

帯鉄筋で横拘束したコンクリート柱の 応力度～ひずみ関係に及ぼす帯鉄筋間隔の影響 および応力度下降域のモデル化

堺淳一¹・川島一彦²・宇根寛³・米田慶太⁴

¹学生会員 修(工) 東京工業大学大学院博士後期課程 日本学術振興会特別研究員
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (同上)

³学生会員 東京工業大学大学院修士課程 (同上)

⁴学生会員 東京工業大学大学院修士課程 (同上)

帯鉄筋間隔がコンクリート柱の応力度～ひずみ関係の拘束効果におよぼす影響を検討するために、帯鉄筋比が同じで帯鉄筋間隔が異なるコンクリート柱の一軸圧縮載荷実験を行った。その結果、帯鉄筋比が同じで帯鉄筋間隔が異なる場合にも最大圧縮応力度まではほとんどその影響がないが、応力度下降域においてはその影響は顕著に現れ、帯鉄筋間隔が小さいほど応力度の低下は抑えられることが明らかとなった。

また、あわせて応力度下降域のモデル化を試みた。実験結果より、最大圧縮応力度時のひずみの4倍までひずみが達した段階では応力度の低下がほとんどなくなることから、このひずみにおける応力度を安定応力度と定義し、最大圧縮応力度点と安定応力度点とを3次の分数関数でうまく近似できることを示した。

Key Words: seismic design, concrete column, confinement effect, falling branch, spacing of hoop reinforcement, stress-strain relation

1. まえがき

平成8年に改訂された道路橋示方書では、橋梁は地震時保有水平耐力法に基づき、その変形性能を重視して設計することが規定された。地震時保有水平耐力法では鉄筋コンクリート橋脚の終局は横拘束されたコンクリートの圧壊で定義されており、横拘束されたコンクリートの応力度～ひずみ関係を正確にモデル化することが重要である。

帯鉄筋で横拘束したコンクリート柱の応力度～ひずみ関係では、帯鉄筋比 ρ_s が同じでも帯鉄筋間隔 s は小さいほうが拘束効果は大きいことが Hoshikuma らによって指摘されている¹⁾が、Hoshikuma らのモデルでは簡略化を図るために帯鉄筋間隔 s はパラメータとして考慮されていない。また、Hoshikuma らの提案式では、橋脚の耐震設計においてコンクリートに大きな圧縮破壊が生じるような損傷を見込むべきではないとの考え方から、圧縮応力度が最大圧縮

応力度の80%まで低下した点までしか履歴曲線が与えられていない。

そこで本研究では、帯鉄筋比 ρ_s が同じで帯鉄筋間隔 s が異なる場合のコンクリート柱の拘束効果を検討した。また、あわせて2～3%の大きなひずみまで表すことができる応力度下降域のモデル化を試みたので、その結果を報告する。

2. 実験に用いた供試体と載荷方法

供試体は、直径200mm、高さ600mmの円柱とし、 ρ_s は0.57%、1.14%、1.71%の3種類とした。そのうえで、表-1、図-1に示すように s を120mm、60mm、40mmとしてその間隔ごとに帯鉄筋を1本ずつ配筋したSシリーズ3体と、 s をSシリーズの2倍としその間隔ごとに帯鉄筋を2本ずつ配筋したDシリーズ3体の計6体作製した。軸方向鉄筋および帯鉄筋にはSD295、直径6mmの異形棒鋼を用い

表-1 実験供試体の帯鉄筋の配筋

		間隔 s (mm)	1段の帯鉄筋 の本数	帯鉄筋体積 比 ρ_s (%)
S シリーズ	S1	120	1 本	0.57
	S2	60		1.14
	S3	40		1.71
D シリーズ	D1	240	2 本	0.57
	D2	120		1.14
	D3	80		1.71

