

## 論 文

[2032] ひびわれ面で軸変形とズレ変形を同時に受ける軸方向鉄筋の  
非弾性挙動に関する研究

正会員○三島 徹也（前田建設工業技術研究所）

正会員 鈴木 顯彰（ 同 上 ）

正会員 篠田 佳男（ 同 上 ）

正会員 前川 宏一（東京大学土木工学科）

## 1. はじめに

ひびわれ面に埋設された鉄筋の力学的特性は、従来、ひびわれ直交方向（抜け出し作用<sup>1)</sup>）と平行方向（ダボ作用<sup>2)</sup>）にそれぞれ個別に検討されてきた。ところが、鉄筋に軸力が存在するとダボ耐力が低下することが鈴木ら<sup>3)</sup>によって指摘されている。この事実は、鉄筋にダボ応力が発生すると鉄筋の軸方向耐力が低下することをも示唆している。鉄筋の拘束効果が低減すると、ひびわれ面のせん断耐力は低下する。したがって、鉄筋のダボ効果は、ひびわれ面のせん断耐力を高める効果と低減させる効果の2面性を持つこととなる。ダボ効果がこのような2面性を持つことから、ダボ変形と軸変形の連成作用を無視したモデル化は危険側になる可能性もあり、より一般化された変形経路（軸変位とズレ変位）下での鉄筋の軸方向抜け出しモデルの構築が望まれる。

本研究の目的は、著者らが実施した一面せん断試験結果に基づき、軸変位とズレ変位を同時に受ける埋設鉄筋の力学的性状を検討し、鉄筋モデルの一般化に必要な実験データを収集することにある。特に、本研究では、ズレ変位が鉄筋の抜け出し性状に与える影響について検討する。

## 2. 鉄筋コンクリート部材の一面せん断試験

## 2.1 試験体

本研究の試験体は、著者らが実施した一面せん断試験の一部であり、表-1に示す通りである。本試験は打継ぎ処理を施したコンクリート接合面の応力伝達特性を調べる目的で実施されたものであるが、本研究では補強鉄筋の挙動のみに着目して検討を行う。試験体は平滑処理試験体、チッピング処理試験体の2種類があり、平滑処理試験体は別報に詳しい<sup>4)</sup>。どちらのタイプも鉄筋比0.37、0.74、1.10%の3体づつ実施されたが、本研究では、鉄筋比0.74%を中心に検討する。打継ぎ処理が同じであれば、補強鉄筋の挙動はほぼ同様の傾向を示すことを確認しており、代表

表-1 試験体一覧

N.O.	処理	鉄筋比(%)	コンクリート強度(Kg/cm <sup>2</sup> )	せん断面積(cm <sup>2</sup> )	鉄筋径	本数(本)
1	平滑	0.37	273	2160	D 1 6	4
2		0.74	277			8
3		1.10	252			12
4	チッピング	0.37	251			4
5		0.74	239			8
6		1.10	232			12

的な2体を検討することによって力学的性状を十分把握できる。

試験体の形状、配筋は接合面の補強鉄筋量が異なる点を除いて各試験体とも同様で、図-1に示す通りである。接合面を貫通する補強鉄筋の定着長は20D以上確保し、鉄筋の抜け出し特性が定着長の影響を受けないように配慮した。打継ぎ方法に関しては、チッピング処理は骨材が接合面から数mm浮きでるまで表面のモルタルを除去する程度とし、平滑処理は小手仕上げ程度とした。各試験体とも、先打ち部打設から約7日間湿潤養生を行った後、後打ち部コンクリートを打設した。

コンクリートの配合強度は $240\text{kgf/cm}^2$ であり、最大骨材寸法は20mmとした。使用した鉄筋は電炉製の異形鉄筋D16であり、一軸引張試験結果は図-2に示す通りである。

