

超高強度コンクリート（樹脂含浸コンクリート）を用いたプレストレスト単純ばりの基礎実験

田 沢 栄 一*
渡 辺 健 之 助*
星 野 親 房*
金 子 晃*

1. はじめに

(1) 概 要

コンクリートに樹脂含浸処理を施すことにより得られる高強度コンクリートを使用したプレストレスト単純ばりの、クリープ特性および曲げ載荷試験によるひびわれおよび破壊性状に関して、実験的に基礎的性質を調べた結果を報告する。

樹脂含浸コンクリートの用途開発を進めていくにあたり、将来、構造用材料として使用する際にその圧縮特性を有効に生かせるプレストレスト部材もしくは高軸圧縮応力を受ける部材が適切であろうと判断される。しかしながら、処理コンクリートは成型した一般コンクリート中の微細な空気をプラスチックにより置き換えられたものであるため、一般コンクリートと比較して当然その力学的特性も異なることが推定される。

現在、種々の物性について研究中であり、本報告は一連の基礎物性収集試験のうちの一部である。

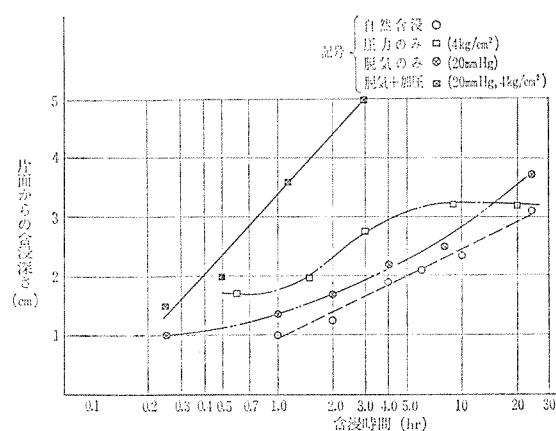
(2) 樹脂含浸コンクリートの製法概略

一般コンクリート中の微細な空気にモノマーを含浸した状態を重合固結する方法として放射線を用いる方法と触媒を混入して加熱する、いわゆる加熱重合法があるが、本供試体は加熱重合法により製作され、以下のような工程、すなわち、乾燥工程、含浸工程、重合工程、後処理工程を踏む。

乾燥工程では、かなりの高温で強制乾燥する。ついで部材を冷却し、鉄製容器に収納する。

含浸工程は、この状態で、まず容器内の脱気を行ないモノマーを導入して、ベース材の微細な空気にまで含浸させる。この場合加圧を併用することもある。モノマーの含浸方法と含浸深さの関係を図-1に示す。これはW/C 30.8%、スランプ 18 cm のコンクリートをベース材にして行なった実験である。含浸させうる部材の厚さ

図-1 含浸方法と含浸深さの関係



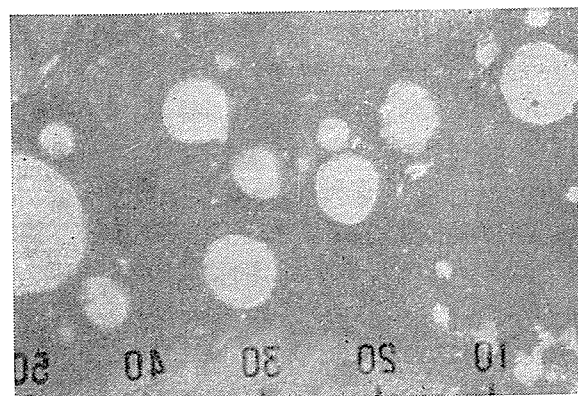
は 10 cm 程度である。

重合工程では、含浸容器より取り出したベース材を通常の樹脂重合温度の熱媒中に置くことにより達成される。重合条件によりポリマーの分子量が変化するため、部材の力学的強度の改善に必要な分子量 100 000 以上となる温度組成などの重合条件を選定している。

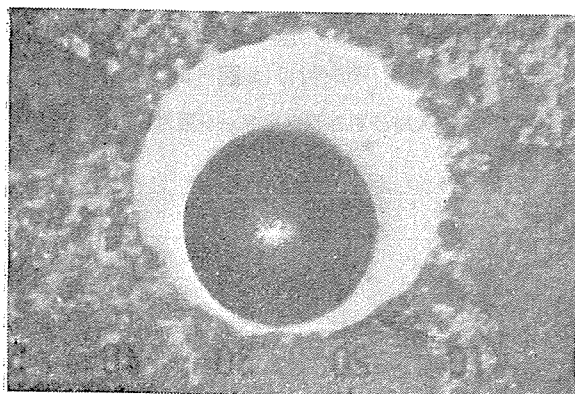
(3) 含浸処理材の光学顕微鏡による観察

写真-1, 2 は含浸処理後の切断面を光学顕微鏡下で撮影したものである。キセノンランプ、偏光板を用いて

写真-1
(倍率 200)



* 大成建設株式会社技術研究所

写真—2
(倍率 200)

