

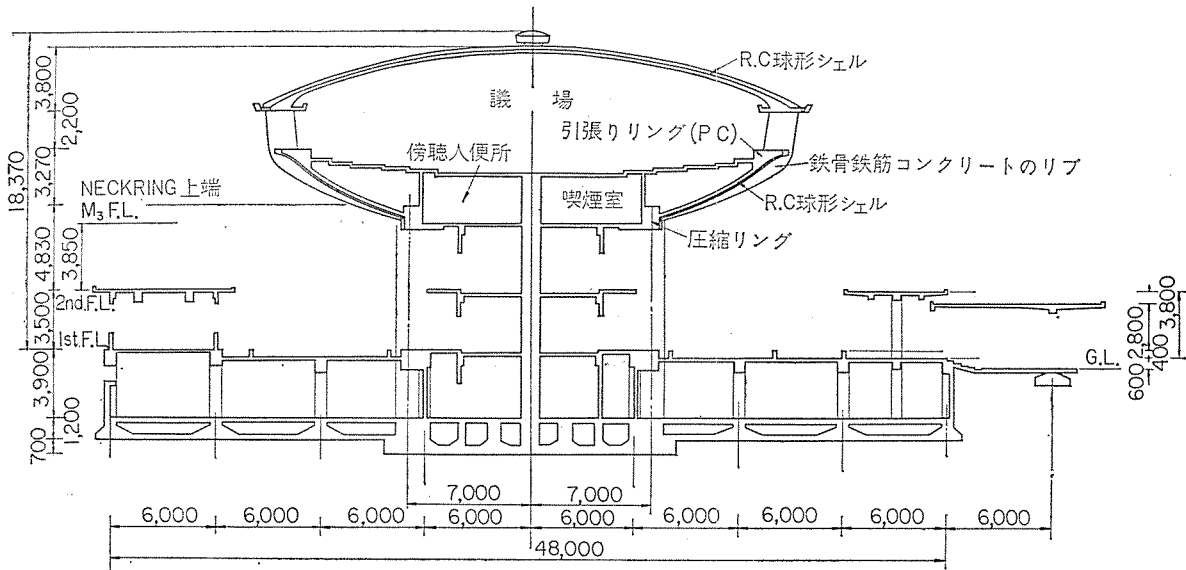
シェル構造の引張リングに PC を用いた一例
 — 千葉県県会議事堂の議場の設計について —

藤 沼 敏 夫*
 川 股 重 也*

現在ではどのような形の構造物でも建てられるという可能性が建築構造の分野に生じてきた。この新しい構造を可能にしているものには技術の進歩のほかに数学の進歩がある。この新しい構造とはシェル構造、その他さまざまな種類の大空間をおおう構造法である。しかしシェ

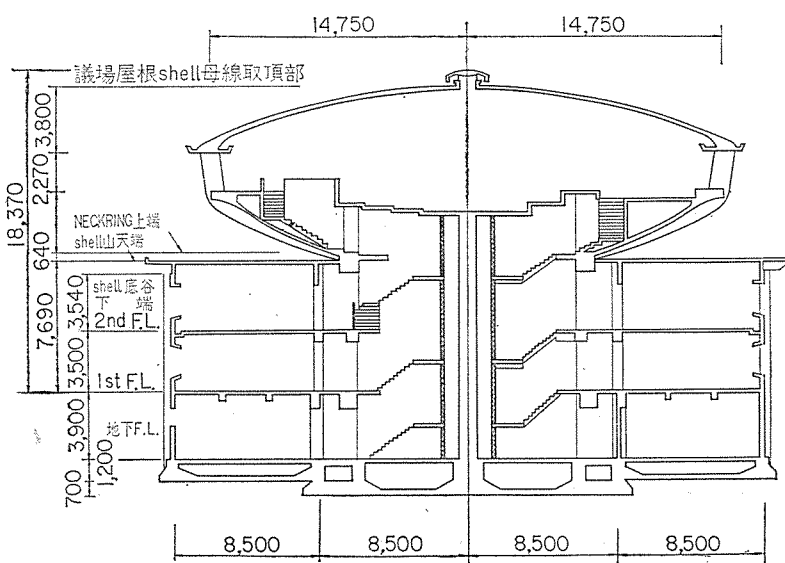
ル構造は大きな空間をおおう屋根としての実用的な用途のみだけでなく、中空に広いスペースを必要とする構造物にも適用できる一例として千葉県県会議事堂の議場に球形シェルを用いた。この程度の大きさのシェル構造は多くの場合、すべて鉄筋コンクリート構造 (RC) で設

