

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密あるいは防護上の観点
から公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-340-13 改 32
提出年月日	平成 30 年 9 月 4 日

工事計画に係る補足説明資料

耐震性に関する説明書のうち

補足-340-13 【機電分耐震計算書の補足について】

平成 30 年 9 月

日本原子力発電株式会社

1. 炉内構造物への極限解析による評価の適用について
2. 設計用床応答曲線の作成方法及び適用方法
3. 建屋－機器連成解析モデルの時刻歴応答解析における地盤物性のばらつき
の考慮について
4. 機電設備の耐震計算書の作成について
5. 弁の動的機能維持評価について
6. 動的機能維持の詳細評価について（新たな検討又は詳細検討が必要な設備
の機能維持評価について）
7. 原子炉格納容器の耐震安全性評価について
8. 制御棒の挿入性評価について
9. 電気盤等の機能維持評価に適用する水平方向の評価用地震力について
10. 大型機器，構造物の地震応答計算書の補足について

下線：ご提出資料

1. 炉内構造物への極限解析による評価の適用について

目 次

1. 概要	1
2. 耐震評価について	1
3. 炉内構造物への極限解析の準用	3
3.1 規格基準における扱い及び炉内構造物への準用	3
3.2 極限解析による評価	15
4. 試験による確認について	47
4.1 はじめに	47
4.2 試験目的	47
4.3 試験内容	47
4.4 試験結果	51
4.5 まとめ	57
5. 1本あたりの地震荷重の算出について	68
5.1 詳細モデルによる影響評価	68
5.2 最外周部の偏心の扱いについて	76
別紙－1 試験体に対する極限解析について	78
別紙－2 補強板の健全性について	82
別紙－3 気水分離器と蒸気乾燥器の相対変位について	87

炉内構造物への極限解析による評価の適用について

1. 概要

既工認においては、炉内構造物として公式等を用いた評価を行っていたが、今回工認では、機能限界を踏まえた許容限界をより現実的に示す観点で、J E A G 4601, J S M E 設計・建設規格で定められた極限解析による評価（以下「極限解析」という。）を採用する。極限解析については、規格基準に基づく手法であり、また新規制基準での工認における高浜 1, 2 号炉, 美浜 3 号炉で適用実績のある手法である。

2. 耐震評価について

スタンドパイプの耐震評価フローを図 2-1 に示す。今回工認におけるスタンドパイプの地震荷重については、多質点系の建屋機器連成解析モデルを用いた地震応答解析を実施し、スタンドパイプ全 225 本を 1 質点として算出された地震荷重を算出する。得られた地震荷重からスタンドパイプ 1 本に掛かる地震荷重を算出し、算出した地震荷重が 1 本のスタンドパイプにおける極限解析により得られた許容値（許容荷重）以下であることを確認することにより、健全性を確認する。

これは、シュラウドヘッド及び全スタンドパイプに対する評価においては、あるスタンドパイプが許容限界を超えた場合においても、他のスタンドパイプが有する耐力により構造物としての耐力が期待できると考えられるが、1 本に対する許容値と荷重を比較する場合他のスタンドパイプの耐力に期待しないため保守的な手法となると判断しているものである。

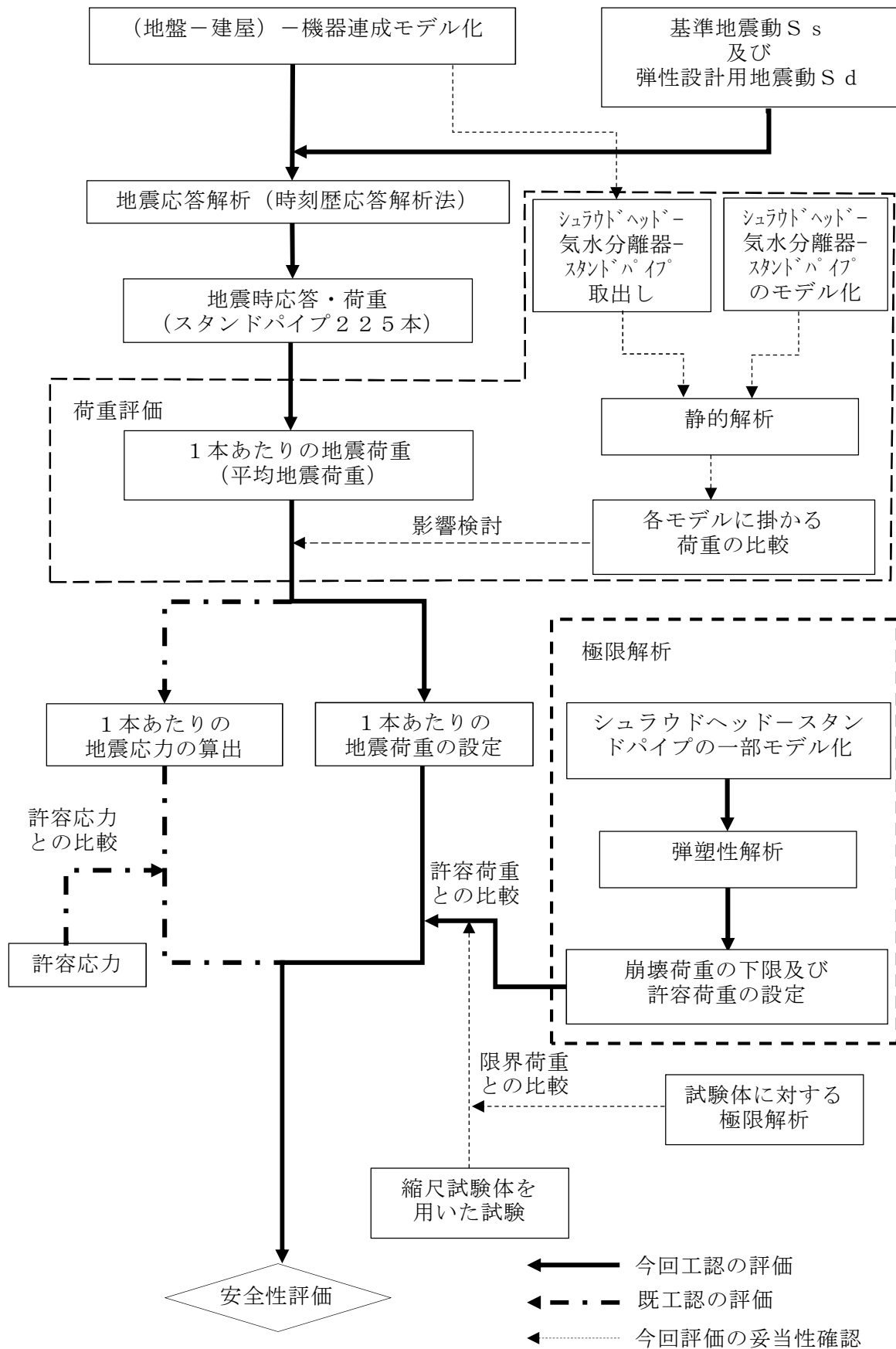


図 2-1 スタンドパイプの耐震評価フロー

3. 炉内構造物への極限解析の準用

3.1 規格基準における扱い及び炉内構造物への準用

J E A G 4601, J S M E 設計・建設規格の炉心支持構造物に関する抜粋を図 3-1 ~ 3 に示す。極限解析は, J E A G 4601, J S M E 設計・建設規格において, 炉心支持構造物に適用可能な設計手法として規定されている。また, J E A G 4601 において, 炉内構造物の許容応力は炉心支持構造物の許容応力を準用することができることを定めている。整理結果を表 3-1 に示す。

東海第二発電所の今回工認における炉内構造物の極限解析の適用に際して炉心支持構造物の規定を準用するため, 極限解析の具体的な評価手法が規定されている J S M E 設計・建設規格の炉心支持構造物の規格に定められた要求事項を満足することを確認して, 準用することとする。炉心支持構造物の規格要求事項に対して, 極限解析を適用するスタンドパイプの適合性確認に対する要求の整理結果を表 3-2 に示す。

J S M E 設計・建設規格の炉心支持構造物の規格に定められた要求事項について建設時の記録及び応力解析から要求事項を満足していることを確認した。

また, 評価範囲であるスタンドパイプとシュラウドヘッドの取付部の溶接施工管理については炉心支持構造物と同様の施工管理を実施している。

表 3 - 1 極限解析の規格基準における扱い

規格基準	適用範囲	備考
J E A G 4601	炉心支持構造物 炉内構造物	<ul style="list-style-type: none"> ・ 炉内構造物は炉心支持構造物を準用 ・ 具体的な手法として J S M E 設計・建設規格を読み込み (JEAG では告示 501 号を読み込み)

表 3 - 2 J S M E 設計・建設規格 炉心支持構造物の規格に対するスタンドパイプの適合性確認整理結果

CSS-1000：一般要求事項

規格番号	規格名称	規格内容（概要）	炉内構造物としての考慮の要否	左欄で否の場合：理由を記載 左欄で要の場合：考慮に対する方針を記載
CSS-1100	適用			
CSS-1110	適用範囲	適用範囲を炉心支持構造物の材料，設計及び検査としている。	要	材料，設計及び検査の規格を満足することで，適用範囲を満足することを確認する。
CSS-1120	境界			
CSS-1121	炉心支持構造物と炉内構造物の境界	境界は炉心支持構造物の外表面とする。	否	評価範囲はシュラウドヘッドとスタンドパイプであり，共に炉内構造物であることから炉心支持構造物と炉内構造物の境界がないため。
CSS-1300	記号の定義	使用する記号の定義を定めている。	要	記号の定義に従う。
CSS-1400	応力分類	CSS-3000 に規定する設計，応力解析の応力分類について定めている。	要	CSS-3000 に規定する設計及び応力解析は，規定の応力分類に従う。

CSS-2000：炉心支持構造物に使用する材料

規格番号	規格名称	規格内容（概要）	炉内構造物としての確認の要否	左欄で否の場合：理由を記載 左欄で要の場合：確認結果を記載
CSS-2100	炉心支持構造物に使用可能な材料			
CSS-2110	炉心支持構造物に使用可能な材料の規定	付録材料表 Part1 の炉心支持構造物の規格に適合する又はこれと同等以上の化学成分及び機械的強度を有するものを使用することを定めている。	要	使用材料は SUS304TP 相当（ASME SA-312 Gr. TP304）であり，適合している。
CSS-2120	材料の熱処理に関する部分の特例規定	CSS-2120 の規定にかかわらない熱処理に関する特例規定を設けている。	否	特例規定を適用しないため。
CSS-2130	機械試験に関する要求事項	CSS-2110 及び CSS-2300 に規定する試験を行う場合は PVB-2200 及び 2300 の規定を準用する。	否	本要求はフェライト系材料に対しての要求であり，使用材料であるオーステナイト系ステンレス鋼に対する要求はないため。
CSS-2300	破壊靱性試験要求			
CSS-2310	破壊靱性不要となる規定	使用する材料は破壊靱性試験を行い，適合することを定めている。ただし，形状，材料によっては破壊靱性試験を要しない。	否	使用材料はオーステナイト系ステンレス鋼であり，CSS-2310 に記載される破壊靱性試験は不要の条件を満たしているため。
CSS-2320	破壊靱性試験における試験片数と組数	破壊靱性試験における試験片数と組数について定めている。	否	CSS-2310 を満足しており，破壊靱性試験を行わないため。
CSS-2330	破壊靱性試験の方法および判定基準	破壊靱性試験の方法及び判定基準を定めている。	否	CSS-2310 を満足しており，破壊靱性試験を行わないため。

規格番号	規格名称	規格内容（概要）	炉内構造物としての確認の要否	左欄で否の場合：理由を記載 左欄で要の場合：確認結果を記載
CSS-2400	非破壊試験要求			
CSS-2410	各材料に適用する非破壊試験	使用する材料は PVB-2411 に規定する非破壊試験を実施し，CSS-2430 に合格することを定めている。	要	PVB-2411 に規定する斜角法による超音波探傷試験及び浸透探傷試験を実施し，CSS-2430 に合格している。
CSS-2420	溶接による補修	CSS-2410 に規定に合格しないものに対して溶接による補修について定めている。	否	CSS-2410 の試験に合格しており，溶接による補修を実施していないため。
CSS-2430	非破壊試験の判定基準	非破壊試験の判定基準を定めている。	要	PVB-2422 に定められる超音波探傷試験の判定基準及び PVB-2426 に定められる浸透探傷試験の判定基準を満足している。
CSS-2500	溶接材料			
CSS-2510	溶接に用いる材料	溶接に用いる材料は，溶接規格 N-1040 に適合することを定めている。	要	溶接に用いる材料は，母材と同等の強度を有するものを使用しており，溶接規格 N-1040 に適合している。

CSS-3000：炉心支持構造物の設計

規格番号	規格名称	規格内容（概要）	炉内構造物としての確認の要否	左欄で否の場合：理由を記載 左欄で要の場合：評価結果を記載
CSS-3010	考慮すべき荷重	設計に考慮すべき荷重を考慮することを定めている。	要	考慮すべき荷重をとして、冷却材による差圧，自重，地震荷重を設計に用いる。
CSS-3020	考慮すべき事項	(1)減肉が考えられる部材は減肉を考慮すること。 (2)応力評価は公称寸法を使用してもよい。 を定めている。	要	(1)減肉は考慮しない (2)原則として公称寸法を使用する。
CSS-3100	材料の応力強さの限界および許容応力			
CSS-3110	ボルト等締付部材以外の応力評価			
CSS-3111	各供用状態における一次応力評価	設計条件及び各供用状態において生じる応力解析による一次応力評価は(1)～(4)の規定（一次一般膜応力強さ等に対する制限）を満足すること。	要	各供用状態における一次応力強さが規定を満足することを確認した。
CSS-3111.1	プロトタイプまたはモデル試験による評価	CSS-3111の応力評価の代わりにプロトタイプまたはモデル試験を実施する場合は、最大荷重 L_e を求め、実際の荷重が許容荷重値を超えないこと。	否	プロトタイプまたはモデル試験による評価は適用しないため。
CSS-3112	供用状態A，Bにおける一次+二次応力評価	供用状態A及びBにおいて生じる一次応力と二次応力の応力強さのサイクルの最大値と最小値の差は $3 S_m$ を超えないこと。	要	供用状態A，Bにおいて生じる一次応力と二次応力の最大値と最小値の差が $3 S_m$ 以内であることを確認した。
CSS-3113	疲労評価（供用状態A，B）	供用状態A及びBにおける疲労累積係数は1を超えないこと。	要	CSS-3130（疲労評価不要の条件）を満足すること確認したため、疲労評価を実施しない。

規格番号	規格名称	規格内容（概要）	炉内構造物としての確認の要否	左欄で否の場合：理由を記載 左欄で要の場合：評価結果を記載
CSS-3114	純せん断応力評価	純せん断荷重を受ける部分に生じる平均せん断応力は許容値を満足すること。	要	評価結果からせん断応力は生じていないため。
CSS-3115	支圧応力評価	支圧荷重を受ける部分に生じる平均支圧応力は許容値を満足すること。	要	支圧応力は、2つの強度部材が接触し圧縮力が作用している場合の接触面における応力であり、シュラウドヘッドとスタンドパイプの継手は接触ではなくすみ肉溶接にて接合されている。このため支圧応力は発生しない。
CSS-3116	軸圧縮応力の評価			
CSS-3116.1	軸方向に圧縮荷重を受ける円筒形の胴の圧縮応力の評価	軸方向に圧縮荷重を受ける円筒形の胴に生じる圧縮応力は許容値を満足すること。	要	圧縮応力は自重のみであり、軸圧縮応力が小さい（1MPa）ため評価結果を記載しない。
CSS-3116.2	軸方向に圧縮荷重を受ける柱状の部材の圧縮応力の評価	軸方向に圧縮荷重を受ける柱形の胴に生じる圧縮応力は許容値を満足すること。	要	圧縮応力は自重のみであり、軸圧縮応力が小さい（1MPa）ため評価結果を記載しない。
CSS-3117	ねじりせん断応力の評価	ねじり荷重を受ける中実円断面の形状に生じる圧縮応力は許容値を満足すること。	否	中空円断面であり、中実円断面ではないため。
CSS-3120	ボルト等締付部材の応力評価	ボルト等の支持構造物についての各供用状態における許容値を満足すること。	否	ボルト等締結部材はないため。
CSS-3130	疲労解析不要の条件	繰り返し荷重が(1)～(4)に適合する場合は疲労解析を行うことを要しない。	要	疲労評価不要の条件(1)～(4)を満足することを確認した。
CSS-3140	疲労強度低減係数または応力集中係数	疲労解析に使用する疲労強度低減係数または応力集中係数について定めている。	要	CSS-3130（疲労評価不要の条件）を満足するため疲労解析が不要であることから、使用しない。
CSS-3150	溶接部継手効率	溶接部の許容応力等に対して継手効率を考慮することを定めている。（CSS-3111.1, 3160, 3113, 3116.2 除く）	要	溶接方法の区分に応じた継手効率を考慮している。

規格番号	規格名称	規格内容（概要）	炉内構造物としての確認の要否	左欄で否の場合：理由を記載 左欄で要の場合：評価結果を記載
CSS-3160	極限解析による評価	極限解析による評価について定めている。これを満足する場合は CSS-3111 の規定を満足しなくてよい、	要	地震時以外は適用しない。 (地震時の評価は本資料に記載)
CSS-3200	外面に圧力を受ける炉心支持構造物の評価			
CSS-3210	外面に圧力を受ける炉心支持構造物の形状	外面に圧力を受ける炉心支持構造物の胴の形状について定めている。	否	各供用状態において、内面の圧力の方が外面の圧力より高いため。
CSS-3220	円筒形または円すい形の胴における許容圧力（外圧）	円筒形または円すい形の胴において外面に受ける圧力に対する許容値を定めている。		
CSS-3230	球形の胴における許容応力	球形の胴において外面に受ける圧力に対する許容値を定めている。	否	円筒形であり、球形でないため。また、各供用状態において、内面の圧力の方が外面の圧力より高いため。
CSS-3240	外面に圧力を受ける円筒形の炉心支持構造物に強め輪を設ける場合	円筒形において外面に受ける圧力に対する許容値を定めている。	否	強め輪は設けていないため。
CSS-3300	簡易弾塑性解析	CSS-3112 で一次＋二次応力強さが 3 S m を超えた場合の規定を定めている。	要	CSS-3112 で一次＋二次応力強さが 3 S m 以内であることを確認したため、簡易弾塑性解析を使用しない。
CSS-3400	クラッド構造の炉心支持構造物に対する強度評価上の取扱いについての規定	クラッド構造の炉心支持構造物の応力解析、疲労評価への考慮について定めている。	否	クラッド構造ではないため。

CSS-5000 : 完了検査

規格番号	規格名称	規格内容（概要）	炉内構造物としての確認の要否	左欄で否の場合：理由を記載 左欄で要の場合：確認結果を記載
CSS-5010	炉心支持構造物の完了検査	設計仕様書に定められた要求事項に従って、完了検査を満足すること。	要	完成後、要求事項に従い、外観検査、寸法検査を行い、満足している。

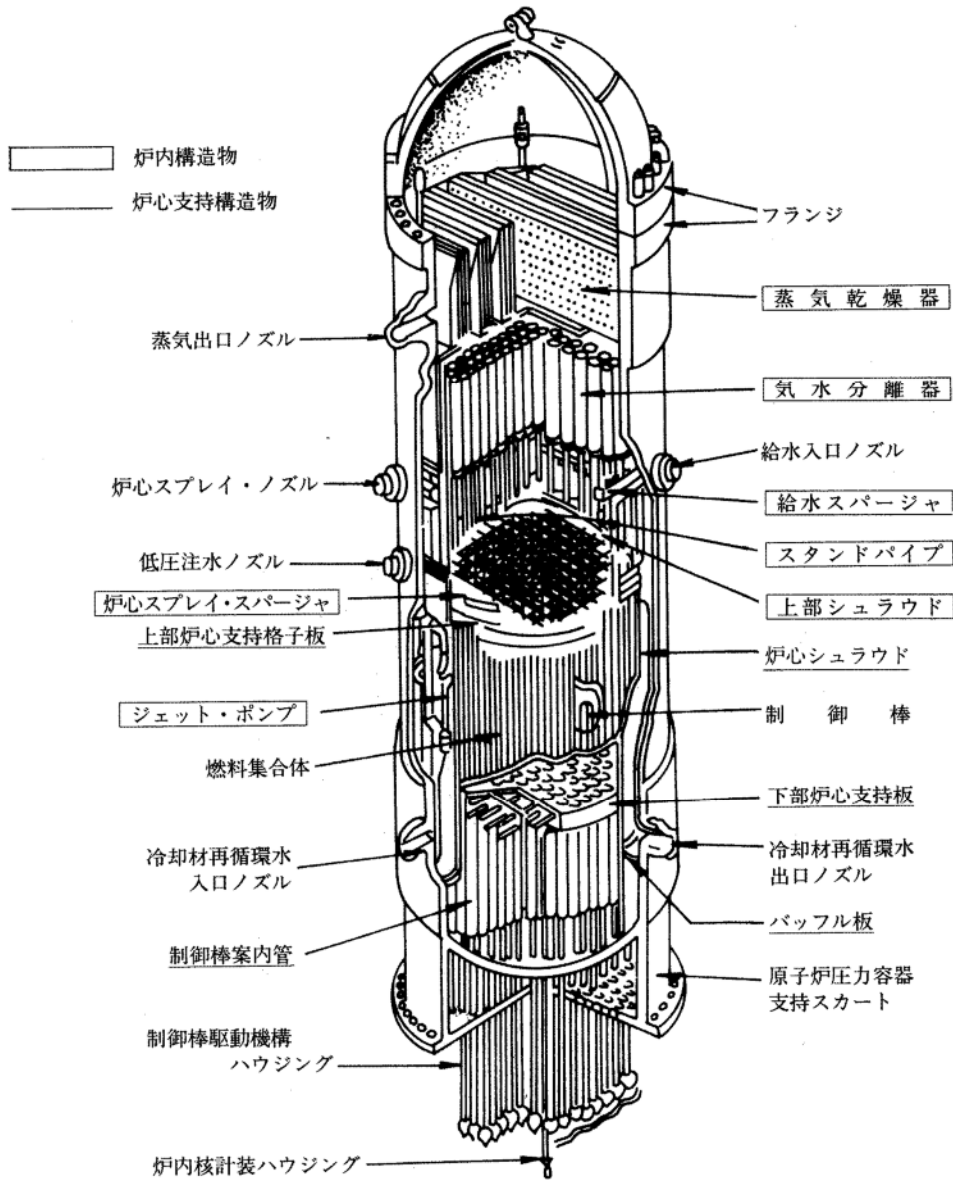


図 3 - 1 JEAG4601 炉心支持構造物と炉内構造物の分類に関する抜粋

2.5 炉心支持構造物の許容応力

2.5.1. 炉心支持構造物（ボルト等を除く）の許容応力

炉心支持構造物（ボルト等を除く）の許容応力を次に示す。

応力分類 許容 応力状態	1次一般膜応力	1次一般膜応力 + 1次曲げ応力	1次+ 2次応力	1次+ 2次 + ピーク応力	特別な応力限界		
					純せん 断応力	支 圧 応 力	ねじり 応 力
設計条件	$S_m^{(1)}$	左欄の1.5倍の値 ⁽¹⁾	—	—	—	—	—
I _A	—	—	$3 S_m^{(2)}$	運転状態I及びIIにおける荷重の組合せについて疲れ解析を行い疲れ累積係数が1.0以下であること。	$0.6 S_m^{(4)}$	$S_y^{(5)}$ ($1.5 S_y$)	$0.8 S_m^{(7)}$
II _A	—	—			$0.6 S_m^{(4)}$	$S_y^{(5)}$ ($1.5 S_y$)	$0.8 S_m^{(7)}$
III _A	$1.5 S_m^{(1)}$	左欄の1.5倍の値 ⁽¹⁾	—	—	$0.9 S_m^{(4)}$	$1.5 S_y^{(5)}$ ($2.25 S_y$)	$1.2 S_m^{(7)}$
IV _A	$2/3 S_u^{(1)}$ ただしオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については $2/3 S_u$ と $2.4 S_m$ の小さい方。	左欄の1.5倍の値 ⁽¹⁾	—	—	$1.2 S_m^{(4)}$	$2 S_y^{(5)}$ ($3 S_y$)	$1.6 S_m^{(7)}$
III _A S	$1.5 S_m^{(1)}$	左欄の1.5倍の値 ⁽¹⁾	—	—	$0.9 S_m^{(4)}$	$1.5 S_y^{(6)}$ ($2.25 S_y$)	$1.2 S_m^{(7)}$
IV _A S	$2/3 S_u^{(1)}$ ただしオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については $2/3 S_u$ と $2.4 S_m$ の小さい方。	左欄の1.5倍の値 ⁽¹⁾	—	—	$1.2 S_m^{(4)}$	$2 S_y^{(6)}$ ($3 S_y$)	$1.6 S_m^{(7)}$

注：(1) 告示第96条第1項第一号の崩壊荷重の下限に基づく評価（ただし、設計条件については同号イ、III_A及びIII_ASについては同号ロ、IV_A及びIV_ASについては同号ハの評価）を適用する場合は、この限りではない。

- (2) $3 S_m$ を超えるときは告示第97条の弾塑性解析を用いることができる。
- (3) 告示第96条第1項第三号を満たすときは、疲れ解析を行うことを要しない。
- (4) 告示第96条第1項第一号へによる。
- (5) 告示第96条第1項第一号トによる。（ ）内の値は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値
- (6) （ ）内の値は、支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値
- (7) 告示第96条第1項第一号リによる。

図3-2 J E A G 4601 炉心支持構造物（ボルト等を除く）の許容値に関する抜粋

表 CSS-3110-1 応力強さの限界(ボルト等を除く)

応力の分類 供用状態	一次応力		二次応力	ピーク応力	特別な応力限界
	一般膜応力	曲げ応力	膜応力と曲げ応力		
	P_m	P_b	Q	F	
設計条件	P_m S_m 弾性解析 または $\frac{2}{3}P_{cr}$ 極限解析(注1) または $0.44L_e$ 試験(注5)	P_m+P_b $1.5S_m$ 弾性解析 または $\frac{2}{3}P_{cr}$ 極限解析(注1) または $0.44L_e$ 試験(注5)	評価不要	評価不要	—
供用状態A およびB			P_m+P_b+Q $3S_m$ 弾性解析 または P_m+P_b+Q+F S_a 疲労解析	P_m+P_b+Q+F S_a 疲労解析 P_m+P_b+Q+F S_a 弾塑性解析	支圧荷重 S_y または 平均支圧応力 $1.5S_y$ せん断荷重 $0.6S_m$ 平均せん断応力 $0.8S_m$ 最大ねじりせん断応力
供用状態C	P_m $1.5S_m$ 弾性解析 または P_{cr} 極限解析(注1) または $0.6L_e$ 試験(注5)	P_m+P_b $2.25S_m$ 弾性解析 または P_{cr} 極限解析(注1) または $0.6L_e$ 試験(注5)	評価不要	評価不要	供用状態A およびB の1.5倍
供用状態D	P_m $\frac{2.4S_m}{2/3S_u}$ (注2) $\frac{2}{3}S_u$ (注4) または $0.9P_{cr}$ 極限解析(注1) または $0.8L_e$ 試験(注5)	P_m+P_b $\frac{3.6S_m}{S_u}$ (注2) S_u (注4) または $0.9P_{cr}$ 極限解析(注1) または $0.8L_e$ 試験(注5)	評価不要	評価不要	供用状態A およびB の2倍

- (備考)
- (注1) 供用状態D以外の P_{cr} は $1.5 S_m$ の値を降伏点として計算した崩壊荷重の下限である。供用状態Dの P_{cr} は $\text{MIN}[2.3S_m, 0.7Su]$ の値を降伏点として計算した崩壊荷重の下限である。
 - (注2) 2つのうちのいずれか小さい方の値をとる。
 - (注3) オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金に適用する。
 - (注4) オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金以外の材料に適用する。
 - (注5) L_e はプロトタイプまたはモデル試験により評価を行う場合の最大荷重である。
 - (注6) 実線は応力に基づく評価、破線は荷重に基づく評価を示す。

図3-3 J SME 設計・建設規格 炉心支持構造物(ボルト等を除く)の許容値に関する抜粋

3.2 極限解析による評価

極限解析は、3次元FEMモデルを用いて、弾完全塑性体の物性値を入力した解析により崩壊荷重の下限（ P_{cr} ）を求め、求めた崩壊荷重の下限から許容荷重を設定するものである。極限解析フローを図3-4に示す。

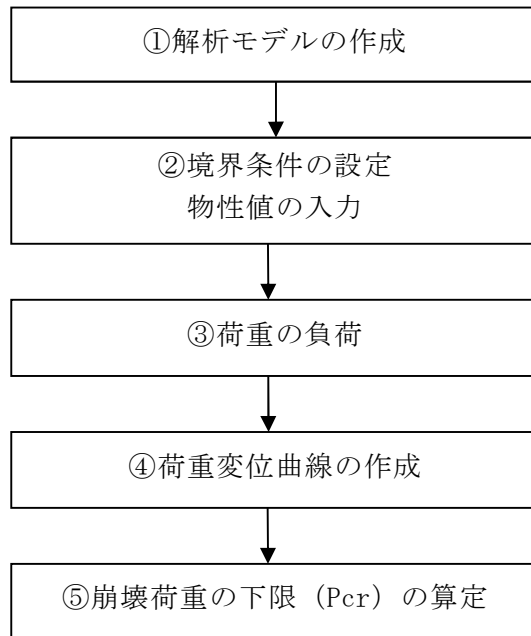


図3-4 極限解析フロー

① 解析モデルの作成

気水分離器及びスタンドパイプは、図3-5に示すとおり、シュラウドヘッド穴部に差し込まれ内外面を溶接にて取り付けている。気水分離器に作用する地震時の荷重は、スタンドパイプを介してシュラウドヘッドへ伝達される構造となっている。また、各スタンドパイプは大小の補強板で連結されている。

今回の評価では、1本のスタンドパイプが耐えることができる許容荷重を極限解析により求め、1本に掛かる地震荷重と比較することにより健全性を確認するため、解析においては、1本のスタンドパイプに着目してソリッド要素にてモデル化することとする。モデル図を図3-6に示す。

モデルは評価上厳しくなる構造不連続部であるスタンドパイプ付根部の許容荷重を設定する観点から、付根部を含むスタンドパイプの一部分（スタンドパイプ長さ1000mmまで）をモデル化する。

