

## 高強度鉄筋コンクリート柱の圧縮特性の寸法効果

### SIZE EFFECT ON PLASTIC DEFORMATION BEHAVIOR OF REINFORCED HIGH STRENGTH CONCRETE COLUMNS UNDER AXIAL COMPRESSION

小池 狭千朗<sup>\*1</sup> 畑中 重光<sup>\*2</sup>

Sachio KOIKE<sup>\*1</sup> Sigemitsu HATANAKA<sup>\*2</sup>

[ABSTRACT] A series of uniaxial compression tests of reinforced high strength concrete (RC) columns have been carried out to examine the size effect on their compressive behavior. The strength ( $F_c$ ) of concrete has been set to be about  $F_c=700 \text{ kgf/cm}^2$ , and the RC columns have been confined by various types of hoops (□, □, ⊕, ⊗, and ⊞). Based on the test results, discussion is carried out mainly on the relation between the types of hoops and the size effect on the compressive strength, strain at the peak stress, and stress-strain curve of the RC columns. Test results show that the size effect on the compressive behavior is largely dependent on the type of hoops.

#### 1. まえがき

最近、鉄筋コンクリート造建物の高層化に伴い、高強度コンクリートと高強度鉄筋を用いた鉄筋コンクリート（以下、RCと略記）柱が用いられるようになった。これらの高強度RC部材に所要の変形能力を付与する必要から、各種の横補強筋で補強された高強度RC柱の塑性変形性能に関する研究が行われている。普通強度のコンクリートでは、一般に供試体寸法が大きくなるとコンクリートほど塑性変形挙動が脆性的で、小型供試体の実験結果は実部材に比して危険側の結果を与える場合が多い。本研究では、 $F_c=700 \text{ kgf/cm}^2$  級の高強度コンクリートを用いたRC柱の圧縮特性の寸法効果に及ぼす帯筋の形状の影響について考察する。

#### 2. 実験方法

##### 2.1 実験の概要

表-1に、RC柱の一軸圧縮実験の概要を、また図-1および2に、供試体の寸法と帯筋の配置を示す。コンクリートの水セメント比(W/C)は32%とした。RC柱の高さと幅の比(H/b)は、すべて2とした。帯筋径は、形状が□型で間隔が断面辺長bと等しい場合に帯筋比が約0.3%となるように選んだ。供試体の個数は各要因ごとに2体、合計56体である。コンクリート強度のバッチ間変動(2バッチ)を調べるために、別に円柱体も作成した。

##### 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)、岡崎産の碎石(5~15mm)および高性能減水剤を使用し、設計スランプは18cmとした。コンクリートの混練には容量600ℓのスミス式コンクリートミキサーを使用した。

\*1 愛知工業大学 建築学科

\*2 三重大学 建築学科

コンクリートの打ち込み方向は縦打ちとした。柱供試体と同一養生としたφ10×20cmコンクリートシリンダーの圧縮強度のバッチ間の差は、平均圧縮強度の3.9%であった。

表-2および3に、使用した主筋および帯筋の力学特性を示す。なお、表中には□タイプの場合の帯筋の拘束指標 ( $\sigma_y \cdot A_s / A_c$ ) も併示した。養生方法は、すべて恒温恒湿空中養生(温度20±1°C、相対湿度85±5%)とし、材令6週で圧縮試験を行った。

2.3 載荷および測定方法

図-3に、ひずみの測定方法を示す。圧縮ひずみの測定域( $l_0$ )は、供試体の高さ中央部の1.8bの領域とした。載荷には、最大容量200tのアクチュエーターを使用し、毎分約  $1 \times 10^{-3}$  のひずみ速度で、供試体の中央部1.8b区間の縦ひずみが  $22 \times 10^{-3}$  に至るまで継続載荷した。耐荷力が200tを越える供試体では、最大容量600tの圧縮試験機を使用した。

