

東海第二発電所	工事計画審査資料
資料番号	工認-755改1
提出年月日	平成30年8月29日

V-5-21 計算機プログラム（解析コード）の概要・NORA2D

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. NORA2D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	4
3.4 解析フローチャート	8
3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)	8

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）NORA2D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-2-2-4	使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書	Ver. 01. 03. 00

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	NORA2D
使用目的	固有値解析及び地震応答解析
開発機関	株式会社大林組
開発時期	1979年(初版)
使用したバージョン	Ver. 01. 03. 00
コードの概要	<ul style="list-style-type: none"> ・株式会社大林組が独自に開発したコードである。 ・NORA2Dは、2次元集中質点系モデルを対象に、地震応答解析を行う解析コードである。実固有値解析、線形応答解析の他、部材の材料非線形性及び基礎浮き上がり非線形性を考慮した非線形応答解析を行うことができる。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>NORA2D (Ver. 01. 03. 00) は、使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析に使用している。</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。 ・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。 <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"> ・原子力産業界において、「東京電力株式会社福島第一原子力発電所における事故を踏まえた大飯発電所3号機の安全性に関する総合評価(一次評価)の結果について(報告)」の地震応答解析に本解析コードが使用された実績がある。 ・地震応答解析に対して、原子力産業界において、多数の解析で使用実績のある「TDAPⅢ」(株式会社アーク情報システム)を用いた解析解と、本解析コードによる解析解を比較した結果、両者の解が概ね一致していることを確認した。 ・非線形性を考慮した地震応答解析に対して、原子産業界において、多数の解析で使用実績のある「Soil Plus」(伊藤忠テクノソリューションズ株式会社)を用いた解析解と、本解析コードによる解析解を比較した結果、両者の解が概ね一致していることを確認した。 ・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. NORA2Dの解析手法について

3.1 一般事項

NORA2Dは、株式会社大林組が開発したプログラムであり、時間領域における構造解析用解析コードである。NORA2Dは、使用済燃料乾式貯蔵建屋の水平方向及び鉛直方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの応答を評価するために使用している。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードは、直接積分法の1つであるニューマークβ法 (Newmark β method) により、非線形地震応答解析を行う解析コードである。主な特徴を以下に示す。

- ・2次元集中質点系モデルを対象とした解析コードである。
- ・建屋モデル化に用いるはり要素では、せん断剛性、曲げ剛性の各々に対して、独立した材料非線形性を与えることができる。
- ・地盤モデル化には、ダンパー付ばね要素の他、基礎浮き上がり非線形が考慮できる回転ばね要素が用意されている。
- ・減衰として、レーリー減衰、ひずみエネルギー比例型減衰等の適用が可能である。

3.3 解析手法

a. 運動方程式

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = -[m]\{\alpha\}\ddot{u}_0 \cdots \cdots (1)$$

ここに、

- $[m]$: 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
- $\{\alpha\}$: 入力ベクトル (入力のある自由度:1, 他:0)
- \ddot{u}_0 : 入力地震動の加速度

地盤ばねを考慮する質点を添字cで、それ以外の質点を添字sで表すと(1)式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sc} \\ C_{cs} & C_{cc} + C_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{u}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} \\ K_{cs} & K_{cc} + K_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ u_c \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} \{\alpha\} \ddot{u}_0 \cdots \cdots (2)$$

ここで、

$$[m] = \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix}$$

$$[c] = \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sc} \\ C_{cs} & C_{cc} + C_c \end{bmatrix}$$

$$[k] = \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} \\ K_{cs} & K_{cc} + K_c \end{bmatrix}$$

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_s \\ u_c \end{Bmatrix}$$

$[K_c], [C_c]$: 地盤ばねの剛性及び減衰マトリックス

b. 固有値の解法

(2)式において、外力項を $\{0\}$ とし減衰項を除けば、(3)式に示す自由振動を表す方程式となる。

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} \\ K_{cs} & K_{cc} + K_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ u_c \end{Bmatrix} = \{0\} \dots\dots\dots (3)$$

(3)式で変位 $(u_s, u_c)^T$ に調和振動を仮定すれば、(4)式が得られる。

$$\left(-\omega_i^2 \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} \\ K_{cs} & K_{cc} + K_c \end{bmatrix} \right) \{\phi_i\} = \{0\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

ω_i : i 次の固有円振動数

$\{\phi_i\}$: i 次の固有モードベクトル

(4)式が固有モードベクトル $\{\phi_i\} \neq \{0\}$ を満たす条件は固有値問題となり、(4)式を解くことにより固有値 ω_i が得られる。

c. 減衰項の設定

本項では、系の粘性減衰に着目し、建物にはひずみエネルギー比例型減衰、地盤ばねには減衰係数を直接与えることを想定して、減衰項の設定について述べる。

地盤ばねに与える減衰を除いた建物のモード減衰定数 h_i は、 i 次振動モードにおける各部材のひずみエネルギーに比例するものとして次式で求める。

$$h_i = \frac{\sum_j (h^j E_i^j)}{\sum_j E_i^j} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

h^j : j 部材の減衰定数

$$E_i^j = \frac{1}{2} \{\phi_i^j\}^T [k^j] \{\phi_i^j\} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、

$[k^j]$: j 部材の剛性マトリックス

$\{\phi_i^j\}$: i 次振動モードにおける j 部材の材端変位ベクトル

建物の減衰マトリックスは、(5)式による各次モード減衰定数と固有モードベクトルより次式で求める。

$$\begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sc} \\ C_{cs} & C_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} (\sum_i \{\phi_i\} \eta_i \{\phi_i\}^T) \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

$$\eta_i = \frac{2h_i \omega_i}{\{\phi_i\}^T \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} \{\phi_i\}}$$

