

論文 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

松本 隆明^{*1}・檜貝 勇^{*2}・斉藤 成彦^{*3}

要旨：鉄筋とコンクリートの付着性状が RC 構造物の全体挙動に大きく影響を及ぼす場合がある。FEM 解析において付着を取扱う場合には、付着応力 - すべり関係を用いるのが便利であり、この関係については、これまでにいくつかの提案がなされている。しかし、かぶり厚が小さい鉄筋の付着応力 - すべり関係についての研究は極めて限られている。本研究では、かぶり厚を変化させてポストピーク領域も含めた付着応力 - すべり関係を実験的に検討した。

キーワード：かぶり厚，付着応力，すべり，ポストピーク挙動

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下，RC）構造物の FEM 解析において，鉄筋とコンクリートは完全付着として取扱うのが一般的であった。しかし，鉄筋とコンクリートの付着性状が RC 構造物の全体挙動に大きく影響を及ぼす場合があり，付着の重要性が認識されてきている。FEM 解析において付着を取扱うには，付着応力 - すべり関係を用いるのが便利であり，マッシュピブなコンクリートに埋め込まれた鉄筋の付着応力 - すべり関係は島ら¹⁾²⁾によって定式化されている。しかし，曲げ部材のようなかぶり厚が小さい鉄筋の付着応力 - すべり関係についての研究は極めて限られている。そこで本研究では，曲げ部材の挙動解析にも適用できるような，かぶり厚が小さい RC 一軸部材の両引き試験を行い，ポストピーク領域も含めた付着応力 - すべり関係を実験的に検討した。

2. 既往の研究

付着応力 - すべり関係については，これまでにいくつかのモデルが提案されているが，本研究では，島らの提案式と CEB³⁾の規定を比較に用いた。

2.1 島式

島らは鉄筋径，コンクリート強度，定着長および境界条件を変化させた RC 一軸部材の引抜き試験を行い，付着応力 - すべり関係式(1)を提案している。この関係式は，縦ひび割れが発生しないマッシュピブなコンクリート中に十分長く定着された鉄筋に対して適用でき，フーチング中に十分長く定着された柱，あるいは壁の主鉄筋などの解析に役立つものである。

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

ここで， τ ：付着応力（N/mm²）

f_c' ：コンクリートの圧縮強度（N/mm²）

S ：すべり（mm）

D ：鉄筋直径（mm）

2.2 CEB 式

CEB では，図 - 1 のような付着応力 - すべり関係を規定している。補強鉄筋が無い場合のパラメータを表 - 1 に示す。CEB 式は，引抜き試験結果に基づいて定められたものである。付着軟化域も考慮されている点に特徴がある。

*1 山梨大学大学院 医学工学総合教育部 工修 (正会員)

*2 山梨大学大学院 医学工学総合研究部教授 工博 (正会員)

*3 山梨大学大学院 医学工学総合研究部助教授 博(工) (正会員)

3. 実験概要

3.1 使用材料

降伏点が 300 ~ 500N/mm² 程度の通常の鉄筋を用いると、付着強度に達する以前に鉄筋が降伏するので、ポストピーク挙動を把握することができない。そこで鉄筋としては、降伏応力の高い総ねじ PC 鋼棒 D25 を用いた。表 - 2 に鉄筋の力学的性質、図 - 2 に形状および寸法を示す。この鉄筋は、比例限度が 700N/mm² 程度であり、それ以降は応力 - ひずみ関係は曲線となる。それで、実験に先立って、比例限度の向上を目的に鉄筋の予備載荷を行った。これにより、比例限度を 850N/mm² まで高めた。なお、予備載荷時の最大応力は 0.2% 降伏点以下であるため、予備載荷後も降伏点の変化はない。

表 - 3 にコンクリートの配合、表 - 4 に試験時のコンクリート強度を示す。コンクリートには、早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材は最大寸法 20mm の砕石を用いた。目標圧縮強度は、7 日強度で 25N/mm² とした。スランプは、付着試験に対するブリーディングの影響を極力避けるために 5cm と小さくした。

