

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-22-0048_改1
提出年月日	2021年10月4日

VI-5-41 計算機プログラム（解析コード）の概要

・KANDYN\_2N

2021年10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 .....	5
3.1	一般事項 .....	5
3.2	解析コードの特徴 .....	5
3.3	解析理論 .....	5
3.3.1	運動方程式 .....	5
3.3.2	減衰項の策定 .....	5
3.3.3	直接積分法による解法 .....	6
3.4	解析フローチャート .....	7
3.5	検証(Verification)と妥当性確認(Validation) .....	8
3.5.1	検証(Verification) .....	8
3.5.2	妥当性確認(Validation) .....	8
3.5.3	評価結果 .....	24
4.	引用文献 .....	24

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）KANDYN\_2N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-2-2-29	第3号機海水熱交換器建屋の地震応答計算書	Ver. 5.00
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. 5.00

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	KANDYN_2N
使用目的	地震応答解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	2005 年
使用したバージョン	Ver. 5.00
コードの概要	<p>KANDYN_2N（以下「本解析コード」という。）は，原子力発電所建屋の地震応答解析用として開発された FEM を用いる解析コードである。</p> <p>地震時の建屋接地率が 50%を下回る場合の特別な検討に用いる研究に使用された実績がある。</p> <p>本解析コードは，動荷重（節点加振力，地震入力）を扱うことができる。</p> <p>地震応答解析は，線形解析及び非線形解析を時間領域における数値積分により行う。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証(Verification)】</b></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"> <li>・本解析コードの計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。</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></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"> <li>・本解析コードを用いて，はり要素の弾塑性地震応答解析を行い，既存原子力発電所への使用実績の豊富な検証済の解析コード NUPP4 による解析結果と一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードによる平行成層地盤の側面・底面境界条件自動作成機能を用いた地盤応答が，同一深度に同一変位条件を与えた場合の地盤応答結果と合致することを確認している。</li> </ul>

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>・本解析コードを用いた基礎部の浮上り解析を行い、時間領域のグリーン関数法の解析結果とほぼ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

本解析コードは、鹿島建設株式会社で開発した原子力発電所建屋を対象としたプログラムであり、時間領域における質点系はりモデル及び FEM による動的応答解析プログラムである。

#### 3.2 解析コードの特徴

- (1) 3次元問題を対象として、はり要素、ばね要素、ダンパー要素、ソリッド要素等が用意されており、原子力発電所建屋他の地盤を含めた構造物の動的解析を行うことができる。
- (2) 離散化した構造物-地盤間に非線形地盤ばねを考慮することができ、接地率の小さな構造物の応答計算に使用できる。
- (3) 大規模問題も取り扱うために、入力データが簡素化されている。
- (4) 自由度の拘束方法は、取り扱う問題にあったものを選ぶことができる。

#### 3.3 解析理論

##### 3.3.1 運動方程式

多自由度系の運動方程式は一般に (a) 式で表される。

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

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

$\{\ddot{u}\}$  : 加速度ベクトル

$\{\dot{u}\}$  : 速度ベクトル

$\{u\}$  : 変位ベクトル

$\{F\}$  : 荷重ベクトル

##### 3.3.2 減衰項の策定

減衰項として、系の粘性減衰はレーリー減衰を用いており、レーリー減衰の定義は以下で表される。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

ただし、

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(h_1\omega_2 - h_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$$

$$\beta = \frac{2(h_2\omega_2 - h_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$$

ここで、

$\omega_1$  : 減衰定数  $h_1$  を定義する円振動数

$\omega_2$  : 減衰定数  $h_2$  を定義する円振動数

### 3.3.3 直接積分法による解法

直接積分法は、連立の微分方程式を直接積分するもので、時間を  $\Delta t$  毎に分割し、時間ステップごとに、順次解を求めていく方法である、今回の解析で用いた Newmark- $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ) について以下に示す。

(1) 式の運動方程式を増分形式で表すと (3) 式となる。

$$M\{\Delta\ddot{u}\} + C\{\Delta\dot{u}\} + K\{\Delta u\} = -M\{1\}\Delta\alpha \quad (3)$$

$n$  ステップの変位  $\{u_n\}$ 、速度  $\{\dot{u}_n\}$ 、加速度  $\{\ddot{u}_n\}$  が既知の場合、次の  $n+1$  ステップの変位増分、速度増分は以下の様に表せる。

$$\{\Delta u_{n+1}\} = \{u_{n+1}\} - \{u_n\} = \Delta t \left( \frac{\{\dot{u}_{n+1}\} + \{\dot{u}_n\}}{2} \right)$$

$$= \Delta t \left( \frac{(\{\dot{u}_n\} + \{\Delta\dot{u}_{n+1}\}) + \{\dot{u}_n\}}{2} \right) = \Delta t \left( \{\dot{u}_n\} + \frac{\{\Delta\dot{u}_{n+1}\}}{2} \right) \quad (4)$$

$$\{\Delta\dot{u}_{n+1}\} = \Delta t \left( \{\ddot{u}_n\} + \frac{\{\Delta\ddot{u}_{n+1}\}}{2} \right) \quad (5)$$

(4) 式、(5) 式より

$$\{\Delta\dot{u}_{n+1}\} = \frac{2}{\Delta t} \{\Delta u_{n+1}\} - 2\{\dot{u}_n\} \quad (6)$$

$$\{\Delta\ddot{u}_{n+1}\} = \frac{4}{\Delta t^2} \{\Delta u_{n+1}\} - \frac{4}{\Delta t} \{\dot{u}_n\} - 2\{\ddot{u}_n\} \quad (7)$$

(6) 式、(7) 式を (3) 式に代入し、 $\{\Delta u_{n+1}\}$  に関して解く。

$$M \left( \frac{4}{\Delta t^2} \{\Delta u_{n+1}\} - \frac{4}{\Delta t} \{\dot{u}_n\} - 2\{\ddot{u}_n\} \right) + C \left( \frac{2}{\Delta t} \{\Delta u_{n+1}\} - 2\{\dot{u}_n\} \right) + K\{\Delta u_{n+1}\} = -M\{1\}\Delta\alpha$$

$$\Rightarrow \left( M \frac{4}{\Delta t^2} + C \frac{2}{\Delta t} + K \right) \{\Delta u_{n+1}\} = -M\{1\}\Delta\alpha + M \left( \frac{4}{\Delta t} \{\dot{u}_n\} + 2\{\ddot{u}_n\} \right) + C(2\{\dot{u}_n\})$$

$$\Rightarrow \{\Delta u_{n+1}\} = \left( M \frac{4}{\Delta t^2} + C \frac{2}{\Delta t} + K \right)^{-1} \left( -M\{1\}\Delta\alpha + M \left( \frac{4}{\Delta t} \{\dot{u}_n\} + 2\{\ddot{u}_n\} \right) + C(2\{\dot{u}_n\}) \right)$$

(8)

(8) 式を解くと、 $n+1$  ステップの変位増分が得られる。また、(6) 式、(7) 式を用いて  $n+1$  ステップの速度増分および加速度増分が得られる。



