

柏崎刈羽原子力発電所第6号機	設計及び工事計画審査資料
資料番号	KK6 添-3-013-16 改0
提出年月日	2023年12月21日

VI-3-別添 1-9-2 主排気筒の強度計算書

K6 ① VI-3-別添 1-9-2 R0

2023年12月
東京電力ホールディングス株式会社

VI-3-別添 1-9-2 主排気筒の強度計算書

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	6
2.4 適用規格	8
3. 強度評価方法	8
3.1 評価対象部位	8
3.2 荷重及び荷重の組合せ	9
3.3 使用材料及び材料の許容応力度	13
3.4 評価方法	15
4. 評価条件	22
5. 強度評価結果	26

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、波及的影響を及ぼす可能性がある施設である5号機主排気筒（以下「主排気筒」という。）が、設計竜巻による風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、竜巻より防護すべき施設の安全機能を損なわないよう、竜巻より防護すべき施設を内包する原子炉建屋及び軽油タンクに対して、機械的な波及的影響を及ぼさないことを確認するものである。

6号機主排気筒の強度に関する評価は、令和2年10月14日付け原規規発第2010147号にて認可された柏崎刈羽原子力発電所7号機の設計及び工事の計画のV-3-別添 1-9-2「主排気筒の強度計算書」によるものとし、6号機主排気筒が原子炉建屋及びコントロール建屋に対して、機械的な波及的影響を及ぼさないことを確認している。

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」を踏まえ、「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

主排気筒は、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「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、5号機原子炉建屋の東側に設置されている施設である。主排気筒の設置位置を図2-1に示す。

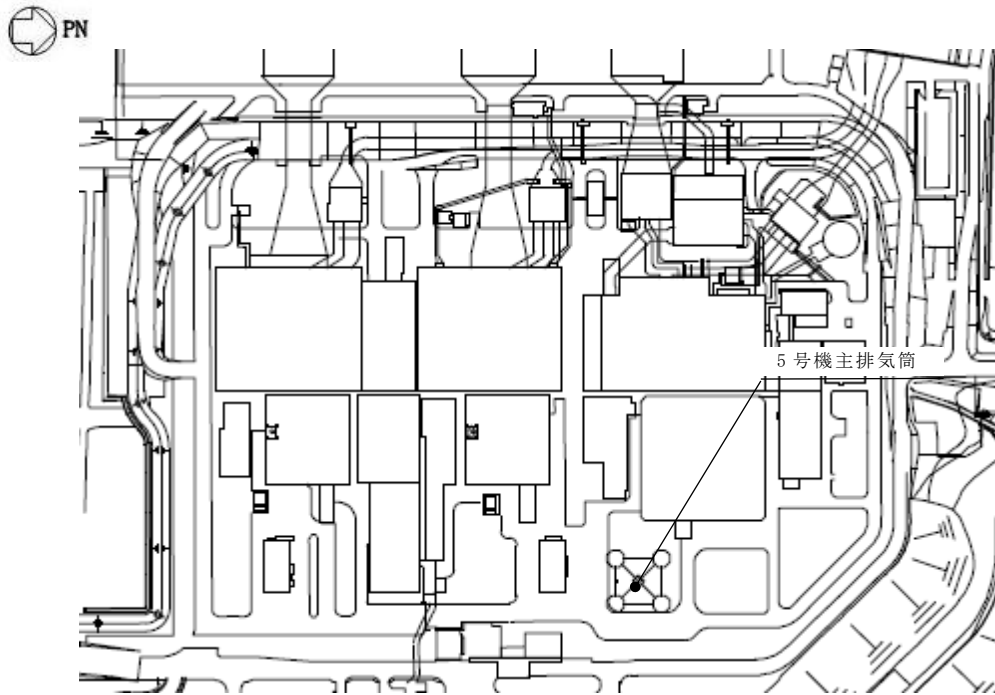


図 2-1 主排気筒の設置位置

2.2 構造概要

主排気筒は、5号機原子炉建屋の東側に位置し、内径 3.4m の鋼板製筒身（換気空調系用排気筒）を鋼管四角形鉄塔で支えた鉄塔支持形排気筒である。

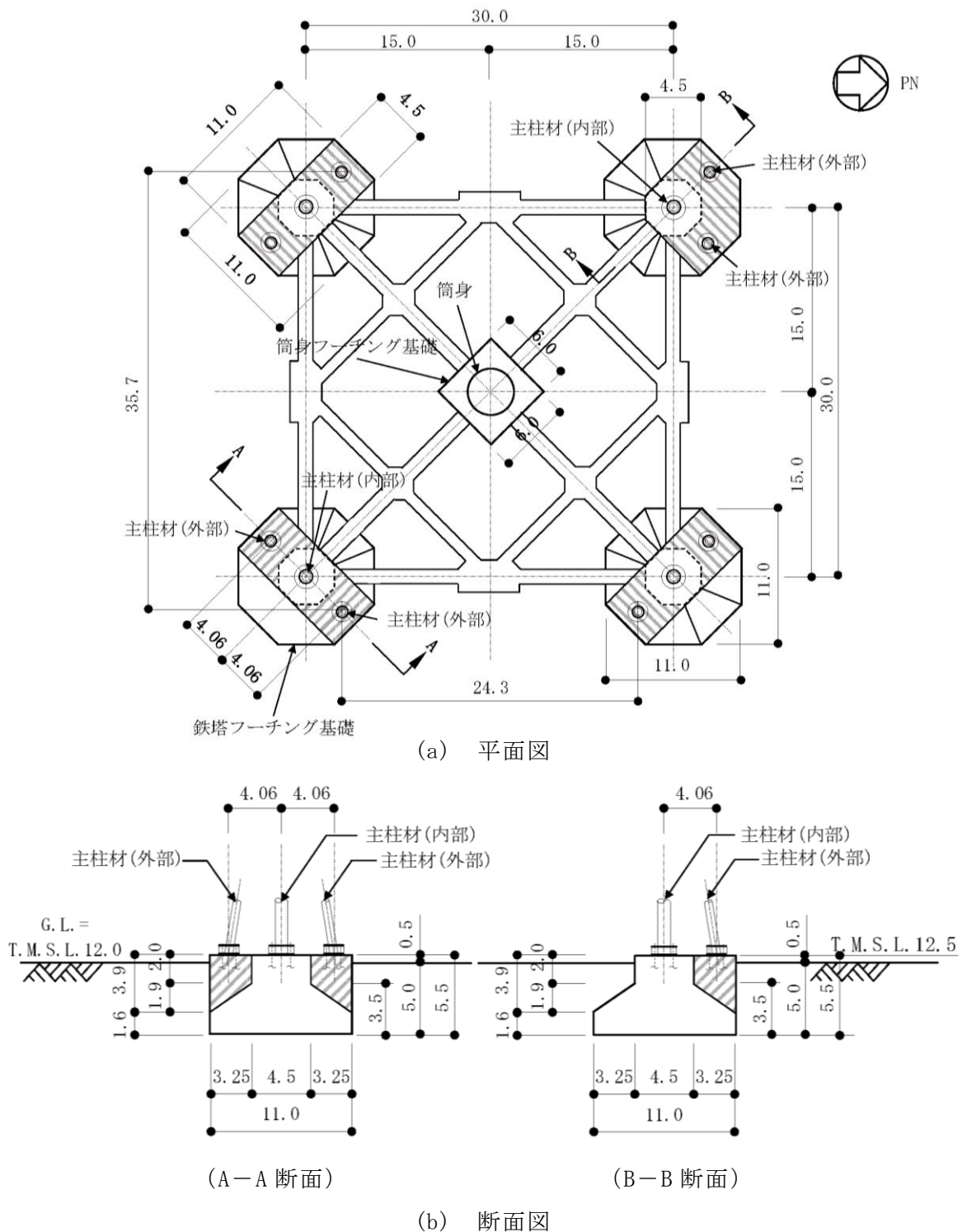
また、筒身内部には、非常用ガス処理系用排気筒が筒身に支持されている。主排気筒の概要図を図 2-2 に示す。

