

論文

[2038] 定着鉄筋の伸び出し量に対する荷重速度の影響

石本陽一*・島 弘**

1. まえがき

鉄筋コンクリート柱や橋脚などの構造物に水平外力が作用すると、フーチング部の定着鉄筋が伸び出し、躯体部分の回転変形による付加的な水平変位が生じる。この付加的な変位の全水平変位に対する割合は大きいため、定着鉄筋の伸び出し量を知ることは重要である。伸び出し量に関しては、鉄筋直径、コンクリート強度、鉄筋間隔、鉄筋降伏後、繰り返し作用など様々な要因について、調査あるいは定式化が行われている[1][2]。しかし、これらのほとんどのものは静的載荷実験によるものである。そこで、実際の構造物に作用する、衝撃荷重、地震荷重、死荷重、持続荷重など広範囲な荷重速度をもった荷重に対して適用するためには、さらに、伸び出し量に対する荷重速度の影響を取り入れる必要がある。この問題に関して、鈴木ら[3]は軸方向主鉄筋の伸び出し量に対する載荷速度の影響を調べているが、定式化はされていない。

そこで、本研究では、衝撃荷重から極めてゆっくりとした荷重に相当する荷重速度で片引き試験を行い、鉄筋降伏後を含めた、伸び出し量に対する荷重速度の影響を実験的に調べた。

2. 実験概要

2.1 実験要因

載荷は、ひずみ制御ではなく、降伏前後に関わらず一定の荷重速度とする制御方法とした。したがって、実験

表-1 実験条件

供試体 No.	応力速度 (MPa/s)	ひずみ速度 (降伏前) (1/s)	f'c (MPa)
1	2.7×10^3	1.4×10^{-2}	28.0
2	5.7×10^1	3.0×10^{-4}	28.0
3	2.1	1.1×10^{-5}	30.5
4	5.3×10^{-2}	2.8×10^{-7}	30.5
5	2.9×10^{-3}	1.5×10^{-6}	30.5

f'c: コンクリート強度

要因は、荷重端における鉄筋の応力速度(dσ/dt)である。表-1に示すように、5本の供試体に対して、鉄筋の荷重端における応力速度を変えた引抜き試験を行った。本実験においては、供試体No.1, No.2における応力速度を衝撃荷重、地震荷重に相当するように設定した[4]。また、供試体No.4については、通常の静的載荷試験程度の応力速度であり、供試体No.5はNo.4よりも遅い応力速度とした。

2.2 供試体

供試体寸法を図-1に示す。断面300mm×300mm、高さ600mmのコンクリートブロックの断面中央に鉄筋を鉛直に埋め込んだ。この供試体寸法は、付着割裂ひび割れの発生を防ぎ、かつ、自由端すべりが生じない大きさのものである。

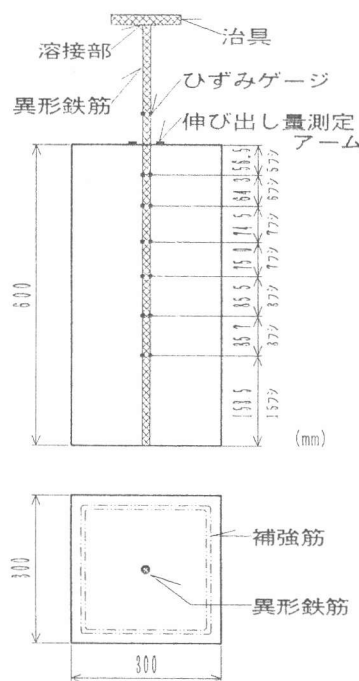


図-1 供試体の概形

* 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

** 徳島大学助教授 工学部建設工学科, 工博 (正会員)

鉄筋は、市販の異形鉄筋を用いた。その性質および形状を表-2に示す。表-2中の支圧面積係数(BA)は、國分・岡村[5]の提案によるものである。

コンクリートは、W/C=70%、目標スランプ8cm、骨材の最大寸法25mm、圧縮強度が25MPa程度となるように配合設計したものを鉄筋軸と同じ方向、つまり、鉛直に打設した。各供試体の試験時のコンクリート強度は表-1のとおりである。

