

# 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応力-すべり-ひずみ関係

## BOND-SLIP-STRAIN RELATIONSHIP OF DEFORMED BARS EMBEDDED IN MASSIVE CONCRETE

島 弘\*・周 礼良\*\*・岡村 甫\*\*\*

By Hiroshi SHIMA, Lie-Liung CHOU and Hajime OKAMURA

Bond tests of deformed bar embedded in massive concrete which have no effect of splitting crack were carried out. Bond-slip relationships obtained from extremely short embedment test are different from those obtained from long embedment test. Relationships between bond stress and slip depend on the location along a bar in short embedded pull-out test and in short embedded axial tension test. Bond-slip relationship of aluminium bar is different from that of steel bar. These results can be obtained by the analysis of using an unique bond-slip-strain relationship. The bond-slip-strain relationship model is formulated. This model includes the effect of bar diameter and concrete strength. In the case of condition that the strain is zero where slip is zero, the bond stress can be expressed only by the slip. The bond-slip relationship is formulated in simple form.

*Keywords : bond stress, slip, strain, deformed bar*

### 1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物の解析においては、鉄筋とコンクリートとの付着を、「鉄筋に沿った任意の点の局部付着応力  $\tau$  を、 $\tau = f(s)$  のように、その点における鉄筋の局部すべり  $s$  によって表わす」、いわゆる付着応力-すべり関係 ( $\tau$ - $s$  関係) を用いて取り扱っているのが一般的である。有限要素解析を最初に鉄筋コンクリート部材に適用した Ngo and Scordelis<sup>1)</sup> は、局部付着応力と局部すべりとを線形で関係づけた。つづいて Nilson<sup>2)</sup> は、有限要素解析に非線形の  $\tau$ - $s$  関係を用いた。

$\tau$ - $s$  関係としては、現在までに多くのモデルが提案されており、一部は定式化されているが、これらの  $\tau$ - $s$  関係式は、研究者によって大きく異なる<sup>3)</sup>。これは、 $\tau$ - $s$  関係が多くの要因に影響され<sup>4)</sup>、その要因がそれぞれの研究によって異なるためである。たとえば、他の条件がまったく同じである片引き試験において、定着長が極端に短いものから求めた  $\tau$ - $s$  関係は、定着

が十分に長いものから求めた  $\tau$ - $s$  関係と異なる<sup>5)</sup>。また、一本の供試体内においてできても、自由端すべりを生じるような定着長が比較的短い片引き試験では、載荷端近傍の影響を除いても、鉄筋に沿った位置によって  $\tau$ - $s$  関係が異なる<sup>6)</sup>。

解析に用いる  $\tau$ - $s$  関係は、現実に近いものがよいのは当然であるが、たとえば有限要素解析においては、既往の付着試験結果あるいは推測による  $\tau$ - $s$  関係が用いられてきた<sup>7)</sup>。しかし、現在までに提案されている  $\tau$ - $s$  関係式は、森田ら<sup>8)</sup>が提案したものはじめ、ほとんどが短い付着長の実験<sup>9), 10)</sup>を行い、その平均付着応力から得たものであり、これらを通常の部材のような長い付着長のものに適用するのは問題である。しかも、ひびわれ面近傍の付着力低下の影響<sup>2), 11)</sup>を除いては、 $\tau$ - $s$  関係は鉄筋に沿った位置によらず同じであるとすることは、現実とは異なるものである。したがって、定着長の違いによる  $\tau$ - $s$  関係の相違、あるいは鉄筋に沿った位置による  $\tau$ - $s$  関係の違いを説明した、より現実に近い  $\tau$ - $s$  関係を用いる必要がある。

本研究は、実験的に、これらの  $\tau$ - $s$  関係が異なる機構を  $\tau$ - $s$  関係にひずみの影響を取り入れることにより説明し、定着長あるいは境界条件が異なる場合においても、鉄筋に沿った任意の位置における付着応力を 1 つの

\* 学生会員 工修 東京大学大学院 工学系研究科  
(〒113 文京区本郷 7-3-1)

\*\* 工博 主任技師 Taipei Railway  
(Taipei, Republic of China)

\*\*\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科  
(〒113 文京区本郷 7-3-1)

付着応力-すべり-ひずみ関係 ( $\tau$ - $s$ - $\epsilon$  関係) で表わし、それを定式化しようとするものである。

鉄筋の応力が付着応力に影響するという考え方の方は、丸鋼に関しては、六車ら<sup>12)</sup>がその可能性を指摘している。最近、Bennett ら<sup>13)</sup>は、丸鋼についての実験を行い、付着応力-すべり-鉄筋応力関係を図で表わした。しかし、異形鉄筋に関しては、丸鋼の付着が表面の摩擦に支配されることに対して、異形鉄筋の付着はふしによる機械的作用に支配されるために<sup>14)</sup>、鉄筋の応力は付着応力に影響しないとされてきた。Edwards ら<sup>15)</sup>は、異形鉄筋および丸鋼を用いて、鉄筋の応力を変えた付着試験を行い、応力は  $\tau$ - $s$  関係に影響しないと報告している。これと関連したものとしては、De Groot ら<sup>16)</sup>が付着-すべり機構を解析的にモデル化する中で、付着-すべり要素を鉄筋要素と組み合わせたために、付着応力をすべり量、鉄筋の軸方向ひずみおよび付着-すべり要素の半径方向の変形とで表わしている。

$\tau$ - $s$  関係の違いをひずみの影響で処理しようとするときに、縦ひびわれの発生は邪魔となる。したがって、縦ひびわれの影響をなくすために、研究対象をマッシュピナコンクリート中に鉄筋を埋め込んだものとした。これは、そのままフーチングなどへ応用できるものである。

## 2. 実験の概要

### (1) 実験条件および供試体

供試体としては、直径 50 cm のコンクリート円筒の中心に鉄筋を埋め込んだものである。この供試体直径は、縦ひびわれが発生せず、さらにコンクリートの応力が小さくかつ均等になるようにするために十分大きくしたものである。実験方法は、片引き試験あるいは両引き試験とした。その片引き試験の供試体および試験装置を図-1 に示す。