3. 実験結果とその考察

3.1 圧縮強度の寸法効果

軸圧縮荷重を供試体の断面積で除した値およびピーク点の応力を、以下の考察ではそれぞれ応力および圧縮強度とする。図-4(a)および(b)に、RC柱の圧縮強度に及ぼす供試体寸法の影響を示す。図(a)は、□タイプの柱の圧縮強度を帯筋のピッチ別に示したものである。RC柱の圧縮強度は、供試体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下し、b=25cmの供試体のものはb=9.7cmのものに比べてS=b/8のもので約10%、またS=b/4のもので約8%低下している。

この図中のプレーンコンクリートと□タイプ、s=b/4の柱の圧縮強度を、筆者らが既報<sup>1)</sup>で報告したこれと同じ調合で横打ちのプレーンコンクリートおよび主筋にφ2.7mm鉄筋を4本配置し、帯筋形状を□型としたRC柱(ここでは、主筋比が小さいため、本報のRC柱と区別してコンファインドコンクリートと呼ぶ)の強度を比較した。図には示していないが、プレーンコンクリートの圧縮強度は両者ほぼ同じ値であり、その寸法効果も同様な傾向を示した。また、

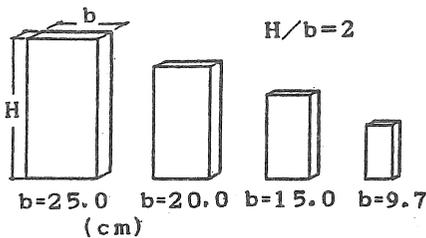


Fig.1 Size of test specimens

Table 1 Outline of experiment of RC columns

Size of RC column		Longitu. bar		Hoop	
Section	Height H=2b H (cm)	Diameter φ (mm)	φ (mm)	Shape and Spacing	
b×b (cm)				Shape	Spacing
9.7×9.7	19.4	D6	5.0	plain	b/4   ※3 b/8
15.0×15.0	30.0	D10	5.6	※1	
20.0×20.0	40.0	D13	8.0	※1	
25.0×25.0	50.0	D16	10.0	※2	

[Notes] ※1 :eight longitudinal bars, ※2 :twelve longitudinal bars  
※3 :only for □ type

Table 2 Mechanical properties of longitudinal bar

Nominal diameter	φ ※1 (mm)	σ <sub>y</sub> ※2 (kgf/cm <sup>2</sup> )	σ <sub>u</sub> ※3 (kgf/cm <sup>2</sup> )	e ※4 (%)
D6	6.4	3430	6140	20.4
D10	9.5	3070	5720	22.9
D13	12.7	3500	5210	25.7
D16	15.9	3400	5390	29.2

[Notes] ※1 φ :Measured diameter,  
※2 σ<sub>y</sub>:Yield strength,  
※3 σ<sub>u</sub>:Maximum strength(0.2 % offset stress),  
※4 e :Elongation

Table 3 Mechanical properties of hoop

Nominal diameter	φ ※1 (mm)	σ <sub>y</sub> ※2 (kgf/cm <sup>2</sup> )	σ <sub>u</sub> ※3 (kgf/cm <sup>2</sup> )	e ※4 (%)	σ <sub>y</sub> ·A <sub>s</sub> /A <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )
φ5.0	5.0	1890	3020	34.6	7.04
φ5.6	5.6	3190	4350	23.9	6.00
φ8.0	8.0	2820	3830	27.4	6.14
φ10.0	10.0	3500	4500	25.0	7.61

[Notes] ※1 φ :Measured diameter, ※2 σ<sub>y</sub>:Yield strength,  
※3 σ<sub>u</sub>:Maximum strength, ※4 e :Elongation,  
A<sub>s</sub>:Sectional area of hoop,  
A<sub>c</sub>:Area of horizontal section of core concrete

$S=b/4$  のものでは、柱の圧縮強度はコンファインドコンクリートよりも約 $50\text{kgf/cm}^2$  大きい(主筋断面の寄与分)、寸法の増大とともに強度が低下する寸法効果の傾向は定量的にも極めて類似していることが分かった。

