

東海第二発電所	工事計画審査資料
資料番号	工認-756 改2
提出年月日	平成30年9月28日

V-5-22 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	3
3.	SHAKEの解析手法について	4
3.1	一般事項	4
3.2	解析コードの特徴	4
3.3	解析手法	5
3.4	解析フローチャート	8
3.5	検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)	9

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
V-2-2-14	主排気筒の地震応答計算書	Ver. 1.6.9
V-2-2-16	非常用ガス処理系配管支持架構の地震応答計算書	Ver. 1.6.9

2. 解析コードの概要

項目	コード名 SHAKE
使用目的	地盤応答解析（入力地震動評価）
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. 1.6.9
コードの概要	<ul style="list-style-type: none"> ・SHAKE Ver. 1.6.9（以下「本解析コード」という。）は、米国カルフォルニア州立大学から発表されたSHAKE（最新公開版は「SHAKE - 91」である。）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多層地盤の地震応答解析を行うプログラムである。なお、本解析コードは、インハウスコードである。 ・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及び応答波形が求められる。 ・地盤の等価線形解析を行うことが可能である。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	<p>SHAKE Ver. 1.6.9は、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S_sに対する地盤応答を1次元重複反射理論に基づき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"> ・本解析コードによる弾性地盤の増幅特性の解析結果が公開文献*¹の理論解（以下「理論解」という。）と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使用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"> ・本解析コードのベースとなった米国カルフォルニア州立大学から発表されたSHAKEは世界的に広く用いられており、その最新版であるSHAKE-91を用いた解析解と本解析コードの解析解を比較した結果、概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。 <p>注記 *1： 最新耐震構造解析 柴田明德著 234頁，235頁 森北出版株式会社 第1版</p>

3. SHAKEの解析手法について

3.1 一般事項

本資料は、地盤応答解析を行う解析コードSHAKE Ver. 1.6.9の概要である。

本解析コードは、日本国内の原子力施設の工事計画認可申請に多くの利用実績のある解析コードであり、地盤応答解析（入力地震動の評価）に用いる。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードは、1次元重複反射理論に基づく弾性地盤応答解析ができる解析コードである。以下に、今回の解析に使用する弾性解析の機能を示す。

- ①1次元波動論に基づき、多層地盤の地震応答解析を行う。
- ②解析結果として、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及び応答波形が求められる。
- ③本解析コードは、次の仮定を設けて地震応答解析を行っている。
 - ・地盤は、水平方向に半無限に広がっているものとする。（水平成層地盤）
 - ・応答は、地震動が解析基盤から鉛直伝播により起こるものとする。
 - ・地盤物性は、各層の単位体積重量、せん断波速度（又はせん断弾性係数）、ポアソン比及び減衰定数を入力することで定義する。
- ④等価線形解析を行うことができる。

また、今回の解析における本解析コードのバージョン、件名、使用要素及び評価内容を表3.2-1に示す。なお、次に示す検証及び妥当性確認はVer. 1.6.2で実施した結果である。本工事計画において使用するバージョンは、検証及び妥当性確認において記載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。

表3.2-1 使用件名

バージョン	件名	使用要素	評価内容
Ver. 1.6.9	<ul style="list-style-type: none"> ・主排気筒 ・非常用ガス処理系配管支持架構 	—	地盤応答解析

3.3 解析手法

解析理論において、図3.3-1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。各層は、均質、等方性であり、厚さ h 、密度 ρ 、せん断弾性係数 G 及び臨界減衰比 β で定義される。

図3.3-1に示される系を通過するせん断波の伝播は、水平変位 $u = u(x, t)$ による以下の式で表わされる。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

η : 粘性係数

水平変位 $u = u(x, t)$ を、以下の (2) 式で表わされる振動数 ω に対する調和振動と考える。

$$u(x, t) = U(x) \cdot e^{i\omega t} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

i : 虚数単位

(2) 式は、波動方程式の一般解として (3) 式で表わされる。

$$u(x, t) = E \cdot e^{i(kx + \omega t)} + F \cdot e^{-i(kx - \omega t)} \dots\dots\dots (3)$$

$$k = \sqrt{\frac{\rho\omega^2}{G + i\omega\eta}} = \sqrt{\frac{\rho\omega^2}{G^*}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

