

論文

[2009] RC 片持はりの長期たわみと付着解析

正会員 鈴木計夫 (大阪大学建築工学科)

正会員 大野義照 (大阪大学建築工学科)

正会員 ○李 振宝 (大阪大学大学院)

鍋沢斤吾 (大阪大学大学院)

1. はじめに

1988年に改訂された日本建築学会RC標準付録には長期たわみ計算法が示され、そこで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が考慮されている。しかし、固定支持の床スラブや梁のたわみに及ぼす端部筋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までに至っていないために考慮されていない。

本研究は、長期たわみ特に端部筋の抜け出しによるたわみ増加量をよりの確に把握し、そのメカニズムを解明するために、4体の片持梁の持続載荷実験を行い、その端部筋の抜け出しによるひび割れ幅のたわみの増加に対する影響を調べた。また、端部ひび割れ幅はスタブからの抜け出しと梁部分からの抜け出しからなると考えられ、それらの抜け出し量を算定するため、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するとともに、別報[1]で提案した $\tau \sim s$ 関係モデルを用いて、端部ひび割れ幅および端部筋の抜け出しによる付加たわみを解析した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用したコンクリート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ーミクストコンクリートで、表1に試験時のコンクリートの力学的性質を示す。

鉄筋は図1に示すように、ひずみゲージを貼付するため縦リブを削って溝を加工した横ふし異形鉄筋D19 (SD295)を用いた。

2.2 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2、図3に、その種類を表2に示す。T型およびL型の2種類の片持梁を2体ずつ作製した。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よって制御)とし、L型では端部持続鉄筋応力とした。

2.3 荷重方法と測定項目

荷重方法も前掲の図2、図3に示す。L型のH型钢への固定はPC鋼棒による締め付け力の影響を少なくするため鋼棒は鉄筋から6cm離

表1 コンクリートの力学的性質

材令(日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 ×10 ⁵ (kgf/cm ²)
28	285	19.8	2.46

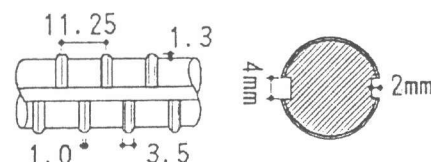


図1 鉄筋ふしおよび断面形状

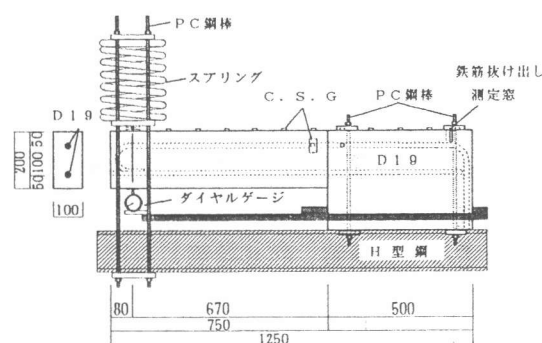


図2 L型片持梁の形状、および荷重装置

表2 試験体の種類

試験体名	端部鉄筋持続 応力(kgf/cm ²)	シールの有無
TN	2000	無
TS	2000	有
L-1	1000	無
L-2	2200	無

している。鉄筋ひずみはスタブと梁の接合部付近では2ふし(2.33cm)、その他では4ふし(4.67cm)間隔に貼付したワイヤ・ストレイン・ゲージ(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、たわみは梁先端載荷点においてダイヤルゲージにて測定した。また、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断面形状の試験体において測定し、クリープは断面10×10cmのコントロール試験体において圧縮クリープ性状を調べた。それらの結果を図4に示す。図中の曲線は最小2乗法で求めた実験曲線である。

