

# 論文 鉄筋コンクリート梁の長期ひび割れ幅

李振宝\*<sup>1</sup>・大野義照\*<sup>2</sup>・尚自端\*<sup>3</sup>・鈴木計夫\*<sup>4</sup>

要旨： ひび割れ間隔、鉄筋応力、部材せい、圧縮鉄筋の有無等を要因に三年間にわたって行った RC 単純梁 10 体の持続載荷実験結果を用い、持続荷重下におけるひび割れ幅の増加に及ぼす付着クリープやコンクリートの乾燥収縮等の影響を検討するとともに、既報に提案した付着クリープ及びコンクリートの乾燥収縮のひび割れ幅への影響を考慮した長期ひび割れ幅算定式の適用性を検討した。

キーワード： ひび割れ幅、乾燥収縮、付着クリープ、持続載荷、RC 部材

## 1. まえがき

持続荷重下における鉄筋コンクリート（以下 RC と略記）梁のひび割れ幅は圧縮側コンクリートのクリープによる鉄筋応力の増大、鉄筋の付着作用の減少（以下付着クリープと略記）による鉄筋ひずみの増加、及びひび割れ間コンクリートの収縮によって増大することが明らかにされている[1] [2] [3]。圧縮側コンクリートのクリープによる鉄筋応力の増大は既往の研究[4]によりほぼ解明されているが、付着クリープおよびコンクリートの乾燥収縮のひび割れへの影響は定量的に把握されるまでには至っていない。本論では 3 年間にわたって、ひび割れ間隔、初載荷時鉄筋応力、部材せい、圧縮鉄筋の有無等を要因に行った RC 単純梁 10 体の持続載荷実験結果を用い、持続荷重下におけるひび割れ幅の増加に及ぼす付着クリープやコンクリートの乾燥収縮等の影響を検討するとともに、既報[5]に提案した付着クリープ及びコンクリートの乾燥収縮のひび割れ幅への影響を考慮した長期ひび割れ幅算定式の適用性を検討した。

## 2. 実験概要

試験体の種類を表 1 に示す。試験体の形状の一例を持続載荷装置と合わせて図 1 に示す。実験要因は予め設けたスリットによって制御したひび割れ間隔、初載荷時鉄筋応力、部材せい及び圧縮鉄筋の有無とし、鉄筋のかぶり厚さは 5cm とした。実験は恒温恒湿室および地下室の 2 カ所で行った。

コンクリートは早強ポルトランドセメント、山砂及び砕石を使用したレディミクスコンクリートを用いた(W/C=47%, 単位水量 W=194kg/m<sup>3</sup>)。表 2 に持続載荷開始時の力学的性質を示す。鉄筋は D19 のふし異形鉄筋 SD345 を用いた。

表 1 試験体の種類

実験体名	断面 b×D (cm)	初載荷時 鉄筋応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ひび割れ間 隔(スリット 間隔)(cm)	圧縮 筋の 有無	実験 場所	
No.1	12×24	2000	22	無	恒 温 恒 湿 室	
No.2			12			
No.3		1000	22	有		
No.4			0			
No.5		12×42	2000	22/12*	無	地 下 室
No.6						
No.7			1000	22/12*	有	
No.8			2000			
No.9			0			
No.10			0			

\* 予めスリットを等曲げ区間において 12cm 又は 22cm 間隔に設け、ひび割れとした。記号 22/12 は中央右半分は 22cm、左半分は 12cm 間隔にスリットを設けたことを表している。

\*1 (株) 耐震企画設計 [大末建設 (株) より出向] 工博 (正会員)

\*2 大阪大学教授 工学部建築工学科、工博 (正会員)

\*3 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻前期課程

\*4 大阪大学教授 工学部建築工学科、工博 (正会員)

試験体は荷重2日前まで湿布養生し、コンクリート材令18~19日に荷重した。持続荷重方法は前掲の図1に示す。また、コンクリートの乾燥収縮は梁断面と同じ断面の角柱試験体で測定し、クリープ試験体は梁幅と同じ12×12cm断面の角柱試験体を用いて行った(持続圧縮応力42kgf/cm<sup>2</sup>)。図2、図3にそれぞれ乾燥収縮ひずみ $S_h(t)$ 及びクリープ係数の経時変化を示す。図中の曲線は最小2乗法によって求めた近似曲線である。なお、詳細は文献[5]に参照されたい。