また、解析モデルはスタンドパイプがシュラウドヘッドに対して平面に取り付く中

央位置及び斜めに取り付く最外周位置の2種類のモデルとする。

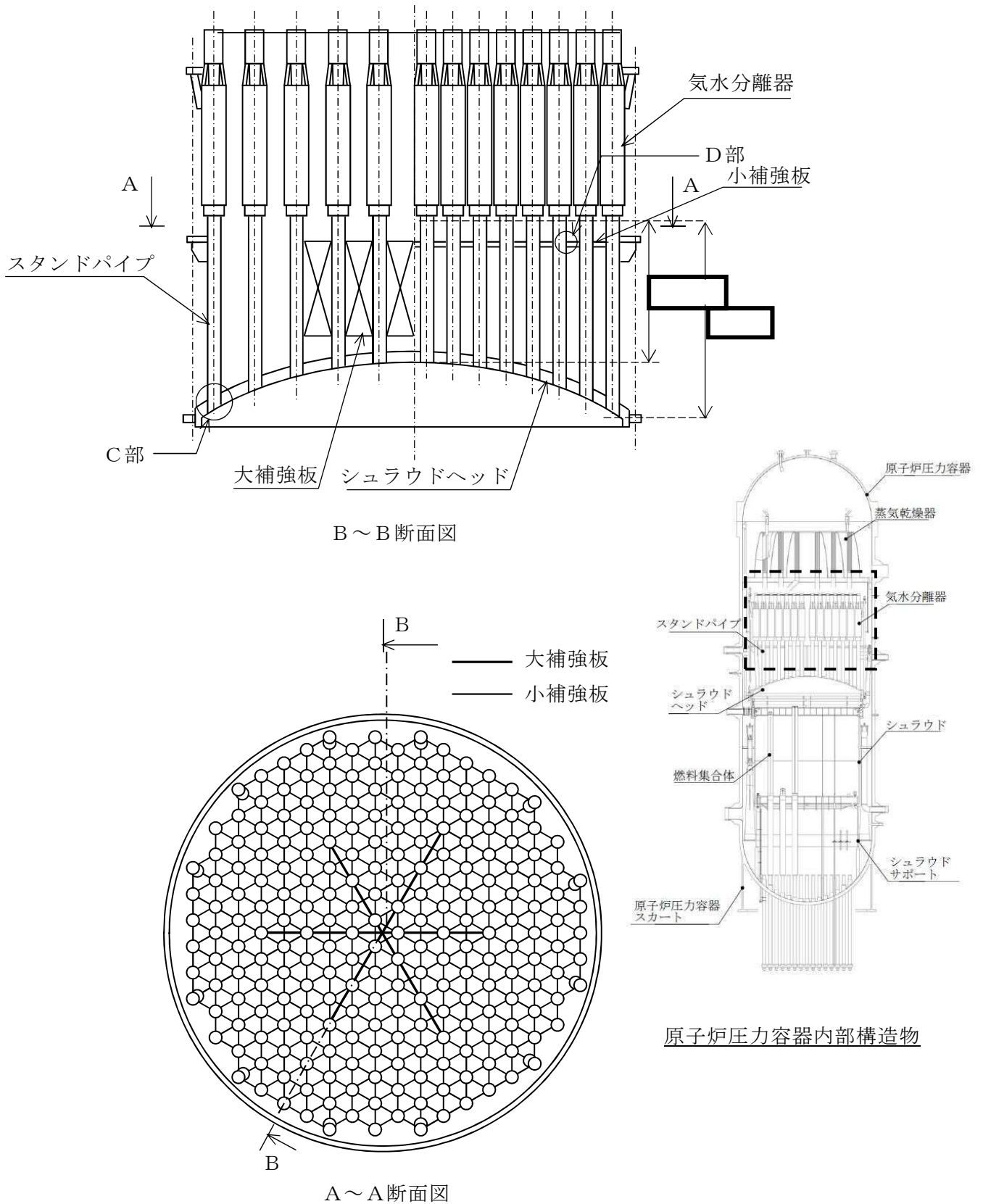


図 3 - 5 炉内構造物（気水分離器及びスタンドパイプ）構造概要図（1/2）

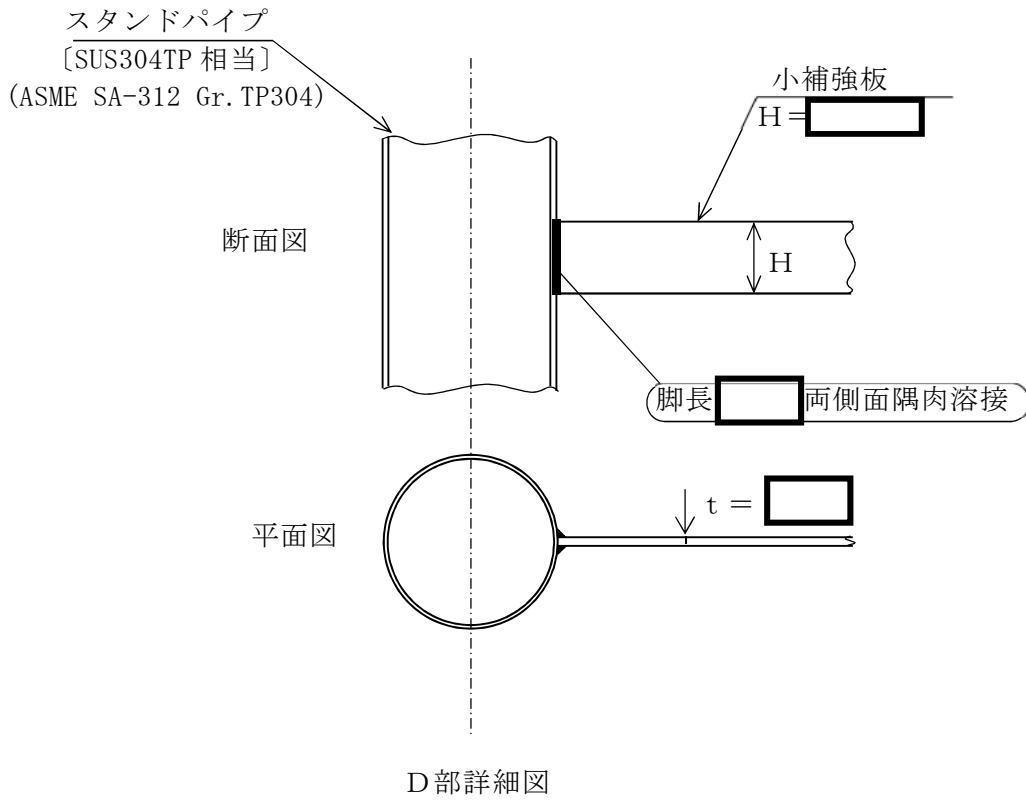
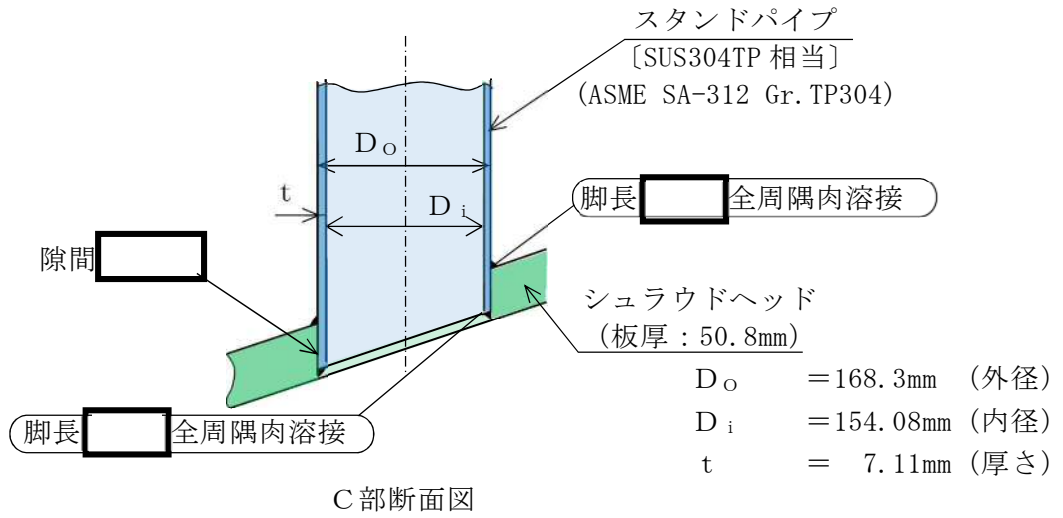
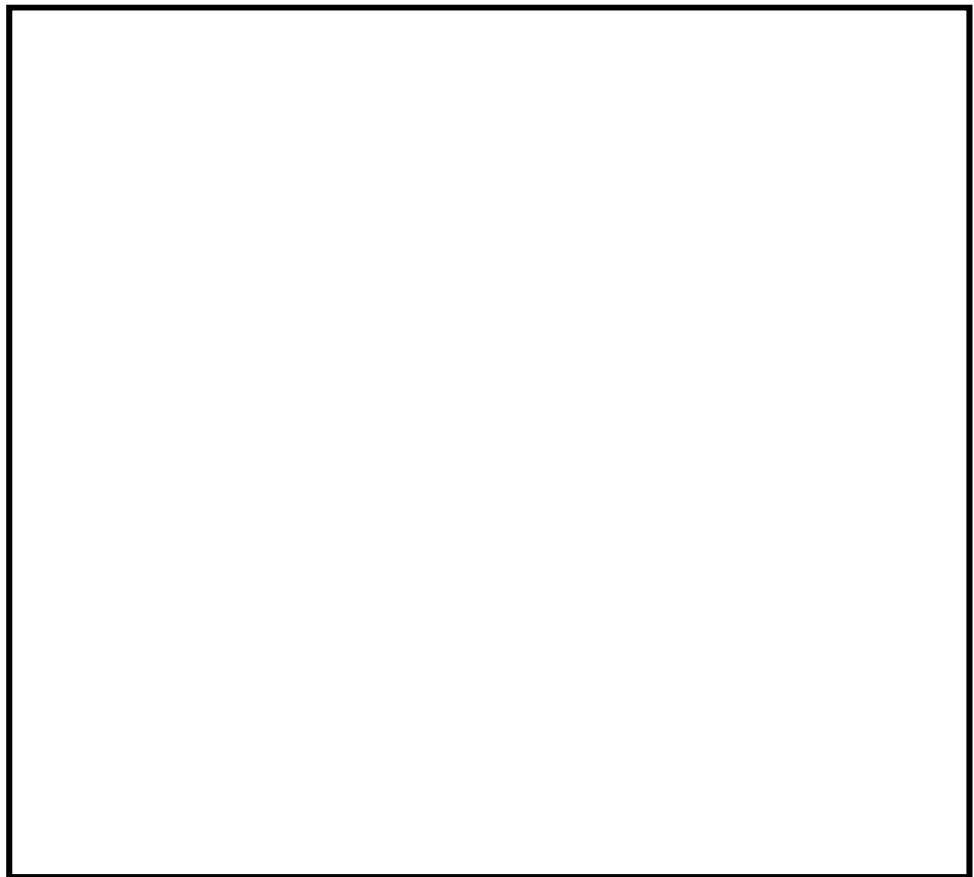
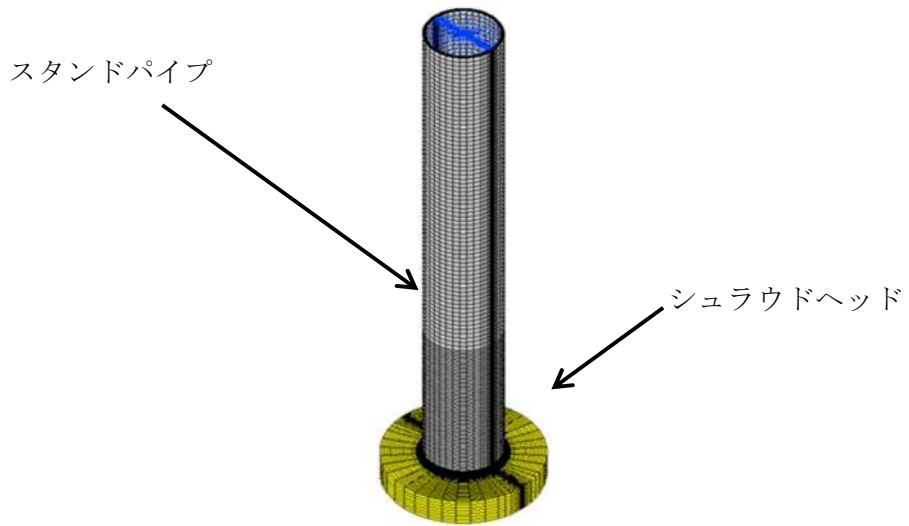


図3-5 炉内構造物（気水分離器及びスタンドパイプ）構造概要図(2/2)



溶接部

図 3 - 6 極限解析に用いる解析モデル概要図 (中央位置)

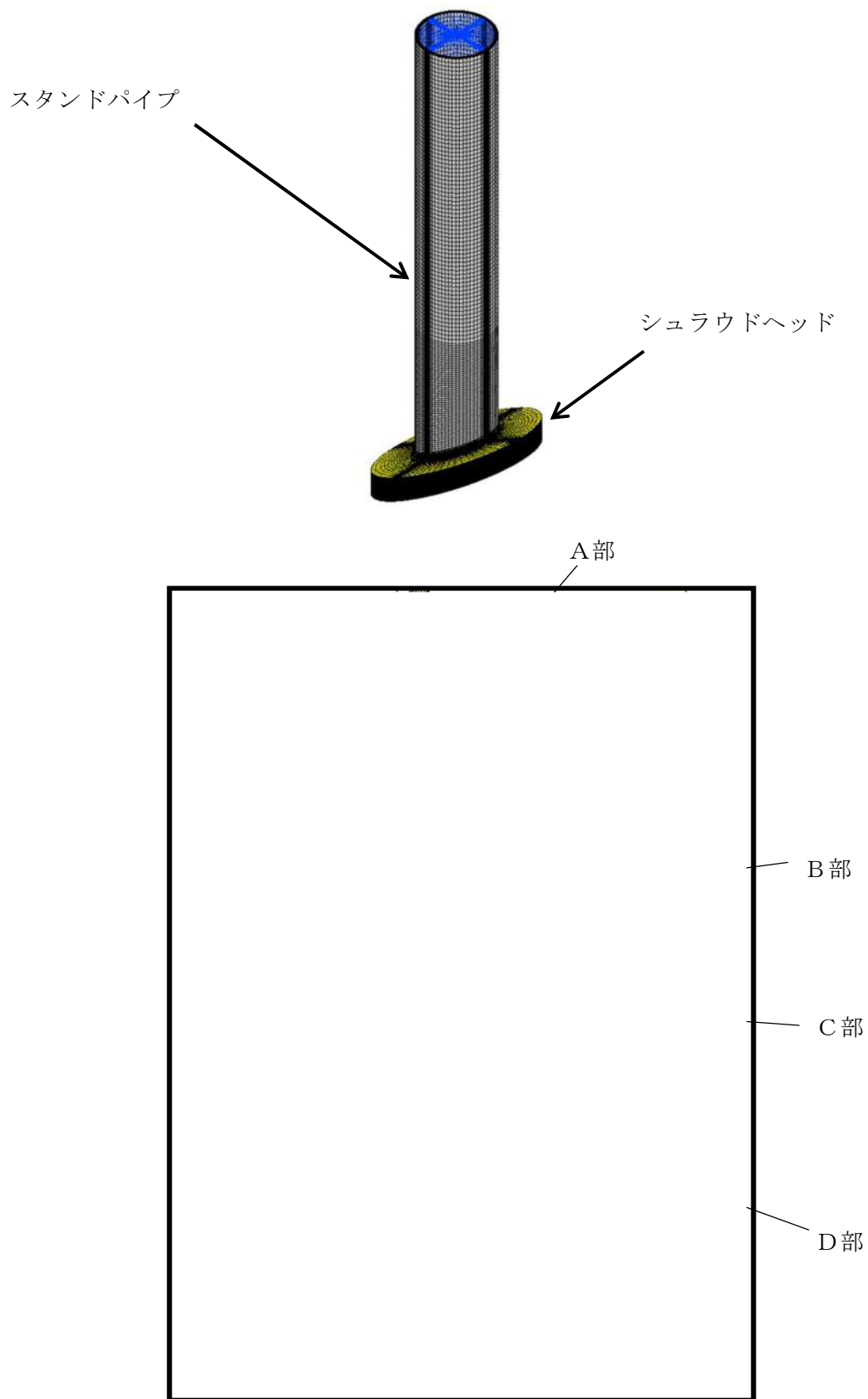
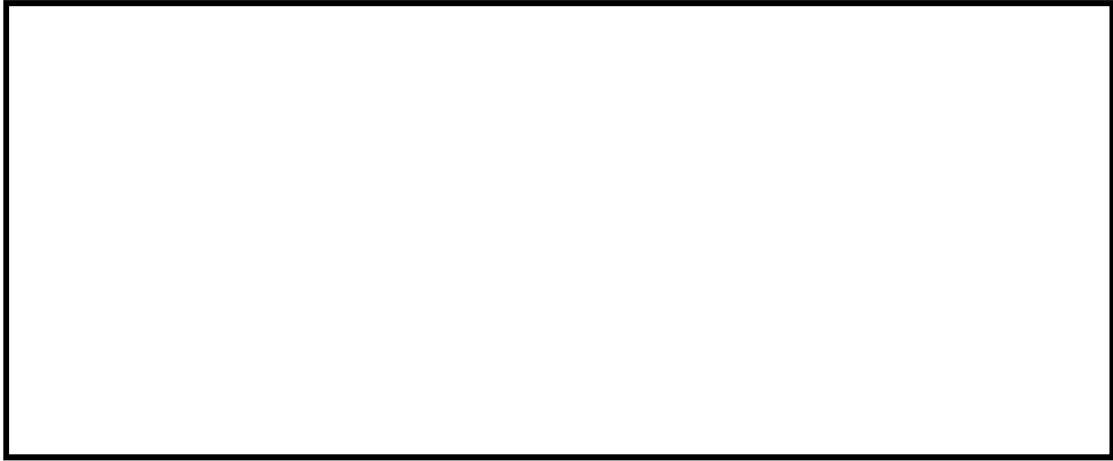
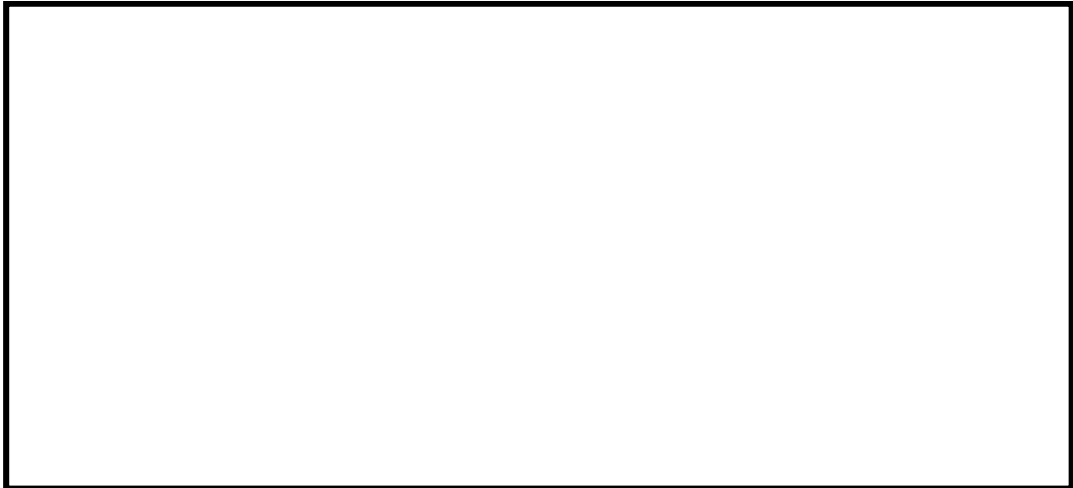


図 3 - 6 極限解析に用いる解析モデル概要図 (最外周位置)



A部詳細

B部詳細



C部詳細

D部詳細

図 3 - 6 極限解析に用いる解析モデル概要図 (最外周位置)

② 境界条件及び物性値

解析モデルの境界条件を図 3-7 に示す。境界条件として、モデル化したシュラウドヘッドの端部を完全固定としている。

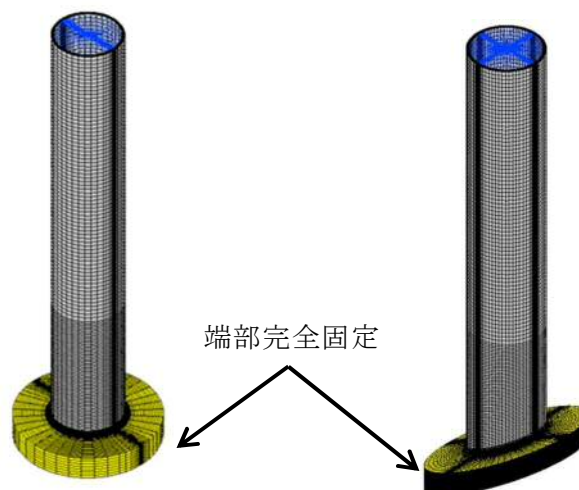


図 3-7 解析モデルの境界条件

解析モデルの物性値は、許容応力状態Ⅳ_{AS} における許容荷重を求める際には、J S M E 設計・建設規格 CSS-3160 に規定されているとおり、 $2.3S_m$ と $0.7S_u$ の小さい方を材料の降伏点とした弾完全塑性体、許容応力状態Ⅲ_{AS} における許容荷重を求める際には、同じく、 $1.5S_m$ を材料の降伏点とした弾完全塑性体を入力する(表 3-3, 図 3-8 参照)。また、シュラウドヘッドとスタンドパイプは溶接にて取り付けられており、溶接部は母材と同等の強度を有しているため、物性値は母材と同じとしている。

表 3 - 3 解析モデルに使用する材料の物性値

材料	ヤング率 × 10 ⁵ [MPa]	降伏応力 [MPa]		
		許容応力状態 IV _A S		許容応力状態 III _A S
		0.7Su	2.3Sm	1.5Sm
スタンドパイプ SUS304TP	1.76	273	264	172
シュラウドヘッド SUS304				

注：運転状態 I 及び II の最高使用温度（301℃）に対する物性値を使用

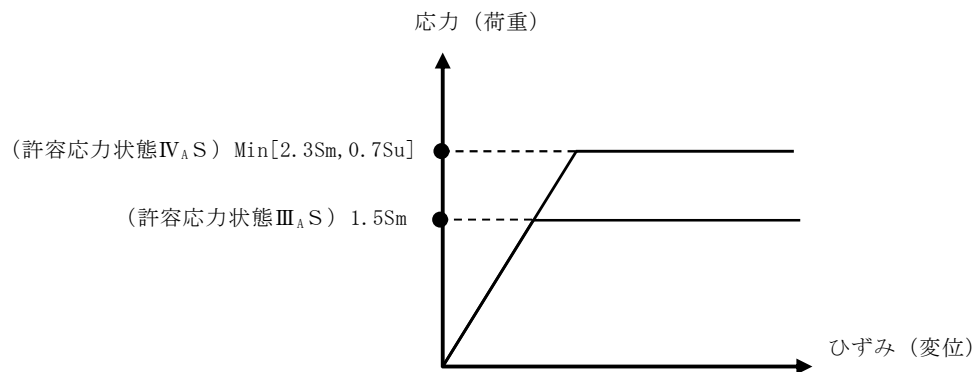


図 3 - 8 弾完全塑性体として応力とひずみの関係

③ 荷重の負荷

(1) 荷重の負荷に対する考慮

スタンドパイプはシュラウドヘッドとの取付部である付根部が構造不連続部であり評価上厳しい部位となるため、付根部が耐えることができる許容荷重を極限解析にて求める。

付根部の許容荷重と地震荷重との比較のため、地震荷重が有する3成分（水平荷重、鉛直荷重、モーメント）を有する負荷荷重とし、地震荷重の3成分のそれぞれの比率が等しくなるように負荷荷重を設定する。

また、荷重の負荷位置については、地震時に受ける荷重との整合性の観点から、モデル上端面から荷重を負荷する（以下、「入力荷重」という。）。

入力荷重に対して付根部が受ける荷重（以下、「出力荷重」という。）には、出力荷重の方が入力荷重の水平荷重によるモーメントの分だけ荷重が増加する。このため、出力荷重に対して地震荷重が有する3成分の比率が等しくなるように入力荷重を設定する。

(2) 荷重の負荷方向に対する考慮

a. 鉛直荷重方向

鉛直荷重の入力方向については、自重による荷重分だけ下向き方向の方が厳しい評価となるため、鉛直荷重は下向きとする。

b. 水平荷重方向

(a) 中心位置モデル

中心位置の水平荷重方向については、鉛直方向に対して軸対称モデルであることから、入力方向に対して許容荷重への影響はないと考えられるため、1方向とする。

(b) 最外周位置モデル

最外周位置の水平荷重方向については、鉛直方向に対して面对称モデルであることから、入力方向に対して許容荷重への影響があると考えられることから入力方向に対する検討を行う。

具体的には、入力荷重を中心方向、中心方向と反対のリング方向、周方向の3ケースについて実施する。

c. モーメント方向

モーメントの入力方向については，中心位置及び最外周位置共に，地震荷重との方向の整合性の観点から水平荷重方向と同じ向きとする。

中心位置及び最外周位置の入力荷重方向を図 3 - 9 に示す。

(3) 入力荷重の設定

入力荷重と出力荷重の関係はつり合いの関係から，以下のとおりとなる。(図 3 - 10 参照)

a. 鉛直荷重

入力荷重と出力荷重は等しくなる

b. 水平荷重

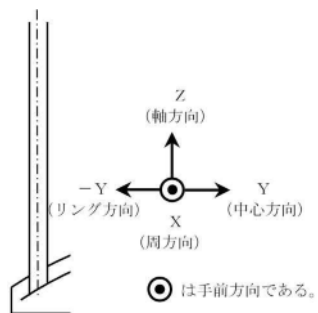
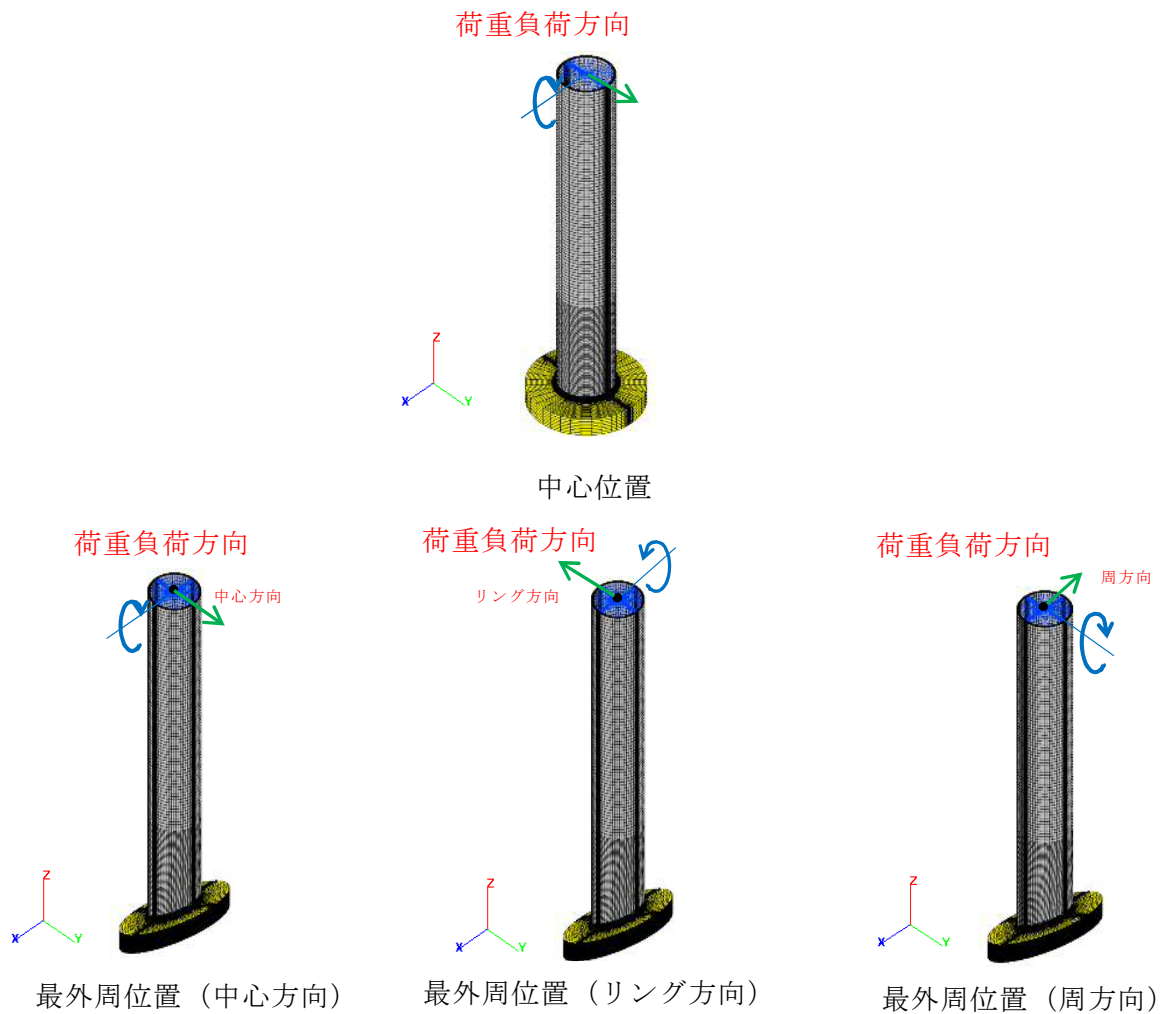
入力荷重と出力荷重は等しくなる

c. モーメント

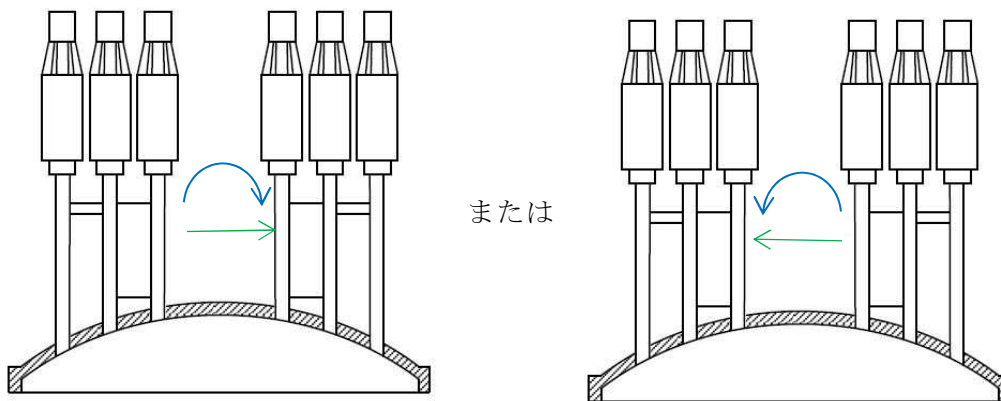
入力荷重に対して出力荷重は，水平の入力荷重と入力荷重位置と出力荷重位置の距離によるモーメントの分だけ荷重の絶対値は増加する。

