

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0600-40-54_改0
提出年月日	2021年10月29日

補足-600-40-54 横置一胴円筒形容器の耐震評価における
応力分類に関する補足説明資料

1. はじめに

横置一胴円筒形容器は、J E A G 4 6 0 1-1987 及び女川 2 号機の既工認を踏まえて作成した添付書類「VI-2-1-13-2 横置一胴円筒形容器の耐震性についての計算書作成の基本方針」に基づき、胴（脚つけ根部）、脚及び基礎ボルトのそれぞれに対して耐震評価を行っている。

そのうち、胴（脚つけ根部）については、鉛直方向地震によって発生する脚反力による応力、静水頭による応力及び長手方向曲げモーメントによる応力が発生する。鉛直方向地震によって発生する脚反力による応力は、脚つけ根部（胴）に発生する周方向及び軸方向の膜応力及び曲げ応力であり、各規格を踏まえ、膜応力を一次応力、曲げ応力を 2 次応力に分類している。また、鉛直方向地震によって発生する静水頭による応力及び長手方向曲げモーメントによる応力は、一次応力に分類している。

本資料は、横置一胴円筒形容器の応力評価における上記応力分類の考え方をまとめたものである。

なお、本資料が関連する工認図書は以下のとおり。

- ・「VI-2-1-13-2 横置一胴円筒形容器の耐震性についての計算書作成の基本方針」

2. 応力分類

2.1 既工認及び今回工認における鉛直方向地震による脚つけ根部の応力分類

横置一胴円筒形容器の概要図を図 1 に示す。鉛直方向地震により胴の脚つけ根部に作用する反力によって、胴の脚つけ根部に発生する応力は、Bijlaard 文献*1 から読み取った値と反力から周方向及び軸方向に発生する膜応力及び曲げ応力が算出（(1) 式～ (4) 式）され、それぞれ一次応力に膜応力を、二次応力に曲げ応力を分類している。この分類の考え方については、次項で整理する。また、鉛直方向地震が静水頭に加わり胴に生じる周方向の応力（ $\sigma_{\phi 2}$ ）（(5) 式）及び鉛直方向地震による長手方向曲げモーメントにより胴の脚つけ根部に生じる軸方向の応力（ $\sigma_{x 6}$ ）（(6) 式）は、一次応力として分類している。

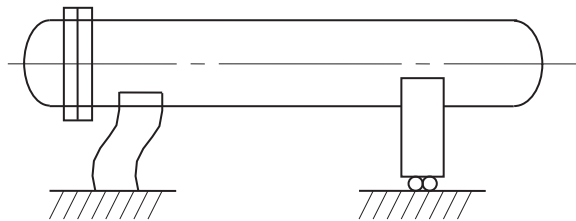


図 1 横置一胴円筒形容器の概要図

①鉛直方向地震により胴の脚つけ根部に作用する反力によって、胴の脚つけ根部に発生する応力

一次応力

$$\sigma_{\phi 71} = \left(\frac{N_{\phi}}{P_e / r_m} \right) \cdot \left(\frac{P_e}{r_m \cdot t_e} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_{x 71} = \left(\frac{N_x}{P_e / r_m} \right) \cdot \left(\frac{P_e}{r_m \cdot t_e} \right) \quad (2)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi 72} = \left(\frac{M_{\phi}}{P_e} \right) \cdot \left(\frac{6 \cdot P_e}{t_e^2} \right) \quad (3)$$

$$\sigma_{x 72} = \left(\frac{M_x}{P_e} \right) \cdot \left(\frac{6 \cdot P_e}{t_e^2} \right) \quad (4)$$

ここで,

- N_{ϕ} : 胴に生じる周方向の膜力
- N_x : 胴に生じる軸方向の膜力
- M_{ϕ} : 胴に生じる周方向の曲げモーメント
- M_x : 胴に生じる軸方向の曲げモーメント
- P_e : 鉛直方向地震により胴の脚つけ根部に作用する反力
- r_m : 脚つけ根部における胴の平均半径
- t_e : 脚つけ根部における胴の有効板厚
- $\sigma_{x71}, \sigma_{x72}$: 鉛直方向地震により胴の脚つけ根部に生じる軸方向一次応力及び二次応力
- $\sigma_{\phi71}, \sigma_{\phi72}$: 鉛直方向地震により胴の脚つけ根部に生じる周方向一次応力及び二次応力

