

論文 中子筋を有する RC 部材の重ね継手の解析

村田憲治 *1, 市之瀬敏勝 *2, 林隆成 *3

要旨：重ね継手の付着抵抗機構を、主筋の節前面・横補強筋・主筋周囲のコンクリートに分けてモデル化して解析的に強度を算定した。特に横補強筋を頂点としてコンクリートが三角柱状に付着してできる梁の存在を予想して解析をおこなった。本研究ではこの梁を三角梁と名付けた。その結果、付着強度に補強筋の降伏強度が関係しないのは、この三角梁が曲げ降伏するためであることや、横補強筋比の増大による強度の上昇が直線的であるのは、三角梁の本数が増えるためであることがわかった。

キーワード：重ね継手, 中子筋, 三角梁, 割裂ひび割れ, 付着応力

1. はじめに

異形鉄筋の付着割裂については、実験的研究により多くの知見が得られてきた。しかし、多くの謎も残っている。筆者らには特に次の3点が長年の疑問であった。

(1) 付着強度式のほとんどは $\tau_{bu} = \tau_{co} + \tau_{st}$ (コンクリートと補強筋の寄与分の和) という形式で与えられる。この τ_{co} は、付着割裂ひび割れ発生時の強度でもある。一方、 τ_{bu} はひび割れが十分拡大した後の終局強度である。なぜ終局強度にひび割れ強度が関係するのか？

(2) τ_{st} に補強筋の降伏強度が関係しないのはなぜか？

(3) 桜田らの重ね継手の実験¹⁾ では $p_w = 0.2\%$ から 2.4% まで τ_{st} と p_w との間に直線的関係が見られた。なぜこれほどの高補強まで直線的効果があるのか？ 補強筋の効果に上限は無いのか？

この論文は、対象を重ね継手に限定し、解析的方法により上記3点への回答を試みようとするものである。

2. 解析方法

本研究では付着破壊はサイドスプリット型で起こるとして解析をおこなう。主筋については、文献[2]と同じく、剛体と考え、断面を長方形に置き換える。さて、サイドスプリット型の割裂ひび割れが十分に成長した後で、かぶりコンクリートを取り去った状況を想定してみよう。すると、図1のように、横補強筋を頂点としてコンクリートが三角柱状に付着して残ることが予想される。本研究ではこれを三角梁と呼ぶ。部材を主筋の位置で軸方向に切断した状態を図2に示す。つまり、本研究ではコンクリートをかぶり部、三角梁部、コア部に分けて考える。田才ら³⁾ は、割裂破壊実験の後にエポ

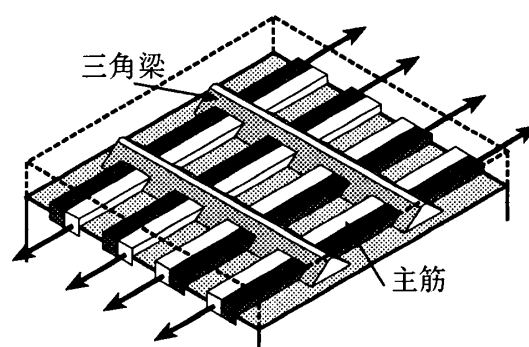


図1 主筋と三角梁の位置関係

*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

キシを注入し、図2と同じ位置で切断した写真を発表しているが、そこでも補強筋から約45°の線に沿って生じる三角梁らしきものを確認できる。これらのひび割れ、三角梁の仮定より主筋の節前面、横補強筋、主筋周囲のコンクリートの付着抵抗機構のモデル化をおこなっていく。

主筋の節前面での仕事について考える。文献[2]では主筋の節は主筋軸に対して90°にモデル化したが、本研究では節の角度も考慮する。主筋の節前面での仕事は文献[2]と同様、塑性理論を用いて求めるが、本研究では節前面での破壊を次の3つのタイプに分けて考える。ひび割れが次の節に達しない破壊状態1、ひび割れが次の節に達する破壊状態2、コンクリートと節の間の摩擦による破壊状態3である。これらの破壊状態のイメージ図と詳細図を図3に示す。図において α は破壊面とコンクリートの変位の角度、 γ は破壊面と主筋との角度、 β は節の角度、 V_c はひび割れ幅、 V_s は主筋滑り量である。 a は節間距離で、 h_d は節高さである。文献[2]より破壊状態1と2の節1個分の節前面での内部仕事増分 ΔW_{ic} は次式で求めることができる。

$$\Delta W_{ic} = S \cdot \frac{1}{2} \nu f_c (1 - \sin \alpha) \frac{\Delta V_s}{\cos(\alpha + \gamma)} \quad \dots (1)$$

