

# PC 煙 突

— 設 計 編 —

加 藤 正 治\*  
三 浦 俊 悦\*\*  
辻 村 元 義\*\*

## 1. はじめに

電源開発(株)が、沖縄県石川市に建設中の石川石炭火力発電所(156000kW×2基:昭和61年11月および63年3月運転開始予定)の煙突は、我が国初の、鉛直方向にプレストレスを導入した鉄筋コンクリート造煙突である。

建設地点は、図-1および図-2に示すように本島中央部の東海岸に位置し、沖縄電力(株)石川火力発電所(125000kW×2基)に隣接している。

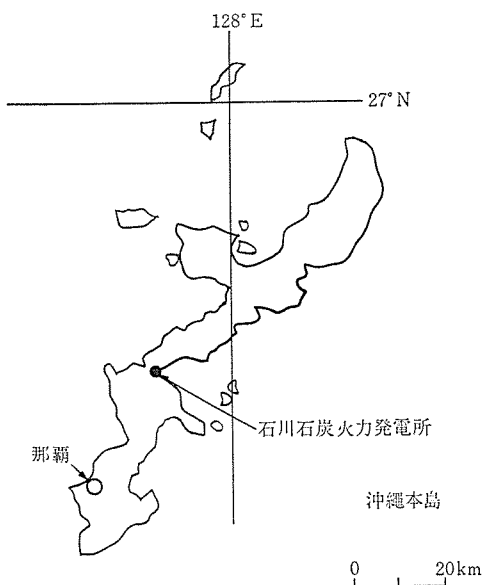
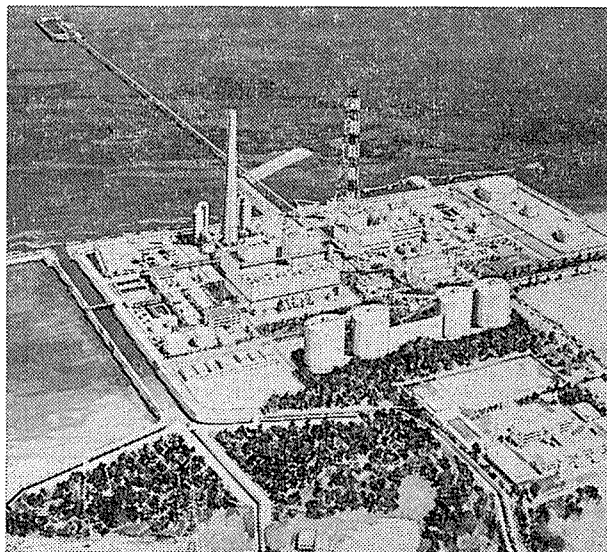


図-1 建設地点



左側、手前より石炭サイロ、本館、煙突  
右側は既設の沖縄電力(株)石川火力発電所

図-2 完成予想図

煙突工事は、施工業者が(株)大林組で、順調に進捗しており、4月末現在、外筒工事を終了した。

今回、本煙突の設計について紹介する。

## 2. 構造概要

図-3~図-6に煙突の立面、断面、平面を示す。

- ・最高部高さ:GL+170m

- ・外筒 高さ:GL+169.5m  
頂部径:10.0m  
底部径:16.0m  
頂部壁厚:30cm  
底部壁厚:40~80cm
- ・内筒 フルー:鋼製SS41φ3.5m×2本  
(ただしノズル部はFRP製)  
ライニング:耐酸キャストブル(厚70mm)  
外装(断熱材):グラスウール(厚50mm)
- ・基礎盤:杭支持による正八角形コンクリート造  
(対辺長さ35m,厚4.0m)
- ・杭:ベノト杭(φ1.5m,平均長さ約30m)
- ・支持地盤:礫混じり粘土層(N値>50)

煙突の高さ、内外筒径は排ガス量、設定吐出速度によりほぼ決定されるが、それと今回外筒コンクリートプレストレスを導入したために、従来のもよりスレンダーで、軽快なプロポーションとなった。

