

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 5-047
提出年月日	2023年2月9日

VI-5-47 計算機プログラム（解析コード）の概要  
・ S H A K E

2023年2月

中国電力株式会社

## 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	4
2.1 SHAKE Ver. 2.0	4
3. 解析手法	5
3.1 一般事項	5
3.2 解析コードの特徴	5
3.3 解析手法	6
3.4 解析フローチャート	9
3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	10
3.5.1 検証	10
3.5.2 妥当性確認	12
3.5.3 評価結果	18

1. はじめに

本資料は、VI-2-30「第1ベントフィルタ格納槽の地震応答計算書」等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-1-1-7-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. 2.0
VI-1-9-3-1	斜面安定性に関する説明書	Ver. 2.0
VI-2-2-18	取水槽の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-2-20	屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-2-22	B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-2-24	屋外配管ダクト（B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-2-26	屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-2-28	取水管の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
VI-2-2-29	取水口の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
VI-2-2-30	第1 ベントフィルタ格納槽の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-2-32	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-2-34	緊急時対策所用燃料地下タンクの耐震性についての計算書	Ver. 2.0
VI-2-2-35	ガスタービン発電機用軽油タンク基礎の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-2-37	屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-10-2-2-1	防波壁（波返重力擁壁）の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-10-2-2-2	防波壁（逆T擁壁）の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-10-2-2-3	防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-10-2-4	防波壁通路防波扉の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
VI-2-10-2-5	1号機取水槽の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-11-2-3	免震重要棟遮蔽壁の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
VI-2-11-2-12	復水貯蔵タンク遮蔽壁の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
VI-2-11-2-13	仮設耐震構台の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
VI-2-別添2-2	溢水源としないB, Cクラス機器の耐震性についての計算書	Ver. 2.0
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. 2.0

VI-2-別添4-2	地下水位低下設備の地震応答計算書	Ver. 2.0
VI-2-別添6-2	漂流防止装置の耐震性についての計算書	Ver. 2.0

## 2. 解析コードの概要

### 2.1 SHAKE Ver. 2.0

コード名	SHAKE
項目	
使用目的	1次元地震応答解析による入力地震動の算定
開発機関	中電技術コンサルタント株式会社
開発時期	2008年
使用したバージョン	Ver. 2.0
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. 2.0) について、2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他プラントの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>

### 3. 解析手法

#### 3.1 一般事項

本資料は、解析コード SHAKE Ver. 2.0（以下「本解析コード」という。）の概要である。

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

本解析コード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。

本解析コードの主な特徴として、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である。

### 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  $m$  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  $h_m$ 、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義で、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  $A_{n,m}(\omega)$  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)、式(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。

