

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-3-021 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 HISAP .....	2
別紙2 NuPIAS .....	5
別紙3 ABAQUS .....	17
別紙4 MSC NASTRAN .....	52
別紙5 ISAP .....	57
別紙6 DYNA2E .....	60
別紙7 f a p p a s e .....	64
別紙8 LS-DYNA .....	79
別紙9 ADMIT .....	86
別紙10 DAC3N .....	96
別紙11 GRIMP2 .....	98
別紙12 Hyper Statics and Dynamics .....	100
別紙13 KSHAKE .....	102
別紙14 LNOVAK .....	104
別紙15 NOVAK .....	113
別紙16 NX NASTRAN .....	115
別紙17 NVK263 .....	118
別紙18 SHAKE .....	125
別紙19 SHAKE .....	140
別紙20 ST-CROSS .....	155
別紙21 Super Build/SS3 .....	157
別紙22 TDAS .....	195
別紙23 FLIP .....	197
別紙24 FREMING .....	200
別紙25 SLOK .....	202
別紙26 ASHSD2-B .....	204
別紙27 TACF .....	206

1. はじめに

本資料は、添付書類V-3「強度に関する説明書」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。

「強度に関する説明書」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。

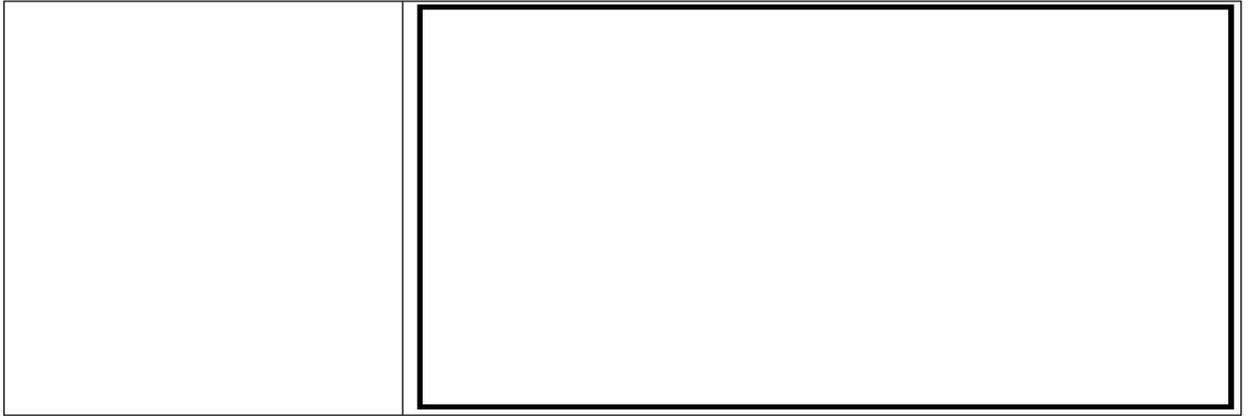
別紙1 H I S A P

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-3-2-2-1-4-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-3-1-1-3-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-3-1-2-1-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-3-2-1-7-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-3-3-1-6-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-3-3-2-5-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-3-3-3-2-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-3-3-4-1-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-3-4-1-3-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-3-5-1-6-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-3-5-2-5-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-3-6-1-2-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-4-2-1-4-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-4-3-1-1-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-4-3-2-2-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-6-2-4-2-1-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-6-2-5-1-2-2	管の応力計算書	Ver. 52
V-3-3-6-2-5-2-1-2	管の応力計算書	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 <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px;"></span> 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><b>【検証 (Verification)】</b></p> <p>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><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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> <div style="border: 2px solid black; height: 50px; 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2 NuPIAS

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-3-2-2-2-4-2	管の応力計算書	Ver. 6.1.3c
V-3-3-5-1-2-2-2	管の応力計算書	Ver. 6.1.3c
V-3-3-5-1-3-2-2	管の応力計算書	Ver. 6.1.3c
V-3-3-6-2-5-1-2-2	管の応力計算書	Ver. 6.1.3c
V-3-3-6-2-6-1-2-2	管の応力計算書	Ver. 6.1.3c
V-3-3-6-2-7-1-4-2	管の応力計算書	Ver. 6.1.3c
V-3-3-6-4-3	管の応力計算書（格納容器圧力逃がし装置）	Ver. 6.1.3c

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	N u P I A S
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><b>【検証（Verification）】</b></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"> <li>・配管系応力解析プログラム <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">                    </span>*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。</li> <li>・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 *2， J E A G *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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認（Validation）】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・今回の工事計画認可申請で行うはりモデルによる管の</li> </ul>

	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。
--	---------------------------------------

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）

### 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。

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

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

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

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:  $[c] = \alpha [m] + \beta [k]$  ,  $\alpha$  及び  $\beta$

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  $\{\ddot{u}\} = \{\dot{u}\} = 0$ 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。

$$[k] \cdot \{u\} = \{R\} \cdots \cdots \cdots (3.3)$$

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-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  $[c] = \{R\} = 0$ 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。

$$[k] \cdot \{\phi\} = [m] \cdot \{\phi\} \cdot \omega^2 \cdots \cdots \cdots (3.4)$$

ここで、 $\omega$ 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。

$$[k] \cdot [\Phi] = [m] \cdot [\Phi] \cdot [\Omega^2] \cdots \cdots \cdots (3.5)$$

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  $[k]$ 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。

$$[m] \cdot \{\ddot{u}\} + [c] \cdot \{\dot{u}\} + [k] \cdot \{u\} = \{R(t)\} \cdots (3.6)$$

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。

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

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。

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

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、 $\omega_i$  は  $i$  次モードの固有角振動数、 $\xi_i$  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。

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

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  $\theta$  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。

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

ここで、 $\{\ddot{\mathbf{u}}_{g_x}\} + \{\ddot{\mathbf{u}}_{g_y}\} + \{\ddot{\mathbf{u}}_{g_z}\}$  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。

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

ここで、 $\mathbf{X}_r$  は  $r$  次における  $\{\mathbf{X}\}$  の要素であり、かつ

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

(3. 11) 式から、 $x$  方向への最大の  $r$  次の変位は、

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

ここで、 $\beta_{r_x}$  は  $r$  次モードにおける刺激係数であり、

$$\beta_{r_x} = \frac{\{\phi_r\}^T \cdot [\mathbf{m}] \cdot \{\mathbf{I}_x\}}{\{\phi_r\}^T \cdot [\mathbf{m}] \cdot \{\mathbf{I}_r\}}$$

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

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

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

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。

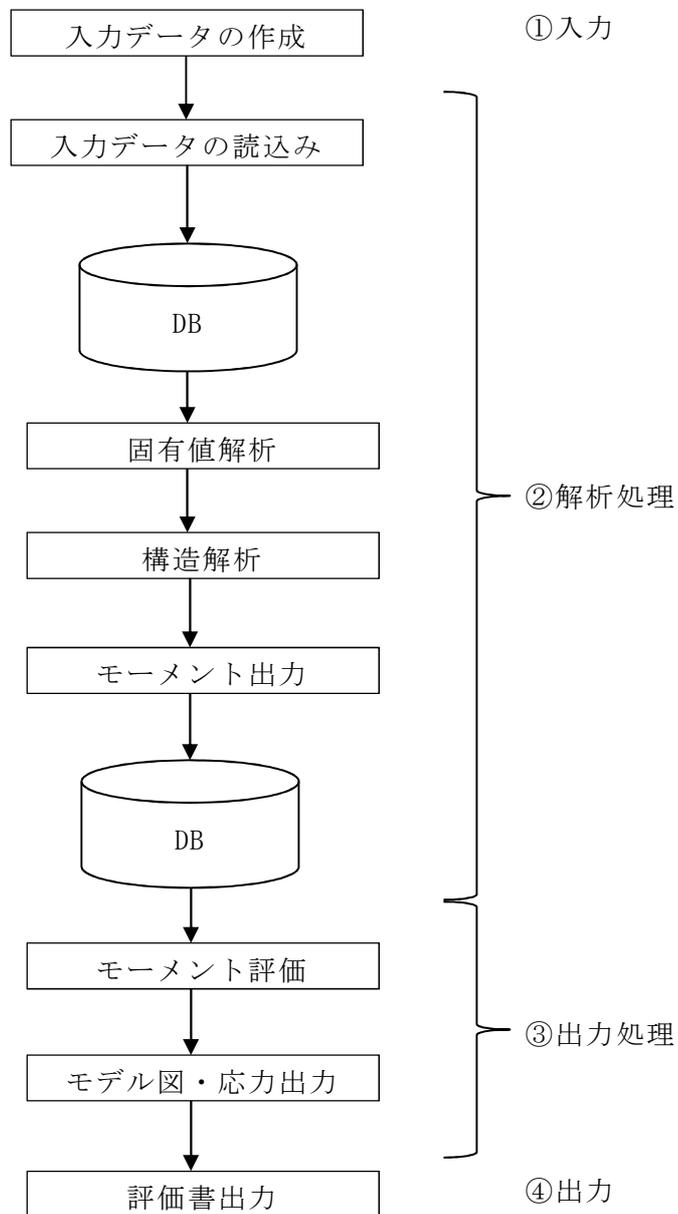
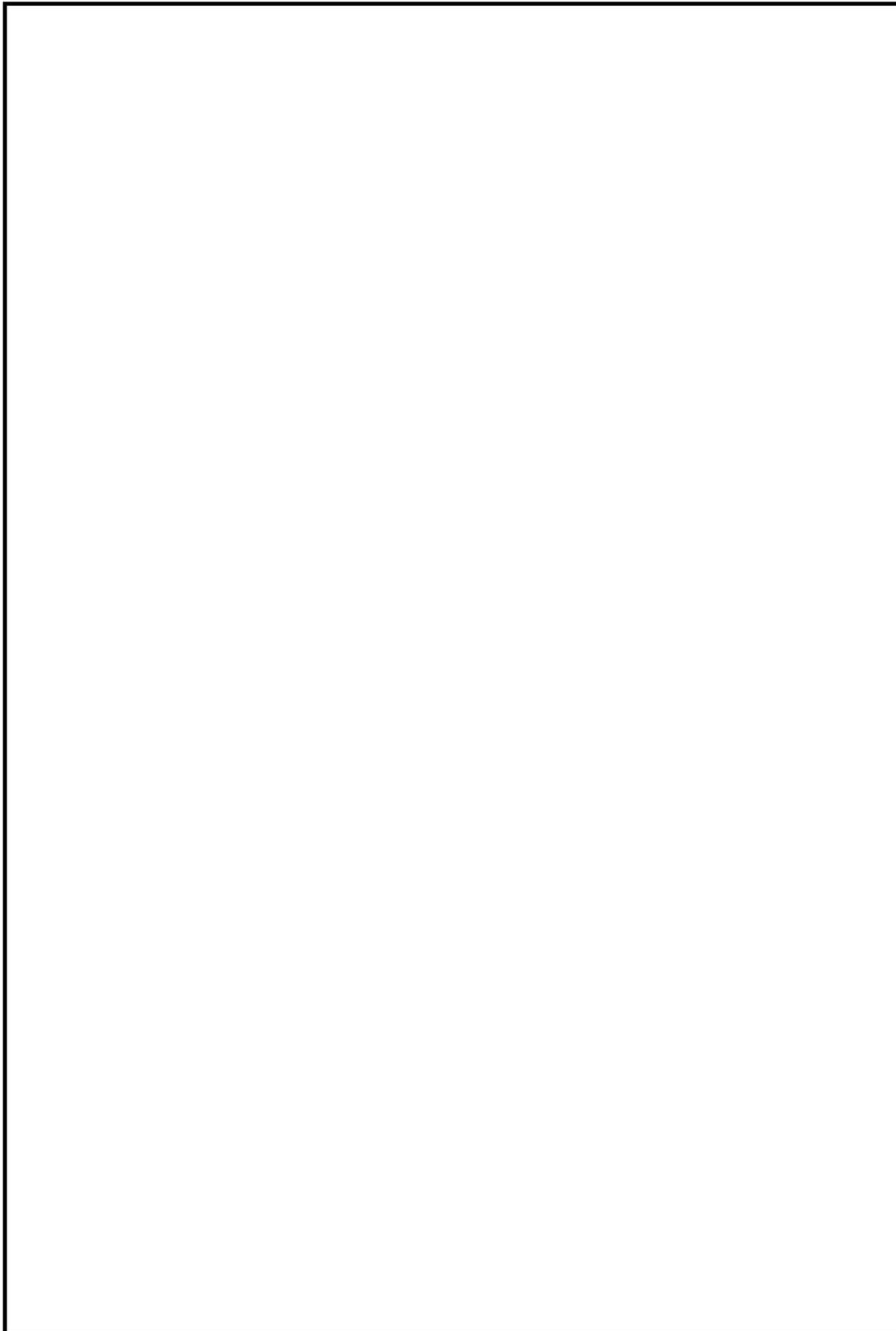
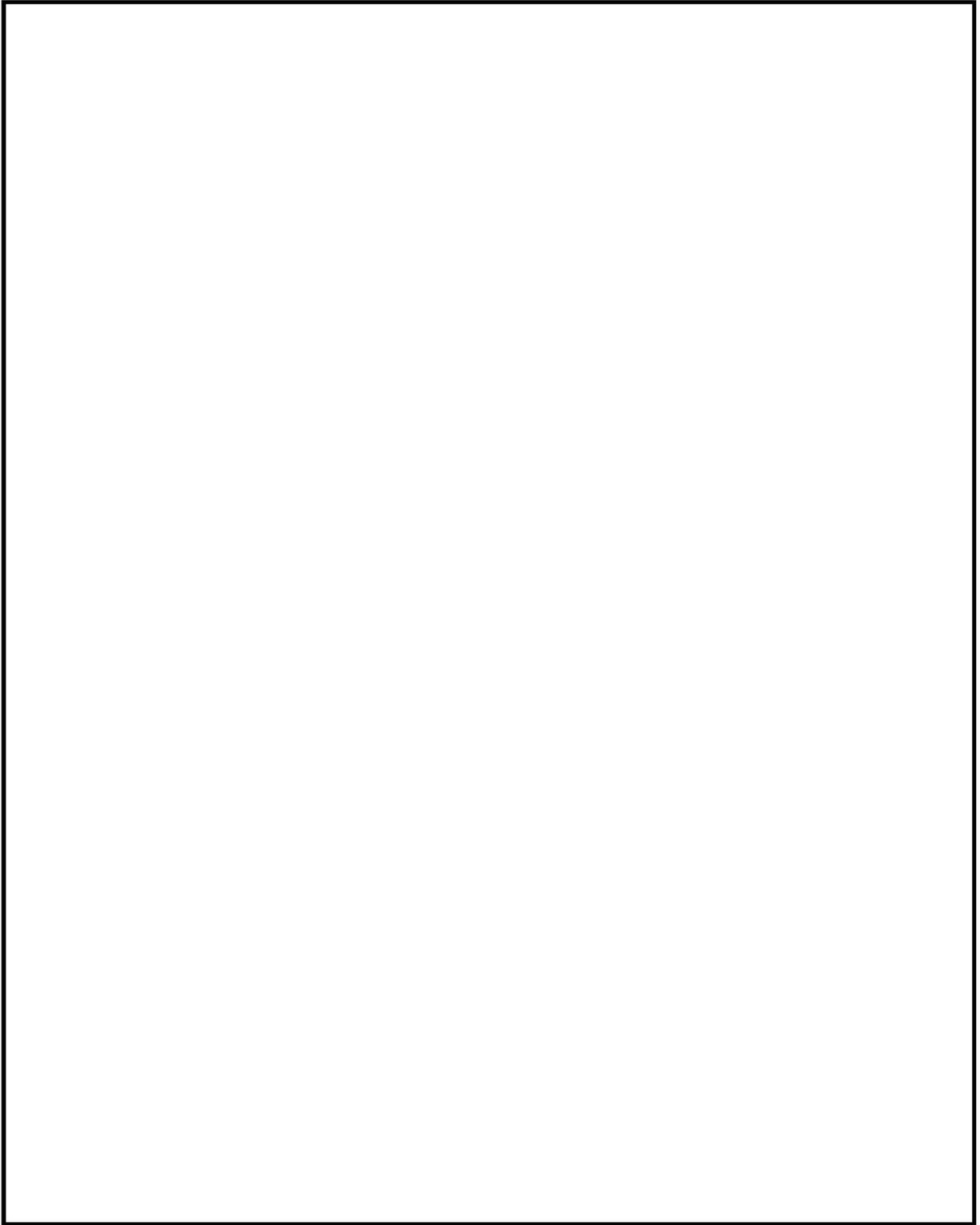


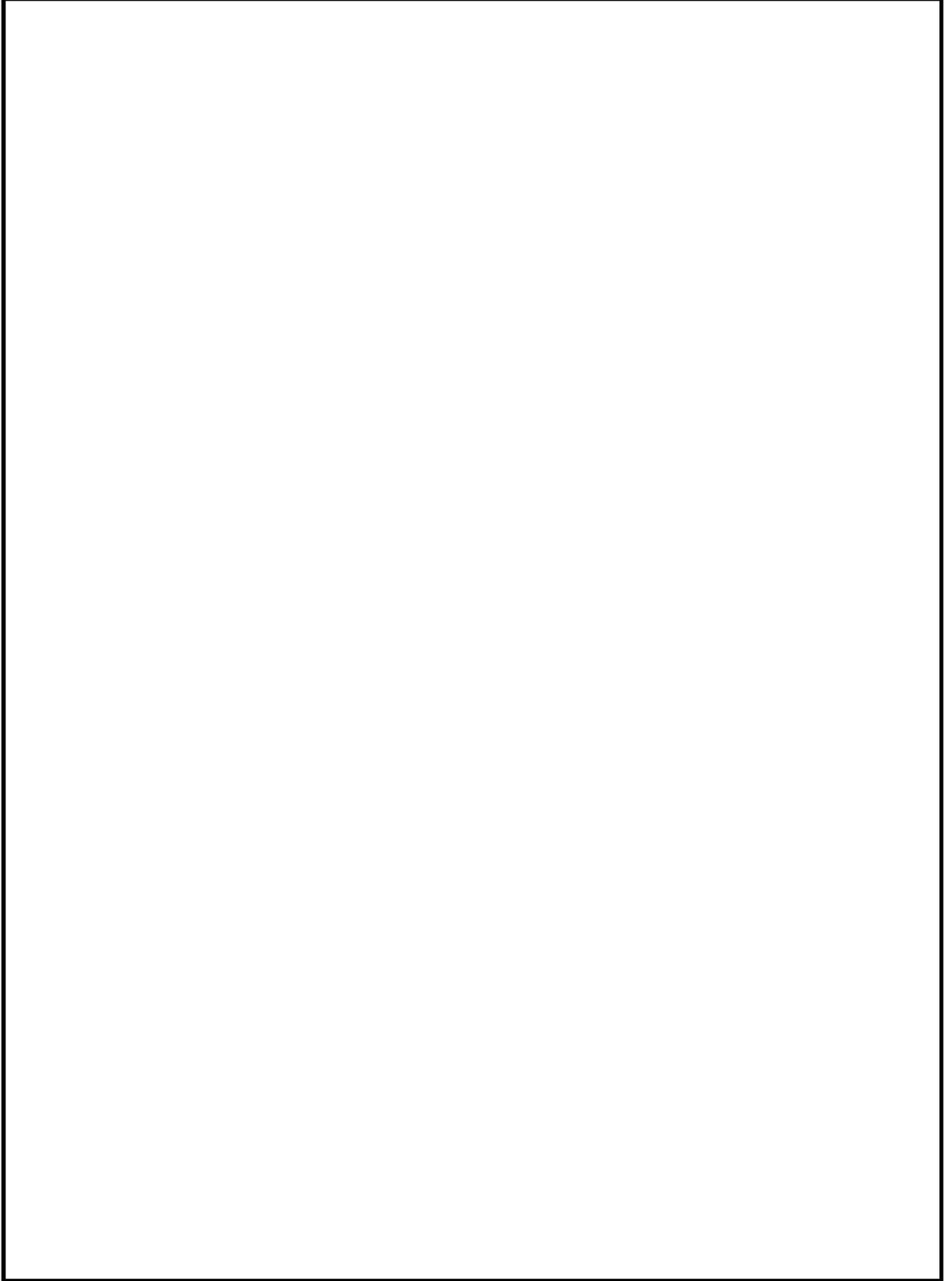
図3-1 計算機コード「NuPIAS」を用いた評価フロー

### 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3 ABAQUS

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-3-3-1-1-2	主蒸気逃がし安全弁自動減圧機能用アキュムレータの強度計算書	Ver. 6.4-4
V-3-3-6-1-1-1	原子炉格納容器コンクリート部の強度計算書	Ver. 6.14-6
V-3-別添1	竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	Ver. 6.14-2 Ver. 6.14-3 Ver. R2018x

## 2. 解析コードの概要

### 2.1 ABAQUS Ver. 6.4-4

項目 \ コード名	ABAQUS
使用目的	2次元有限要素法（軸対称モデル）による応力評価
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. 6.4-4
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プログラムである。</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><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・今回使用する適用モデル（軸対称モデル）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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・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持ち、妥当性は十分に確認されている。</li> <li>・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計</li> </ul>

	<p>画認可申請で使用する 2 次元有限要素法（軸対称モデル）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。</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・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。</li></ul>
--	--

2.2 A B A Q U S Ver. 6. 14-6

項目	コード名 A B A Q U S
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>
<p>検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）</p>	<p>本解析コードは，原子炉格納容器コンクリート部の3次元有限要素法による応力解析に使用している。</p> <p><b>【検証（Verification）】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示</li> </ul>

	<p>された要件を満足していることを確認している。</p> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>
--	---

2.3 A B A Q U S Ver. 6. 14-2

項目	コード名 A B A Q U S
使用目的	有限要素法による衝突解析
開発機関	Dassault Systèmes Simulia Corp.
開発時期	2013 年
使用したバージョン	Ver. 6. 14-2
コードの概要	<p>本解析コードは有限要素法による構造物の静的及び動的な大非線形応答を求めるための汎用解析コードである。解法は時間積分を用いた陽解法に基づいており、構造物の耐衝撃設計を行うことを前提に、衝突問題をモデル化する為に開発されたものである。特に接触/摩擦が多く存在する相互作用問題の解析に優れている。</p> <p>本解析コードは以下の結果を算出することができる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 節点の変位，速度，加速度の最大応答値，及び応答時刻歴</li> <li>・ 構造部材に作用する接触力，断面力，応力，ひずみ，及びダメージ指標</li> </ul> <p>本解析コードは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) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・ 本解析で使用した Abaqus Ver. 6. 14-2 から実績のある Abaqus Ver. 6. 14-3 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。</li> <li>・ 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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・ バージョンの差分は、ソルバーの処理能力向上、接触問</li> </ul>

	<p>題におけるシェル交差部の板厚オフセットの扱いの向上，材料モデルの追加，出力書式の追加，プレポスト処理のパフォーマンス向上であるが，今回の使用範囲における解析結果に影響を及ぼさない。</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・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。</li></ul>
--	--

2.4 A B A Q U S Ver. 6. 14-3

項目	コード名 A B A Q U S
使用目的	3次元有限要素法（はり要素, シェル要素及びソリッド要素）による衝突解析
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） 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. 14-3
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，陽的時間積分を用いた非線形動的過渡応答解析の機能を有している。特に衝突問題などの高速な動的現象や複雑な接触相互作用を含む問題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><b>【検証（Verification）】</b></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"> <li>・本解析コードによる衝突解析の結果が理論解と概ね一致することを確認している。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認（Validation）】</b></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"> <li>・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持ち，妥当性は十分に確認されている。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>・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 次元有限要素法による衝突解析に，本解析コードが適用できることを確認している。</li></ul>
--	--

2.5 A B A Q U S Ver. R2018x

項目	コード名 A B A Q U S
使用目的	有限要素法による衝突解析
開発機関	Dassault Systèmes Simulia Corp.
開発時期	2018 年
使用したバージョン	Ver. R2018x
コードの概要	<p>本解析コードは有限要素法による構造物の静的及び動的な大非線形応答を求めるための汎用解析コードである。解法は時間積分を用いた陽解法に基づいており、構造物の耐衝撃設計を行うことを前提に、衝突問題をモデル化する為の開発されたものである。特に接触/摩擦が多く存在する相互作用問題の解析に優れている。</p> <p>本解析コードは以下の結果を算出することができる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 節点の変位，速度，加速度の最大応答値，及び応答時刻歴</li> <li>・ 構造部材に作用する接触力，断面力，応力，ひずみ，及びダメージ指標</li> </ul> <p>本解析コードは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) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・ 本解析で使用した Abaqus R2018x は、実績のある Abaqus Ver. 6.14-3 から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。</li> <li>・ 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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・ バージョンの差分は、サポート OS の変更，ソルバーの</li> </ul>

	<p>処理能力向上，接触問題における接触エッジの効率化，使用可能な要素の追加，出力書式の追加，プレポスト処理のパフォーマンス向上であるが，今回の使用範囲における解析結果に影響を及ぼさない。</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・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。</li></ul>
--	---

### 3. 解析手法

#### 3.1 ABAQUS Ver. 6.14-6 の解析手法

##### 3.1.1 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、原子炉格納容器コンクリート部の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。

##### 3.1.2 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）、はり要素及びトラス要素（ロッド要素）である。

### 3.1.3 解析手法

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。

### 3.1.4 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。

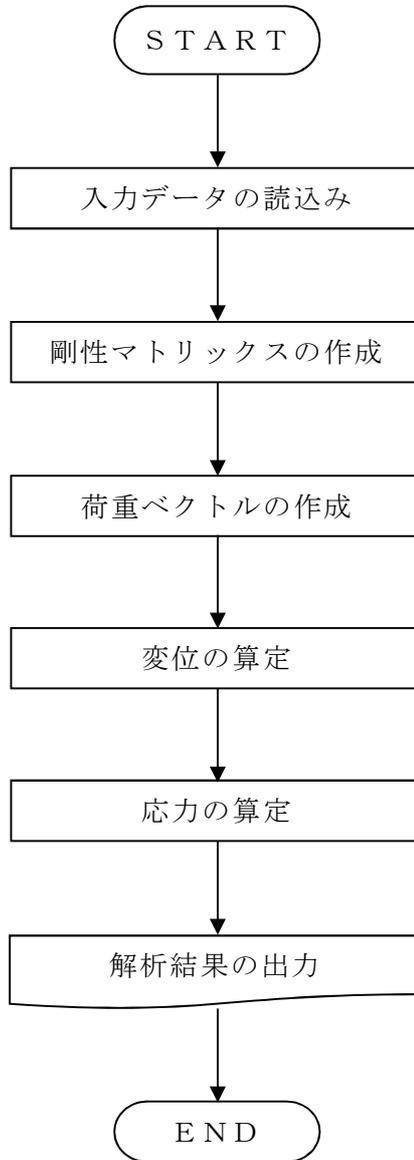


図 3-1 解析フローチャート

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

#### (1) 実験結果とシミュレーション解析の比較による検証

##### a. 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。

##### b. 検証モデル

図 3-2 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  $8.5 \times 10^{-3}$  である。

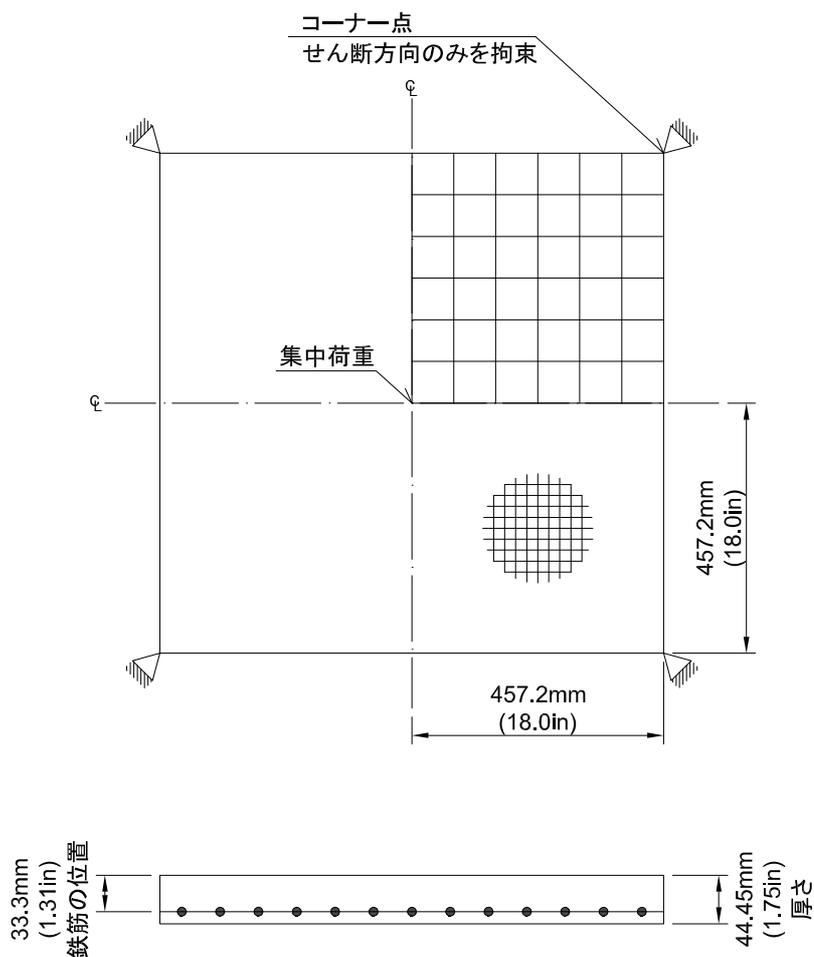


図 3-2 解析モデル

c. 材料物性値

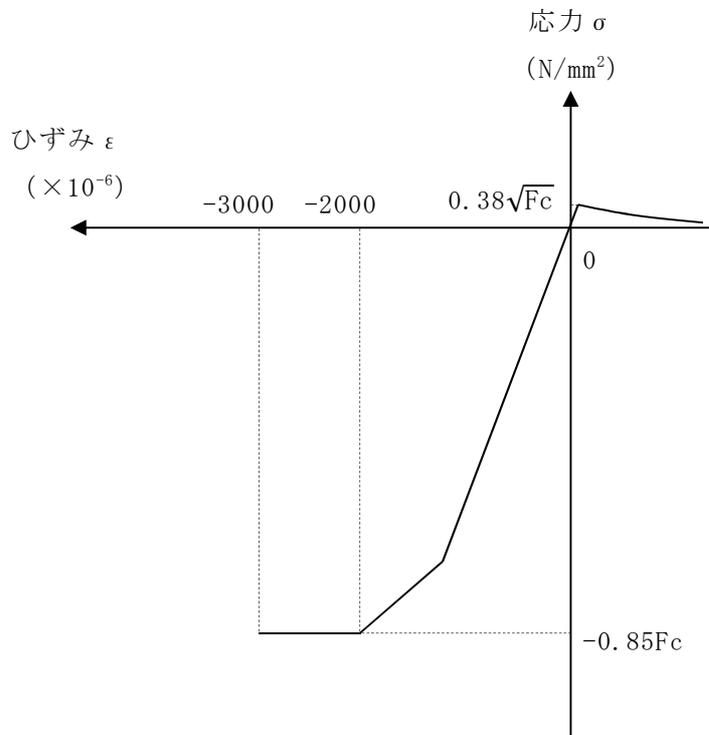
表 3-1 に解析に用いる材料物性値を示す。材料物性値は原則として文献(引用文献(1)及び引用文献(2)参照)に記載の値を用いる。

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 <sup>2</sup> (5500 lb/in <sup>2</sup> )
	ヤング係数	$2.86 \times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> (4150000 lb/in <sup>2</sup> )
	ポアソン比	0.15
鉄筋	降伏強度 $\sigma_y$	345 N/mm <sup>2</sup> (50000 lb/in <sup>2</sup> )
	ヤング係数	$2.00 \times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> (29000000 lb/in <sup>2</sup> )

d. 材料構成則

図 3-3 に材料構成則を示す。



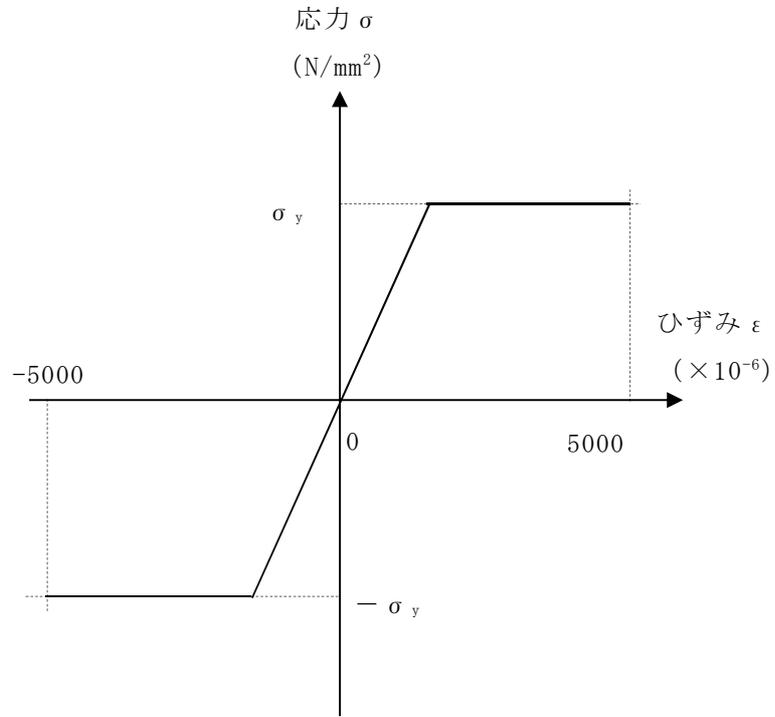
$F_c$  : コンクリートの設計基準強度

項目	設定
圧縮強度	$-0.85F_c$ (CCV 規格)
終局圧縮ひずみ	$-3000 \mu$ (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 3-3 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）



$\sigma_y$  : 鉄筋の降伏強度

(b) 鉄筋の応力-ひずみ関係

図 3-3 材料構成則(2/2)

e. 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3-4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。

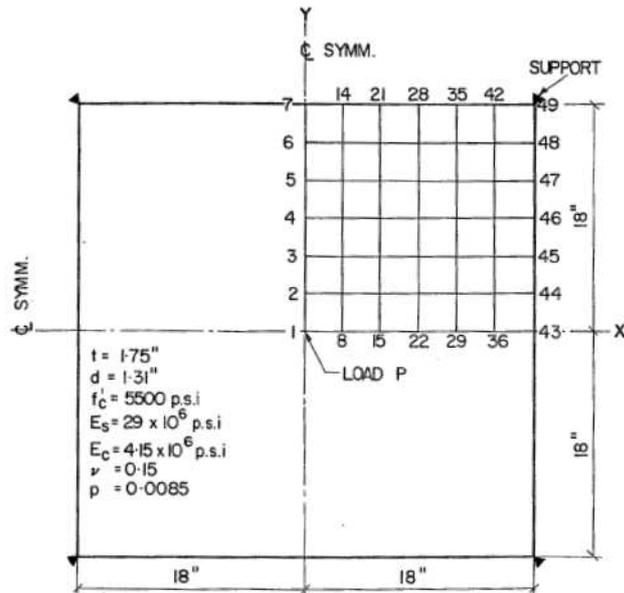
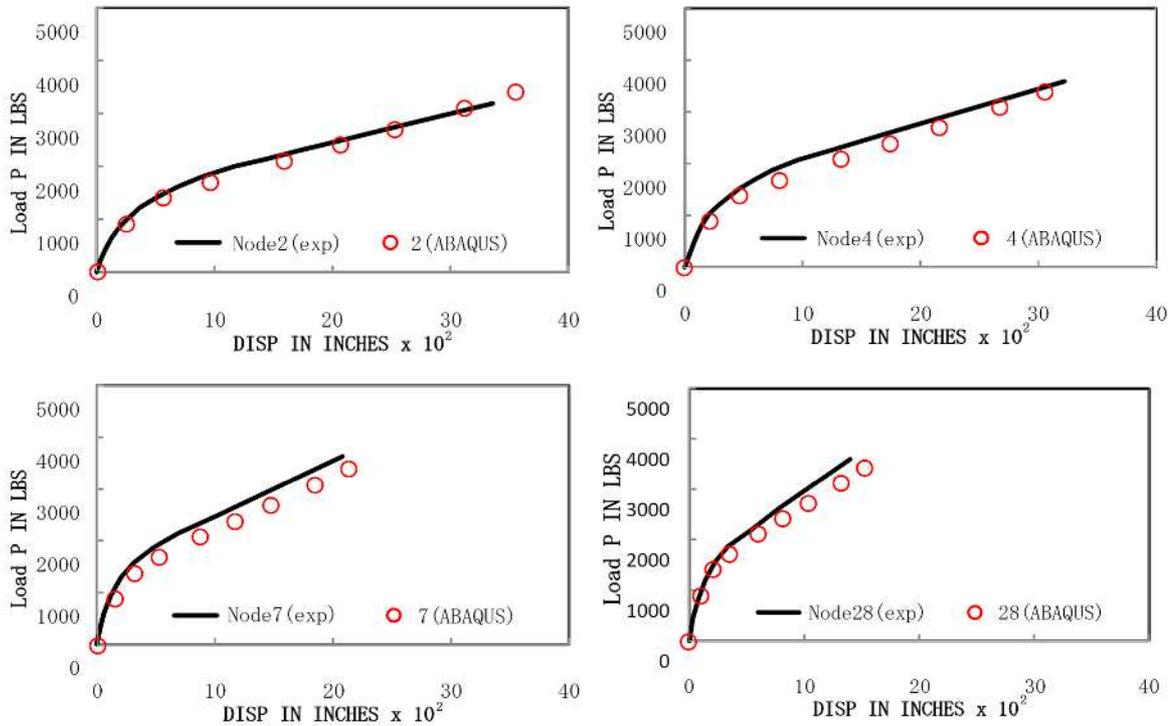


