

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-015 改16
提出年月日	2023年4月20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

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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.....	11
4.6 損傷形態の評価方法.....	12
4.6.1 タンクの応答挙動の確認.....	12
4.6.2 胴の評価.....	12
4.6.3 基礎ボルトの評価.....	13
5. 損傷形態の評価結果.....	14
5.1 タンクの応答挙動の確認結果.....	14
5.2 胴の評価結果.....	16
5.2.1 破断伸びに対する評価結果.....	16
5.2.2 疲労評価結果.....	25
5.3 基礎ボルトの評価結果.....	26
6. 評価結果まとめ.....	26
7. 添付資料.....	27
8. 参考文献.....	27

1. 概要

本資料では、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)

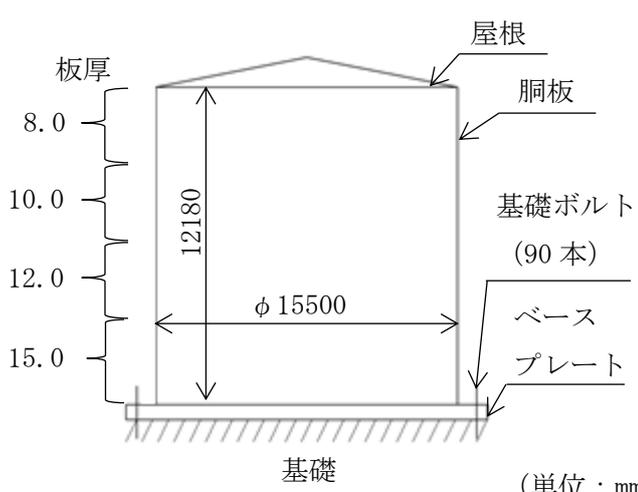
計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>復水貯蔵タンクは、胴下端のベースプレート为基础ボルトで基礎に据え付ける。</p>	<p>たて置円筒形 (上面に屋根、下面にベースプレートを有するたて置円筒形容器であり、胴は上部にいくほど段階的に板厚が薄くなる構造である。)</p>	 <p>(単位: mm)</p>

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を経基礎ボルトで基礎に据え付ける。	たて置円筒形（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 style="text-align: right;">(単位：mm)</p>

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*：復水貯蔵タンクの屋根は二重構造になっていることから，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。

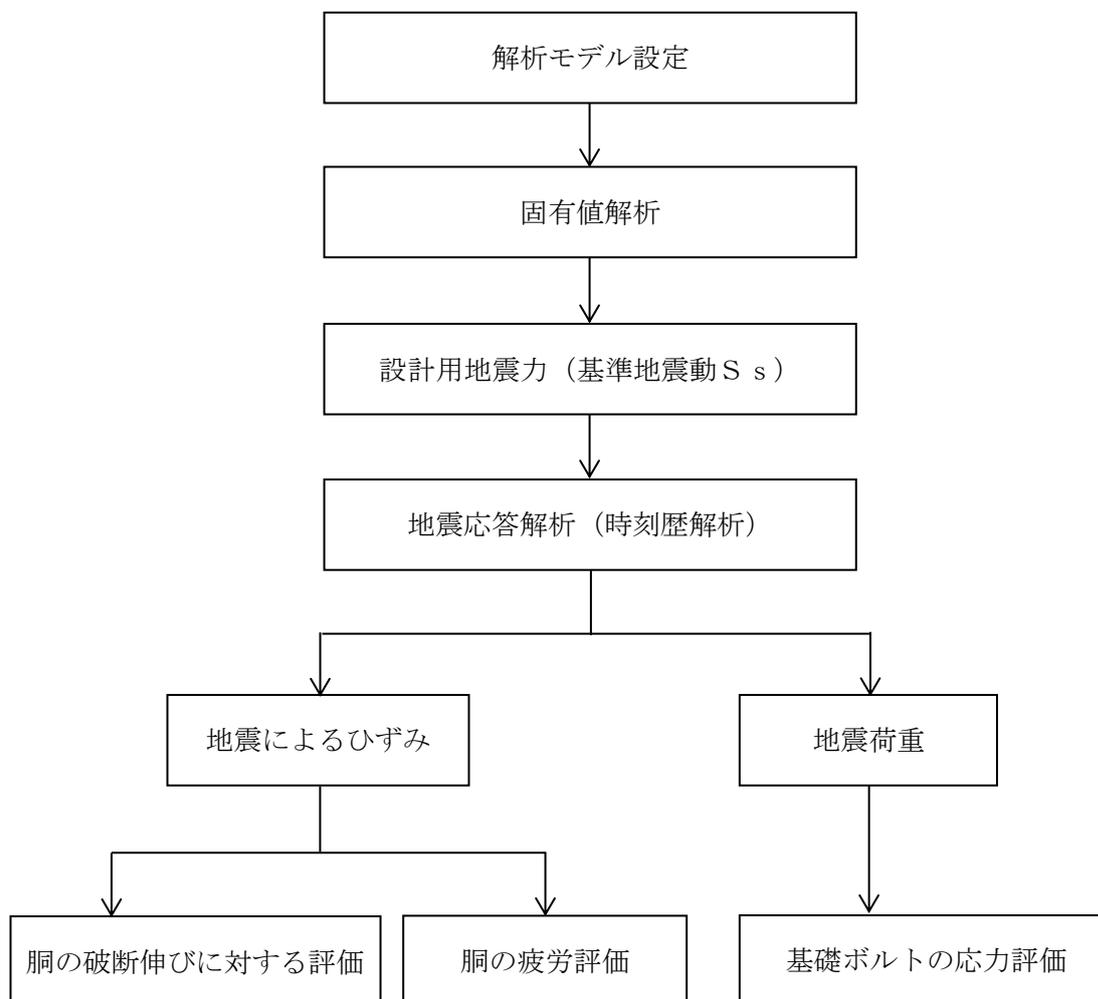


図 2-1 損傷形態の評価フロー

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1本当たりの締付力	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ト数	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引張強さ (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降伏点 (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) 及び 0.05s (20Hz) に設定する。
- (4) 胴の評価については、地震応答解析により得られたひずみを用いた破断伸びに対する評価と、疲労評価を行う。
- (5) 基礎ボルトの評価については、地震応答解析により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) 損傷形態の評価では、胴のバウンダリ機能及び基礎ボルトの支持機能の確認を目的としているため、座屈は評価項目としない。損傷形態の評価における座屈の扱い及び初期不整の影響について添付資料 (1) に示す。
- (7) 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。
- (8) 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	$D + P_D + M_D + S_s + P_s$

注記*：記号の定義は VI-2-1-9 「機能維持の基本方針」に基づく。

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、容器本体の応力ひずみ関係を図4-2に示す。

- (1) タンク（ベースプレート、胴及び屋根）及び内包水の断面を図4-1のように軸対称シェル要素でモデル化し、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。

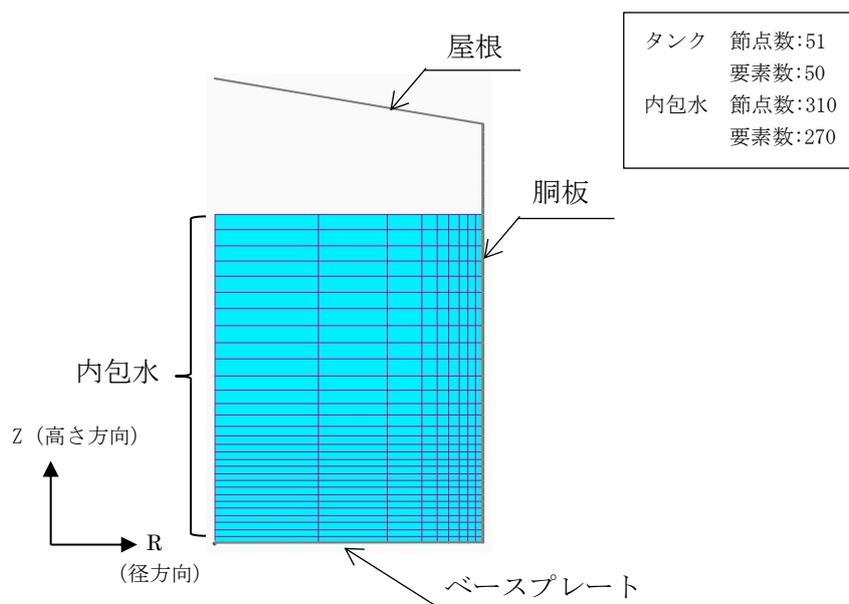


図4-1 解析モデル（軸対称断面）

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 ⁻⁶	202 × 10 ³	245	0.3	等方硬化則	810
内包水*	—	1.0 × 10 ⁻⁶	—	—	—	—	—

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

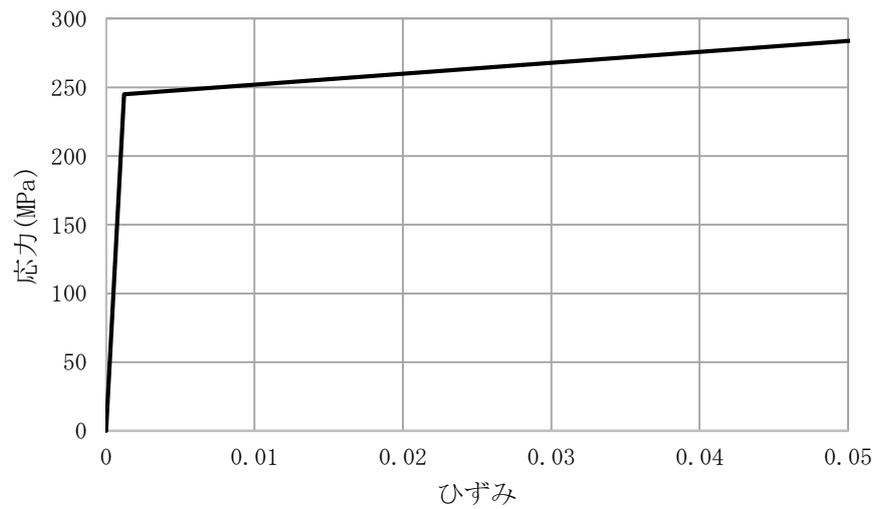
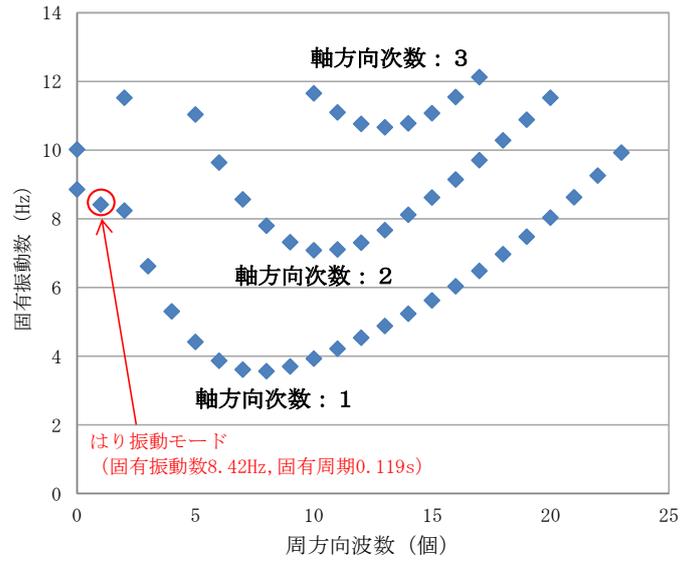


図 4-2 容器本体の応力ひずみ関係

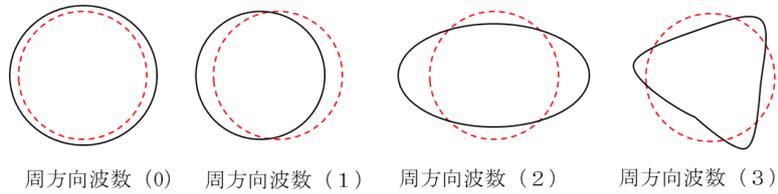
4.4 固有値解析

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

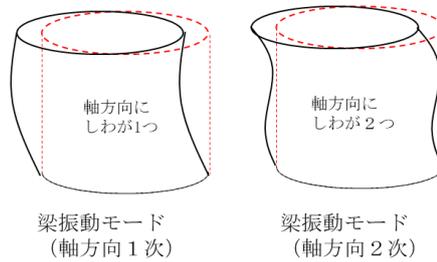
振動モード図において、高さ方向に階段状に変形が生じているのは、高さ方向で胴板の板厚及び内包水による内圧が異なるためである。



