

# 超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 ULTRA-HIGH STRENGTH COLUMNS UNDER AXIAL COMPRESSION

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

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

[ABSTRACT] A series of uniaxial compression tests of reinforced ultra-high strength concrete (RC) columns were carried out to examine the size effect on their compressive behavior. Experimental factors include the section size of specimen ( $b \times b$ ,  $b=9.7, 15, 20$  and  $25\text{cm}$ ), the type of bar arrangement (shape of hoops are : , , ,  and ), pitch ( $S=\infty, b/4, b/6$  and  $b/8$ ) and yield strength of hoops ( $\sigma_y \doteq 3000, 5000$  and  $15000 \text{ kgf/cm}^2$  level). The strength ( $F_c$ ) of concrete was set to be about  $F_c=1000 \text{ kgf/cm}^2$ .

Based on the test results, discussion is carried out mainly on the relation between the type and yield strength of hoops and the size effect on the compressive failure of the RC columns. Following statements can be drawn from the test results.

1) The compressive strength of large specimens with  $b=25.0\text{cm}$  is smaller than that of small specimens with  $b=9.7\text{cm}$  by about 25%, almost regardless of the shape, pitch, and yield strength of hoops.

2) Compressive toughness ( area under stress-strain curve) gradually decreases with increasing size of specimen. It should be noted that the shapes of stress-strain curves in softening range are rather obtained from various size of specimens, i.e. size effect in the stress-strain curves is mainly due to the size effect in the peak stress point.

### 1. まえがき

筆者らは昨年度、圧縮強度  $F_c=700\text{kgf/cm}^2$  レベルの超高強度コンクリートを用いたRC柱の応力-ひずみ挙動に及ぼす供試体寸法の影響を調べた。その結果、RC柱の圧縮強度および圧縮靱性は、供試体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下すること、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および圧縮靱性の寸法効果は顕著であること、などが明かとなった<sup>1)</sup>。本報では、水セメント比を25%とした $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$ 級の超高強度コンクリートについて、これらの要因および帯筋の降伏強度の影響を実験的に調べ、既報<sup>1,2)</sup>の結果と比較・検討する。

### 2. 実験方法

#### 2. 1 実験の概要

\*1 愛知工業大学 建築学科

\*2 三重大学 建築学科

Table 1 に、RC柱の一軸圧縮実験の概要を示す。実験要因として、帯筋比、帯筋の強度レベルおよび帯筋の形状の相違を取り上げた。Fig.1 および2に、供試体の寸法および帯筋の形状・配置を示す。コンクリートの水セメント比 (W/C)は25%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の1/4の場合に帯筋比が約1.2%となるように選んだ。帯筋の降伏強度レベルは、3000、5000および15000kgf/cm<sup>2</sup> の3種類とした。供試体の個数は各要因ごとに2体、合計288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、シリカヒューム、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 100ℓの2軸強制練り式コンクリートミキサーを使用した。角柱供試体と同一養生としたφ

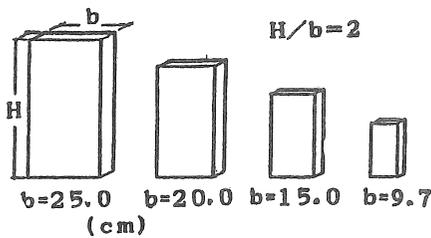


Fig.1 Size of test specimens

10×20cmコンクリートシリンダーの平均圧縮強度のバッチ間の差は、全平均圧縮強度の4.0%以内であった。コンクリートの打ち込み方向は縦打ちとした。

Table 2 および 3に、使用した主筋および帯筋の力学的性質を示す。供試体の上端面は鏡面仕上げとし、主筋の上下端面は供試体の上下端面と一致させた。また、供試体の上下端部の帯筋量を増して補強を図った。なお、表中に□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温空中養生 ( 温度  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $85 \pm 10\%$  ) とし、材令約12週で圧縮試験を行った。

2. 3 載荷および測定方法

Fig.3 に、ひずみの測定方法を示す。圧縮ひずみの測定域 ( $\ell_0$ ) は、供試体の高さ中央部の1.8bの領域とした。載荷には、b=9.7cm の供試体には最大容量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  $30 \times 10^{-3}$  に至るまで継続載荷した。b=15.0

