

論文 メゾスケール解析による異形鉄筋の付着挙動解析

武藤 信太郎^{*1}・Worapong Srisoros^{*2}・中村 光^{*3}・国枝 稔^{*4}

要旨：異形鉄筋の節形状までモデル化を行った剛体バネモデルによるメゾスケール解析により、異形鉄筋とコンクリート間の付着挙動について検討を行った。マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋を対象としたメゾスケール解析により、鉄筋のひずみ分布、付着応力-すべり関係、付着応力-すべり-ひずみ関係が既往の提案式と同等に評価できることを示した。また、鋼材の剛性を変化させた場合の付着挙動について検証を行い、付着応力-すべり-ひずみ関係として唯一の関係が成り立つ可能性を示した。

キーワード：メゾスケール解析、付着応力、付着応力-すべり-ひずみ関係、異形鉄筋

1. はじめに

コンクリート構造物の挙動を解析的に評価する場合、力学的挙動に対してマクロスケール(数cm以上)での平均的な挙動を表す材料構成則を用いて、解析が行われてきた¹⁾。それに対し、近年、コンクリートの強度や応力-ひずみ関係、破壊性状といった基本的な力学特性を数値解析的に評価する手法の一つとして、メゾスケール(数mmオーダー：準微視的)での解析が注目を浴びている。

著者らは、異形鉄筋の幾何形状を考慮して、その節までもモデル化した剛体バネモデルを用いて、後藤ら²⁾が行った両引き試験を対象としたメゾスケール解析を行った³⁾。その結果、節近傍の内部ひび割れ性状、マクロなひび割れ性状、鉄筋節間隔の影響等がメゾスケール解析により概ね妥当に評価可能なことを示した。付着特性はそのメカニズムからより明確にする必要があると考えられるが、現状では、実験的にマクロな付着応力-すべり関係などの挙動が評価されているに過ぎない。また、実験結果に基づく幾つかの付着応力-すべり関係のモデルが提案されているが、それらのモデルは対象とした境界

条件の相違から相互に異なったものとなっており、いずれも普遍的なモデルとはいえない。

そこで本研究では、マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着挙動の評価をメゾスケール解析により行った。本解析により、鉄筋とコンクリート間の挙動について評価を行い、さらに、既往の実験より得られた付着応力-すべり-ひずみ関係の提案式⁴⁾の適用性について検証を行った。

2. 剛体-バネモデル

本研究では、コンクリートの構造解析手法として、ひび割れ進展等の不連続現象を直接表現できる離散型の解析手法である剛体-バネモデル⁴⁾を用いた。

剛体-バネモデルでは、コンクリートのひび割れをバネの破壊によって表現するため、ひび割れは要素境界辺上に沿って発生する。このため、ひび割れの発生・進展がコンクリートの要素分割に大きく依存する。そこで図-1に示すように、計算幾何学の概念であるVoronoi多角形分割により、コンクリートおよび鉄筋をランダムな要素に分割し、コンクリートに発生するひび

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学科 (正会員)
 *2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学科 工修 (正会員)
 *3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学科教授 博(工) (正会員)
 *4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学科助教授 博(工) (正会員)

割れの要素依存性を低減した。また，Voronoi 分割されたコンクリート要素は 3 自由度を持つ剛体と仮定し，要素の境界辺上に垂直バネ (k_n) および，せん断バネ (k_s)，回転バネ(k_θ)を設けた。バネ定数には，コンクリートおよび鉄筋の弾性剛性 E を二要素間の母点間距離 h で除したものを与えた。