(a) 軸方向次数及び周方向波数に応じた固有振動数



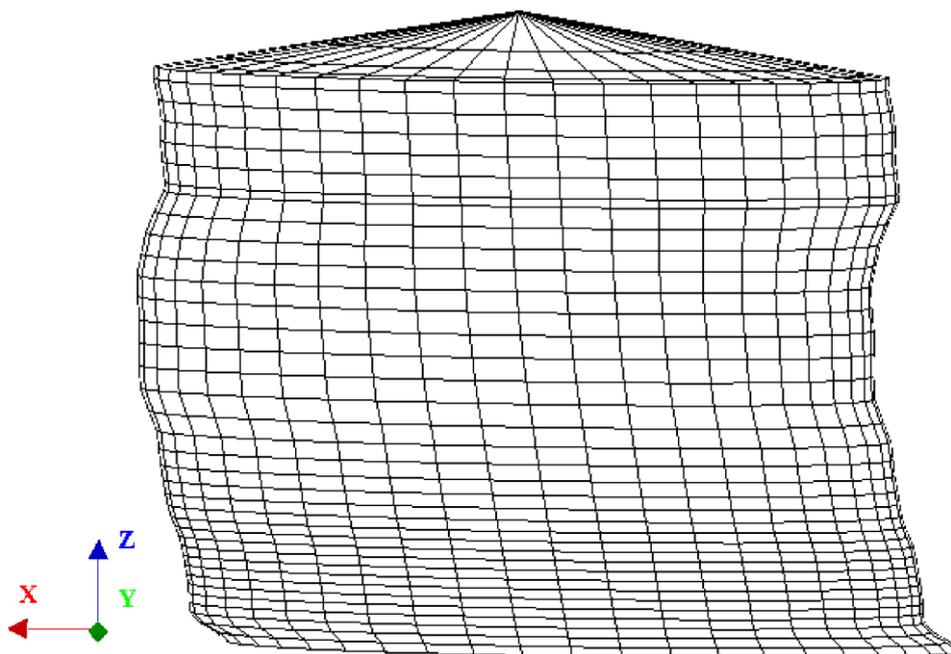
【タンク断面図による周方向波数の説明】



【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 4-3 固有値解析結果

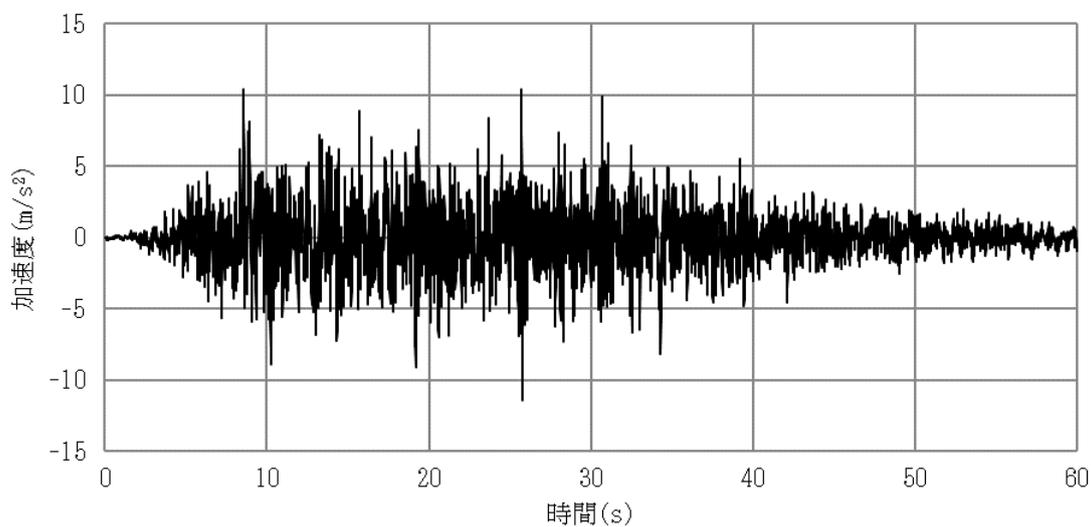


【固有振動数 8.42Hz】

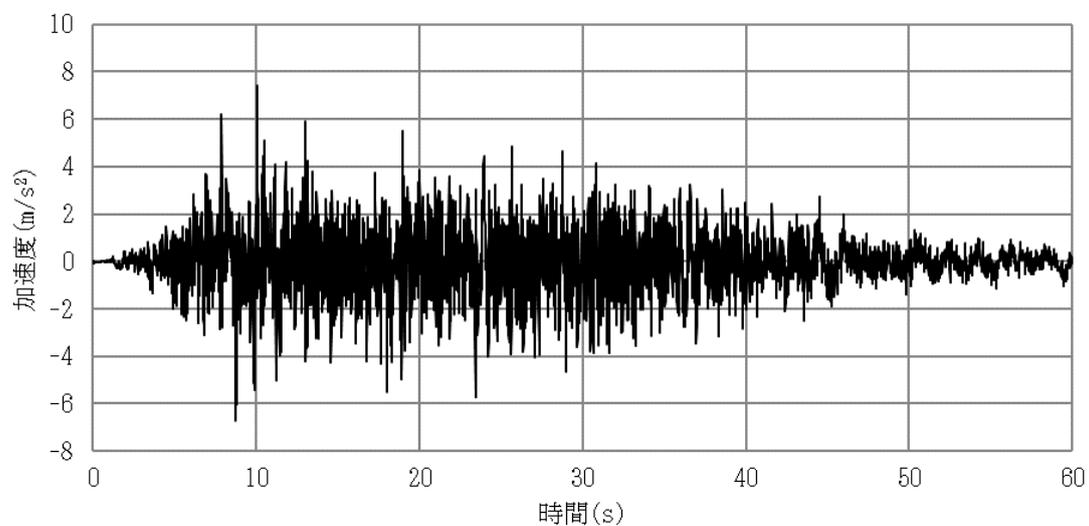
図 4-4 タンクはり振動モード図 (軸方向次数 1, 周方向波数 1)

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 4-5 に示す。



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図 4-5 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

時刻歴応答解析により得られる変位分布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の最大値 ϵ_{\max} 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いて、地震荷重に対して支配的な方向のひずみの時刻歴を用い、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) 地震荷重に対して支配的な方向のひずみの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) 相当ひずみの時刻歴におけるひずみの最大値 ϵ_{\max} を求める。
- (3) 保守的に ϵ_{\max} が $N_{c'}$ 回繰り返されると仮定し、繰返しピーク応力強さ $S_{\ell'}$ を以下の式により求める。

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

- (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

地震応答解析により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

地震応答解析により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。なお、基礎ボルトの引張応力の評価における水平方向及び鉛直方向の動的地震力による荷重の組合せにはSRS法を適用する。

4.6.3.2 せん断応力

地震応答解析により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 τ_b 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、

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

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

摩擦力 F_μ の計算においては、基礎ボルトの締付力による垂直抗力と、タンク自重による垂直抗力を考慮し、摩擦係数 μ は参考文献(1)に基づき0.5とする。

基礎ボルトの締付力による垂直抗力は、基礎ボルト1本当たりの締付力 F_f に基礎ボルトの本数 n を乗じることで計算する。ここで、 F_f は参考文献(2)に示されるボルト締付の目標値から次式のとおりとする。

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

タンク自重による垂直抗力は、タンク自重から鉛直方向震度 C_v による上向きの力を差し引くことで算出する。基礎ボルトのせん断応力の評価における水平方向及び鉛直方向の動的地震力による荷重の組合せには組合せ係数法を適用することから、鉛直方向震度には係数0.4を乗じる。

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 5-2 における鉛直方向変位時刻歴のドリフトは、タンク下部に残留変形が生じたことによるものである。

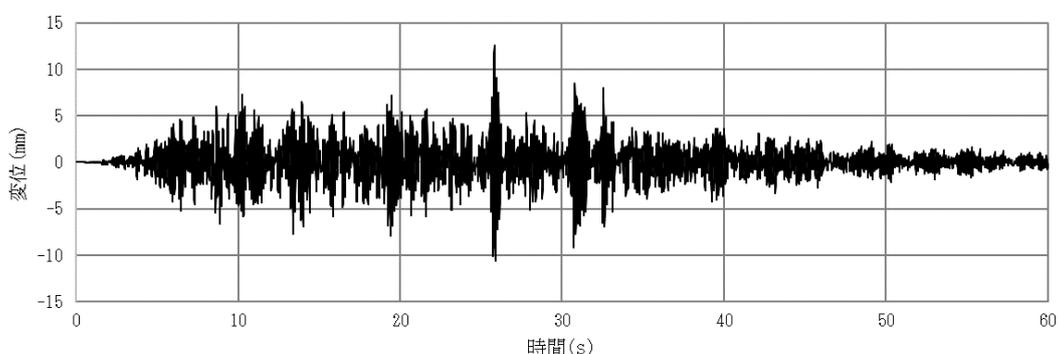


図 5-1 補助復水貯蔵タンクの水平方向変位時刻歴

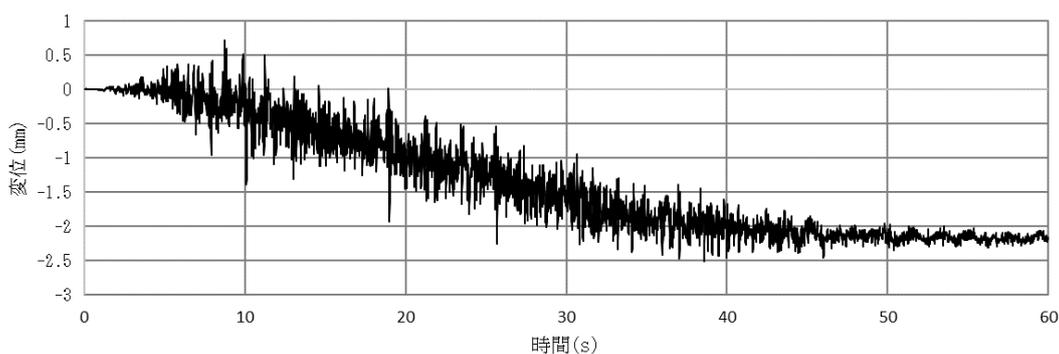


図 5-2 補助復水貯蔵タンクの鉛直方向変位時刻歴

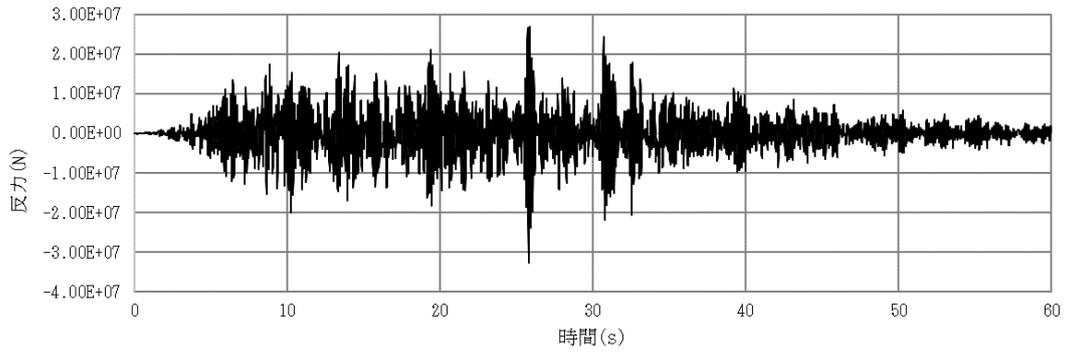


図 5-3 タンク基礎部の水平方向反力時刻歴

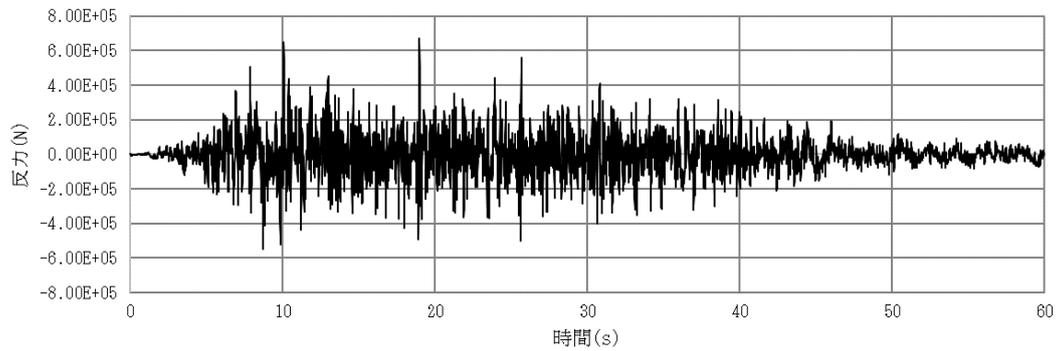


図 5-4 タンク基礎部の鉛直方向反力時刻歴

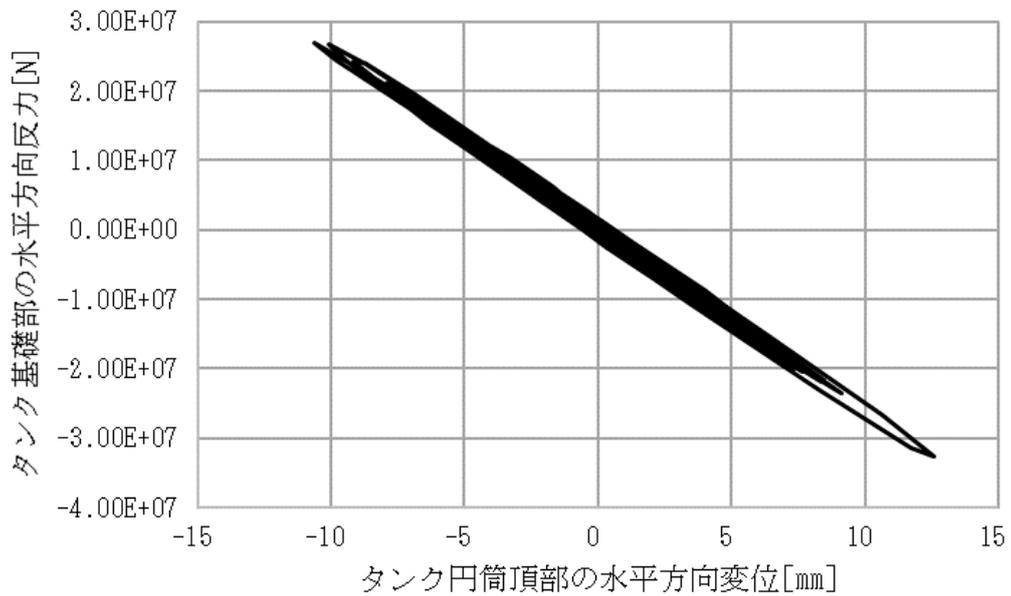


図 5-5 タンク基礎部の水平反力とタンク円筒頂部の水平変位の履歴

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。なお、変位分布及びひずみ分布は $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 範囲と $180^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 範囲で対称となるため、 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 範囲を代表として示す。

a. 最大水平反力発生時

最大水平反力発生時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の評価点1（ 0° 断面、高さ101mm、外表面）で生じている。図5-10及び図5-11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の評価点2（ 0° 断面、高さ5589mm、外表面）で生じている。ひずみの大きさは周方向ひずみが大きいことから、評価点2における相当ひずみを破断伸びと比較する。評価点2における相当ひずみの時刻歴を図5-12に、時刻歴における相当ひずみの最大値 ε_{\max} が破断伸びを下回ることを確認した結果を表5-1に示す。