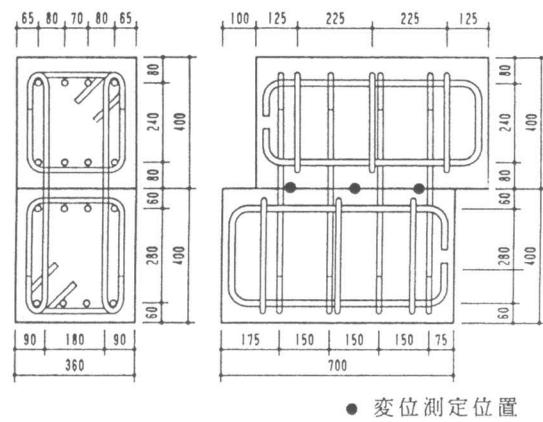
## 2.2 計測項目

溝切り処理（幅：3mm、深さ：3mm）を施した鉄筋を使用し、鉄筋ひずみ測定が鉄筋の付着性状に影響を及ぼさないよう配慮するとともに、ひずみゲージを鉄筋中心軸に対して、加力側とその反対側に位置するように配置し、ズレ変位に伴う鉄筋の曲げ変形と軸変形の両者を検出できるようにした（図-3）。接合鉄筋の中の2本に図-4に示すような間隔でひずみゲージを添付し、ひずみ分布測定を行った。この鉄筋を主な試験対象として、せん断ズレと軸変位同時に受ける鉄筋の力学的挙動の解明を試みる。

図-1に示す試験体の表裏、各3箇所に変位計を設置し、接合面の開口変位とせん断ズレ変位の測定を行った。本試験の計測変位はあくまで表面で測定されたものであり、接合断面の平均変位と異なると思われるが、簡易的に測定値の平均をひびわれ面の代表変位と考えた。また、コンクリートの変形は微少であると考え、ひずみ分布測定用鉄筋の軸変位とズレ変位も接合面の開口変位とせん断ズレ変位にそれぞれ等しいと仮定した。

## 2.3 載荷試験

載荷はプッシュオフ形式の一面せん断試験にて行った。鉄筋コンクリート部材の一面せん断試験には、接合面にあらかじめひびわれを導入した後、せん断加力をを行う方式と、最初からせん断



● 変位測定位置

図-1 試験体

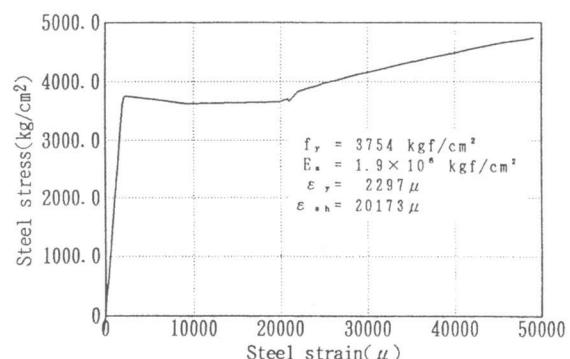


図-2 鉄筋の単軸応力-ひずみ関係

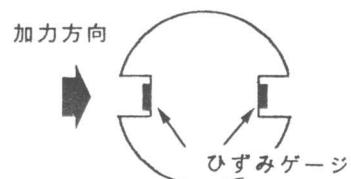


図-3 鉄筋ひずみ測定方法

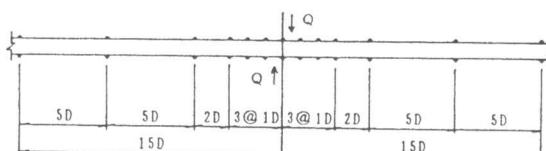


図-4 鉄筋ひずみ分布測定位置

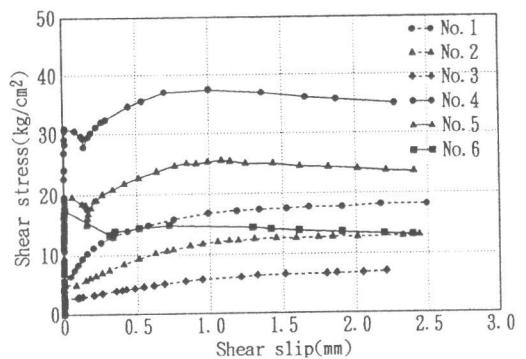
加力を加える方式の2通りがある。本研究では、後者、すなわち、最初からせん断加力をを行う方式を探った。本方式を採用した場合、接合面以外のせん断ひびわれ発生が懸念されるが、本試験体の接合面は打継ぎ面であり、一般部コンクリートに比べて引張強度が低いため、本方式をとっても有害なひびわれは発生せず、接合面に沿ってそってきれいに開口した。

図-5に各試験体のせん断ズレ変位-せん断応力関係とせん断ズレ-開口変位関係を示す。各試験体とも、接合面が開口するまでほとんどせん断ズレ、開口変位とも発生していない。本研究では、接合面開口後の挙動のみに着目することとする。平滑処理試験体はひびわれ面の凹凸が非常に小さいため、開口変位量も非常に小さいが、チッピング試験体ではせん断ズレの4割程度の開口変位が生じている。両タイプの試験体を比べることによって、せん断ズレと開口変位の比率が鉄筋挙動に与える影響を明確に把握することができる。

