

論文

[2046] RC部材の変形、応力の長期挙動

正会員 佐藤良一 (宇都宮大学建設学科)

正会員 氏家 勲 (宇都宮大学建設学科)

正会員 鈴木雅博 (ピーエスコンクリート)

正会員 〇湊 英一 (宇都宮大学大学院)

1. まえがき

限界状態設計法が採用されたこと、最近の材料強度や品質の目覚ましい向上および構造物の多様化にともなって、鉄筋コンクリート(RC)構造物の変形の問題が重視されるようになってきた。欧米では、相当早くから変形の問題が研究され、設計規準も整備されるに至っている。しかし、長期の変形予測については、現象が複雑で、経験的な手法を基本とする設計式の予測精度にかなりのばらつきのあることが指摘されている[1]。

このような観点から、著者らは、有効弾性係数法(以下、EM法)に基づく持続荷重を受けるRC曲げ部材の変形およびひびわれ幅などの予測方法を提示した[2][3]。このEM法に基づく方法は、一定の持続荷重を受けるRC曲げ部材の場合には、かなり高い予測精度を有していることが明らかとなったが、応力の履歴が問題となるときには本質的に取り扱えない問題点を有している。この問題点を解決するために、重ね合わせの原理を基本としてコンクリートの応力履歴を考慮し得るRC曲げ部材の変形の予測方法(以下、SM法)を提案した[4]。しかし、それは予測理論の定式過程に力点を置いたものであって、その妥当性も予測値との比較に用いた供試体数や載荷日数の点で極めて限定された範囲で確認されたものであった。

そこで本研究は、荷重の履歴をパラメーターとして持続荷重を作用させる曲げ実験を実施し、その実測値との比較から、上記の二つの予測方法の適用性、長期変形特性に及ぼす荷重履歴の影響、およびコンクリートの応力について検討することを目的とする。

2. 解析方法の概要[4]

持続荷重を受けるRC曲げ部材の変形予測理論の定式化にあたっては、ひびわれおよびひびわれ間の任意断面において、以下の仮定が成立するものとしている。

- 1) 乾燥収縮は断面内で一様に生じる。
- 2) ひびわれ断面のコンクリートは引張応力を負担しない。
- 3) 圧縮応力域のコンクリートひずみと鉄筋ひずみとの間には平面保持の仮定が成立する。
- 4) 引張応力域のコンクリートひずみは応力に関する中立軸からの距離に比例する。
- 5) 全てのひびわれ幅およびひびわれ間隔は同一である。

重ね合わせの原理を適用すれば、時間ステップ i 、下縁からの距離 z におけるコンクリートの全ひずみ $\varepsilon_1(z)$ は、静的荷重により生じる弾性ひずみ $\varepsilon_1(z)$ 、応力変化により生じる弾性ひずみ $\varepsilon_{e,1}(z)$ 、クリープにより生じるひずみ $\varepsilon_{cr,1}(z)$ 、および温度変化ひずみ $\varepsilon_{c,\Delta T,1}$ と乾燥収縮ひずみ $\varepsilon_{sh,1}$ からなる自由変形ひずみ $\varepsilon_{fr,1}$ の和として、次のように示される。

$$\varepsilon_1(z) = \varepsilon_1(z) + \varepsilon_{e,1}(z) + \varepsilon_{cr,1}(z) + \varepsilon_{fr,1} \quad (1)$$

ここで、重ね合せ法により弾性ひずみおよびクリープひずみを表示すれば、

$$\varepsilon_{e,i}(z) = \sum_{j=2}^i \frac{\sigma_j(z) - \sigma_{j-1}(z)}{\bar{E}_{c,j-1}} \quad \varepsilon_{cr,i}(z) = \sum_{j=2}^i \frac{1}{2} \{ \sigma_j(z) + \sigma_{j-1}(z) \} \frac{\phi_j - \phi_{j-1}}{\bar{E}_{c,j-1}}$$

であり、 $\bar{E}_{c,j-1}$ は j と $j-1$ 間のコンクリートの平均弾性係数、 ϕ_j は j におけるクリープ係数である。これら両式により時々刻々変化する弾性係数および応力の影響を考慮できることになる。

