

材令5年を経たPCばりの曲げ破壊実験

六 車 熙*

1. まえがき

長期材令を経たPCばりが、設計どおりの力学的性質を示すかどうかを知ることは、きわめて興味ぶかいことである。外国ではすでに材令15年に達するプレテンションばりの実験が行なわれ、設計当初に予想された有効プレストレス力が確実に残存し、PCばりとしての満足すべき力学的性質を示したことが報告されている¹⁾。著者はたまたまクリープ実測を行なう目的で製作した2-φ17.4mm PC鋼棒使用ポストテンションばり2本を、クリープ実測終了後材令5年まで保存し、材令5年で曲げ破壊実験を行なった。本報告はその実験結果について、短期材令におけるものとの比較を行なったものである。

2. 供試体の製作

材令5年の供試体用PCばりとして全長365cm、支点間距離345cm、断面20×22cm、2-φ17.4mm PC鋼棒をばり中央偏心4cm、支点上0cm、この間2次放物線形に配置したもの2本を用いた。同時に別の実験目的で製作し短期材令(材令7週)で実験した4本のPCばりを、結果の比較に用いた。これら4本のばりは、いずれも上記の材令5年のばりと同材料、同寸法、同方法により製作されたものである。なお、導入プレストレス力計画値はいずれのばりも25t(鋼棒1本あたり12.5t)とした。図-7は供試体用PCばりの概略図である。

供試体の製作に用いた材料はつぎのとおりである。

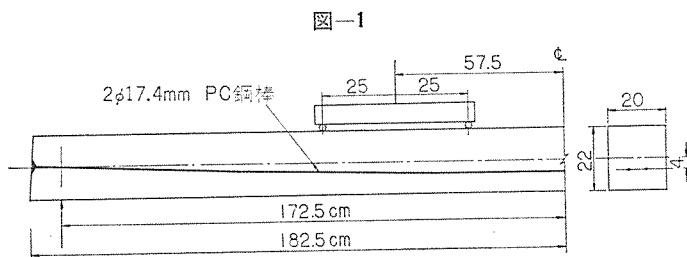


図-1

セメント：材令5年のばりは徳山普通ポルトランドセメント、材令7週のはり是小野田普通ポルトランドセメントを用いた。JIS規格による強度試験成績は表-1に示すとおりである。

骨 材：砂は木津川産、砂利は桂川産、最大粒径はそれぞれ5および30mm、粗粒率はそれぞれ3.00および7.01のものを用いた。

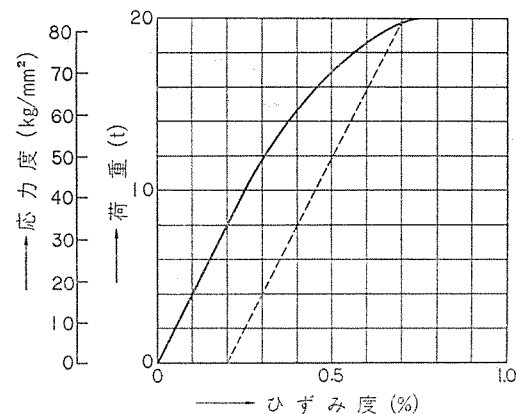
PC鋼棒：神戸製鋼所製φ17.4mm(3/4in)を用いた。機械的性質は表-2、応力-ひずみ曲線は図-2のとおりで、第2種引抜鋼棒にあたる。

表-2 φ17.4mm PC鋼棒機械的性質

棒 径 (mm)	破断強度 (kg/mm ²)	降伏点応力* (kg/mm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)	伸び** (%)
17.4	96.6	81.4	1800000	5

* 0.2% 永久伸び応力, ** G.L=8×(直径)

図-2



コンクリートは重量配合比1:2.02:2.6、水セメント比50%、28日予定圧縮強度300kg/cm²のものを手練りで製作、木製型わくを用い棒バイブレーターで振動づめを行なった。製作にあたって鋼棒はあらかじめ内径22mmのうす鉄板製シースで包み、鋼棒偏心位置を正して決めるために、型わく側面4カ所で側板を貫通して配置したφ6mm鉄筋に