構造概要

構造形状	四角鉄塔支持形鋼管構造
主排気筒の高さ	148.0m (T.M.S.L. 160.0m)
鉄塔高さ	140.0m (T.M.S.L. 152.0m)
鉄塔幅 (NS 方向, EW 方向共通)	頂部 内側部材間 7.5m, 外側部材間 9.3m 根開き 内側部材間 30.0m, 外側部材間 35.7m
筒身支持点位置	T.M.S.L. 47.5m, 73.0m, 94.0m, 112.0m, 126.0m, 137.0m, 152.0m
鉄塔フーチング基礎	鉄筋コンクリート造

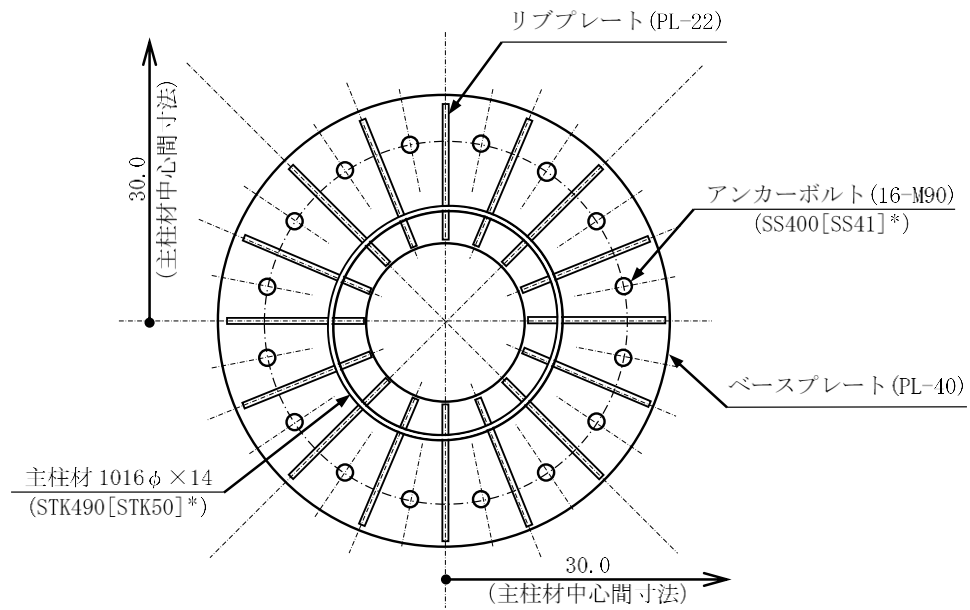
注：東京湾平均海面（以下「T.M.S.L.」という。）

また、主排気筒の基礎の概要図を図 2-3 に示す。主排気筒の鉄塔フーチング基礎は、鉄筋コンクリート造である。主柱材脚部の詳細図を図 2-4 に示す。



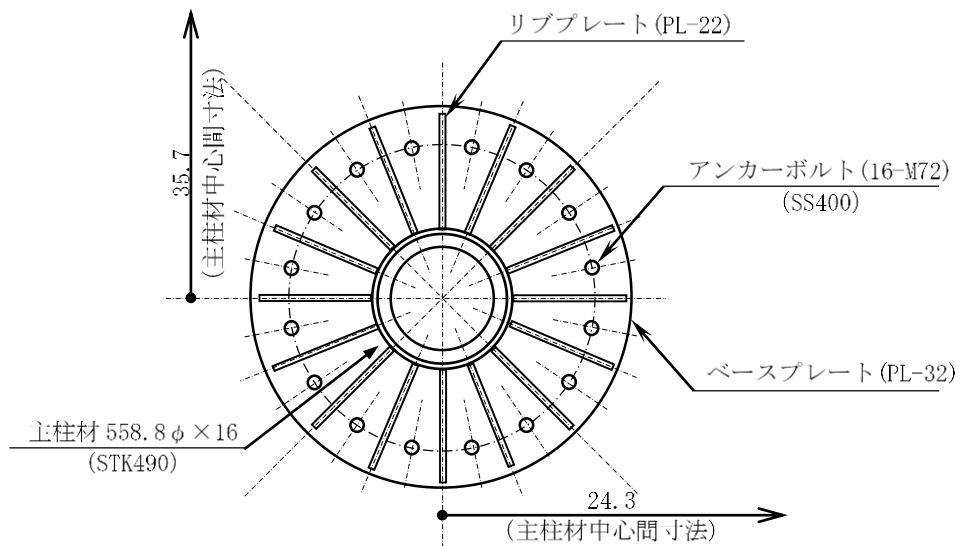
注: 鉄塔フーチング基礎のハッチング部分は、設計基準強度 F_c が 30N/mm^2 の範囲を示す。
その他の部分は 23.5N/mm^2 である。

図 2-3 主排気筒の基礎の概要図 (単位: m)



注記* : [] 内は従来標記を示す。

(a) 主柱材 (内部) 脚部



(b) 主柱材 (外部) 脚部

図 2-4 主柱材脚部の詳細図 (単位 : m)

2.3 評価方針

主排気筒の強度評価は、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「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、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないことを「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。

主排気筒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。

具体的には、主排気筒が、竜巻より防護すべき施設を内包する原子炉建屋及び軽油タンクに、倒壊による影響を及ぼさないことを確認する「構造強度評価」を行う。

主排気筒の構造強度評価については、主排気筒の構造を踏まえ、設計荷重が主排気筒に作用した場合に、主排気筒の各評価対象部位に作用する応力度が、「3.3 使用材料及び材料の許容応力度」に示す許容応力度を下回ることを確認する。ここで、設計竜巻による設計飛来物の衝突は、主排気筒の主要な支持機能を有する鉄塔部材を損傷させるものとして考慮し、強度評価においては、設計飛来物の衝突による衝撃荷重は考慮しないこととする。また、主排気筒は筒身に作用する荷重を鉄塔が支持する構造であることから、主排気筒の倒壊による波及的影響の評価においては鉄塔部（支柱材、斜材、水平材）、基礎（支柱材脚部アンカーボルト、鉄塔フーチング基礎）を評価対象とし、筒身は評価対象外とする。筒身への設計飛来物の衝突による筒身の損傷についても、鉄塔部材の損傷想定に包含される。

なお、上記のような損傷を想定しても、主排気筒の有する安全機能を発揮すべき事象（運転時の異常な過渡変化または設計基準事故に伴う放射性物質の放出）が竜巻に起因して発生することはなく、また筒身に損傷が生じた場合は安全上支障のない期間に補修する方針としていることから、主排気筒の安全機能に対する影響はない。

主排気筒の強度評価フローを図 2-5 に示す。

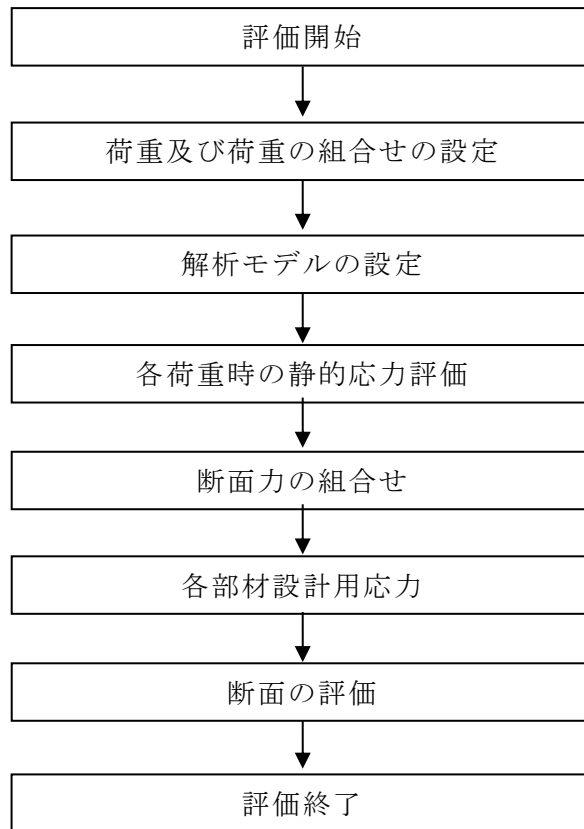


図 2-5 主排気筒の強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法及び同施行令
- ・ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1, March 2007
- ・ 「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－」（日本建築学会，2005 改定）
- ・ 「各種合成構造設計指針・同解説」（日本建築学会，2010 改定）
- ・ 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」（日本建築学会，2010 改定）
- ・ 日本産業規格（J I S）

