

# RC 部材の曲げモーメント—曲率—軸力関係について

張 恒平・青木 徹彦・猪股 俊司

## On M— $\phi$ —P Relationship on RC Members

Zhang Hen Ping, Tetsuhiko AOKI and Shunji INOMATA

It is necessary to prepare Moment-Curvature (M— $\phi$ ) relationship for the analysis of ultimate strength and rotational capacity of reinforced concrete (RC) members. Since no appropriate figures and tables have not yet been available in use to obtain this M— $\phi$  relationship, computational efforts are required to analyze complicated stress distributions in members, by taking non-linear stress-strain relationships of concrete and steel bars into account. It has been known that in addition to these material nonlinearity, cross sectional area ratio of steel bars to concrete body, compressive strength of concrete and arrangement of steel bars also have great influences on the characteristics of M— $\phi$  relationships.

This paper concerns with parametric analysis for M— $\phi$  relationships for RC beam members and M— $\phi$ —P curves for RC columns.

### 1. はじめに

本研究は鉄筋コンクリート (RC) 部材 (はり, 柱) の弾塑性曲げ挙動を明らかにするための基礎的研究として, 曲げ—曲率 (M— $\phi$ ) 関係および曲げ—曲率—軸力 (M— $\phi$ —P) 関係を調べたものである。

RC 部材の M— $\phi$  関係を知るためには, コンクリートおよび鉄筋の応力—ひずみ関係が必要であり, これらのデータには当研究室で過去に行われた実験結果<sup>1)</sup>を利用する。実験データにはバラツキがみられたので, これらが M— $\phi$  関係に及ぼす影響も調べる。また, 単鉄筋, 複鉄筋の別, コンクリート強度, 鉄筋比などのパラメータを変えて計算する。

### 2. 曲げモーメント—曲率 (M— $\phi$ ) 関係

#### 2-1 材料試験

##### (a) コンクリート圧縮試験

円柱供試体 (直径10cm, 高さ20cm, 材令28日) 14本を用いた。圧縮試験<sup>12)</sup>による応力—ひずみ関係を図1に示す。同図から, 実験結果には大きなばらつきがあることがわかる。これらの1本ごとの曲線に対して, 図2(a)に示す近似曲線をあてはめ, 図中の  $\sigma_{cy}$  (最大応力),  $\epsilon_{cy}$  (最大応力時のひずみ),  $\epsilon_{cu}$ ,  $\epsilon_{co}$  を求めた。

これらの平均値  $m$ , 標準偏差  $s$  を表1に示す, 変動係数 ( $\omega = s/m$ ) は  $\sigma_{cy}$  では6.5%と大きかった。

##### (b) 鉄筋の引張り試験

異形鉄筋 SD35 (公称降伏強度3500kg/cm<sup>2</sup>以上) 12本に対

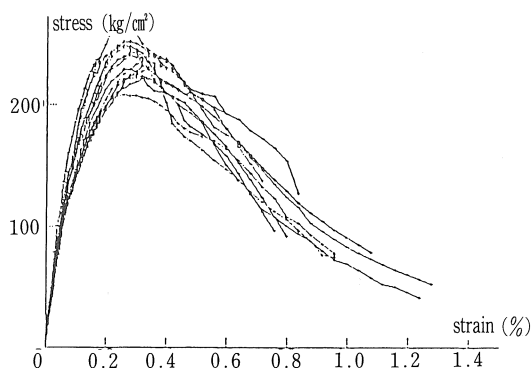


図1 コンクリート円柱供試体圧縮実験結果

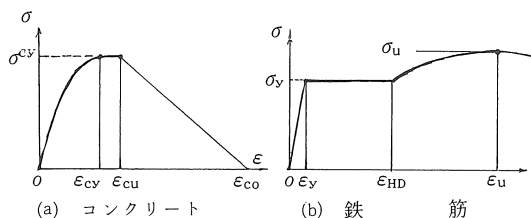


図2 応力—ひずみ近似曲線

表1 コンクリートの材料強度定数 (変動係数)

