

論文

[1080] カンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の実用化とその応用

加藤清志*

1. まえがき

鉄筋コンクリート (RC) 構造物の震災では、はりよりもむしろ柱の座屈被害が全体の崩壊に連係する事実は多くの事例の示すとおりである。このような観点から、本研究ではRC短柱のもっとも基本的な中心載荷時の保有耐力向上法について述べる。

RC柱の保有耐力向上のための基本理念としては、種々の実験および理論的背景から[1],[2],[3]、「①構造体コンクリートのせん断強度増—②横拘束鉄筋の斜めせん断補強筋法の採用—③横筋・主筋の高強度化」の「三位一体化」が図られていなければならない。

本報では、とくに、柱の荷重-変形挙動上にひずみ硬化を生じさせる主筋閾値鉄筋比が存在すること、また、工学的要因としてはカンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線が確定されていないが、この実用化を図り、その応用例を示す。

2. RC柱の工学的要因の分析の概要[1],[2],[3]

2.1 構造体コンクリートのせん断強度

一般に、柱の高さ/径比 (h/d) が3以上では、斜めせん断ひびわれは水平から約70° 方向に発生し、圧壊する。このせん断強度を“複合せん断強度” (τ_{uh}) と呼び、種々のコンクリート配合での拘束圧縮応力 (σ'_{nd}) との関係は、式(1)の破壊限界曲線で与えられる。

$$\eta = 1.00 + 17.4\xi - 23.274\xi^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\eta = \tau_{uh} / \tau_{u0}$, $\xi = \sigma'_{nd} / \tau_{u0}$, τ_{u0} : 単純せん断強度、 f'_{co} : 単純圧縮強度、

$$\tau_{u0} = f'_{co} / 6 \dots\dots\dots (2)$$

2.2 斜めせん断補強筋法

図-1に示す斜めひびわれモードを考慮し、水平から20° のらせん角をもつ横拘束筋法が合理的である。また、拘束応力比はせん断伝達耐力[4]を取り込むことにより、式(3)で与えられる。

$$\xi = 0.375 \{1 - (1 - 0.305 \mu f_{yd} \bar{p} / \tau_{u0})^{1/2}\} / 5 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 f_{yd} : 鉄筋の設計降伏強度、 $\bar{p} \equiv \Sigma p \sin^2 \theta$, $\mu = 0.12 (f'_{cd})^{1/2} \dots\dots\dots (4)$

p : 拘束鉄筋比、 θ : らせん角、 f'_{cd} : 設計圧縮強度、

また、換算横拘束鉄筋比 \bar{p} は式(3)を変形し式(5)でも与えられる。

$$\bar{p} = \{145.68 (1 - 1.333\xi) \xi \tau_{u0}\} / \{f_{yd} (f'_{cd})^{1/2}\} \dots\dots\dots (5)$$

図-2に、コンクリートの設計基準強度 (f'_{ck}) をパラメーターとした場合の換算鉄筋比と複合

* 防衛大学校教授 土木工学教室、工博 (正会員)

せん断強度比との関係の一例を示す。図から、同一鉄筋比の場合、SD30に比し、SBPD130は約7倍の拘束応力比を与え、とくに、コンクリートが低強度ほどその効果は大きい。また、一定拘束応力比とすれば、SBPD130の鉄筋比はSD30の約1/4でよいことになる。すなわち、高強度斜めせん断補強筋法は施工および耐力上、きわめて有効であることがわかる。

2.3 主筋の高強度化とひずみ硬化の基本メカニズム

RC柱の構成素材の応力-ひずみ曲線の一例を図-3(a)に、また、これら素材からなる柱の荷重-変形曲線を図-3(b)に示す。2種の主筋量 ($p=3.12\%$ 、 6.24%) のいずれの場合でも、SD材では早期にひずみ軟化し、一方、高強度筋SBPD材では、大変形の範囲にわたってひずみ硬化を示している。すなわち、SD材に比し、SBPD材からなるRC柱は、高耐力・高保有耐力を示すことができる。

3. ひずみ硬化と閾値鉄筋比[3]

