

論文 持続荷重を受ける PRC 連続はりの挙動について

津田 守^{*1}・佐藤良一^{*2}・鳥取誠一^{*3}・手塚正道^{*4}

要旨：プレストレス量、引張鉄筋比、圧縮鉄筋比をパラメーターとする PRC 連続はりの短期および長期の変形、ひび割れおよびモーメントの再分配について実験的に検討した。ついで、クリープに及ぼす載荷時材齢の影響、コンクリート応力の履歴、ひびわれ発生域のテンションスティフニングを考慮して解析を行い実測値と比較した。その結果、解析によって求めたモーメント再分配は、所定の静的荷重の載荷時では概ね実測値と一致したが、長期材齢では小さく評価する傾向があった。

キーワード：PRC、連続はり、クリープ、乾燥収縮、モーメント再分配

1. まえがき

PRC は RC と PC の長所を生かし得る構造部材であるため、近年その利用が注目され、変形やひび割れに関する研究がなされ、実構造物においても調査研究が行われている。著者らも部材の長期変形・ひび割れ幅の検討を行ってきたが [1]、室内実験の多くは単純はりに対してであった。連続はりに関する研究も行われているが、静的載荷時のひび割れによるモーメントの再分配に関するもので、長期的な検討は行われていない。Elbadry 等は、コンクリートの応力履歴や引張剛性を考慮して、マトリックス法に基づいた方法を提案しているが [2]、実験による検証は行われていない。

そこで、本研究では、先ず、プレストレス量、引張鉄筋比、圧縮鉄筋比をパラメータとする PRC 連続はりの短期および長期のモーメントの再分配およびたわみについて実験的に検討した。ついで、クリープに及ぼす載荷時材齢の影響、コンクリート応力の履歴、テンションスティフニングを考慮して解析を行い実測値と比較した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

本実験では早強ポルトランドセメント（比重 3.13）を用い、粗骨材には鬼怒川産砕石（最大寸法 20mm、比重 2.65、F.M. 6.63）を、細骨材には鬼怒川産川砂（比重 2.62、F.M. 2.83）を使用した。混和剤には高縮合トリアジン系高性能減水剤（標準形 I 種）をセメント重量の 0.4% を使用した。鉄筋には SD295A の異形鉄筋 D16、D13 および D10 を用いた。D16 および D13 の実測の弾性係数は、 $1.97 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ である。PC 鋼材には異形棒 D 種 1 号で呼び名 7.4mm、9.2mm、および 11mm を使用した。それらの弾性係数は、9.2mm が $2.05 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、その他は $2.06 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ である。

2. 2 供試体の作製および計測方法

用いたコンクリートの水セメント比は 55%、単位セメント量は 300 kg/m^3 である。載荷実験に供し

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)

*2 宇都宮大学助教授 工学部建設学科、工博 (正会員)

*3 (財) 鉄道総合技術研究所 構造担当研究室主任研究員、工修 (正会員)

*4 オリエンタル建設株式会社 技術研究所 主任研究員 (正会員)

表-1 供試体一覧

供試体名	鉄筋	p _s (%)	P C 鋼材	p _p (%)	設定 緊張力 tf	緊張直後		載荷直前			
						実測 緊張力 tf	鉄筋応力* kgf/cm ²	コンクリート 応力* kgf/cm ²	緊張力* tf	鉄筋応力* kgf/cm ²	コンクリート 応力* kgf/cm ²
Dm16-7.4	4@Dm16	1.2	4φ7.4	0.3	13.1	12.5	-156(上) -153(下)	-22(上縁) -20(下縁)	12.1	-361(上) -357(下)	-19(上縁) -18(下縁)
Dm13-9.2	4@Dm13	0.7	4φ9.2	0.5	21.2	20.3	-279(上) -279(下)	-39(上縁) -39(下縁)	19.4	-554(上) -554(下)	-35(上縁) -35(下縁)
Dm13-11	4@Dm13	0.7	4φ11	0.7	31.3	30.6	-414(上) -435(下)	-57(上縁) -61(下縁)	29.3	-753(上) -784(下)	-52(上縁) -56(下縁)

