

柏崎刈羽原子力発電所1号機
新潟県中越沖地震後の設備健全性に係る
排気筒の点検・評価について

(第38回構造WGでの指摘事項に関する回答)

平成21年8月10日

東京電力株式会社

○ コメント内容

委員が結果を判断するにあたっては応力度がわかりやすいと思うが、そういったものが図になっていない。表で示されている結果を感覚的に分かるように図などに直して示すこと。

(平成 21 年 7 月 15 日 耐震・構造設計小委員会構造 WG(第 38 回))

○ 回答

断面検討している鉄塔および筒身部の主要構造部材のうち、部材軸力と部材曲げモーメントの組み合わせで検討している支柱材および筒身材の結果を例示する。

全体座標および部材座標と検討用応力の関係を図-1に示す。図-2に支柱材および筒身材の部材軸力または部材曲げモーメントの高さ方向の分布図を、図-3に応力の高さ方向の分布図をそれぞれ示す。また、図-4に評価基準値(短期許容応力度)に対する発生応力の比率(以下、「応力比」という。)の高さ方向の分布図を示す。

なお、図-4(1)には部材軸力と部材曲げモーメントの最大値の組み合わせに基づく応力比を、図-4(2)には時刻を考慮した組み合わせに基づく応力比を示す。

各部の応力比(時刻を考慮した組み合わせ)の最大は以下のとおり。

① 鉄塔部の応力比の最大

- ・ 支柱材 : 0.50 (T. M. S. L. +76.2m~T. M. S. L. +65.0m)

② 筒身部の応力比の最大

- ・ 筒身材 (1号機) : 0.28 (T. M. S. L. +53.9m~T. M. S. L. +40.0m)
- ・ 筒身材 (2号機) : 0.23 (T. M. S. L. +53.9m~T. M. S. L. +40.0m)

なお、断面検討は以下の式により行っている。

$$\frac{{}_s\sigma_c}{{}_s f_c} + \frac{{}_s\sigma_b}{{}_s f_b} \leq 1.0$$

ここに、 ${}_s\sigma_c$: 地震時における部材の軸応力 ($=N_x / A$)

${}_s\sigma_b$: 地震時における部材の曲げ応力 ($=M_{yz} / Z$)

${}_s f_c$: 短期許容圧縮応力度
(座屈の影響を考慮して細長比等により低減した数値)

${}_s f_b$: 短期許容曲げ応力度

N_x : 検討用の部材軸力

M_{yz} : 検討用の曲げモーメント

(2軸曲げを合成した曲げモーメント $M_{yz} = \sqrt{(M_y)^2 + (M_z)^2}$)

A : 部材の軸断面積

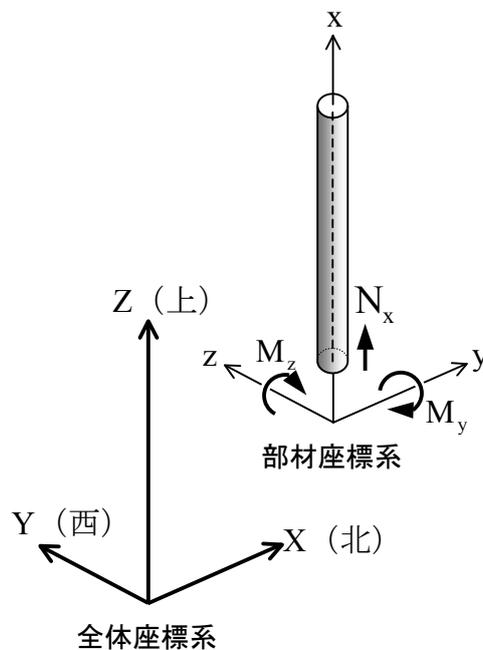
Z : 部材の断面係数

「記号の説明」

- ・ X : 全体座標の X 方向 (+方向)
- ・ Y : 全体座標の Y 方向 (+方向)
- ・ Z : 全体座標の Z 方向 (+方向)

- ・ x : 部材座標の x 方向 (+方向)
- ・ y : 部材座標の y 方向 (+方向)
- ・ z : 部材座標の z 方向 (+方向)

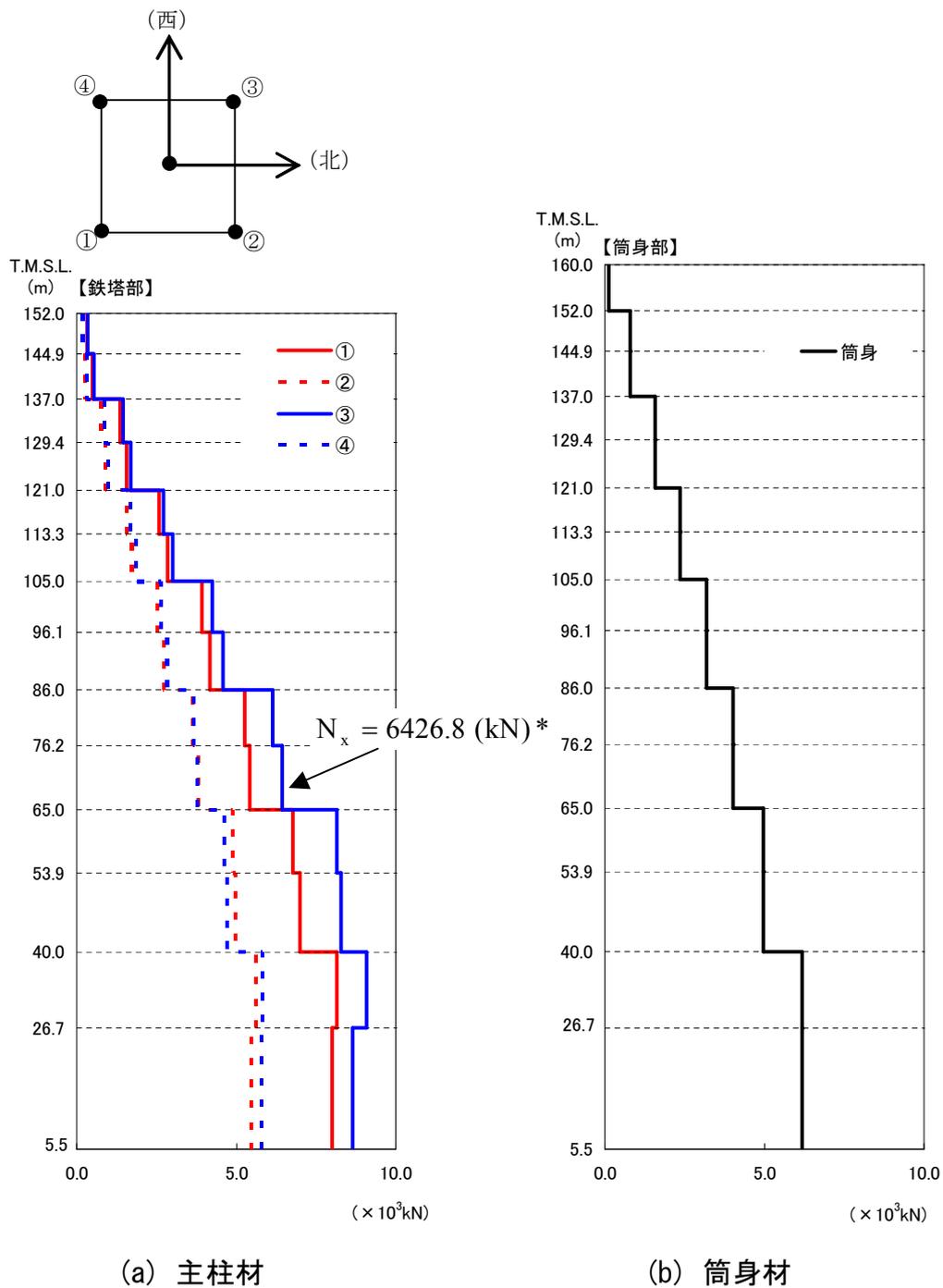
- ・ N_x : 部材座標 x 軸方向力 (部材軸力) (+方向)
- ・ M_y : 部材座標 y 軸廻りの部材曲げモーメント (+方向)
- ・ M_z : 部材座標 z 軸廻りの部材曲げモーメント (+方向)



