

論文

[2119] 横拘束コンクリートの圧縮特性に及ぼす供試体の形状・寸法の影響

正会員○小池狭千朗（愛知工業大学工学部）

正会員 畑中 重光（三重大学工学部）

1. はじめに

RC梁部材の曲げ回転性能を論じるには、塑性ヒンジ領域における圧縮域のコンクリートの塑性変形挙動に及ぼす横補強筋の拘束効果を把握しておく必要がある。筆者らは、さきに横拘束コンクリート（以下、コンファインドコンクリート）の一軸圧縮試験およびRC梁部材の曲げせん断試験を実施し、両者ともに横補強筋のピッチに拘らず供試体寸法の大きなものほど脆性的であることを報告した¹⁾。ここで、これらの試験体は実験室内の作業ヤード内で空中養生されたものであるが、養生条件によってはこのような寸法効果が大幅に異なることも予想される。

本研究では、恒温水中養生および恒温恒湿空中養生されたコンファインドコンクリートの一軸圧縮実験を行い、供試体寸法と養生条件の関係、および供試体形状（高さ一辺長比）とひずみ測定域の関係が横拘束コンクリートの応力一ひずみ関係に及ぼす影響について考察する。なお、本研究で得られた実験データおよび知見は、寸法の異なるRC梁の塑性変形挙動を解析する際、曲げ圧縮部コンクリートの応力一ひずみ関係を表現するための基礎資料となるものである。

2. 実験方法

2. 1 実験の概要

表-1に、コンクリート角柱体の一軸圧縮実験の概要を示す。実験要因として帯筋比、供試体の高さ一辺長比、供試体寸法および養生条件の相違を取り上げた。図-1および図-2に、供試体の寸法と帯筋の配置を示す。前年度に行ったRC梁の曲げ試験¹⁾に用いた梁部材の曲げ圧縮部に関わる要因を考慮して、角柱体の断面の一边を梁幅bと等しく取り、帯筋間隔は梁のあばら筋に対応するようにb/4、b/2、bの3種類とした。RC梁には、曲率測定用の変位計を取り付けるためネジ鋼棒を埋め込んだ。今回の実験でも、これらの梁の曲げ圧縮部を模擬するため図-2のように、角柱体にφ6mmネジ鋼棒（B=7.3cm シリーズでは、φ4mm）を、間隔bごとに配置した。

また、帯筋および鋼棒を配置しない供試体（Plain）も製作した。帯筋径は、帯筋間隔Sが辺長bと等しい角柱体で帯筋比が約0.3%となるように選んだ。角柱体は横打ちとし、高さとの比（H/b）は2と3の2種類とした。供試体の個数は、各要因ごとに2体、合計160体である。

2. 2 供試体の製作および養生方法

コンクリートの製作には、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂（5mm未満）と川砂利（5~25mm）を使用した。水セメント比は55%、単位水量は180kg/m³、およびスランプは15cmとした。コンクリートの混

表-1 角柱体の一軸圧縮実験の概要

断面: b×b (cm)	供試体寸法		帯筋		主筋 鉄筋径 (mm)	養生 条件
	高さ: H (cm)		鉄筋径 (mm)	間隔 S		
	H/b=2.0	H/b=3.0				
7.3×7.3	14.5	21.9	φ3.2	b/4 b/2 b plain	2.7	空中 水中
9.7×9.7	19.4	29.1	φ3.9			
12.5×12.5	24.9	37.5	φ4.9			
15.0×15.0	30.0	45.0	φ5.7			
20.0×20.0	40.0	60.0	φ8.0			

表-2 帯筋の力学的性質

種類	実測直径 (mm)	降伏点: σ _y (kgf/cm ²)	引張強さ (kgf/cm ²)	伸び率 (%)	σ _y ・A _s /A _c (kgf/cm ²)
φ3.2	3.19	2420	3430	29.2	6.37
φ3.9	3.90	2280	3350	40.9	5.04
φ4.9	4.98	1940	3070	41.6	4.19
φ5.7	5.93	2980	3890	31.5	6.34
φ8.0	7.96	2650	3530	32.5	5.71

