

[2084] 高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入した PRC はりの曲げ性状

正会員 鈴木 計夫 (大阪大学工学部)

正会員 ○大野 義照 (大阪大学工学部)

正会員 白井 敏彦 (大阪大学大学院)

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造における高強度鉄筋の利用は、短期荷重に対しては部材強度の増加、鋼材量の節減、配筋の簡略化等の多くの利点を有しているが、常時荷重下において強度に見合う高い鉄筋応力を許すとひびわれ幅やたわみが大きくなるという問題があり、その有効な利用が狭められている。その解決策としては P C 鋼材にてプレストレスを導入し、常時荷重下の鉄筋応力を制御するいわゆる P R C 構造とすることも一方法であるが、高強度鉄筋そのものの引張によるプレストレッシング工法によってひびわれ幅やたわみを制御する方法がより有効であると考えられる。この場合も、鉄筋はプレストレスを導入する P C 鋼材とひびわれの分散を計る引張側鉄筋の両者の役割を果たし、一種の P R C とみなせよう。筆者らは鉄筋そのものの引張による高強度鉄筋の有効利用を目指し、先に普通強度の鉄筋を用い同じ鉄筋量のほりにおいて鉄筋の引張によってプレストレスを導入した場合と、同量のプレストレスを P C 鋼材を用いて導入した場合の比較実験を行ない、鉄筋が降伏しない範囲では両者のひびわれ幅、たわみ性状は等しいこと、コンクリート断面に作用するプレストレスの損失は総鋼材量の少ない鉄筋を引張した場合の方が小さいことなどを報告した。本論文では、鉄筋の引張応力の大きさと載荷時期を実験変数として高強度異形鉄筋 (S D 50) を用いてプレストレスを導入したはりの曲げ載荷実験を行ない、コンクリートのクリープ・乾燥収縮によるプレストレスの損失やひびわれおよびたわみ等の曲げ性状を調べ、高強度鉄筋の有効利用の一方法について述べる。

2. 実験概要

表2 鉄筋の力学的性質

鋼材種	断面積 (cm ²)	降伏荷重 (kg)	引張荷重 (kg)	弾性係数 (kg/cm ²)
D13 (S D 50)	1.23	7380	9250	2.1×10 ⁵

2-1 使用材料

コンクリートは

早強ポルトランドセメント、山砂および最大寸法20mmの碎石を使用した水セメント比54%、スランブ18cmの手練りコンクリートを用いた。その力学的性状を表1に示す。鉄筋はS D 50の異形鉄筋D13を用いた。鉄筋の力学的性質を表2に示す。

2-2 試験体の性質

試験体の種類を表3に示す。鉄筋の目標初引張応力は 0,1000,2000,3000 kg/cm²とし、導入から載荷までのクリープ・乾燥収縮によるプレストレスの損失およびそのはりの曲げ性状に及ぼす影響を調べるため、載荷時期は導入即載荷 (0シリーズ), 導入後2週間 (2Wシリーズ) および導入後3ヶ月

表1 コンクリートの力学的性状

(1) 0, 2Wシリーズ

材令	圧縮強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)	乾燥収縮 (×10 ⁻⁴)	クリープ係数
9日	309	31.9	2.61×10 ⁵	0	0
23日	400	34.6	2.75×10 ⁵	2.12	0.68

(2) 3Wシリーズ

材令	圧縮強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)	乾燥収縮 (×10 ⁻⁴)	クリープ係数
6日	279	27.8	2.53×10 ⁵	0	0
97日	384	32.6	2.95×10 ⁵	4.17	1.23