### 3.4 解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを図 3.4-1 に示す。

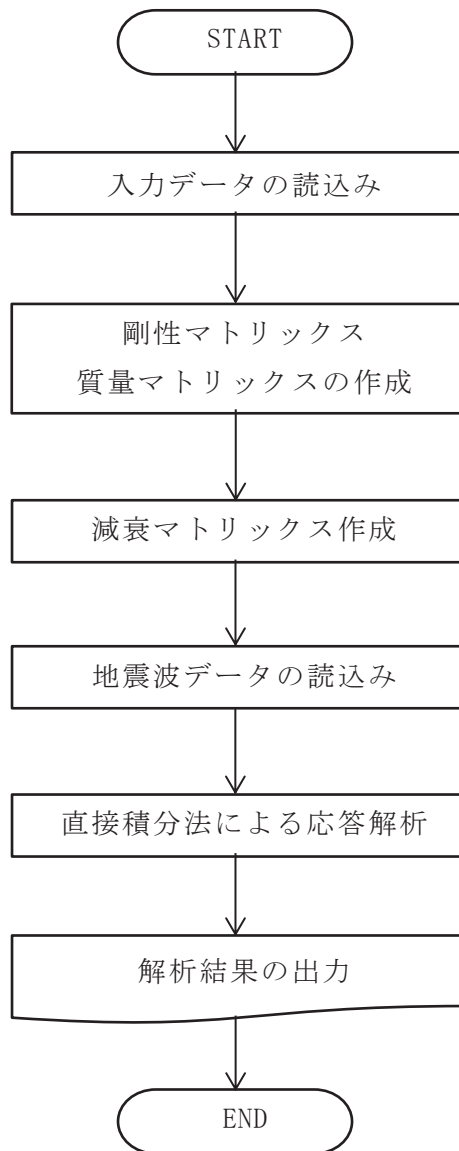


図 3.4-1 解析フローチャート

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

本解析コードは、「3.3 解析理論」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、主に原子力発電所建築物における接地率の小さな場合の研究に使用実績を有しており、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、下記4項目に対して本解析コードによる解析を実施し、本解析コードの解析機能の適切さを確認している。

- ① はり要素の弾塑性地震応答解析
- ② 平行成層地盤の側面・底面境界条件自動作成の妥当性検証
- ③ 建屋と地盤間の剥離を考慮する解析
- ④ 浮上り非線形解析

#### 3.5.1 検証(Verification)

本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。

#### 3.5.2 妥当性確認(Validation)

##### (1) はり要素の弾塑性地震応答解析

###### a. 妥当性確認方法

本解析コードによるはり要素の弾塑性地震応答解析を行い、既存原子力発電所への使用実績の豊富な検証済の解析コード NUPP4 による解析結果とほぼ一致することを確認する。

###### b. 解析条件

###### (a) 解析モデル

検証を行う解析モデルを図 3.5-1 に示す。各質点に並進自由度と回転自由度を有する基礎固定の2質点系モデルとする。

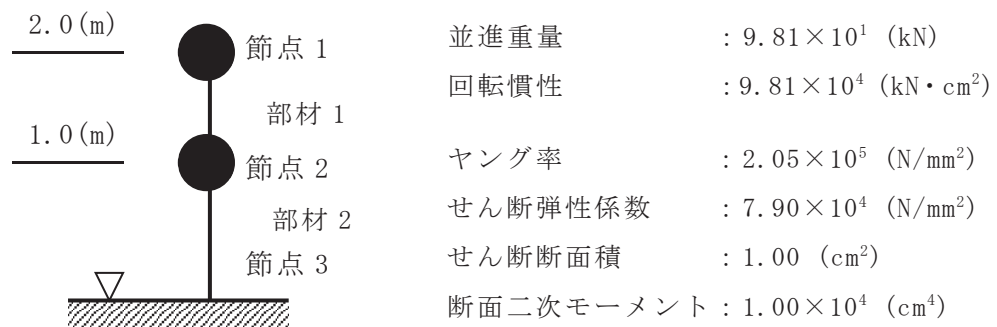


図 3.5-1 解析モデル

###### (b) 固有値解析結果

検証済解析コード NUPP4 を用いた固有値解析結果を表 3.5-1 に示す。減衰

行列は初期剛性比例の内部粘性減衰で、1次周期 0.43s に対して全部材に一律  $h=0.02$  を与える。

表 3.5-1 固有値解析結果

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数
			X 方向
1次	0.43	2.32	1.18
2次	0.15	6.58	-0.22
3次	0.06	17.64	-0.11
4次	0.03	37.44	-0.05

(c) 非線形履歴モデル

はり部材の非線形履歴モデルは、JEAG4601-1991 (引用文献(1)参照。)のモデルを用いる。スケルトンカーブのパラメータを表 3.5-2 及び図 3.5-2 並びに表 3.5-3 及び図 3.5-3 に示す。

表 3.5-2 スケルトンカーブのパラメータ (せん断非線形特性)

	$Q_1$ (kN)	$Q_2$ (kN)	$\alpha_1$	$\alpha_2$
部材 1 (質点 1~2)	75.0	90.0	0.50	0.05
部材 2 (質点 2~3)	110.0	140.0	0.50	0.05

表 3.5-3 スケルトンカーブのパラメータ (曲げ非線形特性)

	$M_1$ (kNm)	$M_2$ (kNm)	$\alpha_1$	$\alpha_2$
部材 1 (質点 1~2)	80.0	100.0	0.20	0.05
部材 2 (質点 2~3)	200.0	250.0	0.20	0.05

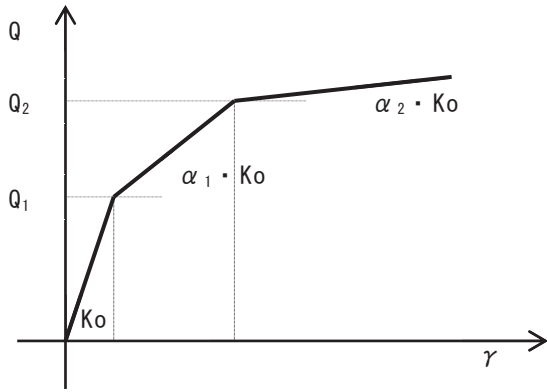


図 3.5-2 せん断非線形特性

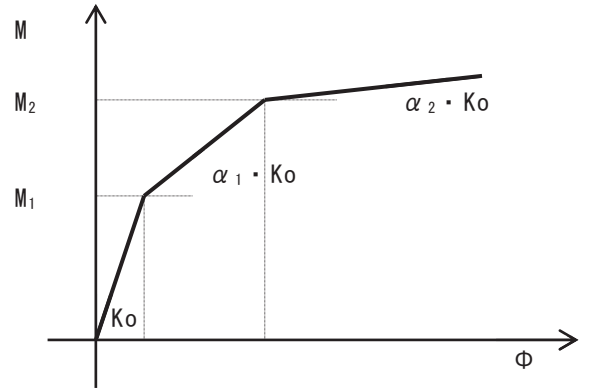


図 3.5-3 曲げ非線形特性

(d) 入力地震動

入力地震動は国土交通省告示波（RANDOM-B）で，継続時間は先頭から 50s とし，最大加速度を  $500\text{cm/s}^2$  に規準化して入力する。図 3.5-4 に加速度時刻歴波形，図 3.5-5 に絶対加速度応答スペクトルを示す。時間刻みは原波刻み（ $dt=0.01\text{s}$ ）を 10 分割する。

