

## 高強度コンクリートの除荷・再載荷モデルの開発

中澤宣貴<sup>1</sup>・川島一彦<sup>2</sup>・渡邊学歩<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科 土木工学専攻修士課程（〒152-8552 東京都目黒区大岡山）

<sup>2</sup>正会員 工博 東京工業大学大学院理工学研究科 教授 土木工学専攻（同上）

<sup>3</sup>正会員 修（工） 東京工業大学大学院理工学研究科 助手 土木工学専攻（同上）

### 1. まえがき

橋脚の耐震設計では、橋脚の塑性ヒンジ領域における変形性能の向上が重要であり、このためには、帯鉄筋による横拘束を正しく考慮できる横拘束モデルの開発が求められる。しかしながら、現在までに開発されている横拘束モデルの大部分は強度 30MPa 程度の普通強度コンクリートを対象としたもので、高強度コンクリートを対象とした横拘束モデルはほとんど提案されていない。

本研究では、強度90MPa程度までの円形断面コンクリートを対象とした横拘束モデルを開発すると同時に、コンクリート強度が横拘束に与える影響を検討し、強度30～90MPaと広範囲のコンクリートの横拘束モデルを開発する。このために、目標強度を30MPa, 60MPa, 90MPaとしたコンクリートシリンダーに対する一軸圧縮実験を行い、圧縮変形および強度特性を検討すると同時に横拘束モデルの定式化を行った。実験の概要に関してはすでに報告している<sup>1)</sup>ので、ここでは、応力～ひずみの定式化を示す。

### 2. 実験供試体及び載荷方法

帯鉄筋比 $\rho_s$ およびコンクリート強度 $\sigma_{co}$ を変化させて、直径 200mm、高さ 600mm の円柱供試体を 36 体作製した。これらは、堺・川島・庄司の検討<sup>2)</sup>に基づいて、単調載荷した場合の包絡線を求めるための供試体（E-1～E-21）と部分除荷・部分再載荷、完全除荷・完全再載荷を含む除荷・再載荷履歴を求めるための供試体（C-1～C-15）から構成されている。包絡線を求めるためには単調載荷（タイプ I 載荷<sup>2)</sup>）を、また、除荷・再載荷履歴を求めるために

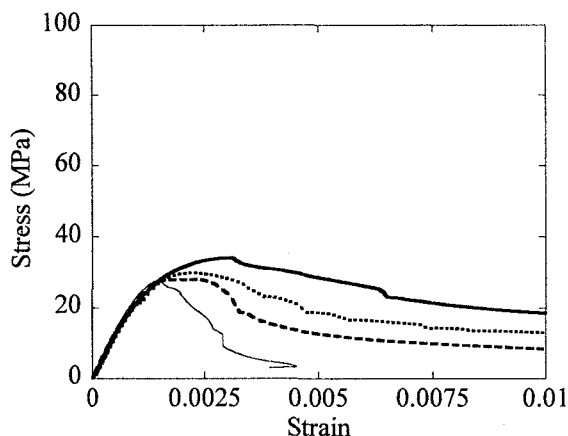
は繰り返し載荷（タイプ II～IV 載荷<sup>2)</sup>）を行った。コンクリート強度としては、30, 60, 90MPa を目標としたが、実際には試験当日のコンクリート強度は 37.6～51.1, 68.7, 101.6MPa である。軸方向鉄筋、帯鉄筋には SD295、直径 6mm の異形棒鋼を用いた。ミルシートによれば、軸方向鉄筋および帯鉄筋の降伏強度は 321MPa、引張強度は 492MPa、伸びは 2% である。帯鉄筋の配置間隔を変えることにより、帯鉄筋（体積）比 $\rho_s$ を 0～1.36% の範囲で変化させた。供試体の上下端で破壊しないように、上下の 50～75mm の範囲では帯鉄筋を密に配置した。

損傷はある領域に集中するため、コンクリートのひずみは高さ方向に一樣とはならない。そのため、どの領域でひずみを計測するかが重要である。ここでは、ファイバー要素解析に用いることを前提に、供試体全長の変形量を全高で割って平均ひずみを求めることとした。ただし、供試体全長の変形量は供試体中央部にひずみゲージを貼付したアクリル棒を挿入し、アクリル棒のひずみから求めた<sup>3) 4)</sup>。

