

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0600-11_改9
提出年月日	2021年8月5日

補足-600-11 サプレッションチェンバの耐震評価における内部水質の考え方の変更等についての
補足説明資料

目次

1.	はじめに	1
2.	サプレッションチェンバ及びボックスサポートについて	4
2.1	サプレッションチェンバ及びボックスサポートの構造	7
2.2	サプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震補強対策	8
2.2.1	耐震補強対策の目的	8
2.2.2	耐震補強対策の内容	8
3.	サプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震評価	14
3.1	評価手順	14
3.2	地震応答解析	17
3.2.1	基本方針	17
3.2.2	地震応答解析モデル	17
3.3	応力解析	21
3.3.1	基本方針	21
3.3.2	応力評価点	21
3.3.3	応力解析方法	25
3.4	既工認と今回工認における耐震評価手法の相違	26
4.	地震応答解析の詳細	30
4.1	地震応答解析モデル（3次元はりモデル）	30
4.1.1	サプレッションチェンバ内部水の有効質量算定	30
4.1.2	地震応答解析モデルにおける内部水の有効質量の設定	33
4.1.3	サプレッションチェンバ本体のモデル化	37
4.1.4	ボックスサポート取付部のばね剛性の算定	38
4.1.5	ボックスサポートのモデル化	41
4.2	地震応答解析モデル（3次元はりモデル）の適用性確認	49
4.2.1	適用性の確認方針（適用性確認の着眼点）	49
4.2.2	適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）	51
4.2.3	3次元はりモデルと適用性確認用解析モデルとのモデル化比較	52
4.3	地震応答解析に対する内部水の有効質量算出法及び高振動数領域の影響検討	72
4.4	スロッシング荷重	76
5.	応力解析の詳細	78
5.1	応力評価フロー	78
5.2	応力評価点	79
5.2.1	サプレッションチェンバの応力評価点	79
5.2.2	ボックスサポートの応力評価点	81

5.3	応力解析モデル.....	83
5.3.1	サプレッションチェンバの応力解析モデル.....	83
5.3.2	フランジプレート（外側）の応力解析モデル.....	84
5.4	応力評価.....	85
5.4.1	サプレッションチェンバの応力評価.....	85
5.4.2	ボックスサポートの応力評価.....	87
6.	サプレッションチェンバ等の耐震評価における不確かさの考慮及び保守性.....	88
7.	サプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震評価結果.....	90
8.	まとめ.....	94

別紙 1	内部水の有効質量の適用およびその妥当性検証
別紙 2	サプレッションチェンバ内部水の地震応答解析モデルへの縮約方法及びその妥当性確認結果
別紙 3	地震応答解析モデルに対するバルジングの影響検討
別紙 4	サプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性の設定
別紙 5	適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）の設定
別紙 6	スロッシング荷重の算定方法
別紙 7	計算機コード（NASTRAN, OpenFOAM）の概要
別紙 8	内部水の有効質量の概要
別紙 9	規格類における内部水の有効質量の適用例
別紙 10	サプレッションチェンバの水位条件
別紙 11	地震時におけるトーラス型容器内部水の有効質量に係る研究の概要
別紙 12	内部水の有効質量比に対するスロッシング影響
別紙 13	振動試験の内部水の有効質量比
別紙 14	内部水の有効質量比に対する入力地震動の影響
別紙 15	サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング荷重及び有効質量の影響評価
別紙 16	規格基準における内部水の有効質量比との比較
別紙 17	原子炉建屋基礎版上における地震応答を用いる妥当性
別紙 18	ボックスサポートの耐震評価における応力算出方法の考え方
別紙 19	サプレッションチェンバ内の耐震補強対策等による有効性評価等への影響
別紙 20	サプレッションチェンバのモデル化に係る固有周期への影響検討

1. はじめに

本書は、女川原子力発電所第2号機（以下、女川2号機という。）の工事計画認可申請書添付資料「VI-2-9-2-1-2 サプレッションチェンバの耐震性についての計算書」及び「VI-2-9-2-1-5 ボックスサポートの耐震性についての計算書」における耐震評価手法についてまとめた資料である。

サプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震評価では、サプレッションチェンバ本体とそれを支持するボックスサポートを模擬した地震応答解析モデルを用いて地震荷重を算定し、それらに基づき、各部の構造強度評価を行うことで、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震性を評価するものである。

女川2号機の既工認及び今回工認における動的地震力及び静的地震力に対する耐震評価フローを図1-1, 1-2, 1-3, 1-4に示す。

女川2号機の既工認におけるサプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震評価は、簡便な扱いとして、サプレッションチェンバ内部水を含めたサプレッションチェンバ全体を剛と見做し、3次元はりモデルを用いた静的解析によりサプレッションチェンバの地震応答解析を実施していた。

今回工認においては、重大事故時のサプレッションチェンバの水位上昇に伴う内部水質量の増加、基準地震動の増大等を踏まえ、より詳細な地震応答解析を実施するため、より現実に近いサプレッションチェンバの内部水の挙動を考慮して内部水質量を従来の固定質量から有効質量へ変更する*。また、内部水の有効質量のモデル化、地震荷重の増大（内部水質量、基準地震動 S_s ）を踏まえ各部材に負荷される地震荷重を詳細に評価するため、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデルを既工認から精緻化及び詳細化を図り、サプレッションチェンバ本体に加えてボックスサポート等を考慮した3次元はりモデルによる動的解析（スペクトルモーダル解析）を適用することとした。なお、サプレッションチェンバ内部水質量の扱いを有効質量としたことに伴い、サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング荷重を流体解析にて算定することとした。

また、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震評価にあたっては、サプレッションチェンバとボックスサポートの取付部にばね剛性を模擬し考慮すること等に加えて、耐震性の向上を目的としたサプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震補強対策の内容を反映し、より詳細に評価を実施する。

なお、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析に3次元はりモデルを適用するにあたっては、妥当性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）による地震応答解析結果との比較検討を行い、耐震評価において考慮すべき振動モードが3次元はりモデルにて表現できていること等を確認している。

注記*：女川原子力発電所第2号炉審査資料「女川原子力発電所2号炉 設計基準対象施設について

4条 地震による損傷の防止 別紙—4 サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の変更について」（02-NP-0272(改114)（令和2年2月7日））参照

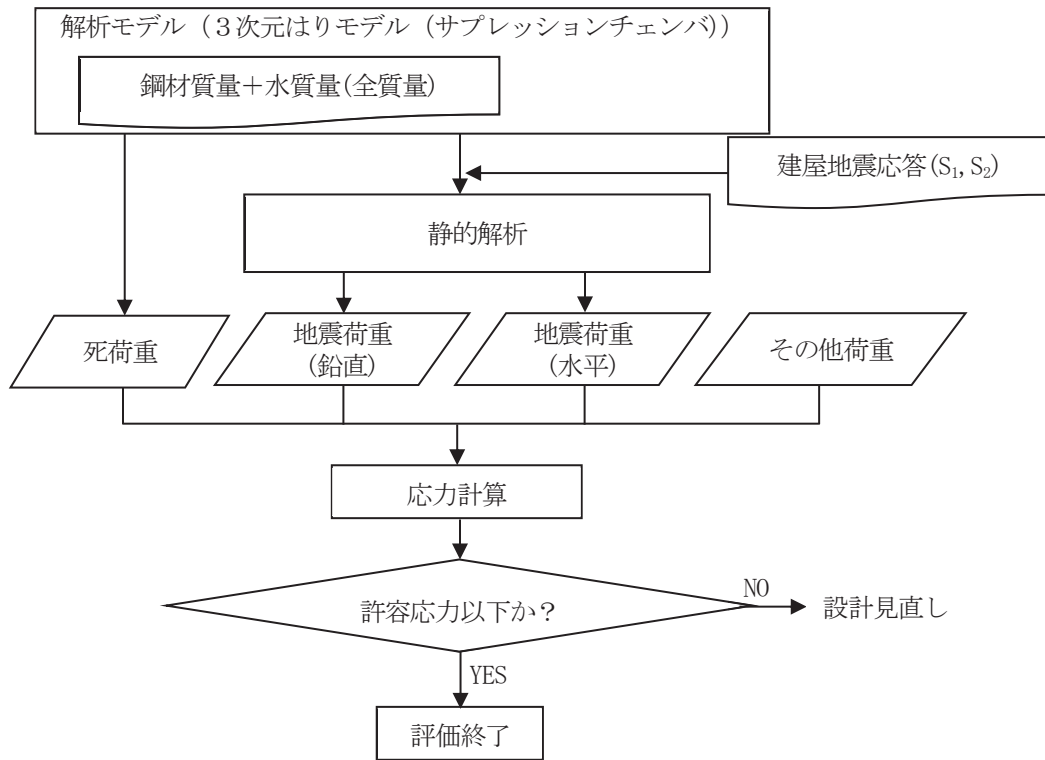


図 1-1 既工認におけるサプレッションチェンバの動的地震力による耐震評価フロー

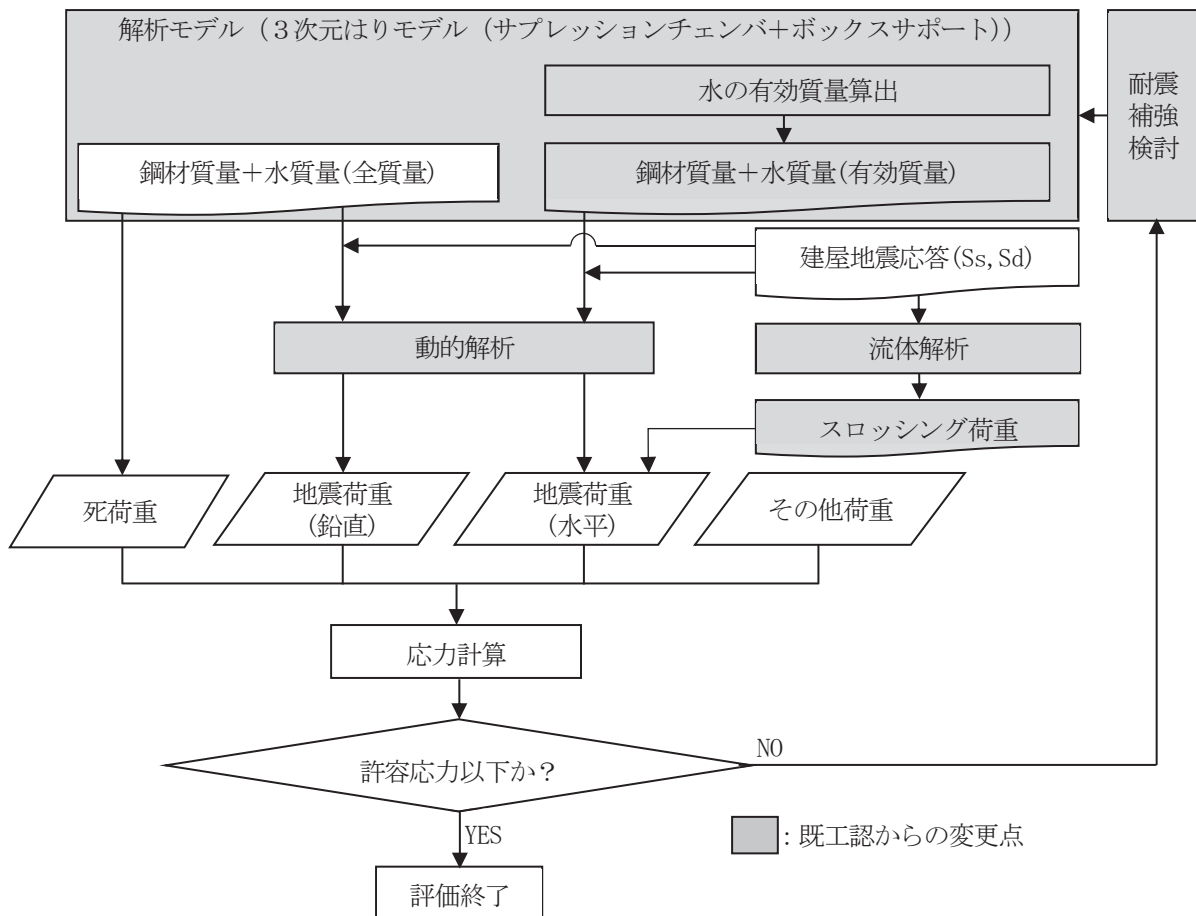


図 1-2 今回工認におけるサプレッションチェンバの動的地震力による耐震評価フロー

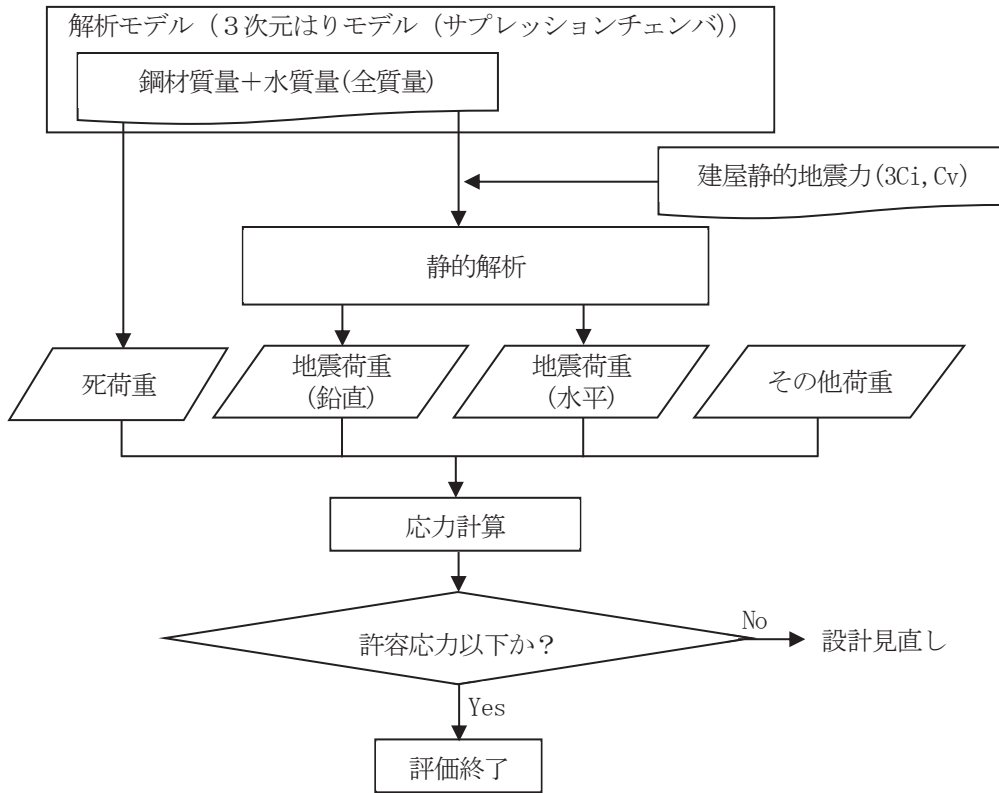


図 1-3 既工認におけるサプレッションチェンバの静的地震力による耐震評価フロー

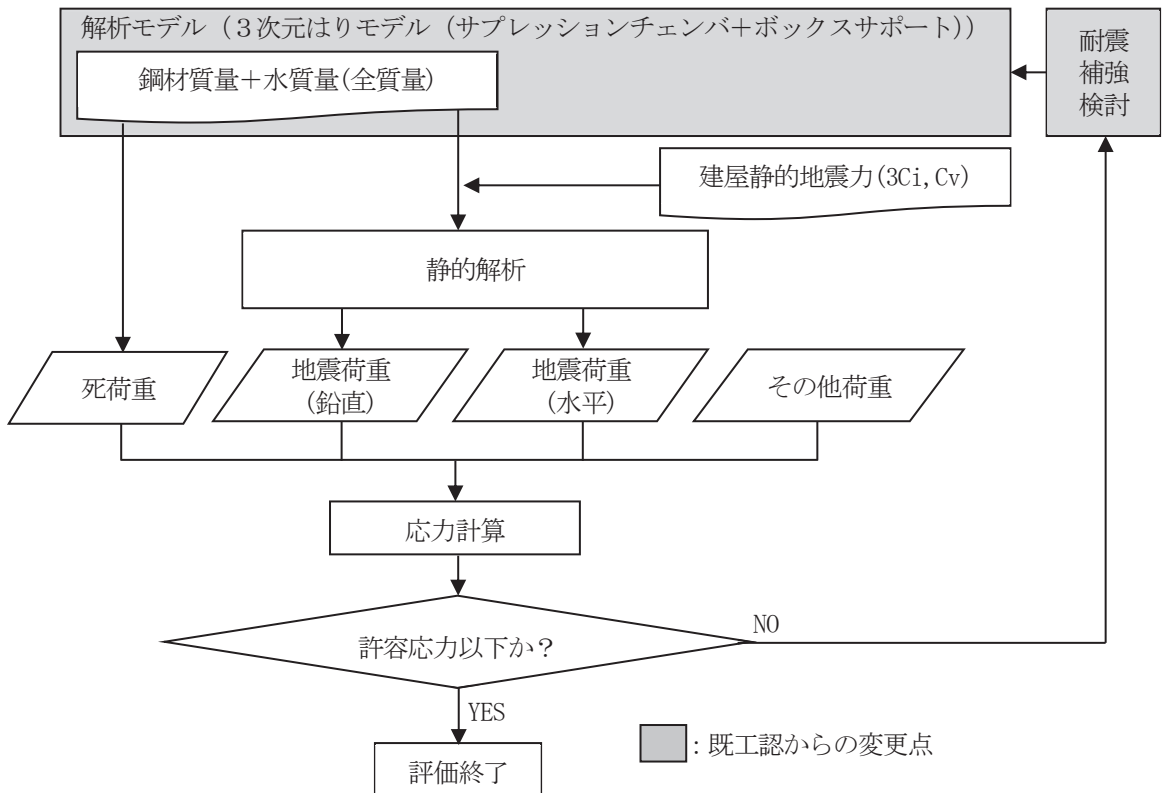


図 1-4 今回工認におけるサプレッションチェンバの静的地震力による耐震評価フロー

2. サプレッションチェンバ及びボックスサポートについて

2.1 サプレッションチェンバ及びボックスサポートの構造

女川2号機のサプレッションチェンバ及びボックスサポート構造概要図を図2.1-1に、ボックスサポート構造詳細図を図2.1-2に、サプレッションチェンバ断面概要図を図2.1-3に、サプレッションチェンバ諸元を表2.1-1に示す。

サプレッションチェンバは、大円が直径 \square mm、小円が直径 \square mm、板厚 \square mm、16セグメントの円筒を繋ぎ合わせた円環形状（トーラス状）の構造物である。また、各セグメントの継ぎ目部（以下、「胴エビ継手部」という）には箱状の支持構造物であるボックスサポートが大円の内側及び外側それぞれに16箇所の計32箇所に取り付けられており、それらが基礎ボルトを介して原子炉建屋基礎版上（O.P.-8, 100mm）に自立している。ボックスサポートは、サプレッションチェンバ（大円）の半径方向の熱膨張を吸収する目的で可動し、周方向に地震荷重を原子炉建屋基礎版に伝達させる構造となっている。サプレッションチェンバは、ドライウェルとベント管を介して接続されているが、ベント管のベント管ベローズにより振動が伝達しない構造としており、地震による揺れは、原子炉建屋基礎版上からボックスサポートを介しサプレッションチェンバに入力される（別紙17）。

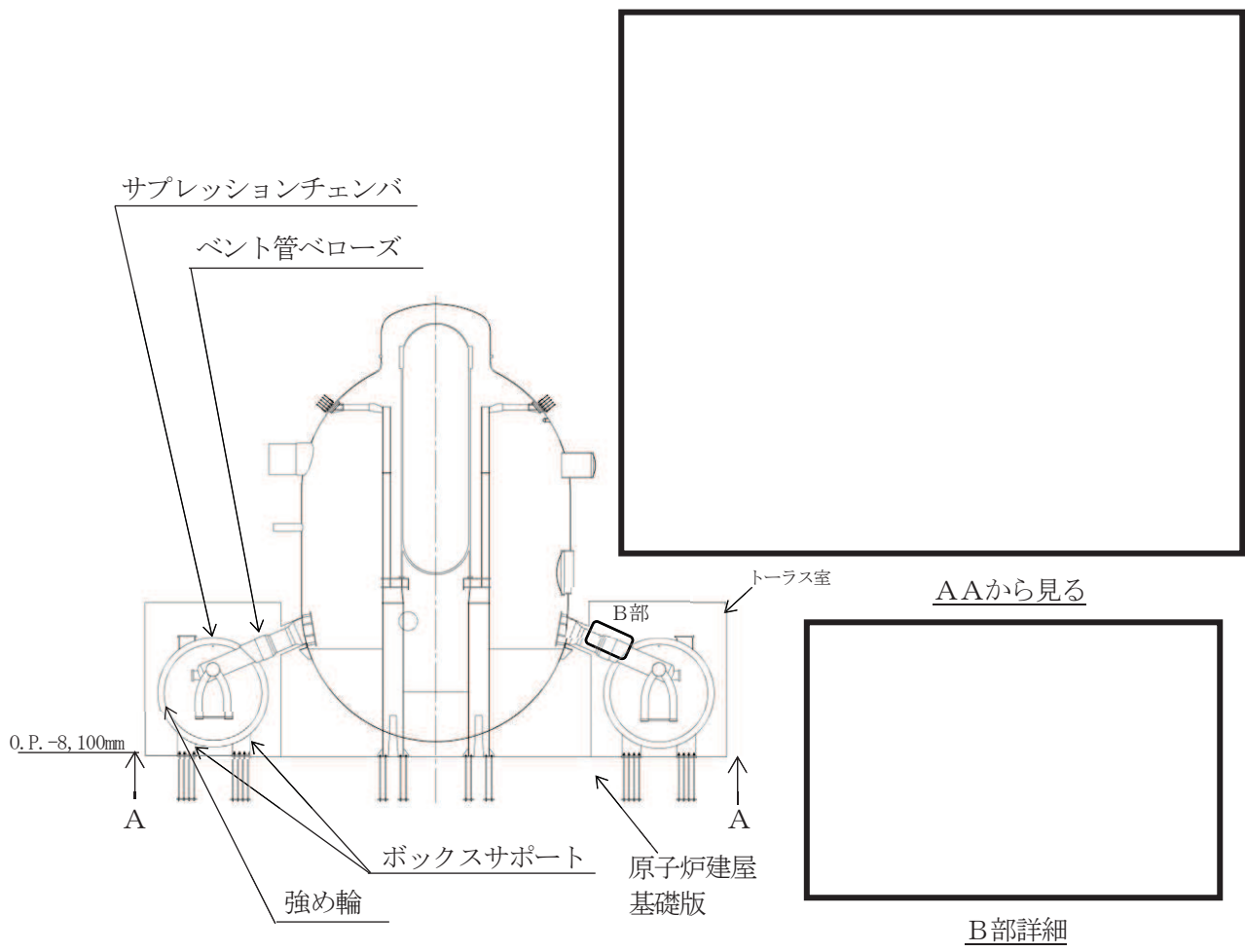


図 2. 1-1 サプレッションチェンバ及びボックスサポート構造概要図

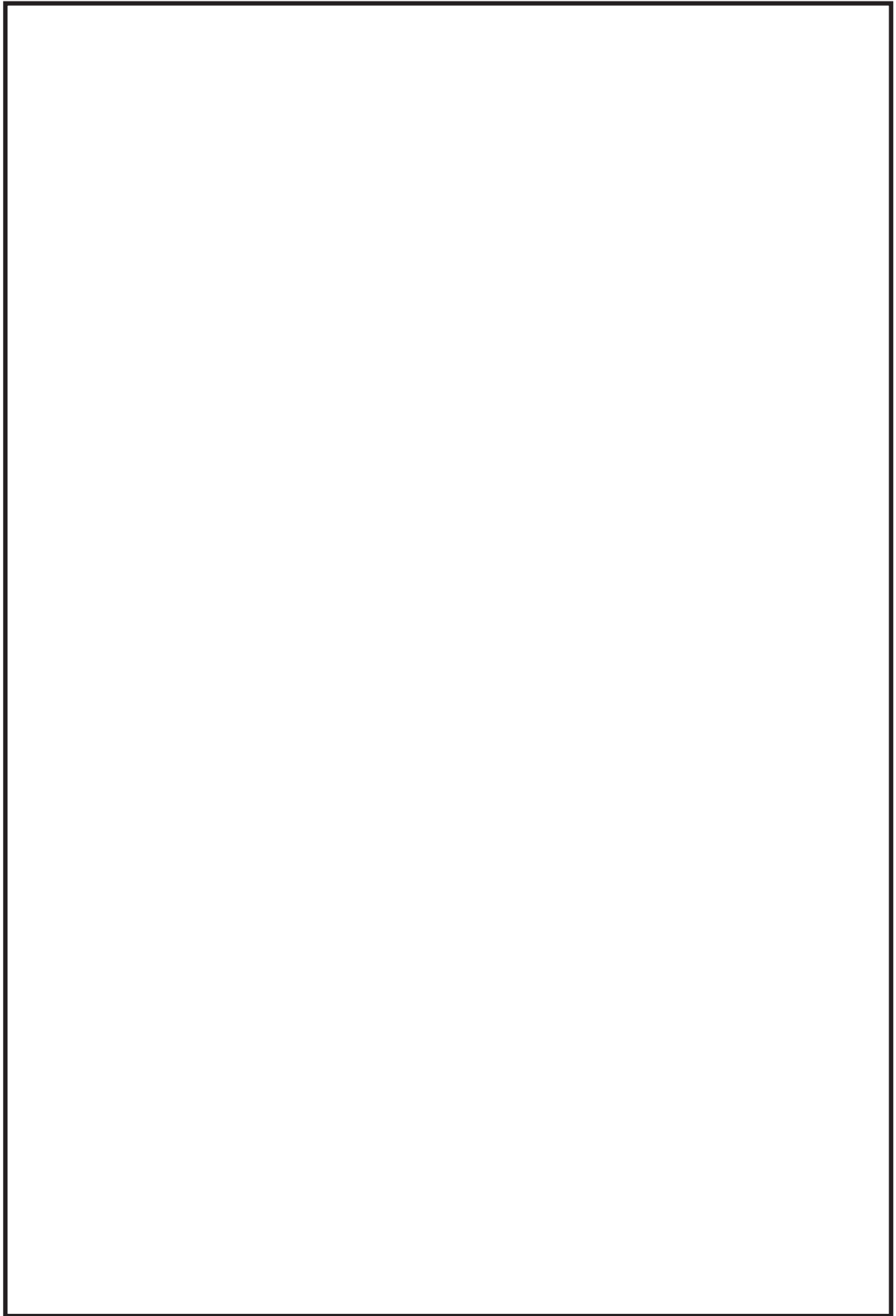


図 2.1-2 ボックスサポート構造詳細図



図 2.1-3 サプレッションチェンバ断面概要図

表 2.1-1 サプレッションチェンバ諸元

項目		内容	備考
耐震クラス		Sクラス	設計基準対象施設
設備分類		常設耐震重要重大事故防止設備 常設重要重大事故緩和設備	重大事故等対処設備
設置建屋		原子炉建屋	
設置高さ		O. P. -8, 100	原子炉建屋基礎版上
主要寸法	D		記号は図 2.1-1 に示す
	λ		
	t		
	θ		
サプレッションチェンバ質量 (内部水及びボックスサポート含む)		約 4,200 ton	通常運転水位における質量
		約 6,770 ton	耐震解析用重大事故等時水位* における質量
内部水質量		約 2,900 ton	通常運転水位における質量
		約 5,470 ton	耐震解析用重大事故等時水位* における質量

注記* 重大事故等時水位よりも高い水位（真空破壊装置下端位置）（別紙 10 参照）

2.2 サプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震補強対策

2.2.1 耐震補強対策の目的

今回工認においては、重大事故等時のサプレッションチェンバの水位上昇に伴う内部水質量の増加、基準地震動の増大等を踏まえ、女川2号機のサプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震性を向上させるための補強対策として、サプレッションチェンバの強め輪及びボックスサポート取付部、ボックスサポートの脚部及び基礎部に補強部材を追加する。

2.2.2 耐震補強対策の内容

(1) サプレッションチェンバ及びボックスサポート取付部

サプレッションチェンバ及びボックスサポート取付部の耐震補強対策前後の比較表を表 2.2-1 及び表 2.2-2、耐震補強対策後の詳細構造図を図 2.2-1、補強位置の概略図を図 2.2-2 に示す。

サプレッションチェンバの小円については、建設時より、断面変形を抑制する設計のためサプレッションチェンバ内部に強め輪が設置されているが、強め輪を拡張する補強部材及び強め輪間の連結板を追加する耐震補強対策を実施し、強め輪の剛性を向上させることによって小円の断面変形を更に抑制する。【強め輪 64 枚中の 32 枚（胴エビ継手部）】なお、耐震補強対策の範囲は、サプレッションチェンバ内の設備（サプレッションチェンバスプレイ管、主蒸気逃がし安全弁排気配管）との干渉及びサプレッションチェンバ下部の強め輪補強が応力に与える影響が小さいことを踏まえて設定している（図 2.2-3 参照）。

サプレッションチェンバの内側及び外側ボックスサポート取付部（P9、P10）に対する応力低減を目的として、ボックスサポート取付部周辺にパッド及び補強リブを追加する。【ボックスサポート取付部：32ヶ所】なお、外側ボックスサポート取付部よりも内側ボックスサポート取付部の地震荷重が大きいため、内側ボックスサポート取付部のパッドの幅を大きく設計している。

サプレッションチェンバ内の耐震補強対策等による部材の追加によってサプレッションチェンバ空間部体積及び水量が変化するため、有効性評価等に与える影響について確認し、有効性評価等で用いられている評価条件が確保されることを確認した。併せて、耐震補強対策等による部材の追加によってLOCA時等の水温や内部水の流動に与える影響について考察し、影響がほとんどないことを確認した。（別紙 19）。

(2) ボックスサポート

ボックスサポートの耐震補強対策前後の比較表を表 2.2-3、耐震補強対策後の詳細構造図を図 2.2-4 に示す。

ボックスサポートのシヤラグ取付部（P4）及びシヤコネクタ取付部（P8）に対する応力低減を目的として、ベースプレート外側（周方向）に新設ベースプレート、新設シヤコネクタ及び新設シヤラグを追加する。また、ボックスサポートのフランジプレート（P6）及びベースプレート（P7）に対する応力低減を目的として、ボックスサポートのボックスプレートに追加リブを追加する。【ボックスサポート：32ヶ所】

表 2.2-1 サプレッションチェンバの耐震補強対策前後比較表

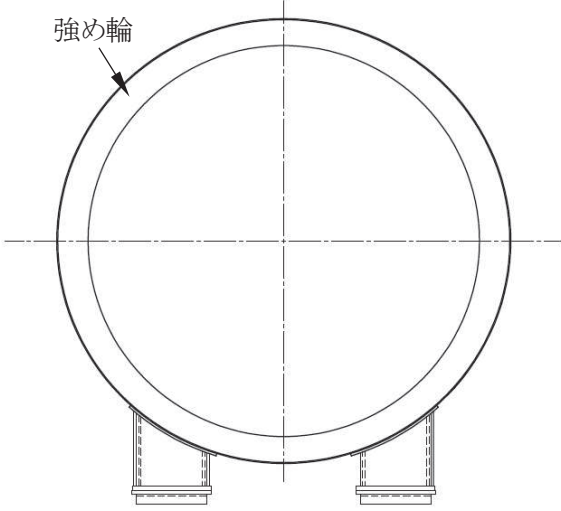
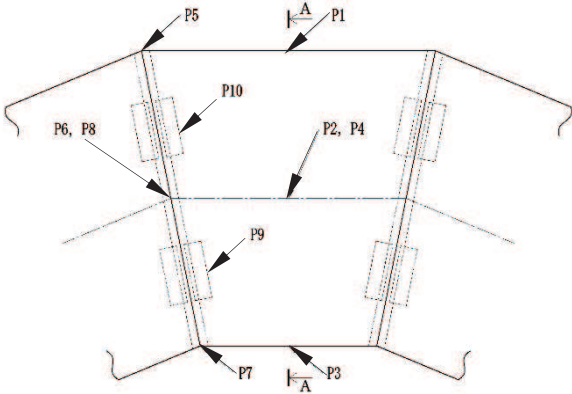
	補強前（小円断面）	補強後（小円断面）
概略構造		

表 2.2-2 ボックスサポート取付部の耐震補強対策前後比較表

	補強前（ボックスサポート取付部）	補強後（ボックスサポート取付部）
概略構造	<p>*P1～P10 は既工認における応力評価点</p> 	

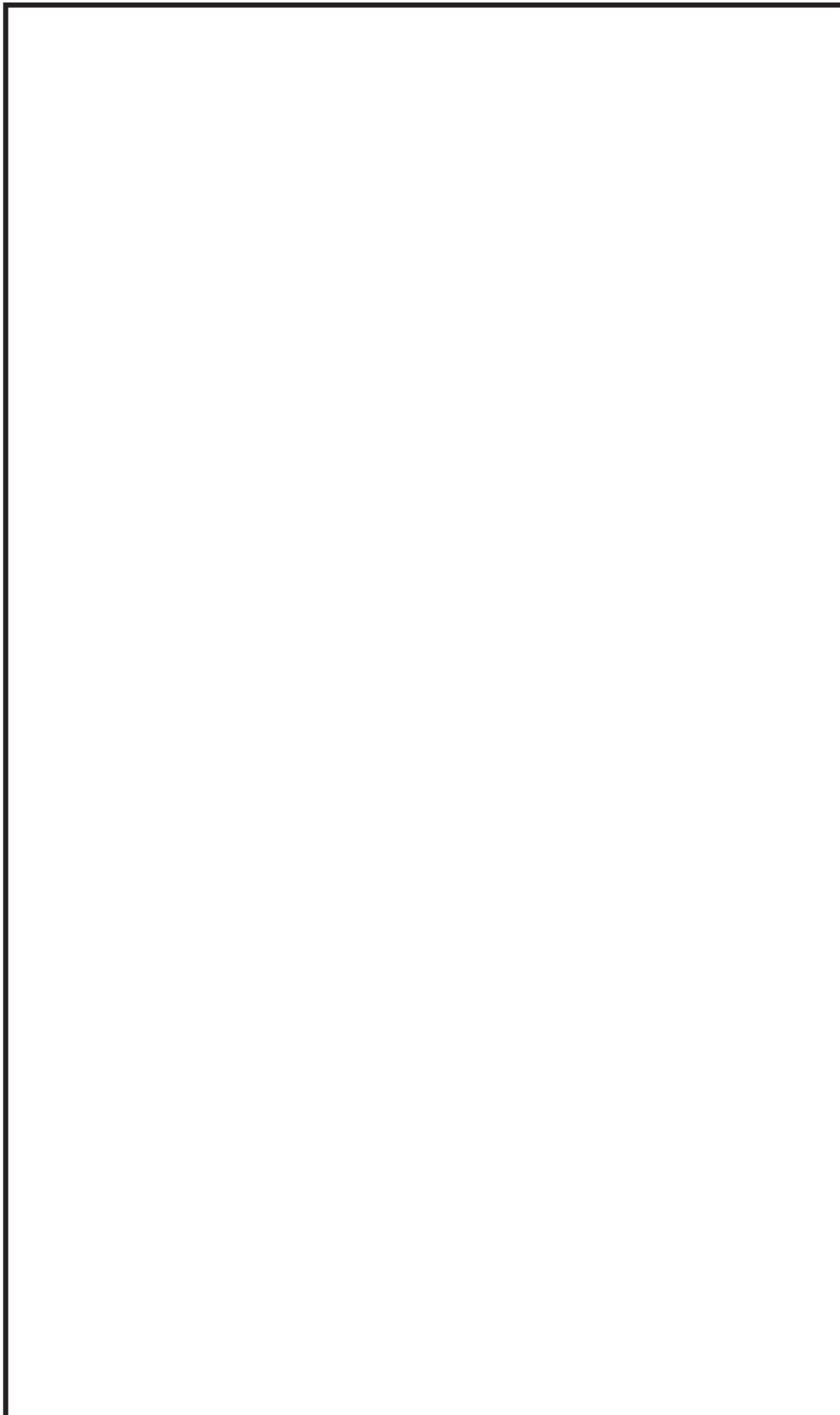


図 2. 2-1 サプレッションチェンバ及びボックスサポート取付部の耐震補強対策後詳細構造図

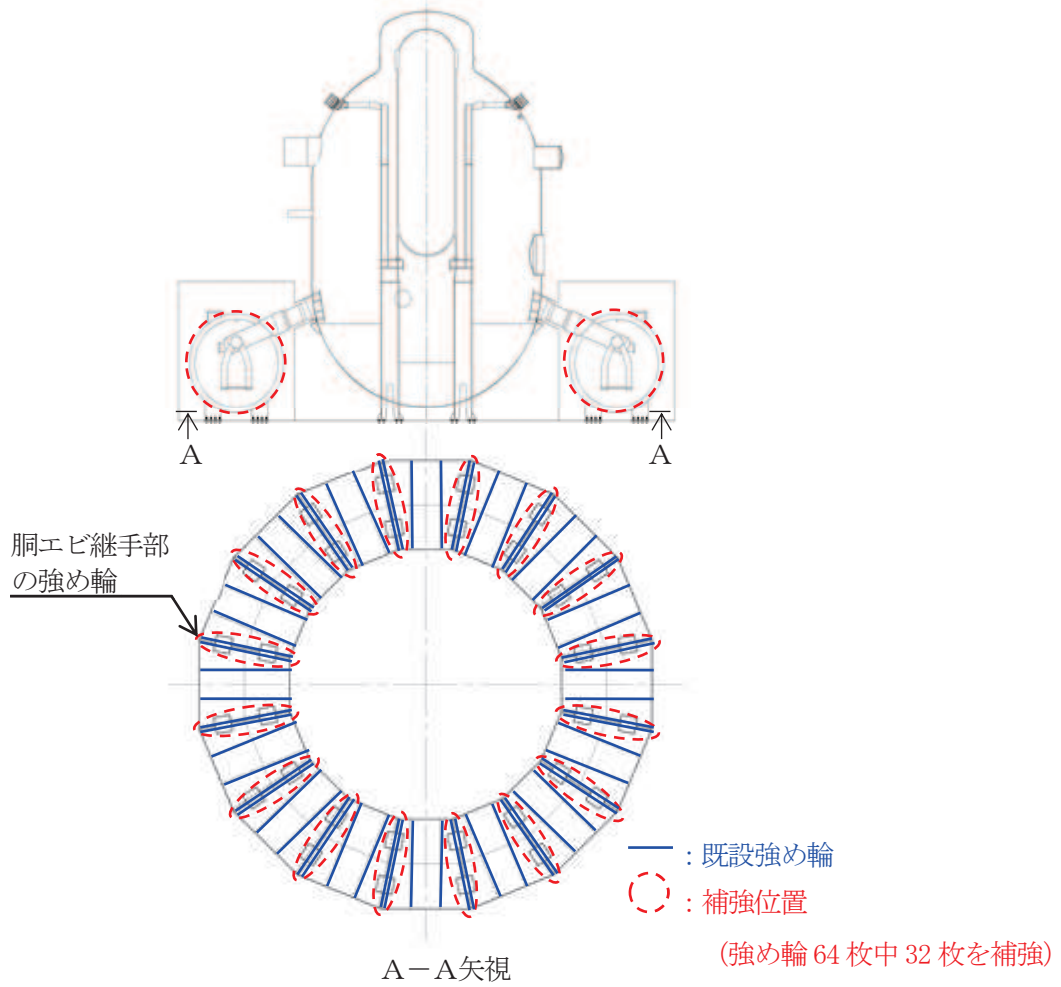


図 2.2-2 補強位置の概略図

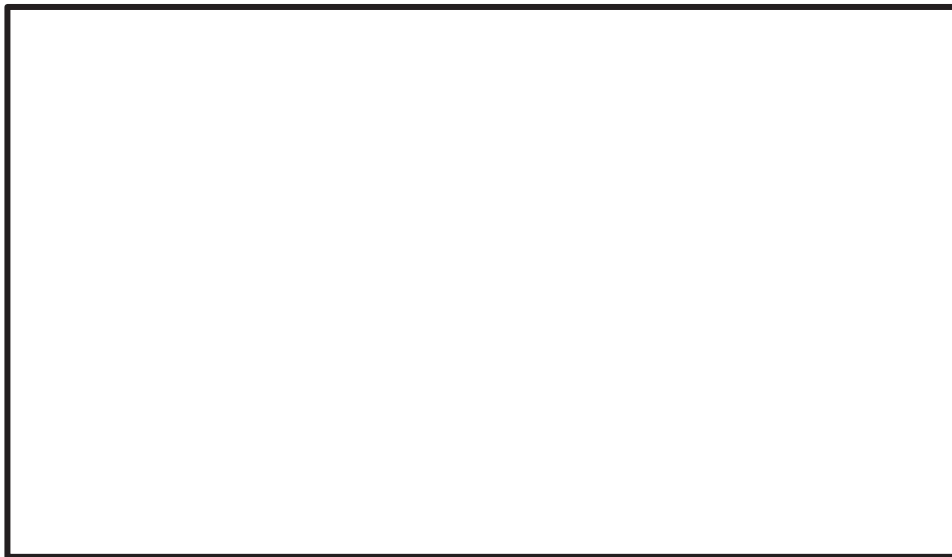
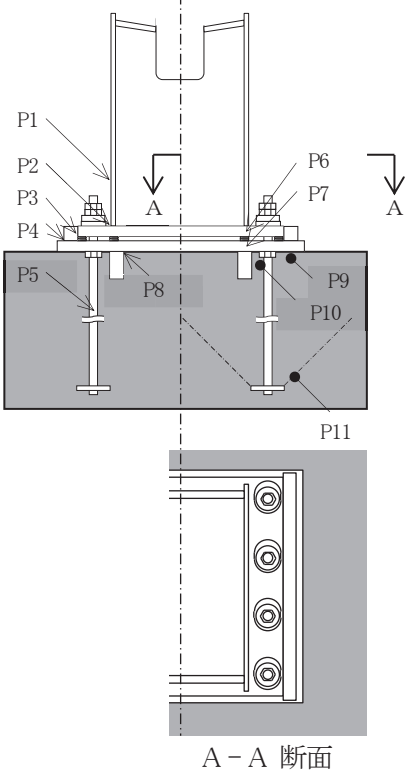


図 2.2-3 強め輪の補強範囲とサブプレッションチェンバ内の設備との関係

表 2.2-3 ボックスサポート耐震補強対策前後比較表

	補強前	補強後
概略構造	<p>*P1～P11 は既工認における応力評価点</p>  <p style="text-align: center;">A - A 断面</p>	<p>■ : 補強部材</p> <div style="border: 2px solid black; height: 350px; width: 100%;"></div>

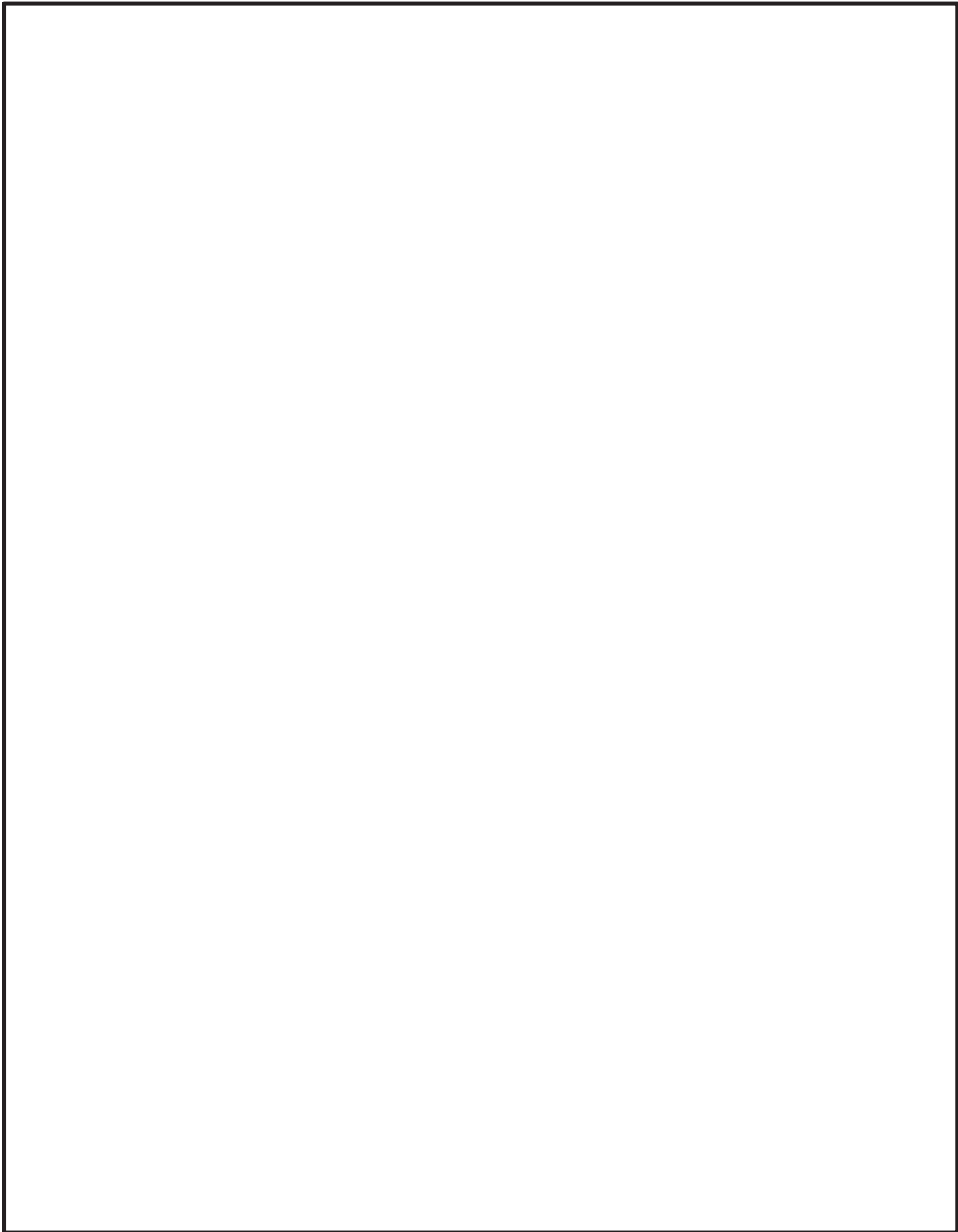


図 2.2-4 ボックスサポートの耐震補強対策後詳細構造図

3. サプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震評価

3.1 評価手順

サプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震評価に係る評価手順は、表 3.1-1 のとおり、地震応答解析及び応力解析に大別される。

地震応答解析では、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの構造特性、サプレッションチェンバ内部水の流体特性等を考慮し、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデル（3次元はりモデル）を設定し、固有値解析及び地震応答解析（スペクトルモーダル解析）を実施し、地震時における荷重等を算定する。なお、スロッシング荷重については、地震時のサプレッションチェンバ内部水の挙動を考慮し、流体解析にて算定する。

応力解析では、地震応答解析にて算定した地震時における荷重等を用いて、サプレッションチェンバ及びボックスサポートのシェルモデルを用いた FEM 解析による応力解析、評価断面の形状から公式等による手計算等によって各応力評価点の応力を算定する。

なお、表 3.1-1 には、設置変更許可審査時に詳細設計へ送付した事項（詳細設計送付事項）及び詳細設計の進捗を踏まえて説明する項目を示す。

■：詳細設計申送り事項

□：詳細設計の進捗を踏まえた説明項目

表 3.1-1 評価手順 (1/2)

評価手順	主な詳細設計項目	今回工認における補足説明の内容
<p>耐震評価</p> <p>地震応答解析モデルの設定 (3次元はりモデル)</p> <p>固有値解析の実施</p> <p>地震応答解析の実施 (スペクトルモーダル解析)</p> <p>地震時における荷重等の算定</p> <p>応力解析へ</p>	<p>耐震補強対策</p> <p>サブレーションチェンバ内部水の有効質量のモデル化</p> <p>サブレーションチェンバ本体のモデル化</p> <p>ボックスサポート取付部のモデル化</p> <p>ボックスサポートのモデル化</p> <p>設計用床応答曲線</p> <p>動的解析</p> <p>スロッシング荷重</p>	<p>耐震補強対策の内容 本文：2.2.2 参照</p> <p>内部水の有効質量の算定及びモデル化 本文：4.1.1, 4.1.2 参照 別紙：別紙1, 2 参照</p> <p>バルジングの影響検討 本文：4.1.3 参照 別紙：別紙3 参照</p> <p>はね剛性の設定 本文：4.1.4 参照 別紙：別紙4 参照</p> <p>ボックスサポートの剛性の詳細化，基礎ボルトのモデル化 本文：4.1.5 参照</p> <p>はりモデルの妥当性検討（シェールモデルとの応答比較） 本文：4.2 参照</p> <p>内部水の有効質量算定解析コード間の差異影響 本文：4.3 参照</p> <p>スペクトルモーダル解析の適用（高振動数の考慮確認） 本文：4.3 参照</p> <p>流体解析によるスロッシング荷重算定 本文：4.4 参照 別紙：別紙6 参照</p>

地震応答解析

表 3.1-1 評価手順 (2/2)

 : 詳細設計申請書
 : 詳細設計の進捗を踏まえた説明項目

評価手順	主な詳細設計項目	今回工認における補足説明の内容
<p style="text-align: center;">地震応答解析より</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">応力評価点の設定</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">応力解析を実施するか</p> <p style="text-align: center;">NO → (左側へ戻る)</p> <p style="text-align: center;">YES →</p> <p style="text-align: center;">応力解析モデルの作成 (シェルモデル)</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">応力解析による評価</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">公式等による評価</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">個別詳細評価 が必要な場合</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">個別詳細評価</p>	<p style="text-align: center;">サブレスジョンエンバの解析結果及び ボックスサポート荷重伝達経路の考慮</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">サブレスジョンエンバ及び ボックスサポートのモデル化</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">FEM解析</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">フランジプレート (外側) のモデル化</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">FEM解析</p>	<p style="text-align: center;">応力評価点の検討</p> <p style="text-align: center;">本文：5.2 参照</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">モデル化方針</p> <p style="text-align: center;">本文：5.3.1 参照</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">サブレスジョンエンバの応力評価</p> <p style="text-align: center;">本文：5.4.1 参照</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">モデル化方針</p> <p style="text-align: center;">本文：5.3.2 参照</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">ボックスサポートの応力評価</p> <p style="text-align: center;">本文：5.4.2 参照</p>

3.2 地震応答解析

3.2.1 基本方針

既工認では、簡便な扱いとして、サブプレッションチェンバ内部水を含めたサブプレッションチェンバ全体を剛と見做し、3次元はりモデルを用いて静的に地震応答解析を実施していたが、今回工認におけるサブプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析では、重大事故時のサブプレッションチェンバの水位上昇に伴う内部水質量の増加、基準地震動の増大等を踏まえ、より詳細に地震応答を把握するため、より現実に近いサブプレッションチェンバの内部水の挙動を考慮して内部水質量を従来の固定質量から有効質量へ変更すること、サブプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析として、女川2号機と同型炉で既工認実績のある動的解析（3次元はりモデルを用いたスペクトルモーダル解析）を適用し、地震時における荷重を算出する。なお、スロッシング荷重については、地震時のサブプレッションチェンバ内部水の挙動を考慮し、流体解析にて算定する。ここで、既工認のサブプレッションチェンバの耐震設計においては、はりモデルを用いた地震応答解析によりサブプレッションチェンバの全体的な地震応答（全体像）を算定し、その地震応答による各部位の詳細な応力算定については3次元シェルモデルにより応力解析を実施している。そのため、今回工認における耐震設計においても同様の評価手順として、3次元はりモデルを適用した地震応答解析及び3次元シェルモデルを用いた応力解析によりサブプレッションチェンバの耐震性を検討している。なお、はりモデルを用いた地震応答解析は、大型機器（原子炉圧力容器、原子炉格納容器等）で工認実績がある。

また、地震応答解析モデルの設定にあたっては、サブプレッションチェンバとボックスサポートの取付部にサブプレッションチェンバ小円の断面変形及びボックスサポート取付部の局部変形の剛性を考慮したばね要素を考慮すること等に加えて、耐震性の向上を目的としたサブプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震補強対策の内容を反映し、より詳細にサブプレッションチェンバとボックスサポートの耐震評価を実施する。

なお、地震応答解析に適用する3次元はりモデルの妥当性確認として、3次元シェルモデルを用いた地震応答解析との比較検討を行い、耐震評価において考慮すべき振動モードが3次元はりモデルにて表現できていること等を確認する。

3.2.2 地震応答解析モデル

サブプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析に適用する3次元はりモデルについて、図3.2-1に示す。サブプレッションチェンバ及びボックスサポートの3次元はりモデルは、サブプレッションチェンバ本体をサブプレッションチェンバ小円断面中心位置にはり要素でモデル化し、ボックスサポートをボックスサポート中心位置にその中心高さを模擬したはり要素でモデル化している。サブプレッションチェンバ本体、ボックスサポート等の鋼材質量は、サブプレッションチェンバ本体のはり要素にモデル化し、サブプレッションチェンバ内部水の有効質量（(1)参照）と合わせて32箇所の質点に考慮する。サブプレッションチェンバ本体とボックスサポートは、サブプレッションチェンバ小円断面中心位置とボックスサポート上端位置（取付位置）間の位置関係を考慮し剛体要素で接続する。ここで、剛体要素とボックスサポート上端位置間は、サブプレッションチェンバ小円の断面変形とボックスサポート取付部

の剛性を考慮したばね要素を介して接続する（(2)、(3)参照）。ボックスサポートは、ボックスサポート下端位置から基礎ボルト位置間の位置関係を考慮し剛体要素で接続する。剛体要素と基礎ボルト上端位置の間は、ボックスサポートのフランジプレートのはね剛性を考慮したばね要素を介して接続する。基礎ボルトは、剛ばね要素としてモデル化しているが、その長さは剛ばね要素であるため、評価には影響しない。

詳細設計 申送り事項、詳細設計段階における進捗等を踏まえ、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの3次元はりモデルの設定にあたっての主な考慮事項を以下に示す。なお、詳細検討内容については、4項に示す。

(1) サプレッションチェンバ内部水に対する有効質量

サプレッションチェンバ内部水に対する有効質量は、NASTRANの仮想質量法を用いて、サプレッションチェンバの内面圧力（水平及び鉛直方向の圧力）から各方向の内部水の有効質量を算出する。また、算出された内部水の有効質量の**地震応答解析モデル（3次元はりモデル）**への設定は、NASTRANの機能（Guyan縮約法）を用いて、サプレッションチェンバの各質点に縮約し、付加する。

なお、サプレッションチェンバ内部水の有効質量の妥当性検証として、実機を縮小した試験体を用いた振動試験及び流体解析により算出した内部水の有効質量と比較・検証**を行っている**。

(2) サプレッションチェンバ本体のバルジングに対する影響

サプレッションチェンバ及びボックスサポートを構成する各部材の剛性、質量、サプレッションチェンバ内部水等を適切に考慮し、はり要素でモデル化する。

一方、内部水を有する薄肉円筒容器（たて置円筒容器）の円筒壁面が変形振動（バルジング）することの既往知見に対して、既工認におけるサプレッションチェンバ本体（小円）の耐震設計では、強め輪によりサプレッションチェンバ本体（小円）の断面変形を抑制する設計としている。ただし、今回工認では、重大事故等時のサプレッションチェンバの水位上昇に伴う内部水質量の増加、基準地震動の増大等を踏まえ、強め輪の剛性を更に向上させる耐震補強対策を実施することによって、サプレッションチェンバ本体（小円）の断面変形を更に抑制する設計とする。

また、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデルの設定にあたっては、より詳細に地震応答を把握するため、**サプレッションチェンバの振動挙動に対するバルジングの影響（サプレッションチェンバ小円の断面変形）**を考慮したボックスサポート取付部のはね剛性（並進、回転）をばね要素として地震応答解析モデル（3次元はりモデル）に付加する。

(3) ボックスサポート取付部の**局部変形**の影響

既工認におけるボックスサポート取付部の耐震設計では、当該部における局部変形を防止するため、サプレッションチェンバ内部に強め輪を設置するとともに、ボックスサポートは当て板を介してサプレッションチェンバに取り付けられていることから、ボックスサポート取付部の剛性を簡便に剛として扱っていた。今回工認では、重大事故等時のサプレッションチェンバの水位上昇に伴う

内部水質量の増加，基準地震動の増大等を踏まえ，より詳細な地震応答を把握するため，バルジンの影響（サブレッションチェンバ小円の断面変形）と合わせて，ボックスサポート取付部の局部変形の影響を考慮したボックスサポート取付部のばね剛性（並進，回転）をばね要素として地震応答解析モデル（3次元はりモデル）に付与する。サブレッションチェンバ小円の断面変形及びボックスサポート取付部の局部変形を考慮したボックスサポート取付部のばね剛性（並進，回転）は，シェルモデルとはりモデルを用いた解析からボックスサポート取付部のばね剛性を各々算定し，そのばね剛性の差から算定を行った。

(4) ボックスサポートの剛性の詳細化及び基礎ボルト等の扱い

既工認におけるサブレッションチェンバのモデル化では，十分に剛性が高いことから

に考慮して

いた。今回工認では，より詳細な地震応答を把握するため，シェルモデルを用いた解析からボックスサポートの剛性を算定し，地震応答解析モデルに考慮する。

また，ボックスサポートの基礎ボルトに負荷される地震荷重をより詳細に評価するため，基礎ボルトを剛ばね要素として，地震応答解析モデル（3次元はりモデル）に考慮する。

また，ボックスサポートは，サブレッションチェンバ本体（大円）の半径方向に対する熱膨張を吸収する可動構造であることから，地震応答解析モデル（3次元はりモデル）におけるボックスサポート下端の境界条件は，サブレッションチェンバ本体（大円）の周方向に固定，半径方向に自由とする。

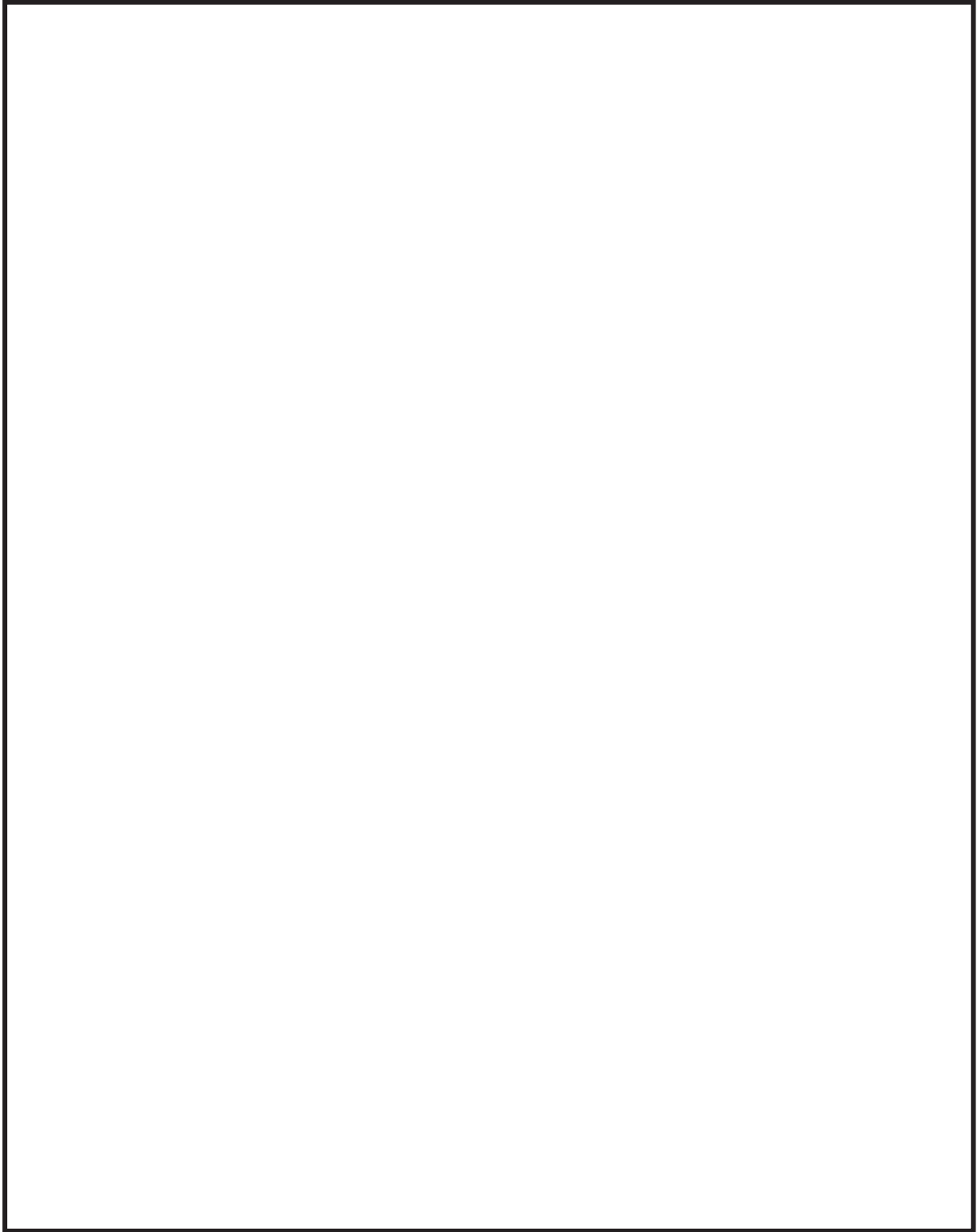


図 3.2-1 サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデル（3次元はりモデル）

3.3 応力解析

3.3.1 基本方針

今回工認のサプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震評価における応力評価では、重大事故等時のサプレッションチェンバの水位上昇に伴う内部水質量の増加、基準地震動の増大等に加えて、耐震性の向上を目的としたサプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震補強対策の内容も踏まえ、構成部材の形状、断面性能及び荷重伝達等を考慮して応力評価点及び応力解析方法を設定し、応力評価を行う。なお、詳細検討内容については、5.項に示す。

3.3.2 応力評価点

サプレッションチェンバ及びボックスサポートの応力評価点を表 3.3-1、図 3.3-1、表 3.3-2、図 3.3-2 に示す。

表 3.3-1 サプレッションチェンバの応力評価点

評価設備	応力評価点番号	応力評価点	既工認	今回工認
サプレッション チェンバ	P1	胴中央部外側	○	○
	P2	胴中央部底部	○	○
	P3	胴中央部内側	○	○
	P4	胴中央部頂部	○	○
	P5	胴エビ継手部外側	○	○
	P6	胴エビ継手部底部	○	○
	P7	胴エビ継手部内側	○	○
	P8	胴エビ継手部頂部	○	○
	P9	内側ボックスサポート取付部	○	○*
	P10	外側ボックスサポート取付部	○	○*

注記*：耐震補強対策を考慮して評価断面位置を変更する

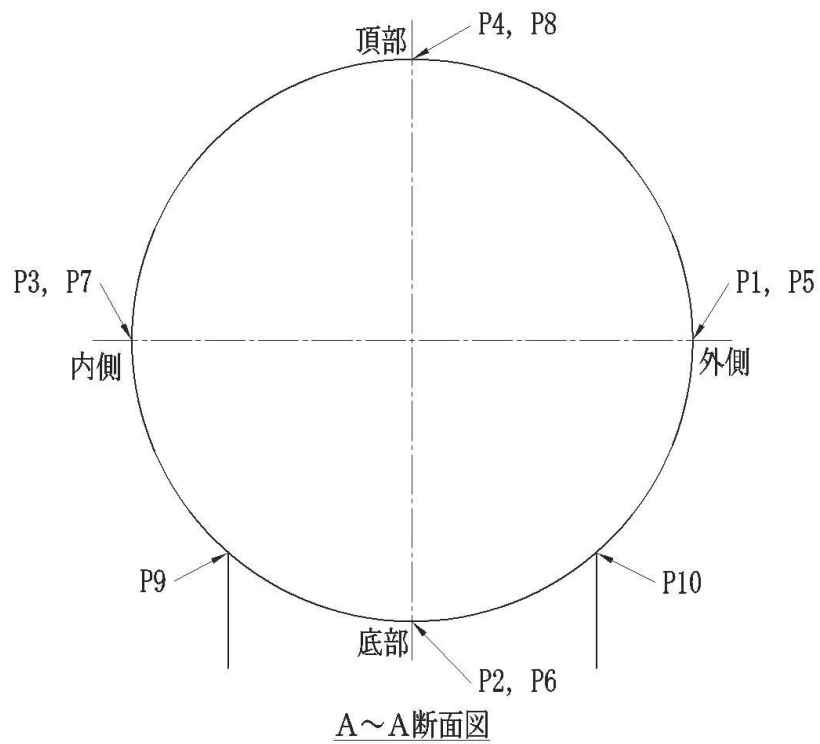
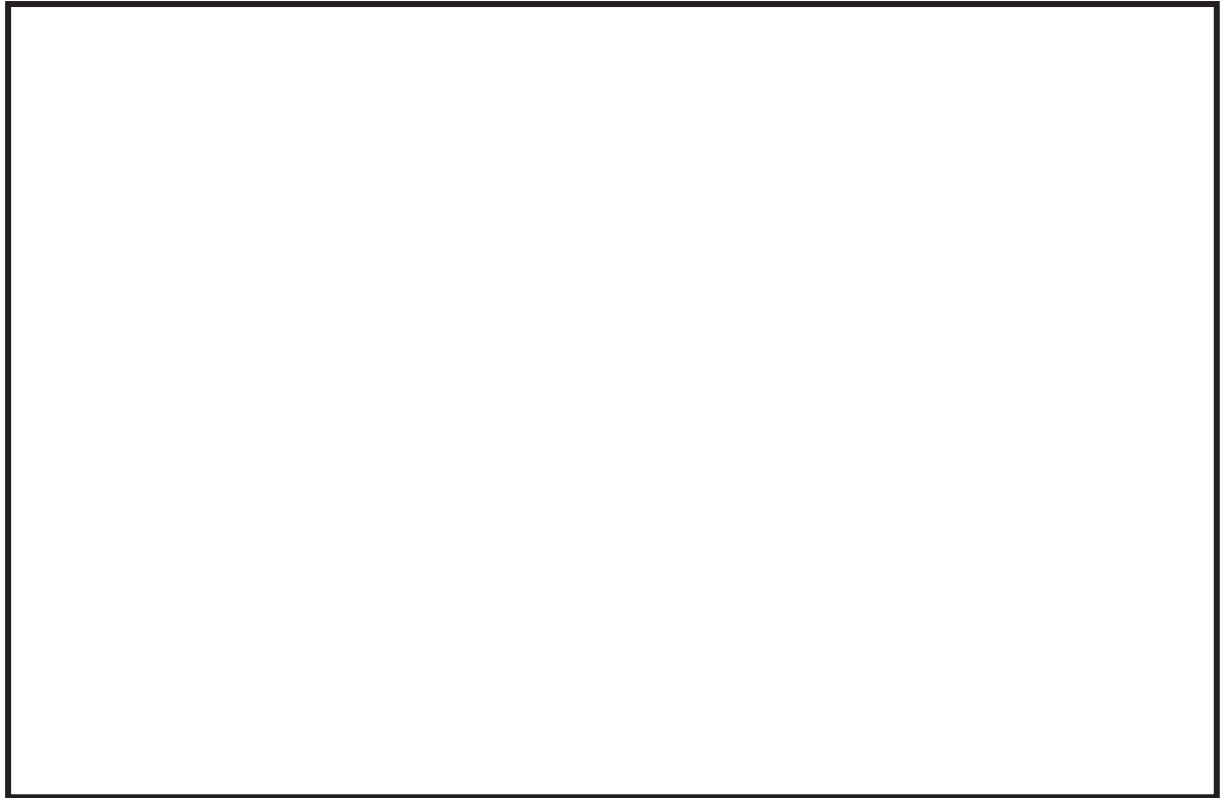


図 3.3-1 サプレッションチェンバの応力評価点

表 3.3-2 ボックスサポートの応力評価点

評価設備	応力評価 点番号	応力評価点	既工認	今回工認
ボックス サポート	P1	ボックスプレート	○	○
	P2	ボックスプレート取付部	○	○
	P2'	ボックスプレート（上側）取付部	—	○
	P3	フランジプレートとシヤラグ接触部	○	○
	P4	シヤラグ取付部	○	○
	P5	基礎ボルト	○	○
	P6	フランジプレート	○	○
	P6'	フランジプレート（外側）	—	○
	P7	ベースプレート	○	○*
	P8	シヤコネクタ（外側）取付部	○	○*
	P9	コンクリート（ベースプレート下面）	○	○
	P10	コンクリート（シヤコネクタ（外側）側面）	○	○*
P11	コンクリート（シヤプレート上面）	○	○	
P12	パッド取付部	—	○	

注記*：耐震補強対策を考慮して評価断面位置を変更する

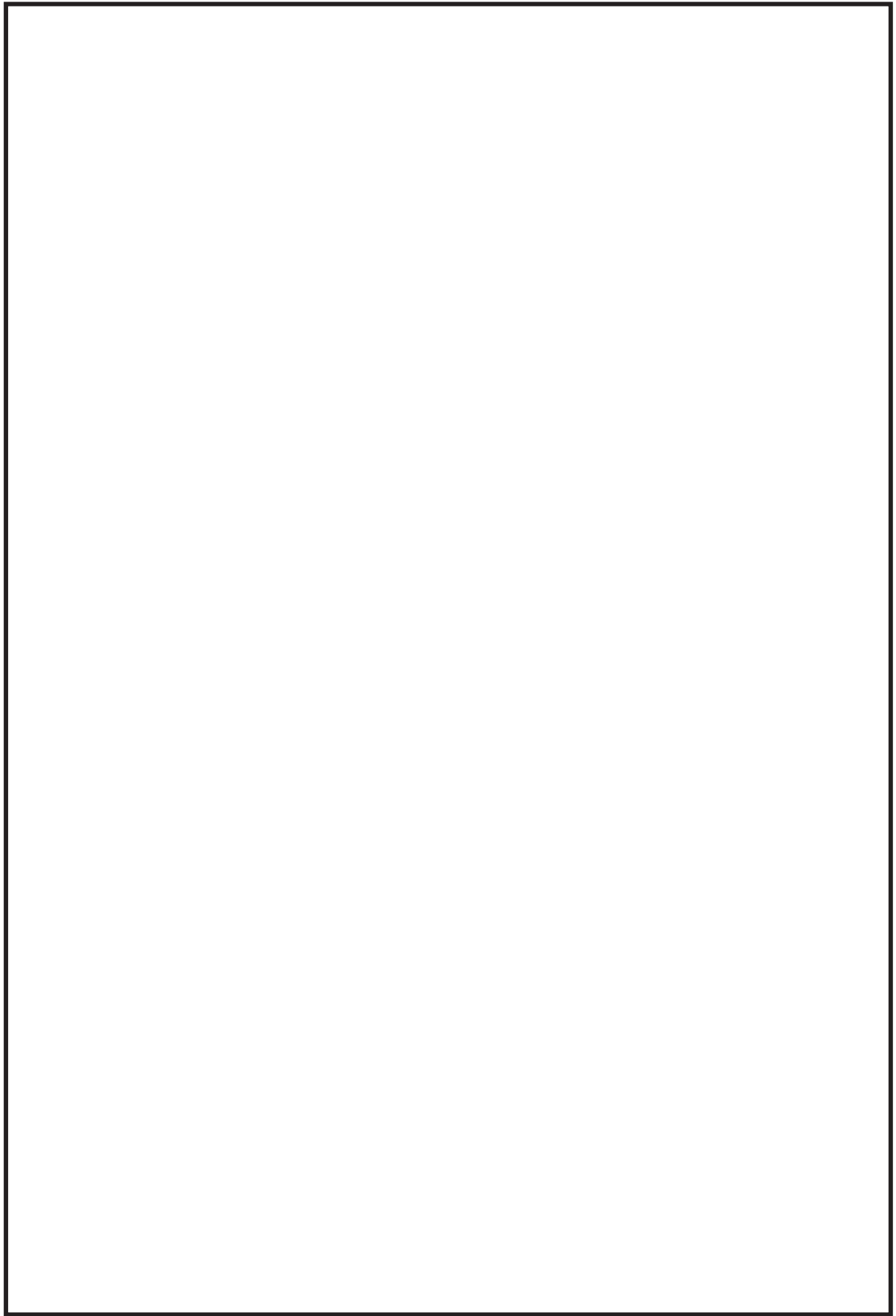


図 3.3-2 ボックスサポートの応力評価点

3.3.3 応力解析方法

(1) 公式等による手計算を用いた応力評価

既工認におけるサプレッションチェンバ（ボックスサポート取付部除く）の応力評価は、サプレッションチェンバをはり要素でモデル化し、サプレッションチェンバ設置床の最大応答加速度に対する静的解析によって得られた地震荷重及び評価断面の形状等から、公式等による手計算によって応力を算出していた。また、ボックスサポートは、手計算により算出したボックスサポート1個当たりの地震荷重及び評価断面等の形状から公式等による手計算によって応力を算出していた。

今回工認におけるサプレッションチェンバの応力評価は、動的解析（3次元はりモデルによるスペクトルモーダル解析）から算出された地震荷重等を用いて、応力解析モデルを用いた応力評価を行い、ボックスサポートの応力評価は、動的解析（3次元はりモデルによるスペクトルモーダル解析）から算出された地震荷重等を用いて、既工認同様、公式等による手計算によって応力を算出する。

なお、ボックスサポートのうち、公式等による評価が許容応力を満足せず、個別に詳細評価が必要となったフランジプレート（外側）の応力評価については、ボックスサポートの耐震補強対策として設置した追加リブによる拘束効果を考慮し、より詳細に応力を評価するため、フランジプレート周りをシェル要素でモデル化し、FEM解析による応力解析を行う。

(2) 応力解析モデルを用いたFEM解析による応力評価

既工認におけるボックスサポート取付部の応力評価は、内側と外側のボックスサポート（1組）とその両側にあるサプレッションチェンバ（胴部）をシェル要素でモデル化し、ボックスサポート下端位置等に静的解析で算出された地震荷重等を入力し、FEM解析による応力解析を行っていた。

今回工認では、重大事故等時のサプレッションチェンバの水位上昇に伴う内部水質量の増加、基準地震動の増大等を踏まえ、サプレッションチェンバ及びボックスサポートに負荷される局所的な応力をより詳細に評価するため、シェル要素でモデル化し、ボックスサポート取付部に加えて、サプレッションチェンバについてもFEM解析による応力解析を行う。

応力解析モデルは、ボックスサポート取付部のばね剛性の算定に用いたモデルと同等の解析モデルを適用する。また、地震応答解析で算出された地震荷重等の応力解析モデルへの入力値は、応力評価点の変形を適切に模擬するように地震応答変位を用いて設定する。

3.4 既工認と今回工認における耐震評価手法の相違

既工認と今回工認におけるサプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震評価手法について比較・整理した結果を表 3.4-1 に示す。また、既工認におけるサプレッションチェンバの地震応答解析モデルを図 3.4-1 に、ボックスサポートの荷重算定方法について図 3.4-2 に示す。

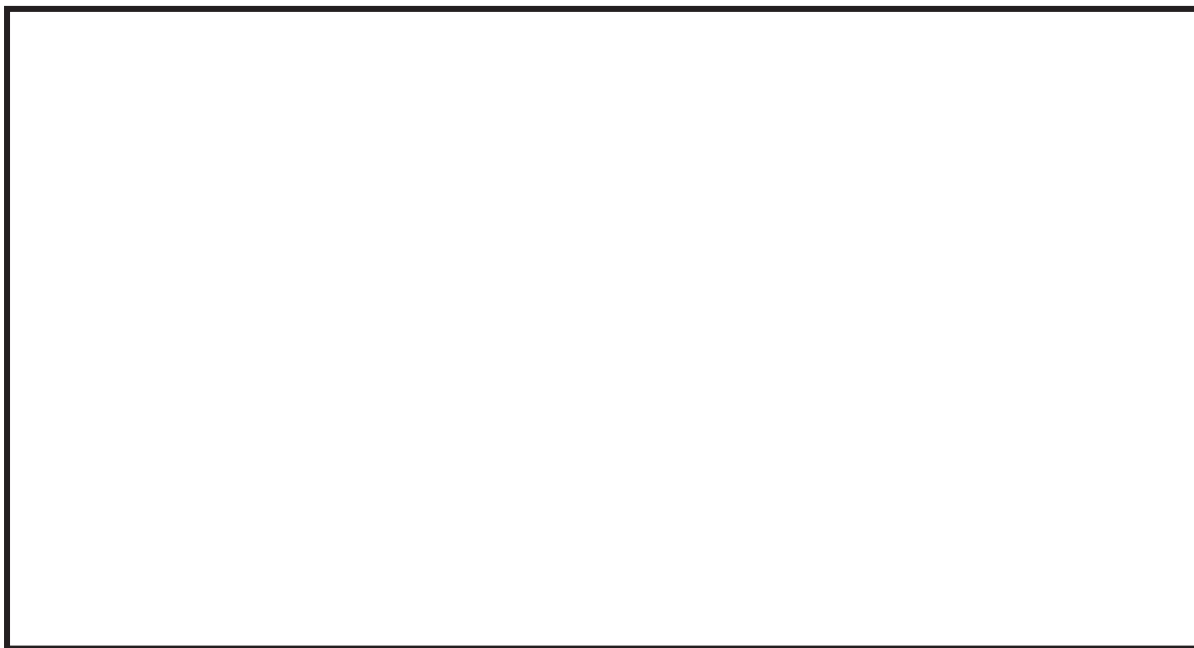


図 3.4-1 既工認におけるサプレッションチェンバの地震応答解析モデル

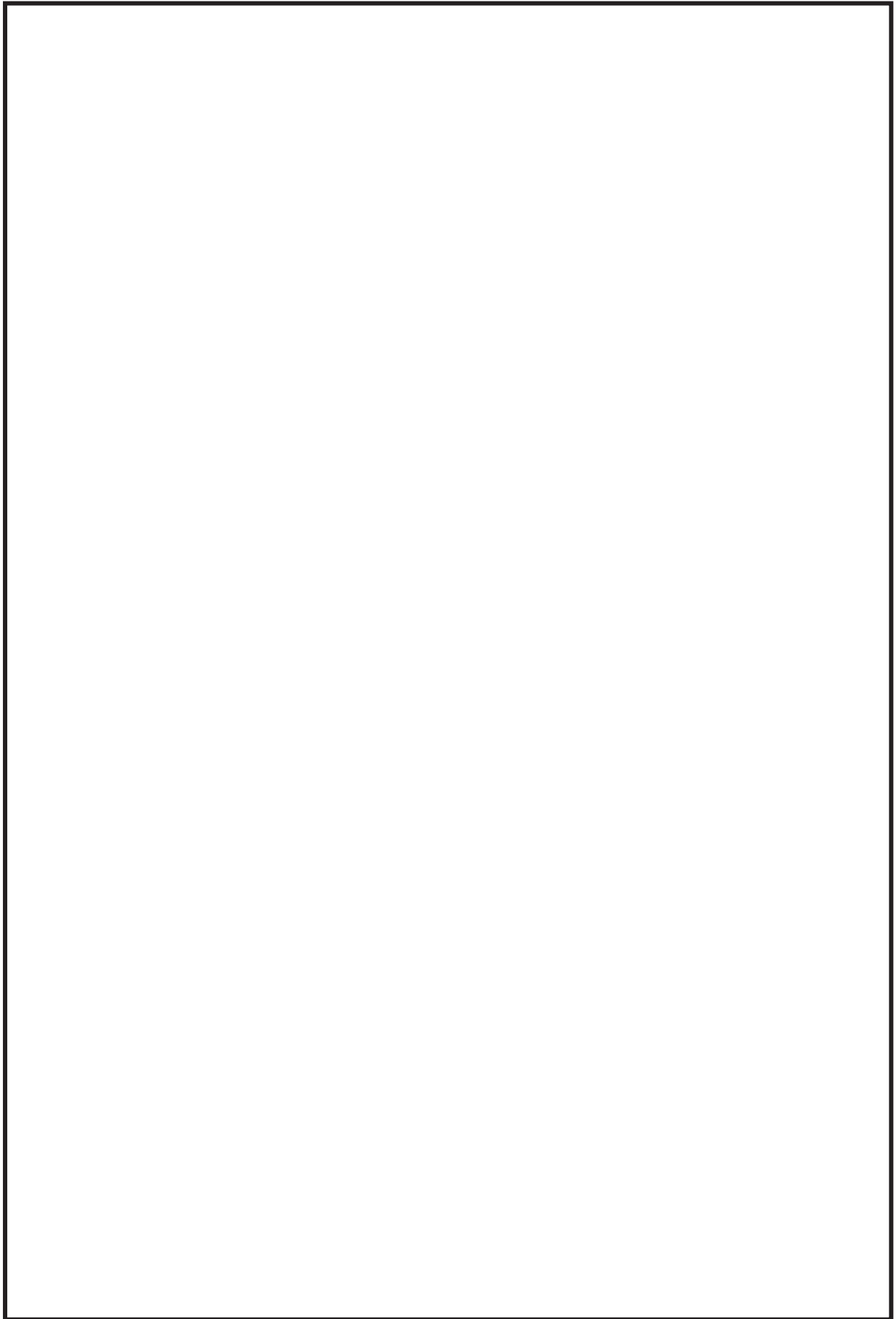


図 3.4-2 ボックスサポートの荷重算定方法

表 3. 4-1 既工認と今回工認における耐震評価手法の相違 (1/2)

