

フラットジャッキによるプレストレス導入法の研究

A CIRCULAR PRESTRESSING METHOD BY RADIAL ACTION

藤田 亀太郎*

By Kometaro Fujita

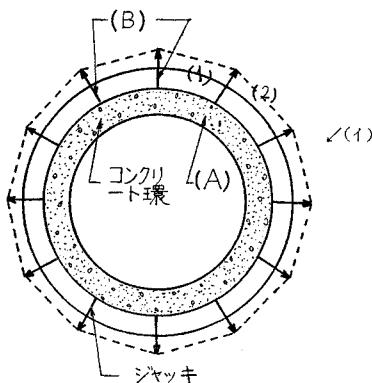
1. 試験目的および工法の概要

シリンドラーの円周方向プレストレスを与える場合、普通にはPC鋼材を円周に沿って配置し、その両端をシリダーリブに定着する方法が用いられている。すなわち、タンクに円周方向プレストレスを与える場合などに、すでに古くから用いられているものである。

原子力発電に用いられるプレストレストコンクリート圧力容器(PCPV)では与えなければならないプレストレスの大きさが従来のタンクの比ではなく、非常に大きいプレストレッシング力を必要とする。この非常に大きいプレストレッシング力を従来一般に用いられているプレストレッシング方式(PC鋼線束のケーブル)を用いたのでは、必要なケーブル本数は非常に多くなり、その配置、プレストレッシング等が非常に複雑となるものである。それで PCPV に用いるため大きい引張力を与えることの可能な大単位 PC ケーブルの開発が進められている。

本研究では従来一般に用いられていた PC 鋼線または PC 鋼より線を束とし、その両端で緊張定着する方式によらず、円周に沿ってエンドレスに巻きつけた PC 鋼より線を半径方向に押し出して PC 鋼より線に引張力を与える工法の可能性を検討するものである。

図-1 フラットジャッキによるプレストレッシング概要図



すなわち、図-1において(A)はプレストレスを与えるようとするコンクリート環を示す。(イ)は環(A)の円周に沿って巻いたPC鋼より線である。

環(A)とPC鋼より線(イ)との間にフラットジャッキ

* 正会員 極東鋼弦コンクリート振興KK社長

を挿入して置く。フラットジャッキ(B)を作動させると PC 鋼より線は(2)の位置に移動し、その長さは増加する。すなわち、PC 鋼より線には引張力が作用する。

PC 鋼より線(2)はフラットジャッキ(B)の間では直線状となる。この折線の角の2等分線方向、すなわち半径方向の PC 鋼より線引張力の分力は、コンクリート環(A)に対して半径方向外力として作用し内圧による引張応力を打消すための圧縮応力を与えることになる。

このようなプレストレッシング工法の利点はつぎのようである。

(1) PC 鋼より線を PCPV の炉心より離して配置できるので、PC 鋼より線の温度上昇はほとんどなく、レラクセーションも小さくできる。また放射能の影響も最少になる。

(2) PC 鋼より線の引張力を容易に調節可能であり、またその引張力測定も容易であるから、PCPV の安全性を検査、確保することができる。

(3) 円周方向のプレストレッシング用 PC 鋼より線は、コンクリート打ち後またはコンクリート打ちの進行にともなって巻けるので、従来のようにシース配置を終了しないとコンクリート打ちができないのに比較して現場作業が簡易化される。

(4) 巻き付ける PC 鋼より線直径を太いものとすることによって、従来用いられた形式の定着装置によっては不可能な大きい引張力を比較的コンパクトな形式で与えることができる。フラットジャッキによってプレストレスを与える場合、上記のような利点が考えられるが、実際に所望のプレストレスが与えられるものかどうかを確かめるため、本研究を実施した。

2. 供試体製作

(1) 供試体構造および形状寸法

供試体は図-2に示すように高さ 40 cm、厚さ 100 cm、内径 800 cm のコンクリート環体で、外周に 24 個のフラットジャッキを挿入したコンクリートブロックが取付けである。

ブロックの中には直径 35 cm のフラット ジャッキを 2層に配置してある。

ブロックの外面には PC ストランド支承用鋼板を固定し、この鋼板外周に 12.4 mm 直径の PC ストランドを 2 層に 38 本配置してある。

供試体環体内壁には厚さ 10 cm のアルミナセメントコンクリート(耐熱用)で中埋めした 2 枚の鋼板製ライナーが設けてある。

この供試体はシリンダー状の圧力容器の一部を切取った部分模型であって円周方向プレストレスの研究

をするためのものである。

(2) 使用材料

a) コンクリート コンクリートの配合は表-1 のようである。

使用コンクリートの圧縮強度試験結果は表-2 のようである。

供試体寸法は、直径 10 cm、高さ 20 cm の円柱である。

試験結果は 3 個の平均値である。

b) PC 鋼より線 PC 鋼より線は直径 12.4 mm

図 2 (a)

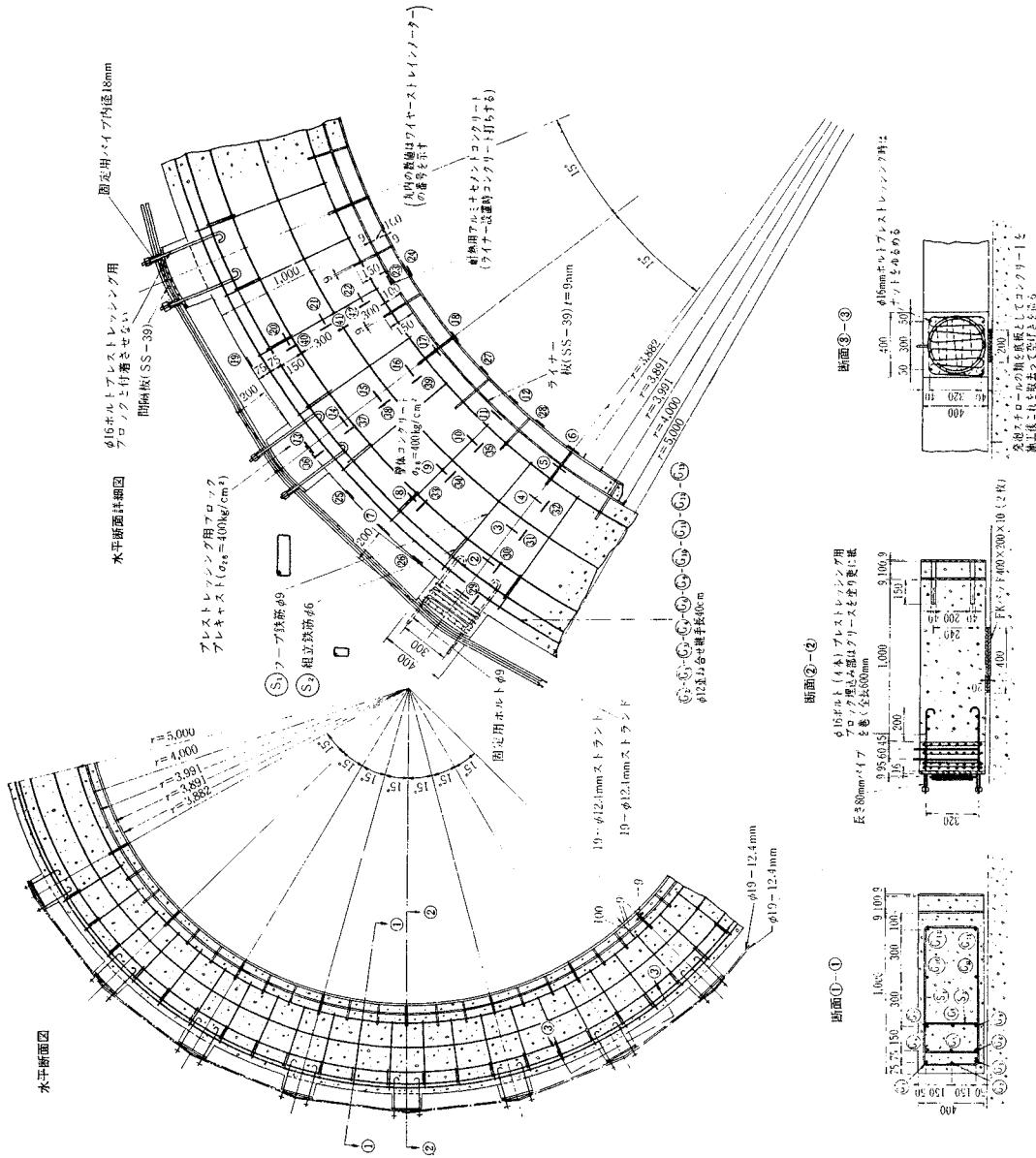


図-2 (b)