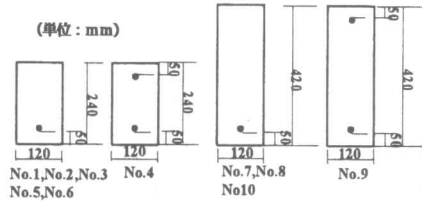
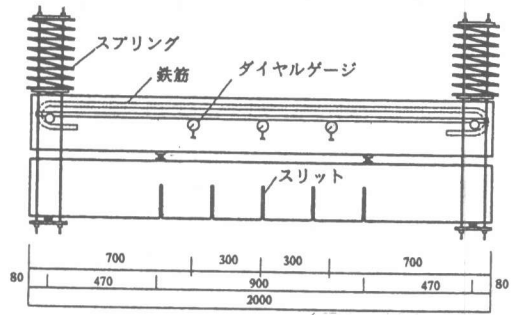


図-1 試験体断面寸法/配筋及び持続荷重方法

表2 コンクリートの力学的性質

材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	割裂強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
18	336	24.7	2.37×10 <sup>5</sup>

### 3. 長期ひび割れ幅計算法

既報[5]では、付着解析に基づき付着クリープやコンクリートの乾燥収縮等を考慮した長期ひび割れ幅算定式を提案した。ここにその概要を提示する。

$$W_{av} = q'(t)L_{av}(\varepsilon_{smax} + S_h(t)) \quad (1)$$

$$q'(t) = a_1 a_2 q(t) \quad (2)$$

ここに、 $W_{av}$ :平均ひび割れ幅、 $q'(t)$ :付着特性に関する係数、ただし、 $a_1 a_2 \geq 1$

$$q(t) = \frac{e^{\alpha(t)L} - e^{-\alpha(t)L}}{\alpha(t)L(e^{\alpha(t)L} + e^{-\alpha(t)L})} \quad (3)$$

$$\alpha(t) = \sqrt{\frac{1+n'p}{E_s A_s} UK_t} \quad (4)$$

$$n' = \frac{E_s}{E_c}, \quad E'_c = \frac{E_c}{1+\phi_t}, \quad p = \frac{A_s}{A_c}$$

$$K_t = \left[ \frac{0.25 + 0.5t^{0.2}}{t^{0.2}} \right] 10000 \text{ (kgf/cm}^3\text{)}$$

$$a_1 = \begin{cases} 1 & (\sigma_{smax} \leq 1000 \text{ kgf/cm}^2) \\ 1 + (\sigma_{smax} - 1000) \times 0.15 / 2000 & (\sigma_{smax} \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2) \end{cases} \quad (5)$$

$$a_2 = \begin{cases} 1 & (\sigma_{smax} \leq 1000 \text{ kgf/cm}^2) \\ 1 + (l-20)(\sigma_{smax} - 1000) \times 0.15 / 20000 & (\sigma_{smax} \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2) \end{cases} \quad (6)$$

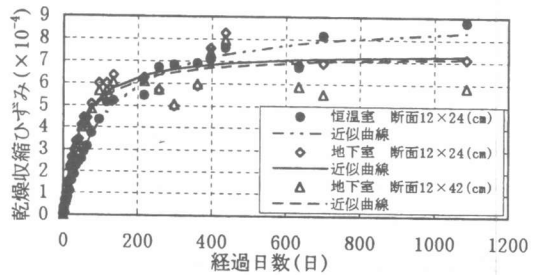


図-2 乾燥収縮ひずみの経時変化

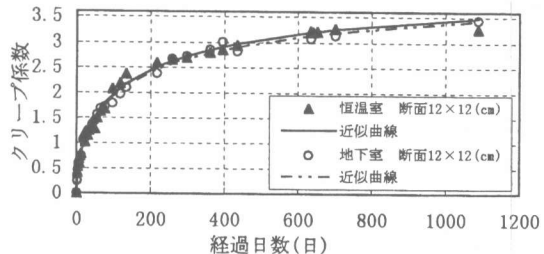


図-3 クリープ係数の経時変化

$E_s, A_s, U$  : 鉄筋のヤング係数、断面面積、周長。 $E_c, A_c, \phi_t$  : コンクリートのヤング係数、有効引張断面面積、クリープ係数。 $L_{av}$  : 平均ひび割れ間隔、 $L=L_{av}/2$ 。 $\epsilon_{smax}(t)$  : 持続荷重中  $t$  時刻におけるひび割れ断面の鉄筋ひずみ。 $S_h(t)$  : コンクリートの自由乾燥収縮ひずみ。