3.2 供試体

本研究では、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。

図 - 3 に供試体概要を示す。供試体は、かぶり厚 c を 10, 30, 50, 100mm とし、各かぶり厚に対して 6 体製作した。コンクリート断面はかぶり厚 10 ~ 50mm では 150 × 150mm、かぶり厚 100mm では 250 × 250mm である。供試体長さを長くすると供試体の中間に横ひび割れが発生する。ひび割れ発生前後で付着応力分布は大きく変化するので、そのような供試体を用いるのは望ましくない。それで、横ひび割れが発生しない長さとして供試体長さ 150mm (6D, D: 鉄筋直径) を用いた。従って、本実験では、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性状を検討した事になる。

コンクリートは最小かぶり面が打ち込み底面

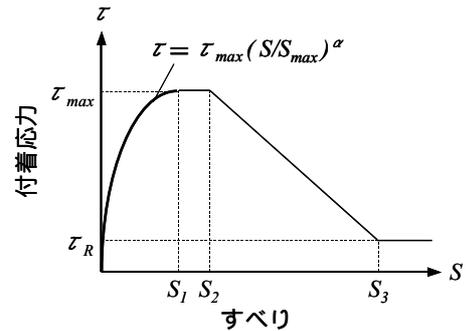


図 - 1 付着応力 - すべり関係モデル

表 - 1 CEB モデルパラメータ

Bond conditions	Unconfined concrete	
	Good	All other
S_1	0.6mm	0.6mm
S_2	0.6mm	0.6mm
S_3	1.0mm	2.5mm
α	0.4	
τ_{max}	$2.0\sqrt{f_c}$	$1.0\sqrt{f_c}$
τ_R	$0.15\tau_{max}$	

表 - 2 鉄筋の力学的性質

呼び名	D (mm)	As (mm ²)	fy (N/mm ²)	Es (N/mm ²)
D25	25.4	506.7	1010	1.89×10^5

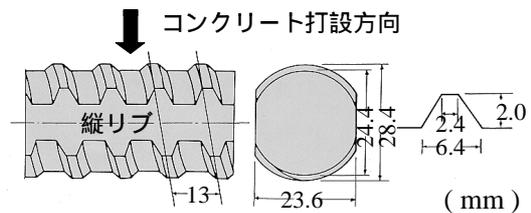


図 - 2 鉄筋の形状および寸法

表 - 3 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 - 4 試験時のコンクリート強度

かぶり (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
10	25.2	2.45
30	25.2	2.52
50	25.3	2.54
100	24.6	2.50

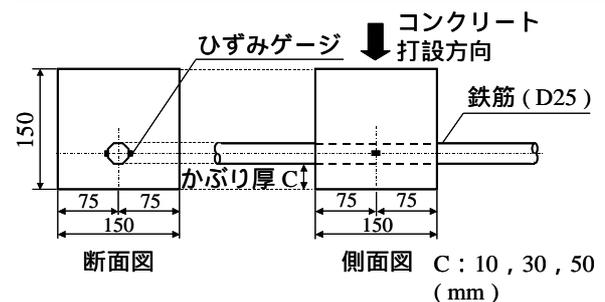


図 - 3 供試体概要 (かぶり 10 ~ 50mm)

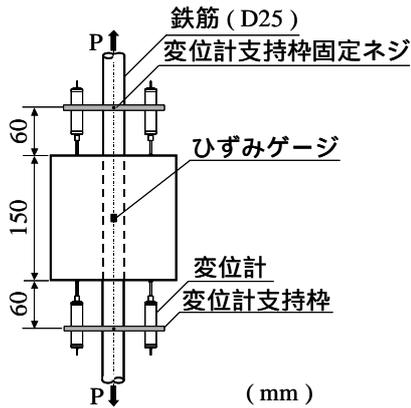


図 - 4 荷荷方法

に、鉄筋が水平になるようにして打設した。また、鉄筋は縦リブが水平になる向きに配置した。

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ゲージを使用した。ゲージは付着を乱さないために、ふしを削らないで、鉄筋の縦リブ部分の表裏 2 箇所に貼付した。また、コーティングは大きくならないように注意して、まず、エポキシ樹脂を塗布し、その後にワックスを用いた。

