

[150] マッシブなコンクリート中に定着された鉄筋の降伏以後の 拔出し特性

正会員 村山 八洲雄（鹿島建設技術研究所）

正会員 ○須田 久美子（鹿島建設技術研究所）

正会員 三村 長二郎（鹿島建設技術研究所）

1. はじめに

RC橋脚などの耐震設計においてその変形性能を検討する場合、柱部材の変形に加えて、柱筋のフーチングからの拔出し評価が必要となる。ここではその評価方法を検討するため、拔出し特性を把握する目的で群鉄筋の交番繰返し載荷による付着実験を行った。実験では、拔出し量の大部分が鉄筋の降伏している部分の伸びによってもたらされているので、鉄筋が降伏している区間に着目し、鉄筋の深さ方向の各位置における局所的な付着応力度とすべりの関係（ $\tau-s$ 関係）、及び鉄筋応力度とひずみの関係（ $\sigma-\epsilon$ 関係）を調べた。

また実験結果をもとに、 $\tau-s$ 関係及び $\sigma-\epsilon$ 関係それぞれが拔出しに及ぼす影響を試算し、両者が複合して及ぼす影響を調べた。

2. 実験概要

(1) 試験体と載荷方法

試験体はマッシブなフーチング内の柱筋の状態をモデル化したもので、群鉄筋にはD10鉄筋を5本1組（鉄筋中心間隔4φ、φは鉄筋径）で使用した。群鉄筋はコンクリート上面位置で予め鋼製ブロックに溶接して固定した。これにより引張力と圧縮力を各鉄筋に均等に作用させるようにした（図-1）。使用した材料の特性値を表-1に示す。

試験体の種類を表-2に示す。測定目的に応じてひずみ試験体・応力試験体を準備した。載荷パターンは（M）（R）（R'）の3種類で、（R）は軸力が無い柱部材に対応するもので、交番加力において引張荷重と同じ大きさの圧縮荷重を載荷したもの、（R'）は10 kg/cm² { 0.98MPa } 程度の軸圧縮応力を受ける柱部材に対応するもの、（M）は対比用として一方向の引張荷重を載荷したものである。

(2) 測定方法

鉄筋のひずみ分布は、塑性ひずみゲージを群鉄筋の主として内側3本に深さを変えて貼付け、各測定値を重ね合わせることで求めた。ひずみゲージによるフシ欠損率は載荷端から20φの区間で約5%（付着面積欠損率は約8%）であった。

交番応力履歴を受ける鉄筋の塑性域での応力度を測定するため、測定箇所である鉄筋の一部分を専用の加熱コイルで高周波焼入れし、その部分の降伏応力度を母材の1.3倍程度に高めた（以下、局部焼入れした部分を“鉄筋ロードセル”と呼ぶ）。局部焼入れによる熱影響の範囲は約1.5φ程度であり、繰返し載荷（引張荷重のみ）による残留ひずみは50×10⁻⁶（応力度に換算して80 kg/cm² { 7.84MPa }）以内であった。応力分布は、ひずみ分布測定と同様に、鉄筋ロードセルを主として内側3本に振分け、各測定値を重ね合わせることで求めた。鉄筋ロードセルのための焼入れ部が占める割合は載荷端から20φの区間で約9%であった。

すべり量は、鉄筋ロードセルの位置にすべり計測用ワイヤーを取

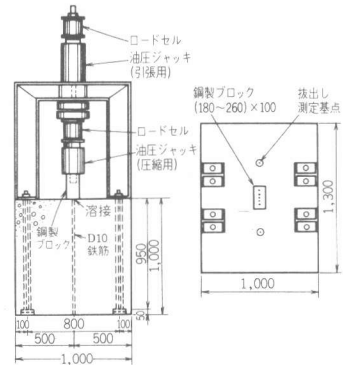


図-1 実験概要

表-1 材料特性

コンクリート (G _{max} =20mm)		供試体寸法 φ10x20	
28日強度 (kg/cm ²)	実験時強度 (kg/cm ²)	標準	養生
289	29	375	351
鉄筋 (D10)			
降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	ひずみゲージの読み 降伏ひずみ (×10 ⁻⁶) ひずみ硬化点 (%)	
36.7	52.4	2031	3.0