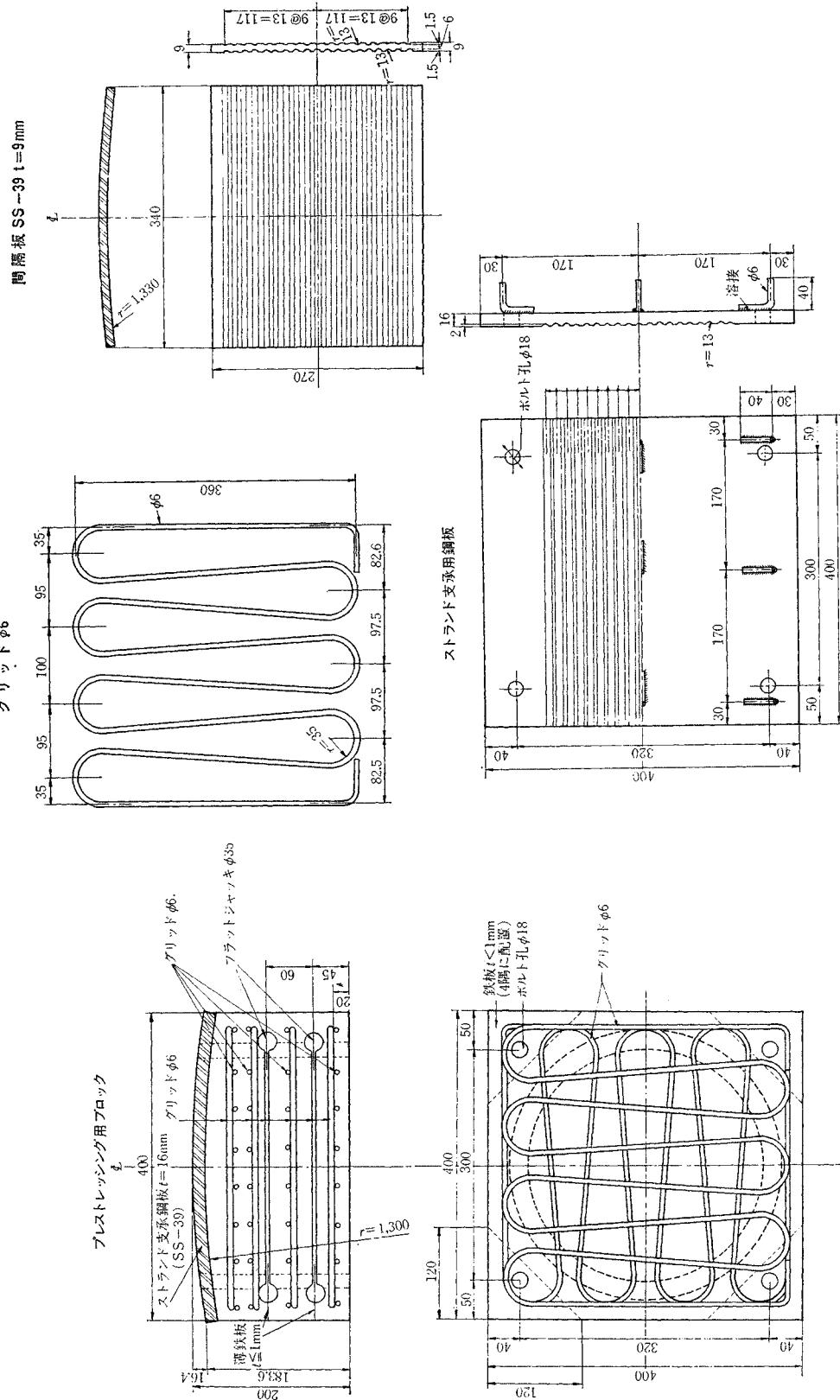


表-1 使用コンクリートの示方配合

使用部分	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	単位水量 W (kg)	単セメント量 C (kg)	位置水セメント比 w/c (%)	細骨材率 S/A (%)	単細骨材重量 S (kg)	位置粗骨材重量 G (kg)	セメントの種類
壁体	25	3±0.5	166.5	450	37	42.4	780	1 060	普通ポルトランド
フラットジャッキブロック	5	1±0.5	230.9	513	45	48.7	780	820	普通ポルトランド
耐熱層部	5	2±0.5	180.0	300	60	45.2	865	1 050	シマンホンジュ

注: 普通ポルトランドセメントは日本セメントKK香春工場製

シマンホンジュはフランス、ラファルジュ社製

骨材は酒匂川産天然川砂および砂利で試験結果は下表のようである

細、粗骨材試験結果

	比重	単位容積重量 (kg/cm³)	粗粒率	吸水率 (%)	泥土量 (%)
細骨材	2.61	1 646	3.02	1.07	1.0
粗骨材	2.65	1 675	6.74	0.55	0.2

表-2 コンクリート圧縮強度試験結果

(i) 壁体用コンクリート スランプ=3.0 cm

施工年月日	材令(日)	平均圧縮強度(kg/cm²)
9:22/39年	7	458
9:22/39年	28	655
10:1/39年	28	618
10:3/39年	28	668
10:3/39年	150	676

(ii) フラットジャッキブロック コンクリート
スランプ=1.0 cm

施工年月日	材令(日)	平均圧縮強度(kg/cm²)
11:16/39年	7	380
11:16/39年	7	370
11:16/39年	14	461
11:16/39年	14	445
11:16/39年	112	633

(iii) 耐熱層用アルミナセメントコンクリート
スランプ=2.0 cm

施工年月日	材令(日)	平均圧縮強度(kg/cm²)
9:18/39年	7	336
9:18/39年	7	320

のもので神鋼鋼線鋼索製である。

試験結果は表-3 のようである。

PC鋼より線試験結果の応力ひずみ曲線は図-3 に示してある。

c) フラットジャッキ フラットジャッキは直径350 mm、厚さ 25 mm、最大作用力 110 t、最大揚程 25 mm でその形状、寸法は図-4 に示してある。2枚の薄軟鋼板を加工しその円周を溶接したもので、注入孔と排気孔とを有しており、加圧された流体を容器中に注入すると、ジャッキの両面は押しひろげられるよう変形する。図-4 の(B)および(C)はそれぞれ注入前および注入後の状態を示し、 $h_b - h_a$ が揚程に相当する。また作

表-3 PC鋼より線試験結果

直 径 (mm)	引張荷重 (kg)	破断時伸び 600 mm (%)	降伏荷重 (0.2%) (kg)	断面積 (mm²)	レラクセ ーション (%)	ピッチ (d×倍)
12.39 (公称 12.4)	17 200 (>16 400)	5.6 (>3.5)	15 800 (>14 000)	92.87 (標準92.9)	1.44 (<3.5) (36~48)	40.3

注: () 内は JIS G 3536 の 7 本より 12.4 mm に対する数値である。

素 線 径 (mm)

心 線	4.23
側 線	4.08~4.10

図-3 PC鋼より線の応力ひずみ曲線

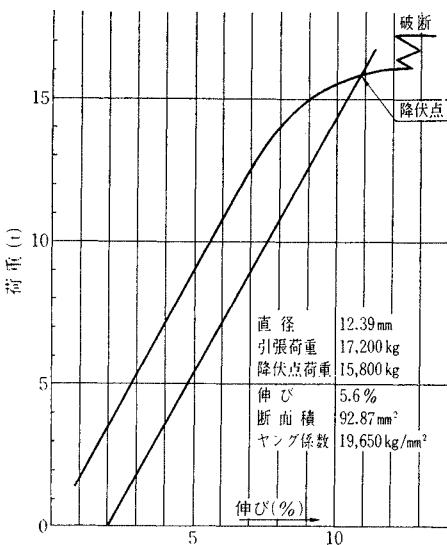
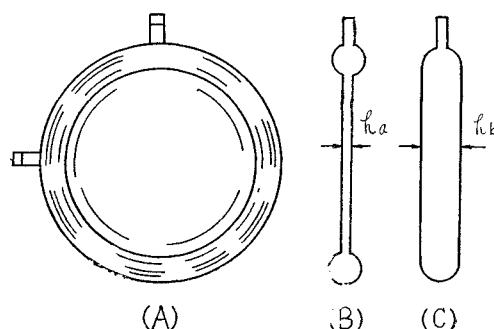


図-4 フラットジャッキ



動力はジャッキの有効面積に注入液体圧力を積したものに等しい。

フラット ジャッキのキャリブレーションには、100 t 圧縮試験を用いて実施した。すなわちフラット ジャッキに油を注入した状態で試験機を作動させ、フラット ジャッキに加圧してポンプの圧力計読みに相応する試験機荷重計の読みをとったものである。この結果を表-4、図-5 に示す。フラット ジャッキはこれをコンクリート ブロックに埋込んで実際に使用する時と同一状態にしてある（写真-1）。

