

論文 かぶり厚が小さい異形鉄筋の付着特性に及ぼす鉄筋ひずみの影響

飯塚 敬一*1・斉藤 成彦*2・檜貝 勇*3・高橋 良輔*4

要旨: 鉄筋とコンクリート間の付着特性に影響を与える要因は多様であり、これらの影響を統一的に扱うことは難しい。このような問題に対して、付着モデルに鉄筋ひずみの影響を考慮することによって一般性を持たせる試みがなされ、その有効性が示されている。本報では、かぶり厚が小さい両引き試験の結果を基に鉄筋ひずみが付着特性に与える影響を検討し、かぶり厚の影響を考慮したポストピークまでの付着応力-すべりひずみ関係を導き出した。さらに、FEM 解析などによって、提案したモデルが、コンクリートの応力状態や境界条件が異なる様々な付着問題に対して適用性を示すことを検証した。

キーワード: 付着応力-すべりひずみ関係、ひずみの関数、FEM 解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC と略記）構造物の FEM 解析において、多くの場合、鉄筋とコンクリートは完全付着として取扱い、付着の特性については、テンションステイフニング効果を考慮したコンクリートの引張応力とひずみの関係などによって間接的に考慮される。しかし、鉄筋とコンクリートの付着特性は、鉄筋降伏以前の変形やひび割れ性状に影響を与え、また、付着劣化の進行がポストピークの挙動に影響を及ぼす可能性も考えられることから、解析によって RC 構造物の変形挙動をより正確に評価するためには、付着特性を正しく考慮することが重要となる。

付着特性は、付着応力とすべり量の関係（以下、 τ - S 関係と略記）に基づいた定式が便利であり、これまでも様々なモデルが提案されている。しかし、 τ - S 関係に影響を与える要因は、材料強度や鉄筋の仕様のみならず、かぶり厚や定着長、あるいは境界条件や載荷方法による応力場の違いなど極めて多様であることが山尾ら¹⁾や壹岐ら²⁾によって指摘されており、これらの影響をひとつのモデルで統一的に扱うことは非常に難しい問題である。このような理由から、従来の付着モデルも、その背景となる実験の方法によって大きく異なる場合が多く、解析にこれらを用いるためには、研究者の目的とモデルを導出するための実験の内容を十分に吟味し、取り扱う問題に合ったモデルを選定することが必要であった。

このような問題に対して、島ら³⁾は、いかなる境界条件にも適用可能な付着モデルを定式化するため、 τ - S 関係に鉄筋ひずみの影響を取り入れ、異なるいくつかの載荷方法や境界条件の付着問題への適用性を検証している。しかし、島らの提案式はマッシュパなコンクリートに埋め

込まれた鉄筋の引き抜き試験に基づいて定式化されたものであり、かぶり厚が比較的小さい柱や梁、面部材の曲げ、せん断問題への適用性については明らかではない。

そこで著者らは、様々な要因によって変化する付着特性に一般性を持たせるため、島らの研究を参考として、 τ - S 関係にかぶり厚の影響を陽な形で考慮した鉄筋ひずみ ϵ の関数を取り入れ、付着応力-すべりひずみ関係（以下 τ - S - ϵ 関係と略記）の検討を行った。このとき、曲げ部材の引張側のようにかぶり厚が小さい部材の挙動も模擬できる付着モデルを構築することを目的として、一面のかぶり厚が小さい RC 一軸引張供試体の両引き試験の結果を基に、鉄筋ひずみが τ - S 関係に与える影響を分析し、ポストピークまでの τ - S - ϵ 関係を検討した。

さらに、提案する τ - S - ϵ 関係を用いた FEM 解析の一例として、定着長の短い引き抜き試験のシミュレーション解析を行い、モデルの適用性を検証した。

2. 両引き試験の概要

両引き試験は、鉄筋の直径 D とかぶり厚 C が付着特性に及ぼす影響を検討するため、コンクリートの目標強度を一定とし、 D と C を変化させたケースで実施した。

2.1 使用材料

表-1 にコンクリートの配合を示す。コンクリートには、早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材には最大寸法 20mm の碎石を用いた。また、多くの RC 構造物

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 W/C [%]	細骨材率 s/a [%]	単位量 [kg/m ³]					スランブ [cm]
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤	
71	48	170	258	896	985	0.48	3.8~7.5