カラー撮影をすると樹脂相は桃色、セメントや骨材はこの反対色となるので、この両相の分布状態を判定することができる。写真—1 は比較的大きな不連続な空げきに樹脂相が連続して入っている状態を示す。写真—2 は球状の大きな空げきにおける典型的な樹脂の分布を示すもので、樹脂相の中には球状の空げきが存在し、同心球というより、どちらかに片寄っている場合が多い。

2. 実験方法

(1) 実験計画

樹脂含浸コンクリートばりに、それぞれ $P_{t0}=18.5\text{ t}$ 、 37.00 t 、 52.60 t の初期緊張力を導入し、導入時の初期変形量を確認、約7ヵ月間経過後、導入緊張力の減少を測定し、曲げ載荷試験を行なう。なお、比較のため樹脂含浸処理をしない（以下「未処理」と呼ぶ）コンクリートばりについて $P_{t0}=18.50\text{ t}$ の緊張力を導入し上記測定を行なう。

(2) 供試体

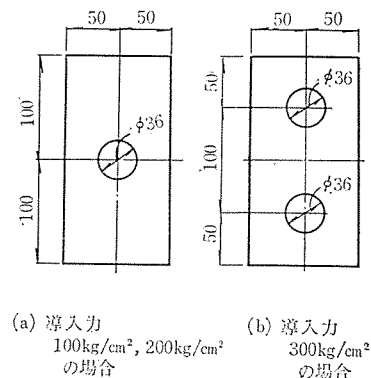
供試体寸法ならびに配筋図を図—2 に示す。軸方向鉄筋については土木学会の「プレストレスト コンクリート設計施工指針」に示された構造細目の用心鉄筋を十分満足するものとした。また、P C 鋼棒定着部の補強用スターラップについては、建築学会の「プレストレスト

コンクリート設計施工指針、同解説」における「局部応力の計算と補強」を参考にした。

(3) 使用材料およびコンクリートの配合

使用セメントは日本セメント製普通ポルトランドセメント

図—2 (b) 鋼棒シース位置



である。また、細・粗骨材は表—1 に示したものを使用した。軸方向鉄筋には SD 30、直径 $D 13\text{ mm}$ 、スターラップとして、SR 24 直径 $\phi 6\text{ mm}$ を使用した。

P C 鋼棒は住友電気工業製の3種、直径 $\phi 30\text{ mm}$ を使用、その機械的性質および荷重—伸び曲線を図—3 に示す。シースは P C 鋼棒用 30 mm のもので、内径 $\phi 36\text{ mm}$ を使用した。

コンクリートの配合は、28 日目目標圧縮強度を 450 kg/cm^2 とした。実施配合を表—2 に示す。

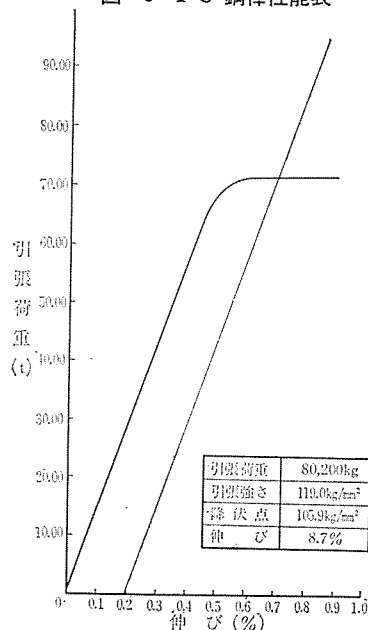
表—1 使用した骨材

種類	産地名	呼称 (mm以下)	比重	吸水率 (%)	粗粒率	備考
砂	富士川	2.5	2.64	2.25	3.13	
砂利	栃木県葛生町	15	2.69	1.05	6.09	石灰岩碎石

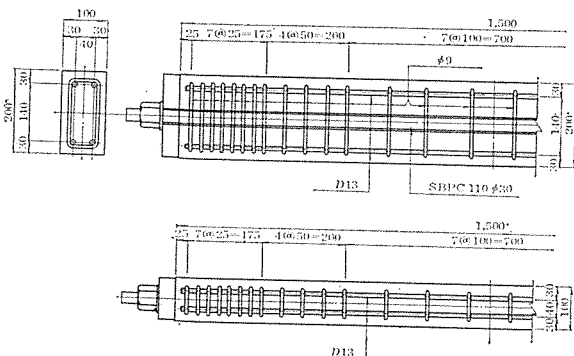
表—2 実施配合 (kg/m³)

セメント	砂	砂利	砂利	混和剤	水セメント比 W/C (°/wt)	細骨材率 S/A (°/vl)	スランプ (cm)	空気量 (%)
412	182	810	1007	1.03	44.2	45.0	5.8	0.8

