

| | |
|-----------------------|-------------------|
| 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-工-B-17-0026_改1 |
| 提出年月日 | 2021年4月13日 |

VI-3-別添 1-1-10-3 消音器の強度計算書

02 ③ VI-3-別添 1-1-10-3 R 2

2021年4月

東北電力株式会社

目 次

| | |
|----------------|----|
| 1. 概要 | 1 |
| 2. 基本方針 | 1 |
| 2.1 位置 | 1 |
| 2.2 構造概要 | 2 |
| 2.3 評価方針 | 3 |
| 2.4 適用規格 | 4 |
| 3. 強度評価方法 | 4 |
| 3.1 記号の定義 | 4 |
| 3.2 評価対象部位 | 6 |
| 3.3 荷重及び荷重の組合せ | 7 |
| 3.4 許容限界 | 8 |
| 3.5 評価方法 | 9 |
| 4. 評価条件 | 12 |
| 5. 強度評価結果 | 13 |

1. 概要

本資料は、添付書類「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、非常用ディーゼル発電設備（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備を含む。）排気消音器（以下、「ディーゼル発電設備排気消音器」という。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、ディーゼル発電設備排気消音器の機能維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

ディーゼル発電設備排気消音器について、添付書類「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、ディーゼル発電設備排気消音器の「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

ディーゼル発電設備排気消音器は、添付書類「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」に示すとおり、原子炉建屋上面に設置する。ディーゼル発電設備排気消音器の位置図を図 2-1 に示す。

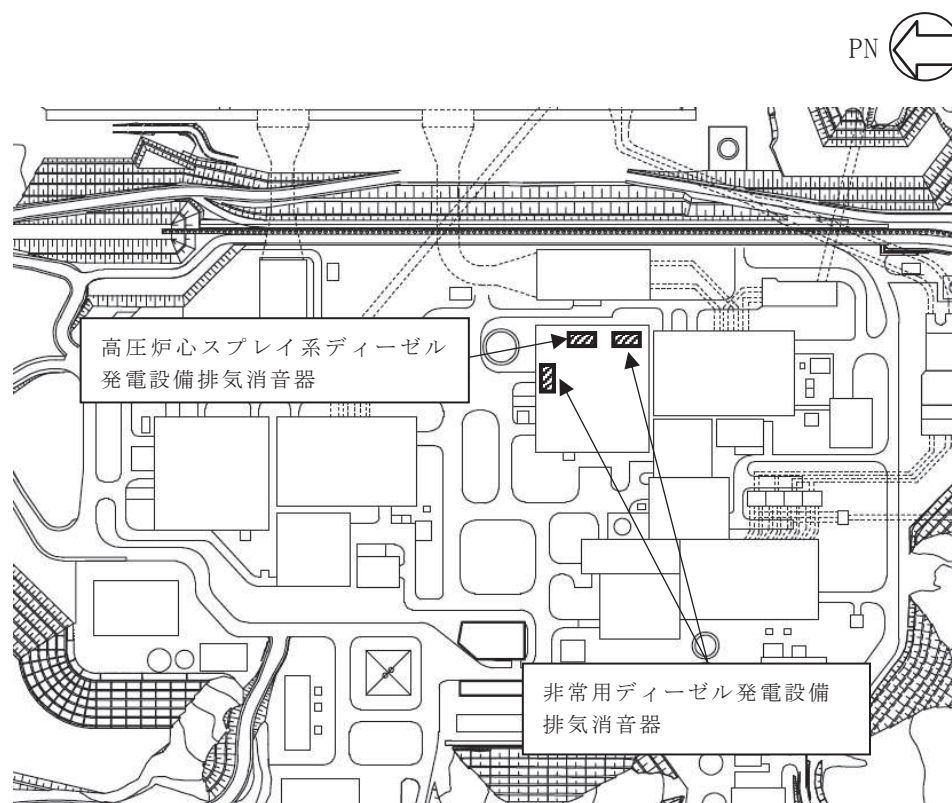


図 2-1 ディーゼル発電設備排気消音器の位置図

2.2 構造概要

ディーゼル発電設備排気消音器について、添付書類「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、構造を設定する。