3. 強度評価方法

3.1 評価対象部位

主排気筒の評価対象部位は，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」に示す評価基準を踏まえ鉄塔部（支柱材，斜材，水平材）及び基礎（支柱材脚部アンカーボルト，鉄塔フーチング基礎）とする。なお，強度評価は「2.3 評価方針」に示す評価フローに基づき，設計荷重に対して，3次元 FEM を用いた応力解析を行う。

3.2 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」に示す荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重を以下に示す。

a. 固定荷重(F_d)

固定荷重として、持続的に生じる荷重である筒身及び鉄塔部の自重の他に、補助部材等の付属設備の重量を考慮する。

b. 風圧力による荷重(W_w)

風圧力による荷重 W_w 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。

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

$$\text{ここで, } q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_D^2 \text{ とし}$$

W_w : 風圧力による荷重 (kN)

q : 設計用速度圧 (kN/m²)

G : ガスト影響係数

C : 風力係数

A : 鉄塔及び筒身の見付面積 (m²)

ρ : 空気密度 (kg/m³)

V_D : 最大風速 (m/s)

なお、風圧力による荷重 W_w が作用する方向は、 45° 方向及び 90° 方向とする。鉄塔部材への荷重は、各レベルの水平力を、各部材の支配幅あたりに分配して設定する。

風圧力による荷重 W_w の入力方法を図 3-1 に示す。

荷重方向：

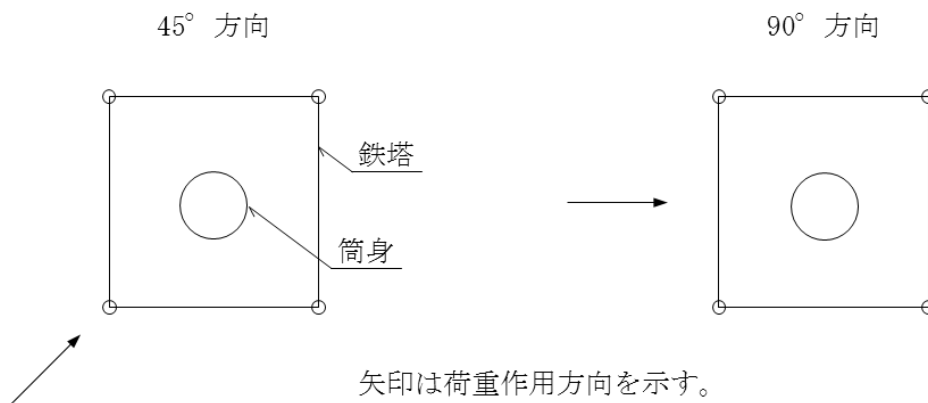


図 3-1 風圧力による荷重 W_w の入力方法

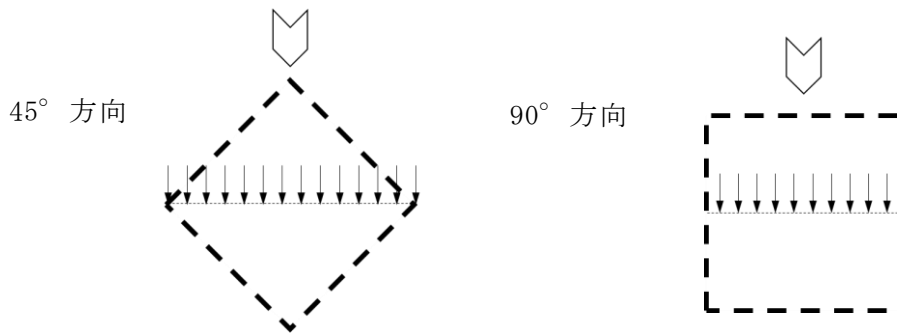
ここで、風力係数Cは「平成12年建設省告示第1454号」に基づき、鉄塔はラチス構造物として設定し、筒身は煙突その他の円筒形の構造物として $C = 0.9k_z$ ($k_z = 1.0$) とする。

鉄塔の風力係数の算出に必要なラチス構造物の風力係数の考え方を表3-1に、ラチス構造物の断面を図3-2に示す。

表3-1 ラチス構造物の風力係数の考え方

風圧力による荷重の作用方向	ϕ		
	(1)	(2)	(3)
	0.1以下	0.1を超え0.6未満	0.6
45° 方向	$1.7k_z$	(1)と(3)に揚げる数値を直線的に補間した数値	$1.3k_z$
90° 方向	$2.2k_z$		$1.5k_z$

注： ϕ （充足率）は風を受ける部分の最外縁に囲まれる面積に対する見付面積の割合とし、 k_z は1.0とする。



注：風圧力による荷重が作用する面積は、 \sum の方向から見たラチス構面の見付面積とする。

図3-2 ラチス構造物の断面

(2) 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せを下記に示す。

$$W_w + F_d$$

ここで、 W_w ：風圧力による荷重 (kN)

F_d ：固定荷重 (kN)

主排気筒は大気中に開かれており、主排気筒内外に気圧差が生じ難い構造であるため、気圧差による荷重は考慮しない ($W_p = 0$)。また、「2.3 評価方針」に示したとおり、設計飛来物による衝撃荷重 W_M は、設計飛来物が鉄塔部材を損傷させるものとして考慮していることから考慮しない ($W_M = 0$)。損傷を想定する部材は、健全時に風圧力による荷重を受ける際に最も厳しい評価結果となる鉄塔脚部の支柱材とする。図 3-3 に主排気筒の評価用モデル及び損傷を想定する箇所を示す。

