

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-015 改 13
提出年月日	2023 年 4 月 5 日

工事計画に係る補足説明資料

(発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書)

2023 年 4 月

中国電力株式会社

補足説明資料目次

今回提出範囲：



1. 防護すべき設備
 - 1.1 機能喪失高さ
 - 1.2 防護すべき設備のうち溢水評価対象外とする設備
2. 想定破損による溢水評価
 - 2.1 想定破損による溢水評価における溢水源
 - 2.2 高エネルギー及び低エネルギー配管の分類
 - 2.3 高エネルギー配管及び低エネルギー配管の応力評価
 - 2.4 想定破損における減肉の考慮
3. 消火水の放水による溢水評価
 - 3.1 消火水の放水による溢水評価の概要
4. 地震起因による溢水評価
 - 4.1 地震起因による溢水評価における溢水源
 - 4.2 溢水防護に関する施設等の耐震評価対象設備・部位の代表性及び網羅性
 - 4.3 燃料プール等のスロッシングによる溢水量の算出
 - 4.4 溢水源としないB, Cクラス機器の耐震評価の内容
 - 4.5 溢水源としないB, Cクラス土木構造物の耐震評価の内容
 - 4.6 溢水源としないB, Cクラス配管の耐震評価の考え方
5. 溢水評価（没水、被水及び蒸気影響評価）
 - 5.1 溢水伝播経路概念図
 - 5.2 溢水伝播経路モデル図
 - 5.3 想定破損による溢水に対する没水影響評価
 - 5.4 想定破損による溢水に対する被水影響評価
 - 5.5 想定破損による溢水に対する溢水評価結果（溢水防護対象設備）
 - 5.6 想定破損による溢水に対する溢水評価結果（重大事故等対処設備）
 - 5.7 消火水の放水による溢水に対する溢水評価結果（溢水防護対象設備）
 - 5.8 消火水の放水による溢水に対する溢水評価結果（重大事故等対処設備）
 - 5.9 地震起因による溢水に対する溢水評価結果（溢水防護対象設備）
 - 5.10 地震起因による溢水に対する溢水評価結果（重大事故等対処設備）
6. その他の溢水評価
 - 6.1 タービン建物からの溢水に対する評価
 - 6.2 屋外タンク等からの溢水評価
 - 6.3 地下水による溢水影響
 - 6.4 放射性物質を含む液体の管理区域外漏えい防止評価
7. 全般
 - 7.1 溢水防護区画毎における機能喪失高さ

- 7.2 ケーブルの被水影響評価
- 7.3 没水影響評価における水上高さ及び滞留面積
- 7.4 貫通部止水処置に関する健全性
- 7.5 地下水位低下設備
- 7.6 その他漏えい事象に対する確認
- 7.7 排水を期待する流下開口
- 7.8 鉄筋コンクリート壁の止水性
- 7.9 経年劣化事象と保全内容
- 7.10 エキスパンションジョイント止水板の性能
- 7.11 水密扉の開閉運用
- 7.12 循環水系隔離システムの内、復水器水室出入口弁への地震時復水器の影響

別紙（1）工認添付資料と設置許可まとめ資料との関係

別紙（2）添付VI-1-1-9 の各資料と工認補足説明資料との関係

6.2 屋外タンク等からの溢水評価

目次

- 6.2.1 はじめに
- 6.2.2 屋外タンク等からの地震起因による溢水評価
- 6.2.3 屋外タンク等からの土石流による溢水評価
- 6.2.4 掘削箇所への溢水の流入を考慮した溢水評価

- 別紙1 溢水源とする屋外タンク等の選定
- 別紙2 タービン建物への溢水量の算出
- 別紙3 地震による損傷形態を踏まえた屋外タンク等からの溢水評価への影響
- 別紙4 土石流による溢水評価における輪谷貯水槽の溢水源としての考え方
- 別紙5 放射性物質を内包する溢水の線量影響評価
- 別紙6 復水貯蔵タンク，補助復水貯蔵タンク及びトーラス水受入タンクの損傷形態
- 別紙7 復水貯蔵タンク，補助復水貯蔵タンク及びトーラス水受入タンク遮蔽壁の損傷形態
- 別紙8 復水貯蔵タンク，補助復水貯蔵タンク及びトーラス水受入タンク並びに遮蔽壁からの漏えいへの対応
- 別紙9 計算機プログラム（解析コード）の概要・AXIS

復水貯蔵タンク，補助復水貯蔵タンク及び
トーラス水受入タンクの損傷形態

目 次

1. 概要	1
2. 一般事項	1
2.1 構造計画	1
2.2 評価方針	3
2.3 記号の説明	4
3. 評価部位	5
4. 地震応答解析及び損傷形態の評価	5
4.1 地震応答解析及び損傷形態の評価方法	5
4.2 荷重の組合せ及び許容応力	6
4.2.1 荷重の組合せ	6
4.2.2 使用材料の許容応力等評価条件	6
4.2.3 積雪荷重	6
4.3 解析モデル及び諸元	7
4.4 固有値解析	8
4.5 設計用地震力	10
4.6 損傷形態の評価方法	11
4.6.1 タンクの応答挙動の確認	11
4.6.2 胴の評価	11
4.6.3 基礎ボルトの評価	12
5. 損傷形態の評価結果	13
5.1 タンクの応答挙動の確認結果	13
5.2 胴の評価結果	15
5.2.1 破断伸びに対する評価結果	15
5.2.2 疲労評価結果	23
5.3 基礎ボルトの評価結果	24
6. 評価結果まとめ	24
7. 参考文献	25

1. 概要

本資料は、復水貯蔵タンク、補助復水貯蔵タンク及びトーラス水受入タンクについて、基準地震動 S_s による地震力に対して、胴及び基礎ボルトの損傷形態を評価する。評価においては、タンクと内包水を連成させ、タンクの弾塑性特性を考慮する。

2. 一般事項

2.1 構造計画

復水貯蔵タンク、補助復水貯蔵タンク及びトーラス水受入タンクの構造計画を表 2-1 に示す。補助復水貯蔵タンク及びトーラス水受入タンクは構造が同じである。また、復水貯蔵タンクは補助復水貯蔵タンクに比べて質量は大きいものの、基礎ボルトの本数が多く、胴板の板厚も厚いことから耐震性が高い構造であるため、補助復水貯蔵タンクを代表として評価を行う。各タンクの仕様について表 2-2 に示す。

表 2-1(1) 構造計画 (復水貯蔵タンク)

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>復水貯蔵タンクは、胴下端のベースプレート为基础ボルトで基礎に据え付ける。</p>	<p>円筒形 (上面に屋根、下面にベースプレートを有するたて置円筒形容器であり、胴は上部にいくほど段階的に板厚が薄くなる構造である。)</p>	

表 2-1(2) 構造計画 (補助復水貯蔵タンク及びトーラス水受入タンク)

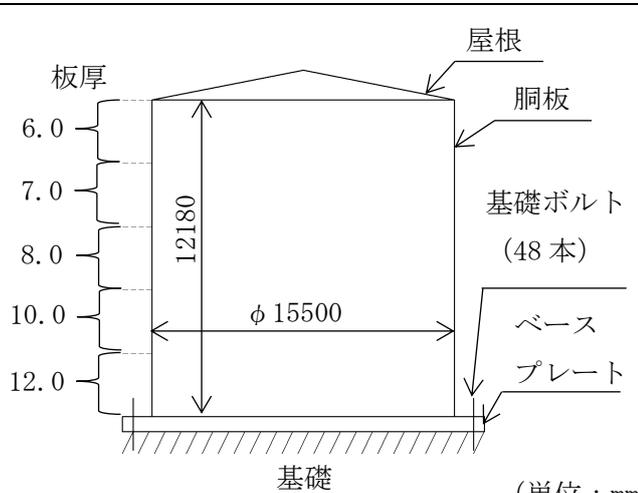
計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
補助復水貯蔵タンク及びトーラス水受入タンクは、胴下端のベースプレート为基础ボルトで基礎に据え付ける。	円筒形 (上面に屋根、 下面にベース プレートを有 するたて置円 筒形容器であ り、胴は上部に いくほど段階 的に板厚が薄 くなる構造で ある。)	

表 2-2 仕様の比較

	復水貯蔵タンク	補助復水貯蔵タンク及び トーラス水受入タンク
内径	15500mm	15500mm
高さ	12180mm	12180mm
板厚*	8~15mm	6~12mm
内包水量	1800m ³	1800m ³
タンク質量	107000kg*	87500kg
基礎ボルト径*	M48	M48
基礎ボルト本数	90本	48本

注記* : 上部構造の違いから、復水貯蔵タンクの方が質量は大きいですが、板厚が薄く、基礎ボルト本数の少ない補助復水貯蔵タンクの方が評価上厳しい構造である。

2.2 評価方針

補助復水貯蔵タンクについて、基準地震動 S_s によるタンクと内包水の連成及びタンクの弾塑性特性を考慮した地震応答解析を行い、得られた胴のひずみ及び基礎部反力を用いて損傷形態を評価する。