図-3から、ひずみ硬化を生起させる条件は、耐力を式(6)で与えるとき、式(7)で与えられる。

$$P_c = A_e \sigma_c(\epsilon) + E_s \cdot \epsilon (p A_e) \dots \dots \dots (6)$$

$$\partial P_c / \partial \epsilon = A_e \{ \partial \sigma_c(\epsilon) / \partial \epsilon + p E_s \} \equiv 0 \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 P_c : 柱の耐力、 ϵ : 圧縮ひずみ、 A_e : コンクリートの有効断面、 $\sigma_c(\epsilon)$: カンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線、 p : 主筋鉄筋比、 E_s : 主筋弾性係数。

よって、閾値鉄筋比 (Threshold steel ratio, p_{th}) は式(8)で与えられ、カンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線は重要な工学的要因であることがわかる。

$$p_{th} = -1 / E_s \cdot \partial \sigma_c(\epsilon) / \partial \epsilon \dots \dots \dots (8)$$

4. カンファインドコンクリートの実用的応力-ひずみ曲線式の誘導

Manderら[5]は横拘束筋のピッチを考慮し、かつ、仮想円管法により式(9)を示した。

$$\sigma_c(\epsilon) = r E_{sec} \epsilon / \{ r - 1 + (\epsilon / \epsilon_{cc})^r \} \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{ここに、} r = E_c / (E_c - E_{sec}) ; (\geq 1) \dots \dots \dots (10)$$

$$E_{sec} : \text{カンファインドコンクリートの終局割線係数, } E_{sec} = f'_{cc} / \epsilon_{cc} \dots \dots \dots (11)$$

$$\epsilon_{cc} \cdot f'_{cc} : \text{カンファインドコンクリートの終局ひずみと終局強度、} \epsilon : \text{圧縮ひずみ、} E_c : \text{プレ}$$

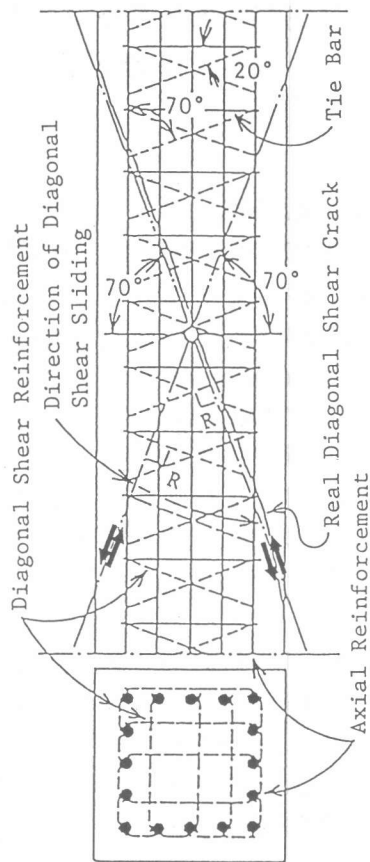


図-1 中心軸方向載荷された短柱の斜めひびわれと配筋法

コンクリートの割線弾性係数。

Mander式は、前述の理想化し過ぎた仮定からなり、かつ、諸元を求めるのに多くの複雑な仮定に基づいているのが難点である。カンファインドコンクリートの圧縮強度は、式(1)・(2)を用い、式(12)で与えられ、また、拘束応力比との関係を図-4に示す。