Table 1 Outline of experiment of RC columns

Section b×b (cm)	Height (H=2b) H (cm)	Longitu. bar Diameter φ (mm)	Hoop			Yield strength level $\sigma_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
			Diameter φ (mm)	Shape and Spacing		
				Shape	Spacing	
9.7×9.7	19.4	D6	4.0 ※4	plain	b/4	3000
15.0×15.0	30.0	D10	6.0 ※5	□ ※1	b/6 ※3	5000
20.0×20.0	40.0	D13	8.0 ※6	⊞ ※1	b/8	15000
25.0×25.0	50.0	D16	10.0 ※7	⊞ ※2		

[Notes] ※1 :eight longitudinal bars, ※2 :twelve longitudinal bars  
 ※3 :only for □ type, ※4 :φ5( $\sigma_y=3000$ ), φ3.5( $\sigma_y=15000$ )  
 ※5 :φ5.6( $\sigma_y=3000$ ), φ5( $\sigma_y=15000$ ), ※6 :φ7.3( $\sigma_y=15000$ )  
 ※7 :φ9.2( $\sigma_y=15000$ )

Table 3 Mechanical properties of hoops

Level of yield strength	Nominal diameter	Measured diameter φ (mm)	Yield strength $\sigma_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Maximum strength $\sigma_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	$\sigma_y \cdot A_s / A_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
3000	φ5.0	5.0	1890	3020	34.6	7.04
	φ5.6	5.6	2832	3530	23.9	5.33
	φ8.0	8.0	3047	3959	27.4	5.86
	φ10.0	10.0	2783	3794	25.0	6.05
5000	φ4.0	4.0	5000 *	5239	9.7	11.6
	φ6.0	6.0	5465	5607	5.9	11.9
	φ8.0	8.0	5203 *	5541	32.5	11.3
	φ10.0	10.0	4526 *	4724	7.9	9.84
15000	φ3.5	3.5	14500 *	16100	9.5	25.4
	φ5.0	5.0	16500 *	21190	10.4	24.5
	φ7.4	7.3	17860 *	18370	6.6	33.3
	φ9.2	9.2	15110 *	15320	8.2	27.7

Table 2 Mechanical properties of longitudinal bars

Nominal diameter	φ (mm)	$\sigma_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	e (%)
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] φ :Measured diameter,  $\sigma_y$ :Yield strength, (0.2 % offset stress),  $\sigma_u$ :Maximum strength  
 e :Elongation,

[Notes] \* :0.2% offset stress,  $A_s$ :Sectional area of hoop,  
 $A_c$ :Area of horizontal section of core concrete

cm以上の供試体には最大容量600tの圧縮試験機を使用した。

3. 実験結果とその考察

典型的な破壊パターンを例をFig.4 に示す。

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。コンファインドコンクリートに関する筆者らの既往の実験データ<sup>2)</sup>によれば、水セメント比(W/C)が55%のコンクリートでは供試体寸法が大きくなっても、圧縮強度はほぼ一定値であるが、水セメント比の減少に伴って寸法効果が顕著となる。すなわち、W/C=32%の高強度コンクリートでは、b=30.0cmの供試体の圧縮強度は b=9.7cmのものに比べて平均で約10%低下し、W/C=25%の超高強度コンクリートでは、b=25.0cmの供試体の圧縮強度は b=9.7cmのものに比べて平均で約15~20%低下した。

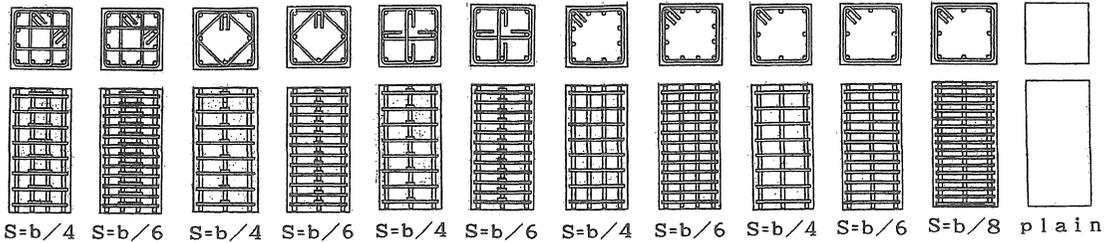


Fig. 2 Arrangement of reinforcement

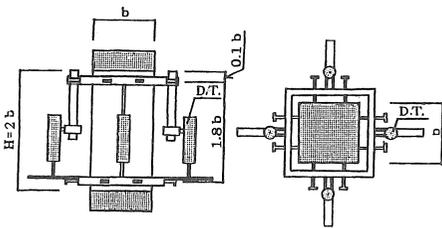


Fig. 3 Method of measurement

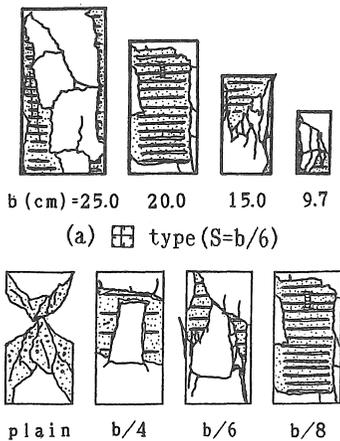


Fig. 4 Failure pattern ( $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$ )

