

プレストレストコンクリート圧力容器の緊張実験とその力学的考察

太 田 達
(原子力部)
磯 畑 脩

§ 1. ま え が き

これは去る昭和38年11月、オリエンタルコンクリートKK多摩工場で行なったプレストレストコンクリート造圧力容器の緊張実験の概況と、円筒構造物としての力学的な機構に関する若干の検討結果について述べたものであって、その内容は以下のとおりである。

§ 2. 緊張実験

2.1 実験概要

緊張試験体は、wylfa—A 1型500MWガス冷却型原子炉の一次系プラントを内蔵するプレストレストコンクリート造円筒形圧力容器(外径30m, 壁厚3.5m)を想定して、圧力容器の円筒胴部を代表すると考えられる次のような寸法のコンクリート環状体である。

外 径	25m
内 径	19m
壁 厚	3m
壁 高	0.6m

上記試験体は、さらに外側上下に座屈防止のための補強壁と、周方向緊張材定着用の補助壁(バットレス)が4箇所にあつて、コンクリート基礎上に設置されている(図-1, 2, 写真-1, 2)。

基礎は円周に沿つて24箇所があり、躯体はこれらの基礎に対して200×200, 厚さ20mmの支台受座鋼板2枚で設置されており、座板間には躯体の変形を拘束しないようにグリースが塗着してある(写真-3)。

サドルは円周方向の緊張力を圧縮力として躯体に伝達させるところの中間支持用鋼製棒金物のことで、バットレス間に4×4個, バットレス内に2×4個, 合計24個が等間隔に取付けてある(図-2-b, 写真-4)。

A. コンクリート設計:

(1) レディミクストコンクリート

所要圧縮強度	350kg/cm ² (調査設計400kg/cm ²)
水セメント比	35.8%
スランブ	6~7cm
セメント	小野田普通ポルトランドセメント
砂 利	多摩川 最大25mm
砂	相模川 最大5mm
養生	クレハロンラテックスを噴霧器で散布

(2) バットレスのコンクリート

オリエンタルコンクリートKK多摩工場内パッチャープラント製

所要圧縮強度	560kg/cm ²
水セメント比	34%
スランブ	2~4cm
セメント	小野田早強ポルトランドセメント
骨 材	本体と同じ

本体コンクリートは9月29日、バットレスのコンクリートは本体より約4週後の10月24日(I, IV), 28日(III), 30日(II)にそれぞれ打設された(表-1参照)。

B. プレストレス設計:

想定する原子炉圧力容器の設計条件(外径30m, 壁厚3.5m)で、プレストレストコンクリート円筒体に内圧30kg/cm²が運転ガス圧力として加わるものとする。

このとき円筒に生ずる周方向引張応力は、

内面部 115.5kg/cm² (最大)

外面部 85.6kg/cm² (最小)

これを打ち消すに要する外面圧力に相当する外周に沿った緊張圧縮力は、2,170tonである。

緊張材は7本撚り12.4mmφ鋼線(JIS G-3536, SW PC-7)が使われる。緊張方式はフレシネ式を採用し、12ストランドを1ケーブルとして、ケーブル単位に緊張する。緊張材の有効引張応力は、

ストランド断面積 92.9mm²

初引張応力度 σ_{pt} 115kg/mm²

(降伏応力度は151kg/mm²)

から、諸損失低減量、すなわち、

コンクリートの弾性変形による減少量 5kg/mm^2
 PC鋼材のリラクゼーションによる減少量 $0.05\sigma_{pt}$
 定着時の端部におけるセット量 6.7kg/mm^2
 サドル上での摩擦による減少量 $0.039\sigma_{pt}$
 ジャッキ内の摩擦による減少量 $0.05\sigma_{pt}$

を差し引けば、 87.3kg/mm^2 となる。前記の緊張圧縮力に対するケーブル所要本数は268本であるが、試験体寸

法、緊張方式(2単位)、サドル型式(4段)を考慮して、実験では240本(4段5層)が採用された。これは、 $87.3 \times 92.9 \times 240 = 1,946,000\text{kg}$ の緊張力となる。この緊張力によって生ずる試験体の周方向圧縮応力度は、内面、外面でそれぞれ次のとおりである。

$$\sigma_{\max} = 123.1\text{kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\min} = 97.6\text{kg/cm}^2$$

