

論文 ひび割れ近傍における鉄筋とコンクリートの付着力の低下

高橋正典^{*1}・島 弘^{*2}

要旨：鉄筋コンクリート構造物の変形を解析するためには、鉄筋とコンクリート間の付着応力-すべり関係が重要である。鉄筋軸を横切るひび割れ面近傍では付着応力が小さくなるのは明らかであり、その付着力低下をモデル化する必要がある。しかし、ひび割れ面の極近傍における付着応力分布を実験的に求めるのは困難であり、付着力低下は定量的に明らかにされていない。そこで、本研究では、太径の鉄筋を用いて実験的に付着応力分布を求め、付着応力-すべり関係に適用するためのモデル化を行った。

キーワード：異形鉄筋, 付着応力, すべり, 付着応力-すべり関係, ひび割れ近傍, 付着力低下

1. はじめに

鉄筋に引張力が働く部材あるいは接合部の変形量は、鉄筋とコンクリート間のすべり特性に支配される。鉄筋が引張力を受けた場合に生じる鉄筋とコンクリートとの間のすべりの大きさは鉄筋軸方向で変化する。この変化を表現するための基本的な指標として、鉄筋軸に沿った各位置での局所的なすべり量が用いられ、通常はその局所位置における鉄筋とコンクリート間のせん断伝達力である付着応力との関係として表される。

鉄筋が引張力を受ける場合、ひび割れ面においてはコンクリートに引張応力が生じ得ないために、付着応力は0となる。ひび割れ面近傍では、この境界条件の影響によって付着応力が小さくなる。したがって、構造物の変形やひび割れ幅を検討する場合には、鉄筋軸を横切るひび割れ面近傍における付着力の低下を考慮しなければならない。

しかし、ひび割れ面近傍における付着応力の分布は明らかにされていない。そこで、本研究は、鉄筋の引き抜き試験方法を用いて、載荷端近傍の付着応力分布を調査し、モデル化を行った。

2. 現状と問題点

山尾¹⁾らは、載荷端に非定着部を設けない引き抜き試験を行い、載荷端から鉄筋径の5倍の間隔でひずみを測定し、載荷端から鉄筋径の5倍の位置では付着応力が低下しないことを報告している。付着低下域における付着応力の分布形については、周らはひずみ分布を計算するために5次曲線を用いている²⁾。

申らは、定着鉄筋の載荷端近傍における鉄筋径の5倍の区間の付着応力が直線的に低下すると仮定して付着応力-すべり-ひずみ関係式を用いて伸び出し量を解析し、簡単な伸び出し量を表す式を示している³⁾。

しかし、ひび割れ面近傍における付着応力分布を実験

的に求めるのは困難であり、ひび割れ近傍において付着力が低下することは明らかであるが、その定量的なことは明らかでないのが現状である。

3. 実験

3.1 実験条件

実験は、鉄筋コンクリート構造物のひび割れ面近傍における異形鉄筋のコンクリートとの付着力の低下を調べるために、載荷端に非定着域を設けずに、引き抜き試験を行った。

試験体の実験条件を表-1に示す。実験の要因は、鉄筋の軸方向とコンクリートの打込み方向との関係である。コンクリートの打込みは、鉄筋軸と平行と垂直の2種類とした。

なお、付着割裂ひび割れを防ぐために、コンクリートブロック断面を十分に大きくした。

表-1 実験条件

試験体名	コンクリートの打設方向	試験時コンクリート圧縮強度 (MPa)
縦打ち	鉄筋軸と平行	32.4
横打ち	鉄筋軸と垂直	30.0

3.2 材料

(1) 鉄筋

ひずみ分布を詳細に測るためには、ひずみゲージを密に貼る必要がある。しかし、細い鉄筋にひずみゲージを密に貼ると、コーティングやリード線などが付着を妨げる可能性がある。そこで、実験が実施できる範囲で最も太いD38(公称直径 $\phi=38.1\text{mm}$)を用いた。

また、ひずみゲージを貼附するに当たって、断面を削らなくて良いものとするために、JIS G 3112に適合する側面にふしのないネジふし鉄筋を用いた。使用した鉄筋

*1 高知工科大学 工学部社会システム工学科 (正会員)

*2 高知工科大学 工学部社会システム工学科教授 工博 (正会員)