2.3 荷重方法

図-2に示すとおり、供試体を鋼棒によって反力床に固定し、油圧ジャッキを用いて片引き試験を行った。固定の際に供試体に生じる鉄筋直角方向応力は0.4MPa程度であり、また、かぶりは約15Dであるので、この応力が付着作用に及ぼす影響はほとんどないと思われる[6]。

2.4 測定項目

測定項目は、荷重、荷重端ひずみ、鉄筋軸に沿ったひずみ分布、荷重端での鉄筋の伸び出し量である。ひずみ測定のために、荷重端付近に1点、定着部に6点の、各裏表に5mmのひずみゲージを貼り、それらの平均値を実験結果とした。また、ゲージ間隔については荷重端から5, 6, 7, 7, 8, 8フシごととした(図-1)。荷重端からの2点には塑性ゲージを用いた。次に、伸び出し量を測定するために、図-3に示すようなアームを荷重端に取り付けた。このアームは鉄筋の縦リブに深さ6mmの細穴をあけ、直径1.4mmのピアノ線を垂直に打ち込み、エポキシ樹脂系ボンドにより補強した。このアームは、鉄筋降伏後もしっかりと固定されていた。そして、電気式変位計を用いて伸び出し量を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重端の鉄筋応力-ひずみ曲線

各供試体の荷重端の鉄筋応力-ひずみ曲線を図-4に示す。応力速度が大きくなるに従い、降伏強度、引張強度が増大することが報告されており[4]、この図においても同様のことがいえる。

鉄筋降伏後の付着応力分布を求めるためには、鉄筋降伏後の応力-ひずみ関係が必要である。そこで、降伏強度と応力速度の関係を図-5に示す。この関係は(1)式のように表せる。

表-2 鉄筋の性質

鉄筋の種類	SD295A
鉄筋直径D, mm	15.9
公称周長U, mm	50
断面積 A_s , cm ²	1.98
フシ間隔 l_n , mm	10.7
フシ純間隔 l_o , mm	9.2
フシ高さh, mm	0.9
フシ有効高さ h_e , mm	0.9
純投影長さ U_o , mm	27.0
フシの支圧面積 $h_e U_o$, mm ²	24.3
支圧面積係数BA, %	4.5
降伏ひずみ ϵ_y , μ	1880
降伏強度 f_y , MPa	360
ヤング係数 E_s , GPa	190
ひずみ硬化開始ひずみ ϵ_{sh} , %	1.65
引張強度 f_u , MPa	540