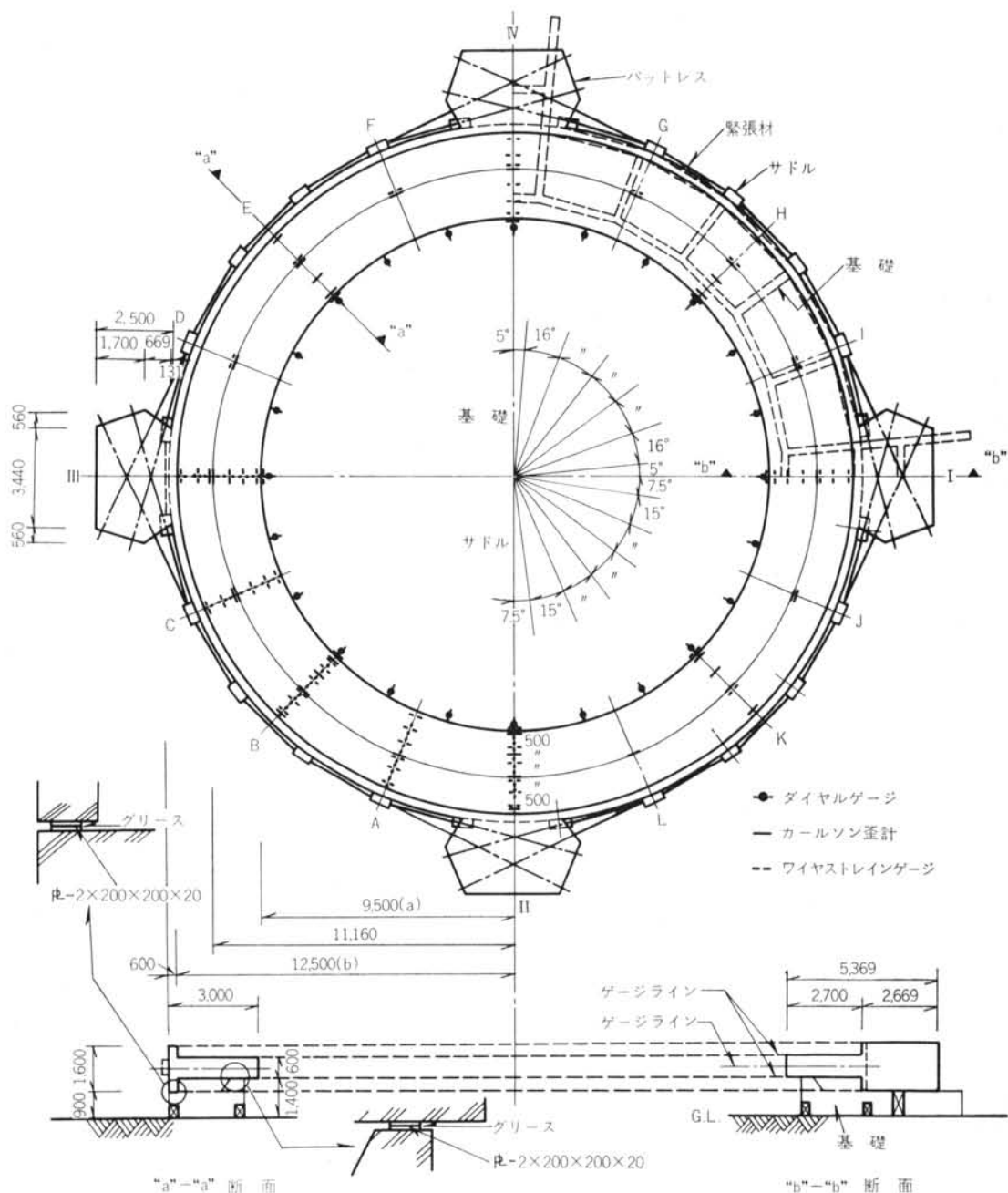


図-1 試験体概要と測定点

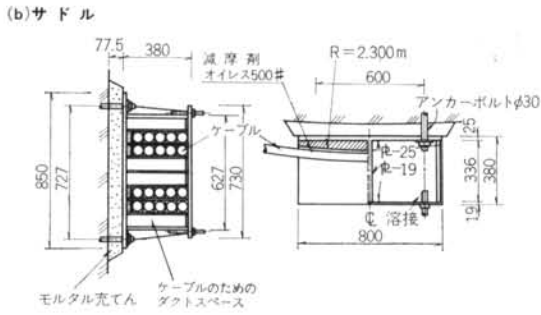
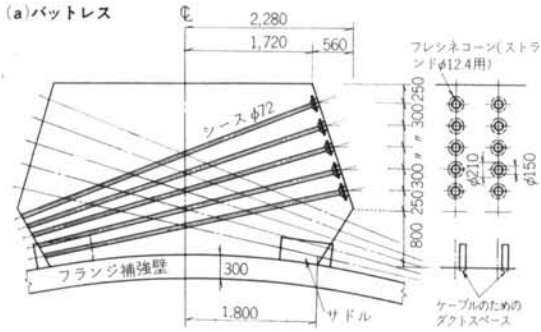


図-2 サドルおよびバットレスの詳細図

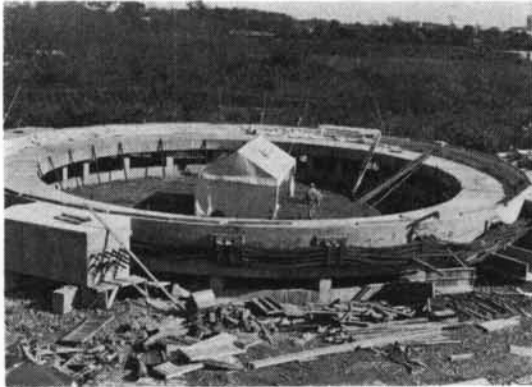


写真-1 試験体の全景



写真-2 シースとダクトとバットレス内の配筋

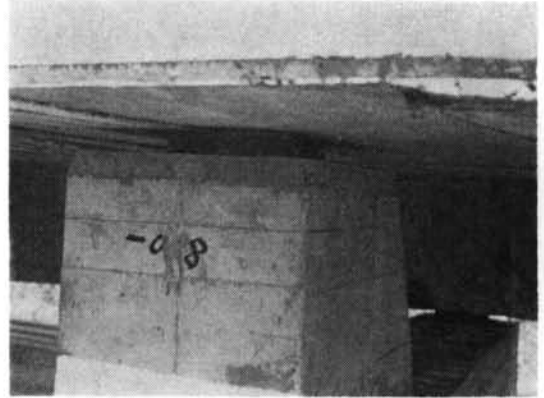


写真-3 基礎上部と試験体下面

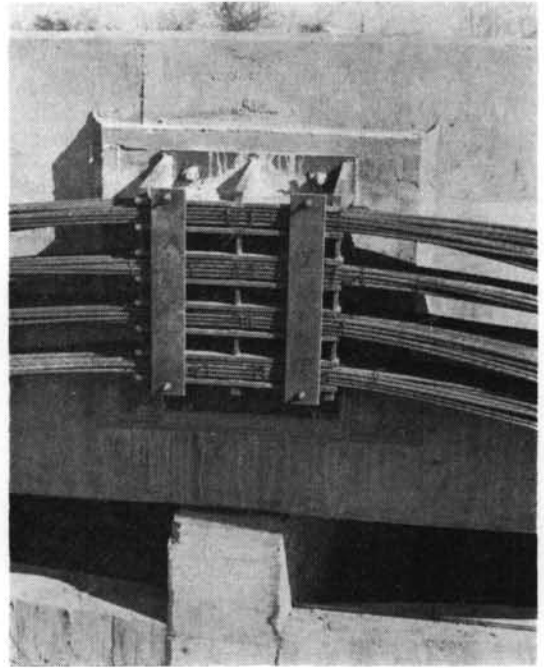


写真-4 サドル付近

	軀 体	バットレス
圧縮強度 f_c : kg/cm ²	410 (28日) 368 (180日)*	535 (28日) 327 (150日)**
静弾性係数 E_c : kg/cm ²	2.98 × 10 ⁵ (28日) 3.05 × 10 ⁵ (50日)	—
ポアソン比 : ν	0.17 (50日)	—