設備	解析種別	応力評価点	既工認		今回工認		変更理由
			解析手法	解析モデル	解析手法	解析モデル	
サブレスシオンチエンバ	地震応答解析	全応力評価点	設置床の最大応答加速度による静的解析	3次元はりモデル (サブレスシオンチエンバ全体を考慮)	動的解析 (スペクトルモード解析)	3次元はりモデル*1 (サブレスシオンチエンバ全体を考慮)	重大事故等時のサブレスシオンチエンバの水位上昇に伴う内部水質量の増加、基準地震動の増大等を踏まえ、より詳細に地震応答を把握するため、解析手法及び解析モデルを詳細化した。
			公式等による評価	-	FEM 解析	3次元シェルモデル (サブレスシオンチエンバ本体とボックスサポート () を考慮)	胴エビ継手部と合わせて、より詳細な応力を考慮することとした。
	応力解析	胴エビ継手部外側 胴エビ継手部底部 胴エビ継手部内側 胴エビ継手部頂部	公式等による評価	-	FEM 解析	3次元シェルモデル (サブレスシオンチエンバ本体とボックスサポート () を考慮)	胴エビ継手部近傍にはボックスサポートが取り付けられているため、より詳細に局部的な応力を考慮することとした。
			FEM 解析	3次元シェルモデル (サブレスシオンチエンバ本体とボックスサポート () を考慮)	地震応答解析モデルに考慮したボックスサポート取付部のばね剛性算定用のシェルモデルを応力解析モデルとした。(から) とした。		
	応力解析	内側ボックスサポート取付部 外側ボックスサポート取付部	FEM 解析	3次元シェルモデル (サブレスシオンチエンバ本体とボックスサポート () を考慮)	FEM 解析	3次元シェルモデル (サブレスシオンチエンバ本体とボックスサポート () を考慮)	

注記*：①サブレスシオンチエンバ内部水に対する有効質量の適用、②ボックスサポート取付部にばね剛性を考慮、③ボックスサポートの剛性の詳細化及び基礎ボルトのモデル化

表 3. 4-1 既工認と今回工認における耐震評価手法の相違 (2/2)

設備	解析種別	応力評価点	既工認		今回工認		変更理由
			解析手法	解析モデル	解析手法	解析モデル	
ボックスサポータ	地震応答解析	全応力評価点	設置床の最大応答加速度による静的解析	—	動的解析 (スベクトルモデル解析)	3 次元よりモデル*1 (サブプレッションモデル) を考慮	重大事故等時のサブプレッションモデルの水位上昇に伴う内部水質量の増加、基礎地震動の増大等を踏まえ、より詳細に地震応答を把握するため、解析手法及び解析モデルを詳細化した。
			公式等による評価	—	公式等による評価	—	評価断面として補強対策で設置した [] を考慮した。
	P1 P2 P4 P6	ボックスプレート 取付部 シヤラグ取付部 フランジプレート	—	公式等による評価	公式等による評価	—	応力評価点として、P2 (ボックスプレート取付部；下側) に加えて、P2' (上側) を新たに設定した。
	P2'	ボックスプレート (上側) 取付部	—*2	公式等による評価	公式等による評価	—	
	P3	フランジプレートとシヤラグ接触部		公式等による評価	公式等による評価	—	
	P9	コンクリート (ベースプレート下側)	公式等による評価	公式等による評価	公式等による評価	—	
	P5	基礎ボルト	公式等による評価	公式等による評価	公式等による評価	—	
	P6'	フランジプレート (外側)	—*2	公式等による評価又は FEM 解析	公式等による評価又は FEM 解析	3 次元モデル (3 辺拘束範囲をモデル化)	応力評価点として、補強対策で設置した [] の拘束効果を考慮し、新たに P6' (外側) を設定した。
	P7	ベースプレート (外側)	公式等による評価	公式等による評価	公式等による評価	—	補強対策として追設した追加リブを考慮し、フランジプレート端部位置のベースプレートを応力評価点とした。
	P8 P10	シヤコネクタ (外側) 取付部 コンクリート (シヤコネクタ (外側) 側面)	公式等による評価	公式等による評価	公式等による評価 (評価断面の変更)	—	補強対策として追設した [] を応力評価点とした。
	P11	コンクリート (シヤプレート上面)	公式等による評価	公式等による評価	公式等による評価	—	
	P12	パッド取付部	—*2	公式等による評価	公式等による評価	—	P2 (ボックスプレート取付部) を代表応力評価点としていたが、新たに P12 を応力評価点に設定した。

注記*1：①サブプレッションモデル内部水に対する有効質量の適用、②ボックスサポータ取付部にばね剛性を考慮、③ボックスサポータの剛性の詳細化及び基礎ボルトのモデル化

*2：既工認では、応力評価点としていない。

4. 地震応答解析の詳細

4.1 地震応答解析モデル（3次元はりモデル）

4.1.1 サプレッションチェンバ内部水の有効質量算定

(1) 内部水の有効質量算定の考え方

内部水の有効質量については、他産業の球形タンクや円筒タンク等の容器の耐震設計に一般的に用いられている考え方である。また、内部水の有効質量は、容器の内部水が自由表面を有する場合、水平方向の揺れによる動液圧分布を考慮して、地震荷重として付加される容器の内部水の質量として設定される。この内部水の有効質量は、容器の形状と水位が既知であれば、汎用構造解析プログラム NASTRAN の仮想質量法を用いて算出することができる。

女川2号機の今回工認において、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析に用いるサプレッションチェンバ内部水の有効質量算定フローを図4.1-1に示す。

地震応答解析に用いる内部水の有効質量は、実機のサプレッションチェンバに対してシェル要素で内部水の有効質量算定用解析モデルを作成し、サプレッションチェンバ内部水の水位を設定（流体部分と構造の接水面設定）した上で、応答解析（仮想質量法）にて、サプレッションチェンバ（各要素）の内面圧力（水平方向の圧力及び鉛直方向の圧力）から各方向の内部水の有効質量を算定する。

また、NASTRANによる内部水の有効質量の算定手法については、サプレッションチェンバが円環形状容器であることを考慮し、実機を縮小した試験体を用いた振動試験及び流体解析*により算出した内部水の有効質量と比較・検証によりその妥当性を確認している。

内部水の有効質量の適用及びその妥当性に係る検討結果の詳細については、別紙1に示す。

注記*：振動試験体を模擬した試験体解析モデルを作成し、試験体への入力波を用いて流体解析を行い、得られた荷重と入力加速度との関係から内部水の有効質量を算出

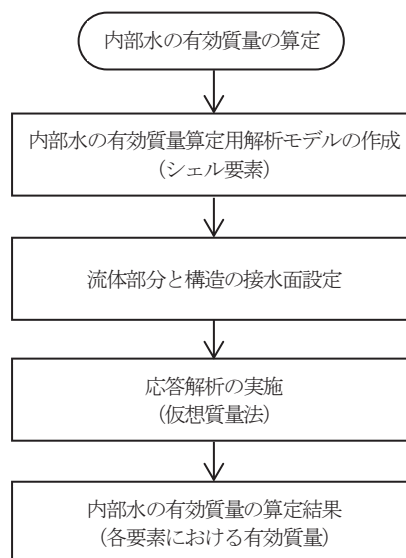


図 4.1-1 内部水の有効質量算定フロー

(2) 内部水の有効質量の解析モデル

サプレッションチェンバ内部水の有効質量を算定するための解析モデルを図 4.1-2 に示す。

解析モデルは、サプレッションチェンバ（強め輪を含む）の寸法、剛性を模擬したシェル要素とし、サプレッションチェンバ内部水の水位を設定する。なお、サプレッションチェンバ内部水の有効質量を算定するための解析モデルの作成にあたっては、内部水の有効質量が解析対象の容器形状及び水位に係る情報のみがあれば算定可能であることから、内部水の有効質量算定に関係のないボックスサポートを模擬していない。

サプレッションチェンバ内部水の水位は、図 4.1-3 に示すとおり、通常運転水位及び耐震解析用重大事故等時水位を考慮して2 ケースを設定する。なお、耐震解析用重大事故等時水位は、重大事故後の状態で弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s による地震力と組み合わせる水位である（別紙 10）。

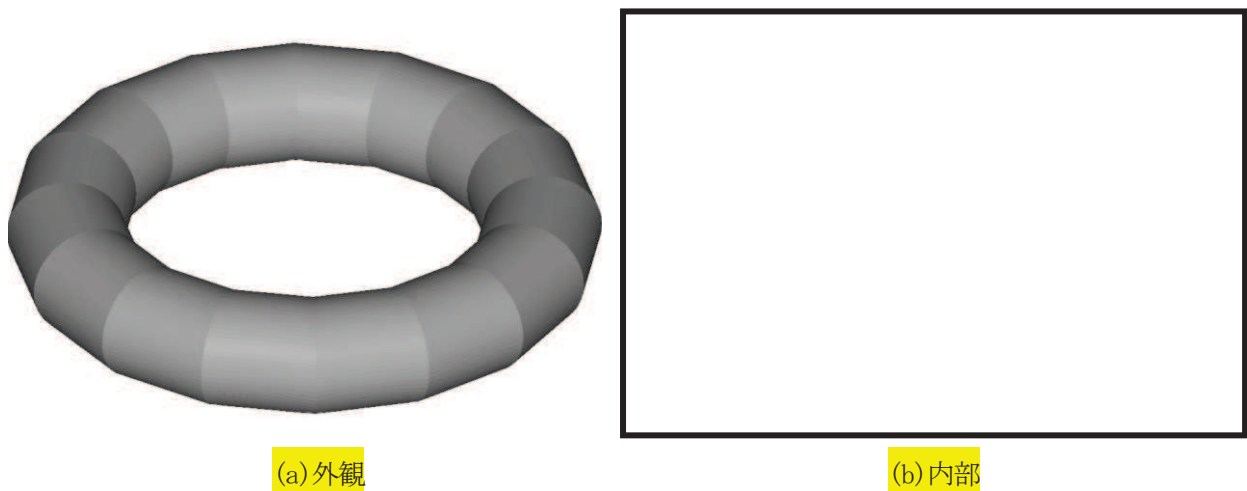


図 4.1-2 内部水の有効質量算定用解析モデル

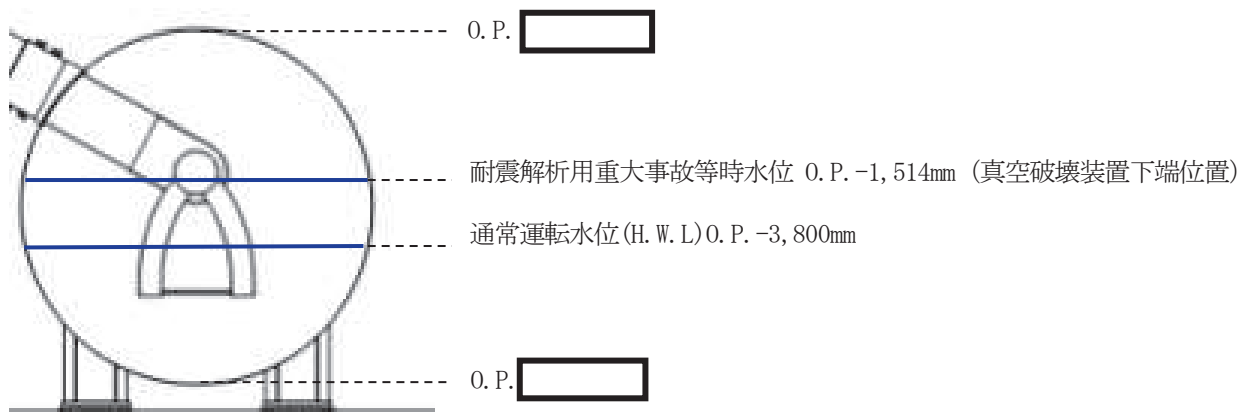


図 4.1-3 サプレッションチェンバ内部水の設定水位

(3) 内部水の有効質量の解析結果

仮想質量法によるサプレッションチェンバ内部水の有効質量の算定結果を表 4.1-1 に示す。ここで、算出結果として示している内部水の有効質量比の値は、内部水全質量に対する水平方向の内部水の有効質量の割合を表す。なお、耐震設計で用いる地震応答解析モデル（3次元はりモデル）における内部水の有効質量は、仮想質量法を用いて設定する。詳細な設定方法については、4.1.2 項に示す。

また、内部水の有効質量を算定する解析プログラムによる比較として、汎用流体解析コード OpenFOAM（流体解析）による算定結果も示す。各水位において仮想質量法と流体解析により算出した内部水の有効質量比は概ね一致しているが、仮想質量法により算出した方がやや大きい傾向があり、内部水の有効質量としては保守側の値となっている。

表 4.1-1 サプレッションチェンバ内部水の有効質量比算定結果

水位	解析手法	
	仮想質量法	流体解析*
通常運転水位(H. W. L)	0.24	0.22
耐震解析用重大事故等時水位	0.33	0.32

注記*：スロッシングの卓越周期帯で応答加速度が大きいS_s-D1を用いた算定結果

4.1.2 地震応答解析モデルにおける内部水の有効質量の設定

仮想質量法で算定したサプレッションチェンバ内部水の有効質量について、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデルへの設定フローを図 4.1-4 に示す。

仮想質量法により算定したサプレッションチェンバ内部水の有効質量は、NASTRAN の機能である Guyan 縮約法を用いてサプレッションチェンバ (3 次元はりモデル) の各質点に縮約し、付加する。なお、NASTRAN の機能である縮約とは、一般に膨大な数のデータを扱う有限要素法などの解析において、行列の大きさ (次元) を小さくする解析上のテクニックとして用いられるものである。

内部水の有効質量算定用解析モデル (シェル要素) で算出されたサプレッションチェンバ各要素の内部水の有効質量は、その有効質量及び位置 (高さ) を考慮し、地震応答解析モデル (はり要素) のサプレッションチェンバ各質点に対する内部水の有効質量 (並進質量及び回転質量) として設定される。

今回工認におけるサプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデルを図 4.1-5 に示す。また、地震応答解析モデルの各質点に設定される内部水の有効質量について、耐震解析用重大事故時水位を代表として、水平 (X 方向) 方向及び鉛直 (Z 方向) 方向の内部水の有効質量 (並進質量及び回転質量) を表 4.1-2 及び表 4.1-3 に示す。

水平 (X 方向) のうち並進 (X 方向) の質量の総和が内部水の有効質量であり、鉛直 (Z 方向) 方向の並進 (Z 方向) の質量の総和が全質量を表し、その内部水の有効質量比は 0.33 と表 4.1-1 と一致しており、適切に縮約されていることを確認した。なお、サプレッションチェンバの強め輪補強対策に係る詳細設計段階の検討結果の反映により、内部水から容器に加わる荷重が増加することで、設置許可時よりも内部水の有効質量比が増加している。

サプレッションチェンバ内部水の地震応答解析モデルへの設定方法に係る詳細及び NASTRAN の機能である Guyan 縮約法の妥当性については、別紙 2 に示す。

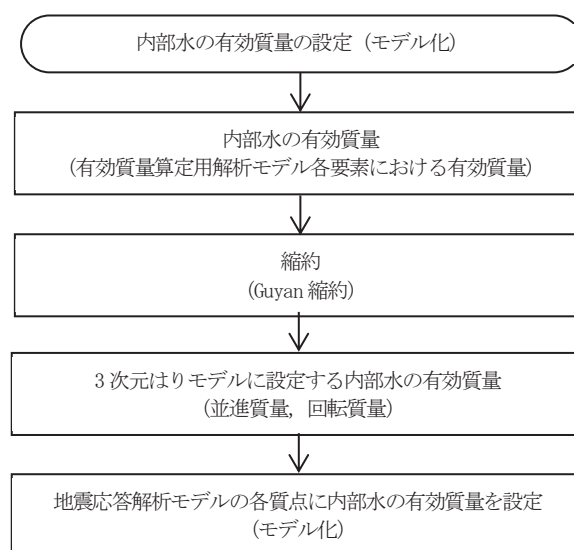


図 4.1-4 内部水の有効質量の地震応答解析モデルへの設定フロー

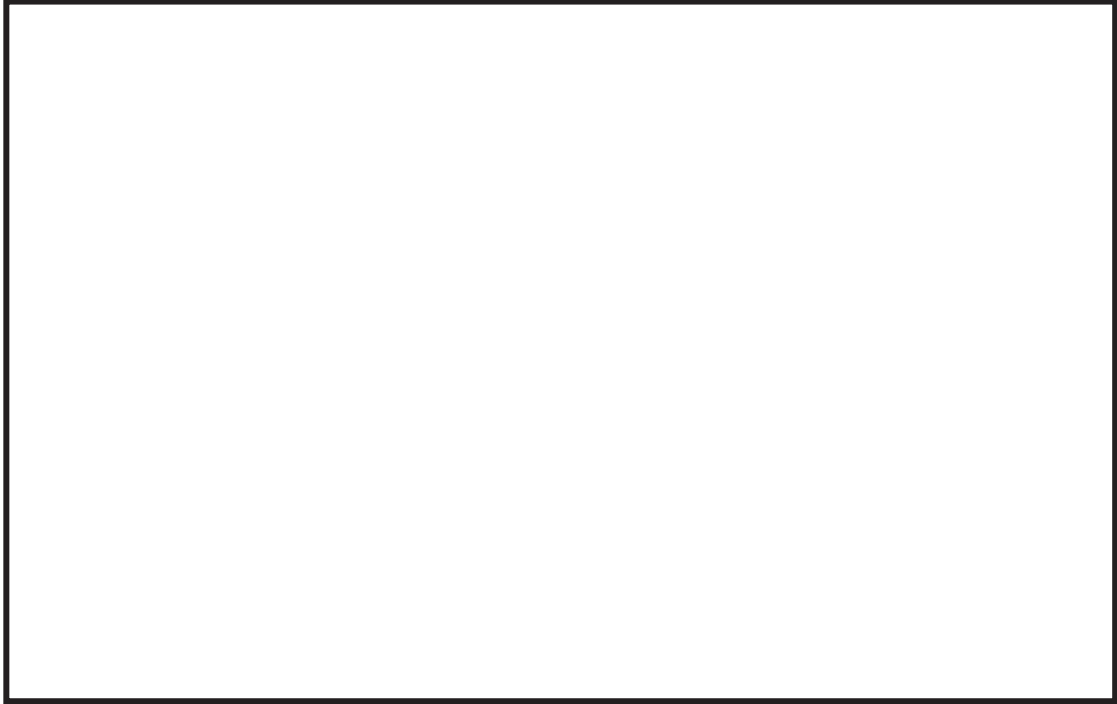


図 4.1-5 サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデル

表 4.1-2 内部水の有効質量の設定（耐震解析用重大事故等時水位，X 方向）

質点 番号	並進質量			回転質量		
	m_x ($\times 10^3$ kg)	m_y ($\times 10^3$ kg)	m_z ($\times 10^3$ kg)	Rm_x ($\times 10^3$ kg・m)	Rm_y ($\times 10^3$ kg・m)	Rm_z ($\times 10^3$ kg・m)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
合計						

表 4.1-3 内部水の有効質量の設定（耐震解析用重大事故等時水位，Z 方向）

質点 番号	並進質量			回転質量		
	m_x ($\times 10^3$ kg)	m_y ($\times 10^3$ kg)	m_z ($\times 10^3$ kg)	Rm_x ($\times 10^3$ kg \cdot m)	Rm_y ($\times 10^3$ kg \cdot m)	Rm_z ($\times 10^3$ kg \cdot m)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
合計						

4.1.3 サプレッションチェンバ本体のモデル化

サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析に適用する解析モデル設定にあたっては、サプレッションチェンバ及びボックスサポートを構成する各部材の剛性及び質量、サプレッションチェンバ内部水等を適切に考慮することとしている。

サプレッションチェンバ本体（小円）については、建設時にサプレッションチェンバ内部に設置した強め輪（64 枚）によって断面変形を抑制する設計としているため、はり要素でモデル化しているが、バルジングに係る既往知見を踏まえ、サプレッションチェンバに対するバルジング*の影響検討を行い、地震応答解析にあたってサプレッションチェンバ本体をはり要素でモデル化することの適用性を検討した。

影響検討の結果、サプレッションチェンバ内部に設置された強め輪の効果によって、サプレッションチェンバ本体（小円）の剛性が向上し、変形が抑制されるため、地震による発生応力が低減されることを確認した。また、強め輪の効果によって、サプレッションチェンバのオーバル振動（花びら状の変形等の小円の複雑な断面変形を伴う振動モード）の影響を十分に抑制できることを確認したことから、サプレッションチェンバ本体をはり要素でモデル化することの適用性があると判断した。

よって、サプレッションチェンバ本体のモデル化は、サプレッションチェンバ本体の小円断面中心位置に円筒断面の理論式により算定した剛性を考慮したはり要素でモデル化し、その剛性は既工認と同様とする（表 4.1-4 参照）。また、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの質量は、サプレッションチェンバ本体のはり要素に考慮した。

ただし、今回工認では、重大事故時のサプレッションチェンバの水位上昇に伴う内部水質量の増加、基準地震動の増大等を踏まえ、サプレッションチェンバ本体小円の断面変形を更に抑制するため、強め輪（32 枚）の補強対策を実施する。

また、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデルの設定にあたっては、より詳細に地震応答を把握するため、ボックスサポート取付部のばね剛性（並進、回転）を考慮したばね要素を 3次元はりモデルに付加する。

なお、強め輪の補強対策については、サプレッションチェンバ本体のはり要素（曲げせん断はり要素）ではなく、ボックスサポート取付部のばね剛性（並進、回転）算定に用いる 3次元シェルモデルに考慮しているため、そのばね要素に補強の効果が考慮される。

地震応答解析モデルに対するバルジングの影響検討結果の詳細については、別紙 3 に示す。

注記*：内部水を有する容器の振動特性に係る既往知見として、地震の揺れに伴うスロッシングの他、特に薄肉円筒容器であるたて置円筒容器の振動モードについては、バルジング（ビーム振動及びオーバル振動に分類される）が生じることが知られている。

表 4.1-4 サプレッションチェンバ本体のモデル化諸元

部材	材質	部材長* (mm)	質量 (10 ³ kg)	断面積 (mm ²)	断面二次 モーメント (mm ⁴)	有効せん 断断面積 (mm ²)	縦弾性 係数 (MPa)	ポアソン 比 (-)
サプレ ション チェン バ	SGV49							

注記*：3次元はりモデルにおけるサプレッションチェンバの全長を表す。

4.1.4 ボックスサポート取付部のばね剛性の算定

サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデルについては、サプレッションチェンバとボックスサポートをはり要素でモデル化し、サプレッションチェンバのボックスサポート取付部については、より詳細な地震応答を把握するため、ボックスサポート取付部のばね剛性（並進、回転）を考慮したばね要素でモデル化する。

サプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性算定フローを図 4.1-6 に示す。

サプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性算定に当たっては、その複雑な変形様態に対応するため、実機のサプレッションチェンバ及びボックスサポートを模擬したシェルモデルを用いるとともに、はりモデルで表現している剛性との重複を排除するため、はりモデルを用いてばね剛性（並進、回転の各3方向）を算定し、算定されたばね剛性（並進、回転の各3方向）をサプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデルに考慮する。

ばね剛性算定方法の詳細については、別紙4に示す。

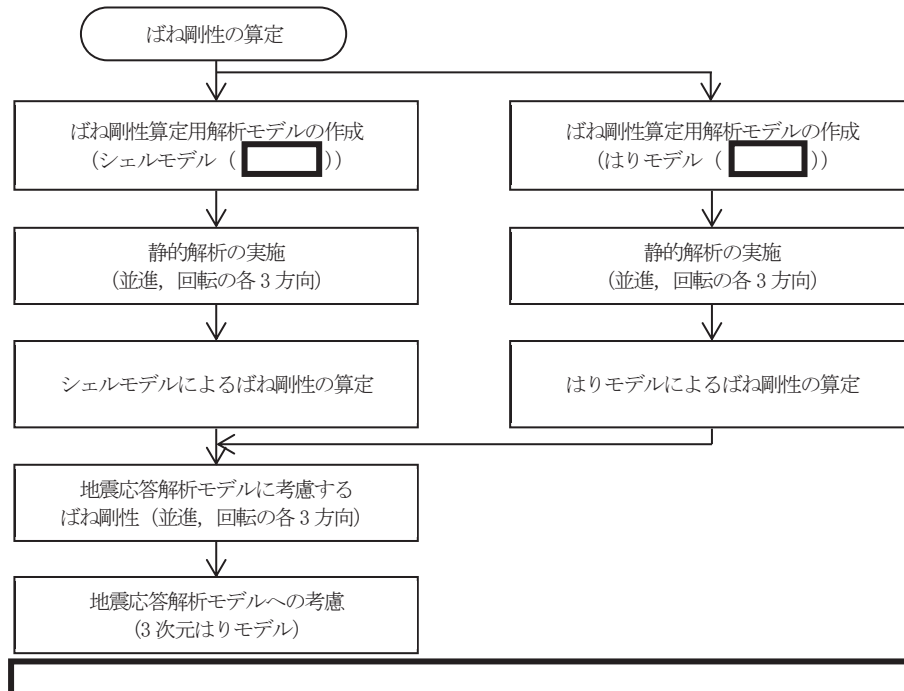


図 4.1-6 ボックスサポート取付部のばね剛性算定フロー

(1) ばね剛性算定用解析モデル（シェルモデル）

サブプレッションチェンバには、16 セグメントの円筒の継ぎ目部（胴エビ継手部）にボックスサポートがサブプレッションチェンバ大円の内側と外側に 1 組配置されている対称構造であることから、ばね剛性算定用解析モデルのモデル化範囲は、
、シェル要素でモデル化する。ばね剛性算定用解析モデルを図 4.1-7 に示す。



図 4.1-7 ばね剛性算定用解析モデル（シェルモデル）

(2) ばね剛性算定用解析モデル（はりモデル）

シェルモデルと同様の範囲について、はり要素によるばね剛性算定用解析モデルを図 4.1-8 に示す。



図 4.1-8 ばね剛性算定用解析モデル（はりモデル）

(3) 地震応答解析モデルに考慮するばね剛性

サブプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析に考慮するボックスサポート取付部のばね剛性を表 4.1-5、地震応答解析モデルを図 4.1-9 に示す。ボックスサポート取付部のばね剛性については、地震応答解析モデル（3次元はりモデル）のボックスサポート上端位置に並進3方向、回転3方向を設定する。

表 4.1-5 ボックスサポート取付部のばね剛性

考慮する方向		ばね剛性	
		内側	外側
並進	大円半径方向 (N/mm)		
	大円周方向 (N/mm)		
	上下方向 (N/mm)		
回転	大円半径軸回り (N・mm/rad)		
	大円円周軸回り (N・mm/rad)		
	上下軸回り (N・mm/rad)		

注記* :

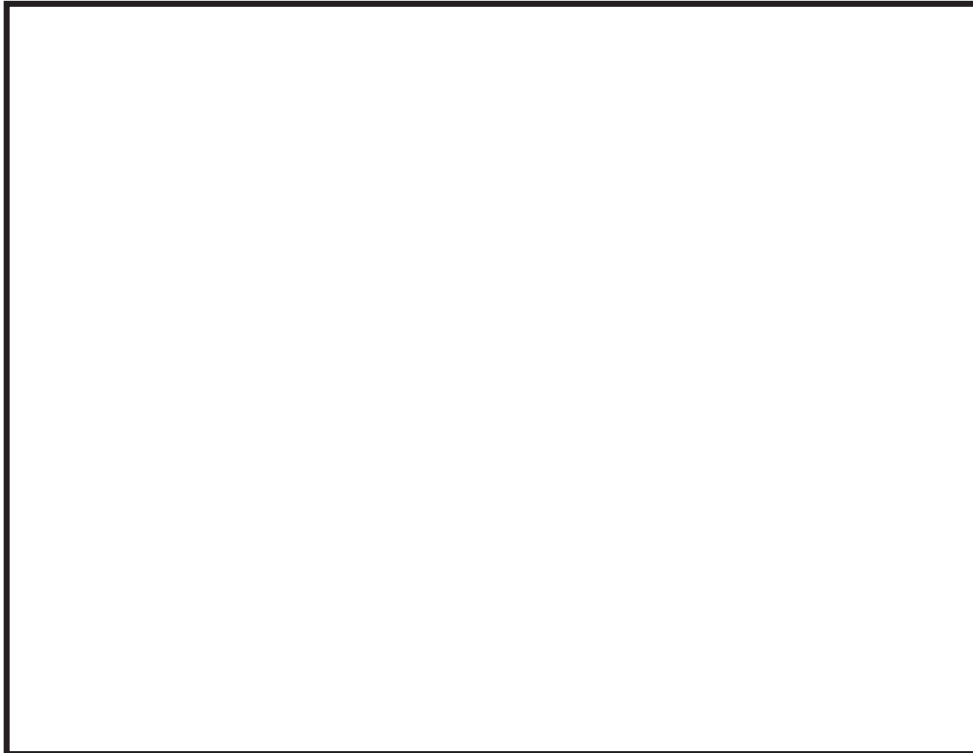


図 4.1-9 地震応答解析モデル（ばね剛性考慮）

4.1.5 ボックスサポートのモデル化

(1) ボックスサポート本体のモデル化の考え方

既工認におけるサプレッションチェンバのモデル化では、
[redacted]
[redacted]
[redacted]に考慮していた。

今回工認では、
[redacted]
[redacted]としてモデル化を行った。
[redacted]算定用の3次元シェルモデル図を図4.1-10及びボックスサポートのモデル化諸元を表4.1-6に、フランジプレートのばね剛性を表4.1-7に示す。

ボックスサポートの剛性は、断面積、せん断断面積及び断面二次モーメントについて、それぞれ以下のように算出した。
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]
[redacted]

[redacted]



図 4.1-10  算定用の3次元シェルモデル図

表 4.1-6 ボックスサポートのモデル化諸元

部材	材質	部材長 (mm)	質量 (10 ⁻³ kg)	断面積 (mm ²)	断面二次 モーメント (mm ⁴)		有効せん断 断面積 (mm ²)		縦弾性 係数 (MPa)	ポア ソン比 (-)
					大円半 径方向	大円円 周方向	大円半 径方向	大円円 周方向		
ボックス サポート	SM41B									

注記*：サブプレッションチェーンバ本体側に考慮。

表 4.1-7 フランジプレートのモデル化諸元

部材	ばね剛性 (N/mm)
フランジプレート	

(2) 基礎ボルトのモデル化の考え方

既工認におけるボックスサポートの基礎ボルトの地震荷重は、サプレッションチェンバの静的評価により求めたボックスサポートの反力を用いて、公式等による簡便な評価としてボックスサポート1か所あたりの力のつり合い（圧縮及び引張）から算出している。

一方、より現実に近いボックスサポートの基礎ボルトの荷重状態としては、サプレッションチェンバに取り付けられるボックスサポートの全ての基礎ボルトがつり合っているものと考えられる。ここで、図4.1-11に示す振動モードを想定した場合、ボックスサポートの位置（図中の①及び②）によって、各ボックスサポートの荷重状態が異なるため、各ボックスサポートにおける各基礎ボルトの荷重分配割合も異なると考えられることから、今回工認においては、より現実に近い挙動を詳細に考慮するため、図4.1-12のとおりボックスサポート1か所につき8本の基礎ボルトを剛ばね要素としてモデル化する。

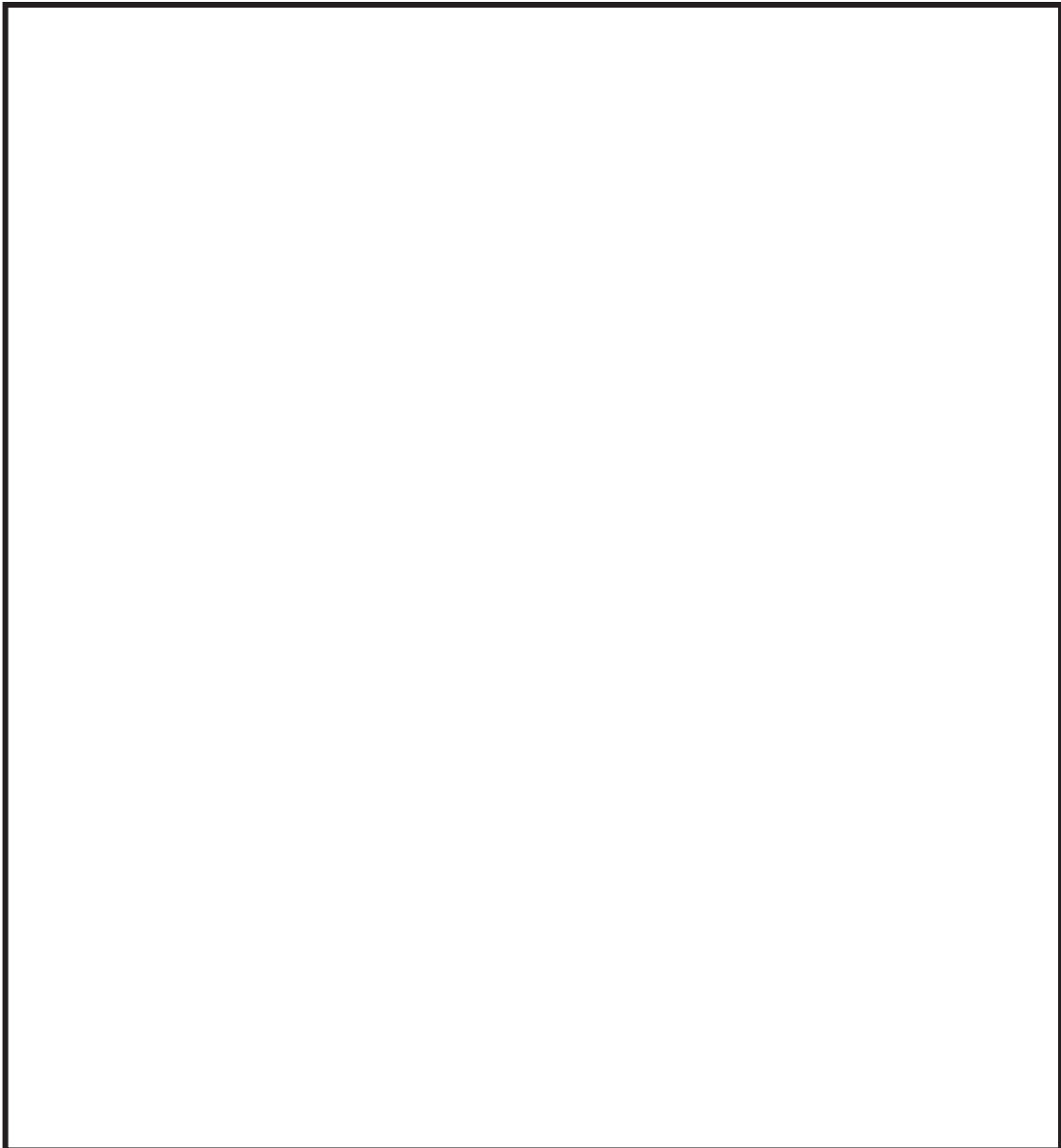


図4.1-11 荷重イメージ

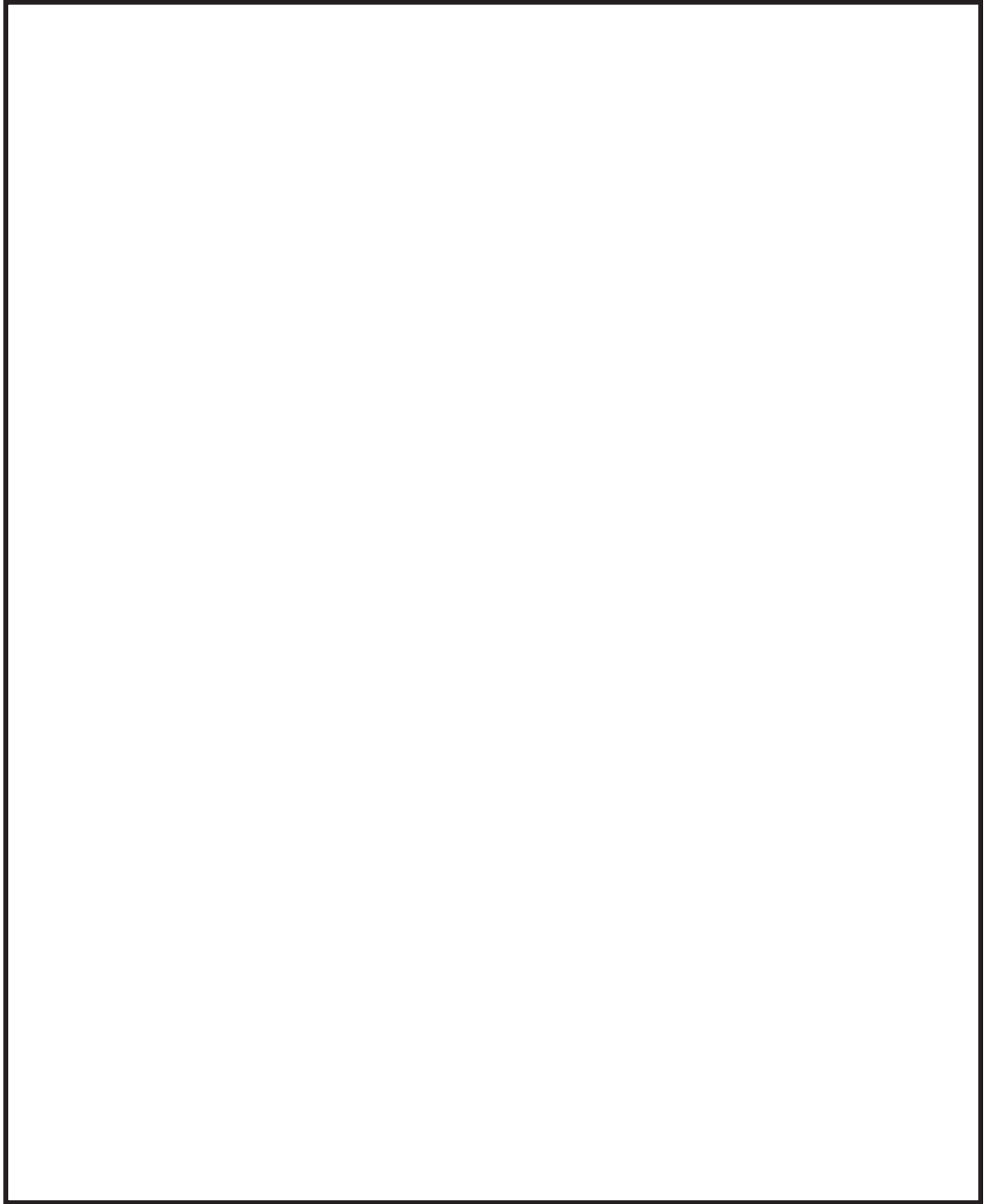


図 4.1-12 ボックスサポートの解析モデル

(3) ボックスサポート（基礎ボルト含む）モデル化

ボックスサポート周りのモデル化に当たっては、

と結合している。

また、

と結合している。

なお、ボックスサポートの基礎ボルトをモデル化したことによる地震応答解析モデルへの影響については、基礎ボルトのモデル化の有無による固有周期を確認した結果、表 4.1-8 のとおり振動性状に与える影響がないことを確認している。

ボックスサポートの解析モデルの境界条件及び解析モデル図を表 4.1-9 及び図 4.1-13 に、今回工認の地震応答解析モデルと影響確認に用いた地震応答解析モデルとの比較を表 4.1-10 に示す。解析モデルの違いは、今回工認の地震応答解析モデルでは基礎ボルト下端位置の境界条件を固定、影響確認に用いた解析モデルでは基礎ボルト上端位置（フランジプレートの剛性を考慮）の境界条件を固定していることである。

表 4.1-8 基礎ボルトのモデル化有無による固有周期比較

耐震評価として 考慮すべき振動モード*	固有周期（s）	
	基礎ボルトモデル有り	基礎ボルトモデル無し
3次		
4次		
5次		
6次		
7次		
10次		

注記*： 4.2.3における「耐震評価として考慮すべき振動モード」と対応。

表 4.1-9 ボックスサポートの解析モデルの境界条件

位置	境界条件
<div style="border: 1px solid black; width: 150px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 120px; height: 15px; margin: 0 auto; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 110px; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>
<div style="border: 1px solid black; width: 150px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 220px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div>



図 4.1-13 ボックスサポートの解析モデル

表 4. 1-10 今回工認の地震応答解析モデルと影響確認に用いた地震応答解析モデルとの比較

	実機地震応答解析モデル	影響確認に用いた地震応答解析モデル
境界条件		
モデル図 ボックス サポート 部詳細		

4.2 地震応答解析モデル（3次元はりモデル）の適用性確認

4.2.1 適用性の確認方針（適用性確認の着眼点）

4.1項では、今回工認におけるサプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析に適用する3次元はりモデルの設定について、サプレッションチェンバ内部水を有効質量として扱うこと、サプレッションチェンバ本体のモデル化及びサプレッションチェンバとボックスサポートの取付部にばね剛性を考慮すること等の考え方を示した。

本項では、上記を踏まえて設定したサプレッションチェンバ及びボックスサポートの3次元はりモデルを地震応答解析に適用することの適用性について確認する。適用性確認にあたっては、サプレッションチェンバ（強め輪を含む）及びボックスサポートをシェル要素でモデル化した適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）による地震応答解析を実施し、3次元はりモデルを用いた地震応答解析結果との比較を行う。地震応答解析は、3次元はりモデル及び適用性確認用解析モデルともに、今回工認で用いる設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析を行った。応力評価は、水平2方向及び鉛直方向の荷重組合せを考慮した。図4.2-1にサプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデル（3次元はりモデル）に対する適用性確認フローを示すとともに、適用性確認における着眼点を以下に示す。

着眼点(1) 固有値解析による振動モード、それらの固有値、刺激係数を比較し、適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）の解析結果から耐震評価として考慮すべきと確認された振動モード（変形方向）が3次元はりモデルにて表現できていること。ここで、耐震評価として考慮すべき振動モードとは、各応力評価点における発生応力に有意に影響する振動モード。また、それらの固有値の違いについては、工学的な判断目安として設計用床応答曲線として設定される10%拡幅を考慮し、10%以内であることとした。

着眼点(2) 地震応答解析（スペクトルモーダル解析）による応力評価部位毎（サプレッションチェンバ胴中央部、胴エビ継ぎ手部、ボックスサポート取付部及びボックスサポート）に許容値に対する発生応力の割合がシェルモデルと3次元はりモデルで概ね一致していること。

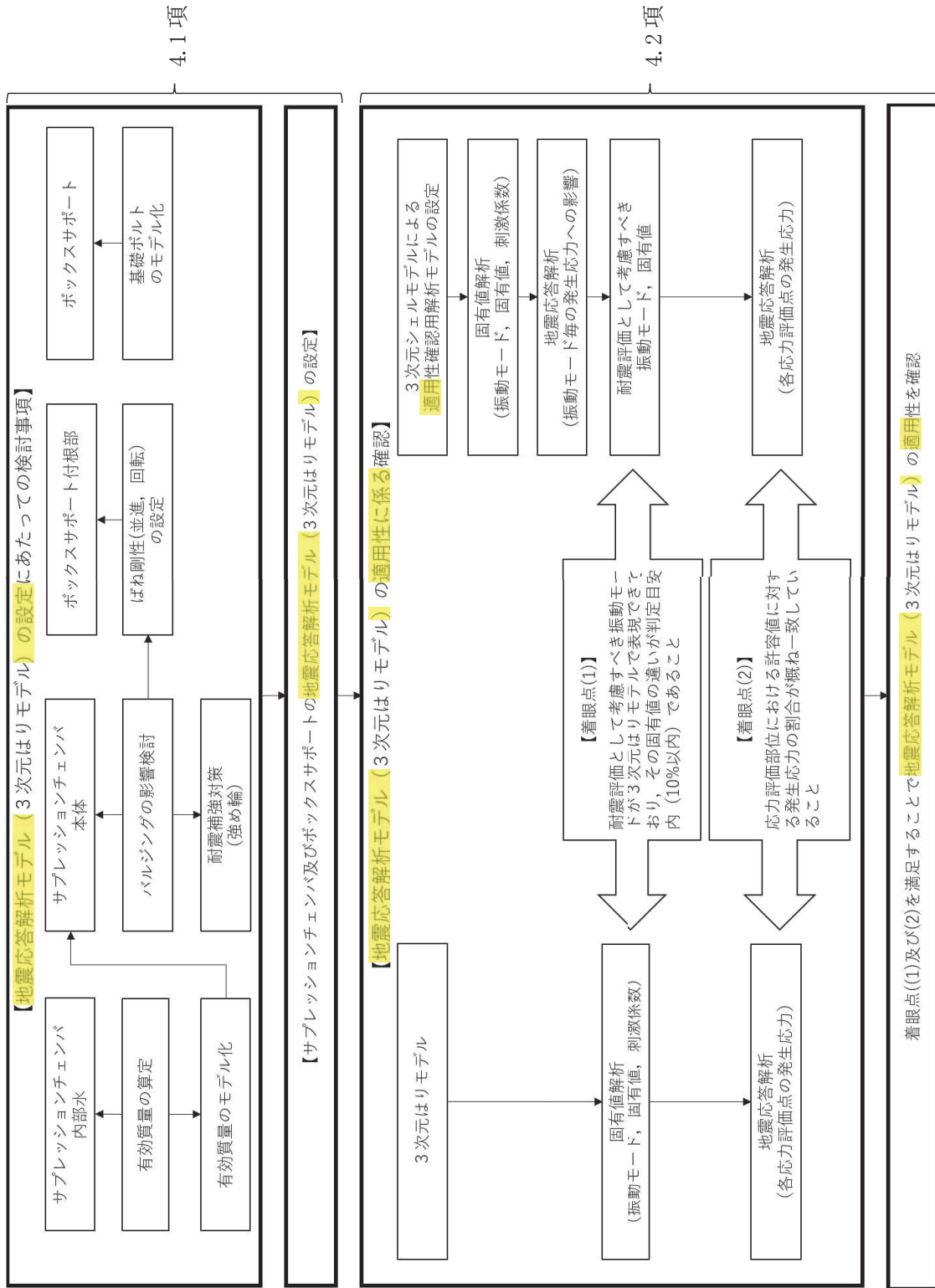


図 4.2-1 3次元はりモデル設定及び適用性検証フロー

4.2.2 適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）

適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）として、サプレッションチェンバ本体（強め輪を含む）及びボックスサポートをシェル要素としてモデル化し、サプレッションチェンバ本体のシェル要素に、4.1.1項と同様にNASTRANの仮想質量法により算定した内部水の有効質量を各シェル要素に考慮する。内部水の有効質量算定における水位条件は、耐震解析用重大事故等時水位を代表とした。適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）のモデル諸元及び解析モデル図を表4.2-1及び図4.2-2に示す。なお、解析モデルの設定に係る詳細については、別紙5に示す。

表 4.2-1 適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）のモデル諸元

項目		内容
モデル要素数		
モデル化	鋼製部	シェル要素：サプレッションチェンバ本体，強め輪（耐震補強対策含む），ボックスサポート（耐震補強対策含む） 剛ばね要素：基礎ボルト
	内部水	<ul style="list-style-type: none"> 耐震解析用重大事故等時水位（O. P. -1, 514mm） NASTRANの仮想質量法を適用

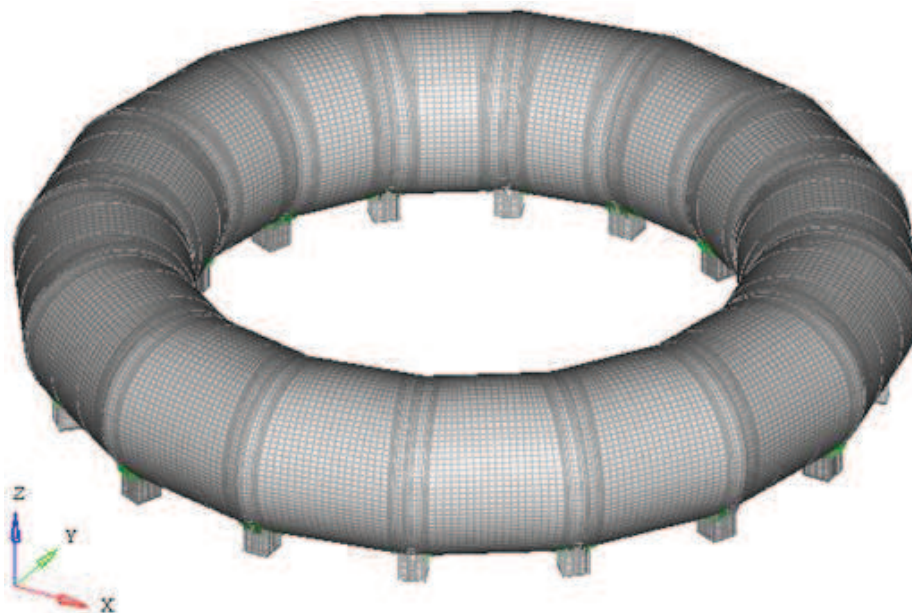


図 4.2-2 適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）図

4.2.3 3次元はりモデルと適用性確認用解析モデルとのモデル化比較

3次元はりモデル及び適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）における主要なモデル化項目の考え方を比較するとともに、モデル化に差異がある場合には、3次元はりモデルにおけるモデル化の適用性について整理した結果を表4.2-2に示す。

表 4.2-2 3 次元はりモデル及び適用性確認用解析モデルのモデル化比較

モデル化項目	3 次元はりモデル	適用性確認用解析モデル (3 次元シェルモデル)	モデル化の差異及びその適用性
内部水の有効質量のモデル化	NASTRAN の仮想質量法により算出し、NASTRAN の機能である Guyan 縮約を用いてはりモデルに付与	NASTRAN の仮想質量法により算出し、その値をシェル要素に考慮	内部水の有効質量の算定方法は同じである。 3 次元はりモデルにおける内部水の有効質量のモデル化は、Guyan 縮約を用いてモデル化しており、別紙 2 において円筒容器を用いた理論式及び内部水の有効質量の妥当性検証に用いた振動試験との対比により妥当性を確認している。(4.1.2 項)
サブレーションチャンバ本体のモデル化	材料物性と円筒断面の理論式により算定したサブレーションチャンバ本体大円の剛性を考慮したはり要素でモデル化	材料物性及び実機構造を模擬したシェル要素でモデル化	3 次元はりモデルにおけるサブレーションチャンバ本体のモデル化は、小円の平面保持を仮定した理論式である。平面保持の仮定については、強め輪によって断面変形を抑制する設計としており、別紙 3 において強め輪の効果によって花びら状の変形等の小円の複雑な断面変形を伴う振動モードのよる影響を十分抑制出来ていることを確認している。
ボックスサポータ取付部のばね剛性のモデル化	実機構造を模擬したばね剛性算定用の 3 次元シェルモデル [] 等を用いてサブレーションチャンバ小円の断面変形を含む取付部の局部変形を考慮したばね剛性を算定し、ボックスサポータ取付部にばね要素としてモデル化 [] でモデル化	材料物性及び実機構造を模擬したシェル要素でモデル化	3 次元はりモデルにおけるボックスサポータ取付部のばね剛性は、モデル化の要素が異なるものの、着目している剛性 (ボックスサポータ取付部のばね剛性及び小円の断面変形を模擬した剛性 (4.1.3 項)) は、適用性確認用モデルと同じである。(4.1.4 項)
ボックスサポータのモデル化	[] 算定用の 3 次元シェルモデルを用いて曲げ・せん断・伸び剛性を算定し、ボックス構造部は [] で、フランジプレートは [] でモデル化	材料物性及び実機構造を模擬したシェル要素でモデル化 基礎ボルトは、剛ばね要素としてモデル化	ボックスサポータ等の剛性は、モデル化の要素が異なるものの、着目している剛性は、適用性確認用モデルと同じである。(4.1.5 項)

4.2.4 適用性確認結果

(1) 適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）による固有値解析結果

適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）を用いた固有値解析結果として、各振動モードに対する固有周期、刺激係数を表 4.2-3 に示す。

(2) 耐震評価として考慮すべき振動モードの確認結果

表 4.2-3 に示す振動モード毎の発生応力への影響を検討するため、各振動モードの刺激係数の値に着目して、各振動モードを3グループに分類した。

グループA：刺激係数が2桁オーダーの値である振動モード

グループB：刺激係数が1桁オーダーの値である振動モード

グループC：刺激係数が1未満の値である振動モード

次に、適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）を用いたサプレッションチェンバの地震応答解析結果として、グループAの振動モード（3次、4次、5次、10次、11次、12次）による発生応力、グループAに対してグループBの振動モード（22次、23次、24次、25次、38次、39次）を加えた振動モードによる発生応力を表 4.2-4 に示す。

グループAの振動モードによる発生応力に対するグループA及びBの振動モードによる発生応力の比率は、最大でも1.001（0.1%）であり、グループBの振動モードによる発生応力への影響はないことを確認した。また、グループCの振動モードについても発生応力への影響もないと判断できる。

したがって、耐震評価として考慮すべき振動モードは、グループAに分類された振動モード（3次、4次、5次、10次、11次、12次）である。

(3) 3次元はりモデルと適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）との固有周期及び発生応力の比較

a. 着眼点(1)

3次元はりモデルを用いた固有値解析結果として、振動モード、固有周期及び刺激係数を表 4.2-5 に示す。また、3次元はりモデルの振動モードについて、適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）で確認された耐震評価として考慮すべき振動モードとの比較結果を表 4.2-6 に示す。

3次元はりモデルによる振動モードと適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）の振動モードは、概ね同様な変形傾向を示しており、また、それら振動モードの固有周期の違いは、全て判定目安（10%以内）にあることを確認した。具体的には、水平方向の主要な振動モード（3次）で9.3%、鉛直方向の主要な振動モード（5次）で9.6%となる。

b. 着眼点(2)

3次元はりモデル及び適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）によるサプレッショ

ンチェーンバの応力評価点における応力評価の比較結果を表4.2-7及び図4.2-3に示す。ここで、3次元はりモデルによるサプレッションチェーンバ本体の応力評価は、今回工認の応力評価法（2ベイシェルモデルを用いた変位入力）を用いて応力を算定している。また、適用性確認解析モデル（3次元シェルモデル）による応力評価は、地震応答解析（スペクトルモーダル解析）によりシェル要素に発生する応力を算定している。

3次元はりモデル及び適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）による発生応力は、サプレッションチェーンバの構造特徴を踏まえ応力評価部位を胴中央部、胴エビ継手部及びボックスサポート取付部に分類して比較した場合、応力評価部位によって大小関係は異なるものの、構造的に類似する胴中央部（P1, P2, P3, P4）、胴エビ継手部（P5, P6, P7, P8）及びボックスサポート取付部（P9, P10）の各分類において許容応力の範囲内で同程度である。耐震評価で最も重要となる最大応力発生部位であるボックスサポート取付部に対しては、3次元はりモデル及び適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）による発生応力が概ね一致しており、3次元はりモデルによる外側ボックスサポート取付部（P10）が最大応力となっている。なお、適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）に対して3次元はりモデルの一部で発生応力が小さい要因は、応力評価モデル（部分シェルモデル）の境界条件（地震荷重入力位置に剛体要素を設定（5.4.1参照））によるものと考えられる。

3次元はりモデル及び適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）によるボックスサポートの応力評価点における応力評価の比較結果を表4.2-8及び図4.2-4に示す。ここで、ボックスサポートの応力評価は、いずれともボックスサポート及び基礎ボルトに加わる荷重を用いて、今回工認の応力評価法（公式等による評価）にて応力を算定している。

3次元はりモデル及び適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）による発生応力は、ボックスサポートの応力評価部位による大小関係は類似しており、3次元はりモデルの発生応力と適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）の発生応力の差は小さく、ボックスサポートの発生応力は許容応力の範囲内で同程度である。なお、適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）に対して3次元はりモデルの一部で発生応力が小さい要因は、基礎ボルトの荷重分布の若干の差異によるものと考えられる。

ここで、サプレッションチェーンバに対する3次元はりモデル及び適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）の加速度及び変位の比較結果を図4.2-5に示す。3次元はりモデルの質点位置における各方向の加速度及び変位は、適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）の小円断面（頂部、底部、内側、外側）における各方向の加速度及び変位の平均的な応答を表していることが分かる。なお、3次元はりモデルによるサプレッションチェーンバ本体の応力は、この3次元はりモデルでの変位を用いて算定し、適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）により算出された応力と比較している。なお、サプレッションチェーンバの設置位置の設計用床の応答曲線に対して、3次元はりモデル及び適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデ

ル)の固有周期(水平1次モード,鉛直1次モード)を図4.2-6に示す。なお,女川2号機の床応答曲線の場合,3次元はりモデルと適用性確認用解析モデルの各々の固有周期帯でフラットな形状となっていることから,応答加速度がほぼ同等となる。

(4) 適用性確認結果

上記3次元はりモデルの適用性確認結果から,3次元はりモデルを用いた地震応答解析は,耐震評価として考慮すべき振動モードを表現できていること,応力評価部位における発生応力が許容応力の範囲内で同程度(3次元シェルモデル及び3次元はりモデルのいずれも許容応力の範囲内)であることから,女川2号機の今回工認におけるサプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデルに対して今回工認で設定した3次元はりモデルの適用性を確認した。

なお,サプレッションチェンバのモデル化の差異(3次元はりモデルと適用性確認用解析モデル)が固有周期に与える影響について,別紙20にて考察した。

表 4.2-3 適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）を用いた固有値解析結果

振動モード	固有周期 (s)	刺激係数* ¹ (-)			刺激係数の値に着目したグループ* ²
		X	Y	Z	
1* ³	0.110	0.03	0.03	0.00	C
2* ³	0.110	0.01	0.00	0.00	C
3	0.107	43.21	19.85	0.01	A
4	0.107	19.85	43.21	0.00	A
5	0.094	0.02	0.01	36.58	A
6	0.082	0.00	0.00	0.00	C
7	0.082	0.01	0.00	0.00	C
8	0.080	0.04	0.01	0.00	C
9	0.080	0.01	0.00	0.00	C
10	0.076	20.27	3.92	0.02	A
11	0.076	3.91	20.27	0.00	A
12	0.069	0.01	0.00	34.92	A
13	0.066	0.00	0.00	0.02	C
14	0.066	0.00	0.00	0.01	C
15	0.058	0.00	0.00	0.00	C
16	0.058	0.00	0.00	0.00	C
17	0.056	0.00	0.01	0.00	C
18	0.056	0.00	0.00	0.00	C
19	0.056	0.00	0.00	0.00	C
20	0.051	0.01	0.00	0.00	C
21	0.051	0.02	0.03	0.00	C
22	0.051	0.53	1.42	0.00	B
23	0.051	1.35	0.53	0.00	B
24	0.051	6.30	4.49	0.00	B
25	0.051	4.49	6.29	0.00	B
26	0.050	0.20	0.02	0.00	C
27	0.050	0.08	0.14	0.00	C
28	0.050	0.01	0.06	0.39	C
29	0.050	0.10	0.20	0.00	C
30	0.050	0.18	0.07	0.01	C
31	0.050	0.13	0.08	0.00	C
32	0.050	0.11	0.04	0.00	C
33	0.050	0.04	0.18	0.01	C
34	0.050	0.14	0.07	0.00	C
35	0.050	0.08	0.15	0.00	C
36	0.050	0.47	0.08	0.00	C
37	0.050	0.09	0.45	0.00	C
38	0.050	4.01	7.86	0.00	B
39	0.050	7.86	4.00	0.00	B

注記*1：質量による正規化

*2：刺激係数が2桁オーダーの振動モード（グループA）、1桁オーダーの振動モード（グループB）、それ以外の振動モード（グループC）と整理

*3：解析対象物が対称な構造物の場合に、解析上現れるモードであって地震時（方向性（水平、鉛直）のある加速度）には励起されないモードである。

表 4.2-4 各振動モードの応力への寄与率

応力	箇所	方位	①グループAの振動モードによる発生応力 (MPa)	②グループA, Bの振動モードによる発生応力 (MPa)	発生応力の割合 ②/①	
サブプレッジョンチェーンバ	P1	胴中央部	外側	198.9	198.9	1.0000
	P2		底部	127.1	127.2	1.0008
	P3		内側	101.9	102.0	1.0010
	P4		頂部	44.2	44.2	1.0000
	P5	胴エビ継部	外側	192.0	192.0	1.0000
	P6		底部	163.6	163.6	1.0000
	P7		内側	130.0	130.1	1.0008
	P8		頂部	102.8	102.9	1.0010
	P9	内側ボックス サポート取付部		328.1	328.2	1.0003
	P10	外側ボックス サポート取付部		289.9	290.1	1.0007

表 4.2-5 3次元はりモデルを用いた固有値解析結果

振動 モード	固有周期 (s)	刺激係数*1 (-)		
		X	Y	Z
1*2	0.104	0.00	0.00	0.00
2*2	0.104	0.00	0.00	0.00
3	0.097	0.14	44.74	0.00
4	0.097	-44.74	0.14	0.00
5	0.085	0.00	0.00	82.02
6	0.076	-27.56	2.52	0.00
7	0.076	2.52	27.56	0.00
8	0.069	0.00	0.00	0.00
9	0.069	0.00	0.00	0.00
10	0.068	0.00	0.00	8.25
11	0.066	0.00	0.00	0.00
12	0.066	0.00	0.00	0.00
13	0.051	0.00	0.00	0.00
14	0.051	0.00	0.00	0.00
15	0.047	0.00	0.00	0.00
16	0.047	0.00	0.00	0.00

注記*1：質量による正規化

*2：解析対象物が対称な構造物の場合に、解析上現れるモードであって地震時（方向性（水平、鉛直）のある加速度）には励起されないモードである。

表 4.2-6 「耐震評価として考慮すべき振動モード」による固有値解析結果 (1/6)

① 適用性確認用解析モデル (3次元シェルモデル)	② 3次元はりモデル	特徴及び固有値の比較 (②/①)
振動モード (固有周期)	黒線：変形前	青線：変形前

表 4.2-6 「耐震評価として考慮すべき振動モード」による固有値解析結果 (2/6)

① 適用性確認用解析モデル (3次元シェルモデル)	② 3次元はりモデル	特徴及び固有値の比較 (②/①)
振動モード (固有周期) 黒線：変形前	振動モード (固有周期) 青線：変形前	

表 4.2-6 「耐震評価として考慮すべき振動モード」による固有値解析結果 (3/6)

① 適用性確認用解析モデル (3次元シェルモデル)	② 3次元はりモデル	特徴及び固有値の比較 (②/①)
振動モード (固有周期) 黒線：変形前	振動モード (固有周期) 青線：変形前	

表 4.2-6 「耐震評価として考慮すべき振動モード」による固有値解析結果 (4/6)

① 適用性確認用解析モデル (3次元シェルモデル)	② 3次元はりモデル	特徴及び固有値の比較 (②/①)
振動モード (固有周期)	黒線：変形前	青線：変形前

表 4.2-6 「耐震評価として考慮すべき振動モード」による固有値解析結果 (5/6)

① 適用性確認用解析モデル (3次元シェルモデル)	振動モード (固有周期)	黒線：変形前	振動モード (固有周期)	② 3次元はりモデル 青線：変形前	特徴及び固有値の比較 (②/①)

表 4.2-6 「耐震評価として考慮すべき振動モード」による固有値解析結果 (6/6)

① 適用性確認用解析モデル (3次元シェルモデル)	振動モード (固有周期)	黒線：変形前	② 3次元はりモデル	振動モード (固有周期)	青線：変形前	特徴及び固有値の比較 (②/①)

表 4.2-7 3次元はりモデル及び適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）による
サブプレッションチェンバの応力比較結果

応力 評価 点	箇所	方位	①3次元 はりモデル による応力 評価結果 (MPa)	②適用性確 認用解析モ デル（3次 元シェルモ デル）によ る応力評価 結果 (MPa)	③許容応力 (MPa)	①/②	③/①
P1	胴中央部	外側	166	199	393	0.83	2.36
P2		底部	106	127	393	0.83	3.70
P3		内側	136	102	393	1.33	2.88
P4		頂部	78	45	393	1.73	5.03
P5	胴エビ 継手部	外側	162	192	393	0.84	2.42
P6		底部	104	164	393	0.63	3.77
P7		内側	152	130	393	1.17	2.58
P8		頂部	92	103	393	0.89	4.27
P9	内側ボックス サポート取付部		300	328	393	0.91	1.31
P10	外側ボックス サポート取付部		330	290	393	1.14	1.19

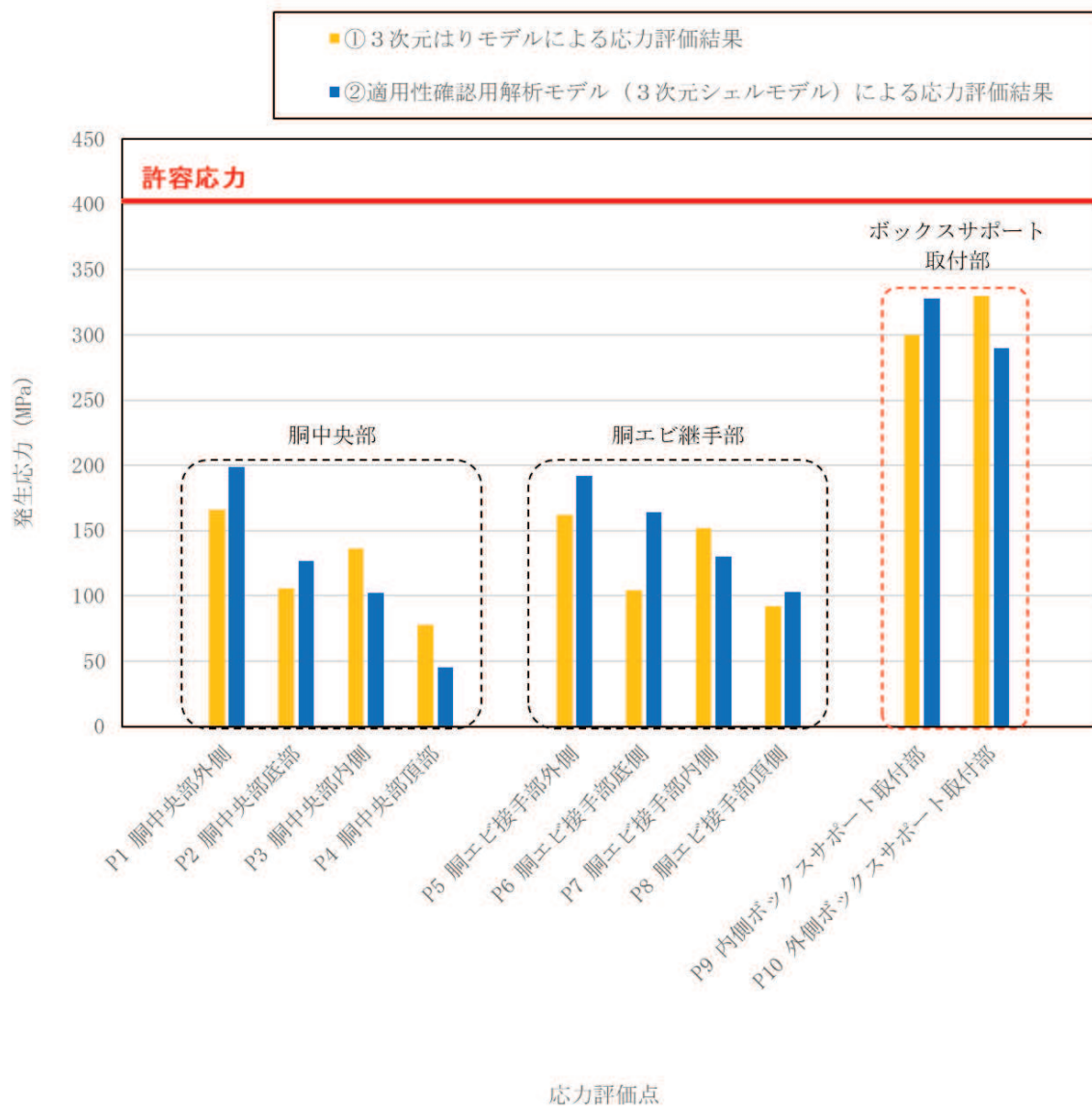


図 4.2-3 3次元はりモデル及び適用性確認用解析モデル (3次元シェルモデル) によるサプレッションチェンバの応力比較結果

表 4.2-8 3次元はりモデル及び適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）による
ボックスサポートの応力比較結果

応力 評価 点	箇所	①3次元 はりモデルに よる応力評価 結果 (MPa)	②適用性確認用 解析モデル（3 次元シェルモデ ル）による応力 評価結果 (MPa)	③許容応力 (MPa)	①/②	③/①
P1	ボックスプレート (一次+二次応力)	314	244		1.29	
P2	ボックスプレート 取付部 (一次+二次応力)	284	242		1.17	
P2'	ボックスプレート (上側) 取付部 (一次+二次応力)	88	80		1.10	
P3	フランジプレートとシ ヤラグ接触部 (一次+二次応力)	63	58		1.09	
P4	シヤラグ取付部 (一次+二次応力)	94	86		1.09	
P5	基礎ボルト (引張応力)	404	446		0.91	
P6	フランジプレート (一次+二次応力)	267	253		1.06	
P6'	フランジプレート (外側) (一次+二次応力)	168	185		0.91	
P7	ベースプレート (一次+二次応力)	148	137		1.08	
P8	シヤコネクタ (外側) 取付部 (一次+二次応力)	46	42		1.10	
P9	コンクリート (ベース プレート下面) (圧縮応力)	10.65	10.17		1.05	
P10	コンクリート (シヤコ ネクタ (外側) 側面) (圧縮応力)	21.10	19.28		1.09	
P11	コンクリート (シヤプレート上面) せん断応力	0.80	0.88	0.91		
P12	パッド取付部 (一次+二次応力)	72	66	1.09		

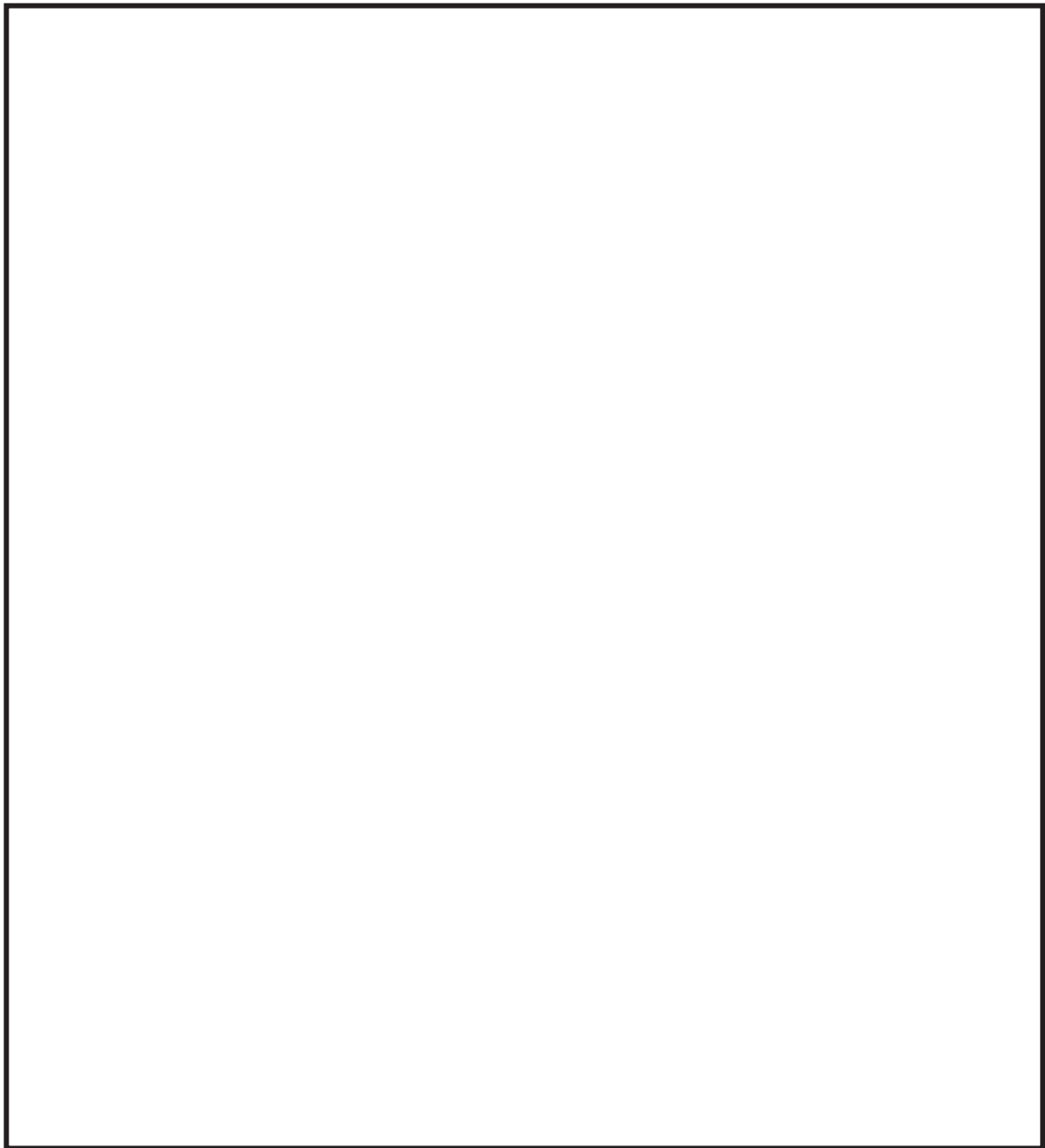


図 4.2-4 3次元はりモデル及び適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）による
ボックスサポートの応力比較結果

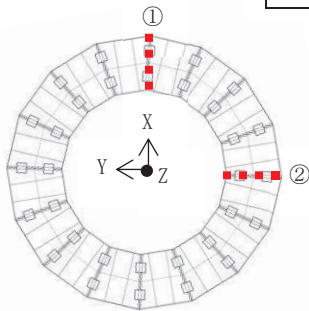
凡例

記載位置は、小円断面での位置を表す。

シェル		
	内側	外側
	頂部	底部

単位:m/s

方向	はり	シェル	
		内側	外側
X	33.51	26.17	47.39
		29.94	
Y	15.79	17.45	12.57
		9.29	
Z	35.04	48.72	25.02
		5.49	



単位:m/s

方向	はり	シェル	
		内側	外側
X	15.79	17.44	12.57
		9.29	
Y	33.51	31.46	47.40
		29.98	
Z	35.04	48.72	25.02
		5.49	

(a) 加速度の比較結果

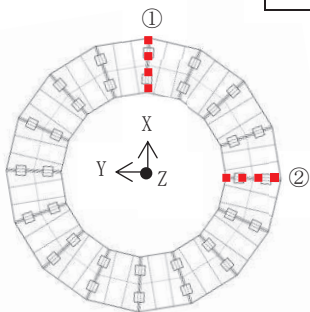
凡例

記載位置は、小円断面での位置を表す。

シェル		
	内側	外側
	頂部	底部

単位:mm

方向	はり	シェル	
		内側	外側
X	7.56	5.99	13.17
		7.67	
Y	3.72	4.76	3.59
		2.57	
Z	6.79	10.16	5.92
		1.18	

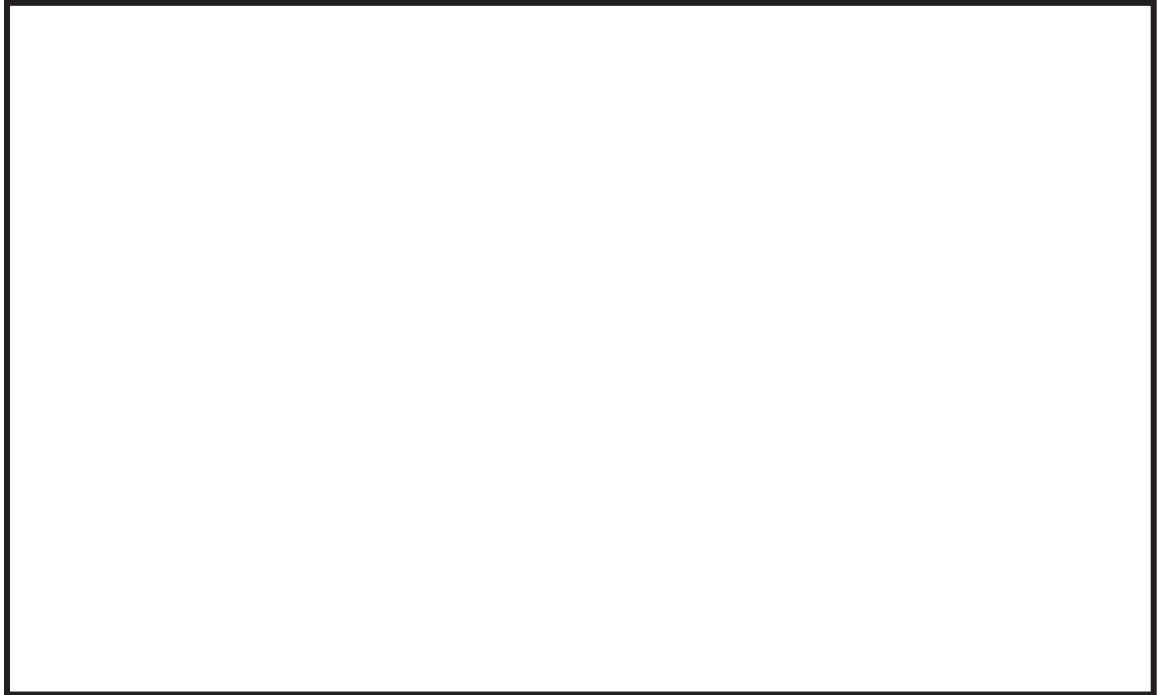


単位:mm

方向	はり	シェル	
		内側	外側
X	3.72	4.76	3.59
		2.57	
Y	7.56	6.00	13.17
		7.68	
Z	6.79	10.15	5.92
		1.18	

(b) 変位の比較結果

図 4.2-5 3次元はりモデルと適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）との加速度及び変位の比較結果



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図 4.2-6 設計用床応答曲線と固有周期の比較

4.3 地震応答解析に対する内部水の有効質量算出法及び高振動数領域の影響検討

地震応答解析では、サブプレッションチェンバ及びボックスサポートの構造特性、サブプレッションチェンバ内部水の流体特性等を考慮し、サブプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデル(3次元はりモデル)を設定し、スペクトルモーダル解析を実施して地震時の荷重を算定する。なお、3次元はりモデルを用いたスペクトルモーダル解析については、女川2号機と同型炉のサブプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析として、既工認実績のある手法である。

本項では、サブプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析(スペクトルモーダル解析)に対して、内部水の有効質量算出法として仮想質量法と流体解析による内部水の有効質量の差異及び高振動数領域の入力加速度の影響を検討する。

(1) 内部水の有効質量算出法の違いによる内部水の有効質量の差異による影響

4.1.1項におけるサブプレッションチェンバ内部水の有効質量の算定結果では、NASTRANの仮想質量法と汎用流体解析コードOpenFOAMによる流体解析により算出した内部水の有効質量比は概ね一致しているが、仮想質量法により算出した方がやや大きい傾向があり、内部水の有効質量としては保守側の値となっていることを確認している(4.1.1参照)。

サブプレッションチェンバ内部水の有効質量は、サブプレッションチェンバ及びボックスサポートの固有値に関連することから、耐震評価に用いる地震荷重としての保守性の観点から、解析手法間(仮想質量法と流体解析)の差異による固有値と設計用床応答曲線の間隔(図4.3-1に示す。設計用床応答曲線は、添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」によるものである)。

4.1.1項で算定した仮想質量法の内部水の有効質量比(0.33)及び流体解析の内部水の有効質量比(0.32)の関係(仮想質量法>流体解析)から、流体解析の場合における主要な振動モードの固有周期を仮想質量法と比較して短周期に5%程度短いとすると*、設計用床応答曲線と固有周期との関係から、内部水の有効質量算出法の違いによって応答加速度が変わらないことから、内部水の有効質量算出法の違いによる地震応答解析への影響はほとんどないことを確認した。

* 仮想質量法に対する流体解析の固有周期の比率は、剛性を同一として、それぞれの内部水の有効質量比から算定($\sqrt{0.32/0.33}=0.985$)し、影響検討条件としては、幅広に5%程度短いものとした。

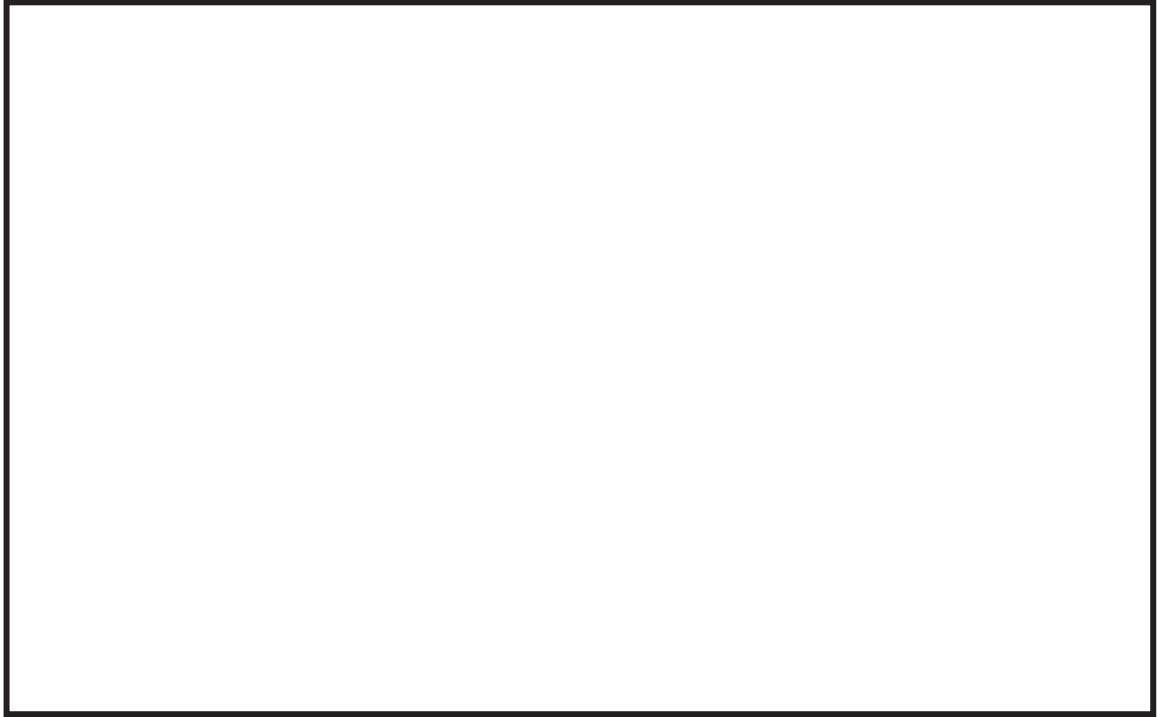


図 4.3-1 設計用床応答曲線と固有周期の比較

(2) スペクトルモーダル解析における高振動数領域の影響

サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析における動的解析では、スペクトルモーダル解析を適用し、配管等に対する地震応答解析同様、打ち切り振動数を 20Hz としている。

