

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-025-12
提出年月日	2023年1月16日

排気筒の基礎の耐震性についての計算書
に関する補足説明資料

2023年1月

中国電力株式会社

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

VI-2-2-15「排気筒の基礎の耐震性についての計算書」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。

別紙 1 応力解析における既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較

別紙 2 応力解析におけるモデル化及び境界条件の考え方

別紙 3 地震荷重の入力方法

別紙 4 応力解析における断面の評価部位の選定

別紙 5 最大接地圧について

別紙 1 応力解析における既工認と今回工認の
解析モデル及び手法の比較

目 次

1. 概要	別紙 1-1
2. 応力解析モデル及び手法の比較	別紙 1-2
2.1 既工認時及び今回工認時の応力解析モデル及び手法の比較	別紙 1-2

1. 概要

本資料は、排気筒の基礎の既工認時及び今回工認時の応力解析モデル及び手法の比較を示すものである。

2. 応力解析モデル及び手法の比較

2.1 既工認時及び今回工認時の応力解析モデル及び手法の比較

排気筒の基礎の応力解析モデル及び手法の比較を表 2-1 に示す。

比較に用いる既工認時の応力解析モデル及び手法は、昭和 59 年 9 月 17 日付け 59 資庁第 8283 号にて認可された工事計画の IV-1-5 「排気筒の基礎に関する説明書」（以下「建設時工認（認可）」という。）及び平成 25 年 5 月 30 日届出（電耐建第 6 号平成 25 年 6 月 14 日一部補正）の IV-2-1 「排気筒の基礎に関する説明書」（以下「耐震裕度向上に伴う補強（届出）」という。）のものである。

表 2-1(1) 応力解析モデル及び手法の比較 (排気筒の基礎)

項目	内容	建設時工認 (認可)	耐震裕度向上に伴う補強 (届出)	今回工認	備考
解析手法		基礎版を格子状のはりとして仮定した 応力解析 (弾性解析)	3次元 FEMモデルを用いた応力解 析 (弾性解析)	同左	—
解析コード		(工認図書に記載なし)	N A S T R A N	同左	—
モデル	モデル化 範囲	・基礎版 ・鉄塔基礎及び筒身基礎	同左	同左	—
	材料物性	(工認図書に記載なし)	検討時の規準に基づき設定 ・コンクリートのヤング係数： $E = 2.15 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ・コンクリートのポアソン比： $\nu = 0.2$ ・鉄筋のヤング係数： $E = 2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$	同左	—
	要素種別	(工認図書に記載なし)	(基礎版モデル部分) ・シェル要素 (鉄塔及び筒身基礎モデル部分) ・はり要素	同左	—
	境界条件	(工認図書に記載なし)	・底面を弾性地盤ばねにより支持 ・底面の弾性地盤ばねは浮上りを 考慮	同左	—
	非線形 特性	考慮せず	同左	同左	—
荷重組合せ	S_1 地震時： $DL + P + S_1$ 暴風時： $DL + P + P_k$ DL：固定荷重 P：積載荷重 S_1 ： S_1 地震荷重 P_k ：風荷重	S_s 地震時： $DL + P + S_s$ 暴風時： $DL + P + P_k$ DL：固定荷重 P：積載荷重 S_s ： S_s 地震荷重 P_k ：風荷重	同左	—	
荷重 の 設 定	固定荷重 及び 積載荷重	基礎自重、排気筒より受ける荷重 のうち自重 (水平力、曲げモーメ ント、軸力) を入力	同左	同左	—
	地震荷重	排気筒より受ける荷重のうち地震 荷重 (水平力、曲げモーメント、 軸力) を入力	排気筒より受ける荷重のうち地震 荷重 (水平力、曲げモーメント、 軸力) 及び排気筒の基礎の慣性力 を入力	同左	—
	風荷重	排気筒より受ける荷重のうち風荷 重 (水平力、曲げモーメント、軸 力) を入力	同左	同左	—
評価 方法	応力解析	発生応力が許容応力度を超えない ことを確認	同左	同左	—

別紙2 応力解析におけるモデル化及び境界条件の考え方

目 次

1. 概要	別紙 2-1
2. 応力解析におけるモデル化及び境界条件	別紙 2-2

1. 概要

本資料は、排気筒の基礎の応力解析におけるモデル化及び境界条件についての概要を示すものである。

2. 応力解析におけるモデル化及び境界条件

排気筒の基礎の応力解析におけるモデル化及び境界条件を表 2-1 に示す。

直接基礎の底面の地盤ばねの設定における基本的な考え方は、以下のとおり。なお、地震時の評価を行うことから、各荷重に共通で動的な地盤物性に基づく地盤ばねを用いる。

- ・水平ばね

振動アドミッタンス理論に基づく水平ばねより算出する。

- ・鉛直ばね

基礎浮上りを考慮し、回転ばね反力として生じる転倒モーメントを適切に評価するため、振動アドミッタンス理論に基づく回転ばねより算出する。

有限要素法を用いた解析モデルにおける要素分割の考え方*については、以下のとおり。

- ・はり要素

はり要素の場合は、曲げの変位関数が 3 次で精度が高いため、基本的に要素分割の細分化は不要であるが、部材の接合点間で変位情報出力や荷重入力がある場合には複数要素に細分し、曲線部材がある場合は、その曲線が直線近似できる程度の分割にすることが一般的である。また、分布荷重がある場合や分布質量が関係する自重荷重などの計算では、要素分割することにより質量分布がより正確になり、解析結果の精度が向上する。さらに、要素分割の細分化により、変形図やモード図で構造物の変形状態を容易に把握することが可能となる。

- ・シェル要素

要素分割は、基本的には発生する応力状態によって決まり、構造形状と荷重条件より要素分割数を考慮する。要素形状の縦横比（アスペクト比）は、重要部分で 1:2 以下、その他の領域や応力変化が少ない領域では、1:3 程度までで、分割に際しては 4 角形要素を利用して格子状とするのが一般的である。曲面板構造の場合は、平板要素や軸対称シェル要素の大きさは、集中荷重や不連続部を含む曲面部近傍では $2.5\sqrt{R/t}$ を 10~20 分割すると適切な応力分布が求められ、構造物の半径 (R) と板厚 (t) が考慮されている。また、面内曲げ・軸力及び面外のせん断や曲げを受ける部材のシェル要素の辺の長さは、シェルの広がり方向の応力分布の状態から決まり、応力変化が大きい領域は要素を小さくする必要がある。