ディーゼル発電設備排気消音器は、原子炉建屋上面に設置しており、基礎ボルトにより固定している。ディーゼル発電設備排気消音器の概要図を図 2-2 に示す。

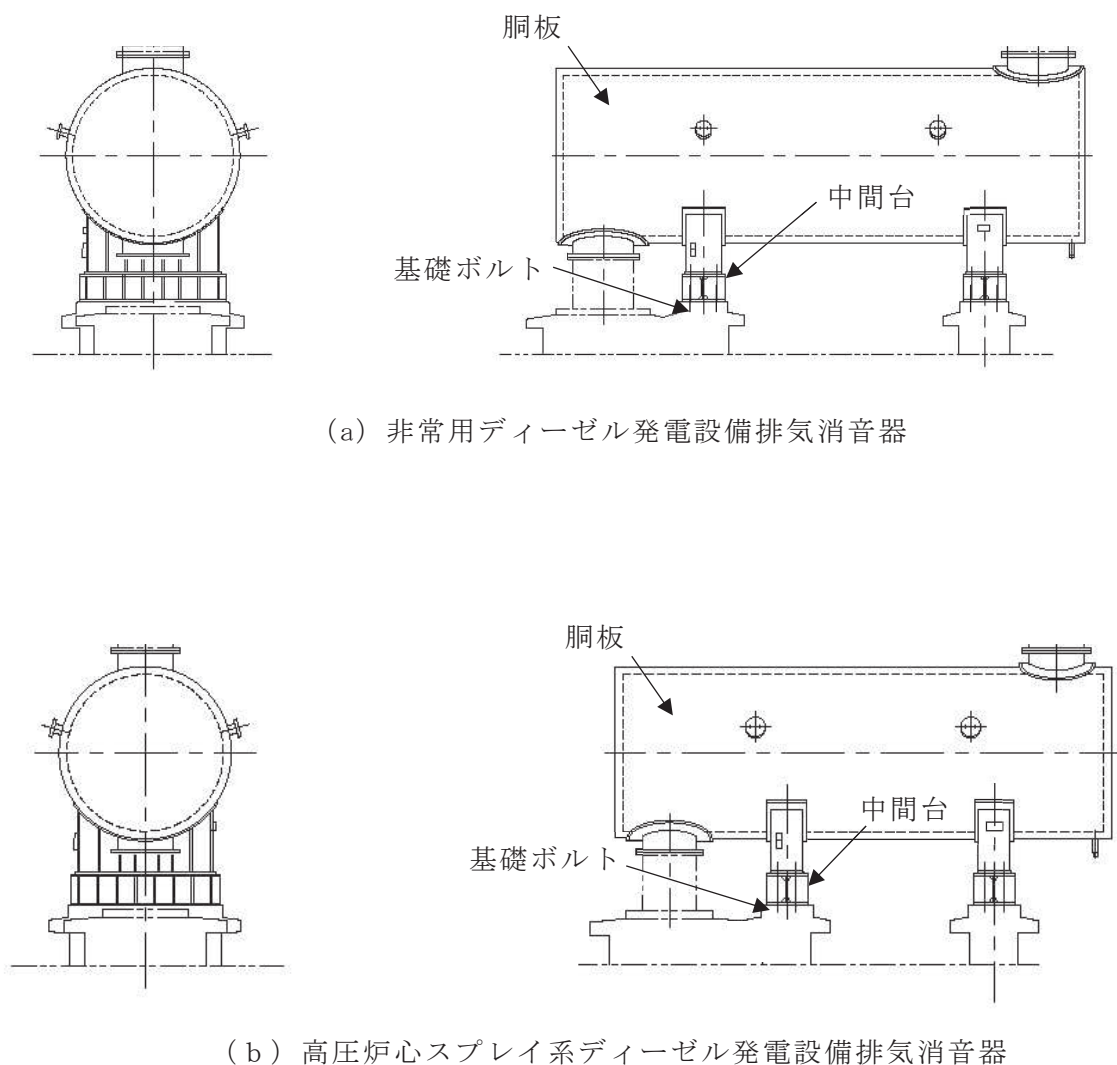


図 2-2 ディーゼル発電設備排気消音器の概要図

2.3 評価方針

ディーゼル発電設備排気消音器の強度評価は、添付書類「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」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、ディーゼル発電設備排気消音器の評価対象部位に作用する応力等が、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」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

ディーゼル発電設備排気消音器の強度評価においては、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、評価対象部位を選定する。

ディーゼル発電設備排気消音器の強度評価フローを図2-3に示す。強度評価においては、ディーゼル発電設備排気消音器に対して、設計竜巻による荷重に自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の強度評価には、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なものであると考へ、「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）」、「原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1-1987）」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、添付書類「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。

ディーゼル発電設備排気消音器の許容限界は、添付書類「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」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

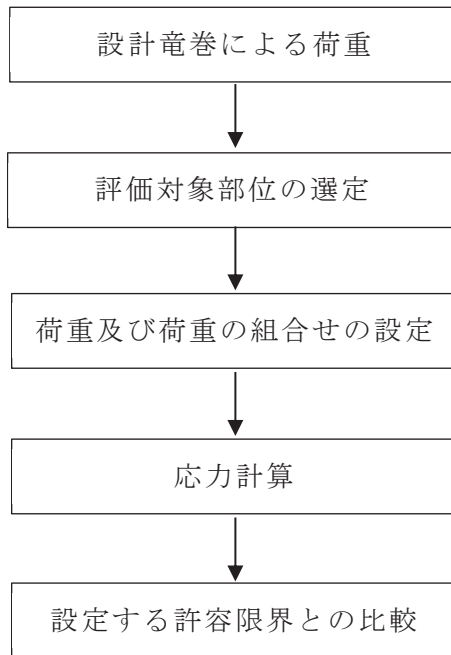


図2-3 ディーゼル発電設備排気消音器の強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・日本建築学会 2004年 建築物荷重指針・同解説
- ・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）
- ・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（J E A G 4 6 0 1-1991 追補版）