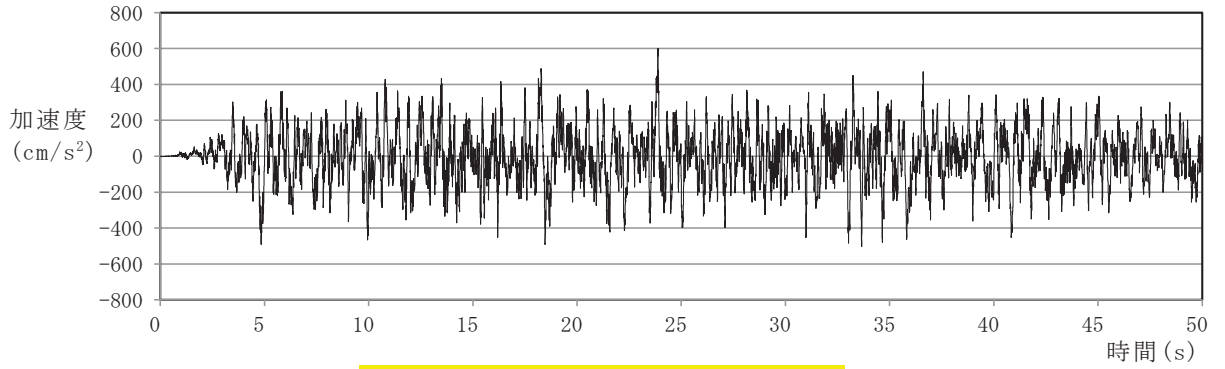


図 3.5-4 原波の加速度時刻歴波形

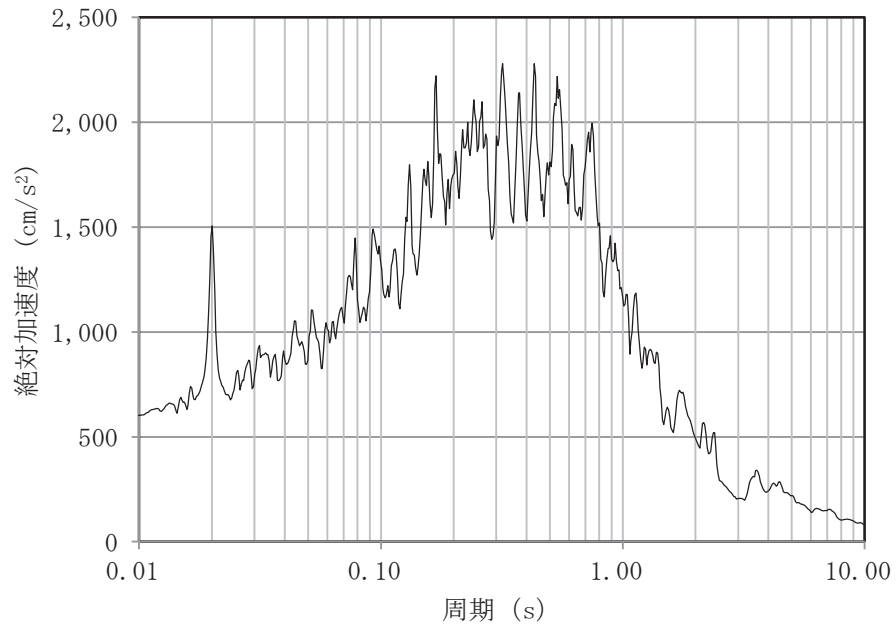


図 3.5-5 原波の加速度応答スペクトル ( $h=0.02$ )

c. 妥当性確認結果

本解析コードと NUPP4 により地震応答解析を実施した。最大応答値を表 3.5-4 に示す。また、質点 1 の加速度応答波形を図 3.5-6、部材 1 の履歴曲線を図 3.5-7 及び図 3.5-8 に示す。これらの結果は、全て一致している。

表 3.5-4 最大応答値

項目	位置	本解析コード	NUPP4
最大加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )	節点 1	1125.5	1125.5
	節点 2	734.64	734.64
せん断力 (kN)	部材 1	110.3	110.3
	部材 2	162.2	162.2
せん断ひずみ ( $10^{-2}$ )	部材 1	6.464	6.464
	部材 2	7.769	7.769
せん断塑性率	部材 1	4.863	4.863
	部材 2	3.610	3.610
曲げモーメント (下端) (kNm)	部材 1	113.4	113.4
	部材 2	276.5	276.5
曲率 (下端) ( $10^{-2}$ )	部材 1	2.177	2.177
	部材 2	4.693	4.693
曲げ塑性率	部材 1	2.480	2.480
	部材 2	2.138	2.138

