

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-22-0040_改0
提出年月日	2021年2月24日

VI-5-33 計算機プログラム（解析コード）の概要

- Ark Quake

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
3. Ark Quake 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
3.5.1 検証 (Verification)	9
3.5.2 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）Ark Quake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-2-2-7	海水ポンプ室の地震応答計算書	ver. 3. 10
VI-2-2-9	第3号機海水ポンプ室の地震応答計算書	ver. 3. 10
VI-2-2-11	原子炉機器冷却海水配管ダクト(水平部)の地震応答計算書	ver. 3. 10
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
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
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
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
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. 10
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. 10
VI-2-10-4-3	取水口の耐震性についての計算書	ver. 3. 10
VI-2-10-4-4-1	取水路(漸拡部)の耐震性についての計算書	ver. 3. 10
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. 3. 10
VI-2-11-2-16	前面護岸の耐震性についての計算書	ver. 3. 10
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. 3. 10
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
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
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
VI-3-別添 3-2-3-1	取放水路流路縮小工(第1号機取水路)の強度計算書	ver. 3. 10
VI-3-別添 3-2-3-2	取放水路流路縮小工(第1号機放水路)の強度計算書	ver. 3. 10
VI-3-別添 3-2-4	貯留堰の強度計算書	ver. 3. 10

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	Ark Quake
使用目的	1次元地震応答解析による入力地震動算定
開発機関	株式会社アーク情報システム
開発時期	1995年
使用したバージョン	ver. 3.10
コードの概要	<p>Ark Quake（以下「本解析コード」という。）は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計算機プログラムである。</p> <p>本解析コードの特徴は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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"> ・本解析コードによる弾性地盤の増幅特性の解析結果が公開文献の理論解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"> ・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。

3. Ark Quake 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 Ark Quake ver3.10 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。

- ① 一次元重複反射理論に基づき、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。

3.3 解析手法

解析理論において、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。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 3-1 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。

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

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。

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

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。

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

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

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、以下の関係を導く。

$$E_m = c_m(\omega) E_1 \quad (5)$$

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

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。

$$A_{n,m}(\omega) = \mathbf{u}_m / \mathbf{u}_n \quad (7)$$

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{\mathbf{e}_m(\omega) + \mathbf{f}_m(\omega)}{\mathbf{e}_n(\omega) + \mathbf{f}_n(\omega)} \quad (8)$$