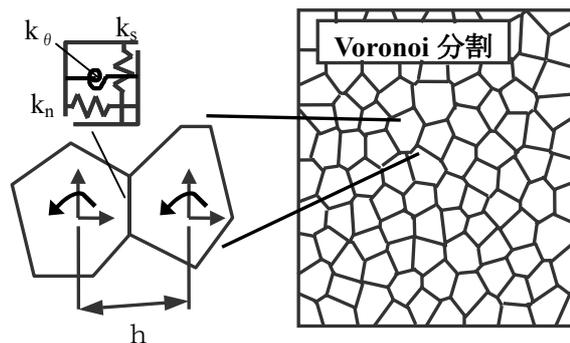


図-1 剛体-バネモデル

3. 解析モデル

コンクリートの材料モデルは，垂直バネに圧縮・引張挙動，せん断バネにせん断すべり挙動をモデル化した。

本研究では，圧縮領域では，異形鉄筋の節による 3 次元的な支圧応力によって見かけの強度が変化し，複雑と考えられることから，簡単のため弾性と仮定した。引張領域では，図-2 に示すように垂直応力が引張強度 f_t に達するまでは線形弾性とし，その後は引張破壊エネルギー G_f によって軟化勾配を変化させる 1/4 モデルに従って応力を低減させた。また，除荷経路は原点指向型とした。なお，変位をひずみに変換するための特性長さは，二要素間の母点間距離 h とした。

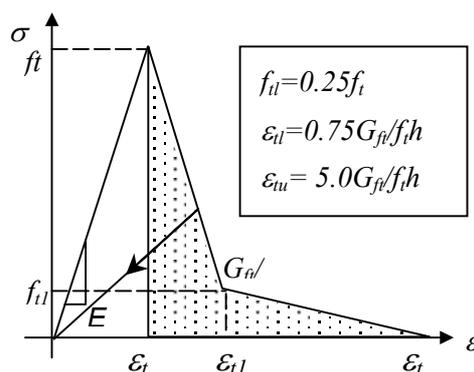


図-2 コンクリートの応力-ひずみ関係

せん断バネについては，斉藤らのモデル⁵⁾に基づきコンクリートのせん断伝達機構のモデル化を行った。せん断強度は，図-3 に示すようなモール・クーロン型の破壊基準を用いて，式(1)で算出されるものと仮定した。

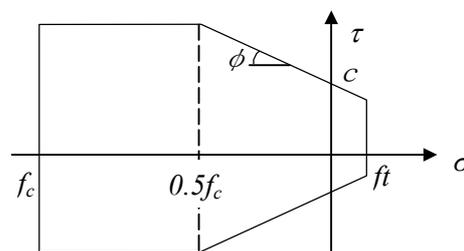


図-3 モール・クーロン型の破壊基準

$$\tau_f = \begin{cases} c - \sigma \tan \phi & (\sigma \geq 0.5f_c) \\ c - 0.5f_c \tan \phi & (\sigma < 0.5f_c) \end{cases} \quad (1)$$

ここで， $c=0.138f_c$ ， $\phi=37^\circ$ とした。破壊線到達後は，終局せん断ひずみ ($\gamma u=0.004$) に達するまで破壊線上を移動するものとした。ただし，ひび割れ面において，ひび割れの開口に伴うせん断剛性の低下を表現するために，せん断剛性低減係数 β を導入し，式(2)で示すようにせん断剛性を仮定してせん断軟化モデルを導入した。ここで， G は初期せん断剛性である。 κ はせん断低減係数の低下率を表す係数である。せん断バネの除荷・再負荷は，初期せん断剛性に従う

ものと仮定した。

$$G_{cr} = \beta G$$

$$\beta = 1 - \omega = \begin{cases} 1 & (\varepsilon \leq \varepsilon_t) \\ \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon} \exp\left[-\frac{\kappa}{\varepsilon_u}(\varepsilon - \varepsilon_t)\right] & (\varepsilon > \varepsilon_t) \end{cases} \quad (2)$$

鉄筋の材料モデルは，弾性と仮定し，弾性剛性は $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とした。

なお，数 mm オーダーの寸法をもつ要素分割ではその材料パラメータをどのように与えるのが問題になる。既往の検討結果³⁾でコンクリートを均質体として扱う場合，数 10cm オーダーの寸法を持つ供試体の実験より得られたマクロな材料特性を適用しても，概ね妥当な結果が得られることが示されているので，材料パラメータ

