

論文 異形鉄筋の付着応力-すべり関係に及ぼすかぶり厚と鉄筋直径の影響

寄特 隆宏^{*1}・檜貝 勇^{*2}・斉藤 成彦^{*3}

要旨 : FEM 解析において梁のせん断性状を解析する場合, 付着の考慮の有無は斜めひび割れ特性に大きな影響を与えることなどが認識されている。FEM 解析で付着を考慮する場合には, 付着応力-すべり関係を用いるのが便利であるが, 曲げ部材の引張側のような, かぶり厚の小さい箇所での付着応力-すべり関係はあまり研究されていない。そこで本研究では, 鉄筋直径とかぶり厚を変化させた両引き試験により付着応力-すべり関係を実験的に検討した。

キーワード : 鉄筋直径, かぶり厚, 付着応力, すべり, 両引き試験

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の FEM 解析においては, 鉄筋とコンクリートは完全付着として取り扱うのが一般的であった。しかし, 梁のせん断性状などの解析において付着を考慮するのとならないのでは, 斜めひび割れ特性が大きく異なる場合があるなど, 付着を考慮することの必要性が認識されてきている。FEM 解析において付着を取り扱うには, 付着応力-すべり関係を用いるのが便利であり, マッシュブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり関係は島ら¹⁾によって, 定式化されている。しかし, 曲げ部材の引張側のようなかぶり厚が薄く, コンクリートが引張応力を受けるような箇所での付着応力-すべり関係についてはあまり研究がなされていない。そこで本研究ではかぶり厚と鉄筋直径を変化させた両引き試験を行って, 付着応力-すべり関係を実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 にコンクリートの配合を示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用し, 粗骨材は最大寸法 20mm の砕石を使用した。目標スラ

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	減水剤
71	48	170	258	896	985	0.48

表-2 鉄筋の力学的性質

呼び名	弾性係数 [N/mm ²]	降伏応力 [N/mm ²]
D19	1.87 × 10 ⁵	1039
D25	1.89 × 10 ⁵	1013
D32	1.83 × 10 ⁵	994

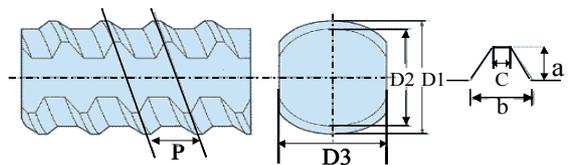


図-1 鉄筋の形状

表-3 鉄筋の寸法

呼び名	公称断面積 [mm ²]	外形			ピッチ P [mm]	ふし高さ a [mm]	ふし底幅 b [mm]	ふし高幅 c [mm]
		D1 [mm]	D2 [mm]	D3 [mm]				
D19	286.4	21.2	18.4	17.7	10	1.8	4.4	2.1
D25	506.7	28.4	24.4	23.6	13	2.0	6.4	2.4
D32	794.2	35.2	30.4	29.4	16	2.4	8.1	3.3

*1 山梨大学大学院 医学工学総合教育部 (正会員)

*2 山梨大学大学院 医学工学総合研究教授 工博 (正会員)

*3 山梨大学大学院 医学工学総合研究助教授 博(工) (正会員)

表-4 コンクリート強度とスランプ値

鉄筋径[mm]	かぶり[mm]	C/D	圧縮強度[N/mm ²]	引張強度[N/mm ²]	スランプ[cm]	供試体数
19	10	0.5	27.7	2.5	2.0	6
	19	1.0	30.0	2.8	3.5	6
	30	1.6	26.0	2.7	2.3	3
	38	2.0	27.7	2.8	3.5	3
	50	2.6	29.4	2.3	3.2	5
25	10	0.4	25.1	2.5	6.2	4
	25	1.0	27.0	2.6	3.8	3
	30	1.8	25.1	2.5	5.8	3
	50	2.0	25.1	2.5	5.4	3
32	10	0.3	20.1	2.2	5.1	3
	30	0.9	21.2	1.9	4.0	3
	50	1.6	29.1	2.1	6.1	4
	64	2.0	27.0	2.6	3.8	3

スランプは付着試験におけるブリーディングの影響を少なくするため 5cm と小さくした。コンクリートの目標圧縮強度は7日強度で 25N/mm² とし、付着供試体、テストピース共に湿布養生を行った。表-4 にスランプ値と試験時のコンクリート強度を示す。付着応力-すべり関係のポストピーク領域も含めて計測するために、鉄筋には降伏応力の高い異形鋼棒 D19, D25, D32 を用いた。表-2 に鉄筋の力学的性質を、表-3, 図-1 に鉄筋の寸法及び形状を示す。