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。

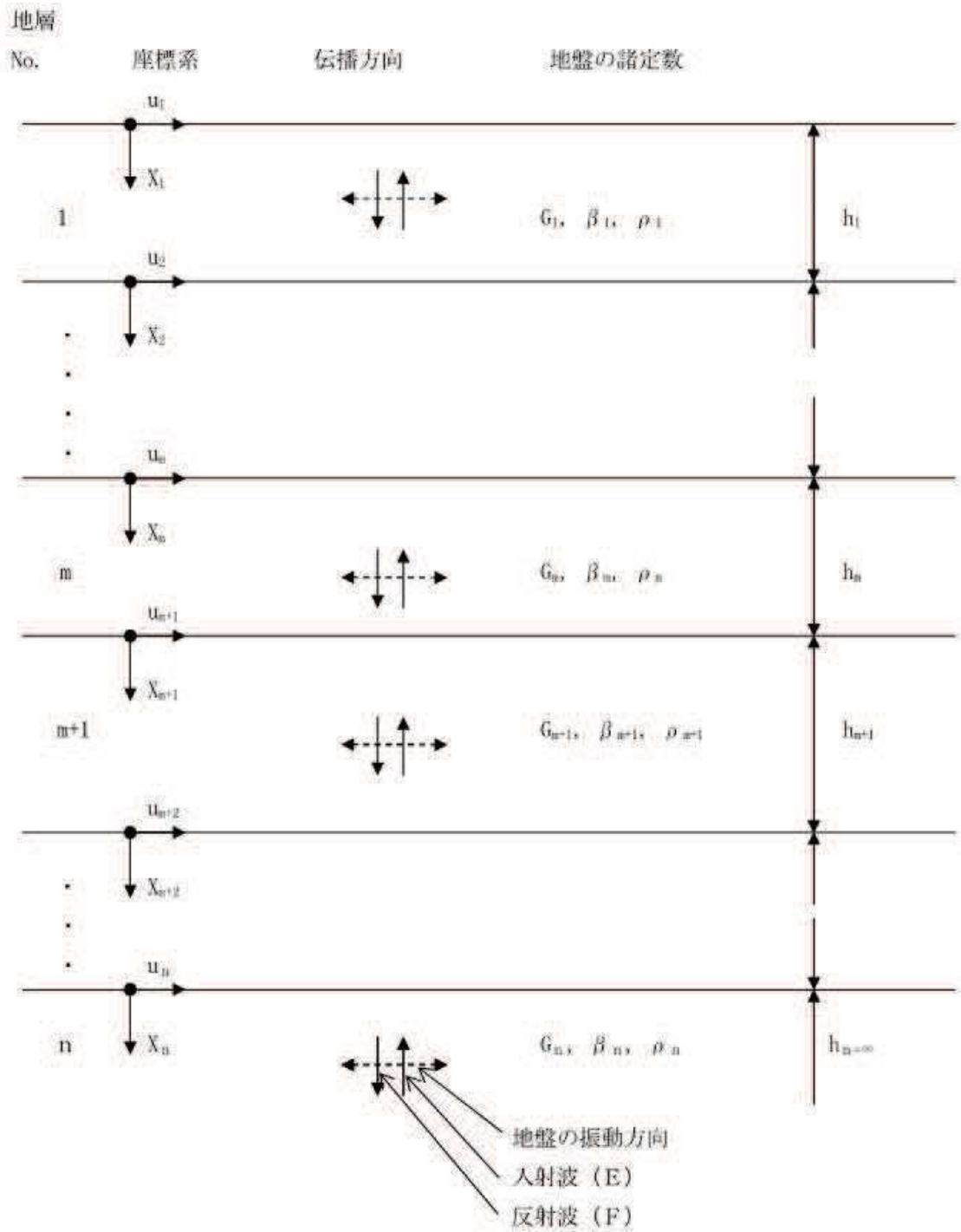
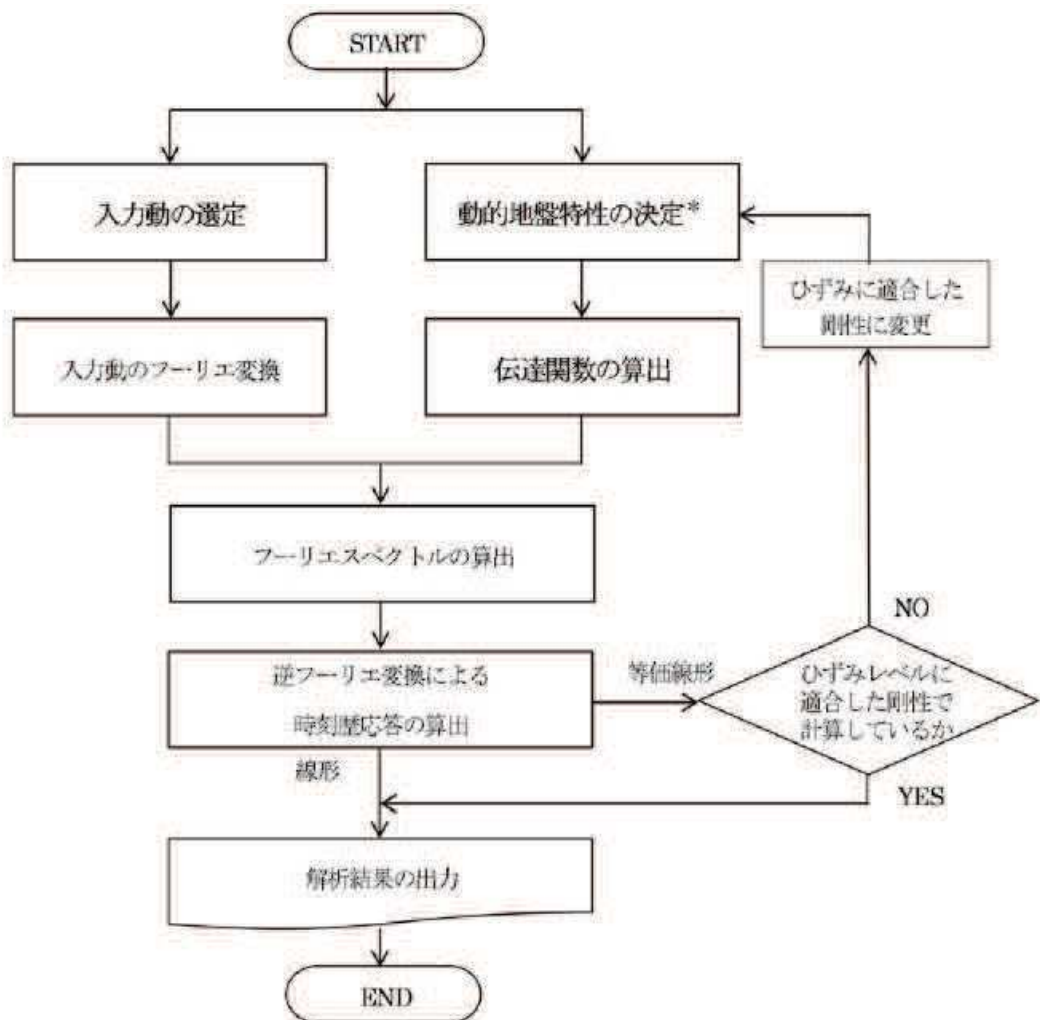


