

(93) 長期持続荷重を受けたP R C連続はりの静的載荷実験

オリエンタル建設(株)技術研究所 正会員 ○阿部浩幸
 広島大学工学部第4類(建設系) 正会員 佐藤良一
 鉄道総合技術研究所構造技術開発事業部 正会員 鳥取誠一
 広島大学工学研究科構造工学専攻 廣河和男

1. はじめに

P R C構造は、R C構造とP C構造の中間領域に位置するコンクリート構造体であり、使用状態におけるひびわれの発生を許容するものである。P C構造と比較した場合、P R C構造ではより多くの鉄筋が必要となり、これら鉄筋量の増加がコンクリートのクリープや乾燥収縮、P C鋼材のプレストレス力に与える影響は無視できなくなることが考えられる。また、不静定構造の場合、ひびわれ発生による部材の剛性低下が断面力の分布に直接影響を及ぼすことになる^{[1]~[3]}。

本研究は、プレストレス量、引張鉄筋比および圧縮鉄筋比をパラメーターとするP R C連続矩形断面供試体の短期載荷実験および長期載荷実験を行った。短期載荷実験は、供試体に持続荷重を与えずに載荷試験を行い、長期載荷実験は、供試体にひびわれを発生させた後、約5年にわたる長期持続荷重を与え、その後載荷実験を行い、それぞれの実験において支点反力、鋼材ひずみなどを測定し、その挙動について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 供試体

各供試体は、幅 200mm×高さ 250mm×長さ 4000mm 寸法の等断面矩形はりを用いた。P C鋼棒および主鉄筋は断面上下対称に配置し、プレストレス量、引張鉄筋比および圧縮鉄筋比をパラメーターとする3タイプの供試体を各2体ずつ製作した。図-1に供試体断面形状を、表-1に各タイプの配置鋼材諸元を示す。使用材料として、コンクリートには早強ポルトランドセメントを用い、鉄筋には異形棒鋼2種(SD295) D16, D13を用いた。鉄筋は、その付着特性を損ねないように鉄筋ひずみ計測用ゲージを添付するため幅 4mm、深さ 3mmの溝を鉄筋の両側の縦リブ位置に切削したものを用い(以下、Dm13, Dm16とする)、P C鋼材としてはP C鋼棒D種1号を用いた。各材料特性値を表-2、3に示す。供試体製作は、

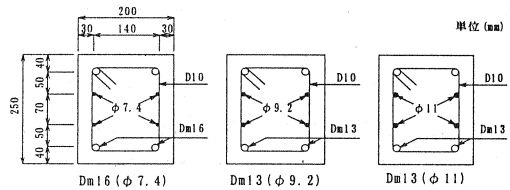


図-1 供試体断面図

表-1 配置鋼材諸元

供試体名	上・下段鉄筋			上・下段P C鋼材		
	呼び名	As (cm ²)	ρs (%)	呼び名	Ap (cm ²)	ρp (%)
Dm16-7.4	2-Dm16	3.114	0.62	2-φ7.4	0.8	0.16
Dm13-9.2	2-Dm13	1.872	0.37	2-φ9.2	1.28	0.26
Dm13-11	2-Dm13	1.859	0.37	2-φ11	1.8	0.36

Dm: 溝切り鉄筋、ρs=100As/bd、ρp=100Ap/bd

表-2 鋼材材料特性

(a) 鉄筋			(b) P C鋼材			
呼び名	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	呼び名	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
Dm16	193	353	φ7.4	202	1425	1480
Dm13	193	340	φ9.2	201	1414	1475
			φ11	202	1411	1488

材齢3日後に脱枠後、湿布養生を行い材齢9日にプレストレスを導入し、その後一斉に乾燥を開始した。プレストレス導入時応力を表-4に示す。プレストレス導入の

表-3 コンクリート材料特性

		材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
短期載荷実験	プレ導入時	9	33.7	-----	26.6
	静的載荷実験時	18	41.4	2.61	28.6
長期載荷実験	プレ導入時	9	33.5	-----	26.7
	持続荷重載荷	16	39.9	2.57	28.7
	静的載荷実験時	1912	48.8	3.16	29.5