図—3 P C 鋼棒性能表



図—2 (a) はり供試体寸法図

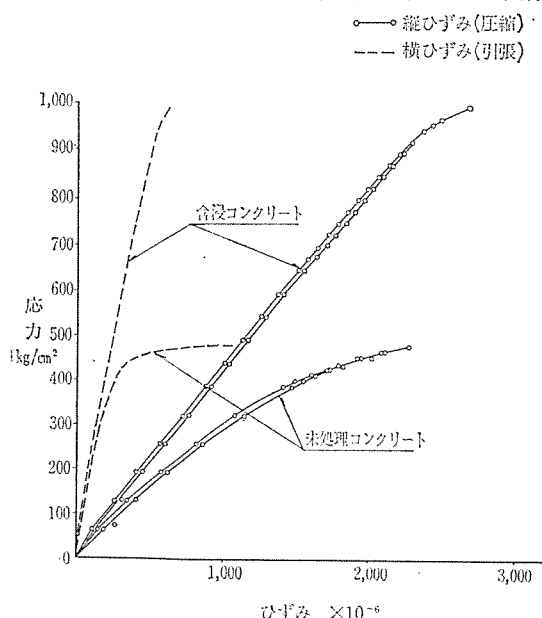


3. 実験結果

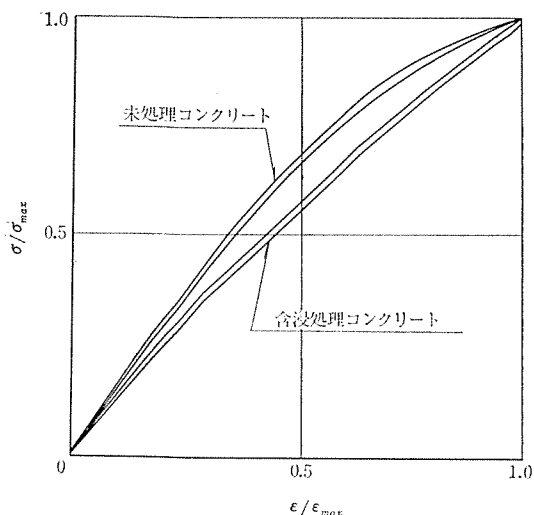
(1) JIS による供試体試験結果

プレストレス導入するはりの物理的諸性質を把握するため、はりと同一バッチより採取したコンクリートを同一条件により処理し、表—4 に示す測定結果を得た。

図—7 $\phi 10 \times 20$ JIS 供試体圧縮応力—ひずみ曲線



図—8 $\sigma/\sigma_{max}/\epsilon/\epsilon_{max}$



なお、図—7 は $\phi 10 \times 20$ を圧縮強度試験法により測定した応力度/ひずみ曲線である。これより処理コンクリートの単純圧縮破壊性状は圧壊直前に多少の塑性変形をみせるだけで概して直線に近い。処理コンクリートと未処理コンクリートとの変形状の違ひは 図—8 からわかる。

(2) 樹脂含浸コンクリートのクリープ特性

P C 鋼棒の初期緊張力の減少は、鋼棒のレラクセーションによるもの、処理コンクリートのクリープによるものを差し引いて求められる。一般のコンクリートにみられる乾燥収縮の影響は供試体製作工程上、乾燥時にすべて終了しているとみなされ、無応力状態のはり供試体と、緊張力を導入した他の供試体と同一環境条件で放置、測定した結果では、ほとんど変化が認められなかった。緊張導入力が直線状に、初期緊張力 P_{t0} から有効緊張力 P_e まで減少するものとすれば、緊張力減少量 ΔP は中央において $1/2 \Delta P$ である。さらに自重によって発生する曲げモーメントによる断面応力度を無視すると式 (1) が成立する。

$$\varphi = \frac{\Delta P \left(\frac{1}{A_p E_p} + \frac{\sigma_{cpt}}{E_c} \times \frac{1}{P_{t0}} \right) - P_{t0} \left(1 - \frac{\Delta P}{2 P_{t0}} \right) \eta_r / E_p A_p}{\frac{\sigma_{cpt}}{E_c} \cdot \left(1 - \frac{\Delta P}{2 P_{t0}} \right)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで

- φ : クリープ係数
- P_{t0} : 導入直後引張力 (kg)
- ΔP : 導入緊張力減少量 (kg)
- η_r : 鋼棒のレラクセーション係数
- σ_{cpt} : 導入直後処理コンクリートに作用している圧縮応力度 (kg/cm²)
- E_c : 処理コンクリート弾性係数 (kg/cm²)
- E_p : 鋼棒の弾性係数 (kg/cm²)
- A_p : 鋼棒の断面積 (cm²)

ΔP を測定すれば式 (1) よりクリープ係数 φ が求まる。鋼棒のレラクセーション係数は 土木学会規定値 $\eta_r = 3\%$ より実際には、かなり小さい値であり、さらに使

表—4 JIS 供試体測定結果

試 験	供試体の寸法 (cm)	試 験 法	試 験 結 果		
			未処理 (材令 37 日)	処 理	処理/未処理
圧 縮 強 度 静 弾 性 係 数 ポ ア ソ ン 比 割 裂 強 度	$\phi 10 \times 20$	JIS A 1108	463 kg/cm ² (最大ひずみ 2380×10^{-6})	979 kg/cm ² (最大ひずみ 2740×10^{-6})	2.12
		ASTM C 469-65 ワイヤーストレンゲージ法による	3.15×10^5 kg/cm ²	4.19×10^5 kg/cm ²	1.33
			0.139	0.205	1.47
		JIS A 1113	47 kg/cm ²	85 kg/cm ² (最大ひずみ 325×10^{-6})	1.81
曲 げ 強 度	$10 \times 10 \times 40$	JIS A 1106	65 kg/cm ²	143 kg/cm ²	2.20

