

高強度RC柱の圧縮破壊時吸収エネルギーの寸法効果

SIZE EFFECT ON STRAIN ENERGY ABSORPTION CAPACITY OF REINFORCED HIGH STRENGTH CONCRETE COLUMNS UNDER UNIAXIAL COMPRESSION LOADING

小池 狭千朗^{*1} 畑中 重光^{*2} 水野 英二^{*3}

Sachio KOIKE^{*1} Sigemitsu HATANAKA^{*2} and Eiji MIZUNO^{*3}






[ABSTRACT] In the present study, the effect of specimen size on the absorption energy of RC columns is discussed based on the reported test data of reinforced high- and ultra-high strength RC rectangular columns reported earlier by the authors and the new data of ultra-high strength RC cylindrical columns.

Experimental factors include the section size of specimen ($b=9.7, 15, 20$ and 25 cm for square cross sections, $D=10, 15, 20$ and 25 cm for circular cross sections), concrete compressive strength ($F_c=700$ and 1000 kgf/cm²), the six types of hoops, pitch of hoops ($S=\infty, b/4, b/6$ and $b/8$) and yield strength of hoops ($\sigma_y=3000, 5000$ and 15000 kgf/cm² level).

Following statements can be drawn from the test results.

- 1) The absorption energy up to failure W_p of RC columns increases with increasing concrete compressive strength and the magnitude of lateral confinement, which depends on the pitch, yield strength and shape of hoops.
- 2) Size effect on the absorption energy up to failure W_p of RC columns is rather small when the magnitude of lateral confinement is very high, or the value of W_p itself is large.

1. まえがき

筆者らは一昨年および昨年度、圧縮強度 $F_c=700$ および 1000 kgf/cm²レベルの高強度コンクリートを用いたRC柱の応力-ひずみ挙動の寸法効果について調べた。その結果、RC柱の圧縮強度およびタフネス(応力-ひずみ曲線下の面積)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、その寸法効果は圧縮強度によって異なり、 $F_c=700$ kgf/cm²レベルのものでは、ほぼ横拘束力の大きい順に、すなわち 、、、 および  の順に、圧縮

強度およびタフネスの寸法効果は顕著であるが、 $F_c=1000$ kgf/cm²レベルのものでは、帯筋の形状、ピッチ、降伏強度に拘らず類似しており、 $b=25.0$ cmの供試体の圧縮強度は $b=9.7$ cmのものに比べ約25%低下すること、などが明かとなった^{1), 2)}。

本報では、これらの実験結果並びに新たに行ったRC円柱体の実験結果に基づき、RC柱の圧縮破壊時吸収エネルギー(塑性ひずみエネルギー)能に及ぼす供試体寸法、帯筋のピッチと降伏強度、およびコンクリート強度の影響について考察する。ここで得られる知見は、寸法効果の一般的性質を明らかにする際の基礎資料となる。また、RC柱のエネルギー吸収能に及ぼす供試体寸法の影響をエネルギー論的に検討³⁾する際の資料とすることができる。

*1 愛知工業大学 建築学科

*2 三重大学 建築学科

*3 名古屋大学 土木工学科

2. 実験データ

用いた実験データは、 $F_c=700\text{kgf/cm}^2$ ($W/C=32\%$)¹⁾および 1000kgf/cm^2 ($W/C=25\%$)²⁾レベルのRC角柱体および新たに行った $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$ ($W/C=25\%$)レベルのRC円柱体の一軸圧縮実験データである。Table 1に、実験の概要を示す。実験要因として、供試体寸法(角柱体:断面寸法の一辺 $b=9.7、15、20、25\text{cm}$ 、円柱体:直径 $D=10、15、20、25\text{cm}$)、供試体の断面形状(円形と角形)、コンクリート強度($W/C=25、32\%$)、帯筋比(帯筋ピッチ $S=b/4、b/6$)、帯筋の降伏強度レベル($\sigma_y=3000、5000、15000\text{kgf/cm}^2$)および帯筋の形状(田、口、田、口、口、タイプ)を取り上げた。円柱体には、スパイラルフープを使用した。

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。RC柱の高さと幅の比($H/b、H/D$)

は、すべて2とした。帯筋径は、形状が口型でピッチが断面辺長 b の1/4の場合に帯筋比が約1.2%となるように選んだ。供試体の個数は各要因ごとに2体、 $W/C=32\%$ (角柱体)¹⁾では56体、 $W/C=25\%$ (角柱体)²⁾では288体、 $W/C=25\%$ (円柱体)では96体、合計440体である。

