

## PCCV 用テンダンの摩擦損失等測定試験

井 垣 力\*  
 近 藤 茂\*\*  
 只 野 直 典\*\*\*

### 1. ま え が き

関西電力(株)では、昭和43年以来 PC 格納容器の設計・施工に関し、諸研究を行ってきたが、昭和53年からは、PC 格納容器として構造上必要とするプレストレスを導入するための大容量テンダンに関する実験的研究を行い、現在もその一部を継続実施中である。ここでは上記「大容量テンダンに関する実験的研究」についての概要とその結果の一部について紹介する。

この実験的研究は、主としてアンボンドタイプの大容量テンダンをを用いたプレストレストコンクリート構造物である大型円形構造物を対象としており、その設計および施工に関する問題点を解明することを目的として行ったものである。

研究は、実物大の部分模型(横断部分、縦断部分)に1000t級テンダンをを用いてプレストレスを導入する実験をとおして、基礎的な材料に関する実験、コンクリート

打込み時の調査、テンダン配置に関する調査、プレストレス導入時および導入後の測定を行い、緊張力損失や定着部の健全性に関する検討、施工性に関する検討等を行った。実験は、A, R, U3種の実物大の試験体を用いた屋外実験を主体とした。写真-1にその状況を示す。テンダンは、おもにストランドタイプのVSL-E5-55(φ12.7mm ストランド55本)を使用した。

### 2. 研究概要

#### 2.1 試験体

試験体形状を図-1に示す。

A試験体は、短辺4.2m、長辺21.6m、厚さ2.0mの直方体であり、その中に14本のテンダンを配置した。

R試験体は、内径43m、厚さ0.8m、高さ1.8mの円筒体であり、2バットレスタイプとして3本のテンダンを配置した。

U試験体は、U形およびC形の2個の試験体からなり、U形試験体は、PC格納容器の縦断部分を模擬した形となっており3本のテンダンを配置した。またそのうえには3バットレスタイプの水平テンダンを模擬した部分も加えてあり1本のテンダンを配置した。さらにテンダンの規格引張荷重時における定着部の挙動を調査するために実機をできるだけ模擬したバットレスも設けた。C形試験体はPC格納容器のドーム部の水平テンダンを模擬したもので1本のテンダンを配置した。

これらの試験体に配置したテンダンの角度変化、曲率半径を表-1に示す。

試験体に用いたコンクリートの強度を表-2に示す。

鉄筋は、いずれもJIS G 3112に規定するSD35である。

ストランドは7本より12.7mmおよび15.2mmの2種を用いた。7本より12.7mmのものは低レラクセーション材である。これらストランドの引張試験結果を表-3に示す。