実験条件および各供試体の性質を表-1 に示す。実験は目的によって 5 つのシリーズに分けられる。

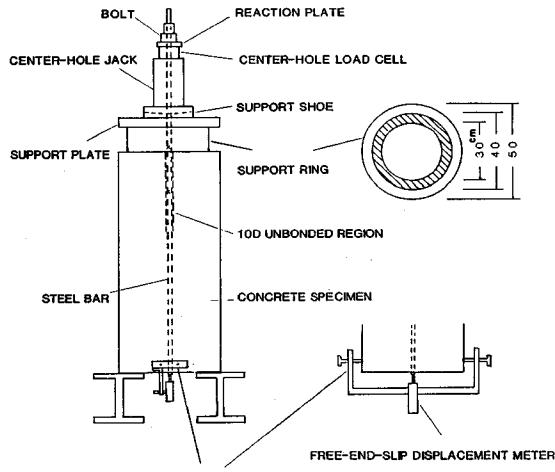


図-1 片引き試験の供試体および試験装置

表-1 供試体の性質

シリーズ番号	供試体番号	D (mm)	f'c (MPa)	定着長 (D)	載荷端非定着長 (D)	自由端非定着長 (D)	実験要因
I	1	25.4*	21.8	5	10	0	定着長
	2			10			
	3			15			
	4			20			
	5			30			
	6			40			
II	7	30.7	18.5	6	10	2.5	自由端非定着長
	8						
	9						
III	10	19.5*	21.6	40	10	0	両引き試験
IV	11	17.7*	34.3	40	10	0	鋼 アルミニウム
	12						
V	13	30.7	18.5 33.0 38.7	2	10	0	コンクリート強度
	14						
	15						
	16						
	17						
VI	18	25.4*	22.4 27.2 50.0	40	0	0	コンクリート強度
	19						
	20						
	21						

D : 鉄筋径 (\* : 高周波焼入れ)

f'c : コンクリート強度 (骨材の最大寸法は 25 mm)

シリーズⅠは片引き試験であり、自由端における境界条件を  $\sigma=0$ かつ  $s\neq 0$ とするために、定着長を短く変化させたものである。その一部として、自由端における供試体端部の影響を調べるために、自由端における非定着長を変えた実験を行った。

シリーズⅡは、供試体中央における境界条件を  $\sigma \neq 0$ かつ  $s=0$ とするために、定着長を  $40D$  ( $D$  は鉄筋の公称直径)とした両引き試験である。

シリーズⅢでは、 $\tau$ - $s$  関係に及ぼすひずみの影響を調べるために、鋼よりもヤング係数が小さいアルミニウムを用いて付着試験を行った。

シリーズIVは、定着長を極端に短くした片引き試験であり、ひずみが小さく、すべり量が大きいときの付着応力に及ぼすコンクリート強度の影響を調べるものである。

シリーズVは、境界条件を  $\sigma=0$  かつ  $s=0$  とするために、定着長を  $40D$  あるいは  $50D$  と十分に長くした片引き試験である。そして、その条件下での  $\tau-s$  関係に及ぼすコンクリート強度および鉄筋径の影響を調べた。

#### (2) 使用した鉄筋およびアルミニウム棒

本実験においては、埋め込んだ鉄筋に沿った各位置におけるひずみの測定が最も重要である。通常の鉄筋では、ひずみゲージを貼付するために鉄筋のリブを削る必要があり、断面が欠損する。本実験では、縦リブがなく、鉄筋を削る必要のない市販のねじふし鉄筋の D 19, D 25 および D 32 を使用した。シリーズⅢで使用した鋼棒およびアルミニウム棒は、他のシリーズに用いたねじふし鉄筋と形状が同じになるように、それぞれ切削加工した。鉄筋径の影響を知るために、それぞれの鉄筋径が正確でなければならない。そこで、表-1 に示す、解析に用いた鉄筋の断面積は、水中重量から求めた体積を長さで割ったものである。このとき、それぞれの鉄筋のヤング係数はほぼ一致して 190 GPa となった。アルミニウム棒のヤング係数は 72 GPa である。

定着長が長い供試体では、通常の強度の鉄筋を用いた場合、鉄筋の弾性範囲におけるすべり量は小さい。したがって、鉄筋が降伏する前に大きいすべり量を得るために、必要に応じて高強度の鉄筋を用いた。この高強度鉄筋は、市販の鉄筋を高周波焼き入れすることにより得た。

### (3) 実験方法

埋め込んだ鉄筋のひずみ分布を測定するために、長さが 5 mm のひずみゲージを鉄筋径の 5 倍の間隔 ( $5D$ ) で鉄筋の両面に貼付した。ただし、供試体 No. 7 から No. 9 は、自由端近傍の付着特性を調べることを目的とするため、ゲージ間隔を  $2D$  とした。また、両引き試験の供試体 No. 10 においては、供試体中央部における

付着特性を詳しく調べるために、供試体中央部におけるゲージ間隔を  $2.5 D$  とした。

鉛直に立てた円筒型枠の中心に鉄筋を固定し、コンクリートを打ち込んだ。したがって、コンクリート打設時の鉄筋の方向は鉛直である。載荷端近傍におけるコンクリートの拘束条件の違いによる影響をなくすために、シリーズⅤ以外は、鉄筋をシースで覆う方法により、載荷端に非付着域を設けた。また、自由端における同様の影響の有無を調べるために、シリーズⅠの供試体No.8およびNo.9には、自由端に非付着域を設けた。打込みから試験までの期間は約2週間である。

載荷は、鉄筋の方向にセットしたセンターホール型ジャッキによって、鉄筋に引張力を加えた。引張力の方向は、片引き試験および両引き試験にかかわらず、コンクリートの打込みに対して逆方向である。載荷速度は、ひずみで約  $100 \mu/\text{min}$  とした。鉄筋のひずみに加えて、自由端における鉄筋のすべり量および載荷端における鉄筋の引張荷重をそれぞれ電気式変位計およびロードセルによって測定した。

#### (4) 付着応力およびすべり量の決定方法

鉄筋に沿った各位置におけるひずみは、鉄筋の裏表の2つのゲージの読みを平均して求めた。得られるひずみの2つのゲージの差は10%以下であった。鉄筋のひずみ分布は、もよりの3点を結ぶ2次放物線をつなげることにより求めた。

鉄筋に沿った任意の点におけるすべり量は、片引き試験では自由端から考えている点までひずみを積分したものに自由端すべりを加えたものである。両引き試験でのすべり量は、供試体中央部でのすべりがない点から考えている点までひずみを積分したものである。両引き試験における供試体中央部でのすべりがない点は、2次放物線で表わしたひずみ分布曲線の傾きが0となる点とし、供試体中央点に固定したものではない。このように、本研究では、すべり量を鉄筋とコンクリートとの相対変位ではなく、あるコンクリート中の動かない点を基準とした鉄筋の各点の変位量としている。これは、鉄筋とコンクリートとの相対変位は、コンクリートの考える点の鉄筋からの距離によって異なるために定義として明確でなく、本研究の定義が一般性があるためである。

