

論文 持続荷重下で短期荷重を受けるコンクリート部材の変形・ひび割れ性状

近藤拓也*¹ Hussein,Nour-Allah Mohamed*² 佐藤良一*³ 河合研至*⁴

要旨：約 1000 日および 2700 日持続載荷した RC, PRC 部材に短期荷重を付加して、その変形・ひび割れ性状について実験・解析的に検討した。また、現行の土木学会の曲げ剛性、曲げひび割れ幅算定式の適用性についても検討した。その結果、RC 部材の持続載荷終了後の短期載荷において、曲率、ひび割れ幅の増加は、モーメントと直線関係になるが、PRC 部材ではそうならないこと、また持続載荷後の短期載荷時において、土木学会曲げ剛性式の適用の可能性を示した。

キーワード：持続載荷、短期載荷、RC, PRC

1. はじめに

近年、コンクリート構造物は材料強度や品質の向上、及び構造物の多様化に伴いその変形の問題が重用視されるようになった。また、構造部の高級化に伴い、これまで以上に厳しい変形、ひび割れ制御が求められるようになってきた。

持続荷重下にある部材が活荷重などを受ける場合、持続荷重に短期荷重を付加して変形予測する必要がある。また、鉄道構造物の固有振動数は、部材の曲げ剛性に基づき算出されるようになっており、供用中の部材の曲げ剛性が必要となってくる¹⁾。

コンクリート部材の一定持続荷重による長期変形予測については、多数の研究報告がなされているが²⁾、短期の変形性状と持続荷重による長期の挙動はこれまで区別して取り扱われてきており、これまでに持続荷重下で短期荷重変動に対する変形、ひび割れ性状に着目した報告は少ない。

よって、本研究では持続荷重下にある RC・PRC はりに短期荷重を付加して、その変形・ひび割れ性状について実験・解析的に検討した。また、土木学会曲げ剛性式、ひび割れ幅算定式が持続荷重

下で短期荷重を受ける場合への適用性についても検討した。

2. 実験概要

2. 1 供試体

供試体の形状は、断面が 20×25cm、長さが 240cm の矩形断面はりである。供試体断面図を図-1、供試体一覧を表-1 に示す。HL シリーズは RC はり 2 体 (HL10, HL12), PRC はり 4 体 (HL20, HL22, HL30, HL32) の計 6 体である。プレストレス量は 3 段階で、全ての供試体の曲げ耐力がほぼ等しくなるようにし、また持続載荷モーメントは曲げ耐力の約 60%を与えた。LL シリーズは 2 体である。供試体を抱き合わせて載荷したので、圧縮鉄筋のない供試体は引張鉄筋応力が 196N/mm²、圧縮鉄筋のある供試体は 222N/mm² となるように持続荷重を載荷した。

実験で用いたコ

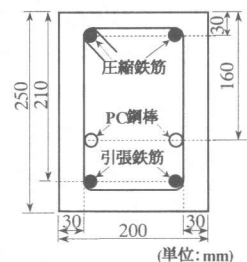


図-1 供試体断面

- | | | |
|------------|------------------|-------|
| *1 広島大学大学院 | 工学研究科構造工学専攻 | (正会員) |
| *2 広島大学大学院 | 工学研究科構造工学専攻 | (正会員) |
| *3 広島大学教授 | 工学部第四類 (建設系), 工博 | (正会員) |
| *4 広島大学助教授 | 工学部第四類 (建設系), 工博 | (正会員) |

表-1 供試体一覧

供試体 名称	環境条件	引張鉄筋 - (PC 鋼棒) - 圧縮鉄筋	ρ_s (%)	ρ'_s (%)	ρ_p (%)	σ_{pc} (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)	持続荷重 開始材齢 (日)	短期荷重 載荷材齢 (日)
HL10	実験室内	D19-0	1.36	---	---	---	181	16	1060
HL12		D19-D16	1.36	0.95	---	---	181		
HL20		D16(7.1)-0	0.95	---	0.19	2.4	156		
HL22		Dm16(7.1)-D16	0.76	0.95	0.19	2.5	185		
HL30		D13(9.0)-0	0.60	---	0.30	3.7	140		
HL32		Dm13(9.0)-D16	0.44	0.95	0.30	3.9	160		
LL10		D19-0	1.20	---	---	---	196	45	2760
LL12		Dm19-D16	0.96	0.76	---	---	224		