なお、定着部の健全性に関する検討のための基礎実験



写真-1 実験場全景

\* 関西電力(株)建設部水力計画課長

\*\* 関西電力(株)建設部土木課

\*\*\* 大成建設(株)原子力部技術プロジェクト担当部長

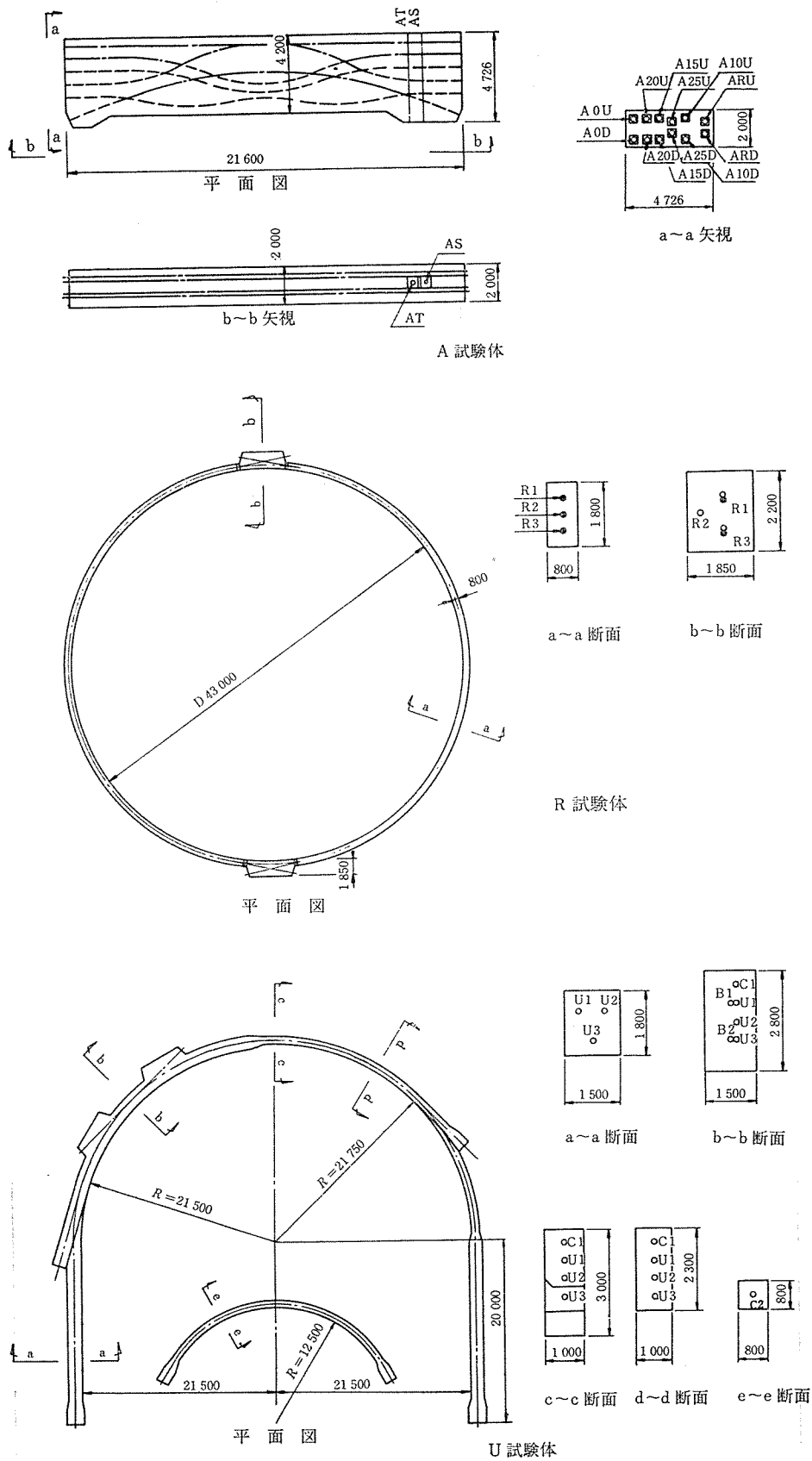


図-1 試験体の概略

研 究

表一 テンドンの角度変化、曲率半径の組合せ

| 曲率半径  | 角 度 変 化 |     |      |      |      |      | テンド<br>ン略長 | テンド<br>ン記<br>号           | 本数  |
|-------|---------|-----|------|------|------|------|------------|--------------------------|-----|
|       | 60°     | 80° | 100° | 120° | 180° | 355° |            |                          |     |
| 9.0m  |         |     |      |      |      |      | 22m        | A15U<br>A15D             | 2   |
|       |         |     |      |      |      |      | 22         | A10U, A20U<br>A10D, A20D | 4   |
|       |         |     |      |      |      |      | 22         | A25U<br>A25D             | 2   |
| 12.9m |         |     |      | 120° |      |      | 32         | C2                       | 1   |
| 21.9m |         |     |      | 120° |      |      | 22         | C1                       | 1   |
|       |         |     |      |      | 180° |      | 110        | U1, U2, U3               | 3   |
|       |         |     |      |      |      |      | 355°       | R1, R2, R3               | 3   |
|       |         | 40° |      |      |      |      | 22         | ARU<br>ARD               | 2   |
| ∞     | 0°      |     |      |      |      |      | 22         | A0U<br>A0D               | 2   |
| 4 種   | 8 種     |     |      |      |      |      | 4 種        |                          | 20本 |

表二 コンクリートの性質\*

| 試験<br>体 | セメントの<br>種 類          | 水セメン<br>ト比<br>(%) | スラン<br>ド<br>(cm) | 下記材令時圧縮強度<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |              |               | 引張強度<br>(kg/<br>cm <sup>2</sup> ) | ヤング係<br>数<br>(×10 <sup>5</sup><br>kg/cm <sup>2</sup> ) |
|---------|-----------------------|-------------------|------------------|------------------------------------|--------------|---------------|-----------------------------------|--|
|         |                       |                   |                  | 7日                                 | 28日          | 91日           |                                   |  |
| E       | 普通ポルト<br>ランドセメ<br>ント  | 41                | 8.0              | 229                                | 447          | —             | (28日)<br>32.9                     | (28日)<br>3.10  |
| A       | 早強ポルト<br>ランドセメ<br>ント  | 40                | 8.4              | (8日)<br>409                        | (29日)<br>483 |               | (15日)<br>30.6                     | (15日)<br>3.02  |
| R       | 中麻熟ポルト<br>ランドセメ<br>ント | 44                | 8.9              | (9日)<br>283                        | (29日)<br>416 | (93日)<br>484  | (93日)<br>30.1                     | (93日)<br>3.07  |
| U       | 同 上                   | 44                | 9.1              | (9日)<br>221                        | (32日)<br>393 | (100日)<br>531 | (100日)<br>34.7                    | (100日)<br>3.46   |

\* 供試体の養生は標準養生

表三 スtrandの引張試験成績

| 試験体 | 直 径<br>(mm) | 降伏荷重<br>(kg) | 破断荷重<br>(kg) | 伸 び<br>(%) | ヤング係数<br>(×10 <sup>4</sup> kg/mm <sup>2</sup> ) |
|-----|-------------|--------------|--------------|------------|---|
| A   | 12.7        | 17,380       | 19,110       | 9.2        | 1.97  |
|     | 12.8        | 18,480       | 19,430       | 7.3        | 1.98  |
| R   | 12.8        | 18,280       | 19,180       | 7.1        | 1.97  |
|     | 12.7        | 17,530       | 19,130       | 9.0        | 1.97  |
| U   | 12.8        | 18,820       | 19,500       | 7.6        | 1.96  |
|     | 15.3        | 26,200       | 27,700       | 6.5        | 1.96  |

(室内実験)用試験体として定着部を直方体に切り出した形状のエンドブロック (E) 試験体を製作した。

2.2 検討の概要

(1) 緊張力の損失

PC 格納容器に使用される大容量テンドンは、わが国では初めての経験であり、従来のプレストレストコンクリート構造物の設計・施工に用いられている小容量テンドンでの実績をそのまま用いることができないと思われる、さらにアンボンドタイプの場合には、わが国では経験のないグリースを用いることにより、緊張時における摩擦損失も特異なものとなることが予想され、これらの確認が必要となった。

このようなことを考慮して緊張力の損失については、その基本的な要因の各々についてこの研究での実験をとおして可能な限りの検討を加えた。

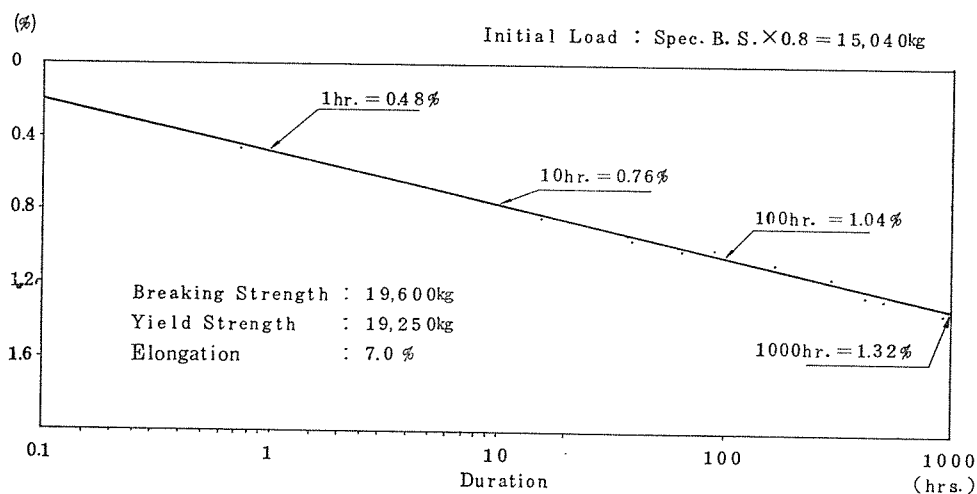
本実験では、表一に示すように、各試験体に種々の角度変化や曲率を持つテンドンを配置しており、これらアンボンドテンドンの緊張時における摩擦損失量を測定した。トランペットシース部およびくさび部での摩擦やセットロス等に関する測定は、A試験体の直線ダクト等を用いて行った。