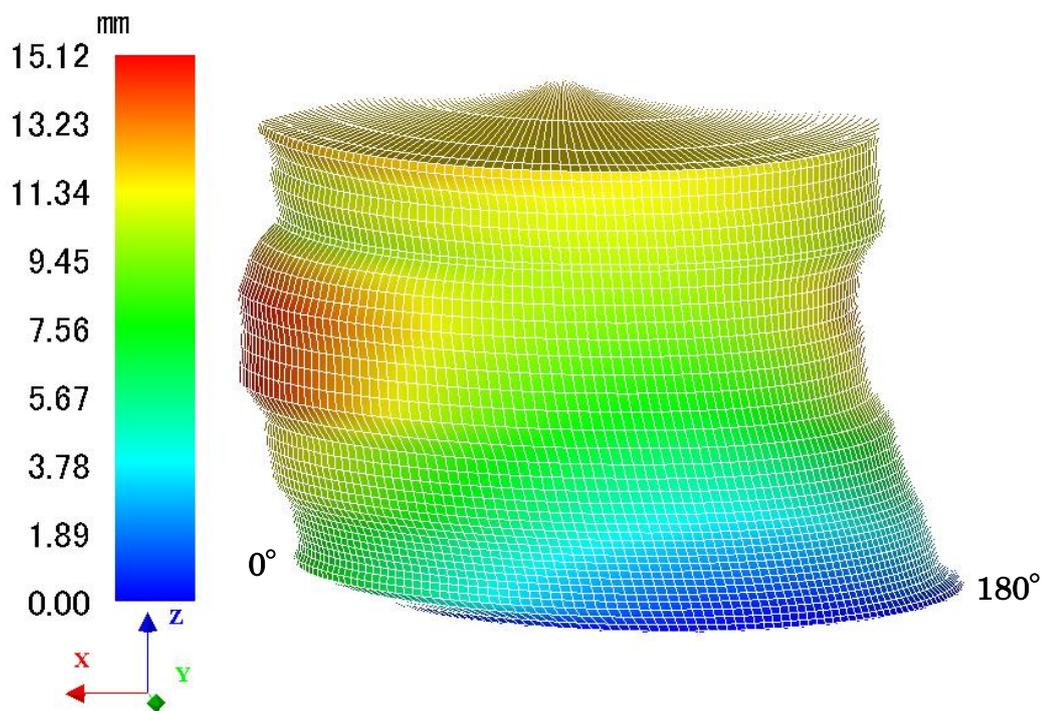
また、疲労評価の評価点を選定するにあたり、評価点1における軸方向ひずみの時刻歴を図5-13に、評価点2における周方向ひずみの時刻歴を図5-14に示す。図5-13及び図5-14におけるひずみ振幅の大きさを比較すると、地震荷重に対しては周方向ひずみが支配的であるため、評価点2を最大水平反力発生時において選定した疲労評価の評価点とし、周方向ひずみの時刻歴を用いた評価を行う。

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5-15～図5-20に示す。

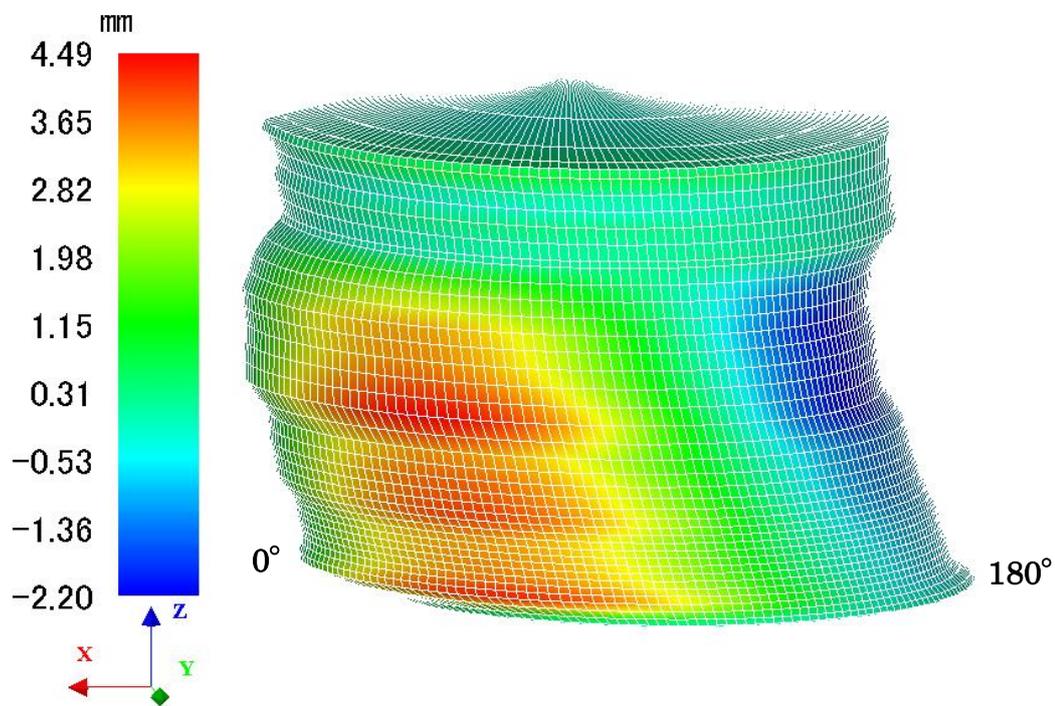
図5-15及び図5-16に示すとおり、タンク下部に残留変形が生じていることから、軽微な象脚座屈が生じていると考えられる。曲げせん断荷重と内圧を受ける円筒容器の座屈形態について添付資料(2)に示す。図5-17及び図5-18に示すとおり、軸方向ひずみ（絶対値）の最大値はタンクの下部の評価点3（ 90° 断面、高さ101mm、外表面）で生じている。図5-19及び図5-20に示すとおり、周方向ひずみ（絶対値）の最大値はタンクの下部の評価点4（ 90° 断面、高さ709mm、外表面）で生じている。ひずみの大きさは周方向ひずみが大きいことから、評価点4における相当ひずみを破断伸びと比較する。評価点4における相当ひずみの時刻歴を図5-21に、時刻歴における相当ひずみの最大値 ε_{\max} が破断伸びを下回ることを確認した結果を表5-2に示す。

また、疲労評価の評価点を選定するにあたり、評価点3における軸方向ひずみの時刻歴を図5-22に、評価点4における周方向ひずみの時刻歴を図5-23に示す。図5-22及び図5-23におけるひずみ振幅の大きさを比較すると、地震荷重に対しては周方向ひずみが支配的であるため、評価点4を解析終了時において選定した疲労評価の評価点とし、周方向ひずみの時刻歴を用いた評価を行う。



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)

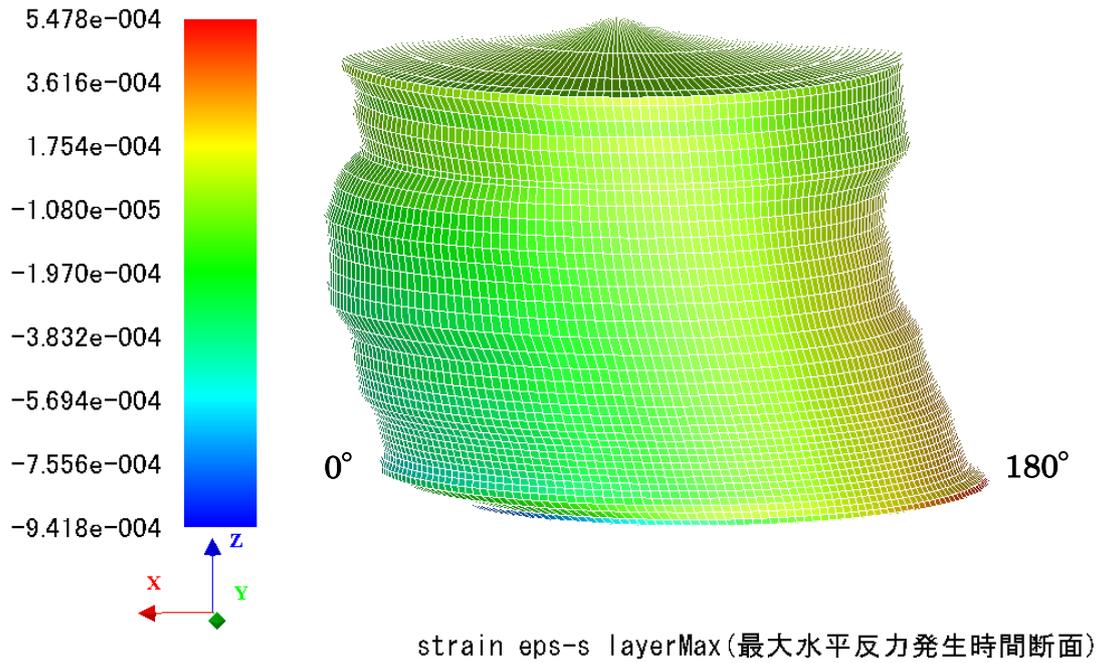


図 5-8 最大水平反力発生時外表面軸方向ひずみ (変形倍率 200 倍)

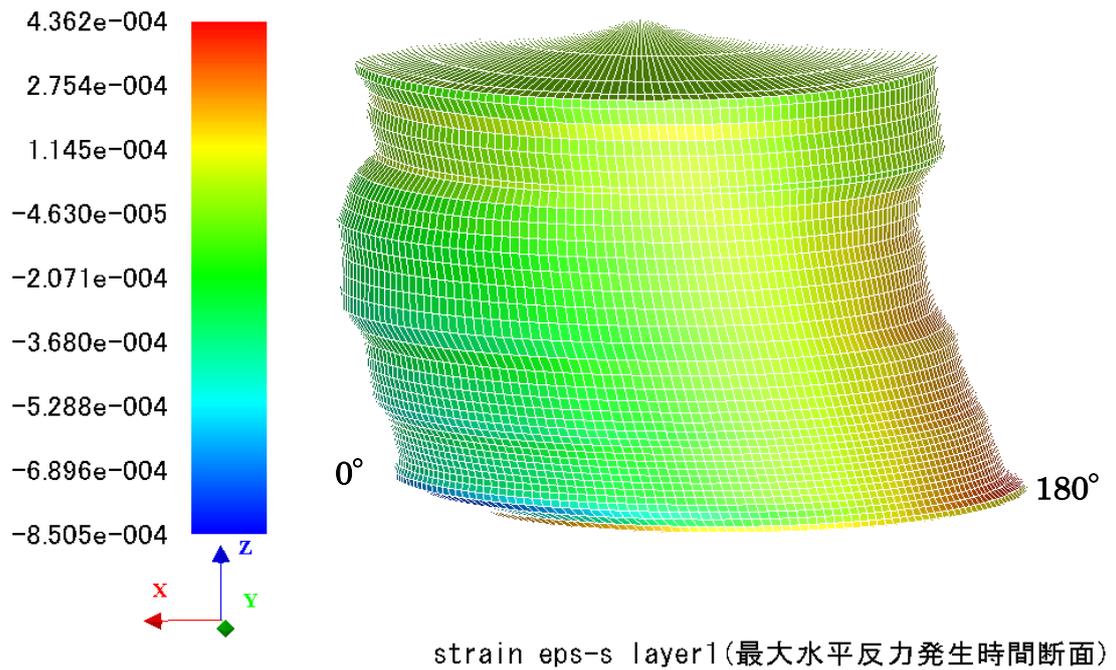


図 5-9 最大水平反力発生時内表面軸方向ひずみ (変形倍率 200 倍)

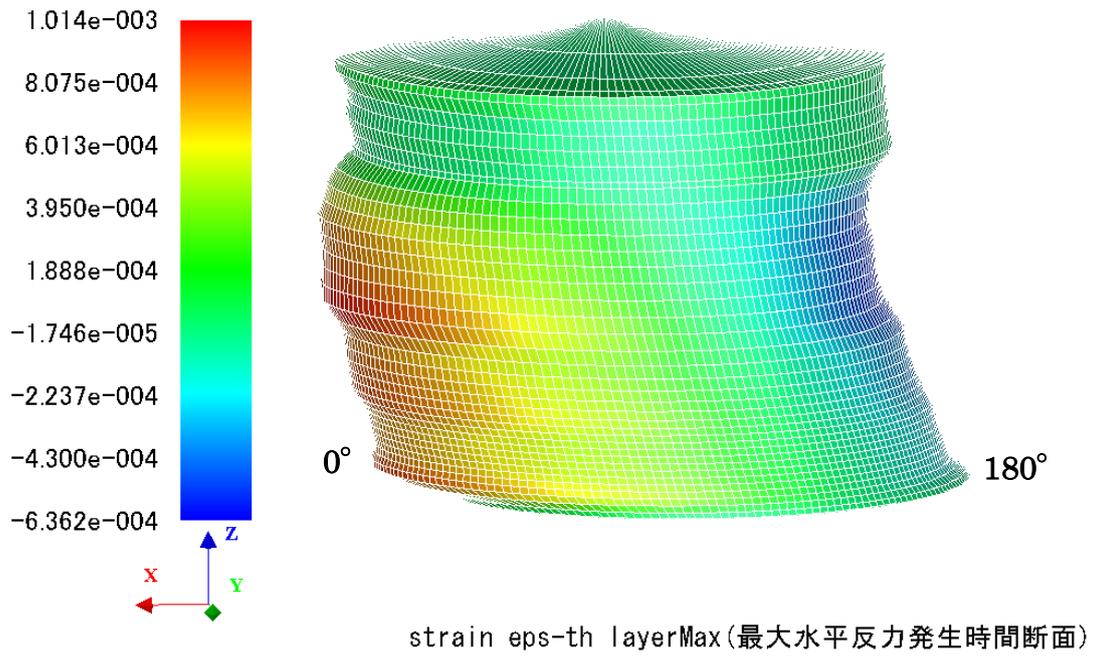


図 5-10 最大水平反力発生時外表面周方向ひずみ (変形倍率 200 倍)

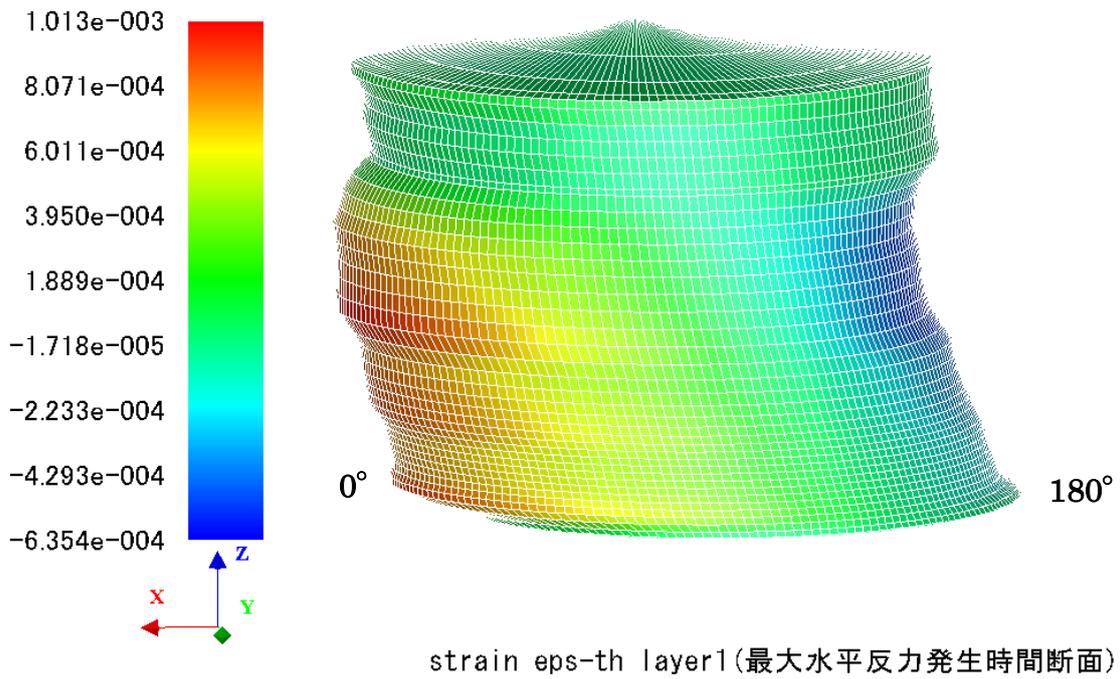


図 5-11 最大反力発生時内表面周方向ひずみ (変形倍率 200 倍)