表-4 プレストレスによる応力

供試体名	実測緊張応力 (N/mm ²)	鉄筋応力* (N/mm ²)	コンクリート応力* (N/mm ²)
Dm16-7.4	777 (上)	-16.6 (上)	-2.3 (上縁)
	751 (下)	-16.3 (下)	-2.2 (下縁)
Dm13-9.2	773	-27.4	-3.8
	787	-27.7	-3.8
Dm13-11	797	-40.6	-5.6
	872	-42.7	-6.0

*鋼材ひずみを用いた弾性計算値

1日後(材齢10日目)にシース内へのグラウトを注入した。

2. 2 荷重方法

供試体の支持は支間1800mmの2径間とし、中間支点を固定そして両端部支点は可動とした。荷重は、静的荷重および持続荷重ともに中間支点对称2点荷重

(Dm16-φ7.4 供試体初期荷重試験のみ中間支点から900mm位置とし、他は700mm)とした。短期荷重実験は、平均材齢18日に荷重点変位が14mm以上になるまでの静的荷重を示し、長期荷重実験は、初期の所定持続荷重までの静的荷重と持続荷重荷重および持続荷重後の所定変位までの静的荷重の全体の挙動を示すものとする。長期荷重実験の持続荷重荷重状況を図-2に示す。長期荷重実験の荷重荷重設定値を図-3に示すが、材齢16日(図中原点)において中間支点上における引張鉄筋応力度がDm16-φ7.4、Dm13-φ9.2およびDm13-φ11それぞれ180N/mm²、106N/mm²、22N/mm²と80N/mm²ずつ異なるような荷重(図中A点)を決め荷重し、その後材齢約850日まで持続(図中B点)した後荷重を減少させて(図中C点)、材齢約1890日まで保持し(図中D点)、そして平均材齢1905日に荷重を約30kNまで減少させ(図中E点)その後数回の静的繰り返し荷重(図中荷重パターン参照)を行った。持続荷重途中における荷重荷重の減少は、主桁の増設などによる荷重の減少を考慮し、回復クリープの影響、プレストレスの復元力特性に及ぼす影響を見ることを目的に行った。持続荷重での荷重荷重は、荷重点に設置したPC鋼材を緊張することで負荷し、荷重の管理はロードセルを用いた。また、静的荷重実験では、荷重点に設置した油圧ジャッキを用いて荷重し、ロードセルで荷重強度を測定した。持続荷重時では、供試体の変形の進行、温度変化などに伴う荷重荷重の変化に対処するために、PC鋼材と荷重点との間にスプリングを配置するとともに定期的に調節を行って、持続荷重が設定値に対し±5%以内とした。

それぞれの実験は、支点の不等沈下が起こることにより正しい反力やたわみ量を測定できなくなることから、中間支点部には鉛直方向変位の調整可能な器具を設置し、3支点が常に直線関係にあるように調整した。ただし、短期荷重実験Dm13-φ9.2およびDm13-φ11において、荷重荷重約200kN以降調整が不可能となり不均一となった。

