

V-20

鉄筋コンクリート部材の曲げ圧縮部コンクリートの応力-ひずみ関係

北海道大学工学部 正員 志村 和紀

北海道大学工学部 正員 佐伯 昇

北海道大学工学部 正員 藤田 嘉夫

1. まえがき

鉄筋コンクリート部材のコンクリートの応力-ひずみ関係については多くの研究が行われており、様々のモデルが提案されているが、その多くは柱供試体の圧縮試験を基にしている。また、曲げ試験による研究もあるが、軸力を作用させ引張領域の無い状態で試験したものが多い。つまり、高軸力下の部材についてはコンクリートの応力-ひずみ関係について明らかになった部分が多いが、純曲げ状態のように中立軸が断面内にあり引張領域がある場合には、横方向鉄筋の拘束効果等が全断面圧縮の場合とは異なることが考えられる。

本研究では単純桁の曲げ試験で得られたひずみデータから圧縮部コンクリートの応力-ひずみ関係を求めることを試みた。

2. 実験方法

実験に使用したコンクリートは目標強度を 300kgf/cm^2 とし、鉄筋はSD35異形棒鋼を用い、引張鉄筋はD13、圧縮鉄筋およびスターラップはD10を用いた。試験桁は矩形断面とし、有効高さを 20cm および 25cm の2種とし、スターラップ間隔を $5, 8, 20\text{cm}$ の3種に変化させた。(表-1)

載荷方法は、図-1に示すように2点載荷とした。引張鉄筋および圧縮鉄筋のひずみは支間中央部に 4cm 間隔で3枚貼付したひずみゲージで測定した。また、主鉄筋位置のコンクリート表面のひずみを変位計によって測定した。

3. 解析方法

コンクリートの応力-ひずみ関係を実験で測定できる値、すなわち、曲げモーメント、鉄筋応力および種々のひずみで表す。以下の式の誘導には、NADAI¹⁾および横山ら²⁾の方法を参考にした。

図-2に示す断面の力および曲げモーメントの釣合いより次の2式を得る。

$$\int_{-\eta_c}^{\eta_t} \sigma_c dA + \sigma_s A_s - \sigma'_s A'_s = 0 \quad \dots (1)$$

$$\int_{-\eta_c}^{\eta_t} \sigma_c \eta dA + \sigma_s A_s \eta_t - \sigma'_s A'_s (\eta_c - d') = M \quad \dots (2)$$

(σ_c : コンクリート応力、 σ'_s : 圧縮鉄筋応力、
 σ_s : 引張鉄筋応力)

表-1 試験桁

試験桁	h cm	d cm	S cm
No.1	20	17.4	5
No.2			8
No.3			20
No.4	25	22.4	5
No.5			8
No.6			20

h; 桁高, d; 有効高さ

S; スターラップ間隔

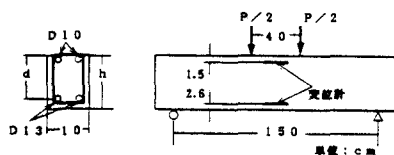


図-1 試験桁の断面・載荷方法

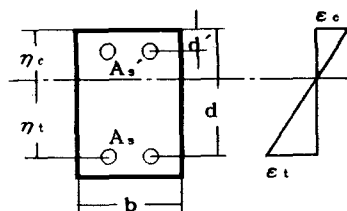


図-2 断面

The Flexural Stress-Strain Relationship of Concrete in Reinforced Concrete Member
by Kazunori SHIMURA, Noboru SAEKI and Yoshio FUJITA

ここで、 $dA = b d\eta$ 、 $\eta = \varepsilon / \phi$ 、 $d\eta = d\varepsilon / \phi$ (ϕ : 曲率) より、

$$\int_{-\varepsilon_c}^{\varepsilon_t} f(\varepsilon) d\varepsilon + \sigma_s A_s \frac{\phi}{b} - \sigma_s' A_s' \frac{\phi}{b} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\int_{-\varepsilon_c}^{\varepsilon_t} f(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon + \sigma_s A_s \frac{\varepsilon_t \phi}{b} - \sigma_s' A_s' \frac{\phi^2}{b} \left(\frac{\varepsilon_c}{\phi} - d' \right) = \frac{M\phi^2}{b} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$(\sigma_c \rightarrow f(\varepsilon))$