E, F : 積分定数

G^* : 複素剛性

(3) 式の第一項は、 X のマイナス方向（上向き）に伝わる入射波を示し、第二項は X のプラス方向（下向き）に伝わる反射波を示している。

ここで、任意の m 層と $(m+1)$ 層の変位とせん断応力との連続性を考え、更に自由面ではせん断応力 $\tau = 0$ の境界条件を導入し、以下関係を導く。

$$E_m = e_m(\omega) E_1 \dots\dots\dots (5)$$

$$F_m = f_m(\omega)F_1 \dots\dots\dots (6)$$

伝達関数 e_m 及び f_m は、それぞれ E_1 及び F_1 に対する倍率であり、 $E_1 = F_1 = 1$ を上式に代入すれば決まるものである。

他の伝達関数は、 e_m 及び f_m から得られ、 n 層及び m 層表面での変位を関連づける伝達関数 $A_{n,m}$ は次のように定義する。

$$A_{n,m}(\omega) = u_m / u_n \dots\dots\dots (7)$$

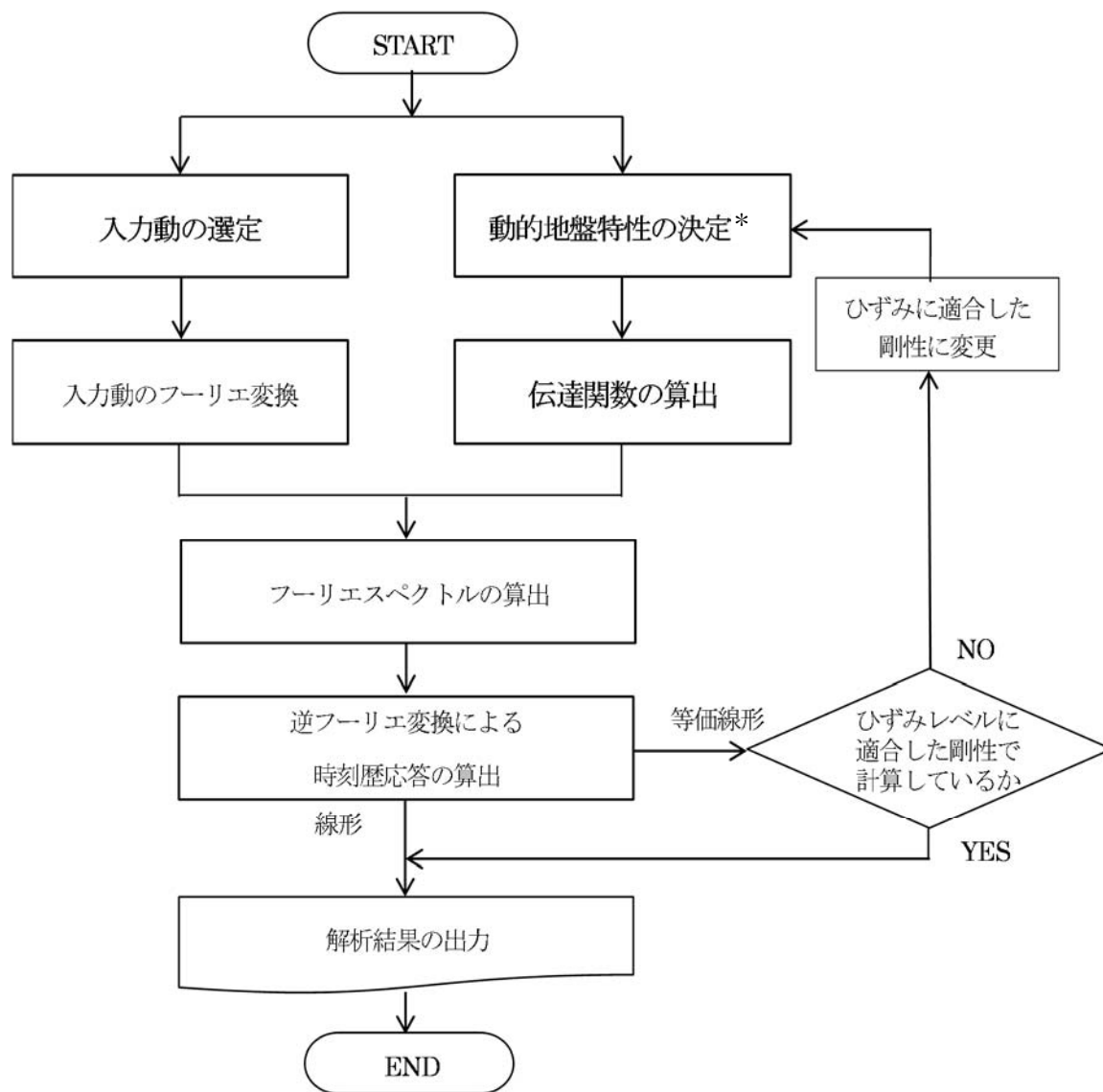
$$A_{n,m}(\omega) = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)} \dots\dots\dots (8)$$