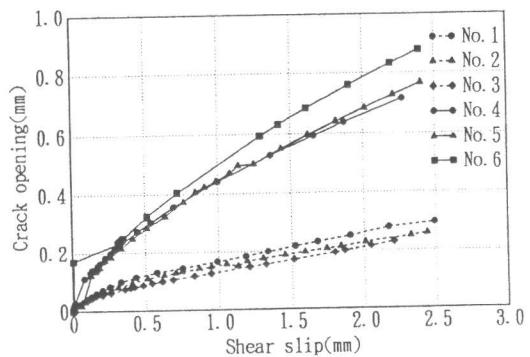
### 3. 試験結果の考察

#### 3.1 鉄筋の軸ひずみ分布

図-6にNo.2(平滑面)、No.5(チッピング面)試験体の代表的な載荷段階の鉄筋軸ひずみ分布を示す。なお、軸ひずみは鉄筋の表裏で測定したひずみを平均して求めた。No.2、5試験体とも、せん断ずれが少ない範囲ではほぼ山形の分布形状をしており、接合面の軸ひずみが最も大きい。この分布性状はRC部材の両引き試験結果等から得られるものと同様である。ところが、せん断ズレが大きくなり、接合面開口後の最大荷重近くになると、接合面から1D離れた位置(以降1D位置と呼ぶ)の軸ひずみが急増し、接合面位置のひずみと大小関係が逆転する現象が見られる。特に、最大荷重後のせん断ズレが非常に大きい時には、1D位置の平均軸ひずみは降伏ひずみを大きく上回っており、接合面内部で塑性が進行していることが分かる。にもかかわらず、接合面位置の軸ひ

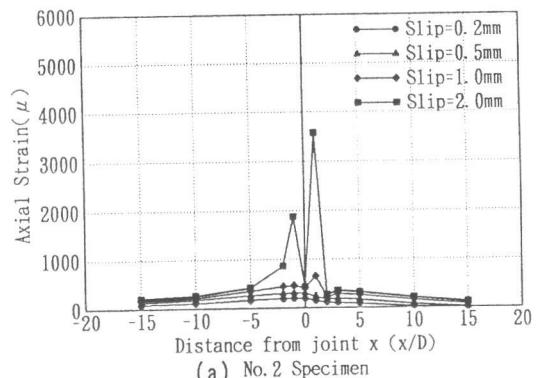


(a) せん断ズレ-せん断応力関係



(b) せん断ズレ-開口変位関係

図-5 試験結果



(a) No. 2 Specimen

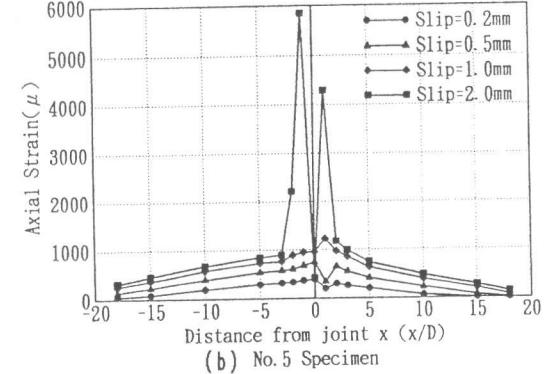


図-6 鉄筋の軸ひずみ分布

ずみは降伏ひずみ以下であり、弾性域にあることは注目に値する。せん断ズレと軸ひずみが存在する場合の鉄筋の変形性状は、純引張状態の試験結果から単純に類推することはできないことが分かる。

### 3.2 鉄筋の曲率分布

図-7にNo.2、5 試験体の曲率分布を示す。曲率は鉄筋の表裏のひずみ値を鉄筋径で除すことによって求めた。曲率分布も、軸ひずみ分布と同様に1D位置で最大になっており、軸ひずみ分布性状と曲率分布性状は密接に関連していると思われる。なお、塑性が開始した後の軸ひずみ分布、曲率分布とも1D位置近傍で急激に値が変化しており、変形が非常に局所的な部分に集中していることにも注意する必要がある。

