

論文

[2036] 鉄筋コンクリート床スラブにおける引張鉄筋の経時的な抜出し算定式に関する実験的検討 正会員 岩原 昭次(熊本工業大学 建築学科)

1. はじめに

従来、引張鉄筋の抜出しは、柱・梁接合部の定着部等に対する大変形あるいはひびわれ時でのより精密な力学的挙動を論じる際に考慮されることが多く、例え、ひびわれが生じていても変形が比較的大きくないような場合主要な影響要因としては評価されていなかったようである。しかしながら、近年の鉄筋コンクリート床スラブ(以後、単に、RC床スラブと略す)で端部にひびわれを生じる場合既往の実験結果や解析資料等の蓄積により、コンクリートのクリープや乾燥収縮は勿論のこと、スラブ端部の引張鉄筋の経時的な抜出しも経時的なたわみ増大の主要因の一つであることが認められてきている。しかしながら、RC床スラブの経時たわみを対象にした引張鉄筋の抜出しに関する具体的な実験資料は少なく、その定量的な評価については余り明確になっていない。

スラブ端部引張鉄筋の抜出しについては、これを力学的なモデルで表すと、片引きあるいは両引き試験体の引き抜き問題として扱うことができる。そこで、先の論文では、付着応力-すべり関係($\tau-s$ 関係)の経時変化(即ち、付着クリープ)に関連するとし、引張鉄筋の経時的な抜出しは、この時間を考慮した $\tau-s$ 関係の基本式に立脚した計算法で評価できることを示した[1]。更に、前報では、より合理的でかつ簡単に評価できる巨視的な bi-linear型の $\tau-s$ 関係を得るための算定式を示すと共に、瞬時での端部引張鉄筋の抜出しを考慮したRC一方向床スラブの力学的問題の解析方法を示した[2]。

本論文は、前報[1]で示した瞬時での鉄筋の抜出し算定方法と、先の論文[2]で示した経時的な抜出しの評価方法とをまとめ、この算定方法の妥当性を実験的に検討したものである。

なお、経時的な抜出しの計算法に有効弾性係数法を用いている。

2. 引張鉄筋の経時的な抜出しの算定方法

① 付着強度 τ_y は次の式(1)[3]あるいは式(2)のうちのいずれか小さい方の値とする。

$$\tau_y = 0.9(0.307b + 0.417)\sqrt{F_c} \quad (1)$$

但し、
$$b = \sqrt{3} \left(\frac{2C_{min}}{D} + 1 \right)$$

$$\tau_y = \frac{\sigma_y A_s}{(0.5g + 10)m} \quad (g \geq 20 \text{ cm}) \quad (2)$$

② 瞬時付着弾性剛性 E_{Bo}

$$E_{Bo} = 92.16 \left(\frac{\tau_y}{0.9} \right) \quad (3)$$

③ 経時的な付着弾性剛性 E_{Bt}

$$E_{Bt} = k_t E_{Bo} \quad (4)$$

但し、

$$k_t = 1 \quad (t = 0) \quad (4.1)$$

$$k_t = \frac{1}{1.2 \{1 + \eta(\phi_t - \phi_1)\}} \quad (t \geq 1)$$

$$\eta = \frac{2}{3(\phi_{\infty} - \phi_1)} \quad (4.2)$$

但し、 t は経過日数を表す。

④ 鉄筋の経時的な拔出し S_w は有効弾性係数法による弾性解析から求めた次式とする。

$$S_w = \frac{\sigma_s}{E_s} (\beta f) + S_0 \quad (5)$$

但し、 S_0 は鉄筋の拔出しが片引き試験体でモデル化できる時式(5.1)、両引き試験体でモデル化できる時式(5.2)となる。

$$S_0 = \frac{1}{\alpha \sinh \alpha g'} \left\{ \frac{(n p + \cosh \alpha g')}{E_s} \sigma_s - \varepsilon_{sh}(1 - \cosh \alpha g') \right\} \quad (5.1)$$

$$S_0 = \frac{\cosh \alpha g' - 1}{\alpha \sinh \alpha g'} \left(\frac{\sigma_s}{E_s} + \varepsilon_{sh} \right) \quad (5.2)$$