損傷形態の評価フローを図 2-1 に示す。

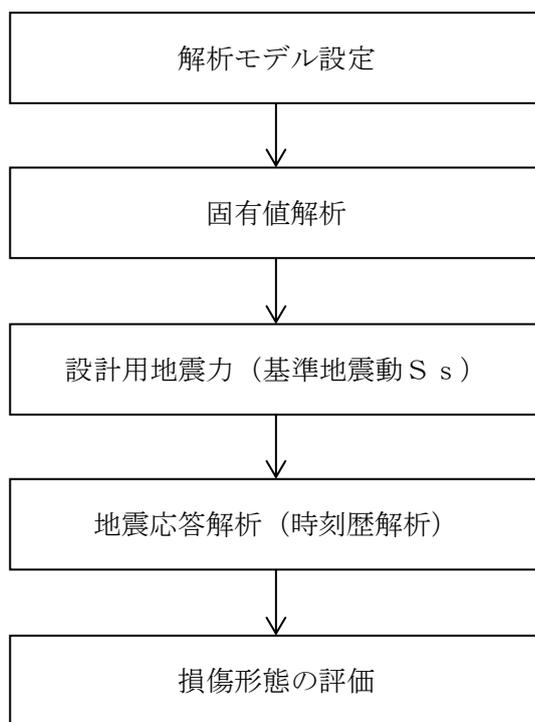


図 2-1 損傷形態の評価フロー

2.3 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A_b	基礎ボルトの軸断面積	mm^2
A_s	基礎ボルトの有効断面積 (F_f の算出に用いる)	mm^2
C_v	鉛直方向設計震度	—
d	基礎ボルトの呼び径	mm
E	タンクの縦弾性係数	MPa
E_o	設計・建設規格の設計疲労線図に規定される縦弾性係数	MPa
F^{*}	設計・建設規格 SSB-3133に定める値 (ただし、算出においては材料試験成績書に基づく降伏点 S_y' 及び引張強さ S_u' を用いる)	MPa
F_f	基礎ボルトの締付力	N
F_μ	タンク底面と基礎の間に作用する摩擦力	N
f'_{sb}	せん断力のみを受ける基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
f'_{to}	引張力のみを受ける基礎ボルトの許容引張応力	MPa
f'_{ts}	引張力とせん断力を同時に受ける基礎ボルトの許容引張応力 (許容組合せ応力)	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s^2
M_s	基礎部に作用する転倒モーメント	$\text{N} \cdot \text{mm}$
m_0	タンク全質量	kg
N_a	地震時の許容繰返し回数	回
$N_{c'}$	ひずみ時刻歴におけるピークのカウンタ数	回
n	基礎ボルトの本数	—
Q_s	基礎部に作用するせん断荷重	N
S_l'	補正繰返しピーク応力強さ	MPa
S_u'	基礎ボルトの応力評価に用いる降伏点 (材料試験成績書に基づく値)	MPa
S_y	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	MPa
S_y'	基礎ボルトの応力評価に用いる引張強さ (材料試験成績書に基づく値)	MPa
U_f	疲労累積係数	—
ε_{\max}	ひずみ時刻歴におけるひずみ (絶対値) の最大値	—
σ_b	基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
τ_b	基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
μ	摩擦係数 (0.5*)	—

注記* : 参考文献 (1)

3. 評価部位

補助復水貯蔵タンクの損傷形態の評価は、「4.1 地震応答解析及び損傷形態の評価方法」に示す条件に基づき、胴及び基礎ボルトについて実施する。評価部位については、表 2-1 の概略構造図に示す。

4. 地震応答解析及び損傷形態の評価

4.1 地震応答解析及び損傷形態の評価方法

- (1) 「4.3 解析モデル及び諸元」に示す解析モデルにより、タンク内包水による静水圧を作用させた条件下での固有周期を求める。
- (2) 「4.3 解析モデル及び諸元」に示す解析モデルにより、タンクと内包水の連成及びタンクの弾塑性特性を考慮した地震応答解析を行う。
- (3) 地震応答解析に用いる減衰定数は、添付書類VI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に基づき、水平方向及び鉛直方向ともに1.0%を用いる。なお、減衰定数はRayleigh減衰により、減衰定数1.0%となる固有周期を、地震応答において支配的なタンクのはり振動モードの1次固有周期0.119s(8.42Hz)と及び0.05s(20Hz)に設定する。
- (4) 胴の評価については、地震応答解析結果に基づく破断伸びに対する評価と、振動の繰り返しに伴う疲労評価を行う。
- (5) 基礎ボルトの評価については、地震応答解析で得られた基礎部の荷重を用いて、理論式により応力を算出する。
- (6) 地震力は、地震応答解析において水平方向及び鉛直方向から同時に入力する。
- (7) 評価に用いる寸法は、公称値を使用する。

4.2 荷重の組合せ及び許容応力

4.2.1 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 4-1 に示す。

4.2.2 使用材料の許容応力等評価条件

補助復水貯蔵タンクの使用材料の許容応力等評価条件を表 4-2 に示す。

4.2.3 積雪荷重

積雪量は、発電所敷地に最も近い気象官署である松江地方気象台で観測された観測史上 1 位の月最深積雪 100cm に平均的な積雪荷重を与えるための係数 0.35 を考慮し 35.0cm とする。積雪荷重については、松江市建築基準法施行細則により、積雪量 1 cm ごとに 20N/m^2 の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。

表 4-1 荷重の組合せ

機器名称	荷重の組合せ
補助復水貯蔵タンク	$D + P_D + M_D + S_s + P_s$

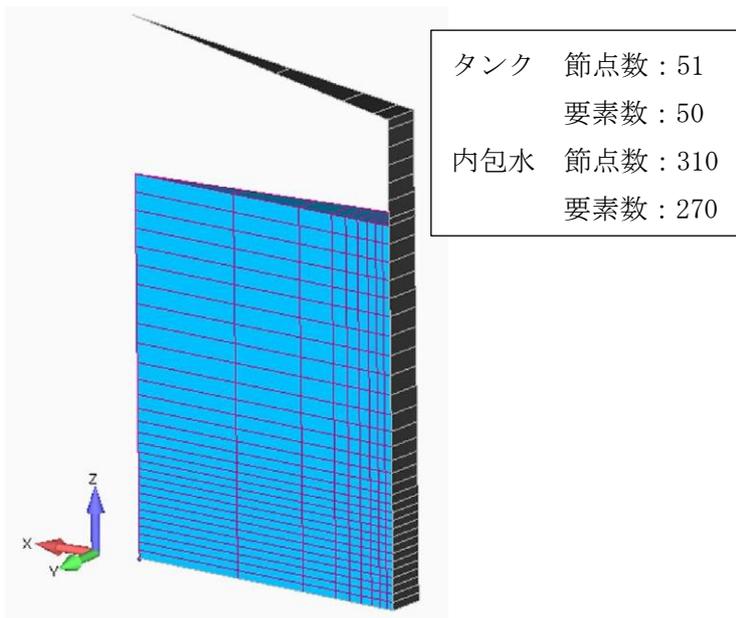
表 4-2 使用材料の許容応力等評価条件

機器名称	評価部材	材料	S_y' (MPa)	S_u' (MPa)	破断伸び (%)
補助復水貯蔵 タンク	胴	SM41A	—	—	17
	基礎ボルト	SCM435	843	970	—

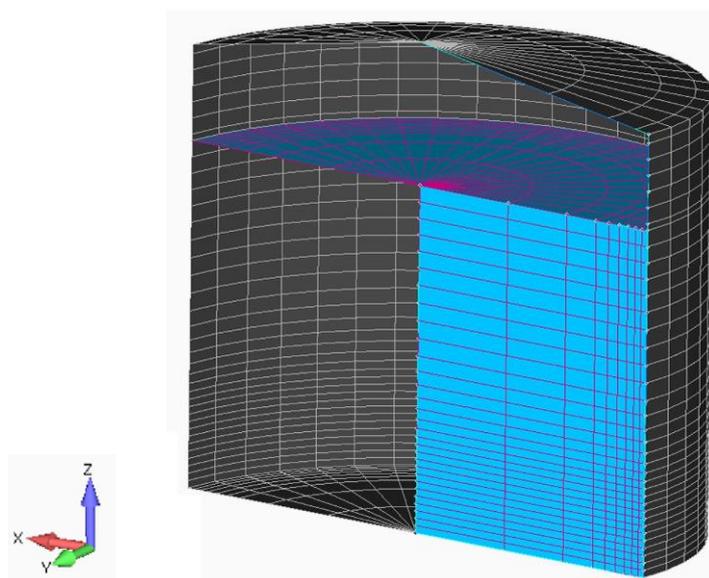
4.3 解析モデル及び諸元

補助復水貯蔵タンクの解析モデルを図4-1に、解析モデルの概要を以下に示す。また、解析に使用した物性値等を表4-3に示す。

- (1) タンク及び内包水を軸対称シェル要素で図4-1(a)のように1断面をモデル化し、周方向の軸対称断面についてはフーリエ級数により表現する。
- (2) 拘束条件は、基礎部を完全固定（6方向拘束）とする。
- (3) 解析コードは、「AXIS」を使用し、固有値、胴の変形状態（変位及びひずみ）及び基礎部の荷重を求める。なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙9「計算機プログラム（解析コード）の概要 AXIS」に示す。



(a) モデル化する断面



(b) 180°分の軸対称断面の表示

図4-1 解析モデル（補助復水貯蔵タンク）

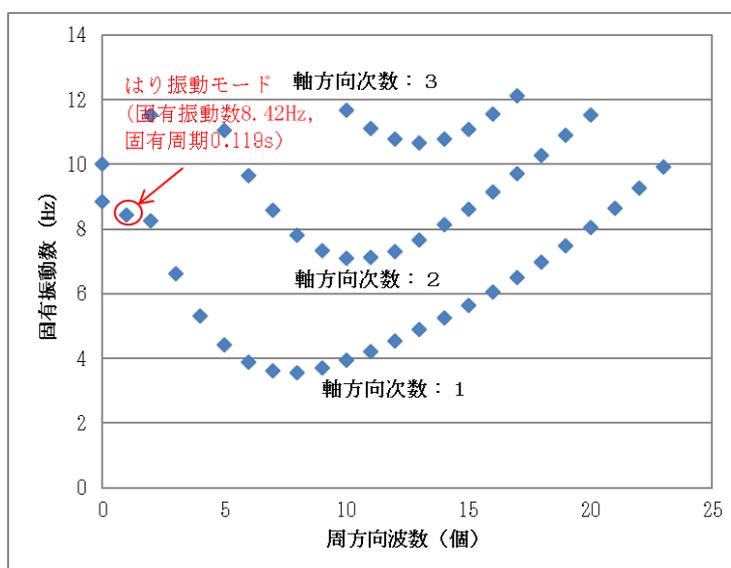
表 4-3 解析に使用した物性値等

部材	材料	密度 (kg/mm ³)	縦弾性係数 E (MPa)	降伏応力 S _y (MPa)	ポアソン比	硬化則	2次勾配 (MPa)
容器本体	SM41A	7.85×10 ⁻⁹	202×10 ³	245	0.3	等方硬化則	810
内包水*	—	1.0×10 ⁻⁹	—	—	—	—	—

