

[168] 繰返し荷重下におけるプレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げ性状

正会員 鈴木計夫 (大阪大学工学部)
 正会員 ○大野義昭 (大阪大学工学部)
 宮丸孝史 (間組東京建築支店)
 山向 優 (大阪大学大学院)

1. まえがき

曲げひびわれ幅やたわみを制御する目的で使用するプレストレスト鉄筋コンクリート(以下P R Cと略記)部材の初載荷時および持続荷重下での曲げ性状については既に報告してきた^{1),2)}。今回は常時荷重下において繰返し荷重が作用した場合、圧縮側コンクリートの剛性の低下や鉄筋とコンクリート間の付着の劣化などによって生ずる曲げひびわれ幅やたわみの増加についてP R Cはりの20万回の繰返し載荷を行って検討した。またはり引張部を想定した両引試験体の繰返し載荷試験を行いはりの曲げ性状に大きな影響を与える鉄筋とコンクリート間の付着の劣化性状も調べた。

2. はり実験

2.1 実験概要

試験体は図1に示すような10×24×200cmの単筋長方形はりである。表1にその性質を示す。試験体は鉄筋比の異なる2種類のRCはり³⁾とPC鋼材の付着の有無の異なるP R CはりおよびP Cはりからなり、それぞれ2体作成し、単調載荷(試験体記号においてMで示す)と繰返し載荷(R)を行った。試験体中央の下縁にはスリットを設け、ひびわれ断面における鉄筋応力を捉えるためひびわれ位置を指定した。

使用したコンクリートおよび鋼材の力学的性質をそれぞれ表2および表3に示す。プレストレスはコンクリート材令23日に導入し載荷は材令49~63日に行った。載荷は3等分点載荷で、繰返し載荷にはサーボ型疲労試験機を使用し載荷速度は3Hzとした。繰返し載荷における上限荷重はRC試験体では鉄筋応力が約2000kg/cm²、P R C試験体では同じく約1000kg/cm²となる荷重、P C試験体ではひびわれ発生直後の荷重とした。下限荷重はそれらの20%とした。繰返し回数は20万回(RC1-Rのみ2万回)である。たわみは変位計で、ひびわれ幅ははり側面の鉄筋位置高さにおいてコンタクトゲージで、鉄筋および圧縮縁コンクリートのひずみはワイヤーストレインゲージで測定した。

2.2 実験結果および考察

単調および繰返し試験体の終局曲げモーメント M_u 、ひびわれモーメント M_{cr} 、平均ひびわれ間隔 l_{av} の実測値および計算値をまとめて表4に示す。

2.2.1 繰返し荷重下の曲げ性状

図2および図3に一部の試験体の単調載荷および繰返し載荷時のモーメント M —曲率 ϕ_{av} の関係および M —平均ひびわれ幅 W_{av} の関係の1回目と最終回のループを示す。図2から上限荷重を超えた新たな荷重域では単調載荷の M — ϕ_{av} 曲線に近づき剛性が回復すること、図3から最終回のループにおいて初載荷時のDecompression モーメント M_{dec} (コ

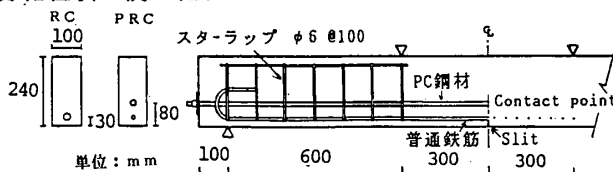


図1 はり試験体形状

表1 試験体の種類

試験体	普通鉄筋	PC鋼材	PC鋼材有効引張力(t)	備考
RC1 M R	D13	—	—	単調載荷 繰返し載荷
RC2 M R	D16	—	—	単調 繰返し
BM P R C BR UM UR	D10	φ9.2	5.94 5.58 5.92 5.88	ボンド・単調 ボンド・繰返し アンボンド・単調 アンボンド・繰返し
BM P C BR UM UR	—	φ9.2	3.46 3.43 3.47 3.47	ボンド・単調 ボンド・繰返し アンボンド・単調 アンボンド・繰返し

