

V-51 鉄筋コンクリートはりのプラスチックヒンジの特性

早稲田大学理工学部 正眞 神 山 一

1. 要 旨 この報告は明確な降伏点をもつ鉄筋のひずみ硬化領域、明確な降伏点をもたない冷間加工、高張力の鉄筋（PC鋼材を含む）の塑性領域を含めて、鉄筋コンクリートはりのプラスチックヒンジの特性を理論、実験の両面から検討したものである。また、コンクリートの応力-ひずみ曲線および圧縮破壊ひずみは非均等圧縮応力状態の資料を基本にして仮定した。これによって力のつり合い条件、ひずみの適合条件を満足するプラスチックヒンジの抵抗モーメントおよび回転角の計算式を導き、測定値と比較した。さらに抵抗モーメントおよび回転能力の両者を考慮して最適鉄筋比の決定条件を提案し、これにもとづく部材設計の一方法を示した。

2. コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ曲線の仮定 コンクリートの応力-ひずみ曲線は不均等圧縮応力状態の破壊近傍に重点をおき、高次放物線を用いて表わした。（図-1の記号参照）

$$\left. \begin{aligned} \eta &= f_c/f_{cu} = \frac{1}{(m-1)^{m-1}} \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} (m - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}})^{m-1} = \frac{1}{(m-1)^{m-1}} \xi (m - \xi)^{m-1} \\ C_f &= \int_0^{\xi} \eta d\xi = \frac{1}{(m+1)(m-1)^{m-1}} \frac{\epsilon_{co}}{\epsilon_c} \left\{ m^m - (1 + \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}})^m (m - \frac{\epsilon_c}{m-1}) \right\} \\ C_m &= \int_0^{\xi} \eta \xi d\xi = \frac{1}{(m+1)^{m-1}} (\frac{\epsilon_{co}}{\epsilon_c})^2 \left\{ m^{m+1} (1 - \frac{2m}{m+1}) - m(m - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}})^m \left\{ 1 - \frac{2}{m-1} (m - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}}) + \frac{(m - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}})^2}{m(m+2)} \right\} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで f_{cu} = コンクリートの圧縮強度, $\epsilon_{co} = f_{cu}$ に対応するひずみ, C_f = 圧縮力係数, C_m = 中立軸に関する圧縮部のモーメント係数. $m = 6$ の場合を例にとれば, C_f は $\epsilon_c/\epsilon_{co} \div 1.70$, C_m は $\epsilon_c/\epsilon_{co} \div 1.40$ でそれぞれ最大になる。

明確な降伏点をもつ鉄筋の応力-ひずみの関係は図-2 (SD-35)の記号を用いれば次式で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_s \leq \epsilon_{sy} &: f_s = E_s \epsilon_s \\ \epsilon_{sy} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh} &: f_s = f_{sy} \\ \epsilon_s \geq \epsilon_{sh} &: f_s/f_{sy} = 1 + B \log e^{\epsilon_s/\epsilon_{sh}}, B = \text{定数 (図-2 では 0.24)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

明確な降伏点をもたない冷間加工鉄筋、高張力鉄筋あるいはPC鋼材の応力-ひずみの関係は図-3の記号を用いれば次式で表せる。 f_{so} , ϵ_{so} はそれぞれ比例限度の応力、ひずみである。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_s \leq \epsilon_{so} &: f_s = E_s \epsilon_s \\ \epsilon_s \geq \epsilon_{so} &: f_s/f_{so} = 1 + \frac{\epsilon_s/\epsilon_{so} - 1}{A + B(\epsilon_s/\epsilon_{so} - 1)}, A, B \text{ は定数} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

3. プラスチックヒンジの抵抗モーメントと回転角 プラスチックヒンジの形成と完了の条件を次のように定義する。

a) 明確な降伏点をもつ鉄筋: $\epsilon_s = \epsilon_{sy}$ で形成, $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ で完了。

b) 明確な降伏点をもたない鉄筋: $\epsilon_s = \epsilon_{so}$ で形成, $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ で完了。

単鉄筋長方形断面を例にとり計算式を要約して述べる。

明確な降伏点をもつ鉄筋を用いた場合:

$$\epsilon_s = \epsilon_{sy}: K_{sy} = p \beta_y / C_f, M_{sy} / b d^2 f_{co} = C_m K_{sy}^2 + p \beta_y (1 - K_{sy}), \phi_{sy} d = \epsilon_{sy} / (1 - K_{sy})$$

$E_c = E_{cu}$: $C_f = C_{fu} = \text{一定値}$, $C_m = C_{mu} = \text{一定値}$

$E_{sh} \geq E_s \geq E_{sy}$, $f_s = f_{sy}$, $E_{cu}/(E_{cu} + E_{sy}) \geq K_{cu} \geq E_{cu}/(E_{cu} + E_{sh})$

$$K_{cu} = p\beta_y / C_{mu}, \quad M_{cu} / bd^2 f_{co} = C_{mu} K_{cu}^2 + p\beta_y (1 - K_{cu}), \quad \phi_{cu} d = E_{cu} / K_{cu}$$

$$\phi = \phi_{cu} - \phi_{sy} = \{E_{cu} / K_{cu} - E_{sy} / (1 - K_{sy})\} / d$$

$E_{sh} > E_s$, $f_s > f_{sy}$, $K_{cu} < E_{cu} / (E_{cu} + E_{sh})$, $f_s / f_{sy} = 1 + B \log e^{E_s / E_{sh}}$, $E_s = (1 - K_{cu}) E_{cu} / K_{cu}$

$$C_{fu} K_{cu} = (1 + B \log e^{E_s / E_{sh}}) p\beta_y, \quad M_{cu} / bd^2 f_{co} = C_{mu} K_{cu}^2 + (1 + B \log e^{E_s / E_{sh}}) p\beta_y$$

$$\phi_{cu} d = E_{cu} / K_{cu}, \quad \phi = \phi_{cu} - \phi_{sy} = \{E_{cu} / K_{cu} - E_{sy} / (1 - K_{sy})\} / d$$