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。

伝達関数が定まれば、複素フーリエ変換により入力動のフーリエスペクトル $F(f)$ を求め、それに伝達関数 $A(f)$ を乗じてフーリエスペクトル $R(f)$ を算定し、それを複素フーリエ逆変換することにより時刻歴応答が求まる。

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3.4-1に示す。



注記 * : 入力データとして単位体積重量, せん断弾性係数及び等価線形法に用いる $G - \gamma$ 関係を選定する。

図3.4-1 解析フローチャート

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

本コードは、「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、日本国内の数多くの原子力施設の工事計画認可申請における解析に使用された実績があるため、解析機能全般について十分な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、公開文献^{*1}により求めた理論解(以下「理論解」という。)と本解析コードによる解析解を比較するとともに、複素応答と1次元重複反射理論に基づき構築された世界各国で用いられている類似解析コードであるSHAKE - 91^{*2}とのコードベンチマークにより、本解析コードの解析機能の適切さを確認している。

注記 *1: 最新耐震構造解析 柴田明德著 231頁, 232頁 森北出版株式会社 第1版参照

*2: SHAK E-91は、米国カルフォルニア州立大学バークレイ校が有償配布している複素応答と重複反射理論に基づいた1次元地盤の等価線形解析コードであり、世界各国で広く用いられている「SHAKE」の最新バージョンである。

a. 検証 (Verification)

(a) 検証方法

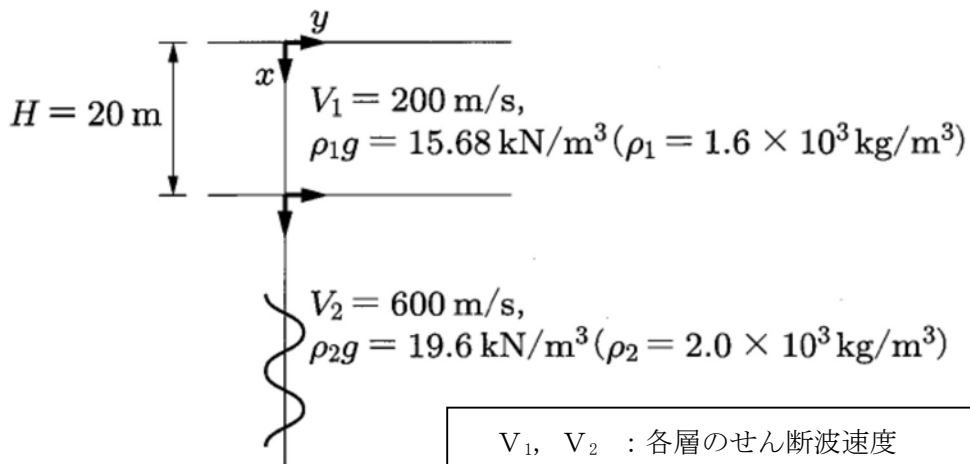
2層の弾性モデル地盤を対象として、本解析コードによる解析解と理論解による結果が一致することを確認する。