スペクトルモーダル解析を適用するに当たって高振動数領域の影響を確認するため、地震応答解析における打ち切り振動数を 50Hz とし、重大事故等対処設備としてのサプレッションチェンバ及びボックスサポートの中で比較的耐震裕度が少ない部位を代表として応力評価を実施した。地震応答解析に用いた床応答スペクトルを図 4.3-2 に、応力評価結果を表 4.3-1 に、固有周期の一覧を表 4.3-2 に示す。本検討に用いた床応答スペクトルは、添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」の作成方針に基づき 0.02 秒 (50Hz) までの床応答スペクトルを作成したものである。

地震応答解析における打ち切り振動数を 50Hz とした場合、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの代表応力評価点に対する算出応力は、打ち切り振動数を 20Hz としている場合に対してほとんど増加しない結果となった。これは、高振動領域における応答加速度と刺激係数が比較的小さいことから、高振動数領域の応答影響がなかったものである。

したがって、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析における動的解析として高振動数領域の応答によるスペクトルモーダル解析への影響がないことを確認した。

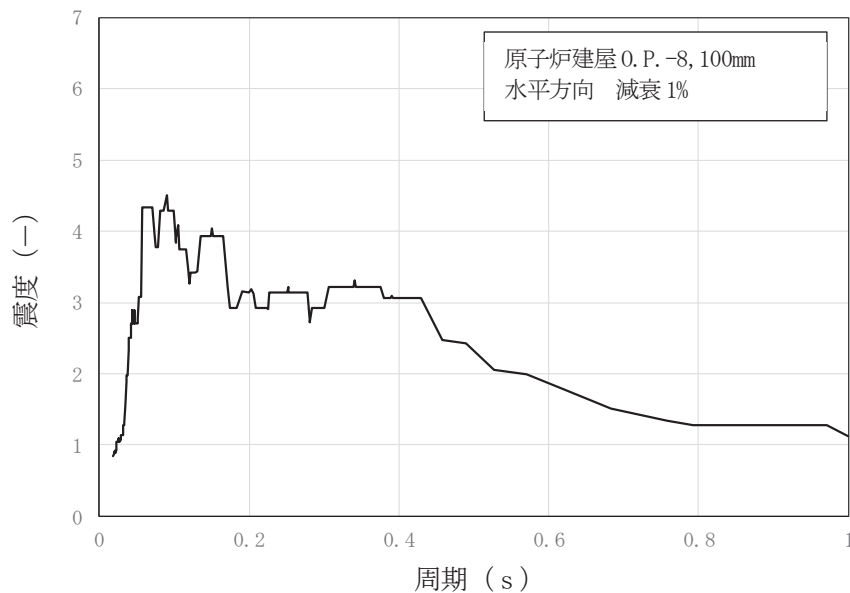


図 4.3-2 床応答スペクトル(高振動数領域を考慮 (0.02~1 秒))

表 4.3-1 応力評価結果

応力評価点	応力分類	算出応力 (MPa)		許容応力 (MPa)
		～20Hz	～50Hz	
胴中央部外側 (P1)	一次一般膜応力	204	204	257
胴エビ継手部外側 (P5)	一次+二次応力	162	162	393
外側ボックスサポート取付部 (P10)	一次+二次応力	330	330	393
ボックスプレート (上側) 取付部 (P2')	一次+二次応力 (せん断)	88	88	

表 4.3-2 固有周期一覧表

振動モード	固有周期 (s)	刺激係数* (-)		
		X	Y	Z
1	0.104	0.00	0.00	0.00
2	0.104	0.00	0.00	0.00
3	0.097	0.14	44.74	0.00
4	0.097	-44.74	0.14	0.00
5	0.085	0.00	0.00	82.02
6	0.076	-27.56	2.52	0.00
7	0.076	2.52	27.56	0.00
8	0.069	0.00	0.00	0.00
9	0.069	0.00	0.00	0.00
10	0.068	0.00	0.00	8.25
11	0.066	0.00	0.00	0.00
12	0.066	0.00	0.00	0.00
13	0.051	0.00	0.00	0.00
14	0.051	0.00	0.00	0.00
15	0.047	0.00	0.00	0.00
16	0.047	0.00	0.00	0.00
17	0.039	0.00	0.00	0.00
18	0.039	0.00	0.00	0.00
19	0.035	0.00	0.00	0.00
20	0.035	0.00	0.00	0.00
21	0.034	0.00	0.00	0.00
22	0.030	0.00	0.00	0.00
23	0.030	0.00	0.00	0.00
24	0.028	0.00	0.00	0.00
25	0.028	0.00	0.00	0.00
26	0.026	-18.12	1.26	0.00
27	0.026	1.26	18.12	0.00
28	0.024	0.00	0.00	0.00
29	0.024	0.00	0.00	0.00
30	0.023	0.00	0.00	0.00
31	0.023	0.00	0.00	0.00
32	0.020	0.00	0.00	0.00
33	0.020	0.00	0.00	0.00

注記* : 質量による正規化

4.4 スロッシング荷重

既工認では、サプレッションチェンバ内部水全体を剛体としていたため、水平方向の地震荷重に含まれる扱いとしていたが、今回工認では、サプレッションチェンバ内部水を有効質量として水平方向の地震荷重を算出するため、スロッシング荷重については、地震時のサプレッションチェンバ内部水の挙動を考慮し、汎用流体解析コード OpenFOAM を用いた流体解析により算定する。スロッシング荷重算定フローを図 4.4-1 に示す。

流体解析に用いる解析モデルは、図 4.4-2 のとおり、サプレッションチェンバ（強め輪を含む）及び主要な内部構造物をモデル化し、サプレッションチェンバ内部水の水位条件は、内部水の有効質量の算定と同様、通常運転水位及び耐震解析用重大事故等時水位とした。また、地震動の入力条件は、スロッシングの固有周期帯の応答加速度が比較的大きく、継続時間の長い $S_s - D1$ を用いた。流体解析では、サプレッションチェンバ内部水の有効質量による荷重（サプレッションチェンバと一体となって振動することによる荷重）とスロッシング荷重の総和として荷重が算定されるため、内部水の有効質量による荷重を差し引くことによってスロッシング荷重を算定する。サプレッションチェンバ内部水のスロッシング荷重算定の詳細については、別紙 6 に示す。

流体解析に基づき算出したスロッシング最大荷重を表 4.4-1 に示す。

今回工認のサプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震評価において、地震時における荷重として考慮するスロッシング荷重については、設計基準対象施設としての評価及び重大事故等対処設備としての評価に関係なく、スロッシング現象の不確かさに対する保守性等を考慮し、耐震解析用重大事故時水位条件に対するスロッシング最大荷重に余裕を加味した耐震評価用スロッシング荷重 ($4.00 \times 10^3 \text{kN}$) を用いることとした。また、水平 2 方向の検討に当たっては、それぞれの方向に耐震評価用スロッシング荷重を考慮する。

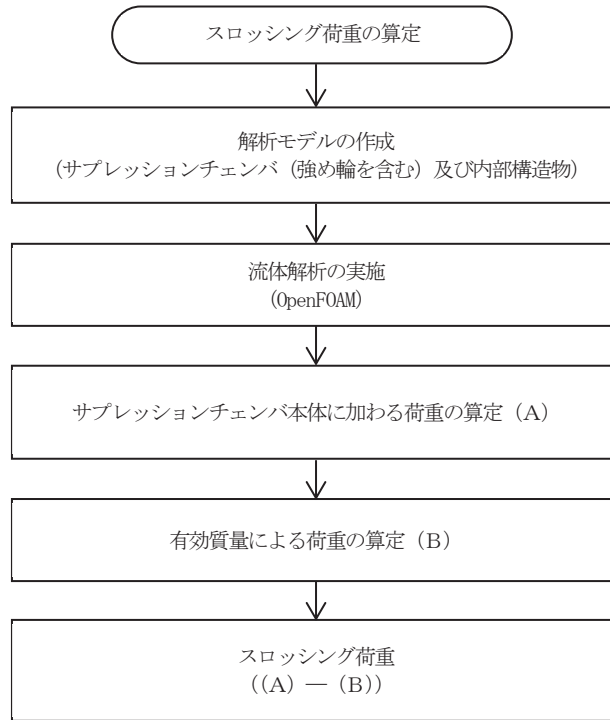


図 4. 4-1 スロッシング荷重算定フロー

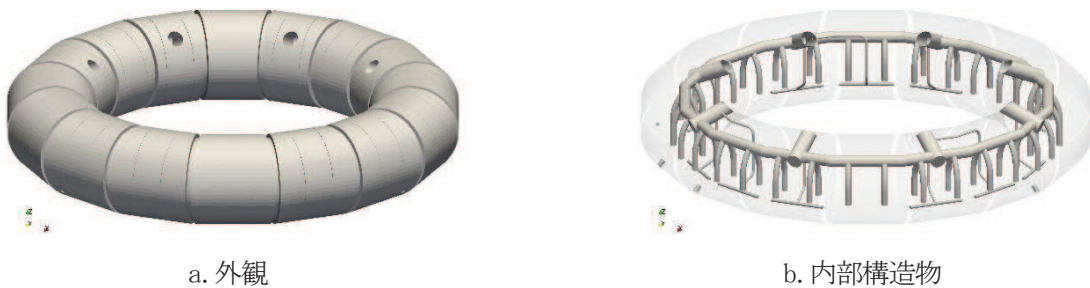


図 4. 4-2 流体解析モデル

表 4. 4-1 流体解析結果及び耐震評価用スロッシング荷重

水位条件	流体解析結果	耐震評価用 スロッシング荷重	備考
通常運転水位	$2.50 \times 10^3 \text{kN}$	$4.00 \times 10^3 \text{kN}$	設計基準対象施設 としての評価
耐震解析用重大事故等時水位 (真空破壊装置下端水位)	$3.21 \times 10^3 \text{kN}$		重大事故等対処設備 としての評価

5. 応力解析の詳細

5.1 応力評価フロー

応力解析は、応力評価点毎に FEM 解析による応力評価又は公式等による評価を実施する。応力評価フローを図 5.1-1 に示す。

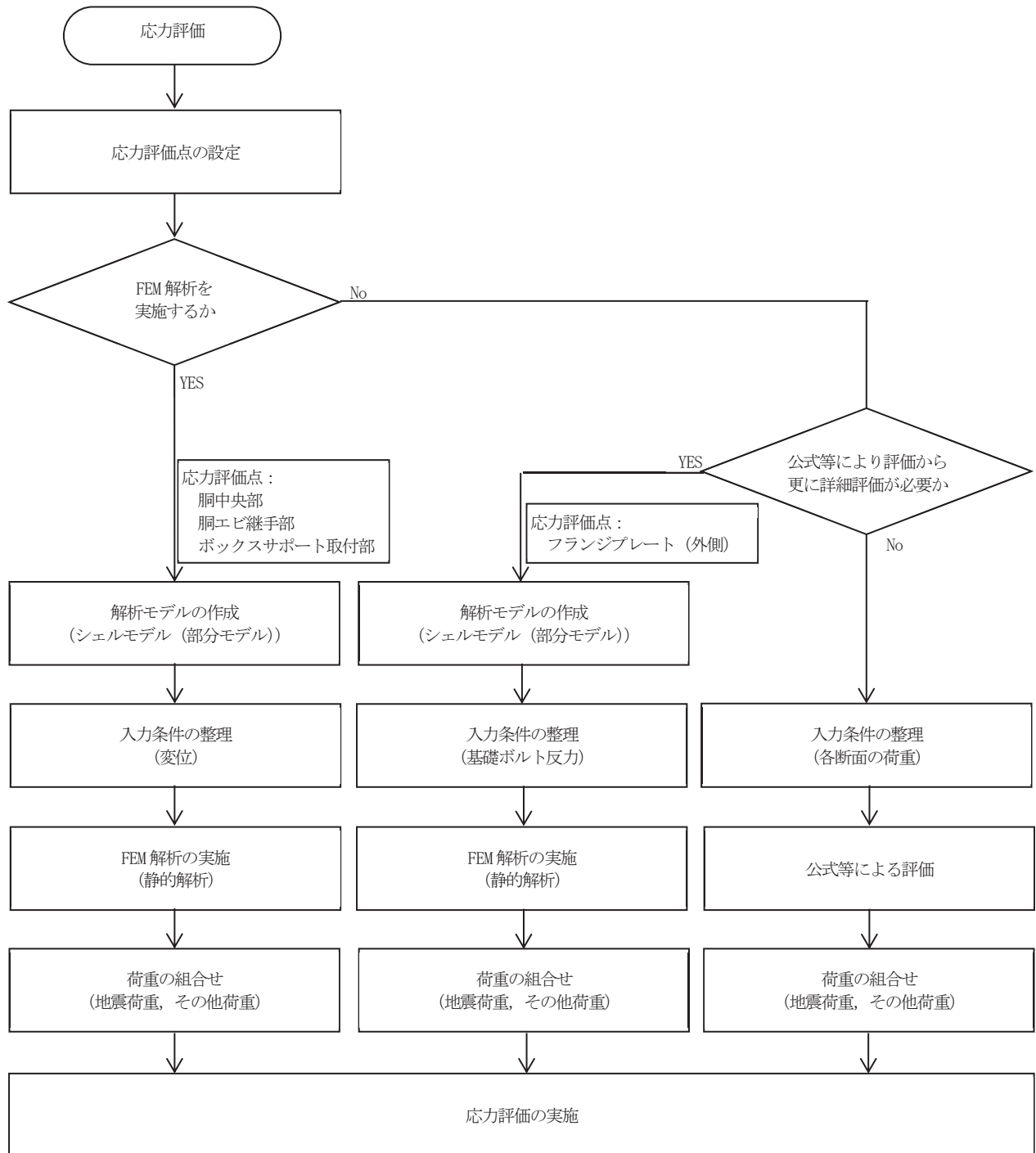


図 5.1-1 応力評価フロー

5.2 応力評価点

サブプレッションチェンバ及びボックスサポートについては、耐震性の向上を目的としたサブプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震補強対策の内容を踏まえ、構成部材の形状、断面性能及び地震荷重の伝達経路等を加味し、今回工認におけるボックスサポートの応力評価点について検討した。

5.2.1 サブプレッションチェンバの応力評価点

既工認及び今回工認における応力評価点を表 5.2-1 及び表 5.2-2 に示す。応力評価点 P9 及び P10(内側及び外側ボックスサポート取付部)については、今回工認における耐震補強対策による効果を踏まえ追加したパッド部の評価点を見直した。

表 5.2-1 サプレッションチェンバの応力評価点

応力評価点番号	応力評価点	評価対象		応力評価方法	発生応力の低減に寄与する補強部材
		既工認	今回工認		
P1	胴中央部外側	○	○	FEM モデルを用いた静的解析	
P2	胴中央部底部	○	○	FEM モデルを用いた静的解析	
P3	胴中央部内側	○	○	FEM モデルを用いた静的解析	
P4	胴中央部頂部	○	○	FEM モデルを用いた静的解析	
P5	胴エビ継手部外側	○	○	FEM モデルを用いた静的解析	
P6	胴エビ継手部底部	○	○	FEM モデルを用いた静的解析	
P7	胴エビ継手部内側	○	○	FEM モデルを用いた静的解析	
P8	胴エビ継手部頂部	○	○	FEM モデルを用いた静的解析	
P9	内側ボックスサポート取付部	○	○*	FEM モデルを用いた静的解析	
P10	外側ボックスサポート取付部	○	○*	FEM モデルを用いた静的解析	

注記*：耐震補強対策を考慮して評価断面位置を変更する

表 5.2-2 サプレッションチェンバの応力評価点

既工認	今回工認
<p>サプレッションチェンバを下から見上げた図</p> <p>頂部 P4, P8</p> <p>内側 P3, P7</p> <p>外側 P1, P5</p> <p>底部 P2, P6</p> <p>A~A断面図</p>	<p>頂部 P4, P8</p> <p>内側 P3, P7</p> <p>外側 P1, P5</p> <p>底部 P2, P6</p> <p>A~A断面図</p>

5.2.2 ボックスサポートの応力評価点

既工認及び今回工認における応力評価部位を表 5.2-3, 応力評価点を表 5.2-4 に示す。

応力評価点 P6 (フランジプレート ; ボックスプレート取付部) については, 耐震補強対策として取り付ける [] による拘束効果を考慮し, 新たに応力評価点 P6' (フランジプレート (外側) : [] を設定するとともに, 当該部位の応力状態をより詳細に把握するため, 個別の詳細評価としてフランジプレートをシェル要素でモデル化し, 追加リブによる拘束効果を反映した FEM 解析による応力評価についても実施する。

応力評価点 P8 (シヤコネクタ (外側) 取付部) 及び P10 (コンクリート (シヤコネクタ (外側) 側面) については, 保守的な扱いとして, 既設シヤコネクタによる荷重分担は期待せずに [] のみで荷重を受けるものとして応力評価を実施する。

応力評価点 P2' (ボックスプレート (上側) 取付部) 及び P12 (パッド取付部) については, サプレッションチェンバとボックスサポートの取付部の応力状態を確認するため, 新たに応力評価点として設定し, 応力評価を実施する。なお, 既工認におけるこれらの応力評価点は, 応力評価点 P2 (ボックスプレート取付部) で代表させていたものである。

表 5.2-3 ボックスサポートの応力評価点

応力評価 点番号	応力評価点	評価対象		応力評価方法	発生応力の 低減に寄与する 補強部材
		既工認	今回工認		
P1	ボックスプレート	○	○	公式等による評価	
P2	ボックスプレート取付部	○	○	公式等による評価	
P2'	ボックスプレート（上側）取付部	—	○	公式等による評価	
P3	フランジプレートとシヤラグ接触部	○	○	公式等による評価	
P4	シヤラグ取付部	○	○	公式等による評価	
P5	基礎ボルト	○	○	公式等による評価	
P6	フランジプレート	○	○	公式等による評価	
P6'	フランジプレート（外側）	—	○	公式等による評価 又はFEMモデルを用 いた静的解析	
P7	ベースプレート（外側）	○	○*	公式等による評価	
P8	シヤコネクタ（外側）取付部	○	○*	公式等による評価	
P9	コンクリート（ベースプレート下面）	○	○	公式等による評価	
P10	コンクリート（シヤコネクタ（外側）側面）	○	○*	公式等による評価	
P11	コンクリート（シヤプレート上面）	○	○	公式等による評価	
P12	パッド取付部	—	○	公式等による評価	

注記*：耐震補強対策を考慮して評価断面位置を変更する。

表 5.2-4 ボックスサポートの応力評価点

既工認	今回工認

5.3 応力解析モデル

5.3.1 サプレッションチェンバの応力解析モデル

サプレッションチェンバ（胴中央部，胴エビ継手部及びボックスサポート取付部）の応力評価に用いる応力解析モデルは，サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデルにおけるばね剛性算定に用いた3次元シェルモデルと同等であり，耐震補強対策における [] 及び [] をより詳細に反映している。

応力解析モデルを，図 5.3-1 に示す。

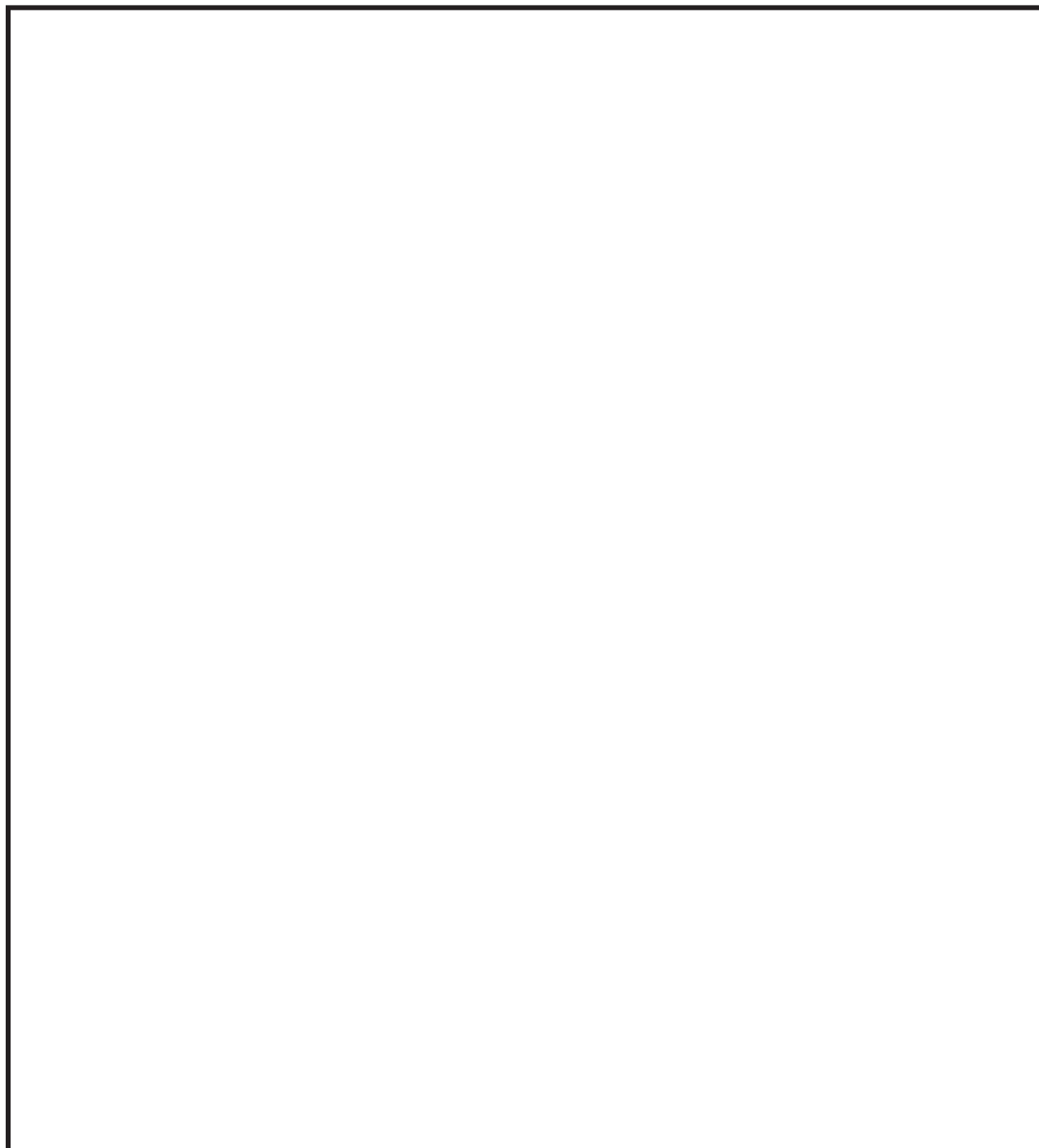


図 5.3-1 応力解析モデル

5.3.2 フランジプレート（外側）の応力解析モデル

フランジプレート（外側）の応力評価に用いる応力解析モデルは、ボックスプレート、フランジプレート及び の接続部における拘束条件等を考慮し、シェル要素でモデル化する。フランジプレート（外側）の構造図及び応力解析モデル（モデルイメージ含む）を図 5.3-2 及び図 5.3-3 に示す。



図 5.3-2 フランジプレート（外側）の構造図

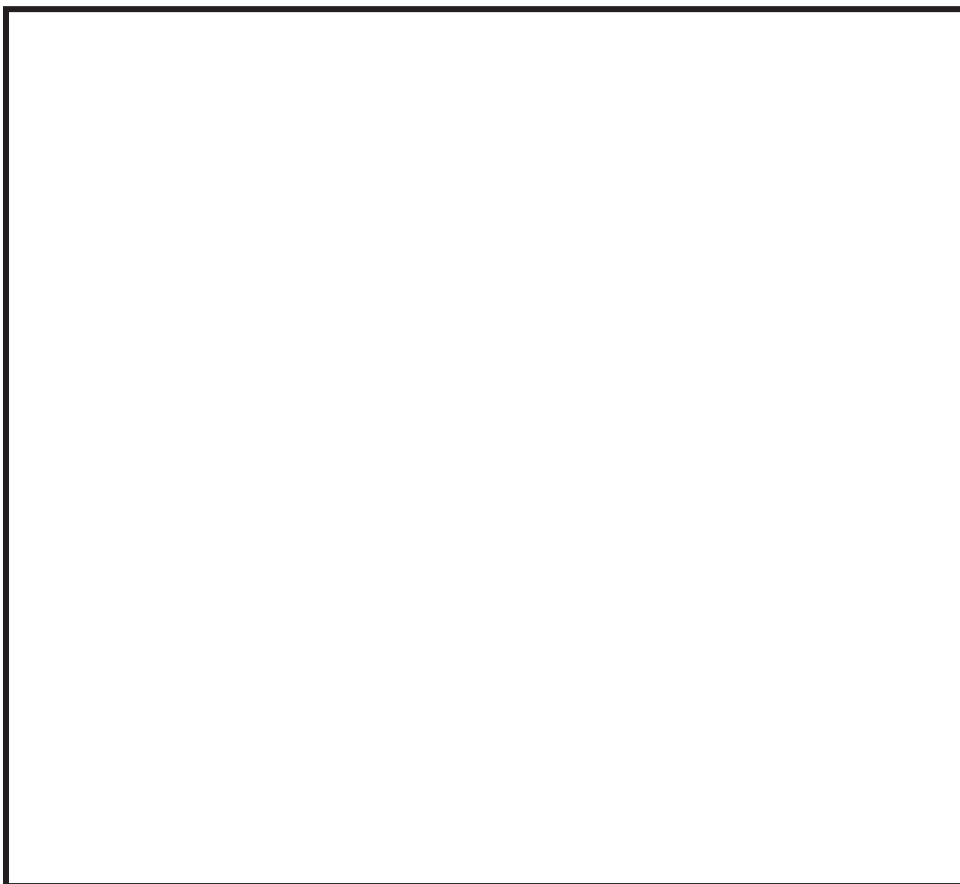


図 5.3-3 フランジプレート（外側）の応力解析モデル

5.4 応力評価

5.4.1 サプレッションチェンバの応力評価

サプレッションチェンバは、応力解析による応力評価を行う。

応力解析による応力評価は、地震応答解析から算定求められる地震荷重（変位）を応力解析モデルに入力し、FEM 解析（静的解析）により各応力評価点の応力を算定する。応力評価の詳細応力評価は、工事計画認可申請書添付資料「VI-2-9-2-1-2 サプレッションチェンバの耐震性についての計算書」に記載している。なお、既工認のボックスサポート取付部の応力評価では、

は、基礎ボルトによる拘束効果が適切に考慮できないことが分かった（ボックスサポートが実態とは異なる極端な変形となる）。今回工認では、

ここで、既工認と今回工認との地震荷重（変位）入力の概念図を図 5.4-1 に、サプレッションチェンバの地震応答解析における地震荷重（変位）の抽出点を図 5.4-2 に、サプレッションチェンバの 3 次元 FEM 解析モデルの解析条件を図 5.4-3 に示す。

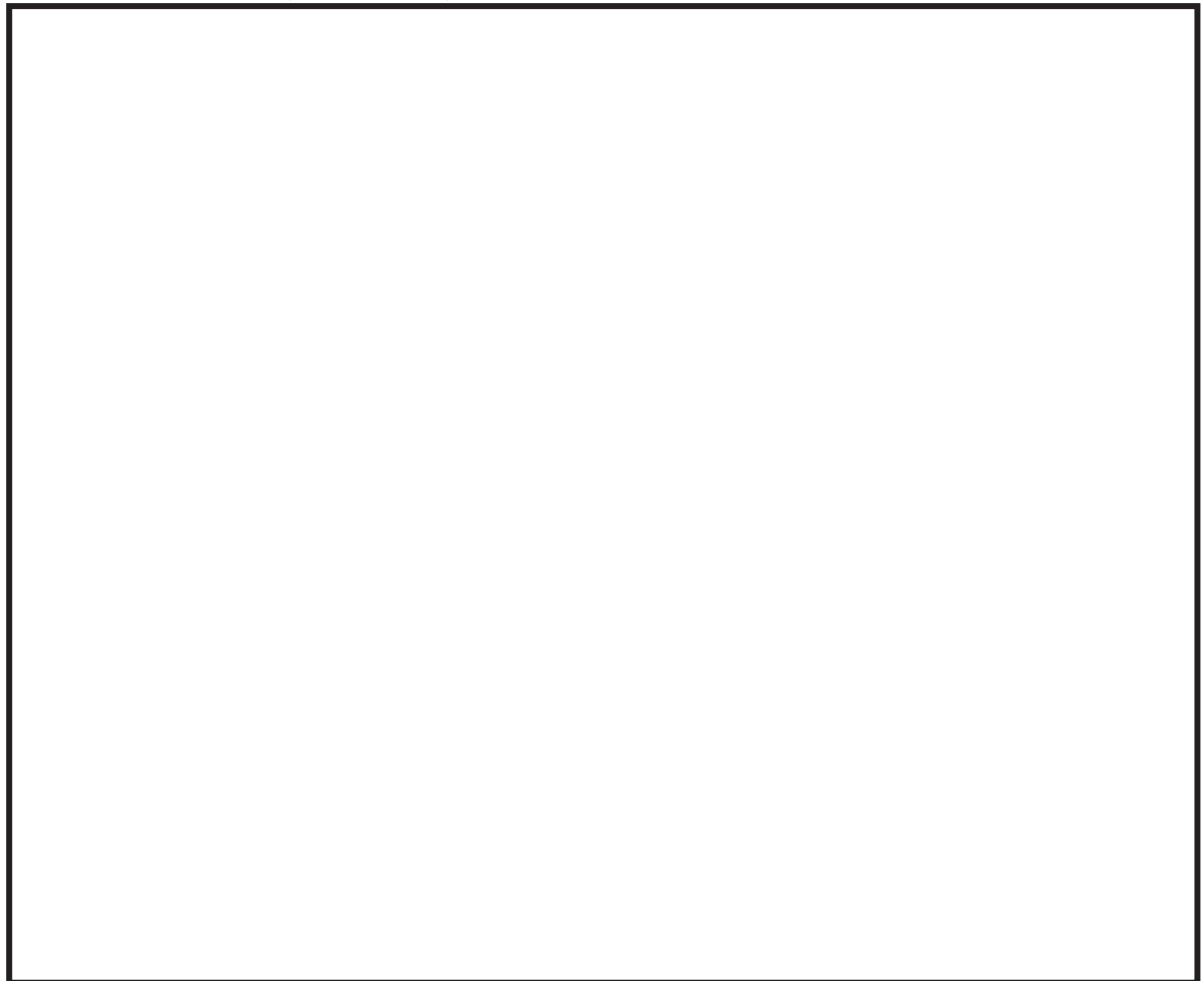


図 5.4-1 既工認と今回工認との地震荷重（変位）入力の概念図



図 5.4-2 地震応答解析における変位抽出点



図 5.4-3 サプレッションチェンバの3次元FEM解析モデル解析条件

5.4.2 ボックスサポートの応力評価

ボックスサポートは、公式等による応力評価又は応力解析（フランジプレート（外側））による応力評価を行う（別紙18）。

公式等による応力評価は、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析（3次元はりモデルを用いたスペクトルモーダル解析）から算定された地震荷重及び構造部材の形状、断面性能等を踏まえて応力を算定する。また、応力解析による応力評価は、地震応答解析から算定求められる地震荷重をフランジプレート（外側）に対する応力解析モデルを入力し、FEM解析（静的解析）により応力を算定する。

応力評価の詳細については、工事計画認可申請書添付資料「VI-2-9-2-1-5 ボックスサポートの耐震性についての計算書」に記載している。

ボックスサポートの地震応答解析における荷重抽出点を図5.4-4に、フランジプレート（外側）の3次元FEM解析モデル解析条件を図5.4-5に示す。



図 5.4-4 地震応答解析における荷重抽出点



図 5.4-5 フランジプレート外側の3次元FEM解析モデル解析条件

6. サプレッションチェンバ等の耐震評価における不確かさの考慮及び保守性

サプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震評価の既工認からの変更に関する不確かさ・保守性の配慮について、地震応答解析から応力解析に至る評価手順に沿って整理したものを表 6-1 に示す。

地震応答解析においては、サプレッションチェンバ内部水の扱いとして内部水の有効質量を適用したこと、ボックスサポート取付部にばね剛性を考慮したこと等による解析モデルの詳細化を行うとともに、解析モデルの詳細化に伴う動的解析として3次元はりモデルを用いたスペクトルモーダル解析を採用した。

内部水の有効質量の適用については、サプレッションチェンバ内部水の有効質量を保守側に算定する解析方法を採用しており、保守性を含めてサプレッションチェンバ内部水の挙動をより詳細に考慮している。また、解析モデルの詳細化にあたって、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの構造を解析モデルに変換する部分については、特段の不確かさはなく、前述までの説明のとおり、実機のサプレッションチェンバ及びボックスサポートの主要な振動モードをよく再現できる解析モデルとなっている。

動的解析方法については、配管等の他機器、女川2号機と同型炉のサプレッションチェンバ及びボックスサポートにて既工認実績のあるスペクトルモーダル解析であり、建屋応答の不確かさも包絡した設計用床応答曲線を用いることによって、他機器と同様の保守性が確保される。なお、床応答スペクトルの周期方向±10%拡幅によって、内部水の有効質量の不確かさによる固有周期への影響も配慮できる。

また、サプレッションチェンバ内部水質量の扱いとして内部水の有効質量を適用したことに伴い、サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング荷重を新たに考慮することとした。スロッシング荷重については、サプレッションチェンバ内部水の条件、地震動等の他、スロッシング現象の不確かさを考慮し、耐震評価用スロッシング荷重を保守的に設定している。

応力解析については、いずれも、解析の精緻化であり、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの構造を解析モデルに変換する部分については、特段の不確かさはなく、地震応答解析と相まって、他機器と同様の保守性が確保されるものと考えられる。

以上のことから、今回工認におけるサプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震評価については、既工認からの地震応答解析及び応力解析に係る変更を考慮しても、保守性が確保されているものと判断できる。

表 6-1 今回工認の変更点に係る不確かさ・保守性の配慮

今回工認での変更点		不確かさの要素	既工認	保守性の考慮方法
地震応答解析	解析モデル	内部水の有効質量に起因する荷重、固有周期	本来は流動挙動するサブレンジョンチェンバ内部水を剛体として扱うことで、保守的な荷重が算出される。	サブレンジョンチェンバ内部水を有効質量として考慮することで、内部水質量による荷重が詳細化される。振動試験等により内部水の有効質量が保守側に算出されることが確認された。NASTRANの仮想質量法を用いて内部水の有効質量を算定することで保守性が確保される。内部水の有効質量の算定方法に起因する固有周期の変動については、周期方向±10%拡張した床応答スペクトルを用いることで配慮できる。なお、設計用床応答スペクトルと固有周期との関係から、内部水の有効質量算出法の違いによって応答加速度が変わらないことから、地震応答解析結果への影響はほとんどないと考えらえる。
	構造部分	なし	サブレンジョンチェンバをはり要素にてモデル化。構造の解析モデルへの変換にあたり特段の保守性の考慮なし。	サブレンジョンチェンバ及びボックスササポートをはり要素によるモデル化にあたり、ボックスササポート取付部にばね剛性を考慮し、ボックスササポートの剛性の詳細化及び基礎ボルトをモデル化することにより、詳細に地震応答を把握する。構造の解析モデルへの変換にあたり特段の保守性の考慮なし。
応力解析	解析方法	入力地震動等の不確かさ	簡便な扱いとして、サブレンジョンチェンバ全体を剛と見做し、静的解析を適用。	サブレンジョンチェンバ内部水の増加、解析モデルの詳細化を踏まえた固有周期を考慮し、動的解析（スペクトルモーダル解析）を適用。配管等の他機器と同様、建屋応答の不確かさも包絡した設計用床応答曲線を用いることで保守性が確保される。
	荷重条件	スロッシング現象の不確かさ	内部水質量の扱い（剛体）に含まれる。	地震荷重としては地震動 $S_s - F - 3$ が最も厳しい地震動であるが、スロッシングに対して最も厳しい地震動 $S_s - DI$ を用いて、設計基準及び重大事故等での水位条件で流体解析を行い、最大荷重を算出し、その包絡値に余裕を加味して耐震評価用スロッシング荷重を設定している。また、地震荷重の最大発生時刻とスロッシング荷重の最大発生時刻が異なると考えられるが、発生時刻によらず、最大地震荷重と組み合わせることで保守性が確保される。
	ボックスササポート取付部（胴中央部、胴エビ継手部含む）	なし	ボックスササポートと隣接するサブレンジョンチェンバ（ ）をシェル要素でモデル化し、地震荷重等を解析モデルに入力した静的解析を実施。特段の保守性の考慮なし。	地震応答解析モデルに考慮したボックスササポート取付部のばね剛性算定用のシェルモデルを応力解析モデルとし、地震荷重等を解析モデルに入力した静的解析を行うことで、より詳細に応力解析を実施した。構造をより詳細にモデル化したものであり、特段の保守性の考慮なし。
ボックスササポートフランジプレート	なし	公式等による応力評価を実施。特段の保守性への考慮なし。	耐震補強対策（ ）により、フランジプレート境界条件を見直し、FEM解析を用いてより詳細に応力解析を実施した。構造をより詳細にモデル化したものであり、特段の保守性の考慮なし。	
基礎ボルト	なし	簡便に一つのボックスササポート内の力つりあい式による計算を実施。特段の保守性の配慮なし。	地震応答解析モデルに基礎ボルトを組み込むことで、サブレンジョンチェンバ全体の力のつり合いに基づき基礎ボルトの応力を算出した。構造をより詳細にモデル化したものであり、特段の保守性の考慮なし。	

7. サプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震評価結果

設計基準対象施設及び重大事故等対処設備としてのサプレッションチェンバの応力評価結果を表 7-1、ボックスサポートの応力評価結果を表 7-2 に示す。いずれの応力評価結果も算出応力が許容応力を満足することを確認した。なお、本評価は、水平 2 方向の地震荷重の組合せを考慮としており、サプレッションチェンバの算出応力は、原子炉格納容器に対する規格基準要求に基づき応力強さである。

なお、サプレッションチェンバの外側ボックスサポート取付部(P10)の一次+二次応力評価結果は、許容応力と接近しており、余裕が小さくなっているが、原子炉格納容器に対する規格基準要求に従えば、仮に一次+二次応力が許容応力を満足しない場合であっても、疲労評価が認められていることから、更に裕度があると考えられる。

また、ボックスサポートのコンクリート（シヤコネクタ（外側）側面）(P10)の応力評価結果は、許容応力と接近しており、余裕が小さくなっているが、実際のシヤコネクタ(外側)側面のコンクリートにおける荷重伝達としては、図 7-1 のとおり、圧縮（既設工認と同様な扱い）ではなく、支圧のような広がりを持った荷重伝達であることから、これを考慮した評価結果（表 7-3）は、十分裕度があることを確認した。

表 7-1 サプレッションチェンバの応力評価結果

応力評価 点番号	応力評価点	応力分類	設計基準 対象施設			重大事故等 対処設備		
			算出応力	許容応力	裕度 (許容応力 /算出応力)	算出応力	許容応力*	裕度 (許容応力 /算出応力)
			MPa	MPa		MPa	MPa	
P1	胴中央部外側	一次一般膜応力	56	258	4.60	204	257	1.25
		一次膜応力+一次曲げ応力	56	387	6.91	204	386	1.89
		一次+二次応力	88	393	4.46	166	393	2.36
P2	胴中央部底部	一次一般膜応力	51	258	5.05	172	257	1.49
		一次膜応力+一次曲げ応力	51	387	7.58	172	386	2.24
		一次+二次応力	54	393	7.27	106	393	3.70
P3	胴中央部内側	一次一般膜応力	48	258	5.37	189	257	1.35
		一次膜応力+一次曲げ応力	48	387	8.06	189	386	2.04
		一次+二次応力	70	393	5.61	136	393	2.88
P4	胴中央部頂部	一次一般膜応力	25	258	10.32	160	257	1.60
		一次膜応力+一次曲げ応力	25	387	15.48	160	386	2.41
		一次+二次応力	40	393	9.82	78	393	5.03
P5	胴エビ継手部 外側	一次膜応力+一次曲げ応力	39	387	9.92	116	386	3.32
		一次+二次応力	86	393	4.56	162	393	2.42
P6	胴エビ継手部 底部	一次膜応力+一次曲げ応力	85	387	4.55	106	386	3.64
		一次+二次応力	56	393	7.01	104	393	3.77
P7	胴エビ継手部 内側	一次膜応力+一次曲げ応力	46	387	8.41	157	386	2.45
		一次+二次応力	78	393	5.03	152	393	2.58
P8	胴エビ継手部 頂部	一次膜応力+一次曲げ応力	28	387	13.82	112	386	3.44
		一次+二次応力	48	393	8.18	92	393	4.27
P9	内側ボックス サポート取付 部	一次膜応力+一次曲げ応力	116	387	3.33	204	386	1.89
		一次+二次応力	158	393	2.48	300	393	1.31
P10	外側ボックス サポート取付 部	一次膜応力+一次曲げ応力	126	387	3.07	262	386	1.47
		一次+二次応力	180	393	2.18	330	393	1.19

注記*：添付書類は、保守的に 200℃で実施しているが、本資料では、機能維持の基本方針に従った許容応力としている。

表 7-2 ボックスサポートの応力評価結果

応力評価 点番号	応力評価点	応力分類	設計基準対象施設			重大事故等対処設備		
			算出応力	許容応力	裕度 (許容応力/ 算出応力)	算出応力	許容応力*1	裕度 (許容応力/ 算出応力)
			MPa	MPa		MPa	MPa	
P1	ボックスプレート	一次応力 (組合せ)	104		167			
		一次応力+二次応力 (組合せ)	181		314			
P2	ボックスプレート 取付部	一次応力 (組合せ)	95		155			
		一次応力+二次応力 (組合せ)	169		284			
P2'	ボックスプレート (上側) 取付部	一次応力 (組合せ)	55		87			
		一次応力+二次応力 (せん断)	51		88			
P3	フランジプレートと シヤラグ接触部	一次応力 (支圧)	37		63			
		一次応力+二次応力 (支圧)	37		63			
P4	シヤラグ取付部	一次応力 (組合せ)	71		123			
		一次応力+二次応力 (座屈)	55		94			
P5	基礎ボルト	引張応力	267		404			
P6	フランジプレート	一次応力 (組合せ) (ボルト反力側)	74		112			
		一次応力 (組合せ) (コンクリート反力側)	95		158			
		一次応力+二次応力 (組合せ)	160		267			
P6' *2	フランジプレート (外側)	一次応力 (組合せ)	152		174			
		一次応力+二次応力 (座屈)	149		168			
P7	ベースプレート	一次応力 (組合せ)	89		154			
		一次応力+二次応力 (座屈)	86		148			
P8	シヤコネクタ (外側) 取付部	一次応力 (組合せ)	63		108			
		一次応力+二次応力 (せん断)	27		46			
P9	コンクリート (ベー スプレート下面)	圧縮応力	6.17	10.65				
P10	コンクリート (シヤ コネクタ (外側) 側 面)	圧縮応力	12.21	21.10				
P11	コンクリート (シヤ プレート上面)	せん断応力	0.53	0.80				
P12	パッド取付部	一次応力 (組合せ)	45	71				
		一次応力+二次応力 (せん断)	42	72				

注記*1：添付書類は、保守的に 200℃で実施しているが、本資料では、機能維持の基本方針に従った許容応力としている。

*2：設計基準対象施設の評価は公式による手計算、重大事故等対処設備の評価は FEM より応力を算出している。

表 7-3 荷重伝達の広がり を考慮した評価

応力評価点		運転状態	算出応力 (MPa)	工認計算書記載値		追加検討結果	
				応力分類	許容応力 (MPa)	応力分類	許容応力 (MPa)
P10	コンクリート (シヤコネクタ (外側) 側面)	V _A S	21.10	圧縮		支圧	

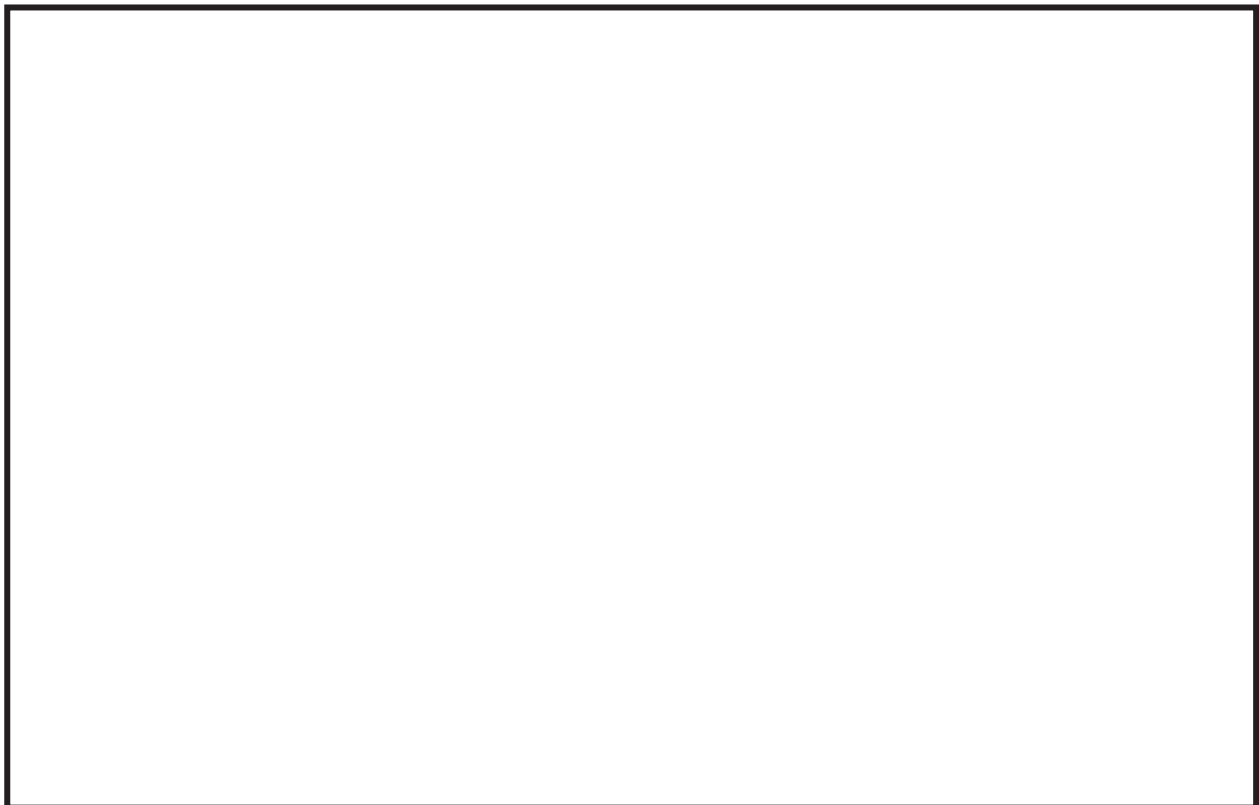


図 7-1 荷重伝達のイメージ

8. まとめ

女川2号機におけるサプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震評価では、サプレッションチェンバ本体とそれを支持するボックスサポートを模擬した地震応答解析モデルを用いて地震荷重を算定し、それらに基づき、各部の構造強度評価を行うことで、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震性を確認する。

今回工認においては、既工認からの変更点として、重大事故等時のサプレッションチェンバの水位上昇に伴う内部水質量の増加、基準地震動の増大等を踏まえ、より詳細な地震応答解析を実施するため、サプレッションチェンバの内部水質量の扱いとして内部水の有効質量を適用すること、サプレッションチェンバとボックスサポートの取付部にばね剛性を考慮すること等に加えて、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震補強対策を考慮した3次元はりモデルを作成し、スペクトルモーダル解析を実施する。なお、内部水の有効質量を適用したことに伴い、サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング荷重を流体解析にて評価する。

また、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの評価対象部位については、耐震補強対策も踏まえ、構成部材の形状及び荷重伝達等を考慮して設定するとともに、より詳細な応力解析を実施するための応力解析モデル等を用いた応力評価を実施する。

以上の地震応答解析及び応力解析に関連する種々の検討を実施して**妥当性、適用性**を確認するとともに、女川2号機のサプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震性を確認した。

内部水の有効質量の適用およびその妥当性検証

1. 有効質量の適用

女川2号機のサプレッションチェンバの耐震評価に当たっては、内部水質量として内部水の有効質量を適用することとし、内部水の有効質量は、汎用構造解析プログラムNASTRANを用いた仮想質量法（以下、仮想質量法という。）（別紙7参照）にて算出する。

内部水の有効質量とは、容器内で内容液が自由表面を有する場合、容器の振動方向に対する実際に地震荷重として付加される質量のことであり、全質量とは異なった値となることが知られている（別紙8参照）。

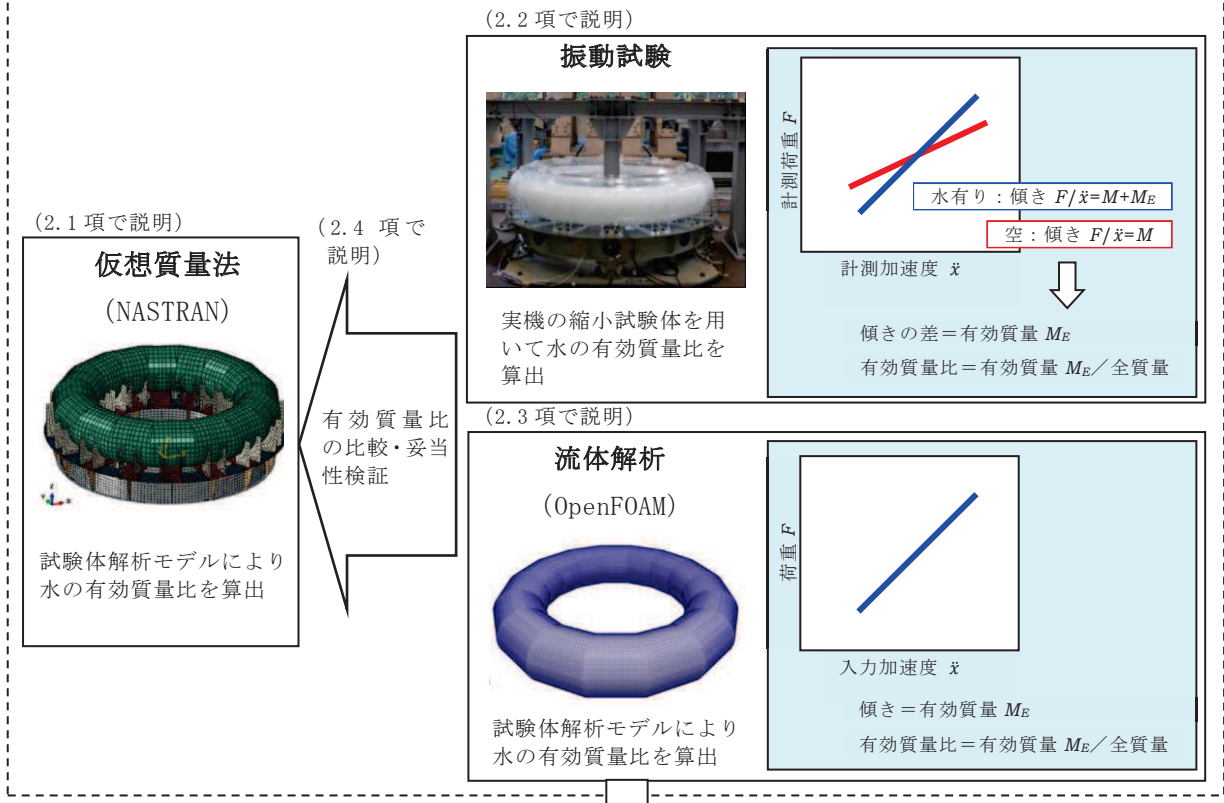
内部水の有効質量は、他産業の耐震設計において一般的に取り入れられている考え方である（別紙9参照）。

円環形状容器であるサプレッションチェンバ内部水の有効質量の算出に仮想質量法を用いるため、その妥当性検証として、サプレッションチェンバの内部構造物を除いた円環形状容器のモデルに対して仮想質量法にて内部水の有効質量を求め、実機を縮小模擬した試験体（前述の仮想質量法に用いる解析モデルと同様）を用いた振動試験及び流体解析（汎用流体解析コードOpenFOAM（別紙7参照））により算出した内部水の有効質量と比較、検証を行う。（2項にて説明）

女川2号機のサプレッションチェンバの耐震評価に用いる内部水の有効質量は、先に検証した仮想質量法により算出した値に対して、内部構造物を含む解析モデルに対する流体解析により算出した値と比較、検証した上で、解析プログラム間の値の差異や試験結果との差異等を踏まえて仮想質量法で算出された値の保守性を検討し、設定する。（3項にて説明）

仮想質量法によるサプレッションチェンバ内部水の有効質量算出の妥当性検証及び女川2号機サプレッションチェンバの耐震評価に用いる内部水の有効質量の設定の流れを図1に示す。なお、内部水の有効質量の評価においては、内部水の全質量に対する有効質量の割合（以下「有効質量比」という。）を用いる。

【円環形状容器の内部水の有効質量算出の妥当性検証】



【耐震評価に用いる内部水の有効質量の設定】

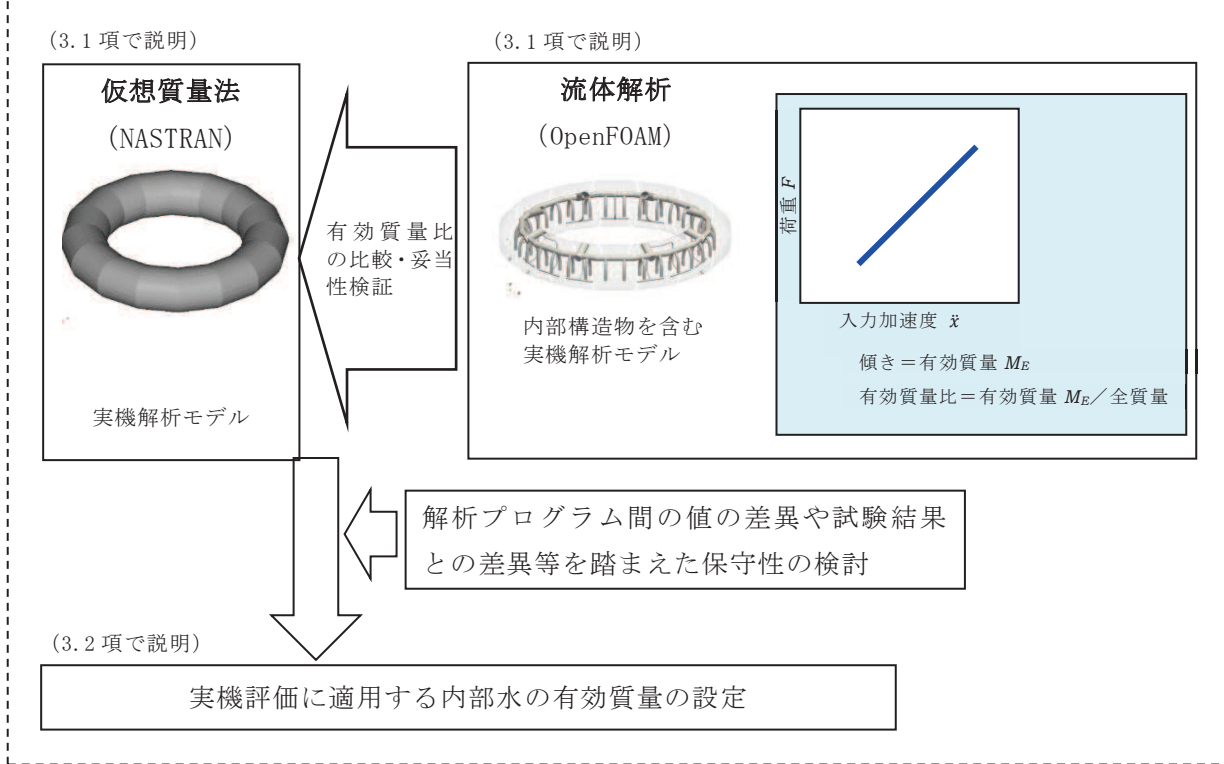


図 1 仮想質量法によるサプレッションチェンバ内部水の有効質量算出の妥当性検証及び女川 2 号機のサプレッションチェンバの耐震評価に用いる内部水の有効質量の設定の流れ

2. 円環形状容器の内部水の有効質量算出の妥当性検証

円環形状容器の内部水の有効質量算出に仮想質量法を用いることの妥当性検証として、振動試験及び流体解析により算出した内部水の有効質量比と比較する。

2.1 仮想質量法による試験体解析モデルの有効質量比の算出

振動試験に用いた試験体の構造解析モデルを作成し、仮想質量法により内部水の有効質量比を算出する。

円環形状容器の内部水の有効質量は、仮想質量法で算出可能であり、入力波によらず、容器の構造（形状及び寸法）と内部水の水位により内部水の有効質量が定まる。また、仮想質量法では、内部水のスロッシングを評価しないため、スロッシング荷重は考慮されない。

2.1.1 検討対象

女川2号機のサプレッションチェンバを対象とし、仮想質量法による内部水の有効質量算出の妥当性検証のために実施する振動試験と同様(2.2.1項参照)に実機サプレッションチェンバを縮小模擬した円環形状とする（実機寸法の約1/25）。

2.1.2 解析モデル

振動試験に用いた試験体及び架台をもとにシェル要素で作成した構造解析モデルを図2に示す。水位は、実機サプレッションチェンバの運転状態を考慮し、4段階（低、中、高、高高）を設定する。サプレッションチェンバの水位条件及び振動試験水位との対応関係を図3に示す。

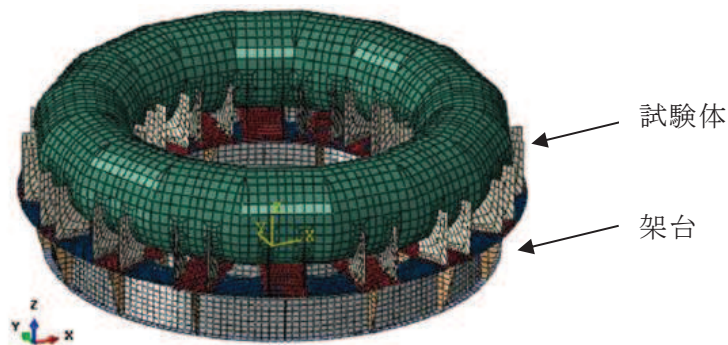
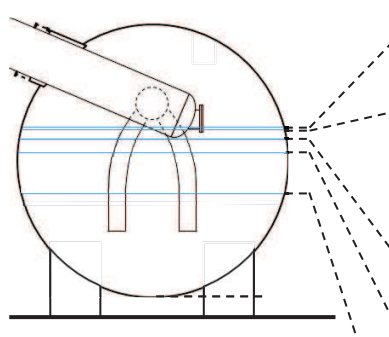


図2 構造解析モデル（試験体解析モデル）



実機条件				試験条件 *1, *2
水位	位置	水位の 範囲	事故シーケンス等	
約 7.8m	—		—	高高水位 (325mm)
約 6.4m	真空破壊装置 上端位置		—	高水位 (259mm)
約 5.9m	真空破壊装置 下端位置		重大事故等時の耐震評価 (S s, S d) に用いる水位 (耐震解析用重大事故等時 水位)	—
約 5.8m	—		格納容器過圧・過温破損 代替循環冷却系を使用でき ない場合 (2Pd に到達するまでに操作 を実施しなかった場合(大破 断 LOCA 発生時))	—
約 5.5m	真空破壊装置 下端位置-0.4m		格納容器過圧・過温破損 (代替循環冷却系を使用で きない場合)	—
約 5.0m	—		—	中水位 (203mm)
5m 以下	—	水位範囲	格納容器過圧・過温破損 (代替循環冷却系を使用す る場合)	—
3.6m	通常運転水位 (H. W. L)	水位範囲 の 条件	通常運転時の耐震評価 (S s, S d) に用いる水位	低水位 (146mm)
3.5m	通常運転水位 (L. W. L)	DB SA 条件	—	—

注記*1: 水位中 (203mm) は、水位設定による内部水の有効質量への影響を確認するため、水位低 (146mm) と水位高 (259 mm) との中間水位として設定した水位

*2: 水位高高 (325 mm) は、他プラントでの重大事故等時の水位条件の検討及び水位設定による内部水の有効質量への影響を確認するため、水位高 (259mm) を上回る水位として設定した水位

図3 サプレッションチェンバの水位条件及び振動試験水位との対応関係

2.1.3 解析結果

仮想質量法による内部水の有効質量及び有効質量比の算出結果を表1に示す。有効質量比は水位とともに増加する傾向が確認された。

表1 仮想質量法による内部水の有効質量及び有効質量比の算出結果

水位*1	水の全質量 M _W [kg]	水の有効質量*2 M _E [kg]	有効質量比 M _E /M _W [-]	備考
低 (146mm)	189.2	28.6	0.15	通常運転水位
中 (203mm)	292.4	64.4	0.22	
高 (259mm)	389.7	115.1	0.30	真空破壊装置上端水位*3
高高 (325mm)	486.4	199.3	0.41	

注記 *1: 試験体底面からの高さ (2.2.3項参照)

*2: 各シェル要素で得られた有効質量の合算値

*3: 重大事故等時水位より高い水位

2.2 振動試験による内部水の有効質量比の確認

円環形状容器の内部水の有効質量算出に仮想質量法を用いることの妥当性を検証するため、実機を縮小模擬した円環形状容器の試験体を用いて振動試験を行い、試験データから内部水の有効質量比を算出したうえで、仮想質量法による内部水の有効質量比との比較を行う (別紙11参照)。

2.2.1 試験体

試験体の寸法は、女川2号機のサプレッションチェンバの実機寸法の約1/25に設定し、材質は内部水の挙動を確認するためアクリルとした。試験体と実機との相似比を表2に示す。なお、解析手法の検証という目的を踏まえ、内部水の流動現象を単純化させるため、強め輪やダウンコマ等の内部構造物は、試験体に模擬していない。

振動台上に試験体を支持する架台を設け、架台の脚部には水平及び鉛直方向の反力を測定可能な分力計を4台設置した。架台は、内部水からの荷重を分力計に確実に伝達させるため強固なものとし、ボックスサポートは模擬していない。試験装置の概要を図4に、写真を図5に示す。

表2 試験体と実機との相似比

物理量	相似比*1	設定値
長さ	1/L	1/24.7
加速度	1/1	1
時間	1/√L	1/√24.7

注記 *1: Lは実機と試験体の縮尺比 (L = 9,400/380 = 24.7)

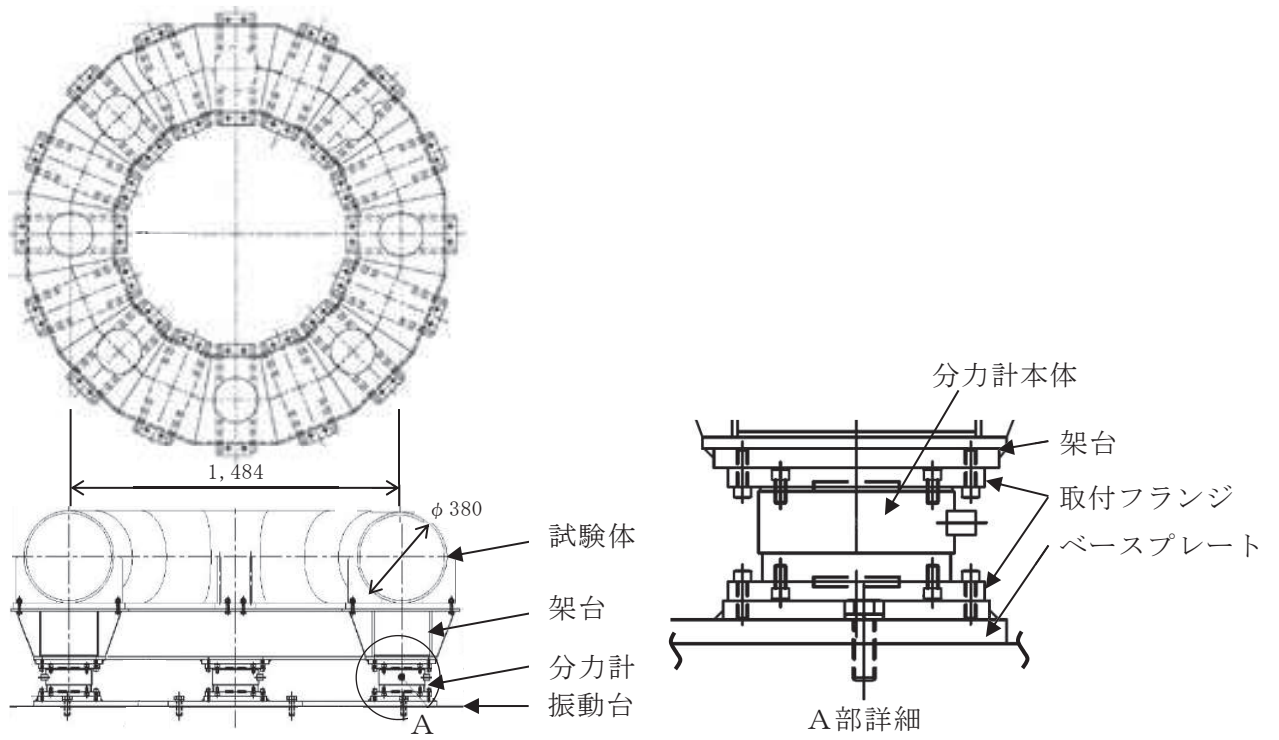


図4 試験装置の概要

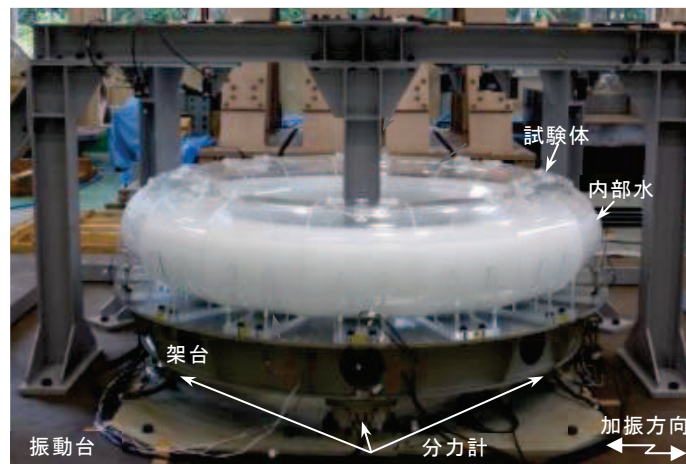


図5 試験装置の写真

2.2.2 計測項目及び計測機器設置

計測項目を表3に示す。これらのうち内部水の有効質量を評価する上で重要な計測項目は振動台上の加速度，試験体への入力となる架台上の加速度及び反力である。計測機器設置位置を図6に示す。

表3 計測項目

計測項目	計測機器	位置	計測チャンネル数 (設置位置)
反力	分力計	架台下方	3成分(X, Y, Z) : 4 (0°, 90°, 180°, 270°)
加速度	加速度計	振動台上	X成分 : 2 (0°, 180°) Y成分 : 2 (90°, 270°) Z成分 : 4 (0°, 90°, 180°, 270°)
		架台下端	X成分 : 2 (0°, 180°) Y成分 : 2 (90°, 270°) Z成分 : 4 (0°, 90°, 180°, 270°)
		試験体下端	X成分 : 4 (0°, 45°, 135°, 180°) Y成分 : 4 (45°, 90°, 135°, 270°) Z成分 : 6 (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 270°)

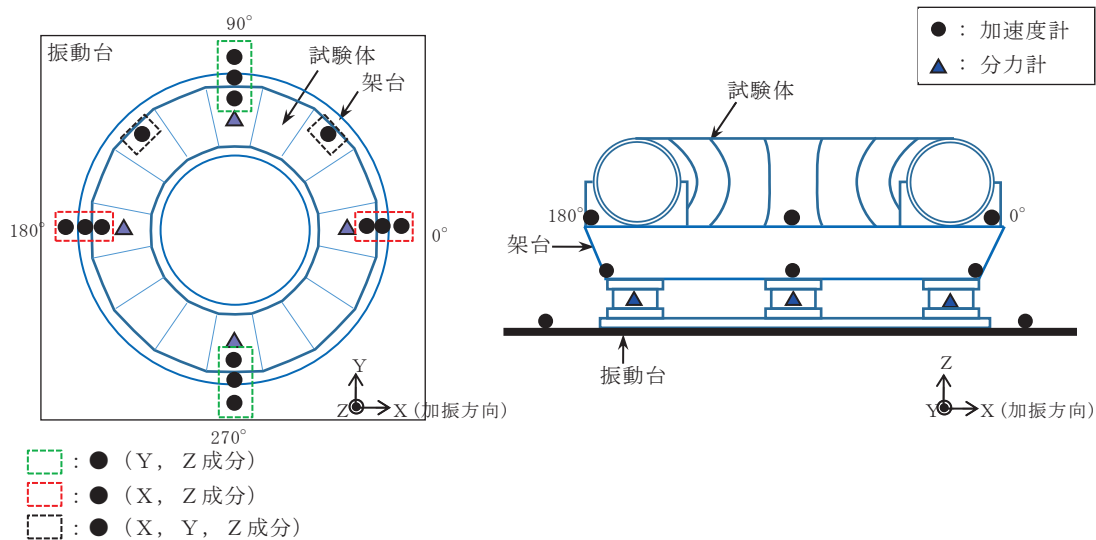


図6 計測機器設置位置

2.2.3 試験条件

(1) 入力波条件

振動台への入力波は、女川 2 号機のサプレッションチェンバ設置床（原子炉建屋基礎版上）における基準地震動 S_s 相当*の応答加速度時刻歴波を、表 2 に示した相似比で時間軸を圧縮している。また、振動台の加振限界振動数以上の成分については、応答加速度時刻歴波の圧縮時に 7.5Hz ローパスフィルタ処理（時間軸圧縮後約 38Hz）を実施している。なお、圧縮後の応答加速度時刻歴波には、試験体のスロッシング周期成分が含まれる。

加振方向は水平 1 方向とし、入力倍率は、上記の応答加速度時刻歴波の 0.5 倍、1.0 倍及び 1.5 倍の 3 ケースとする。サプレッションチェンバ設置床における基準地震動 S_s 相当の応答加速度時刻歴波形及び応答加速度スペクトルを図 7 及び図 9、振動台への入力波に対するものを図 8 及び図 10 に示す。

注記 *：平成 25 年 12 月設置変更許可申請時基準地震動 S_s のうち試験体内部水のスロッシングの卓越周期帯で応答加速度が大きい S_{s-2} を採用

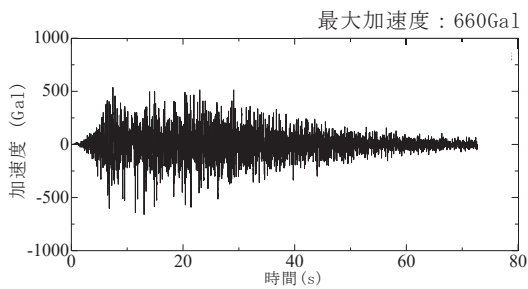


図 7 基準地震動 S_s 相当の
応答加速度時刻歴波形

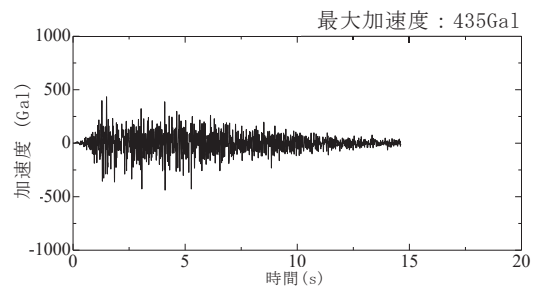


図 8 振動台入力加速度時刻歴
波形(相似則適用)

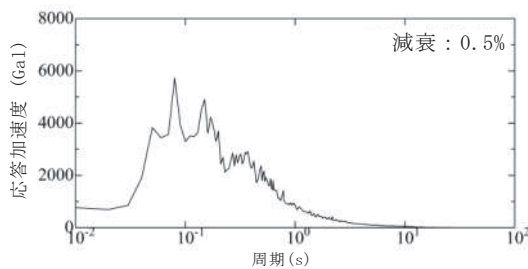


図 9 基準地震動 S_s 相当の
応答加速度スペクトル

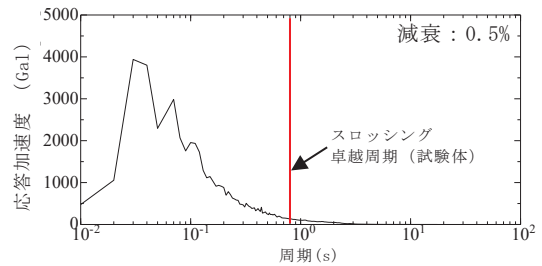
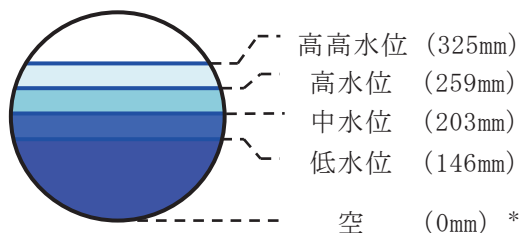


図 10 振動台入力応答加速度
スペクトル(相似則適用)

(2) 水位条件

試験水位レベルは、水を入れない空、低、中、高、高高の計 5 ケースとする（図 11）。試験回数は 1 ケースにつき 3 回以上実施する。



*：括弧内は試験体
底面からの高さ

図 11 試験水位レベル

(3) 温度条件

今回実施した振動試験については、以下の検討を踏まえ、常温下で実施している。

① サプレッションチェンバの耐震評価において考慮する運転状態（重大事故等時の荷重の組合せについては、「重大事故等対処設備について（補足説明資料） 39条 地震による損傷の防止 39-4 重大事故等対処施設の耐震設計における重大事故と地震の組合せについて」にて説明）

- ・ サプレッションチェンバの耐震評価は、設計基準事故時及び重大事故等時ともに、事故の発生確率、継続時間及び地震の年超過確率を踏まえ、地震荷重と事故時の荷重の組合せを考慮するため、今回実施した振動試験の温度条件（水温）は、基準地震動 S_s と荷重の組合せが必要となる運転状態を考慮
- ・ 設計基準事故時は、基準地震動 S_s との組合せは不要であるため、温度条件は通常運転状態（飽和温度以下）
- ・ 重大事故等時は、事象発生後 2×10^{-1} 年以降の荷重と基準地震動 S_s との組合せとなるため、温度条件は飽和温度以下（沸騰状態ではない）

② 水温による内部水の有効質量比への影響

- ・ 内部水の有効質量に関連する内部水の質量は、密度の関数であり、水温が飽和温度以下では温度変化に対する影響は小さい

なお、サプレッションチェンバの耐震評価における地震応答解析及び応力評価に用いる部材温度は、運転状態を考慮した温度条件を用いる。

2.2.4 内部水の有効質量比の算出方法

本試験から得られる計測荷重 F と架台上の計測加速度（＝試験体への入力加速度） \ddot{x} との関係は、運動方程式から下式で表される。

$$F = (M + M_E)\ddot{x}$$

ここで、

M ：試験体（構造体）の質量

M_E ：内部水の有効質量

上式のとおり、試験体（構造体）の質量と内部水の有効質量の合計値は、計測加速度に対する計測荷重の比として表されることから、水有りの試験結果及び空の試験結果の計測加速度と計測荷重の関係から回帰直線の傾きを求め、両者の回帰直線の傾きの差から内部水の有効質量が算出される（図 12 参照）。

なお、内部水の有効質量の算出においては、計測荷重 F について 2Hz のハイパスフィルター処理を行い、スロッシング周期成分を取り除いている（別紙 12 参照）。

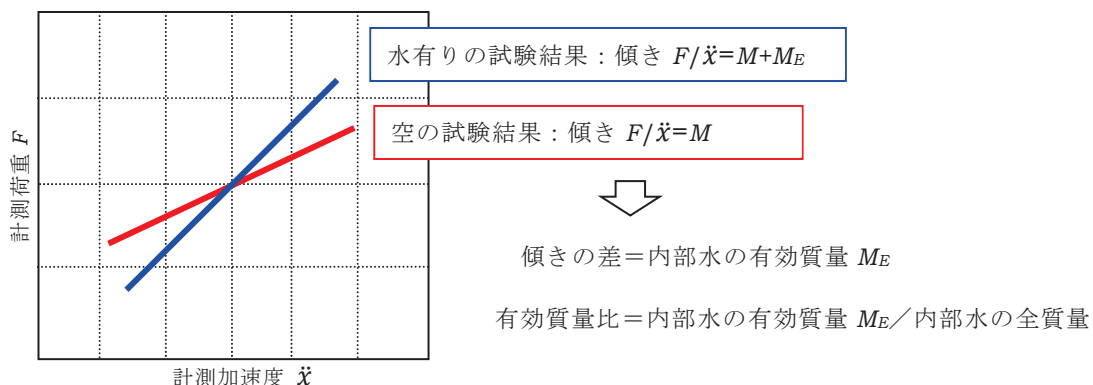


図 12 内部水の有効質量 M_E 及び有効質量比の算出方法

2.2.5 内部水の有効質量比の算出結果

1.0 倍入力、低水位の試験ケースにおける計測荷重の時刻歴を図 13 に、架台上の計測加速度に対する荷重をプロットしたものを図 14 に、各ケースの試験結果から算出した内部水の有効質量比を表 4 及び図 15 に示す。なお、各ケースの試験結果は、再現性があり、ばらつきがほとんどないことを確認している（別紙 13 参照）。

また、図 16 に示す計測荷重 F のフーリエスペクトルから、約 0.8 秒（実機寸法では約 4 秒）にピークを確認したことから、振動試験においてスロッシングによる荷重が発生している。

各ケースの試験結果から、水位の増加に伴い内部水の有効質量比も増加すること、入力倍率の違いによる内部水の有効質量比の差は小さいことを確認した。

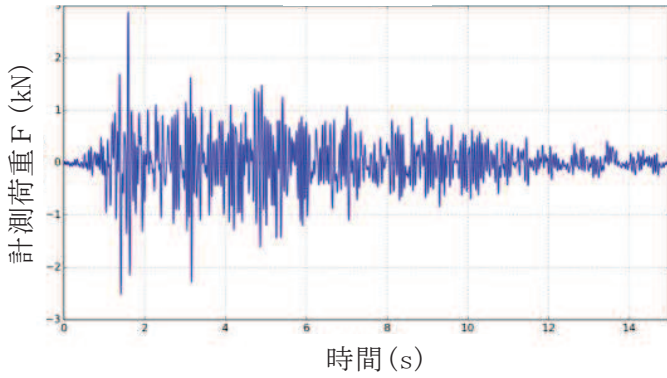


図 13 計測荷重の時刻歴

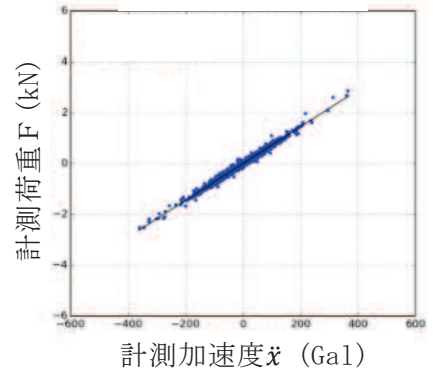


図 14 計測加速度と計測荷重の関係

表 4 試験結果から算出した有効質量比

水位	入力倍率*		
	0.5 倍	1.0 倍	1.5 倍
低 (146mm)	0.14 (0.0061)	0.12 (0.0237)	0.14 (0.0138)
中 (203mm)	0.20 (0.0050)	0.21 (0.0077)	0.21 (0.0066)
高 (259mm)	0.28 (0.0027)	0.28 (0.0015)	0.29 (0.0035)
高高 (325mm)	0.41 (0.0025)	0.42 (0.0032)	0.41 (0.0041)