(全体座標の Z 軸と個材座標の x 軸が上向き)
(全体座標の X 軸と個材座標の y 軸が北向き)

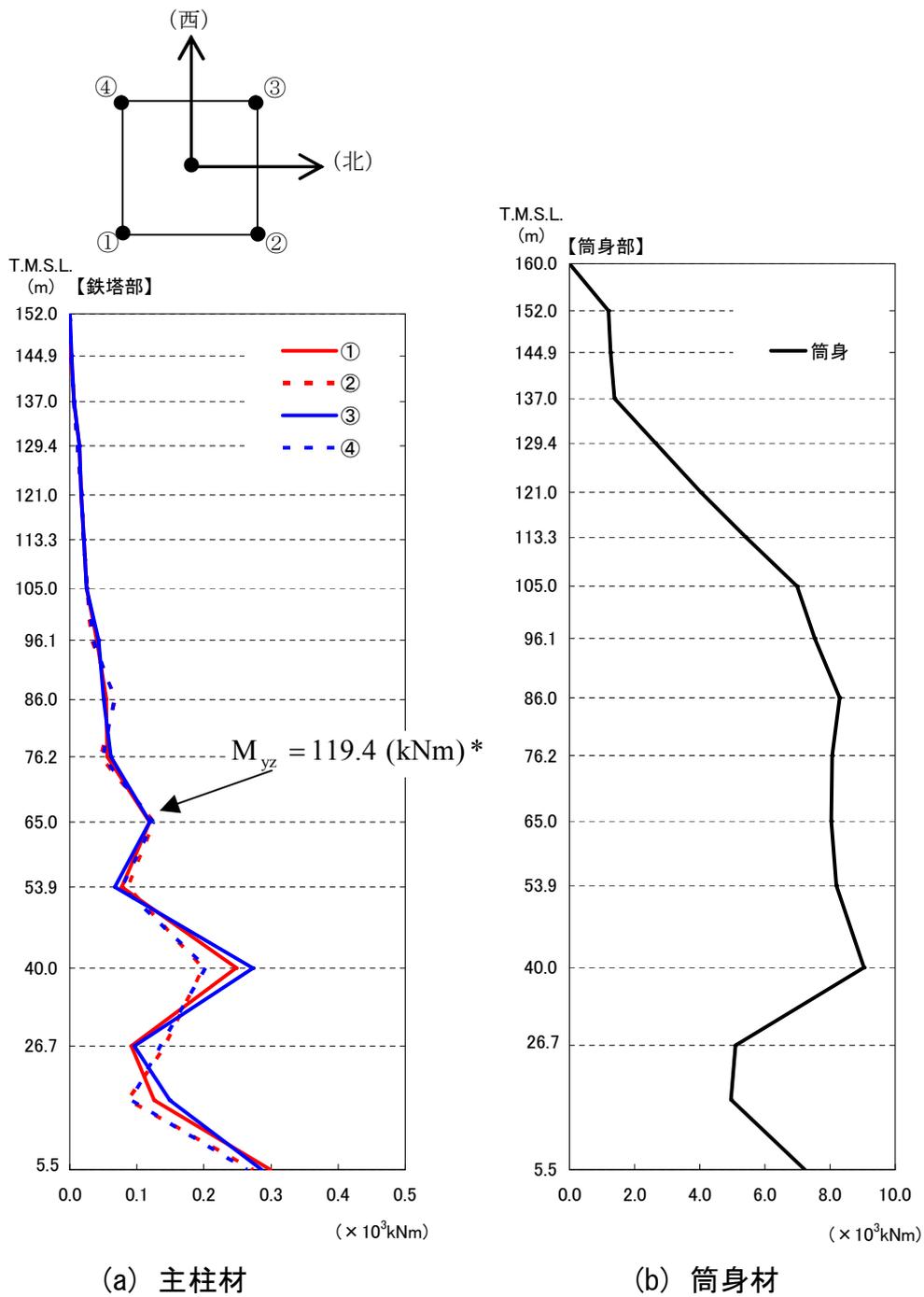
図-1 全体座標および部材座標 (柱・筒身) と検討応力の関係

■ 主柱材と筒身材（軸力と曲げとの組み合わせで断面検討する部材）



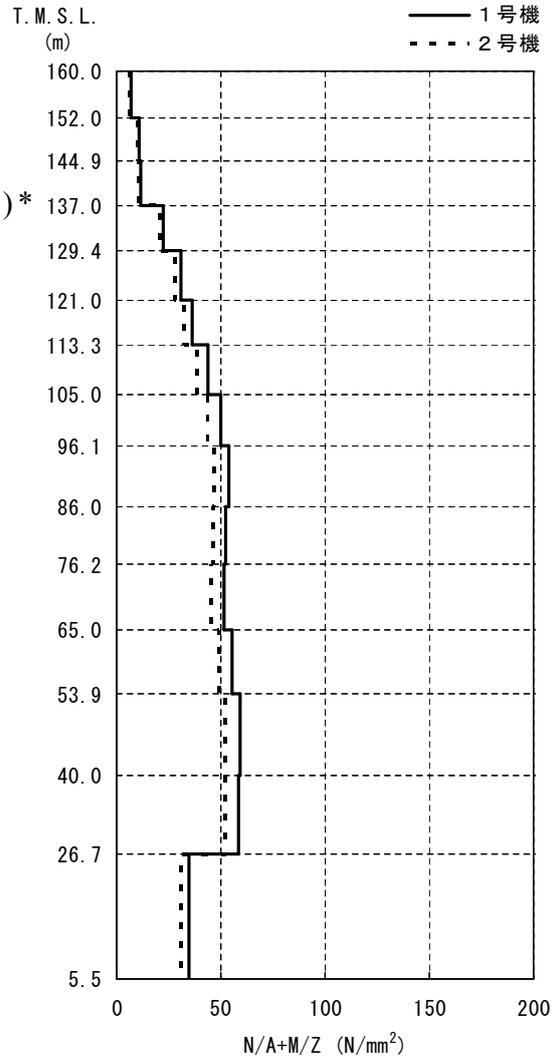
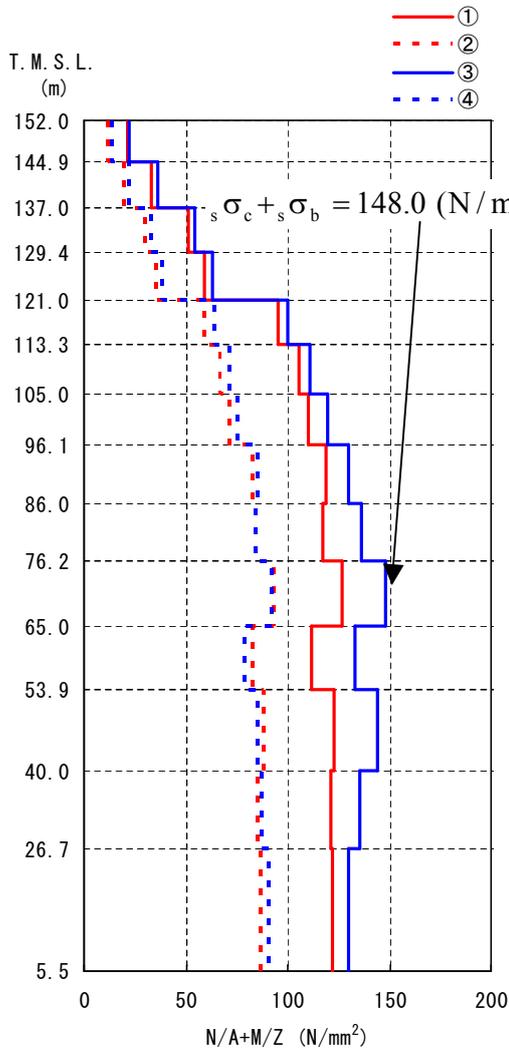
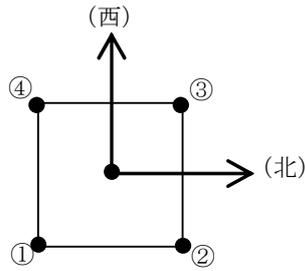
注) * : 主柱材③の T. M. S. L. 76. 2m~T. M. S. L. 65. 0m 区間の値の例示