A_s; 帯筋の断面積 (cm²), A_c; コアコンクリートの断面積 (cm²)

線には容量 600ℓ のスミス式ミキサーを使用し、混練は 6バッチに分けて行った。水中養生した $\phi 10 \times 20$ cm コンクリートシリンダーの平均圧縮強度は 402 kgf/cm^2 、バッチ間の強度差の最大値は 15 kgf/cm^2 であった。表-2に、使用した帯筋の力学特性を示す。なお、表中には帯筋の拘束指標 ($\sigma_y \cdot A_s / A_c$) も併示した。この値より、断面が 12.5×12.5 cm の角柱体 (帯筋に $\phi 4.9$ mm 鉄筋を使用) は、他の寸法の供試体に比べて拘束力が若干小さくなることが予想される。供試体は、さきに報告した乾燥状態で空中養生した実験結果と比較するために、供試体の半数は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中養生とし、残りの半数は恒温恒湿空中養生 (材令8週までは温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $90 \pm 10\%$ 、その後16週間は温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $85 \pm 5\%$) とし、材令24週で圧縮試験を行った。

2.3 荷重および測定方法

図-3に、角柱体のひずみの測定方法を示す。 $H/b=3$ の角柱体の圧縮ひずみの測定域 (ℓ_0) は、供試体の高さ中央部の $2b$ の領域と、これを含む $2.8b$ の領域の2区間とした。 $H/b=2$ の角柱体の測定域は、供試体の高さ中央部の $1.8b$ の領域とした。荷重には、最大容量200tのアクチュエーターを使用した。応力上昇域において最大応力の $2/3$ の時点から荷重変動をフィードバック信号として用いた制御方法を併用して、毎分約 1×10^{-3} のひずみ速度で、供試体の中央部 $2b$ 区間の縦ひずみが 15×10^{-3} に至るまで継続荷重した。

3. 実験結果とその考察

3.1 ピーク点の応力およびひずみ

1) 圧縮強度

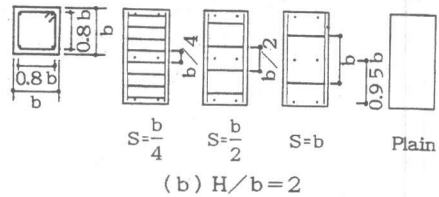
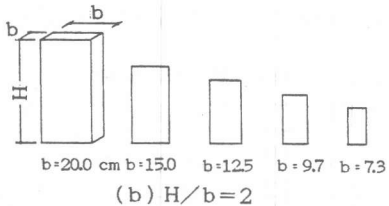
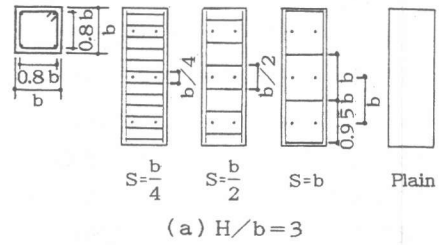
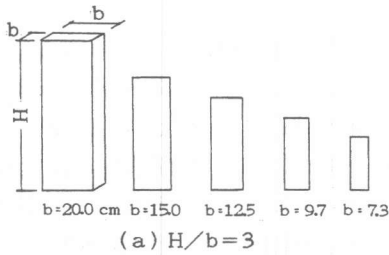