S : 破壊面の面積 f_c : コンクリート強度

ν : 有効強度係数

破壊面の面積 S は破壊状態1と2によって次のように分けて考える。ここで d_b は主筋径である。

$$S = \frac{h_d - V_c}{\sin \gamma} \cdot d_b \quad (\text{破壊状態1})$$

$$\dots (2)$$

$$S = \frac{a - V_s}{\cos \gamma} \cdot d_b \quad (\text{破壊状態2})$$

破壊状態3はコンクリートと節との摩擦による破壊だが、本研究では摩擦とはお互いの表面間で起こる破壊であるとみなし、式(1)を準用して内部仕事増分を求める。式(1)はコンクリート同士の破壊の式であるが破壊状態3ではコンクリートと節との破壊となるため破壊状態3における内部仕事増分は式(1)の1/2となると仮定した。

コンクリートの有効強度について考える。文献

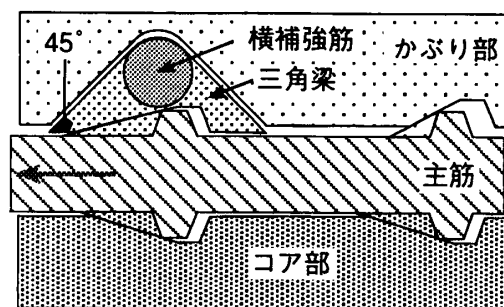
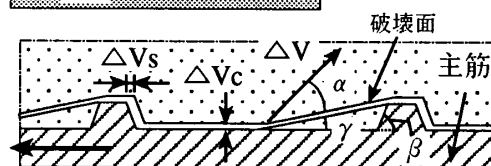


図2 主筋軸方向のひび割れ



(a) イメージ図

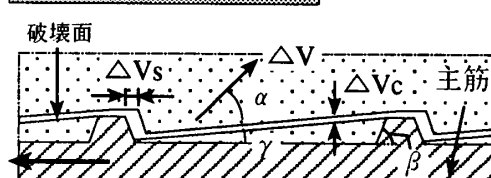


(b) 詳細図

(A) 破壊状態1 ($\tan \gamma \geq h_d/a$)



(a) イメージ図

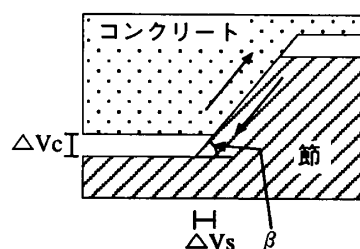


(b) 詳細図

(B) 破壊状態2 ($\tan \gamma < h_d/a$)



(a) イメージ図



(b) 詳細図

(C) 破壊状態3 ($\gamma = \beta$)

図3 節前面における破壊のパターン

[2] では $\nu=1$ としていたが本研究では次のように考えた。赤司ら^[4] は鋼管補強したコンクリートの付着実験をおこない、付着破壊は節と節とを結ぶせん断破壊を起こしていることを確認している。そのときの最大せん断強度 σ_{smax} を次式で与えている。

$$\sigma_{smax} = 2.4 \cdot f_c^{0.85} \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad \dots (3)$$

本研究における単位面積当たりの内部仕事逸散 ΔW_o は

$$\Delta W_o = \frac{1}{2} \nu f_c (1 - \sin \alpha) \Delta V \quad \dots (4)$$

となるが、ここで $\alpha=0$ としたものが σ_{smax} と等しくなるとすれば次式が得られる。

$$\nu f_c = 4.8 f_c^{0.85} \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad \dots (5)$$

これらの式を用いて、それぞれのコンクリートの状態についてどの破壊状態で破壊するかを検討し、それぞれのコンクリート内にある節の数を考慮して節前面での内部仕事増分を求める。

