

[123] 交番載荷を受ける鉄筋の引抜性状について

正会員 ○出 口 秀 史 (鹿児島大学工学部)

正会員 松 本 進 (鹿児島大学工学部)

1. ま え が き

地震時における鉄筋コンクリート橋脚（以下、RC橋脚と略称）の復元力特性には、主鉄筋のフーチング部からの引抜けによる回転変位が大きく影響することが、これまでの研究から明らかにされてきた。本研究は、RC橋脚のフーチング部の簡単なモデルを作製し、主鉄筋が降伏荷重以上の交番載荷を受ける場合の挙動を明らかにするとともに、交番載荷を受ける鉄筋の引抜量を定量化する方法について報告するものである。

2. 実 験 概 要

2-1 実験供試体および実験装置

実験供試体は、図-1に示すように、断面 $40\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ 、高さ 60 cm のコンクリート躯体の断面中心位置に、異形鉄筋を垂直に埋め込んだものである。鉄筋には、載荷時の歪を測定するために、コンクリート表面上 2 cm の位置、コンクリート表面下 5 cm 、 12.5 cm 、 22.5 cm 、以下 10 cm 間隔に塑性ゲージを貼付してある。実験装置は、鉄筋頭部にロードセルを取付け、 50 t の両動オイルジャッキを用いて交番載荷を行うものである。鉄筋の引抜量測定のために、電気抵抗式変位計を用いた。供試体諸元を表-1に示す。

2-2 載荷方法

載荷方法は、コンクリート表面上 2 cm の位置に貼付した鉄筋歪ゲージによる歪制御とし、鉄筋降伏以前の弾性歪領域では、4段階に分け、 $\pm 500\mu$ 、 $\pm 1000\mu$ 、 $\pm 1500\mu$ 、 $\pm 2000\mu$

の歪値で、引張載荷・圧縮載荷を交互にそれぞれ3回ずつ交番載荷を行った。鉄筋の降伏は引張載荷によって生じさせ、鉄筋降伏後は適宜歪を増加させながら交番載荷を行った。

2-3 測定方法

載荷時における鉄筋の歪を塑性ゲージで測定し、載荷荷重、引抜変位量、コンクリート面上の鉄筋歪値が正しく対応が取れるように注意し、また、交番載荷を受ける鉄筋の応力-歪履歴曲線に対する検討のために、測定データはペンレコーダで記録した。

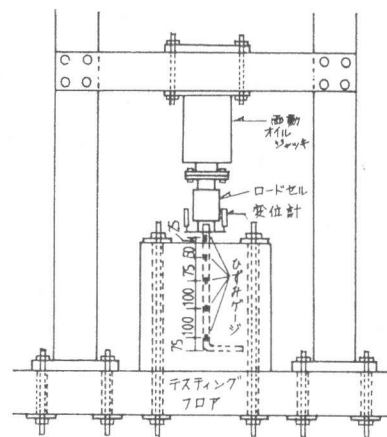


図-1 実験供試体および実験装置

表-1 実験供試体諸元

供試体	鉄筋径	降伏応力 (kg/cm^2)	コンクリート強度 (kg/cm^2)	断面寸法 (cm)	高さ (cm)
No. 1	D 18	4 0 1 7	3 6 2	40×60	60
No. 2	D 16	3 7 7 6	3 6 2	40×60	60
No. 3	D 16	3 7 7 6	3 7 1	40×60	60
No. 4	D 19	4 0 1 4	2 9 2	40×60	60
No. 5	D 19	4 0 1 4	3 7 1	40×60	60
No. 6	D 19	4 0 1 4	4 4 8	40×60	60

3. 実 験 結 果

図-2～図-5は、本実験から得られた鉄筋歪分布、鉄筋応力-歪履歴曲線、鉄筋引抜量の実測値の一例を示し

たものである。

3-1 鉄筋歪挙動

(1) 弾性域歪挙動

図-2は、鉄筋降伏以前の弾性域における歪挙動の一例を示したもので、歪値の小さい領域（100 μ から 200 μ 以下の領域）を除くと、ほぼ直線の分布形状となっている。また、歪値の増大に伴い歪分布の傾きが次第に増加していく傾向が認められ、この傾向は他の供試体についても同様に認められる。

(2) 鉄筋降伏後の歪挙動

図-3は、鉄筋降伏後の交番载荷を受けた鉄筋の歪挙動の一例を示したものである。図に示されるように引張降伏後に圧縮载荷を受けるような場合には、コンクリート表面直下の鉄筋塑性領域では、塑性領域の上部で前回の引張载荷時に受けた引張の残留歪が残っているが、下部では圧縮歪を生じているというように、圧縮载荷時であるにもかかわらず、見かけ上、引張歪と圧縮歪が混在した歪分布挙動を示す。このような歪挙動は、圧縮载荷後の引張载荷時にも現われる。

