

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-22-0007_改0
提出年月日	2020年12月9日

VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要  
(VI-3-別添-3-2-1 防潮堤の強度計算書において使用している計算機プログラム（解析コード）)

2020年12月  
東北電力株式会社

## 目 次

- VI-5-4 計算機プログラム（解析コード）の概要・FLIP
- VI-5-31 計算機プログラム（解析コード）の概要・SHAKE
- VI-5-37 計算機プログラム（解析コード）の概要・TDAPⅢ
- VI-5-56 計算機プログラム（解析コード）の概要・UC-win/Section

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類

目録番号	目録名称	適用コード名						
		資料番号	VI-5-4	VI-5-31	VI-5-37	VI-5-56		
VI-3-別添 3-2-1-1	防潮堤（鋼管式鉛直壁）の強度計算書	コード名	FLIP	SHAKE	TDAPⅢ	UC- win/Section		
		資料番号	VI-5-4	VI-5-31				
VI-3-別添 3-2-1-2	防潮堤（盛土堤防）の強度計算書	コード名	FLIP	SHAKE				
		資料番号	VI-5-4	VI-5-31				

VI-5-4 計算機プログラム（解析コード）の概要  
・ FLIP

## 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

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）FLIP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-1-1-6-別添 1	可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート	ver. 7.3.0_2, ver. 7.4.1
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. 7.3.0_2
VI-2-10-2-2-2	防潮堤（盛土堤防）の耐震性についての計算書	ver. 7.3.0_2
VI-2-10-2-6-1-2	屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）の耐震性についての計算書	ver. 7.3.0_2
VI-2-10-4-4-2	取水路（標準部）の耐震性についての計算書	ver. 7.3.0_2
VI-2-11-2-17	第1号機取水路の耐震性についての計算書	ver. 7.3.0_2
VI-2-11-2-18	第3号機取水路の耐震性についての計算書	ver. 7.3.0_2
VI-2-11-2-19	北側排水路の耐震性についての計算書	ver. 7.3.0_2
VI-2-11-2-20	アクセスルート（防潮堤（盛土堤防））の耐震性についての計算書	ver. 7.3.0_2
VI-2-13-3	地下水位低下設備揚水井戸の耐震性についての計算書	ver. 7.3.0_2
VI-2-13-4	地下水位低下設備揚水井戸の地震応答計算書	ver. 7.3.0_2
VI-3-別添 3-2-1-1	防潮堤（鋼管式鉛直壁）の強度計算書	ver. 7.3.0_2
VI-3-別添 3-2-1-2	防潮堤（盛土堤防）の強度計算書	ver. 7.3.0_2
VI-3-別添 3-2-5-1-2	屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）の強度計算書	ver. 7.3.0_2

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名
項目	FLIP
使用目的	1 次元有限要素法による地震応答解析（有効応力法） 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. 7.3.0_2, ver. 7.4.1
コードの概要	<p>FLIP (Finite element analysis of Liquefaction Program) (以下「本解析コード」という。) は、1988 年に運輸省港湾技術研究所 (現：港湾航空技術研究所) 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。</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"> <li>①有限要素法に基づくプログラムである。</li> <li>②平面ひずみ状態を解析対象とする。</li> <li>③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>④土の応力-ひずみモデルとしてマルチスプリング・モデルを採用している。</li> <li>⑤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> </ol>
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の内容は、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、本工事計画の解析に使用することは妥当である。</li> </ul>



<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</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、防潮堤、防潮扉、可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート、取水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る。</li> <li>• 本工事計画において使用するバージョンのうち ver. 7.4.1 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>• 本工事計画における構造に対し使用する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>
--	--

VI-5-31 計算機プログラム（解析コード）の概要  
・SHAKE

## 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.....	4
2.1 SHAKE 導入時 Ver. ....	4
2.2 SHAKE Ver. 1.6.....	5
2.3 SHAKE Ver. 1.6.3, Ver. 1.6.4, Ver. 1.6.5, Ver. 1.6.6, Ver. 1.6.8, Ver. 1.6.9, Ver. 1.6.11, Ver. 1.6.13.....	6
3. SHAKE Ver. 1.6 の解析手法について .....	7
3.1 一般事項.....	7
3.2 解析コードの特徴.....	7
3.3 解析理論.....	8
3.4 解析フローチャート.....	11
3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation) .....	12

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）SHAKE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-2-2-1	原子炉建屋の地震応答計算書	Ver. 1.6.3, Ver. 1.6.4, Ver. 1.6.5, Ver. 1.6.9
VI-2-2-2	原子炉建屋の耐震性についての計算書	Ver. 1.6.11
VI-2-2-5	復水貯蔵タンク基礎の地震応答計算書	Ver. 1.6
VI-2-2-13	軽油タンク室の地震応答計算書	Ver. 1.6
VI-2-2-15	軽油タンク室 (H) の地震応答計算書	Ver. 1.6
VI-2-2-19	軽油タンク連絡ダクトの地震応答計算書	Ver. 1.6
VI-2-2-21	緊急用電気品建屋の地震応答計算書	Ver. 1.6.11
VI-2-2-23	緊急時対策建屋の地震応答計算書	Ver. 1.6.9, Ver. 1.6.11
VI-2-2-25	排気筒基礎の地震応答計算書	Ver. 1.6
VI-2-2-27	排気筒連絡ダクトの地震応答計算書	Ver. 1.6
VI-2-2-29	第3号機海水熱交換器建屋の地震応答計算書	Ver. 1.6.5, Ver. 1.6.6, Ver. 1.6.8, Ver. 1.6.9
VI-2-2-30	第3号機海水熱交換器建屋の耐震性についての計算書	Ver. 1.6.11
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. 1.6
VI-2-10-2-2-2	防潮堤(盛土堤防)の耐震性についての計算書	Ver. 1.6
VI-2-11-2-3	タービン建屋の耐震性についての計算書	Ver. 1.6.4, Ver. 1.6.5, Ver. 1.6.6, Ver. 1.6.9, Ver. 1.6.13
VI-2-11-2-15	第1号機排気筒の耐震性についての計算書	導入時 Ver.
VI-2-11-2-17	第1号機取水路の耐震性についての計算書	Ver. 1.6
VI-2-11-2-19	北側排水路の耐震性についての計算書	Ver. 1.6
VI-2-11-2-20	アクセスルート(防潮堤(盛土堤防))の耐震性についての計算書	Ver. 1.6
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. 1.6
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. 1.6
VI-2-13-3	地下水位低下設備揚水井戸の耐震性についての計算書	Ver. 1.6
VI-2-13-4	地下水位低下設備揚水井戸の地震応答計算書	Ver. 1.6
VI-2-別添 3-2	可搬型重大事故等対処設備の保管エリア等における入力地震動	Ver. 1.6

