

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 サプレッションチェンバの耐震評価について

2021年7月6日
東北電力株式会社

本日のご説明内容

1. はじめに
2. サプレッションチェンバの構造概要
3. 耐震評価における既工認からの変更内容
4. 設置許可段階での説明内容
5. 詳細設計申送り事項への対応
6. 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る検討
 6. 1 サプレッションチェンバの地震応答解析モデルの設定フロー
 6. 2 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)
 6. 3 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検討
 6. 4 ボックスサポート取付部における局部変形による影響検討
 6. 5 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性確認
7. まとめ

- 参考 1 サプレッションチェンバの耐震補強対策
- 参考 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
- 参考 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
- 参考 4 ボックスサポート取付部のばね剛性の算定

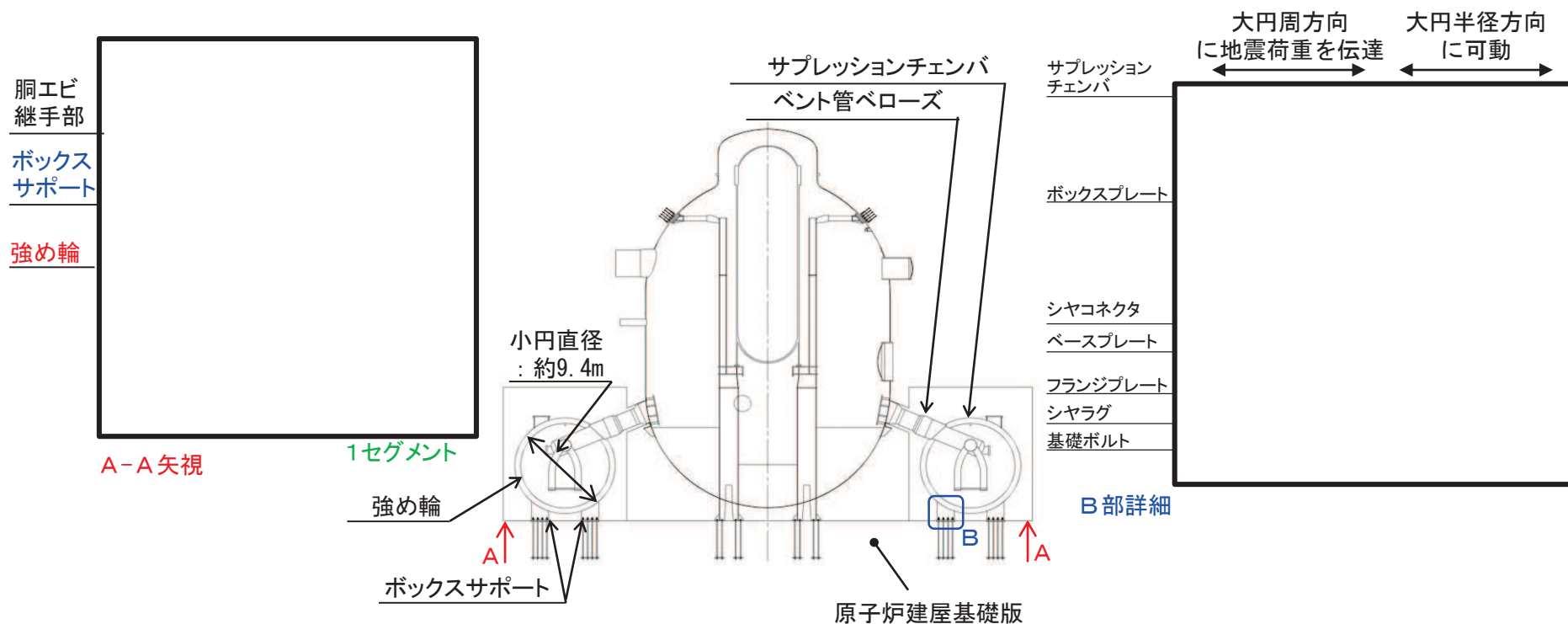
- サプレッションチェンバの耐震評価について、詳細設計申送り事項(第876回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 2020年7月14日)への対応結果を説明する。

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. 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、円筒(合計16セグメント)を繋ぎ合わせた円環形状の構造物であり、その内部には円筒(小円)の変形を抑制するための強め輪(合計64枚)を設置。
- 円筒の継ぎ目部(胴エビ継手部)には、ボックスサポート(内外に合計32箇所)が取り付けられており、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の大円半径方向の熱膨張を吸収するように可動し、大円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。
- 今回工認では、詳細設計を踏まえて、サプレッションチェンバの強め輪、ボックスサポート取付部及びボックスサポートを補強。【参考1】



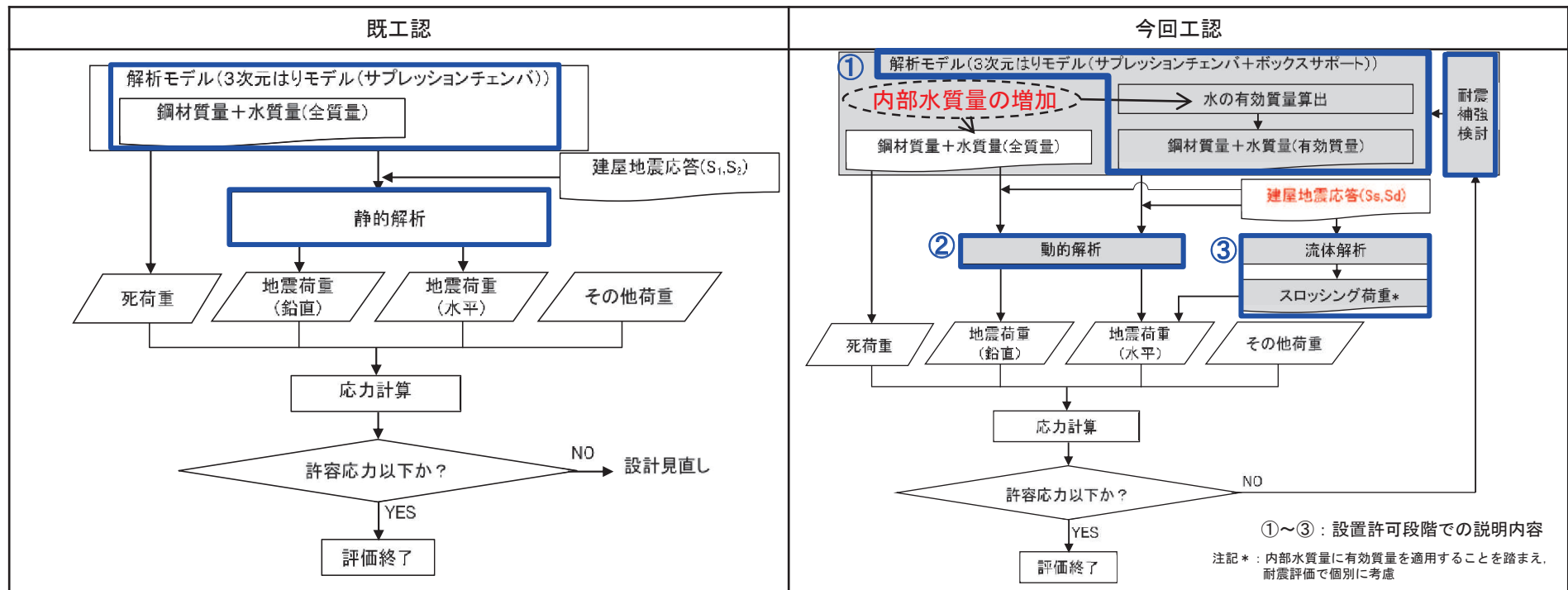
サプレッションチェンバの構造概要

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

3. 耐震評価における既工認からの変更内容

- 今回工認の耐震評価は、重大事故等時のサブプレッションチェンバ内部水質量の増加、基準地震動 S_s の増大等を踏まえて既工認より以下を変更した。
 - ① 内部水質量に対する有効質量の適用【参考2】
 - ② 地震応答解析手法の変更（動的解析としてスペクトルモーダル解析）
 - ③ 流体解析によるスロッシング荷重の個別評価
- 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、既工認がはりモデルであったこと、大型機器（原子炉圧力容器，原子炉格納容器等）もはりモデルを適用していることを踏まえ、今回工認でも3次元はりモデルを適用し、より詳細な検討を実施した。




耐震評価フローの比較



4. 設置許可段階での説明内容

(既工認からの変更内容を踏まえた耐震設計への考慮事項)

- 設置許可審査(第698回審査会合, 2019年4月2日他)においては, 既工認からの変更内容を踏まえて, 工認段階におけるサプレッションチェンバの耐震設計への考慮事項を纏めた。

項目	耐震設計への考慮事項(設置許可段階での説明内容)
<p>①内部水質量に対する有効質量の適用</p> 	<ul style="list-style-type: none">➤ 汎用構造解析プログラム(NASTRAN)の仮想質量法を用いて, サプレッションチェンバ内部水の有効質量を算定する。➤ サプレッションチェンバ内部水の有効質量が固有周期に関連することを踏まえ, 流体解析で算出された有効質量に対する固有周期と床応答スペクトルとの関係も確認し, 地震応答解析への影響を確認する。
<p>②地震応答解析手法の変更</p> 	<ul style="list-style-type: none">➤ サプレッションチェンバの動的解析として, 3次元はりモデルによるスペクトルモーダル解析を適用する。➤ サプレッションチェンバ内部水の有効質量のモデル化は, Guyanの縮約法を適用する。
<p>③流体解析によるスロッシング荷重の個別評価</p> 	<ul style="list-style-type: none">➤ 流体解析によるサプレッションチェンバ内部水のスロッシング荷重は, 水平2方向の荷重の組合せを考慮し, 保守的に評価(水平1方向+鉛直方向の$\sqrt{2}$倍の荷重を考慮)する。➤ スロッシング荷重は, 時刻及び地震動によって異なるが, 地震荷重との組合せとして保守的に最大値を考慮する。

