

V-18 引張り力を受けるRC部材の付着滑り挙動解析

北大・正員 上田 正生 同左 土橋 由造

1 はじめに

著者は、既報1)において、コンクリートの亀裂と鉄筋の降伏をも表示し得る、軸力のみを受ける鉄筋コンクリート(RC)部材の材料非線形付着滑り解析法について報告したが、これは単調増加荷重時の変形挙動の追跡のみを目的としたものであり、繰り返し荷重時は、その対象外であった。この度、既法1)のRC部材の付着滑り解析手法を、除荷及び再載荷を含む繰り返し荷重にも対応し得るように拡張・発展させたので、本報ではその結果について報告する。

2 材料非線形付着滑り解析

本解析法は、全ポテンシャル・エネルギー汎関数に基づく有限要素法によるものであり、基本仮定事項及び解析理論そのものは、前報告と同一であるので、ここでは、

図1に使用要素の概要を掲げるに留め、本報告の主要な改良点である繰り返し荷重時のコンクリートと鉄筋の応力-歪性状、並びに付着応力-滑り性状の構成則についてのみ記述することとする。

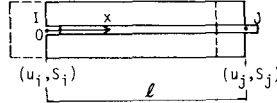


図1 1次元付着滑り有限要素

(1) コンクリートの応力-歪関係

単調載荷時のコンクリートは、図2に示すように、引っ張り側では線形弾性($E_{ct}=E_{co}$)が成立するが、引っ張り強度 σ_{ct} (T点)を超えると亀裂が生じて、その時点で急激に剛性と応力を失うものとし、圧縮側での応力-歪曲線は、圧縮強度 σ_{cc} (C点)に達するまで Saenzのシミュレート曲線¹⁾で表示でき、C点で剛性を失い、C点からF点までは直線に従って応力を過減していき、F点に致って全応力を消失するものとする。また、繰り返し載荷に対しては、

同図中に矢印でその方向を示した初期接線係数 E_{co} に等しい傾きをもつ除荷および再載荷経路

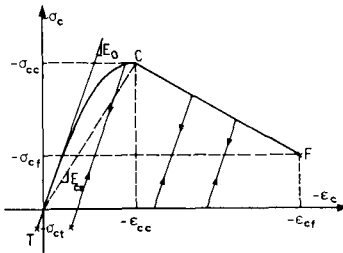


図2 コンクリートの仮定応力-歪関係

を仮定する。

(2) 鉄筋の応力-歪関係

鉄筋は trilinear 型の弾・塑性材料として取り扱い、図3に示す単調漸増載荷及び繰り返し載荷時の応力-歪モデルを仮定する。

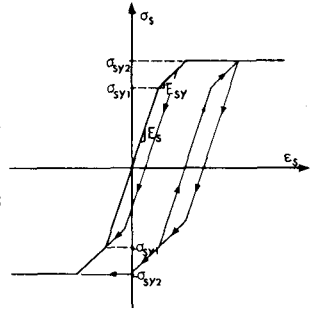


図3 鉄筋の仮定応力-歪関係

(3) 付着応力-滑り関係

一般にRC部材内部で、鉄筋を横切るような亀裂が発生すると、その亀裂を挟むどちらか一方の側には、補強筋の付着滑り方向の逆転が起こるので、単調増加荷重下であっても、付着応力には除荷が生じることになる。単調載荷時のみを対象とした前報1)では、図4示すような、再載荷経路における付着劣化の影響を無視した Tassiosタイプの繰り返し τ - S モデルを用いて定式化を行なったが、本報告では、繰り返し荷重下における既往の τ - S モデルのうちで、最も優れていると思われる森田・角の構成則に準拠した τ - S モデルを設定することにした。

