

(125) 帯鉄筋による拘束を取り入れたコンクリートの応力-ひずみ関係式

建設省土木研究所 正員 川島 一彦
 建設省土木研究所 正員○星限 順一
 建設省土木研究所 正員 長屋 和宏

1. まえがき

現行の鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査では、コンクリートの変形特性については、図-1に示す道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編の規定が準用されている¹⁾。地震時保有水平耐力レベルの地震力を受けた場合には、鉄筋コンクリート橋脚は非線形域に入るが、帯鉄筋により主鉄筋に囲まれたコアコンクリートを拘束することにより、変形性能が向上し、致命的な損傷を生じることなく地震をやり過ごすことができる。したがって、鉄筋コンクリート橋脚の非線形域での変形性能を適切に評価するためには、帯鉄筋による拘束の影響を反映させることが重要である。本研究は、帯鉄筋で横拘束されたコンクリートの応力-ひずみ曲線モデルの開発を目的とするものであり、拘束コンクリート柱の圧縮載荷実験を行い、コンクリートの変形性能に及ぼす横拘束の影響について定量的に分析した結果を示すものである。

2. 拘束コンクリート柱載荷実験

実験に用いた供試体の諸元を表-1に示す。供試体は、小型供試体(Sシリーズ)と大型供試体(Lシリーズ)の2シリーズであり、帯鉄筋による拘束効果を定量的に評価できるように実験ケースを設定した。また、断面形状は拘束効果の大きい円形断面を基本としたが、帯鉄筋形状が拘束効果に及ぼす影響を調査するために、Sシリーズについてのみ正方形断面の供試体(S6~S10)による実験も行っている。写真-1は実験の状況を示したものであり、載荷方

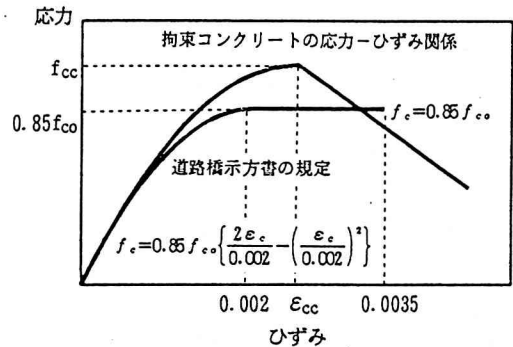


図-1 道路橋示方書に規定されるコンクリートの変形特性

表-1 供試体諸元

シリーズ	供試体形状 (mm)	フレーションコンクリート強度 (kgf/cm ²)	帯鉄筋			帯鉄筋比 (体積比) (%)
			材質	径	間隔(cm)	
S	φ 200 h=600	189	SR235	φ 6	15	0.39
					10	0.58
					5	1.17
					2.5	2.33
					1.25	4.66
	200 × 200 h=600	237	SR235	φ 6	15	0.39
					10	0.58
					5	1.17
					2.5	2.33
					1.25	4.66
L	φ 500 h=1500	294	SD295	d10	15	0.38
				d10	10	0.57
				d13	5	1.14
				d13	30	0.34
				d16	30	0.53
				d16	30	0.53

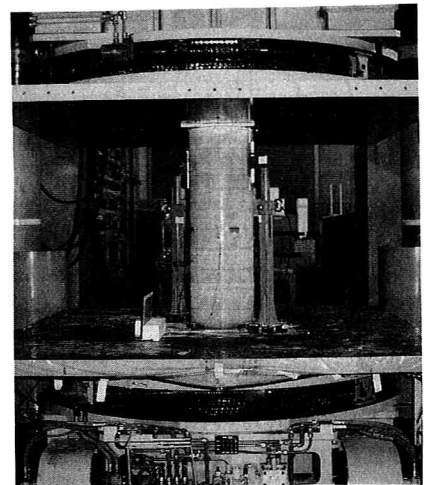


写真-1 30MN大型万能試験機による載荷状況

法は、変位制御による単調一軸圧縮荷とし、軸方向ひずみは、供試体上下間の変位を変位計によって計測し、これを高さで割って求めた。なお、荷重及び変位の計測には動ひずみ計を用い、最大荷重及びひずみ軟化域での応力低下の挙動を正確に計測できるように配慮した。

