

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-22-0019_改0
提出年月日	2021年2月25日

## VI-5-12 計算機プログラム（解析コード）の概要

・VESL-DYN

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. 解析手法.....	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) .....	10
3.5.1 検証 (Verification) .....	10
3.5.2 妥当性確認 (Validation) .....	16
3.5.3 評価結果.....	19

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）VESL-DYN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. 2.03

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	VESL-DYN
使用目的	2次元有限要素法による地震応答解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1982年
使用したバージョン	Ver. 2.03
コードの概要	<p>VESL-DYN（以下「本解析コード」という。）は、2次元有限要素法による地震応答解析を行う解析コードである。本解析コードの主な特徴は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>①2次元有限要素法による周波数領域の解析プログラムである。</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できる。</li> <li>④エネルギー伝達境界によりモデル側方、粘性境界によりモデル下方に伝わるエネルギーの逸散効果を考慮できる。</li> </ul>
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>・水平成層地盤を対象に重複反射理論による解との比較を実施し、解析結果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、動作確認を満足する計算機にインストールして用い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>・原子力産業界において実績のある SuperFLUSH/2D を用いた地震応答解析結果と、本解析コードによる解析結果を比較し、解がおおむね一致す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、地震応答解析用解析コード VESL-DYN の概要である。

本解析コードは、鹿島建設株式会社によって開発された 2 次元有限要素法による地震応答解析を行う解析コードである。本解析コードでは、複素応答に基づいた有限要素法による地震応答解析を実施可能であり、地盤～構造物連成系の相互作用を考慮することができる。

#### 3.2 解析コードの特徴

本解析コードは、2 次元地盤～構造物連成系モデルの相互作用解析コードであり、周波数領域で運動方程式の解法を行うものである。地盤の非線形性は等価線形化法によって考慮することができる。

本解析コードの主な特徴として、以下の①～④を挙げることができる。

- ① 2 次元有限要素法による周波数領域の解析プログラムである。
- 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。
- ③ 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できる。
- ④ エネルギー伝達境界によりモデル側方、粘性境界によりモデル下方に伝わるエネルギーの逸散効果を考慮できる。

### 3.3 解析手法

#### (1) 周波数応答解析法

一般に、時間領域における運動方程式は次式で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{v\}\ddot{\alpha} \quad (1)$$

ここで、

- [M] : 質量マトリックス
- [C] : 減衰マトリックス
- [K] : 剛性マトリックス
- {u} : 変位ベクトル
- {v} : 入力方向ベクトル
- $\ddot{\alpha}$  : 地震加速度

本解析コードでは、周波数応答解析法を式(1)に適用し解析する。この手法は、図 3-1 に示すように、入力地震動の時系列データを高速フーリエ変換により周波数成分ごとに分解し、応答値の重ね合わせが成立するものとして、周波数成分ごとに解析した結果を重ね合わせて応答値を求める手法である。