5. 詳細設計申送り事項への対応

- 本資料では、今回工認におけるサプレッションチェンバの耐震評価に関して、耐震設計への考慮事項及び詳細設計申送り事項を踏まえ、設置許可段階では考慮されていなかった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影響及びサプレッションチェンバのボックスサポート取付部における局部変形の影響を考慮した地震応答解析モデル（3次元はりモデル）を適用することを説明する。

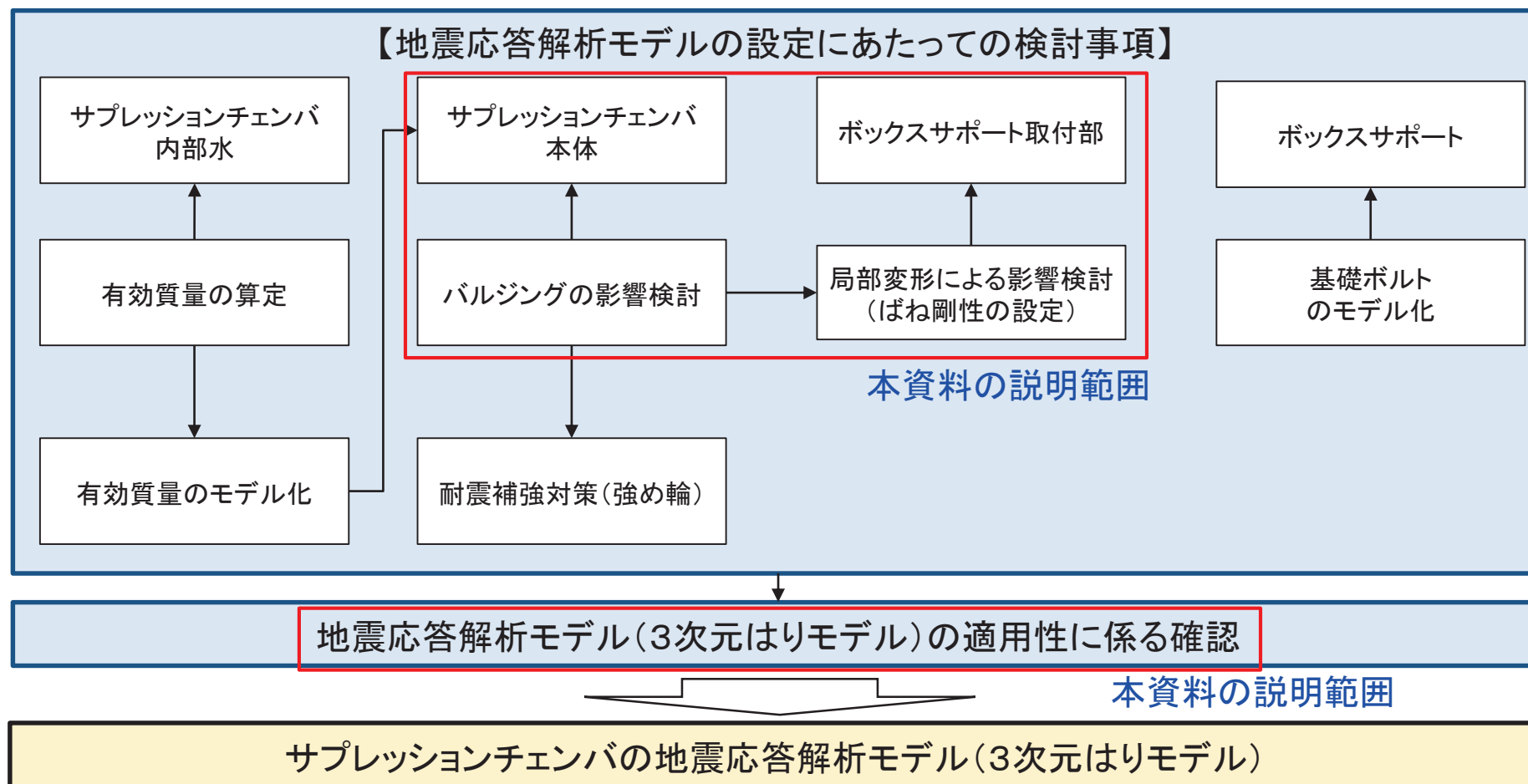
詳細設計申送り事項	今回工認での検討結果	備考
サプレッションチェンバの耐震評価における地震応答解析モデルに3次元はりモデルを適用すること等について詳細を説明する。	<p>1. サプレッションチェンバの振動挙動に対するバルジング*の影響は、強め輪の効果によって地震時の発生応力が低減されるものの、発生応力に対して支配的な振動モード（1次モード及び2次モード）があることを確認した。</p> <p>* : サプレッションチェンバの円筒（小円）が変形するような振動 【参考3】</p>	6.3項で説明
	<p>2. ボックスサポート取付部の局部変形の剛性は、地震応答解析モデルの固有周期に影響することを確認したことから、バルジングの影響と合わせて、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剛性を追加することで考慮した。</p>	6.4項で説明
	<p>3. 地震応答解析モデル（3次元はりモデル）を設定し、「適用性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）」との比較検証を行い、女川2号機に対して適用性があることを確認した。</p>	6.1項, 6.2項, 6.5項で説明

6. 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る検討

7

6.1 サプレッションチェンバの地震応答解析モデルの設定フロー

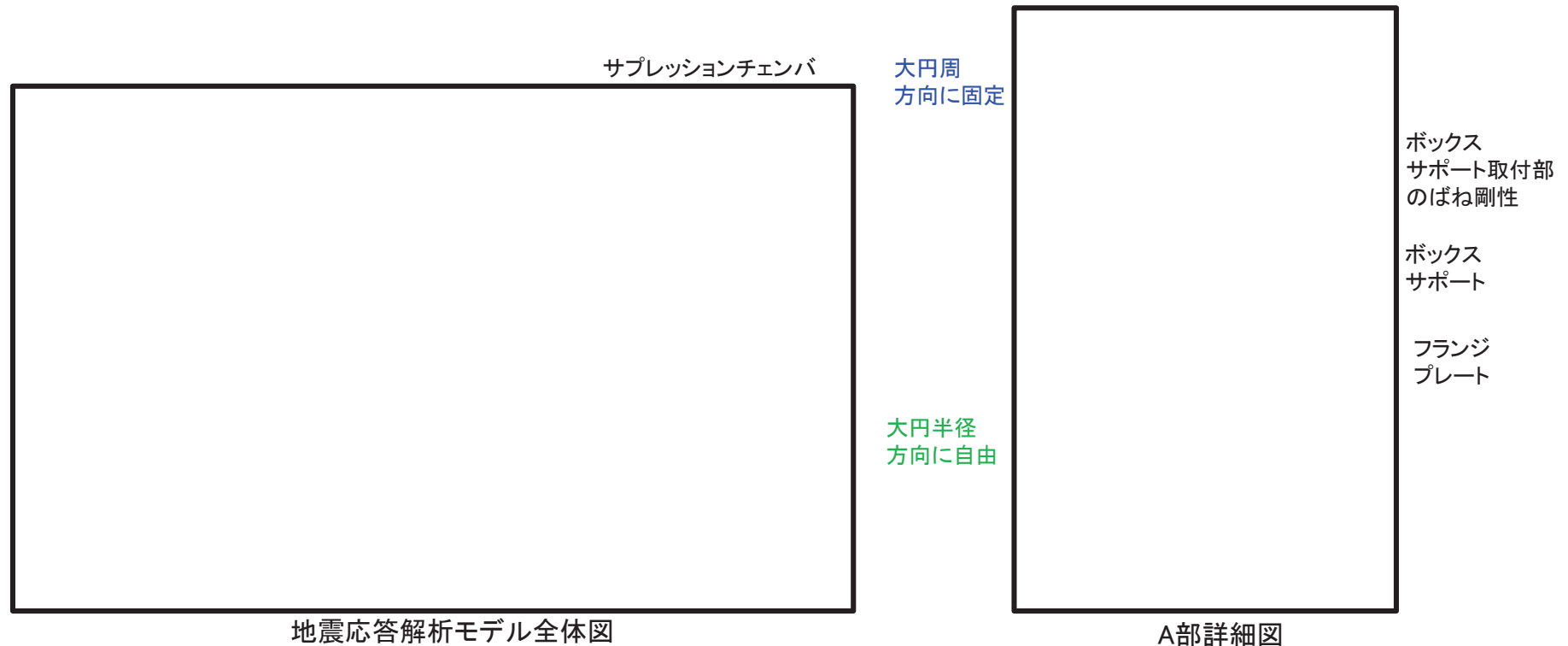
- 今回工認の地震応答解析モデルの設定にあたっては、サプレッションチェンバ内部水、サプレッションチェンバ本体、ボックスサポート取付部及びボックスサポートに係る検討に加えて、地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る確認を実施した。



6. 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る検討

6.2 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)