図5は、ここで仮定した τ - S モデルの代表的な除荷、及び再載荷経路を図示したものである。図中のU点が除荷開始

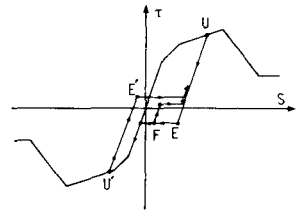


図4 既報1)で使用した τ - S モデル

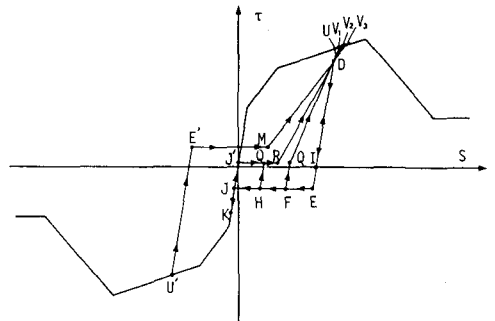


図5 本報告で採用した τ - S モデル

点を、また F, H, K, U 点は、考え得る再載荷開始点の典型を、更にまた、V_i は再載荷完了による単調載荷曲線への復帰点を、それぞれ表わしている。従って、本モデルで表示可能な 1 サイクル当たりの繰り返し載荷経路は、次の 4 種である。

- (a) U → E → F → Q → D → V₁ (但し $\tau_0 > \tau_R$ の時)
- (b) U → E → H → Q → R → D → V₂
- (c) U → E → J → K → J' → R → D → V₂
- (d) U → E → J → U' → E' → M → D → V₃

除荷区間 U-E と再載荷区間 F-Q, H-Q, U'-E' の傾きが、初期付着係数 k_{b1} と同一の値をとるものとすれば、上記の全経路は、① E, E', Q 3 点の τ 座標の値と、② D, I, M, R 4 点の座標値 (τ, S) を、与えることによって決定することができる。これらの各点を規定するために、本モデルで定義した座標値を、以下に列記する。

① E, E', Q 点の τ 座標値

$$\begin{aligned} \tau_E &= -\eta \tau_U \\ \tau_{E'} &= -\eta \tau_{U'} \\ \tau_Q &= -\eta \tau_E \end{aligned} \quad (1)$$

② D, I, M, R 点の座標値 (τ, S)

$$\left. \begin{aligned} \tau_D &= \beta \tau_U, S_D = S_U - (1 - \beta) \tau_U / k_{b1} \\ \tau_I &= 0, S_I = S_U - \tau_U / k_{b1} \\ \tau_M &= \tau_{E'}, S_M = (3S_E + S_{E'}) / 4 \\ \tau_R &= \tau_Q, S_R = S_I / 2 - (1 - \eta) \tau_E / k_{b1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

但し、 $S_M > S_R$ の時は、 $S_M = S_R$ とし、また $\eta = 0.18$ $\beta = 0.9$ とする。

図 6 には、比較のためこのモデルの基礎となった森田等の $\tau-S$ 関係をかかげた。先の図 5 とこの図を対比すると両者の相違は明らかであるが、上記の $\tau-S$ モデルを規定する各点の座標値は、比較的大きな滑り変位振幅を対象にした森田等の再載荷時の $\tau-S$ 基本則を、滑り変位の小さな領域をも取り扱い得るように修整を加えて設定したものである。即ち、森田等が bi-linear で仮定している単調載荷時の $\tau-S$ 曲線を、trilinear で表示したことによって生じた不合理の除去が各座標値の修整の要を生じた主

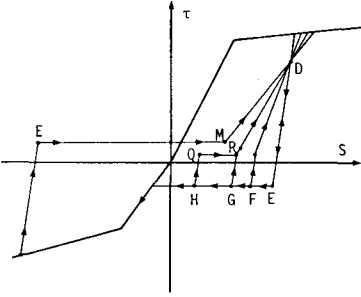


図 6 森田・角の $\tau-S$ モデル³

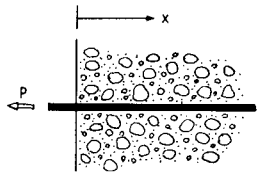
な理由である。これは結果として、上(2) 式の M 及び R 点の S 座標の、森田等の値との相違となつて表われている。参考のため、森田等の原モデルにおけるこれら両点の S 座標値を下式に示す。

$$\begin{aligned} S_M &= (3S_U + S_{U'}) / 4 \\ S_R &= S_J / 2 - (1 + \alpha) \tau_E / k_3 \end{aligned}$$

3 数値計算例

(1) 半無限のコンクリート躯体に埋め込まれた十分な定着長をもつ鉄筋の付着滑り解析

前章で設定した $\tau-S$ モデルが、森田・角の原モデルをどの程度近似しているかを調べるために、図 7 に示すような半無限体のマスコンクリートに、十分な長さで定着されている鉄筋の、繰り返し載荷による付着滑り解析を行なってみる。このモデル供試体は、森田等が文献 2) に計算例として挙げているものである。図 8 には、解析に用いた彼等の単調載荷 $\tau-S$ 仮定曲線を、ま



