

軸方向引張力と曲げモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の強度および変形

早稲田大学理工学部

正員 神山 一

学生員 〇川 口 直 能

1. 要旨

軸方向引張力と曲げモーメントとを受ける単鉄筋長方形断面部材の引張鉄筋降伏時の抵抗モーメントと曲率は軸方向引張力の影響によって、曲げモーメントのみが作用する場合よりも低下する。

この報告は破壊機構を明らかにするために、まず実験結果より判明した破壊過程を明らかにし、ついで曲げモーメントのみが作用する場合との差異と強度および変形について考察したものである。

2. 記号

M_{sy} : 引張鉄筋が降伏するときのモーメント. σ_{sy} : 鉄筋の降伏点応力度

M_{cu} : 圧縮部コンクリートが破壊するときのモーメント. K_{sy} : 引張鉄筋が降伏するときの中立軸係数

N_{cu} : 圧縮部コンクリートが破壊するときの軸方向引張力. K_{cu} : 圧縮部コンクリートが破壊するときの中立軸係数

σ_c : 圧縮部コンクリートの応力度.

ϕ : 断面の曲率

e_t : 引張鉄筋圆心から軸方向引張力作用点までの距離

$\sigma_c = \sigma_{co} \cdot \epsilon_c / \epsilon_{co} \cdot e^{1 - \epsilon_c / \epsilon_{co}}$

σ_{co} : 圧縮部コンクリートの最大応力度

C_f : 圧縮部コンクリートの圧縮力に関する係数

ϵ_c : 圧縮部コンクリートのひずみ度

C_m : 圧縮部コンクリートの中立軸に関するモーメント係数

ϵ_{co} : σ_{co} に相当するひずみ度

ϵ_{cu} : 圧縮部コンクリートの破壊ひずみ度.

b : 断面の幅

ϵ_s : 鉄筋のひずみ度

d : 有効高さ

ϵ_{sy} : 鉄筋の降伏点ひずみ度

A_s : 引張鉄筋断面積

ϵ_{sh} : 鉄筋がひずみ硬化をおこすときのひずみ度

$\rho = A_s / bd$, $\beta_y = \sigma_{sy} / \sigma_{co}$, $\alpha = e_t / d$

3. 荷重の実態

構造物が単独荷重を受ける場合は稀で、一般に複雑な組み合わせの荷重を受け、その組み合わせの影響は特に破壊様式に対して顕著に現われる。たとえば地震力などによる破壊では、どのような荷重の組み合わせが主となって破壊に至ったかの推定が困難であり、種々の研究が現在なされている。これら組み合わせ荷重の中で構造部材が軸方向引張力と曲げモーメントを受けるのは、たとえばラーメン構造に水平力が作用した時、あるいは両端固定のはりに温度降下が起こった状態で、曲げが作用する場合などが考えられる。このときの応力およびひずみ状態の評価は普通に用いられる曲げ強度および曲率の計算式を用いれば可能である。しかし破壊近傍ではフリ合機構に変化が起る。これは鉄筋コンクリート部材における一つの特徴で、重合の法則を用いては説明できず、ひずみの適合条件をどのように満足させるかが問題である。

4. 破壊形態の特徴

偏心引張力を加えた基礎実験によって判明した破壊過程の特徴を記せば次の通りである。(Fig.1)

- まず部材中央部付近に曲げ引張ひびわれが発生する。実験では隅角部にもひびわれが発生したが隅角部近傍を十分に補強しておけば、後者のひびわれは破壊の主原因にはならなかった。
 - 荷重を漸次増加させると第二の曲げ引張ひびわれが発生し、その位置は既存のひびわれから両側にほぼ距離 d のところである。
 - ひびわれの進展が停止し、引張鉄筋が降伏する。
 - 引張鉄筋降伏後、ひびわれの先端を結ぶように材軸方向のひびわれが発生する。この時、鉄筋のひずみに急激な増加が見られ、フリ合い機構に変化が起こる。
 - 破壊はコンクリートの圧縮破壊によって材軸方向のひびわれ先端上部で起こる。
- 以上の事実から軸方向引張力と曲げモーメントとを受ける部材は材軸方向のひびわれ発生に特徴づけられ、この前後でフリ合い機構に変化が生じている事が明らかとなった。