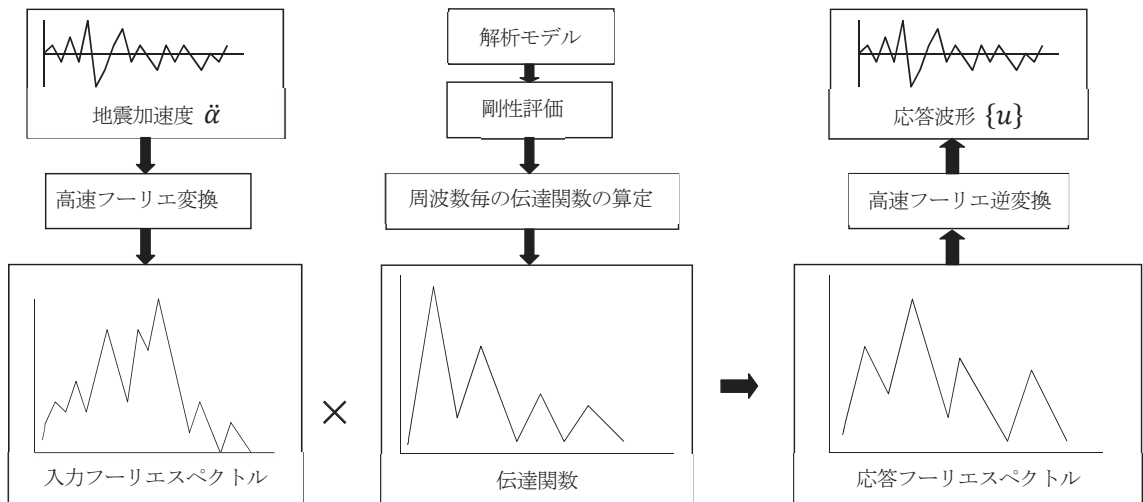


図 3-1 周波数応答解析の概念図

角振動数 $\omega$ の単位振幅波を基盤入力地震加速度とし、減衰を考慮した式(2)の複素剛性 $[K^*]$ を用いると、式(1)は式(3)の運動方程式となる。

$$[K^*] = \sum_j \left\{ (1 - 2h_j^2) + i \cdot 2h_j \sqrt{1 - h_j^2} \right\} [K]_j \quad (2)$$

ここで、

$h_j$  : 要素 j の減衰定数

$[K]_j$  : 要素 j の剛性マトリックス

(  $i$  は虚数単位,  $*$  は複素数であることを表す)

$$[M]\{\ddot{u}^*\} + [K^*]\{u^*\} = -[M]\{v\}e^{i\omega t} \quad (3)$$

調和振動を仮定し変位ベクトルを、

$$\{u^*\} = \{x^*(\omega)\}e^{i\omega t} \quad (4)$$

とおけば、式(3)から $e^{i\omega t}$ を消去して次式のように表すことができる。

$$\{x^*(\omega)\} = -([K^*] - \omega^2[M])^{-1}[M]\{v\} \quad (5)$$

$\{x^*(\omega)\}$ は、単位入力加速度（角振動数 $\omega$ ）に対する変位の伝達関数である。

ところで、フーリエ変換を用いると、 $N$ 個の時系列データからなる地震加速度 $\ddot{a}(t)$ は、下記のような $N/2 + 1$ 個の振動の和として表すことができる。

$$\ddot{a}(t) = R_e \left[ \sum_{n=0}^{N/2} A_n^* e^{i\omega_n t} \right] \quad (6)$$

ここで、 $A_n^*$ はフーリエ変換から得られる係数、 $R_e$ は実部を抽出する関数である。

この $A_n^*$ と式(5)から求まる変位の伝達関数 $\{x_n^*\} = \{x^*(\omega_n)\}$ との積をフーリエ逆変換することにより変位の時刻歴応答が求まる。

$$\{u(t)\} = R_e \left[ \sum_{n=0}^{N/2} \{x_n^*\} A_n^* e^{i\omega_n t} \right] \quad (7)$$

同様に、変位の伝達関数から求められる加速度・応力・ひずみ等の伝達関数を用いると、それぞれの時刻歴応答を求めることができる。



(2) 等価線形化法

周波数応答解析法は、周波数ごとの応答の重ね合わせを仮定しているため、適用は線形問題に限られ、せん断剛性・減衰のせん断ひずみ依存性を直接評価することができない。そこで、等価線形化法を用いて地盤の非線形性を考慮した解析を行う。この手法は、最大せん断ひずみレベルに対応したせん断剛性・減衰を用いた周波数応答解析を、応答結果を入力値としてせん断剛性・減衰が十分収束するまで繰り返す方法である。

### 3.4 解析フローチャート

図 3-2 に周波数応答解析のフローチャート，図 3-3 に等価線形化法による等価せん断剛性・減衰の算定フローチャートを示す。図 3-3 に示した等価線形化法により求めた収束せん断剛性・減衰を用い，図 3-2 のフローに従い各種時刻歴応答を求める。