た図 9 には、荷重 19.5 t から 0 t までの 1 サイクルの繰り返し載荷を含む場合の、森田等及び著者の計算結果を、図 7 半無限体のコンクリート中に埋め込まれた鉄筋の概念図

$x=0 \text{ cm}$ の位置における荷重-滑り曲線 ($P-S_0$ 曲線) で比較して掲げた。両解析曲線には、幾分かの差が認められるが、両者

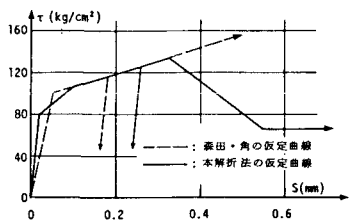


図 8 計算に用いた $\tau-S$ 曲線

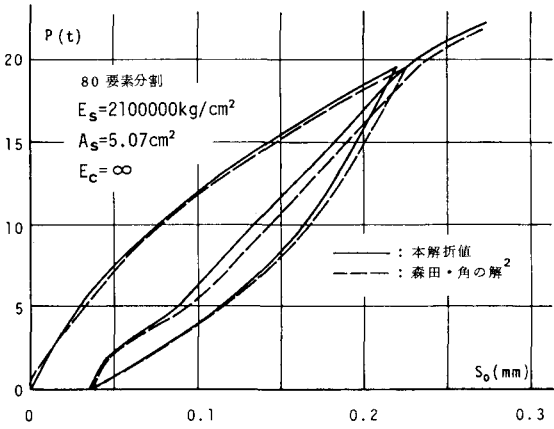


図 9 荷重-材端滑り曲線-1 森田等の解との比較-

の差異の一部が、解析手法と計算仮定（森田等は $S_x = 0.001\text{cm}$ をもって定着完了とみなしているのに対して、ここでは $L=80\text{cm}$ で $S_x=0$ とした）の違いに起因することを考慮すると、本 τ - S モデルは、森田・角の基本構成則を許容しうる十分な精度で踏襲していることを知る。図10,11,12は、図4の既報の τ - S 関係と図5の新しい構成関係を用いた場合の両解析結果の相違を調べたものである。図10は、 P - S_0 曲線を、また図11,12の(a),(b)には、配筋軸方向に沿う鉄筋応力と付着応力分布の推移状況を、除荷及び再載荷途上の5つの荷重段階を例にとってそれぞれ比較してかかげた。両解析値の差は明白であり、既報の τ - S モデルでは表示し得ない再載荷時における付着劣化の

