

[121] 持続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 ○大野義照 (大阪大学工学部)

栗田佳彦 (竹中工務店)

横田 聡 (大阪大学工学部)

1. はじめに

鉄筋コンクリート (以下RCと略記) やプレストレスト鉄筋コンクリート (以下PRCと略記) はり部材の曲げひびわれ幅やたわみは、持続荷重下においてコンクリートの圧縮クリープ、付着クリープおよび乾燥収縮によって時間の経過とともに増加する。ひびわれ幅やたわみを制御目標とするPRC部材にとってそれらの挙動を把握することは特に重要である。既往のRCに関する研究では長期許容応力程度の鉄筋応力で、荷重を増加しても新たなひびわれ発生のないひびわれ定常状態における挙動が主に対象とされてきたが、実際のPRCの設計においては鉄筋応力は長期許容応力よりかなり小さく制御される場合が多い。本報告では鉄筋応力を実験変数にしPRCはりの2年間にわたる持続載荷実験を行ない、持続荷重下におけるひびわれの挙動やたわみの増大について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体の形状と性質

試験体は図1に示すような12x25cmの複筋長方形ばりで長さは200cmである。せん断スパンのみφ6のスターラップを10cm間隔で配筋した。はり試験体の性質を表1に示す。いずれの試験体も同じ鋼材を用いているが、同一載荷モーメントに対して鉄筋応力が異なるように初緊張力を変化させた。試験体はそれぞれ持続載荷用 (L) と単調載荷用 (S) に2体ずつ作成した。

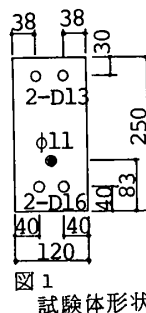


表1 試験体の性質

試験体名	初緊張力 P_0 (kg)	平均プレ ストレス σ_g (kg/cm ²)
NO.1 S	1000	3.3
NO.2 S	4000	13.3
NO.3 S	7000	23.3
NO.4 S	10000	33.3

図1 試験体形状

持続荷重の大きさは、全試験体同じで、単調載荷試験結果を参考にして持続載荷試験体 No. 4-Lのひびわれモーメントである1.32tmとした。表2にひずみ測定値から算出した緊張材の有効引張力、負のプレストレス力として作用している引張鉄筋圧縮力およびそれらによる有効プレストレスを示す。また同表には持続載荷開始時のひびわれ断面での $\sigma_{s, max}$ や鉄筋位値のコンクリート応力が零の時点からのその変化量 $\Delta \sigma_{s, max}$ および圧縮縁コンクリート応力の計算値を示す。ひびわれ幅に直接関係する $\Delta \sigma_{s, max}$ は600~2000 kg/cm²の範囲にあり、圧縮縁コンクリート応力は圧縮強度の40%以下でクリープの比例則が成り立つ範囲にある。

表2 有効プレストレス、持続載荷開始時の応力

試験体名	緊張材 有効引 張力 (kg)	引張鉄 筋圧縮 力 (kg)	下縁有効 プレ ストレス (kg/cm ²)	持続載荷開始時 引張鉄筋応力 $\sigma_{s, max}$ (kg/cm ²)	上縁コン クリート 応力 $\sigma_{cs, max}$ (kg/cm ²)
NO.1-L	911	1380	-6	1530	1940
NO.2-L	3820	2140	8	1000	1520
NO.3-L	6850	2590	25	493	1010
NO.4-L	9830	3280	38	20	614

表3 コンクリートの力学的性質

試験体令 (day)	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)
7	258	2.35×10^5	27.0
24	315	2.38×10^5	26.1
337	333	2.18×10^5	22.6
766	323	2.14×10^5	23.9

