

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

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-749 改3
提出年月日	平成30年8月29日

V-5-2 計算機プログラム（解析コード）の概要・DYNA2E

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	DYNA2E Ver. 7.2.48	3
2.2	DYNA2E Version 8.0.4	5
3.	DYNA2E Version 8.0.4の解析手法について	7
3.1	一般事項	7
3.2	解析コードの特徴	7
3.3	解析手法	8
a.	系の剛性マトリクス	8
b.	非線形解析	11
c.	修正若林モデル	12
3.4	解析フローチャート	14
3.5	検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)	15
a.	文献との比較による検証	15
b.	他コードとの比較による検証	16
c.	理論解との比較による検証 (剛塑性回転ばね付きはり要素)	19
d.	使用内容に対する妥当性	21

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）DYNA2E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-2-2-10	緊急時対策所建屋の地震応答計算書	8.0.4
V-2-9-3-1	原子炉建屋原子炉棟の耐震性についての計算書	8.0.4
V-3-別添 2-1-7	建屋の強度計算書	8.0.4
V-2-3-2	炉心, 原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書	7.2.48

2 解析コードの概要

2.1 DYNA2E Ver. 7.2.48

項目 \ コード名	DYNA2E
使用目的	固有値解析, 応答解析
開発機関	伊藤忠テクノソリューションズ (株)
開発時期	1972年 (センチュリリサーチセンタ (株)) 2007年 (伊藤忠テクノソリューションズ (株))
使用したバージョン	Ver. 7.2.48
コードの概要	<p>DYNA2E (以下, 「本解析コード」という。) は, 土木・建築分野における骨組み*解析を対象として開発された, 市販されている汎用構造計算機プログラムである。</p> <p>本解析コードは, 土木・建築分野における2次元/3次元応答解析コードであり, 固有値解析並びに静的解析 (線形) 及び動的解析 (線形, 非線形) による応答解析が可能である。</p> <p>以下に示す構造に対し, 3種類の解析を行うことができる。</p> <p><構 造></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 2次元骨組み構造 2. 3次元骨組み構造 <p><解 析></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 固有値解析 2. 静的解析 (線形) 3. 動的解析 (線形, 非線形) <p>注記* : 本解析コードでは, 主に曲げせん断はり要素を適用する構造のことをいう。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・別解析コードMSC NASTRAN Ver. 2007r1による検証が実施されていることを確認した。 ・一本棒の曲げせん断型モデルについて, 本解析コード及びMSC NASTRANを用いて得られた結果を比較して検討し, 本解析コードによる解析結果が妥当であることを確認した。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり, 固有値解析及び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。 ・ 第2回工事計画認可申請書のIV-2-4 (原子炉本体の基礎の地震応答計算書) において, 動的解析に使用された実績がある。

	<ul style="list-style-type: none">・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, 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解析機能に影響のある変更がおこなわれていないことを確認している。・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する固有値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。
--	--

2.2 DYNA2E Version 8.0.4

項目	コード名 DYNA2E
使用目的	3次元有限要素法による応力解析，地震応答解析
開発機関	伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
開発時期	1972年（センチュリリサーチセンタ（株）） 2007年（伊藤忠テクノソリューションズ（株））
使用したバージョン	Version 8.0.4
コードの概要	DYNA2Eは，土木・建築分野における骨組解析を対象として開発された，市販されている汎用構造解析コードである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>DYNA2Eは，原子炉建屋の屋根トラスの弾塑性応力解析に使用している。屋根トラスの応力解析では，部材をはり要素などでモデル化し，部材の圧縮座屈による非線形挙動に対して修正若林モデルによる履歴特性を設定している。また，緊急時対策所建屋については地震応答解析に使用している。</p> <p>【検証(Verification)】 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"> ・谷口らの論文および若林らの論文に示される式から算定した履歴曲線と解析結果が一致することを確認している。 ・応答解析については，別の妥当性が確認されている解析コードによる解析結果と一致することを確認している。 ・本コードを用いた3次元有限要素法による応力解析結果と理論解の比較を行い，両者が一致することを確認している。 ・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。 <p>【妥当性確認(Validation)】 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"> ・検証の内容のとおり，非線形挙動及び応力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。 ・第2回工事計画認可申請書のIV-2-3（原子炉格納容器及び原子炉建屋の地震応答計算書）において，動的解析に使用された実績がある。 ・地震応答解析に対して，川内原子力発電所1号機第1回工事計画認可