図-1



東西断面図

図-2



南北断面図

計されており、シェル構造についての設計法および解析は周知のとおりである。ここではシェルの引張リングにプレストレスト コンクリートを用いたので、この引張リングの設計とプレストレストの導入状態およびプレストレスト導入後の結果について述べる。なお導入方法はフレシネー工法でおこなった。

1. 球形シェル引張リングにおける PC の意義

議場の構造は①屋根ドームとしての RC 球形シェル、②屋根荷重と議場床を支える逆型の RC 球形シェル、③この両者を支える下部ラーメン構造、の3つに大別される。

* 東京大学生産技術研究所 坪井研究室

このうち、下部逆型球形シェルの縁に設けられた引張リングにポストテンション方式によりプレストレスを導入したのであるが、ここではシェルの縁リングにPCを用いることの意義と役割りを、全体の構造設計との関連において述べて見たい。

議場は直径約 30 m の円形プランにおさめられ、この屋根として偏平なRC球形シェルがかけられた。このシェルを裾の引張リングを介して 12 本の支柱で支持することには特別な困難はない。

この構造計画の問題点は屋根、議場床を支える下部構造にあった。すなわち平面計画上の要求から議場床が管理棟（2階建）の上に持ち上げられ、議場床構造の外周は左右の管理棟上にオーバーハングしており、屋根と議場床の荷重は直径約 14 m のコアまわりの円周上で支持しなければならない。この放射状のはね出し部分はスパンが約 6 m、屋根と床を合わせた荷重が約 2.6 t/m² となり、片持ばり式の構造では、とても持ち切れないオーダーである。

この点の解決策として採用したのが図-1, 2に見られるような逆型の球形シェルであるが、その考え方は、いったん直径 30 m の円周上に拡がった屋根荷重の流れを直径 14 m の円周までしぼる場合に、その経路の力の伝達形式として、片持ばり方式の曲げの代わりにRCシェルの求心的な圧縮力とリング方向の引張力に頼るということである。ただし 2.6 t/m² の荷重は普通のシェル屋根荷重 0.3~0.4 t/m² に比して極端に大きく、スパンがあまり大きくないことを割引してもシェルとしては相当きつい設計となりそうである。

この逆型シェルの設計の可能性は次の諸点にかかっているといえる。

①シェルのリング方向の引張力が設計可能な大きさにおさえられるか。

②シェルの縦方向（放射線方向）の曲げ応力がシェル厚でカバーできるか。

③支柱より集中荷重として加えられる屋根荷重による応力集中の処理。

このうちの第3項は 12 本の屋根ドーム支柱を補剛リブ的な形でシェルの下部まで延長することで解決された。①, ②項のシェル自体の応力を左右し、あるいは抑制するのは縁リングの剛性である。

球形シェルのように閉じた形のシェルにおいては、縁リングの剛性と強度がシェル全体の応力と耐力を特に大きく左右するものであるが、今の場合にはシェル上縁の大きな引張力に抗して、その拡がりを防ぐ有効な引張リングと、シェル下端の反力を受ける圧縮リングが必要で、これらを強剛にすることによりシェルスラブの応

力を設計可能な限度におさめ、また十分の耐力を期待することが可能となる。

さて、鉄筋コンクリートの性質から考えると、圧縮リングについて剛性と強度を確保するには、十分なコンクリート断面積を与え、コンクリート打ちの現場管理に留意すればよいが、引張リングについては普通鉄筋コンクリートではきれつ問題があるので結局鉄筋のみに頼ることになる。シェルの応力を直接左右するのはリングの剛性であり、もしきれつ問題が解決されてコンクリート断面の剛性も利用できるなら、リングの有効性が大幅に高まり、小さいリング断面でシェル全体の強度を確保できることになる。リングへのプレストレス導入の意義は上記のことを考えれば自ら明らかであろう。あらかじめ圧縮されたコンクリート断面は圧縮力の減少という形で、伸び剛性をも持つからである。