- 今回工認で設定した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)は、下図の通り。
- 次頁以降、下記項目に対する検討結果を説明する。
 - 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検討
 - ボックスサポート取付部における局部変形による影響検討
 - 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性確認



サプレッションチェンバの地震応答解析モデル

6. 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る検討

6.3 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検討(1)

- 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を検討するため、サプレッションチェンバの一部を横置円筒容器とした簡易モデルを用いた固有値解析及び応力解析を実施した。【参考3】
- 解析の結果、高次のオーバル振動(花びら状の変形)の発生応力に与える影響が小さく、サプレッションチェンバ内部に設置された既設強め輪の効果によって、地震時の発生応力が大きく低減されることを確認した。
- ただし、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*。いずれの振動モード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した。

* 本検討におけるバルジングの振動モードとしては、1次モードはビーム振動、2次モードは低次のオーバル振動に分類した。

発生応力に対する既設強め輪の効果*1

評価条件		発生応力*2 【MPa】	
		強め輪 なし	強め輪 あり
水平方向	高次のオーバル振動含まない(0~20Hz)	5104	105
	高次のオーバル振動含む(0~40Hz)	5104	105
鉛直方向	高次のオーバル振動含まない(0~20Hz)	2129	46
	高次のオーバル振動含む(0~40Hz)	2129	46

* 1: 高次のオーバル振動とは、花びら状の変形をいい、20Hz以下の振動数で発現しない。
 なお、花びら状の変形を伴わない振動モード(低次のオーバル振動)は20Hz以下に確認された。
 * 2: ボックスサポート取付部のミーゼス応力を表す。

応力コンター図(強め輪あり)*3,4

振動モード	水平方向	鉛直方向
1次モード		
2次モード		

* 3: 1Gフラットスペクトルを用いた応力解析結果
 * 4: ミーゼス応力を表す

6. 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る検討

6.3 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検討(2)

- 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検討結果を踏まえ、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)に対するばね剛性をそれぞれ算定し、地震応答解析モデル(3次元はりモデル)に考慮する。
- 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耐震補強対策を実施し、小円の断面変形を抑制する。【参考1】

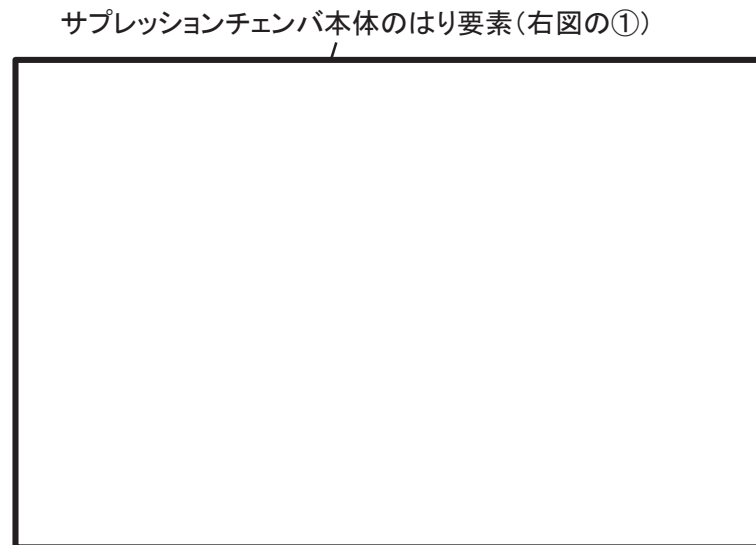
振動モード	モード図*	ばね剛性算定イメージ
1次モード		
2次モード		

*:モード図は、変形前を青線とし、変形後を赤線とした。

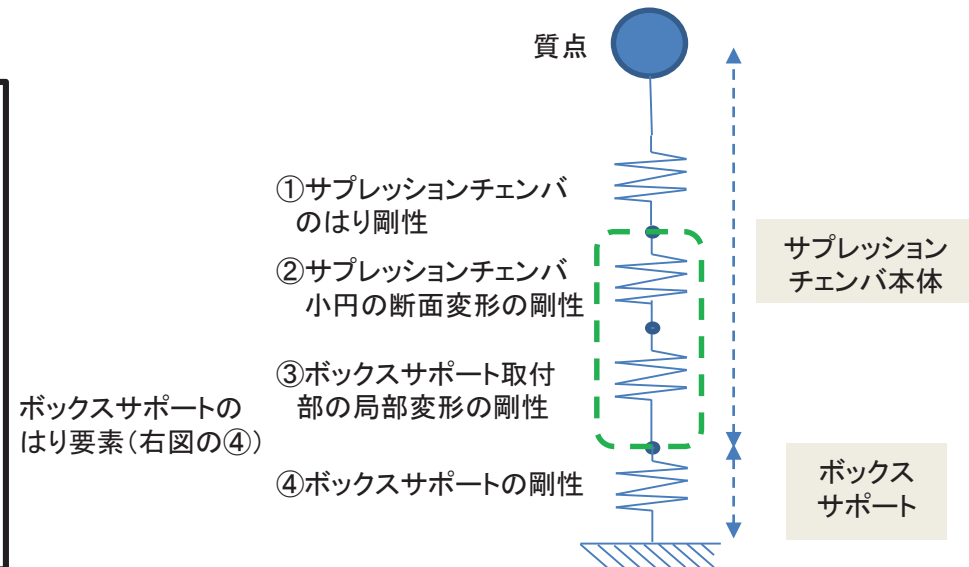
6. 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る検討

6.4 ボックスサポート取付部における局部変形による影響検討(1)

- 設置許可段階では、ボックスサポート取付部の剛性が高いと考えられたことから、地震応答解析モデルにおいては、①サプレッションチェンバのはり剛性及び④ボックスサポートの剛性を考慮していた。
- 今回工認における地震応答解析モデルのモデル化にあたっては、ボックスサポート取付部の局部変形の影響を踏まえ(13頁参照)、③ボックスサポート取付部の局部変形の剛性を考慮する。
- また、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検討結果を踏まえ、②サプレッションチェンバ小円の断面変形の剛性も合わせて考慮する。



設置許可段階での地震応答解析モデル

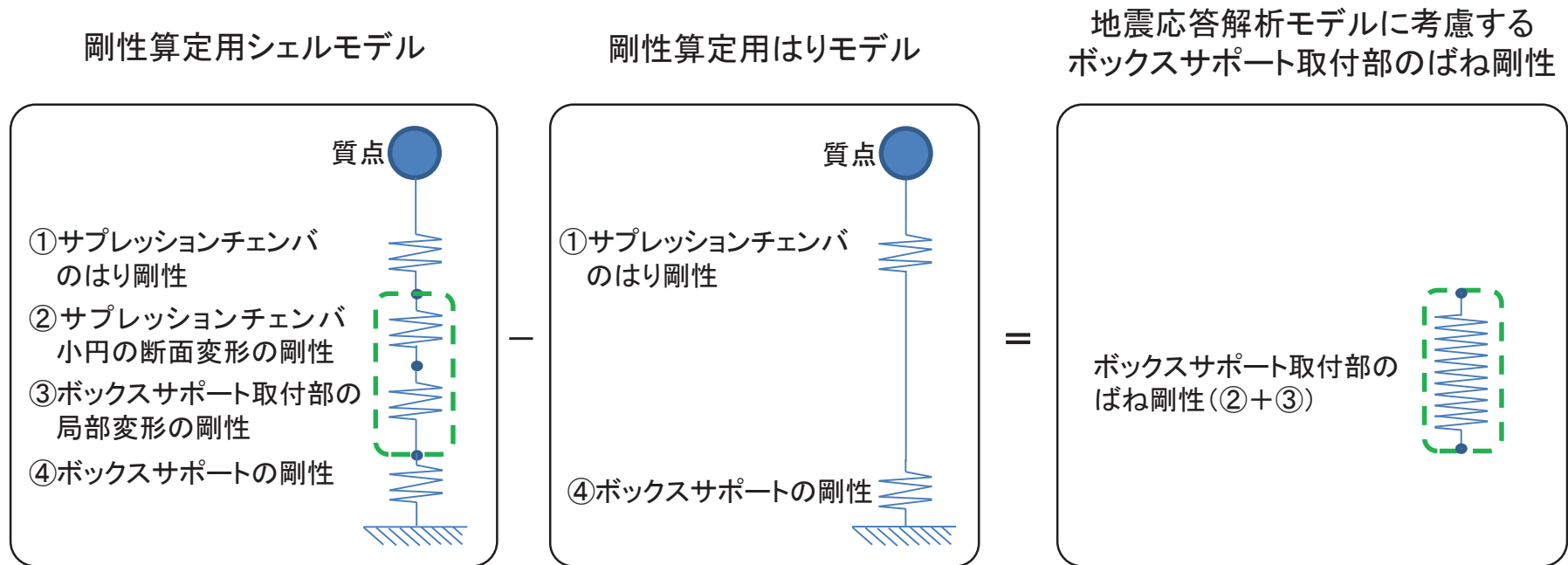


サプレッションチェンバの剛性イメージ

6. 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る検討

6.4 ボックスサポート取付部における局部変形による影響検討(2)

- 今回工認の地震応答解析モデル(3次元はりモデル)に設定するボックスサポート取付部のばね剛性(②サプレッションチェンバ小円の断面変形の剛性及び③ボックスサポート取付部の局部変形の剛性)は、剛性算定用のシェルモデル及びはりモデルを作成し、両者の剛性差から算定した。【参考4】