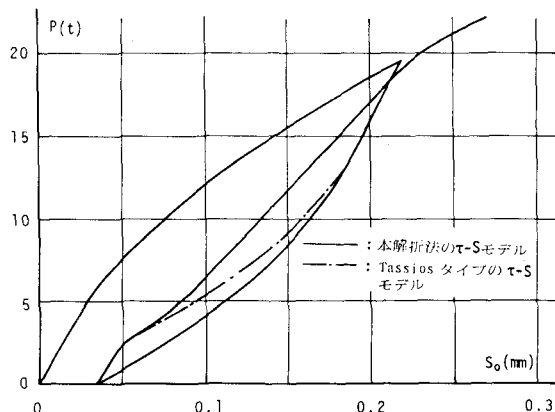


図10 荷重-材端滑り曲線（既報1）の τ - S モデルによる解との比較

効果が、本報告で新たに設定した τ - S 構成則を用いることによって、可成り実際に近い形で表現することが可能なことを示している。

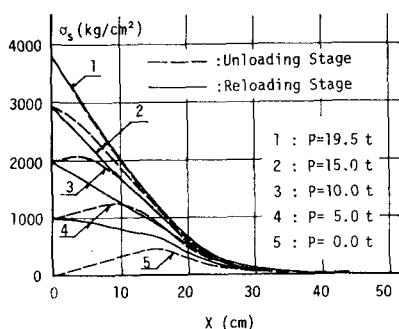
(2) 両引きモデル試験体の解析

図13に示す部材寸法と材料性状を有する両引モデル試験体に、図14の τ - S 曲線を仮定して、処

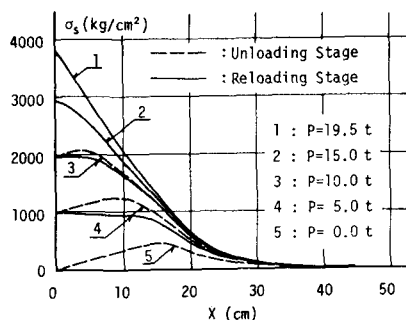
女載荷途上の荷重 $P=10\text{t}$ の時点から $P=0$ まで除荷し、再び鉄筋が降伏するまで載荷した場合の解析を行なってみる。ただし、この試験体のコンクリートには、載荷開始前に乾燥収縮歪 $\varepsilon_{sh}=0.0002$ が生じているものとする。図15に、この部材の荷重-平均歪解析曲線をしめす。

図からも明らかなように、

この部材には載荷開始前に、コンクリートの収縮によって負の平均歪が生ずるため、荷重 $P=0$ におけるこの解析曲線と裸鉄筋の平均歪は一致しない。図中には参考のため、この試験体に逆方向の押し込み荷重を加え、本解析曲線と裸鉄筋の歪直線の交差する位置 Z を求めた時の計算結果を併記した。図16には、

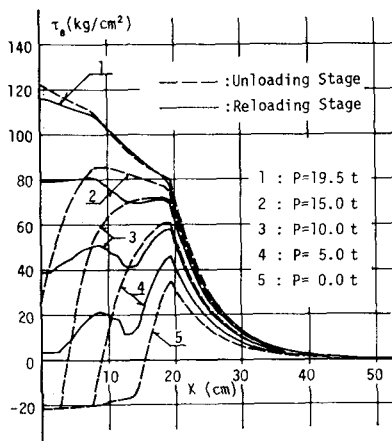


(a) 本 τ - S モデルによる解

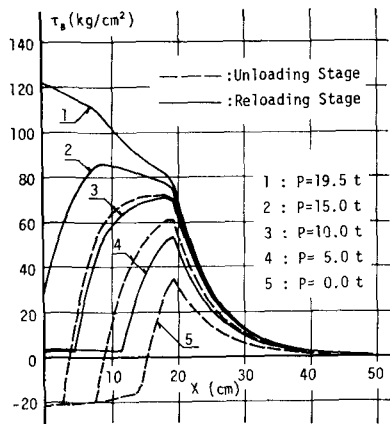


(b) 既報1) の τ - S モデルによる解

図11 材軸に沿う鉄筋応力分布の推移状況の比較

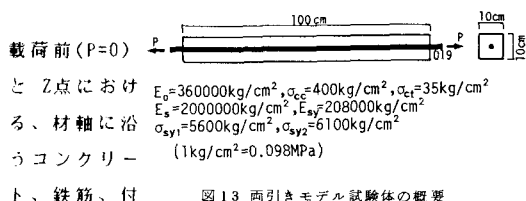


(a) 本 τ - S モデルによる解



(b) 既報1) の τ - S モデルによる解

図12 材軸に沿う付着応力の推移状況の比較



と Z 点における、材軸に沿うコンクリート、鉄筋、付

図13 両引きモデル試験体の概要

着の各応力分布を例示したが、 $P=0$ ではコンクリートの乾燥収縮の影響によって、コンクリートと鉄筋には、それぞれ引っ張り応力と圧縮応力が生じており、また Z 点においては、コンクリートと付着は共にゼロ

