

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、**主要な振動モードである水平方向（3次）で4.7%とよく一致しており**、鉛直方向（5次）でも**9.6%となることを確認した。**

なお、水平方向に対して鉛直方向における固有周期の差が比較的大きくなる要因は、解析モデル上（3次元はりモデル）、水平方向ではボックスサポート取付部のばね剛性及びサブプレッションチェンバ本体のはり要素で変形を模擬していることに対し、鉛直方向ではボックスサポート取付部のばね剛性によって変形を模擬していることに起因するものと考えられる。

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。

また、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)の荷重を用いてボックスサポートの応力評価点における応力評価結果を表4.2-7及び図4.2-4に示す。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、各応力評価部位の発生応力が互いに大小関係はあるものの、ボックスサポートにおける発生応力の傾向は概ね一致している。

(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、応力評価点における発生応力の傾向が概ね一致していることから、サブプレッションチェンバ及びボックスサポートの地震応答解析として、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：解析対象物が対称な構造物の場合に、解析上現れるモードであって地震時（方向性（水平、鉛直）のある加速度）には励起されないモードである。

表 4.2-3 各振動モードの応力への寄与率

応力	箇所	方位	①グループAの振動モードによる発生応力 (MPa)	②グループA, Bの振動モードによる発生応力 (MPa)	発生応力の割合 ②/①	
サブプレッシャーエンバ	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：解析対象物が対称な構造物の場合に、解析上現れるモードであって地震時（方向性（水平、鉛直）のある加速度）には励起されないモードである。

表 4.2-5 「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)

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 (4/6)

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 (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)

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 4.2-6 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
サブプレッションチェンバの応力比較結果

応力評価点	箇所	方位	①3次元はりモデルによる応力評価結果 (MPa)	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	164	199	393	0.82	2.39
P2		底部	110	127	393	0.87	3.57
P3		内側	142	102	393	1.39	2.76
P4		頂部	78	45	393	1.73	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

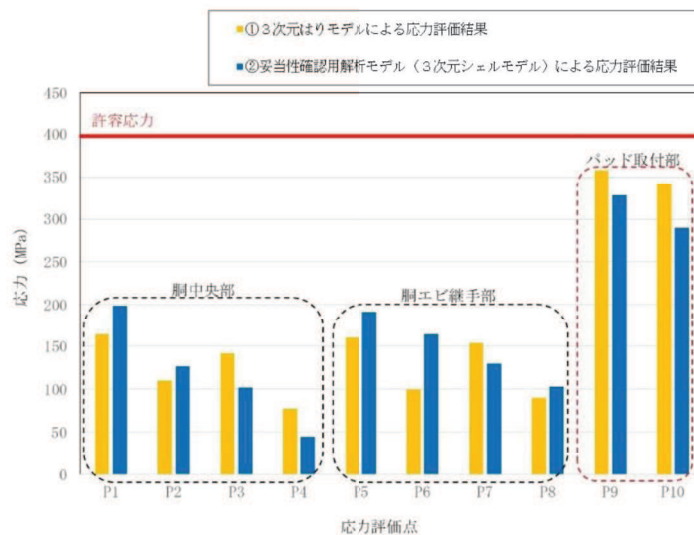


図 4.2-3 3次元はりモデルと3次元シェルモデルによるサブプレッションチェンバの応力比較結果

表 4.2-7 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

ボックスサポートの応力比較結果

応力評価点	箇所	①3次元はりモデルによる応力評価結果 (MPa)	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	③/①
P1	ボックスプレート (一次+二次応力)	277	244		1.14	
P2	ボックスプレート 取付部 (一次+二次応力)	249	242		1.03	
P2'	ボックスプレート (上側) 取付部 (一次+二次応力)	85	80		1.06	
P3	フランジプレートとシヤラグ接触部 (一次+二次応力)	61	58		1.05	
P4	シヤラグ取付部 (一次+二次応力)	91	86		1.06	
P5	基礎ボルト (引張応力)	341	446		0.76	
P6	フランジプレート (一次+二次応力)	227	253		0.90	
P6'	フランジプレート (外側) (一次+二次応力)	142	185		0.77	
P7	ベースプレート (一次+二次応力)	125	137		0.91	
P8	シヤコネクタ (外側) 取付部 (一次+二次応力)	45	42		1.07	
P9	コンクリート (ベースプレート下面) (圧縮応力)	8.91	10.17		0.88	
P10	コンクリート (シヤコネクタ (外側) 側面) (圧縮応力)	20.43	19.28		1.06	
P11	コンクリート (シヤプレート上面) せん断応力	0.67	0.88	0.76		
P12	パッド取付部 (一次+二次応力)	70	66	1.06		