	<p>申請書の3-16-1（原子炉格納施設の地震応答解析）において、動的解析に使用された実績があるTDAPⅢを用いた解析解と、本コードによる解析解を比較した結果、双方の解が一致していることを確認した。</p> <ul style="list-style-type: none">• 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。
--	---

3. DYN2E Version 8.0.4の解析手法について

3.1 一般事項

DYN2Eは、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社が開発したプログラムであり、市販の解析コードである。DYN2Eは、原子炉建屋の屋根トラスについての3次元有限要素法による弾塑性応力解析及び緊急時対策所建屋についての質点系地盤連成モデルによる応答解析に使用している。

3.2 解析コードの特徴

DYN2Eは、汎用構造計算機プログラムであり、ここでは、屋根トラスの応力解析及び緊急時対策所建屋の応答解析に関連する主な特徴を以下に示す。

- ・ばね要素やはり要素などでモデル化した、骨組系の固有値解析、静的解析及び動的解析を行う。
- ・質量は、集中質量もしくは分布質量として評価する。
- ・要素に非線形特性を設定し、非線形解析を行うことができる。
- ・ひずみエネルギー比例型もしくはレーリー減衰型の減衰を用いることができる。
- ・固有値解析は、ハウスホルダー法もしくはサブスペース法による。
- ・応答解析は、時間領域の直接積分法による。

3.3 解析手法

a. 系の剛性マトリクス

図3-1に示す均質等断面のはりについて、断面形の不変、断面の平面保持及び微小変形を仮定すると、要素座標系における材端の力と変位の関係を示す剛性マトリクス K_e は以下のよう表される。

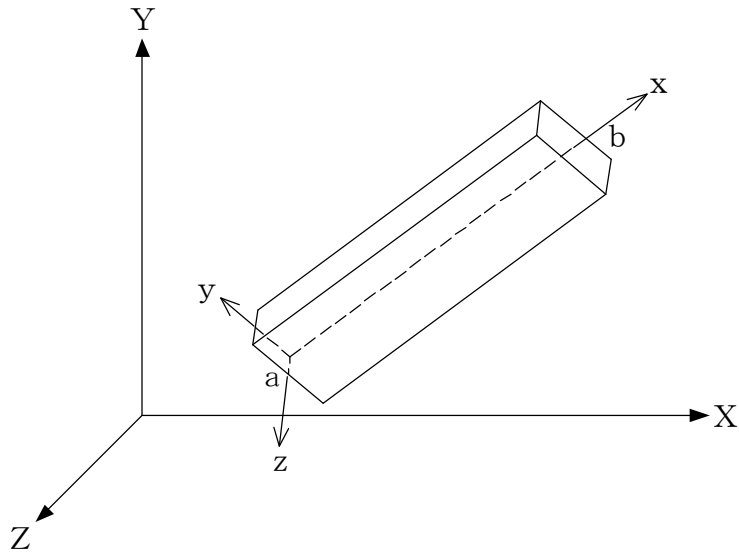


図3-1 はり要素と座標系

$$K_e = \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

ただし,

$$K_{aa} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & & & & & \\ & \frac{12EI_z}{L^3(1+\phi_y)} & & & & \\ 0 & & \frac{12EI_y}{L^3(1+\phi_z)} & & & \\ & 0 & & \frac{GJ}{L} & & \\ 0 & 0 & 0 & & \frac{(4+\phi_z)EI_y}{L(1+\phi_z)} & \\ & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2(1+\phi_z)} & 0 & & \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\phi_y)EI_z}{L(1+\phi_y)} \end{bmatrix} \quad \text{Sym.}$$

$$K_{ba} = \begin{bmatrix} -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{L^3(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2(1+\phi_y)} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3(1+\phi_z)} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2(1+\phi_z)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2(1+\phi_z)} & 0 & \frac{(2-\phi_z)EI_y}{L(1+\phi_z)} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{(2-\phi_y)EI_z}{L(1+\phi_y)} \end{bmatrix}$$

$$K_{bb} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & & & & & \\ & \frac{12EI_z}{L^3(1+\phi_y)} & & & & \\ 0 & & \frac{12EI_y}{L^3(1+\phi_z)} & & & \\ & 0 & & \frac{GJ}{L} & & \\ 0 & 0 & 0 & & \frac{(4+\phi_z)EI_y}{L(1+\phi_z)} & \\ & 0 & \frac{6EI_y}{L^2(1+\phi_z)} & 0 & & \\ 0 & -\frac{6EI_z}{L^2(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\phi_y)EI_z}{L(1+\phi_y)} \end{bmatrix} \quad \text{Sym.}$$