表2 コンクリートの力学的性質

圧縮強度 F_c (kg/cm ²)	弾性係数 E_c (kg/cm ²)	割裂強度 F_t (kg/cm ²)
369	2.39×10^5	33.7

表3 鋼材の力学的性質

鋼材種	断面積 A_s, A_p (cm ²)	降伏点荷重 P_y (kg)
普通鉄筋		
D10	0.63	2660
D13	1.17	4500
D16	1.84	7610
P C鋼材	φ9.2	9240

表4 実験結果一覧表

specimen	M_u (exp) (ton.m)	M_u (cal) (ton.m)	M_{cr} (exp) (ton.m)	M_{cr} (cal) (ton.m)	$l_{av}(a)$ (cm)	$l_{av}(b)$ (cm)	$l_{av}(cal)$ (cm)
RC1							
M	0.99	0.92	0.33	0.50	14.9	14.9	
R	0.99	0.92	0.36	0.50	17.2	14.9	12.8
RC2							
M	1.58	1.52	0.36	0.49	12.5	12.5	
R	1.59	1.52	0.39	0.49	12.6	12.6	11.2
P R C							
BM	1.82	1.84	0.93	0.96	20.1	13.5	
BR	1.94	1.84	0.90	0.95	17.4	13.5	
UM	1.71	1.31	0.90	0.95	16.7	15.9	15.5
UR	1.73	1.31	0.87	0.94	16.8	16.5	
P C							
BM	1.24	1.36	0.74	0.82	—	28.8	
BR	1.22	1.36	0.60	0.81	30.0	30.0	
UM	0.99	0.62	0.63	0.82	—	—	
UR	1.03	0.62	0.54	0.82	—	—	

M_u (cal), M_{cr} (cal): 日本建築学会P C標準の式による計算値

$l_{av}(a)$: 繰返し載荷開始時の平均ひびわれ間隔

$l_{av}(b)$: ひびわれ定常状態における平均ひびわれ間隔

$l_{av}(cal)$: 日本建築学会P R C指針の式による計算値

ンクリート下縁応力が0となるモーメント)まで減力されるとM-Wav曲線において明瞭な屈折点が現れ実際にひびわれは閉じていると見なすことができ、20万回の繰返し載荷後もMdec.はひびわれ制御設計上重要な指標となることが分かる。

2.2.2 繰返し載荷によるたわみおよびひびわれ幅の増加

図4 (a)、(b)にそれぞれ上限荷重時のたわみおよびひびわれ幅と繰返し回数Nとの関係を片対数グラフにて示す。たわみ等の増加量は初めの数回において大きく、その後はほぼ直線的に増大しているが、このような増加は図4 (c)、(d)に示すような圧縮縁コンクリートひずみおよび鉄筋ひずみの増加によって生ずる。そこで次に影響の大きい鉄筋ひずみの増加要因について検討する。

2.2.3 鉄筋ひずみの増加要因

曲げひびわれ幅に直接関係する鉄筋位置のコンクリート応力が0の時の鉄筋ひずみの変化量の平均値(以下単に平均鉄筋ひずみと呼ぶ) $\Delta \epsilon_{sav}$ は、ひびわれ間のコンクリートの拘束を考慮して次式で表される。

$$\Delta \epsilon_{sav} = \frac{1}{E_s} \left(\Delta \sigma_s - k_1 k_2 \frac{\sigma_{ct}}{p_e} \right) \quad (1)$$

ここに、 $\Delta \sigma_s$: ひびわれ断面における鉄筋応力の変化量

E_s : 鉄筋のヤング係数

σ_{ct} : コンクリートの引張強度

p_e : 有効引張鉄筋比 (A_s/A_{ce})

A_{ce} : 鉄筋の重心とその重心が一致する引張側コンクリートの断面積

$k_1 k_2$: ひびわれ間コンクリートの拘束度

繰返しによる $\Delta \epsilon_{sav}$ の増加は、(i) 圧縮側コンクリートの剛性の低下、(ii) ひびわれ断面におけるコンクリートの引張応力の減少および (iii) PC鋼材の付着劣化にともなうPC鋼材引張力の減少による $\Delta \sigma_s$ の増加、さらに (iv) 鉄筋とコンクリートの付着劣化によるひびわれ間コンクリートの拘束の減少 ($k_1 k_2$ の減少) によって生ずる。これら要因のうち (iii) の影響は、図4におけるPRC-BRとUR試験体の $\Delta \epsilon_{sav}$ の増加量の差異が小さいことから分かるように小さいので、(i)、(ii)、(iv) の要因について以下に考察する。