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

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

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。

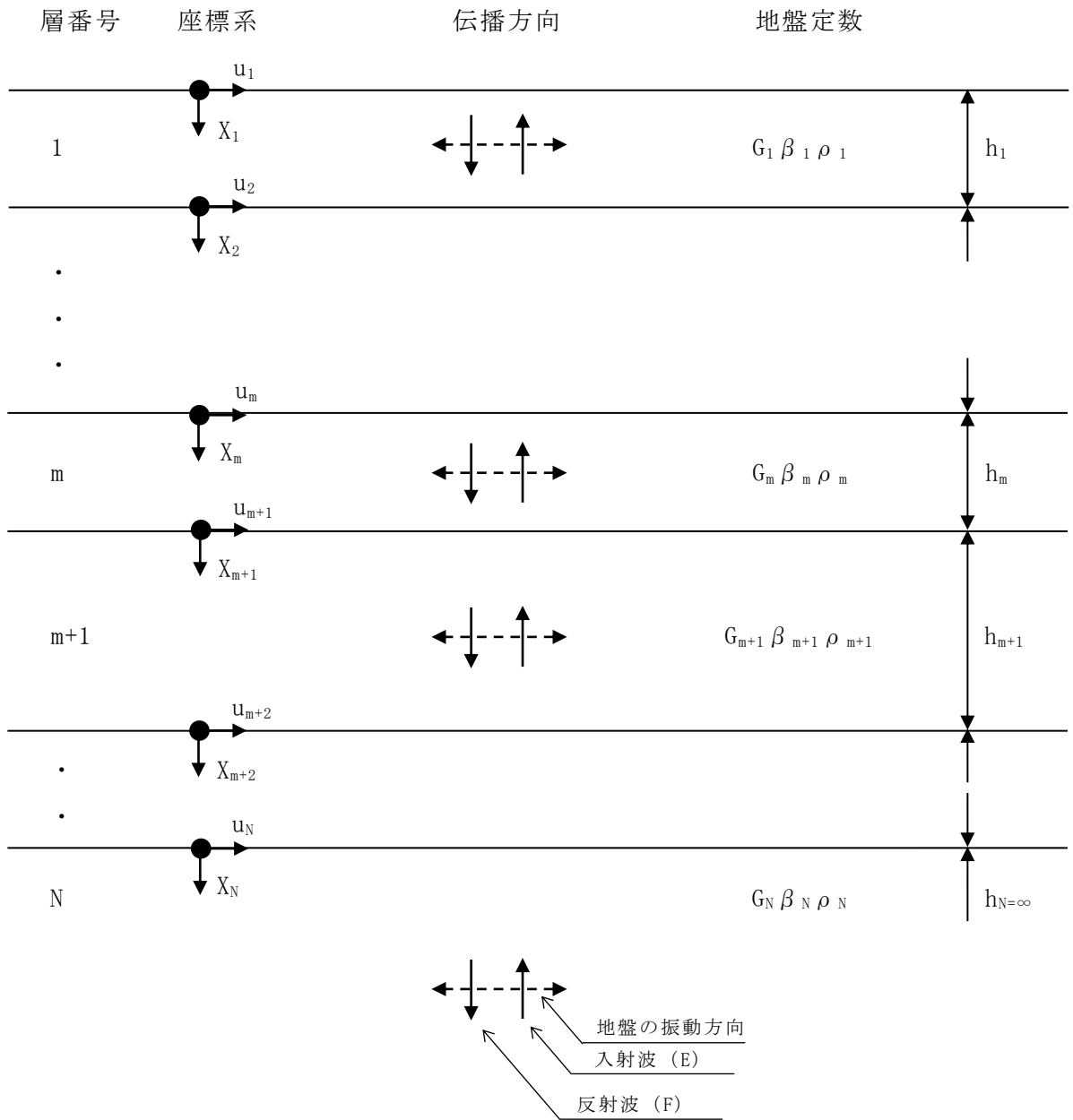


図 3-1 1次元地盤モデル

### 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。

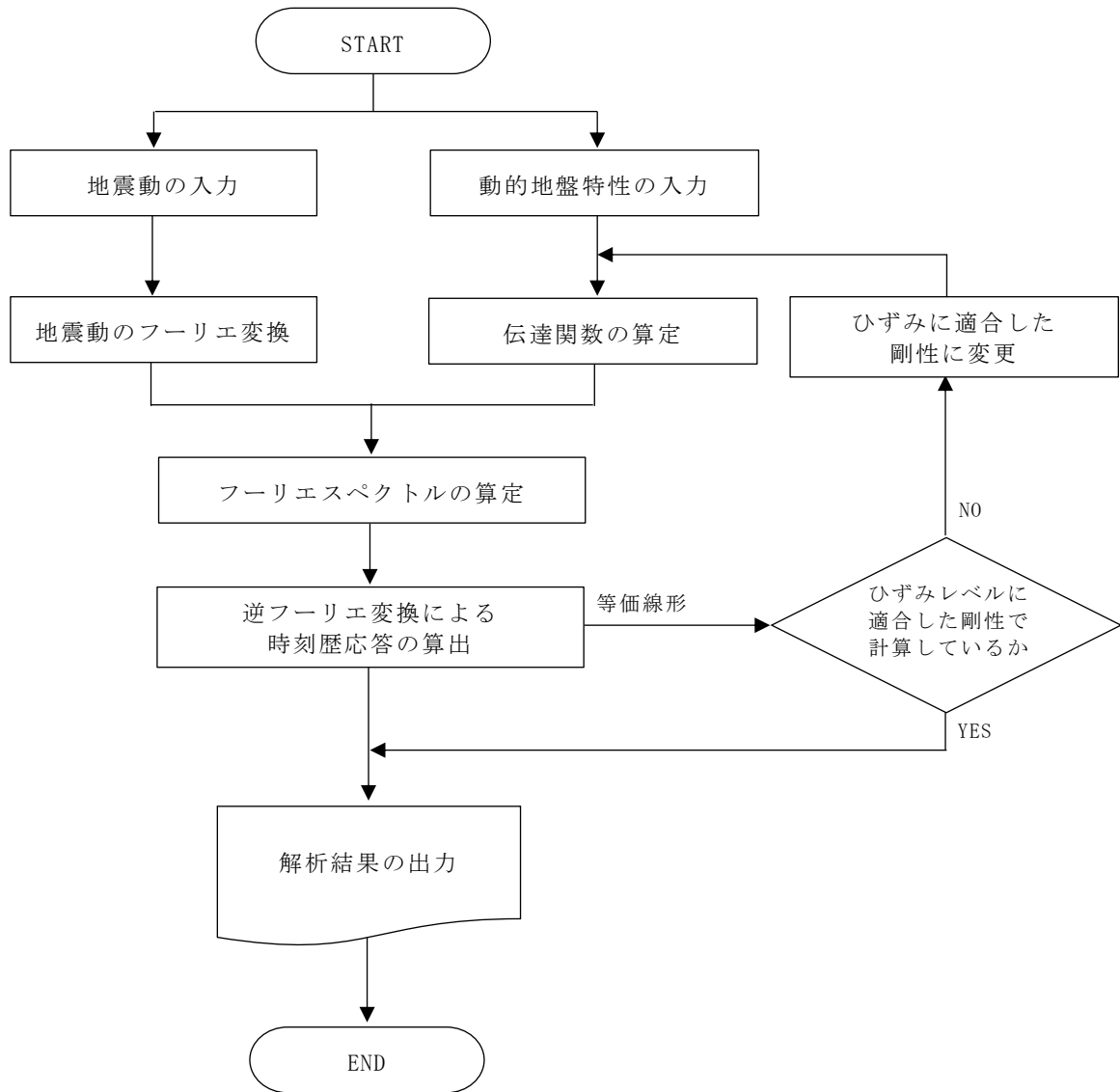


図 3-2 解析フローチャート

### 3.5 検証 (Verification) 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。

#### 3.5.1 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。

##### 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。

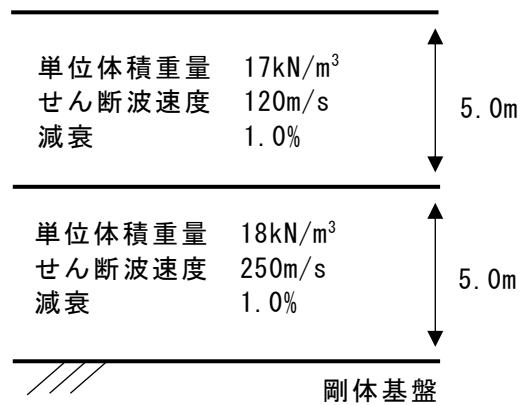


図3-3 地盤モデル諸元

<検討条件>

- ・重量加速度は  $9.80\text{m/s}^2$  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、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。

