

論文 RC 部材の重ね継手における応力分布

林 隆成*1・市之瀬敏勝*2・榊原 行利*3

要旨：著者らは、先にRC部材の重ね継手における局所的な付着すべり特性を提案した。本報告では、この局所的な付着すべり特性から、主筋とコンクリートのひずみを考慮して、付着応力の分布や部材全体の荷重変形関係を求める方法を示した。付着強度の解析は全般的に実験結果と一致した。本解析方法によって、荷重が低下する際、横補強筋のひずみが一定となる実験結果を説明できた。横補強筋比が大きいほど付着強度に及ぼす重ね長さの影響が小さくなった。

キーワード：鉄筋コンクリート、重ね継手、付着応力、ひずみ、すべり

1. はじめに

筆者ら [1] は、節前面でのコンクリートの局所的破壊、割裂ひび割れ、横補強筋の面外への曲がりを考慮した重ね継手解析法を提案した。この解析によれば、 $p_w=2.4\%$ という高いレベルまで横補強筋の効果が表れるという実験結果、また、割裂ひび割れが広く開いても横補強筋が降伏しないという実験結果を無理なく説明できる。しかしこの解析では、主筋を剛体と仮定したので、得られたのは局所的な付着すべり特性 (図1) であると言える。本報告では、主筋とコンクリートのひずみを考慮して、付着応力の分布や部材全体の荷重変形関係を求める方法を示す。

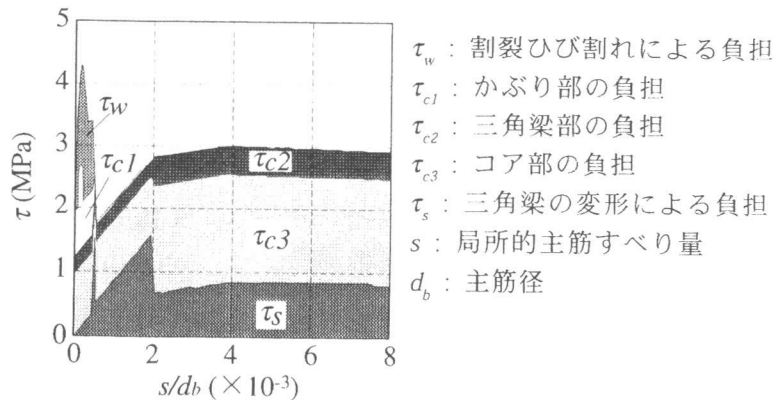


図1 局所的な付着すべり特性 ($p_w=1.0\%$)

2. すべりの定義と基礎方程式

図2のように、左側から来た主筋の変位を u_L 、右側から来た主筋の変位を u_R 、コンクリートの変位を u_c と表す。左右の主筋のすべり量を s_L, s_R で表すと、 s_L, s_R は次式で与えられる。

$$s_L = u_L - u_c \quad \dots (1)$$

$$s_R = u_R - u_c \quad \dots (2)$$

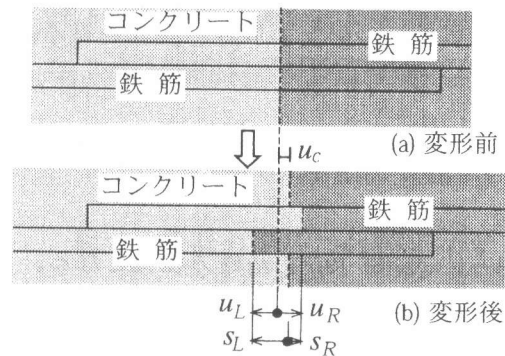


図2 鉄筋とコンクリートの変位の定義

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)
 *2 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科, 工博 (正会員)
 *3 名古屋工業大学学生 工学部社会開発工学科