(a) 圧縮側コンクリートの剛性低下の影響

シリンダーの繰返し試験から得られたコンクリートの見掛けの応力-ひずみ曲線を用いた応力計算結果を表5に示す。鉄筋量が少ない程、鉄筋応力が小さい程 $\Delta \sigma_s$ の増加量が大きくなり、それによる $\Delta \epsilon_{sav}$ の増加量は全増加量(実測値)の5~30%であった。なお圧縮縁ひずみの増加量の

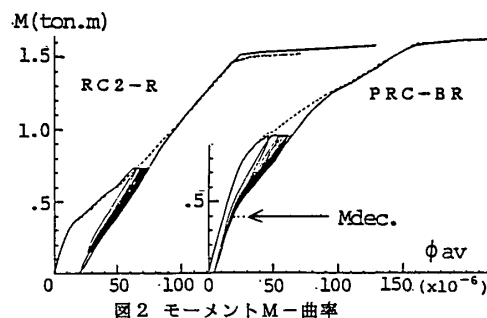


図2 モーメントM-曲率

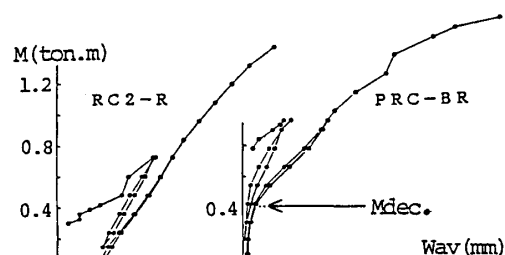
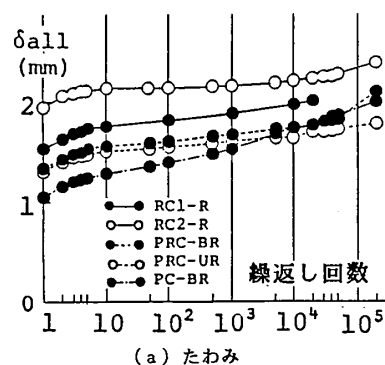
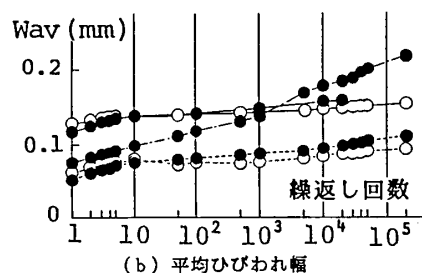


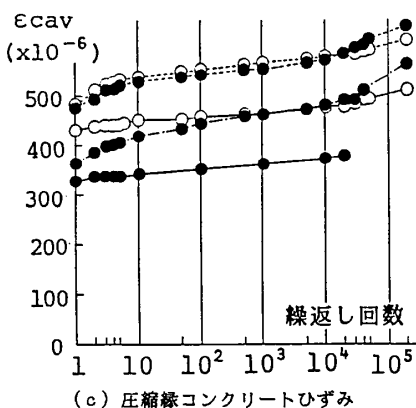
図3 モーメントM-平均ひびわれ幅



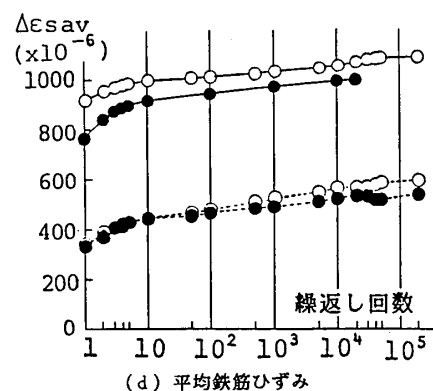
(a) たわみ



(b) 平均ひびわれ幅



(c) 圧縮縁コンクリートひずみ



(d) 平均鉄筋ひずみ

図4 変形の増加状況

計算値と実測値とはほぼ一致している。

(b) ひびわれ断面におけるコンクリートの引張応力の減少の影響

繰返しによるコンクリートの引張強度の低下を20%として、図5に示すように仮定した引張応力-ひずみ関係を用いて計算した $\Delta\sigma_s$ の増加を表5にあわせて示す。鉄筋量が少なく鉄筋応力が小さいPRC試験体ではその影響を無視できないものと思われる。

