

高強度コンクリートの横拘束モデルの開発

中澤宣貴¹・川島一彦²・渡辺学歩³

¹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 2-12-1）
²正会員 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科土木工学専攻（同上）
³正会員 工修 東京工業大学助手 大学院理工学研究科土木工学専攻（同上）

1. まえがき

橋梁の建設には一般に 30MPa 程度のコンクリートが用いられることが多いが、現在ではすでに 150MPa 程度の強度を有するコンクリートを施工可能と言われている。高強度コンクリートは、耐力の向上や断面の減少とそれに伴う地震力の低減などにより、耐震性を向上させるために有効と考えられる。今後、高強度コンクリートを用いた橋梁の設計が普及すると考えられるが、高強度コンクリートを塑性ヒンジ領域に使用する場合には、横拘束効果を適切に評価する必要がある。しかし、現在までに開発されている横拘束モデルは 30MPa 程度のコンクリートを対象としており、高強度コンクリートに対する適用性が保証されていない。

そこで本研究では、30MPa、60MPa、90MPa の 3 種類のコンクリート強度を対象とし、横拘束された円形断面供試体に対する一軸圧縮実験に基づいて、高強度コンクリートにも適用可能な横拘束モデルの提案を行う。

2. 実験に用いた供試体および測定方法

供試体はいずれも直径 200mm、高さ 600mm の円柱供試体である。表-1 および図-1 に示すように、帯鉄筋比 ρ_s およびコンクリート強度 σ_{co} を変化させて合計 15 体を作製した。ここで、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、68.7、101.6MPa であった。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比 ρ_s を変化させた。

コンクリートに圧縮力を作用させると、一般に損傷はある領域に集中する。このためコンクリートのひずみは高さ

表-1 実験に用いた供試体

供試体		コンクリート強度 σ_{co} (MPa)	帯鉄筋	
			間隔 s (mm)	体積比 ρ_s (%)
30MPa	ENV-1	37.6	—	—
	ENV-2		50	1.36
	ENV-3		150	0.45
60MPa	ENV-4	68.7	—	—
	ENV-5		—	—
	ENV-6		50	1.36
	ENV-7		100	0.68
	ENV-8		150	0.45
90MPa	ENV-9	101.6	—	—
	ENV-10		—	—
	ENV-11		50	1.36
	ENV-12		100	0.68
	ENV-13		—	—
	ENV-14		—	—
	ENV-15		150	0.45

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、これによって異なった応力～ひずみ関係が得られる。既往の研究では、供試体上下面間での軸方向の変位量を計測し、これを供試体全長で除して供試体の平均ひずみを求める場合が多い。しかし、この方法では、供試体内部の局所的なひずみの分布を求めることはできない。また、供試体を垂直にセットするために、供試体の上下面に石膏を挿入する場合が多いが、上下面の変位量として石膏の変形が含まれる場合があり、この影響を正しく補正しないと上記の方法により求めた平均圧縮ひずみは真値を過大評価する可能性がある。

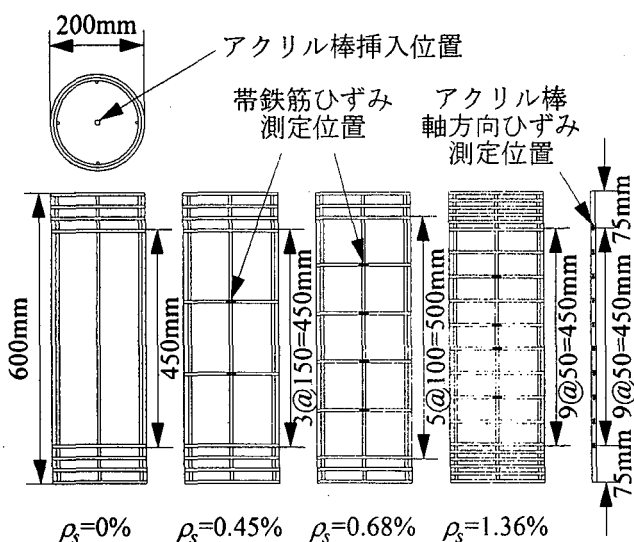


図-1 実験に用いた供試体の配筋図および
アクリル棒ひずみゲージ貼付位置

そこで、ここでは中村・檜貝ら¹⁾、二羽ら^{2), 3)}が用いた方法に基づいて、供試体中央部に図-1に示すよう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相隣るひずみゲージ間(距離 $l_i=50\text{mm}$)のコンクリートの平均ひずみ ε_i を測定することとした。 ε_i を高さ方向に積分すると、供試体全長の変形量 ΔL を次式のように近似的に求めることができる。

$$\Delta L = \sum l_i \varepsilon_i \quad (1)$$

実験には図-2に示す東京工業大学の5MN万能試験機を使用した。荷重は変位制御で行い、荷重速度は毎分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。供試体に作用させた応力度は、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