内筒は、常時自立しているが、地震時の水平力は、28m間隔に設けた6段のステージを介して外筒に伝達さ

\* 電源開発(株)建設部建築室長

\*\* 電源開発(株)建設部建築室

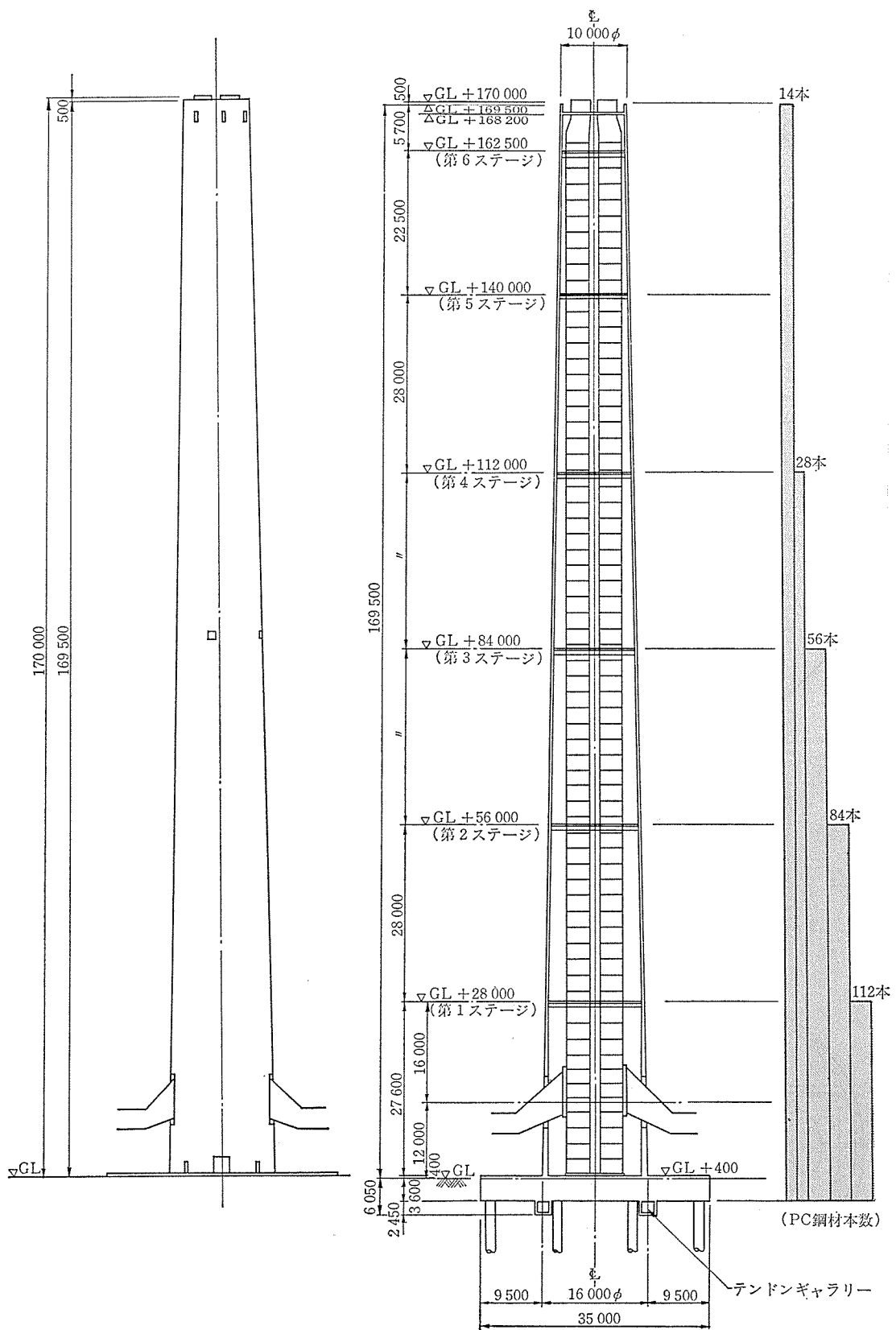


図-3 立面図

図-4 断面図

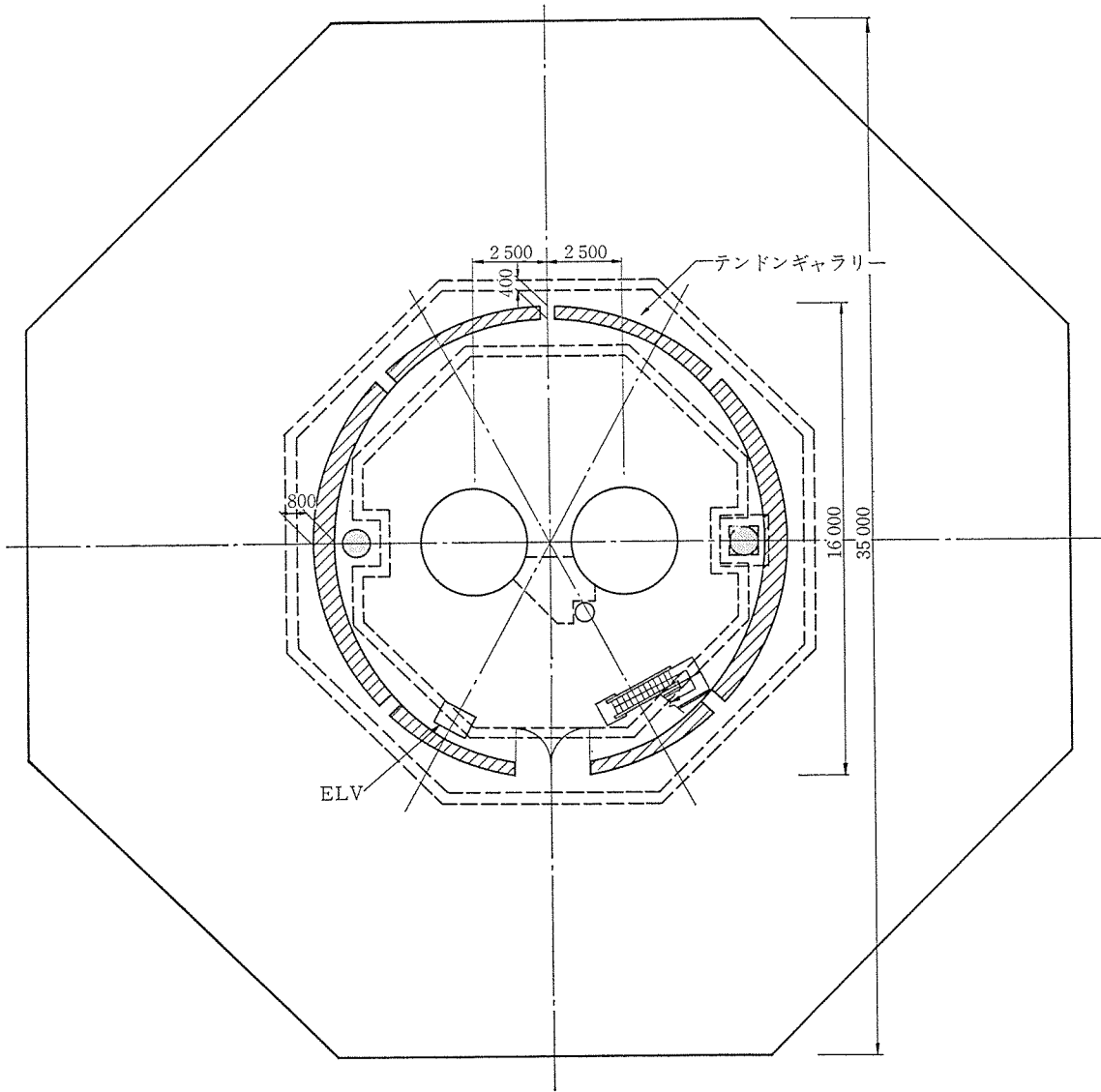


図-5 GL+400 平面図

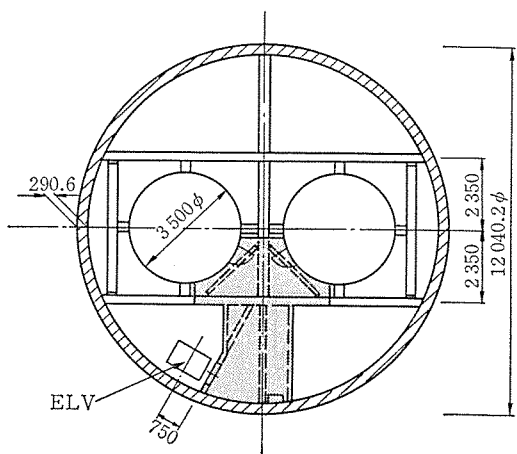


図-6 GL+11 200 平面図

れる。

基礎盤下部には PC 鋼材の緊張作業を行うためのスペ

ースとしてテンドンギャラリーを設けている。

表-1, 表-2, 図-7 および図-8 に使用材料の仕様等を示す。なお, PC 鋼材の定着装置と接合具については, 基礎盤コンクリート強度が  $300 \text{ kg/cm}^2$  以下であることと, 繰返し荷重に対する検討のために性能試験を行

表-1 使用材料の仕様

材 料	種 類	使 用 区 分
鉄 筋	SD 30	帯筋 (外筒, 杭), マット
	SD 35	主筋 (外筒, 杭)
PC 鋼 材	異形鋼棒 (D32)	外筒一般部
	より線 ( $\phi 15.2 \times 4$ )	外筒開口部周辺
コンクリート	$F_c = 240 \text{ kg/cm}^2$	マット, 杭
	$F_c = 300 \text{ kg/cm}^2$	外 筒
鉄 骨	SS 41	$t \leq 40 \text{ mm}$
	SM 41	$t > 40 \text{ mm}$