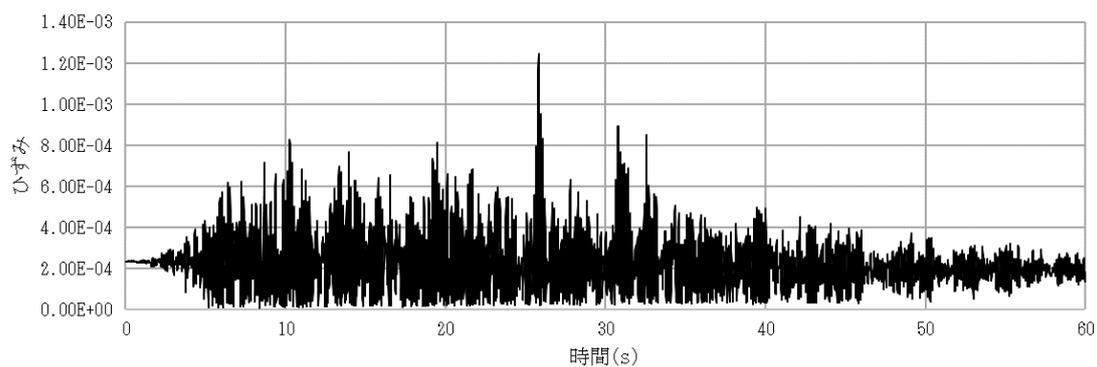


図 5-12 評価点 2 における相当ひずみ時刻歴

表 5-1 評価点 2 における相当ひずみの最大値と破断伸びの比較

相当ひずみの最大値 ϵ_{\max} (%)	破断伸び (%)
0.125	17

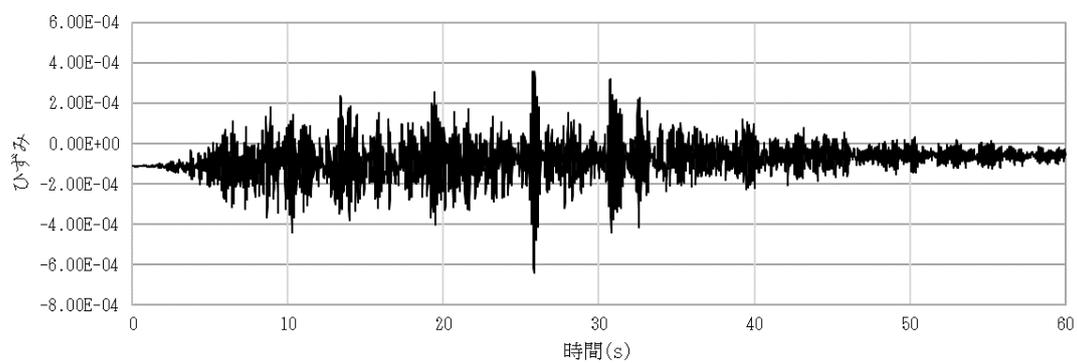


図 5-13 評価点 1 における軸方向ひずみ時刻歴

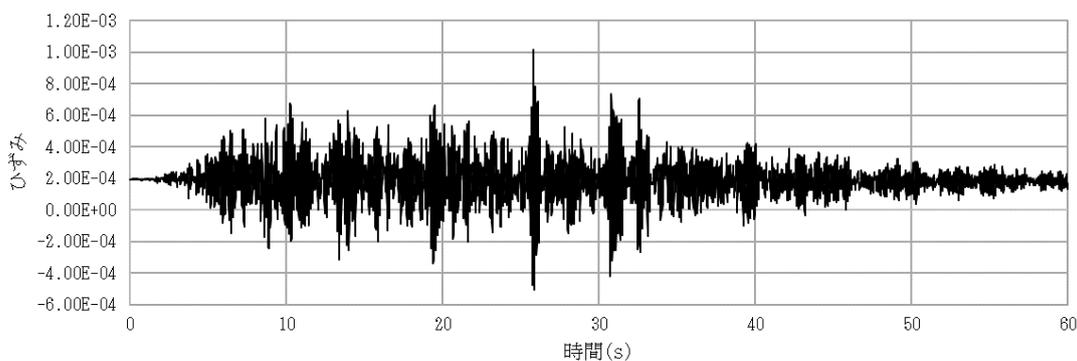


図 5-14 評価点 2 における周方向ひずみ時刻歴

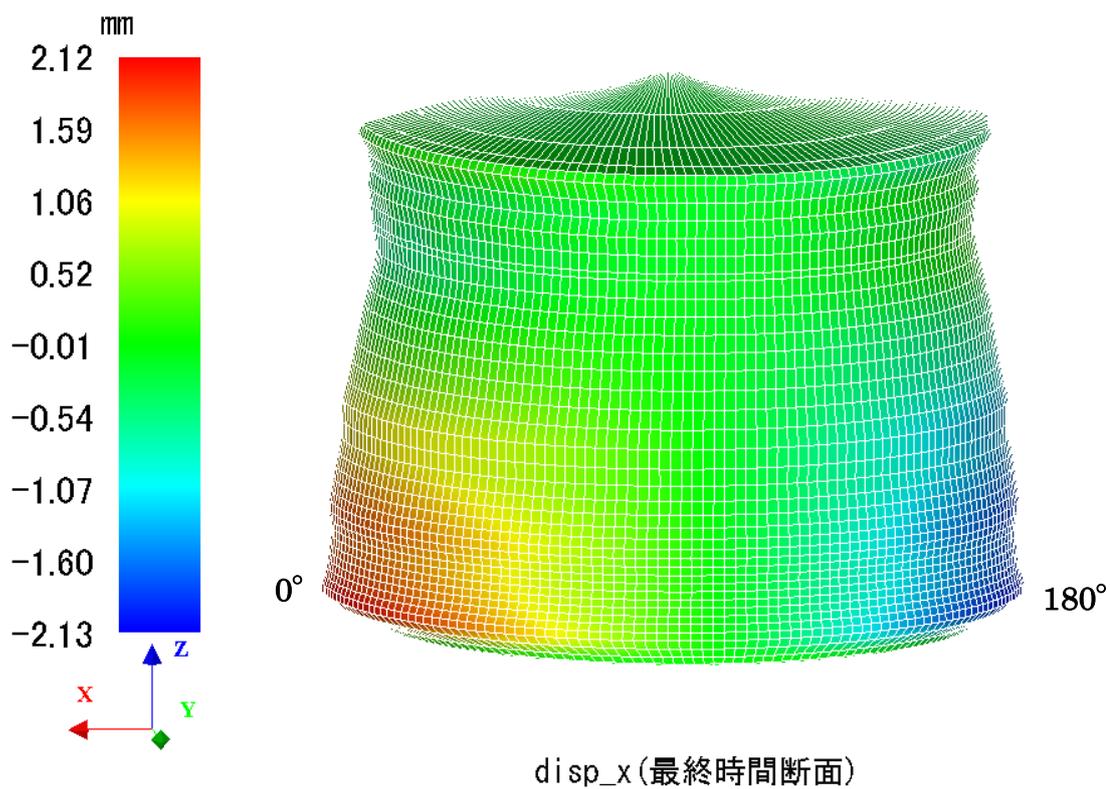


図 5-15 解析終了時水平 X 方向変位分布 (変形倍率 500 倍)

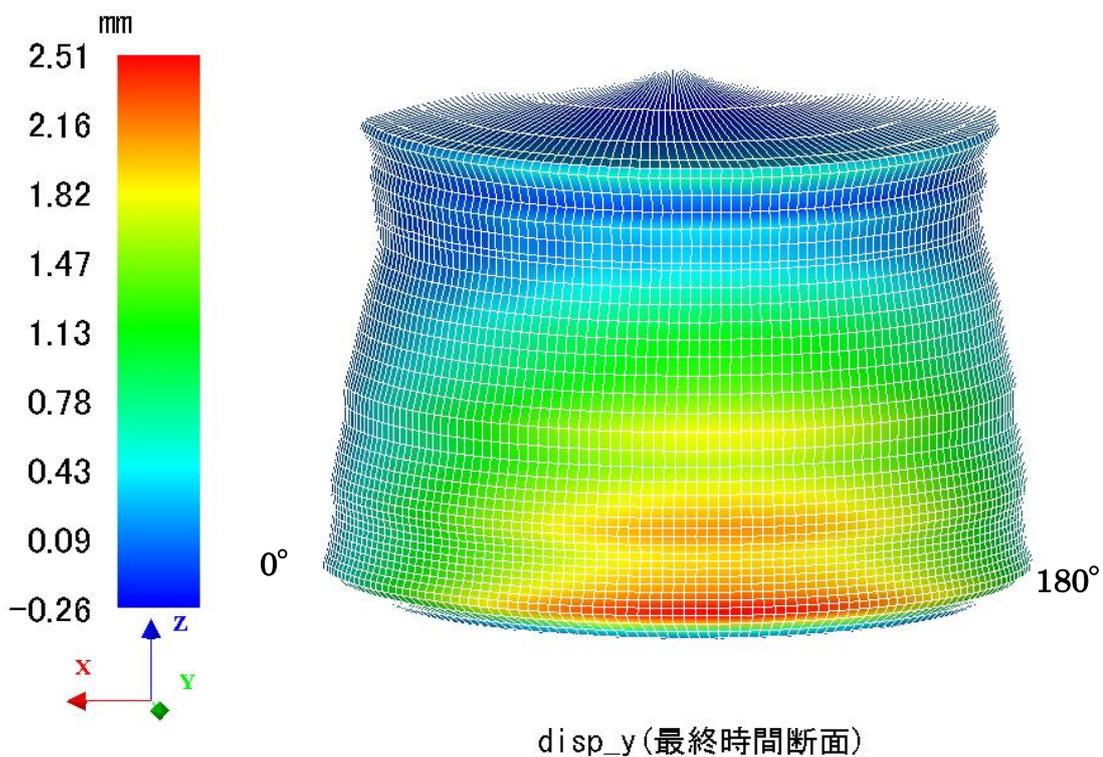


図 5-16 解析終了時水平 Y 方向変位分布 (変形倍率 500 倍)

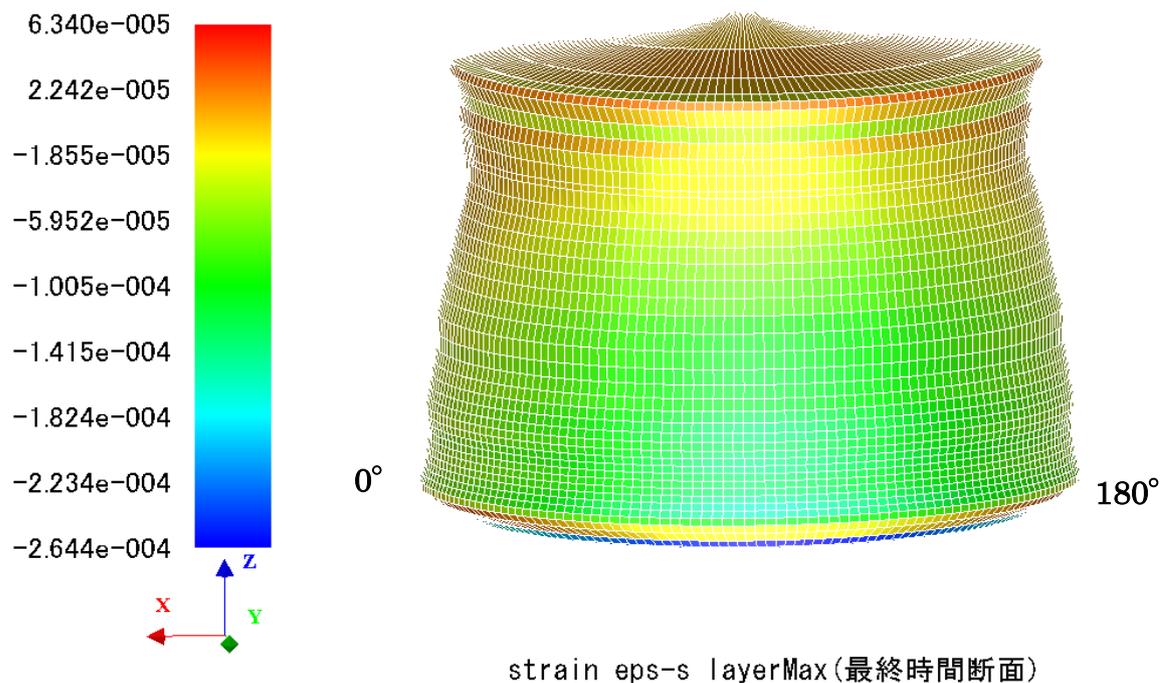


図 5-17 解析終了時外表面軸方向ひずみ (変形倍率 500 倍)

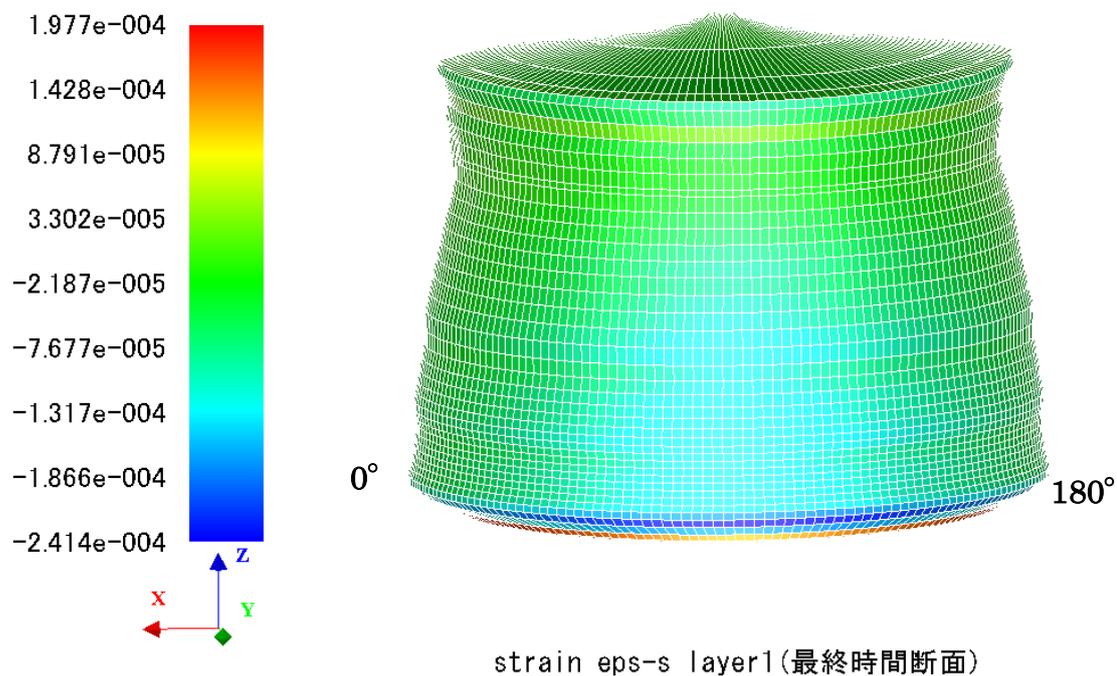


図 5-18 解析終了時内表面軸方向ひずみ (変形倍率 500 倍)