鉄筋のすべりは、図 - 4 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。

3.3 荷荷方法

図 - 4 に荷荷方法を示す。1000kN 万能試験機を用い、鉄筋の両端に軸引張力を加える両引き試験を行った。荷荷方法は単調荷荷とし、最大荷重は鉄筋弾性域の 410kN までとした。荷荷速度は約 100N/min である。

4. 実験結果

ここで、付着応力 τ とは、荷荷端から 75mm (3D) の区間における平均付着応力である。また、すべり量 S は、荷荷端から支持枠固定位置までの鉄筋の伸びを補正して算定した。すべり量は上下の変位計でそれぞれ計測しており、供試体 1 体について付着応力 - すべり関係は 2 つ求まる。供試体は各かぶり厚に対して 6 体ずつ製作しているため、各かぶり厚に対して 12 個の付着応力 - すべり関係が測定されている。この

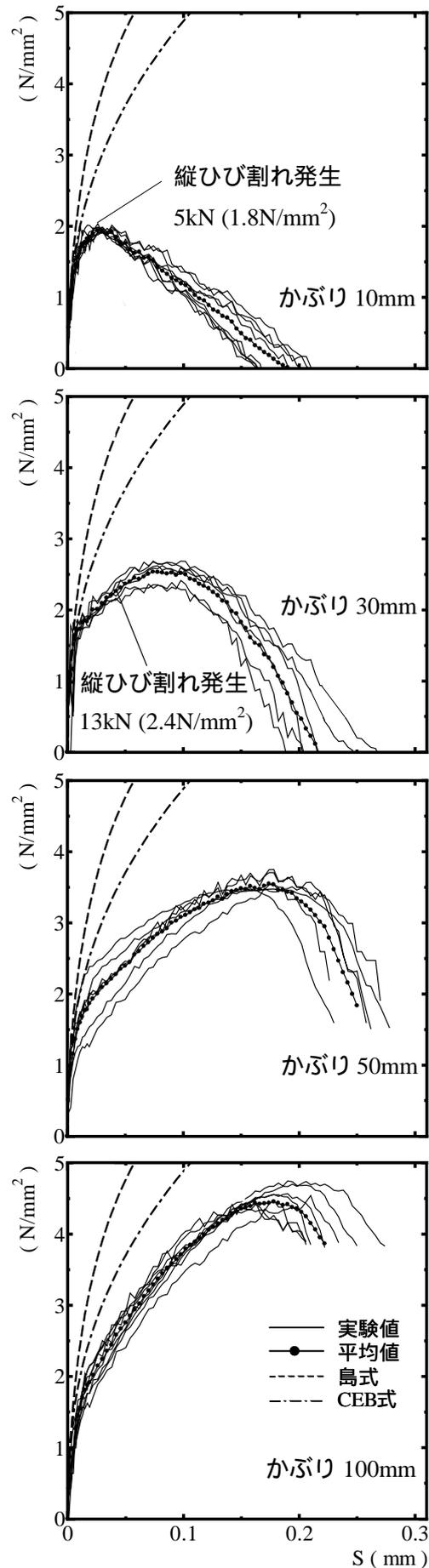


図 - 5 付着応力 - すべり関係

うち、計測が不完全であったもの、および他とは著しく傾向が異なっているものは除き、結果として6から8個のデータを採用した。

4.1 付着応力 - すべり関係

両引き試験より得られた付着応力 - すべり関係を図 - 5 に示す。図中、実線が実験値で、丸印は採用した6から8個のデータの平均値である。また、破線で島式、一点鎖線で CEB 式による値を併せて示した。

付着応力 - すべり関係は、かぶり厚によって異なるが、おおよそ以下のようなものである。付着応力が約 1.5N/mm^2 以下の範囲では、剛性が高い。また、その値はかぶり厚にかかわらずほぼ一定であり、島式および CEB 式とも近い値である。