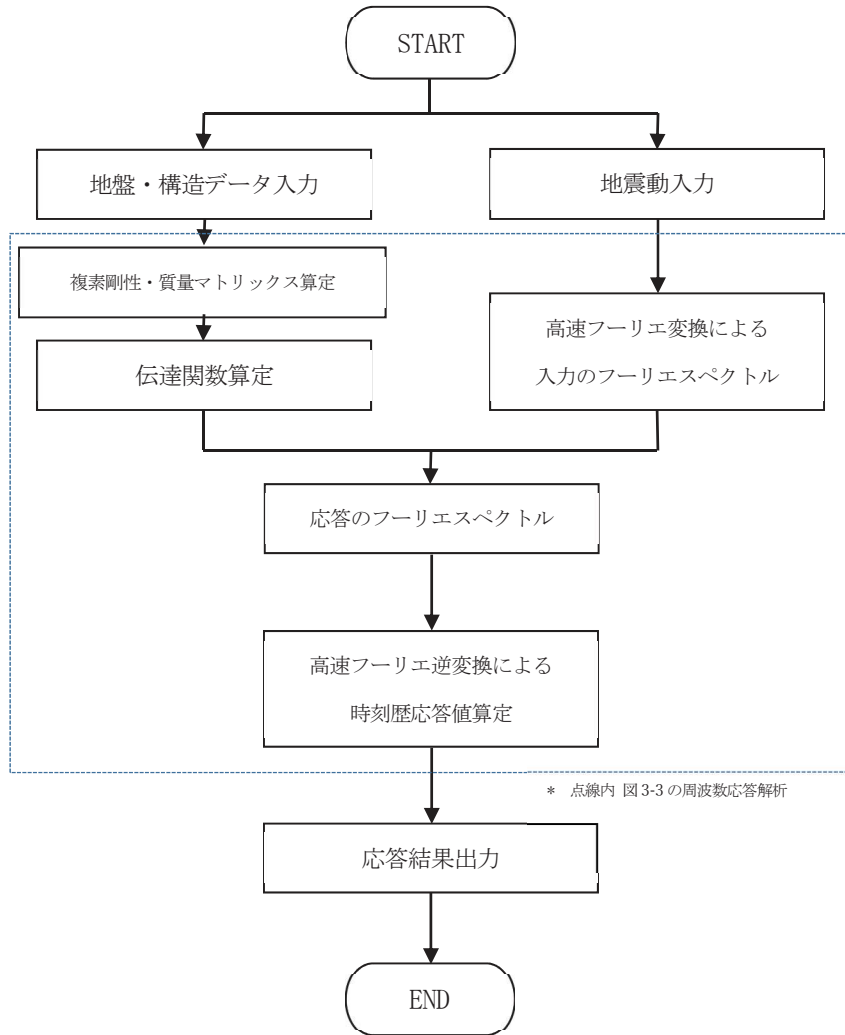


図 3-2 周波数応答解析フローチャート

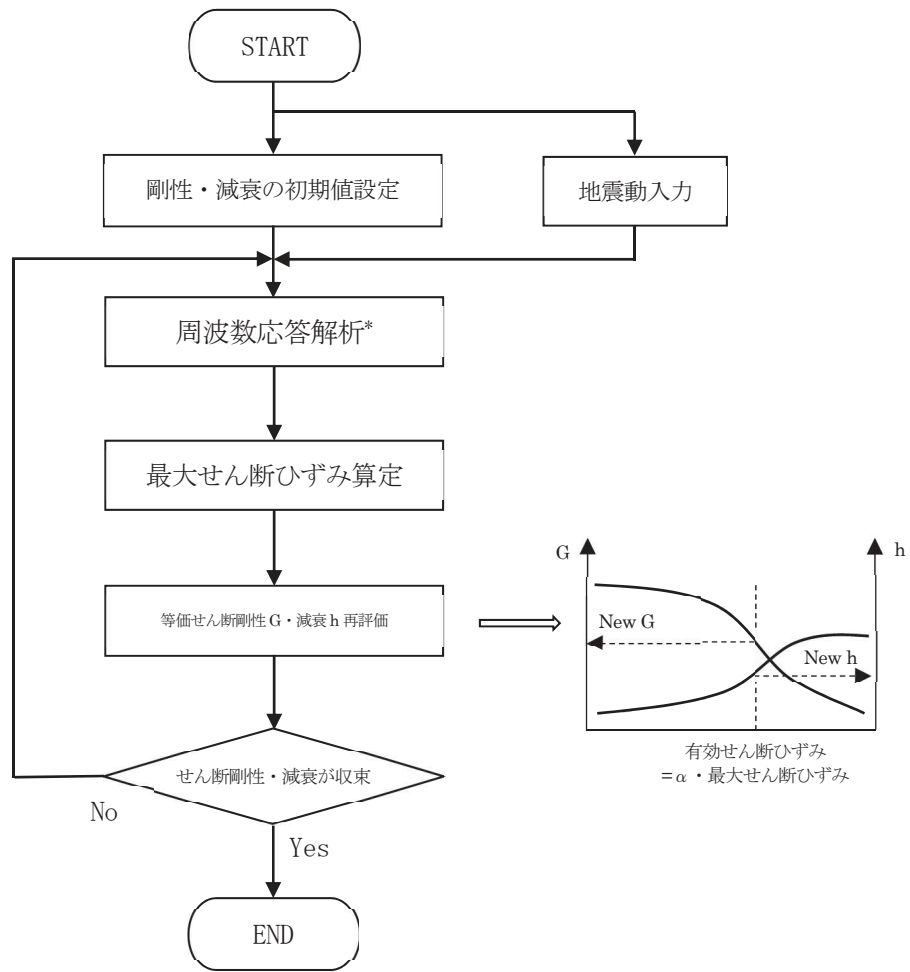


図 3-3 等価線形化法による等価せん断剛性・減衰算定フローチャート

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

本解析コードを本解析に用いるにあたり、検証として水平成層地盤を対象に重複反射理論による解との比較を実施する。また、妥当性確認として類似の汎用プログラム SuperFLUSH/2D による解析結果と、本解析コードによる解析解との比較を実施した。その詳細な内容については以下のとおりとする。

#### 3.5.1 検証 (Verification)

水平成層地盤を対象に重複反射理論による解との比較を実施する。重複反射理論には、カルフォルニア大学バークレー校による1次元地盤の等価線形解析プログラム SHAKE-91 を使用する。すべり線が通過する要素の滑動力や抵抗力を解析結果と理論解で比較を行った。

##### (1) 検証モデル

検討対象とする地盤モデルの諸元を表 3-1 に示す。地盤のひずみ依存特性を図 3-4～図 3-9 に示す。

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> )	動的ポアソン比 $\nu_d$	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	0.48	110	0.030
		1.00	2.00	17	21000	0.48	110	0.030
		1.00	3.00	17	21000	0.48	110	0.030
		1.00	4.00	17	21000	0.48	110	0.030
第2粘性土層	10.80	1.20	5.20	16	25000	0.48	124	0.020
