

本資料のうち、枠囲みの内容は
営業秘密又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	工認-572 改3
提出年月日	平成30年9月4日

V-2-11-2-5 原子炉遮蔽の耐震性についての計算書

目次

1.	概要	1
2.	一般事項	1
2.1	配置概要	1
2.2	構造計画	2
2.3	評価方針	3
2.4	適用基準	3
2.5	記号の説明	4
2.6	計算精度と数値の丸め方	5
3.	評価部位	6
4.	構造強度評価	8
4.1	構造強度評価方法	8
4.2	荷重の組合せ及び許容応力	8
4.3	設計用地震力	9
4.4	計算方法	11
4.5	計算条件	18
4.6	応力の評価	18
5.	評価結果	18

1. 概要

本計算書は、添付書類「V-2-11-1 波及的影響を及ぼすおそれのある下位クラス施設の耐震評価方針」の耐震設計方針に基づき、下位クラス設備である原子炉遮蔽が設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認することで、隣接している上位クラスである原子炉压力容器に対して、波及的影響を及ぼさないことを説明するものである。

2. 一般事項

2.1 配置概要

原子炉遮蔽は、原子炉本体の基礎に配置される。原子炉遮蔽は、図 2-1 の位置関係図に示すように、上位クラス施設である原子炉压力容器の周辺に設置されており、転倒時に原子炉压力容器に対して波及的影響を及ぼすおそれがある。

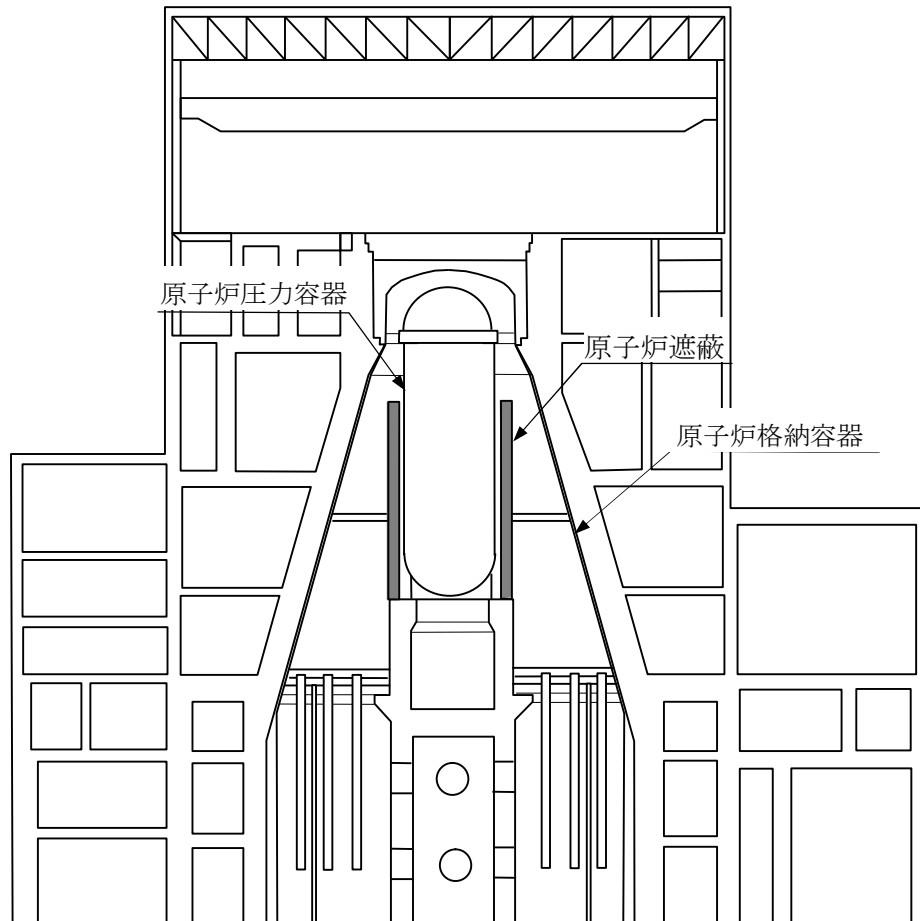


図 2-1 原子炉遮蔽の位置関係図

2.2 構造計画

原子炉遮蔽の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>外径約 [] , 内径約 [] , 高さ約 [] の原子炉圧力容器を取り囲む円筒形コンクリート壁であり内側と外側に [] の鋼板がまかれ内側と外側の鋼板はたてリブでつながれている。その内部にはモルタルが充てんされている。原子炉遮蔽のモルタルは強度部材として考慮しない。水平力は、EL. 約 34.4 m の位置に取り付けられた原子炉格納容器スタビライザ, 及び EL. 約 19.9 m の位置の基礎で原子炉本体の基礎に伝えられる。</p>	<p>炉心を中心に外径約 [] 内径約 [] の円形構造で、EL. 約 [] で原子炉本体の基礎に固定する。</p>	