表-2 PC 鋼材の力学特性

	ゲビンデスターブ鋼棒 SBPD (95/110)	PC 鋼より線 (ディビダ ークストランド 6 AD4)
公称径	32.0 mm	15.2 mm × 4 本
公称断面積	804.2 mm <sup>2</sup>	554.8 mm <sup>2</sup>
降伏点荷重	76.4 t (95 kg/mm <sup>2</sup> 以上)	78.8 t (140 kg/mm <sup>2</sup> 以上)
引張荷重	88.46 t (110 kg/mm <sup>2</sup> 以上)	92.4 t (165 kg/mm <sup>2</sup> 以上)
リラクセーション	1.5%	1.5%
許容引張荷重	導入時 64.9 t 定着完了時 61.1 t	導入時 67.0 t 定着完了時 63.0 t
定着具詳細	図-7 参照	図-8 参照
使用部分	一般部 86 本	開口部周辺 26 本

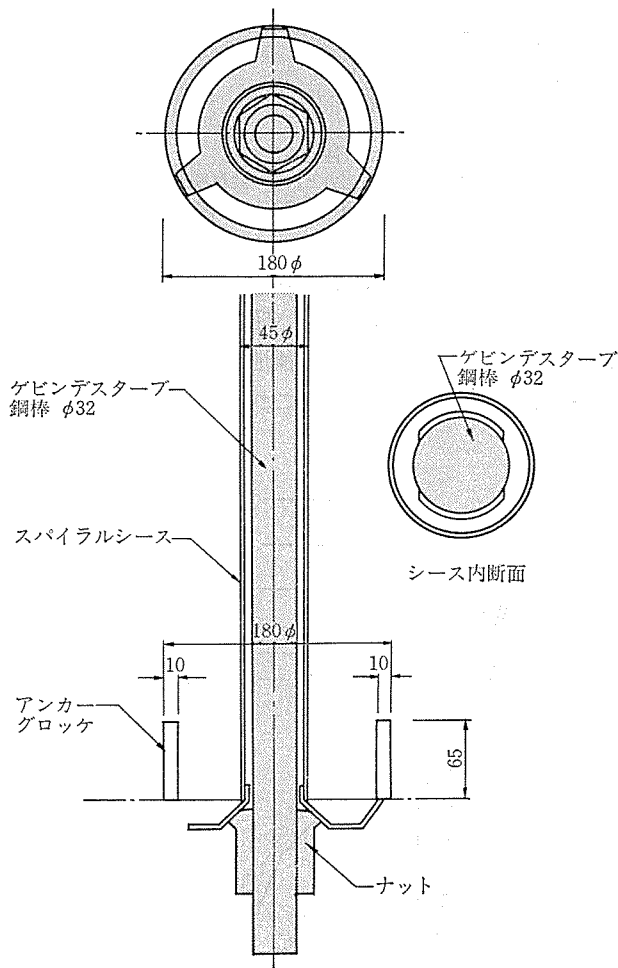


図-7 ゲビンデスターブ鋼棒定着具

い、有効性を確認している。

### 3. 設計方針

沖縄県は、我が国において比較的地震が少なく、逆に風については台風等の厳しい条件下にある。したがって風荷重により断面がほぼ決定する鋼製煙突より、地震荷重で断面が決定され、風の影響が少ない RC 造煙突の方が、本煙突の場合は設計上有利である。更に、外筒完成後は、内筒工事と周辺機械基礎工事を併行して行うことができるので発電所全体工程上有利で、また将来塗装等の維持管理が不要であることから、RC 造煙突を選定した。