2.2 供試体諸元及び荷重方法

付着試験に用いた供試体の概要を図-2 に示す。軸方向鉄筋は呼び名 D19, D25, D32 の異形 PC 鋼棒を用い、それぞれのかぶり厚 C を 10, 30, 50mm と変化させた。さらに D19, D25 ではかぶり厚 C と鉄筋直径 D の比 C/D が 1 になるようなかぶり厚を用い、D19, D32 では C/D が 2 になるようなかぶり厚を用いた。コンクリート断面は 150mm×150mm で、長さは横ひび割れが発生しないように 150mm と短くした。

付着応力を求めるため、供試体中央の断面で鉄筋のひずみを計測した。ひずみゲージは 1mm ゲージを使用し、リブ部分に表裏 2 枚貼付した。その際、水分と衝撃等からの保護のためエポキシ樹脂とワックスを、付着を極力乱さないように薄く貼付した。

すべり量は上下荷重端から約 60mm 離れた鉄

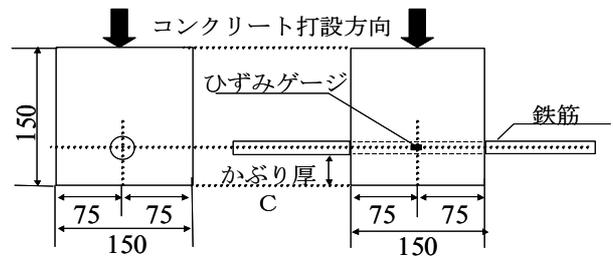


図-2 供試体概要

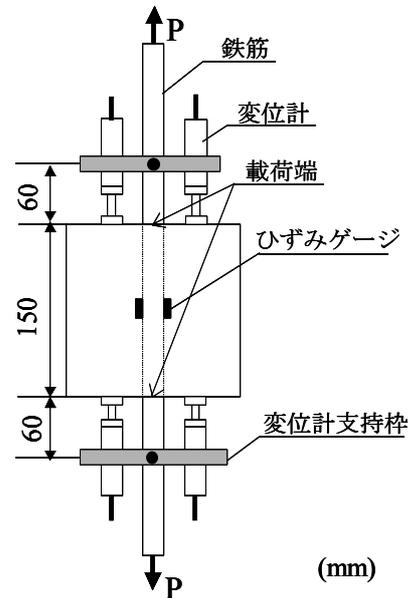


図-3 荷重状況

筋部分に、それぞれフルスケール 5mm の変位計を 2 個取り付けた支持枠をネジで固定して測定した。

荷重状況を図-3 に示す。1000 kN 万能試験機を用い、鉄筋の両端に引張力を与える両引き試

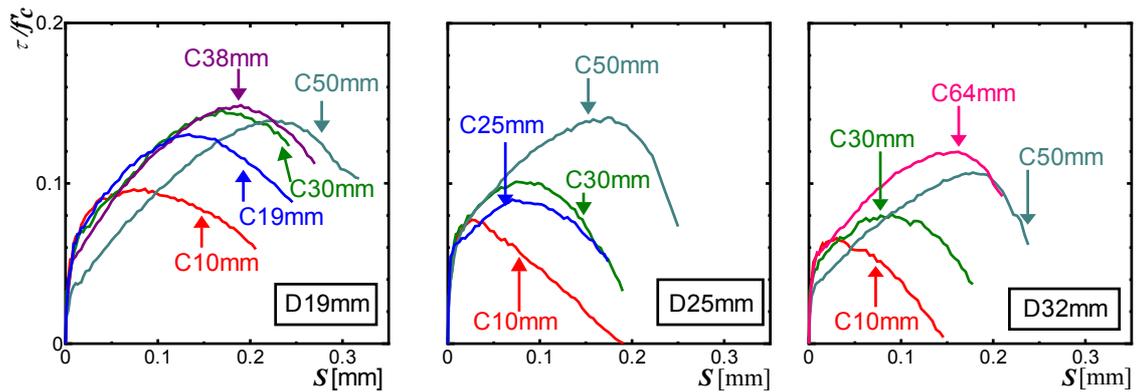


図-4 鉄筋径ごとの τ/f_c - S 関係

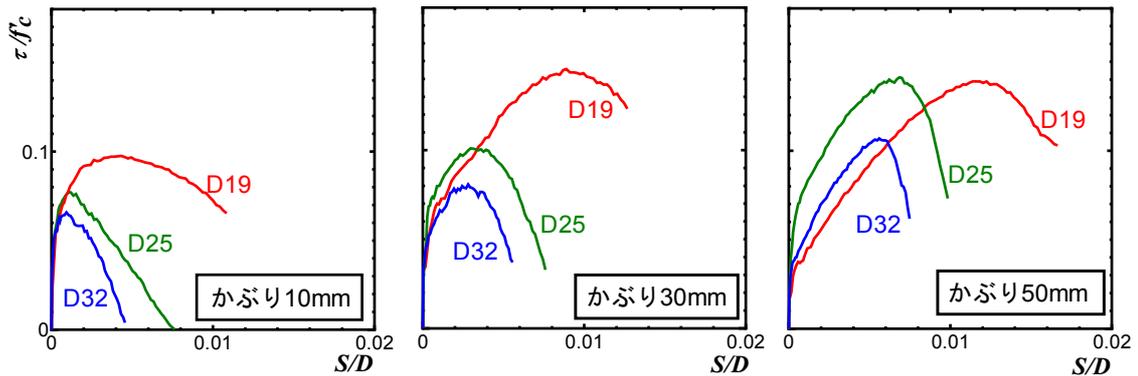


図-5 かぶり厚ごとの τ/f_c - S/D 関係

験を行った。荷重速度は全ての供試体において 100N/min.である。

3. 実験結果

本研究での両引き試験における付着応力 τ とは、式(1)による荷重端から供試体中央までの 75mm の間における平均付着応力である。

$$\tau = A_S(\sigma_{S1} - \sigma_{S2})/ul \quad (1)$$

ここで、 A_S : 鉄筋の公称断面積 (mm²)

u : 鉄筋の公称周長 (mm)

σ_{S1} : 供試体の荷重端の応力 (N/mm²)