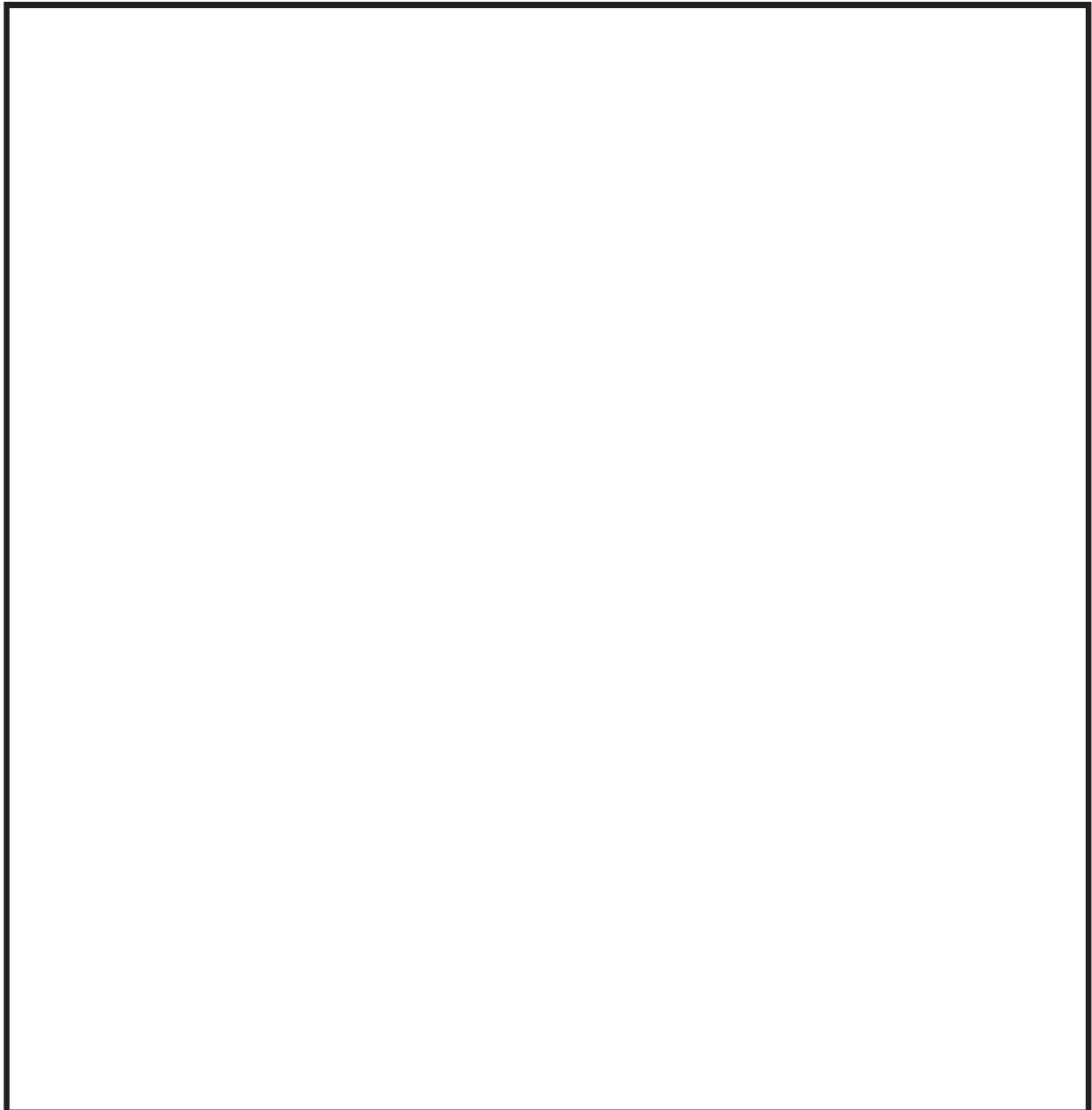


図 4.2-4 3次元はりモデルと妥当性確認用解析モデル（3次元シェルモデル）による
ボックスサポートの応力比較結果

4.3 地震応答解析に係る検討

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

本項では、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項におけるサブプレッションチェンバ内部水の有効質量の算定結果では、NASTRANの仮想質量法と汎用流体解析コードOpenFOAMによる流体解析により算出した有効質量比は概ね一致しているが、仮想質量法により算出した方がやや大きい傾向があり、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。

サブプレッションチェンバ内部水の有効質量は、サブプレッションチェンバ及びボックスサポートの固有値に関連することから、耐震評価に用いる地震荷重としての保守性の観点から、解析手法間(仮想質量法と流体解析)の差異による固有値と設計用床応答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項で算定した仮想質量法の有効質量比(0.33)及び流体解析の有効質量比(0.32)の関係(仮想質量法>流体解析)から、流体解析の場合における主要な振動モードの固有周期は、仮想質量法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(仮想質量法<流体解析)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、サブ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、流体解析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、サブ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(仮想質量法と流体解析)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。

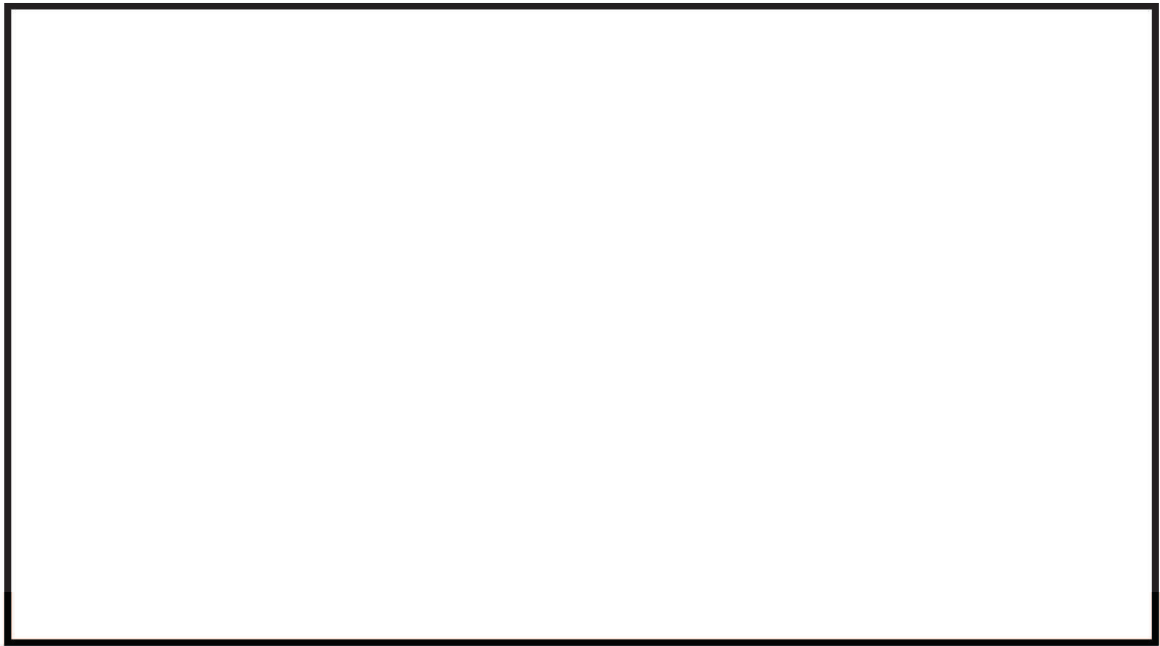


図 4.3-1 設計用床応答スペクトルと固有周期の比較

(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。

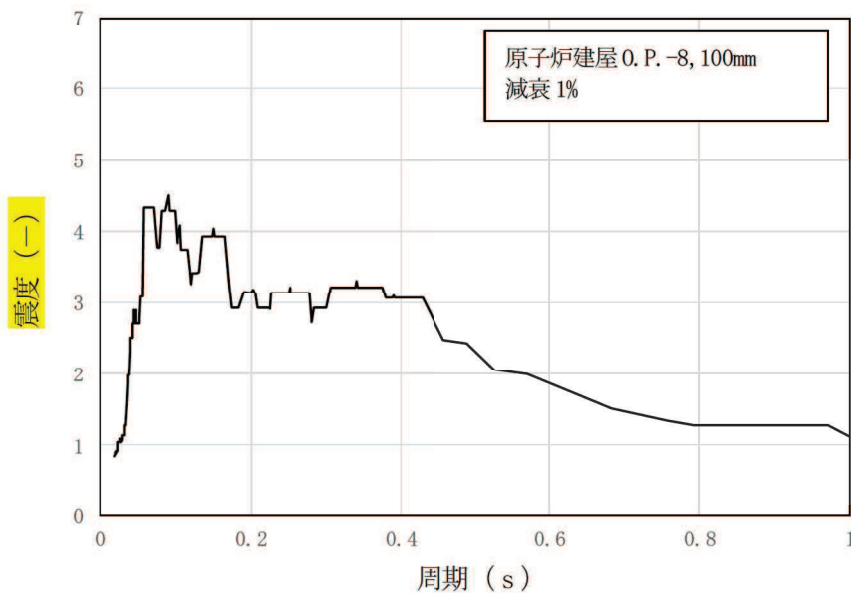


図4.3-2 床応答スペクトル(高振動数領域を考慮(0.02~1秒))