1D位置の曲率が極めて大きいことより、鉄筋を一次元線材と見なすことはできず、3次元的な棒部材として扱う必要があることが理解される。曲げと軸力を同時に受ける弾塑性棒部材では、終局耐力 $M_u$ と $N_u$ の間に図-8に示すような相関があることが知られている。せん断ズレを受ける鉄筋についても同様の扱いをしなければ、鉄筋の正確な軸方向の応力状態を把握できないのである。鉄筋を完全弾塑性材料と仮定し、さらに断面の平面保持を仮定した場合の、1D位置の鉄筋の実測ひずみに基づいて算定した応力状態の推移を図-9に示す。1D位置の鉄筋は軸降伏というよりもむしろ曲げ降伏に近い状態である。

### 3.3 鉄筋の軸ひずみ-軸応力関係

一般に、鉄筋断面の平面保持を仮定すれば、鉄筋断面の平均軸応力は鉄筋の軸ひずみと曲率の関数として与えられ、図-10に示すようになる。仮に、鉄筋の軸ひずみと曲率に対する変形経路が図-10の実線に示す経路となった場合、曲げ降伏の影響によって、鉄筋の平均軸ひずみの最大値が一軸降伏強度をはるかに下回ることになる。No.2、5 試験体の1D位置の軸ひずみ、曲率履歴から算定した軸ひずみ-軸応力関係は図-11に示す通りとなる。どちらの試験体とも、見かけ上の降伏点が大きく低下し、一軸降伏応力の数割程度となっている。特に、せん断ズレが開口変位に対して非常に大きい平滑面試験体（No.2）では、1/3程度まで低下している。曲率の存在を無視すると、鉄筋の応力状態を正しく推定できることは実証された。

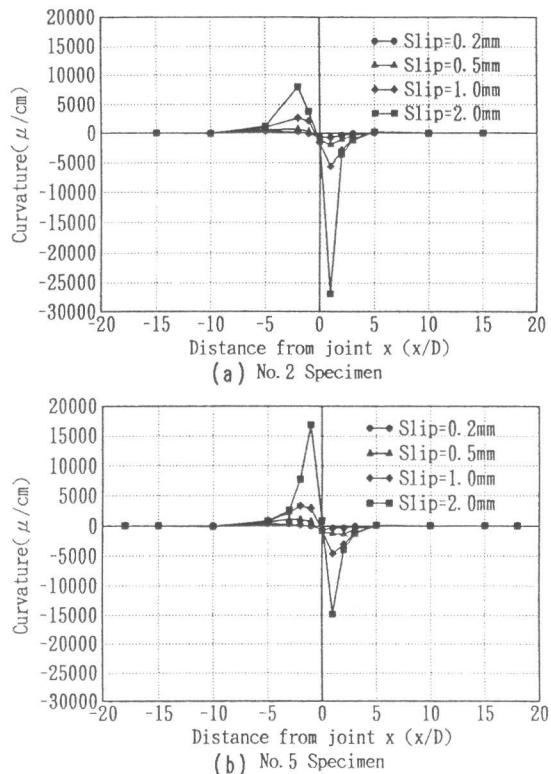


図-7 鉄筋の曲率分布

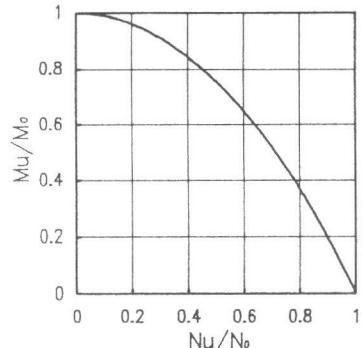


図-8 鉄筋のM-N 相関図

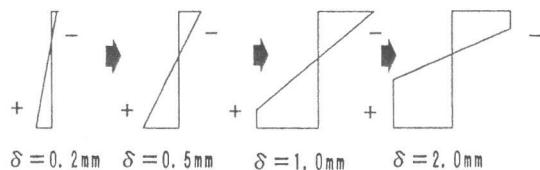


図-9 鉄筋応力状態の推移（No. 2）

### 3.4 鉄筋の軸力分布

図-12は、前節と同様の手法で、曲率と軸ひずみの連成を考慮して計算した鉄筋軸力分布である。接合面近傍で値にばらつきがあり、算定誤差が少なからず含まれていると推察されるが、接合面3D以内の軸力がほぼ一定値となる傾向が見られる。これは、接合面近傍でコンクリートの局所破壊が起こり、付着力がほとんど消滅していると考えれば妥当な結果である。仮に、軸応力が接合面近傍ではほぼ一定値をとるとすれば、軸ひずみが最大になる位置は、鉄筋軸剛性が最も小さい所となる。曲率の影響により1D位置の軸剛性は大きく低下しており、軸ひずみ分布が1D位置で最大となる原因はここにあると思われる。

