

I - B 95

横拘束されたコンクリート柱の応力度～ひずみ関係  
における除荷および再載荷剛性

東京工業大学大学院 学生員 堀 淳一  
（日本学術振興会 特別研究員）  
東京工業大学工学部 F 会員 川島一彦  
東京工業大学工学部 正会員 庄司 学  
（株）ピー・エス 正会員 久保欣也

1. まえがき

ファイバーモデルを用いてRC橋脚の非線形動的解析を行う場合、除荷・再載荷を含むコンクリートの応力度～ひずみ関係が必要である。本文では、コンクリート柱の一軸圧縮載荷実験を行い、除荷・再載荷曲線を定式化した結果を報告する。

2. 実験に用いた供試体と載荷方法

実験には、設計基準強度を23.5MPaとした直径200mm、高さ600mmの円柱供試体を用いた。帯鉄筋としてはSD295、直径6mmの異形棒鋼をフレア溶接で配筋し、図-1に示すように帯鉄筋間隔を100mm（帯鉄筋比 $\rho_s=0.67\%$ 、Aタイプ）、50mm（ $\rho_s=1.33\%$ 、Bタイプ）、25mm（ $\rho_s=2.67\%$ 、Cタイプ）と変化させた。

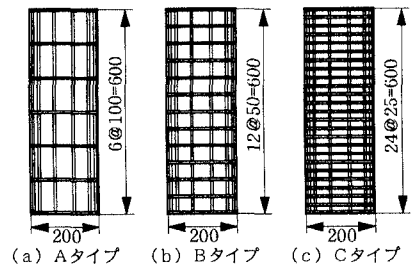


図-1 帯鉄筋の配置

供試体には、一軸圧縮状態で0.5mm/分の載荷速度で変位制御により図-2に示す載荷履歴に基づき荷重を作用させた。AおよびBタイプでは除荷ひずみ $\epsilon_{ul}$ を最大圧縮応力度時のひずみ $\epsilon_{cc}$ の1/2および1/4のn倍（n=1, 2, ...）とした。これらをそれぞれ載荷履歴1、載荷履歴2と呼ぶ。これらではいずれも、ある $\epsilon_{ul}$ における除荷、再載荷の回数を1回としているが、 $\epsilon_{ul}$ は載荷履歴1と同じとし、除荷、再載荷の回数を3回としたのが載荷履歴3である。Cタイプでは、ひずみの増加とともに応力度が増加し続け、 $\epsilon_{ul}$ を直接求められないため、Bタイプの $\epsilon_{ul}$ と同じ値を用いることとした。

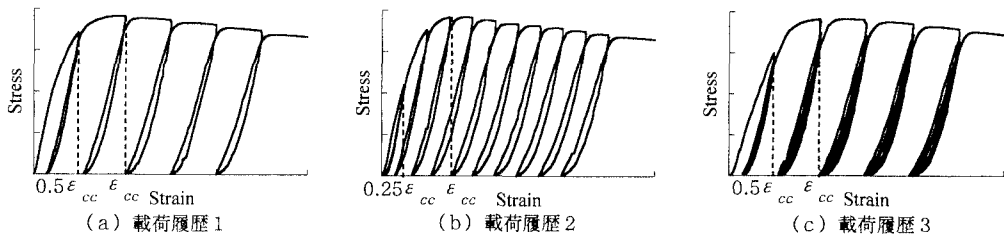


図-2 実験に用いた載荷履歴

3. コンクリート柱の除荷剛性、再載荷剛性の推定

図-3に示すように履歴曲線のある点と原点とを結んだ割線剛性を $E_0$ 、この点から応力度が0となるまで除荷した場合の割線剛性（除荷剛性）を $E_{ul}$ 、応力度が0の点から再載荷した場合の割線剛性（再載荷剛性）を $E_{pl}$ とし、それぞれ以下のように定義する。

$$E_0 = \frac{\sigma_{ul}}{\epsilon_{ul}} \quad (1); \quad E_{ul} = \frac{\sigma_{ul}}{\epsilon_{ul} - \epsilon_{pl}} \quad (2); \quad E_{pl} = \frac{\sigma_{r-ul}}{\epsilon_{ul} - \epsilon_{pl}} \quad (3)$$

いま、 $E_{ul}$ に対する $E_0$ の比を以下のように与える。

$$\alpha_{ul} = \frac{E_0}{E_{ul}} \quad (4)$$

コンクリート柱、応力度～ひずみ関係、拘束効果、除荷・再載荷

〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1 東京工業大学工学部土木工学科 TEL: 03-5734-2922 FAX: 03-5734-3577

$\alpha_{ul}$ の除荷点ひずみ $\varepsilon_{ul}$ 依存性を図-4に示す。図-5には、再載荷剛性 $E_{rl}$ の塑性点ひずみ $\varepsilon_{pl}$ 依存性を示す。これらから、1)  $\alpha_{ul}$ は除荷点ひずみ $\varepsilon_{ul}$ が増加すると低下し、低下の度合いは $\varepsilon_{ul}$ が増加する程緩やかになる、2) 帯鉄筋比 $\rho_s$ が0.67%~2.67%の範囲では、 $\alpha_{ul}$ に対する $\rho_s$ の影響は顕著ではない、3) 再載荷剛性 $E_{rl}$ は塑性点ひずみ $\varepsilon_{pl}$ が増加すると低下し、低下の度合いは $\varepsilon_{pl}$ が増加する程緩やかになる、4) 再載荷剛性 $E_{rl}$ は帯鉄筋比 $\rho_s$ の影響を受け、 $\rho_s$ が大きくなると $E_{rl}$ は大きくなる、ことが分かる。以上より、 $E_{ul} \sim \varepsilon_{ul}$ 、 $\sigma_{ul}$ の関係および $E_{rl} \sim \varepsilon_{pl}$ の関係を回帰分析すると次式が得られる。