フラット ジャッキはこれをコンクリート ブロック中に埋めて用いた。このブロックの詳細は図-2 に示すよ

表-4 フラット ジャッキのキャリブレーション

圧力計の読み (kg/cm ²)	試験機荷重計読み (kg)			計算受圧面積 (cm ²)
	第 1 回	第 2 回	平均	
15	20 950	21 050	21 000	1 400
30	32 300	39 200	31 750	1 058
45	43 750	43 500	43 625	969
60	54 200	54 250	54 225	904
75	64 500	64 550	64 525	860
90	76 500	75 400	75 950	844
105	87 150	87 100	87 125	830
120	98 200	98 500	98 350	820

注：計算受圧面積は次式で求めた。

$$\text{受圧面積} = \frac{\text{試験機荷重}}{\text{圧力計の読み}}$$

図-5 フラット ジャッキ キャリブレーション

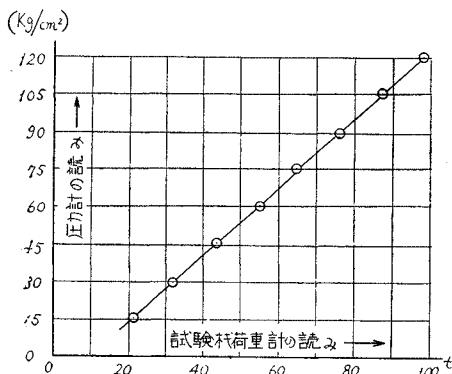


写真-1 フラット ジャッキのキャリブレーション

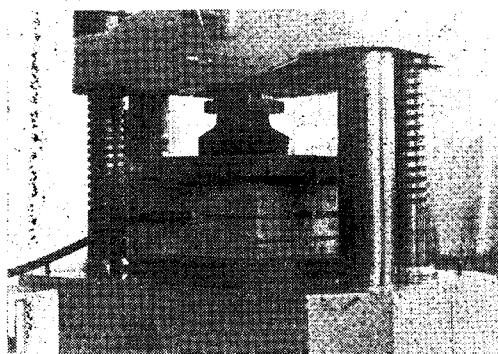


写真-2 コンクリート ブロック、コンクリート打ち前のフラット ジャッキおよびグリッド配置

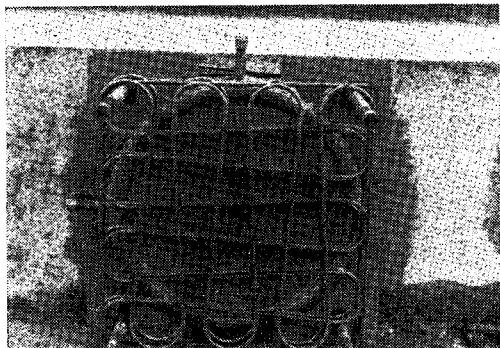
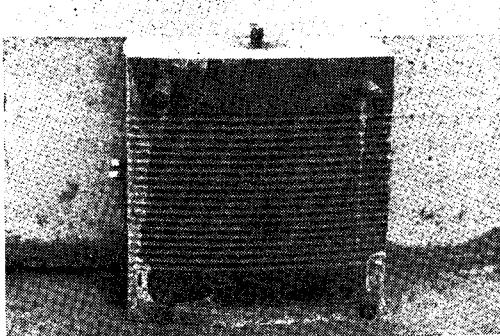


写真-3 フラット ジャッキ ブロック完成状況



うであって、フラット ジャッキはこれを 2 個 1 カ所に用いてある。このコンクリート ブロックには十分な鉄筋を配置して補強すると同時に、4 つの隅には三角形の薄鉄板を挿入して、フラット ジャッキを作動させたときコンクリート ブロックが容易に切れるようにしてある。

写真-2 にはコンクリート ブロックのコンクリート打ち前のフラット ジャッキおよびグリッド配置を示している。写真-3 にはコンクリート ブロックを環体に取り付けた状況を示してある。

(3) コンクリート打ち

コンクリートの練り混ぜには、強制振動練りミキサを用いた。練り混ぜ時間は、全材料投入後 90 秒とし、練り上ったコンクリートはただちに手押車で運搬、型わく中に投入し振動数 8 000 rpm, 1 HP のフレキシブル棒状バイブレーターによって十分振動締め固めをした。

写真-4 には型わく組立および配筋状況を示してある。写真-5 にはコンクリート打ちを示してある。

コンクリート打ち後、約 30 分にして表面仕上げを行ない、表面をぬれむしろでおおい放置した。

コンクリート打ちは、型わくおよび施工上の都合によりつぎの順序によった。

(1) 鋼板ライナー間のアルミナ セメント コンクリートは、これを 1 回で施工。

写真-4 型わくおよび配筋



写真-6 ヒバラーによるPC鋼より線の緊張

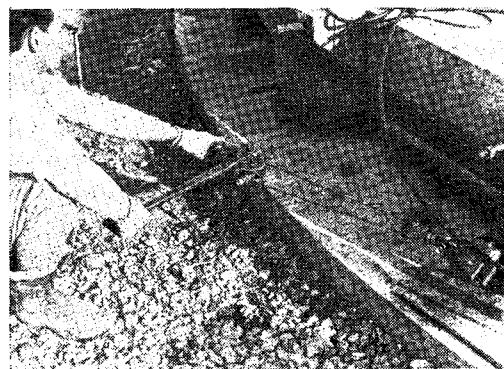
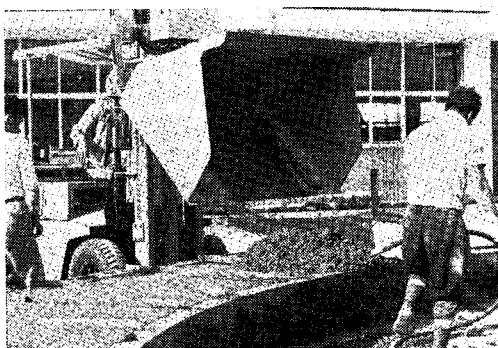


写真-5 コンクリート打ち



(2) 環体部コンクリートは、中心角 60° の 6 ブロックに分け 1 回 1 ブロックごとにコンクリートを施工。

(3) 24 カ所のフラット ジャッキ ブロックを施工。

(4) PC 鋼より線の巻きつけ

PC 鋼より線をコンクリート環体に巻きつけるにあたって実際の場合には機械化されなければならないことは当然であるが、この試験では簡便のため人力によることとした。

PC 鋼より線用木製ドラムをコンクリート環体の中心に設けた鋼製回転台上に置き、これが自由に回転できるようにしておく。PC 鋼より線の先端を人力で引き出し、環体外側から、コンクリート壁体に設けておいた孔を通して、環体内壁部に定着具を用いて固定する。

つぎに、PC 鋼より線を人力で引き出しながら、フラット ジャッキ ブロックの支承鋼板の溝に沿わせて進行し、半周ごとに、環体外に設けたアンカーを用いてヒバラーで一定の引張力を PC 鋼より線に与え（写真-6）、つぎに写真-7 に示すようなフラット ジャッキ ブロック固定ボルトを用いたおさえ金具で PC 鋼より線を仮止めする。

以下同様な作業を繰返して第 1 層 19 巻きを施工する。

つぎに PC 鋼より線各層間の間隔板をはさんで第 2 層 19 巻きを施工する。

最後に環体内壁部に定着してあった PC 鋼より線先端と、巻き終わった PC 鋼より線末端を接続するため、先

写真-7 PC 鋼より線の仮定着金具

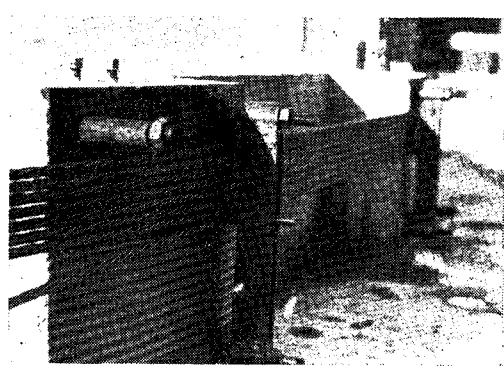


写真-8 カプラーによって PC 鋼より線両端を接続

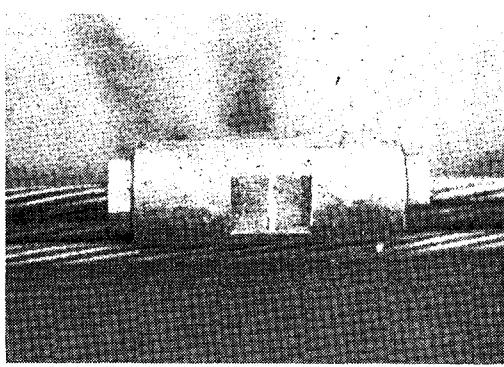


写真-9 PC 鋼より線と支持板

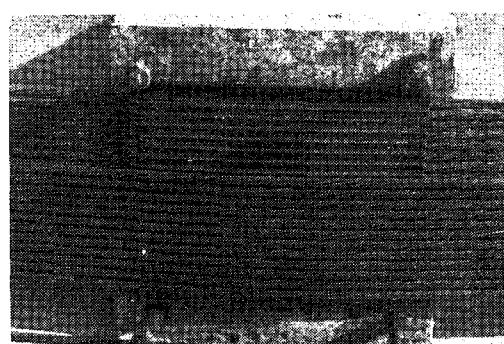
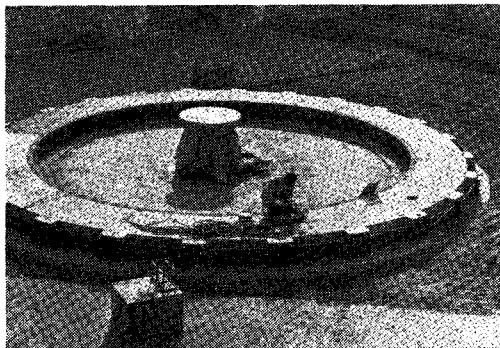


