

[137] 定着板を有する異形鉄筋の付着モデル

正会員 ○周 礼良 (東京大学大学院)

シヴァ・スビラマニラム (東京大学大学院)

正会員 岡村 甫 (東京大学工学部)

1. 序論

異形鉄筋の端部に定着板を用いることは、コンクリート中に埋込まれた鉄筋の定着長を低減することが可能であるために広く行われるところである。しかし、このためには、定着長をいかに定めるか、あるいは定着板により定着された鉄筋の付着挙動をどのように定式化するか、というような点について明らかにしておくことが必要である。現在までの研究によれば、異形鉄筋の付着挙動に関しては多くの付着—すべりモデルが提案されてきてはいる。しかし、定着板を有する鉄筋の付着挙動の解析において、どのような付着—すべりモデルを適用すればよいのかについては明確な方法が確立されていないようである。そこで、本研究では、このような定着板を有する鉄筋の付着挙動を定量的に評価する方法について検討を行ったものである。

定着板の有る場合へと拡張していくことを念頭におけば、まづ第一に定着板の無い場合に、どのような付着モデルを適用するかを決定せねばならないと思われる。それは付着モデルが、載荷方法、コンクリート強度、鉄筋のかぶり、拘束条件等、多くの要因に影響されるからである。このため、様々な実験条件に基づいてそれぞれ適用範囲を限定した各種のモデルが提案されてきている。しかし、これらのモデル間にはかなりのバラツキが認められている¹⁾。これに対して、著者らはマッシブなコンクリート円筒体中に鉄筋を埋込んで行った実験に基づいて、以下の諸点を明らかにしている^{2) 3)}。

- (1)鉄筋の埋込み長さが十分に長ければ、あるいは自由端においてすべりを生じなければ、マッシブなコンクリート中に埋込まれた鉄筋のどの部分においても、唯一つの曲線によって付着—すべり関係を示すことが可能である。
- (2)埋込み長さ、あるいは自由端すべりは、付着—すべり関係に関する重要な要因である。しかしながら、これらの影響も、付着—すべり関係に及ぼす鉄筋ひずみの影響として考慮することが可能である。したがって、著者らは付着—すべりモデルの代わりに、より普遍的な付着—すべり—ひずみモデルを提案している。これは埋込み長さが変化した場合にも容易に適用していくことが可能である。付着—すべり—ひずみモデルは①式で示される。

$$\tau = 76.6 f_c' \% (1 - e^{-0.3s})^{0.7} \left((e^{-2(1000St)^{0.5}} + 0.14) / 1.14 \right)^2 \dots \text{①}$$

ただし、 τ : 付着応力 (kg/cm²)、 St : 鉄筋のひずみ ($\times 10^{-6}$)、 s : 無次元化したすべりであり、 $s = (1000 S / D)$ 、 S : すべり量 (mm)、 D : 鉄筋径 (mm) である。

本研究は、まづ第一に今回行った、定着板の有る場合と無い場合の各実験結果について概要を説明し、引続き定着板の有る場合に、そのひずみ分布、あるいはひずみ—すべり関係を予測するために、どのように上記の付着—すべり—ひずみモデルを適用するかについて述べるものである。なお、このモデルは付着—すべり—ひずみ間の包絡線の関係式を表すものである。

2. 実験

実験は直径50cmの円筒形コンクリートの中心軸に公称径25mmの異形鉄筋を埋込んで、これを引き抜くことにより行った。埋込み長さは10D, 15D, 20D と三段階に変化させてある。これらの供試体の諸元を表1に示した。定着板の有る供試体の場合には、鉄筋は自由端側に定着板を介してコンクリート表面よりもさらに10cmだけ突出させてある。定着板には、10×20×1.5 cmの鋼板を使用している。試験装置を図1に示した。なお、載荷治具等を含めた供試体の詳細については既報³⁾に詳述してある。実験時の測定項目は、荷重端から5D間隔の (D : 鉄筋径) 鉄筋ひずみ、荷重端の変位、自由端のすべり、およびコンクリート面の変形である。載荷は図1中のA'点におけるひずみにより制御した。また、載荷履歴は図2に示すような静的な繰返し載荷である。

