

本資料のうち、枠囲みの内容は  
営業秘密又は防護上の観点から  
公開できません。

V-5-20 計算機プログラム（解析コード）の概要  
・ m i c r o S H A K E / 3 D

## 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
2.1 microSHAKE/3D Ver. 2.2	3
2.2 microSHAKE/3D Ver. 2.2.3.311	5

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）microSHAKE/3D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. 2. 2
V-2-2-22-1	常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の地震応答計算書	Ver. 2. 2. 3. 311
V-2-2-22-2	常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の地震応答計算書	Ver. 2. 2. 3. 311
V-2-2-22-3	常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の地震応答計算書	Ver. 2. 2. 3. 311
V-2-2-22-4	常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の地震応答計算書	Ver. 2. 2. 3. 311
V-2-2-23-1	常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の耐震性についての計算書	Ver. 2. 2. 3. 311
V-2-2-23-2	常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の耐震性についての計算書	Ver. 2. 2. 3. 311
V-2-2-23-3	常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の耐震性についての計算書	Ver. 2. 2. 3. 311
V-2-2-23-4	常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の耐震性についての計算書	Ver. 2. 2. 3. 311

## 2. 解析コードの概要

### 2.1 microSHAKE/3D Ver. 2.2 (※建物・構築物関連)

項目	コード名 microSHAKE/3D
使用目的	入力地震動の策定
開発機関	株式会社地震工学研究所
開発時期	2011年
使用したバージョン	Ver. 2.2
コードの概要	<p>microSHAKE/3D (1次元波動伝播解析コード) は、重複反射理論に基づく地盤の地震応答解析を行うことが可能であり、地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮することができる。</p> <p>microSHAKE/3Dの主な特徴として、以下の①～③を挙げることができる。</p> <p>① 1次元重複反射理論に基づくプログラムである。</p> <p>② 地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮できる。</p> <p>③ 鉛直動は、S波速度<math>V_s</math>をP波速度<math>V_p</math>として定義することで対応が可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>microSHAKE/3D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入力地震動の策定において、基準地震動<math>S_s</math>及び弾性設計用地震動<math>S_d</math>に対する自由地盤の応答を評価するために使用している。</p> <p><b>【検証(Verification)】</b></p> <p>本解析コードの検証の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ microSHAKE/3Dについて、二層のモデル地盤において地震応答解析を行った解析解と、1次元重複反射理論に基づく理論解が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、開発機関から提示された要件を満足し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通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 検証の内容のとおり、地盤の応答解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。</li> <li>・ 関西電力大飯発電所第3号機第2回工事計画認可申請書の資料13別添4(可搬型重大事故等対処設備の耐震設計書のうち屋外保管設備)</li> </ul>

	<p>にコード (Ver. 2.0.1.179) が使用された実績がある。</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・今回の工認申請において使用するバージョンは、既工認において使用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。</li><li>・本工事計画における構造に対し使用する要素、応力解析及び応答解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する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>
--	---

2.2 microSHAKE/3D Ver. 2. 2. 3. 311

項目	コード名 microSHAKE/3D
使用目的	地震応答解析（入力地震動算定）
開発機関	株式会社地震工学研究所
開発時期	2011年
使用したバージョン	Ver. 2. 2. 3. 311
コードの概要	<p>microSHAKE/3D（1次元波動伝播解析コード）は、重複反射理論に基づく地盤の地震応答解析を行うことが可能であり、地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮することができる。</p> <p>microSHAKE/3Dの主な特徴として、以下の①～③を挙げることができる。</p> <p>① 1次元重複反射理論に基づくプログラムである。</p> <p>② 地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮できる。</p> <p>③ 鉛直動は、S波速度<math>V_s</math>をP波速度<math>V_p</math>として定義することで対応が可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>microSHAKE/3D Ver. 2. 2. 3. 311は、常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備並びに常設代替高圧電源装置用カルバートの地震応答計算書及び耐震計算書における入力地震動の算定に使用している。</p> <p><b>【検証(Verification)】</b></p> <p>本解析コードの検証内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・microSHAKE/3Dについて、二層のモデル地盤において地震応答解析を行った解析解と、1次元重複反射理論に基づく理論解が一致することを確認した。</li> <li>・本解析コードの運用環境について、開発期間から提示された要件を満足し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、以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・原子力産業界において、原子力発電所の土木構造物評価をはじめとする多数の解析に本解析コードが使用されており、十分な使用実績があるため、信頼性があると判断できる。</li> <li>・関西電力株式会社の「大飯原子力発電所第3号機」において、可搬型重大事故等対処設備の耐震設計書のうち屋外保管設備に本コード（Ver. 2. 0. 1. 179）が使用された実績がある。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>・今回の工認申請において使用するバージョンは、既工認において使用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。</li><li>・本工事計画における地震応答解析を実施する際の入力地震動算定の使用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>
--	---

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	5
3.1	一般事項	5
3.2	解析コードの特徴	5
3.3	解析手法	5
3.4	解析フローチャート	9
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）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"> <li>・株式会社大林組が独自に開発したコードである。</li> <li>・NORA2D (以下「本解析コード」という。) 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。なお、本解析コードは、インハウスコードである。</li> </ul>
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"> <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>【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"> <li>・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。</li> <li>・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ている。</li> <li>・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</li> </ul>

	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。

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

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、

$\omega_i$  :  $i$ 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 $\omega_i$ 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 $\beta$ 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 $\beta$ 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 $\beta$ 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 $\{\Delta u\}$ を用いて次式のように表される。

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

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

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3-1に示す。

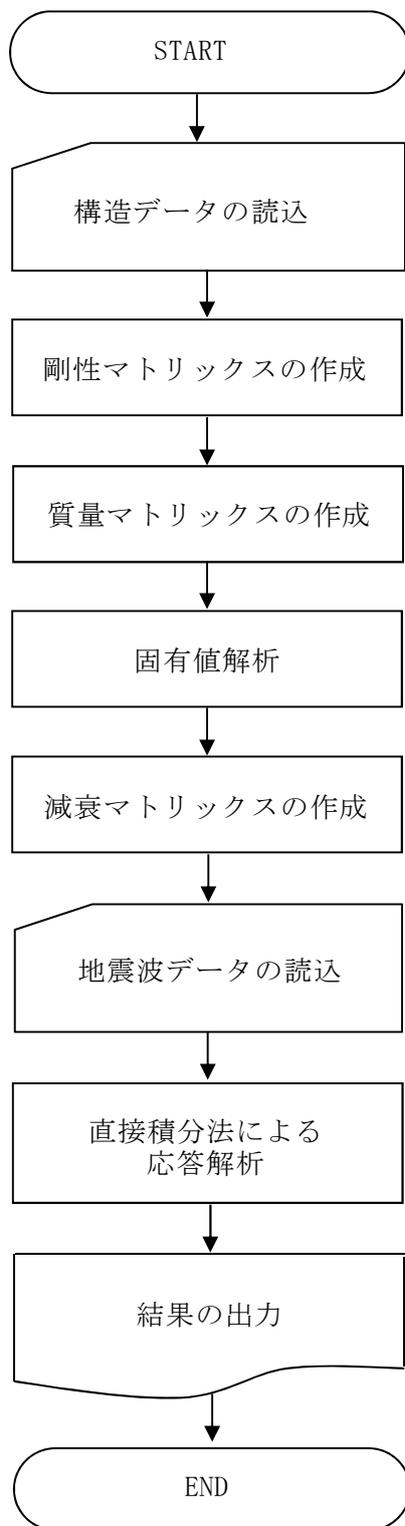


図3-1 解析フローチャート

### 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（スウェイロック）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。建屋減衰はひずみ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3-2に、建屋諸元について表3-1～表3-3に、地盤ばね諸元と浮上り非線形特性について表3-4及び図3-3に、入力地震動を図3-4に示す。

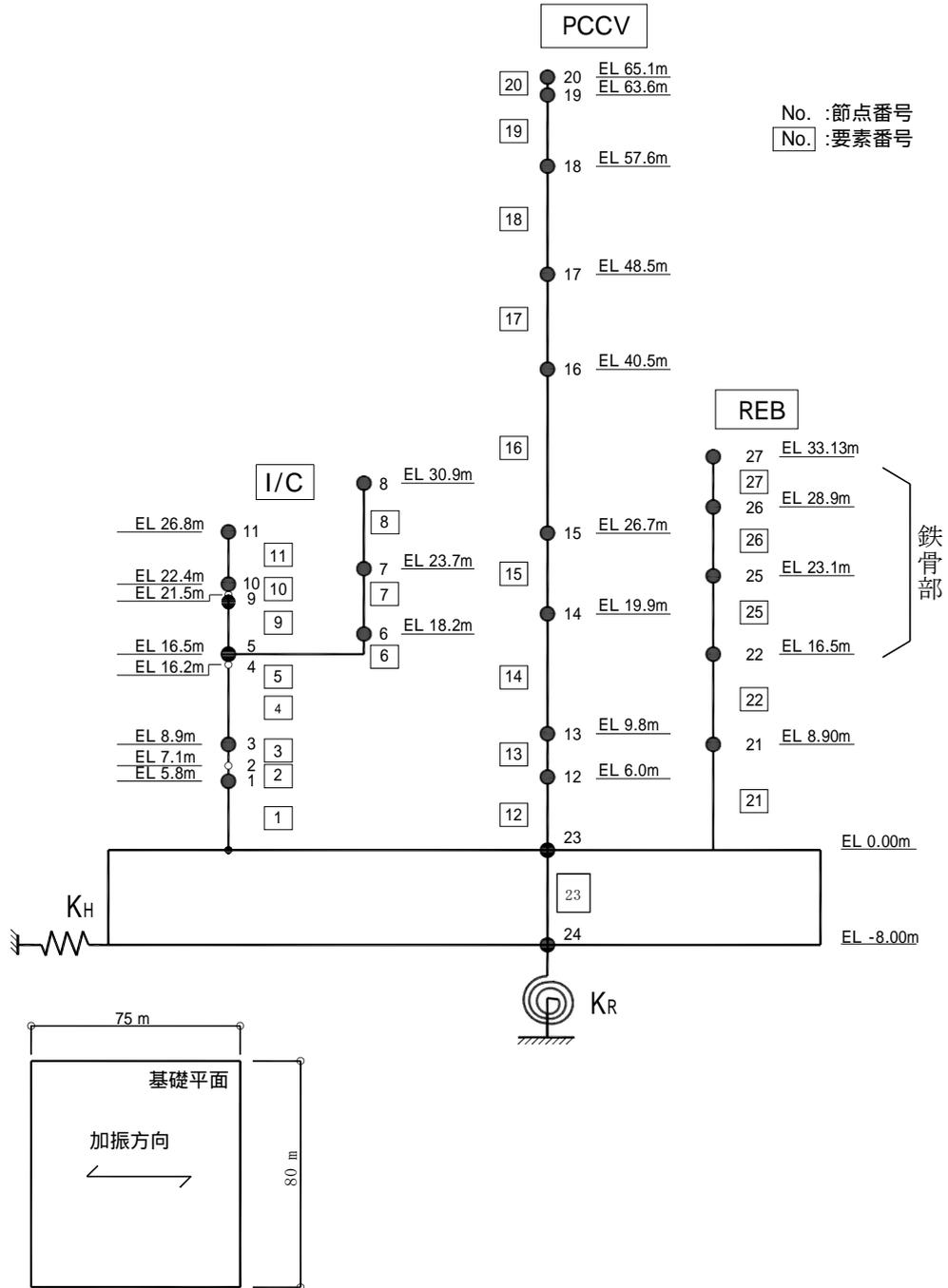


図3-2 PWR型原子炉建屋を模擬した質点系SRモデル

表3-1 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 <sup>2</sup> )	要素番号	せん断断面積 (m <sup>2</sup> )	断面2次モーメント (m <sup>4</sup> )	軸断面積 (m <sup>2</sup> )
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3-2 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 <sup>2</sup> )	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3-3 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 <sup>2</sup> )	せん断剛性 G(tf/cm <sup>2</sup> )	減衰定数 h(%)	設計基準強度 Fc(kg/cm <sup>2</sup> )
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

注記 \* : 部材番号25, 26, 27のFH/B鉄骨部の減衰定数は2%

表3-4 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 <sup>5</sup> (tf/cm)	1.80 × 10 <sup>4</sup> (tf·sec/cm)
回転	16.81 × 10 <sup>12</sup> (tf·cm/rad)	9.85 × 10 <sup>10</sup> (tf·cm·sec/rad)

注 : 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

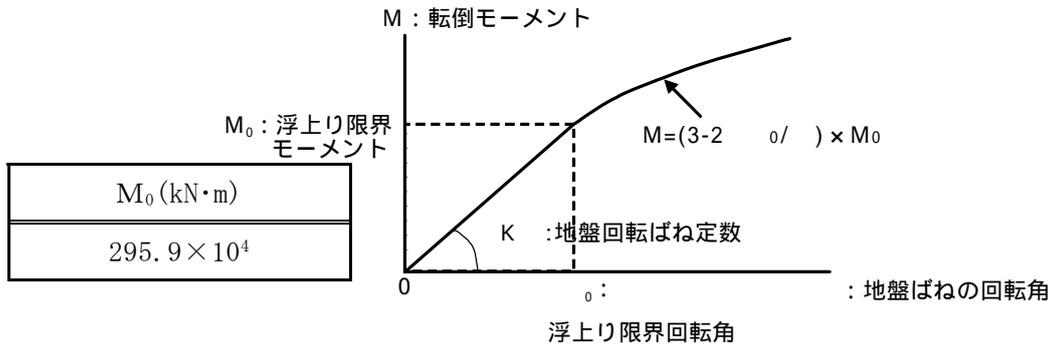
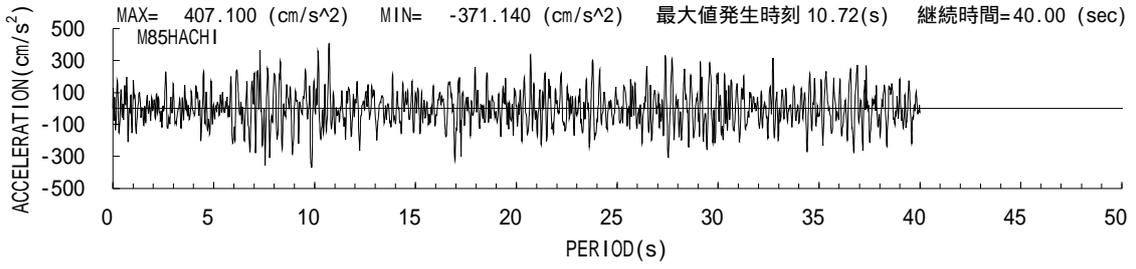
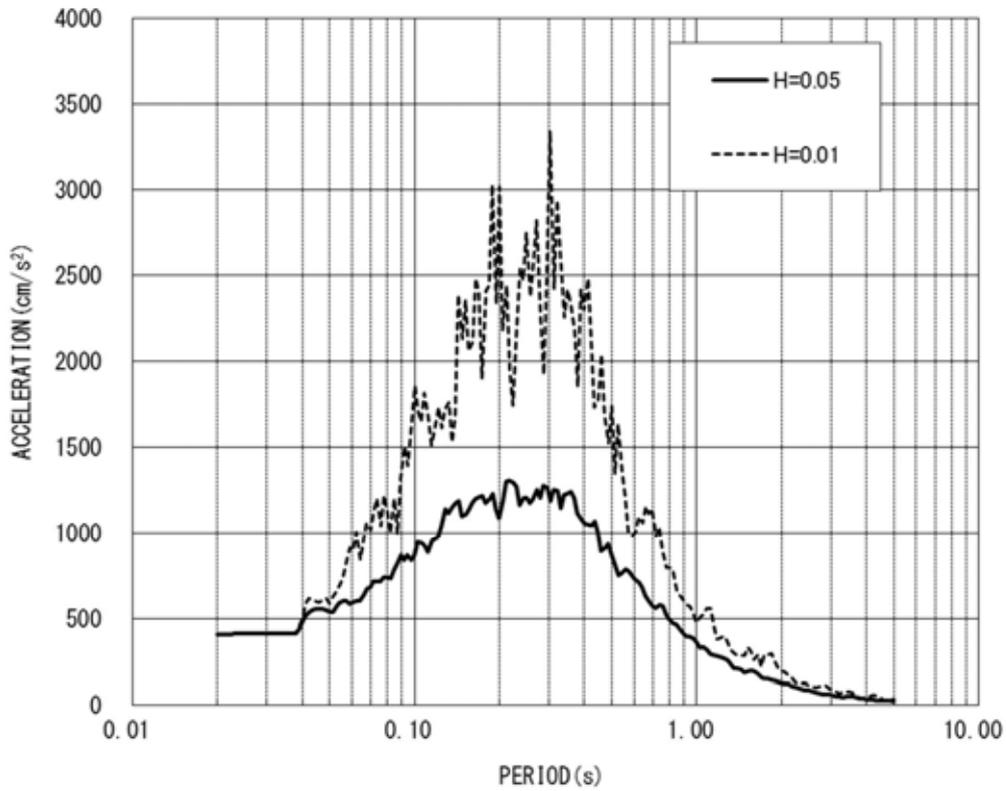


図3-3 地盤回転ばねの浮上り非線形特性



(a) 加速度時刻歴



(b) 応答スペクトル (減衰定数1%, 5%)

図3-4 入力地震動

#### 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 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3-6及び表3-7に示す。なお、比較は変位，速度，加速度，せん断力及び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3-6 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 <sup>2</sup> )	TDAPⅢ (cm/s <sup>2</sup> )	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3-7 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