写真-10 完成した供試体



端部近くを環体外壁部で仮固定したのち、先端定着装置を取りはずし、環体外壁部に引出して、PC鋼より線末端とカプラー（写真-8）によって接続させた（写真-9）。

以上のようにして PC 鋼より線はエンドレスに供試コンクリート環体に巻きつけられた。以上完成した供試体は写真-10 に示してある。

3. プレストレッシング試験

(1) 試験方法および測定方法

プレストレッシングの試験は、コンクリート平均材令約 150 日のときである。

供試環体の中央に置かれた 1 台の電動油圧ポンプから、各フラット ジャッキに等加圧を与える、フラット ジャッキによって PC 鋼より線を半径方向に押出し、PC 鋼より線に引張力を与えるものである。

写真-11 には各フラット ジャッキへの配管を示してある。

以上プレストレッシングにおいて各フラット ジャッキが均等に作動し、PC 鋼より線各部に均等な引張力を与えることができるかを確かめることができる最も大切な目的である。また、PC 鋼より線引張力の半径方向分力によってコンクリート環体におこるプレストレスが期待どおりであるかをも確かめる。

以上の目的を達成させるため、各種測定を実施した。測定の種類および測定方法はつぎのようである。

写真-11 フラット ジャッキへの配管とワイヤ ストレインメーター取付状況



a) カールソン型ひずみ計によるコンクリートひずみ測定 カールソン型ひずみ計（土木測器センター製、L-10 B型）19 個を図-6 に示す位置に配置した。19 個のひずみ計のうち 2 個は無応力計である。プレストレッシング時の半径方向および切線方向のコンクリートひずみを測定した。

なお、コンクリート打ち直後から試験時までのコンクリートの乾燥収縮も測定した。

b) 抵抗線型ひずみ計によるコンクリートおよびライナーひずみ測定 壁体コンクリート、ライナー鋼板内壁面に図-7 に示すように 42 点のワイヤ ストレインゲージを取付け、プレストレッシング時のひずみを測定した。

使用したワイヤ ストレイン ゲージは共和電業製 KP-70-A1 である。

c) PC 鋼より線引張応力度の測定 供試体外周に配置された PC 鋼より線の円周 3 等分点上の 3 カ所で、フラット ジャッキ ブロック間の PC 鋼より線直線区間

図-6 カールソン型ひずみ計配置位置

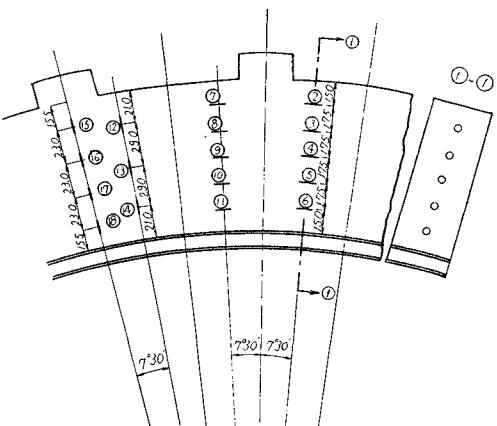


図-7 ワイヤ ストレイン ゲージ位置と番号

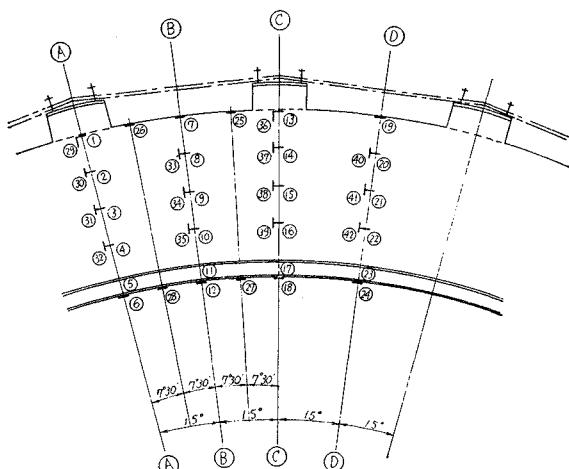


写真-12 PC鋼より線伸び測定

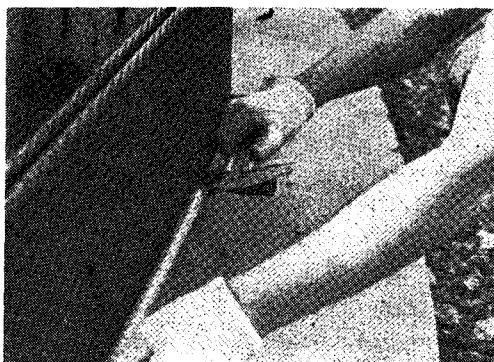
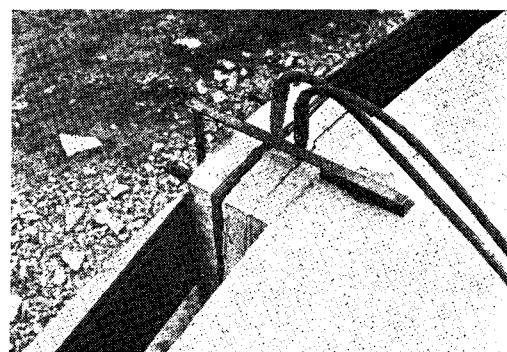


写真-13 フラット ジャッキ揚程測定用型鋼



での伸びを測定することによって、PC鋼より線の引張応力度を求めた。

測定標点間距離は800 mmとし、標点用金具をPC鋼より線に緊結した。あらかじめ製造された鋼製棒状定尺を用い、この定尺と標点間の残余長をノギスによって測定した。測定部1カ所につき2層に配置されたPC鋼より線の外層の上下端2本について伸びを測定した。したがって全測定数は6である。測定方法は写真-12に示してある。

温度変化の影響をできるだけ避けるように注意すると同時に、測定場所の温度を常に測定した。

d) 供試体変形量の測定 供試環体のプレストレッシングによる直徑の変化を直角2方向について1/100 mmのダイヤルゲージで測定した。測定方法は図-8に示してある。測定結果に対する温度補正をするため、外気温およびL型鋼温度も同時に測定した。

e) フラット ジャッキ揚程の測定 フラット ジャッキ ブロック総数24個のうち1つおきに12個をえらび、ポンプの作動にしたがうコンクリートブロック厚さの変化を測定しフラット ジャッキの揚程とした。コンクリートブロック中心線に沿って供試体上面に固定された型鋼とPC鋼より線支承用鋼板との間の間隔を測

図-8 環体直徑変化量測定法

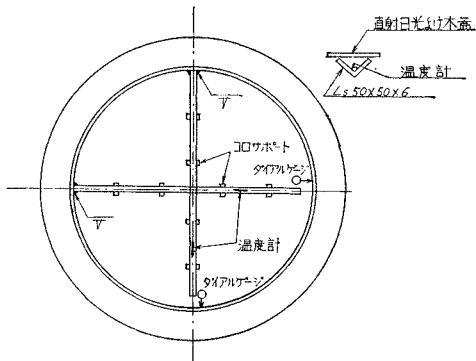
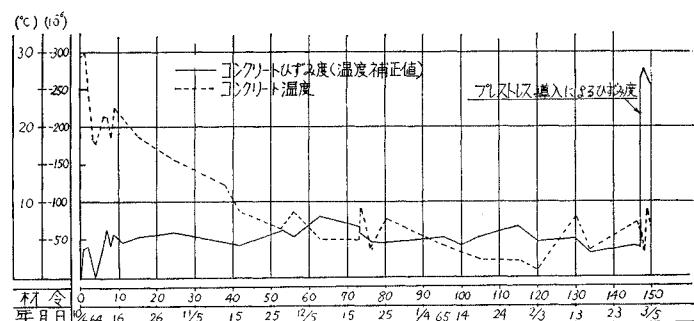