表3 試験体の種類

試験体名	目標鉄筋引張力 (kg/cm ²)	導入直後引張力 (t)	導入～載荷の材料 (日)	載荷時引張力 (t)	引張力の損失 (t)	有効率	下縁プレストレス (kg/cm ²)
0シリーズ	R0-0	0	0	0	0	----	0
	R1-0	1000	2.21	0	2.21	0	28.4
	R2-0	2000	4.45	0	4.45	0	53.1
	R3-0	3000	6.90	0	6.90	0	82.3
2Wシリーズ	R0-2W	0	0	14	-0.84	-0.84	-10.0
	R1-2W	1000	2.22	14	1.27	-0.95	0.57
	R2-2W	2000	4.61	15	3.24	-1.37	0.70
	R3-2W	3000	6.76	15	4.99	-1.77	0.74
3Mシリーズ	R0-3M	0	0	90	-1.66	-1.66	-19.8
	R1-3M	1000	2.36	91	0.34	-2.02	0.14
	R2-3M	2000	4.51	90	2.00	-2.51	0.44
	R3-3M	3000	6.71	91	3.78	-2.93	0.56

(3Mシリーズ)とした。試験体形状は図1に示すような12×20×200 cmの単筋長方形はりである。

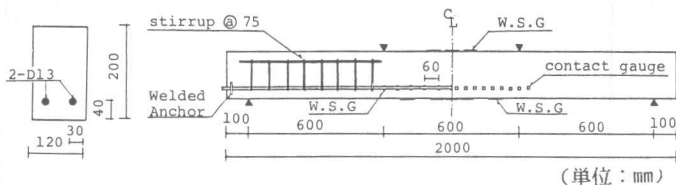


図1 試験体形状

2-3 試験体の製作

プレストレスの導入方式はプレテンション方式で、鉄筋を予め引張した後スターラップ・型枠を組みコンクリートを打設した。なお鉄筋の引張時には鉄筋のリラクゼーションを低減するために20%程度の過緊張を行なっている。脱型は材令2~3日に行ない、材令6~9日のプレストレスの導入時まで湿布養生を行なった。2Wおよび3Mシリーズの試験体はプレストレス導入後荷重まで実験室内に気中保存した。プレストレス導入時におけるプレストレス力(鉄筋の引張力)は鉄筋ひずみより、荷重までの鉄筋の引張力の損失は脱型直後に貼付した検長30cmのコンタクトストレインゲージ(C.S.G.)によるコンクリートひずみ測定値より算出した。コンクリートの乾燥収縮・クリープははり試験体と同一断面形状を有するコントロール試験体にて測定した。図2に3Mシリーズのクリープ・乾燥収縮曲線を示す。また2Wおよび3Mシリーズの荷重時の乾燥収縮・クリープ係数の値を表1に示した。

2-4 実験方法

荷重は等曲げスパン60cmの3等分点荷重とした。はりのたわみは変位計で、ひびわれ幅は鉄筋位置のコンクリート表面に貼付した検長40mmのC.S.G.で、鉄筋のひずみは鉄筋に60mm間隔で貼付した検長2mmのワイヤーストレインゲージ(W.S.G.)で測定した(図1参照)。0シリーズは単調に曲げ破壊まで荷重し、2Wシリーズにおいては鉄筋位置のコンクリート応力が0のときからの鉄筋応力変化量が約2000kg/cm²となる荷重および鉄筋の存在応力が約4000kg/cm²となる荷重から、3Mシリーズにおいてはさらに(ひびわれ荷重+0.4t)の荷重から0.05tまで減力し、たわみの復元性およびひびわれの閉合性等について検討を行なった。

3. 実験結果および考察

3-1 有効プレストレス力

前掲の表3中に荷重時における引張力の損失、有効率、コンクリート下縁の有効プレストレス等を示す。同表における鉄筋を引張していないR0の引張力の損失はコンクリートの乾燥収縮によって生じた鉄筋の圧縮力を意味している。荷重時期が遅い程プレストレス力の有効率は小さくなり、引張応力が2000kg/cm²、3000kg/cm²の試験体は導入の2週間後に約70%、3ヶ月後には約50%内外となる。またプレストレス力の有効率は鉄筋の引張応力度が低いほど小さく、R1-3M

