

RC 橋脚の軸方向鉄筋弾塑性座屈モデルの提案

武蔵工業大学大学院 学生員 渡辺 耕平
武蔵工業大学工学部 正会員 吉川 弘道

1. はじめに

鉄筋コンクリート橋脚の耐震解析で重要となることは、潜在する複数の破壊モードの中でどの破壊モードが顕在化するかを把握し、非線形領域における塑性変形を適切に検討することである。

本研究では、RC 単柱における弾塑性座屈のモデル化と座屈を考慮した鉄筋構成則の構築を行うものである。

2. 鉄筋単体の座屈解析の考え方とモデル化

RC 柱部材の基部に発生する軸方向鉄筋の座屈挙動に関する模式図を図 1 に示す。軸方向鉄筋が座屈する時点では、かぶりコンクリートはかなり大きな損傷を受けており、拘束効果はないものと仮定する。

実構造物中の座屈区間における鉄筋両端支持条件は、両端ヒンジ支持(hinged-hinged)と両端固定支持(fixed-fixed)の間に存在するものと想定でき、両極端として図 2 のような 2 種類のモデル化を行った。

3. 弾塑性座屈モデルの軸方向力と横方向変形関係¹⁾

3.1 初期たわみのある棒部材の弾性座屈曲線

軸圧縮荷重 P を受ける長さ L_b 、断面 2 次半径 r の棒部材に関するオイラーの座屈荷 P_{cr} と座屈応力 s_{cr} は、次式で与えられる。

$$\text{荷重表示: } P_{cr} = \left(\frac{P}{l}\right)^2 EI, \quad \text{強度表示: } s_{cr} \equiv \frac{P_{cr}}{A} = \left(\frac{P}{l}\right)^2 \frac{E}{A} \quad (1)$$

本研究で考える 2 例では、係数 λ を次のような値とする。

両端ヒンジ支持: $l = L_b$, 両端固定支持: $l = 0.5L_b$

両支持条件の下、初期たわみ y_0 が式(2)で与えられるとする。ここで、 a は座屈スパン中央における初期たわみ量を表す。

$$\text{両端固定支持: } y_0 = \frac{a}{2} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2P}{L_b} x\right) \right\}, \quad \text{両端ヒンジ支持: } y_0 = a \sin\left(\frac{Px}{L_b}\right) \quad (2)$$

軸力 P と中央点の横方向変形 δ_v は支配方程式より式(3)のようになる。

$$y(x) = \frac{a}{2(1-P/P_{cr})} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2P}{L_b} x\right) \right\} \text{ より, } d_v \equiv y(L_b/2) = \frac{a}{1-P/P_{cr}} \quad (3)$$

3.2 軸力と曲げモーメントを受ける断面の全塑性限界曲線

曲げモーメントと軸力を受ける断面が全塑性状態となる関数 $f(P, M) = 0$ は降伏荷重 P_y 、全塑性モーメント $M_p (= f_y Z)$ を用い算出される。

$$f(P, M) = \left(\frac{P}{P_y}\right)^{2.13} + \left|\frac{M}{M_p}\right| - 1 = 0 \quad (4)$$

断面が全塑性状態となる塑性条件、式(4)と式(3)を用いた $M = Pd_v + M_0$ により、軸力 P と中央点の横方向変形 d_v の関係が得られる。

$$d_v = \frac{wZ}{A(P/P_y)} \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_y}\right)^{2.13} \right\} \quad (5)$$

ここで $Z (= d^3/6)$ は塑性断面係数、 w は支持条件で決定する係数で、両端ヒンジ支持の場合は $w=1$ 、両端固定支持の場合は $w=2$ となる。

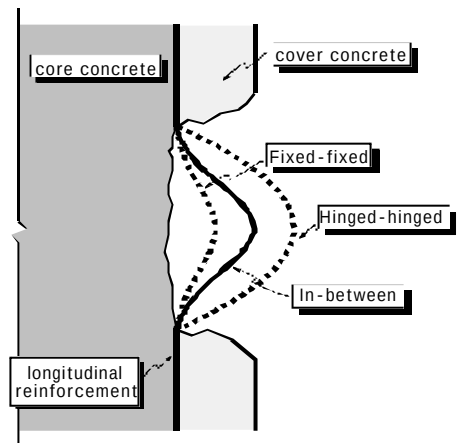
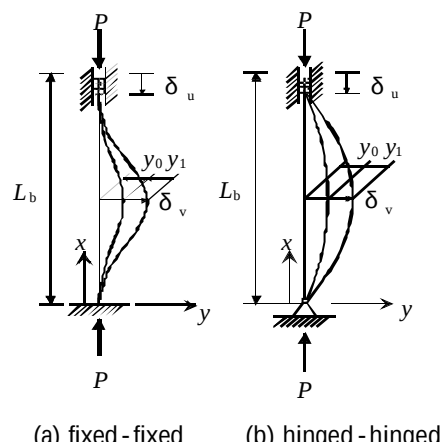


図 1 軸方向鉄筋の座屈挙動



(a) fixed-fixed (b) hinged-hinged
図 2 横方向変形と軸方向変位のモデル

key words : 弾塑性座屈, 両端固定支持, 両端ヒンジ支持, 初期たわみ

連絡先: 〒158-0087 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 TEL: 03-3703-3111(内線:3241) FAX:03-5707-1165

断面に生じる曲げ圧縮応力の最大値 s_{max} は, M_0 は部材上下端の反力モーメント, 断面係数 $W(=\pi d^3/32)$ を用い次のように表す.

$$s_{max} = \frac{P}{A} + \frac{M}{W} = \frac{P}{A} + \frac{Pd_v + M_0}{W} \quad (6)$$

最大圧縮応力点から降伏が開始する時の荷重を P_{ep} とすると, $s_{max} \rightarrow f_y$, $P \rightarrow P_{ep}$ とおくことにより下式を導出することができる.

$$P_{ep} = \frac{1}{2} \left[\{(1+b)P_{cr} + P_y\} - \sqrt{\{(1+b)P_{cr} + P_y\}^2 - 4P_{cr}P_y} \right] \quad (7)$$

ここで, $b = aA/wW$, $P_y = Af_y$, P_{cr} はオイラーの座屈荷重, a はスパン中央点の初期たわみとする.