3-2 鉄筋の応力-歪履歴曲線

上記(2)に示した鉄筋塑性領域の歪挙動は、鉄筋降伏後の交番载荷を受ける場合の鉄筋応力-歪曲線が、単純引張試験より得られる応力-歪曲線と大きく異なることによって生じるものである¹⁾。図-4は、本実験から得られた鉄筋の応力-歪履歴曲線の一例を示したものであり、鉄筋引張降伏後、交番载荷を受けると、明確な降伏点が消失し、いわゆるバウシinger効果呈してラウンディングした応力-歪履歴曲線となる。

3-3 鉄筋の応力-引抜量曲線

図-5は、鉄筋の応力-引抜量の実測曲線の一例を示したものである。応力-引抜量履歴曲線も、鉄筋の応力-歪履歴曲線の影響を強く受けて、応力の増加に伴い引抜量の増加率が大きくなっている^{1) 2)}。

4. 歪エネルギー方法を用いた交番引抜モデル

交番载荷を受ける鉄筋の引抜挙動を把握するためには、フーチング部に埋込まれた鉄筋の歪分布、あるいは、載荷時の歪挙動をできる限り正確にモデル化する必要がある。鉄筋引抜量は、鉄筋の歪分布を鉄筋軸方向に積分したものであり、この鉄筋歪分布を交番载荷のもとでも一義的に決定する方法として、本研究では、鉄筋の単位体積あたりに吸収される歪エネルギー（ $\bar{E}$ ）と、他の諸要因として、コンクリート強度（ σ_c ）、歪分布長（ l ）、鉄筋径（ D ）の間の関係を実験から明らかにした。交番载荷を受ける鉄筋の引抜モデル化を行った。

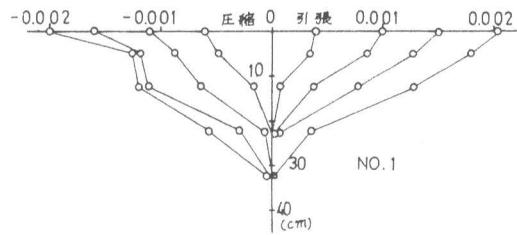


図-2 弾性歪域歪分布挙動

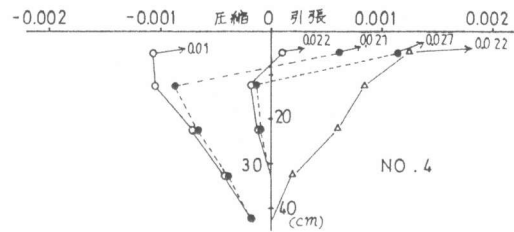


図-3 鉄筋降伏後の歪分布挙動

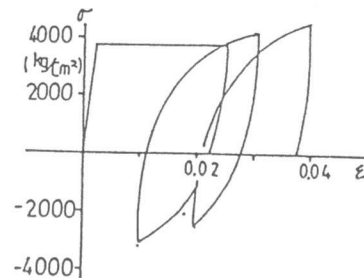


図-4 鉄筋の応力-歪履歴曲線

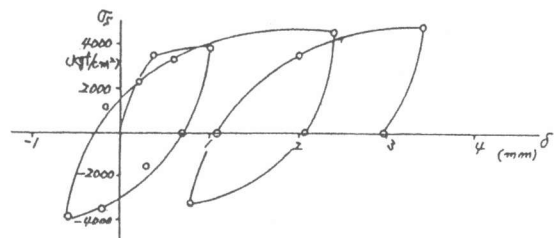


図-5 鉄筋応力-引抜量曲線

4-1 歪エネルギー法の期本概念

$\bar{E}$, σ_c , l , D の間の関係は, 次元解析を行うことにより, 次式のように表わすことができる。

$$\bar{E} / \sigma_c = \phi (l / D) \quad (1)$$

ここで, ϕ は l / D の関数であることを表わす。

4-2 鉄筋降伏以前の弾性歪領域

鉄筋降伏以前の弾性歪領域における鉄筋単位体積あたりの歪エネルギーは次式のようになる。

$$\bar{E}_e = \sigma_s \cdot \epsilon_s / 6 \quad (2)$$

ここで, σ_s は鉄筋応力, ϵ_s は鉄筋歪である。

また, 弾性歪分布長 l_e は, 実験から得られた歪分布形を直線近似し, 回帰直線から求めた。図-6 は, 弾性歪領域における $\bar{E}_e / \sigma_c - l_e / D$ 関係を示したものであり, 回帰分析を行うと, 次式で表わす4次関係となる。