- ・J S M E S N C 1-2005/2007 発電用原子力設備規格 設計・建設規格（以下「設計・建設規格」という。）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

ディーゼル発電設備排気消音器の強度評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 強度評価に用いる記号(1/2)

| 記号 | 単位 | 定義 |
|-----------------|------------------|---|
| A | m ² | 受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積） |
| A _A | m ² | 軸方向応力評価における受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積） |
| A _b | mm ² | ボルトの断面積 |
| A _H | m ² | 軸直角方向応力評価における受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積） |
| C | — | 建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数 |
| C _A | — | 軸方向応力評価における建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数 |
| C _H | — | 軸直角方向応力評価における建築物荷重指針・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 | 設計・建設規格 SSB-3121.1(1)により規定される値 |
| F _{bA} | N | ボルトに対する軸方向応力評価における引張力 |
| F _{bH} | N | ボルトに対する軸直角方向応力評価における引張力 |
| f _s | MPa | 設計・建設規格 SSB-3121.1により規定される供用応力状態A及びBでの許容せん断応力 |
| f _t | MPa | 設計・建設規格 SSB-3121.1により規定される供用応力状態A及びBでの許容引張応力 |
| G | — | ガスト影響係数 |
| g | m/s ² | 重力加速度 |
| H | mm | 排気消音器の高さ（全高） |
| h | mm | 排気消音器重心高さ |
| L _{gH} | mm | 重心からボルト間の軸直角方向水平距離 |
| L _H | mm | 支点からボルト間の軸直角方向水平距離 |
| L _{gA} | mm | 重心からボルト間の軸方向水平距離 |
| L _A | mm | 支点からボルト間の軸方向水平距離 |
| m | kg | 排気消音器の質量 |
| N | — | ボルトの本数 |