(c) 鉄筋とコンクリート間の付着劣化の影響

図6に示す鉄筋ひずみ分布において繰返しによるひずみ分布の勾配の減少が付着劣化の影響であるが、この付着劣化を定量的に把握するためにスリット位置のひずみから求めた $\Delta\sigma_s$ と $\Delta\epsilon_{sav}$ の実測値を用いて(1)式から求めた k_{1k2} と繰返し回数 N との関係を図7に示す。20万回において鉄筋応力の変動の大きいRC試験体でも約50%、PRC試験体では85%以上拘束度は残存している。なお、CEB-FIP'70の指針では100回以上の繰返し荷重が作用する場合、コンクリートの拘束度を0としていたが、'78のコードではその残存率を50%と変更している。

3. 両引試験

3.1 実験概要

試験体の形状とその種類をそれぞれ図8および表6に示す。鉄筋はSD35の横ふし異型鉄筋D19を用い、コンクリートの断面は $10 \times 10 \text{ cm}$ と $15 \times 15 \text{ cm}$ の2種類で試験体長はひびわれ間隔を想定し断面の大きさに応じて異なる。試験体はそれぞれ3体作成して単調荷重および上限応力の異なる2つの繰返し荷重を行った。試験体記号の末尾がR1の試験体の上限応力は 2000 kg/cm^2 、同じくR2は 1000 kg/cm^2 で、下限応力はともに 400 kg/cm^2 である。繰返し荷重に使用した試験機はロウゼンハウゼン型疲労試験機で、荷重速度は 4.5 Hz 、繰返し回数は30万回である。試験時のコンクリートの圧縮

強度は 376 kg/cm^2 であった。

3.2 実験結果と考察

3.2.1 鉄筋のひずみ分布

図9に鉄筋ひずみ分布の1例

として試験体 $15 \times 15\text{-R1}$ のものを示す。同図中○で示す分布が繰返し時の分布である。この図から30万回の繰返し後も付着作用が残存していること、繰返し荷重後新たな荷重域まで荷重すると次第に付着作用が回復することが分かる。Breslerらは、両引試験の数十回の繰返し荷重を行って付着はそれほど劣化せず安定したひずみ分布となることを報告しているが、20、30万回の繰返しにおいても同様なことがいえる。

3.2.2 コンクリートの拘束度の残存率

両引試験体の平均ひずみを $\Delta\epsilon_{sav}$ 、裸の鉄筋の応力を $\Delta\sigma_s$ として、(1)式から各繰返し時の k_{1k2} を求め、その初荷重上限荷重時の値に対する割合(残存率)を図10に示す。各繰返し試験体とも最初の数回での減少が大きく、また鉄筋比にかかわらず上

表5 コンクリートの剛性低下および劣化による $\Delta\sigma_s$ の増加
($N = 20$ 万回) 単位 kg/cm^2

要因	試験体名	RC1-R	RC2-R	PRC-BR	PRC-UR
(i) コンクリートの剛性低下		25	31	161	164
(ii) 引張側コンクリートの劣化		86	53	204	270