図-2 (1) 1 / 2号機排気筒 上部架構の応力分布図
(主柱材および筒身材 : 部材軸力 N_x)



注) * : 主柱材③の T. M. S. L. 76.2m~T. M. S. L. 65.0m 区間の値の例示

図-2 (2) 1 / 2号機排気筒 上部架構の応力分布図
 (主柱材および筒身材 : 部材曲げモーメント M_{yz})



断面性能の比率で1号機と2号機に按分

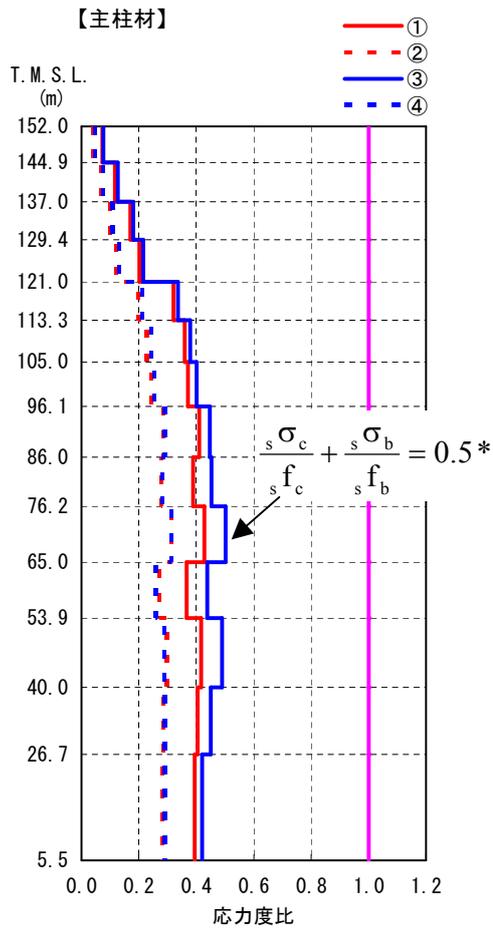
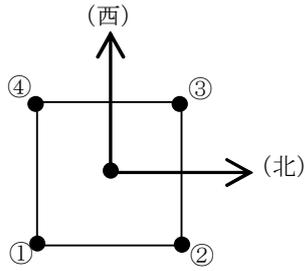
(a) 主柱材

