持続荷重下における端部鉄筋の抜け出しによる 鉄筋コンクリート片持梁の付加たわみ

ADDITIONAL DEFLECTION IN REINFORCED CONCRETE CANTILEVER BEAMS DUE TO SLIPPAGE OF BAR AT FIXED EDGE UNDER SUSTAINED LOADING

大野 義照*, 李 振宝**, 鈴木 計夫***

Yoshiteru OHNO, Zhenbao LI and Kazuo SUZUKI

The long-term loading tests of reinforced concrete cantilever beams were performed in order to understand and to clarify the mechanism of long-term deflection, especially the increase caused by the slippage of tension steel at the fixed edge on the reinforced concrete member after cracking. In the experiment six pieces of specimens were tested, and the slippage of the steel, crack widths and deflections were examined. Bond analysis equations for members on which different end bending moment acts were also presented. The analysis used the relationships between bond stress and slip proposed in the previous paper. Crack widths and deflections that occurred by the slippage of steel were calculated by the bond analysis.

Keywords : long-term deflection, crack width, slippage of tension steel, bond analysis, cantilever beam,
sustained loading

長期たわみ, ひび割れ幅, 鉄筋の抜け出し, 付着解析, 片持ち梁, 持続荷重

1. まえがき

鉄筋コンクリート(以下RCと略記)のスラブでは, ひび割れによる損傷や長期荷重による過大なたわみが問題となっている^{1), 2)}。長期たわみに及ぼす影響要因として, ①コンクリートのクリープと収縮, ②曲げひび割れによる剛性低下, ③固定支持端からの鉄筋抜け出しなどが考えられる。日本建築学会のRC構造計算規準・同解説の付録³⁾にはコンクリートのクリープ, 乾燥収縮および曲げひび割れの影響を考慮した長期たわみ計算法が示されている。しかし, 端部鉄筋の抜け出しの影響については無視できないとしながらも定量的な評価ができるまでには至っていないために考慮されていない。

この鉄筋の抜け出しによる付加たわみについてはこれまでにいくつかの報告がなされているが, 抜け出し量の算定が重要な問題の一つとなっている。東・小森⁴⁾はスラブのたわみを各部分の剛性によるたわみと鉄筋の抜け出しによるたわみとの和として計算している。この報告はスラブの端部にひび割れが発生した後の抜け出しによ

る付加たわみが無視できないほど大きいことを指摘した最初の研究であり, その意義は大きい。しかし, 抜け出しの算定には定着部における付着応力として平均付着応力を用いているなどの問題が残されている。小柳⁵⁾らはスラブの長期たわみに関する研究の一環として片引き試験体の持続載荷実験を行い, 得られた鉄筋の抜け出し量を用いてスラブ端部での回転角を評価し付加たわみを計算している。しかし, 片引き試験から得られた鉄筋の抜け出しの実験式は両引きの場合には適用できない。岩原^{6), 7)}は抜け出しによる付加たわみを厳密に定式化し, スラブからの鉄筋の抜け出しの影響を付着応力 τ とスラブの剛性 s の関係で付着弾性剛性を用いて, 弾塑性たわみ角式の中に組み入れている。しかし, 抜け出し量を求める片引きモデルでは引張力が一端から鉄筋に作用し, RCブリズムの他端に等分布反力が作用しているとするモデル化の方法および定着長さは常時荷重域でRC規準に規定

注: 本文の一部は文献14), 15)に発表している。

* 大阪大学工学部建築工学科 助教授・工博

** 大阪大学大学院建築工学専攻 大学院生

*** 大阪大学工学部建築工学科 教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering Osaka Univ., Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Osaka Univ.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Osaka Univ., Dr. Eng.