以下のひび割れ幅の計算値は本計算法による計算値である。

#### 4. 実験結果及び考察

##### 4. 1 鉄筋ひずみの経時変化

図4に試験体 No.1 及び No.3 のひび割れ位置における鉄筋ひずみ( $\epsilon_{smax}$ ) 及びひび割れ間での平均鉄筋ひずみ( $\epsilon_{sav}$ ) の経時変化を示す。記号は実測値で、曲線は等価ヤング係数法による断面解析により求めた  $\epsilon_{smax}$  の計算値である。同図において No.1 の  $\epsilon_{sav}$  は付着クリープによって1日目に増大しているが、その後の変化は小さく、No.1 及び No.3 における  $\epsilon_{smax}$  と  $\epsilon_{sav}$  の差は時間経過後もほぼ一定で、コンクリートの付着作用がかなり残存していることがわかる。

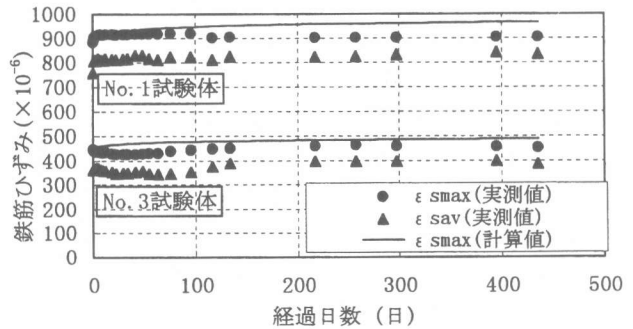


図-4 鉄筋ひずみの経時変化

##### 4. 2 ひび割れ間コンクリートの収縮

鉄筋位置コンクリート表面において測定した、ひび割れ間コンクリートの持続荷重開始後の収縮ひずみ  $\epsilon_{sh}$  の自由乾燥収縮ひずみ  $S_h(t)$  に対する割合  $\beta$  を図5、図6に示す。 $\epsilon_{sh}$  には付着クリープによってコンクリートの引張応力が減少したことによる収縮ひずみが僅かながら含まれているので、持続荷重開始後数日間は  $\epsilon_{sh}$  が  $S_h(t)$  より大きくなる場合もあるが、時間経過とともにその影響は弱まり、 $\beta$  はほぼ一定値を保持し、0.8 前後となっている。この  $\beta$  が 1.0 以下であることは鉄筋とコンクリート間の付着によってコンクリートの収縮ひずみが拘束されていることを示している。 $\beta$  を(2)式の  $q'(t)$  で割った値を図7、図8に示す。この値は  $\beta$  と同様な傾向を示しているが、ひび割れ間隔、鉄筋応力などにほとんど関係なく、ほぼ 1.0 に収束している。これは前述の長期ひび割れ幅算定式(1)式における  $q'(t) \cdot S_h(t)$  を用いて、コンク