(4) その他初期設定条件

入力荷重の他に初期設定条件として，圧力差(0.10MPa)による荷重及び自重による荷重を考慮する。

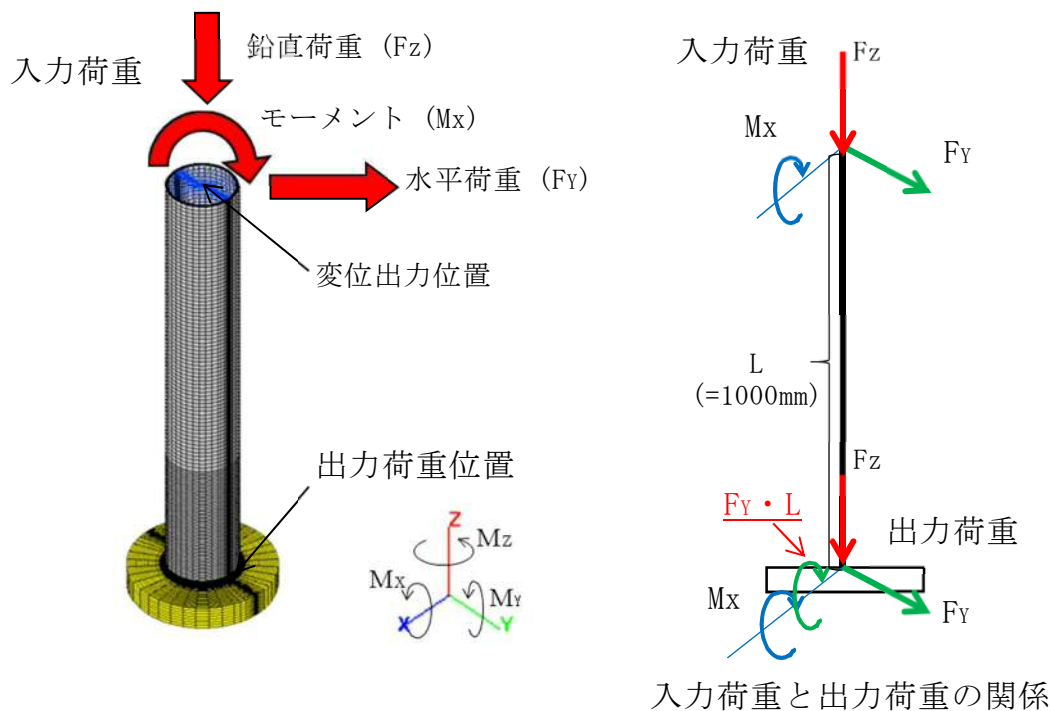


最外周位置の荷重入力方向は左図に示すとおり。



地震荷重方向

図 3 - 9 入力荷重の方向と地震荷重方向の関係



評価用入力荷重 (S s 地震用 倍率 1.0 倍時)

入力荷重成分		S s 地震評価用
鉛直荷重	$F_{Z(IN)}$	-1819.26 [N]
水平荷重	$F_{Y(IN)}$	10251.9 [N]
モーメント	$M_{X(IN)}^{*}$	-1.91312×10^7 [N・mm]

※スタンドパイプ付根部が受ける荷重（出力荷重）と地震荷重の鉛直、水平、モーメントの比率のそれぞれが等しくなるようにするため、入力荷重のモーメントは水平荷重 F_Y によってスタンドパイプ付根部に発生するモーメント ($F_Y \cdot L$) を出力荷重から除いた値としている。

入力荷重と出力荷重の関係

$$|M_{X(OUT)}| = |M_{X(IN)}| + |F_Y \cdot L|$$

$M_{X(OUT)}$: 出力荷重 (モーメント)

$F_Y \cdot L$: 付根部までの距離 (L) により付根部に発生する荷重 (モーメント)

評価用出力荷重 (S s 地震用 倍率 1.0 倍時)

出力荷重成分		S s 地震評価用
鉛直荷重	$F_{Z(OUT)}$	-1819.26 [N]
水平荷重	$F_{Y(OUT)}$	10251.9 [N]
モーメント	$M_{X(OUT)}$	-2.93831×10^7 [N・mm]

S s 地震荷重 (平均地震荷重)

荷重成分		S s 地震
鉛直荷重	F_Z	-1819.26 [N]
水平荷重	F_Y	10251.9 [N]
モーメント	M	-2.93831×10^7 [N・mm]

図 3 - 1 0 荷重の負荷

④ 荷重変位曲線の作成

入力荷重の倍率を段階的に増加させ付根部に荷重を負荷し、FEM解析にてその時の付根部の荷重（出力荷重）と変位（上端部中心位置）をプロットし、荷重－変位曲線を作成する（図3-11参照）。

なお、荷重－変位曲線の荷重は出力荷重を S_s 又は S_d 地震荷重で除した各地震荷重に対する荷重倍率で示す。

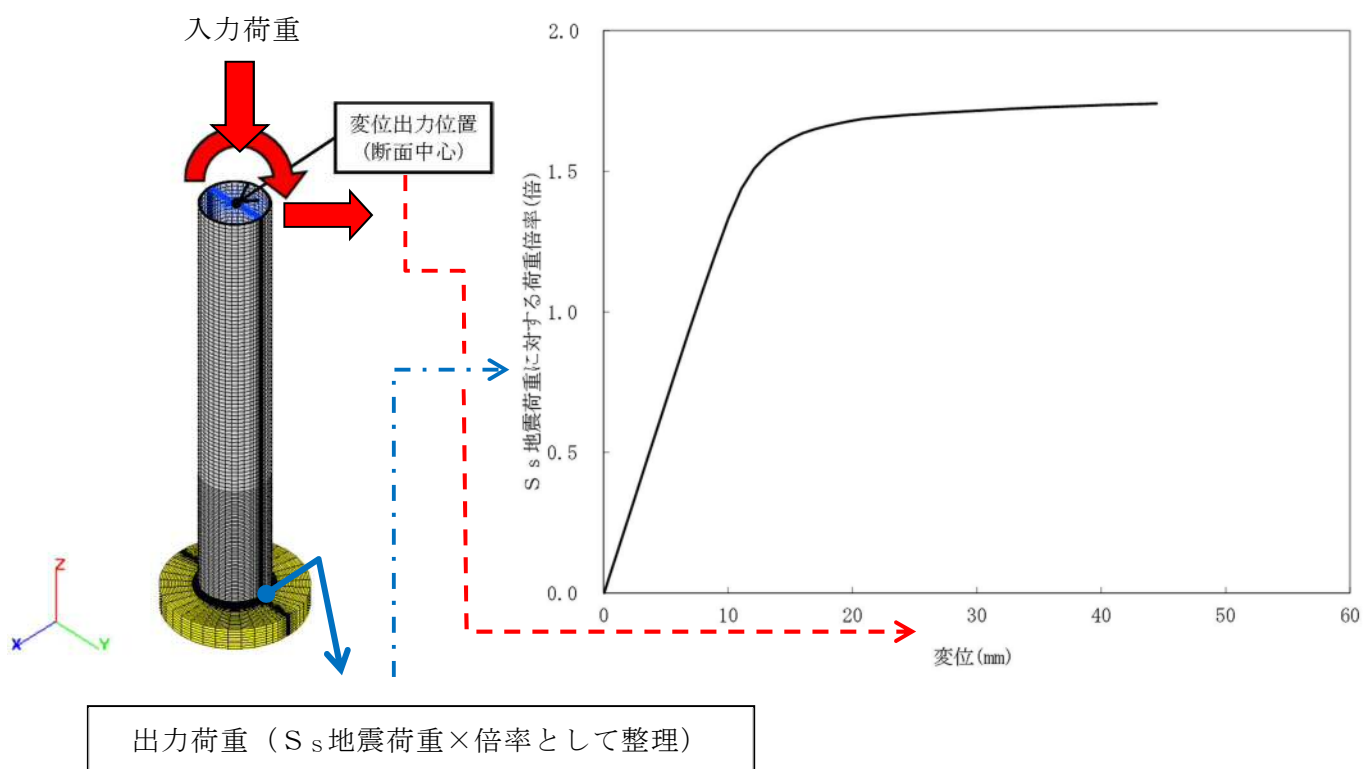


図3-11 荷重変位曲線の作成（ S_s 地震に対する評価の例，中心位置の場合）

⑤ 崩壊荷重の下限 (Pcr) の算定

④にて作成した荷重変位曲線を基に崩壊荷重の下限 (Pcr) を算定する。

S_s地震時及びS_d地震時の崩壊荷重の下限 (Pcr) の算定結果を図3-12~17及び表3-4に示す。S_s地震荷重及びS_d地震荷重は時刻歴応答解析に地盤物性のばらつきに対する考慮として、それぞれの地震荷重を1.5倍している。また、最外周については、S_s地震荷重に対して裕度が低い周方向ケースにて代表して評価を実施している。

ここで、崩壊荷重の下限は、J S M E 設計・建設規格 CSS-3160 から「荷重とそれによる変形量の関係直線に対して、弾性範囲の関係曲線の勾配の2倍の勾配を有する直線が交わる点に相当する荷重」と定義されている(図3-18参照)。

崩壊荷重とは、ひずみ硬化を含まない理想的な弾完全塑性体の材料からなる構造物が荷重を受けて、全断面降伏又は座屈限界に達し、これ以上の荷重を加えると構造物が不安定になって変形が際限なく増加するときの荷重をいう。

算定結果から中央位置と最外周位置では若干ではあるが中央位置のほうが厳しい結果となっている。これは、3次元FEMモデルで詳細にモデル化した場合、斜めに取り付く方が付根部の溶接長さが若干増加し、Pcrが増加したものと考えられる。

今回の極限解析では直接荷重を負荷することにより付根部に局所応力の影響を受けないようシュラウドヘッドからの距離を十分に取り観点から、モデル長さを1000mmとし、荷重を負荷し、その位置での変位を変位出力位置としている。モデル長さを変化させた場合、出力荷重である付根部の荷重は、上端面からの入力荷重にモデル長さが変わることによって変わる水平荷重によるモーメントの影響を考慮して長さを変える前と同じにしていることから変化しない。

モデル長さを1000mm, 1500mm, 2000mm, 2500mmに変化させた場合の荷重変位曲線を図3-19図に、評価結果を表3-5に示す。変位量は変化するが、長さを変えた場合においても崩壊荷重の下限 (Pcr) に対して影響がないことを確認した。これは、構造物が不安定になって変形が際限なく増加するときの挙動は構造不連続部である付根部によるものであり、モデル長さを変化させた場合においても、変形挙動は変化しないためである。

崩壊荷重の下限 (Pcr) での応力・ひずみ分布図を図3-20~23に示す。スタン

ドパイプとシュラウドヘッドの付根部に最大応力・ひずみが発生し、約 13%の相当塑性ひずみが断面内の極一部で発生しているが、断面全体としては塑性域が広がっておらず、塑性崩壊は起きていない。

また、スタンドパイプの材料であるオーステナイト系ステンレス鋼は延性材料であり、材料の伸びの規格値は 34%である。今回の最大ひずみが生じている箇所は溶接部であるが、これに比べても十分に小さい。極限解析は、規格に基づき弾完全塑性体としてモデル化し評価を実施しているため、本評価体系においても保守性を有している。以上から局所的に生じている約 13%相当のひずみにより崩壊は至らないものとする。

シュラウドヘッドに差し込まれたスタンドパイプとシュラウドヘッドとの間の変位は微小であり、スタンドパイプとシュラウドヘッドが接触していないことを確認している。これは、シュラウドヘッドに差し込まれたスタンドパイプは両端を溶接で固定することで、変位が微小になったものとする。

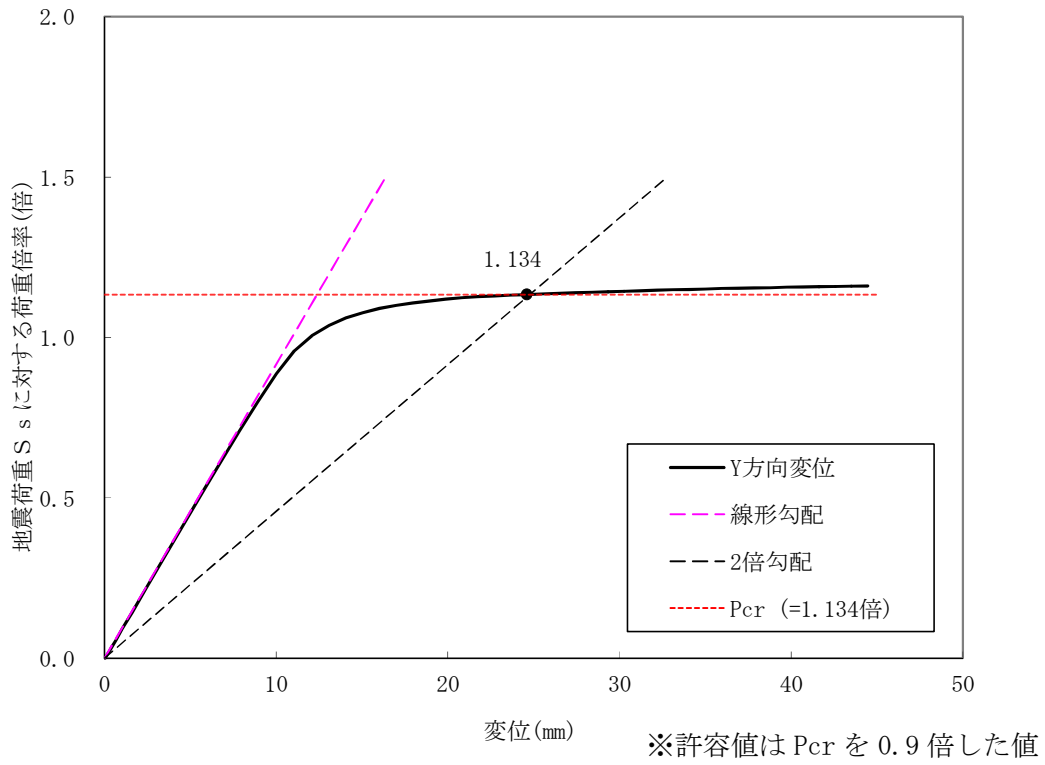


図 3-12 S_s 地震時の崩壊荷重の下限の算定結果 (中心位置)

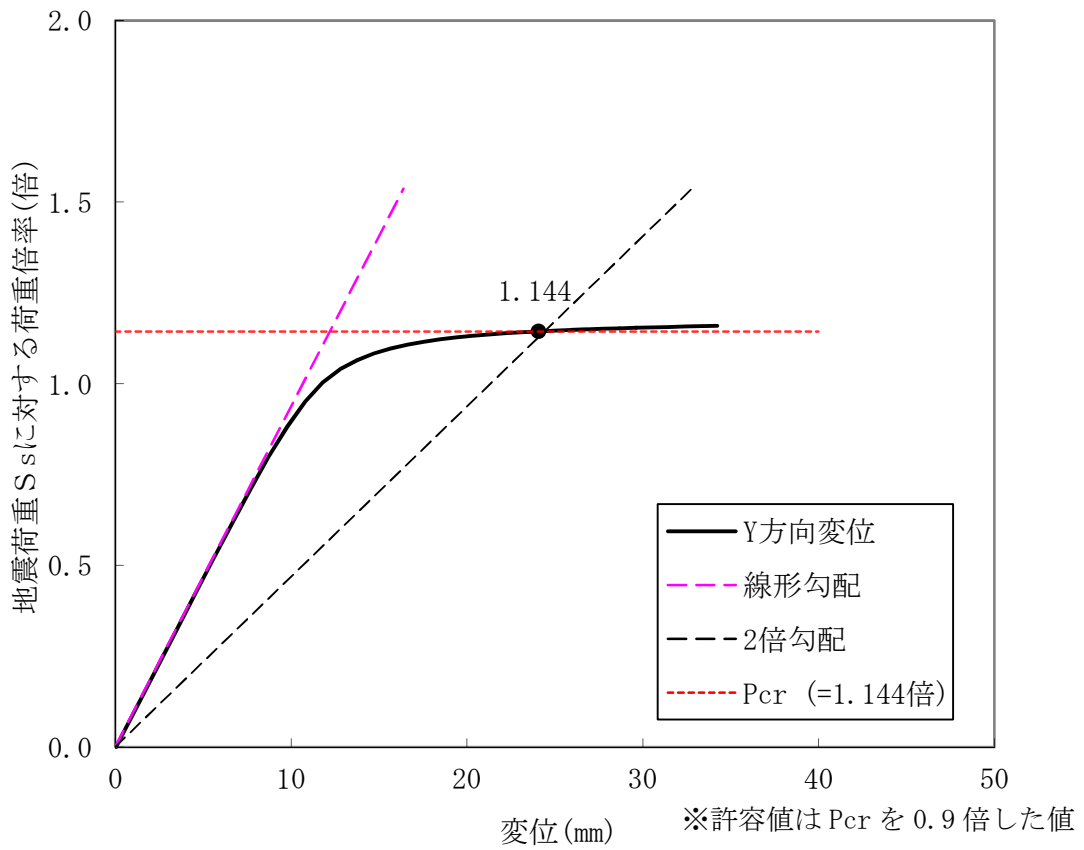


図 3-13 S_s 地震時の崩壊荷重の下限の算定結果
(最外周位置 中心方向に荷重負荷)

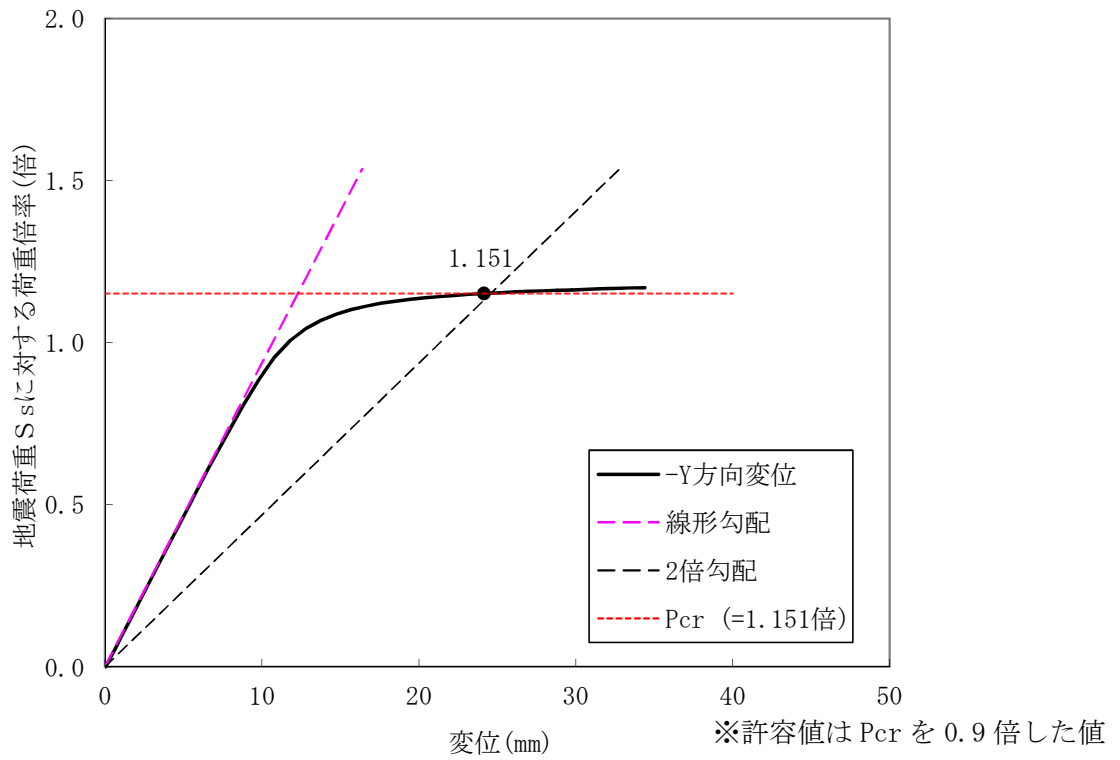


図 3-14 S_s 地震時の崩壊荷重の下限の算定結果
 (最外周位置 リング方向に荷重負荷)

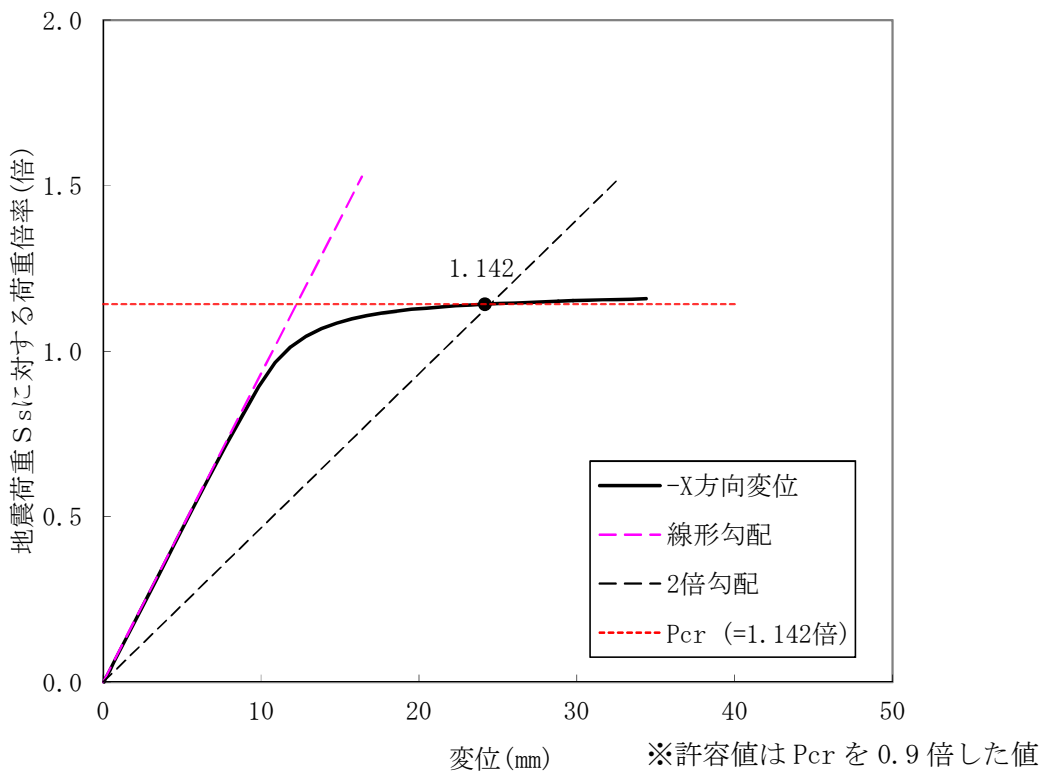


図 3-15 S_s 地震時の崩壊荷重の下限の算定結果
 (最外周位置 周方向に荷重負荷)

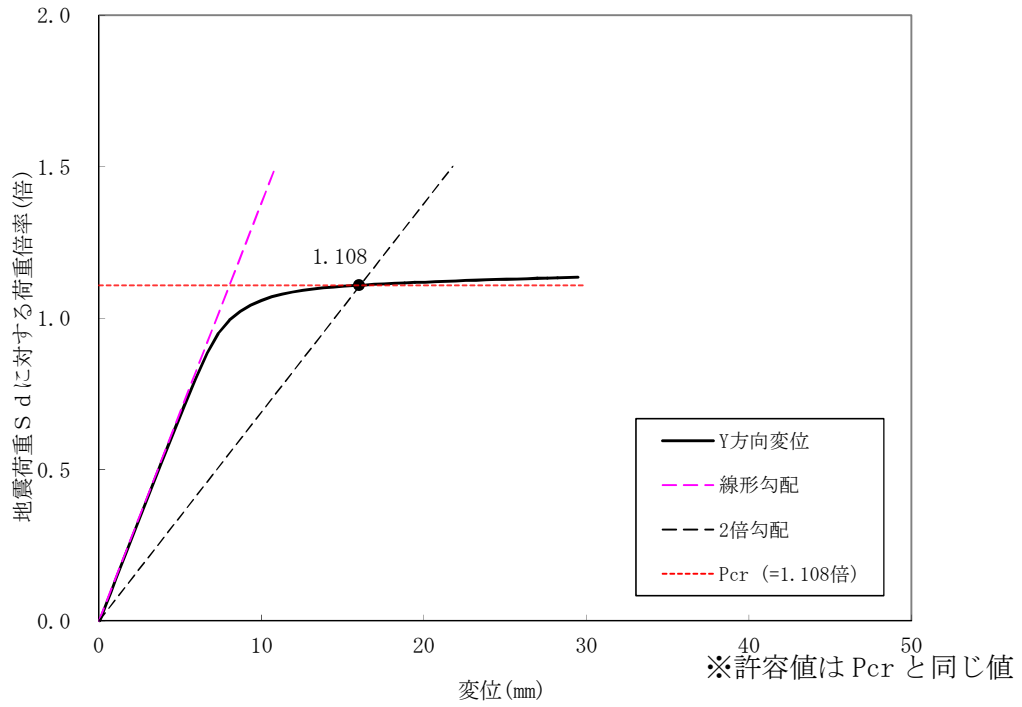


図 3-16 S_d地震時の崩壊荷重の下限の算定結果 (中心位置)

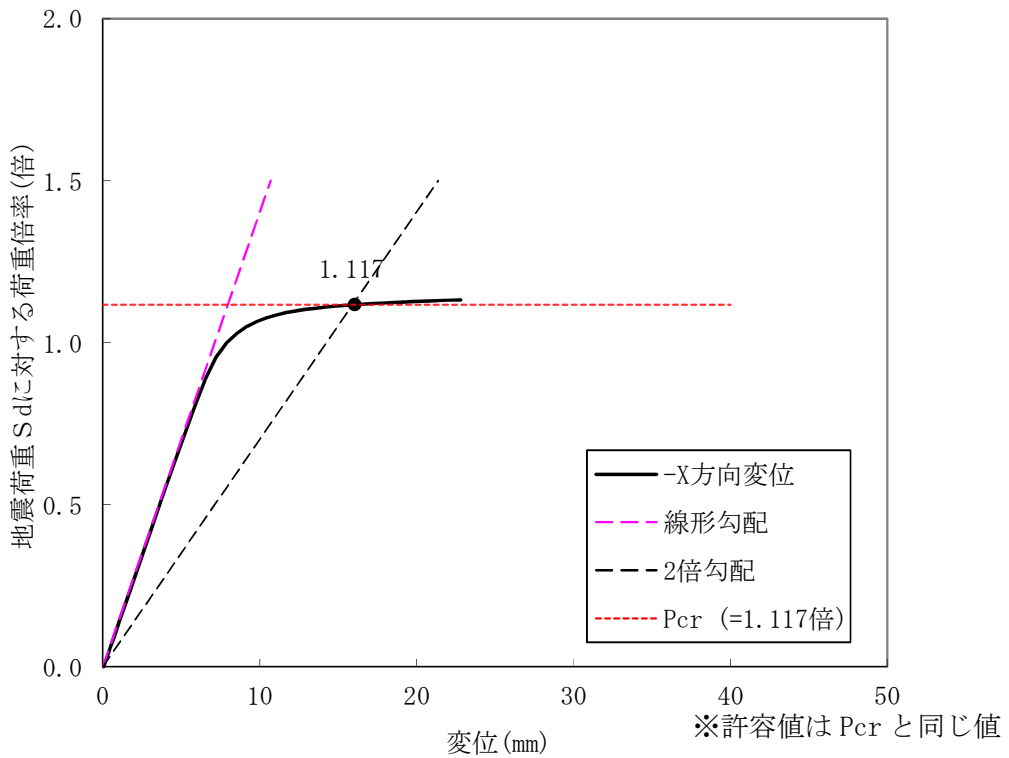


図 3-17 S_d地震時の崩壊荷重の下限の算定結果 (最外周位置 周方向に荷重負荷)

表 3-4 崩壊荷重の下限の算定結果

スタンドパイ プ位置	水平力及びモー メント負荷方向	許容応力 状態	裕度 (Pcr/地震荷重)	裕度 ^{※2} (許容荷重/地震荷重)
中央部	—	IV _A S	1.134	1.02
最外周部	中心方向	IV _A S	1.144	1.02
	リング方向	IV _A S	1.151	1.03
	周方向	IV _A S	1.142	1.02
中央部	—	III _A S	1.108	1.10
最外周部	周方向 ^{※1}	III _A S	1.117	1.11

※1：中心方向，リング方向，周方向のうちIV_ASの裕度が最も低いものを実施

※2：設計・建設規格 CSS-3160 に基づき許容応力状態IV_ASは0.9Pcr，
許容応力状態III_ASはPcrを許容荷重としている。

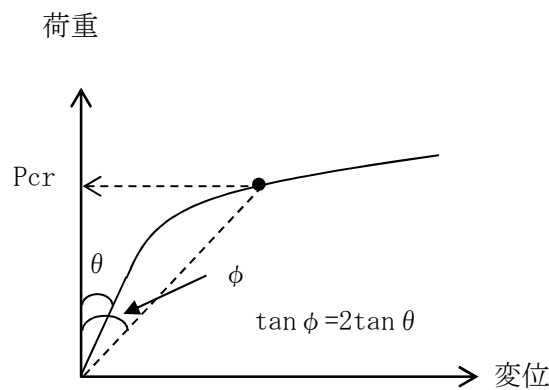
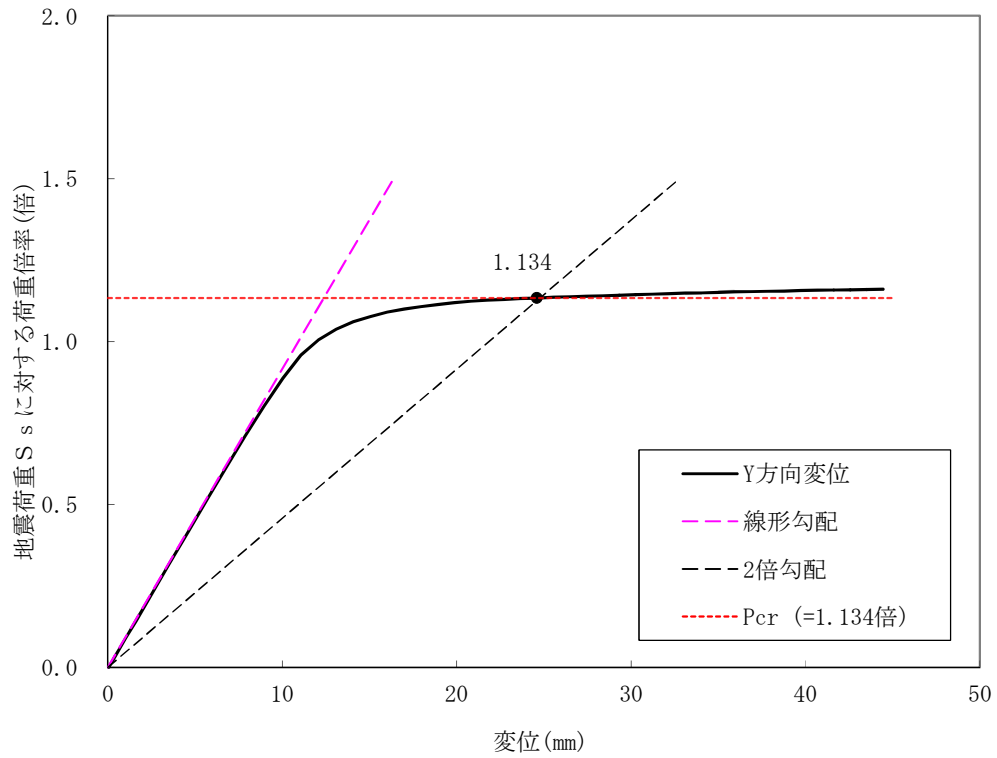
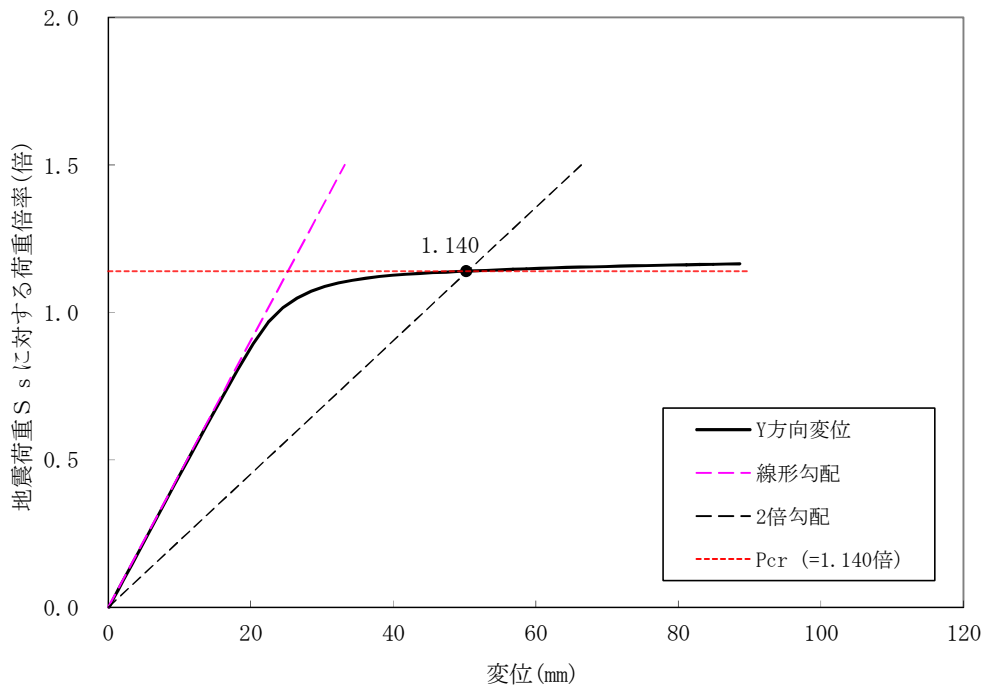