実験により得られた応力-ひずみ曲線を図-2に示す。いずれのシリーズも、応力-ひずみ曲線の特徴として、以下の点が挙げられる。

- ① 応力-ひずみ曲線は、応力上昇域、応力下降域、応力収束域の3区間に分割可能である。
- ② 初期剛性は帯鉄筋比によらずほぼ一定である。
- ③ 帯鉄筋比の増大とともに、最大圧縮応力、最大圧縮応力時のひずみは向上し、また、最大応力後の急激な応力低下が抑制される。
- ④ 帯鉄筋によりコンクリートを拘束することにより、道路橋示方書で定義される終局ひずみ0.35%の圧縮変形を受けても、コンクリート柱には大きな損傷が生じず、変形性能が改善されている。

3. 応力-ひずみ曲線のモデル化

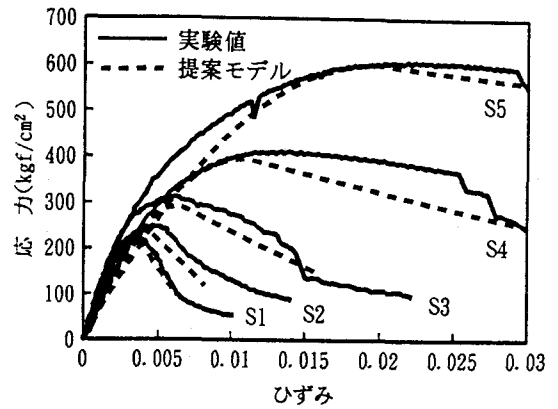
実験結果をもとに、拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線モデルとして、二次曲線と直線を組み合わせた式(1)を提案する。

$$\left. \begin{aligned}
 & \cdot \text{応力上昇域} (0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cc}) \\
 & f_c = f_{cc} \left\{ \frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \right)^2 \right\} \\
 & \cdot \text{応力下降域} (\epsilon_{cc} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}) \\
 & f_c = f_{cc} - E_{des}(\epsilon_c - \epsilon_{cc}) \\
 & \text{ただし } \epsilon_{cu} = \epsilon_{cc} + \frac{f_{cc}}{2E_{des}}
 \end{aligned} \right\} (1)$$

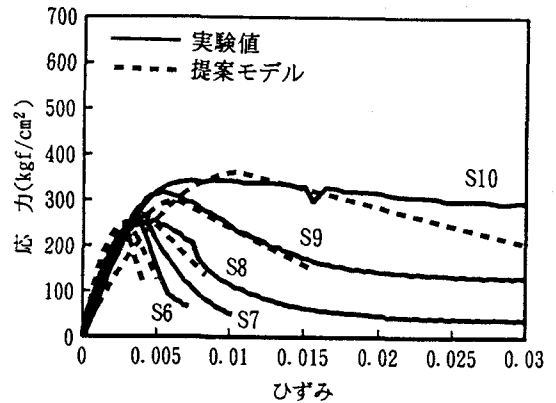
ここに、

- f_{cc} : 最大圧縮応力(kgf/cm²)
- ϵ_{cc} : 最大圧縮応力時のひずみ
- ϵ_{cu} : 終局ひずみ
- E_{des} : 下降勾配(kgf/cm²)

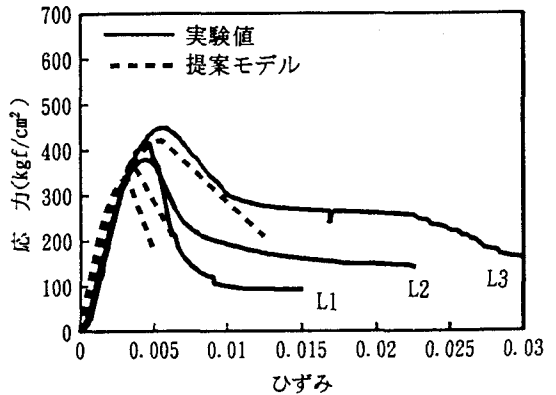
ここで、応力収束域についてはモデル化の対象としなかった。これは、この段階になると、帯鉄筋の破断や主鉄筋の座屈等の大きな損傷が発生し始めており、もはや耐震設計で考慮すべき領域ではないと考えたためである。したがっ



(a) Sシリーズ(円形断面)



(b) Sシリーズ(矩形断面)



(c) Lシリーズ(円形断面)