にひずみゲージを貼附した後の様子を図-1に示す。鉄筋の材質はSD345であり、鉄筋の特性を表-2に示す。

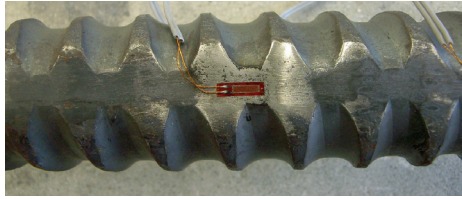


図-1 使用した鉄筋とひずみゲージ

表-2 鉄筋の特性

ヤング係数 (GPa)	降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)
194	405	610

(2) コンクリート

鉄筋とコンクリートとの付着にはコンクリートのブリージングが影響することが知られている。そこで、出来るだけブリージングを少なくするために固練りのコンクリートとした。コンクリートの示方配合、スランブ値およびブリージング試験の結果を表-3に示す。なお、ブリージング試験は、JIS A 1123に準じて行った。

3.3 試験体

(1) 形状寸法

試験体は、角形のコンクリートブロックに鉄筋を埋め込むものとした。試験体の概略を図-2に示す。割裂ひび割れの発生や割裂破壊を防ぐようにするために、コンクリートブロックの断面は十分に大きいものとした。

定着長に関して、土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾による定着長の設計値は式(1)のように 22.5ϕ (ϕ は鉄筋直径)となるため、ブロックの高さは、両試験体で900mmとして、定着長を 23.6ϕ だけ取った。

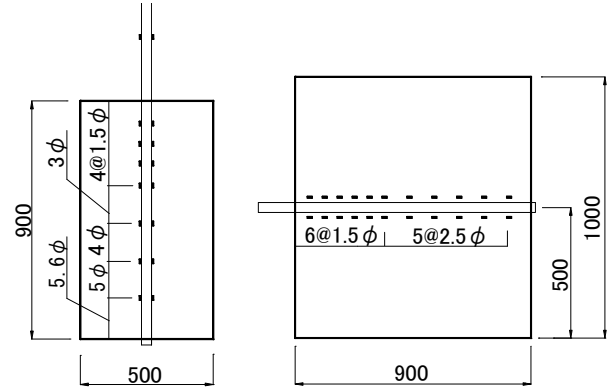
$$l = \alpha \frac{f_y}{4f_{bo}} \phi = 0.6 \frac{405}{4 \times 0.28 \times 30^{2/3}} \phi = 22.5\phi \quad (1)$$

ここで、 α はかぶりや横方向鉄筋の影響を考慮する係数、 f_y は鉄筋の設計引張降伏強度、 f_{bo} はコンクリートの設計付着強度、 ϕ は主鉄筋の直径である。

ブロックの幅と奥行きは、縦打ち試験体で850mmと500mm、横打ち試験体で1000mmと900mmとした。横打ち

試験体におけるコンクリート打設時の鉄筋の位置は底から500mmである。

鉄筋定着端(自由端)のすべりを測定するために、鉄筋端部をコンクリートブロック表面に露出させた。



(a) 縦打ち試験体

(b) 横打ち試験体

図-2 試験体およびひずみゲージ貼附位置

(3) ひずみゲージの貼附

鉄筋軸に沿ったひずみ分布を測るために、鉄筋にひずみゲージを貼り付けた。ひずみゲージの貼附位置を図-2に示す。ひずみゲージは、荷重端から鉄筋直径の9倍(9φ)までは、1.5φ間隔(57.2mm)で6か所に貼付した。ただし、縦打ち試験体では7.5φの位置には貼付せず、荷重側の非定着部に貼付した。荷重端から9φ以降は、縦打ち試験体では2か所、横打ち試験体では5か所にひずみゲージを貼付した。

ひずみゲージを貼り付ける際、ふしのない部分を紙やすりを用いて研磨し、ゲージを瞬間接着剤で貼り付けた。ゲージを貼り付けた後、リード線を細い針金で鉄筋に固定し、上からブチルゴム系テープでコーティングした。

3.4 荷重

荷重側のコンクリート面を拘束しないようにするために、図-3に示すように、コンクリートブロック上面の両端部に荷重板として鉄板を置き、その上に直角方向に鉄筋を挟むように荷重梁としてH鋼を設置した。鉄筋から荷重板までの距離は、325mm(約8.5φ)である。試験体から出しておいた鉄筋に中空型ジャッキを通し、ロードセルを設置し、鉄板とロックナットを使って固定した。一方向(引張のみ)の荷重とし、荷重荷重、ひずみ