されている値に決められているなど、解析上に問題が残されている。また、井野⁸⁾らや岡田⁹⁾も鉄筋抜け出しによるたわみの計算法を提示しているが、鉄筋抜け出しは小柳の実験式をもとに簡略化された算定式を用いている。

本論文では、スラブや梁の端部ひび割れ幅は固定端(スタブ部分)からの鉄筋抜け出しとスラブや梁部分からの抜け出しからなると考え、それらの抜け出し量を算定するため、曲げ材の両端に異なる曲げモーメントが作用した場合の付着解析モデルを提示した。

次に、スラブの長期たわみ特に端部鉄筋の抜け出しによるたわみのメカニズムを解明し、その増加量をより的確に把握するために、6体の片持梁の持続荷重実験を行い、その端部鉄筋の抜け出しによるひび割れ幅およびたわみの増加に対する影響を調べるとともに、本論に提示した付着解析法により端部ひび割れ幅および端部鉄筋の抜け出しによる付加たわみを解析し、その適合性を示した。

2. RC引張材の付着解析

2.1 解析モデル

(1) 解析モデル

付着解析とは鉄筋とコンクリートの一部分を付着解析モデルとしてとり出し、その鉄筋とコンクリート間の付着応力、相対すべり量および鉄筋ひずみの分布を解析的に定量化することであり、既往のモデル化の方法には主として次の二つがある。一つは等曲げ部材の引張側あるいは中柱(中梁)と梁(スラブ)の接合部をモデル化した両引モデル^{6), 10), 11)}である。他の一つは隅柱(隅梁)と梁(スラブ)の接合部をモデル化した片引モデル⁶⁾である。これらの方法はいずれも厳密には通常の曲げモーメント勾配のある部材には適用できない。そこで、部材両端に異なる曲げモーメントが作用した場合にも適用できる図1に示すような付着解析モデルを提案する。図中の弾性域、塑性域はそれぞれ $\tau \sim s$ 関係を図2のように弾塑性曲線で仮定した場合のOAおよびAB域に対応するものである。全長にわたる等分布せん断力 q は部材両端の引張力の差により次式で与える。

$$q = (P_{s1} - P_{s2}) / L$$

特例として、

$$(a) \text{ 両引モデル: } P_{s1} = P_{s2}$$

$$(b) \text{ 片引モデル: } P_{s2} = 0$$

図1 付着解析モデル

これによって両引、片引を含めた付着解析モデルの一般化ができる。

(2) 基本仮定

上記の付着解析モデルに対し、次のことを仮定する。

(a) 軸方向変形のみを考慮し、それと直角方向のせん断変形を無視する。

(b) 持続荷重下における付着応力 τ と相対すべり s 関係を図2に示すように完全弾塑性近似曲線とする。

$$\left. \begin{array}{l} \text{弾性域} \quad \tau_t = K_t \cdot s_t \quad (s_t \leq s_{yt}) \\ \text{塑性域} \quad \tau_t = \tau_{yt} \quad (s_t > s_{yt}) \end{array} \right\} \quad (1)$$

図2 $\tau \sim s$ 関係

図3 解析用有効断面

(c) 梁およびスタブ部分を解析する際、引張鉄筋とコンクリートの図心が一致するコンクリート部分が引張力分担に対して有効である^{6), 10)}とし、図3に示すハッチ部分を解析用コンクリート引張有効断面とする。

2.2 微分方程式および解

(1) 微分方程式

図1に示した両引材において、時刻 t のときにおける両端に作用する力をそれぞれ $P_{s1}(t)$, $P_{s2}(t)$, その間に作用するせん断力を $q(t)$ とすると、既報¹¹⁾と同じような方法で次の微分方程式が誘導できる。

$$\frac{d^2 S_x(t)}{dx^2} = \frac{1+n'}{E_s A_s} \cdot U \cdot \tau_x(t) - \frac{q(t)}{E_c' A_c} \quad (2)$$

ただし: $q(t) = (P_{s1}(t) - P_{s2}(t)) / L$, $n' = E_s / E_c'$
 $E_c' = E_c / (1 + 0.5\phi)$, $p = A_s / A_c$

$S_x(t)$: 時刻 t の時 x 位置における鉄筋とコンクリートの相対すべり

E_s , A_s , U : 鉄筋のヤング係数, 断面積, 周長

E_c , A_c , ϕ : コンクリートのヤング係数, 断面積, クリープ係数, E_c' の式において応力変化を考慮して ϕ に0.5を乗じている。

上式は両端に異なる引張力作用した持続荷重下において両引モデルに関する付着の基礎式である。 $\tau_x(t) = f(s_x(t))$ という付着応力 τ と相対すべり s 関係を与えれば、境界条件を与えて上式を解くことによってすべり分布が