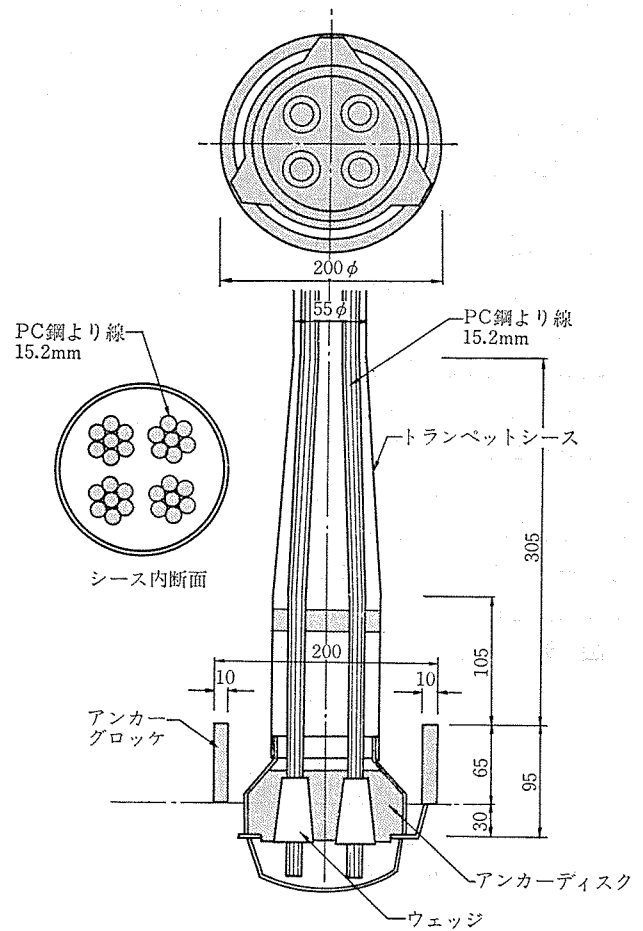


図-8 PC 鋼より線定着具

一方、沖縄県では、東北日本海沿岸地方とともに RC 造構造物の塩害による損傷が多く報告されている。

具志教授(琉球大)の論文等によれば、その要因として、まず内的要因、すなわち海砂利用等によるコンクリート自体の品質の問題が挙げられる。

これに対しては、

- 1) 細骨材の塩分含有量を 0.04% 以下にする。
- 2) W/C=55% 以下の密なコンクリートとする。
- 3) 鉄筋のかぶりを 6 cm とする。

の設計上の配慮を行うこととした。

更に外的な要因として、沖縄の気候・風土が指摘されている。亜熱帯、海洋性気候で鉄筋の腐食にとって好ましくないうえに、台風時には、平常時の数百倍の塩分が強風に乗って空気中にばらまかれ、これが細骨材の海砂中の塩分とともにコンクリート中の塩分の源泉となっている。

以上のような、鉄筋防食上不利な環境条件を勘案し、本煙突では、暴風時に直接塩分がコンクリート内部に侵入しないように、外筒にプレストレスを導入し、曲げひび割れ耐力を増すこととした。

具体的には、設計用荷重に対しては応力が曲げ引張強

◇報告(投稿)◇

度以下になること、すなわち Partial Prestressing とし、かなりの頻度でかつ持続的に繰返し応力が生じるとされる共振風速 (18.5 m/sec) 時荷重に対しては引張力が生じないこと、すなわち Full Prestressing とした。PC 部材、特に Full Prestressing の PC 部材は疲労に対して構造的に有利であることから、これによって防食とともに耐久性が期待できるものとする。

なお設計一般については、日本建築センターから「煙突構造設計施工指針 1982 年版」が最近発行され、それが改正建築基準法施行令および関連告示を踏まえつつ、解析・実験的研究より得られた最新の知見を反映したものであることから、本指針に準拠することとした。その際、プレストレス導入量が最大約 30 kg/cm<sup>2</sup> と一般の PC 構造物に比較し小さく、また PC 鋼材の配置上、偏心モーメントも生じないことから、従来の RC 煙突に準じて設計を行った。

図-9 に、設計のフローを示す。

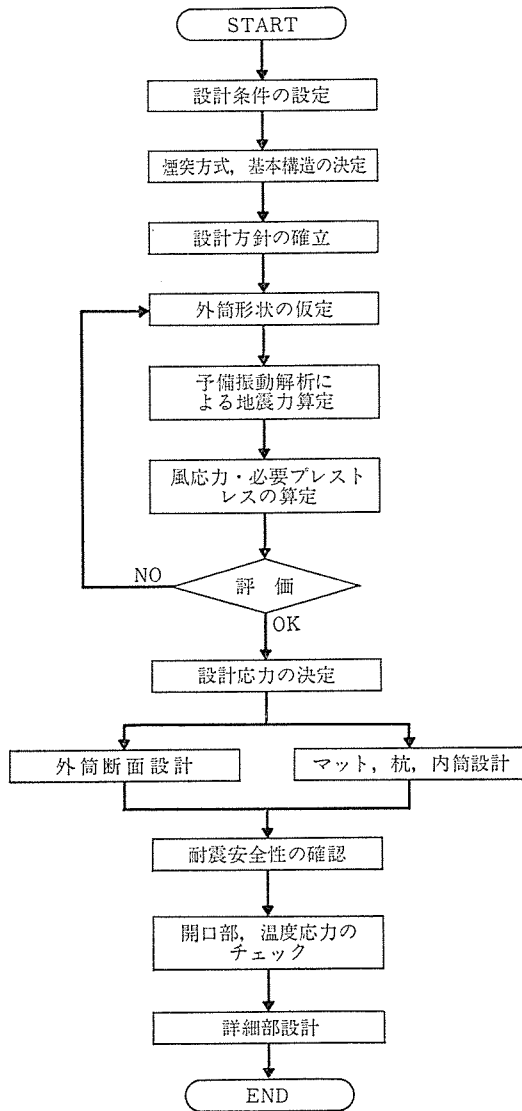


図-9 設計フロー

#### 4. 外筒設計用応力

4章より6章は、外筒設計に関して述べる。表-3 に設計用応力の組合せを示す。

表-3 応力の組合せ

応力の種類	想定する状態	応力の組合せ	
長期	常時	$G+P+P'+T$	
短期	暴風時	風方向	$G+P+P'+W_1$
		風直角方向	$G+P+P'+W_2$
	地震時		$G+P+P'+K$