一般的に考えて、RCシェルが大規模なものになるにつれて当然プレストレス力の導入ということが現実的意義を持つてくるのであるが、特に閉じた形のシェルにあっては縁リングへの導入が効果的であり、縁リングにプレストレスを与えることにより縁リング自体のきれつが防止され信頼度が高まるのみならず、その剛性が高まることによりシェル内部の応力を抑制し、シェルスラブの安全性を高めることにもなるのである。今回の試みはスパンの大きさからくる困難よりも構造形に由来する荷重条件の困難さをプレストレス力の導入により解決しようとしたものと考えてよい。

なお設計上のデータとして下記をあげておく。

屋根および床荷重をふくめ、下部シェルの平面あたりに換算した鉛直荷重が 2.6 t/m²

PCリングの断面積： $A_r=0.645 \text{ m}^2$

PCリングのヤング率： $E_r=3.2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

PCリングの長期荷重による引張力： $T_r=246 \text{ t}$

下端圧縮リング(普通RC)の断面積： $\bar{A}_r=1.30 \text{ m}^2$

同 ヤング率： $\bar{E}_r=2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

同 長期荷重による圧縮力： $\bar{T}_r=-499 \text{ t}$

シェル半径： $a=24.8 \text{ m}$

シェル厚： $t_1=25 \text{ cm}$ (上端), $t_2=40 \text{ cm}$ (下端)

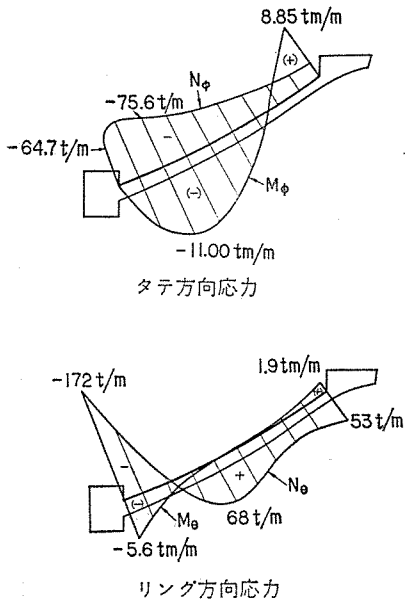
これに対するシェルの長期設計応力として図-3に示すものを得た。この応力は放射状筋 19φダブルリング筋 22φダブルの配筋で処理することができた。

246 t の引張力によるPCリングの長期引張応力度は 38 kg/cm² であるが、屋根荷重の集中加力による局部的曲げ応力を考慮して、有効プレストレス力は 60 kg/cm² とした。

2. 引張リングの設計 (PCリングの設計)

1本のケーブルは 12-7φのPC鋼線としリング断面に対する配置は図-4のようにした。また設計上の仮定

図-3 シェルの設計応力(長期)



として、①定着時のPC鋼線の滑りによる引張力の減少の影響は、はり中心までおよばない。②ケーブルは両端より引張力を与えるものとする。③その他は日本建築学会の「プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説」による、としケーブル緊張時の引張力の諸損失を算定

した。計算順に述べると次のようになる。

(1) スパン中央におけるプレストレス導入後の引張応力度

a) 施工引張応力度:

$$\sigma_0 = 15\,500 \times 0.7 = 10\,850 \text{ kg/cm}^2$$

b) ジャッキおよびコーンにおける摩擦損失:

$$\sigma_1 = \sigma_0 \times 4\% = 10\,850 \times 0.04 = 433 \text{ kg/cm}^2$$

c) ケーブルの延長に沿う摩擦損失 (No. 7, 8 のケーブルについてのみ求める):

$$\sigma_2 = \lambda \times l \times (\sigma_0 - \sigma_1) = 0.004 \times 12.65 (10\,850 - 433) = 527 \text{ kg/cm}^2$$

