

東海第二発電所	工事計画審査資料
資料番号	工認-759 改1
提出年月日	平成30年8月29日

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	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	8
3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (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）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有限要素を含む汎用解析コードである。</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る。</li> <li>・ 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。 <ul 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> </ul> </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</li> </ul>

	の妥当性確認の範囲内であること。
--	------------------

### 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」（以下「本解析コード」という。）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 解析理論

#### 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。

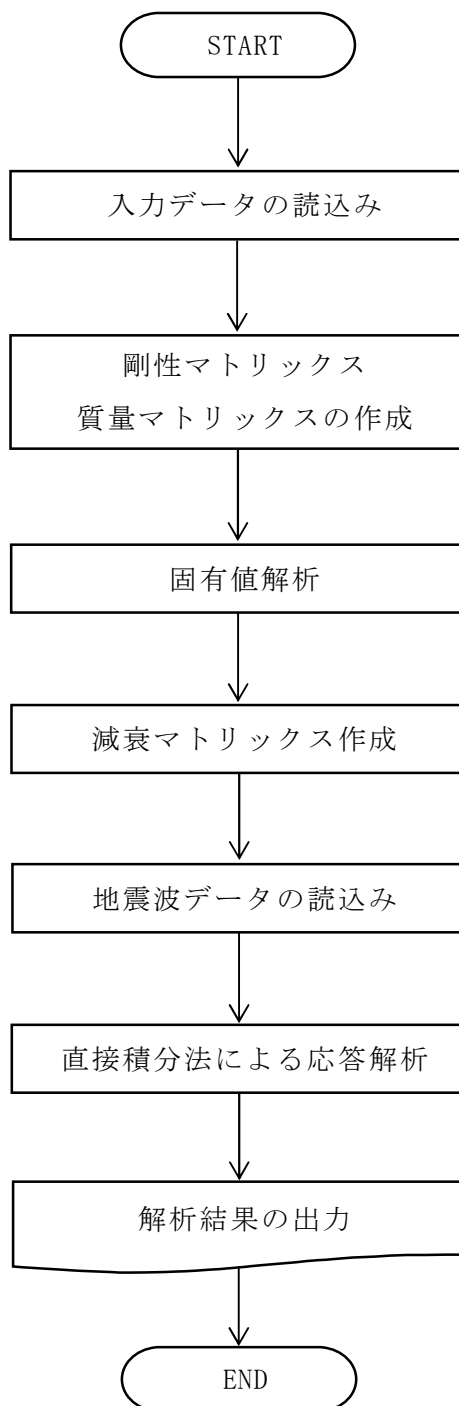


図1 解析フローチャート

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

本解析コードは、「3.3 解析理論」に示した一般性のある理論モデルに基づき構築された解析コードであり、「3.4 解析フローチャート」に示したプログラム構造を持っている。本解析コードは、主に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 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