(b) 解析条件

解析条件及び解析モデルを図3.5-1に示す。地盤減衰は、履歴減衰として0%と5%の二種とする。

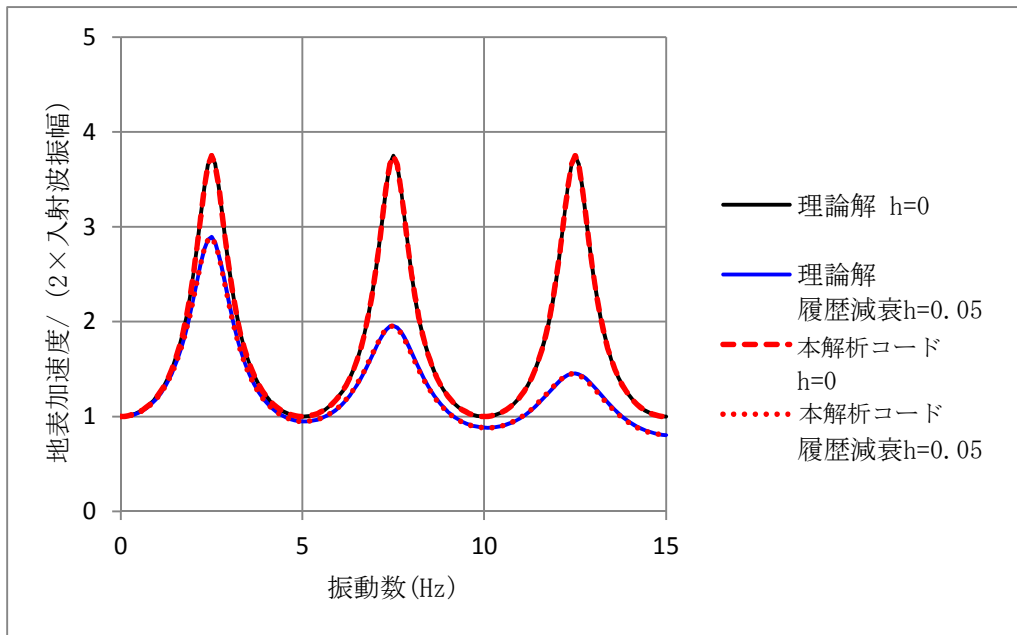
(c) 検証結果

本解析コードによる加速度伝達関数を理論解による加速度伝達関数と比較して図3.5-2及び表3.5-1に示す。本解析コードと理論解の解析結果は同一条件、同一手法による結果であり、両者は概ね一致していることから、本解析コードが正しく評価していることが確認できる。



V_1, V_2	: 各層のせん断波速度
ρ_1, ρ_2	: 各層の密度
g	: 重力加速度 9.80 m/s^2
振動数	: $0 \sim 15 \text{ Hz}$

図 3.5-1 解析条件及び解析モデル



地表面／基盤層

図3.5-2 本解析コードと理論解による加速度伝達関数の比較

表3.5-1 本解析コードと理論解による加速度伝達関数の比較

振動数 (Hz)	h=0			h=0.05		
	理論解	本解析コード	理論解/ 本解析コード	理論解	本解析コード	理論解/ 本解析コード
0.0	1.0000	1.0000	1.000	1.0000	1.0000	1.000
0.5	1.0475	1.0475	1.000	1.0423	1.0425	1.000
1.0	1.2135	1.2135	1.000	1.1962	1.1973	0.999
1.5	1.5971	1.5971	1.000	1.5385	1.5419	0.998
2.0	2.5015	2.5015	1.000	2.2363	2.2445	0.996
2.5	3.7500	3.7500	1.000	2.8930	2.8892	1.001
3.0	2.5015	2.5015	1.000	2.1532	2.1387	1.007
3.5	1.5971	1.5971	1.000	1.4802	1.4717	1.006
4.0	1.2135	1.2135	1.000	1.1510	1.1463	1.004
4.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9987	0.9964	1.002
5.0	1.0000	1.0000	1.000	0.9488	0.9484	1.000
5.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9789	0.9806	0.998
6.0	1.2135	1.2135	1.000	1.0965	1.1012	0.996
6.5	1.5971	1.5971	1.000	1.3345	1.3438	0.993
7.0	2.5015	2.5015	1.000	1.7119	1.7237	0.993
7.5	3.7500	3.7500	1.000	1.9585	1.9534	1.003
8.0	2.5015	2.5015	1.000	1.6739	1.6546	1.012
8.5	1.5971	1.5971	1.000	1.2909	1.2766	1.011
9.0	1.2135	1.2135	1.000	1.0511	1.0427	1.008
9.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9271	0.9228	1.005
10.0	1.0000	1.0000	1.000	0.8822	0.8811	1.001
10.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9012	0.9033	0.998
11.0	1.2135	1.2135	1.000	0.9849	0.9906	0.994
11.5	1.5971	1.5971	1.000	1.1407	1.1502	0.992
12.0	2.5015	2.5015	1.000	1.3456	1.3542	0.994
12.5	3.7500	3.7500	1.000	1.4534	1.4484	1.003
13.0	2.5015	2.5015	1.000	1.3230	1.3063	1.013
13.5	1.5971	1.5971	1.000	1.1052	1.0901	1.014
14.0	1.2135	1.2135	1.000	0.9400	0.9300	1.011
14.5	1.0475	1.0475	1.000	0.8443	0.8389	1.007
15.0	1.0000	1.0000	1.000	0.8060	0.8042	1.002

b. 妥当性確認 (Validation)