注 : (kN)は，水平ばね及び水平粘性に適用し，(kN・m)は，回転ばね及び回転粘性に適用する。

## (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。

## ① 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に、建屋モデルの諸元及び建屋モデルの材料定数と減衰定数を表3-8、表3-9に、地盤諸元と地盤回転ばねの浮上り非線形特性を表3-10、図3-6に、上部構造の復元力特性を表3-11、表3-12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、J E A G 4 6 0 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。

注記 \* : (社)日本電気協会 原子炉発電所耐震設計技術指針追補版(J E A G 4 6 0 1 -1991)

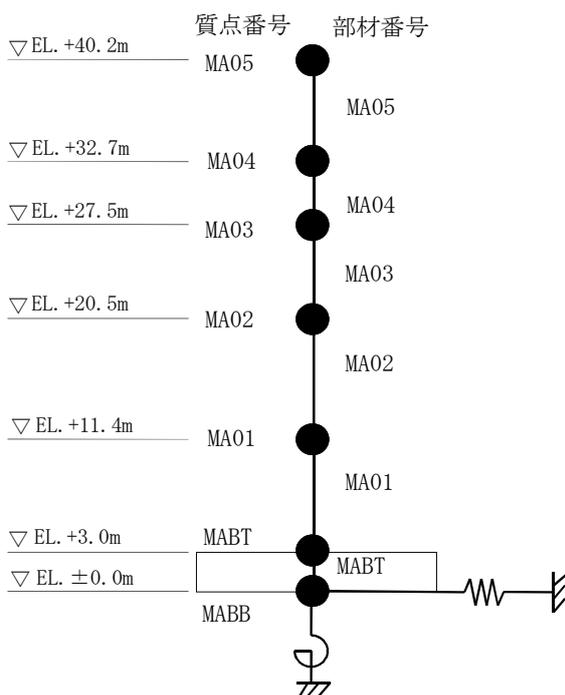


図3-5 質点系SRモデルの解析モデル図

表3-8 建屋モデルの諸元

質点番号	高さ EL. (m)	重量 W (t)	回転慣性 $J_{\theta}$ ( $\times 10^4 \text{ t}\cdot\text{m}^2$ )	部材番号	せん断断面積 $A_s$ ( $\text{m}^2$ )	断面 2 次モーメント $I$ ( $\times 10^2 \text{ m}^4$ )	軸断面積 $A_N$ ( $\text{m}^2$ )
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3-9 建屋モデルの材料定数と減衰定数

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

表3-10 地盤諸元

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

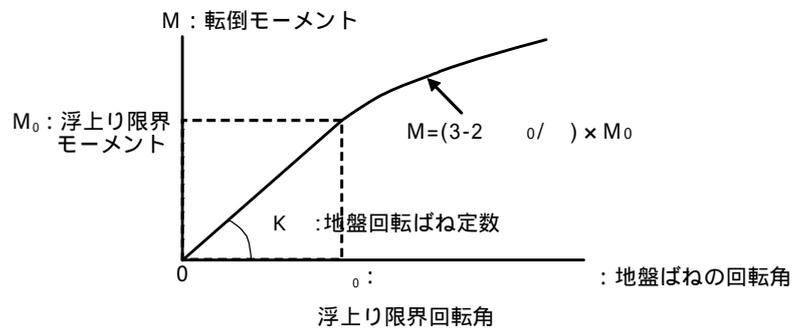


図3-6 地盤回転ばねの浮上り非線形特性

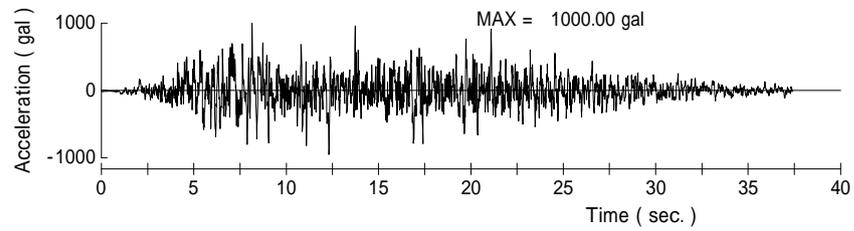
表3-11 上部構造の復元力特性 (τ - γ 関係)

部材	τ <sub>1</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	γ <sub>1</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	τ <sub>2</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	γ <sub>2</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	τ <sub>3</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	γ <sub>3</sub> (×10 <sup>-3</sup> )
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

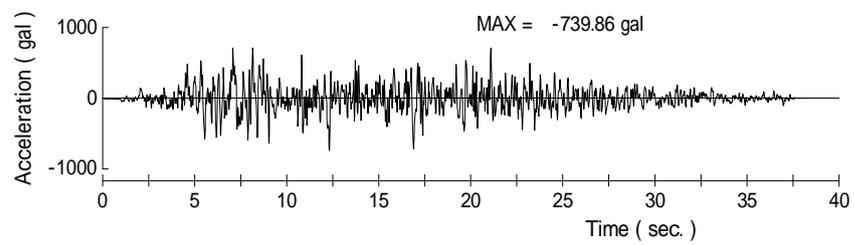
表3-12 上部構造の復元力特性 (M - φ 関係)

部材	M <sub>1</sub> (×10 <sup>4</sup> t・m)	φ <sub>1</sub> (×10 <sup>-6</sup> /m)	M <sub>2</sub> (×10 <sup>4</sup> t・m)	φ <sub>2</sub> (×10 <sup>-6</sup> /m)	M <sub>3</sub> (×10 <sup>4</sup> t・m)	φ <sub>3</sub> (×10 <sup>-6</sup> /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（加速度時刻歴）について図3-7に示す。



(a) 2E波（解放基盤面）



(b) E+F波（建屋入力動）

図3-7 入力地震動（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3-8に、解析モデルを図3-9に示す。建屋は梁要素、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。

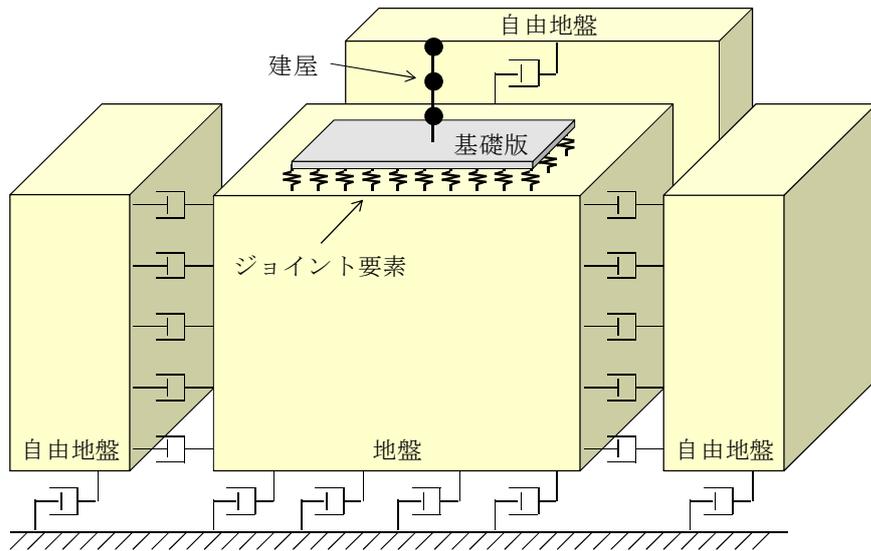


図3-8 3DFEMモデルの概念

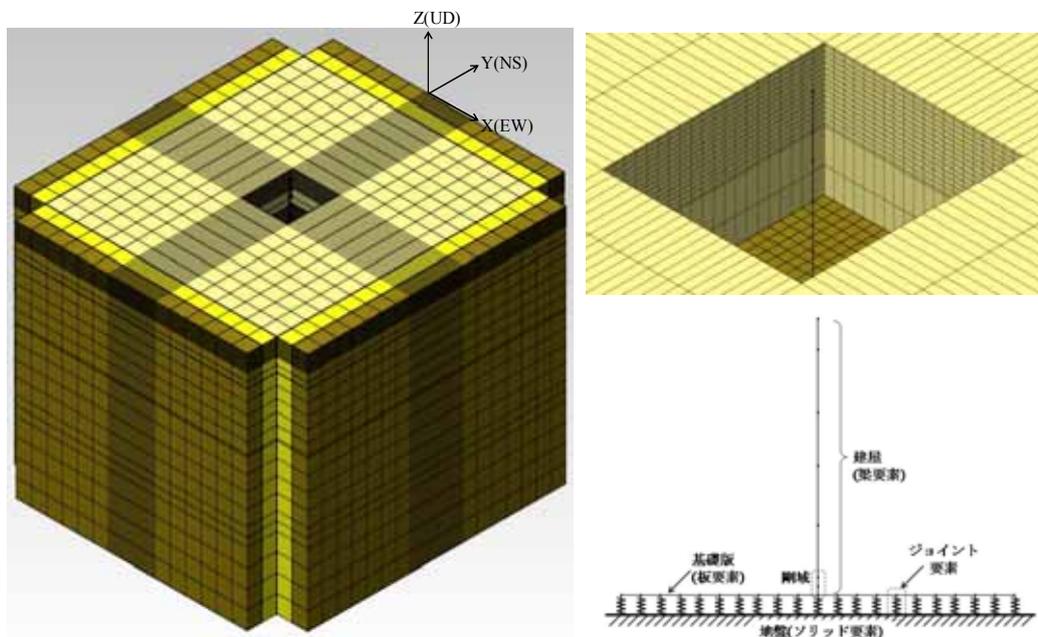


図3-9 解析モデル（3DFEMモデル）

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

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×10<sup>6</sup>）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3-13，表3-14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3-13 建屋各部の最大応答値（加速度）

最大応答加速度 (cm/s <sup>2</sup> )			
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3-14 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。

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"> <li>・ <b>SHAKE Ver. 1.6.9（以下「本解析コード」という。）</b>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。<b>なお、本解析コードは、インハウスコードである。</b></li> <li>・ 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。</li> <li>・ 地盤の等価線形解析を行うことが可能である。</li> </ul>
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<math>S_0</math>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><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>・ 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*<sup>1</sup>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。</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使用し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>・ 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。</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> <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"> <li>・主排気筒</li> <li>・非常用ガス処理系配管支持架構</li> </ul>	—	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  $\rho$ 、せん断弾性係数  $G$  及び臨界減衰比  $\beta$  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、

$\eta$  : 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  $\omega$  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。

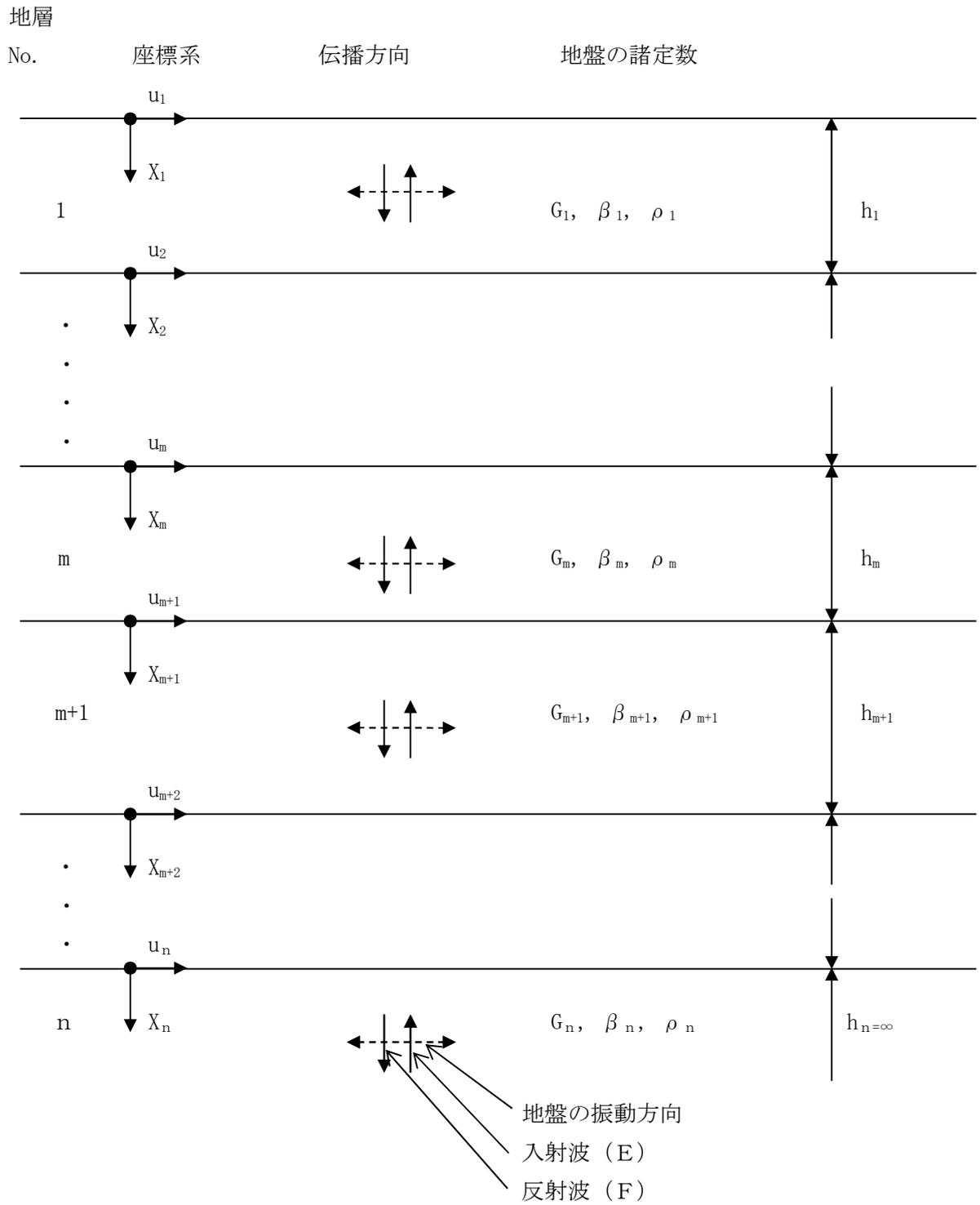
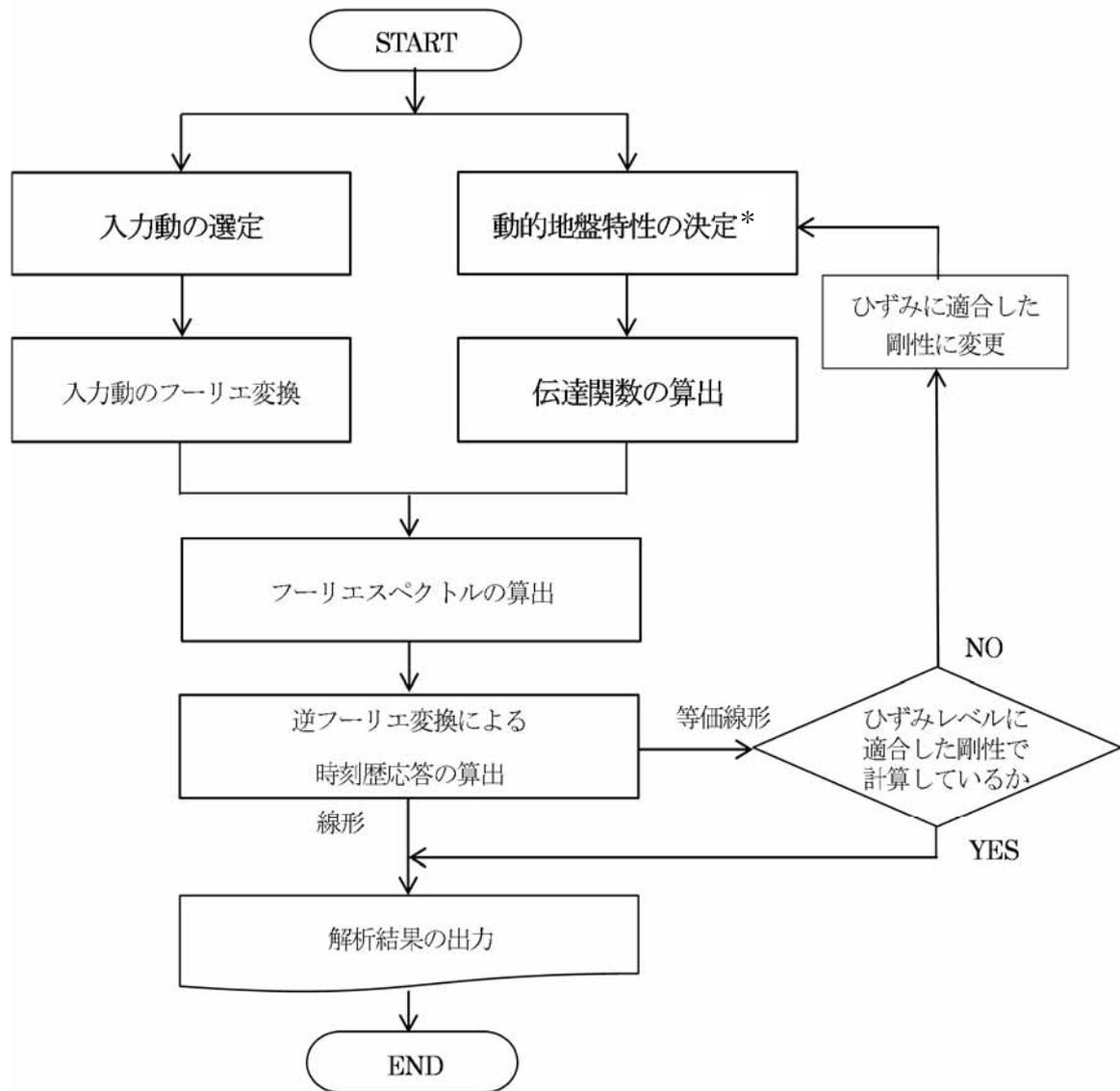