σ_{S2} : 供試体中央の鉄筋の応力 (N/mm²)

l : 片側付着長さ (75mm)

すべり量 S は、荷重端から変位計固定支持位置までの鉄筋の伸びを補正して求めた。供試体は各かぶり厚、各鉄筋について 6 体づつ製作し、値にばらつきの少ない妥当だと思われる供試体の実験データを採用した。データとして採用した供試体数は、表-4 に示したとおりである。

図-4、図-5 に実験より得られた付着応力-すべり関係を示す。図-4、図-5 の各曲線は

3~6 供試体についての平均値であり、例として、図-6 にかぶり厚 10mm の各鉄筋直径の実験値と平均値を示す。

3.1 付着応力-すべり関係

図-4 に、鉄筋径ごとの付着応力-すべり関係を示した。コンクリートの圧縮強度にはばらつきがあるので、付着応力は f'_c で正規化している。圧縮強度 f'_c の影響に関しては、島らの研究によって、付着長が短い場合、付着強度は f'_c に比例するとされている。本実験でも付着長が短いので、付着強度は f'_c に比例するものとした。かぶり厚が 50mm で D19、D32 の場合、初期すべりが他のかぶりの場合よりも大きくなる傾向があるが、これはかぶりが大きくなったため、ブリーディングの影響も増大したためであると思われる。かぶり厚 10、30mm の供試体では付着強度付近で縦ひび割れが発生したが、かぶり厚 50mm の供試体では縦ひび割れは確認できなかった。

島ら¹⁾、山尾ら²⁾の研究では鉄筋直径 D に拘らず付着応力-鉄筋直径で正規化したすべり関係

($\tau - S/D$)は同一であるとされている。そこで本実験で得られた付着応力-すべり関係についても同様に、すべり量を鉄筋直径で正規化したものを図-5に示す。各かぶり厚共に初期勾配はほぼ同様の挙動を示しているが、鉄筋直径が大きくなると付着強度 τ_{max} は低く、付着強度時のすべり S_{max} も小さくなっている。この結果は島、山尾らの見解とは異なっている。島らの研究はかぶり厚が十分大きいために、付着応力と鉄筋直径で正規化したすべりの関係は鉄筋直径に依存しないが、本実験のようにかぶり厚が小さい場合には、鉄筋直径が付着応力-すべり関係に大きく影響を及ぼすものと思われる。