図-9 コンクリートの乾燥収縮度測定結果



定した。各測定箇所ごとに支承鋼板の上下両端の2カ所とした。写真-13にフラット ジャッキ揚程測定用型鋼を示してある。

(2) 測定結果

ポンプ圧力を30, 60, 90, 120, 150, 180 kg/cm²と30 kg/cm²ごとに増加させ圧力を一定に保ちながら3.(1)のa)~e)の測定を実施した。

a) カールソン型ひずみ計によるコンクリートひずみ測定 コンクリート打ち後、プレストレスを与えるま

表-5 カールソン型ひずみ計による測定ひずみ ($\times 10^{-6}$)

圧力計読み 測定 (kg/cm ²)	30	60	90	120	150	180
2	-12	-50	-88	-125	-169	-219
3	-19	-68	-111	-160	-210	-266
4	-19	-58	-110	-162	-175	-240
5	-13	-38	-77	-136	-201	-259
6	0	62	-123	-173	-241	-291
7	-13	-45	-78	-117	-163	-209
8	-19	-57	-95	-139	-183	-227
9	-19	-57	-100	-150	-188	-238
10	-13	-57	-107	-158	-203	-260
11	-12	-56	-124	-188	-238	-287
12	+ 7	+ 14	+ 21	+ 28	+ 35	+ 42
13	+ 6	+ 6	+ 13	+ 20	+ 26	+ 39
14	+ 7	+ 13	+ 20	+ 20	+ 26	+ 33
15	-12	-57	-101	-160	-210	-267
16	-13	-32	-52	-77	-96	-123
17	+ 3	- 5	- 3	- 12	- 8	- 17
18	+ 6	+ 1	+ 7	+ 7	+ 14	+ 14

表-6 抵抗線型ひずみ計によるコンクリートおよびライナーのひずみ測定結果

測点 荷重 (圧力計の示 度) (kg/cm ²)	30	60	90	120	150	180
1	-10	-55	-100	-125	-185	-235
2	-10	-55	-90	-110	-165	-215
3	-10	-60	-100	-135	-185	-250
4	-15	-80	-120	-165	-235	-235
5	-15	-80	-125	-170	-240	-315
6	-15	-80	-135	-175	-235	-325
7	-10	-55	-95	-145	-190	-245
8	-15	-75	-125	-175	-225	-295
9	-15	-80	-130	-175	-235	-295
10	-15	-85	-140	-180	-230	-315
11	-15	-85	-140	-180	-230	-315
12	-15	-85	-135	-175	-235	-300
13	-10	-45	-85	-150	-190	-260
14	-5	-45	-85	-150	-180	-235
15	-10	-65	-110	-160	-200	-255
16	-15	-80	-120	-170	-215	-270
17	-15	-85	-130	-175	-225	-285
18	-15	-85	-130	-170	-225	-280
19	-10	-75	-110	-150	-175	-205
20	-15	-75	-120	-165	-200	-235
21	-20	-80	-125	-170	-205	-240
22	-10	-80	-115	-160	-200	-280
23	-20	-95	-140	-180	-225	-285
24	-20	-95	-125	-165	-210	-285
25	-15	-65	-115	-175	-215	-275
26	-15	-70	-120	-160	-220	-285
27	-15	-90	-135	-175	-240	-300
28	-10	-75	-130	-165	-235	-300
29	+25	+30	+30	+10	+15	0
30	0	-5	0	-45	-50	-70
31	0	0	0	-20	-15	-15
32	+10	+10	+30	+15	+30	+30
33	+5	+15	+30	+30	+45	+55
34	+5	+10	+20	+30	+40	+45
35	+5	+10	+25	+30	+40	+40
36	+25	+15	+20	+15	+40	0
37	0	-20	-30	-10	-10	-45
38	0	-5	+5	+15	+20	+20
39	0	0	0	0	0	0
40	+5	+10	+30	+30	+30	+35
41	+5	+20	+20	+25	+25	+35
42	0	+15	+20	+25	+25	+30

単位: 10⁻⁶

図-10 カールソン型ひずみ計によるひずみ測定結果

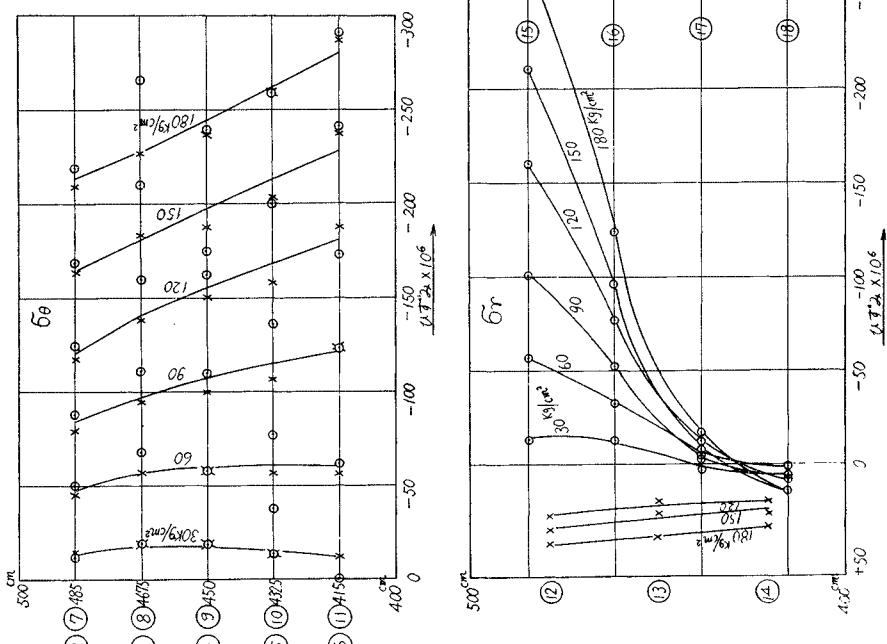


図-11(a) 抵抗線ひずみ計によるひずみ測定結果

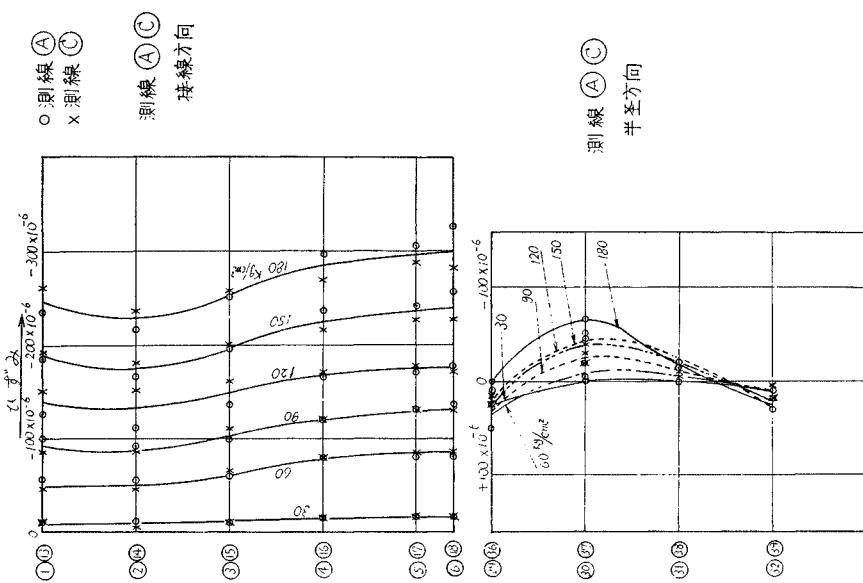
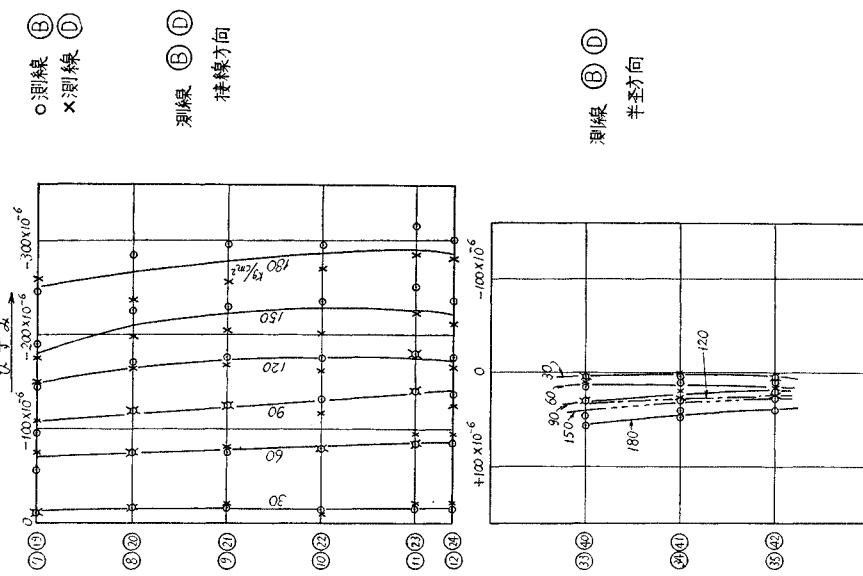


