

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	O2-他-F-19-0031_改1
提出年月日	2021年6月4日

女川原子力発電所第2号機 サブプレッションチェンバの耐震評価について

2021年6月4日
東北電力株式会社

本日のご説明内容

1. はじめに
2. 設置許可段階での説明内容
(既工認からの変更点を踏まえた耐震設計への配慮事項)
3. 詳細設計申送り事項に対する回答内容
4. 詳細設計申送り事項に対する検討結果を踏まえた設計の詳細化
5. サプレッションチェンバの構造概要及び耐震補強対策
6. 今回工認における耐震評価の特徴
7. 今回工認における地震応答解析モデルの検討
8. 今回工認における地震応答解析モデルの妥当性確認
9. まとめ

【参考資料】

- 参考 1 サプレッションチェンバ内部水に対する有効質量の適用
- 参考 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検討
- 参考 3 ボックスサポートのモデル化
- 参考 4 耐震評価として考慮すべき振動モード

- サプレッションチェンバの耐震評価について、詳細設計申送り事項(第876回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 2020年7月14日)に対する回答(詳細設計段階における検討結果)を説明する。

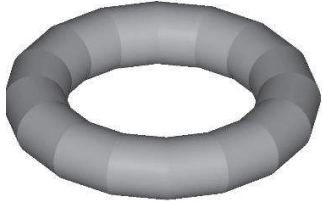


詳細設計申送り事項(第876回審査会合, 2020年7月14日)

No.	項目	概要
2-3	サプレッションチェンバの耐震評価	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モデルに3次元はりモデルを適用すること等について詳細を説明する。

2. 設置許可段階での説明内容

(既工認からの変更点を踏まえた耐震設計への配慮事項)

- サプレッションチェンバの耐震評価については、重大事故時の内部水質量の増加，基準地震動の増大等を踏まえ，既工認から変更を行うこととした。
- 設置許可審査(第698回審査会合，2019年4月2日他)にて，既工認からの変更点に関する耐震設計への配慮事項を以下のとおりとした。

既工認からの変更点	耐震設計への配慮事項
①内部水質量に対する有効質量の適用 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 仮想質量法を用いて内部水の有効質量を算定 ➤ 有効質量が保守的に算定されることでサプレッションチェンバの固有周期が変動することを踏まえ，地震応答解析に用いる床応答スペクトルとの関係も配慮
②地震応答解析手法の変更 (静的解析→スペクトルモーダル解析) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 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等)を適用
③スロッシング荷重の個別評価 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 流体解析により算出されるスロッシング荷重は，水平1方向+鉛直方向のスロッシング荷重の2倍の荷重を考慮することにより保守的に評価 ➤ 地震荷重とスロッシング荷重の最大値が発生する時刻は，互いに異なると考えられるが，保守的に各荷重の最大値を組み合わせる ➤ 地震荷重とスロッシング荷重の最大値は，入力地震動によって異なるが，保守的に各荷重の最大値を組み合わせる

3. 詳細設計申送り事項に対する回答内容

- サプレッションチェンバの耐震評価については、設置許可審査(第698回審査会合, 2019年4月2日他)を踏まえ、以下の内容が詳細設計申送り事項となっている。



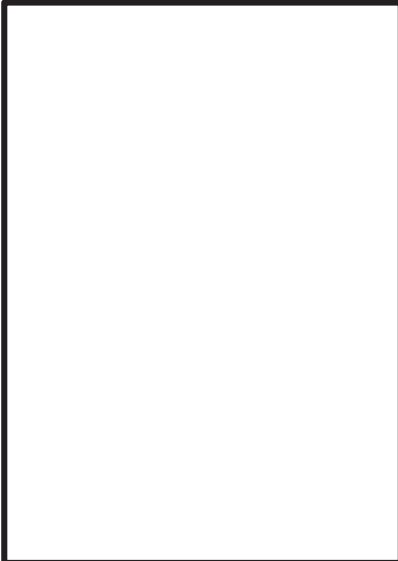

詳細設計申送り事項	回答内容(今回工認における対応)	備考
①サプレッションチェンバの振動挙動について、バルジング(サプレッションチェンバの小円断面が変形するような振動モード)による影響	既設強め輪の効果によって、バルジング(オーバル振動:花びら状の変形)の影響を十分に抑制すること確認した上で、地震応答解析モデル(3次元はりモデル)のボックスサポート取付部に、小円断面の変形影響等を考慮したばね剛性を設定	7項(1)で説明
②サプレッションチェンバボックスサポート付け根部における局部変形による影響		7項(2)で説明
③サプレッションチェンバの耐震評価における地震応答解析モデルに3次元はりモデルを適用すること等について詳細を説明	地震応答解析モデル(3次元はりモデル)について、妥当性確認用解析モデル(3次元シェルモデル)との振動モード、発生応力等の比較検討を行い、女川2号機サプレッションチェンバの耐震評価に適用することの妥当性を確認	8項で説明

4. 詳細設計申送り事項に対する検討結果を踏まえた設計の詳細化(1)

- 詳細設計申送り事項に対する検討結果等を踏まえ、設置許可段階から設計を詳細化した項目を以下に示す。

項目	設置許可段階	詳細設計段階
<p>地震応答解析モデルのモデル化範囲</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・サプレッションチェンバ本体 ・ボックスサポート本体 ・内部水(有効質量) <div data-bbox="501 1034 1227 1358" style="border: 1px solid black; height: 200px; width: 100%;"></div>	<ul style="list-style-type: none"> ・サプレッションチェンバ本体 ・ボックスサポート本体(基礎ボルトを含む)(参考3参照) ・ボックスサポート取付部のばね剛性の追加(7項(2)参照) ・サプレッションチェンバの補強対策(5項参照)を踏まえた内部水質量(有効質量)の再設定 <div data-bbox="1323 1034 2022 1358" style="border: 1px solid black; height: 200px; width: 100%;"></div> <p style="text-align: right; color: red;">赤字: 詳細化内容</p>

4. 詳細設計申送り事項に対する検討結果を踏まえた設計の詳細化(2)

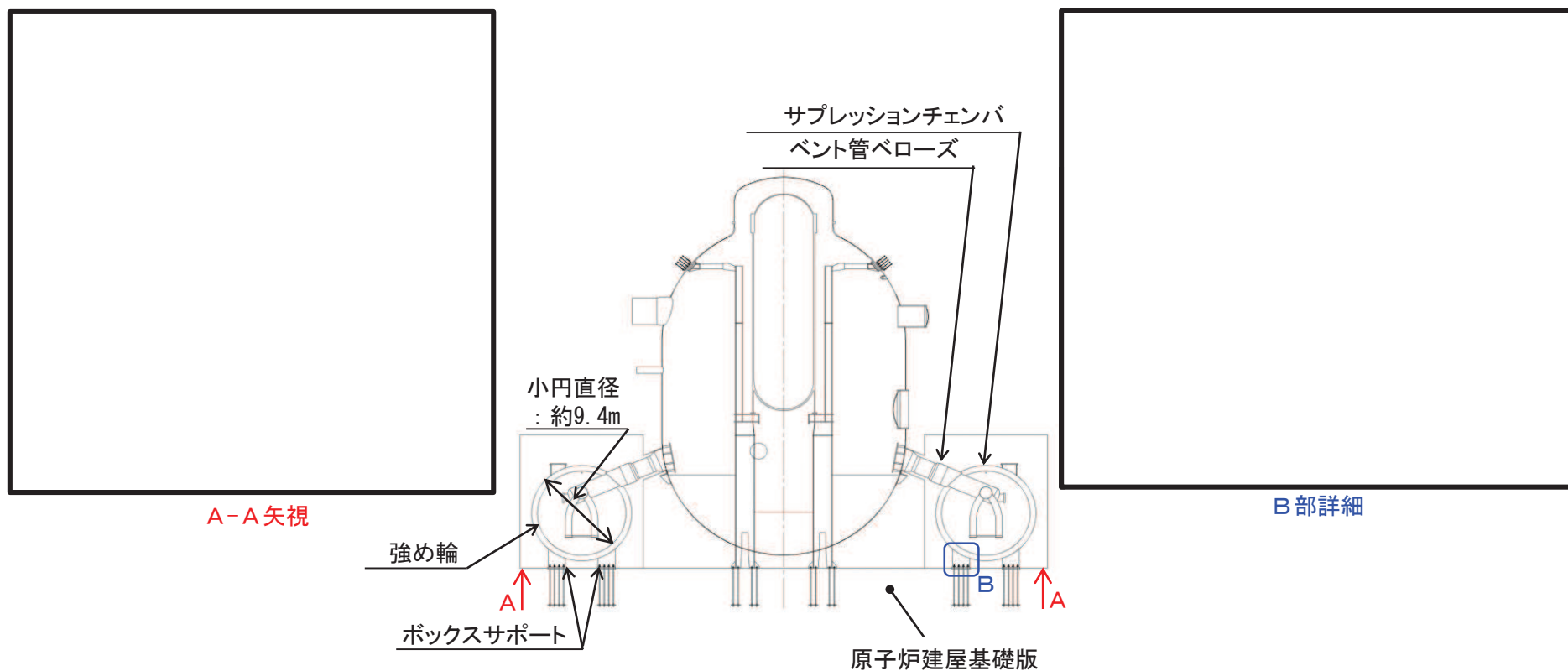
項目	設置許可段階	詳細設計段階
応力解析モデル		<p>・胴一般部及びエビ継ぎ手部の応力評価も踏まえ、2ベイモデルに変更</p> 
耐震対策		<p>・ボックスサポートの補強に加えてサブレーションチェンバ本体の補強を追加</p> 

赤字: 詳細化内容

5. サプレッションチェンバの構造概要及び耐震補強対策

(1) サプレッションチェンバの構造概要

- サプレッションチェンバは、16セグメントの円筒を繋ぎ合わせた円環形状の構造物
- 各セグメントの継ぎ目部(胴エビ継手部)には、ボックスサポート(計32箇所)に取り付け、基礎ボルトを介して原子炉建屋基礎版上に自立する構造
- 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

