

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 3-013-14 改 01
提出年月日	2022年10月7日

VI-3-別添 1-13-2 消音器の強度計算書

2022年10月

中国電力株式会社

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	3
2.3 評価方針	4
2.4 適用規格・基準等	5
3. 強度評価方法	6
3.1 記号の定義	6
3.2 評価対象部位	7
3.3 荷重及び荷重の組合せ	8
3.4 許容限界	9
3.5 評価方法	10
4. 評価条件	13
5. 強度評価結果	15

1. 概要

本資料は、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある排気消音器（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）（以下「排気消音器」という。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、主要な構造部材が構造健全性を保持し、排気消音器の機能を維持することを計算により確認するものである。

2. 基本方針

VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」、
「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」及び「5. 強度評価方法」を踏まえ、排気消音器
の「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格・基準等」を示す。

2.1 位置

VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算」の「3.2 機能維持の方針」に示す
とおり、排気消音器は原子炉建物に設置する。排気消音器の位置図を図2-1に示す。

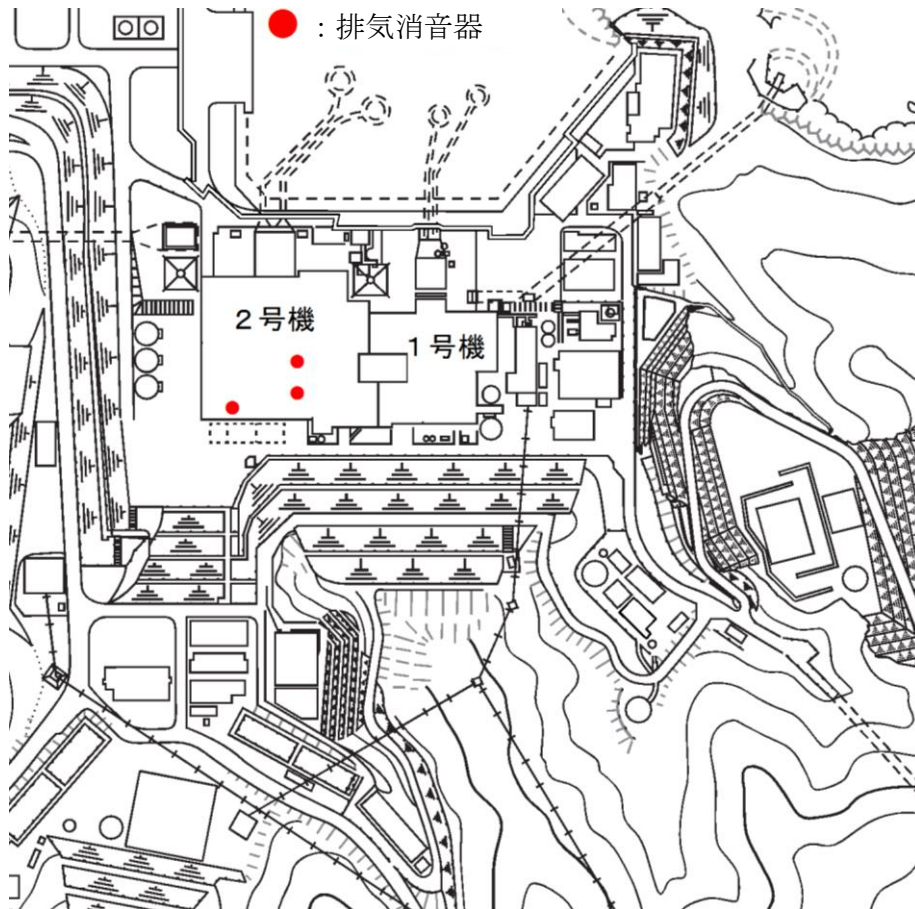


図2-1 排気消音器の位置図

2.2 構造概要

VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえて、排気消音器の構造を設定する。

排気消音器は、鋼製の胴板を主体構造とし、原子炉建物に設けた基礎に本体を結合ボルト及び基礎ボルトで固定する構造とする。排気消音器の概略構造図を図2-2に示す。

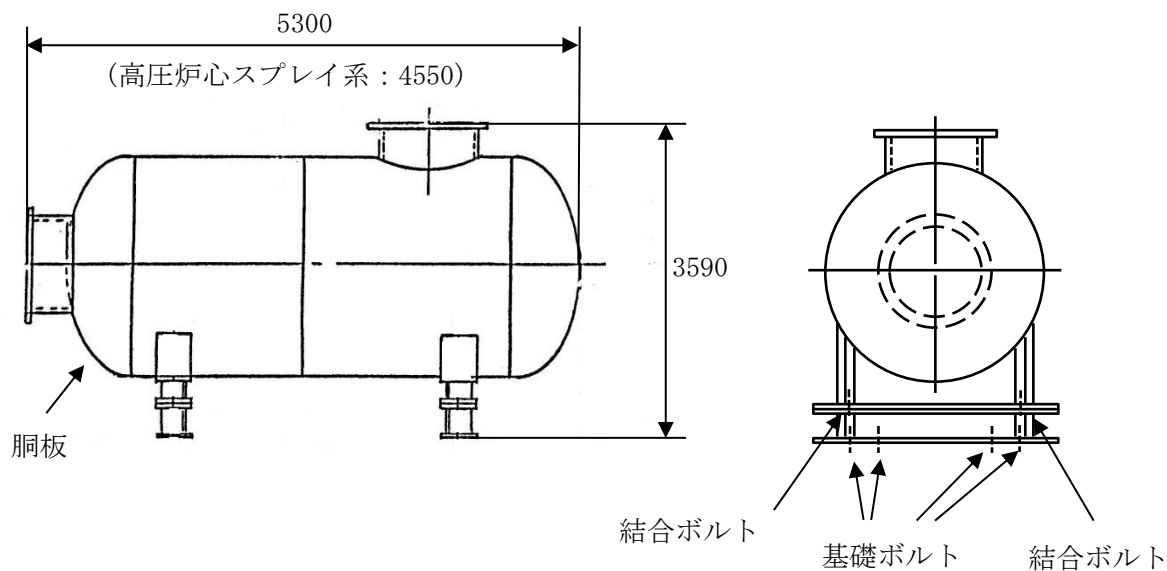


図2-2 排気消音器の概略構造図

2.3 評価方針

VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」を踏まえ、排気消音器の評価対象部位に生じる応力等が、許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す条件を用いて計算し、その結果を「5. 強度評価結果」に示す。

評価対象部位は、その構造を踏まえ、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、選定する。

(1) 構造強度評価の方針

排気消音器の構造強度評価の方針を以下に、構造強度評価フローを図2-3に示す。

- ・排気消音器に対して、設計竜巻による荷重に常時作用する荷重を加えた応力が許容限界以下であることを確認する。
- ・部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たることを想定する。
- ・設計竜巻による荷重は、水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同様であるため、原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1 -1987）、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-1984）及び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）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いて算出する。
- ・許容限界は、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

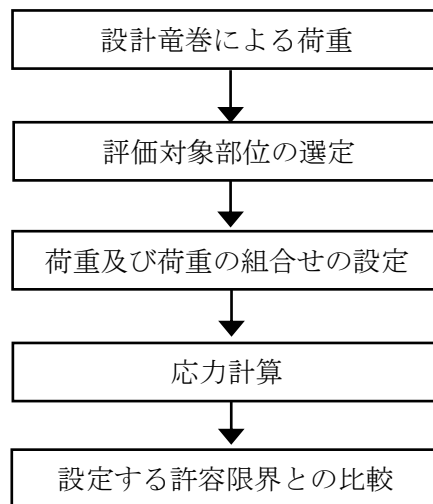


図2-3 構造強度評価フロー

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・建築物荷重指針・同解説（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・発電用原子力設備規格（設計・建設規格 JSME S NC 1-2005（2007年追補版含む。））（（社）日本機械学会）（以下「JSME」という。）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984）（（社）日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4601-1987）（（社）日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4601-1991追補版）（（社）日本電気協会）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 構造強度評価の記号の定義