表-3 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	ブリージング率 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 SP
20	6.5	0.6	51.0	44.2	156	306	820	1062	3.06

および自由端すべりを測定した。

一方向（引張のみ）の荷重とし、荷重荷重、ひずみおよび自由端すべりを測定した。

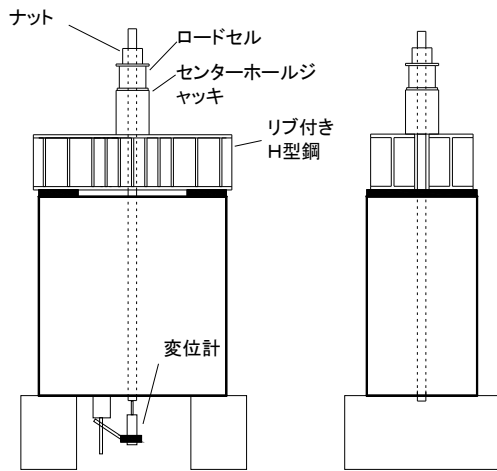


図-3 荷重方法

4. 結果および考察

4.1 ひずみ分布

各試験体のいくつかの荷重下におけるひずみ分布を

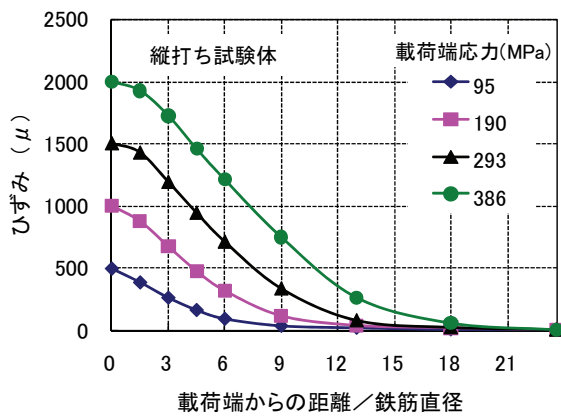


図-4 縦打ち試験体のひずみ分布

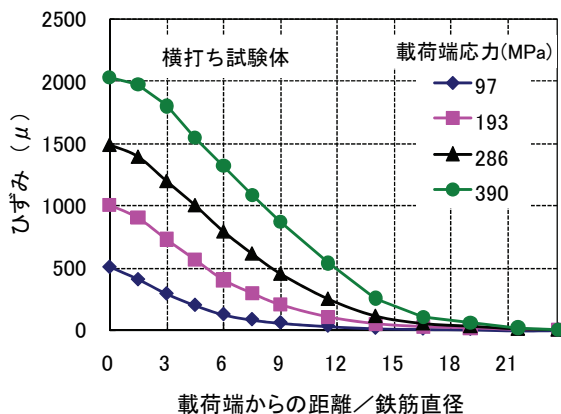


図-5 横打ち試験体のひずみ分布

図-4および図-5示す。このひずみは、鉄筋の裏表に貼ったひずみゲージによる測定値の平均である。荷重の増加とともにひずみが内部に伸展していることが分かる。荷重端近傍と自由端側で曲線形となっている。

4.2 自由端すべり

各試験体において、いずれの大きさの荷重でも自由端でのすべりは無かった。

4.3 付着応力分布

(1) 各試験体の付着応力分布

各試験体の付着応力分布を図-6および図-7に示す。付着応力は、対象とするひずみ測定位置およびその両側のひずみ測定位置の3点におけるひずみを通る2次放物線を求め、その傾きから式(2)を用いて計算した⁵⁾。

$$\tau = \frac{E D d\varepsilon}{4 dx} \quad (2)$$

ここで、 τ : 付着応力 (N/mm²)

E : 鉄筋のヤング係数 (N/mm²)

D : 鉄筋の直径 (mm)

$d\varepsilon/dx$: ひずみ分布の傾き (1/mm)

