

V—28

曲げと軸力を受ける鉄筋コンクリート部材の塑性挙動について

北海道大学工学部 楠 広行
 北海道大学工学部 正員 佐伯 昇
 北海道大学工学部 中津川 汪

1. まえがき

限界状態設計法における一つの利点は、コンクリートの終局時においてモーメントの再分配を期待することができることにある。偶発時、特に地震荷重によって断面が決定されるようなラーメンなどの不静定構造物の柱および桁に、これを有効に利用することができる。

本研究は曲げモーメントと軸力が作用するコンクリート構造物を対象に取り上げ、引張鉄筋と圧縮鉄筋が同じ対称断面の場合について、鉄筋比および曲げモーメントと軸力の比を変化させて、鉄筋降伏時において数回の繰返しおよび桁を反転させて、圧縮鉄筋が引張鉄筋へと逆に作用する場合の曲げモーメント- 曲率および回転能について実験を行い、モーメント再分配のための基礎的資料を求めたものである。

2. 実験方法

(1) 実験供試体

曲げモーメントと軸力を作用させるために、図-1のような形状の供試体とし、支間中央断面は、 $b=25\text{cm}$ 、 $h=35\text{cm}$ として、鉄筋は対称に配置した。スターラップは 17cm 間隔とし、すべての供試体について同じ間隔とした。供試体端部は 8

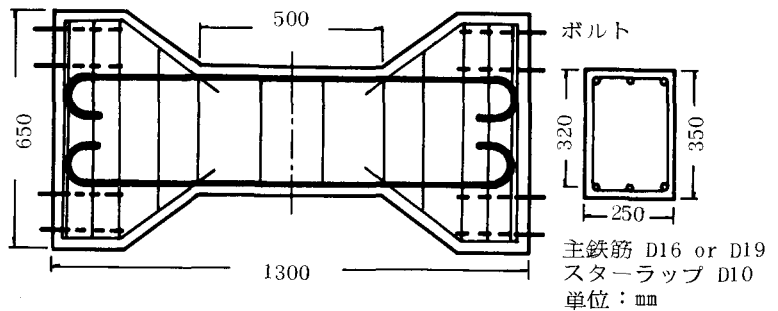


図-1 供試体の寸法、配筋

本のボルトを埋込み、両端に H 鋼を剛結し、H 鋼に

より供試体に曲げモーメントと軸力が作用することができる形状とした。各供試体の鉄筋比および曲げモーメントと軸力の比などの詳細は、表-1に示した。

(2) 材料

セメントは、早強ポルトランドセメント (比重: 3.16 , $f_{28}=442\text{kgf/cm}^2$) を使い、骨材は、細骨材として錦岡海岸砂 (比重: 2.77 , 吸水率: 0.94%)、粗骨材として静内川産川砂利 (比重: 2.75 , 吸水率: 1.04%) を使用した。コンクリートは、AEコンクリートとして目標空気量、スランプをそれぞれ 5% 、 7cm とした。また、目標圧縮強度は 280kgf/cm^2 (材令14日) として配合を決めた。各供試体試験時の $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体の圧縮強度、ヤング係数を表-1に示した。

鉄筋は、SD35の異形棒鋼で主鉄筋 (引張鉄筋、圧縮鉄筋) として、D16とD19を使い、スターラップおよび用心鉄筋にD10を使用した。鉄筋の応力- ひずみ曲線 (鉄筋の引張試験により求めた) は、図-2に示した。鉄筋とコンクリートのヤング係数比 $n=7$ とした。

(3) 载荷方法

载荷方法は、供試体に剛結された2本のH鋼の間に油圧ジャッキを取付け、互いのH鋼を引張ることに

よって、供試体に曲げモーメントと軸力が一定の比で載荷されるように行った。載荷の方法としては、引張鉄筋が降伏し、ひずみの値で0.02(鉄筋がひずみ硬化し始める程度)まで載荷し、その後ただちに除荷した。これを3回繰返した後に供試体をH鋼から取外し、反転(例えば、今までの圧縮鉄筋が引張となるように)して、反転前と同様の載荷の繰返しを行い、最終的に曲げ破壊させた。載荷は、手動油圧センターホールジャッキを使用し、ロードセルにより荷重を記録した。

