

論文

[2162] PRC 部材の長期変形挙動の検討

山本 浩嗣 *1

佐藤 良一 *2

涌井 一 *3

落合 勝 *4

1. まえがき

超高速鉄道構造物などにみられるように、構造物の多様化によって、コンクリート構造物にも厳しい変形制御が求められるケースが出てきた。この傾向はコンクリートの高品質化によって今後益々増加することが考えられる。一方、たわみやひび割れ幅の制御に有効なコンクリート部材としてPRC部材が知られている。PRC部材の長期変形やひび割れ幅に関する研究は、既に鈴木や大野らによってなされている^{1) 2)}が、コンクリートの応力履歴や引張剛性の影響の観点からの検討は必ずしもなされていない。また、Elbadryら³⁾は、コンクリートの応力履歴や引張剛性を考慮してPRC部材の変形の計算を行っているが、実験による検証は行われていない。

そこで、本研究では、まず、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RC、PRCおよびPC部材の短期および長期変形、ひび割れ特性を実験的に検討した。ついで、クリープに及ぼす載荷時材齢の影響を考慮してプレストレスの導入から長期材齢に至るまで連続的にひび割れ断面および全断面有効領域断面のクリープ解析を行った。これに基づいて、CEB MODEL CODE90⁴⁾(以下、MC90)によるコンクリートの引張剛性を用いて変形解析を行い、実測値と比較してテンションスティフニング効果について検討した。さらに、既往の代表的な方法によって、ひび割れ幅の検討も併せて行った。

2. 実験概要

(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)を用い粗骨材は鬼怒川産砕石(最大寸法20mm、比重2.64、F.M.6.65)を、細骨材は鬼怒川産川砂(比重2.61、F.M.2.78)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2%使用した。鉄筋にはSD295Aの異形鉄筋D19、D16、D13およびD10を用いた。D16およびD13の実測の弾性係数は $2.05 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ であった。PC鋼材には異形棒D種1号で呼び名7.4mm、9.2mm、11mmおよび13mmのものを用いた。それらの弾性係数は $2.06 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ である。

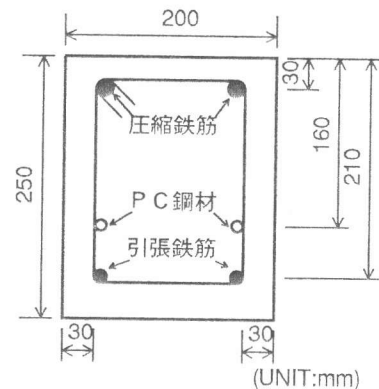


図-1 断面諸元

(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。載荷実験に供した試験体は $20 \times 25 \times 240 \text{ cm}$ の矩形断面ばりで、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用供試体をそれぞれ6体および3体作製した。これら供試体は、材齢9日目のプレストレス導入時まで湿潤養生を行い、その後全供試体の乾燥を開始した。材齢10日目にグラウト注入を行い、材齢17日目から持続載荷実験を開始した。クリープ計測用供

*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 室長、工修(正会員)

*4 オリエンタル建設株式会社 技術研究所 研究員

試体にはプレ
ストレス導入
時と静的載荷
時にそれぞれ
3 体ずつコン
クリート応力
で約 $80\text{kgf}/\text{cm}^2$
を与えた。
載荷はスパン

表-1 供試体一覧

供試体名	引張鉄筋	* ρ_s %	圧縮鉄筋	* ρ_s' %	P C 鋼材	* ρ_p %	設定 緊張力 kgf	緊張直後の		載荷 モーメント kgf・cm	載荷直後の	
								鉄筋応力 kgf/cm ²	コンクリート 下縁応力 kgf/cm ²		鉄筋応力 kgf/cm ²	コンクリート 上縁応力 kgf/cm ²
D19-0	2D19	1.15	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	199000	1855	-156
D19-16	2D19	1.15	2D16	0.79	-----	-----	-----	-----	-----	199000	1854	-137
D16-0(7.4)	2D16	0.79	-----	-----	2φ7.4	0.16	7200	-135	-24	225300	1626	-182
Dm16-16(7.4)	#2Dm16	0.63	2D16	0.79	2φ7.4	0.16	7200	138	24	225300	1954	-170
D13-0(9.2)	2D13	0.51	-----	-----	2φ9.2	0.26	11520	237	-42	226700	1227	181
Dm13-16(9.2)	#2Dm13	0.37	2D16	0.79	2φ9.2	0.26	11520	-249	44	226700	1346	-165
D10-0(11)	2D10	0.29	-----	-----	2φ11	0.36	16920	-340	-60	239900	739	-178
D10-16(11)	2D10	0.29	2D16	0.79	2φ11	0.36	16920	-348	62	239900	557	-150
D0-0(13)	-----	-----	-----	-----	2φ13	0.5	20000	-----	74	255300	-----	-180
D0-16(13)	-----	-----	2D16	0.79	2φ13	0.5	20000	-----	75	255300	-----	-151