付着応力は、各荷重において、荷重端から最も離れている場所から荷重端に向けて大きくなっている。しかし、

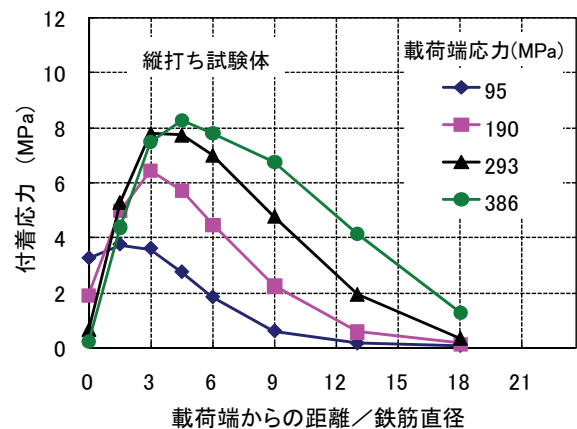


図-6 縦打ち試験体の付着応力分布

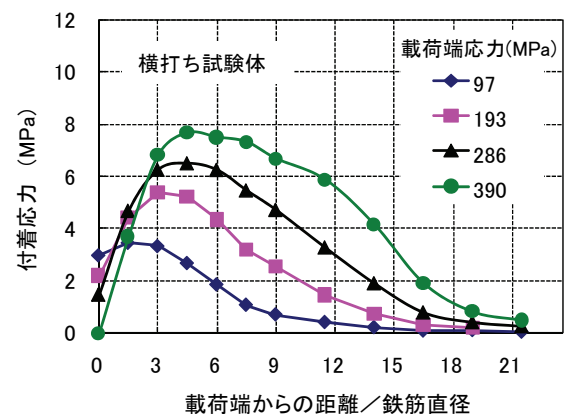


図-7 横打ち試験体の付着応力分布

載荷側のコンクリート端部では、すべりが大きくなるにも関わらず、付着応力が小さくなっている。付着応力が低下し始める位置は、荷重が大きくなるほど深くなり、降伏直前の荷重では、載荷端から約 4.5φ の位置である。

(2) 付着応力-すべり関係

両試験体のひずみゲージ貼付位置における局所付着応力-局所すべり関係を図-8および図-9に示す。各ゲージ貼付位置におけるすべりは、鉄筋の自由端におけるすべりが無いために、式(3)で算定した。

$$S_{xi} = \int_{xi}^l \epsilon_x dx \quad (3)$$

ここで、 S_{xi} : 位置 xi における局所すべり (mm)

ϵ_x : 鉄筋軸に沿った鉄筋のひずみ分布

xi : 載荷端から各ひずみゲージまでの距離 (mm)

l : 定着長で 900 (mm)

である。鉄筋軸に沿った鉄筋のひずみ分布は、付着応力の算定と同様に、3点のひずみを通る2次放物線を用いた⁵⁾。すなわち、ここでの局所すべりは、鉄筋と鉄筋から十分に離れた位置のコンクリートとの軸方向相対変位である。

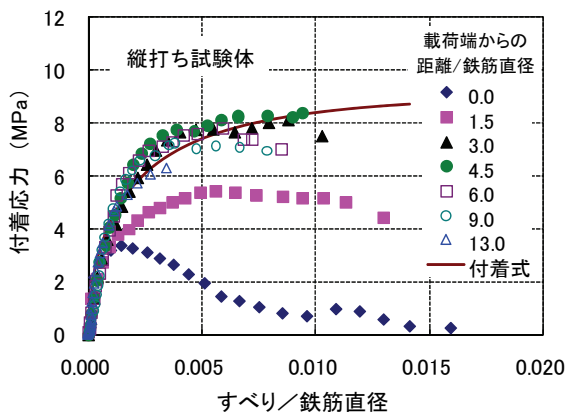


図-8 縦打ち試験体の付着応力-すべり関係

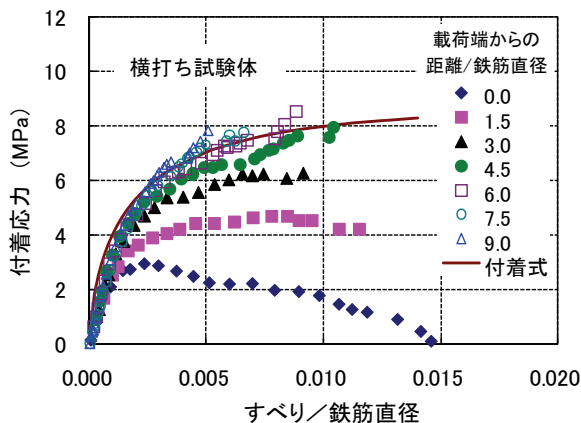


図-9 横打ち試験体の付着応力-すべり関係

載荷端および載荷端から 1.5φ の位置では、両試験体ともに、付着応力が深い位置のものよりも小さくなっている。縦打ち試験体では、載荷端から 3φ 以上の位置の付着応力はほぼ同じ値となっており、横打ち試験体では、載荷端から 4.5φ 以上の位置の付着応力がほぼ同じ値となっている。このことから、付着応力が低下する範囲は、載荷端から 3.0φ あるいは 4.5φ であることが分かる。