求まり、それにより付着応力や鉄筋ひずみの分布が求まる。

(2) 一般解

式(1)の $\tau \sim s$ 関係を用いて上記の微分方程式(2)を解けば、 $S_x(t)$ 、 $P_x(t)$ は次のように求まる。

$$\text{塑性域 } a: S_{xpa}(t) = \frac{1}{2} \cdot \gamma_a \cdot x^2 + C_1 \cdot x + C_2 \quad (3)$$

$$P_{xpa}(t) = P_{s2}(t) - U \cdot \tau_{yt} \cdot x \quad (4)$$

$$\text{弾性域: } S_{xe}(t) = C_3 e^{\alpha x} + C_4 e^{-\alpha x} + \frac{\beta}{\alpha^2} \quad (5)$$

$$P_{xe}(t) = \frac{E_s A_s}{1+n \cdot p} (\alpha C_3 e^{\alpha x} - \alpha C_4 e^{-\alpha x} + \frac{P_{s2}(t)}{E_c \cdot A_c} + \beta \cdot x - S_h(t)) \quad (6)$$

$$\text{塑性域 } b: S_{xpb}(t) = \frac{1}{2} \cdot \gamma_b \cdot x^2 + C_5 \cdot x + C_6 \quad (7)$$

$$P_{xpb}(t) = P_{s1}(t) - U \cdot \tau_{yt} \cdot (L - x) \quad (8)$$

$$\text{ただし: } \alpha^2 = \frac{1+n \cdot p}{E_s A_s} \cdot U \cdot K_t \quad (9)$$

$$\beta = \frac{q(t)}{E_c \cdot A_c} \quad (10)$$

$$\gamma_a = - \frac{1+n \cdot p}{E_s A_s} \cdot U \cdot \tau_{yt} - \beta \quad (11)$$

$$\gamma_b = \frac{1+n \cdot p}{E_s A_s} \cdot U \cdot \tau_{yt} - \beta \quad (12)$$

$S_h(t)$: コンクリートの乾燥収縮ひずみ, $S_{xpa}(t)$, $S_{xe}(t)$, $S_{xpb}(t)$ および $P_{xpa}(t)$, $P_{xe}(t)$, $P_{xpb}(t)$: それぞれ時刻 t の時の塑性域 a , 弾性域, 塑性域 b の x 位置におけるすべりおよび鉄筋に作用する引張力
上式において, 次の境界条件

$$x=0: P_{xpa}(t) = P_{s2}(t)$$

$$x=L: P_{xpb}(t) = P_{s1}(t)$$

$$x=a: S_{xpa}(t) = -S_{yt}, \quad S_{xe}(t) = -S_{yt}$$

$$x=L-b: S_{xe}(t) = S_{yt}, \quad S_{xpb}(t) = S_{yt}$$

より, 積分定数が求まる。

$$C_1 = \frac{P_{s2}(t)}{E_s A_s} + S_h(t) \quad (13)$$

$$C_2 = -S_{yt} - \frac{1}{2} \gamma_a \cdot a^2 - C_1 \cdot a \quad (14)$$

$$C_3 = \frac{(S_{yt} + \beta/\alpha^2) \cdot e^{-\alpha(L-b)} + (S_{yt} - \beta/\alpha^2) \cdot e^{-\alpha a}}{e^{\alpha(L-a-b)} - e^{-\alpha(L-a-b)}} \quad (15)$$

$$C_4 = \frac{-(S_{yt} + \beta/\alpha^2) \cdot e^{\alpha(L-b)} - (S_{yt} - \beta/\alpha^2) \cdot e^{\alpha a}}{e^{\alpha(L-a-b)} - e^{-\alpha(L-a-b)}} \quad (16)$$

$$C_5 = \frac{P_{s1}(t)}{E_s A_s} \cdot S_h(t) - \gamma_b \cdot L \quad (17)$$

$$C_6 = S_{yt} - \frac{1}{2} \gamma_b \cdot (L-b)^2 - C_5 \cdot (L-b) \quad (18)$$

塑性域長さ a , b は次の連続条件

$$x=a, P_{xpa}(t) = P_{xe}(t)$$

$$x=L-b, P_{xe}(t) = P_{xpb}(t)$$

より

$$\alpha C_3 \cdot e^{\alpha a} - \alpha C_4 \cdot e^{-\alpha a} - \gamma_a \cdot a - C_1 = 0 \quad (19)$$

$$\alpha C_3 \cdot e^{\alpha(L-b)} - \alpha C_4 \cdot e^{-\alpha(L-b)} - \gamma_b \cdot (L-b) - C_5 = 0 \quad (20)$$