注記*：構造解析のための有限要素法実践ハンドブック（非線形 CAE 協会，2006 年）

表 2-1(1) モデル化及び境界条件

モデル概要

○モデル化範囲

- ・ 評価対象である基礎版全体、鉄塔基礎及び筒身基礎をモデル化する。

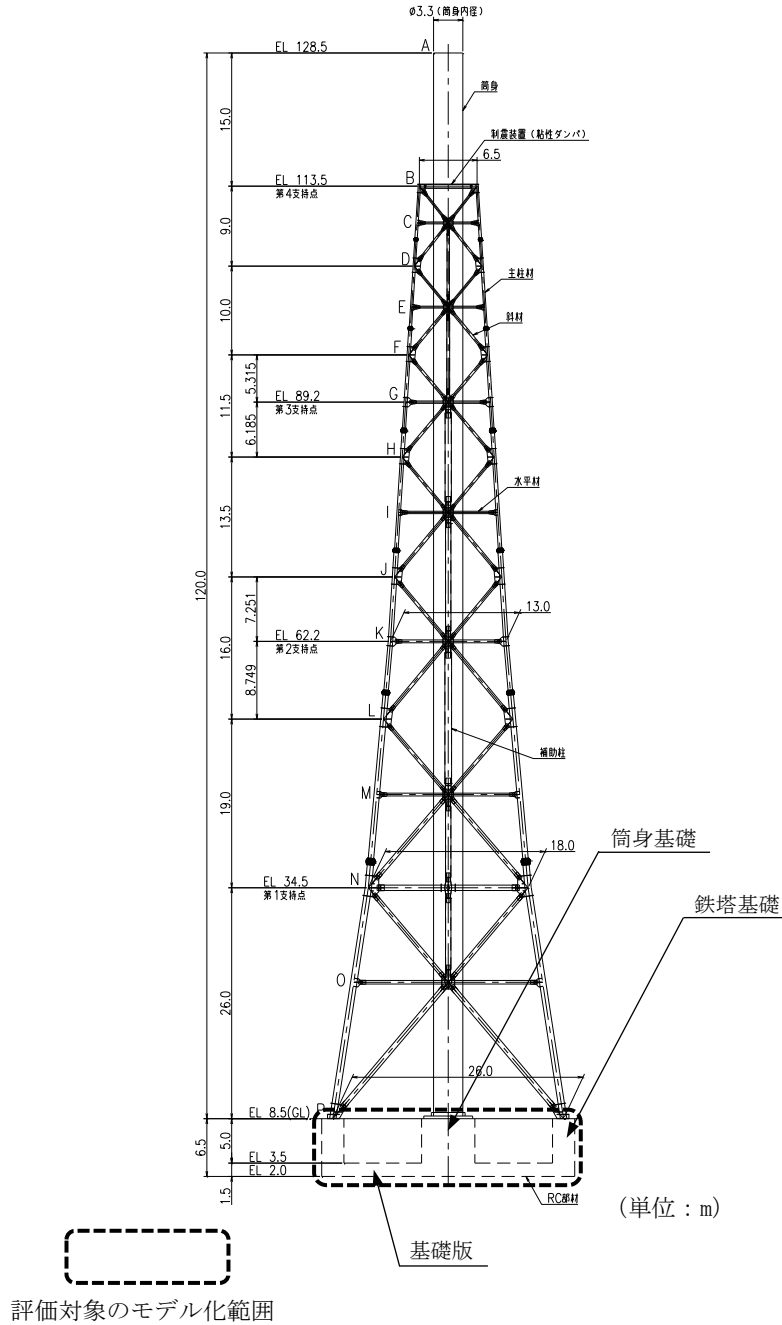


表 2-1(2) モデル化及び境界条件

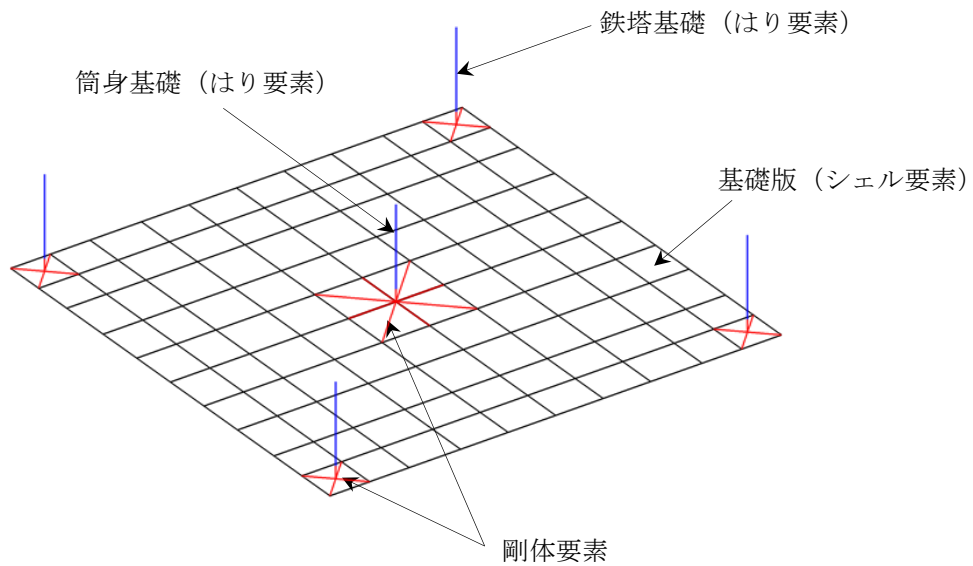
モデル概要

○使用要素

- ・シェル要素
- ・はり要素
- ・剛体要素

○要素分割

- ・要素の一辺の長さを 2.5m~3.0m 程度とし、鉄塔基礎及び筒身基礎の配置を考慮して分割する。



モデル概要

別紙 3 地震荷重の入力方法

目 次

1. 概要	別紙 3-1
2. 地震荷重の入力方法	別紙 3-2

1. 概要

本資料は、排気筒の基礎に作用する地震荷重の入力方法について示すものである。

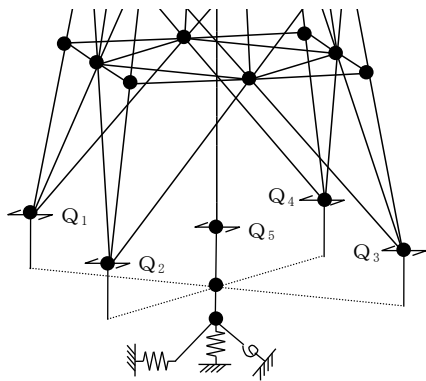
2. 地震荷重の入力方法

排気筒の基礎の応力解析に当たって、FEMモデルに入力する地震荷重として、排気筒より受ける荷重、慣性力を考慮する。

排気筒より受ける荷重については、地震応答解析により求まる鉄塔基礎及び筒身基礎に作用する反力（水平力、曲げモーメント及び軸力）を排気筒から受ける荷重として、FEMモデルの鉄塔基礎及び筒身基礎上端に、節点荷重として入力する。

慣性力については、地震応答解析により求まる基礎版上端位置の質点における最大応答加速度を重力加速度で除した鉛直震度を、排気筒の基礎の各節点の支配重量に乗じた節点荷重としてFEMモデルに入力する。

FEMモデルに入力する地震荷重の概念図を図2-1に示す。また、FEMモデルに入力する地震荷重を図2-2に示す。



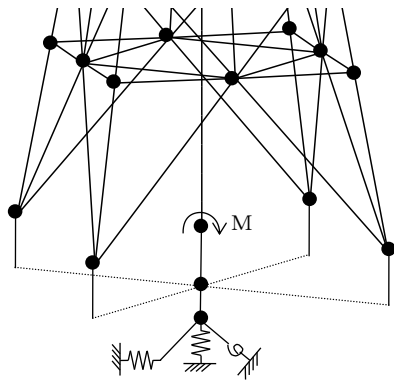
■ 鉄塔基礎及び筒身基礎に作用させる水平力 Q_{US} の算出

$$Q_{USi} = Q_i$$

Q_{USi} : FEMに入力する水平力

Q_i : 地震応答解析より設定した反力 (水平力)

(a) 水平力



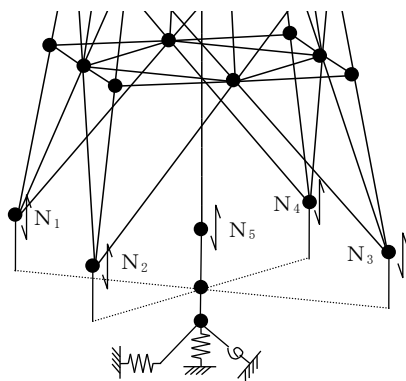
■ 筒身基礎に作用させる曲げモーメント M_{US} の算出

$$M_{US} = M$$

M_{US} : FEMに入力する曲げモーメント

M : 地震応答解析より設定した反力
(曲げモーメント)