図-1 コンクリート角柱体の寸法

図-2 帯筋の配置

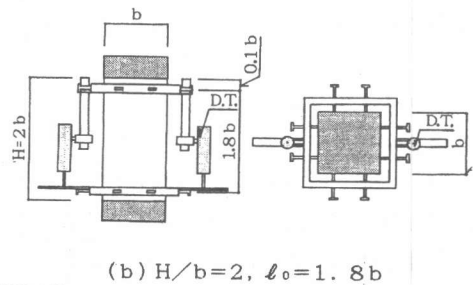
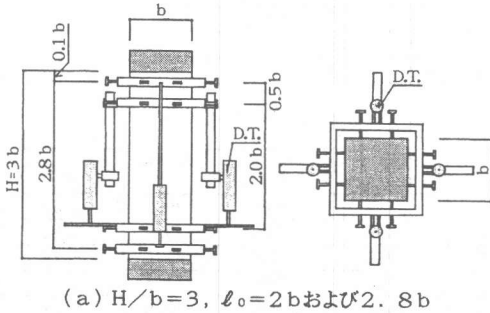


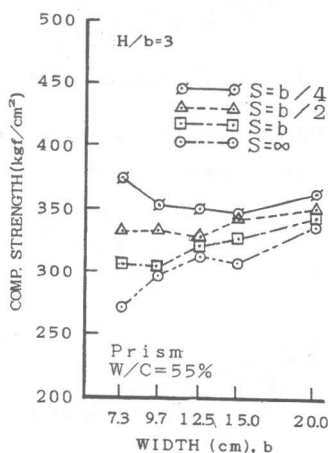
図-3 ひずみの測定方法

図-4 (a) および (b) に、コンファインドコンクリートの圧縮強度と供試体寸法の影響に及ぼす養生条件の影響を、帯筋のピッチ (S) 別に示す。図-4 (a) は、さきに報告した実験室内のヤード (相対湿度 $60 \pm 20\%$ と変動) で空中養生した場合の実験データを示したものである。同図によれば、プレーンコンクリートやあばら筋のピッチの粗いもの ($S=b$) では、寸法が小さくなると若干低い強度を示す。しかし、この寸法効果は、あばら筋のピッチの減少に伴ってほとんどみられなくなる。一方、本実験結果を示した図-4 (b) によれば、恒温室内で空中養生されたコンクリートでは、供試体の縮小化とともに強度が低下する寸法効果は僅かに認められる程度である。これは、初期強度の発現時における水分の発散が、図-4 (a) に示した実験室内のヤードで空中養生したコンクリートと比較すると少ないためと考えられる。水中養生の供試体では、強度の寸法効果はきわめて小さい。

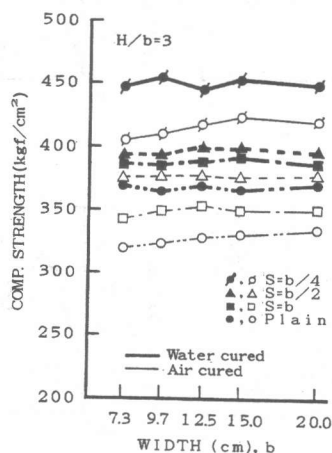
2) 最大圧縮応力時のひずみ

図-5 に、コンファインドコンクリートの最大圧縮応力時のひずみ (ϵ_m) と供試体寸法の影響に及ぼす養生条件の影響を、帯筋のピッチ (S) 別に示す。プレーンコンクリートの場合にすでに指摘されてきている傾向^{3, 4)}と同様に、コンファインドコンクリートにおいても恒温室内で空中養生されたものは、水中養生のものよりも ϵ_m の値が大きい。また、その増大量は一般に供試体寸法が小さくなるほど、また帯筋のピッチが密になるほど大きくなっている。なお、本報の恒温恒室空中養生供試体の最大応力時のひずみの寸法効果は、さきに報告した実験室内で空中養生したコンファインドコンクリートのそれとほぼ等しい。また、圧縮強度の場合とは異なり、水中養生されたコンクリートでも供試体寸法が小さいほど ϵ_m の値がやや大きくなる傾向も示している。なお、図には示していないが、 $H/b=2$ の供試体の場合も、ほぼ同様の傾向を示した。