表-1 セメントの強度試験成績

供 試 体	セメント	曲げ強度 (kg/cm ²)			圧縮強度 (kg/cm ²)		
		3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
材令5年ばり (No. 1~2)	徳山普通ポ	30.7	51.6	76.7	113	206	400
材令7週ばり (No. 3~6)	小野田普通ポ	32.9	47.7	68.1	133	186	367

* 工博 京大助教授, 工学部建築教室

表-3 導入時コンクリート品質および導入プレストレス力

供試体	コンクリート品質		縁ひずみ測定値*		偏心距離 (cm)	中央たわみ (mm)	鋼棒抜け出し長さ** (cm)	導入プレストレス力 (t)			
	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)	上 縁 (×10 ⁻⁵)	下 縁 (×10 ⁻⁵)				縁ひずみより	中央たわみより	抜け出し長さより	平均
No. 1	312	272 000	-0.33	+36.7	3.77	0.935	1.1	21.8	21.2	24.8	22.6
No. 2	289	264 000	-0.33	+29.7	3.75	0.960	1.1	17.1	20.6	24.6	20.8
No. 3	238	248 000	+1	+45	3.49	1.150	測	25.1	27.2	—	26.1
No. 4	300	245 000	-2	+38	4.08	1.100	定	19.4	19.8	—	19.6
No. 5	280	260 000	-1	+45	3.84	1.180	せ	25.2	26.4	—	25.8
No. 6	280	230 000	-1	+45	3.84	1.190	ず	22.3	23.7	—	23.0

* +は圧縮ひずみを表わす。 ** 2本の鋼棒の抜け出し長さの平均値

そわせて配置した。

製作後3日で型わく側板を除去，7日でスパナーでかかる程度のプレストレスを導入して，ひびわれ発生を防ぎながら底面型わくを除去，プレストレス導入時まで湿布養生を行なった。

3. プレストレス力導入および保存

材令4週で予定値 25 t のプレストレス力を導入した。導入時のコンクリートの品質を表-3に示す。導入時のはり中央断面におけるコンクリート上下縁弾性ひずみを検長 10 in, 10⁻⁴in Huggenberger 手持ち式ひずみ計で，はり中央弾性たわみを検長 227 cm, 10⁻²mm ダイアルゲージで，鋼棒の端部からの抜け出し長さを鋼製スケールでそれぞれ測定した。これらの各測定値からそれぞれ導入プレストレス力を計算し，これらの平均値をもって各はりに導入されたプレストレス力とした。なお，計算には，はり中央断面コンクリート上下縁弾性ひずみ実測結果から求めた鋼棒偏心距離を用いた。これらの実測値および計算値も表-3に併記した。

プレストレス力導入後，ただちに水セメント比 50% のセメントペーストでグラウトを行なった。グラウト終了後供試体 No. 1 は支点間距離 345 cm で実験室内に単純支持しておき，同時に No. 2 は支点間距離 345 cm, 曲げスパン 90 cm, せん断スパン 127.5 cm の左右対称2点持続荷重を行ない，1年間にわたって，はり中央断面の上下縁におけるクリープひずみを実測した。No. 2 の持続荷重は載荷点1点あたり 1.505 t (これは導入プレストレス力による下縁応力が打ち消されて0となるのに必要な荷重)である。クリープひずみ実測結果については本論文においては述べない。著者既発表論文²⁾を参照されたい。材令1年において No. 1 および No. 2 のクリープ実測は中止し，No. 2 においては載荷荷重を除荷して No. 1 とともに材令5年まで実験室内に保存した。なお，No. 3~No. 6 はグラウト後実験時(材令7週)まで実験室内に保存した。