(b) 曲げモーメント



■ 鉄塔基礎及び筒身基礎に作用させる軸力 N_{US} の算出

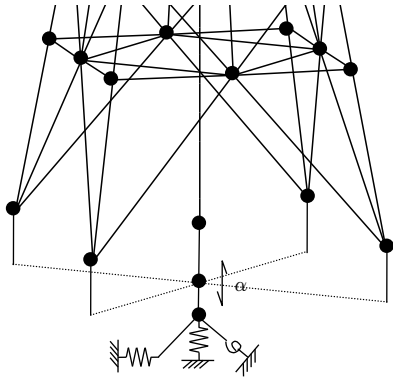
$$N_{USi} = N_i$$

N_{USi} : FEMに入力する軸力

N_i : 地震応答解析より設定した反力 (軸力)

(c) 軸力

図 2-1(1) FEMモデルに入力する地震荷重の概念図 (排気筒より受ける荷重)



■排気筒の基礎に作用させる慣性力 K_v の算出

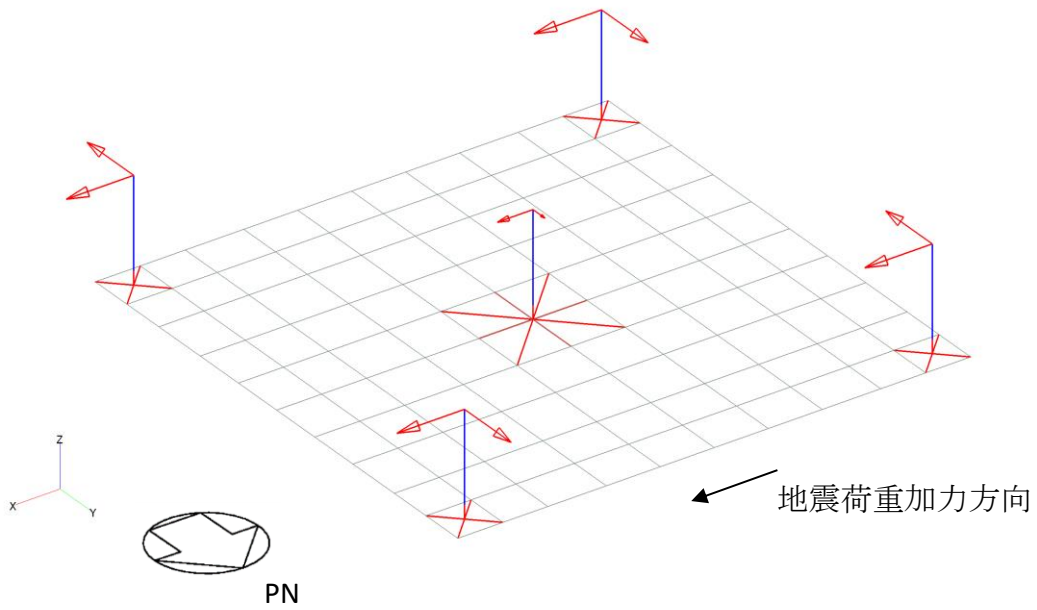
$$K_v = \alpha / g$$

K_v : FEMに入力する慣性力

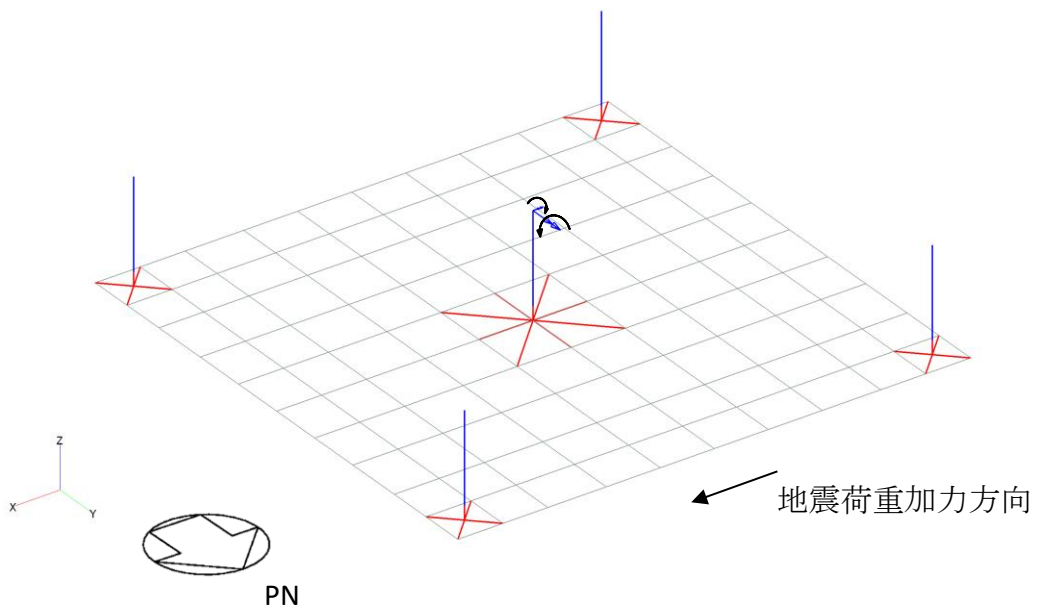
α : 地震応答解析より設定した鉛直加速度

g : 重力加速度

図 2-1 (2) FEMモデルに入力する地震荷重の概念図 (慣性力)

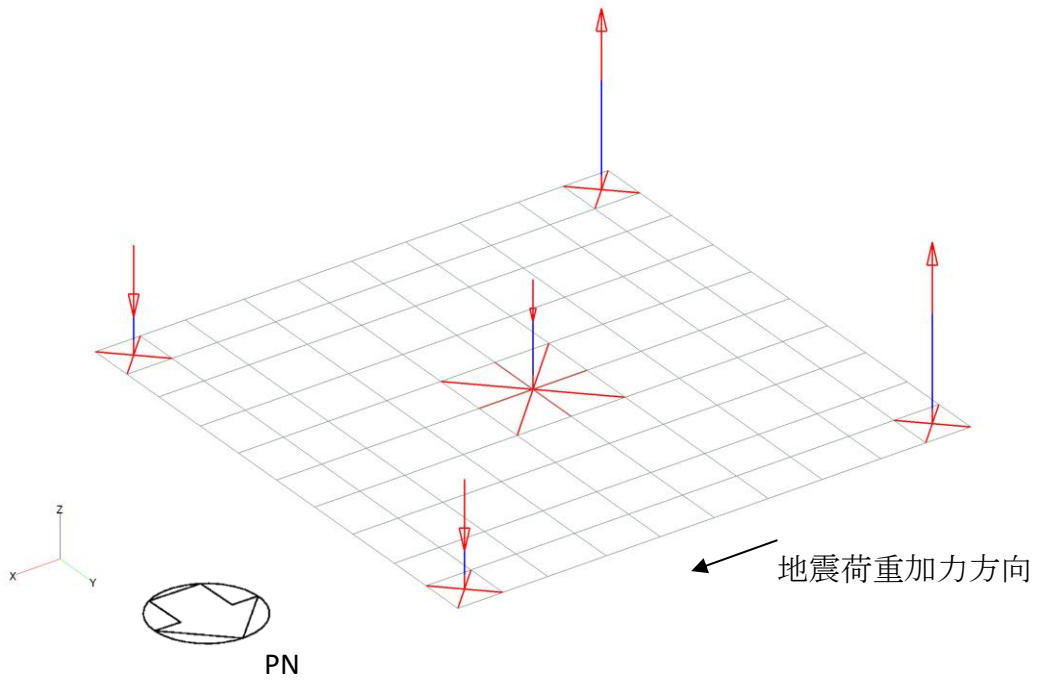


(a) 排気筒から受ける荷重 (0° 方向, 水平力)