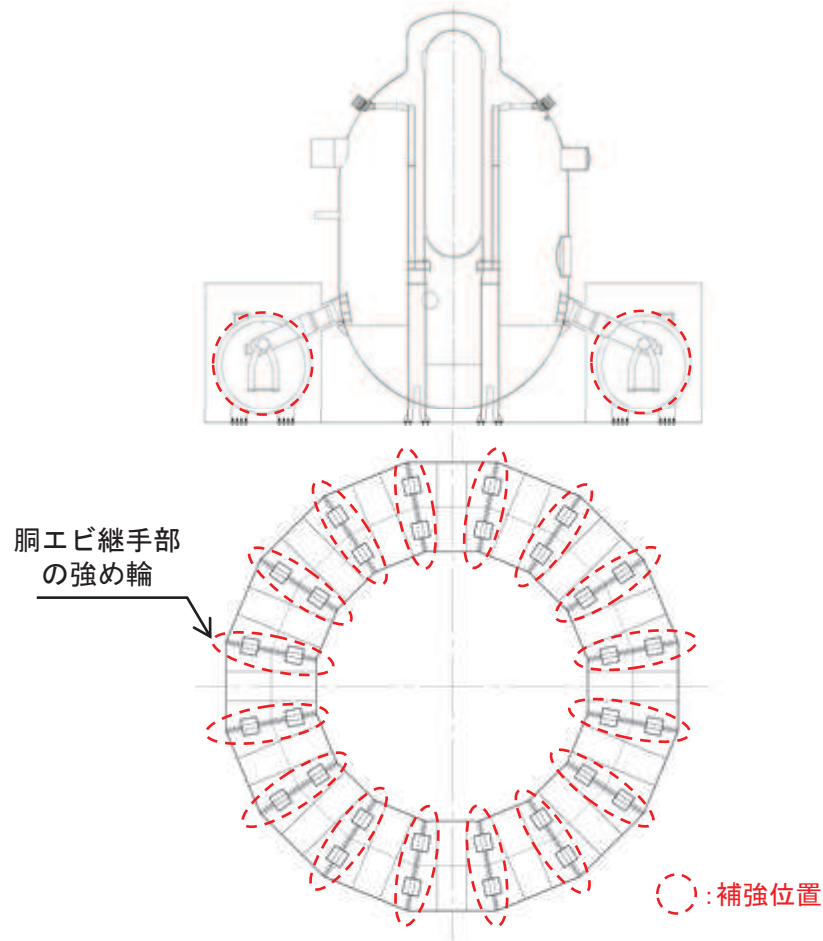


サプレッションチェンバの構造概要

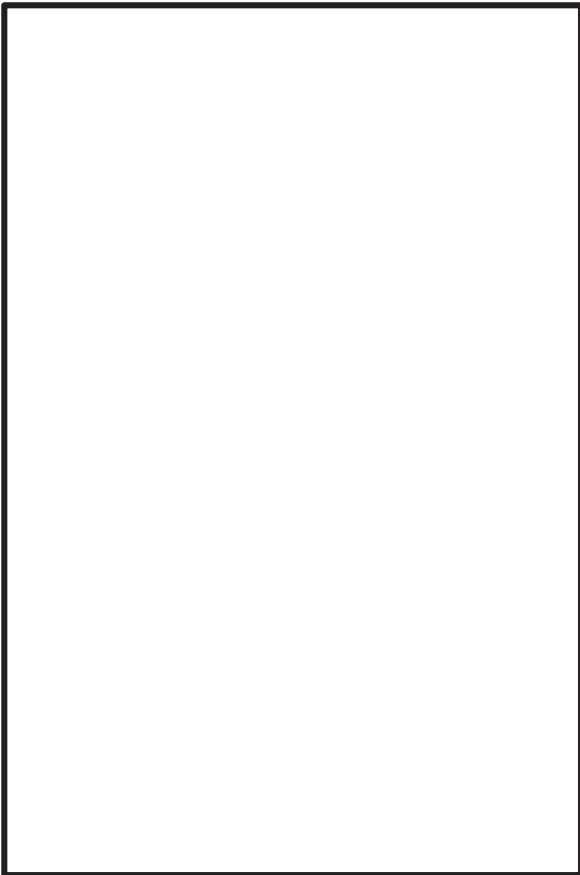
5. サプレッションチェンバの構造概要及び耐震補強対策

(2) サプレッションチェンバ本体の耐震補強対策

- サプレッションチェンバ本体は、既設強め輪への追加補強及び強め輪間の連結板追加によって、胴エビ継手部の強め輪の剛性を向上し、小円の断面変形を更に抑制する。
- ボックスサポート取付部は、パッド(当て板)及び補強リブを追加し、応力低減を図る。



サプレッションチェンバ本体の補強位置

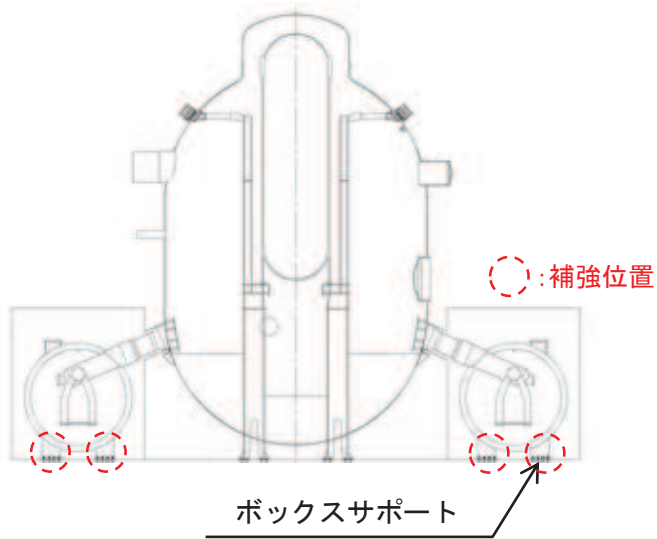


耐震補強対策 (サプレッションチェンバ本体)

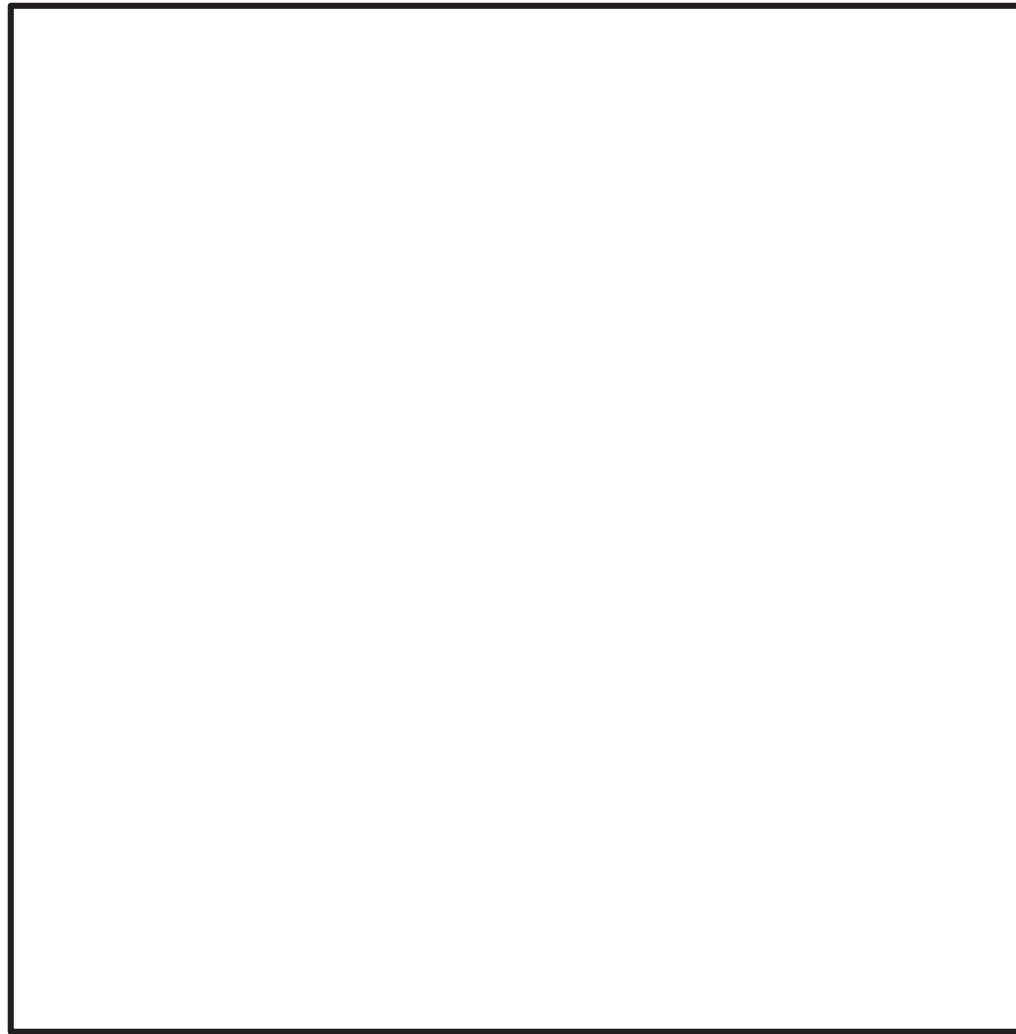
5. サプレッションチェンバの構造概要及び耐震補強対策

(3) ボックスサポートの耐震補強対策

- ボックスサポートは、既設ベースプレート外側に新設ベースプレート、新設シヤコネクタ、新設シヤラグを追加するとともに、ボックスプレートに追加リブを追加し、応力低減を図る。