2.3 評価方針

原子炉遮蔽の応力評価は、添付書類「V-2-11-1 波及的影響を及ぼすおそれのある下位クラス施設の耐震評価方針」の「3. 耐震評価方針」に従い実施する。

評価については、「2.2 構造計画」にて示す原子炉遮蔽の部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、設計用地震力に基づく応力が許容限界内に収まることを、「4. 構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「5. 評価結果」に示す。

原子炉遮蔽の耐震評価フローを図 2-2 に示す。

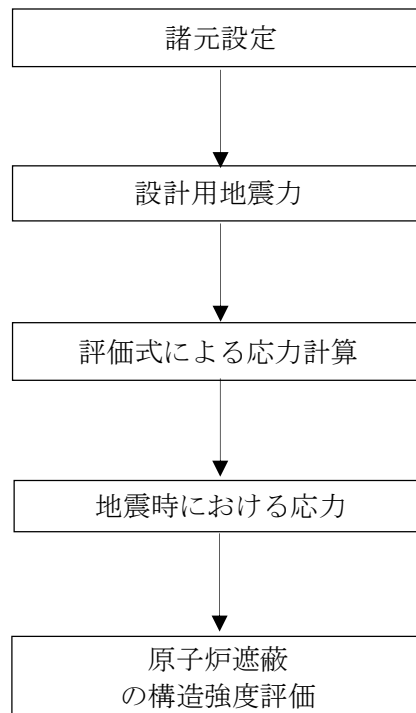


図 2-2 原子炉遮蔽の耐震評価フロー

2.4 適用基準

適用基準を以下に示す。

- (1) 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 (社) 日本電気協会
- (2) 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補一 1984 (社) 日本電気協会
- (3) 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991追補版 (社) 日本電気協会
- (4) 鋼構造設計規準 (日本建築学会 2005 改定)

2.5 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A	面積	mm ²
D ₁	直径	mm
d _B	アンカーボルトの軸径	mm
d _{si}	ベースプレート内径	mm
d _{so}	ベースプレート外径	mm
E _C	コンクリートの縦弾性係数	N/mm ²
E _S	アンカーボルトの縦弾性係数	N/mm ²
F	許容応力度の基準値	MPa
f _b	許容曲げ応力 (f _b を1.5倍した値)	MPa
f _c	許容圧縮応力 (f _c を1.5倍した値)	MPa
f _s	許容せん断応力 (f _s を1.5倍した値)	MPa
f _t	組合せ応力・引張応力 (f _t を1.5倍した値)	MPa
L ₁	シアプレート長さ	mm
M	モーメント	N・mm
N	垂直力	N
N _B	アンカーボルトの本数	—
Q	せん断力	N
r	ベースプレートの平均半径	mm
S _s	基準地震動S _s により定まる地震力	—
t _{1~6}	原子炉遮蔽各部厚さ	mm
t _{b1}	アンカーボルト等価円筒の板厚	mm
t _{b2}	圧縮側コンクリート板厚	mm
W	荷重	N
Z	断面係数	mm ³
σ _c	圧縮応力	MPa
σ _b	曲げ応力	MPa
σ _{cc}	コンクリートの圧縮応力	N/mm ²
σ _{tb}	アンカーボルトの引張応力	N/mm ²
σ	組合せ応力	MPa
τ	せん断応力	MPa
λ	圧縮材の細長比	—
Λ	限界細長比	—
v	係数	—

2.6 計算精度と数値の丸め方

計算の精度は、6桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方を表 2-2 に示す。

表 2-2 表示する数値の丸め方

数値の種類		単 位	処理桁	処理法	表示桁
許容応力	鋼材	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数
算出応力	鋼材	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数

3. 評価部位

原子炉遮蔽の耐震評価は、「4.1 構造強度評価方法」に示す条件に基づき、耐震評価上厳しくなる一般胴部、開口集中部、アンカーボルト及びシアプレートについて実施する。原子炉遮蔽の耐震評価部位については、表 2-1 の概略構造図に示す。また、原子炉遮蔽の形状及び主要寸法を図 3-1 及び図 3-2 に示す。