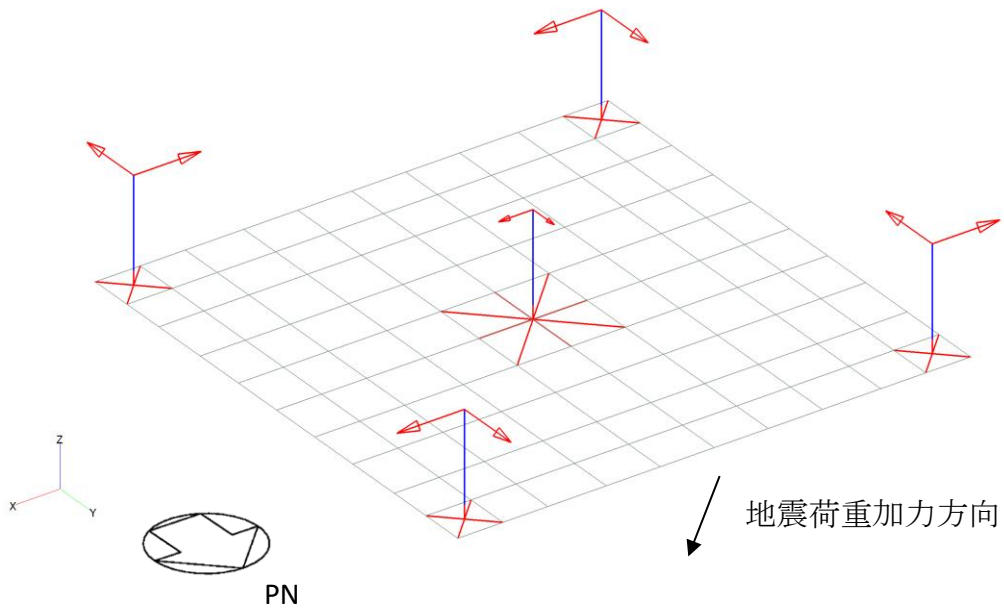


(b) 排気筒から受ける荷重 (0° 方向, 曲げモーメント)

図 2-2(1) FEMモデルに入力する地震荷重

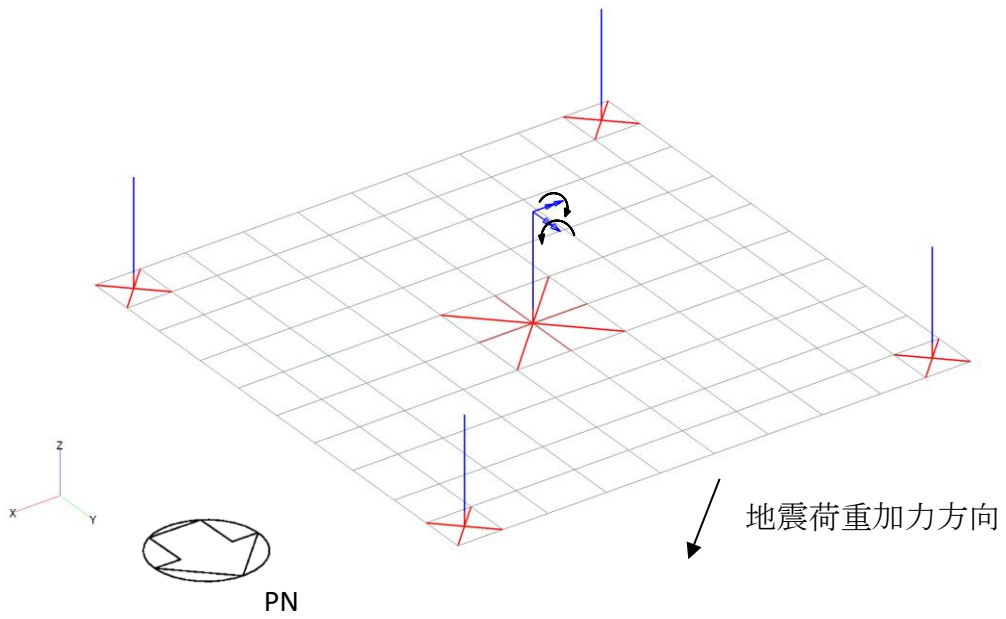


(c) 排気筒から受ける荷重 (0° 方向, 軸力)

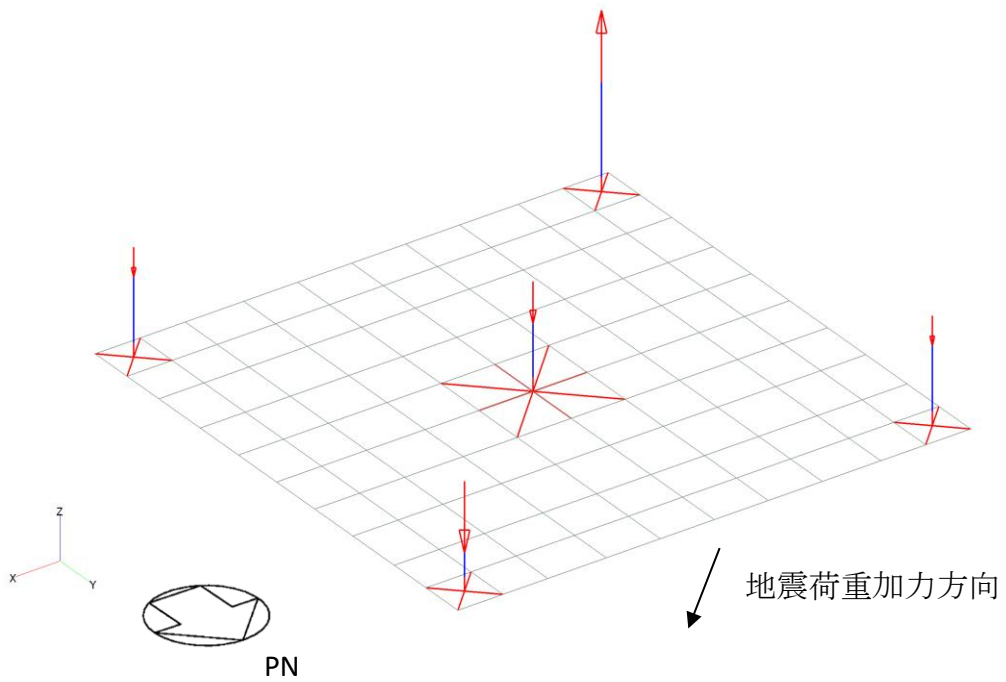


(d) 排気筒から受ける荷重 (45° 方向, 水平力)

図 2-2(2) FEMモデルに入力する地震荷重

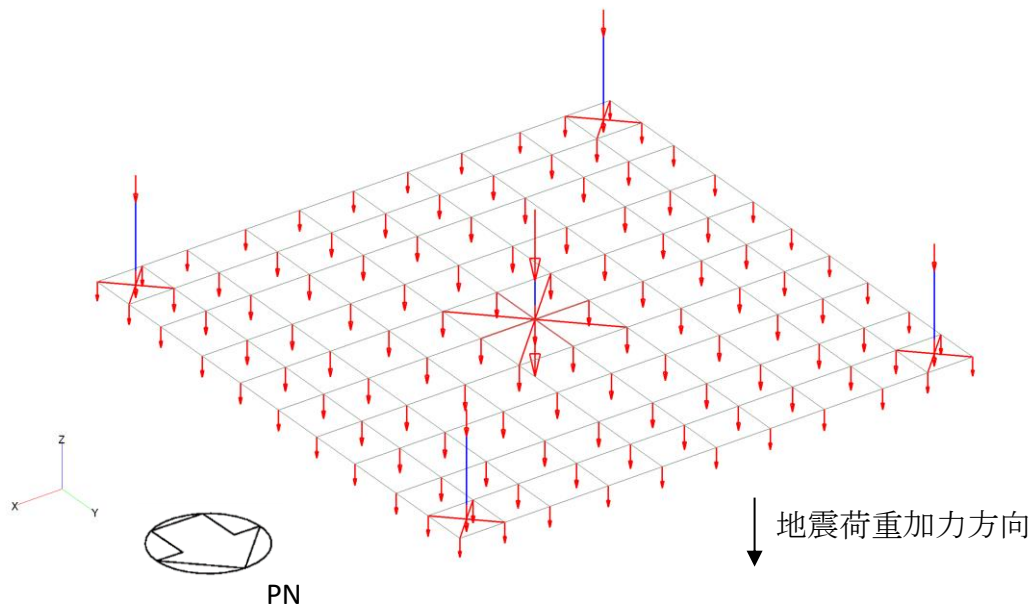


(e) 排気筒から受ける荷重 (45° 方向, 曲げモーメント)



