件は屋根に150mmのRCスラブを配置し、積載荷重は考慮しない。

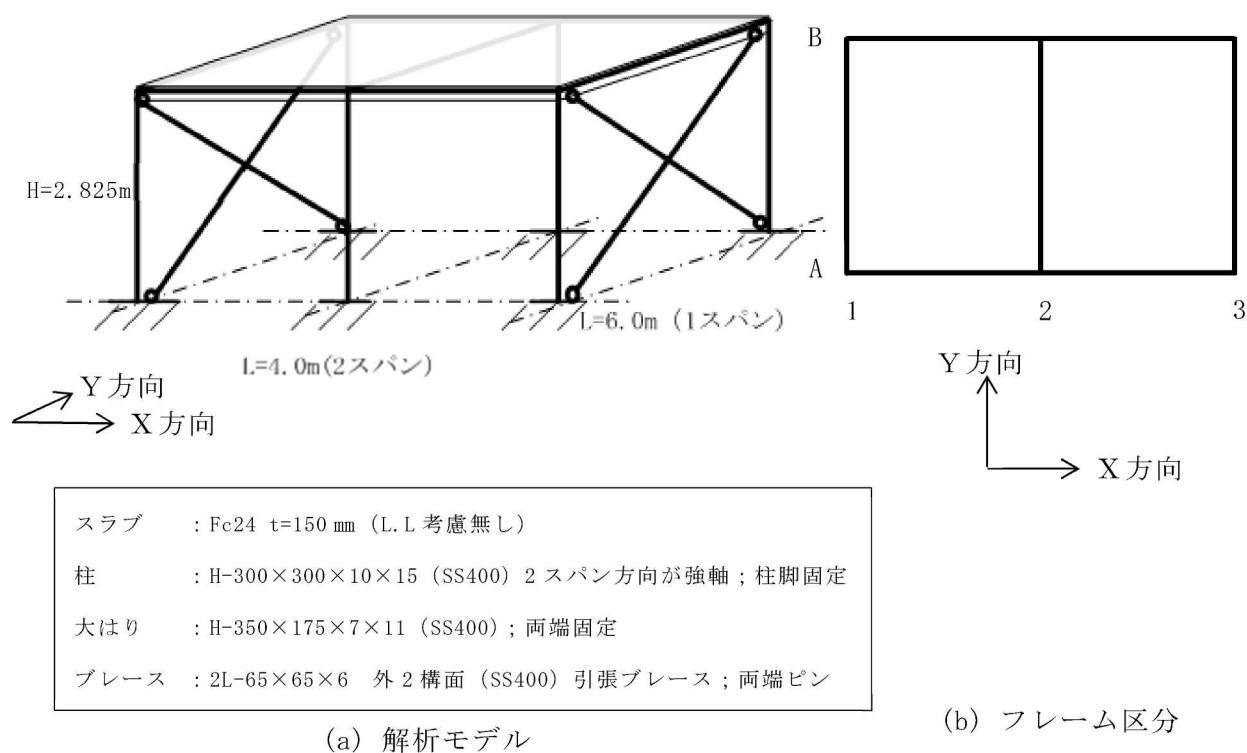


図5-1 解析モデル図

5.1.2 応力解析結果の比較（長期荷重時・水平荷重時）

図 5-3 から図 5-26 に本解析コードと T D A P III の長期荷重時，水平荷重時（X 方向正加振・Y 方向正加振）における断面力図を示す。また，表 5-1 から表 5-12 に本解析コードと T D A P III の発生断面力の比較を示す。水平荷重時は標準せん断力係数 $C_0=0.30$ として解析する。解析結果より，本解析コードの解析結果は先行審査で使用実績があり，建設部門を中心として幅広く使用されている T D A P III の解析結果とほぼ一致しているため，本解析コードの結果は妥当であると判断する。

本解析コード解析結果の凡例を図 5-2 に示す。

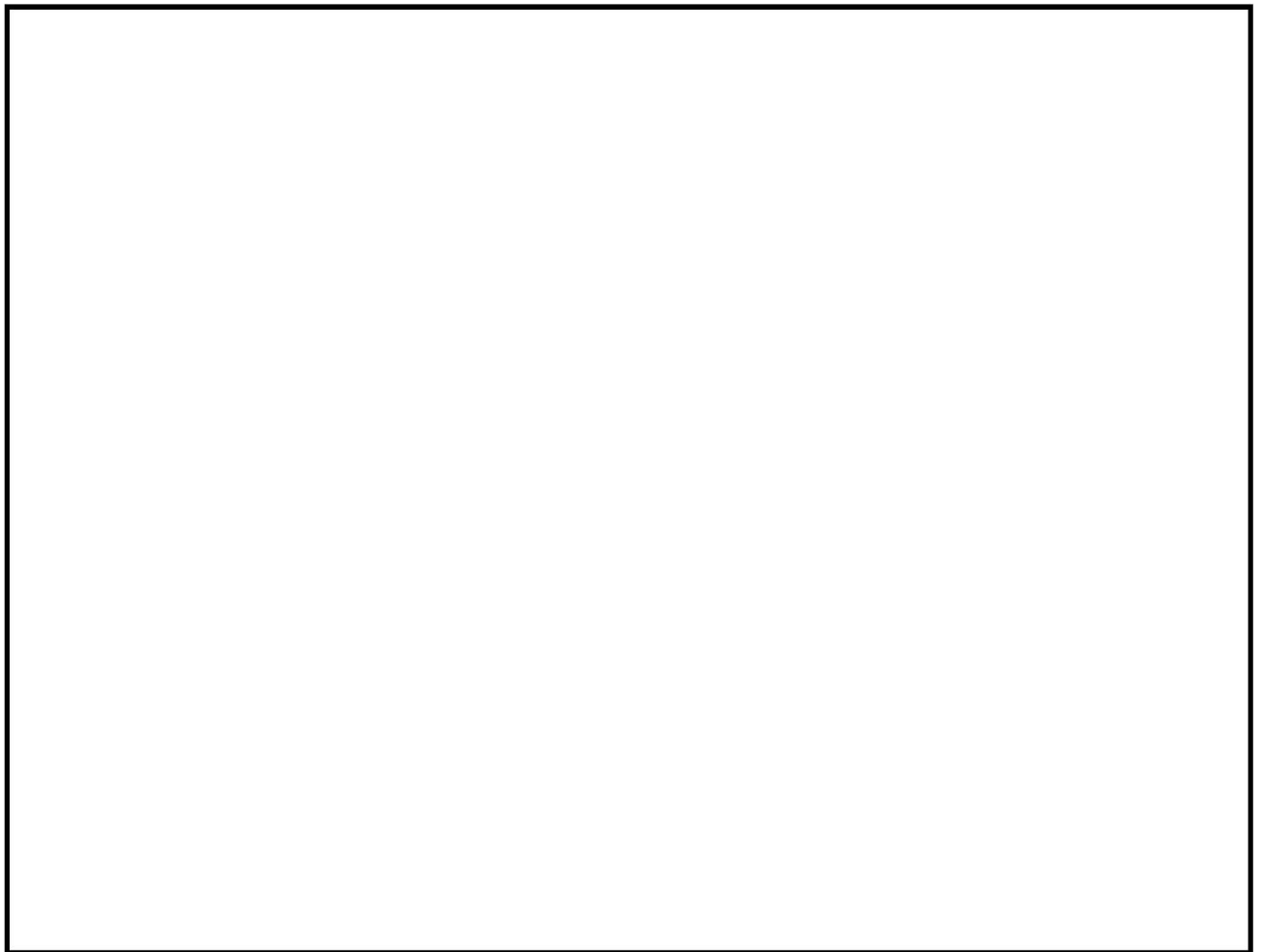


図 5-2 応力図凡例

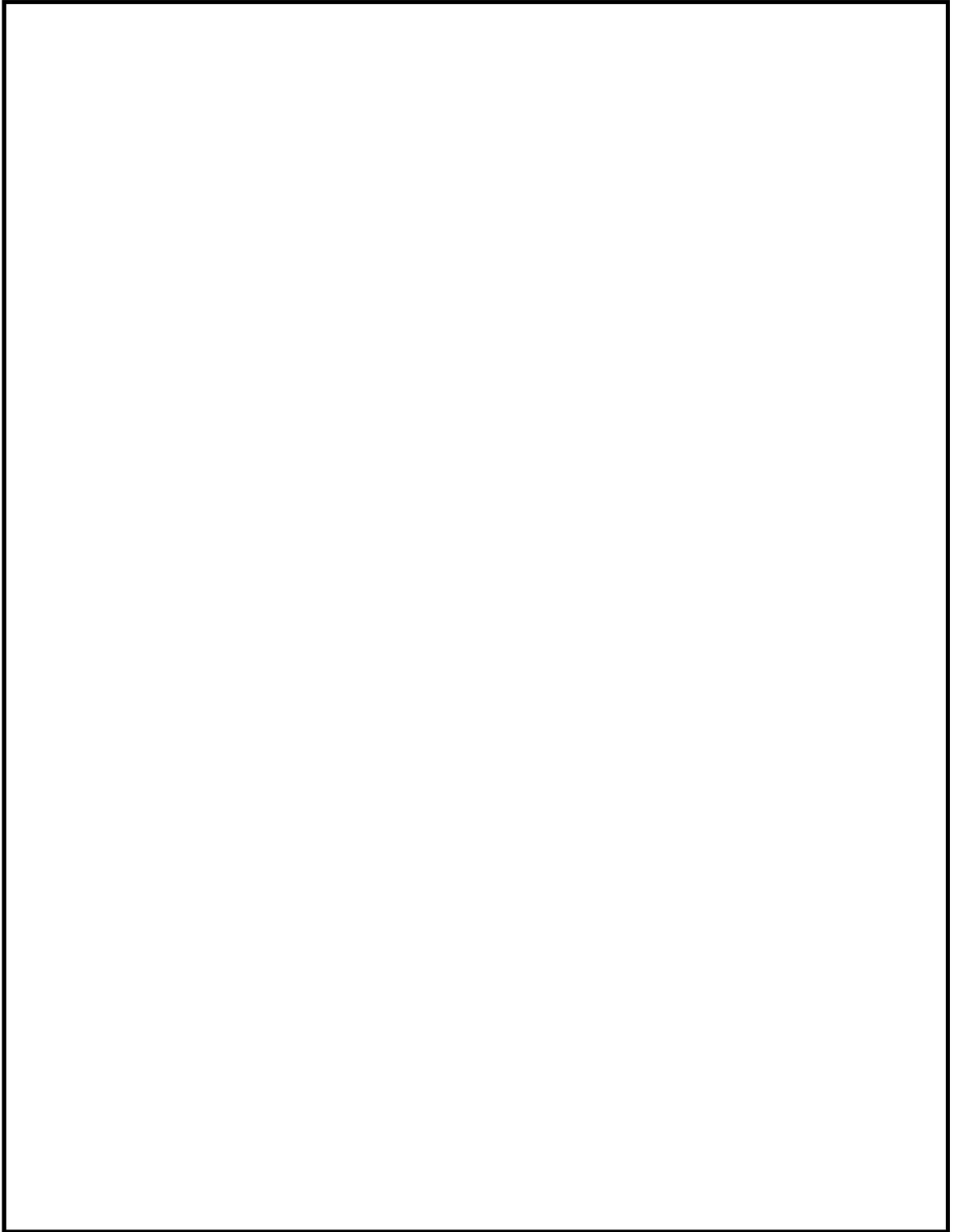


図 5-3 曲げモーメント図 (長期荷重時・A フレーム)
(単位 : kN・m)

表 5-1 解析結果の比較
(長期荷重時・A フレーム・曲げモーメント)

部材	着目箇所	a. SS3 (kN・m)	b. TDAPⅢ (kN・m)	比率 a / b
はり 1	①	-4.7	-4.6	1.022
	②	4.5	4.6	0.978
	③	-7.5	-7.4	1.014
はり 2	④	-7.5	-7.4	1.014
	⑤	4.5	4.6	0.978
	⑥	-4.7	-4.6	1.022
柱 1	⑦	-4.7	-4.6	1.022
	⑧	2.2	2.1	1.048
柱 2	⑨	0.0	0.0	—
	⑩	0.0	0.0	—
柱 3	⑪	4.7	4.6	1.022
	⑫	-2.2	-2.1	1.048

K7 ① V-2 別紙 R0

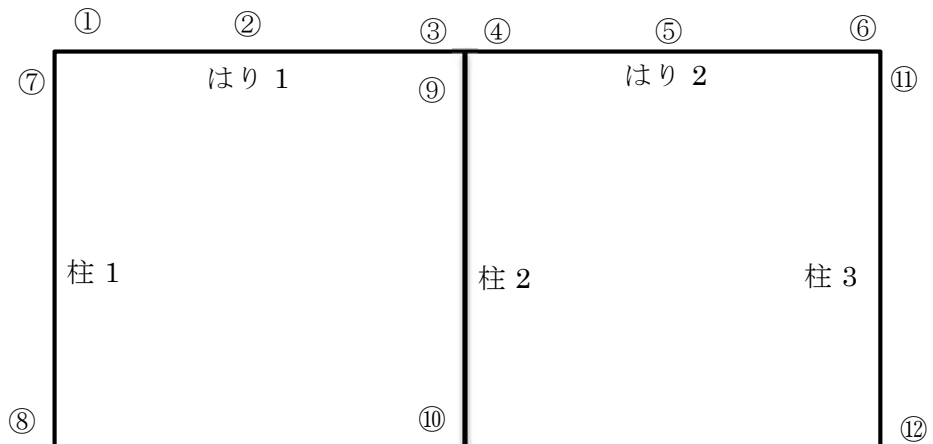


図 5-4 着目位置図
(長期荷重時・A フレーム・曲げモーメント)