また、載荷端から 1.5φ の位置における付着応力はすべりが大きくなった時にもほぼ一定の値を示しているが、載荷端における付着応力はすべりが大きくなるとともに小さくなっている。

なお、図中に実線で示す曲線は、式(4)で表わされる付着応力-すべり関係式⁵⁾であり、載荷端から 4.5φ 以上深い位置の実験結果とほぼ一致している。

$$\tau = 0.9 f_c'^{2/3} \left(1 - e^{-40(S/\phi)^{0.6}} \right) \quad (4)$$

ここで、 τ : 各点における局所付着応力 (MPa)

f_c' : コンクリートの圧縮強度 (MPa)

S : 鉄筋とコンクリートの相対変位 (mm)

ϕ : 鉄筋の直径 (mm)

である。

(3) モデル化

ひび割れ面近傍における付着力の低下をモデル化するにあたり、付着力低下のない十分深い位置における付着応力に対しての低下度を表すのがひとつの方法であると思われる。図-8および図-9における付着応力の実験値の付着応力-すべり式による計算値に対する比を図-10および図-11に示す。すなわち、縦軸は同じすべりに対する実験値と式(4)による計算値との比である。横軸は、すべりあるいはひずみで表現することが考えられる。そこで、両方の図を描いてみたところ、ひずみを用いた方が線がより直線的になったために、今回は横軸をゲージ貼付位置における鉄筋のひずみで表した。

載荷端から 3.0φ 以上の深さ位置における付着応力は、ひずみが小さい範囲において計算値よりも小さくなっているが、ひずみが大きい範囲では付着応力の比はほぼ 1 となっている。ひずみが小さい範囲において実験結果が小さいことに関して、縦打ち試験体ではひずみが約 300μ で比が 1 に達しているのに対して、横打ち試験体ではひずみが 500μ においても比が 1 に達していない。これは、横打ちであるために鉄筋側面にブリージング水が溜まり、すべり初期においてはすべり剛性が低下するが、すべりが大きくなると横フシとコンクリートが接触して付着応力が回復するものと想像される。付着応力-すべり関係に対するブリージングの影響の定量評価は今後の課題としたい。