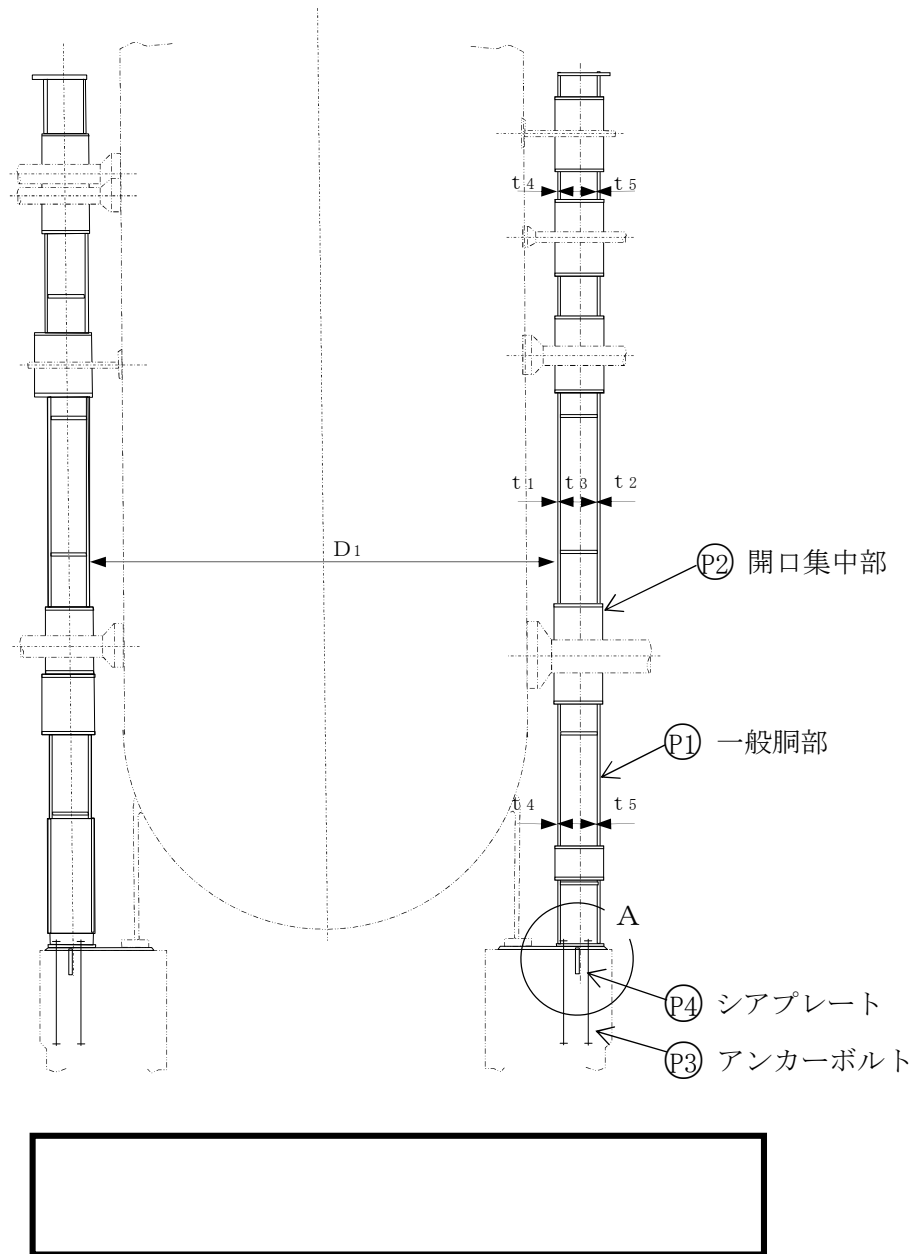


図 3-1 原子炉遮蔽の形状及び主要寸法（単位：mm）

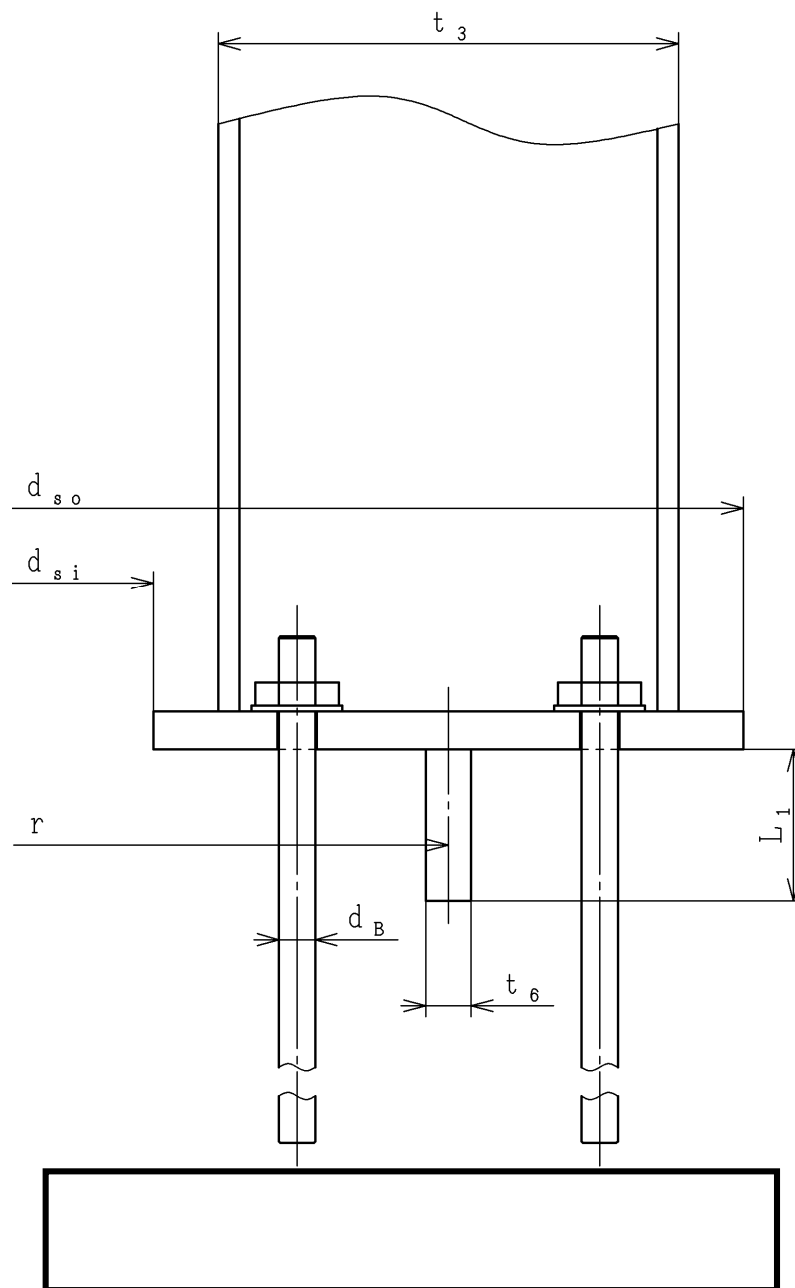


図 3-2 A部詳細(単位 : mm)

4. 構造強度評価

4.1 構造強度評価方法

- (1) 地震力は、原子炉遮蔽に対して、水平方向及び鉛直方向から作用するものとする。
- (2) 耐震計算は、原子炉遮蔽の自重及びその他すべての付帯物の重量に加えて、地震荷重を考慮する。
- (3) 設計基準対象施設及び重大事故等対象設備としての評価において、設計用地震力、許容応力の値が変わらないことから、同一の条件で構造強度評価を行う。
- (4) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を用いる。

4.2 荷重の組合せ及び許容応力

(1) 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 4-1 に示す。

表 4-1 荷重の組合せ

名称	荷重の組合せ
原子炉遮蔽	$D + S_s$

D : 原子炉遮蔽の自重及びその他のすべての付帯物の重量

$W =$

S_s : 基準地震動 S_s による地震力

(2) 許容応力


許容応力は日本建築学会の「鋼構造設計規準」(2005 改定)による。許容応力状態における許容応力を表 4-2 及び表 4-3 に示す。

表4-2 許容応力状態における許容応力 (鋼材)

材料	基準応力 F	短期許容応力 (MPa)				許容応力 状態
		圧縮	曲げ	せん断	組合せ	
	235 (厚さ ≤ 40mm)	$1.5 f_c$	$1.5 f_b$	$1.5 f_s$	$1.5 f_t$	$IV_A S$ ($V_A S^{*1}$)
	215 (厚さ > 40mm)	—	$1.5 f_b$	$1.5 f_s$	$1.5 f_t$	

注 *1 : $V_A S$ としては、 $IV_A S$ の許容限界を用いる

表 4-3 許容応力状態における許容応力（アンカーボルト）

材料	短期許容応力 (MPa)	許容応力 状態
	引張 f_t	
	651	IV _A S (V _A S ^{*1})