式 (1) (2) の両辺を継手中央からの距離 x で微分して、次式を得る。

$$\frac{ds_L}{dx} = \varepsilon_L - \varepsilon_c \quad \dots (3)$$

$$\frac{ds_R}{dx} = \varepsilon_R - \varepsilon_c \quad \dots (4)$$

$\varepsilon_L, \varepsilon_R$: 左右の主筋のひずみ ε_c : コンクリートのひずみ

片側 (たとえば左側) 主筋の微小範囲を考えると、図3に示すような力の釣合が考えられる。よって、付着応力に関する次式が得られる。

$$A \cdot [\sigma_L(x+dx) - \sigma_L(x)] = \psi \cdot \tau_L \cdot dx \quad \dots (5)$$

A : 主筋の断面積 ψ : 主筋の周長

式 (5) を変形して、

$$\frac{d\sigma_L}{dx} = \frac{\psi}{A} \cdot \tau_L \quad \dots (6)$$

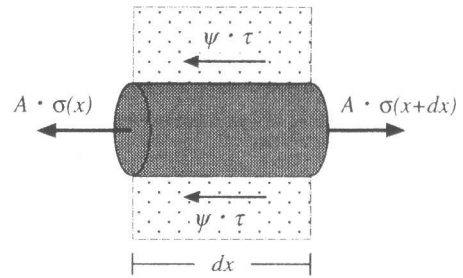


図3 主筋微小範囲における力の状態

を得る。主筋のヤング率を E とすると、弾性範囲内では、

$$\frac{d\varepsilon_L}{dx} = \frac{\psi}{AE} \cdot \tau_L \quad \dots (7)$$

を得る。式 (3) を再度 x で微分し、式 (7) を代入して、次式を得る。

$$\frac{d^2s_L}{dx^2} = \frac{\psi}{AE} \cdot \tau_L - \frac{d\varepsilon_c}{dx} \quad \dots (8)$$

右側の鉄筋についても同様に次式を得る。

$$\frac{d^2s_R}{dx^2} = \frac{\psi}{AE} \cdot \tau_R - \frac{d\varepsilon_c}{dx} \quad \dots (9)$$

これら、式 (8) (9) が基礎方程式となる。

3. すべり分布の解析法

ここで次の2点を仮定する。

1. 左右の主筋の付着応力 τ_L, τ_R は、主筋のひずみなどとは無関係に、すべり量 s_L, s_R のみの関数で与えられる。
2. 隣り合う主筋同士の間での付着応力の伝達は、図4に示すように、それぞれの場所で自己完結的に

われる。...つまり、任意の位置 x において

$$\tau_L = -\tau_R \quad \dots (10)$$

が成り立つ。上記の仮定より、任意の位置 x において

$$s_L = -s_R \quad \dots (11)$$

が成り立つことになる。式 (3) (4) の両辺を足し合わせ、式 (11) を利用すると、

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_L + \epsilon_R}{2} \quad \dots (12)$$

を得る。つまり、コンクリートのひずみは、左右の主筋のひずみの平均となる。また、式 (8) (9) の両辺を足し合わせ、式 (10) (11) を利用すると、

$$\frac{d\epsilon_c}{dx} = 0 \quad \dots (13)$$

を得る。つまり、コンクリートのひずみは、位置 x にかかわらず一様な値となる。さらに、鉄筋の自由端においてひずみがゼロであること、および式 (12) より、継手端の鉄筋のひずみは、コンクリートのひずみ ϵ_c の2倍となる。よって、ひずみの分布は図5のようになる。

また、式 (13) を式 (8) (9) に代入すると次式を得る。ただし、 $s_L = -s_R = s$ 、 $\tau_L = -\tau_R = \tau$ と表す。また、 ds/dx を s' で表す。

$$s'' = \frac{\psi}{AE} \cdot \tau \quad \dots (14)$$

この微分方程式を解いて、すべり s の分布を得る。

継手部分の変形を拡大すると、式 (11) で見たように $s_L = -s_R$ が成り立つから、鉄筋はコンクリートに対して対称にすべることになり、図6のようになる。ここで、図中の鉄筋の編み目部分がすべりが生じていない部分であり、斜線部分がすべりが生じている部分を表している。载荷の初期の段階では、図6(b)