$$\bar{E}_e / \sigma_c = 1.94 \times 10^{-8} (l_e / D)^4 \quad (3)$$

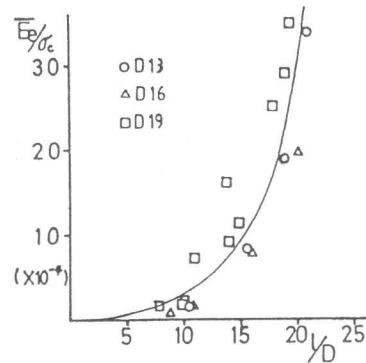


図-6 $\bar{E}_e / \sigma_c - l_e / D$ 曲線

4-3 鉄筋降伏後の塑性歪領域

塑性歪領域の歪エネルギーを計算するためには鉄筋の応力-歪履歴曲線が必要となる。ここでは実験から得られた応力と歪から, 図-7 に示すようにモデル化した。

$$\sigma_s = \epsilon_s / (a + b \cdot \epsilon_s) \quad (4)$$

ただし, ここで σ_s , ϵ_s は荷重の反転点を原点として求めた鉄筋応力および歪である。また, a , b は係数である。図-8 ~ 図-11 は, 鉄筋の応力-歪履歴モデルの係数 a , b と交番繰返し回数 n , 前回受けた塑性歪 ϵ_p との関係を示した一例である。図-8, 図-9 より, 係数 a は, n , ϵ_p とほとんど相関がなく, 定数であると考えられ, 係数 b は n , ϵ_p とほぼ直線関係にある。

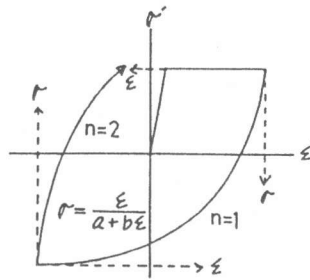


図-7 応力-歪履歴モデル

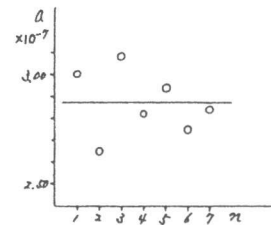


図-8 係数 a と n の関係

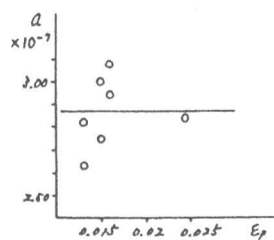


図-9 係数 a と ϵ_p の関係

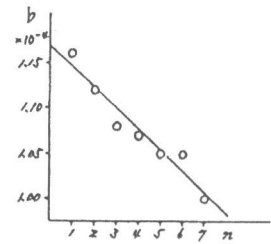


図-10 係数 b と n の関係

塑性歪分布長 l_p は, 鉄筋応力が小さい間は一定値を保ったままであり, さらに大きな荷重が作用して初めて増加する。したがって, ここでは, 前回の載荷時に生じた l_p を増加させる荷重が作用し

新たな塑性歪分布長 l_p となった場合の歪エネルギーを求めた。塑性域の歪エネルギーは, 次式のようになる。

$$\bar{E}_p = \left(\frac{1}{b} - \sigma_0 \right) \cdot (\epsilon_s - \epsilon_0 - \epsilon_y) - \frac{a \{ a + b (\epsilon_0 + \epsilon_y) \}}{b^2 (\epsilon_s - \epsilon_0 - \epsilon_y)} \cdot \left[\frac{a + b \epsilon_s}{a + b (\epsilon_0 + \epsilon_y)} \left\{ \log \frac{a + b \epsilon_s}{a + b (\epsilon_0 + \epsilon_y)} - 1 \right\} + 1 \right] \quad (5)$$

ここで, σ_0 は反転点から求めた最大応力, $\epsilon_0 = \frac{a \sigma_0}{1 - b \sigma_0}$, ϵ_y は鉄筋降伏歪, σ_s は鉄筋応力, ϵ_s は鉄筋歪, a , b は応力-歪履歴曲線モデルの係数である。

図-12 は, このようにして計算した歪エネルギーを用いた $\bar{E}_p / \sigma_c - l_p / D$ 関係を示したものである。図より, 塑性領域では, $\bar{E}_p / \sigma_c - l_p / D$ は, ほぼ直線関係

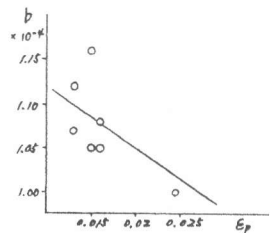


図-11 係数 b と ϵ_p の関係

となり、次式で表わされる。

$$\bar{E}_p / \sigma_c = 4.40 \times 10^{-2} (l_p / D) \quad (6)$$

4-4 歪エネルギーを用いた交番载荷を受ける鉄筋の引抜け解析方法

(1) 鉄筋降伏以前の鉄筋引抜量の算定

鉄筋の引抜量は、歪を分布軸方向に積分すると求められ、弾性領域の歪分長 l_e は(3)式から次式のようになる。

$$l_e = \left\{ (\bar{E}_p / \sigma_c) / 1.94 \times 10^{-8} \right\}^{0.25} \cdot D \quad (7)$$