図 3-18 崩壊荷重の下限 (Pcr) の定義

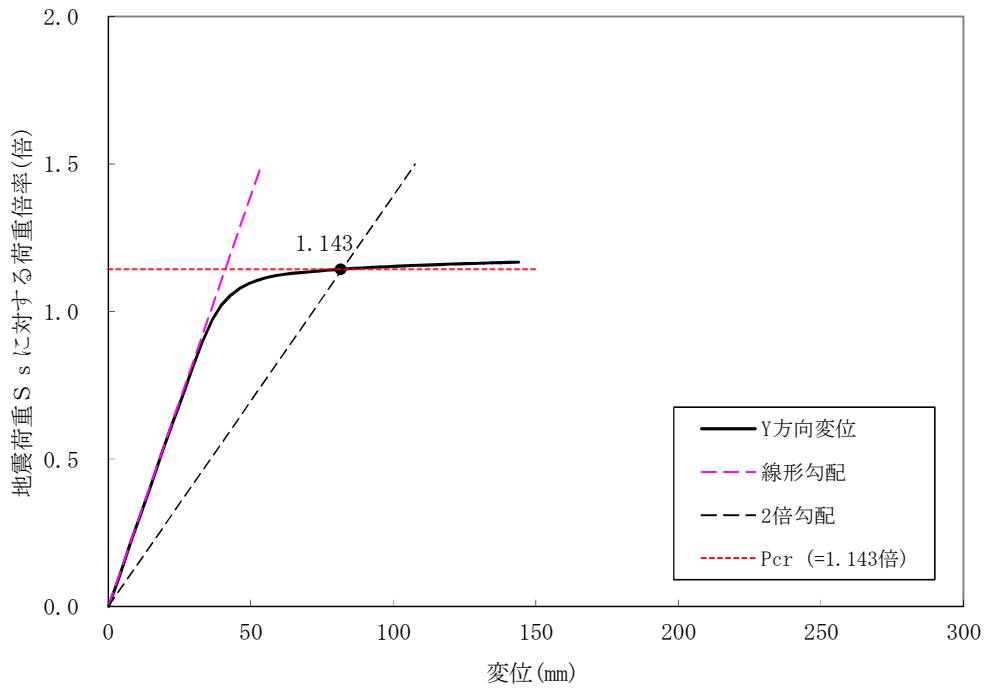


モデル長さ 1000m の場合

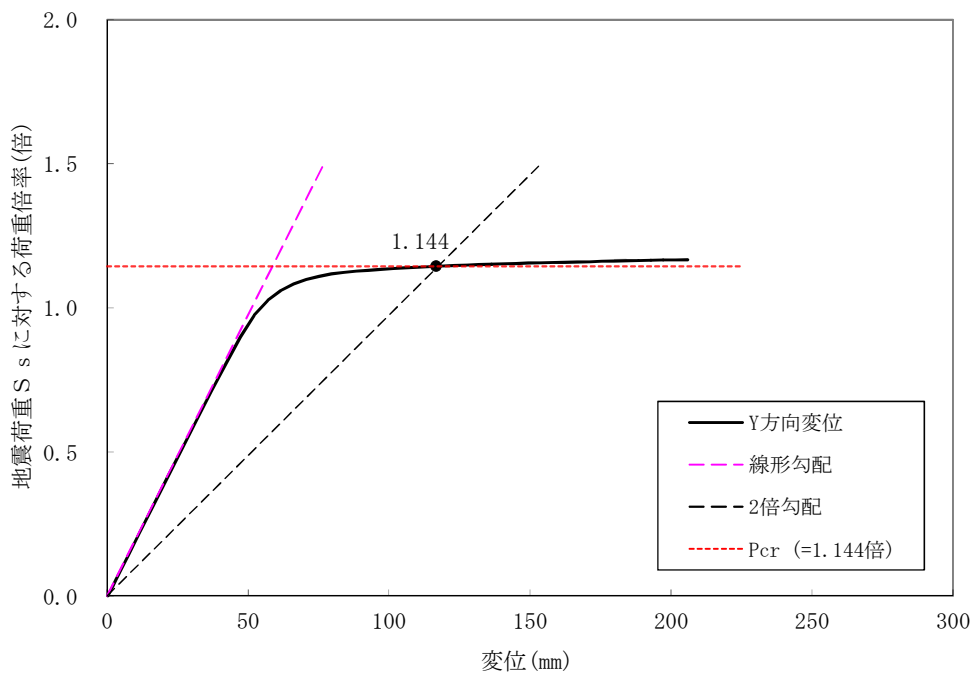


モデル長さ 1500mm の場合

図3-19 長さを変化させた場合の極限解析結果 (1/2)



モデル長さ 2000mm の場合



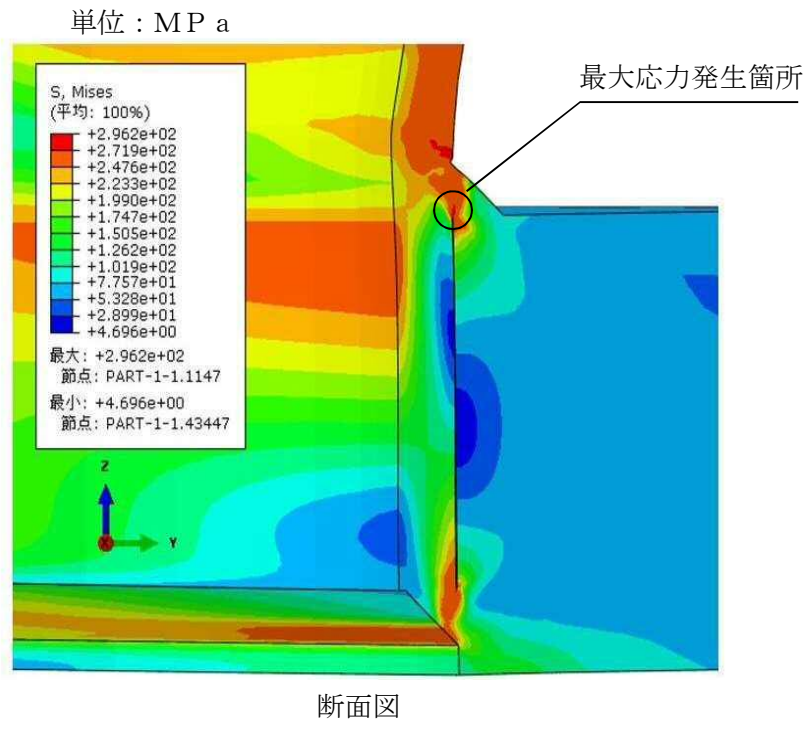
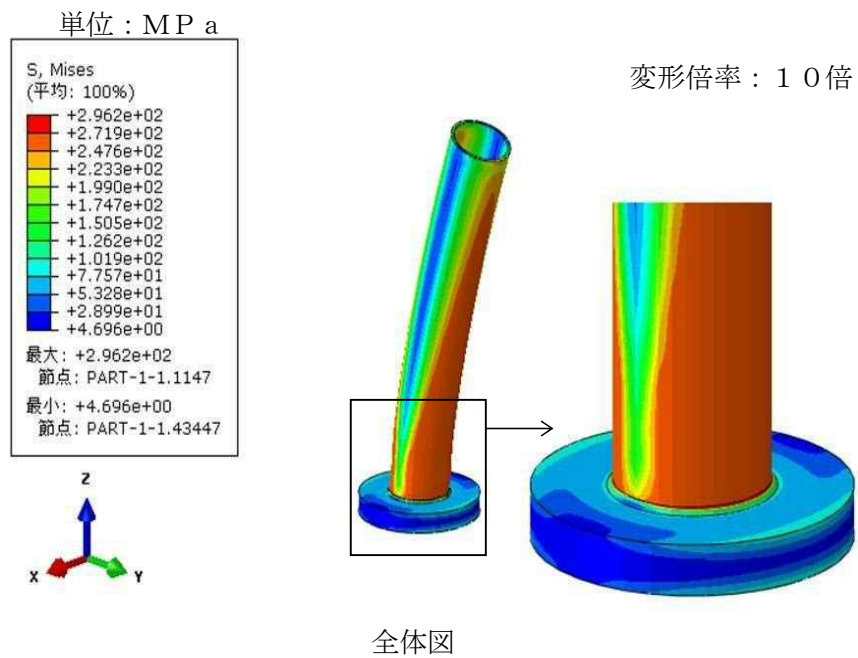
モデル長さ 2500mm の場合

図3-19 長さを変化させた場合の極限解析結果 (2/2)

表 3-5 モデル長さを変化させたときの影響検討結果

モデル長さ [mm]	許容応力 状態	裕度 (P_{cr} /地震荷重)	裕度* (許容荷重/地震荷重)
1000	$IV_A S$	1.134	1.02
1500	$IV_A S$	1.140	1.02
2000	$IV_A S$	1.143	1.02
2500	$IV_A S$	1.144	1.02

※：設計・建設規格 CSS-3160 に基づき許容応力状態 $IV_A S$ は $0.9P_{cr}$ を許容荷重としている。



応力分布図

図3-20 崩壊荷重の下限 (P_{cr}) での応力・ひずみ分布 (中心位置) (1/5)

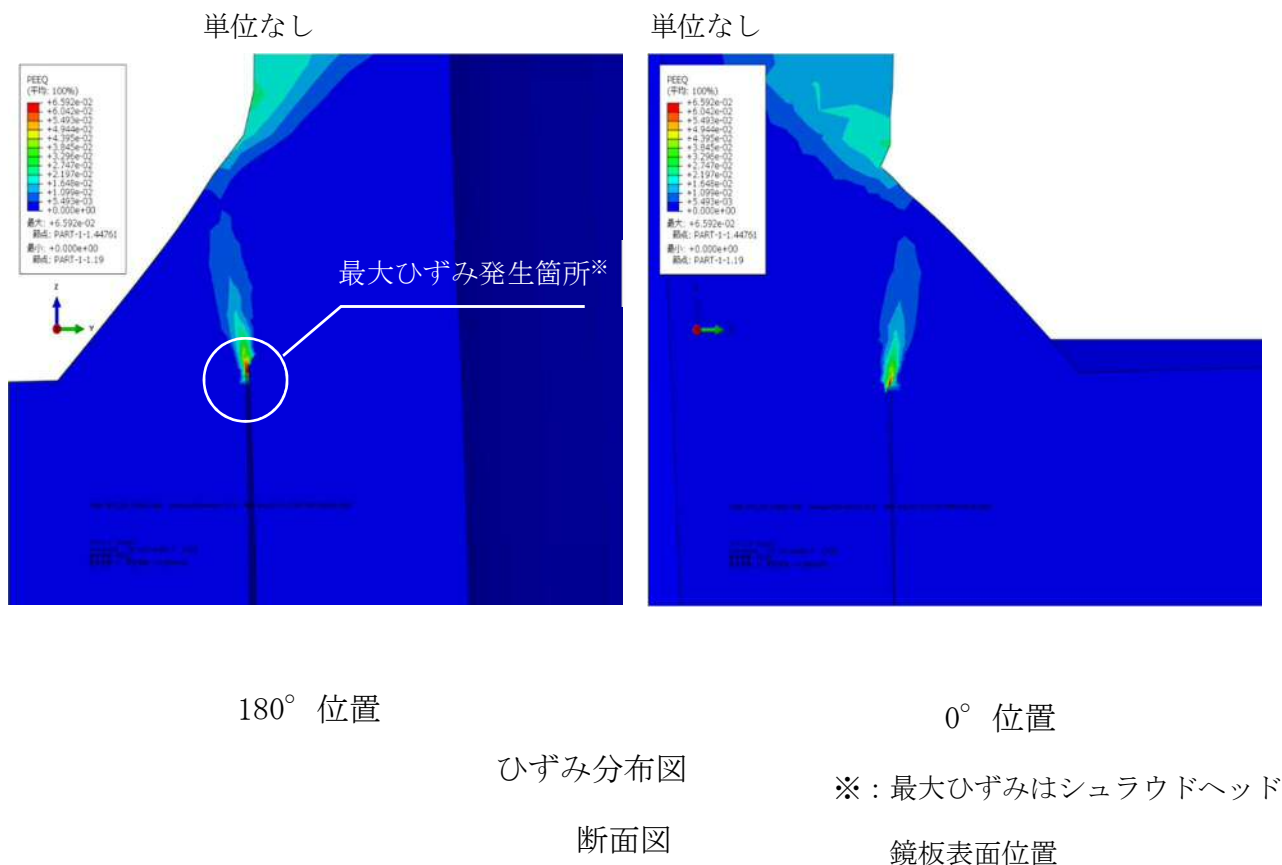
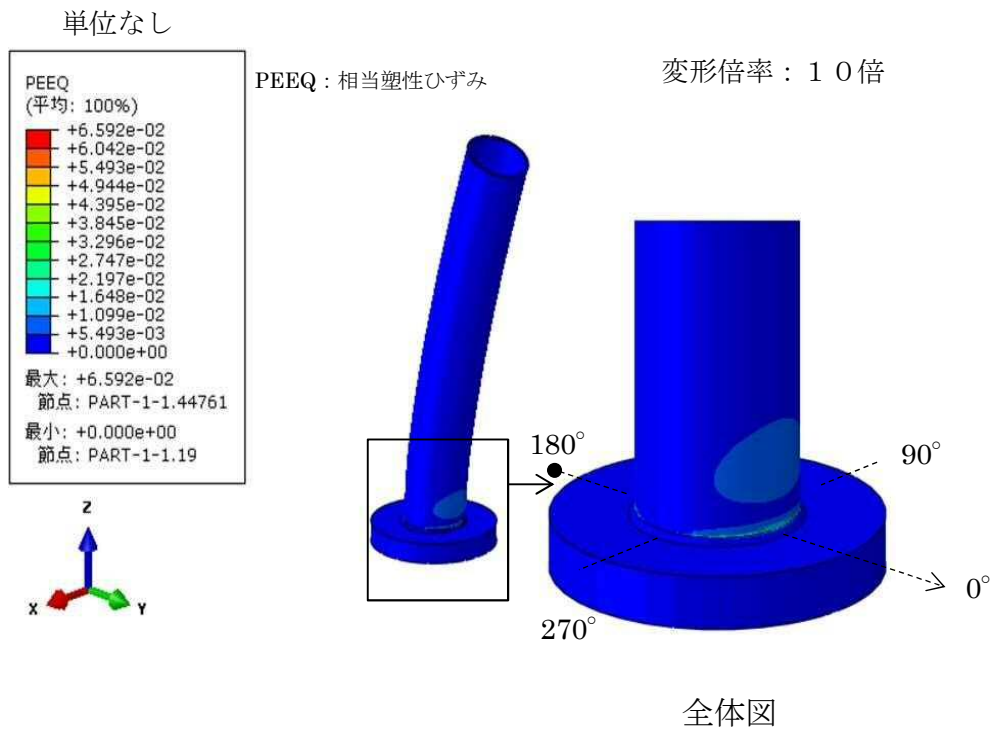


図3-20 崩壊荷重の下限 (Pcr) での応力・ひずみ分布図 (中心位置) (2/5)

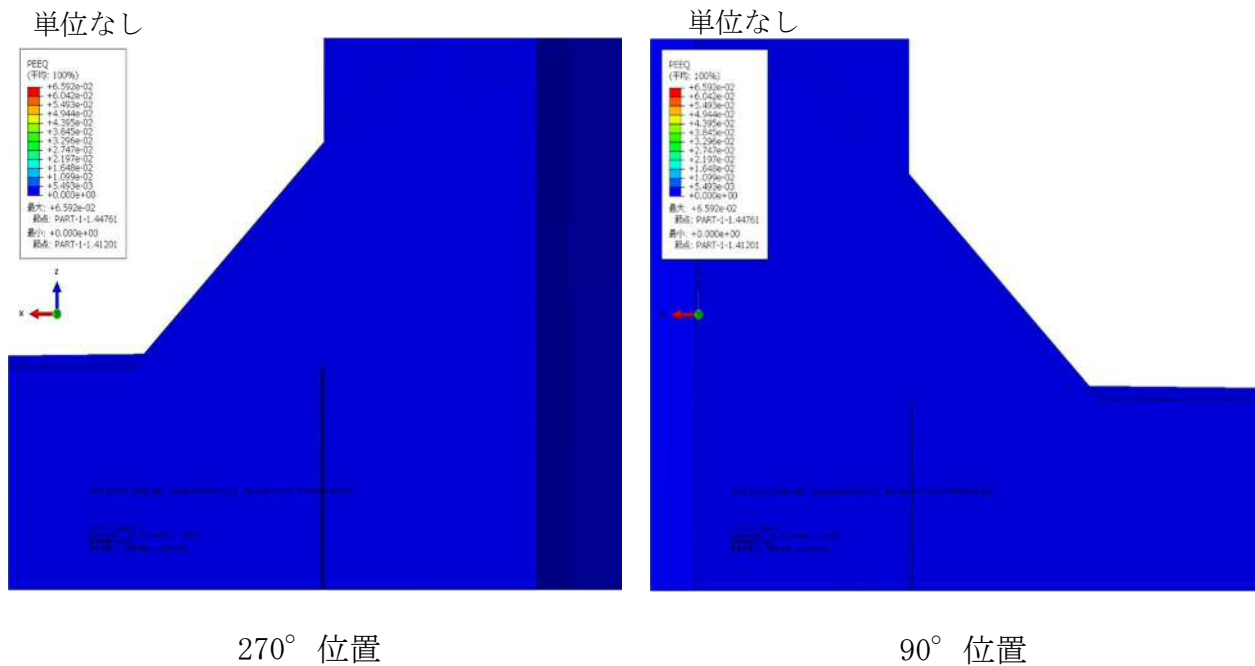
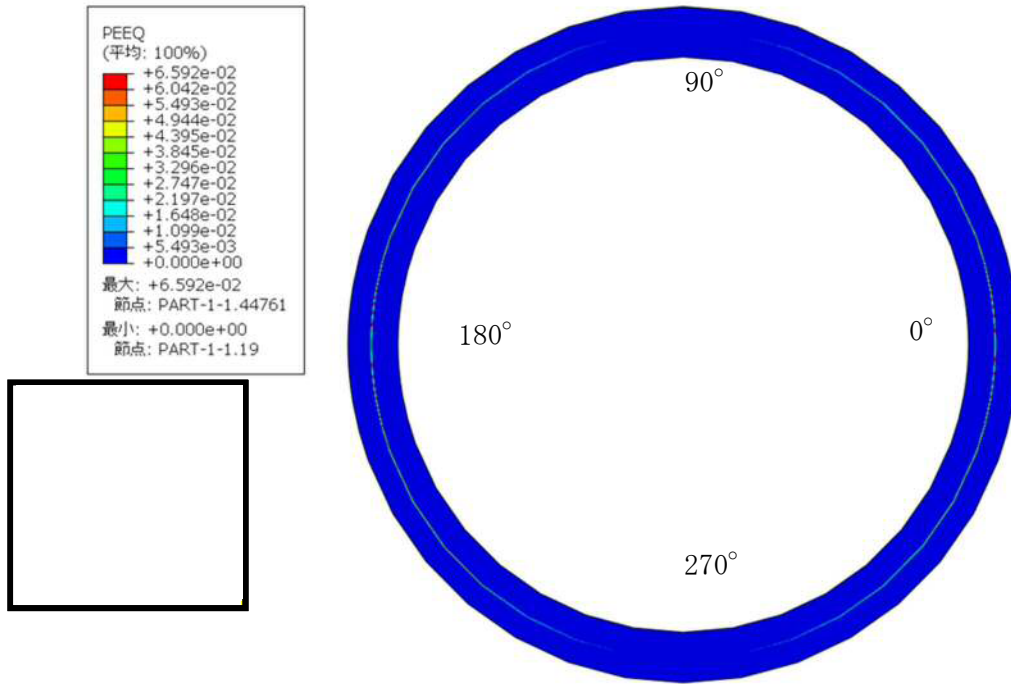


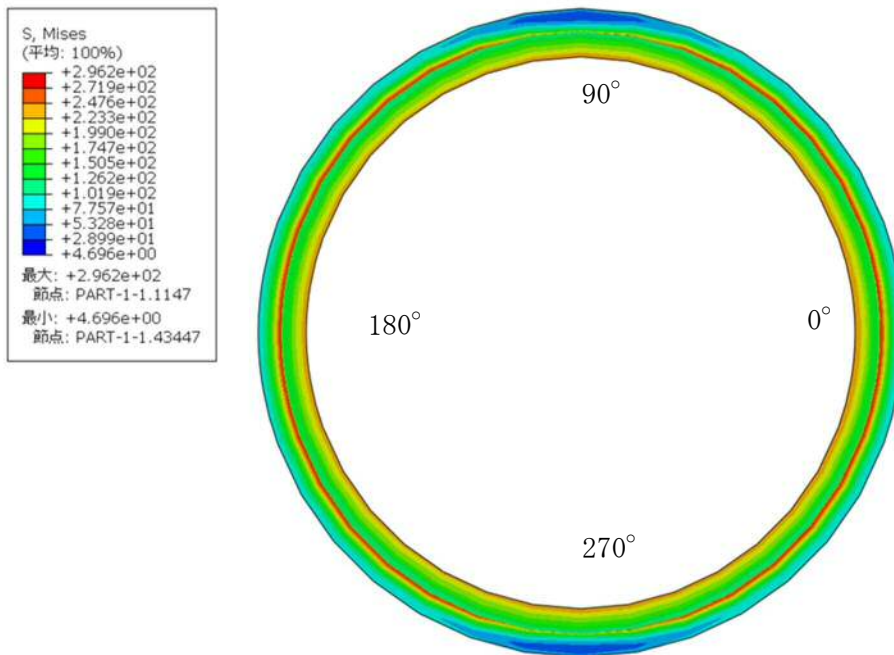
図 3 - 2 0 崩壊荷重の下限 (Pcr) での応力・ひずみ分布図 (中心位置) (3/5)

単位なし



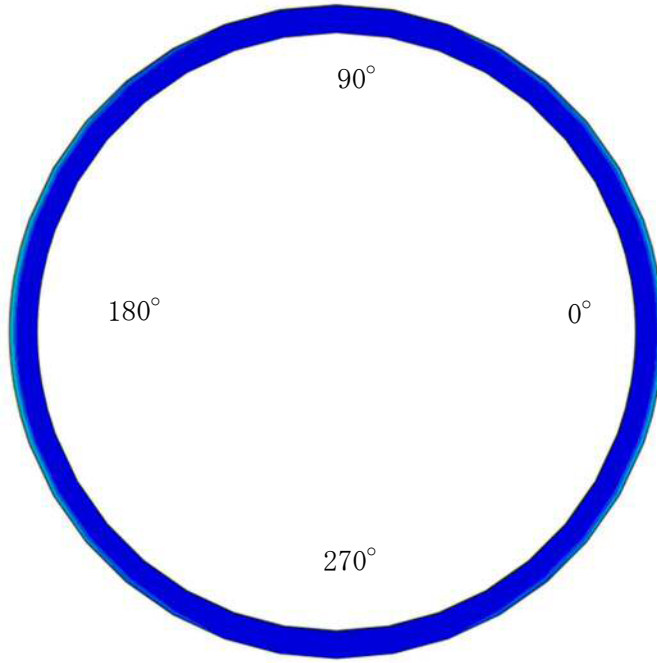
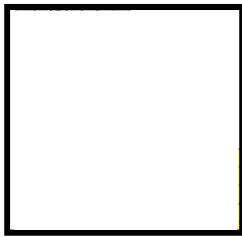
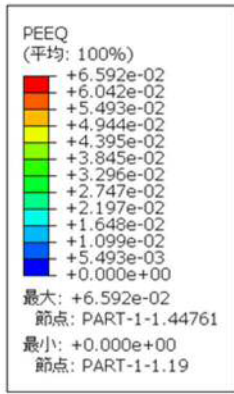
ひずみ分布図 (平面図) 最大ひずみ発生位置高さ

単位:MP a

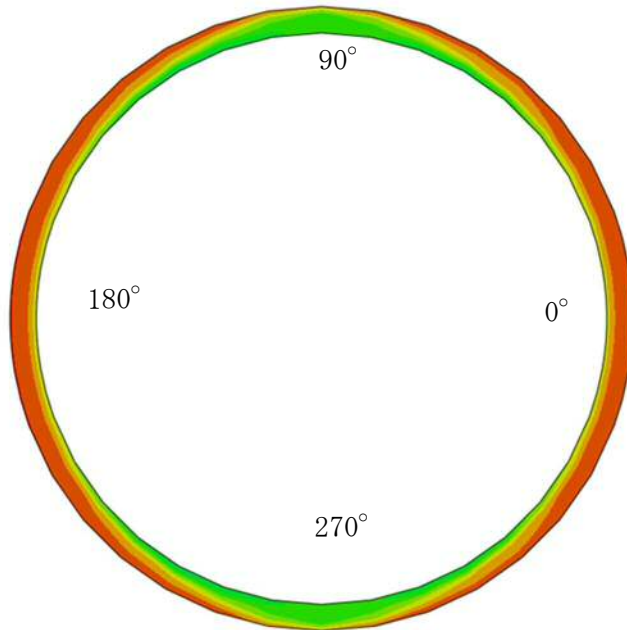
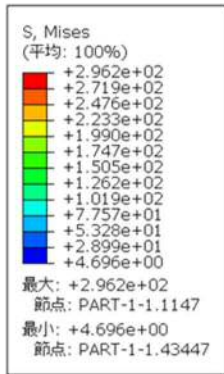


応力分布図 (平面図) 最大ひずみ発生位置高さ

図3-20 崩壊荷重の下限 (P_{cr}) での応力・ひずみ分布図(4/5)

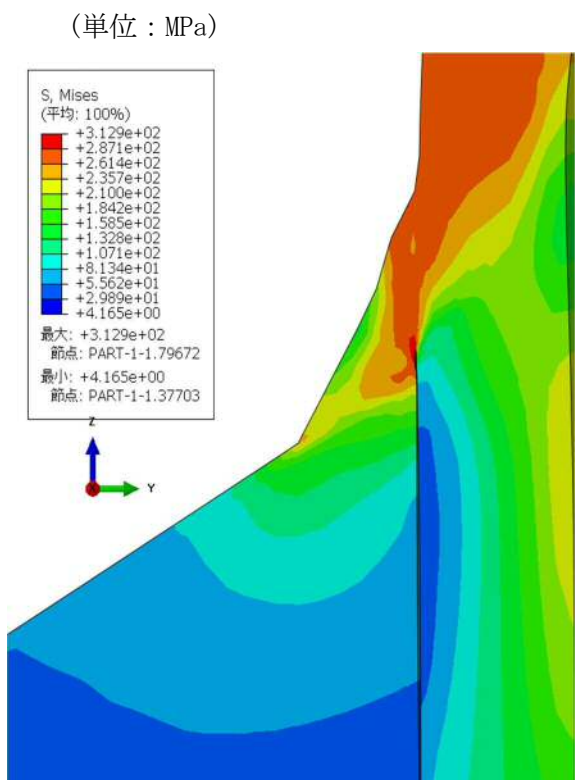
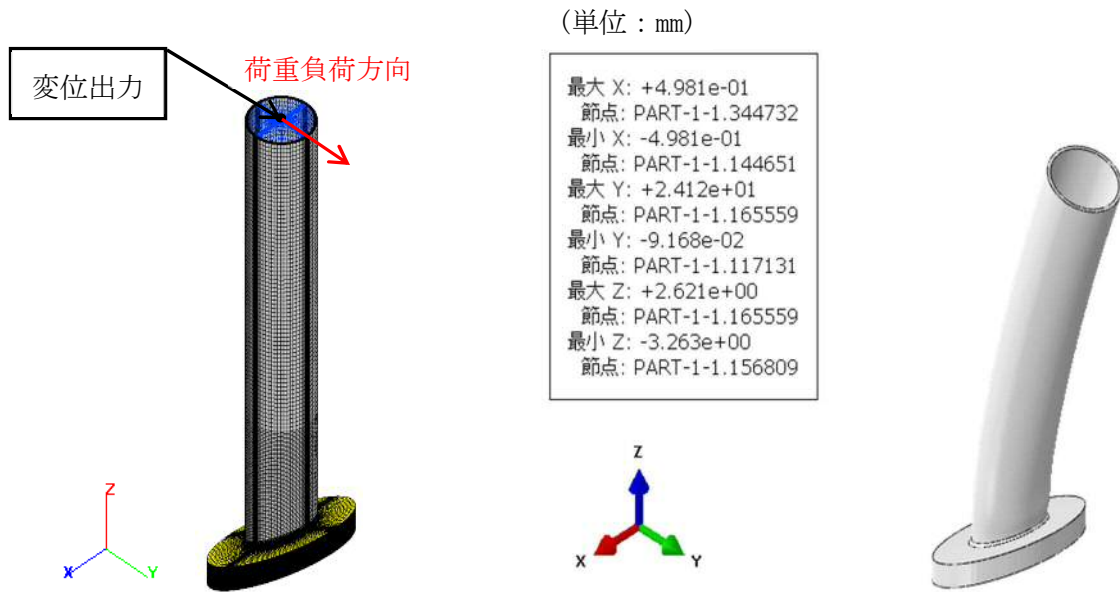


ひずみ分布図 (平面図) 隅肉溶接上端を含む位置

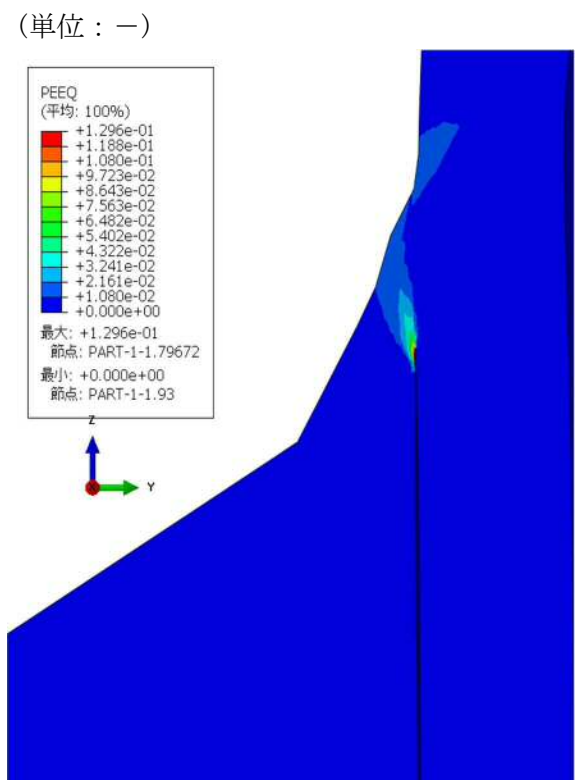


応力分布図 (平面図) (隅肉溶接上端を含む位置)