排気消音器の構造強度評価に用いる記号を表 3-1 に示す。

表3-1 構造強度評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
A	m ²	排気消音器の受圧面積
A _b	mm ²	ボルトの断面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
d	mm	ボルト呼び径
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
F _b	N	ボルトに生じる引張荷重
f _t	MPa	J S M E SSB-3131 により規定される供用状態A及びBでの許容引張応力
f _s	MPa	J S M E SSB-3131 により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
h ₁	mm	取付面から重心までの高さ
h ₂	mm	脚結合部から重心までの高さ
ℓ ₁	mm	軸方向における基礎ボルトと重心の距離
ℓ ₂	mm	軸方向における基礎ボルトと重心の距離
ℓ ₃	mm	軸方向における結合ボルトと重心の距離
ℓ ₄	mm	軸方向における結合ボルトと重心の距離
ℓ ₁ '	mm	軸直角方向における基礎ボルトと重心の距離
ℓ ₂ '	mm	軸直角方向における基礎ボルトと重心の距離
ℓ ₃ '	mm	軸直角方向における結合ボルトと重心の距離
ℓ ₄ '	mm	軸直角方向における結合ボルトと重心の距離
m	kg	排気消音器の質量
n	—	ボルトの本数
n _f	—	引張荷重を受けるボルトの本数
Q _b	N	ボルトに生じるせん断荷重
q	N/m ²	設計用速度圧

表 3-1 構造強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
S_u	MPa	J S M E 付録材料図表 Part5 表 9 にて規定される設計引張強さ
S_y	MPa	J S M E 付録材料図表 Part5 表 8 にて規定される設計降伏点
V_D	m/s	設計竜巻の最大風速
W_T	N	設計竜巻による荷重
W_w	N	風圧力により作用する荷重
σ_b	MPa	ボルトに生じる引張応力
τ	MPa	ボルトに生じるせん断応力
ρ	kg/m ³	空気密度

3.2 評価対象部位

排気消音器の評価対象部位は、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に従い、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、選定する。

(1) 構造強度評価の評価対象部位

設計竜巻による荷重は、排気消音器に作用し、結合ボルトを介して基礎ボルトに作用する。

排気消音器の転倒による閉塞により、非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の排気機能に影響を与える波及的影響を考慮し、転倒を防止するための主要な支持部材のうち、支持断面積が小さいことから、発生する応力が厳しくなる結合ボルト及び基礎ボルトを評価対象部位として選定する。

排気消音器の構造強度評価における評価対象部位を図3-1に示す。

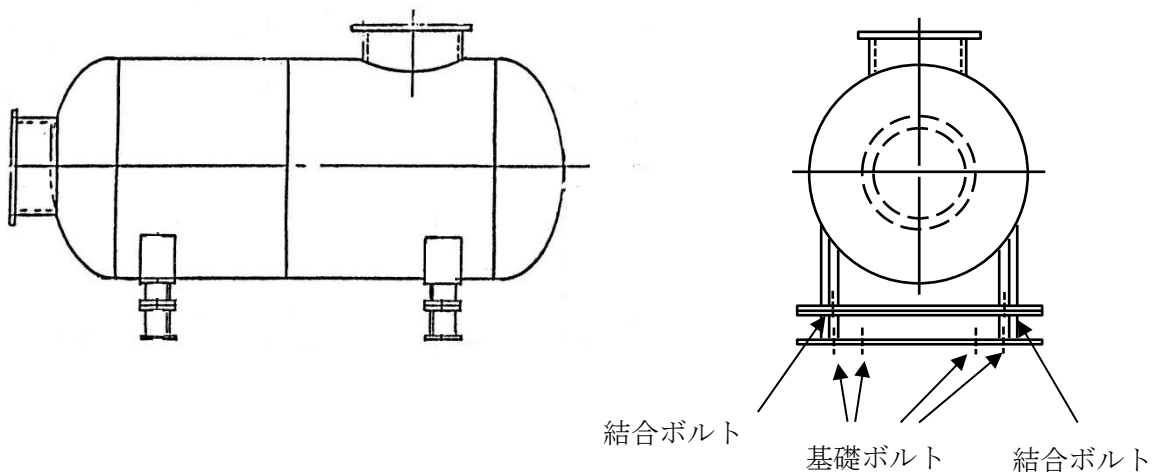


図3-1 排気消音器の評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて示す荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価では、以下の荷重を用いる。