		1.20	6.40	16	25000	0.48	124	0.020
		1.20	7.60	16	25000	0.48	124	0.020
		1.20	8.80	16	25000	0.48	124	0.020
		1.20	10.00	16	25000	0.48	124	0.020
		1.20	11.20	16	25000	0.48	124	0.020
		1.20	12.40	16	25000	0.48	124	0.020
		1.20	13.60	16	25000	0.48	124	0.020
第3粘性土層	9.60	1.60	16.40	16	43000	0.48	162	0.020
		1.60	18.00	16	43000	0.48	162	0.020
		1.60	19.60	16	43000	0.48	162	0.020
		1.60	21.20	16	43000	0.48	162	0.020
		1.60	22.80	16	43000	0.48	162	0.020
		1.60	24.40	16	43000	0.48	162	0.020
第1砂質土層	1.20	1.20	25.60	19	159000	0.48	286	0.020
第4粘性土層	8.00	2.00	27.60	17	110000	0.48	252	0.020
		2.00	29.60	17	110000	0.48	252	0.020
		2.00	31.60	17	110000	0.48	252	0.020
		2.00	33.60	17	110000	0.48	252	0.020
第2砂質土層	2.00	2.00	35.60	19	273000	0.48	375	0.010
礫層(基盤)				20	398000	0.48	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