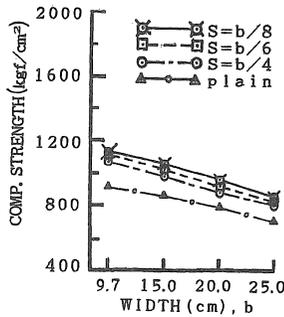


Fig. 5 Size effect on compressive strength for various pitch (S) of hoops (□ type,  $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$ )

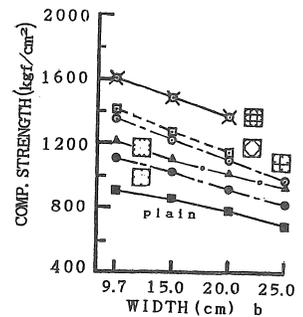
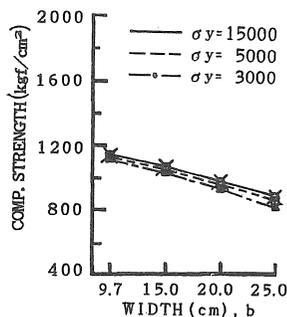
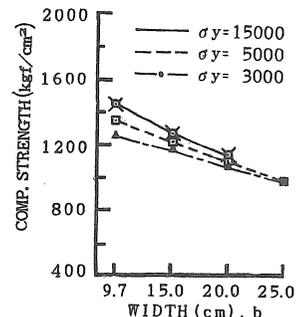


Fig. 6 Size effect on compressive strength for various shape of hoops ( $S=b/6$ ,  $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$ )



(a) □ type ( $S=b/8$ )



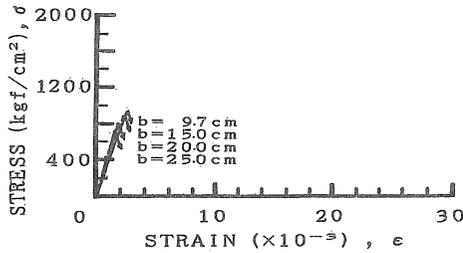
(b) ◇ type ( $S=b/6$ )

Fig. 7 Size effect on compressive strength for various yield strength ( $\sigma_y$ ) of hoops

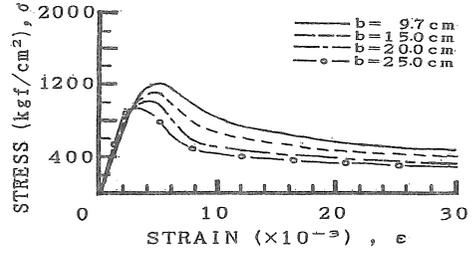
Fig. 5 は、 $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$ レベルの□タイプの帯筋で拘束した主筋本数 8本のRC柱の圧縮強度を帯筋のピッチ(S)別に示したものである。RC柱の圧縮強度は、供試体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下し、いずれのピッチの場合も $b=25.0\text{cm}$ の供試体の圧縮強度は $b=9.7\text{cm}$ のものに比べて約20%程度低下している。図には示していないが、帯筋の降伏強

度レベルの異なる他の供試体でも、強度の寸法効果の傾向は、ほぼ同様である。

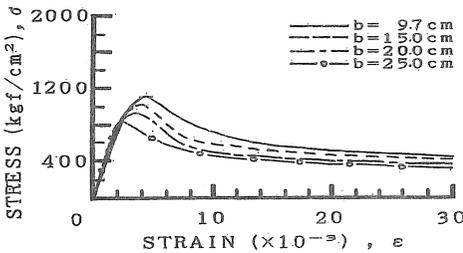
Fig.6 は、 $S=b/6$ 、 $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$ レベルの帯筋を配置したRC柱の圧縮強度の寸法効果に及ぼす帯筋形状の影響を示したものである。いずれの帯筋形状の場合も、 $b=25.0\text{cm}$ の供試体では $9.7\text{cm}$ のものに比べて、圧縮強度が約25%低下している。すなわち、