表3-1 強度評価に用いる記号(2/2)

| 記号 | 単位 | 定義 |
|---------------|-----|------------------------------------|
| n_{fA} | — | 軸方向応力評価における引張力を受けるボルトの本数 |
| n_{fH} | — | 軸直角方向応力評価における引張力を受けるボルトの本数 |
| Q_b | N | ボルトに対するせん断力 |
| q | MPa | 設計用速度圧 |
| S_u | MPa | 設計・建設規格 付録材料図表Part5の表にて規定される設計引張強さ |
| S_y | MPa | 設計・建設規格 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点 |
| W | mm | 排気消音器の幅 |
| W_T | N | 設計竜巻による複合荷重 |
| W_w | N | 設計竜巻の風圧力による荷重 |
| π | — | 円周率 |
| σ_{bA} | MPa | 軸方向応力評価におけるボルトに生じる引張応力 |
| σ_{bH} | MPa | 軸直角方向応力評価における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 |

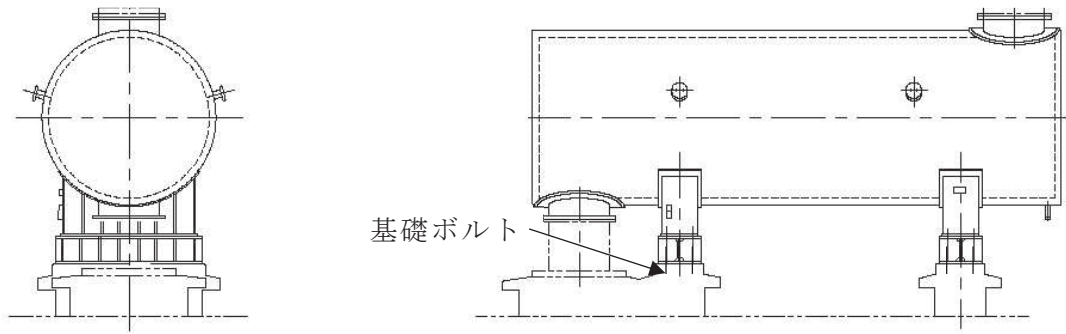
3.2 評価対象部位

ディーゼル発電設備排気消音器の評価対象部位は、添付書類「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」にて示している評価対象部位に従って、「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設定する。

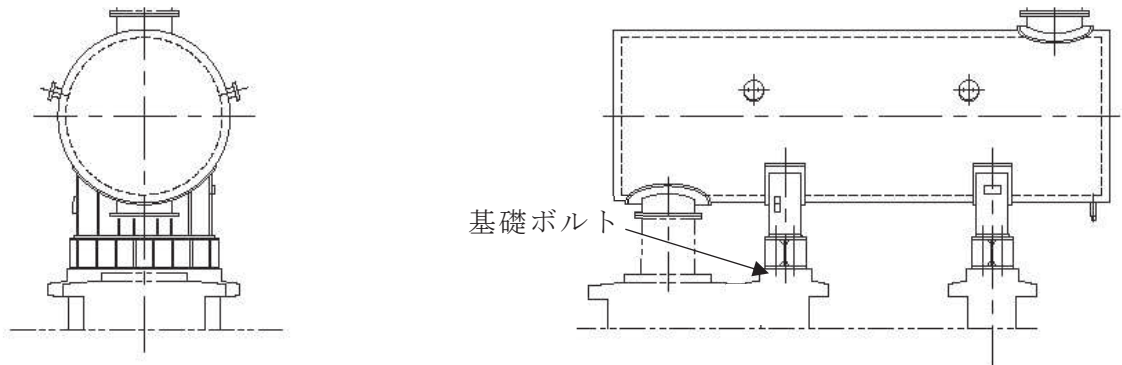
設計竜巻による荷重は、ディーゼル発電設備排気消音器本体に作用し、中間台を介して基礎ボルトに作用する。