Dm:溝切り鉄筋, p_s:鉄筋比 (A_s+A'_s)/(bd) p_p:P C鋼材比 A_p/(bd) *:計算値

たPRC供試体は20x25x400cmの矩形断面は
りでその断面諸元を
図-1に、また供試
体一覧を表-1に示
す。これらと同断面
のクリープおよび乾
燥収縮計測供試体を
それぞれ6体および3

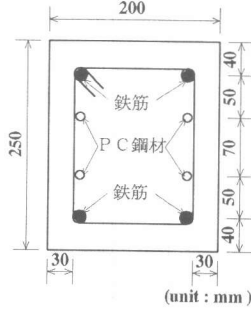


図-1 断面諸元

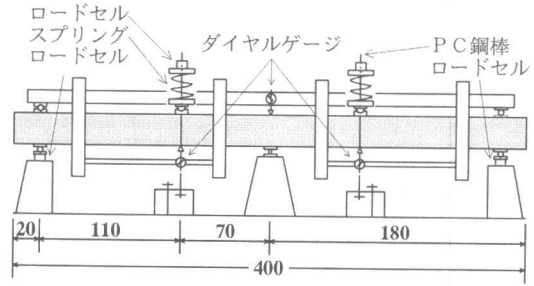


図-2 載荷状況図

体作製した。PRC供試体は、材齢9日にプレストレスを導入した後材齢10日にグラウト注入を行い、材齢16日に持続載荷実験を開始した。載荷は図-2に示すように中間支点对称2点載荷とした。両端の支点にはロードセルを、また中間支点上には反力の計測と垂直方向の変位調整が可能な治具をそれぞれ設置した。この装置により、載荷時には先ず弾性計算値通りの反力が得られるように、中間支点上の変位を調整し、その後持続載荷試験においてはこの中間支点変位を常に一定値に保持し、正確に反力を把握できるように配慮した。供試体のたわみはダイヤルゲージ型変位計(精度1/300mm)で、鉄筋位置のコンクリートひずみはパイ型変位計(標点距離100mm、感度1950x10⁻⁶/mm)で、長期的にはコンタクト型マイクロストレインゲージ(精度1/1000mm)でそれぞれ測定した。クリープ計測用供試体にはプレストレス導入時と載荷実験開始時に、それぞれ3体ずつ、約80kgf/cm²のプレストレスを導入した。

2. 3 材料特性

コンクリートの載荷時材齢での圧縮強度、引張強度および弾性係数はそれぞれ407、26.2、29.3x10⁴(すべてkgf/cm²)であった。図-3はクリープ係数と乾燥収縮ひずみを示したものである。クリープ係数を示す図中の

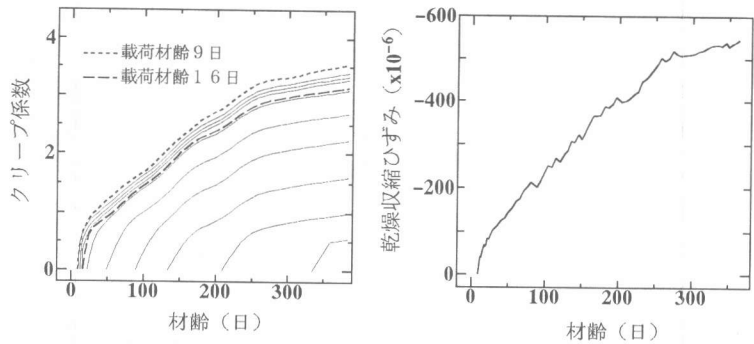


図-3 クリープ係数および乾燥収縮ひずみの経時変化

2本の破線は材齢9日および16日を載荷材齢とする実測値であり、標準養生、材齢28日の実測弾性係数を用いて求めた。その他の実線は、これら2つの実測値とCEB-FIP MODEL CODE 1990 (MC90) [3]より求めた値が一致するように定めたものであり、解析ではこれらの値を用いた。

3. 解析方法

本研究で行った解析はひび割れ発生領域のクリープ解析およびそれを用いた連続はりの解析の2つから構成される。

3.1 クリープ解析[1]