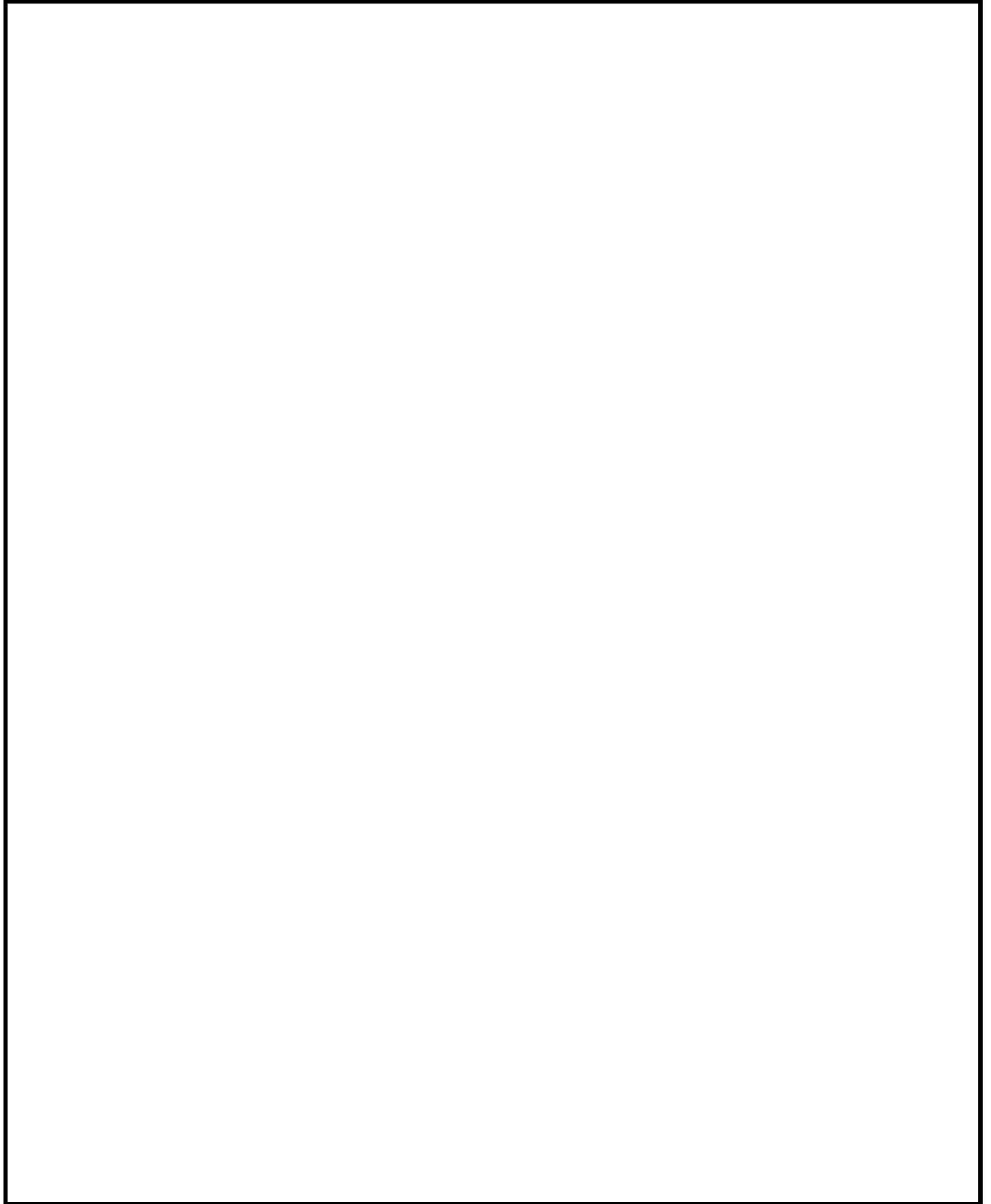


図 5-5 曲げモーメント図 (長期荷重時・1 フレーム)
(単位 : kN・m)

表 5-2 解析結果の比較
(長期荷重時・1フレーム・曲げモーメント)

部材	着目箇所	a. SS3 (kN・m)	b. TDAPⅢ (kN・m)	比率 a / b
はり 1	①	-13.1	-12.6	1.040
	②	17.2	17.4	0.989
	③	-13.1	-12.6	1.040
柱 1	④	-13.1	-12.6	1.040
	⑤	6.4	5.9	1.085
柱 2	⑥	13.1	12.6	1.040
	⑦	-6.4	-5.9	1.085

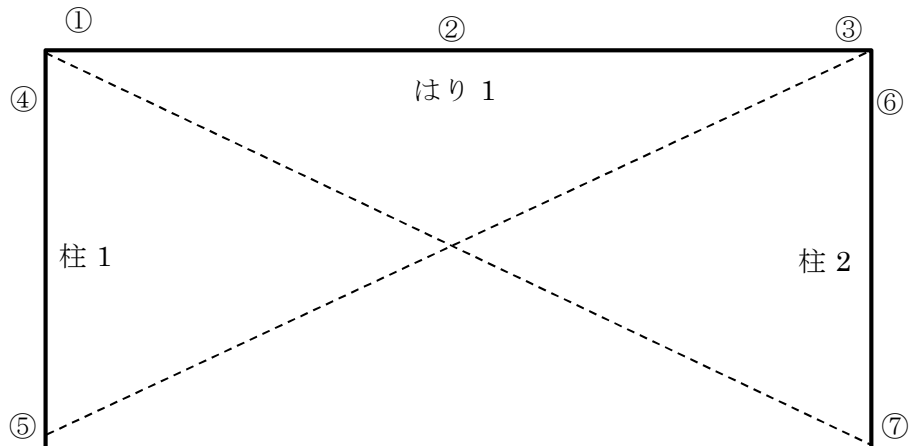


図 5-6 着目位置図
(長期荷重時・1フレーム・曲げモーメント)

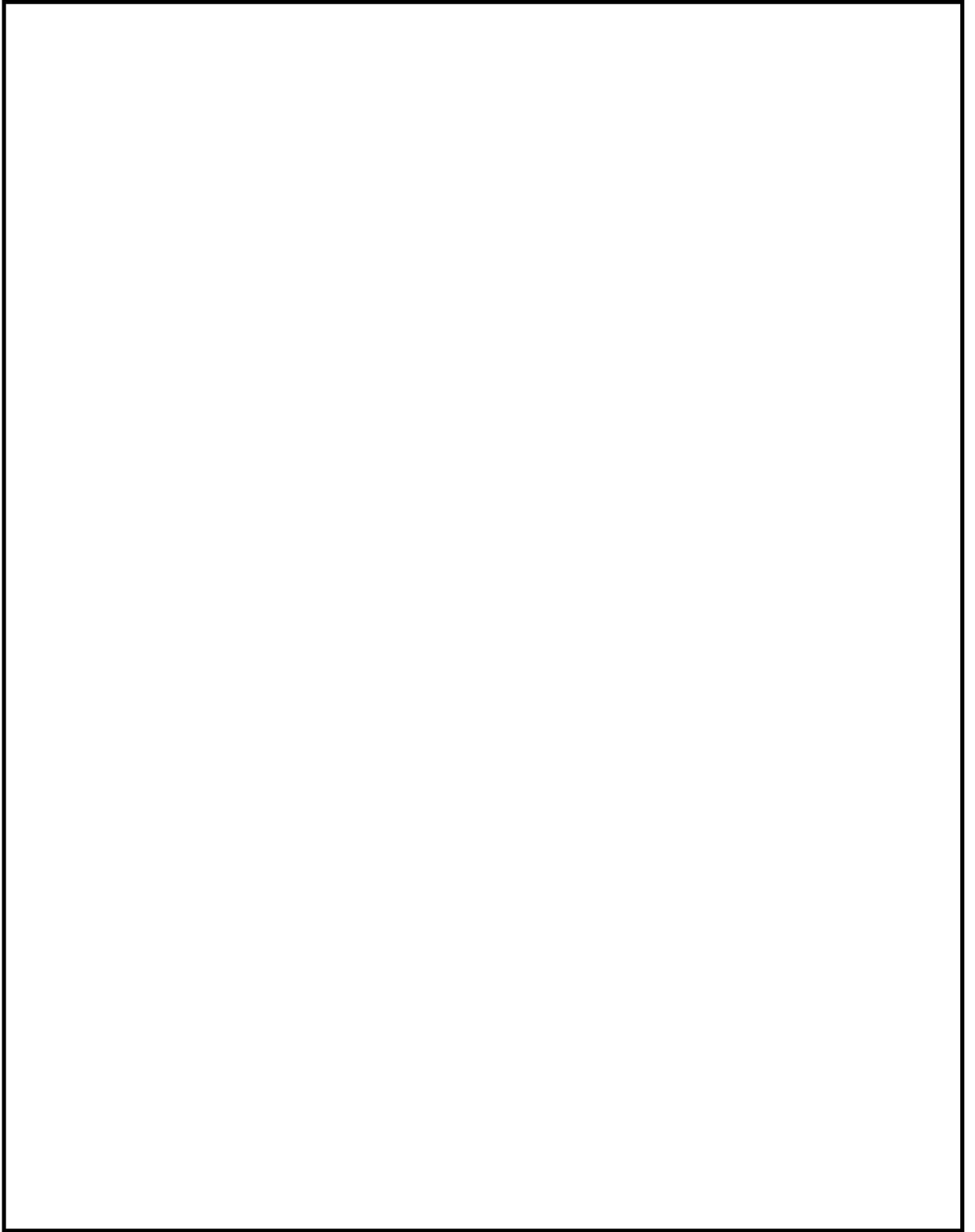


図 5-7 せん断力図 (長期荷重時・A フレーム)
(単位 : kN)

表 5-3 解析結果の比較
(長期荷重時・A フレーム・せん断力図)

部材	着目箇所	a. SS3 (kN)	b. TDAPⅢ (kN)	比率 a / b
はり 1	①	7.4	7.3	1.014
	②	-8.8	-8.6	1.023
はり 2	③	8.8	8.6	1.023
	④	-7.4	-7.3	1.014
柱 1	⑤	-2.4	-2.4	1.000
柱 2	⑥	0.0	0.0	—
柱 3	⑦	2.4	2.4	1.000

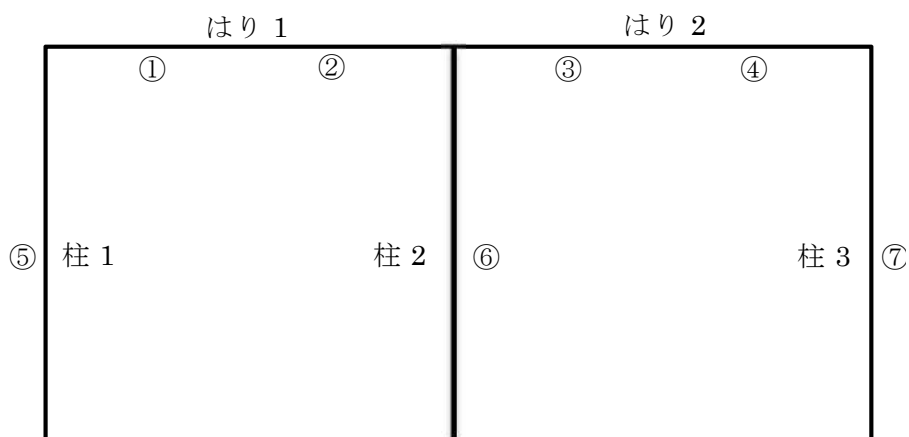


図 5-8 着目位置図
(長期荷重時・A フレーム・せん断力図)

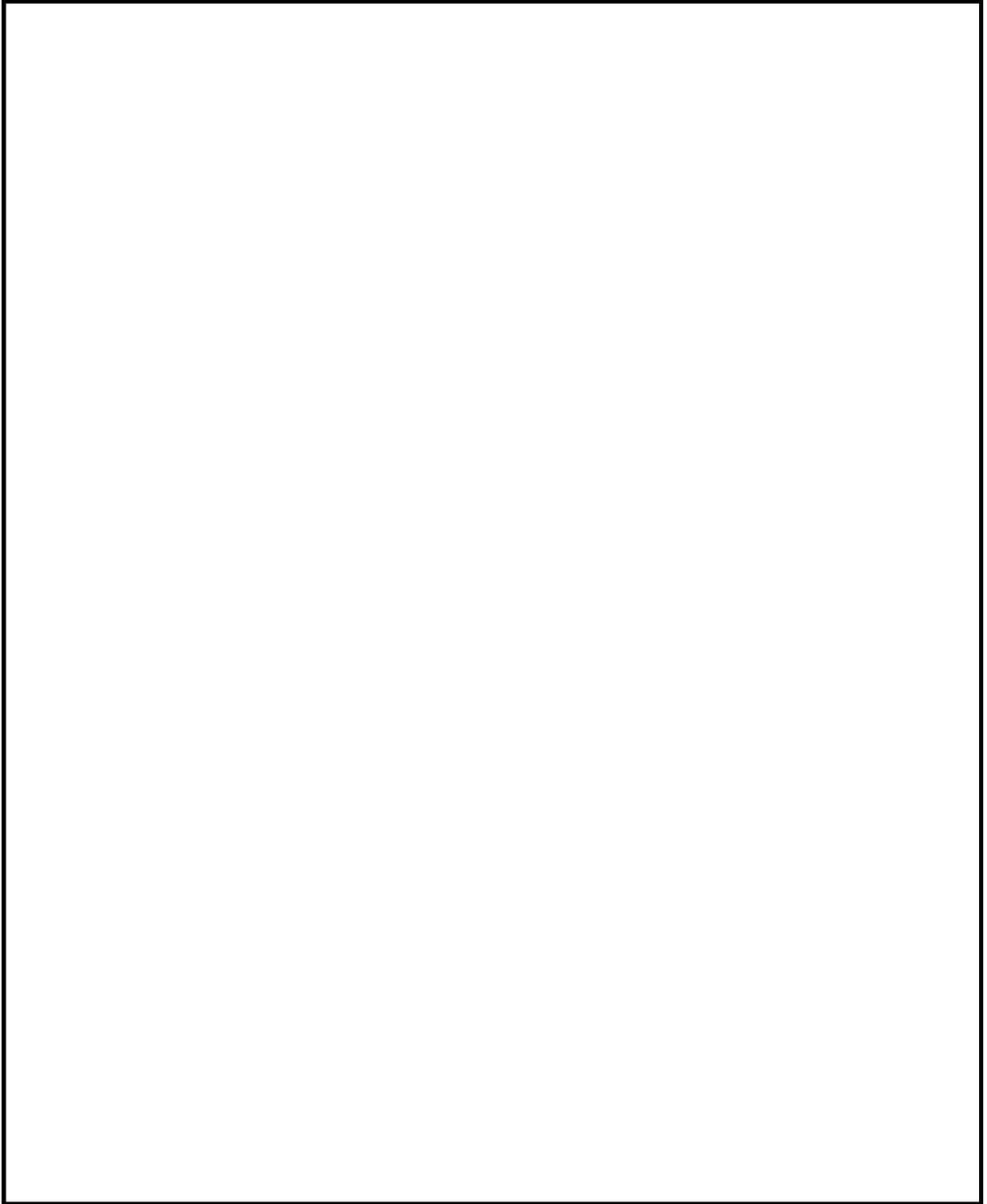


図 5-9 せん断力図 (長期荷重時・1 フレーム)
(単位 : kN)