なお、地盤ばねの減衰は、 C_c で表される内部粘性減衰として与えられるので、地盤-建物連成モデルの減衰マトリックスは、次式で与えられる。

$$[c] = \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sc} \\ C_{cs} & C_{cc} + C_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

d. 運動方程式の解法

本解析コードでは、直接積分法の1つであるニューマーク β 法により、各時間ステップに対する運動方程式の解を順次求めていく。以下に、ニューマーク β 法の概要を示す。

n ステップの変位 $\{u\}_{(n)}$ 、速度 $\{\dot{u}\}_{(n)}$ 、加速度 $\{\ddot{u}\}_{(n)}$ が既知とすると、 $n+1$ ステップの変位、速度は β をパラメータとして(9)式のように表せる。

$$\begin{aligned} \{\dot{u}\}_{(n+1)} &= \{\dot{u}\}_{(n)} + \frac{1}{2}(\{\ddot{u}\}_{(n+1)} + \{\ddot{u}\}_{(n)}) \\ \{u\}_{(n+1)} &= \{u\}_{(n)} + \{\dot{u}\}_{(n)}\Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)\{\ddot{u}\}_{(n)}\Delta t^2 + \beta\{\ddot{u}\}_{(n+1)}\Delta t^2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

(9)式をn+1ステップの運動方程式(1)式に代入して $\{\dot{u}\}_{(n+1)}$ 及び $\{\ddot{u}\}_{(n+1)}$ を消去することにより、変位増分 $\{\Delta u\} = \{u\}_{(n+1)} - \{u\}_{(n)}$ を以下のように求めることができる。

$$\{\Delta u\} = [\bar{K}]^{-1}\{\bar{\Delta P}\} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、

$$[\bar{K}] = [k] + \frac{1}{2\beta\Delta t}[c] + \frac{1}{\beta\Delta t^2}[m]$$

$$\{\bar{\Delta P}\} = -[m]\{\alpha\}\Delta\ddot{u}_0 + [m]\left(\frac{1}{\beta\Delta t}\{\dot{u}\}_{(n)} + \frac{1}{2\beta}\{\ddot{u}\}_{(n)}\right) + [c]\left(\frac{1}{2\beta}\{\dot{u}\}_{(n)} + \left(\frac{1}{4\beta} - 1\right)\{\ddot{u}\}_{(n)}\Delta t\right)$$

$$\Delta\ddot{u}_0 = \ddot{u}_{0(n+1)} - \ddot{u}_{0(n)}$$

また、 $\{\Delta\dot{u}\} = \{\dot{u}\}_{(n+1)} - \{\dot{u}\}_{(n)}$ 及び $\{\Delta\ddot{u}\} = \{\ddot{u}\}_{(n+1)} - \{\ddot{u}\}_{(n)}$ は、(10)式の $\{\Delta u\}$ を用いて次のように表される。

$$\{\Delta\dot{u}\} = \frac{1}{2\beta\Delta t}\{\Delta u\} - \frac{1}{2\beta}\{\dot{u}\}_{(n)} - \left(\frac{1}{4\beta} - 1\right)\{\ddot{u}\}_{(n)}\Delta t \dots\dots\dots (11)$$

$$\{\Delta\ddot{u}\} = \frac{1}{\beta\Delta t^2}\{\Delta u\} - \frac{1}{\beta\Delta t}\{\dot{u}\}_{(n)} - \frac{1}{2\beta}\{\ddot{u}\}_{(n)} \dots\dots\dots (12)$$

このように、(10)～(12)式の手続きを繰り返すことにより、各時間ステップに対する運動方程式の解が順次求められることとなる。

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。

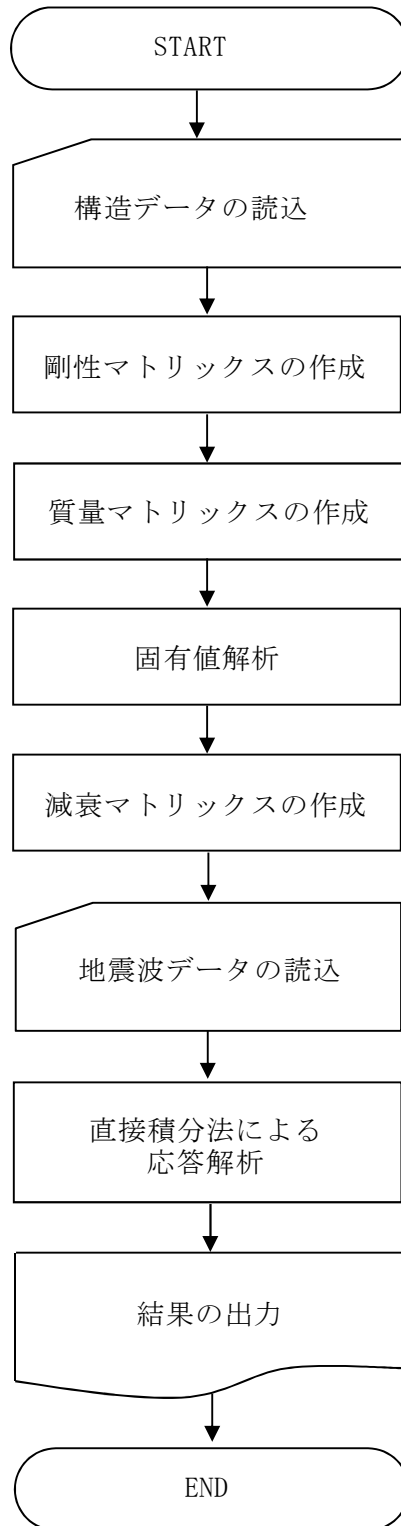


図3.4-1 解析フローチャート

3.5 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

a. 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。

b. 妥当性確認(Validation)

検証用の解析コードとして、原子力産業界において、多数の解析で使用実績のある「TDAPⅢ」（株式会社アーク情報システム）を用いた解析解と、NORA2Dによる解析解を比較した。

また、付着力を考慮した地震応答解析に対して、原子力産業界において、多数の解析で使用実績のある「Soil Plus」（伊藤忠テクノソリューションズ株式会社）を用いた解析解と、NORA2Dによる解析解を比較した。

(a) 「TDAPⅢ」（株式会社アーク情報システム）との比較

PWR型原子炉建屋モデルを模擬した質点系SR（スウェイ-ロッキング）モデルを対象に「TDAPⅢ」（株式会社アーク情報システム）を用いた解析解と、NORA2Dによる解析解を比較した。検証解析の主な内容は以下のとおりとする。

①固有値解析

質点系SRモデルの固有値解析を実施し、固有値（固有振動数）、及びひずみエネルギー比例型減衰手法に基づくモード減衰定数について、NORA2DとTDAPⅢによる結果を比較する。