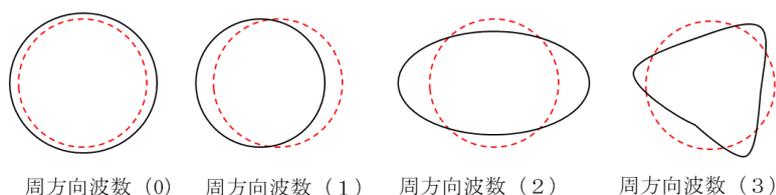
注記*：内包水は非圧縮性，非粘性，非回転流れの流体として付加質量法でモデル化する。

4.4 固有値解析

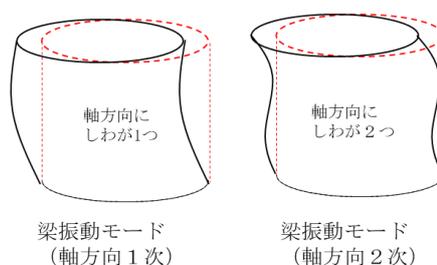
解析モデルでの固有値解析の結果を図 4-2 に，評価上影響の大きいはり振動モード（軸方向次数 1，周方向波数 1）について，振動モード図を図 4-3 に示す。



(a) 軸方向次数及び周方向波数に応じた固有振動数



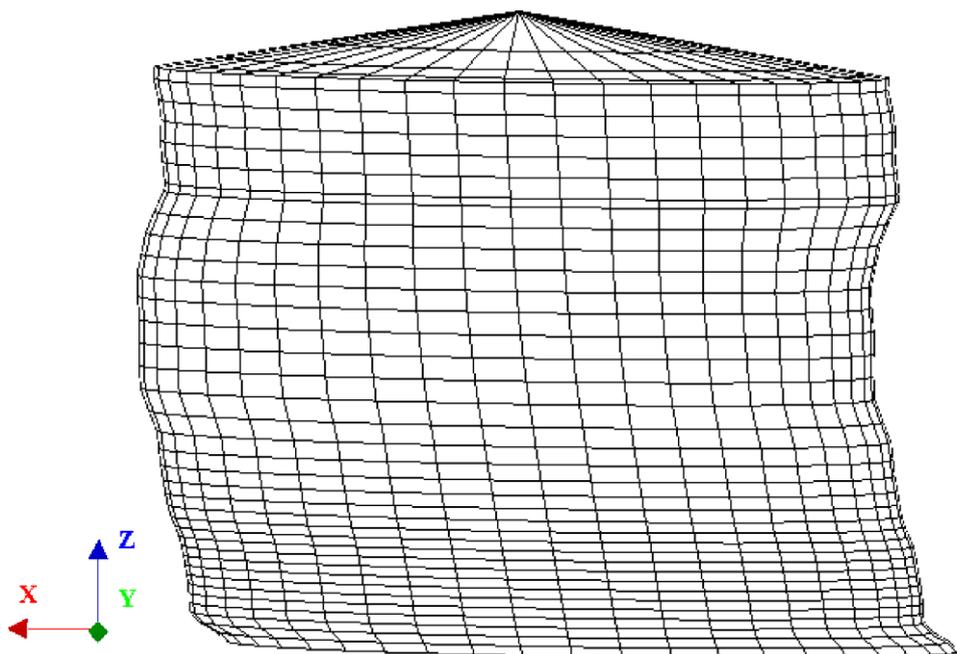
【タンク断面図による周方向波数の説明】



【タンク側面図による軸方向次数の説明】

(b) 軸方向次数及び周方向波数の説明

図 4-2 固有値解析結果

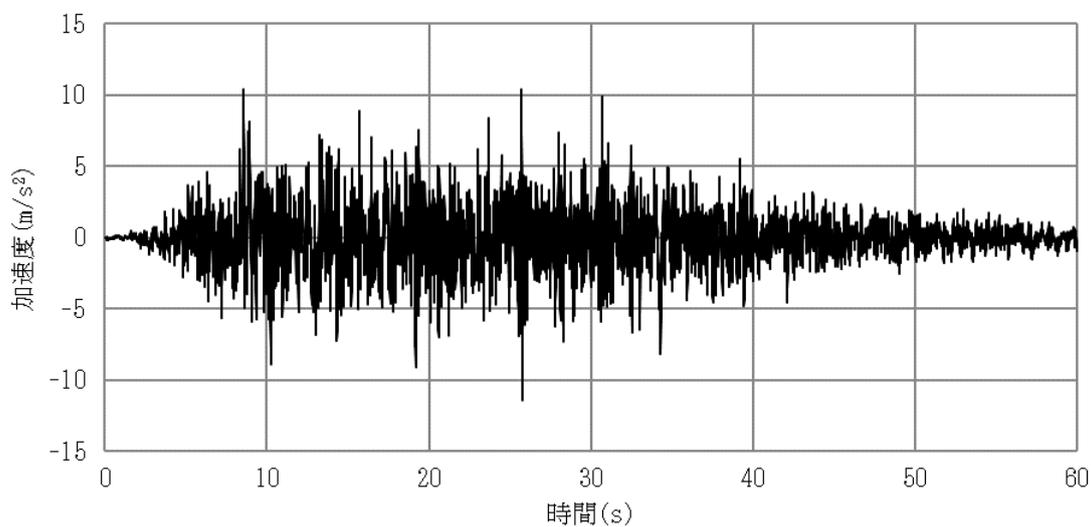


【固有振動数 8.42Hz】

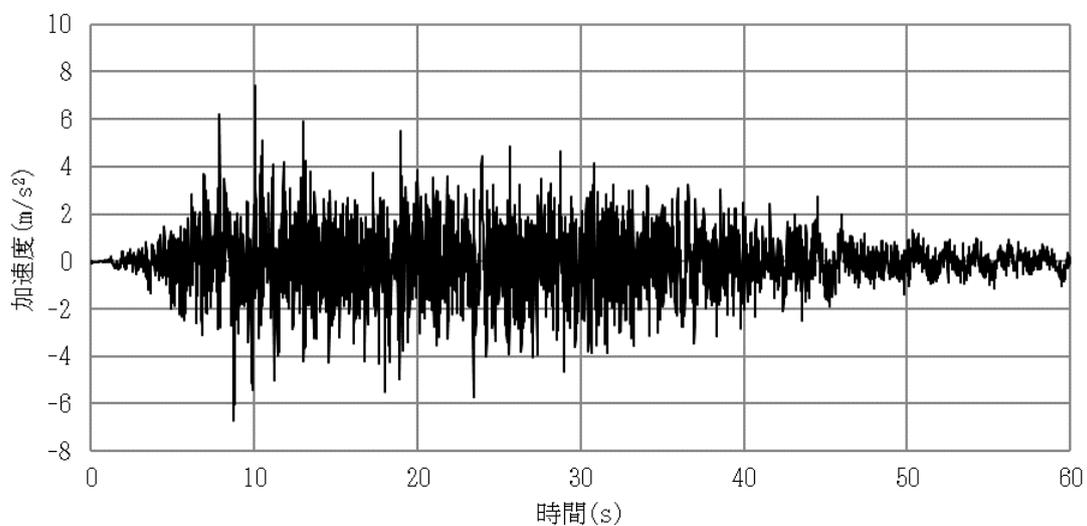
図 4-3 タンクはり振動モード図

4.5 設計用地震力

地震応答解析は、基準地震動 S s - D によるタンク基礎部の加速度時刻歴波を入力とし、水平方向と鉛直方向の同時入力により解析を実施する。地震応答解析に使用した加速度時刻歴波形を図 4-4 に示す。



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図 4-4 加速度時刻歴波形

4.6 損傷形態の評価方法

4.6.1 タンクの応答挙動の確認

時刻歴応答解析結果の変位及び反力の時刻歴を確認し、タンクの応答挙動を確認する。

4.6.2 胴の評価

4.6.2.1 破断伸びに対する評価

時刻歴応答解析の結果得られる変位及びひずみ分布により、胴に破断が生じないことを確認する。ひずみが大きくなる箇所について、当該箇所の相当ひずみの時刻歴におけるひずみ（絶対値）の最大値が破断伸びよりも十分に小さいことを確認する。また、合わせて疲労評価の評価点を選定する。

4.6.2.2 疲労評価

選定した評価点における相当ひずみの時刻歴をもとに、以下の手順により保守的かつ簡易的に疲労評価を行う。

【疲労評価の手順】

- (1) ひずみ時刻歴に対してレンジペア法によるサイクルカウントを行い、ピークのカウンタ数 $N_{c'}$ を求める。
- (2) ひずみ時刻歴におけるひずみ（絶対値）の最大値を求め、 ε_{\max} とする。
- (3) 保守的に ε_{\max} が $N_{c'}$ 回繰返されることを仮定し、繰返しピーク応力強さ $S_{\ell'}$ を以下の式により求める。

$$S_{\ell'} = \varepsilon_{\max} \cdot E_0 \quad \dots\dots\dots (4.6.2.2.1)$$

- (4) 設計・建設規格「表 添付 4-2-1 炭素鋼、低合金鋼および高張力鋼の設計疲労線図（図 添付 4-2-1）のデジタル値」により、許容繰返し回数 N_a を求める。
- (5) 疲労累積係数 U_f が次式を満足することを確認する。

$$U_f = N_{c'} / N_a \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (4.6.2.2.2)$$

4.6.3 基礎ボルトの評価

地震応答解析の結果得られた基礎部の荷重及びモーメントから、基礎ボルトに生じる引張応力及びせん断応力を求め、許容応力以下であることを確認する。

4.6.3.1 引張応力

地震応答解析の結果得られた基礎部に作用するモーメント M_s を用いて、VI-2-1-14「機器・配管系の計算書作成の方法 添付資料-5 平底たて置円筒形容器の耐震性についての計算書作成の基本方針」に記載の計算方法を準用して基礎ボルトに生じる引張応力 σ_b を計算する。