λ : ケーブル長 1m あたりの摩擦損失係数 (0.4×10^{-2})

d) ケーブルに曲率があり、そのうえ上下に多少の移動があるための摩擦損失 (図-7, 写真-1, 2, 3 参照):

$$\sigma_3 = \{\sigma_0 - \sigma_1\} \{1 - e^{-\mu(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots)}\} \quad \alpha: \text{ラジアン}$$

$$= (10\,850 - 433) (1 - e^{-0.3 \times 0.785}) = 2\,200 \text{ kg/cm}^2$$

図-4 ケーブル配置平面図

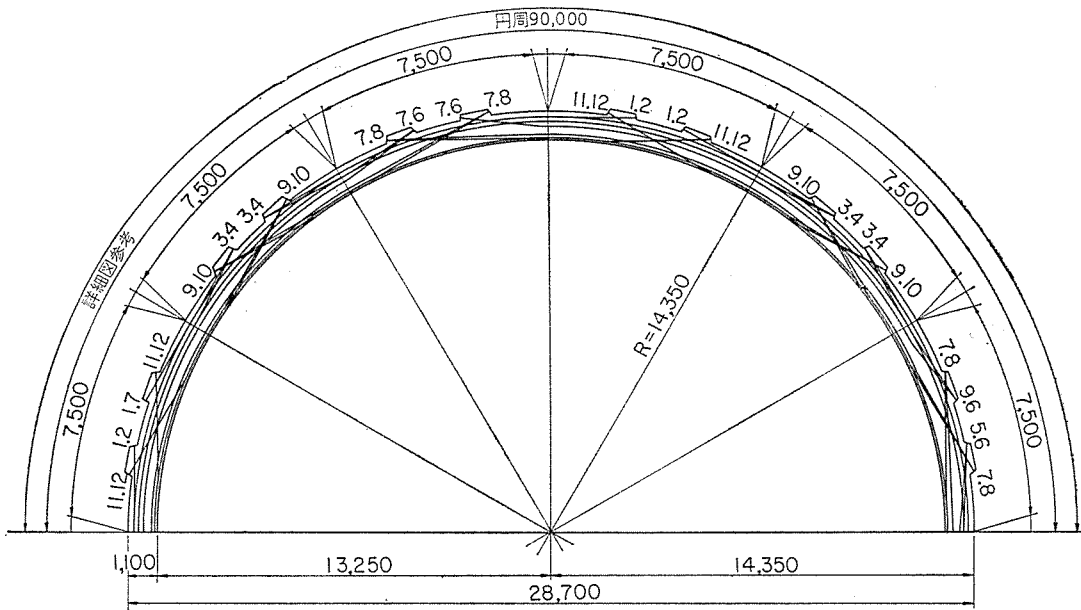


写真-1 B-B 断面

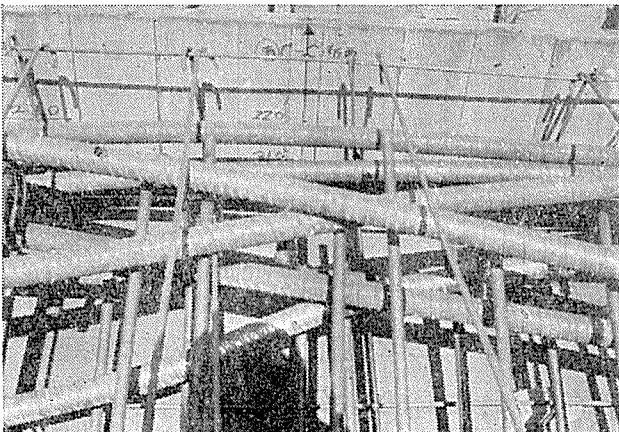


写真-2 C-C 断面

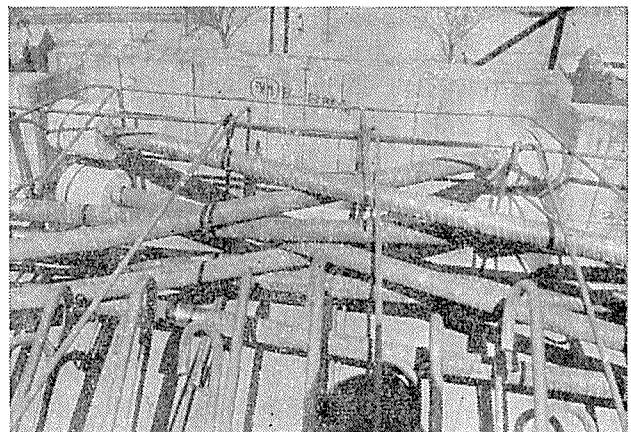
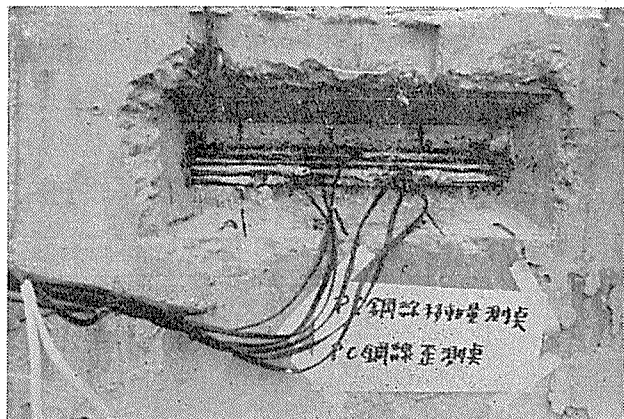