クリープ解析では、コンクリートの応力履歴、乾燥収縮、載荷時材齢のクリープへの影響を考慮し、重ね合わせの原理を用いて行った。このクリープ解析は全

断面有効領域とひび割れ発生領域に対して行い、CEB MC90に従って、

3.2 断面力の解析

ひび割れの生じた部材のモーメント分布を求めるとき、ひび割れ発生領域の短期および長期の剛性評価が重要となる。本研究では、可能な限り単純化するため、図-4に示すように、ひび割れ発生モーメント以上のひび割れ発生領域に作用するモーメントの平均値を求め、これに対応する平均剛性を計算した。この単純化が妥当であるとすれば、連続はりのように単純な構造であれば、断面力の分布が容易に解析解の形で得られるため、そのメリットは極めて大きいといえよう。

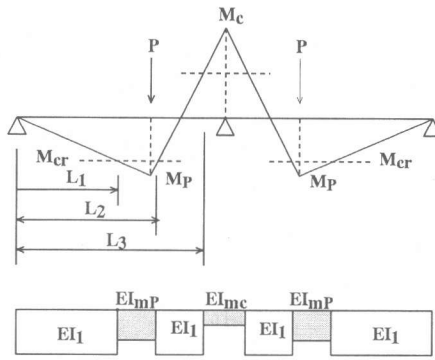
図-5は、上記の考え方に基づく解析のフローを示したものである。まず、

- ①中間支点上の曲げモーメント (M_c) を弾性解析で求める。
- ②この曲げモーメント (M_c) を仮定することによって、ひび割れ発生領域と全断面有効領域の領域長さ (L_1, L_2, L_3) が決まり、ひび割れ発生領域ではその領域の平均曲げモーメントも求まる。
- ③この平均曲げモーメントに対するひび割れ断面および全断面有効領域のクリープ解析を行い断面の曲率を求める。テンションスティフニングを考慮する場合にはCEB MC90に従って平均曲率を求めれば、平均モーメントがわかっているため平均曲げ剛性も得られる。テンションスティフニングを無視する場合にはひび割れ断面の曲率からひび割れ断面の曲げ剛性が得られる。
- ④上記の平均曲げ剛性を用い、3連モーメントの定理に基づき断面力の分布を求める。
- ⑤得られた中間支点上の曲げモーメント (M_c') と仮定した曲げモーメント (M_c) が一致するまで上記の計算を繰り返せばよい。
- ⑥所要の載荷日数に達していなければ日数を指定し先に進む。

4. 結果と検討

4.1 短期挙動

表-2は載荷荷重と応力状態の計算値を示している。曲げモーメントは弾性理論によって求めている。表に示すように、中間支点上に



EI_1 : 全断面有効剛性
 EI_{imp} : 中間支区域平均剛性
 EI_{mp} : 載荷点区域平均剛性
 L_1, L_2, L_3 : 領域長さ
 M_{cr} : ひび割れ発生モーメント
 M_c : 中間支点モーメント
 M_p : 載荷点モーメント

図-4 構造解析モデル

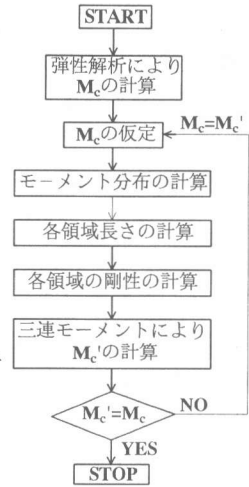


図-5 解析フロー

表-2 載荷条件

供試体名	載荷荷重 tf	中間支点			載荷点		
		曲げモーメント tf・m	鉄筋応力 kgf/cm ²	コンクリート 応力 kgf/cm ²	曲げモーメント tf・m	鉄筋応力 kgf/cm ²	コンクリート 応力 kgf/cm ²
Dm16-7.4	6.53	2.25	1802	-191	1.42	635	-117
Dm13-9.2	6.56	2.26	1061	-201	1.42	-265 ⁺	-99 ⁺
Dm13-11	6.96	2.40	214	-197	1.51	-473 ⁺	-120 ⁺

*:弾性計算値, **:ひび割れ断面における計算値 (+を除く)

+:全断面における計算値

おける鉄筋応力度がそれぞれ 800kgf/cm² ずつ異なるように 載荷荷重を決めた。また表-3 はひび割れ発生荷重の実測値と解析値を示したものである。解析値はモーメントの再分配を考慮して求めた。実測