(f) 排気筒から受ける荷重 (45° 方向, 軸力)

図 2-2(3) FEMモデルに入力する地震荷重



(g) 慣性力

図 2-2(4) FEMモデルに入力する地震荷重

別紙 4 応力解析における断面の評価部位の選定

目 次

1. 概要	別紙 4-1
2. 断面の評価部位の選定	別紙 4-2

1. 概要

本資料は、排気筒の基礎の応力解析における断面の評価部位の選定について示すものである。

2. 断面の評価部位の選定

排気筒の基礎の荷重の組合せケースを表 2-1 に示す。

表 2-1 荷重の組合せケース

外力の状態	組合せケース	鉛直荷重	排気筒より受ける荷重
S s 地震時	1	$1.27 \cdot DL$	$U_s (0^\circ) *$
	2	$0.73 \cdot DL$	
	3	$1.27 \cdot DL$	$U_s (45^\circ) *$
	4	$0.73 \cdot DL$	

注記*：地震応答解析結果に基づく軸力、水平力及び曲げモーメントの最大値を組み合わせた 0° 方向及び 45° 方向の荷重とする。

2.1 鉄塔基礎及び筒身基礎

鉄塔基礎及び筒身基礎の概略配筋図を図 2-1 に示す。

鉄塔基礎及び筒身基礎の評価結果を表 2-2 に、断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果を図 2-2 に、断面の評価部位の選定に関する荷重組合せケースの断面応力図を図 2-3 に示す。