ディーゼル発電設備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機及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機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、荷重作用点から離れていることから転倒モーメントが大きく作用する基礎ボルトを評価対象部位として設定する。

非常用ディーゼル発電設備排気消音器の強度評価における評価対象部位を、図3-1に示す。



(a) 非常用ディーゼル発電設備排気消音器



(b) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備排気消音器

図 3-1 ディーゼル発電設備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、添付書類「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」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 荷重の設定

強度評価に用いる荷重を以下に示す。

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

屋外の施設であるため、風圧力による荷重を考慮する。ディーゼル発電設備排気消音器は屋外施設であり閉じた施設ではないため、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、ディーゼル発電設備排気消音器は排気機能が健全であれば良く、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ることから、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。

(a) 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重 W_w は、添付書類「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。

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

(2) 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、添付書類「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、ディーゼル発電設備排気消音器の評価対象部位ごとに設定する。

ディーゼル発電設備排気消音器の基礎ボルトには、自重及び風圧力による荷重が作用する。

強度評価の荷重の組合せを表 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 |
|-------------------------------|-------------------------|--------|--------------------|
| 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼす可能性がある施設 | 非常用ディーゼル発電設備排気消音器 | 基礎ボルト | ① 自重 ② 風圧力による荷重 |
| | 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備排気消音器 | | |

3.4 許容限界

ディーゼル発電設備排気消音器の基礎ボルトの許容限界は、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、添付書類「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」にて設定している許容限界及び機能損傷モードを踏まえて、J E A G 4 6 0 1 に基づく許容応力状態 III_AS の許容応力の許容荷重を用いる。

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を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1 に従い，設計・建設規格 付録材料図表 Part5,6 の表にて許容応力を計算する際は，評価対象部位の周囲環境温度に応じた値をとるものとするが，温度が設計・建設規格 付録材料図表記載の中間の値の場合は，比例法を用いて計算する。ただし，設計・建設規格 付録材料図表 Part5,6 で比例法を用いる場合の端数処理は，小数点第 1 位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

ディーゼル発電設備排気消音器の基礎ボルトの許容限界を表 3-3 に，許容応力を表 3-4 にそれぞれ示す。

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 | III _A S | 一次応力 | 引張 | $1.5 f_t$ |
| | | | せん断 | $1.5 f_s$ |
| | | | 組合せ | $\text{Min} \{ 1.5 f_t, (2.1 f_t - 1.6 \tau) \}$ |

表 3-4 許容応力

| 評価対象部位 | 材料 | 温度条件(°C) | S _y (MPa) | S _u (MPa) | F(MPa) | 1.5 f _t (MPa) | 1.5 f _s (MPa) |
|--------|-------|----------|----------------------|----------------------|--------|--------------------------|--------------------------|
| 基礎ボルト | SS400 | 40* | 235 | 400 | 235 | 176 | 135 |

注記 * : 周囲環境温度

3.5 評価方法

ディーゼル発電設備排気消音器の強度評価は，添付書類「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」にて設定している評価式を用いる。

(1) 計算モデル

受圧面の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。ディーゼル発電設備排気消音器の計算モデル図を図 3-2 及び図 3-3 に示す。

