

中心軸圧縮を受ける拘束コンクリートの 非線形挙動と破壊モードの判別

武蔵工業大学 学生員 山川和弘
武蔵工業大学 正会員 吉川弘道

1. はじめに

鉛直応力を受けるコンクリート柱は、塑性変形過程に軟化挙動を呈するため、横補強筋を用いることにより、体積膨張を拘束し、強度・靱性を改善することができる。本研究はRC柱の力学場の記述から出発し、解析モデルの構築を行う。さらに、材料破壊形態を diffuse failure と localized failure に分類し、それぞれの発生条件より、Confined Concrete の破壊モードの判定を行うものである。

2. 解析モデルの定式化

図-1に示す外的に作用する軸圧縮応力 $\sigma_{33} (< 0)$ に対して、各材料に作用している応力はベクトル表示した釣合条件、適合条件によって関係づけられる。

$$\text{釣合条件: } \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sigma_{33} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_{11}^c \\ \sigma_{22}^c \\ \sigma_{33}^c \end{Bmatrix} + p \begin{Bmatrix} \sigma_{11}^r \\ \sigma_{22}^r \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{適合条件: } \{\epsilon_c\} = \{\epsilon\}, \{\epsilon_s\} = \{\epsilon\} \quad (2)$$

添字 c, s はそれぞれコンクリートと鉄筋を示す。p は鉄筋比(面積比)を表し、正方形断面より 1, 2 平面を面内等方性 ($\epsilon_{11} = \epsilon_{22}$) として取り扱う。コンクリートおよび鉄筋の構成則に以上の関係を適応させることにより、以下のような定式化が可能となる。ただし、 $D_{ijkl}^{ep} (i, j, k, l = 1 \sim 3)$ は D_{ep} の成分を表す。

$$\dot{\epsilon}_{11} = \dot{\epsilon}_{22} = \frac{-D_{1133}^{ep}}{D_{1111}^{ep} + D_{1122}^{ep} + pE_{1111}^s} \dot{\epsilon}_{33} \quad (3)$$

$$\dot{\sigma}_{33} = \left[D_{3333}^{ep} - \frac{D_{1133}^{ep}(D_{3311}^{ep} + D_{3322}^{ep})}{D_{1111}^{ep} + D_{1122}^{ep} + pE_{1111}^s} \right] \dot{\epsilon}_{33} \quad (4)$$

ここで、横補強筋を持つときの見掛け上のポアソン比を、 $\nu^* \equiv \epsilon_{11}^c / \epsilon_{33}^c \equiv \epsilon_{22}^c / \epsilon_{33}^c$ として定義すると、次式のように表示される。

$$\nu^* = \frac{D_{1133}^{ep}}{D_{1111}^{ep} + D_{1122}^{ep} + pE_{1111}^s} \quad (5)$$

• Concrete

$$\dot{\sigma}_{11}^c = \dot{\sigma}_{22}^c = \left[D_{1133}^{ep} - \frac{D_{1133}^{ep}(D_{1111}^{ep} + D_{1122}^{ep})}{D_{1111}^{ep} + D_{1122}^{ep} + pE_{1111}^s} \right] \dot{\epsilon}_{33} \quad (6)$$

$$\dot{\sigma}_{33}^c = \dot{\sigma}_{33} \quad (7)$$

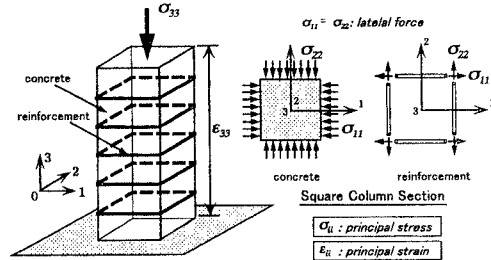


図-1 Confined Concrete Column Under Axially Loading

• Lateral Reinforcement

$$\dot{\sigma}_{11}^r = \dot{\sigma}_{22}^r = \frac{-E_{1111}^{ep} D_{1133}^{ep}}{D_{1111}^{ep} + D_{1122}^{ep} + pE_{1111}^s} \dot{\epsilon}_{33} \quad (8)$$

コンクリートの構成則は、Drucker-Prager 型弾塑性構成則を導入し、次式のように表す。

$$\dot{\sigma}_c = D_{ep} \dot{\epsilon}, (D_{ep} = E_e - E_p) \quad (9)$$

ただし、 D_{ep} は弾塑性接線剛性を表し、弾性成分 E_e 、塑性成分 E_p によって構成される。Drucker-Prager 型の後続の降伏曲面は、呉・田辺の損傷モデル¹⁾を導入し、損傷量 ω によって変化するものとした。

横補強筋の構成則はバイリニア型のモデルを用い、鉄筋の降伏強度以降、初期剛性の 1/100 勾配とした。

3. 材料破壊の分類と条件式

材料破壊として運動場の連続・非連続性から次の 2 つの mode を分類²⁾する。

diffuse failure: diffuse failure は塑性過程において、内部の変数が空間的不連続を示さないもので、応力極値点 (limit point) に対応し、 D_{ep} の特異性に関連付けられ、次式のように表される。

$$\dot{\sigma} = D_{ep} : \dot{\epsilon}_{dif} = 0, (\dot{\epsilon}_{dif} \neq 0) \quad \det(D_{ep}) = 0 \quad (10)$$

localized failure: localized failure は空間的不連続を呈するもので不連続面において、変位速度 $\dot{u}$ は連続、変位速度勾配 $\nabla \dot{u}$ は不連続と考える (c^0 連続体)。

$$[[\dot{u}]] = 0, [[\nabla \dot{u}]] = \dot{\gamma} M \otimes N \neq 0 \quad (11)$$

