

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-22-0044_改0
提出年月日	2021年2月25日

VI-5-37 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ TDAPⅢ

2021年2月

東北電力株式会社

目 次

1.	はじめに.....	1
1.1	使用状況一覧.....	2
2.	解析コードの概要.....	3
2.1	TDAPⅢ Ver. 3.08.....	3
2.2	TDAPⅢ Ver. 3.10.....	5
2.3	TDAPⅢ Ver. 3.10.01.....	7
2.4	TDAPⅢ Ver. 3.11.....	9
3.	TDAPⅢ Ver. 3.10.01 の解析手法について（2次元有限要素法（非線形はり要素）による静的解析）	11
3.1	一般事項.....	11
3.2	解析コードの特徴.....	11
3.3	解析手法.....	12
3.3.1	2次元非線形ファイバー要素.....	12
3.3.2	支配方程式.....	12
3.3.3	静的解析.....	13
3.4	解析フローチャート.....	14
3.5	検証(Verification)と妥当性確認(Validation).....	15
3.5.1	2次元非線形ファイバー要素の適用性の検証.....	15
3.5.2	妥当性確認.....	18
3.5.3	評価結果.....	18

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）TDAPⅢについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-2-12-2	原子炉機器冷却海水配管ダクト（鉛直部）の耐震性についての計算書	Ver. 3. 10. 01
VI-2-2-17	ガスタービン発電設備軽油タンク室の地震応答計算書	Ver. 3. 08
VI-2-2-25	排気筒基礎の地震応答計算書	Ver. 3. 08
VI-2-3-2	炉心，原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書	Ver. 3. 10
VI-2-3-3-2-4	炉心シュラウド支持ロッドの耐震性についての計算書	Ver. 3. 10
VI-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼管式鉛直壁）の耐震性についての計算書	Ver. 3. 08
VI-2-10-2-3-1	杭基礎構造防潮壁 鋼製遮水壁（鋼板）の耐震性についての計算書	Ver. 3. 10. 01
VI-2-10-2-3-2	杭基礎構造防潮壁 鋼製遮水壁（鋼桁）の耐震性についての計算書	Ver. 3. 10. 01
VI-2-10-2-3-3	杭基礎構造防潮壁 鋼製扉の耐震性についての計算書	Ver. 3. 10. 01
VI-2-10-2-4-1	取放水路流路縮小工（第1号機取水路）の耐震性についての計算書	Ver. 3. 11
VI-2-10-2-4-2	取放水路流路縮小工（第1号機放水路）の耐震性についての計算書	Ver. 3. 11
VI-2-10-2-6-1-1	屋外排水路逆流防止設備（防潮堤南側）の耐震性についての計算書	Ver. 3. 08
VI-2-10-2-8-3	浸水防止蓋（揚水井戸（第3号機海水ポンプ室防潮壁区画内））の耐震性についての計算書	Ver. 3. 11
VI-2-13-1	地下水位低下設備ドレーンの耐震性についての計算書	Ver. 3. 11
VI-2-13-2	地下水位低下設備接続柵の耐震性についての計算書	Ver. 3. 11
VI-3-別添 3-2-1-1	防潮堤（鋼管式鉛直壁）の強度計算書	Ver. 3. 08
VI-3-別添 3-2-2-1	杭基礎構造防潮壁 鋼製遮水壁（鋼板）の強度計算書	Ver. 3. 10. 01
VI-3-別添 3-2-2-2	杭基礎構造防潮壁 鋼製遮水壁（鋼桁）の強度計算書	Ver. 3. 10. 01
VI-3-別添 3-2-2-3	杭基礎構造防潮壁 鋼製扉の強度計算書	Ver. 3. 10. 01
VI-3-別添 3-2-5-1-1	屋外排水路逆流防止設備（防潮堤南側）の強度計算書	Ver. 3. 11