$K_{ab} = K_{ba}^T$ (Tはマトリクスの転置を表す)

$$\phi_z = \frac{12EI_z}{GA_S L^2}, \quad \phi_y = \frac{12EI_y}{GA_S L^2}$$

ここで,

- E : ヤング係数
- G : せん断弾性係数
- L : 材長
- A : 断面積
- A_{s_y} : 要素y軸方向のせん断断面積
- A_{s_z} : 要素z軸方向のせん断断面積
- I_z : 要素z軸まわりの断面2次モーメント
- I_y : 要素y軸まわりの断面2次モーメント
- J : 断面ねじりモーメント

要素座標系で表される剛性マトリクスを全体座標系に変換する。図3-2に示す要素座標系と全体座標系の関係は以下のように表される。

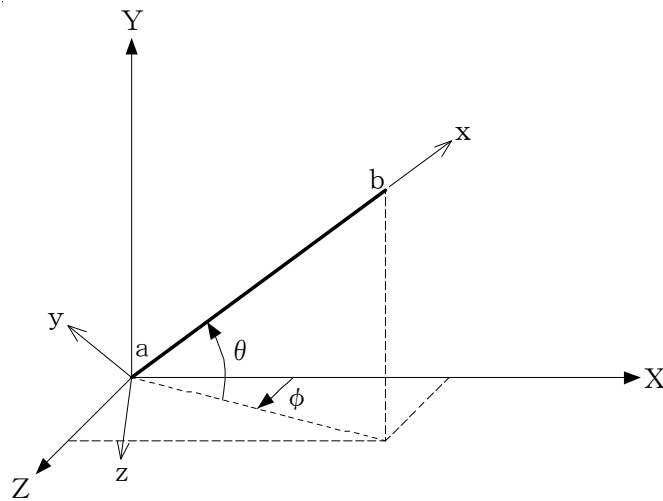


図3-2 全体座標系と要素座標系

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = t \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} \tag{3-2}$$

ただし,

$$t = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix}$$

全体座標系における材端の力と変位の関係を示す剛性マトリクス K は、要素座標系での剛性マトリクス K_0 及び座標変換マトリクス T を用いて以下のように表される。

$$K = T^{-1} K_0 T \quad (3-3)$$

ただし、

$$T = \begin{bmatrix} t & & & \\ & t & & \\ & & t & \\ & & & t \end{bmatrix}$$

全部材の剛性マトリクスを重ね合わせることで、系全体の剛性マトリクスを求めることができる。

b. 非線形解析

増分形式の運動方程式は、変位増分 Δu 及び荷重増分 Δf を用いて以下のように表される。

$$[M] \{\Delta \ddot{u}\} + [C] \{\Delta \dot{u}\} + [K] \{\Delta u\} = \{\Delta f\} \quad (3-4)$$

ここで、

$[M]$: 質量マトリクス

$[C]$: 減衰マトリクス

$[K]$: 剛性マトリクス

非線形解析では、剛性マトリクスが荷重の増加に伴い変化するため、各ステップにおいて剛性マトリクスを更新し、応答を求めている。例として、図3-3に示すように、ステップ n の応答が線形範囲にあり、ステップ $(n+1)$ において応答が線形範囲を超過した場合には、変位増分 Δu はステップ n における剛性マトリクス K_0 及び荷重増分 Δf に基づき算出する。次ステップの応答は、変位 $u_{(n+1)}$ に基づく接線剛性マトリクス K_t 及び荷重と応力の不釣り合いである残差荷重 R を用いて、以下に示す運動方程式から求める。

$$[M] \{\Delta \ddot{u}\} + [C] \{\Delta \dot{u}\} + [K_t] \{\Delta u\} = \{f\} + \{R\} \quad (3-5)$$