図-6 に、コンファインドコンクリートの ϵ_m の値と供試体寸法の影響に及ぼす供試体の H/b の影響を、帯筋のピッチ (S) 別に示す。ひずみの測定長は、供試体のほぼ全長である。図によれば、一般に帯筋のピッチと供試体寸法に拘らず $H/b=2$ の供試体の ϵ_m の値は、 $H/b=3$ のものに比べて大きい。ここで、 $H/b=3$ の供試体では、図-3 (a) に示したように、 $l_0=2b$ 区間のひずみ測定用治具の拘束効果が若干含まれていると考えられる。この影響を考慮すれば、 $H/b=2$ と 3 の供試体の ϵ_m の値の差は、図-6 でみられる以上に大きいものと推定される。



(a) 実験室内空中養生^{1, 2)}



(b) 本実験

図-4 圧縮強度と供試体寸法の影響に及ぼす養生条件の影響

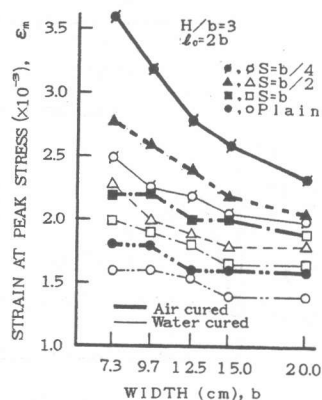


図-5 ϵ_m と供試体寸法の影響に及ぼす養生条件の影響

図-7は、ひずみの測定長をほぼ等しくした場合に、 H/b の異なる供試体から得られる ϵ_m の値を比較したものである。ここで、図-3に示したようにひずみの測定長(ℓ_0)は、 $H/b=2$ の場合 $\ell_0=1.8b$ 、 $H/b=3$ の場合 $\ell_0=2b$ とした。図-7によれば、 $S=b/4$ のものを除き、 $H/b=2$ の供試体の ϵ_m の値は $H/b=3$ の場合よりもやや大きい値を示す。なお、図には示していないが、水中養生の場合も ϵ_m の値のレベルは低いが、類似の傾向を示す。

3. 2 寸法比の異なる供試体の応力-ひずみ曲線

1) 帯筋のピッチの影響

図-8(a)~(d)に、水中養生したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす供試体寸法の影響を、帯筋のピッチ(S)別に示す。これらの図によれば、一般に帯筋のピッチに拘らず、供試体寸法が大きなものほど応力下降域の形状は脆性的である。この傾向は、さきりに報告した空中養生したコンクリートのそれとほぼ同じである。しかし、図-8によれば、 $b=7.3$ cmの場合を除いて、水中養生時の応力-ひずみ曲線間の相違はさほど大きくなく、とくに帯筋ピッチが $S=b/2$ と $b/4$ のように比較的密な場合には、供試体断面の辺長 b が10~20cmの範囲における寸法効果は、きわめて小さいといえる。