2. 解析コードの概要

2.1 TDAPⅢ Ver. 3.08

項目 \ コード名	TDAPⅢ
使用目的	1 次元有限要素法による地震応答解析 2 次元有限要素法による地震応答解析 3 次元骨組み構造（線形はりばねモデル）による動的解析
開発機関	大成建設株式会社 株式会社アーク情報システム
開発時期	1994 年
使用したバージョン	Ver. 3.08
コードの概要	<p>TDAPⅢ（以下「本解析コード」という。）は、2次元及び3次元の有限要素解析の汎用プログラムである。</p> <p>主として、地盤～構造物連成系の地震応答解析を行うものである。</p> <p>また、土木・建築分野に特化した要素群、材料非線形モデルを数多くサポートしており、日本国内では、建設部門を中心として、官公庁、大学、民間問わず、多くの利用実績がある。</p> <p>本解析コードの主な特徴は、以下のとおりである。</p> <ol style="list-style-type: none"> ①2次元及び3次元有限要素プログラムである。 ②地盤～構造物連成系モデルの相互作用解析が可能である。 ③線形要素、平面要素、立体要素等を用いることができる。 ④静的解析を引き継いだ動的解析を行うことができる。 ⑤地盤及び構造物の非線形性を考慮できる。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・橋梁、橋脚、地盤～構造物連成、地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており、十分な使用実績があるため、信頼性があると判断できる。 ・関西電力株式会社高浜発電所第3号機において、海水ポンプ室、海

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>水管トレンチ，海水取水トンネル，燃料油貯油そう基礎の2次元有限要素法による地震応答解析に本解析コード（Ver. 3.05）が使用された実績がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・日本原子力発電株式会社東海第二発電所において，防潮堤（鋼製防護壁）の3次元骨組みモデルによる動的解析に本解析コード（Ver. 3.08）が使用された実績がある。 ・本工事計画において使用するバージョンは，高浜発電所第3号機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。 ・本工事計画において使用するバージョンは，東海第二発電所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。 ・本工事計画における構造に対して行う地震応答解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	--

2.2 TDAPⅢ Ver. 3.10

<p>項目</p>	<p>コード名 TDAPⅢ</p>
<p>使用目的</p>	<p>固有値解析，弾塑性地震応答解析，弾性地震応答解析</p>
<p>開発機関</p>	<p>大成建設株式会社 株式会社アーク情報システム</p>
<p>開発時期</p>	<p>1994 年</p>
<p>使用したバージョン</p>	<p>Ver. 3.10</p>
<p>コードの概要</p>	<p>TDAPⅢ（以下「本解析コード」という。）は，2次元及び3次元の有限要素解析の汎用プログラムである。</p> <p>主として，地盤～構造物連成系の地震応答解析を行うものである。</p> <p>また，土木・建築分野に特化した要素群，材料非線形モデルを数多くサポートしており，日本国内では，建設部門を中心として，官公庁，大学，民間問わず，多くの利用実績がある。</p> <p>本解析コードの主な特徴は，以下のとおりである。</p> <ol style="list-style-type: none"> ①2次元及び3次元有限要素プログラムである。 ②地盤～構造物連成系モデルの相互作用解析が可能である。 ③線形要素，平面要素，立体要素等を用いることができる。 ④静的解析を引継いだ動的解析を行うことができる。 ⑤地盤及び構造物の非線形性を考慮できる。
<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は，以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは妥当性確認の中で確認している。 ・地震応答解析に対して，既工事計画において実績のある解析コード(NAPP, DYNA 等)を用いた解析解と本解析コードを用いた解析解を比較した結果，双方の解がおおむね一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，動作環境を満足する計算機にインストールして用いることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・橋梁，橋脚，地盤～構造物連成，地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており，十分な使用実績があるため，信頼性があると判断できる。 ・日本原子力発電株式会社東海第二発電所において，建物・構造物，

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>屋外重要土木構造物等の静的応力解析に本解析コード (Ver. 3.08) が使用された実績がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本工事計画において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンの変更点は、機能の追加・修正、計算の効率化である。本工事計画の大型機器連成解析に用いる機能のうち、バージョンアップに伴い一部修正が行われているが、過去バージョンと現バージョンの解析結果の差を比較することで影響がないことを確認している。 ・本工事計画における構造に対して行う地震応答解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	---