(1) 供試体の損傷状況

強度60MPaおよび90MPaの高強度供試体を単調荷重していくと、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。しかし、最大圧縮応力に達すると同時に急速にクラックが進展し、爆発音とともにコアコンクリートが飛散して、急激に荷重が低下する。帯鉄筋が破断し、これが急速な破壊の原因と見られる供試体もあれば、帯鉄筋が破断していない供試体もある。ピーク後のひずみを測定することができた供試体もあったが、多くの供試体ではピーク後のひずみを測定できなかった。これは、蓄積された大きなひずみエネルギーが、損傷部分か

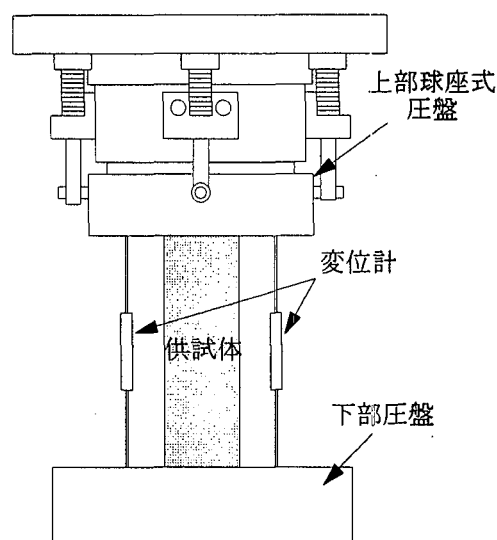


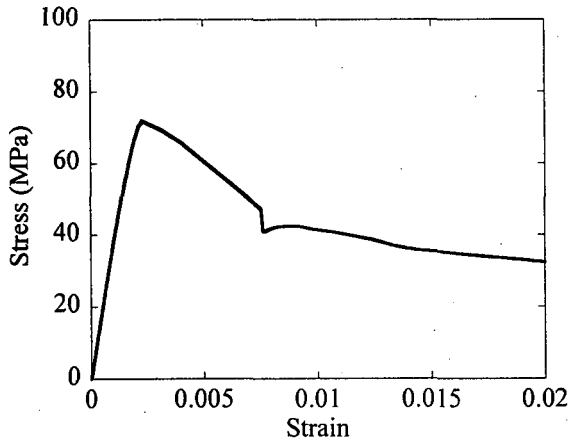
図-2 荷重方法

ら一気に解放されるために、コンクリートが脆性的な破壊をしたためと考えられる。脆性的な破壊をした場合には、ポストピーク領域におけるひずみを計測することはできない。しかし、コンクリートの応力が最大応力に達するか否かの段階で除荷と再荷重をうまく繰り返すと、脆性的な破壊をせず、ポストピーク領域のひずみを計測できた供試体もある。後述の解析においては、ポストピーク領域のひずみは、こうした条件の実験結果である。30MPaの普通強度供試体では、帯鉄筋を配置していない場合でも、徐々にクラックの進展や剥落が生じ、脆性的な破壊は生じなかった。

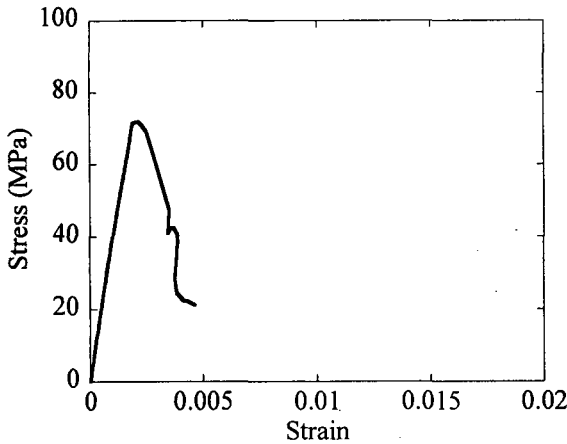
(2) 高さ方向の損傷度の違い

図-3はENV-12供試体の高さ275mm、375mm、475mmにおける応力～ひずみ関係である。最大応力 σ_{cc} が生じるまでは、どの高さにおいても応力～ひずみ関係はほぼ同じである。しかし、最大応力 σ_{cc} 後では損傷の度合いが高さ方向に異なり、損傷が集中する領域(図-3(a))ではひずみが大きく増加するのに対して、損傷が生じてない領域(図-3(c))ではひずみは減少していく。