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	174	174	257
胴エビ継手部内側 (P7)	一次膜応力 +一次曲げ応力	159	159	386
外側ボックスサポート取付部 (P10)	一次+二次応力	342	342	393
ボックスプレート (上側) 取付部 (P2')	一次+二次応力 (せん断)	85	85	

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等時水位とした。また、地震動の入力条件は、スロッシングの固有周期帯の応答加速度が比較的大きく、継続時間の長い S s - 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。

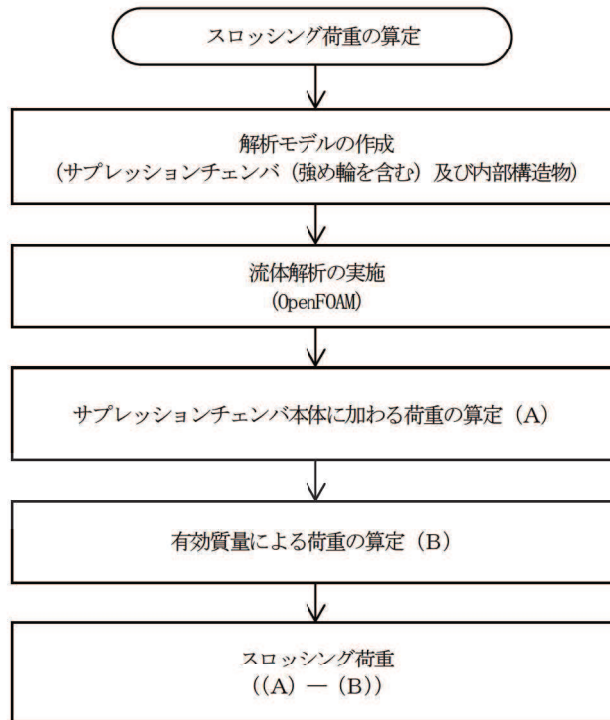


図 4.4-1 スロッシング荷重算定フロー

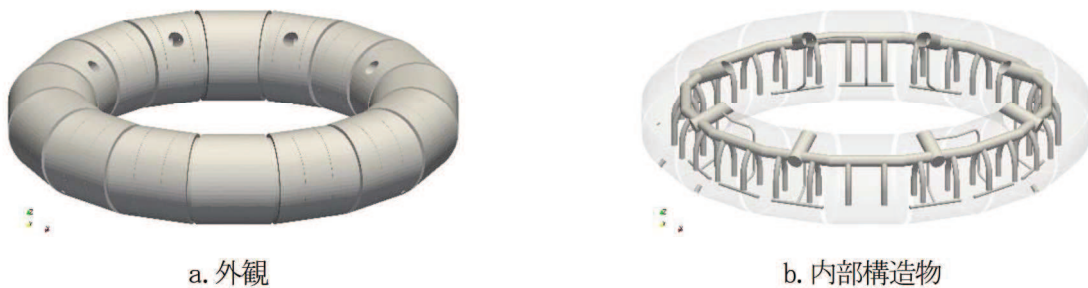


図 4.4-2 流体解析モデル

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等時水位 (真空破壊装置下端水位)	$3.21 \times 10^3 \text{ kN}$		重大事故等対処設備 としての評価