同断面を有する別の供試体において、乾燥収縮ひずみおよびクリープ係数(コンクリートの持続応力

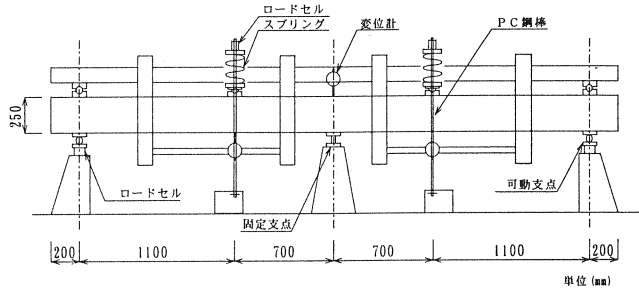


図-2 持続荷重状況図

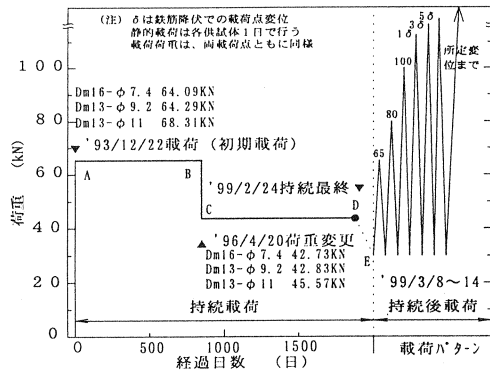


図-3 長期荷重実験荷重設定値

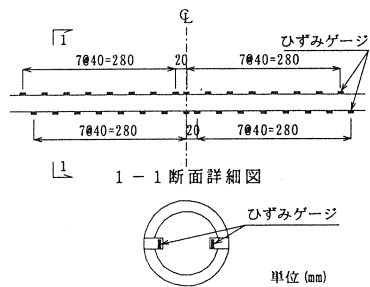


図-4 引張鉄筋ひずみ添付状況図

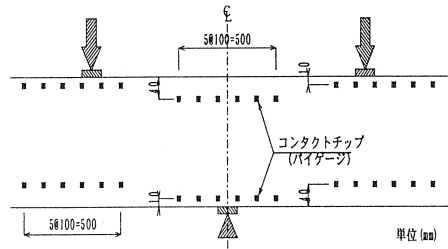


図-5 コンクリートひずみ測定位置

8N/mm²)を計測し、乾燥および荷重開始の材齢16日から長期荷重実験最終までのそれぞれの値は、約620×10⁻⁶と約3.3(材齢28日ヤング係数を用いて計算)であった。

2. 3 計測方法

計測項目は、中間支点部付近では、鉄筋、PC鋼材およびコンクリートひずみとし、荷重点付近においてはコンクリートひずみとした。

引張鉄筋ひずみは、図-4に示すように鉄筋の溝部分にゲージを中間支点から軸方向両側に300mm、計600mm区間に20mm間隔(片側40mm間隔)で32枚添付した。これは、ひび割れが分散して発生すること、その内のどのひび割れが進行するか不確定であることを考慮して添付位置を決めた。圧縮鉄筋ひずみ(持続荷重供試体のみ)およびPC鋼材ひずみは、中間支点の支承線上位置にゲージを添付した。コンクリートひずみは、図-5に示すように圧縮側縁から10mmの高さ位置および引張側縁から40mmの高さ位置(引張鉄筋位置)を静的荷重においてはひずみゲージおよびパイ型ゲージにて、持続荷重時にはコンタクトゲージにて測定した。これも引張鉄筋ひずみと同様にひび割れの分散を考慮するとともに、圧縮ひずみが支点および荷重点の鋼板の影響を受けることを考慮し決めた。

3. 実験結果と考察

3. 1 変位

図-6に短期荷重実験と長期荷重実験の初期荷重と持続後荷重の荷重と荷重点変位の関係を示す。長期荷重実験結果は、持続荷重により変形が進行しているが、持続後荷重と短期荷重実験とはほぼ等しい挙動を示している。短期荷重実験と持続後荷重実験の荷重荷重30kNから中間支点部引張鉄筋降伏荷重までの増加変位量の比は、Dm13-φ9.2の場合0.99、Dm13-φ11は場合1.15であった。また、短期荷重実験において荷重200kN以降中間支点調整が不十分ではあったが、短期荷重実験と長期荷重実験の最大耐力はほぼ等しいことが示された。しかし、持続荷重によるクリープの残留変形により、初期荷重40kNでの変位と比べDm16-φ7.4、Dm13-φ9.2およびDm13-φ11それぞれ5.5、4.1、3.8倍程度大きな値を示した。以上のことから、持続荷重により変位は経時変化するが、持続荷重後の静的荷重による挙動は、持続荷重による影響をほとんど受けないものと考えられる。