(b) 筒身材

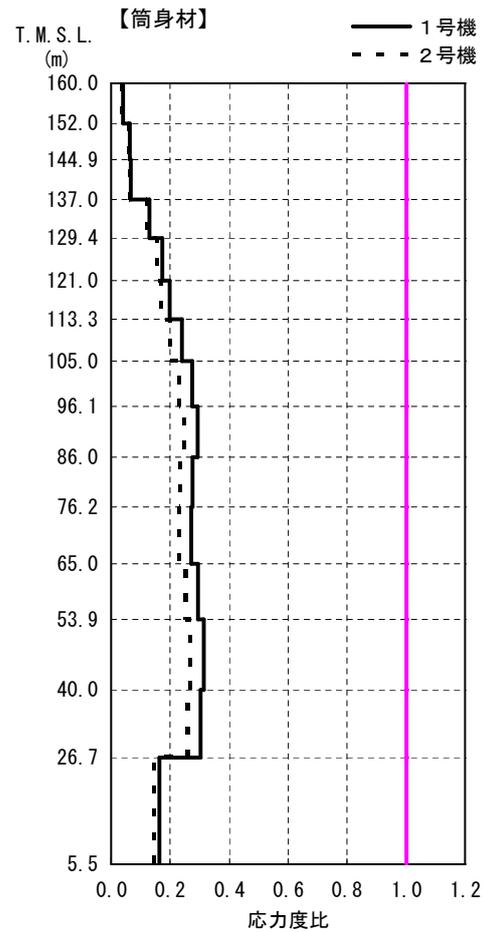
注) * : 主柱材③の T.M.S.L. 76.2m~T.M.S.L. 65.0m 区間の値の例示

図-3 1 / 2号機排気筒 上部架構の応力の分布図

(主柱材および筒身材 : 軸応力度 $\sigma_c (= N_x / A)$ + 曲げ応力度 $\sigma_b (= M_{yz} / Z)$)



(a) 支柱材

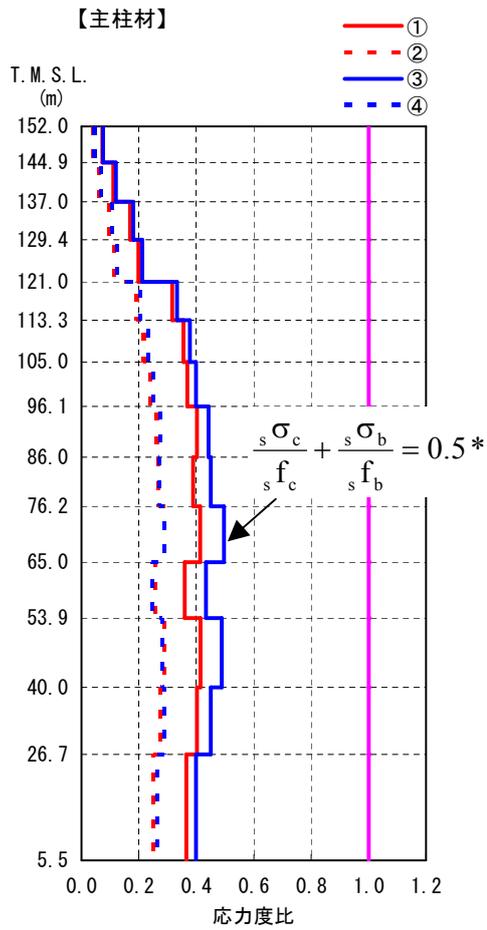
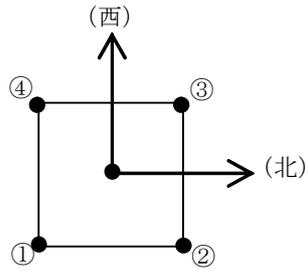


(b) 筒身材

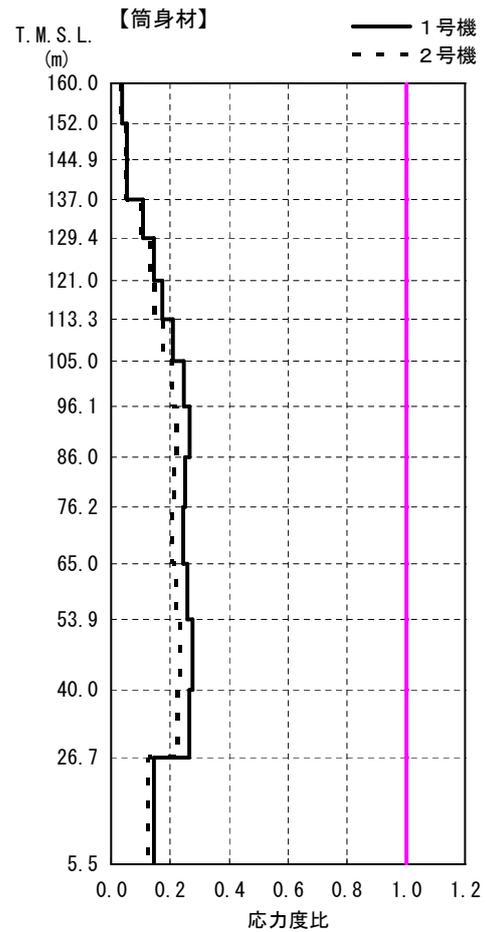
注) * : 支柱材③の T. M. S. L. 76.2m~T. M. S. L. 65.0m 区間の値の例示

図-4 (1) 1 / 2号機排気筒 上部架構の応力比の分布図

(支柱材および筒身材 : 最大値同士による組み合わせ $\frac{s\sigma_c}{s f_c} + \frac{s\sigma_b}{s f_b}$)



(a) 主柱材



(b) 筒身材

注) * : 主柱材③の T.M.S.L. 76.2m~T.M.S.L. 65.0m 区間の値の例示

図-4 (2) 1 / 2号機排気筒 上部架構の応力度比の分布図

(主柱材および筒身材 : 時刻歴による組み合わせ $\frac{s\sigma_c}{s f_c} + \frac{s\sigma_b}{s f_b}$)

以 上

○ コメント内容

杭の短期許容支持力はどうか。杭体で決まっているのか、地盤で決まっているのか、摩擦を考慮しているのか等教えてほしい。

(平成 21 年 7 月 15 日 耐震・構造設計小委員会構造 WG(第 38 回))

○ 回答

今回の中越沖地震に係る耐震健全性評価で用いる杭の支持力については、表-1に示すとおり、建設時の設計で採用している短期許容支持力を SI 単位系に換算した 5,884(kN/本)を用いている。

表-1 杭の許容支持力(杭1本あたり)