図-11(b) 抵抗線ひずみ計によるひずみ測定結果



での間のコンクリート乾燥収縮、コンクリート温度の変化を図-9に示してある。図に示すものはひずみ計番号②の測定結果であるが、他の計器についてもほとんど同一な結果がえられている。乾燥収縮量は 50×10^{-6} 程度と考えられる。

プレストレスを与えた時のカールソンひずみ計の測定結果は表-5および図-10のようである。

b) 抵抗線ひずみ計によるコンクリートおよびライナーのひずみ測定 抵抗線ひずみ計によるひずみ測定結果は表-6および図-11のようである。

c) PC鋼より線伸びの測定 PC鋼より線伸びの測定結果は表-7および図-12に示してある。

図-12には測定ひずみから、 $E_p = 1965\,000\text{ kg/cm}^2$ (PC鋼より線の試験表から求めた値) として計算した応力度をも同時に記入してある。

d) 供試体変形量の測定 供試体環体直径の変化を測定した結果は表-8および図-13に示してある。

e) フラット ジャッキ揚程の測定結果 フラット ジャッキ揚程の測定結果は表-9および図-14に示してある。

フラット ジャッキの揚程は、表-9から明らかなようにフラット ジャッキ圧力の小さい間は、各測定点に

図-12 PC鋼より線引張応力度測定結果

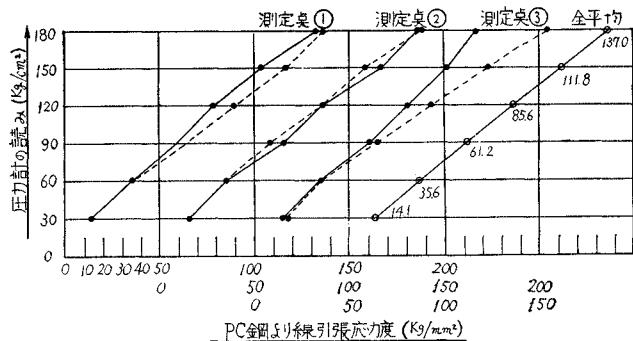
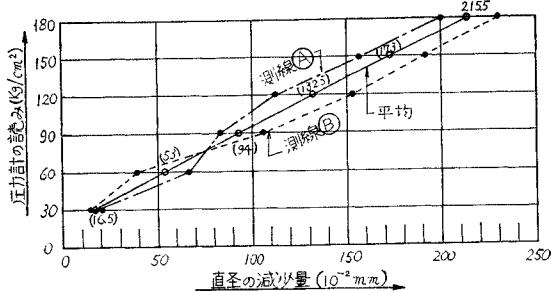


図-13 供試体直徑の変化測定結果



おけるフラット ジャッキ上下部について相当な差が認められる。これはフラット ジャッキ自身の剛性が非常に小さいため、わずかな拘束によってもコンクリート

表-7 PC鋼より線の伸び測定結果 (mm)

測定点 圧力計の読み (kg/cm²)	①		②		③	
	上 端	下 端	上 端	下 端	上 端	下 端
30	0.5 (12.3)	0.5 (12.3)	0.6 (14.7)	0.6 (14.7)	0.6 (14.7)	0.65 (16.0)
60	1.45 (35.6)	1.45 (35.6)	1.45 (35.6)	1.45 (35.6)	1.45 (35.6)	1.45 (35.6)
90	2.4 (59.0)	9.5 (61.4)	9.7 (66.3)	9.3 (56.5)	9.45 (60.9)	9.6 (63.9)
120	3.15 (77.4)	3.65 (89.7)	3.5 (86.0)	3.5 (86.0)	3.3 (81.1)	3.8 (93.3)
150	4.2 (103.2)	4.8 (117.9)	4.8 (117.9)	4.35 (106.8)	4.15 (101.9)	5.0 (122.8)
180	5.45 (133.9)	5.6 (137.6)	5.5 (135.1)	5.65 (138.8)	4.8 (117.9)	6.45 (158.4)

注：表中（）内数字は換算PC鋼より線引張応力度を示す。単位 kg/mm²

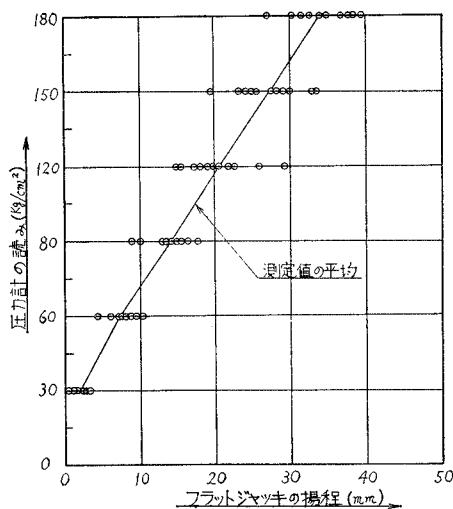
表-8 供試体直徑変化量測定結果 (10^{-2} mm)

測線 測定 圧力計の読み (kg/cm²)	A				B			
	ダイヤルゲージ 読み	累 計	温 度 (°C)	温 度補正	ダイヤルゲージ 読み	累 計	温 度 (°C)	温 度補正
0	883	0	7.5	0	100	0	7.6	0
30	898	15	7.0	19	114	14	7.6	14
60	938	55	6.0	67	139	39	7.6	39
90	959	76	6.8	82	200	100	6.8	106
120	987	104	6.5	112	249	149	7.0	153
150	1 028	145	6.0	157	285	185	7.0	189
180	1 071	188	6.0	200	319	219	6.0	231

表-9 フラット ジャッキの揚程測定結果(単位:cm)

測定点 位置	荷重(圧力荷重計の読み)	30 (kg/cm ²)		60 (kg/cm ²)		90 (kg/cm ²)		120 (kg/cm ²)		150 (kg/cm ²)		180 (kg/cm ²)	
		測定値	平均	測定値	平均	測定値	平均	測定値	平均	測定値	平均	測定値	平均
①	上	0.26	0.17	1.00	0.70	1.84	1.30	1.89	1.72	2.57	2.32	2.50	3.01
	下	0.07		0.39		0.76		1.54		2.06		3.52	
②	上	0.21	0.30	0.70	0.95	0.87	1.64	1.71	2.18	2.33	2.74	3.54	3.37
	下	0.38		1.20		2.40		2.65		3.14		3.19	
③	上	0.14	0.07	0.78	0.43	1.62	0.89	1.67	1.55	2.52	2.41	2.57	3.26
	下	0		0.07		0.16		1.42		2.30		3.95	
④	上	0.22	0.16	1.01	0.61	2.33	1.49	2.54	2.59	3.53	3.36	3.63	3.95
	下	0.09		0.21		0.65		2.63		3.19		4.26	
⑤	上	0.19	0.21	0.96	0.81	2.06	1.53	2.33	1.96	4.13	2.82	4.72	3.14
	下	0.23		0.65		0.99		1.58		1.51		1.56	
⑥	上	0.21	0.20	0.67	0.67	0.93	1.01	1.22	1.49	1.40	1.95	1.59	2.69
	下	0.19		0.66		1.08		1.76		2.49		3.78	
⑦	上	0.43	0.24	1.40	0.78	2.79	1.55	3.08	1.79	3.12	2.54	2.85	3.78
	下	0.04		0.16		0.31		0.50		1.95		4.70	
⑧	上	0.15	0.19	0.56	0.79	0.76	1.49	1.29	2.26	1.84	2.90	2.77	3.44
	下	0.23		1.01		2.22		3.22		3.95		4.11	
⑨	上	0.16	0.27	0.54	1.01	0.90	1.79	1.12	2.92	1.61	3.33	1.65	3.81
	下	0.37		1.48		2.68		4.71		5.04		5.96	
⑩	上	0.18	0.11	0.63	0.44	1.28	1.45	1.41	1.97	1.27	2.99	2.19	3.66
	下	0.03		0.24		1.61		2.52		4.70		5.13	
⑪	上	0.20	0.18	0.75	0.75	1.03	1.50	1.74	1.92	2.50	2.52	3.63	3.15
	下	0.15		0.74		1.96		2.09		2.53		2.67	
⑫	上	0.29	0.29	0.96	0.82	1.22	1.35	1.36	2.08	1.51	2.72	2.44	3.22
	下	0.29		0.67		1.47		2.79		3.92		3.99	
平均		0.20	0.73		1.41		2.04		2.72		3.37		