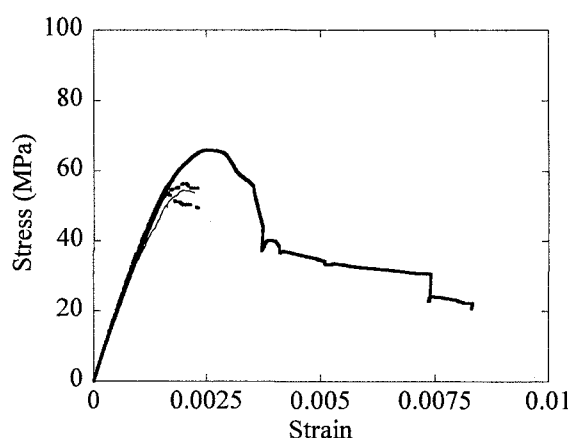
実験には東京工業大学の 5MN 万能試験機を使用した。載荷は変位制御で行い、載荷速度は毎分 0.5mm とした。実験では、荷重、アクリル棒の軸ひずみ、供試体上下面間の軸方向変位、帯鉄筋の周方向ひずみを計測した。供試体の応力は、作用荷重を供試体の断面積で割って求めた。

### 3. コンクリート強度が応力～ひずみ関係に与える影響

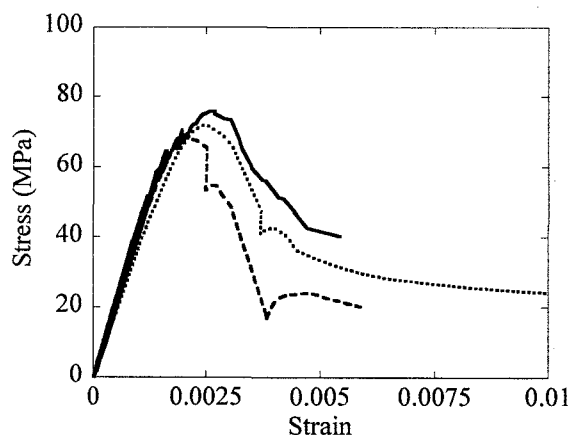
コンクリート強度によって応力～ひずみ関係がどのように変化するかを示した結果が図-1 である。これによれば、コンクリート強度が高くなるほど初期弾性係数  $E_{co}$  は大きくなり、最大圧縮応力  $\sigma_{cc}$  に達



(a) 30MPa 供試体



(b) 60MPa 供試体



(c) 90MPa 供試体

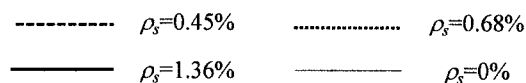


図-1 応力～ひずみ関係に及ぼすコンクリート強度  $\sigma_{c0}$  及び鉄筋比  $\rho_s$  の影響

する際の圧縮ひずみ  $\varepsilon_{cc}$  も増加することがわかる。また、強度が 30MPa の供試体では、帯鉄筋比を大き

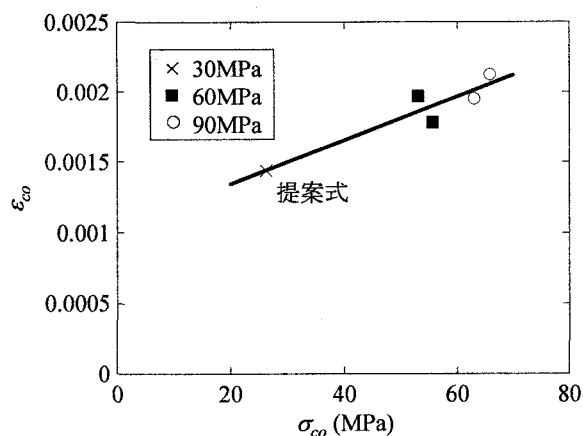


図-2 コンクリート強度  $\sigma_{c0}$  と圧縮ひずみ  $\varepsilon_{cc}$  の関係

くすることによる  $\varepsilon_{cc}$  の増加割合が大きいものに対して、強度が 60MPa や 90MPa のコンクリートでは、帯鉄筋比を大きくしたことによる  $\varepsilon_{cc}$  の増加割合はこれよりも小さい。これは、コンクリート強度が高くなるにつれ、帯鉄筋による横拘束効果が低下することを示している。これには帯鉄筋の降伏強度も関係していると考えられる。