5. 応力解析の詳細

5.1 応力評価フロー

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

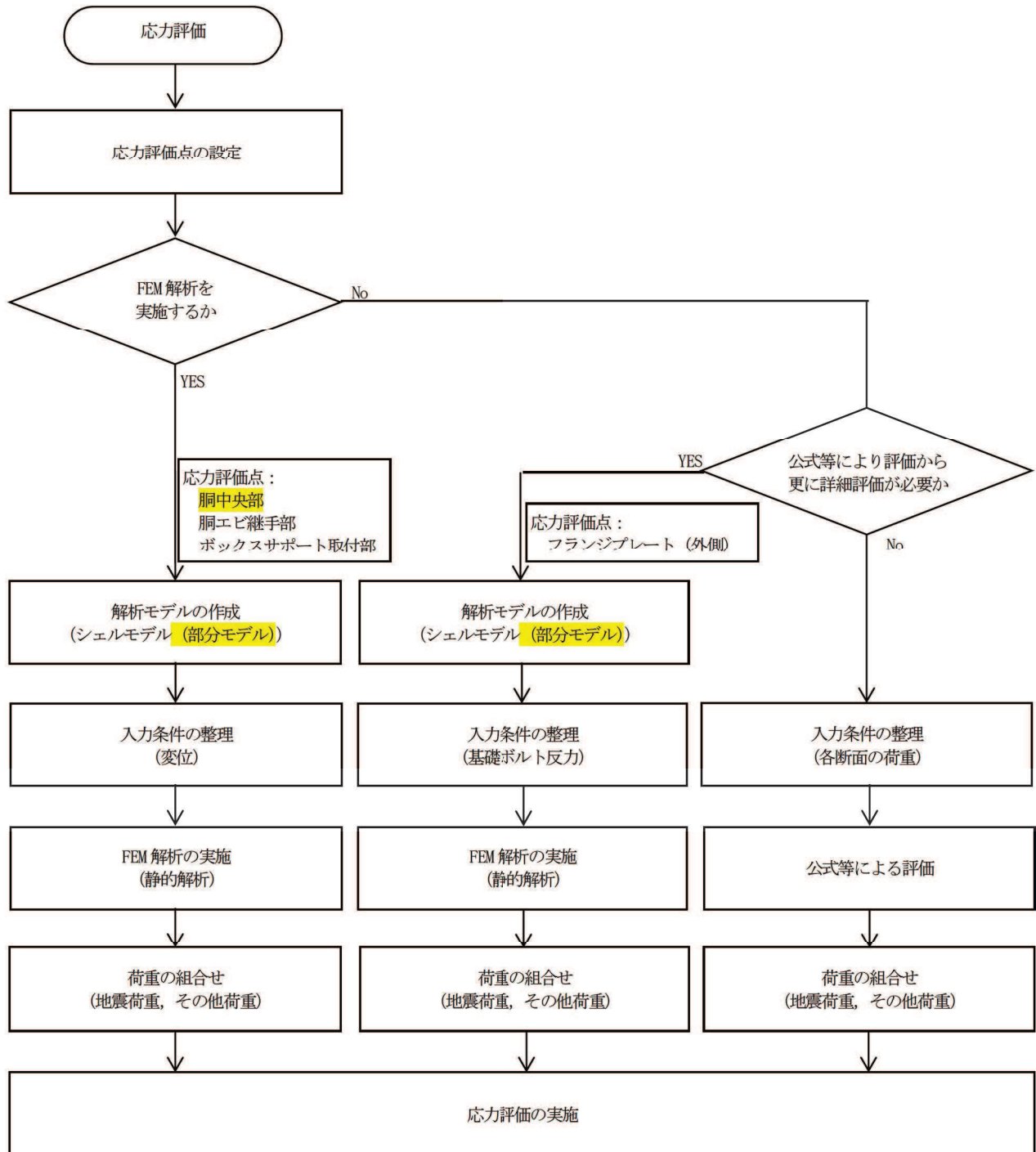


図 5.1-1 応力評価フロー

5.2 応力評価点

サ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 サプレッションチェンバの応力評価点

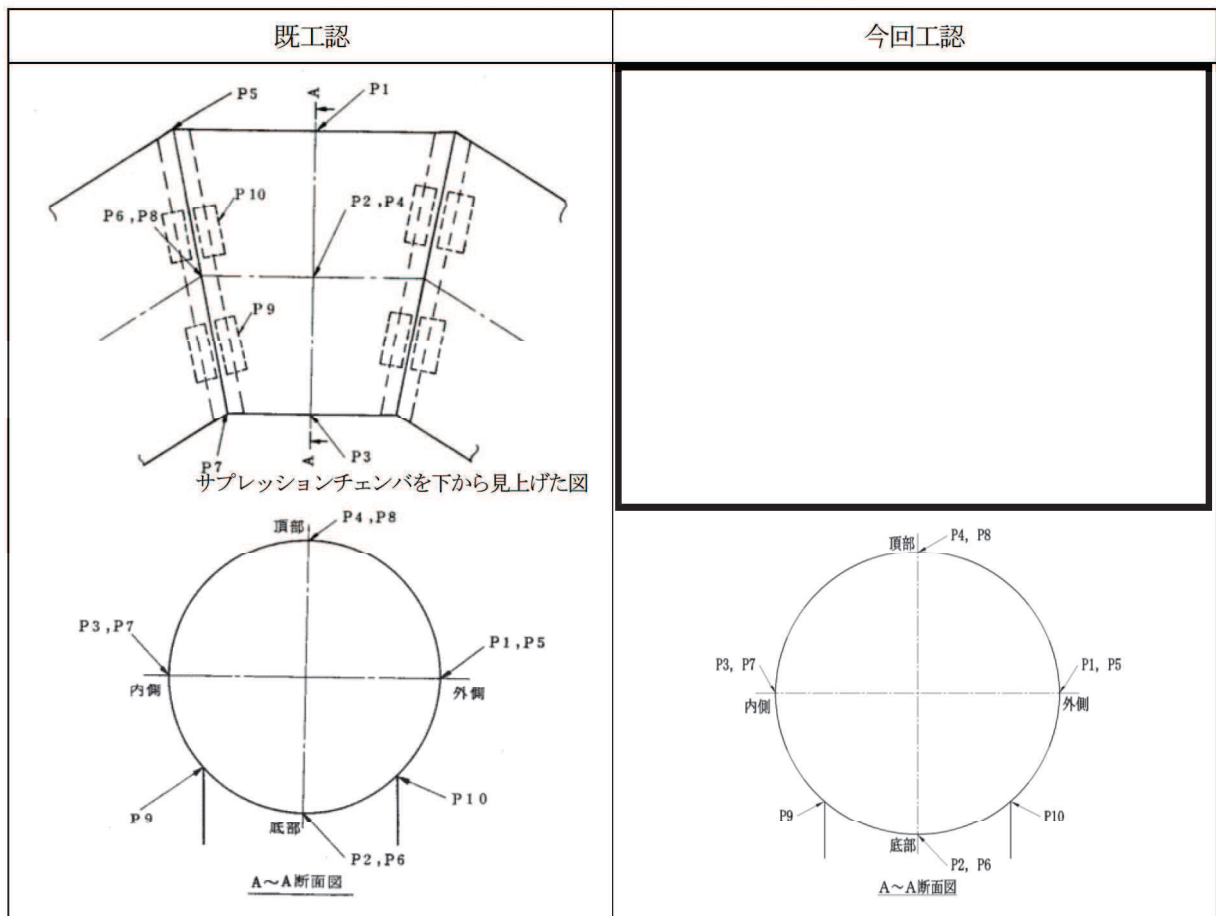
既工認及び今回工認における応力評価点を表 5.2-1 及び表 5.2-2 に示す。応力評価点 P9 及び P10(内側及び外側ボックスサポート取付部)については、今回工認における耐震補強対策による効果を踏まえ追加したパッド部の評価点を見直した。

