

論文

[1108] 圧縮下の高強度軽量コンクリートの破壊と靱性に関する基礎的研究

島崎宗厳*1・畑中重光*2・谷川恭雄*3

1. はじめに

近年, RC造建物の高層化の気運が高まり, 高強度コンクリートに関する研究が注目を集めている。筆者らの研究室においても, 昨年度まで, 普通骨材を用いた高強度・超高強度コンクリートについて, その圧縮靱性を改善することを目的として一連の研究を行ってきた。建物が高層化するに伴い, 下層階の柱軸力が増大するため, コンクリートの軽量化を図ることもまた重要な課題である。しかし現状では, 軽量コンクリートは普通コンクリートに比べて建築物における使用例が少なく, その性状に関する研究も十分に行われているとはいえない[1-5]。

本研究の目的は, 圧縮下の高強度軽量コンクリートの圧縮靱性に及ぼす諸要因の影響を実験的に明らかにすることにある。そのため本研究では次の2シリーズの実験を行った。すなわち, 実験Ⅰでは軽量および普通骨材を用いたコンクリートの圧縮破壊性状を比較し, 実験Ⅱでは, 軽量コンクリートに対する横拘束筋の効果調べた。

2. 実験Ⅰ

2.1 実験方法

(1) 実験概要

表-1に, 実験の概要を示す。コンクリートは, 普通および軽量コンクリート(1種, 2種)とした。実験要因としては, 圧縮強度(F_c), 横補強筋の形状(円形と角形), 横補強筋の降伏強度(f_y), 横補強筋のピッチ(S), および養生条件の違いを取り上げた。供試体の細長比はすべて2とした。

(2) 供試体の製作

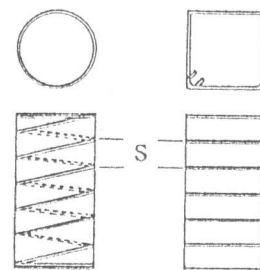
供試体の製作には, 普通ポルトランドセメント, 高性能AE減水剤, および円柱体には円形スパイラル筋(軟鋼, 磨き鋼およびピアノ線の3種類とし, すべて $\phi 3\text{mm}$)を, 角柱体には角形帯筋(磨き鋼)を使用した。

表-2に使用した骨材の性質を, 表-3に標準調合表を示す。スパイラル筋および帯筋はあらか

表-1 実験概要(実験Ⅰ)

断面	H/D	F_c	f_y	S	コンクリートの種類	養生条件
$\phi 10$	2	200	—	∞	普通コンクリート	水中養生
$\square 10$		400	2,800 5,600	2.5 1.25	1種軽量コンクリート	空中養生
		600	12,400	0.6	2種軽量コンクリート	

注) F_c : コンクリートの目標圧縮強度(kgf/cm²), f_y : 横補強筋の強度(kgf/cm²)
 S: 横補強筋のピッチ(cm)
 ・ $F_c = 400$ のみすべてを, その他の強度については下線を引いたものだけを実験対象とする。但し, 角柱体については $S = 1.25\text{cm}$ も対象とする。
 ・ 供試体の個数は各要因の組合せごとに2体, 角柱体は12体 合計84体。



(供試体)

*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻(正会員)
 *2 三重大学助教授 工学部建築学科, 工博(正会員)
 *3 名古屋大学教授 工学部建築学科, 工博(正会員)

じめ型枠内にセットしてコンクリートの打設を行った。供試体は、脱型後、養生室内の水槽中（温度 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ）または養生室内（温度 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ，相対湿度 $88 \pm 2\%$ ）で水中養生および空中養生を行った。試験材令は、4週から5週とし、供試体の個数は、各要因毎に2個とした。

(3) 載荷および測定方法

載荷には、200 t f アクチュエータ試験機を使用し、軸方向ひずみが、 20×10^{-3} に至るまで、一定ひずみ速度（毎分およそ 2×10^{-3} ）で載荷した。軸方向のひずみは供試体の上下端から $0.05H$ （ H ：供試体高さ）の位置にボルトによって固定した鋼製枠を介し、一対の変位計で測定した（すなわち、軸ひずみの検長は $0.9H$ である）