4. 曲げ載荷試験

No. 1 および No. 2 は材令5年で，No. 3~No. 6 は材令7週で静的曲げ破壊実験を行なった。荷重は図-1に示すような載荷条件で載荷した。0.5 t ずつの荷重階で載荷し，各荷重階においてははり中央たわみを 10⁻²cm ダイアルゲージで，はり中央断面上下コンクリート縁ひずみを検長 20 in, 10⁻⁴in ダイアルゲージでそれぞれ測定した。コンクリート上下縁ひずみ実測結果から各荷重に対する断面回転ひずみ，および曲げ剛性を計算した。なお，荷重は No. 1 および No. 2 ではひびわれが断面図心付近まで伸長するまで載荷(本実験では 4.5 t)したのち除荷し，残留たわみを測定したのち，再び載荷し，ひびわれが開口するときの荷重を測定，その後さらに載荷して曲げ破壊荷重の 80~90% の荷重のとき，再び除荷，その後再び載荷して破壊に至らしめた。No. 3~No. 6 では曲げ破壊荷重の約 90% まで載荷後除荷し，残留ひずみを測定したのち再び載荷して破壊に至らしめた。

5. 実験結果と考察

(1) 実験時有効プレストレス力

長期材令のPCばりの有効プレストレス力がいかにほどであるかは最も興味深いことであり，かつ，有効プレストレス力の大きさがはりの力学的諸性質を左右するので重要である。著者は材令5年の供試体 No. 1 および No. 2 の実験時有効プレストレス力推定のため，前項で述べたようにいったん曲げひびわれを発生させたのち除荷，再び載荷してひびわれが開口し始める荷重，すなわち，有効プレストレス力による下縁応力が打ち消されて0となるために必要な載荷荷重を測定し，これより有効プレストレス力を計算した。計算式は下記のとおりである。

$$P = \frac{M_d + M_{c0}}{Z_2} \left/ \left(\frac{1}{A_c} + \frac{e}{Z_2} \right) \right. = \frac{M_d + M_{c0}}{Z_2 + e A_c} A_c \dots (1)$$

P: 有効プレストレス力

M_d : はり自重による曲げモーメント (上縁圧縮を正)

M_{c0} : ひびわれが開口し始めるときの載荷曲げモーメント (上縁圧縮を正)

A_c : コンクリート断面積

Z_2 : 下縁に対する断面係数

e : 偏心距離 (重心軸より下側に正)

なお, (1) 式にははり自重による曲げモーメント M_d の影響もあわせて考慮してある。

ひびわれが開口し始める荷重の測定には, ひびわれ発生後除荷した供試体のはり中央曲げスパンに発生したひびわれをまたいで, 下縁に検長 60 mm の電気抵抗線ひずみ計を貼布し, 再び載荷してひびわれをまたぐコンクリート下縁ひずみ測定結果から推定した。すなわち, ひびわれ開口前の下縁ひずみは弾性的に変化するが, ひびわれが開口し始めると, ひずみの増加量が急激に大となり, その限界における載荷荷重がひびわれ開口荷重である。図-3 は No. 1 および No. 2 の中央曲げスパンに発生した3本の曲げひびわれ上に貼布した抵抗線ひずみ計によるひずみ実測結果平均値と載荷荷重の関係を示すもので, これより推定した曲げひびわれ開口荷重も図示してある。

図-3

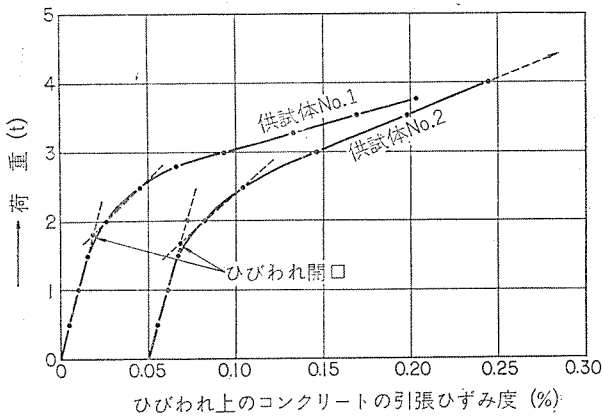


表-4 各供試ばりの有効プレストレス力

供試体	偏心距離 (cm)	ト導入プレストレス (t)	実験時				材令1年	
			材令	重れ開口荷重 (t)	カス有効プレストレス (t)	有効率 (%)	カス有効プレストレス (t)	有効率 (%)
No.1*	3.77	22.6	5	1.75	15.64	69.2	16.16	71.5
No.2*	3.75	20.8	年	1.70	15.65	75.4	16.41	79.0
No.3	3.49	26.1	7	—	25.0	95.8	—	—
No.4	4.08	19.8		—	18.2	91.9	—	—
No.5	3.84	26.4		—	24.8	93.9	—	—
No.6	3.84	23.7		週	—	21.6	91.1	—