図 3-1 1次元地盤の波動伝播

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。



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-γ関係を選定する。

図 3-2 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、複素応答と一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：SHAKE - 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一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。

3.5.1 検証 (Verification)

(1) 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。

(2) 解析条件

解析条件及び解析モデルを図 3-3 に示す。地盤減衰は、履歴減衰として 0%と 5%の二種とする。

(3) 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 3-4 及び表 3-2 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、両者はおおむ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。

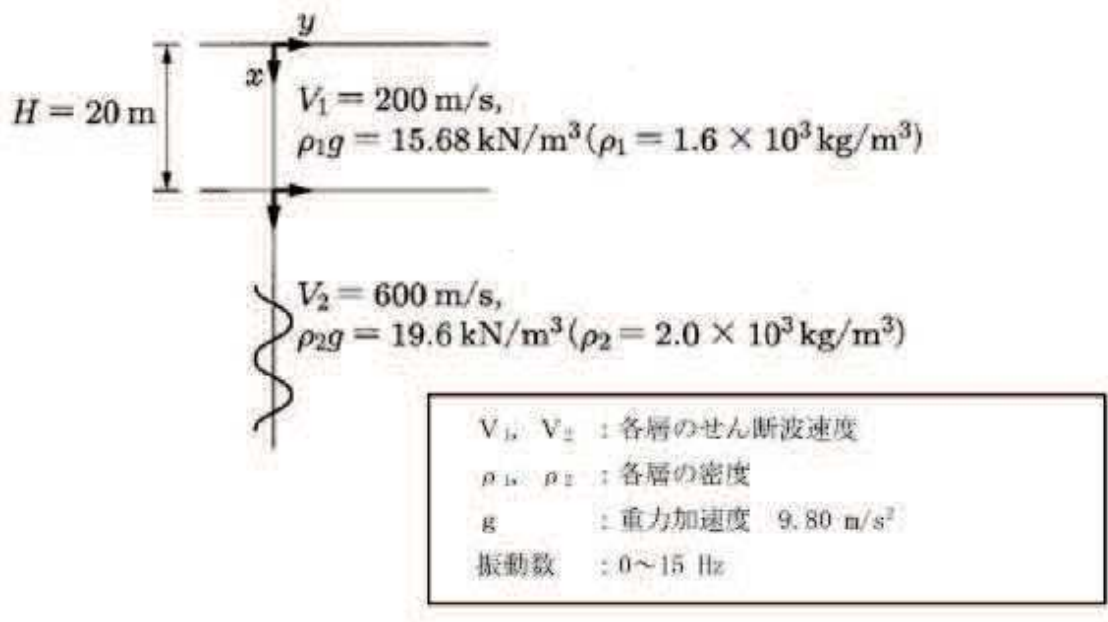


図 3-3 解析条件及び解析モデル

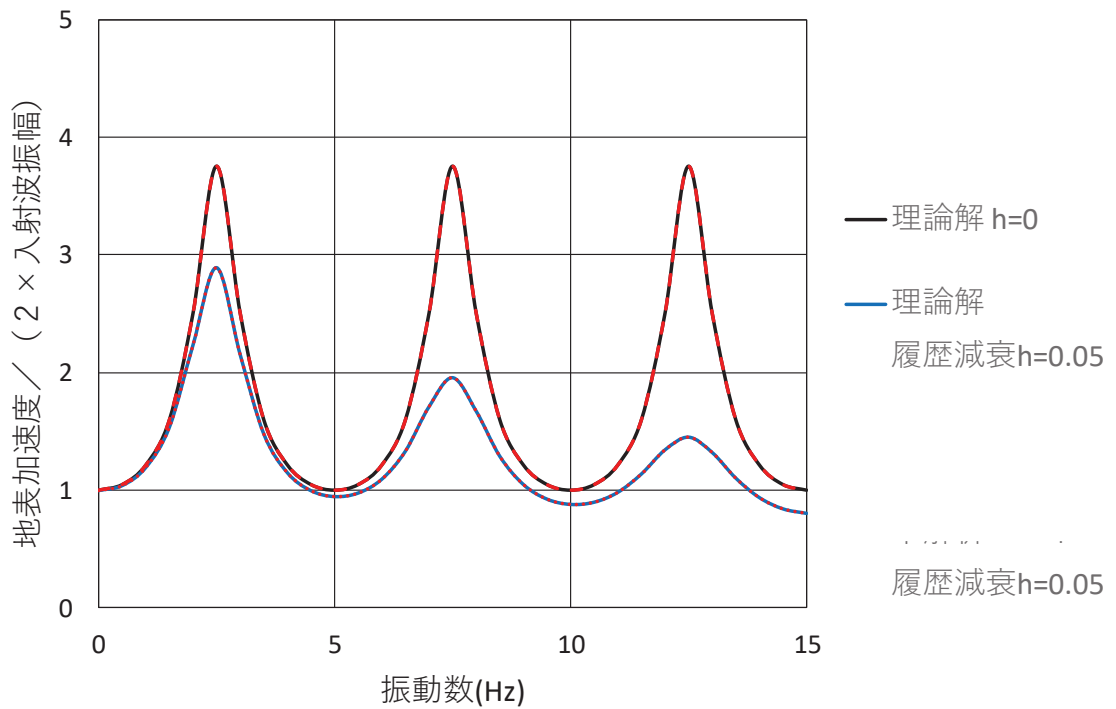


図 3-4 本解析コードと理論解による加速度伝達関数の比較（地表面／基盤層）

表 3-2 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	1.0423	1.000
1.0	1.2135	1.2135	1.000	1.1962	1.1962	1.000
1.5	1.5971	1.5971	1.000	1.5385	1.5385	1.000
2.0	2.5015	2.5015	1.000	2.2363	2.2363	1.000
2.5	3.7500	3.7500	1.000	2.8930	2.8930	1.000
3.0	2.5015	2.5015	1.000	2.1532	2.1532	1.000
3.5	1.5971	1.5971	1.000	1.4802	1.4802	1.000
4.0	1.2135	1.2135	1.000	1.1510	1.1510	1.000
4.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9987	0.9987	1.000
5.0	1.0000	1.0000	1.000	0.9488	0.9488	1.000
5.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9789	0.9789	1.000
6.0	1.2135	1.2135	1.000	1.0965	1.0965	1.000
6.5	1.5971	1.5971	1.000	1.3345	1.3345	1.000
7.0	2.5015	2.5015	1.000	1.7119	1.7119	1.000
7.5	3.7500	3.7500	1.000	1.9585	1.9585	1.000
8.0	2.5015	2.5015	1.000	1.6739	1.6739	1.000
8.5	1.5971	1.5971	1.000	1.2909	1.2909	1.000
9.0	1.2135	1.2135	1.000	1.0511	1.0512	1.000