鉄筋のひずみは、引張および圧縮の各主鉄筋の中央部分に大ひずみゲージを取付け、反転前後で連続的に測定し、支間中央のたわみは、TCLによって記録した。

3. 降伏および終局モーメント、塑性回転角、曲率の算出

(1) 降伏および終局モーメント (M_y, M_u)

降伏・終局の各々のモーメントは断面の中心での曲げモーメントとした。降伏モーメント M_y は、鉄筋の降伏点応力 $f_{sy} = 3700 \text{ ㎍}$ 、ヤング係数 $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ ㎍}$ を用いて、一般的な算定式により計算した。終局モーメント M_u の計算には、断面の応力状態を図-3のように仮定して、コンクリートの終局ひずみ $\epsilon_{cu} = 0.0035$ 、鉄筋の圧縮ヤング

係数は実験により求めた $E'_s =$

$1.91 \times 10^6 \text{ ㎍}$ を用いた。鉄筋のひずみ硬化後の応力-ひずみ曲線は、鉄筋のひずみが 2%と 5%の値を通る直線 ($f_s = 39790\epsilon_s + 2885$) と仮定した。鉄筋断面積の値は、両者ともに公称断面積を用いた。

降伏モーメントの試験値は、鉄筋の引張ひずみ $\epsilon_s = 0.0022$ をめどとし、終局モーメントの試験値は最大モーメントの値とした。

(2) 塑性回転角 (θ_{tu})

塑性回転角 θ_{tu} の計算には、支間中央のたわみを用いた。供試体反転後の典型的な支間中央のモーメント-たわみ曲線は、図-4のようになり、塑性変形による支間中央のたわみ δp は、測定される実際のたわみから STATE II の状態によると想定されるたわみを引いたものとした。(図-4の中で、 δr は、

表-1 各供試体の鉄筋比、圧縮強度、ヤング係数

Test No.	鉄筋比 $p=p'$ (%)	M/N	圧縮強度 ㎍	ヤング係数 ㎍
I-01	0.496 (D16×2)	1.9	265	264
02	0.745 (D16×3)		253	245
03	0.993 (D16×4)		281	265
04	1.213 (D16×2, D19×2)		263	259
II-05	0.496 (D16×2)	1.0	261	245
06	0.745 (D16×3)		267	273
07	0.993 (D16×4)		281	256
08	1.213 (D16×2, D19×2)		256	228

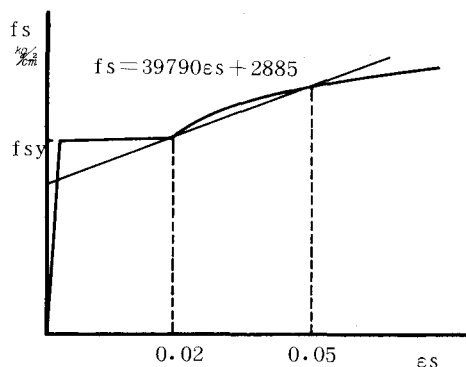


図-2 鉄筋の応力-ひずみ曲線

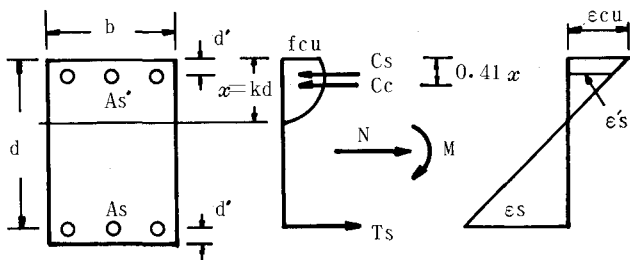


図-3 終局時の断面の応力状態

反転後のため桁軸が逆に変形し残留たわみがあり、反転後に荷重をかけて桁軸が元に戻るために必要な変形とみなされる) 塑性回転角 θ_{tu} は、支間 L_t とすると

$$\theta_{tu} = \tan^{-1} (\delta_p / (L_t / 2))$$

という式から算定される。

(3) 曲率 (φ)

