

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-22-0038_改0
提出年月日	2021年2月25日

VI-5-31 計算機プログラム（解析コード）の概要
・SHAKE

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.....	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V_sをP波速度V_p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>【検証(Verification)】 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。 ・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。 ・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。 <p>【妥当性確認(Validation)】 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"> ・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。 ・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。 ・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。

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V_sをP波速度V_p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>【検証(Verification)】 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 (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。 ・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。 <p>【妥当性確認(Validation)】 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"> ・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。 ・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。

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V_sをP波速度V_p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>【検証(Verification)】 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 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。 ・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。 <p>【妥当性確認(Validation)】 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"> ・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。 ・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。 ・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。 ・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。

注記*：最新耐震構造解析 柴田明徳著 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 ρ 、せん断弾性係数が G 、臨界減衰比が β で定義されているとする。せん断波の伝播は水平変位 $u=u(x, t)$ 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 ω に対し、次式で与えられる。

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

ここに、

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

である。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 ρ_m 、せん断弾性係数を G_m 、臨界減衰比を β_m で定義すると、それぞれ次のように表せる。

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

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

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

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

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

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

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

この複素インピーダンス比 α_m は、周期に対して独立である。自由面におけるせん断応力度 $\tau=0$ と式 (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。

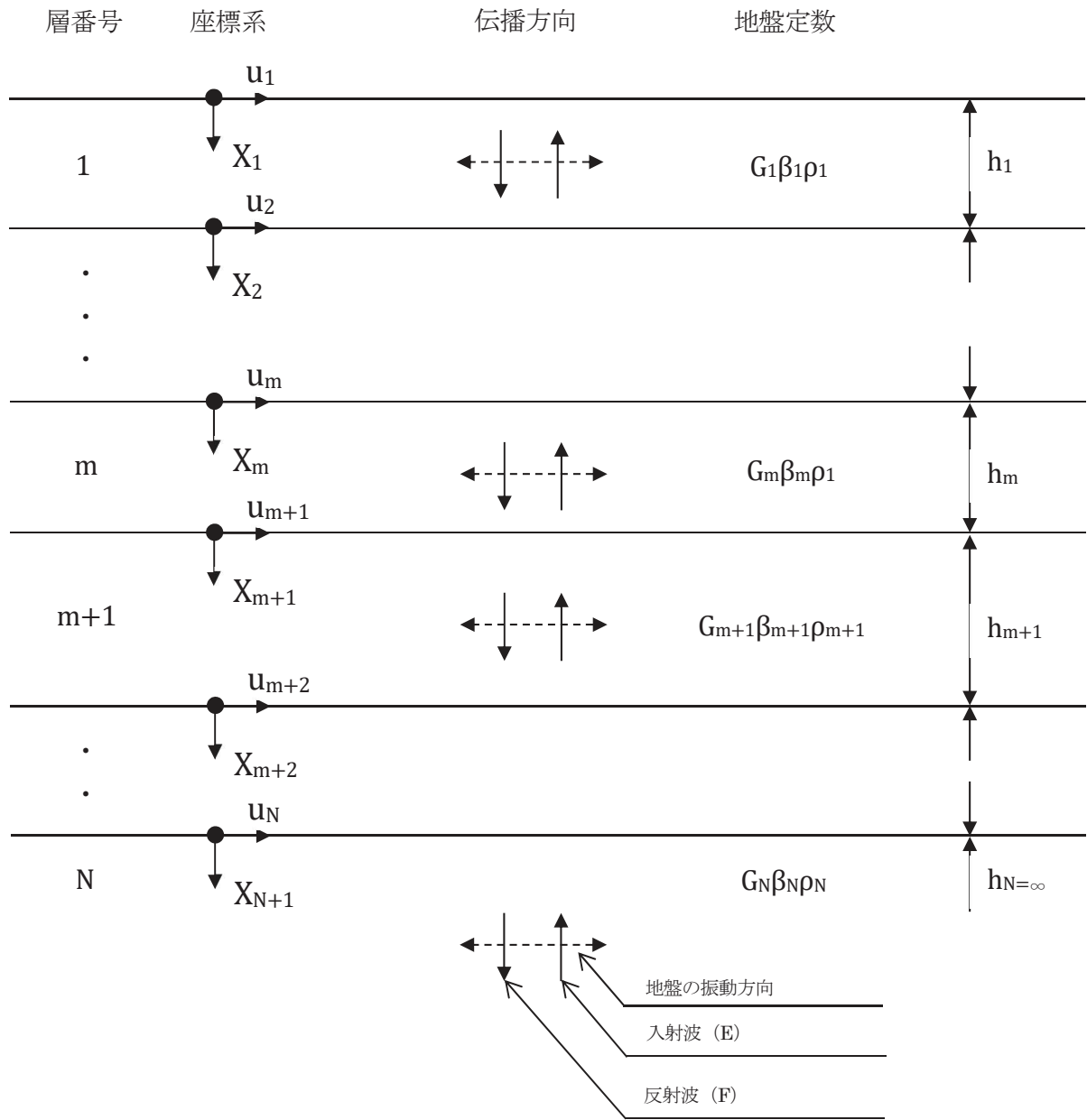


図 3-1 1次元地盤モデル

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。

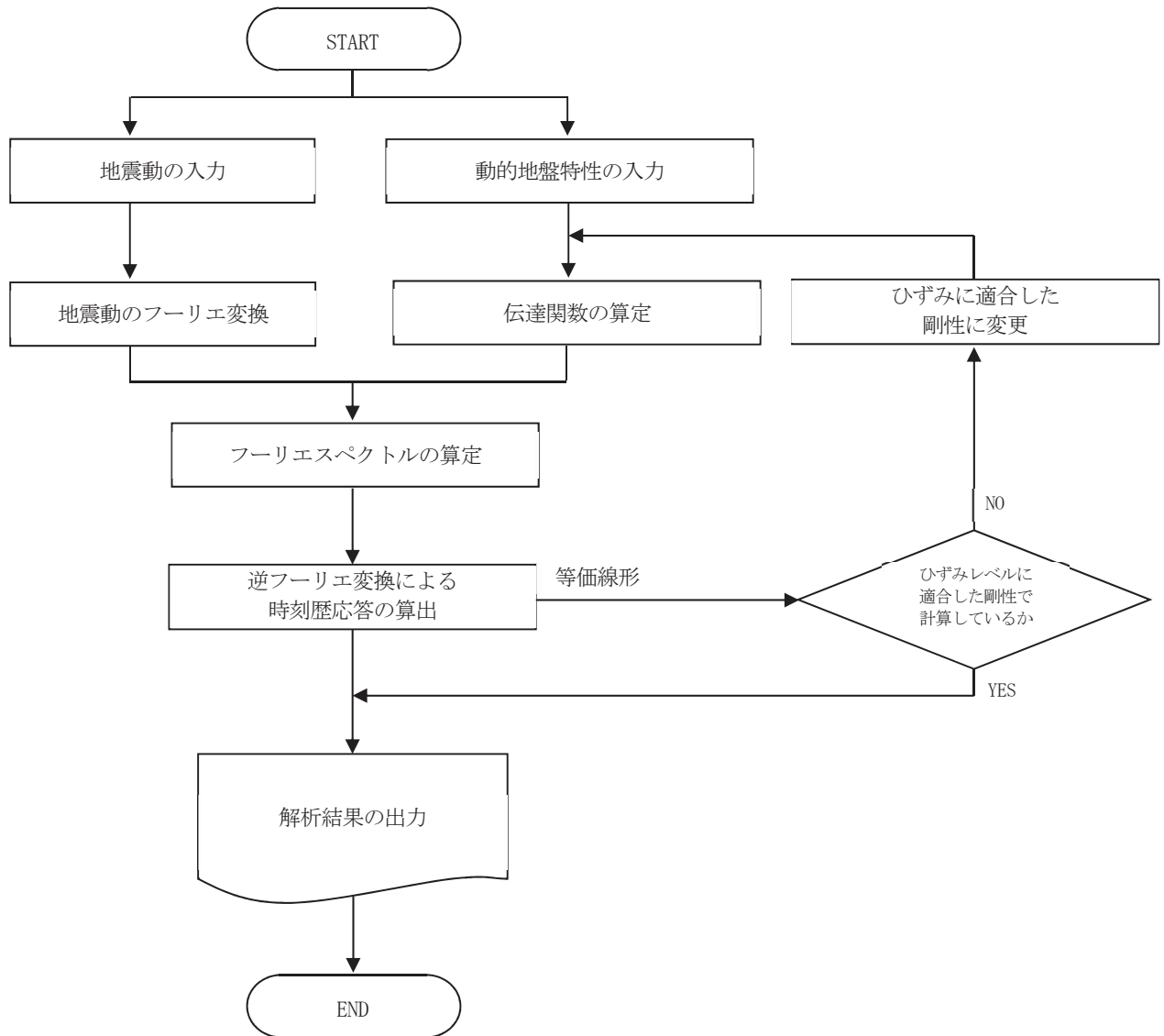


図3-2 解析フローチャート

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。

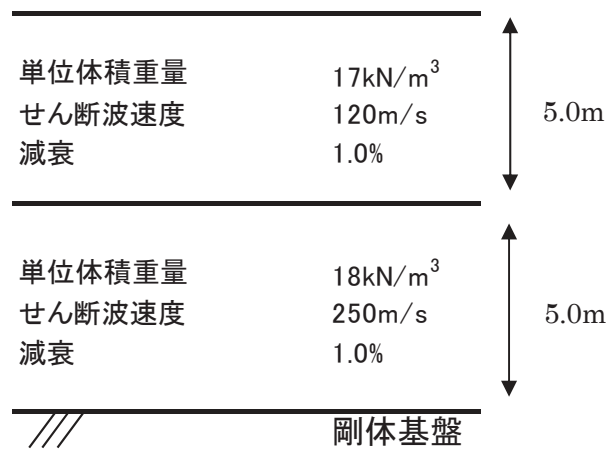


図 3-3 地盤モデル諸元

<検討条件>

- ・重力加速度は 9.80m/s² とする。
- ・検討する振動数は 0~20Hz 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。

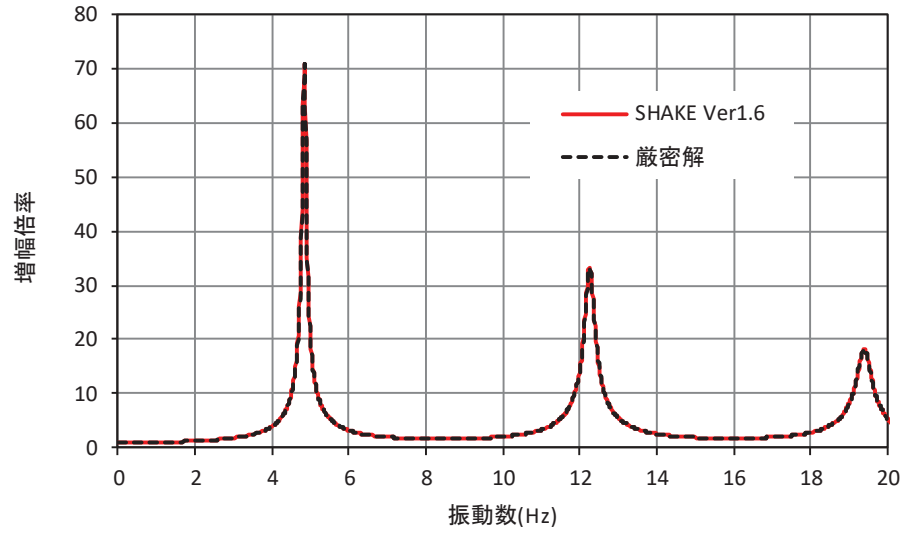


図 3-4 理論解との伝達関数の比較

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 γ_t (kN/m ³)	動的せん断 弾性係数 Gd (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