9.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9271	0.9271	1.000
10.0	1.0000	1.0000	1.000	0.8822	0.8822	1.000
10.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9012	0.9012	1.000
11.0	1.2135	1.2135	1.000	0.9849	0.9849	1.000
11.5	1.5971	1.5971	1.000	1.1407	1.1407	1.000
12.0	2.5015	2.5015	1.000	1.3456	1.3456	1.000
12.5	3.7500	3.7500	1.000	1.4534	1.4534	1.000
13.0	2.5015	2.5015	1.000	1.3230	1.3230	1.000
13.5	1.5971	1.5971	1.000	1.1052	1.1052	1.000
14.0	1.2135	1.2135	1.000	0.9400	0.9400	1.000
14.5	1.0475	1.0475	1.000	0.8443	0.8444	1.000
15.0	1.0000	1.0000	1.000	0.8060	0.8060	1.000

3.5.2 妥当性確認 (Validation)

(1) 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。

(2) 解析条件

解析の諸条件については、地盤モデル諸元を表 3-3、地盤のひずみ依存特性を図 3-5 及び図 3-6 に、入力地震動を図 3-7 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 3-3 には MKS 単位系に変換した数値も併記されている。

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 $0.1g$ (g は重力加速度 9.80665 m/s^2) に規準化したものを用いる。

(3) 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 3-8 に、地盤の等価せん断ひずみ分布を図 3-9 に、地表の加速度応答スペクトルを図 3-10 に示す。

SHAKE - 91 の加速度出力 (重量加速度単位) を重量加速度 $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ 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、両者はおおむ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 3-3 地盤モデル諸元

区分	層厚 ft	深度 ft	湿潤単位体積重量 kpd/ft ³	せん断波速度 ft/s	減衰定数
砂質土	5	5	0.125	1000	0.05
	5	10	0.125	900	0.05
	10	20	0.125	900	0.05
	10	30	0.125	950	0.05
粘性土	10	40	0.125	1000	0.05
	10	50	0.125	1000	0.05
	10	60	0.125	1100	0.05
	10	70	0.125	1100	0.05
砂質土	10	80	0.130	1300	0.05
	10	90	0.130	1300	0.05
	10	100	0.130	1400	0.05
	10	110	0.130	1400	0.05
	10	120	0.130	1500	0.05
	10	130	0.130	1500	0.05
	10	140	0.130	1600	0.05
	10	150	0.130	1800	0.05
基盤	-	-	0.140	4000	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