次に横補強筋による仕事について考える。図1において部材中に三角梁が形成されることを示したが、横補強筋による仕事はこの三角梁が曲がることにより生じるとして解析をおこなう。横補強筋の折れ曲がり点をピンとみなし、横補強筋はひび割れが進行すると抜け出すバネとみなして横補強筋の歪みを考慮した。横補強筋のバネ定数 K を次式に示す。

$$K = \frac{E_w \cdot A_w}{L_w} \quad \dots (6)$$

E_w : 横補強筋のヤング係数

A_w : 横補強筋の断面積

L_w : 歪み長さ (横補強筋径の10倍と仮定)

外周筋から鉛直力 P 、中子筋から鉛直力 nP を受けて三角梁が曲がると仮定する。これらのことをふまえた三角梁のモデル図を図4に、三角梁のモーメント図を図5に示す。三角梁の最大曲げモーメントが図5のA、B点で等しくなるとして P の係数 n を決定した。鉛直力 P 、 nP を受けて三角梁がたわみ、横補強筋が伸びる。A、B点におけるたわみとバネの伸びの和 δ_A 、 δ_B は次式によって得ることができる。

$$\delta_A = K_A \cdot P \quad \dots (7)$$

$$K_A = \left[\frac{g_1^2 \cdot (g_2 - g_1)^2}{3 \cdot g_2 \cdot EI} + \frac{g_1^2 + g_2^2 - g_1 \cdot g_2}{K \cdot g_2^2} \right]$$

$$\delta_B = K_B \cdot P \quad \dots (8)$$

$$K_B = \left[\frac{g_1^2 \cdot (2g_1 + 3g_2) \cdot (g_2 - g_1)}{6 \cdot g_2 \cdot EI} + \frac{1}{K} \right]$$

EI : 三角梁の曲げ剛性 (後述), K : 横補強筋のバネ定数

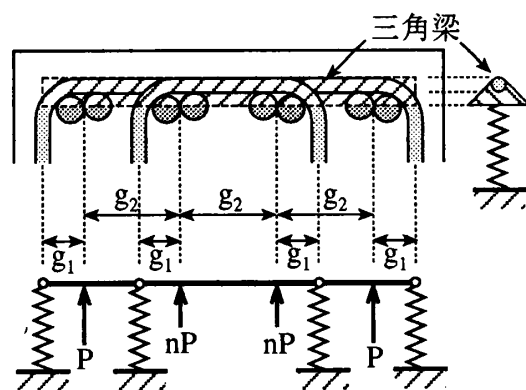


図4 三角梁のモデル図

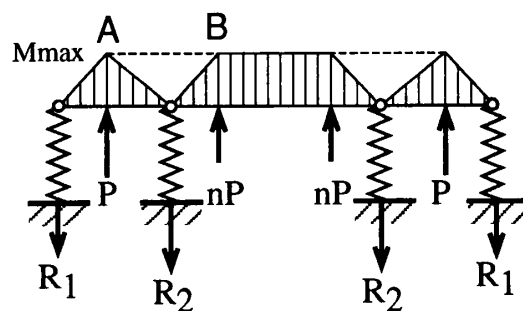


図5 三角梁のモーメント図

A, B点におけるたわみとバネの伸びの和の平均が三角梁部とコア部のひび割れ幅の和と等しくなるという条件より,

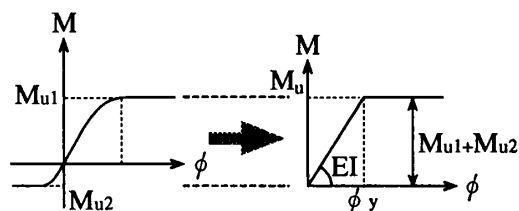
$$\frac{\delta_A + \delta_B}{2} = V_{c2} + V_{c3} \quad \dots (9)$$