(a) 妥当性確認方法

水平成層の弾性モデル地盤を対象として、本解析コードによる解析解と類似解析コードであるSHAKE - 91 (前述) による結果が一致することを確認する。

(b) 解析条件

解析の諸条件については、地盤モデル諸元を表3.5-3、地盤のひずみ依存特性を図3.5-3及び図3.5-4、入力地震動を図3.5-5に示す。

なお、地盤モデルは、SHAKE - 91の例題に添付されている等価線形モデルであり、長さはfeet、重さはpounds、重力加速度は 32.2 feet/s^2 であることから、表3.5-2にはMKS単位系に変換した数値も併記している。

また、入力地震動はSHAKE - 91の例題に添付されている地震波を 0.1 g (g は重力加速度 9.80665 m/s^2) に規準化したものを用いる。

(c) 妥当性確認結果

本解析コードとSHAKE - 91による解析結果のうち、地盤の最大加速度分布を図3.5-6、地盤の等価せん断ひずみ分布を図3.5-7、地表の加速度応答スペクトルを図3.5-8に示す。

SHAKE - 91の加速度出力 (重量加速度単位) を重量加速度 $\text{g} = 9.80665 \text{ m/s}^2$ を用いて cm/s^2 に変換して比較する。

本解析コードとSHAKE - 91の解析結果は同一条件、同一手法による結果であり、両者は概ね一致していることから、本解析コードが正しく評価していることが確認できる。

表3.5-2 地盤モデル諸元

区分	層厚 ft (m)	深度 ft (m)	湿潤単位体積重量 kpd/ft ³ (tonf/m ³)	せん断波速度 ft/s (m/s)	減衰定数
砂質土	5 (1.52402)	5 (1.52402)	0.125 (2.00226)	1000 (304.679)	0.05
	5 (1.52402)	10 (3.04804)	0.125 (2.00226)	900 (274.193)	0.05
	10 (3.04804)	20 (6.07608)	0.125 (2.00226)	900 (274.193)	0.05
	10 (3.04804)	30 (9.14412)	0.125 (2.00226)	950 (289.424)	0.05
粘性土	10 (3.04804)	40 (12.19216)	0.125 (2.00226)	1000 (304.679)	0.05
	10 (3.04804)	50 (15.24020)	0.125 (2.00226)	1000 (304.679)	0.05
	10 (3.04804)	60 (18.28824)	0.125 (2.00226)	1100 (335.139)	0.05
	10 (3.04804)	70 (21.33628)	0.125 (2.00226)	1100 (335.139)	0.05
砂質土	10 (3.04804)	80 (24.38432)	0.130 (2.08235)	1300 (396.083)	0.05
	10 (3.04804)	90 (27.43236)	0.130 (2.08235)	1300 (396.083)	0.05
	10 (3.04804)	100 (30.48040)	0.130 (2.08235)	1400 (426.549)	0.05
	10 (3.04804)	110 (33.52844)	0.130 (2.08235)	1400 (426.549)	0.05
	10 (3.04804)	120 (35.57648)	0.130 (2.08235)	1500 (457.022)	0.05
	10 (3.04804)	130 (39.62452)	0.130 (2.08235)	1500 (457.022)	0.05
	10 (3.04804)	140 (42.67256)	0.130 (2.08235)	1600 (487.476)	0.05
	10 (3.04804)	150 (45.72060)	0.130 (2.08235)	1800 (548.427)	0.05
基盤	—	—	0.140 (2.24253)	4000 (1218.712)	0.01