用鋼棒は $0.3\sigma_y \sim 0.6\sigma_y$ と一般の使用応力度 $0.7 \sim 0.8\sigma_y$ より低応力度である。実測値がないため“文献 2)”より推定した値を供試体 No. 順にそれぞれ $\eta_r = 0.56, 0.56, 0.74, 0.64$ とした。 ΔP 測定結果を表-3 に示す。

ΔP および η_r を使用した計算結果と導入時断面応力度との関係を図-9 に示す。また、図-10 は導入時初期ひずみも含んだ収縮ひずみと時間との関係をあらわしたもので、これから $t=100$ 日付近のクリープ係数を概算する。全ひずみ $\varepsilon_t=100$ 、初期ひずみ $\varepsilon_i=0$ とすれば $\varphi_{t=100} = \varepsilon_{t=100} - \varepsilon_{t=0} / \varepsilon_{t=0}$ で計算され、これを図-9 中に

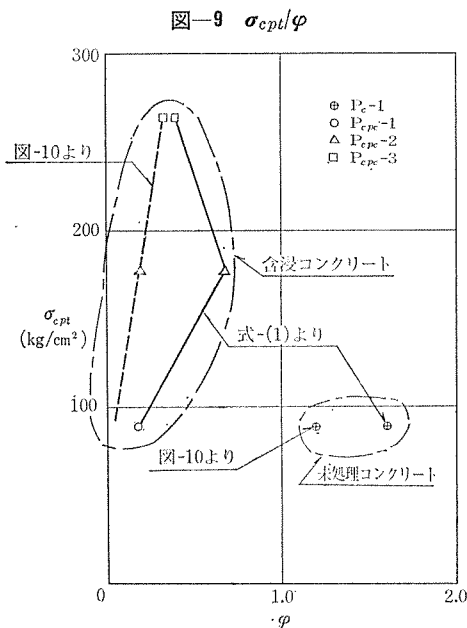


図-10 収縮ひずみ-経過時間

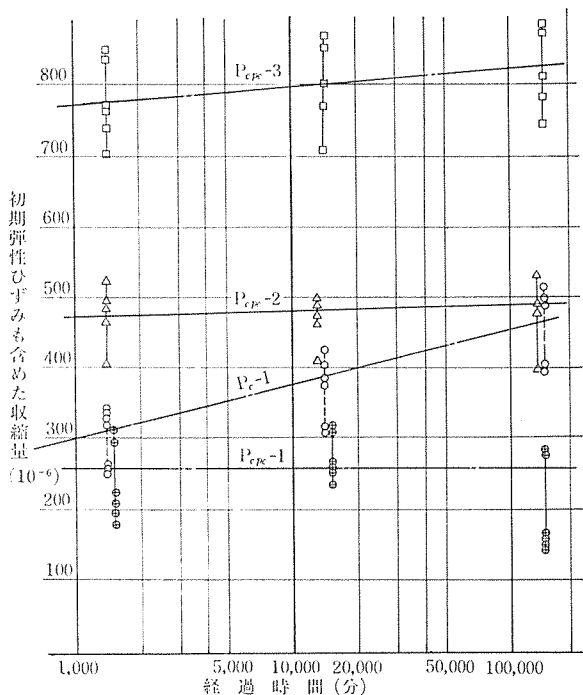
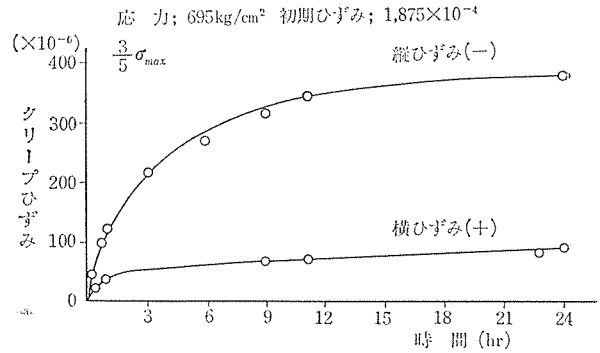


図-11 含浸コンクリートの初期クリープひずみ



プロットする、図-9 中式 (1) から求めた値と図-10 より求めた値にかなりばらつきがみられるが、測定誤差と考えられる。無筋供試体 $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ を応力レベル 60%, 695 kg/cm^2 、初期ひずみ 1.875×10^{-6} に圧縮载荷し初期クリープを測定した結果を図-11 に示す。この結果とも比較しては供試体は、鉄筋の拘束を考慮してもクリープ係数は $\varphi < 0.5$ であることが推定される。アメリカの研究結果によると、含浸処理コンクリートの圧縮クリープひずみを $\sigma_c = 56.2 \text{ kg/cm}^2$ (著者注：応力レベル 4~5.5%) 100 日間持続荷重のもとで測定した結果、逆クリープ現象を呈したと報告されているが、本試験結果では認められなかった。