表-3 ひび割れ発生荷重の実測値と解析値の比較

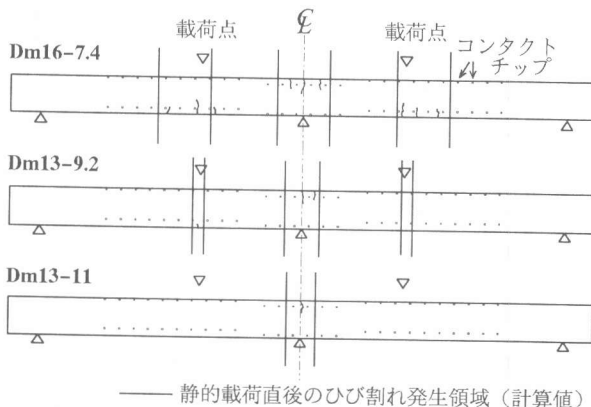
供試体名	中間支点(tf)		載荷点(tf) (L:左載荷点 R:右載荷点)				
	実験値	弾性解	実験値		弾性解	解析値	
			L	R		ひび割れ断面剛性	平均剛性
Dm16-7.4	4.0	3.3	4.0	4.0	5.2	4.7	4.8
Dm13-9.2	4.0	4.2	6.0	-	6.8	6.3	6.4
Dm13-11	4.0	5.3	-	-	8.9	8.3	8.4

値は例えば4tfの場合、1tfずつ載荷しているので4~5tfの間に発生したことを意味する。Dm13-9.2の供試体は6tfで載荷点域において非常に小さなひび割れが目視されたが、その位置での実測ひずみにはひび割れの明確な影響はみられなかった。

図-6 はそれぞれの供試体のひび割れ分散性状と解析によって求めたひび割れ発生領域を示したものである。図に示したひび割れ発生領域は、静的載荷直後のものであるが長期的にもあまり変化していない。この図に示したようにDm16-7.4は中間支点上に3本、載荷点に左右とも3本生じており、解析によるひび割れ発生領域の長さはひび割れ位置とほぼ対応している。Dm13-9.2は中間支点到2本生じている。Dm13-11は中間支点到域に1本生じ載荷点域には認められなかった。

表-3 は中間支点および載荷点でのひび割れ発生荷重を実測値と解析値と比較したもので、解析値は実験値のほぼ30%~20%の範囲にあり、少々大きな差も認められるが、この原因は不明である。

図-7 は中間支点および載荷点のモーメント再分配の実測値と解析値を比較して示したものである。モーメントの再分配は弾性解との比で示した。これらの図によれば、Dm16-7.4およびDm13-9.2は実測値に比べ解析値の再分配は大きく、Dm13-11は実測値のほうが大きい。Dm16-7.4の場合、実測の再分配は荷重の増加と共に徐々に増大し、6tf以降一定値を示す。これに対し解析値は、剛性の取り入れ方に拘らず、ともにおよそ5tfまで急激に増加しその後平均剛性を用いた場合はほぼ一定値を、またひび割れ断面剛性を用いた場合は減少し、所定の荷重で実測値に近い値を示す。



静的載荷直後のひび割れ発生領域 (計算値)