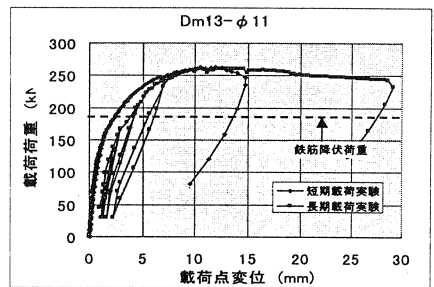
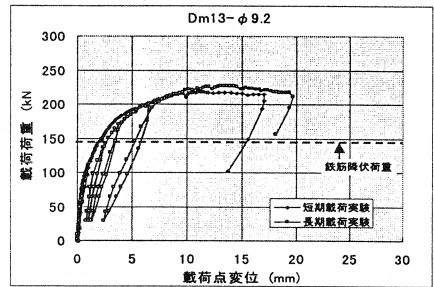


図-6 荷重-荷重点変位の関係

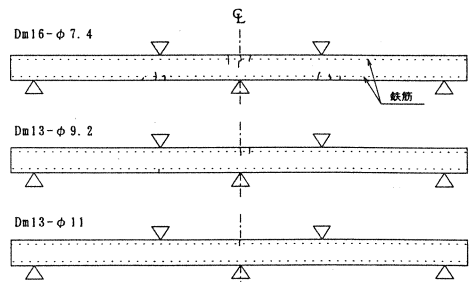


図-7 持続荷重荷重初期のひび割れ状況図

表-5 ひび割れ発生荷重(実験値)

供試体名	中間支点 (kN)	荷重点 (kN)	
		左側	右側
Dm16-7.4	39.2	39.2	39.2
Dm13-9.2	39.2	58.8	—
Dm13-11	39.2	—	—

(注) 鉄筋は9.8kN間隔で増加し、ひび割れ荷重はそのステップの低い値を表示

3. 2 断面力再分配

短期荷重実験と長期荷重実験の荷重荷重点と支点反力の測定結果から、断面力の再分配の関係について比較検討する。図-8に、持続荷重時の中間支点と荷重点曲げモーメントの全断面有効とした弾性解析値に対す