式(5)を用いるにあたって、 g' と β は次式である。

$$\begin{aligned} g' &= g, & \beta &= 0 & (t=0) \\ g' &= g - \beta f & & & (t \geq 1) \end{aligned} \quad (5.3)$$

また、式(5.1)及び(5.2)中の α は次式である。

$$\alpha = \sqrt{\frac{(1 + n p) m E_{bt}}{E_s A_s}} \quad (5.4)$$

上式中の記号の意味は次の通り。

F_c : コンクリートの圧縮強度	E_c : コンクリートのヤング係数	E_s : 有効弾性係数 ($E_c / (1 + \phi_t)$)
A_c : コンクリート断面積	C_{min} : 最小被り厚	g : 付着長
g' : (5.3)式の第2式	σ_m : 加力端鉄筋応力	σ_v : 鉄筋の降伏点応力
E_s : 鉄筋のヤング係数	A_s : 鉄筋断面積	m : 鉄筋周長
f : 異形鉄筋の節間隔	D : 鉄筋の直径	p : 鉄筋比 = A_s / A_c
β : 付着応力消失区減長さを決める	ϕ_t : クリープ係数	ϕ_{∞} : 終局時クリープ係数
為の倍率 = $2x(\sigma_s / 2 \text{ tf/cm}^2)$	ϕ_1 : 経過日数 $t=1$ におけるクリープ係数	ε_{sh} : 乾燥収縮歪
n : ヤング係数比 = E_s / E_c		

3. 実験概要

3.1 試験体

実験は瞬時載荷と長期持続載荷試験の2つから成る。これに用いる試験体は片引き試験体と両引き試験体の2種類で、図1に示すように、その断面

寸法は10cmx10cm、長さは片引き試験体で34cm、両引き試験体で40cmであり、中央にD10の異形鉄筋を配している。実験種別による試験体の種類を表1に示す。

3.2 試験体の養生と脱型

試験体は平成元年9月26日に打設し、その後10月18日までの22日間湿潤養生を行った。打設翌日から1日2回(AM10とPM2時)散水して常に湿潤状態を保つようにした。湿潤養生終了後は実験開始(11月1日~18日)までそのまま放置した。尚、AI-1~3, BI-1,2, AL, BL, AS, BS及び

表1. 試験体一覧

	試験体種別	名称	寸法 (cm)	試験体数
瞬時加力実験	片引き試験体	AI-1,2,3	10x10x34	3
	両引き試験体	BI-1,2	10x10x40	2
長期持続加力実験	片引き試験体	AL,AS	10x10x34	1体ずつ
	両引き試験体	BL,BS	10x10x40	1体ずつ
その他	クリープ係数算出	CC	$\phi 15 \times 30$	1
	乾燥収縮歪算出	CS	$\phi 15 \times 30$	1
		DS	10x10x40	1