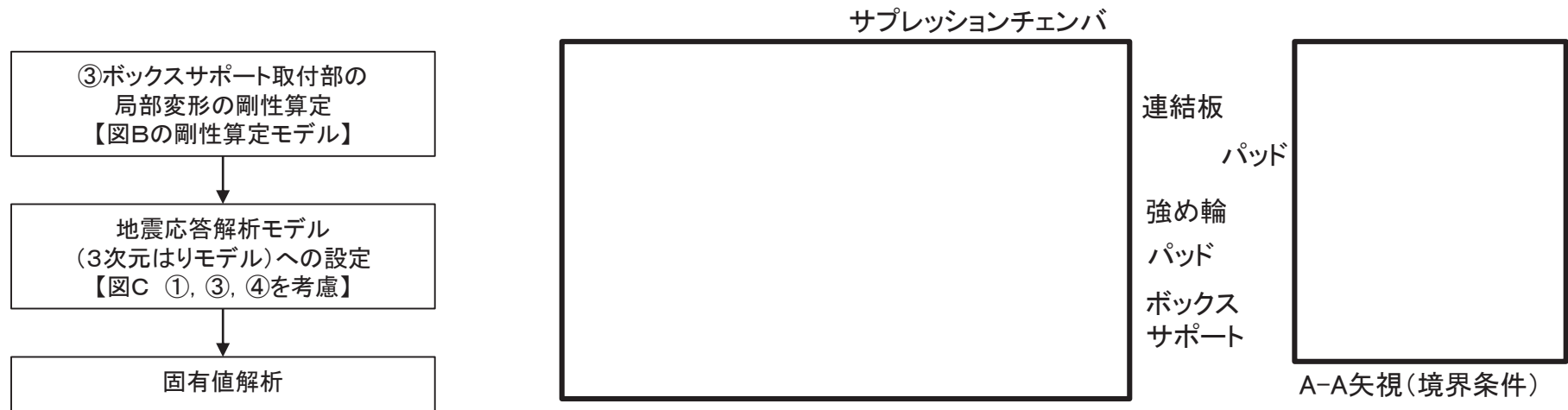


ボックスサポート取付部のばね剛性算定模式図

6. 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る検討

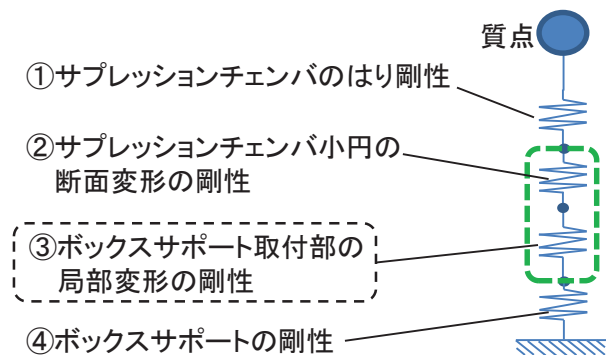
6.4 ボックスサポート取付部における局部変形による影響検討(3)

- ボックスサポート取付部における局部変形の影響を確認するため、③ボックスサポート取付部の局部変形の剛性のみを算定し、地震応答解析モデル(3次元はりモデル)を用いて固有値解析を行った。
- 固有値解析の結果、③ボックスサポート取付部の局部変形の剛性を考慮することで固有周期が変動したことから、ボックスサポート取付部における局部変形による影響があることを確認した。



図A 検討フロー

図B ボックスサポート取付部の局部変形の剛性算定モデル



図C サプレッションチェンバの剛性イメージ

固有周期の比較結果

振動モード	剛性の考慮範囲(図C参照)		
	①+④	①+③+④	【参考】 ①+②+③+④
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

Comparison symbols (比較) are shown between the first two columns for both modes.

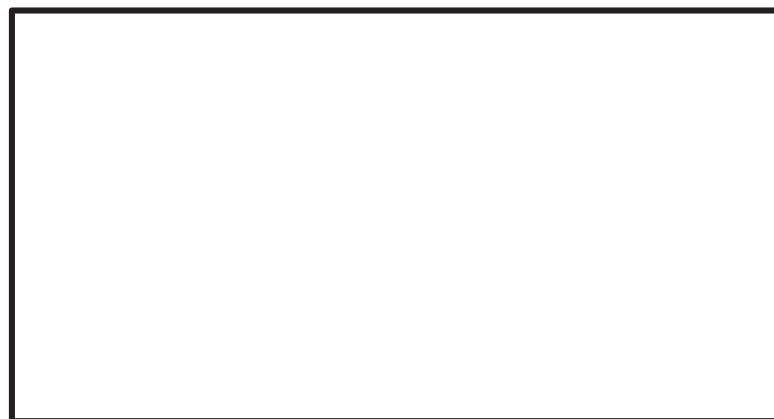
6. 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る検討

6.5 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性確認(1)

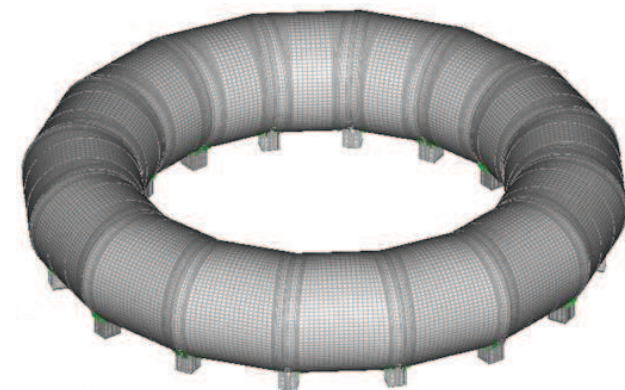
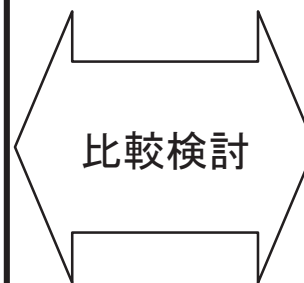
(1) 適用性確認に係る対応方針

- 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)については、「適用性確認用解析モデル(3次元シェルモデル)」との比較検討を行い、以下の観点で、女川2号機への適用性があることを確認する。
 - ・ 耐震評価として考慮すべき振動モード*が概ね同様な傾向であること
 - ・ サプレッションチェンバ及びボックスサポートの発生応力が許容応力の範囲内で同程度であること
 - ・ 最大応力発生部位であるボックスサポート取付部の発生応力が概ね一致すること

*「適用性確認用解析モデル(3次元シェルモデル)」で発生応力に寄与する振動モードを表す。



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)





6. 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る検討

6.5 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性確認(2)

(2) 振動モードの比較結果

➤ 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した。

振動モード比較結果

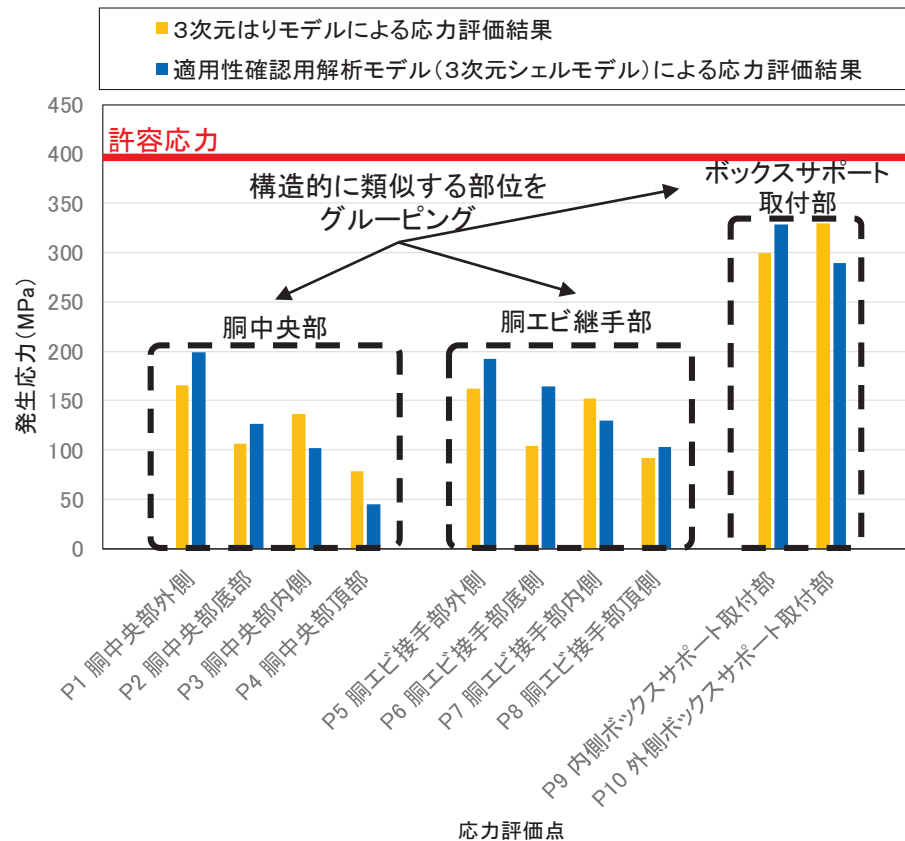
適用性確認用解析モデル(3次元シェルモデル)		3次元はりモデル		振動の特徴	
振動モード (固有周期)	黒線:変形前	振動モード (固有周期)	青線:変形前		
水平1次モード 	平面	水平1次モード 	平面	<p>【適用性確認用解析モデル(3次元シェルモデル)】 水平振動方向前方の小円が上下方向に縮み、後方の小円が上下方向に伸び、全体として加振方向に転倒するモードである。</p> <p>【3次元はりモデル】 水平振動方向前方の小円の断面変形の剛性を考慮したばね要素が上下方向に縮み、後方のばねが上下方向に伸び、全体として加振方向に転倒するモードである。</p>	
	立面		立面		
鉛直1次モード 	平面	鉛直1次モード 	平面		<p>【適用性確認用解析モデル(3次元シェルモデル)】 上下方向に伸縮し振動するモードである。</p> <p>【3次元はりモデル】 小円の断面変形の剛性を考慮したばね要素が上下方向に伸縮し振動するモードである。</p>
	立面		立面		