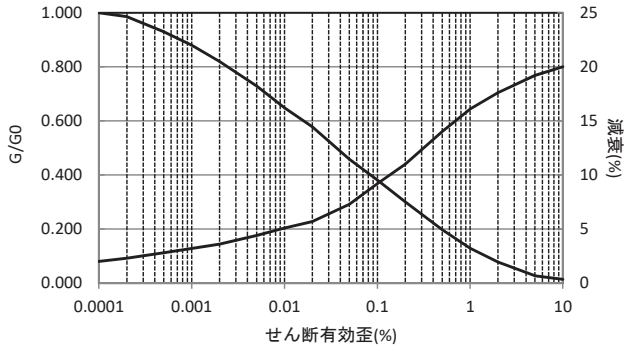


図3-4 ひずみ依存特性 (第1粘性土層)

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

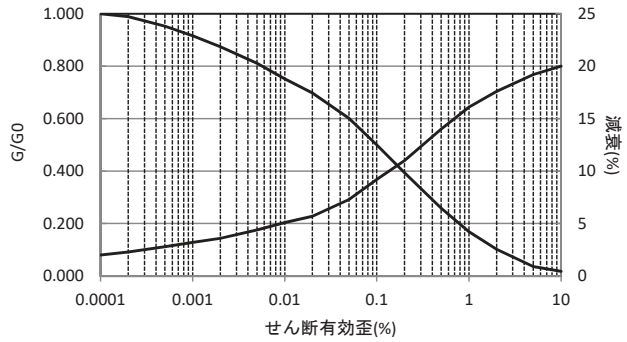


図3-5 ひずみ依存特性 (第2粘性土層)

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

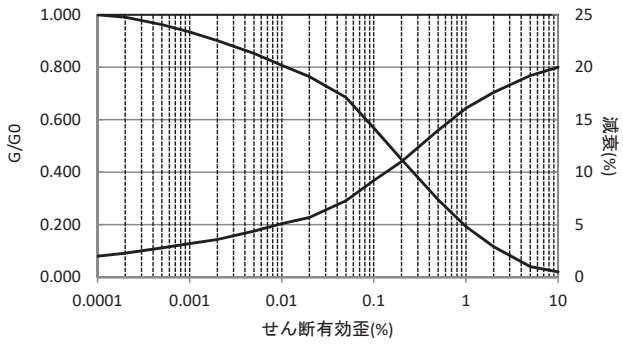


図3-6 ひずみ依存特性 (第3粘性土層)

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

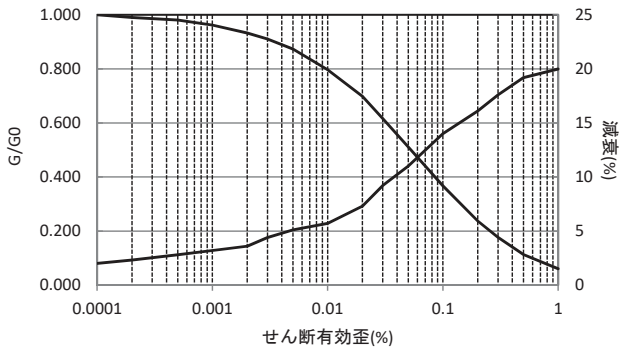


図3-7 ひずみ依存特性 (第1砂質土層)

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

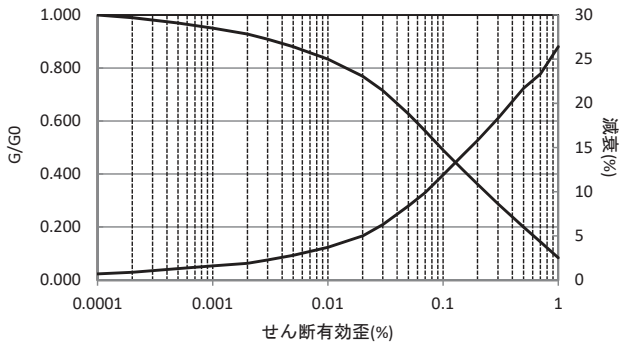


図3-8 ひずみ依存特性 (第4粘性土層)