#:Dm16, Dm13には溝切り鉄筋を使用 * :コンクリート全断面に対する比率

210cm、純曲

げ区間 80cm の 2 点載荷とした。純曲げ区間 80cm を試験区間とし、載荷点と中央点とのたわみから平均曲率を算出した。圧縮部コンクリートひずみは圧縮縁から 1cm の位置で、ひび割れ幅は引張鉄筋位置で、それぞれ標点距離 10cm、2cm のコンタクトゲージを用いて計測した。クリープおよび乾燥収縮ひずみはモールドゲージによって計測した。表-1 に示した 2 体の供試体 Dm16-16(7.4)、Dm13-16(9.2) には引張鉄筋リブ位置に幅 4mm、深さ 3mm の溝を切削し 2cm 間隔で 52cm 区間にストレインゲージを貼付した。これらのゲージは、長期間の測定を可能にするため、1 日加圧後、加圧した状態で 80℃の下で 8 時間養生した。

3. 材料特性

コンクリートの標準養生材齢 28 日での圧縮強度、引張強度および弾性係数は 454、37.1、 3.75×10^5 (すべて kgf/cm^2) であった。載荷時での圧縮強度および弾性係数は 463、 3.01×10^5 (すべて kgf/cm^2) であった。図-2 はクリープ係数と乾燥収縮ひずみを示したものである。図中の 2 種類の破線はプレストレス導入時と静的載荷時に試験開始したものの実測値である。その他の実線は、これら二つの実測値と MC90 の 350 日における載荷時材齢の影響度に対応させて定めたものであり、解析ではこれらの値を用いた。

4. 変形解析

(1) コンクリートのひずみと応力表示

クリープに及ぼす載荷時材齢の影響を考慮し、step-by-step 法に基づけば、上縁から z の位置における、考慮している時点 $t_{i+1/2}$ での全ひずみは次のように表される。

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

これから考慮している時点での応力は次のようになる。

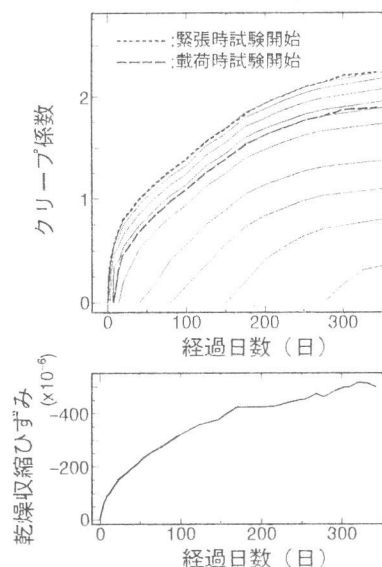


図-2 クリープ係数および乾燥収縮ひずみの経時変化

$$\sigma_{c,i+1/2}(z) = E_e(t_{i+1/2}, t_i) \left\{ \varepsilon_{cs,i+1/2}(z) - \sigma_{c,1/2}(z) J(t_{i+1/2}, t_{1/2}) - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta \sigma_{c,j}(z) J(t_{i+1/2}, t_j) + \sigma_{c,i-1/2}(z) J(t_{i+1/2}, t_i) - \varepsilon_{cs,i+1/2}(z) \right\} \quad (2)$$