2.2 使用材料

コンクリートは普通ポルトランドセメント、山砂および砕石からなる重量比で1:1.54:2.17, W/C = 46%のレディミクストコンクリートを用いた。表3にコンクリートの力学的性質を示す。弾性係数は $1/3F_c$ における割線弾性係数である。普通鉄筋は横ふし異形鉄筋D13 (降伏点応力度 $\sigma_{sy} = 4030$ kg/cm²) およびD16 ($\sigma_{sy} = 3650$ kg/cm²) を、PC鋼材はφ11のD種異形鋼棒 ($\sigma_{py} = 13900$ kg/cm²) を用いた。

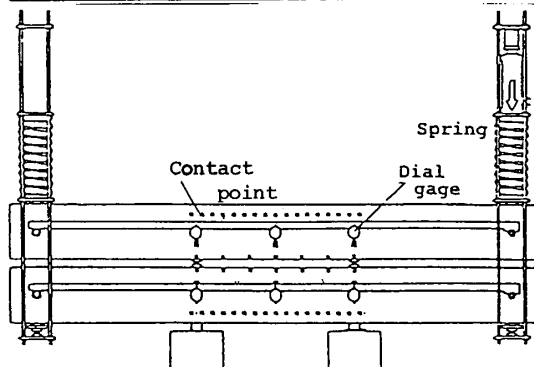


図2 載荷方法

2.3 試験体の製作および持続載荷方法

プレストレスの導入はコンクリート材令7日に行ない、直ちに W/C=45 %の早強ポルトランドセメントペーストをグラウチングした。単調載荷は材令17～19日に行ない、持続載荷は材令23日から開始した。持続載荷の方法を図2に示す。試験体 No. 1-Lと No. 2-L, No. 3-Lと No. 4-Lをそれぞれ1組として載荷した。持続載荷は2年間継続し、その後試験体 No. 3, 4は単調に曲げ破壊まで載荷した。ひびわれ幅と鉄筋ひずみは曲げげスパン内の鉄筋高さ位置のコンクリート表面において検長40mmのコンタクトゲージ（以下C.G.と略記）で、圧縮縁コンクリートのひずみは圧縮縁から1cm下の両側面において検長10cmのC.G.で、たわみはダイヤルゲージを用いた図2に示すような方法で測定した。コンクリートの乾燥収縮およびクリープははり試験体と同じコンクリート断面を有する長さ80cmのプリズムにおいて検長30cmのC.G.にて測定した。クリープ試験体の載荷応力は60 kg/cm²である。図3にクリープ係数 ϕt と乾燥収縮 St を示す。同図中の曲線は最小自乗法で求めた近似曲線であり、後の解析ではこれらの近似曲線を用いた。なお持続載荷実験は温度20±1℃、相対湿度60±5 %の恒温恒湿室で行なった。

3. 実験結果と考察

表4にひびわれモーメント M_{cr} や平均ひびわれ間隔 l_{av} などの実験値と計算値をまとめて示す。単調載荷試験体（S）の l_{av} はひびわれ定常状態での値であり、持続載荷試験体（L）の l_{av} は持続載荷中での値である。試験体 No. 3-L, No. 4-Lの降伏モーメント M_y の実験値などは持続載荷後の載荷試験によるものである。

3.1 ひびわれ状況

ひびわれ状況を図4に示す。単調載荷試験体の図はひびわれ定常状態におけるものである。持続載荷試験体では鉄筋応力の小さい No. 3-L, No. 4-Lにおいて載荷後一週間以内にそれぞれ1および2本のひびわれが発生し、図3に示すようになった。表4の l_{av} はこの時点での値であるが、単調載荷試験体の l_{av} と同程度であり、また持続載荷後、載荷試験を行った No. 3, No. 4において持続荷重を越えた荷重域でも新たなひびわれの発生はなかったことから鉄筋応力の小さい持続載荷試験体でも持続載荷の極く初期にひびわれ定常状態に至っていたと考えられる。したがってひびわれ幅の計算において持続載荷開始時ではひびわれ定常状態に至っていないような場合でもひびわれの定常状態における l_{av} が用い得るものと考えられる。