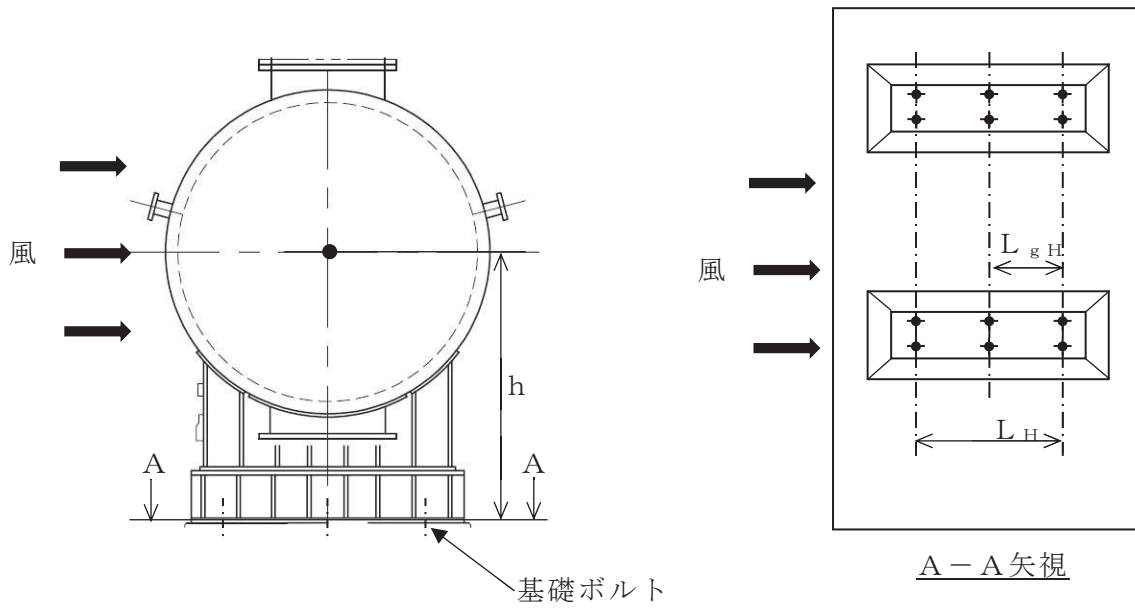


図 3-2 ディーゼル発電設備排気消音器の計算モデル図（風荷重方向：軸直角方向）

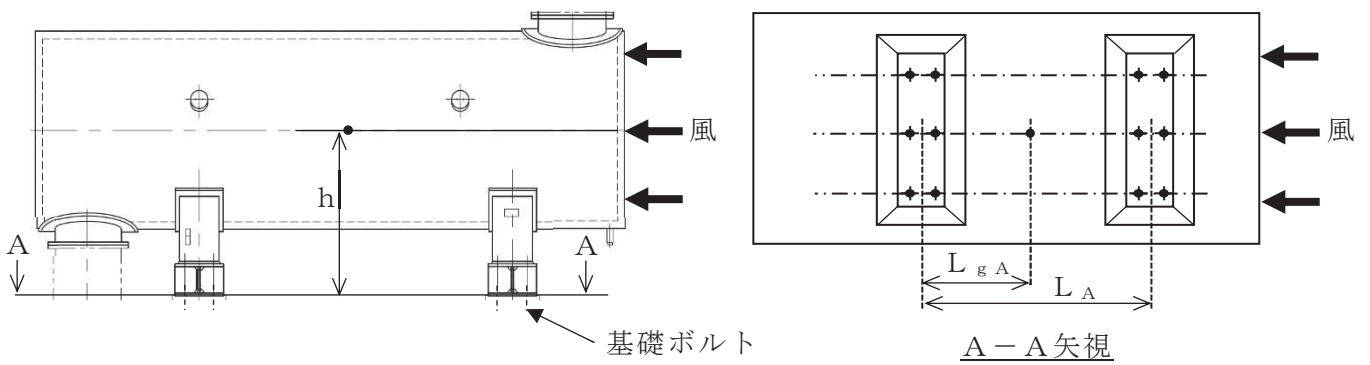


図3-3 ディーゼル発電設備排気消音器の計算モデル図（風荷重方向：軸方向）

(2) 計算方法

a. 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 及び図 3-3 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。