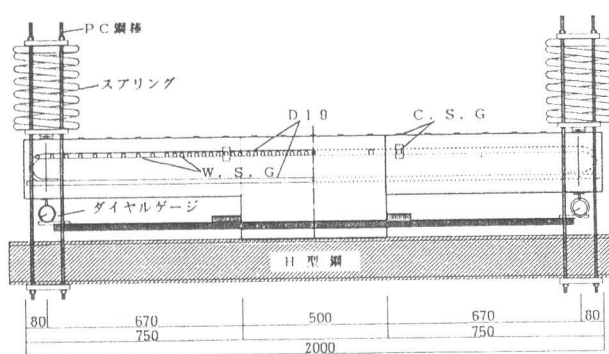


図3 T型片持梁の形状、および荷重装置

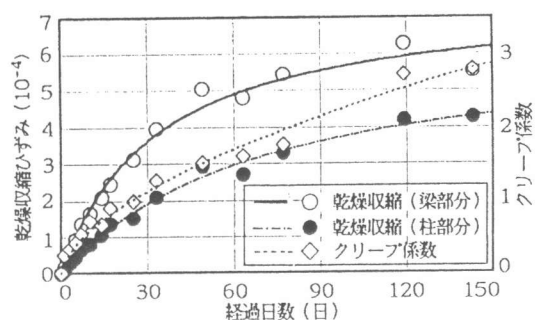


図4 乾燥収縮ひずみ、クリープ係数

3. 実験結果および考察

3.1 初荷重時の端部ひび割れ幅とたわみ

(1) 端部ひび割れ幅

図5に初荷重時の荷重Pと鉄筋位置側面における端部ひび割れ幅wの関係を示す。ひび割れは荷重 $P=0.3$ tで生じ、以後荷重の増加に従ってほぼ直線的に増加した。端部ひび割れ幅は鉄筋のスタブ部分からと梁部分からの抜け出しによって生じる。T型の場合ではスタブ中心位置から、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、L型の場合ではスタブ内の鉄筋の折り曲げ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、鉄筋ひずみ(実測値、図8参照)を積分して算出した鉄筋の抜け出しを破線で示す。実線は後述の付着解析法による解析値である。ただし、L-2試験体の場合では鉄筋折り曲げ部コンクリートが図6に示すように

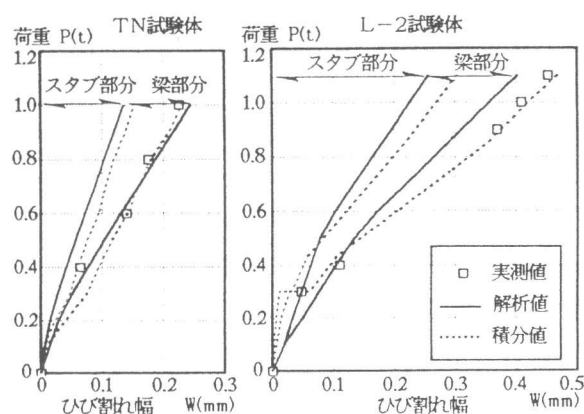


図5 初荷重時のP~w関係

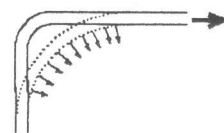


図6 付加すべり変形図(模式図)

析値に加算している。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56%（T型）と63%（L型）を占めている。L型の場合、スタブ部分からの抜け出しが大きいのでひび割れ幅もT型より大きい。

(2) たわみ

図7に初載荷時の荷重 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ている。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 と梁の曲げたわみ δ_f の和を表している。曲げたわみ δ_f はACIコード[2]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、(1)式で計算した。

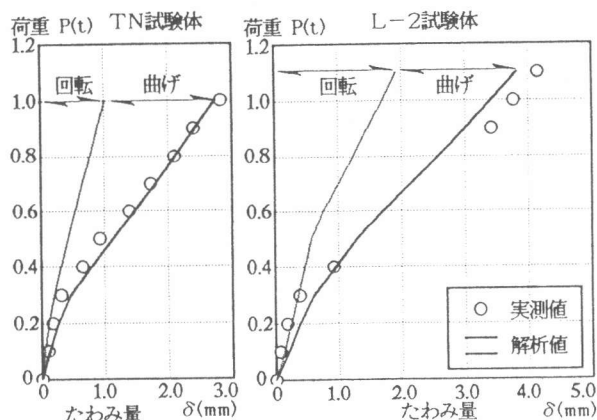


図7 初載荷時の $P \sim \delta$ 関係

$$\delta_R = \theta \cdot L = (S / (d - x_n)) \cdot L \quad (1)$$

L : 梁長さ、 d : 有効せい、 x_n : 中立軸

図7から、計算値は実測値とよく一致していること、たわみに及ぼす端部鉄筋の抜け出しの影響が大きい（T型は約35%、L型は約50%）ことが分かる。端部ひび割れ幅と同様に、たわみもL型がT型より大きい。