*1 東電設計（株） 土木本部耐震技術部 (正会員)
 *2 山梨大学大学院 医学工学総合研究部准教授 博（工） (正会員)
 *3 山梨大学名誉教授 工博 (正会員)
 *4 山梨大学大学院 医学工学総合研究部准教授 博（工） (正会員)

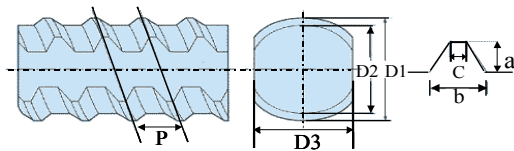


図-1 鉄筋の形状

表-2 鉄筋の形状寸法と力学的性質

呼び名	公称断面積 A_s [mm ²]	外径[mm]			節形状[mm]				弾性係数 E_s [N/mm ²]	降伏応力 f_y [N/mm ²]
		D1	D2	D3	P	a	b	c		
D19	286.5	21.2	19.8	17.6	10	1.8	4.4	2.1	1.91×10^5	1047
D25	506.7	28.4	24.4	23.6	13	2.0	6.4	2.4	1.89×10^5	1013
D32	794.2	35.2	30.4	29.4	16	2.4	8.1	3.3	1.83×10^5	994

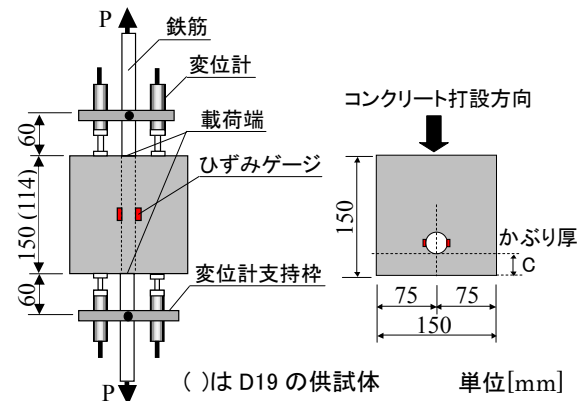


図-2 両引き試験の概要

表-3 供試体の諸元および材料試験結果

鉄筋径 D [mm]	かぶり厚 C [mm]	C/D	付着長 l [mm]	圧縮強度 f_c [N/mm ²]	供試体数
19.1 (D19)	30	1.6	57	21.1	3
	10	0.4	75	25.1	4
25.4 (D25)	25	1.0		27.0	3
	30	1.2		25.1	3
	50	2.0		25.1	2
31.8 (D32)	10	0.3		20.1	3
	30	0.9	21.2	3	
	50	1.6	29.1	4	
	64	2.0	27.0	3	

の設計基準強度が $20 \sim 25 \text{ N/mm}^2$ であることを考慮し、目標圧縮強度を 25 N/mm^2 としたため、水セメント比は71%とやや高めとなっているが、ブリーディングの影響をなるべく小さくするため、スランプは5cm程度と小さくした。付着供試体、テストピースは共に湿布養生を行った。

鉄筋は、付着強度に達する前に降伏しないよう、降伏応力の高い異形PC鋼棒D19、D25、D32を用いた。使用した異形PC鋼棒の形状と力学的性質を図-1および表-2に示す。これら異形PC鋼棒は、予備荷荷によって、予め降伏強度以上の応力を作用させることにより、比例限度を 850 N/mm^2 まで高めて用いた。

2.2 供試体

本研究では、かぶり厚 C が付着特性に及ぼす影響を検討するため、図-2に示すような一面のかぶりを小さくした供試体を用いて両引き試験を行った。実験ケースは表-3に示すとおりであり、かぶり厚 C は、D25では10mm、25mm($C/D=1$)、30mm、50mm($C/D=2$)と変化させ、D32では10mm、30mm($C/D=1$)、50mm、64mm($C/D=2$)と変化させた。D19については、後述する $\tau-S-\epsilon$ 関係の提案式が、鉄筋径が細かい場合にも適用可能であることを確認するため、 $C=30 \text{ mm}$ の供試体の試験のみを実施した。

コンクリート断面は $150 \times 150 \text{ mm}$ であり、長さは供試体の中間に横ひび割れが発生しないように150mm (D19を用いた供試体については114mm)とし、いずれも鉄筋径に対して $5D \sim 6D$ と短くした。このような条件とすることで、RC部材の曲げ引張側において曲げひび割れが十分に発達して定常状態に達した時の付着特性を評価することができる。コンクリートは最小かぶり面が打ち込み底面になるように、鉄筋を水平にして打設した。また、鉄筋は縦リブが水平になる向きに配置した。