図 3 - 2 0 崩壊荷重の下限 (Pcr) での応力・ひずみ分布図(5/5)

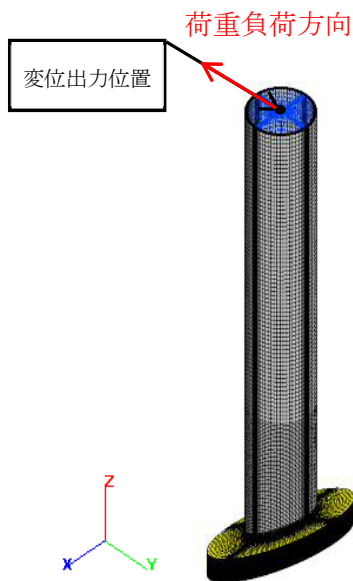


応力分布図(引張側断面)
(2倍勾配交点)



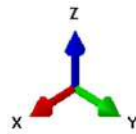
ひずみ分布図(引張側断面)
(2倍勾配交点)

図3-21 崩壊荷重の下限 (Pcr) での応力・ひずみ分布図
(最外周位置 中心方向に荷重負荷)

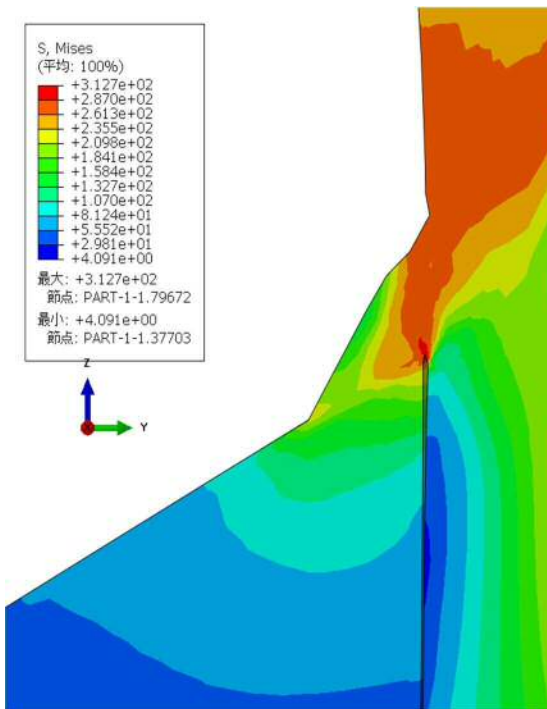


(単位 : mm)

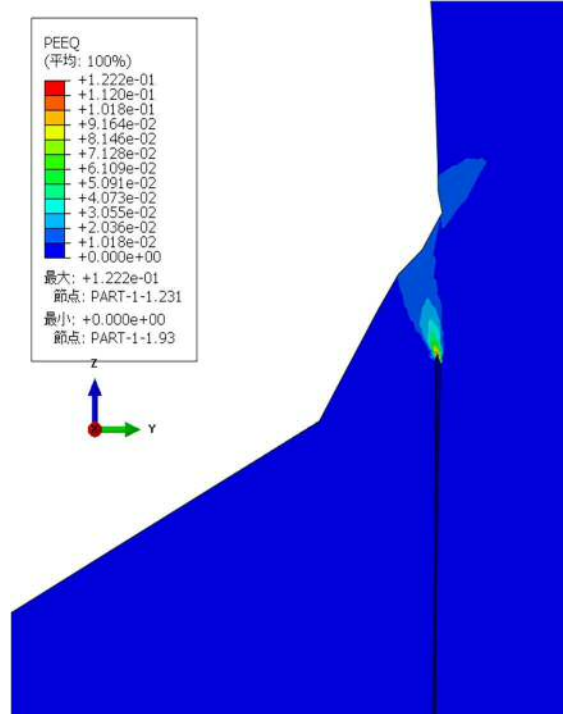
最大 X: +4.248e-01
 節点: PART-1-1.144551
 最小 X: -4.248e-01
 節点: PART-1-1.344632
 最大 Y: +9.590e-02
 節点: PART-1-1.117126
 最小 Y: -2.421e+01
 節点: PART-1-1.156809
 最大 Z: +2.607e+00
 節点: PART-1-1.156809
 最小 Z: -3.327e+00
 節点: PART-1-1.165559



(単位 : MPa)



(単位 : -)



応力分布図(圧縮側断面)

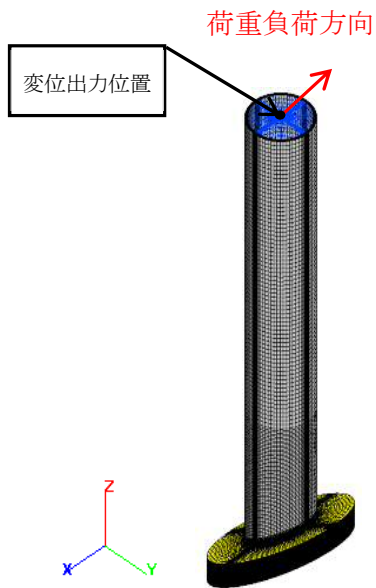
ひずみ分布図(圧縮側断面)

(2倍勾配交点)

(2倍勾配交点)

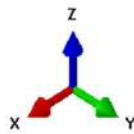
図3-2-2 崩壊荷重の下限 (P_{cr}) での応力・ひずみ分布図

(リング方向に荷重負荷)

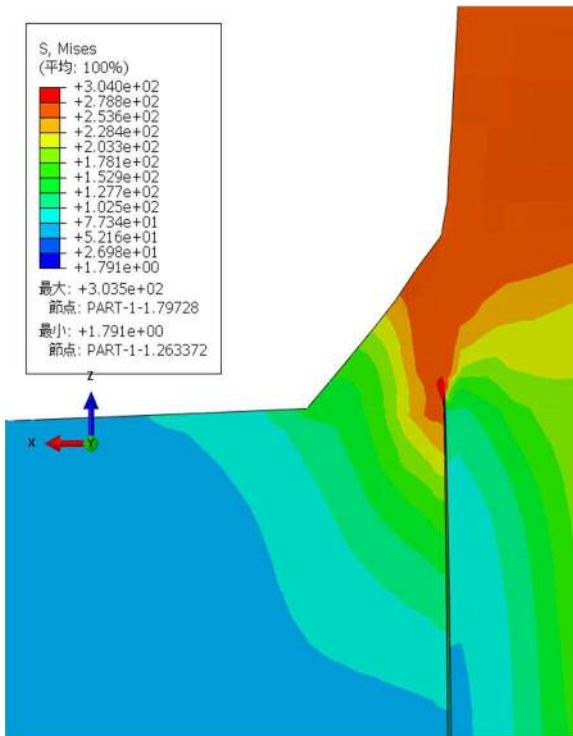


(単位 : mm)

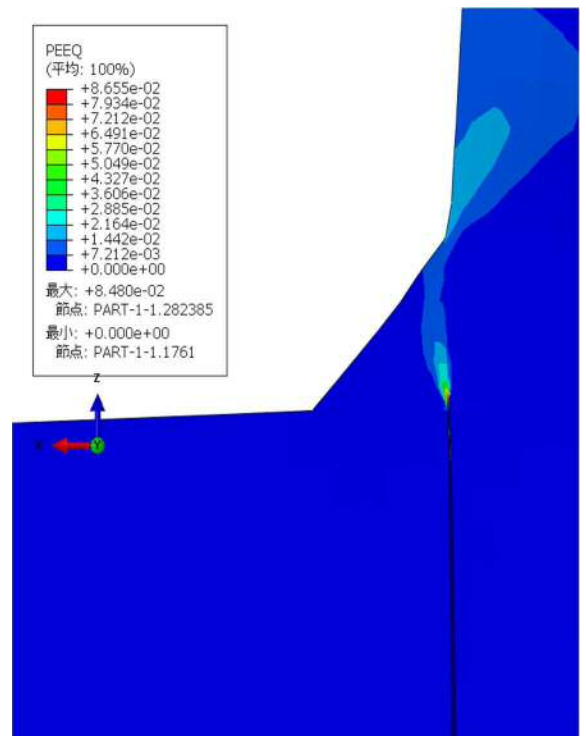
最大 X: +7.514e-02
 節点: PART-1-1.120205
 最小 X: -2.427e+01
 節点: PART-1-1.381740
 最大 Y: +3.257e-01
 節点: PART-1-1.341834
 最小 Y: -3.370e-01
 節点: PART-1-1.141753
 最大 Z: +2.607e+00
 節点: PART-1-1.360600
 最小 Z: -3.285e+00
 節点: PART-1-1.160799



(単位 : MPa)



(単位 : -)



応力分布図(引張側断面)

ひずみ分布図(引張側断面)

(2倍勾配交点)

(2倍勾配交点)

図3-23 崩壊荷重の下限 (P_{cr}) での応力・ひずみ分布図

(周方向に荷重負荷)

(3) 極限解析に対する試験による確認

スタンドパイプにおける今回工認の申請は、極限解析を用いてスタンドパイプ部の有する耐力が地震荷重以上であることを確認することで、地震時における健全性を評価している。極限解析は、これまでの工認での適用例としてPWRの炉内構造物での適用実績はあるが、表3-6に示すように、適用範囲及び解析手法は同じであるものの、適用部位が異なる。なお、先行PWRと同様に東海第二発電所のスタンドパイプへの極限解析の結果が保守性を有することを補足的に確認する観点から、縮尺の試験体を用いた試験を行う。

表3-6 先行実績と東海第二との比較

	先行PWR	東海第二
適用範囲	炉内構造物	同左
適用部位	ラジアルサポート	スタンドパイプ
適用規格	J S M E 設計・建設規格 CSS-3160	同左
解析手法	3次元FEMによる 弾塑性解析	同左

4. 試験による確認について

4.1 はじめに

東海第二の気水分離器及びスタンドパイプのうち、スタンドパイプの耐震評価においては、今回工認では、極限解析を用い、スタンドパイプの耐力が地震荷重以上であることを確認することで地震時における健全性を評価している。極限解析はこれまでの工認で適用例が少ないため、実機スタンドパイプ及びシュラウドヘッドの一部を縮尺した試験体を用いた試験を実施し、極限解析を用いたスタンドパイプの耐震評価手法の保守性を確認する。

4.2 試験目的

試験は、スタンドパイプとシュラウドヘッド部を模擬した縮尺試験体（以下、単に「試験体」という。）に荷重（モーメント）を作用させる試験を実施し、スケール則を考慮してスタンドパイプが負担することができる最大の荷重（以下「限界荷重」という。）を求める。

試験にて得られた限界荷重が極限解析にて得られた崩壊荷重の下限(P_{cr})より大きいことを確認することで、極限解析の保守性を確認する。

4.3 試験内容

(1) 実施項目

東海第二のスタンドパイプ及びシュラウドヘッドを模擬した縮尺試験体にモーメントを作用させる試験を実施した。

(2) 試験内容

a. 試験体

解析結果から中心位置の方が若干 P_{cr} が低い結果であるため、中心位置を代表とした試験体とする。地震による荷重は鉛直荷重、水平荷重及びモーメントが発生するが、モーメントが支配的な荷重であるため、モーメントを負荷できる試験体とした。

試験体は、スタンドパイプの構造を模擬した縮小モデルとし、試験体のサイズは、試験装置が具備する恒温槽の寸法制限を考慮して外径及びスタンドパイプ板厚で

1/3 スケールとした。試験体の材料は実機と同等のものを使用した。

試験体の仕様を表 4-1 に示す。また、試験体の概略図を図 3-1 に、試験装置の概略図を図 4-1 に示す。試験体は、試験装置の荷重負荷を考慮して、シュラウドヘッドを模擬した鋼板に 2 本のスタンドパイプを模擬した管を溶接にて取付け、下側のスタンドパイプを試験装置に固定し、上側のスタンドパイプを上方へ引っ張ることにより、スタンドパイプ付根にモーメントを作用させた。

なお、シュラウドヘッドは固定しておらず、また、シュラウドヘッドは試験結果への影響が軽微と考え、厚い平板で模擬した。

試験では、試験体に荷重を加えながら変位を計測し、限界荷重を確認した。

b. 試験方法

試験は、恒温槽を具備した試験装置に試験体を取り付け、301 °C（運転状態 I，II の最高温度）の高温状態にて、試験体に上方へ荷重を負荷しながら変位を計測することにより実施した。

なお、変位については 2 本のスタンドパイプの変位であることから、変位に 1/2 を乗ずることにより 1 本のスタンドパイプの変位として整理している。

表 4-1 縮尺試験体の仕様

項目		試験体仕様	実機仕様
スタンドパイプ			
寸法	外径 (Do)	56.10mm (1/3 スケール)	168.3mm
	内径 (Di)	51.36mm (1/3 スケール)	154.08mm
	板厚	2.37mm (1/3 スケール)	7.11mm
材料		SUS304TP	SUS304TP 相当 (ASME SA-312 Gr. TP304)
シュラウドヘッド鏡板			
寸法	板厚	32mm	50.8mm
材料		SUS304	SUS304 相当 (ASME SA-240 TYPE304)
変位測定位置		鏡板表面から 148mm	鏡板表面から 1000mm (極限解析の変位出力位置)
荷重負荷位置		鏡板表面から 148mm (モーメントアーム)	鏡板表面から 1000mm

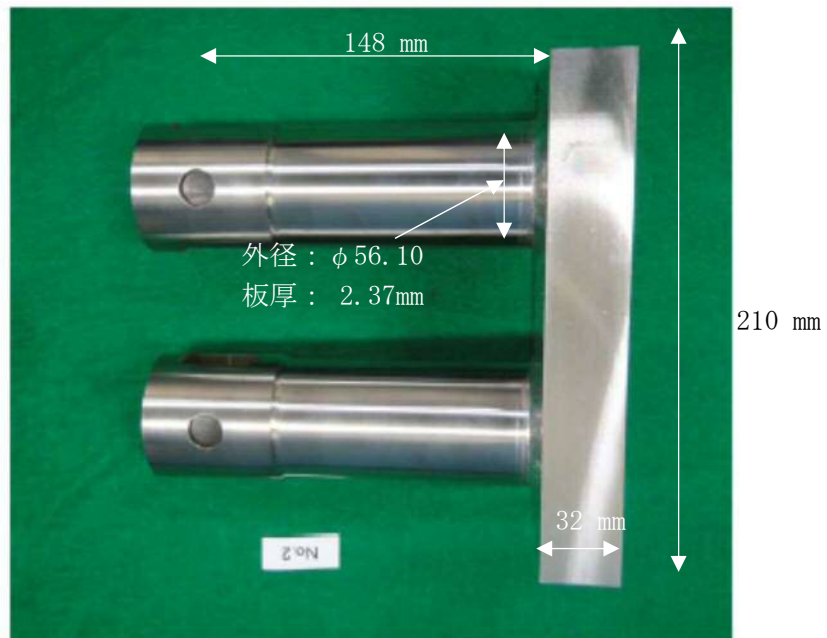
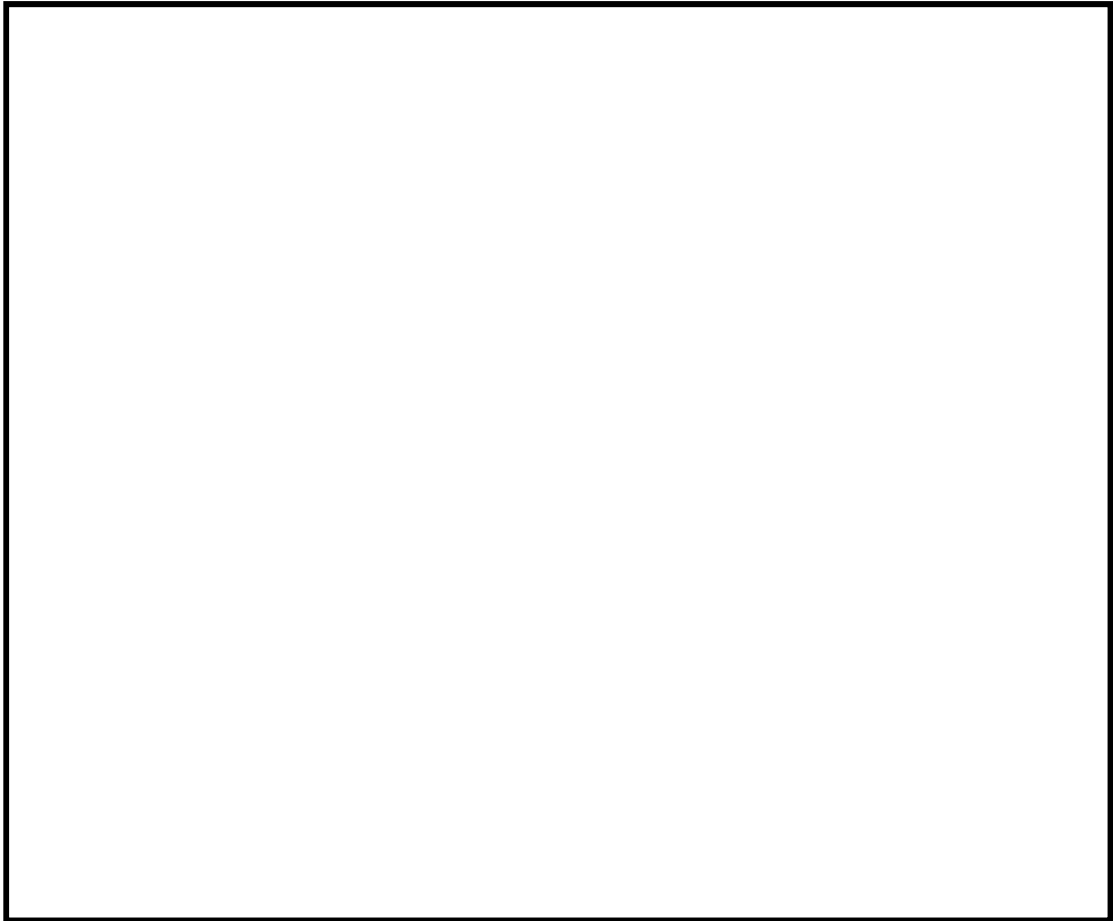


图 4 - 1 試驗体形状

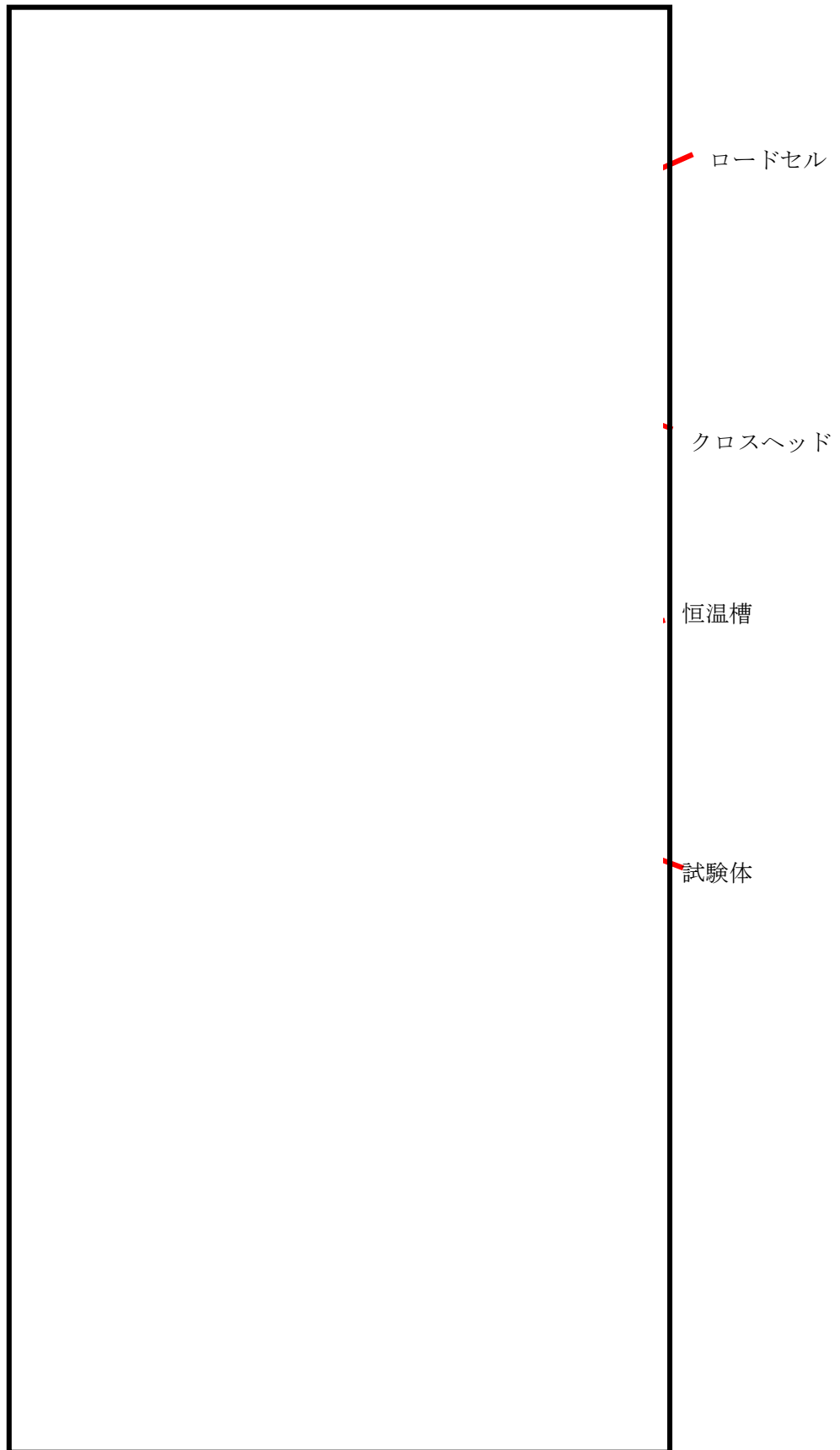
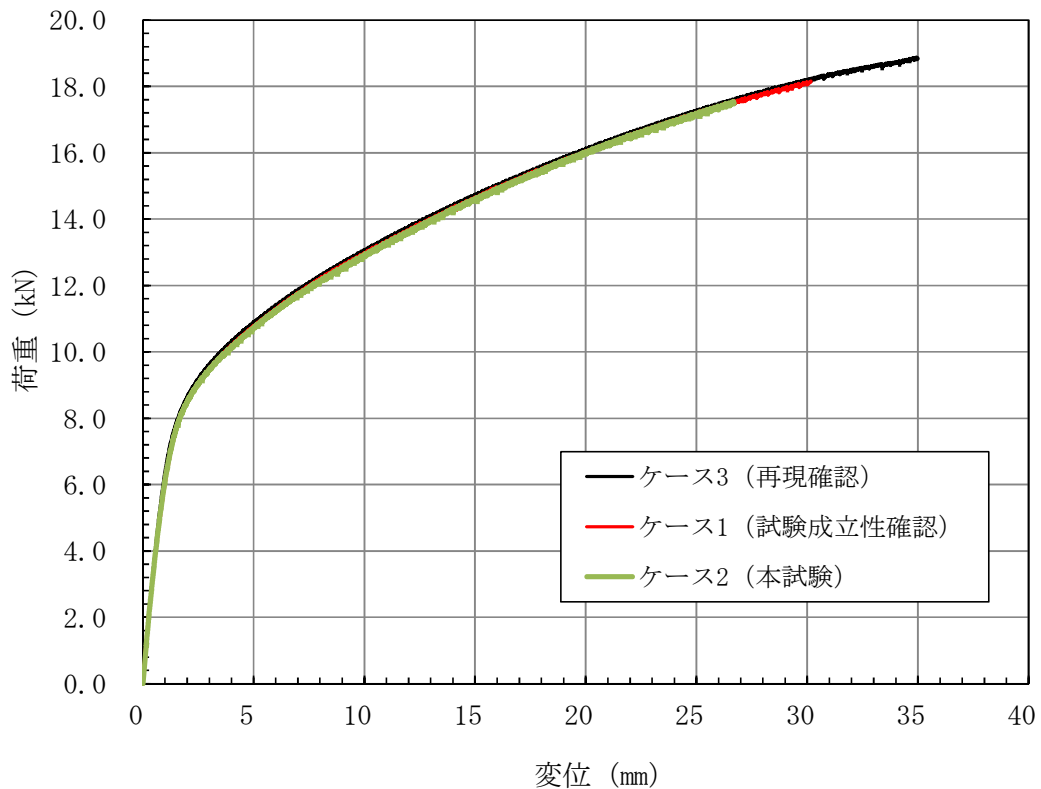


図 4 - 2 試験装置

4.4 試験結果

(1) 試験から得られた荷重変位曲線

試験から得られた荷重変位曲線を図4-3に示す。試験は、試験装置内の試験体と治具との干渉を考慮して、変位が26 mmを超えた時点（荷重：17.5 kN）で試験を終了した。なお、試験については試験成立性確認用、本試験、再現確認用として3回実施しており、それぞれの試験から得られた荷重変位曲線に有意な差はなかったため、本試験データを試験結果としている。



※：試験で得られた変位に1/2を乗ずることにより1本当たりの変位にしている

図4-3 試験から得られた荷重変位曲線

(2) 試験前後及び試験中の試験体の状況

試験前後及び試験中の試験体の状況をそれぞれ図4-4に示す。試験結果から、スタンドパイプ及びシュラウドヘッドを模擬した試験体に亀裂、損傷は確認されなかった。

この結果から、試験体の限界荷重としては、少なくとも17.5 kNであることが確認された。



試験前



試験後

図4-4 各試験段階での試験体の状態 (1/2)



試験中



試験後

図4-4 各段階での試験体の状態 (2/2)

(3) スケール則を踏まえた試験結果と極限解析結果の比較

試験により求められた荷重変位曲線から、スケール則及びスタンドパイプ付根部に掛かる荷重（モーメント）を考慮して実機寸法における荷重変位曲線を作成し、極限解析結果と比較評価する。

スケール則は荷重と変位に対してそれぞれ考慮する。荷重及び変位についてのスケール則の考え方は以下の通りである。

試験体のスタンドパイプ付根部に作用するモーメントは、試験装置で負荷した荷重にモーメントアーム（0.148 m）を乗じて求める。荷重（モーメント）に対しては実機寸法と試験体の弾性断面係数と塑性断面係数の比はそれぞれ等しいこと、また、解析モデルと試験体における終局時の断面性状に即していることから塑性断面係数の比^{*}（= 27）を乗じる。

変位に対しては、今回の評価は弾塑性解析により変位を求めており、解析に用いる応力ひずみ線図は弾完全塑性体としており、塑性域の変位は弾塑性体である試験体と異なるため、弾性域での変位比を乗じる。試験体は、各位置で断面形状が異なることから、長さ、断面二次モーメントを考慮した面積モーメント法により変位を求める。実機はたわみの式により変位を求め、実機と試験体の変位比（= 20.4）を乗ずる（算出方法は補足－1参照）。

このスケール則を考慮した結果を表4－2に示す。極限解析で得られる崩壊荷重の下限値(P_{cr})よりも試験で得られた値の方が耐力を有するため保守的であることがわかる。また、スケール則を考慮した試験体の荷重変位曲線と極限解析結果の荷重変位曲線を重ね描いたものを図4－5に示す。

なお、試験結果と極限解析結果の弾性範囲で傾きが異なるが、これは極限解析ではスタンドパイプ下端を固定端として計算しておりスタンドパイプのみの変位であるが、試験ではスタンドパイプの変位のほかに鏡板やピンのたわみ等も含まれるため解析に比べて大きな変位となると考える。また、本試験目的は解析と試験で得られた荷重の比較を示すものであるが、補足－2に鏡板、ピンのたわみを除いた結果を示す。

※：円筒形の塑性断面係数 Z_p （= $(D_o^3 - D_i^3) / 6$ ）の比

D_o ：外径， D_i ：内径

（表3－1に示す実機と試験体それぞれの内外径）

実機の塑性断面係数： Z_p （実機）= 1.849×10^5 [mm³]

試験体の塑性断面係数： Z_p （試験体）= 6.846×10^3 [mm³]

表 4-2 試験結果と極限解析結果の比較

	荷重 (kN)	モーメント (kN・m)	備考
①試験結果	17.5	—	
②試験結果 (付根部に掛かる モーメント)	—	2.59	①×0.148 m (モーメントア ーム)
③試験結果 (スケール則考慮)	—	69.93	②×27 (塑性断面係数の比)
④極限解析(Pcr)	—	49.73	降伏点を $\text{Min}[2.3S_m, 0.7S_u]$ とした場合
⑤極限解析(Pcr)により 得られる許容荷重	—	44.75	許容応力状態IV _A S (許容荷重=0.9×④)

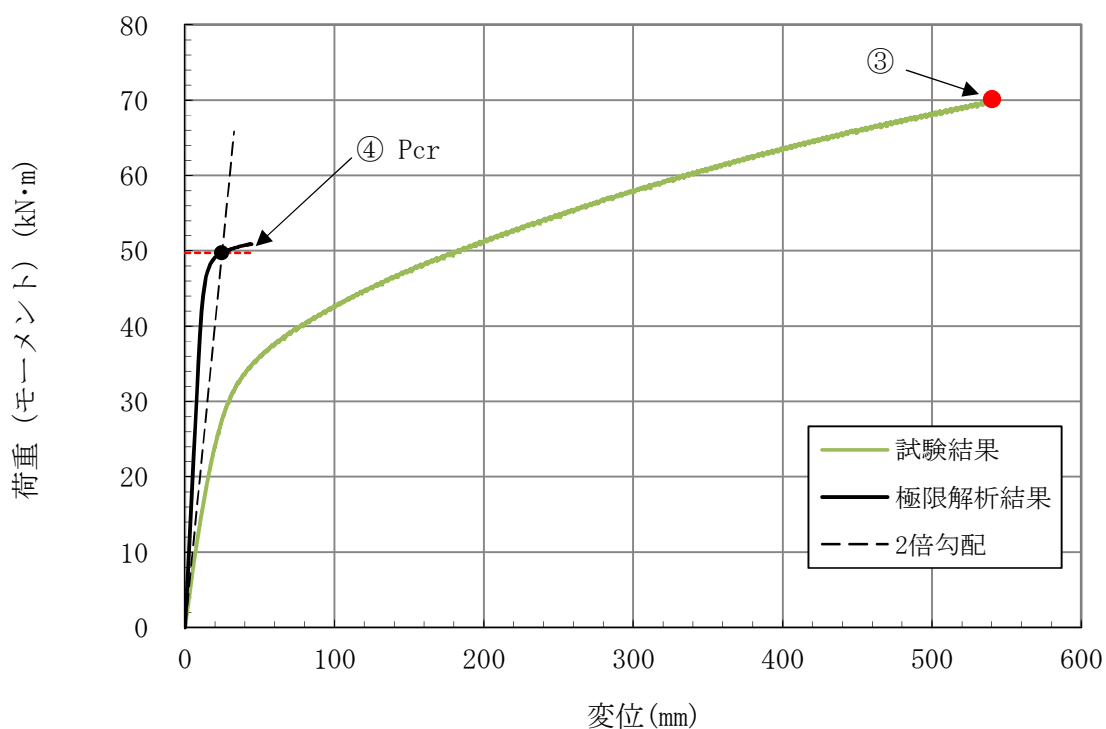


図 4-5 試験結果と極限解析結果の比較

4.5 まとめ

東海第二のスタンドパイプの縮尺試験体に荷重（モーメント）を作用させる試験を実施した結果、限界荷重は少なくとも 17.5 kN であり、試験後の試験体に亀裂、損傷は生じていなかった。試験における限界荷重 17.5 kN は、実機のスケールでは 69.93 kN・m に相当し、極限解析により得られる許容荷重（モーメント）44.75 kN・m に対して十分大きいことがわかった。