γ	粘性土 G/G_0	γ	粘性土 h
0.0001	1.000	0.0001	0.0024
0.0003	1.000	0.0003	0.0042
0.0010	1.000	0.0010	0.0080
0.0030	0.981	0.0030	0.0140
0.0100	0.941	0.0100	0.0280
0.0300	0.847	0.0300	0.0510
0.1000	0.656	0.1000	0.0980
0.3000	0.438	0.3000	0.1550
1.0000	0.238	1.0000	0.2100
3.0000	0.144	3.1600	0.2500
10.0000	0.110	10.0000	0.2800

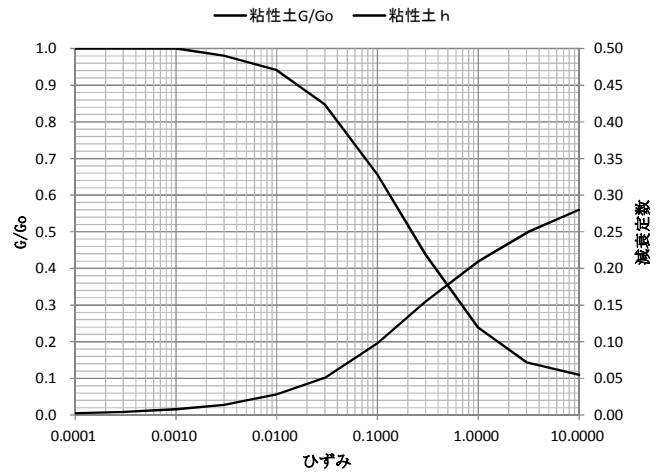


図3.5-3 粘性土の非線形特性

γ	砂質土 G/G_0	γ	砂質土 h
0.0001	1.000	0.0001	0.0024
0.0003	1.000	0.0003	0.0042
0.0010	0.990	0.0010	0.0080
0.0030	0.960	0.0030	0.0140
0.0100	0.850	0.0100	0.0280
0.0300	0.640	0.0300	0.0510
0.1000	0.370	0.1000	0.0980
0.3000	0.180	0.3000	0.1550
1.0000	0.080	1.0000	0.2100
3.0000	0.050	3.0000	0.2500
10.0000	0.035	10.0000	0.2800