G: 固定荷重による応力  
 P: 積載荷重による応力  
 P': プレストレスによる応力  
 T: 熱応力  
 W<sub>1</sub>: 風方向荷重による応力 (沖縄県5割増)  
 W<sub>2</sub>: 風直角方向荷重による応力と、その共振風速に対応する風方向荷重による応力とを同時に考慮した合成応力  
 K: 地震力による応力

短期応力については、図-10 および図-11 に示すように、建設省告示第 1104 号 (昭和 56 年) の地震力によって生じるモーメントが各種地震波入力時や暴風時のモーメントを包絡するため、これを設計用モーメントとした。

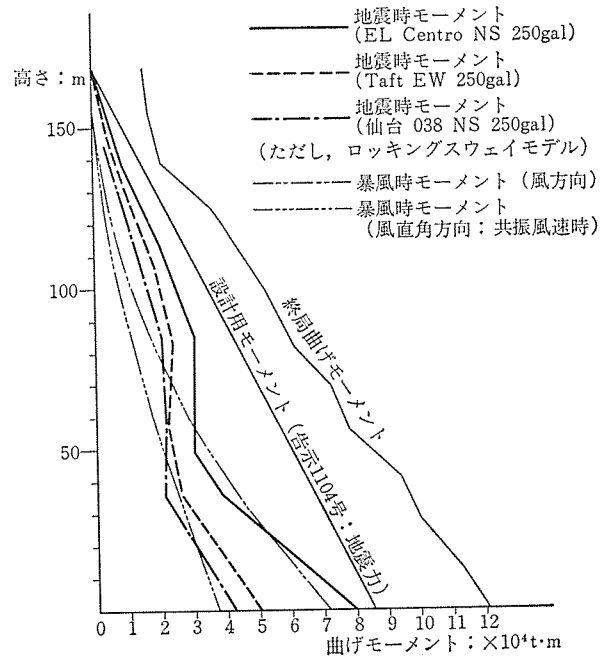


図-10 設計用曲げモーメント

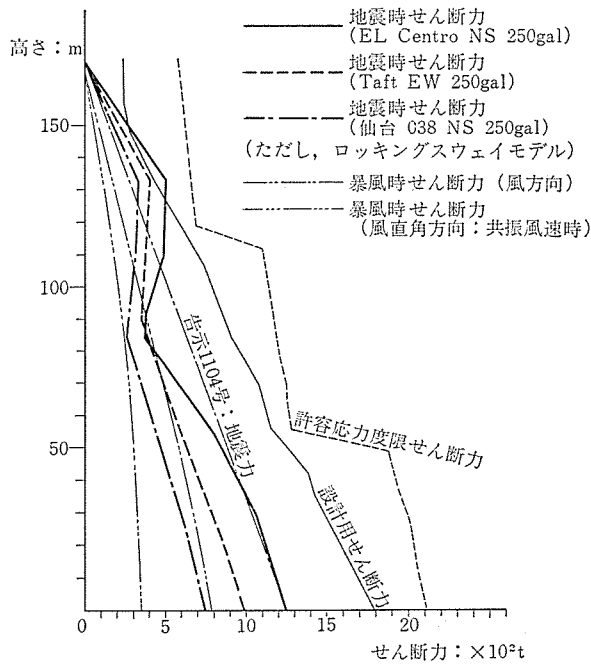
ここで、上記告示による応力とは、せん断応力  $Q_i = C_{si} \cdot W$  (kg) ただし、設計用せん断力は、これに割増し係数を掛けたものである

曲げモーメント  $M_i = 0.4 H \cdot C_{si} \cdot W$  (kg·m)

H: 煙突の地盤面からの全高さ

C<sub>si</sub>: 煙突地上部分の高さ方向の応力の分布を表わす係数で、計算しようとする当該煙突の部分の高さに応じて次の式に適合する数値

$$C_{si} \geq 0.3 Z (1 - h_i/H)$$



図一11 設計用せん断力図

Z: 施行令 88 条第 1 項に規定する Z の数値  
 h<sub>i</sub>: 煙突の地上部分の各部分の高さ (m)  
 W: 煙突地上部分の固定荷重と積載荷重との和 (kg)

地震応答解析は、筒身を 25 質点に置換し、外筒の曲げせん断剛性を評価した振動モデルを作成した。煙突は典型的な静定構造物であるため、比較的大きい入力 (250 gal) に対しても弾性内に収まるものとした。減衰は 1 次、2 次振動に対して 2% とし、3 次以上の高次に対しては、2 次を 2% とした内部粘性型として各次の減衰定数を算定したが、これは当社の既設 RC 造超高煙突の振動試験結果に基づいたものである。プレストレスが振動性状に及ぼす影響は、導入量が小さいことから少ないとした。

なお、耐震安全性の確認では、最終決定断面での弾性計算のほか、参考として 350~400 gal 入力の弾塑性解析を行い、変形量等をチェックしている。

熱応力は、内筒と外筒の間が自然換気されるため、ほとんど生じない。換気計算プログラムによるとコンクリート壁の内外温度差は、一般部で 8°C (冬期) 以下、保温材 (グラスウール) がいないためにふく射熱を受ける頂部 FRP 部分で 20°C (冬期) 以下となっており、そのための補強は特に必要としない。