注記 * : 括弧内は, 複数回実施した試験結果から得られた有効質量比の標準偏差

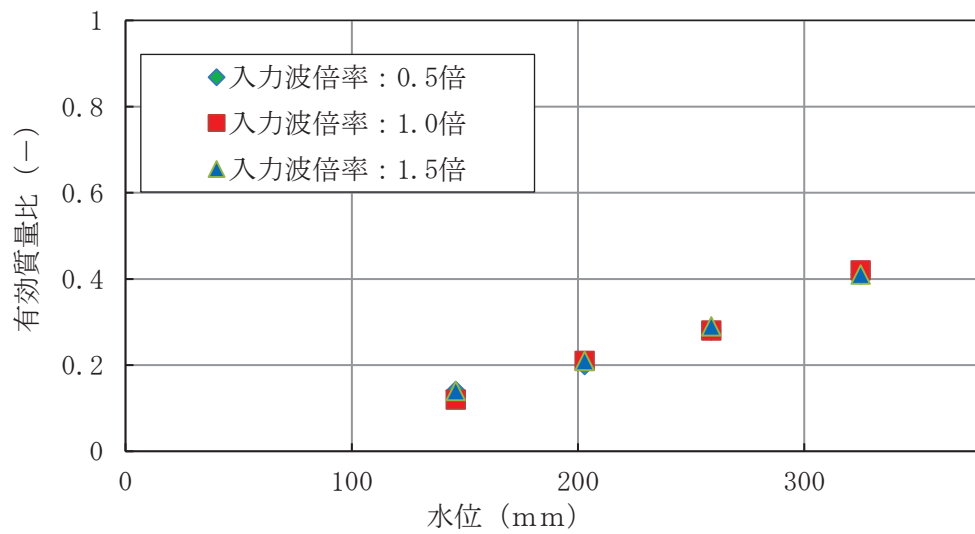


図 15 振動試験における水位と有効質量比の関係

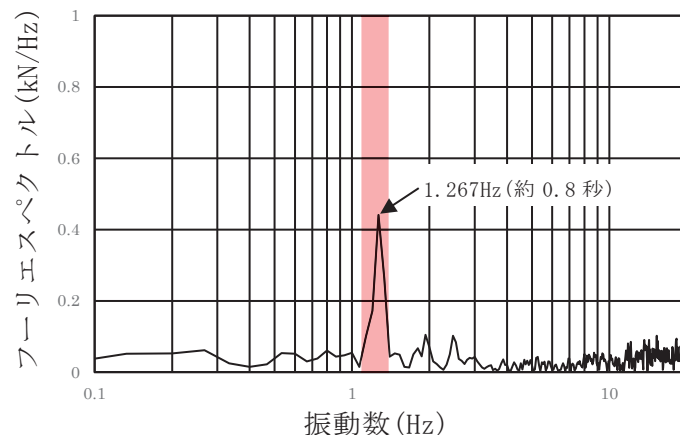


図 16 計測荷重のフーリエスペクトル (低水位, 入力倍率 1.0 倍)

2.3 流体解析による試験体解析モデルの内部水の有効質量比の算出

円環形状容器の内部水の有効質量算出に仮想質量法を用いることの妥当性を検証するため、振動試験に加えて、振動試験に用いた試験体の流体解析モデルを作成し、流体解析により内部水の有効質量比を算出する。

2.3.1 解析モデル

振動試験にて用いた試験体をもとに作成した流体解析モデルを図 17 に示す。



図 17 流体解析モデル（試験体解析モデル）

2.3.2 解析条件

流体解析に用いる入力波は、振動試験で計測された試験体への入力波（架台上で計測された加速度時刻歴波）とする。水位は、代表として低水位及び高水位とする。

2.3.3 内部水の有効質量比の算出方法

流体解析から得られる荷重 F 、入力加速度 \ddot{x} 及び内部水の有効質量 M_E との関係は、運動方程式から下式で表される。

$$F = M_E \cdot \ddot{x}$$

ここで、流体解析から得られる荷重 F は、構造物の表面 S について、圧力 p と表面の法線ベクトル \mathbf{n} の積を積分したもので、下式で表される。

$$F = \oint_S \mathbf{n} p dS$$

上式のとおり、内部水の有効質量 M_E は、入力加速度 \ddot{x} と流体解析から得られる荷重 F の関係から回帰直線の傾きから有効質量が算出される（図 18 参照）。

なお、有効質量比の算出においては、荷重時刻歴波形について 2Hz のハイパスフィルター処理を行い、スロッシング周期成分を取り除いている。

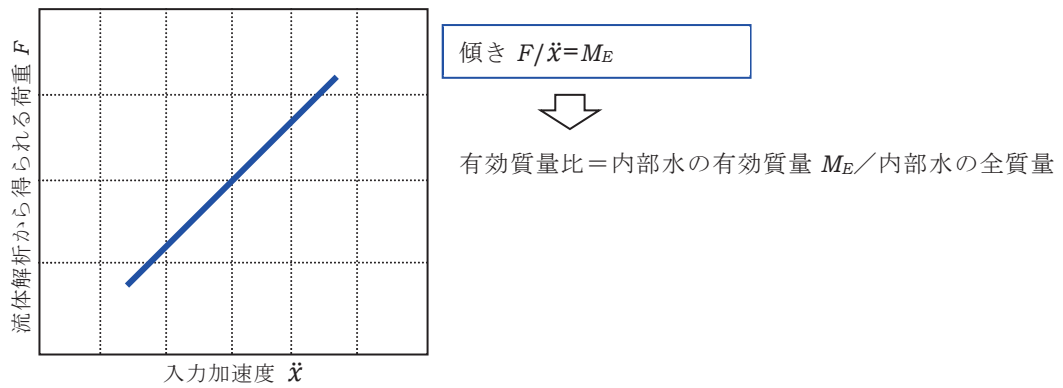


図 18 内部水の有効質量 M_E 及び有効質量比の算出方法

2.3.4 解析結果及び内部水の有効質量比の確認

1.0 倍入力，低水位の解析条件に対して流体解析により算出した荷重時刻歴を図 19 に，入力加速度に対する荷重をプロットしたものを図 20 に示す。また，図 20 の入力加速度と荷重の関係から回帰直線の傾きを求め，内部水の有効質量比を算出した結果を表 5 に示す。

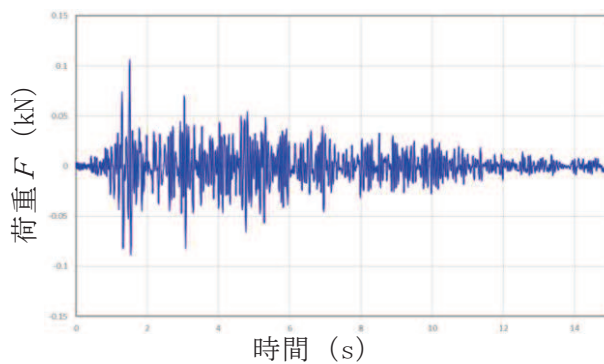


図 19 荷重時刻歴

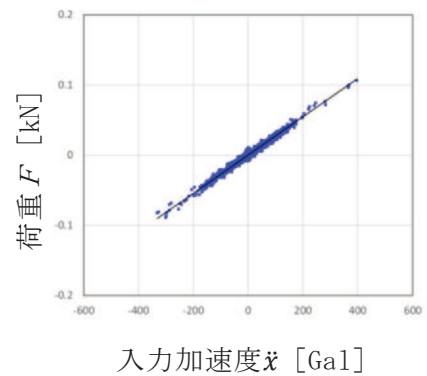


図 20 入力加速度と荷重の関係

表 5 流体解析により算出した内部水の有効質量比

水位	有効質量比[-]
低 (146mm)	0.14
高 (259mm)	0.28

2.4 妥当性検証

上記2.1項～2.3項で得られた内部水の有効質量比を比較し、仮想質量法で算出した円環形状容器の内部水の有効質量比の妥当性を検証する。

2.1項～2.3項に示した仮想質量法、振動試験及び流体解析により算出した内部水の有効質量比を整理して表6及び図21に示す。

入力波の特性に関係なく、容器の形状及び水位により内部水の有効質量比が定まる仮想質量法により算出した内部水の有効質量比に対し（別紙14参照）、内部水の流動を直接考慮した振動試験及び流体解析から算出した内部水の有効質量比が同等であることを確認したことから、仮想質量法により算出される内部水の有効質量比は妥当であると考えられる。

また、内部水の有効質量比は、振動試験の結果から再現性があり、ばらつきがほとんどないことを確認した。

表 6 各方法による内部水の有効質量比の評価結果

水位	仮想質量法	振動試験*	流体解析
低 (146mm)	0.15	0.12	0.14
中 (203mm)	0.22	0.21	
高 (259mm)	0.30	0.28	0.28
高高 (325mm)	0.41	0.42	

注記*：入力倍率 1.0 倍ケースの値

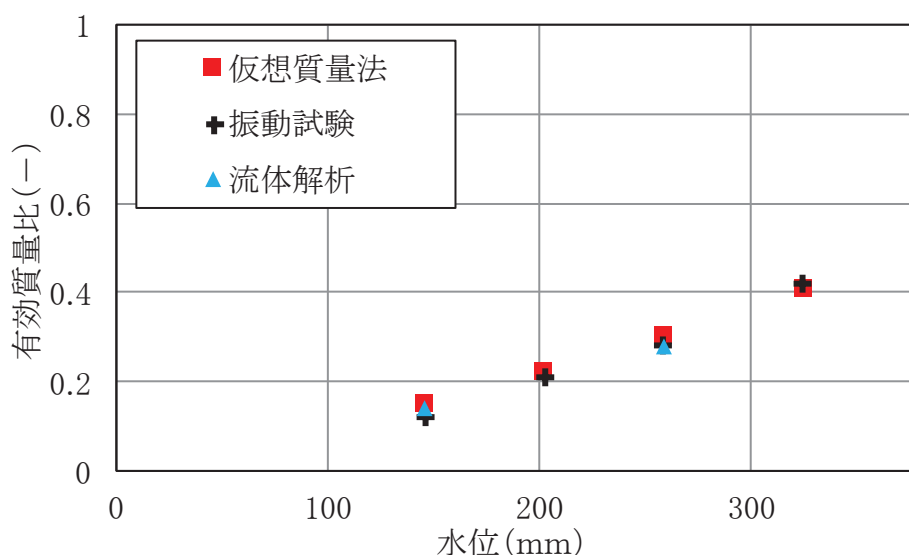


図 21 各手法の内部水の有効質量比の評価結果

3. 耐震評価に用いる内部水の有効質量の設定

女川2号機の実機評価に適用する内部水の有効質量は、実機解析モデルに対する仮想質量法と内部構造物を含む実機解析モデルに対する流体解析による内部水の有効質量比を比較し、その妥当性を検証した上で、解析プログラム間の値の差異や試験結果との差異等を踏まえて仮想質量法で算出された値の保守性を検討し、設定する。

3.1 仮想質量法による実機内部水の有効質量比の算出

2項により妥当性を確認した仮想質量法を用いて、女川2号機の実機解析モデルにより内部水の有効質量比を算出する。

3.1.1 仮想質量法に用いる実機解析モデル

仮想質量法に用いる実機解析モデルを図 22 に示す。

女川 2 号機の実機解析モデルは、サプレッションチェンバ（強め輪を含む）の寸法、剛性を模擬したシェル要素とし、内部水の水位を設定する。なお、本解析モデルは、サプレッションチェンバの内部水の有効質量の算出に用いるものであり、ボックスサポートは模擬していない。

内部水の水位は、図 23 に示すとおり、通常運転水位及び重大事故等時水位より高い水位（真空破壊装置下端水位）（以下、「耐震解析用重大事故等時水位」という。）の 2 ケースとする。

なお、重大事故等時水位は、重大事故後の状態で弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s による地震力と組み合わせる水位である。

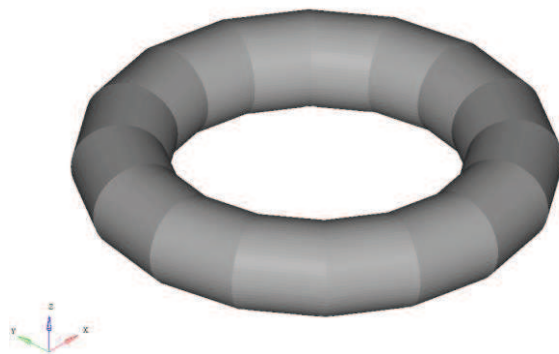


図 22 仮想質量法に用いる実機解析モデル

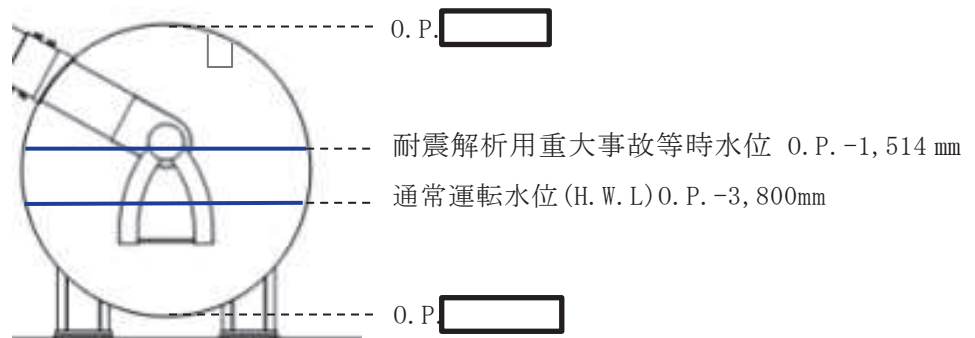


図23 解析水位ケース

3.1.2 流体解析による実機の有効質量比の算出

仮想質量法の実機解析の妥当性を検証するため、女川2号機の主要な内部構造物をモデル化した実機解析モデルを用いて流体解析により内部水の有効質量比を算出し、仮想質量法の内部水の有効質量比と比較する。

流体解析に用いる女川2号機の実機解析モデルの水位条件は、仮想質量法と同じである(図24)。また、入力地震動は、基準地震動 S_s の特徴を踏まえ、スロッシングの卓越周期帯の応答加速度が比較的大きく、継続時間が長い S_s-D1 を用いた(別紙15参照)。

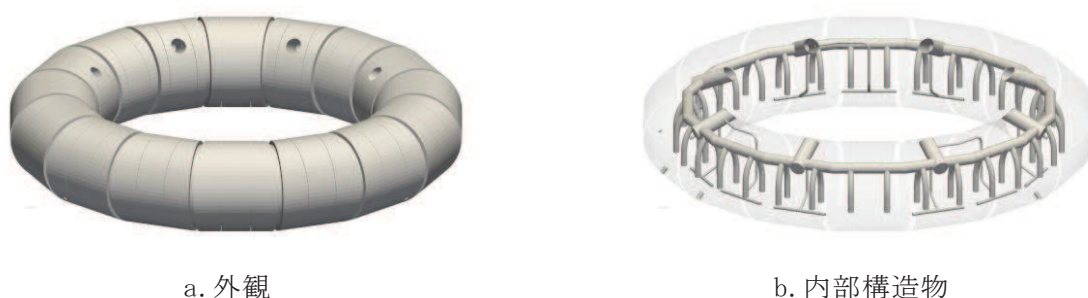


図24 流体解析に用いる実機解析モデル

3.1.3 解析結果

仮想質量法及び流体解析による女川2号機の実機サプレッションチェンバ内部水の有効質量比の算出結果を表7に示す。内部水の有効質量比は、各水位において仮想質量法により算出した内部水の有効質量比の方がやや大きい値となっている。この差異は、内部水の有効質量比の算出において、容器の形状と水位から一義的に求まる(内部水の流動を考慮しない)仮想質量法に対し、流体解析では内部水の流動が考慮されることから、液面変動による効果によりこのような傾向となるものと推定される。また、本傾向は、2.4項に示す仮想質量法の妥当性検証における仮想質量法の内部水の有効質量比と振動試験及び流体解析の内部水の有効質量比の比較結果と整合している。

なお、仮想質量法による実機解析モデルの内部水の有効質量比に対する試験体解析モデルの有効質量比の差は、強め輪の有無によるものであり、内部水の断面積に対する強め輪の面積の割合が大きいほど、大きくなると考えられる。そのため、耐震解析用重大事故等時水位に対して通常運転水位の試験体解析モデルに対する実機解析モデルの内部水の有効質量比の増加割合が大きくなると考えられる。

表7 女川2号機の実機内部水の有効質量比算出結果

水位	実機解析モデル		試験体解析モデル
	仮想質量法	流体解析	仮想質量法
		S s - D 1	
通常運転水位 (H. W. L)	0.24	0.22	0.15
耐震解析用重大事故等時水位	0.33	0.32	0.30

3.2 不確かさを踏まえた耐震評価用の内部水の有効質量の設定

女川2号機の実機評価に適用する内部水の有効質量の設定に当たり、仮想質量法に対する流体解析及び振動試験の値の差異等を踏まえ、仮想質量法で算出された値の保守性を検討し、女川2号機の実機評価に適用する内部水の有効質量を設定する。

試験体モデルに対しては、表6のとおり、仮想質量法、振動試験及び流体解析により算出した内部水の有効質量比は同等であり、おおむね仮想質量法の値が保守的な傾向を示す。また、内部水の有効質量比は、振動試験の結果から、再現性があり、ほとんどばらつきがなく算出できることを確認した。

実機解析モデルに対しては、表7のとおり、仮想質量法により算出される内部水の有効質量比は、内部水の流動による内部水の有効質量比の低減が反映されないため、流体解析により算出される内部水の有効質量比よりも保守的な値となっている。

また、容器構造設計指針・同解説に記載されている球形タンク及び円筒タンクの内部水の有効質量比に対して、仮想質量法を用いて内部水の有効質量比の確認解析を実施したところ、いずれのタンクに対しても内部水の有効質量比がほぼ一致している、又は仮想質量法の値が保守的な傾向となっている（別紙16参照）。

したがって、女川2号機の地震応答解析に考慮する内部水の有効質量は、仮想質量法により算出される内部水の有効質量比が、他評価手法及び容器構造設計指針に対して一致もしくはおおむね保守的な傾向（内部水の有効質量比が大きくなる）を示すことから、仮想質量法により算出される内部水の有効質量を適用する。

なお、評価手法の違い（仮想質量法と流体解析）による内部水の有効質量比の差異によって、サプレッションチェンバの固有周期が変動するため、工認段階においては、耐震評価に用いる床応答スペクトルとの関係にも配慮し、地震荷重を算出する。

サプレッションチェンバ内部水の地震応答解析モデルへの縮約方法及びその妥当性

1. 概要

今回工認に用いる女川 2 号炉のサプレッションチェンバ地震応答解析モデル（はり要素を用いた 3 次元多質点モデル）における内部水の有効質量は、NASTRAN を用いた仮想質量法（以下、仮想質量法という。）（シェル要素を用いた実機解析モデル）により算出される各要素の内部水の有効質量及びその位置（高さ）を考慮し、地震応答解析モデルの各質点に縮約して設定する。

本資料では、その縮約方法の考え方及びその妥当性について説明する。

2. 縮約

縮約とは、膨大な数のデータを扱う有限要素法などの解析において、行列の大きさ（次元）を小さくする解析上のテクニックであり、その手法として、Guyan の縮約法（Guyan's Reduction）が広く一般的に使われている。

サプレッションチェンバの内部水に対する有効質量を地震応答解析モデルに設定するに当たり、この手法を用いて、仮想質量法により算出されるサプレッションチェンバシェルの各要素の内部水の有効質量及びその位置（高さ）を、地震応答解析モデルの各質点に縮約する（図 1 参照）。

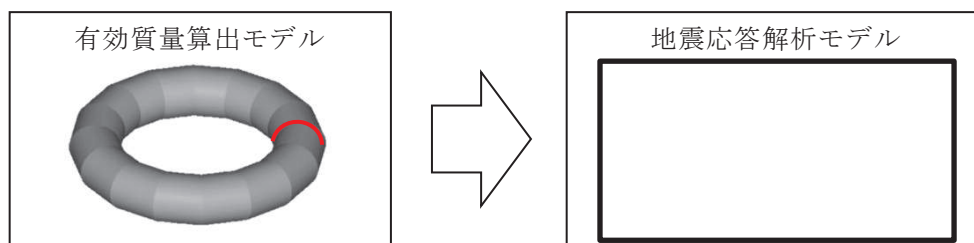


図 1 内部水の有効質量の縮約

3. 地震応答解析モデルへの縮約方法

3.1 地震応答解析モデルへの縮約方法の考え方

仮想質量法により算出されるサプレッションチェンバシェルの各要素の内部水の有効質量及びその位置（高さ）を、地震応答解析モデルのサプレッションチェンバの各質点に縮約する方法（Guyan の縮約法）のイメージを図 2 に示す。

① 仮想質量法から算出されるサプレッションチェンバの内部水の有効質量

仮想質量法ではサプレッションチェンバシェルの各要素に対する内部水の有効質量が算出されており、解析モデルの一断面を考えた場合、有効質量算出モデルの 1 要素における内部水の有効質量 m_i は、水平方向及び鉛直方向の内部水の有効質量（ m_{xi} , m_{zi} ）に分解できる。

なお、水平方向の内部水の有効質量 m_{xi} をサプレッションチェンバ全体に積分すると

サプレッションチェンバの内部水に対する有効質量と一致し、また、鉛直方向の内部水の有効質量 m_{zi} をサプレッションチェンバ全体に積分した場合、サプレッションチェンバシエルの底面圧力による荷重と一致する。

② 地震応答解析モデルのはり要素（1 質点）への縮約（1 要素の有効質量）

上記①で示した水平方向及び鉛直方向の内部水の有効質量 (m_{xi} , m_{zi})、その位置（高さ）を考慮し、それらが地震応答解析モデルのはり要素（1 質点）における慣性力及び回転慣性力が等価となるように、並進質量 (m_x , m_z) 及び回転質量 (Rm_x , Rm_z) を設定する。

なお、回転質量 Rm_z は、サプレッションチェンバシエルの底面圧力によるモーメントとして考慮される。

③ 地震応答解析モデルのはり要素（1 質点）への縮約（全要素の内部水の有効質量）

仮想質量法により算出されるサプレッションチェンバシエル全要素の内部水の有効質量に対して、上記②の考え方を 3 次元の位置関係を考慮して展開し、地震応答解析モデルのはり要素（1 質点）における並進質量 (m_x , m_y , m_z) 及び回転質量 (Rm_x , Rm_y , Rm_z) に縮約する。

④ 地震応答解析モデル（全質点）における内部水の有効質量の設定

地震応答解析モデルにおけるはり要素の全質点に対して、上記③の考え方を展開し、並進質量 (m_x , m_y , m_z) 及び回転質量 (Rm_x , Rm_y , Rm_z) が設定される。

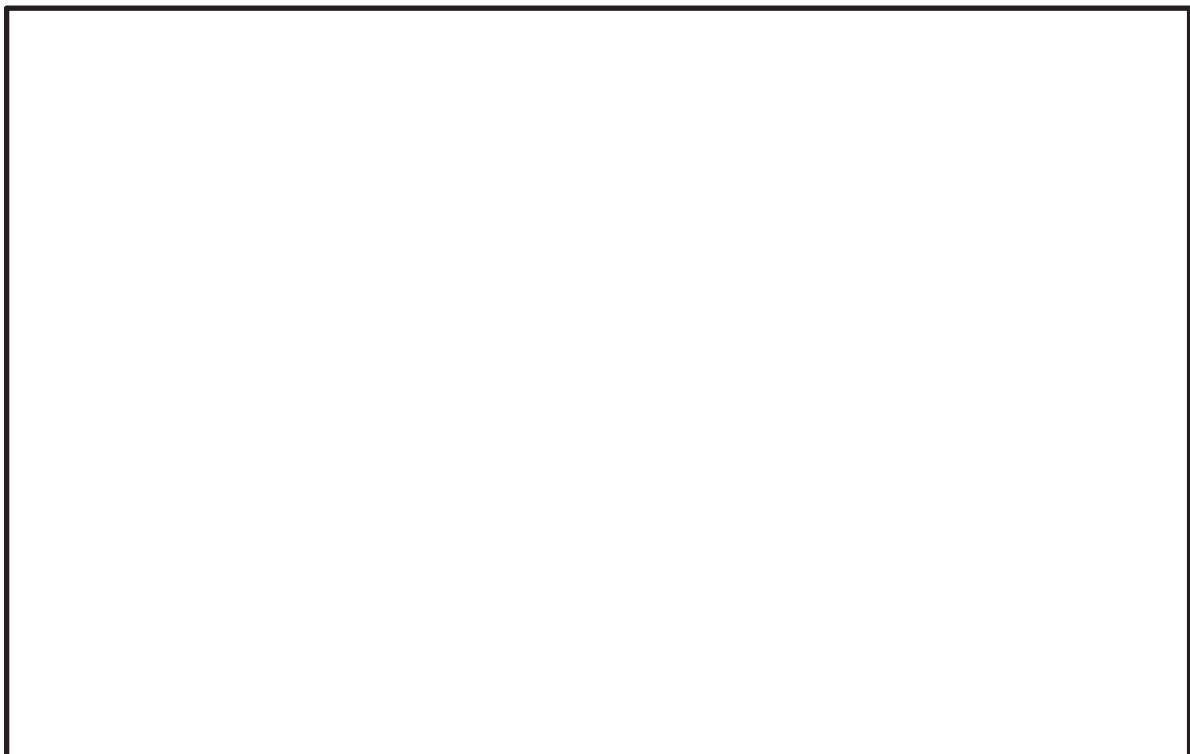


図 2 Guyan の縮約法のイメージ

3.2 地震応答解析モデルへ縮約される内部水の有効質量及びその妥当性

今回工認に用いるサプレッションチェンバの地震応答解析モデルを図3に示す。また、通常運転水位条件による水平（X方向）及び鉛直（Z方向）方向の地震応答解析モデルの各質点位置に縮約される内部水の有効質量を表1及び表2、重大事故等時水位条件によるものを表3及び表4に示し、今回工認に用いるサプレッションチェンバの地震応答解析モデルに設定する内部水の有効質量（並進質量及び回転質量）が有する意味合いを重大事故等時水位条件のものを用いて以下に示す。

(1) 並進質量

- X方向の各質点の並進質量 m_x の合計値 [] kg は、サプレッションチェンバ内部水の内部水の有効質量を表し、Z方向の各質点の並進質量 m_z の合計値 [] kg は、サプレッションチェンバ内部水の全質量を表すことから、内部水の有効質量比は、0.33 (= []) となる。
- この内部水の有効質量比は、本文表4.1-1における仮想質量法による実機解析モデル（重大事故等時水位）の内部水の有効質量比0.33と一致する。
- X方向の並進質量 m_x は、X軸方向（質点1,17）がY軸方向（質点9,25）よりも質量が集中する傾向があり、流体解析コードOpenFOAMによる圧力分布（別紙4 図3.2-1参照）とも整合している。
- X方向の並進質量 m_y , m_z 及びZ方向の並進質量 m_x , m_y は、サプレッションチェンバの容器形状（軸対称）に応じた分布となっており、それぞれの合計値は0となる。

(2) 回転質量

- X方向の各質点の回転質量 Rm_y は、サプレッションチェンバの容器内面に加わる圧力（各シェル要素のX方向成分及びZ方向成分）を各質点位置にオフセットした場合の等価な回転慣性力を表している。
- 各質点での回転質量 Rm_y は、サプレッションチェンバの容器中心位置（はりモデルの質点位置）を基準としているため、回転質量が負の場合は容器中心位置よりも高い位置に、回転質量が正の場合は容器中心位置よりも低い位置に内部水の等価高さがあるとみなすことができる（円筒容器に対する検討結果は、「4.1.2 妥当性確認結果」参照）。
- 今回の地震応答解析モデルにおけるX方向の各質点位置の回転質量の合計値は正であるため、サプレッションチェンバ内部水の有効質量の等価高さは、容器中心位置よりも高い位置にあることを表している。
- X方向の有効質量（並進質量 m_x ）の合計値 [] kg とX方向の回転質量 Rm_y の合計値 [] kg・m から、サプレッションチェンバ内部水全体を簡便に一質点とした場合の等価高さは、サプレッションチェンバの容器中心位置（はりモデルの質点位置）から約 [] m 高い位置にあると算出される。
- これは、内部水の重心位置（容器中心位置から下方に約 [] m の位置）よりも高く、Housner理論による底面圧力を考慮した円筒容器の評価式における容器水位に対する容器半径が比較的大きい場合の傾向とも整合する。
- X方向の回転質量 Rm_x , Rm_z 及びZ方向の回転質量 Rm_x , Rm_y , Rm_z は、隣り合う質点の関係

として回転質量の増減が現れるが、これは質点位置の容器形状の違い（直管部：偶数の質点，接続部：奇数の質点）によるものであり，容器形状が軸対称であるため，それぞれの合計値は，ほぼ0となる。

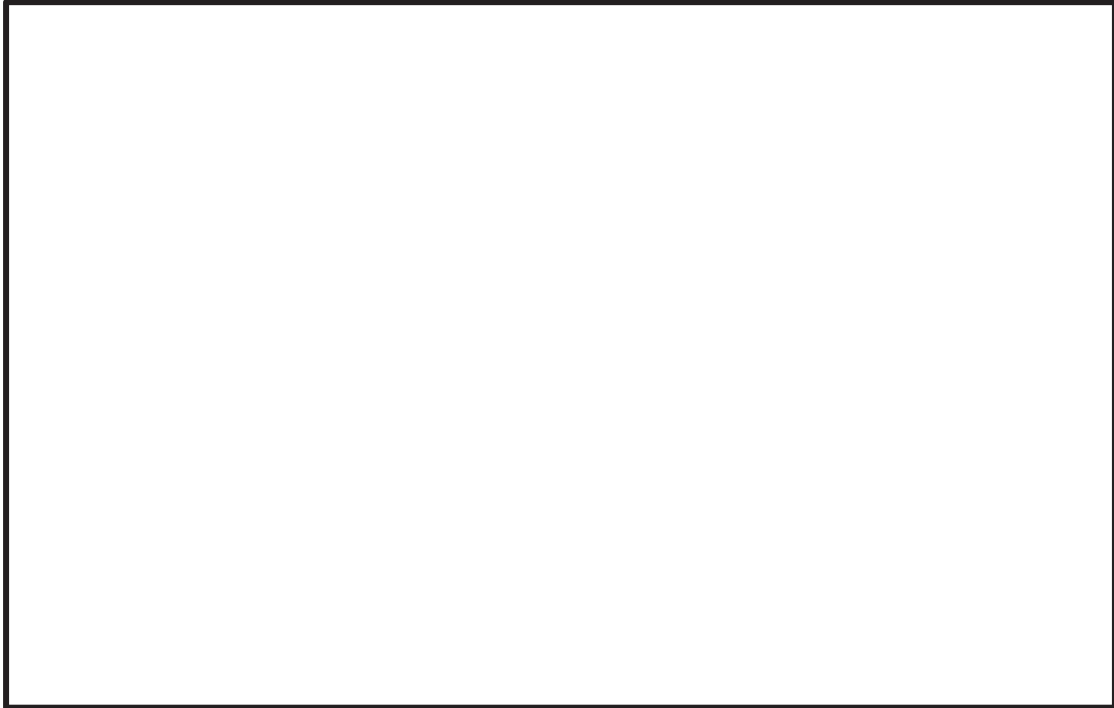


図3 サプレッションチェンバ地震応答解析モデル

表 1 縮約した内部水の有効質量（通常運転水位，X 方向）

質点 番号	並進質量			回転質量		
	m_x ($\times 10^3$ kg)	m_y ($\times 10^3$ kg)	m_z ($\times 10^3$ kg)	Rm_x ($\times 10^3$ kg \cdot m)	Rm_y ($\times 10^3$ kg \cdot m)	Rm_z ($\times 10^3$ kg \cdot m)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
合計						

表 2 縮約した内部水の有効質量（通常運転水位，Z 方向）

質点 番号	並進質量			回転質量		
	m_x ($\times 10^3$ kg)	m_y ($\times 10^3$ kg)	m_z ($\times 10^3$ kg)	Rm_x ($\times 10^3$ kg · m)	Rm_y ($\times 10^3$ kg · m)	Rm_z ($\times 10^3$ kg · m)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
合計						

表3 縮約した内部水の有効質量（重大事故等時水位，X方向）

質点 番号	並進質量			回転質量		
	m_x ($\times 10^3$ kg)	m_y ($\times 10^3$ kg)	m_z ($\times 10^3$ kg)	Rm_x ($\times 10^3$ kg・m)	Rm_y ($\times 10^3$ kg・m)	Rm_z ($\times 10^3$ kg・m)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
合計						

表4 縮約した内部水の有効質量（重大事故等時水位，Z方向）

質点 番号	並進質量			回転質量		
	m_x ($\times 10^3$ kg)	m_y ($\times 10^3$ kg)	m_z ($\times 10^3$ kg)	Rm_x ($\times 10^3$ kg・m)	Rm_y ($\times 10^3$ kg・m)	Rm_z ($\times 10^3$ kg・m)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
合計						

4. Guyan の縮約法の妥当性確認

4.1 自由表面を有する円筒容器評価モデルを用いた妥当性確認

4.1.1 妥当性確認方針

NASTRAN による Guyan の縮約法の妥当性確認にあたっては、計算を簡単にするため、自由表面を有する円筒容器評価モデル(1 質点系)(質量位置の上下方向のオフセットの検討)として、NASTRAN の Guyan の縮約法(容器の重心位置に縮約)と NASTRAN を用いて FEM から直接的に求めた質点位置(内部水の有効質量に対する等価高さ)における内部水の有効質量、地震荷重及び回転質量を比較する。

また、参考として、Housner 理論による方法で求めた内部水の有効質量及び地震荷重も比較する。ここで、上記 3 つの手法による水平反力及び回転モーメントは、NASTRAN を用いて水平 1G 負荷による静的解析で算出している。

Housner 理論による方法では、容器半径に対する水位によって評価式が異なることから、容器半径と水位の関係を考慮した 2 つの評価モデルに対して妥当性検討を実施する。

(1) 評価モデル

評価は、ケース 1 として容器半径に対して水位が高いケース（水位/容器半径 >1.5 ）、ケース 2 として容器半径に対して水位が低いケース（水位/容器半径 ≤ 1.5 ）と容器半径に対して水位が低いケース（ケース 2）の 2 ケース実施する。

それぞれの評価モデルを図 4, 5, 評価モデルの諸元を表 5, 6 に示す

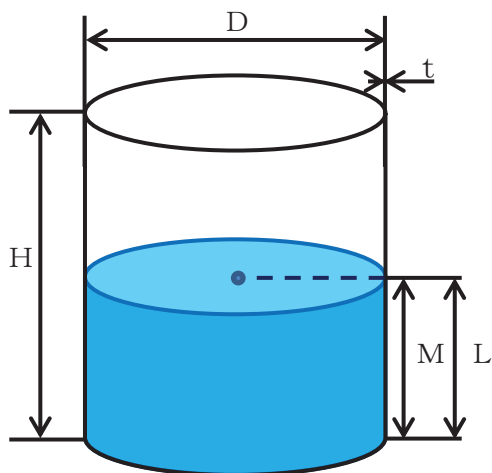


図 4 評価モデル（ケース 1）

表 5 評価モデル（ケース 1）の諸元

部位	寸法
容器直径 D	1000mm
容器板厚 t	50mm
容器高さ H	2000mm
容器重心高さ M	1000mm
水位 L	1000mm
水の密度 ρ	10^{-6}kg/mm^3
水位/容器半径	2.0

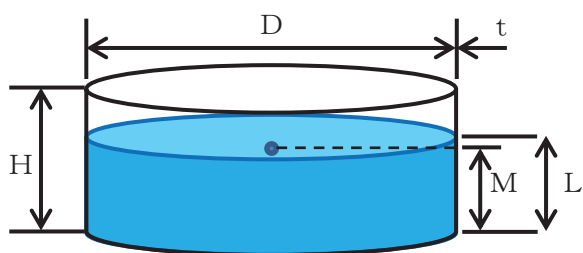


図 5 評価モデル（ケース 2）

表 6 評価モデル（ケース 2）の諸元

部位	寸法
容器直径 D	4000mm
容器板厚 t	50mm
容器高さ H	1000mm
容器重心高さ M	500mm
水位 L	600mm
水の密度 ρ	10^{-6}kg/mm^3
水位/容器半径	0.3

(2) 解析モデル

NASTRAN の評価に用いる解析モデルを図 6, 7 に示す。

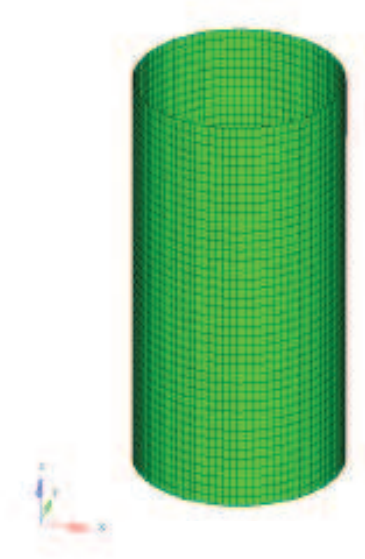


図 6 NASTRAN 解析モデル (ケース 1)

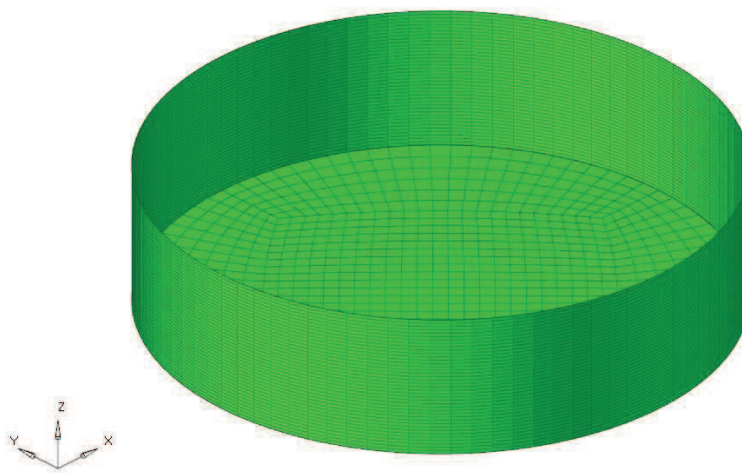


図 7 NASTRAN 解析モデル (ケース 2)

(3) 検討条件

検討条件を表 7, 検討モデルのイメージを図 8 に示す。

表 7 検討条件

検討条件	検討モデル	
	容器のモデル化	内部水のモデル化
Guyan 縮約	1 質点系モデル	Guyan の縮約法により容器の質点位置に内部水の有効質量を付加
直接的評価	1 質点系モデル	NASTRAN を用いて FEM から直接的に求めた等価高さに内部水の有効質量を付加
Housner 理論	1 質点系モデル	Housner 理論に基づく有効質量に対する等価高さ*に内部水の有効質量を付加

注記* : Housner 理論による底面圧力を考慮した評価式を用いて等価高さを算出

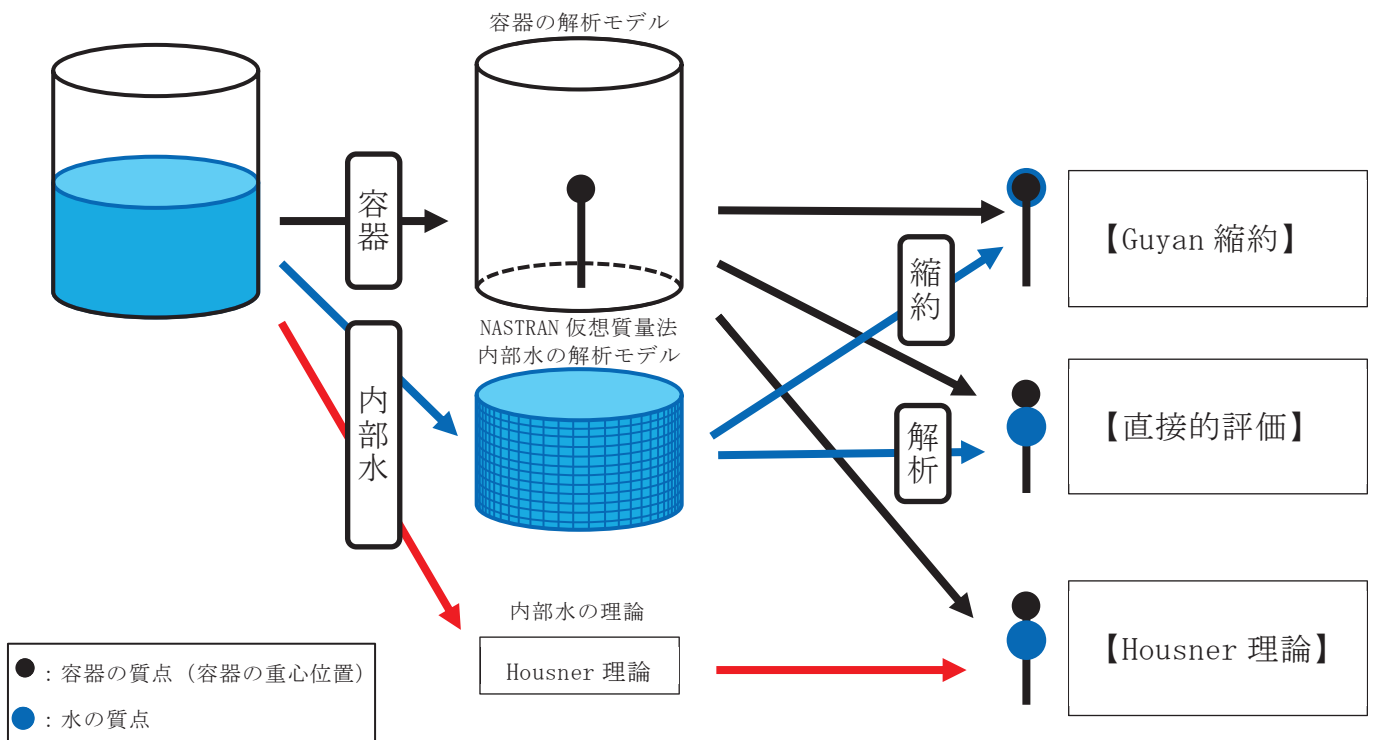


図 8 妥当性確認に用いる検討モデルのイメージ

4.1.2 妥当性確認結果

NASTRAN の Guyan の縮約法と直接的評価による単位加速度 1G に対する内部水の有効質量，地震荷重及び回転質量を表 8，9，内部水の有効質量に対する水平反力等のイメージを図 9，10 に示す。比較結果から NASTRAN の Guyan の縮約法と直接的評価の内部水の有効質量，地震荷重及び回転質量は一致しており，NASTRAN の Guyan の縮約法が妥当であることを確認した。なお，容器重心位置と内部水の有効質量の等価高さの関係（オフセット方向）が回転質量の符号に考慮され，容器重心位置よりも内部水の有効質量の等価高さが低い場合（ケース 1）は負の回転質量となるが，容器重心位置よりも内部水の有効質量の等価高さが高い場合（ケース 2）は正の回転質量となる。

なお，Housner 理論による内部水の有効質量及び地震荷重も NASTRAN の Guyan の縮約法による内部水の有効質量及び地震荷重とほぼ一致していることを確認した。

表 8 Guyan による縮約法の妥当性確認結果（ケース 1）

	内部水の有効質量 (kg)	等価高さ (mm)	地震荷重 (1G)		回転質量 (kg・m)
			水平反力 (N)	回転モーメント (N・mm)	
Guyan 縮約	603.591	—	3.010×10^4	2.714×10^7	-302.613 ^{*1}
直接的評価	603.591	498.646	3.010×10^4	2.714×10^7	-302.613 ^{*2}
Housner 理論	614 ^{*3}	506 ^{*3}	3.021×10^4	2.723×10^7	—

注記*1：Guyan の縮約法後の水の質量マトリクスにおける回転質量の値

*2：直接的評価から求めた有効質量及び等価高さにより算定（図 9 参照）

*3：評価式については，補足 1 参照

表 9 Guyan による縮約法の妥当性確認結果（ケース 2）

	内部水の有効質量 (kg)	等価高さ (mm)	地震荷重 (1G)		回転質量 (kg・m)
			水平反力 (N)	回転モーメント (N・mm)	
Guyan 縮約	1236.927	—	6.050×10^4	4.467×10^7	1469.936 ^{*1}
直接的評価	1236.926	1688.378	6.050×10^4	4.467×10^7	1469.936 ^{*2}
Housner 理論	1306 ^{*3}	1657 ^{*3}	6.118×10^4	4.541×10^7	—

注記*1：Guyan の縮約法後の水の質量マトリクスにおける回転質量の値

*2：直接的評価から求めた内部水の有効質量及び等価高さにより算定（図 10 参照）

*3：評価式については，補足 2 参照

- : 内部水質量
- : 容器質量 (容器重心位置)
- ➡ : 水平反力
- ↻ : 回転モーメント
- ↻ : 回転質量

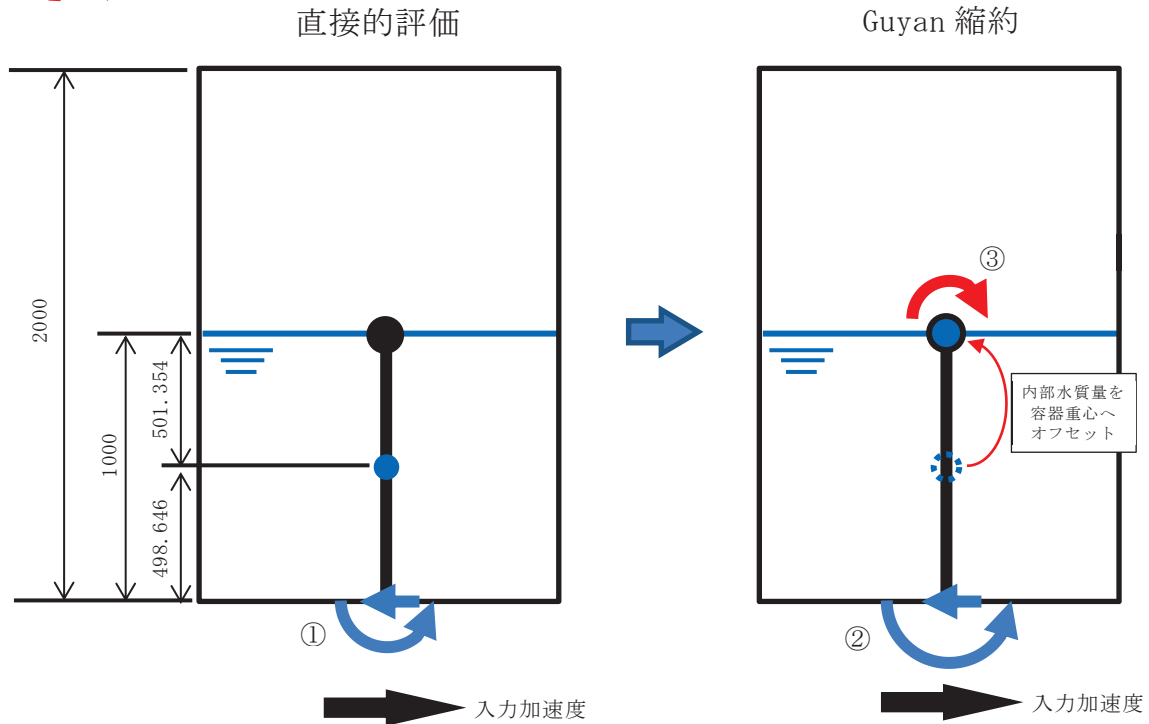


図9 有効質量に対する水平反力等のイメージ

〈回転質量の算出 (ケース1)〉

直接的評価による内部水の有効質量及び等価高さから回転質量を算出し、Guyan 縮約から求めた回転質量と比較する。

- ① 直接的評価による内部水の有効質量及び等価高さから容器底部での回転モーメントを算出。

$$603.591 \times 0.498646 \times 9.80665 = 2,951.588 (\text{N} \cdot \text{m})$$

- ② 直接的評価による内部水の有効質量を容器重心位置 (Guyan 縮約による内部水質量の縮約位置) にオフセットし、容器底部での回転モーメントを算出。

$$603.591 \times 1 \times 9.80665 = 5,919.206 (\text{N} \cdot \text{m})$$

- ③ ①と②の回転モーメントの差を重力加速度で除した値が回転質量となる。

$$(2,951.588 - 5,919.206) / 9.80665 = -302.613 (\text{kg} \cdot \text{m})$$

上記回転質量-302.613 (kg・m) は、Guyan 縮約から求めた回転質量-302.613 (kg・m) と一致するため、内部水を Guyan の縮約によりはりモデルへ縮約する手法は、妥当である。

- : 内部水質量
- : 容器質量 (容器重心位置)
- ➡ : 水平反力
- ↻ : 回転モーメント
- ↻ : 回転質量

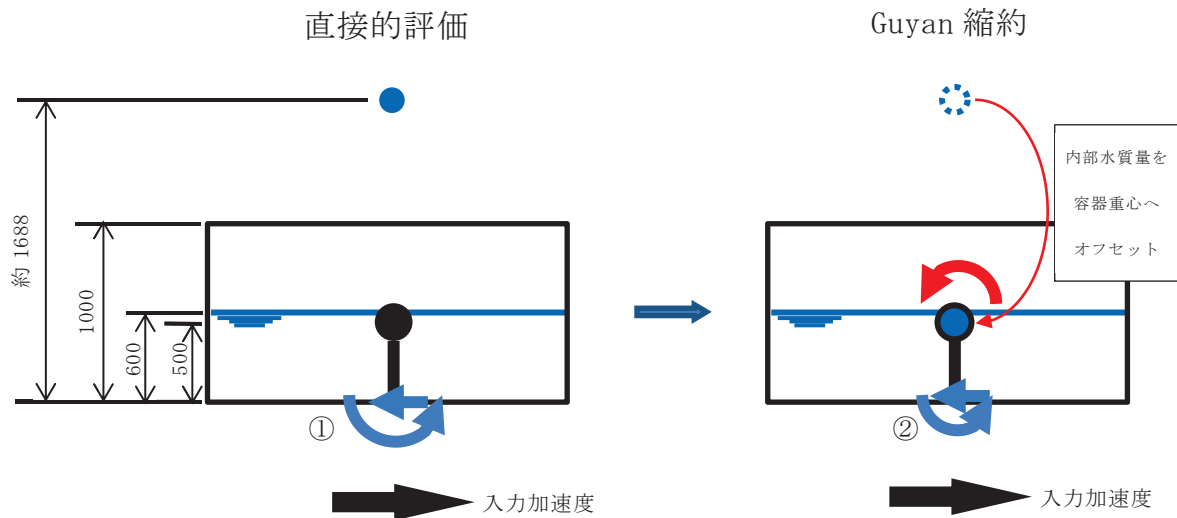


図 10 有効質量に対する水平反力等のイメージ

<回転質量の算出 (ケース 2) >

直接的评价による内部水の有効質量及び等価高さから回転質量を算出し、Guyan 縮約から求めた回転質量と比較する。

- ④ 直接的评价による内部水の有効質量及び等価高さから容器底部での回転モーメントを算出。

$$1236.926 \times 1.688378 \times 9.80665 = 20,480.195 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

- ⑤ 直接的评价による有効質量を容器重心位置 (Guyan 縮約による内部水質量の縮約位置) にオフセットし、容器底部での回転モーメントを算出。

$$1236.926 \times 0.5 \times 9.80665 = 6,065.050 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

- ⑥ ①と②の回転モーメントの差を重力加速度で除した値が回転質量となる。

$$(20,480.195 - 6,065.050) / 9.80665 = 1469.936 \text{ (kg} \cdot \text{m)}$$

上記回転質量 1469.936 (kg・m) は、Guyan 縮約から求めた回転質量 1469.936 (kg・m) と一致するため、内部水を Guyan の縮約によりはりモデルへ縮約する手法は、妥当である。

< 補足 1 >

Housner 理論による内部水の有効質量及び等価高さ (ケース 1)

Housner の論文^[1]による手法を用いて、円筒タンクに対する内部水の有効質量及び等価高さについて算出する。

(1) 評価モデル

評価諸元を表 1、円筒タンクの概要図を図 1 に示す。

水位と容器半径の比が $h/R=1000/500=2>1.5$ であるため、Housner^[1]の論文 (6.5) の評価式から、 $h' = 1.5R$ とおき、 h' より浅い部分と深い部分に分けて計算を行う。

表 1 評価諸元

	記号	値	単位
タンク半径	R	500	mm
タンク底面から液面までの高さ	h	1000	mm
1.5R (水面～ h')	h'	750	mm
h' より深い部分の高さ (h' ～底面)	$h-h'$	250	mm
高さ h' の流体質量	$W_o(h')$	589 ($\pi \times R^2 \times h'$) × 水密度*	kg

注記* : 水の密度は $1 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ とする。

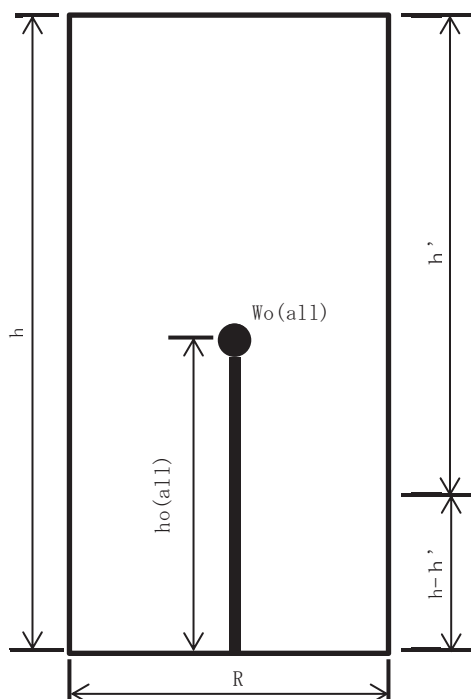


図 1 円筒タンク概要図

参考文献 [1] : Housner, G. W. : Nuclear Reactors And Earthquakes, TID Rep. 7024, 1963.

(2) 内部水の有効質量の算出

以下①～③式により、内部水の有効質量 $W_o(a11)$ を算出する。なお、タンク重量は含まないものとする。

$$W_o(h') = \frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{R}{h'}\right)}{\left(\sqrt{3}\frac{R}{h'}\right)} Wh' \quad \text{①}$$
$$= 418 \text{ kg}$$

$$W_o(h-h') = \pi \times R^2 \times (h-h') \times \rho \quad \text{②}$$
$$= 196 \text{ kg}$$

$$W_o(a11) = W_o(h') + W_o(h-h') \quad \text{③}$$
$$= 418 + 196$$
$$= 614 \text{ kg}$$

(3) 等価高さの算出

以下④～⑥式により、等価高さ $h_o(a11)$ を算出する。

$$h_o(h') = (h-h') + \frac{h'}{8} \left\{ \frac{4}{\frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{R}{h'}\right)}{\left(\sqrt{3}\frac{R}{h'}\right)} - 1} \right\} \quad \text{④}$$
$$= 685 \text{ mm}$$

$$h_o(h-h') = \frac{h-h'}{2} \quad \text{⑤}$$
$$= 125 \text{ mm}$$

$$h_o(a11) = \frac{W_o(h') \times h_o(h') + W_o(h-h') \times h_o(h-h')}{W_o(a11)} \quad \text{⑥}$$
$$= \frac{418 \times 685 + 196 \times 125}{614}$$
$$= 506 \text{ mm}$$

(4) 算出結果

(2), (3)の算出結果を表2に示す。

表 2 Housner の式で算出した内部水の有効質量及び等価高さ

	記号	値	単位
内部水の有効質量	Wo(all)	614	kg
内部水の等価高さ	ho(all)	506	mm

<補足 2 >

Housner 理論による内部水の有効質量及び等価高さ（ケース 2）

Housner の論文^[1]による手法を用いて、円筒タンクに対する内部水の有効質量及び等価高さについて算出する。

(1) 評価モデル

評価諸元を表 1、円筒タンクの概要図を図 1 に示す。

水位と容器半径の比が $h/R=600/2000=0.3 < 1.5$ であるため、Housner^[1]の論文（6.4）の評価式を用いて計算を行う。

表 1 評価諸元

	記号	値	単位
タンク半径	R	2000	mm
タンク底面から液面までの高さ	h	600	mm
高さ h_0 の流体質量	W_0	7540 ($\pi \times R^2 \times h'$) \times 水密度*	kg

注記*：水の密度は $1 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ とする。

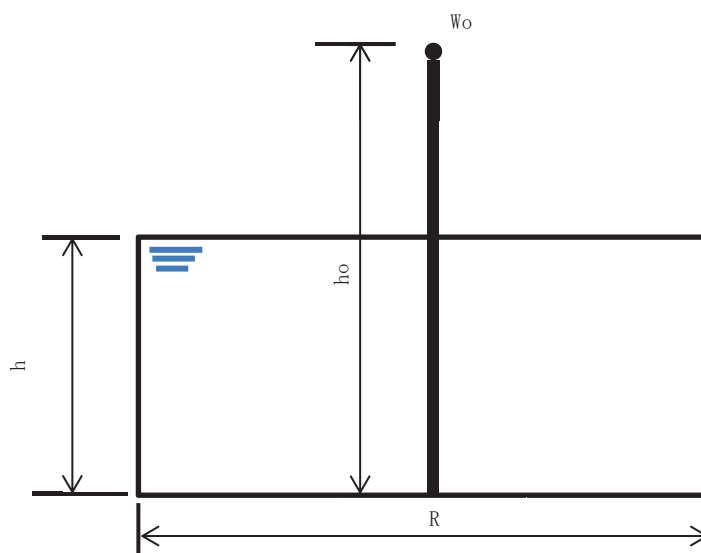


図 1 円筒タンク概要図

参考文献 [1] : Housner, G. W. : Nuclear Reactors And Earthquakes, TID Rep. 7024, 1963.

(2) 内部水の有効質量の算出

下式により, 内部水の有効質量 W_o を算出する。なお, タンク重量は含まないものとする。

$$W_o = \frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{R}{h}\right)}{\left(\sqrt{3}\frac{R}{h}\right)} W$$
$$= 1306 \text{ kg}$$

(3) 等価高さの算出

下式により, 等価高さ h_o を算出する。

$$h_o = \frac{h}{8} \left\{ \frac{4}{\frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{R}{h}\right)}{\left(\sqrt{3}\frac{R}{h}\right)} - 1} \right\}$$
$$= 1657 \text{ mm}$$

(4) 算出結果

(2), (3)の算出結果を表 2 に示す。

表 2 Housner の式で算出した内部水の有効質量及び等価高さ

	記号	値	単位
内部水の有効質量	W_o	1306	kg
内部水の等価高さ	h_o	1657	mm

4.2 振動試験データを用いた妥当性確認

4.2.1 妥当性確認方針

サプレッションチェンバの地震応答解析モデルにおいては、内部水の等価高さを適切に考慮するため、NASTRAN の機能である Guyan 縮約法により縮約した内部水の有効質量を 3 次元はりモデルの質点位置に設定しており、NASTRAN の Guyan 縮約法を用いて縮約した水平方向の内部水の有効質量については、「3. 地震応答解析モデルへの設定方法」にて、Guyan 縮約法を適用していない仮想質量法（3 次元シェルモデル）から算出した水平方向の内部水の有効質量と同等であることを確認している。

また、「4.1 自由表面を有する円筒容器評価モデルを用いた妥当性確認」にて、円筒容器における Guyan 縮約法を用いて縮約した質量（内部水の有効質量及び回転質量）及びそれによる地震荷重について、3 次元シェルモデル及び理論的に求めた質量（内部水の有効質量及び回転質量）及び地震荷重と同等であることを確認している。

ここで、円筒容器等をモデル化する手法として用いられる Housner 理論における円筒容器等の評価式では、内部水の有効質量及び等価高さを以下のとおり算定している。

- ① 内部水の有効質量は、水平方向の加速度による内部水から受ける容器側面圧力（水平方向の圧力）から算定
- ② 内部水の等価高さは、上記①の内部水の有効質量と容器側面圧力（水平方向の圧力）による回転モーメントから算定
- ③ 容器半径に対して水位が低い場合の内部水の等価高さは、上記②に加えて、底面圧力（鉛直方向の圧力）による回転モーメントから算定される高さを加算

上記③における内部水の等価高さの取り扱い及び「3.2 地震応答解析モデルへ設定する内部水の有効質量」における内部水の等価高さが内部水の重心位置よりも高いことを考慮すると、サプレッションチェンバ内部水から受ける容器側面圧力（水平方向の圧力）に加えて底面圧力（鉛直方向の圧力）を把握することは重要である。

今回工認に用いる地震応答解析モデルでは、仮想質量法を用いて容器（各要素）の内面圧力（水平方向の圧力、鉛直方向の圧力）から各方向の内部水の有効質量を算定しており、これらは Guyan 縮約法を用いてサプレッションチェンバのはりモデルの質点位置に縮約される。このため、鉛直方向の圧力に着目して、振動試験を模擬した NASTRAN（3 次元シェルモデル）の鉛直荷重を確認し、振動試験の鉛直荷重との比較により NASTRAN による鉛直方向の圧力の妥当性を確認する。また、円環形状容器に対する Guyan 縮約法の妥当性も確認するため、振動試験を模擬した NASTRAN（3 次元はりモデル：Guyan 縮約法を適用）による鉛直荷重を確認し、NASTRAN（3 次元シェルモデル）及び振動試験の鉛直荷重と比較する。なお、本検討の目的について、表 10 のとおり整理した。

表 10 本検討の目的

比較対象	3次元シェルモデル /振動試験	3次元シェルモデル /3次元はりモデル	3次元はりモデル /振動試験
検討目的	鉛直方向の圧力 の妥当性確認	Guyan 縮約法 の妥当性確認	鉛直方向の圧力 及び Guyan 縮約法 の妥当性確認

(1) 解析モデル

振動試験データを用いた検討を行うため、解析モデルは、実機を縮小模擬した振動試験体とし（図 11）、3次元シェルおよび3次元はりにてモデル化した（図 12 及び図 13）。振動試験体のモデル化に当たっては、振動試験体及び架台は、設計図面をベースとしてモデル化を行い、減衰定数は、JEAG4601 に記載の溶接構造物に対する設計用減衰定数 1% を適用した。

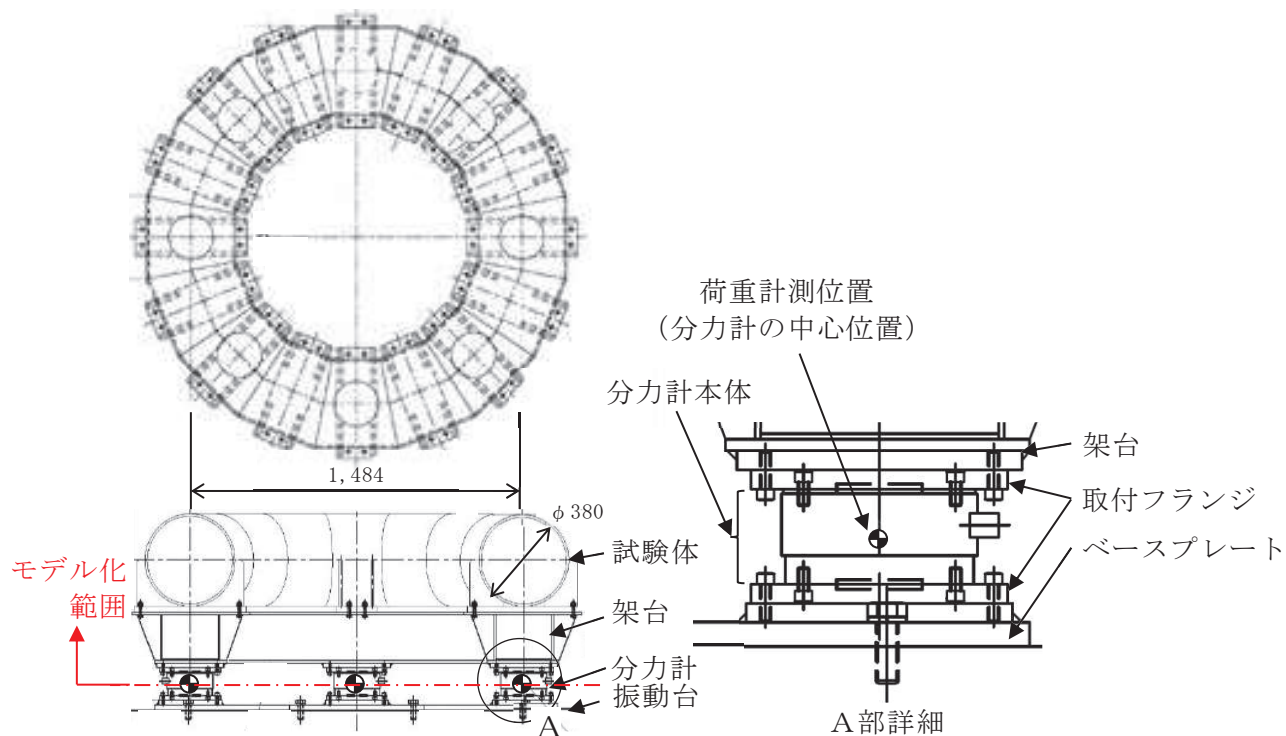


図 11 モデル化範囲

① 3次元シェルモデル

仮想質量法で算定した内部水の有効質量を試験体のシェル要素に付加した 3次元シェルモデル

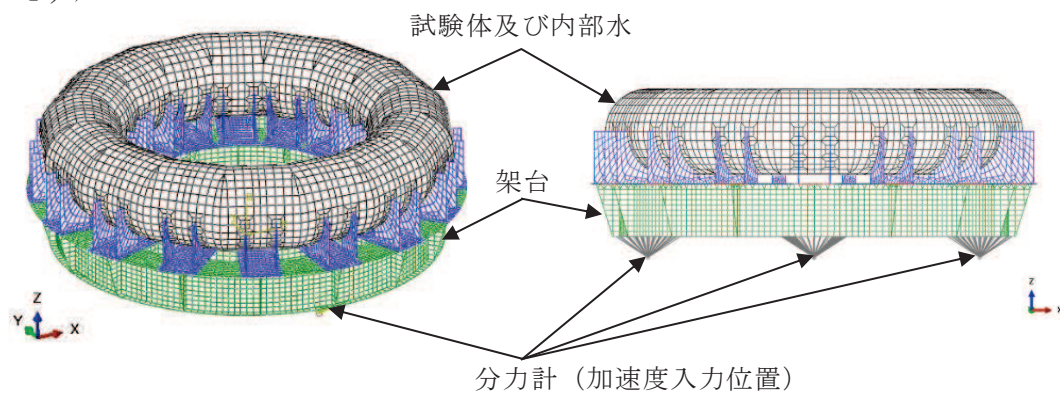


図 12 3次元シェルモデル

② 3次元はりモデル

仮想質量法で算定した内部水の有効質量を Guyan 縮約法を用いて試験体のはり要素に付加した 3次元はりモデル（今回工認におけるサプレッションチェンバの地震応答解析モデル設定と同様）

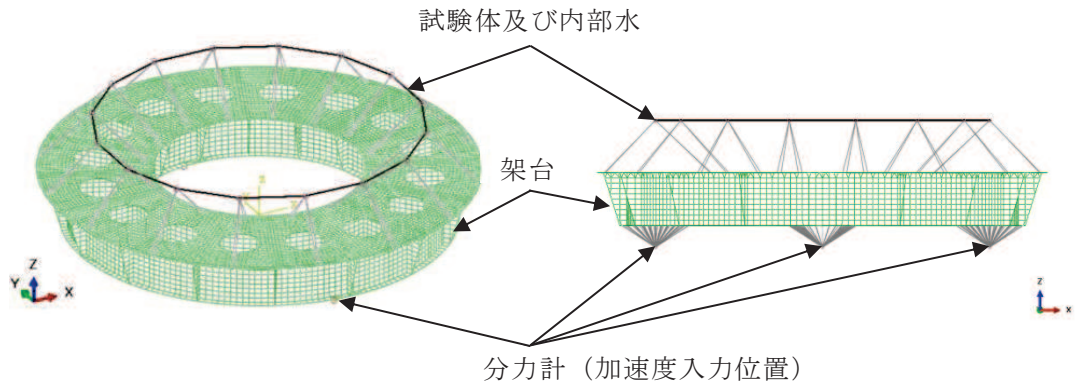


図 13 3次元はりモデル

(2) 解析条件

地震応答解析条件を表 11 に示す。

表 11 解析条件

項目		内容	
解析モデル		3次元シェルモデル	3次元はりモデル
モデル	試験体	シェル要素	はり要素
	架台	シェル要素	
	分力計	剛体要素 荷重計測位置（分力計の中心位置）～架台	
内部水の有効質量の算定方法		NASTRAN の仮想質量法により内部水の有効質量を算定	
内部水の有効質量のモデル化		試験体のシェル要素に付加	Guyan 縮約法を用いて試験体のはり要素に付加
減衰定数		1%（振動試験体，架台）	
境界条件		試験体と架台，架台と分力計：剛結合	
水位		高水位	
入力加速度		架台下端の加速度時刻歴 水平方向：0°，180° 鉛直方向：0°，90°，180°，270°	
加速度入力位置		分力計の荷重計測位置（4箇所）	
解析コード		NASTRAN	

(3) 入力加速度及び荷重比較対象

荷重計測位置よりも低い位置である振動台上で計測された加速度を用いて地震応答解析を行った結果、振動試験における試験体下端で計測された加速度よりも地震応答解析での試験体下端の加速度が小さいことを確認した。また、振動試験で計測した最大加速度及び加速度フーリエスペクトル比は、振動台上から架台下端、試験台上へ地震動が伝達するに従い増加しており、振動台上から架台下端までの増加が大きい（表 12、図 14）。この要因は、分力計の剛性に起因する共振（100Hz 付近）等による影響と考えられる。

今回の検討では、容器の内部水による底面圧力（鉛直方向の圧力）の妥当性確認を目的としているため、簡便な扱いとして、分力計のモデル化は行わず、分力計による応答増幅が含まれる架台下端で計測された水平及び鉛直方向の加速度を用いて多入力時刻歴応答解析を行う。なお、多入力時刻歴応答解析とすることで、鉛直方向のロッキング成分が模擬される。

地震応答解析における荷重の比較対象は、水平方向（X 方向）の加振に伴う内部水の有効質量による鉛直荷重は、加振直交方向（Y 方向）を軸として、加振方向（X 方向）に設置された分力計に作用するため、加振方向の分力計の荷重とした（図 15）。

表 12 最大加速度の比較

最大加速度 (Gal)			最大加速度比 (-)	
振動台上	架台下端	試験体下端	架台下端 / 振動台上	試験体下端 / 振動台上
433	469	483	1.08	1.12

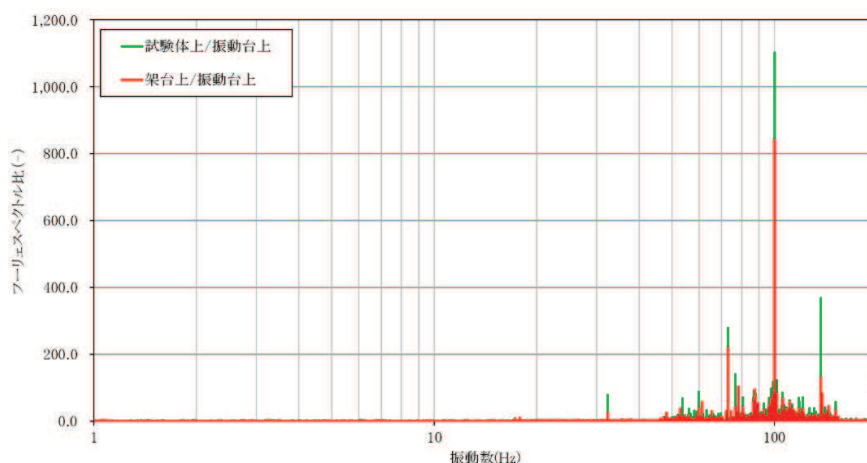


図 14 各計測位置における計測加速度のフーリエスペクトル比

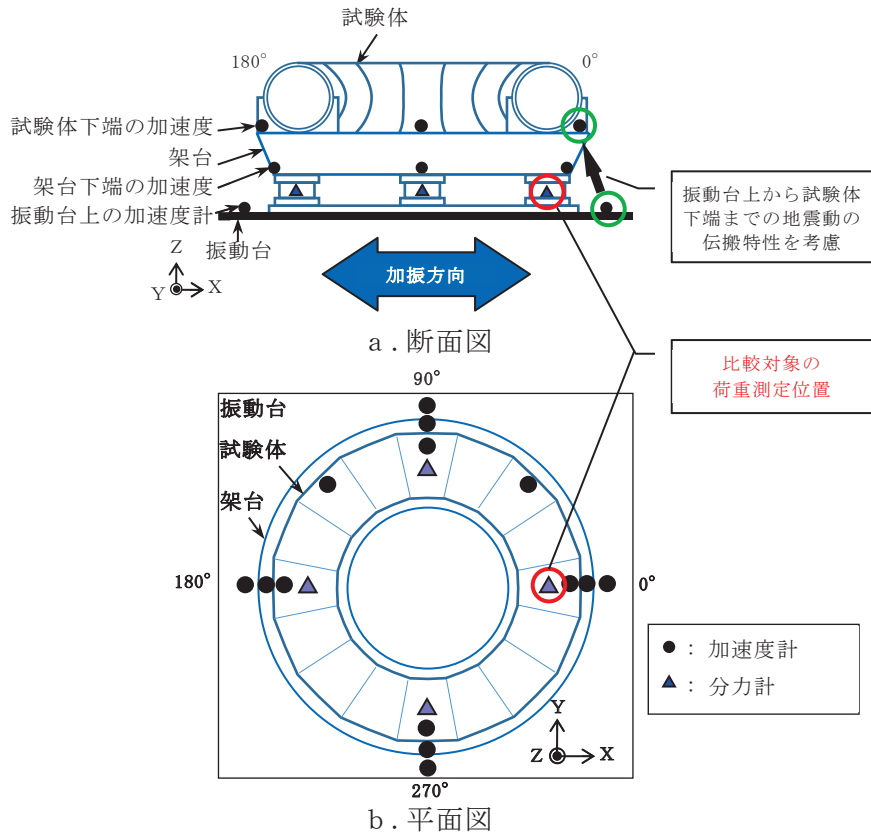


図 15 荷重の比較位置

4.2.2 解析結果

(1) 試験体下端の加速度時刻歴

振動試験で計測された試験体下端の加速度時刻歴, 3次元シェルモデル及び3次元はりモデルによる試験体下端の水平加速度時刻歴及び鉛直加速度時刻歴の比較を図16及び図17に示す。

比較の結果, 3次元シェルモデル及び3次元はりモデルにて解析した試験体下端の加速度時刻歴は, 振動試験で計測された試験体下端の加速度時刻歴とおおむね一致していることを確認した。

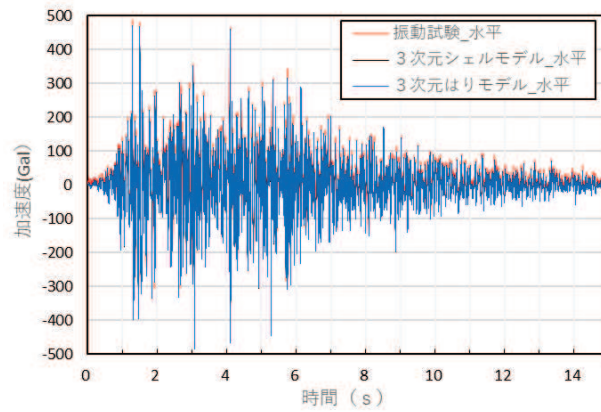
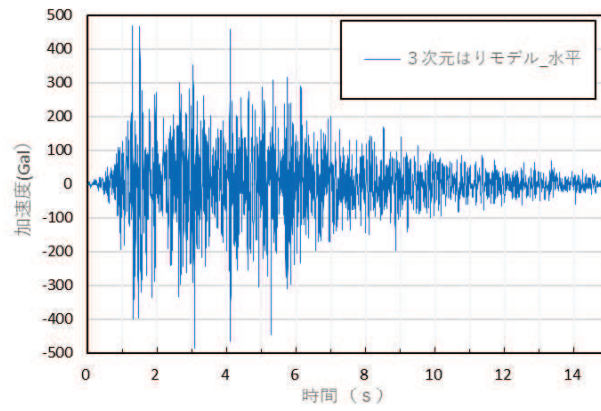
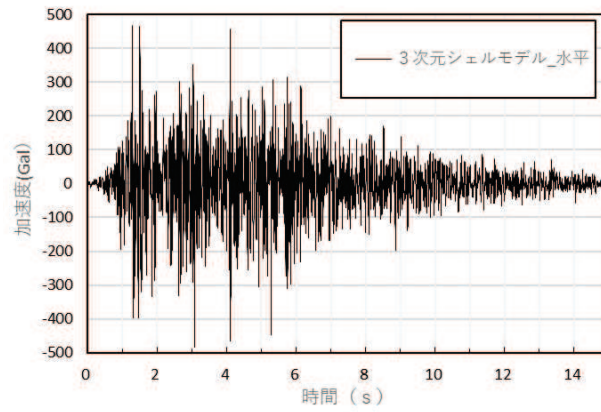
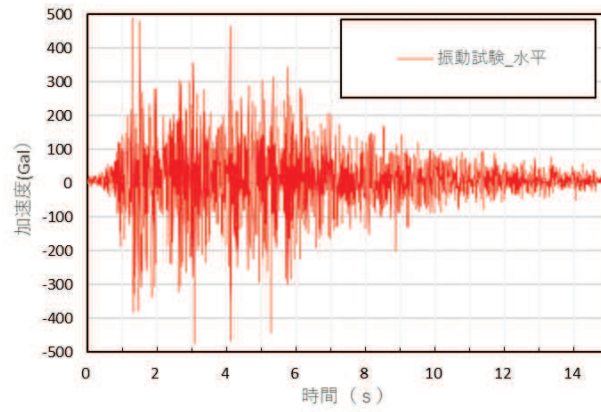


図 16 試験体下端の水平加速度時刻歴 (X 方向) の比較
別紙 2-27

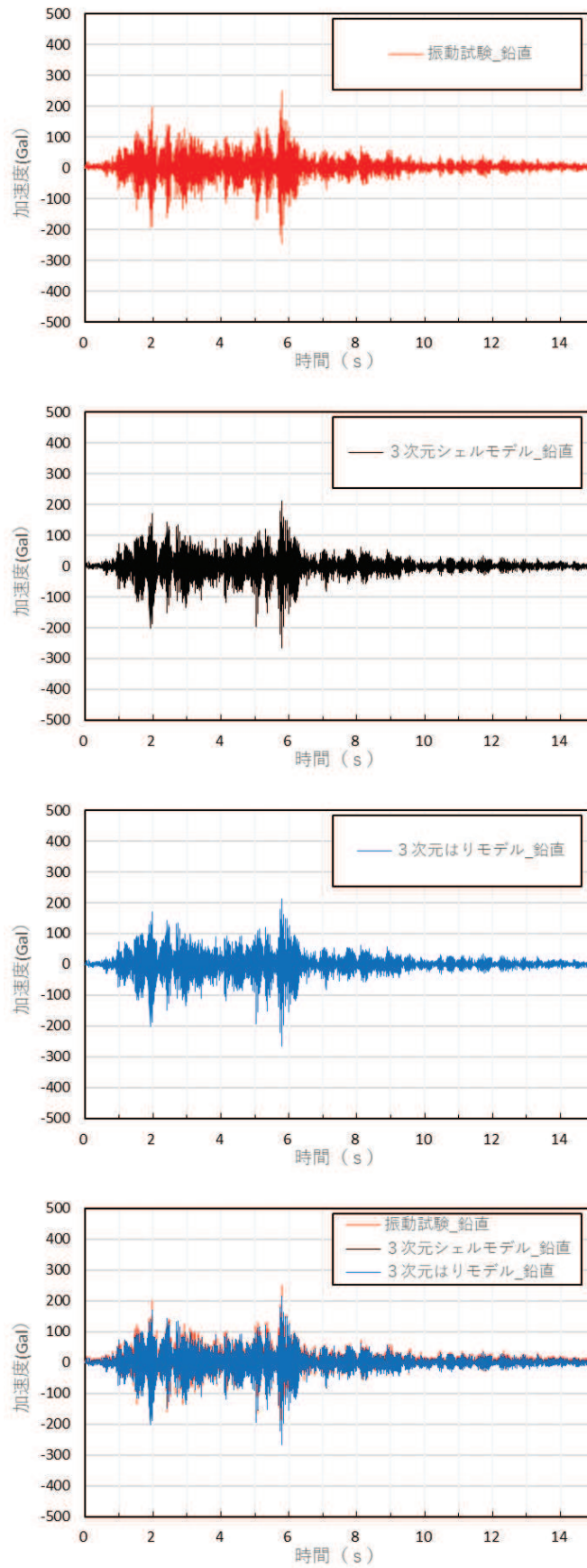


図 17 試験体下端の鉛直加速度時刻歴 (Z 方向) の比較
別紙 2-28

(2) 荷重時刻歴

NASTRAN で算定した有効質量を試験体のシェル要素に付加した 3 次元シェルモデルによる水平及び鉛直荷重時刻歴，振動試験で計測された水平及び鉛直荷重時刻歴の比較結果を図 18 と図 19 に示す。

3 次元シェルモデルによる水平及び鉛直荷重時刻歴は，振動試験で計測された水平及び鉛直荷重時刻歴とおおむね一致している。

3 次元シェルモデルによる水平及び鉛直荷重時刻歴，NASTRAN で算定した内部水の有効質量を Guyan 縮約法を用いて試験体のはり要素に付加した 3 次元はりモデルによる水平及び鉛直荷重時刻歴の比較結果を図 19 と図 20 に示す。