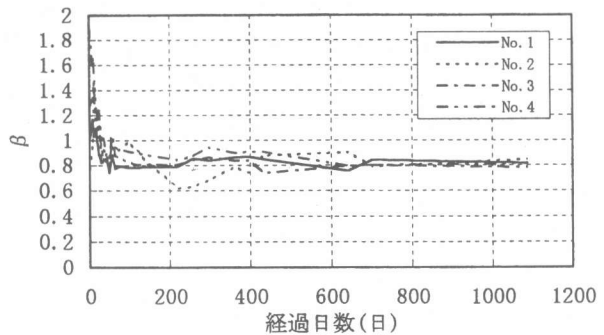


図-5  $\beta$  の経時変化

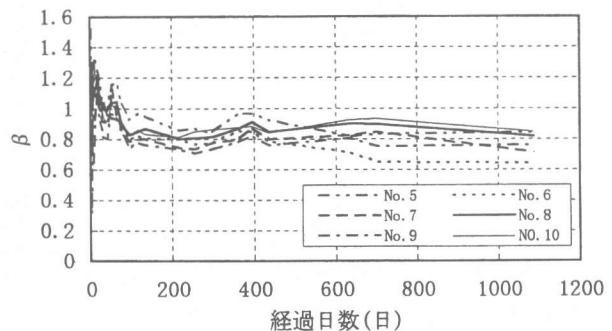


図-6  $\beta$  の経時変化

リートの乾燥収縮のひび割れ幅に対する影響が考慮できることを示している。

#### 4. 3 ひび割れ幅の経時変化

図9に持続荷重下におけるひび割れ幅増加量の経時変化の一例(No.1)を示す。記号○は実測値で、曲線は(1)式による計算値である。2点鎖線はひび割れ位置鉄筋ひずみの増加によるひび割れ幅の増加 $\Delta w_c$ を、破線は $\Delta w_c$ と付着クリープによるひび割れ幅の増加 $\Delta w_b$ との和を、実線はそれとコンクリートの乾燥収縮によるひび割れ幅の増加 $\Delta w_{sh}$ との和を示す。ひび割れ幅は持続荷重開始後1日間に付着クリープによって大きく増大し、その後は乾燥収縮及びクリープにより緩やかに増加している。計算値は実測値とよく一致している。その他の試験体も同じような傾向を示している。

#### 4. 4 長期ひび割れ幅

図10に各試験体の持続荷重開始後1086日目におけるひび割れ幅の増加量を示す。No.1とNo.2の値の差はひび割れ間隔の影響を表している。ひび割れ間隔が大きいほどひび割れ間コンクリートの収縮量が大きいため、ひび割れ幅の増加量も大きい。No.1、No.3とNo.5(22)の値の差は持続鉄筋応力の影響を表している。鉄筋応力が大きいほど圧縮側コンクリートのクリープが大きくなり、ひび割れ断面鉄筋ひずみの増加が大きくなり、また付着クリープも大きいことから、ひび割れ幅の増加が大きくなる。同図中において、ひび割れ間隔、持続鉄筋応力を要因としたその他の試験体も同じ傾向を示している。

圧縮鉄筋の有無及び断面せいの大きさは圧縮側コンクリートのクリープに影響するが、後述のように乾燥収縮によるひび割れ幅増加量が全ひび割れ幅増加量の約9割を占め、その影響が大きいので、圧縮鉄筋の有無及び断面せいの大きさに関係する圧縮側コンクリートのクリープの影