使用添付書類		バージョン
VI-3-別添 3-2-1-1	防潮堤（鋼管式鉛直壁）の強度計算書	Ver. 1.6
VI-3-別添 3-2-1-2	防潮堤（盛土堤防）の強度計算書	Ver. 1.6

## 2. 解析コードの概要

### 2.1 SHAKE 導入時 Ver.

項目 \ コード名	SHAKE
使用目的	1次元地震応答解析による入力地震動の策定
開発機関	東電設計株式会社
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>SHAKE (以下「本解析コード」という。)は、米国カリフォルニア大学から発表された SHAKE を基本に開発されたもので、1次元重複反射理論に基づく地盤の伝達関数や時刻歴波形を算出するプログラムである。</p> <p>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することができ、また、鉛直動はS波速度<math>V_s</math>をP波速度<math>V_p</math>として定義することで、各層における加速度、応力度、ひずみ度等の伝達関数、応答波形等を求めることが可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証(Verification)】</b>          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>・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していることを確認している。</li> <li>・汎用コードである「Super FLUSH/2D for Windows Ver. 5.3.0 (発売元 株式会社構造計画研究所・株式会社地震工学研究所)」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>・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使用していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b>          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、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本工事計画の解析に適用することは妥当である。</li> <li>・東京電力ホールディングス株式会社柏崎刈羽原子力発電所第7号機においてコントロール建屋の底面地盤ばねの算定において使用された実績がある。</li> <li>・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同じであることを確認している。</li> </ul>

2.2 SHAKE Ver. 1.6

項目	コード名 SHAKE
使用目的	1次元地震応答解析による入力地震動の策定
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1971年
使用したバージョン	Ver. 1.6
コードの概要	<p>SHAKE（以下「本解析コード」という。）は、米国カリフォルニア大学から発表されたSHAKEを基本に開発されたもので、1次元重複反射理論に基づく地盤の伝達関数や時刻歴波形を算出するプログラムである。</p> <p>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することができ、また、鉛直動はS波速度<math>V_s</math>をP波速度<math>V_p</math>として定義することで、各層における加速度、応力度、ひずみ度等の伝達関数、応答波形等を求めることが可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証(Verification)】</b> 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>・本解析コード(Ver. 1.6)について、二層のモデル地盤において地震応答解析を行った解析解と、1次元重複反射理論に基づく理論解がおおむ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、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ことを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b> 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>・入力地震動算定に対して、原子力産業界において1次元重複反射理論に基づく地震応答解析は既工事計画において実績があり、同じ理論に基づく解析コードであるshake-91を用いた1次元地震応答解析を行った解析解と、本解析コードによる解析解を比較したコードベンチマーキングを行った結果、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>・本工事計画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>



2.3 SHAKE Ver. 1.6.3, Ver. 1.6.4, Ver. 1.6.5, Ver. 1.6.6, Ver. 1.6.8, Ver. 1.6.9, Ver. 1.6.11, Ver. 1.6.13

項目	コード名 SHAKE
使用目的	入力地震動の策定
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1971年
使用したバージョン	Ver. 1.6.3, Ver. 1.6.4, Ver. 1.6.5, Ver. 1.6.6, Ver. 1.6.8, Ver. 1.6.9, Ver. 1.6.11, Ver. 1.6.13
コードの概要	<p>SHAKE（以下「本解析コード」という。）は、米国カリフォルニア大学から発表された SHAKE を基本に開発されたもので、1次元重複反射理論に基づく地盤の伝達関数や時刻歴波形を算出するプログラムである。</p> <p>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することができ、また、鉛直動はS波速度<math>V_s</math>をP波速度<math>V_p</math>として定義することで、各層における加速度、応力度、ひずみ度等の伝達関数、応答波形等を求めることが可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証(Verification)】</b> 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>・本解析コード Ver. 1.6 による弾性地盤の増幅特性の解析結果と公開文献*の理論解を比較し、両者が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ことを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b> 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、本解析コードの解析結果と公開文献*の理論解の一致をもって、解析機能の妥当性も確認している。</li> <li>・本工事計画における弾性地盤の応答評価の用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。</li> <li>・本工事計画において使用するバージョンのうち Ver. 1.6.9 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>・本工事計画において使用するバージョンのうち Ver. 1.6.3, Ver. 1.6.4, Ver. 1.6.5, Ver. 1.6.6, Ver. 1.6.8, Ver. 1.6.11, Ver. 1.6.13 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> </ul>

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

### 3. SHAKE Ver. 1.6 の解析手法について

#### 3.1 一般事項

本資料は、解析コード SHAKE Ver. 1.6 (以下「本解析コード」という。) の概要である。

SHAKE Ver. 1.6 (1次元波動伝播解析コード) は、重複反射理論に基づく地震応答解析を行うことが可能であり、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

SHAKE Ver. 1.6 における地盤の非線形性は、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。

SHAKE Ver. 1.6 の主な特徴として、①～③を挙げることができる。

- ① 1次元重複反射理論に基づくプログラムである。
- 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。
- ③ 鉛直動は、S波速度  $V_s$  をP波速度  $V_p$  として定義することで対応が可能。

### 3.3 解析理論

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。せん断波の伝播は水平変位  $u=u(x, t)$  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) 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。式 (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、水平方向におけるせん断応力度の定義は次式で与えられる。

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

式 (3.4) に式 (3.2) 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。

式 (3.1) は第 1 図の各層にて成り立つ。各層の局所座標系  $X$  で表される  $m$  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  $\tau=0$  と式 (3.7) より  $E_1=F_1$  が得られる。循環公式 (3.8), (3.9) を繰り返し用いて、次のような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。

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

式 (3.13) に式 (3.4), (3.11) 及び (3.12) 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。

故に、任意の層の動的変位が判れば、他の層の動的変位も計算できる。式 (3.2) 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。