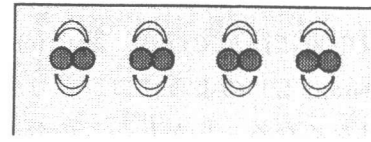


図4 隣り合う主筋同士の
付着応力の伝達

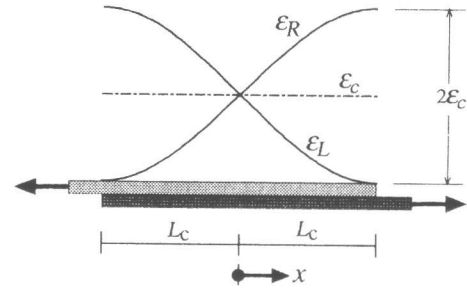


図5 ひずみの分布

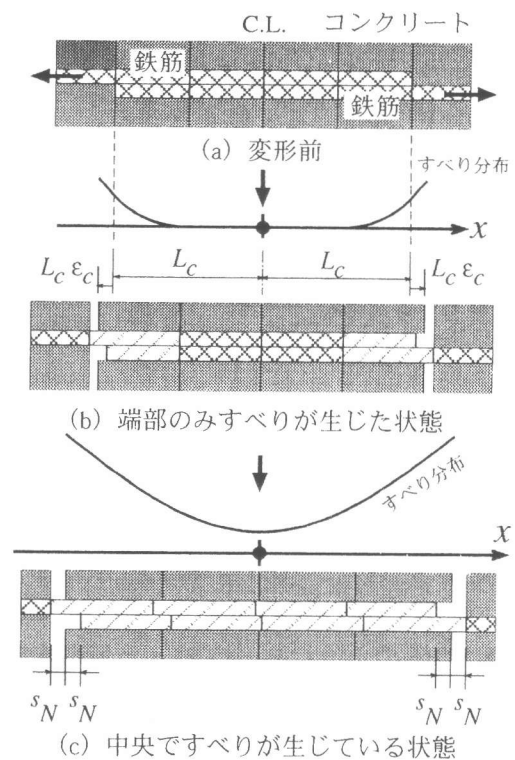


図6 载荷の進行に伴うすべり
分布の変化

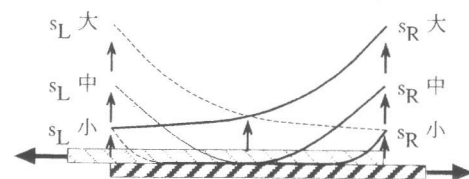


図7 コンクリートのひずみを無視
したときのすべり分布

に示したように、端部の一部の領域のみですべりが生じる。荷重の進行とともにすべりが始まる箇所は中央に進んで行き、図6(c)に示したように、継手中央でもすべりが生じるようになる。なお、Harajli [2]のようにコンクリートのひずみを無視すると、すべりの分布は図7のように左右対称ではなくなる。しかし、この分布は図4と矛盾する上、継手中央部での釣合条件からも不適切である。

4. 荷重 - たわみ関係の計算

既往の実験の多くは、図8(a)のような試験体で、荷重 P と中央のたわみ δ を測定している。重ね長さは中央の $2L_c$ である。

まず、中央のたわみ δ を求めよう。このために次の3点を仮定する。

- (1) 継手部分以外は平面保持が成立する。
- (2) 図8(a)の L_a 部分では、コンクリートのひずみは直線的に変化する。
- (3) 断面の中立軸は、図8(e)に示すように、圧縮縁から $2d_c$ の位置にある。

仮定(1)より、たわみ δ は、次式に示すように、コンクリートのひずみによる変形 δ_f と、継手端部での抜け出しによる変形 δ_s との和で与えられることになる。