2.3 TDAPⅢ Ver. 3.10.01

項目	コード名
使用目的	TDAPⅢ 2次元有限要素法（非線形はり要素）による静的解析 3次元骨組み構造（線形はりばねモデル）による地震応答解析
開発機関	大成建設株式会社 株式会社アーク情報システム
開発時期	1994年
使用したバージョン	Ver. 3.10.01
コードの概要	<p>TDAPⅢ（以下「本解析コード」という。）は、2次元及び3次元の有限要素解析の汎用プログラムである。</p> <p>主として、地盤～構造物連成系の地震応答解析を行うものである。</p> <p>また、土木・建築分野に特化した要素群、材料非線形モデルを数多くサポートしており、日本国内では、建設部門を中心として、官公庁、大学、民間問わず、多くの利用実績がある。</p> <p>本解析コードの主な特徴は、以下のとおりである。</p> <ol style="list-style-type: none"> ①2次元及び3次元有限要素プログラムである。 ②地盤～構造物連成系モデルの相互作用解析が可能である。 ③線形要素、平面要素、立体要素等を用いることができる。 ④静的解析を引継いだ動的解析を行うことができる。 ⑤地盤及び構造物の非線形性を考慮できる。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2次元有限要素法（非線形はり要素）による静的解析については、本解析コードによる非線形はり要素を用いた解析結果と実験結果がおおむね一致することを確認している。 ・3次元骨組み構造（線形はりばねモデル）による地震応答解析については、本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・橋梁、橋脚、地盤～構造物連成、地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており、十分な使用実績が

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>あるため、信頼性があると判断できる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 2次元有限要素法（非線形はり要素）による静的解析については、九州電力株式会社川内原子力発電所第1号機において、海水管ダクト堅坑部の2次元骨組み解析に本解析コード（Ver. 3.01）が使用された実績がある。 ・ 3次元骨組み構造（線形はりばねモデル）による地震応答解析については、日本原子力発電株式会社東海第二発電所において、防潮堤（鋼製防護壁）の3次元骨組みモデルによる動的解析に本解析コード（Ver. 3.08）が使用された実績がある。 ・ 本工事計画において使用するバージョンは、川内原子力発電所第1号機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。 ・ 本工事計画において使用するバージョンは、東海第二発電所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。 ・ 本工事計画における構造に対して行う地震応答解析及び2次元有限要素法による静的解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	--

2.4 TDAPⅢ Ver. 3.11

項目	コード名 TDAPⅢ
使用目的	1次元有限要素法による地震応答解析 2次元有限要素法による地震応答解析
開発機関	大成建設株式会社 株式会社アーク情報システム
開発時期	1994年
使用したバージョン	Ver. 3.11
コードの概要	<p>TDAPⅢ（以下「本解析コード」という。）は、2次元及び3次元の有限要素解析の汎用プログラムである。</p> <p>主として、地盤～構造物連成系の地震応答解析を行うものである。</p> <p>また、土木・建築分野に特化した要素群、材料非線形モデルを数多くサポートしており、日本国内では、建設部門を中心として、官公庁、大学、民間問わず、多くの利用実績がある。</p> <p>本解析コードの主な特徴は、以下のとおりである。</p> <p>①2次元及び3次元有限要素プログラムである。</p> <p>②地盤～構造物連成系モデルの相互作用解析が可能である。</p> <p>③線形要素、平面要素、立体要素等を用いることができる。</p> <p>④静的解析を引継いだ動的解析を行うことができる。</p> <p>⑤地盤及び構造物の非線形性を考慮できる。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・橋梁、橋脚、地盤～構造物連成、地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており、十分な使用実績があるため、信頼性があると判断できる。 ・関西電力株式会社高浜発電所第3号機において、海水ポンプ室、海水管トレンチ、海水取水トンネル、燃料油貯油そう基礎の2次元有限要素法による地震応答解析に本解析コード(Ver. 3.05)が使用された実績がある。

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<ul style="list-style-type: none">・本工事計画において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョン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。・本工事計画における構造に対して行う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。
--	--

3. TDAPⅢ Ver. 3.10.01 の解析手法について（2次元有限要素法（非線形はり要素）による静的解析）
3.1 一般事項

TDAPⅢ Ver. 3.10.01 は、2次元及び3次元の有限要素解析を行う汎用プログラムである。土木・建築分野に特化した要素群、材料非線形モデルを多数準備し、FEM のモデル化を容易にしている。