ここで、 $t_i, t_{i+1/2}$: i 番目のタイムインターバルの中間と終点の材齢、 $\varepsilon_{cs,i+1/2}(z)$: $t_{i+1/2}$ における乾燥収縮ひずみ、 $J(t_{i+1/2}, t_j) = 1/E_c(t_j) + \phi(t_{i+1/2}, t_j)/E_{c28}$ 、 $E_e(t_{i+1/2}, t_j) = 1/J(t_{i+1/2}, t_j)$ 、 $\Delta \sigma_{c,j}(z) = \sigma_{c,j+1/2}(z) - \sigma_{c,j-1/2}(z)$ 、 $\phi(t_{i+1/2}, t_j)$: t_j に載荷されたときの $t_{i+1/2}$ におけるクリープ係数、 $E_c(t_j), E_{c28}$: t_j および標準養生された場合のコンクリートの弾性係数、である。

(2) 断面のひずみ、応力分布

式 (2) で応力が表されたので、断面の釣合条件として以下の 2 式が得られる。

$$0 = \int_{A_c} \sigma_{c,i+1/2}(z) dA + A'_s \sigma'_{s,i+1/2} + A_s \sigma_{s,i+1/2} + A_p \sigma_{p,i+1/2} \quad (3)$$

$$M = \int_{A_c} \sigma_{c,i+1/2}(z)(z - y) dA + A'_s \sigma'_{s,i+1/2}(d' - y) + A_s \sigma_{s,i+1/2}(d - y) + A_p \sigma_{p,i+1/2}(d_p - y) \quad (4)$$

ここで、 y, d', d, d_p はそれぞれコンクリート上縁から重心、圧縮鉄筋、引張鉄筋および P C 鋼材までの距離である。

上記 2 式より、ひずみの直線性を仮定すれば、重心位置と曲率が求まることになるが、プレストレス導入時は圧縮鉄筋、引張鉄筋およびコンクリートが同一平面上にあり、P C 鋼材の変化ひずみとその位置のコンクリートの変化ひずみが等しいという適合条件を適用することにより断面のひずみ分布が求められる。クリープ、乾燥収縮によって P C 鋼材のストレスロスが起こっている段階では、コンクリートひずみの直線性、および圧縮鉄筋、引張鉄筋および P C 鋼材それぞれのひずみとその位置でのコンクリートの変化ひずみに対する適合条件によりひずみ分布が求められる。その後荷重を受け、さらに持続的に作用した場合には鉄筋、P C 鋼材、コンクリートのすべてに平面保持が成立するとすれば求められる。荷重によって、ひび割れが生じない場合は、各段階によって換算断面が異なるため、厳密には、各段階の断面の応力、ひずみ分布を重ね合わせるの正しい。しかし、ひび割れ断面では、重ね合わせることが出来ないため、ひび割れがない場合もひび割れ断面と同様にその時点での全応力に基づいた釣合から算定した。ひび割れが生じた後は、コンクリートの圧縮合力は、その圧縮域について、過去の応力履歴を考慮して求めた。断面の応力分布は断面各位置のひずみがわかれば式 (2) から得られる。

(3) 平均曲率

平均曲率は 4.2 で計算されたひび割れ断面 $1/r_2$ と次に示す MC90 の方法によって求めた。

$$1/r_m = 1/r_2 - 1/r_{ts} \quad (5)$$

ただし、 $1/r_{ts} = (1/r_{2r} - 1/r_{1r})\beta_b(M_r/M)$ であり、 β_b は鉄筋の付着と荷重の繰返しあるいは持続の有無によって決まる定数、 M_r はひび割れ発生モーメント、 $1/r_{2r} \cdot 1/r_{1r}$ はひび割れ発生モーメント時におけるひび割れ断面および全断面有効断面の曲率である。

数値計算ではストレスロスの期間では 4 つの、載荷後は 6 つのタイムインターバルを設定した。載荷時はタイムインターバルを 0.1 日に設定し、クリープ、乾燥収縮の影響を排除した。

5. 結果および考察

図-3はストレスロスが生じている間の、プレストレス量がそれぞれ異なる圧縮鉄筋の無い3体のPRC部材の曲率について実測値と計算値を比較して示したものである。この図にみられるように、計算値は実測値をおおむね良く推定しているが、プレストレスが大きくなると曲率の経時変化を小さく評価する傾向がある。