#### 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)

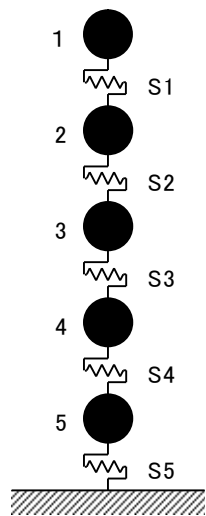
##### (a) 質点系モデルによる地震応答解析

##### 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

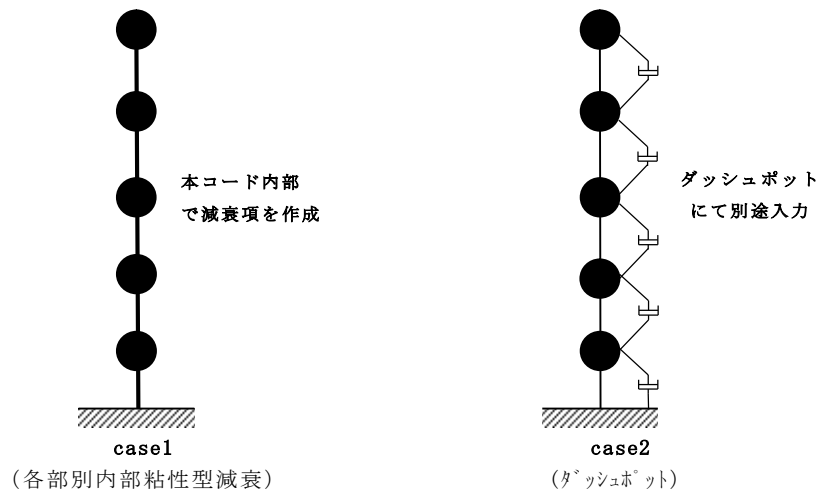


図3 解析ケース

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
6	341.7	341.7	0.0	0.0

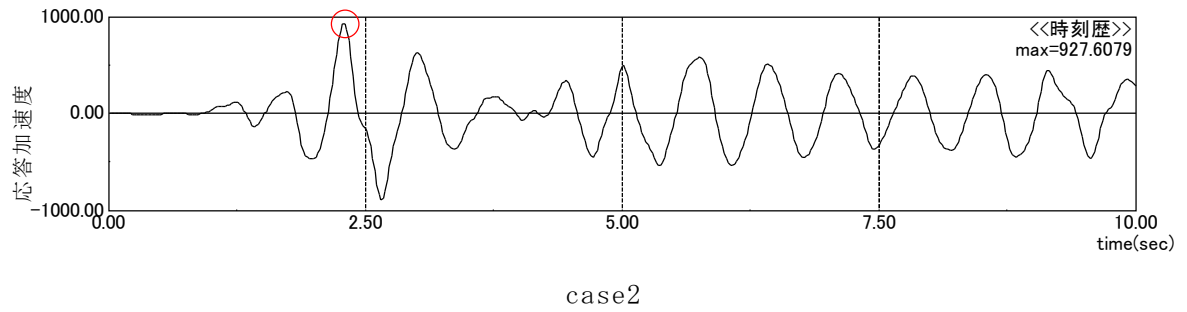
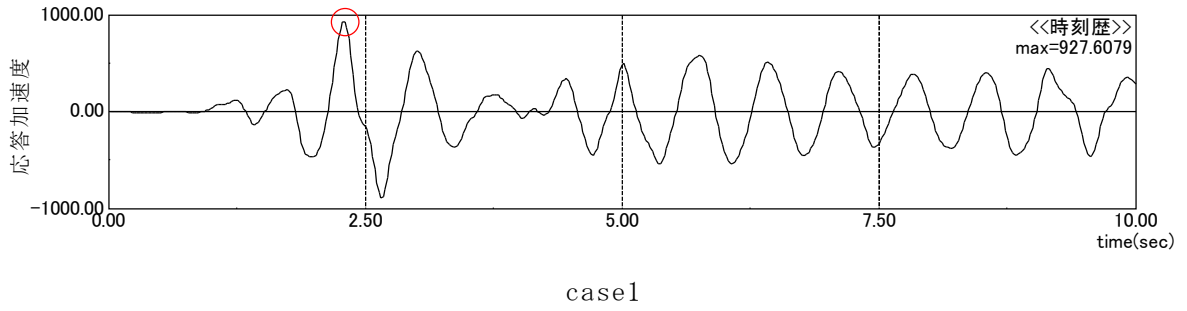


図4 絶対加速度時刻歴波形 (質点1)

(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おおむ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。