②線形応答解析

同上の質点系SRモデルに対して、線形応答解析を実施し、節点及び要素の最大応答値について、NORA2DとTDAPⅢによる結果を比較する。

なお、応答解析の時間刻みは0.002 秒とし、直接積分法による。建屋減衰は歪エネルギー比例型減衰として減衰マトリックスを構成し、地盤の減衰については別途、当該自由度に地盤の減衰係数を足しこむことにより考慮する。

質点系SRモデルの概要図を図3.5-1に、建屋諸元について表3.5-1～表3.5-3に、地盤ばね諸元と浮上り非線形特性について表3.5-4及び図3.5-2に、入力地震動を図3.5-3に示す。

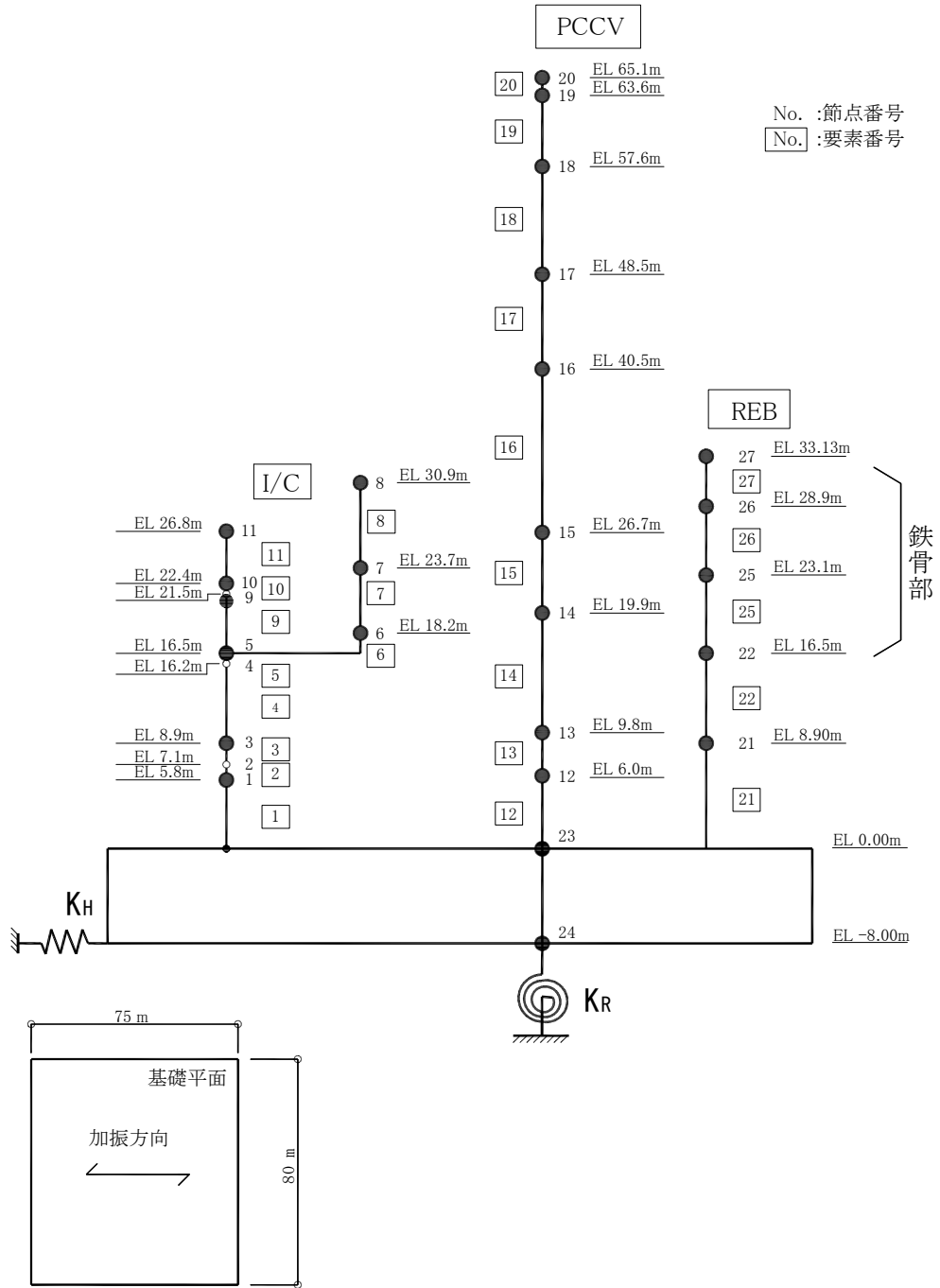


図3.5-1 PWR型原子炉建屋を模擬した質点系SRモデル

表3.5-1 PWR型原子炉建屋を模擬した質点系SRモデルの諸元 (R/B)

建屋・構造物	質点番号	高さ EL. (m)	重量 (tf)	回転慣性 ($\times 10^6$ tf/m ²)	要素番号	せん断断面積 (m ²)	断面2次モーメント (m ⁴)	軸断面積 (m ²)
内部 コンクリート (I/C)	IC11	26.80	290	—	11	13	36	47
	IC10	22.40	475		10	13	36	47
	IC09	21.50	475		9	28	1000	91
	IC08	30.90	200		8	13	180	25
	IC07	23.70	440		7	13	180	25
	IC06	18.20	260		6	13	180	25
	IC05	16.50	5000		5	102	11500	203
	IC04	16.20	—		4	102	11500	203
	IC03	8.90	4600		3	134	15200	255
	IC02	7.10	—		2	130	15100	244
	IC01	5.80	3000		1	147	17400	277
			14740					
原子炉 格納 容器 (PCCV)	CV20	65.10	320	—	20	44	610	1.3
	CV19	63.60	1390		19	76	13480	8.4
	CV18	57.60	3020		18	76	29240	51
	CV17	48.50	3380		17	83	39780	160
	CV16	40.50	5930		16	90	44420	180
	CV15	26.70	4780		15	90	44420	180
	CV14	19.90	3920		14	90	44420	180
	CV13	9.80	3230		13	90	44420	180
	CV12	6.00	2280		12	90	44420	180
			28250					
周辺補機 棟 REB	EB22	16.50	25100	16.0	22	460	230400	890
	EB21	8.90	31700	21.0	21	610	265600	1120
基礎版 BASE	BS23	0.00	78800	27.3	23	5,100	2810000	6000
	BS24	-8.00	57600	27.3				