4.6.3.2 せん断応力

地震応答解析の結果得られた基礎部に作用するせん断荷重 Q_s 及びタンク底面に作用する摩擦力 F_μ から、基礎ボルトに生じるせん断応力を以下のとおり求める。

$$\tau_b = \frac{Q_s - F_\mu}{n \cdot A_b} \dots\dots\dots (4.6.3.2.1)$$

ここで、

$$A_b = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \dots\dots\dots (4.6.3.2.2)$$

$$F_\mu = \mu \cdot \{ F_f \cdot n + m_0 \cdot (1 - 0.4 \cdot C_v) \cdot g \} \dots\dots\dots (4.6.3.2.3)$$

F_f はボルト締付力であり、参考資料(2)に示されるボルト締付の目標値から次式のとおり設定する。また、摩擦係数 μ は参考資料(1)に基づいて0.5に設定する。

$$F_f = 0.6 \cdot S_y \cdot A_s \dots\dots\dots (4.6.3.2.4)$$

5. 損傷形態の評価結果

5.1 タンクの応答挙動の確認結果

タンク円筒頂部の水平方向及び鉛直方向の応答変位時刻歴を図5-1及び図5-2に示す。タンク基礎部に発生する水平方向反力時刻歴を図5-3に、鉛直方向反力時刻歴を図5-4に示す。また、タンク基礎部の水平反力とタンク円筒頂部の水平変位の履歴を図5-5に示す。

これらの結果から以下の応答挙動が把握できる。

- ・図5-1及び図5-3のとおり、水平方向変位及び水平方向荷重の最大値（絶対値の最大値）は、25.82s時点で生じている。
- ・図5-2において、鉛直方向変位時刻歴にドリフトが生じているが、図5-5のとおり、タンクは概ね弾性応答を示している。

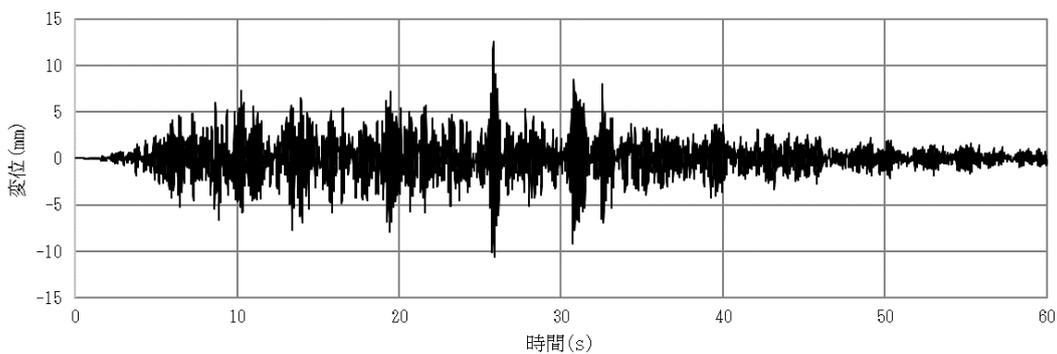


図5-1 補助復水貯蔵タンクの水平方向変位時刻歴

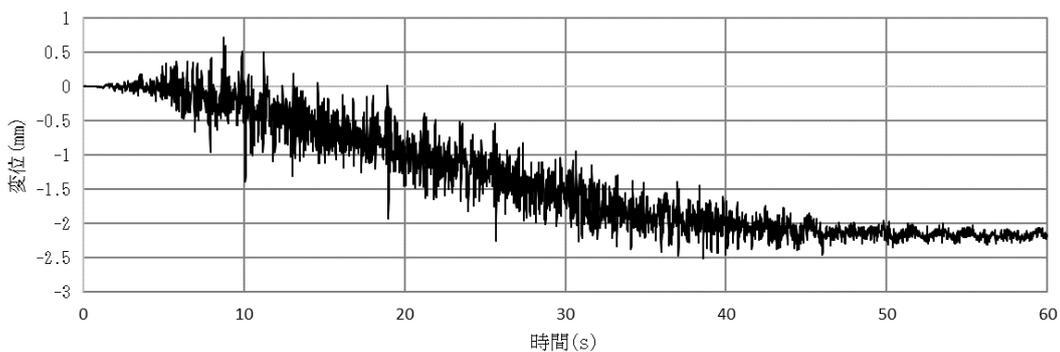


図5-2 補助復水貯蔵タンクの鉛直方向変位時刻歴

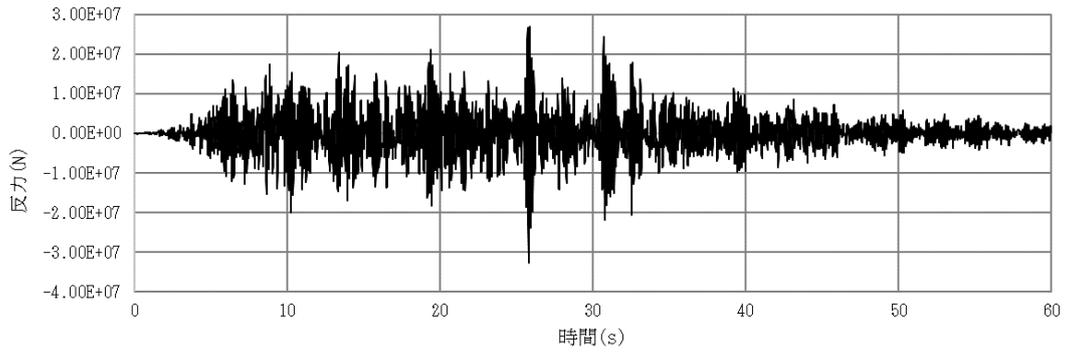


図 5-3 タンク基礎部の水平方向反力時刻歴

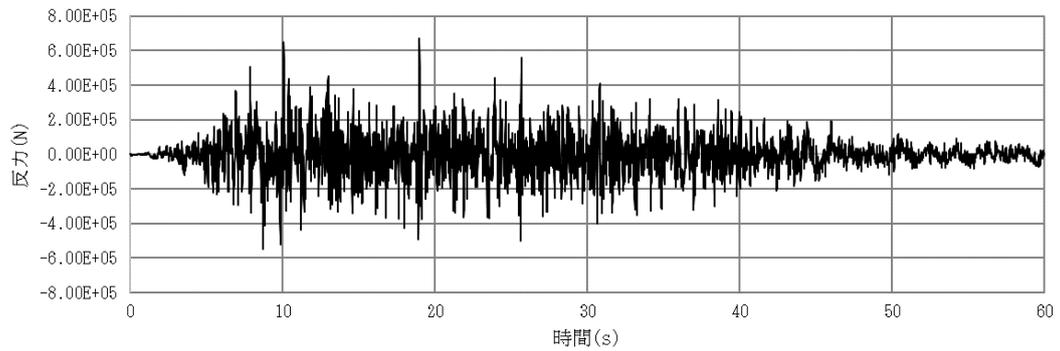


図 5-4 タンク基礎部の鉛直方向反力時刻歴

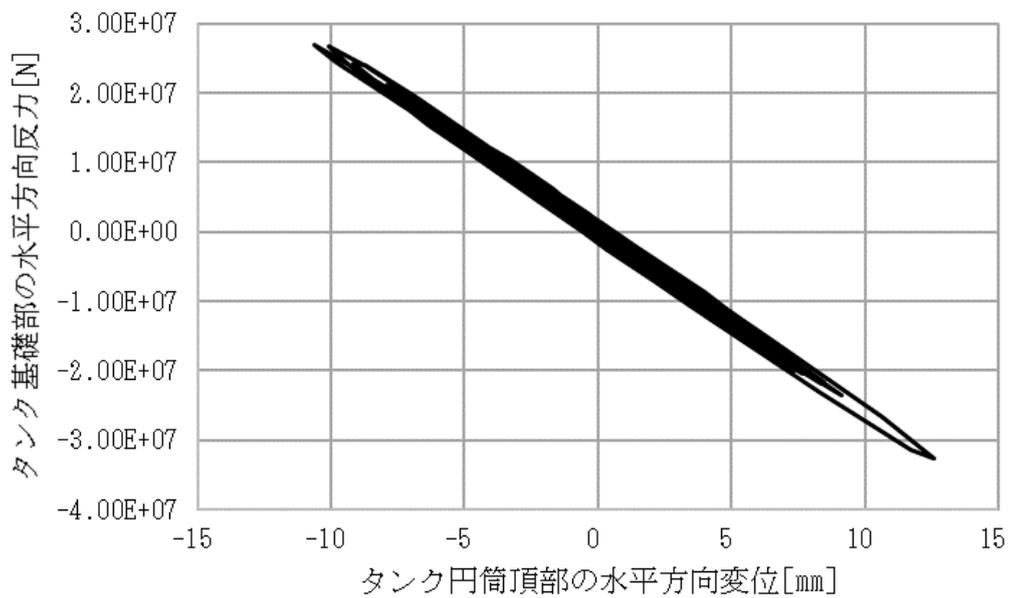


図 5-5 タンク基礎部の水平反力とタンク円筒頂部の水平変位の履歴

5.2 胴の評価結果

5.2.1 破断伸びに対する評価結果

最大水平反力発生時（同時に最大水平変位発生）及び解析終了時の変位分布及びひずみ分布を確認し、胴に破断が生じないことの確認を行う。また、合わせて疲労評価の評価点の選定を行う。

a. 最大水平反力発生時

最大水平反力発生時（同時に最大水平変位発生）の水平方向変位分布及びひずみ分布を図5-6～図5-11に示す。なお、水平方向のうち、加振方向をX方向、その直交方向をY方向とする。