ボックスサポートの補強位置



耐震補強対策（ボックスサポート）

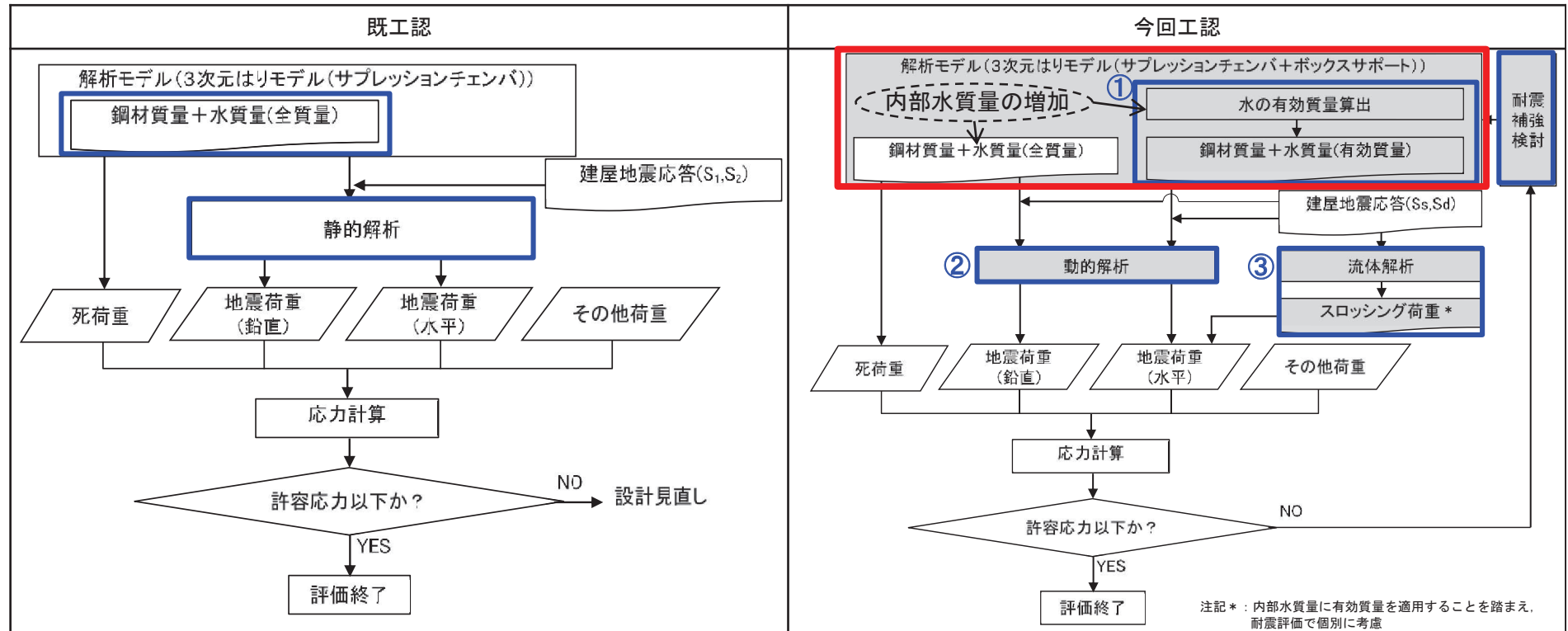
6. 今回工認における耐震評価の特徴

10

(1) 今回工認の耐震評価フロー

- ▶ 今回工認におけるサプレッションチェンバの耐震評価は、重大事故時の内部水質量の増加，基準地震動の増大等を踏まえて既工認より変更を行っている。

既工認及び今回工認における耐震評価フロー



①~③: 設置許可審査で説明済み

- ▶ 地震応答解析モデルへの3次元はりモデルの適用に係る詳細説明が，詳細設計申送り事項となっている。(表1の 部)

6. 今回工認における耐震評価の特徴

(2) 今回工認の地震応答解析モデル設定

- サプレッションチェンバ本体及びボックスサポートのモデル設定に係る以下の詳細検討を行い、今回工認の地震応答解析に用いる3次元はりモデルを設定した。
 - サプレッションチェンバ本体は、内部水の有効質量をモデルに反映するとともに、バルジングの影響検討を踏まえ、耐震補強対策を実施
 - ボックスサポート取付部は、バルジングの影響検討を踏まえたばね剛性を設定

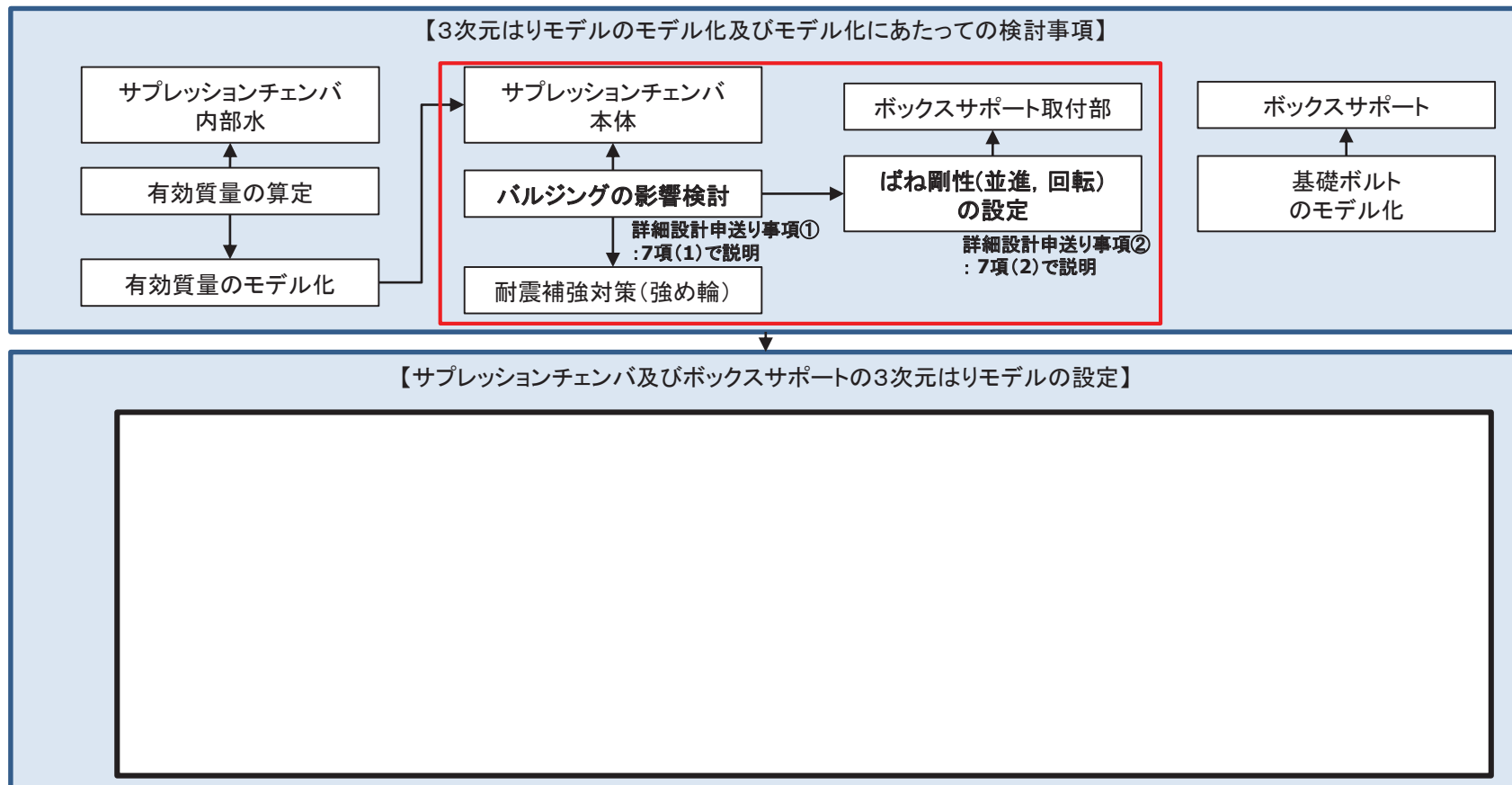


図6 今回工認の地震応答解析モデルの設定フロー

7. 今回工認における地震応答解析モデルの検討

(1) 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検討

《詳細設計送り事項①》

サプレッションチェンバの振動挙動について、バルジング(サプレッションチェンバの小円断面が変形するような振動モード)による影響

- 既設強め輪の効果によって、バルジング(オーバル振動)の影響は小さく、発生応力が大きく低減されていることを確認
- 支配的な振動モードは、水平1次モード及び鉛直2次モードで、いずれもボックスサポート取付部が最大応力発生部位であることを確認
- なお、今回工認では、サプレッションチェンバ本体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

表2 発生応力の比較結果*1,2

モデル化条件	強め輪		なし	あり
	内部水		考慮	考慮
発生応力【MPa】	水平方向	オーバル振動含まない (0~20Hz)	5104	105
		オーバル振動含む (0~40Hz)	5104	105
	鉛直方向	オーバル振動含まない (0~20Hz)	2129	46
		オーバル振動含む (0~40Hz)	2129	46