まず、コンクリートのひずみによる変形 δ_f を考える。コンクリートのひずみ分布は図5および、仮定(2)より図8(b)のようになる。よって、図8(b)から得られる曲率分布を積分してコンクリートのひずみによる変形 δ_f を得る。

次に、図8(c)の抜け出しによる変形 δ_s を考える。継手端部の抜け出しによるひび割れ幅は、図6(c)に示すように、 s_N となる。よって、抜け出しによる回転角 θ は、図8(d)(e)より、

$$\theta = \frac{s_N}{d - 2d_c}$$

となる。抜け出しによる変形は、

$$\delta_s = (L_a + L_b)\theta \quad \dots (16)$$

最後に荷重 P を求めよう。応力中心間距離を図8(f)のように $j = (7/8)d$ と仮定すると、曲げモーメントは、主筋断面積 a_r 、主筋ヤング率 E を用いて、

$$M = j \cdot a_r \cdot E \cdot \varepsilon_s \quad \dots (17)$$

となる。荷重 P は次式で得られる。

$$P = \frac{2M}{L_a} \quad \dots (18)$$

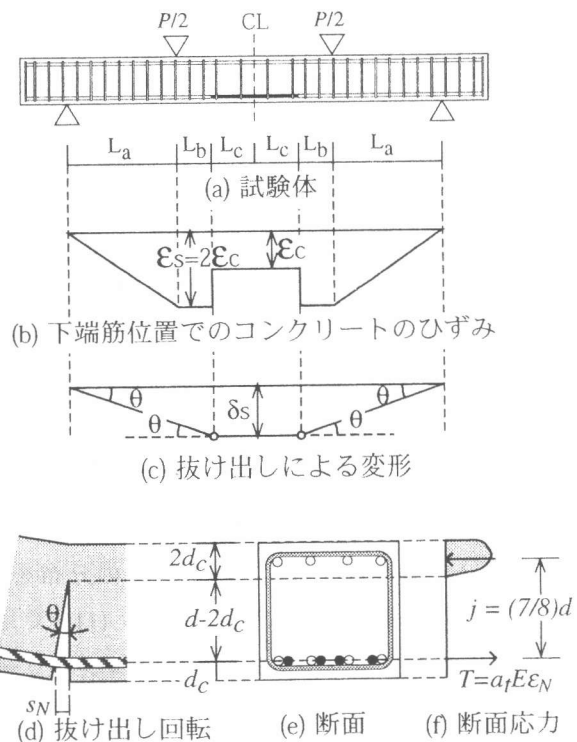


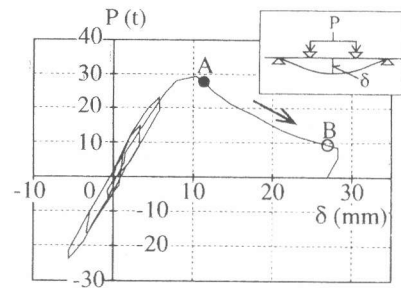
図8 荷重 - たわみ関係の計算仮定

5. 解析結果

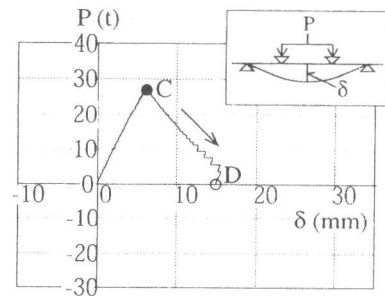
解析対象として、桜田ら [3] の実験を取り上げる。これは、重ね継手の付着割裂強度に及ぼす横補強筋の効果を、中子筋を含めて定量的に検討した実験である。

荷重と試験体中央部のたわみの関係を図9に示す。なお、図9 (a) 実験結果において曲線が往復しているのは、正負繰り返し載荷を行っているためである。荷重最大値以降の区間A→B, C→Dを比較すると、実験結果に比べ解析結果の方が、より急激な耐力低下をしている。しかし、荷重の増加にともなう試験体中央部のたわみ、荷重最大値について、両者がほぼ対応している。