表-2 試験体の種類と載荷パターン

略称	載荷パターン	測定項目 による分類
GM1	(M)	ひずみ試験体
GM2		応力試験体
GR1	(R)	ひずみ試験体
GR2		応力試験体
GR'1	(R')	ひずみ試験体
GR'2		応力試験体

付け、試験体下面との相対変位を読み取り精度1/500 mmの変位計で測定して求めた。すべり計測用ワイヤーは、コンクリートとの摩擦をなくするために予めテフロンシースで被覆したもので、D10鉄筋に比較して十分に細径のもの（シースを含めて1/10 ϕ ）である。

鉄筋の拔出し量は、鋼製ブロックとコンクリート上面（ブロック端部から約20cm離れた所）との相対変位を読み取り精度1/500 mmの変位計で測定して求めた。

3. 実験結果と考察

(1) 鉄筋降伏区間における

局所の τ - s 関係

応力試験体から得られた応力分布とすべり分布（図-2、図-3参照）をもとに、深さ方向に隣合った測点の応力度の差及びすべりの平均値を用いて局所の τ - s 関係を求めた（図-4）。

図-4をみるとすべり量が0.02 ~ 0.05 ϕ の範囲で部分的に τ が小さくなっている。

そこで、鉄筋の深さ方向の各位置における鉄筋応力度とすべりの関係（図-5参照）を見ると、いずれの深さとも同様な関係になっており、すべり量が0.02 ~ 0.05 ϕ 程度の範囲は鉄筋が降伏した直後であり、この範囲では曲線の勾配が著しく小さい。また、このような付着応力の低下を考慮しないと、付着応力を積分して推定した荷端応力度が、実測値と著しく異なったものになる。すなわち、鉄筋が降伏した直後にすべりが急増して、付着応力が急激に低下することが分る。鉄筋降伏直後の付着応力の低下については、Popovら¹⁾によっても示されている。その原因としては、ポアソン効果によって鉄筋径が細くなるため、鉄筋ふしのコンクリートへのひっかかりが弱くなること、鉄筋の谷部とコンクリートとの間に隙間ができ、ふしからの支圧力を受持つコンクリートが変形しやすくなったことなどが考えられる。

図-4を局所 τ - s 関係に対する鉄筋の深さ方向の位置の影響という観点からみると、次に述べる荷重履歴の影響等と比べ、(M)の場合の表面付近を除いて深さによる影響は少ないようである。

荷重履歴の影響については、(R)と(R')では(R')の付着応力度の方がいくぶん小さめであるが、(M)と(R)（または(R')）では、交番荷重を受けた後者の付着応力度の方が明らかに小さく、前者の半分程度となっている。