V_{c2} : 三角梁部のひび割れ幅 V_{c3} : コア部のひび割れ幅

なお, 図2からわかるように, かぶり部のひび割れは横補強筋の伸びには関与しない。式 (6) から式 (9) より P を求める式 (10) が得られる。

$$P = \frac{2(V_{c2} + V_{c3})}{K_A + K_B} \quad \dots (10)$$

三角梁の曲げ剛性 EI について考える。図6 (a) に三角梁のモーメント - 曲率モデルを示す。ここで M_{u1} は梁上端引張時の全塑性曲げモーメント, M_{u2} は梁下端引張時の全塑性曲げモーメントを示す。ここで三角梁は下端引張の曲げモーメントをもたないと考え, M_{u2} を M_{u1} に重ね合わせて全塑性モーメント M_u を与えた (図6 (b))。図7に三角梁断面内の応力度・歪み度分布図を示す。本研究において中立軸は横補強筋内に存在したためその場合の分布図を示した。図7のTとCの釣合より全塑性モーメント M_u とコンクリート圧縮縁から中立軸までの距離 X_n を求める。曲率 ϕ_y はコンクリート圧縮縁における降伏歪みを0.002と仮定し, $\phi_y = 0.002/X_n$ とした。これらのことより曲げ剛性 EI は M_u/ϕ_y で与えられる。

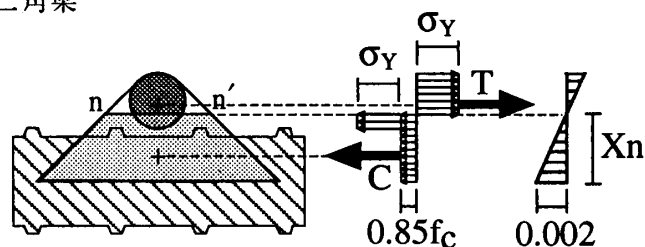


(a) 実際の M - ϕ 曲線 (b) モデル化

図6 三角梁のモーメント - 曲率モデル

式 (10) の P とひび割れ幅の増分を用いて三角梁1本あたりの仕事の増分が得られ, それに三角梁の本数即ち横補強筋の組数を乗じれば横補強筋の仕事増分を求めることができる。

次に主筋周囲のコンクリートの割裂ひび割れ面における仕事を考える。前田は破壊力学に基づく二次元非線形有限要素解析により, ひび割れ幅と割裂応力度の関係を図8のように与えている^[9]。図中点O~点Aはひび割れが進展し, 割裂応力度が上昇する範囲を, 点A~点Bは最大割裂応力度に達した後急激に割裂応力度が低下する範囲を, 点B~点Cは割裂応力度が低下しひび割れ幅が増加する範囲をそれぞれ表している。本研究ではこのモデルのうち, 点Aの強度 σ_{na} について, 割裂線長さ比 b_f の影響を考慮するため, 次式 (11) のように修正し解析に適用した。ここで $Z = d_{max}/d_b$ である (d_{max} : コンクリート最大骨材径)。



(a) 三角梁断面図 (b) 応力度分布 (c) 歪み度分布

図7 三角梁断面内の応力度・歪み度分布

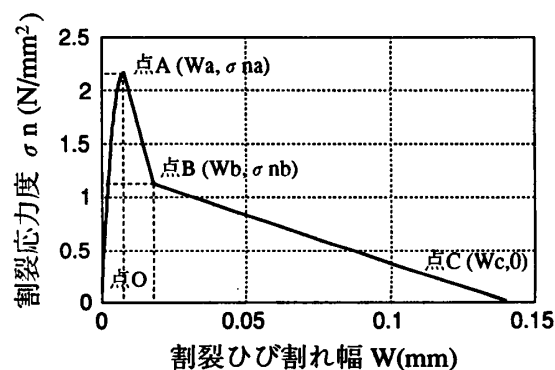


図8 ひび割れ幅と割裂応力度の関係 (前田)

$$\frac{\sigma_{na}}{f_t} = b_i \left(1 - \frac{1}{3z+1} \right) \quad \dots (11)$$

図9にこの関係を示す。図8より得られた割裂応力度より主筋周囲のコンクリートの割裂ひび割れ面における仕事増分を求める。

3. 解析結果

解析対象として桜田ら^[1]の試験体を取り上げる。節の角度は $\beta=60^\circ$ と仮定した。図10に主筋滑り量と付着応力の関係を示す。図中、 τ_{c1} はかぶり部、 τ_{c2} は三角梁部、 τ_{c3} はコア部、 τ_w は主筋周囲のコンクリート、 τ_s は横補強筋の応力負担を表す。黒三角で実験値を示す。またグラフ上部に節前面の破壊の状態を示す。横補強筋比 p_w が増えると三角梁部と横補強筋の応力負担が増加し、付着応力が増加することがわかる。また節前面での破壊はかぶり部では破壊状態3が、コア部、三角梁部では p_w が小さい場合は破壊状態3が、大きい場合は破壊状態1が支配的である。図11に主筋滑り量と横補強筋応力との関係を示す。実験で得られた最大強度時の外周筋の応力を黒三角で、中子筋の応力を白三角で示す。三角梁が曲げ降伏することにより横補強筋の応力の上昇が頭打ちになった。