Dm: 溝切り加工した鉄筋 σ_{pc} : 部材下縁の有効プレストレス

ρ_s , ρ'_s , ρ_p : 引張鉄筋, 圧縮鉄筋および PC 鋼材比で, 有効高さまでの面積比

σ_s : 持続荷重載荷時の引張鉄筋応力度で, 引張部コンクリートを無視した計算値

表-2 コンクリートの配合および強度試験結果

シリーズ	配合					持続荷重載荷開始時		短期荷重載荷時	
	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	SF (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
HL	25	45	150	540	60	100.0	36.6	103.9	38.3
LL	60	53	174	290	---	39.4	30.1	44.5	28.7

ンクリートの配合と強度を表-2 に示す。なお, 結合材として HL シリーズは早強ポルトランドセメントにシリカフェウムを重量で 10%置換したもの, LL シリーズは普通ポルトランドセメントを用いた。

2. 2 載荷方法および計測方法

載荷はスパン 210cm, せん断スパン 65cm の 2 点載荷とし, 純曲げ区間 80cm を試験対象区間として, 平均曲率, 引張鉄筋ひずみ, およびひび割れ幅を測定した。平均曲率は高感度変位計(持続荷重開始時及び持続荷重中は精度 1/100mm, 持続荷重後の短期載荷時は 1/200mm)を用いて測定した。引張鉄筋ひずみは異形鉄筋の縦リブの位置に溝を切削加工して, その溝に試験対象区間中央付近に 2cm 間隔で貼付したひずみゲージ(ゲージ長 5mm)を用いて計測した。引張鉄筋ひずみは HL22, HL32 および LL12 について測定した。ひび割れ幅の測定は, 持続荷重開始時および短期載荷時についてはパイ型変位計(標点距

離 100mm, 精度 1/2000mm)を用いた。持続荷重中はコンタクトゲージ(精度 1/1000mm)を用いてひび割れ幅を測定した。なお, 持続荷重開始時に発生したひび割れについては標点距離 20mm, 持続荷重中に発生したひび割れについては標点距離 100mm とした。

持続荷重後の短期載荷の加力は, 圧縮部コンクリートへのひび割れ発生を防ぐため, 引張鉄筋応力が 50N/mm² となるモーメントを下限値として, 引張鉄筋が降伏に達するまで繰り返し載荷を行った。

持続荷重期間中の平均温湿度は, HL シリーズについては 16.0℃, 64.0%R.H., LL シリーズは 15.9℃, 64.0%R.H. であった。

3. 解析方法の概要

本論文では, 持続荷重後に短期荷重を受ける RC, PRC 部材の変形, ひび割れ幅の挙動を安齋らが提案した解析法³⁾によって検証した。

本解析法はコンクリートの凝結から時間とともに変化するコンクリートのヤング係数、収縮、クリープ、付着剛性などを考慮でき、任意材齢におけるプレストレスの導入、持続荷重の載荷、持続荷重の変動をコンクリートと付着の応力履歴を考慮しながら扱えることが特徴である。

コンクリートのクリープは重ね合わせの原理に基づいて考慮しており、コンクリート部材任意断面の圧縮縁から z の位置における着目している時点 $t_{i+1/2}$ での、コンクリートのひずみ $\varepsilon_{c,i+1/2}(z)$ 、および応力 $\sigma_{c,i+1/2}(z)$ は以下のものである。

$$\varepsilon_{c,i+1/2}(z) = \sum_{j=1}^i \frac{\Delta \sigma_{c,j}(z)}{E_{c,j}(t_{i+1/2}, t_j)} + \varepsilon_{fr,i+1/2} \quad (1)$$

$$\sigma_{c,i+1/2}(z) = E_{c,i+1/2}(z) \left\{ \varepsilon_{c,i+1/2}(z) - \varepsilon_{c,sum,i-1/2}(z) - \varepsilon_{fr,i+1/2} \right\} \quad (2)$$

