

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1
提出年月日	2021年1月29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

2021年1月
東北電力株式会社

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	4
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	20
3.3.1	基本方針	20
3.3.2	応力評価点	20
3.3.3	応力解析方法	24
3.4	既工認と今回工認における耐震評価手法の相違	25
4.	地震応答解析の詳細	28
4.1	地震応答解析モデル	28
4.1.1	サプレッションチェンバ内部水の有効質量算定	28
4.1.2	地震応答解析モデルにおける有効質量の設定	31
4.1.3	サプレッションチェンバ本体のモデル化	35
4.1.4	ボックスサポート取付部のばね剛性の算定	36
4.1.5	ボックスサポートのモデル化	39
4.2	地震応答解析モデル（3次元はりモデル）の妥当性確認	45
4.2.1	妥当性の確認方針（妥当性確認の着眼点）	45
4.2.2	妥当性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）	47
4.2.3	妥当性確認結果	48
4.3	地震応答解析に係る検討	60
4.4	スロッシング荷重	64
5.	応力解析の詳細	66
5.1	応力評価フロー	66
5.2	応力評価点	67
5.2.1	サプレッションチェンバの応力評価点	67
5.2.2	ボックスサポートの応力評価点	69

5.3	応力解析モデル.....	71
5.3.1	ボックスサポート取付部及び胴エビ継手部	71
5.3.2	フランジプレート（外側）の応力評価モデル	72
5.4	応力評価	73
5.4.1	サプレッションチェンバの応力評価	73
5.4.2	ボックスサポートの応力評価.....	74
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.....	75
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.....	77
8.	まとめ	81

別紙 1 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設定方法

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 ばね要素の設定

別紙 5 妥当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 計算機コードの概要

別紙 8 有効質量の概要

別紙 9 規格類における有効質量の適用例

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 有効質量比に対するスロッシング影響

別紙 13 振動試験の振動試験の有効質量比

別紙 14 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

 : 今回提出資料

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次元はりモデル化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こと*、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ついては、既工認における解析モデルの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り動的解析（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

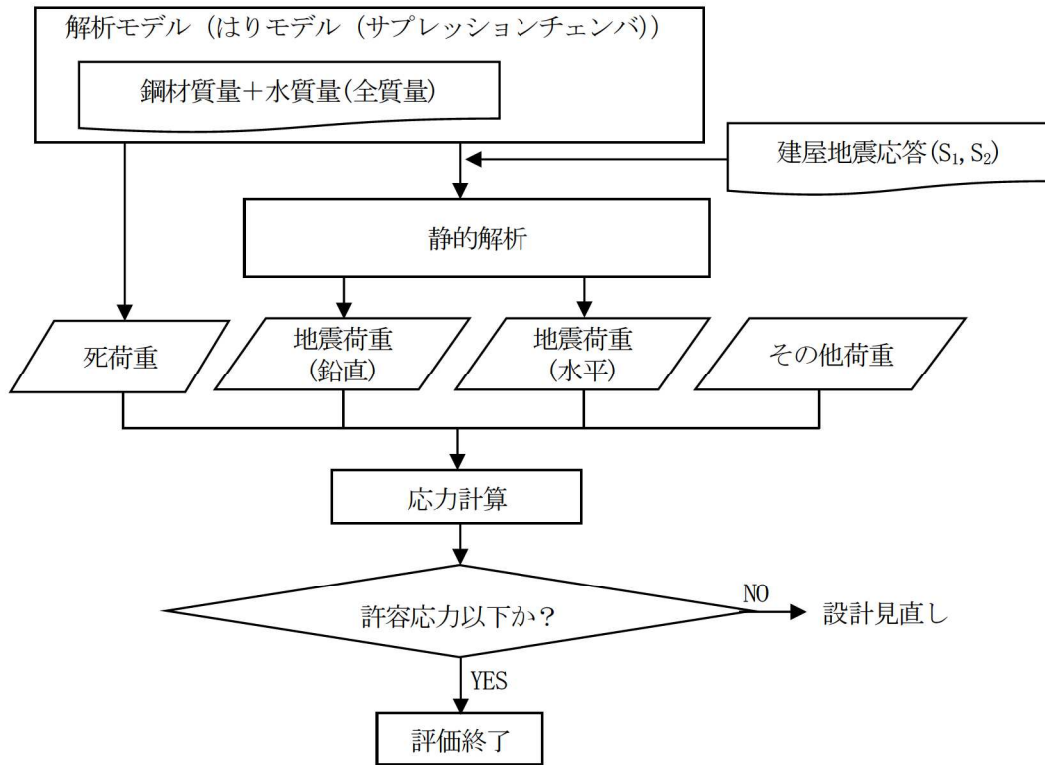


図 1-1 既工認におけるサブプレッションチェンバの動的地震力による耐震評価フロー

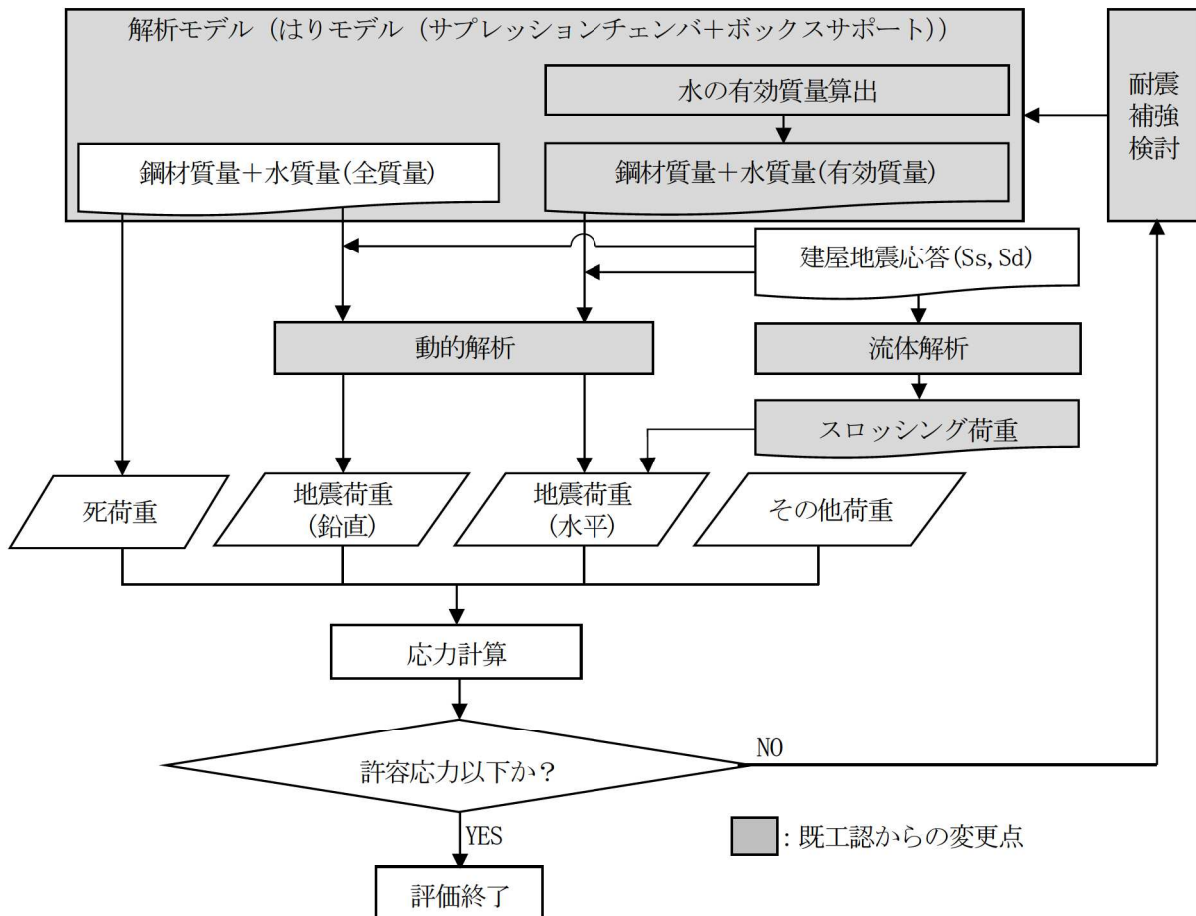


図 1-2 今回工認におけるサブプレッションチェンバの動的地震力による耐震評価フロー

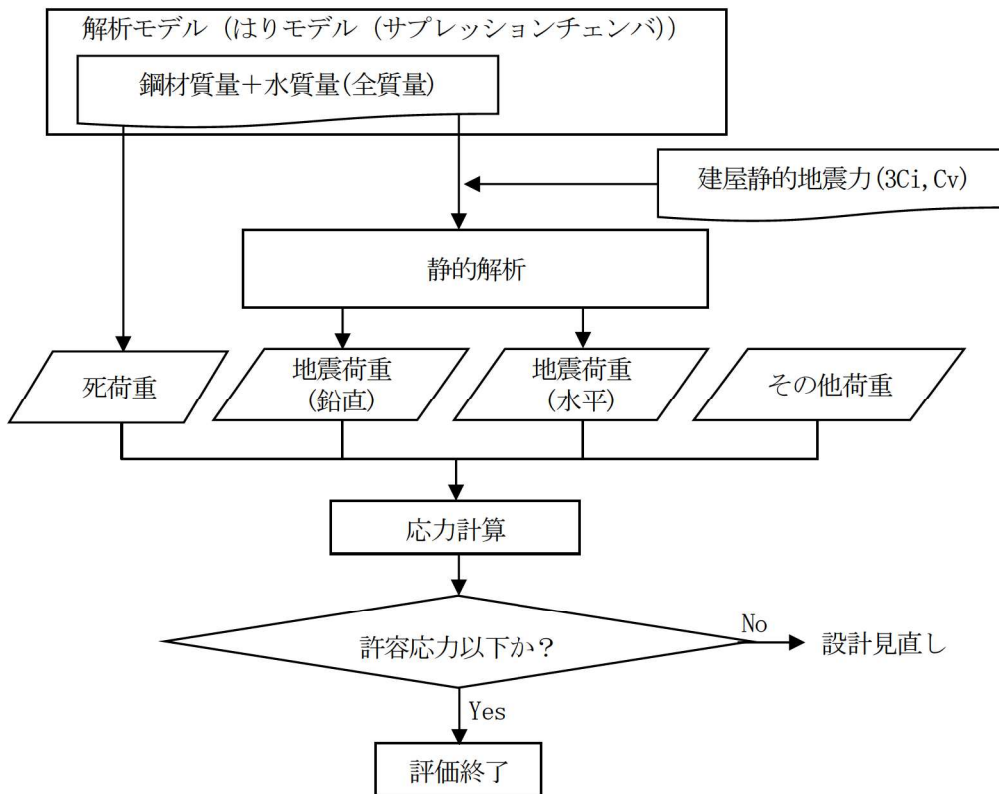


図 1-3 既工認におけるサプレッションチェンバの静的地震力による耐震評価フロー

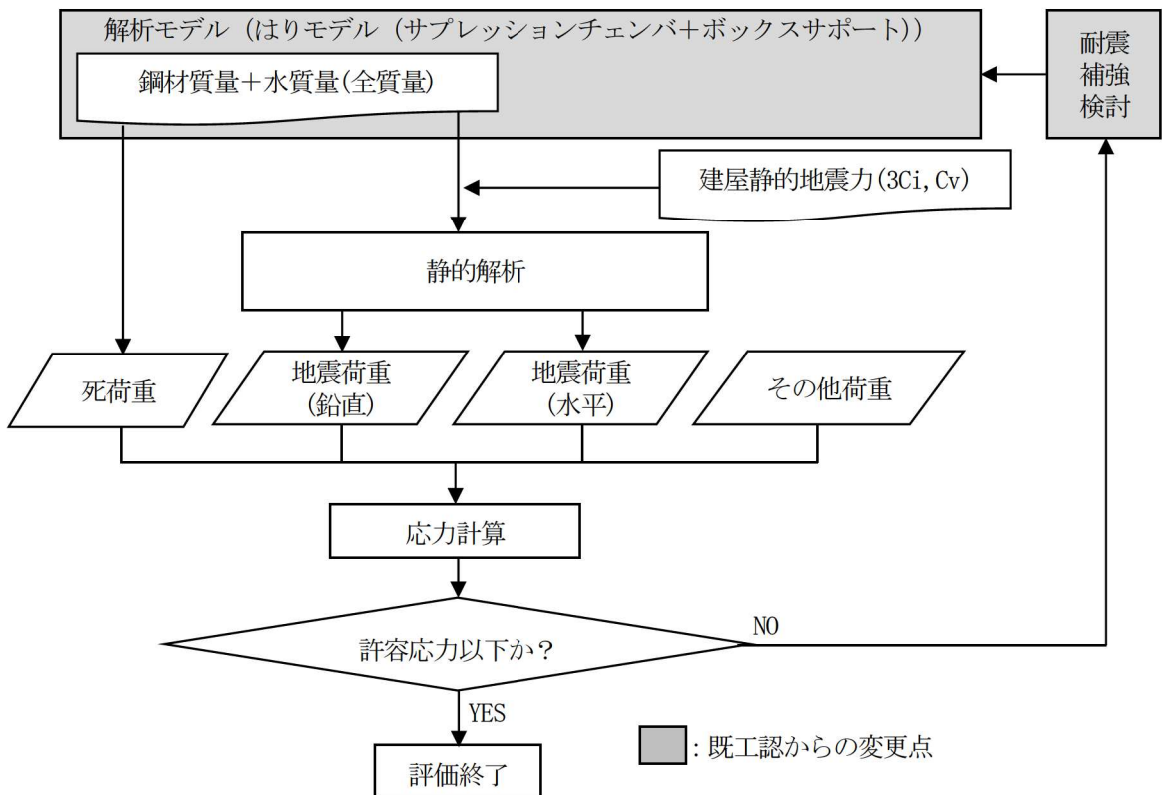


図 1-4 今回工認におけるサプレッションチェンバの静的地震力による耐震評価フロー

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、ドライウエ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）。

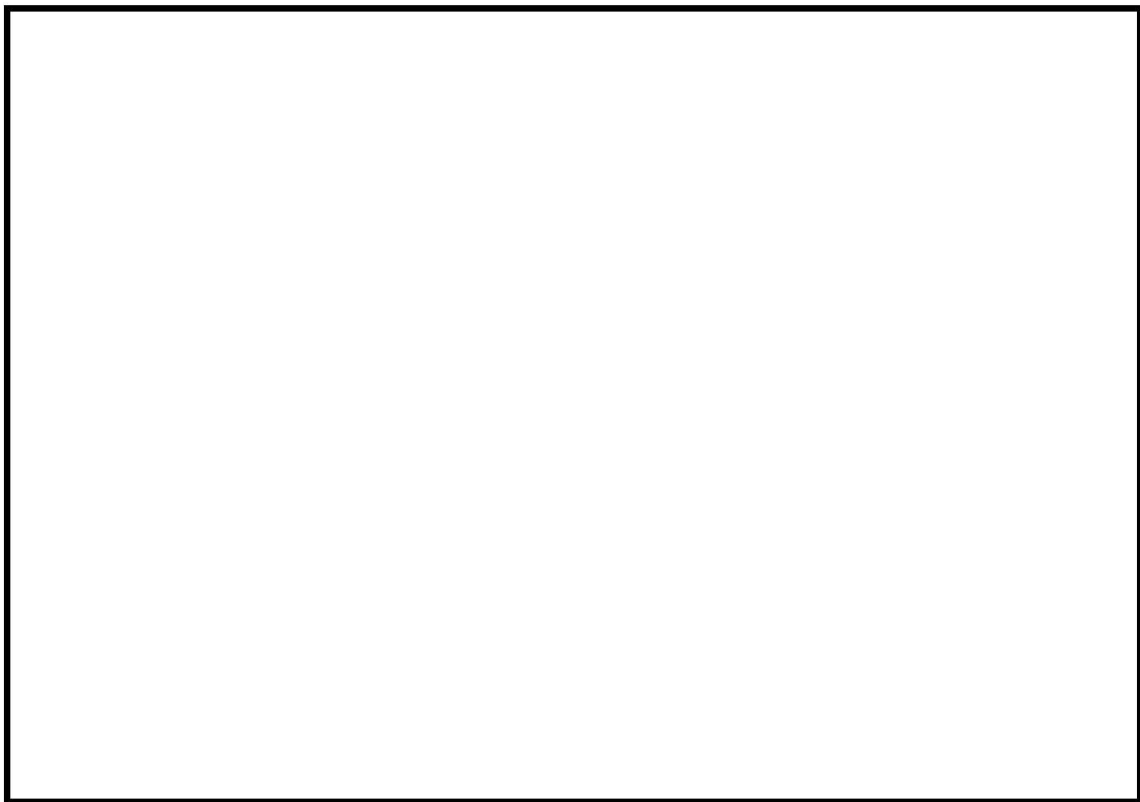
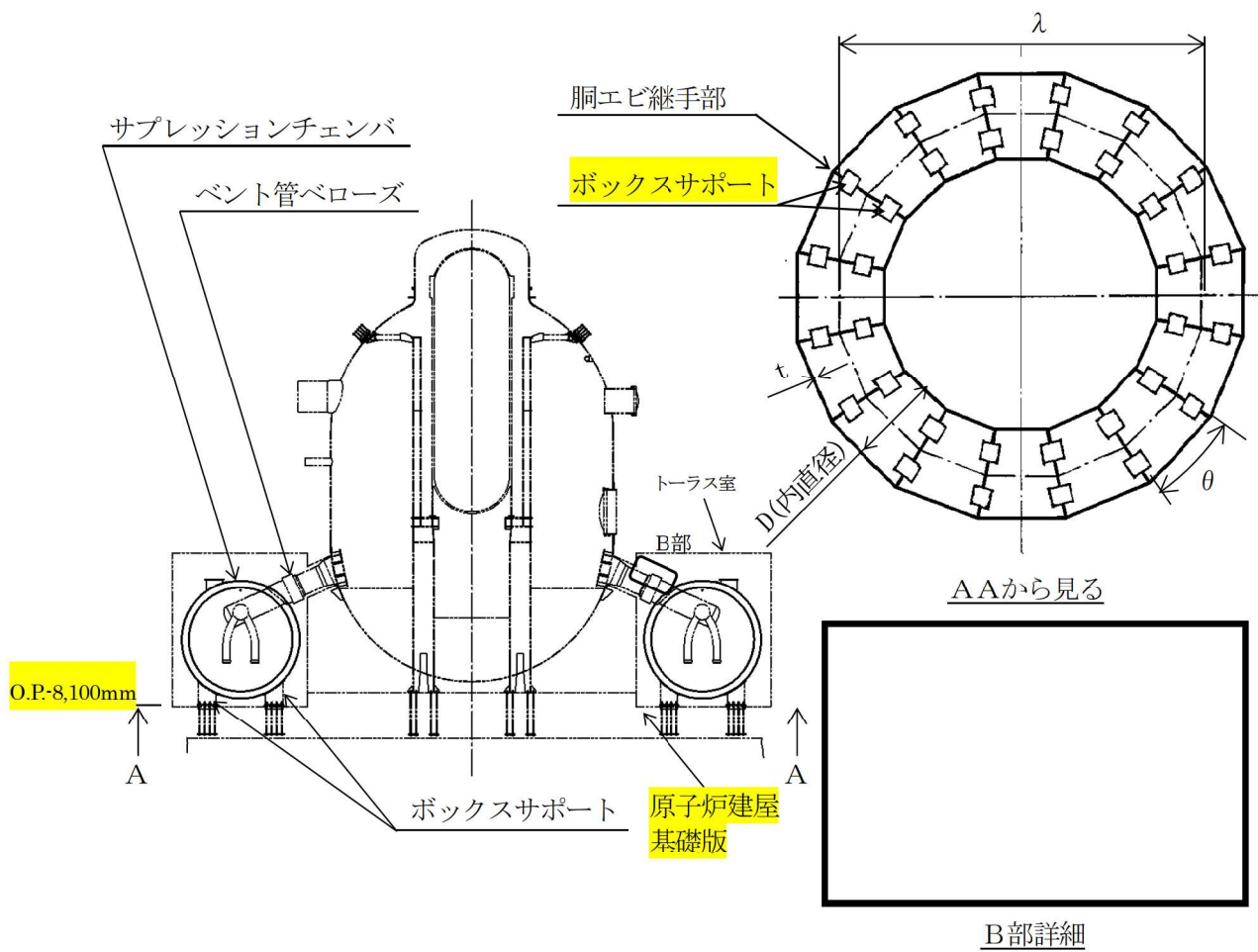