はマクロな解析に用いるものと同一とした。

4. マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着挙動評価

4.1 供試体概要

本解析で用いた解析モデルおよび境界条件を図-4に示す。解析モデルは長さ1,000mm、直径500mmの円柱コンクリートの中心にD32の異形鉄筋が配置した供試体をモデル化した。供試体寸法は、島らが行ったマッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の片引き試験と同一である⁶⁾。なお、本解析は2次元の剛体-バネモデルを用いているため、3次元構造を直接モデル化できない。そこで、鉄筋中心位置から半径 r の地点の供試体厚さを、円周方向の長さ $2\pi r$ として与えることで供試体をモデル化した。

異形鉄筋の寸法と形状を表-1に示し、図-4にその幾何形状のモデル化を示した。なお本解析の異形鉄筋は、後藤らが実験で用いた節形状によりモデル化した。境界条件としては、鉄筋の中心を水平方向に、供試体上部の端のサポートは水平・鉛直方向に固定し、鉄筋上端を鉛直方向に載荷した。さらに、数値的な安定性を持たせるためにコンクリート外縁に水平方向の固定条件を付与した。

なお、図-4に示すように圧縮応力が卓越すると考えられる鉄筋の節上面とコンクリートの境界では、コンクリートと鉄筋との機械的な力の伝達に着目するために、出来るだけ剛結に近づけることとし、弾性剛性を鉄筋の剛性($2.0 \times 10^5 \text{MPa}$)と等しいと仮定した。一方、鉄筋の節上面以外の部分とコンクリートとの境界は、鉄筋表面の微細な凹凸に付着したセメントペーストが硬化とともにせん断キイとなって表面の付着抵抗力を発揮すること⁷⁾を簡単に考慮するために、コンクリートの剛性($2.0 \times 10^4 \text{MPa}$)と等しいと仮定した。コンクリートの材料諸元はヤング係数 $E=2.0 \times 10^4 \text{MPa}$ 、引張強度 $f_t=3 \text{MPa}$ 、破壊エネルギー $G_f=0.1 \text{N/mm}$ 、式(2)のせん断モデルに用いる圧縮強度 30Mpa として用いた。

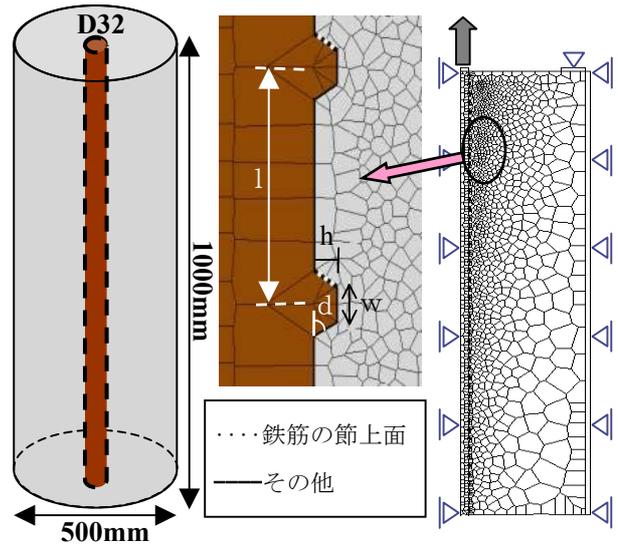


図-4 解析モデルと境界条件

表-1 異形鉄筋の寸法と形状

Nominal diameter ϕ (mm)	Dimension of lug			
	Spacing l (mm)	Height h (mm)	Width at top w (mm)	Face angle d (deg)
32	21	2.2	3	60