表 5.2-1 サプレッションチェンバの応力評価点

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

注記* : 耐震補強対策を考慮して評価断面位置を変更する

表 5.2-2 サプレッションチェンバの応力評価点



5.2.2 ボックスサポートの応力評価点

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

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

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

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

表 5.2-3 ボックスサポートの応力評価点

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

注記* : 耐震補強対策を考慮して評価断面位置を変更する。

表 5.2-4 ボックスサポートの応力評価点

既工認	今回工認

5.3 応力解析モデル

5.3.1 サプレッションチェンバの応力解析モデル

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

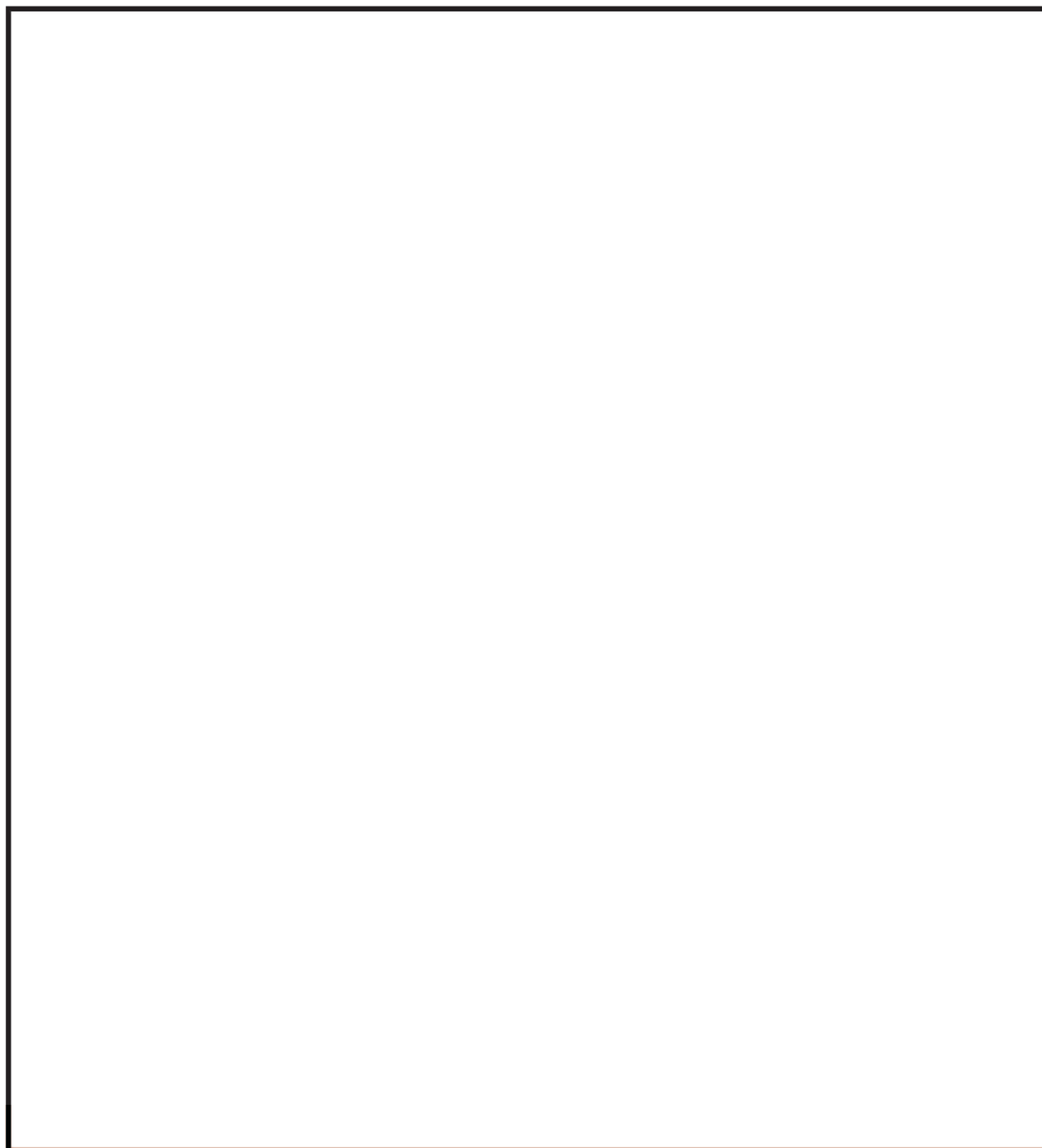


図 5.3-1 応力解析モデル

5.3.2 フランジプレート（外側）の応力解析モデル

フランジプレート（外側）の応力評価に用いる応力解析モデルは、ボックスプレート、フランジプレート及び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。

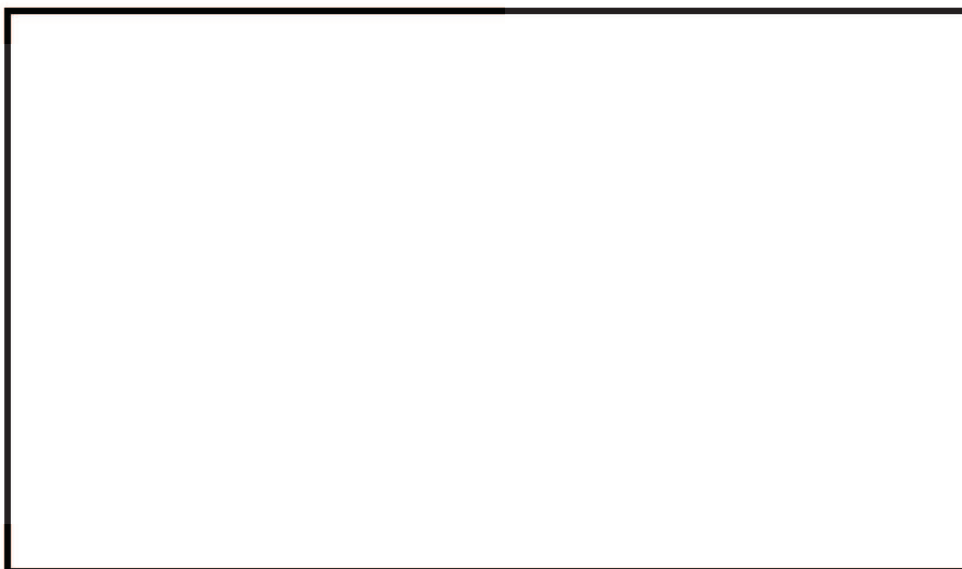


図 5.3-2 フランジプレート（外側）の構造図



図 5.3-3 フランジプレート（外側）の応力解析モデル

5.4 応力評価

5.4.1 サプレッションチェンバの応力評価

サプレッションチェンバは、**応力解析**による応力評価を行う。

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

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。

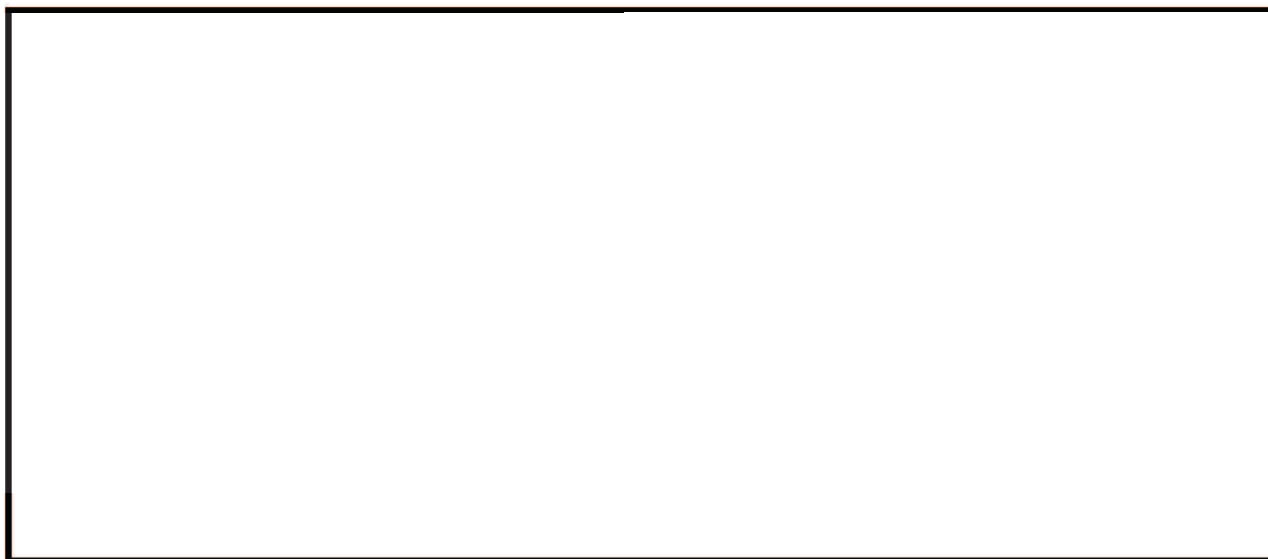


図 5.4-1 地震応答解析における変位抽出点



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

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

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

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

ボックスサポートの地震応答解析における荷重抽出点を図5.4-3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