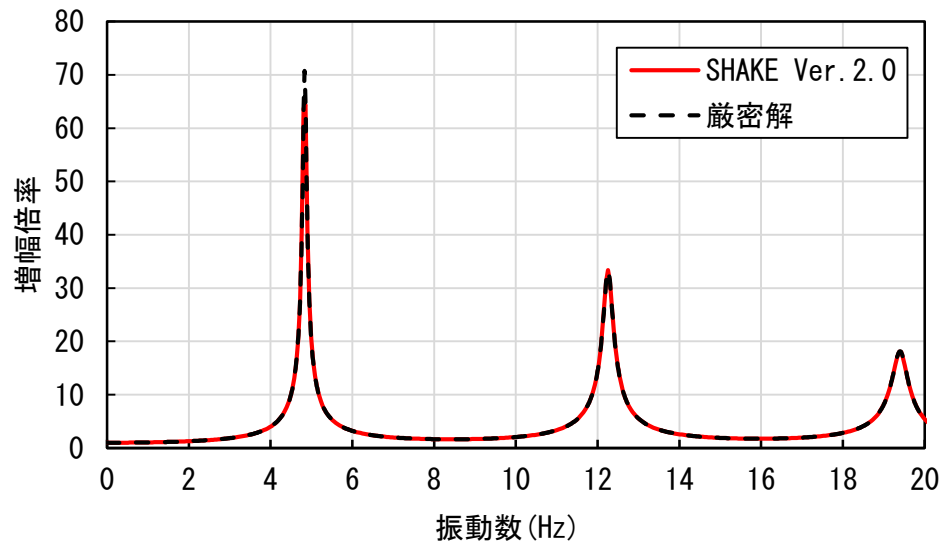


図3-4 理論解との伝達関数の比較

### 3.5.2 妥当性確認

カリ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. 検証モデル及び検討条件

表3-1に検討地盤モデルを示し、図3-5～図3-10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 $\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	動的せん断 弾性係数 Gd ( $\text{kN/m}^2$ )	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	13.60	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
		1.60	24.40	16	43000	162	0.020
第1砂質土層	1.20	1.20	25.60	19	159000	286	0.020
第4粘性土層	8.00	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

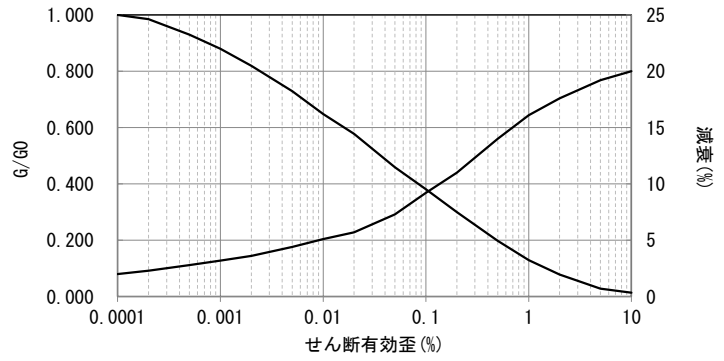


図 3-5 ひずみ依存特性 (第 1 粘性土層)

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

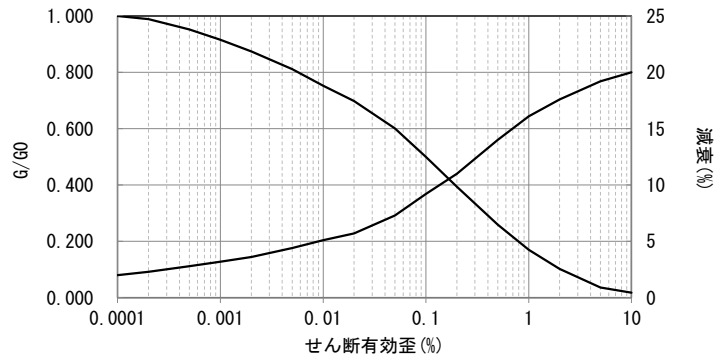


図 3-6 ひずみ依存特性 (第 2 粘性土層)

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

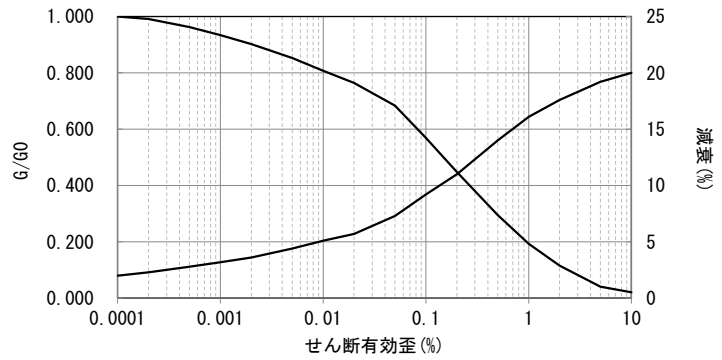


図 3-7 ひずみ依存特性 (第 3 粘性土層)

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

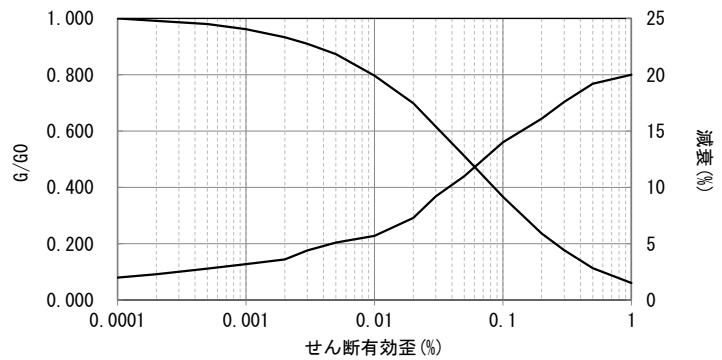


図 3-8 ひずみ依存特性 (第 1 砂質土層)