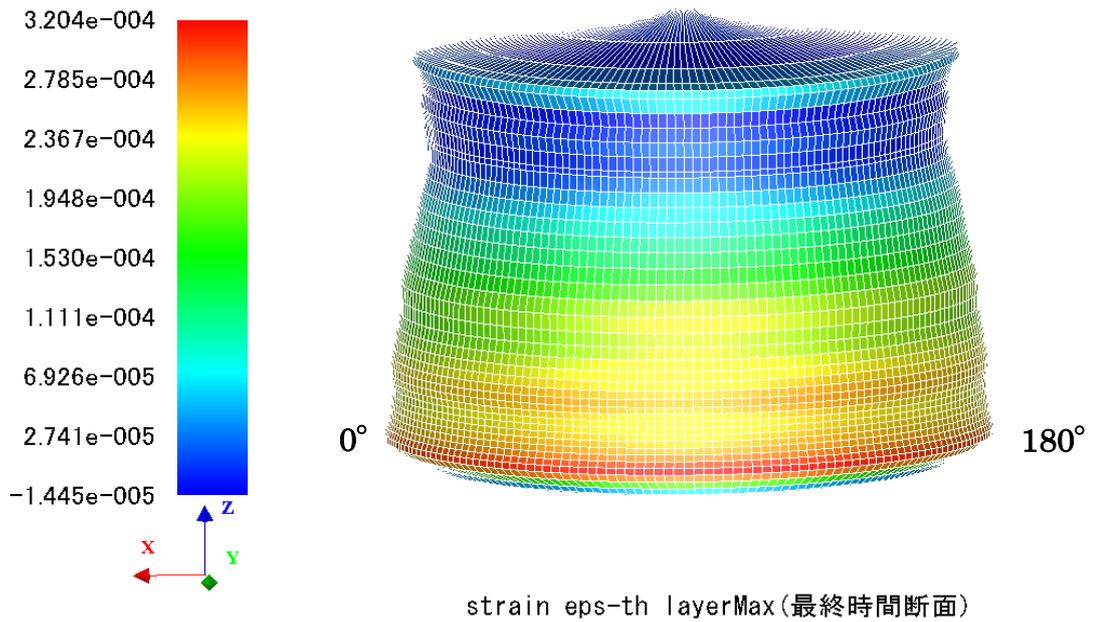


図 5-19 解析終了時外表面周方向ひずみ (変形倍率 500 倍)

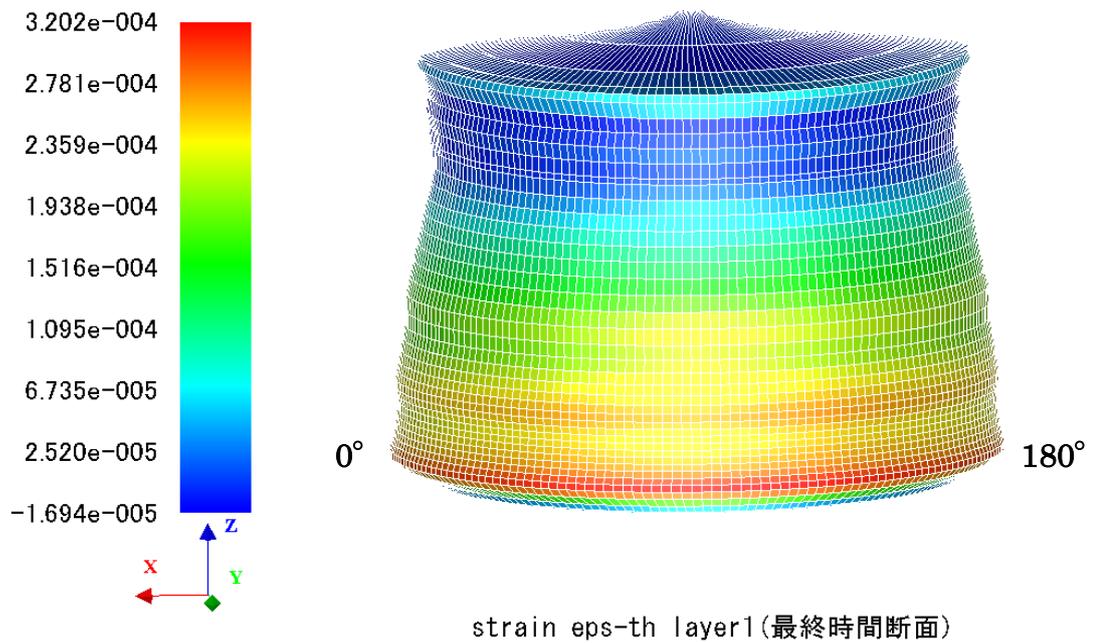


図 5-20 解析終了時内表面周方向ひずみ (変形倍率 500 倍)

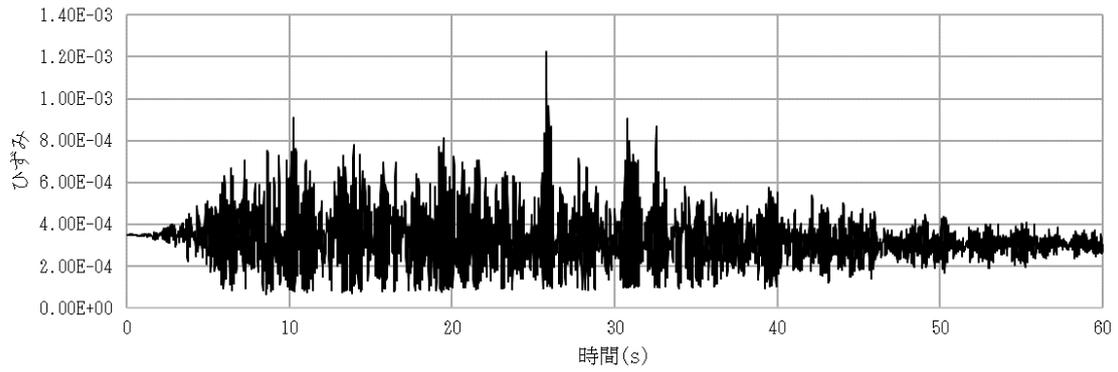


図 5-21 評価点 4 における相当ひずみ時刻歴

表 5-2 評価点 4 における相当ひずみの最大値と破断伸びの比較

相当ひずみの最大値 ϵ_{\max} (%)	破断伸び (%)
0.123	17

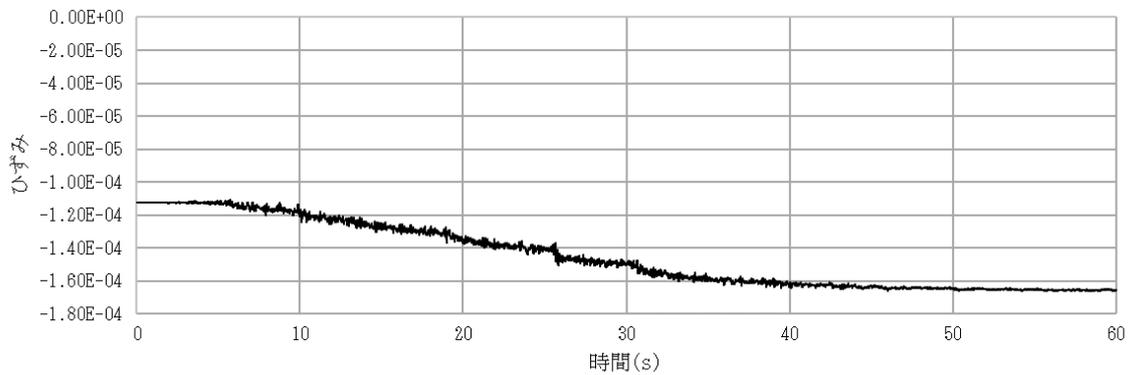


図 5-22 評価点 3 における軸方向ひずみ時刻歴

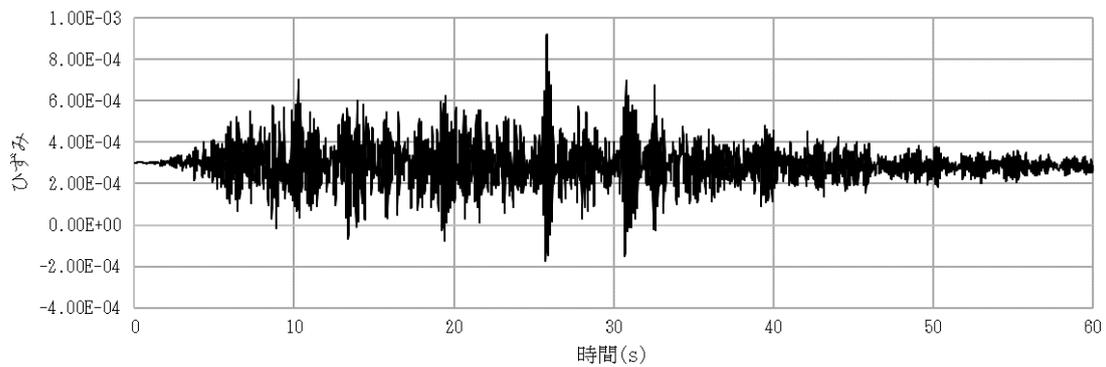


図 5-23 評価点 4 における周方向ひずみ時刻歴

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2及び評価点4について、ひずみの時刻歴（図5-14及び図5-23）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2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' (回)	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 (回)	疲労累積係数 U_f
937	1.25×10^{-3}	259	10389	0.0902

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	293	509
		せん断	117	392

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、地震応答解析により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. 添付資料

- (1) 損傷形態の評価における座屈の扱い及び初期不整の影響
- (2) 曲げせん断荷重と内圧を受ける円筒容器の座屈形態

8. 参考文献

- (1) 渡邊高朗, 小澤潤治, 大野造正, 北村達也, 鶴田賢二, 「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－」, 東急建設技術研究所報 No. 32 (2007 年)
- (2) 日本機械学会, 「機械工学便覧 日本機械学会編」, B1-77 ページ (1996 年)

損傷形態の評価における座屈の扱い及び初期不整の影響

1. 概要

本資料では、損傷形態の評価における座屈の扱い及び初期不整の影響について示す。

2. 損傷形態の評価における座屈の扱い

損傷形態の評価では、胴のバウンダリ機能及び基礎ボルトの支持機能の確認を目的としているため、座屈は評価項目としない。座屈発生後に変位が急増しないことや、座屈発生から貫通き裂発生までに余裕があることについては図1のとおり参考文献(1)に知見が示されている。

3. 初期不整の影響

損傷形態の評価では、タンクに初期不整は考慮していないため、初期不整により座屈が生じやすくなると考えられることから、その影響について以下に示す。

3.1 胴への影響

参考文献(2)及び参考文献(3)において、初期不整のせん断座屈への影響が示されており、参考文献(2)では静的な座屈解析において板厚の3倍程度の初期不整に対して降伏耐力の低下が20%を下回ることを、参考文献(3)では板厚の4倍程度の初期不整に対して降伏耐力の低下が5%程度であることが示されている。損傷形態の評価では、タンクの荷重及び変位の関係から大きな座屈が生じていないこと、胴に生じる相当ひずみの最大値が破断伸びよりも十分小さいこと、保守的な疲労評価方法によって求めた胴の疲労累積係数が1よりも十分小さいことを確認しているため、初期不整による胴への影響は小さいと考える。

3.2 基礎ボルトへの影響

基礎ボルトの評価ではタンク基礎部の荷重を用いるが、タンクに座屈が生じると、応答低減効果によりタンク基礎部に生じる荷重は小さくなる(図1参照)。そのため、基礎ボルトについては、初期不整を考慮していない現状の評価結果が保守的なものである。

4. まとめ

本資料では、損傷形態の評価における座屈の扱い及び初期不整の影響について示した。

5. 参考文献

- (1) 社団法人 日本電気協会, 「原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4 6 0 1 - 2008」, 2009年
- (2) 小久保邦雄, 長島英明, 高柳政明, 間所学, 「円筒かくのせん断座屈の解析(第1報, 初期不整の影響)」, 日本機械学会論文集(A編), 56巻532号(1990年12月), No. 90-0320B
- (3) 伊藤智博, 藤田勝久, 永田薫, 馬場金司, 越智真弓, 「地震下における円筒殻の動的座屈解析(第1報, 理論検討と初期不整の影響評価)」, 日本機械学会論文集(C編), 58巻552号(1992年8月), No. 91-1511