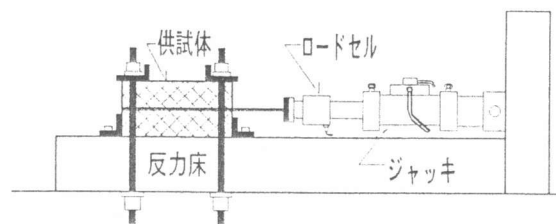


図-2 荷重装置

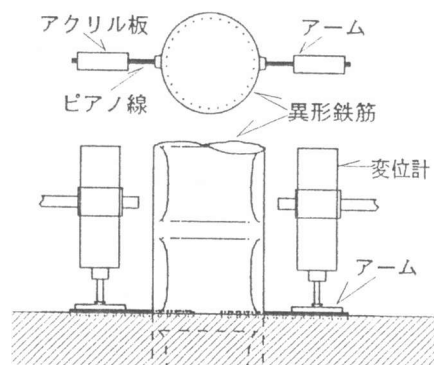


図-3 伸び出し量測定用アーム

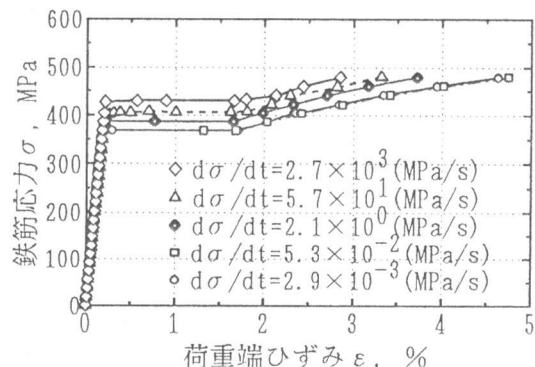


図-4 鉄筋応力-ひずみ関係

$$f_y / f_{y0} = 1.07 + 0.05 \log \dot{\sigma} \quad (1)$$

ここで、 f_y は各応力速度での降伏強度(MPa)、 f_{y0} はJISに基づいた試験方法で行った静的荷重における降伏強度(MPa)である。この式は、図-5のように小谷[4]、睦好ら[7]が示した式よりも傾きが小さい。本研究の計算で用いた鉄筋降伏後の応力-ひずみ式には、島ら[8]の式に(1)式による、以下のような式を用いた。

$$\sigma = f_y + (1 - \exp((\epsilon_{sh} - \epsilon) / \kappa)) \times (f_{u0} - f_{y0}) \quad (2)$$

ここで、 $\kappa = 0.032(400 / f_y)^{1/3}$ 、 σ は鉄筋応力(MPa)、 ϵ はひずみ、 f_{u0} は静的引張強度(MPa)、 ϵ_{sh} はひずみ硬化開始ひずみである。

3.2 引き抜き力-伸び出し量曲線

図-6に各応力速度における変位計で直接測定した伸び出し量と引き抜き力との関係を示す。この図より、応力速度にかかわらず、鉄筋降伏後に伸び出し量が急激に増大していることが確認できる。また、応力速度が小さい程その割合は大きくなっており、引き抜き力が約500MPaにおいては、供試体No.1に対して供試体No.5の正規化伸び出し量は5倍以上になっている。ここで、正規化伸び出し量とは、伸び出し量に鉄筋直径とコンクリート強度の影響を考慮したもので、島ら[8]が提案した次式を用いた。

$$s = (S / D) K_{fc} \quad (3)$$

$$K_{fc} = (f'c / 20)^{2/3} \quad (4)$$

ただし、 S は伸び出し量、 D は鉄筋直径、 $f'c$ はコンクリート強度(MPa)である。以上より、降伏後の定着鉄筋の伸び出し量は、応力速度によって極めて大きく影響されると思われる。

3.3 鉄筋のひずみ分布

引き抜き力が480MPaにおける、供試体No.1、No.3、No.5の鉄筋のひずみ分布を図-7に示す。降伏後のひずみ分布における応力速度の影響は、応力速度が小さいものほど鉄筋降伏位置は供試体内部に進展しており、これより、伸び出し量は増大していることが確認できる。ここで、降伏位置は、ひずみ分布の積分値が伸び出し量の実測値に対して近くなるように決定した。また、どの供試体においても自由端側にひずみが生じていないことから、自由端すべりはないと判断できる。