3.2 平均鉄筋ひずみ

各試験体の等曲げスパンにおける平均鉄筋ひずみの鉄筋位置のコンクリート応力が零の時点からの変化量 $\Delta \epsilon_{s, av}$ （以下平均鉄筋ひずみの変化量と呼ぶ）の経時変化を図5に示す。同図中の曲線はクリープ解析にて計算したひびわれ断面での鉄筋ひずみの変化量 $\Delta \epsilon_{s, max}$ の経時変化である。

持続載荷による鉄筋ひずみの増加は主に、
①圧縮側コンクリートのクリープによる中立軸位置の低下から生ずる応力中心距離 j の減少および②引張側におけるひびわれ間コンク

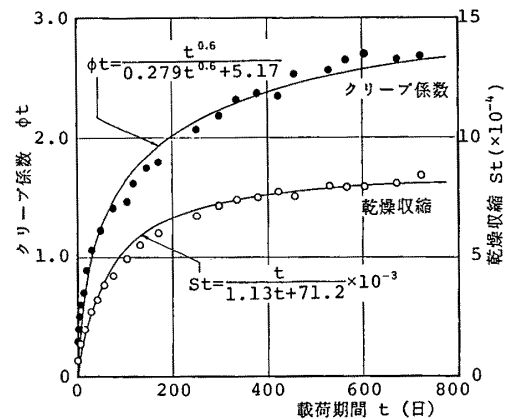


図3 クリープ係数、乾燥収縮の経時変化

表4 試験結果一覧表

試験体名	$M_{cr}(t \cdot m)$		$M_y(t \cdot m)$		$M_u(t \cdot m)$		$l_{av}(cm)$	
	mea.	cal.	mea.	cal.	mea.	cal.	mea.	cal.
NO.1	S 0.38	0.49	3.12	2.65	3.87	3.82	10.8	11.0
	L 0.42	0.47	—	—	—	—	11.9	11.0
NO.2	S 0.75	0.69	3.45	3.03	3.96	3.97	11.1	11.0
	L 0.78	0.64	—	—	—	—	13.3	11.0
NO.3	S 0.98	0.86	4.17	3.36	4.35	3.93	11.1	11.0
	L 1.20	0.85	3.89	3.32	4.40	3.93	12.5	11.0
NO.4	S 1.20	1.07	4.19	3.76	4.45	3.94	10.3	11.0
	L 1.32	1.02	4.05	3.65	4.35	3.88	10.2	11.0

M_{cr} : ひびわれモーメント cal. PC 規準の略算式
 M_y : 引張鉄筋降伏モーメント
 M_u : 曲げ破壊モーメント cal. PC 規準の精算式
 l_{av} : 平均ひびわれ間隔 cal. 著者提案式¹⁾

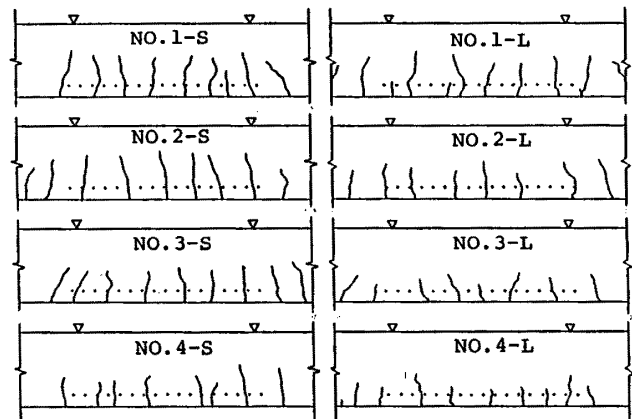


図4 ひびわれ状況

リートと鉄筋との間における付着応力の緩和によって生ずる。解析結果は圧縮側コンクリートのクリープの影響を示すものであるが、本試験体は複筋ばり ($\gamma = 0.61$) であるためその影響は小さく、 $\Delta \epsilon_{s, \max}$ の増加量の最も大きい試験体 No. 1 においても2年間の増加量は 52.8×10^{-6} で持続開始時の値の 5.7% である。一方鉄筋応力の小さい試験体 No. 4 では持続荷重開始後しばらく $\Delta \epsilon_{s, \max}$ が減少している。これは圧縮側においてはコンクリートのクリープ、乾燥収縮によってコンクリート応力が圧縮鉄筋に移行するが、図6に示すように No. 4 では中立軸深さが深いいため他の試験体とは逆に応力中立距離 j が増加したためである。