R試験体では、クリープ、乾燥収縮に関して長期測定を継続中である。

U試験体では、両引きの場合や、緊張解除時および緊張解除後の再緊張時での摩擦についても測定を行った。

使用した PC 鋼材のリラクセーションについては、引張荷重の 80% の荷重で 1000 時間のリラクセーション試験を行った。リラクセーション試験結果を図二に示す。

これらの実験結果から摩擦損失に関しては、現在諸外国のアンボンドテンドンの設計に用いられている数値が採用できることを確かめた。



図二 スtrandのリラクセーション試験結果

(2) 定着部の健全性

通産省資源エネルギー庁の「原子力発電用コンクリート格納容器に関する技術基準(案)」では、緊張材定着部のコンクリート補強に関しては、「緊張材定着部付近のコンクリートにはU字状、格子状またはらせん鉄筋等で補強する」と規定しており、同解説において「定着側のコンクリートの補強方法は、一般に各プレストレスング工法ごとにそれぞれ特有の方法が定められている。この慣用の方法で十分安全であることが認められている場合には、それぞれの慣用の補強方法によるのがよい。」と説明されている。土木学会の「プレレストコンクリート標準示方書」、建築学会の「プレレストコンクリート設計・施工規準」においても同様の主旨が述べられており、建築学会規準では、「わが国で実績のない定着具を用いる場合は、定着部補強筋の設計計算をする必要がある。」としている。

定着部の設計に関しては、ASMEの「Section III Div. 2」で次のように規定している。

- 1) コンクリートは、プレストレス導入時における最大ジャッキ荷重を支持すること。
- 2) 定着部は、テンドン規格引張荷重の1.1倍の荷重までは破壊しないこと。
- 3) 定着部の設計は、実験または実験結果との照合がなされた解析方法により確証されねばならないこと。

このような規定に関連するものとして、土木学会の「プレレストコンクリート標準示方書」では「定着具および接続具は、定着または接続されたPC鋼材が規格に定められた引張荷重値に達する前に破壊したり、著しい変形を生じることのないような構造および強さを有するものでなければならない。」と定められている。ここでは、コンクリートに関しては定められていないが、定着具と同等の強さを有する必要があると思われる。

以上の事項を考慮して定着部に関する実験および解析を行い、安全性を確かめた。

定着部についての基礎実験は、試験体断面120cm×90cm、高さ180cmのE試験体で行った。E試験体は、荷重1000tまでの載荷試験を行った後、日本大学理工学部の3000t大型構造物試験機を使用して、定着部が破壊するまでの実験を行った。

R試験体では、テンドン緊張時の定着部鉄筋応力度を測定し、U試験体では、テンドンの規格引張荷重に相当する荷重を与えて定着部のコンクリートや補強筋の応力状態等を測定した。

定着部の応力状態を理論的に検討する方法としては、3次元直方体要素を用いた有限要素法(FEM)を採用し

た。モデルとしては、ディテンションタイプの定着部を想定して製作したE試験体を対象とした。このエンドブロック試験とFEMとの照合結果から、定着部の応力状態解析にFEMが適用できることを確かめた。

(3) 施工性

本実験では、PC格納容器の実機施工にできるだけ近い状態で模型を製作することによりその施工性を検討した。

PC格納容器が、RC原子炉建屋と異なる点としてはコンクリート壁体内のテンドンの配置、壁体内面のスチールライナーの設置、テンドン定着部を構成するバットレス部の存在、高強度コンクリートであること等があげられる。このうち特にバットレス部には、平面形状が複雑で太径の鉄筋が多量に配置されているほか、シース、トランペットシース、支圧板やそれらの支持架台などがスチールライナーの外側にぎっしりと配置されている。

本実験では、U試験体の一部に実機の場合とほぼ同じ状態のバットレス部を設け、その施工性を検討した。ここでは、太径鉄筋の継手は、カップラー継手とした。バットレス部の配筋状況を写真-2に示す。

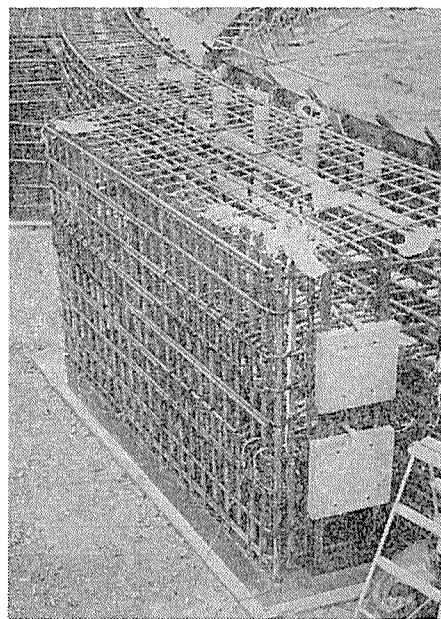


写真-2 U試験体バットレス部配筋および支圧板取付けの状況

電気出力110万kW以上の原子力発電所のPC格納容器では、1基当たりを使用するPC鋼材は、テンドン本数にして200~250本、重量にして1000~1300tとなり、テンドン1本当たりの長さは90~170mで、その重量も数tにもなる。

これらのプレストレス工事においては、従来の小容量テンドンには見られなかった特殊なテンドン配置のための諸装置を必要とするほかに、アンボンドタイプ

研 究

の場合はグリージング作業があり、さらに ISI 時には、リフトオフ荷重測定、緊張解除、再緊張などの特殊作業がある。

テンドンに使用したシースは、 $\phi 145\text{ mm}$  のスパイラルシースで、トランペットシースは、ディテンション用のものでは、 $\phi 335\text{ mm}$  である。このような太径シースの加工、組立て、水密性、据付け等の施工性についても検討した。

テンドン製作用のコイラー、テンドン挿入用のプッシュスルー機、水平タガー、コイラー等も実機施工用相当のものを用意し、それらの操作をとおしてその施工性を検討した。コイラーの使用状況を写真-3 に示す。