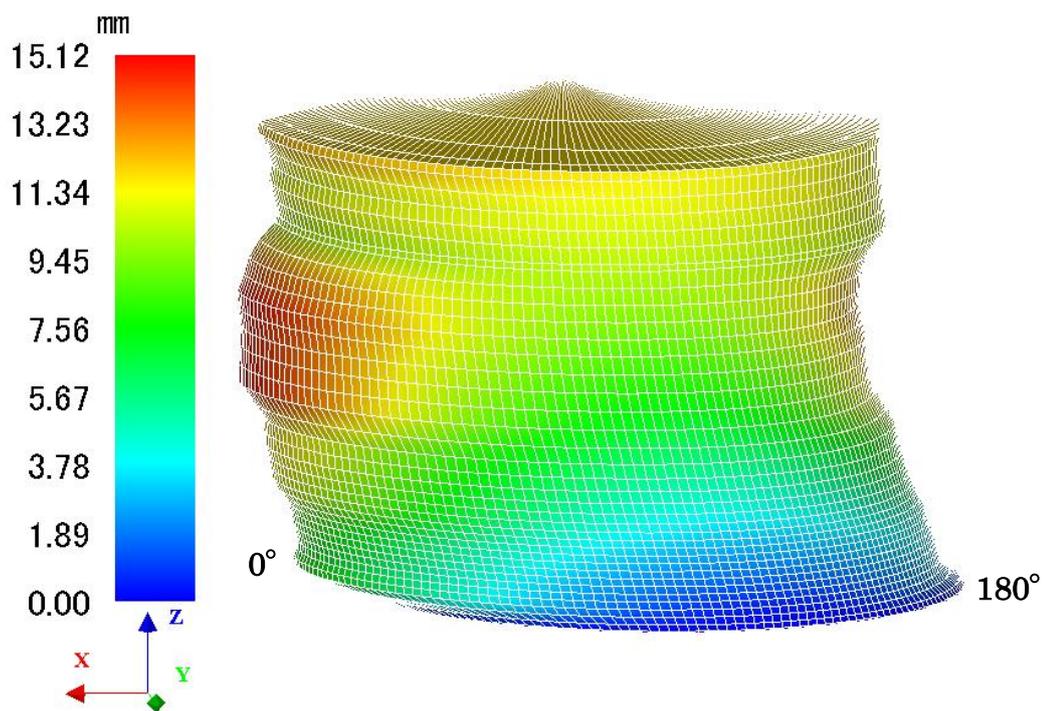
図5-6及び図5-7に示すとおり、タンクのはり振動による変形が生じている。図5-8及び図5-9に示すとおり、軸方向ひずみ（絶対値）の最大値はタンクの下部（180°断面、高さ506mm、内表面）で生じている。図6-10及び図6-11に示すとおり、周方向ひずみ（絶対値）の最大値はタンクの間位置（0°断面、高さ5589mm、外表面）で生じている。また、ひずみの大きさから周方向ひずみが支配的であることが分かる。

周方向ひずみが最大となる箇所（0°断面、高さ5589mm、外表面）の相当ひずみの時刻歴を図5-12に示す。時刻歴におけるひずみ（絶対値）の最大値 ε_{\max} について、破断伸びを下回ることを確認した結果を表5-1に示す。この箇所を最大水平反力発生時において選定した疲労評価の評価点とする。

b. 解析終了時

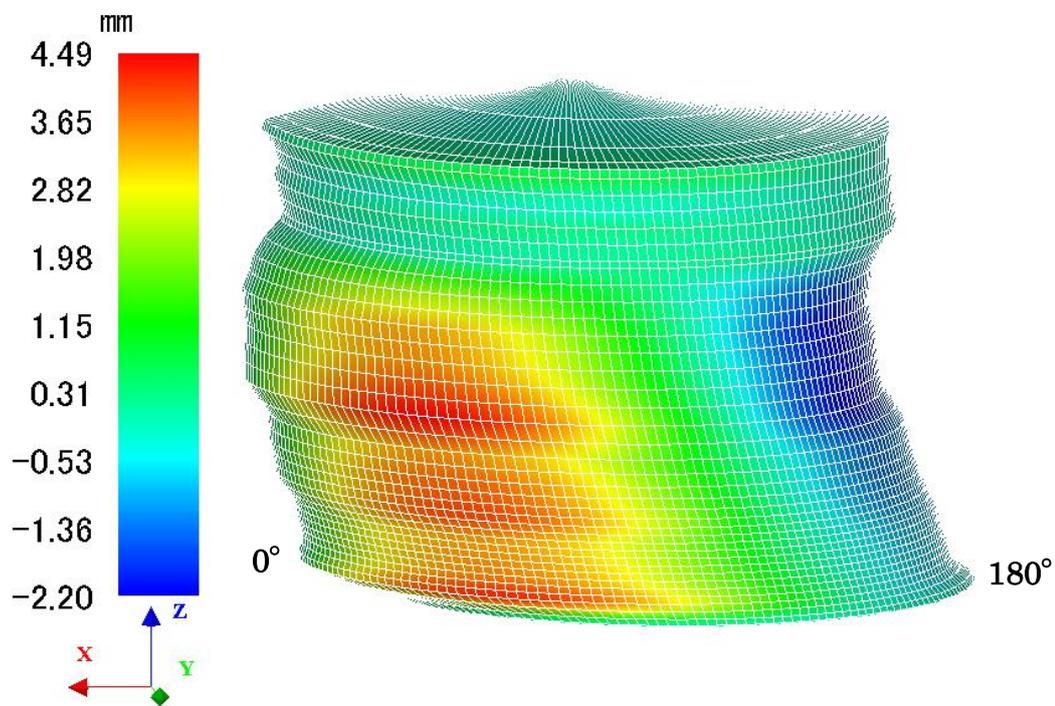
解析終了時の変位分布及びひずみ分布を図5-13～図5-18に示す。なお、水平方向のうち、加振方向をX方向、その直交方向をY方向とする。

図5-13及び図5-14に示すとおり、タンク下部に変形が生じている。図5-15～図5-18に示すとおり、a.と同様に周方向ひずみが支配的であり、最大残留ひずみはタンク下部（90°断面、高さ709mm、外表面）で生じている。最大残留ひずみ発生箇所（90°断面、高さ709mm、外表面）の相当ひずみの時刻歴を図5-19に示す。時刻歴におけるひずみ（絶対値）の最大値 ε_{\max} について、破断伸びを下回ることを確認した比較した結果を表5-2に示す。この箇所を解析終了時において選定した疲労評価の評価点とする。



disp_x(最大水平反力発生時間断面)

図 5-6 最大水平反力発生時水平X方向変位分布 (変形倍率 200 倍)



disp_y(最大水平反力発生時間断面)

図 5-7 最大水平反力発生時水平Y方向変位分布 (変形倍率 200 倍)

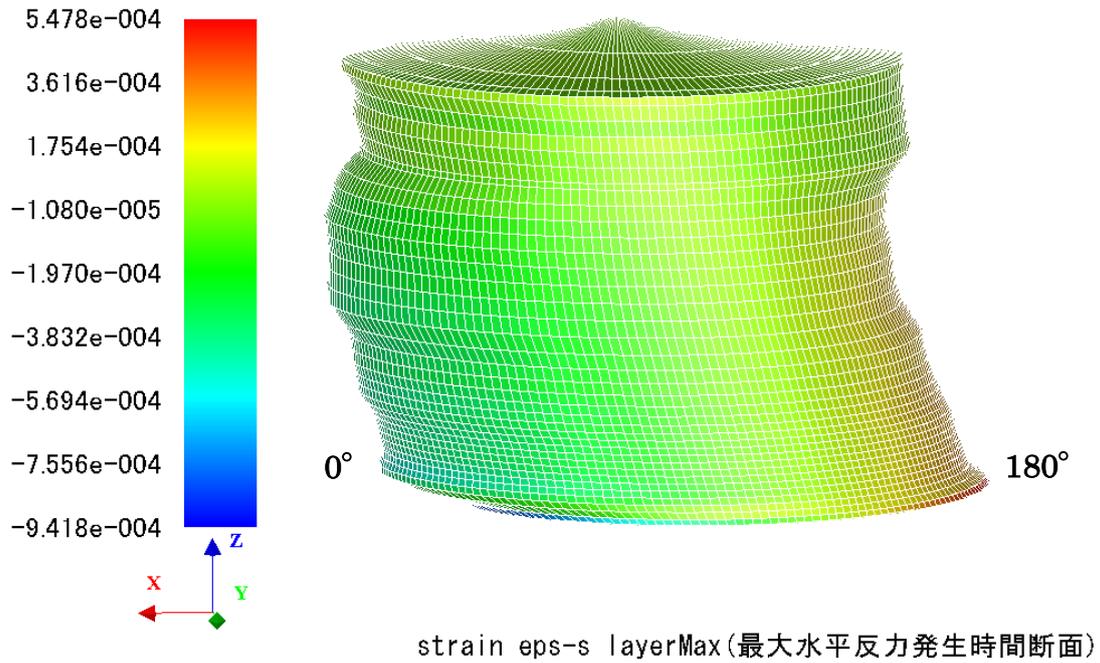


図 5-8 最大水平反力発生時外表面軸方向ひずみ (変形倍率 200 倍)