### 5. 風荷重とプレストレス導入

風荷重の算定は、上記指針に準拠した。ただし、風方向荷重については「沖縄県建築関係条例及び規則」に基づき地域係数 1.5 としている。

(風方向荷重)

$$P = c \cdot q \cdot z \cdot A$$

P: 風方向風荷重 (kg/m<sup>2</sup>)

c: 風力係数 0.7

q: 速度圧 (kg/m<sup>2</sup>),  $q = 60 \sqrt{h}$  ( $h \leq 16$  m)

$q = 120 \sqrt[4]{h}$  ( $h > 16$  m)

z: 地域係数 1.5

A: 基準面積 (m<sup>2</sup>)

(風直角方向荷重)

$$P_r = c_r \times q_r$$

P<sub>r</sub>: 風直角方向荷重 (kg/m<sup>2</sup>)

c<sub>r</sub>: 共振時風力係数

q<sub>r</sub>: 共振時速度圧 (kg/m<sup>2</sup>)

ここで、

$$c_r = \frac{1.5}{\sqrt{\eta}} = 10.6$$

$$V_r = \frac{D}{S_r \times T} = 18.5 \text{ (m/s)}$$

$$q_{r0} = \frac{1}{16} V_r^2 = 21.3 \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

$$q_r = 1.5 \times q_{r0} \times \frac{h}{H} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

η: 煙突の減衰定数 0.02

S<sub>r</sub>: ストローハル数 0.25

V<sub>r</sub>: 共振風速

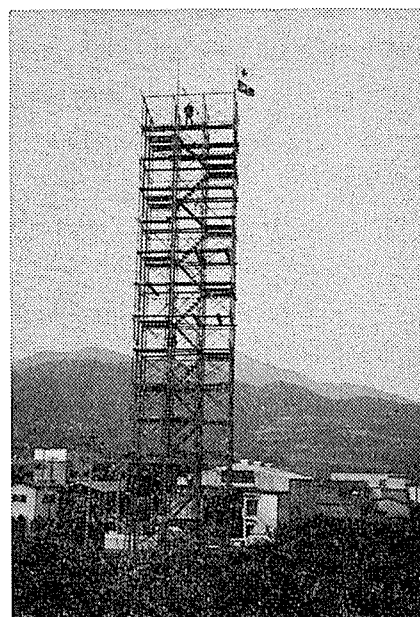
D: 煙突の全高さの 2/3 における外径 (m)

T: 煙突の 1 次固有周期 2.6 (sec)

q<sub>r0</sub>: 共振時基準速度圧

図一12 の右側は、上記風荷重を煙突が受けた時の曲げモーメントを示し、左側は同様に引張応力度をプレストレス導入量 (太い実線) と比較して示したものである。

なお、外筒コンクリートの曲げ引張強度は、



写真一 鉛直 30 m グラウト注入試験

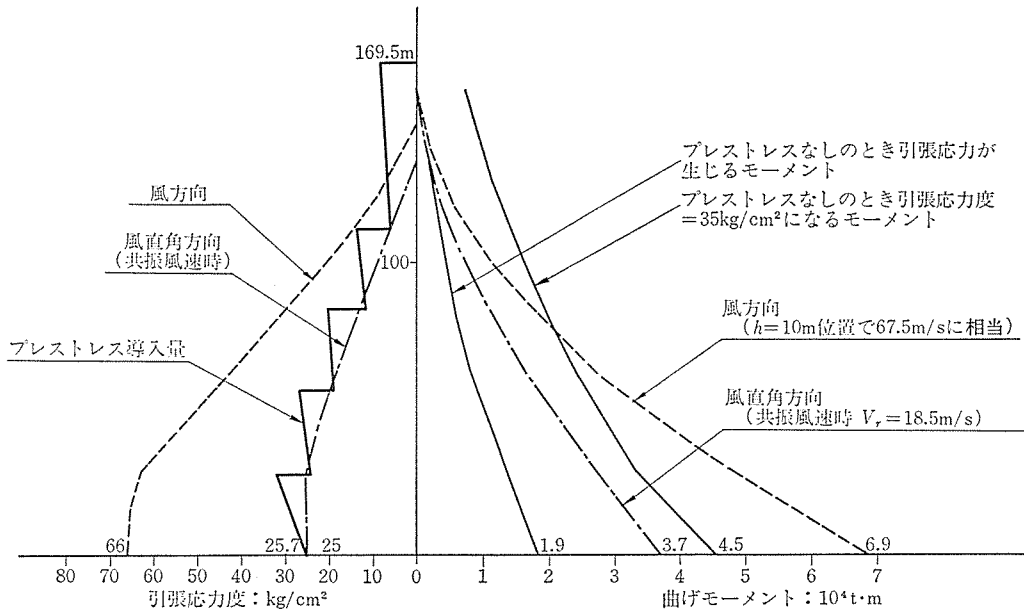


図-12 風荷重による曲げモーメントと引張応力度およびプレストレス導入量

$$0.07 F_c \times \frac{5}{3} = 35 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