解析対象としては、地盤と構造物の連成モデルの耐震解析に用いられることが多く、高速道路（全体モデル、橋脚、杭基礎等）、橋梁、地下トンネル、上下水道施設、原子力発電所施設、起振実験や静的加力実験等の数値シミュレーション等の解析にも多くの実績がある計算機コードであり、2次元骨組みモデルによる静的解析に用いる。

3.2 解析コードの特徴

- (1) TDAPⅢの解析機能の一例を以下に示す。
 - ・静的解析
 - ・等価減衰行列の作成
 - ・複数固有値解析
- (2) ばね要素、はり要素、平面要素、立体要素等、多くの要素が用意されており、種々のタイプの構造物の解析を行うことができる。
- (3) 多自由度を有する大規模問題を効率よく解析することができる。
- (4) 大規模問題を取り扱うために、入力データが簡素化されている。
- (5) 解析する座標系及び拘束方法は、取り扱う問題にあったものを選ぶことができる。

3.3 解析手法

3.3.1 2次元非線形ファイバー要素

RC 部材はファイバーモデルの非線形はり要素でモデル化する。ファイバーモデルは、図 3-1 に示すように線材要素の断面を層状に分割し、各層（ファイバー）が平面保持をして変形し、分割した個々のファイバー内では応力・ひずみが一定のモデルである。各ファイバーは当該材料の非線形性を考慮することができる。

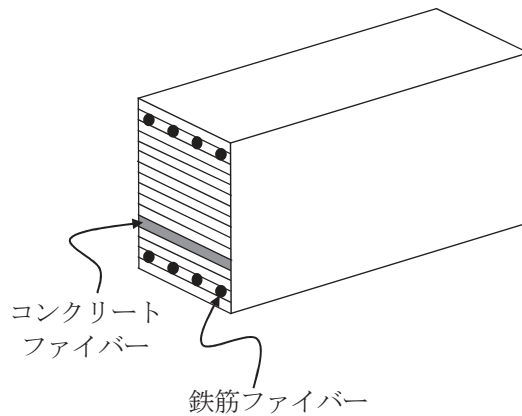


図 3-1 ファイバーモデルの概念図

3.3.2 支配方程式

多自由度系の非線形支配方程式は次式で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + \{F\} = \{R\} \quad \text{式 (1)}$$

ここで、

$[M]$: 質量マトリクス

$[C]$: 減衰マトリクス

$\{F\}$: 要素内力ベクトル

剛性マトリクス $[K]$ が線形の場合 $\{F\} = [K]\{u\}$

$[K]$: 剛性マトリクス

$\{\ddot{u}\}$: 相対加速度ベクトル

$\{\dot{u}\}$: 相対速度ベクトル

$\{u\}$: 相対変位ベクトル

$\{R\}$: 外力ベクトル

$$\{R\} = - \sum_{i=1}^n [M] \{v_i\} \ddot{\alpha}_i + \{R_f\}$$

$\ddot{\alpha}_i$: i 方向の入力地震加速度

n : 入力地震動作用方向数

$\{v_i\}$: i 方向に対応する自由度に1を立てた入力地震動方向ベクトル

$\{R_f\}$: 入力地震加速度以外の外力ベクトル

なお、静的解析の場合は、 $[M]=0$ $[C]=0$ であり、 $\{u\}$ は絶対変位となる。

3.3.3 静的解析

式(1)より、荷重ステップ t から荷重ステップ $t + \Delta t$ の増分ステップにおける支配方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} \left[{}^{t+\Delta t}K^{(i-1)} \right] \{ \Delta u^{(i)} \} &= \{ {}^{t+\Delta t}R \} - \{ {}^{t+\Delta t}F^{(i-1)} \} \\ \{ {}^{t+\Delta t}u^{(i)} \} &= \{ {}^{t+\Delta t}u^{(i-1)} \} + \{ \Delta u^{(i)} \} \\ \{ {}^{t+\Delta t}u^{(0)} \} &= \{ {}^t u \} \\ \{ {}^{t+\Delta t}F^{(0)} \} &= \{ {}^t F^{(0)} \} \end{aligned} \tag{2}$$