### 3.5 鉄筋応力と抜け出し量の関係

鉄筋抜け出し量は鉄筋軸ひずみを積分したものである。従来の鉄筋抜け出しモデル<sup>1), 5)</sup>ではコンクリート内部の鉄筋の曲率増大に伴う塑性変形を無視しており、鉄筋抜け出し量を少なく見積もることとなる。また、鉄筋応力の連続性と接合面近傍の付着劣化を考慮すると、接合面の鉄筋応力と1D位置の鉄筋応力はほぼ等しい。このことは、接合面の鉄筋応力の限界値が1D位置と同様に鉄筋降伏応力の数割程度に低下することを意味しており、特に重要である。

従来の鉄筋ひずみ-すべり関係(申モデル<sup>5)</sup>)を用いて算定した接合面の鉄筋応力-抜け出し関係と実験値の比較を図-13に示す。初期剛性は比較的一致しているが、内部の塑性進行開始後は計算結果に比べて大きく剛性、耐力とも低下している。従来の鉄筋ひずみ-すべり関係とコンクリートの応力伝達モデルを組み合わせて接合面のせん断耐力を算定した場合、せん断耐力を高めに見積もる可能性が高いことが理解される。実際、著者らが開発した離散ひびわれモデル<sup>6)</sup>において、鉄筋抜け出し<sup>5)</sup>とコンクリートの応力伝達モデル<sup>7)</sup>単体では十分な精度を有しているにもかかわらず、それらを重ね合わせた結果得られる離散ひびわれモデルがせん断

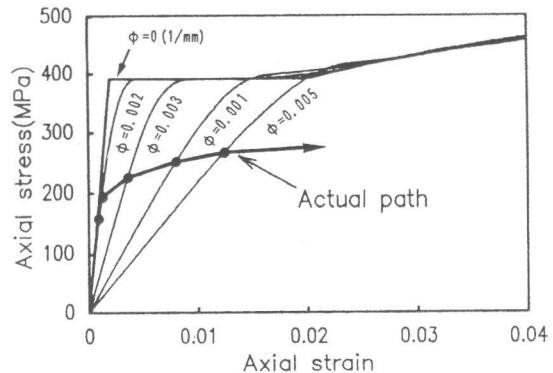


図-10 曲率が鉄筋の応力-ひずみ  
関係に及ぼす影響

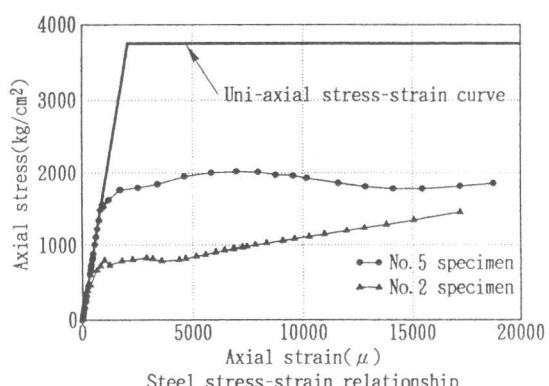
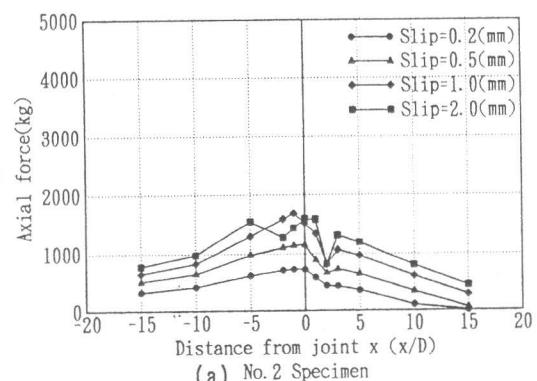
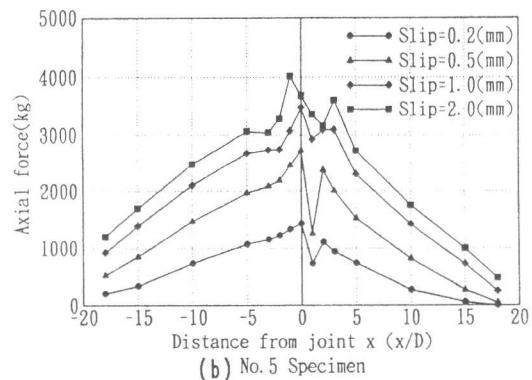