鉄筋に沿った任意の点における鉄筋の付着応力は、その点におけるひずみ分布曲線の傾きを用いて、次式のように求められる<sup>17)</sup>。

ここで、 $E$  は棒材のヤング係数、 $D$  は鉄筋径、および  $d\varepsilon/dx$  はひずみ分布曲線の傾きである。

### 3. 付着応力-すべり-ひずみ関係

#### (1) $\tau$ - $s$ 関係に及ぼすひずみの影響

$\tau$ - $s$  関係は、コンクリート強度、鉄筋の表面形状、あるいはコンクリートの拘束条件および応力状態などの多くの要因によって影響される<sup>4)</sup>。そして、これまで多くの実験によって求められた  $\tau$ - $s$  関係式が提案されているが、それらの  $\tau$ - $s$  関係式は研究者によって大きく異なっており、これは主として試験手法やすべり量のとらえ方、供試体中の応力伝達経路、拘束条件が異なるためであるとされている<sup>3)</sup>。しかし、コンクリートおよび鉄筋の性質、さらに試験手法が同じであっても、境界条件によって  $\tau$ - $s$  関係が異なるものとなる。

まず、定着長の長い片引き試験によって求められた  $\tau$ - $s$  関係は、それを極端に短くした試験で得られたものとは異なることが山尾ら<sup>5)</sup>によって指摘されている。そのことを本実験で確認したものが図-2である。図-2は、定着長が 5D の片引き試験である供試体 No.1において、その引抜き力から平均付着応力を求めた平均付着応力-すべり関係と、定着長が 40D の供試体 No.6 の載荷端から 5D の位置における局部付着応力-すべり関係を示したものであるが、定着長が長いものと極端に短いものの  $\tau$ - $s$  関係は明らかに異なる。

また、周ら<sup>6)</sup>は、定着長の短い片引き試験によって求められた  $\tau$ - $s$  関係は、鉄筋に沿った位置によって異なることを指摘している。本実験における No.2 から No.5 の供試体から求めた、鉄筋に沿った自由端からの各距離における  $\tau$ - $s$  関係を図-3 に示す。自由端から 5D におけるデータは No.2 から No.5 のものであり、自由端から 10D におけるデータは No.3 から No.5 のものであり、以下同様に自由端から 20D よび 25D のものは No.5 から得たものである。位置によって  $\tau$ - $s$  関係が異なっており、位置が自由端に近いほど付着応力が大きくなっている。しかし、 $\tau$ - $s$  関係の位置による

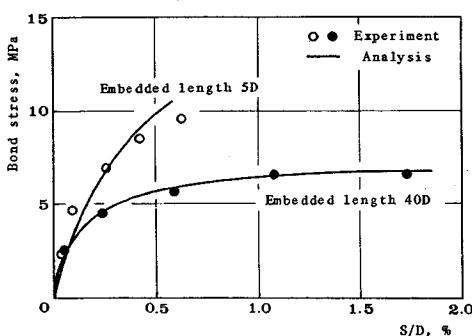


図-2 定着長が極端に短い片引き試験による平均付着応力-すべり関係と定着長が十分に長い片引き試験による局所付着応力-すべり関係

違いは、自由端における供試体端部の影響である可能性が考えられる。図-4 は、自由端における非定着長を 0D, 2.5D, 5D と変化させた供試体 No.7, 8, 9 の自由端から 2D の位置における  $\tau$ - $s$  関係を示したものである。自由端における非定着長が異なる場合の付着応力-すべり関係には有意な差がみられず、 $\tau$ - $s$  関係の位置による違いは、自由端における供試体端部の影響ではないことを示している。

以上はすでに指摘されていることを確認したものであるが、次に、定着長が比較的短い両引き試験においても、

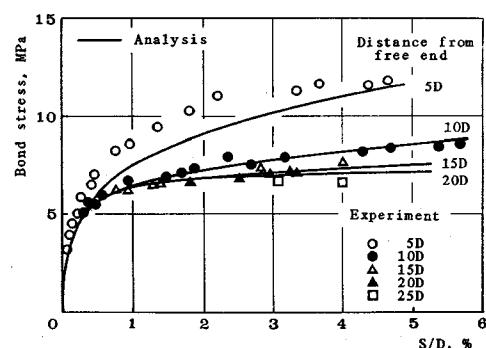


図-3 定着長が短い片引き試験における鉄筋に沿った各位置の  $\tau$ - $s$  関係

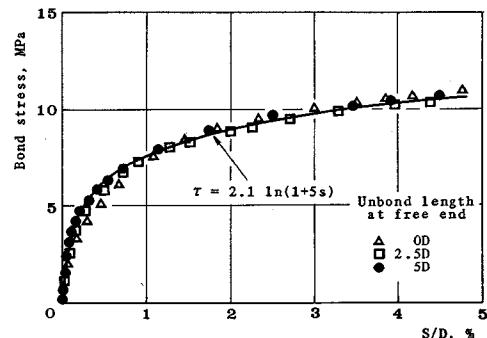


図-4 自由端における非定着長が異なるときの自由端から 2D における  $\tau$ - $s$  関係

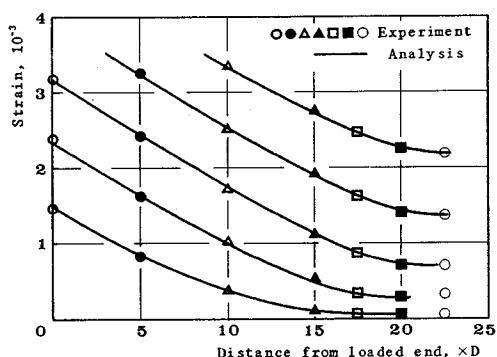


図-5 両引き試験におけるひずみ分布

$\tau-s$  関係が鉄筋に沿った位置によって異なることを示す。両引き試験から得られたひずみ分布の実験値を図-5に示す。そして、そのひずみ分布から求めた鉄筋に沿った各位置における  $\tau-s$  関係を図-6に示す。この図に示されるように、位置によって  $\tau-s$  関係が異なっており、供試体の中心に近いほど付着応力が小さくなっている。