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$\text{自重による荷重} = m \cdot g$$

(b) 設計竜巻による荷重 (W_T)

屋外の設備であるため、風圧力による荷重を考慮する。排気消音器は閉じた施設ではなく、排気消音器に気圧差は発生しないことから、気圧差による荷重は考慮しない。また、排気消音器が、仮に飛来物による衝撃荷重によって貫通しても、その貫通箇所又は本来の排気箇所から排気され、かつ速やかに補修する方針とするため、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重に衝撃荷重を考慮しない。

イ. 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重は、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1(3)c. (a) 風圧力による荷重」に示す式に従い、算出する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

$$\text{ここで } q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_D^2$$

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて設定している荷重の組合せを踏まえ、排気消音器の評価対象部位ごとに設定する。

排気消音器の基礎ボルト及び結合ボルトには、自重及び風圧力による荷重が作用する。構造強度評価に用いる荷重の組合せを表3-2に示す。

表3-2 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
波及的影響を及ぼす可能性のある施設	排気消音器	基礎ボルト 結合ボルト	①自重 ②風圧力による荷重

3.4 許容限界

排気消音器の基礎ボルト及び結合ボルトの許容限界は、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に従い、「3.2 評価対象部位」にて設定している部位における機能損傷モードを考慮し、J E A G 4 6 0 1に基づく許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力を用いる。

(1) 構造強度評価の許容限界

許容限界はJ E A G 4 6 0 1を準用し、その他支持構造物の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_ASから算出した許容応力とする。材料の設計降伏点はJ S M E付録材料図表Part5表8より、設計引張強さはJ S M E付録材料図表Part5表9により算出した値を用いる。周囲環境温度がJ S M E付録材料図表Part5表8及び表9記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算し、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

排気消音器の基礎ボルト及び結合ボルトの許容限界を表3-3、許容応力を表3-4及び表3-5に示す。

表3-3 許容限界

評価対象部位	許容応力状態	応力の種類		許容限界
基礎ボルト, 結合ボルト	Ⅲ _A S	一次応力	引張り	$1.5 \cdot f_t$
			せん断	$1.5 \cdot f_s$
			組合せ	$\text{Min} \{1.5 \cdot f_t, (2.1 \cdot f_t - 1.6 \cdot \tau)\}$

表 3-4 許容応力（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器）

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)	$1.5 \cdot f_t$ (MPa)	$1.5 \cdot f_s$ (MPa)
基礎ボルト	SS400	50	231	394	231	173	133
結合ボルト	SS400	50	231	394	231	173	133

表 3-5 許容応力（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器）

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)	$1.5 \cdot f_t$ (MPa)	$1.5 \cdot f_s$ (MPa)
基礎ボルト	SS400	50	231	394	231	173	133
結合ボルト	SS400	50	231	394	231	173	133

3.5 評価方法

排気消音器の強度評価は、VI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

(1) 構造強度評価の評価方法

a. 計算モデル

重心位置に風圧力による荷重が作用する1質点系モデルとして計算を行う。排気消音器の評価モデル図を図3-2及び図3-3に示す。なお、基礎ボルトに関しては、非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関と高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の排気消音器で取付位置が異なるためそれぞれで評価を行う。