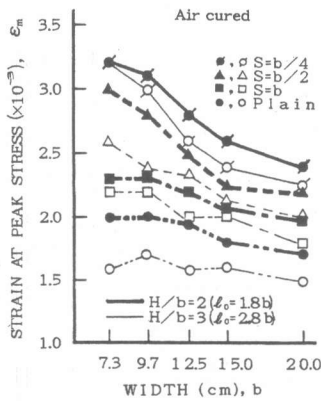


図-6 ϵ_m と供試体寸法の影響に及ぼす供試体の高さ-辺長比の影響

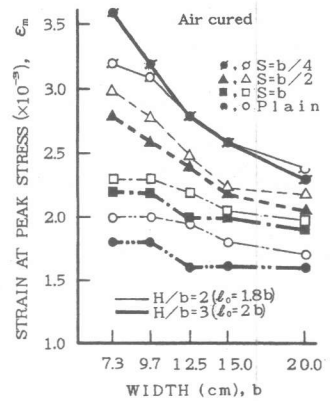
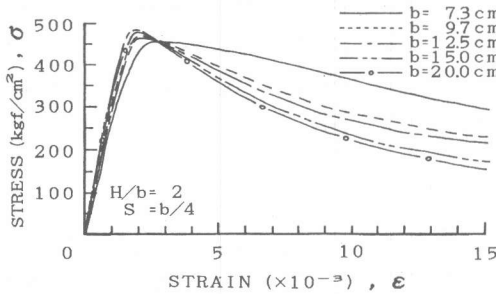
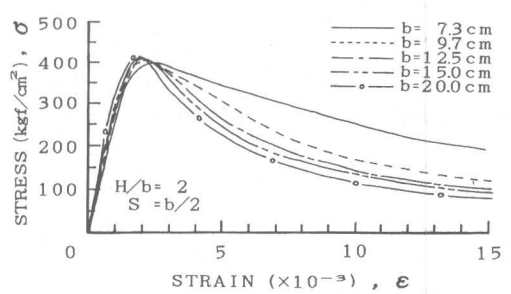


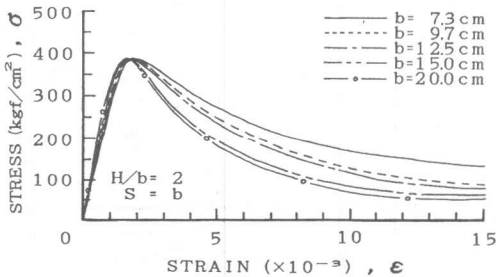
図-7 ϵ_m と供試体寸法の影響に及ぼす高さ-辺長比の影響(ひずみ測定長 ℓ_0 がほぼ等しい場合)



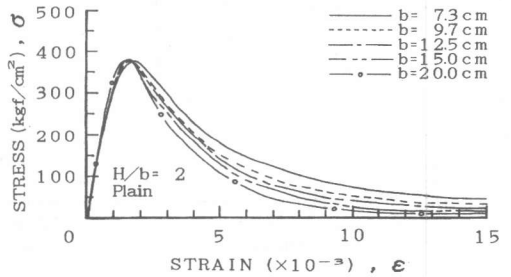
(a) $S=b/4$



(b) $S=b/2$



(c) $S=b$



(d) Plain

図-8 σ - ϵ 曲線に及ぼす供試体寸法の影響($H/b=2$, 水中養生)

2) 養生条件の影響

図-9は、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係の寸法効果に及ぼす養生条件の影響を示した一例である。一般に、恒温室で空中養生されたコンクリートは、水中養生されたものよりも圧縮強度が小さく、応力下降域が延性的である。

3. 3 形状の異なる供試体の応力-ひずみ曲線

1) 供試体の高さ-辺長比の影響

図-10(a)および(b)に、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係の寸法効果に及ぼす供試体の高さ-辺長比(H/b)の影響を示す。 $H/b=2$ の供試体のひずみの測定長は $l_0=1.8b$ 、 $H/b=3$ のそれは $l_0=2.8b$ である。これらの図によれば、 $H/b=2$ の供試体の応力下降域は、 $H/b=3$ のものに比べてかなり延性的である。

ここで、 $H/b=2$ と $H/b=3$ の供試体の応力-ひずみ曲線の相違を定量的に捉えるために、筆者らの一部が提案した仮想破壊域モデル⁵⁾を適用してみる。図-11は、仮想破壊域モデルを用いて $H/b=2$ の供試体の応力-ひずみ曲線から推定した $H/b=3$ の供試体の応力-ひずみ曲線の計算値と実験値を比較したものである。同図および他の比較例によれば、比較的よい近似値が得られているといえる。