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

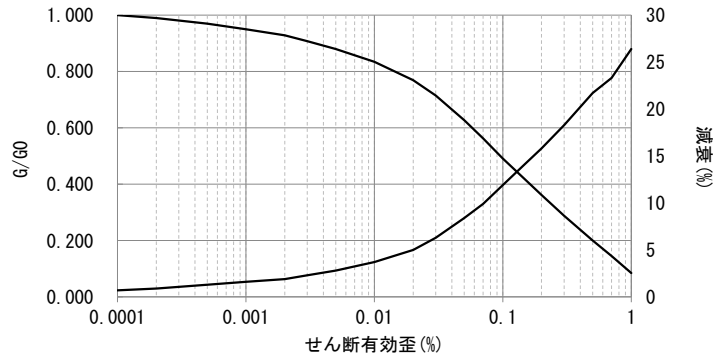


図 3-9 ひずみ依存特性 (第 4 粘性土層)

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

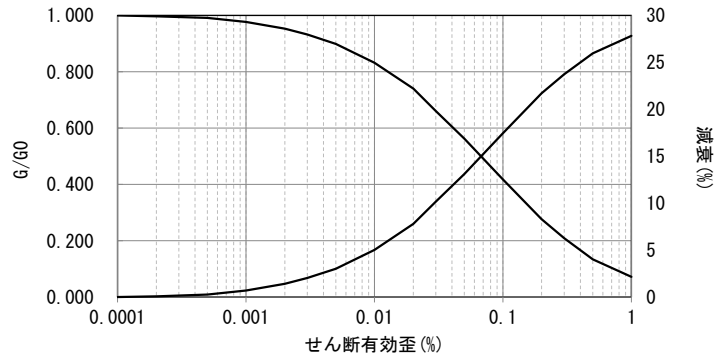


図 3-10 ひずみ依存特性 (第 2 砂質土層)

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 1 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。