3.4 局所付着応力-すべり関係

降伏前における、鉄筋軸に沿った各位置における付着応力-すべり関係(τ - s 関係)を図-8

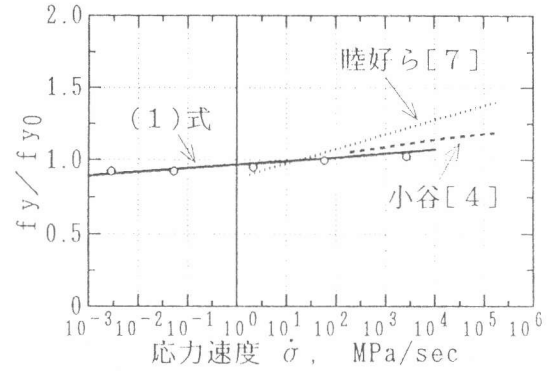


図-5 降伏強度と応力速度との関係

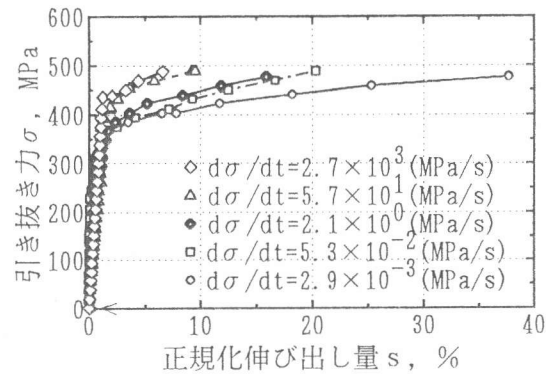


図-6 引き抜き力と伸び出し量との関係

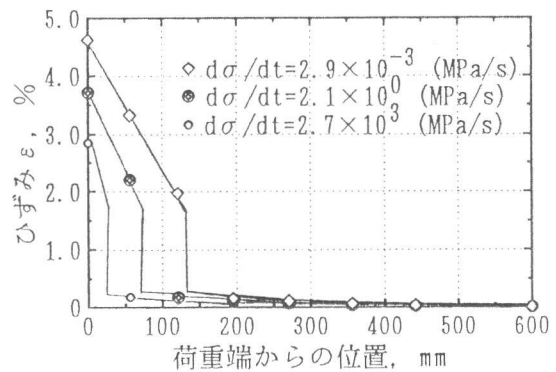
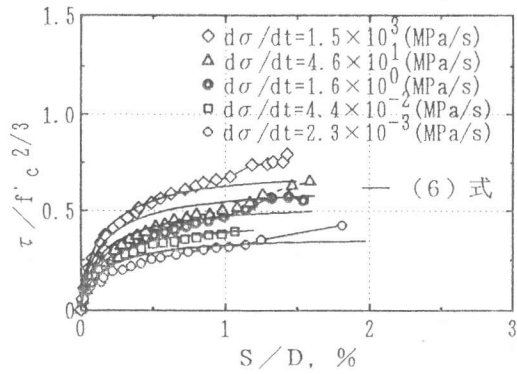
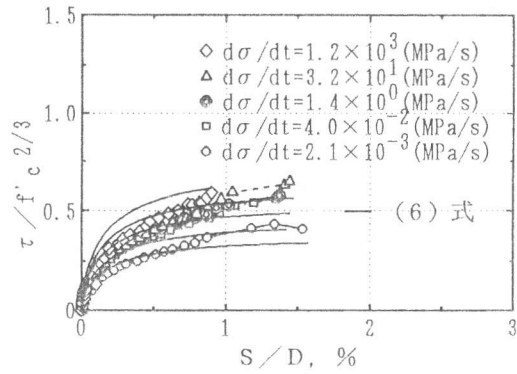


図-7 ひずみ分布に対するsigma-dotの影響



(a)荷重端から56.5mm



(b)荷重端から120.8mm

図-8 局所付着応力-すべり関係

に示す。また、 $\tau - s$ 関係における最大付着応力と応力速度との関係を図-9に示す。図-9には、著者ら[9]のD19ネジフシ鉄筋(BA=9.1%)を用いた実験も示してある。ただし、本実験で用いたD16異形鉄筋とD19ネジフシ鉄筋はフシ形状が相当異なるために、フシ形状の違いによる影響を考慮する必要がある。そこで、本実験においては、鉄筋の支圧面積係数(BA)[5]を指標に用いて、D19ネジフシ鉄筋の τ_{max} を基準としたD16異形鉄筋のBAによる影響係数 K_{BA} を仮定して正規化した(ネジフシ鉄筋： $K_{BA}=1$ ，本実験の鉄筋： $K_{BA}=0.47$)。これより、 τ_{max} と応力速度との関係および $\tau - s$ 関係は次式で表される。

$$\tau_{max}(\dot{\sigma}) / f'_c{}^{2/3} / K_{BA} = 1.07 + 0.12 \log \dot{\sigma} \quad (5)$$

$$\tau(\dot{\sigma}) = \tau_{max}(\dot{\sigma}) \times (1 - \exp(-40 s^{0.6})) \quad (6)$$