2) ひずみ測定長の影響

図-12に、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係の寸法効果に及ぼすひずみ測定長(l_0)の影響を示す。 $H/b=3$ の供試体において、 $l_0=2b$ とした場合、応力下降域の曲線の形状は、 $l_0=2.8b$ のものよりもかなり延性的で、この傾向はどの寸法の供試体でも認められる。すなわち、 $l_0=2.8b$ の場合には、ひずみの測定区間に非破壊領域を含むため、脆性的な塑性変形挙動を示すものと考えられる。一方、载荷盤間で計測したコンクリートの下降域の $\sigma-\epsilon$ 曲線は、 $H/b=3$ 、 $l_0=2.8b$ および $H/b=2$ 、 $l_0=1.8b$ のコンクリートで計測されたものよりも若干脆性的な傾向を示した。

図-13は、ひずみの測定長 l_0 がほぼ一定で、高さ-辺長比が異なる供試体から得られた応力-ひずみ曲線を比較したものである。図によれば、いずれの寸法の供試体の場合も、 $H/b=2$ のものが $H/b=3$ の

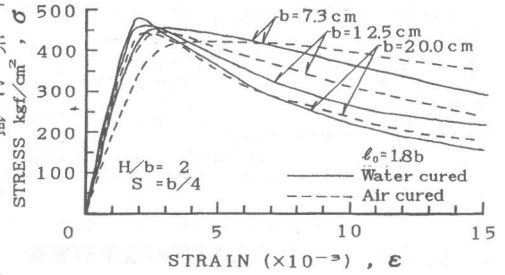
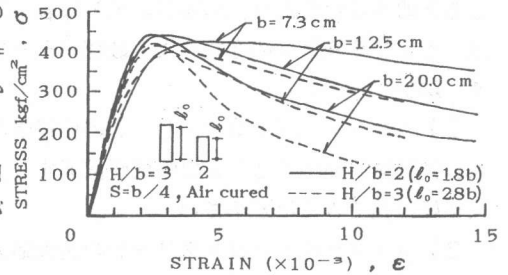
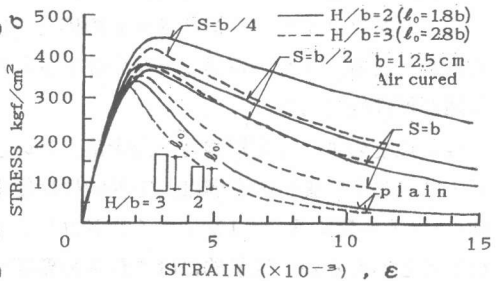