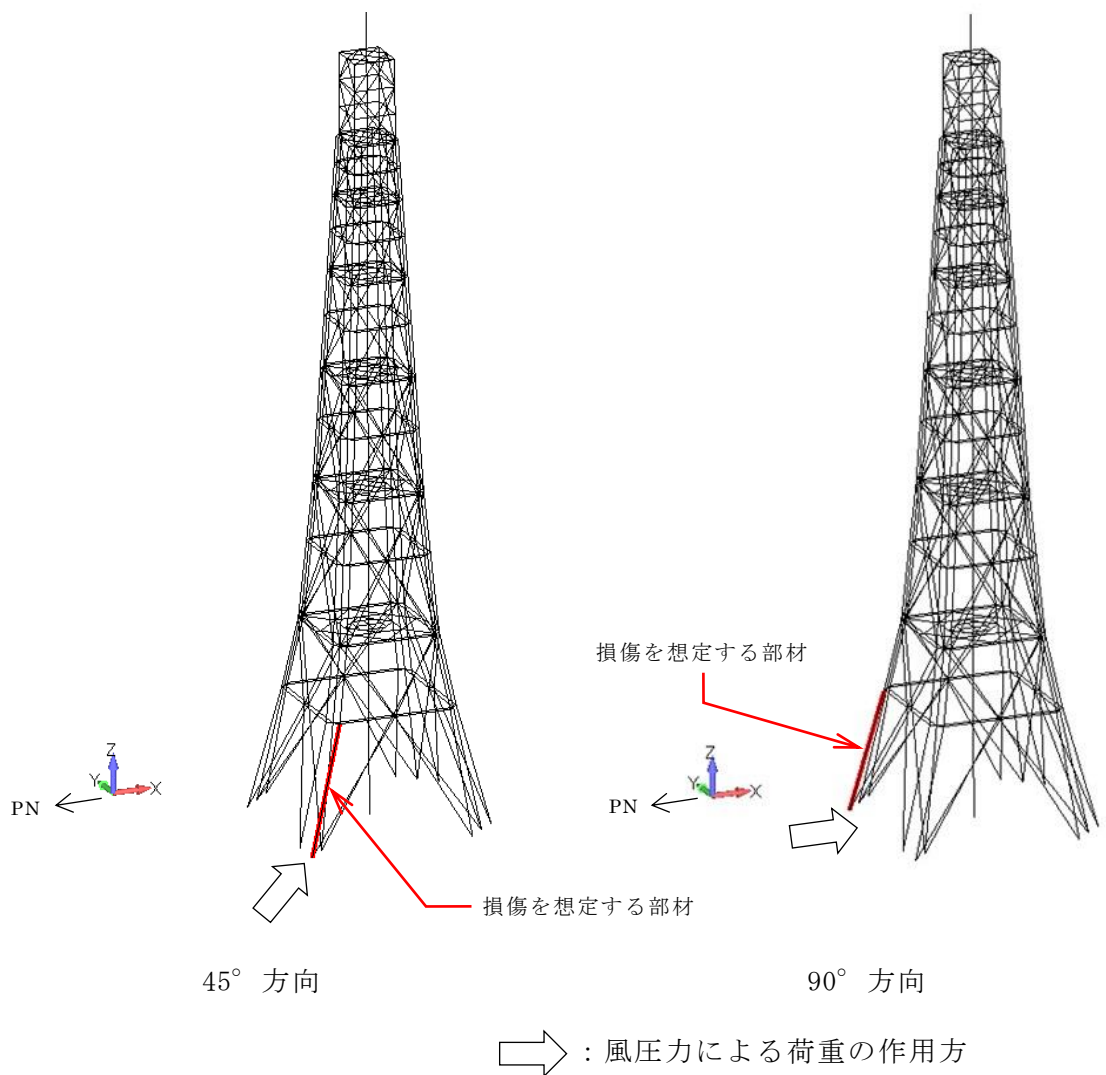


図 3-3 主排気筒の評価用モデル及び設計飛来物による損傷想定箇所

3.3 使用材料及び材料の許容応力度

鋼材は J I S G 3 1 0 1 で規定される一般構造用圧延鋼材 SS400[SS41]， J I S G 3 4 4 4 で規定される一般構造用炭素鋼管 STK400[STK41]， STK490[STK50]を使用する。

なお，鉄塔フーチング基礎に使用するコンクリートは普通コンクリートとし，設計基準強度 F_c は 23.5N/mm^2 ，または 30.0N/mm^2 ，鉄筋は SD345[SD35]及び SD390 とする。各使用材料の許容応力度を表 3-2～表 3-5 に示す。

表 3-2 鋼材の許容応力度

板厚	材料	基準強度 F (N/mm^2)	許容応力度
$t \leq 40 \text{ mm}$	STK490[STK50]*	325	「鋼構造設計規準」に従って左記 F の値により求める。
	STK400[STK41]*	235	

注記*： [] 内は従来標記を示す。

表 3-3 主柱材脚部アンカーボルトの許容応力度

部位	材料	基準強度 F (N/mm^2)	許容応力度
主柱材 (内部) 脚部 (M90)	SS400[SS41]*	215	「鋼構造設計規準」に従って左記 F の値により求める。
主柱材 (外部) 脚部 (M72)	SS400[SS41]*		

注記*： [] 内は従来標記を示す。

表 3-4 コンクリートの許容応力度

(単位：N/mm²)

部位	長 期			短 期		
	圧 縮	引 張	せん断	圧 縮	引 張	せん断
支柱材 (内部) 脚部 F _c = 23.5	7.83	—	0.72	15.6	—	1.08
支柱材 (外部) 脚部 F _c = 30.0	10.0	—	0.79	20.0	—	1.18

表 3-5 鉄筋の許容応力度

(単位：N/mm²)

材料	鉄筋径	長 期		短 期	
		引張 及び圧縮	せん断 補強	引張 及び圧縮	せん断 補強
SD345	D25 以下	215	195	345	345
[SD35]*	D29 以上	195			
SD390	D38	195	195	390	390

注記*： [] 内は従来標記を示す。

3.4 評価方法

(1) 応力評価方法

主排気筒について、3次元FEMを用いた応力解析を実施する。評価用モデルは図3-3に示すとおり。

(2) 断面算定方法

主排気筒の断面の評価に用いる応力は、3次元FEMモデルを用いた応力解析により得られた設計荷重による断面力（軸力、曲げモーメント、せん断力）（以下「評価用応力」という。）を組み合わせることにより算定する。解析には、解析コード「MSC NASTRAN」を用いる。

a. 支柱材，斜材，水平材

断面算定は「建築基準法施行令第90条，第96条」及び「平成13年国土交通省告示第1024号」に準拠して行うものとし，支柱材，斜材，水平材に生じる軸力及び曲げモーメントに対して，下式を用いて行う。

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1$$

ここで，

σ_c : 鋼材の平均圧縮応力度 ($\sigma_c = N \cdot 10^3 / A$) (N/mm²)

σ_b : 鋼材の曲げ応力度 ($\sigma_b = M \cdot 10^6 / Z_p$) (N/mm²)

f_c : 鋼材の圧縮材料強度 (N/mm²)

f_b : 鋼材の曲げ材料強度 (N/mm²)

N : 評価用応力（軸力）(kN)

A : 断面積 (mm²)

M : 評価用応力（曲げモーメント）(kN・m)

Z_p : 塑性断面係数 (mm³)

b. 主柱材脚部アンカーボルト

断面算定はアンカーボルトに生じる軸力と曲げモーメント及びせん断力に対して、下式を用いて行う。なお、せん断力はアンカーボルトに均等に作用するものとする。アンカーボルトの諸元を表 3-6 に、主柱材の断面性能を表 3-7 に示す。

表 3-6 アンカーボルトの諸元

部位	材料	本数 n	ねじ部 公称径 d ₀ (mm)	ねじ部 有効断面積 A ₀ (×10 ² mm ²)
主柱材(内部) 脚部	ボルト (SS400[SS41])	16	90	55.90 * ¹
主柱材(外部) 脚部	ボルト (SS400[SS41])	16	72	34.60 * ²

注記*1：細目ねじとする。(M92×6)

*2：細目ねじとする。(M72×6)

表 3-7 主柱材の断面性能

部位	寸法 (mm)	断面積 A (×10 ² mm ²)	断面係数 Z _p (×10 ³ mm ³)
主柱材(内部)	1016 φ × 14	440.7	14100
主柱材(外部)	558.8 φ × 16	272.8	4710

(a) 引張

$$\sigma_{t1} = \frac{M}{Z_p} - \frac{N}{A}$$

$$T_a = \frac{\sigma_{t1} \cdot A}{n}$$

$$\sigma_t = \frac{T_a}{A_0}$$

$$\frac{\sigma_t}{f_{ts}} \leq 1.0$$

ここで、

σ_{t1} : 鉄塔の引張応力度 (N/mm²)

T_a : アンカーボルト 1 本当たりの引張力 (kN)

σ_t : アンカーボルト 1 本当たりの引張応力度 (N/mm²)

f_{ts} : 鋼材の引張材料強度 (N/mm²)

n : アンカーボルトの本数 (本)

A_0 : アンカーボルトのねじ部有効断面積 (mm²)

N : 評価用応力 (軸力) (kN)

A : 主柱材の断面積 (mm²)

M : 評価用応力 (曲げモーメント) (kN・m)

Z_p : 主柱材の塑性断面係数 (mm³)

(b) せん断

$$Q_a = \frac{Q}{n}$$

$$\tau = \frac{Q_a}{A_0}$$

$$\frac{\tau}{f_s} \leq 1.0$$

ここで、

Q_a : アンカーボルト 1 本当たりのせん断力 (kN)