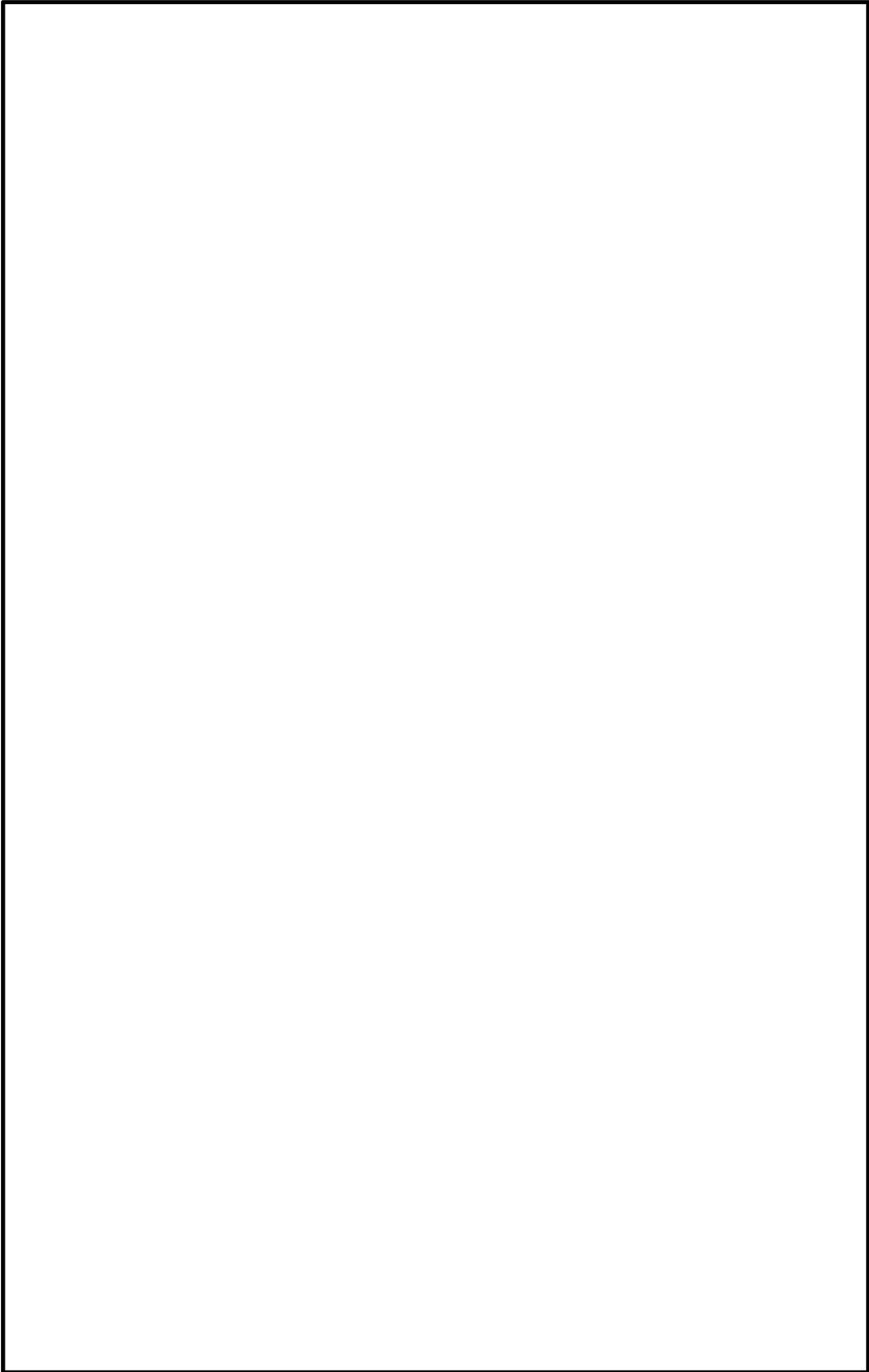


図 1 (1/2) タンクの座屈発生後の応答に関する知見 (J E A C 4 6 0 1-2008 抜粋)

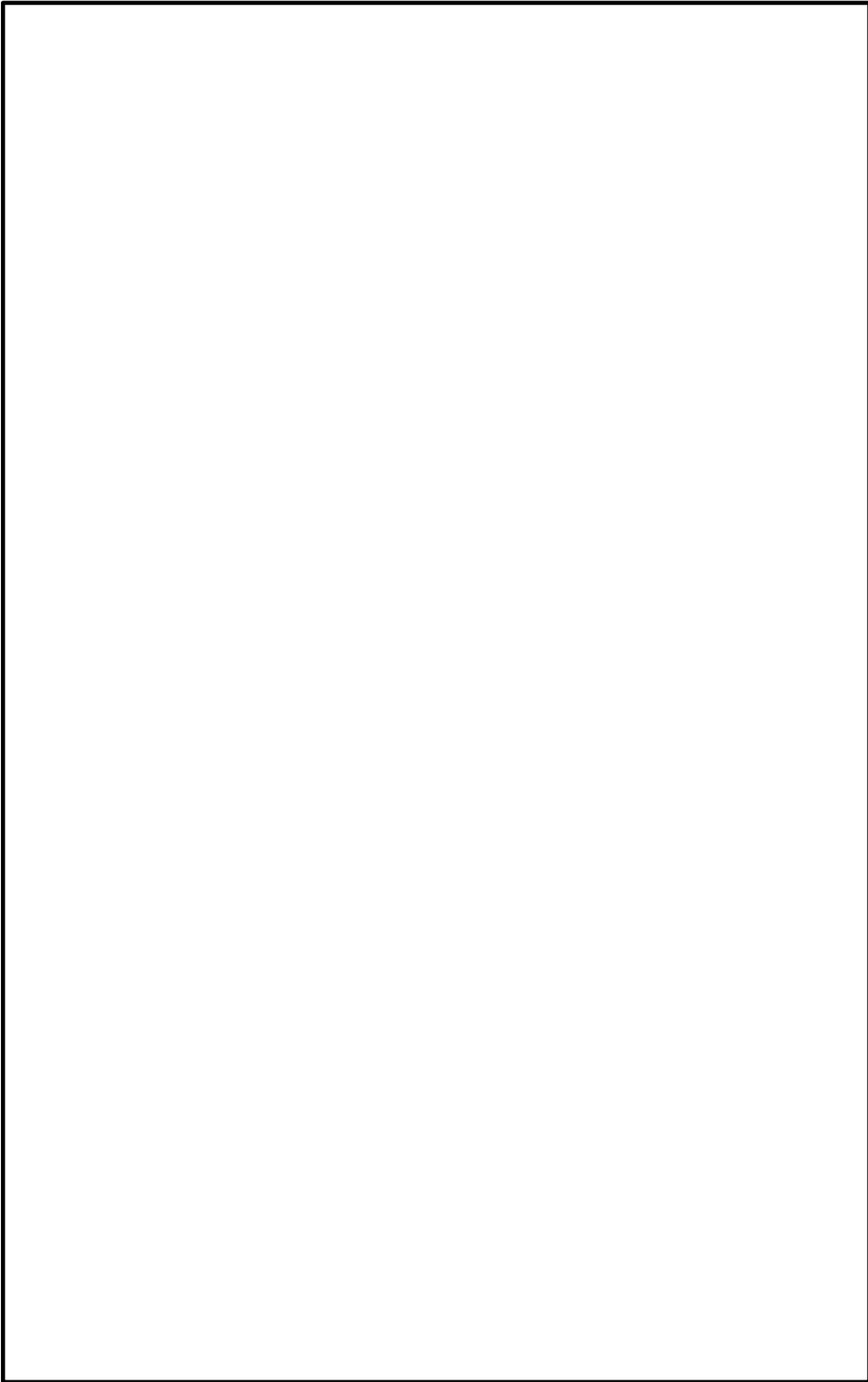


図1 (2/2) タンクの座屈発生後の応答に関する知見 (J E A C 4 6 0 1 -2008 抜粋)

曲げせん断荷重と内圧を受ける円筒容器の座屈形態

1. 概要

本資料では、曲げせん断荷重と内圧を受ける円筒容器の座屈形態に関する知見を示す。

2. 曲げせん断荷重と内圧を受ける円筒容器の座屈形態

参考文献 (1) において、図 1 (1/3) 及び図 1 (2/3) のとおり、内圧を受ける容器については象脚座屈が生じやすく、内圧による周方向引張応力 σ_h と降伏応力 σ_y の比 σ_h / σ_y により、座屈形態が変わるという知見が示されている。 $\sigma_h / \sigma_y < 0.3$ の場合には不伸長座屈 (せん断座屈又はダイヤモンド座屈) が、 $\sigma_h / \sigma_y > 0.3$ の場合には象脚座屈が生じやすく、図 1 (3/3) において、内圧と曲げせん断荷重を受ける容器について試験結果との対応が示されている。また、参考文献 (1) における図 1 の座屈形態の知見は、参考文献 (2) においても試験結果と良く対応することが示されている。

損傷形態の評価を行った補助復水貯蔵タンクについては、内圧として静水圧のみを考慮した場合に $\sigma_h / \sigma_y = 0.25$ 、内圧として静水圧及び鉛直方向地震による水圧を考慮した場合に $\sigma_h / \sigma_y = 0.47$ (鉛直方向震度による算出値) であり、座屈形態の知見によると比較的象脚座屈が生じやすいと考えられる。損傷形態の評価においてもタンク下部に残留変形が生じていることから、軽微な象脚座屈が生じていると考えられる。

3. 参考文献

- (1) 容器構造設計指針・同解説 (日本建築学会 (2010))
- (2) 原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4 6 0 1 - 2008 (社団法人 日本電気協会 (2009))

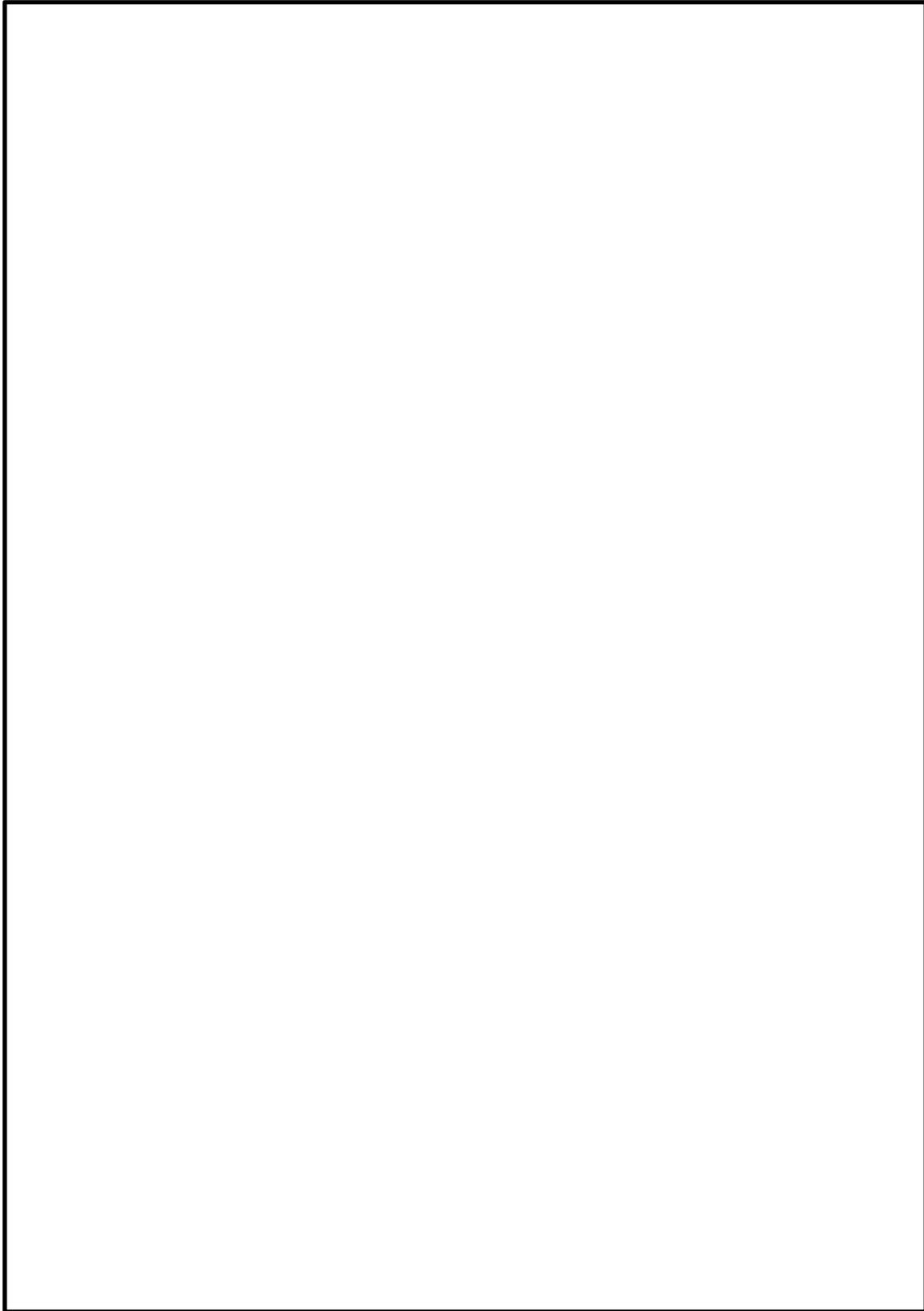


図1 (1/3) 曲げせん断荷重と内圧を受ける円筒容器の座屈形態に関する知見
(容器構造設計指針・同解説 抜粋)

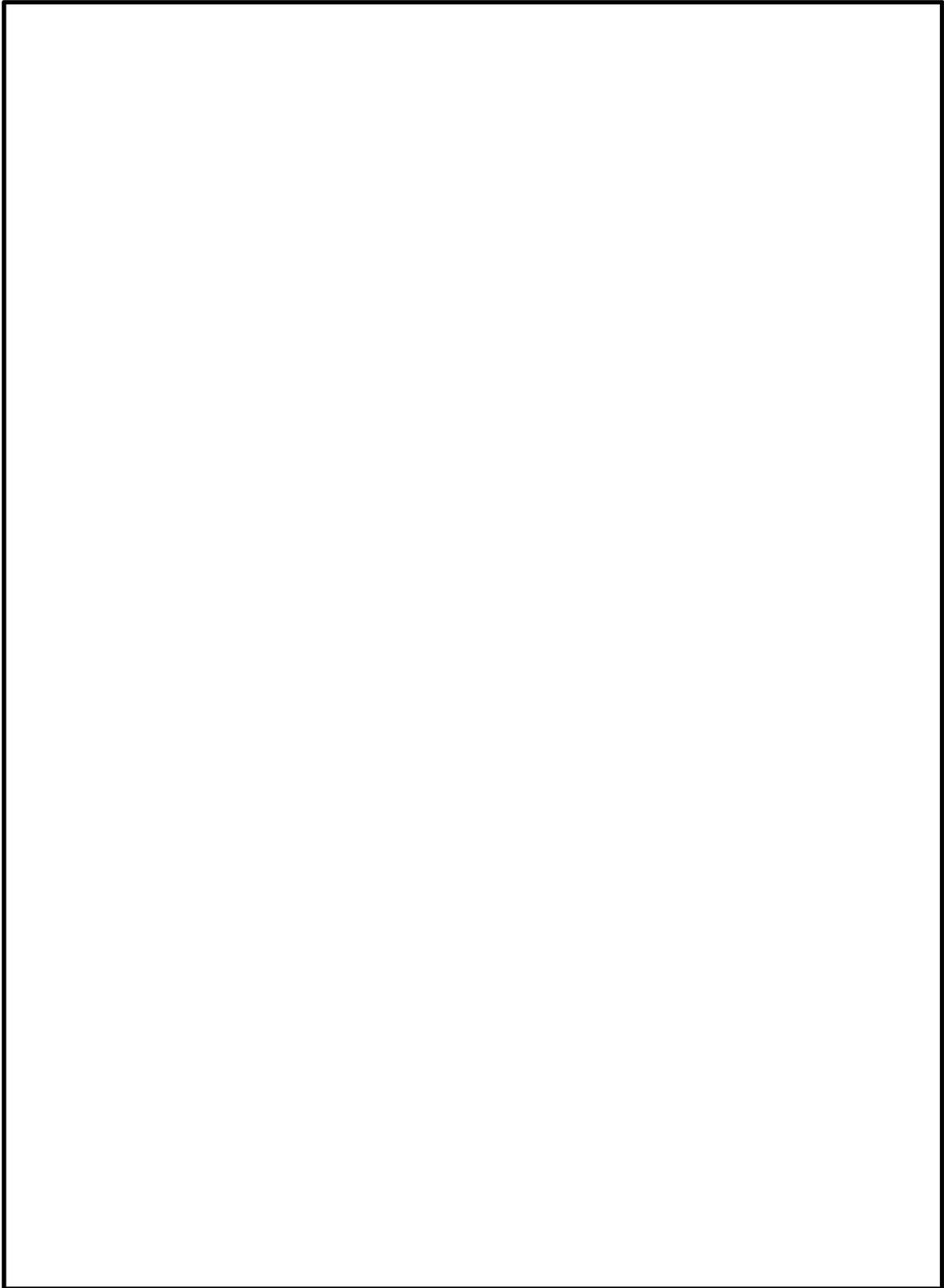


図1 (2/3) 曲げせん断荷重と内圧を受ける円筒容器の座屈形態に関する知見
(容器構造設計指針・同解説 抜粋)