FIG. 7.—CORNER SUPPORTED TWO-WAY SLAB

図 3-4 検証解析結果

(2) 既往知見による検証

a. 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。

b. PCCV の耐圧実証試験及びシミュレーション解析

図 3-5 に試験体外形図と主要諸元を、図 3-6 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。

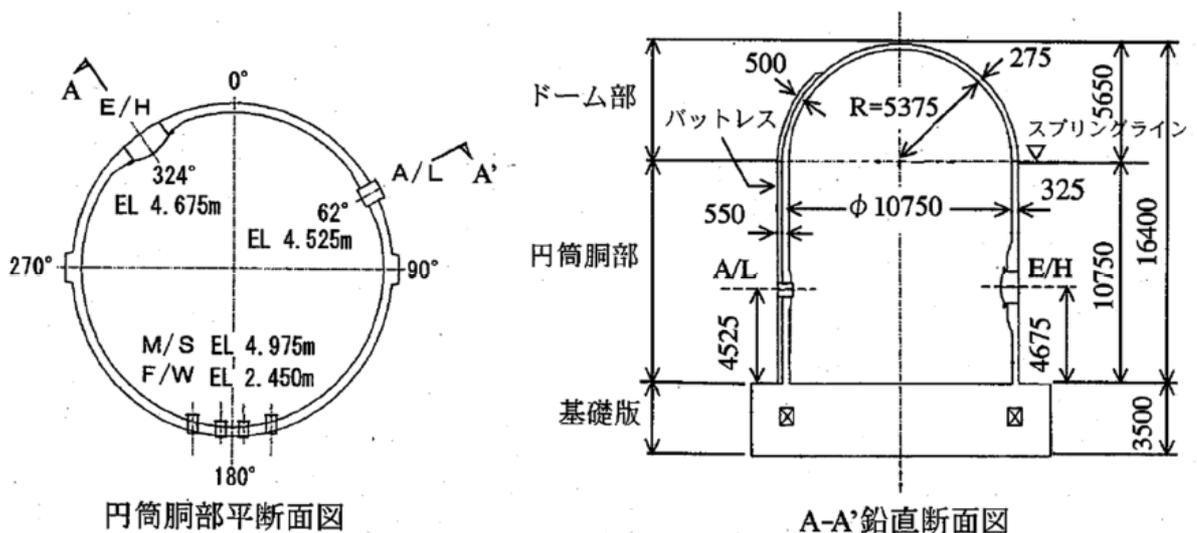


図 3-5 試験体外形図と主要諸元 (引用文献(5)より引用)

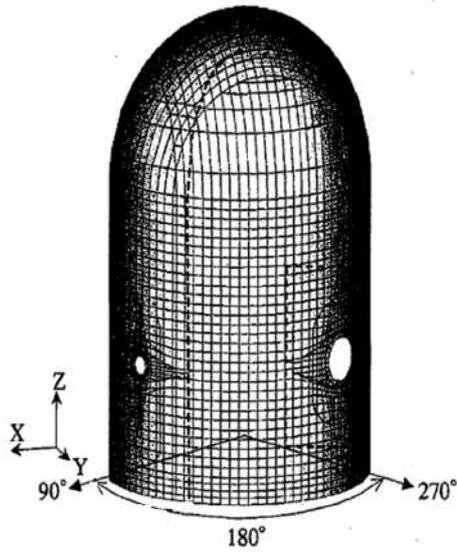


図 3-6 シミュレーション解析モデル (引用文献(5)より引用)

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

c. 解析結果

解析結果の内圧－半径方向変位関係を図 3-7 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。

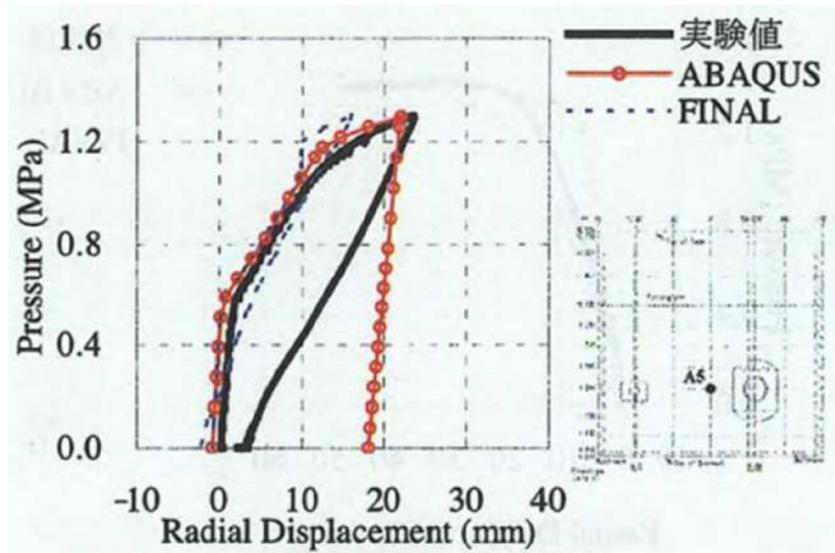


図 3-7 内圧－半径方向変位関係（引用文献(5)より引用）

(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。

(4) 評価結果

(1)、(2)及び(3)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。

3.1.6 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

## 3.2 ABAQUS Ver. 6.14-3 の解析手法

### 3.2.1 概要

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り、幅広い種類の非線形の固体力学問題や構造力学問題を解くために有効である。陽的動解プロシージャは、陰的解析では収束が困難な極めて複雑な接触問題であっても簡単に解くことができる。本解析コードは、竜巻防護鉄筋コンクリート製フードの3次元有限要素法による衝突解析（弾塑性）に使用している。

### 3.2.2 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。
- ・ 衝突など高速な動的現象を扱うことが可能である。
- ・ 物体間の複雑な接触相互作用が含まれる問題を解析することが可能である。

### 3.2.3 解析手法

陽的動的解析による評価は、次の手順で行う。

(3.1)式に示すとおり、与えられた外力と内力の動的釣り合いを満たすことにより、加速度が求まる。

次に、加速度は一定であると仮定して、速度の変化量を計算し、直前の速度と加算することにより速度が求まる。(3.2)式)

さらに、得られた速度の時間積分を行い、直前の変位と加算することにより変位が求まる。(3.3)式)

$$\ddot{u}_{(t)} = M^{-1} \cdot (P_{(t)} - I_{(t)}) \quad (3.1)$$

$$\dot{u}_{(t+\Delta t/2)} = \dot{u}_{(t-\Delta t/2)} + \frac{(\Delta t_{(t+\Delta t)} + \Delta t_{(t)})}{2} \cdot \ddot{u}_{(t)} \quad (3.2)$$

$$u_{(t+\Delta t)} = u_{(t)} + \Delta t_{(t+\Delta t)} \cdot \dot{u}_{(t+\Delta t/2)} \quad (3.3)$$

ここで、

- t : 時間
- $\Delta t$  : 時間増分
- M : 節点質量マトリックス
- P : 与えられた外力
- I : 要素の内力
- $\ddot{u}$  : 節点加速度
- $\dot{u}$  : 節点速度
- u : 節点変位

ひずみ速度 $\Delta \epsilon$ からひずみ増分 $\epsilon$ を計算し、要素の構成方程式により要素応力を求める。

$$\sigma_{(t+\Delta t)} = f(\sigma_{(t)}, \Delta \epsilon) \quad (3.4)$$

ここで、

- $\sigma$  : 要素応力
- f : 要素の構成方程式

求まった応力から各節点における内力 $I_{(t+\Delta t)}$ を計算し、次ステップの計算に進む。

### 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 3-1 に示す。

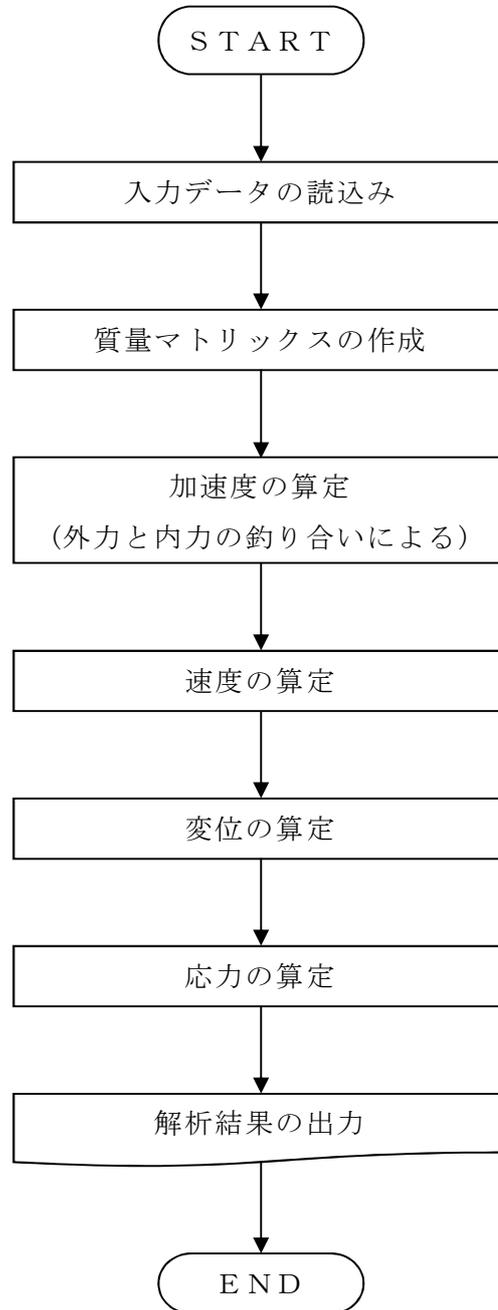


図 3-1 解析フローチャート

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

#### (1) 検証

##### a. 接触相互作用の検証

###### (a) 検証概要

自由落下する落下物の衝撃荷重が作用する弾性体の変形について確認を行う。

###### (b) 検証モデル

図 3-2 に解析モデルを示す。正方形の被衝突体（弾性体）は四辺を完全固定とし、中央に落下物の衝撃荷重を受ける。

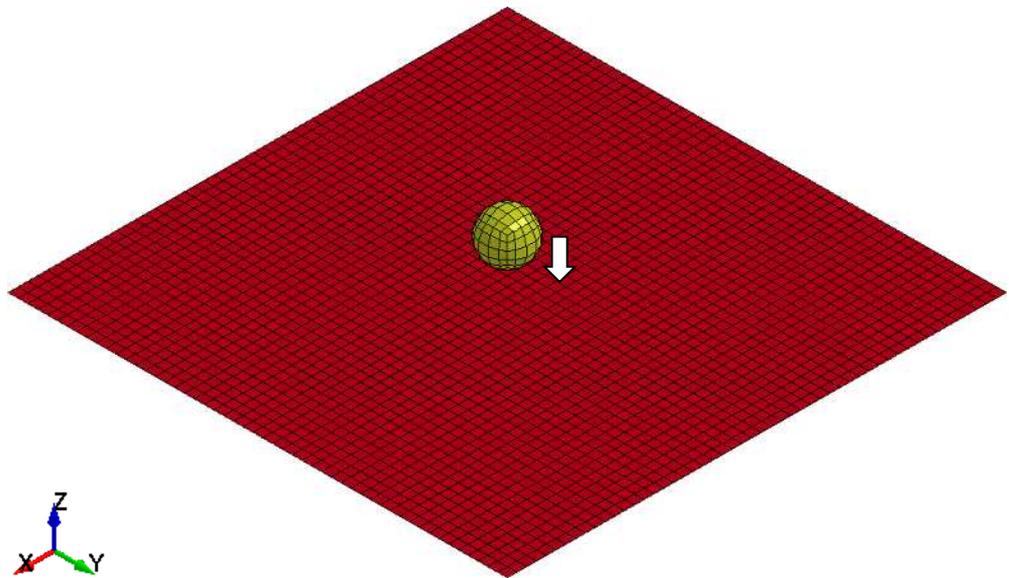


図 3-2 解析モデル

(c) 材料物性値

表 3-1 に解析に用いる材料物性値を示す。

表 3-1 解析に用いる材料物性値

諸元		物性値
被衝突体 (弾性体)	サイズ	幅 10000 mm×奥行 10000 mm×厚さ 500 mm
	ヤング係数	$2.44 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	0.2
	質量	0 t
落下物 (球体)	サイズ	直径 1000 mm
	質量	100 t
摩擦係数		0
減衰		0

(d) 理論解

質量Mの剛体が高さhより自由落下した場合，弾性体に蓄えられる全ひずみエネルギー $U_i$ は(3.5)式で表される。また，衝撃荷重による弾性体の変形を考慮した場合の落下物の位置エネルギー $U_p$ は(3.6)式で表される。

$$U_i = P \cdot \frac{\delta}{2} = K \cdot \frac{\delta^2}{2} \quad (3.5)$$

$$U_p = M \cdot g \cdot (h + \delta) = K \cdot \delta_s \cdot (h + \delta) \quad (3.6)$$

ここで，

P : 衝撃荷重

K : 弾性体の曲げ剛性

M : 落下物の質量

h : 落下高さ

$\delta$  : 衝撃による弾性体の変形量

$\delta_s$  : 弾性体自重（静的荷重）作用時の変形量

g : 重力加速度

(3.7)式のように弾性体に蓄えられる全ひずみエネルギーが落下物の位置エネルギーと等しいと仮定すると，(3.5)式及び(3.6)式から(3.8)式が得られ，弾性体の変形量は(3.9)式に，衝撃荷重は(3.10)式となる。

$$U_i = U_p \tag{3.7}$$

$$K \cdot \frac{\delta^2}{2} - K \cdot \delta_s \cdot (h + \delta) = 0 \tag{3.8}$$

$$\delta = \delta_s + \sqrt{\delta_s^2 + 2 \cdot h \cdot \delta_s} \tag{3.9}$$

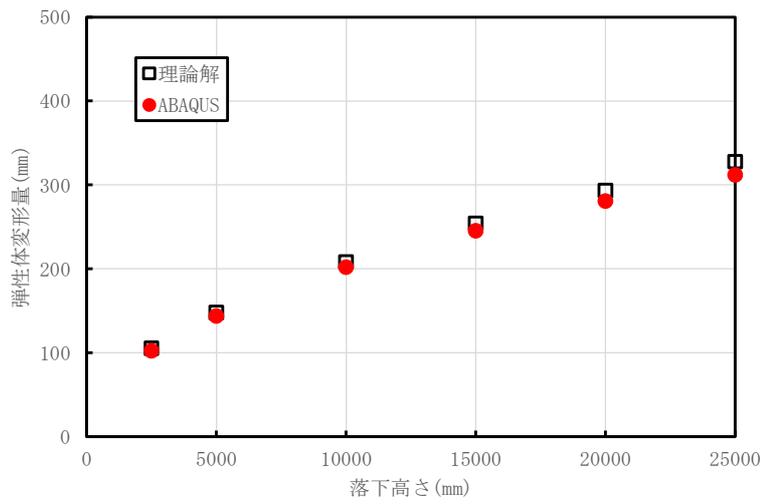
$$P = \frac{2 \cdot M \cdot g \cdot (h + \delta)}{\delta} \tag{3.10}$$

(e) 解析結果

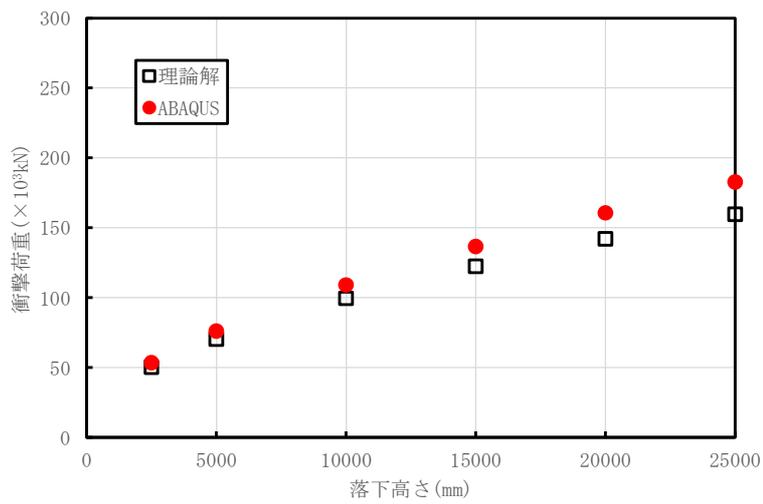
解析結果の弾性体変形量及び衝撃荷重の比較を表 3-2 及び図 3-3 に示す。図より両者は概ね一致していることから、解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

表 3-2 理論解との比較

落下 高さ (mm)	弾性体変形量			衝撃荷重		
	ABAQUS (mm)	理論解 (mm)	比率 (-)	ABAQUS ( $\times 10^3$ kN)	理論解 ( $\times 10^3$ kN)	比率 (-)
2500	102	105	0.97	53	50	1.06
5000	144	148	0.97	76	70	1.08
10000	201	208	0.97	109	99	1.10
15000	245	254	0.96	136	122	1.12
20000	281	293	0.96	161	142	1.13
25000	312	327	0.95	183	159	1.15



(a) 落下高さに対する弾性体変形量の比較



(b) 落下高さに対する衝撃荷重の比較

図 3-3 解析結果の比較

b. 材料構成則の検証

(a) 検証概要

本解析コードで使用するコンクリートの材料構成則について確認を行う。

(b) 検証モデル

図 3-4 に解析モデルを示す。ソリッド要素モデルに対して、1 方向（圧縮・引張）に速度を与える。

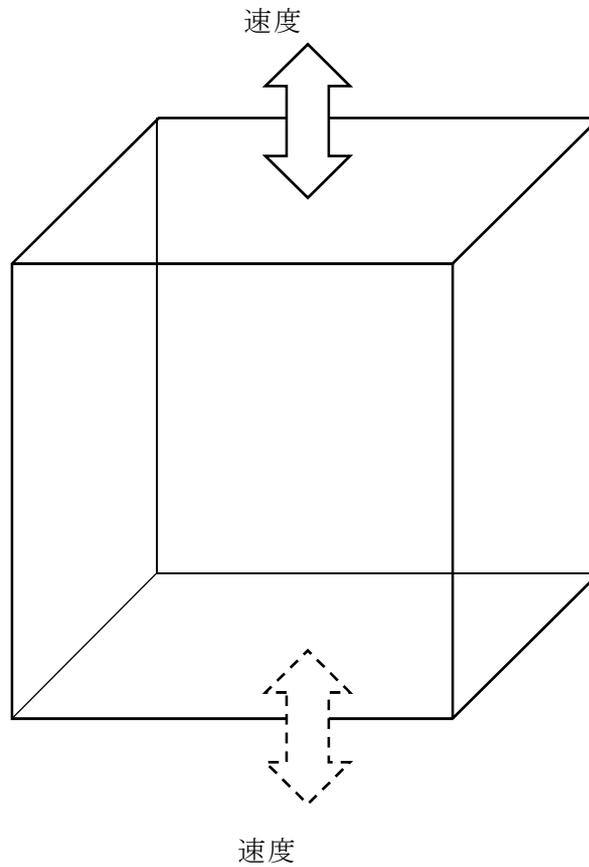


図 3-4 解析モデル

(c) 材料物性値

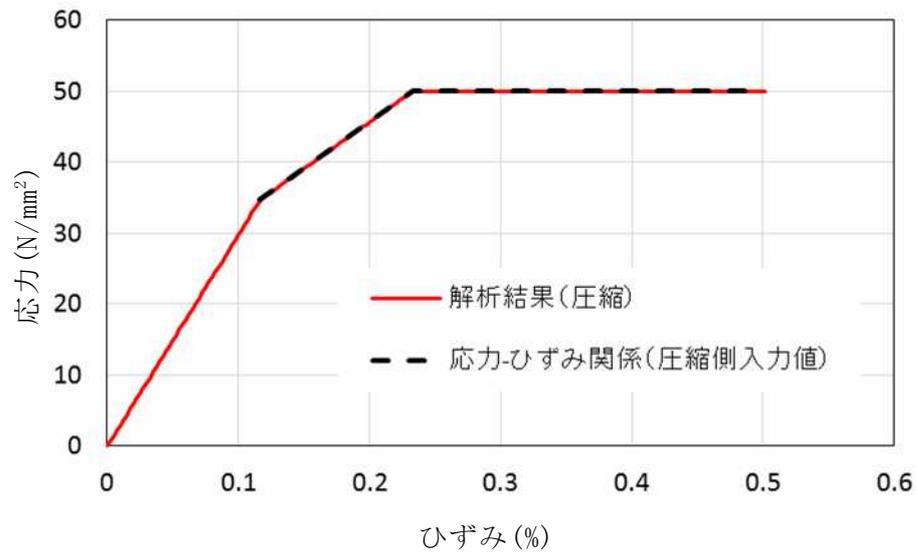
表 3-3 に解析に用いる材料物性値を示す。

表 3-3 解析に用いる材料物性値

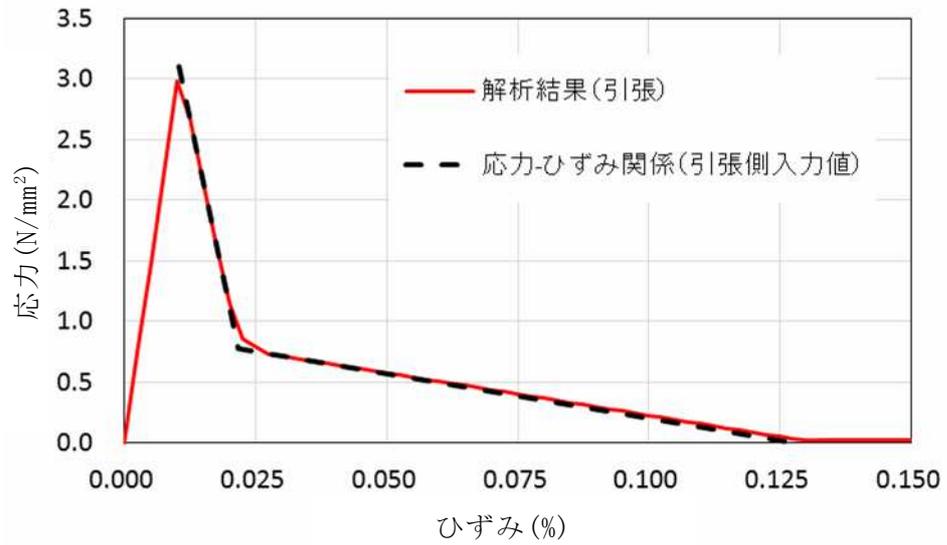
項目	物性値
圧縮強度	50.0 N/mm <sup>2</sup>
引張強度	3.0 N/mm <sup>2</sup>
密度	$2.0 \times 10^{-9}$ t/mm <sup>3</sup>
ヤング係数	29780 N/mm <sup>2</sup>
ポアソン比	0.2

(d) 解析結果

解析結果を図 3-5 に示す。図より入力値と解析結果はほぼ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。



(a) 圧縮



(b) 引張

図 3-5 解析結果の比較

(2) 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次元有限要素法による衝突解析に、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、落下物の衝突問題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) 評価結果

(1)及び(2)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。

3.2.6 引用文献

- (1) WARREN C. YOUNG, RICHARD G. BUDYNAS : Roark' s Formulas for Stress and Strain

別紙4 MSC NASTRAN

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-3-3-2-1-3	残留熱除去系ストレーナの強度計算書	Ver. 2013.0.0
V-3-3-3-2-1-4	残留熱除去系ストレーナ部ティーの応力計算書	Ver. 2013.0.0
V-3-3-3-2-1-5	残留熱除去系ストレーナ取付部コネクタの強度計算書	Ver. 2013.0.0
V-3-3-3-3-1-2	高圧炉心注水系ストレーナの強度計算書	Ver. 2013.0.0
V-3-3-3-3-1-3	高圧炉心注水系ストレーナ部ティーの応力計算書	Ver. 2013.0.0
V-3-3-3-3-1-4	高圧炉心注水系ストレーナ取付部コネクタの強度計算書	Ver. 2013.0.0
V-3-3-3-3-2-2	原子炉隔離時冷却系ストレーナの強度計算書	Ver. 2013.0.0
V-3-3-3-3-2-3	原子炉隔離時冷却系ストレーナ部ティーの応力計算書	Ver. 2013.0.0
V-3-3-6-1-1-6	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）の強度計算書	Ver. 2013.0.0
V-3-3-6-1-1-7	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）の強度計算書	Ver. 2013.0.0
V-3-3-6-2-1	ダイヤフラムフロアの強度計算書	Ver. 2013.0.0
V-3-3-6-3-1	下部ドライウェルアクセストンネルの強度計算書	Ver. 2013.0.0
V-3-別添 2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	Ver. 2008.0.0

## 2. 解析コードの概要

### 2.1 MSC NASTRAN Ver.2013.0.0

項目 \ コード名	MSC NASTRAN
使用目的	<p>3次元有限要素法（はりモデル及びシェルモデル）による応力解析</p> <p>3次元有限要素法（シェルモデル）による応力解析</p> <p>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</p>
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><b>【検証（Verification）】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認（Validation）】</b></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"> <li>・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。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 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。</li><li>・ 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。</li></ul>
--	---

2.2 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（シェル又ははり要素）による応力解析
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>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p><b>【検証（Verification）】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認（Validation）】</b></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"> <li>・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、光学及び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。</li> <li>・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、解析解と理論界の一致をもって解析機能の妥当性も確認している。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>・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。</li></ul>
--	---

別紙5 I S A P

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-3-3-3-5-2-2	管の応力計算書	ISAP-III

2. 解析コードの概要

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>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・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 <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px;"></span></li> <li><span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 450px; height: 15px;"></span></li> <li><span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 450px; height: 15px;"></span></li> <li><span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 100px; height: 15px;"></span> 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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・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，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。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>・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。</li></ul>
--	---

別紙6 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-3-別添 1	竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	Ver. 8.0.4
V-3-別添 2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	Ver. 8.0.4 Ver. 7.2.18

## 2. 解析コードの概要

### 2.1 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）） 2007年（伊藤忠テクノソリューションズ（株））
使用したバージョン	Ver. 8. 0. 4
コードの概要	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。
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<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><b>【検証(Verification)】</b></p> <p>本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b></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"> <li>・ 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今回の解析に適用することは妥当である。</li> <li>・ 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。</li> <li>・ 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。</li> <li>・ 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。</li> </ul>
--	---

2.2 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><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p>・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> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・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。</li> </ul>

別紙7 f a p p a s e

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 1	竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	Ver. 1.63

## 2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	f a p p a s e
使用目的	地震応答解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	2002 年
使用したバージョン	Ver. 1.63
コードの概要	<p>本解析コードは、超高層建物の非線形地震応答解析用として開発されたインハウスコードである。</p> <p>材料非線形モデルを数多くサポートしており超高層建物や免震建物の非線形地震応答解析による建築構造解析に利用実績があり、固有値解析、動的解析及び静的解析による応力等の算定が可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、主排気筒の地震応答解析に使用している。</p> <p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <p>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。</p> <p>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> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・本解析コードを用いて、以下の内容を確認している。             <ol style="list-style-type: none"> <li>① 各部別内部粘性型減衰を用いた地震応答解析を別途検証済解析コードNUPP4による等価なダッシュポットを用いた解析と比較し、同一の解析結果が得られること。</li> <li>② 既往論文に示される1層1スパンX型ブレース（筋違）架構の載荷実験のシミュレーション解析を、本解析コードを用いて同様に実施し、既往論文におけるシミュレーション解析と概ね一致すること。</li> </ol> </li> <li>・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。</li> </ul>

### 3. 解析手法

#### 3.1 一般事項

本資料は、地震応答解析を行う解析コード「fappase Ver. 1.63」の概要を説明するものである。本解析コードは、鹿島建設株式会社で開発した主に骨組構造を対象としたプログラムであり、時間領域における質点系モデルによる動的応答解析コードである。また、本解析コードは、以下の構築物の線形地震応答解析に使用している。

- ・主排気筒

#### 3.2 解析コードの特徴

①fappase 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

② 3次元問題を対象として、はり要素、ばね要素、ダンパー要素、平板要素等が用意されており、原子力発電所建屋他の構造物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。

⑤解析に用いる単位系は、SI単位系に統一されている。

また、今回の解析における本解析コードの使用要素は、はり要素、トラス要素、ばね要素、減衰要素である。なお、次に示す検証及び妥当性確認は Ver. 1.61 で実施した結果であり今回の工事計画認可申請において使用するバージョンと異なるが、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。

### 3.3 解析手法

#### 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。

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

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)式に示す自由振動を表す方程式となる。

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

(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。

$$(-\omega^2 [M] + [K])\{u_r\} = \{0\} \cdots \cdots \cdots (3.3)$$

(3.3)式が固有ベクトル{ $u_r$ } $\neq$ {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 $\omega_r$ が得られる。

### 3.3.3 減衰項の策定

各部別内部粘性型減衰の減衰項は、各部材の剛性マトリックス  $[K_e]$  に比例するものと定義し、以下のように表される。

$$[C] = \sum \beta_e [K_e] \dots\dots\dots (3.4)$$

$$\beta_e = 2h_e T_e / 2\pi$$

ここで、

$h_e$  : 部材の減衰定数

$T_e$  : 部材の減衰マトリックスを定義する周期

### 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  $\Delta t$  毎に分割し、時間ステップごとに、順次解を求めていく。今回の解析で用いた Newmark- $\beta$  法について以下に示す。

$n$  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、速度は  $\beta$  と  $\delta$  をパラメータとして (3.5) 式のように表せる。

$\beta$  と  $\delta$  は、Newmark- $\beta$  法に使用される解析パラメータであり、Newmark- $\beta$  法による積分が安定的に行われるためには、 $\delta \geq 1/2$ 、 $\beta \geq (1/2 + \delta)^2 / 4$  という条件がある。

$$\{\dot{u}\}_{(n+1)} = \{\dot{u}\}_{(n)} + \Delta t \left( (1-\delta) \{\ddot{u}\}_{(n)} + \delta \{\ddot{u}\}_{(n+1)} \right)$$

$$\{u\}_{(n+1)} = \{u\}_{(n)} + \Delta t \{\dot{u}\}_{(n)} + \frac{\Delta t^2}{2} \{\ddot{u}\}_{(n)} + \beta \Delta t^2 (\{\ddot{u}\}_{(n+1)} - \{\ddot{u}\}_{(n)}) \dots (3.5)$$

(3.5) 式を  $n+1$  ステップの運動方程式 (3.1) に代入して、 $\{\dot{u}\}_{(n+1)}$ 、 $\{\ddot{u}\}_{(n+1)}$  を消去すれば以下の変位増分式になる。

$$\left( [K] + \frac{1}{\beta \Delta t^2} [M] + \frac{\delta}{\beta \Delta t} [C] \right) \{\Delta u\} = \{\Delta F\} + [M] \left( \frac{1}{\beta \Delta t} \{\dot{u}\}_n + \frac{1}{2\beta} \{\ddot{u}\}_n \right) + [C] \left( \frac{\delta}{\beta} \{\dot{u}\}_n + \left( \frac{\delta}{2\beta} - 1 \right) \Delta t \{\ddot{u}\}_n \right) \dots\dots\dots (3.6)$$

(3.6) 式を解くと、 $n+1$  ステップの変位増分が得られる。また、(3.5) 式を用いて  $n+1$  ステップの変位、速度及び加速度が得られる。

### 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。

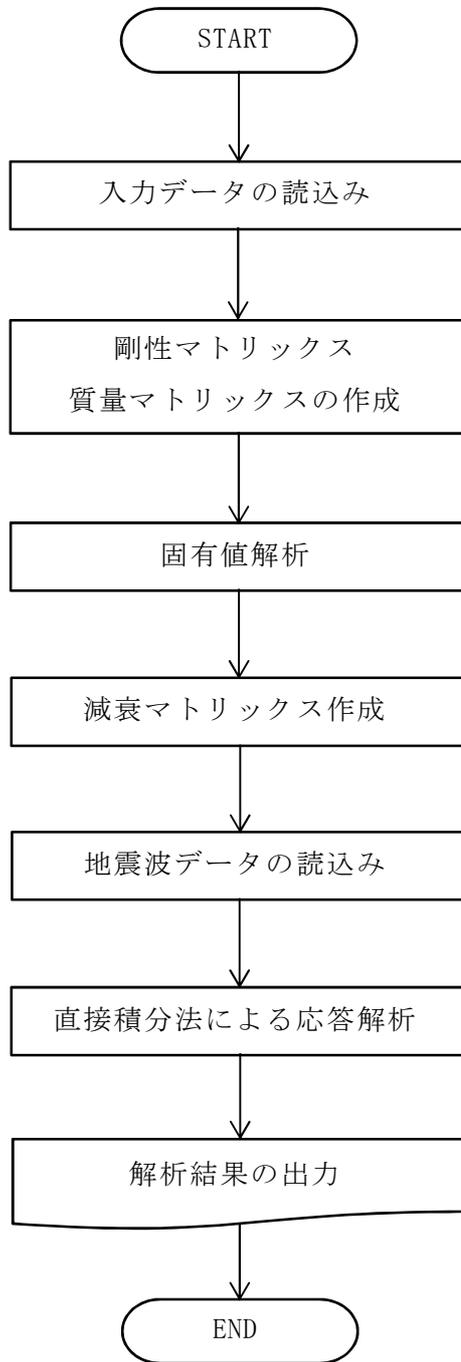


図3-1 解析フローチャート

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

本解析コードは、「3.3 解析手法」に示した一般性のある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、主に建築基準法適用外の国土交通大臣の評定物件である一般超高層建築物に多数の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。

こうした特徴を踏まえ、今回の解析機能に特化する形で、下記の項目に対して本解析コードによる解析を実施し、本解析コードの解析機能の適切さを確認している。

- ①質点系モデルによる地震応答解析
- ②鉄骨ブレースの座屈現象の既往論文との比較

#### 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)

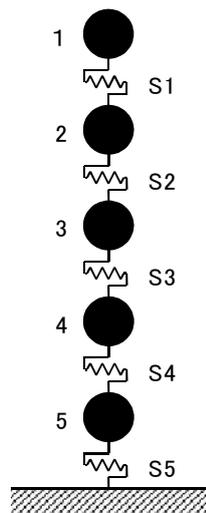
##### (1) 質点系モデルによる地震応答解析

##### a. 妥当性確認方法

線形問題を対象に、減衰行列が一定の場合を検討する。本解析コードにて各部別内部粘性型減衰を用いた場合と、別途検証済解析コードNUPP4により等価なダッシュポットでモデル化した場合の時刻歴応答解析結果を比較し、本解析コードの妥当性を確認する。