τ : アンカーボルト 1 本当たりのせん断応力度 (N/mm²)

f_s : 鋼材のせん断材料強度 (N/mm²)

Q : 評価用応力 (せん断力) (kN)

n : アンカーボルトの本数 (本)

A_0 : アンカーボルトのねじ部有効断面積 (mm²)

c. 鉄塔フーチング基礎

鉄塔フーチング基礎は、その底面の最外縁にある杭位置を荷重作用点とする片持はりとして、曲げとせん断を評価する。

鉄塔フーチング基礎の評価位置の断面諸元を表 3-8 に示す。また、鉄塔フーチング基礎の評価位置、作用荷重の概念を図 3-4 に示す。

表 3-8 鉄塔フーチング基礎の評価位置（片持はり）の断面諸元

作用荷重	長さ L (mm)	はりの有効幅 b (mm)	はりのせい D (mm)	はりの有効せい d (mm) *1	実施配筋量 a _o (mm ²) *2
曲げ	1810	b ₁ = 4560	D ₁ = 3500	3300	11150
せん断	1810	b ₂ = 3360	D ₂ = 2440	2240	—

注記*1：はりの圧縮縁から引張鉄筋重心までの距離

*2：実施配筋 D25@200

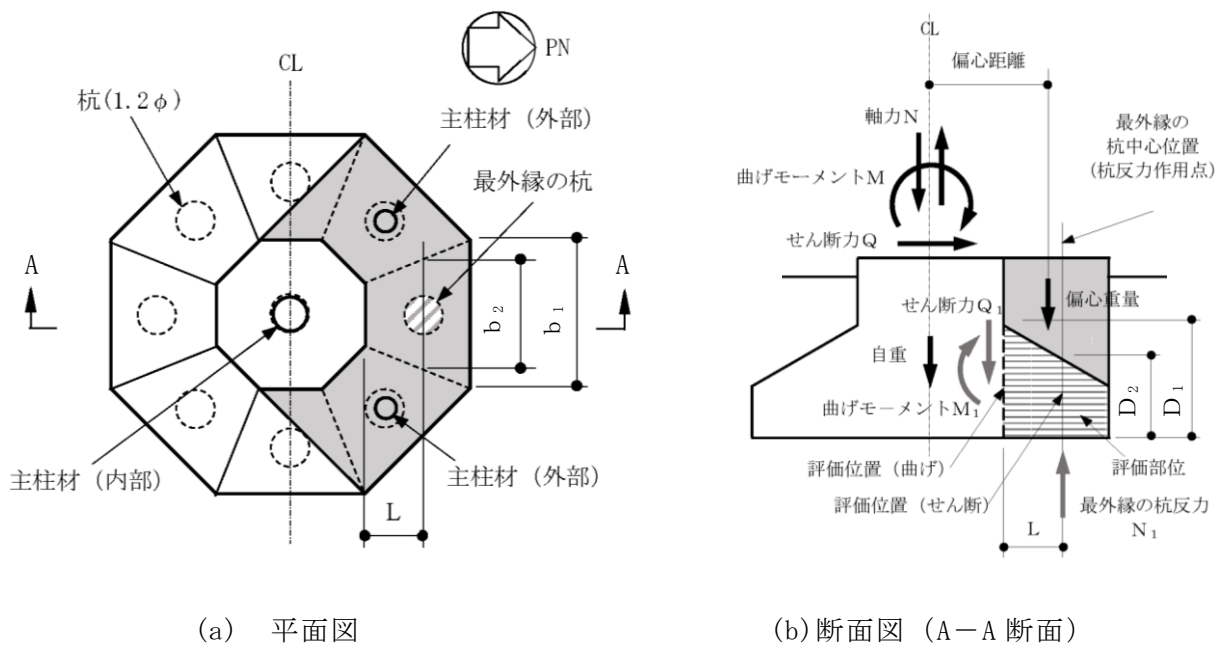


図 3-4 鉄塔フーチング基礎の評価位置、作用荷重の概念図

(a) 曲げ

$$M_1 = N_1 \times L$$

$$a_t = \frac{M_1}{f_t \cdot d \times 7/8}$$

$$\frac{a_t}{a_0} \leq 1.0$$

ここで、

M_1 : 片持はりの曲げモーメント (N・mm)

N_1 : 最外縁の杭反力 (N)

L : 長さ (mm)

a_t : 必要鉄筋量 (mm²)

f_t : 鉄筋の引張材料強度 (N/mm²)

d : 片持はりの有効せい (mm)

a_0 : 実施配筋量 (mm²)

(b) せん断

$$\tau = \frac{Q_1}{b \cdot d \times 7/8}$$

$$\frac{\tau}{f_s} \leq 1.0$$

ここで、

τ : 片持はりの最大せん断応力度 (N/mm²)

Q_1 : 片持はりのせん断力 (= N_1) (kN)

b : 片持はりの有効幅 (mm)

d : 片持はりの有効せい (mm)

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度 (N/mm²)

なお、断面算定にあたり必要な最外縁の杭反力は、支柱材脚部から鉄塔フーチング基礎に作用する荷重(図 3-4 に示す曲げモーメント (M)、せん断力 (Q)、軸力 (N))を用いて算定するものとし、算定に際して 3 本の支柱材から鉄塔フーチング基礎に作用する当該荷重は、保守的に鉄塔フーチング基礎中心に作用するものとする。

また、図 3-4 に示す様に、鉄塔フーチング基礎の形状が基礎中心軸に対し非対称である場合には、その自重分の偏心荷重を考慮する。

d. 材料強度

「平成 12 年建設省告示第 2464 号」に準拠し、基準強度 F 値を 1.1 倍した材料強度を用いて算出した許容応力度に対して、部材に発生する応力が当該許容応力度を超えないことを確認する。

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件として、評価対象部位の材料諸元を表 4-1 に、主排気筒鉄塔部の部材諸元を表 4-2～表 4-4 に、風圧力による荷重 W_w の算出に必要な条件を表 4-5 に、算定した風圧力による荷重 W_w を表 4-6、表 4-7 に示す。

表 4-1 評価対象部位の材料諸元

部位		材料	ヤング係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν	減衰定数 h (%)
鉄塔部		鋼材	2.05×10^5	0.3	2
基礎	主柱材(内部) 脚部	コンクリート*1: $F_c = 23.5$ (N/mm ²) 鉄筋: SD345[SD35]*2	2.25×10^4	0.2	5
	主柱材(外部) 脚部	コンクリート*1: $F_c = 30$ (N/mm ²) 鉄筋: SD345/SD390	2.44×10^4	0.2	5

注記*1: コンクリートの設計基準強度

*2: [] 内は従来標記を示す。

表 4-2 主柱材の部材諸元

部位	部材間	標高 T. M. S. L. (m)	寸法 (mm)	断面積 ($\times 10^2 \text{ mm}^2$)	断面二次 モーメント ($\times 10^4 \text{ mm}^4$)	有効せん断 断面積 ($\times 10^2 \text{ mm}^2$)
内部	A - B	152.0~147.0	318.5 ϕ \times 7	68.50	8310	34.25
		147.0~137.0	318.5 ϕ \times 8	78.04	9410	39.02
	B - C	137.0~126.0	355.6 ϕ \times 9	98.00	14700	49.00
	C - D	126.0~112.0	406.4 ϕ \times 12	148.7	28900	74.35
	D - E	112.0~ 94.0	508.0 ϕ \times 12	187.0	57500	93.50
	E - F	94.0~ 73.0	609.6 ϕ \times 12	225.3	101000	112.7
	F - G	73.0~ 47.5	812.8 ϕ \times 12	301.9	242000	151.0
	G - H	47.5~ 12.5	1016.0 ϕ \times 14	440.7	553000	220.4
外部	B - C	137.0~126.0	609.6 ϕ \times 22	406.1	176000	203.1
	C - D	126.0~112.0	609.6 ϕ \times 19	352.5	154000	176.3
	D - E	112.0~ 94.0	609.6 ϕ \times 16	298.4	132000	149.2
	E - F	94.0~ 73.0	508.0 ϕ \times 12.7	197.6	60600	98.80
	F - G	73.0~ 47.5	558.8 ϕ \times 16	272.8	101000	136.4
	G - H	47.5~ 12.5	558.8 ϕ \times 16	272.8	101000	136.4