(3) 曲げ载荷試験

a) ひびわれ曲げモーメントおよび破壊曲げモーメント理論式

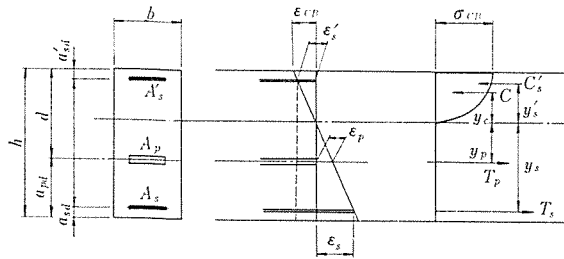
一般コンクリートの圧縮および引張応力度/ひずみ曲線は、ほぼ最大応力度で頂点をもつ 2 次放物線であらわすことができる。しかしながら処理コンクリートの圧縮および引張応力度/ひずみ曲線は図-7 にみられるように破壊直前まで直線的である。したがって、ひびわれ発生時あるいは破壊時の曲げ圧縮極限ひずみと単純圧縮極限ひずみとの関係が一般にコンクリートの曲げ試験の場合と異なることが推定される。特にひびわれ発生時の引張ひずみの有効性は、乾燥、重合処理工程の収縮が鉄筋によって拘束されることにより、発生する元応力によって打ち消されうる。いま、JIS 供試体とは供試体の力学特性が同一であるとして、ひびわれ曲げモーメント理論値は弾性理論から求める。また、破壊曲げモーメント理論式 (2) は“文献 1)”を参考にした。なお、式 (2) は鋼棒に付着がある場合であるが、本供試体はグラウトをしていないので $M_B = (0.85 \sim 0.90) \bar{M}_B$ より求める (文献 5))。

1) 破壊曲げモーメント理論式：図-12 より次の平衡状態が成り立つ。

2) コンクリートの圧縮力 C ：

$$C = \alpha k b d \sigma_{cB}$$

図一12 破壊曲げモーメント理論式



$$y_c = \beta k d$$

ここで

$$r = \epsilon_{iB} / \epsilon_{cB}, \alpha = 1 - r/3, \beta = (0.5 - r/3 - r^2/12) / \alpha$$

3) 鉄筋の圧縮力 C_S' :

$$C_S' = p_s' b \cdot d \sigma_s'$$

$$y_s' = (k - a_s') d$$

$$\epsilon_s' = \frac{(k - a_s')}{k} \epsilon_{cB}$$

4) 鉄筋の引張力 T_S :

$$T_S = P_s \cdot b \cdot d \sigma_s$$

$$y_s = (1 - k + a_p - a_s) d$$

$$\epsilon_s = \frac{1 - k + (a_p - a_s)}{k} \cdot \epsilon_{cB}$$

5) 鋼棒の引張力 T_p :

$$T_p = P_p \cdot b \cdot d \cdot \sigma_p$$

$$y_p = (1 - k) d$$

$$\epsilon_p = \epsilon_{pe} + \epsilon_{cpe} + \bar{\epsilon}_p$$

$$= \frac{P_e}{A_p E_p} + \frac{\sigma_{cpe}}{E_c} + \frac{1 - k}{k} \epsilon_{iB}$$

$$C + C_S' = T_S + T_p + C_t$$

$$\therefore k = \frac{P_s \sigma_s + P_p \sigma_p - P_s' \sigma_s'}{\alpha \sigma_{cB}}$$

$$\bar{M}_B = C y_c + C_S' y_s' + T_S y_s + T_p y_p \dots (2)$$

b) ひびわれ荷重と破壊荷重 実例

ひびわれ荷重 P_{cr} と破壊荷重 P_B およびその値から計算した実例ひびわれ曲げモーメント M_{cr} と破壊曲げモーメント M_B とそれに対応する理論値 M_{cr}^0 と M_B^0 とを比較したのが表一5 である。図一13 は供試体 有効導入応力度と前記値との関係をあらわしたものである。

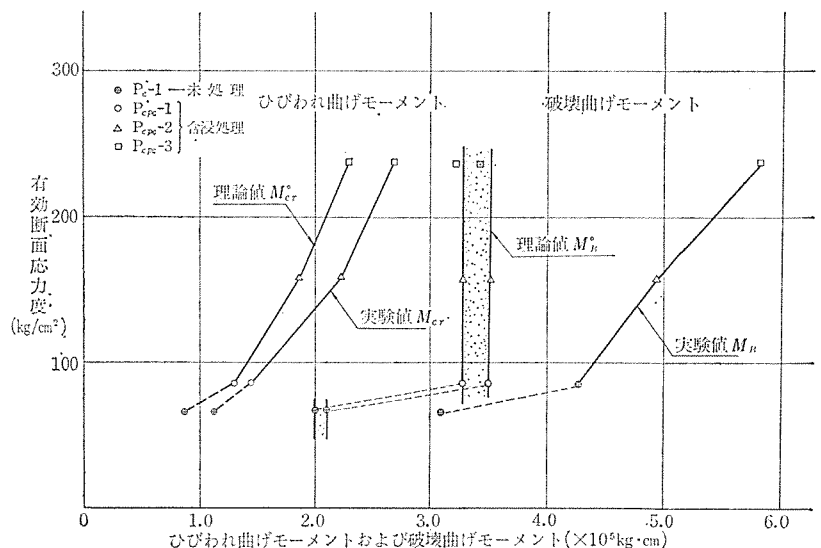
ひびわれ曲げモーメントの実例値と理論値を比較するとほぼ並行線を呈し、その差が塑性変形分の応力増加を示している。いま、 $P_{cpc}-3$ について JIS 供試体曲げ試験による値 $\sigma_{ct}^B = 143 \text{ kg/cm}^2$ を用いて弾性理論式に代入すれば $M_B' = 271 504 \text{ kgcm}$ となり、ほぼ実測値に一致し同程度の塑性域を有することがわかった。これより収縮の鉄筋による拘束によって生ずると推定された処理コンクリート中の内部引張力は、供試体がプレストレスされることによって、ほとんど回復したとも考えられる。