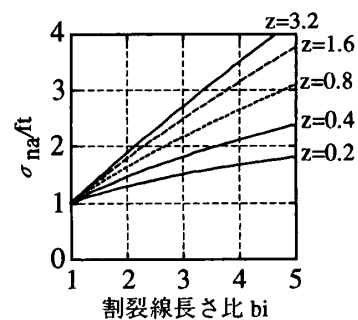
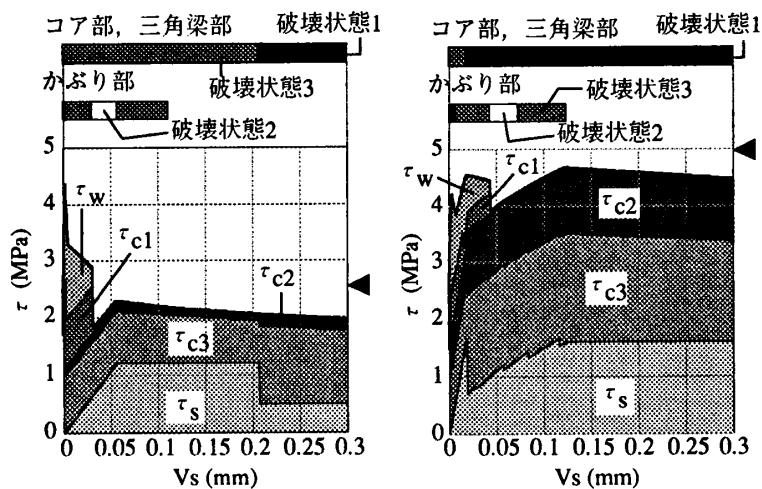


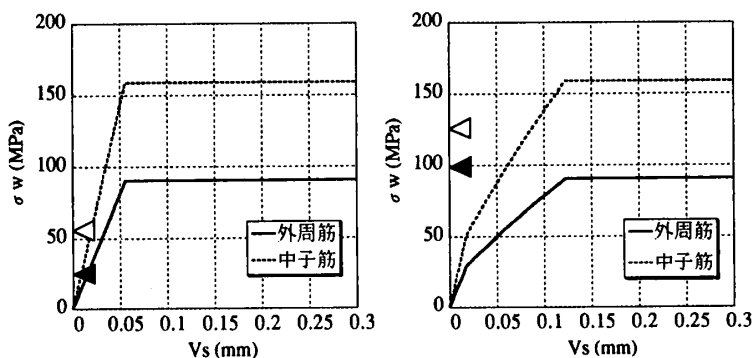
図9 修正した割裂線長さ比と割裂応力度の関係



(a) $p_w=0.4\%$

(b) $p_w=2.4\%$

図10 主筋滑り量と付着応力の関係



(a) $p_w=0.4\%$

(b) $p_w=2.4\%$

図11 主筋滑り量と横補強筋応力の関係

4. 付着応力の分布

これまでは主筋を剛体として解析をおこなってきたが、ここでは付着応力が実際に主筋各部でどのように分布しているかを考える。主筋滑り量 V_s は主筋の変位 U_s 及びコンクリートの変位 U_c で次式で得られる。

$$V_s = U_s - U_c \quad \dots (12)$$

式(12)の両辺を継手中央からの距離 x で微分すれば、

$$\frac{dV_s}{dx} = \epsilon_s - \epsilon_c \quad \dots (13)$$

ϵ_s : 主筋の歪み ϵ_c : コンクリートの歪み

主筋の歪み分布を図12のように仮定すれば(図中 L は継手長さ)ある主筋位置 x のときの主筋滑り量は式(13)を積分すれば得られる。主筋滑り量を求めることができれば「3.解析結果」で得られたグラフよりある主筋位置 x の付着応力を求めることができる。主筋の歪み分布を三角関数、コンクリートの歪み分布を一定として継手端部において $\varepsilon_s = 2\varepsilon_c$ であるという条件を満たすような ε_c を求め解析をおこなった。