さらに、定着長の長い片引き試験における  $\tau-s$  関係は、ヤング係数の異なるアルミニウム棒を用いると鋼棒のものとは異なったものとなる。定着長が長い場合には後で述べるように鉄筋に沿ったすべての位置の  $\tau-s$  関係が同じものとなるが、供試体 No.11 および No.12 から求めたアルミニウム棒および鋼棒の棒に沿ったすべての位置における  $\tau-s$  関係を図-7に示す。すべての位置において、同じすべり量に対するアルミニウム棒の付着応力は鋼棒のものに比べて明らかに小さい。このことから、ひずみの違いが  $\tau-s$  関係に影響を及ぼすことがわかる。それは次のように説明できる。まず前提として、材料にかかわらず、同じすべり量に対して、a) ひずみが大きいとき、または、b) 引張応力が大きいときに付着応力が小さくなるとする。そこで、アルミニウム棒と鋼棒との比較において、アルミニウム棒の付着応力が鋼棒のものより小さいのは、図-8の上段に示すように、

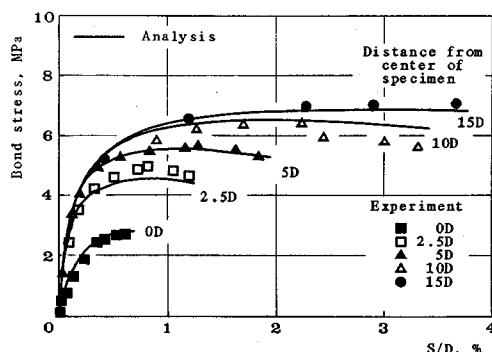


図-6 両引き試験における鉄筋に沿った各位置の  $\tau-s$  関係

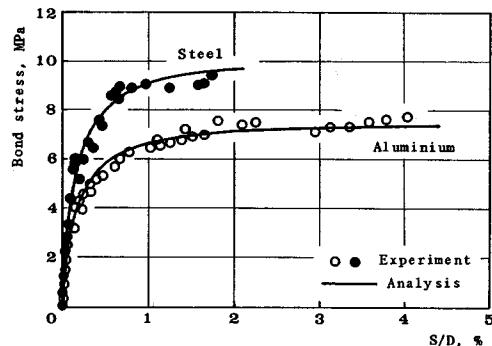


図-7 アルミニウム棒および鋼棒の  $\tau-s$  関係

同じすべり量に対してアルミニウム棒のひずみが大きいからであるとする。すなわち、a) のひずみの影響であると仮定するわけである。このとき、アルミニウム棒の付着応力が鋼棒のものよりも小さくなるためには、図-8の下段に示すように、アルミニウム棒の引張応力が鋼棒のものよりも小さくならなければならない。したがって、応力の違いに関しては、前提 b) と逆の結果となる。すなわち、鉄筋の軸方向の応力の違いは  $\tau-s$  関係に影響を及ぼさないか、あるいはひずみの影響に比べてきわめて影響が小さいといえる。アルミニウム棒の付着応力が小さくなることに対しては、腐食の影響などの疑惑をもたれるかもしれないが、コンクリート中におけるアルミニウムの腐食生成被膜は緻密かつきわめて薄い<sup>18)</sup>。さらに、後で述べるように、ひずみの影響に関してアルミニウム棒と鉄筋とで同じ式が成立つことから、ひずみ以外の影響はないもの、あるいはきわめて小さいものと考えられる。

このひずみの違いによって  $\tau-s$  関係が異なることを、定着長が短い場合および両引きの場合の  $\tau-s$  関係にあてはめると、定着長が短い片引き試験では、自由端において鉄筋のすべりが生じ、境界条件が  $\epsilon=0$ かつ  $s=0$  となり、同じすべり量に対して、鉄筋のひずみは小さく、付着応力が大きくなる。また、両引き試験においては、供試体の中央においてすべり量は 0 であるにもかかわらず鉄筋のひずみが 0 でなくなり、境界条件が  $\epsilon \neq 0$ かつ  $s=0$  となり、同じすべり量に対して、鉄筋のひずみは大きくなり、付着応力が小さくなるのである。

したがって、以上の  $\tau-s$  関係の違いは、1つの付着応力-すべり-ひずみ関係を用いることによって表わすこ

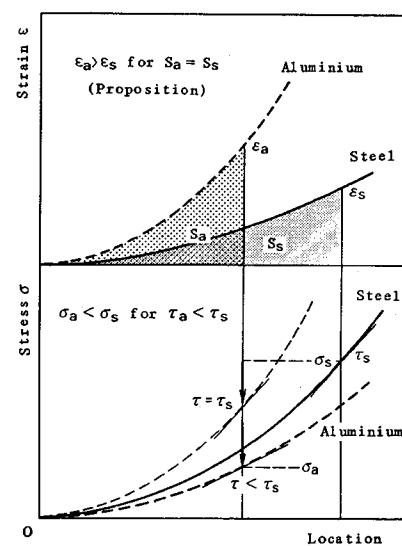


図-8 アルミニウム棒と鋼棒のひずみ分布および応力分布

とができると思われる。

### (2) 付着応力-すべり-ひずみ関係の定式化

いかなる境界条件においても成り立つ  $\tau$ - $s$ - $\epsilon$  関係を定式化するために、付着応力  $\tau$  を、次式のように、すべり量  $s$  よびひずみ  $\epsilon$  の関数として表わすこととする。

ここで、 $\tau_0$ は $\varepsilon=0$ のときの任意のすべり量に対する付着応力であり、 $\tau_0=F(S)$ で表わされる。 $g(\varepsilon)$ は、 $\varepsilon=0$ のときに1をとり、ひずみの増加とともに付着応力を減少させるような、ひずみの影響を表わす関数である。

式(2)を導くためには、 $\tau_0$ あるいは $g(\epsilon)$ を最初に決定しなければならないが、これらを実験から直接に求めることは不可能である。そこで、 $\tau_0$ を仮定することとする。本実験において、 $\tau_0 = F(S)$ に最も近いのは、図-4に示される、定着長が短い供試体No.7からNo.9の自由端から $2D$ における $\tau-s$ 関係である。しかし、ここで注意しなければならないのは、 $\tau_0 = F(S)$ に及ぼすコンクリート強度の影響である。 $\tau-s$ 関係に及ぼすコンクリート強度の影響としては、定着長が十分に長い場合には付着応力が $f_c^{12/3}$ に比例するとされている<sup>5)</sup>。しかしこの場合には、コンクリート強度が大きくなると付着応力が大となり、同じすべり量に対してひずみが大きくなる。また逆に、コンクリート強度が小さくなると同じすべり量に対してひずみも小さくなる。したがって、コンクリート強度の影響は見掛け上 $f_c^{12/3}$ として現われるが、これはひずみの影響を含有したものであり、 $\tau_0$ に及ぼすコンクリート強度の影響は $f_c^{12/3}$ よりも大きくなる。そこで、 $\tau_0$ を