杭径(m)	長期	短期	備考
1.5φ	300 ton	600 ton (5,884 kN)	短期は長期の2倍

この短期許容支持力は、日本建築学会編『建築基礎構造設計規準・同解説』(1974 改)に示される設定手順に従い求めた値を保守的に評価して用いている。

すなわち、

- ① 杭の支持力算定式から求めた許容支持力
- ② 杭材としての長期許容軸力

のうち最も不利なもの(最小値)を長期許容支持力として採用し、その2倍を短期許容支持力としている。長期許容支持力の算出結果を表-2に示す。

以上より、杭の短期許容支持力は、地盤で決まっており、杭周面の摩擦は考慮していない。

表-2 長期許容支持力の算出結果

長期許容支持力 Ra の算出方法		算定式	長期許容支持力 の算出結果
①	杭の支持力算定式から求めた許容支持力 (杭の周面摩擦は無視)	$Ra = 1/3 \times 15 \times N \times Ap - W$ $= 1/3 \times 15 \times 50 \times 1.767 - 35.34$ N: 杭先端 N 値 (西山層 $N \geq 50$) Ap: 杭の断面積 (m^2) W: 杭の自重 (ton)	406 (ton/本)
②	杭材としての長期許容軸力	$Ra = f_c \times Ap = 600 \times 1.767$ f_c : コンクリートの長期許容圧縮 応力度 (ton/m^2) Ap: 杭の断面積 (m^2)	1,060 (ton/本)
採用値		300 (ton/本)	

※短期は長期の2倍とするため、 $300 \text{ (ton/本)} \times 2 = 600 \text{ (ton/本)}$

注) 長期許容支持力 Ra の算定式 (日本建築学会編『建築基礎構造設計規準・同解説』(1974 改)による)

① 支持地盤および杭の周面摩擦から求める式

$$Ra = \frac{1}{3} \left\{ 15 \times \bar{N} \cdot Ap + \left(\frac{Ns \cdot Ls}{5} + 2Nc \cdot Lc \right) \Psi \right\} - W$$

(第1項: 先端支持力、第2項: 杭周面摩擦力(砂層と粘性土)、第3項: 杭自重(置換土の比重考慮))

② 杭体の長期許容軸力

$$Ra = f_c \times Ap \text{ (場所打ち杭の長期圧縮許容応力度 } F_c/4 \text{ に基づく杭体の許容圧縮力)}$$

「記号の説明」

Ra : 長期許容支持力(ton)

\bar{N} : 先端抵抗 N 値(上限 50)

Ap : 杭先端の全断面積(m^2)

Ns : 杭周地盤中、砂質部分の実測 N 値の平均(上限 50)

Ls : 杭周地盤中、砂質部分にある杭の長さ(m)

Nc : 杭周地盤中、粘土質部分の実測 N 値の平均(上限 4)

Lc : 杭周地盤中、粘土質部分にある杭の長さ(m)

Ψ : 杭の周長(m)

W : 場所打ちコンクリート杭の自重(ton)

f_c : 杭の長期許容圧縮応力度(ton/m^2)、設計基準強度 $F_c \times 1/4$

以上

○ コメント内容

杭の検討をやっているのであれば、杭の応力図を示すべきではないか。ひび割れの状況と対応していることがわかるとよい。

(平成 21 年 7 月 15 日 耐震・構造設計小委員会構造 WG(第 38 回))

○ 回答

1/2号機排気筒の杭基礎の杭頭付近の目視点検の結果確認されたひび割れ発生状況と解析的に求められた最大応答結果とを比較して示す。

図-1に排気筒の地震応答解析モデル図を示す。

杭頭付近の目視点検結果(ひび割れ箇所、ひび割れ発生状況)を図-2、図-3および表-1に示す。その結果、杭頭の鋼板巻き(t=12mm)部分との境界付近に0.1~2.2mm程度のひび割れが数本確認されている。

次に地震応答解析から求めたひび割れが確認された付近の杭の応答曲げモーメントや応答軸力を曲げモーメント-曲率(M- ϕ)関係図と軸力-曲げモーメント相関図にプロットして図-4に示す。その結果、コンクリートのひび割れ点に相当する第一折れ点を超過し、鉄筋降伏点に相当する第二折れ点までの中間的な応答を呈している。

以上の杭頭付近の目視点検結果と地震応答解析結果とを比較した結果、両者の結果はほぼ対応する結果であると判断される。

なお、杭の曲げモーメント-曲率(M- ϕ)関係は、(社)日本電気協会編『乾式キャスク貯蔵建屋基礎構造の設計に関する技術指針』(JEAG4616-2003)に基づき設定している。また、N-M相関図は日本建築学会編『鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説』(1991年)の15条(柱)の円形断面に基づき設定している。