曲率 φ は、鉄筋の引張りひずみ ϵ_s を用いて、次式より算定した。

$$\varphi = (\epsilon_s - \epsilon'_s) / d^*$$

ここで、引張りひずみを正、圧縮ひずみを負とし、 d^* は引張・圧縮鉄筋間の距離である。

また、鉄筋のひずみが、反転前後で連続的に測定されているので曲率の値も同様に連続的に算出できる。

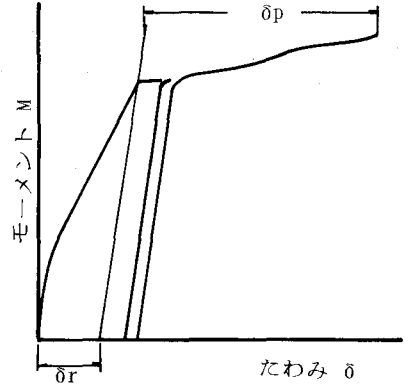


図-4 供試体反転後のモーメント-たわみ曲線

4. 結果および考察

(1) 降伏モーメント M_y および終局モーメント M_u の試験値、計算値は、表-2 に示した。ただし、降伏モーメントの値は、反転前の値である。

降伏モーメントについては、試験値 $M_y(\text{test})$ と計算値 $M_y(\text{cal})$ の比 ($M_y(\text{test}) / M_y(\text{cal})$) は、平均で1.032、終局モーメントについては、試験値 $M_u(\text{test})$ と計算値 $M_u(\text{cal})$ の比 ($M_u(\text{test}) / M_u(\text{cal})$) は、平均で1.058である。両者ともに、試験値と計算値が比較的一致していると思われる。

表-2 各供試体の試験結果

TestNo.	$M_{y,\text{test}}$ ton·m	$M_{y,\text{cal}}$ ton·m	$M_{y,\text{test}} / M_{y,\text{cal}}$	$M_{u,\text{test}}$ ton·m	$M_{u,\text{cal}}$ ton·m	$M_{u,\text{test}} / M_{u,\text{cal}}$	k_u	$1 / k_u$	θ_{tu}
I-01	5.200	4.696	1.107	5.320	5.473	0.972	0.1041	9.861	0.0241
02	7.030	6.965	1.009	8.835	7.649	1.155	0.1183	8.454	0.0399
03	9.500	9.915	1.033	10.735	9.968	1.077	0.1253	7.981	0.0273
04	11.400	11.165	1.021	12.683	11.781	1.077	0.1357	7.358	0.0181
II-05	5.250	5.059	1.038	5.900	5.761	1.024	0.1086	9.210	0.0201
06	8.050	7.475	1.077	8.500	8.153	1.043	0.1246	8.027	0.0246
07	9.500	9.851	0.964	11.250	10.520	1.069	0.1351	7.402	0.0221
08	12.000	11.951	1.004	13.000	12.421	1.047	0.1483	6.741	0.0211

(2) 塑性回転角 θ_{tu} の値は、終局時の中立軸比 $K_u (x / d)$ およびその逆数 $1 / K_u$ とともに表-2 に示した。これによると、 θ_{tu} と $1 / K_u$ の関係は CEB-FIP 規定と比べて小さくなっている傾向があり、軸力のない他の単純桁などの実験では、CEB-FIP 規定と比べて、大きくなっている。その違いは軸力の影響あるいはコンクリートの終局ひずみなどに差異が生ずるためと考えられる。

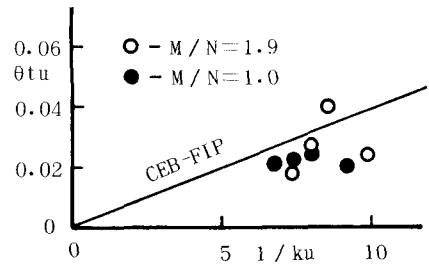


図-5 θ_{tu} と $1 / k_u$ の関係

(3) 曲率については、
 $M/N=1.0, 1.9$ の場合のモーメント-曲率の関係を図-6に示した。まず、鉄筋比一定の場合、 $M/N=1.9$ の方が 1.0 のときよりも終局時の曲率は大きくなっている。また、 M/N 一定の場合、鉄筋比との関係では、 0.8% の鉄筋比の付近で終局時の曲率が最大となっている傾向を示した。