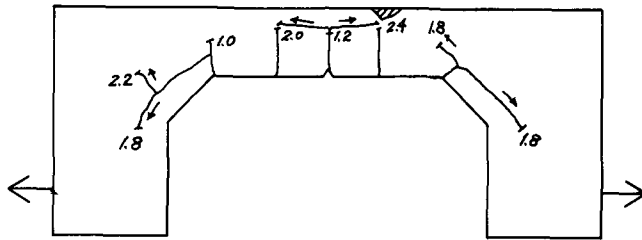


Fig.1 破壊時のひびわれ状況の一例

5. 強度および変形の計算

前述のように、実験によれば鉄筋降伏後、材軸方向にひびわれが発生するが、これ以前は従来の曲げ強度および曲率の計算式が適用できる。

すなわち引張鉄筋が降伏するときの抵抗モーメントおよび曲率は次の式による。

$$\epsilon_s = \epsilon_{sy}, \quad \epsilon_c = \epsilon_{sy} \cdot K_{sy} / (1 - K_{sy}) \leq \epsilon_{cu}$$

$$M_{sy} / b d^2 \sigma_{co} = C_m K_{sy}^2 + p \beta_y (1 - K_{sy})$$

$$\phi_{sy} \cdot d = \epsilon_{sy} / (1 - K_{sy})$$

ただし

$$(C_f - C_m) K_{sy}^2 - C_f (\alpha + 1) K_{sy} + \alpha p \beta_y = 0$$

$$p \beta_y \leq \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{sy} + \epsilon_{cu}} \left\{ C_{fu} (\alpha + 1) - (C_{fu} - C_{mu}) \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{sy} + \epsilon_{cu}} \right\}$$

(1)

圧縮側コンクリートの破壊：

破壊は部材軸方向に発生したひびわれの圧縮側部分のコンクリートの圧縮破壊によって起こる。
この時のひずみ分布は鉄筋のひずみ測定値などから判断して平面保持の法則が成立していない。

そこで破壊強度は曲げ引張ひびわれと部材軸方向ひびわれに囲まれた部分のコンクリートを除
去した一種のタイドラーメンのような構造につり合い機構をモデル化して求める。(Fig. 2)

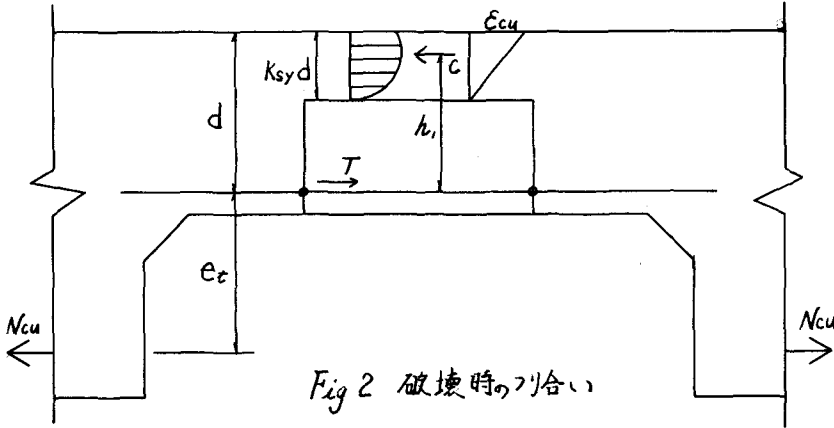


Fig. 2 破壊時のつり合い

鉄筋はコンクリート部に比べ剛性が低いのでピン結合とし、 $Kcu \div Ksy$ と仮定すれば、
圧縮力 C と引張力 T は次のように表わせる。

$$C = Ncu - k_1 \cdot Ncu (e_c + h_1) / h_1 (k_1 + k_2) \div Ncu \cdot e_c / h_1$$