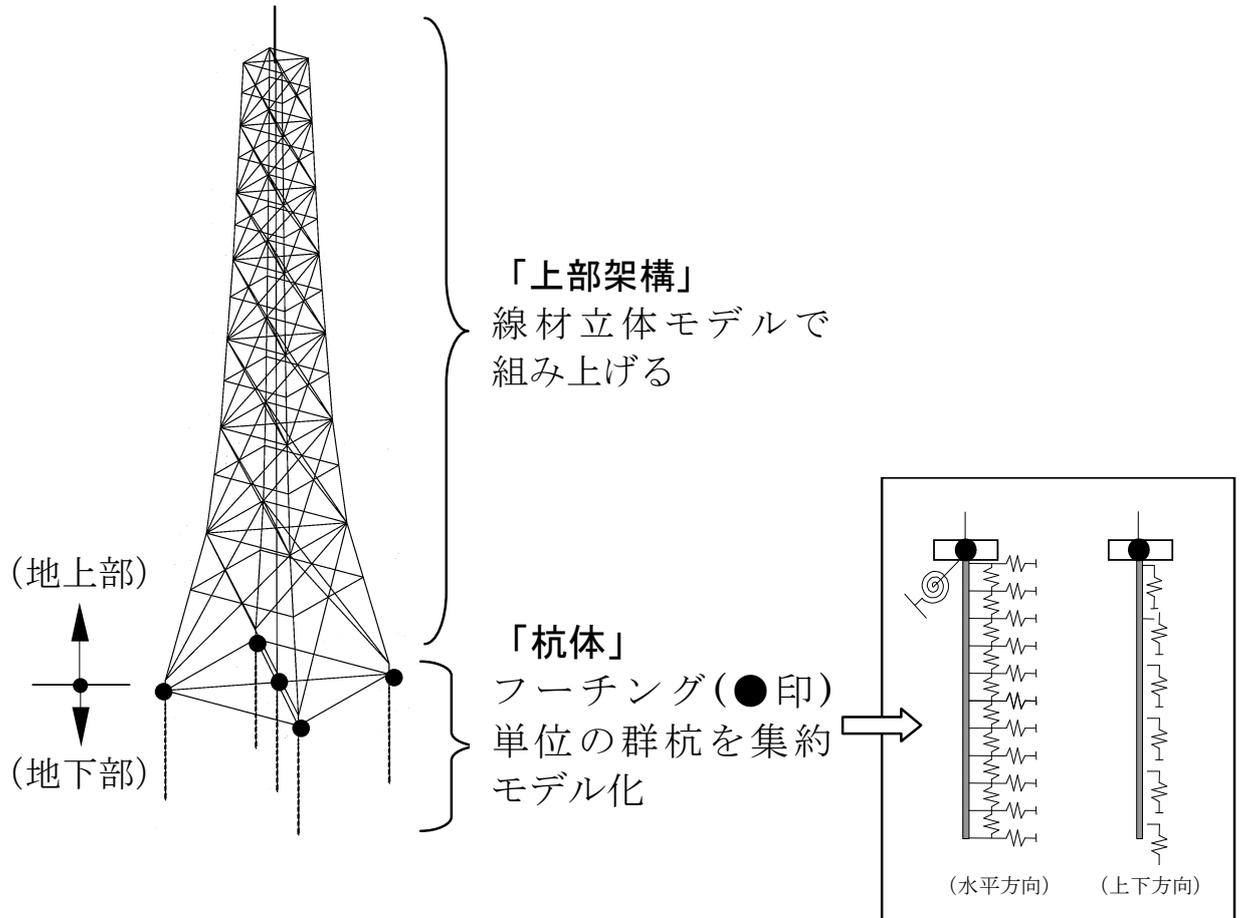


図-1 排気筒の地震応答解析モデル

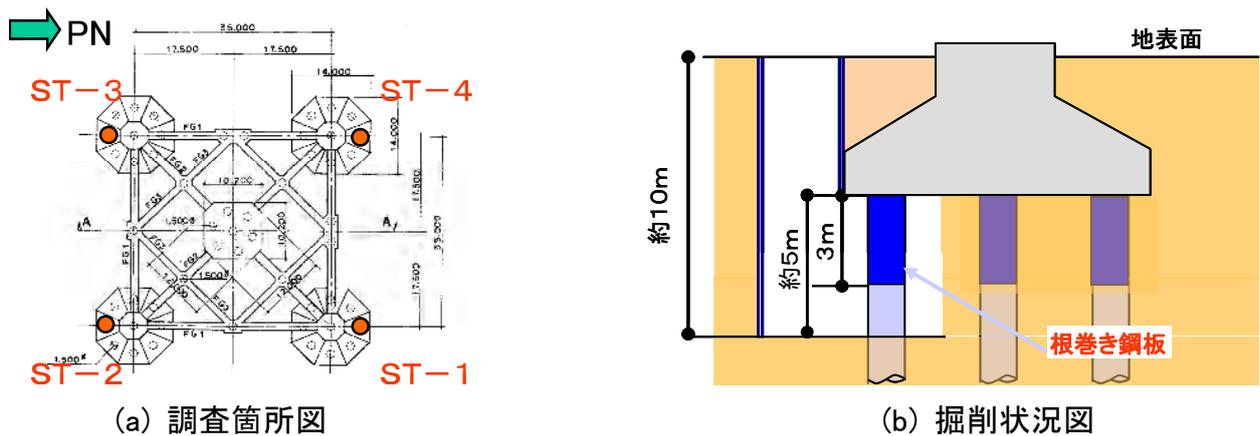
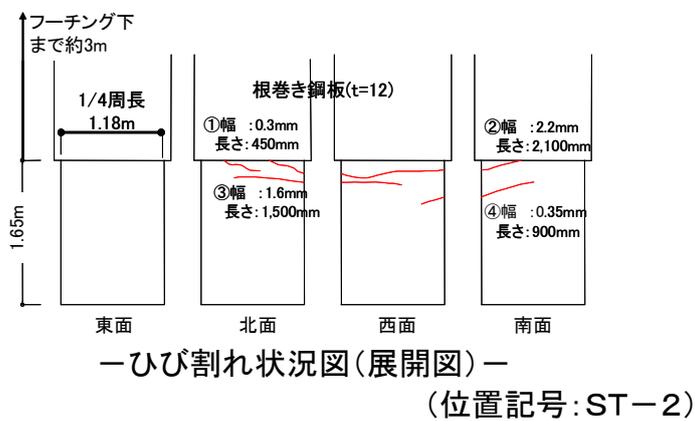
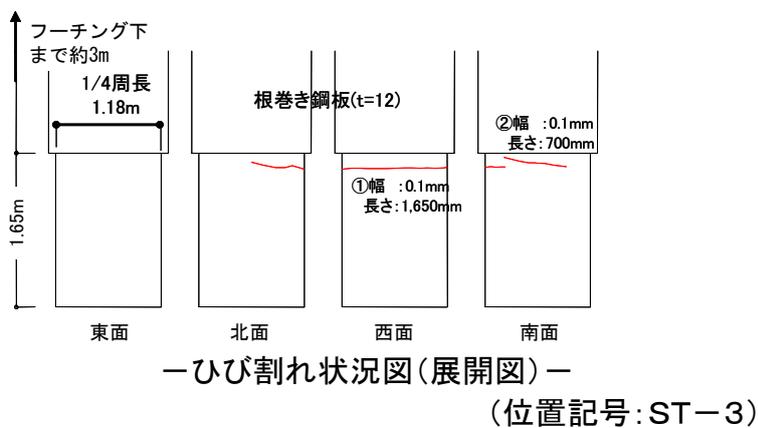


図-2 杭の調査箇所とその掘削状況の概要図

表-1 杭頭付近に確認されたひび割れ状況のまとめ

調査箇所	ひび割れ本数 (本)	ひび割れ幅 (mm)	ひび割れ長さ (m)	主なひび割れ発生面
ST-4	1	0.1	0.70	北
ST-3	2	0.1	0.70~1.65	西
ST-2	4	0.3~2.2	0.45~2.10	西
ST-1	損傷なし			



その他、ST-4にも軽微なひび割れ(0.1mm)が1本確認されている。(表-1参照)