付着応力が約 1.5N/mm^2 を越えると剛性が低下しはじめ、曲線の曲率を増加させながらピークに達する。最大付着応力は、かぶり厚が大きくなるほど大きい。また、かぶり厚が大きくなるにつれて最大付着応力時のすべりも大きくなっている。しかし、かぶり厚が 50mm 以上では、ほぼ一定になるようである。

ピーク以後は、かぶり厚にかかわらず軟化領域が認められる。かぶり厚が $10, 30\text{mm}$ の供試体では最大付着応力直前に縦ひび割れが発生した。かぶり厚が $50, 100\text{mm}$ の供試体では、縦ひび割れは確認できなかった。

4.2 既往の研究と実験値との比較

図 - 6 は、本実験で求めた付着応力 - すべり関係と島式および CEB 式を比較したものである。ここで、コンクリート強度 f'_c は 25N/mm^2 としている。実験で求めた最大付着応力は、島式の $20 \sim 60\%$ 、CEB 式の $15 \sim 40\%$ 程度と極めて低い値である。最大付着応力時のすべり量は、CEB 式の $5 \sim 30\%$ 程度と、最大付着応力と同様に極めて小さい値である。全体的な傾向として、本実験結果と比較すると、島式および CEB 式は最大付着応力が大きく、すべり量も非常に大きいことが明らかである。このように、引抜き試験と両引き試験では、付着応力 - すべり関係が大きく異なっている。この原因の一つは、引抜き試験

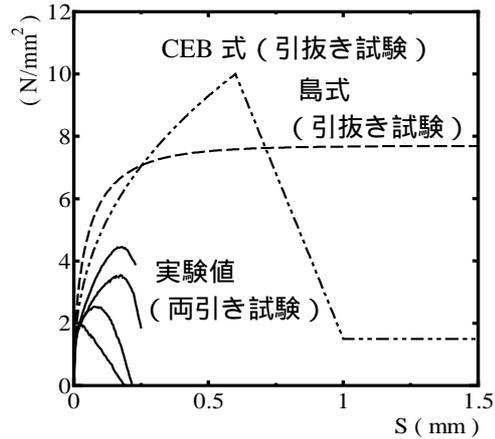


図 - 6 付着応力 - すべり関係の比較

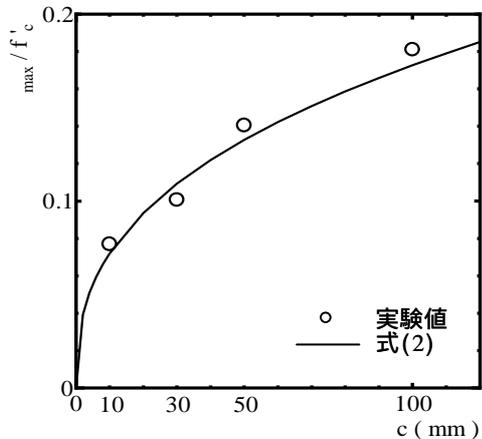


図 - 7 最大付着応力 - かぶり関係

と両引き試験においては鉄筋のひずみが大きく異なることであると考えられる。従って、引抜き試験結果に基づく付着応力 - すべり関係を、曲げ部材の引張側のような両引き試験に近い場合に適用することには問題があるといえる。

5. 付着応力 - すべり関係のモデル化

5.1 最大付着応力

最大付着応力 τ_{\max} とかぶり厚 c の関係を図 - 7 に示す。かぶり厚が大きくなると、最大付着応力は増加し、その関係は次式で近似される。

$$\tau_{\max} = 0.03c^{0.38} f'_c \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2)$$

なお、本実験では、かぶり厚は 100mm 以下であるが、ある程度かぶり厚が大きくなれば最大付着応力は一定になることが予測されるので、これについては、さらに検討の必要があると考え