*1: スペクトルモーダル解析(1Gスペクトル)による発生応力
 *2: ここでいうオーバル振動は、花びら状の変形のこと

強め輪による
 応力低減効果大

オーバル振動の影響小

表3 応力コンター図*4

振動モード	水平方向	鉛直方向
1次モード		
2次モード		
3次モード		

*3: 最大応力発生部位
 *4: サプレッションチェンバ本体の範囲

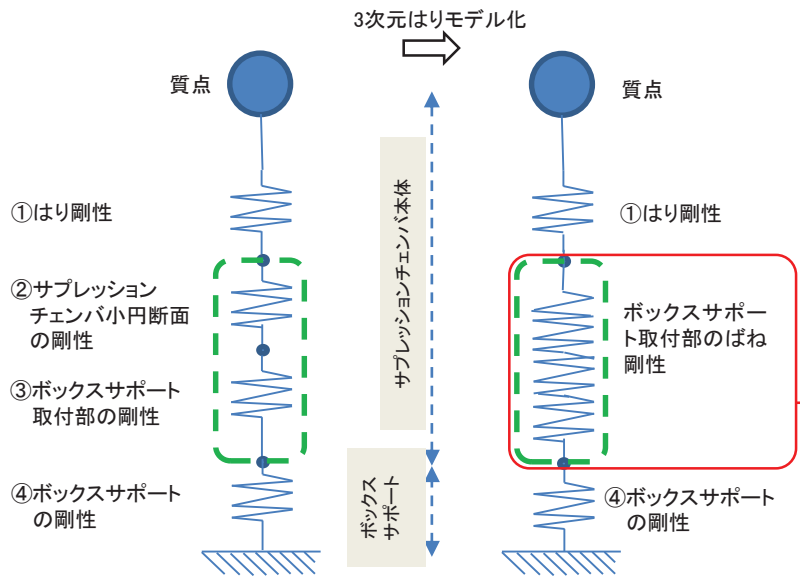
7. 今回工認における地震応答解析モデルの検討

(2) ボックスサポート取付部のばね剛性の算定

《詳細設計申送り事項②》

サプレッションチェンバボックスサポート付け根部における局部変形による影響

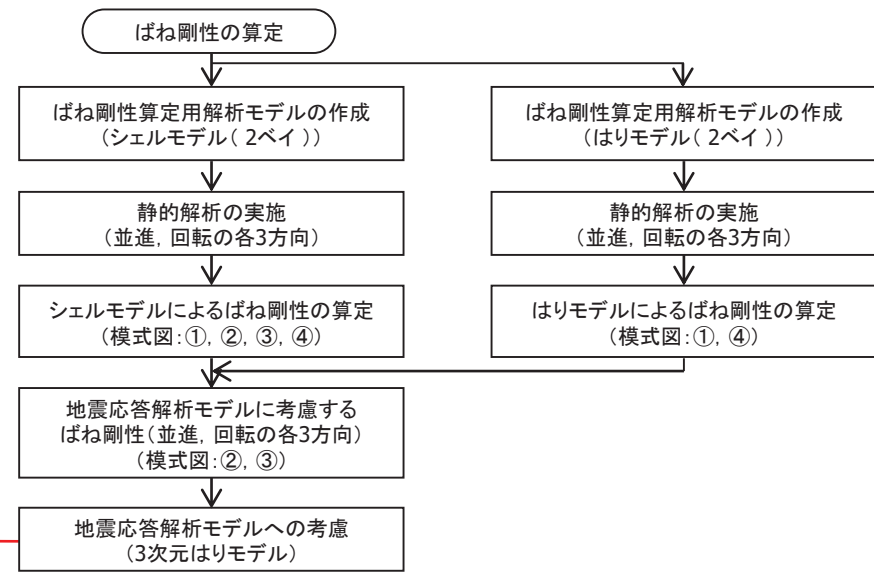
- サプレッションチェンバ小円断面の変形影響等を考慮した剛性(図Aの②)及びボックスサポート取付部の剛性(図Aの③)を, シェルモデルとはりモデルのばね剛性の差から算定(図B)し, これをボックスサポート取付部のばね剛性として, 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)(図C)に設定



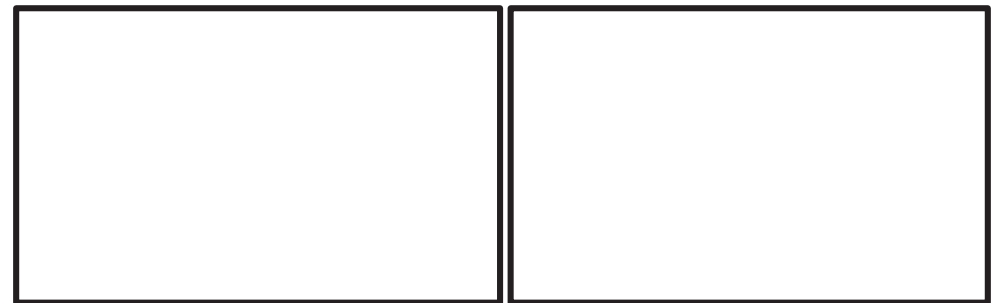
図A サプレッションチェンバとボックスサポートの質量・剛性模式図



図C 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)



図B ボックスサポート取付部のばね剛性算定フロー



図D ばね剛性算定用解析モデル(左側:シェルモデル, 右側:はりモデル)

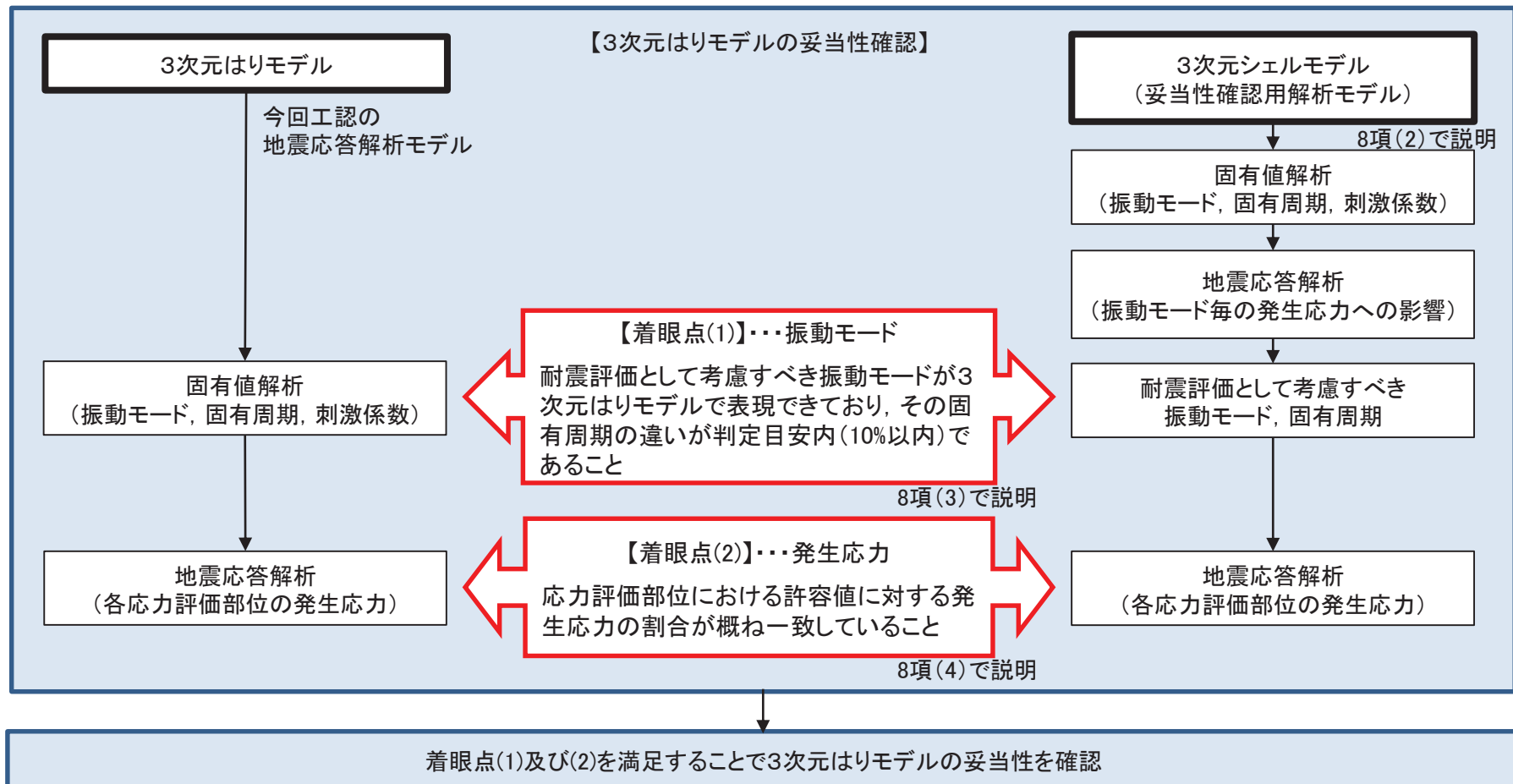
8. 今回工認における地震応答解析モデルの妥当性確認

(1) 今回工認の地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の妥当性確認フロー

《詳細設計申送り事項③》

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モデルに3次元はりモデルを適用すること等について詳細を説明

- ▶ 今回工認における地震応答解析モデル(3次元はりモデル)に対して、サプレッションチェンバ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)を設定し、以下の着眼点で地震応答解析結果を比較検討する。



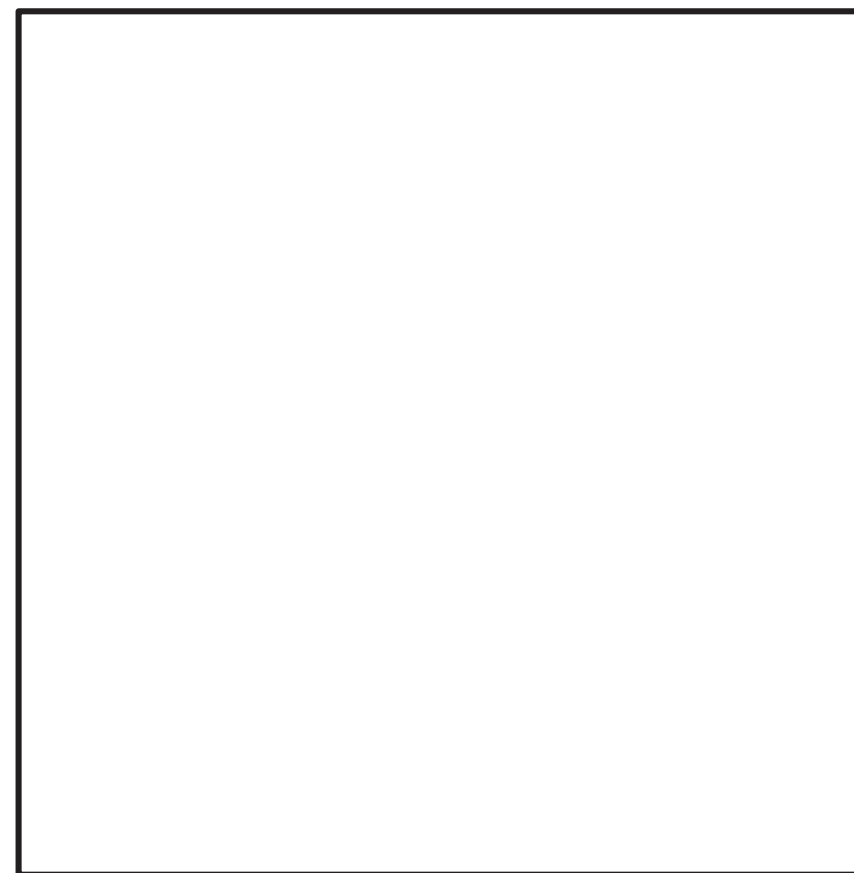
今回工認の地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の妥当性確認フロー