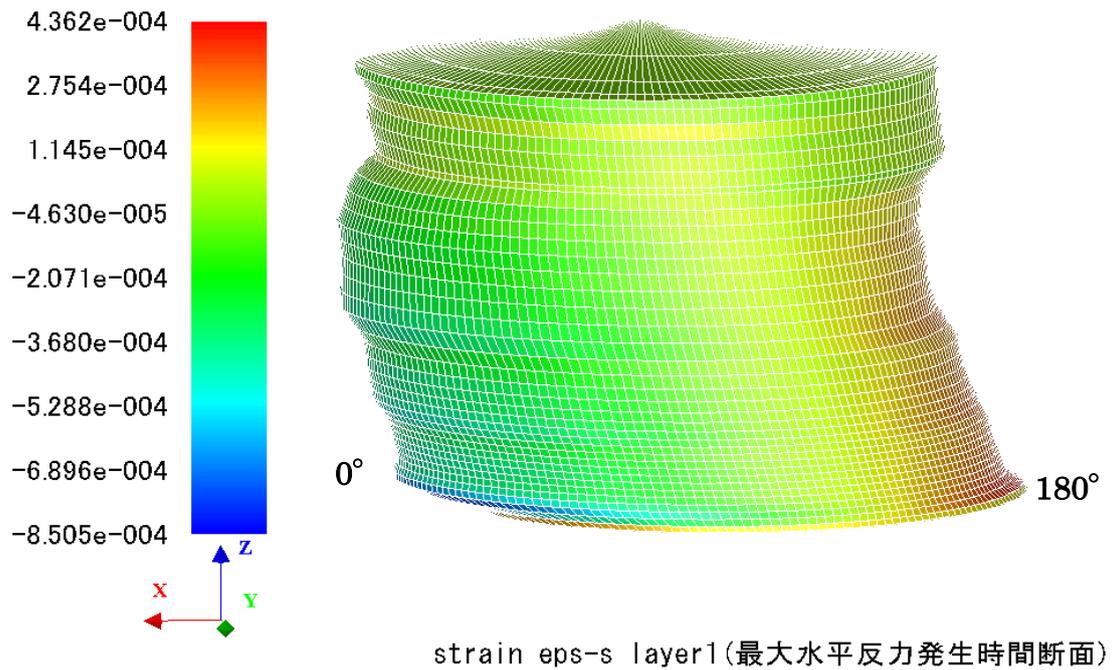


図 5-9 最大水平反力発生時内表面軸方向ひずみ (変形倍率 200 倍)

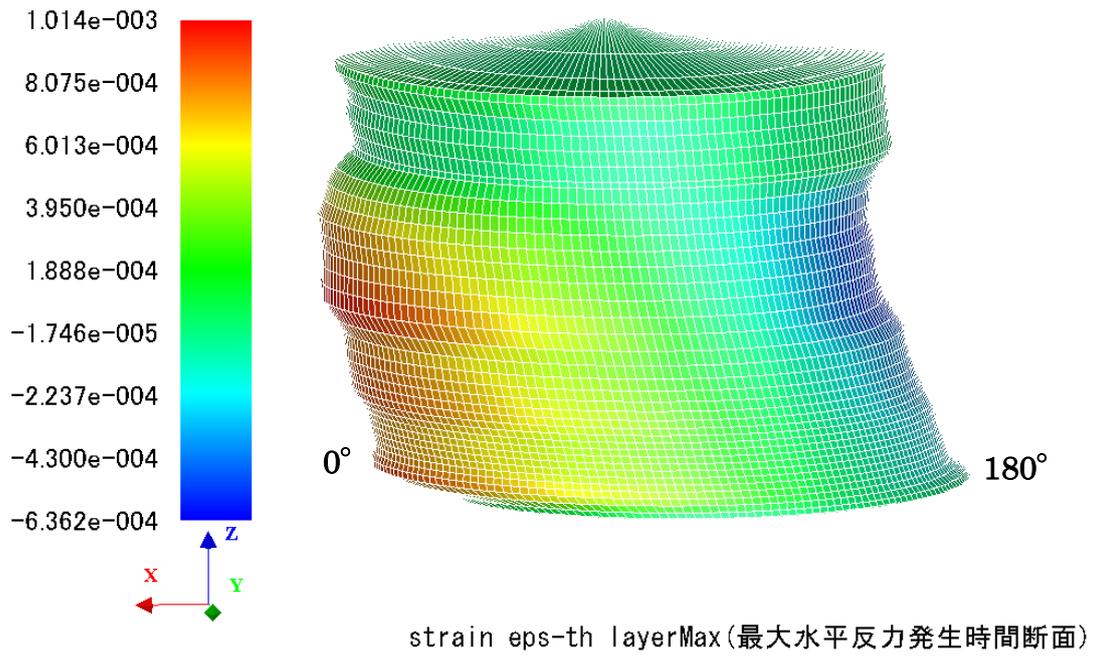


図 5-10 最大水平反力発生時外表面周方向ひずみ (変形倍率 200 倍)

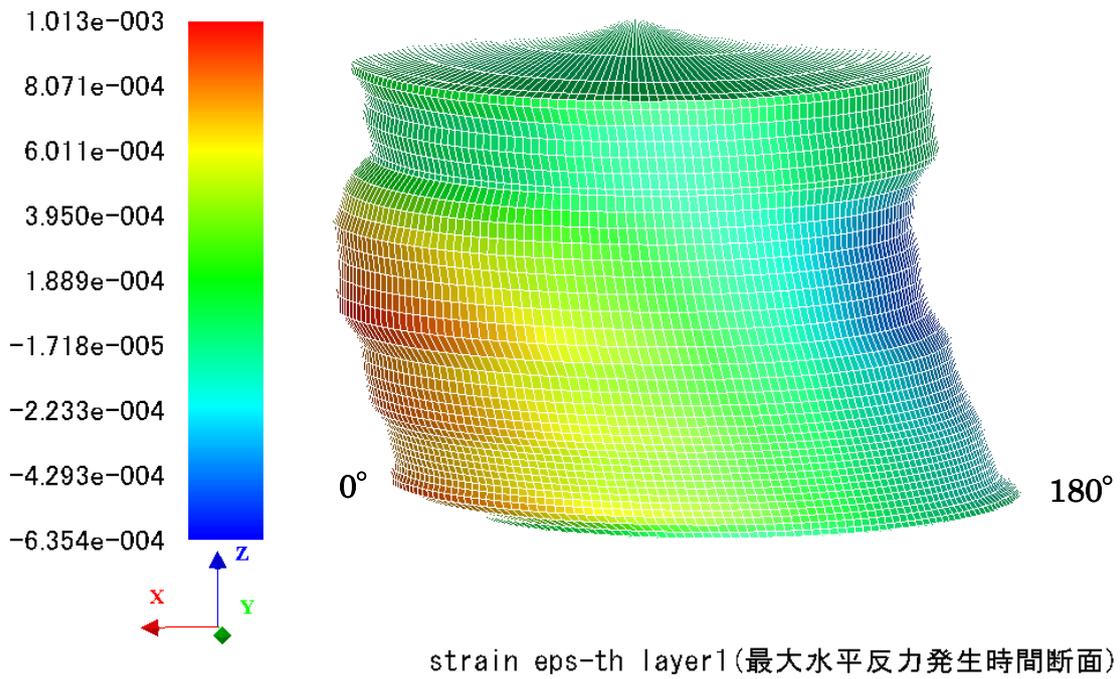


図 5-11 最大反力発生時内表面周方向ひずみ (変形倍率 200 倍)

追而

図 5-12 最大水平反力発生時において選定した評価点の相当ひずみ時刻歴

表 5-1 相当ひずみの最大値と破断伸びの比較
(最大水平反力発生時において選定した評価点)

相当ひずみの最大値 ϵ_{\max} (%)	破断伸び (%)
追而	追而

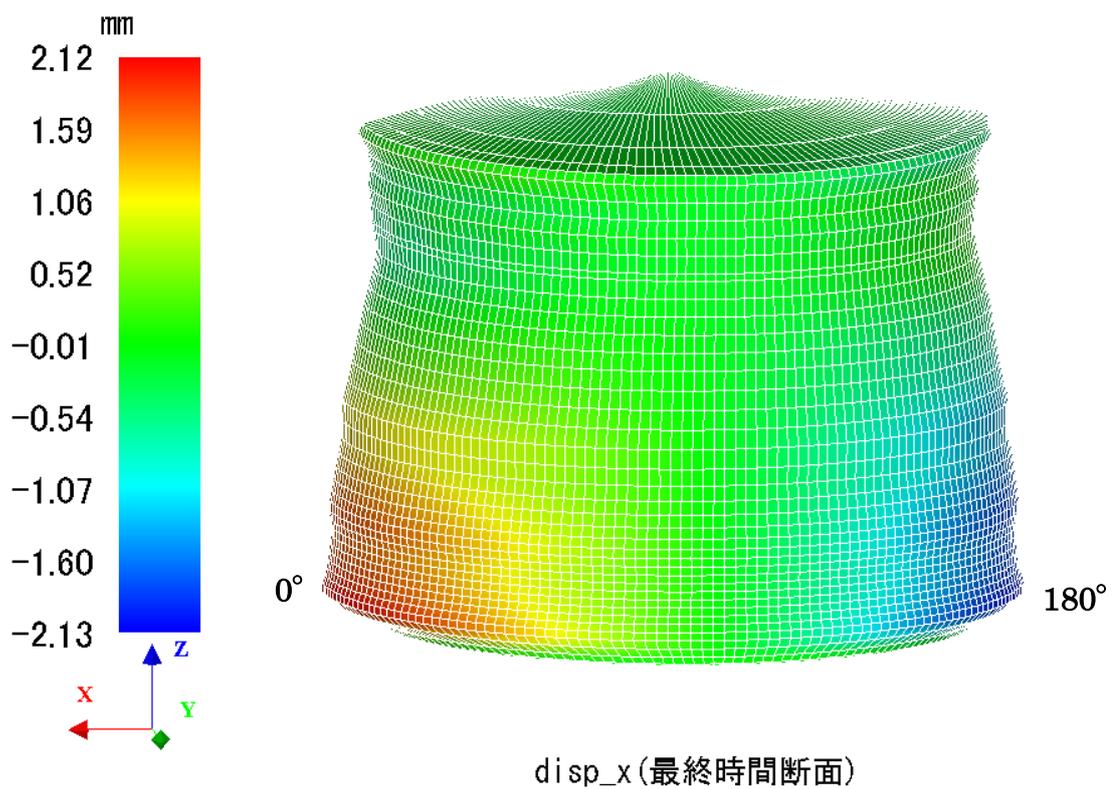


図 5-13 解析終了時水平X方向変位分布 (変形倍率 500 倍)