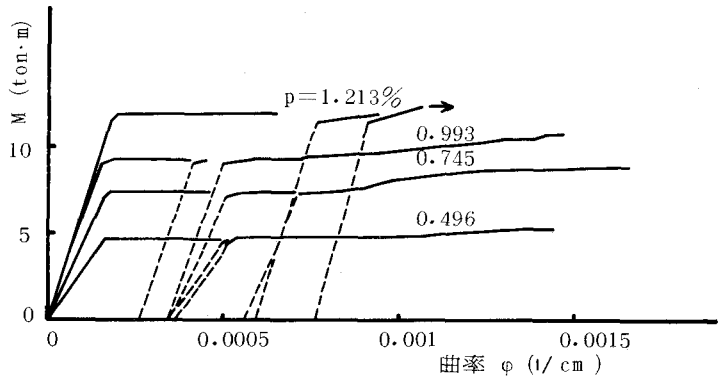


図-6 (a) 供試体反転後のモーメント-曲率曲線 ($M/N=1.9$)

5. まとめ

1. 降伏モーメントの試験値は、 $M/N=1.0, 1.9$ および鉄筋比 $0.496 \sim 1.213\%$ の範囲で、
 $M_y(\text{test})/M_y(\text{cal})$ が $0.964 \sim 1.107$ の範囲にあり、平均 1.032 で、算定式とほとんど一致した。

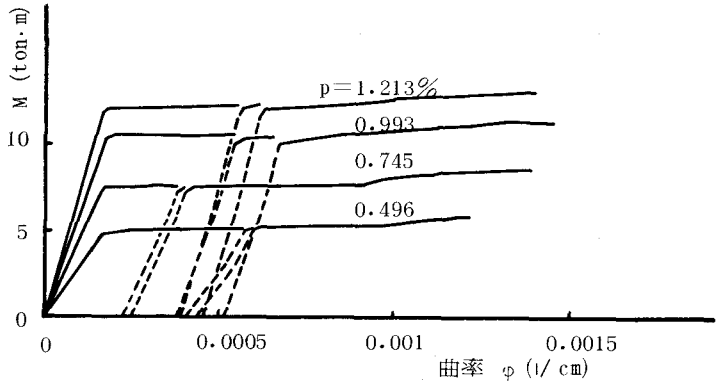


図-6 (b) 供試体反転後のモーメント-曲率曲線 ($M/N=1.0$)

2. 終局モーメントの試験値は、コンクリート終局ひずみ $\epsilon_{cu}=0.0035$ 、鉄筋のひずみはひずみ硬化後の式を仮定する

ことで、 $M/N=1.0, 1.9$ および鉄筋比 $0.496 \sim 1.213\%$ の範囲で、 $M_u(\text{test})/M_u(\text{cal})$ が、 $0.972 \sim 1.155$ (平均 1.058) となり算定上の仮定が有効であり、計算値との比較的良好一致を得た。

3. 曲率は、 M/N の値が大きいくほど終局時の曲率は大きくなり、鉄筋比 $0.496 \sim 1.213\%$ の範囲では、 0.8% 前後の値で最大となる傾向を示していた。

4. 軸力を受ける終局時の塑性回転角は、終局時の中立軸比の逆数との関係で表わすと、CEB-FIP規定より小さくされており塑性回転角の算定には軸力の影響あるいはコンクリート終局ひずみに対する考慮の余地が残されている。

参考文献

- 1) Alan H. Mattock, "ROTATIONAL CAPACITY OF HINGING REGIONS IN REINFORCED CONCRETE BEAMS", FLEXURAL MECHANICS OF REINFORCED CONCRETE, ACI-ASCE, 1964
- 2) CEB-FIP MODEL CODE 1978