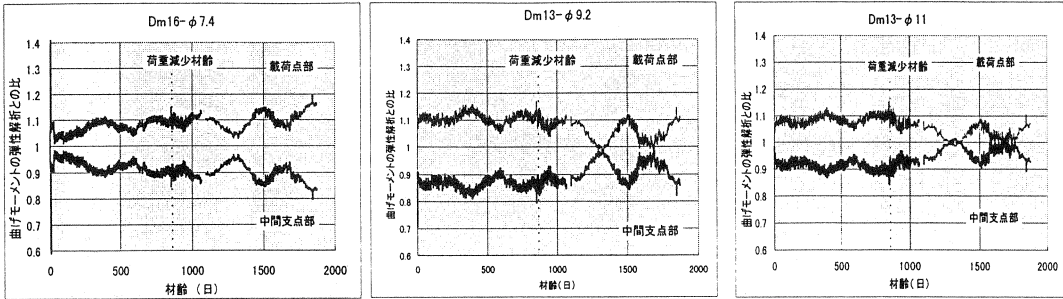


図-8 曲げモーメントの弾性解析との比の経時変化

る実験値の比の経時変化を示す。持続載荷初期から荷重減少前までの間で、Dm16-φ7.4 の場合、中間支点部の比は減少し、載荷点部の比は増加する。Dm13-φ9.2 および Dm13-φ11 場合では、ほとんど変化していないが、Dm13-φ11 の方が弾性解析に近い値を示している。荷重減少後から持続載荷最終までの間において、Dm16-φ7.4 の場合、荷重減少前と同じ傾向を示すが、Dm13-φ9.2 および Dm13-φ11 の場合は中間支点部の比が増加し、載荷点部の比が減少する挙動を示した。特に Dm13-φ11 はその傾向が大きく、弾性解析値に近づいている。これは、Dm16-φ7.4 の場合、減少前後持続荷重が表-5に示す中間支点および載荷点のひび割れ発生荷重を越えていること、プレストレスレベルが低いことなどから荷重減少前後において同じ挙動を示したと考えられる。Dm13-φ11 の場合、減少前持続荷重によるひび割れが小さく、中間支点と載荷点の剛性に大きな差がないため、弾性解析に近い値を示したと考えられる。また、減少後荷重においては、プレストレスの影響によりひび割れが閉じ、剛性が回復し弾性解析に近づく挙動を示したと考えられる。Dm13-φ9.2 の場合、減少前持続荷重により載荷点位置にひび割れが発生するもの小さいため、中間支点と載荷点の剛性の差が大きく他の供試体の比へ弾性解析に対する再分配率がと大きい値を示したと考えられる。また、減少後持続荷重において、弾性解析に近づいているのはプレストレスによる剛性の回復と考えられる。

図-9に短期載荷実験と長期載荷実験の持続後載荷での中間支点と載荷点の弾性解析に対する比を示す。図中に、中間支点部引張鉄筋の降伏荷重の実験値を示す。この図より、Dm13-φ9.2 の場合、短期載荷実験は載荷荷重約60kN以降弾性解析から徐々に離れていき、最大荷重に至っている。持続後載荷実験は荷重約40kNにおいて持続荷重最終値(材齢1890日の値)に近い値を示し弾性解析との比は載荷点で1.18、中間支点で0.82を示した。持続後載荷において荷重の増加とともに短期載荷実験に近づき、中間支点部引張鉄筋降伏荷重において一致し、その後の荷重増加に対してはほとんど同じ挙動を示した。Dm13-φ11の場合、短期載荷実験および持続後載荷実

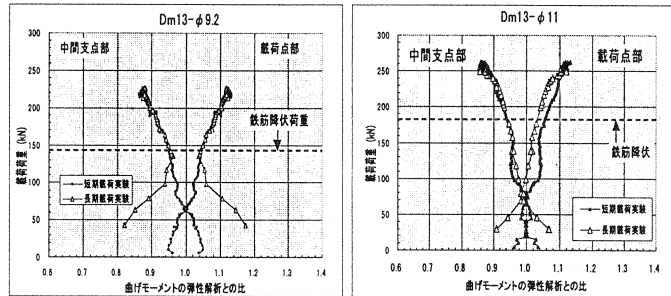


図-9 中間支点および載荷点曲げモーメントの弾性解析との比較

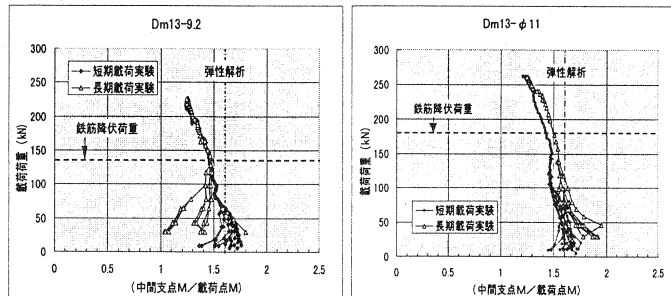


図-10 載荷点に対する中間支点曲げモーメント比

験結果の挙動はほぼ等しく、荷重約 80kN 以降弾性解析から徐々に解析値から離れ、最大荷重に至っている。この両者の挙動が類似している要因として考えられることは、減少後持続荷重によって剛性が回復したことによるものと思われる。