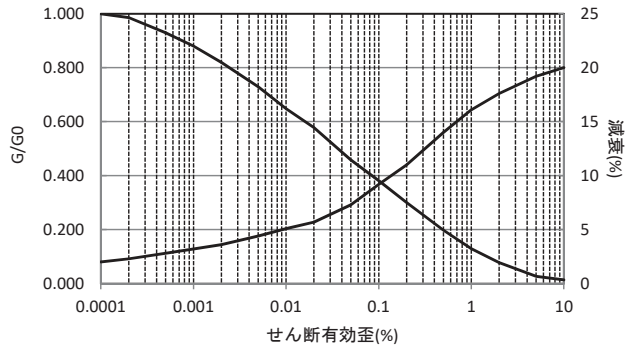


図 3-5 ひずみ依存特性 (第 1 粘性土層)

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

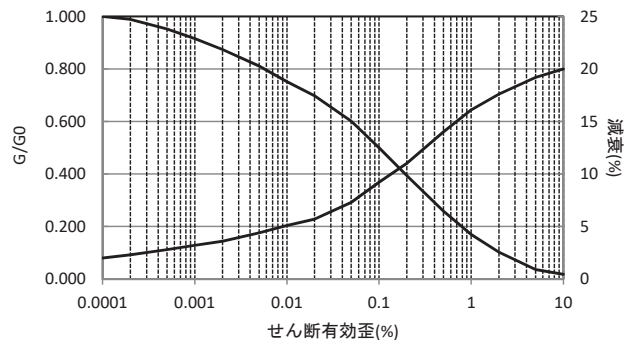


図 3-6 ひずみ依存特性 (第 2 粘性土層)

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

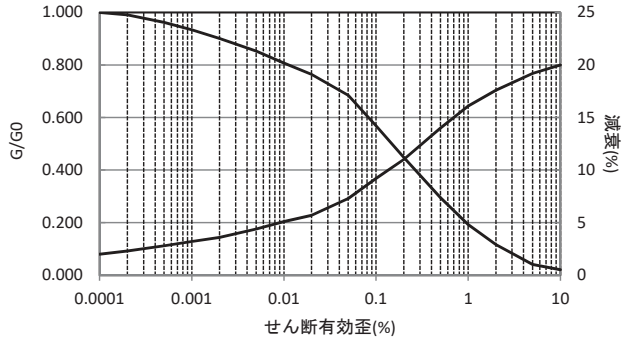


図 3-7 ひずみ依存特性 (第 3 粘性土層)

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

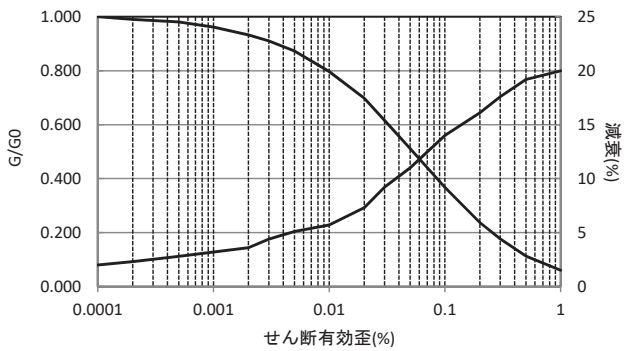


図 3-8 ひずみ依存特性 (第 1 砂質土層)