ここで、 Δt は増分インデックス、 (i) は収束計算回数を示す。

これを用い式(1)を満足するようにニュートンラプソン法により収束計算を行う。

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図 3-4 に示す。

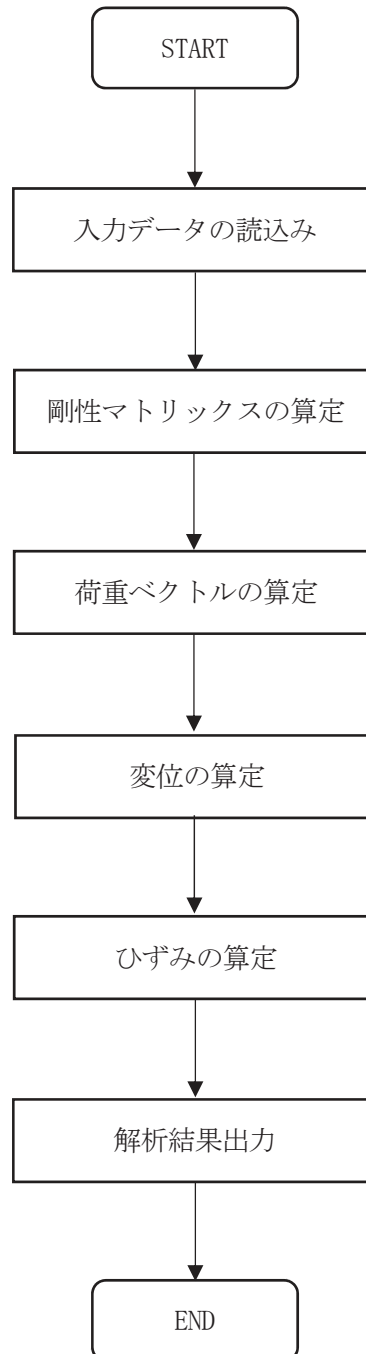


図 3-4 解析フローチャート

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

3.5.1 2次元非線形ファイバー要素の適用性の検証

2次元非線形ファイバー要素は、コンクリート及び鉄筋の非線形性を考慮し、鉄筋コンクリート部材を複数のファイバー(繊維)の集合体とみなし、各ファイバーを等価な直バネに置き換えて、軸力とモーメントの連成を考慮できるようにモデル化する要素である。2次元非線形ファイバー要素を用いた解析の適用性は、単純はりモデルの荷重-変位関係について、本解析コードによる解析結果と実験結果を比較することで検証する。

(1) 検討条件

a. 実験概要

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

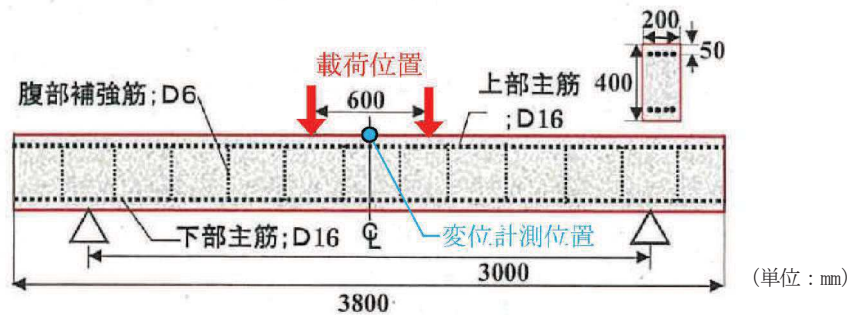


図 3-5 実験概念図

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

b. 解析モデル

解析モデルは図3-5に基づき、2次元非線形ファイバー要素でモデル化し、要素分割は要素数18、節点数19とする。断面のモデル化は断面の分割数を40とし、鉄筋を上端、下端から50mmとなる位置に配置することでモデル化する。解析モデル図、断面のモデル化を図3-6及び図3-7に示す。