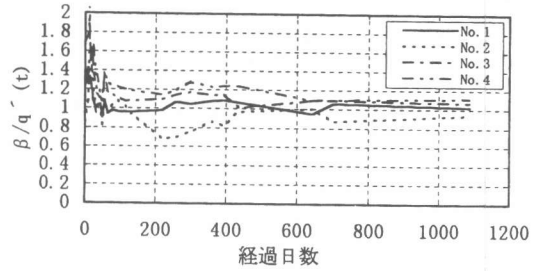


図-7  $\beta/q(t)$ の経時変化

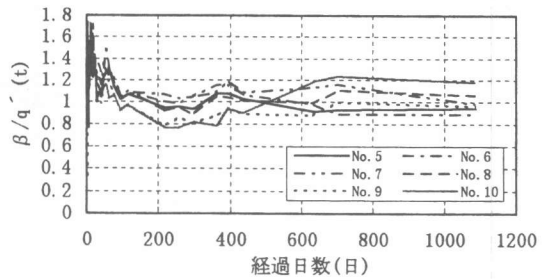


図-8  $\beta/q(t)$ の経時変化

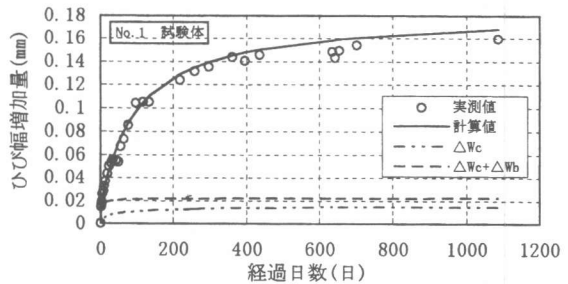


図-9 ひび割れ幅増加量の経時変化

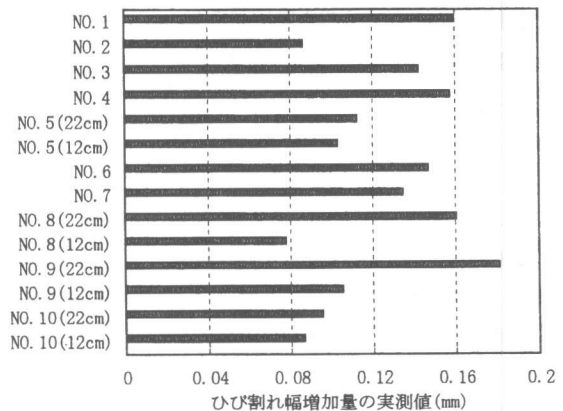


図-10 ひび割れ増加量 (実測値)

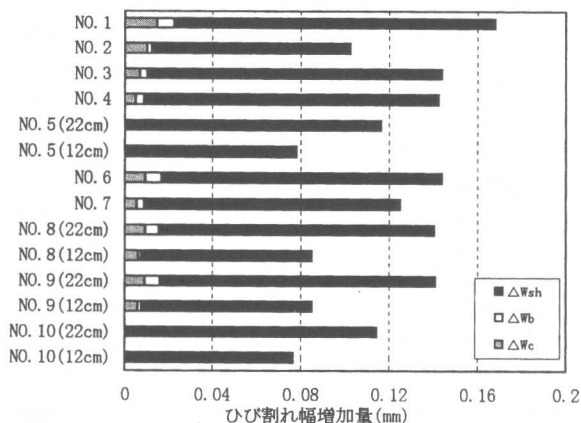
響は明瞭には表れていない。また、恒温恒湿室と地下室のコンクリートの乾燥収縮量がほぼ同じであるため、実験場所のひび割れ幅増加量への影響はほとんどなかった。

図 11 に各試験体の持続載荷後 1086 日目のひび割れ幅増加量の計算値を各要因による増加量  $\Delta w_{sh}$ ,  $\Delta w_b$ ,  $\Delta w_c$  に分けてを示す。全体に持続荷重下におけるひび割れ幅の増加に及ぼす乾燥収縮の影響が大きく、 $\Delta w_{sh}$  は  $\Delta w$  の約 85~95% を占め、その他の  $\Delta w_c$  と  $\Delta w_b$  はそれぞれともに約 3~10% を占める(無載荷の試験体 No.5 と No.10 を除く)。

図 12 及び図 13 にそれぞれ全試験体の持続載荷 1086 日目のひび割れ幅増加量及び初期ひび割れ幅含む長期ひび割れ幅の実測値と(1)~(6)式による計算値の比較を示す。いずれの図においても計算値は実測値の  $\pm 20\%$  以内に納め、計算値は実測値をよく捉えている。

#### 4. 5 たわみの増加量の経時変化

図 14 に試験体 No.1 の持続荷重下における中央 60 cm 区間のたわみの経時変化を示す。記号は実測値で、実線は ACI [6] 式を用いた計算値である。計算値はほぼ実測値を捉えている。図 15 に各試験体の持続載荷後 1086 日目中央 60 cm 区間のたわみの増加量の実測値と計算値を示す。初載荷時鉄筋応力が  $2000 \text{ kgf/cm}^2$  の試験体 (No.1, No.2, No.6, No.8) においては計算値が実測値をほぼ捉えているが、鉄筋応力が  $1000 \text{ kgf/cm}^2$  の試験体 (No.3, No.4) においては計算値は実測値より小さい。このように鉄筋応力が小さい場合、ACI 式ではたわみ増加量を小さめに算出される理由として、ACI 式では瞬時たわみにクリープを考慮した係数を乗じて長期付加たわみを算出しているが、乾燥収縮によるたわみ増加量は、瞬時たわみの大きさとは関係がないこと、があげられる。



$\Delta W_{sh}$  コンクリートの乾燥収縮によるひび割れ幅の増加  
 $\Delta W_b$  付着クリープによるひび割れ幅の増加  
 $\Delta W_c$  ひび割れ位置鉄筋ひずみの増加によるひび割れ幅の増加

図-1 1 ひび割れ幅増加量 (計算値)