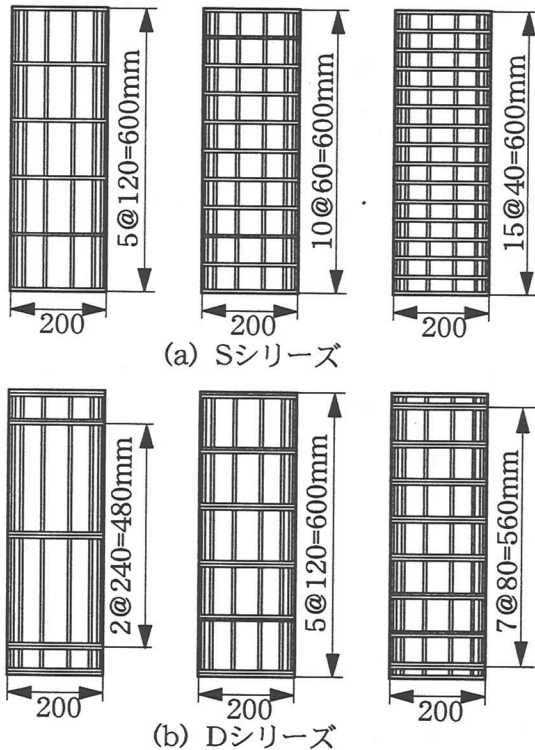


図-1 実験に用いた供試体

た。テストピースによるコンクリートの圧縮強度は 29.8MPa であり、ミルシートによる鉄筋の降伏点は 376MPa、引張強さは 544MPa、伸びは 21%である。

実験には東京工業大学の 5000kN 万能試験機を使用し、毎分 0.5mm の載荷速度で変位制御により荷重を作用させた。載荷時には供試体の荷重、軸方向変位、帯鉄筋のひずみを計測した。コンクリート柱の応力度は作用荷重を初期断面積で割って、またひずみは変位計で測定した供試体上下間の変位を供試体の初期高さで割って、それぞれ算出した。

3. コンクリート柱の応力度～ひずみ関係に及ぼす帯鉄筋間隔の影響

図-2 にコンクリート柱の応力度～ひずみ関係を示す。いずれの供試体も、最大圧縮応力度 σ_{cc} に達

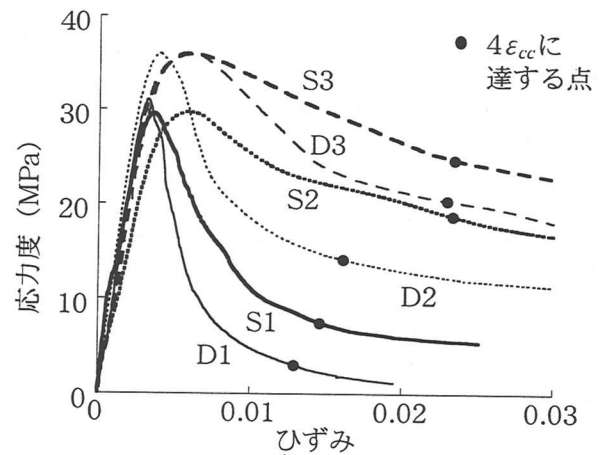
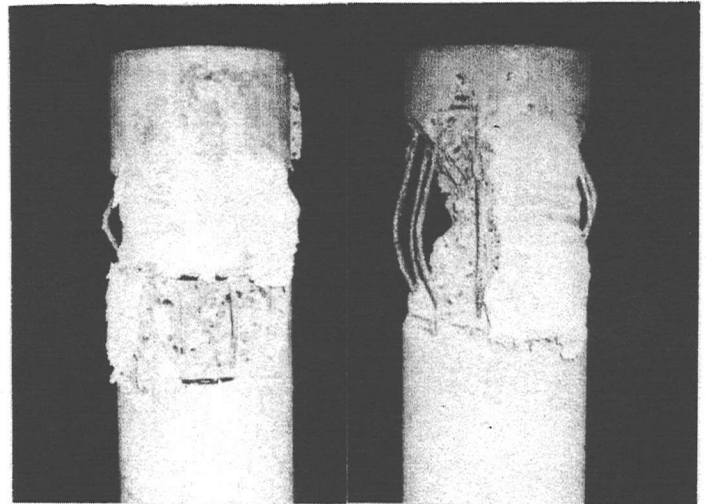


図-2 応力度～ひずみ関係



(a) S1 ($s=120\text{mm}$) (b) D1 ($s=240\text{mm}$)

写真-1 コアコンクリートの損傷の様子 ($\rho_s=0.57\%$)