$\Delta \epsilon_{s, \max}$ の計算値と $\Delta \epsilon_{s, \text{av}}$ の実測値の差はひびわれ間コンクリートの鉄筋の拘束作用あるいは引張力の分担によるものと見なせるが、ひびわれ間コンクリートと鉄筋との間の付着応力の緩和によって $\Delta \epsilon_{s, \text{av}}$ は持続荷重初期に著しく増加している。しかしながらその拘束作用は2年間の持続荷重後も初荷重時の 50 ~ 70 % 残存している。CEB-FIPの1978年のコード⁴⁾ではこの残存率を50%としており本実験結果はほぼ対応している。また鉄筋応力の小さい試験体 No. 4 ではコンクリートの乾燥収縮によるひずみの減少が一時認められる。

なお、本報告で用いたクリープ解析法は、種々の解析法についての検討結果²⁾、比較的簡便で精度の良かったMean-Stress 法³⁾であり、またクリープ解析のなかでコンクリートの乾燥収縮ひずみも図7に示すように考慮している。

3.3 平均ひびわれ幅 Wav

平均ひびわれ幅 Wav の経時変化を図8に示す。上述のように持続荷重の初期に鉄筋ひずみが急増するため、ひびわれ幅もこの期間に急増し、その後はひびわれ間コンクリートの乾燥収縮によって漸増している。このようなひびわれ幅の増加量は鉄筋応力が大きい程大きくなっている。

図9に各試験体におけるひびわれ間コンクリートの収縮ひずみ (ひびわれ発生個所以外の測定区間のひずみ) の自由乾燥収縮ひずみ S_t に対する割合 β の経時変化を示す。持続荷重の初期には、鉄筋とコンクリートとの間の付着応力の緩和によるコンクリート引張応力の減少によって生ずる収縮ひずみのひびわれ間コンクリートの収縮の中に占める割合が大きく β が見掛け上大きくなるが時間の経過とともにその影響は弱まり、各試験体とも β は 0.5 ~ 0.6 の範囲に収束した。なお先に行なった本実験より鉄筋応力の大きい実験においても β の値として大略0.6 が得られている。