(注) ASとBSは荷重を加えない、即ち、乾燥収縮による拔出しを求めるための試験体

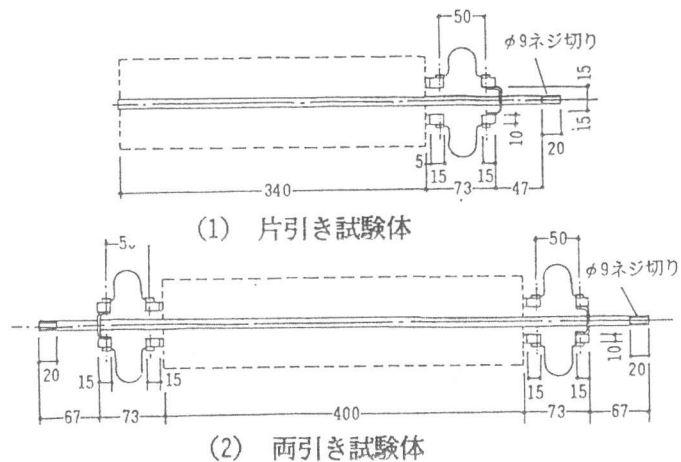


図1 試験体の寸法

DS試験体は材令3日で、CS試験体は材令2日およびCC試験体は材令9日でそれぞれ脱型した。

3.3 試験体の設置方法及び加力方法

図2に長期持続荷重実験用に作成した試験装置を示す。片引き試験体は、図2(1)に示す様に、加力端側と自由端近くのコンクリート面にピン支点を設けた2点支持の引抜き試験ができる様に設置した。

両引き試験体は図2(2)に示すように、鉄筋両端に引張り力が生じるように設置した。長期持続荷重実験では、図中上部に据えてあるスプリングバネをジャッキを用いて加力端鉄筋が所定の応力レベルに成るまで締め付けるようにした。瞬時荷重実験ではスプリングバネをジャッキと取り替え、最終状態に至るまで負荷した。引張鉄筋とカプラーで繋いだ図中央の鋼棒に、瞬時荷重実験に対してはロードセルをセットし、また長期持続加力実験では歪ゲージを貼付けて荷重を検出した。

クリープ係数を測定するためのCC試験体は通常のスプリングバネ式クリープ試験装置によって、 $1/3 F_c$ の応力レベルで一定持続荷重した。乾燥収縮による影響を調べるためのAS、BS、CS及びDSの各試験体は加力をしない。

3.4 測定方法

片引きと両引きの試験体の鉄筋の抜き出しは、図1に示すように加力端側鉄筋とコンクリート面の間にパイ型変位形(検長 $\pm 2\text{mm}$)を貼付し検出した。CC、CS及びDSの各試験体には

試験体中央に埋込み型歪ゲージ(KM-100A, TML製)を埋込み、クリープ歪あるいは乾燥収縮歪を検出した。

3.5 実験場所

通常の室内で実験を行ったので、試験体は温度・湿度の影響を受ける。

3.6 持続荷重期間

片引き及び両引き試験体は材令53日で加力を開始し、経過日数61日(材令115日)で除荷した。

3.7 使用材料及び機械的性質

表2と3にコンクリートの調査と機械的性質を、表4に鉄筋の機械的性質を示す。

4. 瞬時荷重実験

片引き試験体AI-1~3と両引き試験体BI-1, 2の加力端鉄筋応力と鉄筋の抜き出し量(加力端の相対すべり)の関係を図3と図4に示す。3本の片引き試験体の最終時加力端鉄筋応力 σ_s は $\sigma_s = 3697$

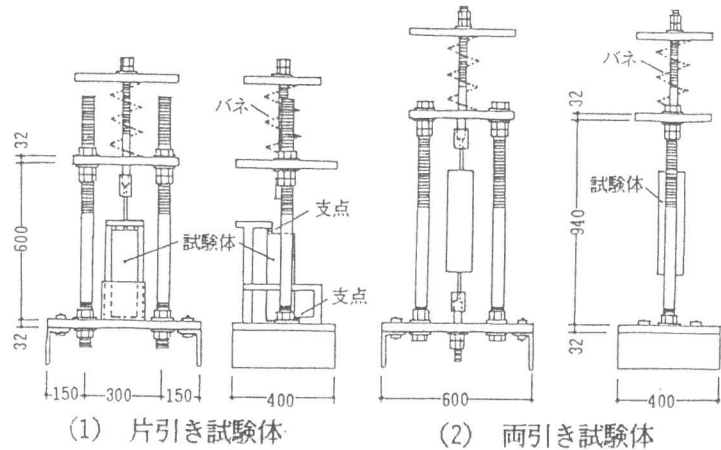


図2 実験装置及び試験体の設置方法

表2. コンクリートの調査

水セメント比	指定スランプ	所要空気量	細骨材率	単位水量
%	cm	%	%	kgf/m ³
59	18	4	49.8	184
セメント	細骨材	粗骨材	混和材	
kgf/m ³				
312	869	1020	0.624	