3 次元シェルモデルと 3 次元はりモデルによる水平及び鉛直荷重時刻歴の解析結果は，よく一致している。

3 次元はりモデルによる水平及び鉛直荷重時刻歴，振動試験で計測された水平及び鉛直荷重時刻歴の比較結果を図 21 と図 22 に示す。

3 次元はりモデルによる水平及び鉛直荷重時刻歴の解析結果は，3 次元シェルモデルと同様に振動試験で得られた水平及び鉛直荷重時刻歴とおおむね一致している。

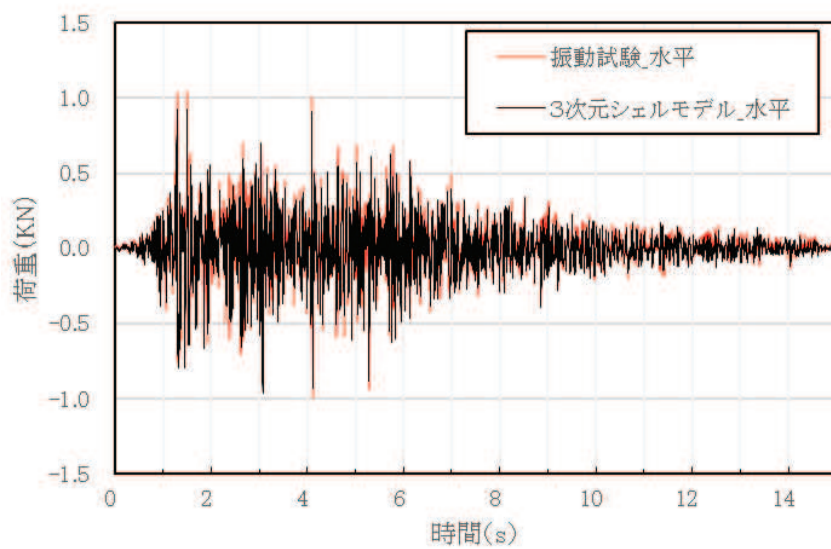
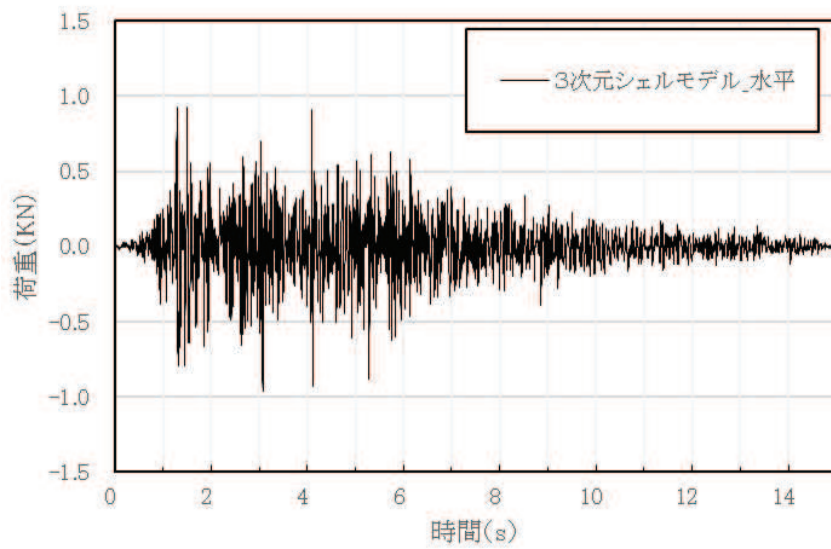
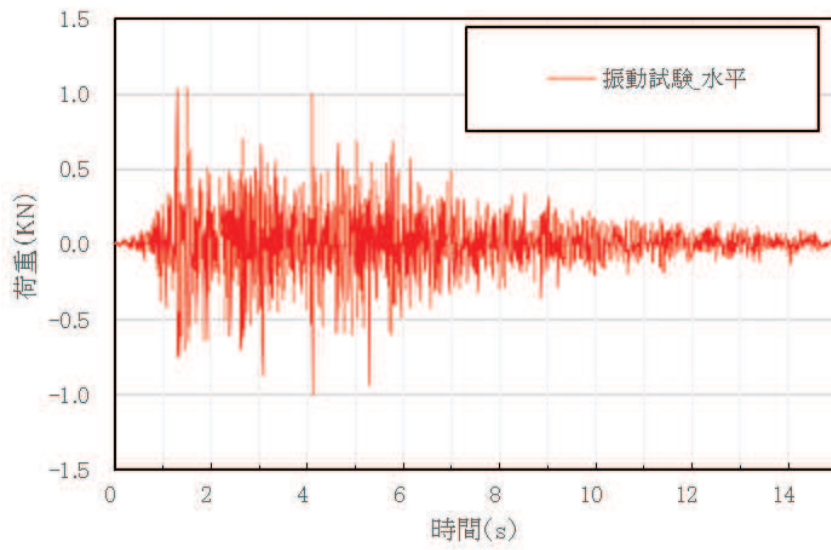


図 18 水平荷重時刻歴 (X 方向) の比較
(振動試験, 3次元シェルモデル)

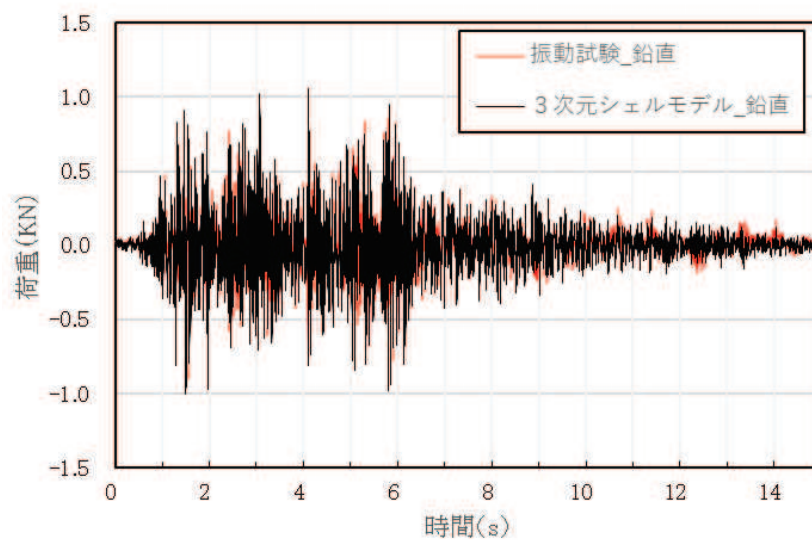
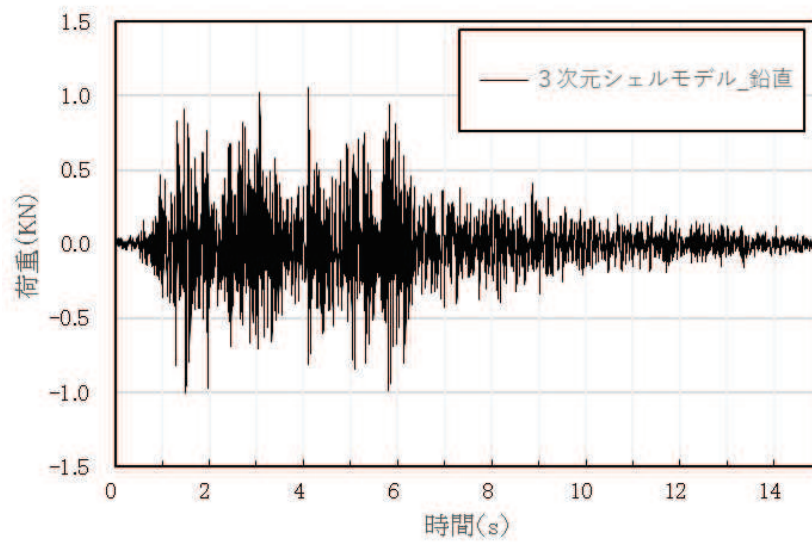
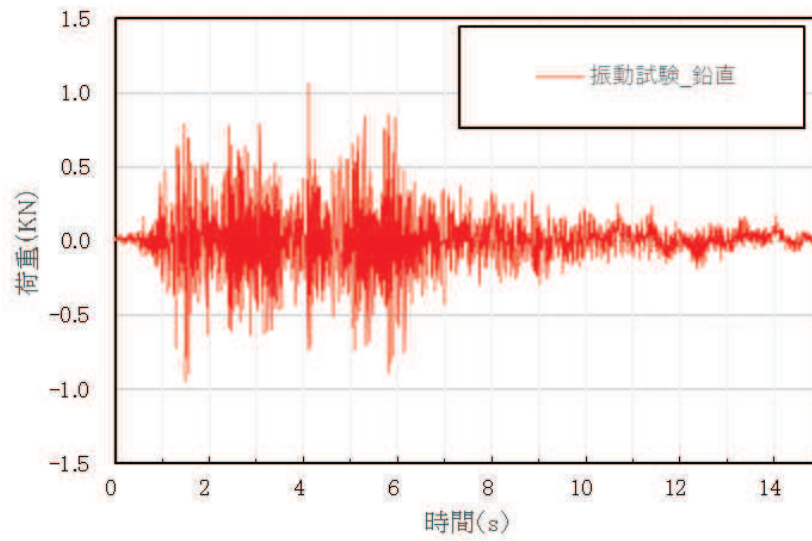


図 19 鉛直荷重時刻歴 (Z 方向) の比較
(振動試験, 3次元シェルモデル)

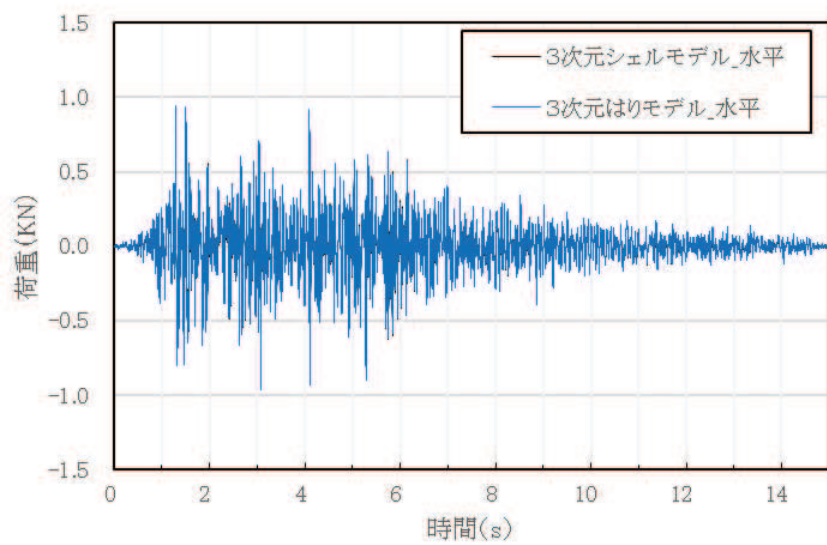
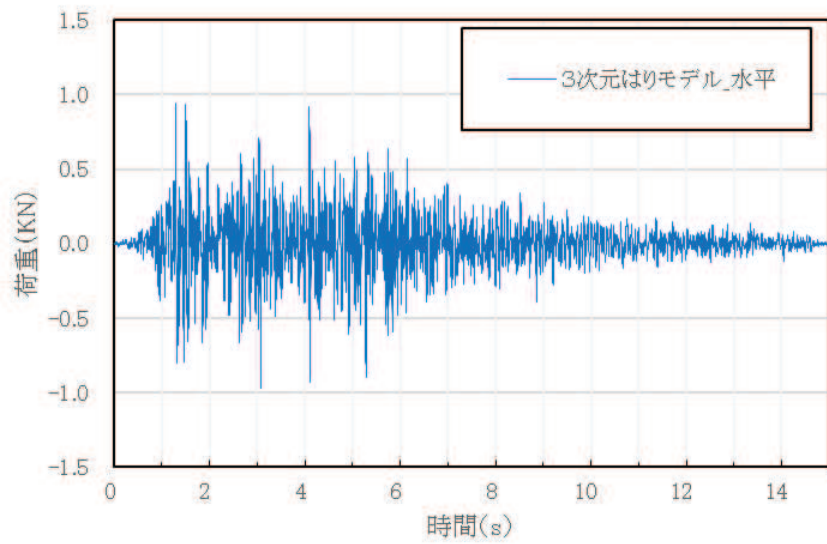
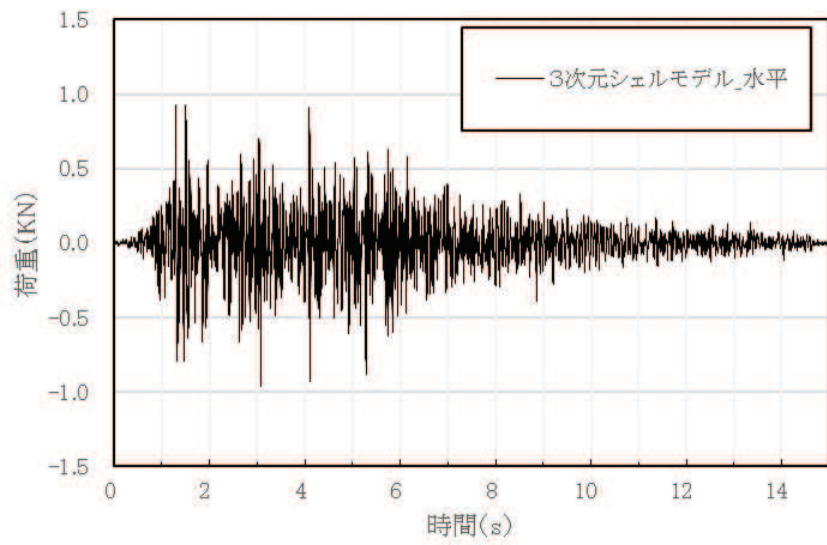


図 20 水平荷重時刻歴 (X 方向) の比較
 (3次元シェルモデル, 3次元はりモデル)
 別紙 2-32

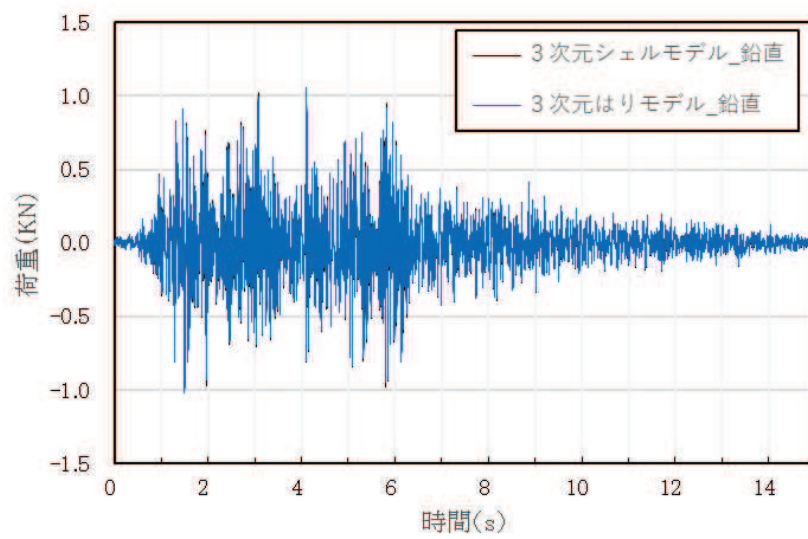
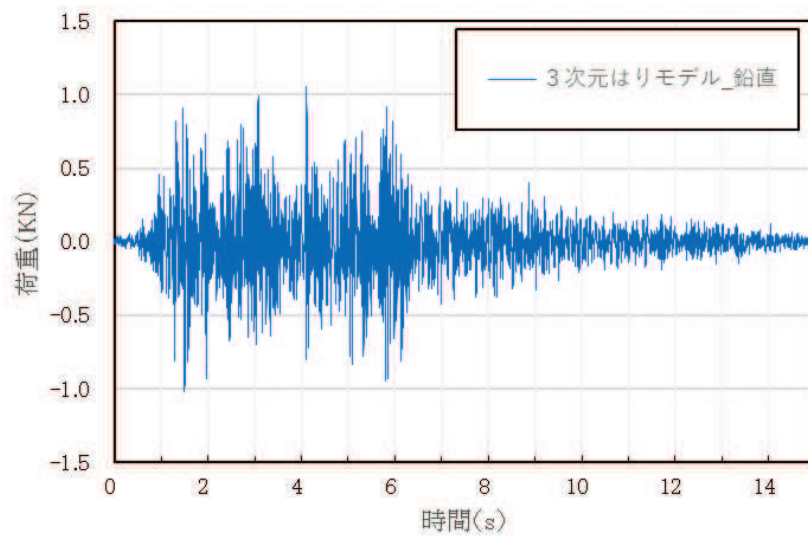
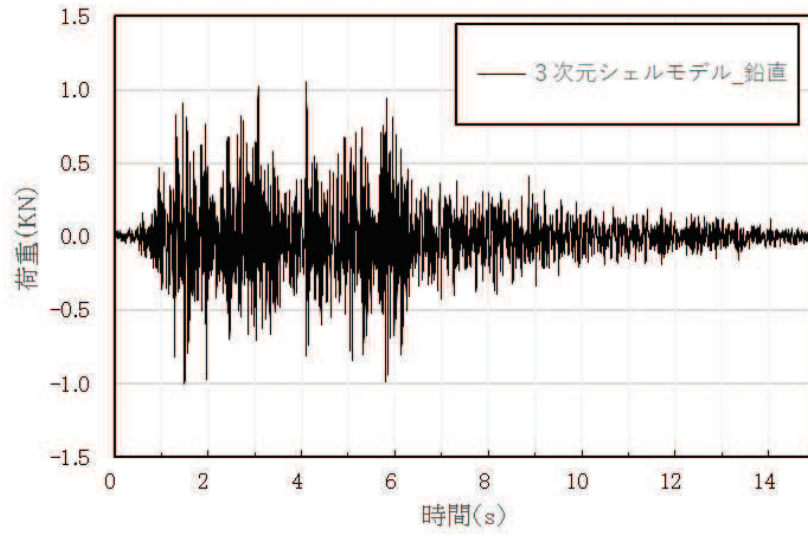


図 21 鉛直荷重時刻歴 (Z 方向) の比較

(3次元シェルモデル, 3次元はりモデル)

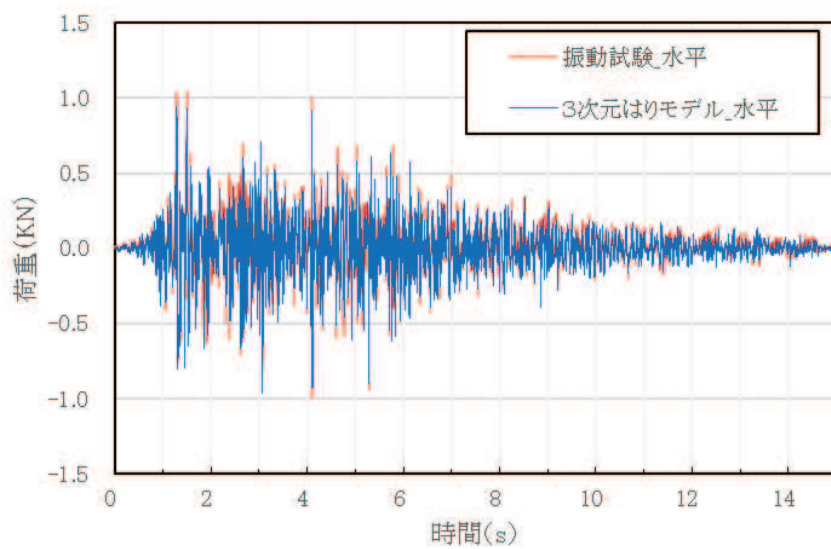
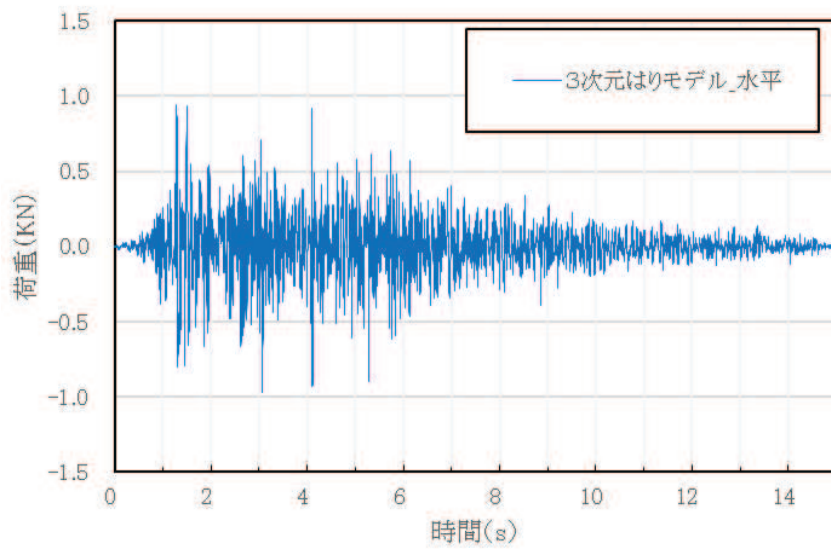
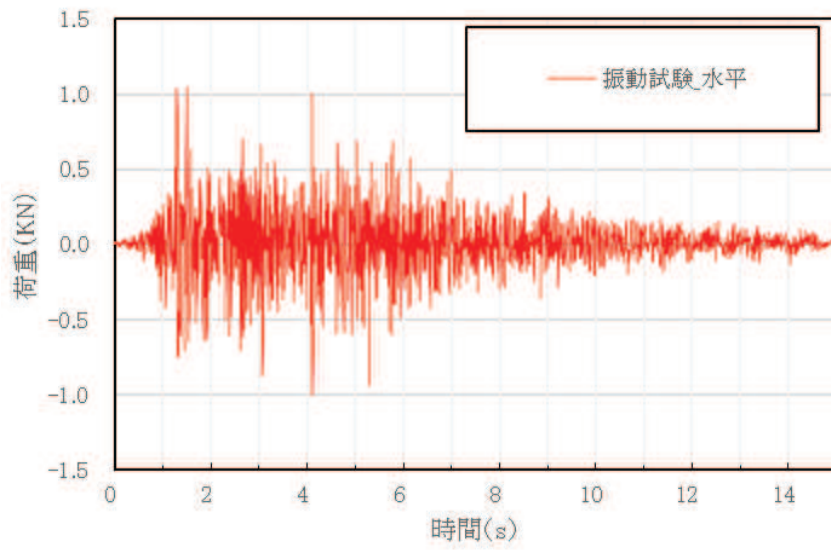


図 22 水平荷重時刻歴 (X 方向) の比較
(振動試験, 3次元はりモデル)

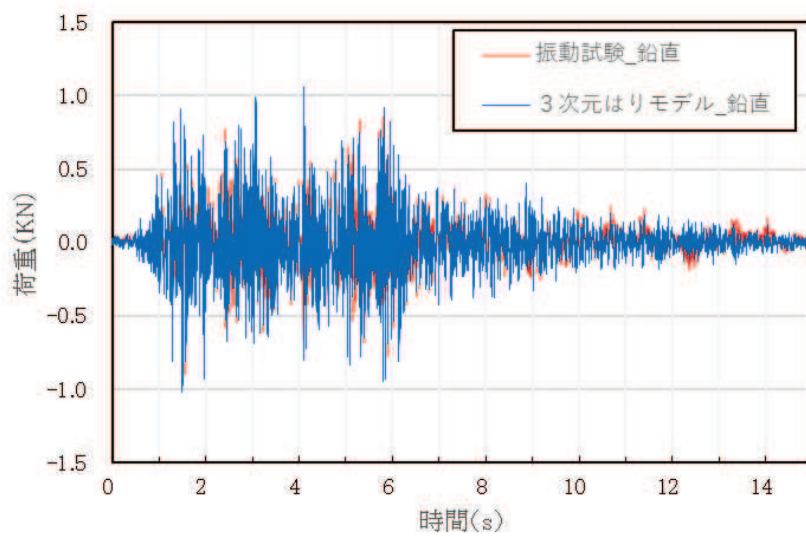
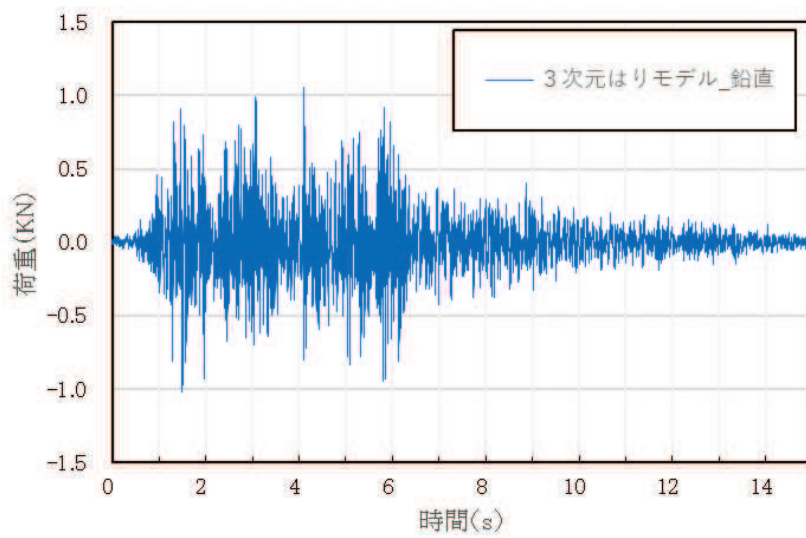
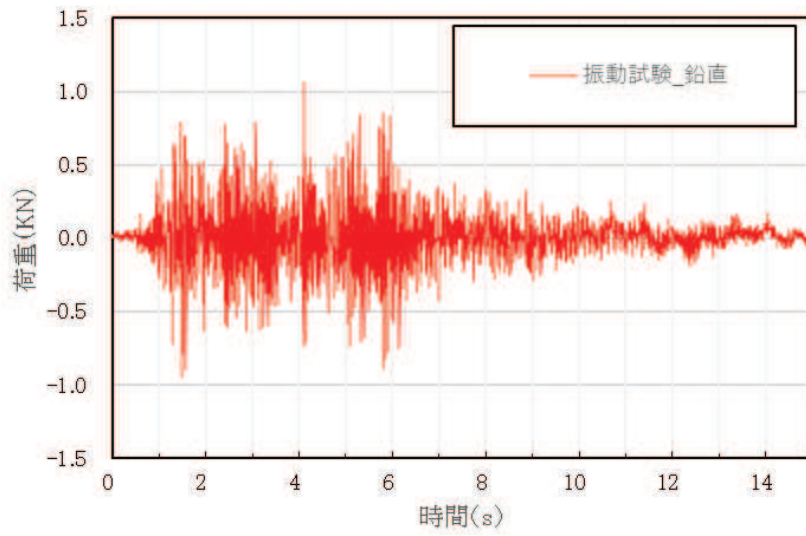


図 23 鉛直荷重時刻歴 (Z 方向) の比較
(振動試験, 3次元はりモデル)

(3) 最大荷重

振動試験で計測された水平荷重及び鉛直荷重の最大値、3次元シェルモデル及び3次元はりモデルによる水平荷重及び鉛直荷重の最大値の比較結果を表11に示す。

振動試験で計測された荷重の最大値に対して3次元シェルモデル及び3次元はりモデルによる荷重の最大値は、水平及び鉛直方向ともにおおむね一致している。また、3次元シェルモデル及び3次元はりモデルによる荷重の最大値は、水平及び鉛直方向ともによく一致している。

ここで、水平方向の荷重の最大値について、地震応答解析（3次元シェルモデル及び3次元はりモデル）が振動試験よりも僅かに小さくなった要因は、振動試験ではスロッシング荷重も含んでいることに対して、地震応答解析はスロッシング荷重を含まず、有効質量による地震荷重のみを評価するためと考えられる。なお、実機の耐震評価では、個別にスロッシング荷重を算出し、地震応答解析に考慮するため、これは実機の耐震評価に影響を与えるものではない。

表13 最大荷重の比較

		①振動試験	②3次元 シェルモデル	③3次元 はりモデル	荷重比		
					②/①	③/①	③/②
最大 荷重 (kN)	水平方向 (X方向)	1.05	0.97	0.97	0.92	0.92	1.00
	鉛直方向 (Z方向)	1.07	1.06	1.06	0.99	0.99	1.00

4.2.3 妥当性確認結果

4.2.2の解析結果から、振動試験と3次元シェルモデルの荷重時刻歴がよく一致しており、最大荷重もおおむね一致していることから、NASTRANによる鉛直方向の圧力は、妥当であることを確認した。また、3次元シェルモデルと3次元はりモデルの荷重時刻歴及び最大荷重がよく一致していることから、サプレッションチェンバに対する耐震評価におけるNASTRANのGuyan縮約法は、妥当であることを確認した。さらに、振動試験と3次元はりモデルの荷重時刻歴がよく一致しており、最大荷重もおおむね一致していることから、NASTRANによる鉛直方向の圧力及びGuyan縮約法は、妥当であることを確認した。

地震応答解析モデルに対するバルジングの影響検討

1. 概要

今回工認におけるサプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析では、重大事故時のサプレッションチェンバの水位上昇に伴う内部水質量の増加、基準地震動の増大等を踏まえ、より詳細に地震応答を把握するため、他の設備を含めた豊富な適用実績があり、女川 2 号機と同型炉で既に認可実績のある 3 次元はりモデルによる動的解析（スペクトルモーダル解析等）を適用する。

本資料では、内部水を有する容器の振動特性に係る既往知見を踏まえ、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析において、サプレッションチェンバ本体をはり要素にてモデル化することの適用性を説明する。

2. 既往知見と耐震設計の考え方

内部水を有する容器の振動特性に係る既往知見として、地震の揺れに伴うスロッシングの他、特に薄肉円筒容器であるたて置円筒容器の振動モードについては、バルジング（ビーム振動及びオーバー振動に分類される）が生じることが知られている。^{*1}

一方、サプレッションチェンバは、トーラス形状容器であり、明確な変形モードの分類・定義を確認できなかったことから、本資料では、表 1 のとおりたて置円筒容器の振動モードで定義されているバルジング及びスロッシングを参照し、ビーム振動、低次オーバー振動及び高次オーバー振動と分類した。

サプレッションチェンバの耐震設計では、このバルジングに対して、サプレッションチェンバ本体（大円）のビーム振動については、3 次元はりモデルを用いた地震応答解析により地震荷重を考慮し、サプレッションチェンバ本体（小円）のオーバー振動については、サプレッションチェンバ内部に設置した 64 枚の強め輪により断面変形を抑制する設計としている。

また、サプレッションチェンバ内部水のスロッシングについては、地震によるスロッシング荷重を流体解析にて考慮する設計である。（表 1、図 1 参照）

*1 振動試験による円筒形貯水タンクの耐震性評価—動液圧分布の入力加速度依存性について—, INSS JOURNAL, Vol.11, pp.117-128(2004)

表 1 各振動モードに対するサプレッションチェンバの耐震設計

振動モード		振動の特徴	サプレッションチェンバの耐震設計
バルジ ング	ビーム 振動 (1次モード)	タンクがあたかも梁 のように振動	サプレッションチェンバ（大円）につい て、サプレッションチェンバ内部水を有 効質量として付加し、3次元はりモデル を用いた地震応答解析にて地震荷重を評 価する。
	低次オーバル 振動	2次モード以降で花 びら状の変形を伴わ ない振動モード	サプレッションチェンバ内部に設置した 強め輪（合計64枚）にて、サプレッショ ンチェンバ（小円）の断面変形を抑制す る。
	高次オーバル 振動	2次モード以降で花 びら状に変形する振 動モード	
スロッシング		大きな液面変動を伴 い揺動	地震によるスロッシング荷重を評価す る。

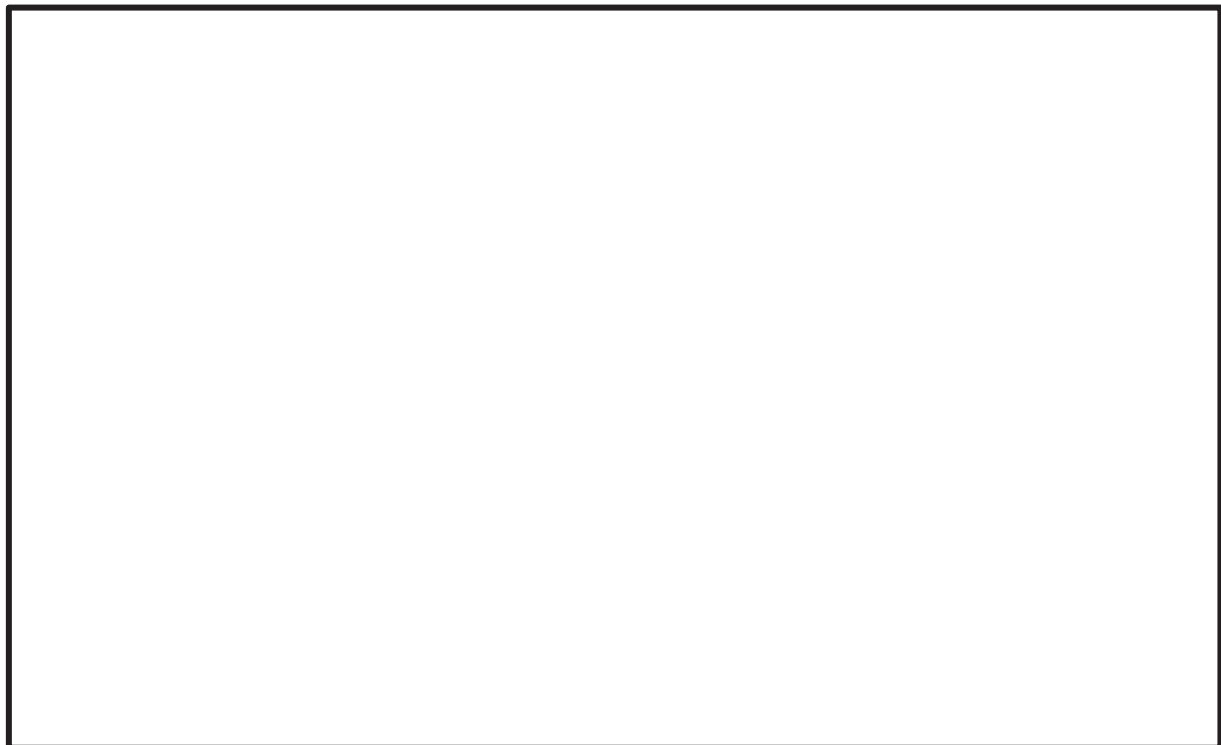


図 1 サプレッションチェンバ断面図

3. バルジングに対する影響検討

3.1 検討方針

前項で既往知見を踏まえた振動モードの分類の整理結果を参考に、サプレッションチェンバの容器構造、強め輪及び内部水がビーム振動及びオーバル振動に与える影響を検討する。

影響検討では、サプレッションチェンバの断面を簡便に横置円筒容器に模擬した3次元シェルモデルを用いて、サプレッションチェンバ内部水に対する圧力分布の特徴を考慮した上で、応答解析を行い、振動モード、強め輪の効果及び内部水の影響を定量的に評価する。

3.2 影響検討モデル

地震時のサプレッションチェンバ内部水の圧力分布は、汎用流体解析コード OpenFOAM で算出した圧力コンター図によれば、各セグメントの範囲で極端な圧力変動が認められないことから、1ベイにおける内部水の圧力による振動影響を考慮することで、サプレッションチェンバ全体のオーバル振動の傾向を把握できると考えられる。(図2参照)

このため、影響検討に用いるサプレッションチェンバのモデル化範囲は、評価対象(1ベイ)に両側の1ベイを加えた3ベイの横置円筒容器として、モデル境界部の影響を除外し、シェル要素でモデル化する。(図3, 図4, 図5参照)

なお、強め輪は、建設時の設置条件にてモデル化した。

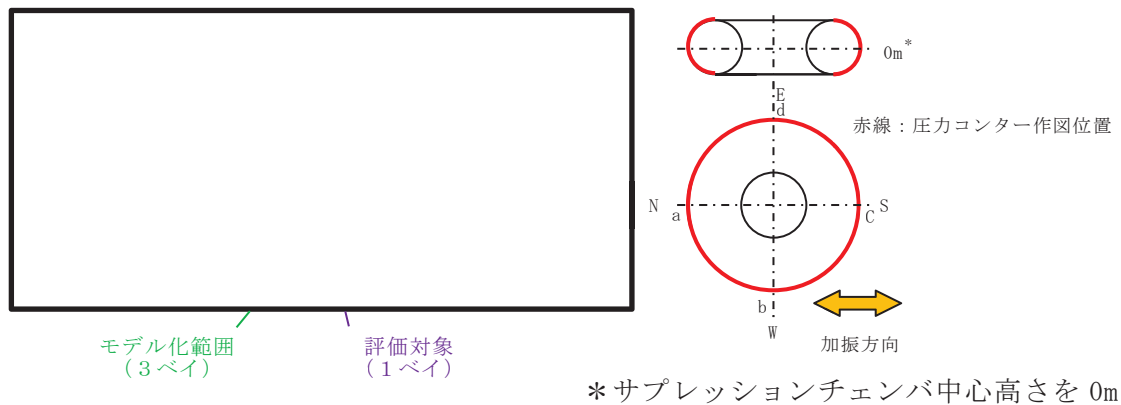


図2 サプレッションチェンバの圧力コンター図*2

(耐震解析用重大事故等水位, $S_s - D_1$ (水平方向), 最大圧力発生時点)

*2 女川原子力発電所第2号炉審査資料「女川原子力発電所2号炉 設計基準対象施設について 4条 地震による損傷の防止 別紙—4 サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の変更について 参考7 参考7-7図」(02-NP-0272(改114)(令和2年2月7日))を引用



図3 サプレッションチェンバ断面図（平面）

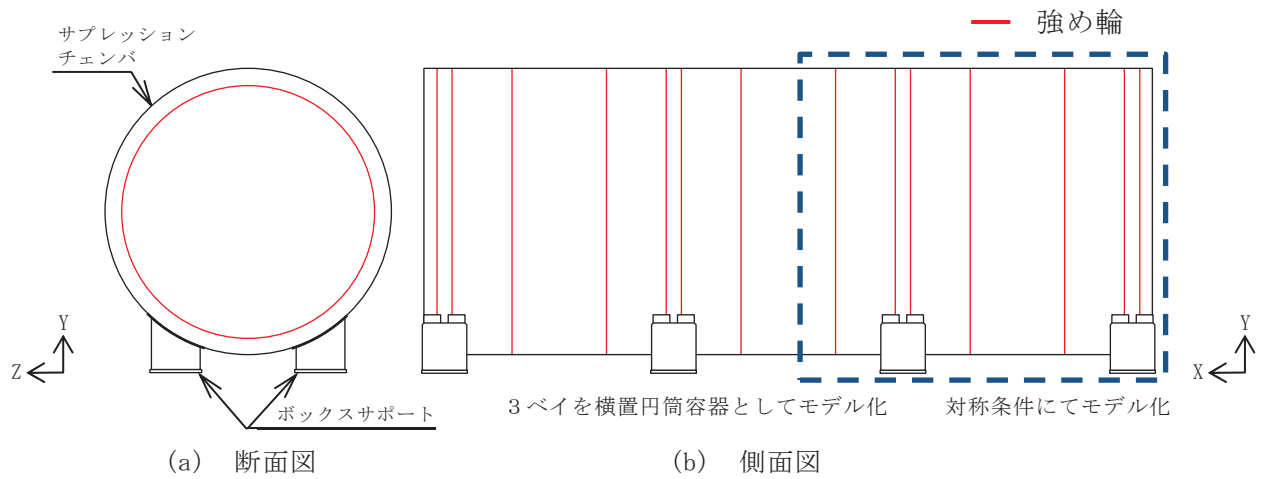


図4 解析モデル概要図

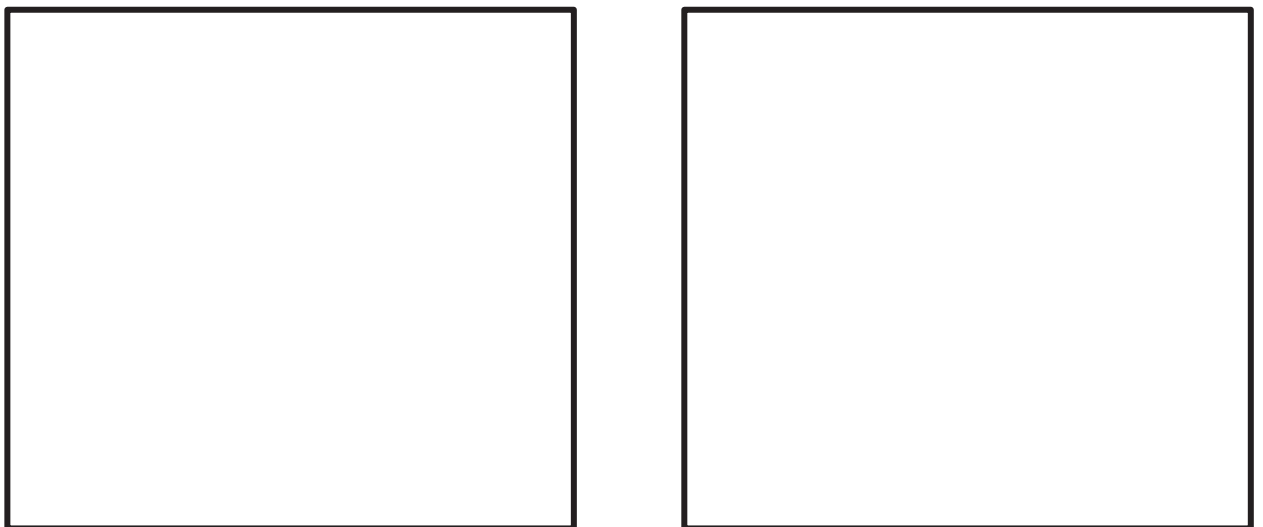


図5 解析モデル図（3 ベイを横置円筒容器として対称条件にてモデル化）

3.3 影響検討

影響検討は、強め輪及び内部水の有無をパラメータとして、表 2 に示す 4 つの検討ケースとする。なお、内部水の扱いは、サプレッションチェンバの地震応答解析と同様、NASTRAN により有効質量を算出し、NASTRAN の機能を用いてシェル要素に付加する。なお、強め輪は建設時の設置条件にてモデル化した。

各検討ケースに対する固有値解析により振動特性を確認するとともに、入力特性による影響を除外するため全周期帯で 1G の応答加速度 (1G フラットスペクトル) を用いたスペクトルモーダル解析によりオーバル振動 (花びら状の変形) が応力に与える影響を確認する。

表 2 バルジングに対する影響検討

検討 ケース	モデル化条件				解析方法	検討内容
	サプレッション チェンバ	ボックス サポート	強め輪	内部水 (有効質量)		
1	3 ベイを横置円筒形容器として 3 次元シェル要素でモデル化	実機 模擬	なし	なし	<ul style="list-style-type: none"> ・ 応答解析は、NASTRAN を用いたスペクトルモーダル解析を実施 ・ 内部水の有効質量は NASTRAN の仮想質量法により算出 	横置円筒容器の振動モードを確認する
2			あり模擬	なし		ケース 1 との比較により、強め輪の効果を確認する
3			なし	考慮		ケース 1 との比較により、内部水の影響を確認する
4			あり模擬	考慮		振動モード、強め輪の効果及び内部水の影響を確認する

3.4 影響検討結果

3.4.1 振動特性

各検討ケースに対する固有値の解析結果について、1次モード(ビーム振動)、2次、3次モード(低次オーバル振動)及び高次オーバル振動(花びら状の変形)とそれに対する固有振動数を表3に示す。

各検討ケースにおけるビーム振動及び低次オーバル振動のモード変形は、強め輪及び内部水の有無によらず、各検討ケースともに同様な傾向にある。

強め輪の効果については、検討ケース1と検討ケース2、検討ケース3と検討ケース4の比較において、強め輪がある場合のビーム振動及び低次オーバル振動の固有振動数は、内部水の有無によらず、強め輪がない場合に比べて20倍程度高い傾向となっている。また、強め輪がある場合は、その効果によって高次オーバル振動(花びら状の変形)が20Hz以上まで発生していない。一方、強め輪がない場合は、高次オーバル振動(花びら状の変形)は認められなかったが、大きな応力を発生させる振動モードが数多く発生している。

内部水の影響については、検討ケース1と検討ケース3、検討ケース2と検討ケース4の比較において、内部水の影響によってビーム振動及び低次オーバル振動の固有振動数は、強め輪の有無によらず、内部水がない場合よりも低くなり、花びら状に変形する振動モードでは、容器下部に変形が集中する傾向にある。

なお、表3の振動モード図は振動特性を把握するため大きな倍率表示としているが、最大変位を100mmとした検討ケース4の振動モード図を表4に示す。強め輪の効果によって、円筒部の変形が抑制されていることが分かる。

3.4.2 発生応力

各検討ケースに対して水平方向に1Gフラットスペクトルを入力したスペクトルモーダル解析による発生応力と鉛直方向に1Gフラットスペクトルを入力したスペクトルモーダル解析による発生応力を表5に示す。

強め輪がない場合(検討ケース1及び3)の応力評価については、高次オーバル振動(花びら状の変形)が30Hz~40Hz(おおむね100次のモードまで確認)までに確認されなかったため、モードの組合せを30Hz~40Hzまでを考慮した。また、強め輪がある場合(検討ケース2及び4)の応力評価では、モードの組合せを20Hzまでとする場合及び高次オーバル振動(花びら状の変形)を含む振動数までとする場合を考慮した。

発生応力の評価結果、強め輪がない場合は、内部水の有無によらず、水平及び鉛直方向ともに高い応力が発生している。一方、強め輪がある場合には、内部水の有無によらず、強め輪の効果によって水平及び鉛直方向の発生応力が大きく低減されることを確認した。なお、高次オーバル振動(花びら状の変形)の有無によって、発生応力が変わらないことから、高次オーバル振動(花びら状の変形)の発生応力に与える影響は、小さい。

また、表6に示す通り、成分別応力(周方向応力、軸方向応力、せん断応力)の通り、各方向の応力割合がほとんど変わらないことから、強め輪の効果で全体的な変形が抑制されることにより発生応力が大きく低減されることとなったと考えられる。

表7に示す通り，最大応力発生部位は，ボックスサポート取付部であり，その最大応力を踏まえると，支配的な振動モードは，1次モード（水平方向）及び2次モード（鉛直方向）であり，小円断面内における変形（3次モード）による応力への寄与は小さい。

最大応力発生部位がボックスサポート取付部となる結果は，本文4.2.4に示すシェルモデルとの傾向と一致している。

バルジングの影響としては，発生応力に対する支配的な振動モードである1次モード（水平方向）及び2次モード（鉛直方向）をバルジングの影響として確認した。

表 3 振動特性の比較結果

検討ケース		1*1	2*1	3*1	4*2
モデル化条件	強め輪	なし	あり	なし	あり
	内部水	なし	なし	考慮	考慮
振動モード 固有振動数	1次モード (ビーム振動)	[Large empty box for comparison results]			
	2次モード (低次オーバール振動)				
	3次モード (低次オーバール振動)				
	高次オーバール振動 (花びら状の変形)				

注記*1：各モード図は、最大変位を 1m として示し，着色は変位コンターを表す。

表 4 振動モード図 (検討ケース 4)

振動モード	振動モード図 (最大変位 100mm*)		
	鳥瞰図		断面図
	着色 : 変位コンター	青色 : 変形前 赤色 : 変形後	青色 : 変形前 赤色 : 変形後
1次モード			
2次モード			
3次モード			

注記* : 水平方向の1Gフラットスペクトルを用いた応答変位が 40 mm程度であることを踏まえ、最大変位を 100mm として表記した。

表 5 発生応力の比較結果

検討ケース			1	2	3	4
モデル化 条件	強め輪		なし	あり	なし	あり
	内部水		なし	なし	考慮	考慮
発生応力*1 【MPa】	水平方向	0~20Hz*2	1767	36	5104	105
		0~*2, 3	1767	36	5104	105
	鉛直方向	0~20Hz*2	445	10	2129	46
		0~*2, 3	445	10	2129	46

- *1 1Gフラットスペクトルを用いたスペクトルモーダル解析によるミーゼス応力
 *2 応力算出時に考慮する振動数の範囲
 *3 強め輪がある場合：高次オーバル振動（花びら状の変形）を含む振動数（40Hz）
 （内部水なし： Hz， 内部水考慮： Hz）
 強め輪がない場合：内部水考慮：30Hz，内部水なし：40Hz

表 6 最大発生応力の成分別応力

検討 ケース	3				4			
加振 方向	強め輪モデル化無し				強め輪モデル化有り			
	ミーゼ ス応力 (MPa)	成分別応力 (S/C 外面)			ミーゼ ス応力 (MPa)	成分別応力 (S/C 外面)		
		周方向 σ_t (MPa)	軸方向 σ_l (MPa)	せん断 応力 τ (MPa)		周方向 σ_t (MPa)	軸方向 σ_l (MPa)	せん断 応力 τ (MPa)
水平 方向	5104	5844	2297	127	105	111	40	18
鉛直 方向	2129	2440	982	60	46	42	20	10

表 7 応力コンター図 (検討ケース 4)

振動モード	応力コンター図	
	水平方向の応答解析結果 (1 Gフラットスペクトルを入力)	鉛直方向の応答解析結果 (1 Gフラットスペクトルを入力)
1次モード		
2次モード		
3次モード		

注記* : サプレッションチェーンバ本体の範囲

別紙 3-11

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4. 地震応答解析に係るはりモデルの適用性

前項のバルジングに対する影響検討の結果、サプレッションチェンバ内部に設置された強め輪の効果により、サプレッションチェンバ本体（小円）の剛性が向上して固有振動数が高くなって変形が抑制されるため、地震による発生応力が低減されること及び1次モード（水平方向）及び2次モード（鉛直方向）が支配的な振動モードとなることを確認した。また、サプレッションチェンバの高次オーバル振動（花びら状の変形）の発生応力に与える影響が小さいことを確認したことから、サプレッションチェンバ本体のモデル化としては、はり要素でモデル化することの適用性があると判断した。

上記検討は、建設時の設置条件で強め輪の効果を確認したものであるが、今回工認では、重大事故時のサプレッションチェンバの水位上昇に伴う内部水質量の増加、基準地震動の増大等を踏まえ、サプレッションチェンバ本体（小円）の更なる剛性向上を目的とした強め輪の補強対策を実施する。

また、サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデルの設定にあたっては、より詳細に地震応答を把握するため、バルジングの影響結果として発生応力に対して支配的な振動モードである1次モード及び2次モードを精緻に表現するため、それぞれの変形に対する剛性を考慮したばね剛性（並進、回転）を考慮したばね要素を3次元はりモデルのボックスサポート取付部に付加する（詳細は別紙4参照）。

サプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性の設定

1. はじめに

今回工認で採用したサプレッションチェンバの地震応答解析モデルは、サプレッションチェンバ本体とボックスサポートをはり要素で模擬し、サプレッションチェンバ本体とサプレッションチェンバのボックスサポート取付部の**局部変形による**ばね剛性については、**サプレッションチェンバのボックスサポート取付部に**ばね要素で模擬することとしている。また、**バルジング影響検討結果（別紙 3）を踏まえ、発生応力に対して支配的な振動モードである 1 次モード（水平方向）及び 2 次モード（鉛直方向）を模擬するためのサプレッションチェンバ小円の断面変形の剛性もサプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね要素に模擬する。**

本資料は、**上記を踏まえた**ばね要素の剛性（ばね剛性）の設定方法についてまとめたものである。

2. ばね要素について

サプレッションチェンバは、サプレッションチェンバ大円の内側と外側で 1 組のボックスサポートが 16 組で支持する構造となっている。このボックスサポート取付部の 1 ベイ部分を切り出して、その構造的な質量と剛性の関係を模式的に表した図を図 1 に示す。

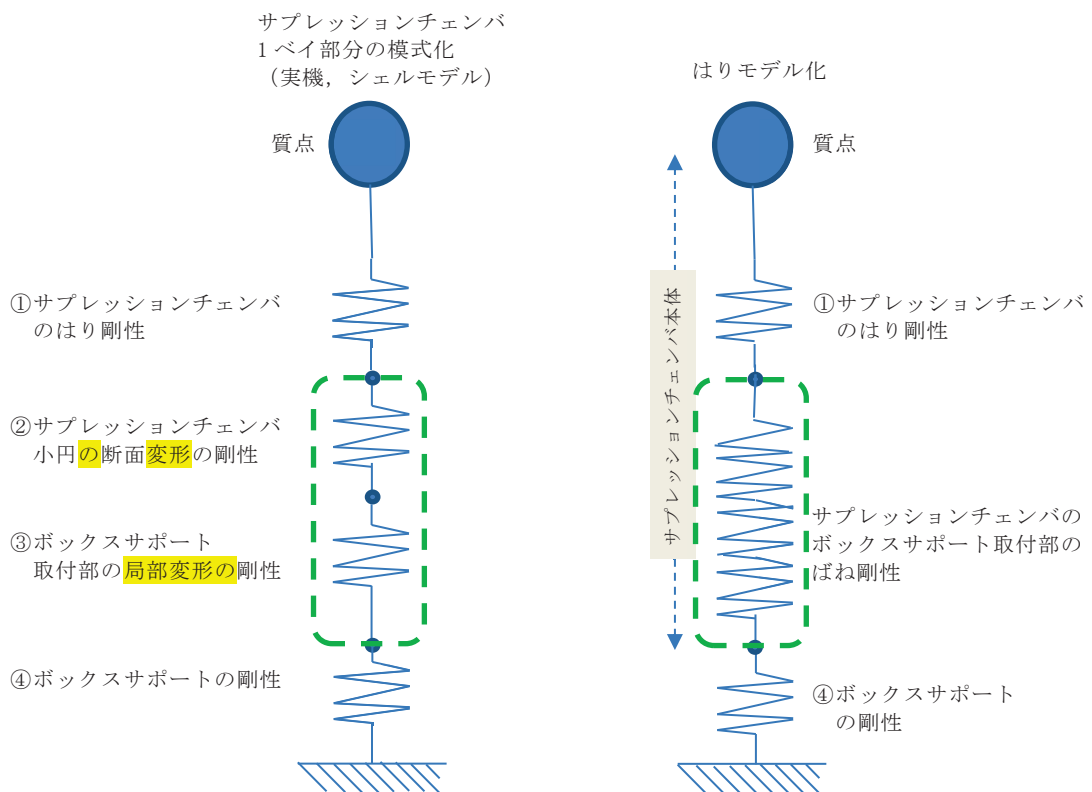


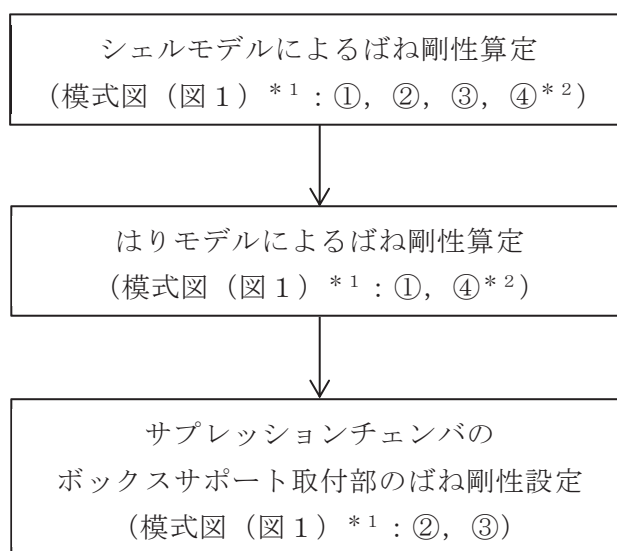
図 1 サプレッションチェンバとボックスサポートの質量・剛性模式図

サプレッションチェンバの剛性は、断面変化なしの部分のはり剛性①とサプレッションチェンバ小円の断面変形による剛性②に分けて考えることができる。また、サプレッションチェンバのボックスサポート取付部は、はり要素のみでモデル化することが難しい複雑な構造であり局部的に変形するため、これをサプレッションチェンバのボックスサポート取付部の局部変形の剛性③とすると、サプレッションチェンバの断面変化なしの部分のはり剛性①、ボックスサポートの剛性④をはり要素とし、これを接続する部分（②及び③）をばね要素としてモデル化すれば、実際の挙動に近い地震応答値を求めることができる。サプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性は、この②及び③に相当する部分を模擬することを目的としている。

なお、ボックスサポートはサプレッションチェンバの胴エビ継手部に配置されており、胴エビ継手部両側のトラス部の中心軸が交わっているため、ボックスサポート取付部のサプレッションチェンバの断面変形の態様は複雑である。このことから、ばね要素は、並進3方向及び回転3方向の合計6成分すべてについて考慮することとした。

3. サプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性の設定手順

ばね剛性の設定にあたっては、サプレッションチェンバおよびボックスサポートをシェル要素でモデル化してサプレッションチェンバ及びボックスサポート全体の剛性（前述の模式図でいえば①，②，③，④）を評価し、おなじ範囲をはり要素でモデル化して評価した剛性（前述の模式図でいえば①，④）を差し引くことによって行うこととした。設定手順を図2に示す。



注記*1：各番号は、以下の剛性を表すものである。

- ①はり剛性
- ②サプレッションチェンバ小円の断面変形の剛性
- ③サプレッションチェンバのボックスサポート取付部の局部変形の剛性
- ④ボックスサポートの剛性

*2：剛性算定項目に応じて④の考慮の有無が異なる

図2 サプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性の設定手順

4. シェルモデルによるばね剛性算定

(1) シェルモデルについて

評価対象となるボックスサポート1組とボックスサポートが取り付くサブプレッションチェンバをモデル化するにあたり、サブプレッションチェンバ円筒部16セグメントのエビ継手部にボックスサポートがサブプレッションチェンバ大円の内側と外側に1組配置されている対称構造であることを踏まえ、モデル化の範囲は、評価対象のボックスサポート1組を中心として、その両側ボックスサポートまでとし、シェル要素でモデル化する。両端のエビ継手部の拘束条件は対称条件とし、評価対象ボックスサポートの両隣接ボックスサポート定着部は完全拘束条件として、評価対象のボックスサポートに与える荷重とそこから得られる変位から、ばね剛性を算定することとした。モデル図を図3に示す。

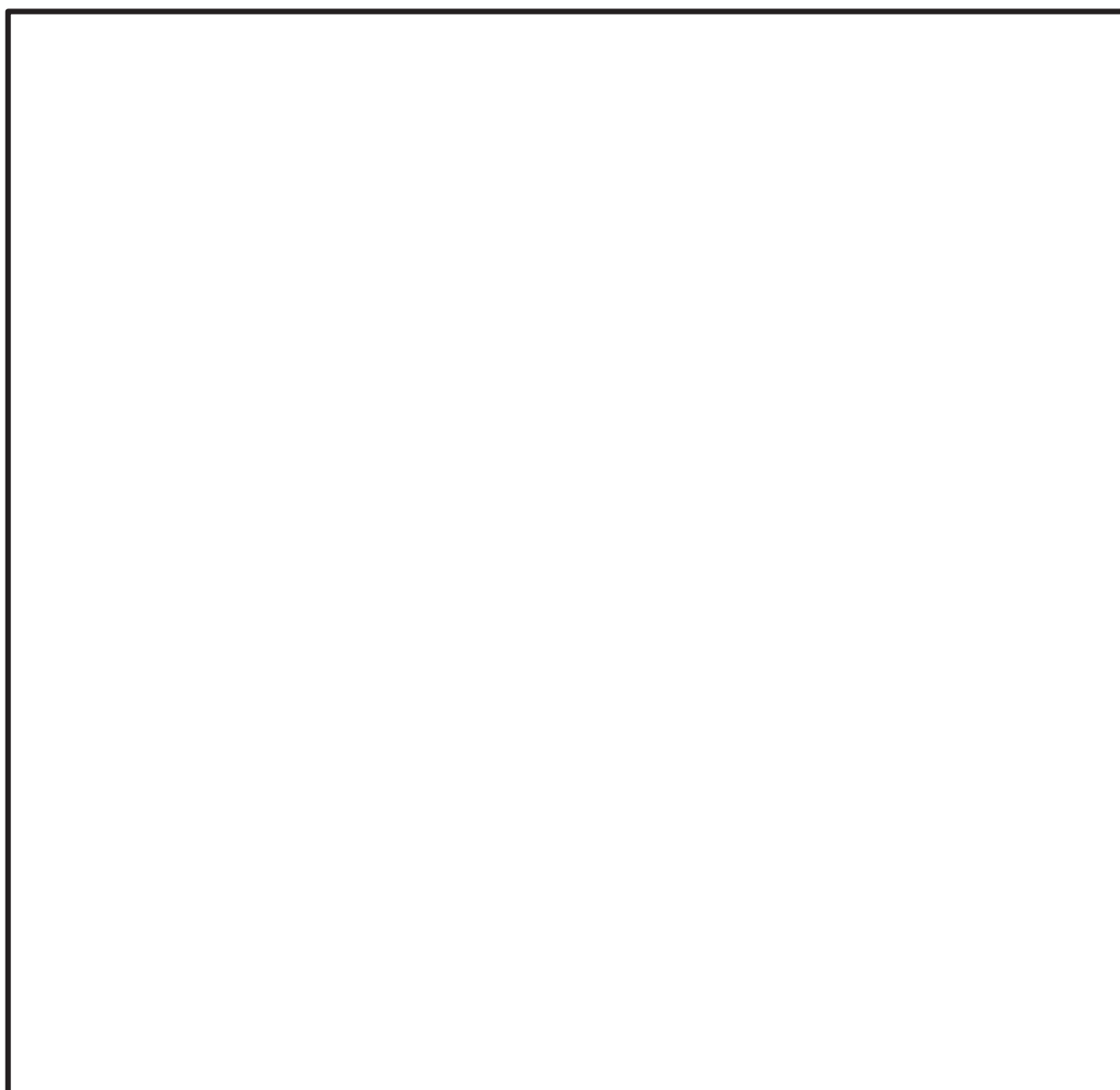


図3 サプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性算定用シェルモデル

(2) ばね剛性算定方法

ばね剛性算定のための具体的な方法を以下に説明する。

まず、並進ばね剛性のうち、サプレッションチェンバ大円半径軸およびサプレッションチェンバ大円周軸の並進ばね剛性については、サプレッションチェンバ本体取付部（ボックスサポート上端面）に設定した剛体要素の中心に荷重を負荷し、得られた剛体要素四隅の変位の平均値と荷重の関係から、ばね剛性を算定した。

なお、サプレッションチェンバ大円半径軸およびサプレッションチェンバ大円周軸の並進ばね剛性算定にあたってボックスサポート下端面に設定した剛体要素の中心に荷重を負荷した場合、サプレッションチェンバのボックスサポート取付部の並進変形よりも局部回転による変位が大きく算定されるため、より適切に並進変形による変位を算定するようにサプレッションチェンバ本体取付部（ボックスサポート上端面）に設定した剛体要素の中心に荷重を負荷している。この場合、図1の④ボックスサポートの剛性が考慮されないこととなるものの、シェルモデル及びはりモデルの両者の荷重の負荷位置を合わせるため、④の剛性を考慮されないことによるばね剛性算定に影響はない。

上下軸の並進ばね剛性及び回転ばね剛性については、ボックスサポート下端面に設定した剛体要素の中心に荷重を負荷し、上下軸の並進ばね剛性については、得られた剛体要素四隅の変位の平均値と荷重の関係から、ばね剛性を算出した。回転ばね剛性については、荷重負荷前後での荷重負荷に用いた剛体要素四隅の回転角の平均値と荷重の関係から、ばね剛性を算出した。各軸のばね剛性算出方法を図4に示す。

ばねの成分		部分シェルモデルの荷重、モーメント作用点	ばね定数の算出方法
並進	大円半径軸 (X)		
	大円円周軸 (Y)		
	上下軸 (Z)		
回転	大円半径軸回り (X)		
	大円円周軸回り (Y)		
	上下軸回り (Z)		

注記* : 並進方向 (大円半径軸及び大円円周軸) では,

図 4 シェルモデルによる各軸のばね剛性算定方法

5. はりモデルによるばね剛性算定

(1) はりモデルについて

4. で説明したシェルモデルと同じ範囲でモデル化を行った。境界条件もシェルモデルと同様とした。モデル図を図 5 に示す。



図 5 ばね剛性算定用はりモデル

(2) ばね剛性算定方法

ばね剛性算定のための具体的な方法を以下に説明する。

まず、並進ばね剛性のうち、サプレッションチェンバ大円半径軸およびサプレッションチェンバ大円周軸の並進ばね剛性については、ボックスサポート上端面（節点 に荷重を負荷し、変位についても荷重負荷点と同じボックスサポート上端面を用いるものとし、それら荷重と変位の関係から、ばね剛性を算定した。

上下軸の並進ばね剛性及び回転ばね剛性については、ボックスサポート下端面（節点 に荷重を負荷した。上下軸並進ばね剛性を変位については、荷重負荷に用いたボックスサポート下端面の変位を用いてばね剛性を算出した。回転ばね剛性については、ボックスサポートの上端面（サプレッションチェンバ取付面）の変位を用いてばね剛性を算出した。各軸のばね剛性算出方法を図 6 に示す。

ばねの成分		部分はりモデルの荷重、モーメント作用点	ばね定数の算出方法
並進	大円半径軸 (X)		
	大円円周軸 (Y)		
	上下軸 (Z)		
回転	大円半径軸回り (X)		
	大円円周軸回り (Y)		
	上下軸回り (Z)		

図 6 はりモデルによる各軸のばね剛性算定方法

6. サプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性設定

4. 及び 5. の方法で算定したばね剛性から、サプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性（以下、 K とする）を設定した。3. で述べたとおり、シェルモデルにより算定したばね剛性（以下、 KS とする）は、 K とはりモデルにより算定したばね剛性（以下、 KB とする）を組み合わせた剛性と解釈できる。それを式で表すと以下の通りとなる。

$$\frac{1}{KS} = \frac{1}{K} + \frac{1}{KB}$$

この式から K を求めると以下の通りとなる。

$$K = \frac{KS \times KB}{KB - KS}$$

7. サプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性設定結果

4. ～6. の結果を表 1 に示す。既工認実績があるサプレッションチェンバ地震応答解析モデルにおいては、サプレッションチェンバ本体をはり要素でモデル化し、ボックスサポート位置を大円半径方向を除き拘束していた。今回工認のサプレッションチェンバ地震応答解析モデルでは、表 1 のサプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性を設定することにより、従来モデルに比べ、振動モードが精緻化されたものとする。

表1 サプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性設定結果

ばねの方向		内側ボックスサポート 又は 外側ボックスサポート	ばね定数（並進：N/mm，回転：N・mm/rad）			
			はりモデル KB (図1 ①, ④) *1	シェルモデル KS (図1 ①, ②, ③, ④) *1	比率 KB/KS	ボックスサポート 取付部のばね剛性 K (図1 ②, ③) *1
並進	大円半径 方向	内側				
		外側				
	大円円周 方向	内側				
		外側				
	上下方向	内側				
		外側				
回転	大円半径 軸回り	内側				
		外側				
	大円円周 軸回り	内側				
		外側				
	上下軸回 り	内側				
		外側				

注記 *1：各番号は、以下の剛性を表すものである。

- ①はり剛性
- ②サプレッションチェンバ小円断面の剛性
- ③サプレッションチェンバのボックスサポート取付部の剛性
- ④ボックスサポートの剛性

*2：式に則り K を算出すると、 という値となるが、これは、当該ばねについては、KB と KS との比率が約 であり、両者が同等の値となっているため、誤差によって生じているものである。当該ばねについては、はりモデルでもばね剛性が表現できているものと判断し、解析の設定としては とした。

8. ボックスサポート取付部の局部変形の影響

本項では、図1に示すボックスサポート取付部の局部変形の影響を確認するため、ボックスサポート取付部の局部変形の剛性（図1の③の剛性）を算定し、ボックスサポート取付部の剛性をサプレッションチェンバ（図1の①の剛性）及びボックスサポート（図1の④の剛性）の剛性に考慮した地震応答解析モデルⅠ（図1の①、③、④の剛性を考慮）とサプレッションチェンバ（図1の①の剛性）及びボックスサポート（図1の④の剛性を考慮）の剛性を考慮した地震応答解析モデルⅡ（図1の①、④の剛性を考慮）の固有値解析を行い、固有周期の比較を行った。影響検討フローを図6に、地震応答解析モデルⅠ、Ⅱのモデル図を図7,8に示す。

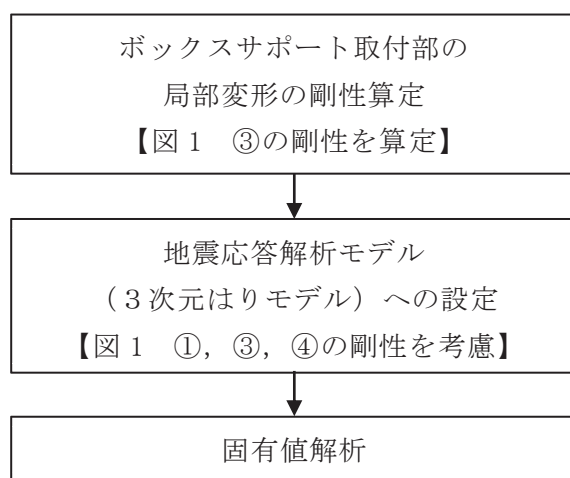


図6 ボックスサポート取付部の局部変形の剛性影響検討フロー



図7 地震応答解析モデルⅠ（図1の①，③，④の剛性を考慮）



図8 地震応答解析モデルⅡ（図1の①，④の剛性を考慮）

8.1 ボックスサポート取付部の局部変形の剛性算定方法及び結果

ボックスサポート取付部の局部変形の剛性（図1の③の剛性）は、サブプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性算定用シェルモデルに境界条件を追加した解析モデルを用いて算定する。ボックスサポート取付部の局部変形の剛性算定に用いた解析モデル及び境界条件の設定を図9に示す。また、ボックスサポート取付部の局部変形の剛性算定結果を表2に示す。

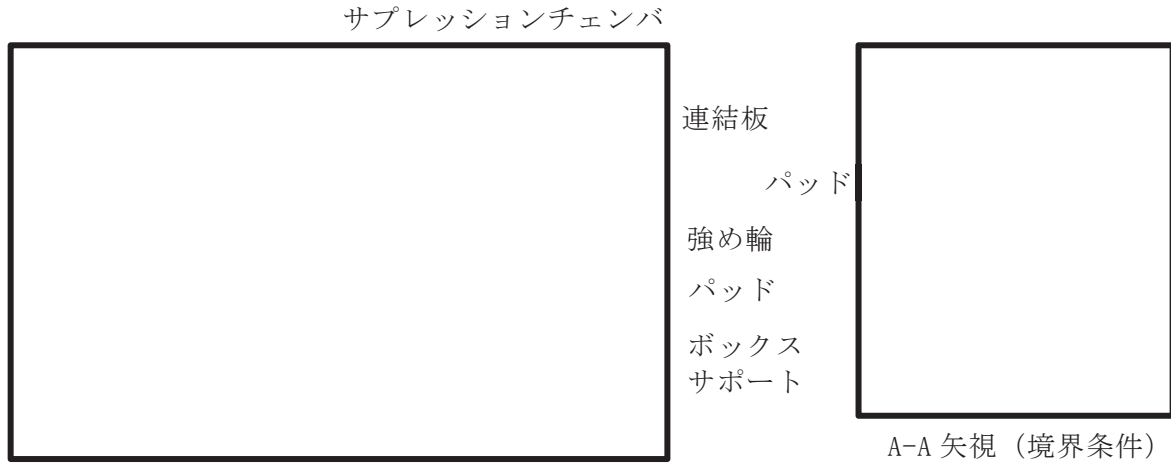


図9 ボックスサポート取付部の局部変形の剛性算定モデル

表2 ボックスサポート取付部の局部変形の剛性算定結果

ばねの方向		内側ボックスサポート 又は 外側ボックスサポート	ボックスサポート取付部の 局部変形の剛性
並進 (N/mm)	大円半径方向	内側	
		外側	
	大円周方向	内側	
		外側	
	上下方向	内側	
		外側	
回転 (N・mm/rad)	大円半径軸回り	内側	
		外側	
	大円周軸回り	内側	
		外側	
	上下軸回り	内側	
		外側	

8.2 ボックスサポート取付部の局部変形の影響評価

ボックスサポート取付部の局部変形の影響評価は、地震応答解析モデルⅠ（図1の①，③，④の剛性を考慮）と地震応答解析モデルⅡ（図1の①，④の剛性を考慮）との固有周期の比較より影響を確認する。

固有周期の比較結果を表3に示す。地震応答解析モデルⅠ（図1の①，③，④の剛性を考慮）の固有周期は、地震応答解析モデルⅡ（図1の①，④の剛性を考慮）の固有周期から水平方向，鉛直方向共に固有周期が長くなり，水平方向に着目するとおおよそ地震応答解析モデルⅡ（図1の①，④の剛性を考慮）と今回工認に適用する地震応答解析モデルの固有周期のおおよそ中間値となっている。よって，ボックスサポート取付部の局部変形は，地震応答解析モデルに影響があることを確認した。

表3 固有周期の比較結果

振動モード	地震応答解析モデルⅡ 【図1 ①，④ の剛性を考慮】	地震応答解析モデルⅠ 【図1 ①，③，④ の剛性を考慮】	今回工認に適用する地震 応答解析モデル 【図1 ①，②，③，④ の剛性を考慮】
水平1次モード	0.086秒	0.091秒	0.097秒
鉛直1次モード	0.05秒以下	0.053秒	0.085秒

9. まとめ

サプレッションチェンバの地震応答解析モデルについては，サプレッションチェンバ本体とボックスサポートをはり要素でモデル化し，サプレッションチェンバのボックスサポート取付部にサプレッションチェンバのボックスサポート取付部の局部変形による剛性及びサプレッションチェンバのバルジング影響検討結果を踏まえたサプレッションチェンバ小円の断面変形の剛性を考慮したサプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性をモデル化することとした。サプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性の設定に当たっては，その複雑な変形様態に対応するため，シェルモデルとはりモデルを活用して，ばね剛性を設定した。サプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性を設定することにより，サプレッションチェンバの地震応答解析モデルが，従来と比較し，より精緻に振動モードを再現できるようになった。

(補足)

ばね算定用解析モデルのモデル化範囲について

今回サプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性を設定するにあたり、シェルモデル及びはりモデルを用いた。評価対象ボックスサポートに荷重を加えて変形を起こさせることでサプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性を算定するが、荷重負荷点と解析モデルの境界条件が近いと、算定しようとしているサプレッションチェンバのボックスサポート取付部のばね剛性に対して、境界条件の影響が及ぶ懸念がある。そのため、モデル化の範囲は、境界条件の影響が及ばない範囲として、評価対象ボックスサポートとその隣接ボックスサポートまでをモデル化することとした。ばね剛性算定解析の変形コンター図を図1に示す。図のとおり、変形範囲と境界条件が離れていることがわかる。

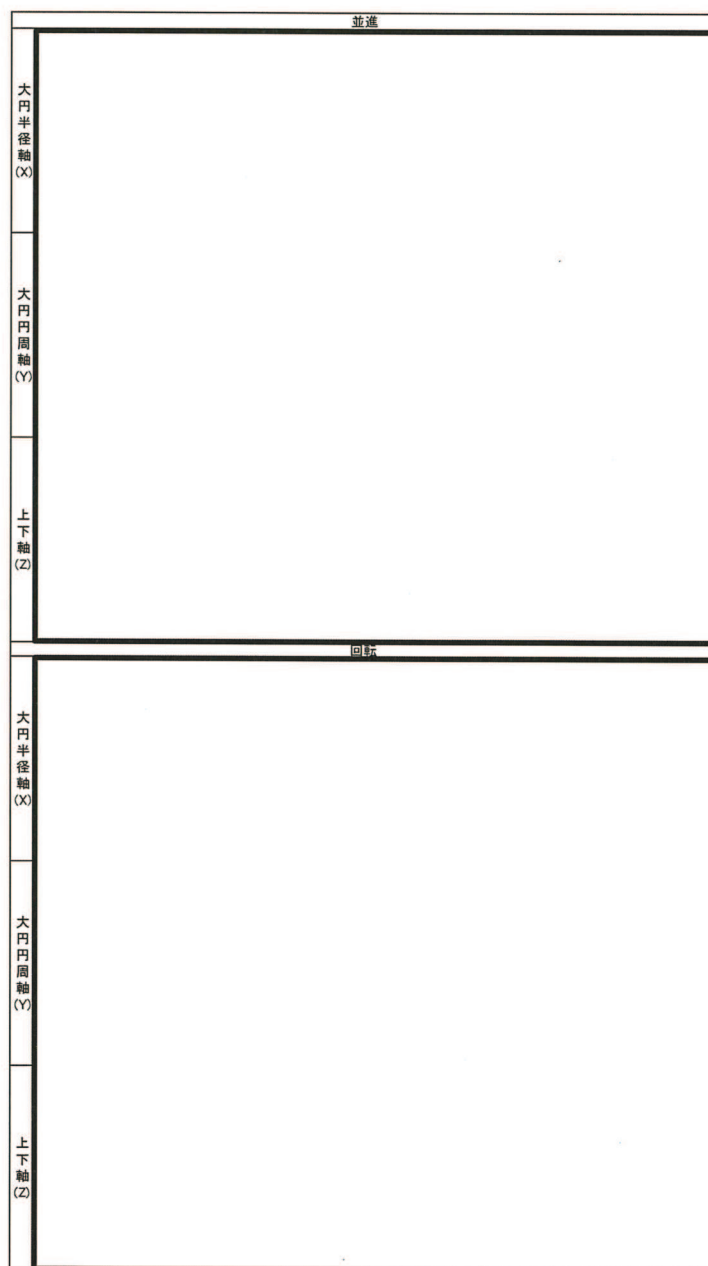


図1 ばね剛性算定解析 変形図

適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）の設定

1. 概要

本資料では、3次元はりモデルの適用性検証に用いた適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）の評価条件やモデル化の詳細を示すものである。

2. 評価条件

表 1 評価条件

項目		内容
モデル化	要素数	
	鋼製部	シェル要素：サプレッションチェンバ本体，強め輪（耐震補強対策含む），ボックスサポート（耐震補強対策含む）* 剛ばね要素：基礎ボルト *内側のボックスサポートのパッド（追加（2））については，シェルのメッシュ形状に合わせて簡便にモデル化を行っている。
	内部水	・耐震解析用重大事故等時水位（O.P. -1, 514mm） ・NASTRANの仮想質量法を適用（本文 4.1.1 項の手法と同様）
地震応答解析	解析手法	スペクトルモーダル解析
	地震力	設計用床応答曲線 （O.P. -8, 100mm，基準地震動 S s 7 波，材料物性の不確かさ等を考慮）*
	減衰定数	1 %
応力評価		1 次 + 2 次応力

注記*：VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針の設計用床応答曲線（図番：RB-SsH-RBB3-010）を適用

3. 解析モデル



図1 解析モデル図

4. モデル化諸元

表2 モデル化諸元

部材番号	部材	材料	質量 ($\times 10^3$ kg)	縦弾性係数 (MPa)	ポアソン比 (-)
1	強め輪	SGV49	1300		
2	強め輪	SGV49			
3	ボックスサポート	SM41B			
4	強め輪補強	SGV480			
5	連結板	SGV480			
6	パッド	SGV49			
7	パッド(追加(1))	SGV480			
8	パッド(追加(2))	SGV480			
9	補強リブ(1)	SGV480			
10	補強リブ(2)	SGV480			
11	補強リブ(3)	SGV480			
12	サブプレッションチェーンバシエル	SGV49			
13	フランジプレート	SM41B			