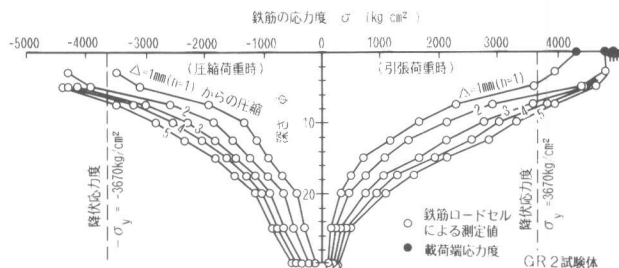


図-2 応力分布の測定例

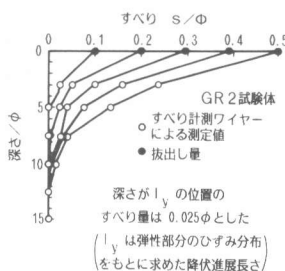


図-3 すべり分布の測定例

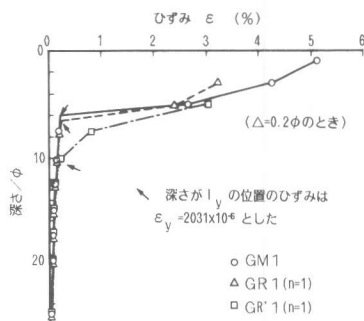


図-6 ひずみ分布の測定例

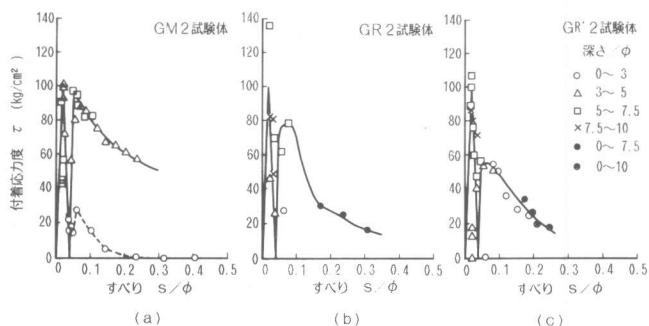


図-4 付着応力度とすべりの関係

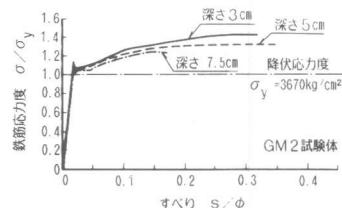


図-5 鉄筋応力度とすべりの関係

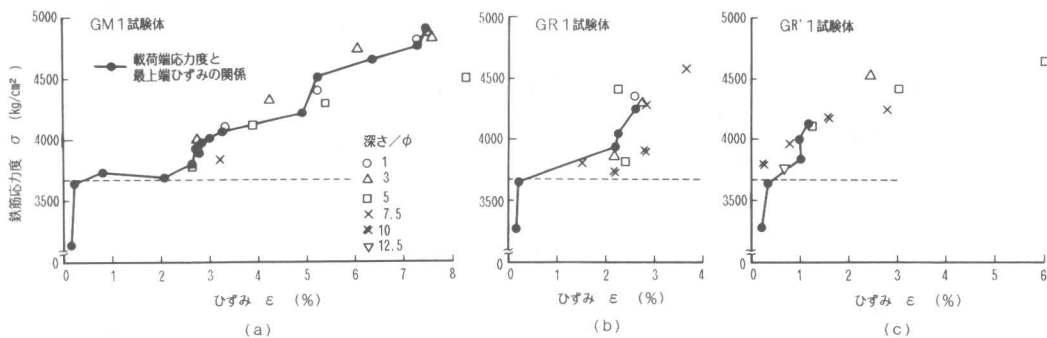


図-7 鉄筋応力度とひずみの関係

以上より局所の $\tau-s$ 関係を図-4図中の太線のように求めて、以降の検討に用いることにした。

(2) 鉄筋降伏区間における局所の $\sigma-\epsilon$ 関係

ひずみ試験体から得られたひずみ分布(図-6参照)をもとに降伏区間での各位置における $\sigma-\epsilon$ 関係を調べた。ひずみ量には実測値を用い、鉄筋応力度には、ひずみ分布を深さ方向に積分してすべり分布を求め、それに図-4図中太線(GM2試験体の表面付近には破線)で与えた $\tau-s$ 関係を適用して τ 分布を求め、これを積分して求めた鉄筋応力度を用いた。その結果を図-7に示す。この推定方法の精度を把握するために、深さ1φについては鉄筋応力度として載荷端応力度を用いたものも併記した(図-7図中●)。

図-7を各載荷パターン毎にみると、鉄筋の深さ方向の各位置における $\sigma-\epsilon$ 関係は載荷端における $\sigma-\epsilon$ 関係に良く一致しており、深さの影響は少ないことが認められる。

載荷履歴の影響については、一方向載荷(M)に比べて交番載荷(R)の場合は、ひずみが減少し、たとえば降伏応力度の1.3倍の応力度では約6割となっている。更に交番載荷でも圧縮力の小さな場合(R)に比べて圧縮力の大きな場合(R')の方が減少の程度が大きい。

(3) 載荷端応力度と拔出し量の関係($\sigma_0-\Delta$ 関係)

図-8にひずみ試験体から得られた $\sigma_0-\Delta$ 関係を示す。載荷履歴の影響が局所の $\tau-s$ 関係及び $\sigma-\epsilon$ 関係では大きかったのに対し、 $\sigma_0-\Delta$ 関係ではさほど顕著ではない。交番載荷によって付着応力度が低下し、ひずみが減少するが、 $\sigma_0-\Delta$ 関係で見ると、それぞれの影響が相殺するように作用していることが分る。