表3 コンクリートの機械的性質

4週圧縮強度	標準水中養生 圧縮強度	ヤング係 数
kgf/cm ²		
234.6	221.2	2.51×10^5
割裂強度	最大歪	スランプ
kgf/cm ²	%	cm
23.1	0.225	19.7

表4. 鉄筋の機械的性質

種別	公称直径	実断面積	降伏点応力
	cm	cm ²	kgf/cm ²
D-10	1	0.633	3758
品質	最大強度	降伏点歪	ヤング係数
	kgf/cm ²	%	$\times 10^4$ kgf/cm ²
SD30A	5436	0.167	2.143

~3760kgf/cm²、また、2本の両引き試験体の上下端の最終時加力端鉄筋応力 σ_s は約 $\sigma_s=3600$ kgf/cm²強であり、降伏点応力に近い。いずれの試験体とも鉄筋の降伏で最終状態に至った。両試験体とも最終状態近くでは鉄筋の加力端付近に放射状のひびわれが見られた。

鉄筋の加力端の拔出しは加力端の左右に取付けた2つのパイ型変位形による値の平均値から同変位形の標点間(73mm)にある鉄筋の伸びを除いてある。図4中でのU、Dは図2(2)で示しているように、両引き試験体を上下方向に設置しているのので、上側の拔出し量をUで、下側の拔出し量をDで表示してある。図3と図4との比較から、加力端鉄筋応力-拔出しの包絡線は、両引き試験体が略直線状に進展して最終状態に至るに対して、片引き試験体では緩やかな曲線を描く。また最終状態近くでは片引き試験体の拔出し量は両引き試験体に比べて約2倍弱程度大きくなっている。

また、図3と図4共に、§2で示した付着弾性剛性を用いたbi-linear型の付着剛性による弾塑性解析結果も合わせて示す。計算方法は文献[1]によっている。片引き試験体に対しては加力端鉄筋応力 σ_s が約2000kgf/cm²前後まで、両引き試験体に対しては最終状態近くまで、解析結果と実験結果はよく近似している。

5. 長期持続荷重実験結果

5.1 クリープ係数と乾燥収縮歪

図5にクリープ係数を示す。図中で「真のクリープ係数」と表示してあるものは一般に云うクリープ係数のことであり、「見かけのクリープ係数」と表示してあるものはクリープ歪に乾燥収縮歪を付加した場合のクリープ係数である。クリープ係数(真のクリープ係数)は経過日数 $t=50$ 日で約1.50となっている。

図6にはCS試験体($\phi 15 \times 30$ cm)とDS試験体(10x10x40cm)の荷重時を基準にした乾燥収縮歪を示す。乾燥収縮歪は角柱よりも円柱試験体の方が1~2割程度大きい値を示している。

円柱試験体の場合 $t=50$ 日で約 2.15×10^{-4} である。

図5には真のクリープ係数の、また図6にはCS試験体の乾燥収縮歪の回帰式(6)、式(7)による値を示す。

$$\phi_t = \frac{t-1}{18.385+0.456t} + 0.32 \quad (6)$$

$$\epsilon_{sh} = 1.155 \phi_t \times 10^{-4} \quad (7)$$

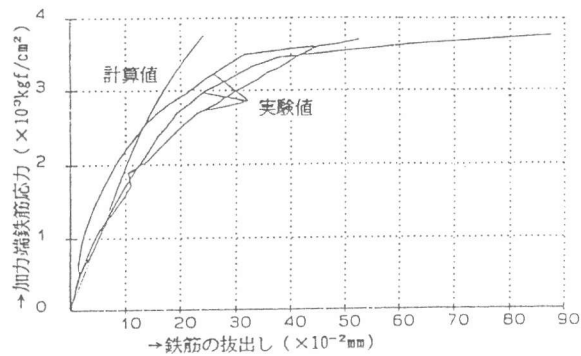


図3 片引き試験体の加力端鉄筋応力と鉄筋の拔出し(瞬時)