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

$$\gamma(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = ik(Ee^{i(kx+\omega t)} - Fe^{-i(kx-\omega t)}) \quad (3.10)$$

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。

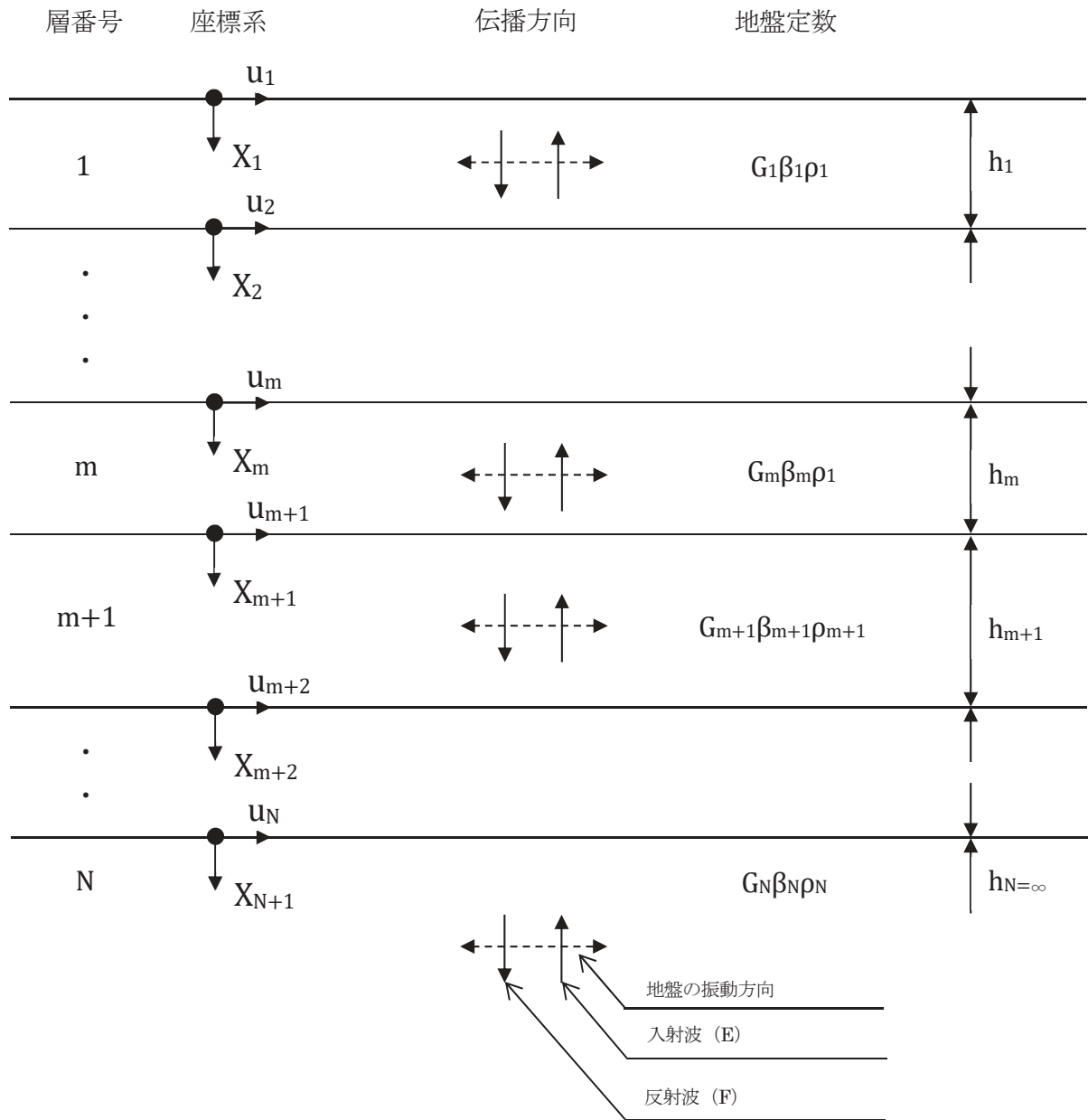


図 3-1 1次元地盤モデル

### 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。

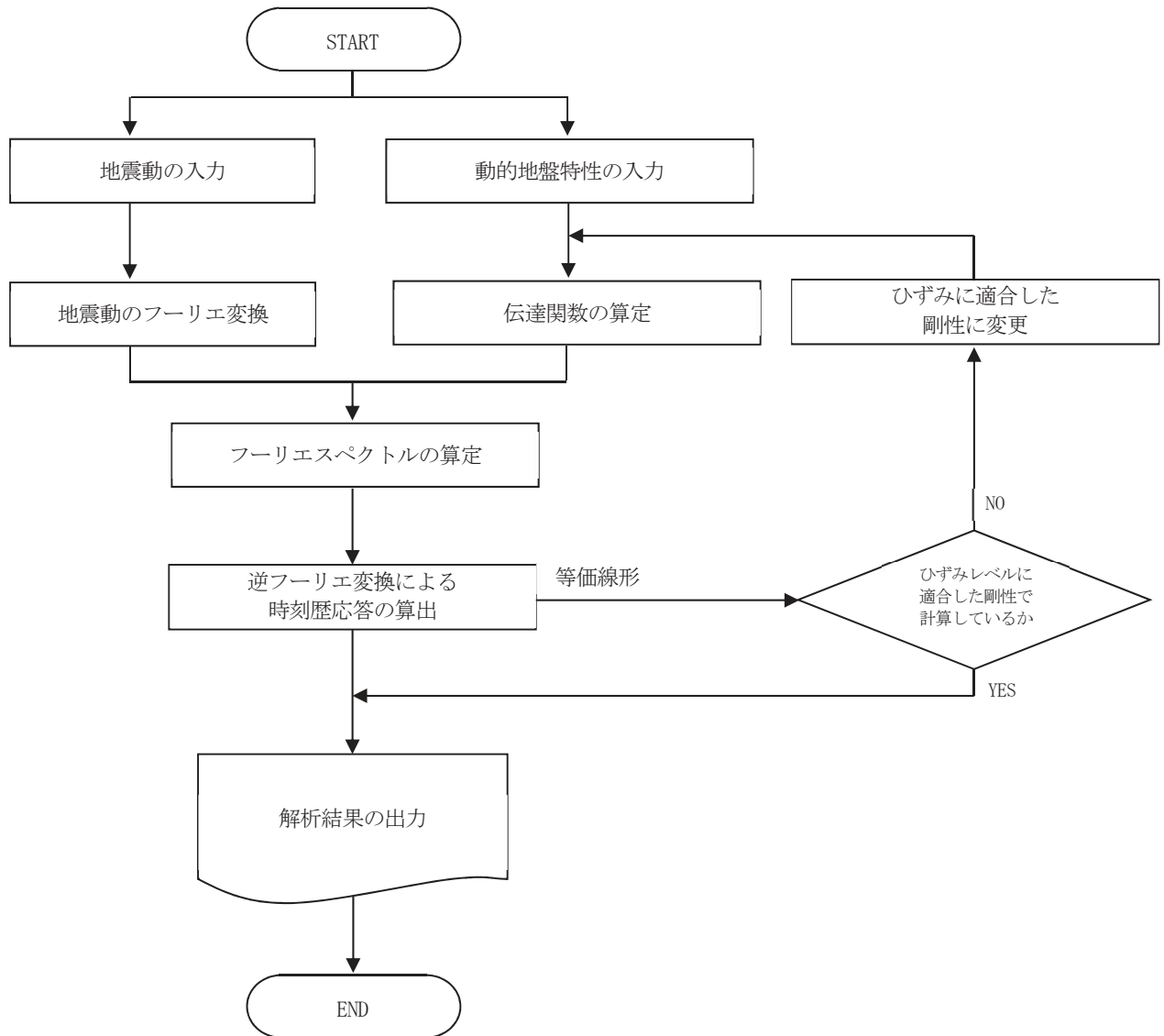


図3-2 解析フローチャート

### 3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

本解析コードを本解析に用いるにあたり、検証として理論解との比較を実施した。妥当性確認として類似プログラムとの比較を実施した。その詳細な内容については下記のとおりとする。

#### a. 検証 (Verification)

二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。

##### (a) 検証モデル及び検討条件

図 3-3 に検討地盤モデルを示す。

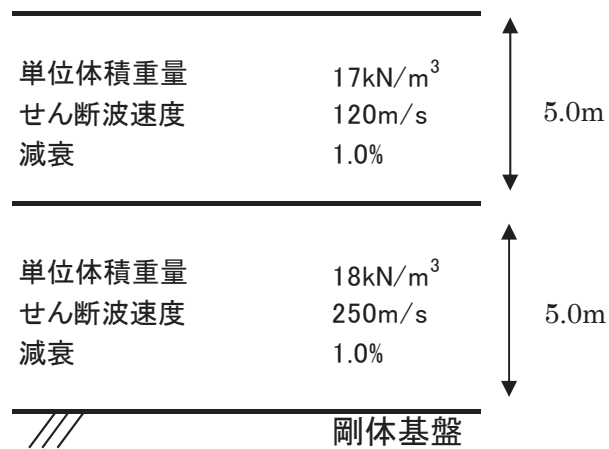


図 3-3 地盤モデル諸元

##### <検討条件>

- ・重力加速度は  $9.80\text{m/s}^2$  とする。
- ・検討する振動数は  $0\sim 20\text{Hz}$  までとする。

(b) 比較結果

伝達関数の比較結果を図 3-4 に示す。

図より、SHAKE Ver. 1.6 と理論解の結果は一致していることが確認できる。

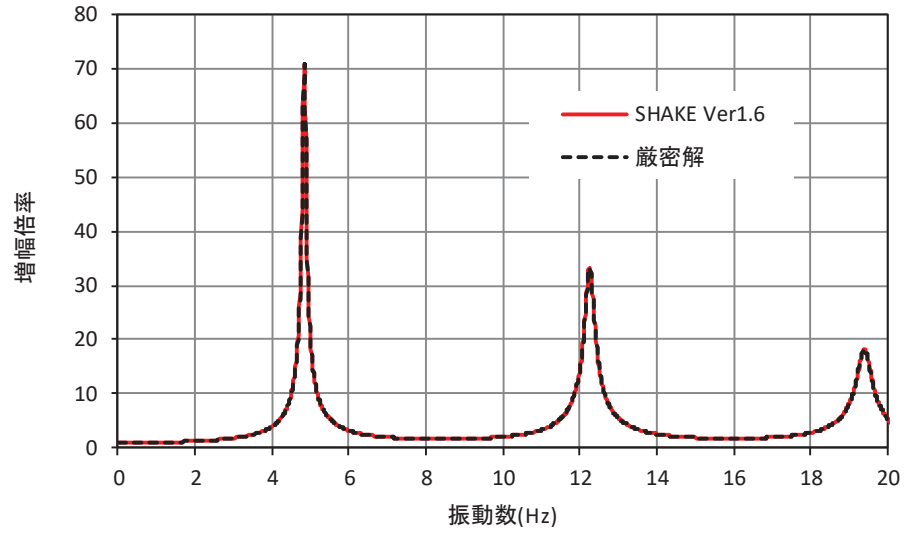


図 3-4 理論解との伝達関数の比較



b. 妥当性確認 (Validation)

カルフォルニア大学バークレー校が有償配布している 1 次元地盤の等価線形解析プログラム shake-91 との比較を実施した。