本解析では、各荷重レベルにおける主筋のすべり分布から、同時に各位置の横補強筋のひずみを求めることができる。そこで、図11に示す継手中央の横補強筋のひずみと荷重の関係を図10に示す。図10 (a) (b) の各曲線I~Lは、図11に示すI~L各位置のひずみを表している。図10 (a), (b) の区間A→Bを見ると、中子筋は600~800 (μ)、外周筋は500~700 (μ)で、ひずみが一定のまま荷重だけが低下している。しかし、荷重-たわみ関係 (図9 (a) 区間A→B) では、荷重は最大に達した後なだらかに低下している。解析においても図9 (b) および、図10 (c) (d) の区間C→Dに示すように、同様の現象がみられる。この現象は、著者らが文献 [1] で提案した三角梁を用いて説明できる。三角梁とは、図12 (a) に示すような、横補強筋のまわりにコンクリートが三角状に付着して形成されるものである。三角梁が主筋から力を受けると、図12 (b) に示すように三角梁が曲がり、バネが伸びる。変形がある程



(a) 実験結果 ($p_w=1.0\%$)



(b) 解析結果 ($p_w=1.0\%$)

図9 荷重と試験体中央部のたわみの関係

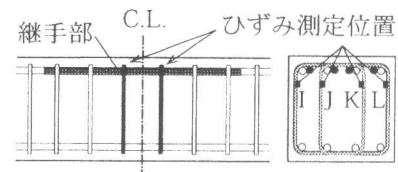
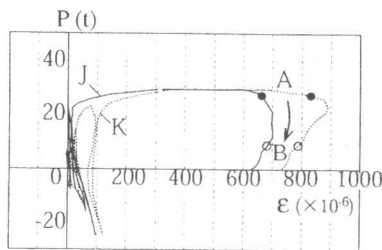
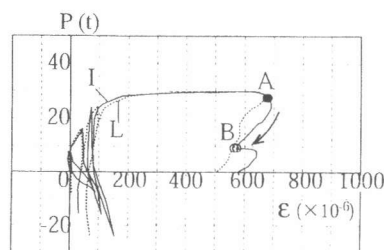


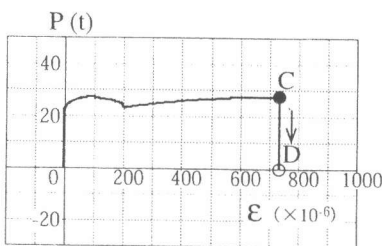
図11 試験体断面図



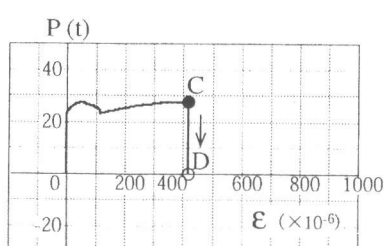
(a) 中子筋実験結果



(b) 外周筋実験結果

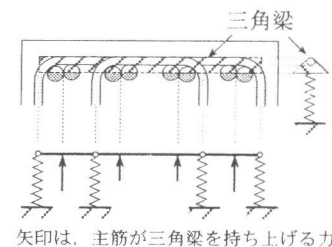


(c) 中子筋解析結果

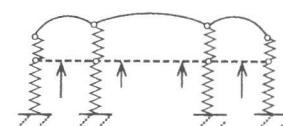


(d) 外周筋解析結果

図10 荷重と横補強筋のひずみの関係



(a) 横補強筋のモデル化



(b) 変形の様子

図12 三角梁モデル図

度まで進行すると、ばねの引張降伏より先に三角梁の曲げ降伏がおきる。その後は、三角梁の曲げ変形のみ進行しながら、付着応力が低下する。すなわち、横補強筋のひずみは一定のまま、荷重だけが低下する。