4.2 解析結果および挙動の評価

図-5に鉄筋上部の荷重作用位置での荷重-変位関係を、図-6に図-5のI~Vにそれぞれ対応する時点でのひび割れ変形図を示す。なお、解析は、鉄筋の最大ひずみが降伏以前の 1500μ まで行った。

図-5より、荷重-変位関係は変位が大きくなるにつれて剛性が低下していく非線形挙動を示しているのが分かる。図-6において、Iの時点では載荷点付近の節近傍から微細ひび割れが発生し始め、その微細ひび割れが載荷点から自由端の方向に進展していく。IIになると、コンクリート上面の載荷点近傍でさらにコンクリートの変形が大きくなってゆき、IIIでは載荷点近傍の微細ひび割れが集まり、局所的な縦ひび割れとなってコンクリートが引き抜け始める。さらに、IVでは載荷点近傍において、内部ひび割れが斜めに進展してゆく。Vの鉄筋の最大ひずみが 1500μ となるレベルになると、水平方向に進展するひび割れがコンクリート上面に到達し、コーン状の破壊性状が生じているのが見られる。なお、鉄筋周辺の微細ひび割れは荷重増加と共に

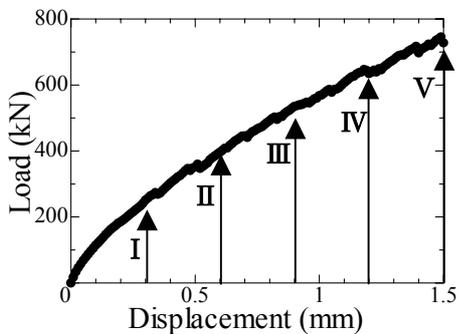


図-5 荷重-変位関係

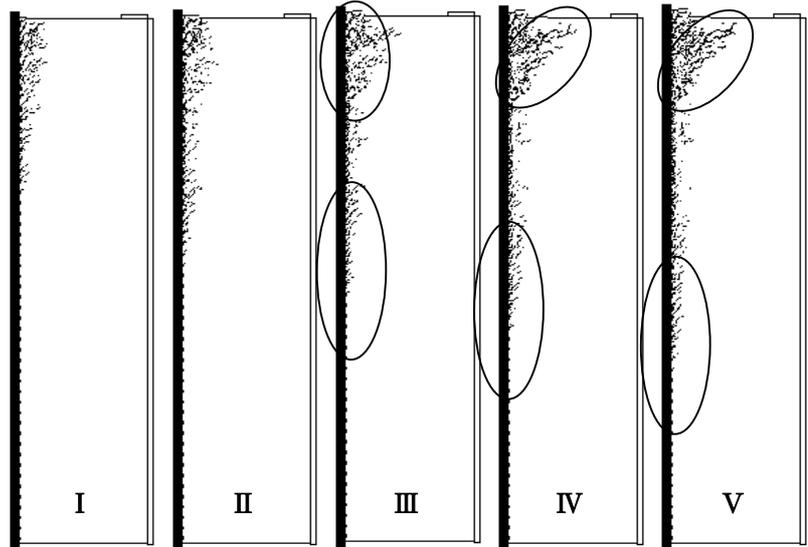


図-6 ひび割れ変形図

に供試体下部へ広がりを見せている。以上より、本解析モデルがマッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の引き抜き試験に見られる特有の破壊性状を再現していることがわかる。

4.3 付着応力-すべり関係の評価

図-7 に解析より得られた鉄筋のひずみ分布を示す。このひずみ分布から付着応力-すべり関係の評価を行った。ここで、鉄筋に沿った任意の点における鉄筋の付着応力 τ は次式によって求められる。

$$\tau = \frac{ED}{4} \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (3)$$