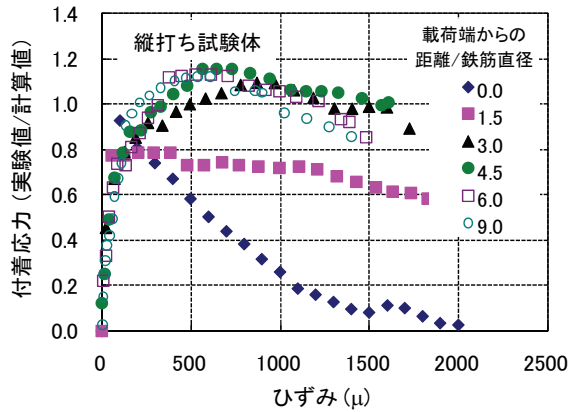


図-10 縦打ち試験体の付着応力-ひずみ関係

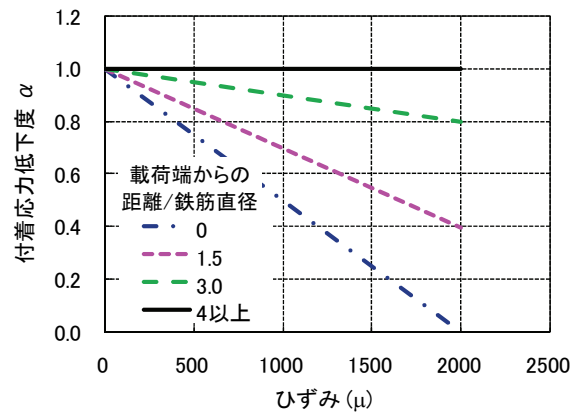


図-12 付着応力の低下度のモデル化の例

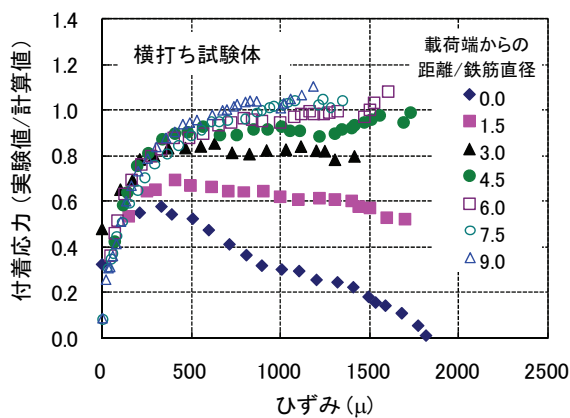


図-11 横打ち試験体の付着応力-ひずみ関係

さて、現象を忠実にモデル化するのであれば、図-10 および図-11 を基に、付着応力の低下度をひずみと位置によってモデル化することが考えられる。これらの図の特徴は、付着応力の比は位置が荷端に近いほど大きく低下しており、その低下はひずみに対してほぼ直線的であることである。それらの現象を表す式の例として、図-10 および図-11 の縦軸を付着応力低下度 α とした時、式(5)のようなものが考えられる。

$$\alpha = 1 - 500 \left(1 - \frac{x}{4\phi}\right) \varepsilon \geq 0 \quad (5)$$

ここで、 x : ひび割れ面からの距離 (mm)

ϕ : 鉄筋の直径 (mm)

ε : 鉄筋のひずみ

である。図-12 は式(5)を図化したものである。これによって、本実験方法による荷端における付着応力がひずみの増大とともに低下して行くことを表すことはできる。

しかし、実際には、ひび割れ面 (実験では荷端) においては、引抜き反対方向の反力がないために付着応力は生じ得ない。すなわち、ひずみゲージを用いる方法では、荷端におけるひずみゲージ間隔を無限小にしな

い限り、荷端に極近い部分の付着応力分布は正確に求められないのである。

そこで、式(5)がひずみの関数であって複雑であることも踏まえて、本研究では、ひび割れ面近傍における最大付着応力をモデル化することを提案する。荷端近傍の付着応力分布を詳細に見たものを図-13 および図-14 に示す。縦軸は、コンクリート強度の違いを正規化するために、付着応力をコンクリート圧縮強度の 2/3 乗で除したものとしている⁵⁾。図中の実斜線は、荷端から 1.5 ϕ の位置の付着応力と原点を結ぶ直線を延長したものである。実験値としては荷端から 1.5 ϕ までの範囲で付着応力が斜線よりも大きくなっているが、モデル化は「付着応力はこの斜線よりも大きくならない」とするものである。この斜線は、式(6)で表わされる。

$$\tau = 0.3 \frac{x}{\phi} f_c^{12/3} \quad (6)$$

ここで、 τ : 付着応力 (MPa)

x : ひび割れ面からの距離 (mm)

ϕ : 鉄筋の直径 (mm)

f_c : コンクリートの圧縮強度 (MPa)