次に持続荷重下のひびわれ幅の算定式について検討する。持続荷重下においてはひびわれ幅はひびわれ間の鉄筋の伸びとコンクリートの収縮の和として現われるので、付着応

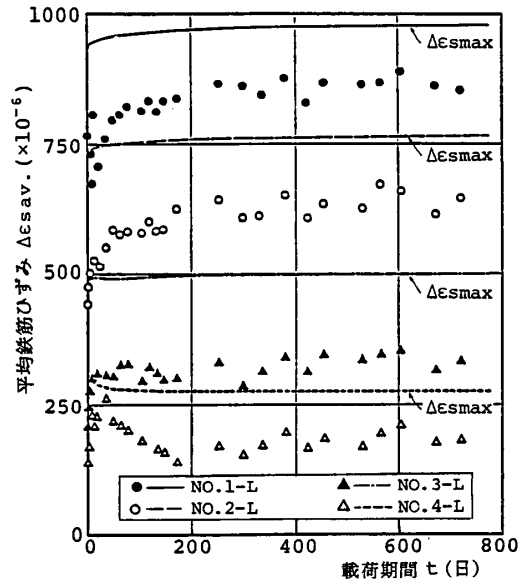


図5 平均鉄筋ひずみの経時変化

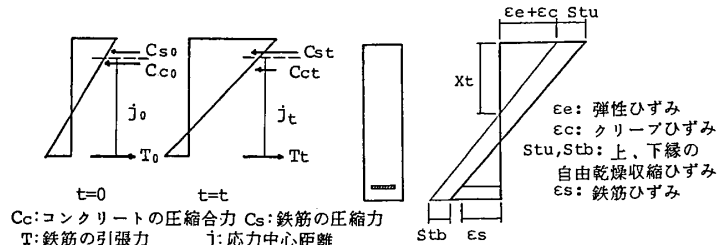


図6

図7 クリープ解析におけるコンクリートの乾燥収縮の考慮

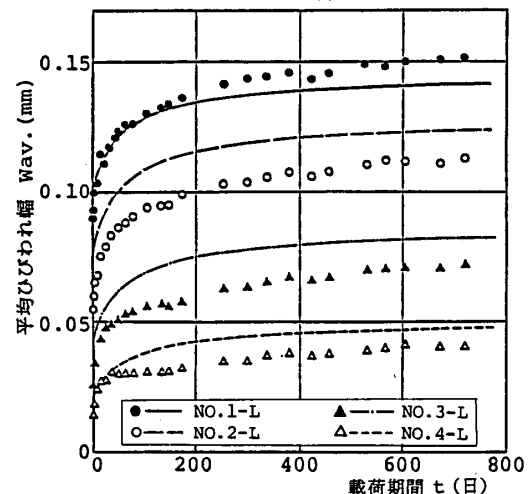


図8 平均ひびわれ幅の経時変化

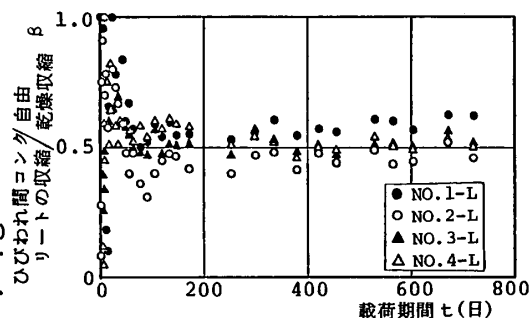


図9 自由乾燥収縮に対するひびわれ間コンクリートの収縮の比の経時変化

力の緩和と乾燥収縮を考慮して、次式で表わされる¹⁾

$$W_{av} = \underbrace{1av(\Delta\sigma_{s,max}/E_s - \alpha\sigma_{s,c}/E_s)}_{\text{鉄筋の伸び}} + \underbrace{\beta St}_{\text{コンクリートの収縮}} \quad \text{---- (1)}$$

ここに、 $\Delta\sigma_{s,max}$ ：圧縮側コンクリートのクリープを考慮したひびわれ断面での鉄筋応力の変化量、 E_s ：鉄筋のヤング係数、 $\sigma_{s,c}$ ：持続載荷開始時のひびわれ間コンクリートの拘束作用による鉄筋応力の減少量、 α ：その残存率である。ここでは本実験結果や既報告²⁾の実験結果を参照して $\alpha=0.5, \beta=0.6$ とし、また $1av$ および $\sigma_{s,c}$ は実測値を $\Delta E_{s,max}$ は前述のクリープ解析による計算値を用いて、

1)式より算出した W_{av} を図8中に曲線で示した。試験体No. 1では計算値が実測値をいく分下廻っているが、全体的にはほぼ満足できる結果が得られた。

3. 4 圧縮縁コンクリートのひずみ

圧縮縁ひずみの経時変化を図10に示す。コンクリートの圧縮縁ひずみは引張鉄筋ひずみに比べてその増大率は格段に大きく、2年後の増大率は330～460%であった。また各試験体の初載荷時の圧縮縁応力はほぼ等しいので、ひずみの増大量にも大きな差異はない。同図には乾燥収縮を考慮したクリープ解析値も示している。ひびわれ断面での解析のため若干大き目であるが、ほぼ実測値と一致している。