から求まる。

特例 (a) 両引の場合 $q(t)=0$ としてよい。

(b) 片引の場合 $q(t)=P_{s1}(t)/L$ とし, 解析試験体長さ L および塑性域長さ b は次の条件

$$x=L-b, P_{xe}(t) = P_{xpb}(t)$$

$$x=0, P_{xe}(t) = 0$$

および定着条件: $x=0$, $S_{xe}(t) = S_0$ (S_0 は結果への影響が殆どない程度に 0 に近い値で, 一般に 0.001cm 程度がよいとされている¹⁰⁾) から求まる。

3. 実験概要

3.1 試験体形状と種類

試験体の形状および配筋状況をそれぞれ図 4 および図 5 (a), (b) にその種類を表 1 に示す。試験体は大きく分けてスタブの片側にのみ片持ち梁を有する試験体 (L 型梁と呼ぶ) とスタブの両側に片持ち梁を有する試験体 (T 型梁と呼ぶ) からなる。

実験 I では十分な定着長さを持ち, 鉄筋の折曲げ部のない L 型の試験体を 2 体作製し, 端部鉄筋の抜け出しによる付加たわみの基本性状を調べた。さらにより詳細にその性状を把握するため, 実験 II では T 型および折曲げ部のある L 型の 2 種類の片持ち梁を 2 体ずつ作製し, 試験変数は T 型梁では乾燥収縮量 (エポキシ樹脂の塗布に

表 1 試験体の種類

実験	試験体名	端部鉄筋 持続応力 (kgf/cm ²)	持続荷重 (tf)	コンクリート 目標強度 (kgf/cm ²)	シールの有無
I	L-I-1	2000	0.9	400	無
	L-I-2				
II	TN	2000	1.0	280	無
	TS				有
	L-II-1	1000	0.5		無
	L-II-2	2200	1.1

図4 試験体の形状および配筋状況 (実験 I)

(a)

(b)

図5 試験体の形状、配筋状況および持続荷重装置 (実験II)

よって制御)とし、L型では端部持続鉄筋応力とした。また、実験I、実験IIに用いたコンクリートの荷重時の目標強度はそれぞれ400と280kgf/cm²で、引張鉄筋のかぶり厚さはそれぞれ6と5cmとした。

表2 コンクリートの力学的性質

実験	材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
I	14	396	32.2	2.74×10^5
	28	426	38.3	2.89×10^5
	292	459	32.9	2.90×10^5
II	28	285	19.8	2.46×10^5
	442	296	26.7	2.36×10^5
	749	308	25.4	2.40×10^5

3.2 使用材料

使用したコンクリートは実験Iでは早強ポルトランドセメント、山砂および最大粒径15mmの碎石を用いたコンクリートで、実験IIでは普通ポルトランドセメント、山砂および最大粒径15mmの碎石を用いたレディーミクストコンクリートである。表2にコンクリートの力学的性質を示す。

鉄筋は図6に

示すように、鉄

筋ひずみを測定

するためのワイ

ヤ・ストレ

イン・ゲージ

(W.S.G)

を貼付するため縦リブを削って溝加工した横ふし異形鉄

筋D19 (SD345)を用いた。

3.3 荷重方法と測定項目

荷重方法も前掲の図5(a), (b)に示す。実験Iの荷重方法は実験IIのL型梁と同じである。L型梁のH型鋼への固定は締め付け力の影響が生じないように固定用PC鋼棒を鉄筋から6cm離れた。長期たわみによる持続荷重の減少を防ぐためスプリングを介して荷重した。