(a) 検証モデル

表 3-1 に検討地盤モデルを示し、図 3-5、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)	湿潤単位 体積重量 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	動的せん断 弾性係数 Gd (kN/m <sup>2</sup> )	せん断波速度 Vs (m/s)	減衰定数 h
第1粘性土層	4.00	1.00	1.00	17	21000	110	0.030
		1.00	2.00	17	21000	110	0.030
		1.00	3.00	17	21000	110	0.030
		1.00	4.00	17	21000	110	0.030
第2粘性土層	10.80	1.20	5.20	16	25000	124	0.020
		1.20	6.40	16	25000	124	0.020
		1.20	7.60	16	25000	124	0.020
		1.20	8.80	16	25000	124	0.020
		1.20	10.00	16	25000	124	0.020
		1.20	11.20	16	25000	124	0.020
		1.20	12.40	16	25000	124	0.020
		1.20	14.80	16	25000	124	0.020
第3粘性土層	9.60	1.60	16.40	16	43000	162	0.020
		1.60	18.00	16	43000	162	0.020
		1.60	19.60	16	43000	162	0.020
		1.60	21.20	16	43000	162	0.020
		1.60	22.80	16	43000	162	0.020
第1砂質土層	1.20	1.20	25.60	19	159000	286	0.020
		2.00	27.60	17	110000	252	0.020
		2.00	29.60	17	110000	252	0.020
		2.00	31.60	17	110000	252	0.020
		2.00	33.60	17	110000	252	0.020
第2砂質土層	2.00	2.00	35.60	19	273000	375	0.010
礫層(基盤)				20	398000	442	0.010