するまでは外観上は健全であり、応力度下降域に入った段階で表面コンクリートにひび割れが生じ、さらにひずみを増加させていくと表面コンクリートが剥落した。図-2 によれば帯鉄筋比 ρ_s が同じであればその最大圧縮応力度 σ_{cc} および最大圧縮応力度時のひずみ ϵ_{cc} は s によらず概ね一致するといえる。 ρ_s が同じということは帯鉄筋による拘束力が同じであることを意味し、コンクリートの損傷が小さい段階であればその拘束力が帯鉄筋間にも一様に伝わっていると考えられる。

一方、応力度下降域では、いずれの ρ_s の場合でもひずみの増加とともに応力度の低下は緩やかになるが、 ρ_s が同じでも s が小さいほうが下降勾配 E_{des} は緩やかである。例えば図-2 に示した $4\epsilon_{cc}$ に達したときの応力度を比較してみると s が小さいほうが応力度は 4～5MPa 大きくなる。これは、写真-1 に示すように帯鉄筋間隔が広いほどコンクリートの損傷は内部にまで達し、その結果コアコンクリートが剥落しており、このために荷重を受け持つことができ

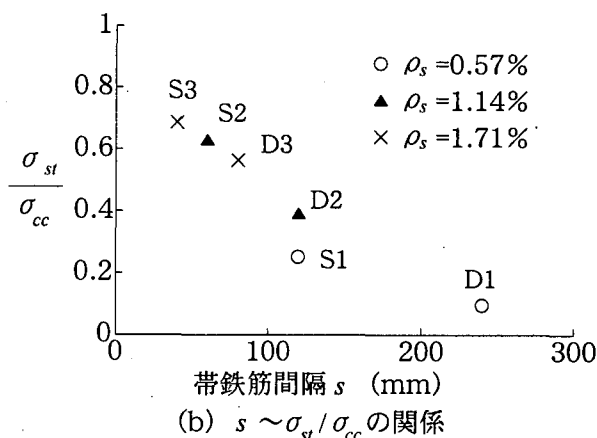
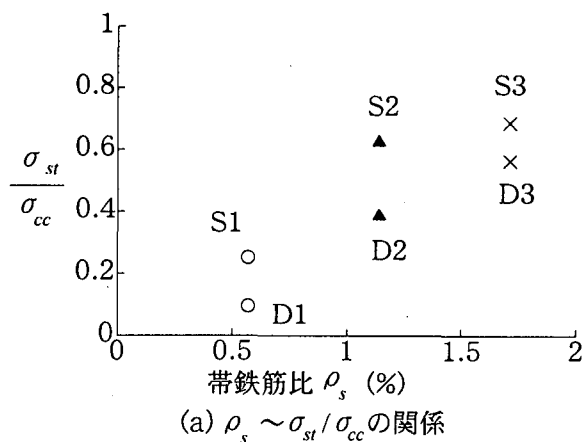


図-3 σ_{st}/σ_{cc} に及ぼす ρ_s および s の影響

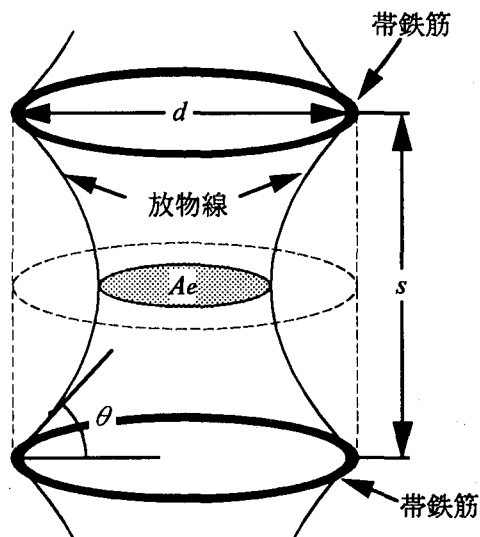


図-4 応力度下降域における断面の減少

る断面積が減少していくためと考えられる。ここで、 $4\varepsilon_{cc}$ に達するとこれ以上ひずみが増加しても応力度はそれほど低下しないことから、本研究では $4\varepsilon_{cc}$ に達したときの応力度を安定応力度 σ_{st} と呼ぶこととする。