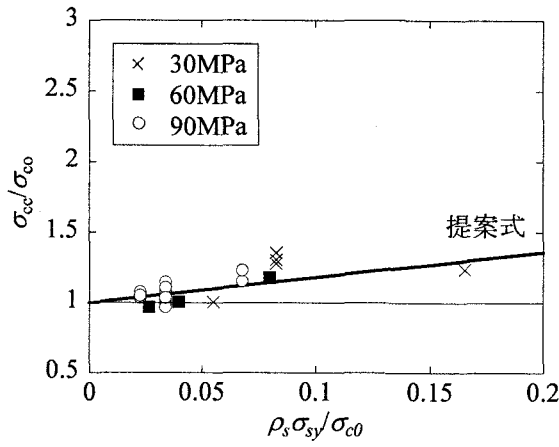
帯鉄筋を配置しない無補強供試体に対して  $\sigma_{c0}$  と  $\varepsilon_{cc}$  との関係を示した結果が図-2 である。図-2 にはそれぞれ後述する  $\sigma_{cc} \sim \varepsilon_{cc}$  関係および  $\sigma_{c0} \sim \varepsilon_{cc}$  の提案式も比較のために示している。これによれば、圧縮ひずみ  $\varepsilon_{cc}$  は圧縮強度  $\sigma_{c0}$  が大きくなるにつれて、ほぼ線形に増加する。現在までに提案された経験式では、 $\varepsilon_{cc}$  を圧縮強度  $\sigma_{c0}$  によらず一定としているが、これは実験に用いられたコンクリートの強度範囲が狭かったためと考えられる。図-2 に基づいてこれを最小 2 乗近似すると、次式のようなになる。

$$\varepsilon_{cc} = 1.54 \times 10^{-5} \cdot \sigma_{c0} + 1.04 \times 10^{-3} \quad (1)$$

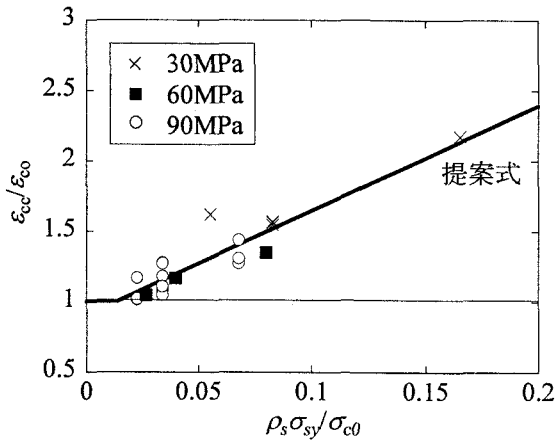
図-2 中には式(1)による提案式も比較のために示している。式(1)は  $\varepsilon_{cc}$  の実験値の特徴を良く表している。

#### 4. コンクリート強度が最大圧縮応力及びその時のひずみに与える影響

横拘束効果によってコンクリートの圧縮強度  $\sigma_{cc}$  やその時のひずみ  $\varepsilon_{cc}$  がどのように変化するかを示した結果が図-3 である。ここでは、横拘束効果を  $\rho_s \sigma_{sy} / \sigma_{c0}$  として与え、 $\sigma_{cc}$  や  $\varepsilon_{cc}$  はそれぞれ  $\sigma_{c0}$ 、 $\varepsilon_{c0}$  によって無次元化している。なお、図中には後述する回帰式も示している。



(a) 最大圧縮応力  $\sigma_{cc}$



(b) 最大圧縮応力のときのひずみ  $\varepsilon_{cc}$

図-3 横拘束が最大圧縮応力  $\sigma_{cc}$  およびそのときのひずみ  $\varepsilon_{cc}$  に及ぼす影響

これによれば、 $\sigma_{cc}/\sigma_{c0}$  および  $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}$  はともに  $\rho_s \sigma_{sy}/\sigma_{c0}$  とおおむね線形関係にある。ここで、 $\rho_s \sigma_{sy}/\sigma_{c0}$  の増加に伴う  $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}$  の増加率が  $\sigma_{cc}/\sigma_{c0}$  の増加率よりも大きいということは、帯鉄筋による横拘束効果が、圧縮応力  $\sigma_{cc}$  の増加よりも圧縮ひずみ  $\varepsilon_{cc}$  の増加により大きな影響を与えることを示している。

図-3 の関係を回帰分析すると、次式のようになる。

$$\frac{\sigma_{cc}}{\sigma_{c0}} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} \leq 0.0022 \\ 1.825 \cdot \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} + 0.996 & 0.0022 \leq \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} \leq 0.0123 \\ 7.494 \cdot \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} + 0.909 & 0.0123 \leq \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} \end{cases} \quad (3)$$