2.3 実験方法

両引き試験は、1000kN万能試験機を用い、図-2に示すように鉄筋の両端に軸引張力を加えて行った。荷荷方法は単調荷荷とし、荷荷速度はおおよそ 100 N/sec である。

付着応力を求めるために、供試体中央断面で鉄筋のひ

ずみを測定した。ひずみゲージは1mmゲージを使用し、付着を乱さないように、節を削らずに、鉄筋の縦リブ部分の表裏2箇所に貼付している。また、水分と衝撃からの保護のために、エポキシ樹脂とワックスを薄く塗布した。鉄筋のすべり量は、図-2に示すように上下荷荷端の鉄筋部分に、フルスケール5mmの変位計を2個取付けた支持枠をネジで固定して測定した。

本実験における付着応力 τ は、荷荷端から75mm (D19については57mm)の区間における平均付着応力であり、荷荷端と供試体中央の鉄筋負担荷重の差に基づいて算出した⁴⁾。また、すべり量 S は、荷荷端から支持枠固定位置までの変位増分から鉄筋の伸びを補正して算出した。

付着長は鉄筋径に対して $2.5D \sim 3D$ と短いため、供試体内部の鉄筋ひずみ分布はほぼ直線で近似できるものと推測され、付着長 l と鉄筋径 D の比 l/D が $\tau-S$ 関係に与える影響は小さいと判断している。また、供試体端部に非付着領域を設けていないが、付着長が短い両引き試験では、引き抜き試験と異なり端部の伸び出し量は小さく、端断面付近の付着劣化が平均付着応力に与える影響は小さいと思われる。実験終了時の観察でも、リングテンションによる荷荷端のひび割れは確認されていない。

供試体は各ケースに対して6体ずつ製作し、このうち計測が不完全であったものは除き、値にばらつきの少ない妥当と思われるデータを採用した。採用供試体数は表-3に示すとおりである。

3. 実験結果

3.1 鉄筋ひずみの影響

実験の τ - S 関係については 3.2 で後述することとし、ここでは、実験で得られた τ と S を用いて、鉄筋ひずみが付着特性に与える影響について検討を行った。

島ら³⁾は、いかなる境界条件でも成り立つ τ - S 関係を定式化するために鉄筋ひずみ ε の影響を取り入れ、付着応力を式(1)のように表している。式中 τ_0 は鉄筋のひずみが 0 であるときの (仮想の) 付着応力であり、式(2)で表される。鉄筋ひずみの影響を表す関数 $g(\varepsilon)$ は、式(3)のような簡単な形で表される。結果的に式(1)(2)(3)より、 τ - S - ε 関係は式(4)となる。したがって、島式における鉄筋ひずみの影響は式(5)のように表すことができる。

$$\tau = \tau_0(s) \cdot g(\varepsilon) \quad (1)$$

$$\tau_0(s) = 0.73 f'_c (\ln(1+5s))^3 \quad (2)$$

$$g(\varepsilon) = \frac{1}{1+\varepsilon \times 10^5} \quad (3)$$

$$\tau = 0.73 f'_c (\ln(1+5s))^3 / (1+\varepsilon \times 10^5) \quad (4)$$

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{g(\varepsilon)} = 0.73 f'_c / \tau (\ln(1+5s))^3 \quad (5)$$

ここで、 $s = 1000S/D$ (S : すべり量, D : 鉄筋径)

一方、著者ら⁴⁾は、付着応力がコンクリートの圧縮強度 f'_c の 1/2 乗に比例することを確認しているため、鉄筋ひずみの影響を式(6)のような関数で表すこととした。そこで、今回の実験結果に対して式(6)を適用し、鉄筋径とかぶり厚を変化させたときに、鉄筋ひずみの影響を表す関数がどのように変化するかを検討した。

$$f(\varepsilon) = \sqrt{f'_c} / \tau (\ln(1+5s))^3 \quad (6)$$

実験より得られた鉄筋ひずみのデータを基に、式(6)によって求めたひずみの関数 $f(\varepsilon)$ と鉄筋ひずみ ε との関係 (以下、 $f(\varepsilon)$ - ε 関係と略記) を図-3 に示す。図の各曲線は 2~4 供試体について縦軸の値を平均したものであり、平均した τ - S 関係で付着強度 τ_{\max} に達したときに対応する点には丸印でマーキングをした。また、同図には、島らの提案する式(7)の $f(\varepsilon)$ に相当する直線を式(4)と式(6)の関係から式(8)のように変換して示した。このとき f'_c は実験の平均的な強度として 25N/mm^2 とした。

$$f(\varepsilon) = 1/g(\varepsilon) = 1 + \varepsilon \times 10^5 \quad (7)$$

$$f(\varepsilon) = 1 + \varepsilon \times 10^5 / (0.73 \sqrt{f'_c}) \quad (8)$$

$f(\varepsilon)$ - ε 関係は、かぶり厚が大きくなると全体の勾配が緩やかとなり、ひずみ量が同じであれば、かぶり厚が小さいケースの $f(\varepsilon)$ の値が大きい傾向にある。また、い