ここで $\Delta \sigma_{c,j} = \sigma_{c,j+1/2} - \sigma_{c,j-1/2}$

$$E_{c,i+1/2}(z) = \frac{E_{c,j}}{1 + (E_{c,j} / E_{28}) \phi_c(t_{i+1/2}, t_j)}$$

$E_{c,j}$ 、 E_{28} は t_j および標準養生材齢 28 日におけるコンクリートのヤング係数である。 $\phi_c(t_{i+1/2}, t_j)$ は、 t_j に生じた変動応力に対する $t_{i+1/2}$ におけるクリープ係数である。 $\varepsilon_{fr,i+1/2}$ は $t_{i+1/2}$ における自由収縮ひずみである。 $\varepsilon_{c,sum,i-1/2}(z)$ は、断面内 z の位置における、 $t_{i-1/2}$ までの応力履歴によって生じたひずみである。また、本解析法は、鉄筋とコンクリートの付着すべり関係においても重ね合わせの原理が成り立つものとし、同様に扱っている。

以上の関係から、全断面およびひび割れ断面（引張部コンクリート無視）においては断面内の軸力とモーメントのつりあい式を解き、ひび割れ間任意断面では、付着すべり関係と関連付けて着目時点のひずみ分布を決定する。

4. 材料特性

図-2 は各供試体の収縮ひずみの経時変化を示す。なお、HL シリーズは材齢 9 日まで湿潤養生を行い、9 日から乾燥を開始した。屋内シリーズは材齢 45 日まで湿潤養生を行った。なお、短期載荷直前の各供試体の収縮量は、HL シリーズで約 550×10^{-6} 、LL シリーズで約 630×10^{-6} であ

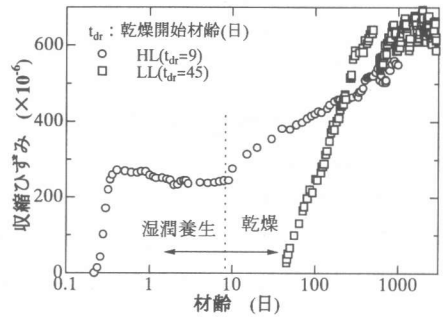


図-2 収縮ひずみの経時変化

った。

解析に用いるコンクリートと鉄筋の付着剛性 K_b は、HL シリーズについては、HL 供試体の引張鉄筋ひずみから、LL シリーズについては、同一配合、同一断面を有する他の供試体で得られた引張鉄筋ひずみ⁴⁾から算出した。HL シリーズは $K_b = 630 \text{ N/mm}^3$ 、LL シリーズは $K_b = 210 \text{ N/mm}^3$ であった。

クリープ係数は、実測値に基づき、CEB-FIP MODEL CODE 1990 の載荷時材齢の影響を考慮した方法に従い定めた。

5. 結果及び考察

5. 1 引張鉄筋ひずみ

図-3, 4 はモーメントと引張鉄筋ひずみの関係を示す。LL12, HL22 ともに持続載荷後の短期載荷時のモーメントと引張鉄筋ひずみは直線の関係

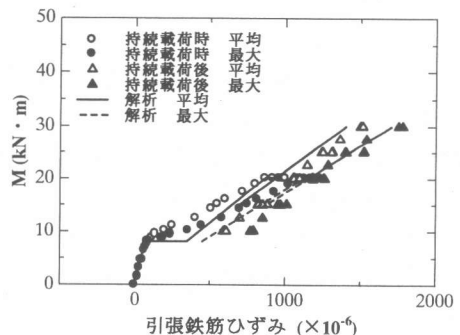


図-3 モーメントー引張鉄筋ひずみの関係 (LL12)