5. サプレッションチェーンバの構造図及び詳細モデル図

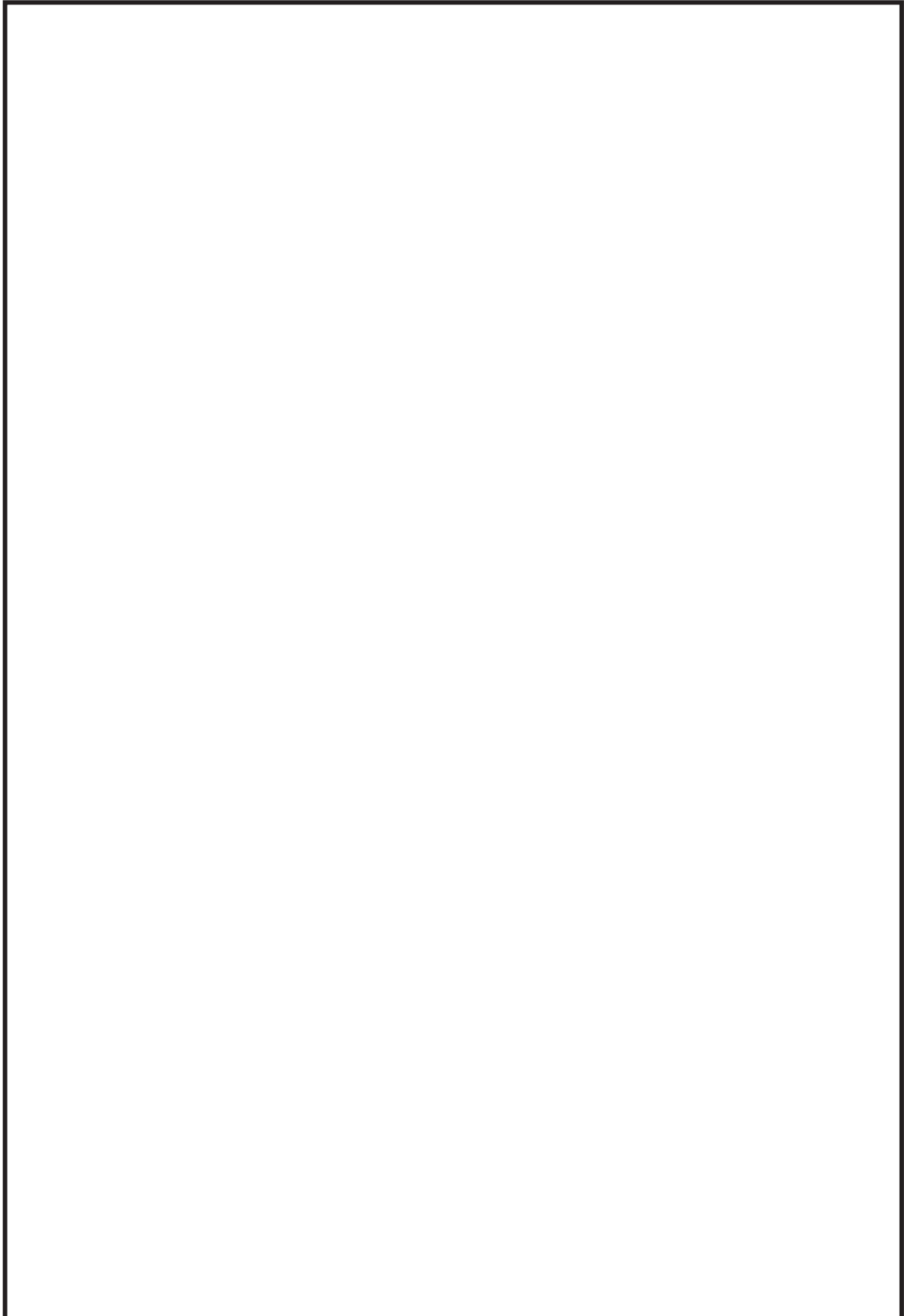


図2 サプレッションチェーンバの構造図

別紙 5-3

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

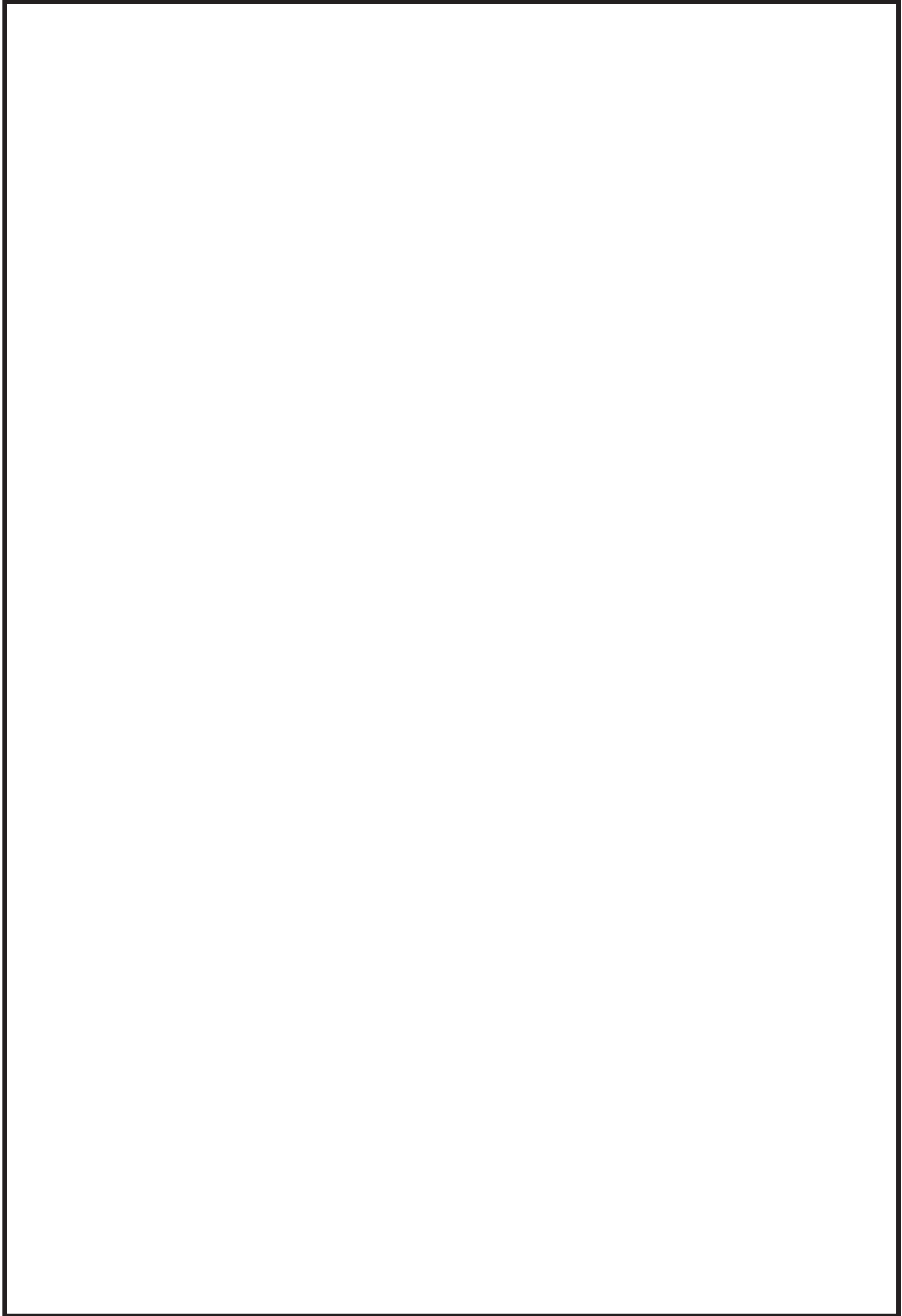


図3 サプレッションチェンバの詳細モデル図

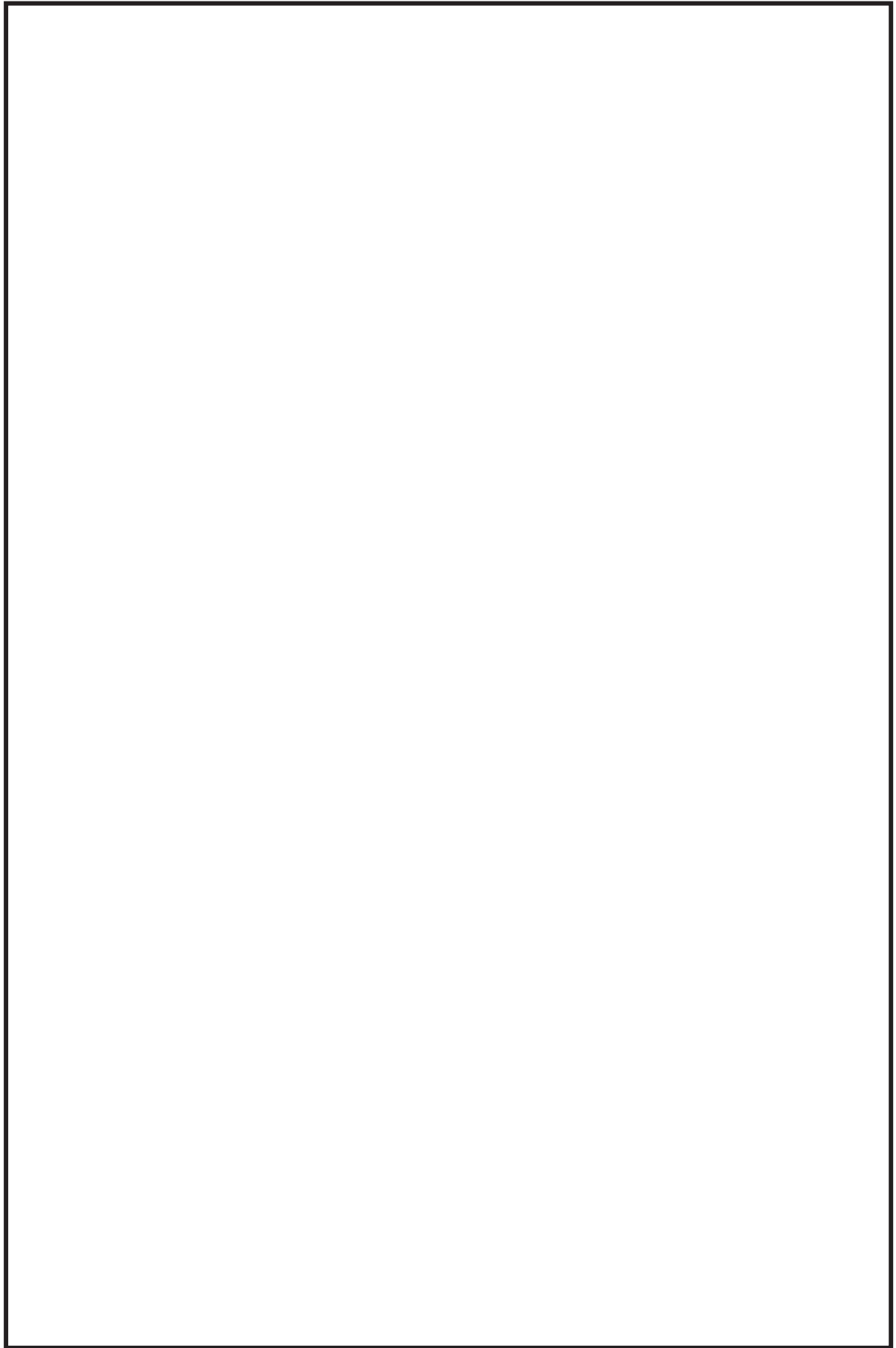


図4 ボックスサポートの詳細モデル図

別紙 5-5

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング荷重の算定

1. 概要

耐震評価における構造物の内部水の考え方としては、たて置円筒容器などでハウスナーの手法が一般的に採用されている。

本資料では、ハウスナーの手法^[1]の考え方をういてサプレッションチェンバの内部水の扱いについて説明する。

また、汎用流体解析コード OpenFOAM を用いたスロッシング荷重の算定方法について説明する。

2. ハウスナーの手法による内部水の考え方

たて置円筒容器の内部水の地震時の挙動の概念について、図 1 に示す。水平方向の地震動に対する内部水の挙動としては、液面表面が揺れることによるスロッシング荷重と内部水が容器と一体となって振動することによる荷重（以下、内部水の有効質量による荷重という。）の 2 つの荷重が組み合わされる。

ハウスナーの手法では、内部水の有効質量による荷重として付加される質量 M_E （有効質量）を剛体として、スロッシング荷重として付加される質量 M_i とスロッシングの固有周期を考慮したバネを容器に結合した解析モデルにて、耐震評価を行い容器に対する荷重を計算する。

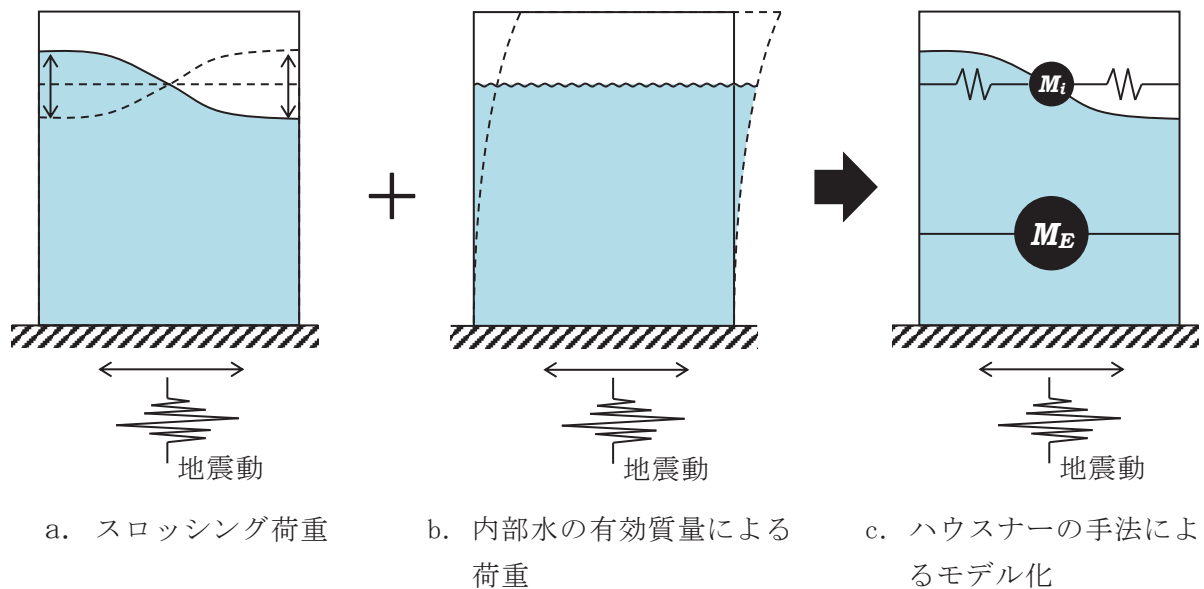


図 1 たて置円筒容器の内部水の地震時の挙動の概念

参考文献 [1] : Housner, G. W. : Nuclear Reactors And Earthquakes, TID Rep. 7024, 1963.

3. サプレッションチェンバの内部水の扱い

地震時のサプレッションチェンバに対する荷重を算出する場合のサプレッションチェンバの内部水の扱いについて、水平方向及び鉛直方向に分けて説明する。

水平方向の地震動によるサプレッションチェンバに対する地震荷重は、内部水の有効質量による荷重及びスロッシングによる荷重に分けて評価する。

有効質量による荷重は、NASTRANの仮想質量法から算出される内部水の有効質量を用いて、地震応答解析モデルに付加質量 M_E として設定し、はりモデルを用いたスペクトルモード解析により算出する。ここで、この地震応答解析モデルでは、スロッシング荷重として付加される質量 M_i とバネは考慮しない。

一方、スロッシング荷重は、前述の地震応答解析とは別に、実機サプレッションチェンバの内部構造物及び内部水の全質量（水位）を考慮し、流体解析（汎用流体解析コード OpenFOAM）により算出する。ここで、流体解析を用いて地震時の内部水によるサプレッションチェンバに対する荷重を算出する場合、スロッシング荷重及び内部水の有効質量による荷重の総和 F として算出される。このため、荷重の総和 F から内部水の有効質量による荷重を差し引くことでスロッシング荷重を算出する。

鉛直方向の地震動によるサプレッションチェンバに対する地震荷重は、地震応答解析モデル上、内部水の全質量を考慮し、はりモデルを用いて算出する。

4. 実機スロッシング荷重の算定方法

流体解析を用いたスロッシング荷重の算出方法について、通常運転時及び重大事故等時における算定方法を説明する。

4.1 解析モデル

解析モデルを図2に、解析諸元を表1に示す。



a. 外観



b. 内部構造物

図2 解析モデル図

表1 解析諸元

項目	解析諸元
格子数	約 1200 万
格子幅	約 0.1cm～22cm

4.2 解析条件

解析条件を表 2、基準地震動 S_s におけるサブプレッションチェンバ設置床の応答加速度スペクトルを図 3 に示す。

表 2 解析条件

項目	内容
モデル化範囲	サブプレッションチェンバ内
水位	通常運転水位 (H. W. L : O. P. -3, 800) 耐震解析用重大事故等時水位 (真空破壊装置下端水位 : O. P. -1, 514) * ¹
評価用地震動	スロッシング荷重の卓越周期帯で応答加速度が大きい基準地震動 $S_s - D 1$ (水平方向と鉛直方向) * ² に対する原子炉建屋 O. P. -8. 100m における建屋床応答
解析コード	OpenFOAM Ver. 4. 1 (汎用流体解析コード) VOF 法を用いた流体解析
その他	内部構造物のモデル化範囲 : 強め輪, ベントヘッダ, ダウンカム, T-クエンチャ及びその配管, ECCS ストレーナ取付配管
解析条件	気相物性* ³ 動粘度 : $1.51 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 密度 : $1.205 \text{ kg}/\text{m}^3$ 液相物性* ³ 動粘度 : $1.0038 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 密度 : $998.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ 境界条件 : 全境界面で不透過滑りなし条件

注記*1 : 重大事故等時水位よりも高い水位

*2 : 別紙 15 における地震動による影響検討結果においても $S_s - D 1$ の条件でスロッシング荷重が最大となることを確認している。

*3 : 理科年表 (20°C, 1 気圧の値)

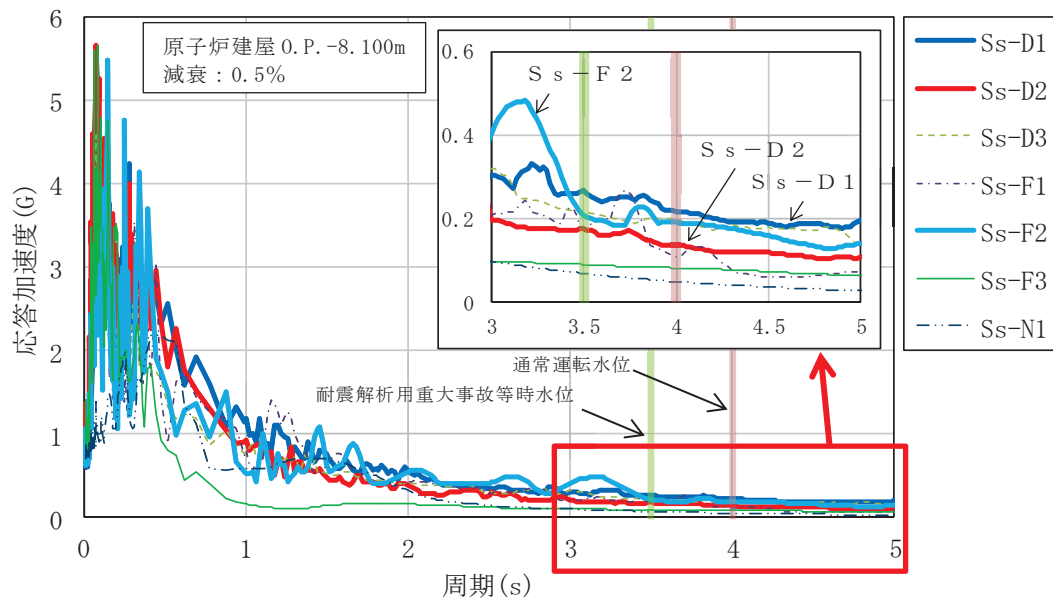


図3 サプレッションチェンバ設置床の応答加速度スペクトル（水平方向，振幅無し）

4.3 スロッシング荷重算定

4.3.1 スロッシング荷重算定方法

流体解析で算出される荷重 F は、スロッシング荷重 F_s 及び内部水の有効質量による荷重 $M_E \cdot \ddot{x}$ の和であることから、スロッシング荷重 F_s は、下式で表される。

$$F_s = F - M_E \cdot \ddot{x}$$

ここで、

M_E : 有効質量

\ddot{x} : 入力加速度

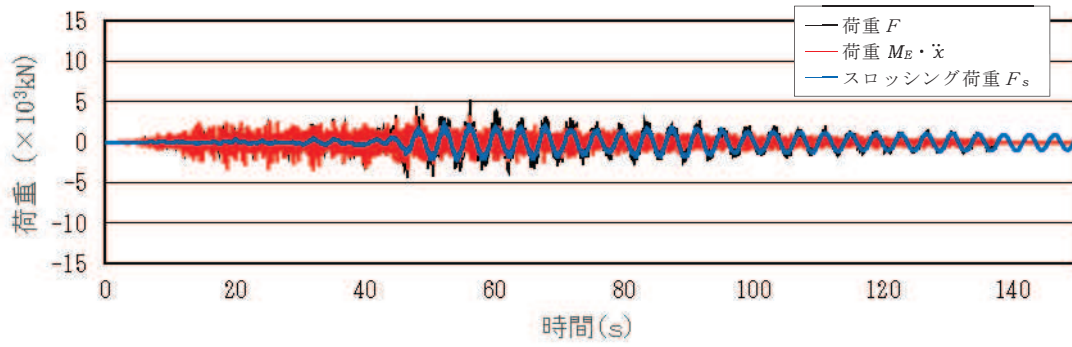
なお、内部水の有効質量の算出においては、荷重時刻歴波形について 0.4Hz のハイパスフィルター処理を行い、スロッシング荷重の卓越周期の成分を取り除いている。(流体解析による内部水の有効質量の算出方法は、別紙 1 2.2.3 参照)

4.3.2 スロッシング荷重算定結果

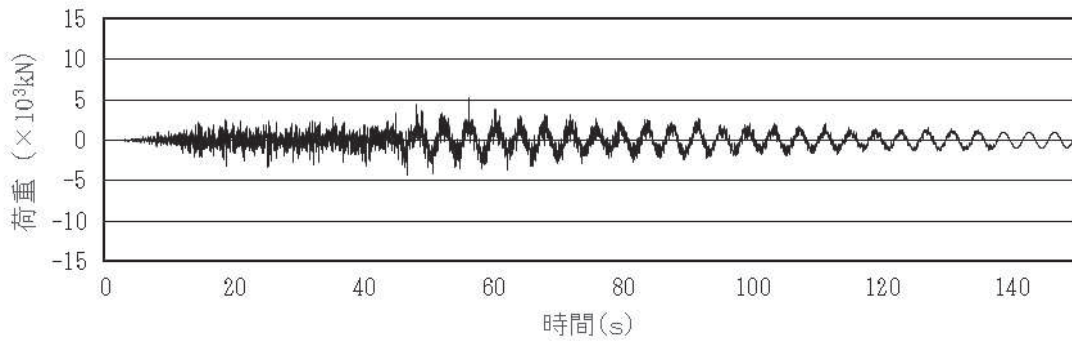
流体解析で算定した荷重 F 、内部水の有効質量による荷重 $M_E \cdot \ddot{x}$ 、スロッシング荷重 F_s の各荷重の時刻歴を図 4~5 に、スロッシング荷重による最大荷重及びスロッシング荷重算定における内部水の有効質量比を表 3 に、流体解析で算出した荷重 F のフーリエスペクトル (S s - D 1, 通常運転水位及び耐震解析用重大事故等時水位) を図 6~7 に、フーリエスペクトルから求めたスロッシングの卓越周期を表 4 に示す。また、スロッシング解析結果例 (S s - D 1, 耐震解析用重大事故等時水位, 最大荷重発生時刻付近 (52 秒時点)) を図 8 に示す。

スロッシング荷重は、耐震解析用重大事故等時水位で $3.21 \times 10^3 \text{kN}$ 、通常運転水位で $2.50 \times 10^3 \text{kN}$ となり、それらを包絡する $4.00 \times 10^3 \text{kN}$ を耐震評価で用いるスロッシング荷重とする。

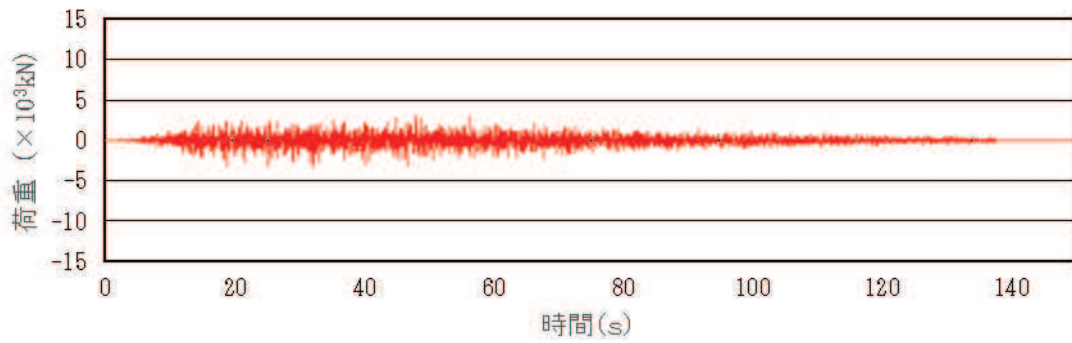
通常運転水位に対する内部水の有効質量比は仮想質量法の 0.24 に対して 0.22、耐震解析用重大事故等時水位に対する内部水の有効質量比は仮想質量法の 0.33 に対して 0.32 であり、仮想質量法の方が保守的に算定されることを確認した (別紙 1 参照)。



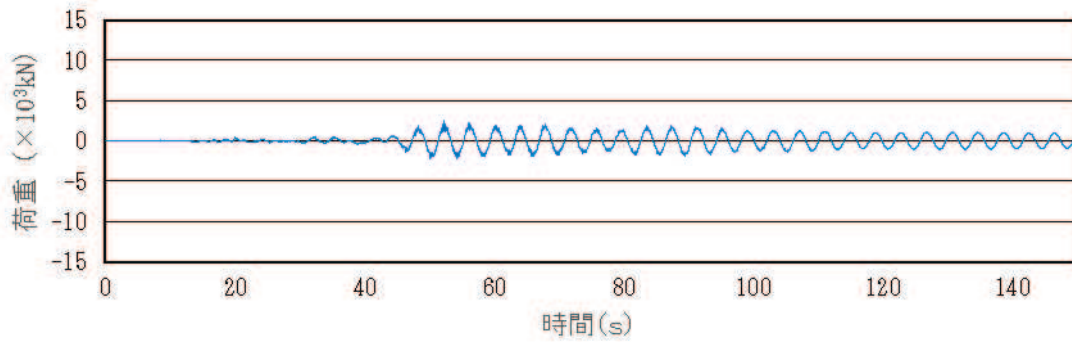
(a) 各荷重の重ねがき



(b) 荷重 F

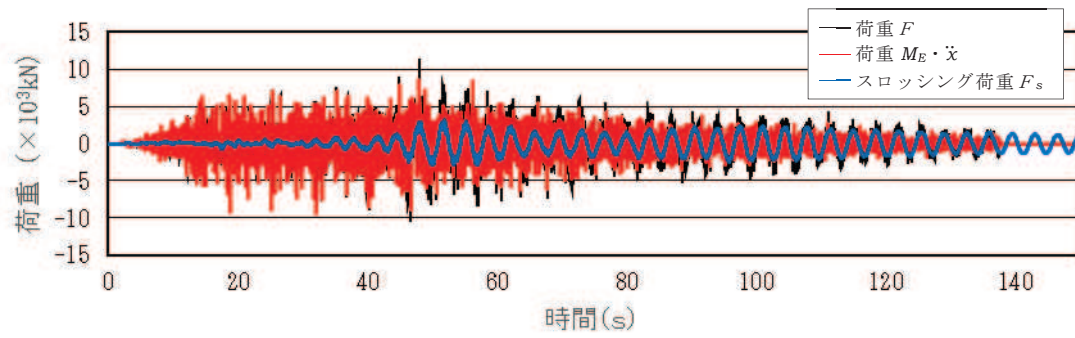


(c) 荷重 $M_E \cdot \ddot{x}$

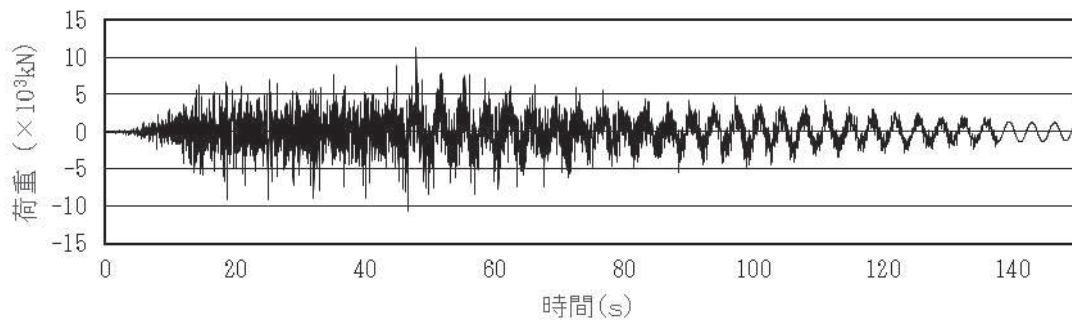


(d) スロッシング荷重 F_s

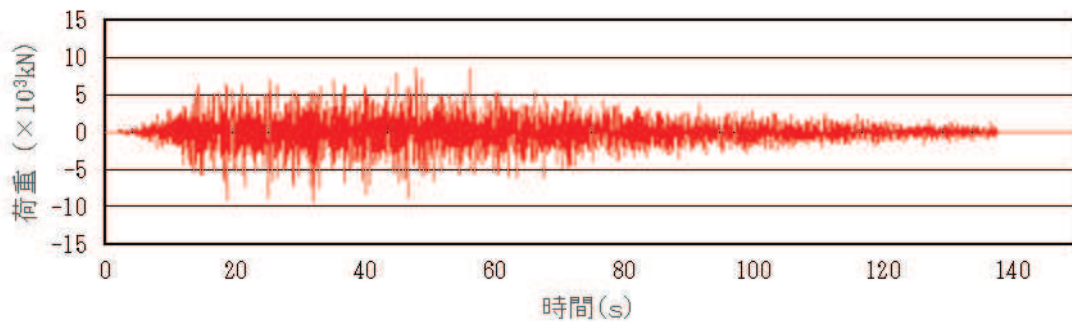
図 4 各荷重の時刻歴 (S s - D 1, 通常運転水位)



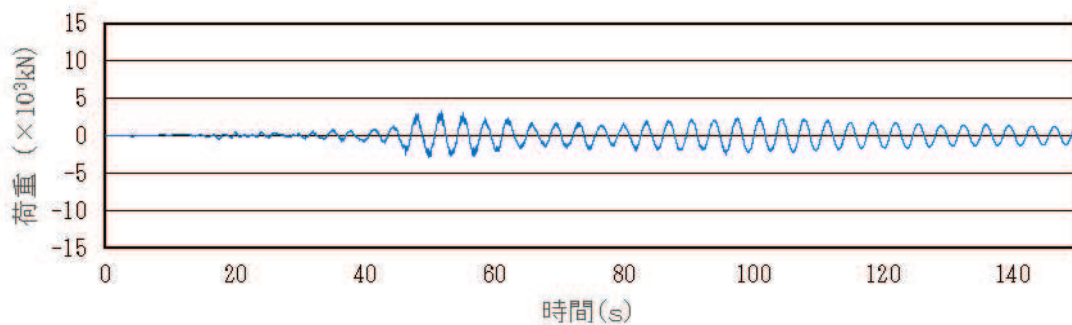
(a) 各荷重の重ねがき



(b) 荷重 F



(c) 荷重 $M_E \ddot{x}$



(d) スロッシング荷重 F_s

図 5 各荷重の時刻歴 (S s - D 1, 耐震解析用重大事故等時水位)

表3 スロッシング荷重及び
スロッシング荷重算定における内部水の有効質量比

地震動	水位条件	最大荷重 (× 10 ³ kN)	内部水の 有効質量比
S s - D 1	通常運転水位	2.50	0.22
S s - D 1	耐震解析用 重大事故等時水位	3.21	0.32

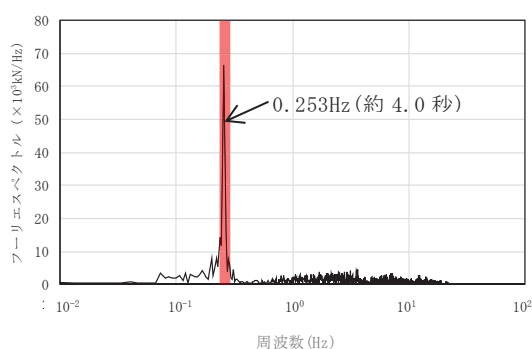


図6 フーリエスペクトル
(S s - D 1, 通常運転水位)

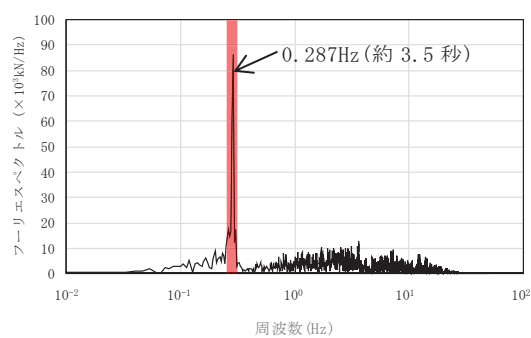
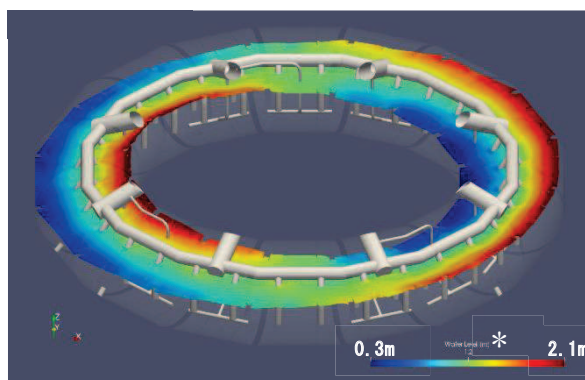


図7 フーリエスペクトル
(S s - D 1, 耐震解析用重大事故等時水位)

表4 スロッシングの卓越周期

水位条件	卓越周期(s)
通常運転水位	約 4.0 秒
耐震解析用重大事故等時水位	約 3.5 秒



* 色の違いは、水面高さの違いを表す。
また、高さは、サブプレッションチェンパ
シエル中心位置を 0mとしたものを表し
ており、初期水位は、約 1.2mである。

図8 スロッシング解析結果例
(S s - D 1, 耐震解析用重大事故等時水位, 最大荷重発生時刻付近)

計算機コード (NASTRAN, OpenFOAM) の概要

1. はじめに

本資料は、汎用解析プログラム NASTRAN 及び汎用流体解析コード OpenFOAM の解析コードについて説明するものである。

2. 使用した解析コードの概要

(1) NASTRAN

NASTRAN は、サプレッションチェンバの構造をモデル化し、構造表面（接水面）における流体-構造の運動方程式を解析する。

(2) OpenFOAM

OpenFOAM は、サプレッションチェンバ内の空間をモデル化し、流体の流れを VOF (Volume Of Fluid) 法により解析する。

(1) NASTRAN

解析コードの概要

項目	コード名 MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法（シェル要素）による有効質量の算定
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年
使用したバージョン	2012, 2016
コードの概要	<p>有限要素法を用いた MSC NASTRAN は、世界で圧倒的シェアを持つ汎用構造解析プログラムのスタンダードである。その誕生は 1965 年、現在の米国 MSC Software Corporation の前身である米国 The MacNeal-Schwendler Corporation の創設者、マクニール博士とシュウェンドラー博士が、当時 NASA（The National Aeronautics and Space Administration）で行われていた、航空機の機体強度をコンピュータ上で解析することをテーマとした「有限要素法プログラム作成プロジェクト」に参画したことに始まる。そこで作成されたプログラム Nastran (NASA Structural Analysis Program) と命名され、1971 年に The MacNeal-Schwendler Corporation から MSC NASTRAN として一般商業用にリリースされた。</p> <p>以来、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野の構造解析に広く利用されている。また各分野からの高度な技術的要求とコンピュータの発展に対応するために、常にプログラムの改善と機能拡張を続けている。</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は以下のとおり実施済みである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ サプレッションチェンバの模擬試験体による振動試験により算定された有効質量比と NASTRAN による 3次元有限要素法（シェル要素）及び仮想質量法（Virtual Mass Method）により算定された有効質量比が一致することを確認している。 ・ 本コードの適用条件について、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)】</p> <p>本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、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木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。 ・ 検証の体系と今回の解析体系とが同等であることから、検証の結果をもって、解析の妥当性が確認できる。

検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<ul style="list-style-type: none">開発機関が提示するマニュアルにより、3次元有限要素法（シェル要素）及び仮想質量法（Virtual Mass Method）による有効質量算定に本解析コードが適用できることを確認している。
---	---

1. 概要

有限要素法を用いた MSC NASTRAN は、世界で圧倒的シェアを持つ汎用構造解析プログラムのスタンダードである。その誕生は 1965 年、現在の米国 MSC Software Corporation の前身である米国 The MacNeal-Schwendler Corporation の創設者、マクニール博士とシュウェンドラー博士が、当時 NASA (The National Aeronautics and Space Administration) で行われていた、航空機の機体強度をコンピュータ上で解析することをテーマとした「有限要素法プログラム作成プロジェクト」に参画したことに始まる。そこで作成されたプログラム Nastran (NASA Structural Analysis Program) と命名され、1971 年に The MacNeal-Schwendler Corporation から MSC NASTRAN として一般商業用にリリースされた。

以来、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野の構造解析に広く利用されている。また、各分野からの高度な技術的要求とコンピュータの発展に対応するために、常にプログラムの改善と機能拡張を続けている。

2. 本コードの特徴

NASTRAN は、MSC Software Corporation により開発保守されている汎用構造解析コードである。原子力発電所の機器の応力評価で用いられる有限要素法による応力評価に加え、流体の入ったタンク構造や没水タービン等、接流体表面を持つ構造の振動解析で一般に広く用いられている。

また、解析における縮約処理は、膨大な数のデータを扱う有限要素法などの解析において、行列の大きさ（次元）を小さくする解析上のテクニックであり、その手法として、Guyan の縮約法 (Guyan's Reduction) が広く一般的に使われており、NASTRAN の機能として整備されている。

3. 解析理論

3.1 仮想質量法 (Virtual Mass Method)

3.1.1 理論式

本コードのうち、流体の入ったタンク構造や没水タービン等、接流体表面を持つ構造の振動解析で用いる仮想質量法の解析理論について述べる。

振動時の容器壁面に作用する圧力は、流体解析によって求められる。サプレッションチェンバのような複雑な形状に対しては、数値解析に依存することとなる。ここで使用される代表的な方法は、「速度ポテンシャル法」及び「非圧縮性粘性流体解析 (Navier-Stokes 方程式と連続式)」等による流体解析法がある。NASTRAN 仮想質量法では、前者の理想流体 (非圧縮性、非粘性、渦無し) を仮定した速度ポテンシャル法に沿う考え方が採用されている。

基礎式は、次のように連続の式及び運動方程式からなる。

$$\nabla \cdot \nabla \Phi = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\frac{1}{\rho} \nabla p + g \quad (2)$$

ここで、 t は時間、 Φ 、 v 、 p 、 g はそれぞれ流体の速度ポテンシャル、速度ベクトル、圧力、重力加速度ベクトルである。

同解析コードでは、構造体の接水面に設定した節点において、構造体の振動により発生する流体圧力と流速を算定し、接水面における流体圧力と加速度の関係式を構造体の運動方程式に流体項を加えることで、構造体と流体の運動方程式が構築される。固有値解析あるいは応答解析を実施して、振動質量を求め、これから構造体の振動質量を差し引くことで、流体の振動質量すなわち流体の有効質量が算定される。

3.1.2 解析フローチャート

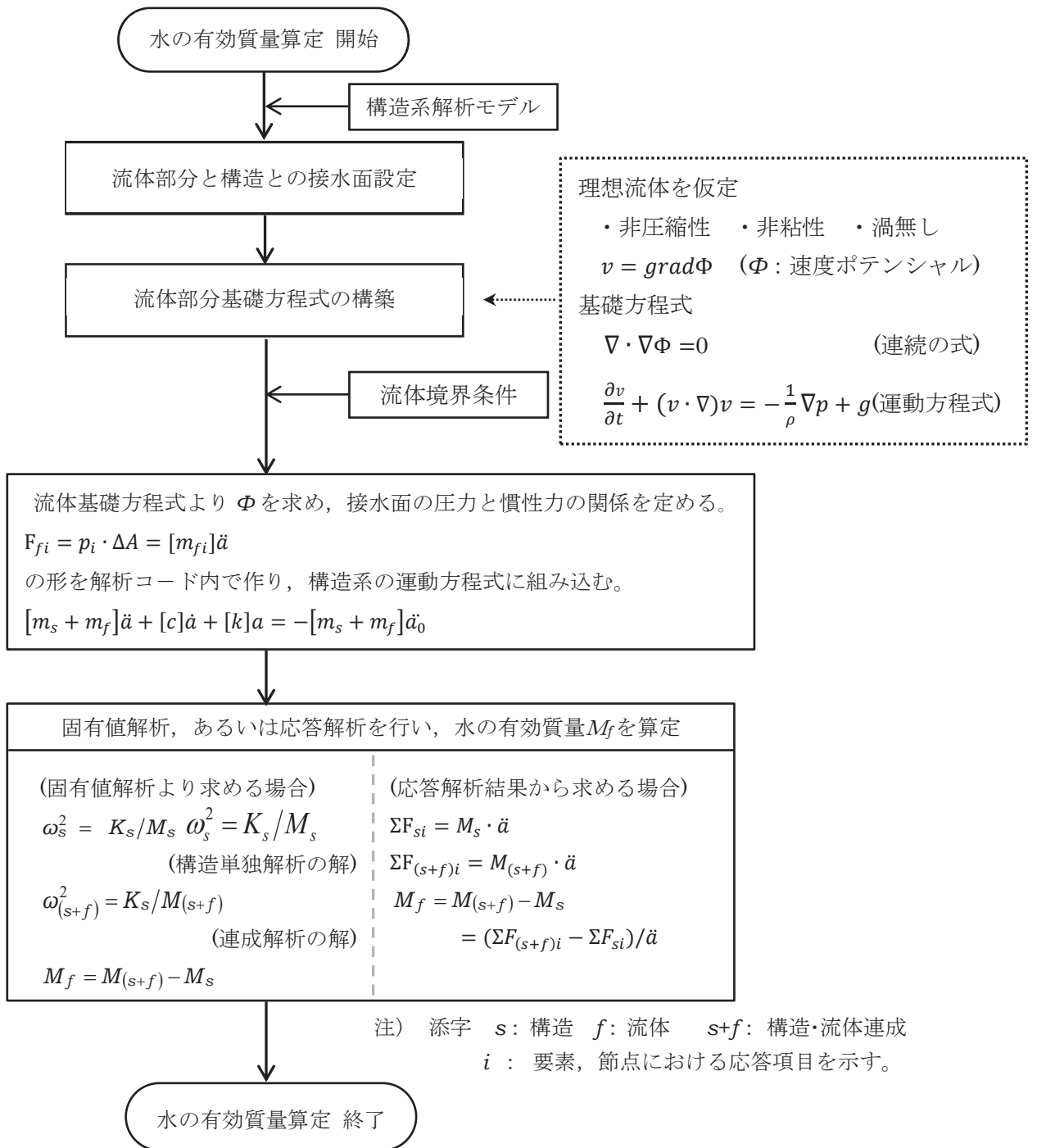


図1 NASTRAN 仮想質量法を用いたサプレッションチェンバ内部水の有効質量算定手順

3.2 Guyan 縮約法

本コードのうち，Guyan 縮約法の解析理論について述べる。

動的問題に対する基礎方程式は，縮約を行う前に \mathbf{u}_f セットに対して組み立てられる。縮約を行う前の標準マトリクス方程式は次式の形になる。

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_{aa} & M_{ao} \\ M_{oa} & M_{oo} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_a \\ \ddot{u}_o \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{B}_{aa} & B_{ao} \\ B_{oa} & B_{oo} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_a \\ \dot{u}_o \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{K}_{aa} & K_{ao} \\ K_{oa} & K_{oo} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_a \\ u_o \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{P}_a \\ P_o \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで

- $u_a, \dot{u}_a, \ddot{u}_a$: 解析セットに残される変位，速度，加速度自由度
 $u_o, \dot{u}_o, \ddot{u}_o$: 消去セットに入れて消去される変位，速度，加速度自由度
 \bar{P}_a, P_o : 作用荷重

フリーボディ運動は解析セットに含めなければならない。そうしなければ， K_{oo} が特異になってしまう。バーを付けた量 (\bar{P} など) は縮約の対象にならない量を示す。

静的問題では，質量と減衰効果を無視して，式(1)下段の分割行を解いて \mathbf{u}_o を計算することができる。

$$\{u_o\} = -[K_{oo}^{-1}]\{K_{oa}\{u_a\} - \{P_o\}\} \quad (2)$$

式(2)の右辺は，Guyan マトリクス G_o と静的補正変位 u_o^o の2つの部分に分解して，次式で表すことができる。

$$[G_o] = -[K_{oo}^{-1}][K_{oa}] \quad (3)$$

$$\{u_o^o\} = [K_{oo}^{-1}]\{P_o\} \quad (4)$$

式(2)から式(4)を式(1)上段の分割行に代入すれば厳密な静的救済の系が得られ，次式の形に縮約された静解析方程式になる。

$$[K_{aa}]\{u_a\} = \{P_a\} \quad (5)$$

$$\{u_o\} = [G_o]\{u_a\} + \{u_o^o\} \quad (6)$$

ここで，

$$[K_{aa}] = [\bar{K}_{aa}] + [K_{ao}][G_o] \quad (7)$$

$$\{P_a\} = \{\bar{P}_a\} + [G_o^T]\{P_o\} \quad (8)$$

これに対して，動解析では，ベクトル \ddot{u}_o と \dot{u}_o を近似することによって系の次数を小さくすることができる。静的マトリクス方程式から出発して縮約を行うのがよい。式(6)から次式の変換を定義する。

$$\{\mathbf{u}_f\} = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_a \\ \mathbf{u}_o \end{Bmatrix} = [\mathbf{H}_f]\{\mathbf{u}_f'\} \quad (9)$$

ここで,

$$\{u'_f\} = \begin{Bmatrix} u_a \\ u_o \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$[H_f] = \begin{bmatrix} I & 0 \\ G_o & I \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで, u_o は, 静的変位形状に対する変位増分である。式(1)で表される系は, 精度を落とすことなく新しい座標系に変換することができる。変換された系における剛性マトリクスは次式の形になる。

$$[K'_{ff}] = \begin{bmatrix} I & G_o^T \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ao} \\ K_{oa} & K_{oo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ G_o & I \end{bmatrix} \quad (12)$$

マトリクスの乗算を行い, 式(3)を代入すると, 次式が得られる。

$$[K'_{ff}] = \begin{bmatrix} K_{aa} & 0 \\ 0 & K_{oo} \end{bmatrix} \quad (13)$$

剛性マトリクス内の連成は解除されたが, 質量と減衰マトリクスは最初の系より連成が増える結果になる。減衰マトリクスは質量マトリクスと同じ形であるから, ここでは減衰マトリクスを省略して考える。厳密な変換系は次式の形になる。

$$\begin{bmatrix} M'_{aa} & M'_{ao} \\ M'_{oa} & M'_{oo} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_a \\ \ddot{u}_o \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{aa} & 0 \\ 0 & K_{oo} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_a \\ u_o \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_a \\ P_o \end{Bmatrix} \quad (14)$$

ここで,

$$[M'_{aa}] = [M_{aa}] + [M_{ao}] [G_o] + [G_o]^T [M_{oa} + M_{oo} G_o] \quad (15)$$

$$[M'_{ao}] = [M'_{oa}] = [M_{ao}] + [G_o^T M_{oo}] \quad (16)$$

$$[M'_{oo}] = [M_{oo}] \quad (17)$$

B'_{ff} の減衰マトリクス成分は, 質量マトリクス分割と同じ形で表すことができる。マトリクスが対称変換でなくても, 上記と同じ変換を得る方法を次に紹介する。まず, 式(1)~(8)から, 縮約される加速度の影響を以下の式で見積もる。

$$\{\ddot{u}_o\} \cong [G_o] \{\ddot{u}_a\} \quad (18)$$

式(18)を式(1)下段の分割行に代入して u_o に関して解くと, 以下の近似式が得られる。

$$\{u_o\} = [K_{oo}^{-1}] \{P_o\} - [K_{oa}] \{u_a\} - [M_{oa} + M_{oo} G_o] \{\ddot{u}_a\} \quad (19)$$

K_{oa} に関する式(3)及び質量項に関する式(16)を式(19)に代入すると, 次式が得られる。

$$\{u_o\} \cong [G_o] \{u_a\} + K_{oo}^{-1} \{P_o\} - [M'_{oa}] \{\ddot{u}_a\} \quad (20)$$

式(18)と式(20)を式(1)上段の分割行に代入すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} & [\bar{M}_{aa} + M_{ao}G_o]\{\ddot{u}_a\} + [\bar{K}_{aa} + K_{ao}G_o]\{u_a\} - [K_{ao}K_{oo}^{-1}][M_{oa} + M_{oo}G_o]\{\ddot{u}_a\} \\ & = \{\bar{P}_a\} - [K_{ao}][K_{oo}^{-1}]\{P_o\} \end{aligned} \quad (21)$$

項を整理すると、式(14)～式(17)と同じ結果が得られる。

上記の縮約手順から、Guyan 変換の特長がわかる。

- 近似が導入されるのは加速度成分のみである (式(18))。
- 縮約した系の剛性成分は厳密な内容である。
- 式(14)及び式(20)で定義される内部変位はほとんど等しい。

(2) OpenFOAM

解析コード：OpenFOAM

<p>コード名 項目</p>	<p>OpenFOAM</p>
<p>使用目的</p>	<p>流体解析によるスロッシング荷重算定</p>
<p>開発機関</p>	<p>OpenCFD Ltd</p>
<p>開発時期</p>	<p>2004 年</p>
<p>使用したバージョン</p>	<p>2.3, 4.1</p>
<p>コードの概要</p>	<p>OpenFOAM は、偏微分方程式を数値的に解くためのライブラリとソルバ一群からなるオープンソースコードである。特に流体計算のためのソルバが充実しており、汎用流体解析コードとして使用されることが多い。基礎式は有限体積法で離散化されており各種物理量の保存特性が良く、数値安定性に優れている。加えて、非構造格子の採用による複雑境界の取り扱いが可能であることから、実用解析に向いている。世界規模のユーザーコミュニティがあり、多様な科学的・工学的分野での使用実績がある。</p>
<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>本コードは機械、土木、建築及び気象を含めたさまざまな分野・業界で使用されている。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <p>本コードの検証は以下のとおり実施済みである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ サプレッションチェンバの模擬試験体による振動試験により算定された有効質量比と OpenFOAM により算定された有効質量比が一致することを確認している。 ・ 流体力学分野における典型的な事象について、解析結果が理論解及び実験結果と一致することを確認している。 ・ 本コードの適用条件について、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)】</p> <p>本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"> ・ 本コードは機械、土木、建築及び気象を含めたさまざまな分野で使用された実績があり、妥当性は十分に確認されている。 ・ 開発機関が提示するマニュアルにより、今回のスロッシング解析に、本コードが適用できることを確認している。 ・ 検証の体系と今回の解析体系とが同等であることから、検証の結果をもって、解析の妥当性が確認できる。

1. 概要

OpenFOAMは、偏微分方程式を数値的に解くためのライブラリとソルバー群からなるオープンソースコードである。特に流体計算のためのソルバーが充実しており、汎用流体解析コードとして使用されることが多い。基礎式は有限体積法で離散化されており各種物理量の保存特性が良く、数値安定性に優れている。加えて、非構造格子の採用による複雑境界の取り扱いが可能であることから、実用解析に向いている。世界規模のユーザーズコミュニティがあり、多様な科学的・工学的分野での使用実績がある。

2. 本コードの特徴

- (1) 本コードの主な解析機能は、以下のとおり
 - ・非圧縮性・圧縮性流れの定常・非定常解析
 - ・ニュートン・非ニュートン流体の取り扱い
 - ・熱・物質の輸送，化学反応，燃焼，粒子追跡
 - ・単相流，多相流，熱物理的状態変化，自由表面流
 - ・層流・乱流，音響，固体力学，電磁気学
- (2) ソースコードが公開されており，世界規模のユーザー・開発者のコミュニティがある
- (3) ソースコードは，オブジェクト指向で設計されており可読性・保守性に優れている
- (4) 非構造格子の採用による複雑境界の表現と格子細分化が可能である
- (5) MPI(Message Passing Interface)による並列処理に対応している

3. 解析理論

複数ある OpenFOAM ソルバーのうち，VOF (Volume Of Fluid) 法による非圧縮性の気液二相流ソルバーである interFoam の解析理論について述べる。

基礎式はアンサンブル平均を施した Navier-Stokes 方程式であり，次のように連続の式（質量保存式）(1)と運動量保存式(2)からなる。

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu S + \tau) + \rho g + \rho f \quad (2)$$

ここで， t は時間， U ， p ， ρ ， μ はそれぞれ流体の速度ベクトル，圧力，密度，粘性係数を意味し， S と τ はそれぞれ歪み速度テンソルとレイノルズ応力を表す。 g は重力加速度ベクトルであり， f は体積力としての外力である。また，気液界面を追跡するために，VOF 値と呼ばれる液相の体積割合 α の輸送方程式を考える。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) = 0 \quad (3)$$

そして，流体の密度と粘性係数は VOF 値を用いてそれぞれ次式で与える。

$$\rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g \quad (4)$$

$$\mu = \alpha \mu_l + (1 - \alpha) \mu_g \quad (5)$$

ただし、下付き添え字の l , g はそれぞれ液相, 気相を意味する。

4. 解析フローチャート

支配方程式である式(1)から式(5)は、コロケート格子を用いた有限体積法で離散化され、数値的に解かれる。流速と圧力の連成手法には非定常解を得るための予測子-修正子手法の一種である PISO 法が用いられる。

気液二相流ソルバー interFoam の計算アルゴリズムを図 2 に示す。

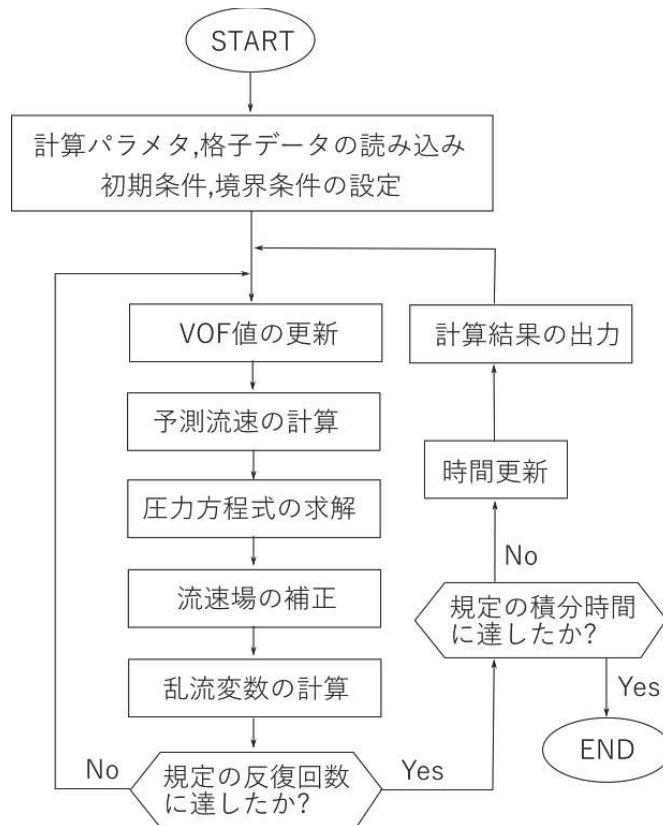


図 2 計算アルゴリズム

内部水の有効質量の概要

容器内で内容液が自由表面を有する場合、容器の振動方向に対する実際に地震荷重として付加される質量は、全質量とは異なった値となることが知られている。円筒タンクを例に有効質量の概要を説明する。

図 1 のように、直径 D の円筒タンクに液面高さ L の水が入っているとす。通常、容器内の水は自由表面を有しており、このタンクに水平方向に単位加速度を与えた場合の側板における動液圧力は、図 2 に示すように自由表面において 0 であり、深さ方向に二次曲線的な分布を生じる。一方、容器内を満水とし自由表面を無くした場合には、水全体が一体となって動くため、側板の動液圧力は高さ方向に一定となる。このように、自由表面を有する場合に側板に作用する地震荷重は、自由表面がない場合（水全体が一体に動く場合）の地震荷重に対して小さくなる。

荷重評価において、自由表面を有する内容液の加速度に対する実際に地震荷重として付加される質量を有効質量という。ここで、水的全質量に対する有効質量の比を有効質量比という。

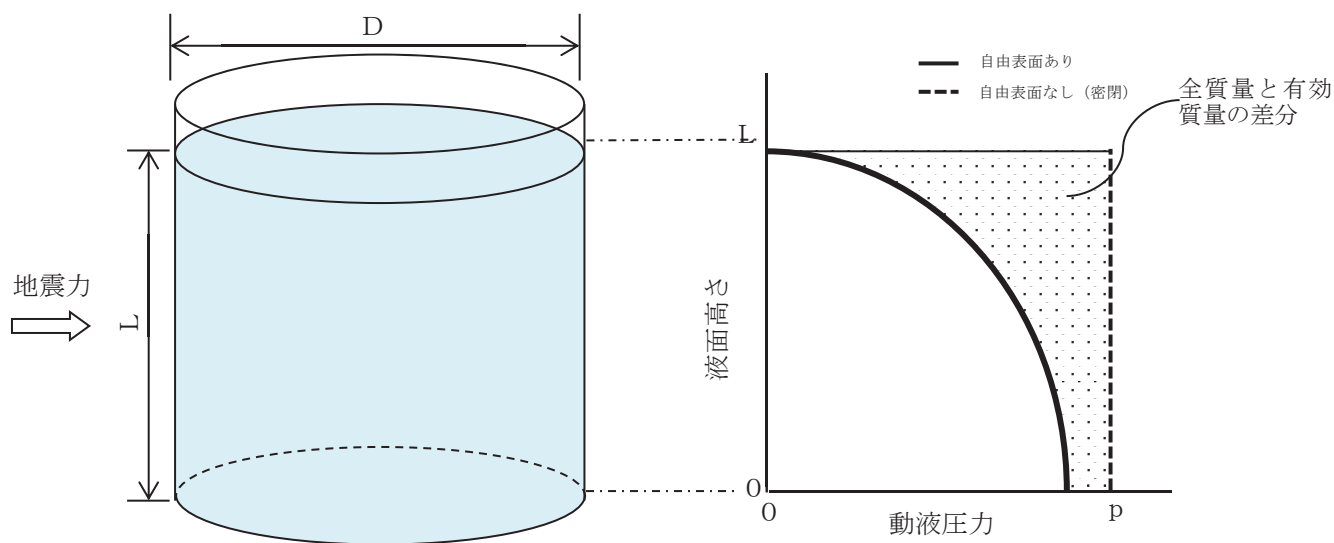


図 1 円筒タンクの内容液
(イメージ)

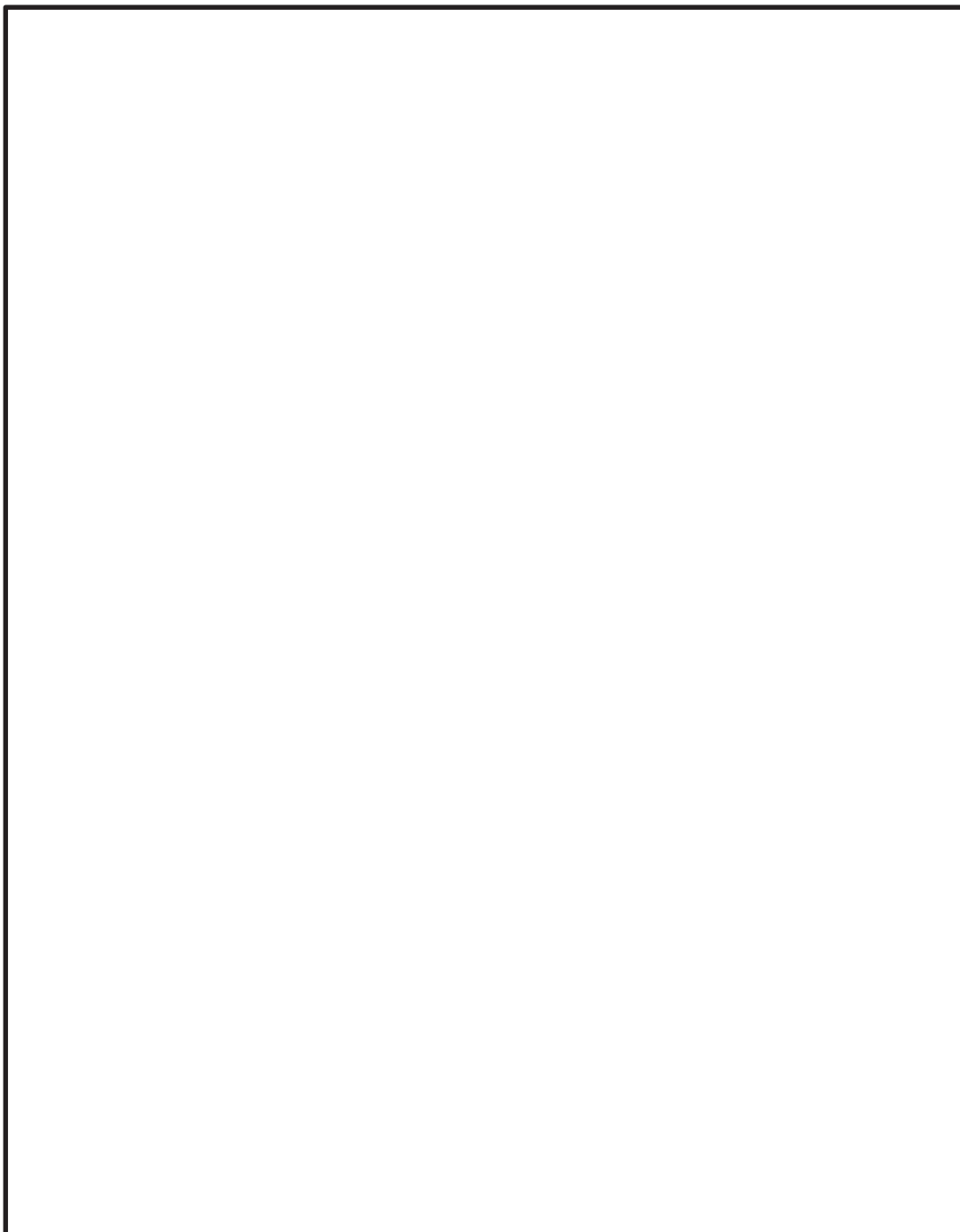
図 2 加速度に対する側板の
動液圧分布

規格類における内部水の有効質量の適用例

1. 概要

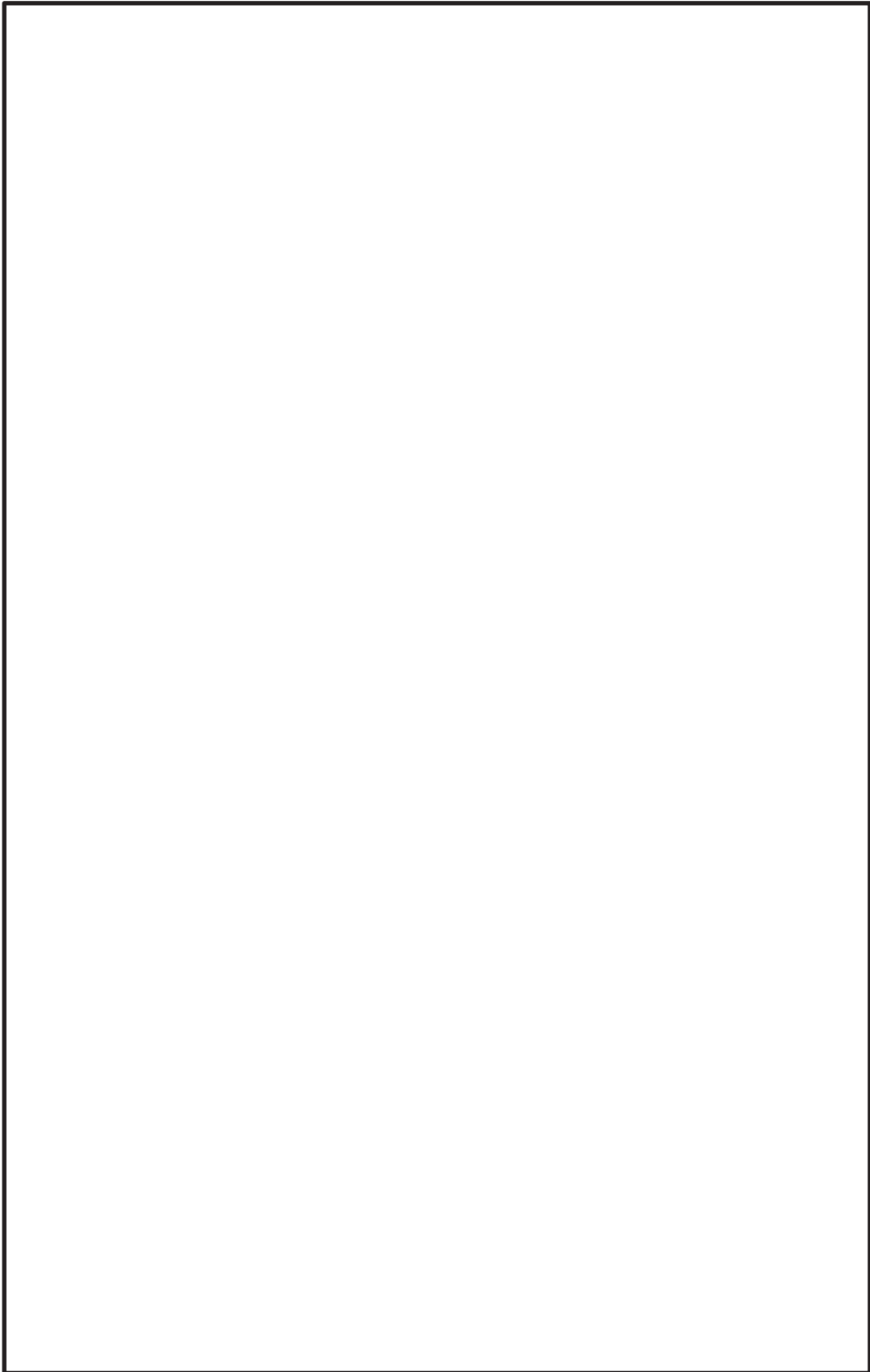
内部水の有効質量の考え方は、他産業の耐震設計において一般的に取り入れられている。その一例として「容器構造設計指針・同解説（日本建築学会）」における球形タンク及び円筒タンク的设计への適用例を示す。

(球形タンクへの適用例)



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(円筒タンクへの適用例)



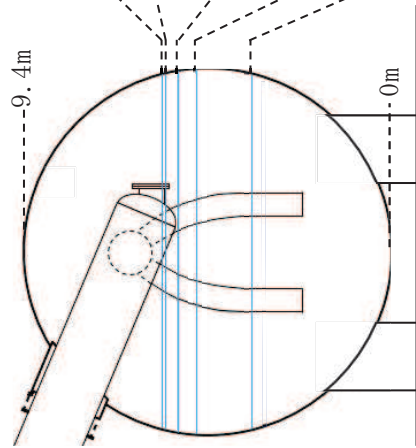
枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

サプレッションチェンバの水位条件

事故シーケンス等におけるサプレッションチェンバの水位について図 1 に示す。なお、重大事故等時におけるサプレッションチェンバの耐震評価に用いる水位条件*の考え方については、表 1 に示す。

また、サプレッションチェンバの機能要求に係る整理結果を別添 1 に、それを踏まえた設計基準事故発生時及び重大事故等発生時のサプレッションチェンバの水位に係る整理結果を別添 2 及び別添 3 に、それぞれ示す。

注記 *：添付書類「VI-1-8-1 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書」を参照



水位	位置	水位の 範囲	警報等	事故シナリオ等
約 7.8m	—		—	—
約 6.4m	真空破壊装置上端位置		—	—
約 5.9m	真空破壊装置下端位置		—	重大事故等時の耐震評価 (S s, S d) に用いる水位 (耐震解析用重大事故等時水位)
約 5.8m	—	← → ← →	—	格納容器過圧・過温破損 代替循環冷却系を使用できない場合 (2Pd に到達するまでに操作を実施しな かった場合 (大破断 LOCA 発生時))
約 5.5m	真空破壊装置下端位置 -0.4m		非常時操作手順書に基づ く PCV ベント実施水 位	格納容器過圧・過温破損 (代替循環冷却系を使用できない場合)
約 5.0m	—		—	—
5m 以下	—	← →	—	格納容器過圧・過温破損 (代替循環冷却系を使用する場合)
3.6m	通常運転水位 (H.W.L)	← →	圧力抑制室水位 “高”	通常運転時の耐震評価 (S s, S d) に用 いる水位
3.5m	通常運転水位 (L.W.L)	← →	圧力抑制室水位 “低”	—

図 1 事故シナリオ等におけるサブプレッションチェンバの水位

表 1 サプレッションチェンバの耐震評価に用いる水位条件の考え方

運転状態	荷重の組合せ	許容応力状態	想定する水位条件	水位条件の想定の方	耐震評価に用いる水位条件	耐震評価に用いる水位条件の考え方
DB	D + P + M + S d *	III _{AS}	3.5m (L. W. L) ～ 3.6m (H. W. L)	保安規定*1に基づきサブプレッショ ンチェンバの水位を管理しており、 運転上の制限を満足しない場合は、高 措置（運転上の制限内への復旧、高 温・冷温停止又はスクラム）を講じ ることとしている。	3.6m (H. W. L) (0. P. -3, 800mm)	耐震評価上、水位 が高い方が地震時 の応答が大きくな る傾向があること から、運転上の制 限も踏まえ通常運 転範囲の上限值 (3.6m (H. W. L)) を 用いる。*2
		IV _{AS}				
	D + P _L + M _L + S d * D + P _L * + M _L + S d *	III _{AS}	3.5m (L. W. L) ～ 約 5.8m	運転手順に基づきサブプレッショ ンチェンバの水位を管理しており、格 納容器過圧・過温破損(全事故シー ケンスのうち、格納容器水位が最も 厳しくなる事故シーケンスを選定) のうち以下を踏まえた水位条件 ・格納容器過圧・過温破損「代替循 環冷却系を使用できなない場合 (2Pdに到達するまでに操作を実 施しなかった場合(大破断 LOCA 発生時))」*3	約 5.9m*4 (0. P. -1, 514mm)	耐震評価上、水位 が高い方が地震時 の応答が大きくな る傾向があること から、格納容器過 圧・過温破損の水 位条件を上回る条 件を用いる。
		IV _{AS}				
SA	D + P _{SAL} + M _{SAL} + S d D + P _{SALL} + M _{SALL} + S s	IV _{AS} IV _{AS}	3.5m (L. W. L) ～ 約 5.8m	運転手順に基づきサブプレッショ ンチェンバの水位を管理しており、格 納容器過圧・過温破損(全事故シー ケンスのうち、格納容器水位が最も 厳しくなる事故シーケンスを選定) のうち以下を踏まえた水位条件 ・格納容器過圧・過温破損「代替循 環冷却系を使用できなない場合 (2Pdに到達するまでに操作を実 施しなかった場合(大破断 LOCA 発生時))」*3	約 5.9m*4 (0. P. -1, 514mm)	耐震評価上、水位 が高い方が地震時 の応答が大きくな る傾向があること から、格納容器過 圧・過温破損の水 位条件を上回る条 件を用いる。

注記*1：女川原子力発電所原子炉施設保安規定【第1編 運転段階の発電用原子炉施設編（2号炉および3号炉に係る保安措置）】第46条 サ
プレッショナルの水位(補足1参照)

*2：運転上の制限を満足しない場合は、保安規定に定める復旧時間等を踏まえ、耐震評価に用いる水位条件に考慮しない。

*3：有効性評価結果を踏まえた非常時操作手順書（シビアアクシデント）「SOP」において、サブプレッショナルチェンバの水位が通常運転水位＋約
2m（約5.5m）到達をもってD/W代替スプレイを停止し、PCVベントを行う手順としている。また、2Pdに達するまで操作を実施しなかった
場合においても、サブプレッショナルチェンバの水位は、約5.8mであり、耐震評価に用いる水位条件約5.9mを上回ることはない。

*4：真空破壊装置下端位置（0. P. -1. 514mm）の水位（5, 886mm）を処理した値。

(記号の説明)

- D : 死荷重
- P : 地震と組み合わせすべきプラントの運転状態(地震との組合せが独立な運転状態Ⅳ, Vは除く。)における圧力荷重
- M : 地震及び死荷重以外で地震と組み合わせべきプラントの運転状態(地震との組合せが独立な運転状態Ⅳ, Vは除く。)で設備に作用している機械的荷重
- 〔 各運転状態におけるP及びMについては, 安全側に設定された値(最高使用圧力, 設計機械荷重等)を用いてもよい。 〕
- P_L : 地震との組合せが独立な運転状態Ⅳの事故の直後を除き, その後に生じている圧力荷重
- P_L^* : 冷却材喪失事故後最大内圧
- M_L : 地震との組合せが独立な運転状態Ⅳの事故の直後を除き, その後に生じている死荷重及び地震荷重以外の機械的荷重
- P_{SAL} : 重大事故等時の状態(運転状態Ⅴ)で長期的(長期(L))に作用する圧力荷重
- M_{SAL} : 重大事故等時の状態(運転状態Ⅴ)で長期的(長期(L))に作用する機械的荷重
- P_{SALL} : 重大事故等時の状態(運転状態Ⅴ)で長期的(長期(L))より更に長期的(長期(LL))に作用する圧力荷重
- M_{SALL} : 重大事故等時の状態(運転状態Ⅴ)で長期的(長期(L))より更に長期的(長期(LL))に作用する機械的荷重
- S_d : 弾性設計用地震動 S_d により定まる地震力
- S_d^* : 弾性設計用地震動 S_d により定まる地震力又はSクラス設備に適用される静的地震力のいずれか大きい方の地震力
- S_s : 基準地震動 S_s により定まる地震力
- Ⅲ_AS : 発電用原子力設備規格(設計・建設規格(2005年版(2007年追補版含む。))JSMESNC1-2005/2007)(日本機械学会2007年9月)(以下「設計・建設規格」という。)の供用状態C相当の許容応力を基準として, それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態
- Ⅳ_AS : 設計・建設規格の供用状態D相当の許容応力を基準として, それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態

補足1 女川原子力発電所原子炉施設保安規定 抜粋

(サブレーションプールの水位)

第46条 原子炉の状態が運転、起動および高温停止において、サブレーションプールの水位は、表46-1(図46)で定める事項を運転上の制限とする。ただし、地震時を除く。

2. サブレーションプールの水位が前項で定める運転上の制限を満足していることを確認するため、次号を実施する。

(1) 発電課長は、原子炉の状態が運転、起動または高温停止において、サブレーションプールの水位を24時間に1回確認する。

3. 発電課長は、サブレーションプールの水位が第1項で定める運転上の制限を満足していないと判断した場合は、表46-2の措置を講じる。

表46-1

項目	運転上の制限
サブレーションプール水位	+5.0cm(上限値)以下 -5.0cm(下限値)以上

図46

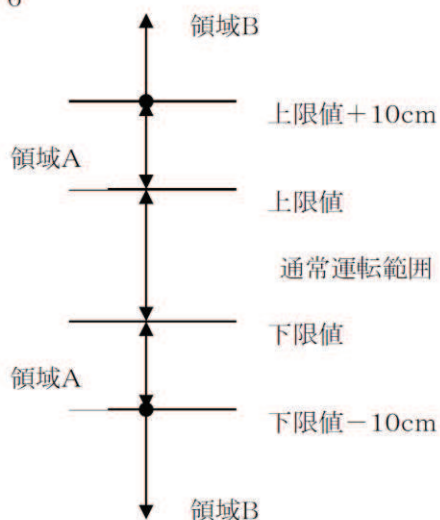


表46-2

条件	要求される措置	完了時間
A. サブレーションプールの水位が図46の領域Aの場合	A1. サブレーションプールの水位を制限値以内に復旧する。	24時間
B. 条件Aで要求される措置を完了時間内に達成できない場合	B1. 高温停止にする。 および B2. 冷温停止にする。	24時間 36時間
C. サブレーションプールの水位が図46の領域Bの場合	C1. 原子炉をスクラムする。	速やかに

注記：図46に記載の上限値は、H.W.L(3.6m)を表し、下限値は、L.W.L(3.5m)を表す。

サブプレッションチェンバの機能要求について

1. サプレッションチェンバに求められる機能及びサブプレッションチェンバの耐震性へ影響を与える機能（別添 1-補足）

サブプレッションチェンバに求められる機能を網羅的に整理するため、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の各条文に対する女川原子力発電所 2 号炉の系統・設備のうち、サブプレッションチェンバが含まれる系統・設備を抽出し、抽出した系統・設備においてサブプレッションチェンバに求められる機能としては、「蒸気凝縮機能」、「冷却材等の貯蔵機能」、「蒸気排出機能」、「水源機能」及び「バウンダリ機能」が整理された。

上記に示す機能のうち、サブプレッションチェンバの水位に影響を与える機能としては、以下のとおり整理された。

- ・ 蒸気凝縮機能
- ・ 冷却材等の貯蔵機能^{※1}
- ・ 蒸気排出機能
- ・ 水源機能

※1 格納容器内雰囲気モニタ系からのドレン水等については、排出する水量は極少量でありサブプレッションチェンバの水位への影響はない程度（格納容器内雰囲気モニタ系：約 0.02cm/d の水位上昇）

なお、プラント停止時においては、一部の系統において実施する機能試験の冷却水等がサブプレッションチェンバに流入するものの、流入量は最大で 10m³程度^{※2}であり、その際のサブプレッションチェンバの水位上昇量は 1 cm 程度であることから、水位への影響は軽微である。また、重大事故等対策の有効性評価「原子炉冷却材の流出」において、原子炉圧力容器からサブプレッションチェンバへの冷却材の流入（約 200m³）を想定しているが、サブプレッションチェンバの水位上昇量は 20cm 程度であり、その際のサブプレッションチェンバの水位は約 3.8m であることから、真空破壊装置下端位置（約 5.9m）に到達することはない。

※2 サプレッションチェンバへ流入が発生する主な機能試験の実績

- 可燃性ガス濃度制御系機能試験 : 約 9 m³
- 原子炉隔離時冷却系機能試験 : 約 8 m³

2. サプレッションチェンバへ流入及び流出する冷却材について

1. において抽出されたサブプレッションチェンバの水位に影響を与える機能を具体化するため、サブプレッションチェンバへの流入・流出形態を踏まえサブプレッションチェンバへの接続配管ごとに、表 1 として整理した。なお、表 1 のうち過渡事象／事故において、LOCA 発生時においては LOCA ブローダウンによりサブプレッションチェンバへ蒸気が流入することから、LOCA と過渡事象（Non-LOCA）を区別して記載した。

表1 サプレッションチェンバへの冷却材の流入及び流出

プラント状態		流入※3		流出※3	
		蒸気	水	蒸気	水
過渡事象 ／ 事故	LOCA	①主蒸気逃がし安全弁排気管クエンチャ ②原子炉隔離時冷却系等の排気管 ③ベント管 (LOCA ブローダウン)	③ベント管 (炉心冠水後の冷却水, ドライウェルスプレイ水) ④サプレッションチェンバスプレイ配管 (サプレッションチェンバスプレイ水)	⑤格納容器ベント配管	⑥残留熱除去系ポンプ (格納容器スプレイ冷却モード) 等吸込配管
	過渡事象 (Non-LOCA)	①主蒸気逃がし安全弁排気管クエンチャ ②原子炉隔離時冷却系等の排気管	③ベント管 (ドライウェルスプレイ水) ④サプレッションチェンバスプレイ配管 (サプレッションチェンバスプレイ水)	⑤格納容器ベント配管	⑥残留熱除去系ポンプ (格納容器スプレイ冷却モード) 等吸込配管
通常運転時		—	—	—	—

※3 No. については図1 と対応

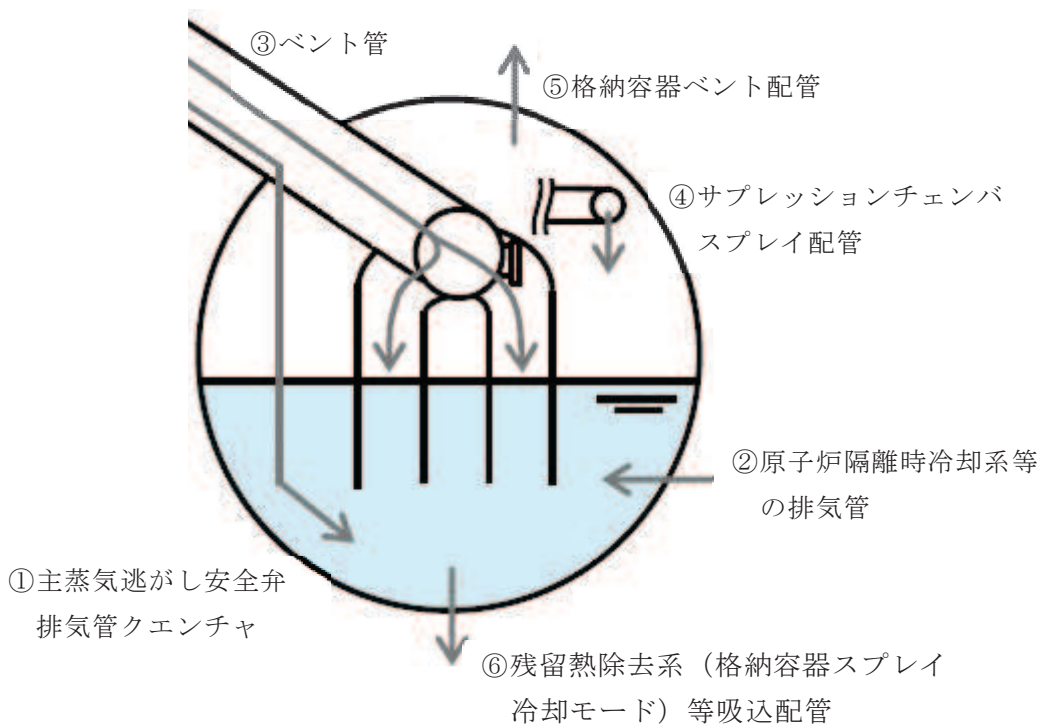


図1 サプレッションチェンバに係る冷却材の流入及び流出の概要

サブプレッションチェンバに求められる機能の抽出及び
サブプレッションチェンバの耐震性へ影響を与える機能の整理

1. サプレッションチェンバに求められる機能の抽出

(1) 検討フロー

サブプレッションチェンバに求められる機能を網羅的に抽出するため、下図に示す検討フローに基づき、検討を実施する。

STEP 1

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の各条文に対する女川原子力発電所2号炉の系統・設備のうち、サブプレッションチェンバが含まれる系統・設備及びサブプレッションチェンバの機能を必要とする系統・設備を抽出する