ずれの実験結果もピークまでは式(8)の直線と大きく異ならないが、ピーク以降の軟化域では、直線から徐々に乖離している。このように、かぶり厚が小さい場合の付着特性に及ぼすひずみの影響は、ピークまでは島らの提案する直線式によってほぼ近似できるが、ピーク以降の軟化域においては、同式で評価できない。

3.2 付着応力-すべり-ひずみ関係の定式

次に、実験で得られた $f(\varepsilon)$ - ε 関係に基づいて、ポストピークまでの τ - S - ε 関係の定式化を試みた。実験の $f(\varepsilon)$ - ε 関係の形状は、かぶり厚が 10mm と小さい供試体では 2 次放物線に近い形状を示しているが、かぶり厚がそれより大きいケースでは、より複雑な高次関数の形状を示している。そこで著者らは、これらの $f(\varepsilon)$ - ε 関係を 4 次関数によって近似することを試みた。このような関数形を選択したのは、かぶり厚の小さい両引き試験の τ - S 関係には、図-4 の左のように I : 初期剛性、II : 2 次剛性、III : 軟化域の 3 つの段階があり、これを忠実に再現するためには、 $f(\varepsilon)$ - ε 関係を 4 次関数とする必要があると考えたためである。なお、 τ - S 関係の上昇域で付着剛性が変化するのは、鉄筋の節周辺で内部ひび割れが発生し始めたことを示していると思われる。 $f(\varepsilon)$ - ε 関係のモデル化では、いくつかの関数を段階に応じて組み合わせるモデル化も考えられるが、関数を切り替えるときのひずみをどのように規定するかといった問題があり、むしろ、ひとつの式で初期からポストピークまでの付着特性を表現できるモデルが、解析に取り入れるためにも有利である。したがって、 τ - S - ε 関係を式(9)のように表したときのひずみの関数は、式(10)のような 4 次関数の形で表すこととした。

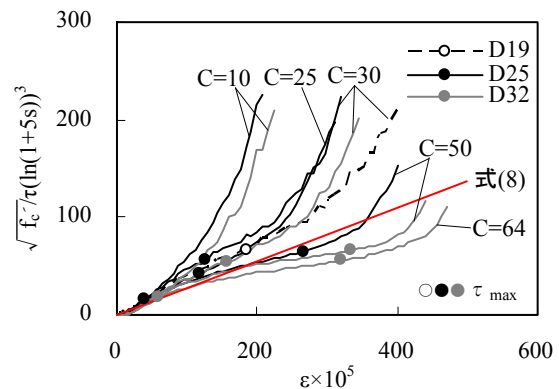


図-3 実験のひずみの関数

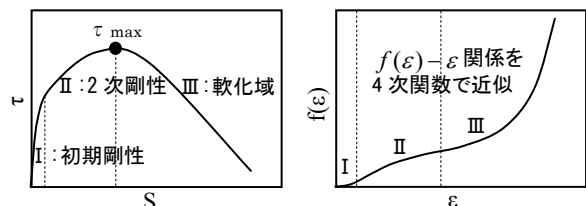


図-4 τ - S 関係(左)と $f(\varepsilon)$ - ε 関係(右)の対応

式(10)の各項の係数 α , β , γ , ζ については, それぞれを C/D の関数で表すことが出来れば, かぶり厚に関わらず, 鉄筋径とかぶり厚の相対的な関係を考慮して付着挙動を評価することが可能となる。そこで, 各係数の値と C/D の間の相関について検討し, 両者の関係について定式化を試みた。なお, D25 以外の鉄筋の $f(\varepsilon)-\varepsilon$ 関係も考慮して検討を行った結果, 係数のばらつきにより, かねて後述する $\tau-S$ 関係の再現性が悪くなるため, 今回は信頼できる D25 のデータを用いて定式化を行った。