8. 今回工認における地震応答解析モデルの妥当性確認 (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)は, 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を用いてモデル化
- 内部水の有効質量は, サプレッションチェンバ本体のシェル要素に仮想質量法により算定し設定

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
	内部水	・耐震解析用重大事故時水位(O.P.-1,514mm) ・NASTRANの仮想質量法を適用
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Ss7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



妥当性確認用解析モデル(3次元シェルモデル)図

8. 今回工認における地震応答解析モデルの妥当性確認

(3)【着眼点1】振動モードの比較

- 耐震評価として考慮すべき振動モードは、概ね同様な傾向を示すことを確認
- 固有周期の差異は、全て判定目安内(10%以内)にあり、主要な振動モードである水平方向(3次モード)で9.3%、鉛直方向(5次モード)で9.6%

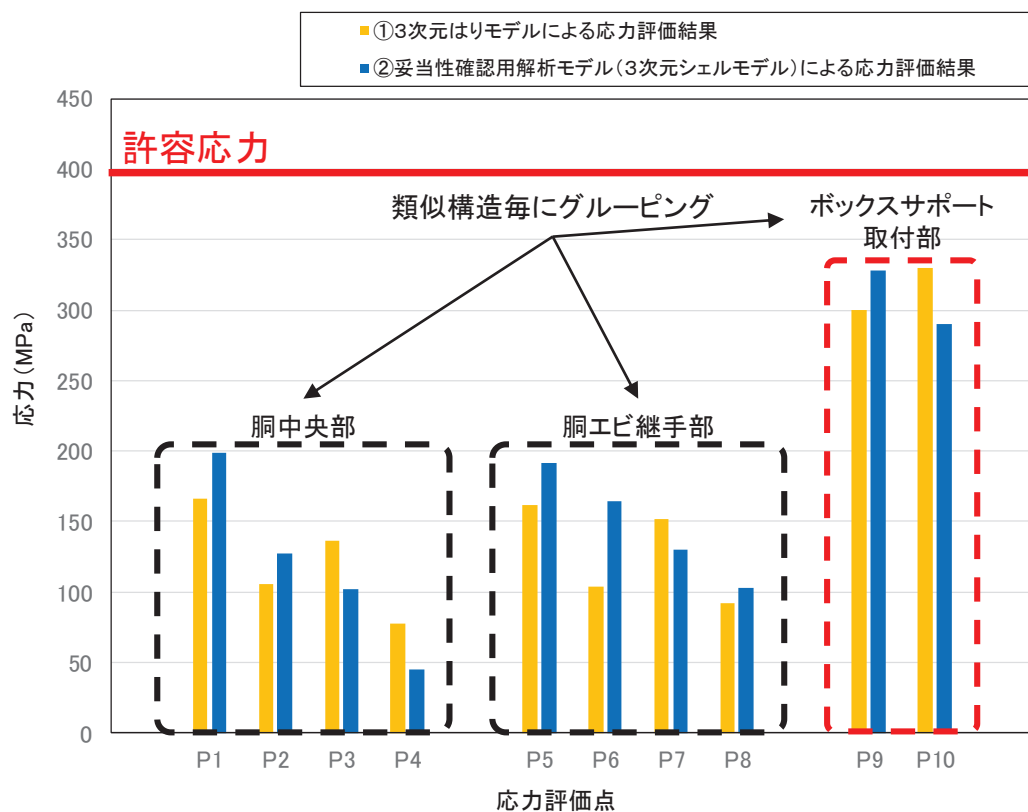
固有値解析結果

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		
				0.907	差は9.3%
				0.904	差は9.6%

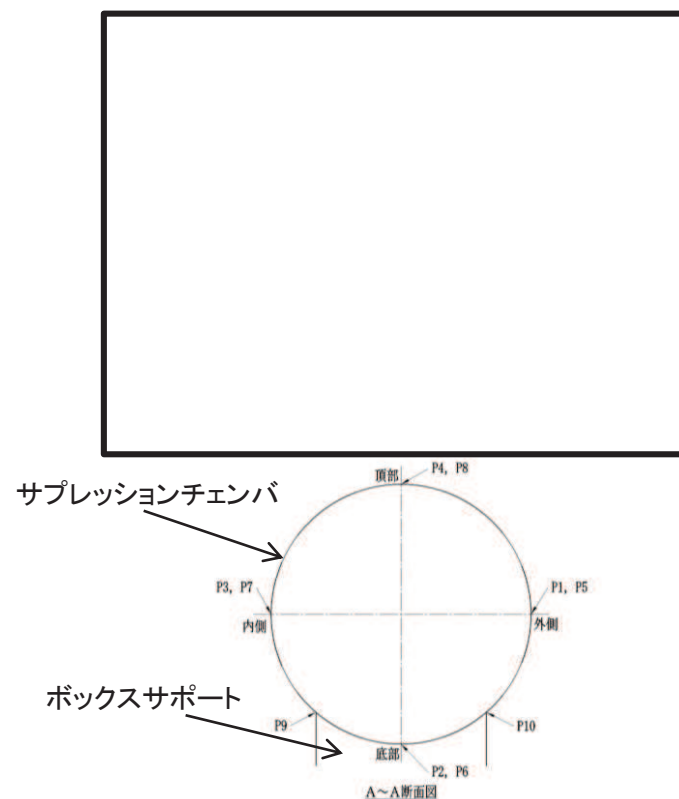
8. 今回工認における地震応答解析モデルの妥当性確認

(4) - 1【着眼点2】応力評価部位における応力比較(サブレーションチェンバ本体)

- サブレーションチェンバ本体の発生応力の比較結果は、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，胴エビ継手部及びボックスサポート取付部の各分類において許容応力の範囲内で同程度であることを確認
- 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次元はりモデルと妥当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いることを確認



サブレーションチェンバ本体の応力比較結果

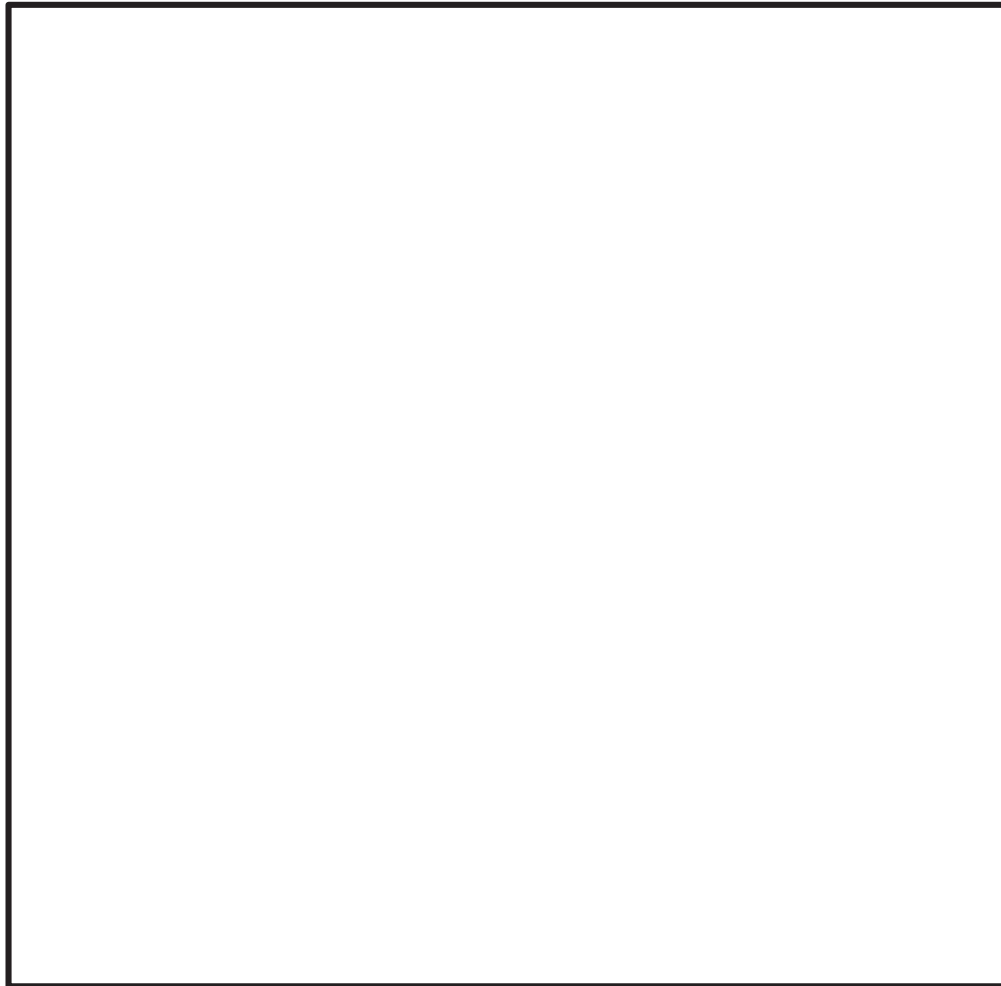


サブレーションチェンバ本体の応力評価点

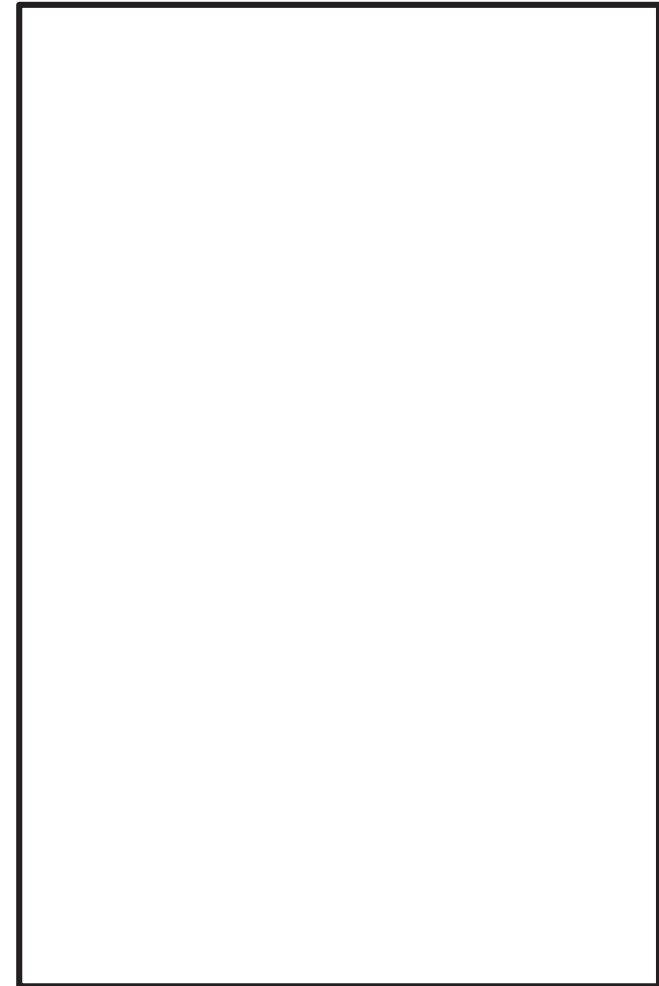
8. 今回工認における地震応答解析モデルの妥当性確認

(4)－2【着眼点2】応力評価部位における応力比較(ボックスサポート)