3.2 鉄筋直径が付着強度に及ぼす影響

図-4、図-5より、各かぶり厚共に鉄筋直径が大きくなると付着強度は小さくなっており、各鉄筋共にかぶり厚が大きくなると付着強度は大きくなる傾向を示している。同じかぶり厚で鉄筋直径によって付着強度が異なるのは、鉄筋直径に対する相対的なかぶり厚が異なるためと考えられる。そこで、鉄筋直径の影響を考慮した付着強度-鉄筋直径で正規化したかぶり厚関係($\tau_{max}/f'_c - C/D$)を、データの範囲と平均値で図-7に示す。各鉄筋共に C/D が増えると τ_{max}/f'_c は直線的に増加する傾向が見られる。しかし、 τ_{max}/f'_c が0.15程度を越えると C/D が増加しても τ_{max}/f'_c はほとんど同一となり、鉄筋直径が小さいほど早く一定値に達するようである。 f'_c 、 D で正規化した付着強度とかぶり厚の関係は、次式で表わすことができる。

$$\frac{\tau_{max}}{f'_c} = 0.15 - 0.04 \left(0.09D - \frac{C}{D} \right) \leq 0.15 \quad (2)$$

ここで、 τ_{max} : 付着強度 (N/mm²)

f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

C : かぶり厚 (mm)

D : 鉄筋直径 (mm)

土木学会コンクリート標準示方書³⁾では、かぶり厚 C は鉄筋直径 D 以上、つまり C/D が1.0以上と規定されており、かぶり厚の影響を考えなければならない範囲が含まれている。

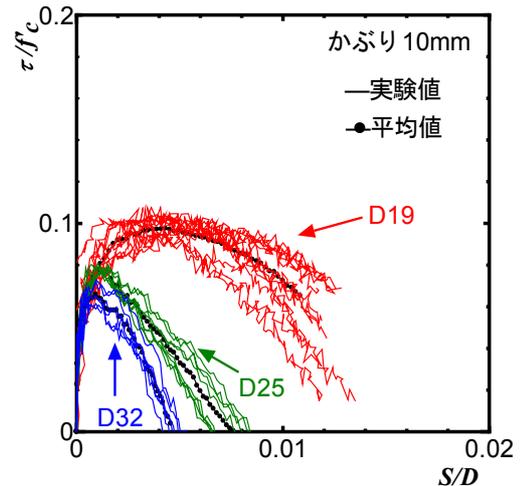


図-6 かぶり 10mm の $\tau/f'_c - S/D$ 関係

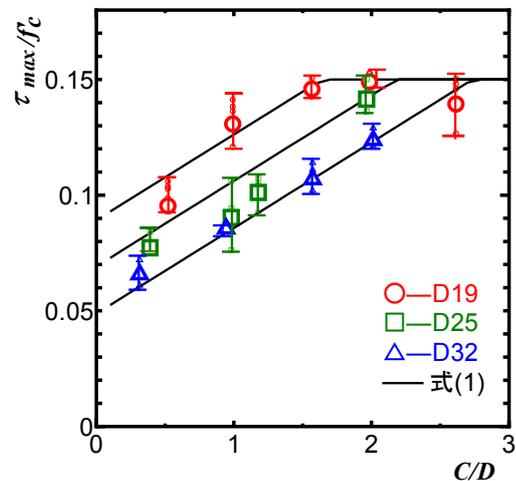


図-7 $\tau_{max}/f'_c - C/D$ 関係

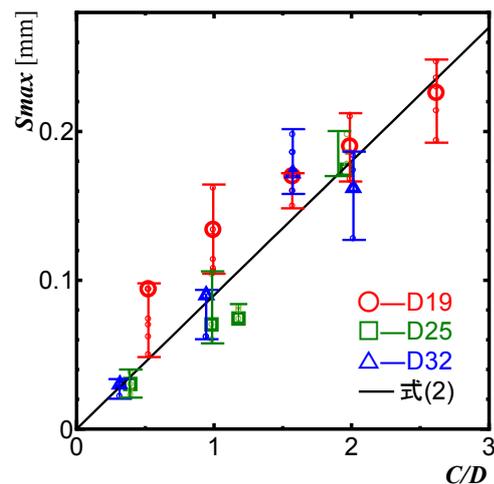


図-8 $S_{max} - C/D$ 関係

3.3 鉄筋直径が付着強度時のすべりに及ぼす影響

3.2節と同様に、鉄筋直径の影響を見るために付着強度時のすべり-鉄筋直径で正規化したか

ぶり厚関係($S_{max}-C/D$)を、各供試体のデータ範囲と平均値で図-8に示す。 C/D が増加すると S_{max} も直線的に増加しているのが分かる。そしてその関係は次式で表わされる。

$$S_{max} = 0.09\left(\frac{C}{D}\right) \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