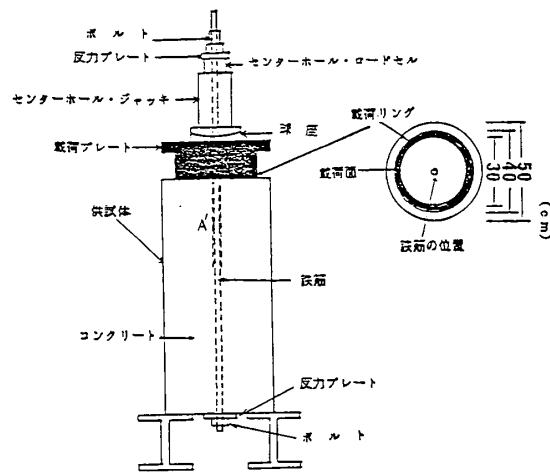


図-1 載荷装置

表-1 実験の要因の組合せ

供試体 No.	材令 (日)	コンクリートの強度 (kg/cm ²)	鉄筋径 D (mm)	埋め込み長さ ℓ ($\times D$)
BSUH7	21	222	25	10
BSUH8	19	222	25	15
BSUH9	18	222	25	20
BSUH15*	20	216	25	10
BSUH16*	21	216	25	15
BSUH17*	22	216	25	20

- 1) 解析に用いた鉄筋の径は、25.4 (mm)、面積は、5.055 (cm²)である。
- 2) *は、定着板のついている供試体である。
- 3) 鉄筋は、すべて焼き入れをした高強度鉄筋である。

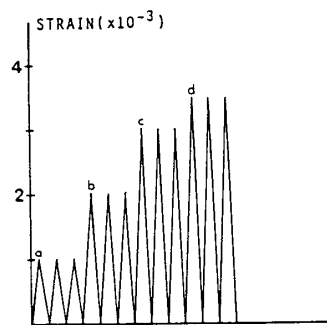
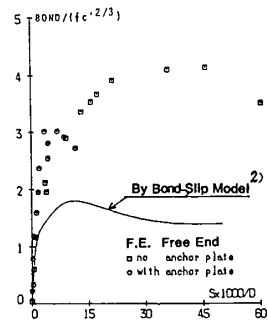
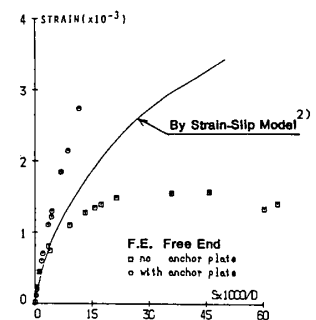


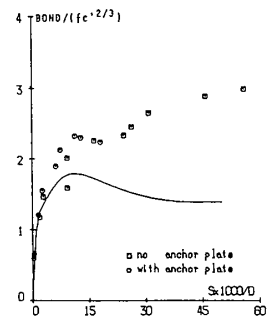
図-2 繰り返しによる載荷方法



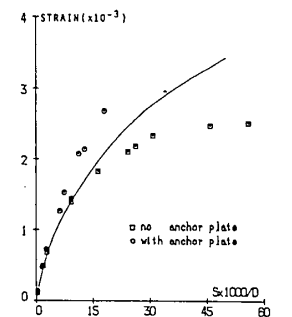
(a) Bond-Slip Rel. at 5D from F.E.



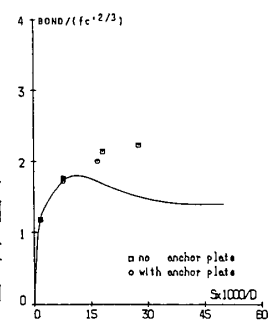
(a) Strain-Slip Rel. at 5D from F.E.