2. 2 実験結果および考察

(1) 予備実験結果

今回用いた軽量骨材コンクリートの圧縮強度の上限を知るため、本実験に先立ち、 $W/C=32\%$ の軽量コンクリートの圧縮強度の発現状況を調べた。予備実験の結果を図-1に示す。 $W/C=32\%$ の場合、碎石コンクリートの圧縮強度はおよそ 700 kgf/cm^2 である。図より、コンクリート強度の頭打ち現象は、1種軽量で $F_c=550 \text{ kgf/cm}^2$ ，2種軽量で $F_c=500 \text{ kgf/cm}^2$ 程度から現れるものと推測される。また同図によれば、比較的若い材令における強度の増進は、水中養生供試体より空中養生供試体の方が大きく、材令4週以後、その関係が逆転している。

(2) 圧縮強度に及ぼす各種要因の影響

図-2(a)~(d)に、圧縮強度-セメント水比関係に及ぼす骨材種類および養生方法の影響を示す。(a)図によれば $F_c=200 \text{ kgf/cm}^2$ レベルでは骨材強度の影響はほとんど見られないが、 $F_c=400 \text{ kgf/cm}^2$ レベル以上になると、セメント水比の増加に伴いその影響が顕著になる[6]。

(b)および(c)図によれば、圧縮強度に及ぼす養生方法の影響は、碎石コンクリートの場合、高強度になるほど顕著になるが、1種軽量コンクリートでは強度レベルにかかわらず、その影響はほとんど見られない。すなわち、軽量骨材の保水性の効果は、単位セメント量の極めて多い高強度コンクリートの場合にも十分期待できるといえる。

(a)および(d)図の比較によれば、骨材種類がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は横拘束力の存在により増幅される傾向にある。すなわち骨材強度が小さい場合には、横拘束力によるコンファインド効果が十分に期待できない可能性がある。

表-2 使用骨材の性質

	種類	最大寸法	表乾比重	F. M.	吸水率 ^{*1}	破砕値 ^{*2}
細骨材	川砂	5 mm	2.62	1.62	1.62%	19.2%
	軽量細骨材	5 mm	1.88	2.78	12.7%	31.5%
粗骨材	碎石	13 mm	2.66	6.62	0.60%	17.6%
	軽量粗骨材	10 mm	1.67	6.28	29.6%	35.5%

注) *1) 軽量骨材の吸水率は出荷時の吸水率とした。

*2) 細骨材の破砕値は、5mmのふるいを通過し、2.5mmのふるいに止まるものを試料とした。φ7.6cmシリンダー容器に資料を詰め破砕試験機を用い1.0 tの荷重をかけ1.2mmのふるいを通過した重量を全重量で除した値

表-3 標準調査表

F _c (kgf/cm ²)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg / m ³)					S L (cm)	コンクリートの種類
			C	W	S	G	S P		
200	70	50.0	267	187	901	908	0.137	10	碎石
						556		17	
400	45	46.0	350	155	857	963	2.90	21	1種軽量
						588		23	
						615		13	
600	35	43.0	440	150	773	982	3.67	7	碎石
						600		24	

注) F_c: 目標圧縮強度, W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材率, C: セメント, W: 水, S: 細骨材, G: 粗骨材, S P: 高性能A E減水剤, S L: 実測スランプ

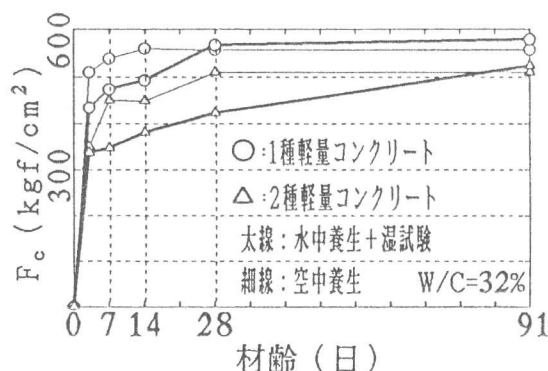
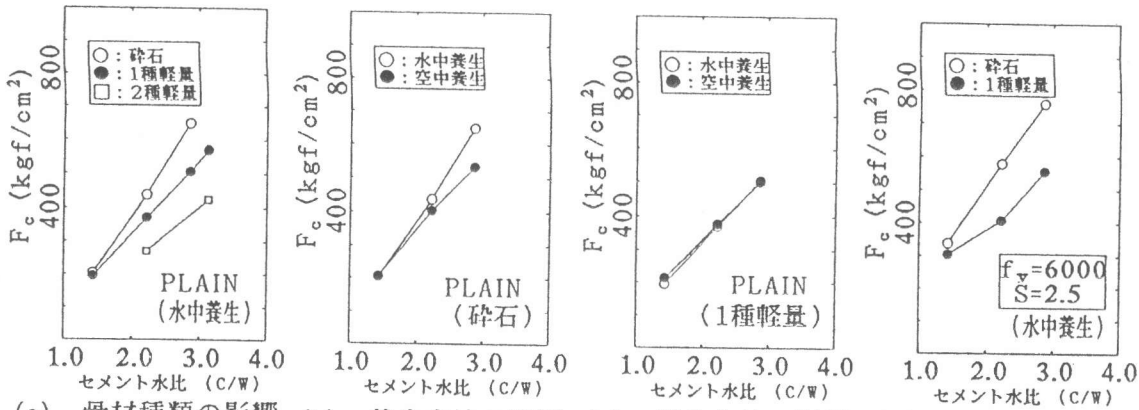