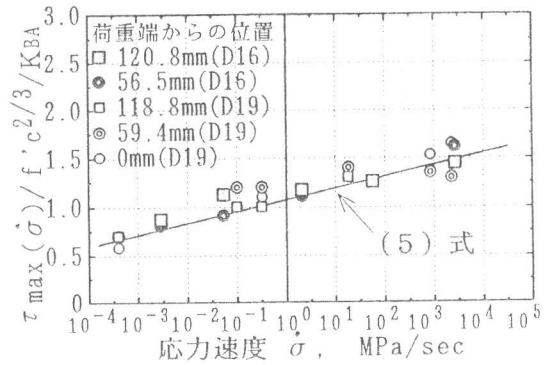
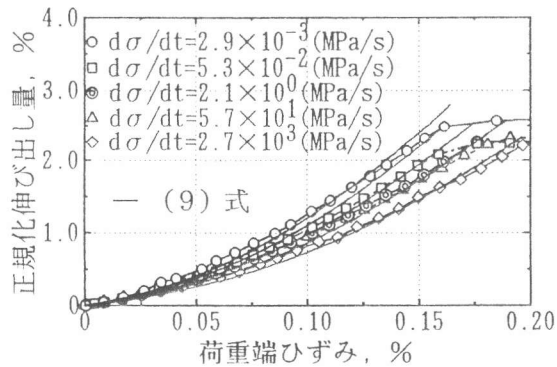


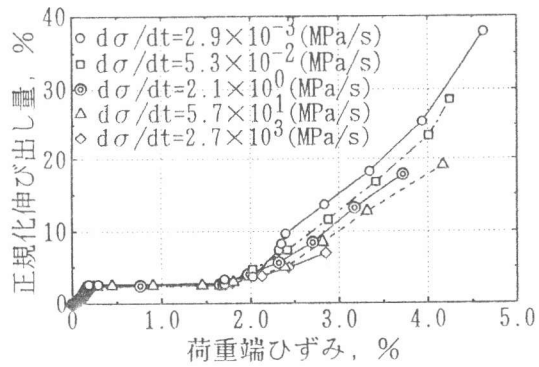
図-9 最大付着応力と応力速度との関係

ここで、 $s = S/D$ ， S はすべりである。本実験では、荷重端に非定着部を設けていないために、荷重端近傍で付着応力は低下するが、図-9より56.5mmの深さでは付着応力は低下していないことが分かる。また、この(6)式から得られる付着応力-すべり曲線と実験値とを図-8で比較した。この図より、(6)式は $\tau - s$ 関係に及ぼす応力速度の影響をほぼ表せているといえる。