$$E_{ul} = 61.1 \sigma_{ul} \varepsilon_{ul}^{-0.372} \quad (r^2 = 0.95) \quad (5)$$

$$E_{rl} = \begin{cases} 2554 \varepsilon_{pl}^{-0.239} & (r^2 = 0.89) \quad \rho_s = 0.67\% \\ 5174 \varepsilon_{pl}^{-0.130} & (r^2 = 0.93) \quad \rho_s = 1.33\% \\ 6849 \varepsilon_{pl}^{-0.099} & (r^2 = 0.90) \quad \rho_s = 2.67\% \end{cases} \quad (6)$$

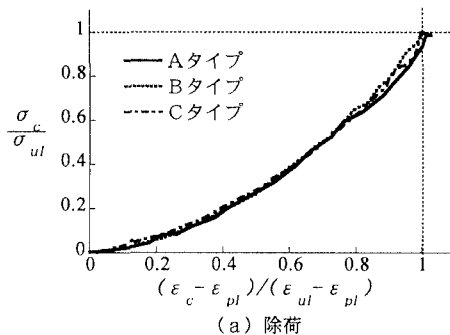
ここで、 $r^2$ は決定係数である。

#### 4. 除荷曲線、再載荷曲線の定式化

除荷曲線および再載荷曲線がひずみ $\varepsilon_c$ および帯鉄筋比 $\rho_s$ によってどのように変化するかを示した一例が図-6である。これによれば、無次元化ひずみ $\tilde{\varepsilon} \equiv (\varepsilon_c - \varepsilon_{pl}) / (\varepsilon_{ul} - \varepsilon_{pl})$ を用いて整理すれば除荷曲線、再載荷曲線ともに、帯鉄筋比 $\rho_s$ の影響をほぼ除去できることが分かる。図-6を回帰すると除荷曲線、再載荷曲線は、次式のようにになる。

$$\text{除荷曲線；} \quad \sigma_c = \sigma_{ul} \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{ul} - \varepsilon_{pl}} \right)^2 \quad (7)$$

$$\text{再載荷曲線；} \quad \sigma_c = E_{rl} (\varepsilon_c - \varepsilon_{pl}) \quad (8)$$



(a) 除荷

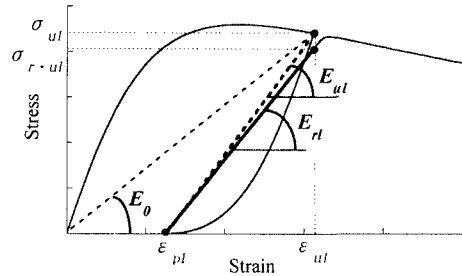


図-3 除荷剛性 $E_{ul}$ 、再載荷剛性 $E_{rl}$ の定義

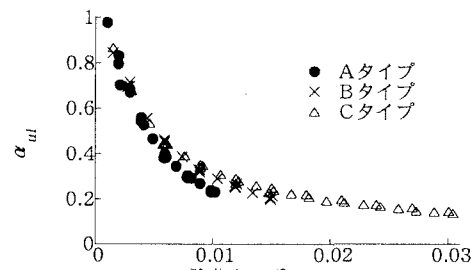


図-4 除荷点ひずみ $\varepsilon_{ul}$ と $\alpha_{ul}$ の関係

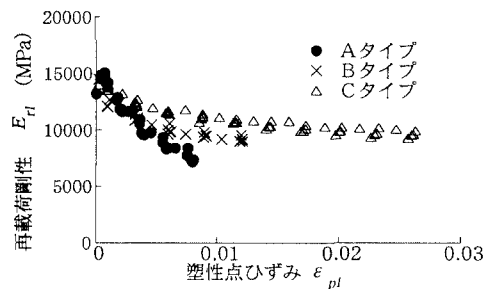
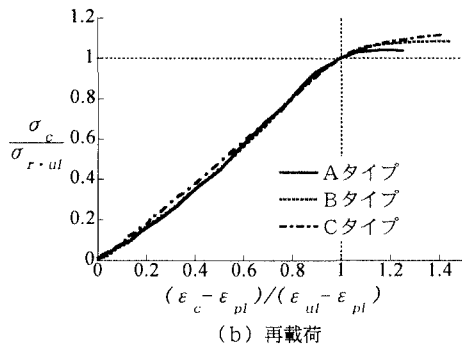


図-5 塑性点ひずみ $\varepsilon_{pl}$ と再載荷剛性 $E_{rl}$ の関係



(b) 再載荷

図-6 除荷、再載荷曲線に及ぼす帯鉄筋比 $\rho_s$ の影響（除荷ひずみを $\varepsilon_{ul} = 0.006$ とした場合）

#### 5. 結論

除荷剛性 $E_{ul}$ を除荷点応力度 $\sigma_{ul}$ および除荷点ひずみ $\varepsilon_{ul}$ の関数として式(5)のように、また再載荷剛性 $E_{rl}$ を帯鉄筋比 $\rho_s$ に応じて塑性ひずみ $\varepsilon_{pl}$ の関数として式(6)のように与えられることを示した。