表3.5-2 PWR型原子炉建屋を模擬した質点系SRモデルの諸元 (鉄骨部)

建屋・構造物	質点番号	高さ EL. (m)	重量 (tf)	回転慣性 ($\times 10^6$ t /m ²)	要素番号	せん断ばね定数 (tf/cm)
燃料取扱 棟 REB (鉄骨部)	FH27	33.129	200	—	27	6894
	FH26	28.90	140	—	26	6718
	FH25	23.10	170	—	25	5577

表3.5-3 PWR型原子炉建屋を模擬した質点系SRモデルの材料定数と減衰定数

	ヤング係数 E(tf/cm ²)	せん断剛性 G(tf/cm ²)	減衰定数 h(%)	設計基準強度 Fc(kg/cm ²)
原子炉格納容器 (PCCV)	304 361	136 155	3	420 588
周辺補機棟, 燃料取扱棟 (REB) 内部コンクリート (I/C) 基礎版 (B/M)	270 318	116 136	5*	240 336

*: 部材番号25, 26, 27のFH/B鉄骨部の減衰定数は2%。

表3.5-4 地盤ばね定数と減衰係数

	ばね定数 Ks	減衰係数 Cs
水平	10.75 × 10 ⁵ (tf/cm)	1.80 × 10 ⁴ (tf·sec/cm)
回転	16.81 × 10 ¹² (tf·cm/rad)	9.85 × 10 ¹⁰ (tf·cm·sec/rad)

*浮上り限界転倒モーメント: $M = W \cdot L / 6 = 244,600 \text{tf} \cdot 75 \text{m} / 6 = 3.06 \times 10^6 \text{tf} \cdot \text{cm} / \text{rad}$

NT2 補③ V-5-21 R0

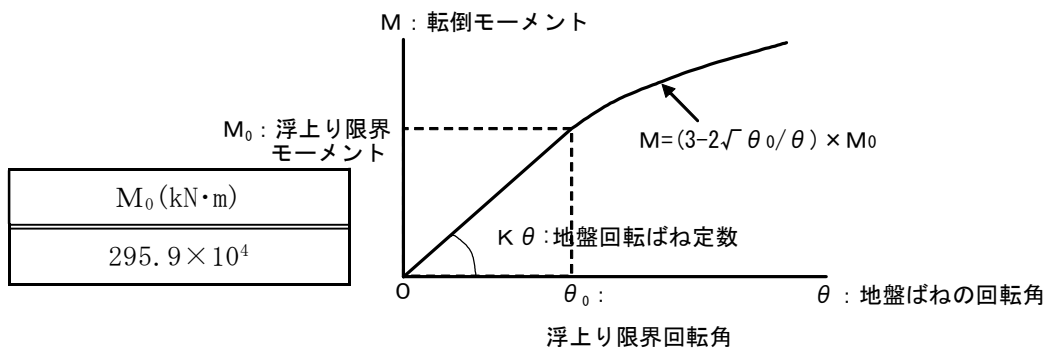
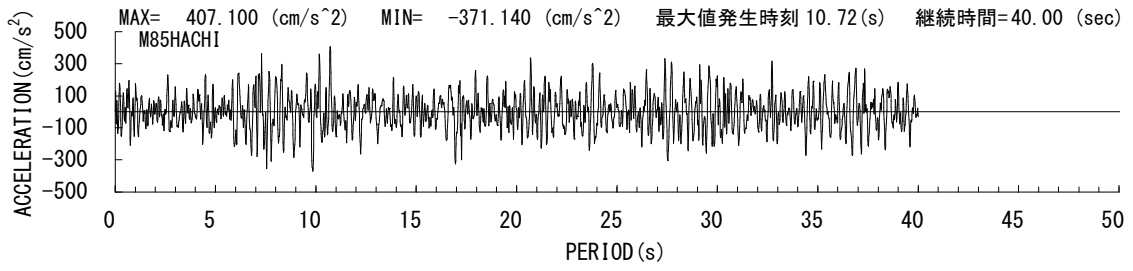
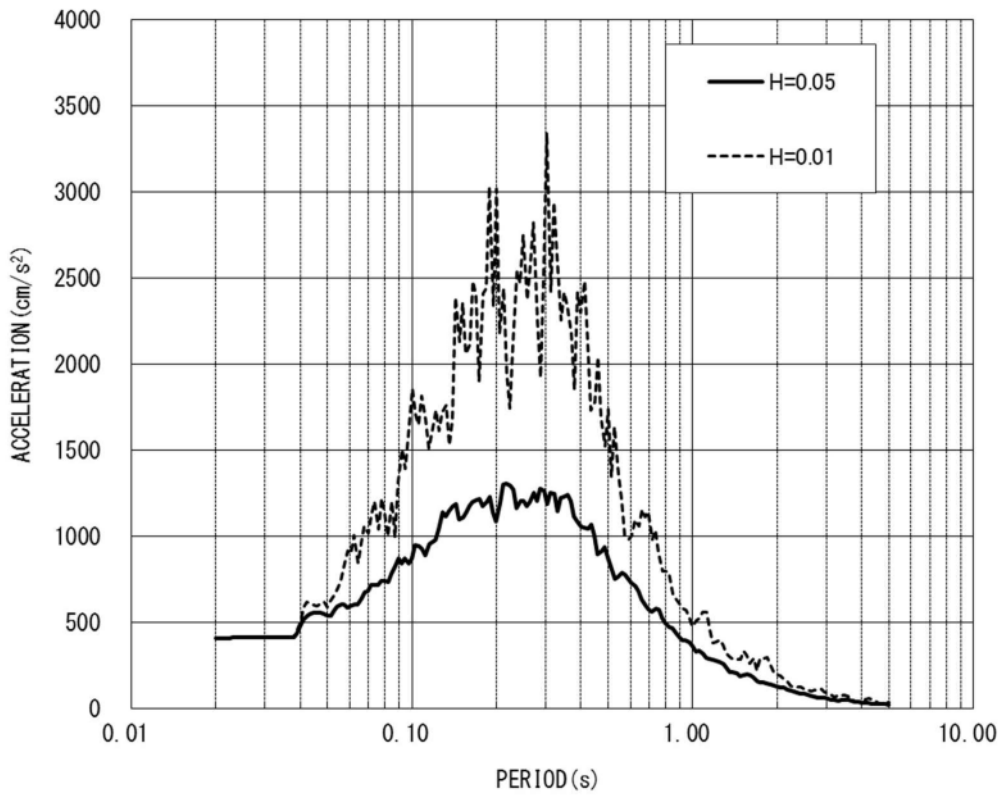