図-14 フラット ジャッキ揚程測定結果



ブロックの四隅の移動量に差が生ずるのである。この差をできるだけ小さくするには、コンクリートブロック

と環体との取付けボルトのナット位置を調節し、フラットジャッキコンクリートブロック四隅の拘束度を変えることによって、揚程差を小さくできるものである。

フラットジャッキの揚程が、フラットジャッキブロックの上下で異なるために、PC鋼より線の伸びも、上下端位置のものについて差を生じたことは表-7、図-12からも明らかであった。

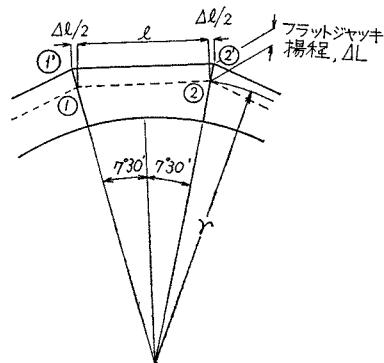
しかしながら、このフラットジャッキ揚程のコンクリートブロック四隅における差は、上記のようにアンカーボルトのナット位置を調節することによって、容易に小さくできることが明らかである。

4. 試験結果の考察

以上の測定結果と計算結果とを比較検討する。

(1) フラットジャッキ揚程とPC鋼より線引張応力度との関係

フラットジャッキ揚程とPC鋼より線引張応力度との関係を計算するには図-15において圧力を加える前

図-15 フラット ジャッキの揚程 ΔL と PC 鋼より線の伸び Δl 

に①,②にあったPC鋼より線端が①,②に移動したものとすると、PC鋼より線伸びは Δl で表わされる。ただし理想的に支承点のみで押したとする。

$$\Delta l = 2 \Delta L \sin 73^{\circ}30' = 0.261 \Delta L$$

したがってPC鋼より線引張応力度 σ_p はつぎのようになる。

$$\sigma_p = \frac{\Delta l}{\Delta L} \cdot E_p = 0.261 \cdot \frac{\Delta l}{\Delta L} \cdot E_p$$

ここに、

$$\Delta L = 2r \sin 73^{\circ}30' = 2 \times 522.5 \times 0.13056$$

$$= 136.4 \text{ cm}$$

$$\sigma_p = \frac{0.261}{136.4} \times 1965000$$

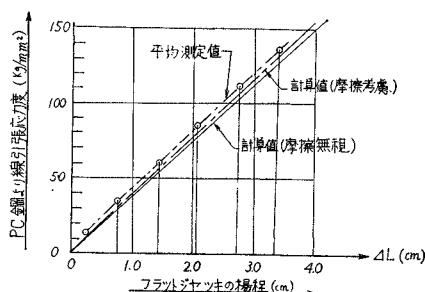
$$\times \Delta L = 37.56 \Delta L (\text{kg/cm}^2)$$

試験結果の表-9と表-7とを組み合わせて測定フラット ジャッキ揚程とPC鋼より線引張応力度との関係を表示すると表-10のようになる。この場合平均測定値を用いた。

表-10 測定平均揚程と測定平均 PC 鋼より線

圧力計の読み (kg/cm ²)	揚 程 (cm)	PC鋼より線引張応力度 (kg/cm ²)
30	0.20	1 410
60	0.73	3 560
90	1.41	6 120
120	2.04	8 550
150	2.72	11 170
180	3.37	13 680

図-16 揚程と PC 鋼より線引張応力度との関係



以上の結果を図示すると図-16 のようになる。

PC鋼より線と支承鋼板との摩擦を考え、この摩擦係数を0.3とする。角変化15°を考慮すると最少引張応力度はつぎのようである。

$$\text{角変化} = \frac{15}{180} \times \pi = 0.262 \text{ ラジアン}$$

$$\sigma_p e^{-0.3 \times 0.262} = \sigma_p e^{-0.0786} = 0.926 \sigma_p$$

PC鋼より線の伸び

$$\equiv \frac{\sigma_p}{E_p} \times 106.4 + \left(\frac{0.926 \sigma_p}{E_p} + \frac{\sigma_p}{E_p} \right) \frac{1}{2} \times 30$$

$$= \frac{\sigma_p}{E_p} \times (106.4 + 0.963 \times 30) = \frac{\sigma_p}{E_p} \times 135.3$$

よって図-15 の摩擦を考えない場合と比較して、 σ_p はつぎのようになる。

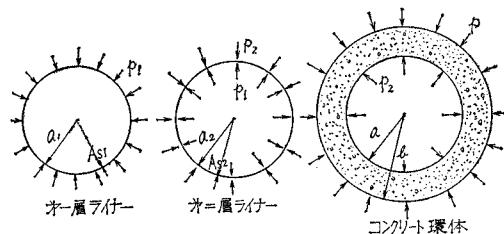
$$\sigma_p = \frac{136.4}{135.3} \times 37.56 \Delta L \approx 37.9 \Delta L$$

図-16 に示すように摩擦の影響を考慮した結果は測定結果と比較的よく一致している。また測定値の σ_p ～ ΔL 直線の勾配は計算値の勾配と平行であるが、測定値がわずかに大きくなっているのは測定の誤差およびPC鋼より線の支承板との接触が点でなく分布していることによるものと考えられる。

(2) PC 鋼より線引張力とコンクリート応力度との関係

PC鋼より線引張力による半径方向反力を等分布荷重と仮定する。鋼ライナーは2枚であるからこれを図-17に示すように分解し、各層間の半径方向反力を未知量として取扱うものとする。

図-17 プレストレスの計算法



未知量を P_1 , P_2 とし各層間に作用する半径方向力とする。各層間の半径方向変形量を等しいものとして未知量を定める。

$$\text{第一層ライナー変形 } a_1^2 P_1 / E_s A_{s1}$$

$$\text{第二層ライナー変形 } a_2^2 (P_2 - P_1) / E_s A_{s2}$$

コンクリート環体変形

$$\frac{P}{E_c} - \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left[(1 - \mu) + (1 + \mu) \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right] a - \frac{P_2}{E_c} \cdot \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left[(1 - \mu) + (1 + \mu) \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right] a$$

第一層ライナーと第二層ライナーとの間にあるコンクリート変形量を無視し、各層の半径方向変形量が等しい条件式はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} \frac{p}{E_c} - \frac{b^2}{b^2-a^2} \left[(1-\mu) + (1+\mu) \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right] a \\ - \frac{p_2}{E_c} \cdot \frac{a^2}{b^2-a^2} \left[(1-\mu) + (1+\mu) \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right] a \\ = \frac{a_2^2}{E_s t_2} (p_2 - p_1) = \frac{a_1^2}{E_s t_1} \cdot p_1 \end{aligned}$$

上式においてつぎの値を用いる。

$$\begin{aligned} E_c &= 400\,000 \text{ kg/cm}^2 & E_s &= 2\,100\,000 \text{ kg/cm}^2 \\ a &= 400 \text{ cm} & b &= 500 \text{ cm} \\ a_1 &= 388.2 \text{ cm} & a_2 &= 399.1 \text{ cm} \\ t_1 = t_2 &= 0.9 \text{ cm} & \mu &= 1/6 \\ 0.0659 p - 0.0560 p_2 &= p_2 - p_1 \\ p_2 - p_1 &= 0.9461 p_1 \end{aligned}$$

両式を解いて p_1, p_2 を求める。

$$p_1 = 0.0623 p, \quad p_2 = 0.1212 p$$

すなわち、

第一層ライナーに作用する外圧

$$p_1 = 0.0623 p$$

第二層ライナーに作用する外圧

$$p_2 - p_1 = 0.0589 p$$

コンクリート環

$$p - p_2 = 0.8788 p$$

各層の応力度は次式で求まる。

$$\text{第一層ライナー } \sigma_{s1} = 0.0623 p \cdot \frac{a_1}{t_1} = 26.8 p$$

$$\text{第二層ライナー } \sigma_{s2} = 0.0589 p \cdot \frac{a_2}{t_2} = 26.1 p$$

コンクリート環

半径方向応力を σ_r , 接線方向応力を σ_θ とする。

$$\sigma_r = p \frac{b^2}{b^2-a^2} \left[1 - \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] + 0.1212 p \frac{a^2}{b^2-a^2} \left[\left(\frac{b}{r} \right)^2 - 1 \right]$$

$$\sigma_\theta = p \frac{b^2}{b^2-a^2} \left[1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] - 0.1212 p \frac{a^2}{b^2-a^2} \left[\left(\frac{b}{r} \right)^2 + 1 \right]$$