$$f'_{cc} = \eta f'_{co} = f'_{co} (1.00 + 17.47\xi - 23.274\xi^2) \dots (12)$$

また、カンファインドコンクリートの終局ひずみは式

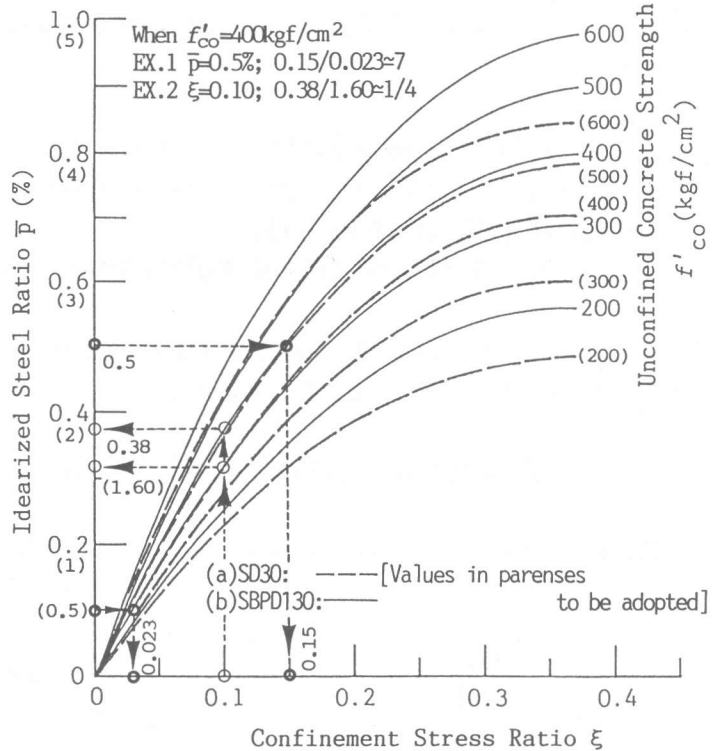


図-2 換算横拘束鉄筋比と拘束応力比との関係

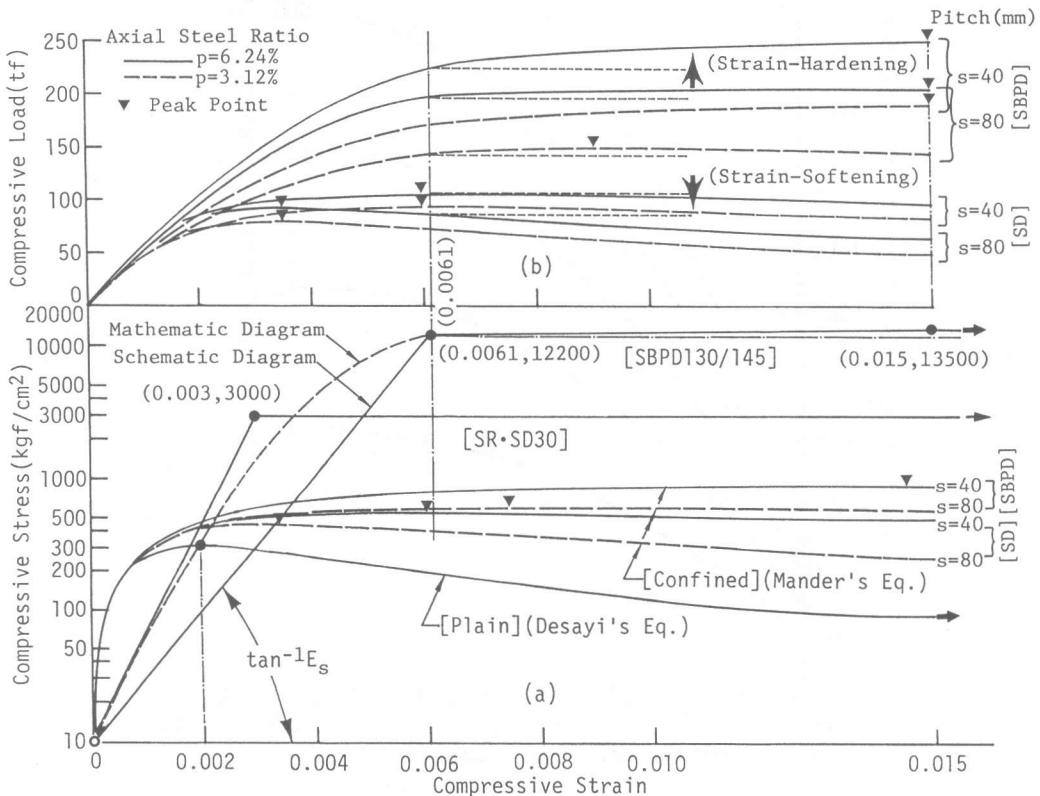


図-3 カンファインドコンクリート柱の構成材料の物性がひずみ軟化・硬化に及ぼす影響

(13)で与えられるが[5]、式(12)により式(14)のように変形される。よって、 E_{sec} は式(15)で与えられる。

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{cc} \{1 + 5 (f'_{cc} / f'_{co} - 1)\} \dots\dots\dots (13)$$