図-10 に Dm13-φ9.2 および Dm13-φ11 の中間支点と載荷点の曲げモーメントの比(中間支点曲げモーメント/載荷点曲げモーメント)と載荷荷重の関係を示す。この図は、中間支点部引張鉄筋鉄筋降伏までの繰り返し載荷した結果を示してある。Dm13-φ9.2 は、繰り返し載荷により徐々に短期載荷実験値に近づく傾向を示した。しかし、載荷荷重 100kN 以下の繰り返し載荷による挙動はほぼ等しく、載荷点に対する中間支点曲げモーメントの比は 1.1~1.3 を示し、短期載荷実験の比が 1.6 前後であるのに対し異なった。これは、持続荷重載荷時において部材に生じた経時変化の影響を受けたものと考えられる。Dm13-φ11 場合、短期載荷実験に比べ中間支点曲げモーメントの比率が大きい傾向はあるが、全体的に短期載荷試験にほぼ等しい挙動を示している。

以上のことから、持続載荷時に発生するひび割れの状態や載荷荷重により、曲げモーメントの再分配が異なること、プレストレスレベルにより持続荷重を減少したことにより剛性が回復すること、持続荷重後の静的載荷での曲げモーメントの分配は、持続荷重時に受けた影響によりそれを受けていない短期載荷の挙動とは異なり、その挙動の違いは鉄筋降伏近くまでであることなど、持続荷重によるクリープ進行の影響として考えられる。

3. 3 引張鉄筋ひずみ

中間支点曲げモーメントと中間支点付近引張鉄筋最大ひずみとの関係を図-11 示す。この図には、長期載荷実験の初期載荷および持続後載荷の結果を示す。この図より、初期載荷を受けた鉄筋ひずみが、持続荷重載荷により Dm16-φ7.4 の場合は引張側へ、Dm13-φ11 場合は圧縮側へ経時変化しそして Dm13-φ9.2 の場合はほとんど変化していない。持続後載荷での荷重除荷時の鉄筋ひずみはほぼ同じ挙動を示し、短期載