図 3.3-1 1次元地盤の波動伝播

### 3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3.4-1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<sup>\*1</sup>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<sup>\*2</sup>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

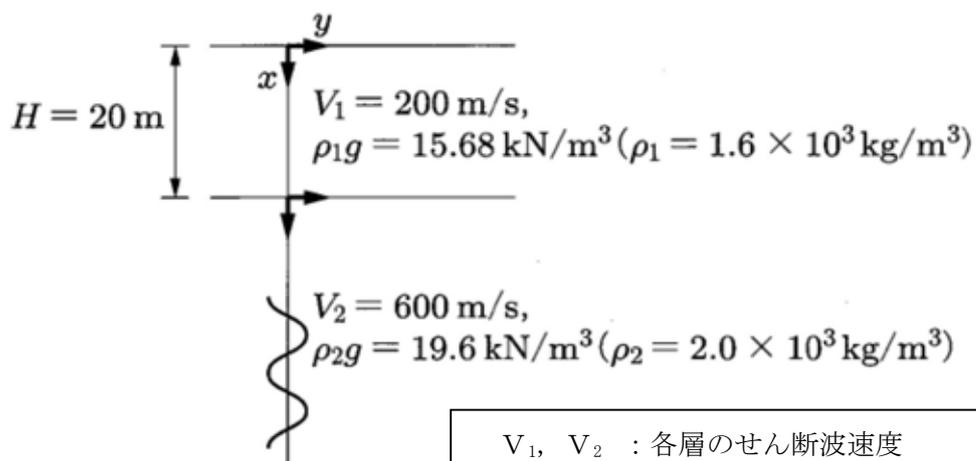
2層の弾性モデル地盤を対象として、本解析コードによる解析解と理論解による結果が一致することを確認する。

##### (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。

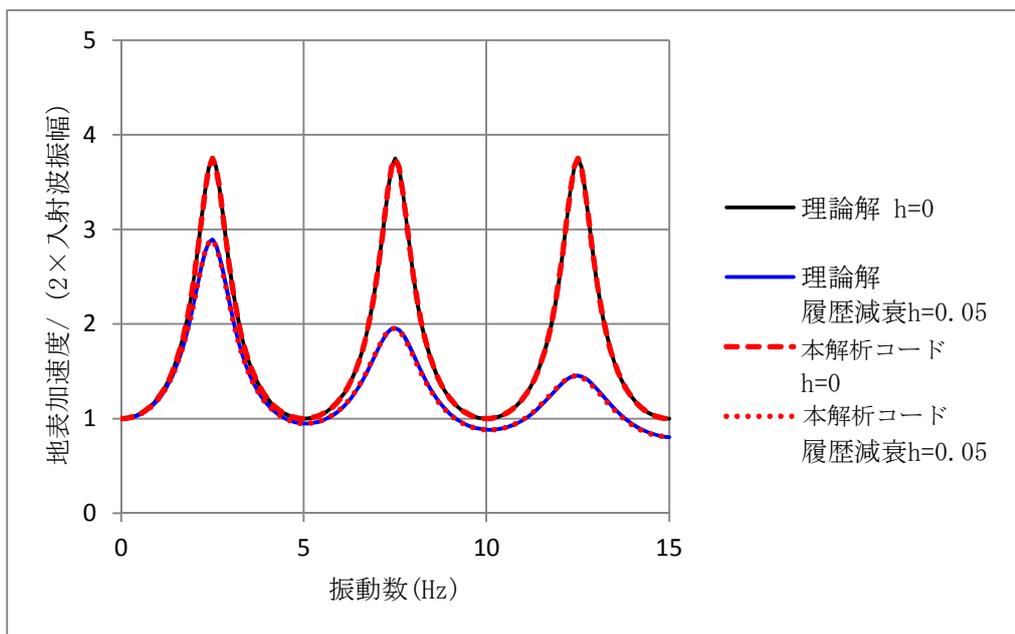
##### (c) 検証結果

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  
 $\rho_1, \rho_2$  : 各層の密度  
 $g$  : 重力加速度  $9.80 \text{ m/s}^2$   
 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3.5-2、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 $32.2 \text{ feet/s}^2$ 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 $0.1 \text{ g}$  ( $\text{g}$ は重力加速度 $9.80665 \text{ m/s}^2$ ) 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  $\text{cm/s}^2$  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 <sup>3</sup> (tonf/m <sup>3</sup> )	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

$\gamma$	粘性土G/G <sub>o</sub>	$\gamma$	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

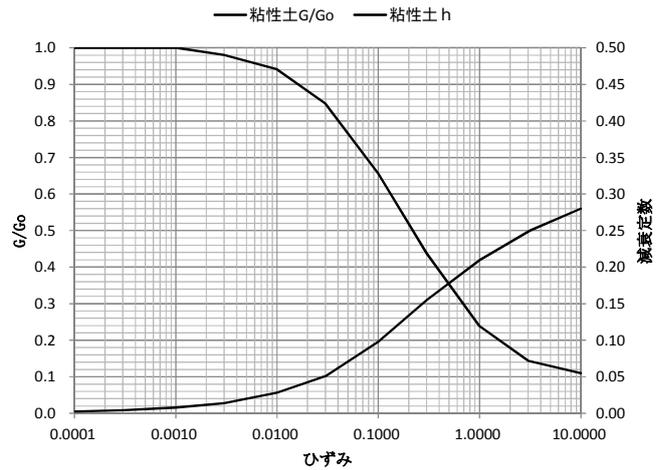


図3.5-3 粘性土のひずみ依存特性

$\gamma$	砂質土G/G <sub>o</sub>	$\gamma$	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

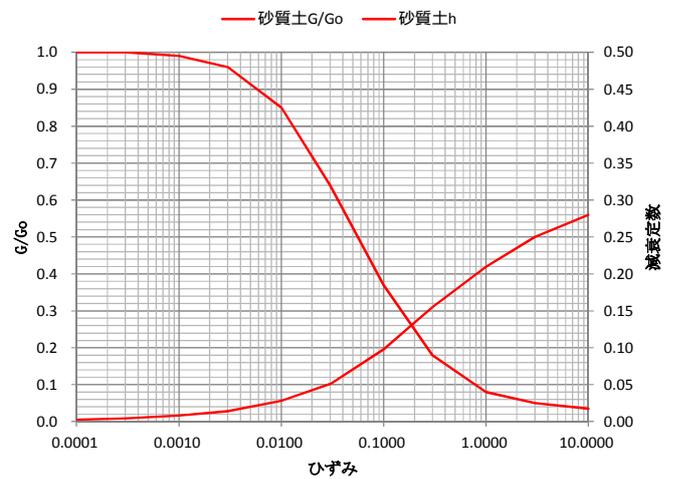


図3.5-4 砂質土のひずみ依存特性

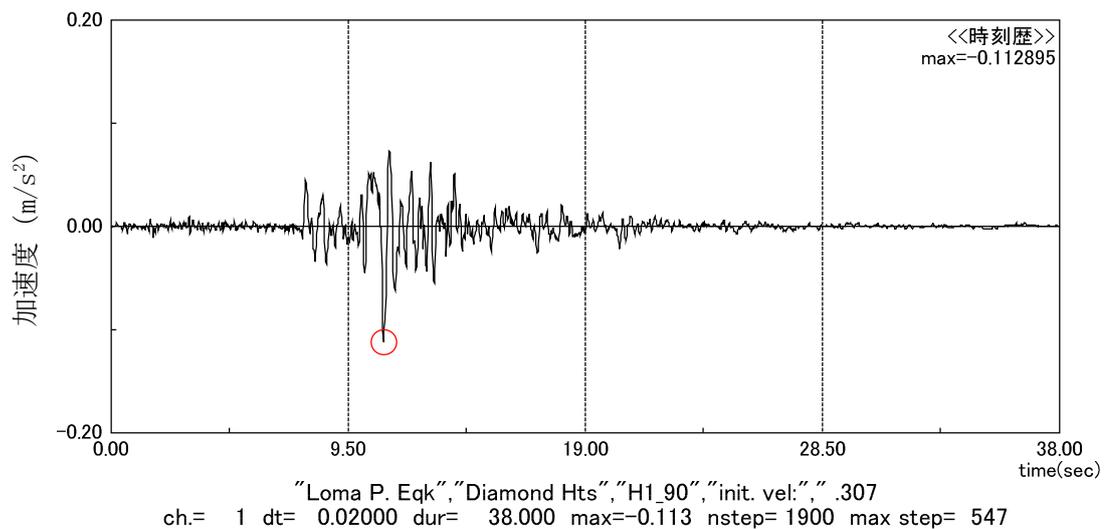


図3.5-5 入力地震動

深さ (ft)	SHAKE -91 (G)	SHAKE -91 (cm/s <sup>2</sup> )	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

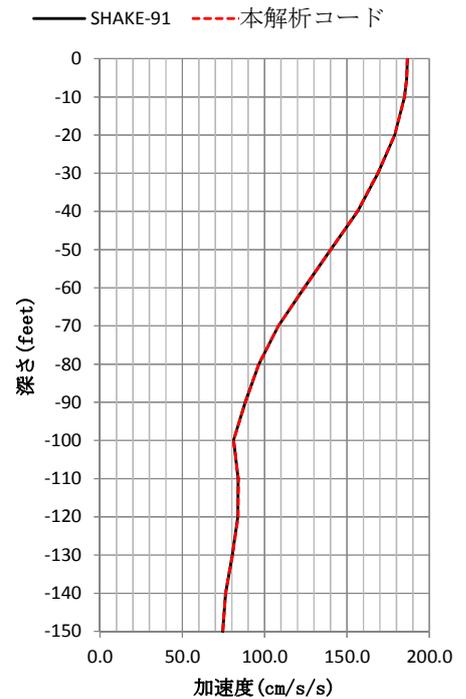


図3.5-6 地盤の最大加速度分布

深さ (ft)	SHAKE-91 (G)	本解析コード (cm/s <sup>2</sup> )	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

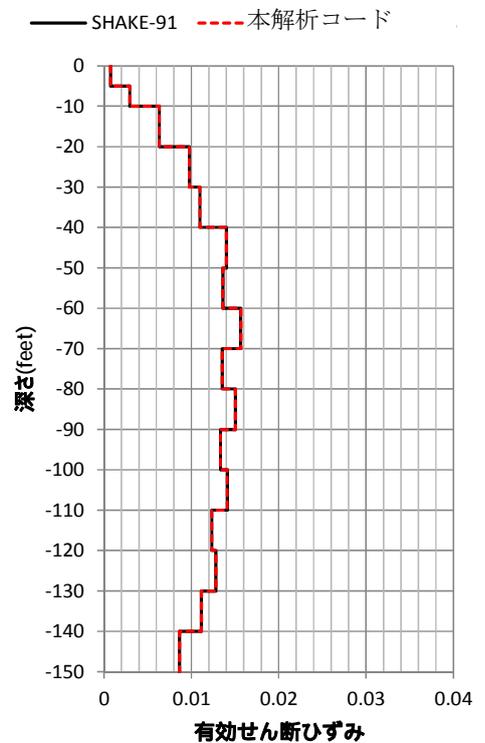


図3.5-7 地盤の等価せん断ひずみ

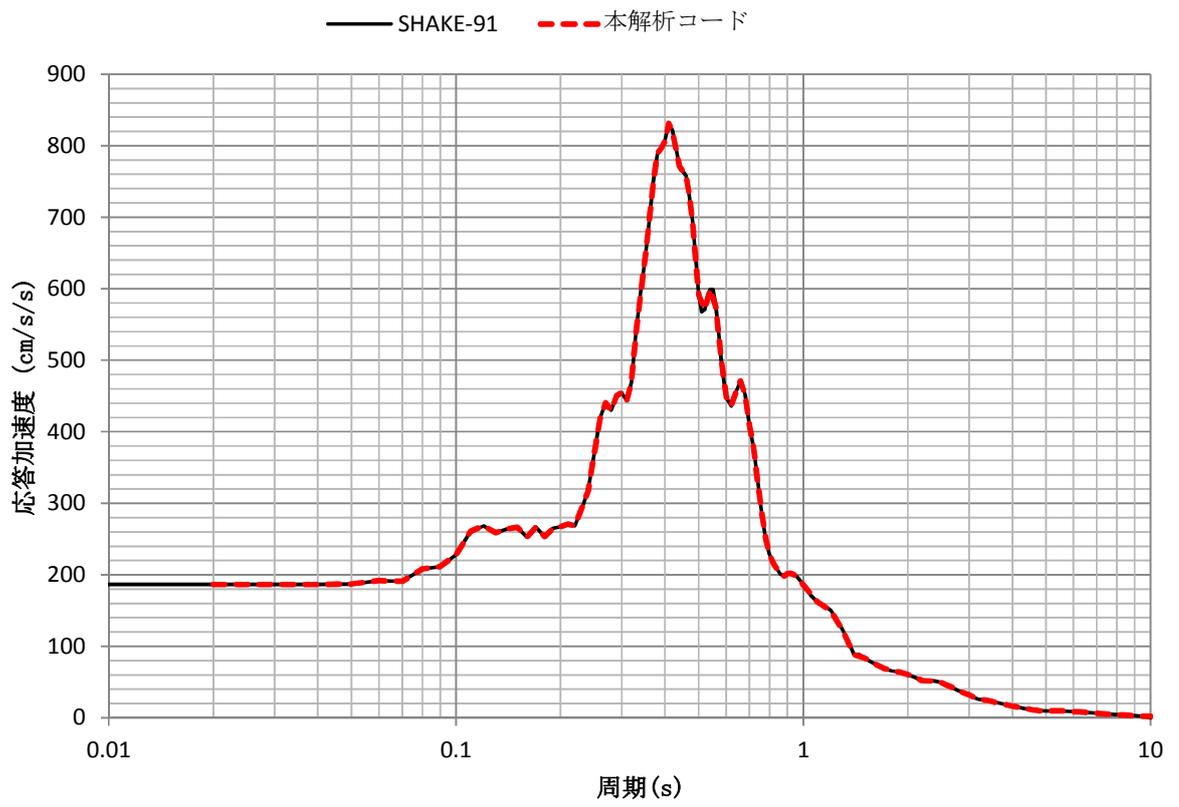


図3.5-8 地表の加速度応答スペクトル (h=0.05)

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。



V-5-23 計算機プログラム（解析コード）の概要・TLP I L E S P

## 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.	TLPILESPの解析手法について	4
3.1	一般事項	4
3.2	本解析コードの特徴	4
3.3	解析手法	5
3.4	解析フローチャート	7
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）TLPILESP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. 2.3
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. 2.3

## 2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	TLPILESP
使用目的	群杭基礎の動的地盤ばねの算出
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1992年
使用したバージョン	Ver. 2.3
コードの概要	TLPILESP（以下「本解析コード」という。）は、鹿島建設が自社開発したもので、薄層要素法に基づく群杭基礎の動的地盤ばねを算出するプログラムである。 <b>なお、本解析コードは、インハウスコードである。</b>
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	<p>本解析コードは、主排気筒の地震応答解析における群杭地盤ばねの算出に使用している。</p> <p><b>【検証（Verification）】</b> 本解析コードの検証は以下のとおり実施している。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードによる解析解と公開文献による解析結果を比較し、概ね一致することを確認している。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認（Validation）】</b> 本解析コードの妥当性確認は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・検証の体系と今回の工事認可申請で使用する体系が同等であることから、本解析コードの解析結果と検証済解析コードの解析解の一致をもって、解析機能の妥当性も確認<b>している</b>。</li> <li>・今回の工事認可申請で行う地震応答解析並びに基礎版の応力解析に用いる地盤ばねの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. TLPILSPの解析手法について

#### 3.1 一般事項

本解析コードは、鹿島建設により開発されたプログラムである。本解析コードは、水平方向に半無限に広がりのある成層地盤上の群杭基礎の動的地盤ばねを算出することができる。

また、本解析コードは、主排気筒及び非常用ガス処理系配管支持架構の動的地盤ばねの算定に使用している。

#### 3.2 本解析コードの特徴

- ①半無限成層地盤の特性は、薄層要素法による加振解を用いており、成層地盤への適用が可能である。
- ②群杭効果を考慮した群杭基礎の動的地盤ばねが算定できる。また、2本杭間の杭頭柔性の重ね合わせを用いているため、大規模群杭への適用が可能である。
- ③本解析コードは、薄層要素法を用いているため、地盤のモデル化において次の仮定を設けている。
  - ・地盤各層は、弾性とし、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)
  - ・分割した地盤各層内の変位分布は、線形と仮定する。
  - ・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モデル下部境界は、半無限要素あるいはダッシュポット要素でモデル化する。

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。

表3.2-1 使用件名

バージョン	件名	使用要素	評価内容
Ver. 2.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>・主排気筒</li> <li>・非常用ガス処理系配管支持架構</li> </ul>	—	地震応答解析モデルによる基礎底面地盤ばねの算定

### 3.3 解析手法

#### a. 基本方針

杭各部での変位を  $\{u^p\}$ ，作用力を  $\{f^p\}$  として，杭-地盤連成系での力の釣り合いを (1) 式のとおりを表す。

$$[K_{ps}]\{u^p\} = \{f^p\} \quad \dots \dots (1)$$

ここで，剛性マトリクス  $[K_{ps}]$  は，図3.3-1及び (2) 式に示すとおり，半無限成層地盤から得られる剛性マトリクス  $[K_{ss}]$  から，杭を土柱に置換した置換土柱の剛性マトリクス  $[K_s]$  を引く一方で，杭の剛性マトリクス  $[K_p]$  を足し合わせて算定する。

$$[K_{ps}] = [K_{ss}] - [K_s] + [K_p] \quad \dots \dots (2)$$

杭の剛性マトリクス  $[K_p]$  は，杭の曲げとせん断剛性をもとに定める。同様に，置換土柱の剛性マトリクス  $[K_s]$  も，土の物性値をもとに評価する。一方，  $[K_{ss}]$  は無限領域に対して評価する必要があり，以下のb. ~d. に示す方法にて評価する。