図 2. 1-1 サプレッションチェンバ及びボックスサポート構造概要図

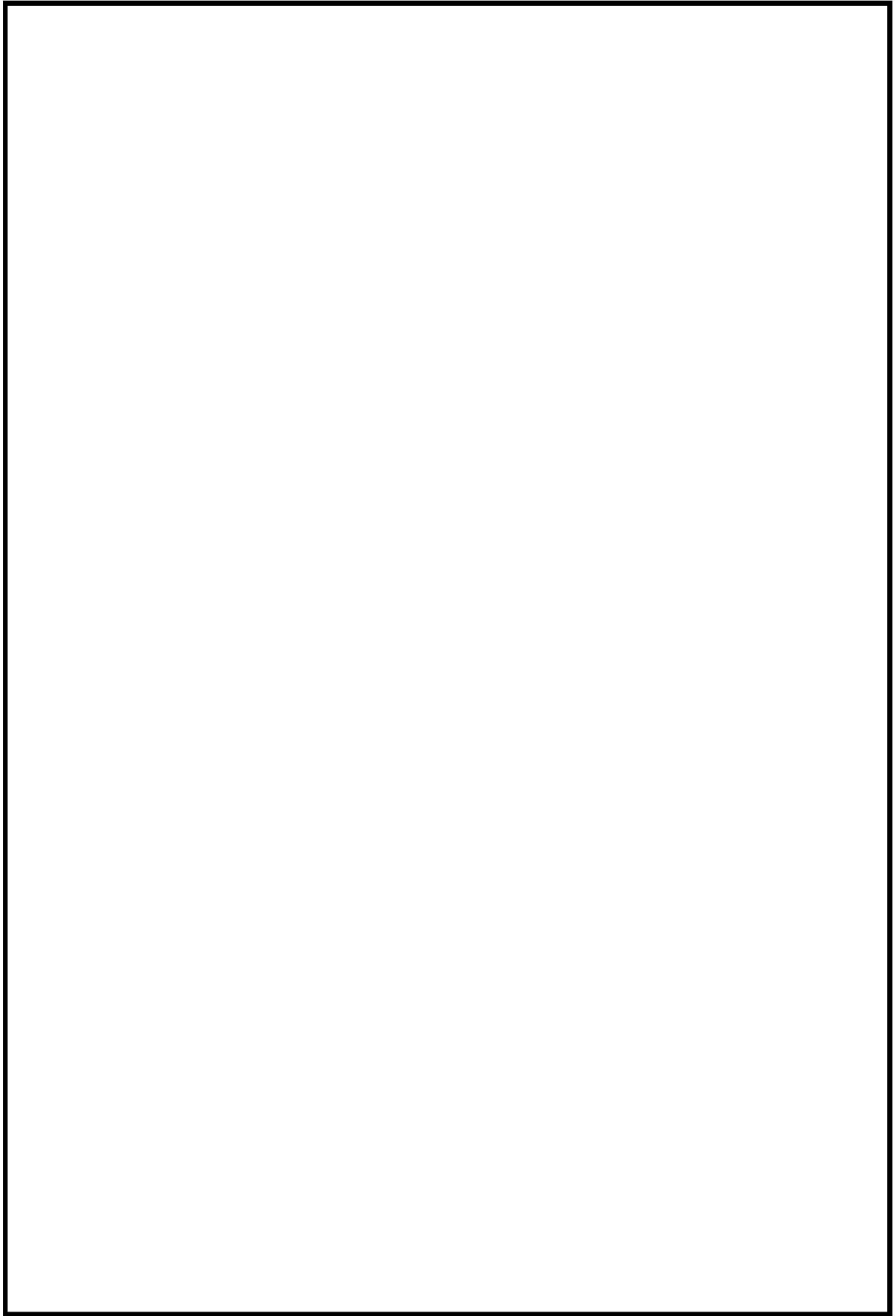


図 2. 1-2 ボックスサポート構造詳細図



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時水位* における質量	

注記* 重大事故時水位よりも高い水位 (真空破壊装置下端位置)

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 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、主蒸気逃し安全弁排気配管）との干渉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】

(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 2.2-2 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

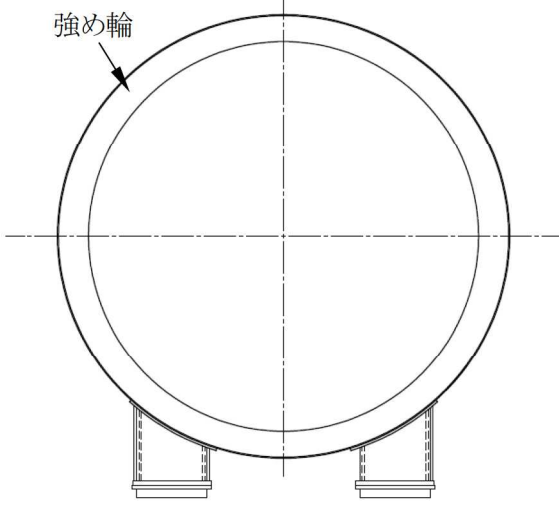
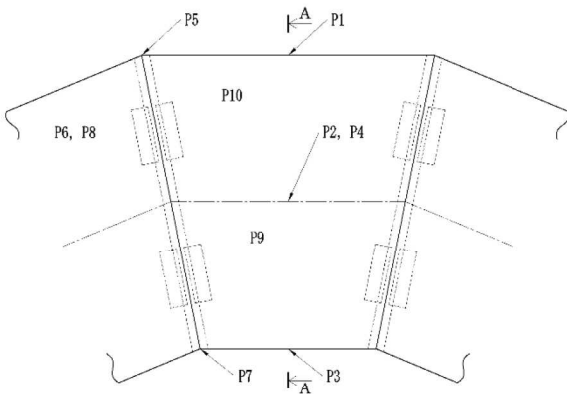
	補強前 (小円断面)	補強後 (小円断面)
概略構造		

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>○ : 補強対策部位</p> <p>*P1~P10 は既工認における応力評価点</p> 	

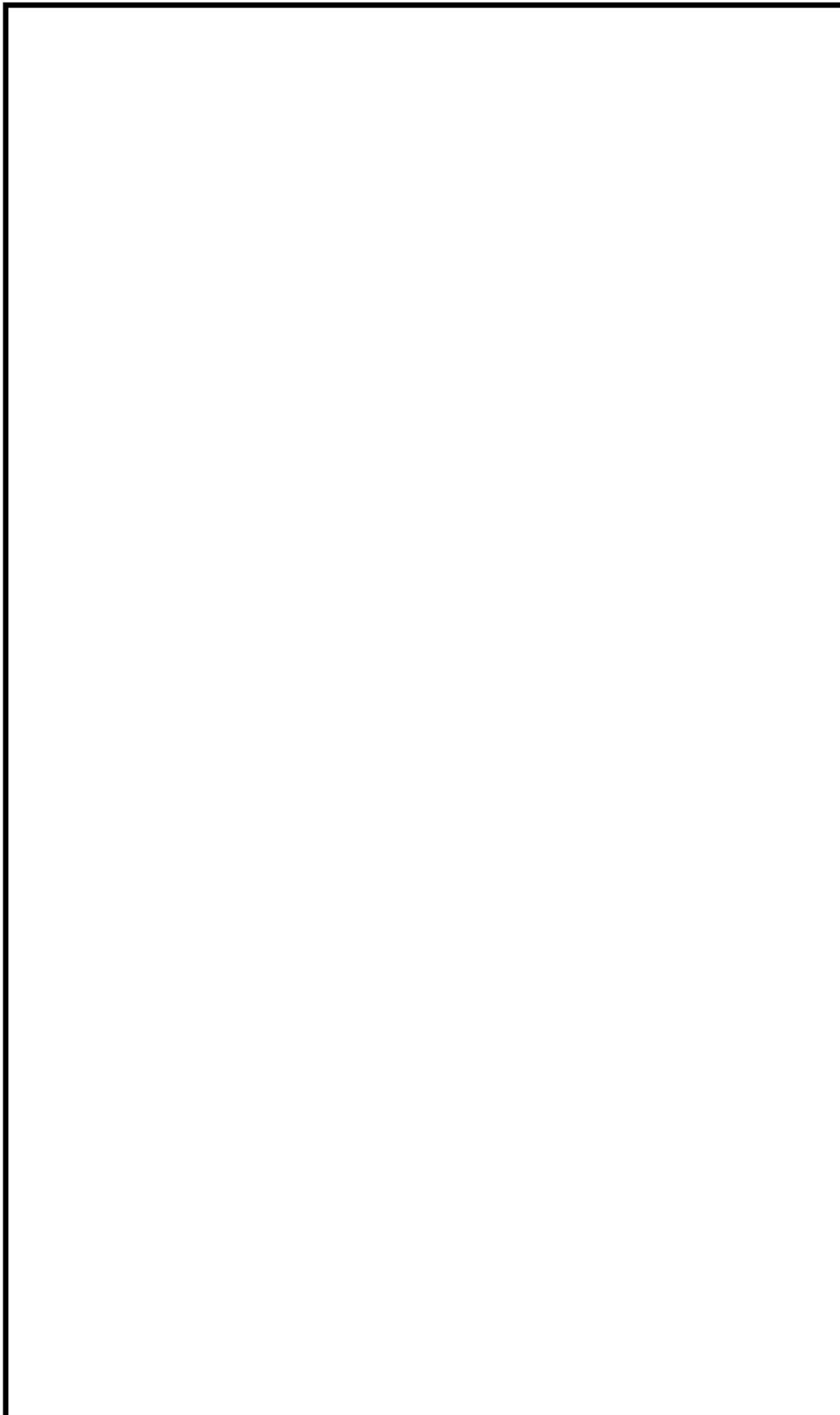
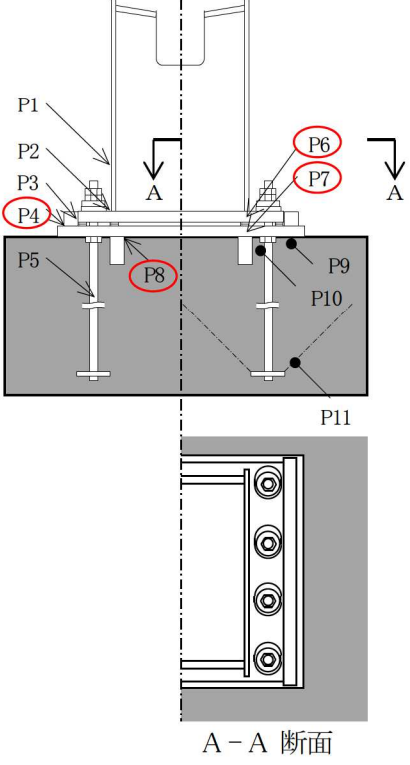


図 2. 2-1 サプレッションチェンバ及びボックスサポート取付部の耐震補強対策後詳細構造図

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>○：補強対策部位</p> <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>

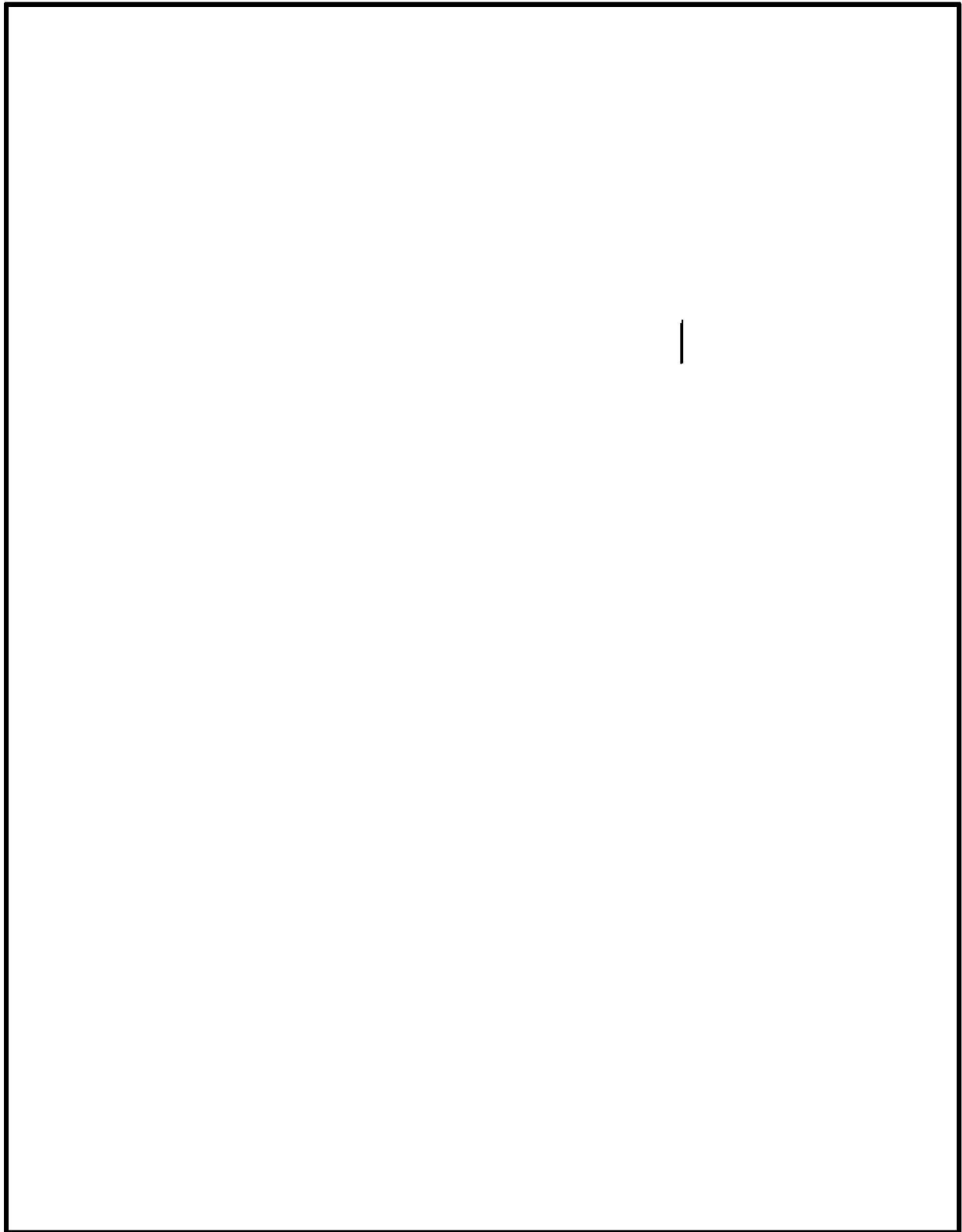


図 2.2-2 ボックスサポートの耐震補強対策後詳細構造図



図 2.2-3 強め輪の補強範囲とサプレッションチェンバ内の設備との関係

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、設置許可審査にて詳細設計段階で説明することとした項目（設置許可からの申送り事項）及び詳細設計の進捗を踏まえた説明する項目を示す。

: 詳細設計段階で説明することとした項目 (設置許可からの申送り事項)
 : 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
耐震評価 ↓ 地震応答解析モデルの設定 (3次元はりモデル)	耐震補強対策 ↓ サプレションチェンバ内部水の有効質量のモデル化 ↓ サプレションチェンバ本体のモデル化 ↓ ボックスサポート取付部のモデル化 ↓ ボックスサポートのモデル化	耐震補強対策の内容 本文：2.2.2 参照 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 バルジングの影響検討 本文：4.1.3 参照 別紙：別紙 3 参照 ばね剛性の設定 本文：4.1.4 参照 別紙：別紙 4 参照 ボックスサポートの剛性の詳細化、基礎ポルトのモデル化 本文：4.1.5 参照 はりモデルの妥当性検討 (シエールモデルとの応答比較) 本文：4.2 参照 有効質量算定解析コード間の差異影響 本文：4.3 参照 スペクトルモデル解析の適用 (高振動数の考慮確認) 本文：4.3 参照 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
↓ 固有値解析の実施 ↓ 地震応答解析の実施 (スペクトルモデル解析)	↓ 設計用床応答曲線 ↓ 動的解析 ↓ スロッシング荷重	
↓ 地震時における荷重等の算定 ↓ 応力解析へ		

地震応答解析

表 3.1-1 評価手順 (2/2)

 : 詳細設計段階で説明することとした項目 (設置許可からの送付事項)
 : 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
応力解析		<p>サブレーションチェーンの解析結果及びボックスサポートの荷重伝達経路の考慮</p> <p>フランジプレート (外側) のモデル化</p> <p>FEM解析</p> <p>サブレーションチェーン及びボックスサポートのモデル化</p> <p>FEM解析</p> <p>サブレーションチェーン及びボックスサポートの応力評価</p> <p>個別詳細評価が必要な場合</p> <p>個別詳細評価</p>	<p>応力評価点の検討 本文：5.2 参照</p> <p>モデル化方針 本文：5.3.1 参照</p> <p>サブレーションチェーンの応力評価 本文：5.4.1 参照</p> <p>モデル化方針 本文：5.3.2 参照</p> <p>ボックスサポートの応力評価 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、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、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こと、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。

また、地震応答解析モデルの設定にあたっては、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剛性を模擬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。

設置許可からの申送り事項、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、汎用構造解析プログラム（NASTRAN）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）から各方向の有効質量を算出する。また、算出された有効質量の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有効質量と比較・検証を行う。

(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、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。

(3) ボックスサポート取付部の影響

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、ボックスサポート取付部の影響を含め、より詳細な地震応答を把握するため、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）に設定することで、はりモデルで考慮されないボックスサポート取付部のばね剛性（並進、回転）を考慮する。

(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

既工認におけるサプ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固定状況を境界条件として考慮していた。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に考慮する。

また、ボックスサポートは、サプ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におけるボックスサポート下端の境界条件は、サプ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。