②鉛直方向地震が静水頭に加わり胴に生じる周方向の応力（1次応力）

$$\sigma_{\phi2} = \frac{\rho' \cdot g \cdot H \cdot D_i \cdot C_v}{2 \cdot t} \quad (5)$$

ここで,

- ρ' : 液体の密度（=比重 $\times 10^{-6}$ ）
- g : 重力加速度（=9.80665m/s²）
- H : 水頭
- D_i : 胴の内径
- C_v : 鉛直方向設計震度
- t : 脚側胴板の厚さ

③鉛直方向地震による長手方向曲げモーメントにより胴の脚つけ根部に生じる軸方向の応力（1次応力）

$$\sigma_{x6} = \frac{M_i}{Z} \cdot C_v \quad (6)$$

ここで,

- M_i : 各脚つけ根部における胴の運転時質量によるモーメント
- Z : 引用文献*2による胴の断面係数
- C_v : 鉛直方向設計震度

注記*1: Wichman, K.R. et al. :Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings, Welding Research Council bulletin, March 1979 revision of WRC bulletin 107 / August 1965.

*2: Stresses in Large Horizontal Cylindrical Pressure Vessels on Two Saddle Supports, Welding Research Supplement, Sep. 1951.

2.2 J E A G 4 6 0 1における応力分類の考え方

原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1-1987）における応力分類の考え方を以下に示す。J E A G 4 6 0 1において一次応力は，単純な平衡の法則を満足する一般膜応力，曲げ応力又は局部膜応力に分類され，二次応力は，隣接部分の拘束又は自己拘束による不連続応力と分類されている。

解析、骨組構造解析等、大型計算機を利用した計算から、単純な形状のものでは材料力学の基本的な式による計算から求める場合もある。

また、容器類の局部応力を求める場合は、Bijlaard の方法あるいは有限要素法が用いられる。

応力評価以外の強度評価法としては、荷重による評価があり、これは、あらかじめ計算により標準荷重あるいは限界荷重を求めておく場合、試験により許容荷重を確認しておく場合などがある。

6.6.2 As 及び A クラス機器

(1) 応力解析の基本事項

a. 応力強さ

第 1 種容器の耐震設計では、応力解析を行い、内圧荷重等の他の荷重による応力と組合せて評価を行う。この応力解析については「告示501号」に細目が定められている。

「告示501号」における圧力容器設計の基本的な考え方は、破壊基準として「最大せん断応力説」を採り、評価は「応力強さ」で行う。

最大せん断応力説では、部材内の主応力が、 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) であるとき、最大せん断応力 $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ が、引張試験の降伏点におけるせん断応力と同じになった時降伏することになる。単軸引張試験では、 $\sigma_1 = S_y, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ であるので降伏条件は $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{1}{2} S_y$ となる。設計評価では最大せん断応力の 2 倍、 $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \times 2 = \sigma_1 - \sigma_3$ ($\sigma_2 - \sigma_1, \sigma_3 - \sigma_2$ も同様) を「応力強さ」と定義することにより、これと材料試験から得られる強度とを直接比較することができる。なお、応力強さによる評価は、第 1 種管、第 2 種容器にも適用される。

b. 応力分類

応力解析では応力を次のように定義する。

1 次応力： 「1 次応力」とは、外力、内力及びモーメントに対して単純な平衡の法則を満足する垂直応力又はせん断応力をいう。

1 次応力は、内圧や外荷重が作用している機器において、それらの力とのバランスのために機器部材内に発生する応力である。すなわち、その特性は自己制御性がないことである。換言すると、それは外荷重により発生する応力で、その応力が材料の肉厚全体にわたって降伏点を超過して増加すると、材料のひずみ硬化による抵抗力以外は持ち堪えることができず、遂には破断に至るものである。