図-5 のグラフは, D25 の供試体の実験の $f(\varepsilon)-\varepsilon$ 関係を 4 次関数で近似したときの各係数と C/D の関係である。これらのグラフから, 各係数は C/D と相関性があることが認められる。両者の関係は, α , β , γ については e の指数関数, ζ については 2 次関数によって近似してよいものと思われ, それぞれの係数を式(11)~式(14)のような関数で表した。

$$\tau = \sqrt{f'_c} (\ln(1+5s))^3 / f(\varepsilon) \quad (9)$$

$$f(\varepsilon) = \alpha(\varepsilon \times 10^5)^4 + \beta(\varepsilon \times 10^5)^3 + \gamma(\varepsilon \times 10^5)^2 + \zeta(\varepsilon \times 10^5) + 1 \quad (10)$$

$$\alpha = 3.0e^{-1.3C/D} \times 10^{-7} \quad (11)$$

$$\beta = -8.7e^{-0.97C/D} \times 10^{-5} \quad (12)$$

$$\gamma = 1.3e^{-C/D} \times 10^{-2} \quad (13)$$

$$\zeta = -0.040(C/D)^2 + 0.19C/D + 0.027 \quad (14)$$

式(10)~式(14)で定式化した $f(\varepsilon)-\varepsilon$ 関係の C/D を 0.4 刻みで変化させてグラフ化すると, 関数の形状は図-6 のように変化する。同図には, 図-3 と同様に島らのひずみの関数に相当する直線式(8)を示すが, 提案式の C/D が 2.0 程度まで大きくなったとき, 両者はひずみが 2000 μ を超えた辺りまで同等の勾配となっている。これは, C/D が 2.0 以上のとき, 鉄筋ひずみの影響は, $\tau-S$ 関係のピーク付近まではかぶり厚が十分大きい場合とほぼ同等になることを示していると考えられる。なお, ひずみの関数の定式化は, C/D が 0.4~2.0 の範囲のデータに基づいて行っているが, 2.0 を超える場合の関数の形状を確認するため, C/D が 3.2 の範囲まで外挿して示している。

次に, 実験の $\tau-S$ 関係と, 図-7 のフローに従って式(9)の $\tau-S-\varepsilon$ 関係に基づいて計算した $\tau-S$ 関係を比較した結果を鉄筋径ごとに図-8 に示す。ひずみの関数は, D25 の実験結果に基づいて定式化していることから, 同図中段の D25 の実験ケースに対しては, いずれのかぶり厚の場合も, 計算値は実験の $\tau-S$ 関係をよく模擬できており, 両者の付着強度 τ_{\max} もほぼ一致している。また, $C=10\text{mm}$ のケースでは, ほぼ初期剛性のま