注 *1 : V_ASとしては, IV_ASの許容限界を用いる

4.3 設計用地震力

耐震評価に用いる設計用地震力を表 4-4 に示す。

原子炉遮蔽に加わる鉛直方向地震力及び水平方向地震力は、添付書類「V-2-3-2 炉心，原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」より求めた基準地震動 S_s の応答値を用いる。

表 4-4 設計用地震力（設計基準対象施設及び重大事故等対象設備）

耐震設計上の 重要度分類	設備区分	床面高さ (m)	評価位置	基準地震動 S_s		
				鉛直荷重 W (N)	モーメント M (N・mm)	せん断力 Q (N)
B	—	EL. 34.420～ EL. 19.851	一般胴部			
			開口集中部			
			アンカーボルト			
			シアプレート			

4.4 計算方法

4.4.1 一般胴部

4.3 項で示した荷重により一般胴部に生じる応力は，次式により計算する。

(1) 圧縮応力

$$\sigma_c = \frac{W}{A}$$

ここで，

$$A = \boxed{}$$

(2) 曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

ここで，

$$Z = \boxed{}$$

(3) せん断応力

$$\tau = \frac{Q}{A}$$

ここで，

$$A = \boxed{}$$

(4) 組合せ応力

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_b + \sigma_c)^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

4.4.2 開口集中部

4.3 項で示した荷重により開口集中部に生じる応力は、次式により計算する。

- (1) 圧縮応力

$$\sigma_c = \frac{W}{A_1}$$

ここで、

$$A_1 = \boxed{}$$

- (2) 曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M}{Z_1}$$

ここで、

$$Z_1 = \boxed{}$$

- (3) せん断応力

$$\tau = \frac{Q}{A_1}$$

ここで、

$$A_1 = \boxed{}$$

- (4) 組合せ応力

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_b + \sigma_c)^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

4.4.3 アンカーボルト

4.3 項で示した荷重によりアンカーボルトの応力は、次に示す手法に基づいて計算する。

アンカーボルトサークルは、図 4-1 に示す円周 2 列アンカーボルトサークルの平均径とする。また、アンカーボルトは、アンカーボルトの軸径の全断面積に等しい面積をもつ等価円筒におきかえる。