* : 壁厚中央付近上下60cmコア抜取平均値

** : 中央上面30cmコア抜取平均値

() : 材令

表-1 コンクリート試験結果

2.2 実験方法

ここでは緊張方法と測定方法について概要を述べる。

A. 緊張方法：

ストランド12本を1ケーブルとする20ケーブルを90°間隔に設けたバットレスのうち、相対する1組を基準に半周ずつ交互に巻きつけ、20周にする。

次に、フレシネジャッキSTUP165を4台使用し、1組のバットレスの両面より1周ずつ同時緊張定着する。このとき、他の1組のバットレスは緊張材が貫通するだけである。この緊張作業は2組のバットレスについて交互に行なわれる。

ケーブルの配置およびその緊張順序は、それぞれ、**図-1**、**図-3**に表わしてある。また、この作業の様子は**写真-5**に示しておいた。

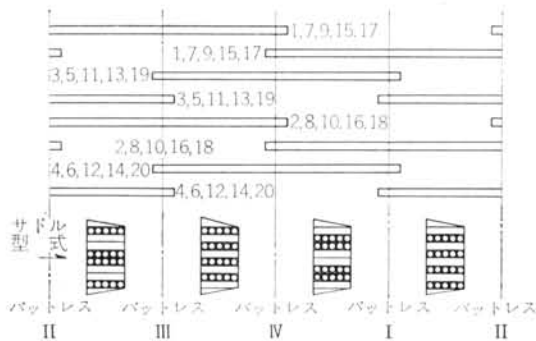


図-3 ケーブルの緊張順序(1, 2, …, 20は順序を示す番号)



写真-5 フレシネジャッキ装置

B. 測定方法：

この緊張実験において、以下の4項目について測定した(**図-1**参照)。

(1) 緊張時の試験体の径方向変位量

試験体内面中心線上の24個所にダイヤルゲージを装置して、ケーブル緊張ごとに記録した(夜間時の値も測定

した)。この測定では、コンクリートの弾性変形、硬化収縮、クリープ、緊張材のリラクゼーションによる塑性変形、温度収縮または膨脹、剛体変位等を含んだものが記録される。

(2) 緊張時の試験体の径方向および周方向歪量

バットレス位置を含む16個所について周方向歪を、4分の1円について径方向歪を測定する。周方向はカールソン歪計を埋設し、ワイヤストレインゲージ(ポリエステルベース60mm)をコンクリート上・下面に接着した。径方向はワイヤストレインゲージを使用した。

これらのゲージはすべて緊張ごとに測定し、ストレインゲージの歪は電子管式自動平衡器5台で記録した。ストレインゲージによる測定は緊張作業時の値であり、カールソンメーターの測定には、夜間を含む緊張作業中止時の値も含まれている。

(3) 緊張後の試験体の挙動

前記カールソンメーターにて定期的に計測する。

(4) 緊張力解放時の試験体の挙動

雄コーンを抜取ることによって、ケーブル緊張力を解放するときの挙動を調べる。

歪はカールソンメーター、変位はダイヤルゲージにて測定する。

2.3 測定結果

緊張作業は11月13日より3日間かけて行なわれた。13日はケーブル1~4、14日は5~11、15日は12~20となっている(**図-3**参照)。

この期間における外気温、試験体の表面温度および内部温度の測定結果を**図-4**に表わしておいた。緊張実験は屋外で行なわれ、実験期間中は晴または曇で、格別、天候には禍されなかった。本期間中におけるコンクリートの内部温度は部位、上下ともに少偏差で、平均10.8°Cであった。

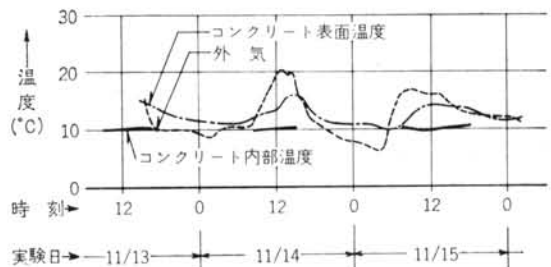


図-4 温度測定結果

本緊張時の変形と歪の記録は、**図-5**、**6**、**7**、**18**に表わしてある。

緊張力解放は、雄コーンを抜き取ることによって行な

う。この場合、雄コーン取り出し操作に対してストランドの十分な伸び代が要求されるので、一端固定、他端ケーブル片引きにより取り出すことになる。この抜取操作順序は省略する。この間、カーソンメーターとダイヤルゲージでそれぞれ測定したが、作業も計測も雨雪に悩まれ、また変位に関しては測定値が不十分であるので、割愛する。

歪の変化の様子は図-17に示してある。

この時期におけるコンクリート内部温度は平均 3.2°Cであった。

図-17には緊張力解放時までの歪の変化と、本緊張から約1年後の記録を表わしておいた。

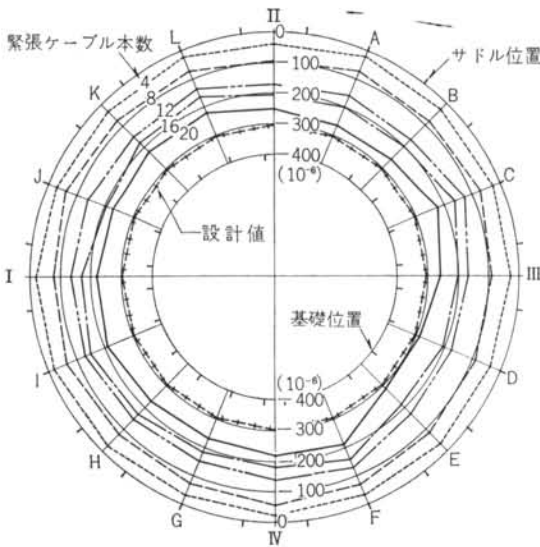


図-6 周方向歪 (ϵ_{θ}) 分布: カールソン歪計値

2.4 摩擦試験

これは、ストランドとサドル間の摩擦係数の測定と、摩擦低減に対する減摩剤の効果を調べる目的で、緊張実験に使用した試験体を利用して行なったものである。

試験方法は、各サドル間にロードセルを入れた $\phi 12.4$ mm ストランド1本を、パットレス I, II, III の半周に配置して、一方を固定し、他端よりセンターホールジャッキで片引きするときの各サドル間の引張力を測定した(図-8)。荷重は緊張側で約 5 ton まで掛け、1 ton ごとに測定する。これを次の3通りについて、各々3回ずつ実施した。