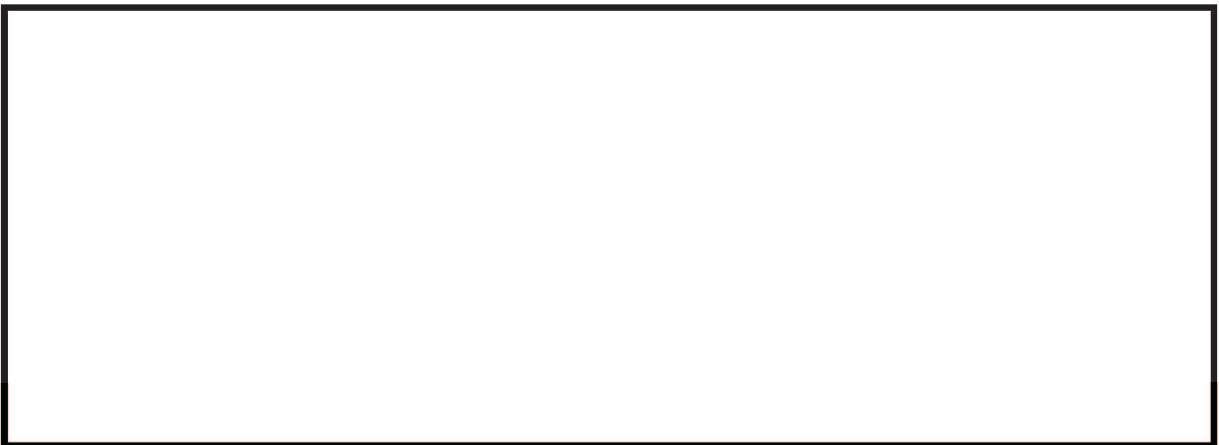


図 5.4-4 3次元 FEM 解析モデル解析条件

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 $\pm 10\%$ 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	解析モデル	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 の仮想質量法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。
	構造部分	なし	サブプレッションチェンバをはり要素にてモデル化。	サブプレッションチェンバ及びボックスササポートをはり要素によるモデル化にあたり, ボックスササポート取付部にばね剛性を考慮し, ボックスササポートの剛性の詳細化及び基礎ボルトをモデル化することでより, 詳細に地震応答を把握する。
	解析方法	入力地震動等の不確かさ	簡便な扱いとして, サプレッションチェンバ全体を見做し, 静的解析を適用。	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内部水の増加, 解析モデルの詳細化を踏まえた固有周期を考慮し, 動的解析 (スペクトルモード解析) 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。
応力解析	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。
	ボックスササポート取付部 (胴中央部, 胴エビ継手部含む)	なし	ボックスササポートと隣接するサブプレッションチェンバ () をシエール要素でモデル化し, 地震荷重等を解析モデルに入力した静的解析を実施。特段の保守性の考慮なし。	地震応答解析モデルに考慮したボックスササポート取付部のばね剛性算定用のシエー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, フランジプレートと境界条件を見直し, 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の方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, サプレッションチェンバ全体の力のつり合いに基づき基礎ボルトの応力を算出した。構造をより詳細にモデル化したものであり, 特段の保守性の考慮なし。	

7. サプレッションチェンバ及びボックスサポートの耐震評価結果

設計基準対象施設及び重大事故等対処設備としてのサプレッションチェンバの応力評価結果を表 7-1, ボックスサポートの応力評価結果を表 7-2 に示す。いずれの応力評価結果も算出応力が許容応力を満足することを確認した。

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

表 7-1 サプレッションチェンバの応力評価結果

応力評価点番号	応力評価点	応力分類	設計基準 対象施設		重大事故等 対処設備	
			算出応力	許容応力	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	58	258	204	257
		一次膜応力+一次曲げ応力	58	387	204	386
		一次+二次応力	94	393	164	393
P2	胴中央部底部	一次一般膜応力	58	258	174	257
		一次膜応力+一次曲げ応力	58	387	174	386
		一次+二次応力	68	393	110	393
P3	胴中央部内側	一次一般膜応力	53	258	193	257
		一次膜応力+一次曲げ応力	53	387	193	386
		一次+二次応力	80	393	142	393
P4	胴中央部頂部	一次一般膜応力	26	258	160	257
		一次膜応力+一次曲げ応力	26	387	160	386
		一次+二次応力	42	393	78	393
P5	胴エビ継手部 外側	一次膜応力+一次曲げ応力	41	387	116	386
		一次+二次応力	90	393	160	393
P6	胴エビ継手部 底部	一次膜応力+一次曲げ応力	86	387	105	386
		一次+二次応力	58	393	100	393
P7	胴エビ継手部 内側	一次膜応力+一次曲げ応力	50	387	159	386
		一次+二次応力	84	393	154	393
P8	胴エビ継手部 頂部	一次膜応力+一次曲げ応力	28	387	111	386
		一次+二次応力	48	393	90	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	122	387	214	386
		一次+二次応力	210	393	358	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	129	387	261	386
		一次+二次応力	200	393	342	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）	83		149	
		一次応力+二次応力（組合せ）	164		277	
P2	ボックスプレート 取付部	一次応力（組合せ）	86		137	
		一次応力+二次応力（組合せ）	154		249	
P2'	ボックスプレート （上側）取付部	一次応力（組合せ）	59		92	
		一次応力+二次応力（せん断）	51		85	
P3	フランジプレート とシヤラグ接触部	一次応力（支圧）	37		61	
		一次応力+二次応力（支圧）	37		61	
P4	シヤラグ取付部	一次応力（組合せ）	71		118	
		一次応力+二次応力（座屈）	55		91	
P5	基礎ボルト	引張応力	239		341	
P6	フランジプレート	一次応力（組合せ） （ボルト反力側）	66		94	
		一次応力（組合せ） （コンクリート反力側）	78	135		
		一次応力+二次応力（組合せ）	134	227		
P6'	フランジプレート （外側）	一次応力（組合せ）	137	147		
		一次応力+二次応力（座屈）	134	142		
P7	ベースプレート	一次応力（組合せ）	77	130		
		一次応力+二次応力（座屈）	74	125		
P8	シヤコネクタ （外側）取付部	一次応力（組合せ）	63	105		
		一次応力+二次応力（せん断）	27	45		
P9	コンクリート（ベ ースプレート下 面）	圧縮応力	5.36	8.91		
P10	コンクリート（シ ヤコネクタ（外側） 側面）	圧縮応力	12.2	20.43		
P11	コンクリート（シ ヤプレート上面）	せん断応力	0.47	0.67		
P12	パッド取付部	一次応力（組合せ）	50	76		
		一次応力+二次応力（せん断）	42	70		