6. 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る検討

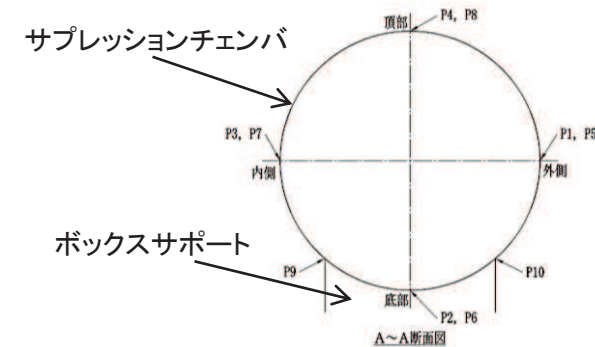
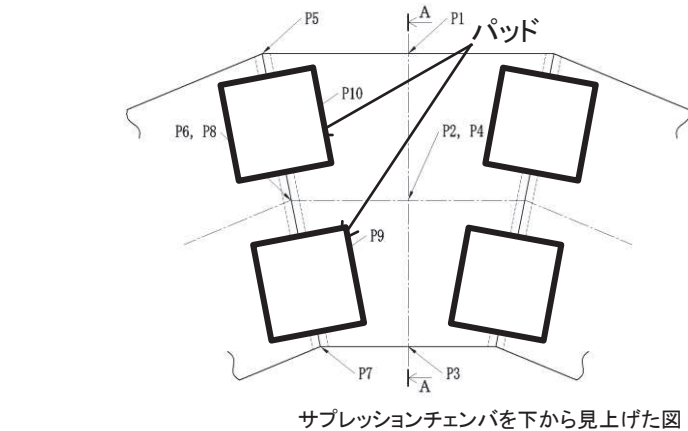
6.5 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性確認(3) - 1

(3) - 1 サプレッションチェンバ本体における発生応力の比較結果

- 応力評価点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。
- 最大応力発生部位であるボックスサポート取付部は、発生応力が概ね一致する。



サプレッションチェンバ本体の応力比較結果



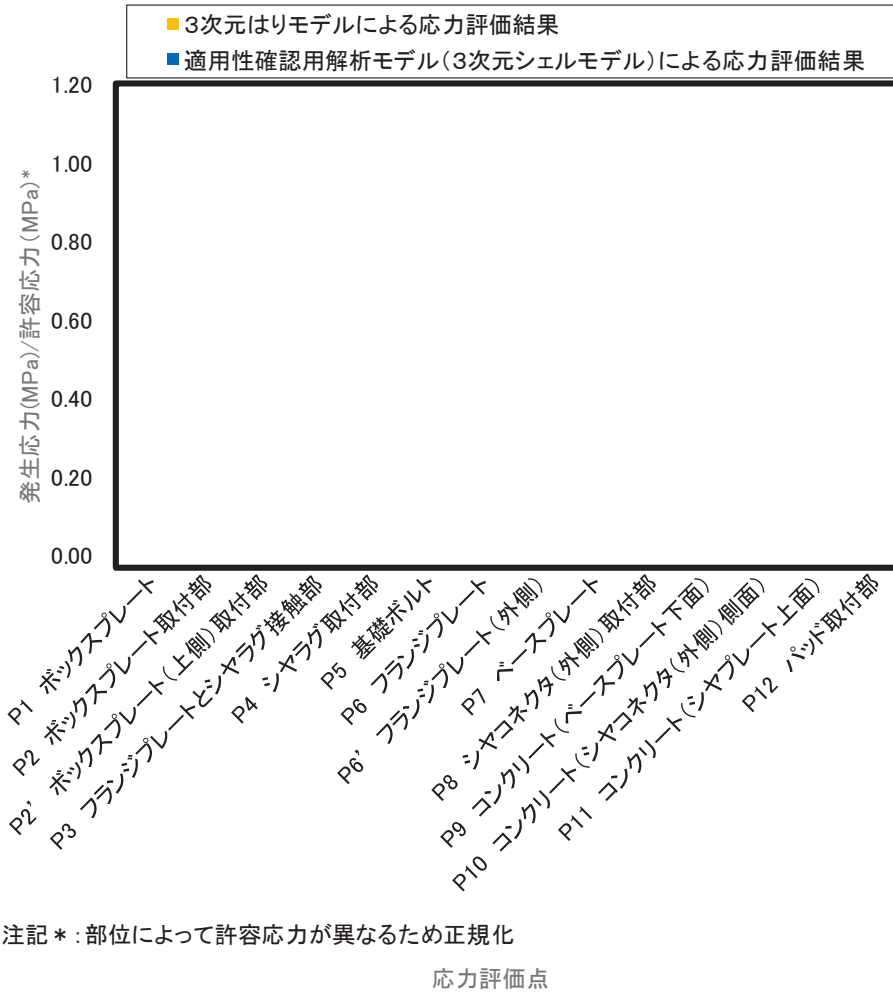
サプレッションチェンバ本体の応力評価点

6. 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性に係る検討

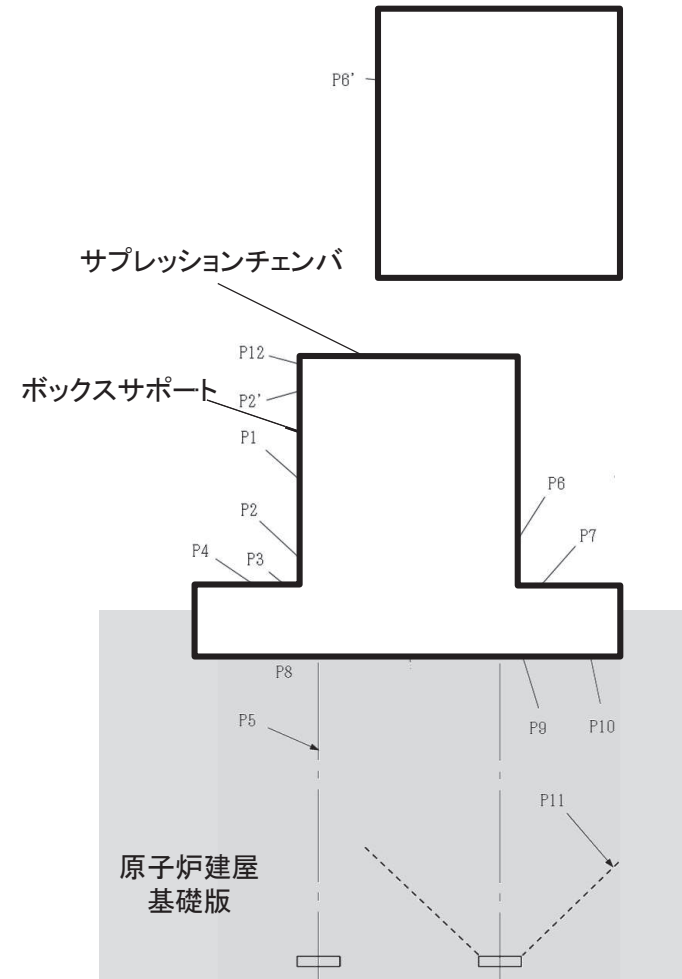
6.5 地震応答解析モデル(3次元はりモデル)の適用性確認(3) - 2

(3) - 2 ボックスサポートの発生応力の比較結果

- 各応力評価点における両者の発生応力の差は小さく、発生応力は許容応力の範囲内で同程度である。



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点

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

7. まとめ

- 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の耐震評価にあたり、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に関して、設置許可段階では考慮されていなかった下記項目に対する検討を実施した。
 - ①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による影響
 - ②ボックスサポート取付部における局部変形による影響
- 上記に係る検討結果は、以下の通り。
 - ①サプレッションチェンバ内部に設置された既設強め輪の効果によって、地震時の発生応力が低減されるものの、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次モードをバルジングの影響として確認した。
 - ②地震応答解析モデル(3次元はりモデル)においては、サプレッションチェンバのボックスサポート取付部に、局部変形の影響及びバルジングによる影響(小円の断面変形の影響)を考慮したばね剛性を設定した。
- 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)については、「適用性確認用解析モデル(3次元シェルモデル)」との比較検討を行い、振動モード、発生応力が同様であり、ともに許容応力を満足することを確認したため、女川2号機への適用性があると判断した。