地盤ばね算定にあたっては，杭頭位置に単位加振，すなわち，  $\{f^p\} = \{e^{i\omega t}, 0, \dots, 0\}^T$  を与えた時の杭頭変位  $u^{op}$  を求め，その逆数を地盤ばねとする。

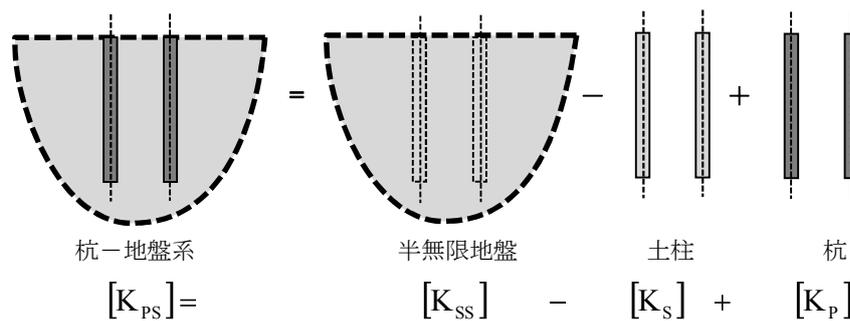


図 3.3-1 杭-地盤系の剛性マトリックス

#### b. 半無限成層地盤についての基礎方程式

上記の半無限成層地盤についての剛性  $[K_{ss}]$  を算定するにあたっては，まず，図3.3-2に示すように，半無限成層地盤の上層部は平行で複数の層からなると仮定する。また，各層においては，図3.3-3に示すとおり  $z$  軸を鉛直下方に向けて円筒座標  $(r, \theta, z)$  を定め，円筒座標系での変位を  $(u_r, u_\theta, u_z)$  と表わす。この時，水平方向に加振する場合，波数  $\alpha$ ，振動数  $\omega$  とした波動方程式は (3) 式となる。

$$\begin{aligned}
 \alpha^2(\lambda+2G)u_r - G \frac{d^2 u_r}{dz^2} + \alpha(\lambda+G) \frac{du_z}{dz} - \omega^2 \rho u_r &= 0 \\
 -\alpha(\lambda+G) \frac{du_r}{dz} + \alpha^2 G u_z - (\lambda+2G) \frac{d^2 u_z}{dz^2} - \omega^2 \rho u_z &= 0 \\
 \alpha^2 G u_\theta - G \frac{d^2 u_\theta}{dz^2} - \omega^2 \rho u_\theta &= 0 \quad \dots \dots (3)
 \end{aligned}$$

ここで、 $\lambda$ はヤング係数、 $G$ はせん断弾性係数、 $\rho$ は質量密度である。

なお、鉛直方向に加振する場合にも類似の方程式が誘導されるが、省略する。

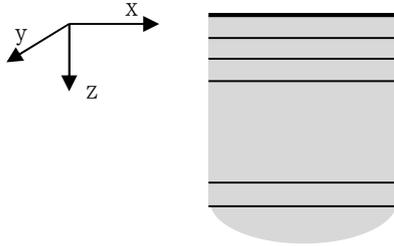


図 3.3-2 半無限成層地盤

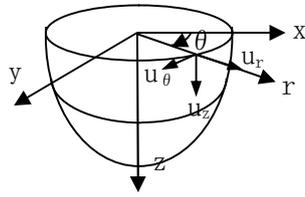


図 3.3-3 円筒座標系

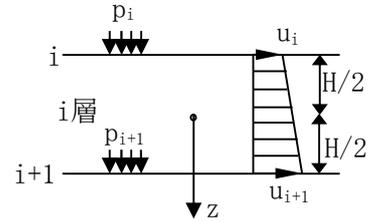


図 3.3-4 層要素

c. 半無限成層地盤の固有値解析

次に、ある層要素*i*については図3.3-4に示すように層内の深さ方向の変位は線形に変化すると仮定する。この時、(3)式の偏微分方程式を離散化し、*i*層の上面、下面の変位を要素に持つベクトル  $\{u^i\} = \{u_i, u_{i+1}\}^T$  についての代数方程式 (4) を誘導することができる。

$$(\alpha^2 [A^i] + \alpha [B^i] + [G^i] - \omega^2 [M^i]) \{u^i\} = \{f^i\} \quad \dots \dots (4)$$

ここで、 $(\alpha^2 [A^i] + \alpha [B^i] + [G^i] - \omega^2 [M^i])$ は波数、振動数に依存した剛性マトリクス、 $\{f^i\} = \{f_i, f_{i+1}\}^T$ は*i*層の上面、下面での表面力を要素に持つベクトル。

上記で誘導した要素の代数方程式を複数の要素について組み合わせると、次のような層分割した半無限成層地盤についての変位ベクトル  $\{u^s\}$  と表面力ベクトル  $\{f^s\}$  の関係式を得る。

$$(\alpha^2 [A] + \alpha [B] + [G] - \omega^2 [M]) \{u^s\} = \{f^s\} \quad \dots \dots (5)$$

ここで、 $(\alpha^2 [A] + \alpha [B] + [G] - \omega^2 [M])$ は波数、振動数に依存した、半無限地盤全体の剛性マトリクス。

$\{f^s\} = 0$  として振動数  $\omega$  ごとに、波数  $\alpha$  に対する複素固有値解析を実施し、固有値と固有ベクトルを計算する。地盤内の点を加振する解は、それらをもとに分解された固有モードの重ね合わせとして表す。

d. 杭位置を加振した時の半無限地盤の剛性マトリクスの評価

円柱形の杭部分は図3.3-5に示すとおりに離散化する。杭位置の各部を加振した変位は、点加振時の変位を半径  $r_0$  の杭外周リング形状に沿って積分して算定する。また、杭が複数本ある場合を想定し、各杭位置を加振した時の各部の変位を算定し (6) 式の通りに表す。また、それを (7) 式のように変形し、剛性マトリクス  $[K_{ss}]$  を定める。

$$\{u^p\} = [D_{ss}] \{f^p\} \quad \dots \dots (6)$$

$$\{f^p\} = [D_{ss}]^{-1} \{u^p\} = [K_{ss}] \{u^p\} \quad \dots \dots (7)$$

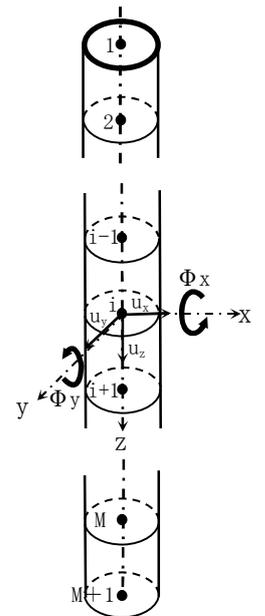


図 3.3-5 杭部分の離散化

### 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。

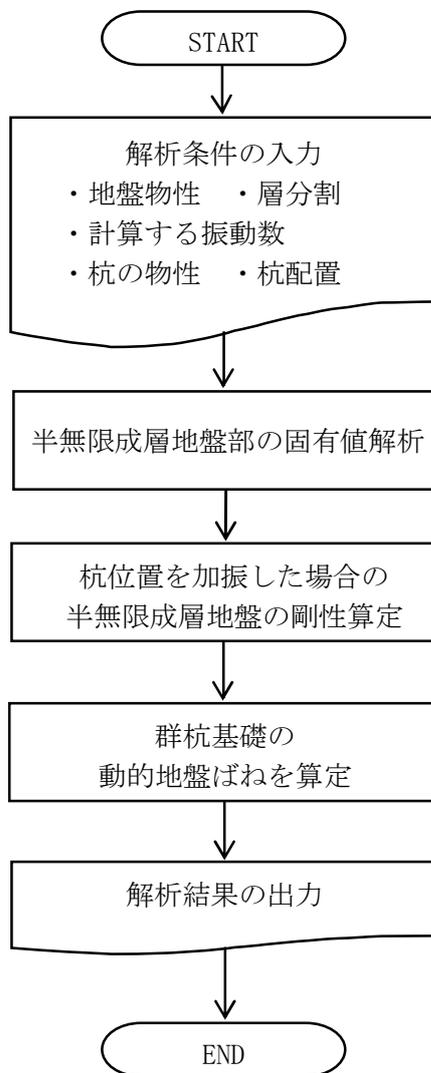


図3.4-1 解析フローチャート

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

#### a. 検証 (Verification)

本コードは、「3.3 解析手法」に示した一般性を有する理論モデルそのままに構築されたものである。また、今回の工事計画認可申請で使用する解析機能は「3.3 解析手法」に示す一般性のあるモデルに基づき構築されている。

以上を踏まえ、今回使用する解析機能に特化する形で、本コードと日本建築学会の公開文献<sup>\*1</sup>の結果を比較することにより、本コードの当該解析機能の適切さを確認した。

検証は、均質地盤を対象として、本コードの解析解と公開文献<sup>\*1</sup>で示されている解析解の比較を行う。検証を行う解析モデル図及び解析諸元を図3.5-1に示す。

単杭及び群杭基礎の動的地盤ばねを算定し公開文献<sup>\*1</sup>の結果と合わせて図3.5-2に示す。図3.5-2より両者は概ね一致しており、本コードが杭基礎の動的地盤ばねを正しく評価していることが確認できる。

注記 \*1：入門・建物と地盤との動的相互作用 174頁～175頁 (社)日本建築学会 1996年4月，第1版第1刷

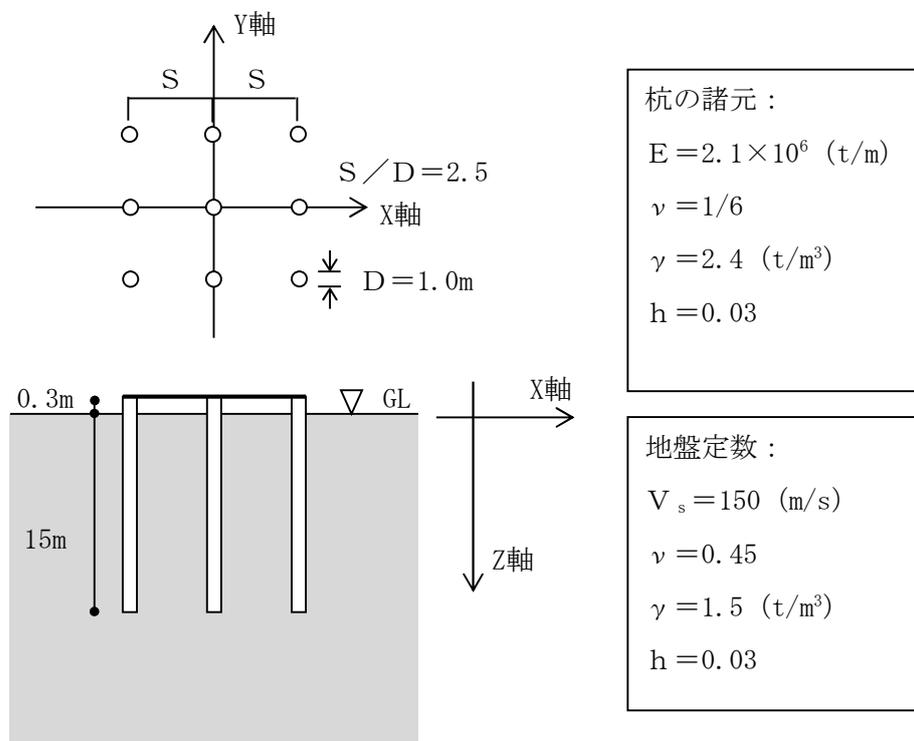


図3.5-1 解析モデル及び解析諸元

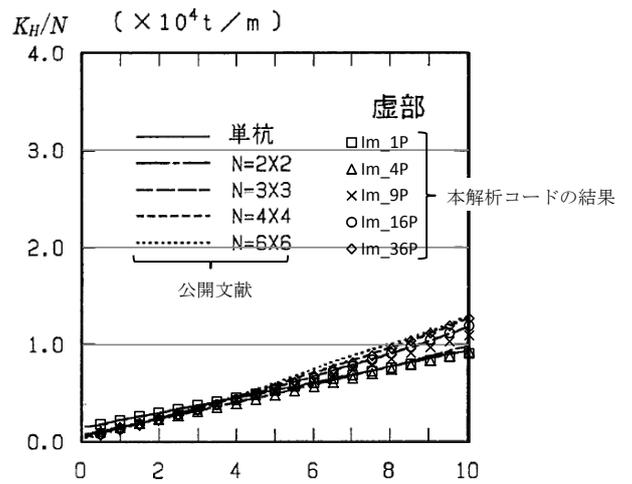
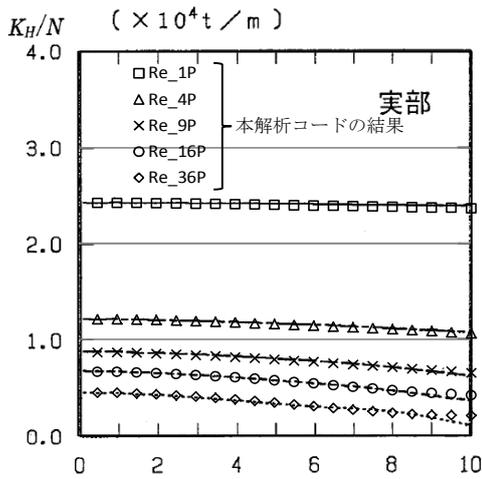


図3.5-2 公開文献\*1の解析解とTLPPILESPによる動的地盤ばねの比較

b. 妥当性確認 (Validation)

本解析コードによる動的地盤ばね計算の機能について、弾性地盤の群杭基礎の動的地盤ばねの解析結果が公開文献による解析解と概ね一致していることを確認している。

また、上記に加えて、今回の工事認可申請で行う解析の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。

c. 評価結果

本解析コードによる解析解と公開文献による解析結果を比較した結果、概ね一致していることが確認できたため、本解析に本解析コードを用いることは妥当である。



V-5-24 計算機プログラム（解析コード）の概要・NUPP4

## 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

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）NUPP4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. 1.4.10

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 NUPP4
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	1967年
使用したバージョン	Ver. 1.4.10
コードの概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・NUPP4（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質点系モデルによる解析コードである。なお、本解析コードは、インハウスコードである。</li> <li>・静荷重（節点荷重）、スペクトルモーダル解析及び動荷重（節点加振力、地震入力）を扱うことができる。</li> <li>・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ほか、線形解析を周波数領域で行うことが可能である。</li> </ul>
検証（Verification）及び 妥当性確認（Validation）	<p>NUPP4 Ver. 1.4.10は、主排気筒の地震応答解析に使用している。</p> <p><b>【検証（Verification）】</b> 本解析コードの検証内容は、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> 本解析コードの適用は、以下のとおり妥当である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードの前バージョンであるNUPP及びNUPPⅡ（以下「前バージョン」という。）は、日本国内の原子力施設における建築物の地震応答解析において数多くの工事計画認可申請に使用されており、十分な使用実績がある。</li> <li>・NUPPⅡは、東海第二発電所 工事計画届書（平成21年3月9日付）の耐震性に関する説明書において、主排気筒の地震応答解析に使用した実績がある。</li> <li>・本工事計画において使用するバージョンは、既工事計画において使用されているもの異なるが、本解析コードは使用計算機（OS）の変更に伴うカスタマイズを施したものであり解析に係る部分は前バージョンから変更していないため、前バージョン同様、信頼性があると判</li> </ul>

	<p>断できる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・固有値解析，弾性地震応答解析については，既設工事認可申請時に確認されている(財)原子力工学試験センターの報告書*<sup>1</sup>による解析結果と概ね一致することを確認している。</li> <li>・弾塑性地震応答解析については，既設工事認可申請時に確認されている(財)原子力発電技術機構の報告書*<sup>2</sup>による解析結果と概ね一致す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は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> <p>注記 *1：質点系モデルの線形動的解析プログラムの作成成果報告書 昭和56年7月 (財)原子力工学試験センター 原子力安全解析所</p> <p>*2：質点系モデル解析コードSANLUMの保守に関する報告書 平成10年3月 (財)原子力発電技術機構 原子力安全解析所</p>
--	---

V-5-25 計算機プログラム（解析コード）の概要・k-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	4

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）k-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-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. 6.2.0
V-2-2-6	取水構造物の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-7	取水構造物の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-8	屋外二重管の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-9	屋外二重管の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-12	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-13	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-20	格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの地震応答計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-21	格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-24	可搬型設備用軽油タンク基礎の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-25	可搬型設備用軽油タンク基礎の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-26	常設低圧代替注水系ポンプ室の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-27	常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-28	代替淡水貯槽の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-29	代替淡水貯槽の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-30	常設低圧代替注水系配管カルバートの地震応答計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-31	常設低圧代替注水系配管カルバートの耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-32	S A用海水ピットの地震応答計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-33	S A用海水ピットの耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-34	緊急用海水ポンプピットの地震応答計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-35	緊急用海水ポンプピットの耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-36	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-37	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-38-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-38-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の地震応答計算書	Ver. 6.2.0