ここで、(3)、(4) 式に Leibnitz の法則³⁾を適用して ϕ で微分する。

$$\sigma_t \frac{d\varepsilon_t}{d\phi} - \sigma_c \frac{d\varepsilon_c}{d\phi} + \frac{A_s}{b} \left(\sigma_s + \phi \frac{d\sigma_s}{d\phi} \right) - \frac{A_s'}{b} \left(\sigma_s' + \phi \frac{d\sigma_s'}{d\phi} \right) = 0 \quad \dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} & \sigma_t \varepsilon_t \frac{d\varepsilon_t}{d\phi} + \sigma_c \varepsilon_c \frac{d\varepsilon_c}{d\phi} + \frac{A_s}{b} \left(\sigma_s \varepsilon_t + \sigma_s \phi \frac{d\varepsilon_t}{d\phi} + \phi \varepsilon_t \frac{d\sigma_s}{d\phi} \right) \\ & - \frac{A_s'}{b} \left(\sigma_s' \varepsilon_c + \sigma_s' \phi \frac{d\varepsilon_c}{d\phi} + \phi \varepsilon_c \frac{d\sigma_s'}{d\phi} - 2\sigma_s' \phi d' - \phi^2 d' \frac{d\sigma_s'}{d\phi} \right) \\ & = \frac{1}{b} (2\phi M + \phi^2 \frac{dM}{d\phi}) \quad \dots\dots (6) \end{aligned}$$

(5) $\times \varepsilon_t$ - (6)

$$\begin{aligned} & \sigma_c (\varepsilon_t + \varepsilon_c) \frac{d\varepsilon_c}{d\phi} + \frac{\sigma_s A_s \phi}{b} \frac{d\varepsilon_t}{d\phi} \\ & + \frac{A_s'}{b} \left[\sigma_s' (\varepsilon_t - \varepsilon_c + 2\phi d' - \phi \frac{d\varepsilon_c}{d\phi}) + \frac{d\sigma_s'}{d\phi} \{ \phi (\varepsilon_t - \varepsilon_c) + \phi^2 d' \} \right] \\ & = \frac{1}{b} (2\phi M + \phi^2 \frac{dM}{d\phi}) \quad \dots\dots (7) \end{aligned}$$

ここで $\phi = (\varepsilon_t + \varepsilon_c) / d$ 、 $d\phi = (d\varepsilon_t + d\varepsilon_c) / d$ より

$$\begin{aligned} \sigma_c \frac{d\varepsilon_c}{d\varepsilon_t + d\varepsilon_c} &= \frac{1}{bd} \left[-\sigma_s A_s \frac{d\varepsilon_t}{d\varepsilon_t + d\varepsilon_c} - A_s' \sigma_s' \left(\frac{\varepsilon_t - \varepsilon_c}{\varepsilon_t + \varepsilon_c} + \frac{2d'}{d} - \frac{d\varepsilon_c}{d\varepsilon_t + d\varepsilon_c} \right) \right. \\ & \quad \left. - A_s' \frac{d\sigma_s'}{d\varepsilon_t + d\varepsilon_c} \{ \varepsilon_t - \varepsilon_c + (\varepsilon_t + \varepsilon_c) \frac{d'}{d} \} \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{d} \{ 2M + (\varepsilon_t + \varepsilon_c) \frac{dM}{d\varepsilon_t + d\varepsilon_c} \} \right] \quad \dots\dots (8) \end{aligned}$$

(8) 式中の微分をそれぞれ微小の増分で近似することにし、整理すれば

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{1}{bd} \left[-A_s \sigma_s \frac{\Delta\varepsilon_t}{\Delta\varepsilon_c} - A_s' \sigma_s' \left\{ \left(\frac{\Delta\varepsilon_t}{\Delta\varepsilon_c} + 1 \right) \left(\frac{\varepsilon_t - \varepsilon_c}{\varepsilon_t + \varepsilon_c} + \frac{2d'}{d} \right) - 1 \right\} \right. \\ & \quad \left. - A_s' \frac{\Delta\sigma_s'}{\Delta\varepsilon_c} \{ (\varepsilon_t - \varepsilon_c) + \frac{d'}{d} (\varepsilon_t + \varepsilon_c) \} \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{d} \{ 2M \left(\frac{\Delta\varepsilon_t}{\Delta\varepsilon_c} + 1 \right) + \frac{\Delta M}{\Delta\varepsilon_c} (\varepsilon_t + \varepsilon_c) \} \right] \quad \dots\dots (9) \end{aligned}$$