写真-3 PC リングの測定窓



e) 考えているケーブルのプレストレス導入直後の鋼線応力度:

$$\sigma_i = \sigma_0 - (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = 7690 \text{ kg/cm}^2$$

(2) 作業緊張応力度

a) 定着コーン直前の緊張応力度:

$$\sigma_{p1} = \sigma_i(1 + \mu\alpha + \lambda l)$$

上式で σ_{p1} を求めると表-1 のようになる。

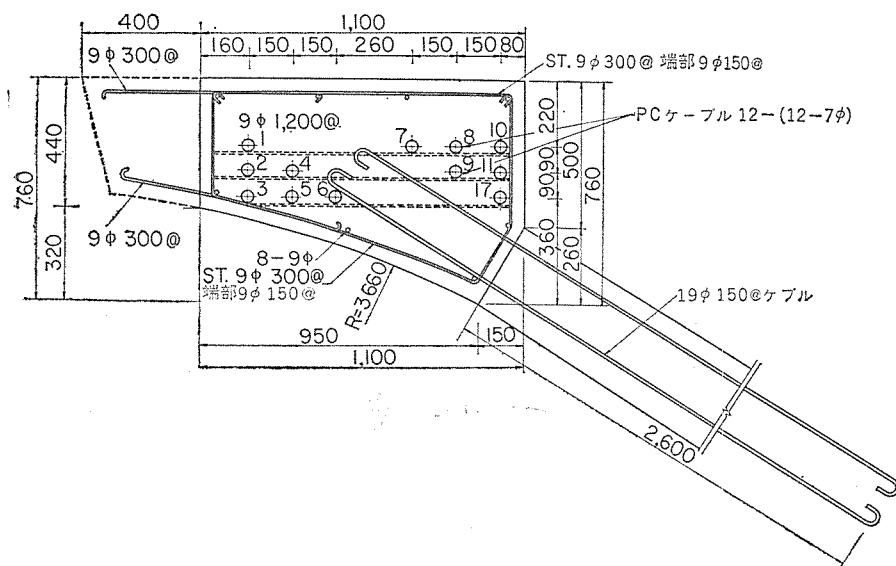
表-1

ケーブル No.	σ_i kg/cm ²	α ラジアン	$\mu\alpha = 0.3\alpha$	l m	$\lambda l = 0.4 l \times 10^{-2}$	$1 + \mu\alpha + \lambda l$	σ_{p1} kg/cm ²
1, 2	7690	0.785	0.235	10.50	0.042	1.277	9820
3, 4	"	"	"	10.45	"	"	"
5, 6	"	"	"	10.35	"	"	"
7, 8	"	"	"	12.65	0.051	1.286	9890
9, 10	"	"	"	12.60	"	"	"
11, 12	"	"	"	12.50	0.050	1.285	"

表-2

ケーブル No.	σ_{p1} kg/cm ²	σ_{p2} kg/cm ²
1, 2, 3, 4, 5, 6	9820	10200
7, 8, 9, 10, 11, 12	9890	10280

図-5 PC リング 断面図



b) マノメーター指度に換算する鋼線引張応力度: ジャッキおよびコーン内面における摩擦損失を4%とすると $\sigma_{p2} = (1 + 0.04)\sigma_{p1}$ となる。

以上のようにして設計は完了したのであるが、シェル鉄筋による拘束、鉄骨のリップによる影響など、幾多の問題が考えられたのでプレストレス導入時とシェルのコンクリート打ち完了後のサポート取りはずし時期に各種の応力測定をおこなったので、測定方法の概要と結果を述べる。