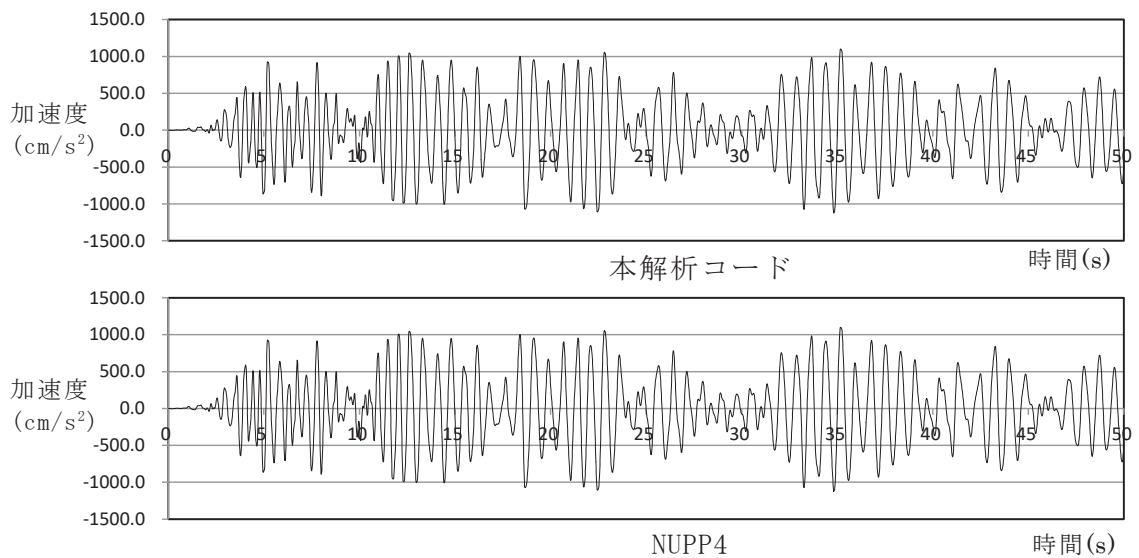


図 3.5-6 質点 1 の加速度応答波形

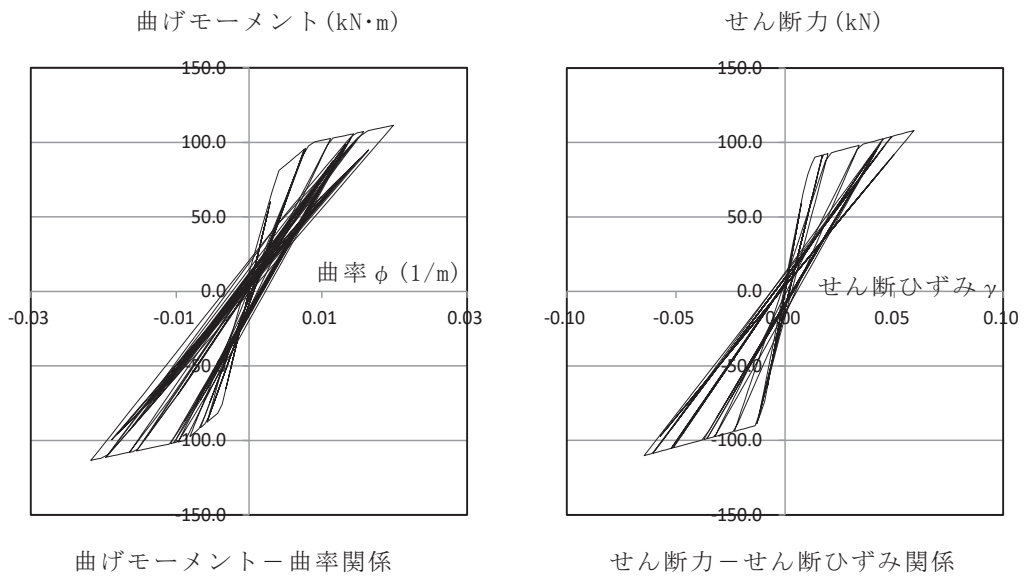


図 3.5-7 部材 1 の応答履歴曲線 (本解析コード)

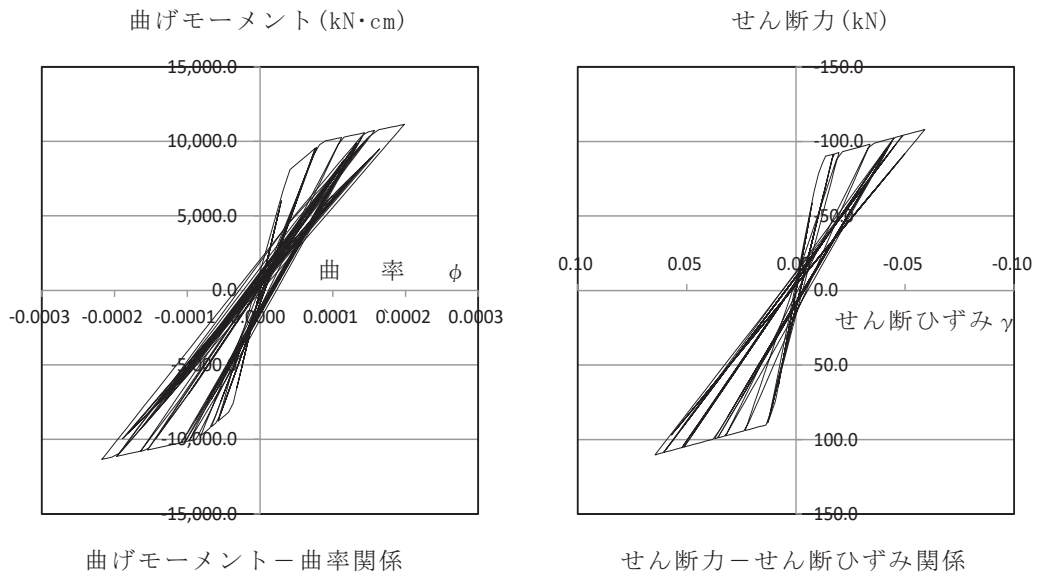


図 3.5-8 部材 1 の応答履歴曲線 (NUPP4)

(2) 平行成層地盤の側面・底面境界条件自動作成の妥当性検証

a. 妥当性確認方法

半無限の成層地盤をモデル化した場合、解析モデルの同一深度の節点は、各方向に同一に変位する。そこで、本解析コードにより各節点に同一変位条件を与えたモデルによる解析結果と切欠き力を与えたモデル(平行成層地盤の側面・底面境界条件自動作成)の結果を比較する。(図 3.5-9 参照。)

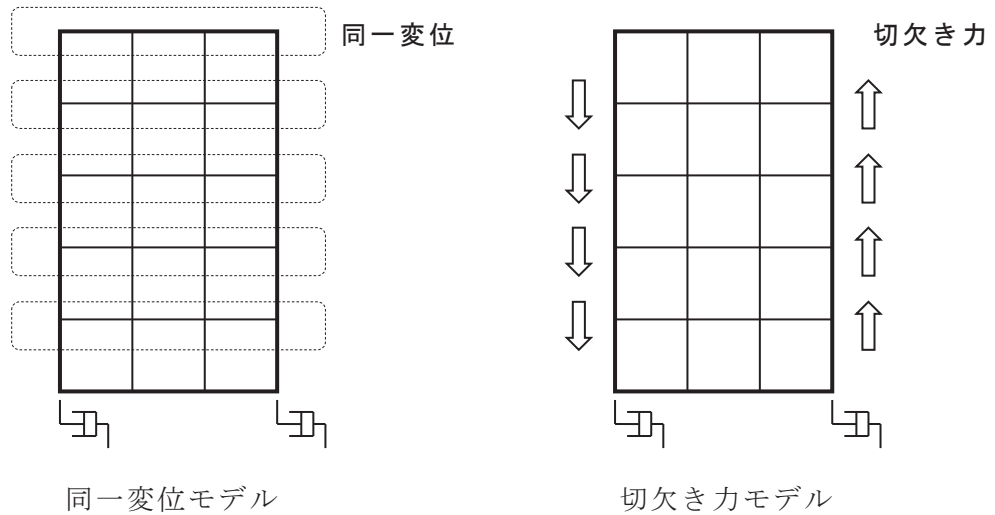


図 3.5-9 検討方法の概要

b. 解析条件

(a) 解析モデル

検証を行う解析モデルを図 3.5-10 に示す。各辺 3.0m、高さ 5.0m の領域をモデル化する。地盤モデルの側面及び底面は 3 方向ともに粘性境界とする。

地盤モデル及びモデル底面以深の物性は均一とし、各々の材料物性を表 3.5-5 に示す。なお、地盤モデルの減衰は、周期 0.1s に対する剛性比例減衰を仮定する。

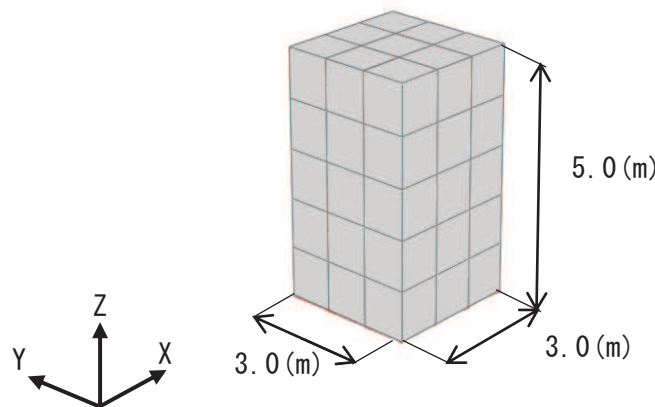


図 3.5-10 検証に用いる解析モデル



表 3.5-5 材料物性

	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン 比	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )
地盤モデル	343.1	117.5	0.46	20.0
モデル底面以深	—	—	—	20.6