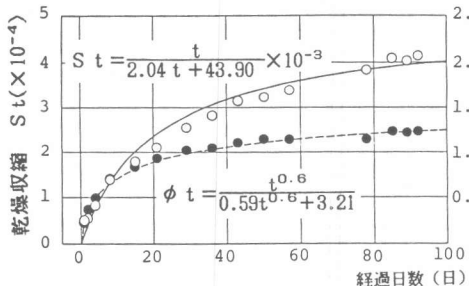


図2 クリープ・乾燥収縮曲線(3Mシリーズ)

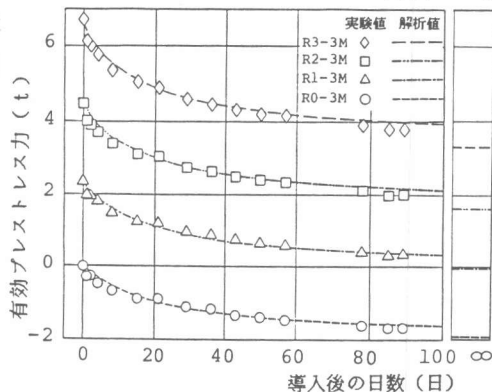


図3 有効プレストレス力の経時変化(3Mシリーズ)

で14%と大幅に減少している。ただしR1-3Mでのプレストレスングの効果を同じ保存条件のRCはりとは下縁応力の比較でみると、R0-3Mが19.8kg/cm²の引張応力が生じているのに対してR1-3Mでは4.4kg/cm²の圧縮応力が残存し、その差は24.2kg/cm²で同効果は大きく残存しているといえる。

図3に3Mシリーズの有効プレストレス力の経時変化を示す。図中の各線は図2のクリープ・乾燥収縮曲線を用いてクリープ速度法により求めた解析値を示している。解析値は実験値とよく一致している。なお、図3中に示す最終解析値は乾燥収縮およびクリープ係数の最終推定値 (Sn=4.90×10⁻⁴, φn=1.69) より算出した値である。

次にプレストレス力の損失に及ぼすクリープと乾燥収縮の影響の割合を検討するために3Mシリーズの荷重時におけるプレストレス力の損失量を乾燥収縮によるものとプレストレスによるクリープ変形によるものとに分けて図4に示す。同図よりプレストレスの損失に及ぼす乾燥収縮の影響が大きく、プレストレス量の最も大きいR3においても乾燥

乾燥収縮
プレストレスによるクリープ変形

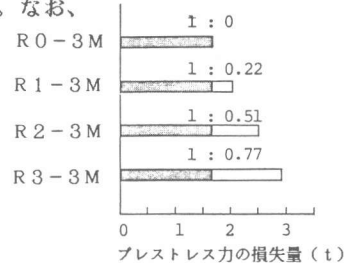


図4 プレストレス力の損失量 (3Mシリーズ)

表4 実験結果一覧表

収縮による損失がクリープ変形による損失より大きいことが分かる。このことは長期間無荷重で保存されるような場合でも湿潤養生等で乾燥収縮を低減することによってプレストレス力の損失を少なくすることができることを示唆している。

3-2 ひびわれモーメントMcr, 降伏モーメントMy, 終局モーメントMu

Mcr, My およびMu の実験値と計算値を表4に、またMcrと有効プレストレスの関係を図5に示す。各シリーズともMcrは有効プレストレス力に応じて大きくなっている。図中に曲げ引張強度を1.8/√Fcとして(1)式より求めた計算値を示している。

$$Mcr = (\sigma_{tb} + \sigma_p) Z \quad \text{---(1)}$$

ここに、σ_{tb}: コンクリートの曲げ引張強度

σ_p: コンクリート下縁有効プレストレス

Z: 引張縁に関する断面係数

計算値は実験値とよく一致している。また、同図に曲げ引張強度を割裂強度の5/3倍として(1)式より求めた計算値も合わせて示す。後者の計算値は実験値より大きめに算出されている。