STEP 2

STEP 1 において抽出した系統・設備において、サブプレッションチェンバに求められる機能を整理する

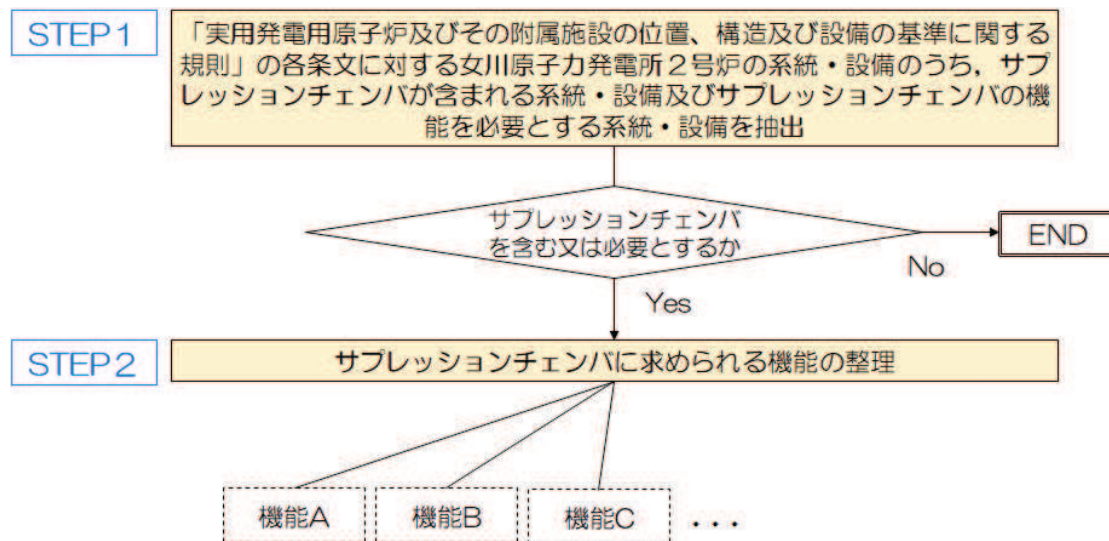


図 検討フロー

(2) 検討結果

表 1 に、検討フローに基づき検討した結果を示す。

サブプレッションチェンバに求められる機能としては、「蒸気凝縮機能」、「冷却材等の貯蔵機能」、「蒸気排出機能」、「水源機能」及び「バウンダリ機能」が抽出された。

2. サプレッションチェンバの耐震性へ影響を与える機能の整理

1. にて抽出されたサプレッションチェンバに求められる機能について、サプレッションチェンバの耐震性への影響という観点で整理を行う。

設計基準対象施設の S クラス施設、重大事故等対処設備の常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備における基準地震動 S_s 又は弾性設計用地震動を用いた耐震評価においては、「構造」に加えて「圧力」、「温度」及び「水位（＝内部水質量）」の条件が評価結果に与える影響がある。ここで、「構造」については、耐震評価も含め各条文で要求される機能を踏まえた構造であることの確認結果を今回工認で示しており、「圧力」及び「温度」については、耐震評価における荷重と地震の組合せで整理していることから、本資料では「水位」に着目する。

以上を踏まえて、サプレッションチェンバの水位に影響を与える機能を整理した結果、「蒸気凝縮機能」、「冷却材等の貯蔵機能」、「蒸気排出機能」及び「水源機能」が整理された（表 2 参照）。

表1 サプレッションチェンバが含まれる系統・設備等，求められる機能（1/8）

条文		サプレッションチェンバが含まれる系統・設備及びサプレッションチェンバの機能を必要とする系統・設備	サプレッションチェンバに求められる機能
1	適用範囲	なし	—
2	定義	なし	—
3	設計基準対象施設の地盤	なし	—
4	地震による損傷の防止	なし	—
5	津波による損傷の防止	なし	—
6	外部からの衝撃による損傷の防止	なし	—
7	発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止	なし	—
8	火災による損傷の防止	なし	—
9	溢水による損傷の防止等	なし	—
10	誤操作の防止	なし	—
11	安全避難通路等	なし	—
12	安全施設	原子炉隔離時冷却系（試験又は検査実施時）	・蒸気凝縮機能
		可燃性ガス濃度制御系（試験又は検査実施時）	・冷却材等の貯蔵機能※
13	運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止	原子炉系（主蒸気逃がし安全弁）	・蒸気凝縮機能

※ ドレン排出水の水量は極少量であり，サプレッションチェンバの水位への影響はない

表1 サプレッションチェンバが含まれる系統・設備等，求められる機能（2/8）

条文		サプレッションチェンバが含まれる系統・設備及びサプレッションチェンバの機能を必要とする系統・設備	サプレッションチェンバに求められる機能
14	全交流動力電源喪失対策設備	なし	—
15	炉心等	なし	—
16	燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	なし	—
17	原子炉冷却材圧力バウンダリ	なし	—
18	蒸気タービン	なし	—
19	非常用炉心冷却設備	高圧炉心スプレイ系	<ul style="list-style-type: none"> ・ 蒸気凝縮機能 ・ 冷却材等の貯蔵機能 ・ 水源機能
		原子炉系（自動減圧系主蒸気逃がし安全弁）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 蒸気凝縮機能
		低圧炉心スプレイ系	<ul style="list-style-type: none"> ・ 蒸気凝縮機能 ・ 冷却材等の貯蔵機能 ・ 水源機能
		残留熱除去系（低圧注水系）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 蒸気凝縮機能 ・ 冷却材等の貯蔵機能 ・ 水源機能
20	一次冷却材の減少分を補給する設備	原子炉隔離時冷却系	<ul style="list-style-type: none"> ・ 蒸気凝縮機能 ・ 冷却材等の貯蔵機能

表1 サプレッションチェンバが含まれる系統・設備等，求められる機能（3/8）

条文		サプレッションチェンバが含まれる系統・設備及びサプレッションチェンバの機能を必要とする系統・設備	サプレッションチェンバに求められる機能
21	残留熱を除去することができる設備	原子炉系（主蒸気逃がし安全弁）	・ 蒸気凝縮機能
		原子炉隔離時冷却系	・ 蒸気凝縮機能 ・ 冷却材等の貯蔵機能
		高圧炉心スプレイ系	・ 蒸気凝縮機能 ・ 冷却材等の貯蔵機能 ・ 水源機能
22	最終ヒートシンクへ熱を輸送することができる設備	原子炉系（主蒸気逃がし安全弁）	・ 蒸気凝縮機能
		原子炉隔離時冷却系	・ 蒸気凝縮機能 ・ 冷却材等の貯蔵機能
23	計測制御系統施設	なし	—
24	安全保護回路	なし	—
25	反応度制御系統及び原子炉停止系統	ほう酸水注入系	・ 蒸気凝縮機能 ・ 冷却材等の貯蔵機能
26	原子炉制御室等	なし	—
27	放射性廃棄物の処理施設	なし	—
28	放射性廃棄物の貯蔵施設	なし	—
29	工場等周辺における直接線等からの防護	なし	—
30	放射線からの放射線業務従事者の防護	なし	—
31	監視設備	格納容器内雰囲気モニタ系	・ 冷却材等の貯蔵機能※

※ ドレン排出水の水量は極少量であり，サプレッションチェンバの水位への影響はない

表1 サプレッションチェンバが含まれる系統・設備等，求められる機能（4/8）

条文		サプレッションチェンバが含まれる系統・設備及びサプレッションチェンバの機能を必要とする系統・設備	サプレッションチェンバに求められる機能
32	原子炉格納施設	原子炉格納容器	・バウンダリ機能
		残留熱除去系	・冷却材等の貯蔵機能 ・水源機能
		可燃性ガス濃度制御系	・冷却材等の貯蔵機能※
33	保安電源設備	なし	—
34	緊急時対策所	なし	—
35	通信連絡設備	なし	—
36	補助ボイラー	なし	—
37	重大事故等の拡大の防止等	(残留熱除去系)	・冷却材等の貯蔵機能 (停止時の有効性評価の起因事象として，サプレッションチェンバへの冷却材の流入を想定)
38	重大事故等対処施設の地盤	なし	—
39	地震による損傷の防止	なし	—
40	津波による損傷の防止	なし	—
41	火災による損傷の防止	なし	—
42	特定重大事故等対処施設	(対象外)	—
43	重大事故等対処設備	高圧代替注水系（試験又は検査実施時）	・蒸気凝縮機能
		原子炉隔離時冷却系（試験又は検査実施時）	・蒸気凝縮機能
44	緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備	ほう酸水注入系	・蒸気凝縮機能 ・冷却材等の貯蔵機能

※ ドレン排水の水量は極少量であり，サプレッションチェンバの水位への影響はない

表1 サプレッションチェンバが含まれる系統・設備等, 求められる機能 (5/8)

条文		サプレッションチェンバが含まれる系統・設備及びサプレッションチェンバの機能を必要とする系統・設備	サプレッションチェンバに求められる機能
45	原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	高圧代替注水系	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気凝縮機能 ・冷却材等の貯蔵機能
		原子炉隔離時冷却系	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気凝縮機能 ・冷却材等の貯蔵機能
		高圧炉心スプレイ系	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気凝縮機能 ・冷却材等の貯蔵機能 ・水源機能
		ほう酸水注入系	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気凝縮機能 ・冷却材等の貯蔵機能
46	原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備	主蒸気逃がし安全弁	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気凝縮機能
47	原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	低圧代替注水系 (常設)	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気凝縮機能 ・冷却材等の貯蔵機能
		低圧代替注水系 (可搬型)	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気凝縮機能 ・冷却材等の貯蔵機能
		残留熱除去系 (低圧注水モード)	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気凝縮機能 ・冷却材等の貯蔵機能 ・水源機能
		低圧炉心スプレイ系	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気凝縮機能 ・冷却材等の貯蔵機能 ・水源機能
		代替循環冷却系	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気凝縮機能 ・冷却材等の貯蔵機能 ・水源機能

表1 サプレッションチェンバが含まれる系統・設備等，求められる機能（6/8）

条文		サプレッションチェンバが含まれる系統・設備及びサプレッションチェンバの機能を必要とする系統・設備	サプレッションチェンバに求められる機能
48	最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備	原子炉格納容器フィルタベント系	・蒸気排出機能
		耐圧強化ベント系	・蒸気排出機能
		残留熱除去系（格納容器スプレイ冷却モード）	・冷却材等の貯蔵機能 ・水源機能
		残留熱除去系（サプレッションプール水冷却モード）	・冷却材等の貯蔵機能 ・水源機能
49	原子炉格納容器内の冷却等のための設備	原子炉格納容器代替スプレイ冷却系（常設）	・冷却材等の貯蔵機能
		原子炉格納容器代替スプレイ冷却系（可搬型）	・冷却材等の貯蔵機能
		残留熱除去系（格納容器スプレイ冷却モード）	・冷却材等の貯蔵機能 ・水源機能
		残留熱除去系（サプレッションプール水冷却モード）	・冷却材等の貯蔵機能 ・水源機能
50	原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備	代替循環冷却系	・蒸気凝縮機能 ・冷却材等の貯蔵機能 ・水源機能
		原子炉格納容器フィルタベント系	・蒸気排出機能

表1 サプレッションチェンバが含まれる系統・設備等，求められる機能（7/8）

条文		サプレッションチェンバが含まれる系統・設備及びサプレッションチェンバの機能を必要とする系統・設備	サプレッションチェンバに求められる機能
51	原子炉格納容器下部の溶融炉心を冷却するための設備	原子炉格納容器下部注水系（常設）	・冷却材等の貯蔵機能
		原子炉格納容器下部注水系（可搬型）	・冷却材等の貯蔵機能
		原子炉格納容器代替スプレイ冷却系（常設）	・冷却材等の貯蔵機能
		原子炉格納容器代替スプレイ冷却系（可搬型）	・冷却材等の貯蔵機能
		代替循環冷却系	・冷却材等の貯蔵機能 ・水源機能
		高圧代替注水系	・蒸気凝縮機能 ・冷却材等の貯蔵機能
		ほう酸水注入系	・冷却材等の貯蔵機能
		低圧代替注水系（常設）（復水移送ポンプ）	・冷却材等の貯蔵機能
		低圧代替注水系（可搬型）	・冷却材等の貯蔵機能
52	水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備	原子炉格納容器	・バウンダリ機能
		原子炉格納容器フィルタベント系	・蒸気排出機能
		格納容器内雰囲気水素濃度 格納容器内雰囲気酸素濃度	・冷却材等の貯蔵機能※
53	水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備	なし	—
54	使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備	なし	—

※ ドレン排水の水量は極少量であり，サプレッションチェンバの水位への影響はない

表1 サプレッションチェンバが含まれる系統・設備等，求められる機能（8/8）

条文		サプレッションチェンバが含まれる系統・設備及びサプレッションチェンバの機能を必要とする系統・設備	サプレッションチェンバに求められる機能
55	工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備	なし	—
56	重大事故等の収束に必要なとなる水の供給設備	サプレッションチェンバ	・水源機能
57	電源設備	なし	—
58	計装設備	格納容器内雰囲気水素濃度 格納容器内雰囲気酸素濃度	・冷却材等の貯蔵機能※
59	運転員が原子炉制御室にとどまるための設備	なし	—
60	監視測定設備	なし	—
61	緊急時対策所	なし	—
62	通信連絡を行うために必要な設備	なし	—
—	その他の設備	原子炉格納容器	・バウンダリ機能

※ ドレン排水の水量は極少量であり，サプレッションチェンバの水位への影響はない

表2 サプレッションチェンバの水位に与える影響

機能	サプレッションチェンバの水位に与える影響	
蒸気凝縮機能	有	蒸気凝縮時に，水位が上昇
冷却材等の貯蔵機能	有	冷却材等の流入時に，水位が上昇
蒸気排出機能	有	蒸気排出時に，水位が低下
水源機能	有	水源として使用する際に，水位が低下
バウンダリ機能	無	放射性物質等の閉じ込め機能であり，水位の増減はない

設計基準事故発生時のサプレッションチェンバの水位について

1. 設計基準事故時のサプレッションチェンバへの冷却材の流入

運転状態IVで想定する設計基準事故「原子炉冷却材喪失」(以下「LOCA」という。)では、LOCA発生後サプレッションチェンバ(内部水源)を水源とした非常用炉心冷却系による注水開始により、炉心は冠水され、冷却材はLOCAの破断口から格納容器下部及びドライウエル床を經由して、サプレッションチェンバへと流入する。

2. 設計基準事故時に原子炉圧力容器より流出する冷却材の保持について

LOCA発生後に原子炉圧力容器より流出する冷却材量は約 200m^3 である。格納容器下部及びドライウエル床には、 250m^3 弱の冷却材を保有できる容量を有しており、LOCA発生後の原子炉圧力容器より流出する冷却材量は格納容器下部及びドライウエル床に保持される。

その後、サプレッションチェンバを水源とする非常用炉心冷却系による注水が継続するため、サプレッションチェンバの水位は事象発生時の水位以下で推移することから、耐震評価においては、保安規定に基づく運転上の制限値を踏まえ、サプレッションチェンバの水位を「通常運転水位(H.W.L)(3.6m)」に設定している。

なお、非常用炉心冷却系のうち高圧炉心スプレイ系については、第一水源として復水貯蔵タンクを用いるが、サプレッションチェンバの水位がH.W.L(3.6m)に到達すると水源がサプレッションチェンバへ切り替わり、その後復水貯蔵タンク水により注水されることはない。

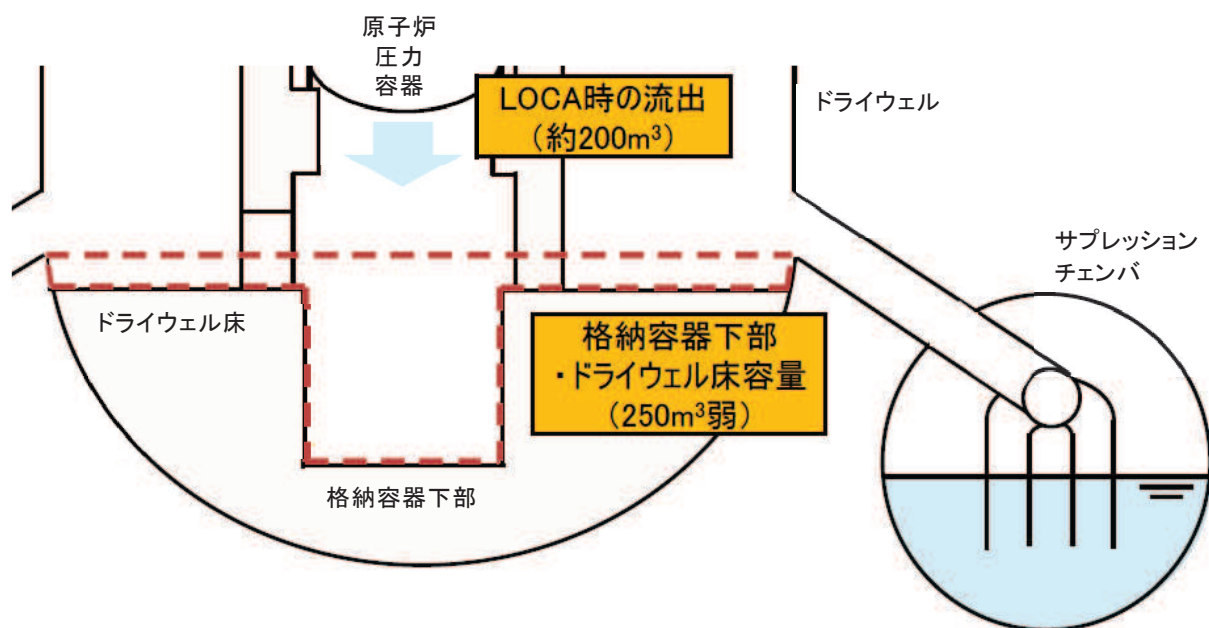


図1 LOCA発生時の流出及び格納容器下部・ドライウエル床容量

重大事故等発生時のサブプレッションチェンバの水位について

1. 重大事故等時のサブプレッションチェンバへの冷却材の流入及び流出

重大事故等時のプラント状態を起因事象を基に分類すると「LOCA」と「過渡事象(Non-LOCA)」の2つに分類され、別添 1 に示すとおり、いずれの場合においても冷却材は圧力抑制機能を担うサブプレッションチェンバに蓄積される。

また、重大事故等時のサブプレッションチェンバの水位の上昇は、残留熱除去系等の機能喪失を想定し、外部水源による注水等を継続的に実施するためであり、その結果、重大事故等時のサブプレッションチェンバへの冷却材の流入及び流出については、表 1 のとおり整理される。

表 1 重大事故等時のサプレッションチェンバへの冷却材の流入及び流出

プラント 状態	流入※ ¹		流出※ ¹	
	蒸気	水	蒸気	水
LOCA	①主蒸気逃がし安全弁 排気管クエンチャ ③ベント管 (LOCA ブローダウン)	③ベント管 (炉心冠水後の冷却水, ドライウェルスプレイ水)	⑤格納 容器 ベント 配管	—
過渡事象 (Non- LOCA)	①主蒸気逃がし安全弁 排気管クエンチャ	③ベント管 (ドライウェルスプレイ水)	⑤格納 容器 ベント 配管	—

※1 各 No. については図 1 と対応

~~XXXX~~ : 重大事故等時に機能喪失を想定

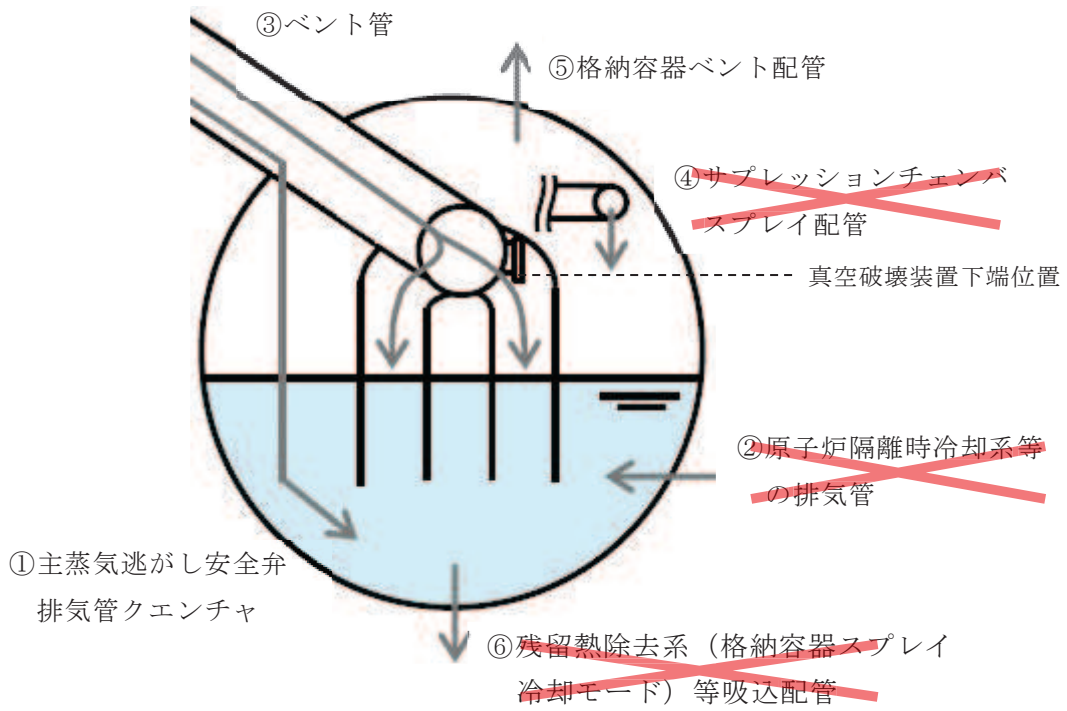


図 1 重大事故時のサプレッションチェンバに係る冷却材の流入及び流出の概要

2. 重大事故等時のサブプレッションチェンバの水位上昇への対応

重大事故等時のサブプレッションチェンバの水位上昇に対しては、重大事故等対処設備を用いた複数計器による水位監視に加え、代替手段として外部水源からの注水量積算（体積）によりサブプレッションチェンバの水位を推定する手段を整備している（表2）。

上記の監視手段を用いてサブプレッションチェンバの水位を継続的に監視するとともに、炉心損傷判断後においては運転手順（技術的能力審査資料 1.7 原子炉格納容器の過圧破損を防止するための手順等）に基づき格納容器代替スプレイを外部水源注水量限界到達（真空破壊装置下端位置-0.4m）により停止し、格納容器ベントを速やかに実施することから、サブプレッションチェンバの水位が真空破壊装置下端位置に到達することはない^{※2}。

万一、外部水源注水量限界到達以降の格納容器ベント実施操作が遅れた場合においても、外部水源注水量限界（真空破壊装置下端位置-0.4m）から真空破壊装置下端位置までは、サブプレッションチェンバの体積として約400m³有しており、崩壊熱除去のために必要となる注水（約20m³/h^{※3}）が継続した場合においても、真空破壊装置下端位置到達までは20時間程度を要するが、中央制御室からの遠隔操作による格納容器ベントが実施できず、現場操作により実施した場合、操作時間（移動時間を含む）は約2時間で実施可能であることから、十分な時間余裕がある。なお、外部水源注水量限界到達時に格納容器代替スプレイの停止操作に失敗し、格納容器代替スプレイが継続することを想定しても、真空破壊装置下端位置に到達するまでに4時間程度の時間余裕がある。このため、万一格納容器代替スプレイの停止遅れが発生した場合においても、運転員による格納容器スプレイの停止に期待できるものと考えられる。

その後、格納容器ベント実施に伴いサブプレッションチェンバの水位は低下するため、サブプレッションチェンバの水位は真空破壊装置下端位置以下で推移することから、耐震評価において、サブプレッションチェンバの水位を「真空破壊装置下端位置（約5.9m）」に設定している。

なお、上記のとおり、サブプレッションチェンバの水位が真空破壊装置下端位置に到達することはないと考えているものの、仮にサブプレッションチェンバの水位が真空破壊装置下端位置を超過した場合においては、大規模損壊の範疇として柔軟に対応を行う。

※2 炉心損傷前においては運転手順（技術的能力審査資料 1.5 最終ヒートシンクへ熱を輸送するための手順等）に基づき外部水源注水量限界到達により格納容器へのスプレイを停止し、格納容器圧力が1Pdに到達した場合に格納容器ベントを実施する。格納容器へのスプレイを停止した以降、炉心冷却の観点から原子炉への注水は継続するため、主蒸気逃がし安全弁を介してサブプレッションチェンバへ冷却材が流入し、水位は上昇することとなるが、真空破壊装置下端位置に到達することはない（参考2参照）

※3 保守的に評価するため、事象発生24時間後に必要となる注水量を使用

表2 サプレッションチェンバの水位監視に係る計器

監視計器	種別	個数	計測範囲
圧力抑制室水位	SA	2	サプレッションチェンバ底面から 3.5 (L. W. L) ~8.5m ^{※4}
外部水源からの注水量積算 (高圧代替注水系ポンプ出口流量, 高圧炉心スプレイ系ポンプ出口流量 他)	SA (代替パラメータ)	1	同上

※4 計器の計測範囲としては 0~5m

さらに、中長期的な手段として、表3に示す格納容器除熱手段を整備しており、循環冷却へ移行することができるため、循環冷却開始以降はサプレッションチェンバの水位は変化しない。

表3 中長期的な格納容器除熱手段

対策	循環冷却
可搬型原子炉格納容器除熱系	可能
原子炉冷却材浄化系	可能
ドライウエル冷却系	可能
残留熱除去系の補修による復旧	可能

【参考1】重大事故等時におけるBWRの荷重作用状態

BWRの荷重作用状態については、従来よりJEAG4601に定められている運転状態I～IVに加えて、重大事故等が発生している状態として新たに運転状態Vを定義している。

また、BWRにおいて重大事故等時に残留熱除去系の機能喪失を前提とした場合、格納容器の以下の特性により格納容器圧力、温度及びサプレッションチェンバの水位が通常運転状態まで低下しないことから、運転状態V(S)及び運転状態V(L)に加えて新たな運転状態として運転状態V(LL)を設定している。

- ・BWRでは事故後の崩壊熱に起因する熱エネルギーをサプレッションチェンバに蓄積
- ・サプレッションチェンバの最高温度の設計思想は「LOCAブローダウン時における凝縮能力」及び「主蒸気逃がし安全弁排気管クエンチャによる蒸気凝縮能力」の確保であり、これらを満足するために、残留熱除去系の除熱能力を設定

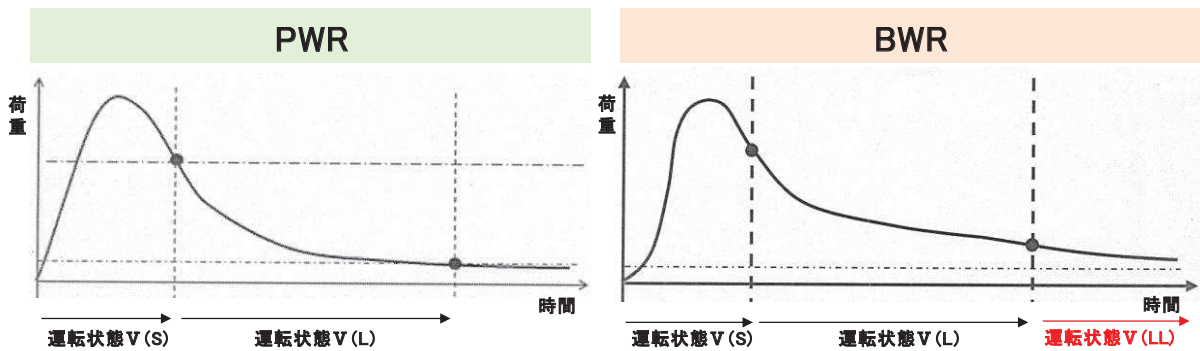
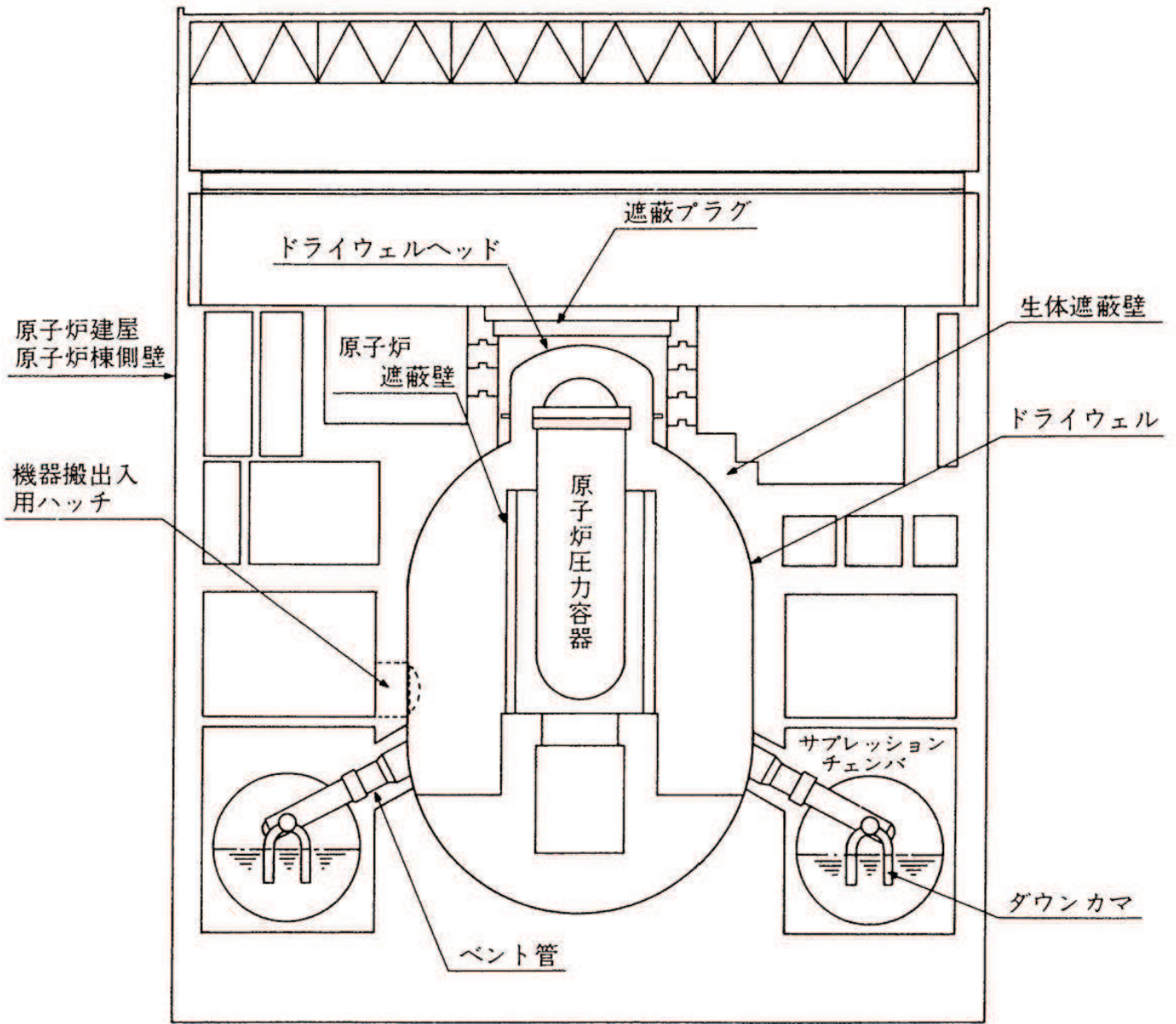


図 PWRとBWRの重大事故等時の荷重の推移(イメージ)

【参考2】炉心損傷防止対策の有効性評価における格納容器ベント実施時のサブプレッション
チェンバの水位

事故シーケンスグループ	サブプレッションチェンバの最大水位 (格納容器ベント実施時)
高圧・低圧注水機能喪失	約 5.7m
崩壊熱除去機能喪失 (残留熱除去系が故障した場合)	約 5.6m
L O C A時注水機能喪失	約 5.7m

【参考3】原子炉格納施設の概要図（設置変更許可申請書より抜粋）



地震時におけるトーラス型容器内部水の有効質量に係る研究の概要

1. 概要

本研究では、トーラス型容器に対し、内部水の水位が有効質量に及ぼす影響や高加速度入力における有効質量を把握するとともに NASTRAN による有効質量評価の妥当性を確認することを目的としている。そのため、実機の縮小モデルによる振動試験、汎用流体解析コード OpenFOAM による数値流体計算を実施した。

2. 研究計画

2.1 研究時期

平成 26 年度～平成 29 年度

2.2 研究体制

本研究は、下記の体制及び役割分担で実施した。

体制	役割分担
東北電力株式会社 中部電力株式会社	研究の計画策定 研究の実施 振動試験実施状況の確認 試験結果及び解析結果の確認
一般財団法人 電力中央研究所	振動試験の実施 OpenFOAM による有効質量の解析
解析会社	NASTRAN による有効質量の解析

なお、プラントメーカーは、研究内容全体に係るレビュー協力

2.3 研究実施場所

本研究における振動試験は、電力中央研究所の振動台で実施した。

3. 振動試験による有効質量評価

3.1 試験体

実機の縮小試験体を製作し振動試験を実施した。試験の状況を図 1 に示す。試験体は実機と同様に 16 個の円筒を円環形に繋いだ形状とし、寸法は実機の約 1/25 となるように、円環の直径 1,484mm、断面の内径 380mm とした。材質は内部水の挙動を確認するため透明の亚克力製とした。試験体の形状及び寸法を図 2 に示す。振動台上には試験体を支持する架台を設け、架台の脚部には水平・鉛直方向の荷重を測定するため、分力計を 90° 間隔で 4 体設置した。なお、別途実施した事前の数値計算により容器や架台には、内容水の挙動や荷重に影響を及ぼすよう

な変形が発生しないことを確認している。

主な計測項目は、振動台上、架台上及び試験体上の加速度、架台を含めた試験体の荷重、架台の変位である。表 1 に計測項目、図 3 に計器配置を示す。

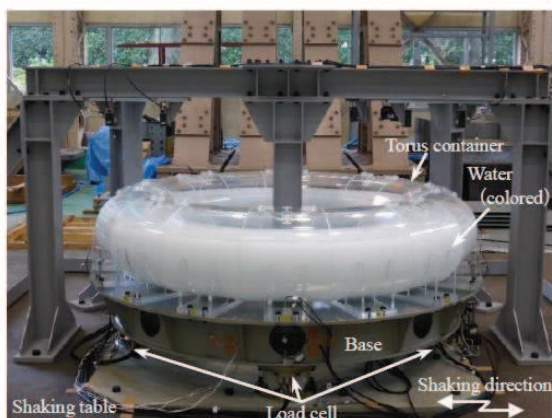


図 1 試験装置

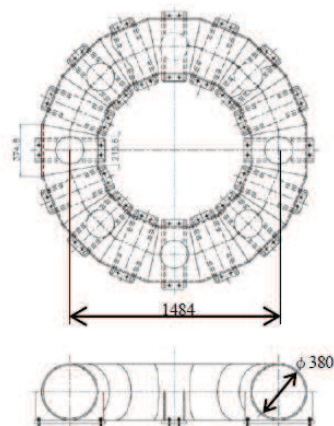


図 2 トーラス型容器

表 1 計測項目

Items	Instruments	Placement
Load	Load cell	Under the base, 90°pitch
Acceleration	Accelerometer	Shaking table, Base, Torus container, etc.
Displacement	Displacement sensor	Base, 0° and 90°

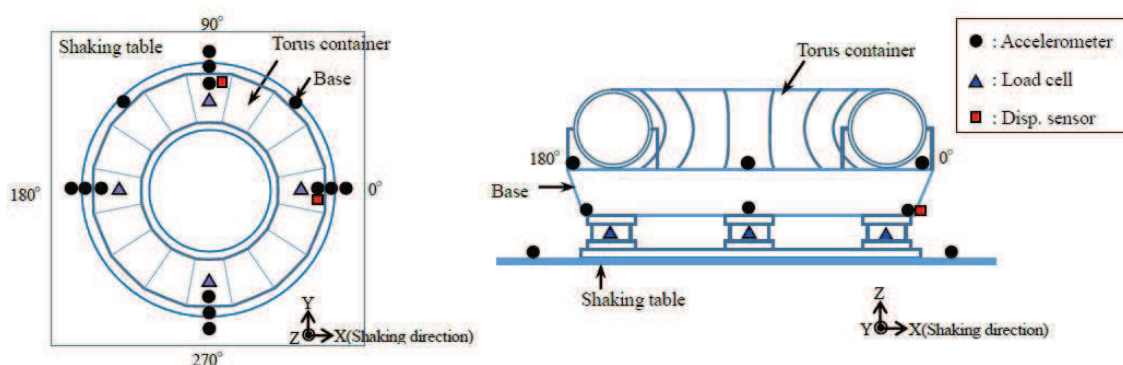


図 3 計測機器設置位置

3.2 試験条件

加振波は、長周期成分及び短周期成分とも加速度レベルが大きい地震波 A 及び短周期成分が相対的に卓越し長周期成分が小さい地震波 B の 2 種類の人工地震波を用いる。図 4 及び図 5 に各地震波の時刻歴波形及び加速度応答スペクトル（減衰 0.5%）を示す。試験では図 4 及び図 5 の地震波の 0.5 倍、1.0 倍及び 1.5 倍で加振を行った。加振は水平 1 方向とする。水位は、内部水なし及び低水位（水位 164mm 又は 146mm）、中水位（水位 218mm 又は 203mm）、高水位（水位 273mm 又は 259mm）及び高高水位（水位 315mm 又は 325mm）の 5 ケースとする。表 2 に試験ケースを示す。

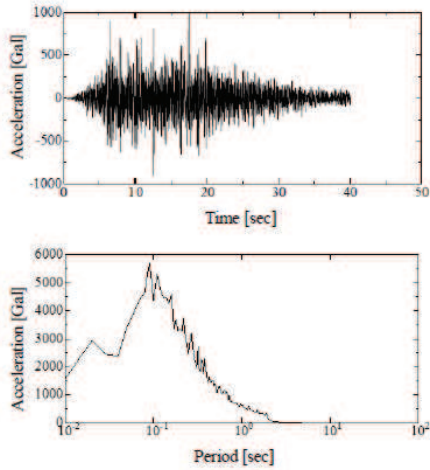


図4 入力地震波 A

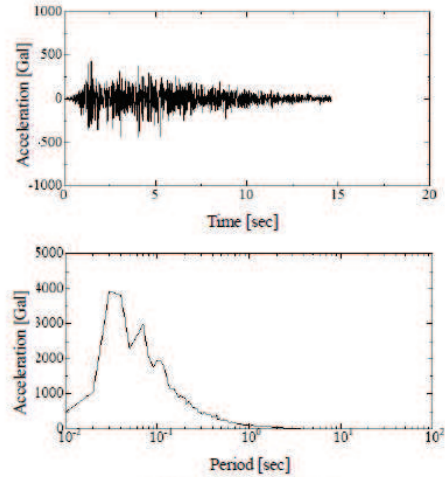


図5 入力地震波 B

表2 試験条件

Input wave	Input magnification	Water level*1	Input wave	Input magnification	Water level*1
Seismic wave-A	×0.5 ×1.0 ×1.5	Empty	Seismic wave-B	×0.5 ×1.0 ×1.5	Empty
		Low(164mm)			Low(146mm)
		Middle(218mm)			Middle(203mm)
		High(273mm)			High(259mm)
		Very high(315mm)			Very high(325mm)

*1 Water level from the bottom of the torus container.

3.3 試験結果に基づく有効質量評価

地震波 A, 入力倍率 1.0 倍, 低水位の試験ケースにおいて計測された荷重の時刻歴波形を図 6 に, 時々刻々の荷重を架台上の計測加速度, すなわち試験体への入力加速度との関係でプロットしたものを図 7 に示す。

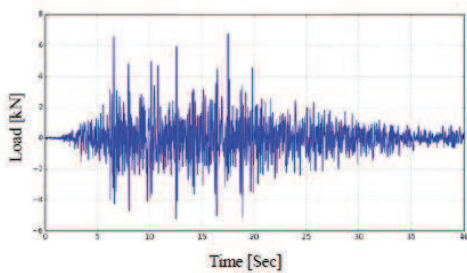


図6 計測荷重の時刻歴波形
(地震波 A×1.0, 低水位)

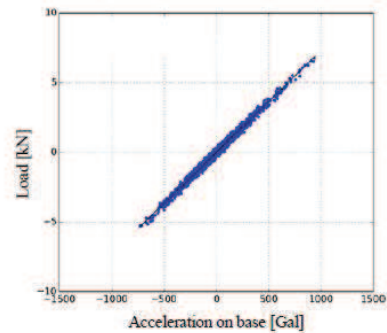


図7 計測荷重と架台上の計測加速度の関係
(地震波 A×1.0, 低水位)

一般的にスロッシングの固有振動数 (0.24~0.39Hz) は低く, 本研究で対象とするような容器支持部に作用する地震荷重への寄与は小さいと考えられるため, 内容水荷重 F [N] と架台上の計測加速度 \ddot{x} [m/s^2] との関係は式(1)で表される。

$$F = (M + M_E)\ddot{x} \quad (1)$$

ここに、 M [kg]は架台を含む容器の質量 M_E [kg]は水の有効質量である。式(1)のとおり、質量は加速度に対する荷重の比として表されることから、図7に示す回帰直線の傾きが架台、容器及び有効質量の総和となる。従って、回帰曲線の傾きから架台及び容器の総質量を引いたものが水の有効質量となり、水の全質量に対する比として有効質量比が算出できる。ただし、本研究では、内部水無しの条件における試験結果を用いて、上記と同様の方法で式(1)より架台及び容器の総質量を算出している。

全試験ケースで得られた水の有効質量比を表3に示す。なお、表3には2Hz ハイパスフィルターによりスロッシング成分をカットした結果も併せて示す。入力倍率による有効質量比の差は、水位変化による差に比べて小さいことを確認した。また、スロッシング成分除去前後で有効質量比はほぼ同じ値であり、上述のように地震波A及びBに対してはスロッシングが有効質量比に与える影響は無視できるほど小さいことを確認した。

表3 振動試験から得られた水の有効質量比

Input wave	Water level*1	Non-filtered			2Hz High-pass filtered*1		
		×0.5	×1.0	×1.5	×0.5	×1.0	×1.5
Seismic wave-A	Low(164mm)	0.14	0.16	0.17	0.14	0.16	0.17
	Middle(218mm)	0.21	0.22	0.23	0.21	0.23	0.23
	High(273mm)	0.30	0.31	0.31	0.30	0.31	0.31
	Very high(315mm)	0.38	0.39	0.40	0.38	0.39	0.40
Seismic wave-B	Low(146mm)	0.14	0.12	0.14	0.14	0.12	0.14
	Middle(203mm)	0.20	0.21	0.21	0.20	0.21	0.21
	High(259mm)	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.29
	Very high(325mm)	0.41	0.42	0.41	0.41	0.42	0.41

*1 High-pass filtered 2Hz to remove the force due to the sloshing

4. NASTRAN による有効質量評価

汎用構造解析ソフト NASTRAN では、容器形状と水位が既知であれば、仮想質量法により有効質量が算出できる。そのため、振動試験や煩雑な数値計算を実施することなく、式(1)より効率的に容器に作用する地震荷重を推定することができる。本研究では、振動試験の各条件に対し、NASTRAN の仮想質量法により有効質量比を算出し、実験結果と比較し、その妥当性を検証する。なお、本方法は流体を非圧縮性のポテンシャル流れと仮定することにより構造物に接する流体の振動質量を求める方法であり、自由表面の重力影響は考慮されない。解析モデルを図8に、解析結果を有効質量比として表4に整理する。

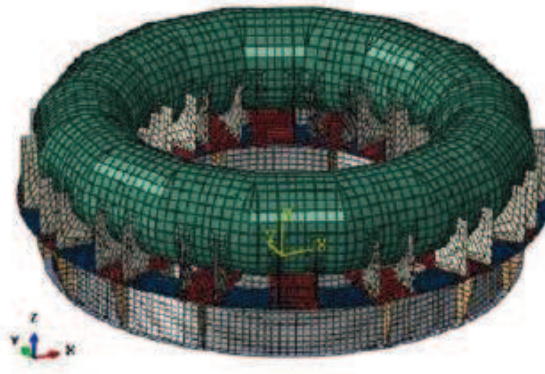


図8 構造解析モデル

5. OpenFOAMによる有効質量評価

前章で示した NASTRAN では、流体を仮想質量として考慮するものであり、スロッシング等の流体の運動は考慮されない。そのため、本章では、オープンソースソフトウェア OpenFOAM による数値流体計算により、流体の運動を考慮した上で、有効質量を算出する。計算に用いる入力波は、振動試験における架台上の計測加速度時刻歴とし、水位は代表として低水位及び高水位とした。なお、有効質量の算出方法は、振動試験結果の整理と同様の方法としている。OpenFOAM による解析結果を有効質量比として表 4 に整理する。

6. 妥当性検証

縮小試験体による振動試験，NASTRAN 及び OpenFOAM のそれぞれで得られた有効質量比を表 4 及び図 9 に整理する。NASTRAN による有効質量比は，いずれの水位においても振動試験や OpenFOAM の結果とよく一致しており，NASTRAN により算出される有効質量は妥当であることが確認された。さらに，水位の増加に伴って有効質量比が増加する傾向を確認した。

表 4 トーラス型容器の水の有効質量比

Input wave	Water level*1	Shaking table test*2	Structural analysis (NASTRAN)	Fluid analysis (OpenFOAM)
Seismic wave-A	Low(164mm)	0.16	0.17	0.17
	Middle(218mm)	0.22	0.24	
	High(273mm)	0.31	0.31	0.31
	Very high(315mm)	0.39	0.39	
Seismic wave-B	Low(146mm)	0.12	0.15	0.15
	Middle(203mm)	0.21	0.22	
	High(259mm)	0.28	0.30	0.28
	Very high(325mm)	0.42	0.41	

*1 Water level from the bottom of the torus container.

*2 Input wave magnification 1.0

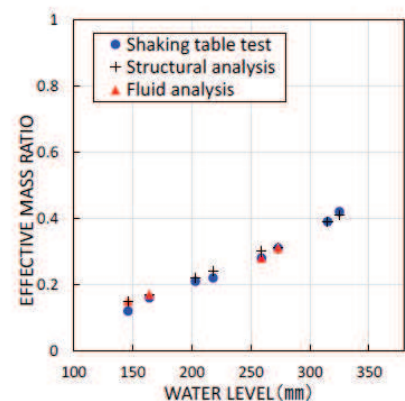


図 9 各水位における有効質量比

7. 結論

トーラス型容器に対し、内部水の水位が有効質量に及ぼす影響や高加速度入力に対する有効質量の把握を目的に、振動試験及び汎用構造解析ソフト NASTRAN 並びにオープンソースソフトウェア OpenFOAM により有効質量を評価し比較を行った。その結果、水位に対する有効質量比の関係が確認された。また、NASTRAN による有効質量算出の妥当性が確認できた。

8. 学会発表実績

本研究結果については、日本機械学会 2016 年度年次大会にて学会発表している。なお、本参考資料の 3. ～7. については、以下の論文データを引用したものである。

地震時におけるトーラス型容器内部水の有効質量の評価, 竹内 正孝, 尾西 重信, 飯田 純, 熊谷 信昭, 豊田 幸宏, 高島 大輔, 永坂 英明, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集, No16-1

内部水の有効質量比に対するスロッシング影響

1. 概要

内部水の有効質量比に対するスロッシング影響の有無を確認するため、振動試験で得られた荷重時刻歴（スロッシング周期成分を含む）及びスロッシング周期成分を取り除いた荷重時刻歴に対する内部水の有効質量比を算定し、比較・検討した。

2. 検討内容

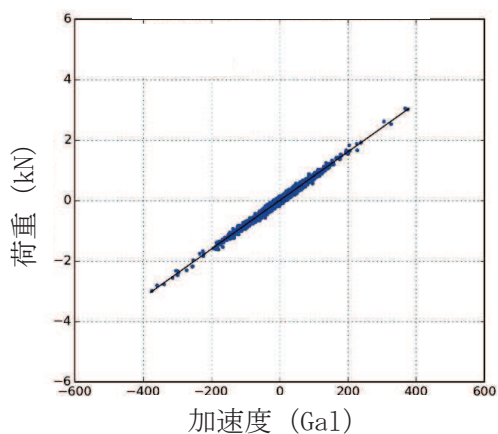
試験体のスロッシング周期は、固有値の解析結果及び正弦波掃引試験により、1.3Hz～1.8Hz（試験体内部の水位により異なる）である。このため、振動試験で得られた荷重時刻歴に対して、2Hzのハイパスフィルター処理を行い、スロッシング周期成分を取り除いた荷重時刻歴を求め、別紙1 2.2.4項の方法にて、内部水の有効質量比を算定した。

また、各水位条件についての内部水の有効質量比に対するスロッシングの影響を検討した。

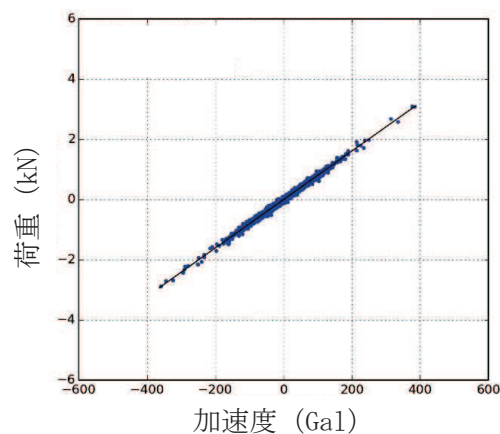
3. 検討結果

スロッシング周期成分有り及びスロッシング周期成分無しの場合の荷重時刻歴に対する加速度と荷重の関係を図1及び内部水の有効質量比の比較結果を表1に示す。

各水位条件について、スロッシング周期成分有り及びスロッシング周期成分無しの内部水の有効質量比に違いはなく、内部水の有効質量比に対するスロッシングの影響はほぼない。



(a) 水位高, 入力倍率 1.0 倍,
スロッシング周期成分有り



(b) 水位高, 入力倍率 1.0 倍,
スロッシング周期成分無し

図1 荷重と加速度の関係

表1 内部水の有効質量比の比較結果

水位	振動試験	
	スロッシング周期成分有り	スロッシング周期成分無し (2Hz ハイパスフィルタ)
低(164mm)	0.12	0.12
中(218mm)	0.21	0.21
高(273mm)	0.28	0.28
高高(315mm)	0.42	0.42

振動試験の内部水の有効質量比

振動試験は同条件で3回以上の試験を実施している。表1に振動試験の全試験回における内部水の有効質量比を示す。同条件での内部水の有効質量比について、ばらつきはほとんどなく、高い再現性があることを確認した。

表1 振動試験の全試験回における内部水の有効質量比

水位	入力倍率	試験回				平均	標準偏差
		1回目	2回目	3回目	4回目		
低	0.5倍	0.1367	0.1494	0.1469	0.1353	0.1421	0.0061
	1.0倍	0.1554	0.1014	0.1187	0.0940	0.1174	0.0237
	1.5倍	0.1447	0.1431	0.1118	0.1429	0.1356	0.0138
中	0.5倍	0.2018	0.1902	0.1947	0.2021	0.1972	0.0050
	1.0倍	0.2103	0.2155	0.1973	-	0.2077	0.0077
	1.5倍	0.2124	0.2179	0.2045	0.2010	0.2090	0.0066
高	0.5倍	0.2877	0.2852	0.2812	-	0.2847	0.0027
	1.0倍	0.2815	0.2823	0.2852	0.2845	0.2834	0.0015
	1.5倍	0.2859	0.2865	0.2818	0.2918	0.2865	0.0035
高高	0.5倍	0.4030	0.4075	0.4098	0.4070	0.4068	0.0025
	1.0倍	0.4165	0.4171	0.4236	-	0.4191	0.0032
	1.5倍	0.4113	0.4125	0.4201	0.4093	0.4133	0.0041

内部水の有効質量比に対する入力地震動の影響

1. 概要

サプレッションチェンバの地震荷重算出に当たり、サプレッションチェンバの内部水の有効質量を NASTRAN により算出することの妥当性を検証するため、実機を縮小模擬した試験体を用いた振動試験を実施しており、両者の内部水の有効質量比が同等であることを確認している。

本資料では、振動試験に用いた入力地震動に対して、加速度振幅及び周期特性の違いによる内部水の有効質量への影響を考察する。

2. 振動試験の入力地震動

振動台への入力波は、別紙 1 2.2.3 項のとおり、女川 2 号機のサプレッションチェンバ設置床における基準地震動 S_s 相当*の応答加速度時刻歴波を用いて、試験体と実機の相似則で時間軸を圧縮したものであり、振動台の加振限界振動数以上の成分をフィルタ処理したものである。

また、振動試験では、上記の入力波を 0.5 倍、1.0 倍、1.5 倍した加速度時刻歴波形を用いて試験を行い、その試験結果から内部水の有効質量比を算出している。

注記 *：平成 25 年 12 月設置変更許可申請時の基準地震動 S_s ($S_s - 2$)

3. 内部水の有効質量比に対する入力地震動の影響検討

3.1 加速度振幅の違い

女川 2 号機の基準地震動 S_s 相当の入力波に対して、入力倍率を変化させて振動試験を実施した結果、各水位条件での内部水の有効質量比は、表 1 に示すとおり、入力波の入力倍率によらず、ほぼ一致している。

この結果は、振動試験に用いた入力地震動の加速度振幅の違いが内部水の有効質量に対して影響がないことを示すものである。

表 1 振動試験から算出した内部水の有効質量比（別紙 1 2.2-3 表の再掲）

水位	入力倍率		
	0.5 倍	1.0 倍	1.5 倍
低 (146mm)	0.14	0.12	0.14
中 (203mm)	0.20	0.21	0.21
高 (259mm)	0.28	0.28	0.28
高高 (325mm)	0.41	0.42	0.41

3.2 周期特性の違い

振動試験においては、女川2号機の基準地震動S_s相当（入力地震波B）を入力地震動とした試験に加えて、図1に示す周期特性の異なる地震動（入力地震波A）を用いた試験を実施している（参考資料5参照）。

また、振動試験では、女川2号機の基準地震動S_s相当に対する試験と同様、周期特性の異なる地震動（入力地震波A）の入力倍率を0.5倍、1.0倍、1.5倍と変化させて、各水位条件に対する振動試験を実施している。

周期特性の異なる地震動（入力地震波A）に対する振動試験から算出された内部水の有効質量比を、女川2号機の基準地震動S_s相当に対する内部水の有効質量比と合わせて、表2及び図2に示す。

振動試験から算出した周期特性の異なる地震動（入力地震波A）に対する内部水の有効質量比は、女川2号機の基準地震動S_s相当と同様、水位増加に伴って増加する傾向があり、入力波の入力倍率によらず、各水位条件でほぼ一致している。

また、女川2号機の基準地震動S_s相当及び周期特性の異なる地震動（入力地震動A）に対する内部水の有効質量比について、水位が近接している条件（低水位、中水位、高水位、高高水位）での内部水の有効質量比は、ほぼ同等であることが分かる。これは、内部水の有効質量は、入力地震動の周期特性によらず、評価対象とする容器の形状及び容器内の水位に依存していることを示すものと考えられる。

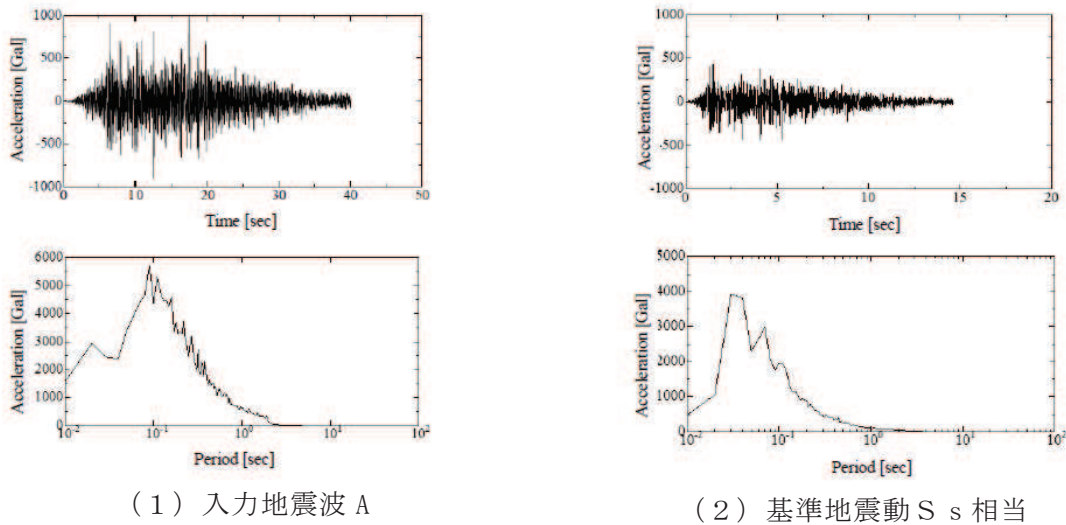


図1 振動試験に用いた地震動比較

(別紙11 図4、図5の再掲)

表 2 入力地震動の加速度振幅及び周期特性の違いによる内部水の有効質量への影響
(別紙 11 表 3 の再掲)

Input wave	Water level*1	Non-filtered			2Hz High-pass filtered*1		
		×0.5	×1.0	×1.5	×0.5	×1.0	×1.5
Seismic wave-A	Low(164mm)	0.14	0.16	0.17	0.14	0.16	0.17
	Middle(218mm)	0.21	0.22	0.23	0.21	0.23	0.23
	High(273mm)	0.30	0.31	0.31	0.30	0.31	0.31
	Very high(315mm)	0.38	0.39	0.40	0.38	0.39	0.40
Seismic wave-B	Low(146mm)	0.14	0.12	0.14	0.14	0.12	0.14
	Middle(203mm)	0.20	0.21	0.21	0.20	0.21	0.21
	High(259mm)	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.29
	Very high(325mm)	0.41	0.42	0.41	0.41	0.42	0.41

*1 High-pass filtered 2Hz to remove the force due to the sloshing

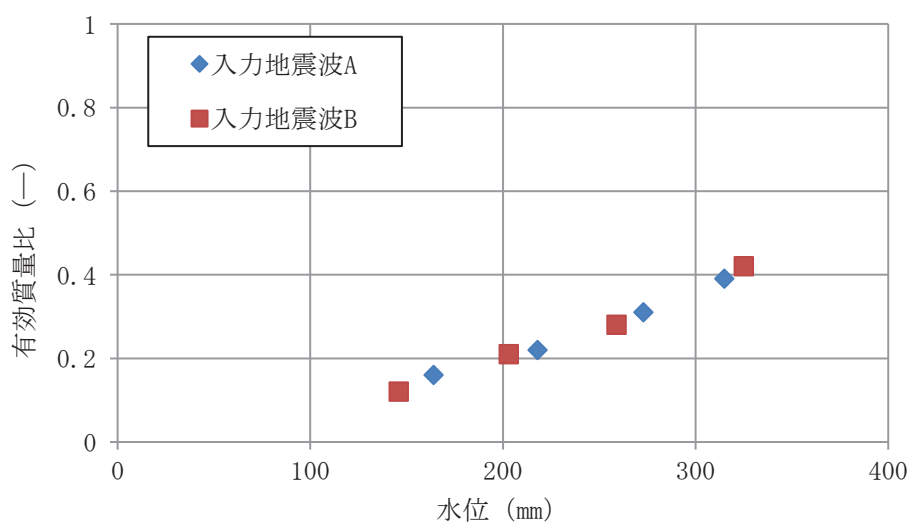


図 2 入力地震動の加速度振幅及び周期特性の違いによる内部水の有効質量への影響

4. 考察

上記のとおり、振動試験に用いた入力地震動に対する加速度振幅及び周期特性の違いによる内部水の有効質量への影響について、今回実施した振動試験結果を用いて検討した結果、入力地震動の加速度振幅及び周期特性の違いによる影響がないことを確認した。

なお、今回の検討結果は、NASTRANにより算出される内部水の有効質量が評価対象とする容器形状及び容器内水位を与えられれば、地震動を用いることなく、内部水の有効質量を算出できるという特徴とも整合しているものと考えられる。

サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング荷重及び有効質量の影響評価

1. スロッシング荷重の影響評価

サプレッションチェンバ内部水によるスロッシング荷重は、サプレッションチェンバの主要な内部構造物を考慮した影響確認用解析モデルを用いて、水平1方向+鉛直方向の地震動を入力した解析結果から算定している。

上記解析条件に対して、地震動による影響、鉛直方向地震動による影響、水平2方向入力による影響及び内部構造物による影響を検討し、スロッシング荷重及び内部水の有効質量に与える影響について検討を行う。検討にあたって、内部水の有効質量の算定方法、スロッシング荷重の算定方法は、別紙1及び別紙6に記載した方法を用いている。

2. 地震動による影響

地震動による影響検討は、地震動の特徴を考慮し、スロッシングの卓越周期帯の応答加速度が大きいS_s-F2、スロッシングの卓越周期帯の応答加速度が大きく、継続時間が長いS_s-D1、及び設備の固有周期帯の応答加速度が大きいS_s-D2を用い、水位条件は、通常運転時及び重大事故等時の水位条件とする。

2.1 影響確認用解析モデル

影響確認用解析モデルを図1に、解析諸元を表1に示す。



図1 解析モデル図

表1 解析諸元

項目	内容
格子数	約 140 万
格子幅	約 0.5cm~45cm

2.2 解析条件

解析条件を表2に示す。

表2 解析条件

項目	内容
モデル化範囲	サプレッションチェンバ内
水位	通常運転水位 (H. W. L : O. P. -3, 800) 耐震評価用重大事故等時水位 (真空破壊装置下端水位 : O. P. -1, 514) *1
評価用地震動	基準地震動 S_s (水平方向と鉛直方向) *2 に対する 原子炉建屋 O. P. -8, 100 における建屋床応答
解析コード	OpenFOAM Ver. 4.1 (汎用流体解析コード) VOF 法を用いた流体解析
その他	内部構造物のモデル化範囲 : 強め輪 (補強前), ベントヘッド, ダウンカマ, T-クエンチャ及びその配管, ECCS ストレーナ取 付配管
解析条件	気相物性*3 動粘度 : $1.51 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 密度 : $1.205 \text{ kg}/\text{m}^3$ 液相物性*3 動粘度 : $1.0038 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 密度 : $998.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ 境界条件 : 全境界面で不透過滑りなし条件

注記*1 : 重大事故等時水位よりも高い水位

*2 : 地震動の特徴を考慮し, スロッシングの卓越周期帯の応答加速度が大きい $S_s - F2$, スロッシングの卓越周期帯の応答加速度が大きく, 継続時間が長い $S_s - D1$, 及び設備の固有周期帯の応答加速度が大きい $S_s - D2$ を用いて検討する。

*3 : 理科年表 (20°C, 1気圧の値)

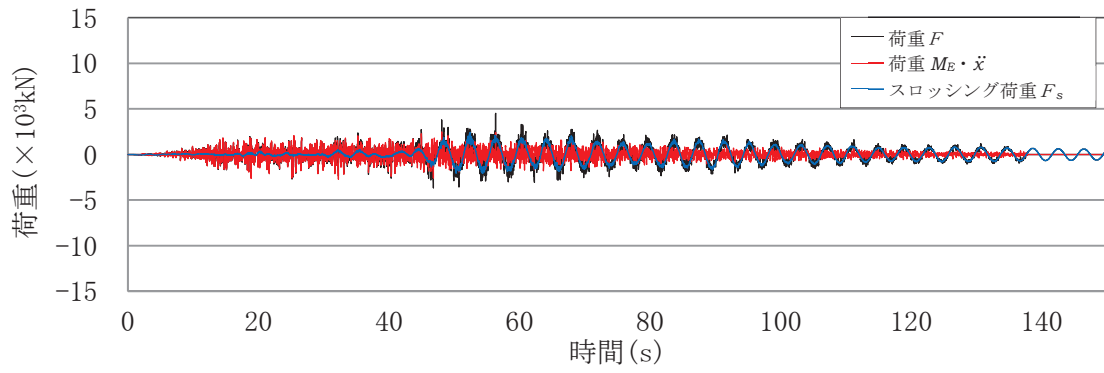
2.3 影響評価結果

流体解析で算定した荷重 F ，容器と一体となって振動することによる荷重 $M_E \cdot \ddot{x}$ ，スロッシングによる荷重 F_s の荷重時刻歴を図 2～7 に，スロッシング荷重による最大荷重及び流体解析で算出した荷重により算定した内部水の有効質量比を表 3 に，流体解析で算出した荷重 F のフーリエスペクトル（S s - D 1，通常運転水位及び耐震評価用重大事故等時水位）を図 8～9 に，フーリエスペクトルから求めたスロッシングの卓越周期を表 4 に示す。また，スロッシング解析結果例（S s - D 1，耐震評価用重大事故等時水位，最大荷重発生時刻付近（52 秒時点））を図 10 に示す。

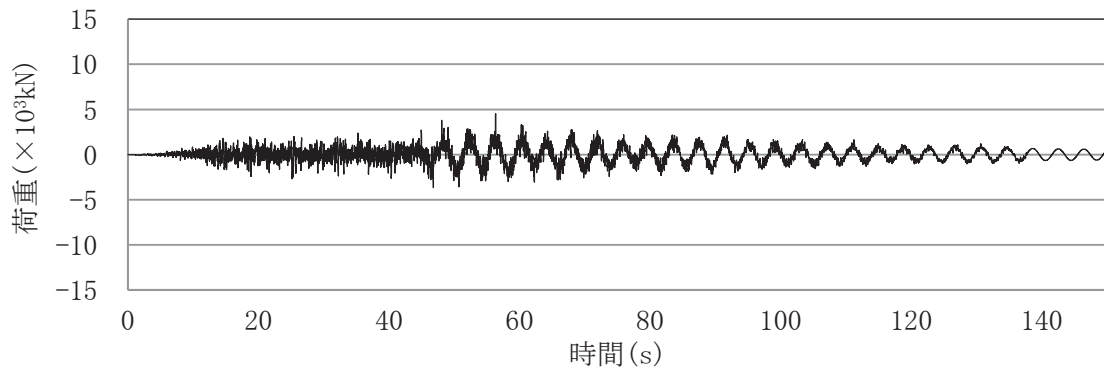
スロッシング荷重は，スロッシングの卓越周期帯の応答加速度が大きく，継続時間が長い S s - D 1 の条件の場合が最大である。

内部水の有効質量比は，水位が同条件の場合には，地震動によらず一定である。

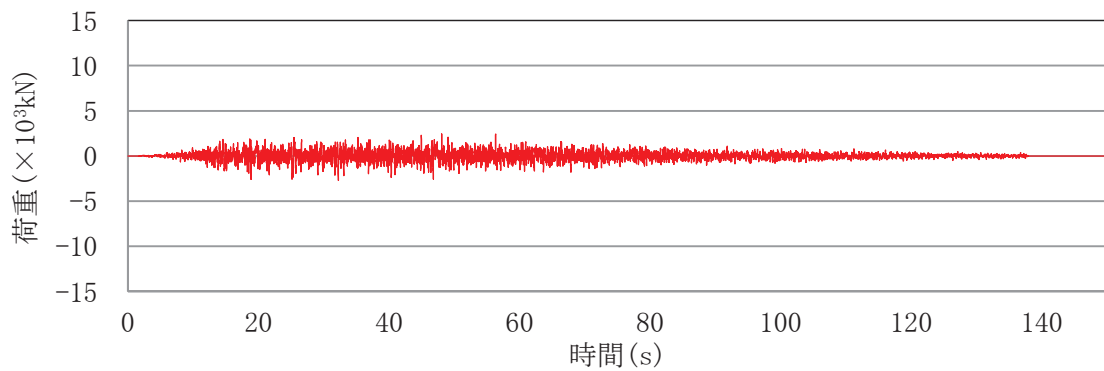
また，サプレッションチェンバの地震荷重に対するスロッシング荷重の割合を表 5 に示す。サプレッションチェンバの地震荷重 (9.163×10^7 (N) (耐震評価用重大事故等時水位，S s - F 3)) に対するスロッシングモードによる荷重の最大値 (2.91×10^6 (N) (耐震評価用重大事故等時水位，S s - D 1)) の比率は約 3% であり，スロッシングモードによる荷重は小さい。



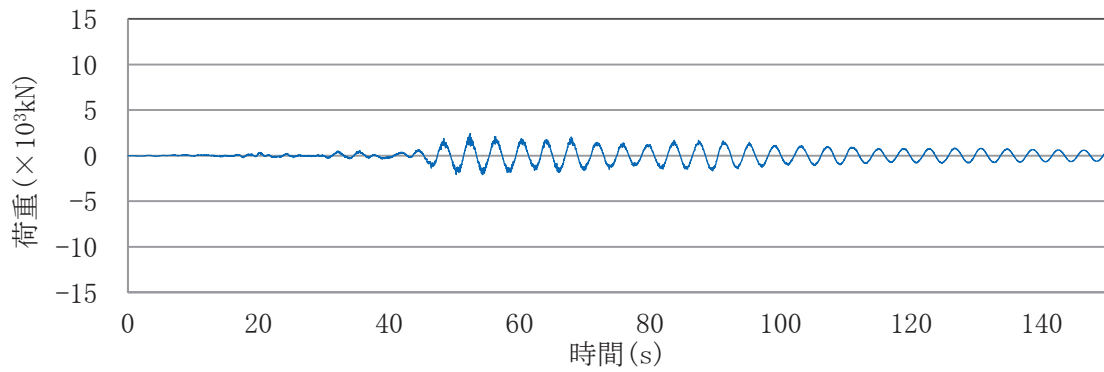
(a) 各荷重の重ねがき



(b) 荷重 F

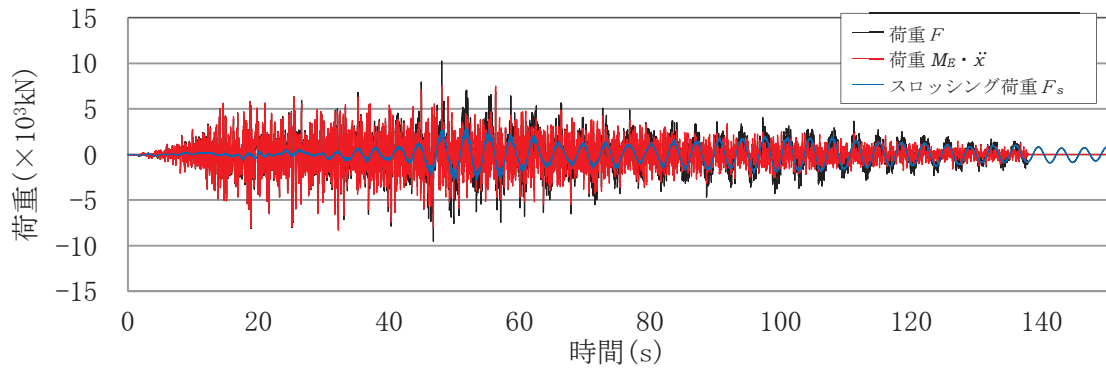


(c) 荷重 $M_E \ddot{x}$

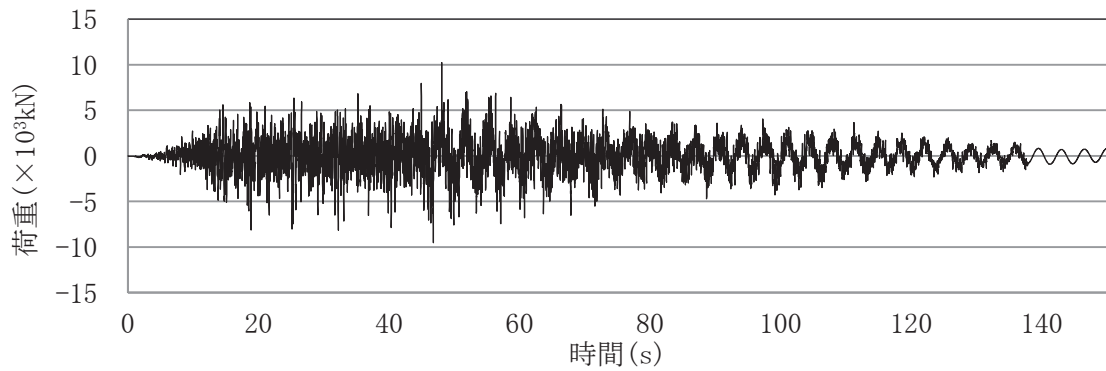


(d) スロッシング荷重 F_s

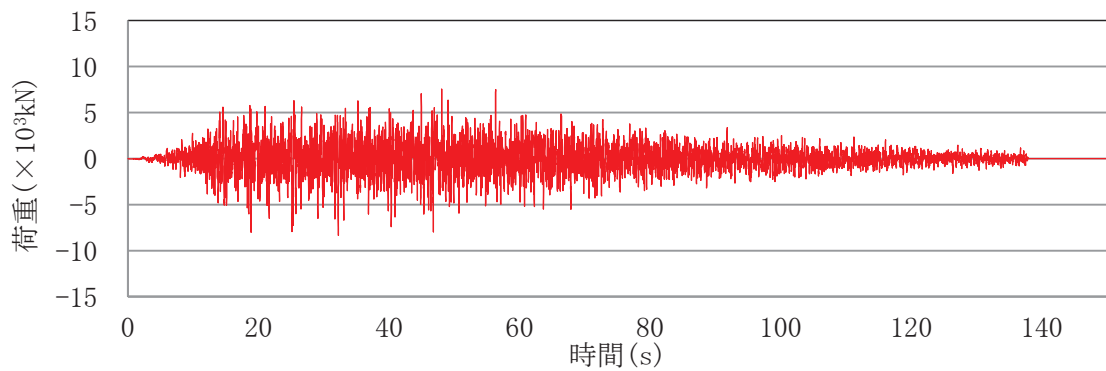
図2 各荷重時刻歴(S s - D 1, 通常運転水位)



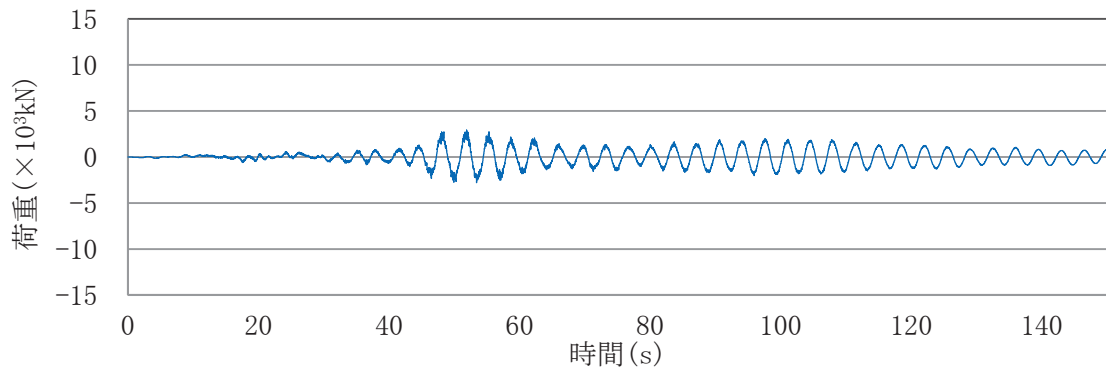
(a) 各荷重の重ねがき



(b) 荷重 F

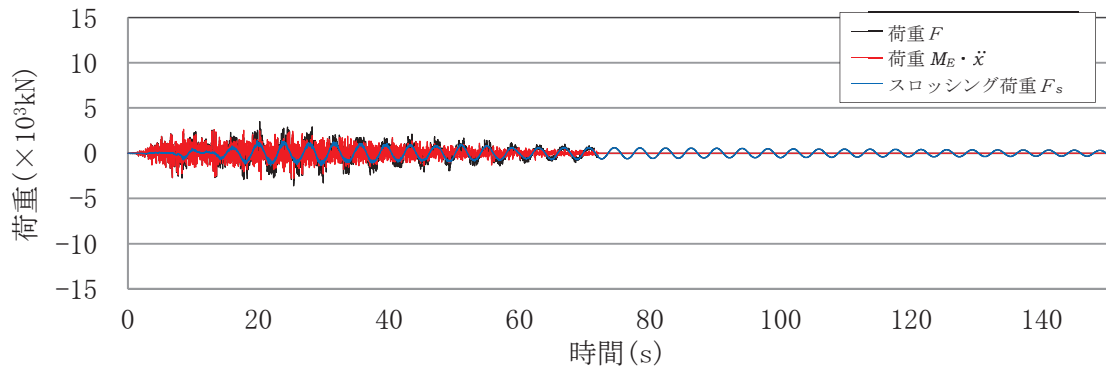


(c) 荷重 $M_E \ddot{x}$

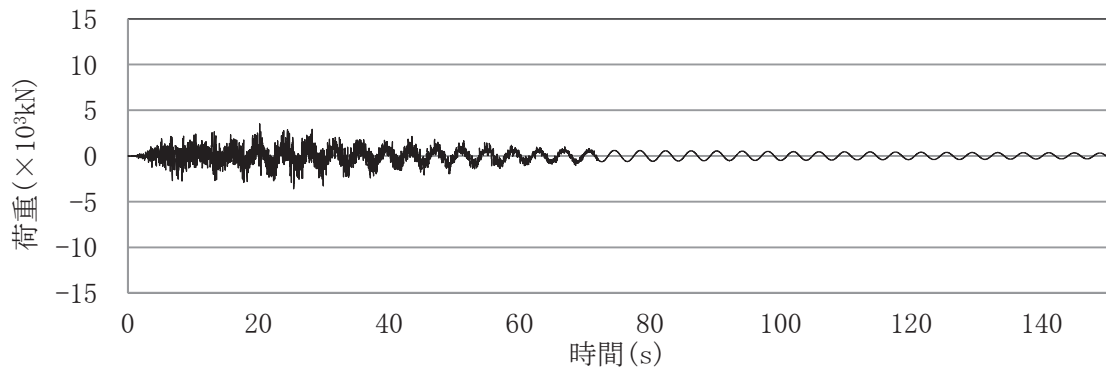


(d) スロッシング荷重 F_s

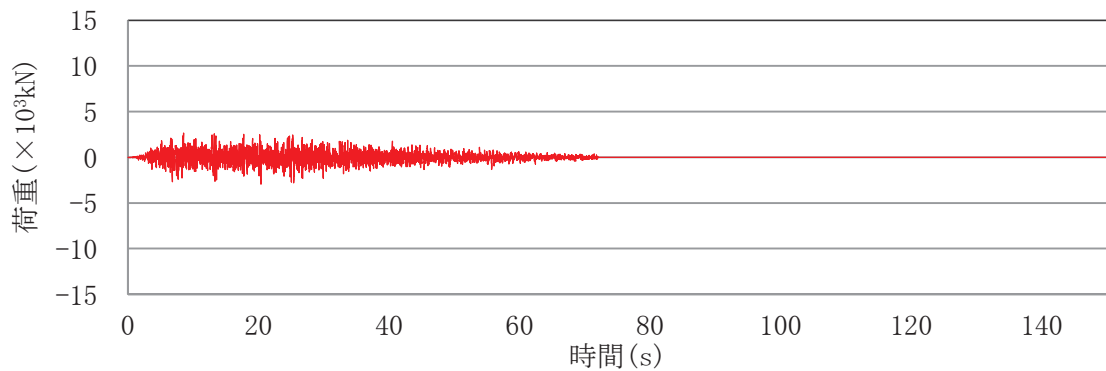
図3 各荷重時刻歴(S s - D 1, 耐震評価用重大事故等時水位)