一方、降伏後については、応力速度が大きい場合において、降伏域の供試体内部への進展が小さく、ひずみ分布が決定できないために、付着応力が求められなかった。



(a)降伏前



(b)降伏後

図-10 ひずみ-伸び出し量関係

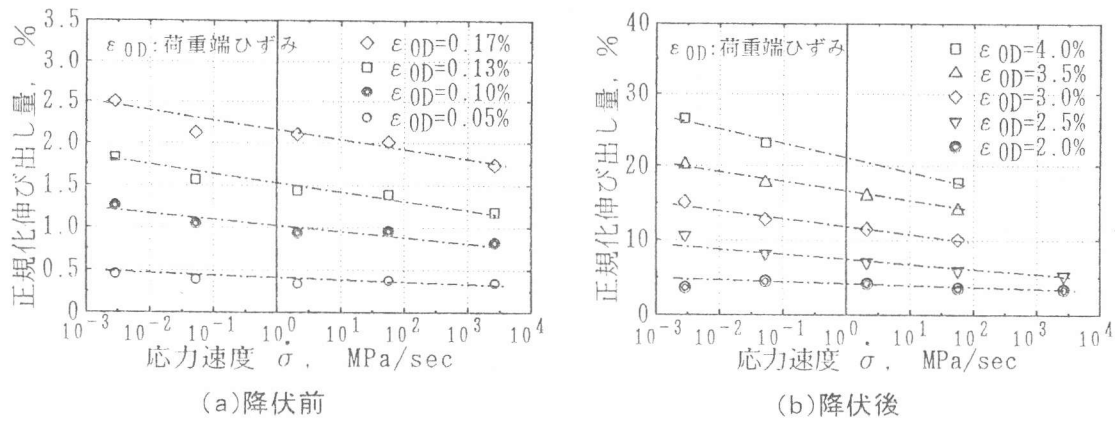


図-11 伸び出し量に対する $\dot{\sigma}$ の影響

3.5 伸び出し量-ひずみ関係

各応力速度における伸び出し量-荷重端ひずみ関係を図-10に示す。定着長が十分長い場合、鉄筋に沿った各位置において、すべりとひずみは一義的に決定される[8]。つまり、伸び出し量は、荷重端ひずみから直接に求めることができる。図-10より、鉄筋降伏前後ともに応力速度が小さくなるに従い、伸び出し量は増大していることが確認できる。これは、応力速度によって、フシ先端からの微細ひびわれの進展度が異なることおよびフシ間のコンクリートの時間依存性変形のためであると考えられる。そして、この増大の割合は降伏後ほど顕著に現れている。

3.6 伸び出し量-ひずみ関係に対する $\dot{\sigma}$ の影響

鉄筋の降伏前および後のいくつかの荷重端ひずみ (ϵ_{OD}) における伸び出し量に対する応力速度の影響を図-11に示す。伸び出し量は、鉄筋降伏前後ともに、同じ荷重端ひずみにおいて、応力速度の対数とほぼ直線関係にあることがわかる。

それぞれの荷重端ひずみにおける伸び出し量について、静的荷重試験に相当する応力速度における伸び出し量を基準とした時の各応力速度時の伸び出し量と応力速度との関係を図-12に示す。この時の伸び出し量と応力速度の対数との関係は、荷重端ひずみの大きさにかかわらずひとつの直線で表すことができるといえる。図中の直線は、次の式である。

$$s_v / s_0 = 0.94 - 0.074 \log \dot{\sigma} \quad (7)$$

ここで、 s_v は各応力速度における伸び出し量、 s_0 は静的荷重試験に相当する応力速度における伸び出し量、 $\dot{\sigma}$ は荷重端の鉄筋の応力速度(MPa/sec)である。すなわち、伸び出し量に対する応力速度の影響は、鉄筋の降伏前後にかかわらず同じ式で表すことができる。