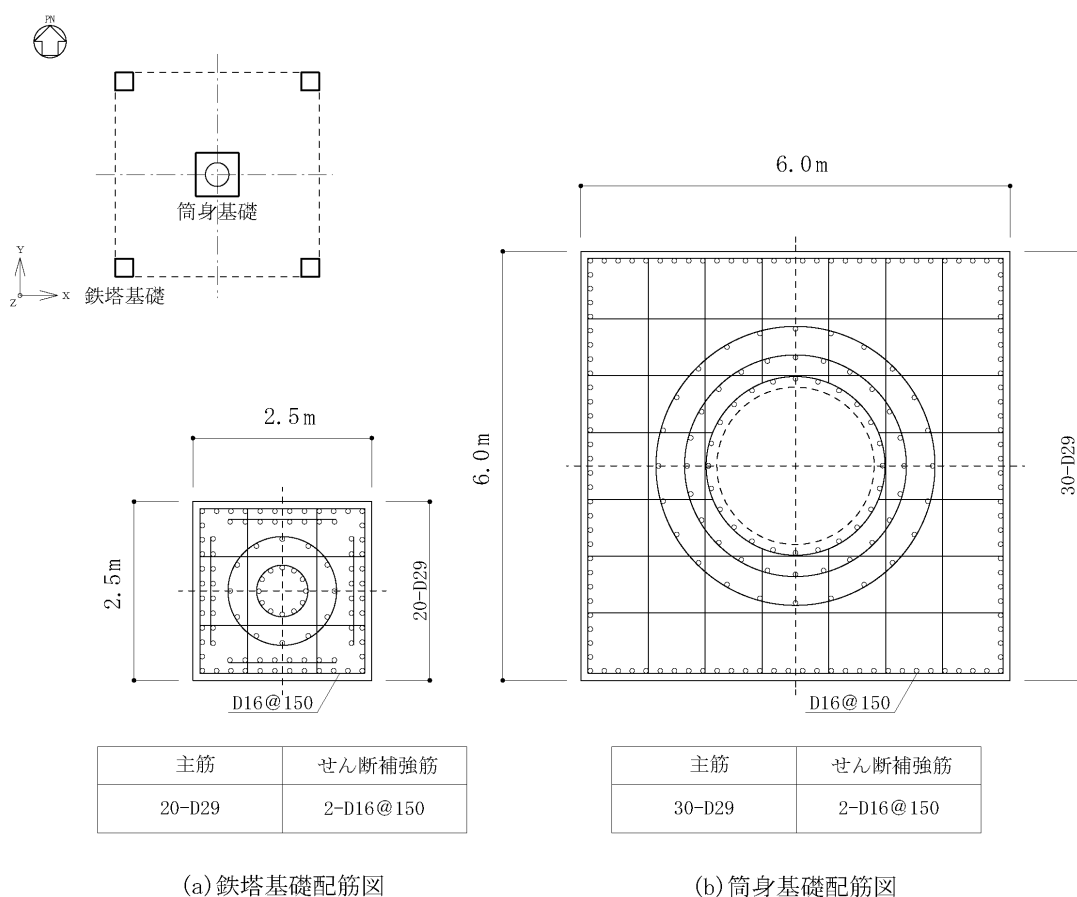


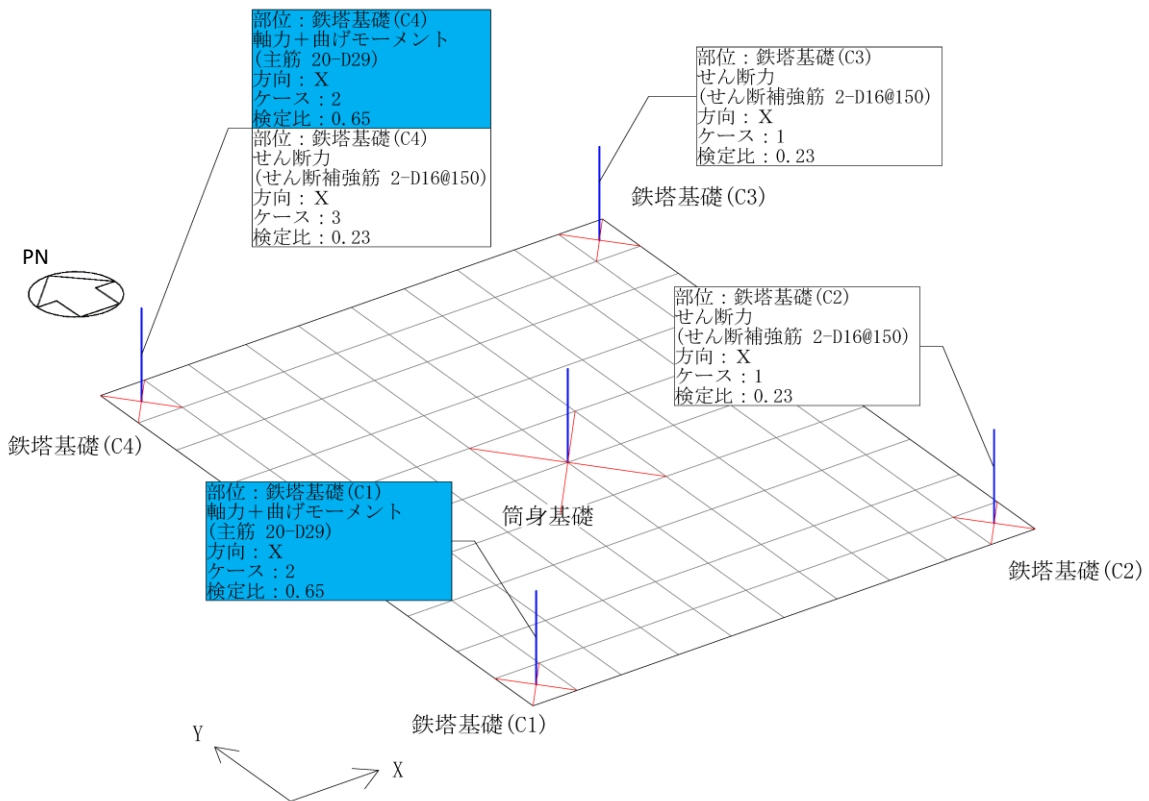
図 2-1 鉄塔基礎及び筒身基礎の概略配筋図

表 2-2 鉄塔基礎及び筒身基礎の評価結果

部位	方向	荷重組合せ				検討応力				曲げモーメントの検討						せん断力の検討									
		荷重 組合せ ケース	N* (kN)	M (kN・m)	N/(b・D) (N/mm ²)	M/(b・D ²) (N/mm ²)	p _t (%)	a _t (mm ²)	設計配筋 (断面積mm ²)	必要配筋量 /設計配筋量	荷重 組合せ ケース	検討応力 Q (kN)	許容せん断力 Q _A (kN)	Q/Q _A	荷重 組合せ ケース	必要配筋量 /設計配筋量	設計配筋 (断面積mm ²)	a _t (mm ²)	p _t (%)	M/(b・D) (N/mm ²)	M/(b・D ²) (N/mm ²)	N/(b・D) (N/mm ²)	N* (kN)	M (kN・m)	
																									Q/Q _A
C ₁	X	2	-2284	3895	-0.365	0.249	0.132	8250	20-D29 (12840)	0.65	1	779	5304	0.15	1	0.65	20-D29 (12840)	8250	0.132	-0.365	0.249	0.132	8250	3895	3895
	Y	2	-2284	3735	-0.365	0.239	0.129	8063	20-D29 (12840)	0.63	1	747	5304	0.15	1	0.63	20-D29 (12840)	8063	0.129	-0.365	0.239	0.129	8063	3735	3735
C ₂	X	4	2019	3895	0.323	0.249	0.034	2125	20-D29 (12840)	0.17	1	1191	5304	0.23	1	0.17	20-D29 (12840)	2125	0.034	0.323	0.249	0.034	2125	3895	3895
	Y	4	2019	5795	0.323	0.371	0.075	4688	20-D29 (12840)	0.37	1	1159	5304	0.22	1	0.37	20-D29 (12840)	4688	0.075	0.323	0.371	0.075	4688	5795	5795
C ₃	X	2	4748	5955	0.760	0.381	0.019	1188	20-D29 (12840)	0.10	1	1191	5304	0.23	1	0.10	20-D29 (12840)	1188	0.019	0.760	0.381	0.019	1188	5955	5955
	Y	2	4748	5795	0.760	0.371	0.016	1000	20-D29 (12840)	0.08	1	1159	5304	0.22	1	0.08	20-D29 (12840)	1000	0.016	0.760	0.371	0.016	1000	5795	5795
C ₄	X	2	-2284	3895	-0.365	0.249	0.132	8250	20-D29 (12840)	0.65	3	1191	5304	0.23	3	0.65	20-D29 (12840)	8250	0.132	-0.365	0.249	0.132	8250	3895	3895
	Y	2	-2284	3735	-0.365	0.239	0.129	8063	20-D29 (12840)	0.63	1	747	5304	0.15	1	0.63	20-D29 (12840)	8063	0.129	-0.365	0.239	0.129	8063	3735	3735
筒身基礎	X	1	5788	3821	0.161	0.018	0.000	0	30-D29 (19260)	—	1	366	31640	0.02	1	—	30-D29 (19260)	0	0.000	0.161	0.018	0.000	0	3821	3821
	Y	3	5788	2703	0.161	0.013	0.000	0	30-D29 (19260)	—	3	259	31640	0.01	3	—	30-D29 (19260)	0	0.000	0.161	0.013	0.000	0	2703	2703

