

岐阜大学 正会員 ○ 六郷 恵哲  
 岐阜大学 正会員 岩瀬 裕之  
 岐阜大学 正会員 小柳 治

### 1. まえがき

曲げを受けるRCはりの終局状態を考えた場合、引張鉄筋比 $p$ を高くすると引張鉄筋の降伏が生じなくなり、逆に引張鉄筋比 $p$ を小さくすると最終的に引張鉄筋の破断が生じる。引張鉄筋の降伏変形は十分生じさせるか破断は生じさせないようなある範囲内に引張鉄筋比を制限することにより、RCはりの曲げ靱性を考慮した設計が可能となる。本研究においては、引張鉄筋の降伏が生じなくなる限界(最小)の引張鉄筋比を降伏限界鉄筋比 $p_y$ とし、引張鉄筋の破断が生じる限界(最大)の引張鉄筋比を破断限界鉄筋比 $p_u$ とし、これらの限界鉄筋比におよぼすコンクリートの圧縮靱性(応力ひずみ曲線下の面積)の影響について検討した。なお、引張鉄筋比に上下限を設けることによりRCはりの靱性を確保する考え方はACI439委員会により提案されているか<sup>1)</sup>、本研究においては、コンクリートの圧縮強度と圧縮ひずみに代って圧縮靱性を用いる合理的な上下限の算定式を提案した。

### 2. 降伏終了点

RCはりのモーメント曲率関係(あるいは荷重変位関係)は、曲げひびわれ発生点、引張鉄筋の降伏開始点、最大耐力点、引張鉄筋の降伏終了点、引張鉄筋の破断点などで特徴づけられる。引張鉄筋の降伏終了点とは、引張鉄筋に除荷が生じ降伏が終了する点である。引張鉄筋の降伏終了点における引張鉄筋の応力 $\sigma_r$ とひずみ $\epsilon_{sr}$ 、左らに上縁コンクリートの応力 $\sigma_{cr}$ とひずみ $\epsilon_{cr}$ は次のように表わされる<sup>2)</sup>。

$$\sigma_r = \sigma_y \cdots (1), \quad \epsilon_{sr} = S(\epsilon_{cr}) / \{ p\sigma_y - p'\sigma_y' + N/(bd) \} - \epsilon_{cr} \cdots (2), \quad \sigma_{cr} = p\sigma_y - p'\sigma_y' + N/(bd) \cdots (3)$$

$\epsilon_{cr}$ : コンクリートの応力ひずみ曲線の下降域において応力が $\sigma_{cr}$ となる点のひずみ(図-1参照)

ここに、 $p, p'$ は引張および圧縮鉄筋比、 $\sigma_y, \sigma_y'$ は引張および圧縮鉄筋の降伏強度、 $b, d$ ははり断面の幅および有効高さ、 $N$ は軸圧縮力である。 $S(\epsilon_{cr})$ は図-1に示すように、コンクリートの応力ひずみ曲線においてひずみ $\epsilon_{cr}$ にいたるまでの応力ひずみ曲線下の面積である。

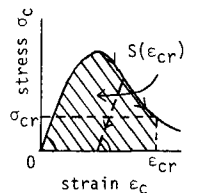


図-1 コンクリートの  
応力ひずみ曲線

### 3. 限界鉄筋比

(a) 降伏限界鉄筋比  $p_y$   $p_y$ は引張鉄筋の降伏開始点と降伏終了点とが一致する場合の鉄筋比と考えることとせず、(2)式で与えられた降伏終了点における引張鉄筋ひずみ $\epsilon_{sr}$ を降伏ひずみ $\epsilon_{sy}$ と置くことにより求められる。

$$p_y = \{ S(\epsilon_{cr}) / (\epsilon_{sy} + \epsilon_{cr}) + p'\sigma_y' - N/(bd) \} / \sigma_y \cdots (4)$$