V-2-2-39-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-2-39-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-10-2-2-2	防潮扉の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-10-2-4	構内排水路逆流防止設備の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-10-4-2	SA用海水ピット取水塔の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-10-4-3	海水引込み管の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-10-4-4-1	貯留堰の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-10-4-4-2	貯留堰取付護岸の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-10-4-5	緊急用海水取水管の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-11-2-16	土留鋼管矢板の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
V-2-別添3-2	可搬型重大事故等対処設備の保管場所等における入力地震動	Ver. 6.2.0
V-3-別添3-2-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	Ver. 6.2.0
V-3-別添3-2-1-2-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	Ver. 6.2.0
V-3-別添3-2-1-2-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の強度計算書	Ver. 6.2.0
V-3-別添3-2-1-3	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	Ver. 6.2.0
V-3-別添3-2-1-4	防潮扉の強度計算書	Ver. 6.2.0
V-3-別添3-2-3	構内排水路逆流防止設備の強度計算書	Ver. 6.2.0
V-3-別添3-2-9	貯留堰の強度計算書	Ver. 6.2.0

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 k-SHAKE
使用目的	地震応答解析（入力地震動の算定）
開発機関	株式会社構造計画研究所
開発時期	1997年
使用したバージョン	Ver. 6.2.0
コードの概要	<p>k-SHAKE（1次元波動伝播解析コード）は、重複反射理論に基づく地盤の地震応答解析を行うことが可能な解析コードであり、地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮することができる。</p> <p>k-SHAKEの主な特徴のうち、今回の使用目的に対して、以下の①～③を挙げることができる。</p> <p>（主な特徴）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 1次元重複反射理論に基づくプログラムである。</li> <li>② 地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮する。</li> <li>③ 鉛直動は、S波速度<math>V_s</math>をP波速度<math>V_p</math>として定義することで対応する。</li> </ul>
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>・本解析コードによる二層のモデル地盤に対する地震応答解析結果と、1次元重複反射理論に基づく理論解が一致してい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、開発機関から提示された要件を満足し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、原子力発電所の地盤・斜面評価をはじめとする多数の解析に本コードが使用されており、十分な使用実績があるため、信頼性があると判断できる。</li> <li>・関西電力株式会社の「大飯原子力発電所第3号機」において、海水ポンプ室周辺地盤かさ上げ部の地震応答解析（入力地震動算定）に本コード（Ver. 5.0）が使用された実績がある。</li> <li>・本工事計画において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンの変更において、本解析の使用範囲の結果に影響の無いことを確認している。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>・本工事計画における地震応答解析を実施する際の入力地震動算定の使用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>
--	---



V-5-26 計算機プログラム（解析コード）の概要・f a p p a s e

## 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. fappase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	7
3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (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）fappase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-2-2-16	非常用ガス処理系配管支持架構の地震応答計算書	Ver. 1.63

## 2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	fappase
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	2002年
使用したバージョン	Ver. 1.63
コードの概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ fappase（以下「本解析コード」という。）は、超高層建物の非線形地震応答解析用として開発されたインハウスコードである。</li> <li>・ 材料非線形モデルを数多くサポートしており超高層建物や免震建物の非線形地震応答解析による建築構造解析に利用実績があり、固有値解析、動的解析及び静的解析による応力等の算定が可能である。</li> </ul>
検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)	<p>本解析コードは、非常用ガス処理系配管支持架構の地震応答解析に使用している。</p> <p><b>【検証 (Verification)】</b></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、以下の内容を確認している。 <ol style="list-style-type: none"> <li>① 各部別内部粘性型減衰を用いた地震応答解析を別途検証済解析コードNUPP4による等価なダッシュポットを用いた解析と比較し、同一の解析結果が得られること。</li> <li>② 既往論文に示される1層1スパンX型ブレース（筋違）架構の載荷実験のシミュレーション解析を、本解析コードを用いて同様に実施し、既往論文におけるシミュレーション解析と概ね一致すること。</li> </ol> </li> <li>・ 今回の工事計画認可申請における用途及び適用は範囲が上述の妥当性確認の範囲内であること。</li> </ul>

### 3. fappase の解析手法について

#### 3.1 一般事項

本資料は、地震応答解析を行う解析コード「fappase Ver. 1.63」の概要を説明するものである。

本解析コードは、鹿島建設株式会社で開発した主に骨組構造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モデルによる動的応答解析コードである。

また、本解析コードは、以下の構築物の線形地震応答解析に使用している。

- ・非常用ガス処理系配管支持架構

#### 3.2 解析コードの特徴

①fappase の解析機能の一例を以下に示す。

- ・動的解析
- ・静的解析
- ・実固有値解析

②3次元問題を対象として、はり要素、ばね要素、ダンパー要素、平板要素等が用意されており、原子力発電所建屋他の構造物解析に用いることができる。

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解析する座標及び拘束方法は、取り扱う問題にあったものを選ぶことができる。

⑤解析に用いる単位系は、SI単位系に統一されている。

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1に示す。なお、次に示す検証及び妥当性確認はVer. 1.61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1 使用件名

バージョン	件名	使用要素	評価内容
Ver. 1.63	・非常用ガス処理系配管支持架構	—	線形地震応答解析

### 3.3 解析手法

#### a. 運動方程式

多自由度系の運動方程式は一般に(1)式で表される。

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

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

#### b. 固有値の解法

(1)式は、荷重ベクトルを $\{0\}$ とし、減衰項を除けば、(2)式に示す自由振動を表す方程式となる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \cdots \cdots \cdots (2)$$

(2)式で変位 $\{u\}$ に調和振動を仮定すれば、(3)式が得られる。

$$(-\omega^2[M] + [K])\{u_r\} = \{0\} \cdots \cdots \cdots (3)$$

(3)式が固有ベクトル $\{u_r\} \neq \{0\}$ を満たす条件が固有値問題であり、(3)式を解くことにより固有値 $\omega_r$ が得られる。

c. 減衰項の策定

各部別内部粘性型減衰の減衰項は，各部材の剛性マトリックス  $[K_e]$  に比例するものと定義し，以下のように表される。

$$[C] = \sum \beta_e [K_e] \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$\beta_e = 2 h_e T_e / 2\pi$$

ここで，

$h_e$  : 部材の減衰定数

$T_e$  : 部材の減衰マトリックスを定義する周期

d. 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。今回の解析で用いた Newmark- $\beta$  法について以下に示す。

$n$  ステップの変位  $u_n$ ，速度  $\dot{u}_n$ ，加速度  $\ddot{u}_n$  が既知の場合，次の  $n+1$  ステップの変位，速度は  $\beta$  と  $\delta$  をパラメータとして (5) 式のように表せる。

$\beta$  と  $\delta$  は，Newmark- $\beta$  法に使用される解析パラメータであり，Newmark- $\beta$  法による積分が安定的に行われるためには， $\delta \geq 1/2$ ， $\beta \geq (1/2 + \delta)^2 / 4$  という条件がある。

$$\{\dot{u}\}_{(n+1)} = \{\dot{u}\}_{(n)} + \Delta t \left( (1-\delta)\{\ddot{u}\}_{(n)} + \delta\{\ddot{u}\}_{(n+1)} \right)$$

$$\{u\}_{(n+1)} = \{u\}_{(n)} + \Delta t \{\dot{u}\}_{(n)} + \frac{\Delta t^2}{2} \{\ddot{u}\}_{(n)} + \beta \Delta t^2 (\{\ddot{u}\}_{(n+1)} - \{\ddot{u}\}_{(n)}) \quad \dots \dots \dots (5)$$

(5) 式を  $n+1$  ステップの運動方程式 (1) に代入して， $\{\dot{u}\}_{(n+1)}$ ， $\{\ddot{u}\}_{(n+1)}$  を消去すれば以下の変位増分式になる。

$$\left( [k] + \frac{1}{\beta \Delta t^2} [M] + \frac{\delta}{\beta \Delta t} [C] \right) \{\Delta u\} = \{\Delta F\} + [M] \left( \frac{1}{\beta \Delta t} \{\dot{u}\}_n + \frac{1}{2\beta} \{\ddot{u}\}_n \right)$$

$$+ [C] \left( \frac{\delta}{\beta} \{\dot{u}\}_n + \left( \frac{\delta}{2\beta} - 1 \right) \Delta t \{\ddot{u}\}_n \right) \quad \dots \dots \dots (6)$$

(6) 式を解くと， $n+1$  ステップの変位増分が得られる。また，(5) 式を用いて  $n+1$  ステップの変位，速度及び加速度が得られる。

### 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1に示す。

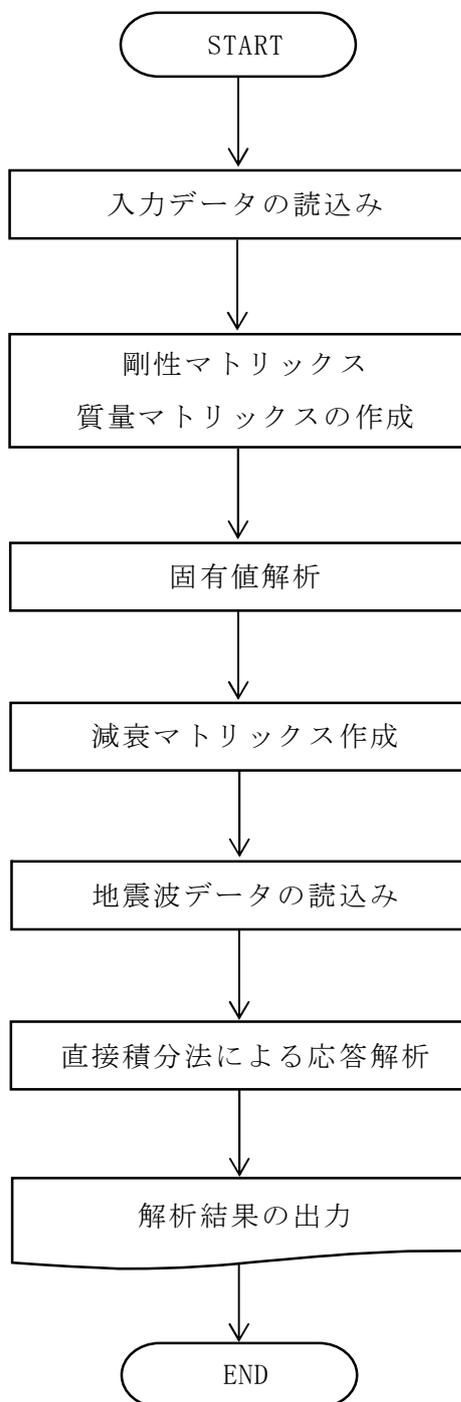


図1 解析フローチャート

### 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、主に建築基準法適用外の国土交通大臣の評定物件である一般超高層建築物に多数の使用実績を有しており、解析機能全般について、十分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、下記の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 質点系モデルによる地震応答解析
- ② 鉄骨ブレースの座屈現象の既往文献との比較

#### 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)

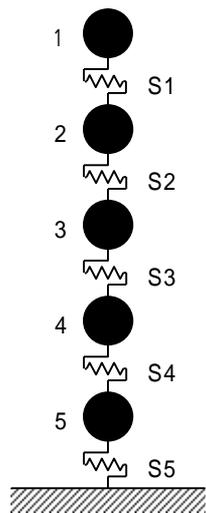
##### (a) 質点系モデルによる地震応答解析

##### イ. 妥当性確認方法

線形問題を対象に、減衰行列が一定の場合を検討する。本解析コードにて各個別内部粘性型減衰を用いた場合と、別途検証済解析コードNUPP4により等価なダッシュポットでモデル化した場合の時刻歴応答解析結果を比較し、本解析コードの妥当性を確認する。

##### ロ. 解析条件

解析モデルの概要を図2に、解析ケースを図3に示す。5質点をせん断ばねで連結した質点系モデルである。各質点の重量及び減衰定数、各要素の剛性、定義周期と減衰定数を図2中の表に示す。



質点番号	重量 (kN)
1~5	100.0

要素名称	剛性 (kN/m)	定義周期 (s)	減衰定数
S1	$1.0 \times 10^4$	0.705	0.03
S2	$1.0 \times 10^4$	0.705	0.03
S3	$1.0 \times 10^4$	0.705	0.03
S4	$1.0 \times 10^4$	0.705	0.05
S5	$1.0 \times 10^4$	0.705	0.05

図2 解析モデルの概要

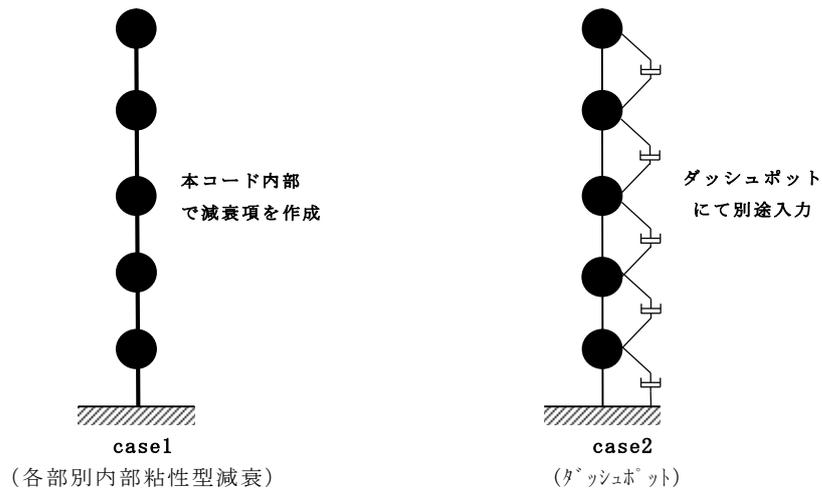


図3 解析ケース

ハ. 妥当性確認結果

EL\_CENTRO (NS) の原波を入力した場合の最大応答値一覧を表2に、質点1の絶対加速度時刻歴波形を図4に示す。最大応答値は合致している。また応答波形も同等である。以上より、本解析コードが応答を正しく評価していることが確認できる。

表2 最大応答値一覧

質点番号	絶対加速度 (Gal)		相対変位 (cm)	
	case1	case2	case1	case2
1	927.6	927.6	9.9121	9.9121
2	785.2	785.2	9.0042	9.0042
3	-590.1	-590.1	7.3710	7.3710
4	-542.0	-542.0	5.2358	5.2358
5	-358.9	-358.9	2.7453	2.7453
床面	341.7	341.7	0.0	0.0

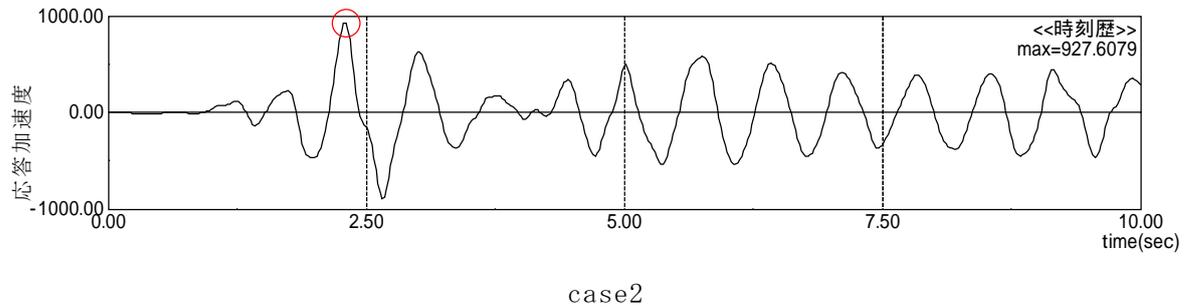
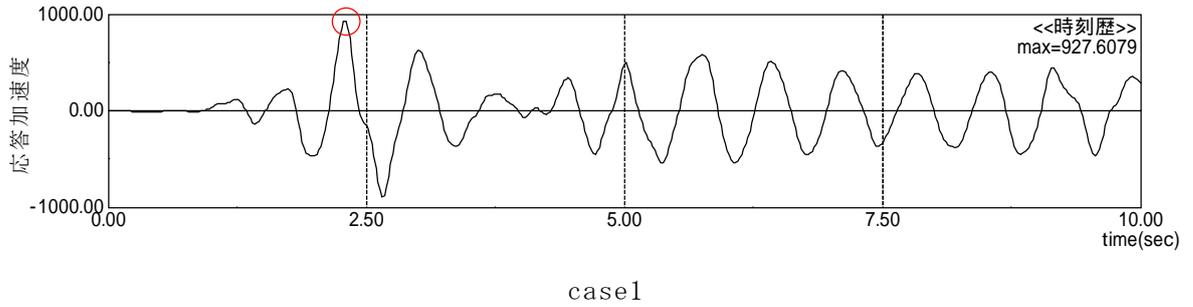


図4 絶対加速度時刻歴波形 (質点 1)

(b) 鉄骨ブレースの座屈現象の既往文献との比較

イ. 妥当性確認方法

論文1では、1層1スパンX型ブレース架構の漸増繰返し載荷実験を、修正若林モデルにてシミュレーション解析している。

載荷実験における試験体概要を図5及び表3に示す。

載荷実験における加力サイクルは、漸増繰返し方式である。加力サイクルを図6に示す。

非常用ガス処理系配管支持架構の地震応答解析の検証として、上記載荷実験のシミュレーション解析を論文1と同様に実施し、本解析コードにより評価した荷重-変形関係が論文1におけるシミュレーション解析結果及び載荷実験結果と概ね一致することを確認する。

ロ. 解析条件

解析モデルを図7に示す。柱及び梁は、はり要素、ブレースはロッド要素とする。柱及び梁の復元力特性は、塑性変形を材端における剛塑性ばねで考慮する材端剛塑性ばねモデルを用い、図8に示すTri-linear型の履歴特性で表し、ブレースの復元力特性は修正若林モデルとする。

ブレースについて、解析で設定する非線形パラメータは、①降伏軸力、②細長比、③無次元オイラー荷重、④座屈荷重のみで、いずれも、部材の材料特性及び幾何学的性状から一意に決まるものである。