図3.5-2 地盤回転ばねの幾何学的非線形特性



(a) 加速度時刻歴



(b) 応答スペクトル (減衰定数1%, 5%)

図3.5-3 入力地震波

4. 固有値解析

質点系SRモデルにおけるNORA2DとTDAPⅢで算定した固有値の比較を表3.5-5に示す。

質点系SRモデルにおけるNORA2DとTDAPⅢで算定した固有値（固有振動数）とモード減衰定数について、両者の結果が同一となることを確認した。

表3.5-5 固有周期，固有振動数およびモード減衰定数による比較

次数	振動数(Hz)			モード減衰定数		
	NORA2D	TDAPⅢ	誤差 比率	NORA2D	TDAPⅢ	誤差 比率
1	4.99	4.99	0.00	0.0277	0.0277	0.00
2	9.56	9.56	0.00	0.0160	0.0160	0.00
3	13.0	13.0	0.00	0.0228	0.0228	0.00
4	13.9	13.9	0.00	0.0454	0.0454	0.00
5	15.9	15.9	0.00	0.0279	0.0279	0.00
6	17.0	17.0	0.00	0.0248	0.0248	0.00
7	19.9	19.9	0.00	0.0496	0.0496	0.00
8	24.2	24.2	0.00	0.0428	0.0428	0.00
9	28.1	28.1	0.00	0.0458	0.0458	0.00
10	28.7	28.7	0.00	0.0338	0.0338	0.00
11	35.2	35.2	0.00	0.0294	0.0294	0.00
12	37.4	37.4	0.00	0.0201	0.0201	0.00
13	40.1	40.1	0.00	0.0303	0.0303	0.00
14	42.7	42.7	0.00	0.0499	0.0499	0.00
15	44.5	44.5	0.00	0.0484	0.0484	0.00
16	49.9	49.9	0.00	0.0500	0.0500	0.00
17	50.4	50.4	0.00	0.0300	0.0300	0.00
18	54.4	54.4	0.00	0.0500	0.0500	0.00
19	57.5	57.5	0.00	0.0302	0.0302	0.00
20	58.1	58.1	0.00	0.0490	0.0490	0.00

ロ. 線形応答解析

NORA2DとTDAPⅢで算定した線形応答解析結果の比較を表3.5-6及び表3.5-7に示す。
なお、比較は変位、速度、加速度、せん断力、モーメントについて示している。

質点系SRモデルにおけるNORA2DとTDAPⅢで算定した各応答について、両者の結果がほぼ同一となることを確認した。

表3.5-6 節点の最大応答値（変位，速度，加速度）による比較（質点系SRモデル，線形応答解析）

(1) 水平変位

節点番号	NORA2D (cm)	TDAPⅢ (cm)	誤差 比率
1	0.1669	0.1669	0.00
2	0.1760	0.1760	0.00
3	0.1888	0.1888	0.00
4	0.2413	0.2413	0.00
5	0.2436	0.2436	0.00
6	0.2586	0.2586	0.00
7	0.3155	0.3155	0.00
8	0.3892	0.3892	0.00
9	0.2776	0.2776	0.00
10	0.2853	0.2853	0.00
11	0.3226	0.3226	0.00
12	0.2905	0.2905	0.00
13	0.4230	0.4230	0.00
14	0.8107	0.8107	0.00
15	1.086	1.086	0.00
16	1.639	1.639	0.00
17	1.930	1.930	0.00
18	2.231	2.231	0.00
19	2.399	2.399	0.00
20	2.437	2.437	0.00
21	0.1790	0.1790	0.00
22	0.2141	0.2141	0.00
23	0.1288	0.1288	0.00
24	0.1045	0.1045	0.00
25	0.3334	0.3334	0.00
26	0.4061	0.4061	0.00
27	0.4536	0.4536	0.00

(2) 水平速度

節点番号	NORA2D (cm/s)	TDAPⅢ (cm/s)	誤差 比率
1	5.260	5.261	0.00
2	5.640	5.642	0.00
3	6.180	6.179	0.00
4	9.070	9.067	0.00
5	9.200	9.196	0.00
6	10.26	10.26	0.00
7	14.63	14.63	0.00
8	20.41	20.41	0.00
9	11.17	11.17	0.00
10	11.64	11.64	0.00
11	13.99	13.99	0.00
12	8.330	8.327	0.00
13	11.57	11.57	0.00
14	22.01	22.01	0.00
15	30.37	30.37	0.00
16	47.50	47.50	0.00
17	56.59	56.59	0.00
18	65.99	65.99	0.00
19	71.20	71.20	0.00
20	72.40	72.40	0.00
21	5.140	5.142	0.00
22	6.260	6.265	0.00
23	3.720	3.724	0.00
24	2.980	2.979	0.00
25	16.74	16.74	0.00
26	24.38	24.38	0.00
27	29.11	29.11	0.00

(3) 絶対加速度

節点番号	NORA2D (cm/s ²)	TDAPⅢ (cm/s ²)	誤差 比率
1	523.2	523.2	0.00
2	540.9	540.9	0.00
3	565.9	565.9	0.00
4	712.0	712.0	0.00
5	719.6	719.6	0.00
6	781.5	781.5	0.00
7	1,051	1,051	0.00
8	1,423	1,423	0.00
9	838.0	838.0	0.00
10	867.6	867.6	0.00
11	1,015	1,014	0.00
12	538.1	538.1	0.00
13	599.6	599.6	0.00
14	887.5	887.5	0.00
15	1,123	1,123	0.00
16	1,585	1,585	0.00
17	1,822	1,822	0.00
18	2,126	2,126	0.00
19	2,302	2,302	0.00
20	2,343	2,343	0.00
21	531.4	531.4	0.00
22	593.8	593.8	0.00
23	451.5	451.5	0.00
24	433.0	433.0	0.00
25	1,256	1,256	0.00
26	1,816	1,816	0.00
27	2,166	2,166	0.00