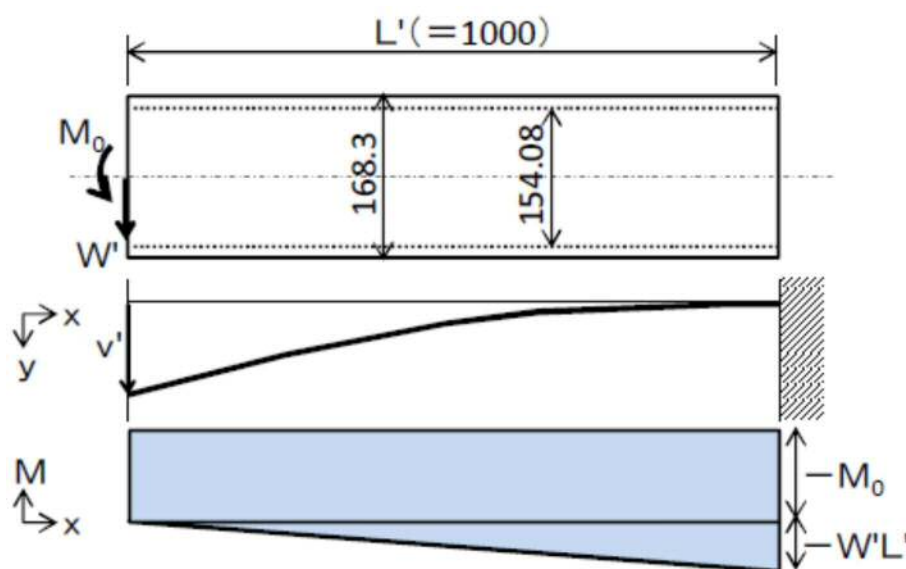
以上より、極限解析による評価手法は十分な保守性を有していることを確認した。

また、試験体に対する極限解析については別紙－1 に示すとおり、試験体に対する極限解析にて得られた P_{cr} (13.7 kN) よりも試験にて得られた許容荷重のほうが十分大きいことを確認した。

変位に対するスケール則の算出について

①実機スタンドパイプ解析モデルの変位の算出

実機スタンドパイプ解析モデルにはスタンドパイプ上面からモーメント及び水平荷重を負荷しているため、それぞれの荷重に対して、材料力学に基づき変位を算出する(下図参照)。



たわみの式より

$$\begin{aligned} v' &= W' L'^3 / (3EI') + M_0 L'^2 / (2EI') \\ &= \sigma Z' (W' / M') L'^3 / (3EI') + \sigma Z' \{1 - (W' / M') L'\} L'^2 / (2EI') \\ &= 5247 \sigma / E \end{aligned}$$

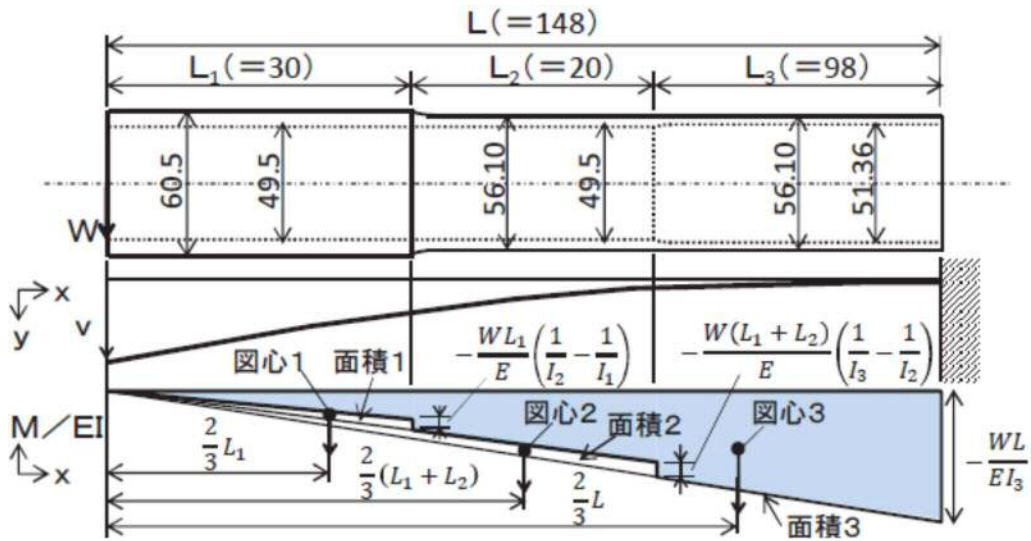
$$M_0 = M' - W' L'$$

実機スタンドパイプの諸元

項目	実機
外径 Do' (mm)	168.3
内径 Di' (mm)	154.08
板厚 t' (mm)	7.11
断面二次モーメント I' (mm^4)	1.172×10^7
変位計測点 L' (mm)	1000
地震荷重 S_s	
W' 水平力 (kN)	3460
M' 曲げモーメント ($kN \cdot mm$)	9870000
W' / M' (mm^{-1})	$3.506E-04$

②スタンドパイプのたわみ v_0

試験体の変位の算出は、引張荷重を付与するために試験体上面に治具を取り付けることによる応力集中によりパイプと板との取付部以外が破損するのを防止するため、試験体上面付近の板厚を 1/3 より肉厚な構造（下図 L1, L2 範囲）にしている。肉厚な構造にすることにより、上面から荷重を負荷した場合、L1, L2 範囲の肉厚構造部の変位の低下を面積モーメント法にて考慮する（下図参照）。



面積モーメント法より

$$\begin{aligned}
 v_0 &= (\text{面積3}) \times (\text{図心3までの距離}) - (\text{面積2}) \times (\text{図心2までの距離}) - \\
 &\quad (\text{面積1}) \times (\text{図心1までの距離}) \\
 &= \{WL/(EI_3)\} \cdot (L/2) \cdot (2L/3) - \{W(L_1+L_2)/(1/I_3-1/I_2)/E\} \cdot \{(L_1+L_2)/2\} \cdot (2(L_1+L_2)/3) \\
 &\quad - \{WL_1/(1/I_2-1/I_1)/E\} \cdot (L_1/2) \cdot (2L_1/3) \\
 &= \sigma Z/E \cdot \{L_2/(3I_3) - (L_1+L_2)^3/(3L) \cdot (1/I_3-1/I_2) - L_1^3/(3L) \cdot (1/I_2-1/I_1)\} \\
 &= 257.1 \sigma / E
 \end{aligned}$$

変位比 $v' / v_0 = 5247/257.1 = 20.4$

試験体の諸元

項目	試験体		
	部位1 (長さ L_1)	部位2 (長さ L_2)	部位3 (長さ L_3)
外径 D_{1o}, D_{2o}, D_{3o} (mm)	60.5	56.1	56.1
内径 D_{1i}, D_{2i}, D_{3i} (mm)	49.5	49.5	51.36
板厚 t (mm)	—	—	2.37
断面二次モーメント I_1, I_2, I_3 (mm ⁴)	3.629×10^5	1.915×10^5	1.446×10^5
変位計測点 L (mm)	148		
長さ L_1, L_2, L_3 (mm)	30	20	98

試験体変位の詳細検討について

1. 概要

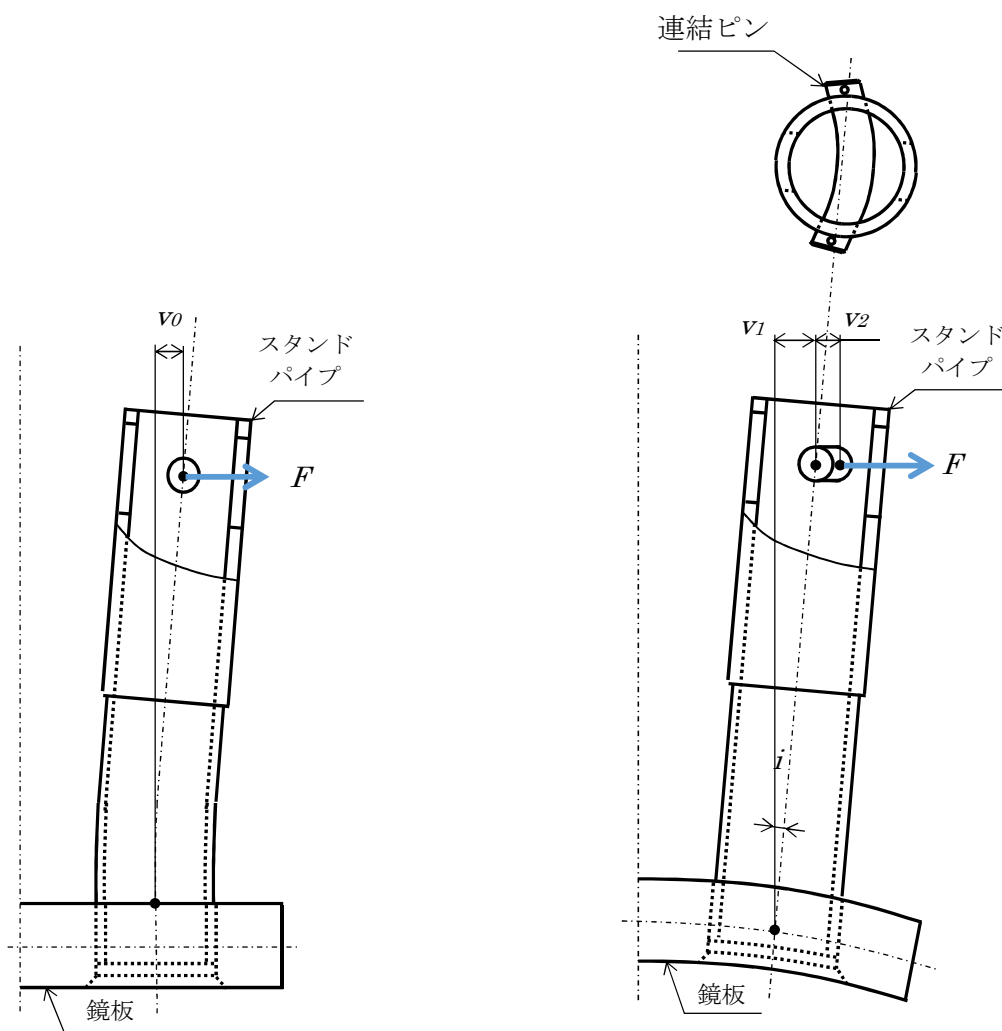
今回の試験体を用いた確認は極限解析により得られた崩壊荷重の下限 (P_{cr}) より試験にて得られた限界荷重の方が大きいことを確認することを目的としたものである。スケール則を考慮した試験体の荷重変位曲線と極限解析で得られた荷重変位曲線では、試験結果の変位を実機スケールに換算するために乗じる変位比を試験結果に含まれる鏡板、ピン等のたわみによる変位にも乗じているため、パイプのみである解析結果とは試験体の弾性範囲においても一致しない。このため鏡板、ピン等のたわみによる変位を除いた変位と解析結果の変位についても詳細検討を行う。

2. パイプ以外の変位

「4. 試験による確認について」で乗じた変位比はパイプの他の鏡板、ピン及び引張試験装置の変位を含んだ試験体の変位に乗じているため、パイプの変位以外を除去する。鏡板及びピンの変位の除去については、材料力学等の理論式に基づき変位を算出し、試験体全体の変位とパイプの変位の比を試験結果で得られた変位に乗じることで除去する。引張試験装置の変位については、試験体間に取り付けたひずみゲージを用いることで、引張試験装置の変位を含まない2点間距離の変位となるため、これを1本の変位にしたものを用いる。

2.1 試験体の変位の算出

試験体の変位は、スタンドパイプの変位の他に連結ピン及び鏡板のたわみによる変位が含まれることから、試験体の変位に対するパイプの変位の比を乗じることによりこれらの変位を除去する（下図参照）。



スタンドパイプのたわみ

鏡板と連結ピンのたわみ

$$\begin{aligned} \text{試験体の変位 } v_T &= \text{スタンドパイプたわみ} + \text{鏡板たわみ} + \text{連結ピンたわみ} \\ &= v_0 + v_1 + v_2 \end{aligned}$$

①鏡板のたわみによる変位 v_1

傾斜 $i(x)$ は、以下により求める。

$$\frac{di(x)}{dx} = \frac{M}{EI_1}$$

$$i(x) = \frac{M}{EI_1} x$$

よって、

$$i = i(a) = \frac{M}{EI_1} a$$

ここで、

$$M = F \left(L + \frac{T}{2} \right)$$

$$I_1 = \frac{W_e T^3}{12}$$

$$E = 176000 \text{ (MPa)} \text{ (301°Cの SUS304 のヤング率)}$$

$$W_e = \frac{1}{a} \left(Wa - \frac{\pi}{8} D_o^2 \right) \text{ (穴部を考慮した等価幅)}$$

変位 v_1 は、以下により求める。

$$\begin{aligned} v_1 &= i \left(L + \frac{T}{2} \right) \\ &= \frac{Fa(L + T/2)^2}{EI_1} \end{aligned}$$

上式に、スタンドパイプ根元部の応力 σ と F の関係式を代入する。

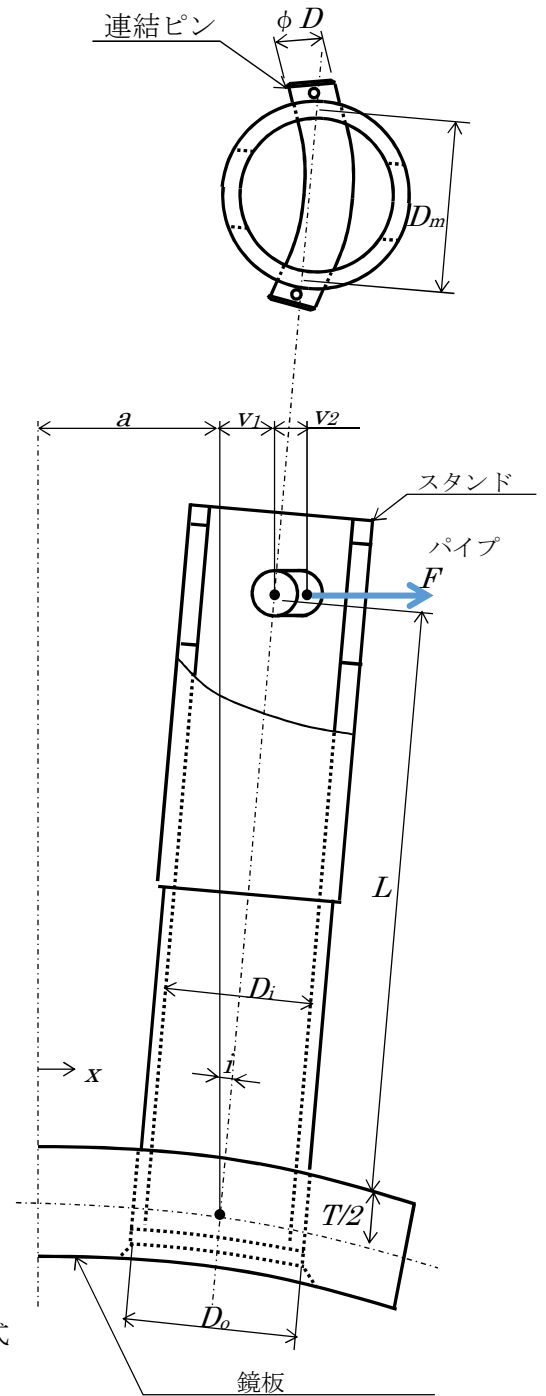
$$\sigma = \frac{FL}{Z}$$

$$F = \frac{\sigma Z}{L}$$

$$Z = \frac{\pi(D_o^4 - D_i^4)}{32D_o}$$

これより、

$$v_1 = \frac{Za(L + T/2)^2 \sigma}{LL_1 E} = 193.5 \frac{\sigma}{E}$$



(幅 W , 板厚 T)

$$a = 55 \text{ (mm)}$$

$$L = 148 \text{ (mm)}$$

$$D = 16 \text{ (mm)}$$

$$T = 32 \text{ (mm)}$$

$$D_m = 55 \text{ (mm)}$$

$$W = 120 \text{ (mm)}$$

②連結ピンのたわみによる変位 v_2

変位 v_2 は、以下により求める。

$$v_2 = \frac{FD_m^3}{48E'I_2}$$

(機械工学便覧 A4-28 No.7 より)

ここで、

$$I_2 = \frac{\pi D^4}{64}$$

$E' = 183000$ (MPa)(301°Cの連結ピン(低合金鋼)のヤング率)

変位 v_2 の式に、スタンドパイプ根元部の応力 σ と F の関係式を代入する。

$$\sigma = \frac{FL}{Z}$$

$$F = \frac{\sigma Z}{L}$$

$$Z = \frac{\pi(D_o^4 - D_i^4)}{32D_o}$$

これより、

$$v_2 = \frac{ZD_m^3 E \sigma}{48Ll_2 E' E} = 36.1 \frac{\sigma}{E}$$

③試験体の全変位 v_T

$$v_T = v_0 + v_1 + v_2 = 486.7 \frac{\sigma}{E}$$

$v_0 = 257.1 \sigma / E$ (補足-1にて得られたパイプの変位)

④試験体の全変位に対するパイプの変位の比

$$\frac{v_0}{v_T} = \frac{257.1}{486.7} = 0.528$$

⑤試験結果に乗じる変位比

試験結果に乗じる変位比 = 実機と試験体の変位比 × 試験体の全変位に対するパイプの変位の比

$$= 20.4 \times 0.528 = 10.8$$

2.2 引張試験装置の変位について

本項に記載している荷重変位曲線の変位は引張試験装置で得られた変位であることから、引張試験装置での変位を除去するため、試験体間に取り付けたひずみゲージの変位を使用する。

3. 詳細検討を反映した荷重変位曲線

2.にて算出したピン、鏡板及び引張試験装置の変位を除いた荷重変位曲線と極限解析結果の荷重変位曲線を重ね合わせたものを図1に示す。図1には試験体の荷重変位曲線も併せて示す。図1に示すとおり、試験体の弾性範囲において解析結果と試験結果が良く一致することを確認した。

なお、その後の変位は差異が生じているが、差異理由については以下の通りである。

極限解析に用いる設計降伏点は設計・建設規格に従い、降伏点を許容応力状態Ⅳ_{AS}ではMIN[0.7Su, 2.3Sm]、Ⅲ_{AS}では1.5Smとしている。オーステナイト系ステンレス鋼のSm値はMIN[1/3Su, 0.9Sy]が採用されており、本評価での使用材料であるSUS304では0.9Syの値の方が低い。このため、許容応力状態Ⅳ_{AS}では2Sy、Ⅲ_{AS}では1.35Syとなるような設計降伏点となり、実際のオーステナイト系ステンレス鋼の降伏点であるSyよりも高い値である(図2参照)。

この理由については、設計・建設規格ではオーステナイト系ステンレス鋼のようにひずみ硬化特性が大きく安全率に余裕があるため、ひずみ硬化特性を考慮して実際の降伏点より高い設計降伏点を定めているとしている(図3参照)。

今回の試験体の降伏点はミルシートから245[MPa](0.2%耐力, 室温)であり、設計・建設規格の室温における設計降伏点 $S_y=205$ [MPa]に対して1.2倍程度高い。これを301℃の降伏点に補正した場合、試験体の降伏点は152MPaであり、解析上の許容応力状態Ⅳ_{AS}での降伏点264[MPa]に対して約1.7倍の降伏点の差異がある。このため、試験体の弾性範囲においては解析結果と概ね一致しているが、その後の変位は差異が生じているものと考えられる。

また、解析と試験体で弾塑性状態における変位挙動が異なる理由は、図3の解説図PVB-3160-1に示すように、解析では設計降伏点以降はひずみ硬化特性を含まない弾完全塑性体であるため、降伏以降は急激に変位が増加するが、試験体はひずみ硬化特性を持つため、

降伏以降も荷重を負荷すると自然に増大していく。このため、それぞれの降伏以降の変位挙動が異なるものとする。

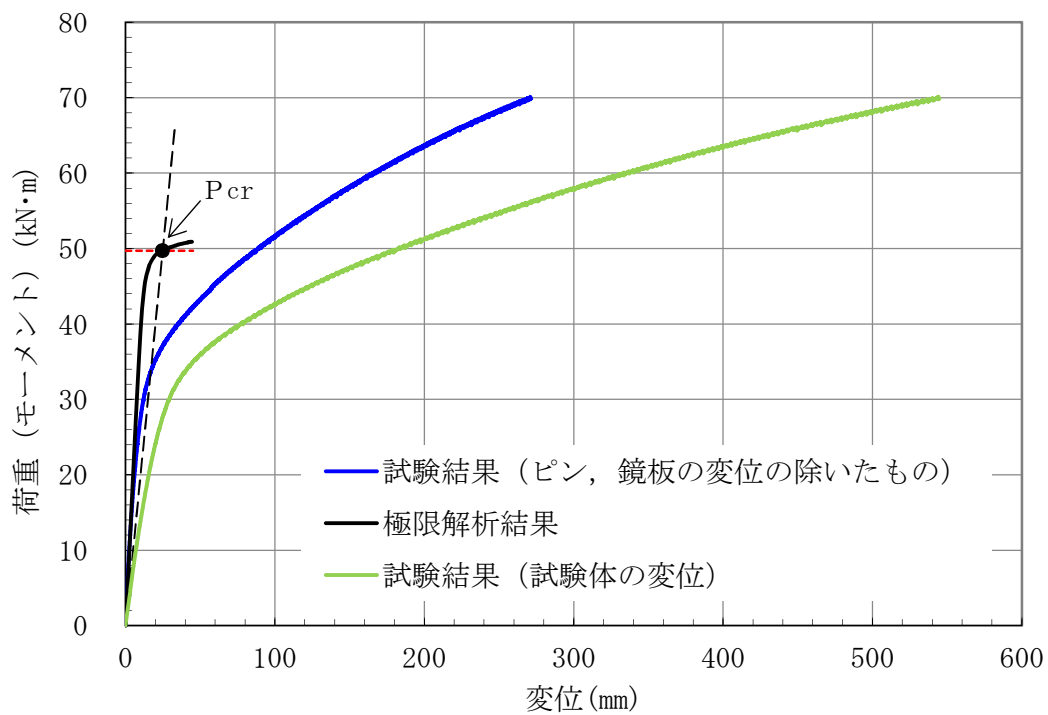


図1 試験結果と極限解析結果の荷重変位曲線
(ピン、鏡板の変位除いて実機スケールに換算したもの)

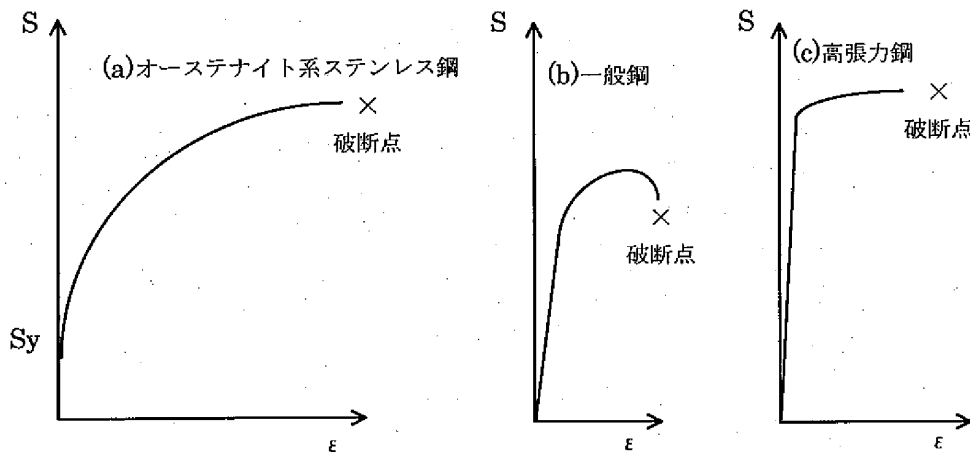
(解説 PVB-3110) ボルト以外の応力評価

PVB-3110 は、クラス 1 容器の応力強さの限界および許容応力について定めたものである。

(中略)

(2) 応力強さの制限の基本的な考え方は、次のとおりである。

各応力に対して定められる応力強さの限界は、基本的には材料の強度試験に基づいている。解説図 PVB-3110-1 に各種材料の引張試験の結果による応力-ひずみ線図の例を示す。



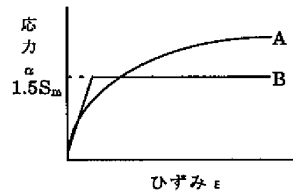
解説図 PVB-3110-1 各種材料における応力とひずみの関係

解説図 PVB-3110-1 は、鋼種による一般的な特性を示したものであるが、一般鋼と比較して、オーステナイト系ステンレス鋼は降伏点に達してもすぐ破断するのではなく、ひずみ硬化によりかなり持ちこたえる。また、それとは反対に高張力鋼は降伏点は高いが、一旦それを超えるとすぐ破断する等の傾向がある。従って、基本となる材料ごとの設計応力強さの S_m 値としては、低合金鋼などの一般鋼材に関しては降伏点の $2/3$ または引張強さの $1/3$ のいずれか小さい方の値にとられているが、オーステナイト系ステンレス鋼では引張強さの $1/3$ またはひずみ硬化を考慮して耐力の 0.9 倍のいずれか小さい方の値がとられている。(解説 GNR-2200 参照)

図 2 設計・建設規格の抜粋 (応力強さの制限の基本的な考え方に関する記載)

PVB-3160 の極限解析において $1.5S_m$ を降伏点とした弾完全塑性体を用いることとしたのは、次のとおりである。

たとえば、ステンレス鋼の応力-ひずみ線図は解説図 PVB-3160-1 の A のようになり、明確な降伏点はなく、このままでは崩壊荷重の解析が複雑になる。そこで、応力-ひずみ線図をより単純にした解説図 PVB-3160-1 の B のようなものを想定して、対象物の荷重-変位曲線を求めようとするものである。



解説図 PVB-3160-1 応力-ひずみ線図の例

ここでは、設計条件および供用状態 C については、材料の降伏点を設計応力強さの 1.5 倍 ($1.5 S_m$) とする弾完全塑性体と考える。 S_m は、 $2/3 S_y$ 以下にとっている場合は、 $1.5 S_m$ は、ほぼ S_y に等しくなる。

高温におけるオーステナイト系ステンレス鋼等の場合のように、 S_m が $0.9S_y$ の場合は、ほぼ $1.35S_y$ になるので、一見不安全側になるようにとらえられやすいが、オーステナイト系ステンレス鋼等の場合は、明確な降伏点がなく、0.2% 耐力を S_y と考えると降伏点は低くなり、また高いひずみ硬化性があり、構造設計の安全性という観点からみれば、 $1.5 S_m$ を降伏点にとっても、フェライト系材料とほぼ同じ効果があると判断できる。

(中略)

供用状態 D については、材料の降伏点を設計応力強さの 2.3 倍 ($2.3 S_m$) と設計応力強さの 0.7 倍 ($0.7S_u$) の小さい方とする弾完全塑性体と考えて、前述と同様にして崩壊荷重の下限を求め、これを P_{cr} とする。この時の許容限界は、次のように表わすことができる。

$$\text{供用状態 D} \quad P_c \leq 0.9 P_{cr}$$

供用状態 D における安全率のとり方は、ASME B&PV Code Section III に従っている。

図 3 設計・建設規格の抜粋 (極限解析での応力-ひずみ線図の設定に関するもの)

5. 1本あたりの地震荷重の算出について

5.1 詳細モデルによる影響評価

今回工認におけるスタンドパイプの耐震評価は、極限解析にて得られた許容荷重が建屋機器連成モデルでの地震応答解析にて得られた225本を1質点として得られた地震荷重をスタンドパイプ総本数(225本)にて除した1本当たりの平均地震荷重を上回ることによって健全性を確認している。

ここで、実際の気水分離器及びスタンドパイプはシュラウドヘッドの鏡板に対して取付くことによりスタンドパイプ長さがそれぞれ異なること、また大小の補強板に結合されており、それぞれのスタンドパイプ付根部に掛かる荷重は異なり、平均地震荷重を上回る可能性がある。このため、地震応答解析にて得られた地震荷重をスタンドパイプ総本数にて除する手法(以下、「平均化」という。)の妥当性を検討した。

検討方法については、図5-1に示す気水分離器、大小の補強板を含めたスタンドパイプ225本とシュラウドヘッドをはり要素及びシェル要素でモデル化したもの(以下「詳細モデル」という。)と図5-2に示す建屋機器連成地震応答解析モデルからシュラウドヘッド、気水分離器及びスタンドパイプの部分を取り出したモデル(以下「連成モデル」という。)に対してそれぞれ水平1Gの加速度を付与し、詳細モデルでの1本に掛かる最大モーメントと連成モデルの静解析結果から得られたモーメントを平均化して得られるモーメントを比較することにより、今回工認で用いている建屋機器連成地震応答解析にて得られた地震荷重を平均化した1本当たりの地震荷重の方が詳細解析に荷重を算出するよりも保守性を有することを確認する。

気水分離器、大小の補強板、スタンドパイプは実形状及び実剛性を考慮した梁モデルでモデル化し、シュラウドヘッドはシェル要素でモデル化している。表5-1、図5-3解析諸元及びモデル図を示す。

解析結果を図5-4に示す。図5-4に示すとおり、詳細モデルの最大モーメントの方が連成モデルの平均化モーメントより低くなった。また、詳細モデル及び連成モデルの固有値解析結果を図5-5示す。詳細モデルと連成モデルで固有周期に差異が生じているが、これは、詳細モデルでは各々のパイプが卓越部位となり、連成モデルでは大補強板の剛性を考慮した1本が卓越部位となるため、固有周期は異なる。

また、図5-6に示すように、スタンドパイプ225本を1本と見立てた連成モデルではモーメントとして算出される荷重が、実形状を模擬した詳細モデルでは軸方向荷重と距離によりモーメントに変換され、モーメントが下がったものと考えられる。