##### b. 解析条件

解析モデルの概要を図3-2に、解析ケースを図3-3に示す。5質点をせん断ばねで連結した質点系モデルである。各質点の重量及び減衰定数、各要素の剛性、定義周期と減衰定数を図3-2中の表に示す。



質点番号	重量 (kN)
1~5	100.0

要素名称	剛性 (kN/m)	定義周期 (s)	減衰定数
S1	$1.0 \times 10^4$	0.705	0.03
S2	$1.0 \times 10^4$	0.705	0.03
S3	$1.0 \times 10^4$	0.705	0.03
S4	$1.0 \times 10^4$	0.705	0.05
S5	$1.0 \times 10^4$	0.705	0.05

図3-2 解析モデルの概要

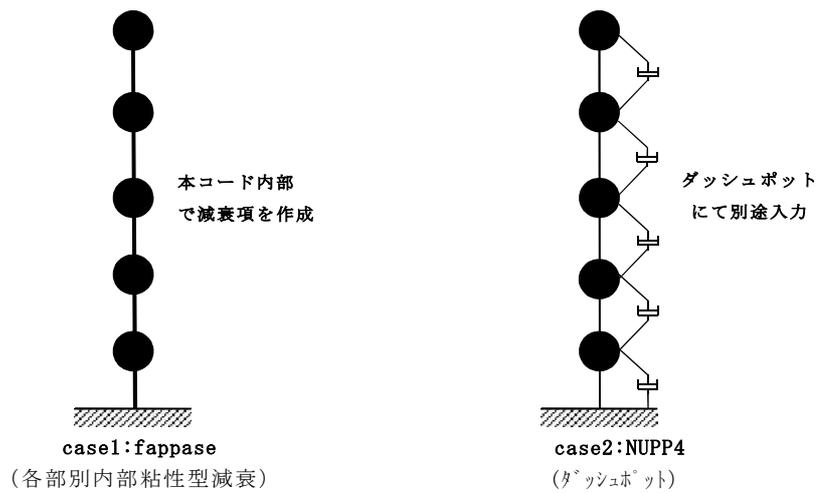


図3-3 解析ケース

c. 妥当性確認結果

EL\_CENTRO (NS) の原波を入力した場合の最大応答値一覧を表3-1に、質点1の絶対加速度時刻歴波形を図3-4に示す。最大応答値は合致している。また応答波形も同等である。以上より、本解析コードが応答を正しく評価していることが確認できる。

表3-1 最大応答値一覧

質点番号	絶対加速度 (Gal)		相対変位 (cm)	
	case1	case2	case1	case2
1	927.6	927.6	9.9121	9.9121
2	785.2	785.2	9.0042	9.0042
3	-590.1	-590.1	7.3710	7.3710
4	-542.0	-542.0	5.2358	5.2358
5	-358.9	-358.9	2.7453	2.7453
床面	341.7	341.7	0.0	0.0

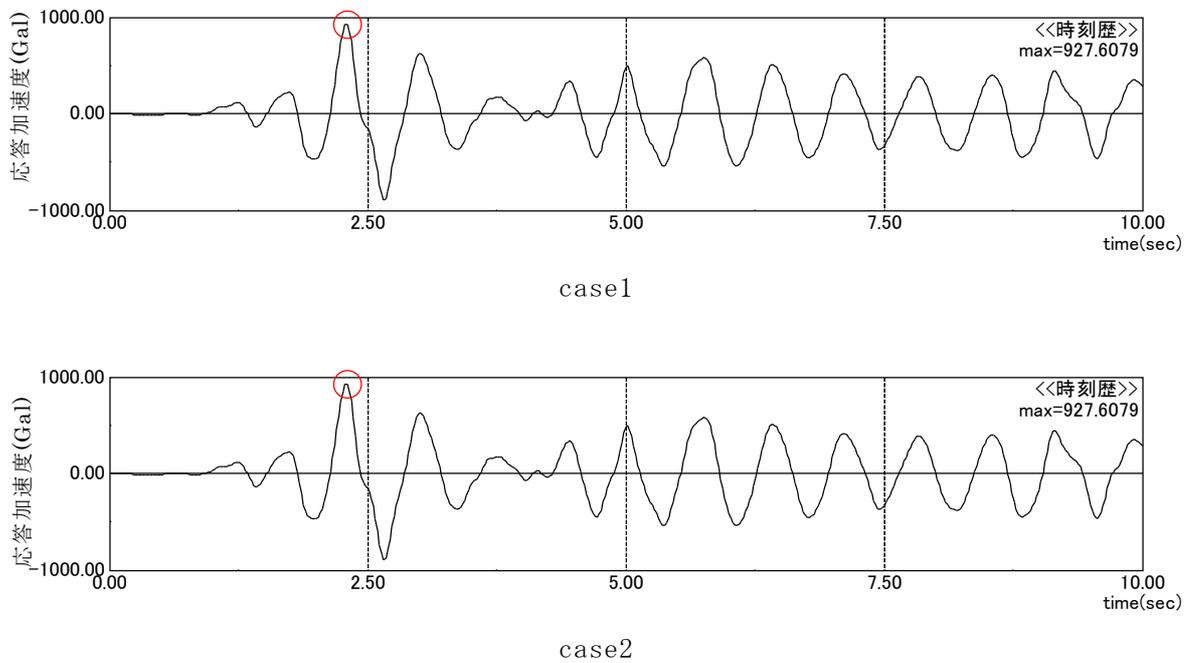


図3-4 絶対加速度時刻歴波形 (質点1)

## (2) 鉄骨ブレースの座屈現象の既往文献との比較

### a. 妥当性確認方法

既往論文では、1層1スパンX型ブレース架構の漸増繰返し載荷実験を、修正若林モデルにてシミュレーション解析している。

載荷実験における試験体概要を図3-5及び表3-2に示す。

載荷実験における加力サイクルは、漸増繰返し方式である。加力サイクルを図3-6に示す。

上記載荷実験のシミュレーション解析を既往論文と同様に実施し、本解析コードにより評価した荷重-変形関係が既往論文におけるシミュレーション解析結果及び載荷実験結果と概ね一致することを確認する。

### b. 解析条件

解析モデルを図3-7に示す。柱及び梁は、はり要素、ブレースはロッド要素とする。柱及び梁の復元力特性は、塑性変形を材端における剛塑性ばねで考慮する材端剛塑性ばねモデルを用い、図3-8に示すTri-linear型の履歴特性で表し、ブレースの復元力特性は修正若林モデルとする。

ブレースについて、解析で設定する非線形パラメータは、①降伏軸力、②細長比、③無次元オイラー荷重、④座屈荷重のみで、いずれも、部材の材料特性及び幾何学的性状から一意に決まるものである。

柱、梁及びブレースの断面性能を表3-3、ブレースの非線形パラメータを表3-4、材端剛塑性ばねモデルの非線形パラメータを表3-5に示す。なお、既往論文の解析条件に合わせて、剛域範囲（剛域長さ）を設定した。

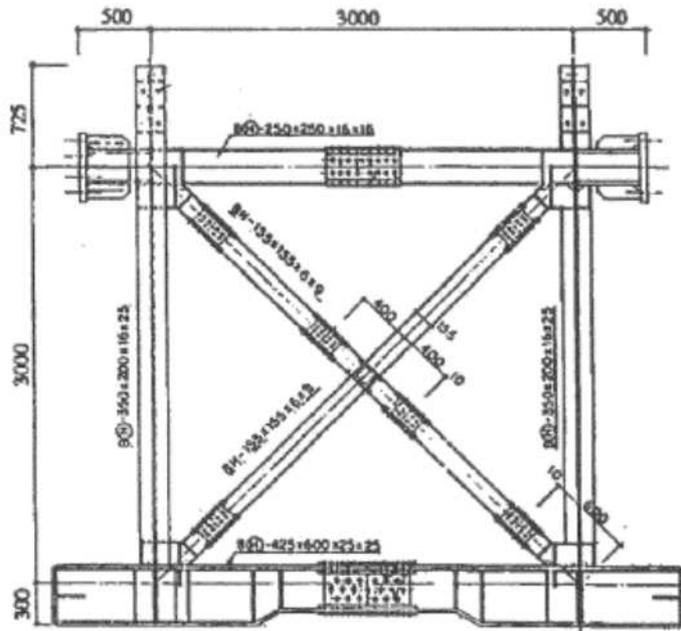


図3-5 試験体概要

表3-2 試験体概要

試験体名称	ブレース部材			継手形式	フレーム形状
	断面	細長比 ( $\lambda$ )	フランジ 幅厚比 ( $b/tf$ )		
SK III - 60.9-B	H-155× 155×6×9	60	9	ブラケット 形式	高さ : 3m スパン : 3m

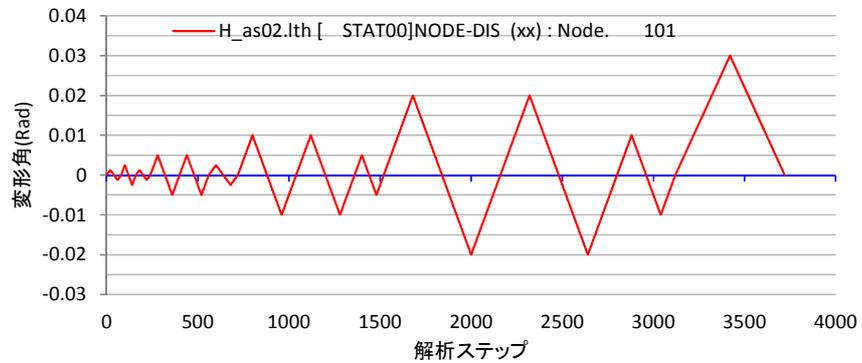


図3-6 加力サイクル

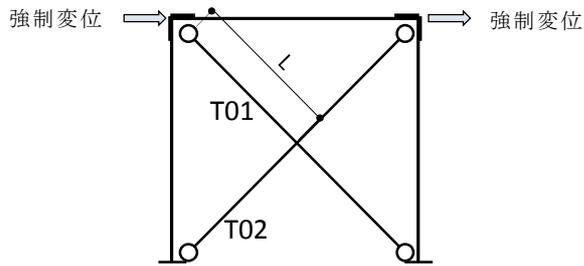


図3-7 解析モデル

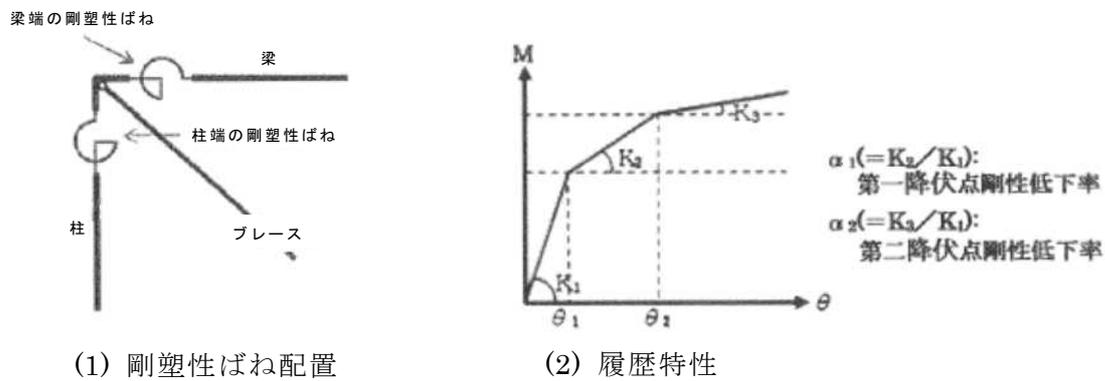


図3-8 材端剛塑性ばねモデル

表3-3 柱、梁及びブレースの断面性能

	ヤング係数E (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	断面積 (m <sup>2</sup> )	断面二次モーメント (m <sup>4</sup> )
柱	$2.05 \times 10^8$	0.3	$1.48 \times 10^{-2}$	$3.32 \times 10^{-5}$
梁	$2.05 \times 10^8$	0.3	$1.16 \times 10^{-2}$	$1.24 \times 10^{-4}$
ブレース	$2.05 \times 10^8$	0.3	$3.59 \times 10^{-3}$	—

表3-4 ブレースの非線形パラメータ

降伏応力度 (kN/m <sup>2</sup> )	降伏軸力 (kN)	細長比	無次元 オイラー荷重	座屈荷重 (kN)	圧縮側限界塑性変形 (m)
$2.9 \times 10^5$	1,041.1	38.5	4.71	988	0.03

表3-5 材端剛塑性ばねモデルの非線形パラメータ

初期剛性K1 (kNm/rad)	第一降伏点 $\theta_1$ (rad)	第一降伏点 剛性低下率 $\alpha_1$	第二降伏点 $\theta_2$ (rad)	第二降伏点 剛性低下率 $\alpha_2$
$2.374 \times 10^6$	$5.000 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-2}$	$4.310 \times 10^{-3}$	$8.260 \times 10^4$

c. 妥当性確認結果

既往論文における載荷実験結果及びシミュレーション解析を図3-9, 本解析コードによるシミュレーション解析を図3-10に示す。

本解析コードによるシミュレーション解析結果は, 既往論文におけるシミュレーション解析結果と概ね一致している。また, 本解析コードによるシミュレーション解析結果は, 既往論文における実験結果と概ね一致している。

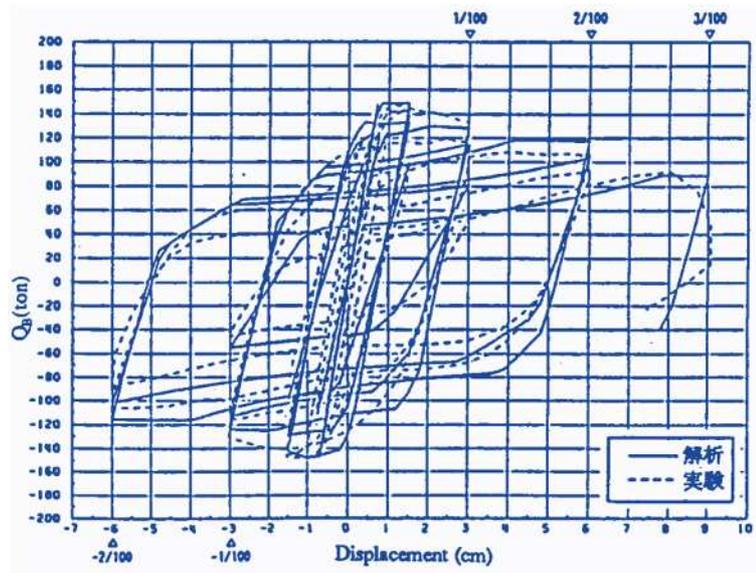


図3-9 既往論文における載荷実験結果及びシミュレーション解析 (荷重-変形関係)

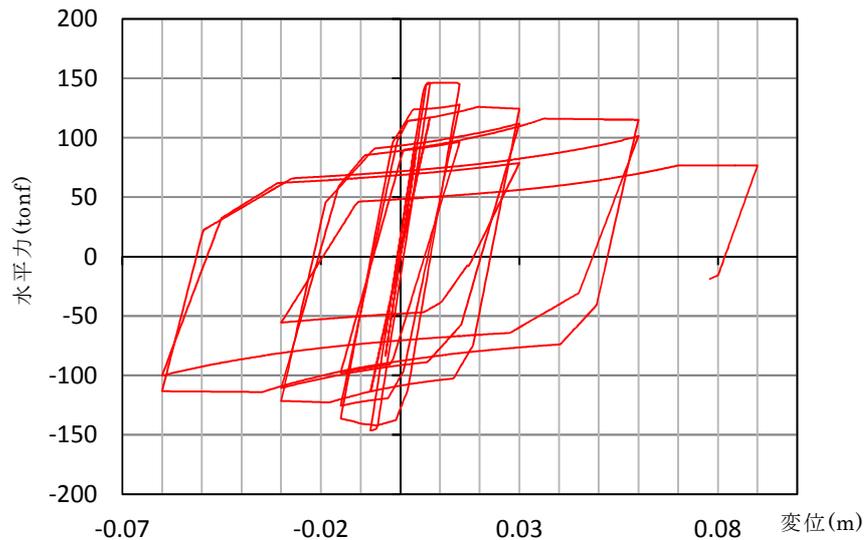


図3-10 本解析コードによるシミュレーション解析 (荷重-変形関係)

### (3) 評価結果

以上のとおり、本解析コードの解析機能について

- ・国内外の超高層建物において使用実績を有しており、建築基準法適用外の国土交通大臣の建物評定により、解析機能全般について妥当性は十分確認されている。
- ・今回の工事計画認可申請で使用する各部別内部粘性型減衰を本解析コードの内部計算と等価なダッシュポットを用いて解析し、両者が一致することを確認している。
- ・既往論文に示されている1層1スパンX型ブレース架構載荷実験シミュレーション解析を本解析コードにて実施し、解析結果を既往論文記載の結果と比較して、概ね一致することを確認している。

以上より、本解析コードの当該機能は適切である。

従って、本解析コードを主排気筒の地震応答解析に使用することは妥当である。

## 4. 引用文献

- (1) 谷口，加藤，中村，高橋，佐伯，広谷，相川：鉄骨X型ブレース架構の復元力特性に関する研究，構造工学論文集，Vol. 37B(1991年3月)，日本建築学会

別紙8 LS-DYNA

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添1	竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	Ver. 971 Ver. R8.0.0 Ver. R8.1.0

## 2. 解析コードの概要

### 2.1 L S - D Y N A Ver. 971

項目 \ コード名	L S - D Y N A
使用目的	3次元有限要素法による衝突解析（竜巻飛来物影響評価）
開発機関	Livemore Software Technology Corporation
開発時期	1987年
使用したバージョン	Ver. 971
コードの概要	<p>本解析コードは、Lawrence Livemore 研究所により開発・公開された陽解法有限要素法 D Y N A 3 D を基に開発された構造解析用の汎用市販コードである。</p> <p>機械・土木建築その他広範な分野に及ぶ要素群、非線形モデルを多数サポートしており、国内外の宇宙航空、自動車、機械、建築、土木等の様々な分野において多くの利用実績があり、陽的時間積分を用いていることから、衝突問題等短時間の動的現象のシミュレーションに適している。また、大変形の非線形問題への適用が容易である点に特徴がある。</p> <p>衝突問題や動的荷重を受ける構造物の応力、ひずみや加速度応答等を算出する。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・開発機構マニュアルにおいて提示している 3次元有限要素法による衝突解析に関する例題解析を実施し、解析結果がマニュアルに記載された結果と一致することを確認している。</li> <li>・Norwegian University of Science and Technology により、シェル要素およびソリッド要素を用いた薄肉交換の軸方向圧縮破壊試験のシミュレーション解析が行なわれており、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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・本解析コードは、国内外の宇宙航空、自動車、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。</li> <li>・開発機関が提示するマニュアルにより、本解析コードの適正な用途、適用範囲を確認している。</li> <li>・今回の工事計画認可申請で行う3次元有限要素法（シェル要素）による動的解析（衝突解析）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。</li> <li>・今回の工事計画認可申請において使用する Ver. 971 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。</li> <li>・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次元有限要素法による衝突解析（竜巻飛来物影響評価）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。</li> </ul>
--	--

2.2 L S - D Y N A Ver. R8. 0. 0

項目	コード名 L S - D Y N A
使用目的	3次元有限要素法による衝突解析（竜巻飛来物影響評価）
開発機関	Livermore Software Technology Corporation
開発時期	1987年
使用したバージョン	Ver. R8. 0. 0
コードの概要	<p>本解析コードは、Lawrence Livermore 研究所により開発・公開された陽解法有限要素法 D Y N A 3 D を基に開発された構造解析用の汎用市販コードである。</p> <p>機械・土木建築その他広範な分野に及ぶ要素群，非線形モデルを多数サポートしており，国内外の宇宙航空，自動車，機械，建築，土木等の様々な分野において多くの利用実績があり，陽的時間積分を用いていることから，衝突問題等短時間の動的現象のシミュレーションに適している。また，大変形の非線形問題への適用が容易である点に特徴がある。</p> <p>衝突問題や動的荷重を受ける構造物の応力，ひずみや加速度応答等を算出する。</p>
<p>検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）</p>	<p><b>【検証（Verification）】</b></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"> <li>・開発機構マニュアルにおいて提示している 3次元有限要素法による衝突解析に関する例題解析を実施し，解析結果がマニュアルに記載された結果と一致することを確認している。</li> <li>・Norwegian University of Science and Technology により，シェル要素およびソリッド要素を用いた薄肉交換の軸方向圧縮破壊試験のシミュレーション解析が行なわれており，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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認（Validation）】</b></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"> <li>・本解析コードは，国内外の宇宙航空，自動車，機械，建</li> </ul>

	<p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・開発機関が提示するマニュアルにより，本解析コードの適正な用途，適用範囲を確認している。</li> <li>・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，シェル要素）による動的解析（衝突解析）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。</li> <li>・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. R8.0.0 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。</li> <li>・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次元有限要素法による衝突解析（竜巻飛来物影響評価）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。</li> </ul>
--	--

2.3 L S - D Y N A Ver. R8. 1. 0

項目 \ コード名	L S - D Y N A
使用目的	3次元有限要素法による衝突解析（竜巻飛来物影響評価）
開発機関	Livermore Software Technology Corporation
開発時期	1987年
使用したバージョン	Ver. R8. 1. 0
コードの概要	<p>本解析コードは、Lawrence Livermore 研究所により開発・公開された陽解法有限要素法 D Y N A 3 D を基に開発された構造解析用の汎用市販コードである。</p> <p>機械・土木建築その他広範な分野に及ぶ要素群、非線形モデルを多数サポートしており、国内外の宇宙航空、自動車、機械、建築、土木等の様々な分野において多くの利用実績があり、陽的時間積分を用いていることから、衝突問題等短時間の動的現象のシミュレーションに適している。また、大変形の非線形問題への適用が容易である点に特徴がある。</p> <p>衝突問題や動的荷重を受ける構造物の応力、ひずみや加速度応答等を算出する。</p>
<p>検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）</p>	<p><b>【検証（Verification）】</b></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"> <li>・開発機構マニュアルにおいて提示している 3次元有限要素法による衝突解析に関する例題解析を実施し、解析結果がマニュアルに記載された結果と一致することを確認している。</li> <li>・Norwegian University of Science and Technology により、シェル要素およびソリッド要素を用いた薄肉交換の軸方向圧縮破壊試験のシミュレーション解析が行なわれており、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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認（Validation）】</b></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"> <li>・本解析コードは、国内外の宇宙航空、自動車、機械、建</li> </ul>

	<p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・開発機関が提示するマニュアルにより，本解析コードの適正な用途，適用範囲を確認している。</li> <li>・今回の工事計画認可申請で行う3次元有限要素法（シェル要素）による動的解析（衝突解析）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。</li> <li>・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. R8.1.0 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。</li> <li>・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次元有限要素法による衝突解析（竜巻飛来物影響評価）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。</li> </ul>
--	--

別紙9 ADMIT

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	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><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・ <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 200px; height: 15px;"></span></li> <li>・ <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 80px; height: 15px;"></span>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。</li> <li>・ 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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・ 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。</li> </ul>

### 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。

- ・振動アドミッ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）

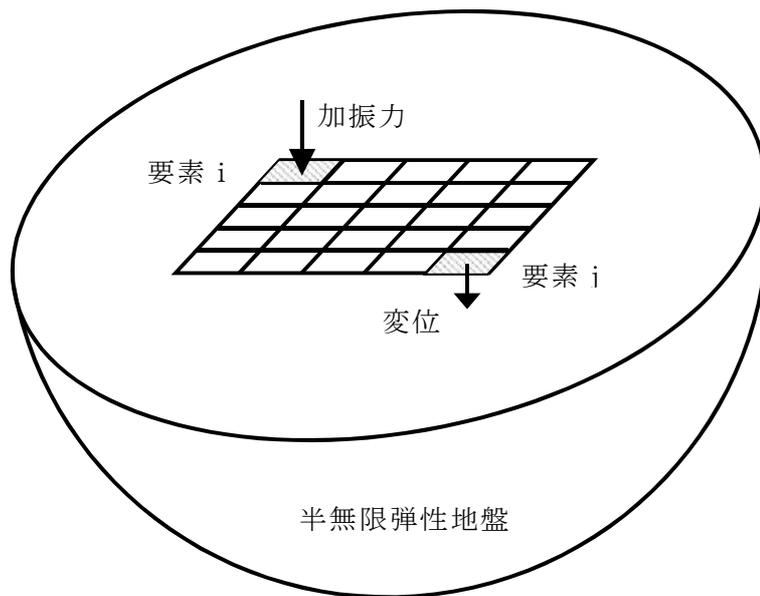


図3-1 基礎分割法による地盤ばねの求め方について

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。

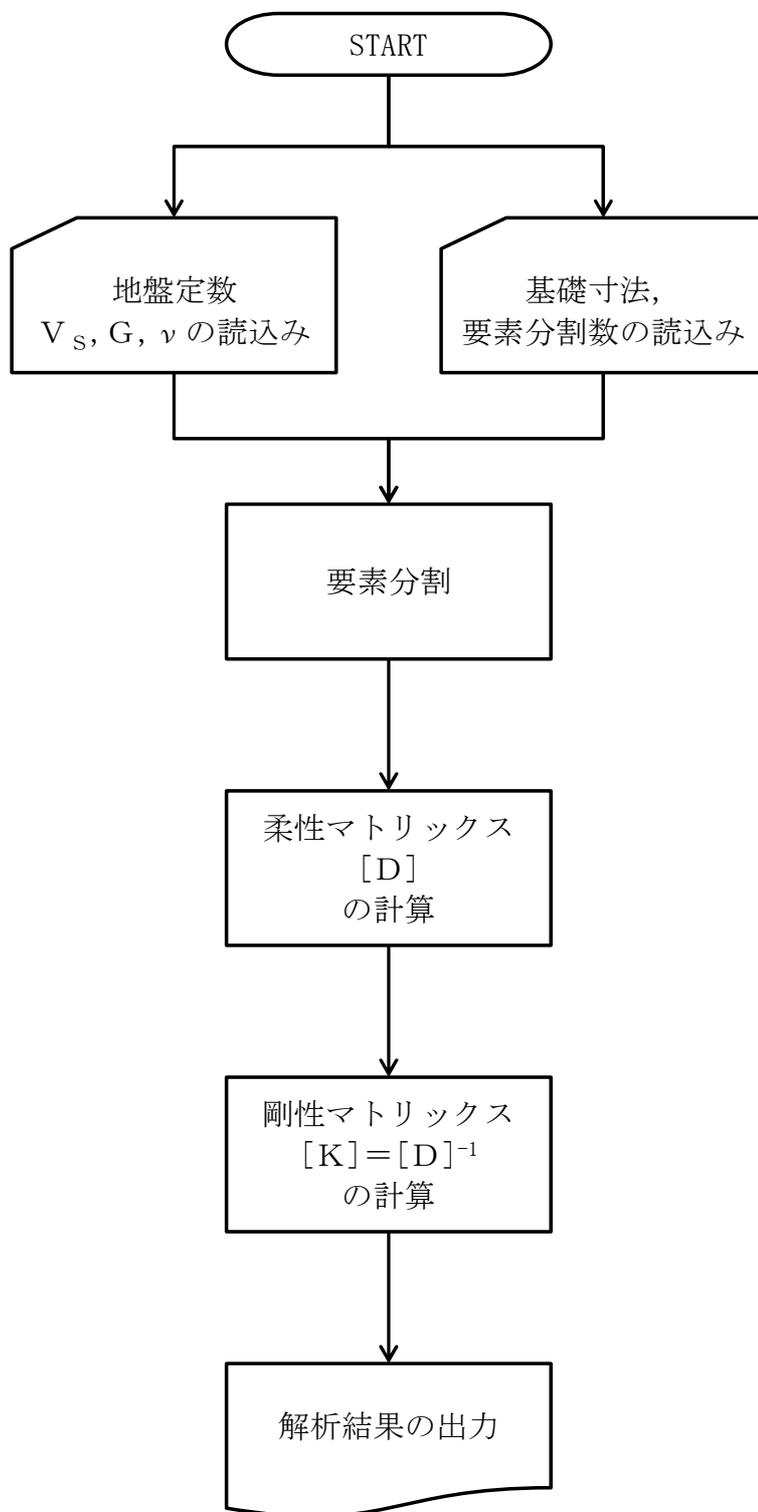


図3-2 解析フローチャート

### 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。

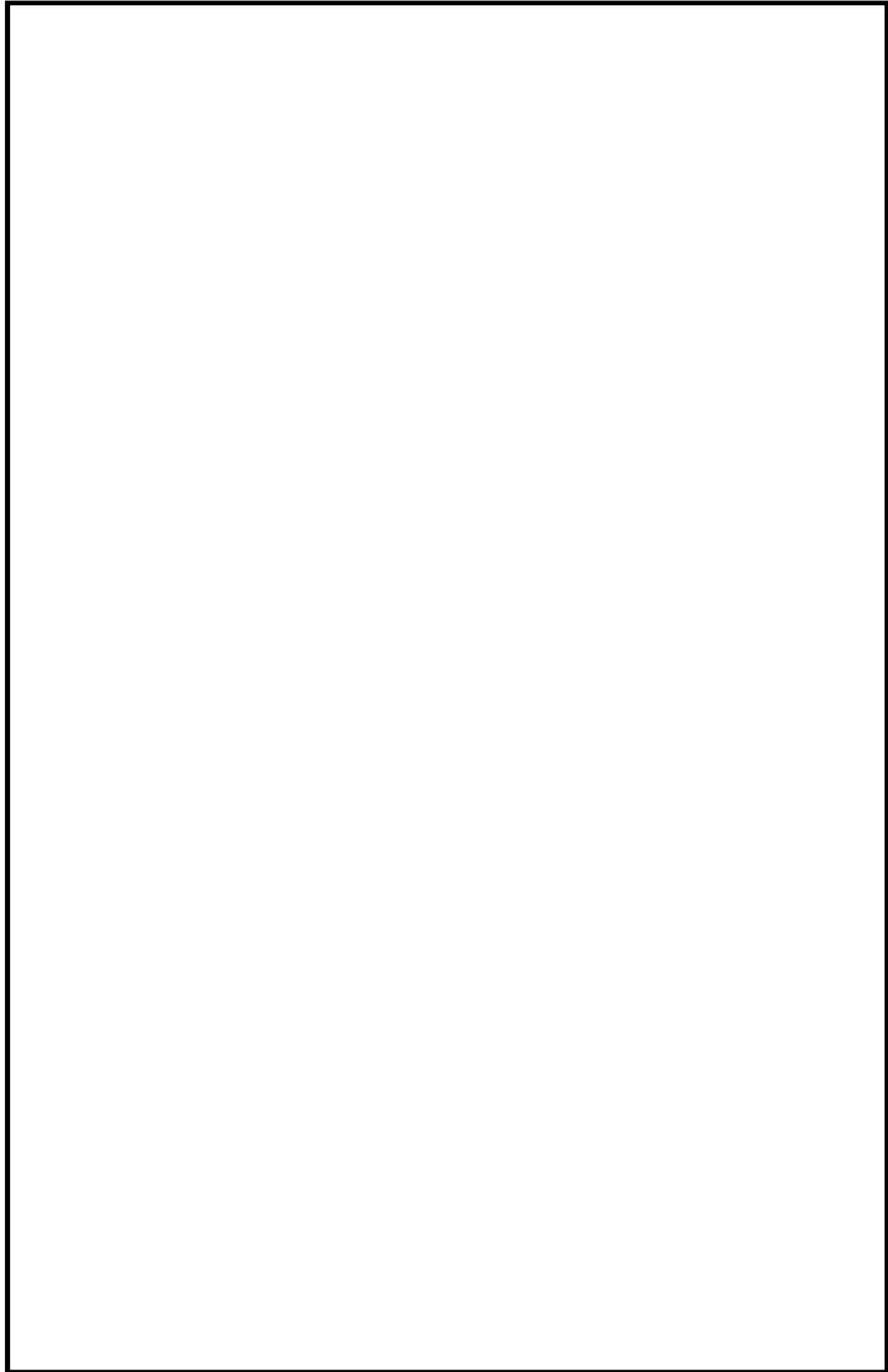


図 3-3 解析結果の比較（水平方向）

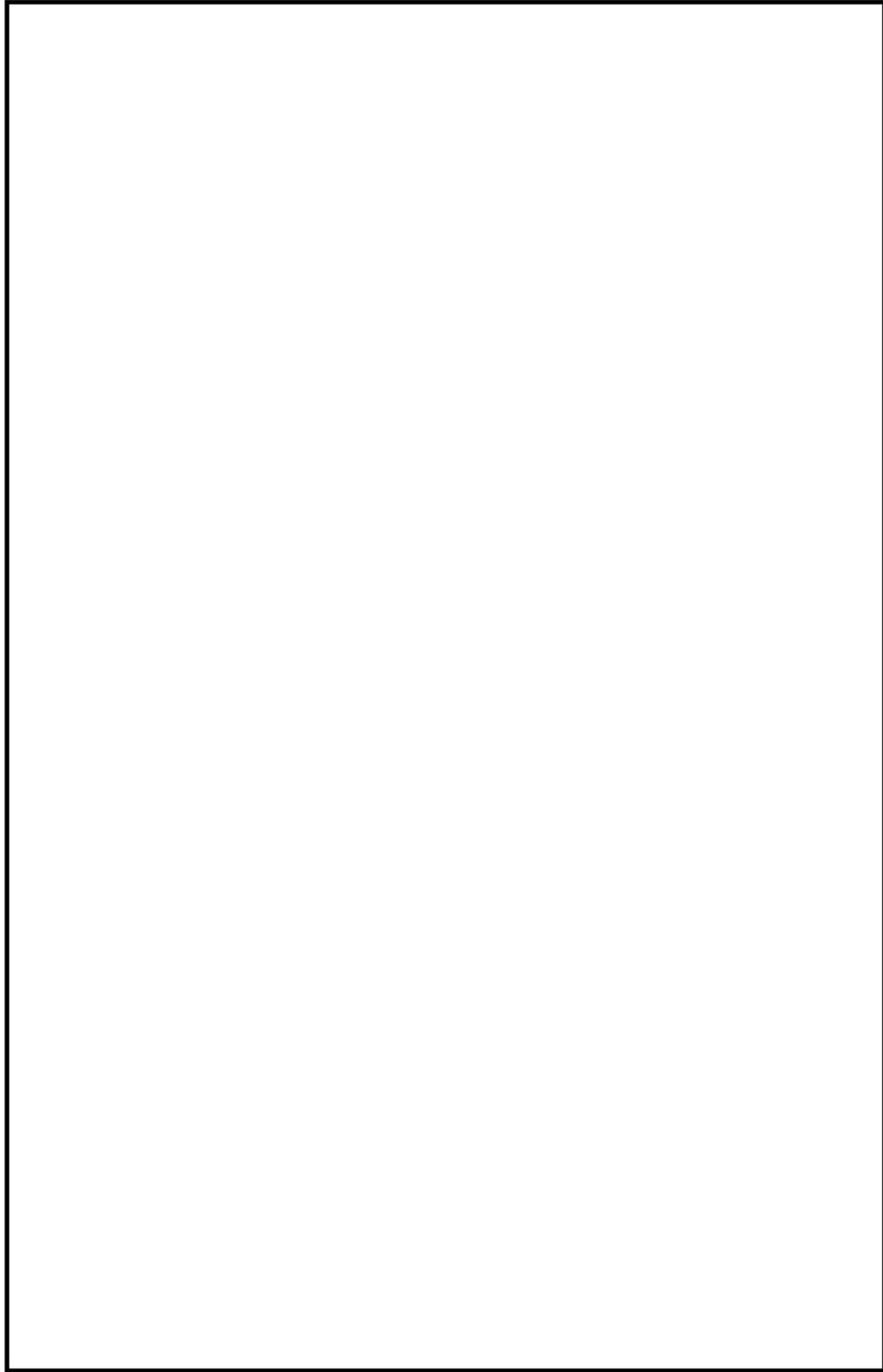


図 3-4 解析結果の比較（鉛直方向）

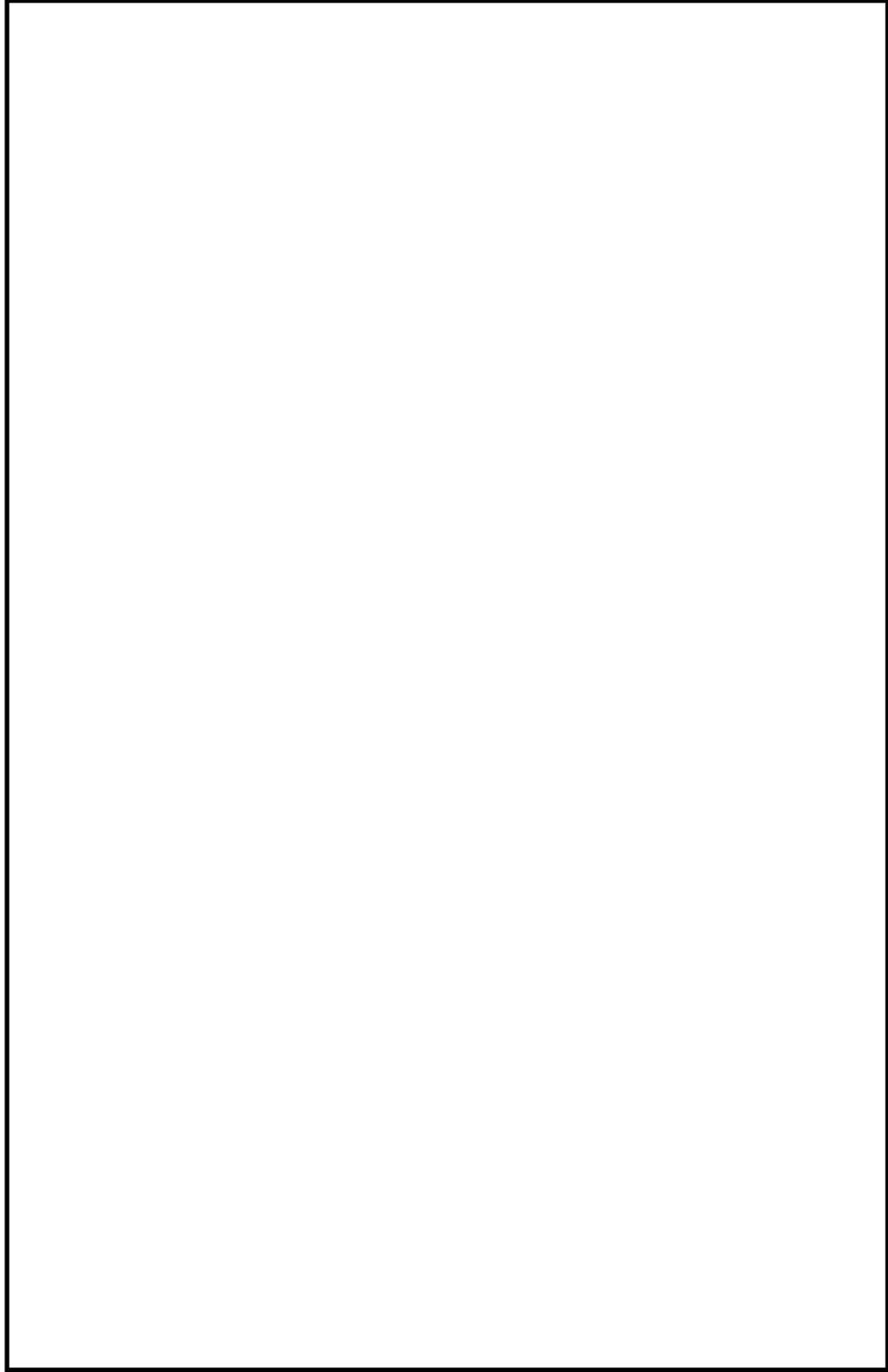


図 3-5 解析結果の比較（回転方向）

### 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 10 DAC3N

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	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 <math>S_s</math> 及び弾性設計用地震動 <math>S_d</math> 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><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・既工事計画において実績のある別コード <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 100px; height: 15px; vertical-align: middle;"></span> 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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・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。</li> </ul>