図(b)は、帯筋形状の影響を示したものである。横拘束力の大きい順に、すなわち帯筋形状が $\boxplus$ 、 $\boxtimes$ 、 $\boxminus$ 、 $\boxdot$ および $\square$ の順に圧縮強度の寸法効果が顕著である。ただし、ここでは便宜上、主筋本数の違いも帯筋形状の違いとみなして比較している。とくに、 $\boxplus$ タイプの形状のものでは、供試体寸法が $25.0\text{cm}$ のものでは $9.7\text{cm}$ のものに比べて平均で約 $18\%$ 低下している。また、この図から実大の柱では、帯筋形状の違いによる圧縮強度の差異は、極めて小さくなることが予想される。

3.2 最大応力時のひずみの寸法効果

図-5(a)および(b)に、最大応力時のひずみ( $\epsilon_m$ )に及ぼす供試体寸法の影響を示す。図

(a)は、 $\square$ タイプの柱の $\epsilon_m$ の値を帯筋のピッチ別に示したものである。供試体寸法の増大とともに $\epsilon_m$ の値が減少する寸法効果がみられる。すなわち、供試体寸法が $b=9.7\text{cm}$ から $25.0\text{cm}$ に増大すると $\epsilon_m$ の値は、 $s=b/8$ のもので約 $38\%$ 、 $S=b/4$ のものでは約 $30\%$ 小さくなる。また、帯筋ピッチが $S=b/8$ と $b/4$ の場合とで $\epsilon_m$ の値はさほど変わらない。図(b)は、帯筋形状の影響を示したものである。図によれば、帯筋形状にかかわらず供試体寸法の大きなものほど $\epsilon_m$ の値が小さくなる寸法効果が認められる。すなわち、 $\epsilon_m$ の値は $b=25.0\text{cm}$ のものは $9.7\text{cm}$ のものに比べて $\boxplus$ 、 $\boxtimes$ 、 $\boxminus$ および $\square$ タイプの形状のもので約 $38\%$ 、 $\boxplus$ タイプのもので約 $20\%$ 低下している。また、帯筋形状が $\boxplus$ 、 $\boxtimes$ 、 $\boxminus$ および $\square$ タイプのもので、 $b=15\text{cm}$ 以下では横拘束力の大きな形状のものがやや大きな $\epsilon_m$ の値を示すが、 $b=20\text{cm}$ 以上になると、帯筋形状に拘らずほぼ等しい値になる。

3.3 応力-ひずみ曲線

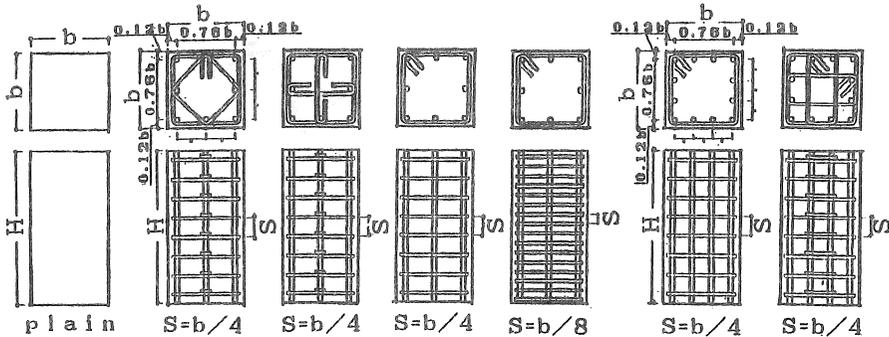


Fig. 2 Arrangement of reinforcement

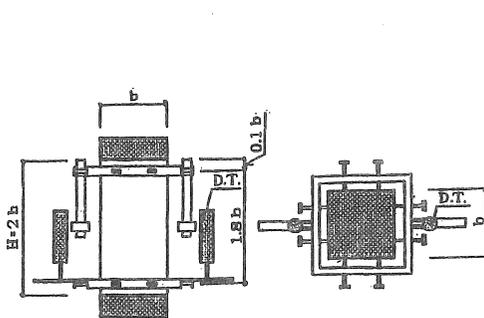
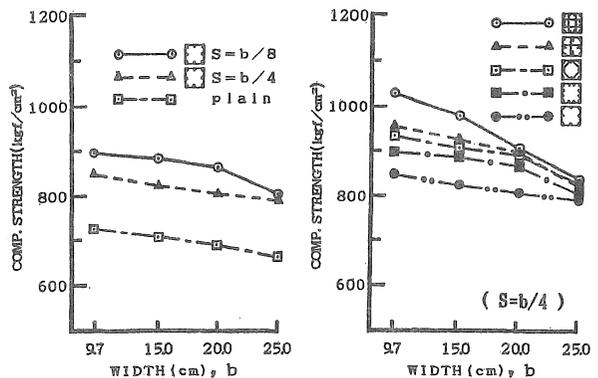