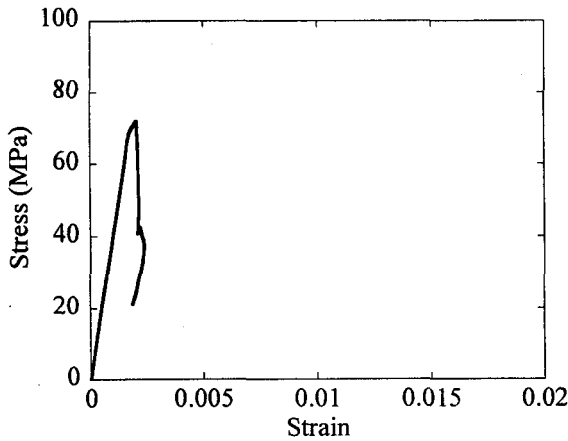
前述したように、応力～ひずみ関係を定式化するためには、ひずみをどのように定義するかが重要である。損傷が集中した領域のひずみを用いれば、終局圧縮ひずみの値が大きくなり、ポストピークでの応力の低下度が小さくなる。有限要素解析法のように要素ごとの応力～ひずみ関係を議論するためには、ローカルな領域のひずみが重要であると考えられる。しかし、コンクリートのひずみは塑性ヒンジ領域の中でも一様ではなく、また、クラックが生じると、連続体としての取り扱いもできなくな



(a) 高さ 275mm



(b) 高さ 375mm



(c) 高さ 475mm

図-3 供試体の高さ方向における損傷の違い

る。

このため、有限要素解析法のように微少要素ごとの細かなひずみ分布やクラックの進展を追うのではなく、塑性ヒンジ領域における拘束されたコンクリートの変形を全体としてとらえて、平均化されたコンクリートの応力～ひずみ関係を用いようとするのがファイバー要素解析法である。ファイバー要素解析法において、塑性ヒンジ領域

における平均的な拘束コンクリートの応力～ひずみ関係を用いれば、橋脚の非線形履歴をよく表すことができることは、既往の研究により明らかにされている^{4)~6)}。

ただし、コンクリートシリンダー内のコンクリートの損傷や横拘束メカニズムと、実際の橋脚の塑性ヒンジ領域におけるコンクリートの損傷や横拘束メカニズムは似てはいても同一ではない。このため、この点については、くり返し載荷実験をファイバー要素法で解析する段階でキャリブレーションしておかなければならない。

以上の点から、本研究では式(1)により ΔL を求め、これを供試体長で割って求めた平均ひずみを解析することとした。

(3) コンクリート強度の違いが強度特性に与える影響

図-4 は、コンクリート強度ごとの応力～ひずみ関係を示した結果である。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_{c0} は大きくなり、最大圧縮応力 σ_{cc} に達する際の圧縮ひずみ ε_{cc} も増加する。また、強度が 30MPa の供試体では、帯鉄筋比が大きくなるにつれて、 ε_{cc} は大きく増加するのに対して、強度が 60MPa や 90MPa の場合には、帯鉄筋比を大きくしても ε_{cc} はそれほど大きくはならない。これは、コンクリート強度が高くなるにつれ、帯鉄筋が効きにくくなることを示しており、帯鉄筋の降伏強度に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の圧縮強度 σ_{c0} と、その時のひずみ ε_{c0} との関係を示した結果が図-5 である。これによれば、圧縮ひずみ ε_{c0} は圧縮強度 σ_{c0} が大きくなるにつれて、ほぼ線形に増加する。