これに対し、EM法の場合は、クリープの影響を弾性係数を低減して取り入れるため、考慮している時点の応力が載荷後から継続して生じていると考えることになる。

ひびわれ間中央断面を原点とし、座標 x の任意の断面において、軸方向力および曲げモーメントに関し、釣り合い条件式が成り立つ。

コンクリートの合力およびモーメントは式(1)から得られる i 時点の応力 $\sigma_i(z)$ を積分することにより求められる。断面のひずみ分布は引張鉄筋ひずみ $\varepsilon_{s,i}$ 、引張鉄筋位置のコンクリートひずみ $\varepsilon_{t,i}$ および中立軸の位置 y_i が求まれば決まるが、式が2つであるため決定することができない。しかし、 $\varepsilon_{s,i}$ および $\varepsilon_{t,i}$ は y_i の関数として表示することは可能である。従って、任意断面での鉄筋とコンクリートとの間のすべり量を δx とすれば、その勾配 $d\delta x/dx$ が y_i の関数として次のように求められる。

$$d\delta x/dx = \varepsilon_{s,i} - \varepsilon_{t,i} = f(y_i) \quad (2)$$

一方、釣り合い条件は $x+dx$ においても成り立つことから、鉄筋ひずみの勾配と鉄筋位置のコンクリートひずみの勾配の関係が得られる。さらに、すべり量とひずみ、鉄筋ひずみと付着応力の関係を用いれば最終的に基礎方程式として(3)式が得られる。ここで、 U_s 、 A_s 、 E_s はそれぞれ引張鉄筋の全周長、全断面積、弾性係数である。付着応力 τx はすべり量と位置の関数(表-1参照)であり、 δx と y_i が未知変数であるので、(2)式と連立すれば、次の境界条件の下で数値解析できる。

$$\frac{d^2 \delta x}{dx^2} = \frac{U_s}{A_s E_s} \{1 + G(y_i)\} \tau x + Q(y_i) \quad (3)$$

なお、 $G(y_i)$ 、 $Q(y_i)$ は y_i の関数であると共に履歴応力の影響も含むものである。それ故、EM法の場合は $Q(y_i)$ はゼロとなる。

境界条件はひびわれ間中央断面($x=0$)およびひびわれ断面($x=a$)において次のように定められる。

$$x=0 : \delta x=0 \quad x=a : d\delta x/dx = \varepsilon_{s,i} - \varepsilon_n(h-y_i)$$

ただし、 $\varepsilon_n(h-y_i)$ はひびわれ断面の中立軸位置のひずみである。

3. 実験概要

3.1 使用材料

本実験では普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材は最大寸法13mm、比重2.62、F.M.6.29、細骨材は比重2.60、F.M.2.95であり、共に鬼怒川産である。混和剤にはリグニンスルホン酸塩系のAE減水剤をセメント重量の0.3%用いた。鉄筋にはD19SD30を用い、弾性係数は $204 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ である。

3.2 供試体の作製

供試体の作製は2回に分けて実

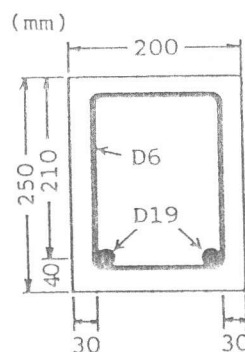


図-1 断面諸元

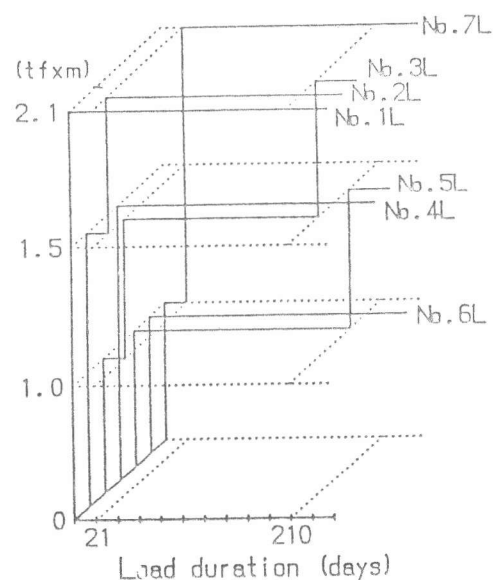


図-2 載荷経路

施し、RC部材合計7体、併せてクリープおよび乾燥収縮の計測用供試体を合計4体ずつ作製した。用いたコンクリートは水セメント比60%、単位セメント量290kg/m³である。RC曲