4. 拔出し量に及ぼす $\tau-s$ 関係及び $\sigma-\epsilon$ 関係の影響

(1) 検討方法

$\tau-s$ 関係及び $\sigma-\epsilon$ 関係の影響が、 $\sigma_0-\Delta$ 関係においてどの程度に相殺するかを目安を得るため、 $\tau-s$ 関係及び $\sigma-\epsilon$ 関係を直線の組合せで近似して比較計算を行った。すなわち、直線近似の仮定をすることによって、任意の深さにおける力の釣合い条件とひずみの適合条件から、すべり $s(x)$ に関する2階微分方程式を導くことができる。ここではまず、図-9のような $\tau-s$ 関係と $\sigma-\epsilon$ 関係を仮定してすべり $s(x)$ を次式のように導き、 τ_2 、 k_3 、 E_{s2} の諸定数の変化が拔出し量に及ぼす影響を調べた。

$$0 \leq x \leq x_2; \quad S(x) = \epsilon_y / (2\alpha_2) * \{ \exp(\alpha_2 * x) - \exp(-\alpha_2 * x) \} + S_y$$

$$x_2 \leq x; \quad S(x) = A_1 * \cos(\alpha_3 * x) + A_2 * \sin(\alpha_3 * x) + S_2 + \phi * \tau_2 / (K_3 * \beta)$$

ここに、 x は降伏位置($\epsilon = \epsilon_y$)を原点として上向きに正。

$$\alpha_2 = 4 * K_2 * \beta / (E_{s2} * \phi^2), \quad \alpha_3 = 4 * K_3 * \beta / (E_{s2} * \phi^2)$$

$$K_2 = k_2 * \phi / \beta, \quad K_3 = k_3 * \phi / \beta$$

$$A_1 = -\phi * \tau_2 / (K_3 * \beta) * \cos(\alpha_3 * x_2) - \epsilon_2 / \alpha_3 * \sin(\alpha_3 * x_2)$$

$$A_2 = -\phi * \tau_2 / (K_3 * \beta) * \sin(\alpha_3 * x_2) + \epsilon_2 / \alpha_3 * \cos(\alpha_3 * x_2)$$

$$x_2 = 1 / \alpha_2 * \operatorname{arcsinh} \{ 4 * \tau_2 / (\phi * E_{s2} * \epsilon_y * \alpha_2) \}$$

$$S_2 = S(x_2), \quad \epsilon_2 = \epsilon(x_2)$$

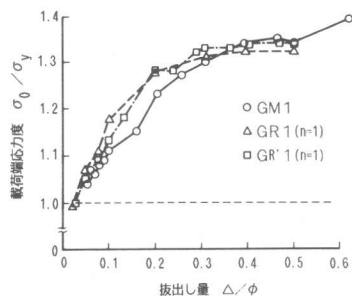


図-8 載荷端応力度と拔出し量の関係

(2) 検討結果

一例として図-10に τ_2 のみを変化させた場合の荷端応力度と拔出量の関係($\sigma_0 - \Delta$ 関係)を実線で、 E_{s2} のみを変化させた場合については破線で示した。また、図-11に τ_2 のみを変化させた場合の付着応力度分布を示した。

τ_2 を小さくして(k_3 を大きくして)、 E_{s2} を大きくすると、それぞれの影響が相殺するように作用する。相殺しあうて $\sigma_0 - \Delta$ 関係が同程度になるときの諸定数の目安は、 τ_2 (k_3)の10 kg/cm²(50 kg/cm²/cm)の変化に対して E_{s2} の10000 kg/cm²(5000 kg/cm²)の変化であった。

その場合、相殺の程度は拔出量の大きさによって若干異なるが、これは τ_2 、 k_3 、 E_{s2} の変化に応じた付着応力度分布の違いがあり、またそれらに応じたひずみ分布の違いとの組合せから理解することができる。