$$T = k_1 \cdot Ncu (e_c + h_1) / h_1 (k_1 + k_2) \div Ncu (e_c + h_1) / h_1$$

ここに k_1, k_2 はそれぞれ垂直、水平部材の剛比。

$$k_1 / (k_1 + k_2) \div 1.00$$

$$h_1 = (1 - Ksy + Cmu/Cfu \cdot Ksy) d$$

一方、 $E_c = E_{cu}$ でコンクリートが圧縮破壊するとすれば、

$$C = b Ksy d \sigma_{co} C_f \quad (3)$$

これを (2) 式に代入すれば、抵抗モーメントおよび圧縮部の曲率は次式で表わせる。

$$\begin{aligned} M_{cu} / b d^2 \sigma_{co} &= \frac{1}{\alpha} \{ Ksy Cmu + Ksy Cfu (1 - Ksy) \} \{ \alpha + (1 - Ksy) \} \\ \phi_{cu} \cdot d &= E_{cu} / Ksy \end{aligned} \quad (4)$$

6. 曲げを受ける部材に軸方向引張力が加わる事の影響

曲げモーメントのみが作用したときの単鉄筋長方形断面部材の抵抗モーメントと曲率は平面保持の法則が成立すると仮定すれば次のように表わせる。

i) 引張鉄筋の降伏

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_s &= \epsilon_{sy}, \quad \epsilon_c = K_{sy} \cdot \epsilon_{sy} / (1 - K_{sy}) \leq \epsilon_{cu} \\ M_{sy} / b d^2 \sigma_{co} &= C_m K_{sy}^2 + p \beta_y (1 - K_{sy}) \\ \phi_{sy} \cdot d &= \epsilon_{sy} / (1 - K_{sy}) \\ \text{ただし} \quad K_{sy} &= p \beta_y / C_f \\ p \beta_y &\leq \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{sy} + \epsilon_{cu}} \cdot C_{fu} \end{aligned} \right\} (5)$$

ii) 圧縮側コンクリートの破壊 : $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{sy} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}, \quad \epsilon_s &= (1 - K_{cu}) \cdot \epsilon_{cu} / K_{cu} \\ M_{cu} / b d^2 \sigma_{co} &= C_{mu} K_{cu}^2 + p \beta_y (1 - K_{cu}) \\ \phi_{cu} \cdot d &= \epsilon_{cu} / K_{cu} \\ \text{ただし} \quad K_{cu} &= p \beta_y / C_{fu} \\ \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{sh}} \cdot C_{fu} &\leq p \beta_y \leq \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{sy} + \epsilon_{cu}} \cdot C_{fu} \end{aligned} \right\} (a)$$

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_s \geq \epsilon_{sh}, \quad \epsilon_s &= (1 - K_{cu}) \cdot \epsilon_{cu} / K_{cu} \\ M_{cu} / b d^2 \sigma_{co} &= C_{mu} K_{cu}^2 + p \beta_y (1 + A \log_e \epsilon_s / \epsilon_{sh}) (1 - K_{cu}) \\ \phi_{cu} \cdot d &= \epsilon_{cu} / K_{cu} \\ \text{ただし} \quad K_{cu} &= p \beta_y (1 + A \log_e \epsilon_s / \epsilon_{sh}) / C_{fu} \\ p \beta_y &\leq \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{sh}} \cdot C_{fu}, \quad A \text{ は鉄筋の性質による定数} \end{aligned} \right\} (b)$$

Fig. 3 ~ Fig. 6 に SD30 を用いたときの純曲げおよび偏心比 $\alpha = 1.5, 10$ に対する引張鉄筋降伏時と圧縮側コンクリート破壊時の抵抗モーメントおよび曲率の様子を示した。また Fig. 7 に降伏から破壊までの変形能力を曲率の差として示した。これから次の点が明らかである。