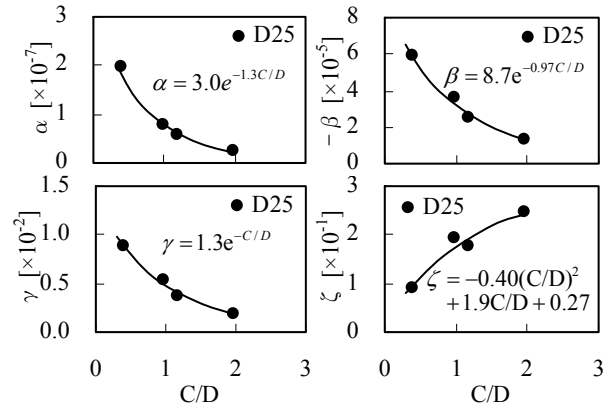


図-5 ひずみの関数式の各係数と C/D の関係

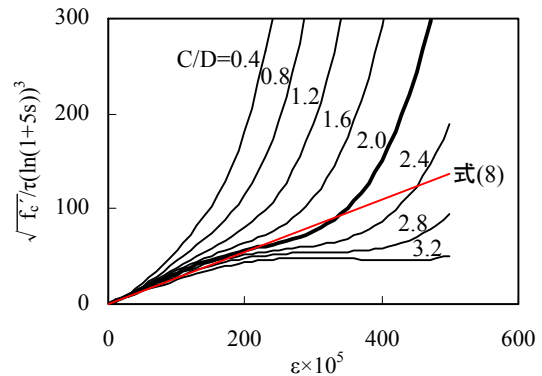


図-6 C/D によるひずみの関数の変化

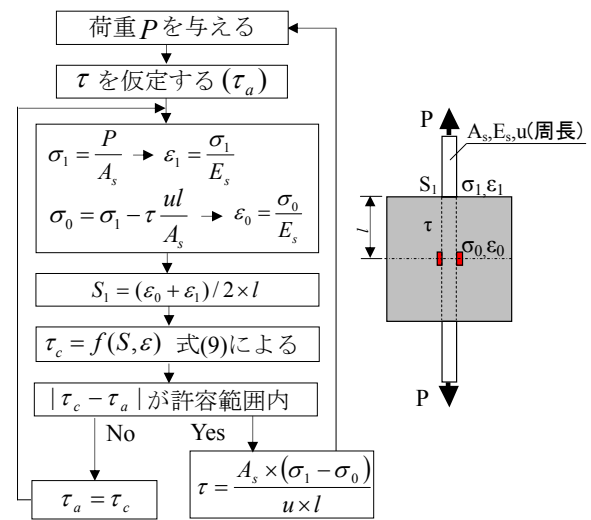


図-7 両引き試験の τ , S の算出フロー

ま τ_{\max} に至り直ちに軟化する傾向, $C=50\text{mm}$ のケースでは, 二次剛性で τ の上昇が続いた後に軟化に至る傾向などもよく再現できている。ただし, 軟化域の勾配は, 特にかぶり厚が小さい場合に計算値がやや緩やかな傾向である。このような差異については, モデル化上, 付着強度以降の軟化域を考慮出来ることが重要であり, その勾配がポストピーク挙動に与える影響は限定的であると考えているため許容した。他の鉄筋径については, D32 の $C=50\text{mm}$ のケースで計算値の τ_{\max} がやや小さくなって

いるものの、鉄筋径が大きい方が、内部ひび割れが発生し易いために2次剛性に移行しやすく、 τ_{max} も小さくなる傾向なども捉えることができおり、一般的に付着特性のばらつきが大きいことを考慮すれば、いずれも τ - S 関係の形状および付着強度の再現性は良好であるといえる。これらの結果から、提案したひずみの関数によって、 C/D の違いによる鉄筋ひずみの影響の変化は概ね正しく評価されているものと推察される。ただし、 C/D が2.0になると、図-6のように、ひずみの関数は島らの直線式とほぼ同等となることから、かぶり厚が大きい場合は、式(11)~式(14)の C/D の上限を2程度として適用しても、その付着挙動は概ね模擬できるものと予想される。

4. 有限要素法への適用

定着長が10D~20Dの比較的短い引き抜き試験では、鉄筋に沿った位置によって τ - S 関係が異なることが山尾ら¹⁾によって指摘されており、これは鉄筋ひずみの影響によるものであると考えられている。このようなケースに対する提案モデルの適用性を確認するため、定着長が12Dの引き抜き試験を対象として、FEM解析によるシミュレーションを行った。

4.1 実験概要

引き抜き試験の概要を図-9に示す。軸方向鉄筋は呼び名D25の異形PC鋼棒を用い、一面のかぶり厚を50mm(2D)と小さくした。コンクリート断面は150mm×150mmで、定着長は300mm(12D)である。鉄筋の伸び出しによる載荷端への影響を避けるため、供試体上面から75mm区間に粘土とビニールテープを巻き、非定着区間を設けた。また、埋め込んだ鉄筋のひずみ分布を測定するため、1mmゲージを75mm(3D)間隔で鉄筋の両面(リブ部分)に貼付した。コンクリートの配合ならびに使用した鉄筋は、先の両引き試験(表-1,表-2)と同様であり、試験時のコンクリート強度 f'_c は24.7N/mm²であった。

4.2 解析モデルとプログラムの概要

図-9に解析モデルの概要を示す。解析モデルは、コンクリートを4節点の平面要素で、鉄筋をトラス要素でモデル化し、両者をボンドリンク要素によって連結した。また、要素寸法の影響を検討するため、ひずみ測定区間(75mm)を3分割したモデルAと、1分割としたモデルBを作成した。図-9に示したのはモデルAである。

引き抜き試験の解析では、コンクリートが圧縮応力場にあり、鉄筋の節周辺から進展する割裂ひび割れはボンドリンク要素の付着特性で考慮されるため、コンクリート要素にはひび割れが発生しない。圧縮応力下のコンクリートの応力-ひずみ関係は、最大圧縮強度 f'_c まで二次放物線で応力が増加し、それ以降は直線的に減少するモデルを用いているが、本解析ではコンクリートは軟化に