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 7-3 荷重伝達の広がり を考慮した評価

応力評価点		運転状態	算出応力 (MPa)	工認計算書記載値		追加検討結果	
				応力分類	許容応力 (MPa)	応力分類	許容応力 (MPa)
P10	コンクリート (シヤコネクタ (外側側面))	V _A S	20.43	圧縮		支圧	

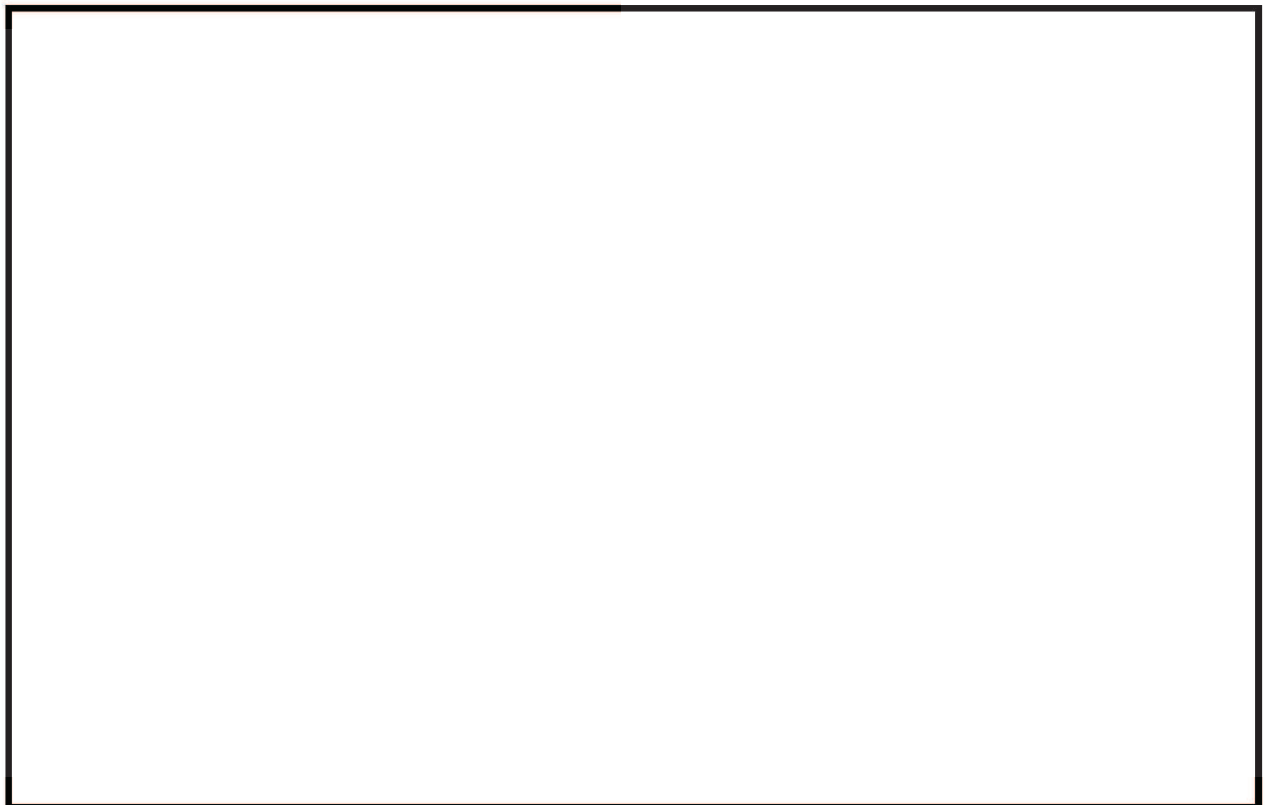


図 7-1 荷重伝達のイメージ

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を用いた仮想質量法（以下、仮想質量法という。）（別紙7参照）にて算出する。

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）。

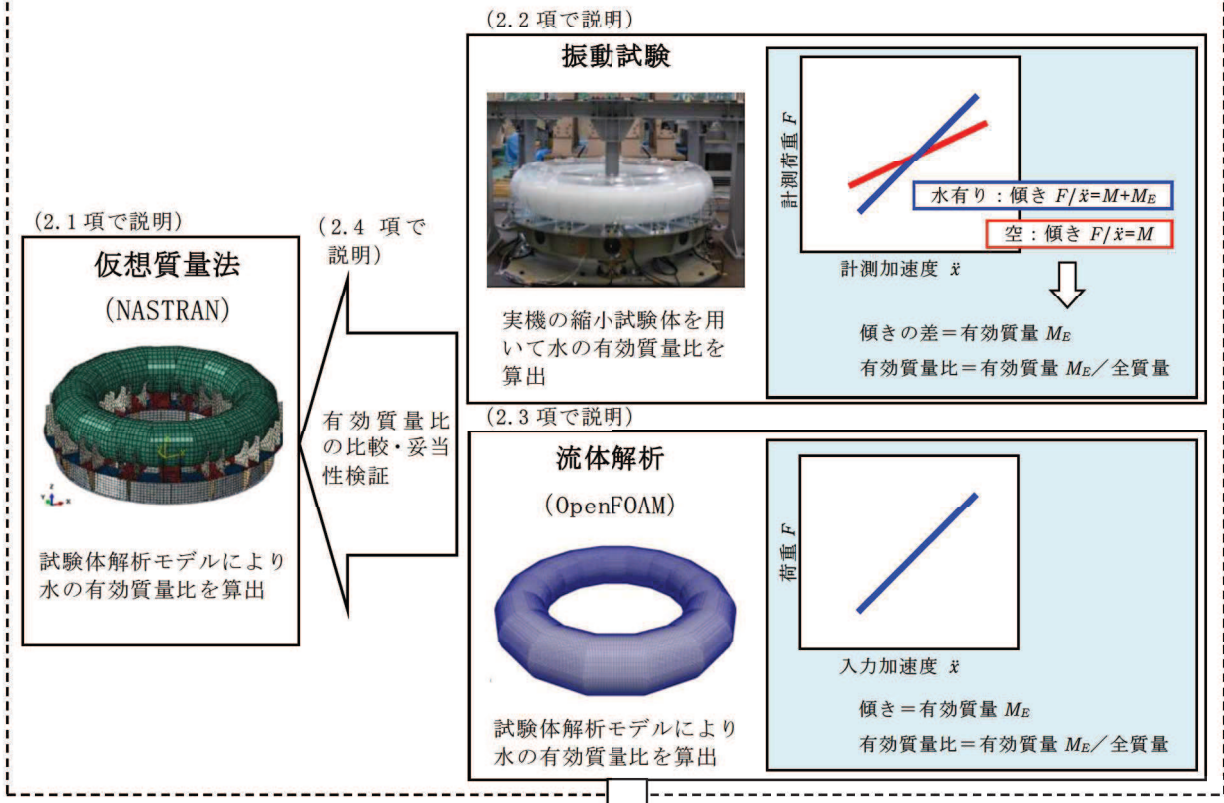
有効質量は、他産業の耐震設計において一般的に取り入れられている考え方である（別紙9参照）。