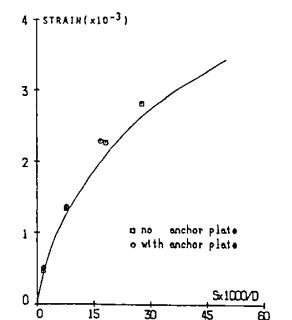
(b) Bond-Slip Rel. at 10D from F.E.



(b) Strain-Slip Rel. at 10D from F.E.



(c) Bond-Slip Rel. at 15D from F.E.



(c) Strain-Slip Rel. at 15D from F.E.

図-3 & 4 付着-すべり & ひずみ-すべり関係

3. 実験結果および考察

測定されたひずみから、すべり、および付着応力の実験値を求める方法については既に述べてあるが³⁾、基本的には隣接する3点のひずみの測定値を2次多項式に当てはめて鉄筋の全長にわたるひずみ分布曲線を求め、着目している点までのひずみ分布曲線の積分値と自由端すべりとの和からその点におけるすべり量を、また着目点でのひずみ分布曲線の勾配から付着応力をそれぞれ計算している。

3-1. 付着-すべり関係およびひずみ-すべり関係の包絡線

これらの包絡線を描くためのデータは載荷履歴中の同一ひずみを与える最初の繰り返し (図2中のa, b, c, d, ...点) の際に測定された最大値を用いた。定着板の有る場合と無い場合の自由端から5D, 10D, 15Dの各点における、付着-すべり関係およびひずみ-すべり関係をそれぞれ図3および図4に示す。

3-2. 付着－すべり関係およびひずみ－すべり関係に関する考察

3-2-1. 付着－すべり関係

図3に示したデータより、以下の2点が見い出される。

- (1)本実験のように埋込み長さが短い場合には、付着－すべり関係は着目している鉄筋位置が変化するとかなり異なる。
- (2)着目点ごとの付着応力の最大値は自由端に近づく程大きくなる。

なお、定着板の有る場合と無い場合とでは、自由端からの距離に応じて付着剛性が変化していることに注意する必要がある。つまり、自由端から5Dの位置では、定着板の有る場合は無い場合に比較して大きい付着剛性を保持しているのに対して、15Dの位置では両者の差が無視し得る程度となってくるのである。

3-2-2. ひずみ－すべり関係

定着板の無い供試体のデータより、以下の2点が見い出される。

- (1)付着－すべり関係と同様に、本実験のように埋込み長さが短い場合には、着目している鉄筋位置が変化するとひずみ－すべり関係はかなり異なる。
- (2)自由端に近づく程、ひずみ－すべり関係から得られるひずみの最大値が低下していく。

図4に示されるように、定着板の有る場合と無い場合とでは得られるひずみ－すべり関係がかなり異なっている。定着板の有る場合のひずみの測定値は無い場合よりも大きい。しかし、自由端から15D程度離れると付着－すべり関係において見られる現象と同様に、その差異はほとんどなくなってくるのである。

付着－すべり関係、およびひずみ－すべり関係が、定着板の有る場合と無い場合で異なるのは、以上より判断して自由端における境界条件のためであると考えることができる。

4. 解析

今回の定着板の有る場合の解析においても、従来の無い場合と同様に鉄筋を軸方向に分割して、分割された各点間の漸化式によって解析を行う。つまり、鉄筋のひずみ分布およびすべりは、釣合条件および境界条件を満足する漸化式により結び付けられる。すなわち、荷重端を原点として鉄筋に沿ってX軸をとり、鉄筋をN等分に分割すると、 $X = X_i$ におけるひずみ $St(X_i)$ およびすべり $S(X_i)$ は以下のように表される。

$$St(X_i) = St(X_{i-1}) - \tau(X_{i-1})(X_i - X_{i-1}) \frac{U}{As \cdot Es} \quad \text{----- ②}$$

$$S(X_i) = S(X_{i-1}) - 0.5(X_i - X_{i-1})[St(X_i) + St(X_{i-1})] \quad \text{----- ③}$$