応力は、最大引張応力 (σ_{tb}) から最大圧縮応力 ($n\sigma_{cc}$) まで直線的に変化する。

以上の仮定のもとに、図 4-1 に示すアンカーボルト部分にモーメント M_s と軸荷重 N が加わった場合の応力計算を行う。

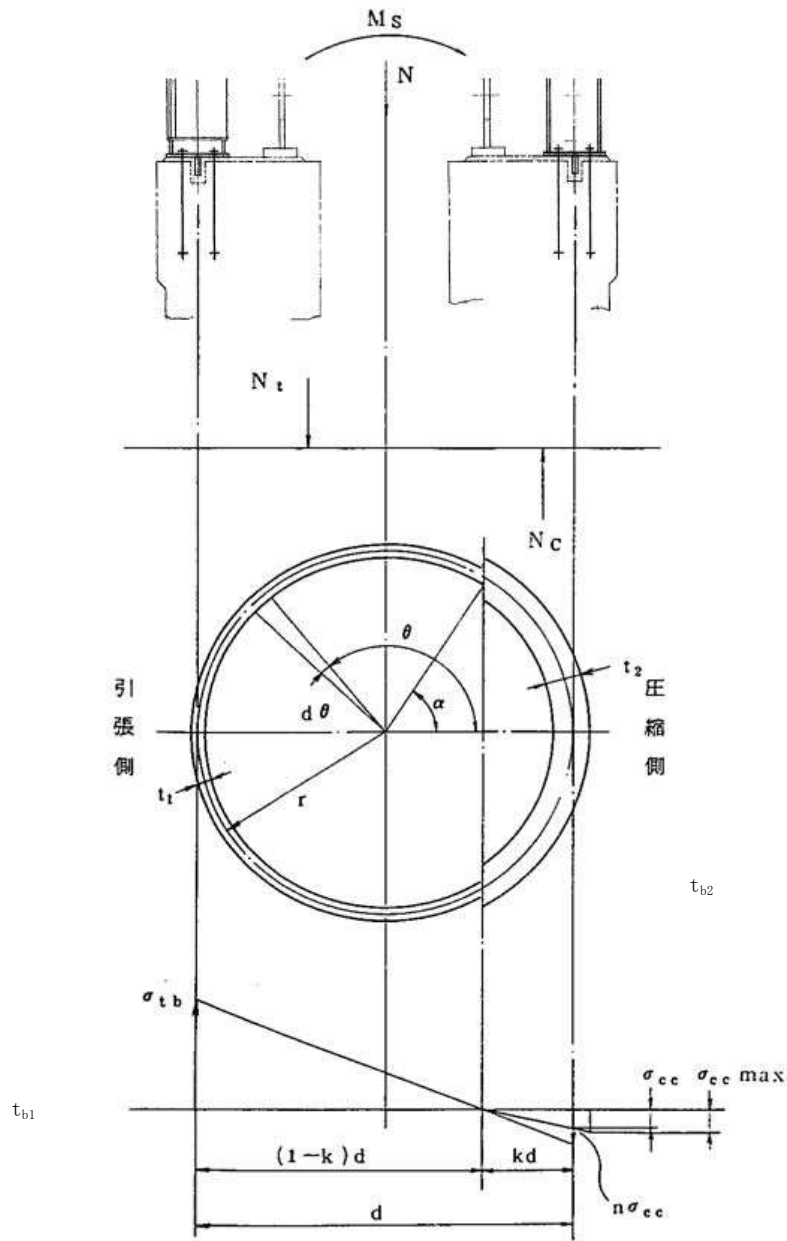


図 4-1 アンカーボルトの等価円筒及び荷重分布

- (1) アンカーボルトの等価円筒の板厚, t_1

アンカーボルトの等価円筒の板厚 t_1 は, 次のように求まる。

$$t_1 = \frac{240 \times \frac{\pi}{4} \times dB^2}{\pi \times 2 \cdot r}$$

- (2) 圧縮側のコンクリートの板幅, t_2

圧縮側のコンクリートの板幅 t_2 は, ベースプレートの幅に等しいとする。

$$t_2 = \frac{d_{s0} - d_{si}}{2}$$

(3) 引張り側及び圧縮側の関係式

コンクリートの圧縮力の総和を N_c 、アンカーボルトの引張り力の総和を N_t とすると、

$$N = N_c - N_t \quad \dots\dots\dots (1)$$

N_c によるモーメントを M_c 、 N_t によるモーメントを M_t とすると、

$$M_s - N \cdot r \cdot \cos \alpha = N \cdot (e - r \cdot \cos \alpha) = M_c + M_t \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $e = \frac{M_s}{N}$

今、 $\theta = 0$ の位置での圧縮応力を σ_{cc} とおくと、図 4-1 から、圧縮応力は、($\theta < \alpha$ ゆえ) 次のように表せる。

$$\sigma_{cc} \times \frac{r \cdot \cos \theta - r \cdot \cos \alpha}{r - r \cdot \cos \alpha}$$

よって、コンクリートの圧縮力の総和は、

$$\begin{aligned} N_c &= 2 \cdot \int_0^\alpha \frac{\sigma_{cc} \cdot (\cos \theta - \cos \alpha) \cdot r \cdot (t_2 - t_1)}{1 - \cos \alpha} \cdot d\theta \\ &= 2 \cdot \sigma_{cc} \cdot r \cdot (t_2 - t_1) \cdot \left[\frac{\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha}{1 - \cos \alpha} \right] \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

となる。

また,

$$M_c = 2 \cdot \int_0^\alpha \frac{\sigma_{cc} \cdot (\cos \theta - \cos \alpha)^2 \cdot r^2 \cdot (t_2 - t_1)}{1 - \cos \alpha} \cdot d\theta$$

$$= \sigma_{cc} \cdot r^2 \cdot (t_2 - t_1) \cdot \left[\frac{\alpha - 3 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + 2 \cdot \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{1 - \cos \alpha} \right] \dots\dots\dots (4)$$

(3), (4)式において, t_1 の代わりに $P \cdot t_2$ を代入すると,

$$N_c = 2 \cdot \sigma_{cc} \cdot r \cdot t_2 \cdot (1 - P) \cdot \left[\frac{\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha}{1 - \cos \alpha} \right] \dots\dots\dots (5)$$

$$M_c = \sigma_{cc} \cdot r^2 \cdot t_2 \cdot (1 - P) \cdot \left[\frac{\alpha - 3 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + 2 \cdot \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{1 - \cos \alpha} \right] \dots\dots\dots (6)$$

となる。

ただし, $P = t_1 / t_2$

次に, アンカーボルトの引張り力についても同様に, まず任意の位置での引張応力は,

$$\sigma_{tb} \cdot \left[\frac{r \cdot \cos \alpha - r \cdot \cos \theta}{r + r \cdot \cos \alpha} \right] = \sigma_{tb} \cdot \left[\frac{\cos \alpha - \cos \theta}{1 + \cos \alpha} \right] \dots\dots\dots (7)$$