図-3 中には式(2)、(3)によって求めた提案式も示している。式(2)、(3)は、実験により求めた横拘束効果を良く表している。

## 5. 応力上昇域と下降域を統合した定式化

コンクリートの応力～ひずみ関係は、最大圧縮応力  $\sigma_{cc}$  まではひずみの増加とともに応力が増加し、上に凸な曲線を描く。最大圧縮応力  $\sigma_{cc}$  に達すると、応力の傾きはゼロになりその後ひずみの増加とともに応力は減少し、さらにひずみが大きくなると応力は一定値に収束する。したがって、コンクリートの応力～ひずみ関係の境界条件として、以下の5条件が要求される。

- ① 初期条件 :  $\varepsilon_c = 0$  で  $\sigma_c = 0$
- ② 初期勾配条件 :  $\varepsilon_c = 0$  で  $d\sigma_c/d\varepsilon_c = E_c$
- ③ 最大値条件 :  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cc}$  で  $\sigma_c = \sigma_{cc}$
- ④ 最大時勾配条件 :  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cc}$  で  $d\sigma_c/d\varepsilon_c = 0$
- ⑤ 終局条件 :  $\varepsilon_c = \infty$  で  $\sigma_c = \sigma_u$

(4)

ここで重要な点は⑤終局条件で、図-1 に示したように、ひずみが増加してもコンクリートの応力は0になるのではなく、ある値に収束していく。Mander らの提案式では、コンクリートのひずみが大きくなると応力が0に収束する<sup>5)</sup>ため、図-1 の特徴を与えることができない。そこで、この問題点を解決するため、 $C_1 \sim C_4$  および  $n$  を未定係数として次式のように分数関数で  $\sigma_c \sim \varepsilon_c$  関係を与えることを提案する。

$$\sigma_c = \frac{C_1 + C_2 \cdot \varepsilon_c}{1 + C_3 \cdot \varepsilon_c^n} + C_4 \quad (5)$$

式(5)に式(4)の境界条件を与えることにより、 $\sigma_c \sim \varepsilon_c$  関係を次式のように与えることができる

$$\sigma_c = \sigma_u + \frac{-\sigma_u + E_{c0} \cdot \varepsilon_c}{1 + \frac{E_c \cdot \varepsilon_{cc} - \sigma_{cc}}{\sigma_{cc} - \sigma_u} \cdot \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^n} \quad (6)$$

ここで、

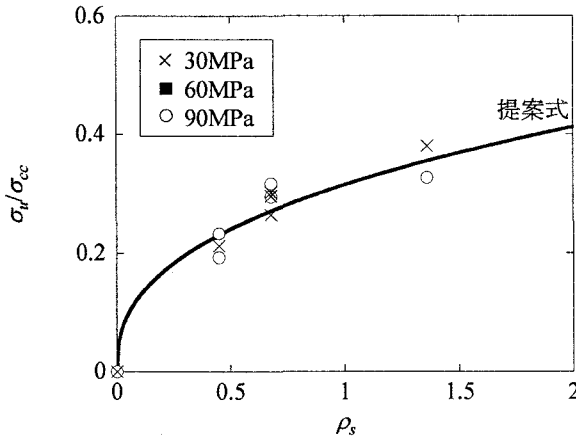


図-4 終局応力  $\sigma_u$  に及ぼすコンクリート強度  $\sigma_{c0}$  および帯鉄筋比  $\rho_s$  の影響

$$n = \frac{E_{c0} \cdot \varepsilon_{cc}}{\sigma_{cc} - \sigma_u} \quad (7)$$

式(6)では、応力  $\sigma_u$  をどのように与えるかが重要となる。ここでは、ひずみが 2%に達したときの応力を終局応力  $\sigma_u$  と見なすこととする。これは、橋脚の耐震設計において、コンクリートの塑性ひずみとして 1%以上を想定することはきわめてまれであり、2%程度のひずみに相当する応力であれば、終局応力  $\sigma_u$  と見なすことができると考えられるためである。実験から、この条件に当てはまるケースを示すと図-4 のようになる。図中には後述する提案式も比較のために示している。これによれば、終局応力  $\sigma_u$  に与えるコンクリート強度の影響は大きいものではなく、終局応力  $\sigma_u$  は次式のように与えることができる。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{cc}} = 0.315 \cdot \rho_s^{0.4} \quad (8)$$

式(8)による  $\sigma_u$  を求めた結果は図-4 に示されている。式(8)はよく実験の特徴を与えることができる。

図-5 は、応力  $\sigma_c$  ～ひずみ  $\varepsilon_c$  関係の包絡線を実験値と式(6)とで比較した結果である。これによれば、式(6)は強度 30MPa～90MPa の幅広い領域にわたってコンクリートの応力～ひずみ関係をよく表している。