図-3 杭頭付近の最大ひび割れの発生状況

杭頭付近の地震応答解析結果の概要

■ 杭の骨格曲線の条件

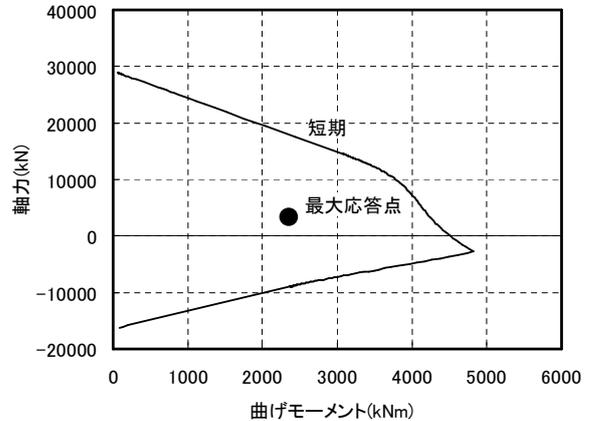
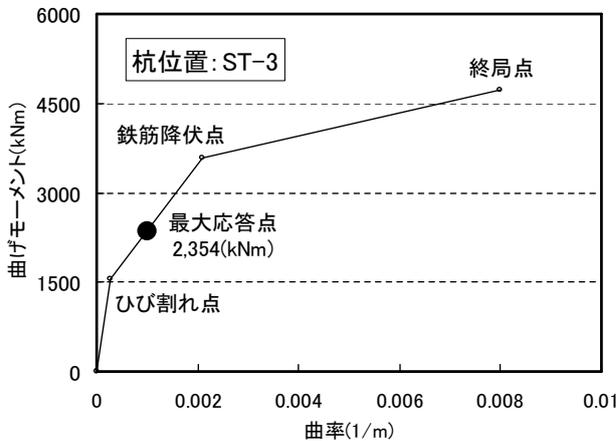
杭の曲げモーメント-曲率(M-φ)関係は、(社)日本電気協会編『乾式キャスク貯蔵建屋基礎構造の設計に関する技術指針』(JEAG4616-2003)に基づき設定している。

- ・第1折れ点: 軸力Nが加わる時にコンクリートの縁部がコンクリートの引張強度 $0.56\sqrt{F_c}$ に達した点
($M_c = 0.56\sqrt{F_c} \cdot Z_e + N \cdot D/8$)
- ・第2折れ点: 圧縮側あるいは引張側の縁鉄筋が降伏に達した点
- ・終局点: 圧縮側コンクリートの圧壊に相当する点(コンクリートの限界圧縮ひずみ 0.3%)

■ 杭の N-M 相関図の条件

N-M 相関図は日本建築学会編『鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説』(1991年)の15条(柱)の円形断面に基づき設定している。

- ・コンクリートの短期許容圧縮応力度: $11.75(N/mm^2)$
- ・鉄筋の短期許容圧縮応力度: $345(N/mm^2)$
- ・鉄筋の短期許容引張応力度: $345(N/mm^2)$

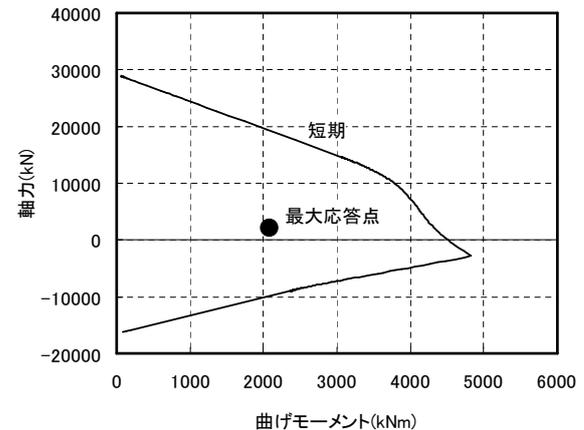
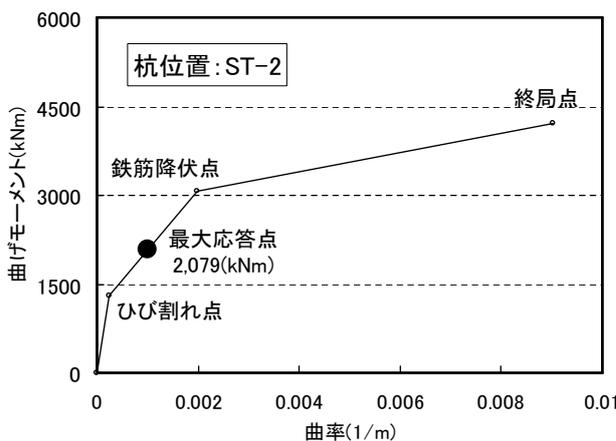


注) 最大応答点●: 最大曲げモーメント発生時の曲げモーメントおよび軸力の点をプロット

(杭の位置記号: ST-3にある1本あたりの応答結果)

(a) 杭の M-φ 関係図と応答プロット点

(b) 杭の N-M 相関図と応答プロット点



注) 最大応答点●: 最大曲げモーメント発生時の曲げモーメントおよび軸力の点をプロット

(杭の位置記号: ST-2にある1本あたりの応答結果)

(a) 杭の M-φ 関係図と応答プロット点

(b) 杭の N-M 相関図と応答プロット点

図-4 地震応答解析から求まる杭頭付近の応答軸力~曲げモーメント関係(EW 方向)

○ コメント内容

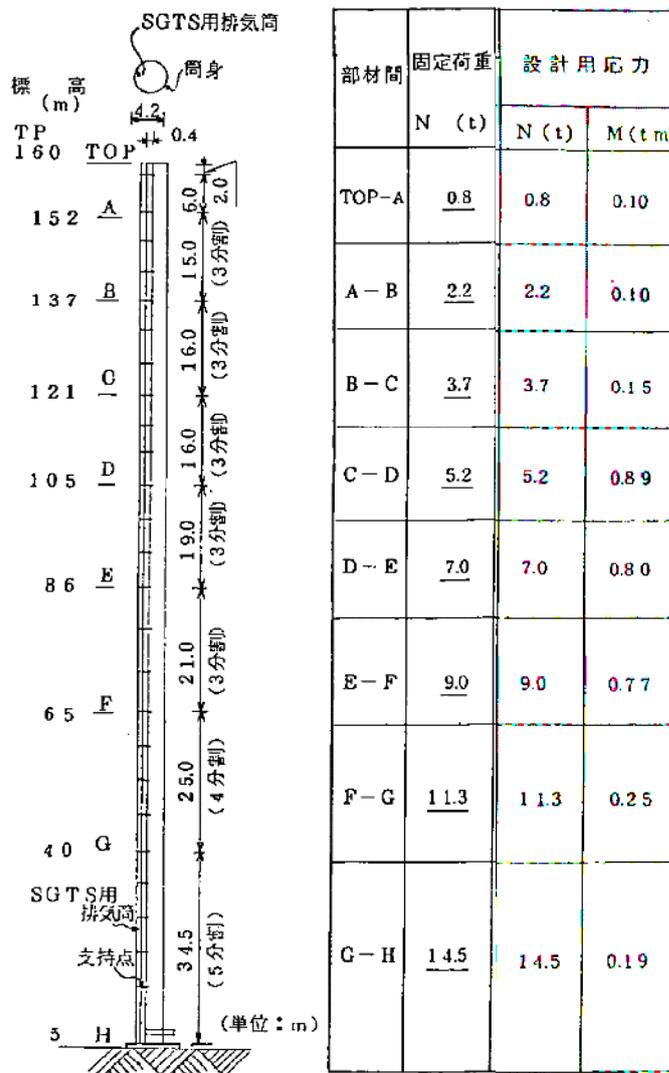
1号機のSGTSの応力解析は建設時から自重が地震時に考慮されていないのではないか。
 (平成21年7月15日 耐震・構造設計小委員会構造WG(第38回))