$$= \varepsilon_{co} \{1 + 5 (\eta - 1)\} \dots\dots\dots (14)$$

$$E_{sec} = \eta f'_{co} / [\varepsilon_{co} \{1 + 5 (\eta - 1)\}]$$

$$= E_c \{1 + 4 / (1.00 + 87.35 \xi - 116.37 \xi^2)\} / 5 \equiv \lambda E_c \dots\dots\dots (15)$$

$$\text{ここに、} \lambda = E_{sec} / E_c = \{1 + 4 / (1.00 + 87.35 \xi - 116.37 \xi^2)\} / 5 \dots\dots\dots (16)$$

したがって、式(9)は式(17)のように変形される。

$$\sigma_c(\varepsilon) = \phi E_c \varepsilon / \{\phi + (\varepsilon / \varepsilon_{cc})^\eta\} \dots\dots\dots (17)$$

$$\text{ここに、} \phi = \lambda / (1 - \lambda) \dots\dots\dots (18)$$

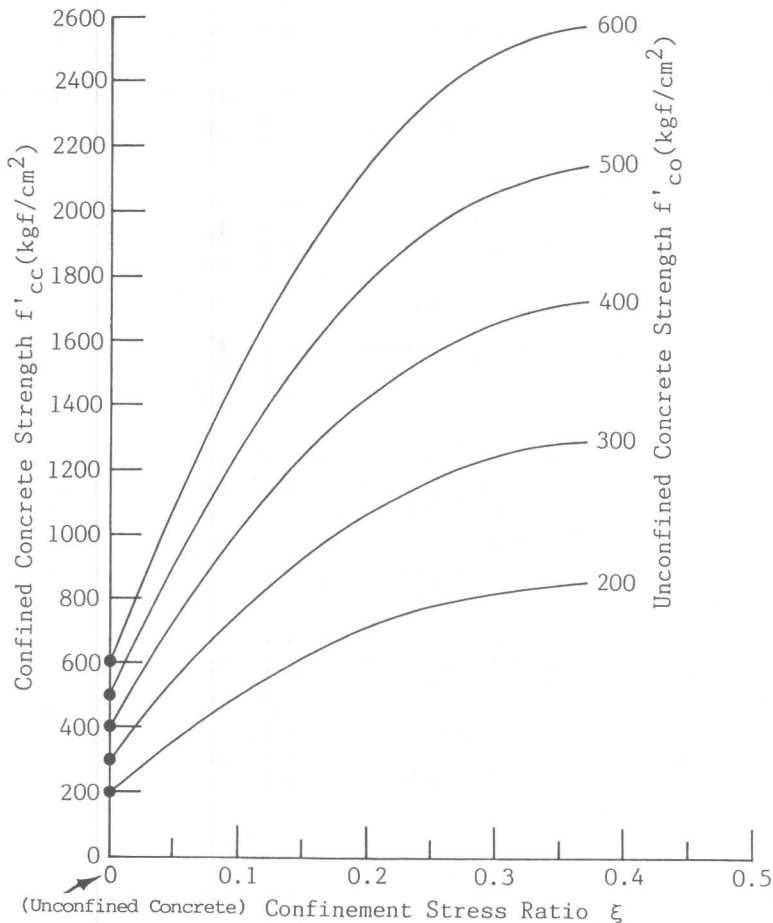


図-4 カンファインドコンクリートの強度と拘束応力比との関係

図-5は $\xi \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot \phi$ との関係を示す。また、図-6は、カンファインドコンクリートの終局ひずみと拘束応力比との関係を示す。

5. 応力-ひずみ曲線と閾値鉄筋比の算出への応用

角柱モデル (150×150×530mm)、斜めせん断補強筋法 (SD30 ; $a_s=1\phi6$ 、らせん角 20° 、ピッチ40mm)、斜めせん断有効断面 $A_{es}=(12\sec 70^\circ) \times 12=421.0\text{cm}^2$ 、 $f'_{co}=400\text{kgf/cm}^2$ 、 $\bar{p}=1.06\%$ 、 $\xi=0.06$ 、 $f'_{cc}=740\text{kgf/cm}^2$ 、 $\gamma=1.5$ 、 $\phi=0.50$ 、 $\varepsilon_{cc}=11,000 \times 10^{-6}$ 。よって、

$$\sigma_c(\varepsilon)=100,000\varepsilon/\{0.50+(\varepsilon/11,000 \times 10^{-6})^{1.5}\} \dots\dots\dots(19)$$