ここで、E：弾性剛性、D：鉄筋径、 $d\varepsilon/dx$ ：鉄筋のひずみ分布の傾きである。また、鉄筋の任意の点におけるすべり量は式(4)に示すように、自由端から考えている点までのひずみを積分したものに、自由端のすべりを加えたものである。なお、本解析において自由端のすべりは常に 0 であったので以下の式を用いてすべり量を求めた。

$$S = \int \varepsilon dx \quad (4)$$

ここで、S：すべり量、 ε ：ひずみ、 x ：自由端からの距離とする。算定された付着応力-すべり関係を図-8 に示す。図-7、8 の I～V は図-5 に示す時点とそれぞれ対応している。

なお、図-8 には島らによって提案された(5)

式に示す定着長が十分長い場合における付着応力-すべり関係を破線で示している。

$$\tau = 0.9 f'_c{}^{2/3} (1 - e^{-40s^{0.6}}) \quad (5)$$

ここで、 τ ：付着応力、 f'_c ：コンクリート強度、S：すべり、D：鉄筋径、 $s=S/D$ である。

図-7 のひずみ分布より、載荷点の変位が進むにつれて鉄筋のひずみの値が大きくなり、供試体下部へひずみが進展していくことがわかる。この現象は図-6 の微細ひび割れの進展と対応しており、付着応力の伝達挙動が理解できる。

図-8 は、図-7 の I～V のひずみ分布から得られる応力-すべり関係を重ねて示しているが、異なるひずみ分布に対しても同一の関係で示されることが分かる。なお、各時点のすべりが大きい領域では曲線上から離れる挙動を示しているが、これは、供試体上部に斜めひび割れが進展し、コンクリートの剥離が生じる領域のひずみから求められたものに対応する。図-8 中に示す式(5)と比較すると、メソスケール解析により得られた結果は概ね等しい挙動を示している。したがって、鉄筋の節までモデル化したメソスケール解析を行うことで、鉄筋の付着応力-すべり関係を解析的に評価できると言える。

4.4 付着応力-すべり-ひずみ関係の評価

前節で示した付着応力-すべり関係は、境界条件などの影響を受けることが知られている。

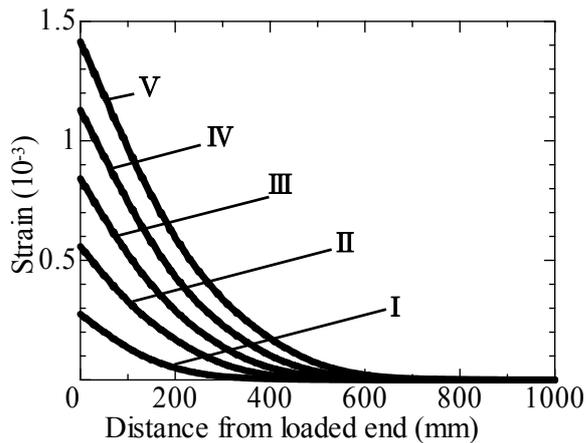


図-7 ひずみ分布

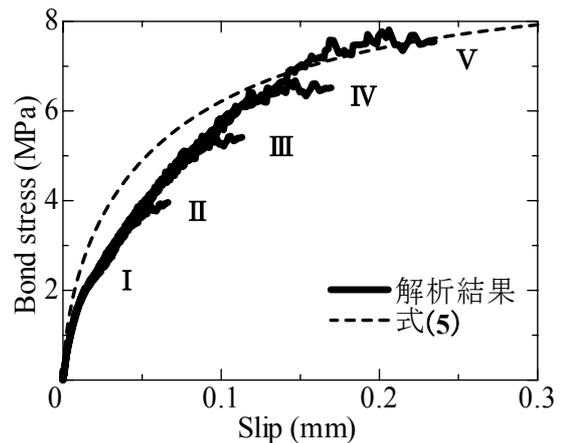


図-8 付着応力-すべり関係

それに対し、島らは、いかなる境界条件、剛性の異なる鋼材に対しても成り立つ関係として(6)式に示す付着応力-すべり-ひずみ関係を提案している。そこで、メゾスケール解析の結果に基づき、島らの提案する付着応力-すべり-ひずみ関係の評価を試みることにする。

$$\tau / f'_c = 0.73 \{ \ln(1+5s) \}^3 / (1 + \varepsilon \times 10^5) \quad (6)$$