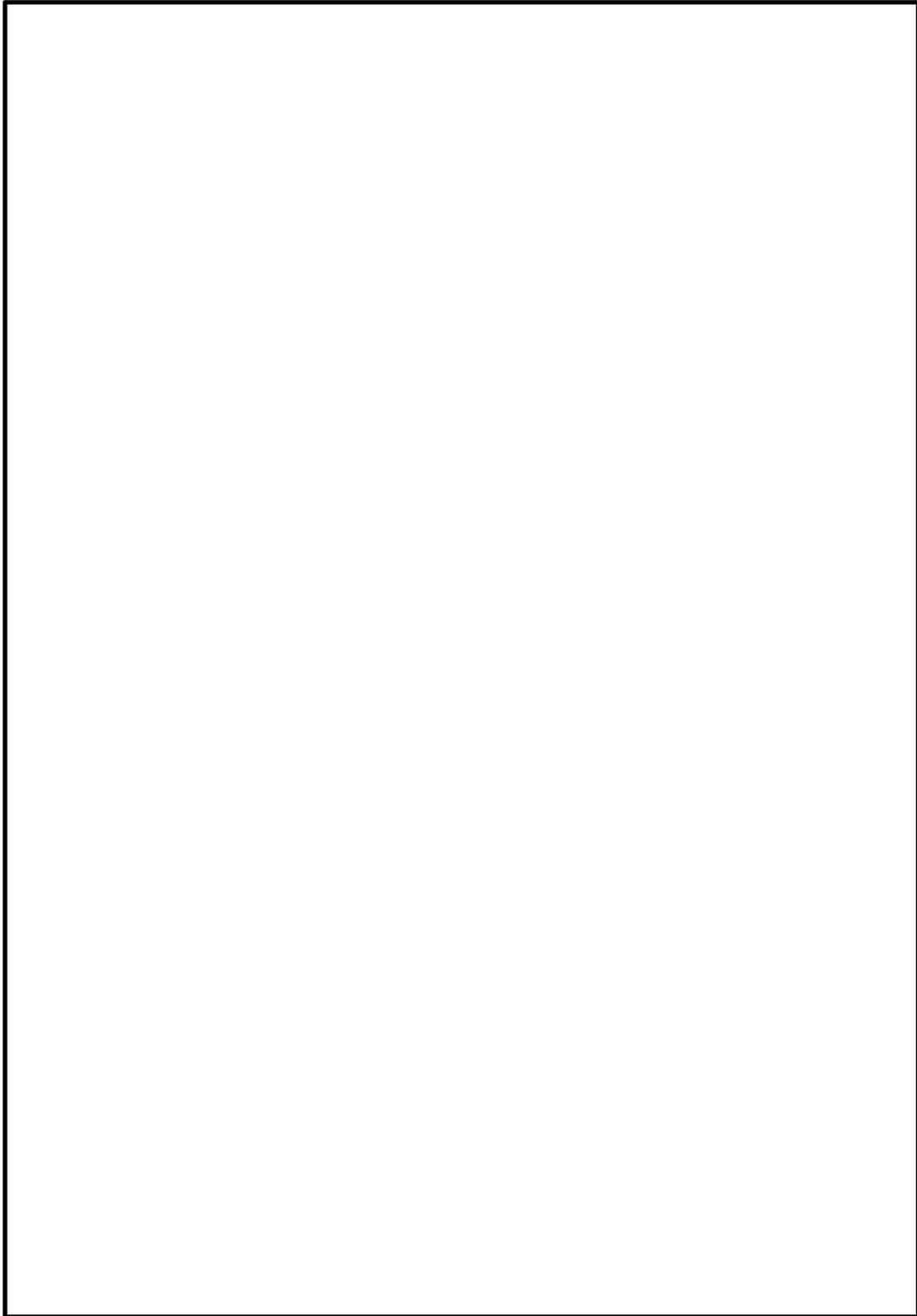


図1 (3/3) 曲げせん断荷重と内圧を受ける円筒容器の座屈形態に関する知見
(容器構造設計指針・同解説 抜粋)

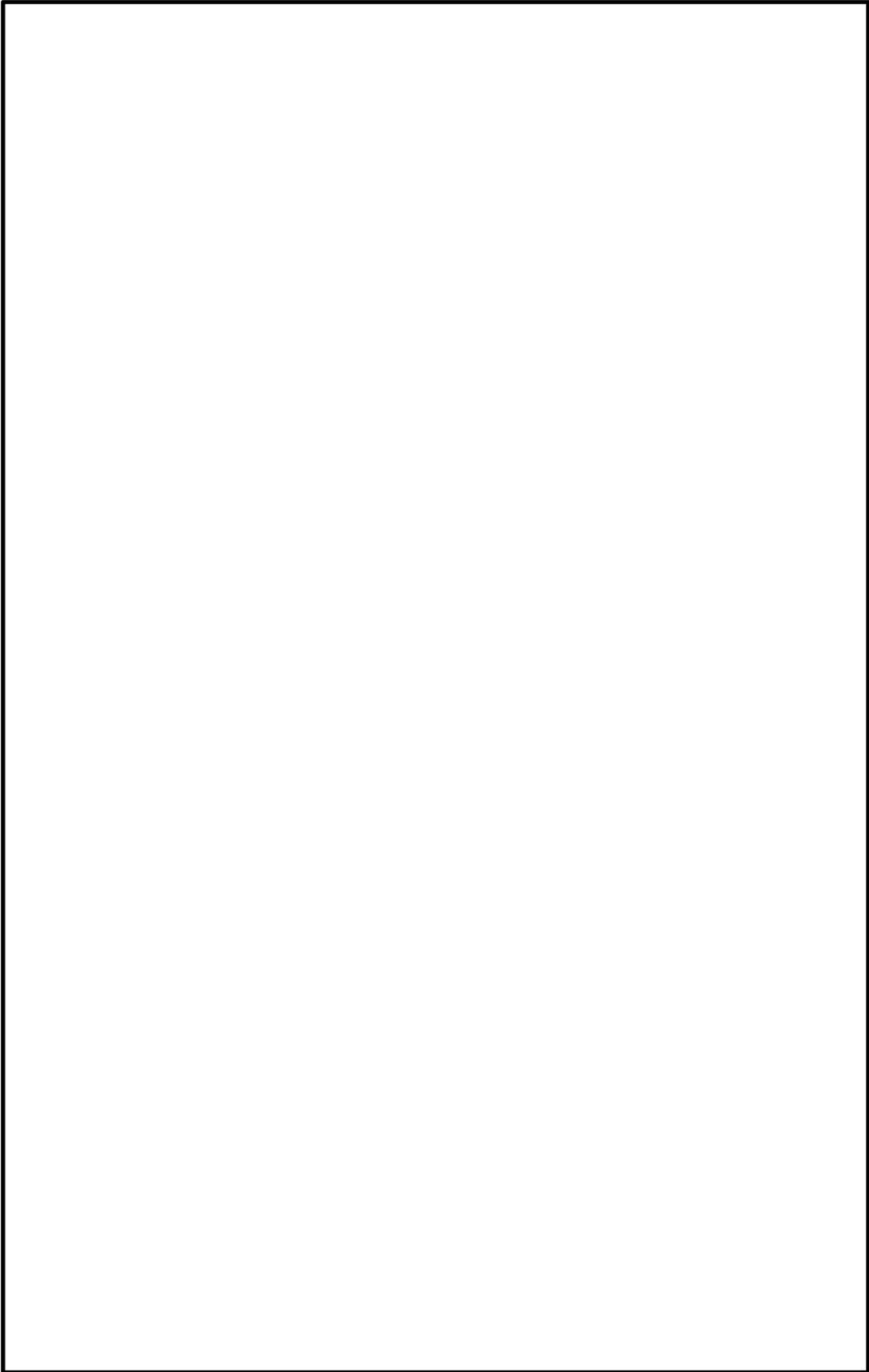


図 2 (1/2) タンクの座屈発形態に関する知見 (J E A C 4 6 0 1-2008 抜粋)

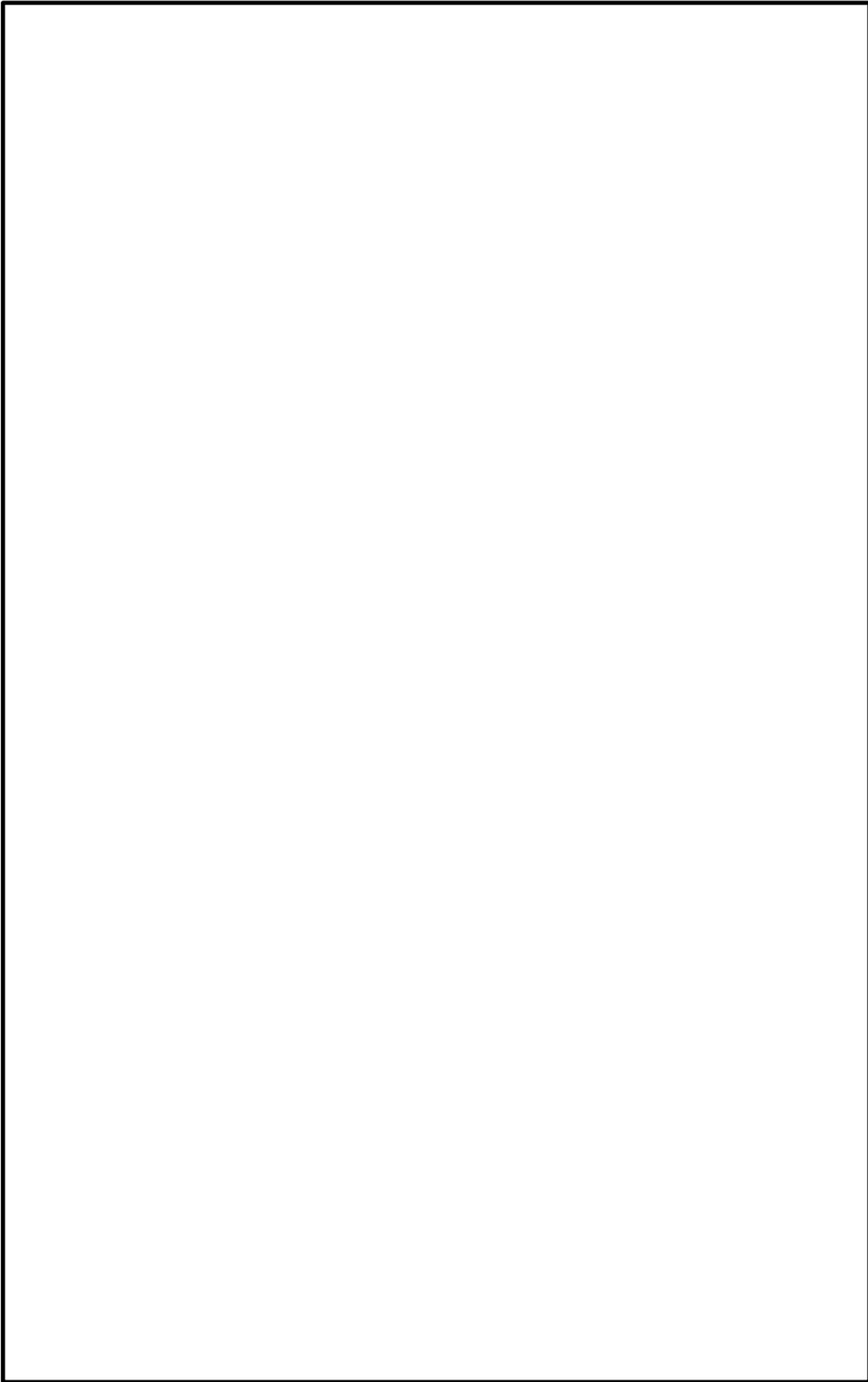


図 2 (2/2) タンクの座屈発形態に関する知見 (J E A C 4 6 0 1 -2008 抜粋)

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 動的流体構造連成座屈解析	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
4. 添付資料	5
5. 参考文献	5

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	AXIS
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，流体構造連成解析の機能を有している。</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，解析結果が理論解と概ね一致することを確認している。 ・通産省資源エネルギー庁の委託研究「高速増殖炉技術確証試験—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，試験結果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，原子力発電所の薄肉円筒タンクに生じた地震被害の再現解析における使用実績がある。 ・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、非粘性及び非回転流れとして扱う。

3.3 解析手法

3.3.1 動的流体構造連成座屈解析

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

一般的に境界面の流体圧力による外力ベクトルは(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、動的流体構造連成座屈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) 静的弾性座屈解析及び静的弾塑性座屈解析

参考文献 (1) における静的弾性座屈解析及び静的弾塑性座屈解析の検証の概要を以下に示す。

・静的弾性座屈解析に関する検証内容

部分球殻を対象とした静的弾性座屈解析において、AXISの解析結果がABAQUSの解析結果及び理論解と良く一致していることを確認している。

・静的弾塑性座屈解析に関する検証内容

円筒を対象とした静的弾塑性座屈解析において、せん断座屈及び曲げ座屈についてはAXISの解析結果がABAQUSの解析結果及び試験結果と良く一致していることを確認している。

(2) 動的流体構造連成座屈解析

参考文献 (2) 及び参考文献 (3) に示す論文における動的流体構造連成座屈解析の検証の概要を以下に示す。

・動的流体構造連成座屈解析に関する検証内容

参考文献(2)では、内包水を含む円筒容器を対象とした動的流体構造連成弾性座屈解析において、AXISの解析結果が加振試験結果と良く一致していることを確認している。

また、参考文献(3)では、内包水を含む二重円筒容器を対象とした動的流体構造連成弾塑性座屈解析において、AXISの解析結果が加振試験結果と良く一致していることを確認している。