3. プレストレス導入時の概要

(1) 試験方法

プレストレスを導入するときの試験方法はPCリングにモールドゲージを埋込み導入応力によるひずみを測定し、緊張作業は円周に沿って4ケーブルずつ同時に8台のジャッキをもっておこない、ジャッキのマノメーターの指度が0-50-250-定着-次のケーブルにジャッキを取りつけたとき(マノメーター指度0とする)の4回とし、PC鋼線の緊張力測定はNo. 10のケーブルについて中央に観測窓を設け、ここからケーブル素線にポリエステルゲージをはり、緊張によるひずみを測定した。この測定回数はマノメーターの指度0-50-100-150-200-250-300-定着-ジャッキ取りはずし-5分後と10回おこない、あわせてPC鋼線の移動量も記録した。

(2) 測定値の考察

① PCリングはシェルに接続しているので前述したような鉄筋、鉄骨のリップ、コーンの定着する所の断面の違

図-6

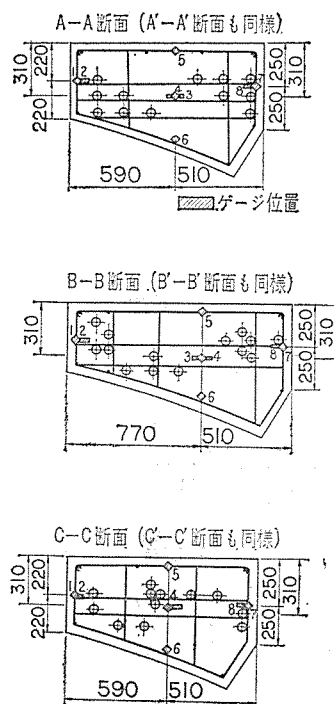
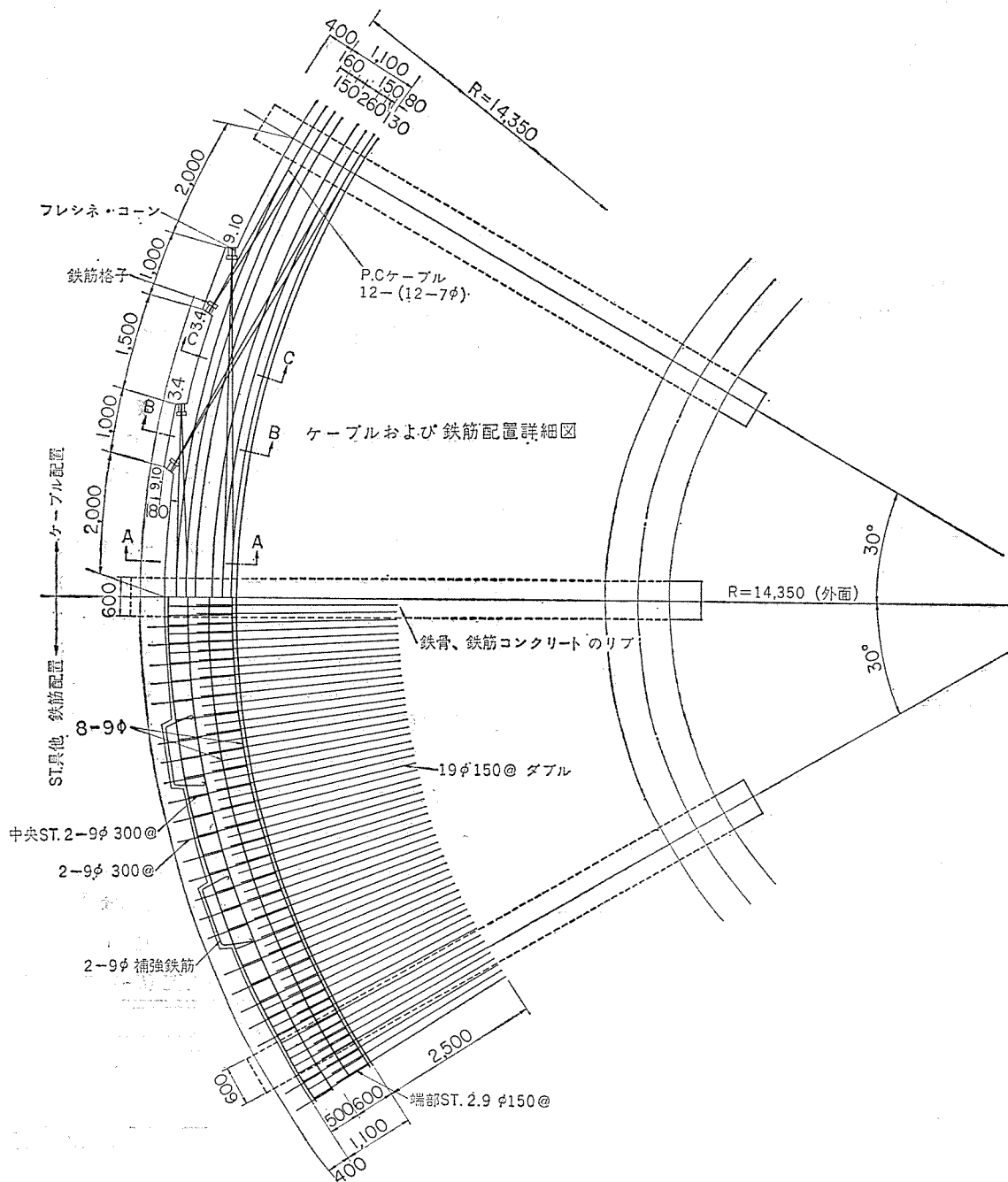