別紙 11 GRIMP 2

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	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、振動アドミッタンス理論により、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><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・ G R I M P 2 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 <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 100px; height: 1.2em; vertical-align: middle;"></span>* の計算結果と良い一致を示すことを確認している。</li> <li>・ 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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・ 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。</li> </ul>

注記\* :

別紙 12 Hyper Statics and Dynamics

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	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応力解析
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、タービン建屋他の 2 次元フレームの応力解析に使用している。</p> <p><b>【検証（Verification）】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b></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"> <li>・静的応力解析について、Super Build/SS7 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。</li> <li>・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。</li> </ul>

別紙 13 K S H A K E

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	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、一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>
<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>本解析コードは、原子炉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 <math>S_s</math> 及び弾性設計用地震動 <math>S_d</math> 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"> <li>・K S H A K E 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。</li> <li>・既工事計画において実績のある別コード <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 100px; height: 15px;"></span> <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 100px; height: 15px;"></span> による解析結果と一致することを確認している。</li> <li>・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。</li> </ul> <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"> <li>・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。</li> </ul>

別紙 14 LNOVAK

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	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><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・ <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 200px; height: 15px;"></span></li> <li>・ <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 80px; height: 15px;"></span>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。</li> <li>・ 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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・ 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。</li> </ul>

### 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。

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

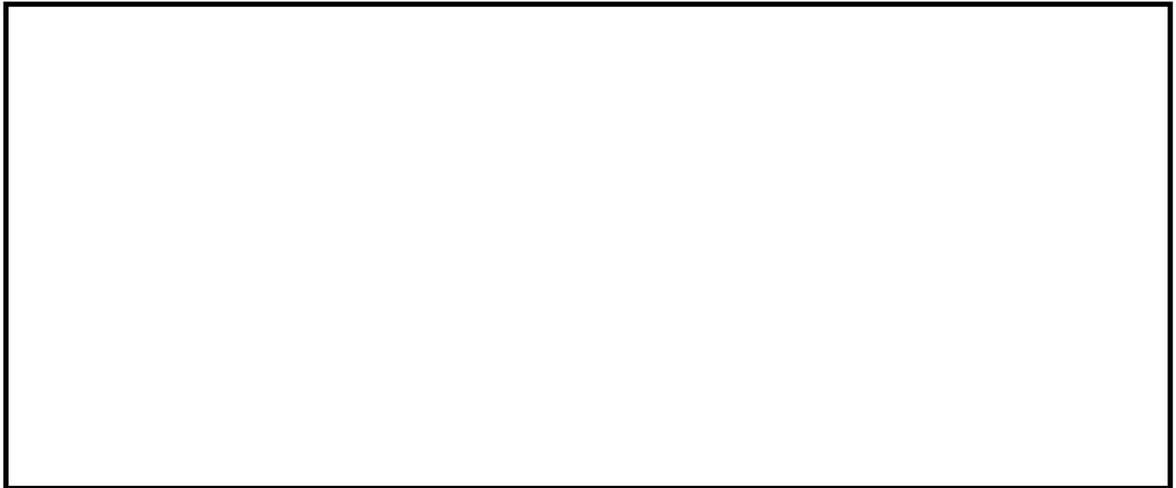


図3-1 加振を受ける剛円盤 (引用文献(2)参照)

なお、解析当たっては下記の仮定を設けている。

- ・ 建屋埋込み部分を等価な円形と仮定する。
- ・ 建屋埋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。

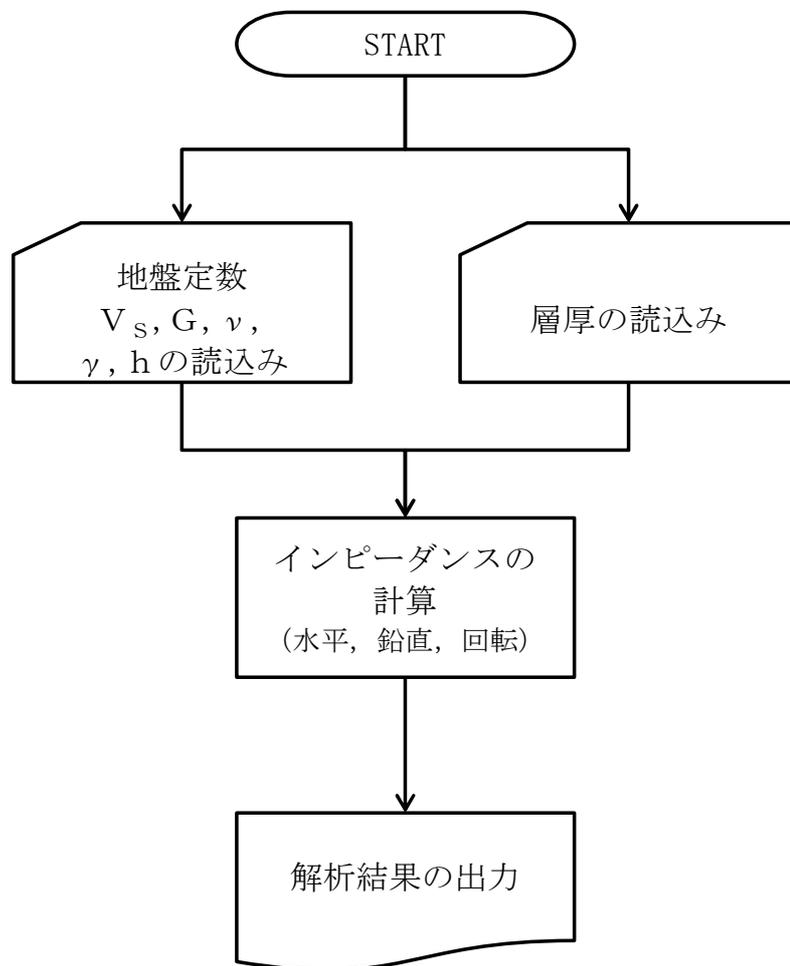


図3-2 解析フローチャート

### 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。

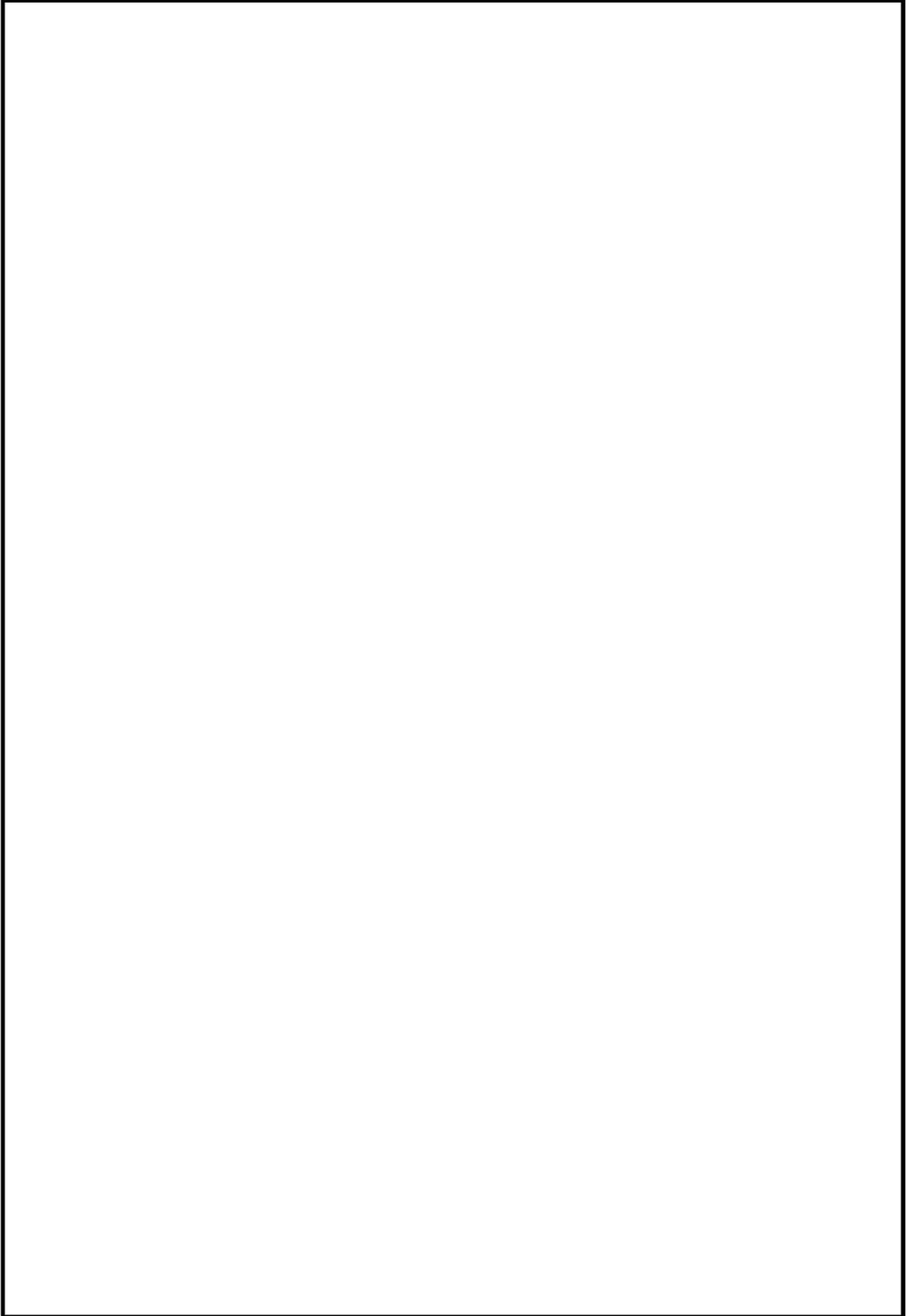


図 3-3 解析結果の比較 (水平方向)

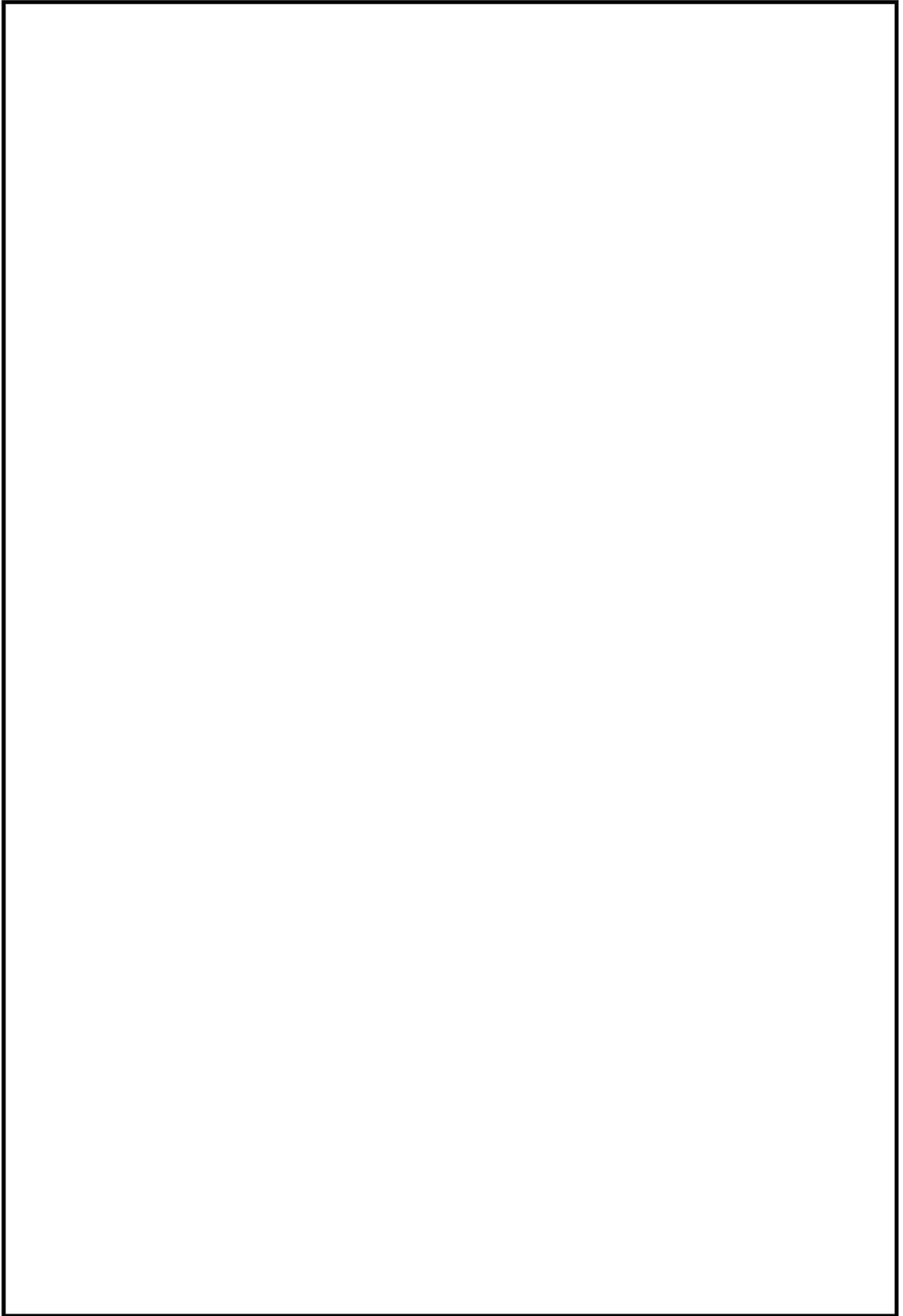


図 3-4 解析結果の比較 (回転方向)

### 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 15 NOVAK

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	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 <math>S_s</math> 及び弾性設計用地震動 <math>S_d</math> 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><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・他コードとの比較</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・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。</li> </ul>

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 16 NX NASTRAN

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	Ver. 9.0

## 2. 解析コードの概要

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><b>【検証（Verification）】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認（Validation）】</b></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"> <li>・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。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>
--	--

別紙 17 NVK 2 6 3

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	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、<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 150px; height: 1.2em; vertical-align: middle;"></span>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><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・ N V K 2 6 3 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 <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 150px; height: 1.2em; vertical-align: middle;"></span> <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 40px; height: 1.2em; vertical-align: middle;"></span> の計算結果と良い一致を示すことを確認している。</li> <li>・ 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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・ 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。</li> </ul>

### 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。NVK263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，

$\pi$  : 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

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

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

$r_0 = \sqrt{B_x B_y / \pi}$  (等価円半径)

$\omega$  : 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

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

$h_j, \nu_j$  : 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。

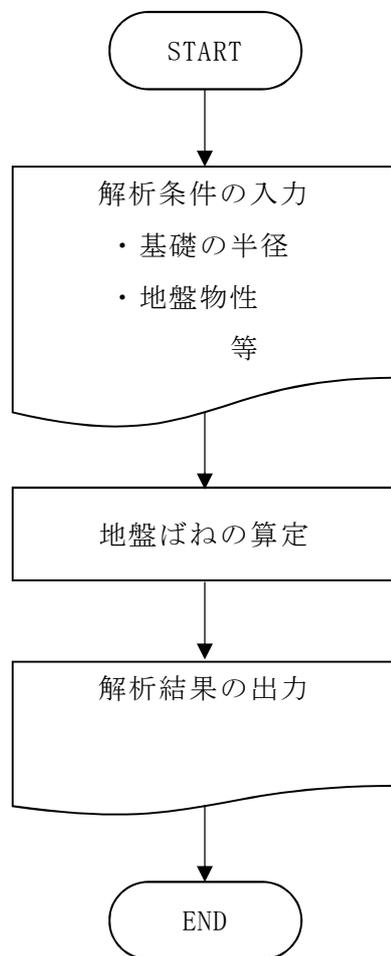


図 3-1 解析フローチャート

### 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。

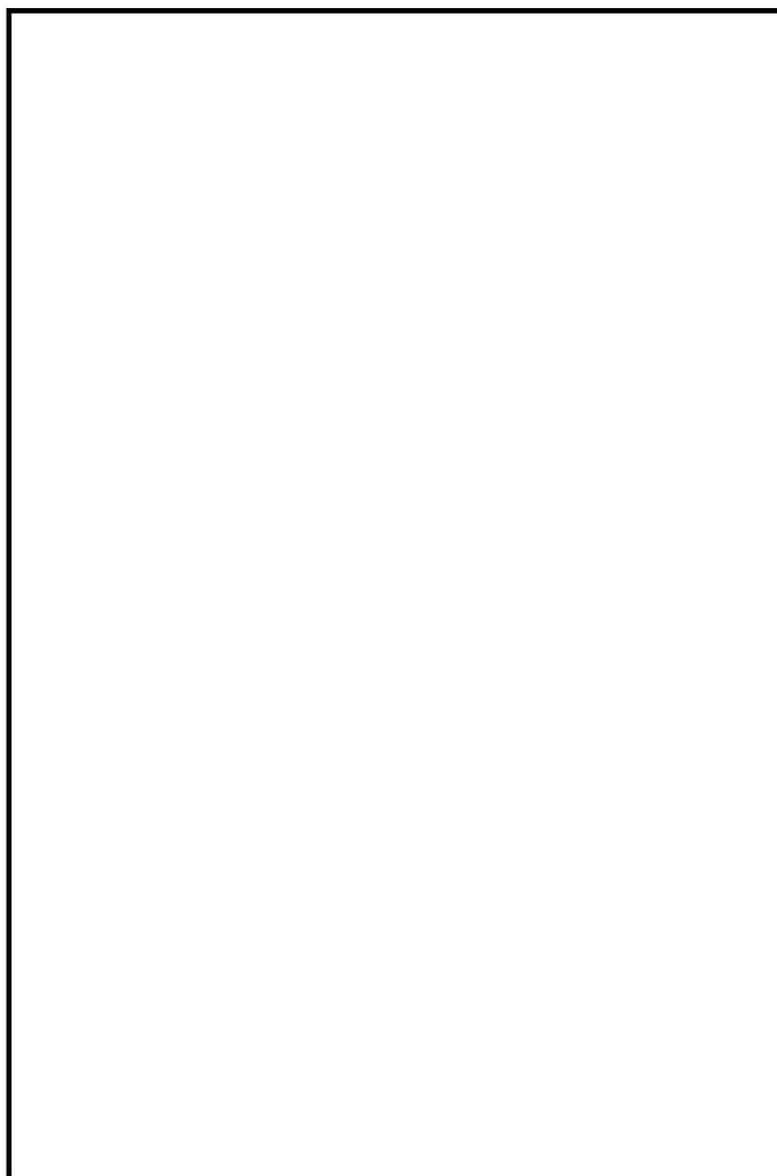


図 3-2 解析結果の比較

### 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 18 S H A K E

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	Ver. 1.0

## 2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	S H A K E
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<math>V_s</math>、P波速度を<math>V_p</math>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 <math>S_s</math> 及び弾性設計用地震動 <math>S_d</math> 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><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・理論解との比較</li> <li>・他コードとの比較</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・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地震応答解析に本解析コードが使用された実績が</li> </ul>

	<p>ある。</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・ 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。</li></ul>
--	--

### 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波速度を  $V_s$ 、P波速度を  $V_p$  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  $\rho$ 、せん断弾性係数が  $G$ 、臨界減衰比が  $\beta$  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  $\omega$  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  $\rho_m$ 、せん断弾性係数を  $G_m$ 、臨界減衰比を  $\beta_m$  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、 $\alpha_m$  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  $\alpha_m$  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。

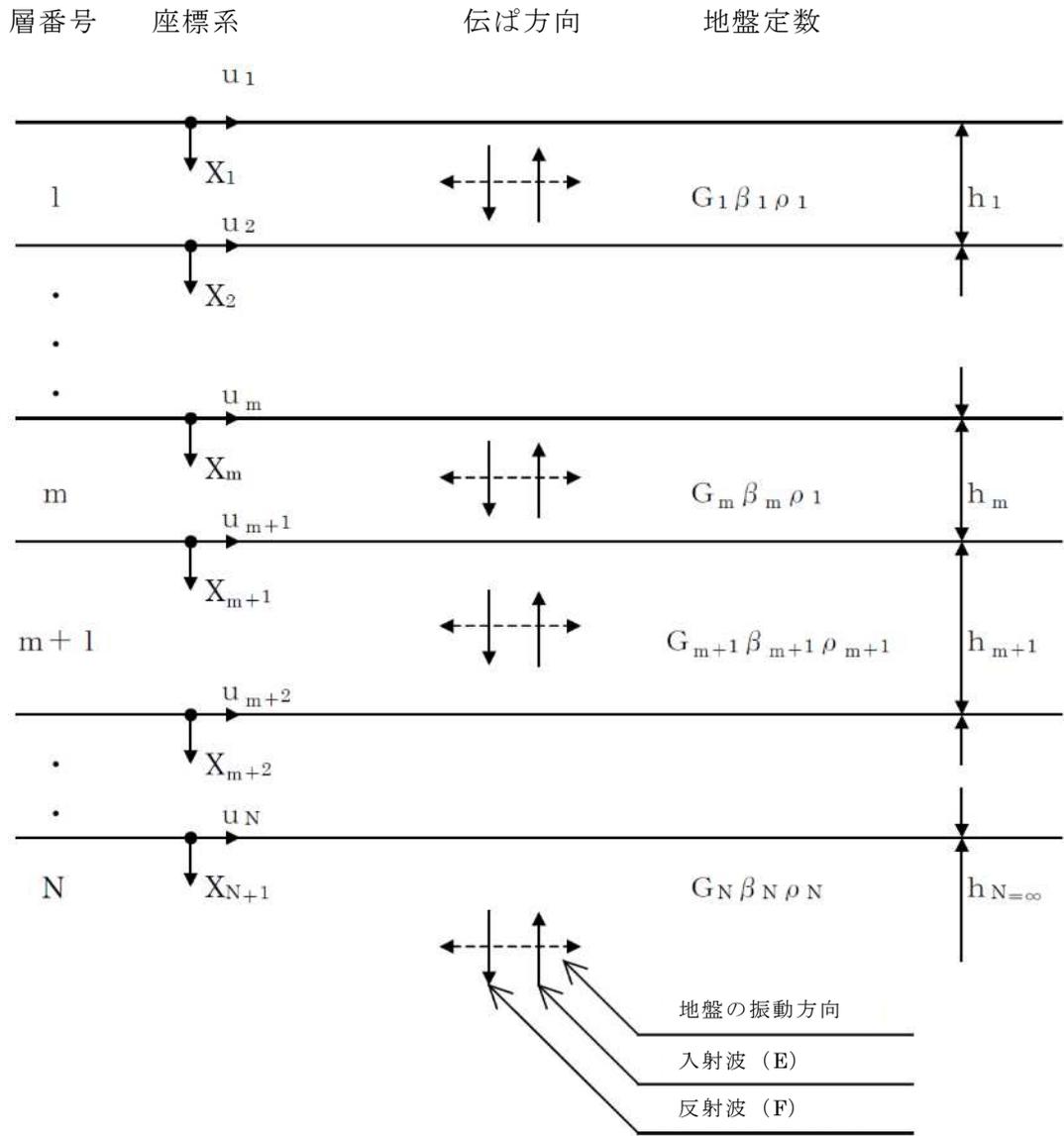


図 3-1 1次元地盤モデル

### 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。

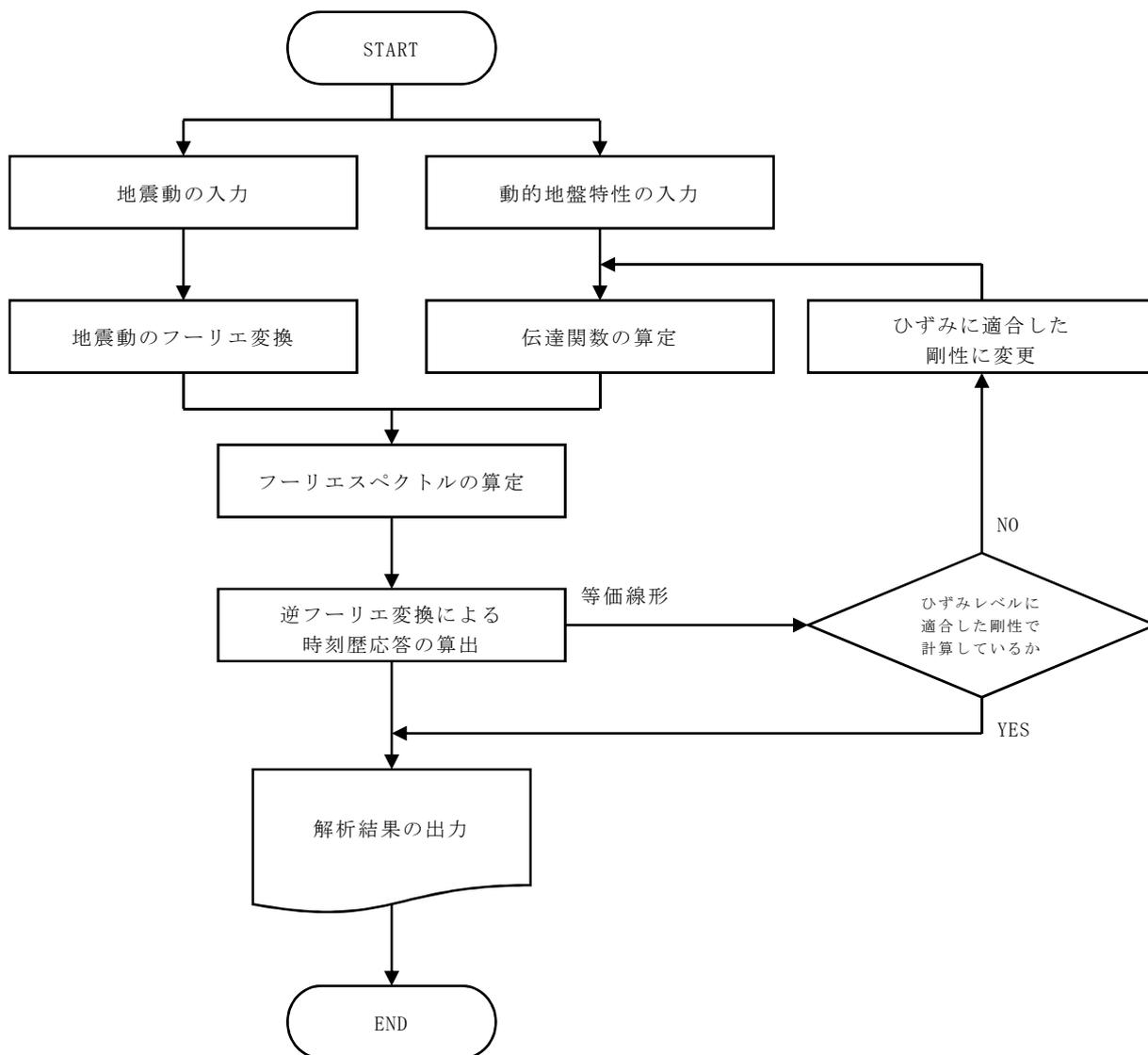


図 3-2 解析フローチャート

### 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。

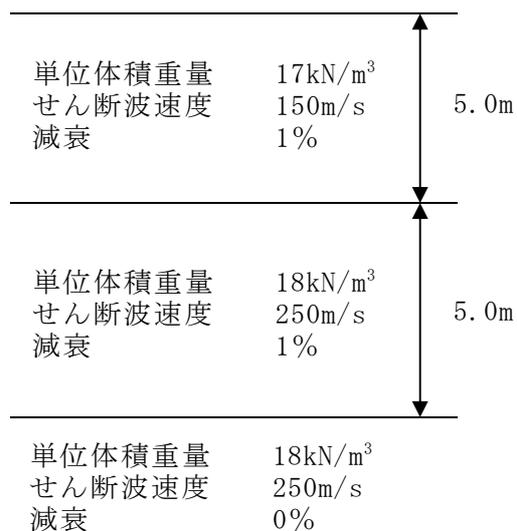


図 3-3 地盤モデル諸元

<検討条件>

- ・重力加速度は  $9.80665\text{m/s}^2$  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。

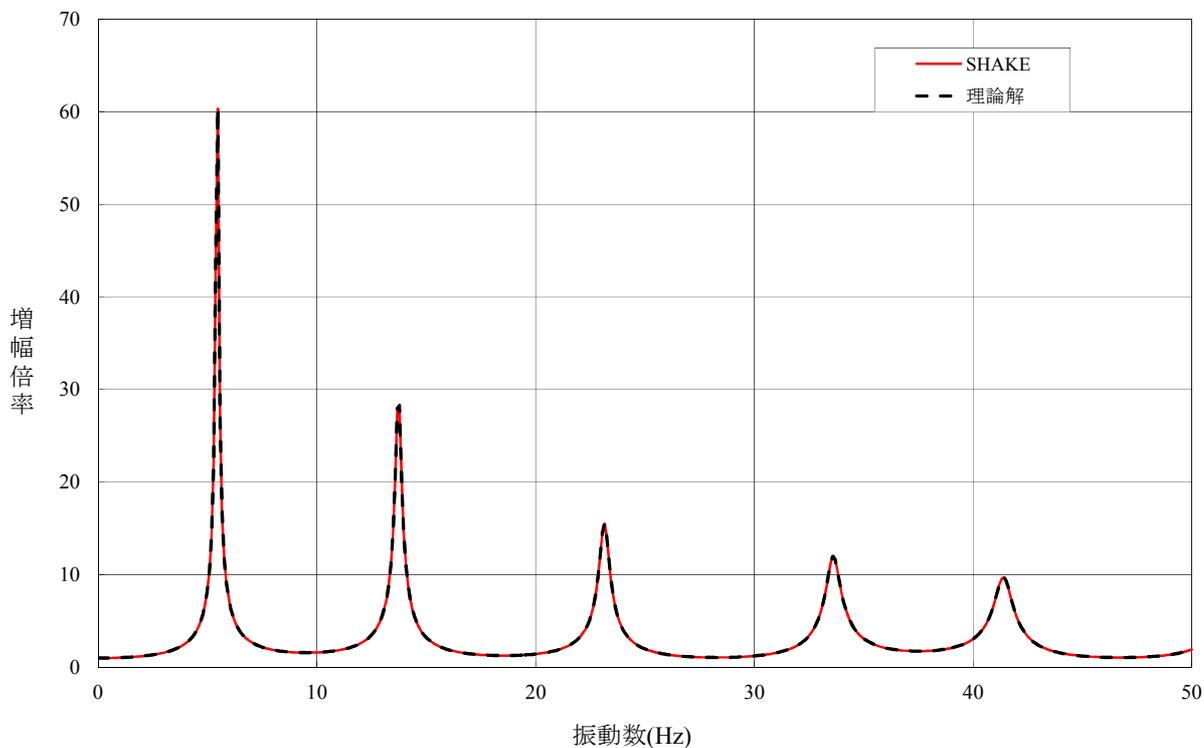


図 3-4 理論解との伝達関数の比較結果

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 <sup>3</sup> )	せん断波速度 (m/s)	せん断弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	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

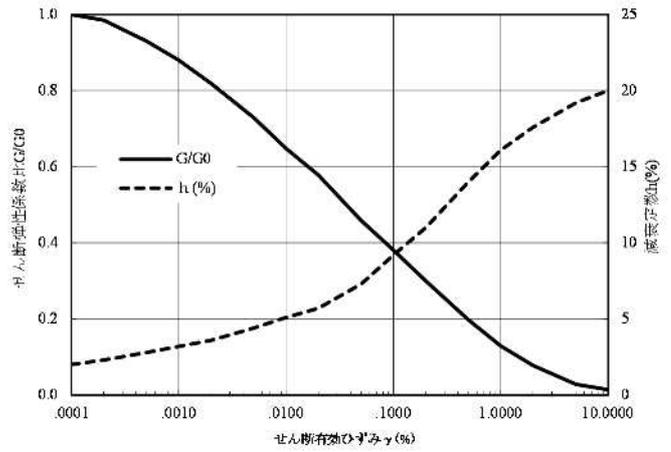


図 3-5 ひずみ依存特性(第 1 層)