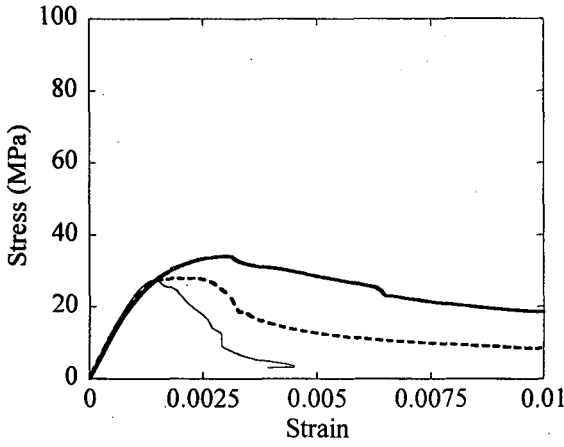
星隈らは、18.5MPa～28.8MPa のコンクリート強度を対象としてコンクリートの横拘束を表すために、 σ_{cc} 、 ε_{cc} を次式のように提案している⁷⁾。

$$\begin{aligned}\sigma_{cc} &= \sigma_{c0} + 3.83 \rho_s \sigma_{sy} \\ \varepsilon_{cc} &= 0.00218 + 0.0332 \rho_s \sigma_{sy} / \sigma_{c0}\end{aligned}\quad (2)$$

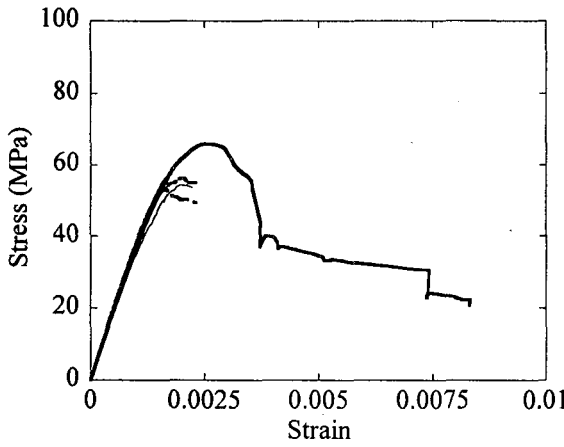
上式にはコンクリート強度 σ_{c0} の項が含まれており、コンクリート強度が横拘束効果に与える影響を考慮した形となっている。しかし、式(2)で $\rho_s=0$ とすると $\varepsilon_{c0}=0.00218$ と一定値となり、上述したようにコンクリート強度が大きくなると圧縮ひずみ ε_{cc} が大きくなるという関係を表すことができない。

Mander et al. は σ_{cc} 、 ε_{cc} を次式のように与えている⁸⁾。

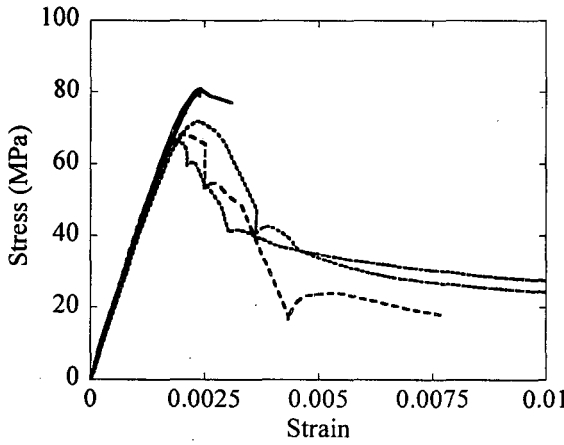
$$\begin{aligned}\sigma_{cc} &= \sigma_{c0} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 \sigma_l}{\sigma_{c0}}} - 2 \frac{\sigma_l}{\sigma_{c0}} \right) \\ \varepsilon_{cc} &= \varepsilon_{c0} \left[1 + 5 \left(\frac{\sigma_{cc}}{\sigma_{c0}} - 1 \right) \right]\end{aligned}\quad (3)$$



(a) 30MPa 供試体



(b) 60MPa 供試体



(c) 90MPa 供試体

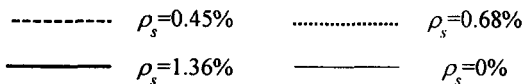


図-4 応力～ひずみ関係に及ぼすコンクリート強度

上式は、コンクリート強度 σ_{c0} が大きくなるにつれて、 σ_{cc}/σ_{c0} および、 $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}$ の増加率が小さくなることを表しているが、帯鉄筋比 ρ_s 、帯鉄筋の降伏強度 σ_{sy} が拘束効

果に与える影響や、 ε_{c0} が σ_{c0} とどのような関係にあるかを与えることができない。

堺・川島らは横拘束モデルを次式のように与えている^{10), 11)}。

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_{cc}}{\sigma_{c0}} &= 0.90 + 4.22C \\ \varepsilon_{cc} &= 0.002 + 0.057C\end{aligned}\quad (4)$$