- 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妥当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ことを確認



ボックスサポートの応力比較結果

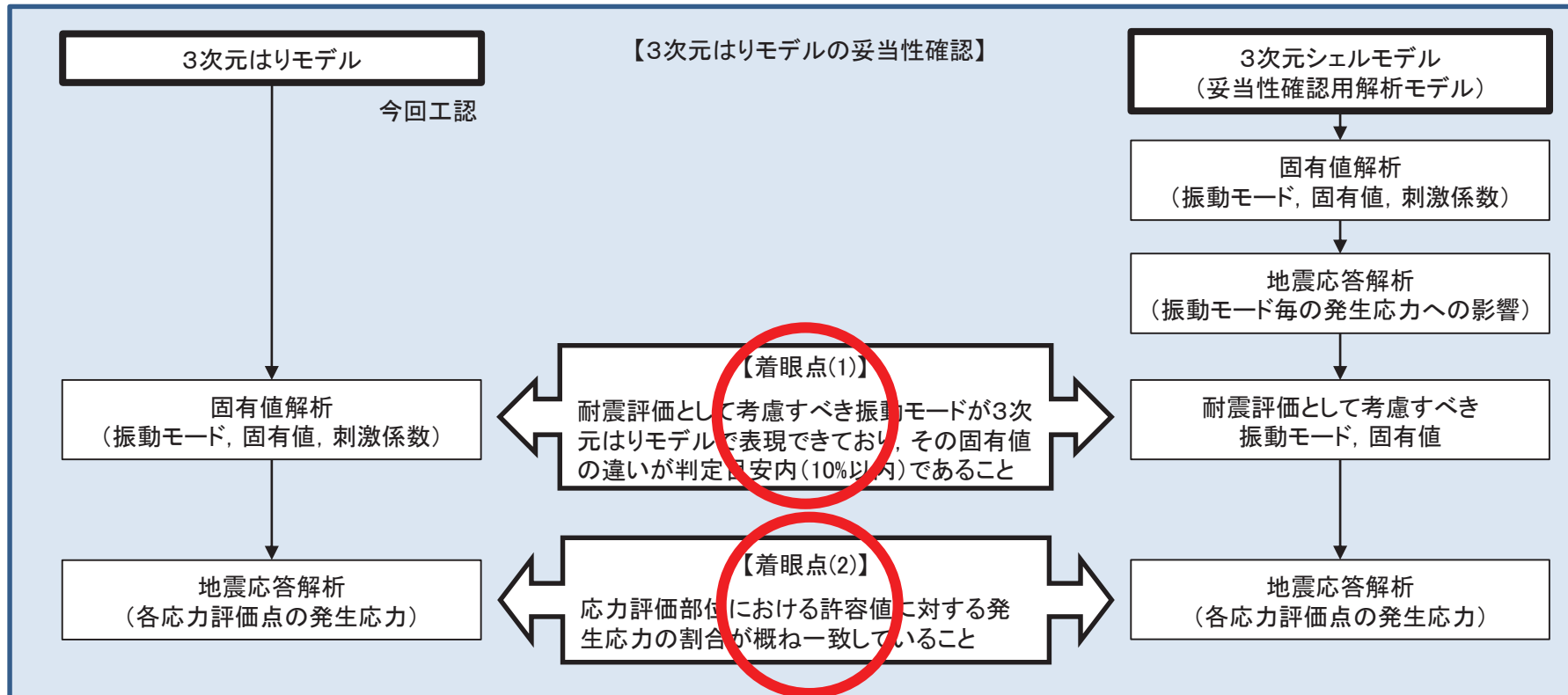


ボックスサポートの応力評価部位

8. 今回工認における地震応答解析モデルの妥当性確認

(5) 今回工認の地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の妥当性

- 今回工認の地震応答解析モデル(3次元はりモデル)は、妥当性確認用解析モデル(3次元シェルモデル)との振動モード、発生応力等の比較検討の結果、着眼点(1)及び(2)を満足する。



サプレッションチェンバの地震応答解析に3次元はりモデルを適用することは妥当

No.	項目	概要
2-3	サプレッションチェンバの耐震評価	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モデルに3次元はりモデルを適用すること等について詳細を説明する。

上記の詳細設計申送り事項に対し、以下の結論を得た。

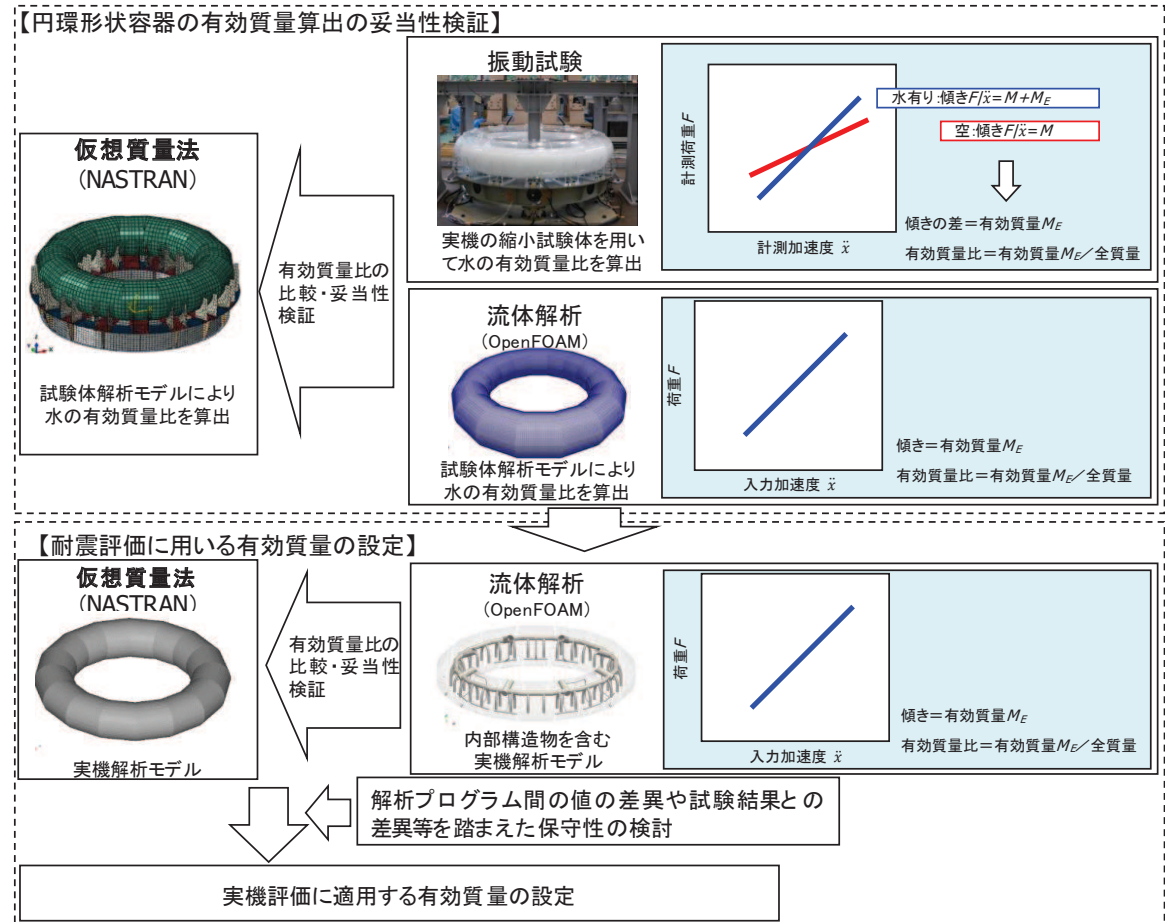
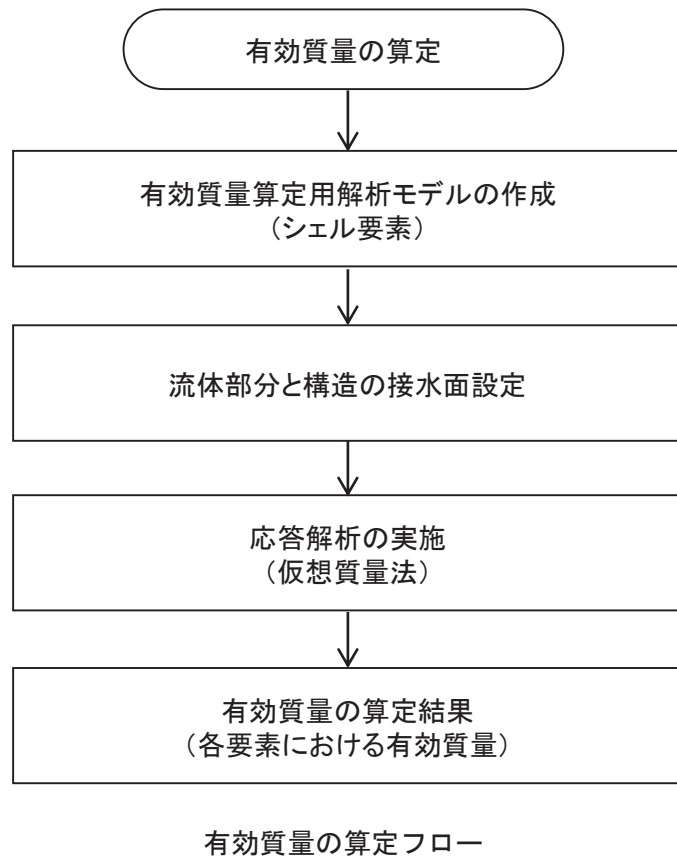
- 今回工認の地震応答解析モデルは、サプレッションチェンバのバルジング（オーバル振動）の影響が小さいことを確認した上で、更なる剛性向上を目的とした強め輪の補強対策を実施するとともに、バルジングの影響検討を踏まえたばね剛性をボックスサポート取付部に設定した3次元はりモデルを適用する。
- 今回工認の地震応答解析モデル（3次元はりモデル）は、妥当性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）との振動モード、発生応力等の比較検討を行い、女川2号機のサプレッションチェンバの地震応答解析モデルに適用することが妥当であることを確認した。