	$\sigma_{cy}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )		
		$\epsilon_{cy}$	$\epsilon_{cu}$	$\epsilon_{co}$
(m)	230.0	2.32	3.06	13.8
(s)	15.0 (6.5%)	0.15	0.08	0.4

( $\omega = s/m$ : 変動係数)

表 2 鉄筋の材料強度定数 (変動係数)

	$\sigma_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )		
			$\epsilon_y$	$\epsilon_{HD}$	$\epsilon_u$
(m)	3957	5342	1.89	18.5	66.3
(s)	98(2.4%)	99(1.8%)	0.05	0.0	0.0

する実験結果から、図 2 (b)に示す  $\sigma_y$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_{HD}$ ,  $\sigma_u$ ,  $\epsilon_u$  の各値を求めると、表 2 に示す平均値および標準偏差が得られた。変動係数は  $\sigma_y$  で 2.4%,  $\sigma_u$  で 1.8% であった

以上より、コンクリート強度  $\sigma_{cy}$  の変動係数は鉄筋強度  $\sigma_y$  の変動係数の約 2.7 倍も大きい値であった。

2-2 M- $\phi$  関係の計算

(a) 計算断面

計算に用いた RC 部材断面を図 3 に示す。図 3 (a) は RC はり曲げ実験<sup>12)</sup>に用いた供試体断面であり、上側鉄筋断面積  $AS_2=2.43\text{cm}^2$ , 下側鉄筋は  $AS_1=3.65\text{cm}^2$  である。図 3 (b) は上下の鉄筋断面積が同じ複鉄筋断面であり、図 3 (a) の上下鉄筋断面積の平均値  $AS=(AS_1+AS_2)/2$  を与えた。図 3 (c) は単鉄筋はり断面であり、図 3 (b) の上側鉄筋を取去ったものである。これら 3 種類のコンクリート断面積 ( $B=14\text{cm}$ ,  $H=20\text{cm}$ ) はすべて等しく、鉄筋位置も同じである。

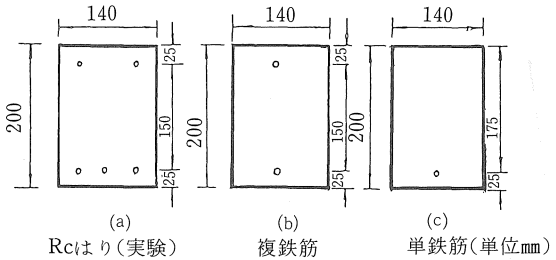


図 3 RC はり断面 (実験及び計算)

(b) 計算方法

計算にはコンクリートの断面内で平面保持の仮定が成立つとし、はじめに曲率  $\phi$  を仮定し、次に圧縮縁ひずみ  $\epsilon_2$  を仮定して軸方向合応力  $P$  を計算し、これが 0 となるように  $\epsilon_2$  を試行的に求めた。

2-3 計算結果

(a) はりの曲げ実験結果との比較

図 3 (a) に示す断面の RC はりに対する  $M-\phi$  曲線の計算結果を図 4 に示す。図中の  $m$  および  $m \pm 2s$  は、表 1 の材料強度データの平均値  $m$  および標準偏差  $s$  より材料強度定数の  $m$  および  $m \pm 2s$  の値を求めそれぞれの  $M-\phi$  計算を行った結果を表している。また、図中の黒丸印は、このはりに対する 2 点荷重曲げ試験結果<sup>12)</sup>を表してい