3.2 持続載荷中の曲げ性状

(1) 鉄筋ひずみ分布

図8にL-2試験体の単調および持続載荷中における鉄筋ひずみ分布の実測値および解析値を示す。太実線部分は単調載荷中、細実線および点線は持続載荷中の値である。鉄筋ひずみ分布においてひび割れ位置には山が形成され、コンクリートの付着効果を示している。持続載荷開始後一日目に、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、他の所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。ただし、乾燥収縮の影響を受けて、ス

タブ内に鉄筋ひずみが小さい部位（折り曲げ部）の鉄筋ひずみは逆に減少する。後述の解析法にて解析した鉄筋ひずみ分布も同図中に示しているが、実測値をほぼ捉えている。

(2) 端部ひび割れ

幅の経時変化

図9に持続載荷中の

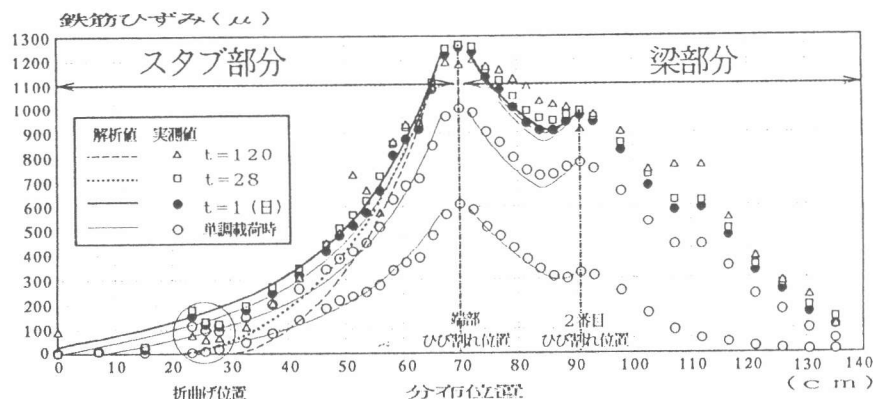


図8 L-2試験体の鉄筋ひずみ分布

鉄筋位置側面の端部ひび割れ幅の増加量の経時変化を示す。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、その後は乾燥収縮、圧縮縁コンクリートのクリープの影響を受けて、しだいに増加している。同図中の曲線は初載荷時と同様に後述の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。持続荷重133日においてスタブ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56%（T型）と約60%（L型）を占めている。

（3） たわみの経時変化

図10に持続荷重中のたわみの増加量の経時変化を示す。図中記号は持続荷重下における実測値の増加量を、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133日におけるたわみ増加量の実測値に占める抜け出しによるたわみ増加量の割合はT型は48%、L型は53%で、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、抜け出しによる回転たわみ δ_R は、初載荷時の計算方法と同じように計算した。曲げたわみ δ_f は、ACIコード[2]の長期たわみの計算法によった。解析値は実測値をよく捉えている。133日間持続荷重後のたわみは持続荷重開始時の約1.68倍（T型）と1.57倍（L型）になった。

4. 解析

4.1 付着解析

（1） 解析モデル

付着解析は鉄筋とコンクリートの一部分を取り出して、その鉄筋とコンクリート間の付着応力 τ 、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る。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或いは中柱（中梁）と梁（スラブ）の接合部をモデル化した両引モデル[3][4][5]である。他の一つは隅柱（隅梁）と梁（スラブ）の