- 1) 引張鉄筋降伏時の抵抗モーメントおよび曲率は軸方向引張力の影響によって曲げモーメントのみが作用する場合に比べ低下する。偏心比が大きくなるに従って純曲げに近づくのは従来と同様である。
- 2) 破壊時は材軸方向のひびわれにより圧縮側の強度負担分が増大するため、従来使用されている鉄筋量（たとえば帯鉄筋柱で 28 ~ 6 %）の範囲では強度増加が見られるが、曲率は逆に低下する。
- 3) 変形能力は純曲げに比べて従来の鉄筋量の範囲では低下する。これは軸方向引張力が作用すると部材の変形能力が減せられ、曲げのみの時に比べ、破壊が急激に起こる事を示唆していると思われる。

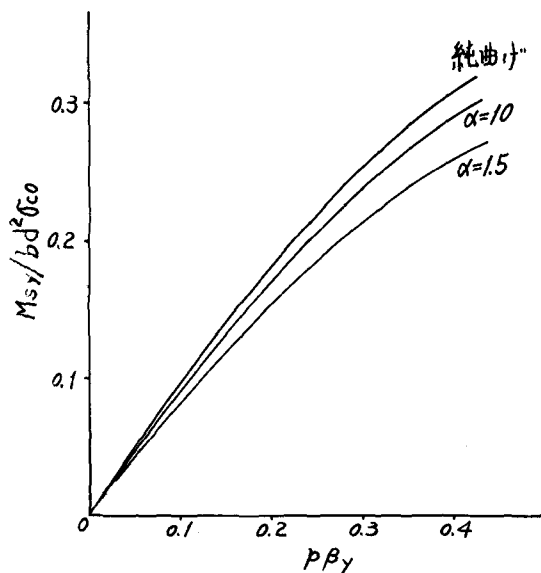


Fig. 3 引張鉄筋降伏時の抵抗モーメント

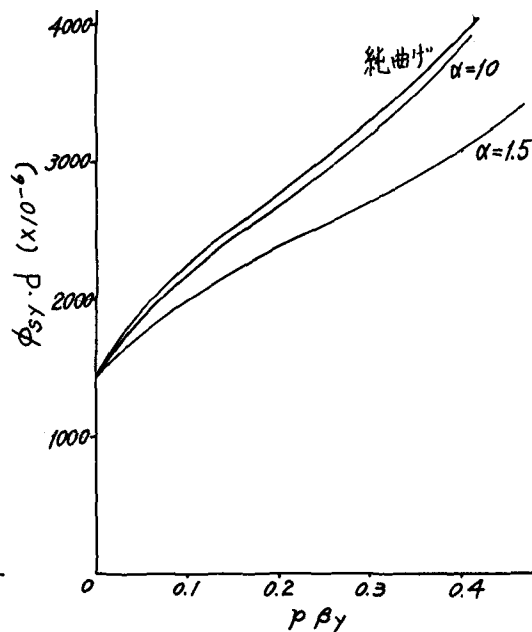


Fig. 4 引張鉄筋降伏時の曲率

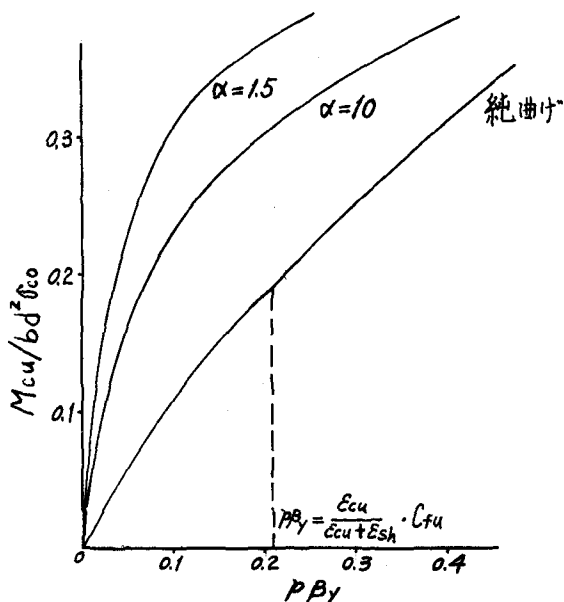


Fig. 5 圧縮側コンクリートが破壊するときのモーメント

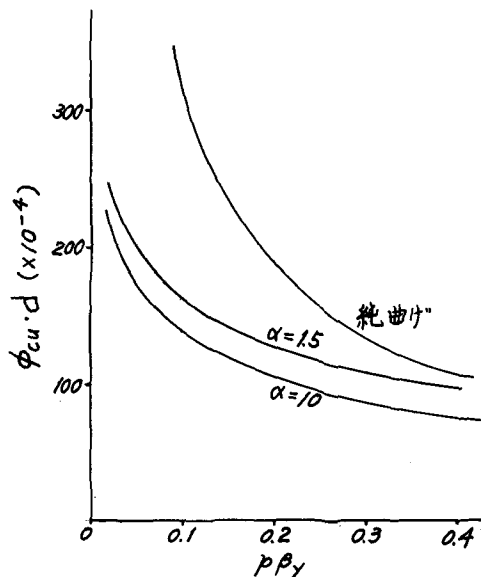


Fig. 6 圧縮側コンクリートが破壊するときのモーメント曲率