図-11 曲率を考慮した鉄筋の  
軸応力-軸ひずみ関係



(a) No. 2 Specimen



(b) No. 5 Specimen

耐力を数割程度高めに見積もる場合もあることが報告されている。その理由は明らかにされていないが、この影響が大きいものと推定される。

なお、変形の対称性を考慮すると、接合位置の鉄筋の曲率はゼロである。接合面位置の鉄筋軸応力の最大値が一軸降伏応力の数割程度となることは、接合位置の鉄筋は全断面で弾性状態を保っていることを意味している。接合位置の鉄筋軸ひずみが弾性であるからといって、鉄筋抜け出しが弾性的に挙動しているとは限らないのである。山田らのプッシュオフ試験で、接合面の鉄筋が弾性範囲にある時にせん断破壊する試験体が多数報告されている<sup>8)</sup>が、この破壊モードも内部の塑性変形進行にともなう鉄筋剛性の低下、つまり、コンクリート面に対する拘束効果の低下によって説明することができる。

#### 4. 結 論

R C 打継ぎ面の一面せん断試験結果から、埋設鉄筋の挙動を抽出し、ズレ変位と軸変位を同時に受ける鉄筋の非弾性挙動を実験的に求めた。その結果、以下の結論を得た。

- 1) ズレ変位と軸変位を同時に受ける接合面に埋設された鉄筋の軸ひずみは、接合面で最大とならず、接合面から 1 D 近傍で最大となり、内部で塑性が進行していることを明らかにした。
- 2) ズレ変位にともなう鉄筋の局所曲げに着目し、鉄筋を弾塑性体とし、鉄筋軸ひずみと曲率を連成させることによって、上記現象が説明できることを明らかにした。特に、曲率の存在が鉄筋軸剛性を低減させ、さらには、鉄筋軸応力の限界値をも低減させることを明らかにし、曲率を考慮したモデル化が重要であることを示した。
- 3) ズレ変位と軸変位を同時に受ける鉄筋の抜け出し挙動は、純引張状態のそれと大きくことなり、曲率の存在を無視した鉄筋モデルはひびわれ面のせん断伝達耐力を高めに見積もる可能性があることを示唆した。

#### 【参考文献】

- 1) Sima, H., Chou, L. and Okamura, H.: Micro and macro models for bond behavior in reinforced concrete, Journal of the faculty of engineering, The University of Tokyo(B), Vol. 39, No. 2, 1987.
- 2) Paulay, T., Park, R., and Phillips, M. H.: Horizontal construction joints in cast-in-place reinforced concrete, ACI SP42-27, pp. 599-616, 1974.
- 3) 鈴木・中村・堀内・尾坂：軸方向鉄筋のダウエル作用に及ぼす引張力の影響に関する実験的研究、土木学会論文集、No. 426/V-14, pp. 15-9-166, 1991年2月
- 4) 篠田・三島・大野・田中：平滑面における鉄筋のダボ効果について、第14回コンクリート工学年次講演会論文集（投稿中）
- 5) 申 鉄穂：繰り返し面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の有限要素解析、東京大学博士論文、1988年6月
- 6) 三島、Bujadham, B.・前川：正負交番載荷に適用可能なR C 離散ひびわれモデルの開発とその適用範囲、土木学会論文集、No. 442/V-16, pp. 181-190, 1992年2月
- 7) Bujadham, B., LI, B. and Mackawa, K.: Path-dependent stress transfer along crack in concrete, Proceedings of the JCI colloquium on analytical studies on shear design of reinforced concrete structures, JCI, pp. 65-72, Oct. 1989.
- 8) 山田・青柳：ひびわれ面におけるせん断伝達、第2回R C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 コンクリート工学協会, pp. 19-26, 1983年10月

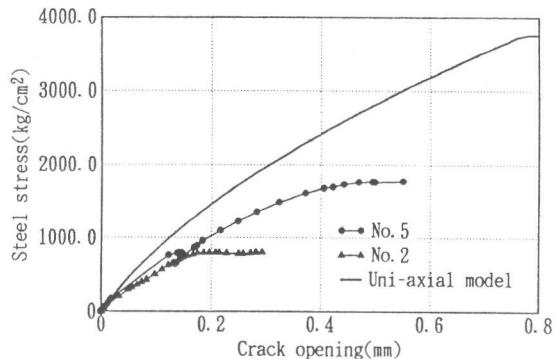


図-13 鉄筋応力-抜け出し関係