(7)式に(2)式を代入して

$$l_e = 1.85 \times 10^{-2} (\sigma_s \cdot \epsilon_s / \sigma_c)^{0.25} \cdot D \quad (8)$$

したがって、弾性領域の引抜量は、 $\delta = \epsilon_s \cdot l_e / 2$ より求まる。

(2) 鉄筋降伏後の引抜量の算定

鉄筋降伏後は交番载荷によって、歪分布は前記したように2つの状態を生じる。図-13に示すように、1つは①前回に受けた塑性歪分布長を越えない間の载荷状態と、もう1つは、②塑性歪分布長をさらに増加させる载荷の状態である。①の状態における鉄筋引抜量の算定は、図-14に示すように、塑性領域下方の弾性歪領域における歪の最大値を、鉄筋の最大応力と鉄筋弾性係数から求める。求めた塑性歪と、鉄筋の応力-塑性履歴曲線から求まる実際の塑性歪、前回の塑性歪分布長 l_p から塑性歪領域の引抜量が計算される。また、②の载荷状態における引抜量は、(5)式より計算される歪エネルギーと(6)式より、塑性歪分布長 l_p が決定され、図-14に示すように歪分布形を定めることにより計算される。

以上のようにして算定した鉄筋引抜量と、実測の引抜量との比較の一例を表-2に示す。

5. 結 論

鉄筋コンクリート橋脚のフーチング部をモデル化した供試体を用いて、交番载荷を受ける鉄筋の引抜け性状について実験的に検討を行ったが、鉄筋の吸収する歪エネルギーを計算することによって、鉄筋の引抜量を交番载荷を受ける場合でも、かなり精度よく推定することが可能である。

参考文献

- 1) 出口、松本：エネルギー法による引抜きモデルについて、土木学会西部支部講演概要集 V-18, 1982
- 2) 出口、松本：交番载荷を受ける鉄筋の引抜け性状について、土木学会第89回年次講演会概要集

V-171, 1984

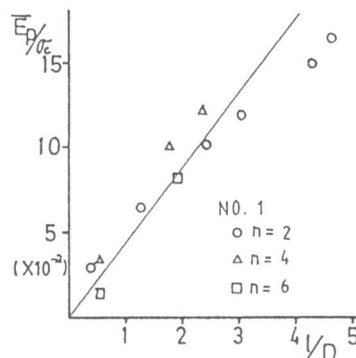


図-12 $\bar{E}_p / \sigma_c - 1/D$ 曲線

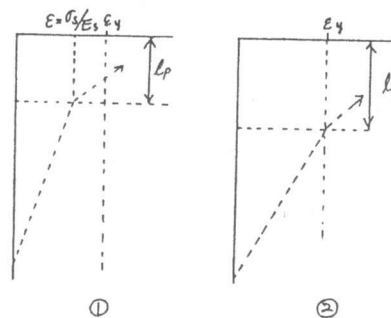


図-13 歪分布の2つの状態

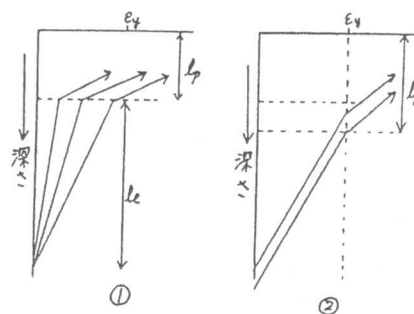


図-14 塑性領域の歪分布形の決定方法

表-2 計算引抜量と実測引抜量との比較

鉄筋歪 (μ)	計算の 引抜量	実測の 引抜量	計算 / 実測	鉄筋歪 (μ)	計算の 引抜量	実測の 引抜量	計算 / 実測
500	0.047	0.056	0.840	4500	0.198	0.170	1.14
1000	0.132	0.124	1.06	5000	0.241	0.221	1.09
1500	0.242	0.234	1.03	5500	0.285	0.263	1.18
2000	0.373	0.340	1.10	6000	0.325	0.298	1.11
				6500	0.359	0.323	1.11
				7500	0.413	0.361	1.14
				8500	0.463	0.407	1.14
				10000	0.524	0.500	1.05
				12000	0.596	0.514	1.16
				14000	0.659	0.645	1.02
				15000	1.04	0.908	1.15
				17000	1.22	1.227	0.994
				18000	1.28	1.341	0.921

(単位は mm)

(単位は mm)