	Vs (m/s)	Vp (m/s)	h
地盤モデル	240.0	881.9	0.05
モデル底面以深	500.0	1380.0	—

(b) 入力地震動

入力地震波は EL\_CENTRO(NS)とし、最大加速度を表 3.5-6 の値に規準化したものを、底面粘性境界外側から入力する。時間刻みは、原波の時間刻みを2分割し0.01sとする。

表 3.5-6 入力地震波の最大加速度

X 方向	300cm/s <sup>2</sup>
Y 方向	200cm/s <sup>2</sup>
Z 方向	100cm/s <sup>2</sup>

(c) 検討ケース

切欠き力を与えたモデルについては、X方向、Y方向、Z方向にそれぞれ入力した場合と3方向同時に入力した場合の4ケース、同一変位モデルについては、3方向同時に入力したケースとする。

c. 妥当性確認結果

図 3.5-11 に示す位置の最大応答値及び応答加速度波形を，表 3.5-7 及び図 3.5-12～図 3.5-14 に示す。

表 3.5-7 によれば，切欠き力モデルの応答加速度は入力方向に対してのみ発生しており，その最大値は同一変位モデルと一致している。また，図 3.5-12～図 3.5-14 の応答加速度波形を比較すると，切欠き力モデルと同一変位モデルは対応している。

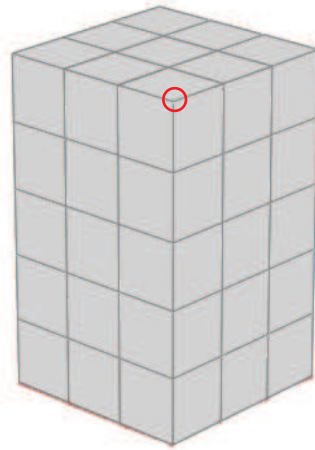


図 3.5-11 応答比較位置

表 3.5-7 応答最大値

		同一変位モデル	切欠き力モデル			
		3方向同時入力	X方向入力	Y方向入力	Z方向入力	3方向同時入力
X 方 向	加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	-321.7	-321.7	0	0	-321.7
	速度 (cm/s)	4.36	4.36	0	0	4.36
	変位 (cm)	-0.36	-0.36	0	0	-0.36
Y 方 向	加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	-214.5	0	-214.5	0	-214.5
	速度 (cm/s)	2.91	0	2.91	0	2.91
	変位 (cm)	-0.24	0	-0.24	0	-0.24
Z 方 向	加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	98.89	0	0	98.89	98.89
	速度 (cm/s)	-0.35	0	0	-0.35	-0.35
	変位 (cm)	-0.04	0	0	-0.04	-0.04