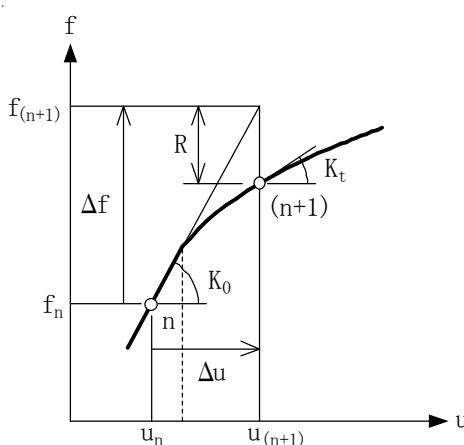


図3-3 非線形解析の概念

c. 修正若林モデル

屋根トラスの応答解析においては、部材の圧縮座屈による非線形挙動に対して、谷口らの論文(文献1)に示される修正若林モデルによる履歴特性を設定している。修正若林モデルは、若林らの論文(文献2)に示される履歴特性を基に、繰返し载荷による初期座屈以降の耐力低下を、圧縮側累積塑性ひずみの関数として以下の式で評価するモデルである。

$$n/n_0 = 1/(\bar{\zeta} - P_n)^{1/6} \leq 1 \quad (3-6)$$

ただし、

$$n = N/N_y$$

$$P_n = (n_e^2/4) - 5$$

$$n_e = \pi^2 E / (\lambda_e^2 \sigma_y)$$

ここで、

N : 軸力

N_y : 降伏軸力

n₀ : 無次元化初期座屈耐力(鋼構造設計基準)

$\bar{\zeta}$: 無次元化圧縮側累積塑性ひずみ

E : 鋼材のヤング係数

λ_e : 有効細長比

σ_y : 鋼材の降伏応力度

(3-6)式による座屈耐力低下曲線を図3-4に示す。また、若林モデルと修正若林モデルの履歴特性を図3-5に示す。

文献1 : 谷口元ほか : 鉄骨X型ブレース架構の復元力特性に関する研究, 日本建築学会構造工学論文集, B Vol. 37B, pp. 303-316, 1991

文献2 : 若林實ほか : 鉄骨筋違の履歴特性の定式化, 日本建築学会論文報告集, 第316号, pp. 18-24, 1982

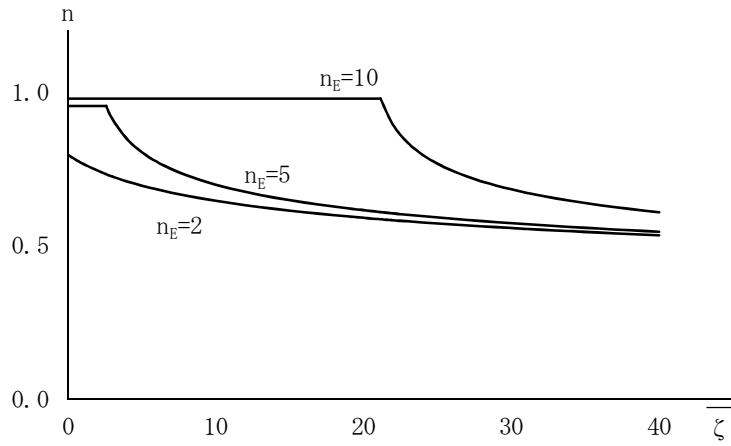
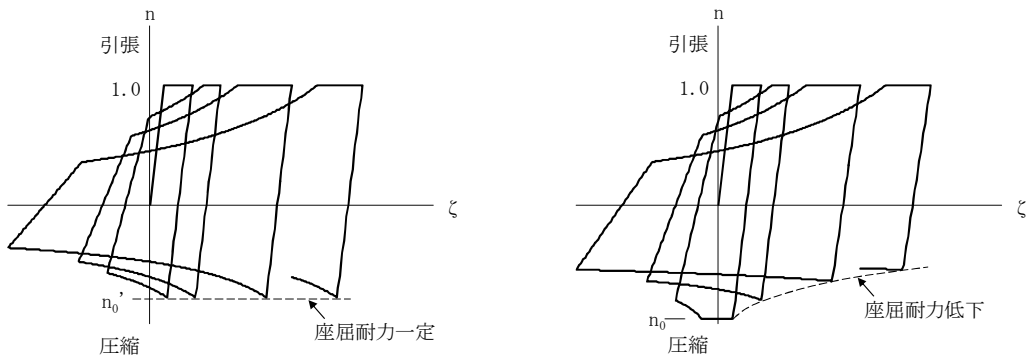