図-1 軽量コンクリートの強度発現状況



(a) 骨材種類の影響 (b) 養生方法の影響 (c) 養生方法の影響 (d) 骨材種類の影響
 (プレーンコンクリート) (砕石コンクリート) (1種軽量コンクリート) (コンファインド
 コンクリート)

図-2 圧縮強度-セメント水比関係に及ぼす骨材種類および養生方法の影響

(3) 応力-ひずみ曲線に及ぼす各種要因の影響

i) 骨材種類の影響

図-3 (a)~(e)に応力-ひずみ曲線に及ぼす骨材種類の影響を示す。これらの図によれば、プレーンおよびコンファインドコンクリートを問わず、一般に、1種軽量コンクリートでは砕石コンクリートに比べて応力上昇域の剛性がかなり小さく、圧縮強度および圧縮靱性も小さい。

(b)および(c)図中の×印は帯筋の破断点を表す。帯筋の破断は砕石コンクリート供試体ではいくつが生じたが、同一条件であっても1種軽量コンクリートでは全く生じなかった。このことから軽量コンクリートでは横方向への膨張力(横剛性)が弱いことが推測される。横補強筋の拘束効果を論じる際にはこの点に留意する必要がある。

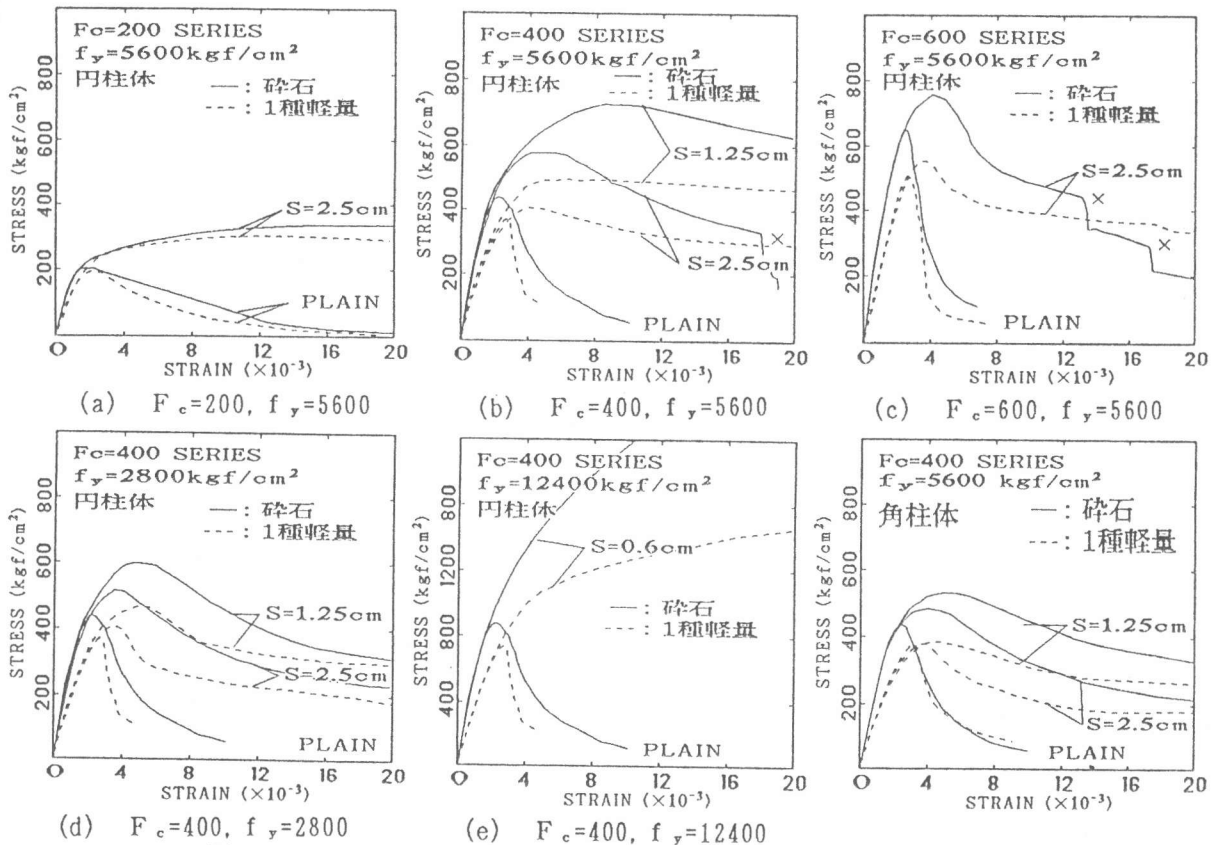


図-3 骨材種類の影響 (円柱体)

図-4 骨材種類の影響 (角柱体)

(a)~(c)図によれば、応力-ひずみ曲線に及ぼす骨材種類の影響は、コンクリートの強度レベルが高いほど、また帯筋ピッチが密なほど、すなわち横拘束力大きいほど顕著になる。(b), (d), (e)図によれば、応力-ひずみ曲線に及ぼす骨材種類の影響は、帯筋の降伏強度が高いほど、すなわちやはり横拘束力大きいほど顕著になる。