図-6 ひび割れ性状

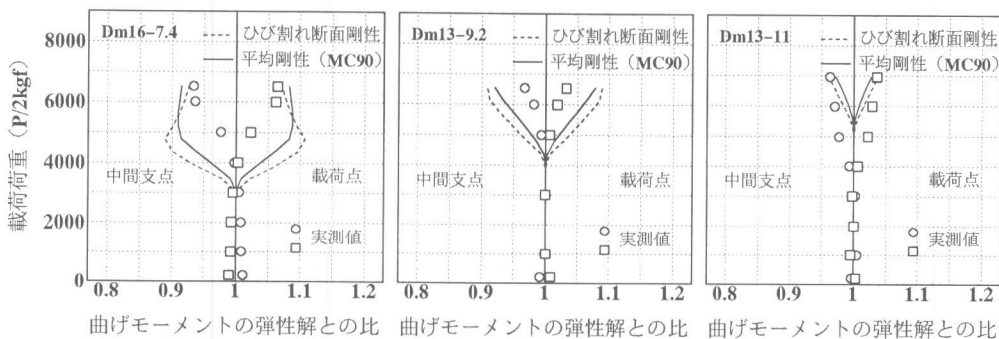


図-7 荷重-曲げモーメント再分配の関係

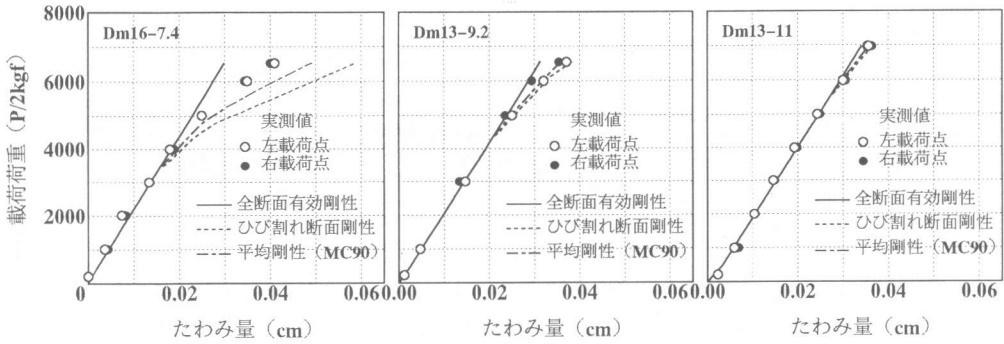


図-8 荷重-たわみ量の関係

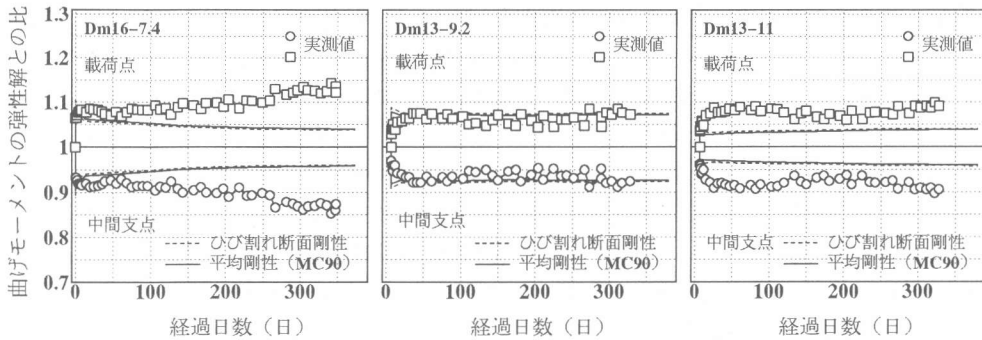


図-9 曲げモーメント再分配の経時変化

これは解析値の場合中間支点と載荷点でひび割れ発生荷重が異なり、その間では剛性差が大きいことによるものである。実測値の傾向は、ひび割れ発生荷重が中間支点と載荷点でほぼ等しいためひび割れ直後では双方の剛性差は小さく、その後荷重の大きさに対応して差が大きくなったことによると思われる。Dm13-9.2は、載荷点に構造的なひび割れが生じていないが、計算値に比べ実測値の再分配が小さいのは、鉄筋応力度が小さいときにはひび割れ断面であってもコンクリートが引張応力を負担し、そのために剛性が高くなったためと思われる。またDm13-11は中間支点上のひび割れ発生荷重が弾性解よりも小さかったため計算値に比べ実測値の再分配が大きくなったと考えられる。

図-8は荷重増加にともなうたわみについて実測値と解析値を比較して示したものである。プレストレスが小さいDm16-7.4の場合、解析値は実測値を大きく評価し、ひび割れ断面剛性を用いた場合は特に顕著となっている。この様にテンションスティフニングの影響は、前図に示した再分配に比べたわみではより明確になる。しかし、プレストレスが高く鉄筋応力度が小さくなればその影響は大きくはなく、実測値との差もみられない。