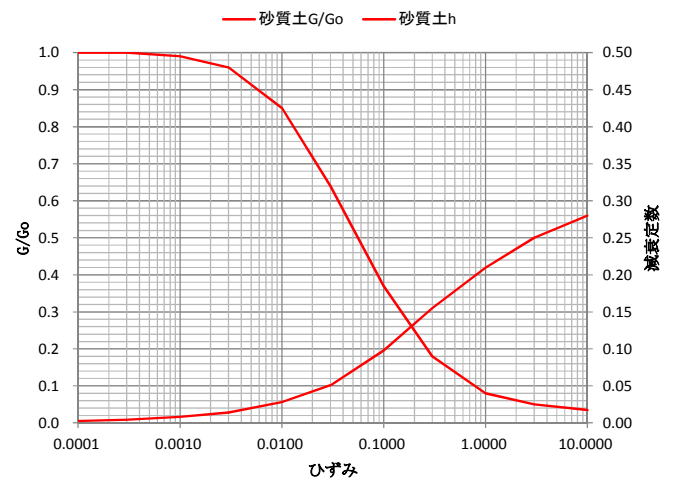


図3.5-4 砂質土の非線形特性

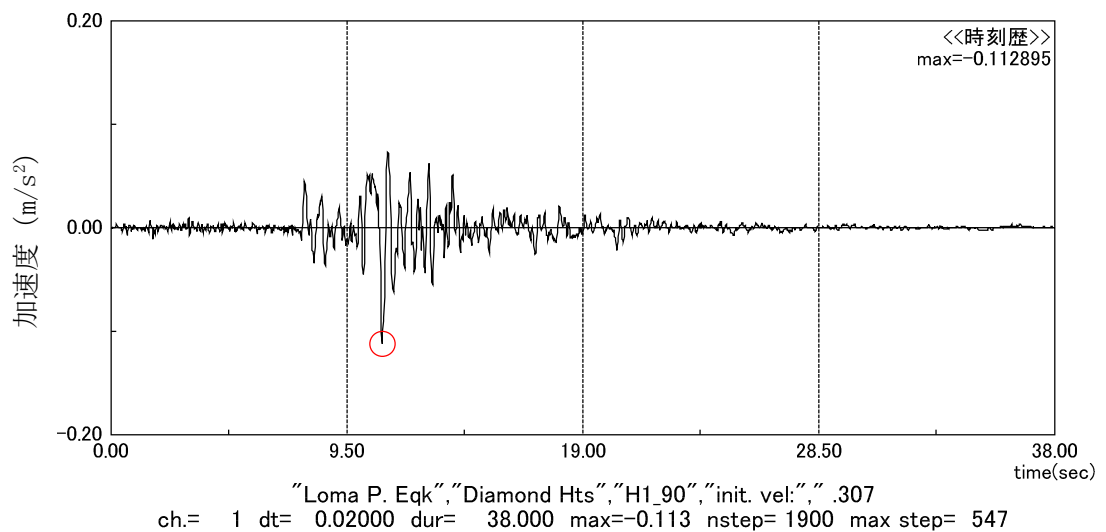


図3.5-5 入力地震動

深さ (ft)	SHAKE -91 (G)	SHAKE -91 (cm/s ²)	本解析コード	SHAKE-91/ 本解析コード
0	0.19040	186.7	186.6	1.001
5	0.19006	186.4	186.3	1.001
10	0.18873	185.1	185.0	1.001
20	0.18258	179.0	179.0	1.000
30	0.17209	168.8	168.7	1.001
40	0.15947	156.4	156.4	1.000
50	0.14288	140.1	140.1	1.000
60	0.12653	124.1	124.1	1.000
70	0.11049	108.4	108.3	1.001
80	0.09839	96.5	96.5	1.000
90	0.08997	88.2	88.2	1.000
100	0.08268	81.1	81.1	1.000
110	0.08559	83.9	84.0	0.999
120	0.08546	83.8	83.8	1.000
130	0.08201	80.4	80.4	1.000
140	0.07769	76.2	76.2	1.000
150	0.07616	74.7	74.7	1.000

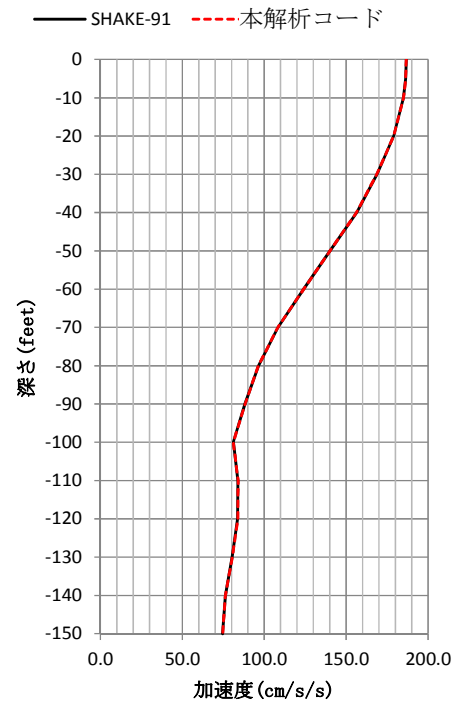


図3.5-6 地盤の最大加速度分布

深さ (ft)	SHAKE-91 (G)	本解析コード (cm/s ²)	SHAKE-91/ 本解析コード
0	0.000770	0.000772	0.997
5	0.002955	0.002954	1.000
10	0.006335	0.006338	1.000
20	0.009760	0.009762	1.000
30	0.010990	0.010989	1.000
40	0.014030	0.014032	1.000
50	0.013615	0.013618	1.000
60	0.015660	0.015662	1.000
70	0.013555	0.013548	1.001
80	0.015055	0.015041	1.001
90	0.013355	0.013348	1.001
100	0.014130	0.014117	1.001
110	0.012335	0.012326	1.001
120	0.012815	0.012806	1.001
130	0.011150	0.011146	1.000
140	0.008645	0.008646	1.000