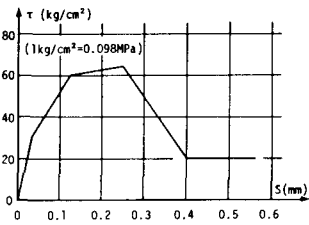


図 14 計算に用いた仮定 τ - S 曲線

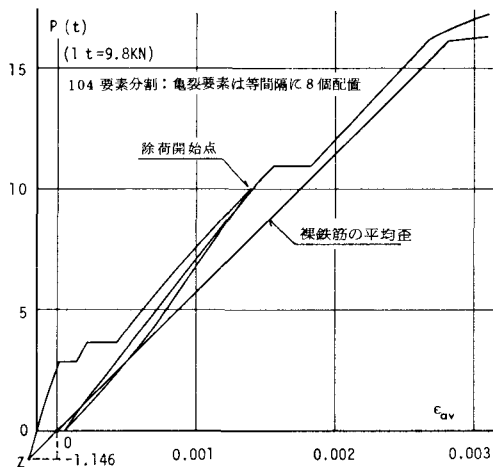


図 15 荷重-平均歪曲線

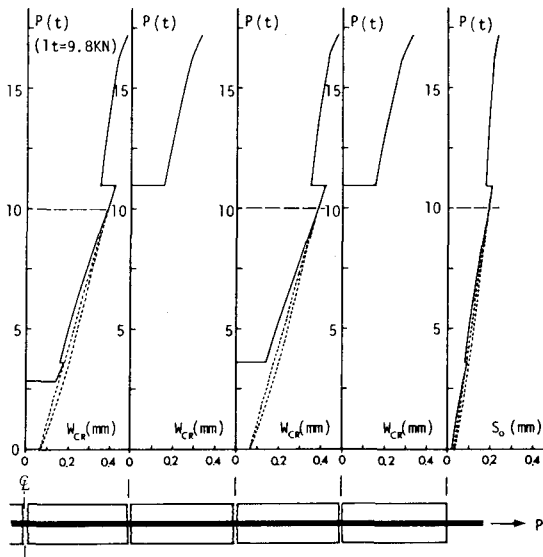


図 17 荷重-亀裂巾、及び荷重-材端滑り曲線

応力状態にあり、鉄筋にのみ一様な圧縮応力 ($\sigma_c = 400 \text{ kg/cm}^2$) が生じている。また図 17 は、各亀裂発生位置における荷重-亀裂巾曲線と、載荷端の荷重-滑り曲線を図示したものである。この図中の各曲線、及び前掲の図 15 の平均歪曲線の各線り返し載荷部分は、それぞれループを描いており、又これらの曲線上では明確に識別することはできないが、再載荷完了時 ($P=10 \text{ t}$) における付着劣化の効果も、

僅か乍ら確認することが出来る。図 18 には、 $P=10 \text{ t}$ から $P=0$ の間の 4 段階の荷重に対するコンクリート、鉄筋、付着の各応力の、除荷及び再載荷時における、材軸に沿う分布の推移状況を対比して掲げたが、これらの各応力分布には、荷重の繰り返しによる付着劣化の影響が明瞭に表われている。

[参考文献]

1) 上田, 土橋 [鉄筋コンクリート部材の材料非線形付着滑り解

析], 土木学会道支部
論報第 40 号, 1984

2) 森田, 角 [繰り返し荷
重下における鉄筋とコ
ンクリート間の付着特
性に関する研究],
建築学会論報第 229,
1975

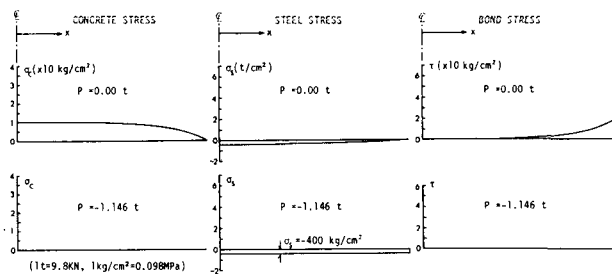


図 16 載荷前 ($P=0$) と Z 点における材軸方向の各応力分布

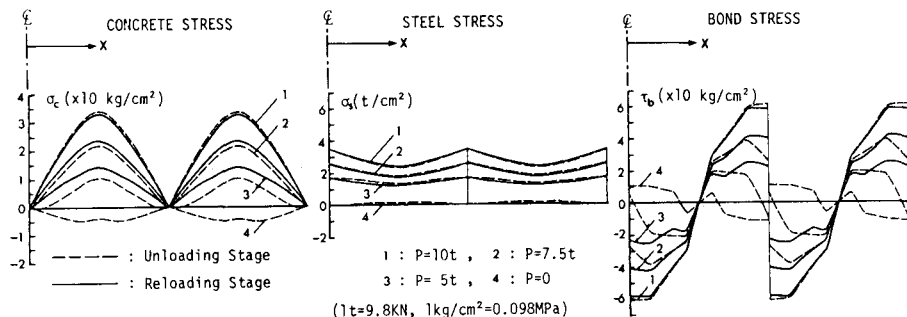


図 18 除荷及び再載荷時における材軸に沿う各応力分布の推移状況