## 6. 応力上昇域と下降域に分けた定式化

橋脚を対象として開発された横拘束モデルとして

は、Hoshikuma らによるモデルがある<sup>6)</sup>。これは、強度 18.5MPa～28.8MPa のコンクリートを対象としたもので、応力の上昇域と下降域に分けて、コンクリートの応力  $\sigma_c$  ～ひずみ  $\varepsilon_c$  関係を次式のように与えている。

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right\} & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc} \\ \sigma_{cc} - E_{des} (\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) & \varepsilon_{cc} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (9)$$

ここで、

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{cc}}{E_c \varepsilon_{cc} - \sigma_{cc}} \quad (11)$$

ここに、 $E_c$  はコンクリートの初期弾性係数である。式(9)の定式化では、 $\varepsilon_{c0}$ 、 $\sigma_{cc}$ 、 $\varepsilon_{cc}$ 、 $E_{des}$  の 4 パラメータが必要とされる。このうち、 $\sigma_{cc}$  と  $\varepsilon_{cc}$  については、実験結果から次式のように与えられる。

$$\frac{\sigma_{cc}}{\sigma_{c0}} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} \leq 0.0022 \\ 1.825 \cdot \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} + 0.996 & 0.0022 \leq \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} \end{cases} \quad (12)$$

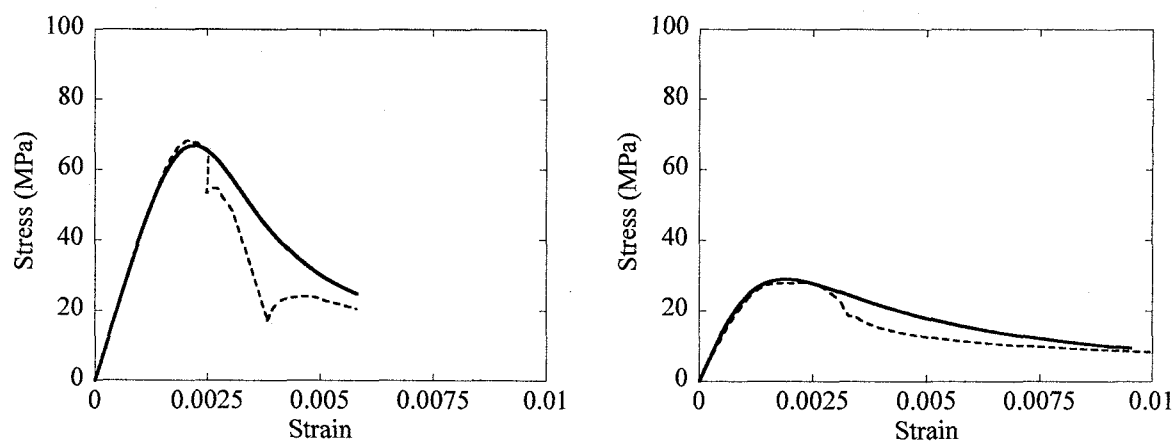
$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} \leq 0.0123 \\ 7.494 \cdot \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} + 0.909 & 0.0123 \leq \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} \end{cases} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{c0} = 1.54 \times 10^{-5} \cdot \sigma_{c0} + 1.04 \times 10^{-3} \quad (14)$$

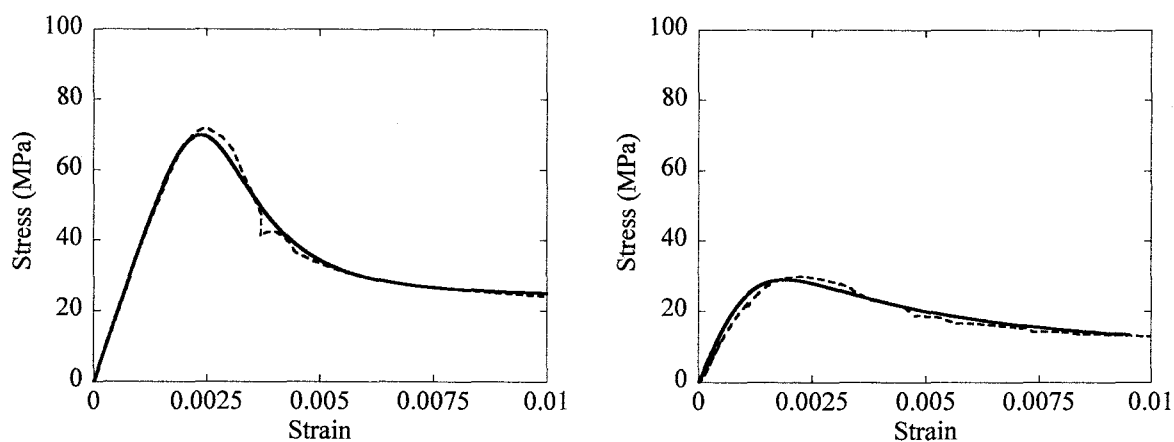
したがって、 $\sigma_{c0}$  を与えれば式(14)から  $\varepsilon_{c0}$  が決まり、式(12)、式(13)から  $\sigma_{cc}$ 、 $\varepsilon_{cc}$  を定めることができる。このため、残りは応力下降域の下降勾配  $E_{des}$  を定める必要がある。ここでは、Hoshikuma らに従って、応力が最大圧縮応力からその 50%に低減する点までの区間の平均勾配を  $E_{des}$  と定義する<sup>6)</sup>。