5. 結 論

以上の検討結果をまとめると以下のとおりである。

- 鉄筋の深さ方向の各位置における $\tau - s$ 関係は、鉄筋降伏直後にすべりが急増して付着応力度が急減する。鉄筋の深さ方向の位置の違いによる $\tau - s$ 関係の相違は、荷端履歴の影響に比べて顕著でなく、実用上考慮する必要は無いものと見做せる。荷端履歴の影響については、交番荷重での付着応力度が一方荷重に比べて大きく低下し、約半分になる。
- $\sigma - \epsilon$ 関係についても、鉄筋の深さ方向の位置の違いによる影響は少ない。荷端履歴の影響については、交番荷重ではバウシinger効果により、圧縮力の小さな場合でも一方荷重に比べひずみが減少し、例えば降伏応力度の1.3倍の応力度では一方荷重の場合の約6割になる。さらに、圧縮力の大きな交番荷重の場合は一方荷重に比べて約4割に減少し、交番履歴の影響が大きい。
- 拔出量に及ぼす荷端履歴の影響は、 $\tau - s$ 関係及び $\sigma - \epsilon$ 関係での影響が相殺するように作用するので、少なくなる。
- 拔出量に対して、 $\tau - s$ 関係及び $\sigma - \epsilon$ 関係それぞれの影響がどの程度に相殺するかの目安を、解析的に調べることができた。

6. おわりに

柱筋の拔出しに関係する要因のそれぞれの影響の程度が明らかになった。今後は、荷端履歴の違いによって変化する $\tau - s$ 関係及び $\sigma - \epsilon$ 関係が複合して、拔出量に及ぼす影響を解析的に検討・整理し、拔出量としては荷端履歴によってあまり影響されない特徴を生かして簡便に評価する方法を導くことが考えられる。

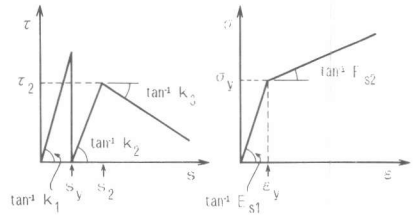


図-9 $\tau - s$ 関係・ $\sigma - \epsilon$ 関係の仮定

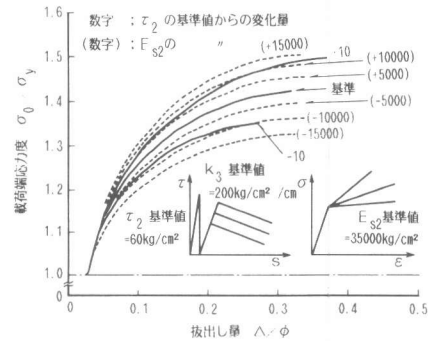


図-10 τ_2 と E_{s2} を変化させた場合の $\sigma_0 - \Delta$ 関係

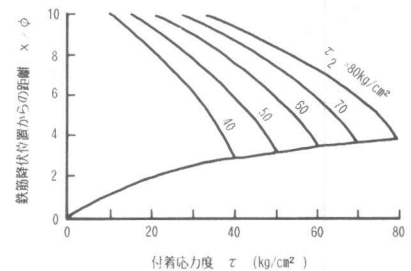


図-11 τ_2 を変化させた場合の付着応力度分布

参考文献

- 1) S. VIJATHANATEPA, E. P. POPOV, V. V. BERTERO; EFFECTS OF GENERALIZED LOADINGS ON BOND OF REINFORCING BARS EMBEDDED IN CONCRETE BLOCKS, REPORT NO. UCB/EERC-79/22, (1979.8)
- 2) 周、シヴァ・スビラマニウム、岡村; 定着板を有する異形鉄筋の付着モデル、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、No. 137, 1984年
- 3) NIWA, CHOU, SHIMA, OKAMURA; Nonlinear Spring Element for Strain-Slip Relationship of a Deformed Bar, SEMINAR OF FINITE ELEMENT ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES, Tokyo, Vol. 2, 1985
- 4) 村山、加藤、橋本; R/C橋脚の地震時変形性能に及ぼす鉄筋配置の影響、第39回土木学会年次学術講演会講演概要集V-173, 1984年
- 5) 加藤、村山、橋本; 定着長の大きい群鉄筋の付着一すべり性状、第39回土木学会年次学術講演会講演概要集V-174, 1984年