せん断有効歪 (%)	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

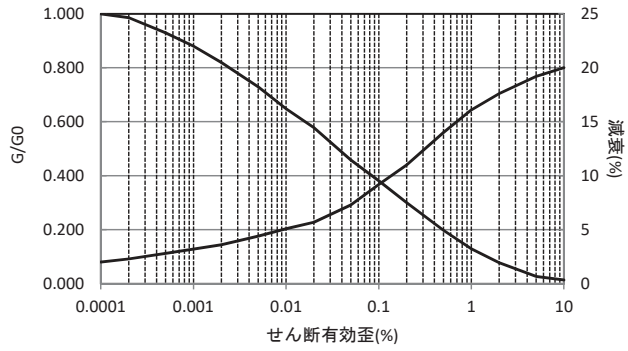


図 3-5 ひずみ依存特性 (第 1 粘性土層)

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	2.00
0.0002	0.989	2.30
0.0005	0.952	2.80
0.001	0.916	3.20
0.002	0.874	3.60
0.005	0.811	4.40
0.01	0.752	5.10
0.02	0.698	5.70
0.05	0.601	7.30
0.1	0.500	9.20
0.2	0.394	11.00
0.5	0.259	14.00
1	0.170	16.10
2	0.102	17.60
5	0.036	19.20
10	0.018	20.00

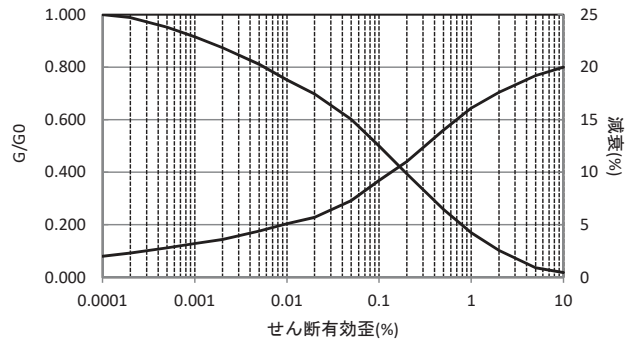


図 3-6 ひずみ依存特性 (第 2 粘性土層)

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	2.00
0.0002	0.991	2.30
0.0005	0.963	2.80
0.001	0.934	3.20
0.002	0.902	3.60
0.005	0.853	4.40
0.01	0.807	5.10
0.02	0.764	5.70
0.05	0.684	7.30
0.1	0.569	9.20
0.2	0.448	11.00
0.5	0.295	14.00
1	0.193	16.10
2	0.116	17.60
5	0.041	19.20
10	0.021	20.00

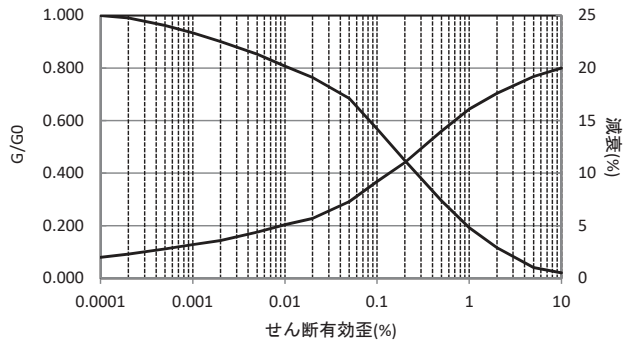


図 3-7 ひずみ依存特性 (第 3 粘性土層)

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	2.00
0.0002	0.991	2.30
0.0005	0.980	2.80
0.001	0.962	3.20
0.002	0.933	3.60
0.003	0.910	4.40
0.005	0.873	5.10
0.01	0.797	5.70
0.02	0.699	7.30
0.03	0.616	9.20
0.05	0.512	11.00
0.1	0.367	14.00
0.2	0.237	16.10
0.3	0.177	17.60
0.5	0.113	19.20
1	0.061	20.00

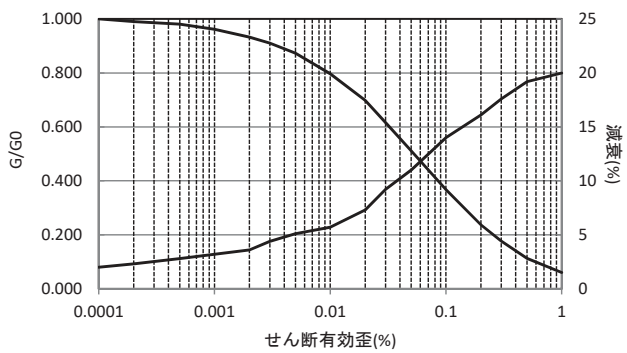


図 3-8 ひずみ依存特性 (第 1 砂質土層)

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	0.700
0.0002	0.990	0.900
0.0005	0.970	1.300
0.001	0.950	1.600
0.002	0.928	1.900
0.003	0.908	2.300
0.005	0.880	2.800
0.01	0.834	3.700
0.02	0.769	5.000
0.03	0.715	6.300
0.05	0.627	8.400
0.07	0.563	9.900
0.1	0.491	11.900
0.15	0.415	14.200
0.2	0.362	15.800
0.3	0.288	18.300
0.5	0.200	21.700
0.7	0.145	23.300
1	0.085	26.400

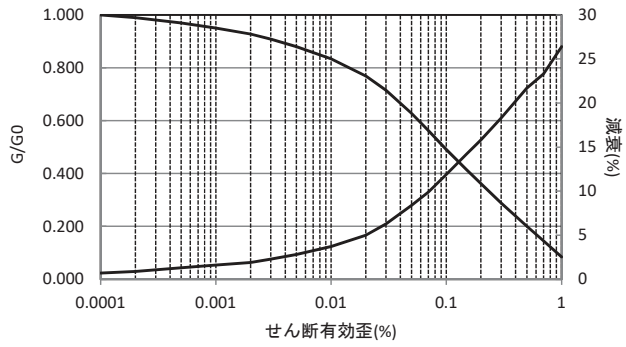


図 3-9 ひずみ依存特性 (第 4 粘性土層)