6. 付着強度と横補強筋比，重ね長さの関係

図14に横補強筋比 p_w と付着強度の関係を示す。中子筋あり，なしどちらも解析値が実験値をやや下回っている。付着強度が横補強筋比に比例して増加する傾向は，良い対応を示している。Orangun 式 [4] では，横補強筋の付着強度に対する効果に上限を設けているため， $p_w \cong 0.8\%$ 以上で付着強度が一定となっている。

図14に重ね長さとの関係を示す。(a) に本解析による計算値を，(b) に Orangun 式による計算値を示す。解析は桜田ら [3] と同じ中子筋のある試験体について，重ね長さを種々に変化させ行った。各グラフに，実験値を合わせて示す。本解析では，横補強筋比 p_w が大きいほど，重ね長さの影響が小さくなる傾向にある。これは，Orangun 式とは異なる傾向である。

7. まとめ

本解析により，次のような結果が得られた。

- 1) 付着強度の解析は全般的に実験結果と一致した。
- 2) 著者らが先に提案した三角梁によって，荷重が低下する際横補強筋のひずみが一定となる実験結果を説明できた。
- 3) p_w が大きいほど付着強度に及ぼす重ね長さの影響が小さくなる。

[謝辞]

本研究遂行にあたり，貴重な資料を提供していただいた日本大学助教授桜田智之先生に厚く感謝致します。また，本論文にその資料の一部を掲載させていただきました。

[参考文献]

- [1] 市之瀬敏勝，村田憲治：RC 部材の重ね継手の解析，日本建築学会構造系論文報告集，1996年3月（掲載予定）
- [2] Harajli, M. H. : Development/Splice Strength of Reinforcing Bars Embedded in Plain and Fiber Reinforced Concrete, ACI Structural Journal, Vol. 91, No. 5, pp. 511-520, 1994
- [3] 桜田智之，師橋憲貴，田中礼治：重ね継手の付着割裂強度に及ぼす横補強筋の効果に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集 第465号 119-128, 1994年11月
- [4] Orangun, C.O., Jirsa, J.O. and Breen, J.E. : A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, ACI Structural Journal, Vol. 74, pp.114-122, Mar. 1977

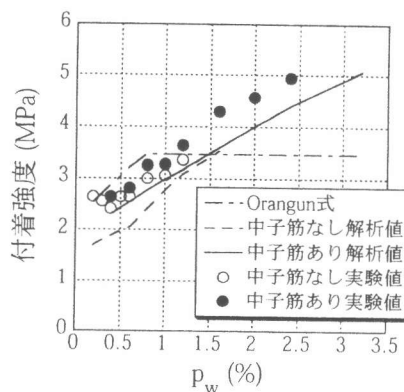
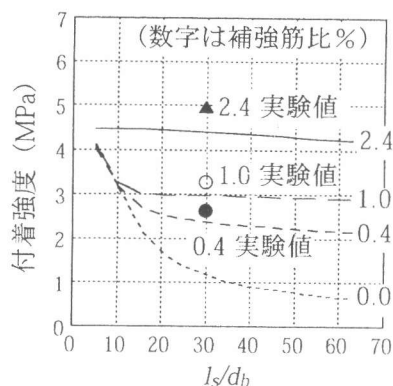
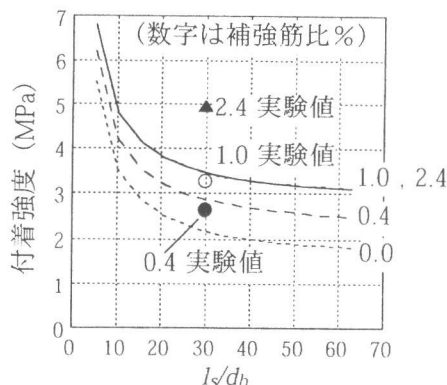


図13 横補強筋比と付着強度の関係



(a) 計算値 (著者ら)



(b) 計算値 (Orangun 式)

図14 重ね長さとの関係