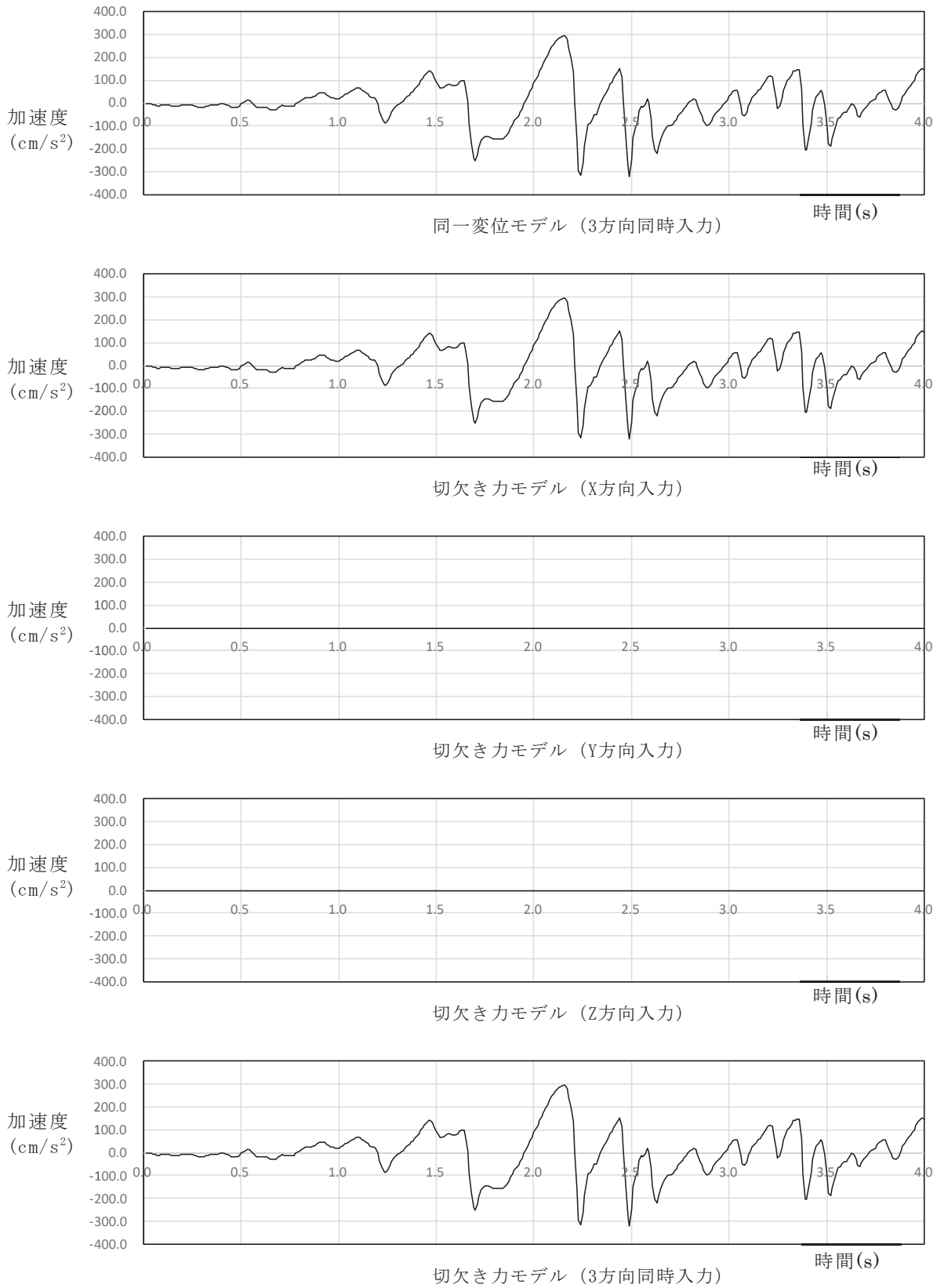


図 3.5-12 X方向応答加速度波形

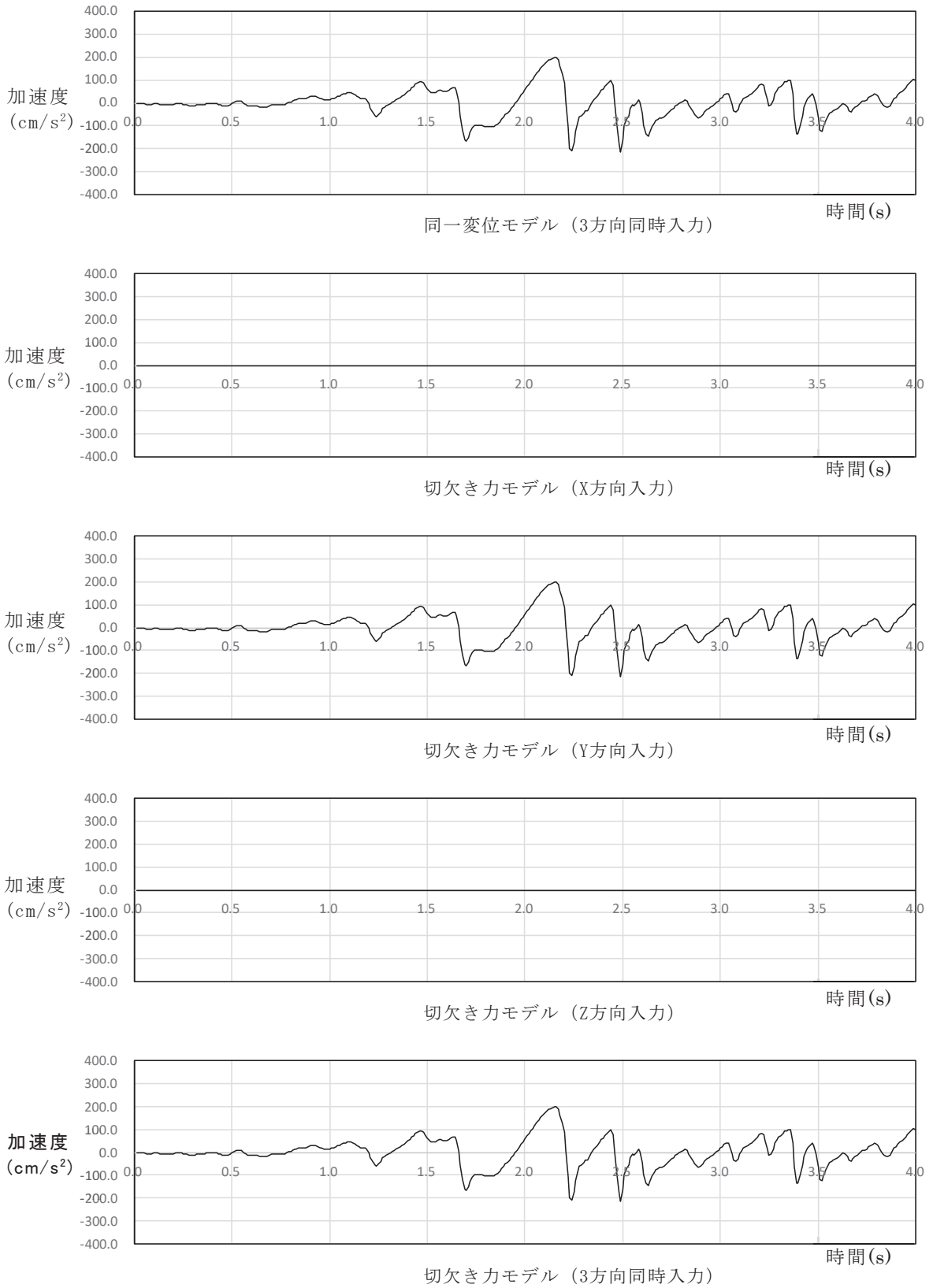


図 3.5-13 Y 方向応答加速度波形

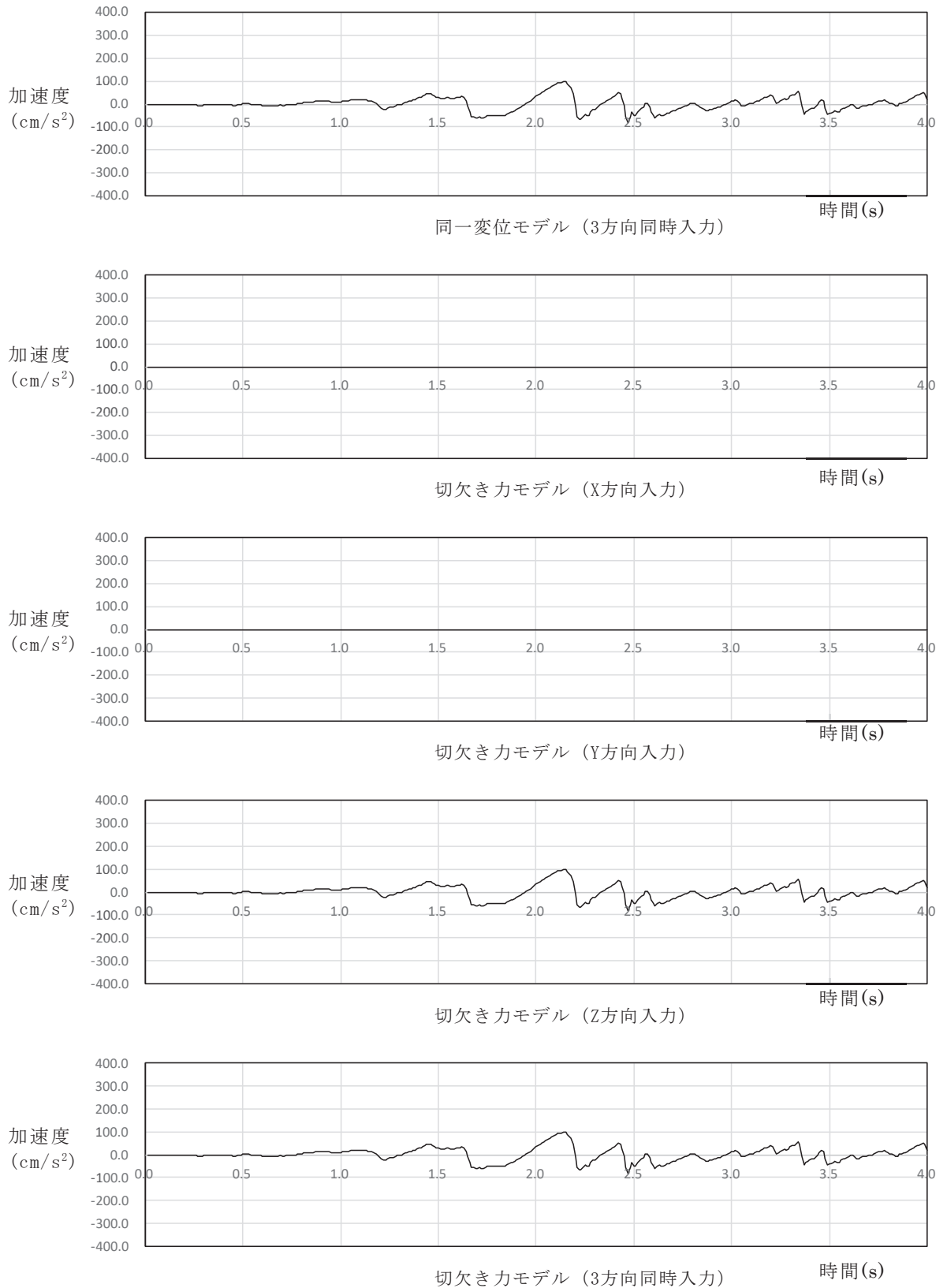


図 3.5-14 Z 方向応答加速度波形

(3) 浮上り非線形解析 (1 方向ばねの非線形特性)

a. 妥当性確認方法

本解析コードによる基礎部の浮上り解析 (1 方向非線形ばね) を行い, 時間領域のグリーン関数法 (引用文献(2)参照。) の解析結果とほぼ一致していることを確認する。