また、破壊曲げモーメント実測値は有効断面応力度の増加につれて大きくなっている。理論値はプレストレスされた一般のコンクリートばりと同様、有効断面応力度 σ_{cpe} の大きさにかかわらず $M_B \div 3.30 \sim 3.50 \times 10^5 \text{ kg/cm} \div \text{const.}$ となり、実測値のような傾向はみられない。この原因としては、圧縮側鉄筋が圧縮塑性域を増大するような働きをしていると考えられ、今後検討を要する。図一14 は、はり中央部のたわみ/荷重との関係を示したものである。また、破壊後のはり供試体のひびわれ発生状況を 図一15 に示す。

b) 曲げ引張極限ひずみおよび曲げ圧縮極限ひずみ

ひびわれ発生時測定曲げ、引張ひずみ ϵ_{ct}^0 から導入時初期ひずみ ϵ_{cpt} を差し引いた値が曲げ引張極限ひずみ ϵ_{ct} となり、これとひびわれ荷重との関係を 図一16 に示す。

図一13 M_{cr}/σ_{cpt} , M_B/σ_{cpt} 実測値および理論値比較



表一5 曲げ試験結果表

	P_{cr} (kg)	P_B (kg)	M_{cr} (kg/cm)	M_B (kg/cm)	M_{cr}^0 (kg/cm)	M_B^0 (kg/cm)	P_B/P_{cr}	M_{cr}/M_{cr}^0
P_{c-1}	5 250	13 800	1.181×10^5	3.105×10^5	0.870×10^5	$2.028 \times 10^5 \sim 2.100 \times 10^5$	2.63	1.36
P_{cpc-1}	6 500	19 000	1.463×10^5	4.275×10^5	1.301×10^5	$3.300 \times 10^5 \sim 3.50 \times 10^5$	2.90	1.13
P_{cpc-2}	10 000	22 000	2.250×10^5	4.950×10^5	1.870×10^5	$3.348 \times 10^5 \sim 3.545 \times 10^5$	2.20	1.20
P_{cpc-3}	12 000	26 000	2.700×10^5	5.850×10^5	2.301×10^5	$3.233 \times 10^5 \sim 3.423 \times 10^5$	2.17	1.18

す。樹脂含浸コンクリートの $\epsilon_{ct}=300\sim450\times10^{-6}$ で、未処理供試体に比べ非常に高い値を示すが、割裂試験による単純引張極限ひずみは $\epsilon_{ct}'=325\times10^{-6}$ で、この値を、はり供試体に等しいものとする、引張塑性係数は $r_t=1.08\sim0.75$ となり一般のコンクリートの場合 ($r_p=0.6\sim0.7$) と比較して塑性変形性能が減少していることがわかる。曲げ破壊時圧縮極限ひずみ/荷重関係は図一17に示す。これに導入時初期ひずみを加え、圧壊時のひずみ勾配を推定して P_B との交点を曲げ圧縮極限ひずみとすると $\epsilon_{cB}=3\,000\sim4\,000\times10^{-6}$ となる(図一18)。これと単純圧縮極限ひずみ $\epsilon_{cB}'=2\,740\times10^{-6}$ との比、すなわち、圧縮塑性係数は $r=\epsilon_{cB}'/\epsilon_{cB}=0.92\sim0.69$ と

なる。

さらに一般のコンクリートの場合の圧縮強度と各ひずみ能力との関係式 ($\sigma_{cB}=200\sim600\text{ kg/cm}^2$ の範囲の実験値) に含浸処理コンクリートを比較してみる(表一6)。