図-3は、 ρ_s と σ_{st}/σ_{cc} の関係および s と σ_{st}/σ_{cc} の関係を示したものである。これによれば、同じ帯鉄筋比 ρ_s であっても帯鉄筋間隔 s が異なると、 σ_{st}/σ_{cc} は最大で0.24の差が生じるが、 s と σ_{st}/σ_{cc} の関係をみるとこの両者はほぼ線形的関係にあることが分かる。ここで、 ρ_s はコアコンクリートに与えられる帯鉄筋からの拘束力に関するパラメータであり、 s はコアコンクリートの損傷による断面積の減少に関するパラメータであると考え、 $4\varepsilon_{cc}$ にまで達した段階ではコアコンクリートの損傷がすすみ、帯鉄筋による拘束力が一様に伝わらなくなるため、安定応力度 σ_{st} は横拘束力よりもコアコンクリートの断面積の減少に、より依存性が高いと言える。

ここで、荷重を負担することができるコアコンク

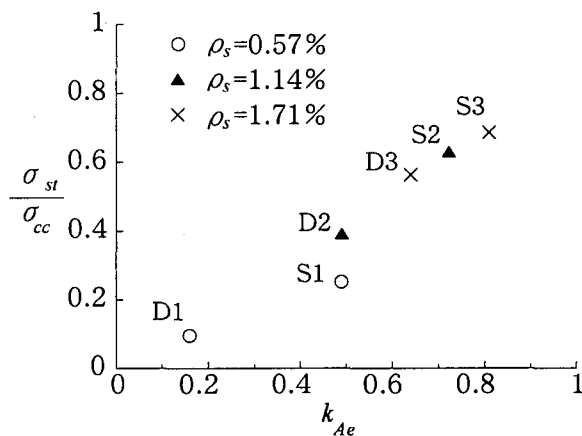


図-5 σ_{st}/σ_{cc} と k_{Ae} の関係 ($\theta=45^\circ$ の場合)

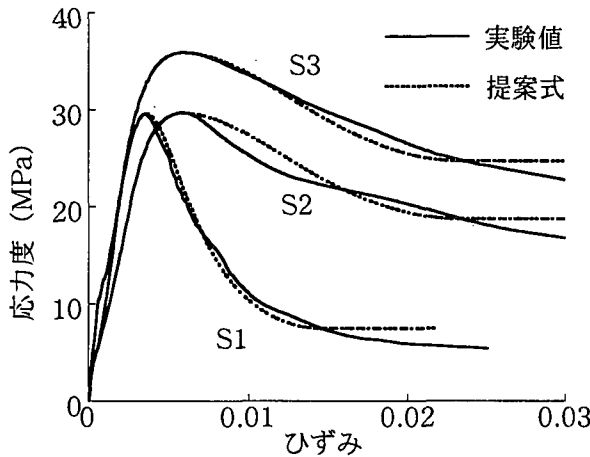
リートの断面積の減少の影響をさらに具体的に検討するために断面の減少を図-4のように仮定する^{2,3}。荷重を負担できる領域と損傷によって荷重が負担できなくなった領域の境界線は初期勾配 θ の放物線としている。帯鉄筋どうしの中点における断面積を有効断面積 A_e と定義し、これの初期断面積との比を有効断面積比 k_{Ae} と定義すると、有効断面積比 k_{Ae} は次式で表される。

$$k_{Ae} = \left(1 - \frac{s \cdot \tan \theta}{2d}\right)^2 \quad (1)$$

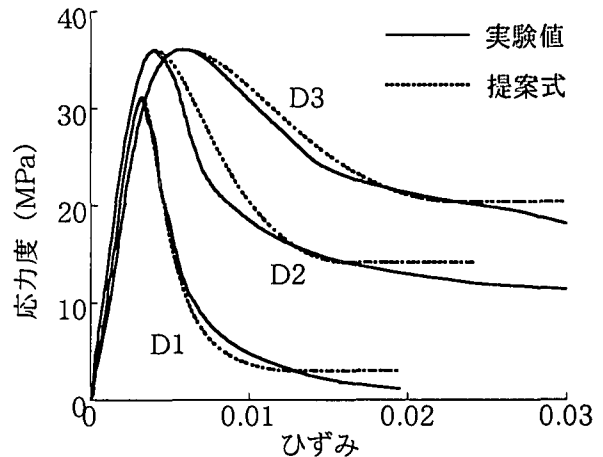
ここで、 d はコアコンクリートの直径である。

図-5は $\theta=45^\circ$ と仮定して、 k_{Ae} と σ_{st}/σ_{cc} の関係を示したものである。 k_{Ae} と σ_{st}/σ_{cc} には概ね線形の相関があることが分かる。