図3-4 修正若林モデルによる座屈耐力低下曲線



(a) 若林モデル

(b) 修正若林モデル

図3-5 若林モデルと修正若林モデルの履歴特性比較

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3-6に示す。

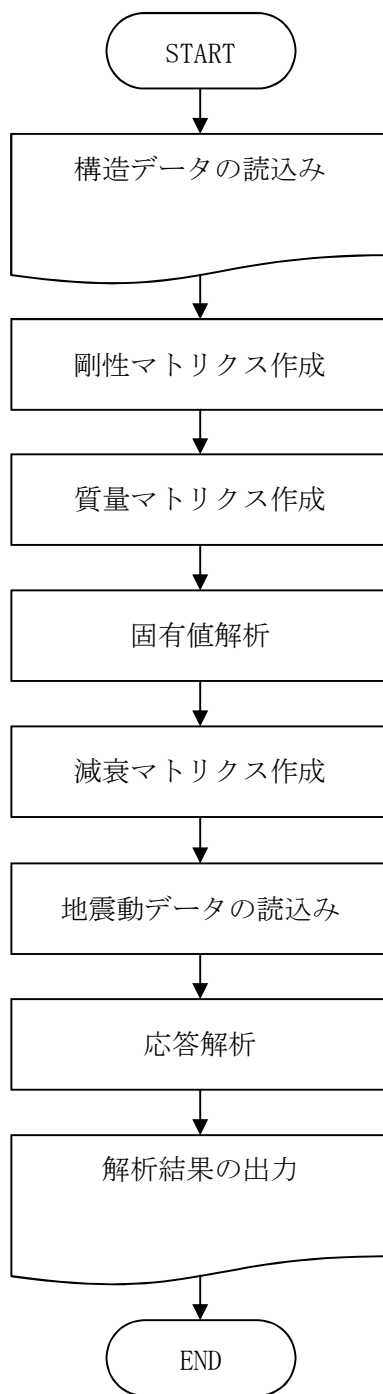


図3-6 解析フローチャート

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

a. 文献との比較による検証

以下に示す条件について履歴曲線を算定し、谷口らの論文および若林らの論文の式から算定した履歴曲線との比較を行う。

- ・オイラー荷重と降伏軸力の比 n_E は5.0とする。
- ・変形サイクルは引張降伏ひずみの比率に対して $\pm 3 \rightarrow \pm 5 \rightarrow \pm 10 \rightarrow +15 \rightarrow 0$ とする。

履歴曲線の比較結果を図3-7に示す。

図より、DYNA2Eの結果は鈴木らの谷口らの論文および若林らの論文による結果と一致していることが確認できる。

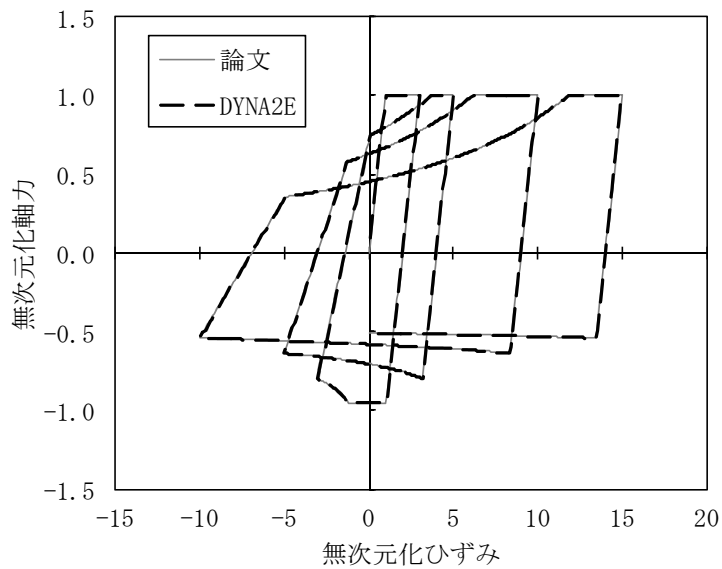


図3-7 解析結果の比較

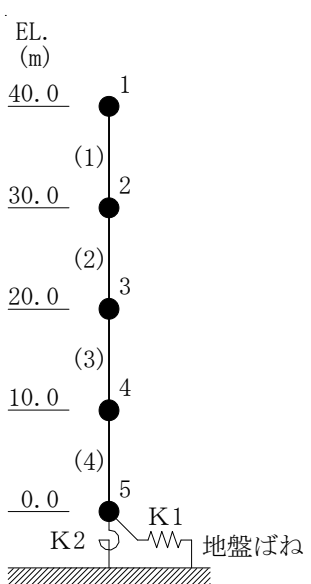
b. 他コードとの比較による検証

緊急時対策所建屋の地震応答解析に使用しているDYNA2Eは、例題に対して、市販されている汎用構造計算機プログラム「TDAPⅢ Ver. 3.09」（大成建設株式会社／株式会社アーキ情報システム）との比較を行う。なお、「TDAPⅢ ver. 3.05」は、川内原子力発電所第1号機の工事計画で実績があり、比較には異なるバージョンを使用するが、バージョンの差異により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。