ここで、 C は横拘束効果係数であり、高さ方向の横拘束筋間隔 s によって横拘束効果が低減される効果を κ_s 、横拘束筋の配置間隔 d_i によって横拘束効果が低減される効果を κ_d とすると、次式のように表せる。

$$C = \frac{\kappa_s \kappa_d \sigma_{lu}}{\sigma_{c0}} \quad (5)$$

式(4)は、帯鉄筋の配置間隔および中間帯鉄筋の影響を考慮できる提案式であるが、21.0～22.8MPa の普通強度コンクリートに対する実験結果に基づいて定式化しており、高強度コンクリートに対する適用性に関しては検討していない。

小橋らは 80MPa の高強度コンクリートを対象として、横拘束効果が σ_{cc}/σ_{c0} に及ぼす影響に関して検討している¹²⁾が、 $\rho_s=2\%$ 以上と非常に密に拘束した場合を対象としており、また拘束効果が $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}$ に与える影響に関しては検討していない。

以上のように、現在までに提案されている横拘束モデルは、いずれもコンクリート強度を適切に表現できない。そこで、本研究では、横拘束効果は帯鉄筋比 ρ_s 、帯鉄筋の降伏強度 σ_{sy} と比例関係にあり、また、コンクリート強度が増加すると横拘束効果は小さくなることを考慮して、横拘束効果を $\rho_s \sigma_{sy} / \sigma_{c0}$ により評価することにする。 σ_{cc}/σ_{c0} および、 $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}$ が $\rho_s \sigma_{sy} / \sigma_{c0}$ によってどのように変化するかを示した結果が図-6である。図中には後述する回帰式も示している。これによれば、 σ_{cc}/σ_{c0} および $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}$ は $\rho_s \sigma_{sy} / \sigma_{c0}$ とおおむね線形関係にある。 $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}$ の増加率が σ_{cc}/σ_{c0} の増加率よりも大きいことは、帯鉄筋による横拘束効果が、圧縮応力 σ_{cc} の増加よりも圧縮ひずみ ε_{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-6 の関係を回帰分析すると、次式のようになる。

$$\frac{\sigma_{cc}}{\sigma_{c0}} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} \leq 0.0135 \\ 3.956 \cdot \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} + 0.947 & 0.0135 \leq \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} \leq 0.0135 \\ 7.488 \cdot \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} + 0.898 & 0.0135 \leq \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{c0}} \end{cases} \quad (7)$$

図-6 中には式(6)、(7)による提案式も示している。式

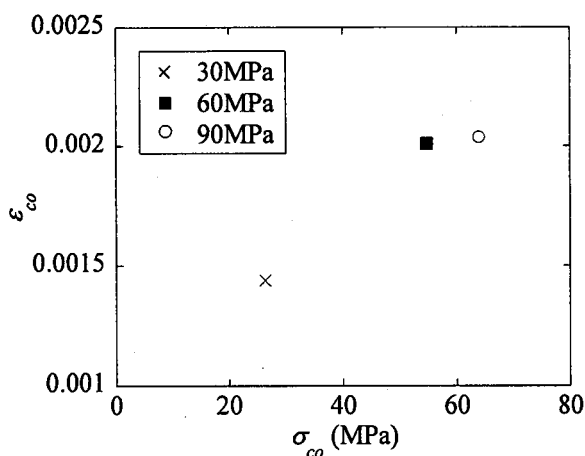
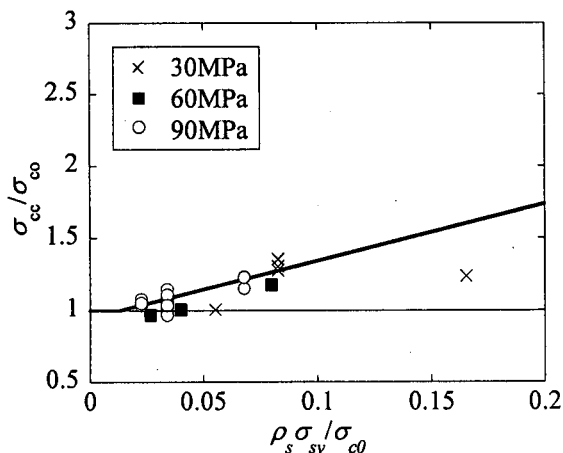
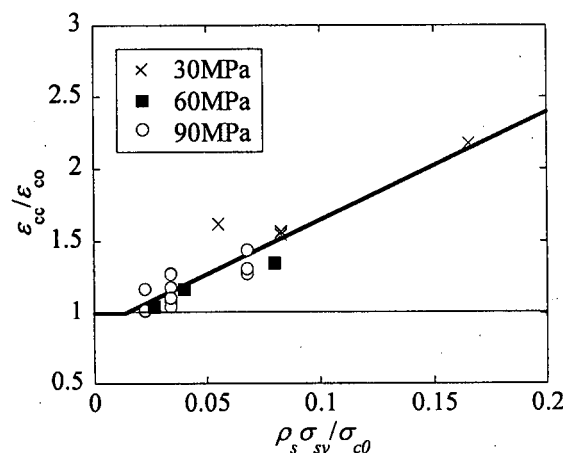