で表わすこととする。ここで、コンクリート強度の影響は、図-9に示すような、定着長を $2D$ と短くして、すべり量に対してひずみが小さくなるようなシリーズIVの引抜き試験の結果から求めた、ひずみに対してすべり量

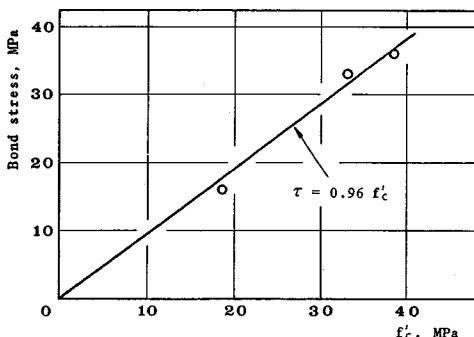


図-9 すべり量に対してひずみが小さいときの付着応力とコンクリート強度との関係

が十分に大きいときの平均付着応力とコンクリート強度との関係から判断した。また、すべり量は鉄筋径に比例するため<sup>5), 19)</sup>、すべり量  $S$  を鉄筋径  $D$  で除して無次元化したすべり量  $s = 1000 S/D$  を用いて鉄筋径の影響を考慮した。

ひずみが小さく  $\tau-s$  関係にひずみの影響がない場合には付着応力が  $f_c^*$  に比例するとしたとき、図-4 に示される自由端から  $2D$  における  $\tau-s$  関係は、次式で表わされる。

ここで、 $s = 1000 S/D$  である。この関係を用いて、 $\tau_0$  を次式のように仮定する。

ここで、 $k$  は定数であり、 $c$  は 1 以上の定数である。 $\tau_0$  を  $\tau_{2D}$  の  $c$  乗という形にしたのは、すべり量が小さいときには式 (4) が成り立つときのひずみも小さいので  $\tau_0$  は  $\tau_{2D}$  に近く、すべり量が大きくなるほど  $\tau_0$  は  $\tau_{2D}$  よりも大きくなるということを考慮したためである。

となる。ここで、ある付着応力  $\tau$  に対するすべり量  $s$  よびひずみ  $\epsilon$  は実験から求まっているので、 $\epsilon$  を  $x$  座標、式(6)の右辺を  $y$  座標としてプロットすることにより  $k \cdot g(\epsilon)$  が得られる。 $c$  の最適値は、 $k \cdot g(\epsilon)$  が自由端すべりがある供試体および両引き試験体に対しては、鉄筋に沿った各位置におけるデータが、またアルミニウム棒と鋼棒のデータが、1つの式で表わされるようになることによって決定される。このとき、 $c$  の最適値は 3 となる。 $c$  を 3 と判断する材料となるものの一例として、鋼棒とアルミニウム棒における  $c$  の違いによる  $k \cdot g(\epsilon)$  の変化を図-10 に示す。 $k \cdot g(\epsilon)$  がとる値の範囲は大きいために、対数を取って表わした。 $c = 3$  のときに鋼棒とアルミニウム棒の  $k \cdot g(\epsilon)$  が重なっており、鋼棒あるいはアルミニウム棒にかかわらず、付着

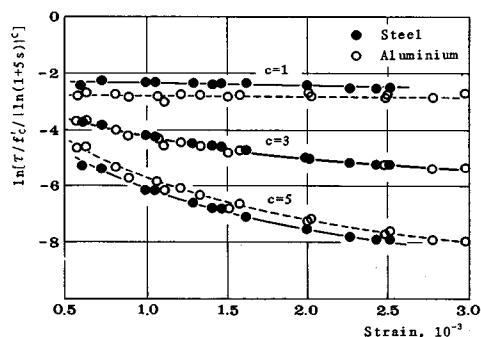


図-10 鋼棒とアルミニウム棒の  $c$  の違いによる  $k \cdot g(\epsilon)$  の変化

応力が1つの $\tau$ - $s$ - $\epsilon$ 関係で表わされることを示している。また、このとき $k$ の値は0.73となり、 $\tau_0$ は最終的に

$$\tau_0 = 0.73(\ln(1+5s))^3 f'_c \quad (\text{MPa}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表わされる。

次のステップとしては、 $g(\epsilon)$ をひずみの関数として式化するわけであるが、 $g(\epsilon)$ と付着応力およびすべり量との関係は、式(2)および式(7)より

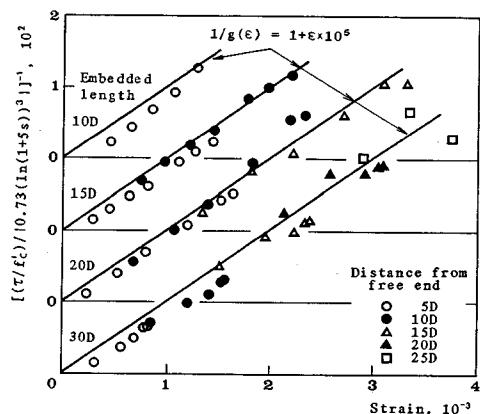


図-11 境界条件が $\epsilon=0$ かつ $s\neq 0$ の場合の鉄筋に沿った各位置における $\tau$ - $s$ - $\epsilon$ 関係

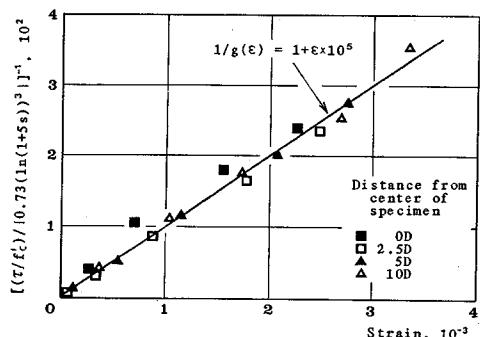


図-12 境界条件が $\epsilon\neq 0$ かつ $s=0$ の場合の鉄筋に沿った各位置における $\tau$ - $s$ - $\epsilon$ 関係