せん断有効歪 (%)	G/G0	減衰 (%)
0.0001	1.000	0.00
0.0002	0.997	0.08
0.0005	0.991	0.28
0.001	0.977	0.70
0.002	0.953	1.41
0.003	0.932	2.04
0.005	0.899	3.02
0.01	0.832	5.03
0.02	0.740	7.79
0.03	0.661	10.16
0.05	0.563	13.10
0.1	0.418	17.46
0.2	0.277	21.70
0.3	0.209	23.73
0.5	0.134	25.97
1	0.072	27.83

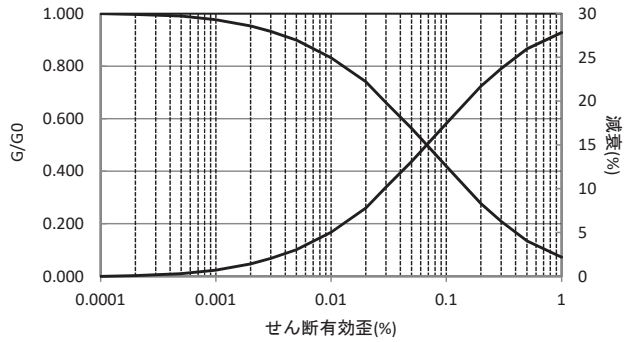


図 3-10 ひずみ依存特性 (第 2 砂質土層)

(b) 検討条件

以下に、検討条件を示す。

- ・重力加速度は  $9.80\text{m/s}^2$ 。
- ・等価線形解析とする。
- ・検討する振動数は  $0\sim 20\text{Hz}$  までとする。

(c) 入力地震動

入力波は水平一方向に入力する。図 3-11 に入力地震動（2E 波）の加速度時刻歴を示す。

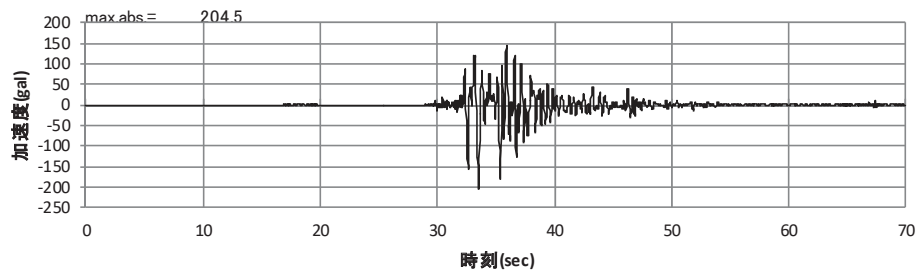


図 3-11 入力地震動加速度時刻歴

(d) 検討結果比較

伝達関数及び加速度の解析解の比較を図 3-12～図 3-15 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。