ただし、 U 、 As 、 Es はそれぞれ鉄筋の周長、断面積、および弾性係数である。また、 $\tau(X_{i-1})$ は $X = X_{i-1}$ における付着応力である。境界条件は、自由端 $X = X_n$ で、定着板の有る場合には $S(X_n) = 0$ 、定着板の無い場合には $St(X_n) = 0$ である。

$\tau(X_i)$ は、 $St(X_i)$ と $S(X_i)$ を①式に代入すれば求めることができる。しかし、定着板の有る場合には τ を計算するに当たり、 $St(X_n) = 0$ ではないために、定着板がなく $St(X_n) = 0$ の境界条件で定式化された①式を直接用いることはできない。そこで、定着板の有る場合には $S(X_n) = 0$ の境界条件を満たすように、図5に示したフローチャートにしたがって繰り返し計算により、 $St(X_n)$ を求め、 $St(X_i)$ の代わりに $St(X_i) - St(X_n)$ を①式に代入するとデータに対する適合度の良いことが認められた。

このようにして得られる定着板の有る場合の解析結果のうち、ひずみ分布曲線と荷重端でのひずみ－すべり関係を実験データとともに図6～8に示す。いずれも、実

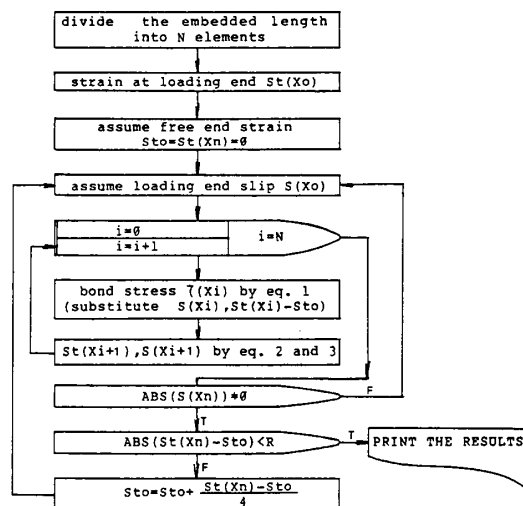


図-5 フローチャート

験データを程良く推定できていることが認められる。

以上まとめると次のように要約できる。すなわち、①式の付着－すべり－ひずみモデルは定着板の無い場合の実験より誘導されたものである。したがって、定着板の有る場合には自由端にひずみが発生し境界条件が異なるので、そのままでは適用できない。しかし、定着板の有る場合でも、この場合の自由端ひずみを図5のフローチャートにしたがって求め、 $St(X_i)$ のかわりに $St(X_i) - St(X_n)$ を用いるならば、図6～8に示したように①式の適用が可能となるのであり、結果的に①式は定着板の有無を問わず汎用的に使用することになるのである。

5. 結論

定着板の有無をパラメータとして、マッシュブなコンクリート中に埋込んだ鉄筋の引抜きの実験および解析結果より、以下の結論が得られた。

(1) 付着挙動のうち、付着－すべり関係は今回の実験においては、鉄筋の埋込み長さが短かったため、鉄筋位置が変化することによってそれぞれ異なったものとなった。しかし、定着板の有る場合と無い場合とではそれほど大きくは変化せず、むしろ類似の傾向を示した。一方、ひずみ－すべり関係は、定着板の有無によってかなり大きく異なることが認められた。

(2) 既に提案している付着－すべり－ひずみモデルは、定着板の有る場合でも、境界条件を満たす自由端ひずみを算出して、任意点の鉄筋ひずみから控除することができれば、定着板の有る場合でも精度良くデータを推定できることが確認された。