- (1) ストランドとサドル間に減摩剤を使用しない場合。
- (2) ストランドとサドル間に2枚の鉄板を入れ、その間にグリースを塗った場合。
- (3) 同じく、グリースの代りにクラノックコンパウンド No. 2(日石製)を塗った場合。

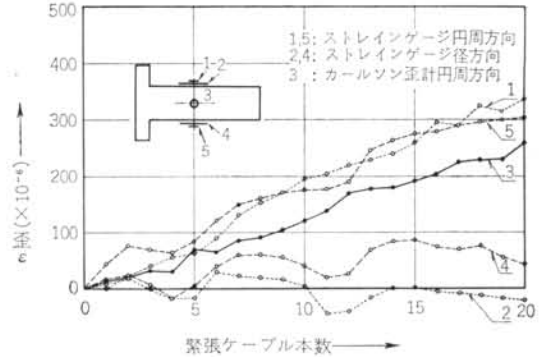


図-5 応力-歪曲線 (パットレス II 位置)

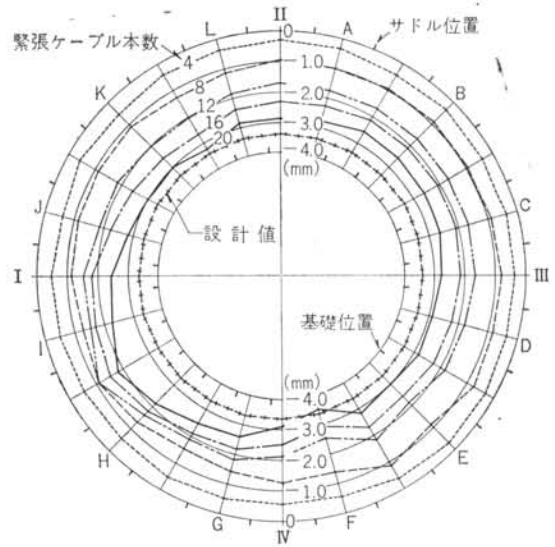


図-7 径方向変位 (u_r) 分布

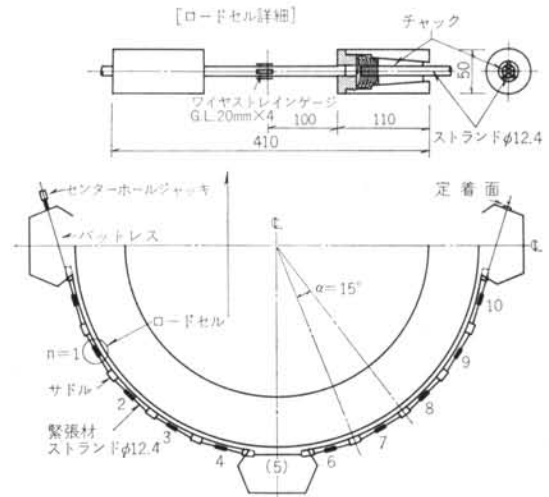


図-8 摩擦試験方法

実験結果を 図-9 に示しておいた。

上記(1)~(3)に対して、

(1) $\mu=0.35\sim0.45$ (dry friction)

(2) $\mu=0.20\sim0.30$ (grease)

(3) $\mu=0.05\sim0.10$ (cranoc compound No. 2)

程度であるが、初回が最も値が低く、回数がふえるにしたがって増加する傾向にある。

ロードセルの精度を顧慮しても、各サドルには相当の摩擦係数のばらつきがみられる。

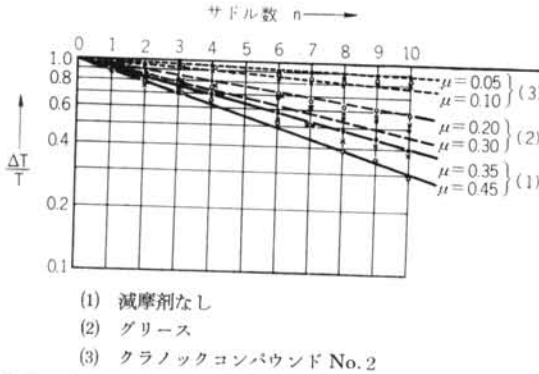


図-9 摩擦試験結果

§ 3. プレストレストコンクリート 円筒形構造物としての解析

3.1 コンクリート厚肉円筒の弾性応力および歪

外圧として $-p$ を受ける厚肉円筒 (自由円筒) の応力, 歪に関する一般式は、次のとおりである (図-10参照)。

$$\sigma_r = \frac{pb^2(r^2 - a^2)}{(b^2 - a^2)r^2} \quad \text{.....(1)}$$

$$\sigma_\theta = \frac{pb^2(a^2 + r^2)}{(b^2 - a^2)r^2} \quad \text{.....(2)}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{du_r}{dr} = \frac{1}{E_c} (\sigma_r - \nu\sigma_\theta) \\ &= \frac{pb^2 \{ (r^2 - a^2) - \nu(a^2 + r^2) \}}{E_c(b^2 - a^2)r^2} \quad \text{.....(3)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_\theta &= \frac{u_r}{r} = \frac{1}{E_c} (\sigma_\theta - \nu\sigma_r) \\ &= \frac{pb^2 \{ (a^2 + r^2) - \nu(r^2 - a^2) \}}{E_c(b^2 - a^2)r^2} \quad \text{.....(4)} \end{aligned}$$

また、径方向変位は次式で表わせる。

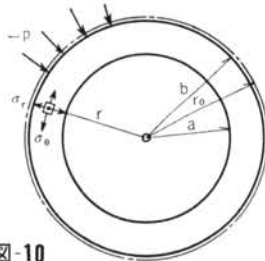


図-10

$$u_r = \varepsilon_\theta \cdot r = \frac{pb^2 \{ (a^2 + r^2) - \nu(r^2 - a^2) \}}{E_c(b^2 - a^2)r} \quad \text{.....(5)}$$