(9) 式よりコンクリートの応力-ひずみ関係が求められるが、実験データをそのまま代入すると実験誤差のために大きな乱れが生ずるため、以下のようにデータの処理を行う⁴⁾。計算結果に大きく影響すると考えられる項、つまり増分の比で表されている値、 $M-\varepsilon_c$ および $\varepsilon_t-\varepsilon_c$ 関係を実験値から平均的な連続曲線で表す。その例を図-3に示したが、いずれの試験桁についても $M-\varepsilon_c$ は変曲点を1つ、 $\varepsilon_t-\varepsilon_c$ は2つ持つ曲線となった。 $\sigma_s'-\varepsilon_c$ については σ_s' が ε_c から求められるため処理を行わなかった。

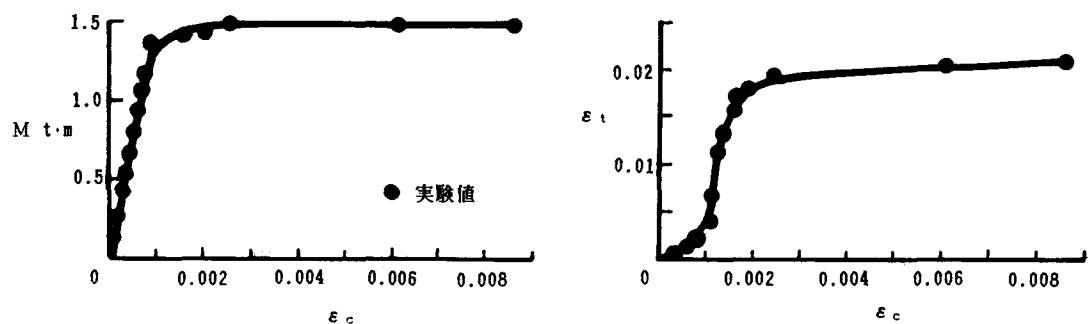


図-3 $M-\varepsilon_c$ 関係、 $\varepsilon_t-\varepsilon_c$ 関係

4. 実験結果および考察

図-4に実験より得られたコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。応力はコンクリート円柱供試体による圧縮強度 f_c' に対する比で表した。