数値計算結果はつぎのようである。

$\sigma_r/p, \sigma_\theta/p$ の値

r (cm)	σ_r/p	σ_θ/p
400	0.1214	5.007
425	0.3956	4.733
450	0.6334	4.495
475	0.8322	4.297
500	1.0000	4.128

PC鋼より線支承位置における反力を中心角 15° 区間にコンクリート環体に等分布するものと仮定する。

$$\text{反力 } R = 2 \sin \frac{\theta}{2} \cdot T \quad 2pbh \sin \frac{\theta}{2} = R$$

$$\text{よって } 1p = \frac{T}{bh} = \frac{T}{500 \times 40} = \frac{T}{2000}$$

$$T = A_p \cdot \sigma_p = 38 \times 0.929 \cdot \sigma_p = 35.3 \sigma_p$$

よって $\sigma_p = 10\,000 \text{ kg/cm}^2$ に対して

$$p = \frac{35.3 \times 10\,000}{2000} = 17.65 \text{ kg/cm}^2$$

表-11 に $\sigma_p = 10\,000 \text{ kg/cm}^2$ と対するプレストレス

の計算値を示す。

以上の計算結果と測定結果とを比較するにあたって、実際のプレストレスリング力はフラットジャッキブロック位置で集中荷重として作用しているか、計算ではコンクリート環の外周に沿って一様に半径方向力 σ_r が作用しているものと仮定していることに注意する必要がある。

したがって σ_θ の値については両者は大体一致するであろうが、 σ_r については両者に相当な差が考えられる。すなわち、フラットジャッキブロックの支承となっている断面と、これらブロックの中間断面では σ_r の分布は全く異なったものとなるであろうことは容易に考えられる。

図-18 にはワイヤストレインメーターによる測定結果(表-6)と σ_θ の計算結果とを図示してある。PC鋼より線引張応力度は表-10 の値を用いたものである。図には $\sigma_p = 136.8 \text{ mm}^2$ および 85.5 mm^2 の2つの場合のみを示した。

図-19 にはカールソンひずみ計による測定結果(表-5)と σ_θ, σ_r の計算結果を図示してある。

以上でひずみから応力度を求めるとき、 $E_c = 400\,000 \text{ kg/cm}^2, E_s = 2\,100\,000 \text{ kg/cm}^2$ と仮定してある。

以上、測定結果と計算結果とを比較検討すると σ_θ の分布については本試験で測定された範囲内において、測

図-18 σ_θ の計算値と測定値との比較
(ワイヤストレインメーターによる測定結果)

σ_θ の分布(kg/mm^2) 実線、計算値 黒丸、測定値

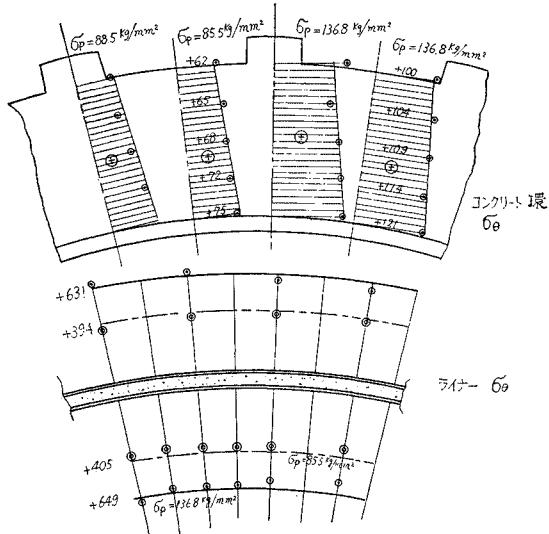
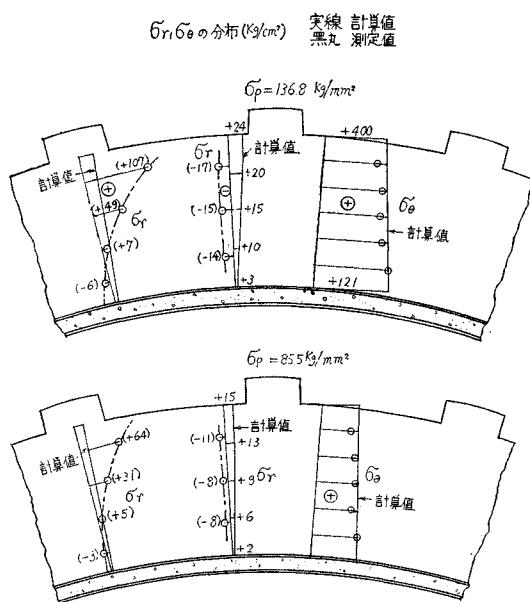


図-19 σ_θ , σ_r の計算値と測定値の比較
(カールソン型ひずみ計による測定値)



定値と計算値とは良く一致している。しかし、 σ_r についてはプレストレッシング力はフラット ジャッキ ブロック位置のみで集中的に作用するため計算値と測定値との間には相当な差を生じている。特に σ_r はフラット ジャッキ ブロック間の中間区間では小さいながら引張応力度となることに注意する必要がある。

(3) コンクリート環の半径方向変形量について

第一層ライナーの鋼板に作用する外力は4.(2)の計算によると

$$P_r = 0.0623 P$$

である。

よって第一層ライナーの半径の減少量は次式で求まる。

$$\begin{aligned} \frac{a_1^2}{E_s t_1} P_1 &= 0.0623 \cdot \frac{a_1^2}{E_s t_1} \cdot P \\ &= 0.0623 \times \frac{388.2^2}{2100000 \times 0.9} \times P \\ &= 0.00497 P \text{ (cm)} \end{aligned}$$

よって直径の減少量はつぎのようになる。

$$\Delta D = 2 \times 0.00497 P = 0.00994 P$$

表-8 の測定結果と比較すると $\sigma_p = 10000 \text{ kg/cm}^2$ に対して $P = 17.65 \text{ kg/cm}^2$ である(4.(2) 参照)ことを用いると 図-20 のようになる。

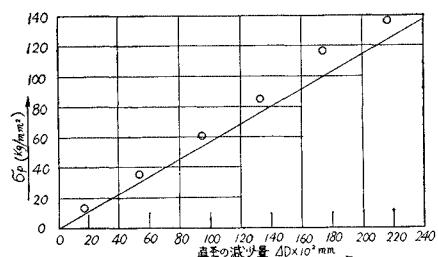
計算

$$\Delta D = 0.00994 \times 17.65 = 0.175 \text{ cm} = 175 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$(\sigma_p = 100 \text{ kg/mm}^2 \text{ のとき})$

両者を比較すると測定 ΔD は計算値よりわずかに小さくなっているが、実用的な範囲内では十分良く一致しているといえる。

図-20 σ_p と ΔD との関係



5. 結論

本試験の範囲内においてつぎのように結論することが可能である。

(1) フラット ジャッキの揚程と PC 鋼より線引張応力度との関係は十分正確に計算で求めることが可能である。

(2) コンクリート環に作用するプレストレスを計算する場合、接線方向プレストレスについては、PC 鋼より線の曲率によって生ずる半径方向力が、円環外周に一様に分布しているものと考えて求めてよい。

半径方向のプレストレスの計算には円環外周に一様に分布している半径方向プレストレッシング力を考慮したのでは誤りが大きくなる。特にフラット ジャッキ支承部の中間区間の半径方向応力は引張応力となる。しかしこの値は小さく十分鉄筋配置によって受けさせることができある。また内圧および温度勾配による半径方向応力は圧縮応力となることを考えれば、炉運転時には圧縮応力またはわずかな引張応力となるに過ぎない。

したがって近似的には PC 鋼より線の曲率による半径方向プレストレッシング力は半径方向に一様に分布しているものとしてプレストレスを計算してよい。

(3) フラット ジャッキの揚程はフラット ジャッキコンクリートブロックの四隅において等しくならない場合もあるが、これは取付け用ボルトのナットによって容易に調節可能である。

(4) プレストレッシング時の PC 鋼より線に与えられる引張応力度の管理にはフラット ジャッキブロックの揚程の測定と同時に、PC 鋼より線のひずみを直接測定する方法によるのがよい。

(5) 本工法によればシースと PC 鋼より線との間の摩擦損失のようなプレストレッシング時の PC 鋼より線引張応力度の損失を考えなくてもよい。

(6) 以上、要するに本工法のフラット ジャッキを用いるプレストレッシングによって所要のプレストレスをコンクリート環に与えることが可能である。また、必要に応じて PC 鋼より線の継直しも容易である。

付記：39 年度科学技術庁研究補助金による研究の一部である。

(1965.8.30・受付)