解析モデルの諸元を表3-1～表3-4に、検討に用いる入力地震動をに、解析結果の比較を図3-9に示す。

図より、DYNA2Eの結果はTDAPⅢによる結果と良い一致を示していることが確認できる。

表3-1 解析モデル諸元



EL. (m)	重量 W (kN)	回転慣性重量 I _g (×10 ⁶ kN・m ²)	せん断断面積 A _s (m ²)	断面2次モーメント I (m ⁴)
40.0	150000	3.0		
30.0	200000	4.0	100	20000
20.0	250000	5.0	150	30000
10.0	300000	6.0	200	40000
0.0	400000	8.0	250	50000

()内は要素番号を示す。

表3-2 材料定数

ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)	減衰定数 h (%)
22100	9210	5

表3-3 (1/2) 復元力特性 ($\tau - \gamma$ 関係)

要素 番号	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
1	1.79	2.42	5.46	0.194	0.582	4.0
2	1.96	2.65	5.75	0.213	0.639	4.0
3	2.08	2.81	6.09	0.226	0.678	4.0
4	2.18	2.94	6.50	0.237	0.711	4.0

表3-3 (2/2) 復元力特性 (M- ϕ 関係)

要素 番号	M ₁ ($\times 10^6$ kN \cdot m)	M ₂ ($\times 10^6$ kN \cdot m)	M ₃ ($\times 10^6$ kN \cdot m)	ϕ_1 ($\times 10^{-6}$ 1/m)	ϕ_2 ($\times 10^{-6}$ 1/m)	ϕ_3 ($\times 10^{-6}$ 1/m)
1	2.29	5.74	9.40	5.18	46.0	415
2	4.06	10.8	17.0	6.12	48.0	350
3	6.11	16.9	26.1	6.91	49.4	312
4	8.46	24.0	36.6	7.66	50.7	286

表3-4 地盤のばね定数と減衰係数

ばね 番号	質点 番号	地盤ばね 成分	ばね定数 K _c	減衰係数 C _c
K1	5	底面・並進	4.0×10^{70} kN/m	1.0×10^6 kN \cdot s/m
K2	5	底面・回転	3.0×10^{10} kN \cdot m/rad	3.0×10^8 kN \cdot m \cdot s/rad