鉄筋ひずみはスタブと梁の接合部付近では2ふし(2.25cm)、その他では4ふし(4.5cm)間隔に貼付したW.S.Gにて、ひび割れ幅は梁上面および側面(端部、鉄筋位置)に貼付したコンタクト・ストレイン・ゲージ(C.S.G)にて測定した。たわみは荷重点においてダイヤルゲージにて測定した。また、実験IIのL型試験体のスタブ部鉄筋折り曲げ部分のすべりを測定するために、折り曲げの手前において、鉄筋に固定した棒の先端の移動をC.S.Gにて測定した。なお、コンクリートの乾燥収縮は片持梁のスタブ部分および梁部分と同じ形状の試験体において測定し、クリープは実験Iでは断面12×12cm、実験IIでは断面10×10cmのコントロール試験体において圧縮クリープ性状(圧縮応力はそれぞれ42と60kgf/cm²である)を調べた。シールした試験体を除きそれらの結果を図7に示す。図中の曲線は最小2乗法で求めた近似曲線である。なお、荷重経過日数450日におけるシールされた試験体の乾燥収縮ひずみは 2.0×10^{-4} 、クリープ係数は1.5であり、それぞれシールされていない試験体の約1/3と1/2である。

4. 実験結果および考察

4.1 解析に用いる $\tau \sim s$ 関係

実験結果の考察の前に、解析に用いる $\tau \sim s$ 関係を設定する。それを用いて前述の付着解析法により鉄筋ひずみ分布、端部ひび割れ幅および端部鉄筋の抜け出しによる付加たわみを解析した。梁のひび割れ間の部分の解析

(a) 実験 I

(b) 実験 II

図7 コンクリートの乾燥収縮およびクリープ係数

表3 $\tau \sim s$ 関係の設定

実験	部材	τ_{y0} (kgf/cm ²)	K_0 (kgf/cm ³)
単 調 載 荷 時	I	梁	43.2
		スタブ	56.1
	II	梁	36.0
		スタブ	46.8
持 続 載 荷 中	$\tau_{yt} = k_1 \cdot \tau_{y0}$ $K_t = k_2 \cdot K_0$ $k_1 = 0.75$ $k_2 = (0.25 + 0.5 \cdot t^{0.2}) / t^{0.2}$ t は持続荷重の経過日数		

には前述の付着解析法を、T型梁およびL型梁のスタブ部分の解析にはその特例の両引きモデルおよび片引きモデルを用いた。既報¹¹⁾の両引き試験体の単調および持続荷重試験結果を参考にし、鉄筋の種類、コンクリート強度、および部材断面を考慮して、 $\tau \sim s$ 関係を表3に示すように設定した。

単調荷重時において実験Iの梁部分、スタブ部分および実験IIの梁部分ではそれぞれ鉄筋種、コンクリート強度および断面がほぼ一致する既報

¹¹⁾の両引試験体II-1, II-5およびI-1の $\tau \sim s$ 関係を、実験IIのスタブ部分の τ_{y0} は断面の大きさを考慮して両引試験体I-1の τ_{y0} にII-5とII-1の τ_{y0} の比率を乗じたものを、 K_0 は両引試験体II-5の値を用いた。持続荷重中における $\tau \sim s$ 関係の変化は既報¹¹⁾に報告した両引試験結果をそのまま用いた。

4.2 鉄筋ひずみ分布

図8に試験体L-I-1の単調および持続荷重中における鉄筋ひずみ分布を示す。なお、試験体L-I-2の鉄筋ひずみ分布はL-I-1とほぼ同じなので、紙数の関係で省略する。図中の記号は実測値で、細実線部分は単調荷重中、太実線および点線、破線は持続荷重中の解析値である。鉄筋ひずみ分布において2つのひび割れ位置の間には谷が形成され、コンクリートの付着効果が見られている。持続荷重開始後一日目に、ひび割れ位置の鉄筋ひずみは圧縮側コンクリートのクリープによって若干増え、他の位置ではさらに付着応力の緩和によって増大するが、その後はほとんど変わらない。解析値は単調荷重時、持続荷重中とも実測値をほぼ捉えている。なお、鉄筋ひずみ分布を求める際に、ひび割れ位置の鉄筋ひずみには実測値を用い、ひび割れの両側の1ふし間は付着がないものとして解析した。

4.3 端部鉄筋の抜け出しによる付加たわみの基本性状(実験I)

(1) 単調荷重時の端部ひび割れ幅とたわみ

a. 端部ひび割れ幅

図9に試験体L-I-1の初荷重時の荷重Pと鉄筋位置側面における端部ひび割れ幅wとの関係を示す。ひび割れは荷重0.4tで生じ、以後荷重の増加に従ってほぼ直線的に増加し、単調荷重完了荷重0.9tの時、0.22mm(試験体L-I-2は0.23mm)である。