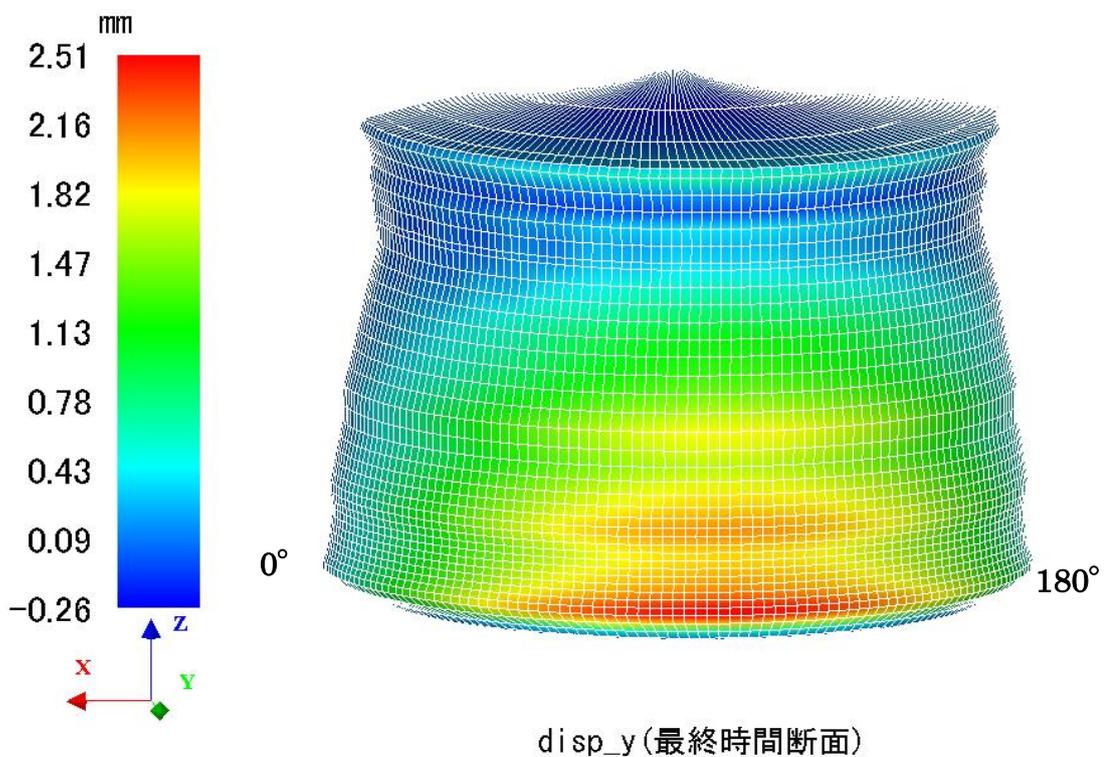


図 5-14 解析終了時水平Y方向変位分布 (変形倍率 500 倍)

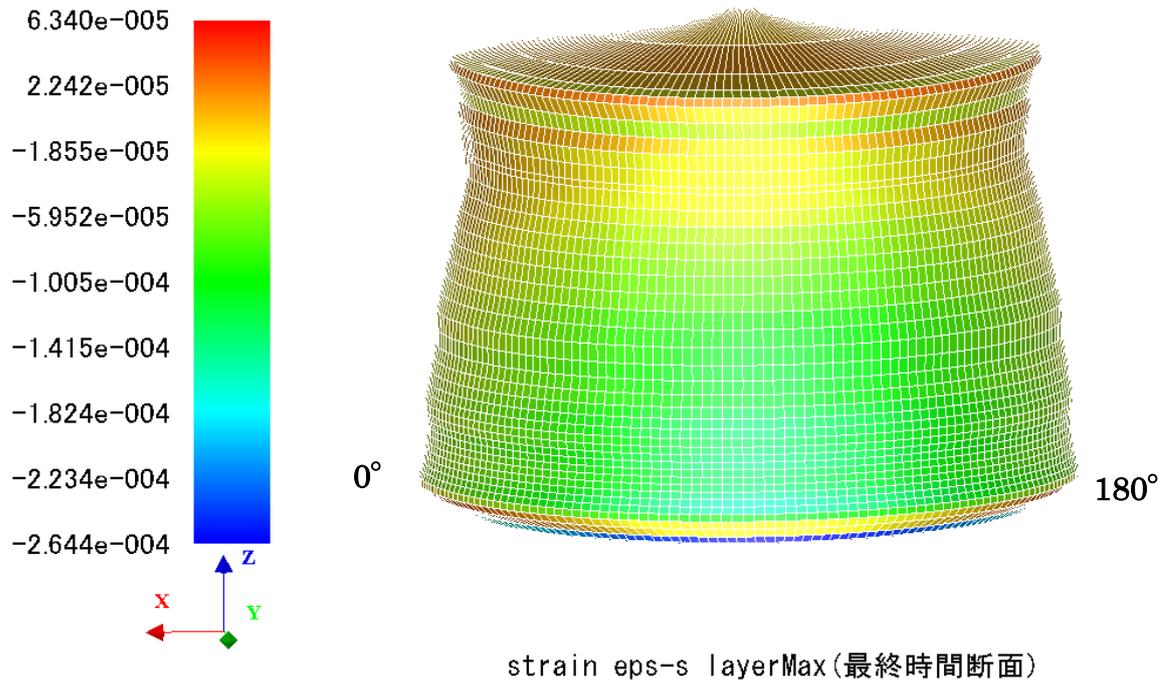


図 5-15 解析終了時外表面軸方向ひずみ (変形倍率 500 倍)

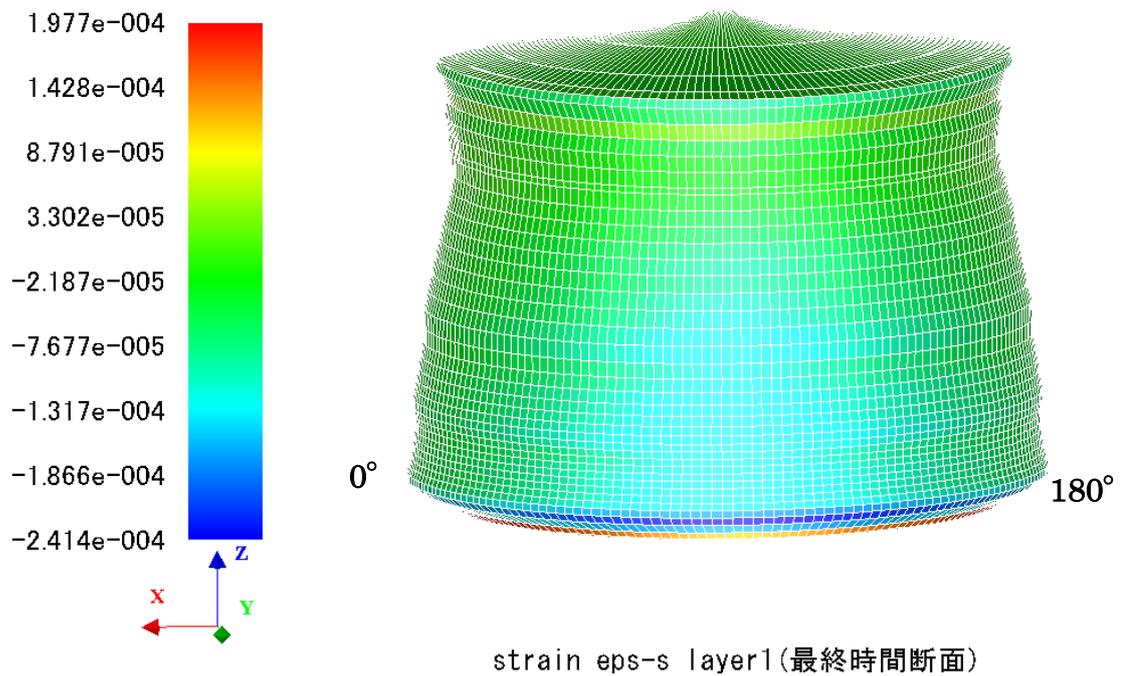


図 5-16 解析終了時内表面軸方向ひずみ (変形倍率 500 倍)

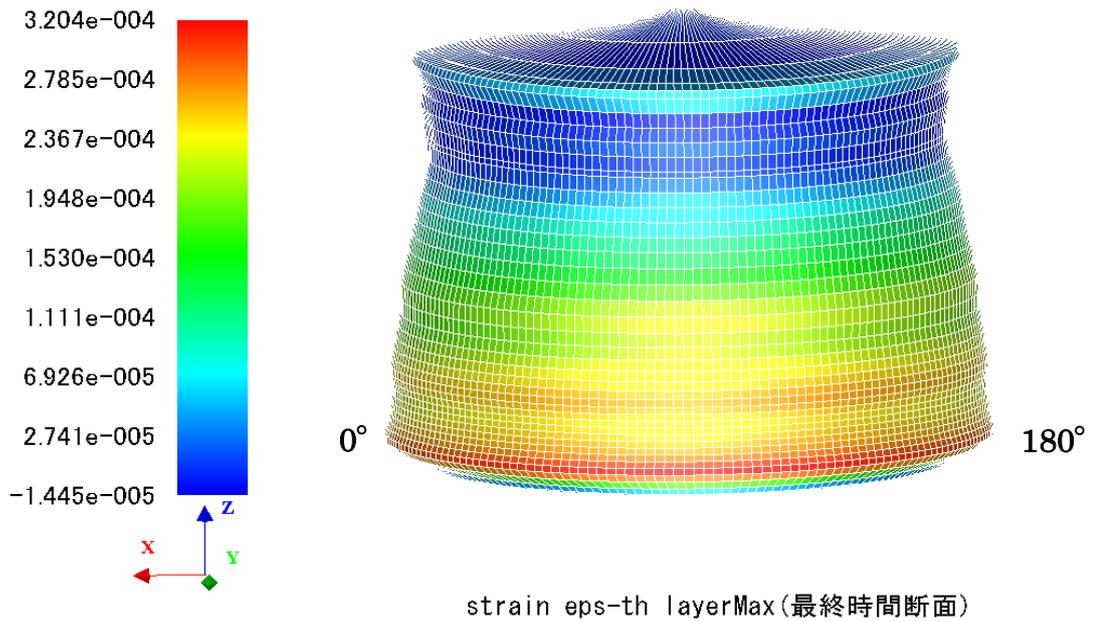


図 5-17 解析終了時外表面周方向ひずみ (変形倍率 500 倍)