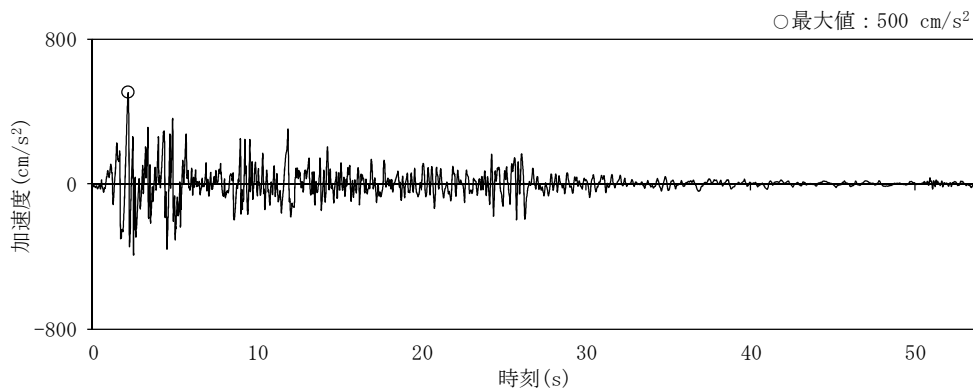
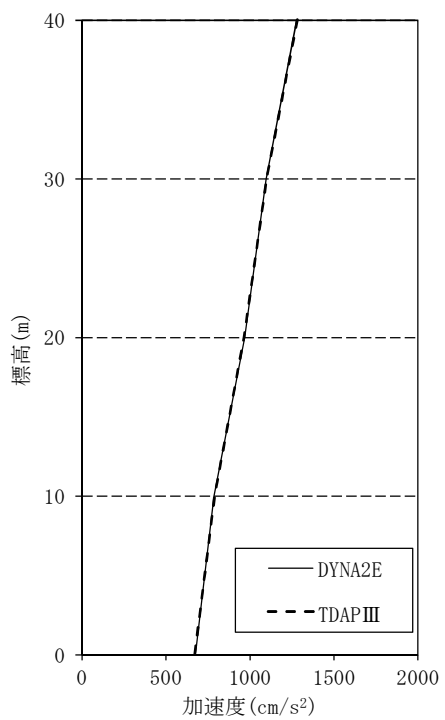
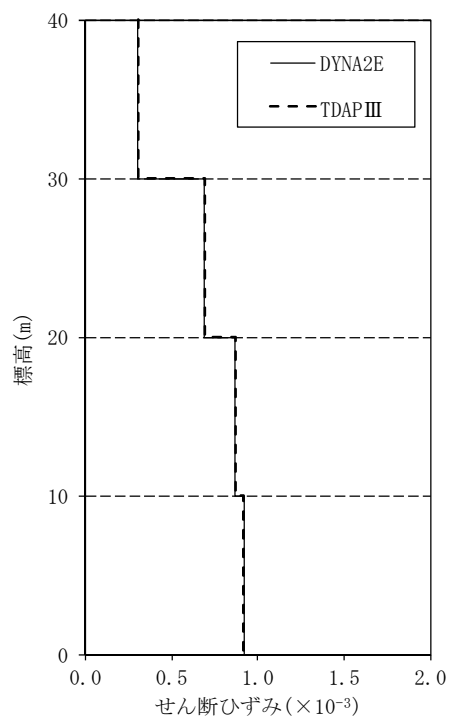


図3-8 入力地震動



(a) 加速度



(b) せん断ひずみ

図3-9 解析結果の比較 (最大応答分布)

c. 理論解との比較による検証（剛塑性回転ばね付きはり要素）

荷重増分解析に用いる剛塑性回転ばね付きはり要素の検証のため、集中荷重が材端に作用する片持ち梁の変位荷重関係について理論解との比較を行う。

図3-10に剛塑性回転ばね付きはり要素でモデル化した片持ち梁の3次元モデルを示す。固定端（B点）に塑性ヒンジを想定、片持ち梁の先端（A点）にはx軸、y軸、z軸方向の集中荷重を組み合わせ作用させ、A端における荷重変形関係について理論解との比較を行う。

剛塑性回転ばね付きはり要素では、要素端部における2軸曲げを考慮し、次式に示すM-Nインタラクション曲面を降伏判定に用いる。図3-11に降伏曲面を示す。なお、降伏後の塑性ヒンジの回転剛性は初期剛性の1/1000として設定する。