なお, 本結果は文献 (引用文献(3)参照。) の結果を示したもので, 地盤ばねを行列評価したモデル (以下, 拡張 SR モデルという。) の解析結果も参考として合わせて示す。

b. 解析条件

(a) 解析モデル

本解析コードで検証を行う地盤 3 次元 FEM の解析モデルを図 3.5-15 に示す。建物部は基礎と建屋の 2 質点の弾性モデルとし, 基礎下に地盤をソリッド要素とした 3 次元 FEM モデルである。

建屋諸元を図 3.5-16 に示す。(参考に拡張 SR モデルも示している。)

なお, 比較に用いるグリーン関数法では基礎を縦横とも 20 分割したもので建屋諸元は同じである。

また, 地盤 3 次元 FEM (及び拡張 SR モデル) では離散化した基礎版と地盤間には常時軸力を越えると剥離する非線形軸ばね要素を設けている。

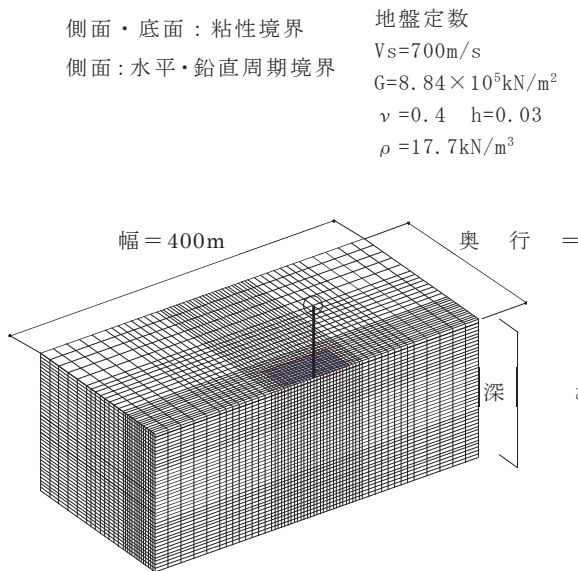
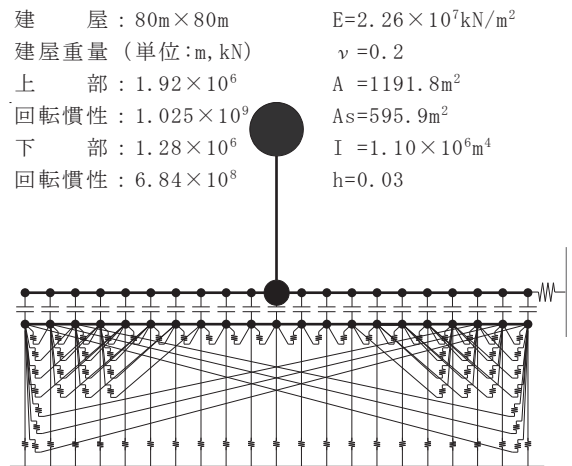


図 3.5-15 解析モデル



(参考 拡張 SR モデルの概要) (3)

図 3.5-16 建屋諸元

(b) 入力地震動

ランダム位相で作成した国土交通省告示の極めて稀に発生する地震動に適合した模擬地震波を作成し、地震開始から主要動の 50s を解析区間とする。入力加速度のレベルに合わせ係数倍して  $800\text{cm/s}^2 \sim 2000\text{cm/s}^2$  まで用いる。 $100\text{cm/s}^2$  で規準化した入力動の加速度波形を図 3.5-17 に示す。なお 3 次元 FEM に用いる地震動は、地表において定義された入力動を解析モデル基盤 (G. L.  $-160\text{m}$ ) へ引き下げた地震波 (30Hz 以上をカット) とし、モデル下端に入力する。地表位置で入力動の再現性を確認した加速度応答波のスペクトルを図 3.5-18 に示す。

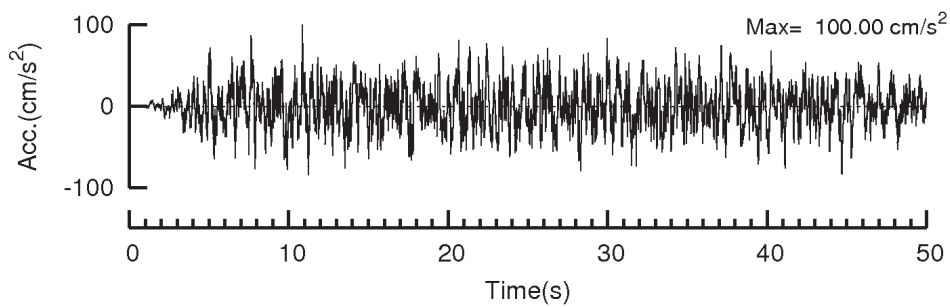


図 3.5-17 規準化した入力波の時刻歴波形

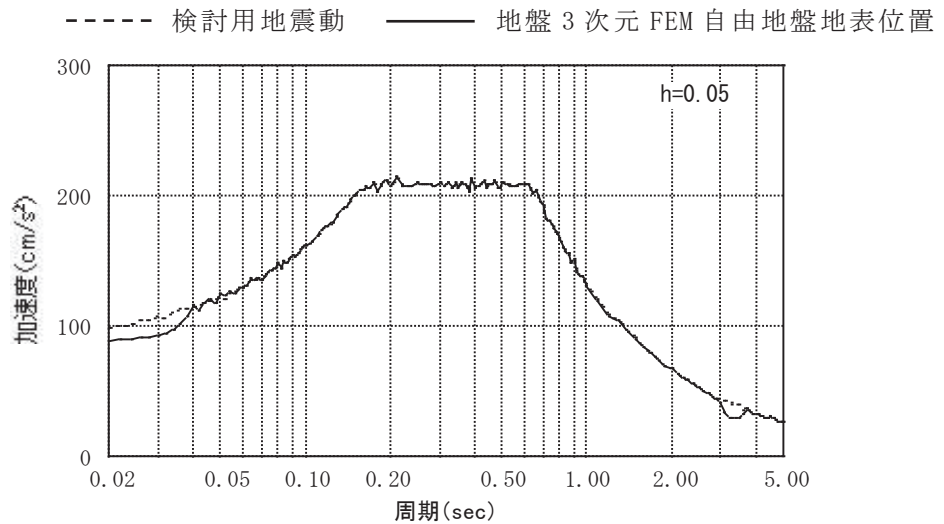


図 3.5-18 検討に用いる入力波加速度応答スペクトル

c. 妥当性確認結果

本解析コードとグリーン関数法により基礎浮上り地震応答解析を実施した。

(文献<sup>(3)</sup>の図表を転記しているため拡張 SR モデルの結果も含む)

入力加速度に対する建屋応答最大水平加速度を図 3.5-19, 建屋応答最大鉛直加速度を図 3.5-20, 最小接地率を図 3.5-21 に示す。また, 1700cm/s<sup>2</sup> 入力時の 3 モデルの接地率の経時変化を図 3.5-22 示す。