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

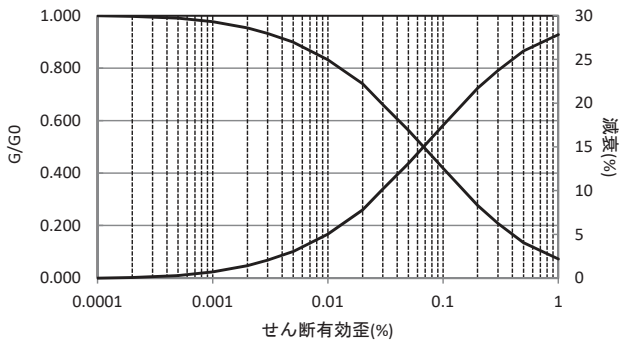


図3-9 ひずみ依存特性 (第2砂質土層)

(2) 入力地震動

入力地震動の加速度時刻歴を図 3-10 に示す。

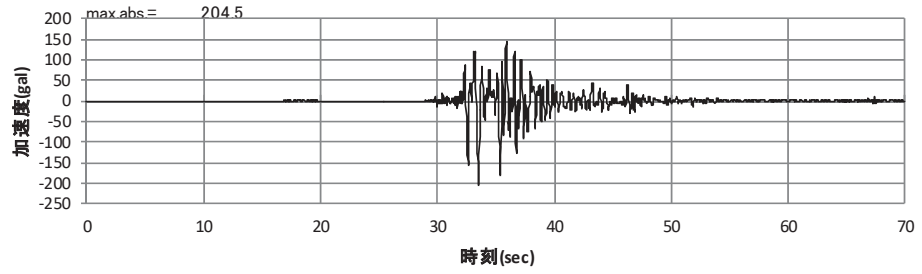


図3-10 入力地震動の加速度時刻歴（水平成分）



(3) 解析結果

重複反射理論 SHAKE による解と本解析コード VESL-DYN の解析結果を図 3-11, 図 3-12 に比較する。伝達関数及び加速度がおおむね一致していることが確認できる。