表 5-4 解析結果の比較
(長期荷重時・1 フレーム・せん断力)

部材	着目箇所	a. SS3 (kN)	b. TDAPⅢ (kN)	比率 a / b
はり 1	①	16.2	15.4	1.052
	②	-16.2	-15.4	1.052
柱 1	③	-6.9	-6.5	1.062
柱 2	④	6.9	6.5	1.062

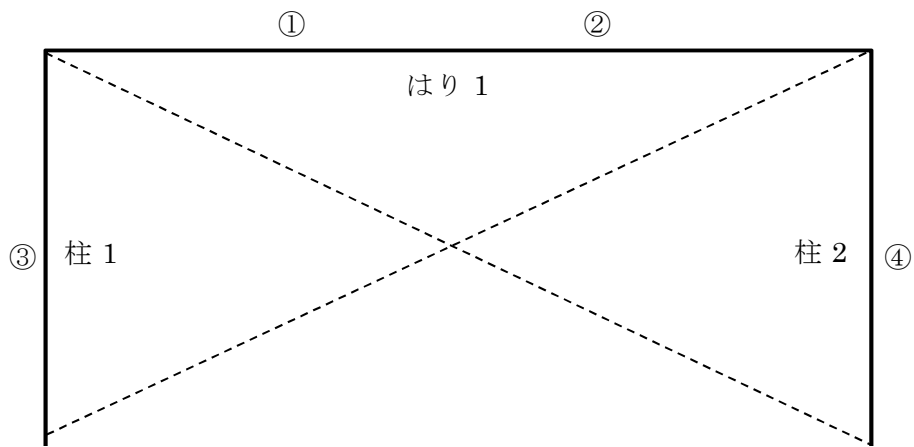


図 5-10 着目位置図
(長期荷重時・1 フレーム・せん断力)

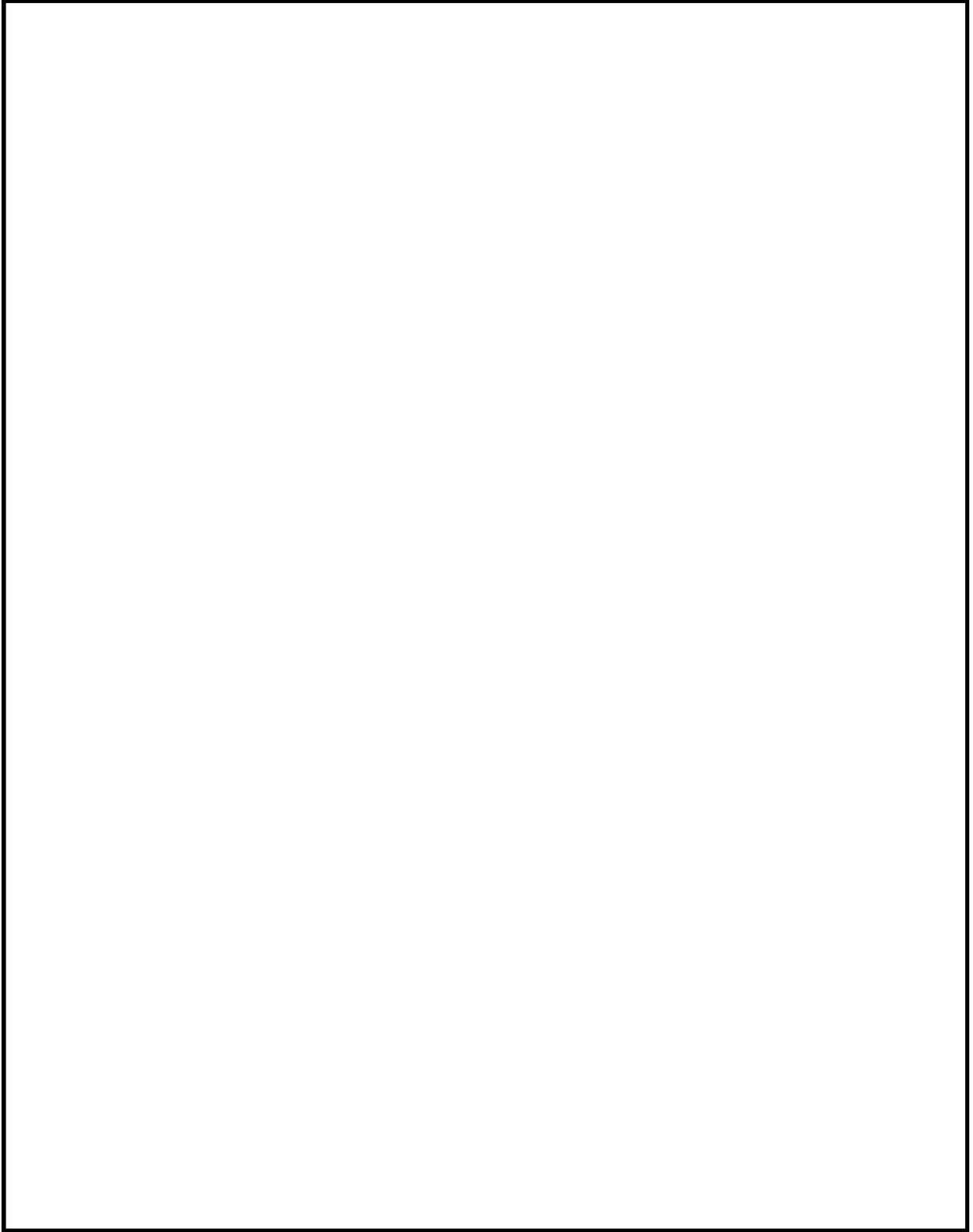


図 5-11 軸力図 (長期荷重時・A フレーム)
(単位 : kN)

表 5-5 解析結果の比較
(長期荷重時・A フレーム・軸力)

部材	着目箇所	a. SS3 (kN)	b. TDAPⅢ (kN)	比率 a / b
柱 1	①	-25.0	-24.8	1.008
柱 2	②	-49.2	-49.3	0.998
柱 3	③	-25.0	-24.8	1.008

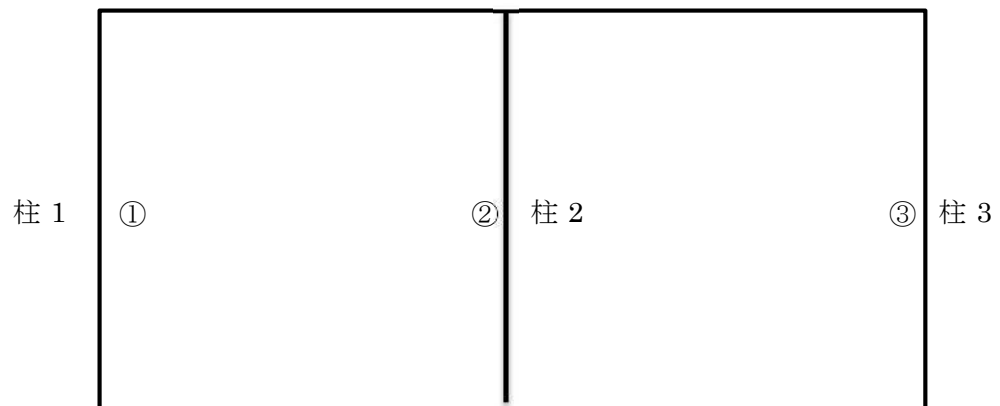


図 5-12 着目位置図
(長期荷重時・A フレーム・軸力)

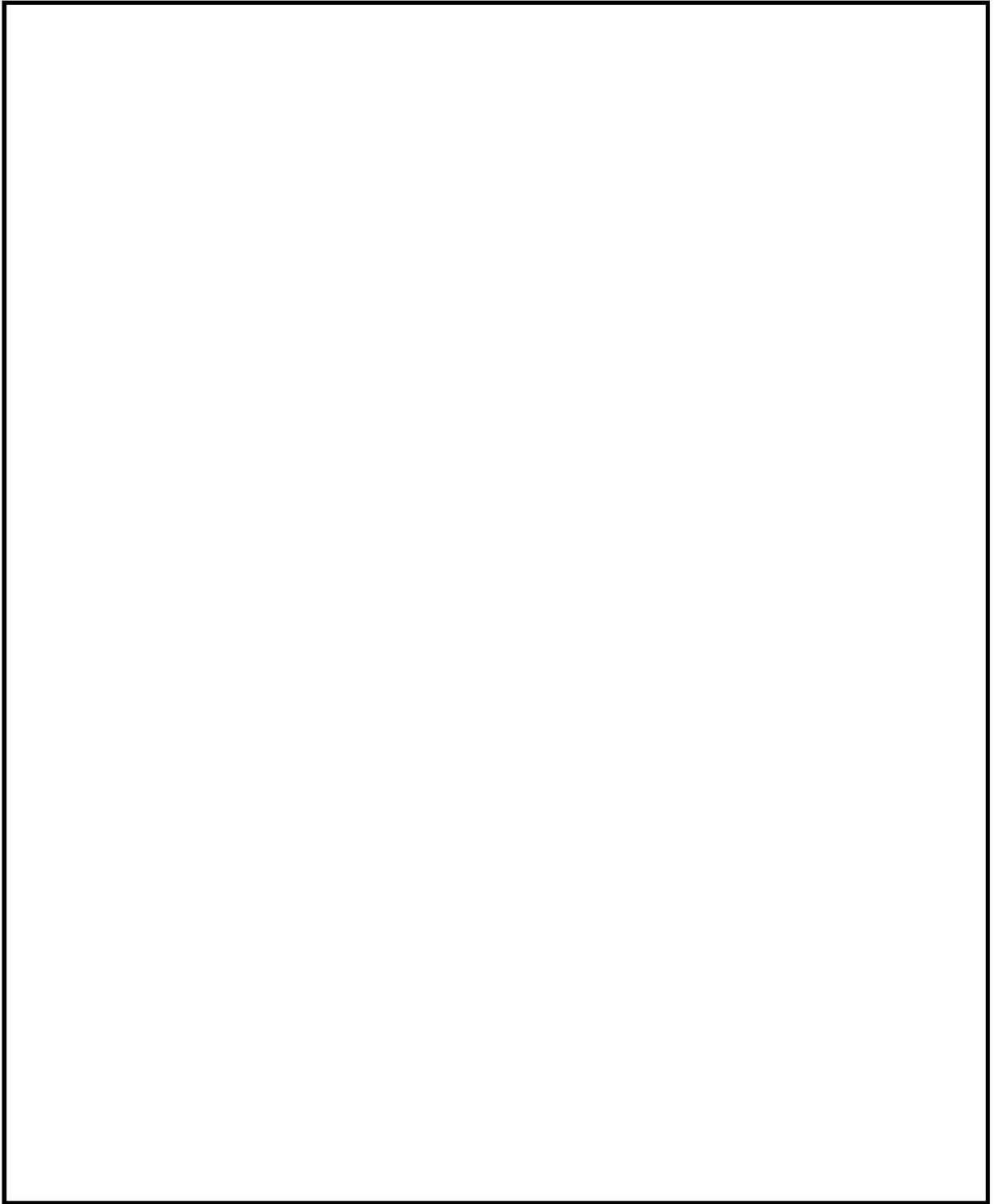


図 5-13 軸力図 (長期荷重時・1 フレーム)
(単位 : kN)

表 5-6 解析結果の比較
(長期荷重時・1 フレーム・軸力)

部材	着目箇所	a. SS3 (kN)	b. TDAPⅢ (kN)	比率 a / b
柱 1	①	-25.0	-24.8	1.008
柱 2	②	-25.0	-24.8	1.008
ブレース 1	③	0.0	0.6	-
ブレース 2	④	0.0	0.6	-