端部ひび割れ幅は鉄筋のスタブ部分からの抜け出しと梁部分からの抜け出しによって生じると考え、スタブ内

図8 鉄筋ひずみ分布 (L-I-1試験体)

図9 初載荷時のP～w関係

図10 片持ち梁のたわみ

図11 初載荷時のP～δ関係

の実測された鉄筋ひずみを積分して求めたスタブ部分からの抜け出しと、端部ひび割れ位置から端部ひび割れとその次のひび割れとの間の鉄筋ひずみが最も小さい位置までの鉄筋ひずみ(図8参照)を積分して算出した梁部分からの鉄筋の抜け出しの計算値を破線で示す。実線は前述の付着解析法による解析値である。解析値によると、スタブ部分における鉄筋の抜け出しは端部ひび割れ幅の約55%と大きな割合を占めている。

b. たわみ

片持ち梁のたわみは図10に示すように曲げモーメントによる梁の曲げたわみ δ_f に、スタブからの抜け出しによる回転たわみ δ_r が加わる。図11に試験体L-I-1の初載荷時の荷重P～たわみδ関係を示す。端部ひび割れの発生後、たわみが大きく増大し、単調載荷完了荷重0.9tの時、1.92mm(L-I-2は2.15mm)である。

同図中の破線は端部鉄筋の抜け出しによって生じた回転付加たわみ δ_r を、実線は δ_r と梁の曲げによるたわみ δ_f の和を表している。 δ_f はACIコード¹²⁾に提案されている有効断面二次モーメントを用い、モールの定理より計算した。端部筋の抜け出しによる回転付加たわみ δ_r は、スタブ部分からの抜け出しSを用いて梁の回転角 θ を求め、(21)式で計算した。

$$\delta_r = \theta \cdot L = [S / (d - x_n)] \cdot L \quad (21)$$

L: 梁長さ, d: 有効せい, x_n : 圧縮縁から中立軸までの距離

図11から、計算値は実測値とよく一致していることと、全たわみのうち約38%(実験IIでは35~50%)が端部鉄筋の抜け出しによるもので、たわみに及ぼす端部鉄筋の抜け出しの影響が大きいことが分かる。

(2) 持続荷重下における端部ひび割れ幅とたわみ

a. 端部ひび割れ幅の持続荷重中の増加

図12に鉄筋位置側面における持続荷重開始後に増加した端部ひび割れ幅の経時変化を示す。ひび割れ幅は持続荷重開始後1日以内に付着応力の緩和によって急増し、その後はコンクリートの乾燥収縮と圧縮縁コンクリートのクリープの影響を受けて緩やかに増加している。

図12 持続荷重中の端部ひび割れ幅の増加(実験I)

持続荷重406日間において0.22mm(L-I-2は0.24mm)増加し、この値は初載荷時のひび割れ幅に匹敵している。前述のように鉄筋ひずみが持続荷重1日後殆ど変わらないのに、このようにひび割れ幅が増加するのはコンクリートの乾燥収縮の影響¹¹⁾によるものである。同図中の曲線は前述の付着解析法による解析値で、破線は鉄筋のスタブ部からの抜け出し、実線はそれに梁部分からの抜け出しを加えたものである。解析値はよく実測値を捉えている。解析値によると、持続荷重406日においてスタブ部分からの鉄筋の抜け出しによるひび割れ幅の増加量は、全増加量の約51%を占めている。

b. たわみの持続荷重中の増加

図13にL-I-1の持続荷重開始後増加したたわみの経時変化を示す。図中破線は端部鉄筋の抜け出しによる回転たわみの増加量 $\Delta\delta_r$ 、実線は $\Delta\delta_r$ と曲げたわみの増加量 $\Delta\delta_f$ の和を表わしている。たわみは持続荷重開始後1日間に鉄筋の抜け出しに伴って急増した。持続荷重406日におけるたわみ増加量(解析値)に占める抜け出しによるたわみ増加量の割合は44%、長期たわみも抜け出しの影響が大きいことがわかる。なお、抜け出しに

図13 持続荷重中のたわみの増加(実験I)