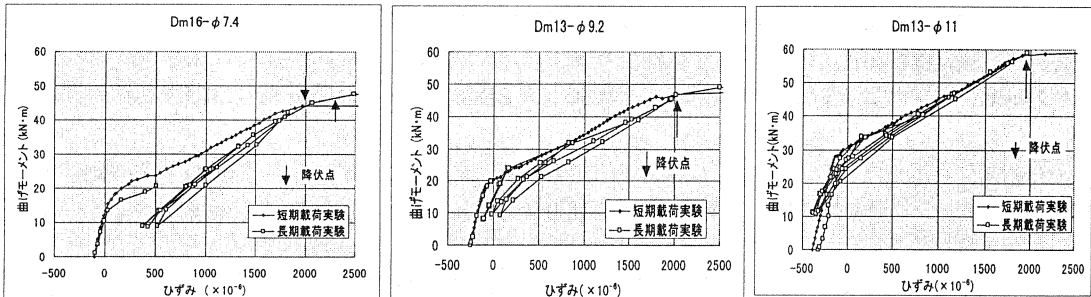


図-11 中間支点部引張鉄筋ひずみの比較

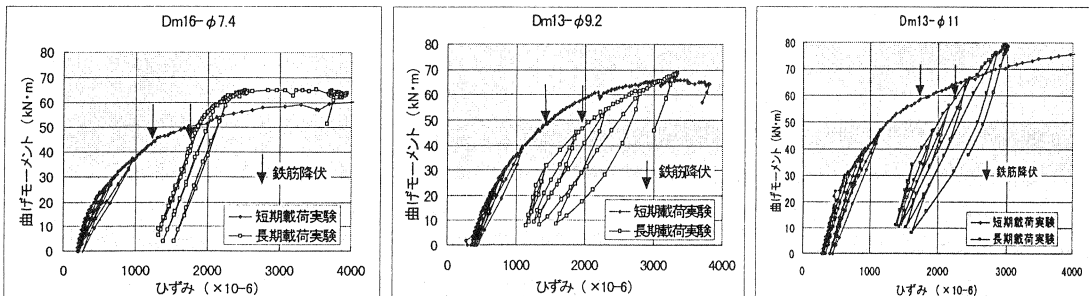


図-12 中間支点部圧縮コンクリートひずみの比較

荷実験値とは異なった。持続荷重により経時変化した状態からひずみ増加が開始するが、降伏点に達する曲げモーメントの値は短期荷重実験の値とほぼ等しく、短期荷重実験に対する長期荷重実験の曲げモーメント比は、Dm16-φ7.4の場合1.02、Dm13-φ9.2の場合1.00、そしてDm13-φ11の場合1.01を示した。Dm13-φ9.2そしてDm13-φ11の場合は、鉄筋が降伏した荷重強度は、短期荷重実験と持続後荷重実験で値はほぼ等しく、Dm13-φ9.2の場合約142kNそしてDm13-φ11の場合178kNであった。このことは、部材の曲げモーメントの分配が持続荷重により影響を受けたため、鉄筋降伏荷重まで異なる挙動を示すが、その後短期荷重実験と同じ挙動を示した結果を裏づけるものである。

3. 4 圧縮コンクリートひずみ

短期荷重実験と持続後荷重実験の中間支点曲げモーメントと中間支点圧縮側でのコンクリートひずみ(図-5参照)の最大値との関係を図-12に示す。この図より、持続荷重時におけるクリープ・乾燥収縮によりコンクリートには大きな圧縮ひずみが生じている。このような持続荷重による影響を受けた状態からの曲げモーメント増加に対するひずみ増加量は、短期荷重実験に比べ小さくその勾配が大きいことが示された。特に持続後荷重のDm16-φ7.4は、曲げモーメントとひずみが直線に近い関係を示した。いずれの供試体も、引張鉄筋降伏までのひずみは短期荷重実験に比べ大きい値を示し、曲げモーメント10~60kN・mまでの増加ひずみ量を比較した場合、Dm16-φ7.4の短期荷重実験と持続後荷重実験の値は 3720×10^{-6} と 970×10^{-6} を、Dm13-φ9.2の値は 1640×10^{-6} と 870×10^{-6} を、そしてDm13-φ11の値は 1530×10^{-6} と 900×10^{-6} を示し、持続後荷重実験の増加量は小さい。以上のことより、持続荷重を受けた圧縮コンクリートひずみは、持続荷重時に生じたクリープ・乾燥収縮の影響を受け、短期荷重実験に比べその増加量が小さく、その挙動はプレストレスレベルおよび鉄筋量によって異なると思われる。

4. まとめ

本研究の範囲内において、以下に示す結果が得られた。

- (1) クリープおよび乾燥収縮による曲げモーメントの弾性解析に対する再分配率は、持続荷重載荷後約5年で0~8.5%であった。また、持続荷重減少後約3年での再分配率は、6.7~5.6%であった。
- (2) 持続荷重後載荷および短期荷重によるひび割れにより曲げモーメントの弾性解析に対する分配率はほぼ等しく、最大13.3~13.7であった。
- (3) 使用状態におけるたわみは、持続荷重による約5年の経時変化によって、処女荷重時のたわみの3.8~5.5倍程度であった。持続荷重後の挙動は、持続荷重を受けていないものと比較して0.99~1.15とほぼ等しいものであった。
- (4) クリープおよび乾燥収縮によって圧縮を受けた状態から鉄筋降伏までのコンクリートひずみの増加量は、その影響を受けていないものと比較して、1/1.7~1/3.8程度小さい値を示した。
- (5) クリープおよび乾燥収縮により影響を受けた連続はりの曲げ耐力は、その影響を受けていないものと比較してほぼ等しい値であった。

参考文献

- [1] 土木学会：コンクリート標準示方書[平成8年版]設計編、1997
- [2] A.Ghali and R.Favre：Concrete Structures :Stresses and Deformations、1986
- [3] 猪又稔、藤田嘉夫：使用状態におけるパーシャルPC桁の変形挙動把握ち連続桁橋への適用、土木学会論文集、No.408、V-11、pp158-165、1989、8
- [4] 津田守、佐藤良一、鳥取誠一、手塚正道：持続荷重を受けるPRC連続はりの挙動について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.2、pp697-702、1995