上式に含まれる上縁コンクリートひずみ $\epsilon_{cr}$ は(3)式を介して引張鉄筋の割合となるため、降伏限界鉄筋比 $p_y$ の算定にあたっては、(3)(4)式を用いて簡単な収束計算を行うことになる。 $p'=0, N'=0$ の場合には、次式となる。

$$p_y = S(\epsilon_{cr}) / \{ (\epsilon_{sy} + \epsilon_{cr}) \sigma_y \} \cdots (5)$$

従来用いられている終局状態におけるフリー鉄筋比 $p_0$ は、引張鉄筋の降伏とコンクリートの圧壊とが同時に生ずる時の引張鉄筋比と定義され、 $p'=0, N'=0$ の場合次式で与えられる。

$$p_0 = \overline{\sigma_c} \epsilon_{cu} / \{ (\epsilon_{sy} + \epsilon_{cr}) \sigma_y \} \cdots (6)$$

ここに、 $\overline{\sigma_c}$ ははり圧縮域のコンクリートの平均圧縮応力、 $\epsilon_{cu}$ はコンクリートの圧壊ひずみである。

RCはりの曲げ破壊過程において、はり上縁コンクリートの圧壊点は実験上必ずしも明確に定めうる点ではないにもかかわらず、フリー鉄筋比 $p_0$ を求めるためにはコンクリートの圧壊ひずみ $\epsilon_{cu}$ の値を決めなければならぬ点に問題がある。例えば鋼繊維補強コンクリートの $\epsilon_{cu}$ をいくらにすればよいか定説はない。これに対し、降伏限界鉄筋比 $p_y$ の算定においては、引張鉄筋が降伏するかどうかのみを判定しているためコンクリートの圧壊ひず

み  $\epsilon_{cu}$  を決める必要がなく、しかもコンクリートの材料特性としての圧縮靱性を直接反映させることができる。

(b)破断限界鉄筋比  $p_f$   $p_f$  は引張鉄筋の降伏終了点と破断点とが一致する場合の鉄筋比と考えることができ、

(c)式において  $\epsilon_{sr}$  を引張鉄筋の破断ひずみ  $\epsilon_{sf}$  とおくことにより、次式で与えられる。

$$p_f = \{ S(\epsilon_{cr}) / (\epsilon_{sf} + \epsilon_{cr}) + p' \sigma_y' - N' / (bd) \} / \sigma_y \quad \cdots \cdots (7)$$

$p' = 0, N' = 0$  の場合には次式となる。

$$p_f = S(\epsilon_{cr}) / \{ (\epsilon_{sf} + \epsilon_{cr}) \sigma_y \} \quad \cdots \cdots (8)$$

降伏限界鉄筋比  $p_y$  ならびに破断限界鉄筋比  $p_f$  は、コンクリートの圧縮靱性  $S(\epsilon_{cr})$  ならびに圧縮鉄筋比  $p'$  が大となると増大し、軸圧縮力  $N'$  が大となると減少することから、(4),(7) 式よりみえる。

#### 4. 計算例

コンクリートの応力ひずみ曲線は、図-2 (a)~(d) に示す4種類とする。(a)は普通コンクリート、(b),(c)は鋼繊維補強コンクリート、(d)は高強度コンクリートをそれぞれ想定したものである。鉄筋の応力ひずみ曲線は、ひずみ硬化を無視した弾塑性体のものとし、降伏強度  $\sigma_y = 400 \text{ MPa}$ 、ヤング係数  $E_s = 200 \text{ GPa}$ 、降伏ひずみ  $\epsilon_{sy} = 0.002$ 、破断ひずみ  $\epsilon_{sf} = 0.12$  とする。簡単のため圧縮鉄筋比  $p' = 0$ 、軸圧縮力  $N' = 0$  とする。

上記の条件のもとに、降伏限界鉄筋比  $p_y$ 、破断限界鉄筋比  $p_f$ 、ならびにコンクリートの圧縮ひずみ  $\epsilon_{cu} = 0.0035$  とした場合のつりあい鉄筋比  $p_o$  を、それぞれ(5),(8),(6)式で計算し、表-1に示す。また、 $p_y$  と  $p_f$  のそれぞれに対応する引張鉄筋の降伏時と破断時のコンクリートひずみ  $\epsilon_{cy}, \epsilon_{cf}$  を図-2に示す。