表3.5-7 要素の最大応答値（せん断力，曲げモーメント）による比較
（質点系SRモデル，線形応答解析）

(1) はり要素

要素番号	下端曲げモーメントM			せん断力S		
	NORA2D (kN・m)	TDAPⅢ (kN・m)	誤差 比率	NORA2D (kN)	TDAPⅢ (kN)	誤差 比率
1	1.376E+06	1.376E+06	0.00	9.445E+04	9.445E+04	0.00
2	8.297E+05	8.297E+05	0.00	8.052E+04	8.052E+04	0.00
3	7.250E+05	7.250E+05	0.00	8.051E+04	8.051E+04	0.00
4	5.800E+05	5.800E+05	0.00	5.624E+04	5.624E+04	0.00
5	1.700E+05	1.700E+05	0.00	5.623E+04	5.623E+04	0.00
6	7.849E+04	7.849E+04	0.00	9.461E+03	9.461E+03	0.00
7	6.220E+04	6.220E+04	0.00	7.450E+03	7.450E+03	0.00
8	2.092E+04	2.092E+04	0.00	2.840E+03	2.840E+03	0.00
9	7.510E+04	7.510E+04	0.00	1.103E+04	1.103E+04	0.00
10	1.979E+04	1.979E+04	0.00	7.058E+03	7.058E+03	0.00
11	1.325E+04	1.324E+04	0.00	2.941E+03	2.941E+03	0.00
12	1.512E+07	1.512E+07	0.00	3.705E+05	3.705E+05	0.00
13	1.290E+07	1.290E+07	0.00	3.608E+05	3.608E+05	0.00
14	1.153E+07	1.153E+07	0.00	3.433E+05	3.433E+05	0.00
15	8.061E+06	8.061E+06	0.00	3.087E+05	3.087E+05	0.00
16	6.000E+06	6.000E+06	0.00	2.552E+05	2.552E+05	0.00
17	2.507E+06	2.507E+06	0.00	1.645E+05	1.645E+05	0.00
18	1.191E+06	1.191E+06	0.00	1.035E+05	1.035E+05	0.00
19	2.484E+05	2.484E+05	0.00	3.944E+04	3.944E+04	0.00
20	1.148E+04	1.148E+04	0.00	7.484E+03	7.484E+03	0.00
21	5.213E+06	5.213E+06	0.00	3.233E+05	3.233E+05	0.00
22	1.884E+06	1.884E+06	0.00	1.552E+05	1.552E+05	0.00
23	2.604E+07	2.604E+07	0.00	1.035E+06	1.035E+06	0.00

(2) せん断バネ要素

要素番号	せん断ばね		
	NORA2D (kN)	TDAPⅢ (kN)	誤差 比率
25	9,073	9,073	0.00
26	6,922	6,922	0.00
27	4,360	4,360	0.00

(3) 地盤バネ要素

要素番号	地盤バネ		
	NORA2D (kN, kN・m)	TDAPⅢ (kN, kN・m)	誤差 比率
水平ばね	1.101E+06	1.101E+06	0.00
回転ばね	2.598E+07	2.598E+07	0.00

(4) 地盤粘性要素

要素番号	粘性要素		
	NORA2D (kN, kN・m)	TDAPⅢ (kN, kN・m)	誤差 比率
水平粘性	5.259E+05	5.259E+05	0.00
回転粘性	5.082E+06	5.082E+06	0.00

(b) 「Soil Plus」 (伊藤忠テクノソリューションズ株式会社) との比較

地盤－建屋間の連成を考慮し、かつ基礎底面と地盤間の付着力を考慮した質点系モデルの地震応答解析に対して、「Soil Plus」 (伊藤忠テクノソリューションズ株式会社) を用いた解析解と、NORA2Dによる解析解を比較した。検証解析の主な内容は以下のとおりとする。

・非線形応答解析

部材の材料非線形性および基礎浮上りによる幾何学的非線形性を考慮した地震応答解析を実施し、節点及び要素の最大応答値について、NORA2DとSoil Plusによる結果を比較する。なお、建屋基礎底面と地盤との間に付着力を考慮する。

NORA2Dにおける解析モデルは、地盤－建屋連成系を質点及び梁やばね等に置換したモデル (以下「質点系SRモデル」という。) とする。質点系SRモデルの解析モデル図を図3.5-4に、建屋諸元及び材料物性を表3.5-8、表3.5-9に、地盤諸元と浮上り非線形特性を表3.5-10、図3.5-5に、上部構造の復元力特性を表3.5-11、表3.5-12に示す。

なお、基礎浮上り非線形特性のモデル化、及び建屋の復元力特性は、JEAG4601^{*1} に従うものとする。NORA2Dにおける質点系SRモデルの地震応答解析の時間刻みは0.001 秒とし、直接積分法による。建屋減衰は歪エネルギー比例型減衰として減衰マトリックスを構成し、地盤の減衰については別途、当該自由度に地盤の減衰係数を足しこむことにより考慮する。

*1 : (社)日本電気協会 原子炉発電所耐震設計技術指針追補版(JEAG4601-1991)