図-2 応力-ひずみ曲線

て、終局ひずみを応力下降域の終点で定義することとし、本文では、実験結果をもとに応力が最大圧縮応力の50%に低減した時のひずみとした。

4. 拘束効果の定量化

上述の検討結果より、拘束コンクリートの応力-ひずみ関係に支配的な特性値は、最大圧縮応力 f_{cc} 、最大圧縮応力時のひずみ ϵ_{cc} 、ひずみ軟化域での下降勾配 E_{des} であることわかる。そこで、これらの各特性値に影響を及ぼす因子を実験結果をもとに分析した。

拘束効果の要因としては、帯鉄筋比の他、帯鉄筋の巻径、拘束形状、降伏強度、配置間隔、また素材としてのプレーンコンクリートの強度等が考えられる。しかし、これらの要因全てをモデルに反映させることは、モデル式の煩雑化を招く結果になりやすい。そこで、設計用としてのシンプルな応力-ひずみ関係のモデル化を図るため、拘束効果の要因を、帯鉄筋比(体積比) ρ_s 、帯鉄筋の降伏強度 f_{yh} 、プレーンコンクリート強度 f_{co} 、拘束形状の必要最低限の4つに絞り込み、他の要因については、別途構造細目により規定し得る事項と判断した。そして、これらの拘束効果と拘束コンクリートの各特性値との関係を以下のように整理することができた。

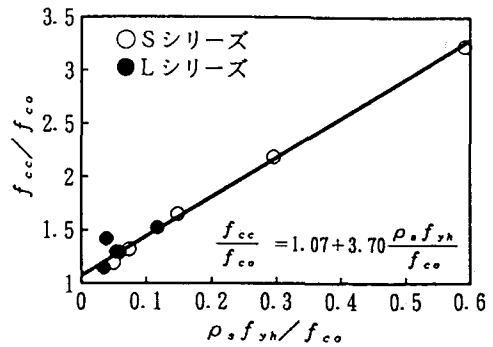
図-3は、拘束効果と最大圧縮応力の関係を示したものである。これより、圧縮強度比(f_{cc}/f_{co})は($\rho_s f_{yh}/f_{co}$)と線形関係にあることがわかり、回帰分析を行った結果、図中に示される関係式が得られた。また、拘束効果は拘束形状によって大きく異なり、最大圧縮応力に対する角柱供試体の拘束効果は、円柱供試体の拘束効果の30%程度であった。

図-4は、拘束効果と最大圧縮応力時のひずみの関係を示したものである。これより、拘束効果の小さい供試体において最大圧縮応力時のひずみがやや大きいものもあるが、 ϵ_{cc} は($\rho_s f_{yh}/f_{co}$)と線形関係にあることがわかる。そして、回帰分析を行った結果、図中に示される関係式が得られた。また、最大圧縮応力時のひずみに対する角柱供試体の拘束効果は、円柱供試体の拘束効果の55%程度である。

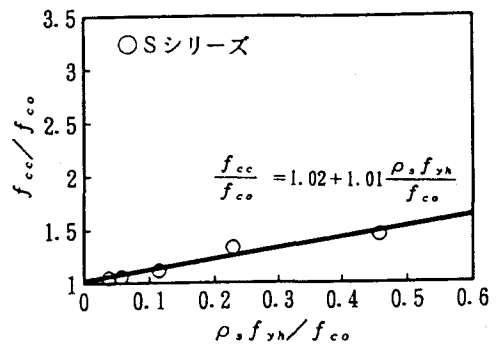
図-5は、拘束効果と下降勾配の関係を示したものである。ここで下降勾配は、応力下降域、即ち応力が最大値からその50%に低減するまでの挙動を最小自乗法によって直線近似し、その勾配として定義したものである。これより、 E_{des} は($\rho_s f_{yh}/f_{co}^2$)と概ね反比例の関係にあることがわかる。回帰分析の結果を図中に示したが、同一の拘束条件に対して、角柱供試体の下降勾配は、円柱供試体の下降勾配の約1.33倍となった。

なお、拘束コンクリートの各特性値に及ぼす供試体の寸法効果の影響については、今回の実験からは特に認められなかった。

以上の分析結果をもとに、拘束コンクリートの各特性値の設計用評価式として次式を提案する。ここで、 α 、 β 、 γ は各特性値に対する断面補正係数である。



(a)円柱供試体



(b)角柱供試体

図-3 拘束効果と f_{cc} の関係

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.70 \alpha \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}} \quad (2)$$