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

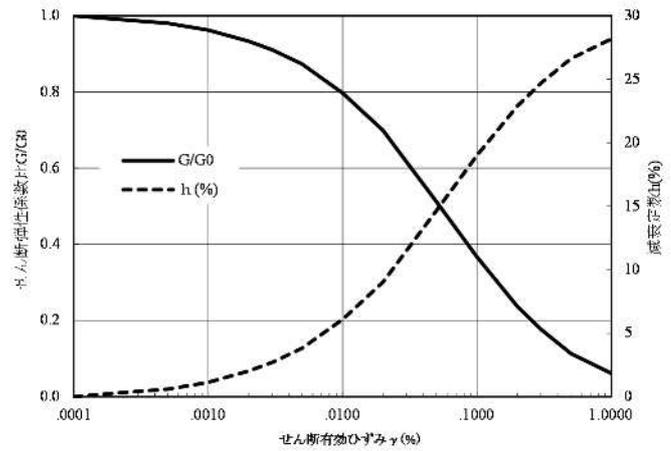


図 3-6 ひずみ依存特性(第 2 層)

(2) 検討条件

以下に，検討条件を示す。

- ・重力加速度は  $9.80\text{m/s}^2$  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。

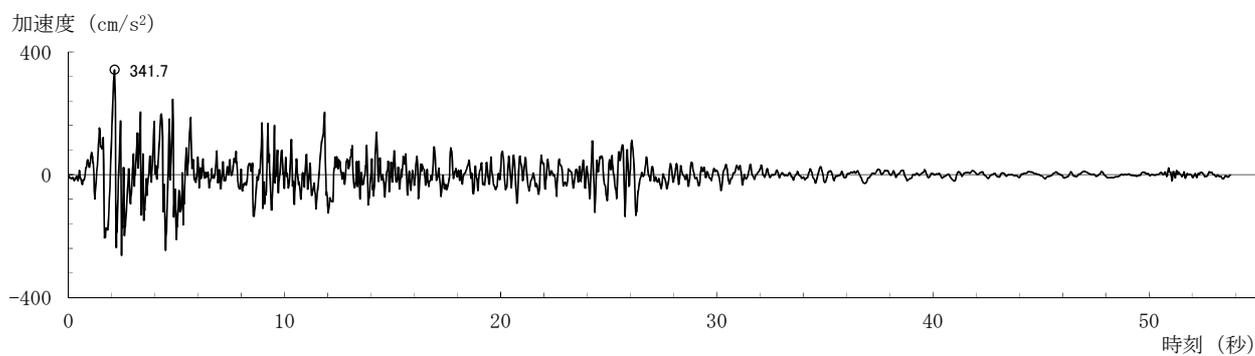


図 3-7 入力地震動加速度時刻歴

(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。

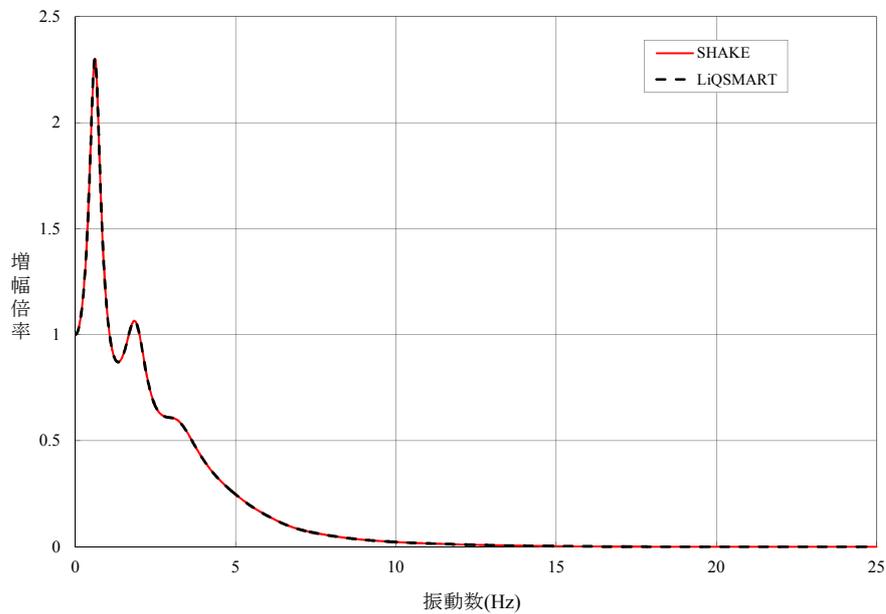


図 3-8 地表面伝達関数比較

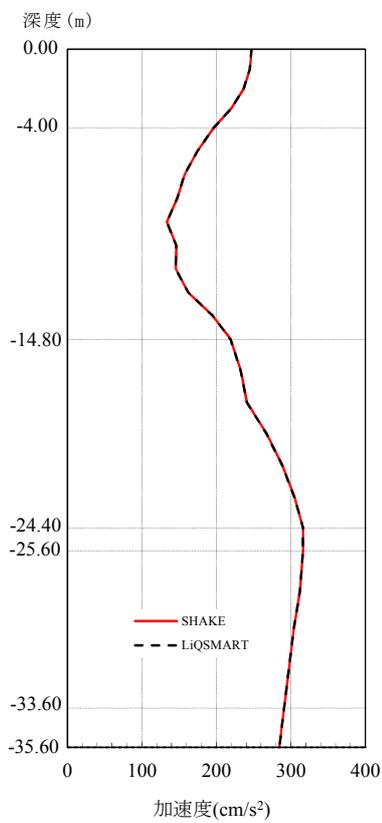


図 3-9 加速度最大分布比較

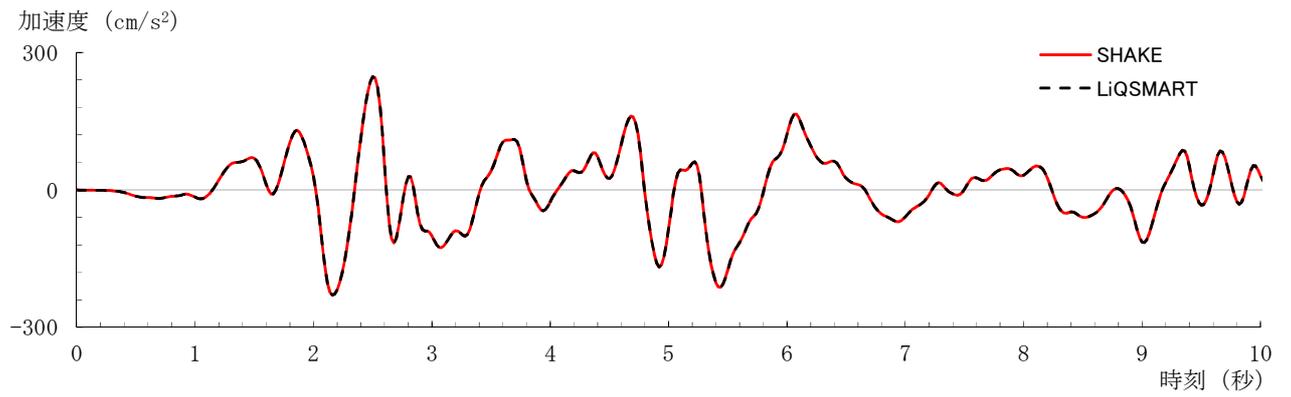


図 3-10 地表面加速度時刻歴比較

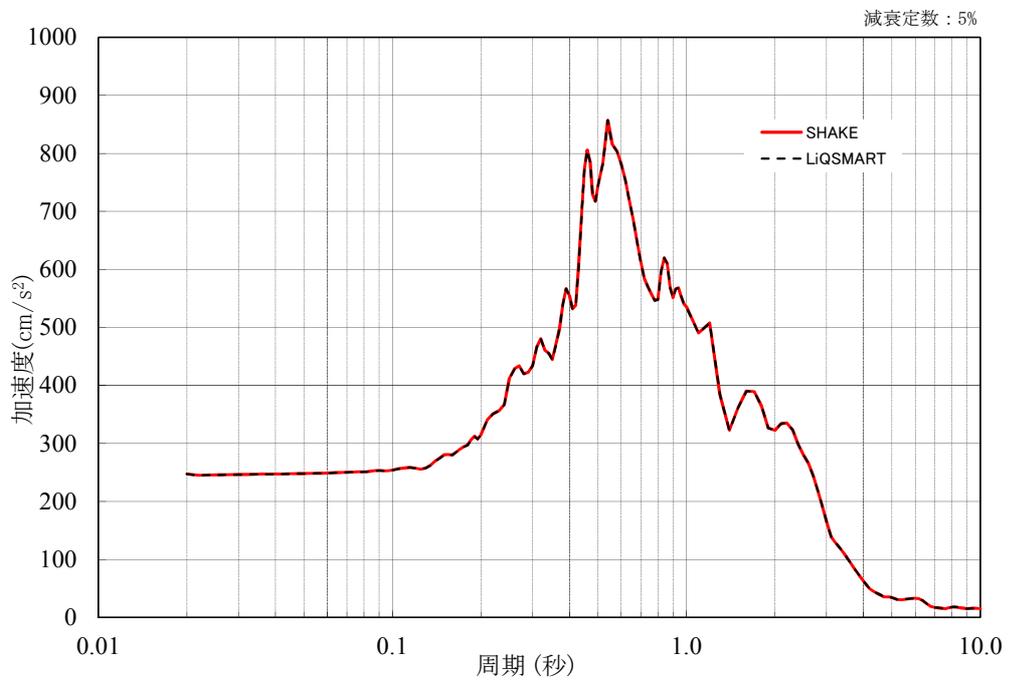


図 3-11 地表面加速度応答スペクトル比較

### 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 19 S H A K E

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	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 <math>S_s</math> 及び弾性設計用地震動 <math>S_d</math> 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"> <li>・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。</li> <li>・汎用コードである [ ]</li> </ul> <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"> <li>・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。</li> </ul> <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"> <li>・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。</li> </ul>

### 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、

$\rho$  : 単位体積重量

$G$  : せん断弾性係数

$u$  : 変位

$\eta$  : 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

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

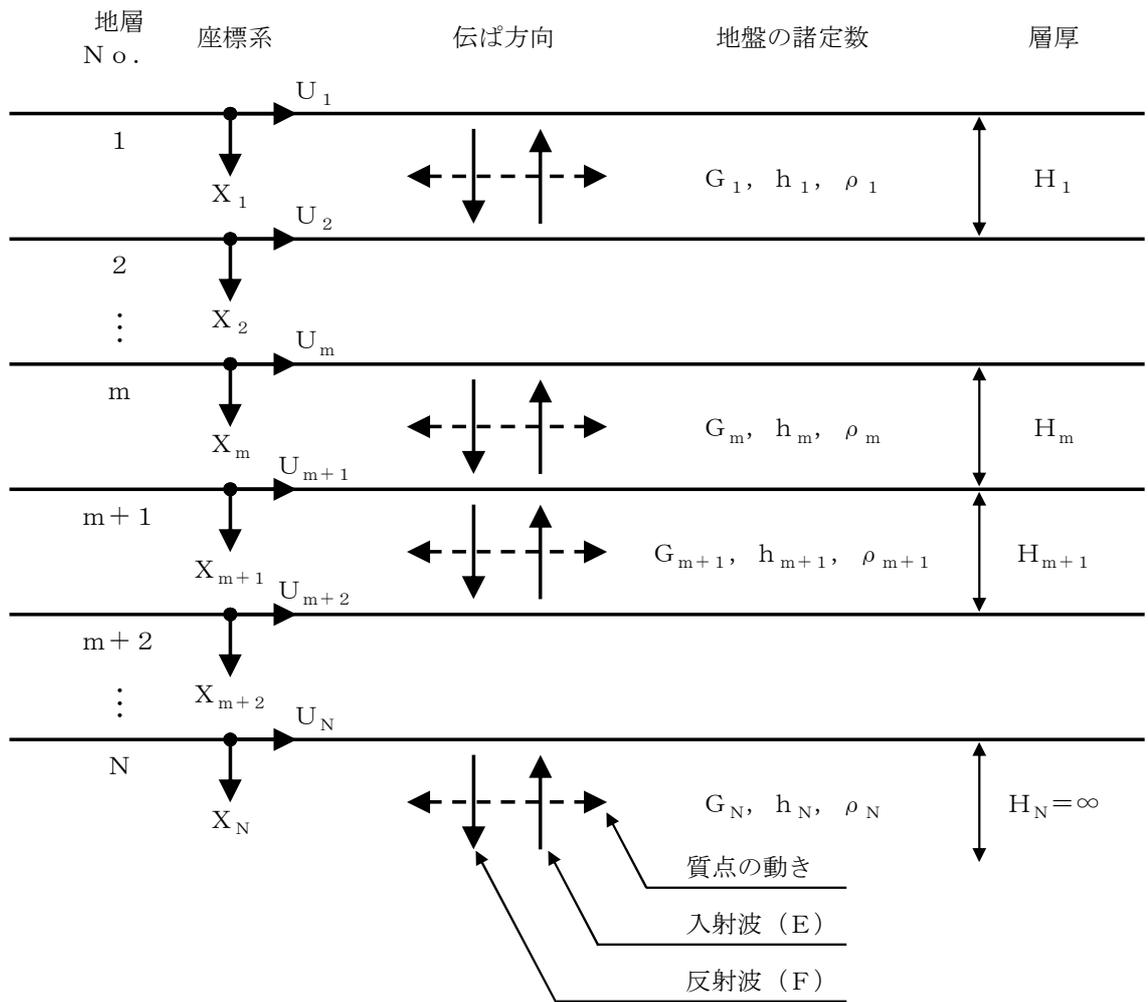
$$U_n = E_n(\omega) + F_n(\omega) \quad (3.5)$$

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
- $\rho_m$  : 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。

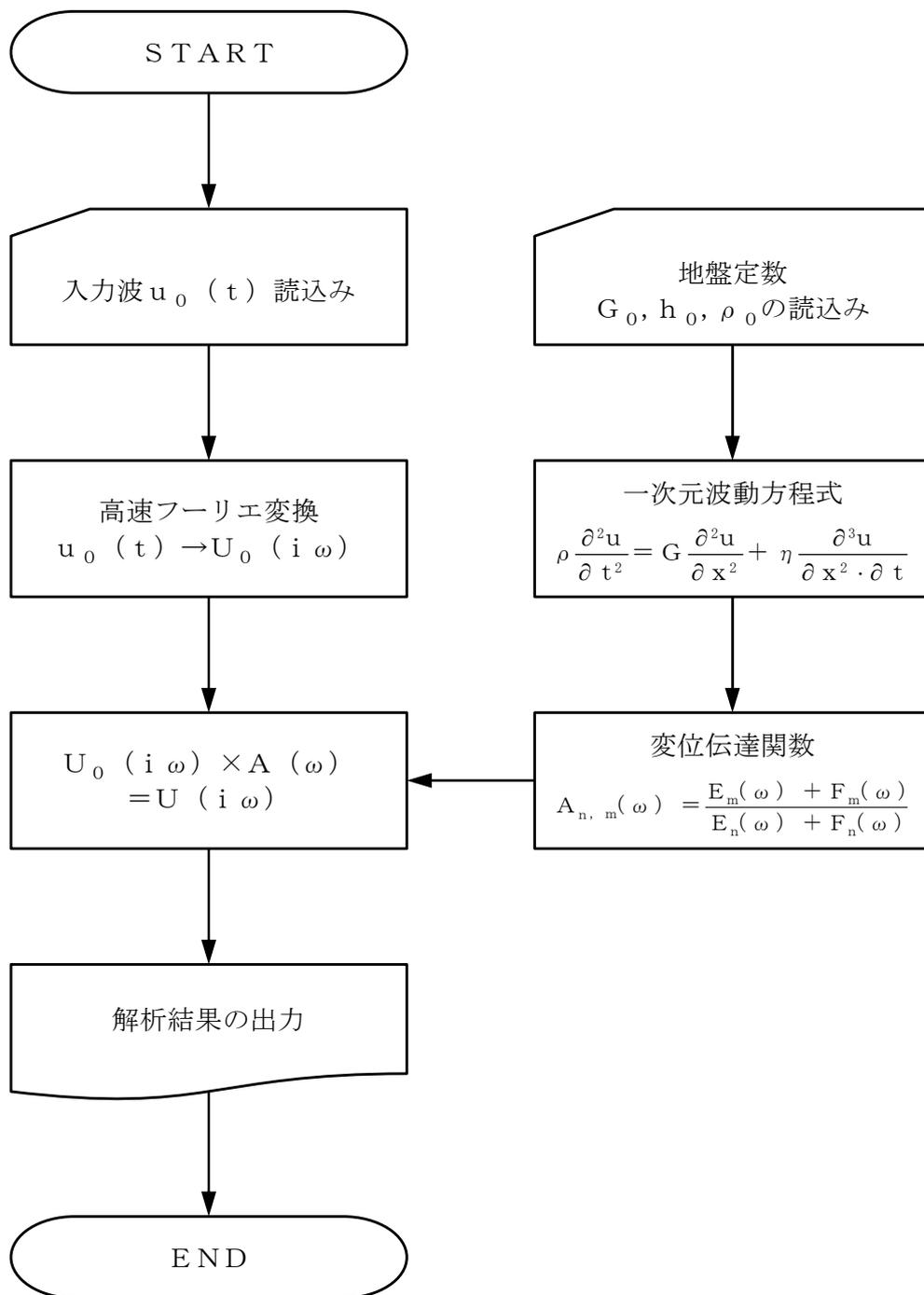


図3-2 解析フローチャート

### 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。

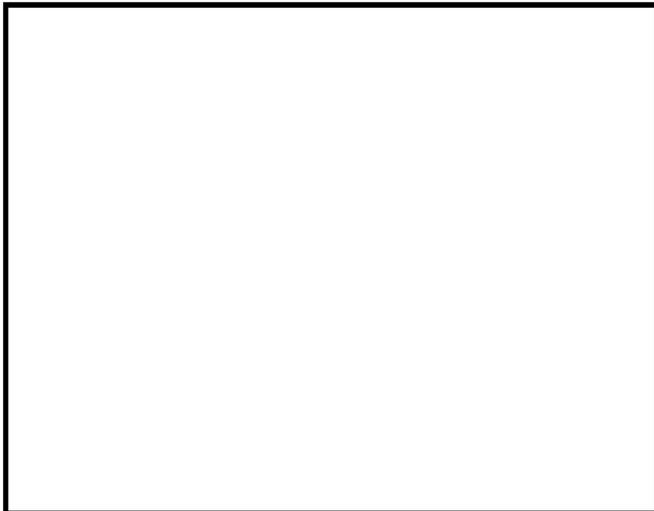
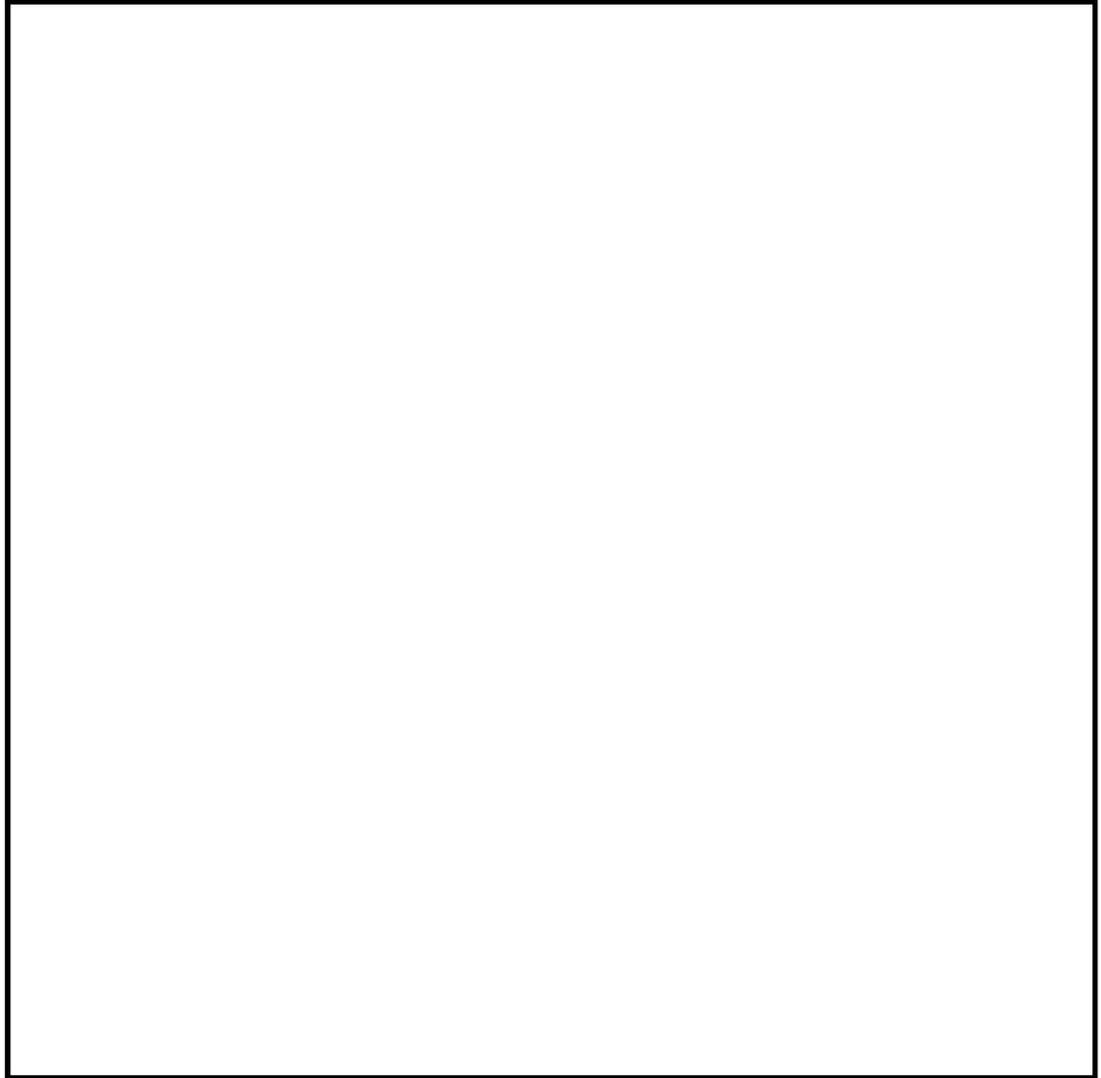


図3-3 検討用地盤モデル

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。

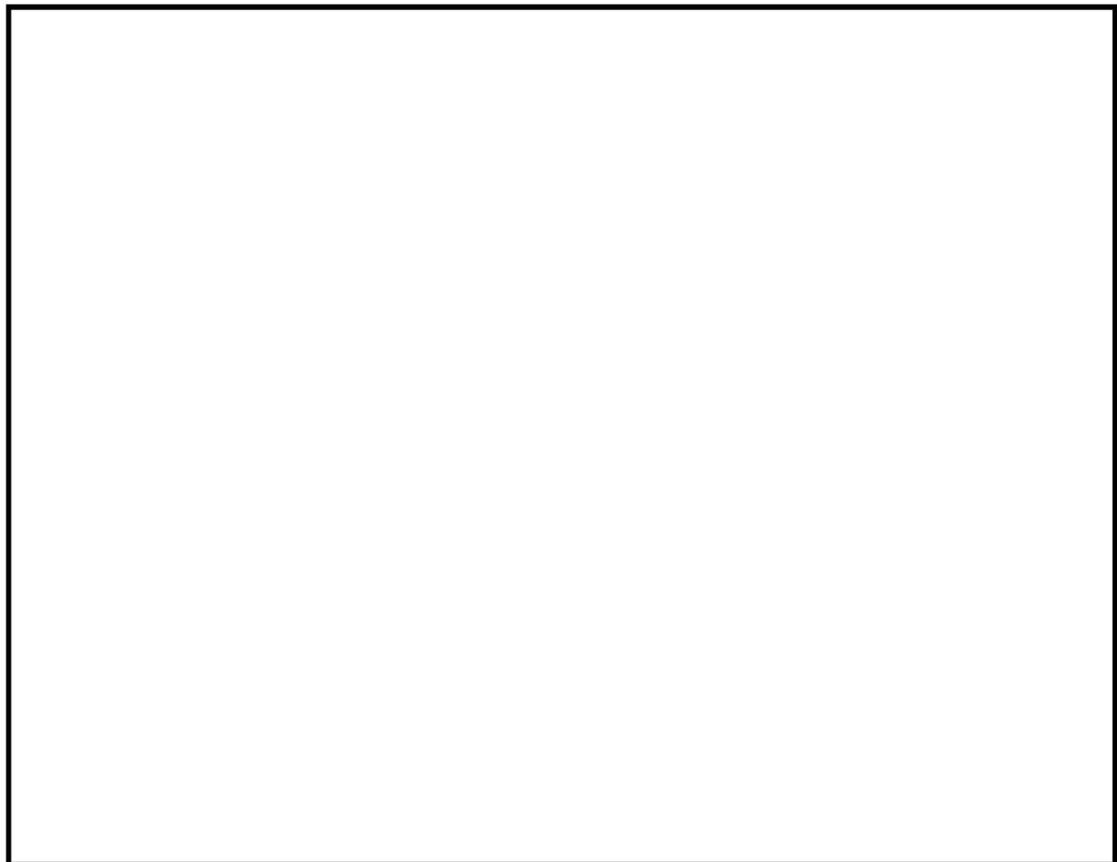


図3-4 伝達関数の理論解との比較

### 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。

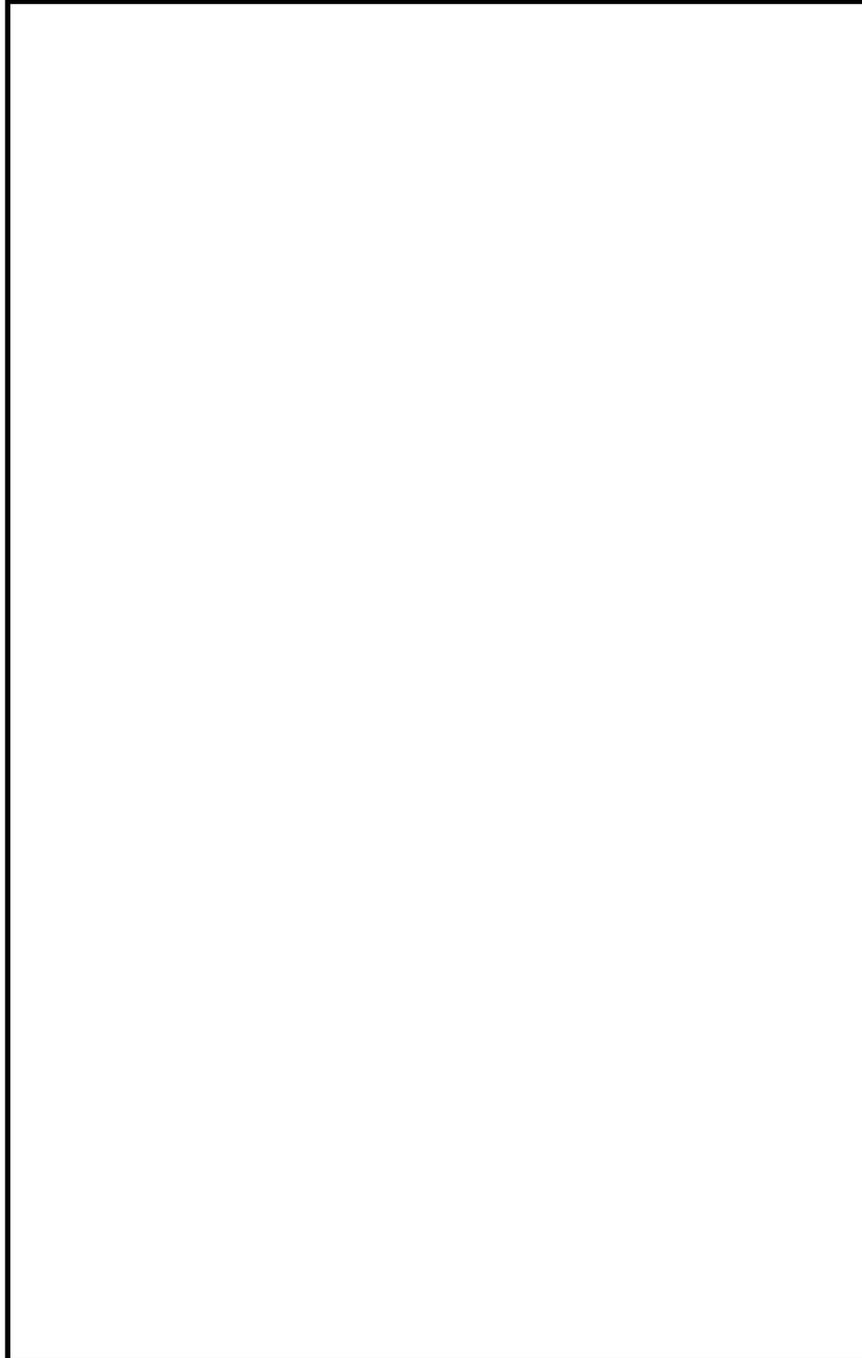
多層地盤を対象に、等価線形解析を実施する。検討用地盤モデルを表 3-1 に、各地層の動的ひずみ依存特性を図 3-5 に示す。図 3-6 に示す入力地震動を [ ] に基準化した地震動を、モデル下端に 2E 波として入力した。なお、解析条件は以下の条件とした。