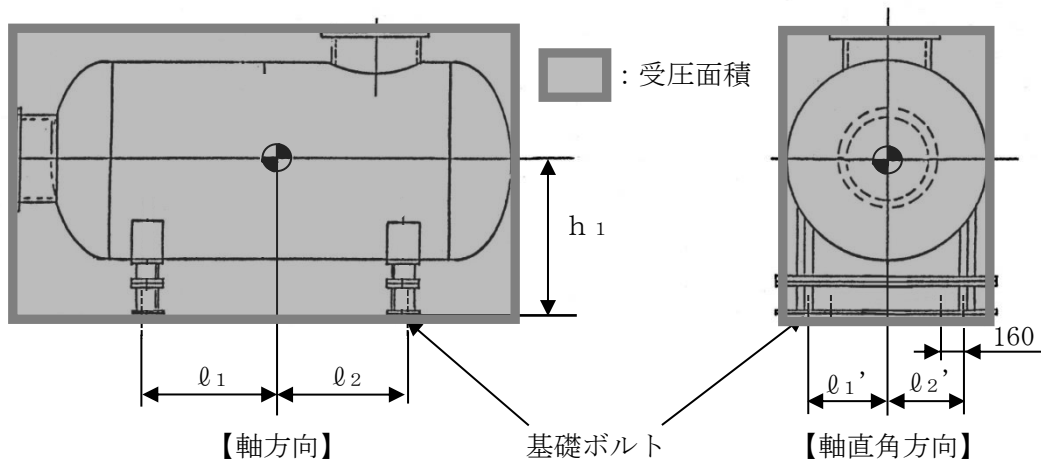


図3-2 排気消音器の基礎ボルトモデル図

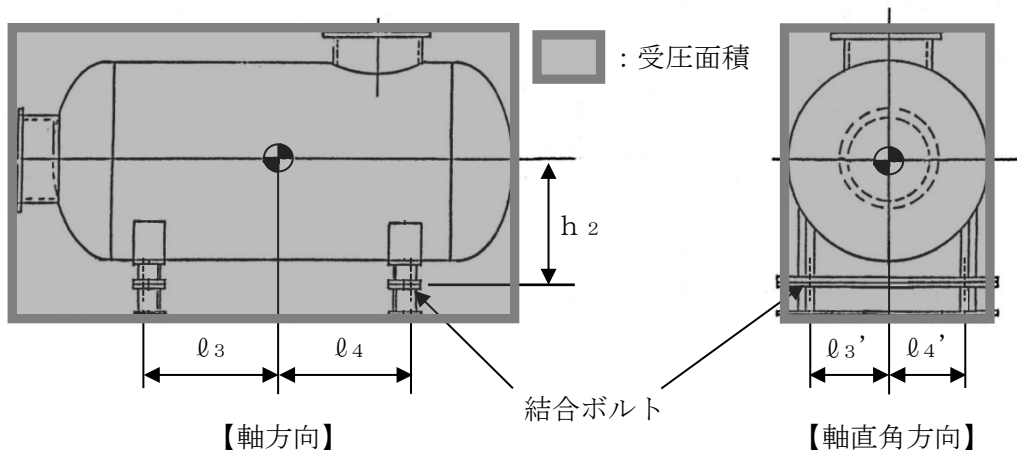


図3-3 排気消音器の結合ボルトモデル図

b. 計算方法

(a) 基礎ボルトの引張応力

基礎ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として、図 3-2 で基礎ボルトを支点とする転倒を考え、これを片側の基礎ボルトで受けるものとして計算する。なお、強度評価においては軸直角方向と軸方向の各引張応力を比較し、値の大きいほうを採用する。

イ. 軸直角方向

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{(W_w \cdot h_1 - m \cdot g \cdot \ell_1') \cdot (\ell_1' + \ell_2')}{(\ell_1' + \ell_2')^2 + (\ell_1' + \ell_2' - 160)^2}$$

(ロ) 引張応力

$$\sigma_b = \frac{F_b}{n_f \cdot A_b}$$

ここで、基礎ボルトの軸断面積 A_b は

$$A_b = \frac{\pi}{4} d^2$$

ロ. 軸方向

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{W_w \cdot h_1 - m \cdot g \cdot \ell_1}{\ell_1 + \ell_2}$$