$\alpha = 1.0$ (円形拘束), 0.30 (矩形拘束)

$$\epsilon_{cc} = 0.002 + 0.033 \beta \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}} \quad (3)$$

$\beta = 1.0$ (円形拘束), 0.55 (矩形拘束)

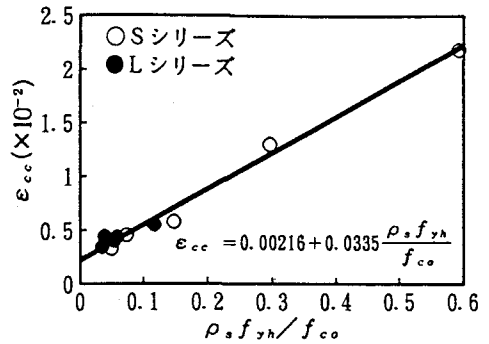
$$E_{des} = 12 \gamma \frac{f_{co}^2}{\rho_s f_{yh}} \quad (4)$$

$\gamma = 1.0$ (円形拘束), $4/3$ (角形拘束)

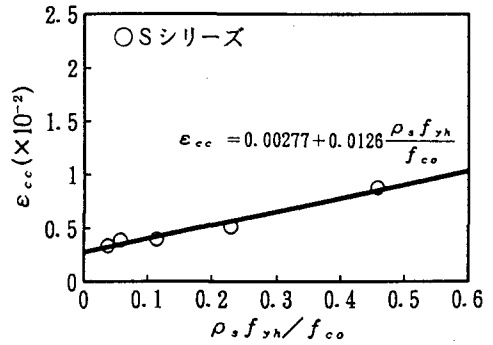
表-1に示す実験条件に対し、上述の提案式(1)~(4)を適用して定量化される応力-ひずみ関係を図-2中に併記した。これより、本提案モデルは、実験結果の傾向をよく推定していることがわかる。しかし、帯鉄筋比が高くなるにつれて初期剛性が小さく評価されており、この点は実験結果を表現できていない。本文では、道路橋示方書のモデルを基本とした応力-ひずみ曲線を提案したが、初期剛性を境界条件に組み入れた応力-ひずみ曲線モデルを考案する必要がある。

5. まとめ

鉄筋コンクリート橋脚の非線形域での変形性能を適切に評価するために、本文では、帯鉄筋で横拘束されたコンクリート柱の圧縮載荷実験を行い、拘束効果を取り入れたコンクリートの応力-ひずみ関係式を式(1)~(4)のように提案した。本モデルは、実験結果に対する統計的な分析にもとづいて提案したものであり、今後も、実験データの蓄積を図っていく予定である。

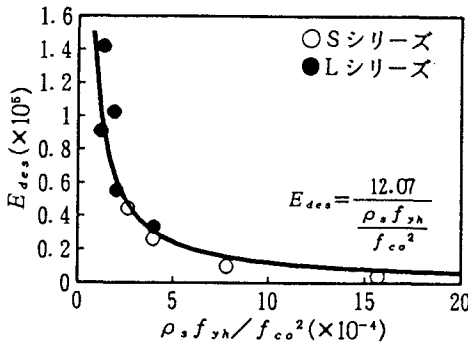


(a)円柱供試体

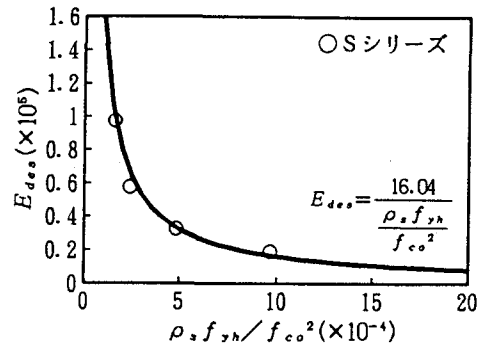


(b)角柱供試体

図-4 拘束効果と ϵ_{cc} の関係



(a)円柱供試体



(b)角柱供試体

図-5 拘束効果と E_{des} の関係

【参考文献】

1)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、平成2年2月

(連絡先) 建設省土木研究所地震防災部耐震研究室(〒305 茨城県つくば市大字旭1 Ⅱ0298-64-2211内線446)