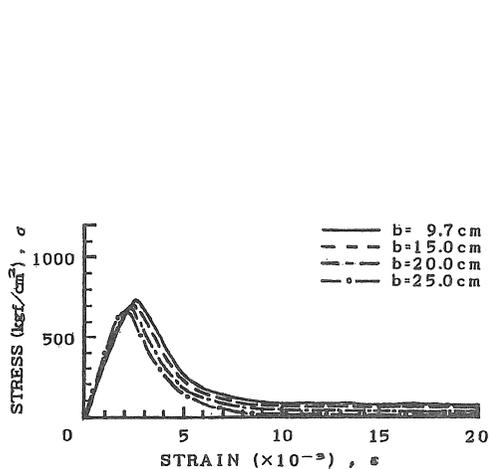
Fig. 3 Method of measurement



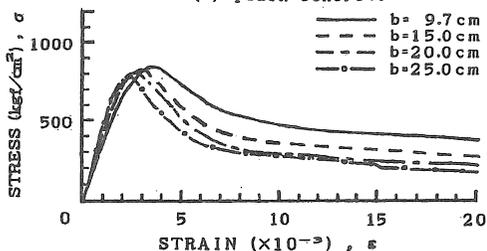
(a) Effect of pitch of hoop (b) Effect of shape of hoop  
Fig. 4 Relationship between compressive strength and specimen size

(1) 供試体寸法の影響: 図-6 (a) ~ (g) に、RC柱の応力-ひずみ曲線 ( $\sigma - \epsilon$  曲線) に及ぼす供試体寸法の影響を帯筋形状別に示す。どの帯筋形状の柱も、供試体寸法の大きなものほど最大応力後の軟化勾配が急になる寸法効果がみられる。図

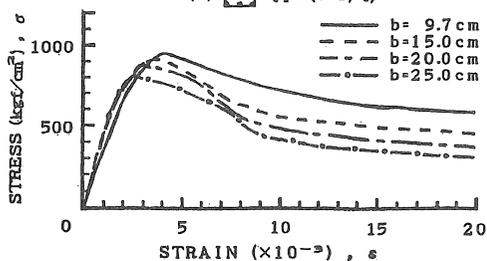
(g) の  $\boxplus$  タイプと図 (d) の  $\boxtimes$  タイプの帯筋形状の柱の応力-ひずみ曲線は、他の帯筋形状のものに比べて応力下降域の変形挙動が延性的で、また供試体寸法が大きなものほど応力下降域の形状が順次、脆性的となる寸法効果が明白にみられる。一方、図



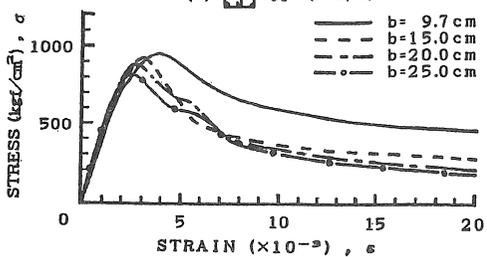
(a) plain concrete



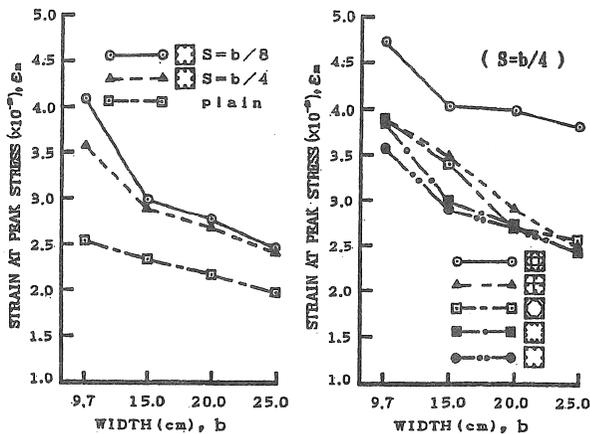
(b) □ type ( $S=b/4$ )