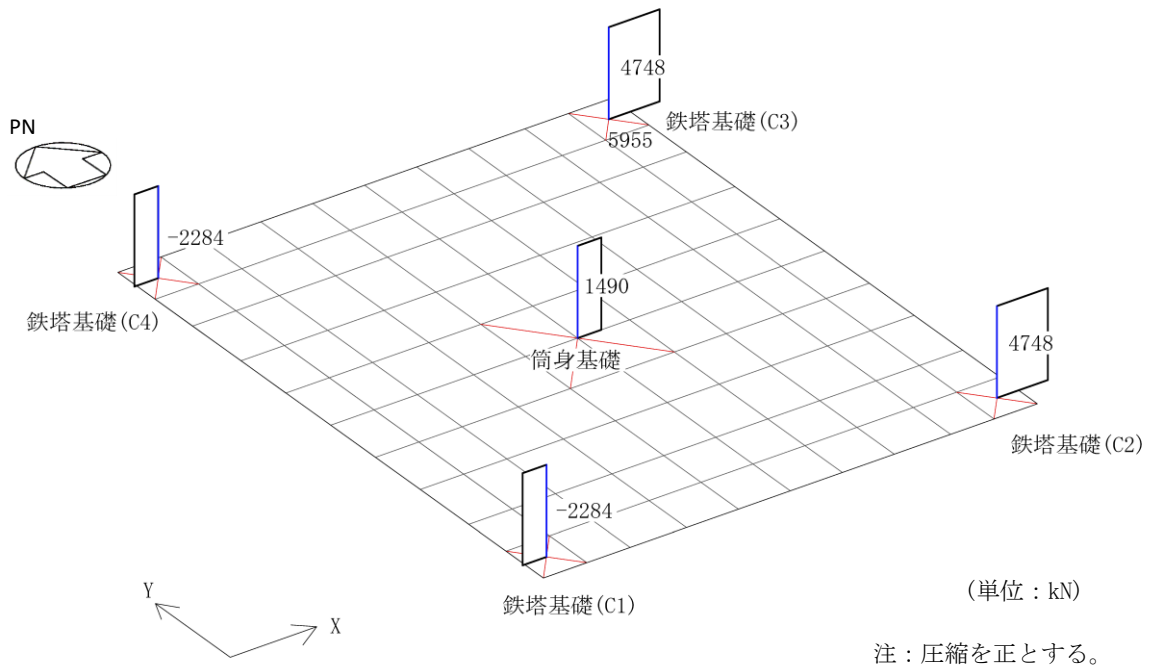
注記* : 圧縮を正とする。

注 : ■ は、検定値が最大となる要素を示す。

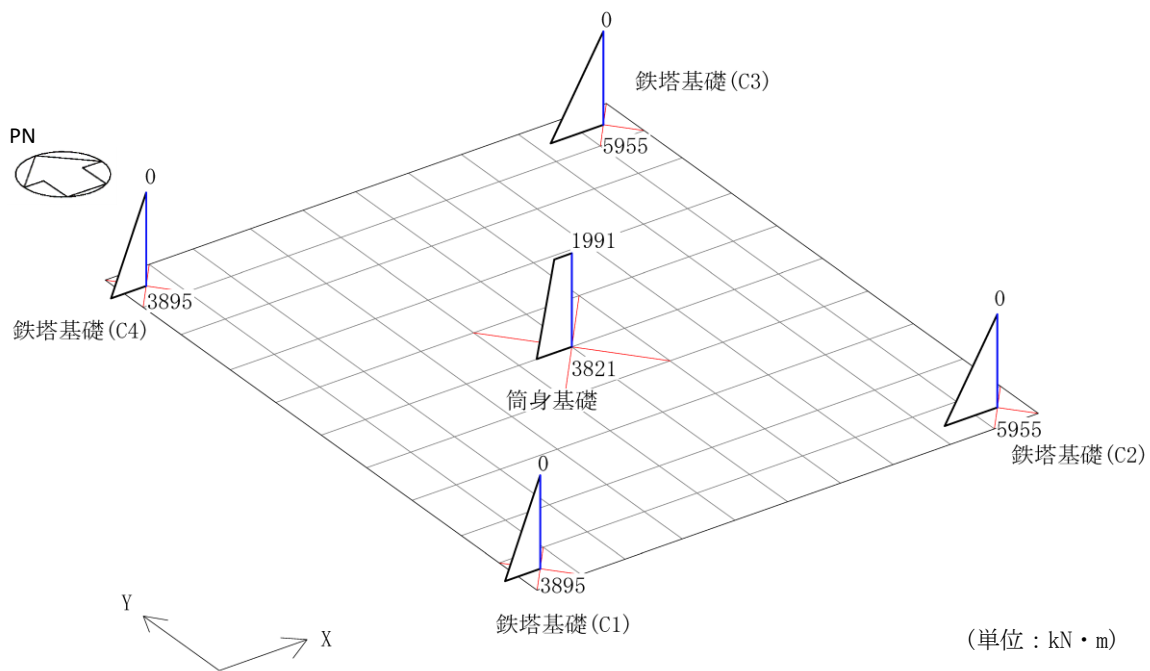


注： は、検定値が最大となる要素を示す。

図 2-2 断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果
(鉄塔基礎及び筒身基礎)



(a) 軸力 (X方向, ケース 2)



(b) 曲げモーメント (X方向, ケース 2)

図 2-3 断面の評価部位の選定に関する荷重組合せケースの断面応力図
(鉄塔基礎及び筒身基礎)

2.2 基礎版

基礎版の概略配筋図を図 2-4 に示す。

基礎版の評価結果を表 2-3 に、断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果を図 2-5 に、断面の評価部位の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図を図 2-6 に示す。

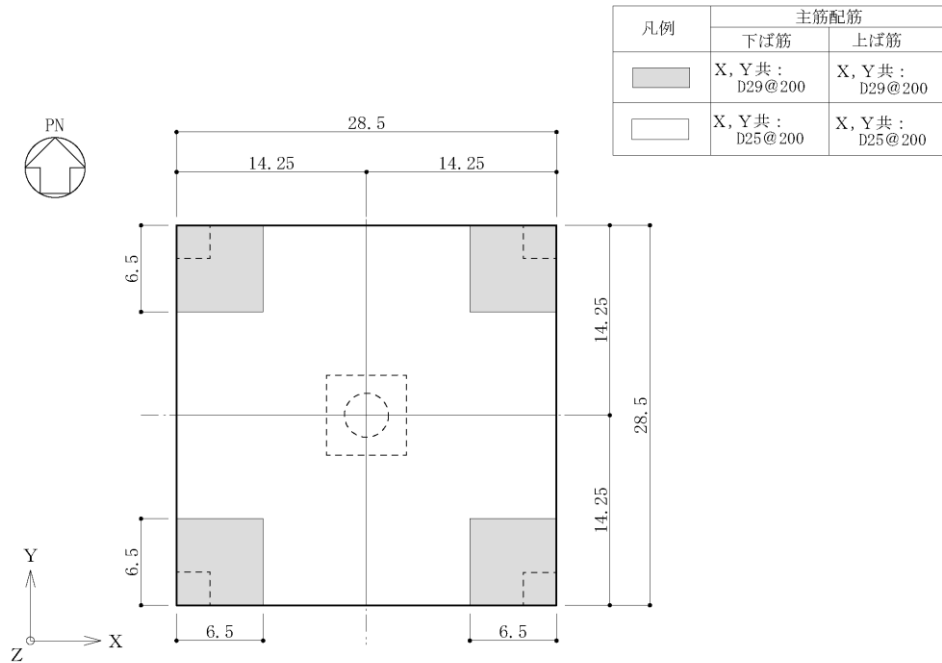


図 2-4(1) 基礎版の概略配筋図 (主筋) (単位 : m)

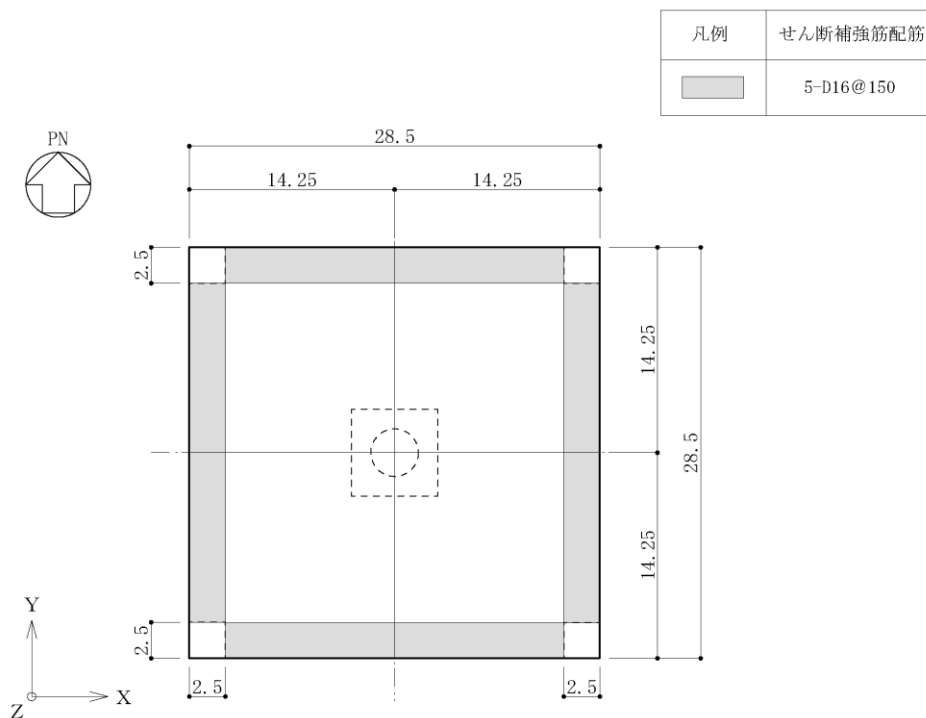


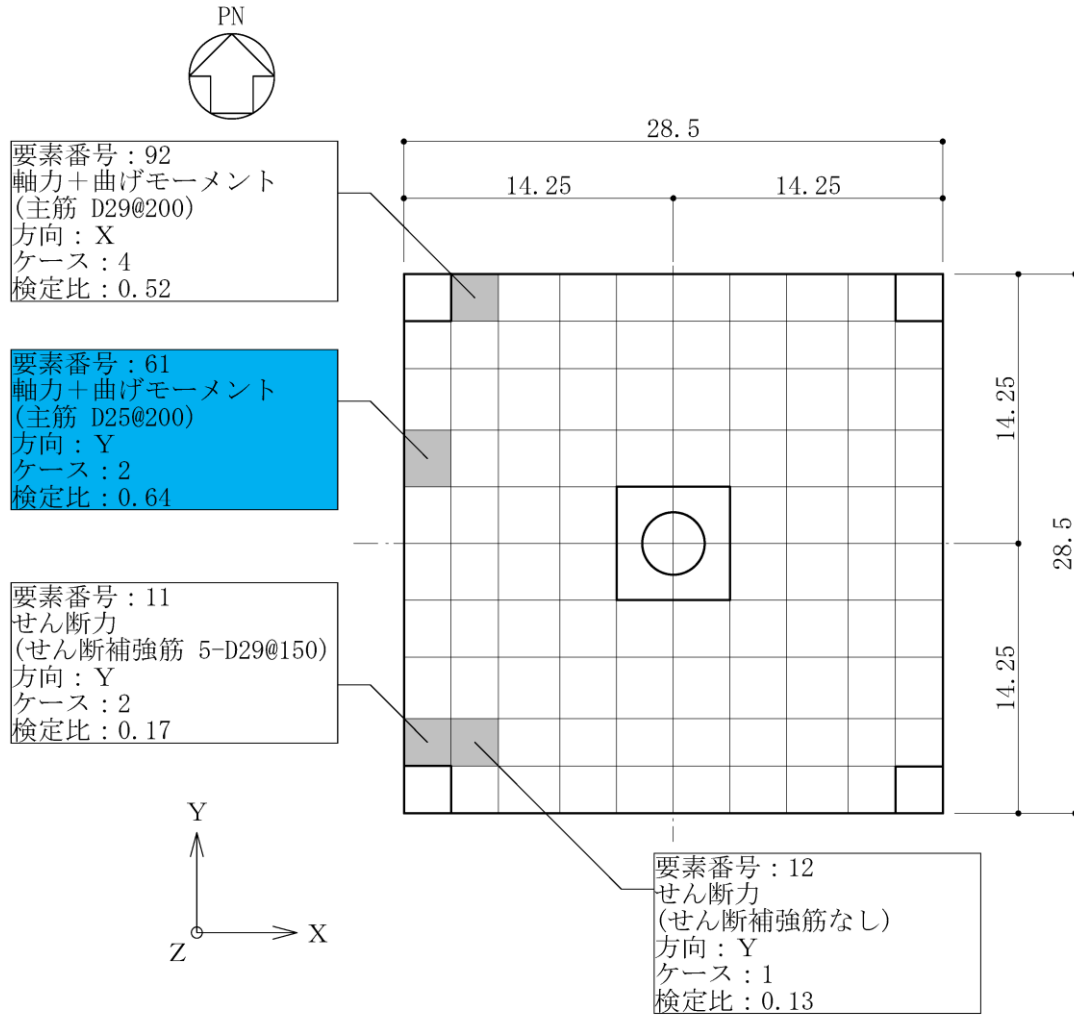
図 2-4(2) 基礎版の概略配筋図 (せん断補強筋) (単位 : m)