(ロ) 引張応力

$$\sigma_b = \frac{F_b}{n_f \cdot A_b}$$

(b) 基礎ボルトのせん断応力

基礎ボルトに対するせん断応力は、基礎ボルト全本数で受けるものとして計算する。

イ. せん断力

$$Q_b = W_w$$

ロ. せん断応力

$$\tau = \frac{Q_b}{n \cdot A_b}$$

(c) 結合ボルトの引張応力

結合ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として、図 3-3 で結合ボルトを支点とする転倒を考え、これを片側の結合ボルトで受けるものとして計算する。なお、強度評価においては軸直角方向と軸方向の各引張応力を比較し、値の大きいほうを採用する。

イ. 軸直角方向

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{W_w \cdot h_2 - m \cdot g \cdot \ell_3'}{\ell_3' + \ell_4'}$$

(ロ) 引張応力

$$\sigma_b = \frac{F_b}{n_f \cdot A_b}$$

ロ. 軸方向

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{W_w \cdot h_2 - m \cdot g \cdot \ell_3}{\ell_3 + \ell_4}$$

(ロ) 引張応力

$$\sigma_b = \frac{F_b}{n_f \cdot A_b}$$

(d) 結合ボルトのせん断応力

結合ボルトに対するせん断応力は、基礎ボルト全本数で受けるものとして計算する。

イ. せん断力

$$Q_b = W_w$$

ロ. せん断応力

$$\tau = \frac{Q_b}{n \cdot A_b}$$

4. 評価条件

(1) 構造強度評価の評価条件

構造強度評価に用いる条件を表4-1～表4-5に示す。

ここでは、受圧面積が大きく、基礎ボルトと重心の水平方向の距離が小さい軸直角方向の条件をまとめる。

表4-1 評価条件

V_D (m/s)	ρ (kg/m ³)	q (N/m ²)	G (-)	C (-)	g (m/s ²)
92	1.226	5189	1.0	1.2	9.80665

表4-2 評価条件（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器基礎ボルト）

A (m ²)	n (-)	n_f (-)	d (mm)	A_b (mm ²)
19.027	8	2	24	452.4

h_1 (mm)	\varnothing_1' (mm)	\varnothing_2' (mm)	m (kg)
2120	977	977	4800

注：軸直角方向の転倒の評価に用いる値を記載

表4-3 評価条件（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器結合ボルト）

A (m ²)	n (-)	n_f (-)	d (mm)	A_b (mm ²)
19.027	12	2	24	452.4

h_2 (mm)	\varnothing_3' (mm)	\varnothing_4' (mm)	m (kg)
1370	977	977	4800

注：軸直角方向の転倒の評価に用いる値を記載

表4-4 評価条件（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器基礎ボルト）

A (m ²)	n (-)	n _f (-)	d (mm)	A _b (mm ²)
16.3345	8	2	24	452.4

h ₁ (mm)	ℓ ₁ ' (mm)	ℓ ₂ ' (mm)	m (kg)
2120	977	977	4400

注：軸直角方向の転倒の評価に用いる値を記載

表4-5 評価条件（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器結合ボルト）

A (m ²)	n (-)	n _f (-)	d (mm)	A _b (mm ²)
16.3345	12	2	24	452.4

h ₂ (mm)	ℓ ₃ ' (mm)	ℓ ₄ ' (mm)	m (kg)
1370	977	977	4400

注：軸直角方向の転倒の評価に用いる値を記載

5. 強度評価結果

(1) 構造強度評価の強度評価結果

a. 排気消音器（非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）

竜巻発生時の強度評価結果を表5-1に示す。非常用ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器基礎ボルト及び結合ボルトに発生する応力は許容応力以下である。

表5-1 評価結果

評価対象部位	応力の種類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
基礎ボルト	引張り	110	173
	せん断	53	133
	組合せ	110	158
結合ボルト	引張り	121	173
	せん断	35	133
	組合せ	121	173

b. 排気消音器（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関の付属施設）

竜巻発生時の強度評価結果を表5-2に示す。高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル機関排気消音器基礎ボルト及び結合ボルトに発生する応力は許容応力以下である。

表5-2 評価結果

評価対象部位	応力の種類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
基礎ボルト	引張り	94	173
	せん断	46	133
	組合せ	94	170
結合ボルト	引張り	103	173
	せん断	31	133
	組合せ	103	173