また, 相似三角形より(図4-1),

$$\frac{n \cdot \sigma_{cc}}{\sigma_{tb}} = \frac{r - r \cdot \cos \alpha}{r + r \cdot \cos \alpha} \quad \therefore \sigma_{tb} = \frac{n \cdot \sigma_{cc} \cdot (1 + \cos \alpha)}{1 - \cos \alpha} \dots\dots\dots (8)$$

となる。

ただし, $n = E_s / E_c$

(7)式と(8)式から, 任意の位置でのアンカーボルトの引張応力は,

$$\frac{n \cdot \sigma_{cc} \cdot (\cos \alpha - \cos \theta)}{1 - \cos \alpha} \dots\dots\dots (9)$$

よって, アンカーボルトの引張力の合計は,

$$N_t = 2 \cdot \int_\alpha^\pi \frac{n \cdot \sigma_{cc} \cdot (\cos \alpha - \cos \theta)}{1 - \cos \alpha} \cdot r \cdot t_1 \cdot d\theta$$

$$= \frac{2 \cdot n \cdot \sigma_{cc} \cdot r \cdot P \cdot t_2 \cdot (\pi \cdot \cos \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha + \sin \alpha)}{1 - \cos \alpha} \dots\dots\dots (10)$$

同様に、アンカーボルト力 N_t によるモーメント

$$M_t = n \cdot \sigma_{cc} \cdot r^2 \cdot P \cdot t_2 \cdot \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot \cos^2 \alpha - 2 \cdot \alpha \cdot \cos^2 \alpha + 3 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \pi - \alpha}{1 - \cos \alpha} \right] \dots\dots (11)$$

(1)式に(5)，(10)式を代入すると，

$$N = \frac{2 \cdot \sigma_{cc} \cdot r \cdot t_2}{1 - \cos \alpha} \cdot [(1 - P - n \cdot P) \cdot (\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha) - n \cdot P \cdot \pi \cdot \cos \alpha] \dots\dots (12)$$

同様に(2)式に(6)，(11)式を代入して，

$$N \cdot (e - r \cdot \cos \alpha) = \frac{\sigma_{cc} \cdot r^2 \cdot t_2}{1 - \cos \alpha} \cdot [(1 - P - n \cdot P) \cdot (\alpha + 2 \cdot \alpha \cdot \cos^2 \alpha - 3 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha) + \pi \cdot n \cdot P \cdot (2 \cdot \cos^2 \alpha + 1)] \dots\dots (13)$$

(12)式と(13)式より，

$$e/r = \frac{(1 - P - n \cdot P) \cdot (\alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha) + \pi \cdot n \cdot P}{2 \cdot [(1 - P - n \cdot P) \cdot (\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha) - \pi \cdot n \cdot P \cdot \cos \alpha]} \dots\dots (14)$$

この式から α を求めて，この α を(12)式に代入すると，

$$\sigma_{cc} = \frac{N \cdot (1 - \cos \alpha)}{2 \cdot r \cdot t_2 \cdot [(1 - P - n \cdot P) \cdot (\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha) - \pi \cdot n \cdot P \cdot \cos \alpha]} \dots\dots (15)$$

σ_{tb} は(15)式を(8)式に代入することによって得られる。

$$\sigma_{tb} = \frac{n \cdot \left\{ \frac{N \cdot (1 - \cos \alpha)}{2 \cdot r \cdot t_2 \cdot [(1 - P - n \cdot P) \cdot (\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha) - \pi \cdot n \cdot P \cdot \cos \alpha]} \right\} \cdot (1 + \cos \alpha)}{1 - \cos \alpha} \dots\dots (15)'$$

また，図4-1より，

$$\frac{\sigma_{cc \max}}{\sigma_{cc}} = \frac{r \cdot (1 - \cos \alpha) + t_2 / 2}{r \cdot (1 - \cos \alpha)}$$

$$\sigma_{cc \max} = \sigma_{cc} \cdot \left[1 + \frac{t_2}{2 \cdot r \cdot (1 - \cos \alpha)} \right] \dots\dots (16)$$