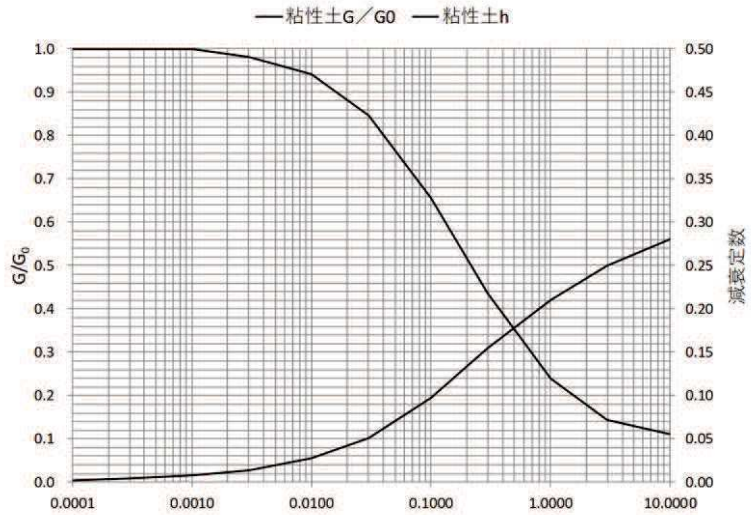


図 3-5 粘性土のひずみ依存特性

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

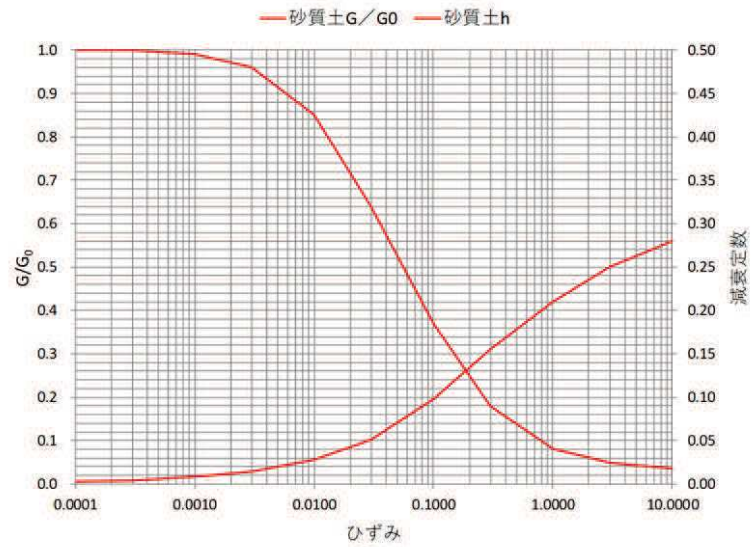


図 3-6 砂質土のひずみ依存特性

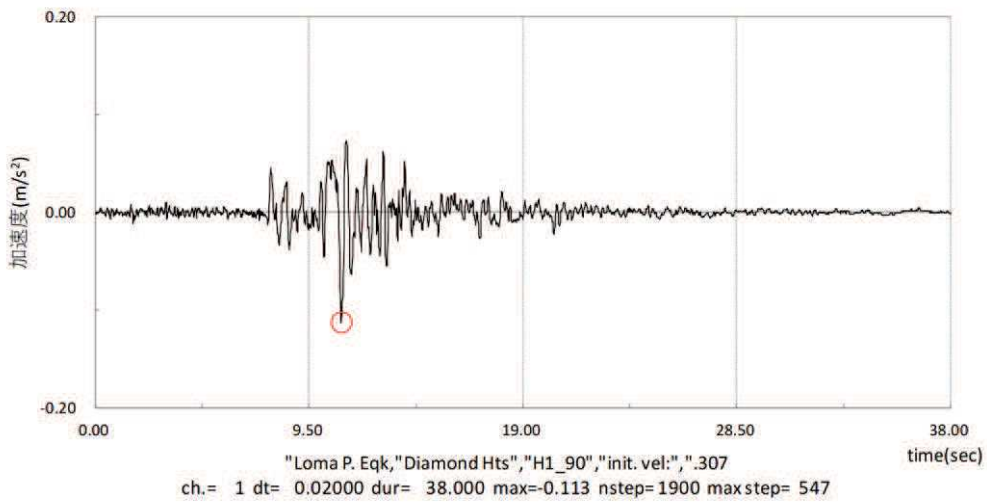


図 3-7 入力地震動

深さ (f t)	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	187.0	0.999
5	0.19006	186.4	186.6	0.999
10	0.18873	185.1	185.3	0.999
20	0.18258	179.0	179.2	0.999
30	0.17209	168.8	168.9	0.999
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	108.5	0.999
80	0.09839	96.5	96.5	1.000
90	0.08997	88.2	88.2	1.001
100	0.08268	81.1	81.1	1.000
110	0.08559	83.9	83.8	1.001
120	0.08546	83.8	83.7	1.001
130	0.08201	80.4	80.4	1.001
140	0.07769	76.2	76.2	1.000
150	0.07616	74.7	74.7	1.000