図-4は鉄筋の応力ひずみの経時変化について示したものであるが、計算値は実測値と良く一致し、プレストレス導入直後から7日で、 100×10^{-6} 程度圧縮側に増加しているのがわかる。載荷までの短い期間の範囲の結果からではあるが、有効プレストレスに及ぼす鉄筋の影響も精度良く予測できるものと思われる。

図-5,6はストレスロスが生じた後に載荷されたときのモーメント-曲率関係について代表的な例を示したものである。引張鉄筋比が0.79%、導入時の下縁プレストレス量が 24 kgf/cm^2 と比較的RCに近いD16-0(7.4)の場合に端的にみられるように、MC90は変形を大きく評価する傾向がある。これはMC90では85年版のCEB Manual⁵⁾と異なり、短期載荷時の影響を示すいわゆる β_2 の値を0.8としているためと思われる。

図-7,8は引張鉄筋比が0.79%と0.63%、圧縮鉄筋比が0%と0.79%で導入プレストレス量がそれぞれ約24

kgf/cm^2 の2体の供試体について、コンクリートの平均圧縮ひずみの経時変化の実測値と計算値を示したものである。この場合、温度変化を無視した計算値と異なり、実測値はともに夏場に温度上昇のため減少しているが、引張部コンクリートを無視した計算値で実測値をおおむね予測できると思われる。この理由として、プレストレスが小さく鉄筋ひずみが大きいと、相対的にテンションスティフニングの影響が低下することが考えられる。一方、図-9,10に示すように、プレストレスが大きく鉄筋応力度もおおよそ 750 kgf/cm^2 以下になると、テンションスティフニングの影響がみられる場合もある。