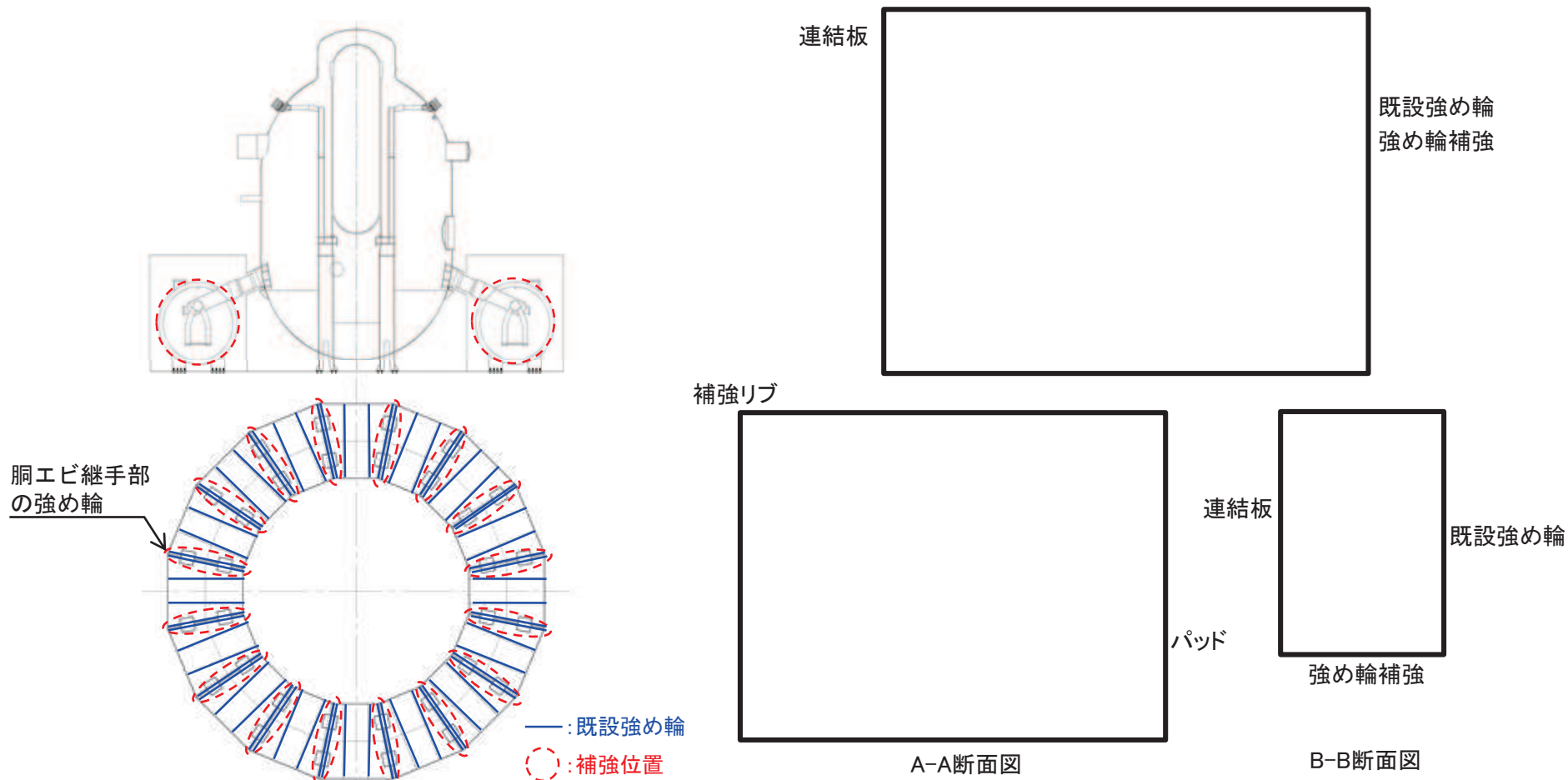
参考資料

- 参考 1 サプレッションチェンバの耐震補強対策
- 参考 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
- 参考 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
- 参考 4 ボックスサポート取付部のばね剛性の算定

【参考1】 サプレッションチェンバの耐震補強対策

(1) サプレッションチェンバ本体

- サプレッションチェンバ本体は、既設強め輪への補強部材追加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、パッド及び補強リブを追加し、地震時の発生応力の低減を図る。

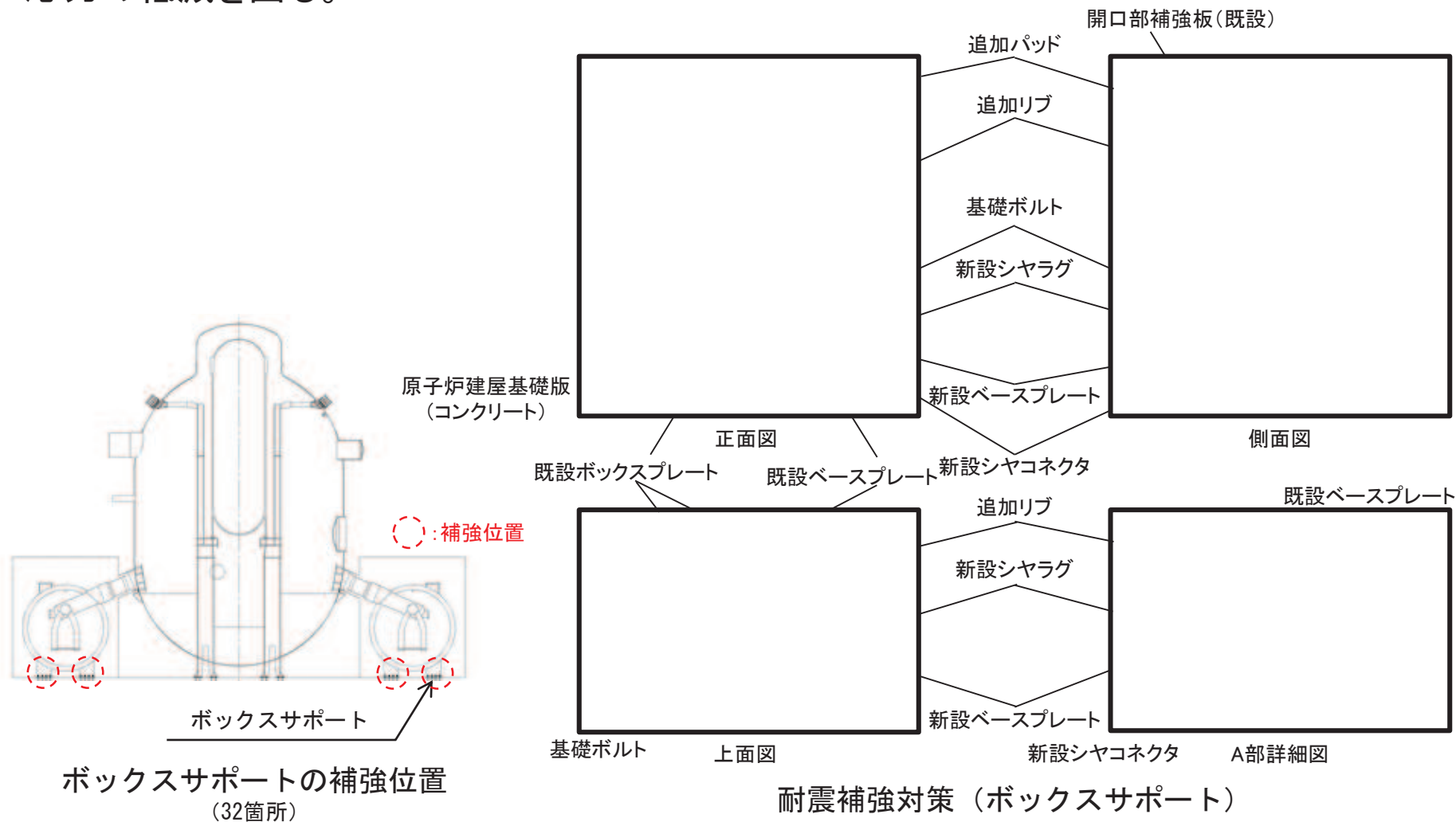


サプレッションチェンバ本体の補強位置
(強め輪64枚中32枚を補強)

耐震補強対策 (サプレッションチェンバ本体)

(2) ボックスサポート

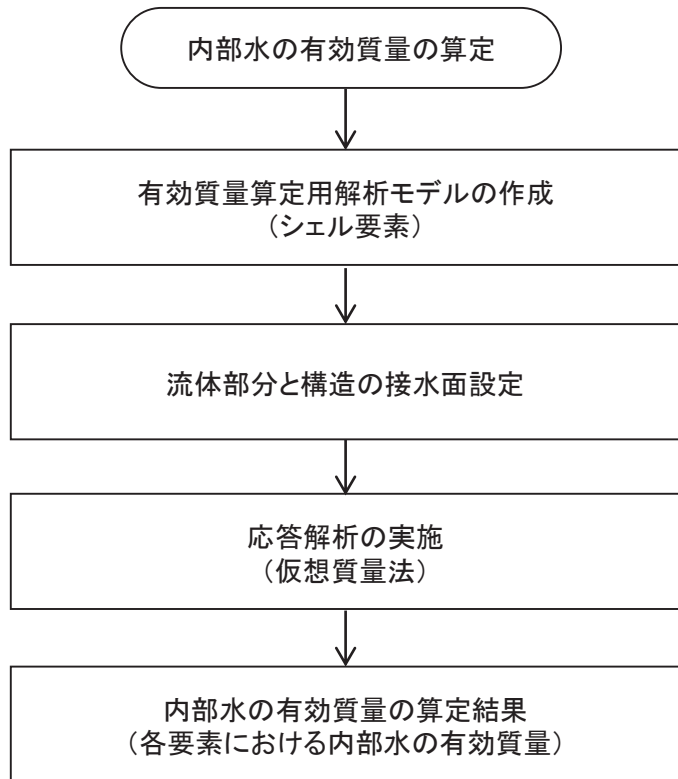
- ボックスサポートは、既設ベースプレート外側に新設ベースプレート、新設シヤコネクタ、新設シヤラグを追加するとともに、既設ボックスプレートに追加リブを追加し、地震時の発生応力の低減を図る。