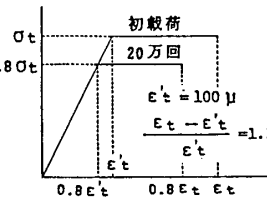


図5 コンクリートの引張応力-ひずみ関係

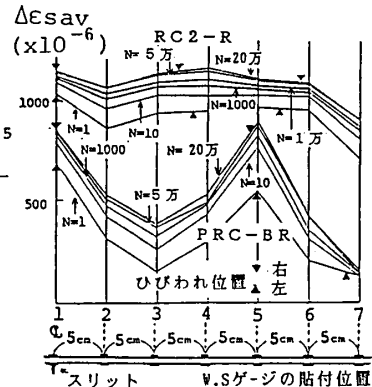


図6 繰返し荷重時のひずみ分布

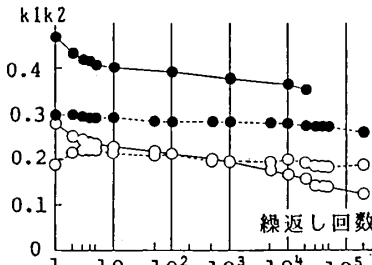


図7 コンクリートの拘束率と繰返し回数

表6 試験体の種類

試験体名 $a \times a$	かぶり (cm)	鉄筋比 (%)	材長(ℓ) (cm)
10×10	4.05	2.60	21
15×15	6.55	1.16	42

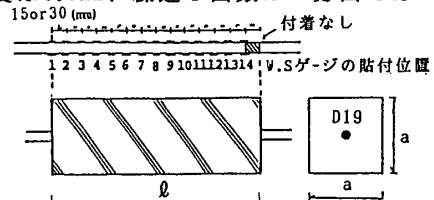


図8 両引試験体形状

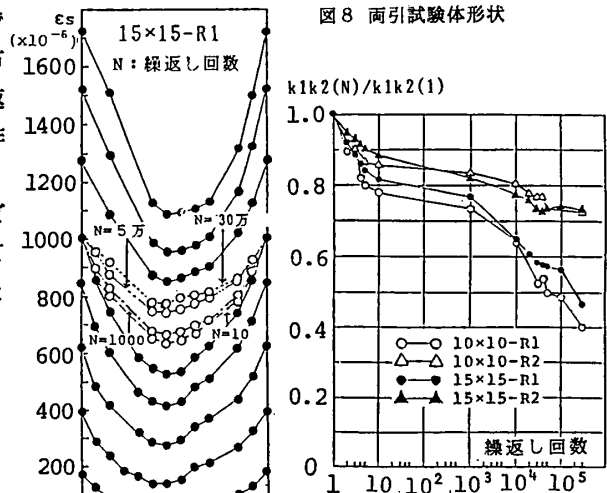


図9 鉄筋ひずみ分布

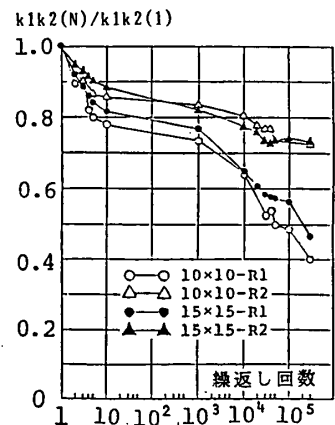


図10 拘束率の残存率と繰返し回数

限応力 $2000\text{kg}/\text{cm}^2$ のR

1試験体では30万回でも40%以上、同じく1000kg/cm²のR2試験体では70%以上残存しており、はり試験結果とよく対応している。

3.2.3 繰返し荷重下の

付着応力-すべり関係

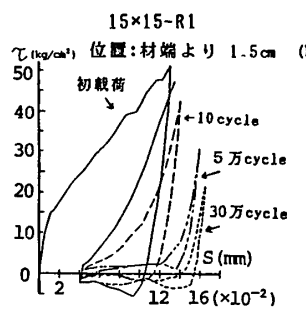


図11 繰返し荷重下の τ -S 関係

図11に繰返し荷重下

の初載荷、10、5万、30万 cycle の τ -S 関係の1例を示す。1万、5万cycleでの τ -S 関係の変化は小さく、5万、30万cycleでも τ -S 関係に著しい劣化は認められなかった。5万回での τ -S 関係を検討する。図12は初載荷時の τ -S 包絡線および5万回目の上限荷重時の各ゲージ位置での(τ , S)の点を描いたものである。この図から5万回目の τ -S 包絡線を、図中直線で示す単調載荷試験体から得た初載荷時の τ -S 曲線の傾きを0.5倍した破線で与えて計算した5万回目の上限荷重時の鉄筋ひずみ分布を図13に示す。また、5万回目の減力、再載荷時における τ -S 関係を図14のように仮定して計算した減力時のひずみ分布を図15に示す。計算値は実測値とよく一致し、仮定した τ -S 曲線が妥当であることを示している。