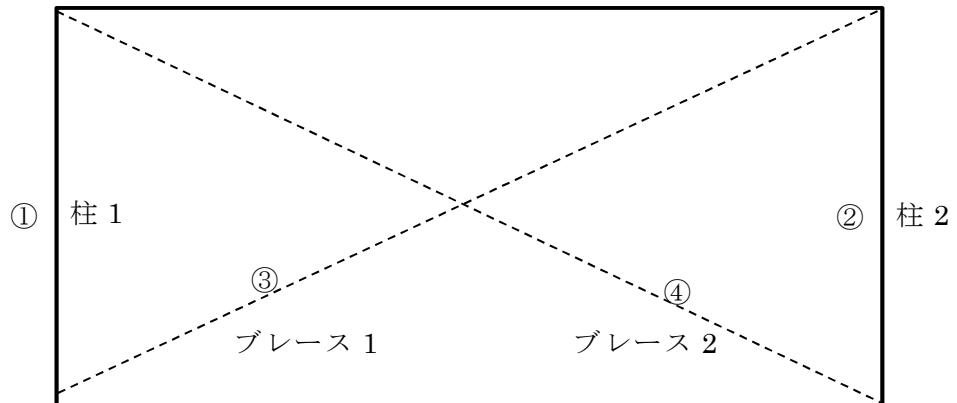


図 5-14 着目位置図
(長期荷重時・1 フレーム・軸力)

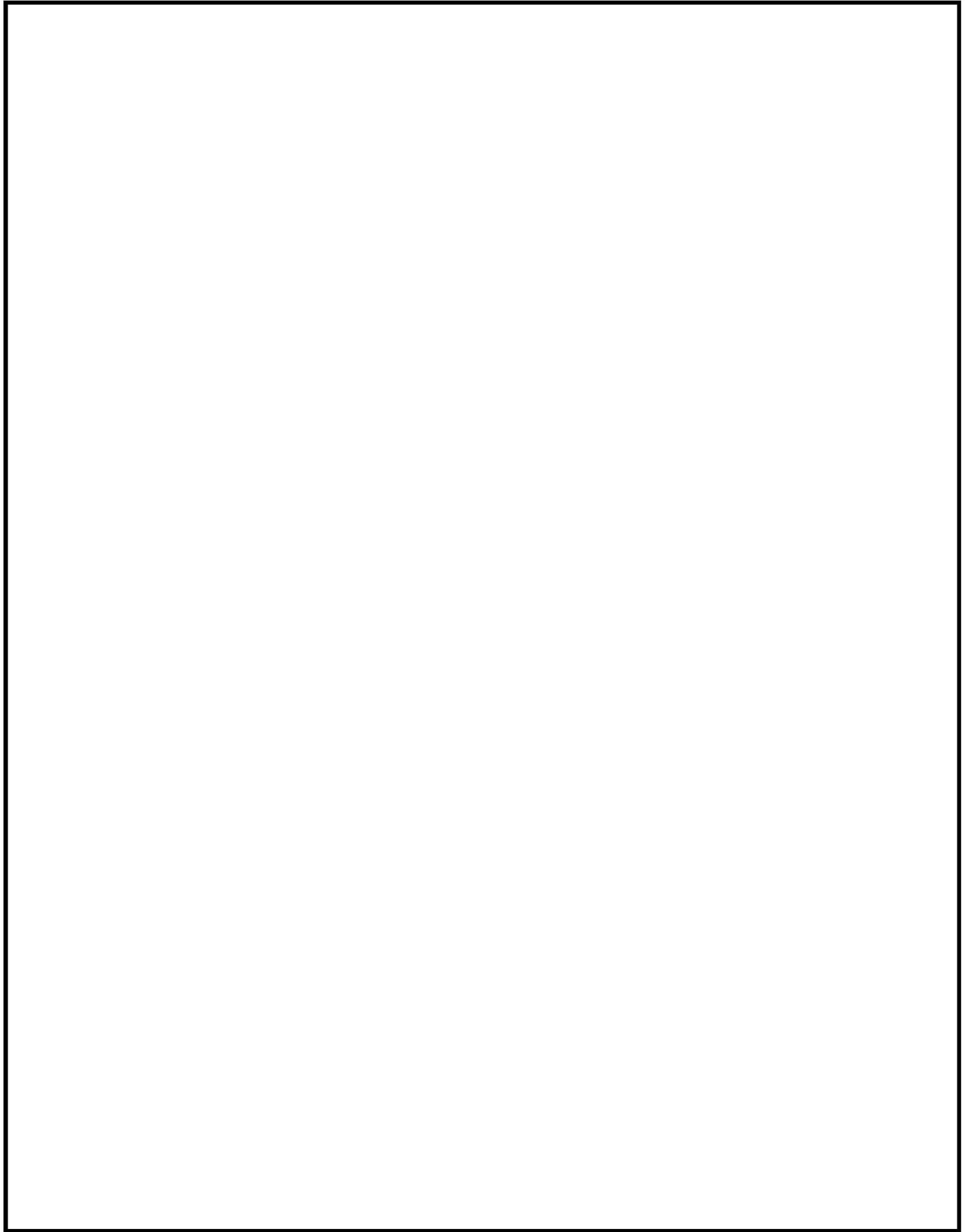


図 5-15 曲げモーメント図 (水平荷重時・X方向正加振・A フレーム)
(単位 : kN・m)

表 5-7 解析結果の比較
 (水平荷重時・X方向正加振・Aフレーム・曲げモーメント)

部材	着目箇所	a. SS3 (kN・m)	b. TDAPIII (kN・m)	比率 a / b
はり 1	①	8.8	8.6	1.023
	②	-7.3	-7.1	1.028
はり 2	③	7.3	7.1	1.028
	④	-8.8	-8.6	1.023
柱 1	⑤	8.8	8.6	1.023
	⑥	-16.3	-16.7	0.976
柱 2	⑦	14.6	14.3	1.021
	⑧	-19.1	-19.3	0.990
柱 3	⑨	8.8	8.6	1.023
	⑩	-16.3	-16.7	0.976

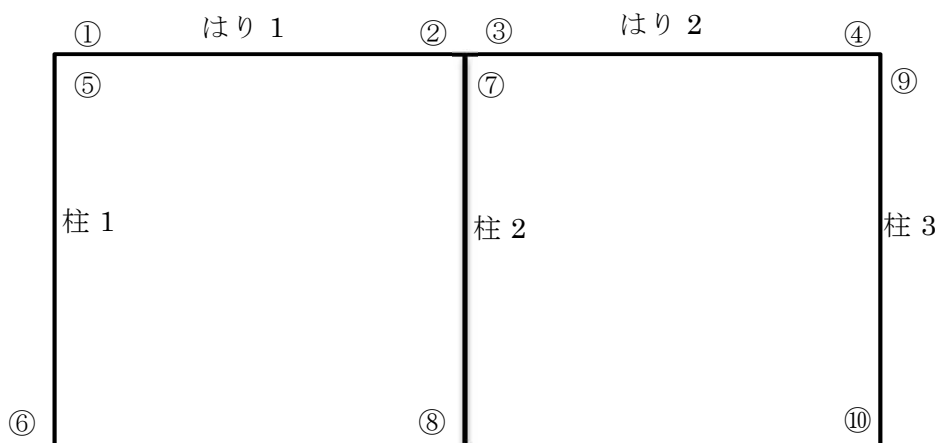


図 5-16 着目位置図
 (水平荷重時・X方向正加振・Aフレーム・曲げモーメント)

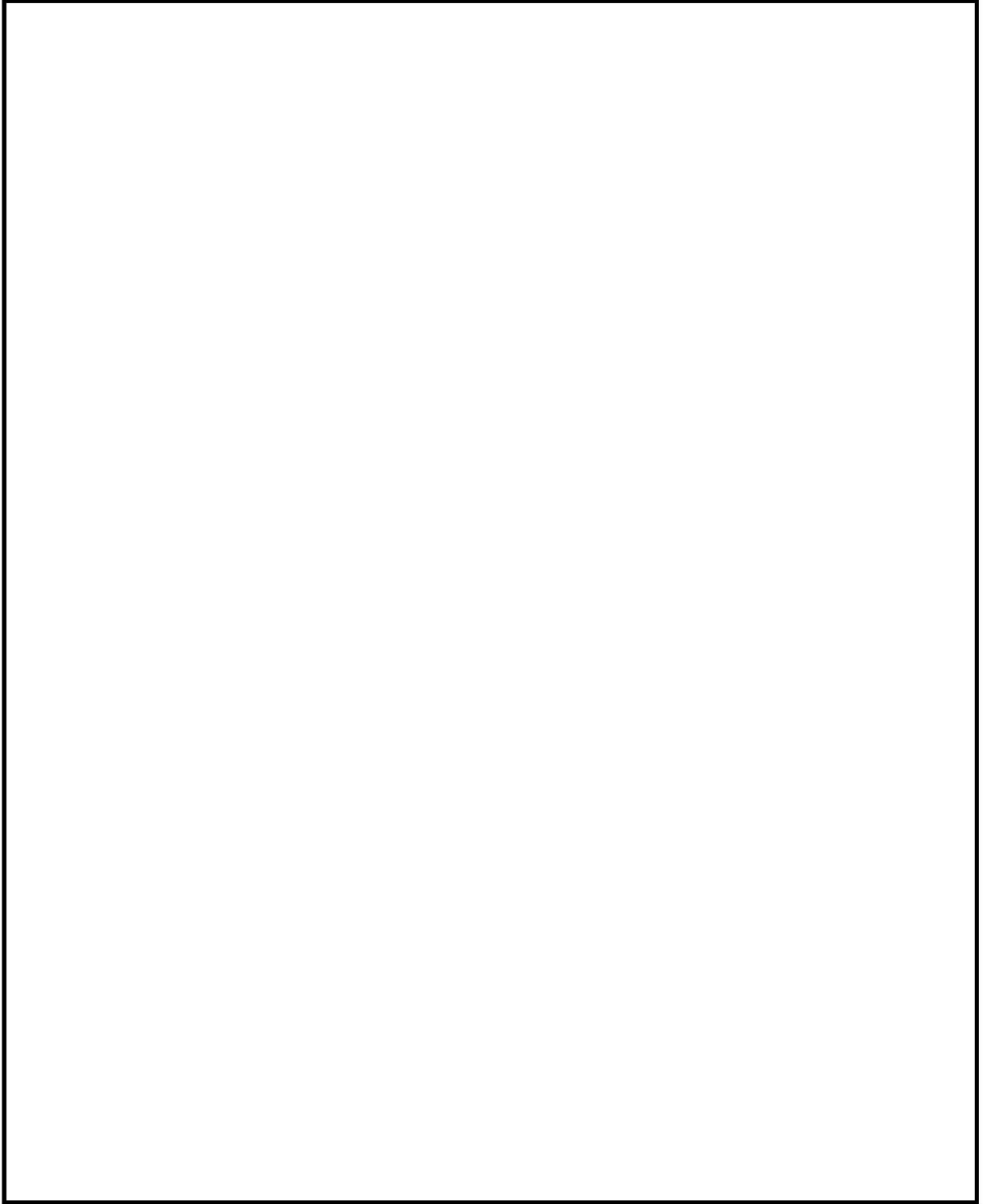


図 5-17 曲げモーメント図 (水平荷重時・Y方向正加振・1 フレーム)
(単位 : kN・m)

表 5-8 解析結果の比較
 (水平荷重時・Y方向正加振・1フレーム・曲げモーメント)

部材	着目箇所	a. SS3 (kN・m)	b. TDAPIII (kN・m)	比率 a / b
はり 1	①	3.3	3.1	1.065
	②	-3.3	-3.1	1.065
柱 1	③	3.3	3.1	1.065
	④	-4.6	-4.6	1.000
柱 2	⑤	3.3	3.1	1.065
	⑥	-4.6	-4.6	1.000

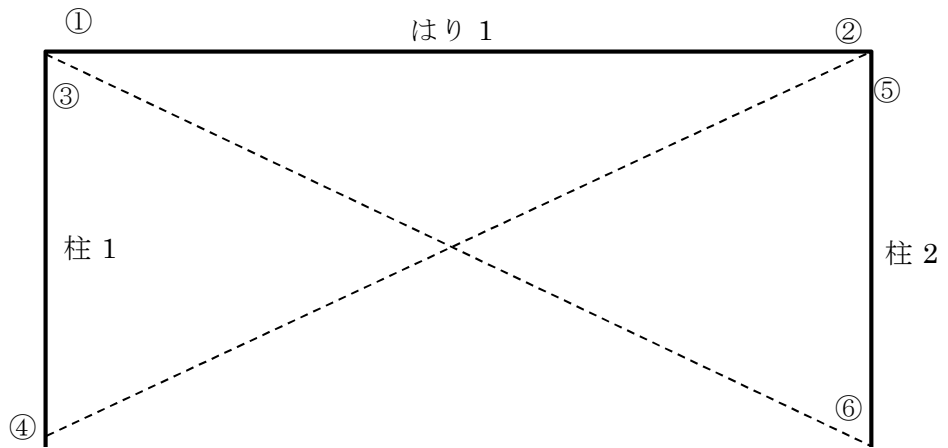


図 5-18 着目位置図
 (水平荷重時・X方向正加振・1フレーム・曲げモーメント)