図-7 ケーブルおよび鉄筋配置詳細図



いなどの影響が考えられたが図-8, 9に見られるように全ケーブル緊張終了後は各断面とも接線方向, 中心方向ともにひずみ分布はほとんど等分布している。このPCリングに使用したコンクリートのヤング係数は測定しなかったが通常 $3.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 前後のヤング係数なので, 2.8×10^5 , 3.0×10^5 , $3.2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ のヤング係数を仮定して導入応力を求めると表-3 のようになる。計算値においては接線方向の圧縮応力度が 60 kg/cm^2 であるから, プレストレス導入応力は十分満足されていると思われる。

②緊張力の計算値は1本のケーブル断面積 = 4.62 cm^2

で緊張力は 36.5 t であり測定ひずみからケーブル中央の緊張力を求めると表-4 のとおりである。緊張力の増加にともなうPC鋼線のひずみの増加状態は図-10によっても明らかなように, ほとんど直線的に変化している。また摩擦状態については測定をケーブル1本 (No. 10) についておこなったため, 設計に用いた摩擦係数について個々に分離して求めることは困難であるが, ①ケーブルにおこる摩擦はすべてケーブルの角変化によっておこるものと仮定してこの係数を求めてみると, 設計に用いた μ は $0.3/\text{rad}$ で測定値による μ は $0.25/\text{rad}$ となる。②今度はケーブルにおこる摩擦はすべてケーブル

図-8 断面接線方向ひずみ分布図
(図中数字はひずみ $\epsilon \times 10^{-6}$)

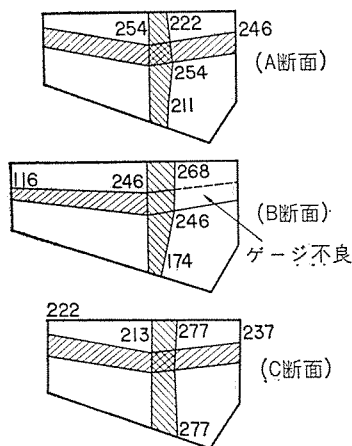
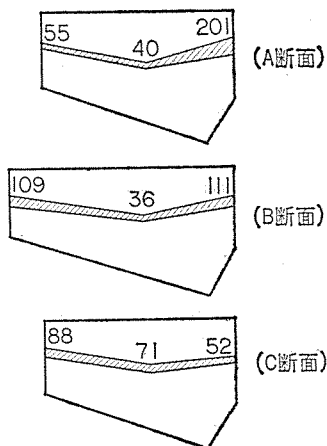
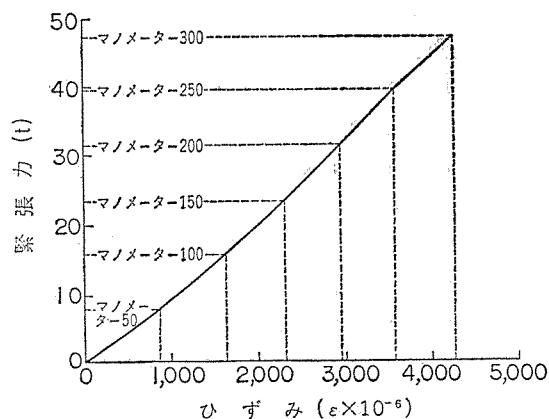