られる。

また，最大付着応力に対するコンクリートの圧縮強度 f'_c の影響に関しては，CEB は f'_c の 1/2 乗に比例するとしている。また，山尾ら⁴⁾は 2/3 乗に比例すると報告している。しかし，島ら¹⁾は，定着長が十分長い場合は 2/3 乗，定着長が短い場合は f'_c に比例するとしている。本実験も付着長（平均付着応力を算定する区間の長さ）は 3D と比較的短いので，暫定的に最大付着応力は f'_c に比例するものと仮定した。

5.2 最大付着応力時のすべり

最大付着応力時のすべり S_{max} とかぶり c の関係を図 - 8 に示した。最大付着応力時のすべりは，かぶりが大きくなると直線的に大きくなる傾向を示している。しかし，かぶり厚 50mm と 100mm では S_{max} はほとんど同じであり，かぶりが 50mm 以上になると，かぶりの影響がなくなるようである。以上より，最大付着応力時のすべりとかぶりの関係は次式で表すことができる。

$$S_{max} = 0.003c \leq 0.17 \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

5.3 最大付着応力までの付着応力 - すべり関係

図 - 9 は τ_{max} ， S_{max} で正規化した付着応力 - すべり関係を示したものである。最大付着応力の点までの曲線は，CEB 式と同じ形で表されるものとして式(4)を用いた。ただし， α はかぶりの関数と考えることができる。

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

図 - 10 に式(4)の係数 α とかぶりの関係を示す。 α は 0.2~0.3 であり，かぶりが大きいほど大きくなる。この関係は式(5)で近似することができる。

$$\alpha = 0.13c^{0.18} \quad (5)$$

5.4 軟化域

軟化域においても，付着応力 - すべり関係は曲線的であるが，簡単のため，最大付着応力点と実験で得られた最大すべり時の点を結ぶ直線で近似した。この直線の勾配を軟化勾配 I とする。 τ_{max} ， S_{max} で正規化した付着応力 - すべり関係の軟化勾配とかぶりの関係は図 - 11 に示すと