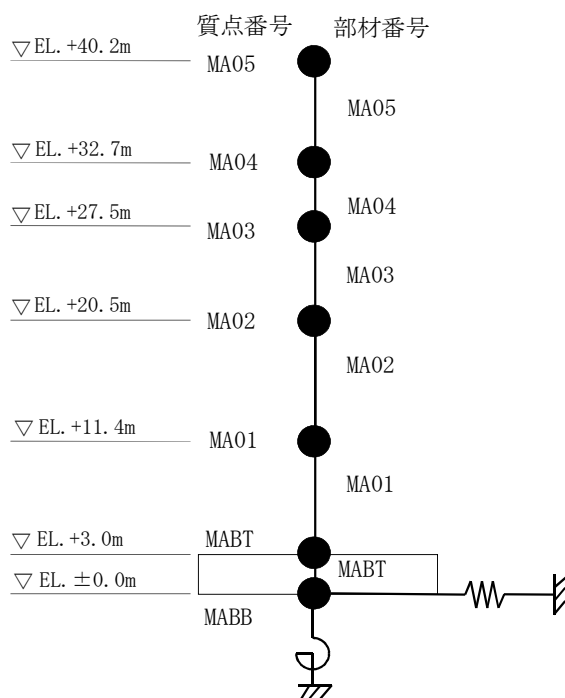


図3.5-4 地震応答解析モデル

表3.5-8 建屋モデルの諸元

質点番号	高さ EL. (m)	重量 W (ton)	回転慣性 J_{θ} ($\times 10^4$ ton \cdot m 2)	部材番号	せん断断面積 A_s (m 2)	断面 2 次モーメント I ($\times 10^2$ m 4)	軸断面積 A_N (m 2)
MA05	40.2	892.7	—	MA05	0.191	—	0.682
MA04	32.7	847.0	1.69	MA04	15.92	6.24	62.84
MA03	27.5	6,611.4	83.1	MA03	77.60	241.03	187.41
MA02	20.5	9,247.8	116.4	MA02	105.09	274.07	250.83
MA01	11.4	13,148.3	166.0	MA01	107.95	302.05	282.49
MABT	3.0	11,572.4	161.2	MABT	1,856.4	2,575.20	1,856.4
MABB	0.0	8,736.7	121.5				

表3.5-9 建屋モデルの材料定数と減衰定数

部位	ヤング係数 E ($\times 10^3$ kg/cm 2)	ポアソン比 ν	減衰定数 h (%)
RC 部	270	0.167	5.0
鉄骨部	2,100	0.3	2.0

表3.5-10 地盤ばね定数と減衰係数

並進		回転	
ばね定数 ($\times 10^5$ t/cm)	減衰係数 ($\times 10^3$ t \cdot s/cm)	ばね定数 ($\times 10^{12}$ t \cdot cm/rad)	減衰係数 ($\times 10^9$ t \cdot cm \cdot s/rad)
5.911	5.074	2.710	2.510

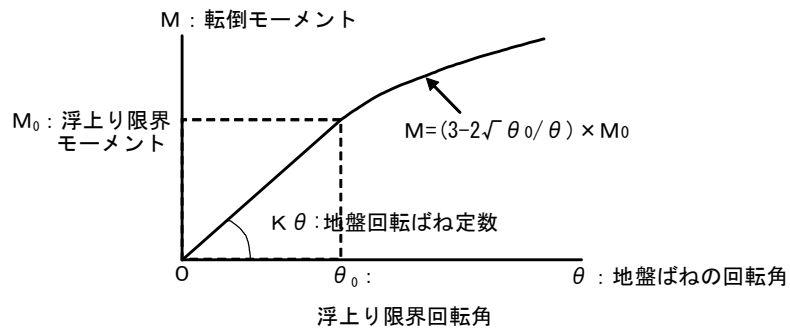


図3.5-5 地盤回転ばねの幾何学的非線形特性

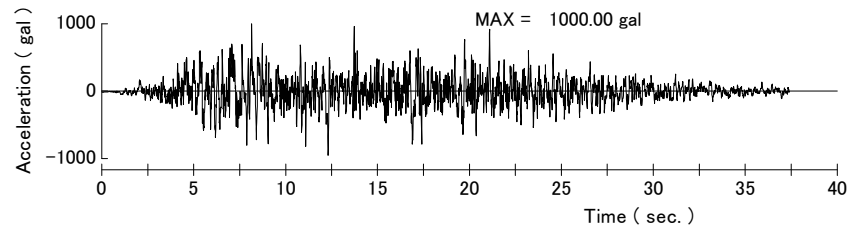
表3.5-11 上部構造の復元力特性 ($\tau - \gamma$ 関係)

部材	τ_1 (kg/cm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	τ_2 (kg/cm ²)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	τ_3 (kg/cm ²)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
MA04	19.47	0.17	26.29	0.50	55.79	4.00
MA03	19.56	0.17	26.41	0.51	60.20	4.00
MA02	20.35	0.18	27.48	0.53	59.48	4.00
MA01	21.34	0.18	28.81	0.55	60.05	4.00

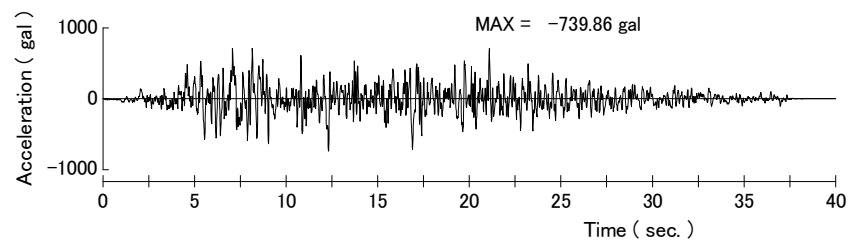
表3.5-12 上部構造の復元力特性 ($M - \phi$ 関係)

部材	M_1 ($\times 10^4$ t·m)	ϕ_1 ($\times 10^{-6}$ /m)	M_2 ($\times 10^4$ t·m)	ϕ_2 ($\times 10^{-6}$ /m)	M_3 ($\times 10^4$ t·m)	ϕ_3 ($\times 10^{-6}$ /m)
MA04	2.06	12.23	5.63	136.15	8.83	2723.10
MA03	32.68	5.02	62.18	51.43	89.82	1028.50
MA02	39.30	5.31	72.35	51.62	110.81	1032.50
MA01	45.69	5.60	88.13	53.11	139.26	1062.20

質点系SRモデルの地震応答解析では埋込みを考慮する。入力地震動については、2E波を解放基盤面（建屋底面位置）に定義し、建屋底面位置におけるE+F波及び切欠き力を求め、これを建屋へ入力する。入力地震動（E+F波）について図3.5-6に示す。