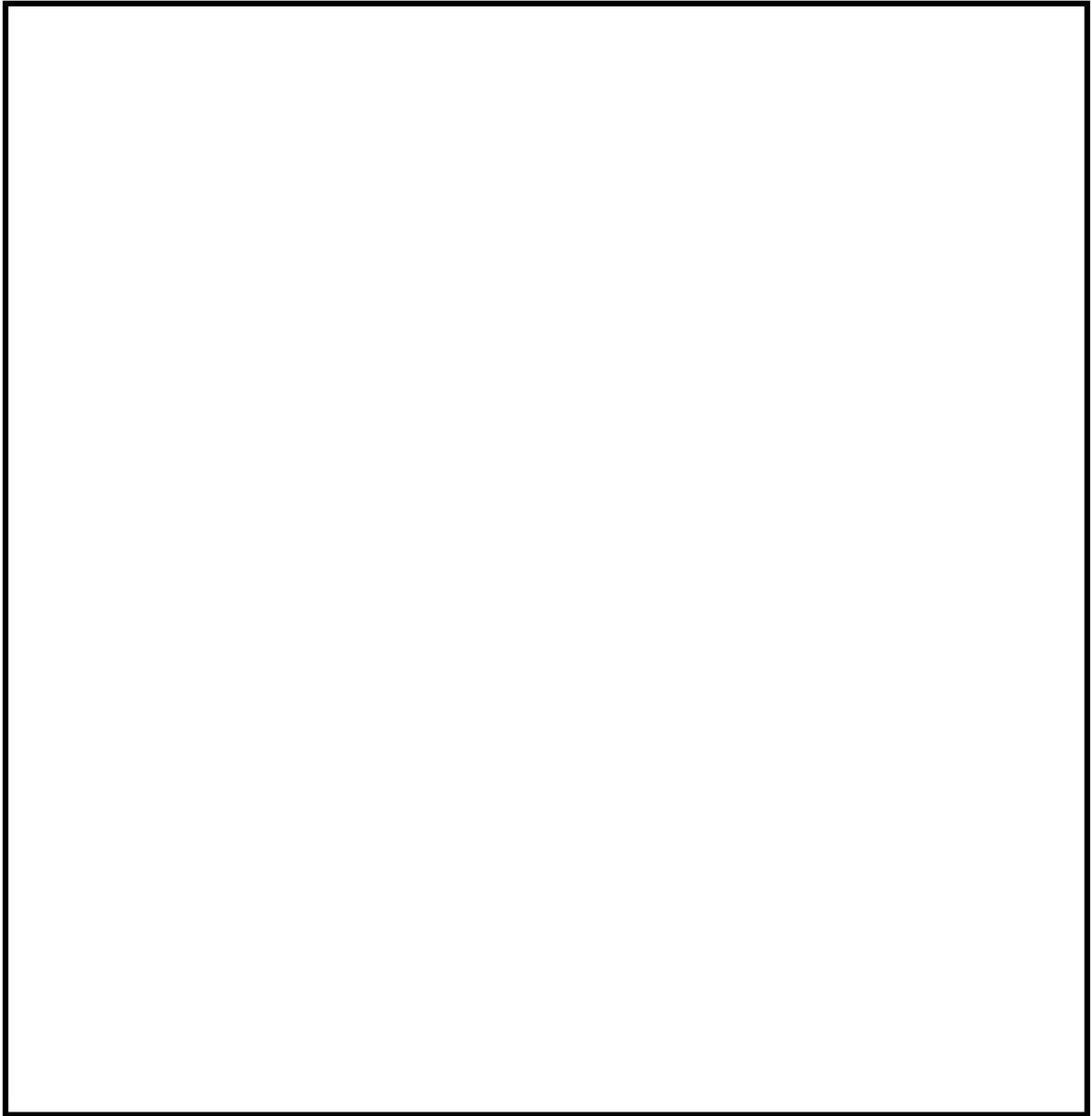


図 3. 2-1 サプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析モデル (3次元はりモデル)

3.3 応力解析

3.3.1 基本方針

今回工認のサブ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

サブ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
サブプレッション 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

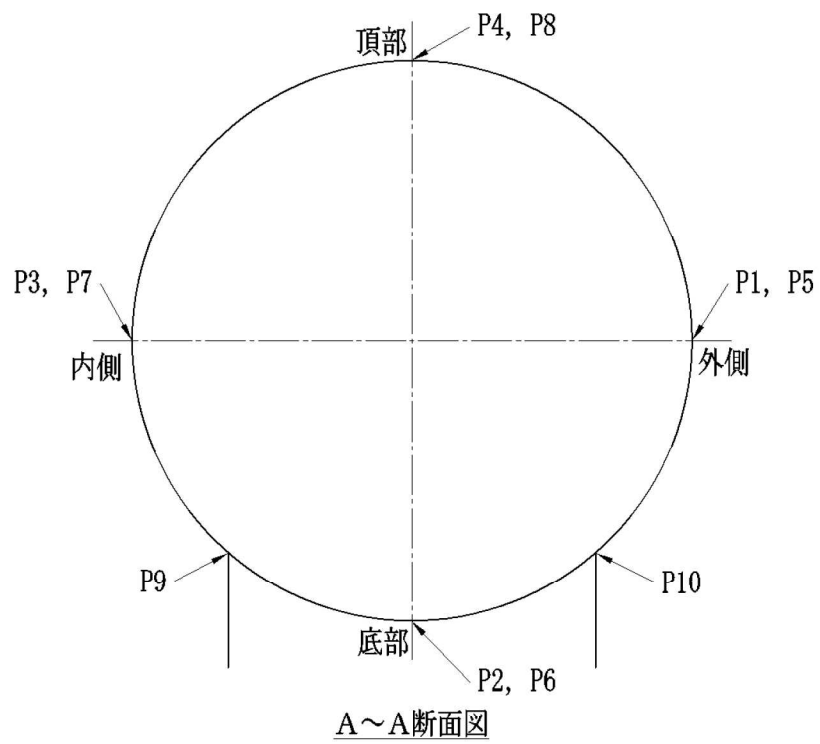
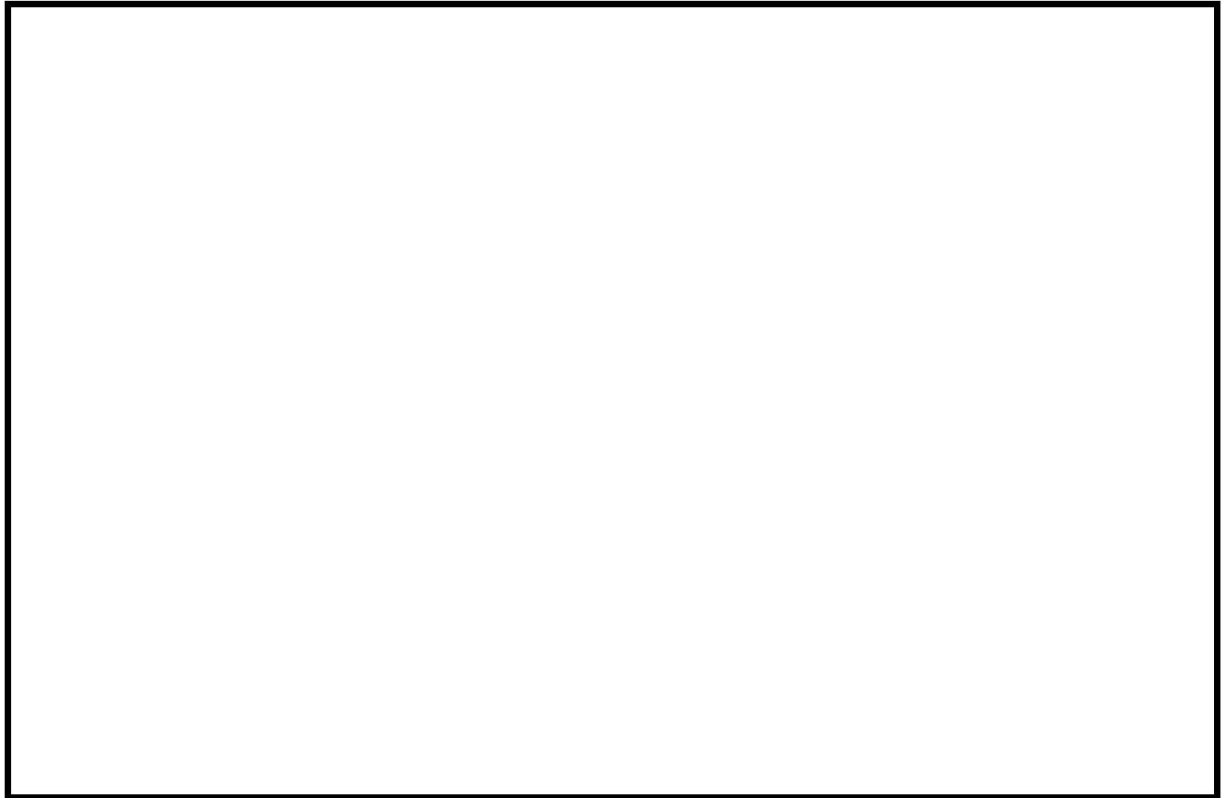


図 3.3-1 サプレッションチェンバの応力評価点

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

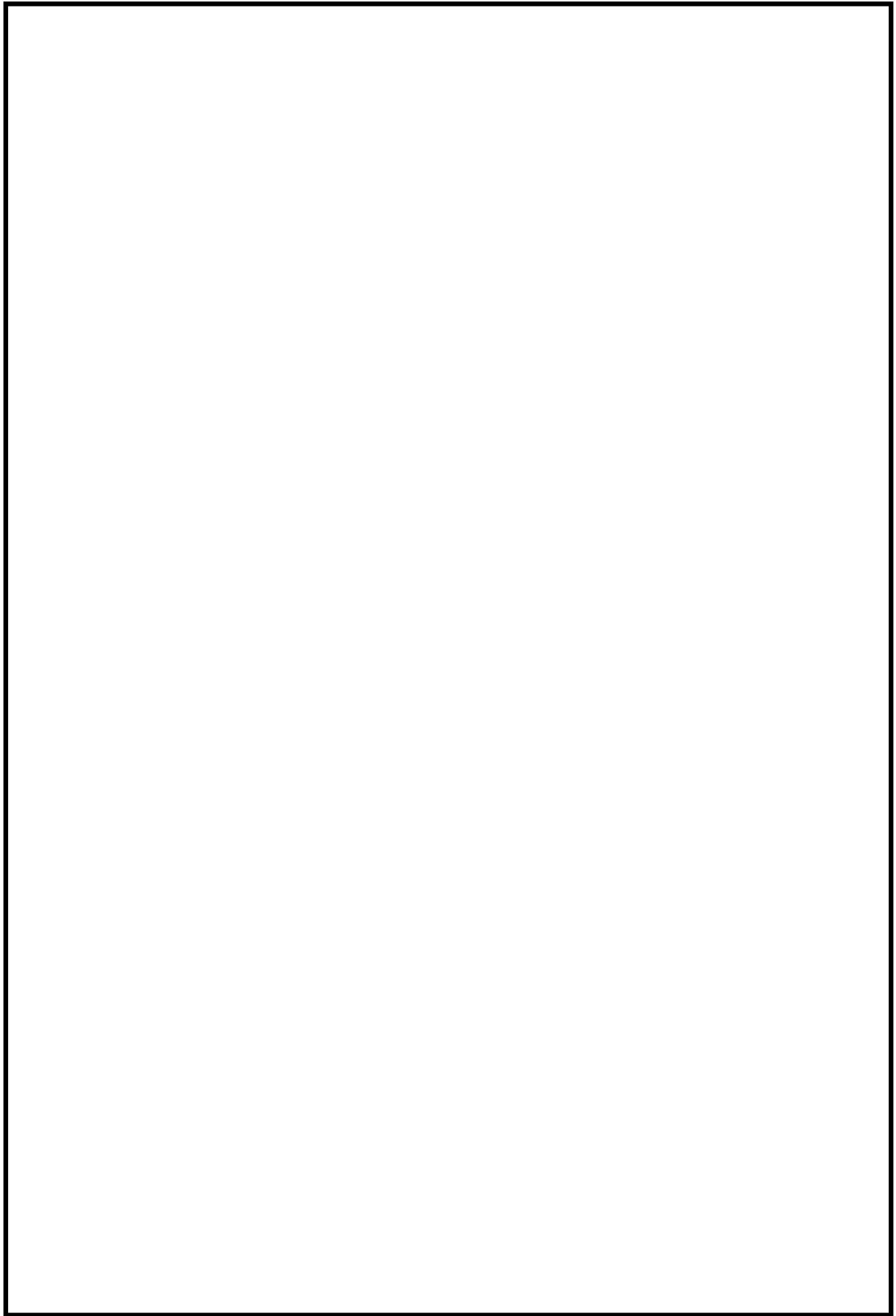


図 3.3-2 ボックスサポートの応力評価点

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

既工認におけるサブ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、サブプレッションチェンバをはり要素でモデル化し、サブ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ブ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。ただし、サブプレッションチェンバ（胴エビ継手部）、ボックスサポート取付部及びフランジプレートについては、応力解析モデルを用いた応力評価を行う。

(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ブ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、サブ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、サブプレッションチェンバ（胴エビ継手部）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、地震応答解析と同様、ボックスサポート取付部のばね剛性の算定に用いた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。

また、ボックスサポートのうち、フランジプレート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。

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。

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		
サブレーション 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 (サブレーションンチエンバ全体 を考慮)	動的解析 (スペクトルモーダル解析)	3次元はりモデル*1 (サブレーションンチエンバ全体 を考慮)	重大事故時のサブレーション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。	
		P1 P2 P3 P4	公式等による評価	-	公式等による評価	-	-	
	応力 解析	P5 P6 P7 P8	胸エビ継手部外側 胸エビ継手部底側 胸エビ継手部内側 胸エビ継手部頂部	公式等による評価	-	FEM 解析	3次元シェルモデル (サブレーションンチエンバ本体 とボックスサポータ() ()を考慮)	胸エビ継手部近傍にはボックスサポータが取り付けら 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。
		P9 P10	内側ボックス サポータ取付部 外側ボックス サポータ取付部	FEM 解析	3次元シェルモデル (サブレーションンチエンバ本体 とボックスサポータ() ()を考慮)	FEM 解析	3次元シェルモデル (サブレーションンチエンバ本体 とボックスサポータ() ()を考慮)	地震応答解析モデルに考慮したボックスサポータ取付 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。

注記*：①サブレーションンチエンバ内部水に対する有効質量の適用、②ボックスサポータ取付部にはばね剛性を考慮、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

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次元はりモデル*1 (サブレスシヨンエンバ全体を考慮)	重大事故時のサブレスシヨン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。
		P1 P2 P4 P6	ボックスプレート ボックスプレート シヤラグ取付部 フランジプレート	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。
	P2'	ボックスプレート (上側) 取付部	—*2	—*2	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。
	P3 P9	フランジプレートとシヤラグ接触部 コンクリート (ベースプレート下面)	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	—	—
	P6'	フランジプレート (外側)	—*2	—*2	公式等による評価又は FEM 解析	3次元シェルモデル (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	—	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 (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	—	—
	P12	パッド取付部	—*2	—*2	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サブレスシヨン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

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) 有効質量算定の考え方

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、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 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、NASTRANによる応答解析にて、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）から各方向の有効質量を算定する。

また、NASTRANによる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有効質量と比較・検証によりその妥当性を確認している。

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。

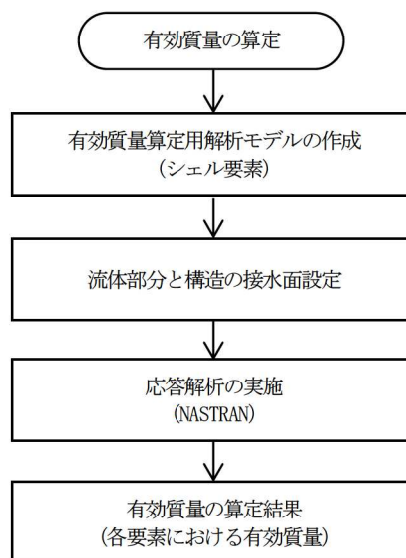


図4.1-1 有効質量算定フロー

(2) 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、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、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。

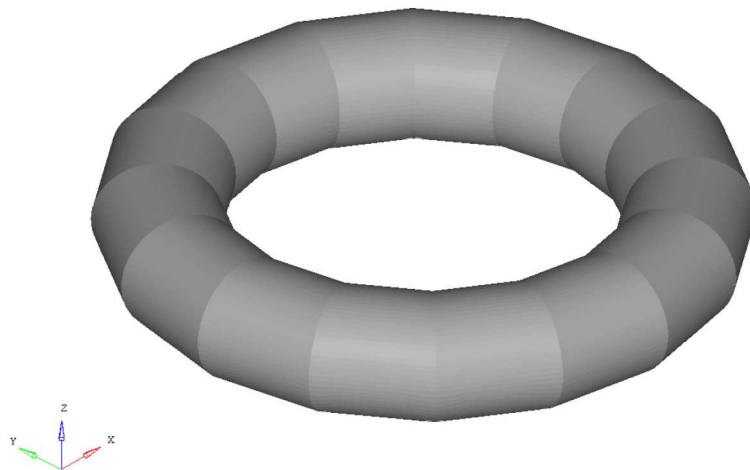


図 4.1-2 有効質量算定用解析モデル

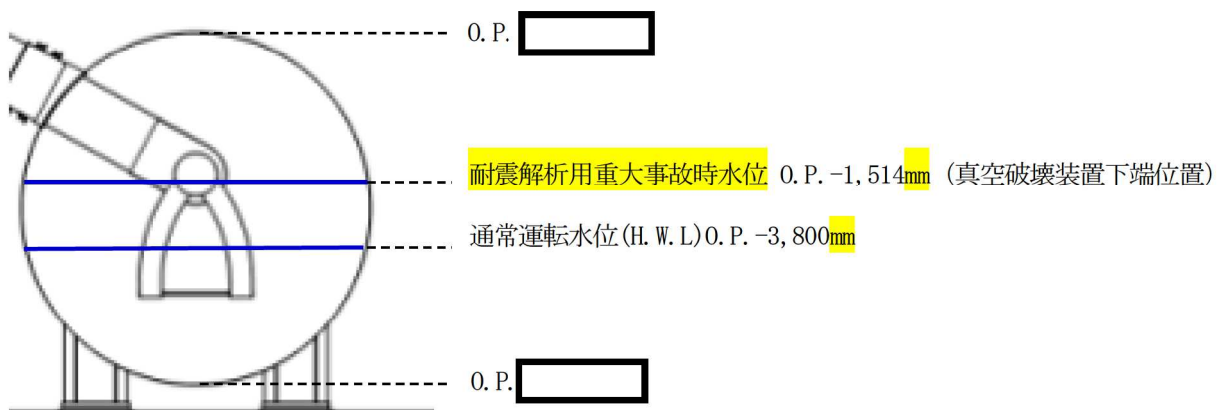


図 4.1-3 サプレッションチェンバ内部水の設定水位

(3) 有効質量の解析結果

NASTRANによ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を表4.1-1に示す。ここで、算出結果として示している有効質量比の値は、内部水全質量に対する水平方向の有効質量の割合を表す。なお、実際の地震応答解析モデルにおける有効質量は、NASTRANの機能を用いて設定する。詳細な設定方法については、4.1.2項に示す。

また、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による算定結果も示す。各水位においてNASTRANと汎用流体解析コードOpenFOAMにより算出した有効質量比は概ね一致しているが、NASTRANにより算出した方がやや大きい傾向があり、有効質量としては保守側の値となっている。

表4.1-1 サブ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	
	NASTRAN	OpenFOAM*
通常運転水位(H. W. L)	0.24	0.22
耐震解析用重大事故時水位	0.33	0.32

注記*：スロッシングの固有周期帯で応答加速度が大きいS s-D 1を用いた算定結果

4.1.2 地震応答解析モデルにおける有効質量の設定

NASTRAN 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。

NASTRAN 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。

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。

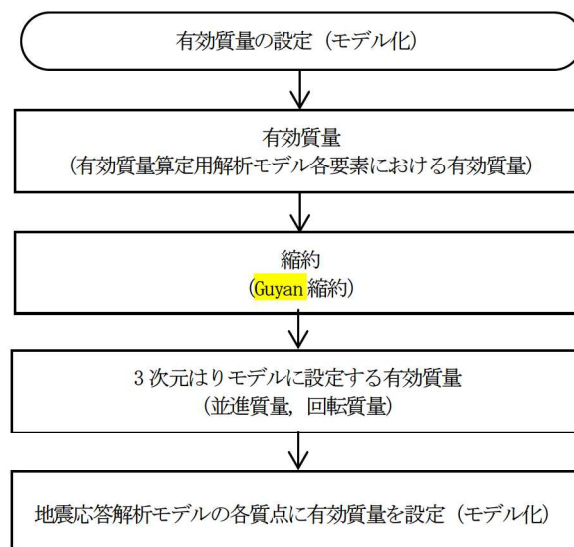


図 4.1-4 有効質量の地震応答解析モデルへの設定フロー



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 有効質量の設定 (耐震解析用重大事故時水位, 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 \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 4.1-3 有効質量の設定 (耐震解析用重大事故時水位, 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、振動特性が改善されるため、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）。