で表される。HL22 では、除荷とともに最大鉄筋ひずみと引張鉄筋ひずみの差が小さくなっていき、載荷とともにテンションスティフニングが大きくなっているが、解析値もこの状態を表現できていると考えられる。

5. 2 付着応力

図-5 は引張鉄筋に貼り付けたひずみゲージのひずみ差から求めたゲージ貼付全区間の平均付着応力とモーメントの関係を示したものである。LL12 は持続荷重載荷から持続載荷中にかけて平均付着応力が低下している。しかし、HL22 は引張部コンクリートの引張応力の負担から、持続載荷時から持続載荷中にかけて平均付着応力が増大している。しかし、両シリーズとも持続載荷後の短期載荷においては平均付着応力は増大している。これは、付着劣化があまり激しくなく、再載荷した時に、鉄筋のふしとコンクリートがかみ合える状態になったためと考えられる。

5. 3 平均曲率

図-6, 7 は、モーメントと平均曲率の関係を示したものである。RC 供試体である HL12 は持続載荷後の短期荷重の剛性は直線関係で示されている。また、解析値の剛性は実測値の剛性を適切に示していると考えられる。普通強度、高強度ともに RC 部材ではこれらの傾向を示した。一方、HL32 は持続載荷後の短期載荷初期においては、解析値の平均と実測値はほぼ同じ挙動を示している。しかし、モーメントが増加するにつれて実測値は解析値の最大に近づく傾向を示している。これは、モーメントの増加とともにひび割れが開口していき、引張部コンクリートの応力負担が小さくなっていくためだと考えられる。

図-8, 9 は、土木学会示方書で定められた曲げ剛性式の、持続荷重後の短期荷重作用時への適用性を検討するために、実測値と比較したものを示す。実測値は持続荷重載荷時の最終値と、持続載荷後の短期載荷時の初期値を重ねたもの、示方書式は持続荷重載荷時の物性値を利用して計算したものを示す。

HL12 は短期荷重を載荷したとき、示方書式に

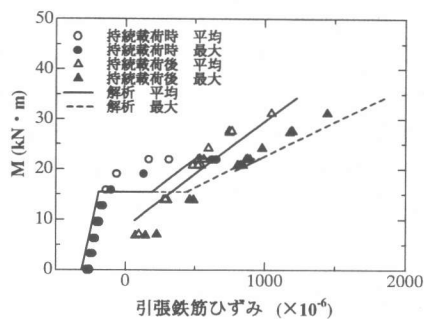


図-4 モーメントー

引張鉄筋ひずみ関係 (HL22)

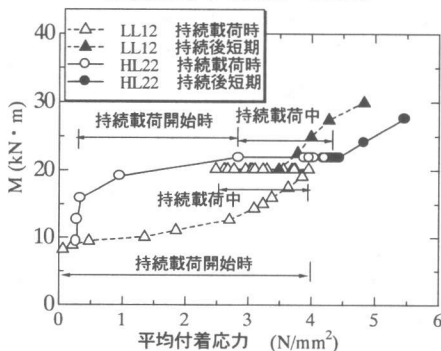


図-5 モーメントー平均付着応力関係

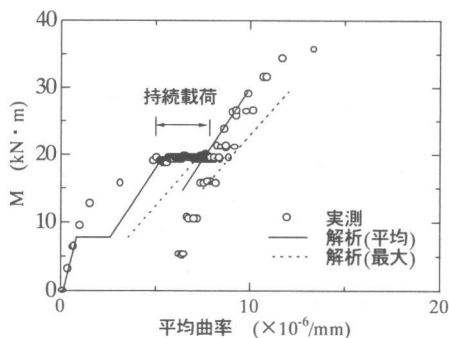


図-6 モーメントー平均曲率関係 (HL12)