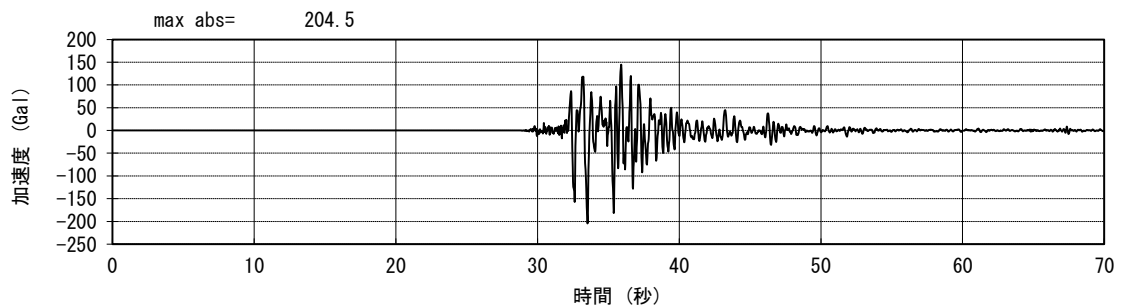


図 3-11 入力地震動加速度時刻歴

## 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。

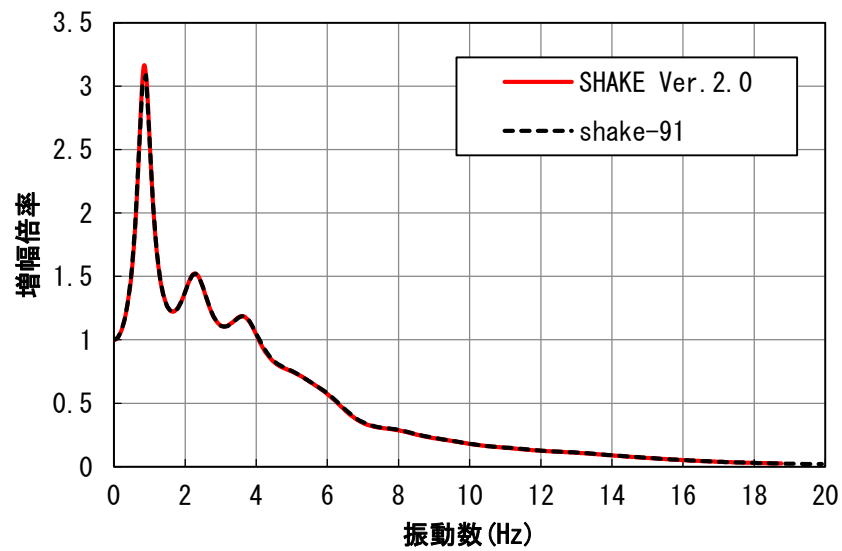


図 3-12 地表面伝達関数比較

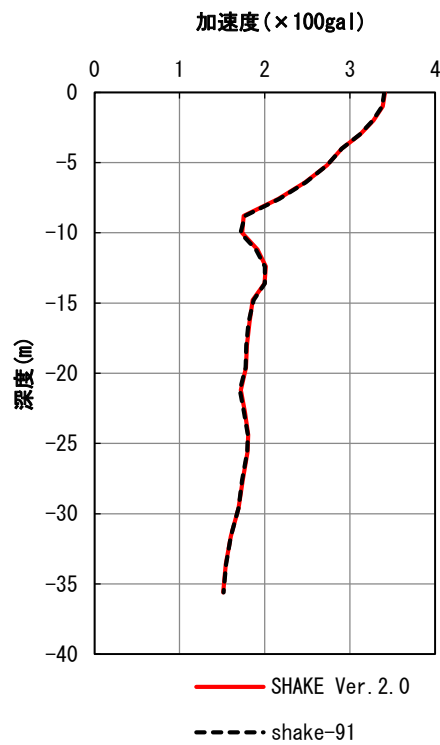


図 3-13 加速度最大分布図

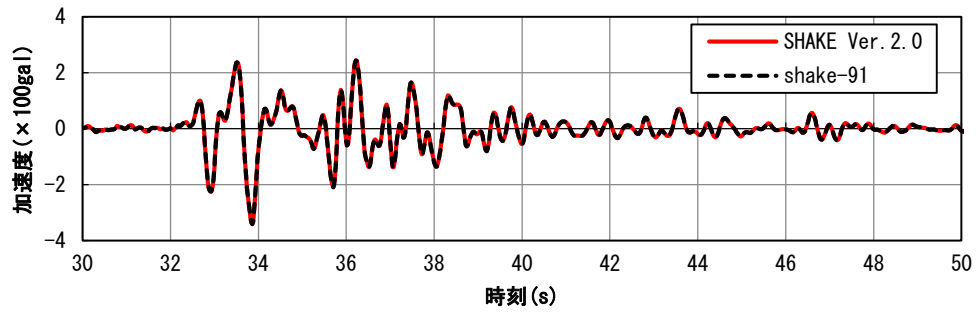


図 3-14 地表面加速度時刻歴比較

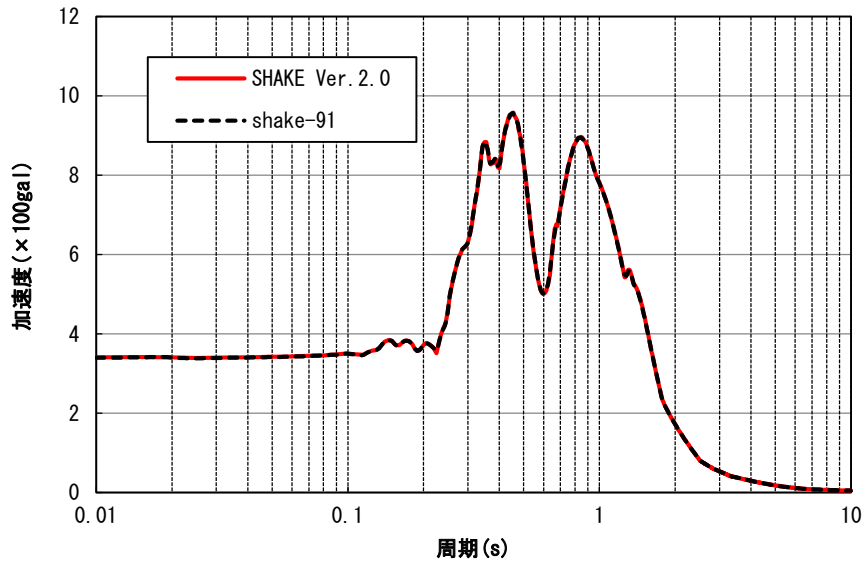


図 3-15 地表面加速度応答スペクトル比較

### 3.5.3 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。