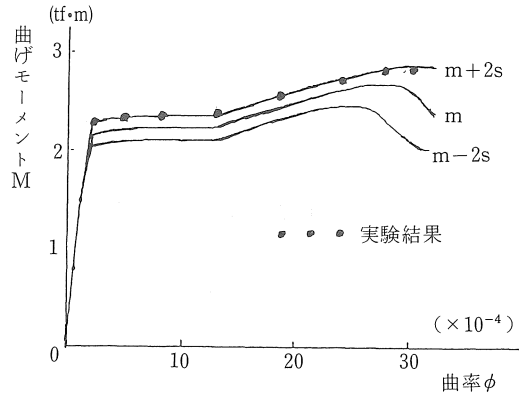


図 4 M- $\phi$  計算値と実験結果

る。両者の比較より、実験結果は計算値の  $m \pm 2s$  曲線にはほぼ一致している。これは実験に用いた RC はりに 7 cm 間隔でスターラップ ( $\phi 6$  mm) が配置されており、はり内部のコンクリート圧縮強度が増加したことによるものと思われる。

(b) 材料強度定数の変動の影響

図 5 は、(1)コンクリートと材料強度のみを  $m \pm 2s$  とした場合、(2)鉄筋強度のみを  $m \pm 2s$  とした場合、(3)両者を同時に変動させた場合の結果を示している。この図より実験に用いたはり断面では、鉄筋の引張り強度の変動の影響が大きいことがわかる。これは、表 1, 2 に示したコンクリートおよび鉄筋の強度の変動係数の値から予想される結果とは逆の結果であった。この理由は、実験に用いた断面ではコンクリート強度に比べて鉄筋の引張り降伏強度が小さく、鉄筋の降伏が早期に生じたために、 $M-\phi$  曲線自体が鉄筋の性質を表しているためと思われる。もし、もっと鉄筋量が多いか、高強度のコンクリートを用いれば、コンクリートの材料強度のばらつきが  $M-\phi$  曲線上に現れるものと思われる。

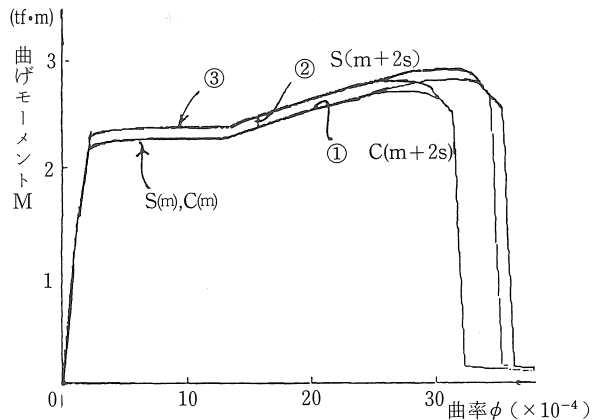


図 5 材料強度定数の変動による  $M-\phi$  曲線の変動

(c) 単鉄筋および複鉄筋はりにおける  $\sigma_{cy}$  変動

図 6 は単鉄筋はりおよび複鉄筋はりのおのおのに対して、コンクリート強度  $\sigma_{cy}$  を平均値  $m$  および  $0.5m, 1.5m$  の 3 通りにかえて、 $M-\phi$  曲線を求めた図である。複鉄筋はりでは、 $\sigma_{cy}$  の変動によって、曲げモーメントの値に大きな変動がみられないにもかかわらず、単鉄筋はりでは、伸び能力(じん性)が著しく変化し、コンクリート強度が小さい場合には、強度、伸び変形とも減少することがわかる。このことから、複鉄筋コンクリートはりにおける鉄筋は、コンクリートの引張り抵抗力を補うばかりでなく、圧縮鉄筋が伸び変形に大きく寄与していることがわかる。 $\sigma_{cy}$  に平均値を用いた場合、降伏モーメントは単鉄筋、複鉄筋とも変わらないものの、 $\phi$  が  $20 \times 10^{-4}$  (1/cm) 以上の領域後の伸びに大きな差が現れている。