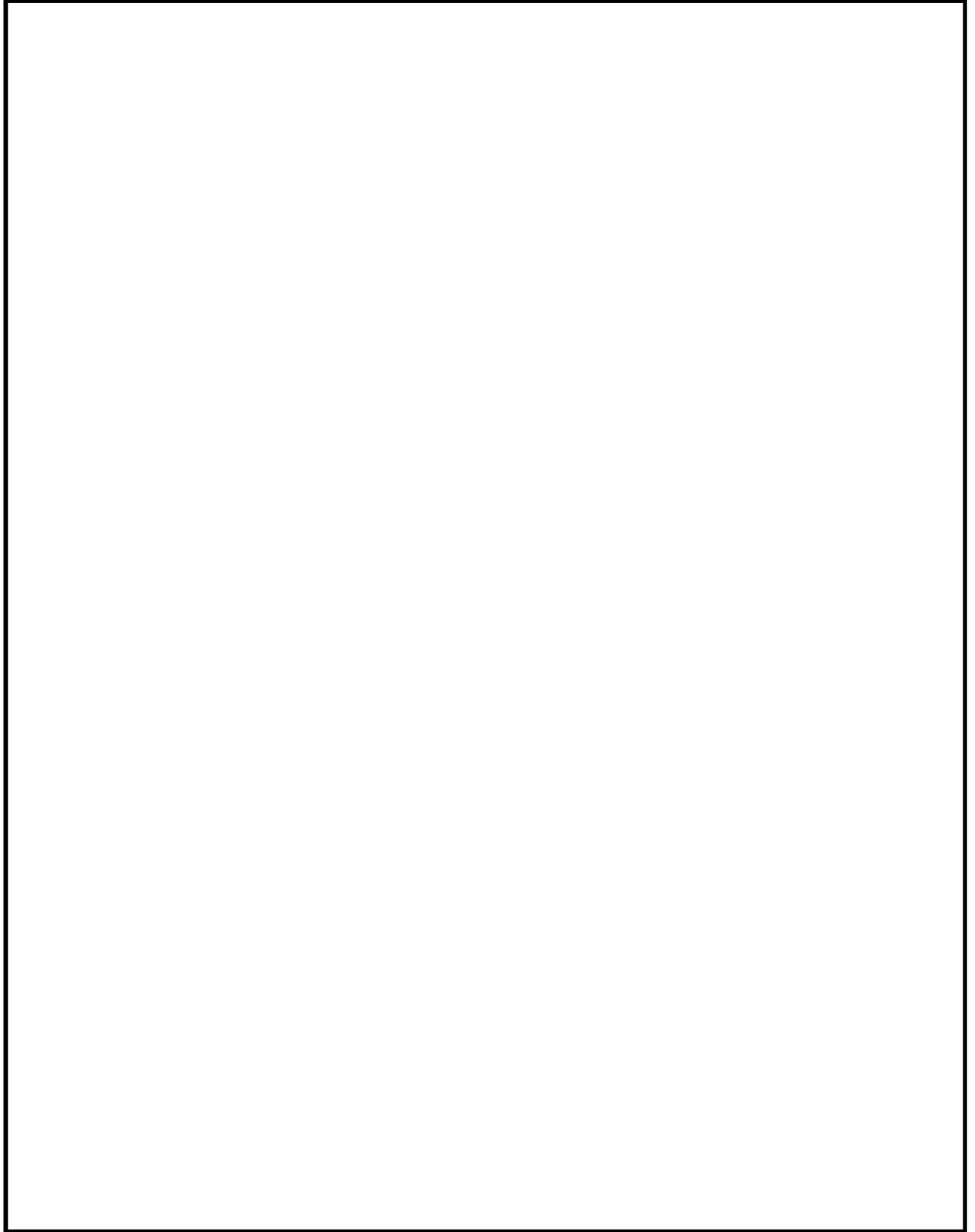


図 5-19 せん断力図 (水平荷重時・X方向正加振・A フレーム)
(単位 : kN)

表 5-9 解析結果の比較
 (水平荷重時・X方向正加振・Aフレーム・せん断力図)

部材	着目箇所	a. SS3 (kN)	b. TDAPⅢ (kN)	比率 a / b
はり 1	①	-4.0	-3.9	1.026
はり 2	②	-4.0	-3.9	1.026
柱 1	③	8.9	9.3	0.957
柱 2	④	11.9	11.9	1.000
柱 3	⑤	8.9	9.0	0.989

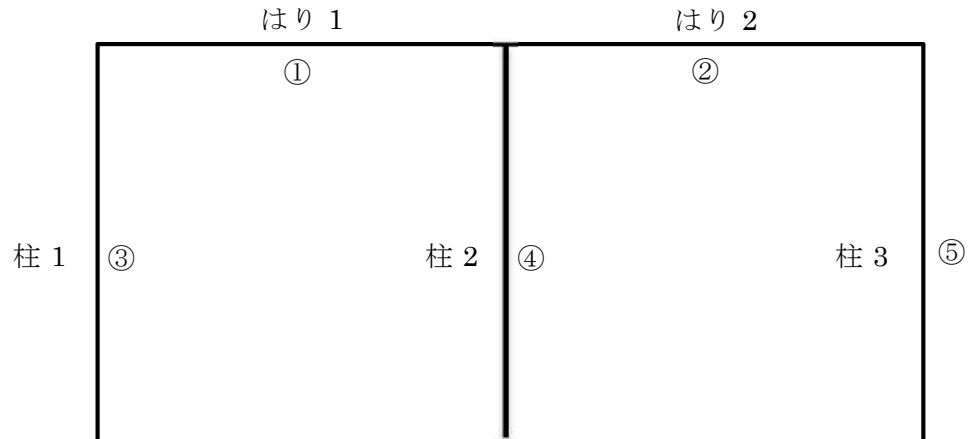


図 5-20 着目位置図
 (水平荷重時・X方向正加振・Aフレーム・せん断力図)

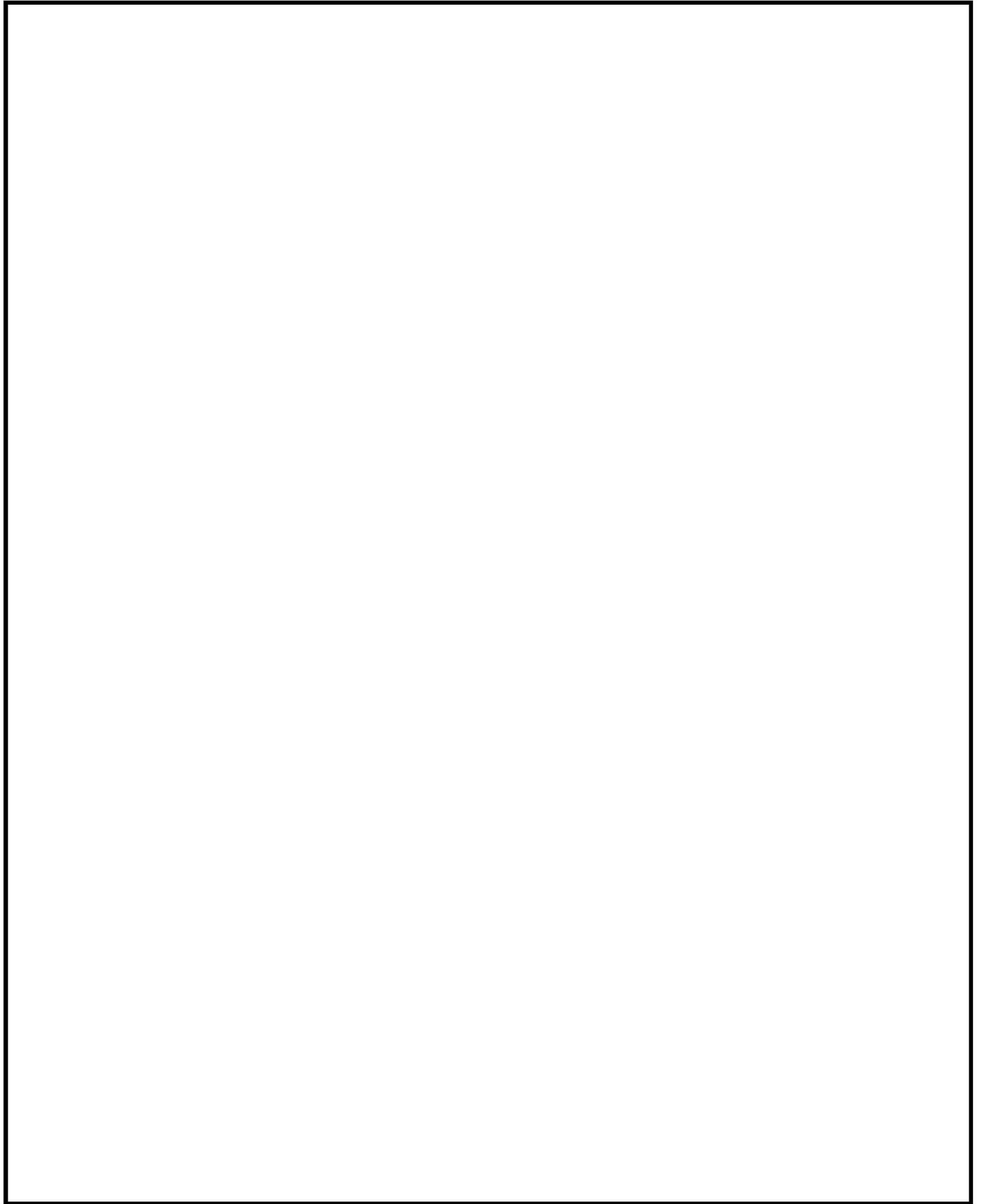


図 5-21 せん断力図 (水平荷重時・X方向正加振・1 フレーム)
(単位 : kN)

表 5-10 解析結果の比較
 (水平荷重時・Y方向正加振・1フレーム・せん断力)

部材	着目箇所	a. SS3 (kN)	b. TDAPⅢ (kN)	比率 a / b
はり 1	①	-1.1	-1.0	1.100
柱 1	②	2.8	2.8	1.000
柱 2	③	2.8	2.8	1.000

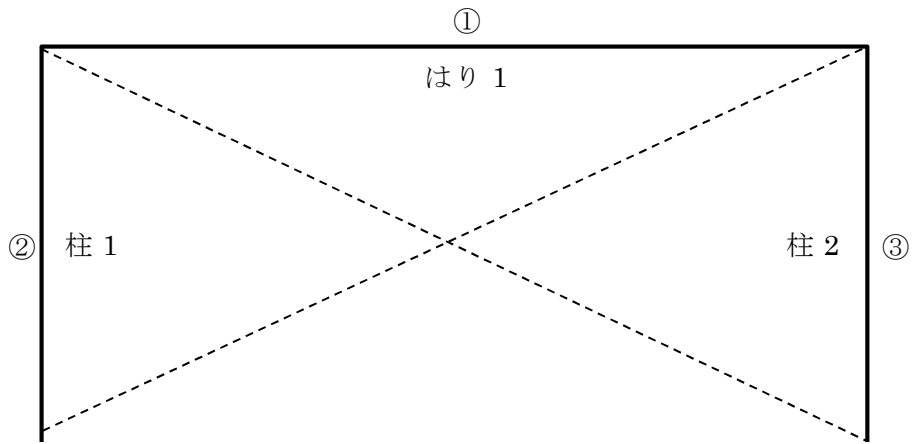


図 5-22 着目位置図
 (水平荷重時・Y方向正加振・1フレーム・せん断力)

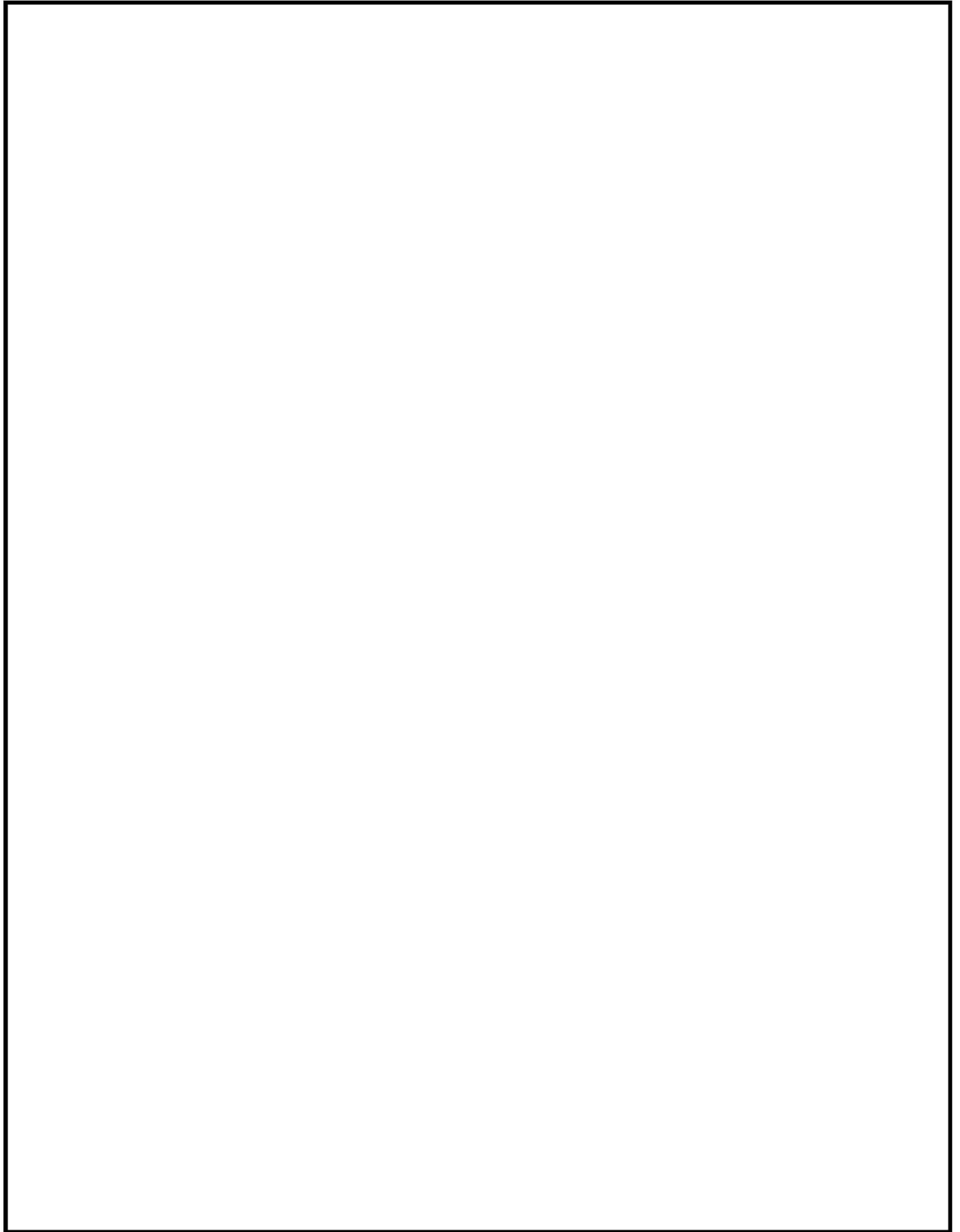


図 5-23 軸力図 (水平荷重時・X方向正加振・A フレーム)
(単位 : kN)