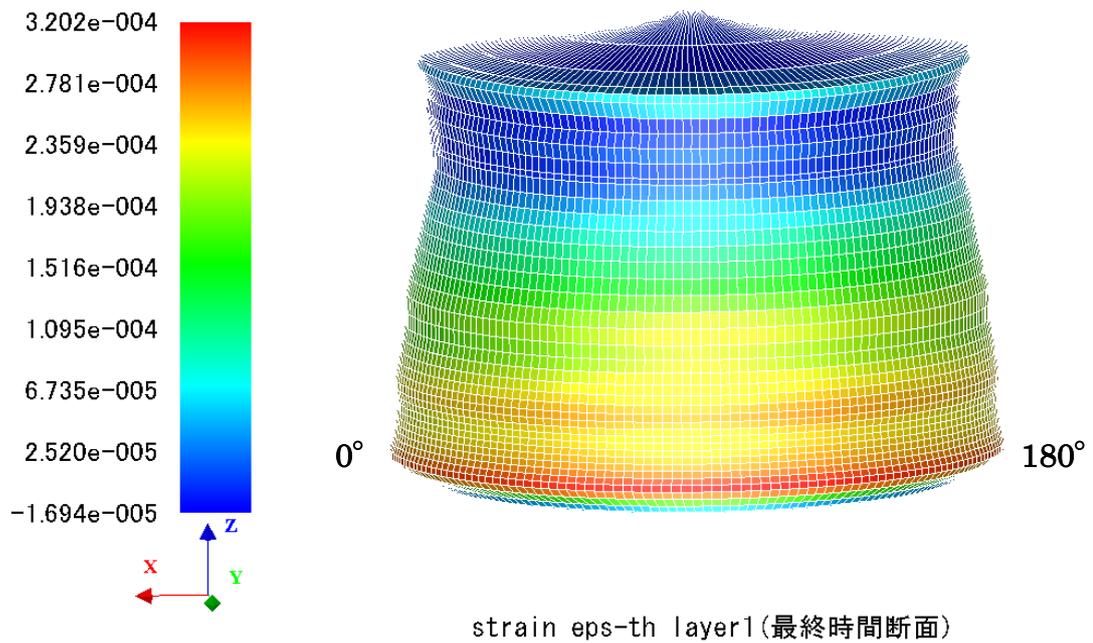


図 5-18 解析終了時内表面周方向ひずみ (変形倍率 500 倍)

追而

図 5-19 解析終了時において選定した評価点での相当ひずみ時刻歴

表 5-2 相当ひずみの最大値と破断伸びの比較
(解析終了時において選定した評価点)

相当ひずみの最大値 ϵ_{\max} (%)	破断伸び (%)
追而	追而

5.2.2 疲労評価結果

5.2.1 項で最大水平反力発生時及び解析終了時において選定した評価点について、相当ひずみの時刻歴（図 5-12 及び図 5-19）を用いて、4.6.2.2 項の評価方法により疲労評価を行った。評価点のうち、より疲労累積係数が大きくなった評価点における疲労評価結果を表 5-3 に示す。

表 5-3 疲労評価結果

ピークの カウント数 N_c'	相当ひずみの 最大値 ϵ_{\max}	繰返しピーク 応力強さ S_l' (MPa)	許容繰返し 回数 N_a	疲労累積係数 U_f
追而	追而	追而	追而	追而

5.3 基礎ボルトの評価結果

4.6.3 項の評価方法で求めた基礎ボルトに生じる応力に対して、引張及びせん断の許容応力を用いて応力評価を実施する。

引張応力 σ_b は次式より求めた許容組合せ応力 f'_{ts} 以下であること。ただし、 f'_{to} は下表による。

$$f'_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f'_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f'_{to}] \quad \dots\dots\dots (5.3.1)$$

せん断応力 τ_b は許容せん断応力 f'_{sb} 以下であること。ただし、 f'_{sb} は下表による。

	基準地震動 S_s による 荷重との組合せの場合
許容引張応力 f'_{to}	$\frac{F^{*'}}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f'_{sb}	$\frac{F^{*'}}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

基礎ボルトの応力評価結果を表5-4に示す。本評価の条件においては、算出応力は許容応力を下回った。

表5-4 基礎ボルトの評価結果

評価対象設備	評価対象部位	応力の種類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
補助復水貯蔵タンク	基礎ボルト	引張	追而	追而
		せん断	追而	追而

6. 評価結果まとめ

基準地震動 S_s による地震力に対してタンクの損傷形態を評価した結果、以下の理由から、胴の破断及び疲労破損並びに基礎ボルトの破断によるタンクの移動が生じないと評価された。

- ・胴については、地震応答解析の結果から得られたひずみが破断伸びに比べて十分小さいこと、また疲労累積係数が1を下回っていること。
- ・基礎ボルトについては、算出応力が許容応力を下回っていること。

7. 参考文献

- (1) 東急建設技術研究所報 No. 32 鋼材とコンクリートの摩擦性状に関する実験的研究－偏心荷重が作用した場合－（渡邊 高朗，小澤 潤治，大野 造正，北村 達也，鶴田 賢二（2007））
- (2) 機械工学便覧 日本機械学会編（B1-77 ページ）（日本機械学会（1996））

計算機プログラム（解析コード）の概要
・ A X I S

目 次

1. はじめに	1
2. 解析コードの概要	2
3. 解析手法	3
3.1 一般事項	3
3.2 解析コードの特徴	3
3.3 解析手法	3
3.3.1 動的流体構造連成解析	3
3.4 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	4
3.4.1 検証	4
3.4.2 妥当性確認	4
3.4.3 評価結果	4

1. はじめに

本資料は，別紙6において使用した計算機プログラム（解析コード）AXISについて説明するものである。

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	A X I S
使用目的	流体連成及び弾塑性変形を考慮した軸対称要素による固有値解析，静的解析及び動的解析
開発機関	一般財団法人 電力中央研究所
開発時期	1989年～1994年
使用したバージョン	Ver. 27
コードの概要	<p>本解析コードは，高速増殖炉の薄肉原子炉容器の座屈解析を目的として開発された有限要素法による構造解析用の計算機プログラムである。</p> <p>適用モデル（薄肉円筒構造）に対して，静的解析（線形及び非線形），動的解析，流体構造連成解析等の機能を有している。</p> <p>通産省資源エネルギー庁からの受託研究「薄肉構造物座屈評価技術確証試験」（昭和62年～平成5年度）において地震時の座屈を合理的に防止する検討を行い，実験との比較などにより適用性を確認してきた。</p> <p>それ以降は，電力会社の発電所における，薄肉円筒タンクなどの設備に生じた地震被害の構造解析に使用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<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"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について，本解析コードを用いた座屈解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解とおおむね一致することを確認している。 ・本解析コードの開発については，通産省資源エネルギー庁からの受託研究「薄肉構造物座屈評価技術確証試験」（昭和62年～平成5年度）において，実験との比較により解析精度を確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，電力会社の発電所内の薄肉円筒タンクなどの設備に生じた地震被害での再現解析における使用実績を有している。 ・検証の体系と別紙6で使用する体系が同等であることから，検証結果によって解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の別紙6における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは、一般財団法人 電力中央研究所が開発した軸対称要素による弾塑性大変形流体連成座屈解析コードである。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードは、弾塑性大変形流体連成座屈解析機能を有する精度の検証された動的座屈解析コードである。本解析コードは、軸対称シェル要素を用いた構造解析プログラムであり、流体部分は非圧縮、非粘性、非回転流れとして扱う。

3.3 解析手法

3.3.1 動的流体構造連成解析

離散化された構造系の運動方程式は(3.1)式のとおり。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{R\} + \{F\} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$[M]$: 質量行列

$[C]$: 減衰行列

$[K]$: 剛性行列

$\{R\}$: 一般外力ベクトル

$\{F\}$: 境界面の流体圧力による外力ベクトル

$\{u\}$: 変位

一般的に流体圧力は(3.2)式のように表される。

$$\{F\} = \frac{1}{\rho} [S]^T \{p\} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

$[S]$: 表面

$\{p\}$: 動水圧

ρ : 流体の質量密度

したがって、(3.1)式に(3.2)式を代入すると(3.3)式が得られる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} - \frac{1}{\rho} [S]^T \{p\} = \{R\} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

連成面での力の釣り合いは(3.4)式のとおり。

$$[H]\{p\} + [S]\{\ddot{u}\} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

$[H]$: 形状関数

(3.3)式及び(3.4)式を連成させると、(3.5)式の非対称行列の運動方程式になる。

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ S & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -\frac{1}{\rho} [S]^T \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

(3.5)式を用いることにより、動的流体構造連成解析を取り扱うことができる。

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

3.4.1 検証

(1) 弾性座屈解析及び静的弾塑性座屈解析

以下に記載した論文において、弾性座屈解析及び静的弾塑性座屈解析の検証事例が示されている。

- ・大坪英臣, 中村秀治, 松浦真一, 小久保邦雄, 大坪敬, 「軸対称要素を用いた弾塑性座屈解析」, 日本機械学会論文集 (A編), 58巻556号 (1992-12), No. 92-0272, 1992. 12

(2) 流体構造連成解析

以下に記載した報告書において、流体構造連成座屈解析の検証事例が示されている。

- ・豊田幸宏, 松浦真一, 増子芳夫, 「流体連成動的座屈解析プログラムの開発とその検証」, 構造工学論文集 Vol. 43B (1997年3月), 1997. 3
- ・豊田幸宏, 松浦真一, 「流体連成二重円筒殻の動的座屈挙動について」, 構造工学論文集 Vol. 44A (1998年3月), 1998. 3

3.4.2 妥当性確認

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。

- ・本解析コードは、電力会社の発電所内の薄肉円筒タンクなどの設備に生じた地震被害での再現解析における使用実績を有している。
- ・検証の体系と別紙 6 で使用する体系が同等であることから、検証結果によって解析機能の妥当性も確認できる。
- ・今回の別紙6における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3.4.3 評価結果

検証及び妥当性確認の内容から、本解析コードを別紙 6 の解析に用いることは妥当である。