$$\sigma_{ct}=24+0.052(\sigma_{cB}-200)$$

$$E_c=31\times10^3\sigma_{cB}^{0.4}$$

$$\epsilon_{cB}'=(0.141+0.00007\sigma_{cB})\times10^{-2}$$

$$\epsilon_{ct}'=(12+0.013\sigma_{cB})\times10^{-5}$$

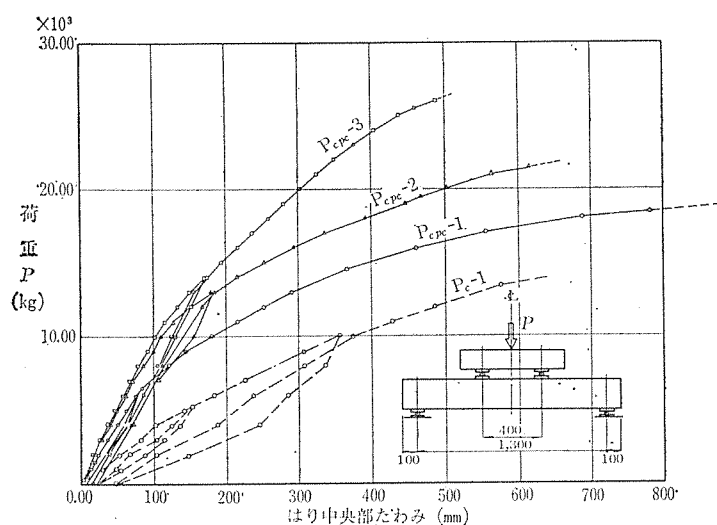
$$\epsilon_{cB}=(0.24+0.001\sigma_{cB})\times10^{-2}$$

$$\epsilon_{ct}=(18.5+0.02\sigma_{cB})\times10^{-5}$$

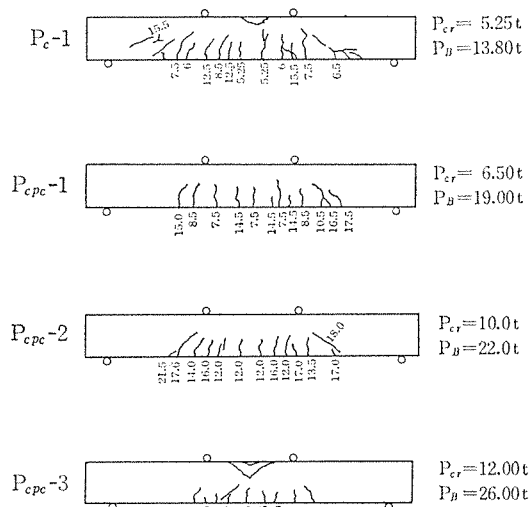
(上記関係式は“文献1”)による実験式である)

概して圧縮強度の増大に伴うひずみ能力増大は普通コ

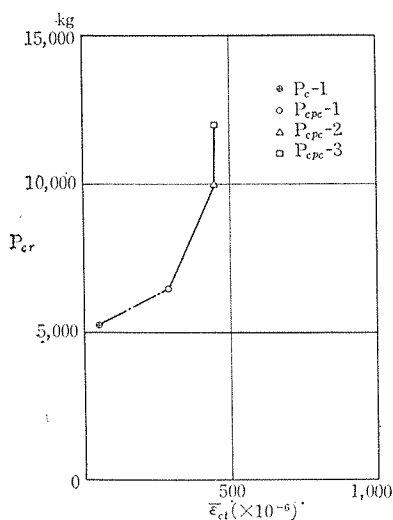
図一14 はり中央部荷重たわみ一曲线



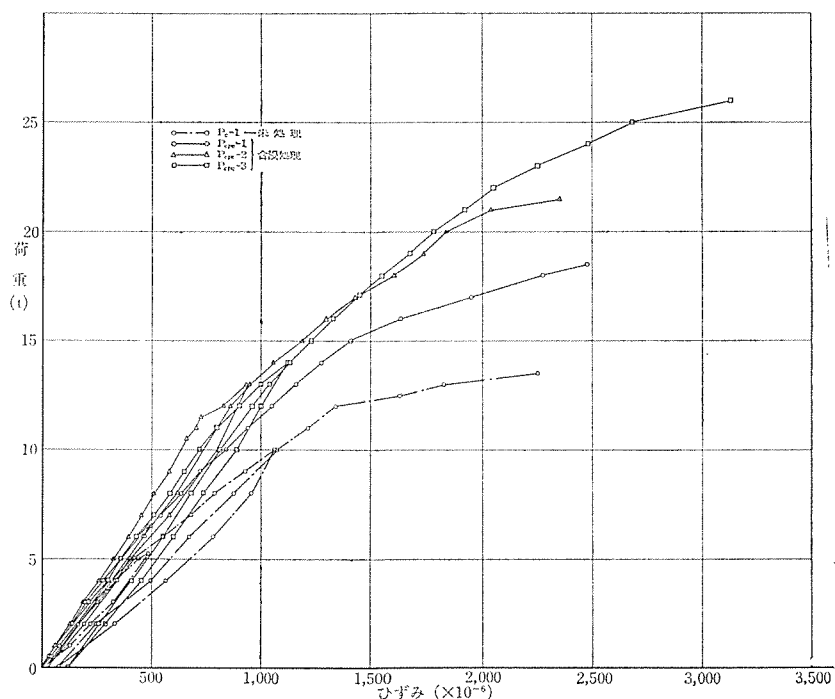
図一15 ひびわれ発生状況図



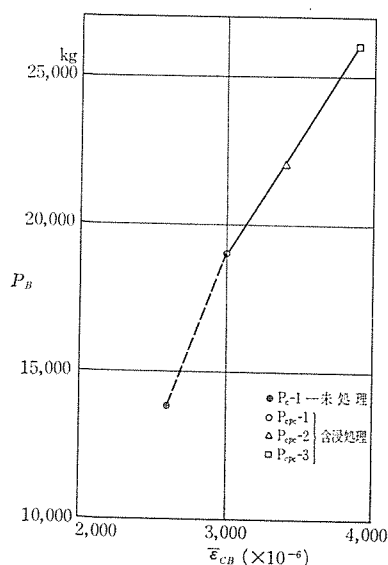
図一16 ひびわれ発生時はりスパン中央部引張縁の実引張ひずみとひびわれ荷重との関係