τ_{max} と同様に、 S_{max} もある程度かぶり厚が大きくなると一定になるものと推察されるが、本実験範囲内では直線で近似できる。

4. 付着応力-すべり関係のモデル化

本実験結果を踏まえ、付着応力-すべり関係を以下のようにモデル化した。

4.1 付着強度までのモデル化

付着強度までの曲線はCEB式⁴⁾と同じ形で表わされるものとして、次式を用いた。

$$\tau = \tau_{max} \left(\frac{S}{S_{max}} \right)^\alpha \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4)$$

式(4)の係数 α と C/D の関係を図-9に示す。

C/D が大きいと α も大きくなる。

松本ら⁵⁾の研究では、係数 α とかぶり厚の関係は指数関数で表わされるので、ここでも指数関数を用いて次式で近似した。

$$\alpha = 0.23\left(\frac{C}{D}\right)^{0.47} \quad (5)$$

4.2 軟化域

実験値の軟化域は曲線であるが、簡単のためCEB式のように直線で表わせるものとした。圧縮強度で正規化した付着応力-すべり関係($\tau/f'_c - S$)において、軟化域を直線近似した時の勾配を軟化勾配 I として、 I と鉄筋直径の関係を図-10に示した。軟化勾配の値は鉄筋直径に無関係であり、かぶり厚の影響を受けるものと考えられる。

図-11に、軟化勾配とかぶり厚の関係を示し、この関係を次式で近似した。

$$I = 0.006C + 0.417 \quad (6)$$

かぶり厚がある程度以上大きくなると軟化勾配も一定になると予測されるのであるが、本実験の範囲内では直線で表わすことができる。かぶ

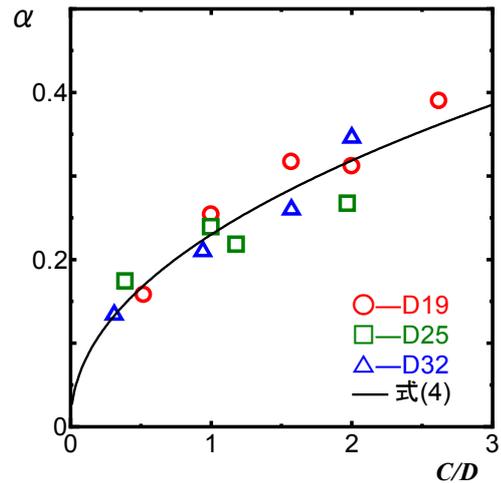


図-9 $\alpha - C/D$ 関係

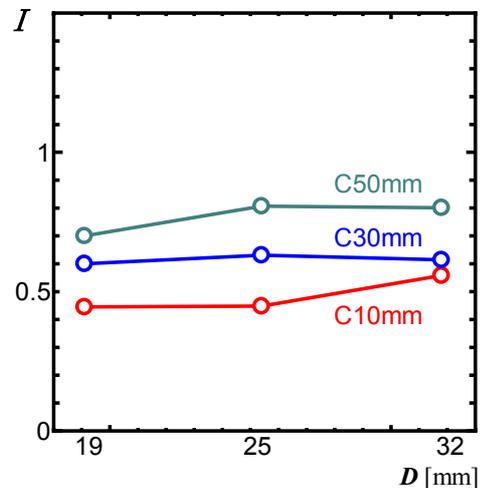


図-10 軟化勾配-鉄筋直径関係

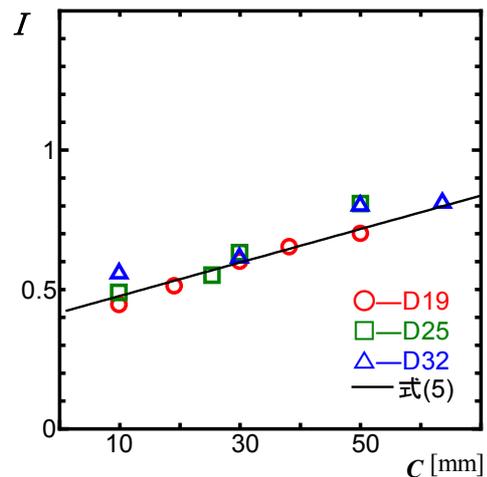


図-11 軟化勾配-かぶり厚関係

り厚が 50mm 以上の場合についての検討は今後の課題である。

4.3 実験結果との比較

図-12に、提案したモデルと実験値をそれぞ

れのかぶり厚ごとに比較した、圧縮強度で正規化した付着応力-すべり関係を示す。3.1節で述べたように、かぶり厚が50mmでD19、D32の初期勾配が実験値と多少異なるのであるが、全体的には概ね実験結果を評価していると思われる。