参考資料

- 参考 1 サプレッションチェンバ内部水に対する有効質量の適用
- 参考 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検討
- 参考 3 ボックスサポートのモデル化
- 参考 4 耐震評価として考慮すべき振動モード

【参考1-1】 サプレッションチェンバ内部水に対する有効質量の適用(有効質量算定)

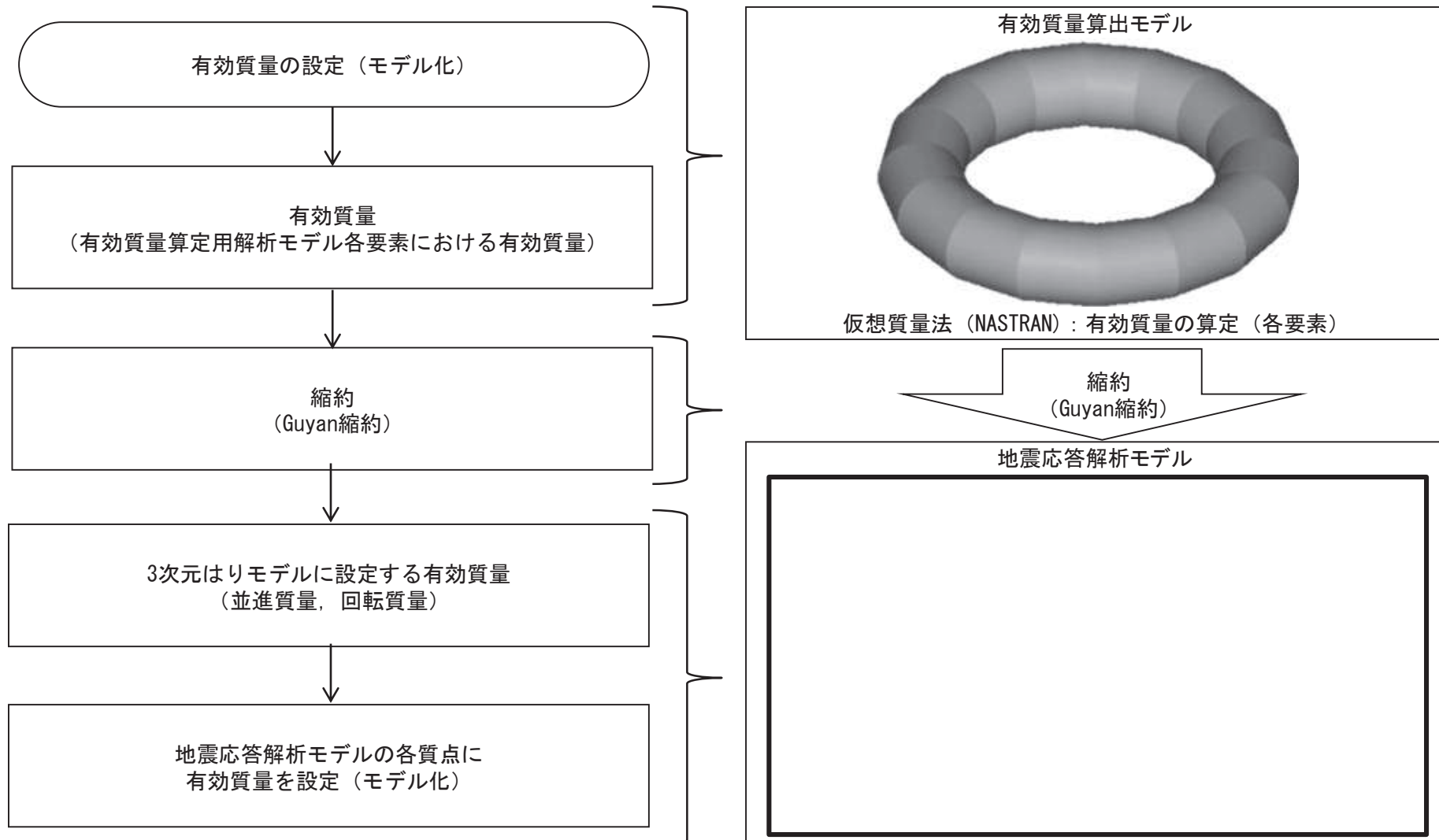
- 振動試験, 流体解析 (OpenFOAM) との比較により妥当性を確認した NASTRAN の仮想質量法を用いて有効質量を算定
- 算定した有効質量は, NASTRAN の機能 (Guyan 縮約法) を用いて, サプレッションチェンバの地震応答解析モデル (3次元はりモデル) の各質点に縮約し付加



有効質量算定に係る妥当性確認フロー

【参考1-2】 サプレッションチェンバ内部水に対する有効質量の適用 (Guyan縮約)

- 仮想質量法を用いて算定した有効質量は、NASTRANの機能 (Guyan縮約法) を用いて、サプレッションチェンバの地震応答解析モデル (3次元はりモデル) の各質点に縮約し、付加

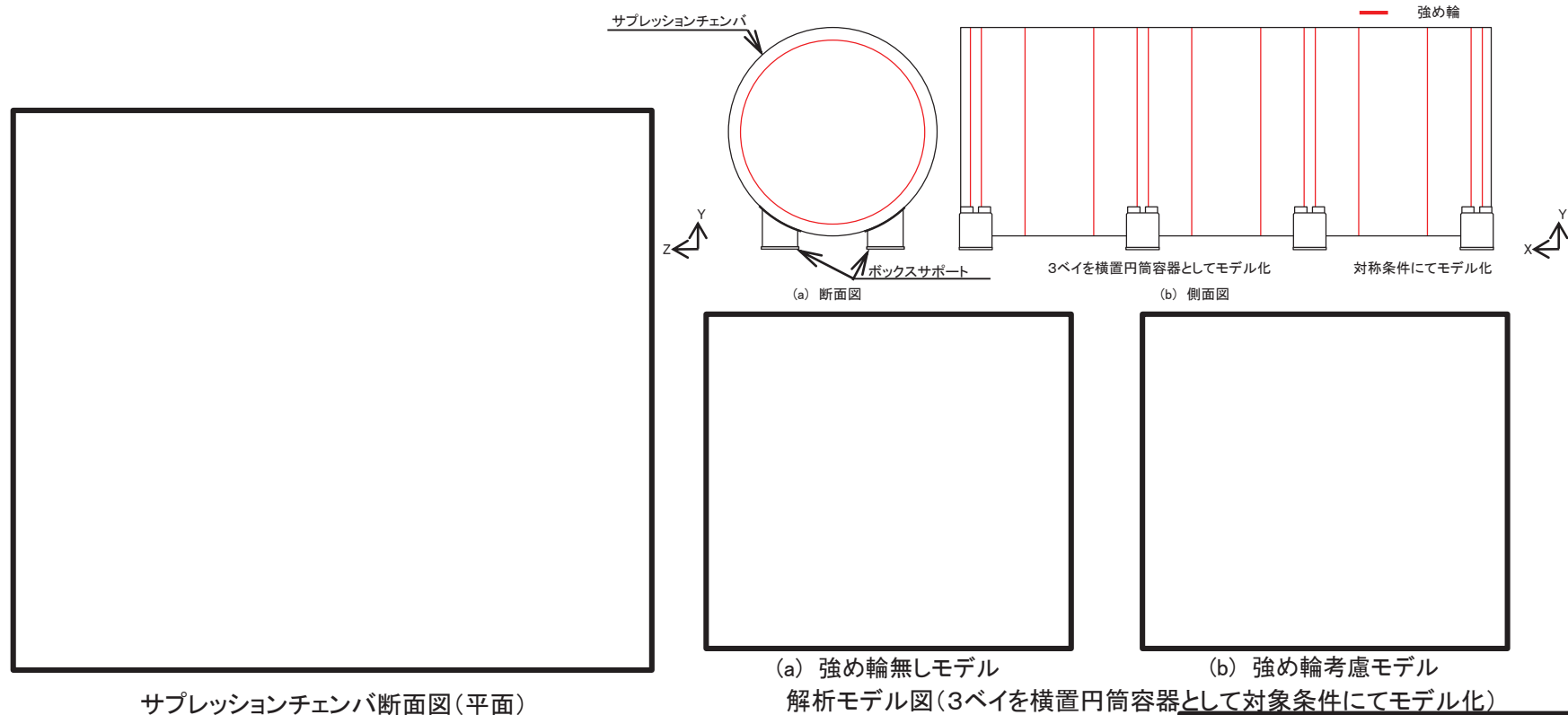


地震応答解析モデルに対する有効質量の設定フロー

【参考2-1】 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検討(検討条件)

➤ バルジングに対する強め輪及び内部水の影響を解析的に実施

項目	内容
検討モデル	サプレッションチェンバの断面を簡便に横置円筒容器(3ベイ分)に模擬した3次元シェルモデル
解析内容	固有値解析 応答解析(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)
検討項目	サプレッションチェンバの振動特性 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)の影響(応力影響) →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



【参考2-2】 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検討(振動特性)

- 振動モードは, 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
- 強め輪がある場合の固有振動数は, 強め輪がない場合に比べて20倍程度高い傾向
- 強め輪の効果によって, 円筒部の変形が抑制

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
振動モード 固有振動数	1次モード				
	2次モード				
	3次モード				
	オーバル振動 (花びら状の振動)				

【参考2-3】 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検討(変形挙動)