よる回転たわみ $\Delta\delta_r$ は、初載荷時の計算方法と同じように(21)式で計算した。曲げたわみ $\Delta\delta_b$ は、ACIコード¹³⁾の長期たわみの計算法によった。ACIの計算法には断面の大きさの違いによる乾燥収縮の差異などが考慮できない問題はあるが、解析値は実測値をほぼ捉えている。406日間持続載荷後のたわみ(実測値)は持続載荷開始時の約1.74倍(L-I-2は1.69倍)になった。

4.4 各種要因の持続荷重下における端部鉄筋の抜け出しによる付加たわみに及ぼす影響(実験II)

(1) 端部ひび割れ幅の持続載荷中の増加

図14(a), (b)に実験IIの各試験体の持続荷重下における端部ひび割れ幅の増加量の経時変化を示す。図中の記号は実測値を、曲線は前述の解析方法による解析値を表している。解析値は実測値をよく捉えている。ひび割れ幅は実験Iと同様に持続載荷開始後1日以内に急増し、その後は緩やかに増加している。前述の解析式からも分かるように、コンクリートの乾燥収縮が大きいほど鉄筋の抜け出し量も大きく、持続鉄筋応力が大きいほど付着長が長くなり、また、付着応力の緩和も大きいいため、鉄筋の抜け出し量も大きくなる。すなわち、コンクリートの乾燥収縮が大きい試験体、あるいは端部鉄筋応

(a)

(b)

図14 持続載荷中の端部ひび割れ幅の増加(実験II)

力の大きい試験体では持続荷重下におけるひび割れ幅の増加量は大きくなる。

図14(b)に示すように試験体L-II-2には図15に示すような折り曲げ部の付加すべりがわずかながら現れている。ただし、その値は小さいため、鉄筋の抜け出しの解析では無視している。

図15 付加すべり

各試験体の端部ひび割れ幅の増加量(解析値)に占めるスタブからの抜け出し量は次の通りである。持続載荷450日において試験体TN, TS, L-II-1およびL-II-2は、それぞれ57%, 52%, 44%と66%で、持続載荷750日において試験体L-II-1およびL-II-2はそれぞれ46%と66%である。

(2) たわみの持続載荷中の増加

図16(a), (b)に実験IIの各試験体の持続荷重下におけるたわみの増加量の経時変化を示す。図中の曲線は前述の解析方法を用いた解析値を表している。解析値は実測値をほぼ捉えている。全体に、端部ひび割れ幅の増加量と同様に、乾燥収縮量の大きい試験体および端部鉄筋持続応力の大きい試験体は鉄筋の抜け出しが大きい

(a)

(b)

図16 持続載荷中のたわみの増加(実験II)

いたため、たわみの増加量も大きい。持続載荷450日において試験体T N, T S, L-II-1, L-II-2のスタブからの抜け出しによる付加たわみの増加量(解析値) $\Delta\delta_r$ はそれぞれ1.3, 0.4, 0.9, 2.1mmで、乾燥収縮が制御されていない試験体(T N)の $\Delta\delta_r$ は制御された試験体(T S)の約3倍、端部鉄筋持続応力の大きい試験体(L-II-2)の $\Delta\delta_r$ は小さい試験体(L-II-1)の約2倍である。

各試験体のたわみの増加量(解析値)に占めるスタブからの抜け出しによる付加たわみは次の通りで、鉄筋抜け出しの影響が大きいことが示されている。持続載荷450日において試験体T N, T S, L-II-1およびL-II-2は、それぞれ52%, 24%, 60%と61%で、持続載荷750日において試験体L-II-1およびL-II-2はそれぞれ59%と60%である。なお、鉄筋の抜け出しによる付加たわみ δ_r は(21)式から理解されるように中立軸深さすなわち部材有効せい(d)に大きく影響される。本試験体のdは15cmで一般のはりよりはかなり小さく、スラブよりは少し大きい。したがって、一般のスラブの δ_r は本実験の結果と同程度かそれ以上で、通常のはりの δ_r は本実験の結果より小さくなることが推測される。また、450日間持続載荷後の試験体T N, T Sのたわみ(実測値)は持続載荷開始時の約1.80と1.53倍で、乾燥収縮が大きい程増加率は大きく、750日間持続載荷後の試験体L-II-1, L-II-2のたわみは持続載荷開始時の初期たわみの約2.82と1.76倍で、荷重が小さい程初期たわみが小さく増加率は大きくなった。