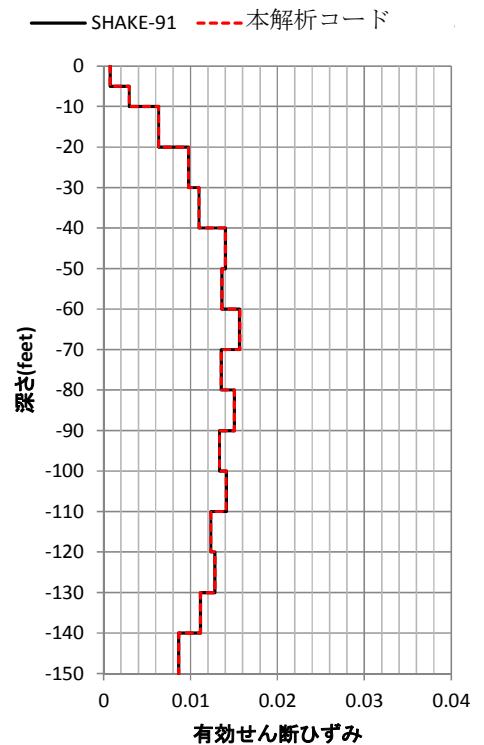


図3.5-7 地盤の等価せん断ひずみ

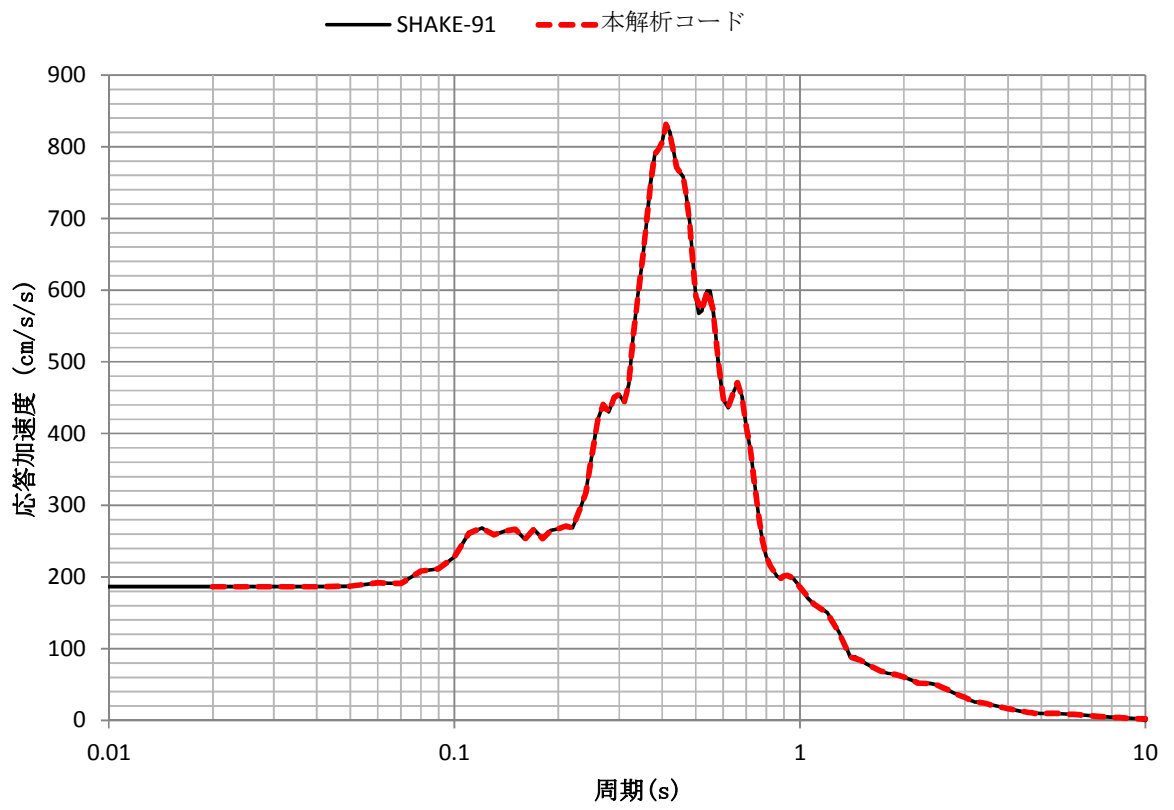


図3.5-81 地表の加速度応答スペクトル (h=0.05)

c. 評価結果

以下の評価結果から，本解析コードを対象とする検討に用いることは妥当である。

- 2層地盤の弾性モデル地盤を対象とした本解析コードの解析解が公開文献による理論解と概ね一致していることを確認できた。
- 水平成層モデル地盤を対象とした本解析の解析解が，複素応答と1次元重複反射理論に基づき構築された類似解析コードであるSHAKE - 91の解析解と概ね一致することを確認できた。