ここで、 τ : 付着応力、 f'_c : コンクリート強度、 S : すべり量、 D : 鉄筋径、 ε : ひずみ、 $s = 1000S/D$ である。式(6)の関係式は、図-9の軸に対して、破線で示す直線関係が成立するとしたものである。図-9に島らの提案式と解析より得られた結果を示す。図中のI~Vの線は、図-5の各荷重段階で得られた結果に基づくものである。図より、メゾスケール解析より求めた、島らの提案式と概ね一致する結果が得られていることがわかる。なお、各線のひずみが大きい領域で曲線上から離れる挙動は前述した通り、供試体上部のコンクリートが剥離する領域の影響と考えられる。

4.5 鋼材の違いによる付着応力-すべり-ひずみ関係の評価

次に、鋼材の弾性剛性が異なる場合に対して付着応力-すべり-ひずみ関係の検証を行った。解析は鋼材の弾性剛性 E を $2.0 \times 10^5 \text{MPa}$ 、 $1.0 \times 10^5 \text{MPa}$ 、 $5.0 \times 10^4 \text{MPa}$ と鉄筋の剛性から変化させたものについて行った。

それぞれの鋼材において載荷点でのひずみが

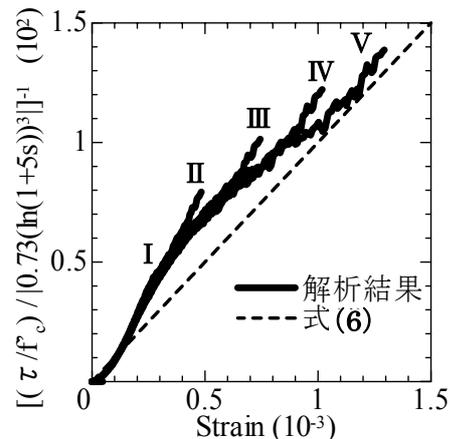


図-9 付着応力-すべり-ひずみ関係

1500 μ の時点での解析結果として、図-10にひずみ分布、図-11に付着応力-すべり関係、図-12に付着応力-すべり-ひずみ関係を示す。図-10より、鉄筋の任意の位置におけるひずみは、弾性剛性が小さい方が小さくなり、供試体下端への進展領域が短くなる。また、図-11の付着応力-すべり関係より、弾性剛性が小さいほど、付着応力は小さく評価されることが分かる。以上の結果は、島らが鉄筋のかわりに剛性の小さなアルミニウム($E=7.2 \times 10^4 \text{MPa}$)を用いた実験で得られた結果⁶⁾と同様な傾向であり、剛性の異なる鋼材を用いたとき、式(5)だけでは付着挙動を評価することが出来ないことを数値解析的にも確認した。一方、図-12の付着応力-すべり-ひずみ関係は弾性剛性の異なる鋼材に対しても付着応力-すべり-ひずみ関係はほぼ同様の挙動を示し、1つの関係が成り立つことが示される。したがって、付着応力-すべり-ひずみ関係を用いれば、剛性が異なる場合でも、