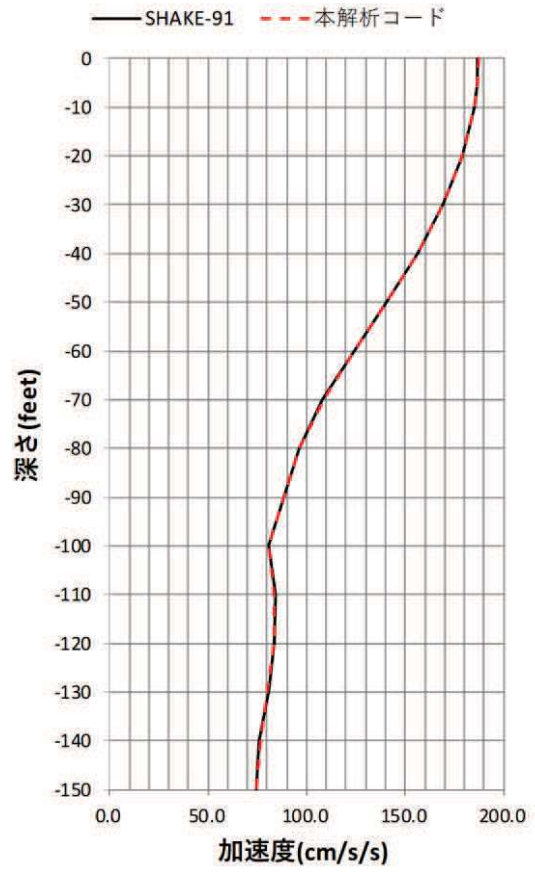


図 3-8 地盤の最大加速度分布

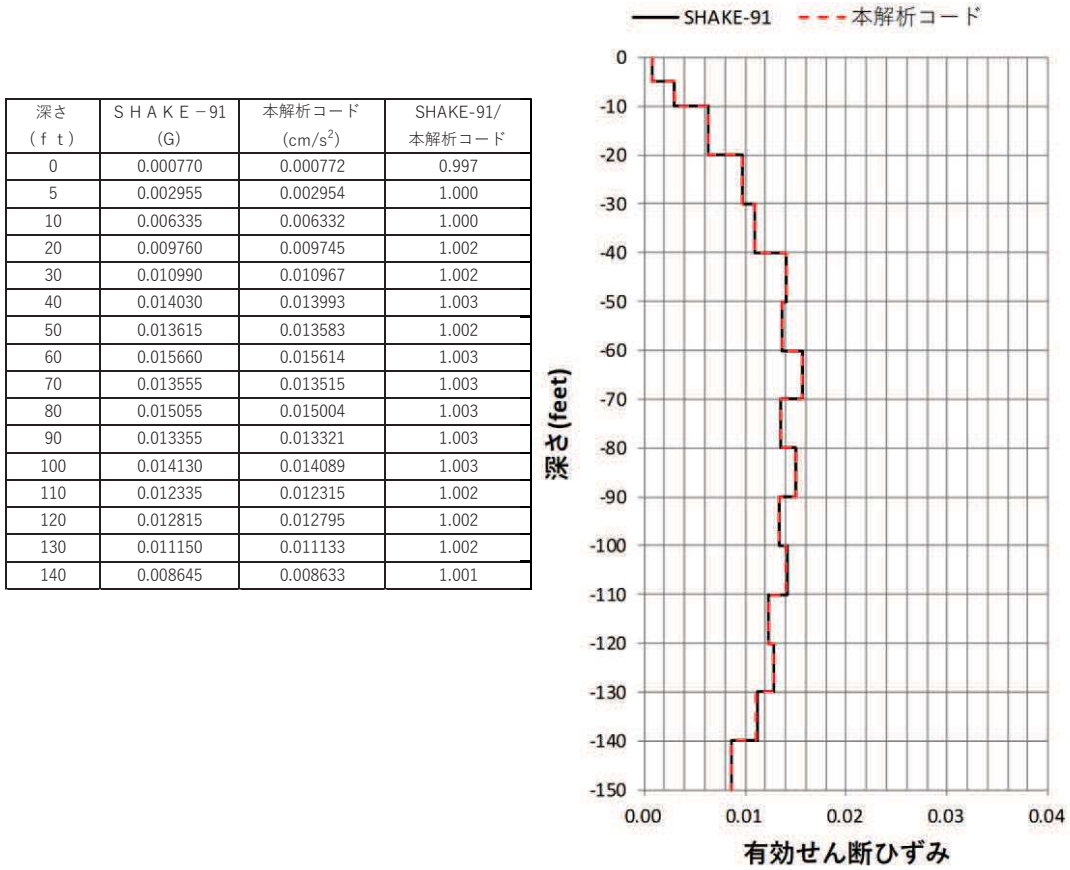


図 3-9 地盤の等価せん断ひずみ分布