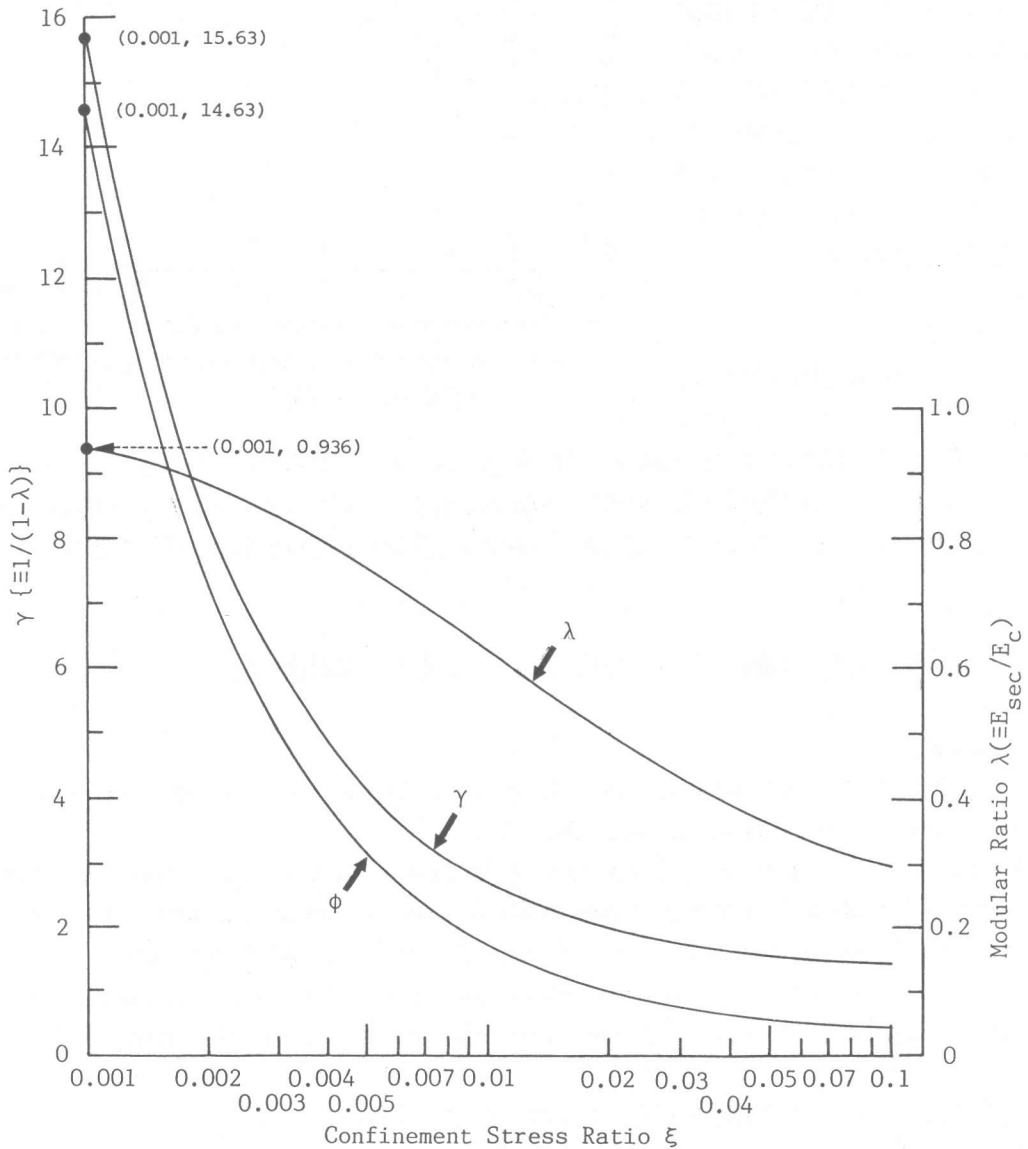


図-5 拘束応力比と $\lambda \cdot \gamma \cdot \phi$ との関係

閾値鉄筋比は式(8)・(17)から

$$P_{th} = \phi E_c / E_s \{ (\gamma - 1) \times (\epsilon / \epsilon_{cc})^{\gamma - \phi} / \{ (\epsilon / \epsilon_{cc})^{\gamma} + \phi \}^2 \} \dots \dots \dots (20)$$