- ・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



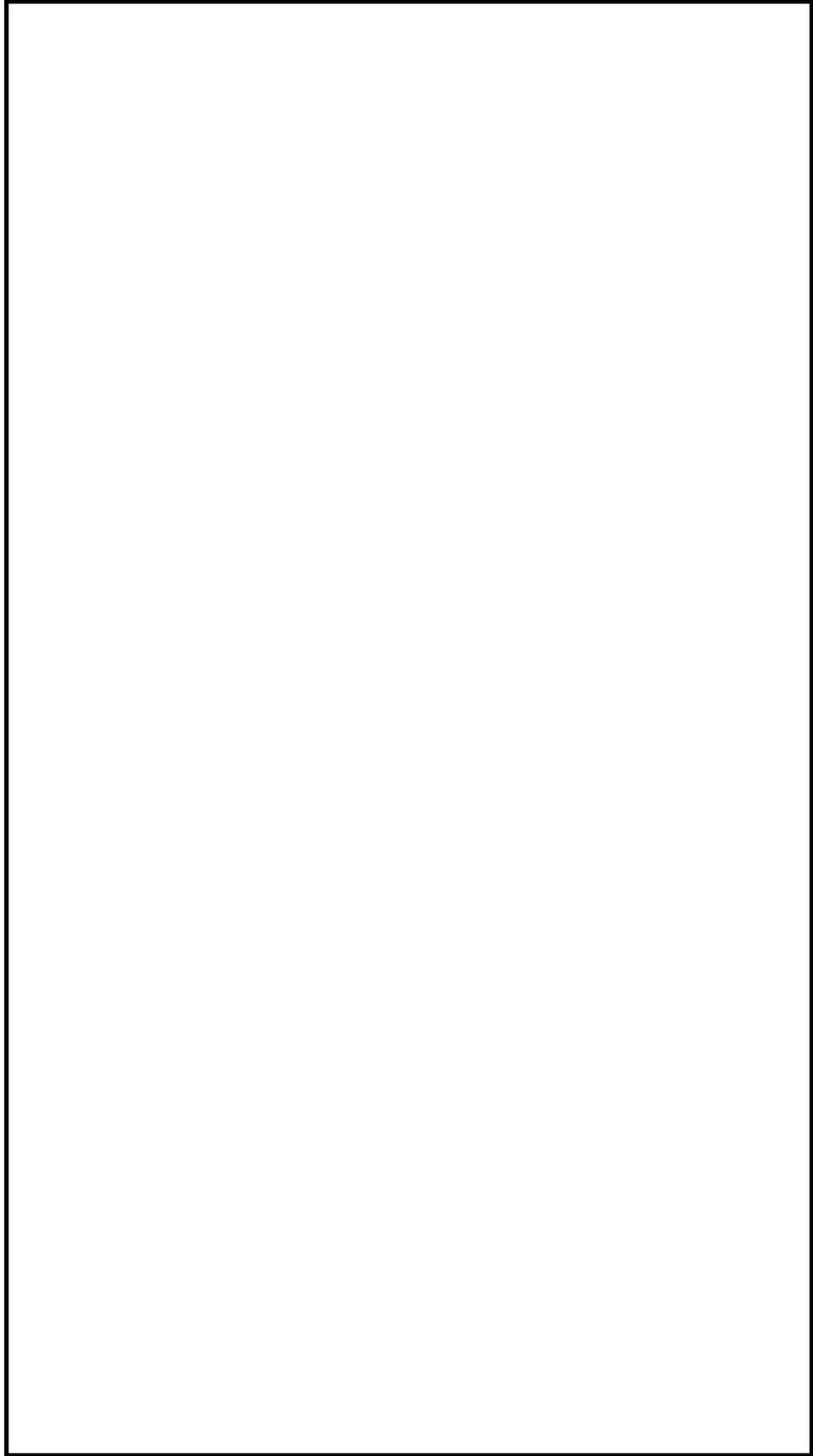


図 3-5 各地層の動的ひずみ依存特性



図 3-6 入力地震動

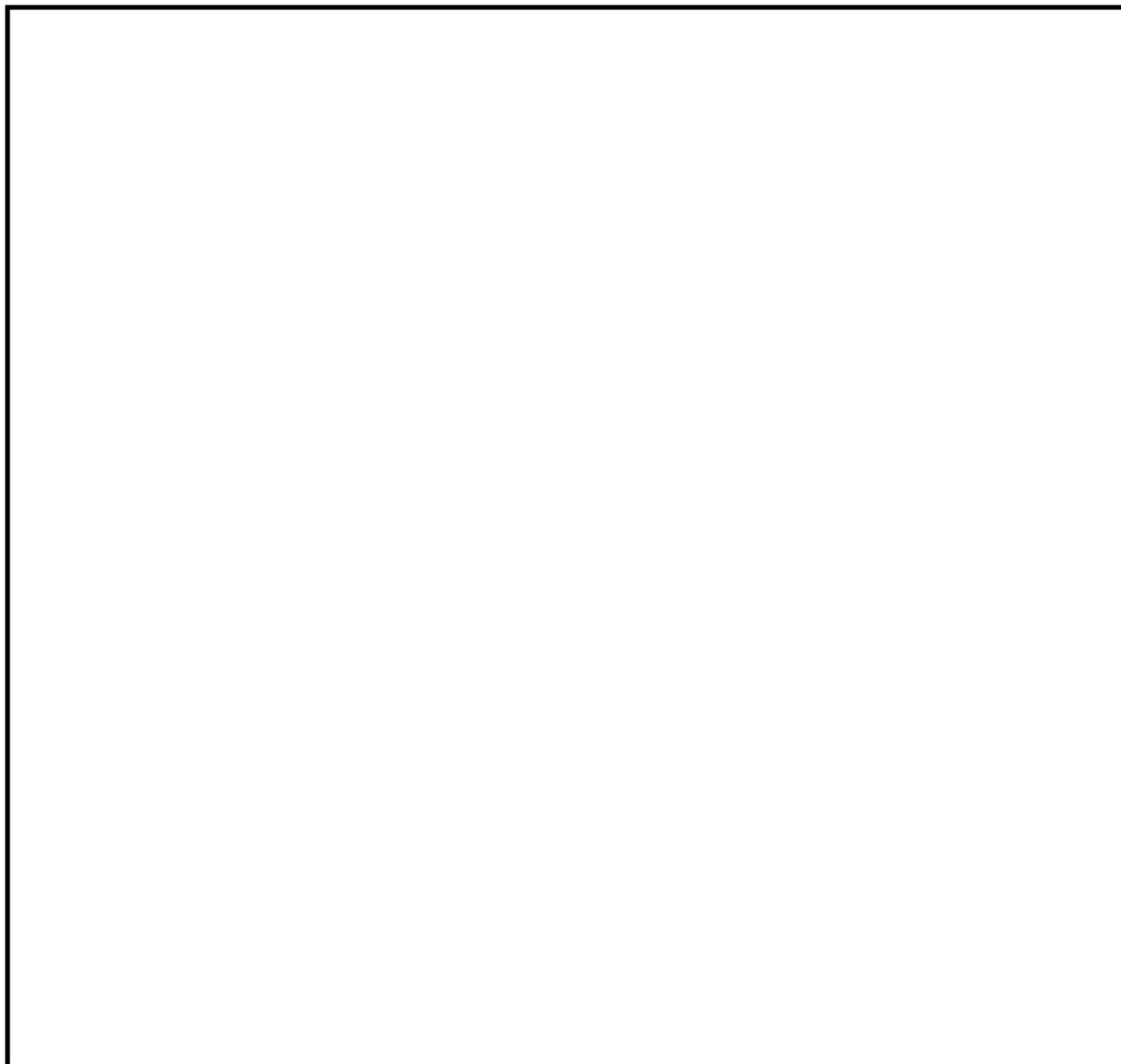


図 3-7 解析結果の比較

表 3-2 解析結果の比較（最大応答加速度）（1/2）

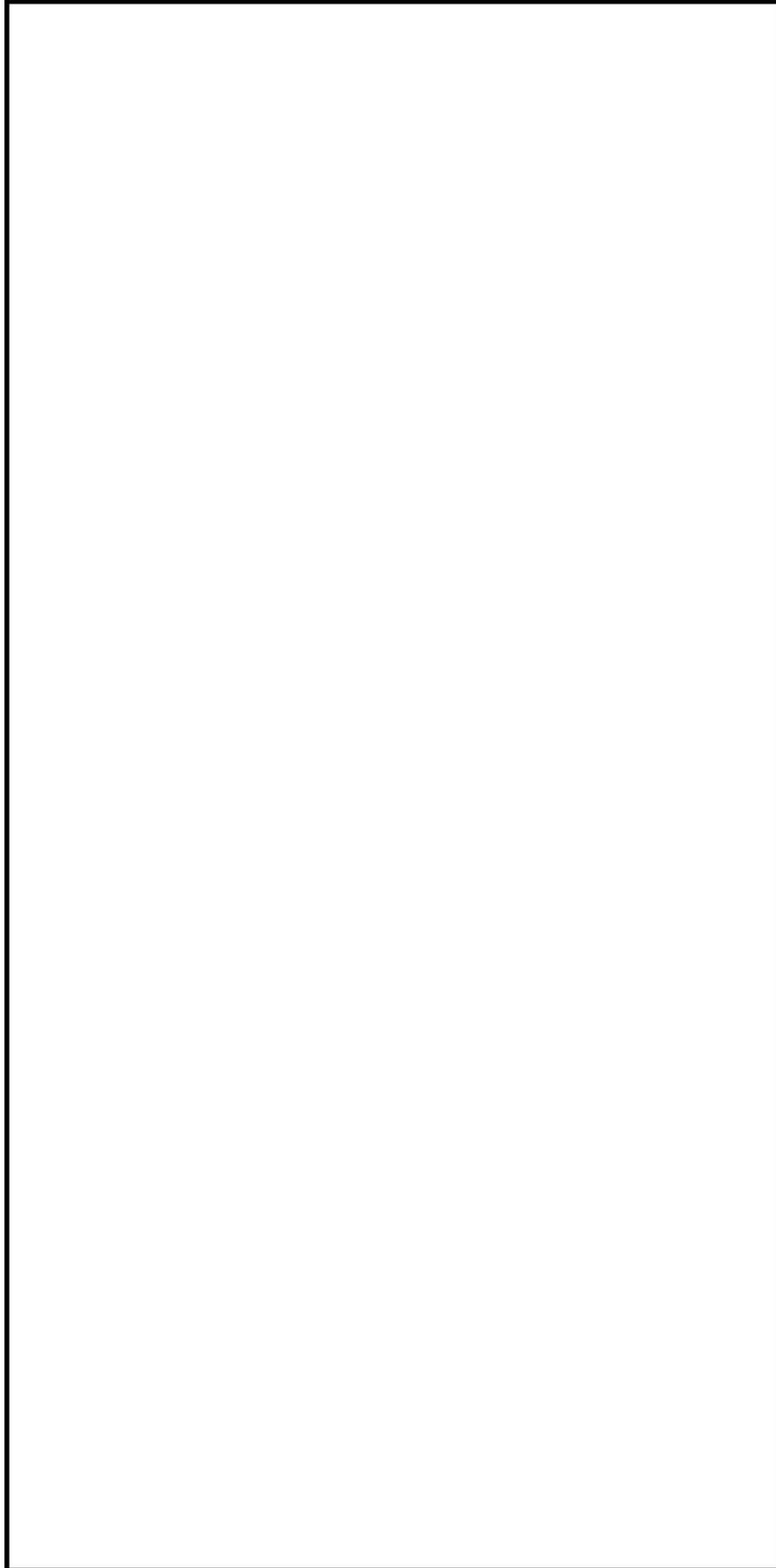
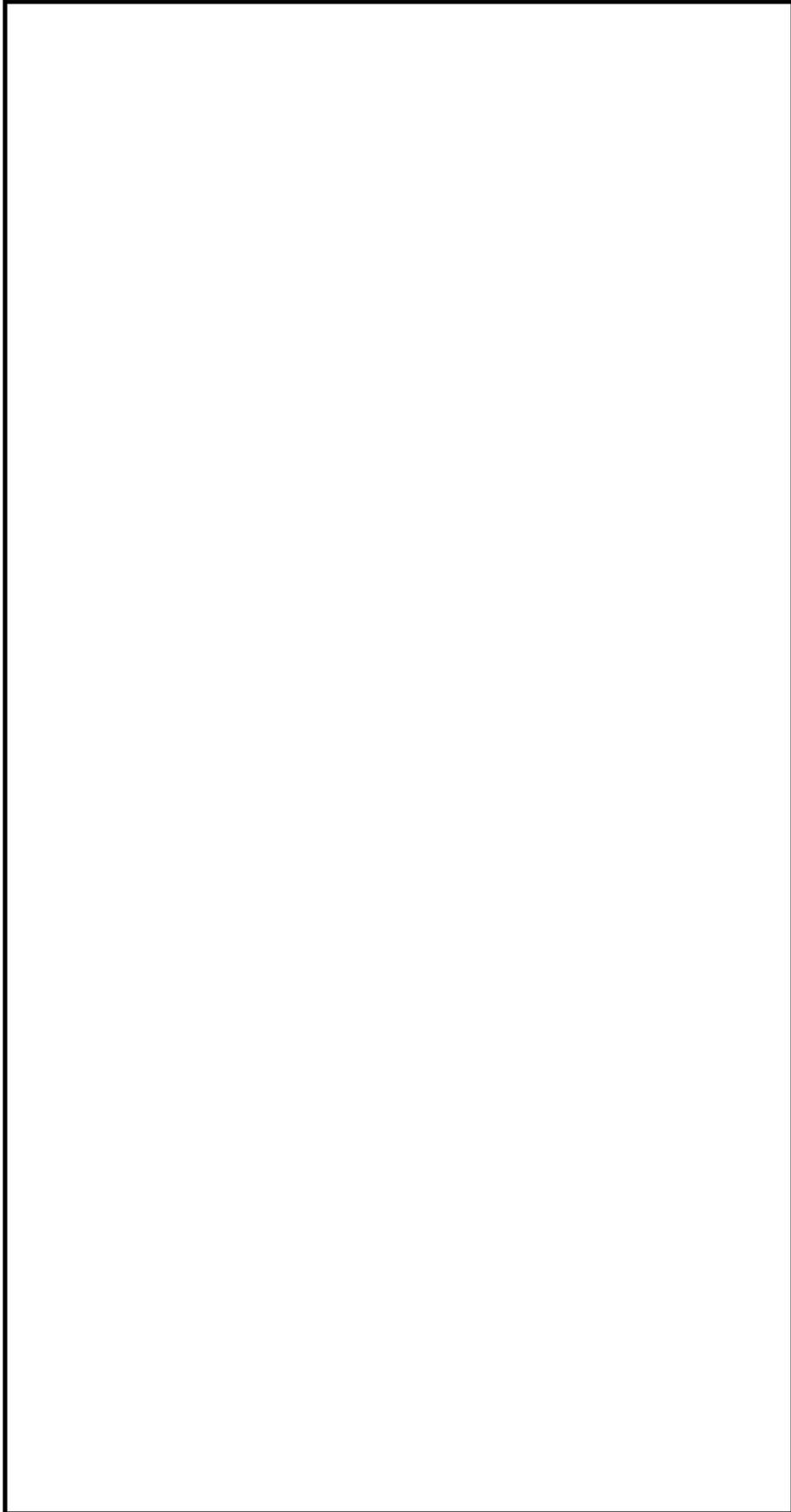


表 3-2 解析結果の比較（最大せん断ひずみ）（2/2）



### 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 20 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-3-別添 2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	Ver. 1.0

## 2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	ST-CROSS
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 <math>S_s</math> 及び弾性設計用地震動 <math>S_d</math> 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><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・理論解との比較</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・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。</li> </ul>

別紙 21 Super Build / SS3

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	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	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。
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p><b>【検証（Verification）】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認（Validation）】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>

### 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、一般建築においては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。

$\delta$  : 鉛直変位, 水平変位

$\theta$  : 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。



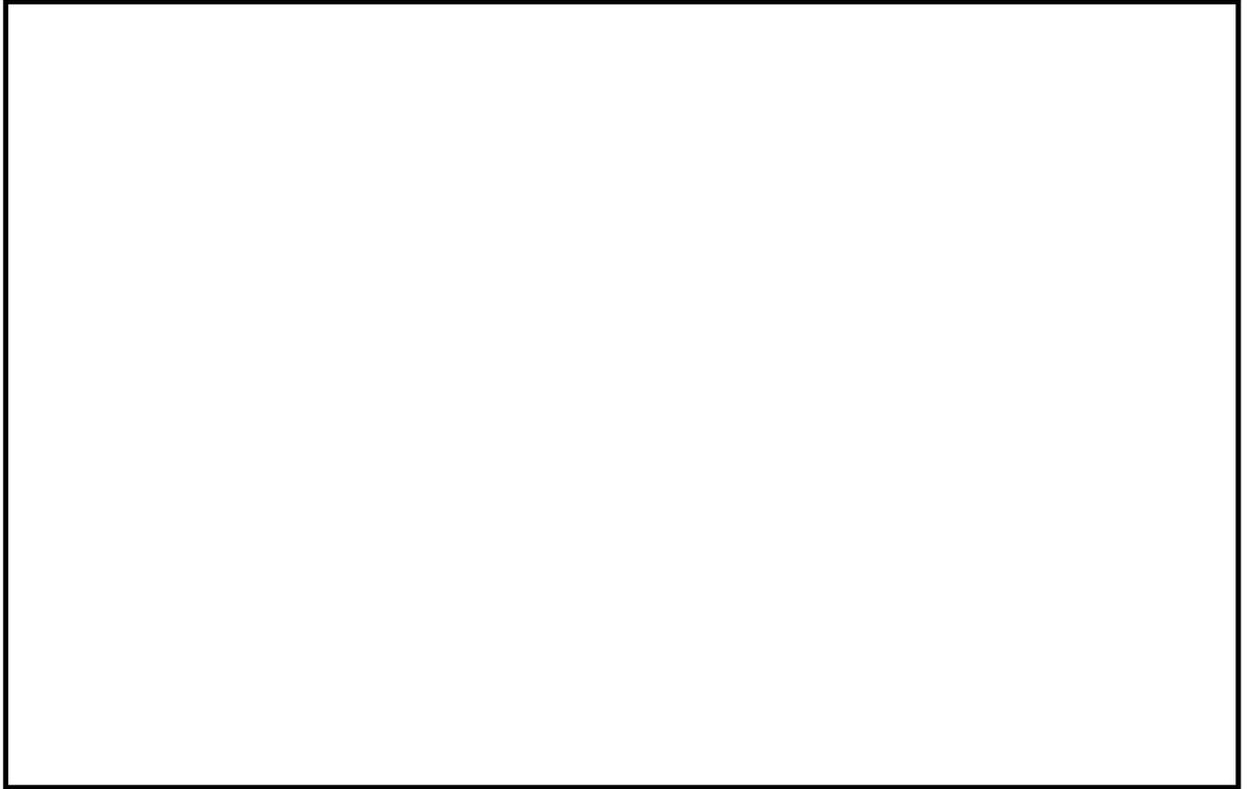
##### (2) はり, 柱, ブレース, 壁柱の荷重－変位関係

「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）

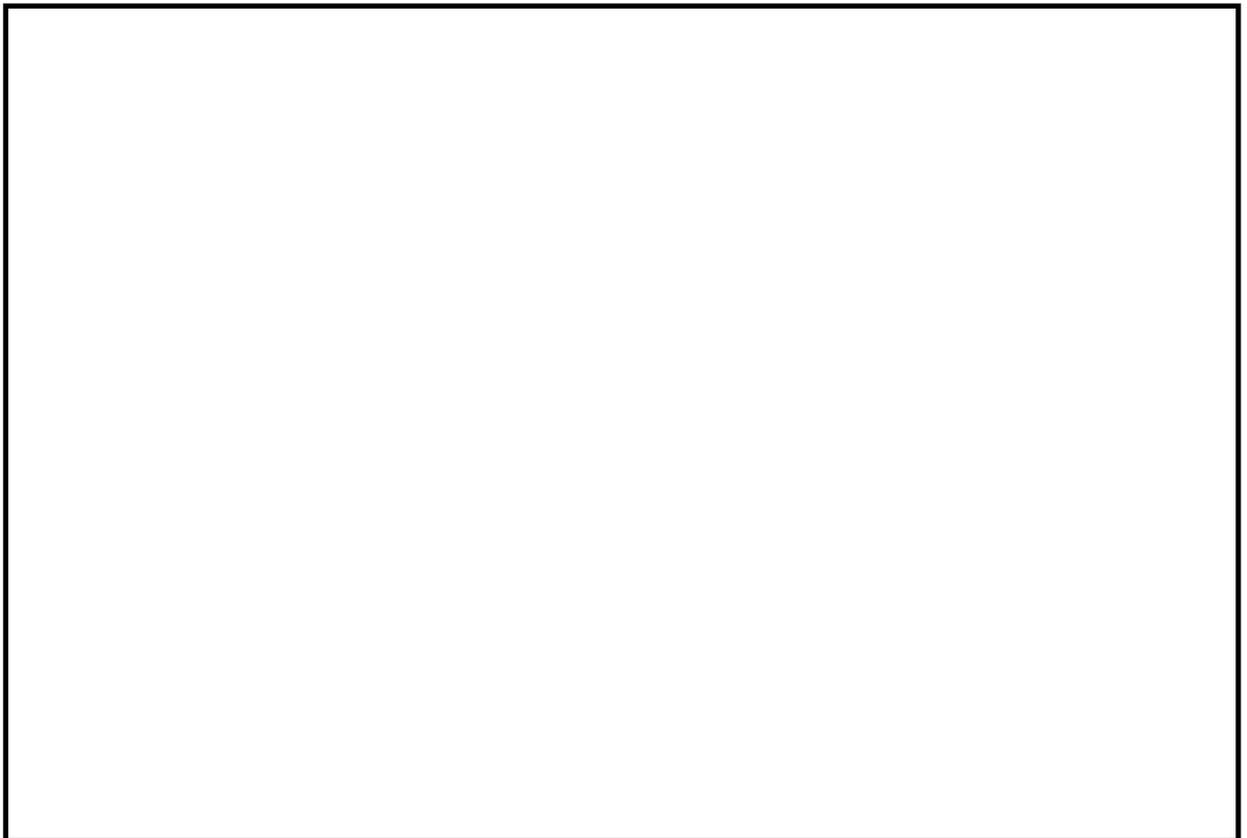
考慮する荷重及び変位の概念図を図 3-2 に示す。x 軸方向の荷重－変位関係は，式 (3.1) のとおり算出する。

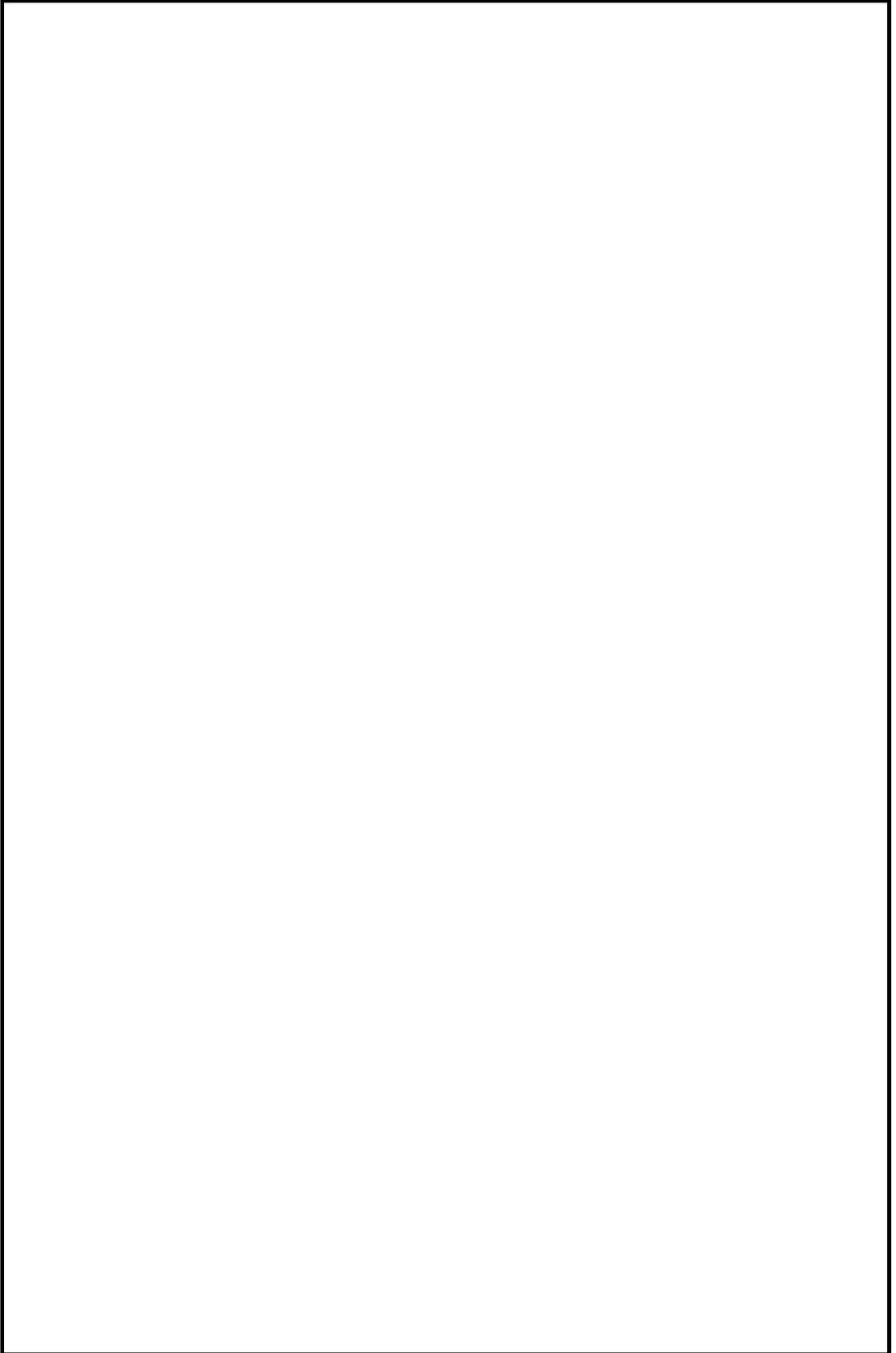




b.  $x - z$  面の荷重－変位関係（せん断, 曲げモーメント）

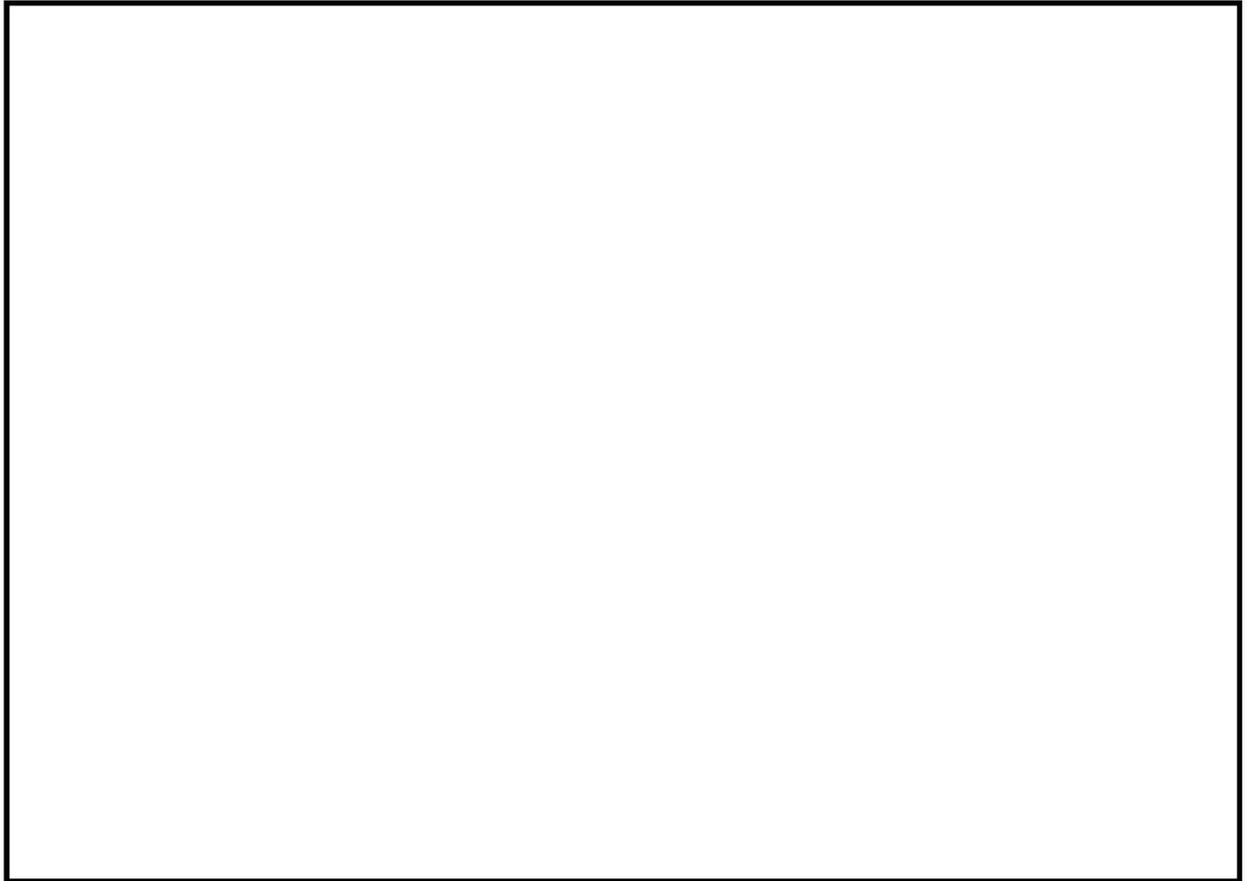
考慮する荷重及び変位の概念図を図 3-3 に示す。 $x$  軸方向の荷重－変位関係は、式 (3.2) のとおり算出する。







c.  $x - y$  面の荷重-変位関係 (せん断, 曲げモーメント)