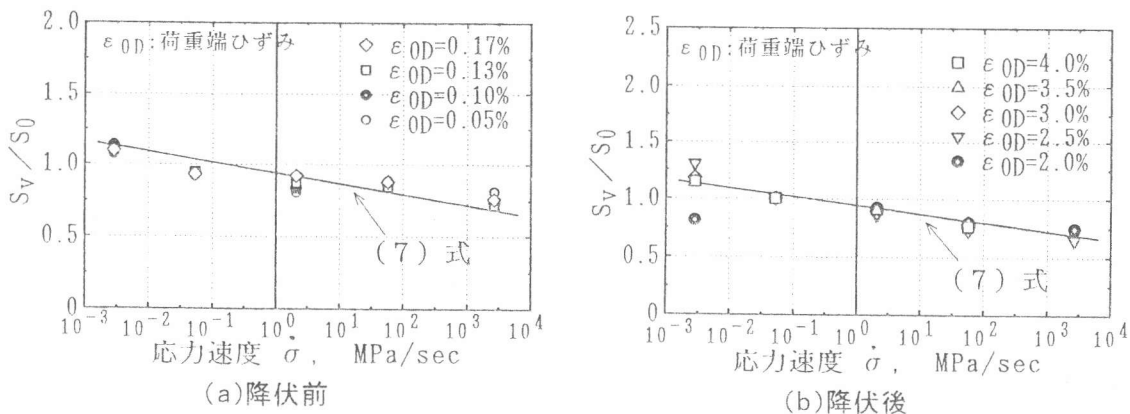


図-12 S_v と $\dot{\sigma}$ の関係

3.7 $\dot{\sigma}$ の影響を考慮した伸び出し量の定式化

鉄筋降伏前における応力速度 $\dot{\sigma}$ の影響を考慮した伸び出し量を定式化するために、島ら[8]が静的載荷試験から求めた次のようなすべり-ひずみ式を静的載荷試験に相当する応力速度における伸び出し量 s_0 として用いた。

$$s_0 = \varepsilon_s (2 + 3500 \varepsilon_s) \quad (8)$$

ここで、 $s_0 = (S/D)K_{rc}$ 、 ε_s は荷重端ひずみ、 $K_{rc} = (f'c/20)^{2/3}$ 、 $f'c$ はコンクリート強度(MPa)である。ただし、本実験で用いた異形鉄筋と島らが用いたD19ネジフシ鉄筋とは、鉄筋フシ形状が異なるため、(8)式に支圧面積係数の影響を考慮した係数 K_{BA}^* を取り入れた。これより、(7)と(8)式から、荷重端ひずみ-伸び出し量関係に応力速度の影響を考慮した(9)式が表せる。

$$s(\sigma) = K_{BA}^* \times s_v \quad (9)$$

ここで、本実験においては $K_{BA}^* = 1.95$ となり、これを用いた(9)式の計算値を図-10(a)中に示す。(9)式は応力速度が異なるときの荷重端ひずみ-伸び出し量関係を表し得ることがわかる。

鉄筋降伏後における伸び出し量の定式化については、降伏域での付着応力低下域あるいはBAの影響がデータ不足であるため今後の検討課題としたい。

4. 結論

(1) 定着鉄筋の伸び出し量は、荷重速度によって大きく影響される。とくに、鉄筋の降伏後においては、その影響度が大きい。

(2) 荷重速度が異なるときの伸び出し量は、鉄筋降伏の前後にかかわらず、応力速度の対数に対して直線的に変化する。この直線関係は、荷重の大きさにかかわらずひとつの式で表すことができる。

(3) 降伏前において、応力速度が異なるときの伸び出し量は、ひずみ-すべり関係式に応力速度の影響を取り入れることで予測ができる。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費補助金（一般研究C04650425）を受けて行ったものである。

参考文献

- [1] 松本・出口：鉄筋とコンクリートの相対引抜け量の算定方法について、コンクリート工学，Vol.24, No.8, pp.115-125, 1986.8. [2] 島・篠原・森岡：フーチングに定着した鉄筋の引抜け量に及ぼす鉄筋間隔の影響，コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集，JCI, pp.109-114, 1990.5. [3] 鈴木ら：フーチングからの軸方向主鉄筋の抜け出し量評価法に関する研究，コンクリート工学論文集，第3巻，第1号，pp.33-43, 1992.2. [4] 小谷：鉄筋コンクリートにおける載荷速度の影響，コンクリート工学，Vol.21, No.11, pp.23-34, 1983.11. [5] 國分・岡村：太径鉄筋の使用に関する研究，土木学会論文報告集，第202号，pp.103-113, 1972. [6] 長友・角・松原：横方向応力作用下における異形鉄筋の付着強度に関する研究，土木学会論文集，No.451/V-17, pp.225-234, 1992.8. [7] 睦好：動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究，東京大学博士論文. [8] H.Shima, L.Chou and H.Okamura: Micro and Macro Models for Bond in Reinforced Concrete, Journal of The Faculty of Engineering, The University of Tokyo(B), Vol. XXXIX, No. 2, pp.133-194, 1987. [9] 石本・島：鉄筋とコンクリートの付着応力-すべり関係に及ぼす載荷速度の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15, No.2, pp.129-134, 1993.6.