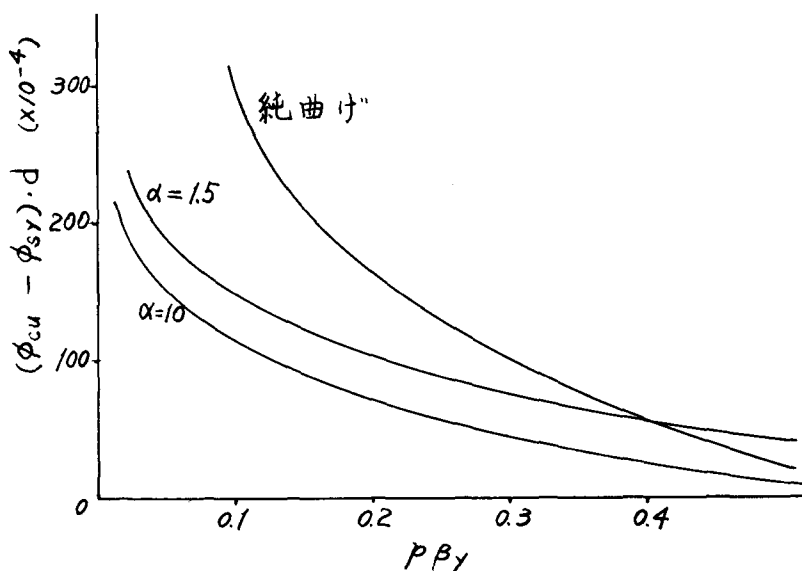


Fig. 7 $(\phi_{cu} - \phi_{sy}) \cdot d$

7. 結論

以上の事から次の点を結論とする。

曲げモーメントのみが作用する場合に対し、従来用いられている鉄筋量の範囲では、

1) 引張鉄筋降伏時の抵抗モーメントおよび曲率は鉄筋比が大きいの程、また偏心比が小さい程、低下する。

2) 圧縮側コンクリート破壊時は抵抗モーメントは増加するが、曲率は減少し、その割合は鉄筋比が小さい程、多くなる。

3) 変形能力は鉄筋比が小さい程、また偏心比が大きい程、低下する。

以上、曲げ強度に対するおおよその傾向はつかめたが、現時点では、軸方向引張力の影響と思われる材軸方向のひびわれ発生機構、およびひずみの適合条件が不明であり、実験データの補充を行ないつつ研究を進める。(1972年、10月)

参考文献

C. W. Dunham "Advanced Reinforced Concrete"

McGraw-Hill Book Company, 1964, P44~P50

神山 一

"鉄筋コンクリートはりのプラスチックヒンジの長さについて"

土木学会第27回年次学術講演会講演概要集 昭和47年