5. 結論

以上の付着解析および部材有効せい15cmの片持ち梁の持続載荷実験から得られた主な結果をまとめると次のようになる。

(1) 曲げモーメント勾配がある部材にも適用できるような、R C引張材両端に大ききの異なる引張力が作用する付着解析モデルを提案した。これを用いて、持続荷重を受ける片持ちはりの鉄筋ひずみ分布およびその抜け出し量(ひび割れ幅)を算定することができた(図8, 図9, 図12, 図14)。

(2) 片持梁の端部ひび割れ幅は、スタブ部分と梁部分からの鉄筋抜け出しからなり、持続載荷後1日間に付着応力の緩和によって急増し、その後は主としてコンクリートの乾燥収縮に応じて緩やかに増加する。本実験の場合、スタブ部分からの抜け出しの持続載荷後増加した端部ひび割れ幅に占める割合は46~66%であった。

(3) 片持梁のたわみは、梁の曲げたわみとスタブ部分の抜け出しによる付加回転たわみからなる。本実験の場合、付加回転たわみは、初載荷時では全たわみ量の30~50%, 持続載荷中では44~61%(コンクリートの乾燥収縮が制御された場合を除く)と大きな割合を占めている。

謝辞 本研究は文部省科学研究費補助金(一般C:代表者 大野義照)の交付を受けた研究の一部として実施したものである。

参考文献

- 1) 土橋由造, 井野 智: 大たわみを持つ鉄筋コンクリート障害床スラブの実態調査とその対策, 日本建築学会論文報告集, NO.272, pp.41~51, 1978.10.
- 2) 武田寿一, 中根 淳, 小柳光生: 鉄筋コンクリート床スラブの長期たわみに関する研究, 日本建築学会論文報告集, NO.365, pp.165~173, 1986.7.
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp.506~512, 1988.
- 4) 小森清司, 東 洋一: 鉄筋コンクリート床スラブの長期たわみに関する研究(2), 日本建築学会大会講演梗概集(中国), 構造系II-II, pp.1837~1838, 1977.10.
- 5) 武田寿一, 高橋久雄, 小柳光生: 床スラブの長期たわみに関する研究, コンクリート工学論文, vol.21, No.9, pp.115~124, 1983.9.
- 6) 岩原昭次: 長期設計荷重下におけるR C造スラブの鉄筋の抜け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, NO.400, pp.45~57, 1989.6.
- 7) 岩原昭次: 使用荷重下における鉄筋コンクリート床スラブの長期曲げ問題に対する解析法に関する研究(第一報 ひび割れを生じた一方スラブの瞬時曲げ問題に対する解析法), 日本建築学会構造系論文報告集, NO.415, pp.63~73, 1990.9.
- 8) 井野智, 伊藤正義, 杉野目章, 植松武是: 鉄筋コンクリート床スラブの端部上は鉄筋定着部の伸びによる付加たわみ概算法, コンクリート工学年次論文報告集, 第14巻, 第2号, pp.149~155, 1992.6.
- 9) 岡田克也: 両端固定R C部材の上端鉄筋の抜け出しによる付加たわみ概算法, 日本建築学会大会講演梗概集(関東), C構造II, pp.159~160, 1993.9.
- 10) 六車 照, 森田司郎, 富田幸次郎: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究(付着応力分布について), 日本建築学会論文報告集, NO.131, pp.1~8, 1967.1.
- 11) 大野義照, 李 振宝, 鈴木計夫: 持続荷重下における異形鉄筋とコンクリート間の付着応力~すべり関係, 日本建築学会構造系論文報告集, No.459, 1994.5.
- 12) Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI318-89) and Commentary-ACI 318R-89, p.93 1989.
- 13) 前出12) p.94
- 14) 鍋沢斤吾, 鈴木計夫, 大野義照, 李振宝, 大田崇士: 鉄筋コンクリート片持ちはりの長期たわみに関する研究, 日本建築学会大会講演梗概集(北陸), C構造II, pp.289~290, 1992.8.
- 15) 李 振宝, 鈴木計夫, 大野義照: 常時荷重域における鉄筋コンクリート部材の付着解析, 日本建築学会大会講演梗概集(北陸), C構造II, pp.949~950, 1992.8.

(1994年5月10日原稿受理, 1994年10月25日採用決定)