以上より、今回工認で建屋機器連成地震応答解析にて得られた225本の荷重を平均化した地震荷重の方が保守性を有していることから、平均化手法を採用している。

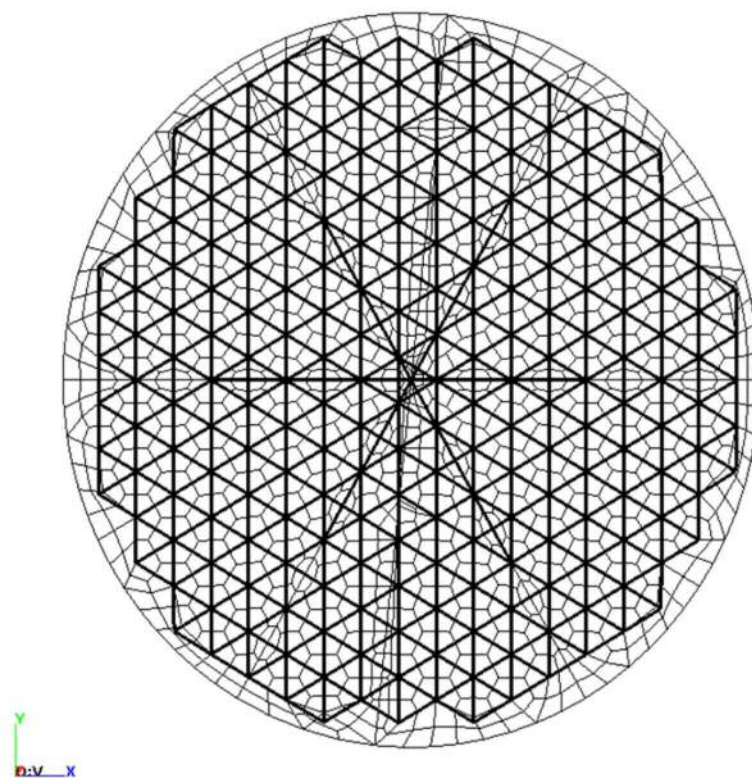
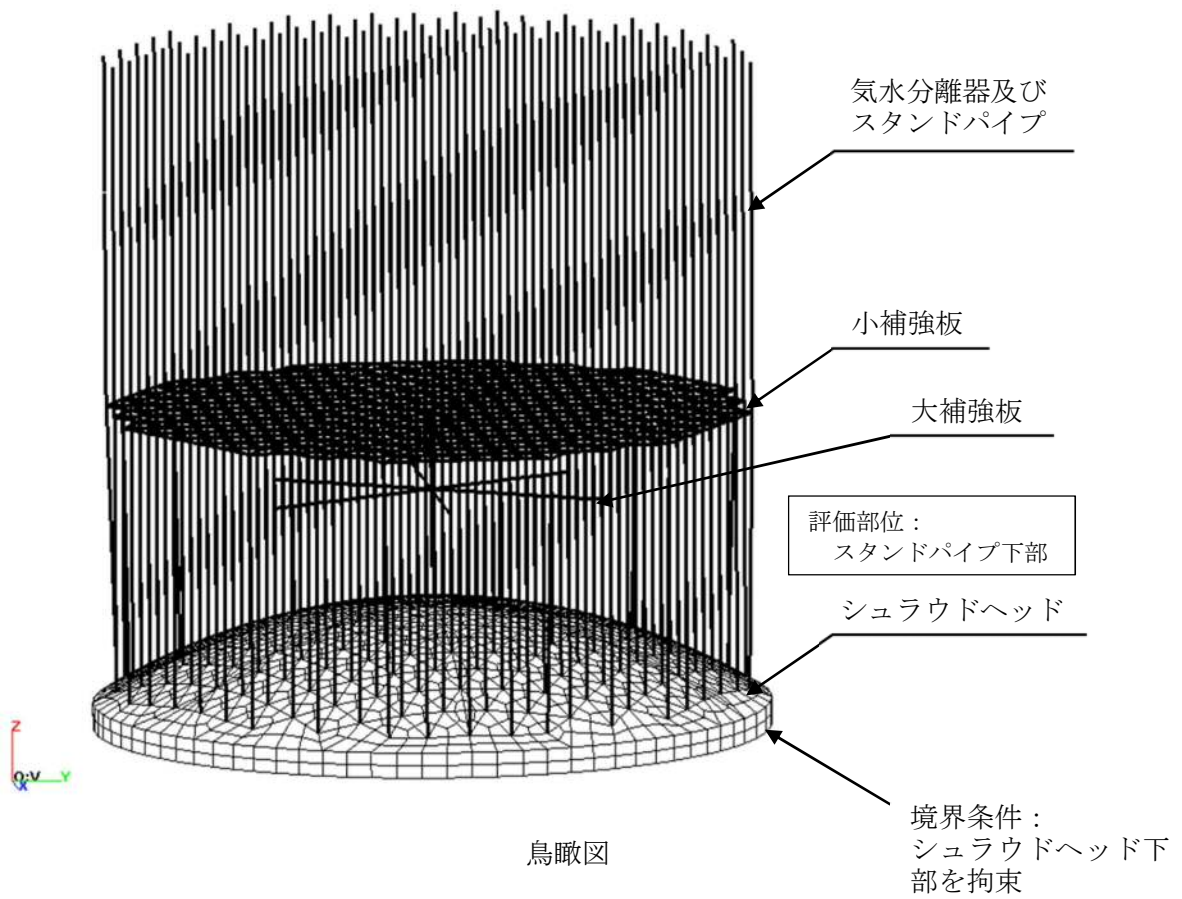
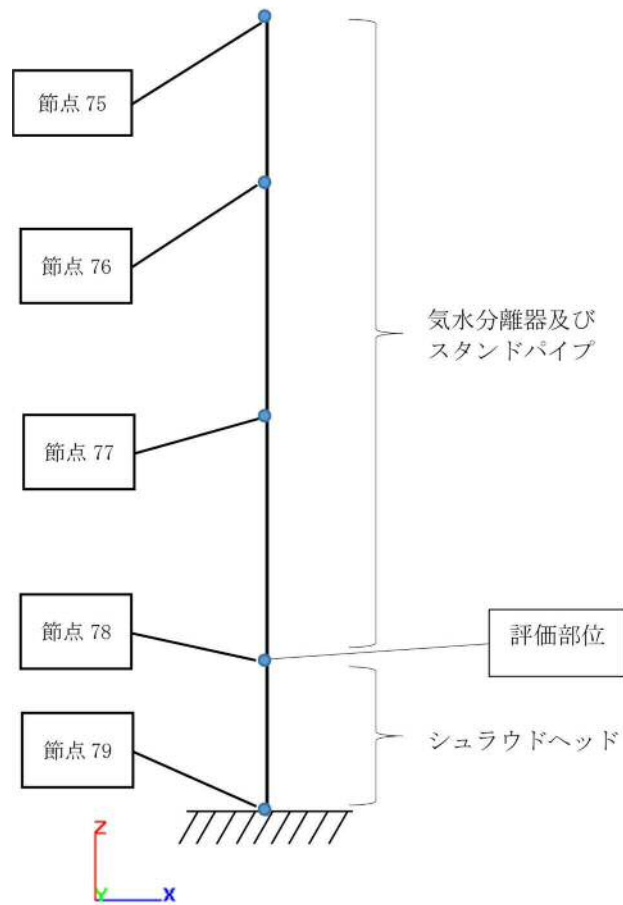


図5-1 シュラウドヘッド，気水分離器及びスタンドパイプ詳細モデル



解析モデル図

連成解析モデルのうち、気水分離器、スタンドパイプ及びシュラウドヘッド部分をモデル化

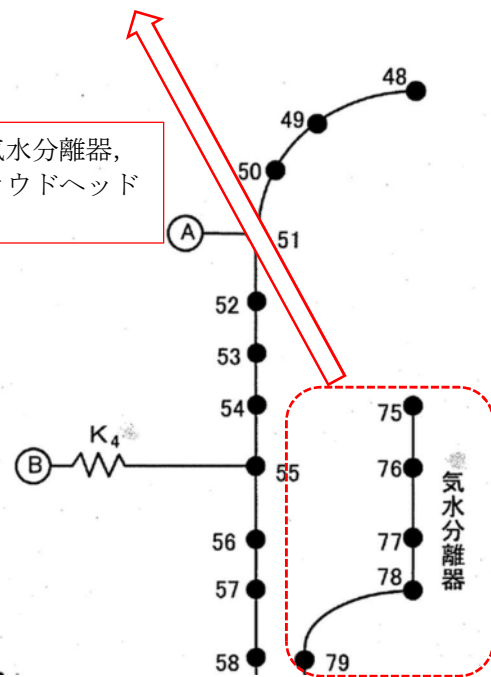


図 5 - 2 シュラウドヘッド，気水分離器及びスタンドパイプ連成モデル

表 5-1 詳細モデルの諸元

各部名称	断面積 [mm ²]	有効せん断 断面積 [mm ²]	断面二次モーメント [mm ⁴]	ねじりモーメント [mm ⁴]	要素タイプ	
スタンドパイプ	3.600E+03	1.800E+03	1.1720E+07	2.344E+07	ビーム要素	
気水分離器	a	1.818E+03	9.088E+02	7.429E+06		1.486E+07
	b	2.194E+03	1.097E+03	8.888E+06		1.065E+07
	c	6.352E+03	3.176E+03	7.348E+07		1.398E+08
	d	1.112E+04	5.562E+03	1.035E+08		1.950E+08
	d'	1.112E+04	5.562E+03	1.035E+08		1.950E+08
	e	7.768E+03	3.884E+03	2.445E+07		4.890E+07
	f	3.600E+03	1.800E+03	1.1720E+07		2.344E+07
小補強板	7.315E+02	6.096E+02	3.540E+05	2.069E+04		
			5.618E+03			
大補強板	7.803E+03	6.502E+03	9.6650E+08	1.065E+05		
			2.6630E+04			
鏡板(球面部)	板厚 50.8[mm]			シェル要素		
鏡板(外周部)	板厚 76.2[mm]					

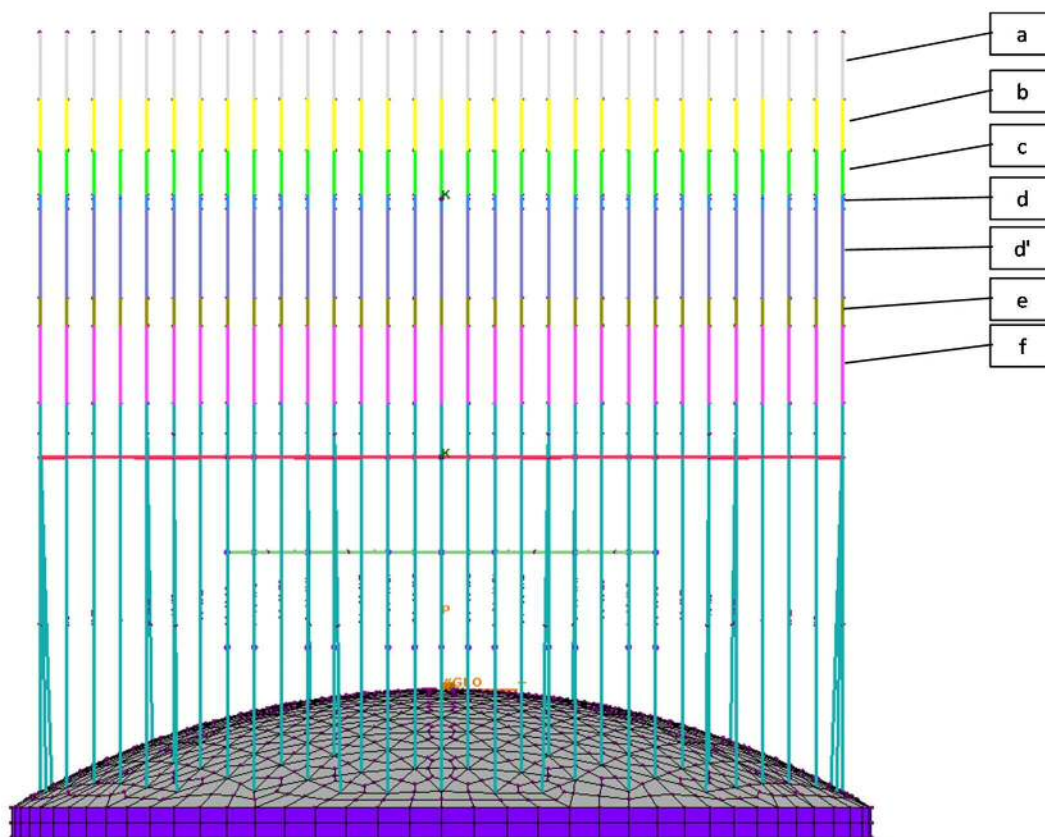


図 5-3 詳細モデルの解析モデル図

(単位：kN・m)

解析モデル	連成モデル	詳細モデル	
		荷重方向	モーメント
荷重条件	モーメント	X方向	8.5 ^{注2}
		Y方向	7.6 ^{注2}
水平 1.0G	10.6 ^{注1}		

注1：225本で除した値

注2：225本のうち最大値（位置は下図参照）を記載

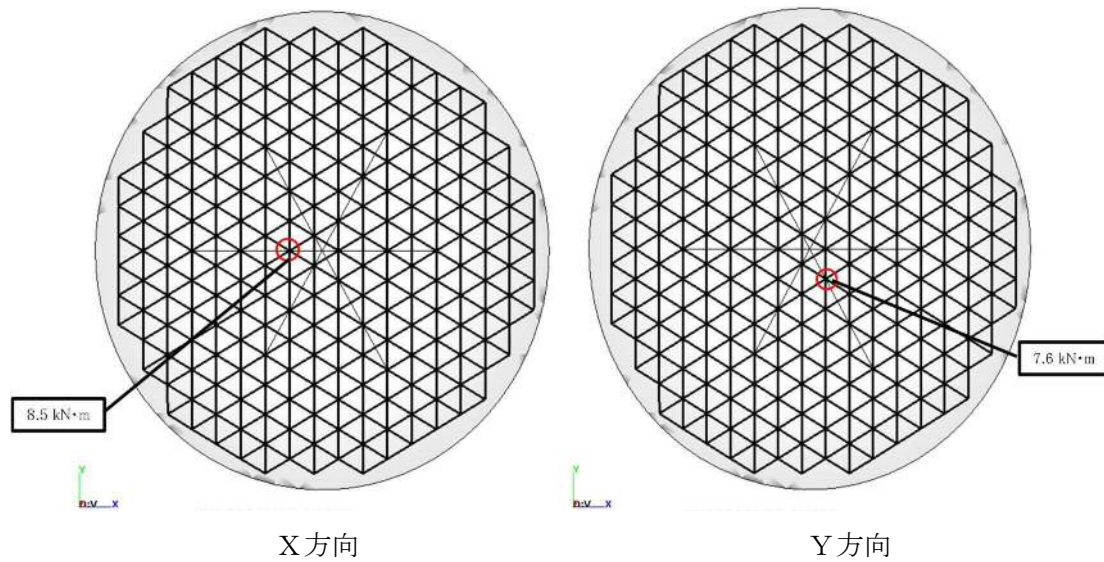
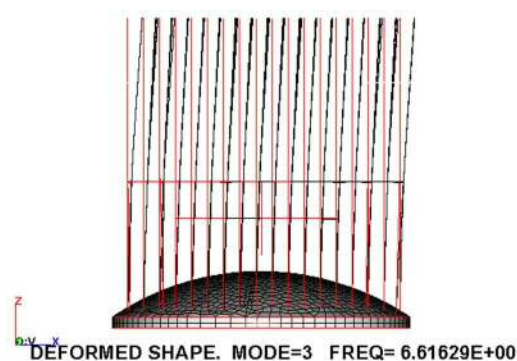
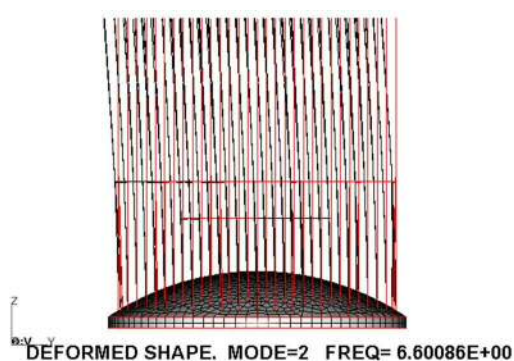


図5-4 連成モデルと詳細モデルの荷重比較

詳細モデルの固有周期及び刺激係数

モード	固有周期 (Hz)	刺激係数		
		x	y	z
1	5.4	0.01	0.03	0.00
2	6.6	-0.65	-7.67	0.00
3	6.6	7.67	-0.65	0.00
4	10.8	0.00	0.01	0.00
5	10.8	0.02	0.00	0.00



連成モデルの固有周期及び刺激係数

モード	固有周期 (Hz)	刺激係数		
		x	y	z
1	14.3	8.31	0.00	0.00
2	41.9	3.86	0.00	0.00
3	89.8	4.24	0.00	0.00
4	115.6	0.00	0.00	10.25
5	203.6	3.24	0.00	0.00

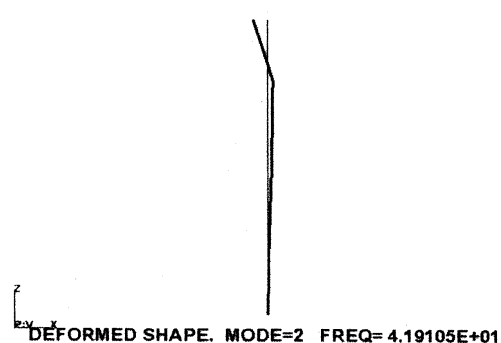
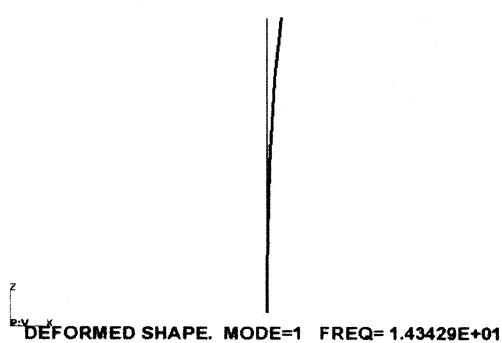


図 5 - 5 詳細モデル及び連成モデルの振動モード図

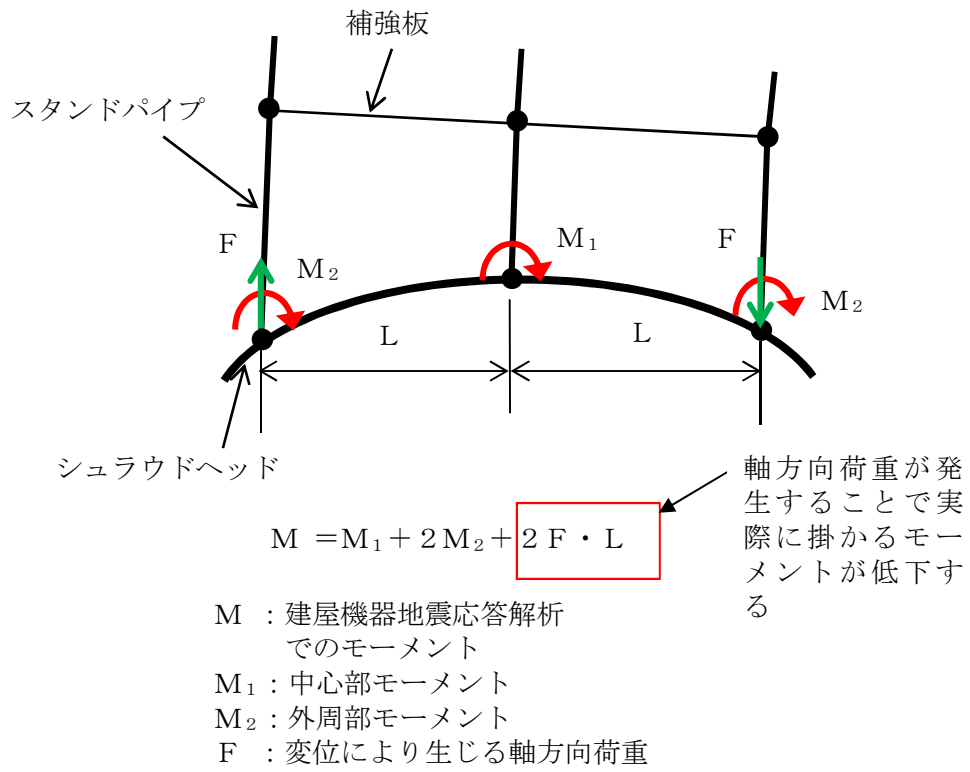


図 5-6 変位に伴い発生する荷重挙動の概略図

5.2 最外周部の偏心の扱いについて

最外周部のスタンドパイプのいくつかについては、スタンドパイプが鉛直方向に対して曲がりを有している構造であるため、偏心しているスタンドパイプの扱いについての影響について整理する。

(1) 地震荷重に対する影響

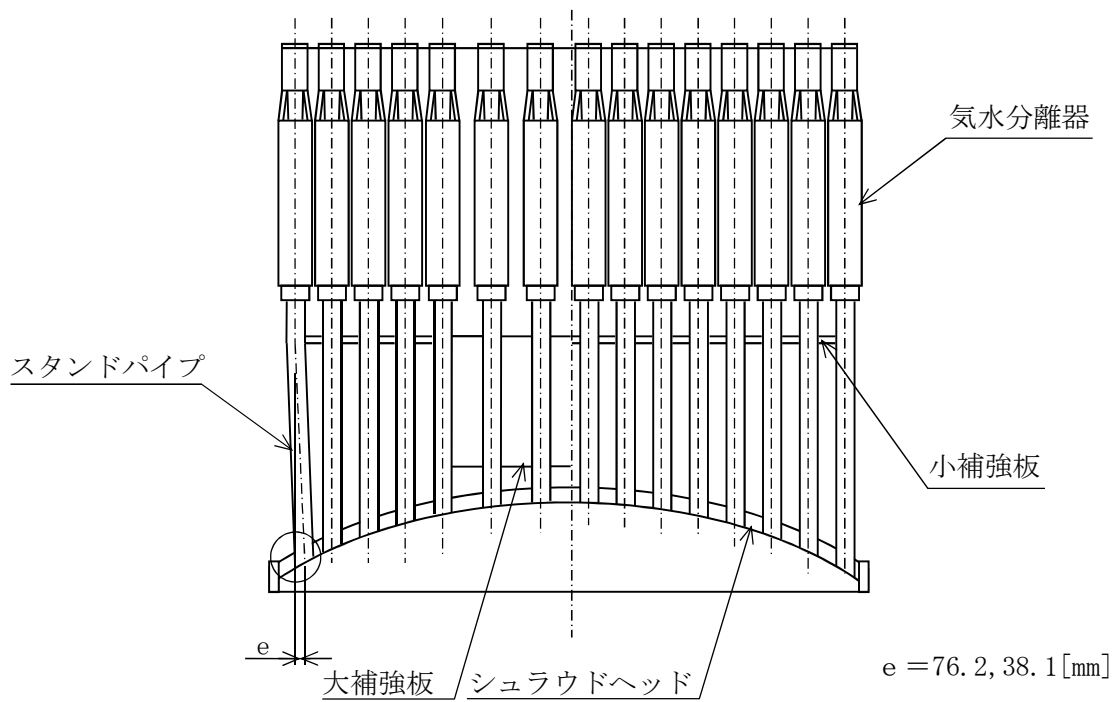
モーメント及び水平方向の地震荷重は偏心することによりスタンドパイプ付根部に対して新たに生じる荷重はない。

鉛直地震荷重は鉛直地震荷重と偏心量によるモーメントが発生するため、偏心により発生するモーメントを地震荷重として考慮する。同様に自重によってもモーメントが発生するため、これを考慮する。(図5-6参照)

なお、偏心により発生するモーメントは、最外周部の偏心を有しているスタンドパイプだけであるが、評価に用いる地震荷重については一律偏心により発生するモーメントを考慮する。

(2) 極限解析に対する影響

極限解析は中心位置と斜め取付く最外周位置の2ケース実施しているが、最外周の偏心を有するスタンドパイプに対してではなく、偏心を有しない最外周のスタンドパイプにて極限解析を実施している。これは、偏心を有するスタンドパイプの方が偏心を有しないスタンドパイプと比べ斜めに取付く影響が軽減されるためである。また、今回の極限解析結果から、中心位置の方が裕度が低い結果であり、斜めに取付く影響は軽微であると考えられることから、極限解析に対する影響はないと考える。



偏心量が 38.1mm と 76.2mm の 2 種類のスタンドパイプがあるが、偏心量が大きい方が鉛直力と偏心により発生するモーメントが大きくなることから、76.2mm の場合の荷重を一律考慮する。

死荷重によるモーメント： $V_{\text{自重}}/225 \times e = 1.91347 \times 10^5$ [N・mm]

$V_{\text{自重}}$ ：全スタンドパイプ死荷重 (= 565000 [N])

地震荷重によるモーメント： $V_{\text{地震}}/225 \times e = 1.38628 \times 10^5$ [N・mm]

$V_{\text{地震}}$ ：全スタンドパイプの鉛直地震荷重 (= 409334 [N])

図 5 - 6 偏心に対する考慮

試験体に対する極限解析について

1. はじめに

実機スタンドパイプ及びシュラウドヘッドの一部を縮尺試験体として試験を実施し、試験にて得られた限界荷重が極限解析にて得られた許容荷重よりも大きいことを確認している。試験体に対しても同様に極限解析を実施し、試験にて得られた限界荷重が極限解析にて得られた許容荷重よりも大きいことを確認する。

2. 解析方法

極限解析手法については、実機のスタンドパイプと同様に実施する。

①解析モデルの作成

解析モデルは2本の試験体の対称性を考慮して1本の試験体とする。解析モデルを図2-1に示す。縮尺試験体は対称形であることから、解析モデルは全体の1/2とし、パイプは鋼板との溶接部から148mm（荷重負荷位置）までの範囲をモデル化している。また、パイプの板厚は、引張試験治具による局所的な影響を考慮する観点から治具取付部近傍を肉厚形状にしていたが、解析上においては、考慮せず、一律1/3スケールの板厚としている。

②境界条件の設定及び物性値の入力

境界条件は荷重負荷方向と反対側側面を拘束する。また、物性値は試験体及び実機の解析条件と同じとする。

③荷重の負荷

荷重の負荷は、試験の荷重の負荷と同様に試験体上面に引張力（水平荷重）を負荷する。

④荷重変位曲線の作成

③の荷重を増加させて荷重－変位曲線を作成する。

⑤崩壊荷重の下限（ P_{cr} ）の算定

④にて作成した荷重変位曲線をもとに崩壊荷重の下限（ P_{cr} ）を算定する。算定結果を図2-2に示す。算出結果から得られえた P_{cr} は13.7 kNであった。

3. 試験結果との比較

試験体に対する極限解析にて得られた荷重－変位曲線と試験にて得られた荷重変位曲線を重ね合わせたものを図3－1に示す。試験にて得られた限界荷重は17.5 kNであり、極限解析にて得られた P_{cr} (=13.7 kN) よりも、保守的であることがわかった。なお、図3－1は引張試験装置での荷重変位曲線であることから、ひずみゲージでの荷重変位曲線と重ね合わせたものを図3－2に示す。解析上はピンのたわみや形状変化部を考慮していないが、これらの変位に対する影響は小さいため、弾性勾配においても概ね一致していることが確認できる。

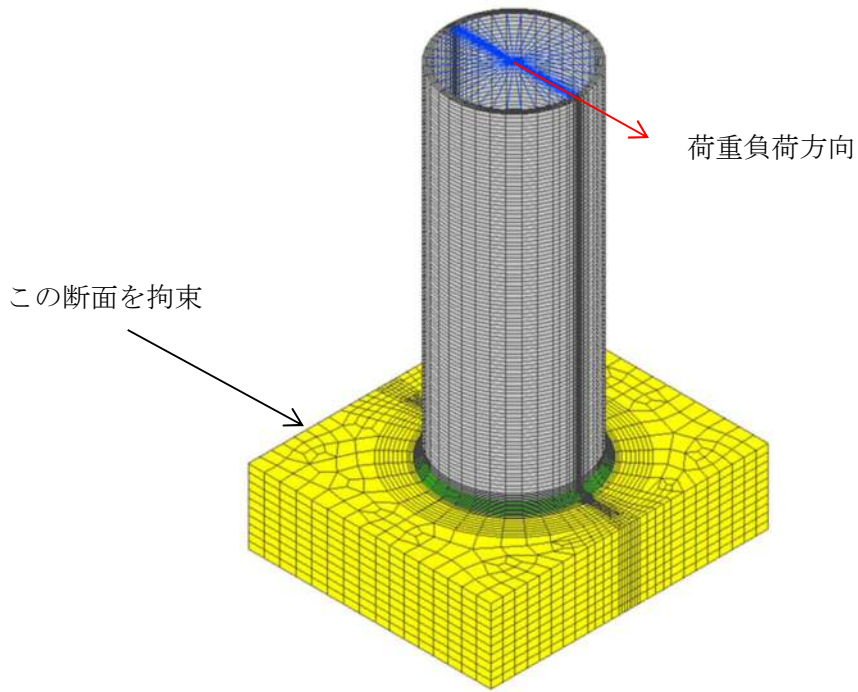


図 2 - 1 縮尺試験体の解析モデル図

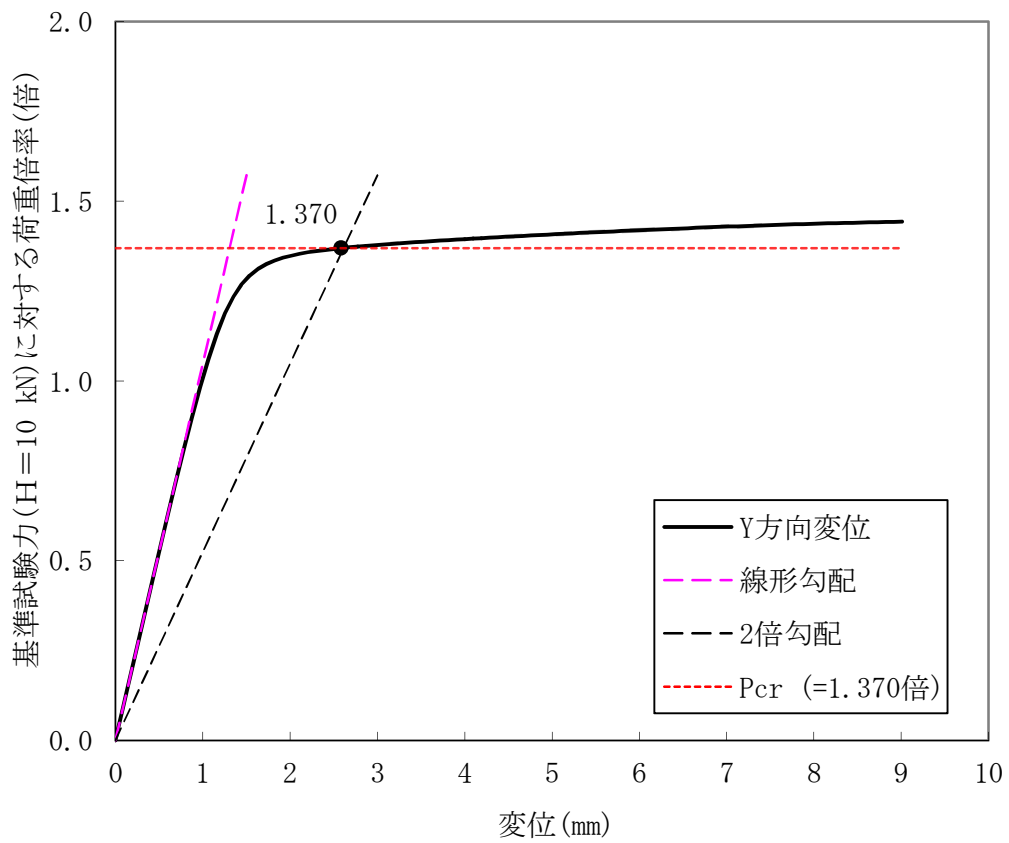


図 2 - 2 縮尺試験体の荷重-変位曲線

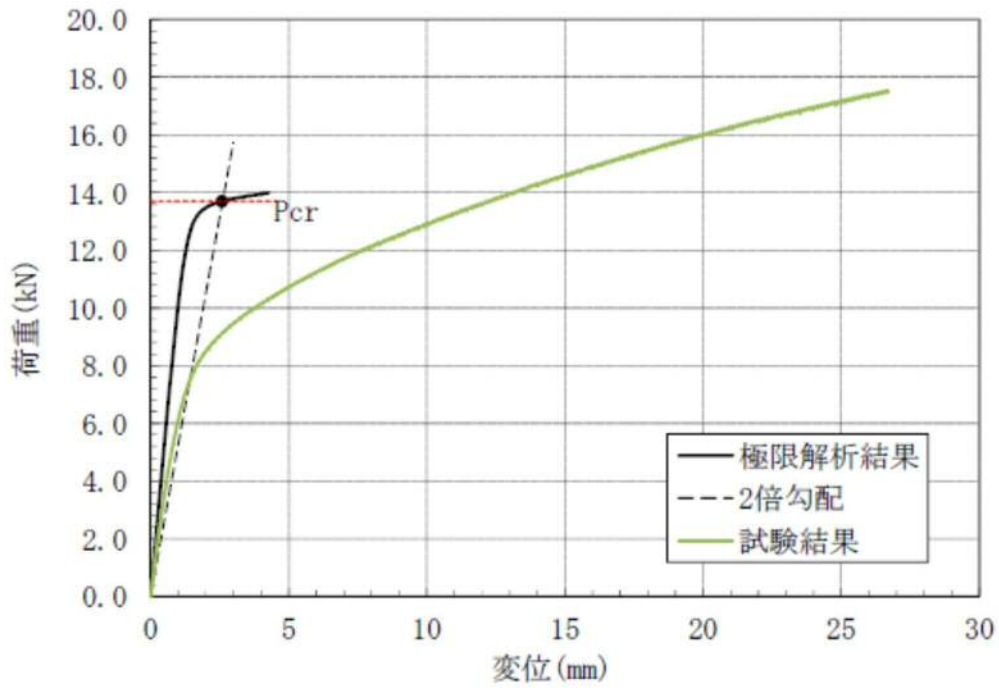


図 3-1 試験結果と試験体に対する極限解析結果との比較（引張試験装置の変位）

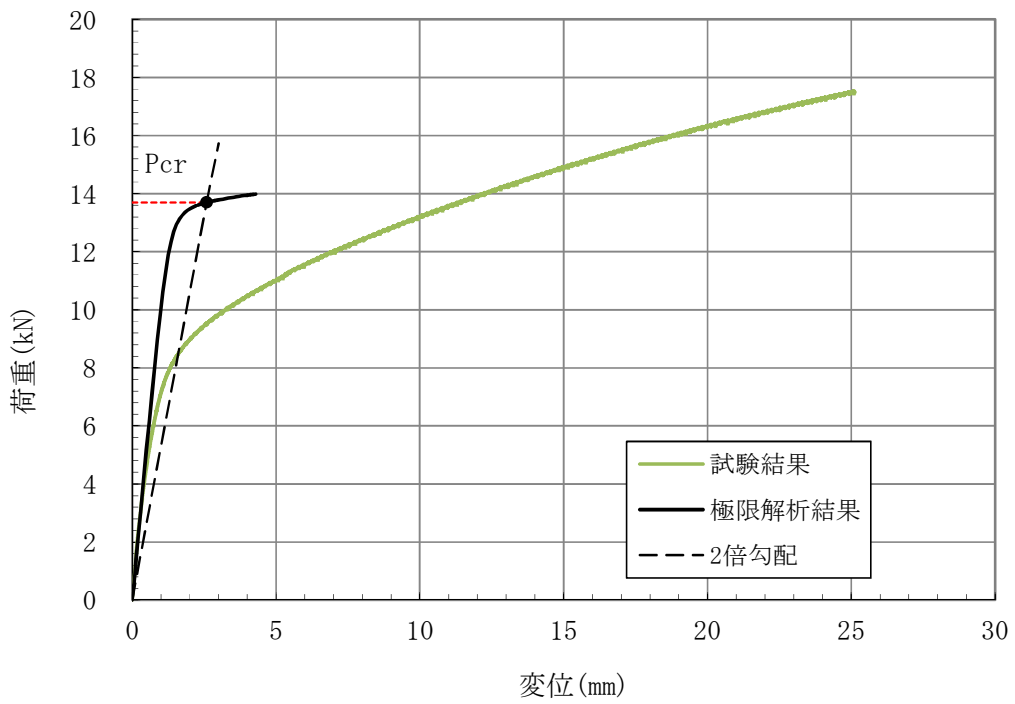


図 3-2 試験結果と試験体に対する極限解析結果との比較（ひずみゲージの変位）

補強板の健全性について

1. 概要

スタンドパイプの地震時の評価は、建屋機器連成解析にて得られた地震荷重が極限解析で得られた許容荷重下回ることで耐震健全性を確認している。極限解析にて得られた許容荷重及び通常の応力評価では大・小補強板の剛性を考慮していないが、地震応答解析に用いた建屋機器連成解析モデルでは大補強板の剛性を考慮しているため、大補強板の耐震健全性について示す。