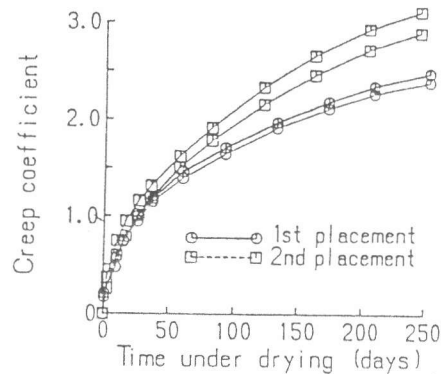


図-3 クリープ係数の経時変化

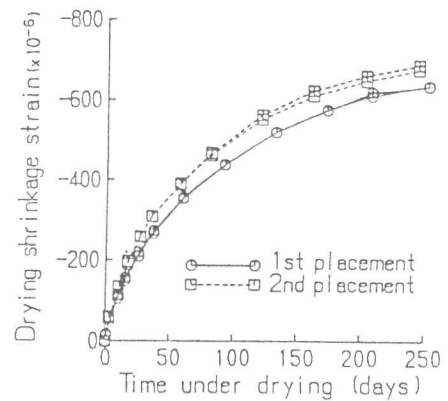


図-4 乾燥収縮ひずみの経時変化

げ部材の形状・寸法は20×25×240cmの矩形断面ばりで、その断面諸元を図-1に示す。また、クリープおよび乾燥収縮用供試体は、RC部材と同じ断面である。これらの供試体は、設定荷重を与えると同時に乾燥を開始した。

3.3 载荷方法および計測方法

载荷はスパン210cm、せん断スパン長65cmの2点载荷とした。純曲げ区間80cmを試験区間としてたわみ、コンクリートの圧縮ひずみ、鉄筋ひずみを計測した。平均曲率は試験区間の中央点で計測されたたわみ量から求めた。コンクリートの圧縮ひずみは圧縮縁から1cmの位置で標点距離10cmのコンタクトゲージで計測した。また、鉄筋ひずみは溝を切削した鉄筋に2cmピッチで試験区間中央部40cmにわたってひずみゲージを貼付して計測した。载荷した曲げモーメントは鉄筋応力度で1000kgf/cm²、1500kgf/cm²および2000kgf/cm²の3種類となるようにし、その経時変化を供試体ごとに示せば図-2のとおりである。また、コンクリートの乾燥収縮およびクリープひずみは埋込型ひずみ計を用いて計測した。クリープ用供試体にはコンクリート応力で約80kgf/cm²を与えた。

表-1 解析に用いた付着特性

項 目	計算に用いた定数および式
付着応力-すべり曲線	$\tau_x = \tau_{\max}(x) e^{\frac{\ln\{(e-1)\delta x / \delta_{\max}(t_i) + 1\}}{(e-1)\delta x / \delta_{\max}(t_i) + 1}}$
付着強度	$\tau_{\max} = 140 \text{ kgf/cm}^2$ (ひびわれ近傍は除く)
付着強度時のすべり量	$\delta_{\max}(t_1) = 0.24 \text{ mm}$ (静的時)
ひびわれ近傍の付着強度の低下	$\tau_{\max}(x) = \frac{a-x}{3.5Ds} \tau_{\max} \quad (a-3.5Ds \leq x \leq a)$ a: ひびわれ間隔/2 Ds: 鉄筋径
付着クリープ	$\delta_{\max}(t_i) = (1.0 + 0.32t_i) \delta_{\max}(t_1) \quad (0 \leq t_i \leq 1)$ $\left\{ 1.32 + \frac{1.32(t_i-1)}{1.64(t_i-1)+134} \right\} \delta_{\max}(t_1) \quad (1 < t_i)$