である。

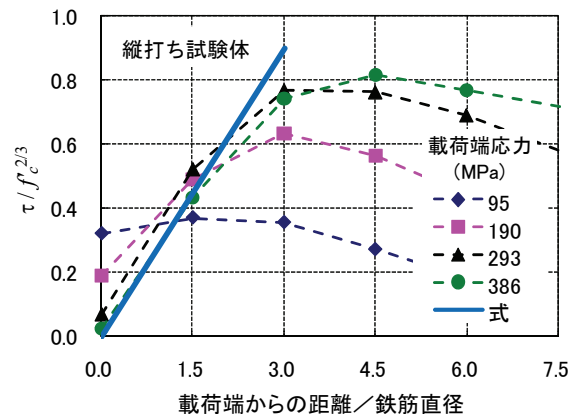


図-13 縦打ち試験体の荷端近傍の付着応力分布

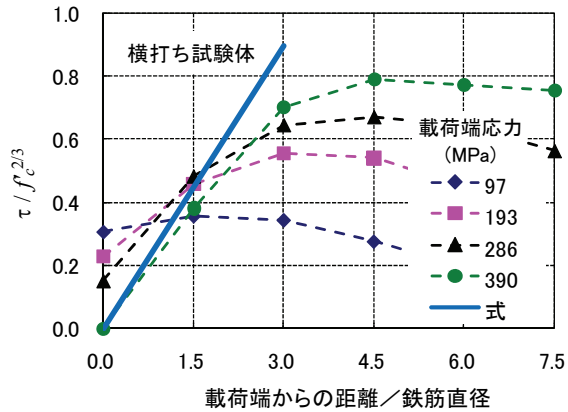


図-14 横打ち試験体の荷端近傍の付着応力分布

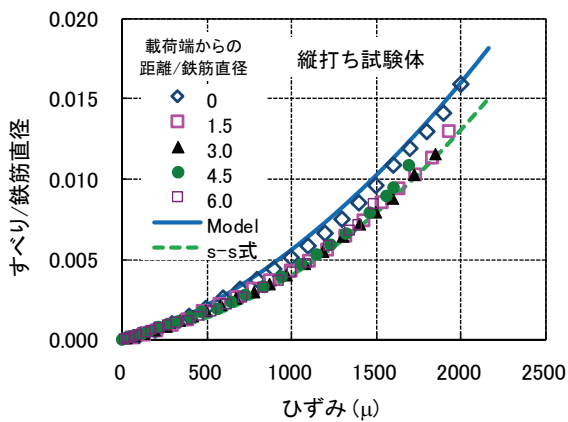


図-15 縦打ち試験体のすべり-ひずみ関係

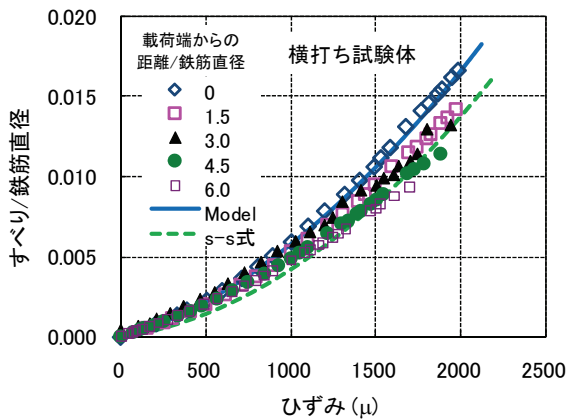


図-16 横打ち試験体のすべり-ひずみ関係

本モデルの応用例のひとつとして、十分に長い定着鉄筋の伸び出しを想定して、荷端における鉄筋のひずみとすべり（伸び出し量）の関係を図-15 および図-16 に示す。深い位置におけるその点でのひずみとすべりの

関係⁶⁾も示しているが、荷端におけるすべりは、荷端近傍における付着力低下のために深い位置でのすべりよりも大きくなっている。図中の破線が付着力の低下がない場合の計算値であり、実線が付着力が式(6)を超えないとして計算したものである。基本式には、式(4)を用いた。式(6)を荷端近傍の付着力の最大値として計算した結果は、実験結果とほぼ一致している。

5. 結論

本研究の結果から以下の結論を得た。

- (1) 荷端近傍では、すべりが大きくなるにもかかわらず、付着力が小さくなる。
- (2) 付着力が低下する範囲は、荷端から鉄筋径の3倍程度までである。
- (3) ひび割れ近傍における付着力は、式(6)を超えないとするモデルを提案し、その妥当性を検証した。

謝辞

供試体の作製や実験の実施にあたっては、高知工科大学 COE 職員の宮地日出夫氏をはじめコンクリート研究室の皆さんに協力して頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 山尾 芳秀, 周 礼良, 二羽淳一郎: 付着力-カーブ関係に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 343, pp. 219-228, 1984. 3
- 2) 周 礼良, 山尾芳秀, 岡村 甫: フーチング中に埋込まれた鉄筋のひずみ分布, 第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp. 417-420, 1982
- 3) 岡村 甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, pp. 63-65, 技報堂出版, 1991年
- 4) 2002年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 土木学会, 2002. 3
- 5) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: マッピングなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着力-カーブ関係, 土木学会論文集, No. 378/V-6, pp. 165-174, 1987. 2
- 6) Shima H., Chou L.L. and Okamura H.: Micro and Macro Models for Bond in Reinforced Concrete, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B), Vol.39, No.2, pp.133-194, 1987