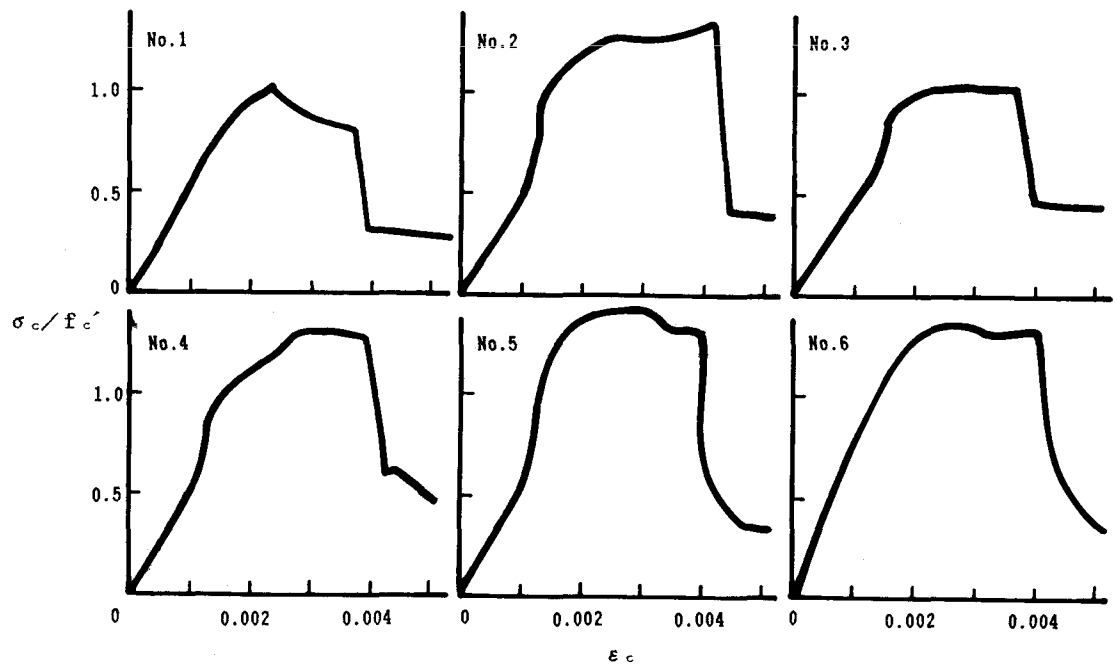


図-4 実験から求めたコンクリートの応力-ひずみ関係

応力-ひずみ関係の形状はいずれも図-5に示すように応力増加部(O→A点)、最大応力の流れ部(A→B)、応力減少部(B→C)および残存応力の流れ部(C→)から成り立っている。

O→A部については、最大応力の90%に達するひずみは0.0017~0.0023の範囲にあり、土木学会コンクリート標準示方書⁵⁾示されているように $\epsilon_c' = 0.002$ にピークを持つ放物線として良いと考えられる。

A→B部については、最大応力の90%を下回るひずみは0.0029~0.0043の範囲にあり、標準示方書に示されている終局ひずみ $\epsilon_{cu}' = 0.0035$ とおおむね一致する。

図-6に最大応力 σ_{cmax} とその時点における中立軸係数 $k_{\sigma_{cmax}}$ (ひずみの測定値より計算したもの)の関係を表した。これによれば、中立軸が高いほど最大応力が増すことがうかがわれる。最大応力に対するスターラップ間隔の影響については本実験の範囲では明確には現れなかった。

B→C部については、多くのモデルにあるような緩やかな応力減少は認められず、急激に減少している。これは、スターラップの拘束効果が急速に減少するためと考えられる。

C点以降は約 $0.3f_c' \sim 0.4f_c'$ の応力を保持しているが、本実験では測定精度および圧縮鉄筋の座屈等の影響により、 $\epsilon_c = 0.005$ より大きなひずみに対する検討はできなかった。

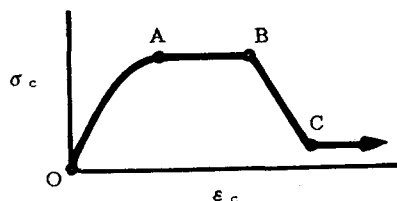


図-5 応力-ひずみ関係の形状

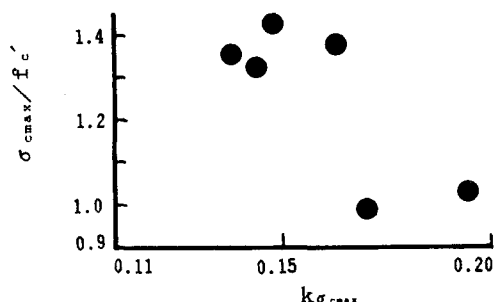


図-6 σ_{cmax} と $k_{\sigma_{cmax}}$ の関係

5. 結論

桁の曲げ試験からコンクリートの応力-ひずみ関係を導くことを試みた。データの数はいくつか少ないが、コンクリート強度 $300\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度において、次のことが考察できた。

- (1) 桁の曲げ試験から得られたひずみデータを基に数値解析的にコンクリートの応力-ひずみ関係を求めることができる。
- (2) 応力増加部は $\epsilon_c = 0.002$ においてピークを持つ放物線として良い。
- (3) 最大応力の大きさは、中立軸が高いほど高まる。
- (4) 最大応力の流れ部の範囲はコンクリート標準示方書のものとほぼ一致する。
- (5) 応力減少部の勾配は他の研究のモデルに比べ大きい。
- (6) 残存応力の大きさはコンクリートの圧縮強度の約0.3~0.4倍であった。

参考文献

- 1) A.NADAI, "Theory of Flow and Fracture of Solids", P.P.353-359, McGRAW-HILL, 1950
- 2) 横山、岸田、"マイコン援用4点曲げ試験システムによる材料の引張り・圧縮応力-ひずみ曲線の決定" 塑性と加工、第27巻 第310号、1986
- 3) C.R.WYLIE, JR., "工業数学<上>", P.273、ブレイン図書出版
- 4) M.T.M.SOLIMAN, C.W.YU, "The Flexural Stress-Strain Relationship of Concrete Confined by Rectangular Transverse Reinforcement", Magazine of Concrete Research, Vol.19, No.61, 1967
- 5) コンクリート標準示方書 設計編、土木学会