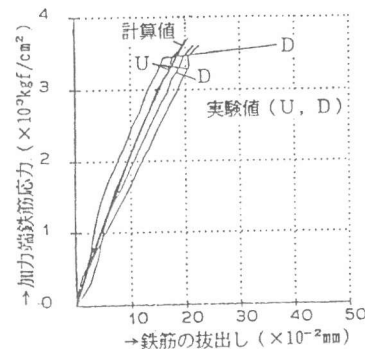


図4 両引き試験体の加力端鉄筋応力と鉄筋の拔出し(瞬時)

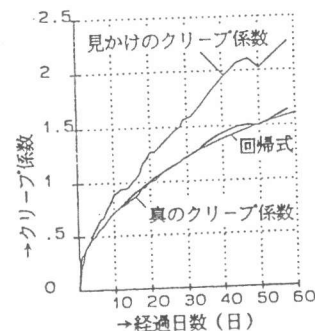


図5 クリープ係数

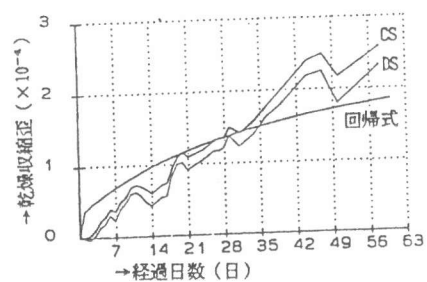


図6 乾燥収縮歪(荷重時基準)

式(7)は ε_{sh} が ϕ_t に比例すると仮定して求めた式である。荷重期間が短いことが原因かもしれないが、式(7)は実験値に余りよく適合していない結果となった。

5.2 片引き試験体(AL)と両引き試験体(BL)

加力端鉄筋応力 σ_s は、AL試験体で $\sigma_s = 2215 \text{ kgf/cm}^2$ まで、BL試験体で $\sigma_s = 2275 \text{ kgf/cm}^2$ まで加力し、以後一定持続荷重とした。

図7と8にAL試験体とBL試験体の鉄筋の抜出しの経時変化に関する実験結果を示す。横軸は5つの区間に分けて表示している。第1の区間が荷重時 ($0 \sim 3 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 、加力端鉄筋応力)、第2の区間が荷重終了直後から10分、第3の区間が10~60分、第4の区間が1時間~24時間、最後の区間が経過日数 $t = 1 \sim 70$ 日である。図9と図10にはAL試験体とBL試験体の乾燥収縮による鉄筋の抜出しの経時変化を示す。図8及び図10中の記号U、Dは図4で述べたように、BL試験体の上側と下側位置を示す。

また、表5に各試験体の主な経過日数での実験値を示す。

荷重直後を基準にすると、AL試験体は経過日数 $t = 1$ 日で約 $2.6 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 、 $t = 50$ 日で約 $7.7 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 、BL試験体は上下位置 (U、D) の平均で $t = 1$ 日で約 $2.5 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 、 $t = 50$ 日で約 $6.8 \times 10^{-2} \text{ mm}$ の抜出しの増加になっている。特に、 $t = 1$ 日での増加量の $t = 50$ 日での増加量に占める割合は、AL試験体で約34%、BL試験体で約37%であり、荷重終了直後から経過日数1日までの抜出し増加量は無視できない程大きいことが示されている。また、 $t = 1 \sim 50$ 日までの増加量はAL試験体に対し約 $5.1 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 、BL試験体に対し平均で約 $4.3 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 、一方、乾燥収縮の影響による抜出しはAS試験体で約 $2.8 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 、BS試験体で約 $2.6 \times 10^{-2} \text{ mm}$ となっている。即ち、 $t = 1 \sim 50$ 日間での抜出し量について、乾燥収縮による影響が占める割合はAL試験体に対し約55%、BL試験体に対し約60%であり、この影響がかなり大きいことが示されている。