5. 結論

かぶり厚と鉄筋直径を変化させた一軸 RC 供試体の両引き試験を行い、付着応力-すべり関係を実験的に検討した結果、本研究の範囲内において以下のような結論が得られた。

- (1) かぶり厚が小さい場合、かぶり厚と鉄筋直径の変化が付着応力-すべり関係に及ぼす影響は大きいことが確認された。
- (2) かぶり厚が小さい場合、付着応力と鉄筋直径で正規化したすべりの関係($\tau/f'_c - S/D$)は一定にはならない。かぶり厚に拘らず初期勾配はほぼ同様であるが、それ以降の曲線は各鉄筋直径及びかぶり厚によって大きく異なる。
- (3) 鉄筋直径及びかぶり厚が異形鉄筋の付着性状に及ぼす影響を定式化し、曲げ部材の引張部に適用できるような、付着応力-すべり関係のモデルを提案した。

参考文献

- 1) 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, No.378/V-6, pp.165-174, 1987.2
- 2) 山尾 芳秀, 周 礼良, 二羽 淳一郎: 付着応力-すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.343, pp.219-228, 1984.3
- 3) 土木学会, コンクリート標準示方書 構造性能照査編, pp.119-120, 2002
- 4) Comite Euro-International du Beton: CEB-FIP Model Code 1990 First Draft, CEB, 1990
- 5) 松本 隆明, 檜貝 勇, 斉藤 成彦: かぶり厚が異形鉄筋の付着性状に及ぼす影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論

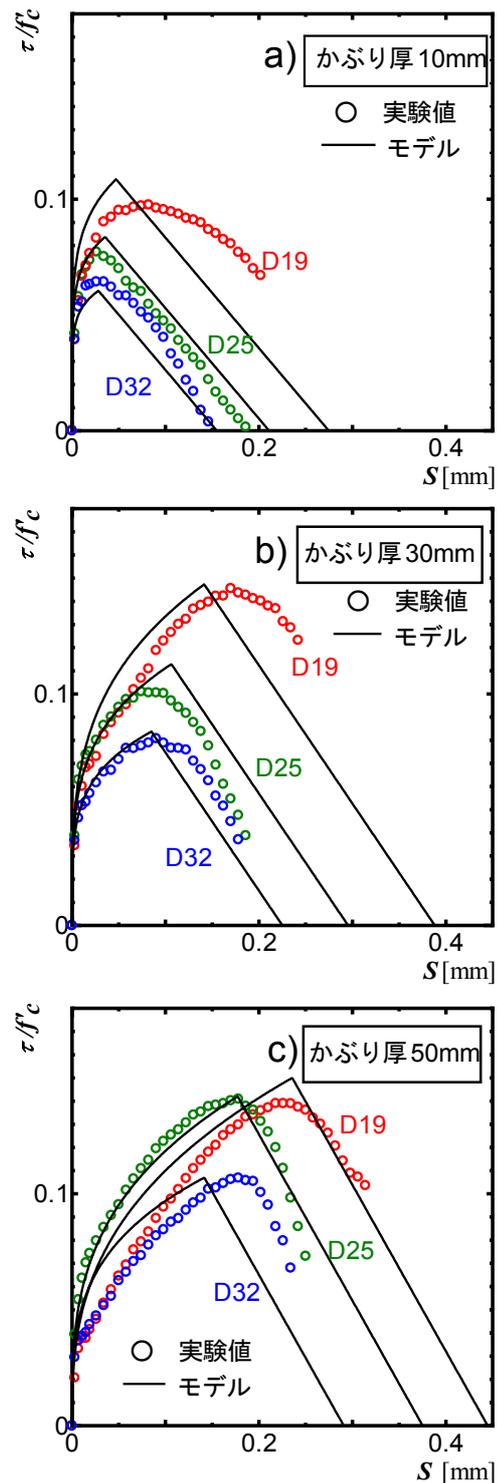


図-12 実験値と提案モデルの比較

- 文集, vol.26, No.2, pp.823-828, 2004.6
- 6) 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, No.505/V-33, pp.73-83, 1996.