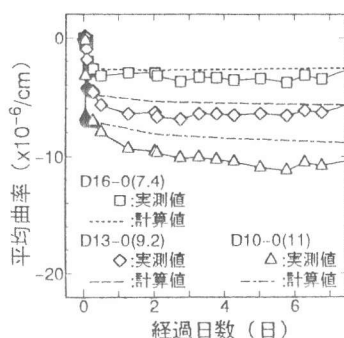


図-3 平均曲率の経時変化

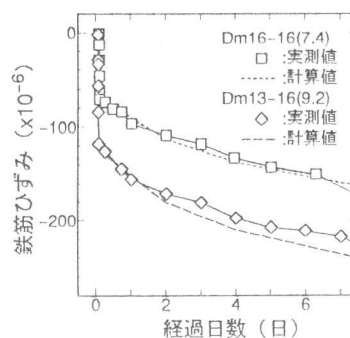


図-4 鉄筋ひずみの経時変化

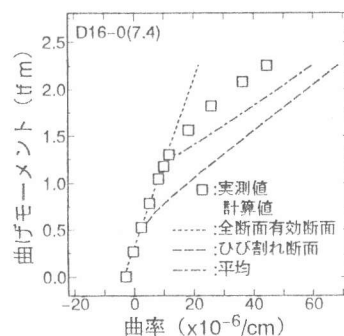


図-5 モーメント-曲率曲線

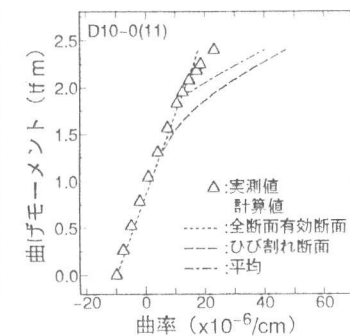


図-6 モーメント-曲率曲線

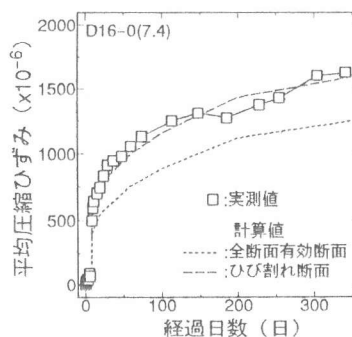


図-7 圧縮ひずみの経時変化

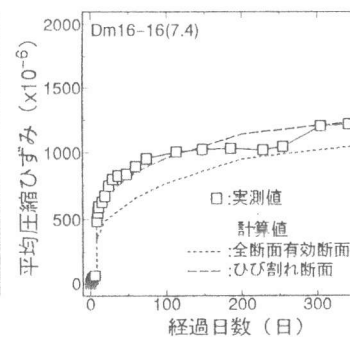


図-8 圧縮ひずみの経時変化

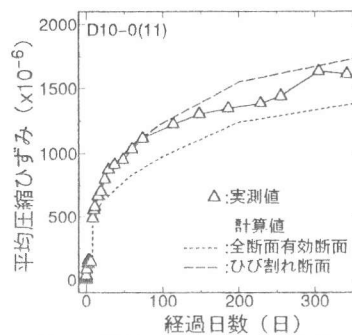


図-9 圧縮ひずみの経時変化

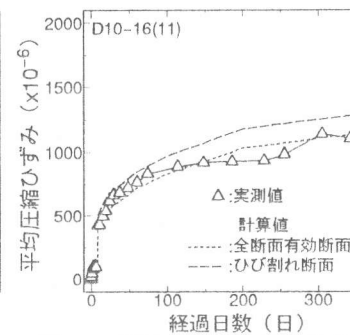


図-10 圧縮ひずみの経時変化

次に、図-11,12は、鉄筋の平均ひずみとひび割れ断面での最大ひずみを示したものである。図に示されているように、載荷後初期の段階と250日あたりの夏場を除けば、Dm16-16(7.4), Dm13-16(9.2)いずれの場合も、計算値および実測値の経時変化は小さい。Dm16-16(7.4)の場合、鉄筋の実測平均ひずみは 800×10^{-6} 、ひび割れ断面のひずみは 1000×10^{-6} と平均ひずみは20%小さい。またDm13-16の場合は450、700と35%小さい。この結果は、従来の認識と一致し、プレストレスが大きく、引張鉄筋ひずみが小さくなるにしたがって、テンションスティフニング効果を考慮することの必要性が高くなることが示されている。図にはMC90の方法によって求めた平均ひずみの計算値も示されているが、Dm16-16(7.4)、Dm13-16(9.2)ともに大きめに予測している。なお、全断面有効断面の引張鉄筋位置のコンクリート応力は、計算によれば引張応力を受けるが、鉄筋ひずみは、圧縮ひずみを示している。これはクリープによってひずみが伸びる以上に乾燥収縮が生じているためである。

図-13～16は引張鉄筋比とプレストレス量が互いに異なる4体の供試体について、平均曲率と経過日数の関係を示したものである。また表-2にはすべての供試体の静的時と経過日数350日における平均曲率の実測値と計算値を示したものである。これらの結果によれば、圧縮部コンクリートおよび引張鉄筋の平均ひずみにおおむね対応して、引張鉄筋の径が13mm以下の供試体のように、引張鉄筋応力度が 1300 kgf/cm^2 以下になれば、テンションスティフニングの効果が認められる。さらに、表-2に示されているように、プレストレス量が大きくなるにつれて、静的時、長期載荷後ともに変形は小さくなる。しかし、持続載荷による増加量はプレストレスの大きさにあまり依存せず、PC部材を除き、RC部材であってもPRC部材であ

っても大きな差はない。一方、圧縮鉄筋がない場合には、計算によれば、プレストレスの増大に対応して変形が増加する。これは、プレストレスによって重心位置が深くなっても曲げ応力がそれに対応して大きくなり、