Hoshikuma らと同じように  $E_{des}$  と  $\sigma_{c0}^2 / \rho_s \sigma_{sy}$  の関係を求めると、図-6 のようになる。これを最小二乗近似すると、 $E_{des}$  は、

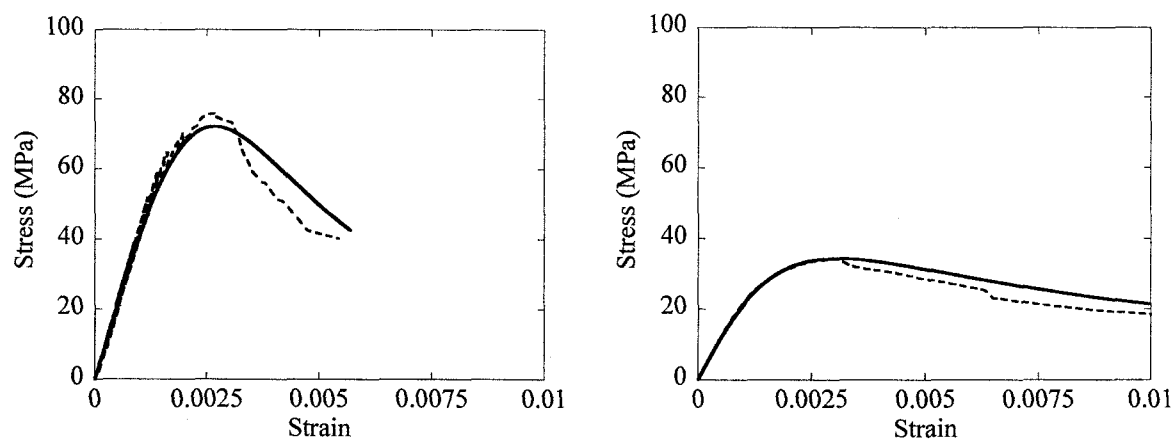
$$E_{des} = \begin{cases} 0.0169 \cdot \frac{\sigma_{c0}^2}{\rho_s \sigma_{sy}} & 0 \leq \frac{\sigma_{c0}^2}{\rho_s \sigma_{sy}} \leq 1.373 \times 10^3 \\ 0.0027 \cdot \frac{\sigma_{c0}^2}{\rho_s \sigma_{sy}} + 19.5 & 1.373 \times 10^3 \leq \frac{\sigma_{c0}^2}{\rho_s \sigma_{sy}} \end{cases} \quad (15)$$



(a)  $\rho_s = 0.45\%$



(b)  $\rho_s = 0.68\%$



(c)  $\rho_s = 1.36\%$

(1) 90MPa 供試体

(2) 30MPa 供試体

—— 提案式

----- 実験値

図-5 式(6)による応力～ひずみ関係の適用性

図-6 中には式(15)による結果も比較のために示している。式(15)は30MPa～90MPaの範囲の強度のコンクリートに対して、応力低下域の下降勾配  $E_{des}$  をよく表している。

以上より、式(12)～式(15)により  $\epsilon_{c0}$ ,  $\sigma_{cc}$ ,  $\epsilon_{cc}$ ,  $E_{des}$  を求め、応力～ひずみの包絡線を式(9)によって求めた結果を実験結果と比較すると図-7のようになる。これによれば、強度30MPa～90MPaの範囲のコ