柱、梁及びブレースの断面性能を表4、ブレースの非線形パラメータを表5、材端剛塑性ばねモデルの非線形パラメータを表6に示す。なお、文献1の解析条件に合わせて、剛域範囲（剛域長さ）を設定した。

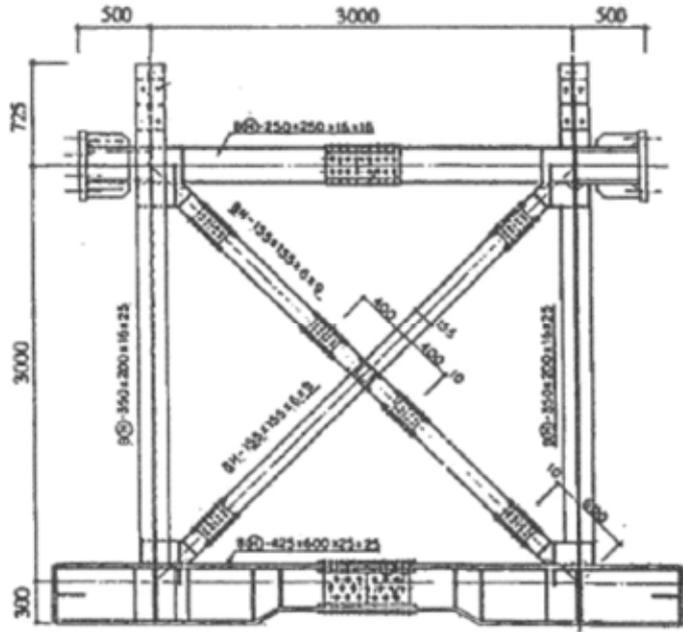


図5 試験体概要

表3 試験体概要

試験体名称	ブレース部材			継手形式	フレーム形状
	断面	細長比 ( $\lambda$ )	フランジ 幅厚比 ( $b/tf$ )		
SKⅢ-60.9-B	H-155× 155×6×9	60	9	ブラケット 形式	高さ：3m スパン：3m

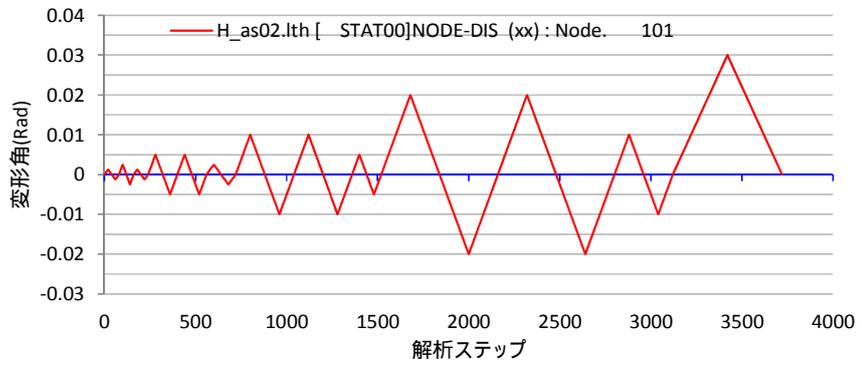


図6 加力サイクル

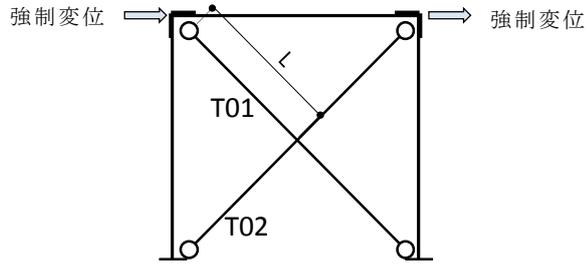


図7 解析モデル

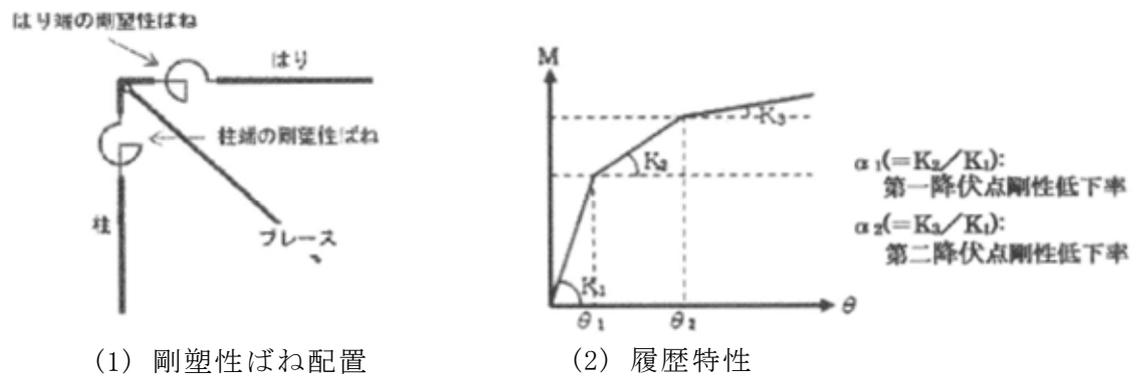


図8 材端剛塑性ばねモデル

表4 柱、梁及びブレースの断面性能

	ヤング係数E (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	断面積 (m <sup>2</sup> )	断面二次モーメント (m <sup>4</sup> )
柱	$2.05 \times 10^8$	0.3	$1.48 \times 10^{-2}$	$3.32 \times 10^{-5}$
梁	$2.05 \times 10^8$	0.3	$1.16 \times 10^{-2}$	$1.24 \times 10^{-4}$
ブレース	$2.05 \times 10^8$	0.3	$3.59 \times 10^{-3}$	—

表5 ブレースの非線形パラメータ

降伏応力度 (kN/m <sup>2</sup> )	降伏軸力 (kN)	細長比	無次元 オイラー荷重	座屈荷重 (kN)	圧縮側限界塑性変形 (m)
$2.9 \times 10^5$	1,041.1	38.5	4.71	988	0.03

表6 材端剛塑性ばねモデルの非線形パラメータ

初期剛性K1 (kNm/rad)	第一降伏点 $\theta_1$ (rad)	第一降伏点 剛性低下率 $\alpha_1$	第二降伏点 $\theta_2$ (rad)	第二降伏点 剛性低下率 $\alpha_2$
$2.374 \times 10^6$	$5.000 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-2}$	$4.310 \times 10^{-3}$	$8.260 \times 10^4$

ハ. 妥当性確認結果

論文1における載荷実験結果及びシミュレーション解析を図9、本解析コードによるシミュレーション解析を図10に示す。

本解析コードによるシミュレーション解析結果は、論文1におけるシミュレーション解析結果と概ね一致している。また、本解析コードによるシミュレーション解析結果は、論文1における実験結果と概ね一致している。

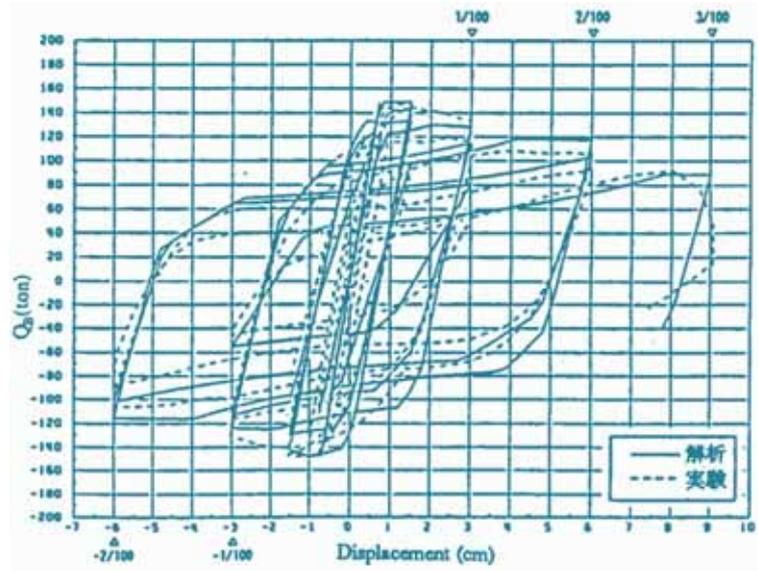


図9 論文1における載荷実験結果及びシミュレーション解析（荷重－変形関係）

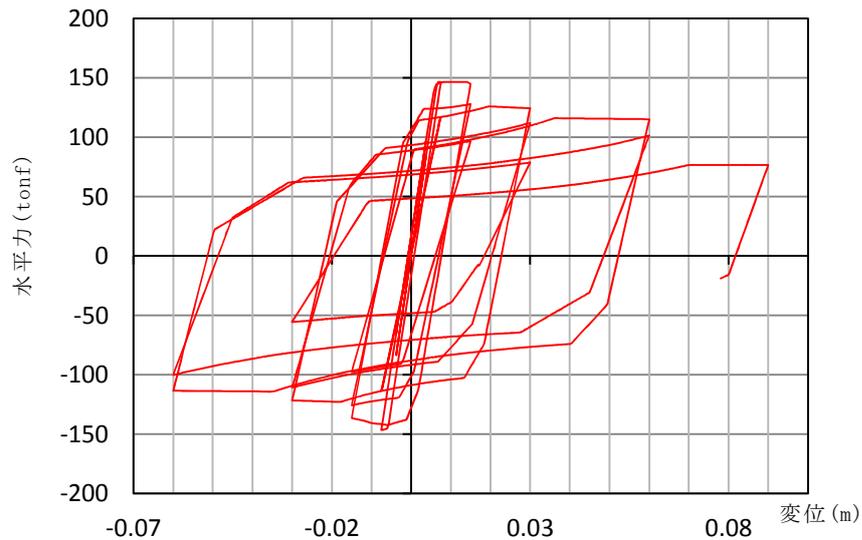


図10 本解析コードによるシミュレーション解析（荷重－変形関係）

(c) 評価結果

以上のとおり，本解析コードの解析機能について

- ・国内外の超高層建物において使用実績を有しており，建築基準法適用外の国土交通大臣の建物評定により解析機能全般について，妥当性は十分確認されている。
- ・今回の工事計画認可申請で使用する各部別内部粘性型減衰を本解析コードの内部計算と等価なダッシュポットを用いて解析し，両者が一致することを確認している。
- ・公開文献に示されている1層1スパンX型ブレース架構載荷実験シミュレーション解析を本解析コードにて実施し，解析結果を既往論文記載の結果と比較して，概ね一致することを確認している。

したがって，本解析コードの当該機能は適切である。

また，上記に加えて，使用マニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する解析手法による地震応答解析に，本解析コードが適用できることを確認している。

したがって，本解析コードを，非常用ガス処理系配管支持架構の地震応答解析に使用することは，妥当である。

V-5-27 計算機プログラム（解析コード）の概要・KANSAS 2

## 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.	KANSAS2の解析手法について	5
3.1	一般事項	5
3.2	解析コードの特徴	5
3.3	解析手法	6
3.4	解析フローチャート	7
3.5	検証 (Verification) 及び妥当性確認 (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）KANSAS2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-2-2-17	非常用ガス処理系配管支持架構の耐震性についての計算書	Ver. 6.01
V-3-別添1-1-1	竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書	Ver. 6.01

## 2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	KANSAS2
使用目的	応力解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	2004年
使用したバージョン	Ver. 6.01
コードの概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ KANSAS2（以下「本解析コード」という。）は、鹿島建設により開発された 3次元骨組応力解析（面内 F E M要素含む。）のインハウスコードである。</li> <li>・ 本解析コードは、微小変位理論による変位法を用いて、3次元平面骨組（面内 F E M要素含む。）の断面力・変位を算出するための構造解析プログラムである。</li> </ul>
検証(Verification)及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、非常用ガス処理系配管支持架構及び廃棄物処理建屋固体廃棄物搬出入設備（鉄骨造部）のうち鉄骨架構の梁・柱及びブレースの応力解析に使用している。</p> <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>・ 構造力学分野における一般的な知見により解を求めることができる体系について、はり要素を用いた応力解析について、はり要素を用いた解析結果と文献*1による理論解の比較を行い、本解析コードによる解析解が文献の理論解と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は、解析マニュアルに記載された要件を満足し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>・ 検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、検証結果をもって、解析機能の妥当性も確認している。</li> <li>・ 今回の工事計画認可申請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> <p>注記 *1：成岡昌夫，服部正他：コンピュータによる構造工学</p>

	講座Ⅱ-1-B, 日本鋼構造協会編, 骨組構造解析, 培風館, 昭和46年6月, pp. 20~33
--	--

### 3. KANSAS2 の解析手法について

#### 3.1 一般事項

本資料は、応力解析を行う解析コード「KANSAS2 Ver.6.01」の概要である。

本解析コードは、微小変位理論による変位法を用いて、3次元骨組モデルの断面力・変位を算出するための構造解析プログラムである。

#### 3.2 解析コードの特徴

3次元で構成された骨組モデルに対して、任意方向の荷重が積載された場合の解析を行う。

微小変位理論による変位法を用いて、3次元平面骨組（面内FEM要素含む。）の断面力・変位を算出するための構造解析プログラムである。

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1に示す。

表1 使用件名

バージョン	件名	使用要素	評価内容
Ver. 6.01	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 非常用ガス処理系配管支持架構</li> <li>・ 廃棄物処理建屋固体廃棄物搬出入設備（鉄骨造部）のうち鉄骨架構</li> </ul>	—	線形応力解析

### 3.3 解析手法

本解析コードの解析部分は微小変形理論に基づいており、節点変位を未知数とする多次元連立方程式を解くことによって所要の変位・断面力・反力を算出する。この連立方程式は、構造データから決定される剛性マトリックスと荷重データから決定される荷重ベクトルから構成される。

検討に用いた静的線形解析で使用する基本方程式は以下のとおり。

$$[K]\{U\} = \{P\} \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、

- $[K]$  : 構造物の全体剛性マトリックス
- $\{U\}$  : 変位ベクトル
- $\{P\}$  : 荷重ベクトル

### 3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図1に示す。

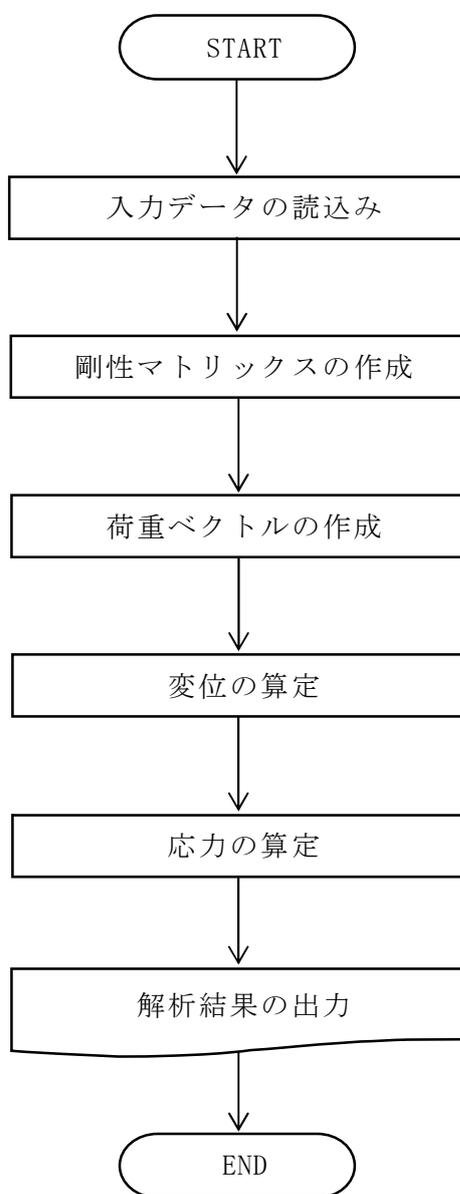


図1 解析フローチャート

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

本解析コードは、「3.3 解析手法」に示した一般性を有する理論モデルそのままに構築されたものである。よって、解析解の適切さは、当該分野で公知の理論モデルに基づく文献による解析解をもって確認可能である。

#### a. 検証 (Verification)

##### (a) 検証方法

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)

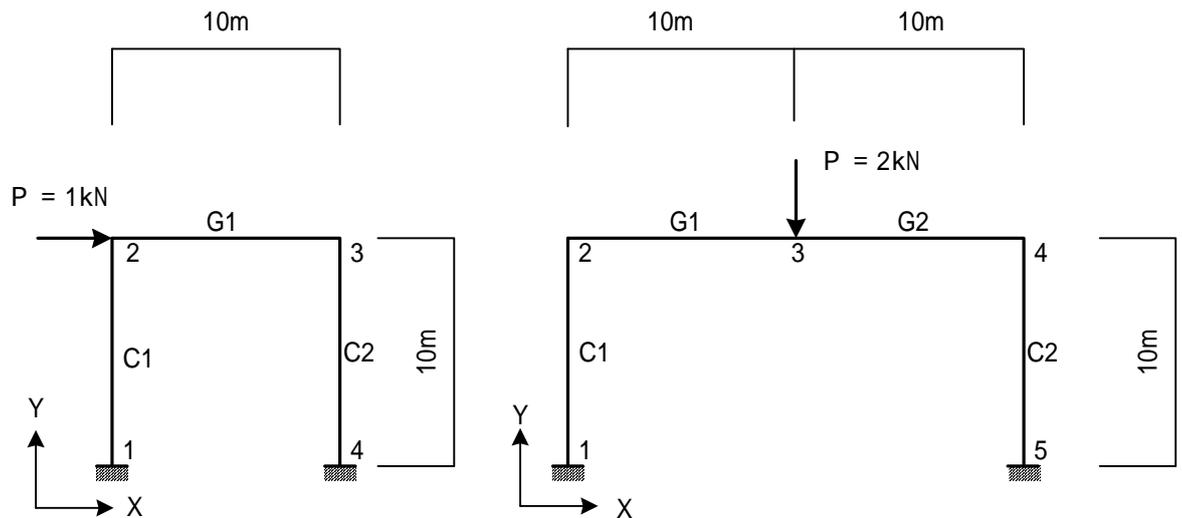
##### (a) 妥当性確認方法

本解析コードを用いてはり要素による応力解析を実施し、解析結果と文献\*1の理論解の比較、検証を行う。

##### (b) 解析条件

評価対象は、図2及び表2に示す門型ラーメン架構の水平荷重及び鉛直荷重載荷時である。

なお、本解析コードの出力に合わせて、単位系はSI単位系、力はkN、長さはcmとしている。



(1) H1モデル (水平荷重)