My, Mu は試験体によるばらつきは若干見られるが鉄筋の引張力および荷重時期の影響はみられない。

試験体名	ひびわれモーメント Mcr (tm)		降伏モーメント My (tm)		終局モーメント Mu (tm)		平均ひびわれ間隔 lav (cm)	
	実験値	計算値*1	実験値	計算値*2	実験値	計算値*2	実験値	計算値*3
0シリーズ	R0-0	0.33	0.28	2.03	2.03	2.06	12.4	11.8
	R1-0	0.61	0.52	2.11	2.13	2.06	13.1	11.8
	R2-0	0.87	0.78	2.07	2.13	2.06	10.6	11.8
	R3-0	1.08	1.02	1.96	2.05	2.06	10.5	11.8
2Wシリーズ	R0-2W	0.24	0.23	2.18	2.21	2.13	10.7	11.8
	R1-2W	0.42	0.45	2.10	2.21	2.13	11.2	11.8
	R2-2W	0.68	0.68	2.09	2.21	2.13	9.8	11.8
	R3-2W	0.87	0.85	2.10	2.21	2.13	12.3	11.8
3Mシリーズ	R0-3M	0.18	0.14	2.11	2.14	2.12	12.3	11.8
	R1-3M	0.48	0.33	2.19	2.23	2.12	12.2	11.8
	R2-3M	0.59	0.52	2.08	2.10	2.12	9.6	11.8
	R3-3M	0.78	0.67	2.03	2.17	2.12	9.5	11.8

注) Myは鉄筋降伏時の曲げモーメント、Muは最大の曲げモーメントである。
*1 Mcrの計算には建築学会RC規程解説の曲げ引張強度を用いた。
*2 Muの計算値は同PC規程解説の計算式による。
*3 lavの計算値は同PC規程解説の計算式による。

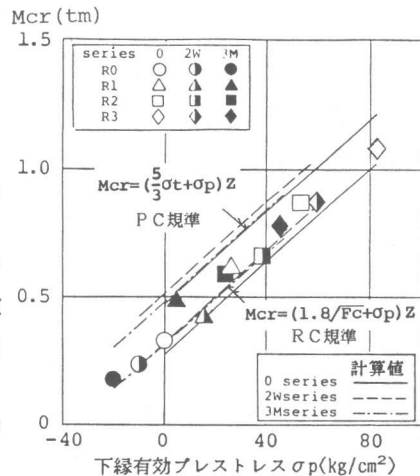


図5 ひびわれモーメントと下縁有効プレストレスの関係

3-3 ひびわれ間隔

図6に存在鉄筋応力が約4000kg/cm²の曲げモーメントM=1.4tmにおけるひびわれ状況を示す。同一荷重に対してひびわれ深さは、プレストレス力に応じて浅くなり、荷重時期が遅くなる程ひびわれ深さが進展していることが分かる。ひびわれ定常状態におけるひびわれ間隔も表4にあわせて示す。ひびわれ間隔はプレストレス量および荷重時期の影響は見られない。またP R C指針解説の式により求めた計算値は実験値とはほぼ一致している。

3-4 ひびわれ幅

図7(a)にプレストレス導入後直ちに荷重した0シリーズの曲げモーメントMと平均ひびわれ幅 w_{av} の関係を示す。プレストレス量に応じてひびわれ幅が制御されていることが分かる。たとえばM=1.4tmにおける平均ひびわれ幅 w_{av} は、R0が0.21mmであるのに対してR1は0.15mm、R2は0.08mm、R3は0.04mmと制御されている。また、 $w_{av}=0.10$ mmに対する抵抗曲げモーメントはR0の0.76tmに対してR1は1.13tm、R2は1.52tm、R3は1.79tmと大幅に増加する。同図中に平均ひびわれ間隔 l_{av} と鉄筋位置のコンクリート応力が0の時点からの平均鉄筋ひずみの変化量 $\Delta \epsilon_{sav}$ の積として算出される w_{av} のP R C指針解説の式による計算値を破線で示した。計算値は実測値とよく一致している。