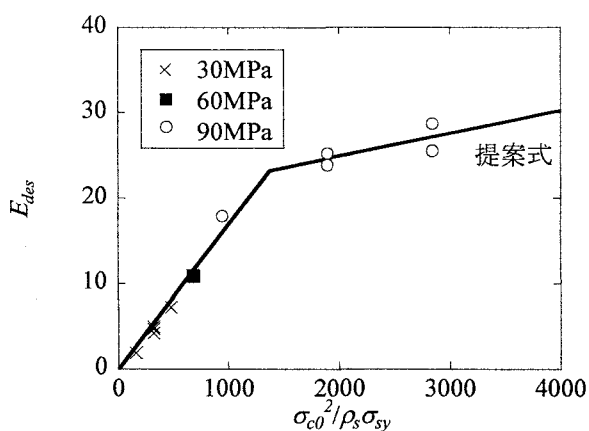


図-6 横拘束効果が応力度低下域の下降勾配に与える影響

ンクリートに対して、式(9)は横拘束効果をよく表すことができる。

## 7. 結論

強度 90MPa 程度の高強度コンクリートの横拘束モデルを開発すると同時に、これに及ぼすコンクリート強度の影響を明らかにすることにより、結果的に 30～90MPa 程度の広い強度範囲のコンクリートの横拘束モデルを開発した。本研究より得られた結論を示すと、以下の通りである。

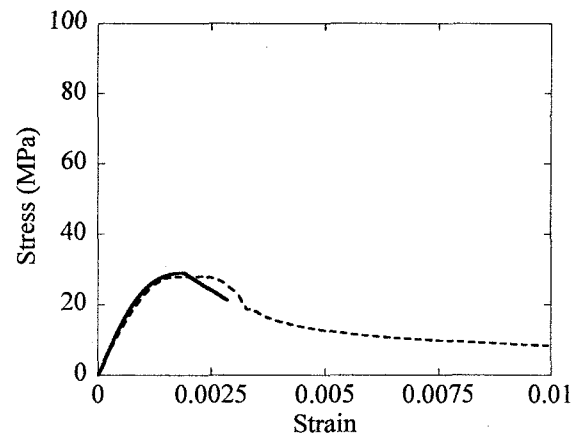
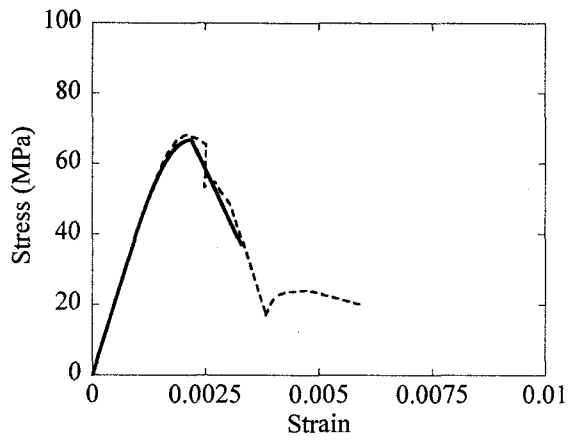
- 1) 強度 90MPa の高強度供試体を単調載荷していくと、最大圧縮応力に達するまでは、供試体にはほとんど損傷が生じないが、最大圧縮応力に達すると急速に破壊が進行し、ぜい性的な破壊となる。
- 2) 帯鉄筋を配置しない場合の最大圧縮ひずみは、最大圧縮応力とほぼ線形関係である。最大圧縮応力と最大圧縮ひずみの関係を式(12)を用いることにより表すことができる。
- 3) 最大圧縮応力と最大圧縮ひずみの関係を、式(13)、式(14)のように提案した。式(13)、式(14)は 30MPa 程度から 90MPa 程度までの幅広い範囲のコンクリートに対する最大圧縮応力と最大圧縮ひずみの関係をよく表すことができる。
- 4) 応力低下域の下降勾配を式(20)により提案した。