本研究に対しまして財団法人鹿島学術振興財団外国人研究者受け入れの御援助をいただきました。また、本研究は昭和58年度文部省科学研究費補助金（課題番号58460159）を受けて行われたものです。

6. 参考文献 (1) 藤井 栄, 森田司郎: 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, 日本コンクリート工学協会, 1983.10
- (2) 周 礼良: Analytical Model for Bond of Deformed Bar Embedded in Massive Concrete, 東京大学学位論文, 1984
- (3) 周 礼良, 二羽淳一郎, 岡村 甫: マッシュブ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, 日本コンクリート工学協会, 1983.10

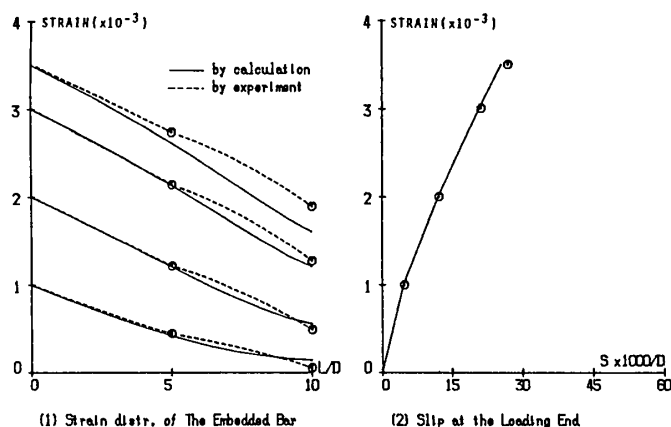


図-6 解析と実験結果 (供試体 BSUH15)

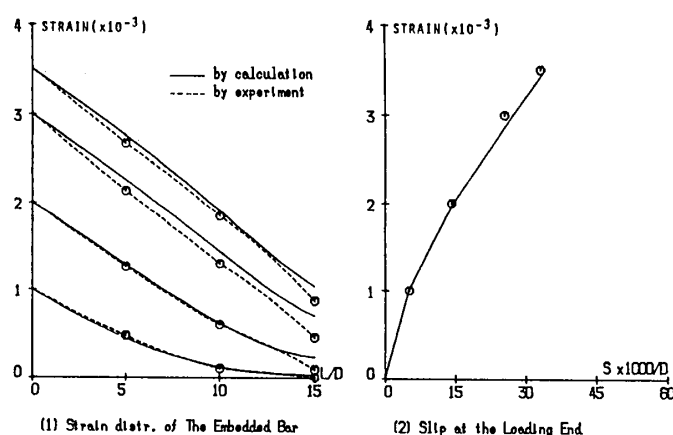


図-7 解析と実験結果 (供試体 BSUH16)

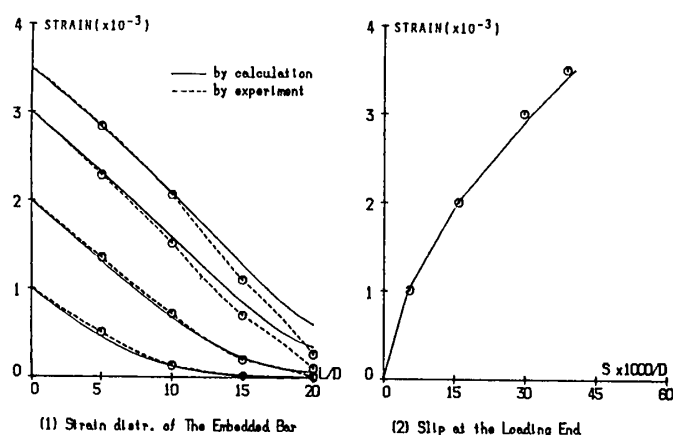


図-8 解析と実験結果 (供試体 BSUH17)