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、参考文献(4)において原子力発電所の薄肉円筒タンクに生じた地震被害の再現解析における使用実績がある。その概要を添付資料(1)に示す。
- ・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。

4. 添付資料

- (1) 薄肉円筒タンクの地震被害の再現解析における AXIS の使用実績

5. 参考文献

- (1) 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 年 12 月), No. 92-0272
- (2) 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」, 日本建築学会構造工学論文集 Vol. 43B (1997 年 3 月)
- (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」, 土木学会構造工学論文集 Vol. 44A (1998 年 3 月)
- (4) 松浦真一, 豊田幸宏, 「原子力発電所屋外鋼製円筒タンクの地震時座屈挙動解析」, 電力中央研究所報告, 受託報告:N08514 (2009 年 5 月)

鋼製円筒タンクの地震被害の再現解析における AXIS の使用実績

1. 概要

新潟県中越沖地震においては、東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所で設計時の想定を上回る地震動が観測され、Cクラスの屋外鋼製円筒タンクのうち、一部のタンクにおいて座屈変形等の損傷が生じた。通常的设计評価では、タンク形状及び作用荷重を単純化し、座屈強度を安全側に評価しており、設計評価では実際の損傷状態を再現して説明することは困難である。このため、地震によるタンクの損傷状態の再現解析を目的として、タンク形状、材料の弾塑性特性、流体連成振動の効果等を考慮した時刻歴解析が AXIS により実施されている。

2. 解析対象

柏崎刈羽原子力発電所の No. 1 純水タンクを解析対象とした AXIS の再現解析の内容を示す。タンクの概要を表 1 に、地震後の全景写真を図 1 に示す。表 1 に示すとおり、No. 1 純水タンクは、胴の上部及び下部で変形が生じており、基礎ボルトには破断が生じている。胴の上部と下部で異なる変形が生じている当該タンクに対して、再現解析により変形状態の再現が可能か確認を行った。当該タンクには基礎ボルトの破断も生じているが、再現解析においてはタンク基礎部を固定した条件で解析を行った。

表 1 No. 1 純水タンクの概要

代表寸法 (mm)			損傷状態
半径	板厚	胴部長さ	
7500	4.5~9	12800	<ul style="list-style-type: none"> ・ 胴上部の変形 ・ 胴下部の変形 (象脚座屈) ・ 基礎ボルト破断 (M20×12)

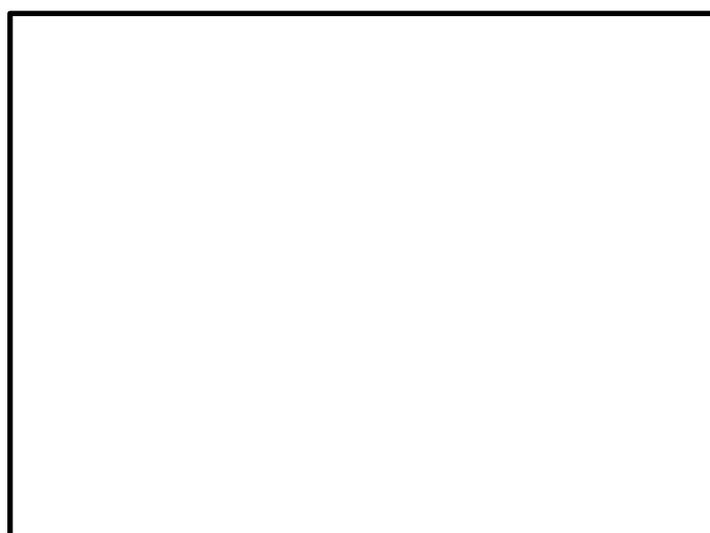


図 1 No. 1 純水タンクの全景写真

(容器構造設計指針・同解説 (日本建築学会 (2010)) から抜粋)

3. 解析モデル

解析モデルを図2に、解析に使用した物性値等を表2に示す。その他解析モデルのモデル化条件については、別紙6と同様である。

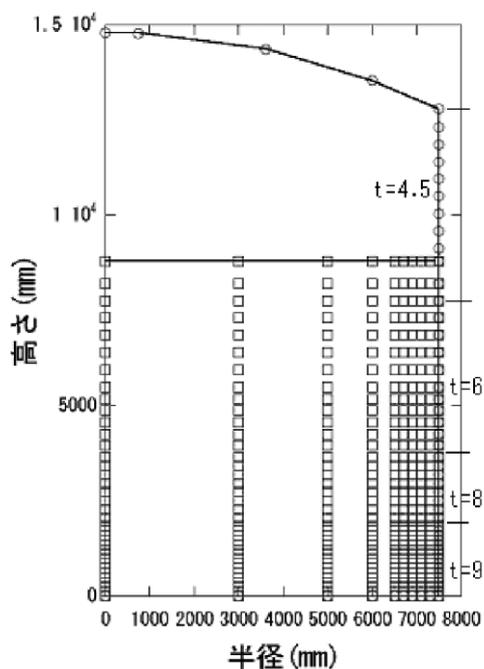


図2 No.1 純水タンクの解析モデル

表2 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 (MPa)	降伏応力 (MPa)	ポアソン比	硬化則	2次勾配 (MPa)
容器本体	SS400	7.9×10^{-6}	205.8×10^3	234.2	0.3	等方硬化則	810
内包水*	—	1.0×10^{-6}	—	—	—	—	—

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. 固有値解析結果

静水圧を負荷した状態で固有値解析を実施した結果、別紙6と同様にはり振動モード及び複数の面外振動モードが確認されている。固有値解析の結果を図3に、地震応答において支配的であるはり振動モードの振動モード図を図4に示す。

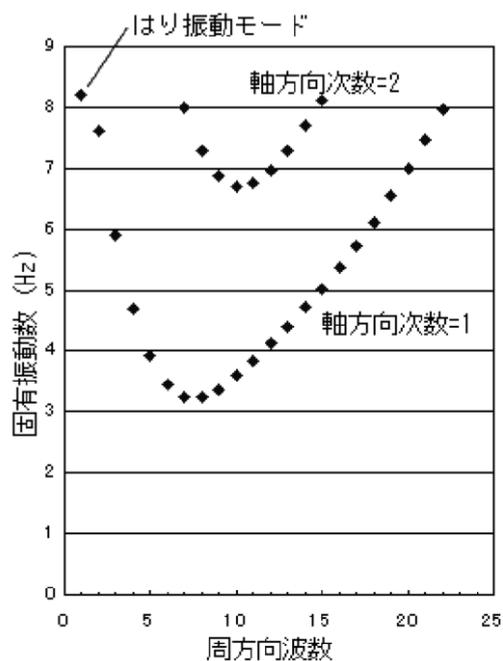
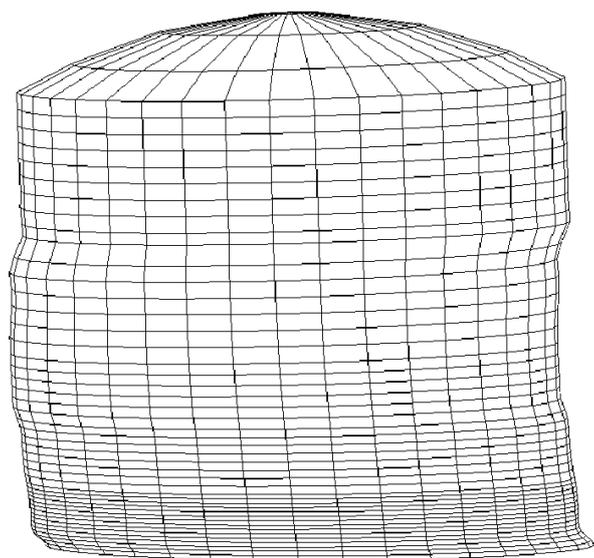


図3 固有値解析結果



【固有振動数 8.20Hz】

図4 No.1 純水タンクのはり振動モード

5. 解析用地震動

解析用地震動の加速度時刻歴波を図 5 に示す。解析用地震動には、No. 1 純水タンクに近い荒浜側観測小屋で観測された水平方向及び鉛直方向の地震動を使用している。

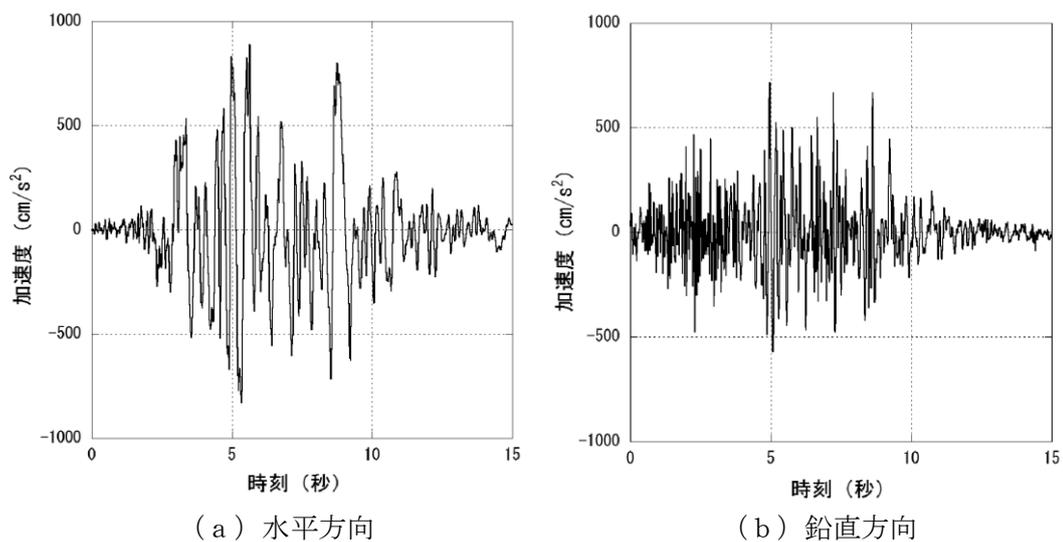


図 5 解析用地震動の加速度時刻歴波

6. 地震応答解析結果

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 6 に示す。また、解析終了時のタンクの変形状態について図 7 に示す。図 6 (b) の鉛直方向変位において約 3s 時点からドリフトが生じており、これはタンク下部に象脚座屈による変形が生じたことによるものである。また、図 7 について、4.68s 時点ではタンク右下端部に象脚座屈による変形が確認でき、12.90s 時点ではタンク上部の変形が確認できる。図 7 の 15.00s 時点では、タンク下部及び上部に変形が残留しており、これらの変形は表 1 におけるタンクの損傷状態と対応していることが確認できた。

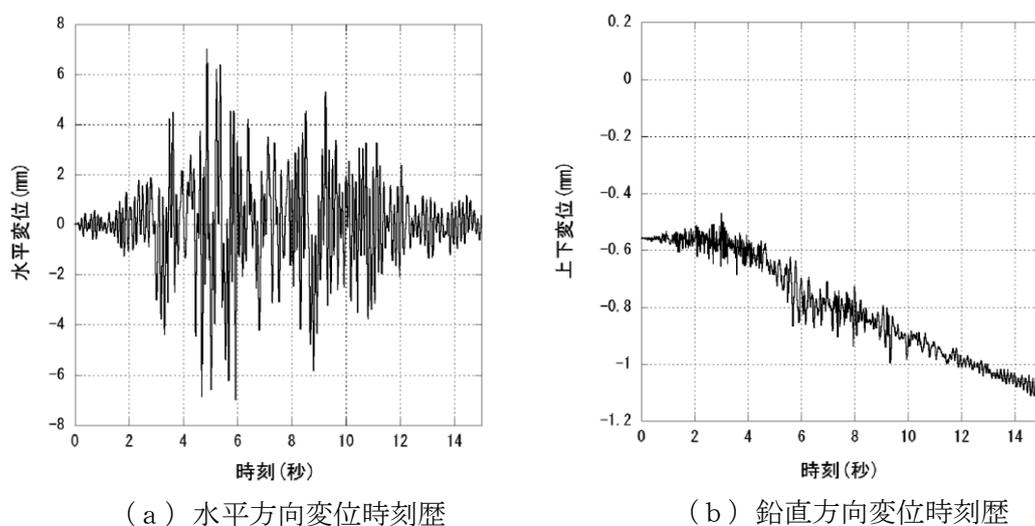


図 6 No. 1 純水タンクの円筒頂部の変位時刻歴

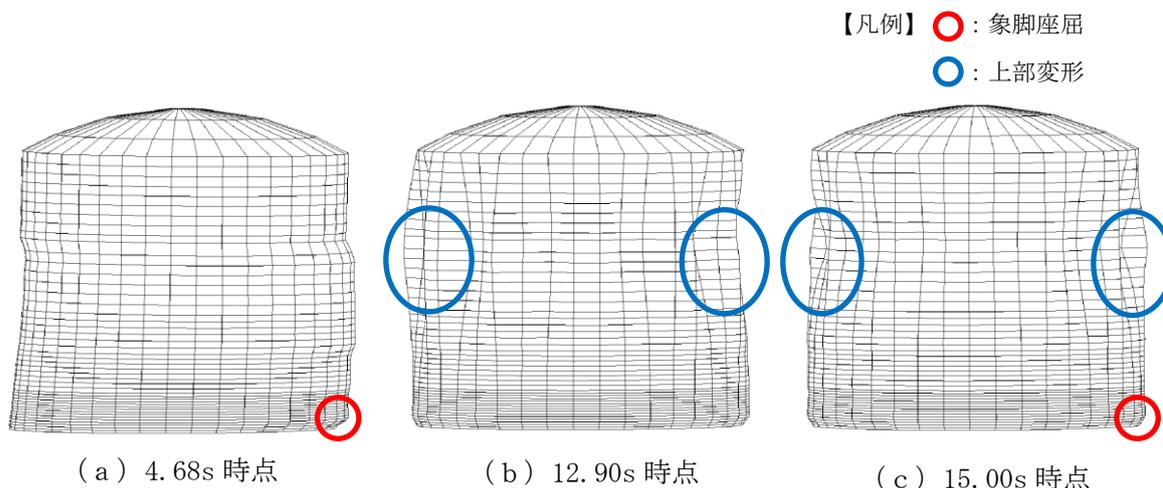


図 7 No. 1 純水タンクの変形状態 (変形倍率 500 倍)

7. まとめ

No. 1 純水タンクについて、AXIS を用いた地震による損傷状態の再現解析の実績を示した。解析の結果、タンク下部及び上部に変形が生じることを確認でき、実際の損傷状態との対応が確認できた。