図-2 (d) の荷重変位曲線は(a)の曲線を荷重軸のみ2倍にしたものであるが、 $\epsilon_{cy}$  ならびに  $\epsilon_{cf}$  は(a)(d)で同一となり、(d)の  $p_o, p_y, p_f$  は、いずれも(a)の2倍となった。すなわち、つりあい鉄筋比  $p_o$  も降伏限界鉄筋比  $p_y$  もともにコンクリートの圧縮靱性の増加(この場合は圧縮強度の増加)を反映している。しかしながら、(a)に対して(b),(c)のように、変形能の増加によりコンクリートの圧縮靱性が増加した場合には、つりあい鉄筋比  $p_o$  よりも、降伏限界鉄筋比  $p_y$  の方がコンクリートの圧縮靱性の増加をよりよく反映している。破断限界鉄筋比  $p_f$  は、コンクリートの応力ひずみ曲線下の全面積にほぼ比例している。降伏限界鉄筋比  $p_y$  も破断限界鉄筋比  $p_f$  もともにコンクリートの圧縮強度には直接影響されず、コンクリートの応力ひずみ曲線の形状のうち主として曲線下の面積に影響される。

#### 5. まとめ

曲げを受けるRCはりについて、引張鉄筋の降伏が生じる限界の降伏限界鉄筋比  $p_y$  ならびに破断が生じる限界の破断限界鉄筋比  $p_f$  を算定する式を、コンクリートの圧縮靱性をそれぞれ応力ひずみ曲線下の面積を用いた形式で提示した。鋼繊維補強コンクリートのように通常のコンクリートに比べ変形能の増加により圧縮靱性が増加した場合には、引張鉄筋比の上限としてつりあい鉄筋比  $p_o$  よりも降伏限界鉄筋比  $p_y$  の方が適していることを示した。

<参考文献> 1) ACI Committee 439: ACI J., pp. 165~173, March 1969,  
2) 小柳治他: 第5回コンクリート工学年講演文集, pp. 333~336, 1983年.

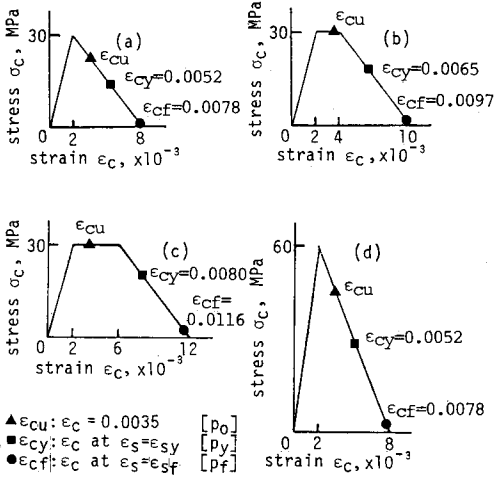


図-2 コンクリートの応力ひずみ曲線と  $\epsilon_{cu}, \epsilon_{cy}, \epsilon_{cf}$

表-1 つりあい鉄筋比  $p_o$  と限界鉄筋比  $p_y, p_f$

| type of stress-strain curve of concrete | reinforcement ratio |                     |                       |
|-----------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
|                                         | balanced $p_o$ %    | yield-limit $p_y$ % | rupture-limit $p_f$ % |
| (a) $A=120 \text{ kPa}$                 | 3.15                | 3.49                | 0.23                  |
| (b) $A=180 \text{ kPa}$                 | 3.41                | 4.39                | 0.35                  |
| (c) $A=240 \text{ kPa}$                 | 3.41                | 5.00                | 0.45                  |
| (d) $A=240 \text{ kPa}$                 | 6.31                | 6.97                | 0.47                  |

A: コンクリートの応力ひずみ曲線下の全面積