本研究では、帯鉄筋間隔 s をパラメータとして検討したが、荷重を負担することができるコアコンクリートの断面積の減少には式(1)からも分かるように、 s だけでなく、コアコンクリートの直径 d の影響もあると考えられる。したがって、 σ_{st}/σ_{cc} の d に対する依存性に関して、今後の検討が必要である。



(a) Sシリーズ



(b) Dシリーズ

図-6 提案モデルによる応力度～ひずみ関係と実験結果の比較

4. コンクリート柱の応力度～ひずみ関係の応力度低下域のモデル化

上述したように応力度低下域ではひずみの増加とともに応力度の低下は緩やかになり、 $4\varepsilon_{cc}$ に達すると概ね一定値に収束していく。したがって、ここでは次の4つの境界条件を満たす3次関数で応力度下降域を表すこととした。

- (1) $\varepsilon_c = \varepsilon_{cc}$ で $\sigma_c = \sigma_{cc}$
- (2) $\varepsilon_c = \varepsilon_{cc}$ で $d\sigma_c/d\varepsilon_c = 0$
- (3) $\varepsilon_c = 4\varepsilon_{cc}$ で $\sigma_c = \sigma_{st}$
- (4) $\varepsilon_c = 4\varepsilon_{cc}$ で $d\sigma_c/d\varepsilon_c = 0$

これより未定定数を求めると、次式ようになる。

$$\sigma_c = \frac{\alpha \sigma_{cc}}{2\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right)^3 - 15\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right)^2 + 24\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right) + \beta} \quad (2)$$

$$\text{ここで、} \alpha = -\frac{27\left(\frac{\sigma_{st}}{\sigma_{cc}}\right)}{1 - \left(\frac{\sigma_{st}}{\sigma_{cc}}\right)}, \quad \beta = -\frac{11 + 16\left(\frac{\sigma_{st}}{\sigma_{cc}}\right)}{1 - \left(\frac{\sigma_{st}}{\sigma_{cc}}\right)} \text{である。}$$

また、 $\varepsilon_c \geq 4\varepsilon_{cc}$ は以下のようにモデル化する。

$$\sigma_c = \sigma_{st} \quad (3)$$

図-6は、実験値と式(2)、(3)による提案値を比較した結果である。ここで提案値は応力度低下域のみを示し、 σ_{cc} 、 ε_{cc} および σ_{st} には図-5の関係ではなく実験結果を用いている。これは、現段階では σ_{st} を定量化するにはいたっていないためである。図-6より、式(2)、(3)による応力度下降域のモデルは実験結果の傾向を概ね近似できていることが分かる。

5. 結論

帯鉄筋で横拘束されたコンクリート柱の応力度～ひずみ関係に及ぼす帯鉄筋間隔 s の影響を検討するために、一軸圧縮載荷実験を行った。本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) 最大圧縮応力度 σ_{cc} までは、帯鉄筋間隔 s の影響は小さいが、応力度下降域においてはその影響は顕著に現れ、帯鉄筋間隔 s が小さいほど応力度の低下は抑えられる。

(2) $4\varepsilon_{cc}$ に達すると概ね応力度は一定値になることから、この点における応力度を安定応力度 σ_{st} と定義した。安定応力度 σ_{st} は、帯鉄筋による拘束力よりも荷重を負担することができるコアコンクリートの断面積の減少との相関が強い。

(3) 最大圧縮応力度点から安定応力度点までの応力度～ひずみ関係を式(2)で表される3次の分数関数でモデル化した。これは、実験結果の傾向を概ねよく表している。

(4) 今後はコアコンクリートの直径 d の安定応力度 σ_{st} に及ぼす影響を検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 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
- 2) Sheikh, S. A. and Uzumeri, S. M.: Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns, J. Struct. Div., ASCE, Vol. 108, No. ST12, pp. 2703-2722, 1982
- 3) Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, J. Struct. Engrg., ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826, 1988