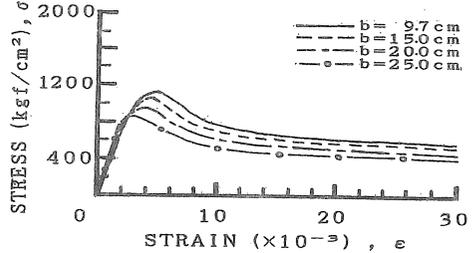
(a) plain concrete



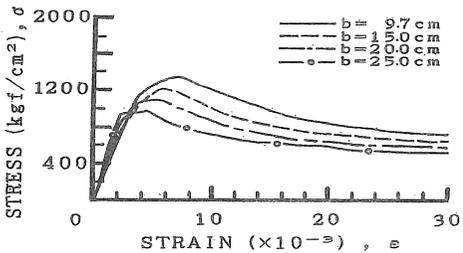
(b) □ type ( $S=b/6$ )



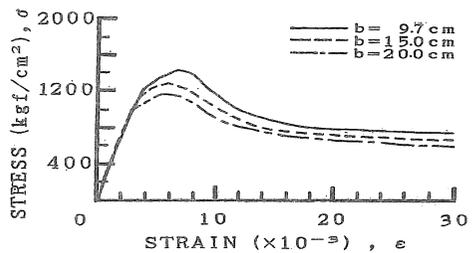
(c) □ type ( $S=b/6$ )



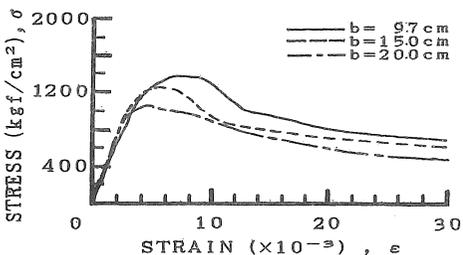
(d) □ type ( $S=b/8$ )



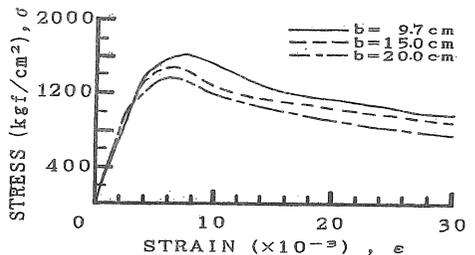
(e) □ type ( $S=b/6$ )



(f) □ type ( $S=b/6$ )



(g) □ type ( $S=b/4$ )



(h) □ type ( $S=b/6$ )

Fig. 8 Size effect on stress-strain curve ( $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$ )

圧縮強度は帯筋による横拘束力の差異の分だけ増減する関係にあり、強度の寸法効果は帯筋形状に拘らずほぼ等しいといえる。これは、 $F_c=700\text{kgf/cm}^2$ レベルのコンクリートを用いた既報<sup>1)</sup>の結果とも類似している。

Fig. 7(a) および (b)は、RC柱の圧縮強度の寸法効果に及ぼす帯筋の降伏強度 ( $\sigma_y$ )の影響を示したものである。降伏強度が大きい供試体ほど圧縮強度が若干高いが、圧縮強度の寸法効果は、降伏強度に拘らずほぼ同様であり、断面寸法が25.0cmの供試体では、9.7cmのものに比べて Fig.6 の場合、平均で約26%低下している。

### 3.2 応力-ひずみ曲線

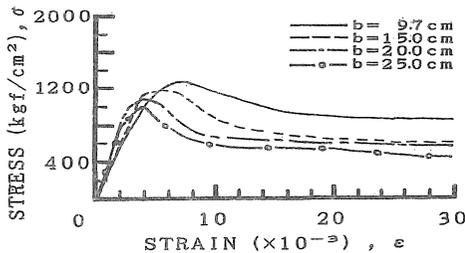
Fig. 8(a)~(h) は、帯筋の形状およびピッチ(S)の異なるRC柱の応力-ひずみ曲線に及ぼす供試体寸法の影響を示したものである。これらの図によれば、一般に、供試体寸法の増大に伴い、ピーク時の応力およびひずみは減少し、圧縮塑性もまた減少する。但し、応力下降域における曲線形状は、供試体寸法に拘らず類似しており、ピーク応力点における寸法効果がそのまま現れる形となっている。すでに報告した $F_c=700\text{kgf/cm}^2$ レベルのコンクリートを用いたRC柱の場合<sup>1)</sup>、帯筋の拘束力があまり大きくない供試体で同様な傾向がみられた。