図-5 コンクリート強度と圧縮ひずみの関係



(a) 最大圧縮応力



(b) 最大圧縮応力時のひずみ

図-6 横拘束効果が最大圧縮応力、および最大圧縮応力時のひずみに与える影響

(6), (7)は、実験により求めた横拘束効果を良く表していると考えられる。

4. 結論

強度 90MPa 程度の高強度コンクリートも含めて、帯鉄

筋による横拘束効果を表現できるモデルの開発を目的として、15体の円形コンクリート供試体に対する、一軸圧縮載荷実験を行った。まだ、中間段階ではあるが、本研究より得られた結論を以下に示す。

- 1) 90MPa 程度の高強度コンクリートでは、応力が最大圧縮応力に達すると同時に、急激に耐力が低下し、脆性的な破壊を生じる。30MPa 程度の強度の供試体では、このような現象は生じない。
- 2) 一軸圧縮載荷を行うと、ある領域に損傷が集中し、その領域ではひずみが大きくなるのに対して、損傷が生じていない領域ではひずみが減少する。
- 3) コンクリート強度 σ_{c0} が増加すると、コンクリートの初期弾性係数 E_{c0} と最大圧縮応力に達する際のひずみ ϵ_{c0} が増加する。
- 4) コンクリート強度が高くなるほど、帯鉄筋による横拘束効果が σ_{cc}/σ_{c0} および $\epsilon_{cc}/\epsilon_{c0}$ に与える影響は小さくなる。
- 5) 普通強度のコンクリートから 90MPa 程度の高強度コンクリートまでを対象とすることができる、横拘束モデルを式(6), (7)のように提案した。提案式を用いることで、コンクリート強度および帯鉄筋比の影響を精度良く評価することができる。

5. 謝辞

本研究に関し、独立行政法人土木研究所の星隈順一氏、カリフォルニア大学バークレー校の堺淳一氏から有益なご意見を賜りました。また、コンクリート柱のひずみの測定法に関しては、東京工業大学の二羽淳一郎教授のご指導を得ました。また、供試体の製作や実験に際しては、中島商事(有)、東京工業大学の五十嵐規矩夫助教授の他、東京工業大学川島研究室の下山英介、永田聖二、松川亮平、中村剛、早川涼二、福田智之、宮路健太郎の各氏のご援助を得ました。また、本研究を実施するに際しては、(財)国土開発研究センターの研究助成を得ました。ここに記して厚くお礼申し上げる次第です。

参考文献

- 1) Nakamura, H., Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 堺淳一, 川島一彦: 引張力を含む軸力変動がRC橋脚の変形性能に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp.735-746, 2002.
- 5) 川島一彦, 宇根寛, 堺淳一: 軸力変動を受ける RC 中空断面アーチリブの耐震性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp.747-757, 2002.
- 6) 白石俊英, 田中良弘, 畑明仁, 趙唯堅: ファイバーモデルによる非線形フレーム解析とその検証, 大成建設技術研究所報, 第 29 号, pp.119-126, 1996.
- 7) 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.
- 8) Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R.: Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.114, No.ST8, pp.1804-1826, Aug.1988.
- 9) 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.
- 10) 堺淳一, 川島一彦: コンクリートの横拘束効果に及ぼす横拘束筋の配置間隔と中間帯鉄筋の影響, 土木学会論文集, No.717/I-61, pp. 91-106, 2002.
- 11) 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度～ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp. 297-316, 2000.
- 12) 小橋弘樹, 中塚侑, 大和真一, 山本裕之: 円筒形コンファインドコンクリートの強度・変形特性に及ぼす材料強度の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.3, pp.217-222, 2000.