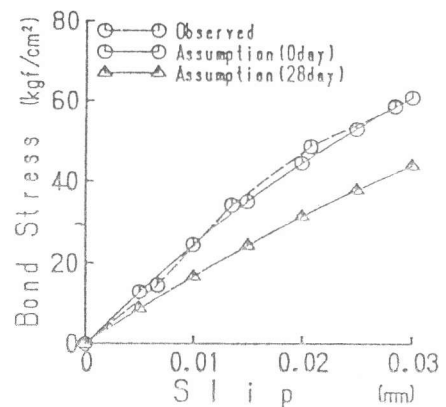


図-5 付着応力-すべり曲線

4. 材料の性質

1回目のコンクリートの圧縮強度、引張強度および弾性係数は標準養生材令28日で332, 29.4, $2.9.0 \times 10^4$ であり、载荷時で349, 30.6, 28.9×10^4 (kgf/cm²)である。2回目の場合は、378, 31.9, 32.0×10^4 、390, 29.6, 31.3×10^4 (kgf/cm²)である。解析では弾性係数は一定とし、载荷時の値を用いた。

図-3、図-4は実験により得られたクリープ係数および乾燥収縮ひずみであり、解析ではこれらの実測値を用いた。

解析に用いた付着特性は表-1に示すとおりであり[4]、付着応力-すべり量曲線、ひびわれ付近の付着強度の低下、付着クリープを取り入れている。実測の付着応力-すべり量曲線を仮定値と比較して示せば図-5のとおりである。

5. 実験結果および考察

図-6は、No.1Lの供試体の断面内のひずみ分布の経時変化の解析結果の一例を示したものである。図に示されているように、鉄筋比が1.1%、鉄筋応力度が 2000kgf/cm^2 といずれも高く、それによって平均ひびわれ間隔も 12.3cm とそれほど広くないため、その程度は小さいが、ひびわれ断面からひびわれ間の中央断面に向かって中立軸が低下することがわかる。また、乾燥収縮とクリープの影響によって圧縮部コンクリートのひずみが著しく増加することなども認められる。任意断面のこのようなひずみの傾向はこれまで定性的な予測に限られ、定量評価は極めて困難とされていたが、2.の仮定の下で、重ね合わせの原理と付着特性を取り入れた微分方程式を解くことによって可能となった。

図-7は平均曲率の経時変化に及ぼす一定の持続荷重の大きさの影響について実測値と解析値を比較して示したものである。実測平均曲率は載荷直後に急増し、その後クリープと乾燥収縮の影響によって増加するが、およそ250日における静的時に対する増加量はNo.1L、No.4L、No.6Lでそれぞれ 85 、 88 、 $66 \times 10^{-6}/\text{cm}$ であり、載荷荷重の大きい方が大きい傾向があるが、必ずしも載荷荷重の大きさに依存していない。一方、解析値はEM法、SM法いずれの場合も載荷荷重の大きさに対応した変形特性を示し、No.4LおよびNo.6Lについては実験値と特に良く一致している。

図-8は、2段階で持続荷重が異なり、1段階目と3段階目で同一の持続荷重が作用した場合の平均曲率の経時変化の実測値と解析値を比較して示したものである。2段階目で大きい荷重が作用したNo.7Lの供試体は、No.3Lの場合より、3段階目で同一の荷重が作用しても、その時の平均曲率は6.8%大きく履歴応力の影響が認められる。この影響はSM法によっても表現されており、3段階目の荷重増加による平均曲率の増加量は実測値を1とした場合、SM法1.26、EM法1.93であった。荷重が作用する前の平均曲率に対する増加率は、実測値の場合0.12、SM法0.16、EM法0.23でEM法の場合実測値の約2倍大きいとその差は10%程度とそれほど大きくないため、このような場合にはEM