Fig. 9(a) ~ (d) は、帯筋の降伏強度 ( $\sigma_y$ ) および形状の異なるRC柱の応力-ひずみ曲線に及ぼす供試体寸法の影響を示したものである。Fig.9(a) および(b)によれば、 $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$ レベルの帯筋を用いた供試体では、Fig.8 の $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$ レベルの帯筋を用いた場合と比べて、相対的に圧縮塑性が小さくなるものの、応力-ひずみ曲線に及ぼす供試体寸法の影響は極めて類似している。また、応力-ひずみ曲線における寸法効果が取れんする傾向も見受けられる。一方、Fig.9(c)および(d)によれば、 $\sigma_y=15000\text{kgf/cm}^2$ レベルの帯筋を用いた供試体の応力-ひずみ曲線は、圧縮塑性が極めて大きいため、高ひずみ域に至っても応力低下が小さく、やはりピーク応力の差異がそのまま残る傾向がある。

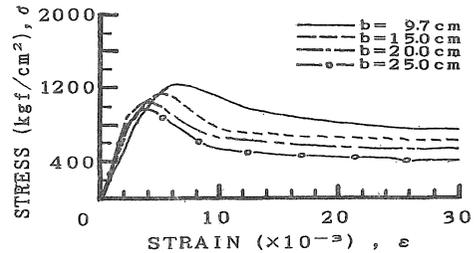
### 4. 結論

$F_c=1000\text{kgf/cm}^2$ レベルの超高強度コンクリートを用いたRC柱の一軸圧縮時の応力-ひずみ関係の寸法効果と帯筋の形状、ピッチおよび降伏強度と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。

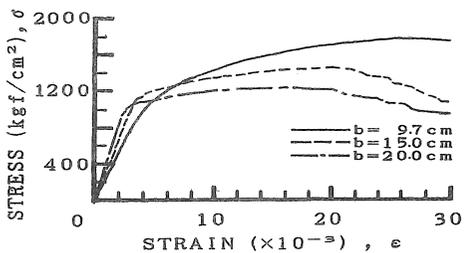
- (1) RC柱の圧縮強度は、供試体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下する。その寸法効果は帯筋の



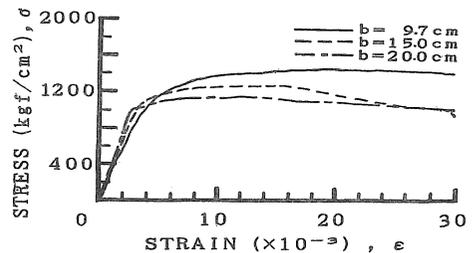
(a) □ type ( $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$ )



(b) ⊞ type ( $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$ )



(c) □ type ( $\sigma_y=15000\text{kgf/cm}^2$ )



(d) ⊞ type ( $\sigma_y=15000\text{kgf/cm}^2$ )

Fig. 9 Size effect on stress-strain curve ( $S=b/6$ )

形状、ピッチ、降伏強度に拘らず類似しており、 $b=25.0\text{cm}$  の供試体の圧縮強度は $b=9.7\text{cm}$ のものに比べ、約25%低下した。

(2) RC柱の圧縮靱性は、供試体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下する。ただし、一般に、軟化域における応力-ひずみ曲線の形状は供試体寸法に拘らず類似しており、ピーク応力点における寸法効果がそのまま現れる形となっている。この傾向は、 $F_c=700\text{kgf/cm}^2$  レベルのコンクリートを用い、帯筋の拘束力があまり大きくない場合にみられた傾向と一致する。

[謝辞]

本実験に協力していただいた愛知工業大学卒研生

の諸君に感謝します。また、セメントを提供いただいた日本セメント㈱、高性能減水剤を提供いただいた竹本油脂㈱並びに加工したPC鋼線を提供いただいた高周波熱練㈱に御礼申しあげます。

[参考文献]

- 1) 小池狭千朗・畑中重光、コンファインド超高強度コンクリートの圧縮特性の形状・寸法効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.2、pp.949-954 (1992)
- 2) 小池狭千朗・畑中重光、高強度RC柱の圧縮特性の寸法効果、セメント・コンクリート論文集、No.46、pp.744-749 (1992)

(受理 平成6年3月20日)