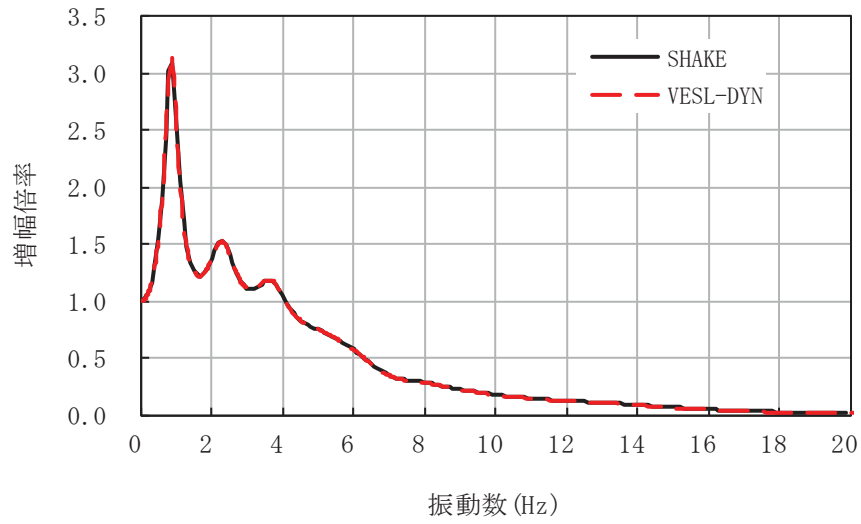


図3-11 地表面の伝達関数

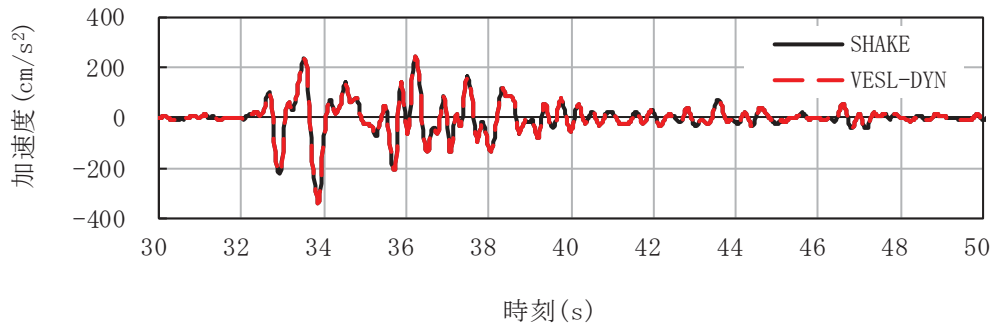


図3-12 地表面の加速度時刻歴

### 3.5.2 妥当性確認 (Validation)

原子力産業界において実績のある SuperFLUSH/2D を用いた地震応答解析結果と、本解析コードによる解析結果を比較する。

#### (1) 解析モデル

解析モデルを図 3-13 に示す。

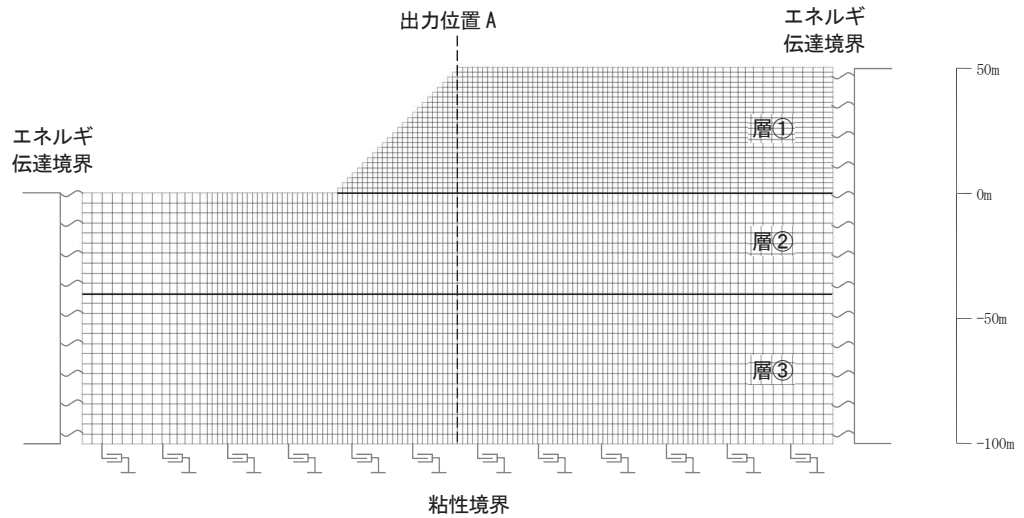


図3-13 解析モデル

#### (2) 解析条件

地盤モデルの諸元を表 3-2 に示す。

表3-2 地盤モデル諸元

	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	せん断弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比	減衰定数
層①	20.0	330000	0.40	0.03
層②	22.0	1400000	0.38	0.03
層③	24.0	3500000	0.35	0.03