ここに、

$-p$: コンクリート外面における等分布外圧

a, b : 厚肉円筒の内径および外径

σ_r, σ_θ : 厚肉円筒の径方向および周方向応力

$\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$: 厚肉円筒の径方向および周方向歪

ν : ポアソン比

3.2 プレストレストコンクリート厚肉円筒の塑性歪による緊張材の緊張力損失

$$T_0 = -pr_0d \quad \text{.....(6)}$$

の外周緊張力を受けるコンクリート厚肉円筒の塑性歪による緊張力変化を考える。

塑性歪を生ぜしめる原因としては、コンクリートの硬化収縮、クリープ、および緊張材のリラクゼーションがあり、これらによる緊張材の緊張力損失量を、それぞれ $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$ とおけば、全損失量 ΔT は、 $\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3$ にて表わすことができる。ここに、

r_0 : 円筒中心から緊張材中心までの距離

d : 円筒の高さ

A. 硬化収縮による緊張力損失 ΔT_1 :

コンクリートの硬化収縮量を $k\varphi_t$ (φ_t はクリープ係数) とおけば、コンクリート外面の径方向変位 u_1 は、

$$u_1 = -\varepsilon_\theta \cdot b = -bk\varphi_t \quad \text{.....(7)}$$

緊張力損失量 ΔT_1 によって生ずる緊張材およびコンクリート外面の径方向変位をそれぞれ δ_{s1}, δ_{e1} とすれば、

$$\delta_{s1} = -\varepsilon_s \cdot r_0 = -\frac{\Delta T_1 \cdot r_0}{E_s A_s} \quad \text{.....(8)}$$

$$\delta_{e1} = \varepsilon_\theta \cdot b = \frac{\Delta T_1}{r_0 d} \cdot \frac{b \{ (a^2 + b^2) - \nu(b^2 - a^2) \}}{E_c(b^2 - a^2)} \quad \text{.....(9)}$$

ここに、 E_s, E_c はそれぞれ緊張材およびコンクリートのヤング係数、 A_s は緊張材の断面積を表わす。

δ_{s1} は収縮量であり、 δ_{e1} は緊張力損失による復元変位であるから、変位に関して、

$$\delta_{s1} - \delta_{e1} = u_1 \quad \text{.....(10)}$$

が成立する。

式(7), (8), (9)を式(10)に代入して ΔT_1 を求めれば、

$$\Delta T_1 = \frac{\frac{b}{r_0} k\varphi_t}{\frac{b \{ (a^2 + b^2) - \nu(b^2 - a^2) \}}{r_0^2 \cdot d E_c(b^2 - a^2)} + \frac{1}{E_s A_s}} \quad \text{.....(11)}$$

B. コンクリートのクリープによる緊張力損失 ΔT_2 :

この場合はコンクリートのクリープ径方向変位 u_2 を、

$$u_2 = -\left(\frac{T_0}{r_0 d}\right) \varphi_t \cdot \frac{b \{ (a^2 + b^2) - \nu(b^2 - a^2) \}}{E_c(b^2 - a^2)}$$

とおけば、**A** と全く同様にして求められ、

$$\Delta T_2 = \frac{\varphi_t \cdot T_0}{1 + \frac{r_0^2 d E_c (b^2 - a^2)}{b \{ (a^2 + b^2) - \nu (b^2 - a^2) \} E_s A_s}} \quad \dots\dots\dots(12)$$

C. 緊張材のリラクゼーションによる緊張力損失 ΔT_3 :

変形が拘束されない場合は、コンクリート側に復元歪が生ずるので、 ΔT_3 は、リラクゼーション量より実際には小さい。リラクゼーションによる緊張材のクリープ径方向変位 u_φ は、リラクゼーション係数を ψ_t として、次式で表わせる。

$$u_\varphi = \frac{\psi_t T_0 r_0}{E_s A_s} = \frac{T_{\varphi\psi} \cdot b \{ (a^2 + b^2) - \nu (b^2 - a^2) \}}{r_0 d E_c (b^2 - a^2)} \quad \dots\dots\dots(13)$$

$T_{\varphi\psi}$ はこの間に減少するコンクリート外圧に相当する周方向力である。

一方、緊張材の緊張力損失 ΔT_3 に相当するコンクリート側の周方向力 $\Delta T_{\varphi 3}$ は、式(13)を顧慮して、

$$\Delta T_{\varphi 3} = \frac{r_0^2 d E_c (b^2 - a^2) \cdot \Delta T_3}{b \{ (a^2 + b^2) - \nu (b^2 - a^2) \} E_s A_s} \quad \dots\dots\dots(14)$$

平衡位置における力の釣合条件は、

$$(-T_0 + T_{\varphi\psi} - \Delta T_{\varphi 3}) + (T_0 - \Delta T_3) = 0 \quad \dots\dots\dots(15)$$

式(13), (14), (15)より ΔT_3 を求めれば、

$$\Delta T_3 = \frac{\psi_t \cdot T_0}{1 + \frac{b \{ (a^2 + b^2) - \nu (b^2 - a^2) \} E_s A_s}{r_0^2 d E_c (b^2 - a^2)}} \quad \dots\dots\dots(16)$$

$k\varphi_t = 3.75 \times 10^{-4}(\max)$, $\varphi_t = 3(\max)$, $T_0 = 2.055 \times 10^6 \text{kg}$ とするときの式(11), (12), (16)の結果を、**図-11** に示しておいた。

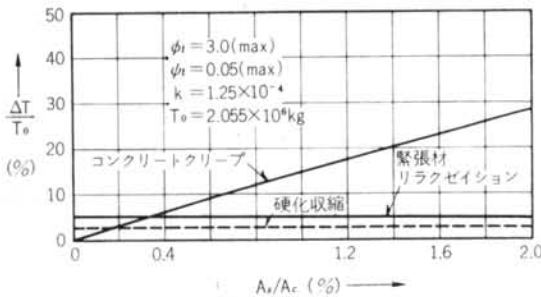


図-11 式(11), (12), (16)の結果

3.3 曲りはりとしての応力

本実験を厚肉円筒の多角形緊張とみなして考える。

A. 多角形緊張：径方向圧縮力数が一定の場合

P_n の対称性を仮定し、多角形頂点数(荷重点数)を $8m$ とおけば、 $j=1, 2, 3, \dots, 2m+1$ の位置における断面力(**図-12**)は、曲りはりの理論より、次式で表わせる。