テンドン挿入方法としては、アメリカでは、プルスルー方式、フランスではプッシュスルー方式がおもに用い

られている。

PC 格納容器が半球ドーム型の場合、逆Uテンドンの挿入方法はプルスルー方式となるが、水平テンドンに対しては、プッシュスルー方式を使用することによってその経済効果が期待される。本実験では、この二つの方法についてグリース塗布の作業も含めてその施工性等の比較検討を行い、両者の水平テンドンに対する適用性を確認した。その挿入状況を図-3、図-4 に示す。

テンドンの緊張は、800 t および 1 000 t ジャッキを用いて行った。使用したテendonは、VSL-E 5-55 ( $\phi 12.7\text{ mm}$  ストランド 55 本) および VSL-E 6-55 ( $\phi 15.2\text{ mm}$  ストランド 55 本) でプレストレス中の許容引張力は、それぞれ 787 t および 1 119 t である。容量の大きい後者のテendonは、定着部の耐力等を調べるため、

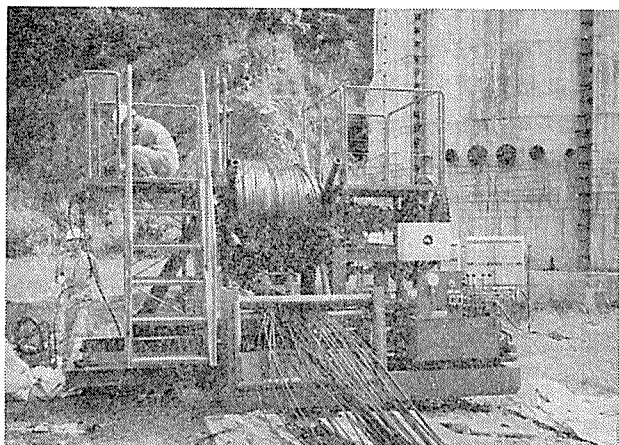


写真-3 コイラーによるケーブルの巻取り

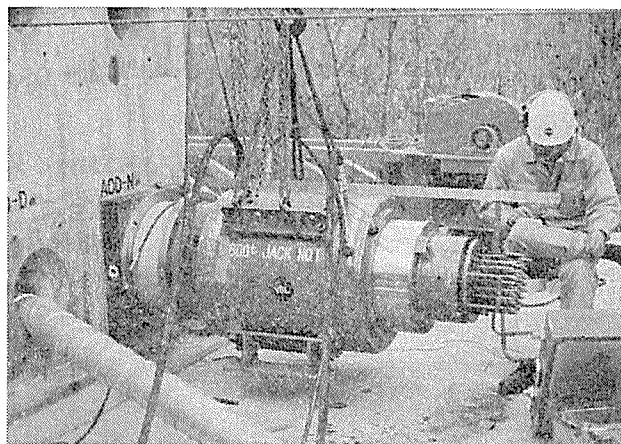


写真-4 緊張作業

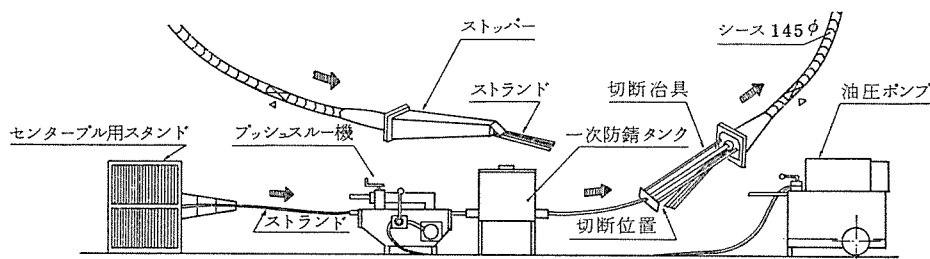


図-3 プッシュスルーによるケーブルの挿入

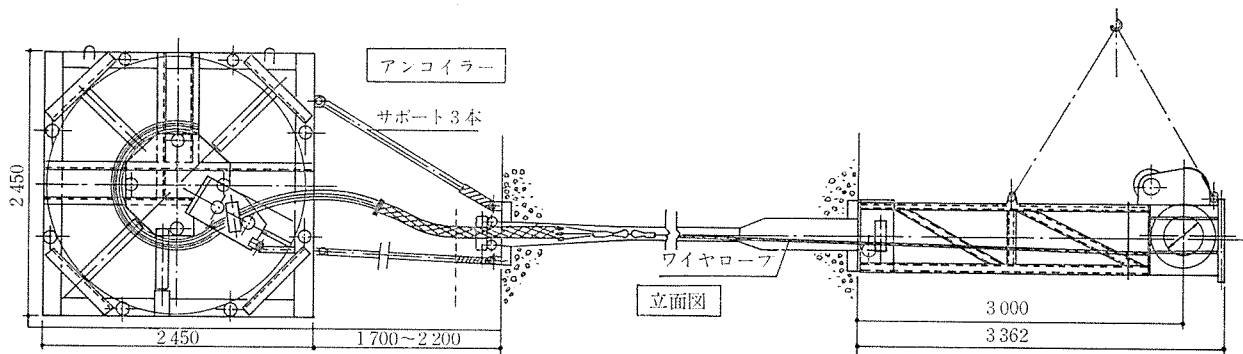


図-4 プルスルー挿入状況図

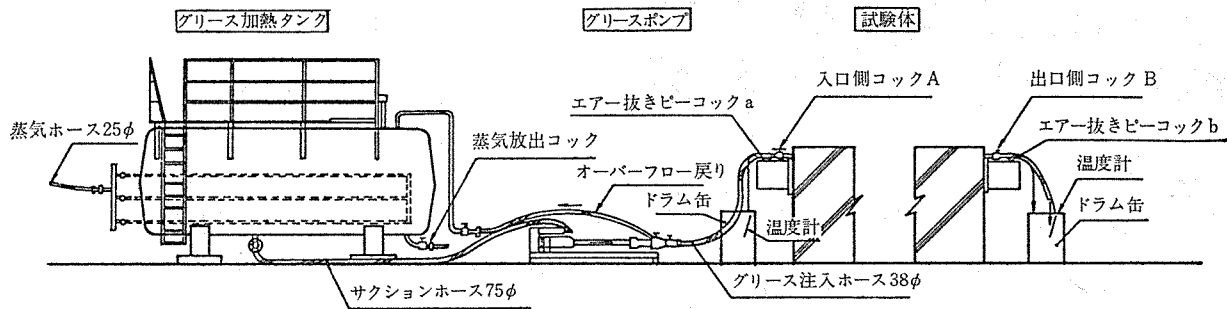


図-5 グリース注入設備

表-4 グリースの性状

|                    | 試験方法       | 昭石 P-603                                  | VISCONORUST<br>2090P-4 |
|--------------------|------------|---|------------------------|
| 比重 15/4℃           | JIS-K-2249 | 0.94                                      | 0.94                   |
| 引火点 ℃              | JIS-K-2265 | 215                                       | 215                    |
| ちょう度 25 ℃          | JIS-K-2560 | 214                                       | 196                    |
| 残存イオン量<br>ppm      | 塩素イオン      | ASTM-D-512                                | 2                      |
|                    | 硝酸イオン      | ASTM-D-992                                | 2                      |
|                    | 硫酸イオン      | APHA No 428                               | 2                      |
| 塩水噴霧<br>A級-Hr      | 25 μ       | JIS-Z-0236                                | 288                    |
|                    | 50 μ       |   | 600 以上                 |
| 流下試験 (膜厚 1 mm) ℃   | JIS-Z-0236 | 60  | 50                     |
| 耐温度性 ℃             | JIS-K-2561 | 54  | 49                     |