表 5-11 解析結果の比較
 (水平荷重時・X方向正加振・Aフレーム・軸力)

部材	着目箇所	a. SS3 (kN)	b. TDAPⅢ (kN)	比率 a / b
柱 1	①	4.0	3.9	1.026
柱 2	②	0.0	0.0	—
柱 3	③	-4.0	-3.9	1.026

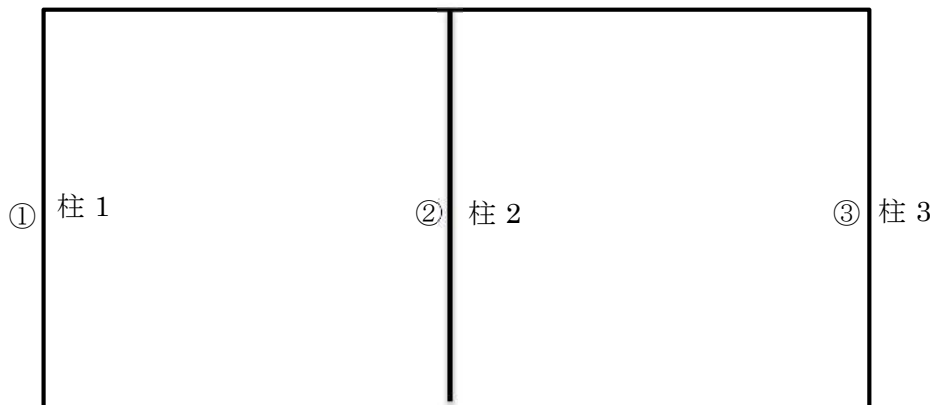


図 5-24 着目位置図
 (水平荷重時・X方向正加振・Aフレーム・軸力)

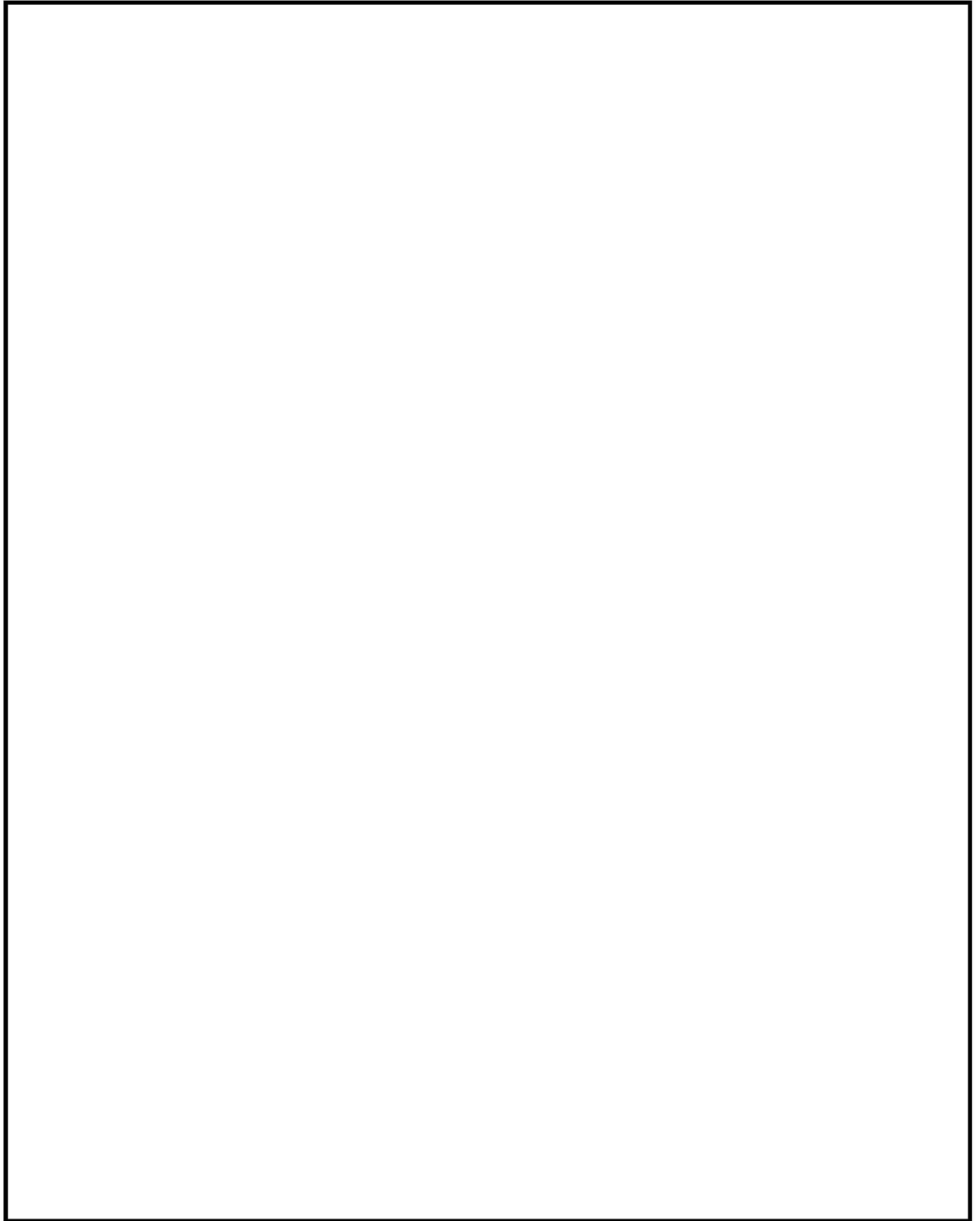


図 5-25 軸力図 (水平荷重時・Y方向正加振・1 フレーム)
(単位 : kN)

表 5-12 解析結果の比較
(水平荷重時・Y方向正加振・1フレーム・軸力)

部材	着目箇所	a. SS3 (kN)	b. TDAPⅢ (kN)	比率 a / b
柱 1	①	1.1	1.0	1.100
柱 2	②	-11.1	-11.1	1.000
ブレース 1	③	23.6	23.8	0.992
ブレース 2	④	0.0	0.0	—

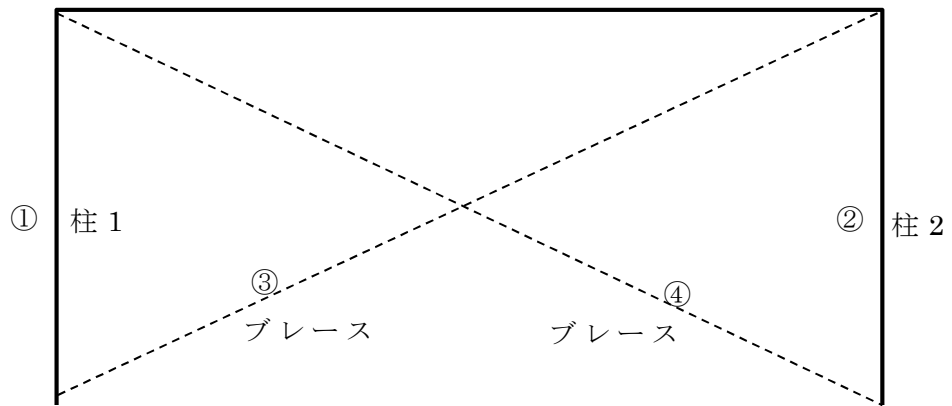


図 5-26 着目位置図
(水平荷重時・Y方向正加振・1フレーム・軸力)

5.2 使用目的に対する妥当性

本解析コードは、建屋構造の応力解析に使用されており、その適用妥当性は5.1「解析結果の比較による検証」において検証している。

また、本解析コードは一般建築分野の構造計算及び建築確認申請では広く使用されているプログラムであり、建屋構造計算では十分な実績を有している。

したがって、本解析にSuper Build/SS3を使用することは妥当である。

別紙 48 N-DAPS 3

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-別添 2-2	溢水源としない耐震 B, C クラス機器の耐震計算書	Ver. 2. 20
V-2-別添 2-5	復水器出入口弁の耐震性についての計算書	Ver. 2. 20
V-2-別添 2-7	タービン補機冷却海水ポンプ吐出弁の耐震性についての計算書	Ver. 2. 20

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	N-DAPS3
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析
開発機関	三和テッキ株式会社
開発時期	1970年
使用したバージョン	Ver. 2.20
コードの概要	<p>本解析コードは，配管の強度解析を目的として開発された計算機プログラムである。汎用構造解析コード DAPS と SRAC をメインプログラムとし，応力評価プログラム及びそれらのインターフェイスプログラムのサブプログラムからなる。</p> <p>任意の3次元形状に対し，有限要素法により静的解析，動的解析を行い，反力・モーメント・応力，固有振動数・刺激係数等の算出が可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ N-DAPS3 と汎用コード “ADL Pipe Static-Thermal-Dynamic Pipe Stress Analysis” (Arthur D. Little. Inc., Cambridge, Massachusetts, January 1971) による解析結果がよく一致していることを確認した。 ・ 応力評価プログラムは，メインプログラムの出力結果（モーメント）から，適用技術基準（J S M E *¹, J E A G *²等）に基づいて応力評価が正しく計算されていることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 原子力の分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・ 検証結果より，今回の工事計画認可申請で行う固有値解析，地震応答解析及び応力解析の使用目的に照らして，妥当であることを確認している。

注記*1：日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」

*2：原子力発電所耐震設計技術指針

3. 解析手法

3.1 一般事項

本計算機プログラムは、原子力発電所、火力発電所、化学プラントにおける配管系の、熱膨張応力、分布荷重応力、静的震度法による地震応力、スペクトルモード解析法による地震応答応力等を計算するプログラムである。なお、本プログラムで用いている固有値解法は、米国カリフォルニア大学で作成された汎用計算プログラム「SAP」を基に作られている。

計算機コード名「DAPS」は静的解析、「SRAC」は固有値解析及びスペクトルモード解析を行うプログラムであるが、要素データ入力や応力計算式は共通化されているので、以下にその理論の概要を述べる。

4. 理論

4.1 静的解析

静的解析における基本式は、

$$\{f\} = [K]\{d\} + \{f\}_T + \{f\}_W \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、 $[K]$ は剛性行列、 $\{d\}$ は変位ベクトル、 $\{f\}$ は外荷重ベクトル、 $\{f\}_T$ は熱膨張荷重ベクトル、 $\{f\}_W$ は分布荷重ベクトルを表す。

この式に拘束自由度及び強制変位を代入し、それらの自由度を消去すると、

$$\{f\} = [K]\{d\} + \{f\}_T + \{f\}_W + \{f\}_D \dots\dots\dots (4.2)$$

ここで、 $\{f\}_D$ は変位を与えた自由度を消去したために発生した変位消去ベクトルを表す。

力ベクトルをまとめると、

$$\{f^*\} = \{f\} - \{f\}_T - \{f\}_W - \{f\}_D \dots\dots\dots (4.3)$$

(4.2) 式を (4.3) 式に代入すると、

$$\{f^*\} = [K]\{d\} \dots\dots\dots (4.4)$$

これは、 d を未知数とする連立方程式であり、これを解くために $[K]$ を次の様に三角分解する。

$$[K] = [L][D][U] \dots\dots\dots (4.5)$$

ここで、 $[L]$ は下三角行列、 $[D]$ は対角行列、 $[U]$ は上三角行列を表す。

この三角分解された行列を用いて、前進消去、後退代入を実行する事により、未知変位 d を求める。

応力は、(4.4) 式に対応した部材座標の断面力から求める。

4.2 固有値解析

固有値解析(固有振動数と固有ベクトル)は、次の固有値問題を解けばよい。

$$[K]\{x\} = \lambda[M]\{x\} \cdots \cdots \cdots (4.6)$$

ここで、 $[K]$ は系の剛性行列、 $[M]$ は系の質量行列、 λ は固有値、 $\{x\}$ は固有ベクトルを表す。

(4.6) 式を解く方法として2つの方法があり、ひとつは $[K]$ の次数及びバンド幅が小さい時の解法としての行列式探索法 (Determinant Search Method) , もうひとつは $[K]$ の次数及びバンド幅が大きい時の解法としてのサブスペース法 (Subspace Method) を採用している。

4.3 スペクトルモーダル解析

スペクトルモーダル解析における基本式は次の式で表される。

$$[M]\{\ddot{d}\} + [C]\{\dot{d}\} + [K]\{d\} = -\ddot{A}(t)[M]\{I\}_i \cdots \cdots \cdots (4.7)$$