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。

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 (-)
サプレッ ションチ ェンバ	SGV49							

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、はりモデルも用いてばね剛性（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。

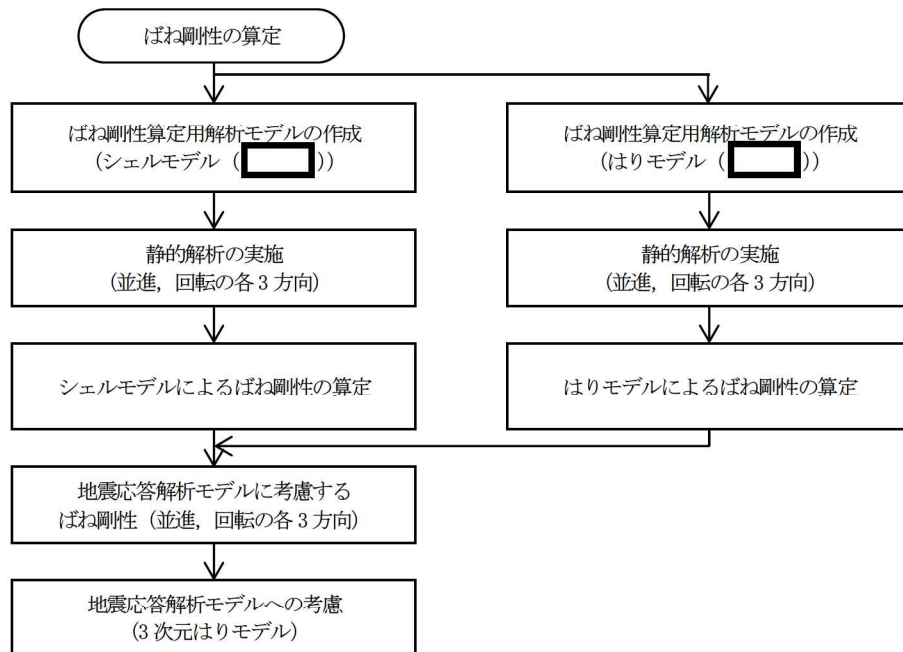


図 4.1-6 ばね剛性算定フロー

(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。

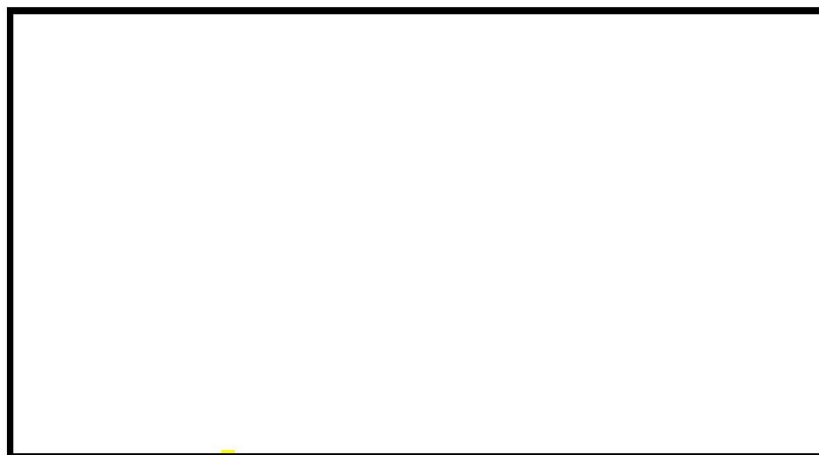


図 4.1-8 ばね剛性算定用解析モデル（はりモデル）

(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* :

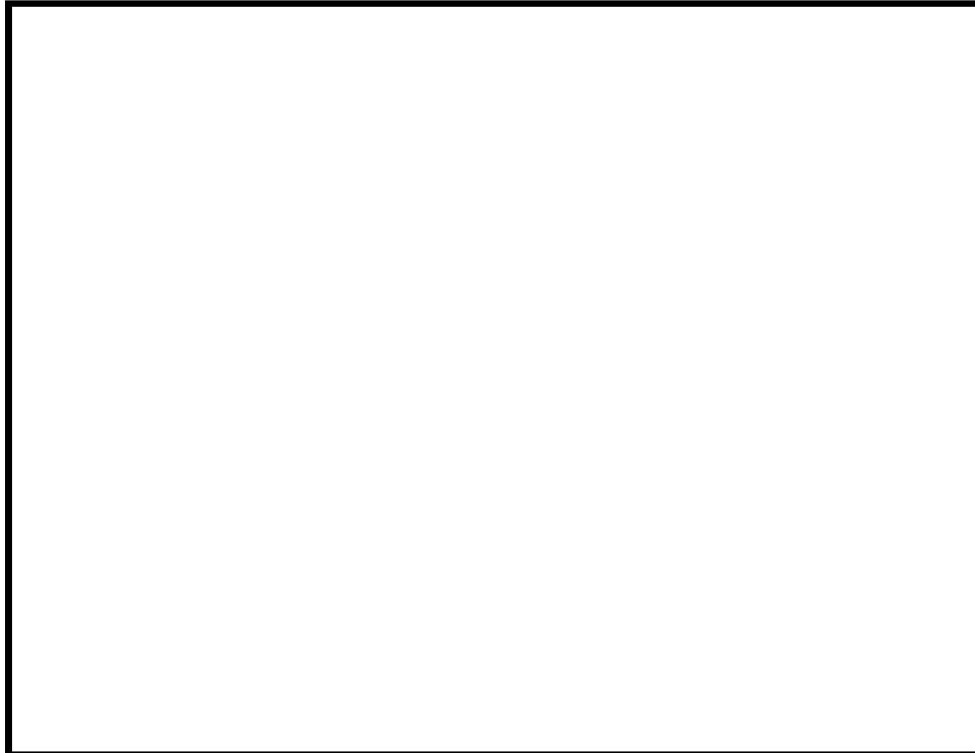


図 4.1-9 地震応答解析モデル (ばね剛性考慮)

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、

に考慮していた。

今回工認では、

としてモデル化を行った。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、

それらの関係から算出を行った。



図4.1-10 算定用の3次元シェルモデル図

表 4.1-7 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* : サプレッションチェンバ本体側に考慮。

表 4.1-6 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。

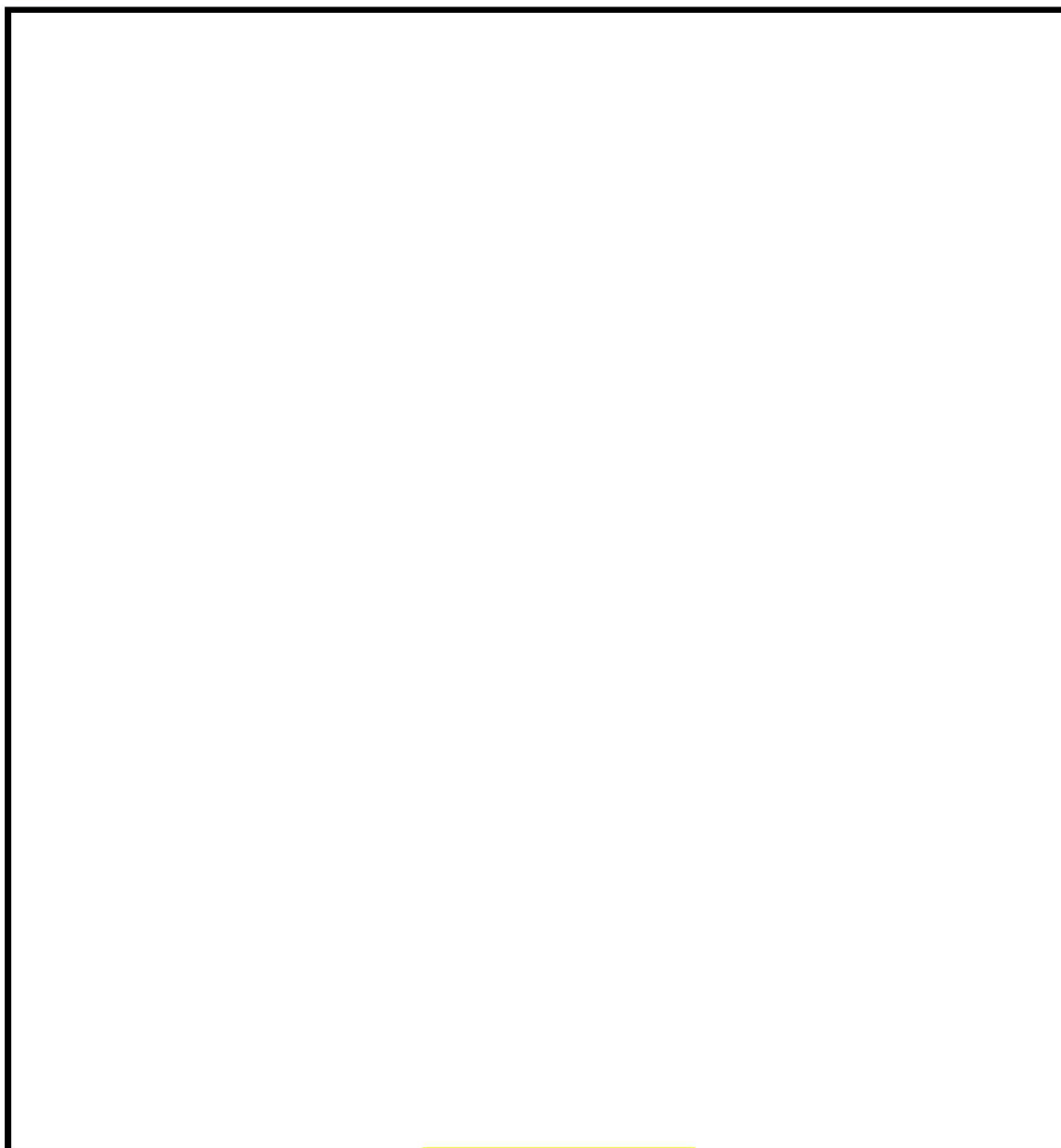


図4.1-11 荷重イメージ

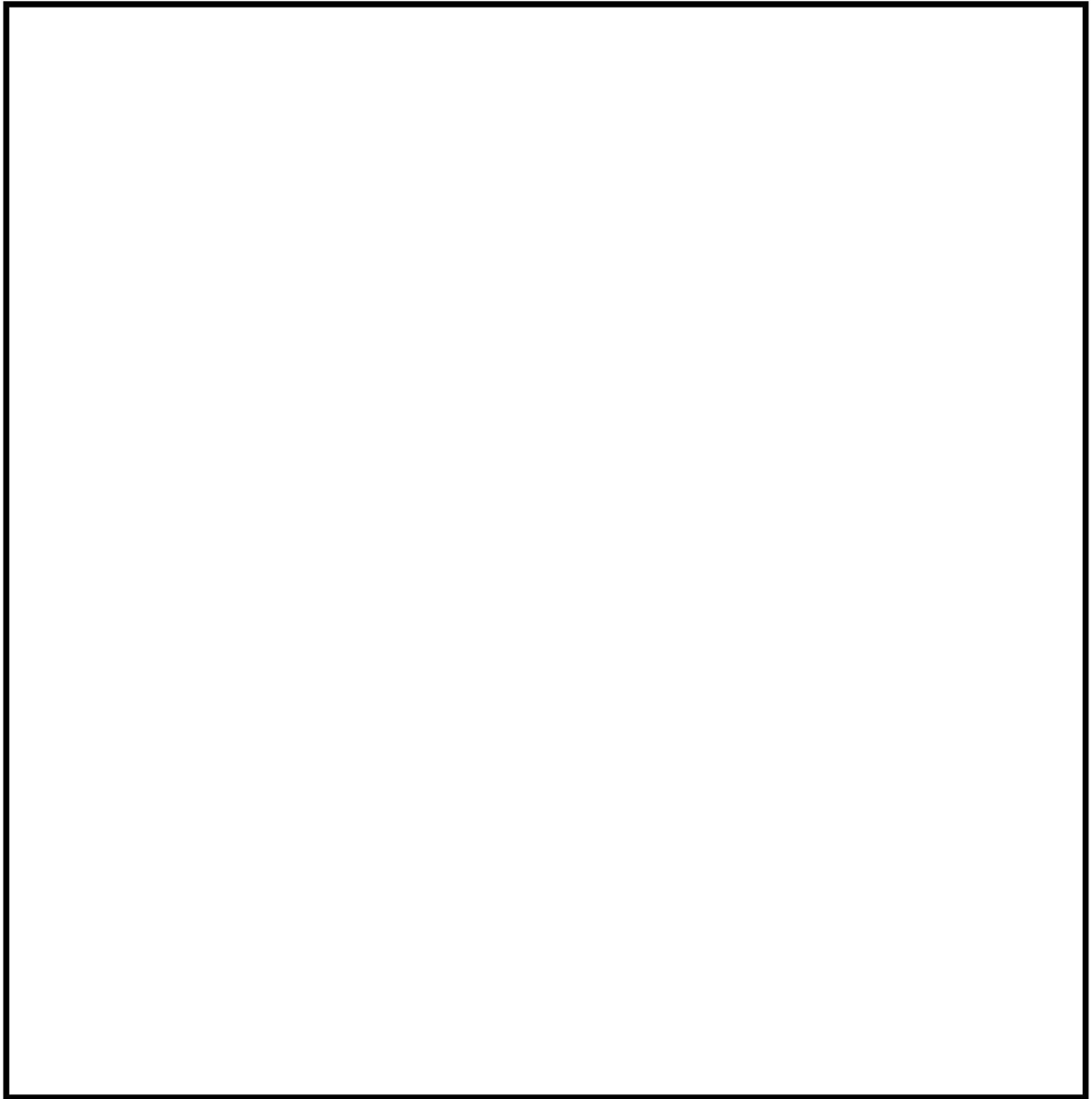


図 4.1-12 ボックスサポートの解析モデル

(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、

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 に示す。

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
	
	

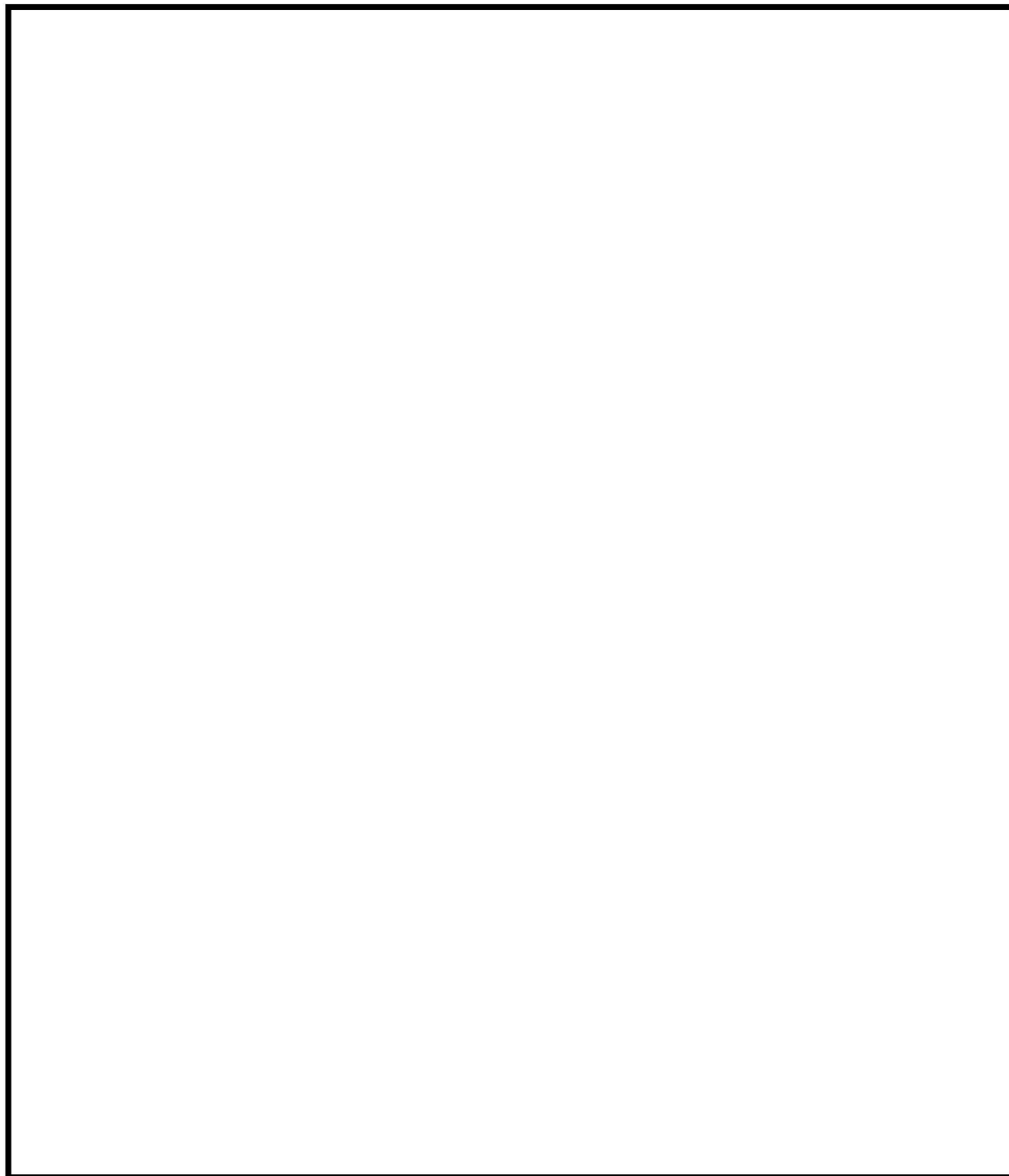


図 4.1-13 ボックスサポートの解析モデル

4.2 地震応答解析モデル（3次元はりモデル）の妥当性確認

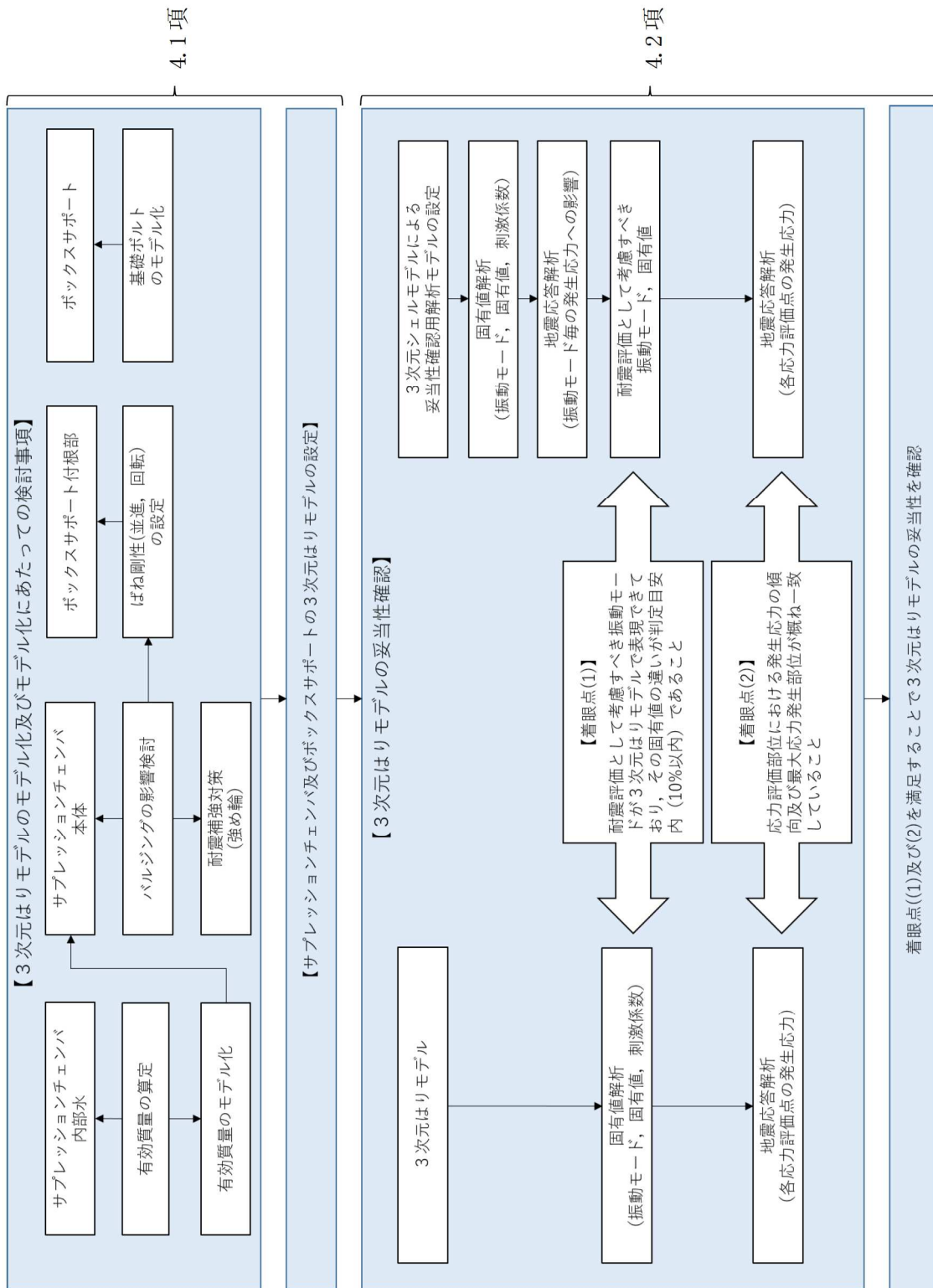
4.2.1 妥当性の確認方針（妥当性確認の着眼点）

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妥当性について確認する。妥当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。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）に対する妥当性確認フローを示すとともに、妥当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、妥当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、これまでの経験を踏まえた工学的な判断目安として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における発生応力の傾向及び最大応力発生部位がシェルモデルと3次元はりモデルで概ね一致していること。