新たに製作した円柱体のコンクリート、主筋および帯筋は、 $W/C=25\%$ (角柱体)²⁾シリーズのものと同じ調合・材料とし、供試体の養生条件および載荷・測定方法とも同一とした。圧縮ひずみの測定域(ℓ_0)は、供試体の高さ中央部の $1.8b$ ($1.8D$)の領域とした。

3. 実験結果とその考察

3.1 破壊状況と破壊片の破碎状況

Photo.1に、 $\epsilon=30 \times 10^{-3}$ 時の円柱体の破壊パタ

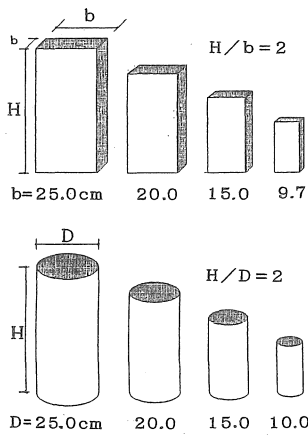


Fig.1 Size of test specimens

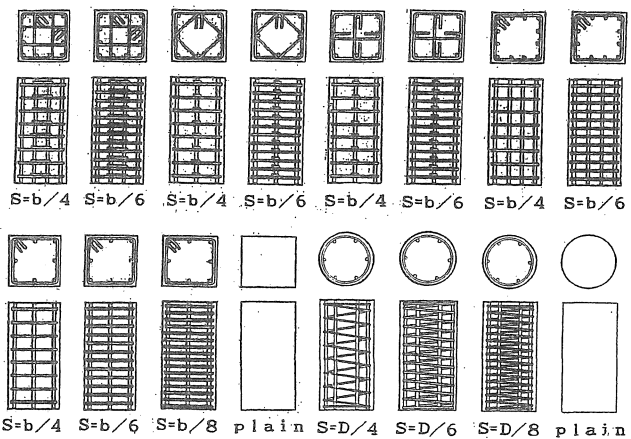


Fig.2 Arrangement of reinforcement

Table 1 Outline of experiment of RC columns

Size of RC column		Height ($H=2b$) ($H=2D$) H (cm)	Longitu. bar		Hoop		Water cement ratio W/C (%)		
Prism Section $b \times b$ (cm)	Cylinder Diameter ϕ (cm)		Diameter ϕ (mm)	Diameter ϕ (mm)	Shape and Spacing				
				Shape		Spacing			
9.7×9.7	10	19.4(20)	D6	4.0 ※1	plain	b/4 b/6 ※8 b/8 ※9	32 25		
15.0×15.0	15	30.0	D10	6.0 ※2	※5				
20.0×20.0	20	40.0	D13	8.0 ※3	※5				
25.0×25.0	25	50.0	D16	10.0 ※4	※6 ※7				

[Notes] ※1 : $\phi 5$ ($\sigma_y=3000$, prism), $\phi 3.5$ ($\sigma_y=15000$), ※2 : $\phi 5.6$ ($\sigma_y=3000$), $\phi 5$ ($\sigma_y=15000$)
 ※3 : $\phi 7.3$ ($\sigma_y=15000$), ※4 : $\phi 9.2$ ($\sigma_y=15000$), ※5 : eight longitudinal bars
 ※6 : twelve longitudinal bars ※7 : six longitudinal bars only for cylinder
 ※8 : only for $W/C=25\%$ ※9 : only for □ and ○ type

ーンの一例を示す。写真は、 $W/C=25\%$ 、 $\sigma_y=5000$ kgf/cm^2 、 $S=b/8$ のRC円柱体のもので、供試体の寸法比で縮小してある。本実験では、供試体-載荷板間の摩擦を減じていないため、写真の供試体では全て、せん断型の終局破壊面が斜めに形成されている⁴⁾。それは、ひずみの増大とともにこの一本の局所帯に破壊が集中し、ついにはコンクリートが斜めの破壊面に沿って滑り出した結果である。多くの場合、滑り量がある限界値に達すると帯筋が破断する。破壊の外観からは、供試体寸法の相違の影響はあまり認められない。

軸ひずみが 30×10^{-3} の時点で載荷を終了したRC円柱体の 2cm^3 以上の破壊片の体積分布を調べた。供試体は載荷終了後、剥落した被りコンクリートを除去し、露出した帯筋を全部切断・除去した後、斜めのひび割れ面を横断する主筋を切断して、破壊片を手で分解し、一個づつ重量を計測した。