| 鉄分 wt%             | 原子吸光分析     | 0.00                                      | 0.10                   |
| 油分離 40℃ 24hr       | JIS-K-2570 | 0.4                                       | 6.7                    |
| 耐水性 ※              | JIS-Z-0236 | 4992h (208日) 油膜<br>表面乳白色になる素<br>地には達していない | 同 左                    |
| 耐アルカリ性 1/2N NaOH ※ | JIS-Z-0236 | 同 上                                       | 同 左                    |
| 耐酸性 1/2N HCl ※     | JIS-Z-0236 | 4992h (208日) 異状なし                         | 同 左                    |
| 屋外暴露 ※※            | JIS-Z-0236 | 1368h (57日) 発錆                            | 同 左                    |

※ 試験膜厚 3500 μ  
 ※※ 試験膜厚 30 μ

U試験体の一部に使用した。緊張作業の状況を 写真-4 に示す。

グリーシングに関しては、グリース加熱タンク、グリースポンプ等の諸機器の性能試験、グリースの熱特性試験、ダクト内注入状態の観察等を行い、その施工性およびグリースが完全に充てんされていることを確認した。グリース注入設備を 図-5 に、使用したグリースの性状を 表-4 に示す。

(4) ISI (Inservice Inspection)

諸外国では、PC 格納容器の機能が十分に果たせることを保証するために、建設後に耐圧、漏えい試験が行われ、使用期間中もその構造性能に影響を与える構造上の劣化の有無を調べるために定期検査 (ISI) が行われている。

本実験では、ISI に関連する作業としてリフトオフ荷重の測定、緊張力解除、ストランドの抜き取りおよび再緊張等を行い、これら諸作業の検討を行った。

リフトオフ荷重の測定は、緊張直後と緊張力解除作業開始時に行った。緊張直後におけるリフトオフ荷重の測定は、ジャッキチェアーリングを取り付けて、再緊張し、アンカーヘッドを浮かせて行う方法によった。

テンドン定着部には標準タイプとディテンションタイプの定着具を用いて、それぞれの場合について、テンドンの伸びを戻す緊張力解除の作業を行った。これらの作業は、ディテンション装置を用いて行った。ディテンション装置のセット状況を 写真-5 に示す。

再緊張は、前記の緊張力解除作業と全く逆の作業となるが、この際にはテンドンの伸び量を考慮して行った。

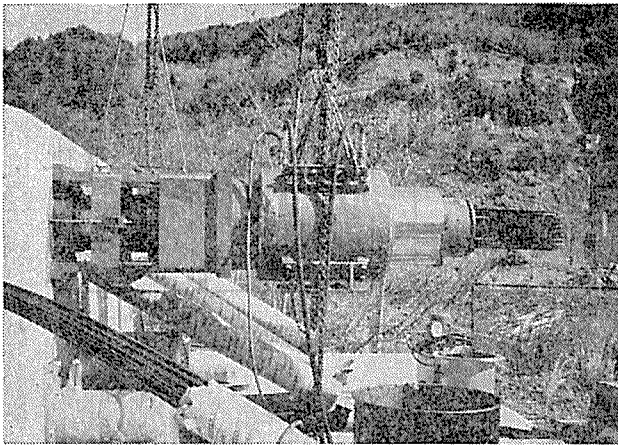


写真-5 ディテンション装置セット状況

2.3 摩擦損失に関する実験結果

緊張時の摩擦に関しては、テンドンの角度変化に関する

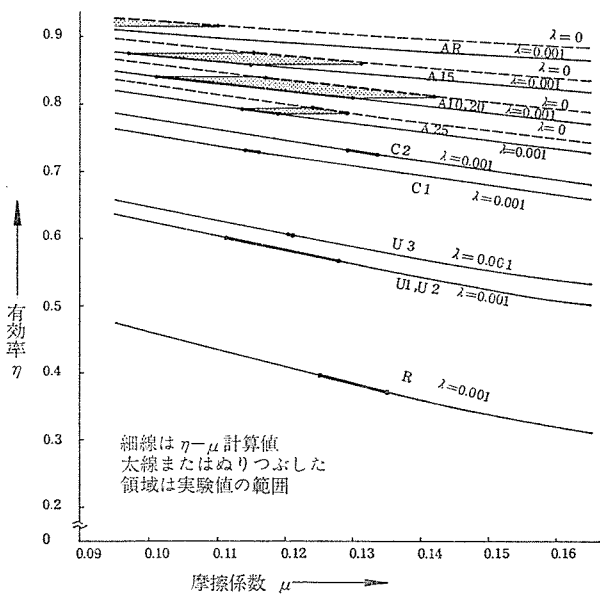


図-6 摩擦係数の分布の範囲

る係数μと長さに関する係数λとを考慮し、有効率ηとして下式を用いて評価した。

$$\eta = e^{-\mu\alpha - \lambda l}$$

ここに、α：テンドンの角度変化

l：テンドンの長さ

A, R, U3種の試験体に配置した12本のテンドンについての実験結果から求められた摩擦係数をまとめた結果を示すと、図-6および図-7のようになる。

図-6は、種々の角度変化をもつそれぞれのテンドンの場合について、実験で得られた摩擦係数μの範囲を、計算で求めたη-μ曲線上に示したものである。η-μ関係の計算値は、λ=0.001として算出しているがA試験体についてはλ=0の場合の計算値も破線で示し実験値を領域で示した。A試験体では、シースの配置精度を高め付加角変化を小さくしたため、λが小さくなっているとも考えられるのでλ=0の場合も考慮した。