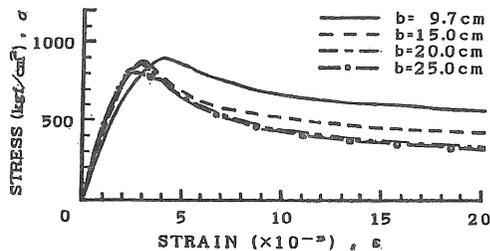
(d) ⊗ type ( $S=b/4$ )



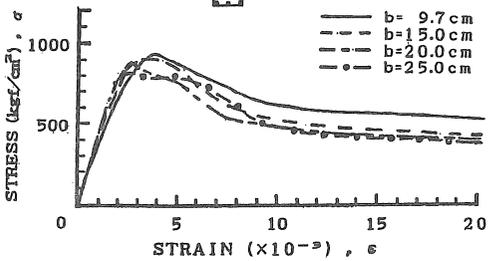
(f) □ type ( $S=b/4$ )



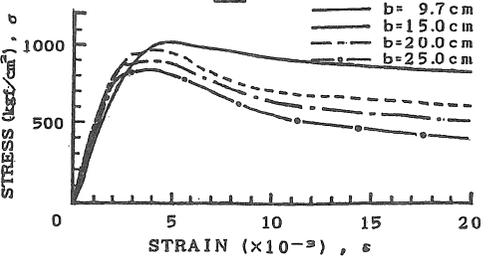
(a) Effect of pitch of hoop (b) Effect of shape of hoop  
Fig.5 Relationship between  $\epsilon_n$  and specimen size



(c) □ type ( $S=b/8$ )



(e) ⊗ type ( $S=b/4$ )



(g) ⊕ type ( $S=b/4$ )

Fig.6 Effect of specimen size on stress-strain curve

(b)、(c)、(e)および(f)に示す□(S=b/4およびb/8)、⊠および⊞タイプの形状のものは、供試体寸法がb=15cm以上になると、応力-ひずみ曲線の寸法効果が非常に小さくなる。

図-6(b)に示す□タイプ、S=b/4の帯筋で補強された柱の応力-ひずみ曲線と、同じ帯筋で補強された前述のコンファインドコンクリート<sup>1)</sup>と比較した。図には示していないが、両者にはほぼ同様の寸法効果が存在することが確認された。

(2) 帯筋ピッチの影響: 図-7(a)および(b)に、それぞれ□タイプの帯筋で補強されたb=9.7cmおよび25.0cmのRC柱供試体の応力-ひずみ曲線に及ぼす帯筋ピッチ(S)の影響を示す。これらの図および他の寸法の場合の比較によれば、帯筋を密に配置することによる靱性改善効果は、供試体寸法が大きくなるにつれて徐々に減少する。この傾向は、筆者らが報告した前述のコンファインドコンクリート<sup>1)</sup>において、帯筋ピッチをS=bからS=b/4まで変化した場合と同じ傾向である。

(3) 帯筋形状の影響: 図-8(a)および(b)に、それぞれb=9.7cmおよび25.0cmのRC柱の応力-ひずみ曲線に及ぼす帯筋形状の影響を示す。これらの図および他の寸法の場合の比較によれば、応力-ひずみ曲線の下降域の形状は、ほぼ横拘束力の

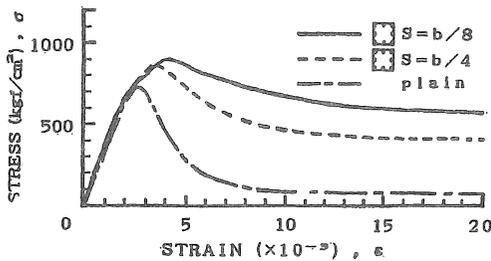
大きい順に、すなわち⊞、⊠、⊞、□および□タイプの帯筋形状の順に延性的な変形挙動を示している。ただし、その靱性改善効果は供試体寸法が大きくなるにつれて徐々に減少する。