図 3 に軸方向力とスパン中央点の横方向変形関係を示す. $P \sim \delta_v$ 曲線は, 弾性座屈曲線(式(3))と全塑性限界曲線(式(5))によって包絡される. すなわち, 荷重初期では, 弾性座屈曲線を辿るが荷重が P_{ep} に達すると断面の塑性化が始まり, 弾性座屈曲線を離脱し全塑性限界曲線に漸近する. 弾性時および塑性遷移時においては, 軸力が増加し続けることが, 弾性座屈曲線から全塑性限界曲線に移行する荷重 P_{crs} 点を境に, 軸力は減少を示す.

4. 軸力と軸方向変位関係

軸方向変位に寄与するものとして, 軸力による軸方向変位 $\delta_{u,axial}$,

弾性たわみ(横たわみ)による軸方向変位 $\delta_{u,def}$, 塑性ヒンジによる剛体回転 $\delta_{u,rot}$ が挙げられる. したがって, 軸方向変位 $d\delta_u$ は次式のように表される.

弾性時: $dd_u = dd_{u,axial} + dd_{u,def}$, 全塑性時: $dd_u = dd_{u,axial} + dd_{u,def} + dd_{u,rot}$

, による変形を考慮し, 式(8)を算出した. の変位算出にあたり, まず幾何学的性質より, 座屈スパン中央点における横方向変形～軸方向変位関係の算出を行い, 軸力～軸方向変位の関係を得る.

$$dd_u = \left\{ e_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{dd_v}{dx} \right)^2 \right\} dx, \quad d_u = \int_0^{L_b} dd_u = \frac{S}{E} L_b + \frac{p}{L_b} d_v^2 \quad (8)$$

5. 材料構成則への発展

式(8)より, 軸方向平均応力 s_s^* (average axial stress) と平均ひずみ e_s^* (average axial strain) の関係を示す.

$$s_s^* \equiv P/A, \quad e_s^* \equiv \frac{1}{L_b} \int_0^{L_b} \left(\frac{dd_u}{dx} \right) dx = \frac{s_s^*}{E} + \left(\frac{p}{L_b} d_v \right)^2 \quad (9)$$

座屈を考慮した鉄筋の軸方向平均応力と平均ひずみ関係を図4に示す. 鉄筋単体の弾塑性座屈挙動は, 初めは弾性座屈曲線上を辿るが, 応力が $s_{s,ep}^*$ になると断面内に塑性域が発生しはじめ, 弾性座屈曲線から乖離し, より大きな変形となる. さらに応力を加えると, 弾塑性状態から全塑性限界曲線上に移行し, 軟化挙動を示すと考えられる.

そこで, EP 点から CRS 点の応力に対し, 応力低減係数 h (stress reduction factor) を導入することにより, より実挙動に近い弾塑性状態を再現するものである. 応力低減係数 h は次のように定義する.

$$h \equiv \frac{s_{s,max}^* - s_{s,ep}^*}{s_{s,crs}^* - s_{s,ep}^*} \quad (0 \leq h \leq 1) \quad (10)$$

ここで, $s_{s,max}^*$: 最大圧縮応力, $s_{s,ep}^*$: 塑性開始応力, $s_{s,crs}^*$: 軟化開始応力とする.

謝辞: 本研究をまとめるにあたり, 元武蔵工業大学大学院(現 JR 東日本) 竹市八重子氏に有益な御指摘を賜りました. ここに謹んで厚く御礼申し上げます.

【参考文献】

1) 竹市八重子: 軸方向鉄筋の座屈を考慮した鉄筋コンクリート柱部材の非線形挙動, 武蔵工業大学 修士学位論文, 1998.3

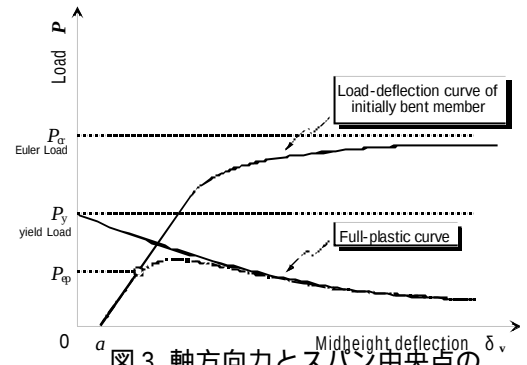


図3 軸方向力とスパン中央点の

横方向変形関係

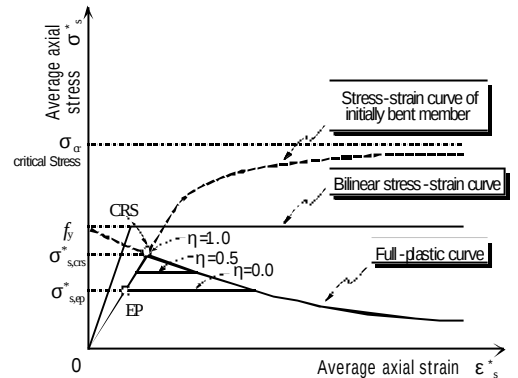


図4 軸方向平均応力と平均ひずみ関係