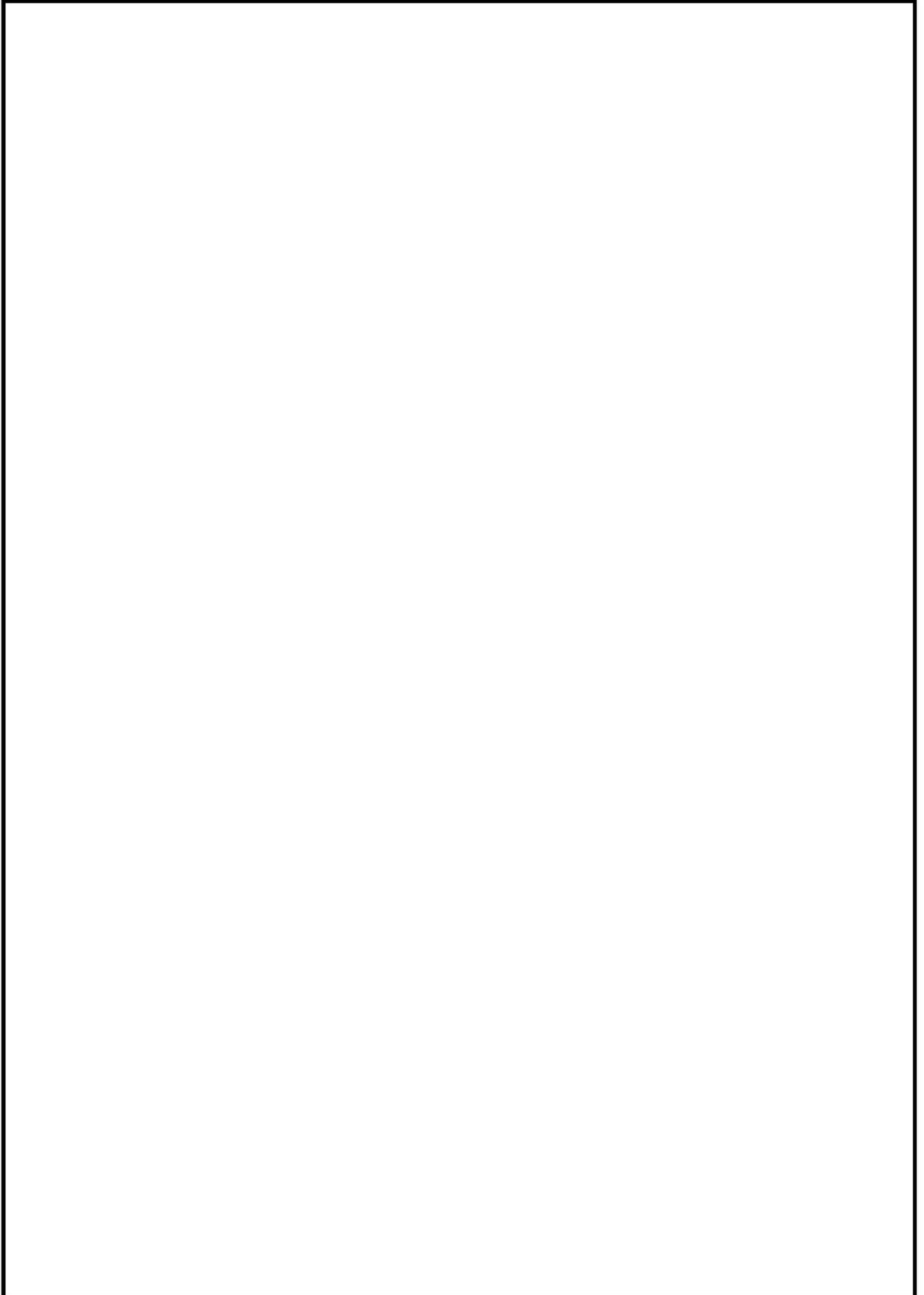


(3) 支点



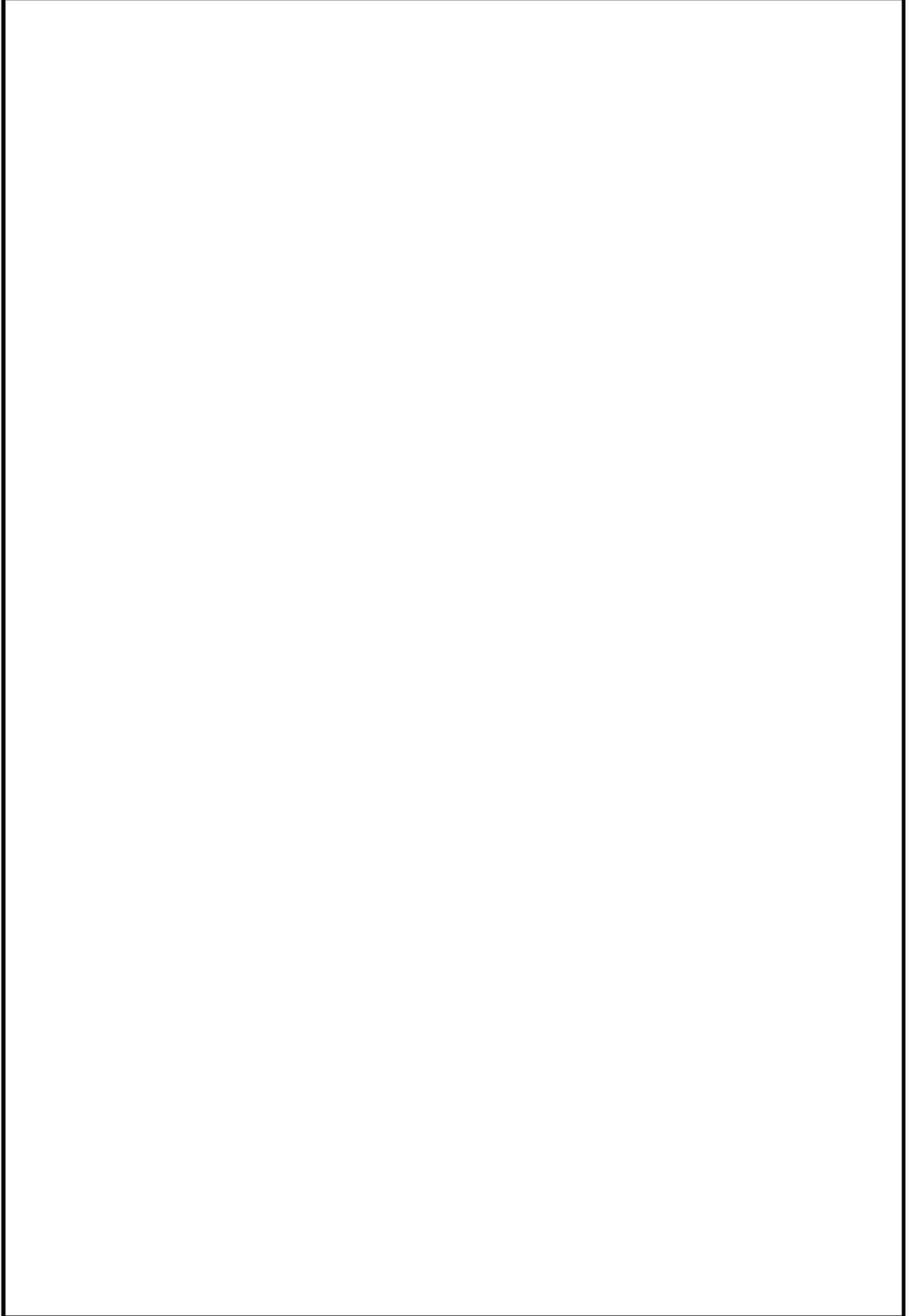
### 3.3.2 全体剛性マトリクス

#### (1) 全体座標系変換



(2) 剛床変位変換

K7 ① V-3 別紙 R0



(3) 全体剛性マトリクスの組み立て

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。

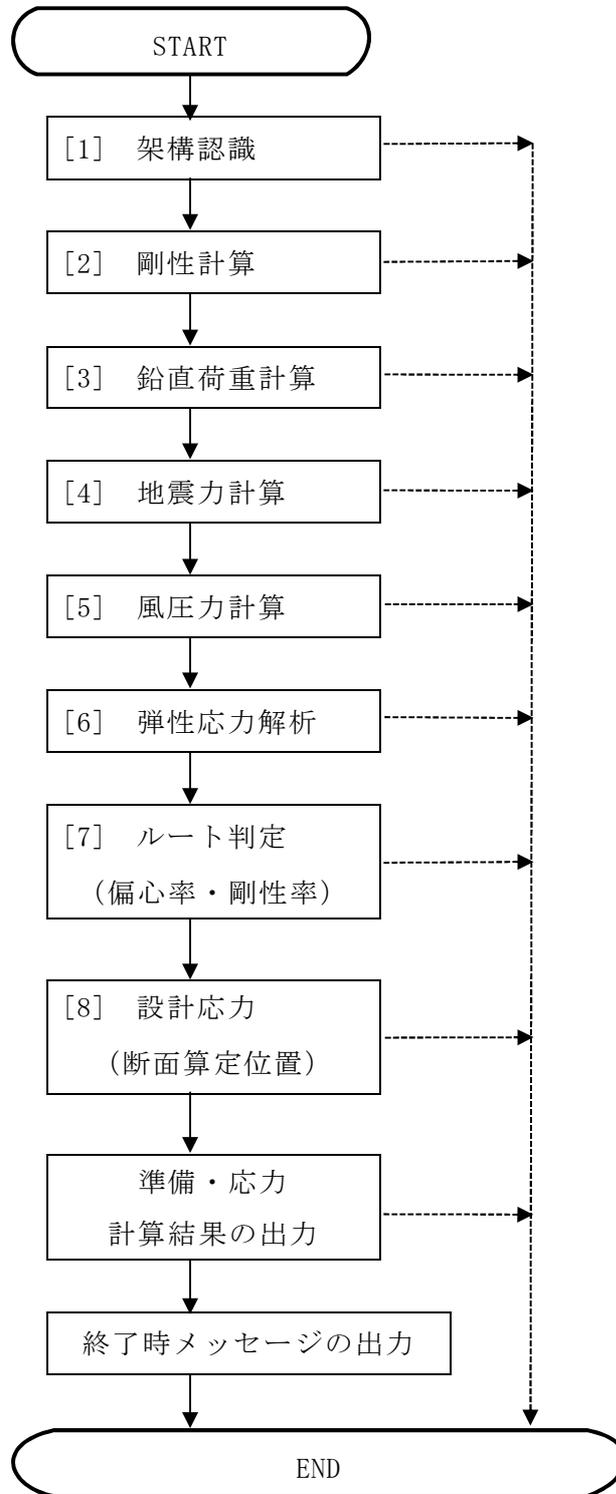


図 4-1 解析フローチャート

## 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 [ ] 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。

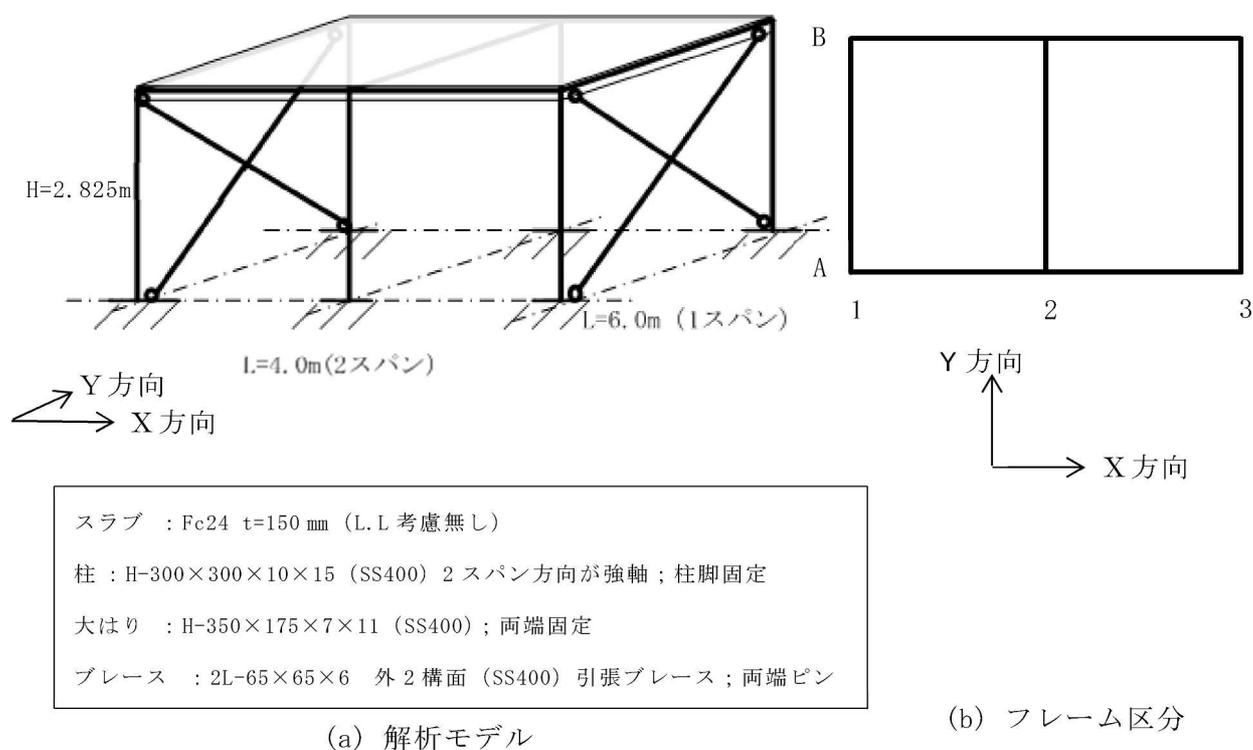


図5-1 解析モデル図

### 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。

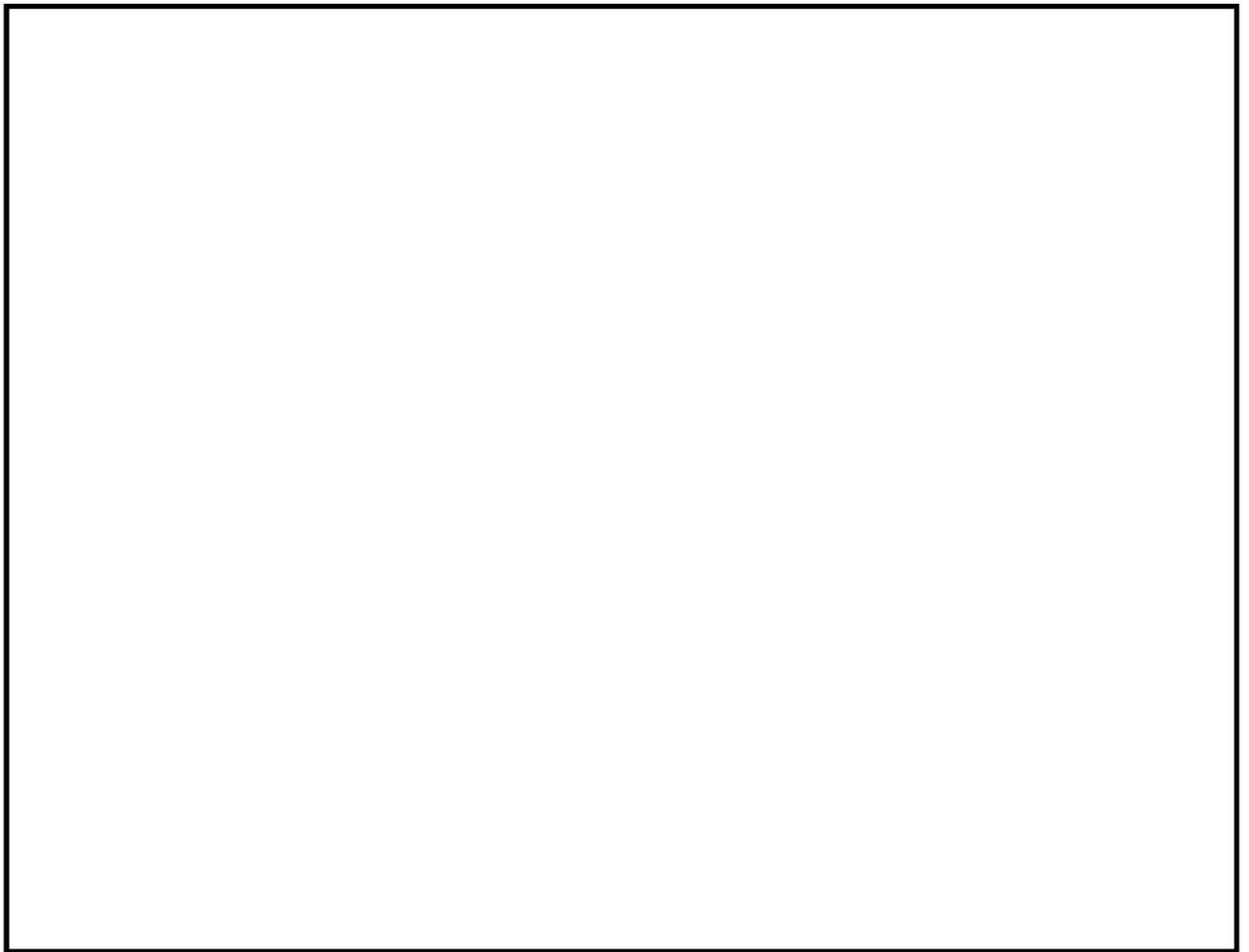


図 5-2 応力図凡例

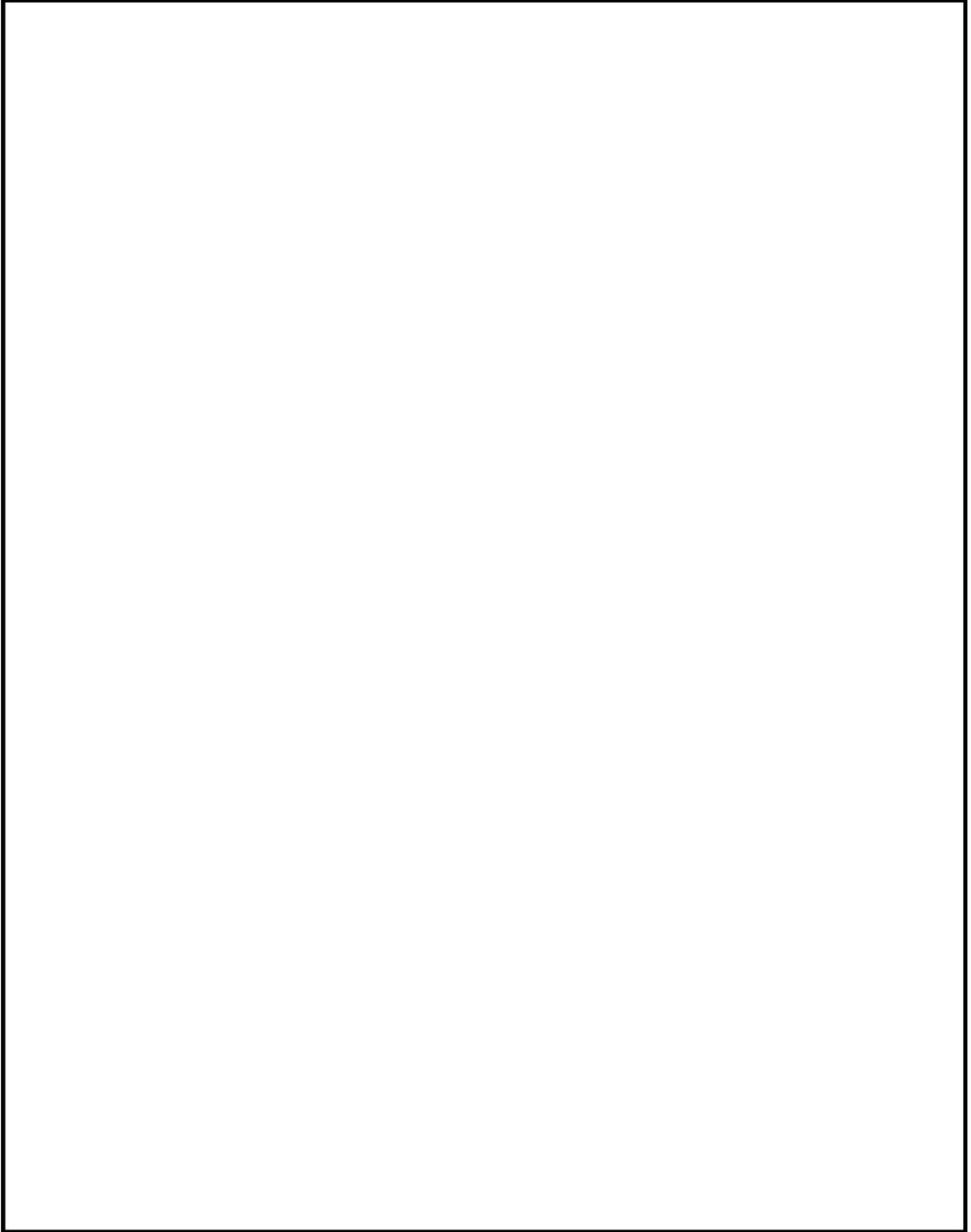


図 5-3 曲げモーメント図 (長期荷重時・A フレーム)  
(単位 :  $\text{kN} \cdot \text{m}$ )

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-3 別紙 R0

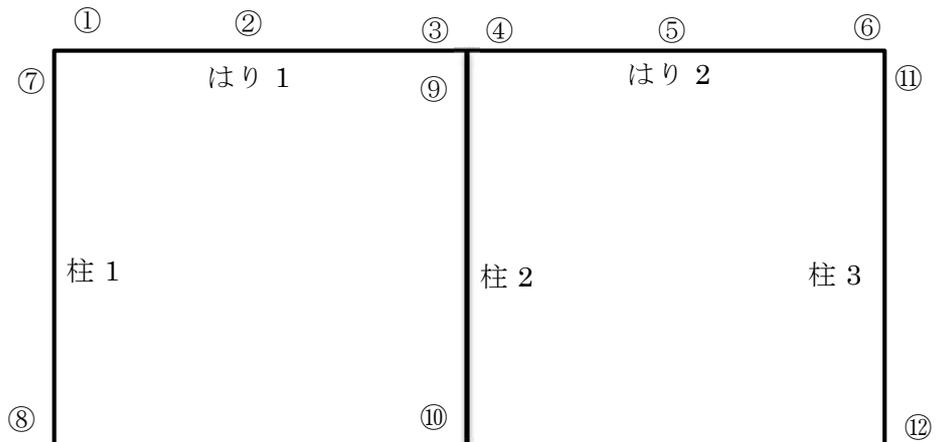


図 5-4 着目位置図  
(長期荷重時・A フレーム・曲げモーメント)

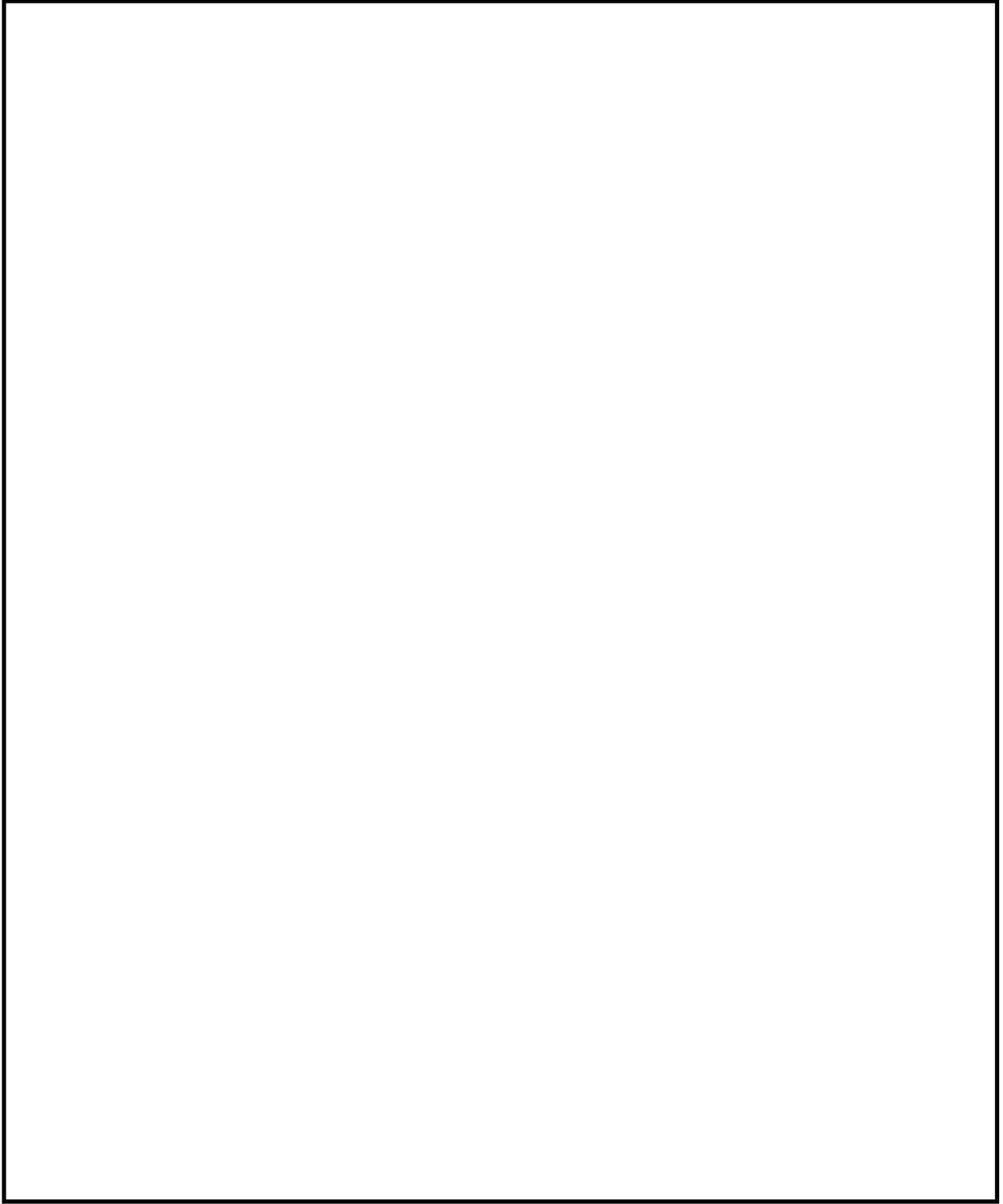


図 5-5 曲げモーメント図 (長期荷重時・1 フレーム)  
(単位 : kN・m)

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

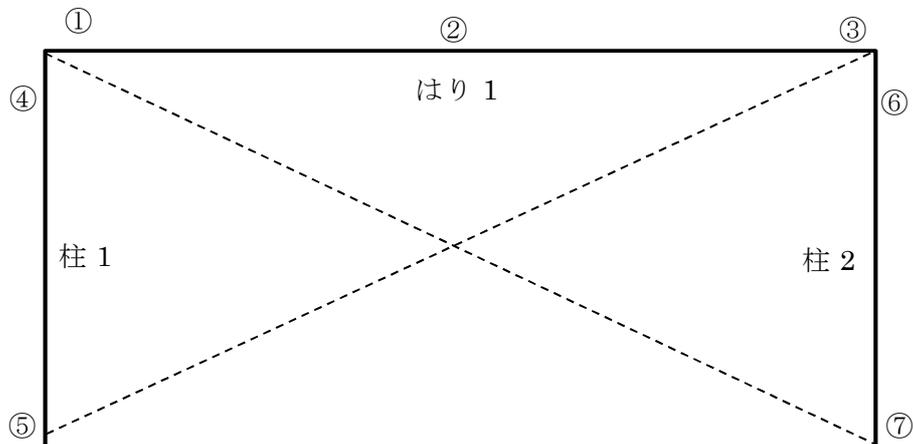


図 5-6 着目位置図  
 (長期荷重時・1 フレーム・曲げモーメント)

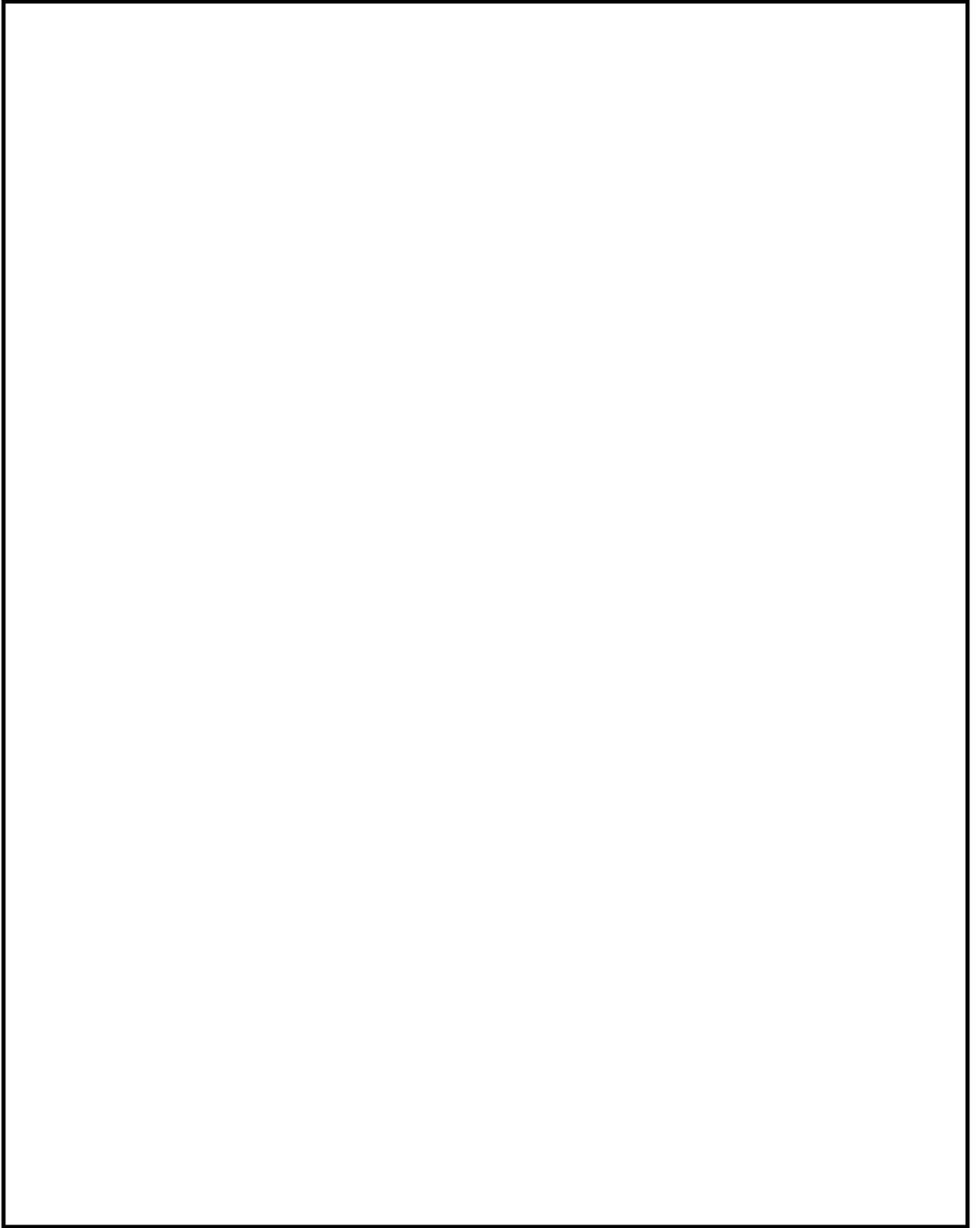


図 5-7 せん断力図 (長期荷重時・A フレーム)  
(単位 : kN)

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

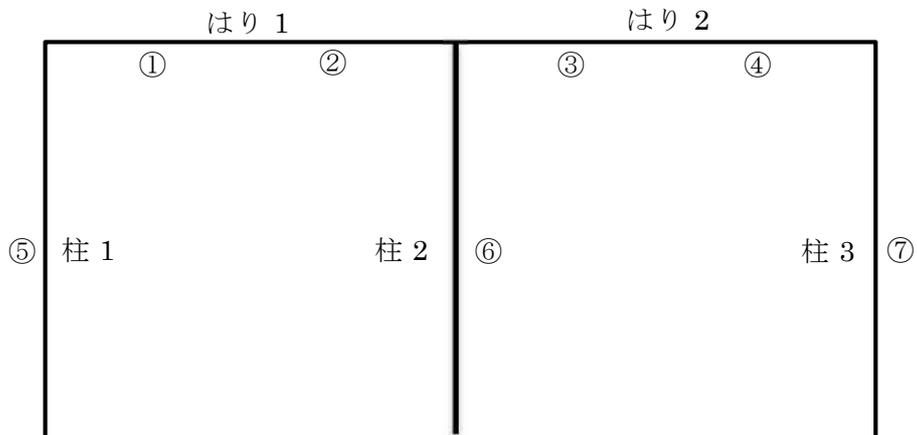


図 5-8 着目位置図  
(長期荷重時・A フレーム・せん断力図)

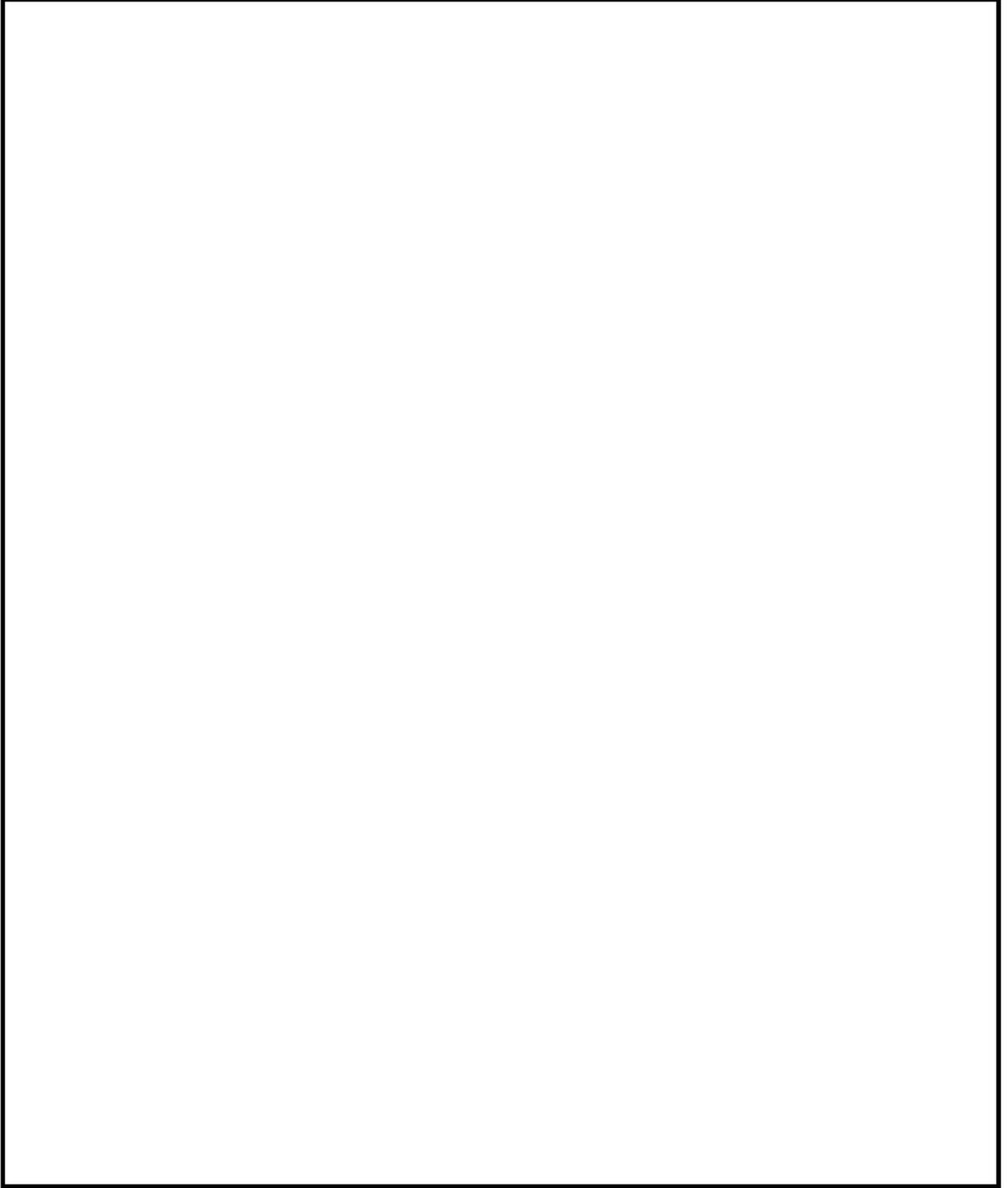


図 5-9 せん断力図（長期荷重時・1 フレーム）  
（単位：kN）

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

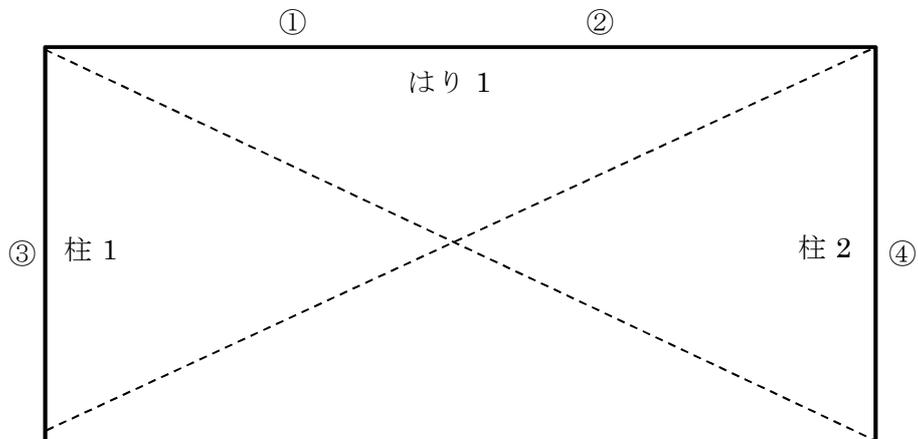


図 5-10 着目位置図  
(長期荷重時・1 フレーム・せん断力)

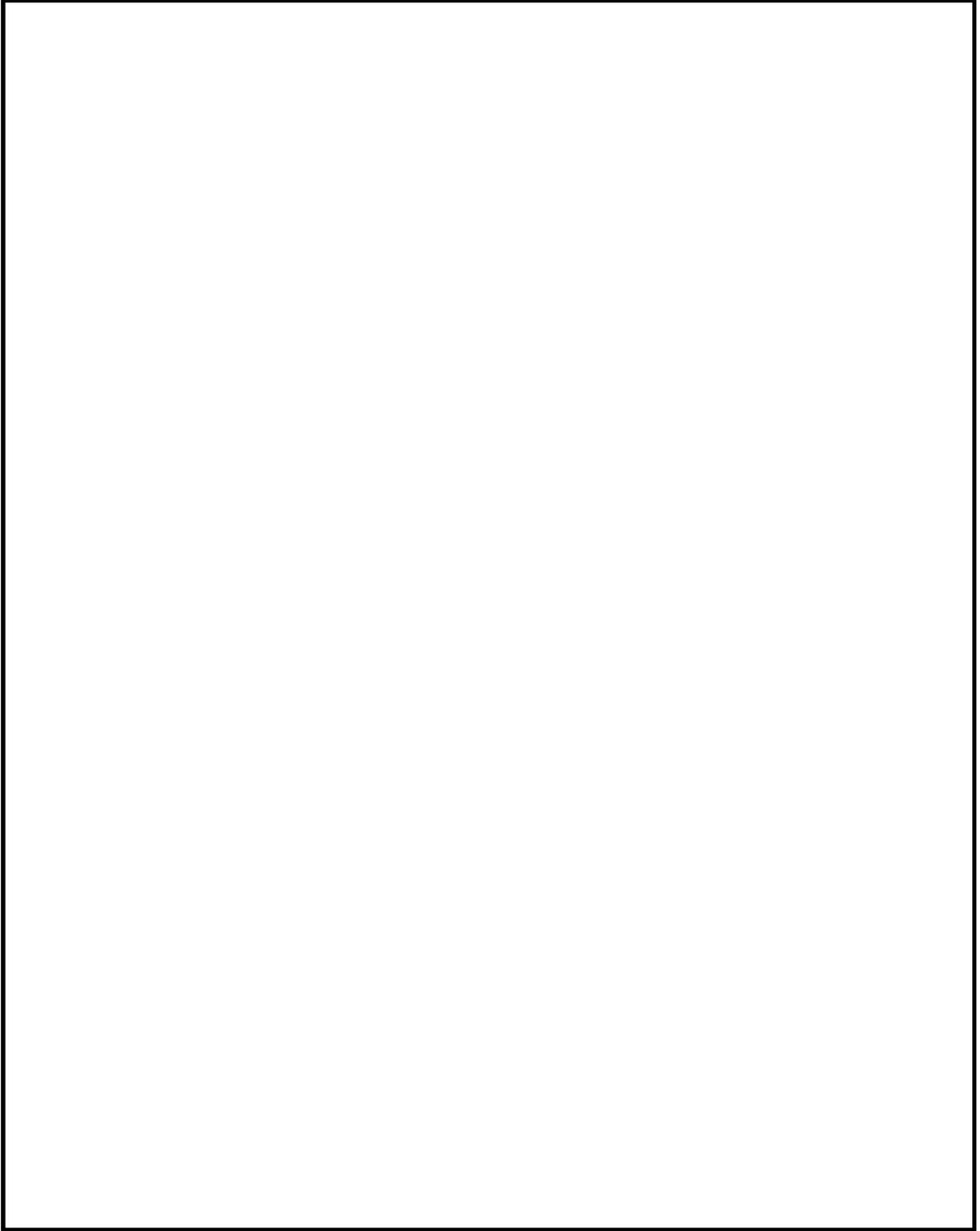


図 5-11 軸力図 (長期荷重時・A フレーム)  
(単位 : kN)

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

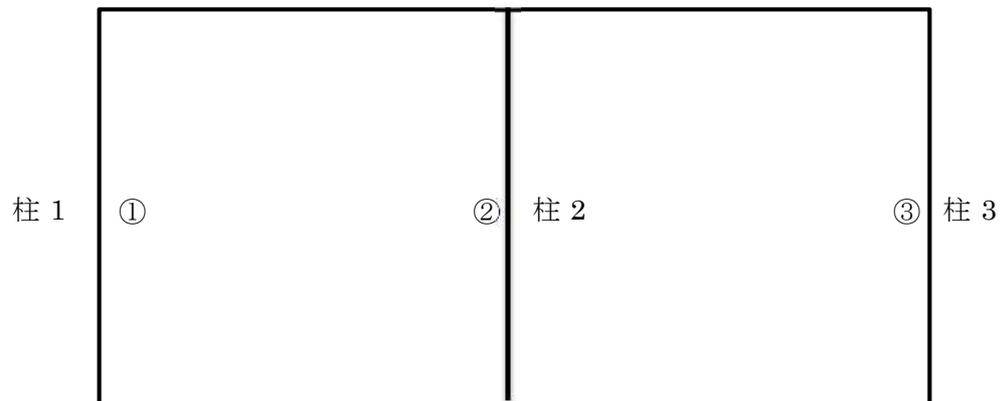


図 5-12 着目位置図  
(長期荷重時・A フレーム・軸力)

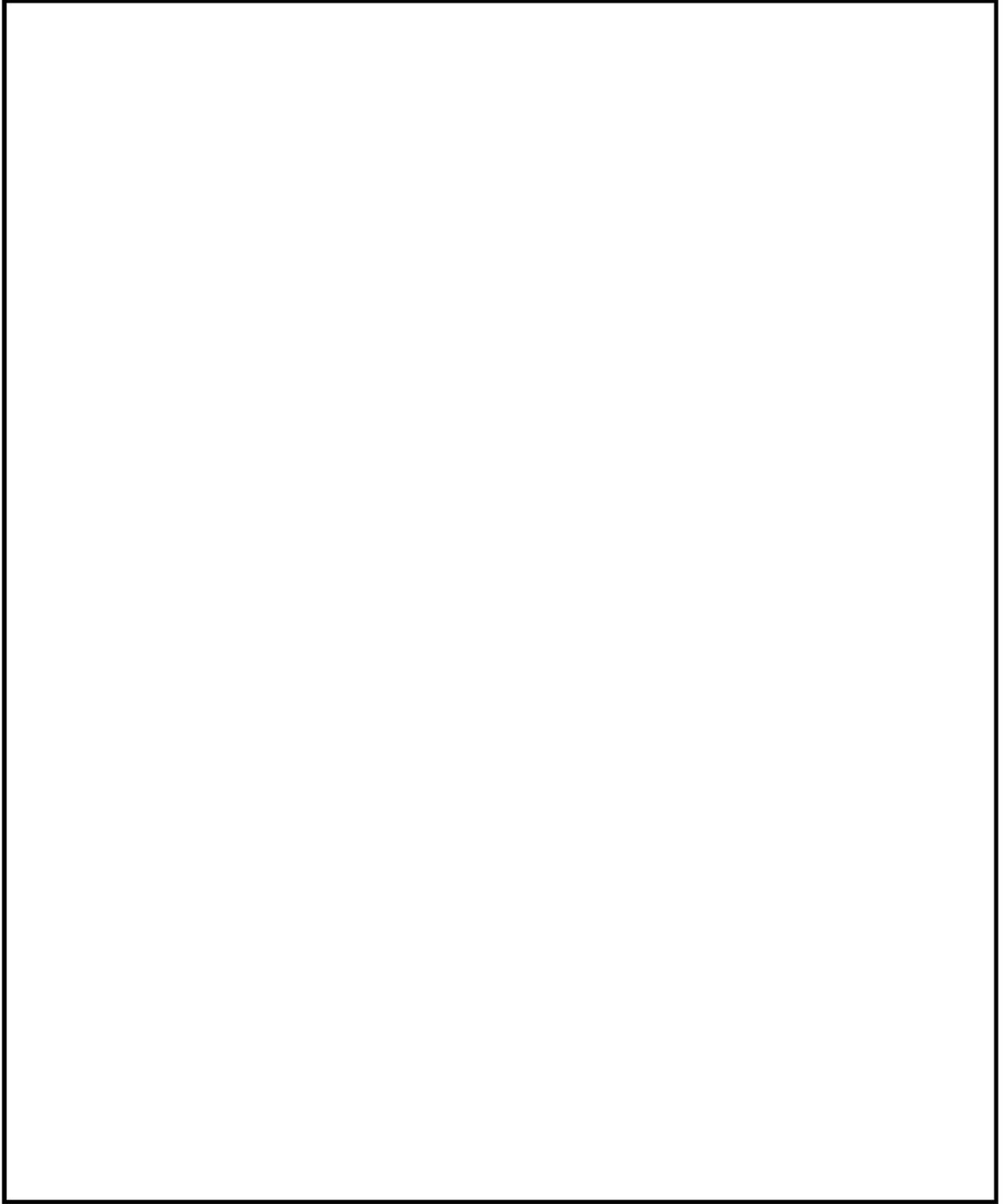


図 5-13 軸力図 (長期荷重時・1 フレーム)  
(単位 : kN)

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	-

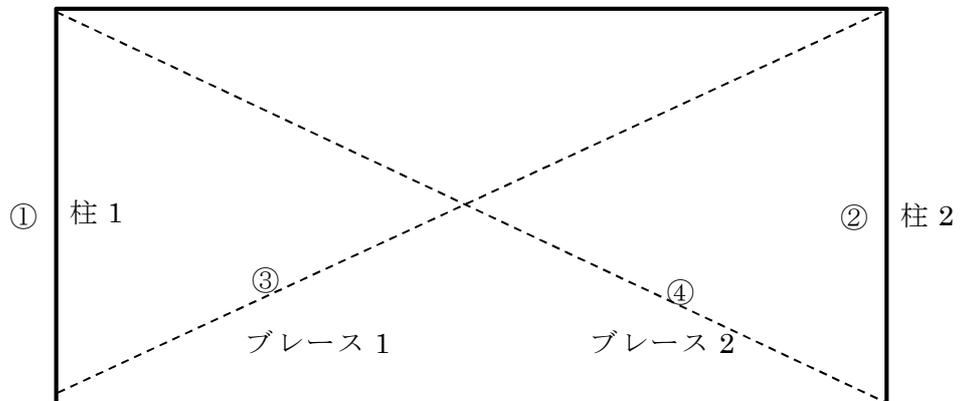


図 5-14 着目位置図  
(長期荷重時・1 フレーム・軸力)