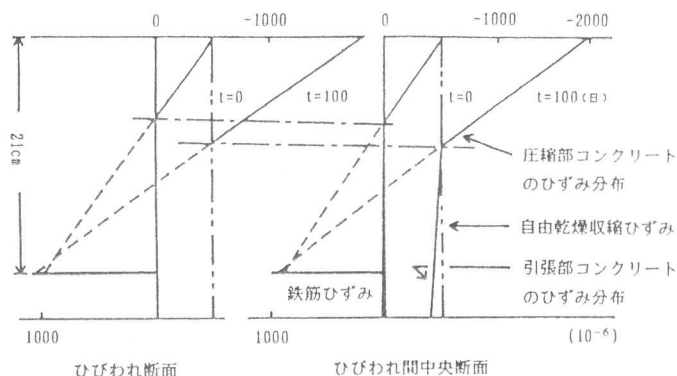


図-6 断面内ひずみ分布の経時変化

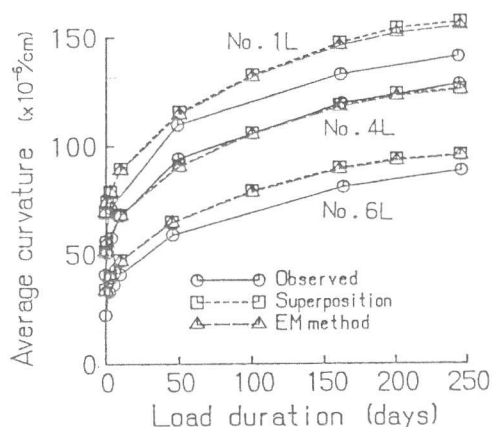


図-7 平均曲率の経時変化

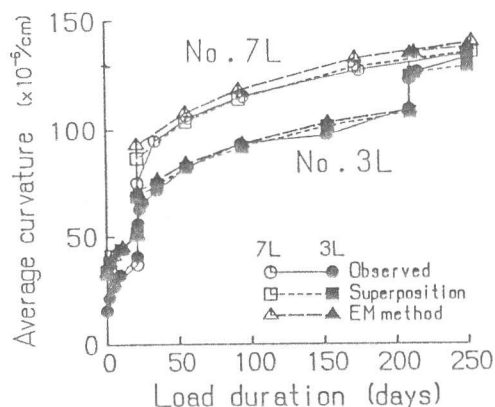


図-8 平均曲率の経時変化

法を用いてもある程度の精度で平均曲率の予測が可能といえる。

図-9は、2段階目の鉄筋応力度が 1500kgf/cm^2 と図-8の場合と比べ載荷荷重が小さい場合の履歴応力の影響を示したものである。2段階目の載荷後のNo.4L、No.5Lの実測平均曲率はそれぞれ 126.6 、 $96.2 \times 10^{-6}/\text{cm}$ でNo.4Lの変形はNo.5Lより30%大きく、明らかに履歴応力の差の影響が認められる。図-8の場合と同様、載荷により生じた曲率の増加量は実測値を1とすればSM法1.71、EM法2.82でありいずれも大きいと特にEM法が大きい。載荷前の曲率に対する実測値、SM法、EM法の増加率はそれぞれ0.12、0.18、0.31と全体の変形量の観点からみれば、SM法の場合比較の実験値に近いが、EM法の場合は実測値より全変形量のおよそ20%大きく評価するといえよう。

図-10は、試験区間内で平均した圧縮ひずみに及ぼす持続荷重の大きさの影響について解析値と実測値を比較して示したものである。静的載荷時に対する約250日のひずみの増加量はNo.1L、No.4L、No.6Lで 1530 、 1580 、 1320×10^{-6} と図-7の平均曲率と同様の傾向を示した。また、いずれの場合も乾燥収縮が加算され、極めて大きなひずみが生じている。これらのひずみの予測については、SM法とEM法の差は認められない。次に、図-11は図-9に示した部材について圧縮ひずみの経時変化におよぼす応力履歴の影響を示したものである。この図によれば、210日における載荷後のNo.5LとNo.4Lのひずみ差はおおよそ 400×10^{-6} あり、平均曲率の場合と同様、履歴応力の影響が無視し得ないことが認められる。SM法によれば、全ひずみの観点からみれば、定量的にも比較的精度よく実測値を予測しているといえるが、EM法の場合は過大評価する。これはこの時点での高い応力が1回目の載荷から生じているとする考え方による。