Photo.2に、 $W/C=25\%$ 、 $\sigma_y=15000\text{kgf/cm}^2$ 、 $S=b/8$

のRC円柱体の破碎状況を示す。破壊片（剥落した被りコンクリートは除外）は、原則として径の大きいものから順に右へ並べてある。写真は、全ての供試体と同寸法となるように、すなわち、供試体の寸法比で縮小してある。比較的大きな破壊片の分布を概観すると、大径の破壊片（Photo.2(b)~(d)の写真における上段の破壊片の大きさ程度）は、写真間であまり相違していない。すなわち、ほぼ供試体の寸法比に応じた大きさとなっている³⁾。中径の破壊片の分析は、ここでは省略する。

3・2 圧縮強度の寸法効果

Fig. 3は、 $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$ レベルのタイプの帯筋で拘束した円柱体の圧縮強度を帯筋のピッチ(S)別に示したものである。円柱体の圧縮強度は、供試体寸法が大きくなるにつれて徐々に低下し、ピッチがD/4、D/6およびD/8の場合に、 $D=25.0\text{cm}$ の供試体の圧縮強度はD=10cmのものに比べて、それぞれ約

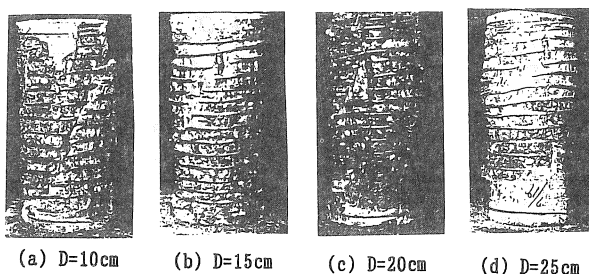


Photo.1 Failure pattern (Cylinder, $W/C=25\%$, $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$, $S=b/8$)

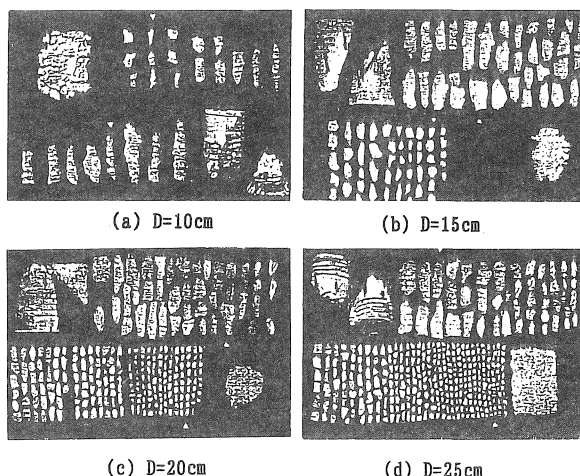


Photo.2 Concrete fragments after failure (Cylinder, $W/C=25\%$, $\sigma_y=15000\text{kgf/cm}^2$, $S=b/8$)

23、20および16%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円柱体でも、強度の寸法効果の傾向は、ほぼ同様である。前報²⁾の□タイプの角柱体の強度の寸法効果と比較して、ほぼ同程度の寸法効果が認められたといえる。

3・3 破壊時吸収エネルギー

コンクリートの破壊片の分析に引き続いて、ここでは、寸法の異なるRC柱の破壊時吸収エネルギー（軟化域まで含めた総エネルギー： W_p 、Fig.4参照）の寸法効果について考える。RC柱の吸収するエネルギーは、コンクリートの吸収するエネルギー、軸方向鉄筋の吸収するエネルギーおよび横補強筋の吸収するエネルギーの和と考えられる。本研究では、軸方向鉄筋と帯筋のひずみを計測していないので、コンクリートが吸収するエネルギーとこれらの鉄筋

が吸収するエネルギーを分離できない。ここでは、これらの吸収エネルギーの総和（軸ひずみが 20×10^{-3} の時点）について考察する。

1) コンクリート強度の影響

Fig.5(a)および(b)は角柱体の W_p に及ぼす供試体寸法の影響を、 $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$ 、 $S=b/4$ のものについて帯筋形状別に示したものである。Fig.5(a)は $W/C=32\%$ 、Fig.5(b)は25%シリーズの結果を示したものである。これらの図によれば、 W_p の値はどの帯筋形状のものも、供試体寸法が大きくなるにつれてほぼ直線的に低下し、かつ、帯筋形状の違いによる横拘束力の差異の分だけ増減する関係が認められる。コンクリート強度の差異が W_p の値に及ぼす影響を調べるため、Fig.(a)と(b)を比較する。図によれば、 $W/C=25\%$ の角柱体では $W/C=32\%$ のものに比べてコンクリート強度が高い分だけ大きなエネルギー