図-7は、λ=0.001, μ=0.14とした場合の各テンドンごとの計算値と、今回の実験で得られた値をプロットしたものである。実験値は、同じ角度変化をもつテンドンの測定結果の平均値である。

これらの結果から、摩擦係数についてλ=0.001, μ=0.14として設計を行えば、必要とするプレストレスが十分導入できるものと判断した。

2.4 定着部の健全性に関する実験結果

定着部の健全性に関する基礎実験に用いたE試験体は標準タイプとディテンションタイプのトランペットシースを埋込んだもので、格子状補強筋とU字補強筋の2種の補強方法について、その耐力を確かめた。その荷重状況を写真-6に、供試体寸法を図-8に示す。

これらE試験体の荷重試験結果を表-5に示す。

定着部における、コンクリート、補強筋ひずみ等の測

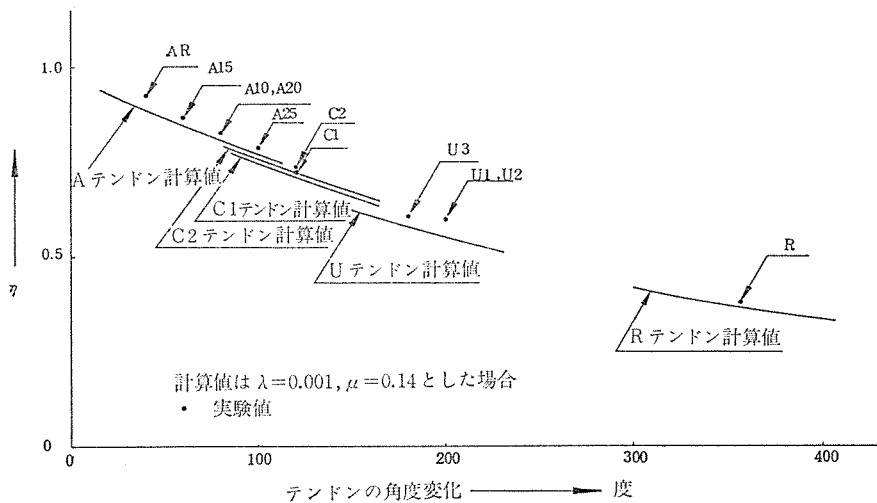


図-7 有効率の計算値と実験値の比較

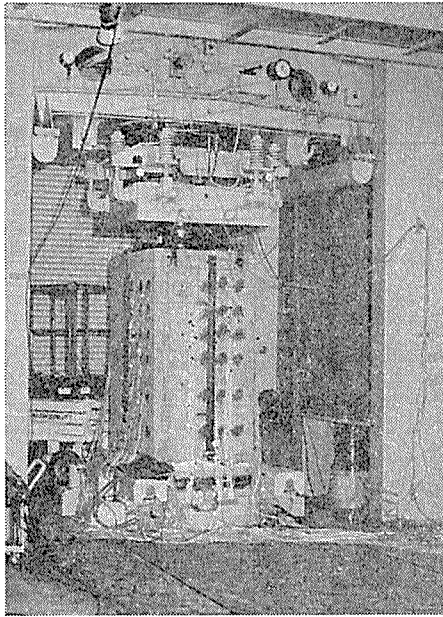


写真-6 E実験載荷状況

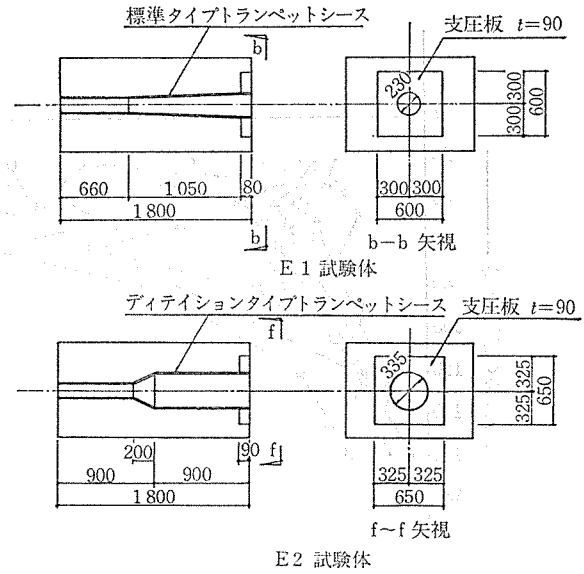


図-8 E 試験体

定はR試験体およびU試験体でも行った。これらの測定結果の中から、横補強筋ひずみ分布について 図-9、図-10 に示す。

E試験体について、荷重 800 t 時のコンクリート応力分布の測定結果と、3次元直方体要素を用いた FEM による解析結果とを対比したものを 図-11 に示す。

これらの実験および解析結果をまとめると、次のとお

表-5 エンドブロック試験結果一覧表

| 試験体名 | ①最大荷重 (t) | ①/1030 t | ②補強筋降伏時の荷重 (t) | ①/②  | 備 考        |
|------|-----------|----------|----------------|------|------------|
| E1   | 1782      | 1.73     | 1650           | 1.08 | 標準タイプ      |
| E2   | 1909      | 1.85     | 1850           | 1.03 | ディテンションタイプ |
| E3   | 1694      | 1.64     | 1600           | 1.06 | 標準タイプ      |
| E4   | 1800      | 1.75     | 1600           | 1.13 | ディテンションタイプ |