表 4-3 斜材の部材諸元

部位	部材間	標高 T. M. S. L. (m)	寸法 (mm)	断面積 ($\times 10^2 \text{ mm}^2$)	断面二次 モーメント ($\times 10^4 \text{ mm}^4$)	有効せん断 断面積 ($\times 10^2 \text{ mm}^2$)
内部	A - B	152.0~137.0	267.4 ϕ \times 6	49.27	4210	24.64
	B - C	137.0~126.0	267.4 ϕ \times 8	65.19	5490	32.60
	C - D	126.0~112.0	267.4 ϕ \times 8	65.19	5490	32.60
	D - E	112.0~ 94.0	318.5 ϕ \times 8	78.04	9410	39.02
	E - F	94.0~ 73.0	318.5 ϕ \times 9	87.51	10500	43.76
	F - G	73.0~ 47.5	355.6 ϕ \times 9	98.00	14700	49.00
	G - H	47.5~ 12.5	406.4 ϕ \times 9	112.4	22200	56.20
外部	E - F	94.0~ 84.4	406.4 ϕ \times 9.5	118.5	23300	59.25
		84.4~ 73.0	457.2 ϕ \times 9.5	133.6	33500	66.80
	F - G	73.0~ 61.8	457.2 ϕ \times 9.5	133.6	33500	66.80
		61.8~ 47.5	318.5 ϕ \times 6.9	67.55	8200	33.78
	G - H	47.5~ 34.4	318.5 ϕ \times 6.9	67.55	8200	33.78
		34.4~ 12.5	406.4 ϕ \times 9.5	118.5	23300	59.25

表 4-4 水平材の部材諸元

部位	部材間	標高 T. M. S. L. (m)	寸法 (mm)	断面積 ($\times 10^2 \text{ mm}^2$)	断面二次 モーメント ($\times 10^4 \text{ mm}^4$)	有効せん断 断面積 ($\times 10^2 \text{ mm}^2$)
内部	A, A - B	152.0~142.0	216.3 ϕ \times 6	39.64	2190	19.82
	B, B - C	137.0~131.9	216.3 ϕ \times 6	39.64	2190	19.82
	C, C - D	126.0~119.5	267.4 ϕ \times 7	57.26	4860	28.63
	D, D - E, E	112.0~ 94.0	267.4 ϕ \times 7	57.26	4860	28.63
	E - F, F, F - G	84.4~ 61.8	318.5 ϕ \times 7	68.50	8310	34.25
	G, G - H	47.5~ 34.4	318.5 ϕ \times 8	78.04	9410	39.02
外部	B	137.0	165.2 ϕ \times 4.5	22.72	734	11.36
	B - C	131.9	165.2 ϕ \times 5.0	25.16	808	12.58
	C, C - D, D	126.0~112.0	165.2 ϕ \times 4.5	22.72	734	11.36
	D - E	103.8	190.7 ϕ \times 5.3	30.87	1330	15.44
	E, E - F, F	94.0~ 73.0	267.4 ϕ \times 6.6	54.08	4600	27.04
	F - G	61.8	318.5 ϕ \times 6.9	67.55	8200	33.78
	G	47.5	355.6 ϕ \times 6.4	70.21	10700	35.11
	G - H	34.4	457.2 ϕ \times 9.5	133.6	33500	66.80

表 4-5 風圧力による荷重 W_w の算出に必要な条件

最大風速 V_D (m/s)	空気密度 ρ (kg/m ³)	ガスト影響係数 G (-)	工作物の高さ* H (m)	設計用速度圧 q (kN/m ²)
92	1.226	1.0	140	5.19

注記*：鉄塔部の高さを示す。

表 4-6 風圧力による荷重 W_w (鉄塔部)

T. M. S. L. (m)	90° 方向風荷重			45° 方向風荷重		
	風力係数 C	見付面積 A (m ²)	風圧力による荷重 W_w (kN)	風力係数 C	見付面積 A (m ²)	風圧力による荷重 W_w (kN)
152.0	1.98	15.2	157	1.55	24.6	198
137.0	1.89	37.2	365	1.49	54.5	422
126.0	1.75	59.3	539	1.38	80.7	578
112.0	1.79	80.0	744	1.42	107.2	791
94.0	1.79	111.0	1032	1.42	155.0	1143
73.0	1.78	153.7	1420	1.41	224.3	1642
47.5	1.81	470.4*	4419	1.47	628.6	4796

表 4-7 風圧力による荷重 W_w (筒身)

T. M. S. L. (m)	90° 方向風荷重			45° 方向風荷重		
	風力係数 C	見付面積 A (m ²)	風圧力による荷重 W_w (kN)	風力係数 C	見付面積 A (m ²)	風圧力による荷重 W_w (kN)
160.0	0.90	13.8	65	0.90	13.8	65
152.0	0.90	39.6	185	0.90	39.6	185
137.0	0.90	44.7	209	0.90	44.7	209
126.0	0.90	43.0	201	0.90	43.0	201
112.0	0.90	55.0	257	0.90	55.0	257
94.0	0.90	67.1	314	0.90	67.1	314
73.0	0.90	79.9	374	0.90	79.9	374
47.5	0.90	164.1*	767	0.90	164.1	767

5. 強度評価結果

「3.4(2) 断面算定方法」に基づいた主柱材，斜材，水平材，主柱材脚部アンカーボルト及び鉄塔フーチング基礎の評価結果を表5-1～表5-18に示す。いずれの評価対象部位においても検定比が1.0を超えず，主排気筒が原子炉建屋及び軽油タンクに対して，機械的な波及的影響を及ぼさないことを確認した。

表 5-1 45° 方向 主柱材 (内部) の評価結果

標高 T. M. S. L. (m)	部材間	評価用応力		使用部材				ℓ_k (mm)	λ	f_c (N/mm ²)	f_b (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	σ_b (N/mm ²)	$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
		N (kN)	M (kN・m)	寸法 (mm)	A ($\times 10^2$ mm ²)	Z_P ($\times 10^3$ mm ³)	i (mm)							
152.0	A-B	62.0	1.3	318.5 $\phi \times 7$	68.50	679	110	5000	46	325	357	9.1	1.9	0.04
137.0		401.6	4.3	318.5 $\phi \times 8$	78.04	771	110	5000	46	325	357	51.5	5.6	0.18
126.0	B-C	219.1	3.5	355.6 $\phi \times 9$	98.00	1080	123	2680	22	350	357	22.4	3.2	0.08
112.0	C-D	591.9	5.8	406.4 $\phi \times 12$	148.7	1870	140	5680	41	332	357	39.8	3.1	0.13
94.0	D-E	1239.7	16.1	508.0 $\phi \times 12$	187.0	2950	175	7180	42	330	357	66.3	5.5	0.22
73.0	E-F	2575.9	56.9	609.6 $\phi \times 12$	225.3	4290	211	8370	40	333	357	114.3	13.3	0.39
47.5	F-G	3975.1	230.0	812.8 $\phi \times 12$	301.9	7700	283	13210	47	324	357	131.7	29.9	0.50
12.5	G-H	10523.7	680.6	1016.0 $\phi \times 14$	440.7	14100	354	10380	30	343	357	238.8	48.3	0.84