○ 回答

表-1に建設時のSGTS管の設計応力を示す。SGTS管の設計には高さレベルに応じた固定荷重Nが考慮されており、この固定荷重Nは高さレベルより上にあるSGTS管の自重に相当している。

なお、今回の中越沖地震に対する耐震性評価においても、同様に固定荷重を考慮して検討している。

表-1 SGTS管の設計用応力(1号機建設時)



(1号機工事計画認可申請書:参考資料7「排気筒構造設計について」より抜粋)

○ コメント内容

中越沖地震時に非常用ガス処理系(SGTS)は上下方向がフリーになっており、SGTS 管の重さが底部に全て作用するので、軸方向の自重を踏まえて検討を実施した結果を示してほしい。
(平成 21 年 7 月 15 日 耐震・構造設計小委員会構造 WG(第 38 回))

○ 回答

図-1に1号機の建設時のSGTS管脚部の詳細図を示す。図のD部に示すとおり、SGTS管脚部は筒身基礎にベースプレートとアンカーボルトにより直接支持されており、SGTS管の自重や地震時に発生する応力を筒身基礎に伝達できる構造となっている。

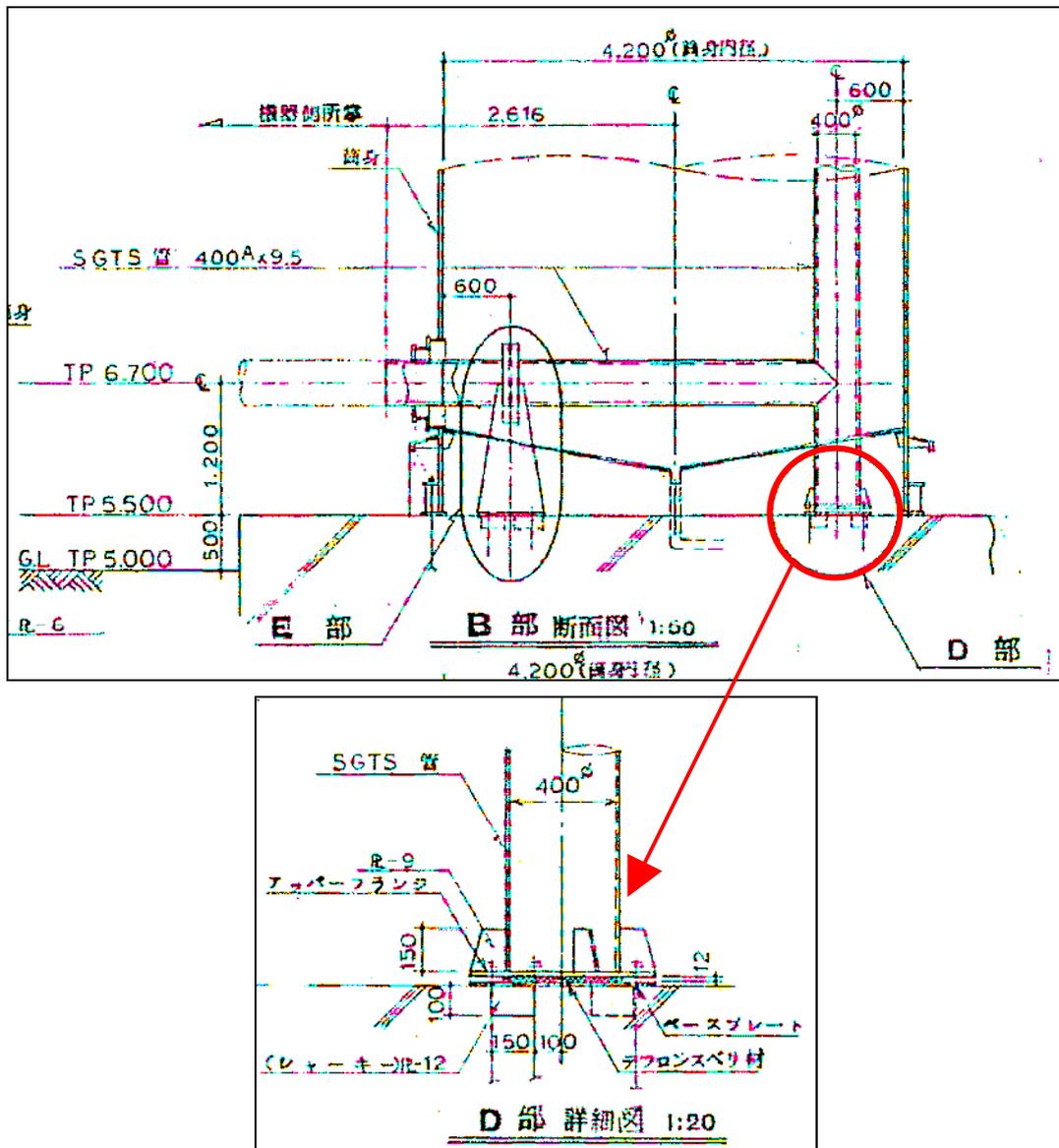


図-1 1号機 SGTS 管脚部詳細図(建設時設計図より抜粋)

なお、中越沖地震のシミュレーション解析においても、SGTS 管脚部では、地震力を上向きと下向きに検討している。上向きに地震力を考慮した場合の断面検討用軸力は 118.0kN であり、引張力は作用していない。また、軸力の大きな下向きの地震力を考慮した場合の断面検討用軸力は 167.8kN であり、ベースプレート下面に発生する応力は 0.51N/mm^2 となる。これに対して、コンクリートの短期許容応力度は 29.4N/mm^2 であり、健全性は確保されている。

(参考)

ベースプレートを無視し、SGTS 管によってコンクリートに作用する支圧応力を仮定した場合でも、発生応力は 17.85N/mm^2 であり、コンクリートの短期許容応力度を下回っていることが確認できる。

以 上