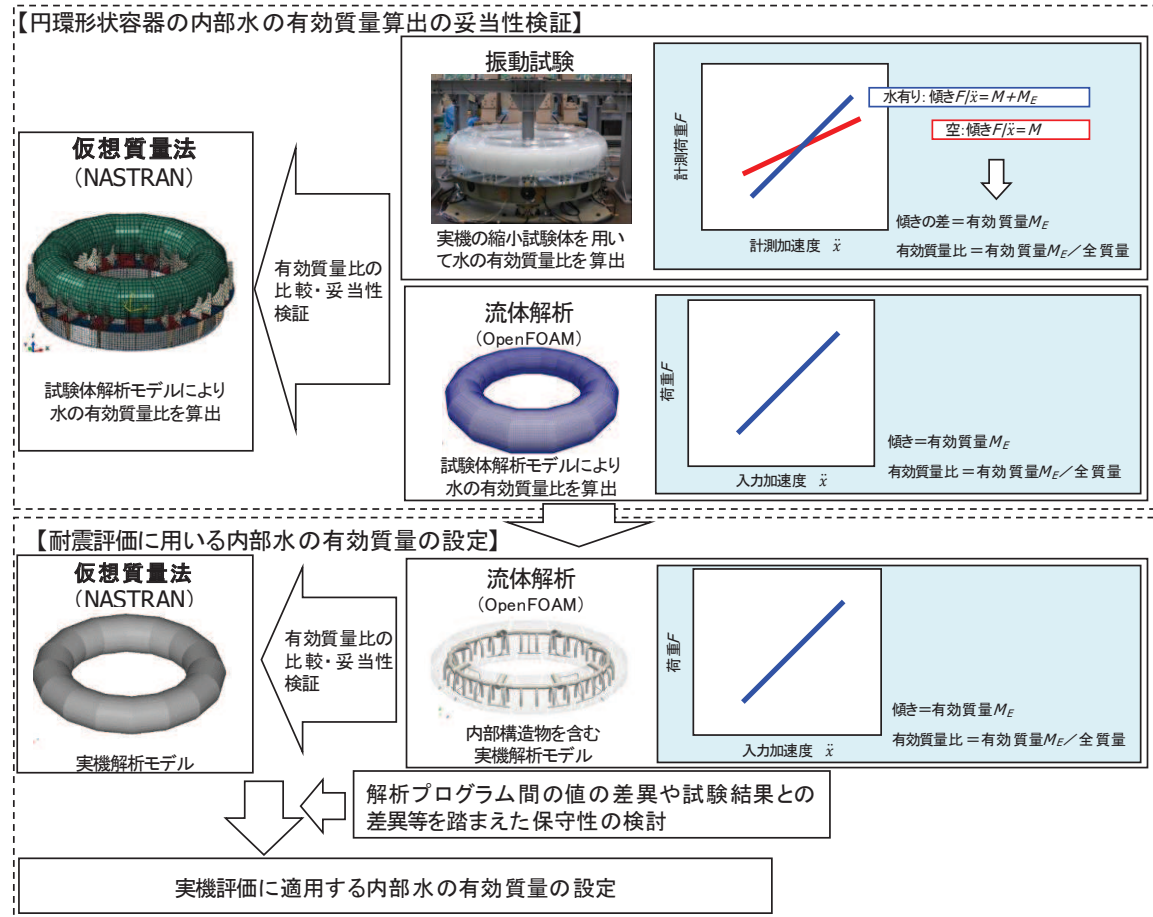
【参考2】 サプレッションチェンバ内部水に対する有効質量の適用

(1) 内部水の有効質量の算定

- サプレッションチェンバ内部水の有効質量は、振動試験及び流体解析との比較により妥当性を確認した汎用構造解析プログラムであるNASTRANの仮想質量法を用いて算定する。



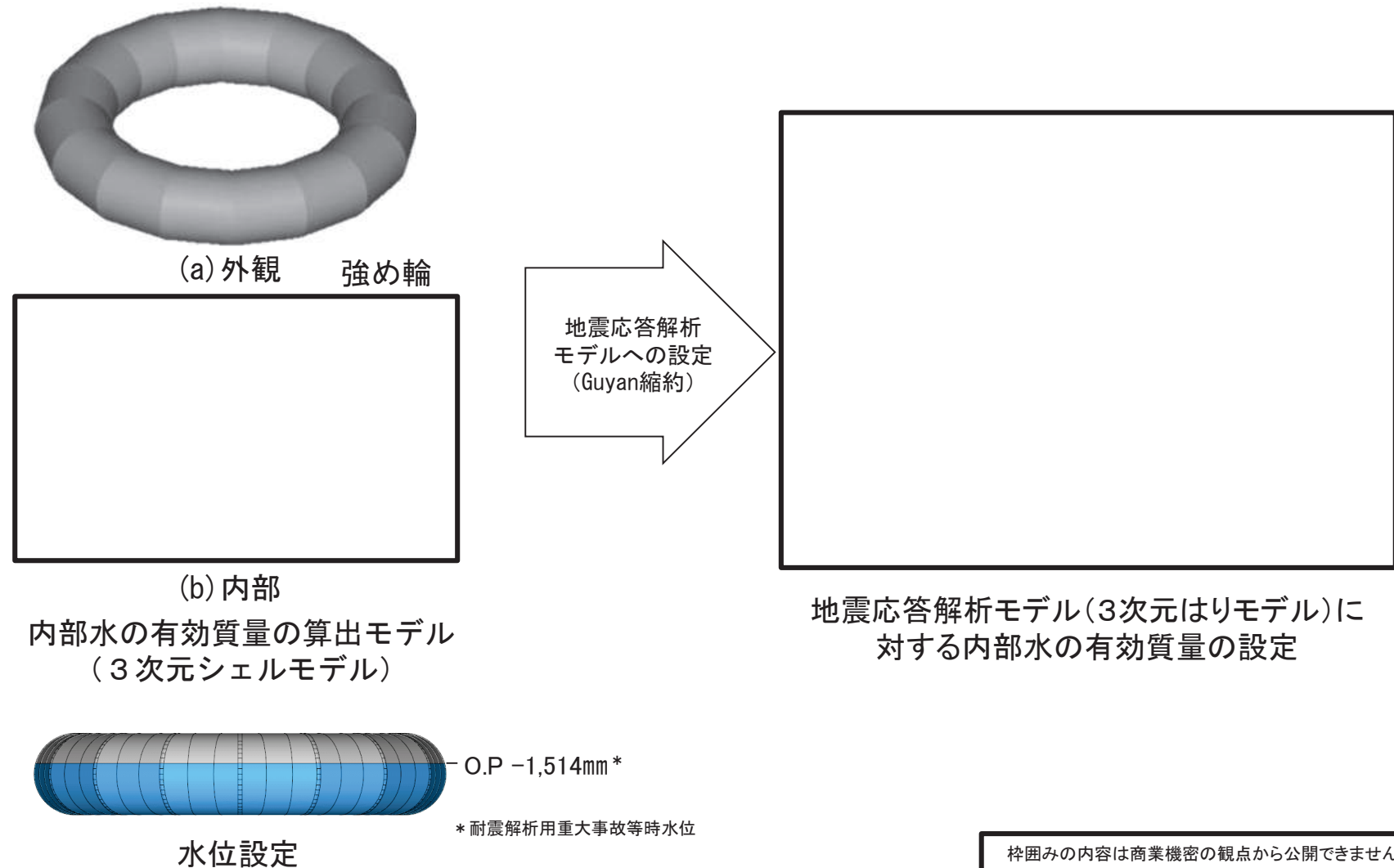
内部水の有効質量の算定フロー



内部水の有効質量算定に係る妥当性確認フロー

(2) 地震応答解析モデルへの内部水の有効質量の設定 (Guyan縮約)

- 仮想質量法を用いて算定した内部水の有効質量は, NASTRANの機能 (Guyan縮約) 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, 設定する。



【参考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

(1) 振動モードの考え方

- サプレッションチェンバの耐震設計では、内部水及び容器の振動モードを考慮し、3次元はりモデルで地震応答解析を実施する。
- 内部水を有する容器に対する既往知見*として、特に薄肉円筒容器(縦置き)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)が生じることが知られている。
- サプレッションチェンバの耐震設計では、ビーム振動を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、オーバル振動については、強め輪によりサプレッションチェンバの円筒(小円)の変形を抑制する考え方であるが、必要により、地震応答解析モデルを詳細化する。