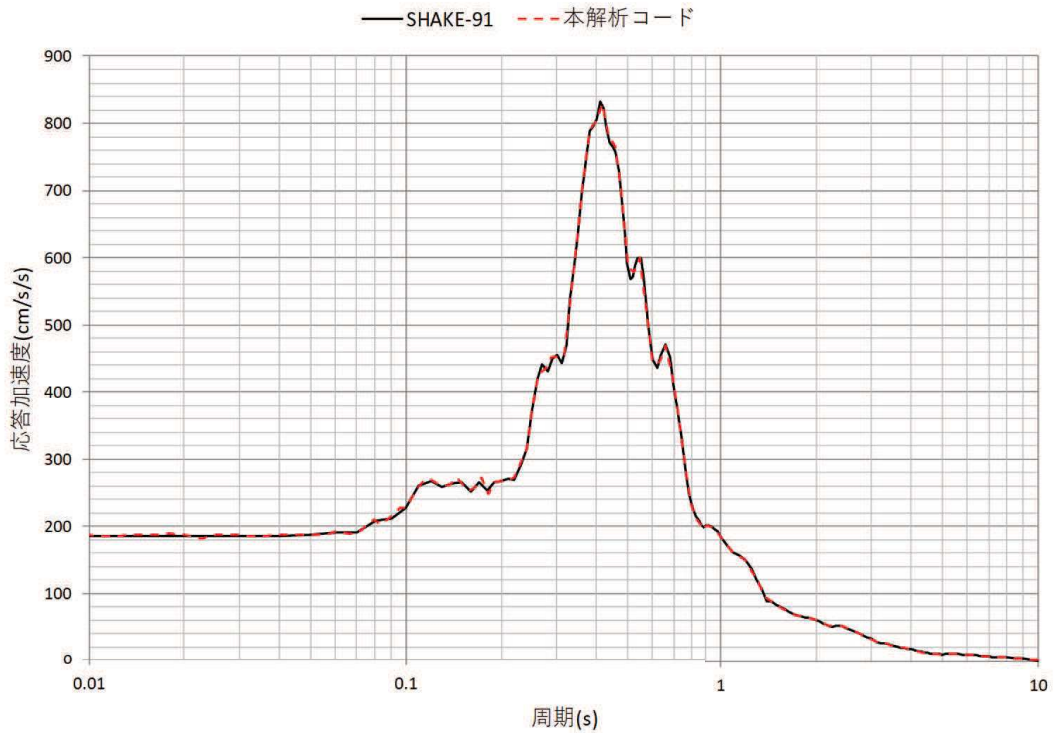


図 3-10 地表の加速度応答スペクトル (h = 0.05)

(4) 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 の解析解とおおむね一致することを確認できた。