(2) V1モデル (鉛直荷重)

図2 解析モデル

表2 部材諸元

モデル	部材	断面2次 モーメント I (cm <sup>4</sup> )	備考
H1	C1, C2	250,000	水平荷重
	G1	250,000	
V1	C1, C2	250,000	鉛直荷重
	G1, G2	500,000	

ヤング係数  $E = 1 \text{ kN/cm}^2$

注記 \*1: 成岡昌夫, 服部正他: コンピュータによる構造工学講座Ⅱ-1-B, 日本鋼構造協会編, 骨組構造解析, 培風館, 昭和46年6月, pp. 20~33

(c) 妥当性確認結果

イ. 水平荷重

文献\*1によれば，水平荷重時の変位及び部材応力は撓角法により以下のよう  
に示されている。

$$u_2 = u_3 = (5/84)(P h^3 / E I) = 5/84 \times 1 \times 1000^3 / (1 \times 2.5 \times 10^5) = 238.0952$$

$$\theta_2 = \theta_3 = P h^2 / 28 E I = 1 \times 1000^2 / (28 \times 1 \times 2.5 \times 10^5) = 0.1428571$$

$$M_1 = (4/14) P h = 285.714$$

$$M_2 = (3/14) P h = 214.286$$

$$M_3 = (3/14) P h = 214.286$$

$$M_4 = (4/14) P h = 285.714$$

$$H_1 = H_2 = P / 2 = 0.5$$

$$V_1 = (6/14) P = 0.428571$$

$$V_2 = (6/14) P = 0.428571$$

本解析コードと理論解の比較検証結果を表3に示す。検証の結果，本解析コー  
ドの解析結果は，理論式による結果と一致することを確認した。

表3 水平荷重時の解析結果の比較

項目		理論式	KANSAS2 Ver. 6.01
変形	$u_2$ (cm)	238.0952	238.0952
	$\theta_2$ (rad)	0.1428571	0.1428571
曲げ モーメント (kN・cm)	$M_1$	285.714	285.714
	$M_2$	214.286	214.286
	$M_3$	214.286	214.286
	$M_4$	285.714	285.714
反力 (kN)	$H_1$	0.5	0.5
	$H_2$	0.5	0.5
	$V_1$	0.428571	0.428571
	$V_2$	0.428571	0.428571

ロ. 鉛直荷重

文献\*1によれば，鉛直荷重時の変位及び部材応力は撓角法により以下のように示されている。

$$\theta_2 = P \ell^2 / 24E I = 2 \times 1000^2 / (24 \times 1 \times 2.5 \times 10^5) = 0.333333$$

$$v_3 = P \ell^3 / 24E I = 2 \times 1000^3 / (24 \times 1 \times 2.5 \times 10^5) = 333.333$$

$$v_2 = 0$$

$$u_2 = 0$$

$$M_1 = P \ell / 12 = 2 \times 1000 / 12 = 166.667$$

$$M_2 = P \ell / 6 = 2 \times 1000 / 6 = 333.333$$

$$M_3 = P \ell / 3 = 2 \times 1000 / 3 = 666.667$$

$$H_1 = P / 2 = 0.5$$

$$V_1 = P = 1$$

本解析コードと理論解の比較検証結果を表4に示す。検証の結果，本解析コードの解析結果は，理論式による結果と一致することを確認した。

表4 鉛直荷重時の解析結果の比較

項目		理論式	KANSAS2 Ver. 6. 01
変形	$\theta_2$ (rad)	0. 333333	0. 333333
	$v_3$ (cm)	333. 333	333. 333
曲げ モーメント (kN・cm)	$M_1$	166. 667	166. 667
	$M_2$	333. 333	333. 333
	$M_3$	666. 667	666. 667
反力 (kN)	$H_1$	0. 5	0. 5
	$V_1$	1. 0	1. 0

c. 評価結果

2次元骨組モデルによる断面力について，理論モデルによる理論解と比較し，解析解が理論解と一致することを確認した。

また，上記に加えて，今回の工事計画認可申請で行う解析の用途及び提供範囲が，上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

したがって，本解析コードを，静的応力解析に使用することは，妥当である。



V-5-28 计算机プログラム（解析コード）の概要・CONDSLIP

## 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

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）CONDSLIP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-2-11-2-3	使用済燃料乾式貯蔵建屋天井クレーンの耐震性についての計算書	Ver. 5

## 2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	CONDSLIP
使用目的	3次元はりモデルによる非線形時刻歴応答解析（部材力算定）
開発機関	三菱重工業株式会社
開発時期	1995年
使用したバージョン	Ver. 5
コードの概要	<p>CONDSLIP（以下「本解析コード」という。）は、クレーン等の走行構造物に対して、すべり・浮き上がり・衝突の非線形現象を含めた地震応答解析に用いられているコードである。</p> <p>本解析コードを用いて、すべり・浮き上がり・衝突現象を含む非線形時刻歴応答解析を実施し、すべり量・浮き上がり量・衝突力等の非線形力を算出することで、構造各部の変位や部材力を算出する。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、上位クラス施設への波及的影響のおそれのある下位クラス施設である使用済燃料乾式貯蔵建屋天井クレーン等（以下「クレーン」という。）の地震応答解析に使用している。</p> <p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <p>本解析コードの検証は Ver. 4 について実施した。内容は次の通りである。</p> <p>本解析では、クレーンをはり要素でモデル化している。クレーンのはり要素については、以下の通り、理論解との比較による検証を行い、計算機能が適正であることを確認している。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・片持ちはりモデルに対して静的解析を行い、解析結果と理論解を比較し、誤差 1%以下で一致していることを確認している。</li> </ul> <p>クレーン（車輪）とレールの接触面で生じる、すべり・浮き上がり・衝突等の非線形要素については、以下の通り、衝突要素試験による検証を行い、計算機能が適正であることを確認している。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・衝突要素試験による地震応答検証試験での衝突事象の結果とそれらを考慮した解析モデルによる解析結果を比較し、非線形挙動が一致していることを確認している。</li> <li>・上記の衝突要素試験による地震応答検証結果については、機械学会論文集に投稿掲載している（2004年9月号（第70巻第697号））。</li> </ul>

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <p>本解析コードをクレーンの解析に用いることの妥当性について、以下の通り、クレーン供試模型による地震応答検証試験との比較を行い確認している。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・クレーン供試模型を用いた地震応答検証試験によるすべり、浮上り、衝突事象の結果とそれらを考慮した解析モデルによる解析結果を比較し、非線形挙動は一致していることを確認している。</li> <li>・上記のクレーン供試模型による地震応答検証結果については、機械学会論文集に投稿掲載している（2004年9月号（第70巻第697号））。</li> <li>・今回の解析には Ver. 5 を用いているが、Ver. 4 から Ver. 5 へのバージョンアップにおいて、今回使用する解析機能に影響が生じていないことを確認している。</li> <li>・今回の工事計画認可申請で行う3次元はり要素モデルによる非線形時刻歴応答解析（部材力の算定）の用途、適用範囲が、上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。</li> <li>・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは、既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。</li> </ul>
--	--

V-5-29 计算机プログラム（解析コード）の概要・STAR-CD

## 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. STAR-CD Ver. 4. 16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 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	5

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）STAR-CD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-1-1-8	発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書	Ver. 4.16.023

## 2. 解析コードの概要

### 2.1 STAR-CD Ver. 4.16.023

項目 \ コード名	STAR-CD
使用目的	3次元流動解析によるスロッシング評価
開発機関	シーメンス社
開発時期	2011年
使用したバージョン	Ver. 4.16.023
コードの概要	STAR-CD (以下, 「本解析コード」という) は, 汎用流体解析用計算機プログラムであり, 数多くの研究機関や企業において, 航空宇宙, 鉄道, 自動車, 機械, 原子力・火力・水力・風力発電などの様々な分野の流体解析に広く利用されている。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本解析コードは有限体積法を用いた汎用流体解析プログラムであり, 数多くの研究機関や企業において, 様々な分野の流体解析に広く利用されていることを確認している。</li> <li>試験結果と解析結果を比較し, 検証されていることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本解析コードは, 航空宇宙, 鉄道, 自動車, 機械, 原子力・火力・水力・風力発電などの様々な分野における使用実績を有しており, 妥当性は十分に確認されている。</li> </ul>

### 3. STAR-CD Ver. 4.16 の解析手法について

#### 3.1 一般事項

本書は、シーメンス社において開発された汎用流体解析コード STAR-CD の説明書である。

本解析コードは、VOF (Volume of Fluid) 法を搭載した汎用流体解析コードである。VOF 法は、気液界面の変形を伴う 3 次元非定常流動現象を高精度で解析できる手法であり、スロッシング現象の把握に適している。

#### 3.2 解析コードの特徴

本解析コードは、有限体積法を用いた汎用流体解析プログラムであり、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、鉄道、自動車、機械、原子力・火力・水力・風力発電などの様々な分野の流体解析に広く利用されている。

#### 3.3 解析手法

STAR-CD で適用している VOF 法は、各計算セルに含まれる液体の体積率を流体体積率 (VOF 値) で示し、この VOF 値の移流計算をする事で、気液界面の形状や変化を計算する。ある計算セルが液体 (水) で満たされていれば VOF=1、気体 (空気) で満たされていれば VOF=0 である。計算セル内に液体が部分的に存在している場合は、その割合に応じた VOF 値 ( $0 \leq \text{VOF} \leq 1$ ) が設定される。図 3-1 に計算セルの例を示す。

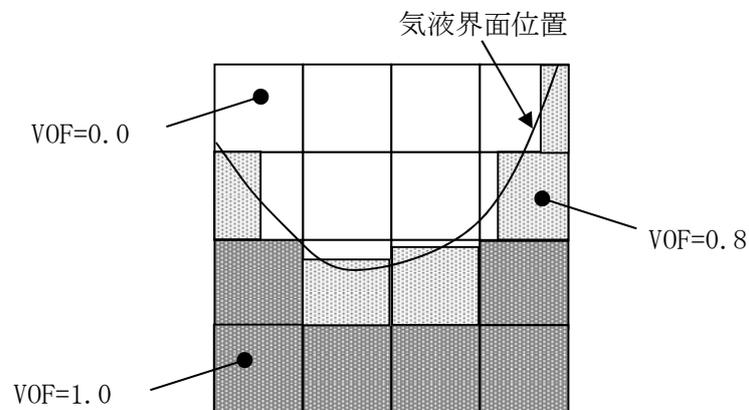


図3-1 計算セルの例

### 3.4 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

#### 3.4.1 検証 (Verification)

本解析コードの検証として、矩形容器を用いた振動試験及び解析を実施し、波高及び溢水量を比較する。また、他の解析コードで解析を実施し、本解析コードの波高及び溢水量を比較する（出典：日本原子力学会 2017 年秋の大会 使用済燃料プールの地震時溢水量評価に用いる解析コードの検証）。

##### (1) 試験条件と試験体

試験条件を以下に示す。また、試験体を図3-2に示す。水位計にて時刻歴波高を計測する。

- ・入力波：正弦波加振
- ・計測装置を用いた測定項目：液面水位，台上の加速度

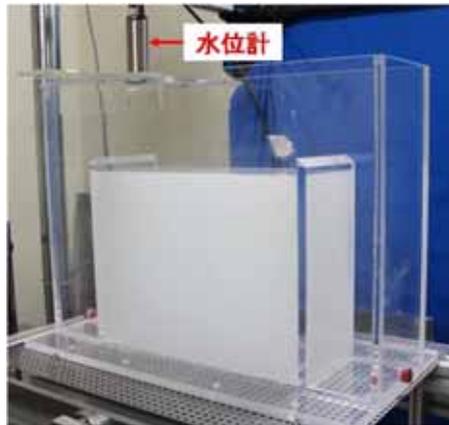


図3-2 試験体

##### (2) 試験と解析の比較

試験と解析の時刻歴波高を図3-3に示す。また、試験と解析の溢水量を表3-1に示す。本結果から、解析結果と試験結果はよく一致している。

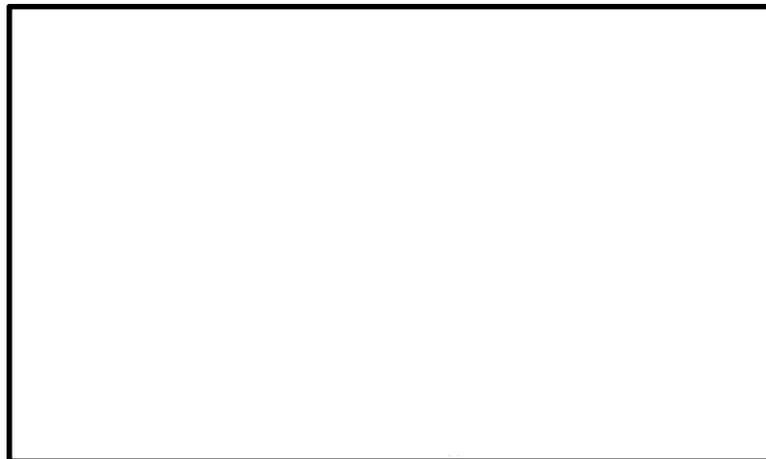


図3-3 試験と解析の時刻歴波高の結果

表 3-1 試験と解析の溢水量の結果

試験	212.4 (cm <sup>3</sup> )
解析	222.7 (cm <sup>3</sup> )

## (3) 他コードとの比較

本解析コードと他コードを比較した波高を図3-4、溢水量を図3-5に示す。本結果から、他コードとの比較もよく一致している。

(2) (3)の結果から、本解析コードが検証されていることを確認した。



図 3-4 他コードとの比較 (波高)

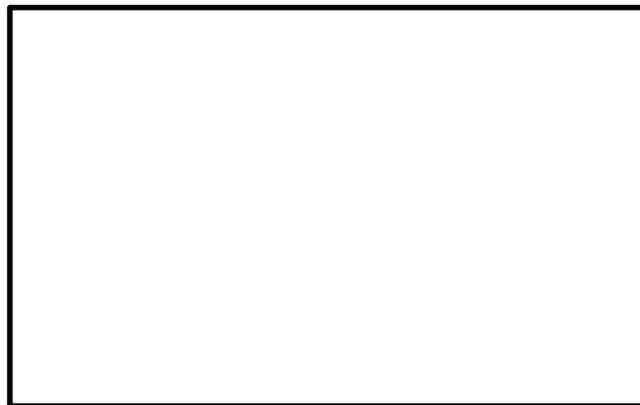


図 3-5 他コードとの比較 (溢水量)

## 3.4.2 妥当性確認 (Validation)

本解析コードの妥当性は、機械工学、土木工学、航空工学等の様々な分野における使用実績を有しており、十分に確認されている。

## 3.4.3 評価結果

3.4.1 及び 3.4.2 より、本解析コードを使用目的に示す溢水評価に用いることは妥当である。

V-5-30 計算機プログラム（解析コード）の概要・Fluent

## 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
2.1 Fluent Ver. 16. 0. 0	3

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）Fluent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-1-1-8	発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書	Ver. 16.0.0

## 2. 解析コードの概要

### 2.1 Fluent Ver. 16.0.0

コード名 項目	Fluent
使用目的	流体解析
開発機関	ANSYS, Inc(アメリカ)
開発時期	2015年（初版開発時期 1983年）
使用したバージョン	Ver. 16.0.0
計算機コードの概要	ANSYS Fluentは、CFD解析の初心者からエキスパートまで、幅広い要求に応える使いやすさと多くの機能を備える。有限体積法をベースとした非構造格子に対応するソルバを搭載しており、化学反応、燃焼、混相流などが取り扱える。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは有限体積法を用いた汎用流体解析プログラムであり、数多くの研究機関や企業において、様々な分野の流体解析に広く利用されていることを確認している。</li> <li>・2次元ダムブレイク問題の解析結果と他の数値解法による結果を比較し、よく一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードの製品開発、テスト、メンテナンス、サポートの各プロセスは、United States Nuclear Regulatory Commission（アメリカ合衆国原子力規制委員会）の品質要件を満たしている。</li> <li>・使用する解析モデルは、工事計画認可申請書を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは、航空宇宙、自動車、化学などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。</li> <li>・2次元ダムブレイク問題の解析結果と実験結果とを比較し、よく一致することを確認している。</li> </ul>