表5. 鉄筋の抜出しについて実験結果と弾塑性解析結果との比較 ($\times 10^{-2} \text{ mm}$)

試験体 (σ_s)		経過日数									
		荷重直後	1	3	5	10	20	50	53	61	∞
AL (2215)	実験値	8.186	10.778	11.438	11.342	11.942	12.530	15.842	15.074	15.782	—
	計算値	11.468	14.298	14.566	14.809	15.33	16.108	17.376	17.475	17.675	19.931
BL (2275)	実験値	11.259	13.737	14.417	14.139	14.741	15.681	18.051	17.265	18.249	—
	計算値	10.983	13.308	13.507	13.690	14.079	14.654	15.593	15.653	15.818	17.404
AS	実験値	0	0.132	0.864	0.552	0.912	0.720	2.976	2.172	2.712	—
	計算値	0	0.385	0.510	0.625	0.876	1.260	1.921	—	—	3.283
BS	実験値	0	0.588	1.116	0.786	0.978	0.942	3.180	2.046	2.556	—
	計算値	0	0.402	0.533	0.653	0.917	1.323	2.022	—	—	3.473

(注1) BLとBSについては両端の抜出しの平均値を示す。

(注2) ALとBLの () 内の値は荷重直後を基準とした増加量を示す。

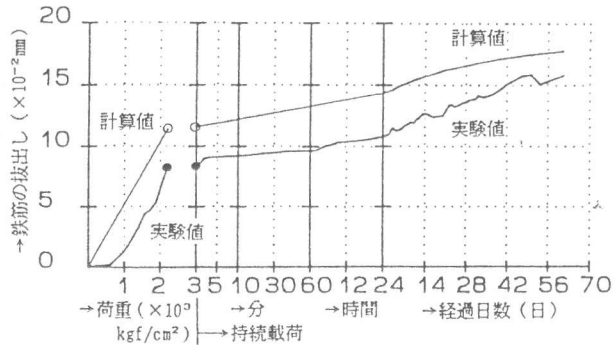


図7 片引き試験体の鉄筋の抜出しの経時変化

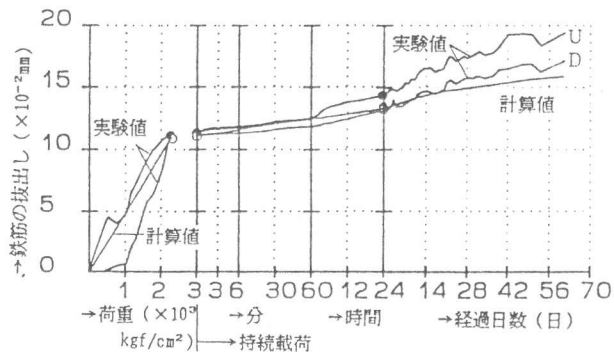


図8 両引き試験体の鉄筋の抜出しの経時変化

以上のことから、引張鉄筋の経時的な抜出しは載荷終了直後から短期間（ここでは経過日数1日）までに急激な増大があることと、経時的には乾燥収縮の影響を強く受けることが分かる。図7～10及び表5には解析結果も合わせて示してある。解析方法は8.2の諸式を用いて、既に述べた文献[1]の弾塑性解析によっている。但し、AL試験体の加力端鉄筋応力 $\sigma_s = 2215 \text{ kgf/cm}^2$ 、BL試験体の $\sigma_s = 2275 \text{ kgf/cm}^2$ に対して解析上共に弾塑性状態になるが、この解析値は式(5)の弾性計算値に適用した場合の解と比較しても殆ど同じなので、ここでは弾塑性解析結果を図に示した。弾塑性解析結果と実験結果とを比較すると、次のような考察ができる。