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

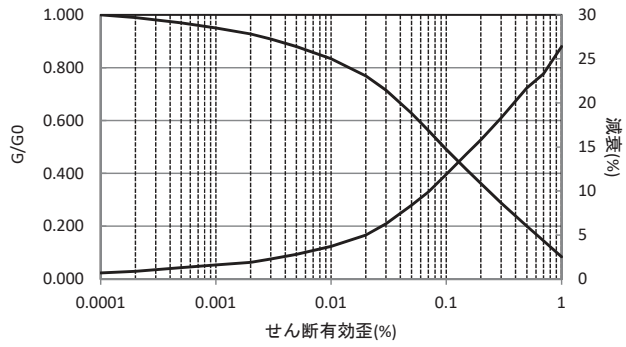


図 3-9 ひずみ依存特性 (第 4 粘性土層)

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

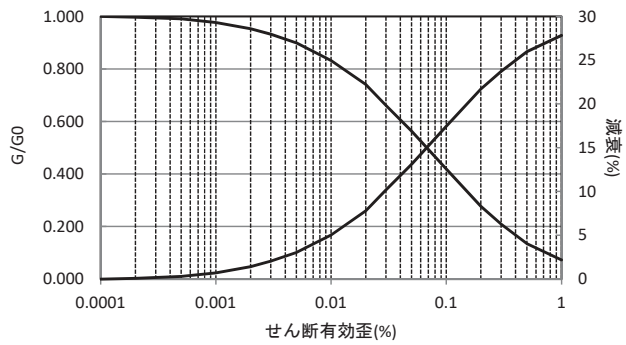


図 3-10 ひずみ依存特性 (第 2 砂質土層)