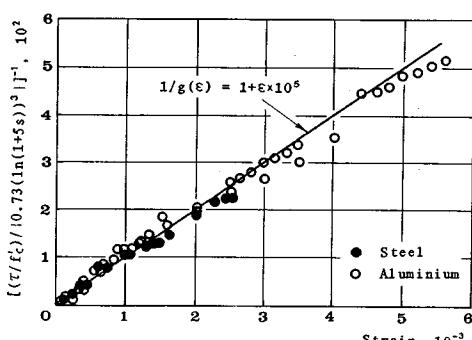


図-13 アルミニウム棒および鋼棒における $\tau$ - $s$ - $\epsilon$ 関係

$$g(\epsilon) = \tau / \tau_0 = (\tau / f'_c) / (0.73(\ln(1+5s))^3) \dots\dots\dots (8)$$

となる。式(8)の右辺の逆数を縦軸に取って、 $\tau$ - $s$ 関係が異なる供試体のデータをプロットしたものを図-11から図-13に示す。図-11、図-12、図-13は、それぞれ、境界条件が $\epsilon=0$ かつ $s\neq 0$ 、 $\epsilon\neq 0$ かつ $s=0$ である場合およびアルミニウム棒と鋼棒のものである。これらの図に示されるように、すべてのデータが1つの $\tau$ - $s$ - $\epsilon$ 関係で表わせており、そのとき $g(\epsilon)$ は

$$g(\epsilon) = 1 / (1 + \epsilon \times 10^5) \dots\dots\dots (9)$$

という簡単な式で表わすことができる。

したがって、最終的に、 $\tau$ - $s$ - $\epsilon$ 関係は、式(2)、式(7)および式(9)から、次式のように表わされる。

$$\tau / f'_c = 0.73(\ln(1+5s))^3 / (1 + \epsilon \times 10^5) \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $s = 1000 S/D$

$\tau$ : 付着応力

$f'_c$ : コンクリート強度

$S$ : すべり量

$D$ : 鉄筋径

$\epsilon$ : ひずみ

である。図-14は、この $\tau$ - $s$ - $\epsilon$ 関係を、 $\tau$ - $s$ 関係に及ぼすひずみの影響として表わしたものである。

境界条件が $\epsilon=0$ かつ $s=0$ 、 $\epsilon=0$ かつ $s\neq 0$ 、 $\epsilon\neq 0$ か

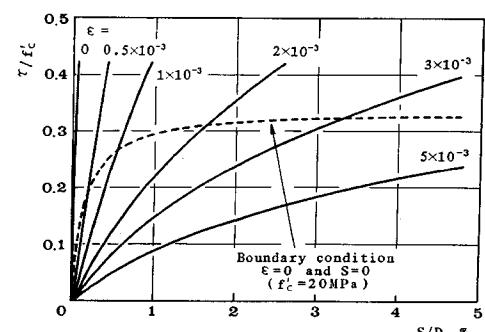


図-14  $\tau$ - $s$ 関係に及ぼすひずみの影響として表わした $\tau$ - $s$ - $\epsilon$ 関係

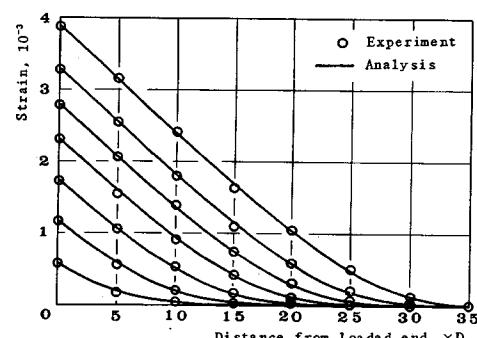


図-15 境界条件が $\epsilon=0$ かつ $s=0$ の供試体No.6におけるひずみ分布の実験値および計算値

つ  $s=0$  である場合およびアルミニウム棒の  $\tau-s$  関係は、 $\tau-s-\epsilon$  関係式から逆算できる。定着長が  $40D$  であり境界条件が  $\epsilon=0$ かつ  $s=0$  のものを図-2に、他の条件のものをそれぞれ図-3、図-6および図-7の中に曲線で示す。 $\tau-s-\epsilon$  関係式は、1つの式で条件によって異なる  $\tau-s$  関係を表わしていることが確認できる。

$\tau-s-\epsilon$  関係式の精度を確認するために、実測値であるひずみ分布と  $\tau-s-\epsilon$  関係式を用いて求めたひずみ分布とを比較する。図-5は両引き試験のものであるが、境界条件が  $\epsilon \neq 0$ かつ  $s=0$  である場合における精度はよいことを示している。また、図-15は自由端すべりがない供試体 No. 6 のものを示す。境界条件が  $\epsilon=0$ かつ  $s=0$  である場合も精度はよいことを示している。次に、自由端すべりがある場合の例として、供試体 No. 4 のものを図-16に示す。境界条件が  $\epsilon=0$ かつ  $s \neq 0$  である場合においても、 $\tau-s-\epsilon$  関係式を用いて求めたひずみ分布は、実測値とよく一致しているといえる。さらに、自由端すべりがある場合には、ひずみ分布と同時に自由端すべりも実測値と一致しなければならない。供試体 No. 1 から No. 5 におけるひずみ分布および自由端すべりの実測値と  $\tau-s-\epsilon$  関係式から求めたものとを比較したものを、それぞれ表-2 および図-17に示す。ひずみ分布および自由端すべりは実測値とほぼ一致しており、境界条件が  $\epsilon=0$ かつ  $s \neq 0$  である場合も精度がよ

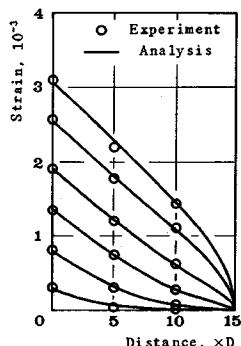


図-16 境界条件が  $\epsilon=0$ かつ  $s \neq 0$  の供試体 No. 4 におけるひずみ分布の実験値および計算値

表-2 ひずみ分布の実験値と  $\tau-s-\epsilon$  関係を用いた計算値との比較

供試体番号	載荷端ひずみ ( $\mu$ )	自由端からの各距離におけるひずみ ( $\mu$ )					
		20D		10D		5D	
		計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値
2	1004 2000	—	—	—	—	456 1230	438 1273
3	1600 2830	—	—	948 2067	962 1971	418 1284	436 1257
5	2070 4100	754 2605	818 2581	71 1195	59 1202	15 597	10 555

いことを示している。以上のように、式(10)で表わされる  $\tau-s-\epsilon$  関係式は、いかなる境界条件においても満足する精度を有していると思われる。