なお、1 次応力は、一般膜応力、曲げ応力又は局部膜応力に細分され、それぞれの応力に対して定めた応力強さの限界は異なっている。

2 次応力： 「2 次応力」とは、隣接部分の拘束又は自己拘束により生じる垂直応力又はせん断応力をいう。

すなわち、その特性は自己制御性があることである。換言すると、2次応力が発生し、部材が降伏を起こしたり、又はわずかにひずみを生じた場合、もはや異常の応力の増加はなく、応力の飽和状態に達する。したがって、2次応力のみによって破損を起こすことは考えられない。ただし、2次応力により生じるひずみが無制限に許されているのではなく、シェイクダウン特性を考慮して応力強さの限界を設けている。

2次応力の代表例として、熱応力と不連続応力がある。熱応力は、部材内部に温度差が発生することにより生じるものであり、この応力によって変形を生じるか又は応力の増加により塑性流れの状態を生じると、応力分布は全体として均等化する。

不連続応力は、部材の肉厚が一樣でない管台等において、変形が不連続になることにより発生する応力である。これは、内圧や外荷重の増減に伴い変化するが、容器全体からみると極めて限られた部分であり、1次応力のようにいつまでもその応力状態を維持しているわけではなく、応力が増加すれば局所的な塑性流れを発生し応力分布は均等化することになる。

ピーク応力：「ピーク応力」とは、局所的な不連続性、応力集中の影響又は局部的熱応力のために1次応力と2次応力に付加される応力である。その特徴は、それによって大きな変形は起こらないが、それが繰返されると疲労破壊の原因となることである。

耐震設計では、1次応力評価のみ他の荷重との組合せで行い、1次+2次応力評価及び1次+2次+ピーク応力評価は地震荷重のみで行う。

疲れ解析は、1次+2次+ピーク応力より疲れ累積係数を求めて評価するが、この手法には、地震動の等価繰返し回数を用いる方法あるいは機器の時刻歴応答から応力振幅の大きさの頻度分布を直接求める方法がある。

なお、地震動の等価繰返し数を求める場合にはピーク応力法（図6.6.2-1参照）あるいはエネルギー換算法（図6.6.2-2参照）が用いられている。

ここで「疲れ累積係数」とは、各応力サイクルにおける実際の繰返し回数と繰返しピーク応力強さに対応する許容繰返し回数との比をすべての応力サイクルについて加えたものをいう。