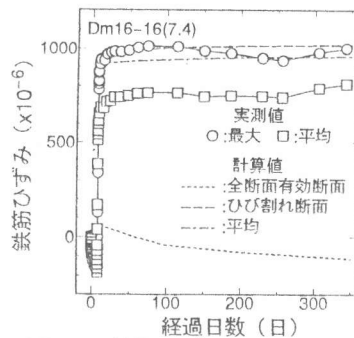


図-11 鉄筋ひずみの経時変化

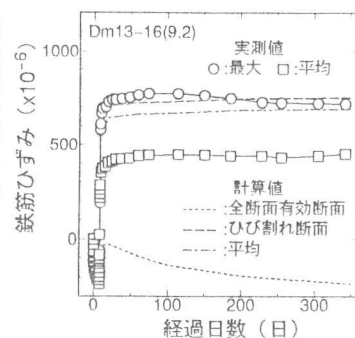


図-12 鉄筋ひずみの経時変化

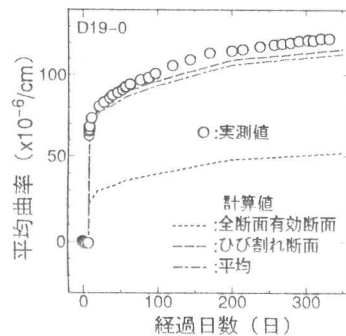


図-13 平均曲率の経時変化

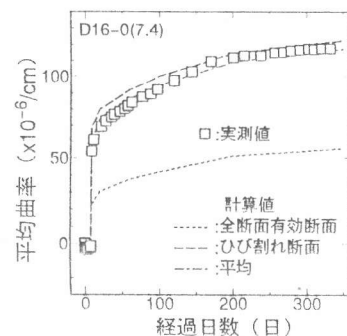


図-14 平均曲率の経時変化

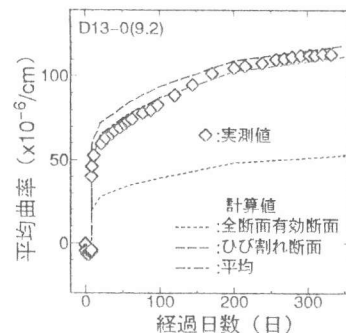


図-15 平均曲率の経時変化

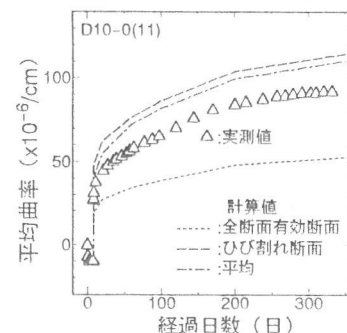


図-16 平均曲率の経時変化

表-2 平均曲率

供試体名	静的載荷時			載荷日数350日			増加量		
	①実測	②計算	①/②	③実測	④計算	③/④	⑤実測	⑥計算	⑤/⑥
D19-0	59.1	64.7	0.913	122.0	112.9	1.081	62.9	48.2	1.305
D19-16	58.2	62.0	0.939	104.4	92.9	1.124	46.2	30.9	1.495
D16-0(7.4)	44.5	59.6	0.747	117.1	117.1	1.000	72.6	57.5	1.263
Dm16-16(7.4)	56.2	67.5	0.833	109.8	108.9	1.008	53.6	41.4	1.295
D13-0(9.2)	39.3	48.4	0.812	113.4	112.0	1.013	74.2	63.6	1.167
Dm13-16(9.2)	34.2	49.8	0.687	84.8	95.5	0.888	50.6	45.7	1.107
D10-0(11)	23.2	54.9	0.423	92.0	110.3	0.834	68.8	55.4	1.242
D10-16(11)	22.4	34.5	0.649	69.0	77.7	0.888	46.6	43.2	1.079
D0-0(13)	22.8	38.3	0.595	111.9	120.9	0.926	89.1	82.6	1.079
D0-16(13)	14.2	---	---	53.2	---	---	39.0	---	---

(単位: $\times 10^{-6}/\text{cm}$)

クリープ変形が進行するためと思われる。

最後にひび割れ幅について、静的載荷時および持続載荷日数 350 日における実測値と土木学会⁶⁾、

CEB Manual および

MC90 の方法で求めた計算値を比較して表-3 に示す。土木学会の値は最大ひび割れ間隔をかなり高い精度で予測しているが、テンションスティフニング効果を無視しているため、静的時のひび割れ幅を 35% 程度大きく評価している。しかし、乾燥収縮の影響を 150×10^{-6} としているので、結果的には長期ひび割れ幅の予測精度は高くなっている。これに対し、CEB Manual は特に長期ひび割れ幅を過大に評価しているが、これは最大と平均のひび割れ間隔の比を 1.7 とし、さらに経時変化の影響を自由乾燥収縮ひずみによって考慮しているためと考えられる。MC90 は、プレストレス量が小さくなれば最大ひび割れ間隔を過小評価し、静的時のひび割れ幅も小さい。そのため、長期では乾燥収縮ひずみの影響が卓越し、ひび割れ幅に対するプレストレスの制御効果もほとんどみられない。