定着長が  $5D$  の供試体の平均付着応力-すべり関係の実験値を図-2に示したが、 $\tau-s-\epsilon$  関係式を用いると、任意の自由端すべりに対するひずみ分布が計算できるため、この短い定着長の試験から得られる平均付着応力-すべり関係をシミュレートすることができる。その結果を図-2の中に曲線で示すが、両者はほぼ一致している。また、同様に、コンクリートの拘束条件が同じであれば、他の研究者の付着実験もシミュレートすることができる。ここでは、Hawkins ら<sup>10)</sup>および Mirza ら<sup>20)</sup>の実験を対象とする。Hawkins らは、縦ひびわれが発生しないようにコンクリートを十分に拘束した条件で、定着長をさらにリブ1ふしから4ふしと短くした引抜き試験を行い、その引抜け力から平均付着応力を求めた  $\tau-s$  関係式を提案している。また、Mirza らは、定着長の短い両引き試験を行い、 $\tau-s$  関係式を提案している。図-18に、Hawkins らおよび Mirza らの  $\tau-s$  関係を示すが、これらの  $\tau-s$  関係は大きく異なっている。この図に、Hawkins らの実験における定着長が4ふしの場合および Mirza らの実験の供試体中心から  $40\text{ mm}$  の位置における  $\tau-s$  関係のシミュレーション結果を示す。それぞれ

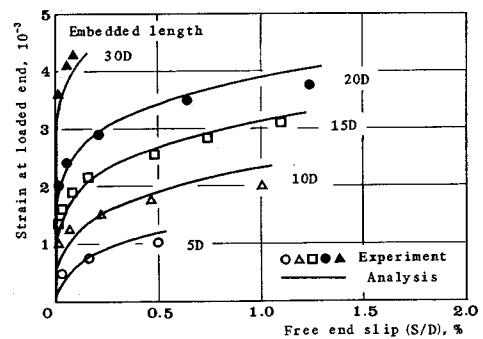


図-17 載荷端ひずみと自由端すべりとの関係

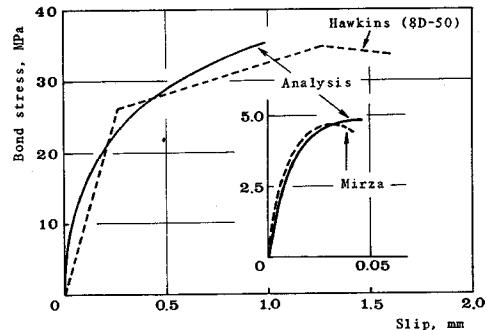


図-18 Hawkins ら<sup>10)</sup>および Mirza ら<sup>19)</sup>の実験の  $\tau-s-\epsilon$  関係を用いたシミュレーション

よく似た  $\tau$ - $s$  関係となっている。ただし、Hawkins らの  $\tau$ - $s$  関係に関しては、付着応力にはふし間のコンクリートのせん断で決まる上限があり<sup>21)</sup>、それ以降は破壊モードが変わり、それが軟化として現われている。

本研究は鉄筋が弾性域にある場合に関する行ったが、  
 3.(1)で述べたように、付着応力はすべり量およびひずみの関数として表わされるものであり、鉄筋の応力は付着応力に影響を及ぼさない。したがって、式(10)は鉄筋降伏後にも適用できるものと思われる。

#### 4. 定着長が十分に長い場合の付着応力-すべり関係

定着長が十分に長く境界条件が  $\epsilon=0$ かつ  $s=0$  である場合には、鉄筋に沿った位置にかかわらず、すべり量とひずみとが一義的な関係をもつようになる。したがって、この場合には、図-14に示すように、付着応力をすべり量あるいはひずみのみによって表わすことができる。すなわち、付着応力-すべり関係あるいは付着応力-ひずみ関係が、鉄筋に沿った位置にかかわらず一義的に成り立つわけである。コンクリート強度を変化させた供試体 No. 16 から No. 18、および鉄筋径を変化させた供試体 No. 19 から No. 21 から得られた、鉄筋に沿った各位置における  $\tau-s$  関係をそれぞれ図-19 および図-20 に示す。これらの図から、 $\tau-s$  関係は鉄筋に沿った位置にかかわらず同じであることが確認できる。ただし、供試体端部の影響がある載荷端および載荷端から 5 D の位置のものは除いている。また、境界条件を  $\epsilon=0$ かつ  $s=0$  として  $\tau-s-\epsilon$  関係式から求めた  $\tau-s$  関係を、それぞれの図中に破線で示す。 $\tau-s-\epsilon$  関係式は、コン

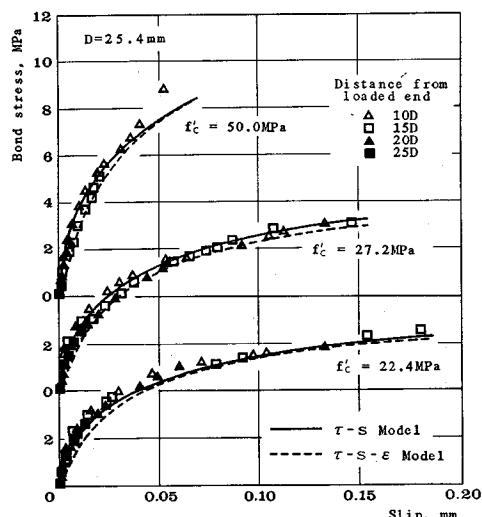


図-19 定着長が十分に長い場合におけるコンクリート強度が異なるときの  $\tau$ - $s$  関係

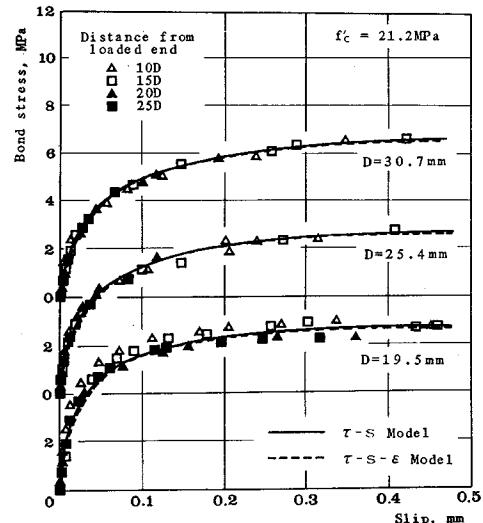


図-20 定着長が十分に長い場合における鉄筋径が異なるときの  $\tau$ - $s$  關係

クリート強度および鉄筋径の影響をうまく処理していることが確認できる。

鉄筋径およびコンクリート強度の影響を処理すれば、定着長の長いすべての供試体の  $\tau$ - $s$  関係が 1 つの曲線で表わされる。式 (11) はこの曲線を簡単な形で表わしたものである。