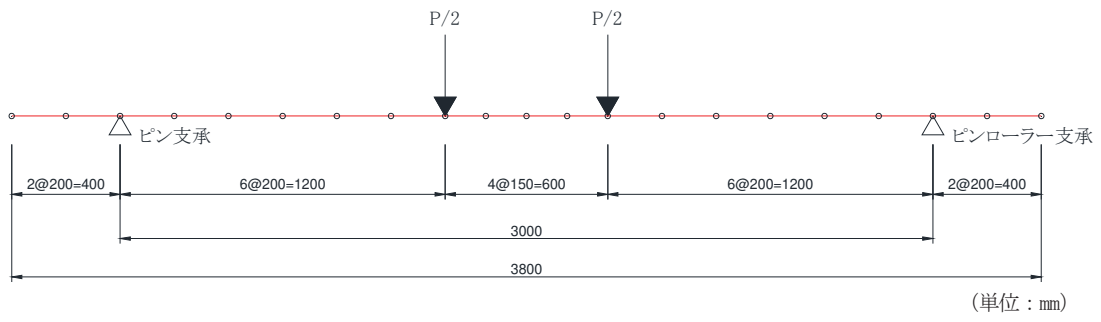


図 3-6 解析モデル図

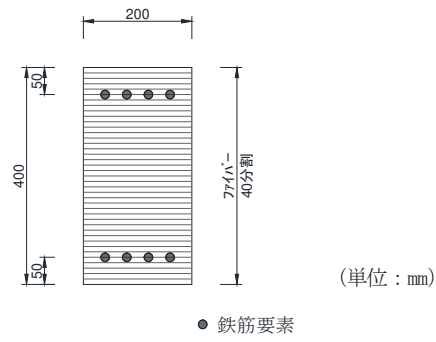


図 3-7 断面のモデル化

c. 解析用物性値

解析用物性値を表 3-1 に示す。

表 3-1 解析用物性値

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

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

d. 解析条件

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

(2) 結果の検証

実験結果と解析結果の荷重－変位関係の比較を図 3-8 に示す。

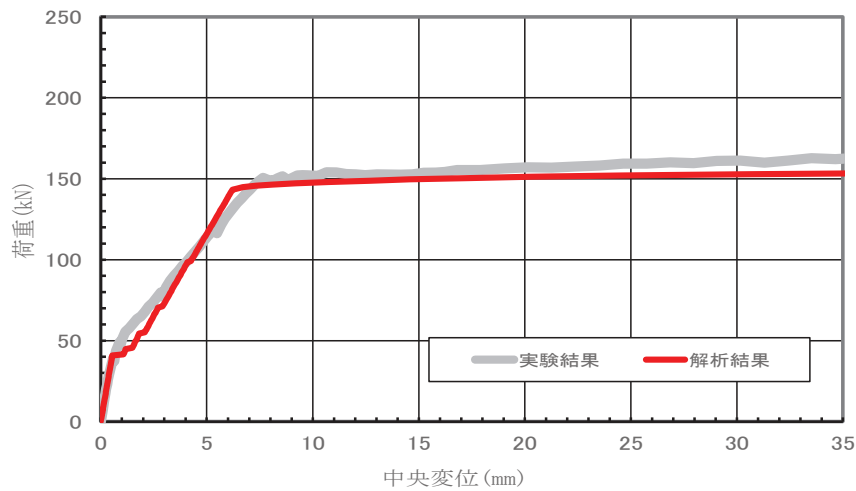


図 3-8 荷重－変位関係の比較

解析結果と実験結果の荷重－変位関係はおおむね一致しており、鉄筋降伏時の荷重もおおむね同等である。以上より、2次元非線形ファイバー要素を用いた解析の適用性を確認した。

3.5.2 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。

- ・ 橋梁，橋脚，地盤～構造物連成，地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており，十分な使用実績があるため，信頼性があると判断できる。
- ・ 検証の体系と本工事計画で使用する体系が同等であることから，検証の結果をもって，解析機能の妥当性も確認できる。
- ・ 本工事計画で使用する応力解析の用途，適用範囲が，上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3.5.3 評価結果

以上の検証結果及び妥当性確認結果により，本解析コードを，屋外重要土木構造物の応力解析に使用することは妥当である。