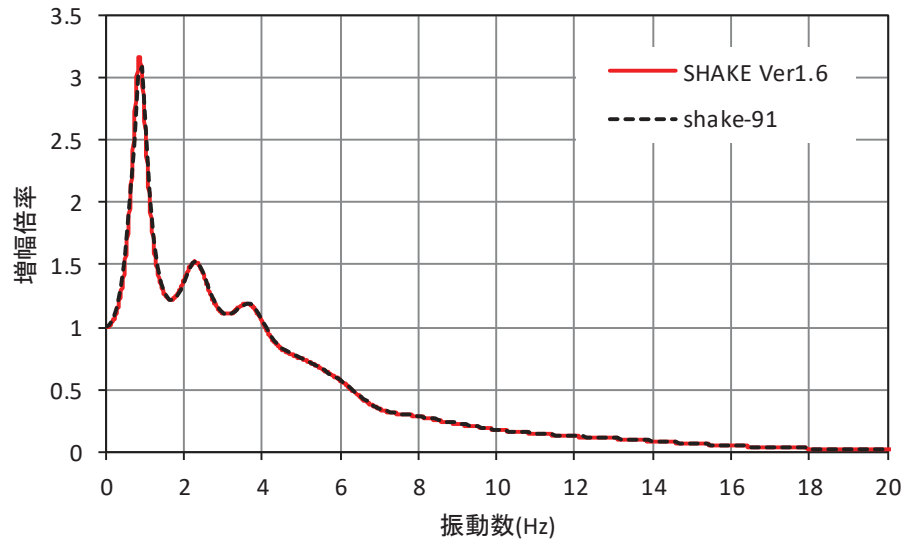


図 3-12 地表面伝達関数比較

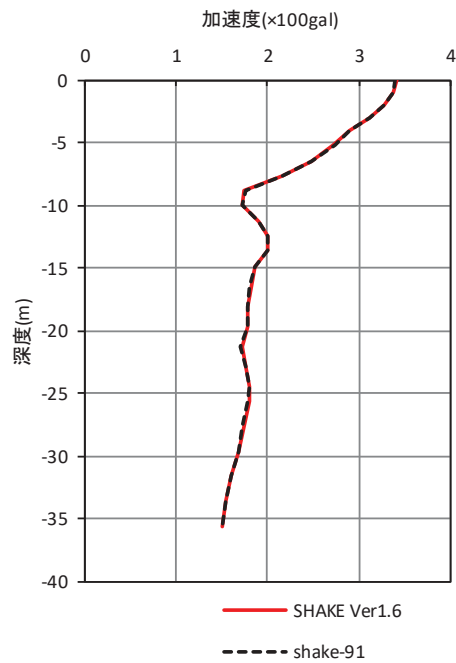


図 3-13 加速度最大分布比較

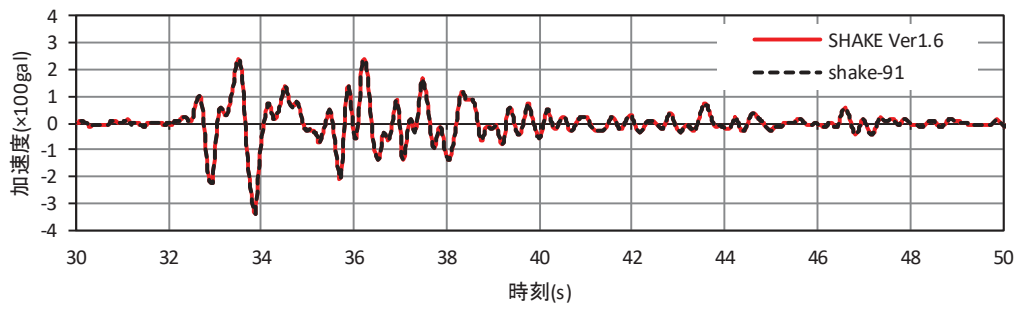


図 3-14 地表面加速度時刻歴比較

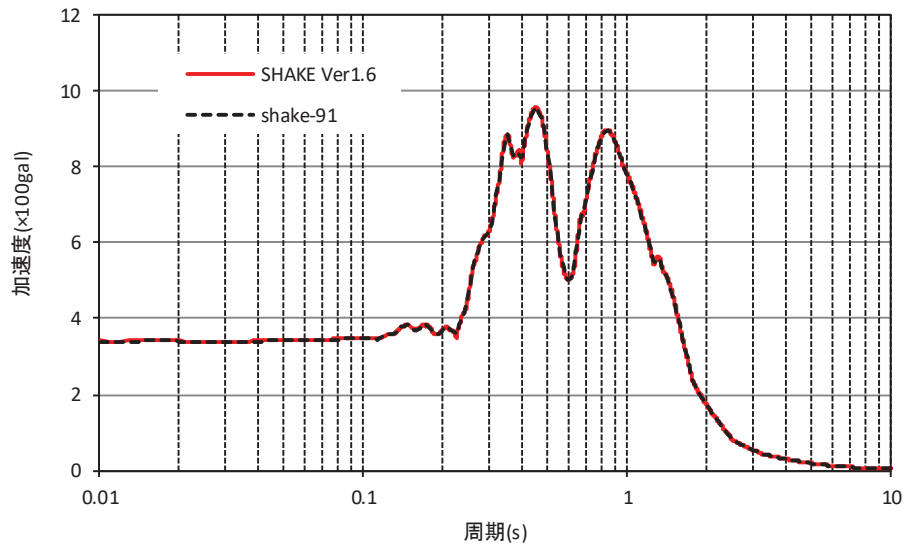


図 3-15 地表面加速度応答スペクトル比較

c. 評価結果

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 shake-91 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、本解析に本解析コードを使用することは妥当である。



VI-5-37 計算機プログラム（解析コード）の概要  
・ TDAPⅢ

## 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"> <li>①2次元及び3次元有限要素プログラムである。</li> <li>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。</li> <li>③線形要素、平面要素、立体要素等を用いることができる。</li> <li>④静的解析を引き継いだ動的解析を行うことができる。</li> <li>⑤地盤及び構造物の非線形性を考慮できる。</li> </ol>
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。</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>・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。</li> <li>・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</li> </ul>

<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"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>
--	--

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"> <li>①2次元及び3次元有限要素プログラムである。</li> <li>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。</li> <li>③線形要素，平面要素，立体要素等を用いることができる。</li> <li>④静的解析を引継いだ動的解析を行うことができる。</li> <li>⑤地盤及び構造物の非線形性を考慮できる。</li> </ol>
<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。</li> <li>・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。</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>・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。</li> <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・構造物，</li> </ul>

<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"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>
--	---



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"> <li>①2次元及び3次元有限要素プログラムである。</li> <li>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。</li> <li>③線形要素、平面要素、立体要素等を用いることができる。</li> <li>④静的解析を引継いだ動的解析を行うことができる。</li> <li>⑤地盤及び構造物の非線形性を考慮できる。</li> </ol>
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の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</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>・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</li> </ul>

<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"> <li>・ 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。</li> <li>・ 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。</li> <li>・ 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。</li> <li>・ 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。</li> <li>・ 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。</li> </ul>
--	--

2.4 TDAPⅢ Ver. 3.11

<p>項目</p>	<p>コード名 TDAPⅢ</p>
<p>使用目的</p>	<p>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</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. 3.11</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> <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>
<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。</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>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>・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。</li><li>・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。</li></ul>
--	--

### 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。

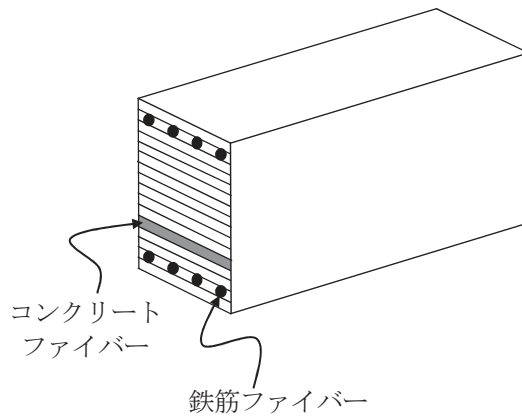


図 3-1 ファイバーモデルの概念図

#### 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、 $\Delta t$  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。