図7(b)、図7(c)にプレストレス導入の2週あるいは3ヶ月後に荷重した2W、3Mシリーズの試験体の曲げモーメントと平均ひびわれ幅 w_{av} との関係を示す。プレストレスの損失によって鉄筋の初引張力が大きい程荷重時期の遅れによる同一曲げモーメントに対するひびわれ幅の増加量が大きくなるので、R0~R3の間の同一曲げモーメントに対する w_{av} の差は小さくなるがプレストレスにより依然としてひびわれ幅は大幅に制御されている。

3-5 鉄筋ひずみ

図8(a),(b)にモーメントMと平均鉄筋ひずみの変化量 $\Delta \epsilon_{sav}$ の関係を示す。(a)図は導入即荷した0シリーズの試験体の関係である。プレストレスに応じて $\Delta \epsilon_{sav}$ が低減されていることが認められる。本実験の場合、各試験体の鉄筋量

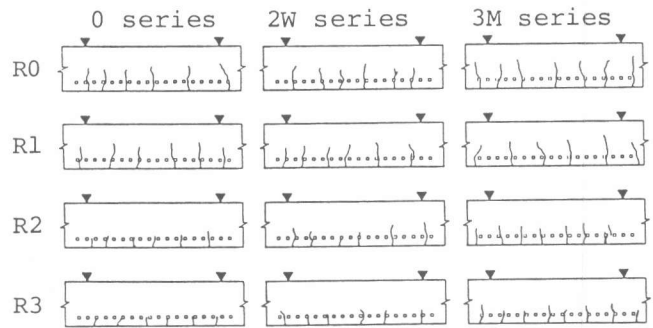


図6 ひびわれ状況図 [M=1.4tm, ($\sigma_{smax} \approx 4000 \text{kg/cm}^2$)]

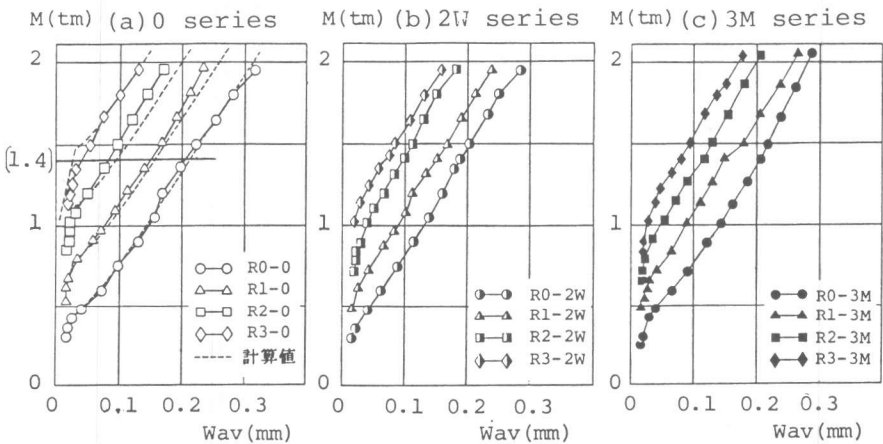


図7 モーメントと平均ひびわれ幅の関係

は同じでひびわれ分散性も同じとなるので $\Delta \varepsilon_{sav}$ の低減が直接ひびわれ幅の制御に結びついている。またひびわれ発生時に生ずるひびわれ断面における鉄筋応力のジャンプ量はプレストレスによって減少するので、試験体R1-0からR3-0の順にひびわれ発生時のM- $\Delta \varepsilon_{sav}$ 曲線の勾配の変化は滑らかとなる。ただし鉄筋量は同じなのでその後の勾配はR0-0と等しい。(b)図は3Mシリーズの試験体のM- $\Delta \varepsilon_{sav}$ 関係を示したものである。プレストレスの損失によって3Mシリーズの $\Delta \varepsilon_{sav}$ は0シリーズに比べ増加しているが依然としてプレストレスングの効果が認められる。