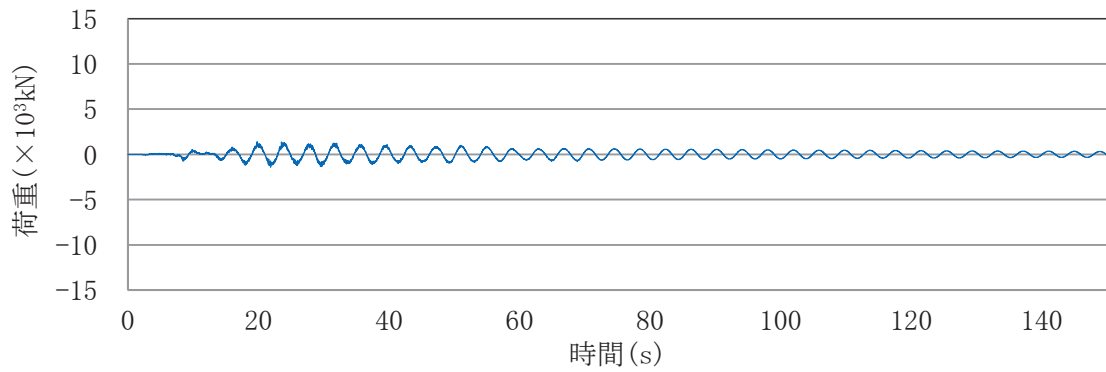
(a) 各荷重の重ねがき



(b) 荷重 F

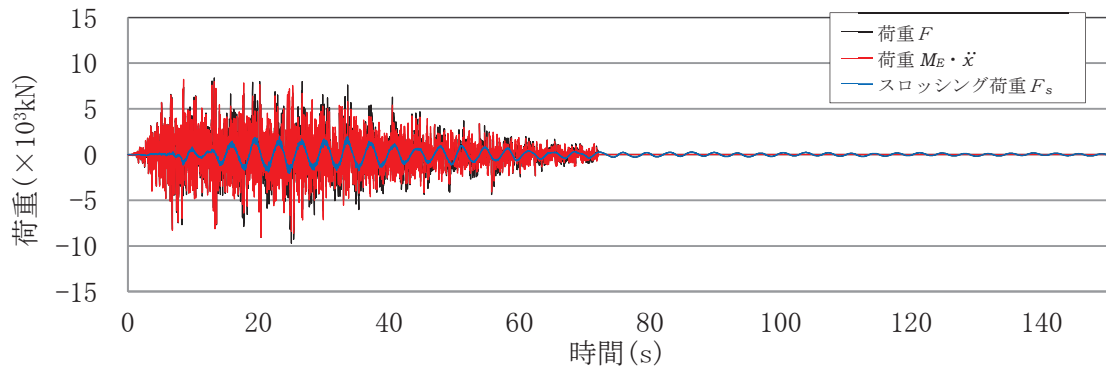


(c) 荷重 $M_E \dot{x}$

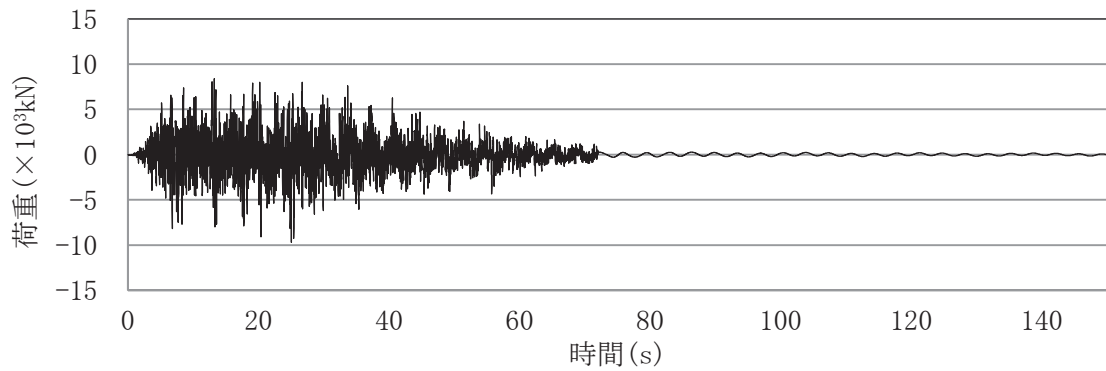


(d) スロッシング荷重 F_s

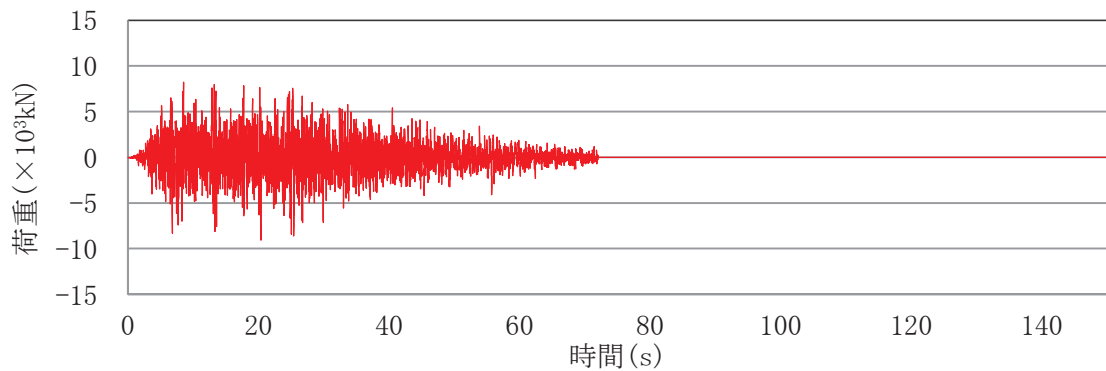
図4 各荷重時刻歴(S s - D 2, 通常運転水位)



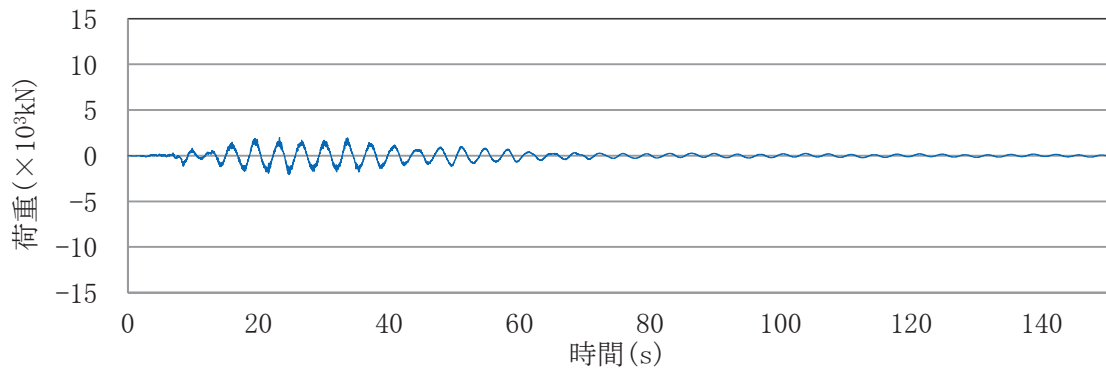
(a) 各荷重の重ねがき



(b) 荷重 F

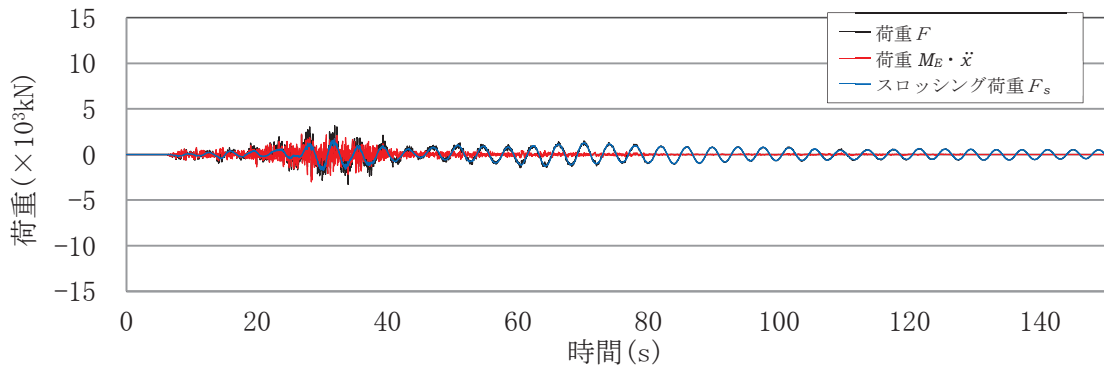


(c) 荷重 $M_E \ddot{x}$

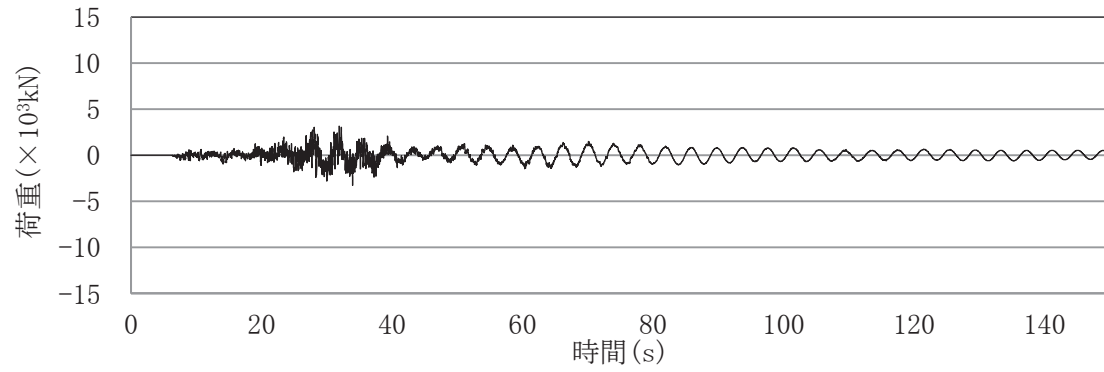


(d) スロッシング荷重 F_s

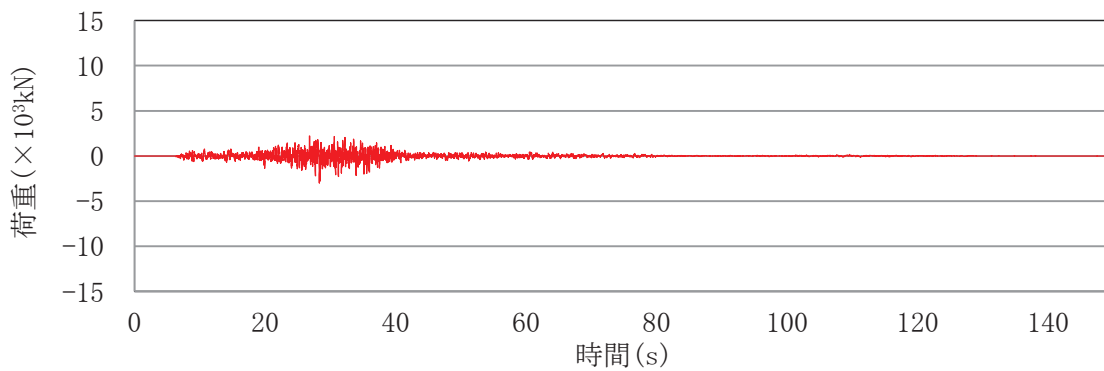
図5 各荷重時刻歴(S s - D 2, 耐震評価用重大事故等時水位)



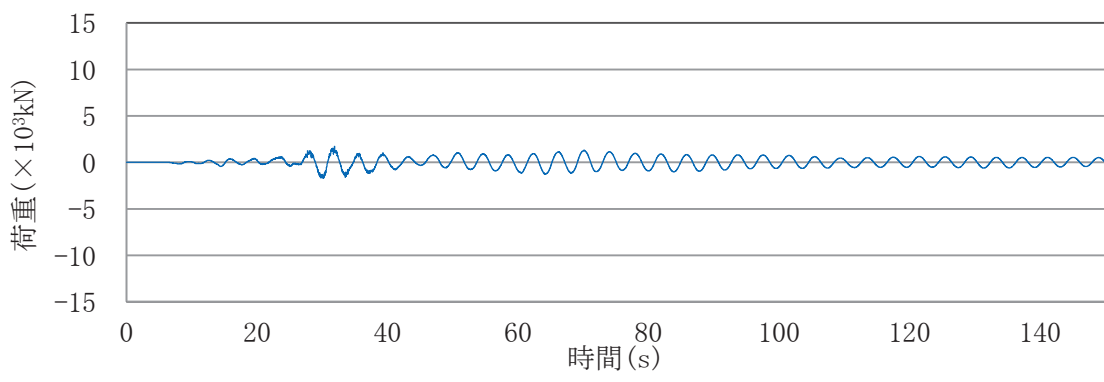
(a) 各荷重の重ねがき



(b) 荷重 F

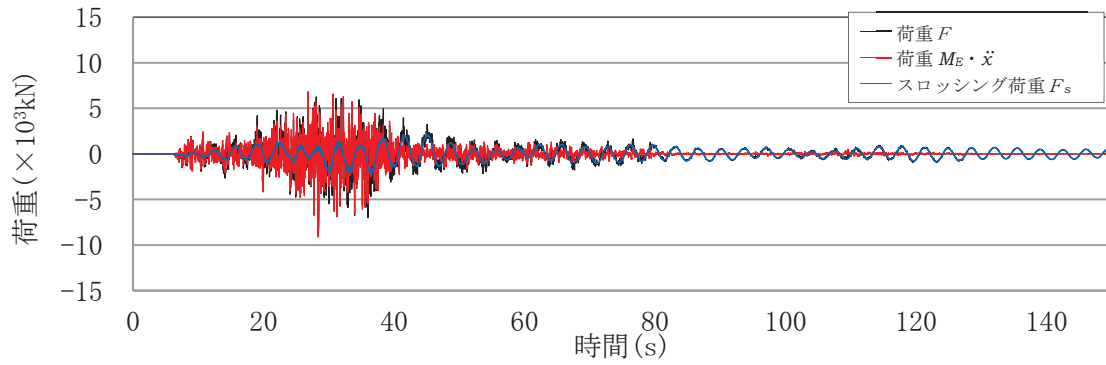


(c) 荷重 $M_E \ddot{x}$

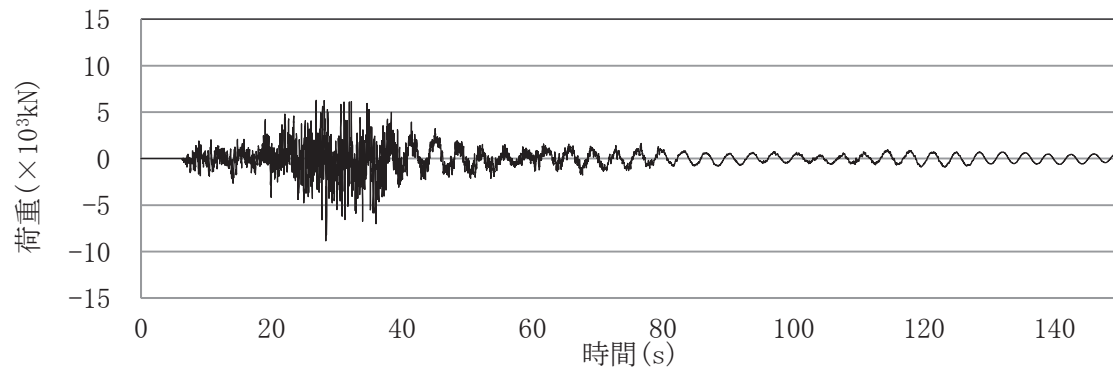


(d) スロッシング荷重 F_s

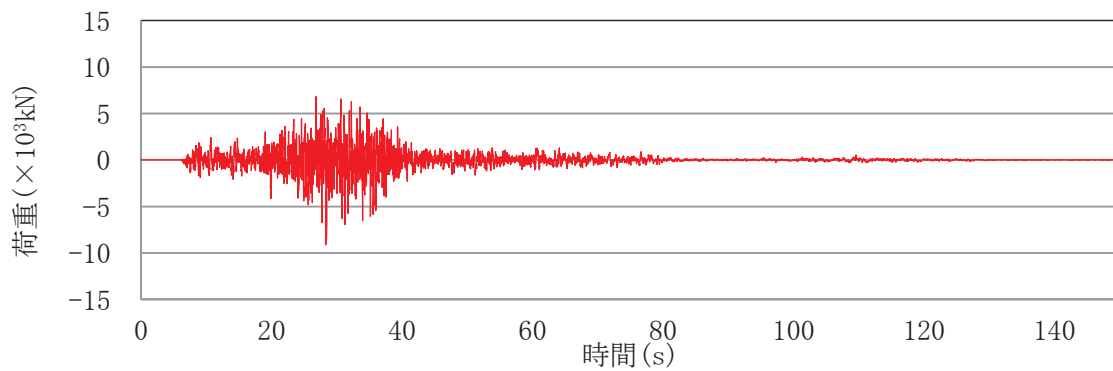
図6 各荷重時刻歴(S s - F 2, 通常運転水位)



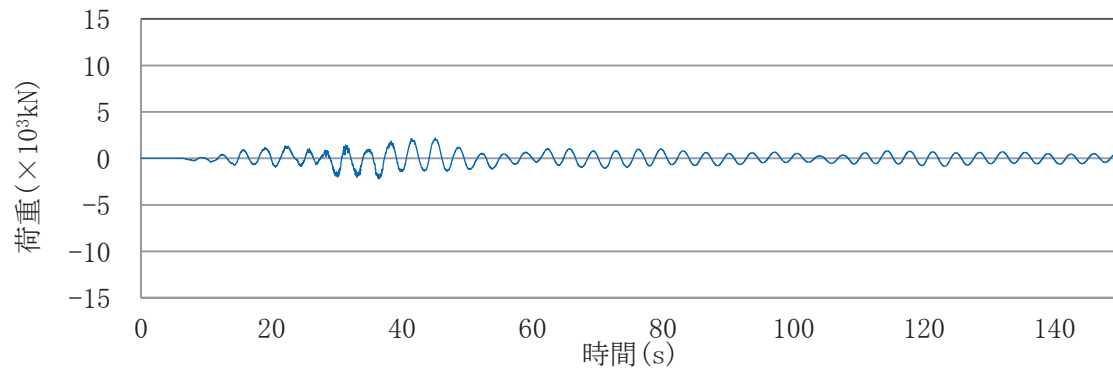
(a) 各荷重の重ねがき



(b) 荷重 F



(c) 荷重 $M_E \ddot{x}$



(d) スロッシング荷重 F_s

図7 各荷重時刻歴(S s - F 2, 耐震評価用重大事故等時水位)

表3 スロッシング荷重による最大荷重及び

流体解析で算出した荷重により算定した内部水の有効質量比

地震動	水位条件	最大荷重 (×10 ³ kN)	内部水の有効質量比
S _s -D1	通常運転水位	2.42	0.17
S _s -D2		1.39	0.17
S _s -F2		1.71	0.17
S _s -D1	耐震評価用 重大事故等時水位	2.91	0.28
S _s -D2		2.06	0.28
S _s -F2		2.24	0.28

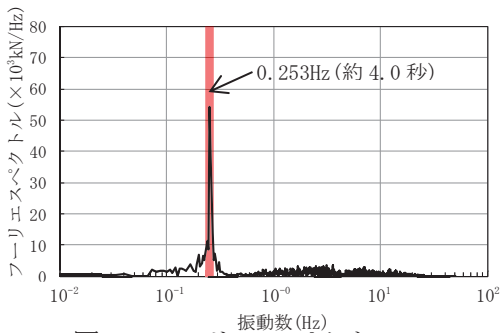


図8 フーリエスペクトル
(S_s-D1, 通常運転水位)

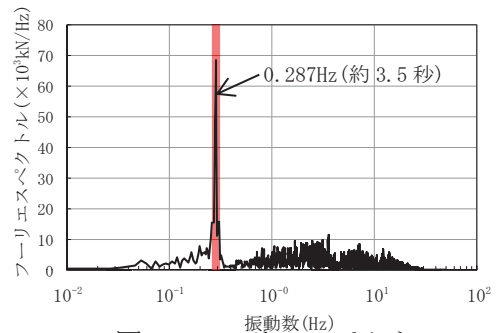


図9 フーリエスペクトル
(S_s-D1, 耐震評価用重大事故等時水位)

表4 スロッシングの卓越周期

水位条件	卓越周期(s)
通常運転水位	約4.0秒
耐震評価用重大事故等時水位	約3.5秒

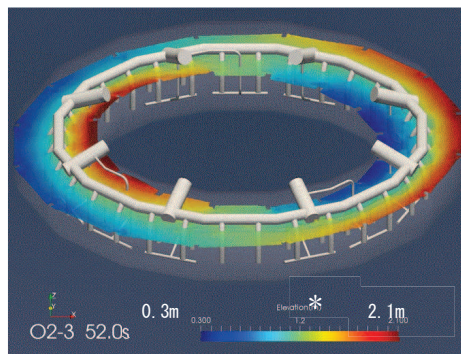


図10 スロッシング解析結果例

(S_s-D1, 耐震評価用重大事故等時水位, 最大荷重発生時刻付近)

* 色の違いは、水面高さの違いを表す。
また、高さは、サブプレッションチェンバ
シエル中心位置を 0mとしたものを表して
おり、初期水位は、約1.2mである。

参考文献 [1] : Housner, G. W. : Nuclear Reactors And Earthquakes, TID Rep. 7024, 1963.

表5 サプレッションチェンバの地震荷重に対するスロッシング荷重の割合

項目	荷重 (N)
① サプレッションチェンバの地震荷重 (耐震評価用重大事故等時水位, S _s -F3)	9.163×10 ⁷
② スロッシング荷重の最大値 (耐震評価用重大事故等時水位, S _s -D1)	2.91×10 ⁶
②/①	約3 (%)

3. 鉛直方向地震動による影響

鉛直方向地震動によるスロッシング荷重への影響について、地震動の入力条件を水平1方向+鉛直方向及び水平1方向のみとした場合のスロッシング荷重を比較し、確認する。

解析モデルは、2.1項と同じモデルを用いる。

3.1 解析モデル

解析モデルは、2.1項と同じモデルを用いる。

3.2 解析条件

入力地震動は、スロッシング荷重が最大となるS_s-D1を用いる。また、水位条件は、スロッシング荷重が最大となる耐震評価用重大事故等時水位を用いる。解析条件を表6に示す。

表6 解析条件（鉛直方向地震動）

項目	基本ケース	影響検討ケース
解析コード	OpenFOAM	同左
解析モデル	影響確認用解析モデル	同左
入力波	S _s -D1	同左
地震動の入力方向	水平1方向 +鉛直方向	水平1方向
水位	耐震評価用 重大事故等時水位	同左

3.3 影響検討結果

評価結果を表7に示す。評価結果から、スロッシング最大荷重は、基本ケースの方が1割程度大きく算出されているが、鉛直方向地震動の影響は小さいことを確認した。

また、基本ケースと影響検討ケースの内部水の有効質量比は、一致しており、鉛直方向の地震動による内部水の有効質量比への影響はないことを確認した。

表 7 評価結果（鉛直方向地震動）

検討ケース	①基本ケース （水平 1 方向 +鉛直方向入力）	②影響検討ケース （水平 1 方向入力）	①/②
スロッシング 最大荷重（ $\times 10^3 \text{kN}$ ）*	2.91	2.70	1.08
内部水の有効質量比	0.28	0.28	1.00

4. 水平2方向入力による影響

水平2方向入力によるスロッシング荷重への影響について、地震動の入力条件を水平1方向+鉛直方向及び水平2方向+鉛直方向とした場合のスロッシング荷重を比較し、確認する。

4.1 解析モデル

解析モデルは、2.1項と同じモデルを用いる。

4.2 解析条件

入力地震動は、スロッシング荷重が最大となるS_s-D1を用いる。また、水位条件は、スロッシング荷重が最大となる耐震評価用重大事故等時水位を用いる。解析条件を表8に示す。

表8 解析条件（水平2方向入力）

項目	基本ケース	影響検討ケース
解析コード	OpenFOAM	同左
解析モデル	影響確認用解析モデル	同左
入力波	S _s -D1	NS方向：S _s -D1 EW方向：位相特性の異なる S _s -D1*
地震動の入力方向	水平1方向 +鉛直方向	水平2方向 +鉛直方向
水位	耐震評価用 重大事故等時水位	同左

*位相特性の異なるS_s-D1の作成方針等については、補足参照

4.3 影響検討結果

評価結果を表9に、最大荷重発生時刻付近（52秒時点）の変位コンター図を図11に示す。

水平2方向入力によるスロッシング荷重の影響について、基本ケース（合成荷重：水平1方向入力の最大荷重値の $\sqrt{2}$ 倍）に比べ、影響検討ケース（水平2方向入力の荷重時刻歴の最大値）は、やや小さいことを確認した。これは、水平2方向入力の影響により、スロッシング荷重が周方向へ分散していること及びEW方向地震動の位相特性によるものと考えられる。また、水平2方向の入力方法を位相反転させた場合の影響は、サプレッションチェンバが円環形状（対称形状）であることから、スロッシング荷重への影響はないと考えられる。よって、サプレッションチェンバのスロッシング荷重評価は、基本ケースのとおり、入力地震動を水平1方向+鉛直方向とすることで保守的になることを確認した。

有効質量比は、基本ケースと影響検討ケースで一致しており、水平2方向入力による内部水の有効質量比への影響はないことを確認した。

なお、基本ケース及び影響検討ケースに対するスロッシング最大荷重発生時刻付近の変位コンター図は、ほぼ同様な分布、波高であり、大きな差異がないことを確認した。

表 9 評価結果 (水平 2 方向入力)

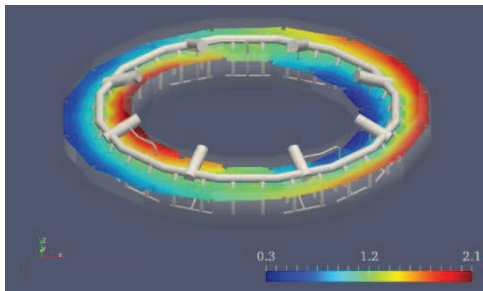
検討ケース		①基本ケース (水平 1 方向 入力)	②影響検討ケース (水平 2 方向入力)	①/②
スロッシング 最大荷重 (MN) *1	NS	2.91	2.88*2	1.01
	EW	-	2.76*2	1.05
	合成荷重	4.12*3	3.23*4	1.28
内部水の 有効質量比	NS	0.28	0.28	1.00
	EW		0.28	1.00

*1 スロッシング最大荷重は、地震波に依存することから、今後作成する建屋応答に対するスロッシング荷重を確認する必要があるため暫定値

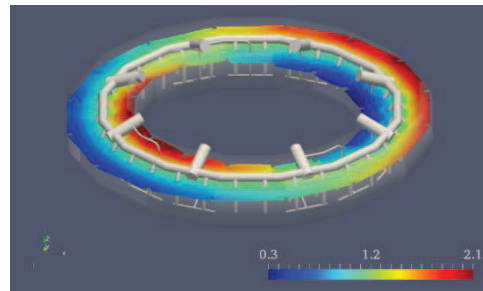
*2 1 方向成分 (NS 若しくは EW) のみに着目した場合の最大荷重

*3 基本ケースの最大荷重の $\sqrt{2}$ 倍の荷重

*4 時刻歴合成 ($\sqrt{NS^2 + EW^2}$) の最大荷重



①基本ケース
(最大荷重発生時刻付近 (52 秒時点))



②影響検討ケース
(最大荷重発生時刻付近 (52 秒時点))

* 色の違いは、水面高さの違いを表す。
また、高さは、サブプレッションチェンバ
シエル中心位置を 0m としたものを表して
おり、初期水位は、約 1.2m である。

図 11 変位コンター図

5. 内部構造物による影響

内部構造物によるスロッシング荷重への影響について、解析モデルを主要な内部構造物までモデル化及び容器（強め輪を含む）のみをモデル化した場合のスロッシング荷重を比較し、確認する。

5.1 解析モデル

解析モデルを図 12 に、解析諸元を表 10 に示す。



図 12 解析モデル図

表 10 解析諸元

項目	内容
格子数	約 67 万
格子幅	約 3.5cm~45cm

5.2 解析条件

入力地震動は、スロッシング荷重が最大となる S s - D 1 とし、水平 1 方向+鉛直方向に入力する。また、水位条件は、スロッシング荷重が最大となる耐震評価用重大事故等時水位を用いる。解析条件を表 11 に示す。

表 11 解析条件（内部構造物）

項目	基本ケース	影響確認ケース
解析コード	OpenFOAM	同左
解析モデル	影響確認用解析モデル (内部構造物も含めてモデル化)	容器（強め輪を含む）のみモデル化
入力波	S s - D 1	同左
地震動の入力方向	水平 1 方向 + 鉛直方向	同左
水位	耐震評価用 重大事故等時水位	同左

5.3 影響検討結果

評価結果を表 12 に示す。評価結果から、スロッシング最大荷重は、基本ケースが影響確認ケースよりもやや小さく算出されることを確認した。これは、内部構造物によりスロッシングが抑制されることによるものと考えられる。

また、基本ケースと影響検討ケースの内部水の有効質量比は同等であり、内部構造物による内部水の有効質量比への影響がないことを確認した。

表 12 評価結果（内部構造物）

検討ケース	①基本ケース (内部構造物も含めて モデル化)	②影響検討ケース (容器（強め輪を含 む）のみモデル化)	①/②
スロッシング 最大荷重 (MN) *	2.91	3.06	0.95
内部水の有効質量比	0.28	0.28	1.00

* スロッシング最大荷重は、地震波に依存することから、今後作成する建屋応答に対するスロッシング荷重を確認する必要があるため暫定値

(補足)

位相特性の異なる模擬地震波

1. 概要

水平2方向及び鉛直方向地震力の同時入力による影響検討を行う際にサプレッションチェンバのスロッシング解析にはスロッシング荷重が大きく算定される S_s-D1 を代表波として用いている。この際、水平1方向には、 S_s-D1 を用いるが、その直交方向には S_s-D1 とは位相特性の異なる模擬地震波を用いている。

ここでは、 S_s-D1 の直交方向の模擬地震波について示す。

2. 基準地震動 S_s の水平方向に組み合わせる地震動の作成方針

S_s-D1 とは位相特性の異なる模擬地震波は、「補足-600-5 水平2方向及び鉛直方向の適切な組合せに関する検討について」における水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価に用いる模擬地震波等の作成方針に基づき作成されたものである。

3. スロッシング解析に用いる入力波

スロッシング解析に用いる入力波は、 S_s-D1 及び S_s-D1 と位相特性の異なる模擬地震波を用いて、建屋応答解析を実施し、得られた応答加速度時刻歴を用いている。

応答加速度時刻歴波形を図1及び図2に、それぞれの地震波を2方向入力した場合の建屋応答加速度のオービットを図3に、床応答加速度スペクトルを図4に示す。

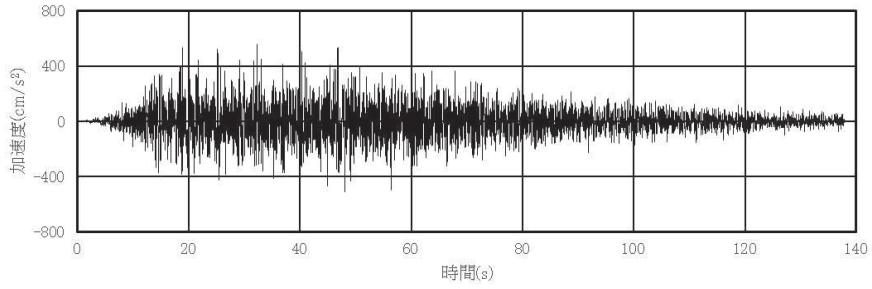


図1 S s - D 1 の応答加速度時刻歴波形

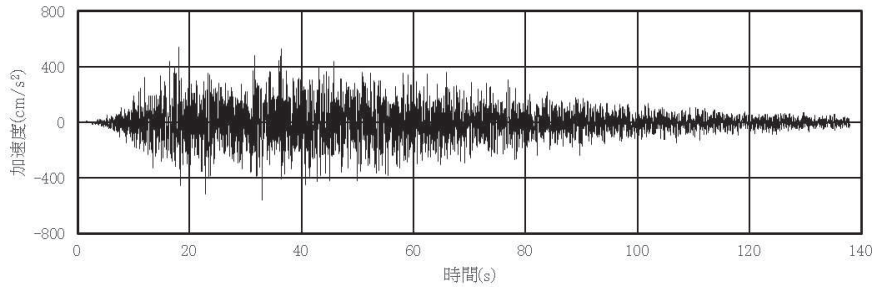


図2 S s - D 1 と位相特性の異なる模擬地震波の応答加速度時刻歴波形

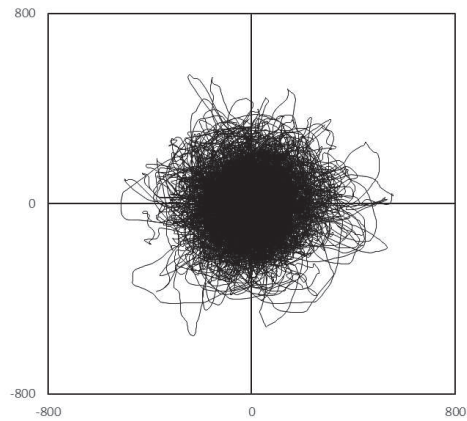


図3 S s - D 1 による建屋応答加速度のオービット
(位相が異なる地震波を2方向入力した場合)

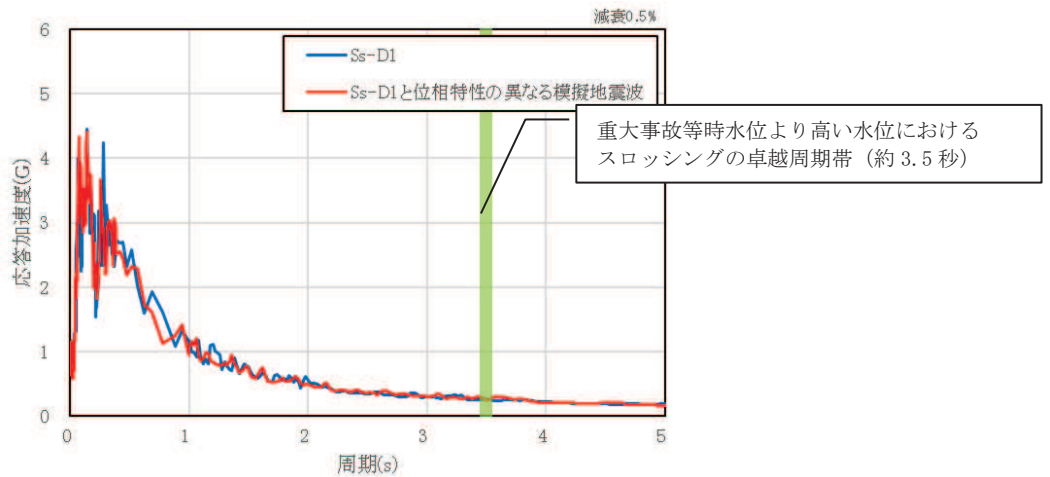


図4 床応答加速度スペクトル

規格基準における内部水の有効質量比との比較

1. はじめに

本資料は、NASTRAN による内部水の有効質量比算出の妥当性を確認するため、容器構造設計指針・同解説（2010 年 3 月改訂版）（以下「容器指針」という。）に記載されている球形タンク及び円筒タンクの内部水の有効質量比と NASTRAN による内部水の有効質量比の算出結果の比較検討を行う。

2. 解析結果

(1) 球形タンク

NASTRAN の解析モデルを図 1、解析モデル諸元を表 1、NASTRAN による内部水の有効質量比の算出結果及び容器指針における球形タンクの内部水の有効質量比を図 2 に示す。

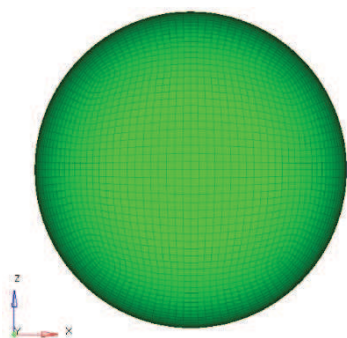


図 1 球形タンク解析モデル

表 1 球形タンク解析モデル諸元

半径	0.5m
メッシュ数	約 5400

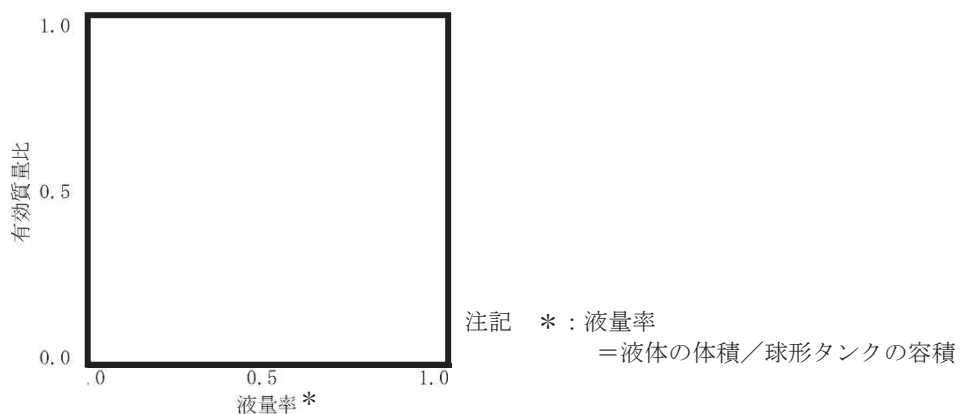


図 2 球形タンクの内部水の有効質量比

(2) 円筒タンク

NASTRAN の解析モデルを図 3、解析モデル諸元を表 2、NASTRAN による内部水の有効質量比算出結果及び容器指針における円筒タンクの内部水の有効質量比を図 4 に示す。

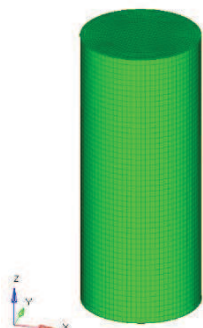


図 3 円筒タンク解析モデル

表 2 円筒タンク解析モデル諸元

半径	0.5m
高さ	2.5m
メッシュ数	約 6400

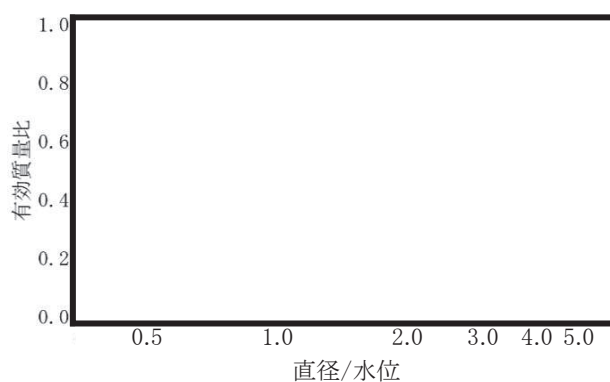


図 4 円筒タンクの内部水の有効質量比

4. 検討結果

図 2 及び図 4 の比較結果から、NASTRAN による内部水の有効質量比算出結果と容器指針における内部水の有効質量比がほぼ一致しており、NASTRAN による内部水の有効質量比算出は妥当であることを確認した。

原子炉建屋基礎版上における地震応答を用いる妥当性について

1. 概要

サプレッションチェンバは、ドライウェルとベント管を介して接続されるが、ベント管に設けられたベント管ベローズ（材質：オーステナイト系ステンレス鋼（SUS316L））により相対変位を吸収する構造となっているため、サプレッションチェンバの耐震評価に当たっては、ドライウェルの地震応答と切り離し、原子炉建屋基礎版上における地震応答を用いている。

本資料では、ベント管ベローズの構造及びサプレッションチェンバへの地震応答への影響を確認し、上記扱いの妥当性について確認する。

2. ベント管ベローズの構造

ベント管ベローズは、図 1 に示すとおり、サプレッションチェンバとベント管の熱膨張による相対変位や地震相対変位を吸収できる構造となっている。

また、地震相対変位によるサプレッションチェンバへの反力は、ベント管ベローズのばね定数と地震相対変位により算定することができる。サプレッションチェンバの荷重伝達イメージを図 2 に示す。

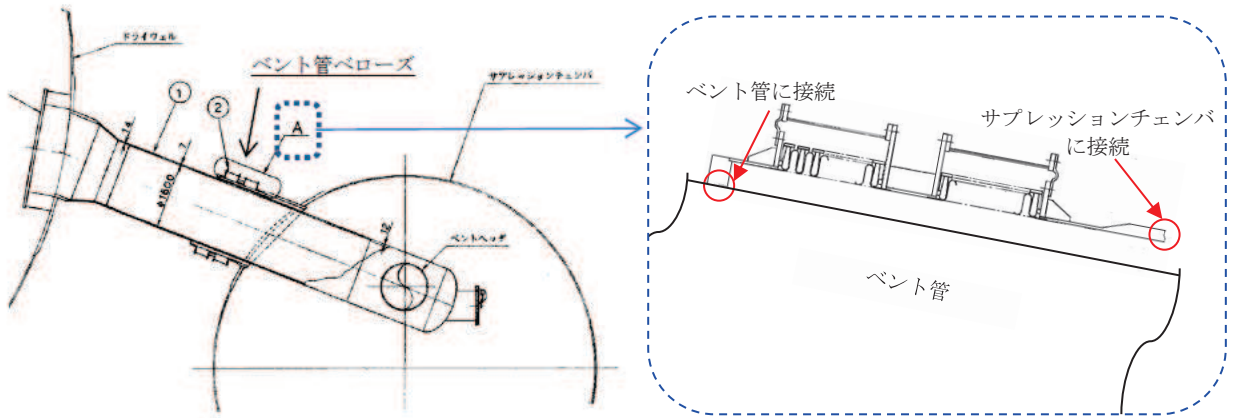
3. サプレッションチェンバの地震応答への影響

サプレッションチェンバとベント管の地震相対変位、ベント管ベローズの反力、サプレッションチェンバの地震荷重及びそれらの比率を表 1 に示す。評価用地震動は、添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」（原子炉建屋 0.P.-8, 100mm, 減衰 1% (RB-SsH-RBB3-010)）に記載のものを用いた。地震相対変位によるベント管ベローズの反力は、サプレッションチェンバの地震荷重に対して 1%程度と軽微であり、サプレッションチェンバの地震応答解析に原子炉建屋基礎版上における地震応答を用いることは、妥当と考えられる。

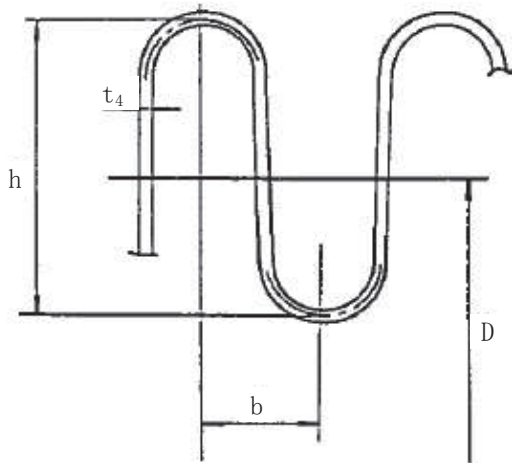
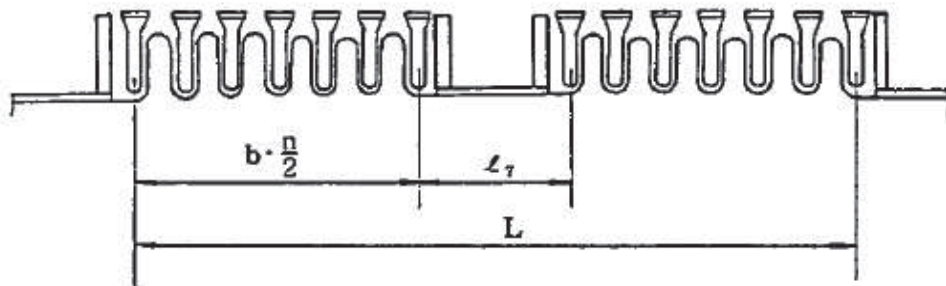
なお、オーステナイト系ステンレス鋼のひずみ速度に関する知見としてひずみ速度が 1sec^{-1} 以下となるものについては、ひずみ速度が耐力や設計引張強さに影響がないものとされている^[1]。ベント管ベローズのひずみ速度は、 $7.9 \times 10^{-2}\text{sec}^{-1}$ 程度*であり、上記知見を踏まえると、材料物性への影響がないと推定されるため、剛性に対しても同様に影響がないものと考えられる。

* サプレッションチェンバの地震応答解析モデルの固有周期 T に対するサプレッションチェンバの最大ひずみ量 ε の比 (ε/T) からひずみ速度 (sec^{-1}) を算出

参考文献[1]:Hiroe Kobayashi et al., Strain Rate of Pipe Elbow at Seismic Event and Its Effect on Dynamic Strain Aging, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, July 26-30, 2009



a. ベント管ベローズの構造概要



- D = 1875
- b = 25
- L = 828
- $l_1 = 228$
- $t_4 = 2$
- h = 73
- n = 2×6×2
- = 24

b. ベント管ベローズの主要寸法

図1 ベント管ベローズの構造

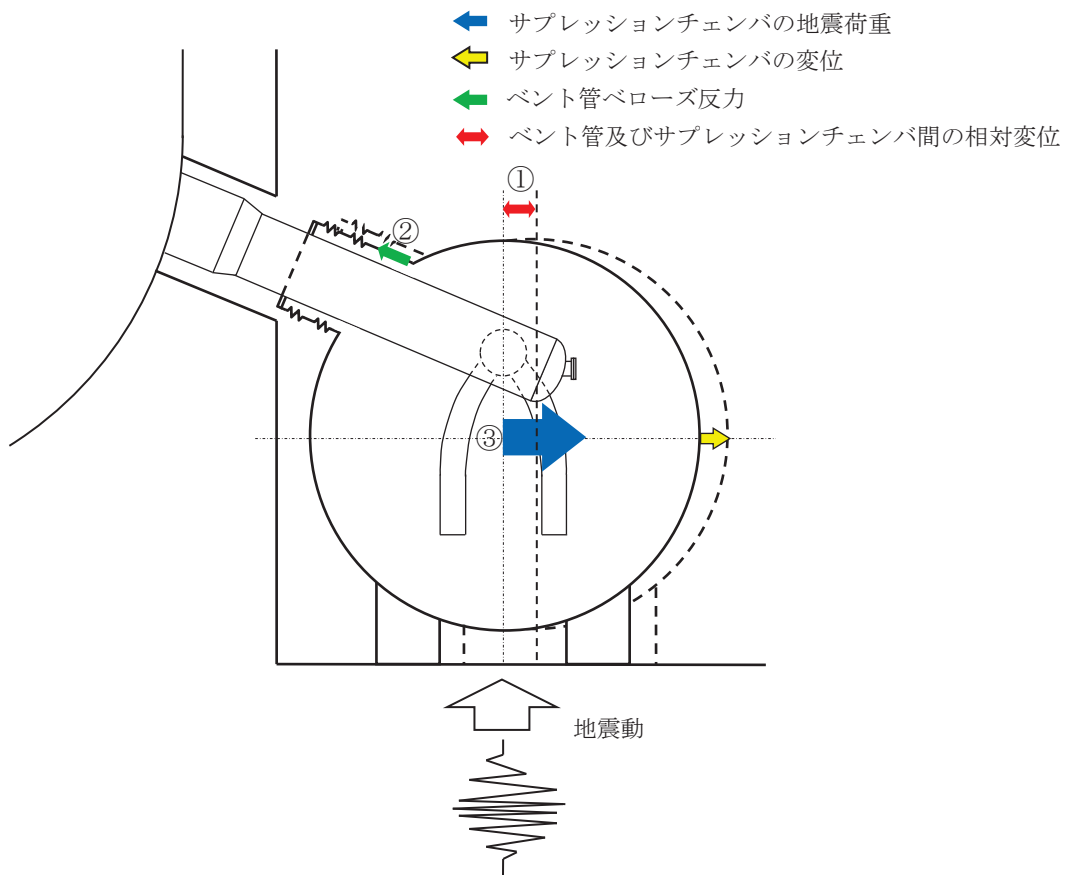


図2 サプレッションチェンバの荷重伝達イメージ

表1 相対変位による影響評価結果

項目*	評価値
① 地震相対変位	211.4 mm
② 地震相対変位による ベント管ベローズの反力	1.029×10^5 (N)
③ サプレッションチェンバ の地震荷重	9.281×10^7 (N)
比率 (②/③)	1%

注記* : 項目の①～③は, 図2の番号に対応する

ボックスサポートの耐震評価における応力算出方法の考え方

1. 概要

ボックスサポートの耐震評価における応力算出は、既工認で公式等による応力評価を行っていることを踏まえ、今回工認においても同様に公式等による応力評価を行い、個別に詳細評価が必要な場合に FEM 解析による応力評価を行っている。なお、サプレッションチェンバの応力評価は、3次元 FEM 解析モデルによる応力評価を行っている。

本書では、今回工認におけるボックスサポートの耐震評価における応力算出方法に対して、公式等による応力評価を行うことの方針について説明する。

2. 耐震評価における応力算出方法の考え方

2.1 適用規格

サプレッションチェンバ及びボックスサポートは、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601・補-1984, JEAG4601-1987 (以下「JEAG4601」という。)に基づき、サプレッションチェンバは原子炉格納容器として、ボックスサポートは原子炉格納容器の支持構造物として耐震評価を行う。また、JEAG4601において、原子炉格納容器及び原子炉格納容器の支持構造物の耐震評価について地震力と他の荷重を組み合わせた場合には、原則として過大な変形がないようにすることが求められている。

2.2 原子炉格納容器及び原子炉格納容器の支持構造物の耐震評価

原子炉格納容器に対する地震荷重との組合せ評価は、JEAG4601 に従い、以下の項目に対する応力評価が要求される。

- ① 一次応力評価
- ② 一次+二次応力評価
- ③ 一次+二次+ピーク応力評価 (疲れ解析)

ただし、原子炉格納容器の一次+二次+ピーク応力評価 (疲れ解析) は、設計・建設規格 JSME NC1 2005/2007 PVB-3140 (6) の要求を満足する場合、評価を省略することができる。なお、一次+二次応力評価に対する許容応力 $3S_m$ を超える場合は、評価対象部位の応力集中係数を用いた一次+二次+ピーク応力評価又は3次元 FEM 解析による疲れ解析を行う。

一方、原子炉格納容器の支持構造物に対する地震荷重との組合せ評価は、JEAG4601 上、一次応力、一次+二次応力に対する応力評価が要求されており、一次+二次+ピーク応力に対する応力評価は要求されていない。

2.3 ボックスサポートの耐震評価における応力算出方法

上記のとおり、ボックスサポートは、原子炉格納容器の支持構造物に該当する。原子炉格納容器の支持構造物に対する要求事項に基づき、ボックスサポートの耐震評価は、一次応力及び一次+二次応力に対する応力評価を行い、過大な変形がないことを確認する。また、耐

震評価における応力算出については、ボックスサポートの構造から面外変形もなく単純な曲げ・せん断変形が主であること、一次+二次+ピーク応力といった局所的な応力評価要求がないことから、既工認に用いた公式等による応力評価からの変更は不要と判断している。なお、フランジプレート（外側）のように、公式等による応力評価の結果、詳細評価が必要な場合には、FEMモデルを用いた応力解析を行う。

6.1.3 荷重の組合せと許容限界

荷重の組合せと許容限界についての原則を以下に示すが、^{(6.1.1-1), (6.2.1-1)}詳細は参考文献を参照のこと。

(1) 荷重の組合せ

- a. 地震動によって引き起こされるおそれのある事象については、その荷重を組合せる。
- b. 地震動によって引き起こされるおそれのない事象については、その事象の発生確率と荷重の継続時間及び地震の発生確率を考え、同時に発生する確率が高い場合にはその組合せを考慮するものとする。

(2) 許容限界

a. As クラス

- (a) 基準地震動 S_1 又は静的震度による地震力と他の荷重とを組合せた場合には、原則として弾性状態にあるようにする。
- (b) 基準地震動 S_2 による地震力と他の荷重とを組合せた場合には、原則として過大な変形がないようにする。

b. A クラス

上記 a. (a)と同じ

c. B 及び C クラス

静的震度による地震力と他の荷重と組合せた場合には、原則として弾性状態にあるようにする。

<第2種容器に対する評価>

2.1.2 第2種容器の許容応力

第2種容器の許容応力を次に示す。

応力分類 許容 応力状態	1次一般膜応力	1次膜応力+ 1次曲げ応力	1次+2次応力	1次+2次+ ピーク応力	特別な応力限界	
					純せん断 応力	支圧応力
設計条件	S	1.5 S	—	—	—	—
I _A	—	—	(1) 3 S	(2) 運転状態 I 及び II における荷重 の組合せについ て疲れ解析を行 い疲れ累積係数 が1.0 以下であ ること。	(6) 0.6 S	(7)(8) S _y (1.5 S _y)
II _A	—	—			(6) 0.6 S	(7)(8) S _y (1.5 S _y)
III _A	S _y と2/3 S _u の 小さい方。ただ しオーステナイ ト系ステンレス 鋼及び高ニッケ ル合金については 1.2 Sとする。	左欄の1.5 倍の値	—	—	(6) 0.6 S	(7)(8) S _y (1.5 S _y)
IV _A	構造上の連続な 部分は0.6 S _u 、 不連続な部分は S _y と0.6 S _u の 小さい方。ただ しオーステナイ ト系ステンレス 鋼及び高ニッケ ル合金については 、構造上の連 続な部分は2 S と0.6 S _u の小 さい方、不連続 な部分は1.2 S とする。	左欄の1.5 倍の値	—	—	—	—
III _A S	S _y と0.6 S _u の 小さい方。ただ しオーステナイ ト系ステンレス 鋼及び高ニッケ ル合金については 1.2 Sとする。	左欄の1.5 倍の値	(3) 3 S 〔 S ₁ 又は S ₂ 地震動のみ による応力 振幅につい て評価する。〕	(4)(5) S ₁ 又は S ₂ 地震 動のみによる疲 れ解析を行い疲 れ累積係数を求 め、運転状態 I, II における疲れ 累積係数との和 が1.0 以下であ ること。	0.6 S	(8) S _y (1.5 S _y)
IV _A S	構造上の連続な 部分は0.6 S _u 、 不連続な部分は S _y と0.6 S _u の 小さい方。ただ しオーステナイ ト系ステンレス 鋼及び高ニッケ ル合金については 、構造上の連 続な部分は2 S と0.6 S _u の小 さい方、不連続 な部分は1.2 S とする。	左欄の1.5 倍の値			0.4 S _u	(8) S _u (1.5 S _u)

- 注：(1) $3S$ を超えるときは、告示第14条の弾塑性解析を用いることができる。 (S_m) を S と読替える。
- (2) 告示第13条第1項第三号を満たすときは疲れ解析を行うことを要しない。 (S_m) を S と読替える。
- (3) $3S$ を超えるときは弾塑性解析を行うこと。この場合告示第14条（同条第三号を除く。また、 S_m は S に読替える。）の弾塑性解析を用いることができる。
- (4) 告示第13条第1項第3号へを満たすときは、疲れ解析を行うことを要しない。
ただし、へ項の“応力の全振幅”は“ S_1 又は S_2 地震動による応力の全振幅”と読替える。
- (5) 運転状態Ⅰ、Ⅱにおいて、疲れ解析を要しない場合は、地震動のみによる疲れ累積係数が1.0以下であること。
- (6) 告示第13条第1項第一号チによる。
- (7) 告示第13条第1項第一号リによる。
- (8) ()内は、支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値

2.8.2 第2種支持構造物の許容応力

2.8.1の(2)、(3)及び(4)の規定を準用する。

2.8.3 第3種支持構造物の許容応力

2.8.1の(2)、(3)及び(4)の規定を準用する。

応力分類 許容 応力状態	1次応力					1次+2次応力				
	引張	せん断	圧縮	曲げ	支圧	引張 圧縮	せん断	曲げ	支圧	座屈
設計条件	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
I _A	f_t	f_s	f_c	f_b	f_p	$3f_t$	$3f_s^{(1)}$	$3f_b$	$1.5f_p^{(3)}$	$1.5f_s$ 又は $1.5f_c^{(3)}$
II _A	f_t	f_s	f_c	f_b	f_p	$3f_t$	$3f_s^{(1)}$	$3f_b$	$1.5f_p^{(3)}$	$1.5f_s$ 又は $1.5f_c^{(3)}$
III _A	$1.5f_t$	$1.5f_s$	$1.5f_c$	$1.5f_b$	$1.5f_p$	—	—	—	—	—
IV _A	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$1.5f_c^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_p^*$	—	—	—	—	—
III _A S	$1.5f_t$	$1.5f_s$	$1.5f_c$	$1.5f_b$	$1.5f_p$	$3f_t$	$3f_s^{(1)}$	$3f_b^{(2)}$	$1.5f_p^{(4)}$	$1.5f_b^{(2)(4)}$
IV _A S	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$1.5f_c^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_p^*$	(S_1 又は S_2 地震動の みによる応力振幅に ついて評価する)			$1.5f_p^{(4)}$	$1.5f_s$ 又は $1.5f_c$

- 注：(1) すみ肉溶接部にあつては最大応力に対して $1.5f_s$ とする。
 (2) 告示第88条第3項第一号イ(ハ)により求めた f_b とすること。
 (3) 応力の最大圧縮値について評価する。
 (4) 自重、熱膨張等により常時作用する荷重に、地震動による荷重を重ね合せて得られる応力の圧縮最大値について評価を行うこと。
 (5) 鋼構造設計規準（日本建築学会（1970年度制定））等の幅厚比の制限を満足すること。
 (6) 上記応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対しても評価を行うこと。
 (7) 耐圧部に溶接等により直接取り付けられる支持構造物であつて耐圧部と一体の応力解析を行うものについては耐圧部と同じ許容応力とする。

サブプレッションチェンバ内の耐震補強対策等による有効性評価等への影響

1. 概要

本資料は、サブプレッションチェンバ内の耐震補強対策等による設備の構造変更によって設計基準事故及び重大事故等対策の有効性評価（以下「有効性評価等」という。）へ与える影響について検討したものである。

2. 耐震補強対策等の対象

サブプレッションチェンバ本体の耐震補強対策（強め輪）が有効性評価等へ与える影響について検討した。なお、本検討では、新規制基準後工事に加えて、新規制基準前に実施したECCS系ストレーナの取替工事等も考慮した。

3. 有効性評価等への影響検討方針

耐震補強対策等による補強部材の追加や構造変更によってサブプレッションチェンバ空間部体積及び水量が変化するため、有効性評価等に与える影響について確認する。

併せて、耐震補強対策による補強部材の追加によって、LOCA時等の水温や内部水の流動に与える影響についても確認する。

4. 有効性評価等への影響検討結果

① 有効性評価等の空間部体積及び水量への影響

有効性評価等における空間部体積及び水量の評価条件及び耐震補強対策等前後の空間部体積及び水量の算定結果の比較結果を表1に示す。比較の結果から、耐震補強対策等による空間部体積及び水量の減少はわずかであり、有効性評価等で用いている評価条件以上の体積が確保されることを確認した。

表1 有効性評価等の評価条件及び耐震補強対策等前後の空間部体積及び水量の比較結果

事象	パラメータ	評価条件 (m ³)	工事前の 体積 (m ³) *	工事後の 体積 (m ³) *
設計基準事故	空間部体積	4700		
	水量	2800		
重大事故等 - 炉心損傷防止 (TC除く) - 格納容器破損防止	空間部体積	5100		
	水量	2850		
重大事故等 - 炉心損傷防止 (TC)	空間部体積	5150		
	水量	2800		

注記*：工事前後の体積は10m³未満を切り捨て

② LOCA時等の水温や内部水の流動影響

耐震補強対策等の補強部材追加による水温や内部水の流動への影響は、LOCA時及び主蒸気逃がし安全弁作動時に着目して考察を行った。

LOCA時の水温や内部水の流動影響については、耐震補強対策等によってベント管、ダウンカム内部の構造変更がなく、ベント管からの蒸気及び高温水がダウンカムから各ベイに放出されることになるため、耐震補強前の状態と変わらず補強による影響はない。また、ダウンカムから蒸気流出後においては、サプレッションチェンバ水平断面に対して補強部材の投影面積がごくわずかであること、単一ベイ中でも複数のダウンカムが分散していることなどから、内部水の流動への影響はほとんどないと考えられる。

主蒸気逃がし安全弁作動時に係る試験時の知見(NUREG/CR-3471)によれば、隣接ベイへの流動による熱移動は、高温水が主にプール上部の水面に近い領域を拡散することで行われる(図1)。そのため、主蒸気逃がし安全弁作動時の水温や内部水の流動影響は、阻害要因となる強め輪がトラス壁面近傍にあるものの、実機サプレッションチェンバの水面に近い領域においてベイ間の流路が十分に広いため(図2)、隣接ベイへの流動による熱移動が阻害されることはないと考えられる。なお、クエンチャ近傍のトラス断面内では、図1の上図に示すような断面に沿った流れも生じるが、この領域に強め輪はなく、サプレッションチェンバ水平断面に対して補強部材の投影面積ごくわずかであることから、内部水の流動への影響はほとんどないと考えられる。

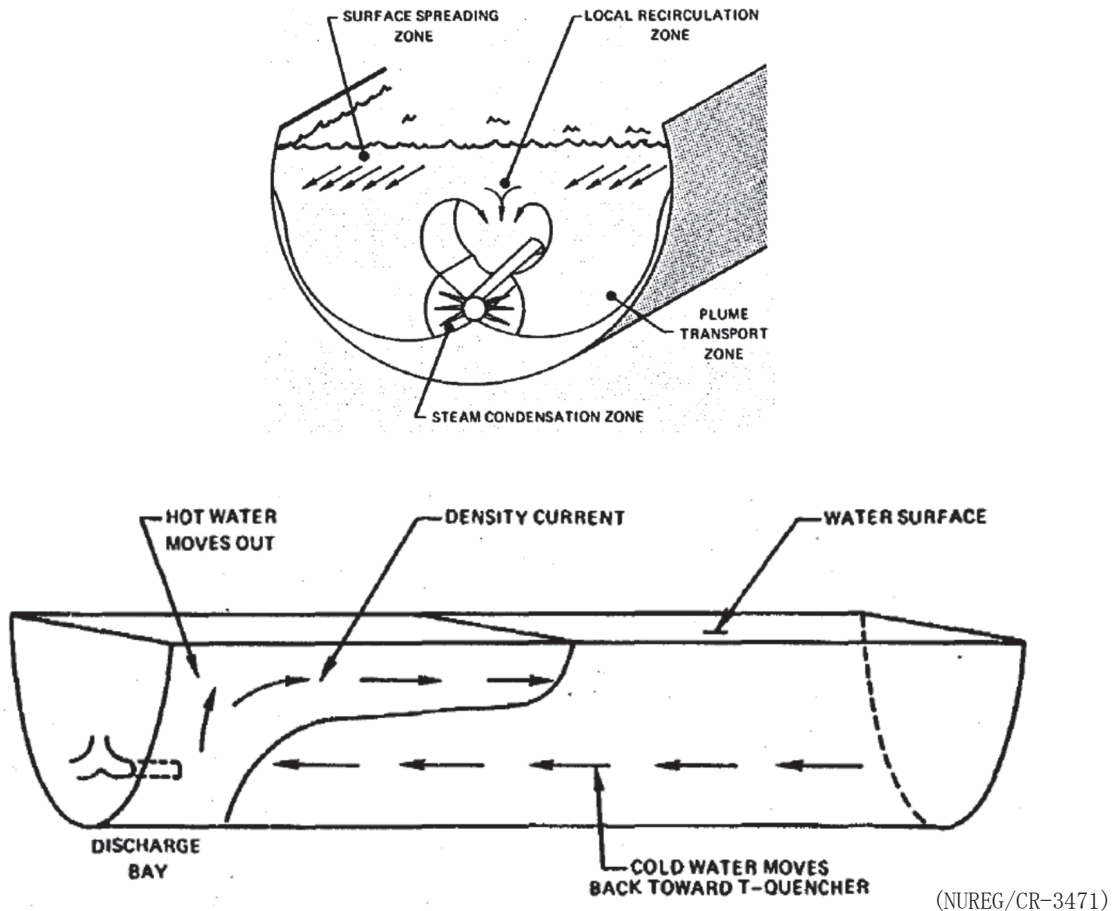


図1 内部水の流動(概念図)

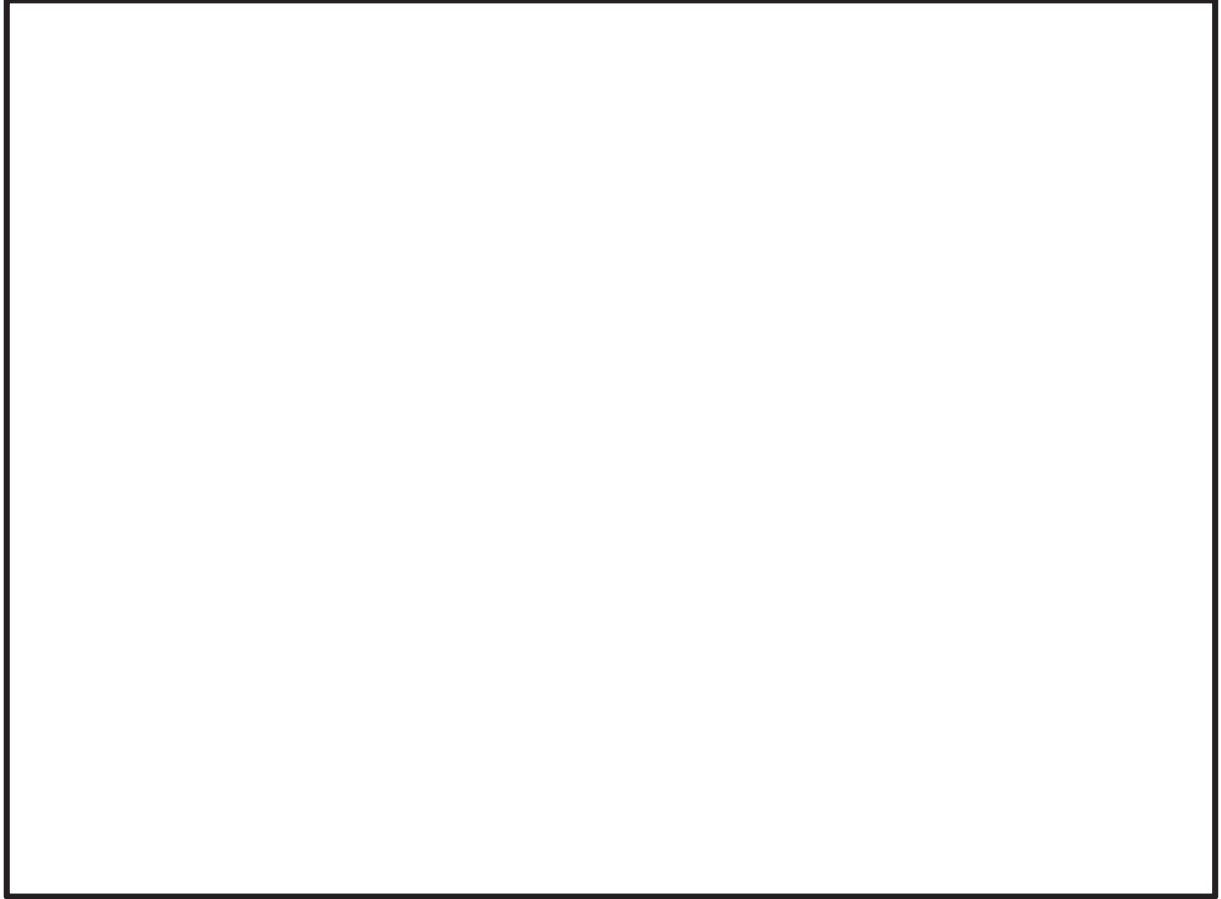


図2 サプレッションチェンバ断面図

サプレッションチェンバのモデル化に係る固有周期への影響検討

1. 概要

サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデル（3次元はりモデル）に対する適用性確認のため、適用性確認用解析モデルとして3次元シェルモデルによる固有値解析を行い、耐震評価に考慮すべき振動モードが概ね一致していることを確認している。

この3次元はりモデルは、既工認でサプレッションチェンバとボックスサポートの強度を評価するために用いたサプレッションチェンバ大円の変形を模擬したはりモデルに、別紙4に示すサプレッションチェンバ小円の断面変形を含むサプレシジョンチェンバ本体とボックスサポート付根部の局部変形を考慮したばね（ボックスサポート取付部ばね剛性という。）を加えた地震応答解析モデルである。それらの変形を地震応答解析モデルに考慮することで、今回工認における地震応答解析モデルが3次元シェルモデルによる地震応答挙動と同等の解析結果を算定できるようにしているものである。

本資料では、耐震評価に考慮すべき振動モードが概ね一致していることを確認しているが、今回工認の地震応答解析モデル（3次元はりモデル）と適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）のモデル化の差異が固有周期に与える影響について、定量的に検討を行ったものである。

2. モデル化の差異に係る影響検討

サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデル（3次元はりモデル）で考慮したモデル化項目に着目して、その影響を検討する。影響検討を行うモデル化項目に対する地震応答解析モデル（3次元はりモデル）及び適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）のモデル化内容及び影響検討内容を表1に示す。

表 1 モデル化の差異に係る影響検討

影響検討を行うモデル化項目	モデル化の内容		影響検討内容
	地震応答解析モデル (3次元はりモデル)	適用性確認用解析モデル (3次元シェルモデル)	
有効質量のモデル化	NASTRANの仮想質量法により算出し、NASTRANの機能であるGuyan縮約を用いてはりモデルに付与	NASTRANの仮想質量法により算出し、その値をシェル要素に考慮	有効質量 (Guyan 縮約) に着目し、内部水質量を除外した場合 (有効質量の考慮なし) について、地震応答解析モデル (3次元はりモデル) 及び適用性確認用解析モデル (3次元シェルモデル) の固有周期を比較する。
サブレーションチエンバ本体のモデル化	材料物性と円筒断面の理論式により算定したサブレーションチエンバ本体大円の剛性を考慮したはり要素でモデル化	材料物性及び実機構造を模擬したシェル要素でモデル化	サブレーションチエンバ本体をはり要素でモデル化した3次元シェルモデルとシェル要素でモデル化した3次元シェルモデルの固有周期を比較する。また、はり要素が小円の平面保持を仮定した理論式で算定していることも踏まえ、小円の平面保持を条件とした3次元シェルモデルとの固有周期の比較する。なお、サブレーションチエンバ本体のはり要素による分割数の適用性も固有周期の観点で合せて確認する。
ボックスササポート取付部のばね剛性のモデル化	実機構造を模擬したばね剛性算定用の3次元シェルモデル [] 等を用いてサブレーションチエンバ小円の断面変形を含む取付部の局部変形を考慮したばね剛性を算定し、ボックスササポート取付部にばね要素としてモデル化	材料物性及び実機構造を模擬したシェル要素でモデル化	地震応答解析モデル (3次元はりモデル) について、ばね要素を取り除いた場合及び適用性確認用解析モデル (3次元シェルモデル) との固有周期を比較する。
ボックスササポートのモデル化	[] 算定用の3次元シェルモデルを用いて曲げ・せん断・伸び剛性を算定し、ボックス構造部は [] で、フランジプレートは [] でモデル化 基礎ボルトは、剛ばね要素としてモデル化	材料物性及び実機構造を模擬したシェル要素でモデル化 基礎ボルトは、剛ばね要素としてモデル化	ボックスササポート (フランジプレートを含む) のみを対象とし、はり要素及びシェル要素でモデル化した場合の固有周期を比較する。

3. 影響検討結果

3.1 有効質量のモデル化の影響

既に有効質量を Guyan 縮約にてモデル化する手法の妥当性は、別紙 2 の 4. 項で自由表面を有する円筒容器評価モデルを用いた妥当性確認及び振動試験データを用いた妥当性確認により、既に確認しているものであるが、有効質量のモデル化の影響について、内部水の有無による地震応答解析モデル（3次元はりモデル）及び適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）の固有周期の比較を行った。その結果を表 2 に示す。

固有周期の比較結果から、有効質量が影響する水平 1 次のモードで内部水の有無による固有周期の比率が地震応答解析モデル（3次元はりモデル）と適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）で同等【表 2（A），（B）参照】であり、有効質量を Guyan 縮約にてモデル化する手法は妥当と判断できる。ここで、鉛直 1 次及び水平 2 次のモードは、内部水質量を除外した解析モデルで固有周期の差があることから、有効質量のモデル化の影響ではなく、別の要因（3.3 項のボックスサポート取付部ばね剛性のモデル化の影響）によるものと考えられる。

表 2 固有周期の比較結果（有効質量のモデル化）（単位：s）

検討ケース	①	②	③	④	(A) ①/②	(B) ③/④
解析モデル	地震応答解析モデル (3次元はりモデル)		適用性確認用解析モデル (3次元シェルモデル)			
内部水	有り	無し	有り	無し		
水平 1 次	0.097	0.054	0.107	0.059	1.8	1.8
鉛直 1 次	0.085	0.037	0.094	0.048	2.3	2.0
水平 2 次	0.076	0.036	0.076	0.047	2.1	1.6
面内変形	0.068	0.038	0.069	0.040	1.8	1.7

3.2 サプレッションチェンバ本体のモデル化の影響

(1) サプレッションチェンバ本体のモデル化の影響

サプレッションチェンバ本体をはり要素でモデル化した3次元はりモデルとシェル要素でモデル化した3次元シェルモデルの固有周期を比較する。また、はり要素が小円の平面保持を仮定した理論式で算定していることも踏まえ、小円の平面保持を条件とした3次元シェルモデルとの固有周期の比較する。比較した結果を表3に、影響検討に用いた解析モデルを図1に示す。ここで、影響検討に用いた解析モデルは、いずれも内部水質量を考慮していない。

固有周期の比較結果から、3次元はりモデルと3次元シェルモデルの固有周期は、差がある【表3(A)参照】。一方、3次元はりモデルと小円の平面保持を条件とした3次元シェルモデルの固有周期は、固有周期がほぼ一致【表3(B)参照】した。この結果から、3次元はりモデルと3次元シェルモデルとの固有周期の差は、小円の平面保持の有無によって生じるものと考えられる。

上記結果を踏まえ、女川2号の今回工認の地震応答解析モデルでは、サプレッションチェンバ本体のバルジングの影響検討(別紙3参照)で支配的な振動モードが1次モード(水平並進)及び2次モード(鉛直並進)であったことも考慮し、小円断面の変形を含むボックスサポート取付部のばね剛性を算定(別紙4参照)し、それを考慮した地震応答解析モデルを設定している。

このモデル化の影響検討結果は、3.3項で示す。

表3 固有周期の比較結果(サプレッションチェンバ本体のみモデル化)(単位:s)

検討ケース	①	②	③	(A) ①/②	(B) ①/③
解析モデル	3次元はりモデル	3次元シェルモデル	3次元シェルモデル (小円の平面保持)		
1次	0.105	0.130	0.100	0.8	1.1

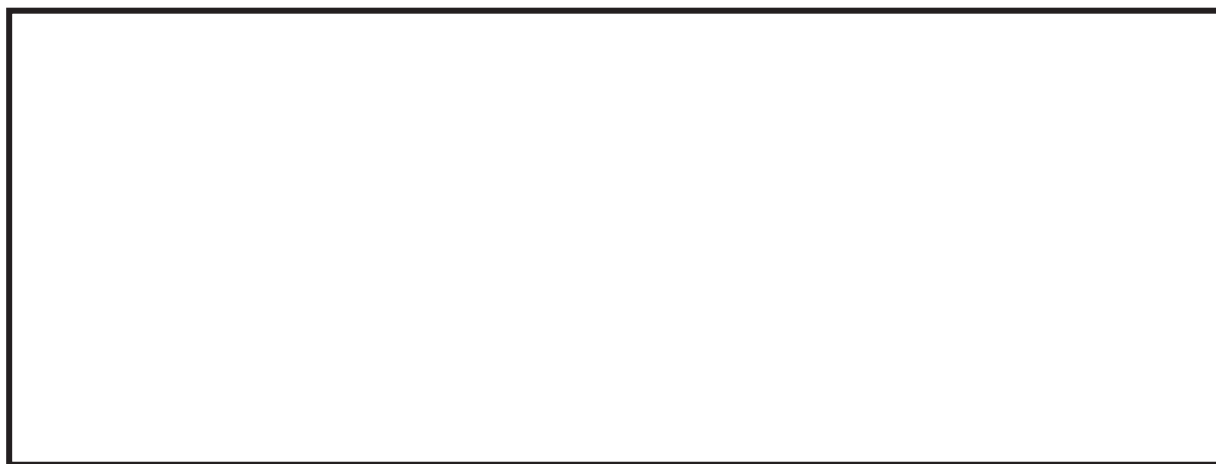


図1 影響検討に用いた解析モデル図(サプレッションチェンバ本体のモデル化)

(2) サプレッションチェンバ本体のはり要素分割数の妥当性

サプレッションチェンバ本体のはり要素による分割数に着目し、地震応答解析モデル（3次元はりモデル）について、はり要素分割数を4倍（2分割⇒8分割）にした場合の固有周期の比較結果を表4に示す。また、影響検討に用いた解析モデルを図2に示す。

固有周期の比較結果から、サプレッションチェンバ本体のはり要素分割数によらず固有周期は同等であり【表4(A)参照】、地震応答解析モデル（3次元はりモデル）におけるサプレッションチェンバ本体の要素分割は妥当である。

表4 固有周期の比較結果（サプレッションチェンバ本体のはり要素分割）（単位：s）

検討ケース	①	②	(A) ①/②
はり要素分割数	2分割	8分割	
水平1次	0.097	0.097	1.0
鉛直1次	0.085	0.085	1.0
水平2次	0.076	0.075	1.0
面内変形	0.068	0.068	1.0



図2 妥当性確認に用いた解析モデル図（サプレッションチェンバ本体のはり要素分割数）

3.3 ボックスサポート取付部ばね剛性のモデル化の影響

今回工認では、サプレッションチェンバ小円の断面変形を含む取付部の局部変形を考慮したばね剛性を算定し、地震応答解析モデル（3次元はりモデル）のボックスサポート取付部にばね要素としてモデル化しており、それが固有周期に与える影響を確認する。

ボックスサポート取付部のばね要素を考慮した地震応答解析モデル（3次元はりモデル）及びそのモデルからボックスサポート取付部のばね要素を取り除いた3次元はりモデルと適用性確認用解析モデル（シェルモデル）との固有周期の比較結果を表5に示す。

固有周期の比較結果から、ボックスサポート取付部のばね要素を取り除いた3次元はりモデルと適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）との固有周期は差があり、ボックスサポート取付部のばね要素を取り除いた3次元はりモデルではサプレッションチェンバ本体の小円断面変形が支配的となる鉛直1次モードと水平2次モードが発現しない【表5(A)参照】。それに対して、今回工認の地震応答解析モデル（ボックスサポート取付部のばね要素を考慮）では、小円断面変形が支配的となる鉛直1次モードと水平2次モードが発現し、適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）との水平1次の固有周期の差が小さくなっている。（判断目安10%以内）

この結果から、3次元はりモデルに小円断面の変形及びボックスサポート取付部の局部変形を考慮したボックスサポート取付部ばね剛性を考慮することで、適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）の小円断面の変形を主とした耐震評価として考慮すべき振動モードを表現し（本文4.2.4項参照）、3次元シェルモデルの小円断面の変形による1次モードの固有周期の差が縮小したと考えることが出来る。

なお、検討ケース②と③の固有周期には地震応答解析モデルの適用性確認の判断目安10%以内の差【表5(B)参照】があるが、これは局部的で細かな変形を考慮できる3次元シェルモデルに対して全体的に変形をとらえる3次元はりモデルのモデル化の違いによる影響が要因となっていると考えられる。

表5 固有周期の比較結果（ボックスサポート取付部のばね剛性のモデル化）（単位：s）

検討ケース	①	②	③	(A) ①/③	(B) ②/③
解析モデル	地震応答解析モデル (3次元はりモデル)		適用性確認用解析モデル (3次元シェルモデル)	(A) ①/③	(B) ②/③
	ボックスサポートの取付部のばね要素無し	ボックスサポートの取付部のばね要素を考慮			
水平1次	0.086	0.097	0.107	0.8	0.907
鉛直1次	—	0.085	0.094	*	0.904
水平2次	—	0.076	0.076	*	1.000
面内変形	0.069	0.068	0.069	1.0	0.986

注記*：比較対象の振動モードが発現しない。

3.4 ボックスサポートのモデル化の影響

ボックスサポート（フランジプレートを含む）をはり要素及びシェル要素でモデル化した3次元はりモデルと3次元シェルモデルの固有周期の比較結果を表6に示す。また、影響検討に用いた解析モデルを図3に示す。

固有周期の比較結果から、3次元はりモデルと3次元シェルモデルとの固有周期は、差がある【表6(A)参照】。これに対してボックスサポートのモデル化に対する追加検討として、3次元はりモデル及び3次元シェルモデルにおけるフランジプレートをモデル化範囲から除外したところ固有周期が一致した【表6(B)参照】。

この結果から、ボックスサポートのフランジプレートのモデル化が地震応答解析モデル（3次元はりモデル）と適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）との固有周期の差を生む1つの要因となっていると考えられるが、ボックスサポートの剛性が高いことから、サブレスションチェンバ全体の固有周期に与える影響は、小さいと考えられる。ここで、フランジプレートのモデル化による固有周期の差を生む要因としては、フランジプレートの剛性算定用の3次元シェルモデルのフランジプレートの境界条件を剛体要素とした影響が考えられる。なお、表6の③と④が一致【表6(B)参照】したことから、ボックスサポートの剛性に加えて、ボックスサポートの高さ（ボックスサポート中心高さ）も妥当であることが確認できた。

表6 固有周期の比較結果（ボックスサポートのモデル化）（単位：s）

検討ケース	①	②	③	④	(A) ①/②	(B) ③/④
解析モデル	3次元 はりモデル	3次元 シェルモデル	3次元 はりモデル	3次元 シェルモデル		
			フランジプレート除外			
1次	0.024	0.030	0.019	0.019	0.8	1.0
2次	0.023	0.027	0.017	0.017	0.9	1.0
3次	0.010	0.012	0.006	0.006	0.8	1.0



図3 影響検討に用いた解析モデル図（ボックスサポートのモデル化）

4. まとめ

影響検討結果から、影響検討を行ったモデル化項目である有効質量のモデル化(3.1項)、サブプレッションチェンバ本体のモデル化(3.2項)、ボックスサポート取付部のばね剛性のモデル化(3.3項)及びボックスサポートのモデル化(3.4項)の影響評価を行った。その結果、固有周期が完全に一致しない(差を生む)要因は、局部的で細かな変形を表現する3次元シェルモデルに対して全体的に変形をとらえる3次元はりモデルのモデル化の違いによる影響であると考えられることを確認した。

今回工認における地震応答解析モデルは、上記のように固有周期が完全に一致しない(差を生む)要因が考えられるものの、本文4.2.4におけるはりモデルの適用性確認結果(耐震評価として考慮すべき振動モードが表現できていること及び応力評価部位における発生応力が許容応力の範囲内で同等(3次元シェルモデル及び3次元はりモデルのいずれも許容応力の範囲内)であること)を踏まえ、女川2号機の今回工認におけるサブプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデルへの今回設定した3次元はりモデルの適用性があると判断している。