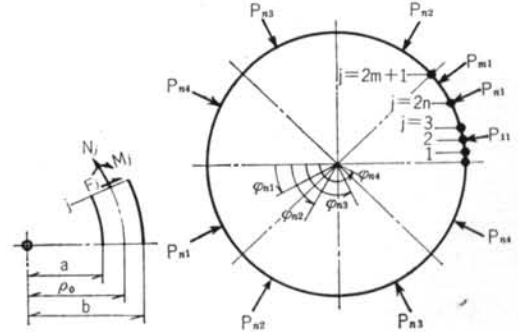


図-12

$$\left. \begin{aligned} N_j &= -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^m \sum_{l=1}^4 P_{nl} \cos \varphi_{nl} \\ M_j &= -\sum_{n=1}^m \sum_{l=1}^4 \rho_0 P_{nl} \left\{ \frac{1}{\pi(1+\kappa)} - \frac{1}{2} \cos \varphi_{nl} \right\} \\ F_j &= -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^m \sum_{l=1}^4 P_{nl} \sin \varphi_{nl} \end{aligned} \right\} \kappa = \frac{1}{3} \left(\frac{b-a}{2\rho_0} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(17)$$

ここに、

ρ_0 : 曲りはりの中立軸曲率半径

κ : ρ_0 に依存する断面形状係数

N_j, M_j, F_j : それぞれ周方向直応力, 曲げモーメント, せん断力

P_n : 多角形頂点(サドル)に働く1対の径圧縮力

φ_{nl} : 基線から P_{nl} のなす角度

周方向の応力度は、次式で表わされる。

$$\sigma_{\theta j} = \frac{1}{d(b-a)} \left\{ N_j + \frac{M_j}{\rho_0} \left(1 + \frac{r-\rho_0}{\kappa r} \right) \right\}, \quad a \leq r \leq b \quad \dots\dots\dots(18)$$

B. 多角形緊張：径方向圧縮力の大きさが一定で個数が変化する場合

この場合は、 P_n の対称性を考えて頂点数を $4m$ とおき、径方向圧縮力 P_n を $4(P_0, P_1, \dots, P_m, \dots, P_m)$ とおく。これらを等間隔に配置すれば、 P_n の角度変化 α は、

$$\alpha = \frac{2\pi}{4m} \quad \dots\dots\dots(19)$$

式(17)で $P_{nl} = P_0(\text{const})$ とおけば、荷重点位置 ($j=2, 4, \dots, 2n$) における断面力は、式(20)で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} N &= -\frac{1}{2} P_0 - P_0 \sum_{n=1}^{m-1} \cos n\alpha \\ M &= -\rho_0 P_0 \left\{ \frac{2}{\pi(1+\kappa)} - \frac{1}{2} \right\} \\ &\quad + \rho_0 P_0 \left\{ \sum_{n=1}^{m-1} \cos n\alpha - \frac{2(m-1)}{\pi(1+\kappa)} \right\} \\ F &= -\frac{1}{2} P_0 - P_0 \sum_{n=1}^{m-1} \sin n\alpha \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(20)$$

荷重点中間 ($j=1, 3, 5, \dots, 2m+1$) における断面力は式(21)で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} N' &= -P_0 \sum_{n=0}^{m-1} \cos\left(n + \frac{1}{2}\right)\alpha \\ M' &= -\rho_0 P_0 \left\{ \frac{2m}{\pi(1+\kappa)} - \sum_{n=0}^{m-1} \cos\left(n + \frac{1}{2}\right)\alpha \right\} \\ F' &= -P_0 \sum_{n=0}^{m-1} \sin\left(n + \frac{1}{2}\right)\alpha \end{aligned} \right\} \dots\dots(21)$$

式(20), (21)の結果を図-13に表わしておいた。

図-13では, N, M 曲線は $m = \frac{1}{4}n$ ($n=1, 2, 3, \dots$) に対して曲線に N, M が対応することを意味するにすぎない。

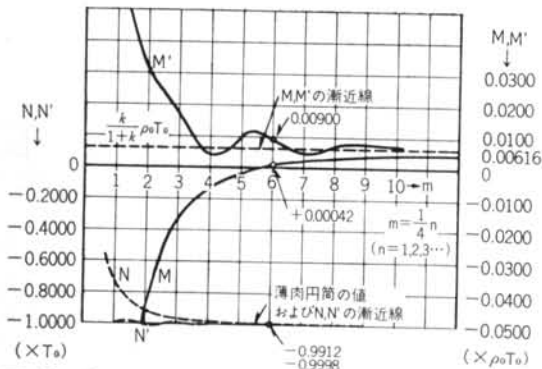


図-13 式(20), (21)の結果

3.4 緊張力と径方向圧縮力の関係

T_0 : 初緊張力または最大周方向力

T_n : サドル n 個を通過するときの周方向力(緊張力)

P_n : サドル n 点における径方向圧縮力

Q_n : 円周方向摩擦力

μ : サドルの静摩擦係数

α : サドルにおける周方向力の角度変化

とおけば,

$$T_n = T_0 \cdot e^{-n\mu\alpha} \dots\dots(22)$$

の関係がある。

したがって, P_n, Q_n を T_0 で表わせれば (図-14参照),

$$\left. \begin{aligned} P_n &= -(T_n + T_{n+1}) \sin \frac{\alpha}{2} = T_0 e^{-n\mu\alpha} (1 + e^{-\mu\alpha}) \sin \frac{\alpha}{2} \\ Q_n &= -(T_n - T_{n+1}) \cos \frac{\alpha}{2} = T_0 e^{-n\mu\alpha} (1 - e^{-\mu\alpha}) \cos \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots(23)$$