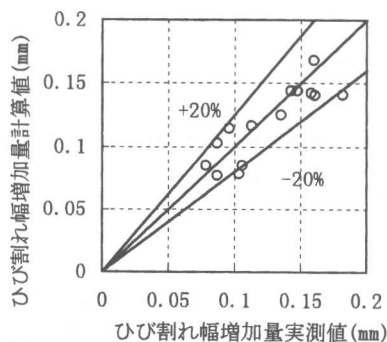


図-1 2 長期ひび割れ幅増加量の比較

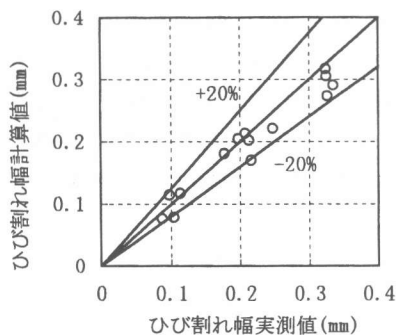


図-1 3 長期ひび割れ幅の比較

## 5. まとめ

以上の持続荷重実験結果をまとめると次のようになる。

1) 持続荷重開始後 1086 日において、乾燥収縮によるひび割れ幅の増加量は全増加量の約 85~95% を占め、その影響が大きい。圧縮側コンクリートのクリープ及び付着クリープによるひび割れ幅の増加量の全増加量に占める割合はそれぞれ約 3~10% である。

2) ひび割れ間隔が大きいほど、持続鉄筋応力が大きいほど、ひび割れ幅の増加量が多い。梁せいと圧縮鉄筋の有無の影響が少なかった。

3) 提案した長期ひび割れ幅計算式による計算値は実測値をよく捉えている。

4) ACI のたわみ計算式では鉄筋応力が小さい場合にはたわみを小さく算出する。

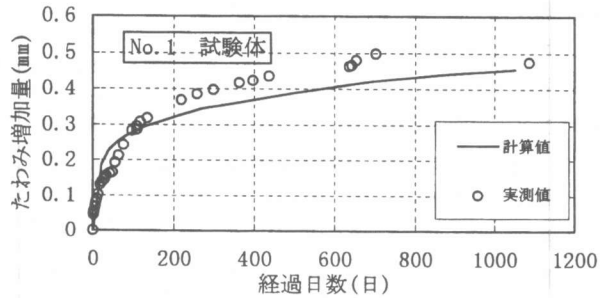


図-14 スパン中央 60cm 区間のたわみ増加量の経時変化

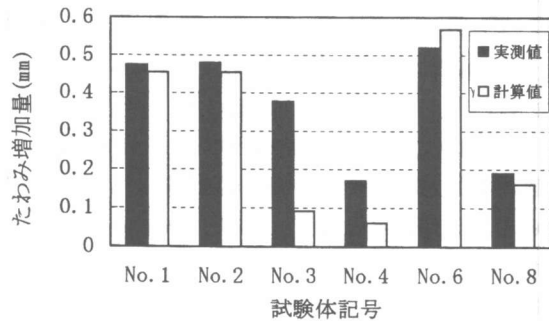


図-15 スパン中央 60cm 区間のたわみの増加量

謝辞：実験の実施及びデータ整理において大阪大学大学院生岩田樹美氏の協力を得たことを記して謝意を表す。

参考文献：

- [1] L.A.Lutz, N.K.Sharma and P.Gergely: Increase in Crack Width in Reinforced Concrete Beams Under Sustained Loading, Journal of ACI, pp.538-546, September, 1967
- [2] 横道英雄, 角田与史雄, 小野薫: 鉄筋コンクリートのひび割れ制御に関する 2, 3 の研究, セメント技術年報 XXIII, pp.557-561, 1968
- [3] J.M.Illston and R.F.Stevens: Long-Term Cracking in Reinforced Concrete Beams, Proc. Instn. Civ. Engrs, Part2, 53, pp.445-459, December, 1972
- [4] たとえば, 岡田清: 鉄筋コンクリート梁のクリープ近似解, 土木学会誌, 36-5, pp.29-32, 1951
- [5] 李振宝, 大野義照, 鈴木計夫: RC はりの長期ひび割れに及ぼす付着クリープと乾燥収縮の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.407-412, 1994
- [6] Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83) (Revised 1986)