式(20)は、コンクリート強度および横拘束筋体積比が下降勾配に与える影響をよく表すことができる。

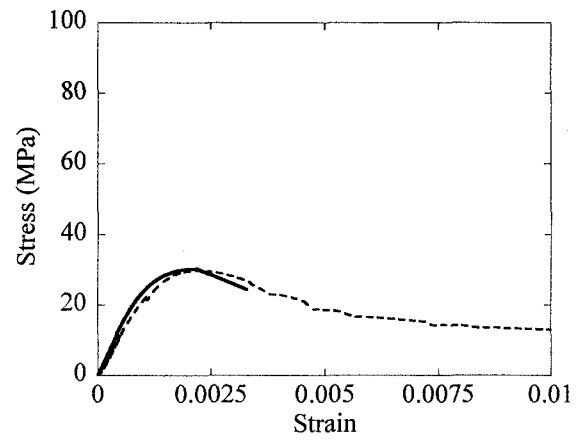
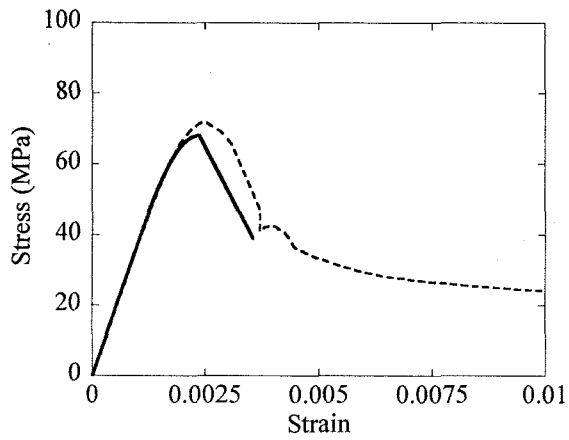
5) 応力上昇域と応力下降域を 1 つの式で表すことのできる応力～ひずみ関係を式(17)のように提案した。式(17)を用いることにより、30MPa の普通強度から 90MPa 程度の高強度の幅広い範囲を対象とした、コンクリートの応力～ひずみ関係をよく表すことができる。

## 参考文献

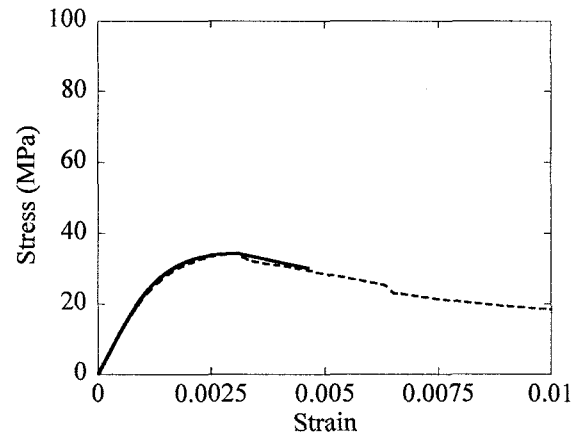
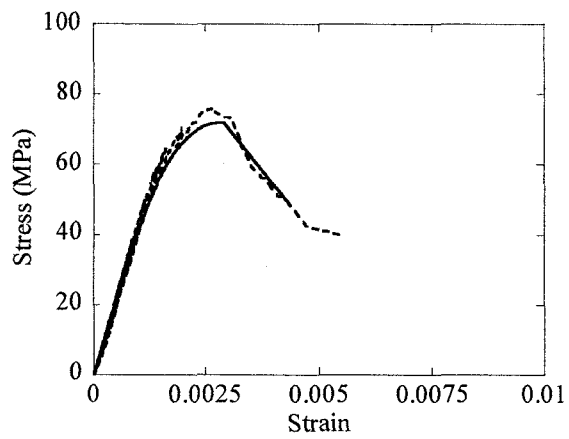
- 1) 中澤宣貴，川島一彦，渡邊学歩：高強度コンクリートの横拘束モデルの開発，第 6 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計法に関するシンポジウム，2003
- 2) 堺淳一，川島一彦，庄司学：横拘束されたコンクリートの除荷および再載荷過程における応力～ひずみ関係の定式化，土木学会論文集，No. 654/I-52，pp. 297-316，2000.
- 3) Lertsrisakulrat, T., Watanabe, K., Matsuo, M., and Niwa, J.: Experimental Study on Parameters in Localization of Concrete Subjected to Compression, 土木学会論文集，No. 669/V-50，pp. 309-321，2001.
- 4) Lertsrisakulrat, T., Niwa, J., Yanagawa, A. and Matsuo, M.: Concepts of Localized compressive failure of concrete in RC deep beams, 土木学会論文集，No. 697/V-54，pp. 215-225，2002.
- 5) Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R.: Observed stress-strain behavior of confined concrete, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.114, No.ST8, pp.1827-1849, Aug.1988.
- 6) Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K. and Taylor, A. W.: Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 123, No. 5, pp. 624-633, 1997.



(a)  $\rho_s = 0.45\%$



(b)  $\rho_s = 0.68\%$



(c)  $\rho_s = 1.36\%$

(1) 90MPa 供試体

(2) 30MPa 供試体

—— 提案式      - - - - 実験値  
 図-7 式(9)による応力～ひずみ関係の適用性