3-6 たわみ性状

図9に荷重Pとプレスト

レスの導入および保存期間中のそり上りを考慮した中央たわみ δ の関係を示す。P- δ 関係においてもプレストレス力に応じてたわみが低減され、たわみ制御の点でもプレストレスングの効果が認められる。そり上りを考慮した場合はひびわれ幅の場合とは違って3Mシリーズも0シリーズと同程度にプレストレスングによってたわみが制御されている。

3-7 繰り返し載荷時の挙動

図10に3Mシリーズの繰り返し載荷時の荷重Pと中央たわみ δ の関係を示す。R0のP- δ は減力開始からほぼ直線的に戻るのに対して、R3はPC特有の復元性を示し、残留たわみも小さくなる。図11に2W、3Mシリーズの残留たわみを減力開始時たわみで除した残留変形率と有効プレストレス力の関係を示す。載荷時期に関係なく有効プレストレス力に応じた復元性が示されている。

図12に3Mシリーズの繰り返し載荷時のモーメントMと最大ひびわれ幅 w_{max} の関係を、図13に2W、3Mシリーズのひびわれ幅残留率と有効プレストレス力の関係を示す。ひびわれ幅の閉合性についてもたわみと同様にプレストレスングの効果が認められる。またPC鋼材にてプレストレスを導入したPRC部材の場合と同様に、M- w_{max} 関係においてDecompressionモーメント M_{dec} 。(コンクリート下縁応力が0となる曲げモーメント)で實際上ひびわれが閉じていると見なせる屈折点が現れている。