表 2-3 基礎版の評価結果

部位	要素番号	方向	曲げモーメントの検討						せん断力の検討						
			検討応力		$N/(b \cdot D)$ (N/mm^2)	$M/(b \cdot D^2)$ (N/mm^2)	p_t (%)	a_t (mm^2/m)	設計配筋 (断面積 mm^2/m)	必要配筋量 /設計配筋量	荷重 組合せ ケース	検討応力 Q (kN/m)	許容せん断力 Q_A (kN/m)	Q/Q_A	
			N^* (kN/m)	M ($kN \cdot m/m$)											
基礎版	11	X	1	26	193	0.017	0.086	0.024	360	D29@200 (3210)	0.12	2	104	2372	0.05
		Y	1	152	563	0.101	0.250	0.066	990	D29@200 (3210)	0.31	2	445	2690	0.17
	12	X	2	88	788	0.059	0.350	0.104	1560	D29@200 (3210)	0.49	3	154	1275	0.13
		Y	2	86	775	0.057	0.344	0.102	1530	D29@200 (3210)	0.48	1	155	1275	0.13
61	X	2	2	124	0.001	0.055	0.017	255	D25@200 (2535)	0.11	2	30	1462	0.03	
	Y	2	44	779	0.029	0.346	0.107	1605	D25@200 (2535)	0.64	2	128	1415	0.10	
92	X	4	-394	521	-0.263	0.232	0.111	1665	D29@200 (3210)	0.52	2	432	2690	0.17	
	Y	1	27	194	0.018	0.086	0.024	360	D29@200 (3210)	0.12	2	102	2357	0.05	

注記* : 圧縮を正とする。

注 : ■ は、検定値が最大となる要素を示す。

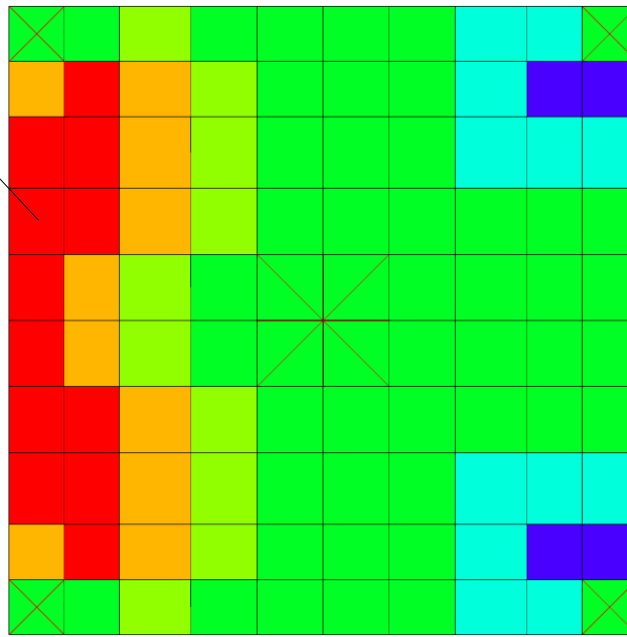


注：■ は、検定値が最大となる要素を示す。

図 2-5 断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果
(基礎版)



要素番号 : 61

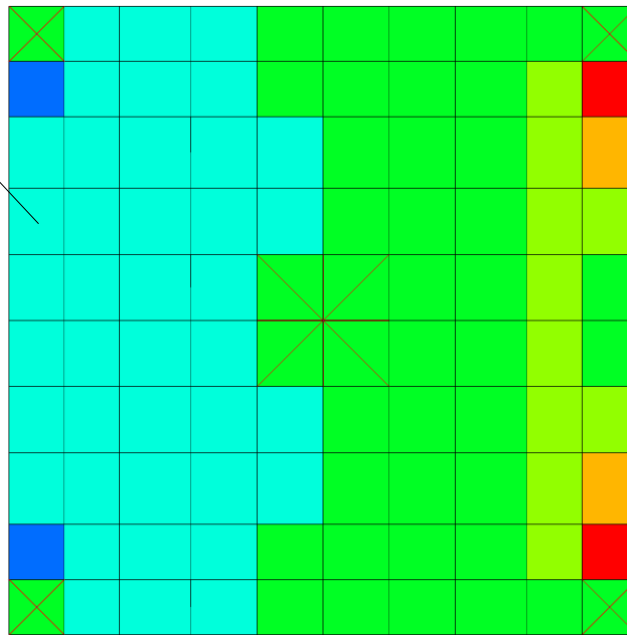


(a) 曲げモーメント (Y方向, ケース 2)

(kN · m/m)



要素番号 : 61



(b) 軸力 (Y方向, ケース 2)

(kN/m)

注 : 圧縮を負とする。

図 2-6 断面の評価部位の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図
(基礎版)

別紙 5 最大接地圧について

目 次

1. 概要	別紙 5-1
2. 接地圧	別紙 5-2

1. 概要

本資料は、排気筒の基礎の基準地震動 S_s による地震力（以下「 S_s 地震時」という。）に対する接地圧を示すものである。

2. 接地圧

S s 地震時の最大接地圧が、岩盤の極限支持力度 (9.8N/mm²) を超えないことを確認する。

荷重の組合せケースを表 2-1 に、荷重の組合せケースごとの S s 地震時の接地圧を表 2-2 に示す。材料物性の不確かさを考慮した S s 地震時の最大接地圧は 1.12N/mm² であることから、岩盤の極限支持力度を超えないことを確認した。

表 2-1 荷重の組合せケース

外力の状態	組合せ ケース	鉛直荷重	排気筒より受ける荷重
S s 地震時	1	1.27・DL	U _s (0°) *
	2	0.73・DL	
	3	1.27・DL	U _s (45°) *
	4	0.73・DL	

注記*：材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果に基づく軸力，水平力及び曲げモーメントの最大値を組み合わせた 0° 方向及び 45° 方向の荷重とする。

表 2-2 S s 地震時の接地圧

組合せ ケース	最大接地圧 (N/mm ²)
1	1.12
2	1.06
3	1.12
4	1.06