* No. 1 は無載荷, No. 2 は設計荷重載荷1年, 以後無載荷で材令5年まで保存。

** はり自重は含まず。

表-4 は No. 1 および No. 2 の有効プレストレス力を上記ひびわれ開口荷重を用い (1) 式により計算した結果を示したもので, 参考のために材令1年における有効プレストレス力²⁾ (はり中央断面 コンクリート上下縁クリープひずみ実測値より求めたもの) も併記してある。また, 短期材令 (7 週) で試験した No. 3~No. 6 の値も併記してある。

表-4 の結果から No. 1 および No. 2 の材令1年~5年間に起こるプレストレス力減少はきわめて少なく, 材令5年までにおこるプレストレス力減少量の85~90%の減少が, 材令1年までにおこっている。このことから, 材令5年においてはコンクリートのクリープおよび収縮はすでに定常状態に達し, 以後のプレストレス力減少は, ほとんどおこらないものと推論される。このことはドイツにおける各種PC構造物の長期クリープ実測結果³⁾ においても結論されているものである。また, 材令1年においては No. 1 は設計荷重無載荷のまま, No. 2 は設計荷重持続載荷されているため, 前者の有効率は後者の有効率よりも小さくなっているが, 材令5年においても両者の有効率の差が保たれており, 全期間でなくても設計荷重がある期間だけ持続載荷されたよりは, 明らかにプレストレス力減少量が少なくなることがわかる。このことは理論的にも証明されていることである⁴⁾。

なお, 材令5年における有効率は本実験では慣用の有効率85%と比較してかなり小さい。これは本実験に用いた供試体の緊張材鉄筋比 $p=1.1\%$ であって, 一般のPCばりの鉄筋比 $p=0.7\%$ 程度と比較して, かなり鉄筋比が大であるためである。理論上プレストレス力減量は近似的に緊張材鉄筋比に正比例することから^{1), 4)}, 本実験の材令5年におけるプレストレス力有効率を普通のPCばりの場合 $p=0.7\%$ に換算すると,

$$\text{No. 1 に対する有効率 } \eta = 0.692 \text{ より換算}$$

$$\eta = 1 - (1 - 0.692) \frac{0.7}{1.1} = 1 - 0.196 = 0.804$$

$$\text{No. 2 に対する有効率 } \eta = 0.754 \text{ より換算 } (2)$$

$$\eta = 1 - (1 - 0.754) \frac{0.7}{1.1} = 1 - 0.157 = 0.843$$

となって, 設計荷重が載荷されている No. 2 ではプレストレス力有効率は慣用の値 $\eta=0.85$ とよく一致し, 慣用値 $\eta=0.85$ はきわめて妥当な値であると考えられる。ただし, 鉄筋比が大なる場合には本実験 No. 2 の有効率から明らかなように慣用値を下まわることもあるので注意を要する。

(2) ひびわれおよび破壊荷重

初ひびわれは, いずれのはりもはり中央曲げスパンに発生, 破壊は曲げスパン圧縮側コンクリートの圧壊によ

表-5 ひびわれおよび曲げ破壊荷重

供試体	実験時 材令	偏心距離 (cm)	有効プレス トレス力 (t)	実験時コンクリート品質 (kg/cm ²)			初ひびわれ荷重 (t)		曲げ破壊荷重 (t)	
				圧縮強度	引張強度	弾性係数	実 験	理論***	実 験	理論***
No. 1	5 年	3.77	15.64	*	**	—	3.88	2.76	8.28	7.52
No. 2		3.75	15.65				380(323)	36.2	2.6	2.77
No. 3	7 週	3.49	25.0	263	23.1	240 000	3.7	4.03	6.80	6.99
No. 4		4.08	18.2	325	27.4	277 000	3.3	3.43	7.95	7.58
No. 5		3.84	24.8	322	22.6	257 000	3.8	4.10	7.28	7.40
No. 6		3.84	21.6	298	23.2	249 000	3.8	3.65	7.37	7.24