4.4.4 シアプレート

(1) 形状と寸法

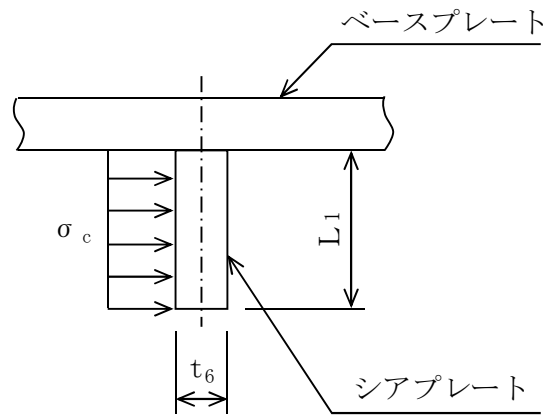


図 4-2 シアプレート

(2) せん断応力

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{Q}{A} \\ &= \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot t_6}\end{aligned}$$

(3) コンクリート部反力

$$\sigma_c = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot L_1}$$

(4) 曲げ応力

$$\begin{aligned}\sigma_b &= \frac{6 \cdot M}{t_6^2} \\ &= \frac{6 \times \frac{1}{2} \cdot \sigma_c \cdot L_1^2}{t_6^2}\end{aligned}$$

(5) 組合せ応力

$$\sigma = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

4.5 計算条件

4.5.1 原子炉遮蔽の応力計算条件

応力計算に用いる計算条件は、本計算書の5. 評価結果の設計条件および機器要目に示す。

4.6 応力の評価

4.6.1 一般胴部、開口集中部及びシアプレートの応力評価

4.4.1項、4.4.2項及び4.4.4項で求めた一般胴部、開口集中部及びシアプレートの圧縮応力、曲げ応力、せん断応力及び組合せ応力については、それぞれ許容圧縮応力 f_c 、許容曲げ応力 f_b 、許容せん断応力 f_s 及び許容組合せ応力 f_t 以下であること。ただし、 f_c 、 f_b 、 f_s 、 f_t は下表による。

	基準地震動 S_s による 荷重との組合せ
許容圧縮応力 f_c	$1.5 \cdot \frac{\left\{ 1 - 0.4 \cdot \left[\frac{\lambda}{\Lambda} \right]^2 \right\} \cdot F}{\nu}$
許容曲げ応力 f_b	$1.5 \cdot \frac{F}{1.5}$
許容せん断応力 f_s	$1.5 \cdot \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$
許容組合せ応力 f_t	$1.5 \cdot \frac{F}{1.5}$

4.6.2 アンカーボルトの応力評価

4.4.3項で求めたアンカーボルトの引張応力については、許容組合せ応力 f_t 以下であること。ただし、 f_t は下表による。

	基準地震動 S_s による 荷重との組合せ
許容引張応力 f_t	$1.5 \cdot \frac{F}{1.5}$

5. 評価結果

原子炉遮蔽各部の評価結果を【原子炉遮蔽の耐震性についての計算結果】に示す。発生値は許容応力を満足しており、耐震性を有することを確認した。

【原子炉遮蔽の耐震性についての計算結果】


1. 設計基準対象施設及び重大事故等対象設備

1.1 設計条件

機器名称	床面高さ (m)	評価位置	基準地震動 S_s		
			鉛直荷重 W (N)	モーメント M (N・mm)	せん断力 Q (N)
原子炉 遮蔽	EL. 34.420～ EL. 19.851	一般胴部			
		開口集中部			
		アンカーボルト			
		シアプレート			

1.2 機器要目

1.2.1 原子炉遮蔽

部材	W (N)	D_1 (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)	t_4 (mm)	t_5 (mm)	A (mm ²)		Z (mm ³)	
								一般胴部	開口集中部	一般胴部	開口集中部
原子炉遮蔽 											

1.2.2 アンカーボルト

部材	d_B (mm)	d_{so} (mm)	d_{si} (mm)	r (mm)	N_B (本)	E_S/E_c	t_1 (mm)	t_2 (mm)
アンカーボルト □								

1.2.3 シアプレート

部材	r (mm)	t_6 (mm)	L_1 (mm)
シアプレート □			

1.3 結論

評価対象設備	評価部位		応力分類	発生値	評価基準値
				MPa	MPa
原子炉遮蔽	P 1	一般胴部	圧縮応力 σ_c	27	233
			曲げ応力 σ_b	30	235
			せん断応力 τ	7	135
			組合せ応力 σ	59	235
	P 2	開口集中部	圧縮応力 σ_c	87	233
			曲げ応力 σ_b	111	235
			せん断応力 τ	28	135
			組合せ応力 σ	204	235
	P 3	アンカーボルト	引張応力 σ_{tb}	59	651
	P 4	シアプレート	曲げ応力 σ_b	67	215
			せん断応力 τ	7	124
			組合せ応力 σ	68	215

すべて許容応力以下である。