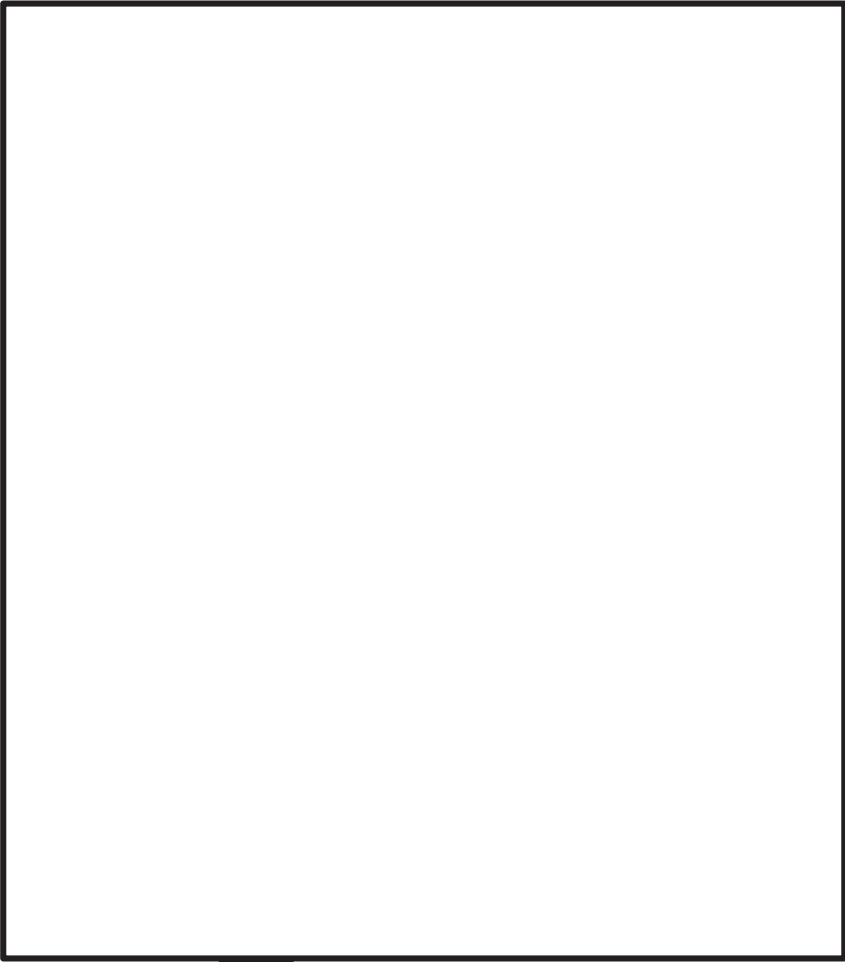
- 強め輪の効果によって, 円筒部の変形が抑制

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			

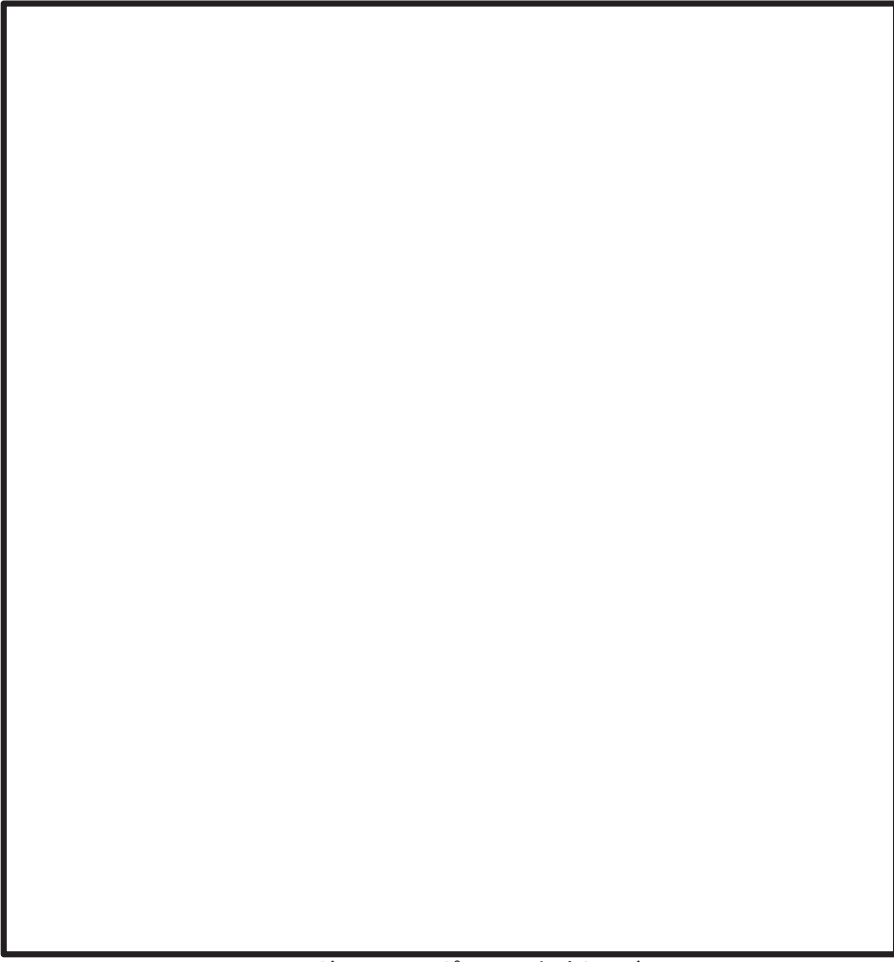
【参考3-1】 ボックスサポートのモデル化



としてモデル化



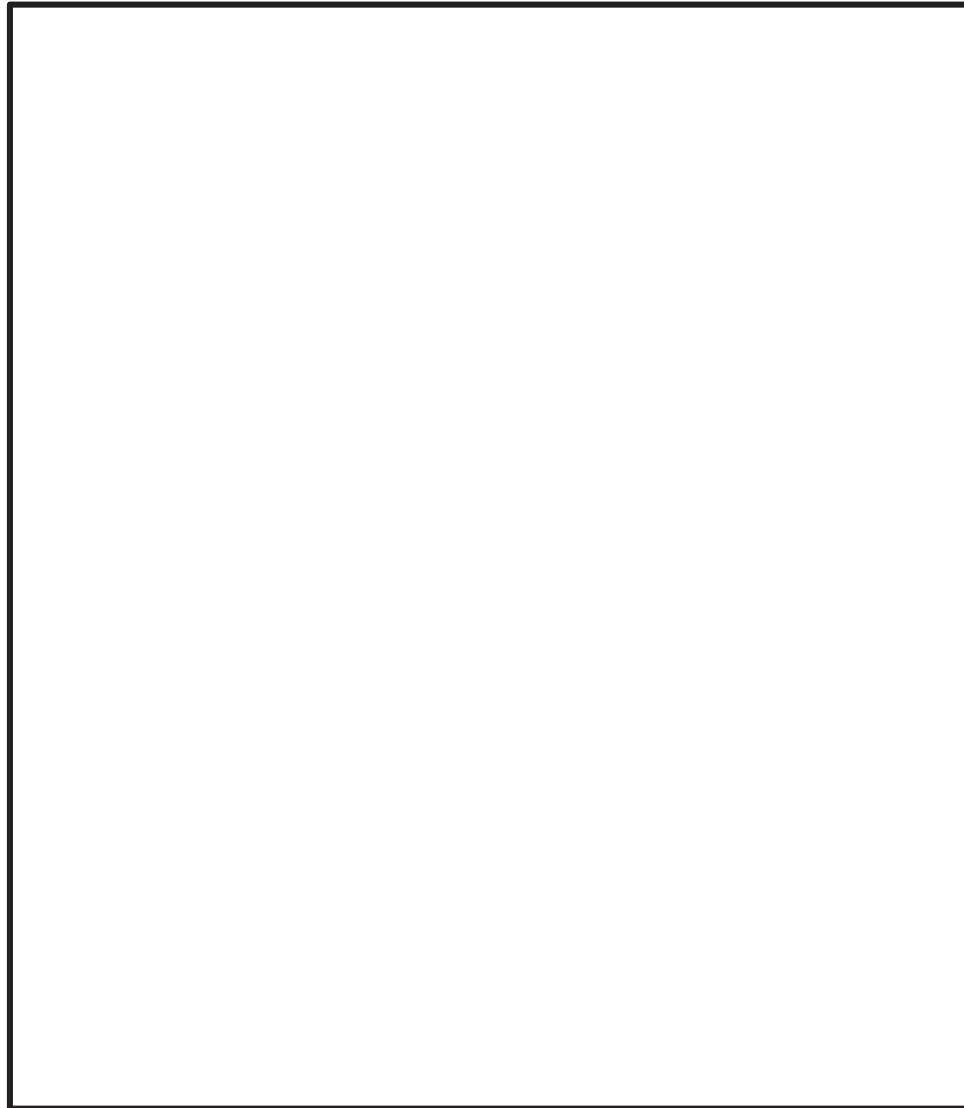
算定用の3次元シェルモデル図



ボックスサポートの解析モデル

【参考3-2】 ボックスサポートのモデル化(基礎ボルト)

- より現実に近い挙動を詳細に考慮するため、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



荷重イメージ

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

➡ より現実に近い
挙動を詳細に考慮

【参考4】 耐震評価として考慮すべき振動モード

- 妥当性確認用解析モデルの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、各振動モードを3グループに分類し、発生応力への影響を検討
- 検討結果から、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)となった。

妥当性確認用解析モデルの固有値解析結果

振動モード	固有周期 (s)	刺激係数(-)			刺激係数の値に着目したグループ
		X	Y	Z	
1	0.110	0.03	0.03	0.00	C
2	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
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22	0.051	0.53	1.42	0.00	B
23	0.051	1.35	0.53	0.00	B
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
39	0.050	7.86	4.00	0.00	B

1未満の値
⇒ 応力への影響なし

2桁オーダーの値
⇒ 耐震評価として考慮すべき振動モード

1桁オーダーの値
⇒ 応力への影響なし

耐震評価として考慮すべき振動モードのモード図

振動モード	振動モード図	
	平面	立面
3次		
4次		
5次		
10次		
11次		
12次		