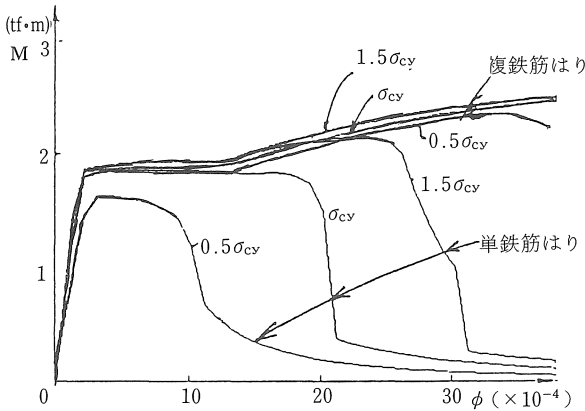


図 6 コンクリート強度変動とはり  $M-\phi$  変動

(d) 材料強度の変動と単鉄筋および複鉄筋はりの挙動

図 7 はコンクリートおよび鉄筋の両材料強度の実験値の平均値 ( $m$ )  $\pm 2s$  ( $s$  = 標準偏差) を用いて、単鉄筋および複鉄筋はりの  $M-\phi$  関係を求めたものである。降伏モ

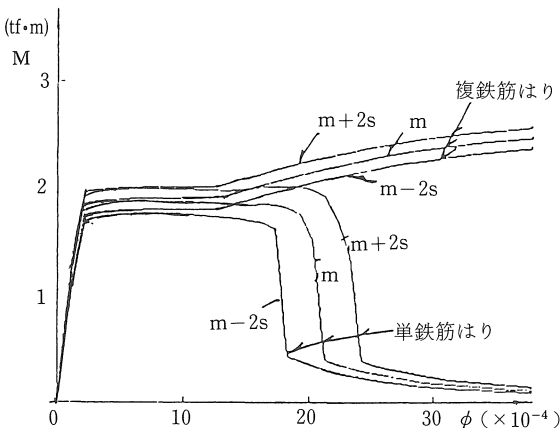


図 7 材料強度変動とはりの  $M-\phi$  変動

メントについては、単鉄筋も複鉄筋も変わりなく、図 5 で示したように主に鉄筋強度のばらつきの影響を受けている。しかし、伸び能力に関しては、 $\phi = 25 \times 10^{-4}$  (1/cm) 付近で単鉄筋の方が低下し、またばらつきも大きい。

3. 曲げ—曲率—軸力 ( $M-\phi-P$ ) の計算

3-1 計算方法

コンクリート断面に軸力  $P$  が入った場合の曲げモーメント ( $M$ )—曲率 ( $\phi$ ) 関係の計算手順は、軸力がない場合と同じであり、断面内の合応力 ( $N$ ) が、与えられた軸力 ( $P$ ) に等しくなるように繰り返し計算を行う。

3-2 計算結果

基準軸力  $P_0$  を次式で与えた。

$$P_0 = b \cdot h \cdot \sigma_{cy} + E_s \cdot (AS_1 + AS_2) \cdot \epsilon_c$$

ここに  $b \cdot h$  はコンクリートはり断面幅および高さ、 $\sigma_{cy}$  はコンクリート圧縮強度、 $E_s$  は鉄筋のヤング係数、 $AS_1, AS_2$  は鉄筋断面積、 $\epsilon_c$  はコンクリート最大応力のひずみである。軸力  $P$  として、 $P = 0.1P_0, 0.2P_0, 0.3P_0$  の 3 種を与えて  $M-\phi$  曲線を計算したところ、図 8 の結果が得られた。同図中には、比較のために  $P = 0$  の  $M-\phi$  曲線も示してある。これらの計算結果からわかるように、軸力  $P$  が小さいときは、 $P = 0$  の場合より  $M$  は上昇するが、伸び変形(じん性)は低下する。軸力がさらに大きくなり、 $P = 0.2P_0$  のときには  $M$  の最大値は  $P = 0.1P_0$  の場合とほぼ同じであるが、伸び能力 ( $\phi$ ) が著しく小さくなり、わずかの曲率の増大で曲げ耐力が低下している。このような部材を柱のような圧縮材に用いた場合、わずかにたわんだだけで、柱の耐力が急速に失われる恐れがある。