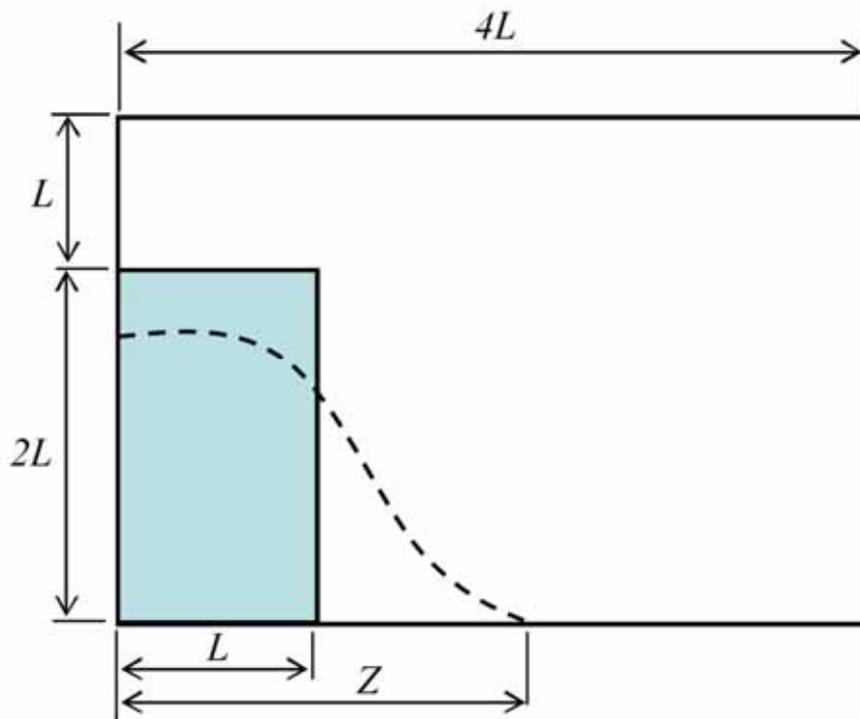
## 解析コード「Fluent (Ver. 16.0.0)」の妥当性検証

## 1. 概要

使用プログラムFluent (Ver. 16.0.0)の動作検証を実施するため、2次元ダムブレイク問題の模擬解析を行い、水面位置の時間変化を実験結果と比較する。

## 2. 対象問題

第1図に示すアスペクト比1 : 2の水柱（水色の領域）を初期条件として、時間の経過とともに第1図中破線のように水柱が崩れる問題に対して非定常解析を行う。L=0.5[m]とし、物性値は第1表に示す値を用いる。



第1図 解析対象

第1表 物性値

水	
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_l=1000$
粘性係数 [Pa・s]	$\mu_l=1.0 \times 10^{-3}$
空気	
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_l=1.0$
粘性係数 [Pa・s]	$\mu_l=1.8 \times 10^{-5}$

### 3. 解析モデルと解析条件

#### 3.1 メッシュ分割

第2図にメッシュ分割図を示す。全域においてメッシュサイズを鉛直／水平方向とも0.025 [m] (0.05L) とする。



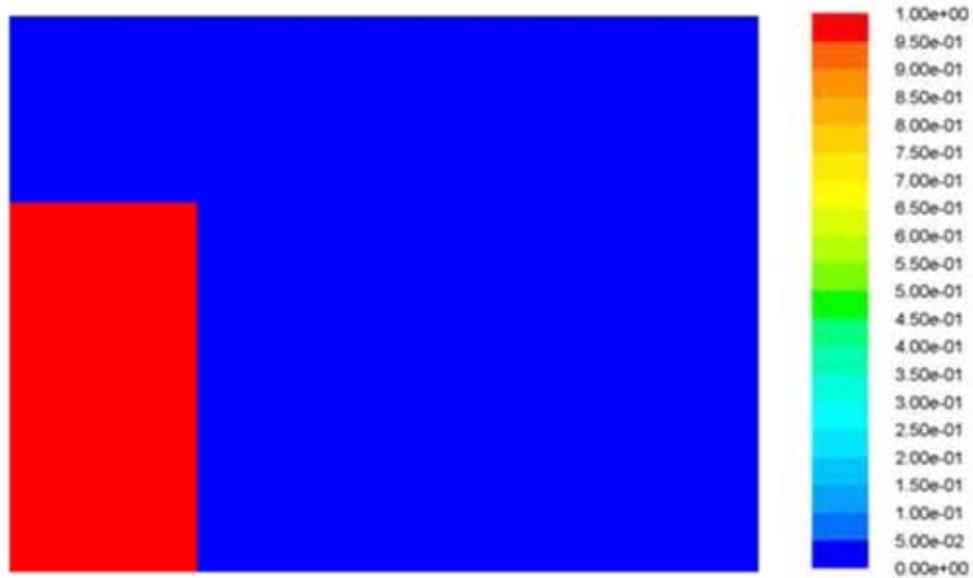
第2図 メッシュ分割図

#### 3.2 流体のモデル化

水及び空気の2相流，かつ2相とも非圧縮性粘性流体としてモデル化する。2相の取り扱いについては，VOF法 (Volume Of Fluid 法) <sup>[1]</sup>を採用する。

### 3.3 初期条件

水柱の初期状態を模擬するために、第3図に示すような体積分率の初期条件を与える。流速及び圧力は、すべて0とする。なお、赤色は水を、青色は空気を、コンターレンジ途中の色(黄緑色等)は水と空気の混合状態を意味する。



第3図 体積分率分布 (初期条件)

### 3.4 境界条件

メッシュモデル下面及び側面には、滑りなしの境界条件を与えた。また上面は圧力境界条件とする。

### 3.5 重力の取り扱い

鉛直下向きに1G ( $=9.8\text{m/s}^2$ ) 相当の体積力を与える。

### 3.6 時間積分

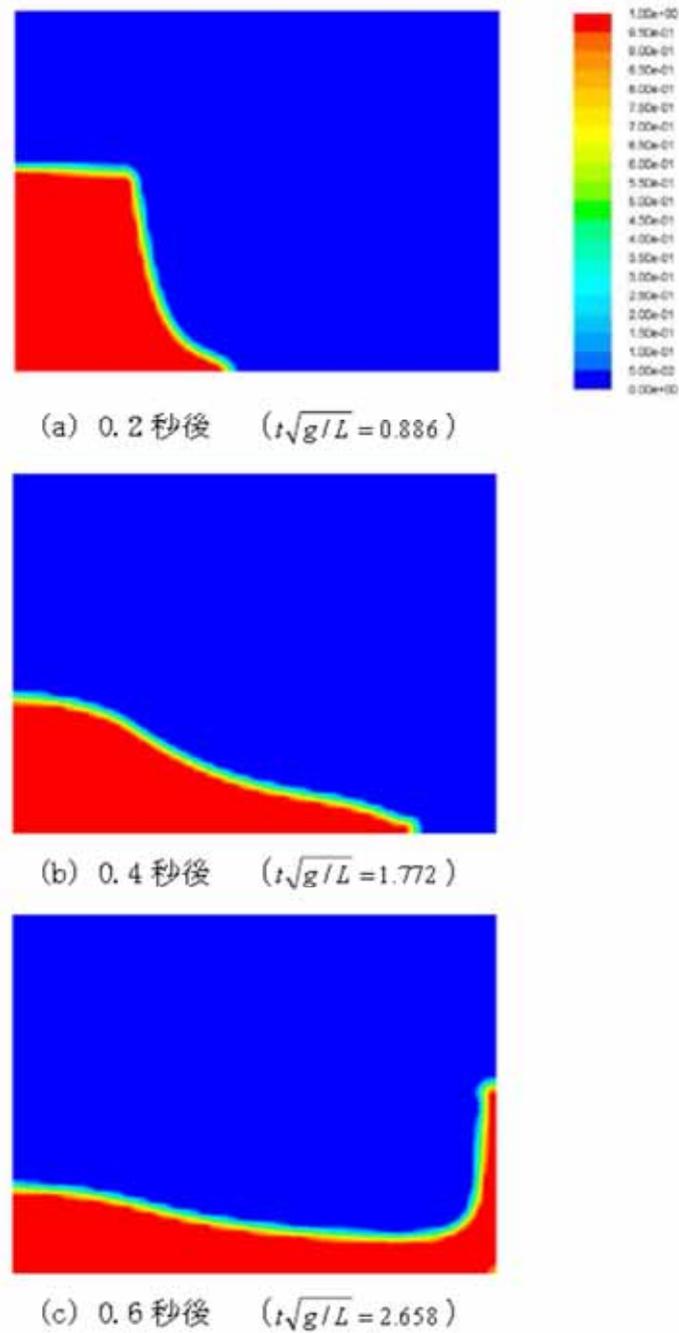
非定常計算における時間刻みは、0.01秒とし、100時間ステップ (=1.0秒間) の解析を行う。

## 4. 解析結果及びまとめ

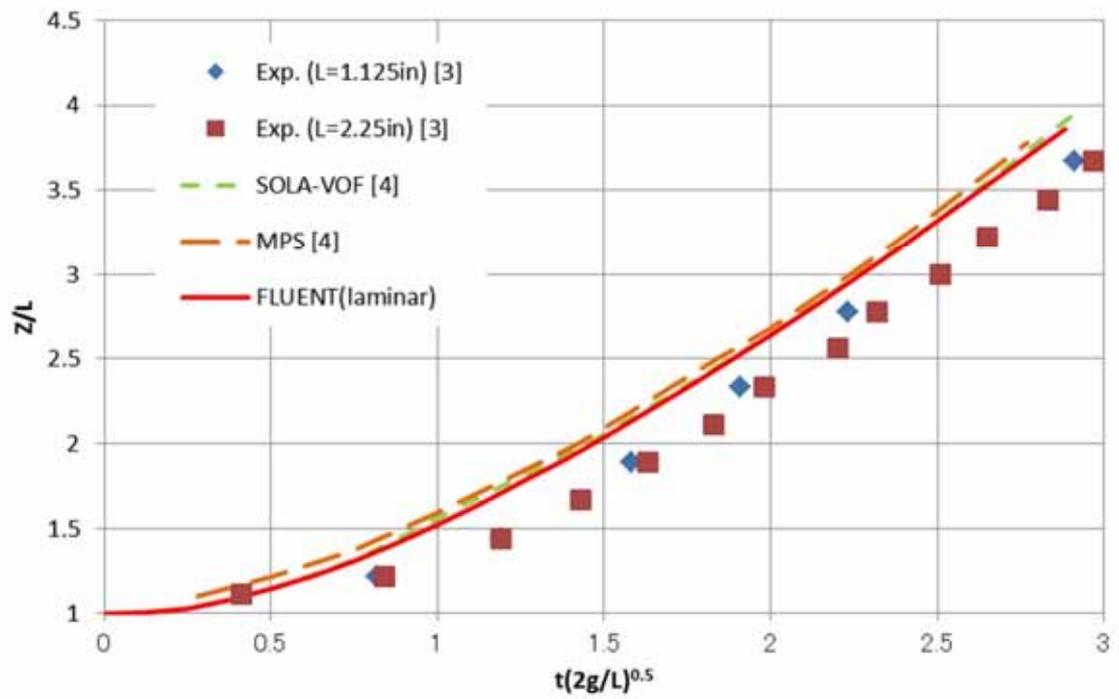
第4図に、体積分率分布を示す。ここで、図中のt:経過時刻[s], g:重力加速度を示す。時間の経過に伴って水柱が崩壊し、モデル右側面に衝突した水流が壁面を伝って上昇している様子が分かる。また、自由表面の形状に関して、物理的に破たんしているような部分や、自由表面がぼやけるような現象は見られない。

実験結果<sup>[2]</sup>及び他の数値解法<sup>[3]</sup>との比較を、第5図及び第6図に示す。第5図は水の先端(右端)の位置の時間変化を、第6図はモデル左端における水面の高さの時間変化を無次元化して整理したグラフである。これらの図において、本解析結果は他の解法・コードで計算した結果とよ

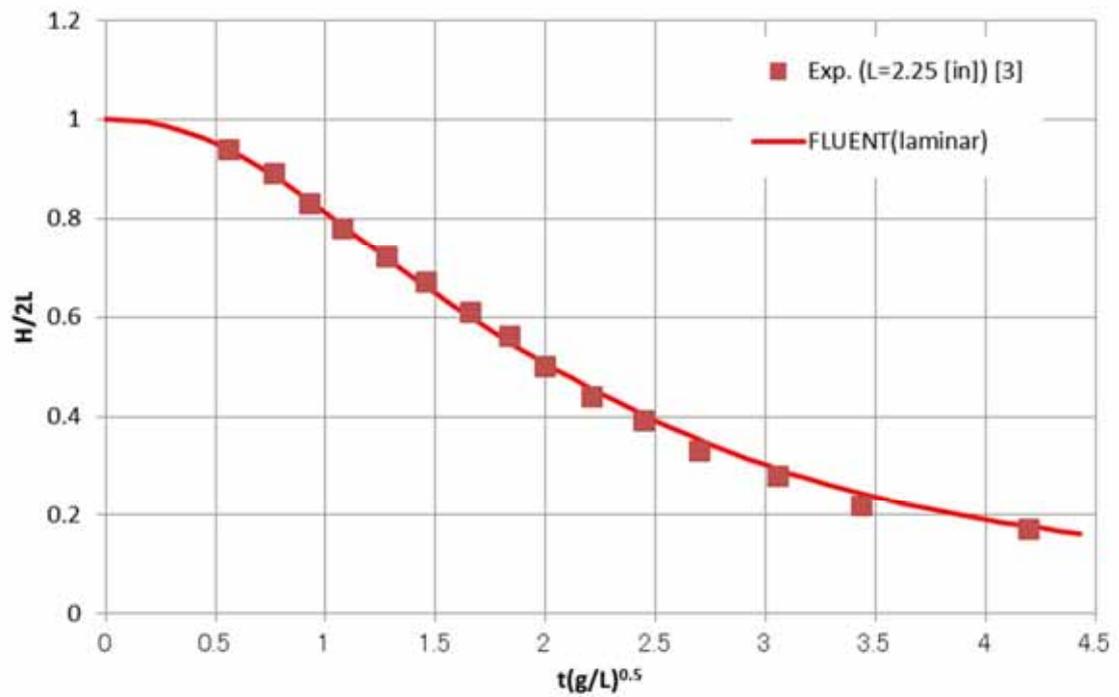
く一致している。第5図の水の先端位置の時間変化において、解析結果が実験結果と比べて先行する傾向があるが、これは実験においては水ダムのスリットの開放が有限時間で行われることの影響が大きいと思われる。



第4図 水面（体積分率分布）の変化



第5図 先端位置Zの時間変化



第6図 水柱高さHの時間変化

参考文献

- [1] Hirt, C.W. and Nicholls, B.D.,: Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys.*, Vol.39, pp.201-221, 1981
- [2] Martin, J.C. and Moyce, W.J.: Part IV. An Experimental Study of the Collapse of Liquid Columns on a Rigid Horizontal Plane, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Science*, Vol.244, No.882, pp.312-324, 1952
- [3] 越塚誠一, 山川宏, 矢川元基, : 数値流体力学 (インテリジェント・エンジニアリング・シリーズ), 培風館, 1997



V-5-31 計算機プログラム（解析コード）の概要・NOPS

## 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

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）NOPS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及び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-1-2-2	原子炉圧力容器の脆性破壊防止に関する説明書	Ver. 0
V-2-3-4-1-2	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書（その1）	Ver. 0
（ V -2-3-4-1-2 に含める）	下部鏡板の耐震性についての計算書 給水ノズル（N4）の耐震性についての計算書	
V-2-3-4-1-3	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書（その2）	Ver. 0
（ V -2-3-4-1-3 に含める）	胴板の耐震性についての計算書 制御棒駆動機構ハウジング貫通部の耐震性についての計算書 再循環水出口ノズル（N1）の耐震性についての計算書 再循環水入口ノズル（N2）の耐震性についての計算書 主蒸気ノズル（N3）の耐震性についての計算書 炉心スプレイノズル（N5）の耐震性についての計算書 差圧検出・ほう酸水注入管ノズル（N10）の耐震性についての計算書 低圧注水ノズル（N17）の耐震性についての計算書 上鏡スプレイノズル（N6）の耐震性についての計算書 ベントノズル（N7）の耐震性についての計算書 ジェットポンプ計測管貫通部ノズル（N8）の耐震性についての計算書 計装ノズル（N11, N12, N16）の耐震性についての計算書 ドレンノズル（N15）の耐震性についての計算書	
V-3-3-1	原子炉圧力容器の強度計算書	Ver. 0
（ V -3-3-1に 含める）	胴板の強度計算書 主フランジ、上部鏡板及びスタッドボルトの強度計算書 下部鏡板の強度計算書 制御棒駆動機構ハウジング貫通部の強度計算書 中性子計測ハウジング貫通部の強度計算書 再循環水出口ノズル（N1）の強度計算書 再循環水入口ノズル（N2）の強度計算書 主蒸気ノズル（N3）の強度計算書 給水ノズル（N4）の強度計算書 炉心スプレイノズル（N5）の強度計算書 上鏡スプレイノズル（N6）の強度計算書 ベントノズル（N7）の強度計算書 ジェットポンプ計測管貫通部ノズル（N8）の強度計算書 差圧検出・ほう酸水注入管ノズル（N10）の強度計算書 計装ノズル（N11, N12, N16）の強度計算書 ドレンノズル（N15）の強度計算書 低圧注水ノズル（N17）の強度計算書	

## 2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	N O P S
使用目的	シェル理論及びはり理論による応力計算
開発機関	バブコック日立(株)
開発時期	1983年
使用したバージョン	Ver. 0
コードの概要	<p>N O P S (以下「本解析コード」という。)は、原子炉圧力容器に対する評価を目的として、円筒殻及び球殻の構造不連続による効果を含まない一次応力を、シェル理論又ははり理論に基づいて計算するプログラムである。</p> <p>荷重は、内圧、外圧及び外荷重を考慮できる。</p> <p>原子炉圧力容器の円筒殻、球殻及びノズル等に内圧及び外圧によって生じる一次一般膜応力並びに外荷重によって生じる一次一般膜応力及び一次膜＋一次曲げ応力の計算を行う。</p> <p>原子力の分野における使用実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>代表的な検証用モデルに対し、本解析コードで計算される解析解が理論解と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、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本解析コードのマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する応力計算に、本解析コードが適用できることを確認している。</li> <li>本解析コードは、これまで多くの既工事計画で使用実績を有しており、妥当性は十分確認されている。</li> </ul>