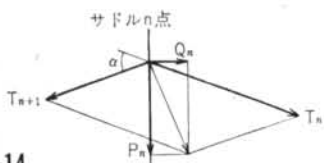


図-14

μ が与えられるときの T_n, P_n は図-15にて示される。

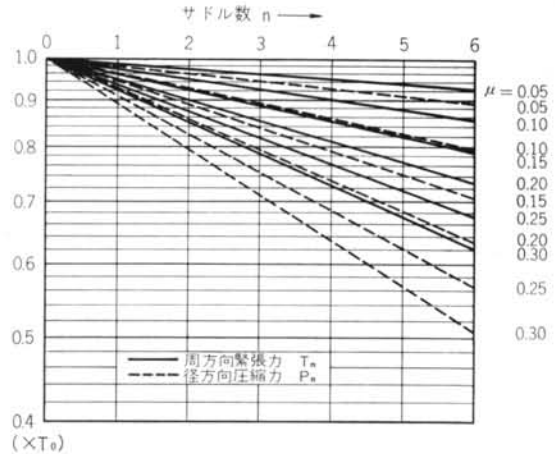


図-15 式(22), (23)の結果

§ 4. 結果の検討

§ 3 に基づいて実験結果を検討してみる。実際の緊張における有効初引張力(ジャッキ端) T_0 は, 実験条件を顧慮すれば, 次の式で表わすことができよう。

$$T_0 = c \{ (\sigma_{pi} - \Delta\sigma_j) A_s - \Delta T_e \} - \Delta T_b \dots\dots(24)$$

c : フランジ部分の拘束効果を考慮するときのプレストレス減少係数で, 薄肉円筒として考えれば, 0.869 である。

σ_{pi} : スtrandの初引張応力度 (§2の2.1参照)

A_s : 緊張材全断面積

$\Delta\sigma_j$: ジャッキ内の摩擦による減少量で, $0.05\sigma_{pi}$.

ΔT_e : コンクリート弾性変形によるプレストレスの損失で, ヤング係数比を20/3とすると, 実験体の如き断面比では $0.02T_0$ 程度である。

ΔT_b : コーンセット時のstrand弾性伸びの戻りによるプレストレス損失であって, 実測結果より約 $0.10T_0$ であった。

これらの数値を式(24)に代入すれば, 有効初引張力は,

$$T_0 = 1.887 \times 10^6 \text{ kg}$$

と推定される。したがって, これに相当する外圧は,

$$-p = \frac{T_0}{r_0 d} = \frac{1.887 \times 10^6}{1275 \times 60} = 24.7 \text{ kg/cm}^2$$

4.1 塑性量

緊張材の形状如何に拘らず, 一般にプレストレス構造材では, 緊張材のリラクゼーションまたはコンクリートのクリープ等による緊張力損失は, コンクリートの復元変形があるので少ないものである。したがって, 短時間の緊張実験では, これらの影響は全く無視できるのであるが, 今回のように数日を要した緊張実験では, どの程

度現われるものかを算出してみよう。

試験体の形状、寸法、屋外条件等を考慮すれば、コンクリートのクリープ係数 φ_t は、次式で表わされる。

$$\varphi_t = \frac{0.75t}{1.5 + 0.25t} \quad (t: \text{週})$$

コンクリートの硬化収縮量は、

$$1.25 \times 10^{-4} \varphi_t$$

一方、緊張材のリラクゼーションは、短期日のうちにそのほとんどが生ずる性質のものであり、リラクゼーション係数 ψ_t は、最大 0.05 程度である。 φ_t の極限値は 3.0 であって、これらの数値に対する緊張材のプレストレス損失量は、断面積比をパラメータにして図-11 に表わされている。試験体の場合の断面積比は 1.23% であり実験期間中の損失プレストレスは高々 3% で、他の条件を考慮すれば無視できよう。歪についても同様である。

4.2 厚肉円筒解と曲りはり解の相異

図-13 にて示されるとおり、サドル数が $4m=16$ 以上では、円周方向力は両方も接近している。試験体の場合の $6m=24$ では、厚肉円筒でも曲りはりでも、巨視的には同一である。ただし、サドル付近の局所的な状態は厚肉円筒では考えるのに困難である。

4.3 径方向圧縮力

図-15 で示すように、サドルの圧縮力 P_n は摩擦係数 μ に依存する。今回のような緊張方式では、サドルに生ず

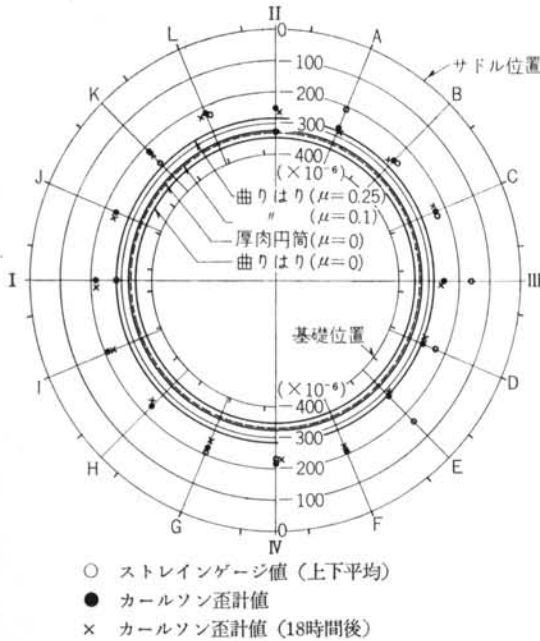
る摩擦力は両方向成分が相殺され、摩擦力による影響はほとんど現われず、 $\mu=0.3$ 以下では、不釣合な摩擦力はサドル圧縮力の 3% 以下となるから無視できる。したがって、 μ が増加すると、そのままサドル圧縮力が低下し、コンクリートに十分プレストレスが入らないことになる。この低下の様子は表-2 に示してある。