図-9 断面中心方向ひずみ分布図
(図中数字はひずみ $\epsilon \times 10^{-6}$)



注：このひずみ分布図は全ケーブル緊張後の圧縮ひずみ分布を示す。

図-10 荷重～ひずみ曲線
(No. 10 PC ケーブルの中央におけるひずみを示す)



注：ひずみはケーブル中央における4側点の平均値とする。

表-3

(a) 各断面の重心位置における応力
(接線方向)

断面	断面重心ひずみ ($\epsilon \times 10^{-6}$)	圧縮応力 (kg/cm^2)		
		$E_c=2.8 \times 10^5$	$E_c=3.0 \times 10^5$	$E_c=3.2 \times 10^5$
A	-254	72.3	76.3	81.3
B	-246	69.5	73.6	78.8
C	-213	59.6	64.0	68.3

(中心方向)

断面	断面重心ひずみ ($\epsilon \times 10^{-6}$)	引張応力 (kg/cm^2)		
		$E_c=2.8 \times 10^5$	$E_c=3.0 \times 10^5$	$E_c=3.2 \times 10^5$
A	40	11.2	12.0	12.8
B	36	9.4	10.8	11.5
C	71	19.9	21.3	22.7

(b) 各断面の平均応力 (6 測点の平均値)
(接線方向)

断面	断面平均ひずみ ($\epsilon \times 10^{-6}$)	圧縮応力 (kg/cm^2)		
		$E_c=2.8 \times 10^5$	$E_c=3.0 \times 10^5$	$E_c=3.2 \times 10^5$
A	-232	65.0	69.5	74.3
B	-201	59.2	59.2	64.4
C	-245	68.7	68.7	78.4

(中心方向)

断面	断面平均ひずみ ($\epsilon \times 10^{-6}$)	引張応力 (kg/cm^2)		
		$E_c=2.8 \times 10^5$	$E_c=3.0 \times 10^5$	$E_c=3.2 \times 10^5$
A	101	28.1	30.3	32.1
B	85	23.8	25.5	27.2
C	67	18.7	20.1	21.4

の長さによるシーソとの摩擦と考えると設計に用いた値は μ, λ とともに考えて計算しているから $\mu\alpha + \lambda l = 0.28$ となり、測定値では $\lambda l = 0.2$ となる。③ PC 鋼線の伸び

表-4

マンメータの読み (kg/cm^2)	0	50	100	150	200	250	300
ひずみ ($\epsilon \times 10^{-6}$)	0	953	1621	2346	2987	3587	4224
緊張力 (t)	0	8.0	14.9	21.6	27.6	33.1	39.0

については計算値では 112 mm なのに対して測定値は 114 mm となった。

以上から判断すると設計に用いたシーソとの摩擦係数はもっと小さい係数を取り、摩擦損失の緊張力を減少させることができるかもしれない。しかし PC 断面の変化、ケーブルの配置、鉄筋または鉄骨などの影響があり詳細に分析することはむずかしい。そのうえ今回の測定はケーブル 1 本についておこなったものなので摩擦損失についての結論は今後の課題である。

4. サポート取りはずしによる PC リングの応力測定

前述のようにプレストレスの導入は非常に好結果を得た。そこでプレストレス導入のシェルのコンクリート打ち、サポートの取りはずしによる応力の変化を測定しようとしたが測定準備の不備などにより、応力測定はサポート取りはずし開始前を 0 とした場合のみの結果となったが、これについて少し述べる。

測定に用いたゲージはプレストレス導入時に用いたものを利用した。サポート取りはずしは外側 (PC リング側) より円周に沿ってほぼ同時におこない、応力測定はサポート取りはずし開始前を 0 とし、取りはずしはほぼ等速度で進めこの間 20 分ごとに測定をおこない、全サポート取りはずし完了後は 2 時間ごとに 3 回測定し、その後 5 時間へて最終回の測定をおこなった。この結果サポート取りはずしによる PC リングの急激な応力変化