4.2.2 妥当性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）

妥当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有効質量を各シェル要素に考慮する。有効質量算定における水位条件は、耐震解析用重大事故時水位を代表とした。妥当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の詳細については、別紙5に示す。

表4.2-1 妥当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時水位（O.P. -1514mm） NASTRANの仮想質量法を適用

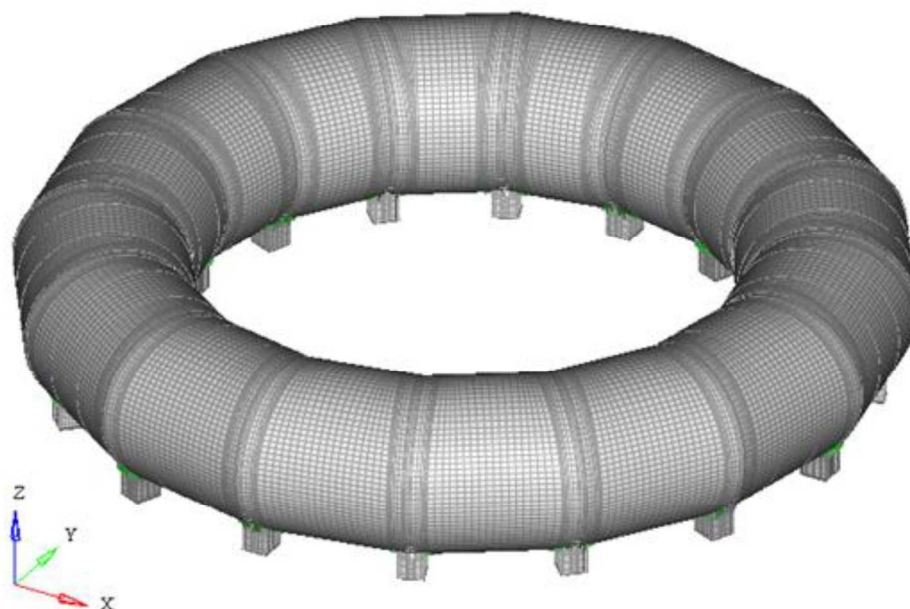


図4.2-2 妥当性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）図

4.2.3 妥当性確認結果

(1) 妥当性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）による解析結果

妥当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 4.2-2 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 4.2-2 に示す各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、妥当性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）を用いたサブ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 4.2-3 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次元はりモデルと妥当性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）との比較

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 4.2-4 に示す。また、3次元はりモデルの振動モードについて、妥当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比較結果を表 4.2-5 に示す。

3次元はりモデルによる振動モードと妥当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）にあり、水平方向（3次）で最大4.7%、鉛直方向（5次）で最大9.6%となることを確認した。

b. 着眼点(2)

3次元はりモデル及び妥当性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）を用いたサブプレッションチェンバの応力評価点における応力評価結果を表 4.2-6 及び図 4.2-3 に示す。

サブプレッションチェ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の分類で確認した場合、3次元はりモデル及び妥当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は、互いに大小関係はあるものの、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)における発生応力の傾向を捉えていると考えられる。また、耐震評価で最も重要となる最大応力発生部位は、共にボックスサポート取付部(P9)と一致しており、発生応力も同等(3次元はりモデルがやや保守側の評価結果)であることを確認した。

(4) 3次元はりモデルの妥当性確認結果

上記確認により、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の傾向及び最大応力発生部位が概ね一致していることから、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として、3次元はりモデルを用いることは妥当であると判断した。

表 4.2-2 妥当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

*3：1次、2次モードは、対称モードであるため地震での応答励起は起きない。

表 4. 2-3 各振動モードの応力（一次+二次応力）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
サブプレッシャーエンバ	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	ボックスサポート取付部	内側	328.1	328.2	1.0003
	P10		外側	289.9	290.1	1.0007

表 4.2-4 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	0.110	0.00	0.00	0.00
2*2	0.110	0.00	0.00	0.00
3	0.102	-0.18	-48.18	0.00
4	0.102	48.18	-0.18	0.00
5	0.085	0.00	0.00	82.02
6	0.077	0.40	-23.00	0.00
7	0.077	23.00	0.40	0.00
8	0.070	0.00	0.00	0.00
9	0.070	0.00	0.00	0.00
10	0.068	0.00	0.00	8.25
11	0.067	0.00	0.00	0.00
12	0.067	0.00	0.00	0.00
13	0.052	0.00	0.00	0.00
14	0.052	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

*2：1次，2次モードは，対称モードであるため地震での応答励起は起きない。

表 4.2-5 「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 妥当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		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. 2-5 「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)

振動モード (固有周期)	① 妥当性確認用解析モデル (3次元シェルモデル) 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	固有値 の比較 (②/①)

表 4. 2-5 「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)

振動モード (固有周期)	① 妥当性確認用解析モデル (3次元シェルモデル) 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	固有値 の比較 (②/①)

表 4. 2-5 「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)

振動モード (固有周期)	① 妥当性確認用解析モデル (3次元シェルモデル) 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	固有値 の比較 (②/①)

表 4. 2-5 「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)

振動モード (固有周期)	① 妥当性確認用解析モデル (3次元シェルモデル) 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	固有値 の比較 (②/①)

表 4.2-5 「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)

振動モード (固有周期)	① 妥当性確認用解析モデル (3次元シェルモデル) 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	固有値 の比較 (②/①)

表 4.2-6 3次元はりモデルと3次元シェルモデルによる応力（一次+二次応力）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) *1	②3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*1	③/①*1
P1	胴中央部	外側	102 (164)	199	393	0.51 (0.82)	3.85 (2.39)
P2		底部	106 (110)	127	393	0.83 (0.87)	3.70 (3.57)
P3		内側	102 (142)	102	393	1.00 (1.39)	3.85 (2.76)
P4		頂部	106 (78)	45	393	2.36 (1.73)	3.70 (5.03)
P5	胴エビ継手部	外側	160	192	393	0.83	2.45
P6		底部	100	164	393	0.61	3.93
P7		内側	154	130	393	1.18	2.55
P8		頂部	90	103	393	0.87	4.36
P9	ボックスサポート取付部	内側	358	328	393	1.09	1.09
P10		外側	342	290	393	1.18	1.14

注記*1：応力評価点P1～P4の括弧内の数値については、3次元シェルモデルを用いたFEM解析による応力解析結果を示す。

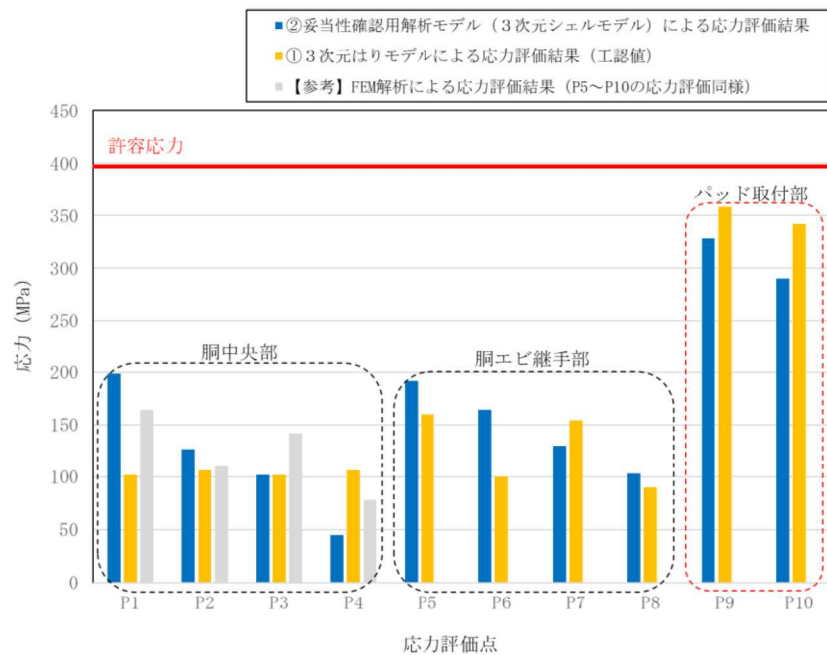


図 4.2-3 3次元はりモデルと3次元シェルモデルによる応力（一次+二次応力）比較結果

4.3 地震応答解析に係る検討

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、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、地震応答解析に関連して、以下の影響検討を実施した。

(1) 有効質量算定解析コード間の有効質量の差異による影響

4.1.1項におけ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では、NASTRANと汎用流体解析コードOpenFOAMにより算出した有効質量比は概ね一致しているが、NASTRANにより算出した方がやや大きい傾向があり、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。

サプレッションチェンバ内部水の有効質量は、サ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、解析コード間(NASTRANとOpenFOAM)の差異による固有値と設計用床応答スペクトルの関係を図4.3-1に示す。設計用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」によるものである。

4.4.1項で算定したNASTRANの有効質量比(0.33)及びOpenFOAMの有効質量比(0.32)の関係((NASTRAN>OpenFOAM)から、OpenFOAMの場合における主要な振動モードの固有周期は、NASTRANと比較して短周期に5%程度スライドするため、設計用床応答スペクトルにおける関係としては、応答加速度が7%程度大きくなる(NASTRAN<OpenFOAM)と考えられる。ただし、この場合、地震荷重(=加速度×質量)に関係する有効質量は減少するので、応答加速度の差異が単純に荷重増加割合となるものではない。

一方、サプレッションチェンバの応力評価点における最小裕度部位においても、1割程度の裕度を有することから(7項参照)、解析コードの差異による応答加速度の増加割合よりも裕度が大きく、OpenFOAMとした場合の発生応力が許容応力を上回ることはないと考えられる。

したがって、サプレッションチェンバ内部水の有効質量を算定する解析コード間(NASTRANとOpenFOAM)の差異による地震応答解析への影響はないことを確認した。



図 4.3-1 設計用床応答スペクトルと固有周期の比較

(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。

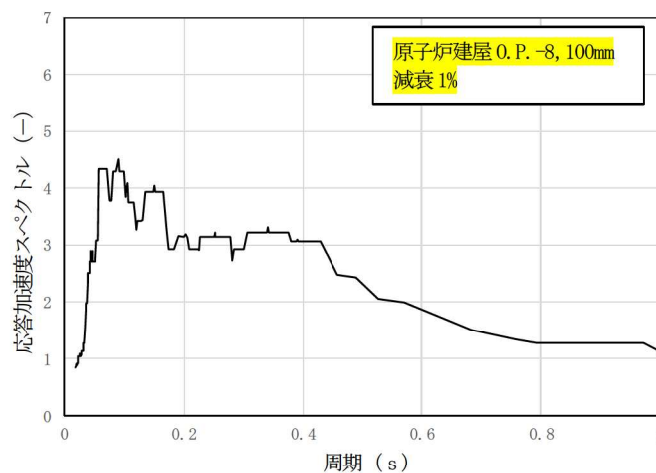


図 4.3-2 床応答スペクトル(高振動数領域を考慮 (0.02~1 秒))

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	
胴中央部底部 (P2)	一次一般膜応力	追而		
胴エビ継手部内側 (P7)	一次膜応力 +一次曲げ応力			
外側ボックスサポート取付部 (P10)	一次+二次応力			
基礎ボルト (P5)	引張			

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	0.110	0.00	0.00	0.00
2	0.110	0.00	0.00	0.00
3	0.102	-0.18	-48.18	0.00
4	0.102	48.18	-0.18	0.00
5	0.085	0.00	0.00	82.02
6	0.077	0.40	-23.00	0.00
7	0.077	23.00	0.40	0.00
8	0.070	0.00	0.00	0.00
9	0.070	0.00	0.00	0.00
10	0.068	0.00	0.00	8.25
11	0.067	0.00	0.00	0.00
12	0.067	0.00	0.00	0.00
13	0.052	0.00	0.00	0.00
14	0.052	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	0.039	0.00	0.00	0.00
20	0.035	0.00	0.00	0.00
21	0.035	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	-15.99	0.90	0.00
25	0.028	0.90	15.99	0.00
26	0.028	0.00	0.00	0.00
27	0.028	0.00	0.00	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、サブ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、サブ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、地震時のサブ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、サブ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、サブプレッションチェンバ内部水の水位条件は、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 - D 1 を用いた。流体解析では、サブプレッションチェンバ内部水の有効質量による荷重（サブ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、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。サブ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。