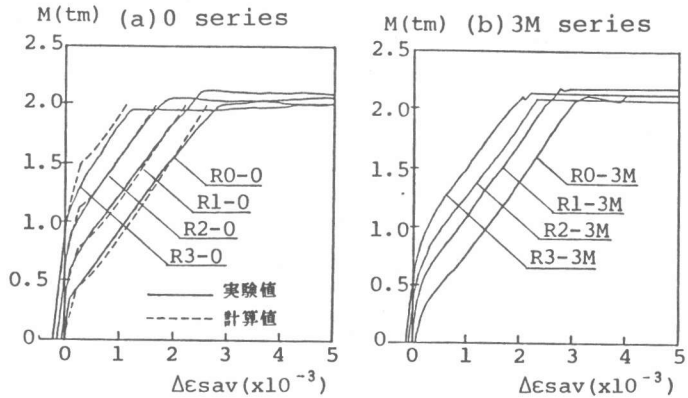


図8 モーメントと平均鉄筋ひずみの変化量の関係

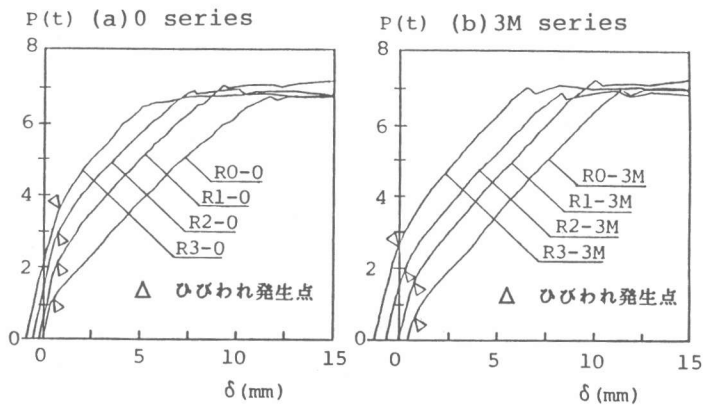


図9 荷重と中央たわみの関係

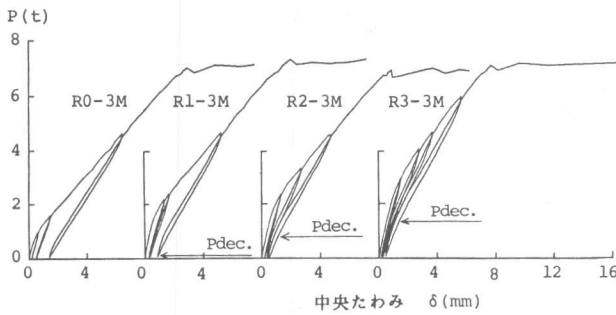


図10 繰り返し載荷時の荷重と中央たわみの関係

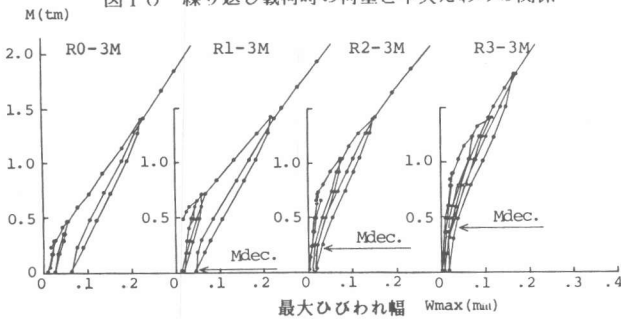


図12 繰り返し載荷時のモーメントと最大ひびわれ幅の関係

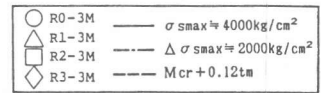


図11 残留変形率

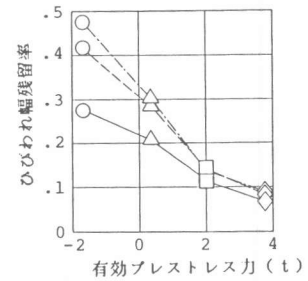


図13 ひびわれ幅残留率

4. まとめ

高強度鉄筋の有効利用の観点から高強度鉄筋を鉄筋応力度で1000~3000kg/cm²引張りプレテンション方式でプレストレスを導入したはりのプレストレス力の損失や曲げ性状を調べた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 導入から載荷までの保存期間中に生ずるプレストレス力の損失はコンクリートのクリープ変形による損失よりも乾燥収縮による損失が大きい(図4)。したがって導入後長期間保存される場合はこの間の乾燥収縮を低減することによってプレストレスの損失を少なくできる。
- (2) ひびわれ幅やたわみの制御に対して鉄筋の引張力の大きさに応じた効果が確認できた。ひびわれ幅は鉄筋位置のコンクリート応力が0のときからの鉄筋応力の変化量をとらえたPRC指針解説の式によって算定できた(図7~図9)。
- (3) プレストレスを導入して3ヶ月後載荷したはりにおいてもプレストレスリングの効果が認められた(図7~図9)。
- (4) 繰り返し荷重下におけるたわみの復元性およびひびわれの閉合性に対してもプレストレスリングの効果が認められた(図10~図13)。

謝辞 本研究は本学卒業生谷川清次氏(現積水ハウス株)の協力を得て行なったものであり、(株)神戸製鋼所からは鉄筋を御提供いただいたことを記して謝意を表します。

- 参考文献
- 1) プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説; 日本建築学会
 - 2) 鈴木、大野、白井: 普通鉄筋にてプレストレスを導入したはりの曲げ性状について; 日本建築学会大会学術梗概集 昭和61年 8月
 - 3) Fritz Leonhardt: Recommendations for the Degree of Prestressing in Prestressed Concrete Structures; FIP Notes No.69 pp.9~pp.14
 - 4) 鈴木、大野、佐田: プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げ性状について; 第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集 1980