(4)

数値計算の結果を図-4, 図-5に示した。

明確な降伏点をもたない鉄筋を用いた場合:

$$E_s = E_{so}: \quad K_{so} = p\beta_o / C_f, \quad M_{so} / bd^2 f_{co} = C_m K_{so}^2 + p\beta_o (1 - K_{so}), \quad \phi_{so} d = E_{so} / (1 - K_{so})$$

$$E_c = E_{cu}: \quad E_s = (1 - K_{cu}) E_{cu} / K_{cu} > E_{so}, \quad C_{fu} K_{cu} = p\beta_o \left\{ 1 + \frac{E_c / E_{so} - 1}{A + B(E_s / E_{so} - 1)} \right\}$$

$$M_{cu} / bd^2 f_{co} = C_{mu} K_{cu}^2 + p\beta_o \left\{ 1 + \frac{E_s / E_{so} - 1}{A + B(E_s / E_{so} - 1)} \right\} (1 - K_{cu}), \quad \phi_{cu} d = E_{cu} / K_{cu}$$

$$\phi = \phi_{cu} - \phi_{so} = \{E_{cu} / K_{cu} - E_{so} / (1 - K_{so})\} / d$$

(5)

数値計算の結果を図-6, 図-7に示した。

4. 実験結果との比較

実験結果との比較の一例を図-8に示した。その結果を要約すれば

次の通りである。

a) プラスチックヒンジ形成時と完了時の抵抗モーメントには顕著な差がある。両者の差異には鉄筋とコンクリートとの強度比を考慮した力学的鉄筋比 $p\beta_y$ あるいは $p\beta_o$ によって変化する。

b) 一般に使用される程度の鉄筋量の場合は、プラスチックヒンジ完了時には鉄筋はひずみ硬化領域にある。この影響は抵抗モーメントよりもプラスチックヒンジの回転角量の方に大きく現われる。すなわち、プラスチックヒンジの特性は力のつり合い条件と同等にひずみの適合条件を厳密に取扱わなければならない。

c) 明確な降伏点をもたない冷間加工、高張力鉄筋あるいはPC鋼材を用いた場合のプラスチックヒンジの特性も合理的に計算でき、実験結果と良好な一致が得られる。

5. 適正鉄筋比の選択

強度およびプラスチックヒンジの回転能力の両者から評価するとき、

圓形の鉄筋比 P よりも力学的鉄筋比 $p\beta_y$ あるいは $p\beta_o$ の方が適切である。プラスチックヒンジの回転能力のみから見れば力学的鉄筋比が小さいほど大きい。上記計算式にはひずみ速度を全く考慮していないので、プラスチックヒンジ形成から完了までの時間経過が不明確であり、これが適正鉄筋比を選択するときの欠点になる。そこで、ここではプラスチックヒンジ形成から完了までの抵抗モーメントの差 $(M_{cu} - M_{sy})$ または $(M_{cu} - M_{co})$ が最大になる力学的鉄筋比を適正鉄筋比と定義した。その数値は次の値になる。

$$\text{明確な降伏点をもつ鉄筋(SR24, SD24, SR30, SD30, SD35)} \quad p\beta_y = 0.290(1 \pm 0.01) \approx 0.290$$

明確な降伏点をもたない鉄筋

$$p\beta_o = 0.216(1 \pm 0.02) \approx 0.216$$

(6)

6. 部材の設計

部材設計の順序は次の通りである。

a) 適正鉄筋比またはこれに近い鉄筋比を用いる。

b) プラスチックヒンジ完了時の抵抗モーメント $M_{cu} = \alpha_2 LL + \alpha_d DL$ を設計モーメントとする。

明確な降伏点をもつ鉄筋の場合： $(f_c - E_c$ を6次放物線と仮定)

$$d = K_c \sqrt{\frac{M_{cu}}{b}}, \quad K_c = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{P\beta_y}{C_{fu}}\right) \left(1 - \frac{C_{mu}}{C_{fu}}\right) \rho\beta_y f_{co}}} \div \frac{2.26}{\sqrt{f_{co}}} \quad A_s = 0.290 b d f_{co} / f_{sy}$$

明確な降伏点をもたない鉄筋の場合：

$$d = K_c \sqrt{\frac{M_{cu}}{b}}, \quad K_c = \frac{1}{\sqrt{C_{fu} K_{cu} \{1 - K_{cu} (1 - \frac{C_{mu}}{C_{fu}})\} f_{co}}} \div \frac{2.27}{\sqrt{f_{co}}} \quad A_s = 0.216 b d f_{co} / f_{sy}$$

(7)

7. 結 論 不均等圧縮応力状態におけるコンクリートの最大応力近傍の応力-ひずみ曲線、圧縮破壊ひずみ、鉄筋の塑性領域の応力-ひずみ曲線を用いて、鉄筋コンクリートはりのプラスチックヒンジの特性を従来よりも一般性のある理論的に検討し、実験によって確認した。理論の特徴はひずみの適合条件も比較的厳密に取扱った点にある。この理論にもとづいて最適鉄筋比決定条件を明確にし、これを用いた部材断面の設計式を提案した。設計断面はプラスチックヒンジの形成、完了時の抵抗モーメント、回転角が容易に求められる計算式、数表あるいは図表が準備できるので、鉄筋コンクリート構造物の終極設計に従ふと思う。