4. 2 長期挙動

次に図-9は弾性計算されたモーメントと実測および解析で求めたモーメントの比の経時変化を示したものである。実測による再分配は載荷後比較的早期の段階で急激に進行し、その後は漸増あるいは一定の傾向を示し、支点および載荷点の剛性比があまり変わらないことを意味している。解析値は実測値と比較してDm16-7.4、Dm13-11に対しては小さく、Dm13-9.2に対してはほぼ一致している。解析上はDm16-7.4、Dm13-9.2の載荷点にはひび割れが発生し、Dm13-11には生じていない。載荷点および中間支点の双方にひび割れが生じる解析値によれば再分配は経時的に減少す

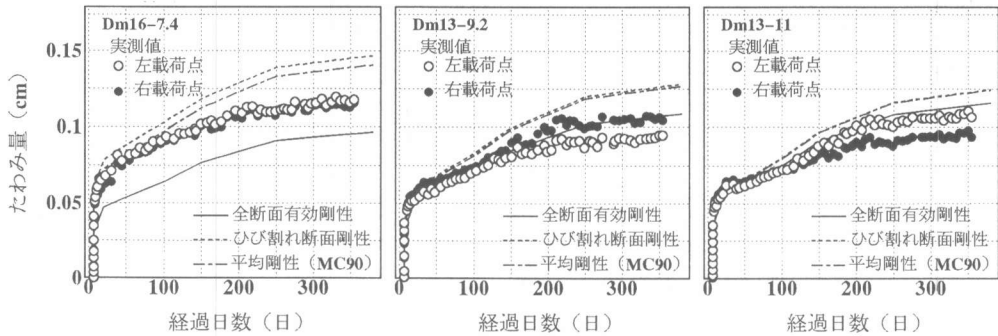


図-10 たわみ量の経時変化

る傾向がみられ、その程度はプレストレスの小さいDm16-7.4の方が大きい。この減少傾向は、一つには、乾燥収縮はひび割れが生じた場合変形を進行させようとするが、この影響がクリープ変形に対しモーメントの小さい断面の方が相対的に大きく、荷重点の剛性を相対的に低下させることによって起こっているものと考えられる。しかし、Dm16-7.4の場合、この説明では現象を説明できない。荷重点に構造ひび割れがなかったとみられるDm13-9.2の場合、実測値と解析値は比較的良く一致しているが、これはDm16-7.4と異なり、解析上の荷重点のひび割れ発生領域の長さが中間支点のそれと大きく異なり、それぞれの領域の剛性差が明確に現れたためと思われる。プレストレスが最も大きいDm13-11では、解析値は漸増する傾向を示すが実測値より小さい。これら実測値との差の説明は今後の検討課題としたい。

最後にたわみの経時変化を図-10に示す。これらの図に示されているように、計算値は実測値より大きく、特にプレストレスが大きくなるにつれて全断面有効剛性を用いた計算値より実測値は小さくなっている。この原因としては、テンションスティフニング効果を小さく評価していること、中間支点および荷重点で用いた荷重板（幅10cm、厚さ8mmの鉄板）の影響によって剛性が大きくなっていることなどが考えられる。

5. まとめ

本研究の範囲内で以下の結論を得た。

- 1) コンクリートの応力履歴を考慮したP R C連続はりの比較的簡易な断面力の解析方法を示した。
- 2) ひび割れによる曲げモーメントの弾性解に対する再分配率は3.5~6.5%であった。
- 3) クリープおよび乾燥収縮による弾性解に対する再分配率は、荷重後初期に急激に進行し、その後漸増あるいはほぼ一定の傾向を示し、荷重後およそ一年で4.5~6.5%であった。
- 3) 本方法によって求めた再分配率は、静的荷重時には所定の荷重でほぼ実測値と一致したが、長期においては小さく評価する傾向がみられた。
- 4) 本方法は特に長期のたわみを大きく評価し、CEB MODEL CODE 1990の引張剛性評価は小さいことも認められた。

<参考文献>

- [1]山本浩嗣、佐藤良一、涌井一、落合勝：P R C部材の長期変形挙動の検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.2、pp.973-978、1994.
- [2]Elbadry, M.M. and Ghali, A : Serviceability Design of Continuous Prestressed Concrete Structures, PCI Journal, Vol.34, No.1, pp54-87, Jan./Feb., 1989.
- [3]CEB : CEB-FIP MODEL CODE 1990, Final Draft, 1991