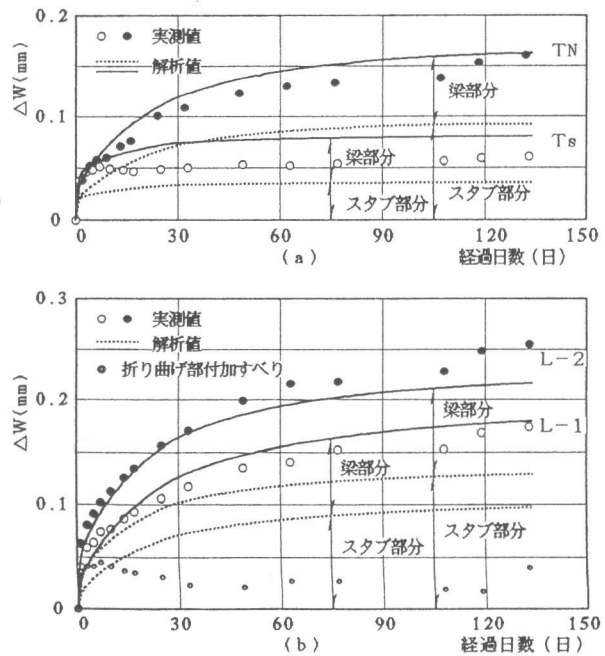


図9 端部ひび割れ幅の経時変化

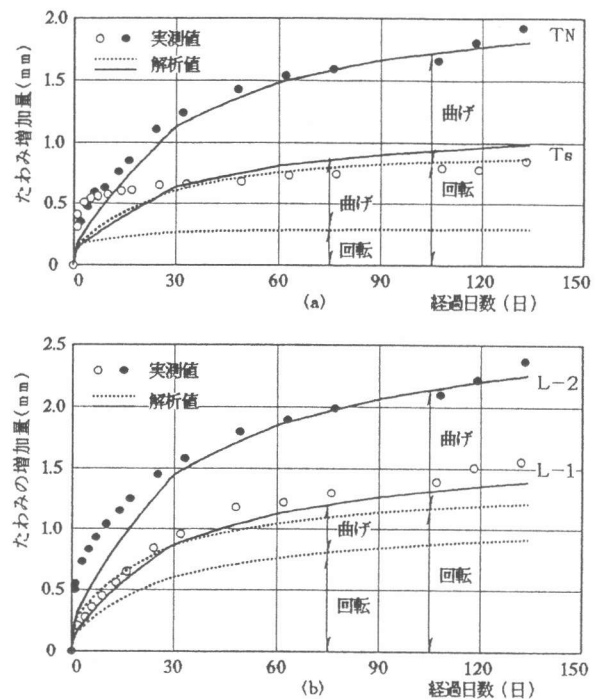


図10 たわみの経時変化

接合部をモデル化した片引モデル[4][5]である。しかし、最も一般的な曲げモーメント勾配のある梁の場合には、上記の二つの方法はいずれも適用できない。ここでは部材両端に異なる曲げモーメントが作用した場合に対して、図11

(a) に示すような付着解析モデルを提案する。部材両端の力の差は全長にわたる等分布せん断力 q で与える。

特例として、(1) 両引モデル: $P_{s1} = P_{s2}$

(2) 片引モデル: $P_{s1} = P_{s0}$, $P_{s2} = 0$

(2) 微分方程式

図11(a) に示すような両引材を考え、両端に作用する力をそれぞれ P_{s1} , P_{s2} 、その間に作用するせん断力を q とし、文献[2]と同じような方法で次の微分方程式が誘導できる。

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

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

$$n' = E_s / E_c', \quad E_c' = E_c / (1 + \phi), \quad p = A_s / A_c$$

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

上式は両端に異なる曲げモーメントが作用した両引モデルに関する付着の基礎式である。上式において $\tau_x(t) = f(s_x(t))$ という付着応力 $\tau \sim$ 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。

(3) 解

別報[1]に提案した $\tau \sim s$ モデルを参考にして、本実験では端部鉄筋持続応力が常時荷重域であるため、図11(b) に示すような $\tau \sim s$ 関係を与えて、上記の微分方程式を解いた。

$$\text{弾性域: } S_{xe} = C_1 e^{\alpha_1 x} + C_2 e^{-\alpha_1 x} + \frac{\beta_1}{\alpha_1^2}$$

$$P_{xe} = \frac{E_s A_s}{1+n'p} (\alpha_1 C_1 e^{\alpha_1 x} - \alpha_1 C_2 e^{-\alpha_1 x} + \frac{P_{s2}}{E_c' A_c} + \frac{P_{s1} - P_{s2}}{E_c' A_c L} \cdot (x - S_h))$$

$$\text{準弾性域: } S_{xe} = C_3 e^{\alpha_2 x} + C_4 e^{-\alpha_2 x} + \frac{\beta_2}{\alpha_2^2}$$

$$P_{xe} = \frac{E_s A_s}{1+n'p} (\alpha_2 C_3 e^{\alpha_2 x} - \alpha_2 C_4 e^{-\alpha_2 x} + \frac{P_{s2}}{E_c' A_c} + \frac{P_{s1} - P_{s2}}{E_c' A_c L} \cdot (x - S_h))$$

$$\text{ただし: } \alpha_1 = \frac{1+n'p}{E_s A_s} \cdot U \cdot K_1, \quad \beta_1 = \frac{q}{E_c' A_c}$$