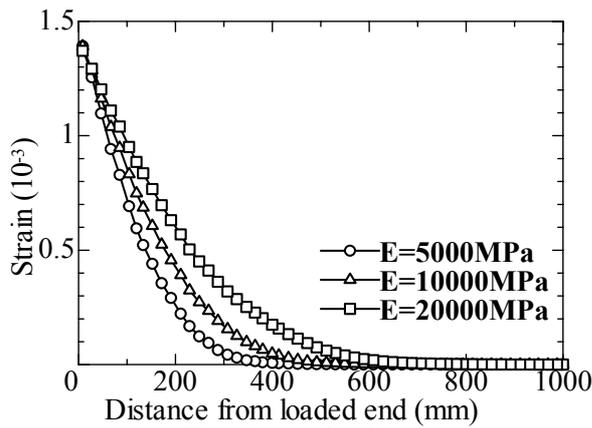


図-10 ひずみ分布

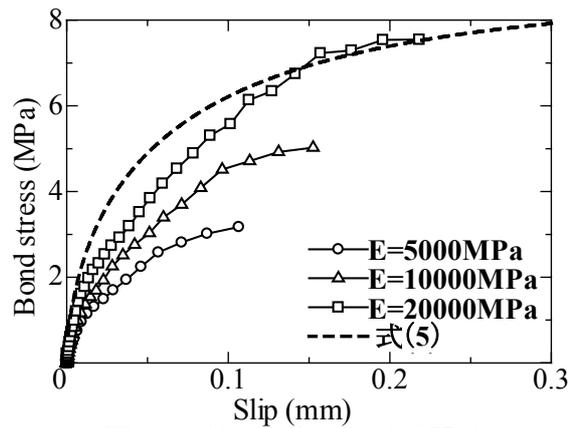


図-11 付着応力-すべり関係

ひとつの関係で付着挙動が評価できるという島らの提案が妥当であることが、メゾスケール解析から推測される。

5. まとめ

本研究では、マッシュなコンクリートに埋め込まれた鉄筋の付着挙動を異形鉄筋の節までモデル化した剛体バネモデルによるメゾスケール解析により評価を行い、以下の結論を得た。

- (1) 本解析手法を用いることで、マッシュなコンクリートに埋め込まれた鉄筋の引き抜き試験を行った場合⁶⁾、破壊性状、内部ひび割れ進展状況、ひずみ分布性状、付着応力を解析的に評価できる。
- (2) 付着応力-すべり関係は、鋼材の剛性に依存し、剛性が小さいほど付着応力は小さくなることを数値解析的に示した。
- (3) 付着応力-すべり-ひずみ関係は、鋼材の剛性によらず唯一の関係となり、島らの提案式と概ね一致することを解析的に示し、実験結果より得られた島らの提案式の妥当性が推測された。

なお、今後の課題として、より実現象に近い挙動を捉えるために、3次元解析への拡張を行う必要がある。

参考文献

- 1) 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, 技報堂出版, 1991.
- 2) 周後藤幸正, 大塚浩司: 引張を受ける異形鉄

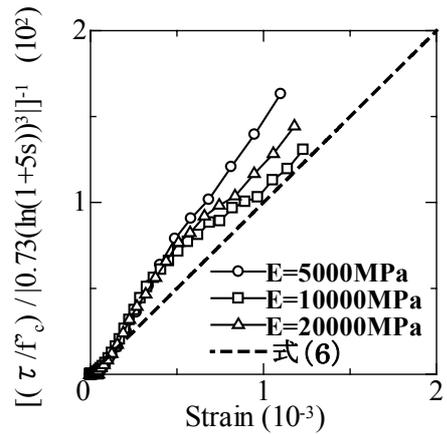


図-12 付着応力-すべり-ひずみ関係

筋辺のコンクリートに発生するひび割れに関する研究, 土木学会論文報告集, 第294号, pp.85-100, 1980

- 3) 武藤信太郎ら: メゾスケール解析によるコンクリートと異形鉄筋の付着挙動, 応用力学論文集, Vol.7, pp.767-774, 2004
- 4) Kawai, T.: New discrete models and their application to seismic response analysis of structure, Nuclear Engineering and design, Vol.48, pp.207-229, 1978.
- 5) Saito, S.: Fracture analysis of structural concrete using spring networks with random geometry, Doctor Thesis of Kyushu University, 1999.
- 6) 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-ひずみ関係, 土木学会論文集, 第378号/V-6, pp.165-174, 1987
- 7) 田辺忠顕, 檜貝勇, 梅原秀哲, 二羽淳一郎: コンクリート構造, 朝倉出版, 1992.