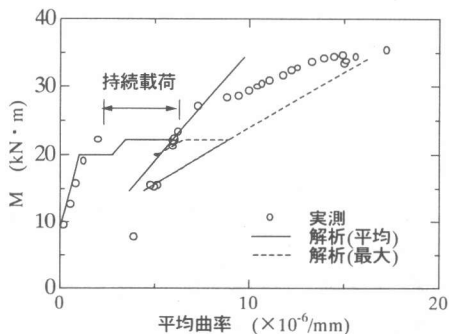


図-7 モーメントー平均曲率関係 (HL32)

比べ、剛性が増加している。これは、持続荷重中にひび割れの分散が終了し、5.2平均付着応力で述べたように、付着応力が増加したためだと考えられる。HL32は、短期荷重載荷後も、示方書式とよく一致している。これは、短期荷重による付着の影響よりも、ひび割れの分散の影響が大きく表れたためだと考えられる。その他の供試体でも、以上のような傾向が見られ、持続荷重後の短期荷重載荷時の変形挙動を、土木学会式で評価できる可能性を示した。

5. 4 ひび割れ幅

図-10は、モーメントとひび割れ幅の関係を示したものである。図に示しているHL10は持続荷重後の短期荷重時のモーメントとひび割れ幅の関係は直線で示されている。また、解析値の短期荷重時のひび割れ幅増加率は実測値を概ね精度よく示していると考えられる。また、プレストレス力が大きくなるにつれて、平均曲率の時と同様、荷重モーメントの増加とともにひび割れ幅の増加割合が大きくなり、解析値と同じ増加割合を示さなくなる傾向を示した。

図-11, 12は土木学会示方書の曲げひび割れ算定式の、持続荷重後の短期荷重載荷時適用性を検討するために、実測値と比較したものである。なお、ここではひび割れ幅算定式に用いられる引張鉄筋応力増加量をモーメントに換算したものをを用い、持続荷重載荷時のひび割れ幅の最終値と持続荷重後の短期荷重載荷時の初期値を重ねて表示した。

HL10, LL12ともに、持続荷重載荷時は示方書式に漸近しているが、持続荷重後の短期荷重になると、示方書式よりもひび割れ幅の増加量が低下する傾向を示した。これは、持続荷重後に短期荷重が載荷されることにより図-5に示すように付着の形態が変わるためであると考えられ、付着の考慮がない示方書式と差が表れたと考えられる。

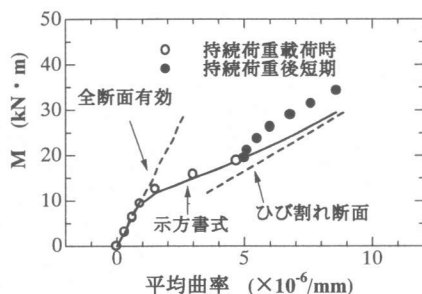


図-8 モーメントー平均曲率関係 (HL12)

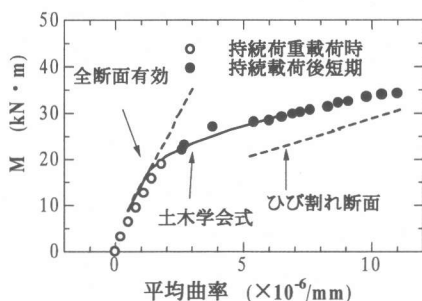


図-9 モーメントー平均曲率関係 (HL32)

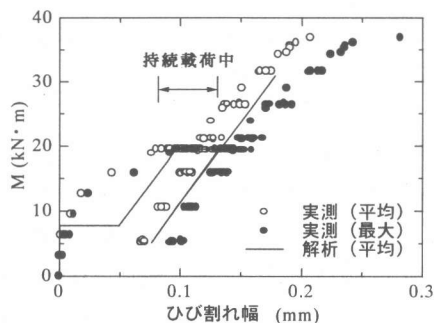


図-10 モーメントーひび割れ幅関係 (HL10)

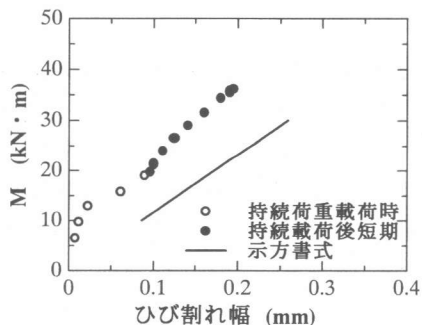


図-11 モーメントー最大ひび割れ幅関係 (HL10)