図-9 $\sigma-\epsilon$ 曲線に及ぼす養生条件の影響



(a) 供試体寸法が相違する場合



(b) 帯筋ピッチが相違する場合

図-10 $\sigma-\epsilon$ 曲線に及ぼす供試体の高さ-辺長比 (H/b) の影響

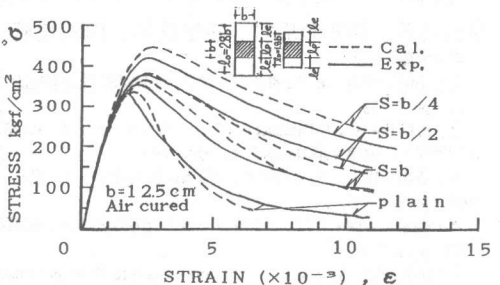


図-11 仮想破壊域モデルによる計算値と実験値の比較

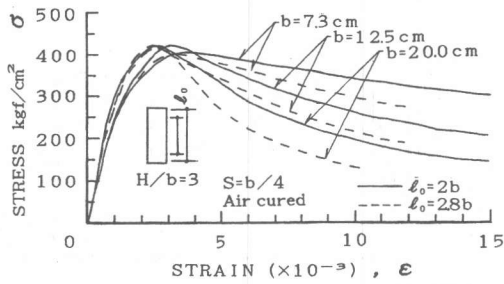


図-12 σ - ϵ 曲線に及ぼすひずみ測定長の影響

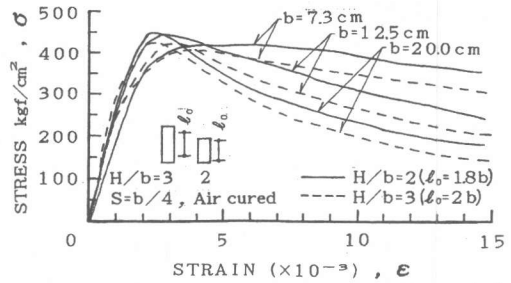


図-13 σ - ϵ 曲線に及ぼす高さ-辺長比 (H/b) の影響 (ほぼ同じひずみ測定長の場合)

ものよりやや延性的な塑性変形挙動を示している。既往の研究⁶⁾によれば、縦打ちを行ったプレーンコンクリート円柱体の場合、ひずみ測定長が同じであれば、応力-ひずみ曲線はほぼ等しくなると報告されており、本実験結果とは若干異なる。これは、コンクリートの打ち込み方向の相違、および横補強筋の存在による破壊パターンの相違が一因と考えられる。

4. 結論

1) コンファインドコンクリートの圧縮強度の寸法効果は、養生時の湿度が低いほど顕著に現れ、供試体の縮小化とともに強度が低下する。しかし、水中養生の供試体では、このような寸法効果は無視できるほど小さい。

2) コンファインドコンクリートの最大応力時のひずみ (ϵ_m) は、供試体寸法が小さいほど大きく、その傾向は帯筋のピッチが密になるほど著しい。また、 ϵ_m の値は水中養生時に比べて、空中養生時には10~40%ほど増大する。

3) コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線は、供試体寸法が大きなものほど脆性的な形状となる。また、恒温室で空中養生されたコンクリートでは、水中養生のものよりも応力下降域が延性的である。

4) 以上のような圧縮強度、最大応力時のひずみおよび応力-ひずみ曲線における供試体の形状・寸法および養生の影響は、定性的には従来プレーンコンクリートについて指摘されている傾向^{1), 2)}と一致する。コンファインドコンクリートの場合も、プレーンコンクリートの延長線上にあるといえるが、定量的にはこれらの要因の影響の程度は帯筋のピッチに依存して変動する。

5) コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線は、供試体の高さ-辺長比 (H/b) の影響を受け、供試体のほぼ全長をひずみ測定域とした場合には、 H/b の大きい供試体ほど脆性的となる。その傾向は、仮想破壊域を仮定したモデルによって推定することがほぼ可能である。

〔謝辞〕 本実験に協力していただいた愛知工業大学卒研究生、釜谷充哉君、小長谷一樹君、杉浦展浩君、鈴木義男君、多田茂君、山田登君、良知文啓君の諸君に感謝します。

〔参考文献〕

- 1) 小池・畑中・奥谷：鉄筋コンクリート梁の塑性変形性能に及ぼす供試体寸法の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11-2、1980、pp. 27-32。
- 2) S. Koike and S. Hatanaka: Size Effect on Stress-Strain Behavior of Plain and Confined Concrete Under Compression, 第33回材料研究連合講演会論文集、Apr. 1990。
- 3) 谷川・畑中・小阪：高ひずみ領域に至るまでのコンクリートの応力度-ひずみ度曲線の表示式、セメント技術年報、Vol. 34、1980、pp. 242-245。
- 4) 鈴木・中塚・江口：コンクリートの全応力度-ひずみ度関係に関する研究、第2回コンクリート工学年次講演論文集、Vol. 2、1980、pp. 265-268。
- 5) Hatanaka, Kosaka and Tanigawa: Plastic Deformational Behavior of Axially Loaded Concrete Under Low Lateral Pressure, 日本建築学会構造系論文報告集、No. 377, July 1987, pp. 27-40。
- 6) F. Watanabe: Complete Stress-Strain Curve for Concrete in Concentric Compression, Proc. of International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Kyoto, IV, 1971, pp. 153-161。