$$\frac{|M_y|}{M_{yp}} + \frac{|M_z|}{M_{zp}} + \frac{|N_x|}{N_{xp}} \leq 1$$

ここに、

M_y, M_{yp} : 材端モーメント及び降伏モーメント（y軸周り）

M_z, M_{zp} : 材端モーメント及び降伏モーメント（z軸周り）

N_x, N_{xp} : 軸力及び降伏軸力

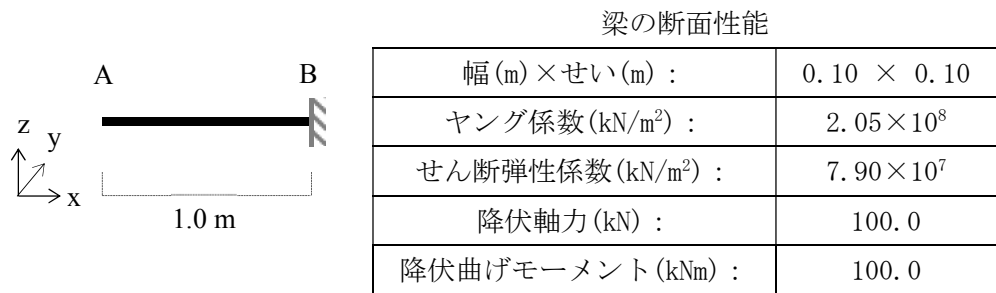


図3-10 片持ち梁の3次元モデル

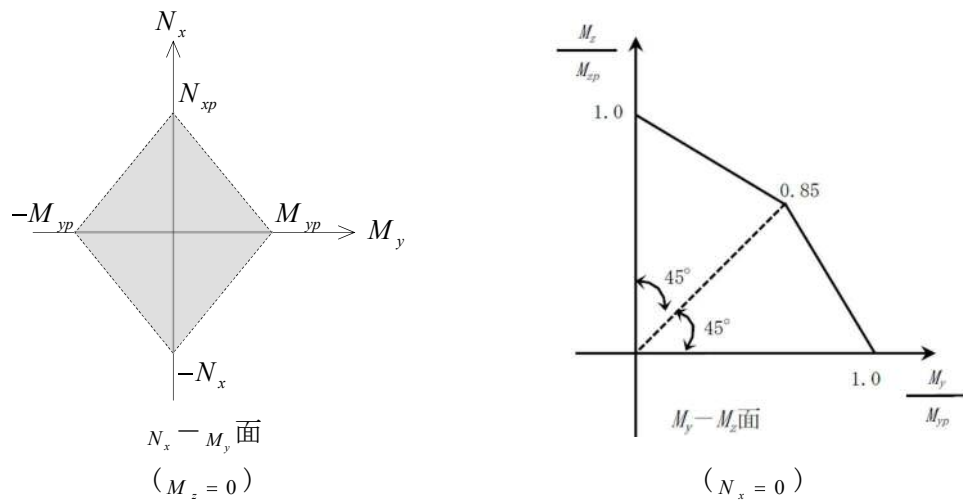


図3-11 降伏曲面

点に作用させる荷重の組み合わせを表3-5に示す。X, Y方向に弾性範囲内に収まる集中荷重を作用させた後, Z方向の集中荷重を作用させ, 荷重増分解析を行う。荷重ケースごとに, ステップ2において塑性ヒンジが形成される際の荷重(弾性限界荷重 $P_{z, limit}$)を理論解として算定すると, 表3-6の通りとなる。

表 3-5 荷重ケース

	ステップ 1		ステップ 2※
	X 方向集中荷重 P_x (kN)	Y 方向集中荷重 P_y (kN)	Z 方向集中荷重 P_z (kN)
CASE1	0	0	0~200
CASE2	50	0	0~200
CASE3	50	30.052	0~200

※Z方向変位30mmまで荷重増分解析を実施

表 3-6 荷重ステップ 2 における弾性限界荷重 $P_{z, limit}$ (理論解)

	ステップ 2
	弾性限界荷重 $P_{z, limit}$
CASE1	100
CASE2	50
CASE3	30.052

解析結果として, ステップ2におけるA端の荷重変形関係を図3-12に示す。それぞれの荷重ケースについて, 表3-6に示す弾性限界荷重 $P_{z, limit}$ において荷重が頭打ちとなっており, 理論解との対応が確認できる。

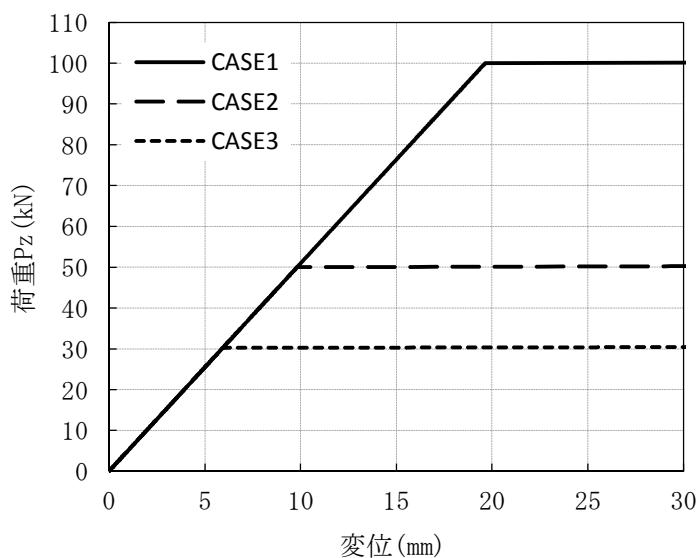


図3-12 荷重変位関係 (荷重ステップ2, A端)

d. 使用内容に対する妥当性

原子炉建屋の屋根トラス及び緊急時対策所建屋の応答解析にDYNA2Eを使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証されており、妥当である。

- ・検証の内容のとおり、非線形挙動及び応力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。