表-3 最大ひび割れ幅の実測値と示方書式の比較

	示方書式(mm)			実測値(mm)			実測値/示方書式		
	0日	長期	長期+短期	0日	長期	長期+短期	0日	長期	長期+短期
HL10	0.212	0.241	0.315	0.108	0.141	0.171	0.51	0.59	0.54
HL12	0.215	0.244	0.315	0.148	0.191	0.224	0.69	0.78	0.71
HL20	0.200	0.230	0.321	0.073	0.103	0.120	0.37	0.45	0.37
HL22	0.234	0.264	0.321	0.098	0.159	0.174	0.42	0.61	0.54
HL30	0.171	0.201	0.328	0.032	0.081	0.154	0.19	0.40	0.47
HL32	0.198	0.227	0.328	0.049	0.087	0.118	0.25	0.38	0.36
LL10	0.193	0.221	0.291	0.095	0.134	0.190	0.49	0.61	0.65
LL12	0.219	0.248	0.291	0.202	0.292	0.347	0.92	1.18	1.19

※図中の長期とは LL シリーズにおいて 2760 日、HL シリーズにおいて 1060 日をさす。

長期+短期は引張鉄筋応力変化量 $\sigma_{se}=300(\text{N/mm}^2)$ のときを示す。

表-3 は、最大ひび割れ幅を土木学会示方書式と実測値で比較したものである。HL シリーズは全供試体とも、持続荷重載荷後、持続載荷終了時、短期荷重載荷時ともに示方書式に比べ、実測値が低い値を示している。これは、高強度コンクリートに関しては、コンクリートと鉄筋の付着が大きいことによるものと考えられる。

6. まとめ

本研究で得られた結果は以下のとおりである。

(1) RC 部材において、持続載荷後の短期荷重載荷時の引張鉄筋ひずみ、曲げ剛性、ひび割れ幅増加率は、モーメントと直線関係で示される。一方、PRC 部材については、短期載荷直後はモーメントと直線関係になるが、モーメントの増加とともに増加率が大きくなる。

(2) 持続荷重載荷後の短期荷重載荷時の高強度コンクリート部材の変形挙動について、土木学会式の適用の可能性を示した。しかし、ひび割れ幅算定式に関しては、その適用に関して検討が必要である。

(3) 安齋らが提案した解析法は、持続載荷後の短期載荷時の引張鉄筋ひずみ、曲げ剛性、ひび割れ幅の増加を比較的精度よく評価した。

(参考文献)

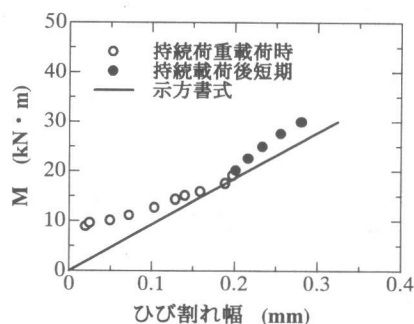


図-12 モーメント-最大ひび割れ幅関係 (LL12)

- 1)運輸省鉄道局監修，鉄道総合研究所編：鉄道構造物等設計標準，同解説 コンクリート構造物，丸善株式会社，1992.10
- 2)例えば佐藤良一，氏家勲，鈴木雅博，北條泰秀：鉄筋コンクリート曲げ部材の長期変形挙動およびその解析法に関する研究，土木学会論文集，No.634/V-45，pp27-41，1999.11
- 3)安齋慎介，廣河和男，袖山隆行，佐藤良一：応力履歴を考慮した高強度PRC部材のクリープ解析について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp187-192，1999
- 4)阿部司，佐藤良一，手塚正道，許明：重ね合わせの理論に基づく RC 曲げ要素の変形解析理論について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp687-692，1997