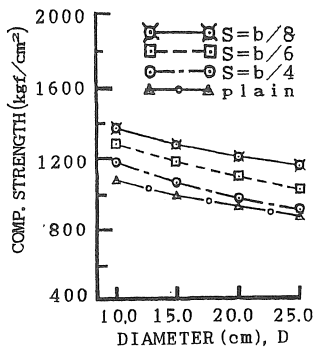


Fig.3 Size effect on compressive strength for various pitch(S) of hoops (Cylinder, O type, W/C=25%, $\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$)

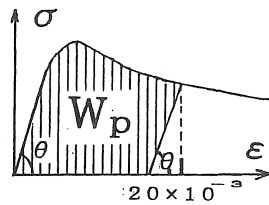
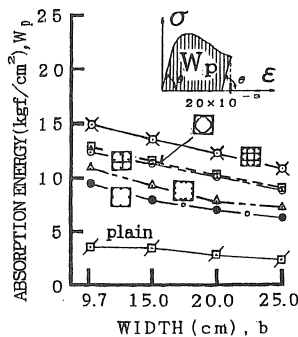
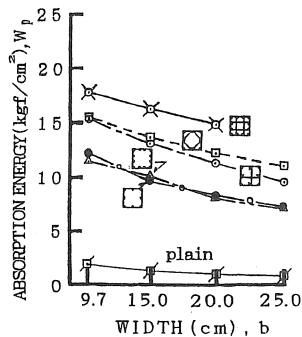


Fig.4 Absorption energy W_p



(a) W/C=32%



(b) W/C=25%

Fig.5 Size effect on absorption energy for various shape of hoops (Square, $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$, $S=b/4$)

を吸収でき、 W_p が約10~20%増大している。

2) 帯筋ピッチの影響

Fig.6(a)~(c)は、□タイプの帯筋で拘束したRC角柱体の W_p に及ぼす帯筋ピッチの影響を、 $W/C=25\%$ のコンクリートについて帯筋の降伏強度別に示したものである。これらの図によれば、帯筋のピッチが密になるほど、また、帯筋の降伏強度が増すほど、 W_p は増大するが、帯筋の降伏強度レベルに拘らず、□タイプの柱の W_p は供試体寸法が大きくなるにつれてかなり顕著に低下することがわかる。

Fig.7(a)~(c)は、○タイプの円柱体について、Fig.6(a)~(c)と同様の比較を行ったものである。図によれば、Fig.7(a)の $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$ の円柱体の場合、 W_p の値とその寸法効果に及ぼす帯筋ピッチの影響は、□タイプの角柱体のそれとほぼ同じである。一方、帯筋の降伏強度の増大とともに、円柱

体の W_p は角柱体より大きくなるが、供試体寸法による W_p の値の差異の絶対量そのものは、□タイプの角柱体の場合と同様あまり変化せず、3~5(kgf/cm^2)程度である。但し、拘束力が極めて大きい場合(Fig.7(c)の $S=b/8$ の場合)には、 W_p の寸法依存性が小さくなる傾向がある。

3) 帯筋形状の影響

Fig.8(a)~(c)は、 $W/C=25\%$ 、帯筋ピッチ $S=b/6$ の角柱体の W_p に及ぼす帯筋形状の影響を帯筋の降伏強度別に示したものである。 W_p の値は、帯筋の横拘束力の大きさが大きいほど、すなわち、帯筋のピッチが密になるほど、また、帯筋の降伏強度が増すほど大きな値を示す。 W_p の寸法効果は、前項の○タイプの場合と同様、帯筋の横拘束力が極めて高い場合(■タイプの角柱体のように W_p の値そのものが大きい場合)には若干減少する傾向がある。

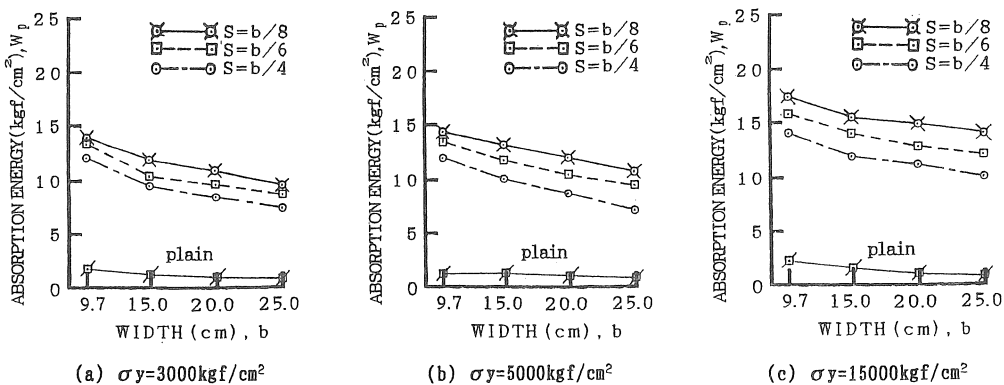


Fig.6 Size effect on absorption energy for various pitch (S) of hoops (□ type, $W/C=25\%$)