(a) 軸直角方向

イ. 引張力

$$F_{bH} = \frac{W_T \cdot h - m \cdot g \cdot L_{gH}}{n_{fH} \cdot L_H}$$

ただし， $F_{bH} \leq 0$ ならば引張力は発生しない。

$F_{bH} > 0$ ならば引張力は作用しているので，以下の引張応力の計算を行う。

ロ. 引張応力

$$\sigma_{bH} = \frac{F_{bH}}{A_b}$$

ここで，基礎ボルトの軸断面積 A_b は

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

(b) 軸方向

イ. 引張力

$$F_{bA} = \frac{W_T \cdot h - m \cdot g \cdot L_{gA}}{n_{fA} \cdot L_A}$$

ただし， $F_{bA} \leq 0$ ならば引張力は発生しない。

$F_{bA} > 0$ ならば引張力は作用しているので，以下の引張応力の計算を行う。

ロ. 引張応力

$$\sigma_{bA} = \frac{F_{bA}}{A_b}$$

ここで，基礎ボルトの軸断面積 A_b は

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

b. 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。

(a) せん断力

$$Q_b = W_T$$

(b) せん断応力

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

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-3 に示す。

表 4-1 評価条件

| q (MPa) | G (-) | C _H (-) | C _A (-) | g (m/s ²) |
|-------------------------|----------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|
| 6.13 × 10 ⁻³ | 1.0 | 1.2 | 2.4 | 9.80665 |

表 4-2 評価条件（非常用ディーゼル発電設備排気消音器基礎ボルト）

| L _{gH} (mm) | L _H (mm) | L _{gA} (mm) | L _A (mm) | A _H (m ²) | A _A (m ²) |
|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 900 | 1800 | 2100 | 4200 | 26.94 | 6.991 |

| W (mm) | H (mm) | h (mm) | m (kg) | ボルト サイズ | N (-) |
|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|----------|
| 7900 | 3410 | 1910 | 13500 | M30 | 12 |

| n _{fH} (-) | n _{fA} (-) | A _b (mm ²) |
|------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| 4 | 3 | 706.9 |

表 4-3 評価条件（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備排気消音器基礎ボルト）

| L_{gH} (mm) | L_H (mm) | L_{gA} (mm) | L_A (mm) | A_H (m^2) | A_A (m^2) |
|------------------|---------------|------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| 760 | 1520 | 1325 | 2650 | 19.11 | 5.328 |

| W (mm) | H (mm) | h (mm) | m (kg) | ボルト サイズ | N (-) |
|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|----------|
| 6350 | 3010 | 1710 | 10000 | M30 | 12 |

| n_{fH} (-) | n_{fA} (-) | A_b (mm^2) |
|-----------------|-----------------|---------------------|
| 4 | 3 | 706.9 |

5. 強度評価結果

強度評価結果を表 5-1，表 5-2 に示す。

非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備排気消音器基礎ボルトに発生する応力は許容応力以下である。

表 5-1 強度評価結果（軸直角方向）

| 評価対象部位 | 応力 | 発生応力 (MPa) | 許容応力 (MPa) |
|------------------------------|-----|---------------|---------------|
| 非常用ディーゼル発電設備排気消音器基礎ボルト | 引張 | 51 | 176 |
| | せん断 | 24 | 135 |
| | 組合せ | 51 | 176 |
| 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備排気消音器基礎ボルト | 引張 | 39 | 176 |
| | せん断 | 17 | 135 |
| | 組合せ | 39 | 176 |

表 5-2 強度評価結果（軸方向）

| 評価対象部位 | 応力 | 発生応力 (MPa) | 許容応力 (MPa) |
|------------------------------|-----|---------------|---------------|
| 非常用ディーゼル発電設備排気消音器基礎ボルト | 引張 | -* | 176 |
| | せん断 | 13 | 135 |
| | 組合せ | — | 176 |
| 高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備排気消音器基礎ボルト | 引張 | 1 | 176 |
| | せん断 | 10 | 135 |
| | 組合せ | 1 | 176 |

注記 * : $F_{bA} \leq 0$ であるため引張応力は発生しない。