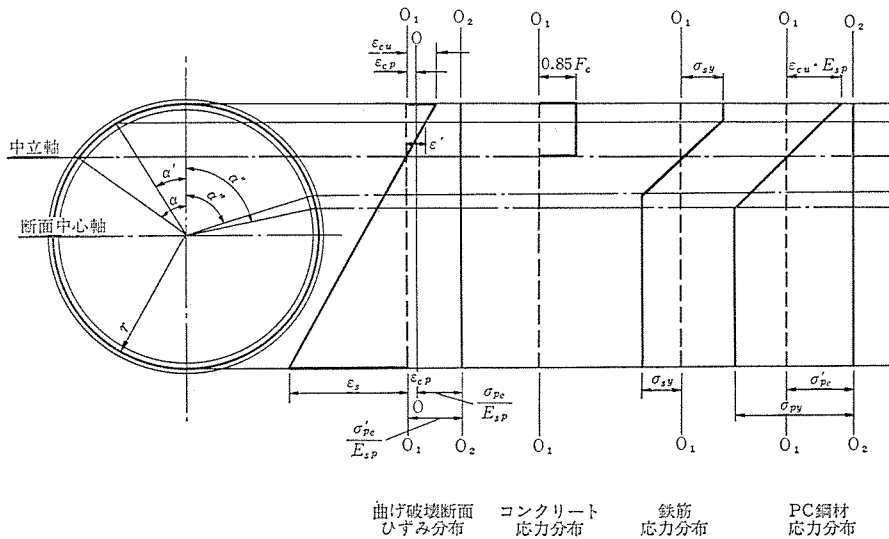
$F_c$ : コンクリート設計強度 300 (kg/cm<sup>2</sup>)

としている。

プレストレスの導入はボンド工法とし、PC 鋼材とコンクリートとの付着性を考慮して、太径異形鋼棒を使用することとした。ただし、コンクリート打設はスリップフォームによるため、施工上の理由で開口部周辺の一部

(112 本のうち 26 本) は PC 鋼より線を使用した。

図-4 に、PC 鋼棒の配置および本数を示す。緊張順序は、外筒立上げ中に PC 鋼材のアンカー部のコンクリートが所定の強度に達した下部鋼材より、順次テンドンギャラリーから行うこととしている。またグラウトは外筒コンクリート完了後に 5 か所のステージを利用して行う。鉛直グラウトについては、当初、健全性が懸念されたが、写真-1 のような注入試験により問題のないこと



$E_c$ : コンクリートのヤング係数

$E_s$ : 鉄筋のヤング係数

$E_{sp}$ : PC 鋼材のヤング係数

$n$ : 鋼材とコンクリートのヤング係数比

$\sigma_{py}$ : PC 鋼材の引張降伏点応力

$\sigma_{pe}$ : PC 鋼材の有効引張応力度

$\sigma_{pe}' = \sigma_{pe} + E_{sp} \cdot \epsilon_{cp}$

$\sigma_{sy}$ : 補強鉄筋の降伏点応力 (=35 kg/mm<sup>2</sup>)

$\epsilon_{cu}$ : コンクリートの圧縮破壊ひずみ (=2.5×10<sup>-3</sup>)

$\epsilon_{cp} = \sigma_{cp} / E_c = P_e / A_r \cdot E_c = \sigma_{pe} / E_s \cdot n P_p / \{1 - P_p + (n-1)$