これらより, 最大水平応答加速度は, 3 モデルとも 800cm/s<sup>2</sup>~1900cm/s<sup>2</sup> 入力に対し直線的に増加しており, モデル間での応答の差は小さい。最大鉛直応答加速度は, 入力の増加により下に凸状に増加しているがモデル間での差は小さい。最小接地率も 30% 程度までは, 3 モデルとも, ほぼ一致している。1700cm/s<sup>2</sup> 入力時の 3 モデルの接地率の経時変化は, 細部を比較すると若干差異があるが最大値発生時刻はいずれも 8.0s 近傍で発生しており接地率の値もほぼ一致している。

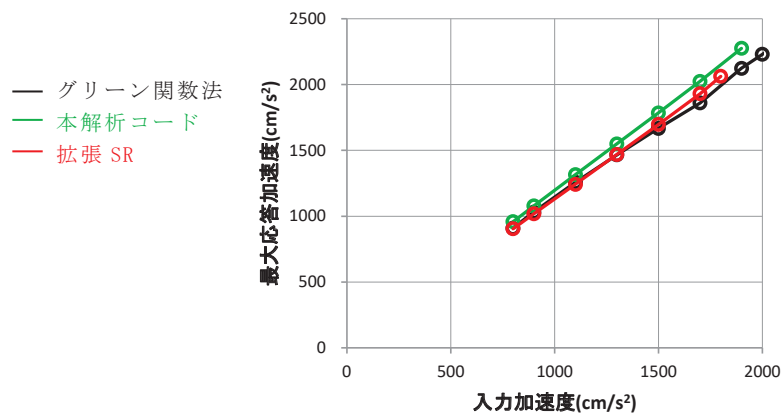


図 3.5-19 建屋最大応答水平加速度

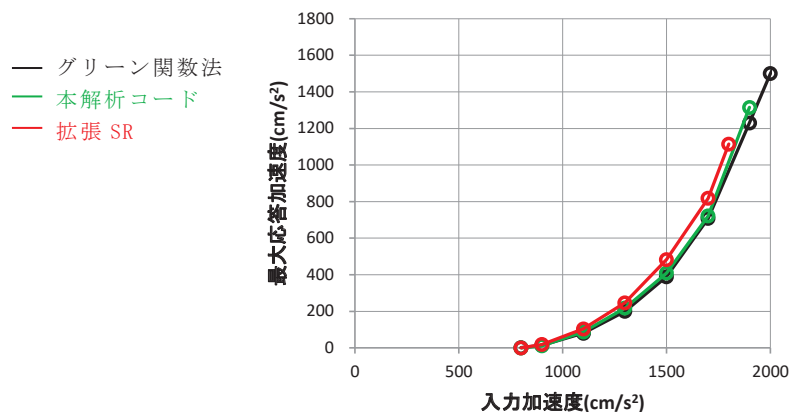


図 3.5-20 建屋最大応答鉛直加速度



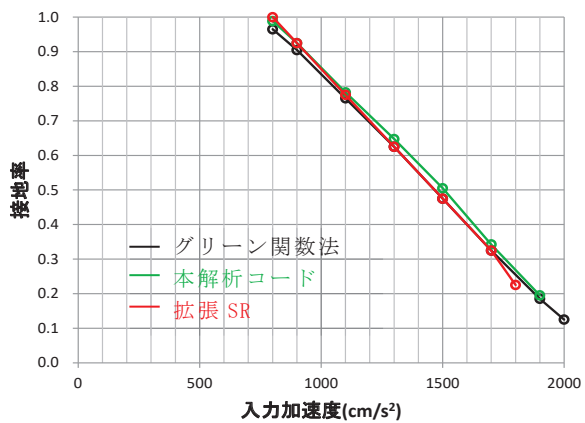
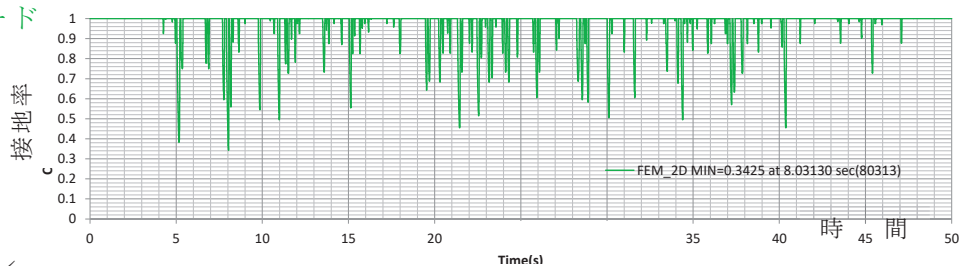
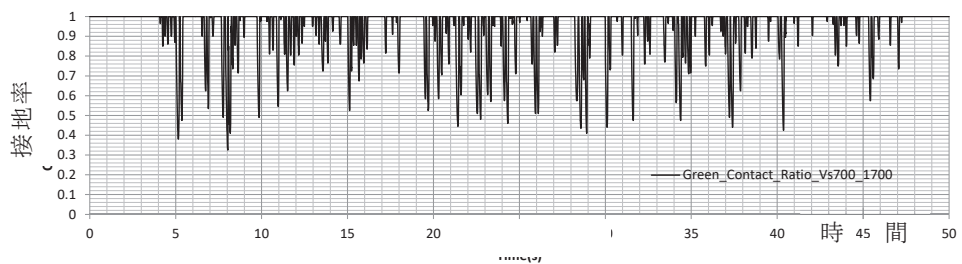


図 3.5-21 最小接地率

本解析コード



グリーン関数法



拡張SR

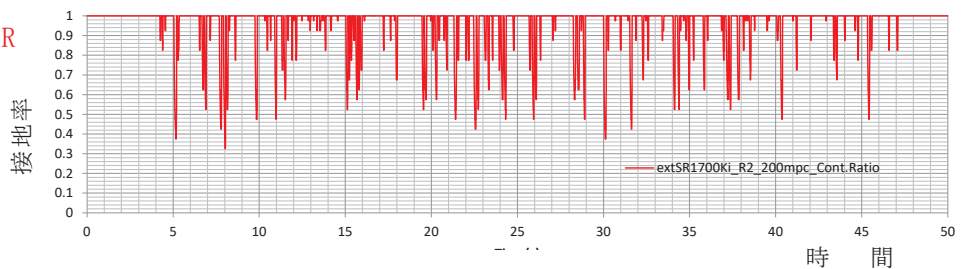


図 3.5-22 接地率 (1700cm/s<sup>2</sup>入力時)

### 3.5.3 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。

- ・ 建屋曲げせん断部材の非線形特性について、多くの原子力発電所の使用実績がある解析コード NUPP4 と同一の結果が得られた。
- ・ 平行成層地盤の側面・底面境界条件自動作成機能を用いた地盤応答が同一深度に同一変位条件を与えた場合の地盤応答と合致することを確認した。
- ・ 基礎部の浮上り解析を行い、時間領域のグリーン関数法の解析結果とほぼ一致していることを確認した。

## 4. 引用文献

- (1) 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 (社) 日本電気協会
- (2) 原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4 6 0 1 -2008 参考資料 3.5 (社) 日本電気協会
- (3) 藪内耕一他, 日本建築学会 第 38 回情報・システム・利用シンポジウム, マトリックス地盤ばねを用いた SR モデルの検討, 2015 年 12 月