①AL試験体の解析値は、瞬時載荷実験の結果（図3）と比較するとこの加力端鉄筋応力レベルでは3本の試験体の平均的な抜出し量となっているが、AL試験体に対するこの実験においては実験値の約1.4倍となった。BL試験体の場合、解析値と実験値は比較的良く近似している。

②載荷直後から経過日1日までの増加量について、AL及びBL試験体の解析値は実験値の約0.94と1.09倍であり、良く近似している。

③経過日数1日以後の経時変化について、AL試験体の場合解析値の方が全般的に実験値よりも大きくなっているが、これは主に載荷直後の解析値が実験値よりも大きいことが原因である。増加量で見ると、 $t=1\sim 61$ 日間でAL試験体の場合、実験値が $5.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$ であるのに対して解析値は $3.38 \times 10^{-2} \text{ mm}$ であり、実験値は解析値の約1.5倍になっている。BL試験体の場合、実験値が $4.51 \times 10^{-2} \text{ mm}$ に対し、解析値は $2.51 \times 10^{-2} \text{ mm}$ であり、実験値は解析値の約1.8倍となっている。この様に、増加量で見ると実験値が解析値よりもかなり大きくなるのは、図6に示されるように $t=61$ 日での乾燥収縮歪の実験値が回帰式(7)による値の約1.4倍であることが主要因であると考えられる。このことは、図9と図10からも考察することができる。

以上のように、増加量から見ると、本論文で示した算定方法にはまだ詳細な検討が要求される点もあるが、測定期間（経過日数61日）までの抜出し量の解析値は実験値の約1.12倍（AL試験体）と約0.87倍（BL試験体）であり、大略的には実験値を評価できると考えられる。

6. まとめ

- (1) 本論文で提示した引張鉄筋の経時的な抜出しの算定方法はある程度実用上評価できる。
- (2) 実験結果から、片引き及び両引き試験体とも、載荷直後から経過日数1日までの抜出しの増加量は無視できないほど大きいことがわかる。また、抜出しの経時的な増加量には乾燥収縮による影響の占める割合が $t=1\sim 61$ 日の場合で5割以上であり、かなり大きい。

参考文献

- 1) 岩原昭次「長期設計荷重下におけるRC造スラブの鉄筋の抜出しに関する解析的研究」日本建築学会構造系論文報告集、第400号、PP.45～58, 1989.6
- 2) 岩原昭次「鉄筋コンクリート床スラブの長期たわみ計算法に関する研究（その2。ひびわれを生じた一方向スラブの瞬時たわみの計算法—続き）」日本建築学会中国・九州支部研究報告第3号、PP.249～252, 1990.3
- 3) 藤井栄、森田司朗「異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究 第2報 付着割裂強度式の提案」日本建築学会論文報告集、第324号、PP.45～53, 1983.2

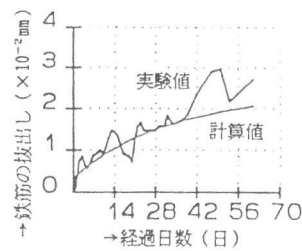


図9 乾燥収縮による鉄筋の抜出し（片引き試験体）

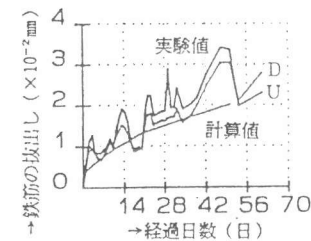


図10 乾燥収縮による鉄筋の抜出し（両引き試験体）