今回工認のサブ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。

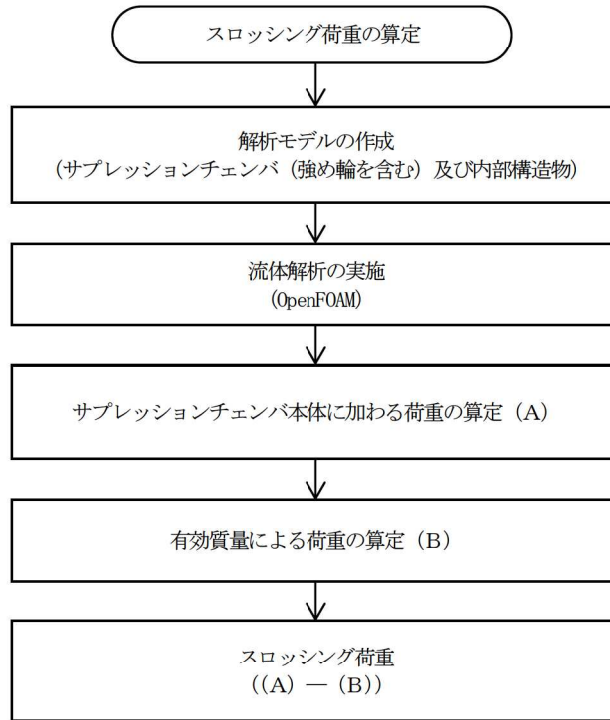


図 4.4-1 スロッシング荷重算定フロー

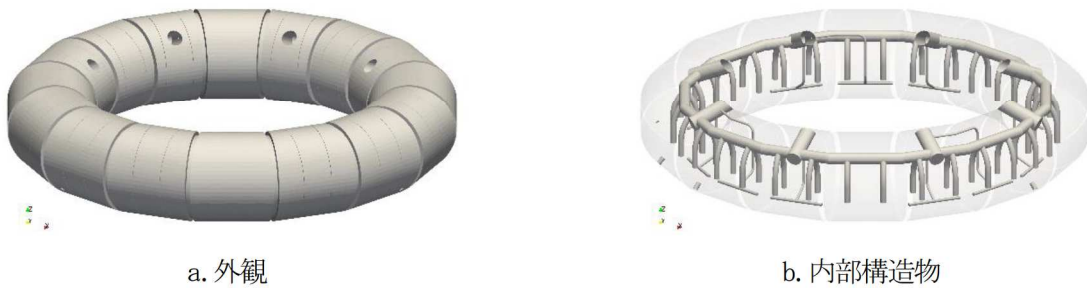


図 4.4-2 流体解析モデル

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。

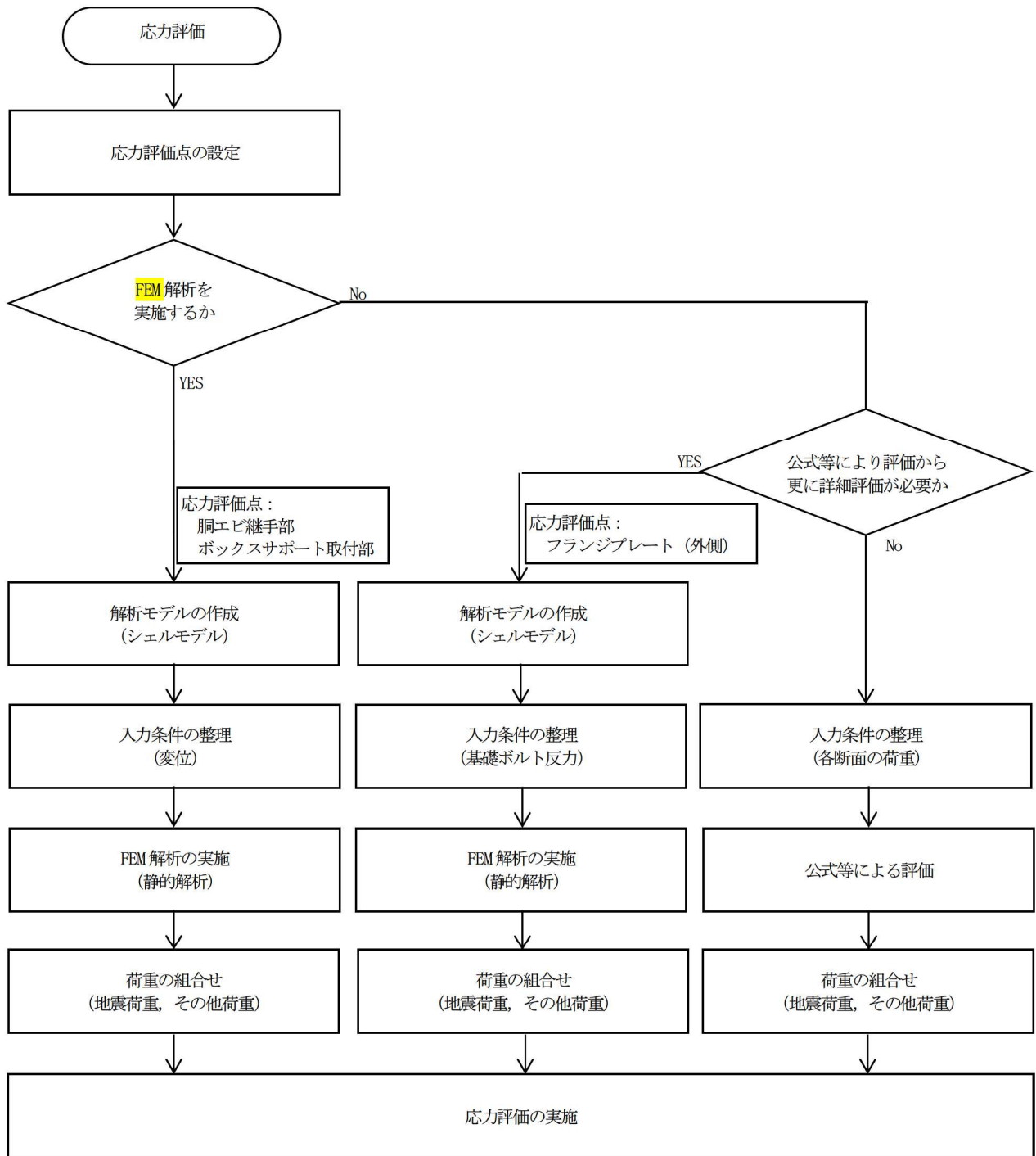


図 5.1-1 応力評価フロー

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

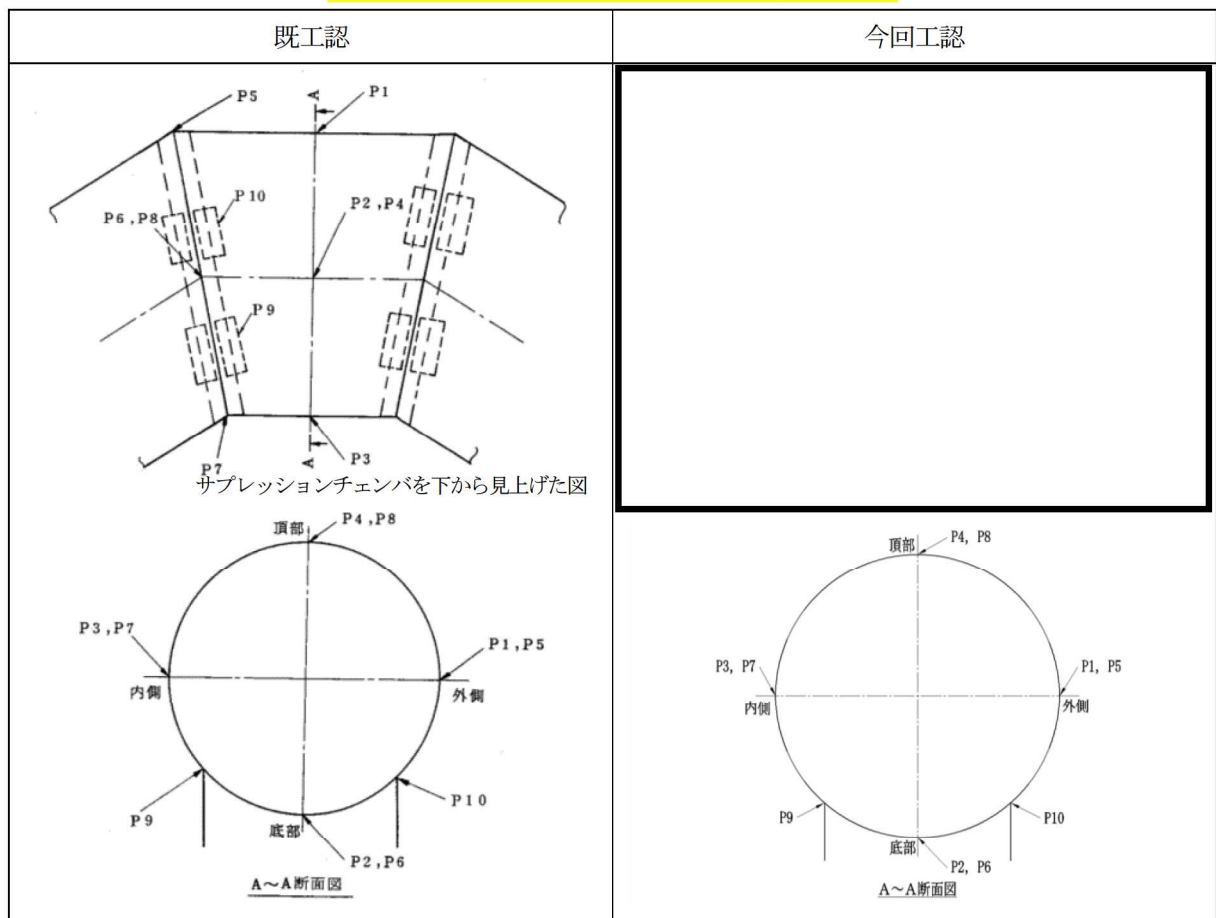
既工認及び今回工認における応力評価点を表 5.2-1 及び表 5.2-2 に示す。応力評価点 P9 及び P10(内側及び外側ボックスサポート取付部)については、今回工認における耐震補強対策による効果を踏まえ追加したパッド部の評価点を見直した。

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	○	○	公式等による評価	
P2	胴中央部底部	○	○	公式等による評価	
P3	胴中央部内側	○	○	公式等による評価	
P4	胴中央部頂部	○	○	公式等による評価	
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* : 応力評価点を追加したパッド周りに見直し。

表 5. 2-2 サプレッションチェンバの応力評価点



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回りの構造及び拘束条件等をシェル要素でモデル化し, 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 ボックスサポート取付部及び洞エビ継手部

ボックスサポート取付部及び洞エビ継手部の応力評価に用いる応力解析モデルは、サブプレッションチェー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追加パッド及び追加リブ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。

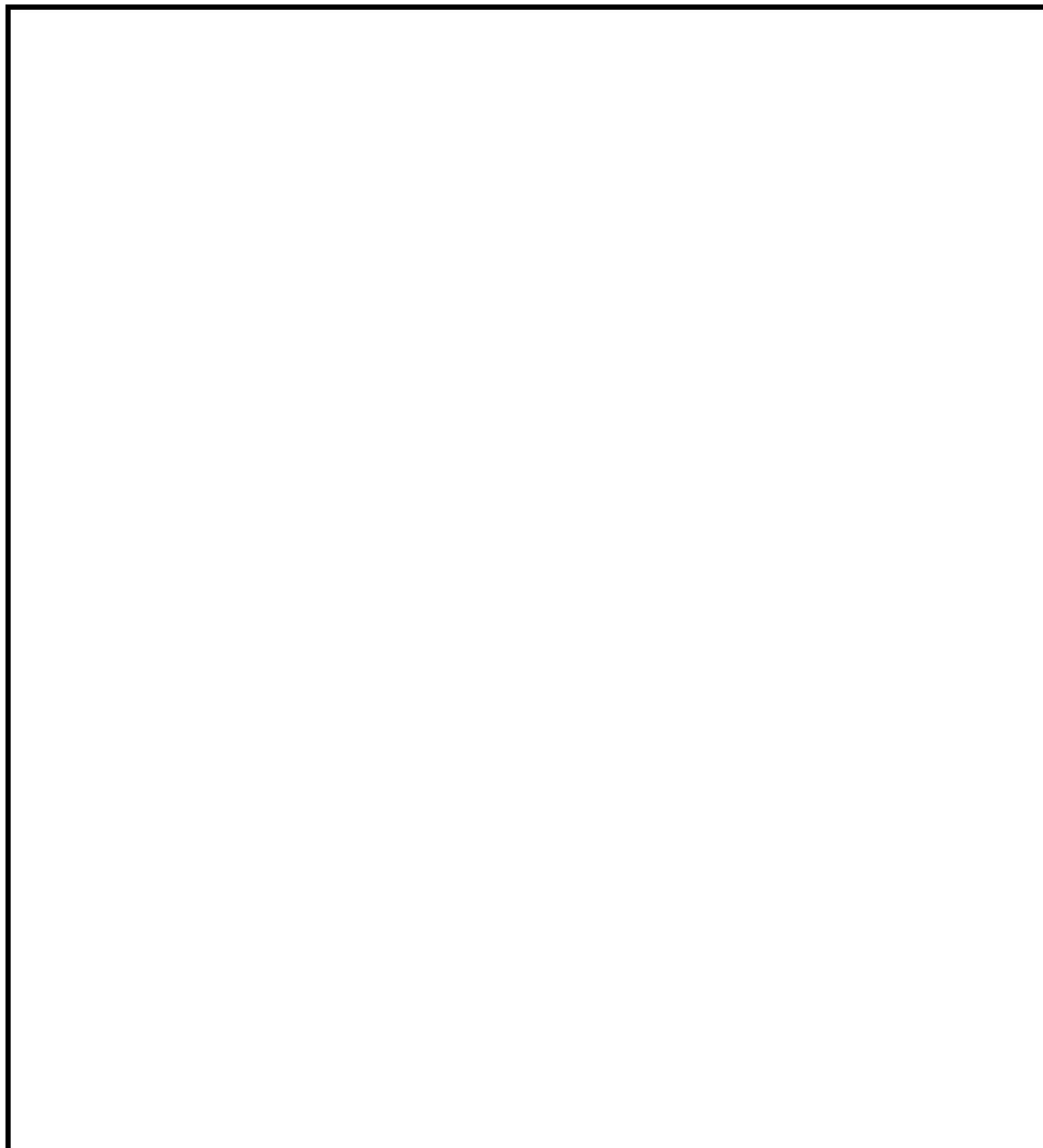


図 5.3-1 応力解析モデル

5.3.2 フランジプレート（外側）の応力評価モデル

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追加リブ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。

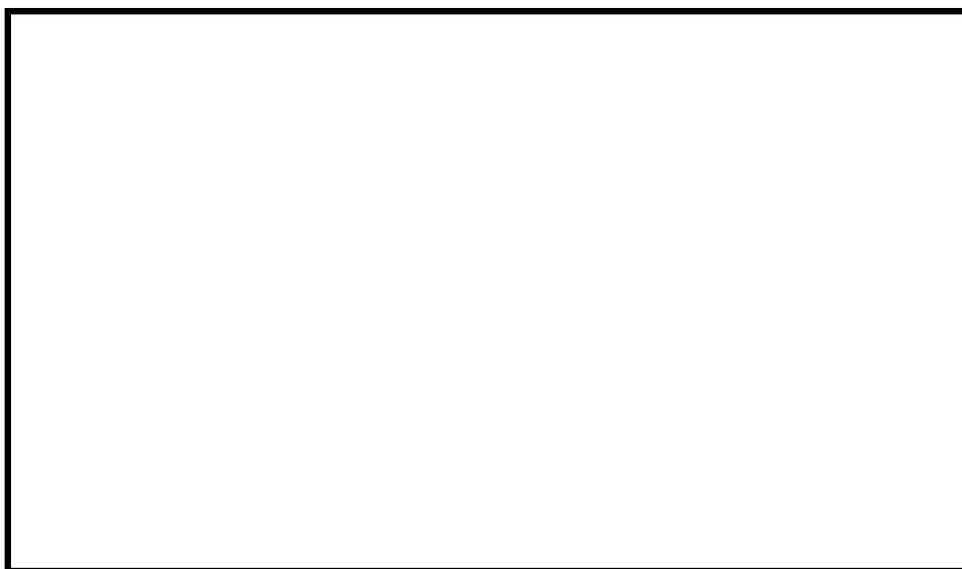


図 5.3-2 フランジプレート（外側）の構造図

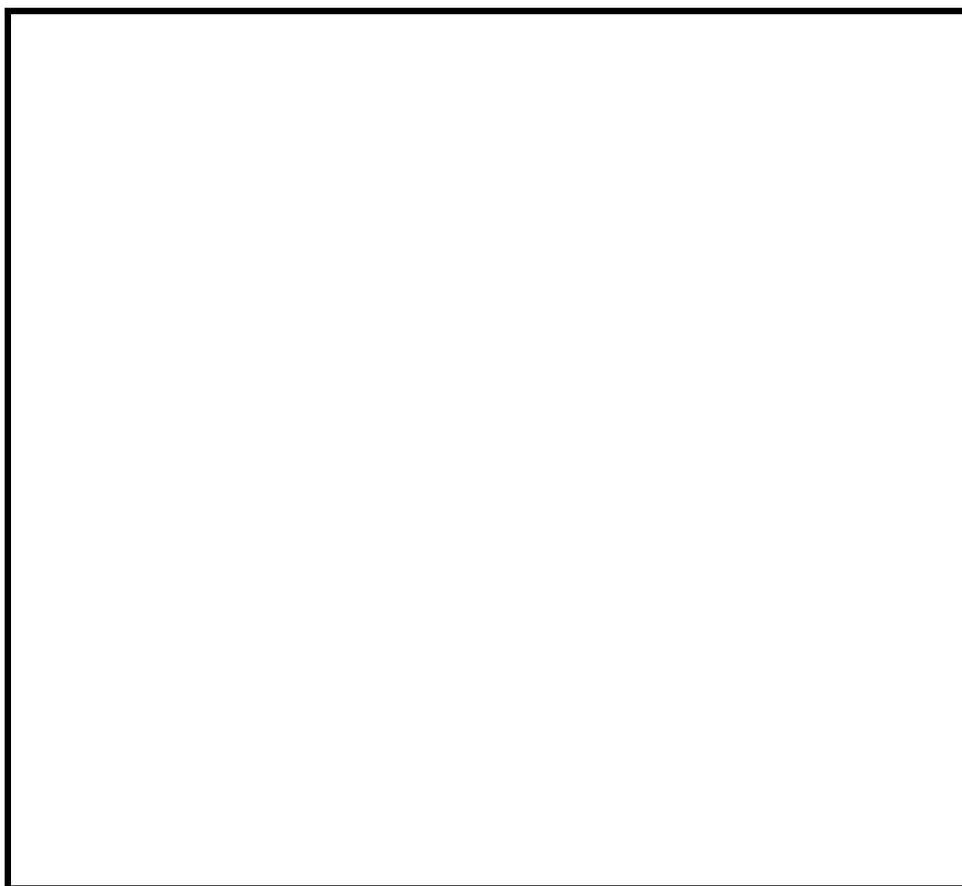


図 5.3-4 フランジプレート（外側）の応力評価モデル

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、公式等による応力評価又は応力解析（胴エビ継手部、ボックスサポート取付部）による応力評価を行う。

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応力解析モデルにし、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。

ここで、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5.4-1に、3次元FEM解析モデルの解析条件を図5.4-2に示す。



図 5.4-1 地震応答解析における変位抽出点



図 5.4-2 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。

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5.4-3に、応力解析モデルの解析条件を図5.4-4に示す。

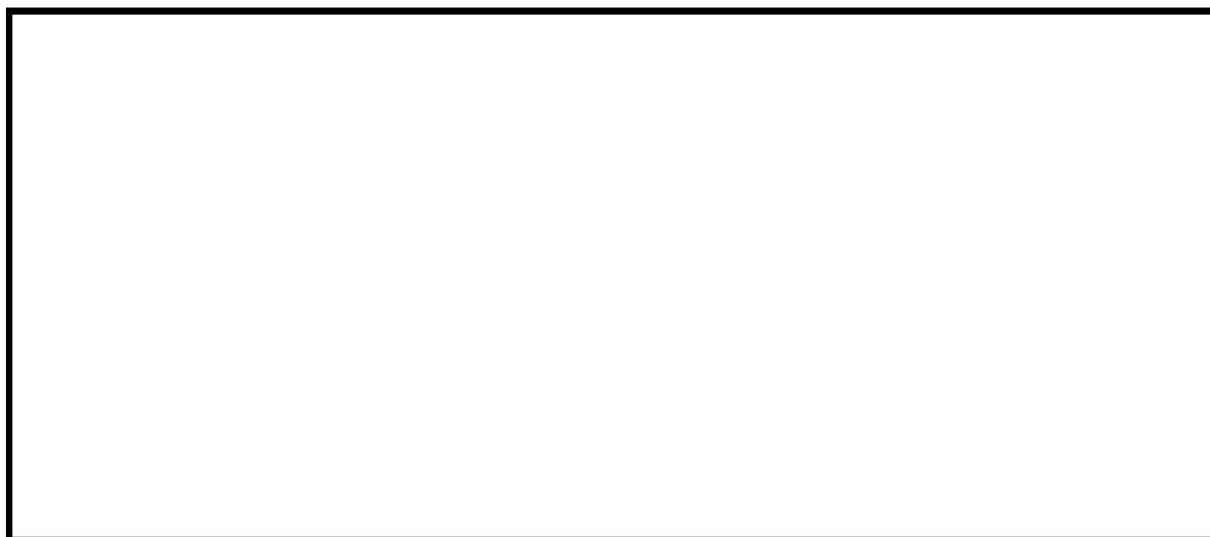


図 5.4-3 地震応答解析における荷重抽出点



図 5.4-4 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。

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、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	内部水質量	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プレッシ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。	サブプレッシ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。振動試験等により有効質量が保守側に算出されることが確認された NASTRAN を用いて有効質量を算定することで保守性が確保される。有効質量の算定方法に起因する固有周期の揺らぎについては、周期方向±10%拉幅した床応答スペクトルを用いることで配慮できる。
	解析モデル	なし	サブプレッションチェンバをば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。	サブプレッションチェンバ及びボックスササポートをば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。
スロッシング荷重	解析方法	入力地震動等の不確かさ	簡便な扱いとして、サブプレッションチェンバ全体を剛と見做し、静的解析を適用。	サブプレッシ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（スペクトルモデル解析）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。	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、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。
応力解析	ボックスササポート取付部 (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プレッションチェンバ() 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	簡便に規格式による手計算を実施。特段の保守性への考慮なし。	耐震補強対策()により、フランジプレートの境界条件を見直し、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。
	ボックスササポート基礎ボルト	なし	簡便に一つのボックスササポート内で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、サブプレッションチェンバ全体の力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、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、圧縮評価の場合（既設工認と同様な扱い）ではなく、支圧評価の場合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	算出応力	許容応力*
			MPa	MPa	MPa	MPa
P1	胴中央部外側	一次一般膜応力	追而	258	追而	257
		一次膜応力+一次曲げ応力		387		386
		一次+二次応力		393		393
P2	胴中央部底部	一次一般膜応力		258		257
		一次膜応力+一次曲げ応力		387		386
		一次+二次応力		393		393
P3	胴中央部内側	一次一般膜応力		258		257
		一次膜応力+一次曲げ応力		387		386
		一次+二次応力		393		393
P4	胴中央部頂部	一次一般膜応力		258		257
		一次膜応力+一次曲げ応力	387	386		
		一次+二次応力	393	393		
P5	胴エビ継手部 外側	一次膜応力+一次曲げ応力	387	386		
		一次+二次応力	393	393		
P6	胴エビ継手部 底部	一次膜応力+一次曲げ応力	387	386		
		一次+二次応力	393	393		
P7	胴エビ継手部 内側	一次膜応力+一次曲げ応力	387	386		
		一次+二次応力	393	393		
P8	胴エビ継手部 頂部	一次膜応力+一次曲げ応力	387	386		
		一次+二次応力	393	393		
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	387	386		
		一次+二次応力	393	393		
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	387	386		
		一次+二次応力	393	393		