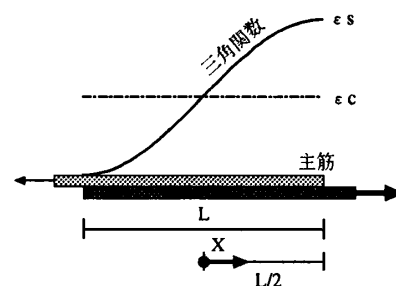


図12 主筋歪み分布図

図13に継手中央部からの距離と付着応力の関係を示す。図10と同様、各部の応力負担と実験値を示した。図より継手中央付近では主筋周囲のコンクリートの応力負担 τ_w が大きく、継手端部付近では横補強筋の応力負担 τ_s が大きいことがわかる。また横補強筋比が大きくなると三角梁による応力負担 τ_s, τ_{c2} が大きくなっている。図13の付着応力を平均すればその試験体の付着強度を算出することができる。図14に計算値と実験値を比較して示す。解析値は実験値を下回ってはいるが、およそ良い対応は示し、その傾向をとらえているといえる。

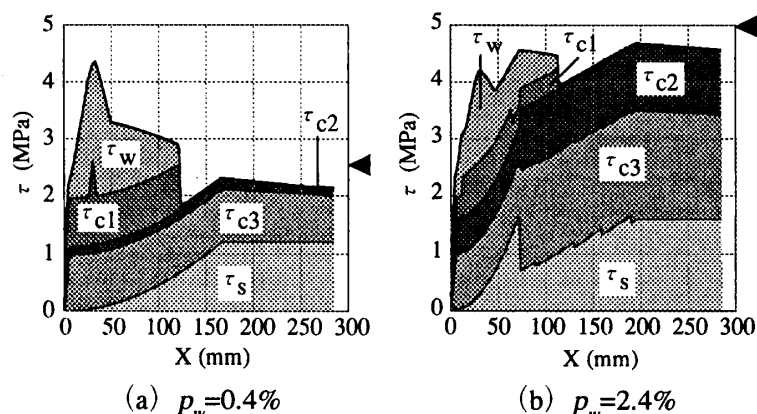


図13 継手中央からの距離と付着応力の関係

5. 結論

本論文の仮定が正しいとすれば、次のことが言える。

- (1) 付着強度にひび割れ強度が関係するのは、重ね長さの中央部にすべりの極めて小さい領域(=コンクリートの引張応力が働いている領域)と、重ね長さの両端部にすべりの大きい領域(=補強筋が働いている領域)が同時に共存するからである。
- (2) 付着強度に補強筋の降伏強度が関係しないのは、横補強筋が降伏するわけではなく、三角梁が曲げ降伏するからである。
- (3) 横補強筋比の増大による強度の上昇が直線的であるのは、三角梁の本数が増えるためである。また強度の上限は三角梁が重なり合う状態になったときに生じると予想される。

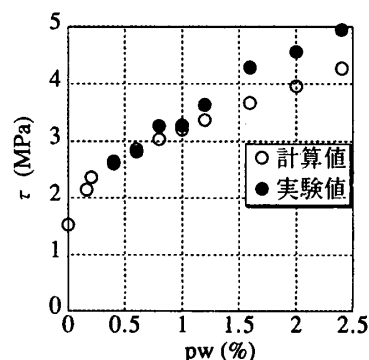


図14 計算値と実験値の比較

参考文献

- [1] 桜田智之他：重ね継手の付着割裂強度に及ぼす横補強筋の効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.2，pp.223-228，1993 [2] 村田憲治他：塑性理論と破壊力学を考慮したRC部材の付着割裂解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.2，pp.217-222，1994
- [3] 田才晃他：エポキシ樹脂注入後の付着割裂強度，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.2，pp.193-198，1993 [4] 赤司二郎他：コンクリート強度と鉄筋節形状が付着特性に与える影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.2，pp.127-132，1991 [5] 前田匡樹：鉄筋コンクリート部材の付着割裂破壊に関する研究，東京大学博士論文，第2章，1994.3