所定の持続荷重を200日程度受けた後持続荷重が増大した時には、上述したように、EM法では平均曲率やコンクリートの圧縮ひずみを過大評価する傾向にあることが明らかとなったが、コンクリート応力の経時変化について、ひびわれ断面の圧縮縁応力を例にとりSM法とEM法により求めた値を比較して示したのが図-12、13である。図-12のNo.4Lの場合210日で荷重を増大させる直前では、EM法により求めた応力はSM法より10%程度大きい。一方、No.5Lの場合はEMの方がSM法より6%程度大きく、両者の差は生じている応力に依存するといえる。No.5Lのように200日を過ぎて持続荷重の増大が起これば、常時同一の持続荷重が作用していたNo.4Lの場合に比べ、SM法では、 16kgf/cm^2 、即ち20%程度の大きな応力が生じることになるが、

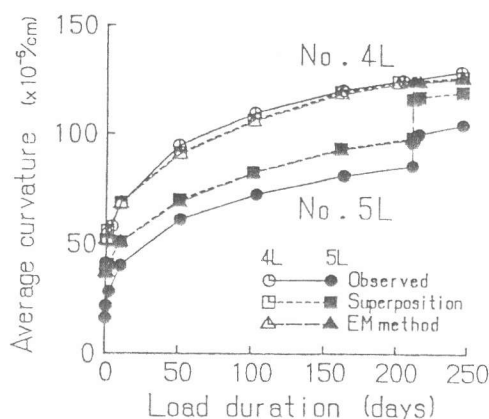


図-9 平均曲率の経時変化

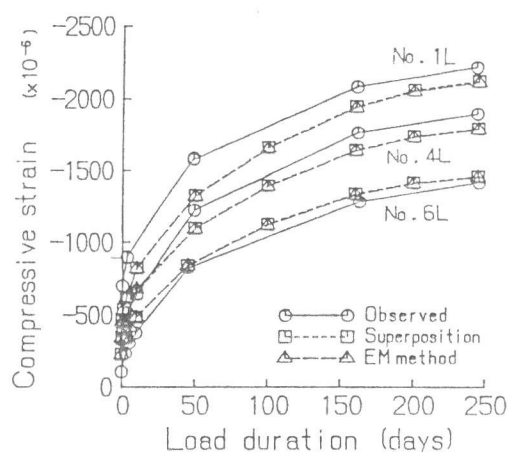


図-10 コンクリート圧縮ひずみの経時変化

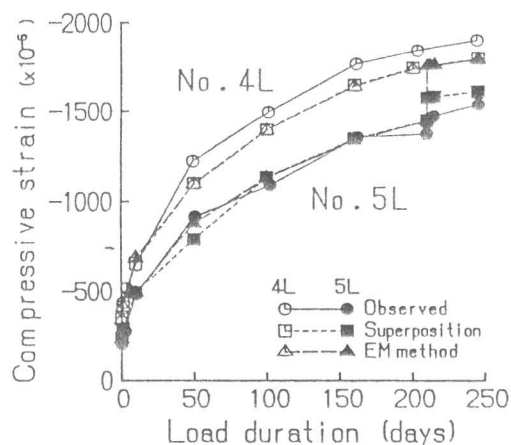


図-11 コンクリート圧縮ひずみの経時変化

EM法によつてはこの特性を表すことはできない。EM法とSM法のこのような相違は図-13のNo.2LとNo.3Lの関係についてもみられるが、持続荷重の変動が2度あり、かつ作用荷重が大きいこの場合には、EM法とSM法による値の差は小さくなる傾向がある。これらの結果は、コンクリートの遅延弾性回復ひずみを無視した計算値であり、実験値との比較によって確認されたものではないが、明らかにEM法による場合よりは実際の現象に近いものと考えられる。