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	算出応力	許容応力*
			MPa	MPa	MPa	MPa
P1	ボックスプレート	一次応力 (組合せ)	追而		追而	
		一次応力+二次応力 (組合せ)				
P2	ボックスプレート 取付部	一次応力 (組合せ)				
		一次応力+二次応力 (組合せ)				
P2'	ボックスプレート (上側) 取付部	一次応力 (組合せ)				
		一次応力+二次応力 (せん断)				
P3	フランジプレート とシヤラグ接触部	一次応力 (支圧)				
		一次応力+二次応力 (支圧)				
P4	シヤラグ取付部	一次応力 (組合せ)				
		一次応力+二次応力 (座屈)				
P5	基礎ボルト	引張応力				
P6	フランジプレート	一次応力 (組合せ) (ボルト反力側)				
		一次応力 (組合せ) (コンクリート反力側)				
		一次応力+二次応力 (組合せ)				
P6'	フランジプレート (外側)	一次応力 (組合せ)				
		一次応力+二次応力 (座屈)				
P7	ベースプレート	一次応力 (組合せ)				
		一次応力+二次応力 (座屈)				
P8	シヤコネクタ (外側) 取付部	一次応力 (組合せ)				
		一次応力+二次応力 (せん断)				
P9	コンクリート (ベ ースプレート下 面)	圧縮応力				
P10	コンクリート (シ ヤコネクタ (外側) 側面)	圧縮応力				
P11	コンクリート (シ ヤプレート上面)	せん断応力				
P12	パッド取付部	一次応力 (組合せ)				
		一次応力+二次応力 (せん断)				

注記* : 添付書類は、保守的に 200°C 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 7-3 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		評価の見直し	
				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 _{AS}	追而	圧縮		支圧	



図 7-1 荷重伝達のイメージ

8. まとめ

女川2号機におけるサブ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、サブ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、サブ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、より詳細な地震応答解析を実施するため、サブプレッションチェンバの内部水質量の扱いとして有効質量を適用すること、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ばね剛性を考慮すること等に加えて、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、有効質量を適用したことに伴い、サブ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、サブ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適用性、妥当性を確認するとともに、女川2号機の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性を確認した。

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、内部水質量として有効質量を適用することとし、有効質量は、汎用構造解析プログラムNASTRAN（別紙7参照）にて算出する。

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）。

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の有効質量の算出にNASTRAN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NASTRANにて有効質量を求め、実機を縮小模擬した試験体（前述のNASTRANの解析モデルと同様）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有効質量は、先に検証したNASTRAN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（汎用流体解析コードOpenFOAM）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NASTRAN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）

NASTRAN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有効質量の設定の流れを図1に示す。なお、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。

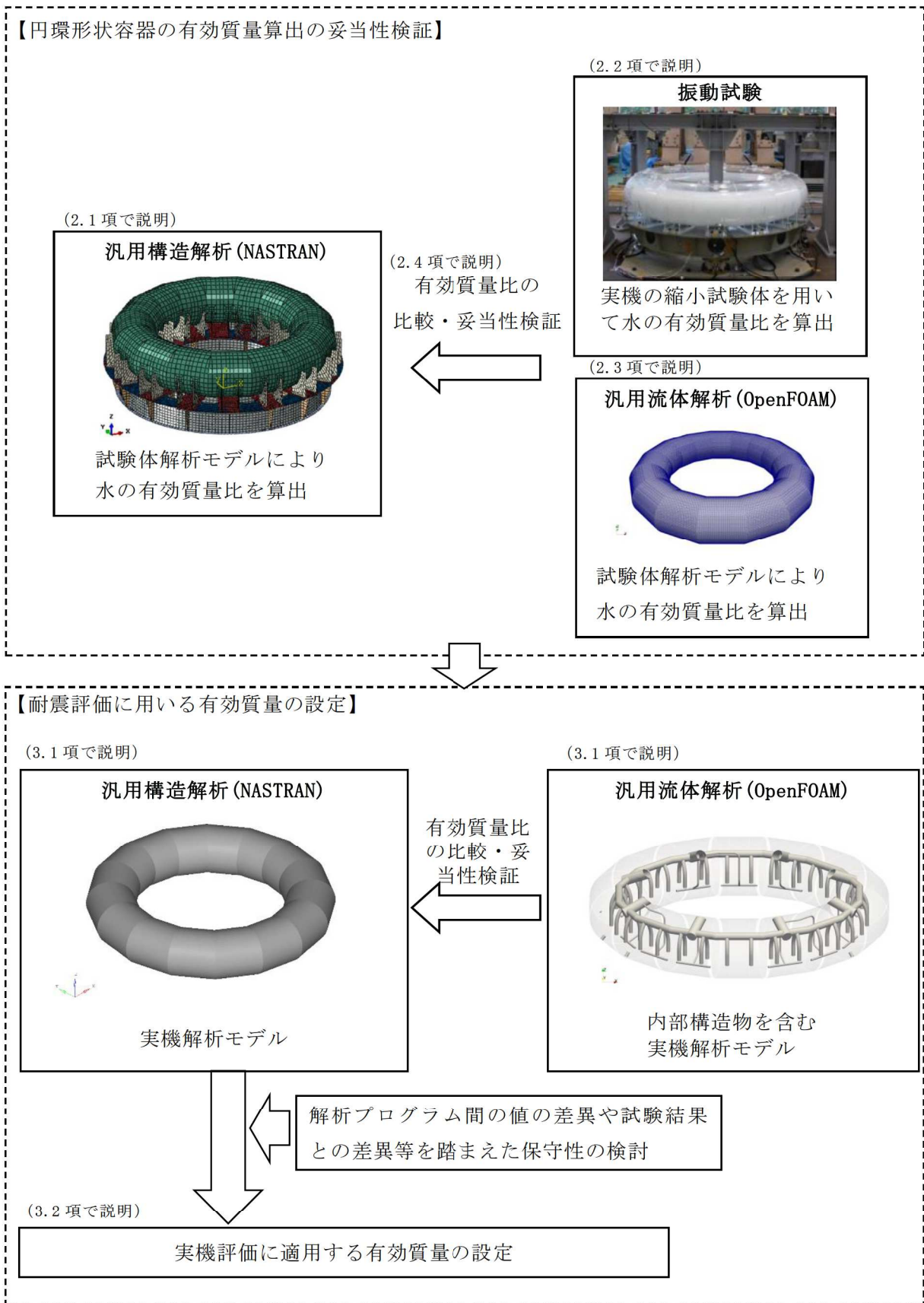


図1 NASTRANによるサプレッションチェンバ内部水の有効質量算出の妥当性検証及び女川2号機のサプレッションチェンバの耐震評価に用いる有効質量の設定の流れ

2. 円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証

円環形状容器の有効質量算出に汎用構造解析プログラムNASTRANを用いることの妥当性検証として、振動試験及び汎用流体解析コードOpenFOAMにより算出した有効質量比と比較する。

2.1 NASTRAN 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、NASTRANにより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、NASTRAN 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有効質量が定まる。また、NASTRAN 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、NASTRANによる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）（別紙10参照）を設定する。

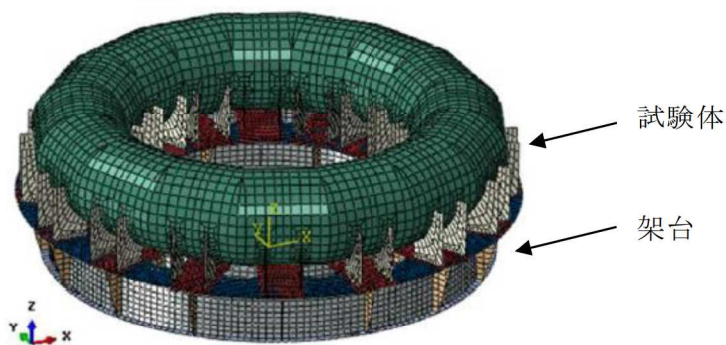


図2 構造解析モデル（試験体解析モデル）

2.1.3 解析結果

NASTRANによる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 NASTRANによる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: 重大事故時水位より高い水位

2.2 振動試験による有効質量比の確認

円環形状容器の内部水の有効質量算出にNASTRAN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、試験データから有効質量比を算出したうえで、NASTRANによる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、強め輪やダウンカム等の内部構造物は、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3に、写真を図4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)

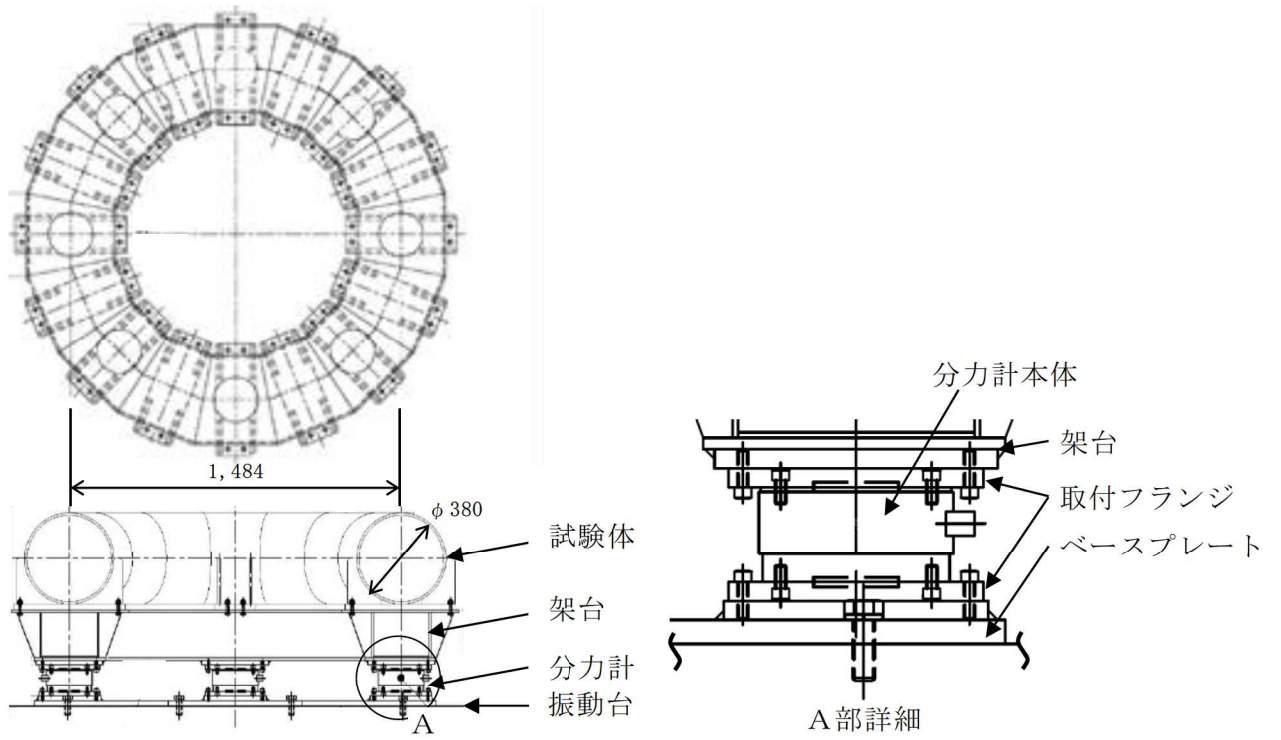


図3 試験装置の概要

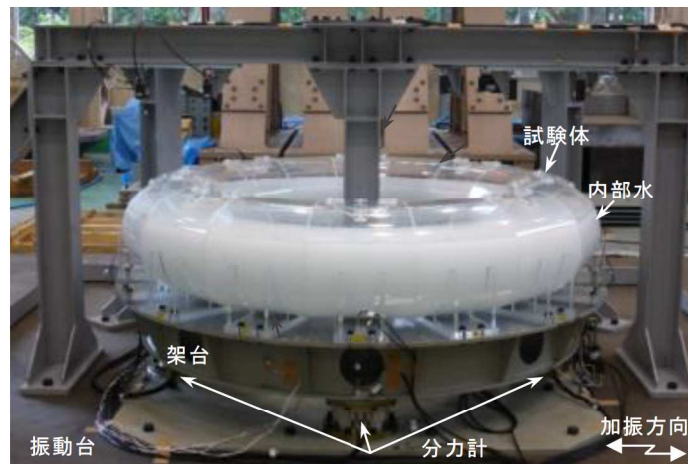


図4 試験装置の写真

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5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°)

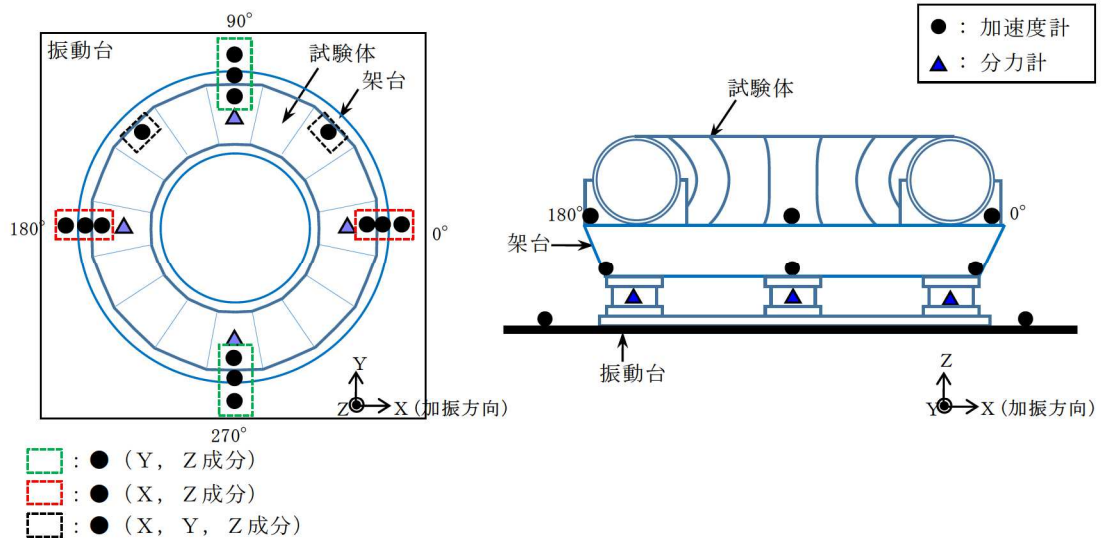


図5 計測機器設置位置

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 6 及び図 8、振動台への入力波に対するものを図 7 及び図 9 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固有周期帯で応答加速度が大きい S_s-2 を採用

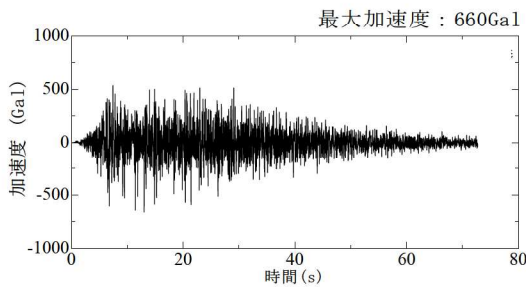


図 6 基準地震動 S_s 相当の
応答加速度時刻歴波形

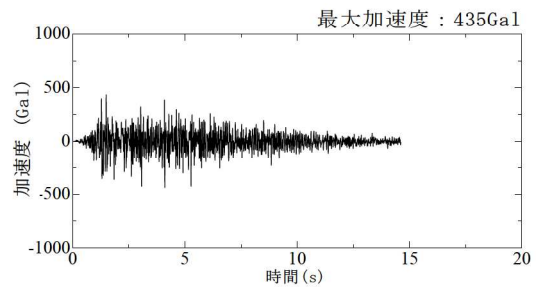


図 7 振動台入力加速度時刻歴
波形(相似則適用)

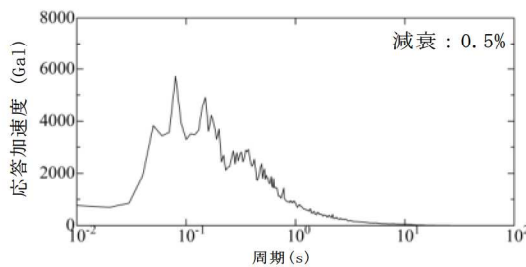


図 8 基準地震動 S_s 相当の
応答加速度スペクトル

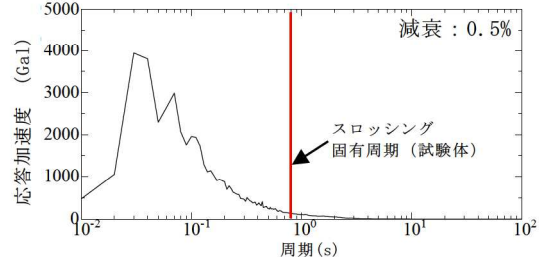
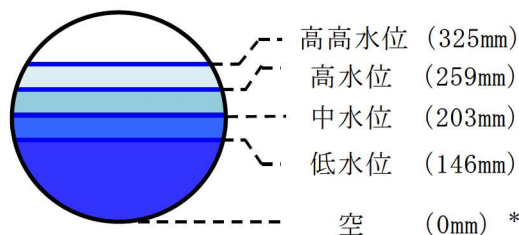


図 9 振動台入力応答加速度
スペクトル(相似則適用)

(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 10）。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10 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 水温による有効質量比への影響

- ・ 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 試験結果

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 11 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 12 に示す。

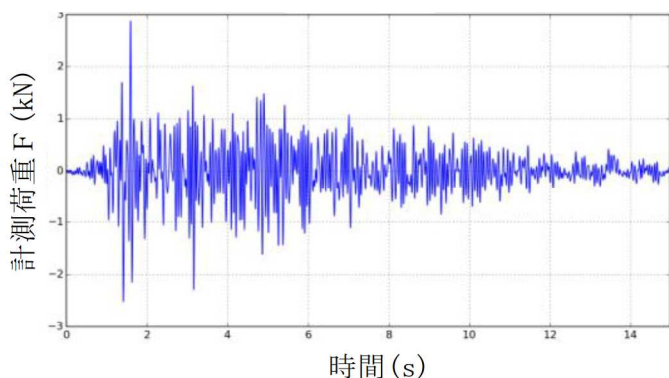


図 11 計測荷重の時刻歴

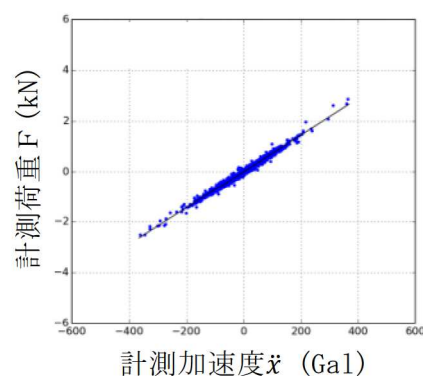


図 12 計測加速度と計測荷重の関係

図 12 において、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 13 参照）。

なお、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）。

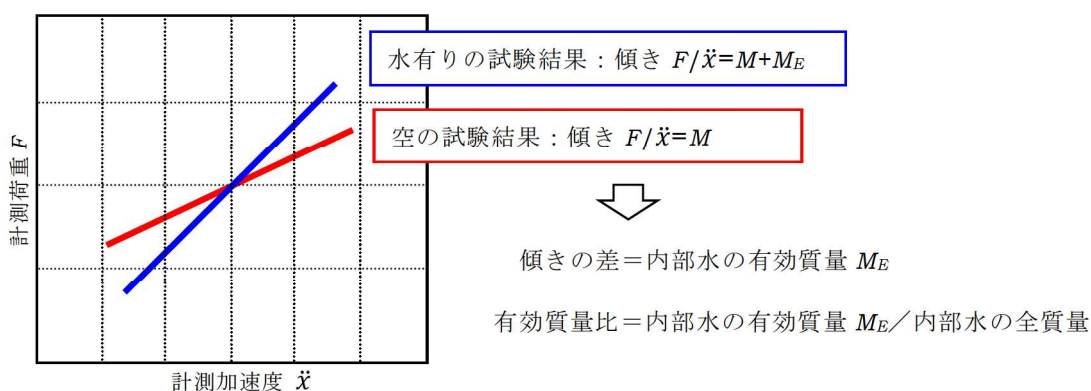


図 13 内部水の有効質量 M_E 及び有効質量比の算出方法

各ケースの試験結果から算出した有効質量比を表 4 及び図 14 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 15 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、水位の増加に伴い有効質量比も増加すること、入力倍率の違いによる有効質量比の差は小さいことを確認した。