4. 結論

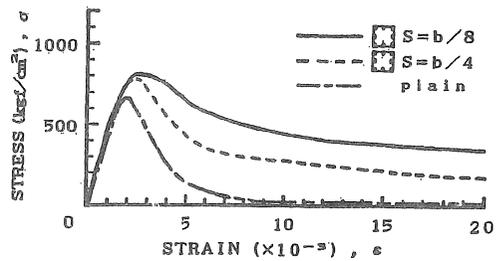
一軸圧縮を受けるRC柱の応力-ひずみ関係の寸法効果と帯筋形状の関係について実験的に検討した。本研究の結果は、およそ以下のようにまとめられる。

(1) RC柱の圧縮強度は、供試体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下する。その寸法効果は、帯筋形状によって異なり、ほぼ横拘束力の大きい順に、すなわち⊞、⊠、⊞、□および□の順に圧縮強度の寸法効果が顕著である。とくに、⊞タイプの形状のものは、ピッチS=b/4で供試体寸法b=25.0cmのものでは、9.7cmのものに比べて平均で約18%低下した(図-4(b))。

(2) RC柱の最大応力時のひずみ(ε<sub>m</sub>)は、供試体寸法が大きくなるにつれて減少する。その寸法効果は、帯筋形状によって異なり、S=b/4の場合、b=25cmの供試体のε<sub>m</sub>の値は、9.7cmのものに比べて

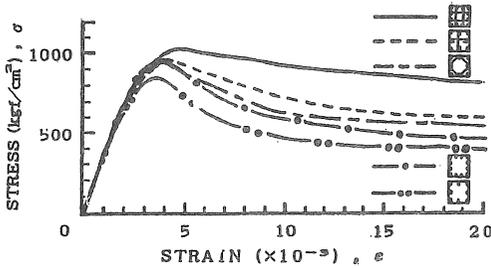


(a) b=9.7cm

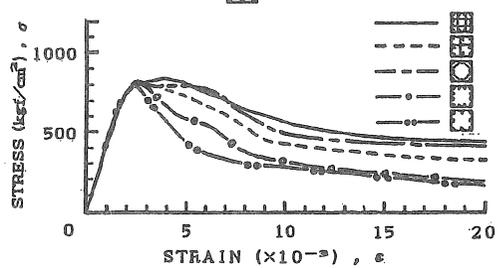


(b) b=25.0cm

Fig.7 Effect of pitch of hoops on stress-strain curve (□ type)



(a) b=9.7cm



(b) b=25.0cm

Fig.8 Effect of shape of hoops on stress-strain curve (S=b/4)

田、、およびタイプのもので約38%、タイプのもので約20%低下した(図-5(b))。

(3) RC柱の応力-ひずみ曲線は、供試体寸法の大きなものほど最大応力後の軟化勾配が急になる。その寸法効果は帯筋形状によって異なり、タイプとタイプの帯筋形状の柱の応力-ひずみ曲線は、供試体寸法が大きなものほど応力下降域の形状が順次、脆性的となる。また、 ( $S=b/4$ および $b/8$ )、およびタイプの形状のものでは、供試体寸法が $b=15\text{cm}$ 以上になると、応力-ひずみ曲線の寸法効果が非常に小さくなる(図-6)。

(4) 帯筋を密に配置することによる靱性改善効果は、供試体寸法が大きくなるにつれて徐々に減少する(図-7)。

(5) 横拘束力の大きい形状の帯筋を配置することによる靱性改善効果は供試体寸法が大きくなるにつれて徐々に減少する(図-8)。

[謝辞] 本研究の一部は、内藤科学技術研究助成金を受けて実施したものである。本実験に協力していただいた愛知工業大学卒研究生の諸君に感謝します。また、セメントを提供いただいたNセメント社並びに高性能減水剤を提供いただいたT油脂社に御礼申し上げます。

[参考文献]

1) 小池狭千朗・畑中重光, 形状・寸法の異なるコンファインド高強度コンクリートの圧縮特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp. 397-402 (1991)

(受理 平成6年3月20日)