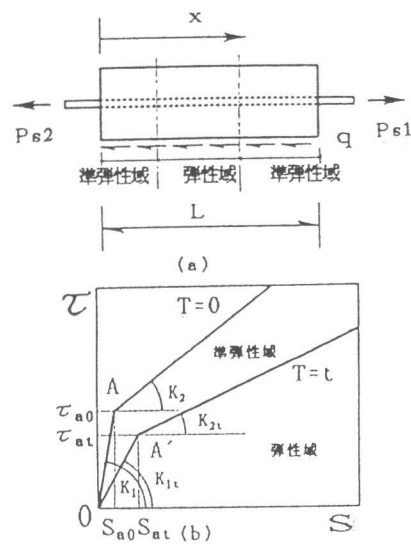


図11 付着解析モデル

$$\alpha_2 = \frac{1+n'p}{E_s A_s} \cdot U \cdot K_2, \quad \beta_2 = \frac{q}{E_c' A_c} - \frac{1+n'p}{E_s A_s} U \cdot S_s (K_1 - K_2)$$

C_1, C_2, C_3, C_4 は積分定数で、境界条件により求まる。

4.2 片持梁端部ひび割れ幅および鉄筋ひずみの解析

上に提案した付着解析モデルの妥当性を検討するため、片持梁の端部ひび割れ幅および鉄筋ひずみ分布の解析を試みた。

片持梁の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とし、 $10 \times 10 \text{ cm}$ の部分(図12参照)をコンクリート解析用断面とした。付着応力 $\tau \sim$ すべり s 関係は別報[1]で提案したものをを用いた。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、実測結果を参考に端部ひび割れの両側の2ふしは付着が切れているものとして解析した。解析結果は初載荷時ならびに持続載荷時の鉄筋ひずみ分布(図8)やひび割れ幅(図5、図9)、たわみ(図7、図10)の増加をほぼ捉えている。

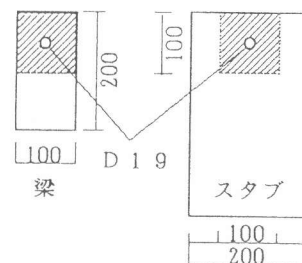


図12 解析用断面

5. 結論

以上から得られた主な結果をまとめると次のようになる。

- 1) 片持梁の端部ひび割れ幅は、スタブ部分と梁部分の抜け出しからなり、持続載荷後1日間に付着応力の緩和によって急増し、その後はコンクリートの乾燥収縮に応じて緩やかに増加する。
- 2) 片持梁のたわみは、梁の曲げによる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。付加回転たわみは、全たわみ量の初載荷時で35%(T型)と50%(L型)、長期で48%(T型)と53%(L型)を占めている。端部ひび割れ幅と同様に持続載荷後1日間に大きく増大し、その後は緩やかに増大する。133日間持続載荷後のたわみは持続載荷開始時の約1.68倍(T型)と1.57倍(L型)になった。
- 3) 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案し、その妥当性を片持梁の端部ひび割れ幅および鉄筋ひずみ分布の解析で確認した。

謝辞 本研究は本学学生の太田崇士君の協力を得て行ったものであり、また文部省科学研究費補助金(一般B:代表者 鈴木計夫)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) 鈴木・大野・李・太田: 持続荷重下における異形鉄筋の付着応力 $\sim$ すべり関係、第14回コンクリート工学年次論文集、1992.6
- 2) A C I 318-83、Building Code Requirements for Reinforced Concrete
- 3) 鈴木・大野・横田: 持続荷重下における異形鉄筋とコンクリートの付着特性、セ技年報40、pp.514~517、1986
- 4) 六車・森田・富田: 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、第131号、pp.1~8、1967.1
- 5) 岩原: 長期設計荷重下におけるRC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