ここで、 $[M]$ は質量行列、 $[C]$ は減衰行列、 $\{\ddot{d}\}$ は相対加速度ベクトル、 $\{\dot{d}\}$ は相対速度ベクトル、 $\{d\}$ は相対変位ベクトル、 $\ddot{A}(t)$ は地震加速度、 $\{I\}_i$ は地震方向ベクトル(地震方向が1, 他は0のベクトル)を表す。

スペクトルモーダル解析は、境界条件を入れた(4.7)式に、

$$\{d\} = \sum_s \{\phi_s\} q_s \cdots \cdots \cdots (4.8)$$

となる変数分離を適用すれば、各次が独立になる。

$$\ddot{q}_s + 2h_s \omega_s \dot{q}_s + \omega_s^2 q_s = -\beta_{s,i} \ddot{A}(t) \cdots \cdots \cdots (4.9)$$

ここで、 $\{\phi_s\}$ はS次の固有モードベクトル、 q_s はS次の時刻関数、 s は=1~n(モード番号)、 i は x, y, z を表す。

なお、 $\beta_{s,i}$ は刺激係数と呼ばれるもので、次式で表す。

$$\beta_{s,i} = \frac{\{\phi_s\}^T [M] \{I_i\}}{\{\phi_s\}^T [M] \{\phi_s\}} \cdots \cdots \cdots (4.10)$$

(4.9) 式の解の最大値は、

$$(q_s)_{\max} = \beta_{s,i} \frac{(S_A)_{\omega_s, h_s}}{\omega_s^2} \cdots \cdots \cdots (4.11)$$

ここで、 (S_A) は床応答スペクトルより、固有値 ω_s に対応した加速度スペクトルである。

これを(4.8)式に代入すると、各次の最大の応答変位は、

$$\{d\}_{s, \max} = \{\phi_s\} \times (q_s)_{\max} \cdots \cdots \cdots (4.12)$$

次に、一次から最大次数までの応答値の近似値を各次応答値の二乗和平方根法

(Square Root of the Sum of the Squares 法)により求める。

$$\{d\} = \left\{ \left[\sum (d_{s,\max})^2 \right]^{1/2} \right\} \dots\dots\dots (4.13)$$

応力は、(4.12)式の各次の変位モードに対応した部材座標の断面力から変位と同等の手順で求める。

5.1.1 入力データ

入力データは次のものである。

- ・ タイトル
- ・ 要素のデータ（縦弾性係数，管の外径，肉厚，計算圧力，温度，管の単位長さ当たりの重量等）
- ・ 系の幾何学的形状についてのデータ，すなわち要素とその両端の質点及びその座標
- ・ 集中荷重及び分布荷重の作用する節点あるいは要素とその値
- ・ 境界条件及び拘束条件，すなわちアンカ，レストレイントの位置及び方向
- ・ 数値化された加速度応答スペクトル

5.1.2 出力データ

出力データは次のものである。

- ・ 入力データ
- ・ 固有周期
- ・ 固有ベクトル
- ・ 節点変位
- ・ 要素の応力
- ・ 支持拘束に作用する力，モーメント

6. 計算機コードの検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

6.1 他計算機コードとの比較による検証

計算機コード「N-DAPS3 (Ver. 2.20)」による計算結果との比較検証に用いた配管応力解析プログラム「ADLPIPE」は、米国にて開発された配管系応力解析プログラムである。本プログラムは、1971年開発後これまで、約40年の使用実績があり、世界的に使用実績およびクライアント数の多い配管専用応力解析プログラムの一つである。解析種類としては、静的解析として熱膨張・自重・風力・静的地震解析及び動的解析として応答スペクトラム解析（単一入力スペクトラム・多入力スペクトラム）等が行える。

「ADLPIPE」と「N-DAPS3 (Ver. 2.20)」を用いてある配管用検証モデルを対象に解析を行い、得られた結果を比較することにより、検証を行った。

6.2 検証解析

(1) 解析条件

この解析では、次に示す種々の荷重条件

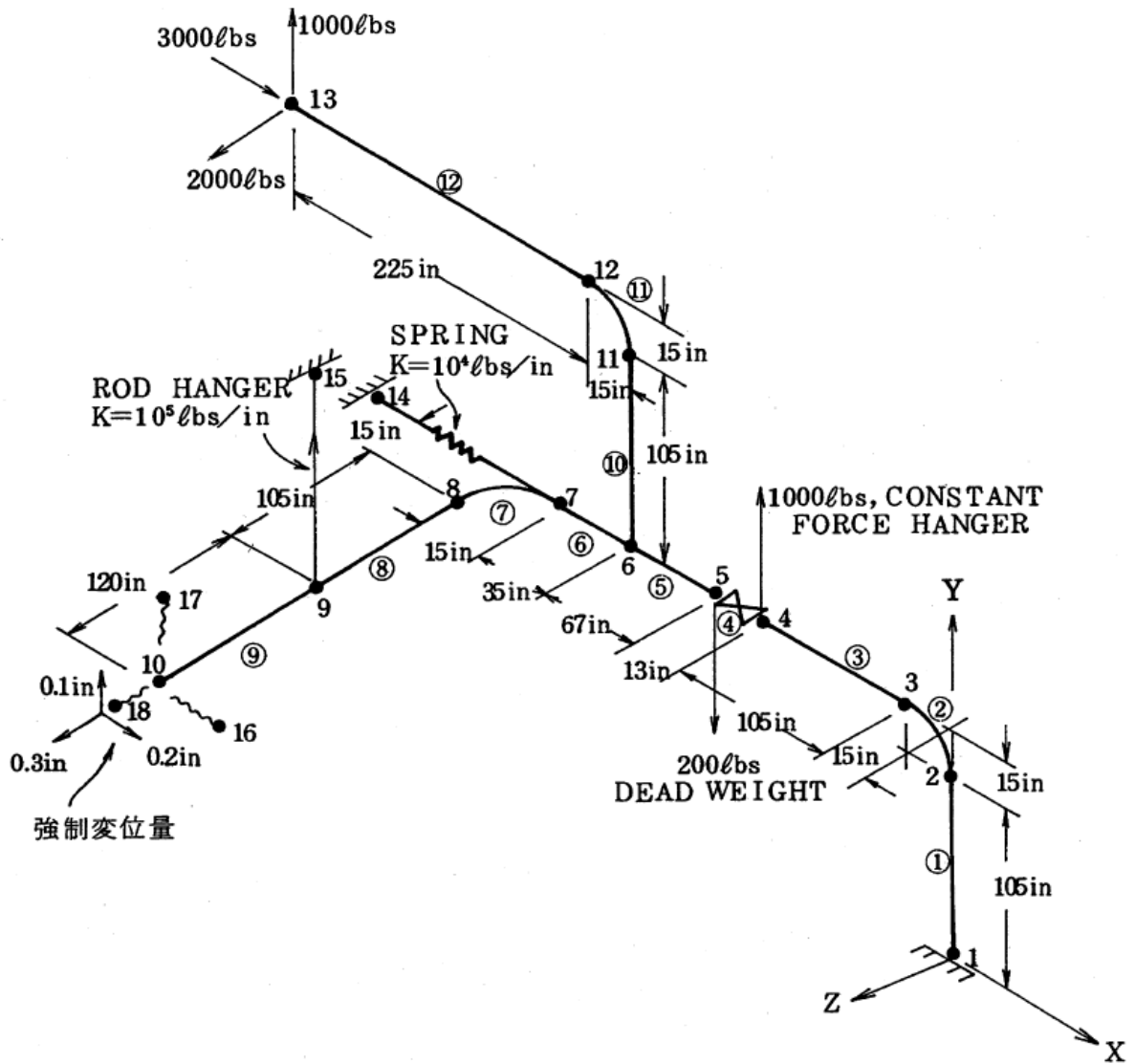
1. 集中荷重
2. 垂直（Y-方向）重力荷重
3. 一様温度変化（熱荷重）
4. 支持点に作用する強制変位

のもとで、配管系の静的な解析を行った。

(2) モデル図

図-添1の配管系は、配管解析プログラム「ADLPIPE」のユーザマニュアルに掲載されている配管系である。

a. モデル図



K7 ① V-2 別紙 R0

- in : インチ
- lb : ポンド
- psi : ポンド / (インチ)²
- ksi : キロポンド / (インチ)²

図-添1 「ADLPIPE」ユーザマニュアルの配管用モデル

b. 各節点の座標値と拘束条件

(単位：mm)

節点番号	X	Y	Z	拘束条件	
1	0.0	0.0	0.0	完全固定	
2	0.0	2667.0	0.0		
3	-381.0	3048.0	0.0		
4	-3048.0	3048.0	0.0		
5	-3378.2	3048.0	0.0		
6	-5080.0	3048.0	0.0		
7	-5969.0	3048.0	0.0		
8	-6350.0	3048.0	381.0		
9	-6350.0	3048.0	3048.0		
10	-6350.0	3048.0	6096.0		回転成分固定
11	-5080.0	5715.0	0.0		
12	-5461.0	6096.0	0.0		
13	-11176.0	6096.0	0.0		
14	-6350.0	3048.0	0.0	以下境界要素の方向を決める節点として使われる仮想節点	
15	-6350.0	3302.0	3048.0		
16	-6096.0	3048.0	6096.0		
17	-6350.0	3302.0	6096.0		
18	-6350.0	3048.0	6350.0		

c. 管の材料特性

ヤング率 $E = 1.92 \times 10^5 \text{ MPa}$ ($27.9 \times 10^6 \text{ psi}$)ポアソン比 $\nu = 0.333$ 熱膨脹係数 $\alpha = 1.23 \times 10^{-5} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$ ($6.81 \times 10^{-6} \text{ in/in/}^\circ\text{F}$)

d. 管の形状特性

外径 272.796 mm (10.74 in)

肉厚 12.7 mm (0.5 in)

ただし、要素番号 4 における管肉厚は、50.8 mm (2.0 in)

単位管質量 118.04 kg/m (6.61 lbs/in)

なお、配管系の温度上昇は $411.11 \text{ }^\circ\text{C}$ ($740 \text{ }^\circ\text{F}$) とする。

e. 載荷荷重

(単位：N)

荷重の種類	方 向		
	X	Y	Z
集中荷重：			
節点番号 4	—	4448	—
節点番号 5	—	-890	—
節点番号 13	13345	4448	8896
重力荷重：		-27952	
計	13345	-19946	8896

重力荷重 27952(N)は、次式より計算される。

$$\text{管の全長}^* \quad \text{単位管質量} \quad \text{重力加速度} \quad \text{重力荷重}$$

$$24.147 \text{ m} \times 118.04 \text{ kg/m} \times 9.80665 \text{ m/s}^2 = 27952 \text{ N}$$

注記*：管の全長は、950.686 in(24.147 m)。

(3) 解析結果

表-添1に、「N-DAPS3 (Ver. 2.20)」と「ADLPIPE」それぞれの解析コードから得られる結果の比較を示す。これにより、互いの解析結果がよく一致していることが分かる。

表-添1 反力 (N-DAPS3 (Ver. 2.20)とADLPIPEの比較)

(単位：N)

節 点	N-DAPS3 (Ver. 2.20)			ADLPIPE		
	Fx	Fy	Fz	Fx	Fy	Fz
1	-48917	20048	13176	-49024	20057	13193
7	25115	—	—	25172	—	—
9	—	-17998	—	—	-18024	—
10	10462	17904	-22077	10502	17909	-22090
計	-13340	19954	-8901	-13350	19942	-8897

ADLPIPEの反力値は、lbsをNに単位換算して表示している。

6.3 妥当性

計算機コード「N-DAP S3 (Ver. 2.20)」による計算結果は、汎用構造解析コード「ADLPIPE」の計算結果と比較してよく一致していることから、計算機コード「N-DAP S3 (Ver. 2.20)」は妥当性があると判断する。

別紙 49 S A P - V

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-別添 2-2	溢水源としない耐震 B, C クラス機器の耐震計算書	ADAMS-V

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	S A P - V
使用目的	3次元有限要素法(はりモデル)による応力解析
開発機関	株式会社 I H I
開発時期	1993年
使用したバージョン	ADAMS-V
コードの概要	<p>本解析コードは、米国カリフォルニア大学が開発した S A P - IV をベースに南カリフォルニア大学が一部機能を追加し開発された S A P - V に対して、I H I が一部機能追加・拡張したバージョンである。任意の3次元形状に対して、有限要素法により静的解析を行い、反力、モーメント、応力等の算出が可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・汎用構造解析プログラムである「N A S T R A N」を用いた計算結果、及び理論式に基づく計算結果と、検証モデルの計算結果を比較し、検証モデルの結果がよく一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回の工事計画認可申請で行うはり要素の応力解析の使用目的に照らして、用途及び適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法(はり要素)による応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本書は、米国カリフォルニア大学にて 10 年以上に及ぶ研究に基づいて 1970 年に開発されたプログラム「S A P」（引用文献(1)参照）をもとに、追加改良がなされた構造解析用計算機コード「S A P - V」の概要説明書である。

本計算機コードは、任意形状の 3 次元系の静的解析を、有限要素法を用いて行うもので、主として支持構造物の自重、運転時荷重及び地震力による応力計算等に用いる。要素の応力は、構造マトリックスを誘導し、釣合い方程式を解き変位を求めて算出する。