4.4 測定結果

測定値および理論値の比較を図-16, 17, 18, 表-2 にそれぞれ歪について示す。この場合、コンクリートのヤング係数は、 $3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、ポアソン比は 0.17 としている。円周方向については全体の分布、断面分布ともに実験値が小さいが、径方向については大きい。断面分布は定性的に厚肉円筒の傾向を表わしているといえよう。今回の実験では、屋外実験であるため、塑性の影響は全く把握できない。温度影響について述べれば、図-4 に示される如く、コンクリートの内部温度は安定しているが表面付近では不安定であり、したがって、ワイヤストレインゲージの値は予想以上に悪影響を受けている。測定値が低く現われた点については、緊張力解放時およびその後の躯体の挙動から判断すると、サドルの摩擦係数 μ が大きいことの外に、基礎との接着面の拘束効果はかなり大きいことが考えられる。カールソン歪計の測定値によれば、緊張力を解放した後、緊張実験から 1 年目ごろ（大体同じ気候条件とみなせる）には、元の位置に戻っていることが認められた。

r(cm)		ε_θ			$u_r(\text{cm})$	ε_r	
		950 (a)	1116	1250 (b)	950	1116	
計 算 値	厚肉円筒 ($\mu=0$)	-390×10^{-6}	-326×10^{-6}	-294×10^{-6}	-370×10^{-3}	3×10^{-6}	
	曲り はり	$\mu=0$	-389×10^{-6}	-344×10^{-6}	-315×10^{-6}	-378×10^{-3}	—
		(1) $\mu=0.1$	-365×10^{-6}	-322×10^{-6}	-295×10^{-6}	-354×10^{-3}	—
		(2) $\mu=0.25$	-322×10^{-6}	-284×10^{-6}	-260×10^{-6}	-312×10^{-3}	—
測 定 値	平 均	(3) -370×10^{-6}	(3) -225×10^{-6}	—	(5) -225×10^{-3}	—	
		—	(4) -244×10^{-6}	—	(6) -273×10^{-3}	—	
	最 大	(3) -475×10^{-6}	(3) -320×10^{-6}	—	(5) -283×10^{-3}	(3) -10×10^{-6}	
		—	(4) -338×10^{-6}	—	(6) -355×10^{-3}	—	
	最 小	(3) -285×10^{-6}	(3) -160×10^{-6}	—	(5) -132×10^{-3}	(3) -95×10^{-6}	
		—	(4) -207×10^{-6}	—	(6) -180×10^{-3}	—	
設計値(厚肉円筒)		-357×10^{-6}	-307×10^{-6}	-271×10^{-6}	-339×10^{-3}	2×10^{-6}	

表-2 (1) オイレス500# (2) グリース (3) ワイヤストレインゲージ (4) カールソン歪計
(5) は夜間の歪を含まない、(6) は夜間の歪を含む。



○ ストレインゲージ値(上下平均)
● カールソン歪計値
× カールソン歪計値(18時間後)

図-16 緊張完了時の円周方向歪(ε_θ)分布

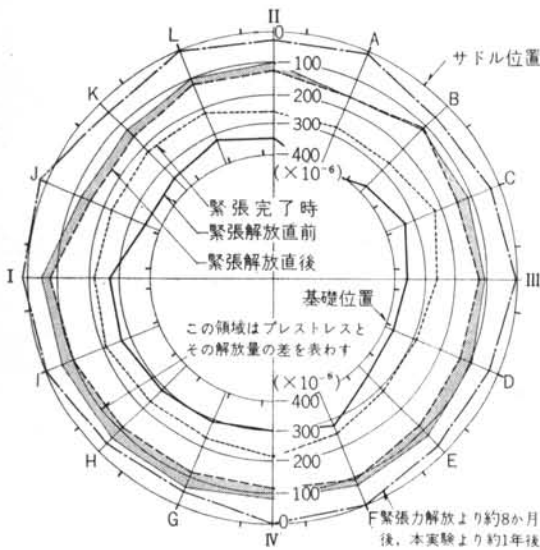


図-17 緊張力解放時の円周方向歪(ε_θ)分布

4.5 結び

ここに述べた緊張実験は、清水建設が昭和38年度科学技術庁原子力平和利用研究費補助金を受けて、建築学会

<参考文献>

- 1) プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説 : 日本建築学会
- 2) プレストレストコンクリート : 六車 照 : コロナ社, 1963
- 3) プレストレストコンクリートの設計および施工 : 猪股俊司 : 技報堂, 1957
- 4) 材料力学 : 湯浅亀一 : コロナ社, 1959

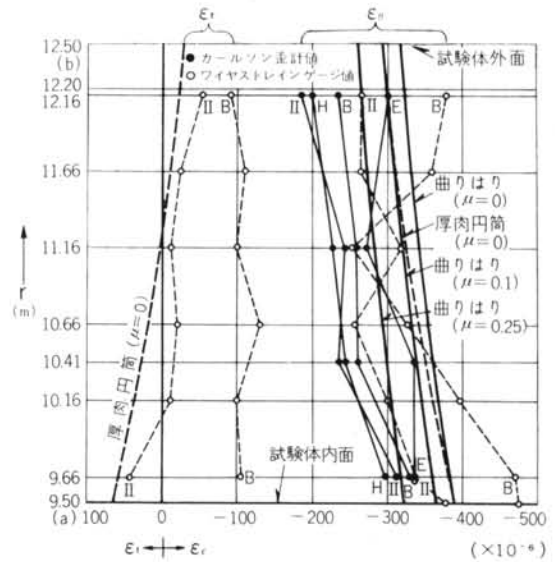


図-18 緊張完了時における円周方向歪(ε_θ)と径方向歪(ε_r)の径方向分布

構造標準委員会 PCV 小委員会および FAPIG 第1原子炉部会 CV 小委員会の協力の下に、昭和38年6月~39年3月まで、オリエンタルコンクリート KK 多摩工場内で行なったものである。

この詳細な報告は、総括的に「原子炉のプレストレストコンクリート圧力容器の設計及び施工法に関する基礎的試験研究」の成果報告書(昭和39年12月)にある。

清水建設における実験の計画担当者および協力者は次のとおりである。

- 原子力部 : 太田 達(担当), 金井三千夫, 星野一郎
 設計部 : 山岸 清, 粟野 豊
 研究所 : 新見芳男, 烏田専右, 高橋和男, 山原 浩
 宮路栄二, 中西正俊, 磯畑 脩, 松本芳紀
 市之瀬紘一, 松井建二, 谷口正弘,
 柳剛正弘, 三谷勝之, 曾田俊紀

本報告を作成するに当たり、実施に尽力を賜わったオリエンタルコンクリート KK の大西氏、宇多田氏、下村氏をはじめ、同社多摩工場の方々、および実験に関係された清水建設の各位に謝意を表する。

緊張力解放、摩擦試験、コンクリート継続測定および §2 以下、円筒構造物としての考察は、太田、磯畑、松本、三谷が担当したもので、磯畑がまとめた。