また、本文 5. 項に記載している詳細モデルと連成モデルの荷重比較では、詳細モデルに大・小補強板の剛性を考慮していることから、併せて小補強板の健全性についても示す。上記をまとめたものを表 1 に示す。

表 1 補強板剛性の考慮の有無

モデル名称*	大補強板	小補強板
建屋機器連成解析モデル (地震荷重の算出)	○	×
極限解析モデル (許容荷重の算出)	×	×
詳細モデル (荷重分配の影響検討)	○	○

○：剛性を考慮する， ×：剛性を考慮しない

※：() 内はモデルの用途を示す

2. 評価方法

補強板 1 体当たりの死荷重に崩壊荷重発生時の震度を乗じて地震荷重を算出する（表 2 参照）。水平震度及び鉛直震度は建屋機器連成解析から得られた当該部位の震度を用いる。得られた荷重から一次応力を求め、応力強さが許容値を満足することを確認する。

表2 評価用震度

許容応力状態	EL. [m]	水平震度*	鉛直震度*	荷重倍率 (P_{cr} /地震荷重)
Ⅲ _A S	33.132	2.79(2.51)	0.92(0.83)	1.108
Ⅳ _A S	33.132	4.28(3.77)	1.74(1.53)	1.134

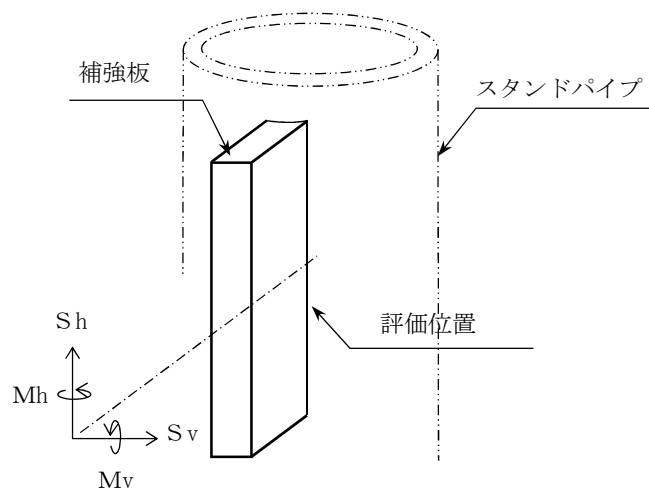
※：() 内に示す震度に荷重倍率を乗じた値

表2 大補強板に生じる地震荷重

許容応力状態	せん断力 S [N]		曲げモーメント M [N・mm]	
	Sh	Sv	Mh	Mv
Ⅲ _A S	397	131	28100	9270
Ⅳ _A S	608	247	43200	17600

表2 小補強板に生じる地震荷重

許容応力状態	せん断力 S [N]		曲げモーメント M [N・mm]	
	Sh	Sv	Mh	Mv
Ⅲ _A S	15.4	5.06	447	148
Ⅳ _A S	23.6	9.57	685	279



評価部位

3. 許容応力

補強板は原子炉圧力容器の内部にあることから JEAG4601-1984 の炉内構造物の許容限界を適用する。また、301℃（運転状態Ⅰ及びⅡの最高使用温度）における許容応力状態Ⅲ_AS及びⅣ_ASの許容応力に、JSME CSS-3150に準拠し、溶接継手効率として大補強板^{※1}は0.35、小補強板^{※2}は0.60を考慮する。表3に補強板の許容応力を示す。

※1 不連続すみ肉溶接，表面浸透探傷試験（検査の種類E）

※2 両側すみ肉溶接，表面浸透探傷試験（検査の種類E）

表3 補強板の許容応力（炉内構造物）

評価部位	応力分類	許容応力状態 [※]	
		Ⅲ _A S	Ⅳ _A S
小補強板 (オーステナイトステンレス鋼 (SUS304))	一次一般膜応力	103 (1.5Sm×0.60)	156 (Min (2.4Sm, 2/3Su) ×0.60)
	一次一般膜+ 一次曲げ応力	154 (2.25Sm×0.60)	234 (Min (3.6Sm, Su) ×0.60)
大補強板 (オーステナイトステンレス鋼 (SUS304))	一次一般膜応力	60 (1.5Sm×0.35)	91 (Min (2.4Sm, 2/3Su) ×0.35)
	一次一般膜+ 一次曲げ応力	90 (2.25Sm×0.35)	136 (Min (3.6Sm, Su) ×0.35)

※：301℃における値

4. 評価結果

補強板の応力評価結果を表4に示す。表4により各許容応力状態において、発生応力は許容応力を下回っており、補強板の健全性が確保できている。

表 4 補強板の応力評価結果

許容応力 状態	評価部位	評価応力	応力強さ [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度
Ⅲ _A S	大補強板	一次一般膜応力	1	60	60.0
		一次一般膜応力 +一次曲げ応力	4	90	22.5
	小補強板	一次一般膜応力	1	103	103.0
		一次一般膜応力 +一次曲げ応力	1	154	154.0
Ⅳ _A S	大補強板	一次一般膜応力	1	91	91.0
		一次一般膜応力 +一次曲げ応力	6	136	22.6
	小補強板	一次一般膜応力	1	156	156.0
		一次一般膜応力 +一次曲げ応力	1	234	234.0

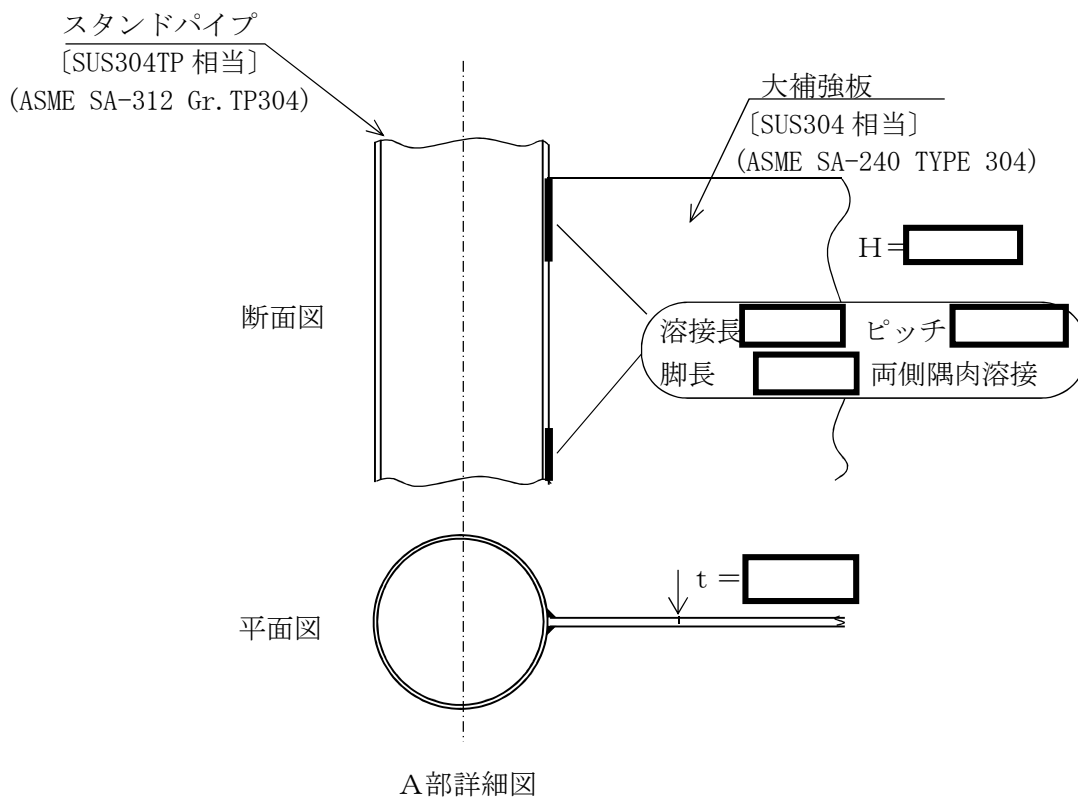
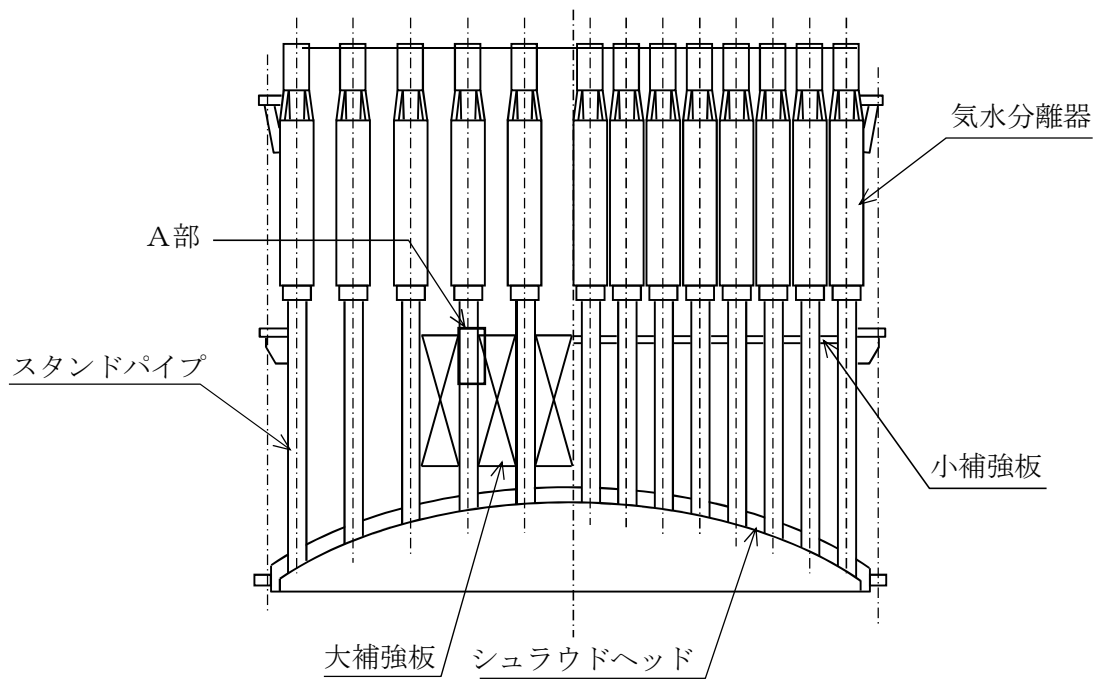


図1 補強板の外形図

気水分離器と蒸気乾燥器の相対変位について

1. 概要

蒸気乾燥器は原子炉圧力容器上部のブラケットにて支持され、気水分離器は炉心シュラウド上部のシュラウドヘッドに設置されている。気水分離器と蒸気乾燥器は水平方向に対してそれぞれを支持しておらず（図1参照）、地震時には水平方向の変位により蒸気乾燥器と気水分離器が接触、衝突が発生する可能性がある。また、今回のスタンドパイプに用いた極限解析は弾塑性状態まで考慮した許容荷重であり、かつ許容荷重と S_s 地震荷重は近いことから、線形解析である建屋機器連成解析で得られる変位と比べ弾塑性状態での変位を含めると変位が増加する。このため、スタンドパイプ付根部の弾塑性状態による変位増加を含めた蒸気乾燥器と気水分離器の地震時の相対変位を評価することにより、衝突等の考慮の有無を確認する。

2. 気水分離器と蒸気乾燥器間の相対変位の算出

気水分離器と蒸気乾燥器間の相対変位の算出は、図2に示す建屋機器連成解析モデルを使用し、線形解析による時刻歴応答解析により蒸気乾燥器と気水分離器との相対変位を時々刻々に確認し、最大となる相対変位を算出する。線形解析により得られた最大相対変位にスタンドパイプ付根部の弾塑性状態による変位増加分を加えることにより、弾塑性状態を考慮した相対変位を算出する。

2.1 線形解析による相対変位の算出

建屋機器連成解析モデルを用いた時刻歴応答解析による気水分離器上部と同じ高さに位置する原子炉圧力容器間の相対変位の最大値を表1に示す。表1に示すとおり、相対変位の最大値は1方向で5.62mm、水平2方向で7.84mmである。

表1 建屋機器連成解析による相対変位の最大値（線形解析）（単位:mm）

評価位置	①相対変位		1方向 最大変位	水平2方向
	NS	EW	①の最大値	①のSRSS
気水分離器上部と原子炉圧力容器（同じ高さ位置） （質点番号54と75間）	5.62	5.46	5.62	7.84

2.2 弾塑性状態に対する変位増加の算出

2.2.1 変位増加の算出概要

スタンドパイプ付根部の弾塑性状態による変位の増加の影響を受けるのはシュラウドヘッド上部に設置される気水分離器及びスタンドパイプであるため、気水分離器及びスタンドパイプの変位増加量を算出する。

気水分離器及びスタンドパイプ自体の最大応答変位は建屋機器連成解析結果から、気水分離器上部（質点番号 75）で 38.0mm、シュラウドヘッド上部（質点番号 78）で 32.5mm であるため、気水分離器及びスタンドパイプ自体の最大応答変位は 5.5mm となる。これに極限解析にて得られた荷重変位曲線から S_s 地震時の弾性状態と仮定した変位と弾塑性状態での変位の比から弾塑性状態での変位の増加量を加える（図 3 参照）。増加量の算出は 2.2.2 に示す。

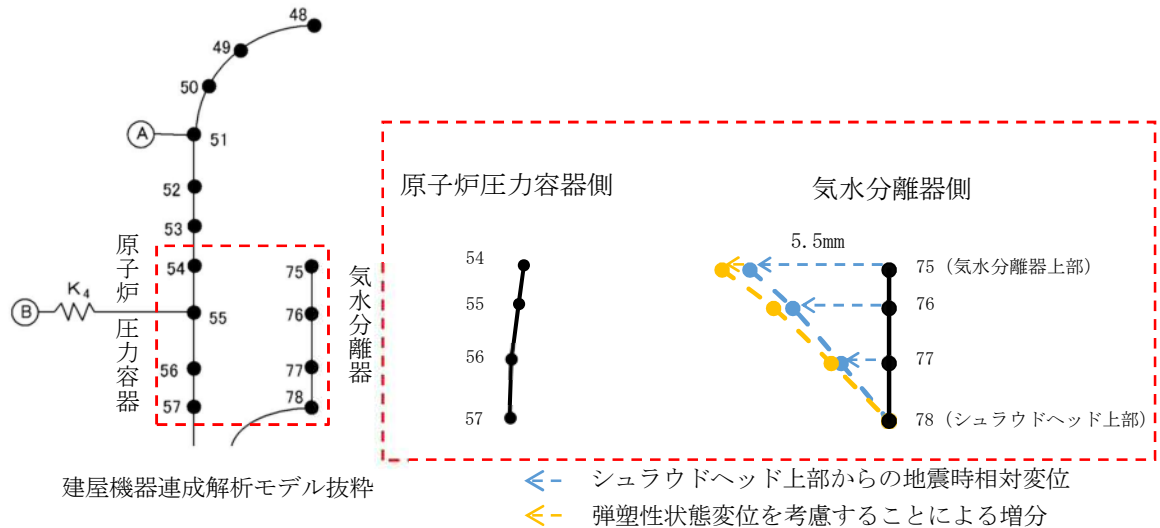


図 3 弾塑性状態の変位に対する考慮の概要図

2.2.2 弾塑性状態に対する変位増加の算出

図4に示す極限解析にて得られた荷重変位曲線から S_s 地震時における変位は弾性状態と比較して約1.2倍変位が増加する。このため、弾塑性状態の変位に対する考慮として、スタンドパイプから気水分離器までの最大応答変位5.5mmに弾塑性状態による増加分である0.2分の変位1.1mmを上乗せする。弾塑性状態による変位増加を加えた結果を表2に示す。表2に示すとおり、相対変位の最大値は1方向で6.72mm、水平2方向で9.40mmである。

表2 弾性解析結果に弾塑性による変位増加を考慮した相対変位 (単位:mm)

評価位置	①相対変位 (線形解析)		1方向 最大変位	水平2方向
	NS	EW	①の最大値 +5.5×0.2	(①+5.5×0.2) のSRSS
気水分離器上部と原子炉圧力 容器 (同じ高さ位置) (質点番号54と75間)	5.62	5.46	6.72	9.40

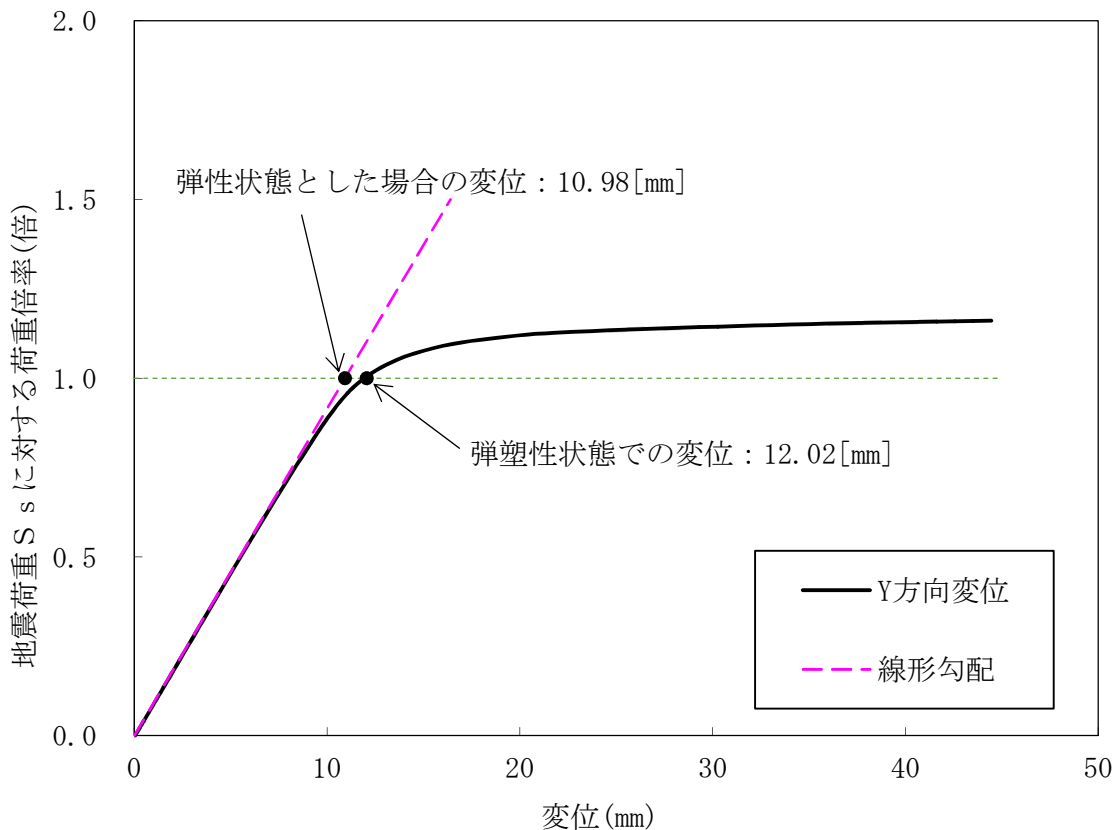


図4 極限解析での荷重変位曲線 (1000mm)

3. 気水分離器と蒸気乾燥器間の距離

気水分離器と蒸気乾燥器間の最短距離は図1に示すとおり、上リングと蒸気乾燥器スカート間の mm である。

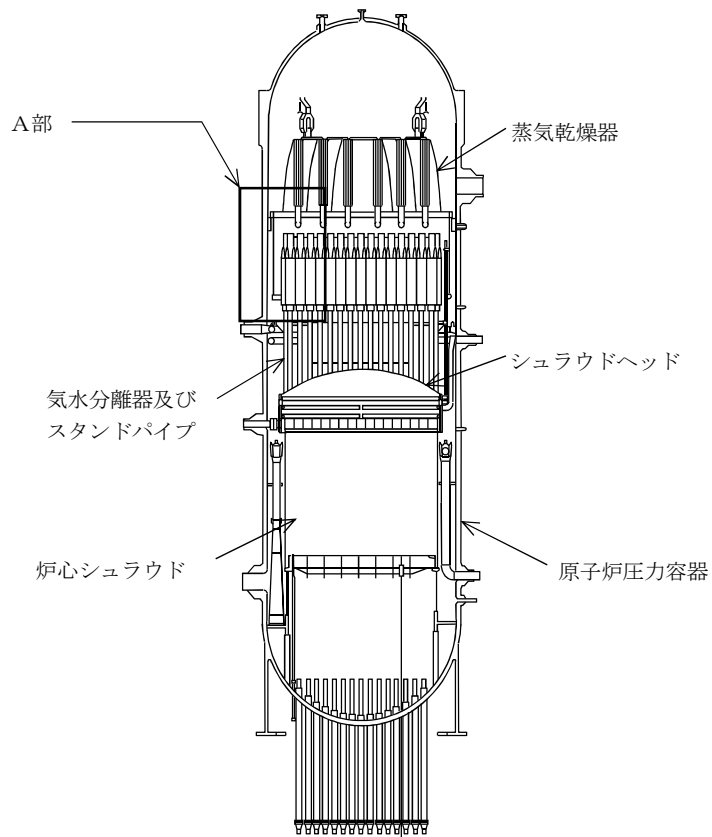
4. 評価結果

評価結果を表3に示す。表3に示すとおり、スタンドパイプ付根部の弾塑性状態による変位増加を考慮しても相対変位は基準値である mm 以内であることから、衝突等は生じない。

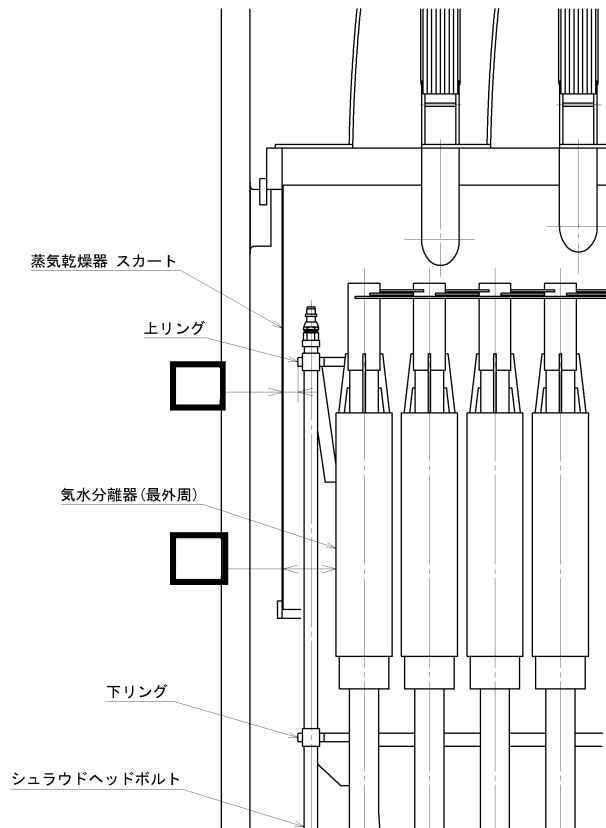
また、鉛直方向に対しては、気水分離器はシュラウドに、蒸気乾燥器はブラケットに支持されていることから鉛直方向に対して衝突は発生しない。

表3 弾塑性状態の変位増加を考慮した相対変位評価結果 (単位:mm)

評価位置	1方向 最大変位	水平2方向	基準値 (最小ギャップ)
気水分離器上部と原子炉圧力容器 (同じ高さ位置) (質点番号54と75間)	6.72	9.40	<input type="text"/>



原子炉圧力容器内部構造物概要図



A部詳細図

図1 蒸気乾燥器，気水分離器及びスタンドパイプ概要図

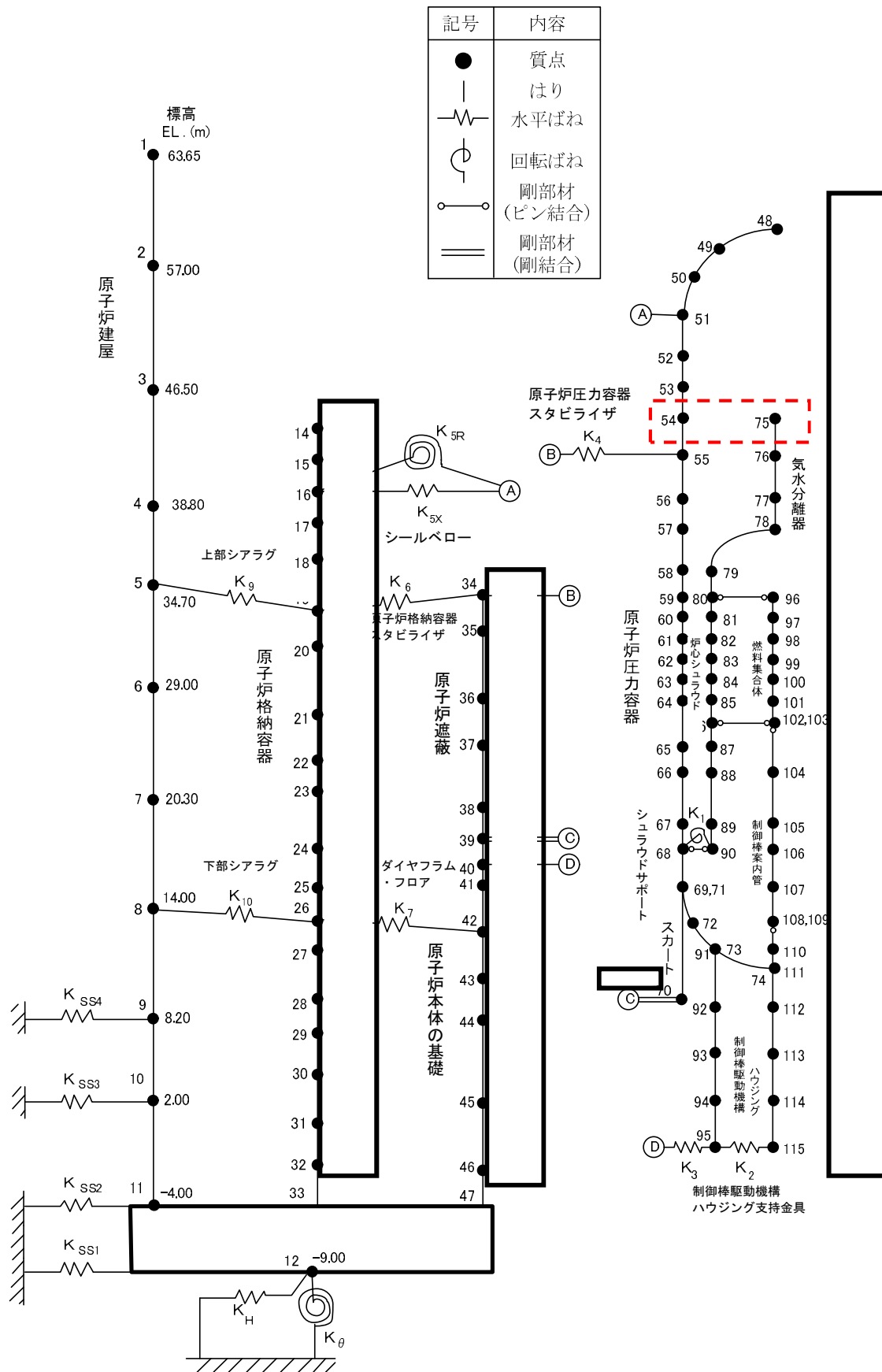


図2 建屋機器連成解析モデル (水平)