3. 5 たわみ

曲げスパン内のたわみの経時変化を図11に示す。プレストレスの大きさに応じてたわみは小さくなってはいるが、上述のように引張鉄筋ひずみに比べて圧縮縁コンクリートひずみの増大量は格段に大きく、各試験体のその増大量は同程度であったため、ひびわれ幅の場合と異なってプレストレスすなわち鉄筋応力の大きさによるたわみ増大量の差は小さい。同図中の曲線はクリープ解析による計算値、すなわち圧縮縁コンクリートひずみ計算値と平均鉄筋ひずみ計算値（ただし $\alpha=0.5$ ）とから算出した値である。計算値は幾分大き目であるが実測値とよく対応している。

4. 結論

鉄筋応力の大きさを要因とした2年間のPRCはりの持続載荷試験結果をまとめると次のようになる。

1. 鉄筋応力が小さく持続載荷開始時にはひびわれ定常状態に至っていても短期間に新たなひびわれが発生し、いわゆるひびわれ定常状態に至った。
2. 平均鉄筋ひずみの増加は主に付着応力の緩和によるひびわれ間コンクリートの拘束作用の減少によって生ずるが、その拘束作用は載荷開始時の50%以上残存していた。
3. コンクリートの乾燥収縮によるひびわれ間コンクリートの収縮は自由乾燥収縮の50～60%であった。
4. クリープ解析によるひびわれ断面での鉄筋応力の算定値、および結論2、3の結果を用いて持続荷重下のひびわれ幅を精度よく算定することができた。
5. 引張側に比べコンクリートの乾燥収縮、クリープによる圧縮側のひずみの増大量が大きく、たわみの増加は主に圧縮側ひずみの挙動に支配され、その増大量はプレストレスの大きさに関係なくほぼ同じであった。

参考文献

- 1) 鈴木、大野；プレストレス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、その2），日本建築学会論文報告集第303、305号昭和56年 5、7月
- 2) 鈴木 他；プレストレス鉄筋コンクリートはりの長期曲げ性状について（その1、その2），日本建築学会近畿支部研究報告集 昭和56年 6月
- 3) H. Rusch, D. Jungwirth; コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮（百島祐信訳），鹿島出版
- 4) CEB-FIP; Model Code for Concrete Structures 1978

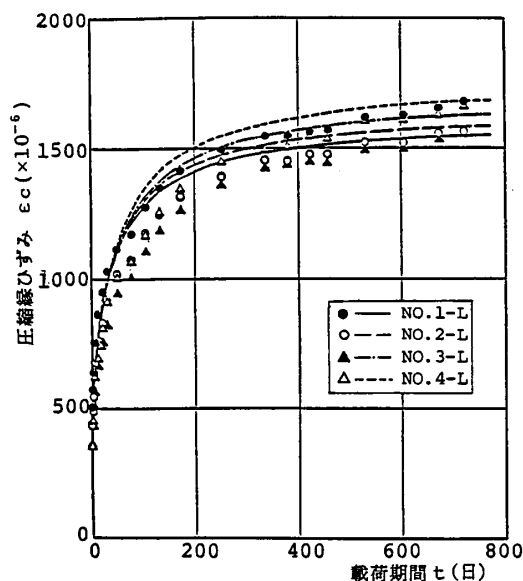


図10 圧縮縁ひずみの経時変化

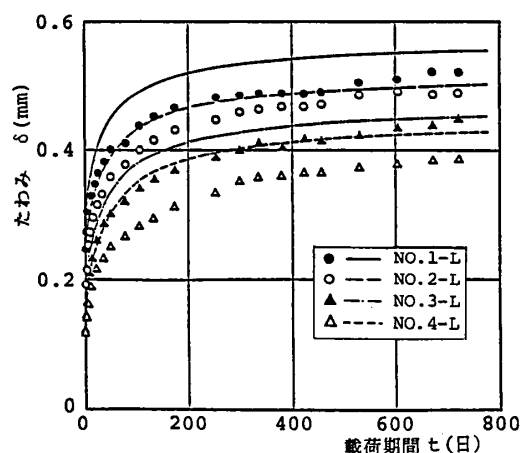


図11 たわみの経時変化