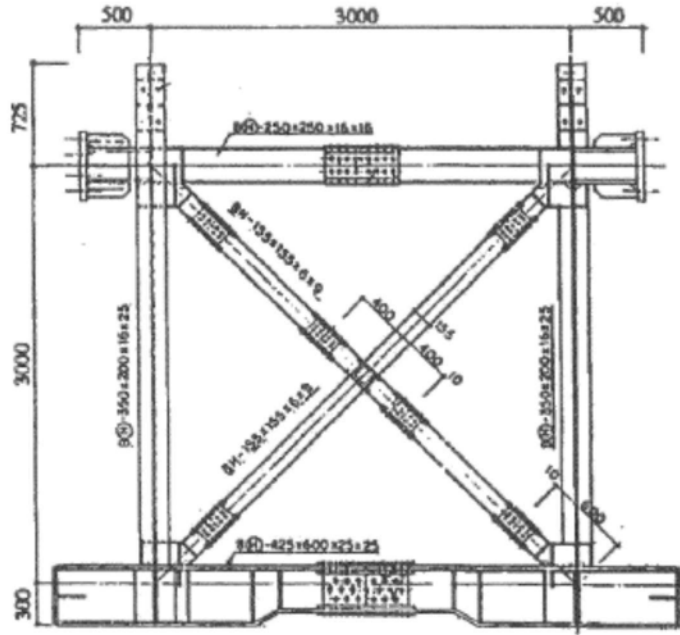


図5 試験体概要

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

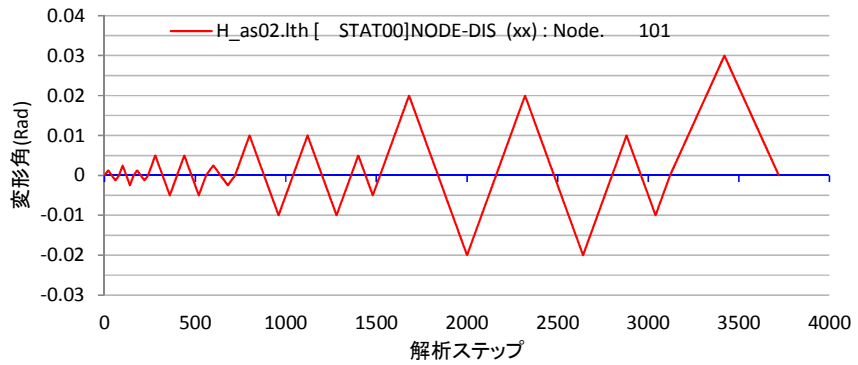


図6 加力サイクル

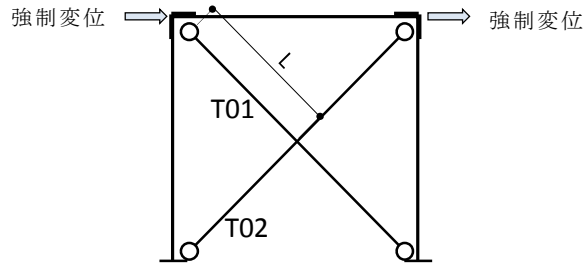


図7 解析モデル

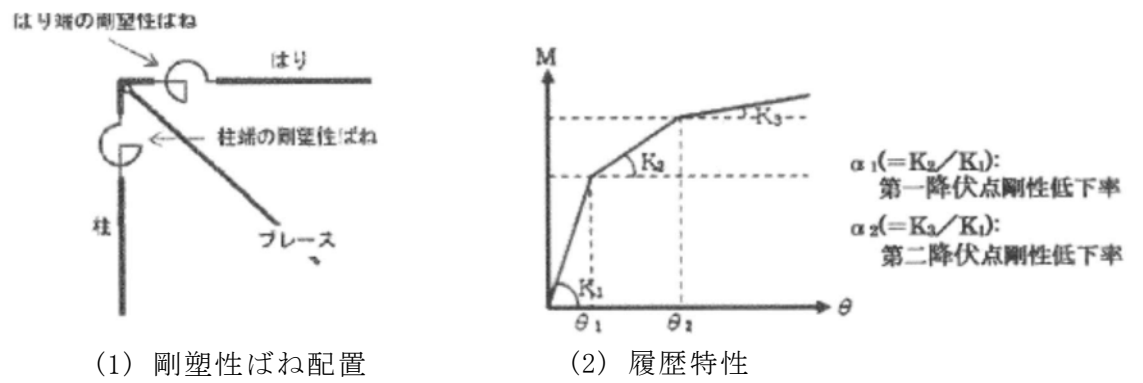


図8 材端剛塑性ばねモデル



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おおむね一致している。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おおむね一致している。

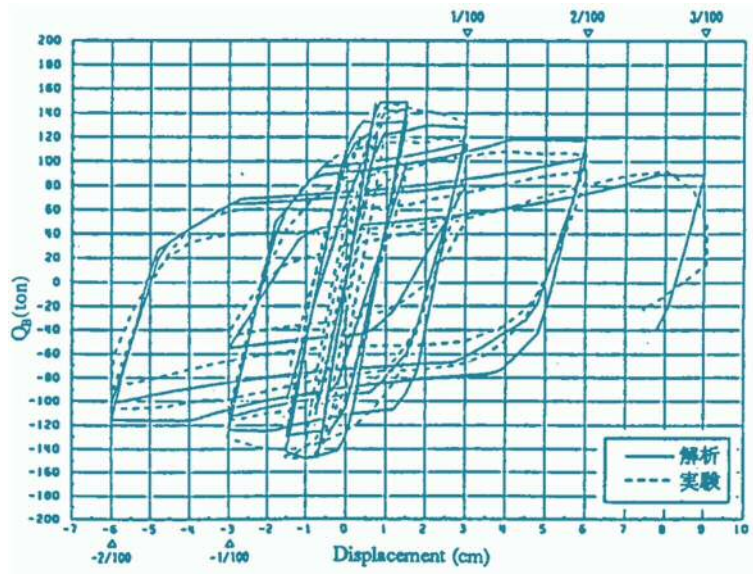


図9 論文1における載荷実験結果及びシミュレーション解析 (荷重-変形関係)

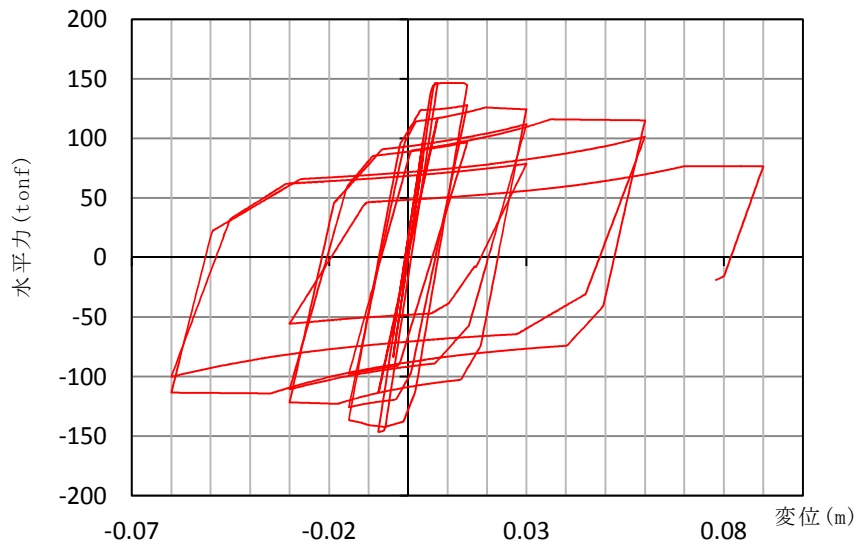


図10 本解析コードによるシミュレーション解析 (荷重-変形関係)

(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，おおむ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。