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

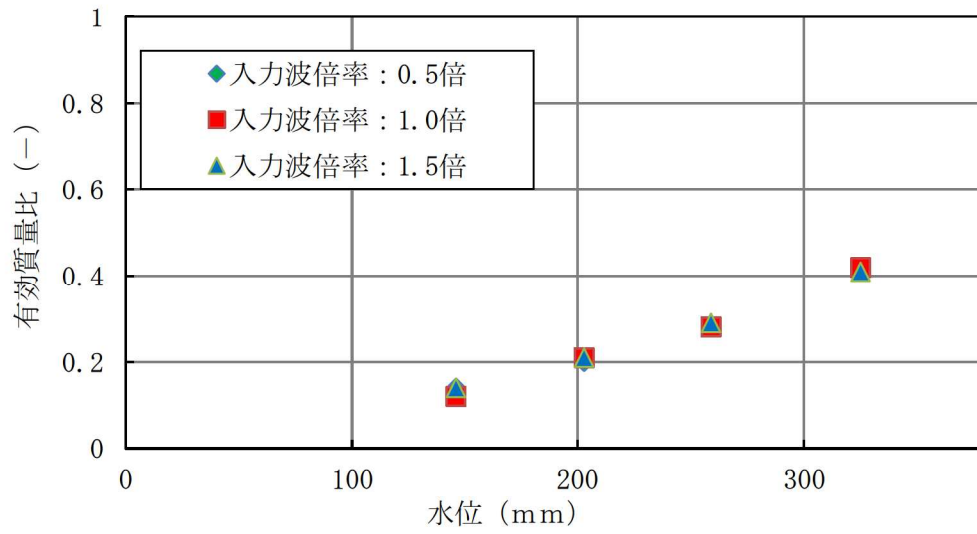


図 14 振動試験における水位と有効質量比の関係

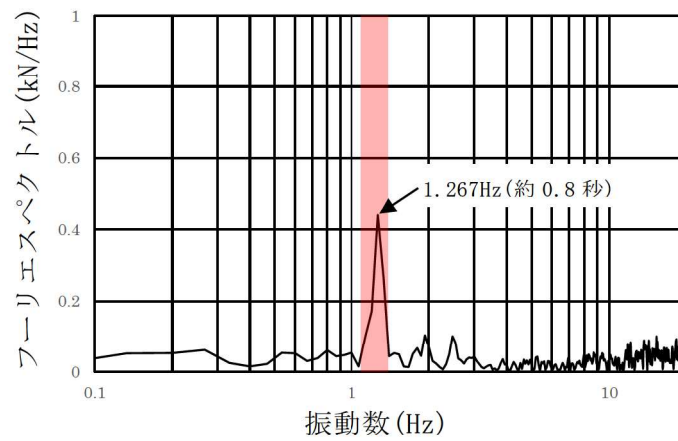


図 15 計測荷重のフーリエスペクトル (低水位, 入力倍率 1.0 倍)

2.3 OpenFOAMによる試験体解析モデル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 NASTRAN 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、OpenFOAMにより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 16 に示す。

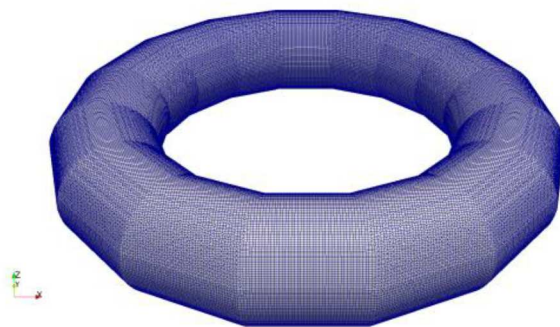


図 16 流体解析モデル（試験体解析モデル）

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 解析結果及び有効質量比の確認

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 17 に、入力加速度に対する荷重をプロットしたものを図 18 に示す。また、図 18 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。

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。

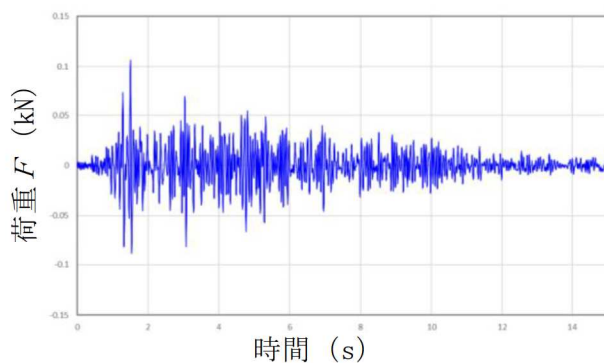


図 17 荷重時刻歴

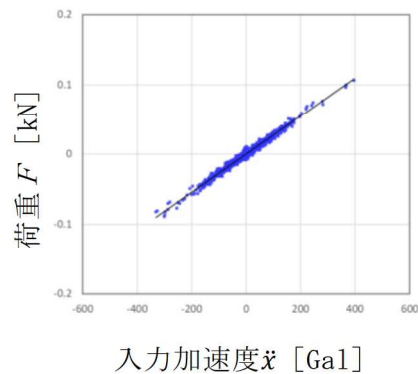


図 18 入力加速度と荷重の関係

表 5 OpenFOAM により算出した有効質量比

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項で得られた有効質量比を比較し、NASTRAN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NASTRAN、振動試験及びOpenFOAMにより算出した有効質量比を整理して表6及び図19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有効質量比が定まるNASTRANにより算出した有効質量比に対し（別紙14参照）、内部水の流動を直接考慮した振動試験及びOpenFOAMから算出した有効質量比が同等であることを確認したことから、NASTRANにより算出される有効質量比は妥当であると考えられる。

また、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 各方法による有効質量比の評価結果

水位	NASTRAN	振動試験*	OpenFOAM
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

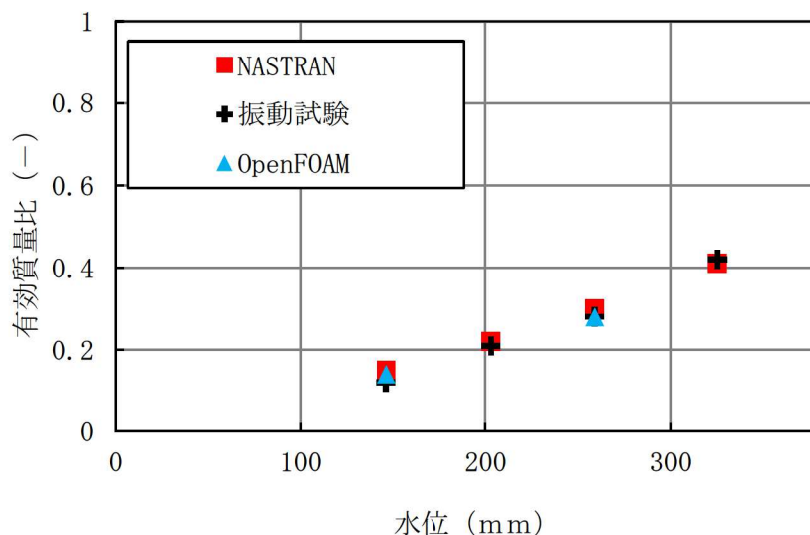


図19 各手法の有効質量比の評価結果

3. 耐震評価に用いる有効質量の設定

女川2号機の実機評価に適用する有効質量は、実機解析モデルに対するNASTRANと内部構造物を含む実機解析モデルに対するOpenFOAMによる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NASTRANで算出された値の保守性を検討し、設定する。

3.1 NASTRAN による実機の有効質量比の算出

2項により妥当性を確認したNASTRANを用いて、女川2号機の実機解析モデルにより有効質量比を算出する。

3.1.1 NASTRAN の実機解析モデル

NASTRAN の実機解析モデルを図 20 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 21 に示すとおり、通常運転水位及び重大事故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時水位」という。）の 2 ケースとする。

なお、重大事故時水位は、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。

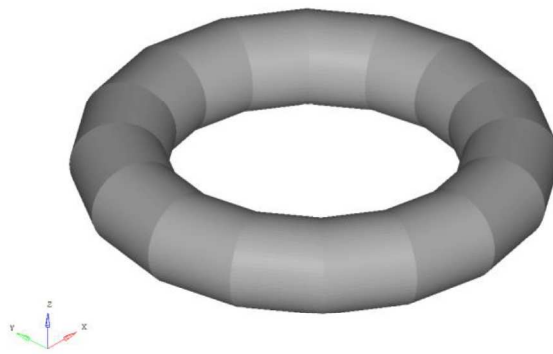


図 20 NASTRAN の実機解析モデル

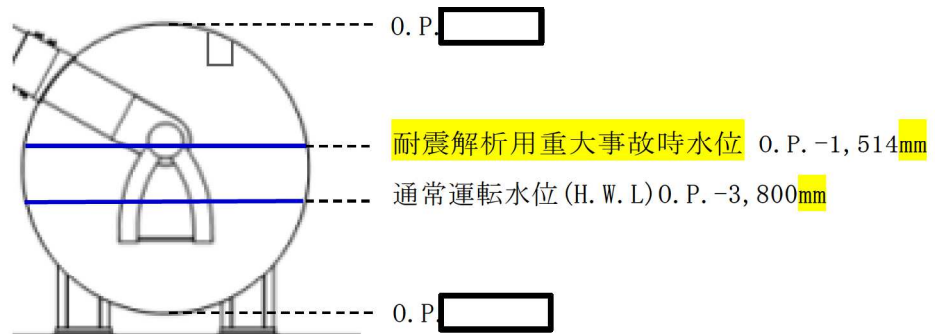


図21 解析水位ケース

3.1.2 流体解析による実機の有効質量比の算出

NASTRAN の実機解析の妥当性を検証するため、OpenFOAM を用いて、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により有効質量比を算出し比較する。

OpenFOAM における女川 2 号機の実機解析モデルは、水位条件は NASTRAN と同じである (図 22)。また、入力地震動は、基準地震動 S_s の特徴を踏まえ、スロッシングの固有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)。

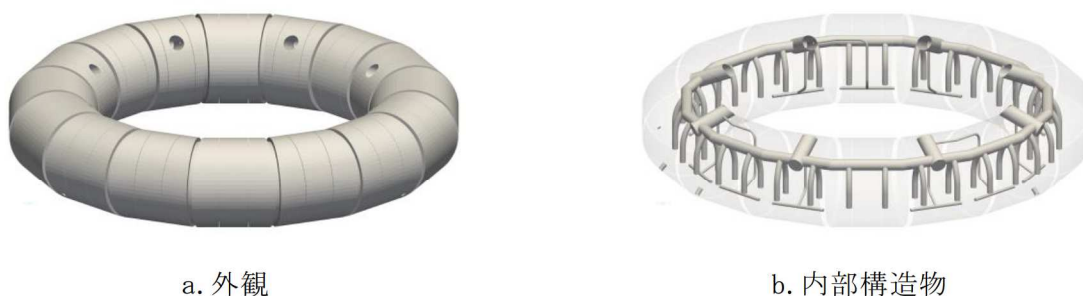


図 22 OpenFOAM の実機解析モデル

3.1.3 解析結果

NASTRAN 及び OpenFOAM 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。有効質量比は、各水位において NASTRAN により算出した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、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) NASTRAN に対し、OpenFOAM 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 NASTRAN の妥当性検証における NASTRAN の有効質量比と振動試験及び OpenFOAM の有効質量比の比較結果と整合している。

なお、NASTRAN による実機解析モデル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
	NASTRAN	OpenFOAM	NASTRAN
		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有効質量の設定

女川2号機の実機評価に適用する有効質量の設定に当たり、NASTRANに対する流体解析及び振動試験の値の差異等を踏まえ、NASTRAN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、NASTRAN、振動試験及び OpenFOAM により算出した有効質量比は同等であり、おおむね NASTRAN の値が保守的な傾向を示す。また、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、NASTRAN により算出される有効質量比は、内部水の流動による有効質量比の低減が反映されないため、OpenFOAM により算出される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有効質量比に対して、NASTRAN を用いて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有効質量比がほぼ一致している、又は NASTRAN 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有効質量は、NASTRAN により算出される有効質量比が、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（有効質量比が大きくなる）を示すことから、NASTRAN により算出される有効質量を適用する。

なお、評価手法の違い（NASTRAN と OpenFOAM）による有効質量比の差異によって、サブ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。

サブ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

1. 概要

今回工認に用いる女川 2 号炉のサブ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（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、その設定方法の考え方について説明する。

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。

サブ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、NASTRAN により算出されるサブプレッションチェンバシェルの各要素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）。

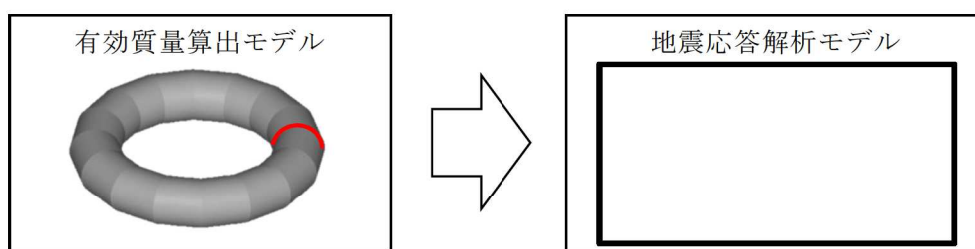


図 1 有効質量の縮約

3. 地震応答解析モデルへの設定方法

3.1 地震応答解析モデルへの設定方法の考え方

NASTRAN により算出されるサブプレッションチェンバシェルの各要素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ブプレッションチェンバの各質点に設定する方法（Guyan の縮約法）のイメージを図 2 に示す。

① NASTRAN から算出されるサブプレッションチェンバの内部水の有効質量

NASTRAN ではサブ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 要素における有効質量 m_i は、水平方向及び鉛直方向の有効質量（ m_{xi} , m_{zi} ）に分解できる。

なお、水平方向の有効質量 m_{xi} をサブプレッションチェンバ全体に積分するとサブ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、鉛直方向の有効質量 m_{zi} をサブプレッションチェンバ全体に積分した場合、サブプレッションチェンバシェルの底面圧

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（全要素の有効質量）

NASTRAN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。

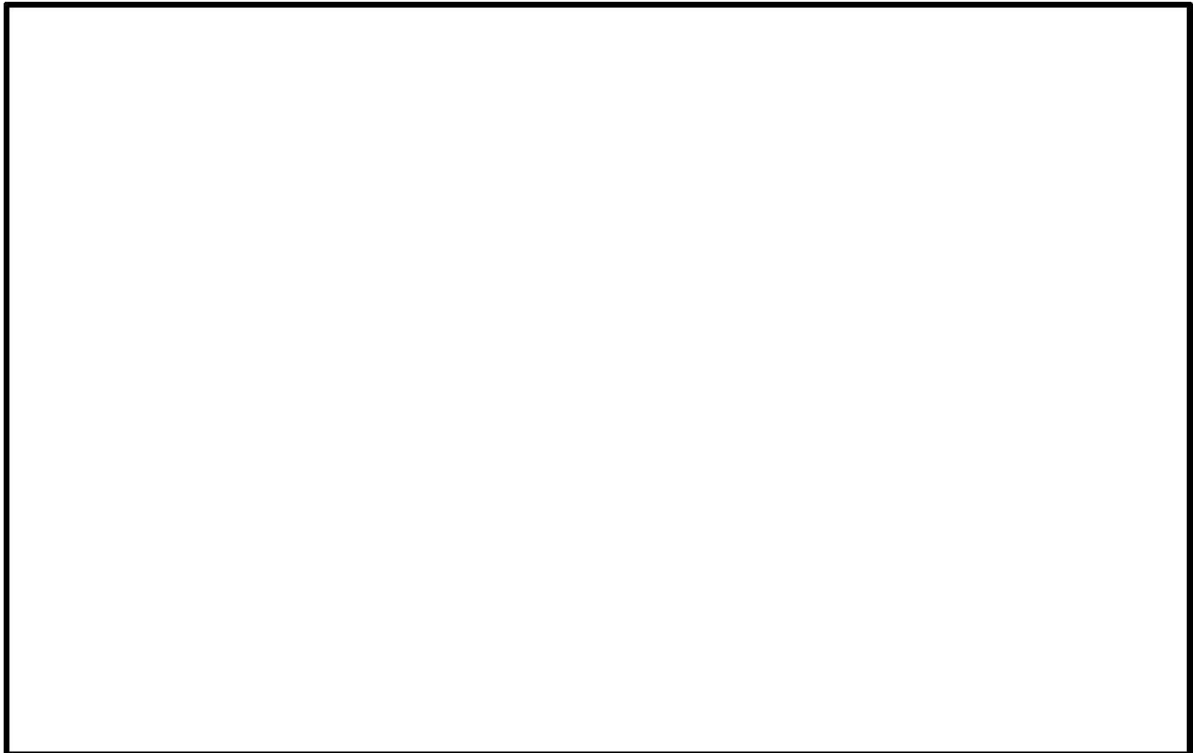


図 2 Guyan の縮約法のイメージ

3.2 地震応答解析モデルへ設定する有効質量

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有効質量を表1及び表2、重大事故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、有効質量比は、0.33 [] となる。
- この有効質量比は、本文表4.1-1におけるNASTRANによる実機解析モデル（重大事故時水位）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。

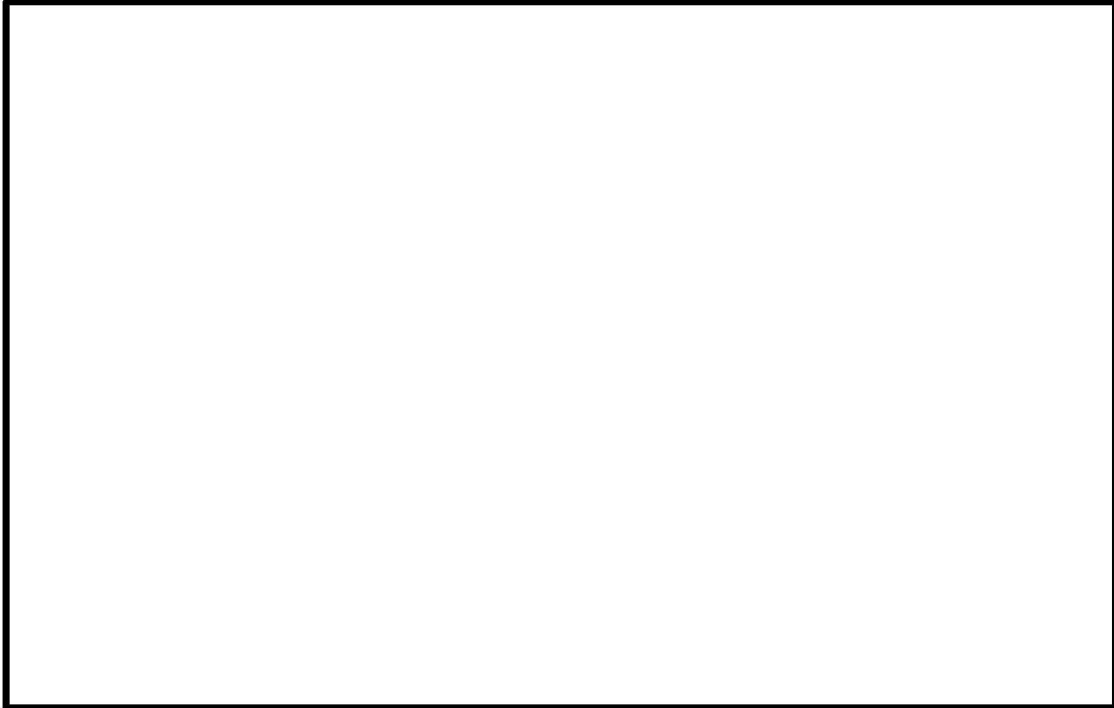


図 3 サプレッションチェンバ地震応答解析モデル

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・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2 縮約した有効質量（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 縮約した有効質量（重大事故時水位，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 縮約した有効質量（重大事故時水位，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(有効質量に対する等価高さ)における有効質量、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。