* 22×20×19.5 cm 立方体強度, カッコ内は $F=12.68+0.816 W^{0.5}$ により換算した $\phi 15 \times 30$ cm 円筒強度

** 断面 19.5×22 cm コンクリートはりの曲げ引張強度

*** 自重による荷重換算値 0.27 t を控除した値

る曲げ破壊であった。ひびわれ荷重および曲げ破壊荷重を表-5にまとめて示す。また表-5には実験時コンクリート品質もあわせて示してある。No.1 および No.2 のコンクリート引張強度は断面幅 19.5 cm, 高さ 22 cm のコンクリートはりの曲げ引張強度, 圧縮強度は曲げ試験の折片に 22×20 cm の載荷板を用いて得た立方体強度(カッコ内の値は $\phi 15 \times 30$ cm 円筒強度換算値)である。No.3~6 のコンクリートは $\phi 15 \times 30$ cm 円筒供試体の圧縮および引張強さ係数試験により得た値である。これらの値は、いずれもひびわれおよび破壊荷重理論計算に用いた。

初ひびわれ荷重は短期材令より No.3~6 とくらべて長期材令は No.2 はいちじるしく小となっている。No.1 では No.3~6 とかわらない初ひびわれ荷重を示しているが、これはひびわれ発見がおくれたためであって、理論値からわかるように No.2 と同様に No.3~6 よりも低い初ひびわれ荷重を示したものと推定される。有効プレス