ただし、ベクトル N は不連続面の直交方向、ベクトル M は不連続部の相対的な運動方向を表す。局所化

Key Words: 拘束コンクリート, 弾塑性構成則, 拘束効果, 分布/局所破壊

連絡先 (武蔵工業大学 〒158 東京都世田谷区玉堤 1-28-1, TEL:03-3703-3111, (ext.3241), FAX:03-5707-2125,

E-mail:yamakawa@shear.civil.musashi-tech.ac.jp)

の開始直前までは、材料が一様塑性状態と仮定し、不連続面の直交方向に作用するトラクション i は連続 ($[[i]] = N \cdot [[\sigma]] = 0$) でなければならない。最終的に, localized failure の発生条件は, 特性テンソル Q_{ep} によって次式のように表される。

$$\det(Q_{ep}) = 0, \quad Q_{ep}(N) \equiv N \cdot D_{ep} \cdot N \dots\dots (12)$$

4. 数値シミュレーションによる考察

上記で定式化したモデルを用いて数値シミュレーションを実施した。図-2は鉄筋比 ($p=0.5\sim 2.0\%$) をパラメータとして軸ひずみ ϵ_{33} に応答する拘束コンクリートの応力～ひずみ関係を示したものである。図から横補強筋の拘束効果による最大圧縮応力 / peak 時のひずみが改善され、拘束効果が良くシミュレートされたといえる。また、破壊モードの判定においては、破壊基準である λ^{diff} が0であることから, diffuse failure と判定された。図-3は応力経路を示したものである。鉄筋比が大きいほど拘束圧も大きくなり、鉄筋の降伏以降、急激に軸力が低下することがわかる。図-4は横補強筋の拘束量と最大圧縮応力の関係を示したもので、鉄筋比と降伏強度の増大に伴い、最大圧縮応力の向上が見られた。星隈らの提案式³⁾と比較した結果、各種とも鉄筋は低拘束量で、ほぼ似た勾配をとり、良好な結果が得られた。また、鉄筋の種類によって勾配が異なる結果となった。

5. まとめ

本研究では、補強筋で拘束されるコンクリートを簡潔な方法を用いて、解析的に再現することを試みた。モデルの定式化、および、数値シミュレーションにより、拘束効果を再現したものと考え、破壊モードの判定においては、diffuse failure と判定したが、今後、破壊モードについては、構成則の再考、および、実験結果の照合よりさらなる検討が必要とされる。

参考文献

- 1) Wu, Z.S. and Tanabe, T.: "A Hardening/Softening Model of Concrete Subjected to Compressive Loading", Journal of Structural Engineering, Architectural Institute of Japan, Vol.36B, pp.153-162, March, 1990.
- 2) Yoshikawa, H. and Willam, K.: "Analysis of Localized Fracture in Elasto-plastic Solids", IUTAM Symposium, Mechanics of Brittle disordered Materials, Concrete, Rock and Ceramics, E&FN SPON, pp.464-478, 1995.
- 3) 星隈順一, 川島一彦, 長屋和宏: "鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係", 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.1-11, 1995

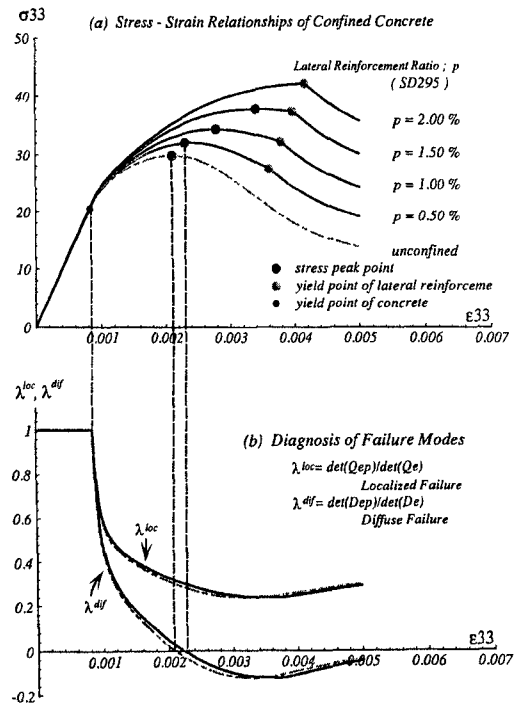


図-2 (a) 拘束コンクリートの応力～ひずみ関係, (b) 破壊モードの判定

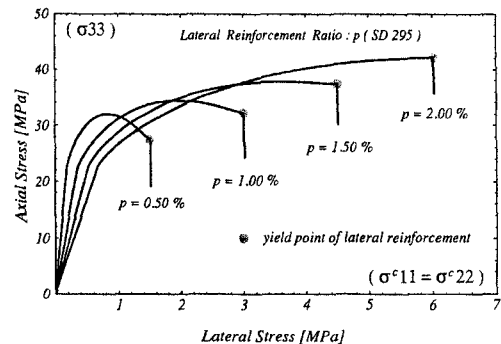


図-3 拘束コンクリートの応力経路

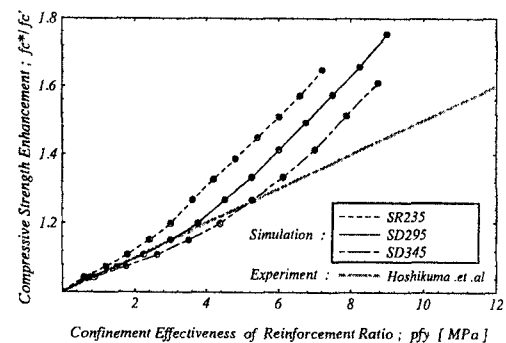


図-4 横補強筋の拘束量と最大圧縮応力の関係