注：許容応力度は材料強度評価に基づく。

記号の説明

- N : 軸力
- M : 曲げモーメント
- A : 断面積
- Z_P : 塑性断面係数
- i : 断面二次半径
- ℓ_k : 座屈長さ
- λ : 細長比 (ℓ_k / i)
- f_c : 圧縮応力度に対する許容値 (建築基準法に基づく鋼材の材料強度 (F 値の 1.1 倍) による。)
- f_b : 曲げ応力度に対する許容値 (建築基準法に基づく鋼材の材料強度 (F 値の 1.1 倍) による。)
- σ_c : 圧縮応力度 (N / A , 圧縮を正とする。)
- σ_b : 曲げ応力度 (M / Z_P)

表 5-2 45° 方向 主柱材 (外部) の評価結果

標高 T. M. S. L. (m)	部材間	評価用応力		使用部材				ℓ_k (mm)	λ	f_c (N/mm ²)	f_b (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	σ_b (N/mm ²)	$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
		N (kN)	M (kN・m)	寸法 (mm)	A ($\times 10^2$ mm ²)	Z_P ($\times 10^3$ mm ³)	i (mm)							
137.0	B-C	665.2	47.4	609.6 $\phi \times 22$	406.1	7600	208	5010	25	253	258	16.4	6.2	0.09
126.0	C-D	1160.7	39.4	609.6 $\phi \times 19$	352.5	6630	209	6430	31	250	258	32.9	5.9	0.16
112.0	D-E	984.7	231.6	609.6 $\phi \times 16$	298.4	5640	210	8360	40	333	357	33.0	41.1	0.22
94.0	E-F	2224.4	35.3	508.0 $\phi \times 12.7$	197.6	3120	175	9870	57	308	357	112.6	11.3	0.40
73.0	F-G	3922.9	94.7	558.8 $\phi \times 16$	272.8	4710	192	6470	34	339	357	143.8	20.1	0.49
47.5	G-H	5419.9	288.0	558.8 $\phi \times 16$	272.8	4710	192	6130	32	341	357	198.7	61.1	0.76
12.5														

注：許容応力度は材料強度評価に基づく。

記号の説明

- N : 軸力
- M : 曲げモーメント
- A : 断面積
- Z_P : 塑性断面係数
- i : 断面二次半径
- ℓ_k : 座屈長さ
- λ : 細長比 (ℓ_k / i)
- f_c : 圧縮応力度に対する許容値 (建築基準法に基づく鋼材の材料強度 (F 値の 1.1 倍) による。)
- f_b : 曲げ応力度に対する許容値 (建築基準法に基づく鋼材の材料強度 (F 値の 1.1 倍) による。)
- σ_c : 圧縮応力度 (N / A , 圧縮を正とする。)
- σ_b : 曲げ応力度 (M / Z_P)

表 5-3 45° 方向 斜材 (内部) の評価結果

標高 T. M. S. L. (m)	部材間	評価用応力	使用部材				ℓ_k (mm)	λ	f_c (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	$\frac{\sigma_c}{f_c}$
		N (kN)	寸法 (mm)	A ($\times 10^2$ mm ²)	i (mm)						
152.0	A-B	217.4	267.4 ϕ \times 6	49.27	92.4	4900	54	313	44.1	0.15	
137.0	B-C	308.3	267.4 ϕ \times 8	65.19	91.8	5630	62	299	47.3	0.16	
126.0	C-D	519.7	267.4 ϕ \times 8	65.19	91.8	2850	32	341	79.7	0.24	
112.0	D-E	847.7	318.5 ϕ \times 8	78.04	110	4370	40	333	108.6	0.33	
94.0	E-F	895.0	318.5 ϕ \times 9	87.51	109	4530	42	330	102.3	0.31	
73.0	F-G	1288.3	355.6 ϕ \times 9	98.00	123	6340	52	316	131.5	0.42	
47.5	G-H	1714.1	406.4 ϕ \times 9	112.4	141	6700	48	322	152.5	0.48	

注：許容応力度は材料強度評価に基づく。

記号の説明

N : 軸力

λ : 細長比 (ℓ_k / i)

A : 断面積

f_c : 圧縮応力度に対する許容値 (建築基準法に基づく鋼材の材料強度 (F 値の 1.1 倍) による。)

i : 断面二次半径

σ_c : 圧縮応力度 (N/A, 圧縮を正とする。)

ℓ_k : 座屈長さ

表 5-5 45° 方向 水平材 (内部) の評価結果

標高 T. M. S. L. (m)	部材間	評価用応力	使用部材			ℓ_k (mm)	λ	f_c (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	$\frac{\sigma_c}{f_c}$
		N (kN)	寸法 (mm)	A ($\times 10^2$ mm ²)	i (mm)					
152.0 142.0	A A-B	78.4	216.3 ϕ \times 6	39.64	74.4	3100	42	244	19.8	0.09
137.0 131.9	B B-C									
126.0 119.5	C C-D	162.1	267.4 ϕ \times 7	57.26	92.1	5020	55	234	28.3	0.13
112.0	D									
94.0	D-E E									
84.4 61.8	E-F F F-G	382.2	318.5 ϕ \times 7	68.50	110	5960	55	234	55.8	0.24
47.5 34.4	G G-H									
		369.0	318.5 ϕ \times 8	78.04	110	10050	92	191	47.3	0.25

注：許容応力度は材料強度評価に基づく。

記号の説明

N : 軸力

λ : 細長比 (ℓ_k / i)

A : 断面積

f_c : 圧縮応力度に対する許容値 (建築基準法に基づく鋼材の材料強度 (F 値の 1.1 倍) による。)

i : 断面二次半径

σ_c : 圧縮応力度 (N/A, 圧縮を正とする。)

ℓ_k : 座屈長さ

表 5-7 45° 方向 主柱材（内部）脚部アンカーボルトの評価結果

評価項目		記号	単位	値
評価応力 (軸力は圧縮を正とする。)		M	kN・m	268
		Q	kN	3968
		N	kN	-9806
引 張	鉄塔の引張応力度	σ_{t1}	N/mm ²	242
	アンカーボルト 1 本当たりの引張力	T_a	kN	666
	引張応力度	σ_t	N/mm ²	120
	許容限界	f_{ts}	N/mm ²	236
	検定値	σ_t / f_{ts}	—	0.51
せん断	アンカーボルト 1 本当たりのせん断力	Q_a	kN	248
	せん断応力度	τ	N/mm ²	44.4
	許容限界	f_s	N/mm ²	136
	検定値	τ / f_s	—	0.33

注：許容応力度は材料強度評価に基づく。

表 5-8 45° 方向 主柱材（外部）脚部アンカーボルトの評価結果

評価項目		記号	単位	値
評価応力 (軸力は圧縮を正とする。)		M	kN・m	43
		Q	kN	1755
		N	kN	-4508
引 張	鉄塔の引張応力度	σ_{t1}	N/mm ²	175
	アンカーボルト 1 本当たりの引張力	T_a	kN	298
	引張応力度	σ_t	N/mm ²	86.0
	許容限界	f_{ts}	N/mm ²	236
	検定値	σ_t / f_{ts}	—	0.37
せん断	アンカーボルト 1 本当たりのせん断力	Q_a	kN	110
	せん断応力度	τ	N/mm ²	31.8
	許容限界	f_s	N/mm ²	136
	検定値	τ / f_s	—	0.24

注：許容応力度は材料強度評価に基づく。

表 5-9 45° 方向 鉄塔フーチング基礎の評価結果

評価項目		記号	単位	値	
評価応力 (軸力は圧縮を正とする。)		主柱材 脚部	M	kN・m	313
			Q	kN	6237
			N	kN	19069
		評価部位	M ₁	kN・m	11572
			Q ₁	kN	6394
			N ₁	kN	6394
曲げ	必要鉄筋量		a _t	mm ²	10574
	実施配筋量		a _o	mm ²	11150
	実施配筋量に対する必要鉄筋量の比		a _t / a _o	—	0.95
せん断	コンクリートのせん断応力度		τ	N/mm ²	0.98
	許容限界		f _s	N/mm ²	1.08
	検定値		τ / f _s	—	0.90