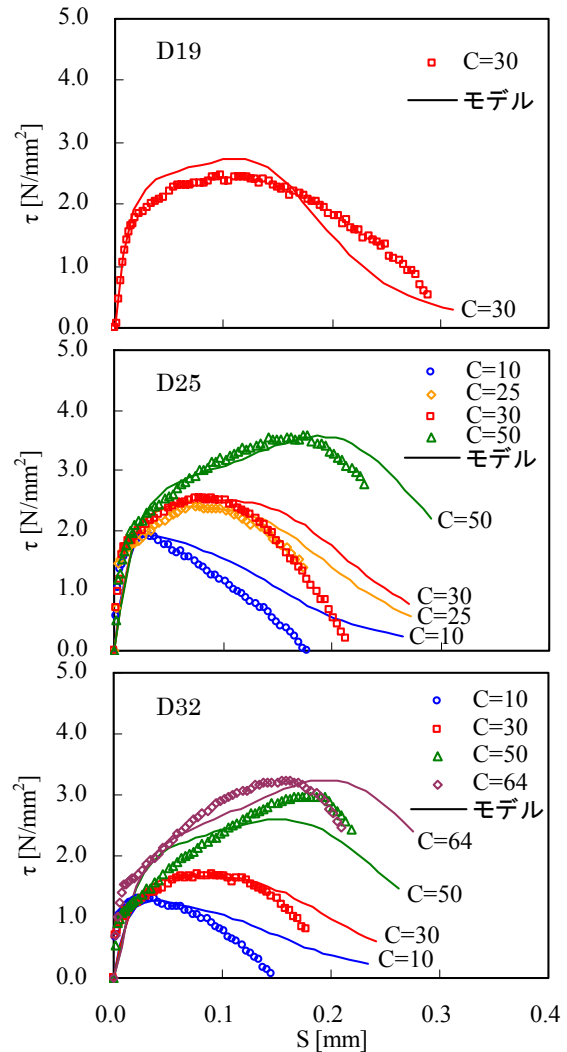


図-8 実験と計算による付着応力-すべり関係の比較

至らないため、軟化域のモデルの詳細は省略する。鉄筋モデルは、降伏強度までは応力が直線が増加し、降伏点以降の勾配は初期剛性の1/1000となるバイーリニヤ型のモデルとした。ボンドリンク要素に与える付着モデルは、式(9)~式(14)の τ - S - ϵ 関係であり、接続する鉄筋要素のひずみの情報に基づいて付着応力を算出する。解析は、変位制御による増分解析とし、Newton-Raphson法に従って収束計算を行った。

4.3 解析結果

実験と解析の引張荷重 P と伸び出し量 S の関係を図-10に示す。実験の伸び出し量は、2供試体の平均値であり、載荷端から支持枠固定位置までの変位増分から鉄筋の伸び量を補正して算定した。解析の伸び出し量は、載荷端のボンドリンク要素の伸び量(鉄筋の節点とコンクリートの節点の相対変位量)である。解析モデルAとBの結果を比較すると、僅かに要素分割が粗いモデルBの結果が硬い傾向である。これは、要素寸法の違いによるひずみ分布の近似誤差によるものと思われるが、その差は小さく、いずれのケースも実験とよく一致している。

次に鉄筋に沿った各位置の τ - S 関係を実験と解析で比較し図-11 に示す。実験の τ は、3 点の鉄筋ひずみの測定値からひずみ分布を二次曲線で仮定し、着目する点における分布曲線の傾きを用いて式(15)によって算出した。また、すべり量 S は、自由端から考えている点までひずみを積分したものに自由端すべりを加えたものである。一方、解析の τ - S 関係は、着目する位置のボンドリンク要素の τ と S の履歴である。

$$\tau = \frac{E_s \cdot D}{4} \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (15)$$

解析で得られた τ - S 関係は、いずれの位置においても実験結果を模擬出来ており、荷端から 3D、6D、9D と離れるにしたがって、同じすべり量に対する付着応力が大きくなる傾向を捉えている。これは、鉄筋ひずみの違いによるものであり、自由端に近いほど端部すべりの影響が大きくなり、鉄筋ひずみが小さくなるためと考えられる。また、荷端から 9D の位置では要素分割が粗いモデル B の τ - S 関係が、実験よりもやや硬い傾向を示しているが、これは、その位置のボンドリンク要素に接続した鉄筋要素のひずみが、自由端のすべりの影響によって小さくなったことによるものと思われる。しかし、今回の要素分割程度であれば、いずれのモデルもモデル全体の鉄筋ひずみ分布を十分捉えられていると思われ、要素寸法が付着挙動に与える影響は小さいといえる。