(b) 検討条件

以下に、検討条件を示す。

- ・重力加速度は 9.80m/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。

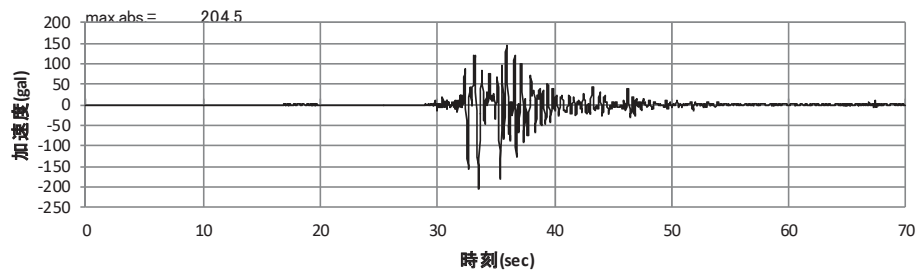


図 3-11 入力地震動加速度時刻歴

(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。

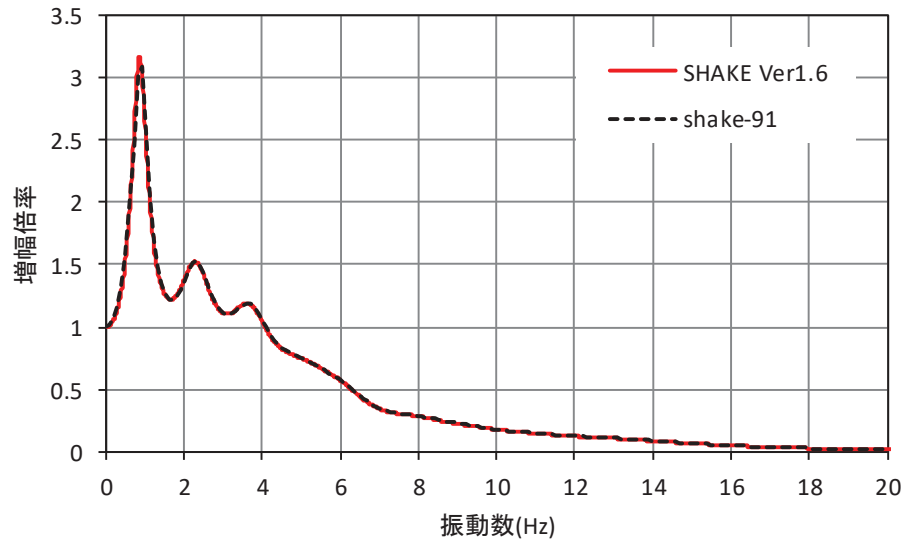


図 3-12 地表面伝達関数比較

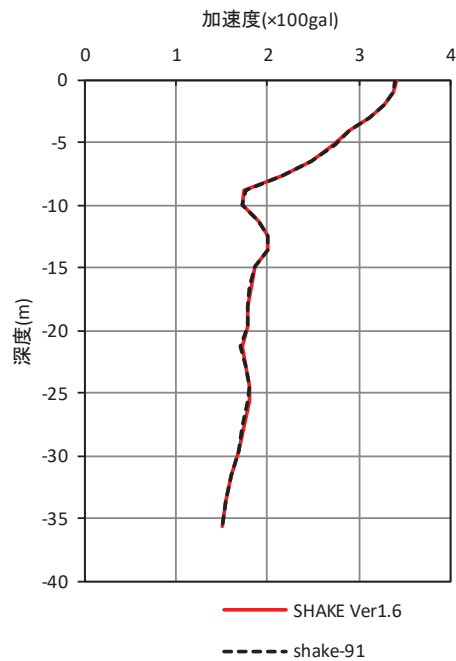


図 3-13 加速度最大分布比較

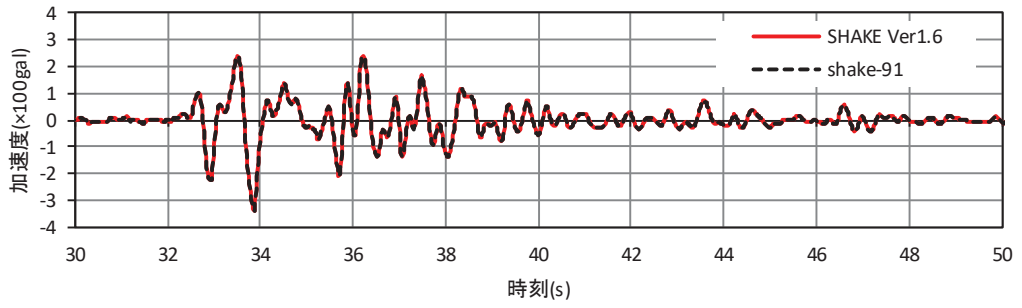


図 3-14 地表面加速度時刻歴比較

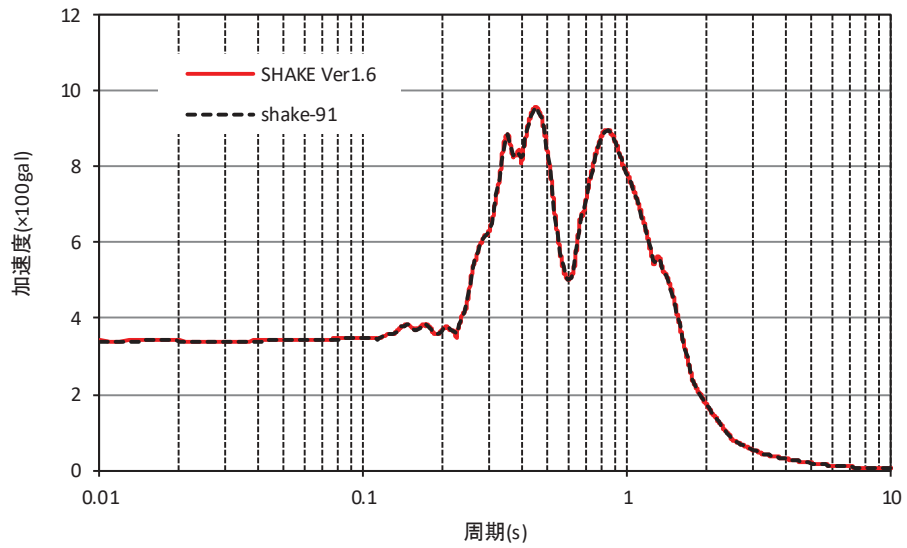


図 3-15 地表面加速度応答スペクトル比較

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。