\* テンドン規格引張荷重

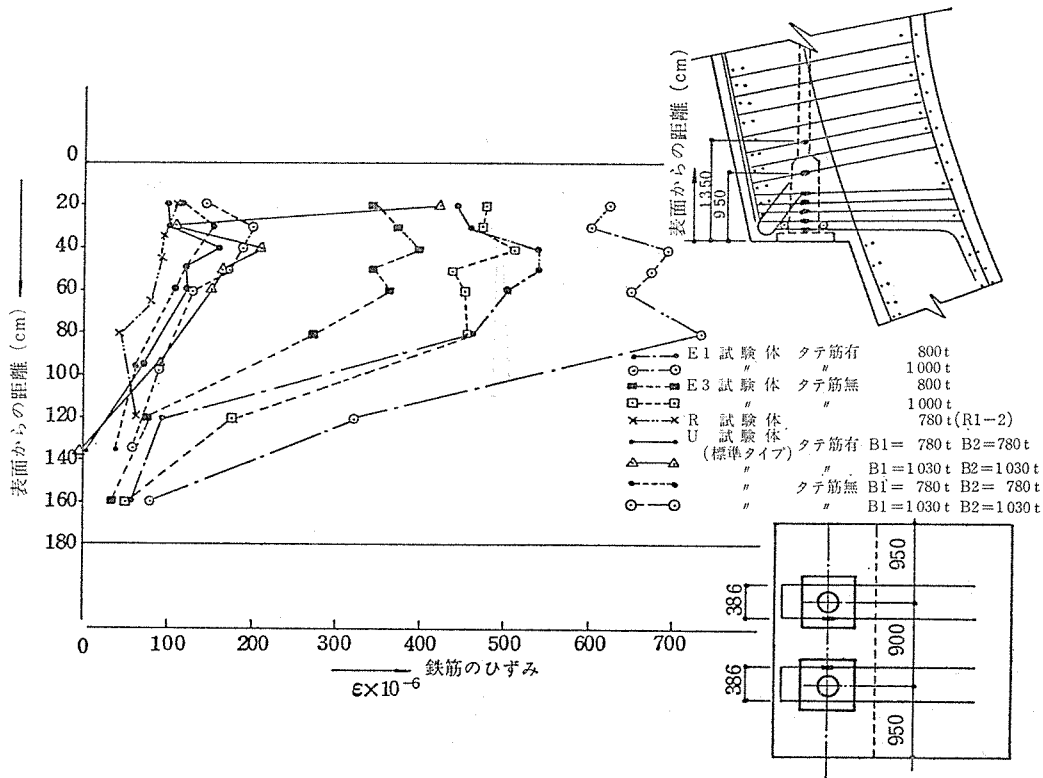


図-9 横補強筋のひずみ (標準タイプ)



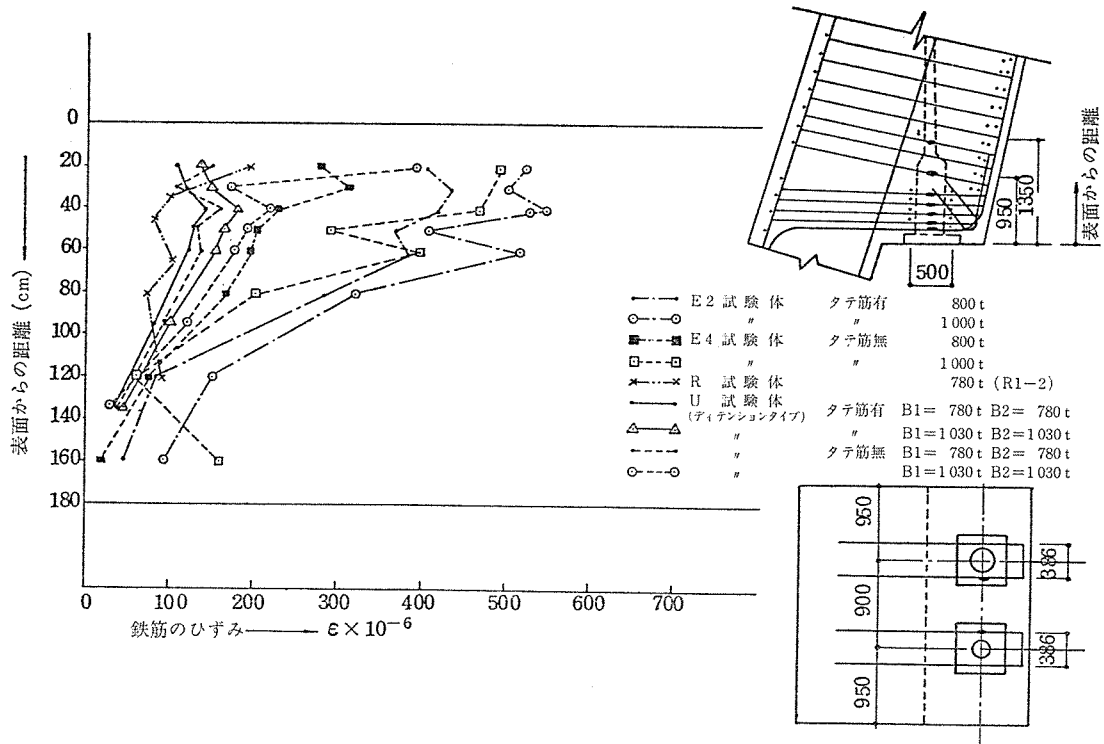


図-10 横補強筋のひずみ (ディテンションタイプ)

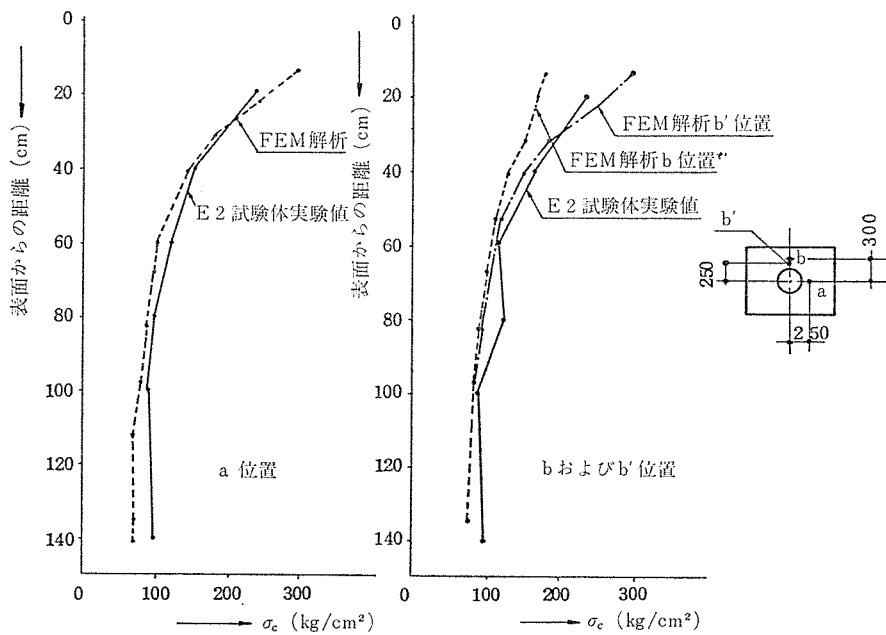


図-11 定着部コンクリート支圧応力分布 (実験値と解析結果の対比)