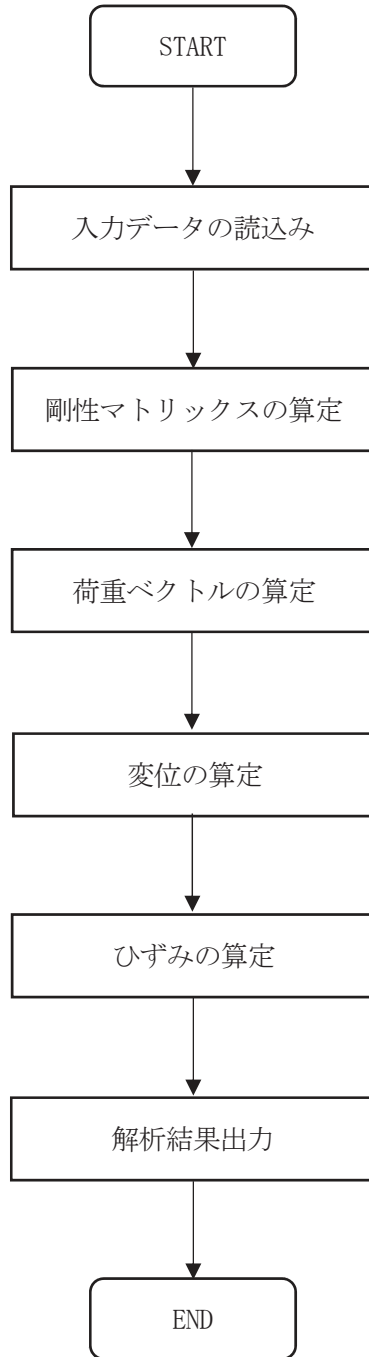


図 3-4 解析フローチャート



### 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。

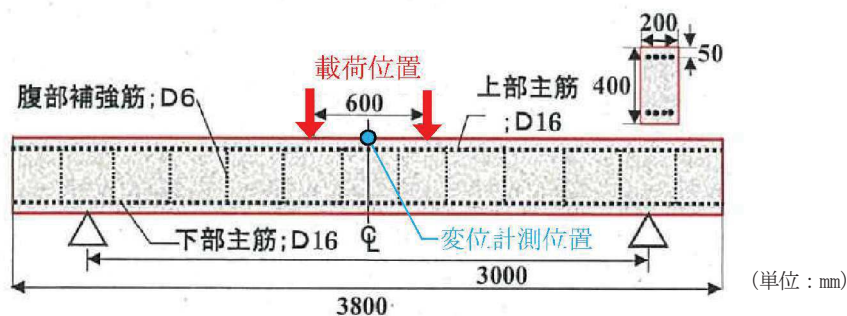


図3-5 実験概念図

(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。

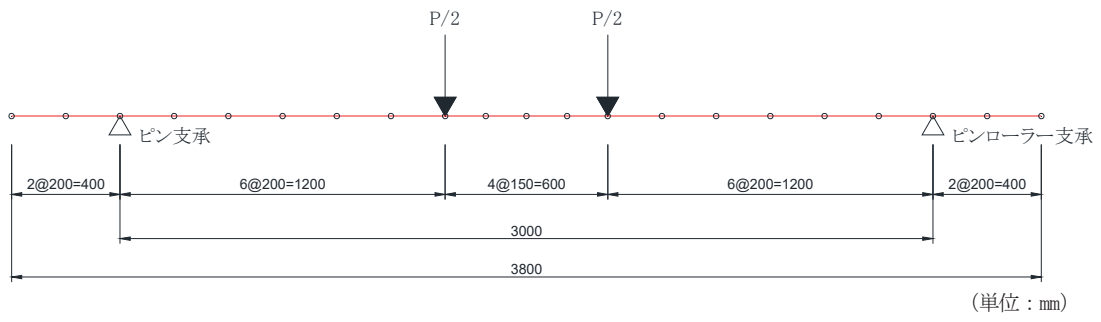


図 3-6 解析モデル図

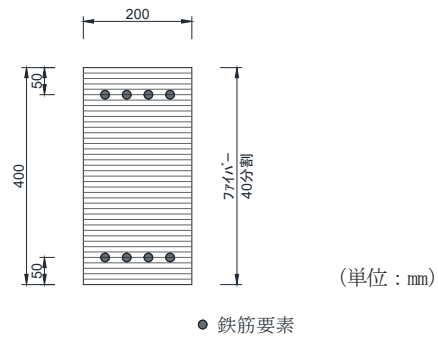


図 3-7 断面のモデル化

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 <sup>2</sup> )	45.3
	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	3.7
	ヤング係数 $E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$3.06 \times 10^4$
鉄筋	降伏強度 $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	344
	ヤング係数 $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	$1.94 \times 10^5$

(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。

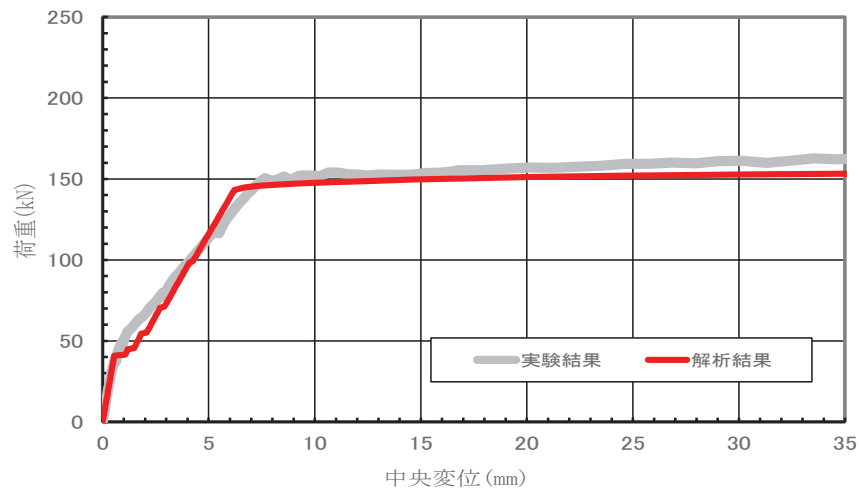


図 3-8 荷重-変位関係の比較

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。

VI-5-56 計算機プログラム（解析コード）の概要  
・UC-win/Section

## 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

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）UC-win/Section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-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼管式鉛直壁）の耐震性についての計算書	Ver. 6.02.02
VI-2-13-3	地下水位低下設備揚水井戸の耐震性についての計算書	Ver. 6.02.02
VI-3-別添 3-2-1-1	防潮堤（鋼管式鉛直壁）の強度計算書	Ver. 6.02.02



## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 UC-win/Section
使用目的	鉄筋コンクリートの応力度計算
開発機関	株式会社フォーラムエイト
開発時期	2003 年
使用したバージョン	Ver. 6. 02. 02
コードの概要	<p>UC-win/Section (以下「本解析コード」という。) は、鉄筋コンクリート断面の断面諸量、応力度計算、断面耐力算定を行う解析コードで、主な特徴は、以下のとおりである。</p> <p>①鉄筋の情報(位置、断面積)を1本毎に考慮でき、複鉄筋等、配筋に忠実な断面計算が可能である。</p> <p>②任意形状に対して2軸曲げの計算が可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証(Verification)】</b> 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>・本解析コードによる複鉄筋の断面照査結果と理論解が一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードによる2軸曲げの計算結果と理論解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> 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、複鉄筋及び2軸曲げについて検証していることから、解析の目的に照らして本工事計画に本解析コードを適用することは妥当である。</li> <li>・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、SA用海水ピット他の鉄筋コンクリートの応力解析(断面照査)に本解析コード(Ver. 6. 02. 01)が使用された実績がある。</li> <li>・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。</li> <li>・本工事計画における構造に適用する要素、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>