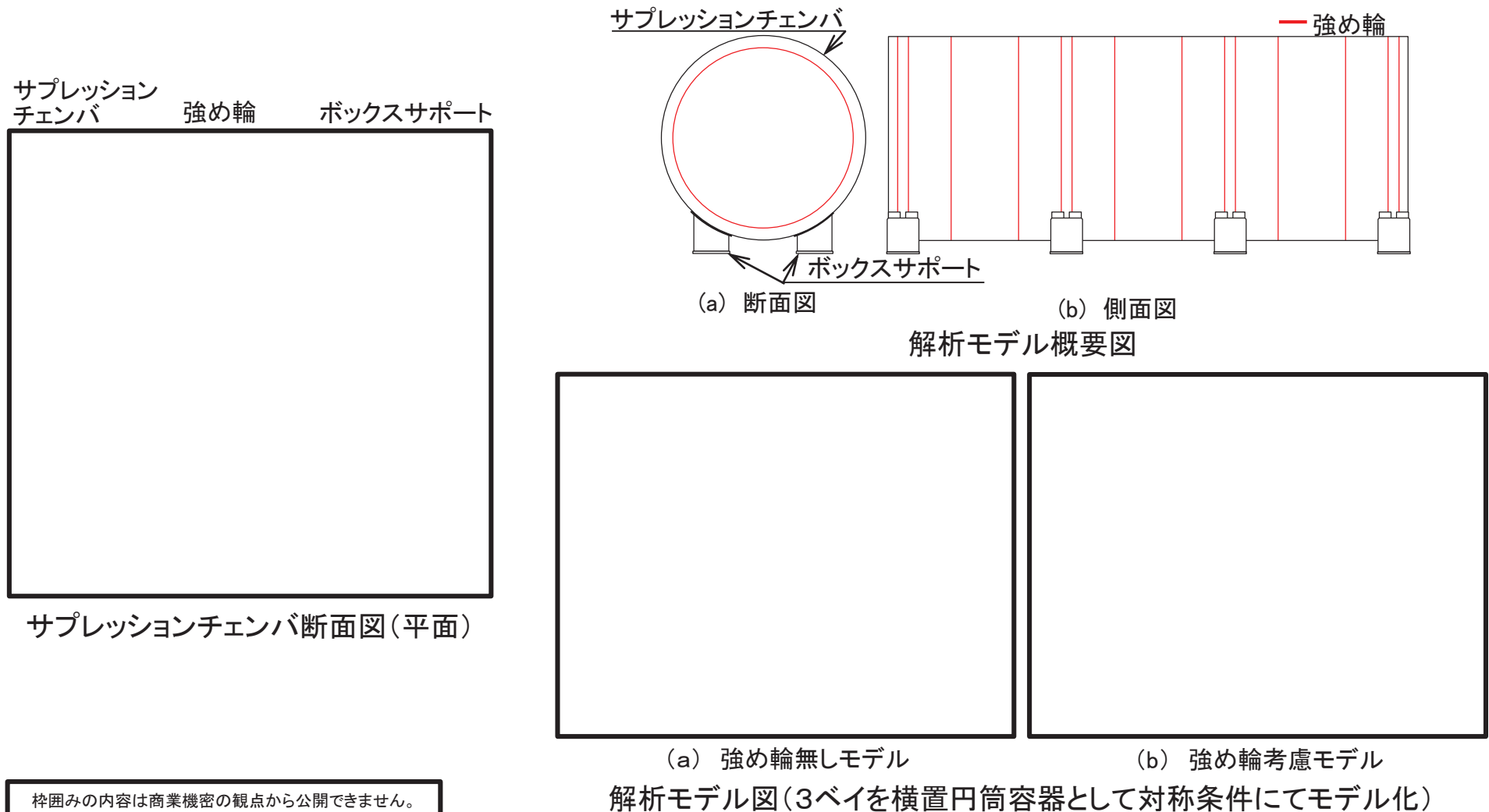
各振動モードに対するサプレッションチェンバの耐震設計の考え方

既往知見に基づく定義		今回検討(横置円筒容器)における振動モード	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		
スロッシング	大きな液面変動を伴い揺動	スロッシング	汎用流体解析コードOpenFOAMにより算出したスロッシング荷重を考慮
バルジング	ビーム振動	ビーム振動(1次モード)	NASTRANにより算出した有効質量を考慮した3次元はりモデルによる地震荷重を考慮
	オーバル振動	低次のオーバル振動(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) 高次のオーバル振動(2次モード以降で花びら状に変形する振動モード)	サプレッションチェンバ内部に強め輪(合計64枚)を取り付け、サプレッションチェンバの円筒(小円)の変形を抑制(サプレッションチェンバのオーバル振動を抑制)

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

(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(解析モデル)

- 下記に示す3次元シェルモデルを用いて、強め輪の有無，内部水の有無を組み合わせた4ケースの固有値解析及び応力解析を行い，バルジングに対する影響検討を実施。



【参考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

(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(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

振動特性の比較結果*

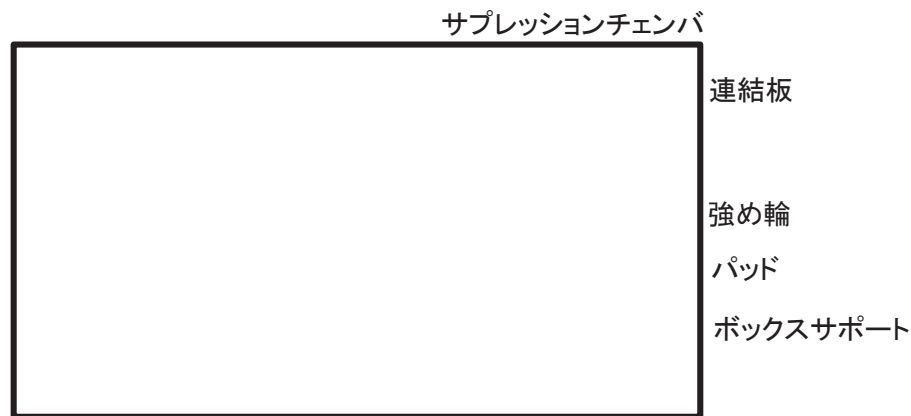
検討ケース		1	2	3	4	
モデル化条件	強め輪	なし	あり	なし	あり	
	内部水	なし	なし	考慮	考慮	
振動モード固有振動数	1次モード (ビーム振動)					
		0.224Hz	4.811Hz	0.179Hz	3.718Hz	
	2次モード (低次オーバル振動)					
		0.578Hz	12.774Hz	0.360Hz	7.521Hz	
3次モード (低次オーバル振動)						
	1.138Hz	25.543Hz	0.717Hz	14.257Hz		
高次オーバル振動 (花びら状の振動)	40Hzまでに105次の振動モードが存在(花びら状の変形は認められない)			30Hzまでに99次の振動モードが存在(花びら状の変形は認められない)		
		15次 35.917Hz			39次 23.330Hz	

* 各モード図は、変形を強調するために最大変位を1mとして示す。

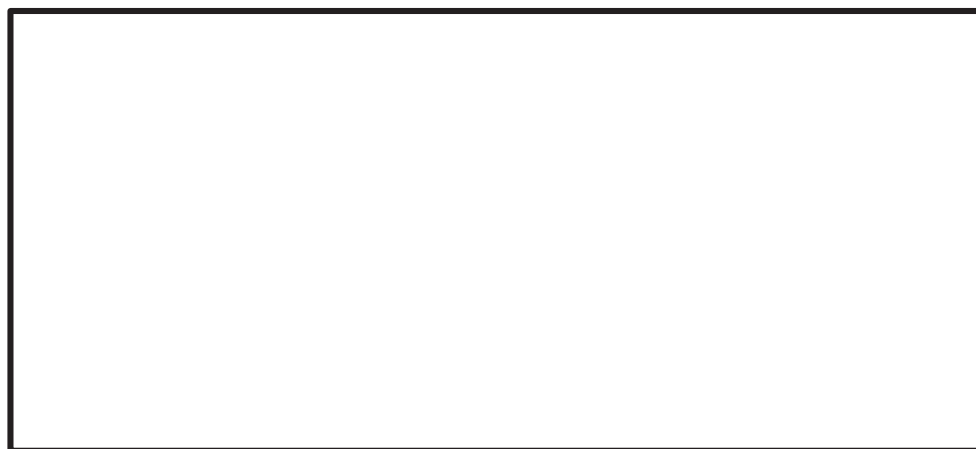
枠囲みの内容は
商業機密の観点
から公開できま
せん。

【参考4】 ボックスサポート取付部のばね剛性の算定 (1)剛性算定用解析モデル

- 今回工認の地震応答解析モデル(3次元はりモデル)に設定するボックスサポート取付部のばね剛性の算定に用いた剛性算定用シェルモデル及びはりモデルは、以下の通り。



(a)解析モデル外観



(b)内部モデル及び境界条件
剛性算定用シェルモデル



剛性算定用はりモデル

【参考4】 ボックスサポート取付部のばね剛性の算定

(2) 剛性算定方法

➤ 剛性算定用のシェルモデルとはりモデルの剛性差によりボックスサポート取付部のばね剛性を算定

剛性算定用シェルモデルのばね剛性算定方法

ばねの成分		荷重, モーメント作用点	ばね剛性の算出方法
並進	大円半径軸 (X)	ボックスサポート取付部に定義した剛体要素の中心に荷重を作用*	
	大円円周軸 (Y)		
	上下軸 (Z)	ボックスサポート下端の剛体要素の中心に荷重, モーメントを作用	
回転	大円半径軸回り (X)		
	大円円周軸回り (Y)		
	上下軸回り (Z)		

剛性算定用はりモデルのばね剛性算定方法

ばね剛性の成分		荷重, モーメント作用点	ばね剛性の算出方法
並進	大円半径軸 (X)	ボックスサポート取付部に荷重を作用	
	大円円周軸 (Y)		
	上下軸 (Z)	ボックスサポート下端に荷重, モーメントを作用	
回転	大円半径軸回り (X)		ボックスサポート取付部の並進変位, 回転角で, 負荷した荷重, モーメントを割ってばね定数を算出
	大円円周軸回り (Y)		
	上下軸回り (Z)		