以上のような特徴を有する本プログラムにつき、以下にその概要を述べる。

表 3-1 S A P - V システム概要

コード名 項目	S A P - V
開発機関	(株) I H I (ADAMS-Vは、米国カリフォルニア大学が開発した S A P - IVをベースに南カリフォルニア大学が一部機能を追加し開発された S A P - Vに対して、(株) I H I が一部機能追加・拡張したバージョンである)
使用バージョン	ADAMS-V
開発時期	1993 年
計算機コード の概要	(汎用構造解析コード) 任意の 3 次元形状に対して、有限要素法により静的解析を行い、反力、モーメント、応力等の算出が可能。
検証方法	検証モデルに対し、汎用構造解析プログラムである「N A S T R A N」及び理論解と計算結果を比較し、一致することを確認。(詳細は添付資料-1 参照)

4. 理論

構造物全体に対して次の平衡方程式を作り，これを解く。

$$[k] \cdot \{u\} = \{f\} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで，

[k] : 剛性マトリックス

{u} : 変位ベクトル

{f} : 荷重ベクトル

計算された節点の変位から，要素の変形及び要素の応力を求める。

5. 応力解析

境界条件として節点変位，拘束を与え，荷重を負荷し，これらをもとに要素中のひずみと応力を算出する。

本計算機コードの応力解析のフローチャートを図 5-1 に示す。

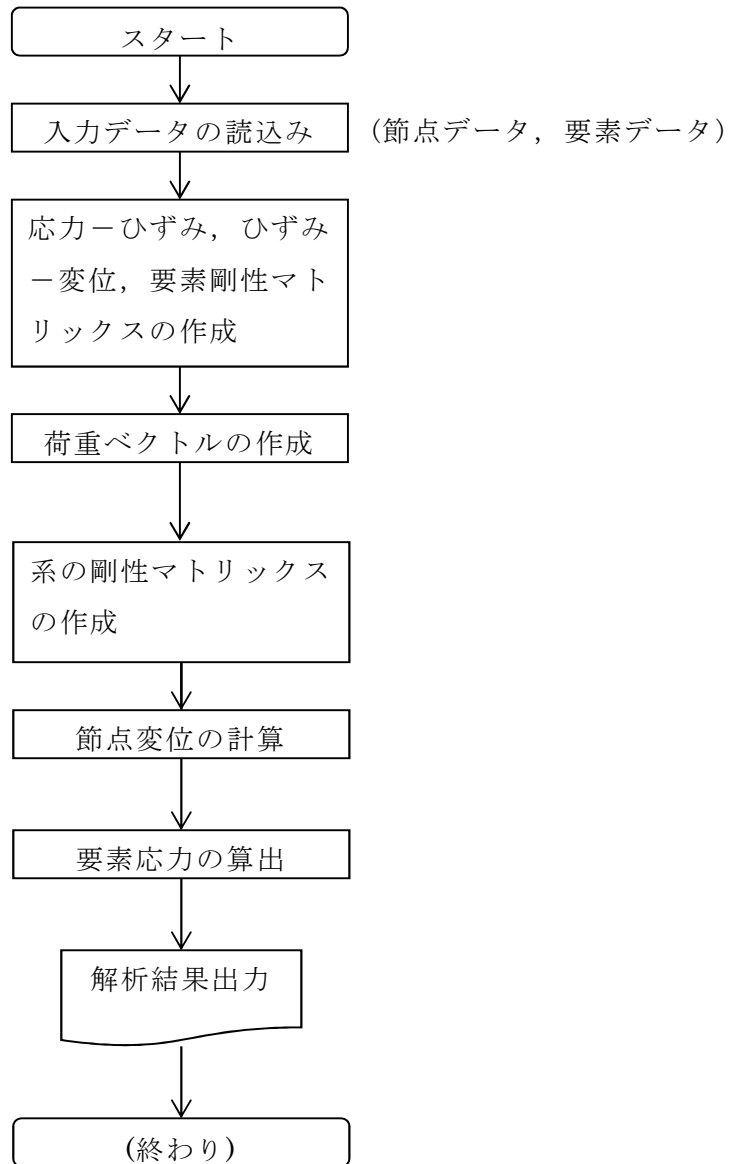


図 5-1 応力解析フローチャート

6. 計算機コードの検証

本計算機コードの検証結果を示す。検証は評価フローの各段階で実施した。

6.1 計算機コードを用いた評価フローチャート

本計算機コードを用いて行う評価フローチャートを，図 6-1 に示す。

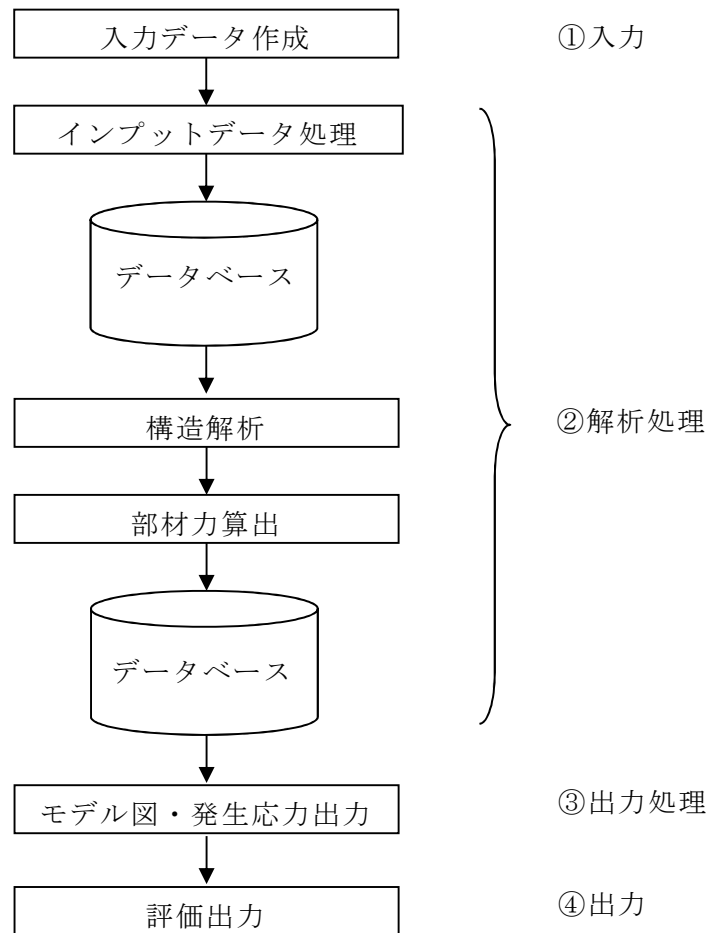


図 6-1 計算機コード(SAP-V:バージョン ADAMS-V)を用いた評価フローチャート

6.2 検証結果

図 6-1 に示したフローチャートに基づき，本計算機コードによる計算結果と，汎用の構造解析プログラムを用いた計算結果及び理論式に基づいた計算結果を比較した（詳細は，添付資料-1 を参照）。

各計算結果は概ね一致していることから，本計算機コードの妥当性を確認した。

7. 引用文献

- (1) E. L. WILSON, K. J. BATHE, F. E. PETERSON and H. H. DOVEY “SAP - A STRUCTURAL ANALYSIS PROGRAM FOR LINEAR SYSTEMS” (NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN 25(1973)257-274

添付資料-1 コードの検証

1. 計算機コード検証についての概要

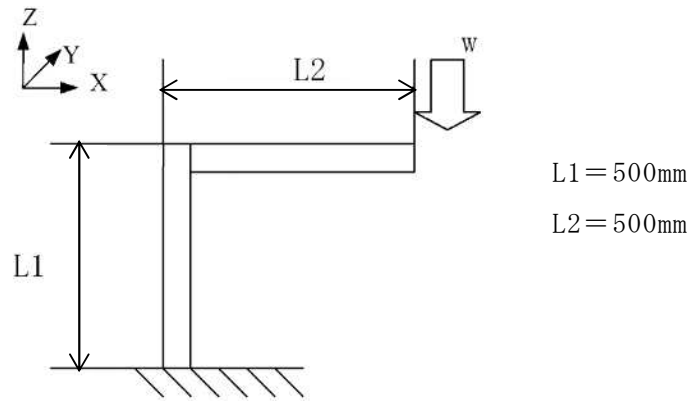
本計算機コード「SAP-V：バージョンADAMS-V」の検証を行うため、汎用の構造解析プログラムである「NASTRAN」の計算結果，理論式に基づく計算結果と，検証モデルの計算結果を比較した。

2. 解析条件

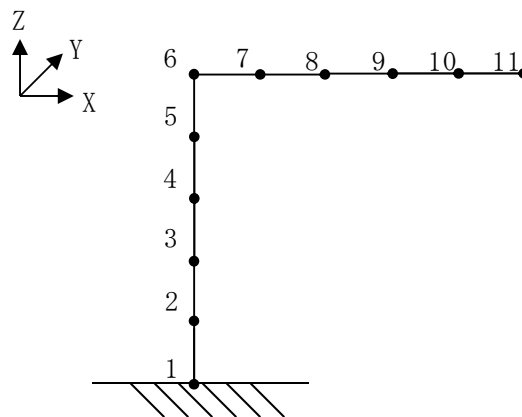
検証モデルの解析条件を次に示す。

2.1 モデル図

検証に使用した構造モデル図を図添 2-1 に，解析モデル図を図添 2-2 に示す。



図添 2-1 構造モデル図



図添 2-2 解析モデル図

注：図中の番号は各節点に割り当てた節点番号を表す。各要素の要素番号は，両端の節点の節点番号のうち，小さい方を適用する。

2.2 荷重条件

本解析では，構造物の自重は考慮せず，集中荷重のみによる支持構造物の静的解析を行った。

2.3 各節点の座標と拘束条件

表添 2-1 各節点の座標と拘束条件

(単位:mm)

節点 番号	X	Y	Z	拘束条件
1	0.0	0.0	0.0	6方向拘束
2	0.0	0.0	100.0	
3	0.0	0.0	200.0	
4	0.0	0.0	300.0	
5	0.0	0.0	400.0	
6	0.0	0.0	500.0	
7	100.0	0.0	500.0	
8	200.0	0.0	500.0	
9	300.0	0.0	500.0	
10	400.0	0.0	500.0	
11	500.0	0.0	500.0	

2.4 部材の形状特性

角型鋼管

辺の長さ = 100.0 mm × 100.0 mm

肉厚 = 4.5 mm

2.5 部材の材料特性

縦弾性係数 E = 2.03×10^5 MPaポアソン比 ν = 0.3

2.6 負荷荷重

表添 2-2 負荷荷重

(単位:N)

荷重の種類	方 向		
	X	Y	Z
節点番号 11	-	-	-2000

3. 解析結果

表添 3-1～表添 3-2 に、「S A P - V : バージョン ADAMS-V」, 「N A S T R A N」及び理論式に基づく計算結果を示す。表より, 互いの解析結果がよく致していることが分かる。

表添 3-1 軸力(F)及びせん断力(M)の計算結果

(単位 : N)

要素 番号	S A P - V (ADAMS-V)		N A S T R A N		理論式	
	F	M	F	M	F	M
1	0.0000	-2000	0.0000	-2000	0.0000	-2000
2	0.0000	-2000	0.0000	-2000	0.0000	-2000
3	0.0000	-2000	0.0000	-2000	0.0000	-2000
4	0.0000	-2000	0.0000	-2000	0.0000	-2000
5	0.0000	-2000	0.0000	-2000	0.0000	-2000
6	-2000	0.0000	-2000	0.0000	-2000	0.0000
7	-2000	0.0000	-2000	0.0000	-2000	0.0000
8	-2000	0.0000	-2000	0.0000	-2000	0.0000
9	-2000	0.0000	-2000	0.0000	-2000	0.0000
10	-2000	0.0000	-2000	0.0000	-2000	0.0000

表添 3-2 Y 軸回りモーメント (M_y) の計算結果
(単位 : $N \cdot mm$)

節点 番号	S A P - V (ADAMS-V)	N A S T R A N	理論式
	M_y	M_y	M_y
1	-1000000	-1000000	-1000000
2	-1000000	-1000000	-1000000
3	-1000000	-1000000	-1000000
4	-1000000	-1000000	-1000000
5	-1000000	-1000000	-1000000
6	-1000000	-1000000	-1000000
7	-800000	-800000	-800000
8	-600000	-600000	-600000
9	-400000	-400000	-400000
10	-200000	-200000	-200000
11	0.0000	0.0000	0.0000

別紙 50 S T R U C T

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-別添 2-2	溢水源としない耐震 B, C クラス機器の耐震計算書	Ver 2.86
V-2-別添 2-7	タービン補機冷却海水ポンプ吐出弁の耐震性についての計算書	Ver 2.86

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	S T R U C T
使用目的	3次元有限要素法(はりモデル)による応力解析
開発機関	三和テッキ株式会社
開発時期	1982年
使用したバージョン	Ver. 2. 86
コードの概要	<p>本解析コードは、骨組構造の静的解析及び動的解析を、はり理論を用いて行う計算機プログラムである。架構等の骨組構造に対し、集中荷重、分布荷重、静的震度等による反力、モーメント、応力の算出が可能である。</p> <p>原子力発電所、火力発電所、化学プラント等での使用実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードと材料力学分野の一般的知見により解を求めることができる体系に対し、静的解析の結果が概ね一致することを確認した。 ・本解析コードと既工事計画において使用実績のある応力解析コードMSC NASTRANを比較対象として、今回の工事計画において対象とする構造物の形状の構成要素である片持ちばり、門型はり、斜材付支柱はりの応力解析を検証問題とする解析を行い、本解析コードによる数値解がMSC NASTRANによる数値解と概ね一致する事を確認した。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子力産業界において、配管支持構造物などの評価に十分な使用実績が有り、妥当性は十分に確認されている。 ・検証結果より、今回の工事計画認可申請で行う応力解析の使用目的に照らして、妥当であることを確認している。