(2) 第1種機器

a. 容器

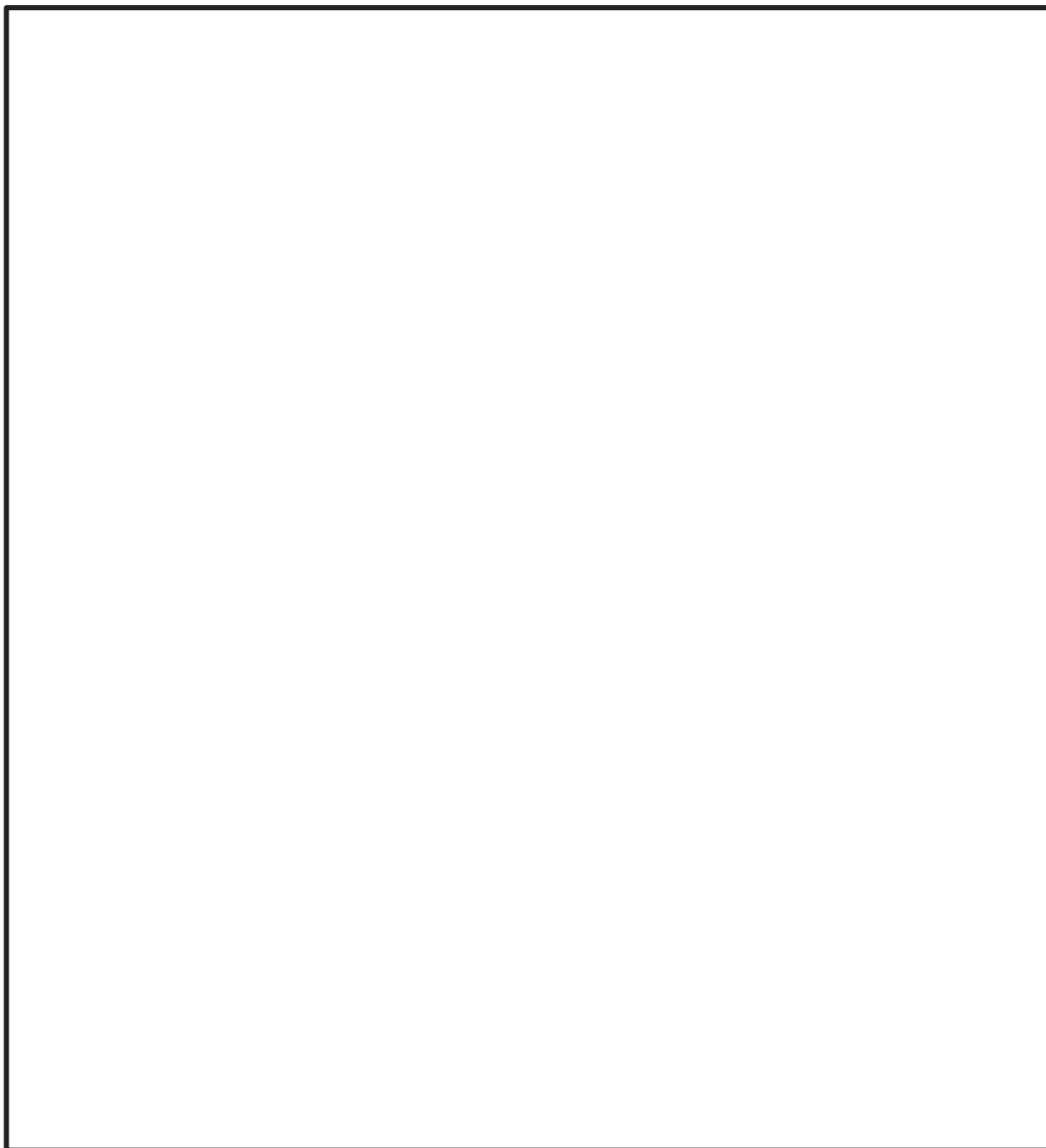
(a) 応力解析の流れ

第1種容器の地震荷重に対する構造設計は、単に地震応力評価のみではなく、内圧、熱、自重等を含め、プラントの運転状態に対応した全体の応力評価体系の一部として位置付けられる。

2.4 設計・建設規格における形状不連続部の応力に対する応力分類の考え方

設計・建設規格（J S M E S N C 1 -2005/2007）の解説 PVA-3100 を以下に示す。

J S M E において形状不連続部の機械的外荷重による応力については，不連続による曲げ応力は二次応力（Q）に分類するものと整理されている。



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

2.4 横置一胴円筒形容器の鉛直方向地震による脚つけ根部の応力分類の考え方

2.1～2.3の整理結果から、横置一胴円筒形容器の鉛直方向地震による脚つけ根部の反力によって発生する応力（式（1）～式（4））は、脚つけ根部と胴の構造的な不連続性に起因する膜応力及び曲げ応力であり、J E A G 4 6 0 1 及び J S M E の応力分類の考え方を踏まえると、当該の膜応力は1次応力に、曲げ応力は2次応力に分類することができる。また、鉛直方向地震が静水頭に加わり胴に生じる周方向の応力（ $\sigma_{\theta 2}$ ）及び鉛直方向地震による長手方向曲げモーメントにより胴の脚つけ根部に生じる軸方向の応力（ $\sigma_{x 6}$ ）は、鉛直方向地震力との平衡の法則を満足するために発生する応力であるため、1次応力として分類できる。

3. まとめ

既工認及び今回工認における横置一胴円筒形容器の鉛直方向地震による脚つけ根部の応力分類は、規格の考え方に準拠し、適切に設定されていることを確認した。