りとなり、定着部に関しては十分安全であると判断した。

(1) プレストレス導入時：コンクリートの平均支圧応力は許容値以下であり、補強筋のひずみは、E試験体では降伏ひずみの1/5程度、R試験体およびU試験体では1/8程度であり、コンクリートのひびわれはR試験体およびU試験体では生じなかった。

(2) テンドンの規格引張荷重時：コンクリートの応

力はプレストレス導入時の50%増となり、補強筋のひずみは、E、U試験体で降伏ひずみの1/4程度である。支圧板の一部は局部的に降伏するが、定着部に著しい変形は生じなかった。

(3) テンドンの規格引張荷重の1.1倍時：E試験体は、テンドンの規格引張荷重の1.1倍荷重では破壊せず、1.64~1.85倍の荷重で破壊した。

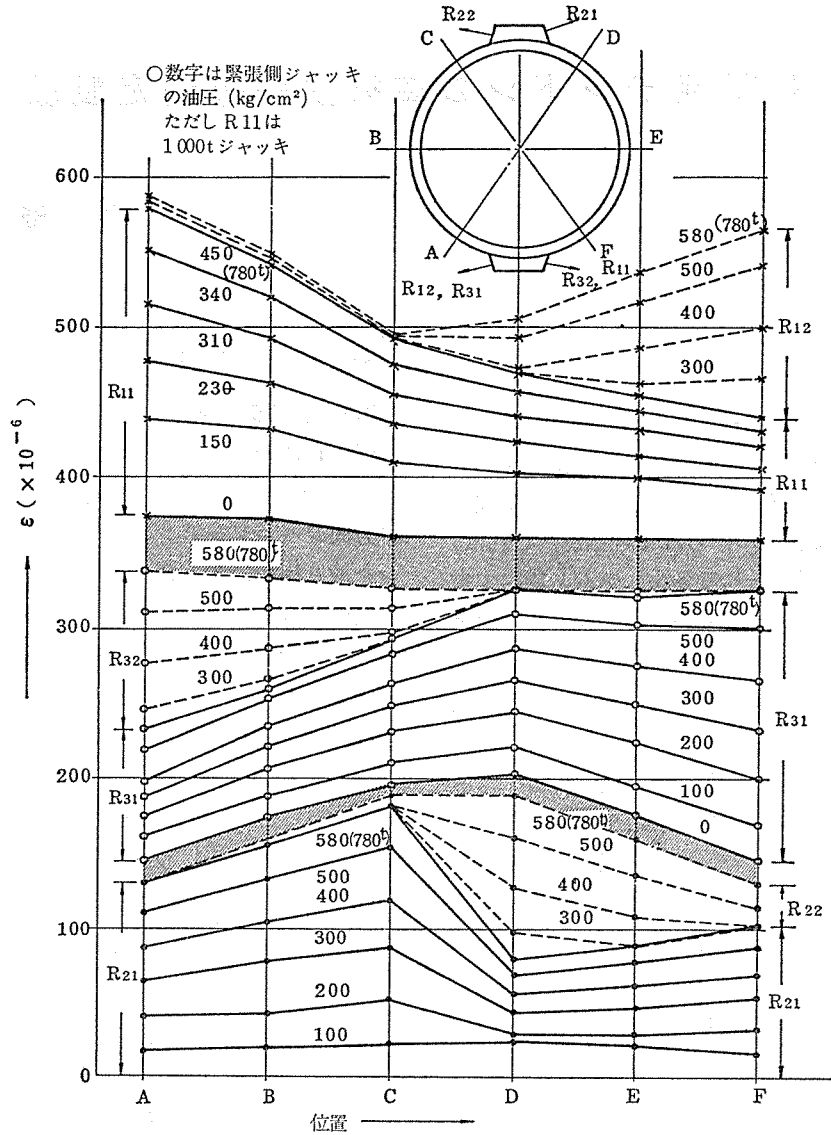


図-12 R テンドンプレストレッシング時円周方向ひずみ分布

2.5 R 試験体の実験結果

アメリカ等においては、PC 格納容器は 3 バットレスタイプが主流となっている。しかしながら、大容量テンドンを用いる場合には、バットレス数を少なくした方が作業性、経済性に対して有利になるものと考えられ、フランスでは 2 バットレスタイプの PC 格納容器も建設されている。そこで R 試験体は、図-1 に示すように 2 バットレスタイプとし、プレストレッシング作業、プレストレス分布等について検討した。また、プレストレスの長期測定も実施している。

R 試験体の諸測定のうちからプレストレッシングによるコンクリートのひずみ分布の測定結果を 図-12 に示す。図は、各測定断面の平均軸方向ひずみをプレストレッシングによる荷重段階ごとに示してある。図中ぬりつぶしてある部分は、プレストレッシングを中断した (24 ~ 48 時間) 期間のクリープひずみである。実機でのプ

レストレス分布は、この実験での R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> 2 本のテンドンを緊張したときの状態に対応するものと考えられ、このときの応力状態は、全周にほぼ均等な応力分布を示している。

この結果から、2 バットレスでも、プレストレス導入には全く問題がないものといえる。

3. あとがき

実機を想定した実物大の試験体による大容量テンドンに関する実験的研究について、紙面の許すかぎりその概要について述べたが、この研究の一部についてはなお継続中である。ここに報告した研究は、関西電力 (株) が大成建設 (株) の協力を得て昭和 53 年 12 月から昭和 55 年 3 月までに行ったものである。本研究を進めるにあたって多くの専門の方々にご指導賜わった。誌面を借りて深く感謝する。