6. まとめ

荷重の履歴を影響因子とする長期の持続実験を実施し、長期変形特性におよぼす荷重履歴の影響、重ね合わせの原理によって取り入れたコンクリートの応力履歴と有効弾性係数法に基づく変形解析法の適用性、およびそれらの解析結果によるコンクリートの応力などについて検討した結果、本研究の範囲内で以下のような結論が得られた。

1) 鉄筋応力度で 1500kgf/cm^2 に相当する一定の持続荷重を受けた場合の平均曲率は、 1000kgf/cm に相当する持続荷重を受けた後210日で同一の持続荷重を受けた場合のそれよりも30%大きく、無視し得ない応力履歴の影響が認められた。

2) 一定の持続荷重および変動する持続荷重いずれを受ける場合も、応力履歴を考慮した解析方法は平均曲率やコンクリートのひずみをかなりよい精度で予測できる。これに対し、有効弾性係数法に基づく解析法は、一定の持続荷重を受ける場合には比較的予測精度は高いが、持続荷重が増大する場合には、増大後変形を過大評価する傾向がある。

3) 一定の持続荷重の下では、応力履歴を考慮した方法と有効弾性係数法に基づく方法によるコンクリート応力の差は最大で10%あった。荷重変動がある場合はその差はさらに高く20%であった。しかし、実測による検証は今後の問題として残った。

なお、本解析法は2.の仮定のもとで、付着特性に及ぼす応力履歴の影響を取り込めば複雑な応力履歴を受ける場合にも適用できると考えられるので、今後はこの点について検討したい。

〔謝辞〕本研究は文部省の科学研究費（一般研究(C)、課題番号01550372）の援助のもとで実施したものであり、厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Belnard Espion et al. : Long-Term Deflections of Reinforced Concrete Beams : Reconsideration of Their Variability, ACI structural journal, pp.232-236, March-April 1990
- 2) 佐藤良一他: 持続荷重を受けるRC曲げ部材の変形・ひびわれ, JCI年講, Vo.9, pp.217-222, 1987
- 3) Sato Ryoichi et al. : A Numerical Analysis of Long-Term Deformations of Reinforced Concrete Members, Proc. of EASEC-2, pp.1085-1090, 1989
- 4) 佐藤良一他: 応力履歴を考慮したRC曲げ部材の変形解析法, JCI年講, Vo.12, pp.239-244, 1990

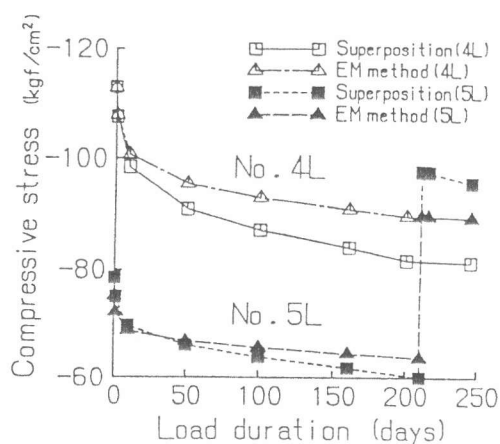


図-12 コンクリート圧縮縁応力度の経時変化

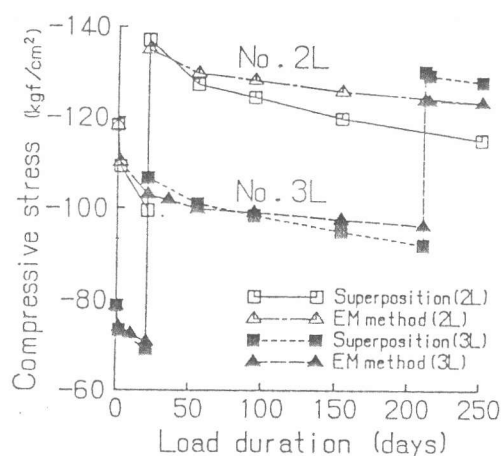


図-13 コンクリート圧縮縁応力度の経時変化