6. 結論

クリープに及ぼす載荷時材齢の影響を詳細に考慮して、ストレス導入から長期に至るまで連続的に PRC 部材断面のクリープ解析を行い、PRC 部材の長期載荷実験結果と比較、検討した。これにより、本研究の範囲内で得られた主な結論は以下の様である。

- 1) 本クリープ解析によって、ストレスロスにともなう曲率、鉄筋ひずみの増加は精度良く予測された。しかし、曲率についてはプレストレスが大きくなれば過小評価する傾向がみられた。
- 2) プレストレス量が相対的に小さく鉄筋応力度が 1300 kgf/cm^2 を越える場合にはひび割れ断面の計算によって圧縮ひずみ、曲率を比較的高い精度で予測できる。しかし、断面下縁のプレストレスが 40 kgf/cm^2 を越え鉄筋応力度が 1300 kgf/cm^2 以下となる場合には、テンションスティフニングの影響を考慮する必要がある。
- 3) 静的時、持続載荷時ともにプレストレス量が大きくなれば変形は小さくなる。しかし、持続載荷による増加量はプレストレス量にはあまり依存しない。この結果、プレストレスの増大に対応して大きくなる CEB MC90 に基づいて得られた計算値と異なった。
- 4) 土木学会、CEB Manual、MC90 の 3 つの方法の中では、土木学会の方法が、最大ひび割れ間隔、最大ひび割れ幅の両者に対して、最も高い予測精度を示した。しかし、土木学会の方法は静的時と長期材齢における最大ひび割れ幅を同等の精度で予測することは出来ない。

参考文献

- 1) 鈴木計夫・大野義照・花房隆: プレストレス鉄筋コンクリートはりの長期曲げひび割れ幅とたわみについて、セメント技術年報、Vol.33、pp.508-512、1979
- 2) 鈴木計夫・大野義照ほか: 持続荷重下におけるプレストレス鉄筋コンクリートはりの曲げ性状、コンクリート工学年次講演会論文集、Vol.7、pp.481-484、1985
- 3) Elbadry, M.M. and Ghali, A.: Serviceability Design of Continuous Prestressed Concrete Structures, PCI JOURNAL, Vol.34, No.1, pp.54-87, Jan./Feb. 1989
- 4) CEB: CEB-FIP MODEL CODE 1990, Final Draft, 1991
- 5) CEB: CEB Manual on Cracking and Deformations, 1985
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 [平成 3 年版] 設計編, 1991

表-3 最大ひび割れ間隔および最大ひび割れ幅

供試体名	最大ひび割れ間隔 (単位: cm)			最大ひび割れ幅 (静的載荷時) (単位: mm)				最大ひび割れ幅 (載荷日数 350 日) (単位: mm)			
	実測値	計算-A	計算-C	実測値	計算-A	計算-B	計算-C	実測値	計算-A	計算-B	計算-C
D19-0	17.3	19.1	11.2	0.14	0.17	0.20	0.07	0.20	0.20	0.32	0.14
D19-16	19.1	19.1	11.6	0.14	0.17	0.20	0.07	0.20	0.20	0.32	0.14
D16-0(7.4)	14.6	19.6	12.3	0.10	0.16	0.14	0.05	0.15	0.18	0.27	0.12
Dm16-16(7.4)	17.2	19.8	14.7	0.14	0.19	0.19	0.08	0.21	0.22	0.31	0.16
D13-0(9.2)	19.6	20.0	14.3	0.08	0.12	0.08	0.03	0.15	0.15	0.21	0.12
Dm13-16(9.2)	22.6	20.3	17.5	0.08	0.13	0.09	0.05	0.15	0.16	0.22	0.15
D10-0(11)	18.1	20.5	16.7	0.05	0.07	0.04	0.04	0.09	0.10	0.17	0.13
D10-16(11)	21.1	20.5	16.8	0.06	0.06	0.03	0.04	0.08	0.09	0.16	0.12

計算-A: 土木学会, 計算-B: CEB Manual, 計算-C: CEB MC90