図一17 はり供試体圧縮縁ひずみ ϵ_c/P (実測値)



図一18 曲げ破壊時はリスパン中央部圧縮縁の実圧縮ひずみと破壊荷重との関係



表一6 樹脂含浸コンクリート物性の既存理論の外そう値と実測値との比較表

項	目	外そう値	実測値	備考
弾性係数	E_c	kg/cm ²		
引張強度	σ_{ct}	66	85	85 %
単純圧縮極限ひずみ	ϵ_{cB}'	2 110	2 740	130 %
単純引張極限ひずみ	ϵ_{ct}'	250	325	130 %
曲げ圧縮極限ひずみ	ϵ_{cB}	3 400	3 000 ~ 4 000	88 ~ 120 %
曲げ引張極限ひずみ	ϵ_{ct}	385	300 ~ 450	78 ~ 120 %

ンクリートで同一強度が得られた場合、多少の変形能力の差はあるにせよ、ほぼ等しいことになり一般にコンクリートの各力学特性比が、そのままレベルアップしたものと推定される。

4. 結 論

1) 樹脂含浸処理により圧縮強度 $\sigma_{cB}=979 \text{ kg/cm}^2$ のコンクリートを製作し、 $\sigma_{cBt}=263 \text{ kg/cm}^2$ のプレストレスを導入した。約7ヵ月のクリープ期間を置いたのちの有効プレストレスは、ひびわれ曲げモーメントを高める意味で有効であることが破壊実験によって確認された。

2) 含浸処理したはり供試体（鉄筋比 $\rho=2.5\%$ ）のクリープ係数は、再緊張による有効導入力チェックならびにコンタクトゲージによるひずみ測定の結果から、ほぼ、 $\phi=0.2\sim0.5$ の範囲になった。無筋の供試体（ $\phi 10 \times 20$ ）では $\sigma_c=0.6 \sigma_{\max}$ の応力比で24時間経過後のクリープは弾性ひずみの30%以下であり、処理コンクリートのクリープ係数は $\phi \leq 0.5$ であることが推定さ

れる。未処理コンクリートは37日間湿空養生を行ない $\phi=1.2\sim1.6$ となった。

3) ひびわれ曲げモーメント実測値は弾性理論による計算値よりずれも大きい値を示し、収縮時鉄筋の拘束による引張内部応力の影響は認められなかった。

4) 破壊曲げモーメント実測値は理論値とかなり異なり、ひびわれ曲げモーメントの場合と同様、導入緊張力の増大につれてその値も大きくなる傾向がみられる。一方、圧縮極限ひずみも $\epsilon_{cB}=3\,000\sim4\,000 \times 10^{-6}$ と増加している。これは、はり供試体の圧縮域が鉄筋の拘束によって補強された圧縮塑性が増大したためと考えられる。有効導入力が増すにつれ理論値との差が大きくなる理由は導入力の増加にともない k が大きくなって、上記効果が増したためと推定されるが今後の検討を要する。

5) 普通コンクリートの場合の曲げ引張り極限ひずみ ϵ_{ct}^0 、曲げ圧縮極限ひずみ ϵ_{cB}^0 と σ_{cB} との関係式に樹脂含浸コンクリートの σ_{cB} を代入してみると、ほぼひずみ能力は一致する。

あ と が き

供試体本数も少なく、実験データとしてかならずしも満足するものではないが、樹脂含浸コンクリートの曲げ極限ひずみは、その圧縮強度/ひずみ特性として普通コンクリートについて得られた関係式を外そうして用いることがわかった。また、破壊曲げモーメントおよび曲げ圧縮極限ひずみが有効プレストレスの増大につれて大きくなる傾向を呈したことについて、今後試験を進めていきたい。

なお、本研究は大成建設株式会社と三井東圧化学株式会社の共同研究の一つとして行なった。供試体の含浸技術に関して三井東圧化学大船中央研究所、小林貞雄、井福直之、国崎秀雄の各氏の協力を得たのを初め、両社の多くの関係者の協力によるもので、ここに記して感謝の意に代える。

参 考 文 献

- 1) コンクリート橋
- 2) プレストレスト コンクリート, Vol. 3, No. 3, April 1961, “各種 PC 用鋼の試験 (2)” PC 用鋼研究会
- 3) セメント コンクリート, No. 279 “樹脂含浸によるコンクリートの強化” 十代田知三抄訳
- 4) コンクリート ジャーナル, Vol. 9, No. 1, Jan. 1971 “樹脂含浸セメント製品に関する基礎研究” 田沢栄一ほか
- 5) 建築構造物のリミットアナリシス, 日本建築学会

1971. 6. 11・受付