(3) 入力地震動

入力地震動の加速度時刻歴を図 3-14 に示す。

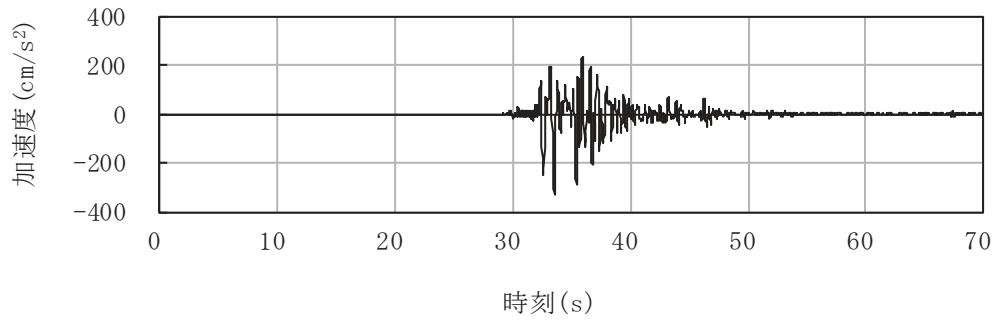


図3-14 入力地震動の加速度時刻歴（水平成分）

(4) 解析結果

図 3-13 に示す出力位置 A における最大水平加速度分布を図 3-15 に、最大水平せん断応力分布を図 3-16 に示す。各図より結果はおおむね一致していることが確認できる。

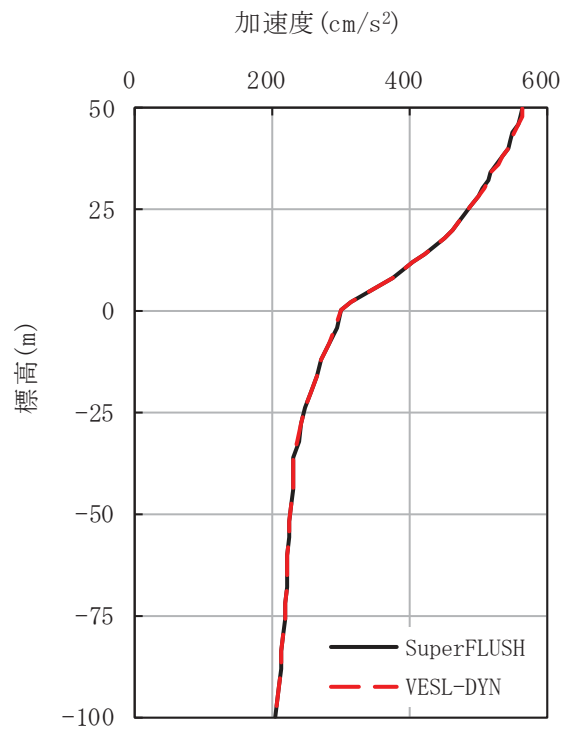


図3-15 最大水平加速度分布（出力位置A）

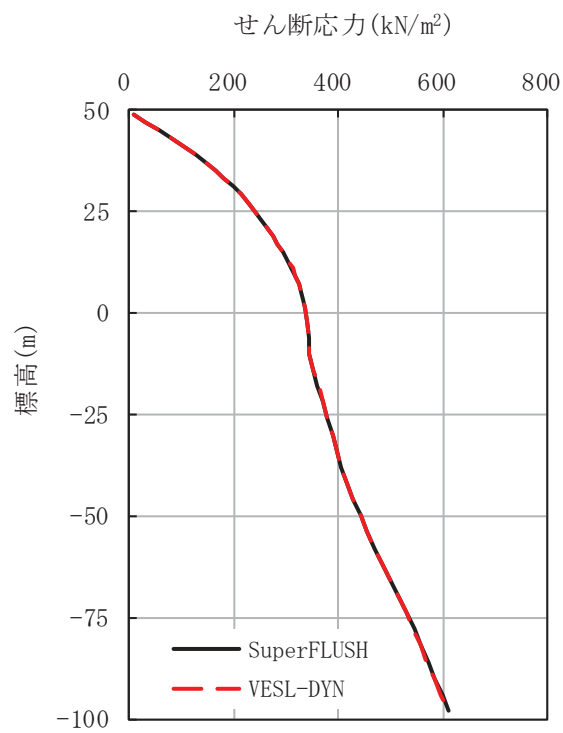


図3-16 最大水平せん断応力分布（出力位置A）

### 3.5.3 評価結果

本解析コードの検証として水平成層地盤を対象に重複反射理論による解との比較を実施し、解析解がおおむね一致することを確認した。また、妥当性確認として類似の汎用プログラム SuperFLUSH/2D による解析結果と、本解析コードによる解析結果との比較を実施し、解析結果がおおむね一致していることを確認した。

以上のことから、本解析コードを本解析に使用することは妥当である。