$P = 0.3P_0$  では、抵抗モーメントははじめから負であり、本計算例に用いたはり部材ではもはや圧縮部材として用いることができないものと思われる。

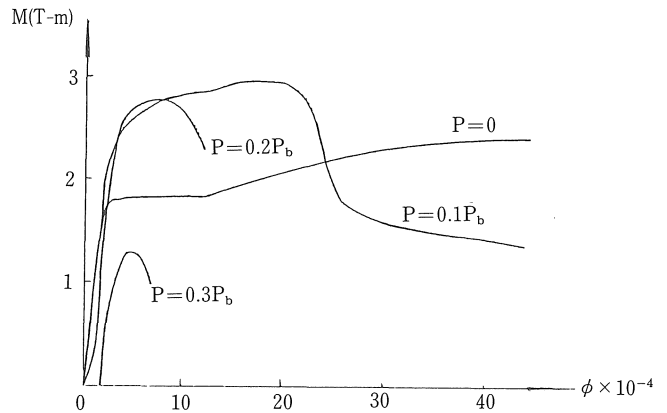


図 8 曲げ—曲率—軸力関係計算結果

#### 4. まとめ

本研究は鉄筋コンクリートはり、および柱の弾塑性荷重-変形性能を調べる基礎として、曲げモーメント-曲率( $M-\phi$ )関係、および曲げモーメント-曲率-軸力( $M-\phi-P$ )関係を数値解析的に求めたものである。研究の結果、つぎのようなことが明らかになった。

(1) 複鉄筋の計算結果と実験結果の比較より、圧縮供試体の応力-ひずみ関係をそのまま用いると、 $M-\phi$ 曲線の形状は同じであるものの計算値によるMの値は低下する。

これは実験はりにはスターラップ(補強鉄筋)が入っているために、コンクリートの圧縮強度が増加するためであり、より精度の高い数値計算結果を得るためには、スターラップによる影響を考慮する必要がある。

(2) 鉄筋コンクリートはりの $M-\phi$ 曲線はコンクリート圧縮強度、鉄筋引張り強度および断面の鉄筋位置などのパラメーターを変えることによって著しく変動する場合がある。ことに単鉄筋はりでは材料強度の変動によって伸び能力の変動が大きく現れる。

(3) 今回実験供試体で用いたような引張り鉄筋降伏型の $M-\phi$ 曲線では、コンクリート強度のバラツキが大き

くても、あまり影響はなく、鉄筋の $\sigma_y$ のばらつきに支配される。しかしながら、もし鉄筋断面積が大きく、コンクリートの圧縮破壊型曲げ実験を行ったならば、コンクリート強度のバラツキの影響を大きく受けるものと思われる。

(4)  $M-\phi-P$ 曲線の計算結果より、軸力Pの存在は曲げ変形能力(じん性)に大きな影響を及ぼし、ある軸力以上では急速に抵抗モーメントが低下し、じん性も失なわれるという結果が得られた。

(5) 今後は、さらにいくつかの実験データを加えて、RCはり、柱の強度特性を明らかにする必要がある。

#### 参考文献

- 1) 加藤真澄：RC連続ばりの終局耐荷力に関する基礎的研究，愛知工大，修士論文
- 2) 加藤真澄・青木徹彦・不破昭・猪股俊司：RC連続ばりの終局耐荷力実験，土木学会中部支部研究発表会，昭和60年3月8日
- 3) 池田尚治ほか：鉄筋コンクリートの力学，土木学会編，新体系土木工学，技報堂，昭和57年11月20日  
(受理 昭和61年1月25日)