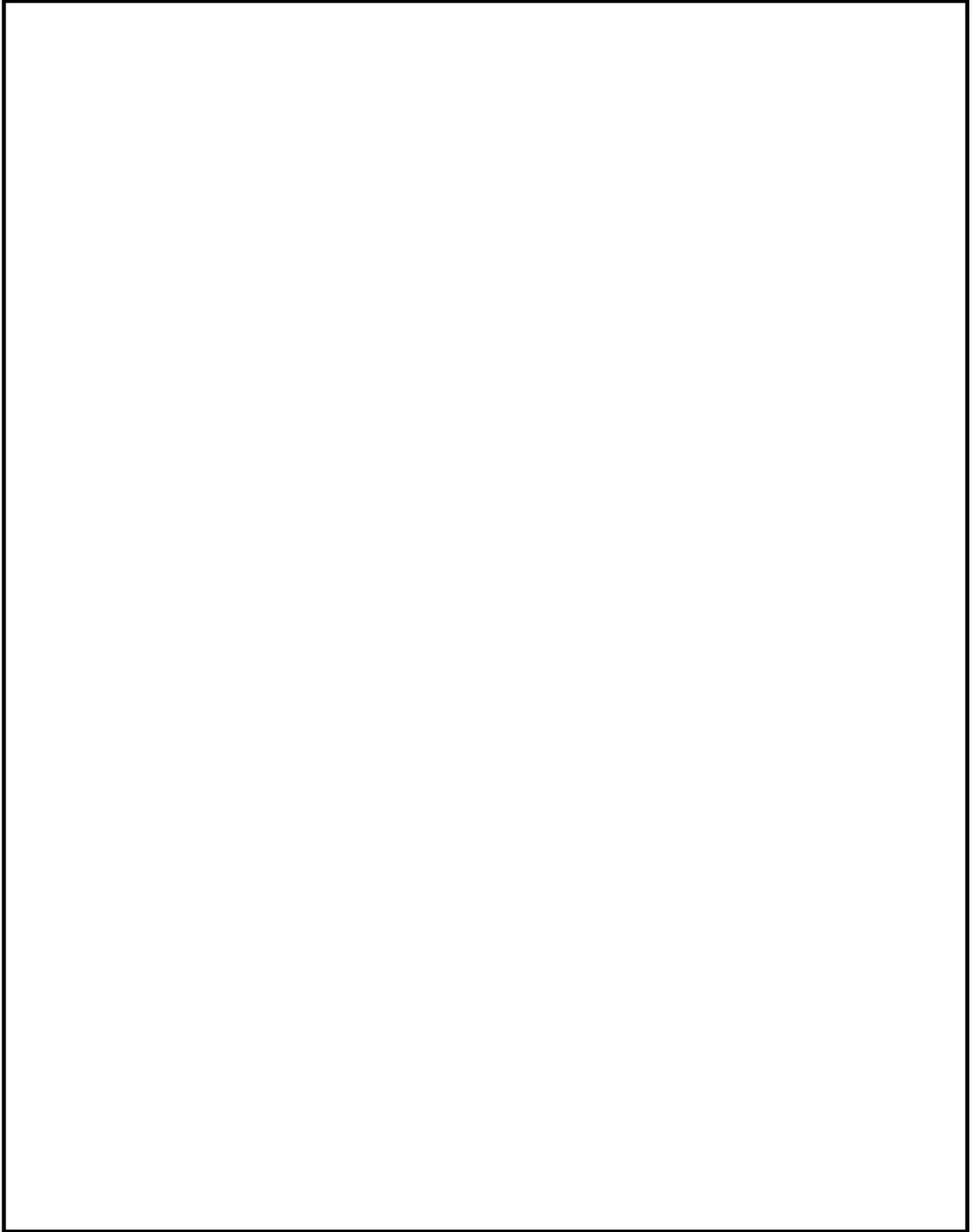


図 5-15 曲げモーメント図 (水平荷重時・X方向正加振・A フレーム)  
(単位 : kN・m)

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

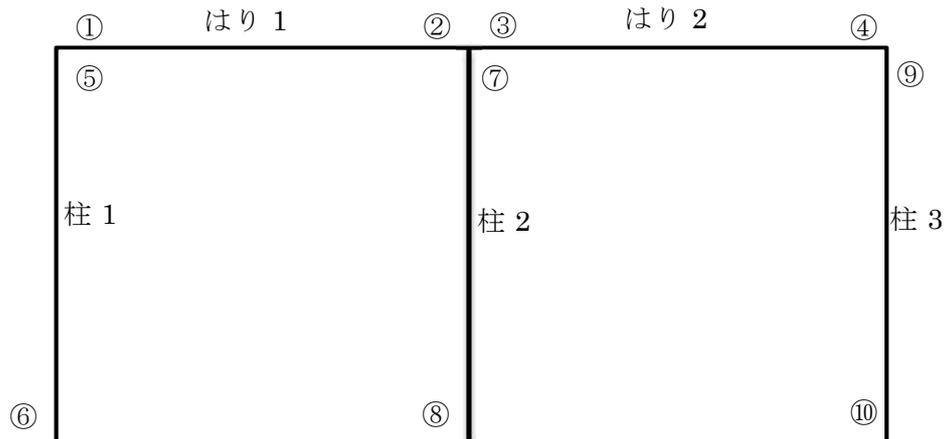


図 5-16 着目位置図  
(水平荷重時・X方向正加振・Aフレーム・曲げモーメント)

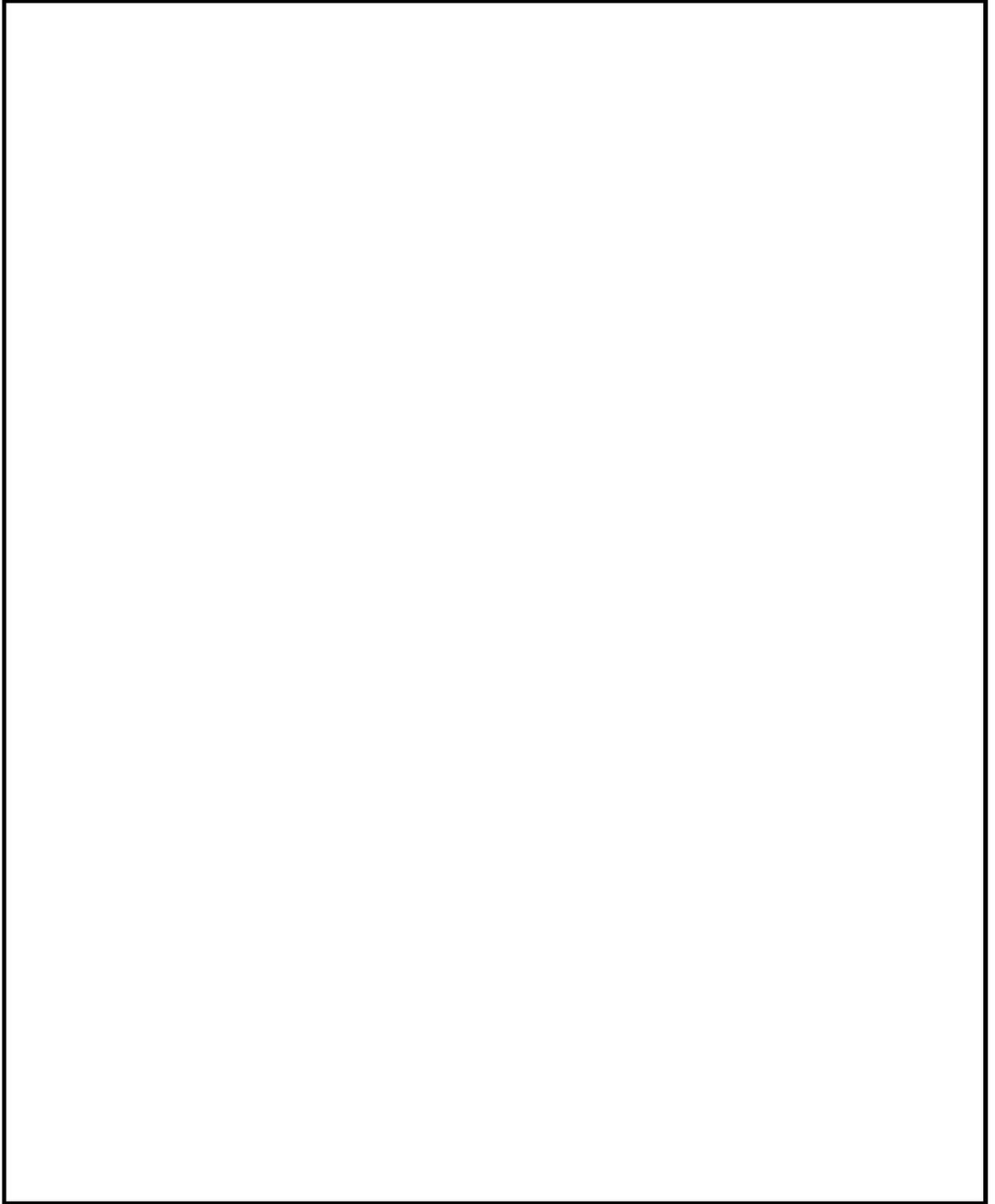


図 5-17 曲げモーメント図 (水平荷重時・Y方向正加振・1 フレーム)  
(単位 : kN・m)

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

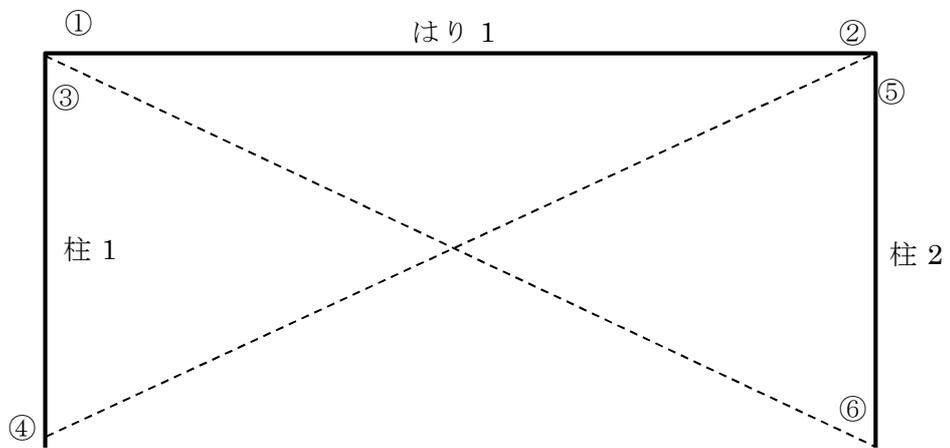


図 5-18 着目位置図  
 (水平荷重時・Y方向正加振・1フレーム・曲げモーメント)

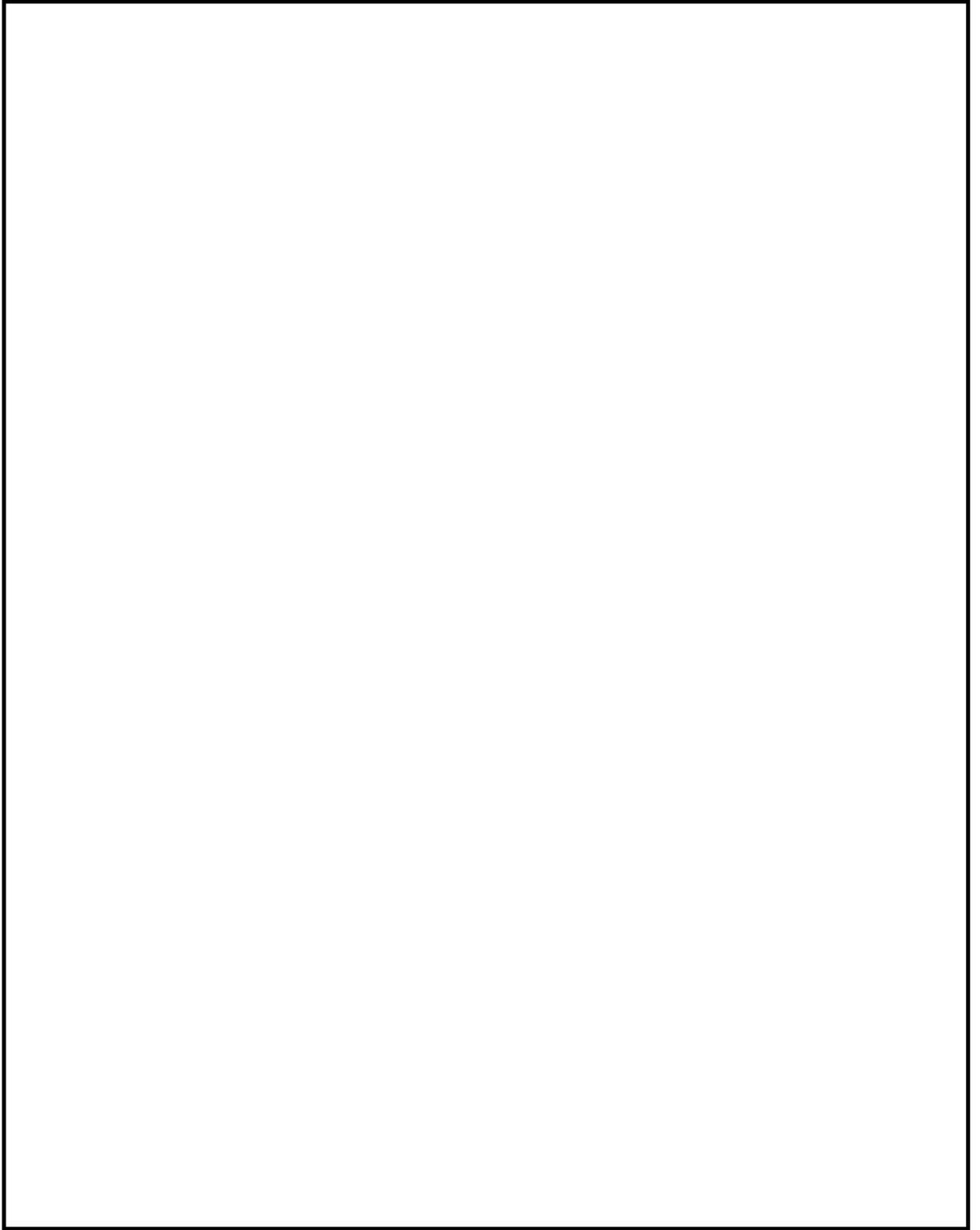


図 5-19 せん断力図 (水平荷重時・X方向正加振・A フレーム)  
(単位 : kN)

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

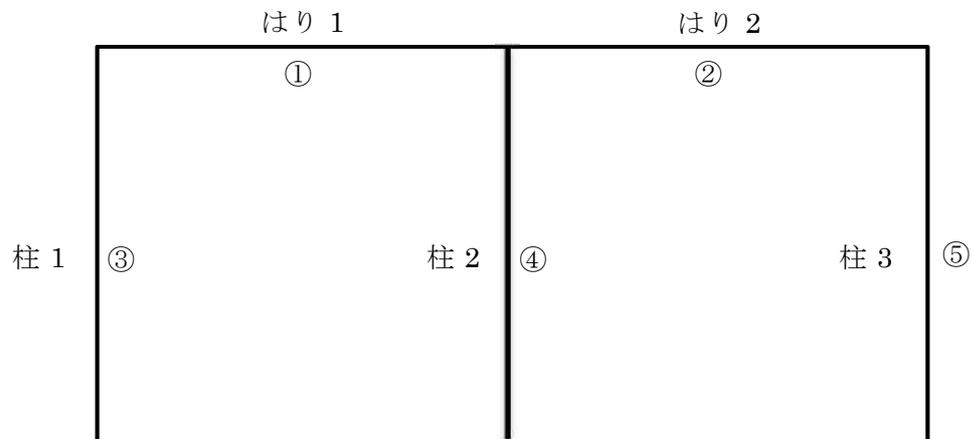


図 5-20 着目位置図  
 (水平荷重時・X方向正加振・Aフレーム・せん断力図)

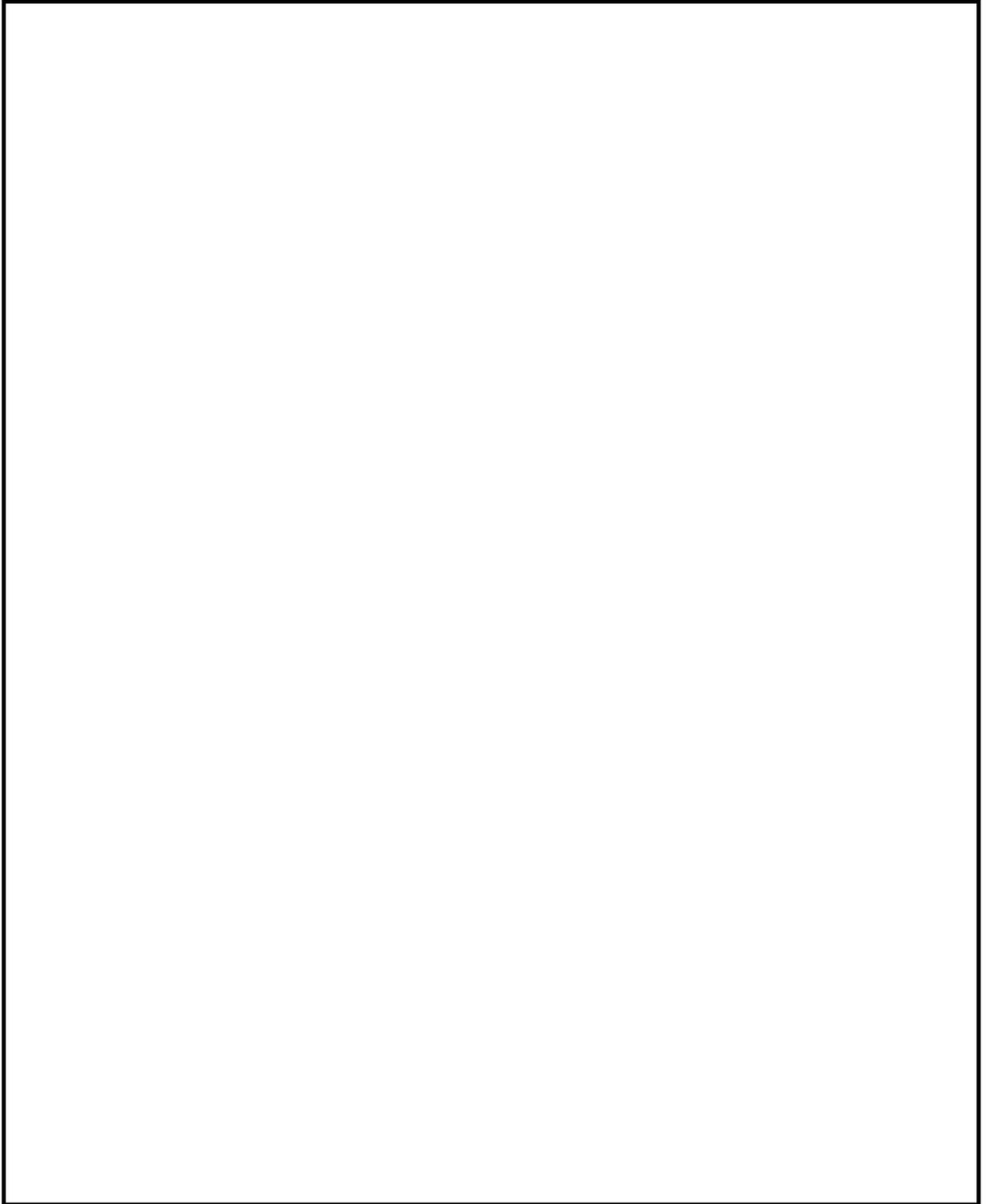


図 5-21 せん断力図 (水平荷重時・Y方向正加振・1 フレーム)  
(単位 : kN)

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

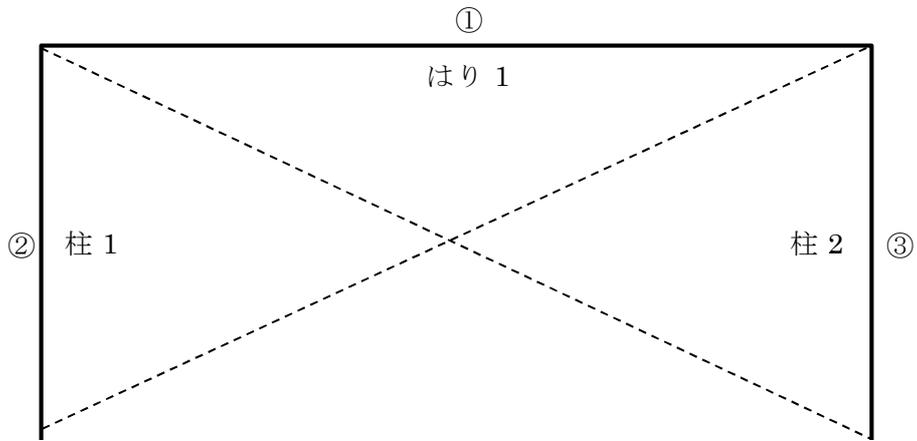


図 5-22 着目位置図  
 (水平荷重時・Y方向正加振・1フレーム・せん断力)

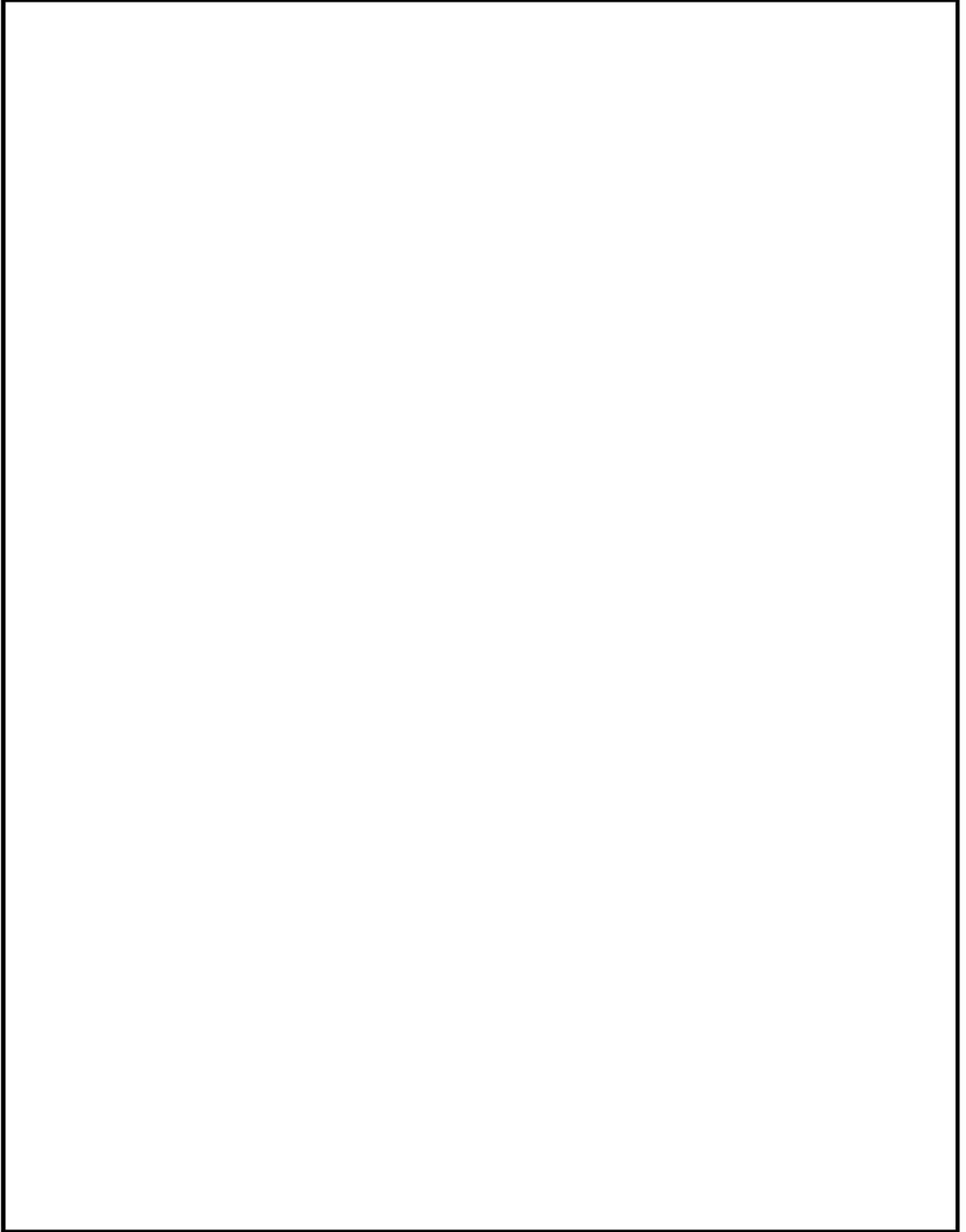


図 5-23 軸力図 (水平荷重時・X方向正加振・A フレーム)  
(単位 : kN)

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

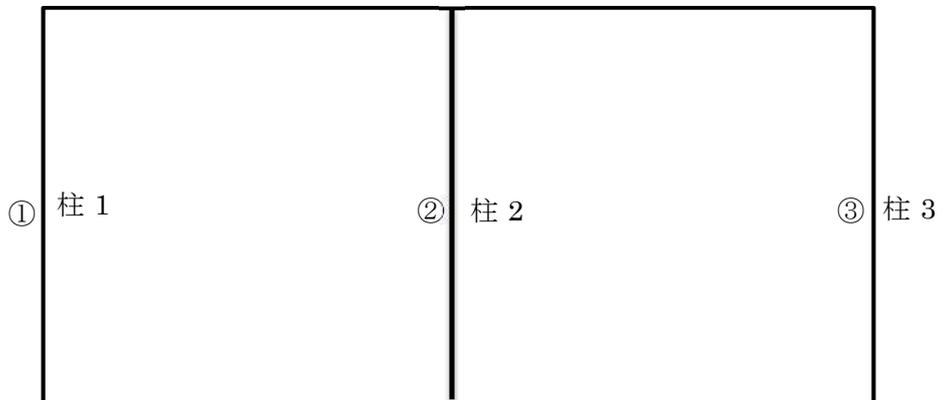


図 5-24 着目位置図  
 (水平荷重時・X方向正加振・Aフレーム・軸力)

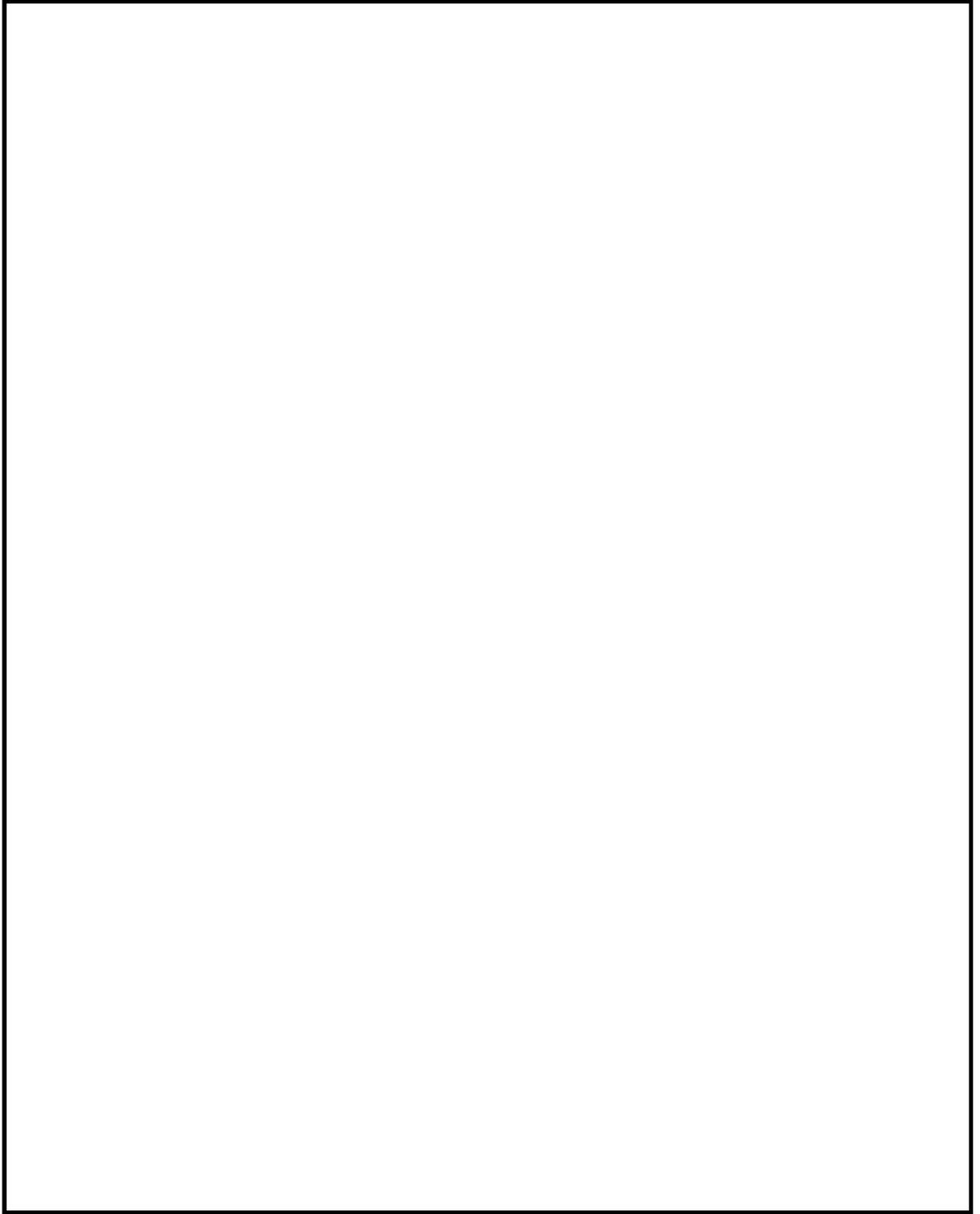


図 5-25 軸力図 (水平荷重時・Y方向正加振・1 フレーム)  
(単位 : kN)

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	—

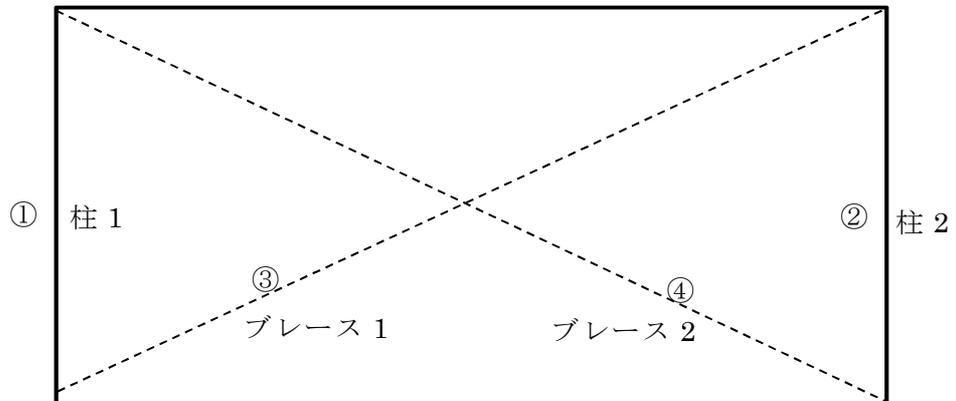


図 5-26 着目位置図  
(水平荷重時・Y方向正加振・1フレーム・軸力)

## 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 22 T D A S

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 2	火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書	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 <math>S_s</math> 及び弾性設計用地震動 <math>S_d</math> に対する地盤の応答を評価するため並びに基準地震動 <math>S_s</math> 及び弾性設計用地震動 <math>S_d</math> 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><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・理論解との比較</li> <li>・他コードとの比較</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・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。</li> </ul>

別紙 23 F L I P

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 3-1-2	海水貯留堰の強度計算書	Ver. 7. 4. 1
V-3-別添 3-1-3	海水貯留堰（6号機設備）の強度計算書	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"> <li>・有限要素法に基づくプログラムである。</li> <li>・平面ひずみ状態を解析対象とする。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>
検証（Verification） 及び 妥当性確認（Validation）	<p><b>【検証（Verification）】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認（Validation）】</b></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"> <li>・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。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>
--	--

別紙 24 F R E M I N G

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 3-1-2	海水貯留堰の強度計算書	Ver. 14. 1B
V-3-別添 3-1-3	海水貯留堰（6号機設備）の強度計算書	Ver. 14. 1B

## 2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	F R E M I N G
使用目的	平面骨組解析（断面力算出）
開発機関	富士通エフ・アイ・ピー株式会社
開発時期	1995 年
使用したバージョン	Ver. 14. 1B
コードの概要	<p>本解析コードは、富士通エフ・アイ・ピー株式会社によって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、平面骨組計算プログラムであり、平面構造物にモデル化できる構造物は全て計算が可能である。</p> <p>適用範囲として、橋りょう、鉄塔、トンネル、及び共同溝等の土木構造物から、ビル、建屋等建築構造物の設計計算に利用可能である。</p> <p>また、面内荷重及び面外荷重において、線形及び非線形解析が可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・材料力学分野における一般的知見によって解を求めることができる体系について、平面骨組解析モデルによる解析解（断面力）と理論解を比較し、一致することを確認している。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・日本原子力発電株式会社東海第二発電所において、貯留堰等の平面骨組解析（断面力算出）に本解析コード（Ver. 14. 1B）が使用された実績がある。</li> <li>・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。</li> <li>・今回の工事計画認可申請における平面骨組解析（断面力算出）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。</li> </ul>

別紙 25 S L O K

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 3-1-2	海水貯留堰の強度計算書	Ver. 2.0
V-3-別添 3-1-3	海水貯留堰（6号機設備）の強度計算書	Ver. 2.0

## 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><b>【検証（Verification）】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認（Validation）】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>

別紙 26 A S H S D 2 - B

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 8	原子炉圧力容器スカート強度計算書	Ver. <input type="text"/>

2. 解析コードの概要

項目	コード名 A S H S D 2 - B
使用目的	2次元有限要素法（軸対称モデル）による応力解析
開発機関	米国カリフォルニア大学及びバブcock日立株式会社
開発時期	1979年
使用したバージョン	Ver. <input type="text"/>
コードの概要	<p>本解析コードは、原子炉圧力容器に対する評価を目的として、有限要素法により軸対称構造物の <input type="text"/> 荷重に対する応力を計算する汎用プログラムである。</p> <p>荷重条件としては、 <input type="text"/> <input type="text"/> を扱うことができる。</p> <p>要素としてシェル要素、三角形要素及び四角形要素があり、任意の組合せで構造物をモデル化できる。</p> <p>熱応力計算に当たっては、温度分布解析用解析コード（TACF）の結果をファイルを介して自動的に取り込むことができる。</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） 及び 妥当性確認（Validation）</p>	<p><b>【検証（Verification）】</b></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"> <li>・内圧を受ける厚肉円筒の弾性解析と、理論解との比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認（Validation）】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・本解析コードは、これまで多くの既工事計画で使用実績を有しており、妥当性は十分確認されている。</li> </ul>

別紙 27 T A C F

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添 8	原子炉圧力容器スカート強度計算書	Ver. 0

## 2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	T A C F
使用目的	2次元有限要素法（軸対称モデル）による応力解析
開発機関	バブコック日立株式会社
開発時期	1982年
使用したバージョン	Ver. 0
コードの概要	<p>本解析コードは、原子炉圧力容器に対する評価を目的として、有限要素法により平面及び軸対称構造物の定常及び非定常温度分布を計算するプログラムである。</p> <p>温度分布計算は、領域を小さなメッシュに分割し、各メッシュについての熱平衡方程式をたて、定常問題は弛緩法*により、非定常問題は微小時間でステップごとの温度分布を順次求める方法による。</p> <p>境界条件としては、強制対流熱伝達のほか、自然対流熱伝達、輻射熱伝達等の非線型熱伝達も扱うことができる。</p> <p>要素として三角形要素及び四角形要素があり、任意の組合せで構造物をモデル化できる。</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><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・平板の1次元熱伝導の温度分布解析と、理論解との比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・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。</li> <li>・本解析コードは、これまで多くの既工事計画で使用実績を有しており、妥当性は十分確認されている。</li> </ul>

注記\*：エネルギー最小化原理に基づく解法の一つで反復法ともいう。近似解を仮定し、それを修正する計算を反復することによって、真の解に収束させる手法である。