(a) 2E波（解放基盤面）



(b) E+F波（建屋入力動）

図3.5-6 入力地震波（加速度時刻歴）

比較用の解析コード「Soil Plus」における解析モデルは、3次元FEM地盤-建屋モデル（以下、「3DFEMモデル」という。）とする。

3DFEMモデルの概念図を図3.5-7に、解析モデルを図3.5-8に示す。建屋はり要素、基礎版は板要素、地盤はソリッド要素でモデル化する。基礎版節点と地盤節点をジョイント要素で連結し、浮上りを考慮する。

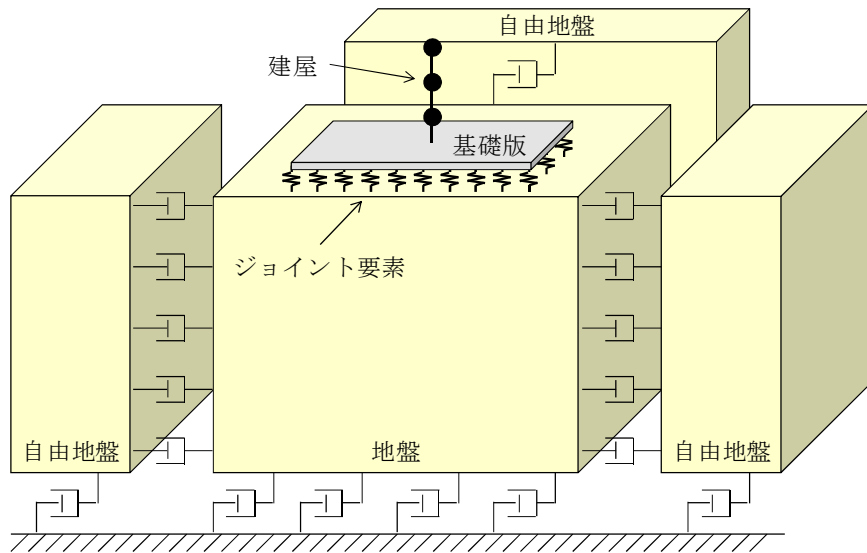


図3.5-7 3DFEMモデルの概念

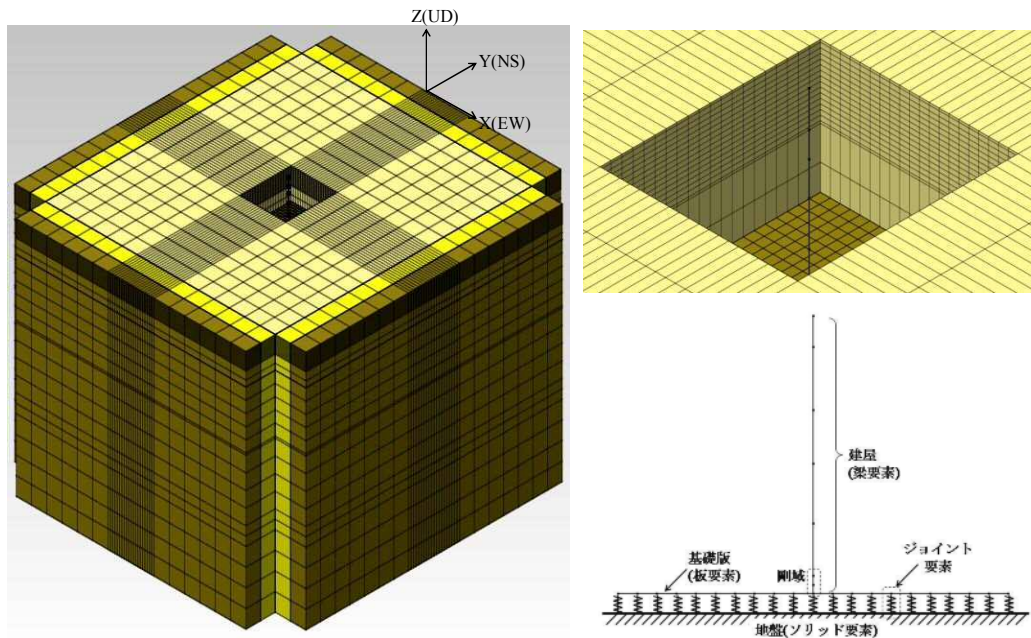


図3.5-8 解析モデル（3DFEMモデル）

3DFEMモデルの建屋諸元については表3.5-8及び表3.5-9に、建屋の復元力特性は表3.5-11及び表3.5-12に従う。なお、応答解析では、時間刻みを0.002 秒刻みとする。

3DFEMモデルにおける自由地盤の重量は、地盤に比べ十分大きい値（地盤 $\times 10^6$ ）を設定し、地盤と自由地盤をダッシュポットで繋ぎ、逸散減衰を表現する。また、減衰についてはRayleigh型減衰を用いる。

NORA2DとSoil Plusにおける建屋各部の最大応答値（加速度，変位）を表3.5-13，表3.5-14に示す。

建屋各部の応答は，やや応答差が現れるものの，両解析コードにおける非線形応答解析結果は概ね同一となることを確認した。

表3.5-13 建屋各部の最大応答値（加速度）

最大応答加速度 (cm/s ²)			
質点	NORA2D	Soil Plus	誤差比率
MA05	4820	4665	0.03
MA04	2319	2319	0.00
MA03	1496	1576	0.05
MA02	1279	1283	0.00
MA01	1118	1092	0.02

表3.5-14 建屋各部の最大応答値（変位）

最大応答変位 (cm)			
質点	NORA2D	Soil Plus	誤差比率
MA05	6.14	6.36	0.03
MA04	2.87	2.78	0.03
MA03	1.81	1.89	0.04
MA02	1.52	1.61	0.05
MA01	1.07	1.09	0.02

c. 使用内容に対する妥当性

PWR型原子炉建屋モデルを模擬した2次元質点系SRモデルによる検証において、以下の結果が得られたことから、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。

- 固有値解析結果について、他解析コードの計算結果と比較して同じ結果が得られることが確認できた。
- 線形応答解析結果について、他解析コードの計算結果と比較してほぼ同一の結果が得られることが確認できた。
- 部材の材料非線形性及び基礎浮き上がり非線形性を考慮した非線形応答解析結果について、他解析コードの計算結果と比較してほぼ同一の結果が得られることが確認できた。