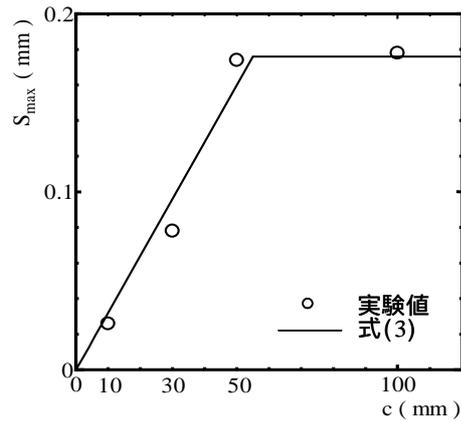


図 - 8 最大付着応力時のすべり - かぶり関係

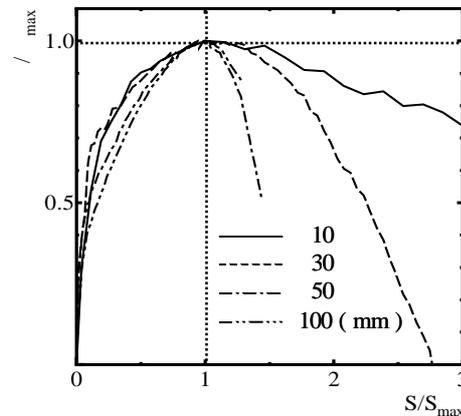


図 - 9 τ_{max} - S/S_{max} 関係

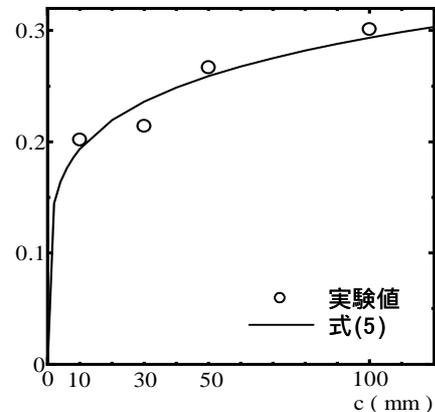


図 - 10 α - かぶり関係

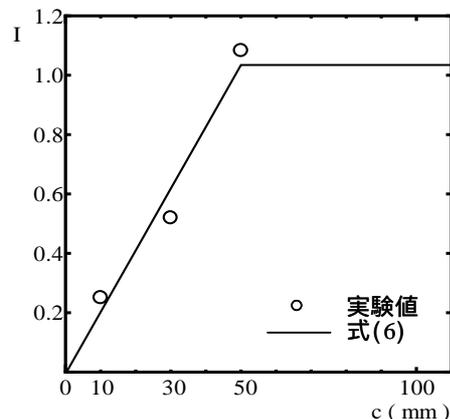


図 - 11 軟化勾配

りであり，式(6)のように近似することができる。

$$I = 0.02c \leq 1.0 \quad (6)$$

かぶり厚が 50mm までは，かぶりが大きいほど軟化勾配が大きくなる傾向を示した。かぶり厚 100mm については，荷重が鉄筋の比例限度を超えてしまうため，軟化域における付着応力 - すべり関係を十分測定できなかったのであるが，測定した範囲では 50mm の場合とほぼ同一であることから，暫定的に 50mm 以上では一定になるものと仮定した。今後，かぶり厚がさらに大きい場合も含めて検討する必要がある。

5.5 実験結果との適合性

図 - 12 は，5 節で検討したモデルと実験結果を比較したものである。提案した付着応力 - すべりモデルは概ね実験結果を評価していると思われる。

土木学会コンクリート標準示方書⁵⁾では，一般構造物の一般の環境における最小かぶりを 25 ~ 35mm の範囲としており，本研究で提案したモデルの適用すべき範囲は広いものと考えられる。

6. 結論

曲げ部材の挙動解析に適用できるように，かぶり厚が小さい RC 一軸部材の両引き試験を行い，ポストピーク領域も含めた付着応力 - すべり関係を実験的に検討した結果，本実験の範囲内において以下のような結論が得られた。

- (1) 引抜き試験と両引き試験では付着応力 - すべり関係が大きく異なる。引抜き試験によって得られた島式および CEB 式に代表されるような付着応力 - すべり関係を，曲げ部材の引張側のような両引き試験に近い場合の解析に適用することはできない。
- (2) かぶり厚が小さい場合を含めて両引き試験を行った結果，付着応力 - すべり関係に及ぼすかぶり厚の影響は大きいことが確認された。
- (3) 曲げ部材の引張側に適用できるような，かぶり厚を考慮した付着応力 - すべり関係モデルを提案した。

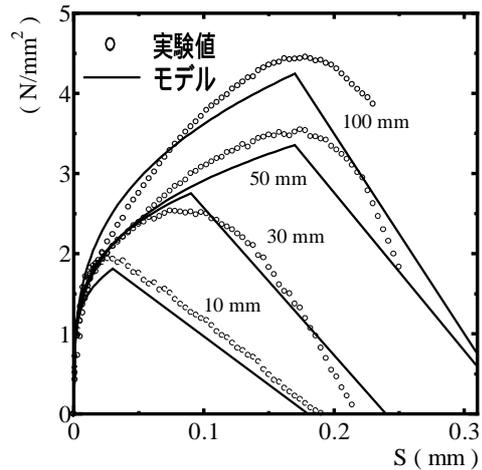


図 - 12 実験値と提案モデルの適合性

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，第 378/V-6 号，pp.165-174，1987.2
- 2) 周 礼良，二羽 淳一郎，岡村 甫：マッシュなコンクリート中の異形鉄筋の付着モデル，第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，pp.45-52，1983.10
- 3) Comite Euro-International du Beton:CEB-FIP Model Code 1990 First Draft, CEB, 1990
- 4) 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，343 号，pp.219-228，1984.3
- 5) 土木学会，コンクリート標準示方書 設計編，pp.106，2002
- 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，505/V-33 号，pp.73-83，1996.11
- 7) ACI : Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI (318-77), 1992