このように、両引き試験に基づいて導出した τ - S - ε 関係は、コンクリートが圧縮応力場であり、鉄筋に沿った位置によって τ - S - ε 関係が異なるような付着問題に対しても、適用性があることを確認した。

5. 結論

鉄筋径とかぶり厚を変化させた RC 一軸引張供試体の両引き試験に基づいて、鉄筋ひずみが付着特性に与える影響を検討した結果、以下のような結論を得た。

- (1) 鉄筋ひずみが付着特性に与える影響は、かぶり厚と鉄筋径の比 C/D と相関性がある。
- (2) 両引き試験の結果に基づいて、鉄筋ひずみが付着特性に及ぼす影響を C/D の影響を考慮した 4 次関数で表すことにより、かぶり厚に関わらず、鉄筋径とかぶり厚の相対的な関係を考慮して付着挙動を評価することが可能な τ - S - ε 関係を導出した。
- (3) 提案した τ - S - ε 関係を FEM 解析に組込むことによって、応力状態や境界条件が異なる様々な付着問題を解析的に評価できる可能性を示した。今後はその適用範囲を見極めていくことが課題である。

参考文献

- 1) 山尾 芳秀, 周 礼良, 二羽 淳一郎: 付着応力-

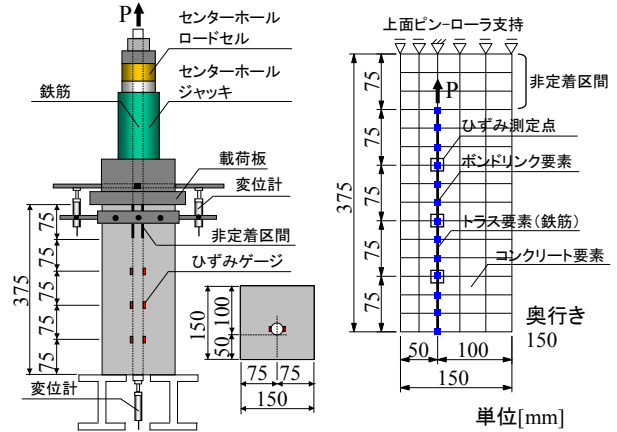


図-9 実験概要(左)とFEM解析モデルA(右)

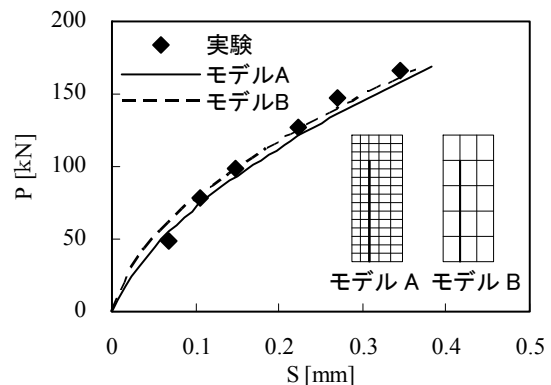


図-10 引張荷重と伸び出し量の関係の比較

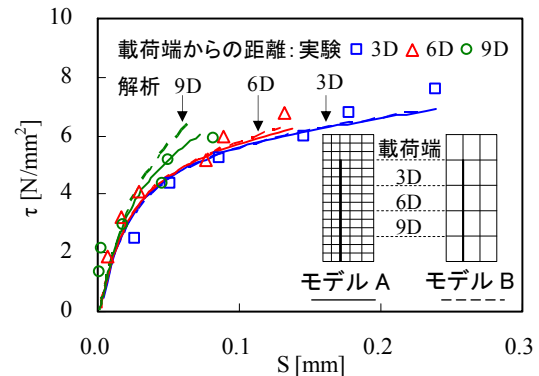


図-11 各鉄筋位置の付着応力-すべり関係の比較

すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文集, 343号, pp.219-228, 1984.3

- 2) 壹岐 直之, 清宮 理, 山田 昌郎: 付着応力-すべり関係に影響を及ぼす要因の実験的研究, 土木学会論文集, 第550/V-33号, pp.73-83, 1996.11
- 3) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり関係, 土木学会論文集, 第378/V-6号, pp.165-174, 1987.2
- 4) 飯塚 敬一・檜貝 勇・斉藤 成彦・高橋 良輔: かぶり厚が小さい異形鉄筋の付着性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.655-660, 2008.6