表 5-10 90° 方向 主柱材 (内部) の評価結果

標高 T. M. S. L. (m)	部材間	評価用応力		使用部材				ℓ_k (mm)	λ	f_c (N/mm ²)	f_b (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	σ_b (N/mm ²)	$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
		N (kN)	M (kN·m)	寸法 (mm)	A (×10 ² mm ²)	Z _P (×10 ³ mm ³)	i (mm)							
152.0	A-B	61.9	0.9	318.5φ×7	68.50	679	110	5000	46	325	357	9.0	1.3	0.04
		273.6	3.4	318.5φ×8	78.04	771	110	5000	46	325	357	35.1	4.4	0.13
137.0	B-C	152.1	2.3	355.6φ×9	98.00	1080	123	2680	22	350	357	15.5	2.1	0.06
126.0	C-D	411.4	12.6	406.4φ×12	148.7	1870	140	5680	41	332	357	27.7	6.7	0.11
112.0	D-E	740.1	69.9	508.0φ×12	187.0	2950	175	8360	48	322	357	39.6	23.7	0.19
94.0	E-F	1769.7	133.5	609.6φ×12	225.3	4290	211	8370	40	333	357	78.5	31.1	0.33
73.0	F-G	2937.8	259.1	812.8φ×12	301.9	7700	283	9790	35	338	357	97.3	33.6	0.39
47.5	G-H	7535.8	446.8	1016.0φ×14	440.7	14100	354	10380	30	343	357	171.0	31.7	0.59
12.5														

注：許容応力度は材料強度評価に基づく。

記号の説明

- N : 軸力
- M : 曲げモーメント
- A : 断面積
- Z_P : 塑性断面係数
- i : 断面二次半径
- ℓ_k : 座屈長さ
- λ : 細長比 (ℓ_k / i)
- f_c : 圧縮応力度に対する許容値 (建築基準法に基づく鋼材の材料強度 (F 値の 1.1 倍) による。)
- f_b : 曲げ応力度に対する許容値 (建築基準法に基づく鋼材の材料強度 (F 値の 1.1 倍) による。)
- σ_c : 圧縮応力度 (N/A, 圧縮を正とする。)
- σ_b : 曲げ応力度 (M/Z_P)

表 5-11 90° 方向 主柱材 (外部) の評価結果

標高 T. M. S. L. (m)	部材間	評価用応力		使用部材				ℓ_k (mm)	λ	f_c (N/mm ²)	f_b (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	σ_b (N/mm ²)	$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
		N (kN)	M (kN・m)	寸法 (mm)	A ($\times 10^3$ mm ²)	Z_P ($\times 10^3$ mm ³)	i (mm)							
137.0	B-C	472.4	34.6	609.6φ×22	406.1	7600	208	5010	25	253	258	11.6	4.6	0.07
126.0	C-D	952.9	80.6	609.6φ×19	352.5	6630	209	6430	31	250	258	27.0	12.2	0.16
112.0	D-E	1725.5	158.2	609.6φ×16	298.4	5640	210	8360	40	333	357	57.8	28.0	0.26
94.0	E-F	1869.9	75.4	508.0φ×12.7	197.6	3120	175	9870	57	308	357	94.6	24.2	0.38
73.0	F-G	2621.9	109.0	558.8φ×16	272.8	4710	192	9790	51	318	357	96.1	23.1	0.37
47.5	G-H	3667.3	136.0	558.8φ×16	272.8	4710	192	6130	32	341	357	134.4	28.9	0.48

注：許容応力度は材料強度評価に基づく。

記号の説明

- N : 軸力
- M : 曲げモーメント
- A : 断面積
- Z_P : 塑性断面係数
- i : 断面二次半径
- ℓ_k : 座屈長さ
- λ : 細長比 (ℓ_k / i)
- f_c : 圧縮応力度に対する許容値 (建築基準法に基づく鋼材の材料強度 (F 値の 1.1 倍) による。)
- f_b : 曲げ応力度に対する許容値 (建築基準法に基づく鋼材の材料強度 (F 値の 1.1 倍) による。)
- σ_c : 圧縮応力度 (N/A, 圧縮を正とする。)
- σ_b : 曲げ応力度 (M/ Z_P)

表 5-14 90° 方向 水平材 (内部) の評価結果

標高 T. M. S. L. (m)	部材間	評価用応力	使用部材			ℓ_k (mm)	λ	f_c (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	$\frac{\sigma_c}{f_c}$
		N (kN)	寸法 (mm)	A ($\times 10^2$ mm ²)	i (mm)					
152.0 142.0	A A-B	71.0	216.3 ϕ \times 6	39.64	74.4	3100	42	244	17.9	0.08
137.0 131.9	B B-C									
126.0 119.5	C C-D	119.7	267.4 ϕ \times 7	57.26	92.1	5020	55	234	20.9	0.09
112.0	D									
94.0	D-E E									
84.4 61.8	E-F F F-G	375.0	318.5 ϕ \times 7	68.50	110	5960	55	234	54.7	0.24
47.5 34.4	G G-H	382.8	318.5 ϕ \times 8	78.04	110	10050	92	191	49.1	0.26

注：許容応力度は材料強度評価に基づく。

記号の説明

N : 軸力

λ : 細長比 (ℓ_k / i)

A : 断面積

f_c : 圧縮応力度に対する許容値 (建築基準法に基づく鋼材の材料強度 (F 値の 1.1 倍) による。)

i : 断面二次半径

σ_c : 圧縮応力度 (N/A, 圧縮を正とする。)

ℓ_k : 座屈長さ

表 5-16 90° 方向 支柱材（内部）脚部アンカーボルトの評価結果

評価項目		記号	単位	値
評価応力 (軸力は圧縮を正とする。)		M	kN・m	153
		Q	kN	2798
		N	kN	-6139
引 張	鉄塔の引張応力度	σ_{t1}	N/mm ²	151
	アンカーボルト 1 本当たりの引張力	T_a	kN	414
	引張応力度	σ_t	N/mm ²	74.0
	許容限界	f_{ts}	N/mm ²	236
	検定値	σ_t / f_{ts}	—	0.32
せん断	アンカーボルト 1 本当たりのせん断力	Q_a	kN	175
	せん断応力度	τ	N/mm ²	31.3
	許容限界	f_s	N/mm ²	136
	検定値	τ / f_s	—	0.23

注：許容応力度は材料強度評価に基づく。

表 5-17 90° 方向 支柱材（外部）脚部アンカーボルトの評価結果

評価項目		記号	単位	値
評価応力 (軸力は圧縮を正とする。)		M	kN・m	31
		Q	kN	1584
		N	kN	-2903
引 張	鉄塔の引張応力度	σ_{t1}	N/mm ²	113
	アンカーボルト 1 本当たりの引張力	T_a	kN	193
	引張応力度	σ_t	N/mm ²	55.7
	許容限界	f_{ts}	N/mm ²	236
	検定値	σ_t / f_{ts}	—	0.24
せん断	アンカーボルト 1 本当たりのせん断力	Q_a	kN	99.0
	せん断応力度	τ	N/mm ²	28.7
	許容限界	f_s	N/mm ²	136
	検定値	τ / f_s	—	0.22

注：許容応力度は材料強度評価に基づく。

表 5-18 90° 方向 鉄塔フーチング基礎の評価結果

評価項目		記号	単位	値	
評価応力 (軸力は圧縮を正とする。)		主柱材 脚部	M	kN・m	78
			Q	kN	5113
			N	kN	14461
		評価部位	M ₁	kN・m	9930
			Q ₁	kN	5486
			N ₁	kN	5486
曲げ	必要鉄筋量	a _t	mm ²	9074	
	実施配筋量	a ₀	mm ²	11150	
	実施配筋量に対する必要鉄筋量の比	a _t / a ₀	—	0.82	
せん断	コンクリートのせん断応力度	τ	N/mm ²	0.84	
	許容限界	f _s	N/mm ²	1.08	
	検定値	τ / f _s	—	0.78	