トレス力が小さくなれば初ひびわれ荷重も低下して当然である。これに対し、曲げ破壊荷重は実験時材令の長

図-4

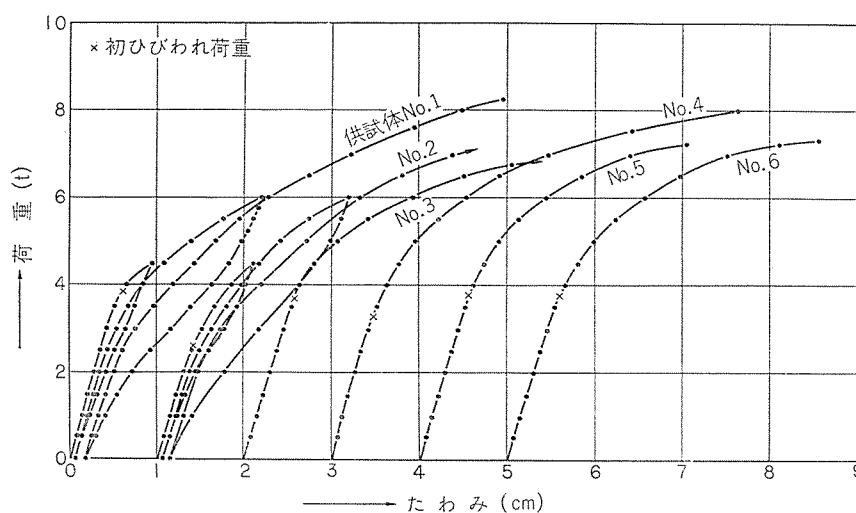


図-5

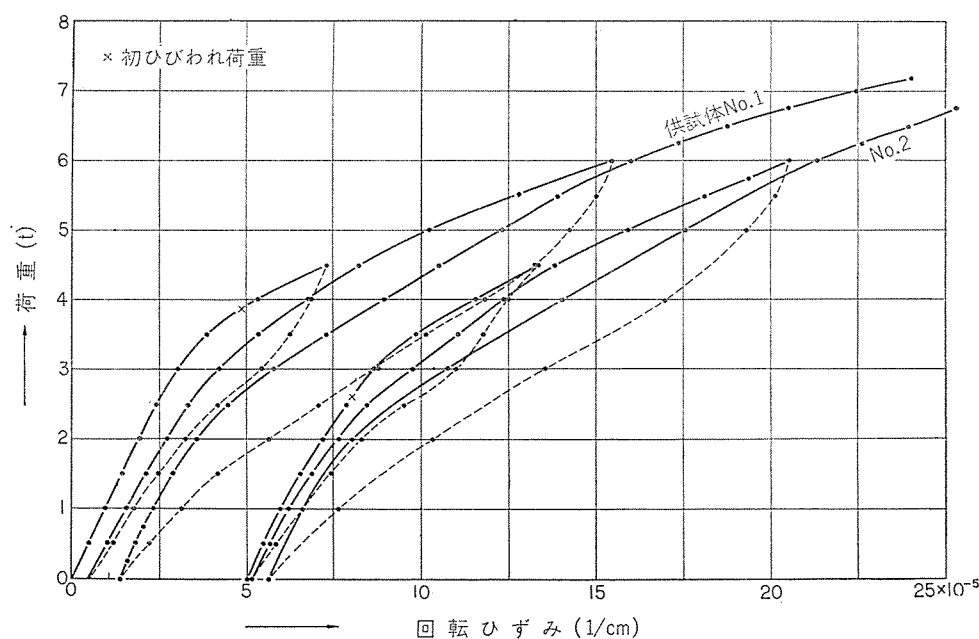


図-6

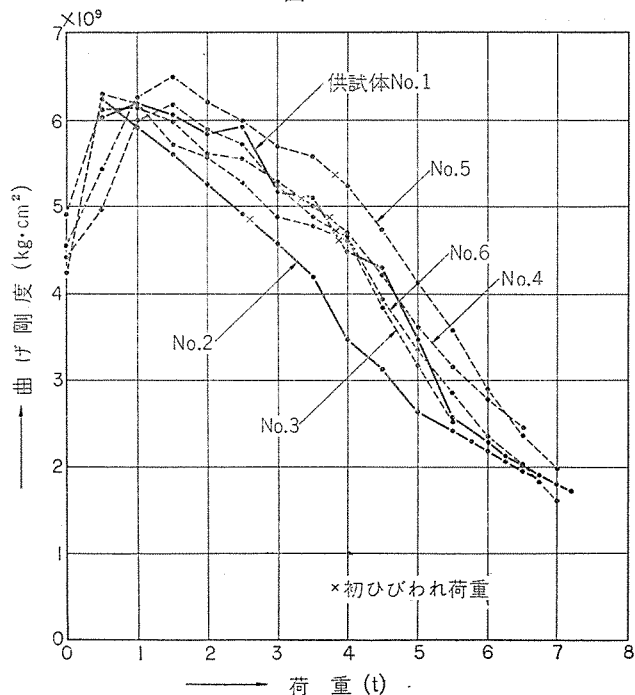


図-6 は各供試体の中央断面コンクリート上下縁ひずみ実測値から計算した曲げ剛性と載荷荷重の関係を示すものである。弾性範囲においてもひびわれ発生以後の塑性範囲においても曲げ剛性は材令の長短による明瞭な差はみられなかった。

6. 結 言

本実験からPCばりのプレストレス力減退は材令1年において全プレストレス力減退量の85%が少なくともおこり、材令5年においてはコンクリートのクリープおよび収縮が定常状態に達していると考えられ、以後のプレストレス力減退はおこらないとしてもよいこと、プレストレス力有効率としては緊張材鉄筋比 $p=0.7\%$ 程度のものであれば慣用値 $\eta=0.85$ を用いても安全であること、緊張材鉄筋比がこれ以上になる場合や設計荷重が持続して作用しないよりは有効率を割引くことが妥当であること、長期材令のよりは短期材令のほりとくらべて有効プレストレス力が小さいので初ひびわれ荷重は低下するが、破壊耐力はほとんどかわらないことなどが明らかにされた。また、曲げ剛性、たわみ曲線などには材令の長短による明瞭な差異は認められなかった。

参 考 文 献

- 1) G.D. Base & H.E. Lewis : Tests on 15-year-old, 54-ft long, Pre-tensioned Beams, J. of PCI, Vol. 4, No. 1, June 1959
- 2) 坂・六車 : 載荷 PC ばりの緊張力減退に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第63号, 昭34.10
- 3) U. Finsterwalder : Ergebniss von Kriech- und Schwindmessungen an Spannbetonbauwerken, Beton und Stahlbetonbau, 53 Jg. Ht. 5, Mai 1958
- 4) 坂・六車 : プレストレスト コンクリート材の緊張力減退に関する研究 (I) および (II), 日本建築学会論文報告集, 第62号, 昭34.6 および第64号, 昭35.2
- 5) 坂・六車・安井 : シュミットハンマーによるかた練りコンクリート強度判定, セメント技術年報, XV, 昭36.