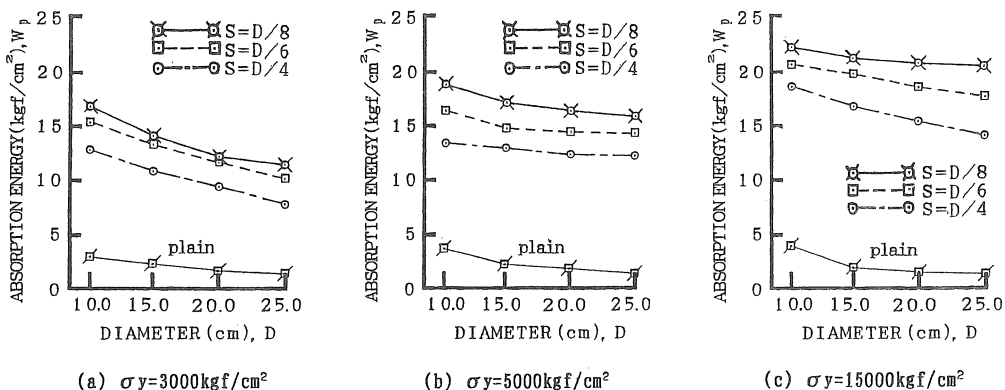


Fig.7 Size effect on absorption energy for various pitch (S) of hoops (○ type, $W/C=25\%$)

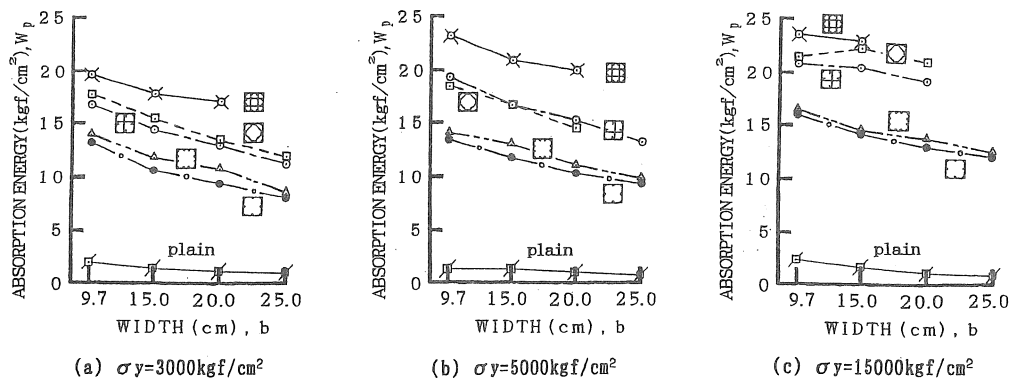


Fig.8 Size effect on absorption energy for various shape of hoops ($W/C=25\%$, $S=b/6$)

4. 結論

(1) 本研究の範囲内では、高さとの比 (H/D) が 2 の RC 円柱体の終局破壊形態は、ほとんどの場合、せん断型の斜め滑り破壊であった (Photo.1)。

(2) 柱試験体の破壊片分析によれば、大径の破壊片の大きさは、ほぼ供試体の寸法比に応じた大きさであった。この傾向は、既往の研究結果³⁾と一致する (Photo.2)。

(3) RC 柱の破壊時吸収エネルギー W_p は、供試体寸法が大きくなるにつれてかなり顕著に低下する。この寸法効果は、帯筋によるの横拘束力が大きいほど、すなわち帯筋のピッチが密になるほど、また、帯筋の降伏強度が大きいほど若干ではあるが減少する傾向がある (Fig.6,7および8)。

[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の諸君に感謝します。また、セメントを提供いた

いた日本セメント(株)、高性能減水剤を提供いただいた竹本油脂(株)並びに加工した PC 鋼線を提供いただいた高周波熱線(株)に御礼申しあげます。

[参考文献]

- 1) 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)
- 2) 小池狭千朗・畑中重光、超高強度 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.47, pp.706-711 (1993)
- 3) 畑中重光・水野英二・小池狭千朗・谷川恭雄、供試体寸法の異なるコンクリートの圧縮破壊性状に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、Vol.5, No.1, pp.65-73 (1994)
- 4) 畑中重光・水野英二・小池狭千朗、圧縮下のコンクリートの破壊性状とそのモデル化について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.2, pp.147-152 (1994)

(受理 平成7年3月20日)