$P_p\}$ : コンクリートのプレストレイン

$\epsilon' = \sigma_{sy} / E_s$ : 補強鉄筋の圧縮降伏点ひずみ

$\sigma_{cp}$ : コンクリートの有効プレストレス

$P_p$ : PC 鋼材の鉄筋比

$P_s$ : 補強鉄筋の鉄筋比

図-13 断面内のひずみと応力の分布

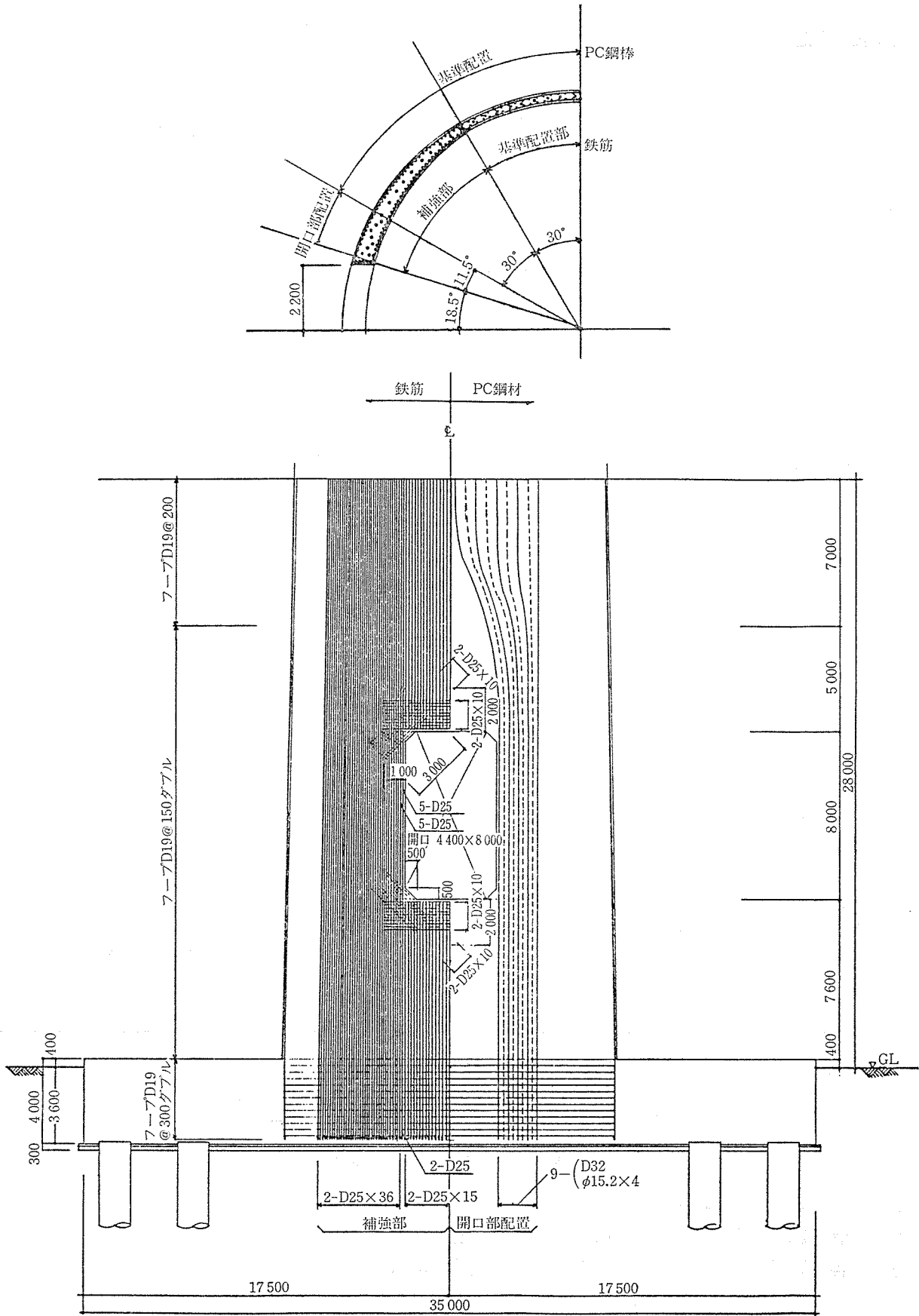


図-14 開口部の鉄筋および PC 鋼材の配置



## ◇報告(投稿)◇

を確認している。

### 6. 断面算定

一般部の断面算定は「鉄筋コンクリート煙突の構造設計指針」(日本建築学会)等の一般的手法に基づいたが、軸力には自重のほかにはプレストレス力を加えた。

また、PC鋼材は設計プレストレスを45t/本と余裕を持たせ、緊張状態から降伏までの応力が鉄筋の降伏応力と同程度以上にしたため、断面算定上、鉄筋と同様に扱った。このような仮定が妥当であることは、図-13に示す断面内の応力のつり合いから算出した終局モーメントと、結果を比較することで確認している。

開口部周辺の補強は、上記指針に基づいて行くとともに、FEM解析による検討も行った。開口部の鉄筋およびPC鋼材の配置を図-14に示す。

### 7. おわりに

RC造の超高煙突は、当社を含め既にかんりの実績があるが、今回の設計は、このような経験と耐震設計に関する研究により得られた最新の知見を踏まえたうえで、建設地点の気象条件等の地域性を考慮したものである。

プレストレスの導入により、機能が改善されるとともに、工事費も上部構造が軽量化するために基礎工事費が低減する等で、従来のものより若干経済的になっている。

なお、本煙突では、設計の妥当性を検証するとともに今後出現すると思われる、より高い煙突や塔状建造物の合理的な設計法を開発するための資料を得るため、風向・風速、暴風時の加速度応答およびコンクリートひずみ、温度の計測を行うことにしている。

最後に、本煙突の設計は日本建築センターの評定を受けたもので、その際、(株)開発設計、(株)武藤構造力学研究所の協力を得た。

また、基本計画の段階で、東京電機大中野教授、建設

省建築研究所岡本先生に貴重な御意見をいただくとともに、ピー・エス・コンクリート(株)からは、PC構造物に関する多くの参考資料の提供を受けた。

ここに深く感謝の意を表する次第です。

### 参 考 文 献

- 1) 電源開発(株):石川石炭火力発電所煙突新設工事構造設計概要書(評定資料)'84年2月
- 2) 電源開発(株):松島火力発電所2筒身集合型煙突新設工事構造設計概要書(評定資料)'78年6月
- 3) 電源開発(株):松島火力発電所2筒身集合型煙突強制振動試験報告書'80年9月
- 4) 日本建築センター:煙突構造設計施工指針 1982年版
- 5) 日本建築センター:プレストレスコンクリート造設計施工指針 1983年版
- 6) 日本建築学会:プレストレスコンクリート設計施工標準・同解説
- 7) 日本建築学会:鉄筋コンクリート煙突の構造設計指針
- 8) 具志幸昌:沖縄県における鉄筋コンクリート建造物の耐久性、「建設技術講演会」資料'80年3月
- 9) 小林茂敬:コンクリート構造物におけるひびわれの発生と鉄筋の腐食,土木技術資料16-11(1974)
- 10) 岸谷孝一:鉄筋コンクリート構造物における鉄筋の腐食について,コンクリートジャーナル,Vol.12, No.2, Feb.(1974)
- 11) 角田与史雄:鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅,コンクリートジャーナル,Vol.8, No.9, Sept.(1970)
- 12) 野口 功ほか:RC桁フルおよびパーシャルPC桁の疲労強度について,プレストレスコンクリート,Vol.6, No.1, February 1964
- 13) Franz, Knoll et al.: Prestressing the CN Tower, Jour. of P.C.I., May-June 1976(荒木毅訳)
- 14) 岡本 伸:プレストレスコンクリート建造物の耐震性,プレストレスコンクリート, Vol.21, No.4, Aug. 1979
- 15) 六車 照:アンボンドプレストレスコンクリート(IV),コンクリート工学,Vol.19, No.7, July 1981
- 16) 久富 洋ほか:ある4種PC鋼棒の破断事故から,清水建設研究所報第12号,昭和43年10月
- 17) 榎田博臣:PC杭の破壊荷重の計算法,プレストレスコンクリート,Vol.8, No.3, Aug. 1966

【昭和59年12月18日受付】

## ◀刊行物案内▶

### PCくいの基礎の最近の進歩

—PCくいの正しい使い方—

体 裁: A4判 246ページ

定 価: 2000円(会員特価1800円) 送 料: 800円

内 容: 1) PCくい, 2) PCくい基礎の設計, 3) PCくいの施工, 4) 超高強度コンクリートくい, 超大径くい

お申込みは代金を添え,(社)プレストレスコンクリート技術協会へ