コンクリート強度の影響に関しては、ひずみが小さく、ひずみの影響が少ない場合には、式(3)のように、付着応力が  $f_c^*$  に比例するとした。しかし、3.(2)で述べたように、境界条件が  $\epsilon=0$ かつ  $s=0$ である場合には、コンクリート強度が大きくなると  $\tau_0$  で表わされる付着応力が大きくなると同時に、同じすべり量に対するひずみが大きくなり、 $g(\epsilon)$  が小さくなる。したがって、コンクリート強度の影響の度合いは見掛け上小さくなり、結果的に定着長が十分に長い場合には付着応力が  $f_c^{2/3}$  に比例する形となる。図-19および図-20に、式(11)で表わされる  $\tau-s$  関係を曲線で示す。コンクリート強度および鉄筋径の違いにかかわらず、この  $\tau-s$  関係式は実験結果とほぼ一致している。

式(11)は、縦ひびわれが発生しない条件のマッシブ

なコンクリート中に十分に長く定着された鉄筋に対して応用でき、フーチングに十分に長く定着された柱あるいは壁の主鉄筋などの解析に役に立つものと思われる。

## 5. 結論

縦ひびわれの影響がないマッシュなコンクリートに埋め込まれた鉄筋の付着性状に関する実験および解析の結果に基づいて、以下のような結論を得た。

(1) 境界条件が  $\epsilon=0$ かつ  $s\neq 0$ 、あるいは  $\epsilon\neq 0$ かつ  $s=0$  の場合は、付着応力-すべり関係が鉄筋に沿った位置によって異なる。

(2) ヤング係数の小さいアルミニウム棒の付着応力-すべり関係は、鋼棒の付着応力-すべり関係と異なる。

(3) (1) および (2) のことは、1つの付着応力-すべり-ひずみ関係式で表わすことができる。その関係式を鉄筋径およびコンクリート強度の影響を考慮して導き、簡単な形で表わした。

(4) 境界条件が  $\epsilon=0$ かつ  $s=0$  の場合には、付着応力をすべり量によって一義的に表わすことができ、その付着応力-すべり関係を、鉄筋径およびコンクリート強度の影響を考慮した簡単な式で表わした。

**謝辞：**本研究の一部は文部省科学研究費補助金（一般研究 A 61420035）を受けて行ったものである。また、一部は三菱財団助成金により行ったものであり、それに対し、ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Ngo, D. and Scordelis, A. C. : Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams, ACI Journal, pp. 152~163, March 1967.
- 2) Nilson, A. H. : Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method, ACI Journal, pp. 757~766, Sept. 1968.
- 3) 藤井・森田：異形鉄筋の付着応力-すべり関係に関する考察、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、JCI, pp. 37~44, 1983.
- 4) "Bond Action and Bond Behaviour of Reinforcement — State of The Art Report —," Bulletin D'Information, No. 151, CEB, April 1982.
- 5) 山尾・周・二羽：付着応力-すべり関係に関する実験的研究、土木学会論文報告集、No. 343, pp. 219~228, 1984.
- 6) 周・二羽・岡村：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、JCI, pp. 45~52, 1983.
- 7) 野口・井上：有限要素法による鉄筋コンクリート構造のせん断解析手法、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、JCI, pp. 77~98, 1982.
- 8) 森田・角：繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間に付着特性に関する研究、日本建築学会論文集、No. 229, pp. 15~24, March 1975.
- 9) Ciampi, V., Elieghansen, R., Bertero, V. and Popov, E. : Analytical Model for Deformed Bar Bond under Generalized Excitations, IABSE Colloquium Delft 1981. Report of the Working Commissions, Vol. 34, IABSE, pp. 53~67.
- 10) Hawkins, N. M., Lin, I. J. and Jeang, F. L. : Local Bond Strength of Concrete for Cyclic Reversed Loadings, Bond in Concrete, Proceedings of the International Conference on Bond in Concrete, Applied Science Publishers, London, pp. 151~161, 1982.
- 11) Plauk, G. and Hees, G. : Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams with Special Regard to Bond Behaviour, IABSE Colloquium Delft 1981, Report of the Working Commissions, Vol. 34, IABSE, pp. 655~670.
- 12) 六車・森田・富田：鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究、日本建築学会論文報告集、No. 131, pp. 1~8, Jan. 1967, pp. 1~6, Feb. 1967.
- 13) Bennett, E. W. and Snounou, I. G. : Bond-slip characteristics of plain reinforcing bars under varying stress, Bond in Concrete, Proceedings of the International Conference on Bond in Concrete, Applied Science Publishers, London, pp. 140~150, 1982.
- 14) Lutz, L. A. and Gergely, P. : Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete, ACI Journal, pp. 711~721, Nov. 1967.
- 15) Edwards, A. D. and Yannopoulos, P. J. : Local bond-stress to slip relationships for hot rolled deformed bars and mild steel plain bars, ACI Journal, pp. 405~420, March 1979.
- 16) de Groot, A. K., Kusters, G. M. A. and Monnier, Th. : Numerical Modeling of Bond-Slip Behaviour, Heron, Vol. 26, No. 1 B, I. B. B. C. Institute TNO, Delft, Netherlands, 1981.
- 17) Nilson, A. H. : Internal Measurement of Bond Slip, ACI Journal, pp. 439~441, July 1972.
- 18) 高谷・山川・吉沢：モルタル、コンクリート中のアルミニウム腐食に及ぼす食塩の影響、材料、Vol. 35, No. 398, pp. 1310~1315, 1986.
- 19) Morita, S. and Fujii, S. : Bond-slip model —its applicability to finite element analysis—, Seminar on finite element analysis of reinforced concrete structures, Tokyo, May 1985, Vol. 2, JCI, pp. 39~53.
- 20) Mirza, S. and Houde, J. : Study of bond stress-slip relationships in reinforced concrete, ACI Journal, pp. 19~46, Jan. 1979.
- 21) 国分・岡村：コンクリートと補強材との結合機構に及ぼす補強材の表面形状の影響、日科技連第6回複合材料シンポジウム, pp. 53~58, 1973.

(1986.5.29・受付)