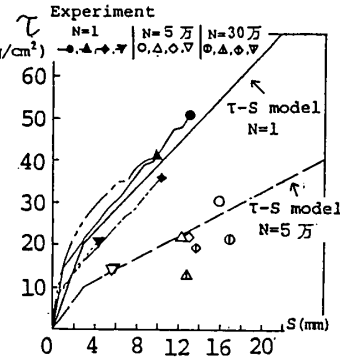


図12 繰返し上限荷重時の τ -S 関係

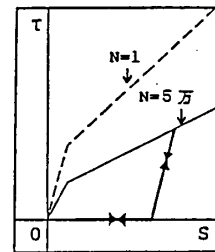


図14 減力・再載荷時の τ -S 関係

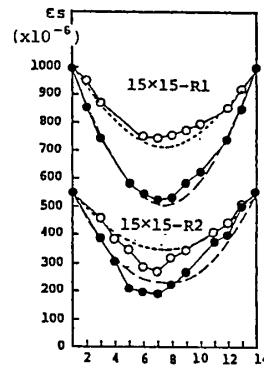


図13 鉄筋ひずみ分布

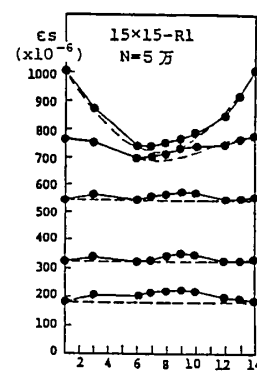


図15 減力時鉄筋ひずみ分布

4. 結論

はり実験および両引試験より得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) PRCははり試験体において20万回の繰返し載荷後もプレストレスは有効に働き、Decompression モーメント M_{dec} でひびわれは閉じ、 M_{dec} は設計上の重要な指標となる。
- (2) 繰返し載荷によるたわみやひびわれ幅の増加は初めの数回において大きく、その後は片対数グラフ上で直線的に増加していく。
- (3) たわみやひびわれ幅は鉄筋ひずみの増加によって増加するが、その鉄筋ひずみの増加に及ぼす圧縮側コンクリートの剛性低下およびひびわれ断面における引張側コンクリートの劣化の影響は、特に鉄筋比が小さく、鉄筋応力も小さい場合は無視できない。
- (4) 鉄筋ひずみの増加に及ぼすコンクリートと鉄筋との間の付着の劣化の影響は大きい、はり試験体におけるその付着作用は20万回の繰返し後も50%以上残存していた。
- (5) 両引試験において数十万回の繰返し載荷後も付着作用はかなり残存しており、30万回においてコンクリートの拘束あるいは引張力分担率は繰返し上限鉄筋応力が $2000\text{kg}/\text{cm}^2$ の場合40%、 $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ の場合70%以上残存していた。
- (6) 繰返し荷重下の付着応力-すべり関係を捉え、繰返し荷重下における減力・加力時鉄筋ひずみ分布の変化を捉えることができた。

参考文献

- 1) 鈴木、大野；プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ幅に関する研究（その1）；日本建築学会論文報告集、第303号、昭和56年5月
- 2) 鈴木、大野、栗田、横田；第7回コンクリート工学年次講演会論文集、1985
- 3) 鈴木、大野、宮丸；PRCはりの繰返し荷重下における曲げ性状について；セメント技術年報 38 昭和59
- 4) M.Saito and S.Imai: Direct Tensile Fatigue of Concrete by the Use of Friction Grips; ACI Journal Sep.-Oct. 1983 pp.431-438
- 5) プレストレストコンクリート設計施工基準・同解説；日本建築学会、1975、p.211
- 6) コンクリート構造物設計施工国際指針CEB-FIP1970.日本語版、鹿島出版会
- 7) CEB-FIP: Model Code for Concrete Structures (1978)
- 8) Bresler, B. and Bertero, V.: Behavior of Reinforced Concrete under Repeated Load, Proceedings ASCE Vol. 94, ST6, June 1968, pp.1567-1590
- 9) 鈴木、大野、宮丸、山向；繰返し荷重下における鉄筋とコンクリートの付着特性；日本建築学会大会学術講演梗概集 昭和60年10月