いま、 $\epsilon = 15,000 \times 10^{-6}$ に関し、主筋SBPD130で $P_{th} = 0.75\%$ 、SD30で 3.4% 等が容易に求まるのである。

以上のように、主筋には「閾値鉄筋比」があり、カンファインドコンクリートの減退力の程度と密接に連係しており、横拘束筋のピッチを十分小さくすることも重要で、「標準示方書」の「構造細目」を見直す必要がある。

6. まとめ

RC柱の中心載荷能向上のためには、コンクリートと鉄筋の高強

度化・横拘束筋の斜めせん断補強筋法の三位一体化が図られねばならないこと、また、せん断破壊限界式を求め、これをMander式に適用し、仮定値を含まない実用的カンファインド曲線を求めた。これにより、柱の耐力にひずみ硬化を生じさせる主筋閾値鉄筋比を求める手法を明示した。

[謝辞]

ワープロは、防大 佐藤純一事務官の尽力によった。付記して謝意を表する。

[参考文献]

- 1) Kato, K.: Shear Strength of Concrete in Compression Stress Field, Japan Congress of Materials Research, Proc.31, pp.93-98, 1988.
- 2) Kato, K. Kato, N. and Iwasaka, N.: Development of Loading Capacity of RC Column Considering Complex Shear Strength of Concrete and Strength of Shear Reinforcement, Theoretical and Applied Mechanics, (Univ. of Tokyo Press) V.40, pp.233-248, 1991.
- 3) Kato, K. Kato, N. and Iwasaka, N.: Strain-Hardening of RC Column and Development of Its Bearing Capacity, Theoretical and Applied Mechanics, (Univ. of Tokyo Press) V.41, pp.159-168, 1992.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書、設計編、p.60, 1986.
- 5) Mander, J.B. Priestley, M.J.N. and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Jour. Struct. Engrg., V.114, No.8, pp.1804-1826, 1988.

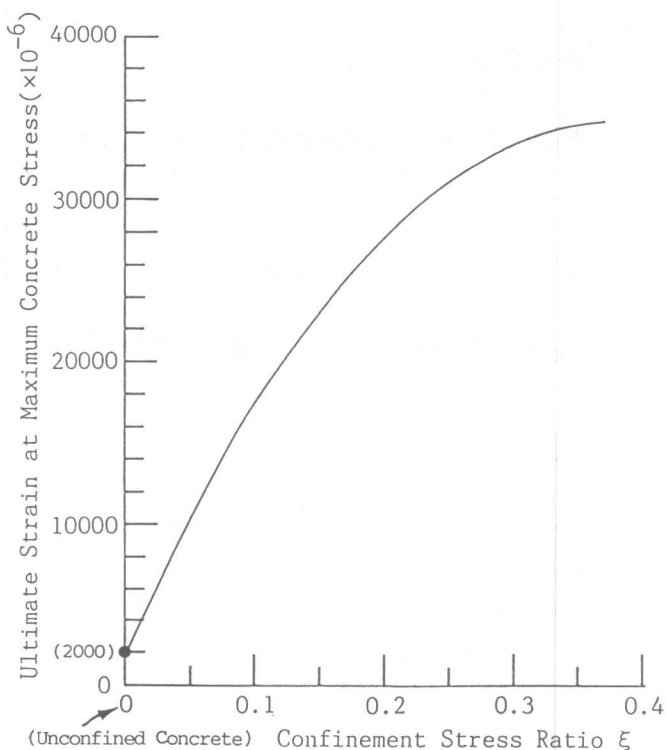


図-6 カンファインドコンクリートの終局ひずみと拘束応力比との関係