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仮想質量法を用いるため、その妥当性検証として、サプレッションチェンバの内部構造物を除いた円環形状容器のモデルに対して仮想質量法にて有効質量を求め、実機を縮小模擬した試験体（前述の仮想質量法に用いる解析モデルと同様）を用いた振動試験及び流体解析（汎用流体解析コードOpenFOAM（別紙7参照））により算出した有効質量と比較、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、先に検証した仮想質量法により算出した値に対して、内部構造物を含む解析モデルに対する流体解析により算出した値と比較、検証した上で、解析プログラム間の値の差異や試験結果との差異等を踏まえて仮想質量法で算出された値の保守性を検討し、設定する。（3項にて説明）

仮想質量法によるサプレッションチェンバ内部水の有効質量算出の妥当性検証及び女川2号機サプレッションチェンバの耐震評価に用いる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。

【円環形状容器の有効質量算出の妥当性検証】



【耐震評価に用いる有効質量の設定】

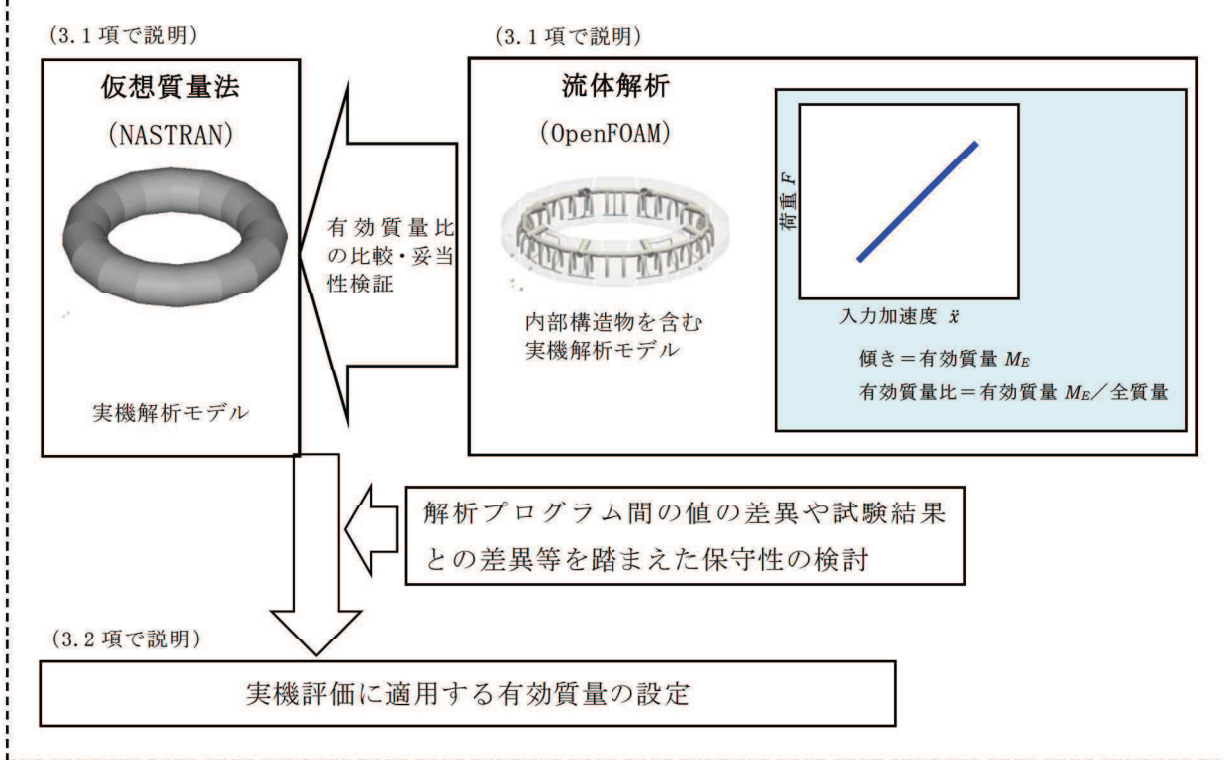


図1 仮想質量法によるサプレッションチェンバ内部水の有効質量算出の妥当性検証及び女川2号機のサプレッションチェンバの耐震評価に用いる有効質量の設定の流れ

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**仮想質量法**を用いることの妥当性検証として、振動試験及び**流体解析**により算出した有効質量比と比較する。

2.1 **仮想質量法**による試験体解析モデルの有効質量比の算出

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

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

2.1.1 検討対象

女川2号機のサプレッションチェンバを対象とし、**仮想質量法**による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。

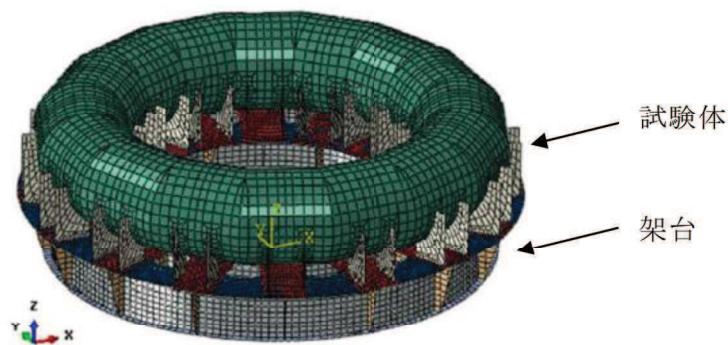


図2 構造解析モデル（試験体解析モデル）

2.1.3 解析結果

仮想質量法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 仮想質量法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: 重大事故等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仮想質量法を用いることの妥当性を検証するため、実機を縮小模擬した円環形状容器の試験体を用いて振動試験を行い、試験データから有効質量比を算出したうえで、仮想質量法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、強め輪やダウンコマ等の内部構造物は、試験体に模擬していない。

振動台上に試験体を支持する架台を設け、架台の脚部には水平及び鉛直方向の反力を測定可能な分力計を4台設置した。架台は、内部水からの荷重を分力計に確実に伝達させるため強固なものとし、ボックスサポートは模擬していない。試験装置の概要を図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 ($L = 9,400/380 = 24.7$)