1962. 7. 6 受付

短、有効プレストレス力の大小には無関係にほぼ同じ値となっており、過去の経験的事実とよく一致する。なお、初ひびわれ荷重および曲げ破壊荷重理論値と実験値とはよく一致していることを付記する。

(3) 中央たわみおよび曲げ剛性

各供試体のはり中央たわみ実測結果を 図-4 にまとめて示す。No. 1 および No. 2 についてはとくにくり返し載荷に対する中央たわみ曲線もあわせて示してある。長期材令のほりにおいてもプレストレス力が存在する限りひびわれ発生までの弾性的性質、超過荷重が作用してひびわれが発生しても除荷すれば高度の復元性を示し、再びもとと同じ弾性的性質を示すことが実証されている。このことは 図-5 に示したはり中央断面コンクリート上下縁ひずみ実測値から計算した断面回転ひずみと載荷荷重の関係からもわかる。

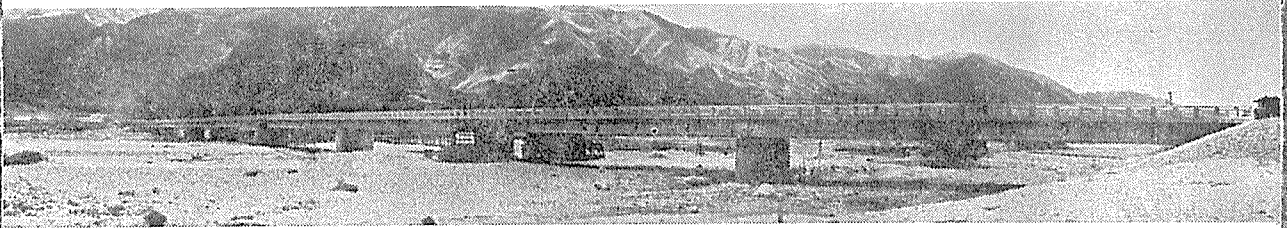
会員増加運動について御協力の御願い

現在協会には約920名の会員がおられ各方面で御活躍のことは御同慶にたえません。しかしながら協会として今後大いに活動してゆくには少なくとも現在の2倍、2000名程度の会員を獲得しなければ運営その他に非常な支障をきたします。そこで現在会員でおられる皆様方に御協力いただき、一人でも多く会員を獲得したい念願から、**会員増加運動**を行ないたいと思います。

入会申込書は事務局に御申出次第お送りいたします。会員がふえ協会が健全に発達してゆくことは、結局会員へのサービスとなって反映してゆく訳です。事情御賢察の上よろしく御協力のほど御願い申し上げます。



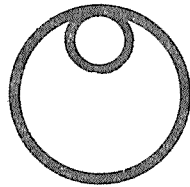
武田橋(山梨県)



ピーエスコンクリート設計施工並に製作 日本ピー・エス・コンクリート株式会社

顧問 加賀山之雄 顧問 稲浦鹿蔵 取締役社長 有馬義夫

本社	福井県敦賀市泉125号2番地	電話(敦賀)代表 1400番
東京営業所	東京都千代田区大手町1丁目4番地	(大手町ビル3階327号室) 電話 和田倉(201) 4530番
大阪営業所	大阪市北区堂島上2丁目39番地	(毎日産業ビル3階) 電話 大阪(36) 7797番
名古屋営業所	名古屋市中区南呉服町2丁目18番地	(呉服町ビル3階4号室) 電話 名古屋(24) 7516番
福岡営業所	福岡市上辻の堂町26番地	(ナショナルビル5階) 電話 東京◎代表 4134番



株式会社 十二製作所

取締役社長 南出他十郎

本社	東京都千代田区丸ノ内1丁目1番地 (国際観光会館4階432号室) 電話 丸ノ内(231) 7812・5081番
工場	東京都江東区南砂町1丁目1016番地 電話 深川(644) 0141・0142番