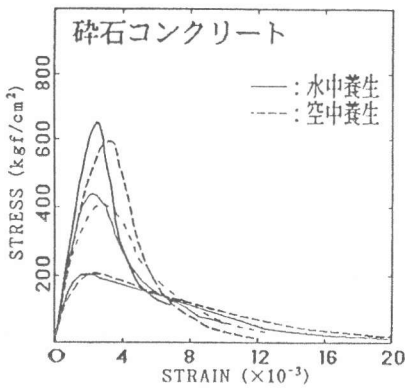
図-4は、角形コンファインドコンクリートの実験結果である。円柱体に比べて帯筋の拘束効果は半減しているが、骨材種類による拘束効果の差異は帯筋の降伏強度の小さい場合の円形コンファインドコンクリート(図-3(d))と類似している。

i i) 養生方法の影響

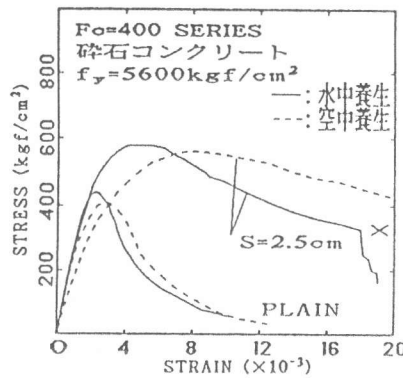
図-5(a)および(b)にプレーンコンクリート円柱体の応力-ひずみ曲線に及ぼす養生方法の影響を示す。これらの図によれば、骨材種類にかかわらず、応力上昇域の剛性は一般に空中養生供試体の方が水中養生供試体より低くなる傾向があるが、軽量コンクリートではその差異が若干小さい。図-6(a)および(b)は、コンファインドコンクリートの場合を示したものであるが、養生方法の影響は、定性的にはプレーンコンクリートの場合と同様の傾向である。

i i i) 帯筋形状の影響

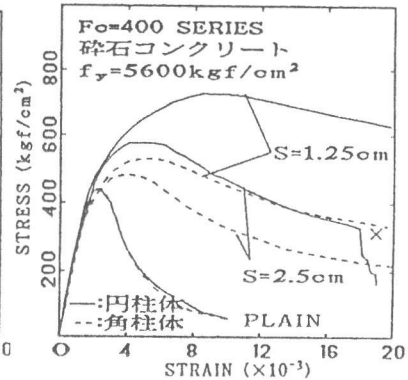
図-7(a)および(b)に、それぞれ砕石および1種軽量コンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす帯筋形状の影響を示す。(a)図によれば、帯筋量が同じ場合、砕石コンクリート角柱供試体の圧縮靱性(応力-ひずみ曲線下の面積)の増加量は、円柱供試体のそれのおよそ1/2である。この関係は、(b)図の1種軽量コンクリートでもほぼ同様の傾向が認められた。



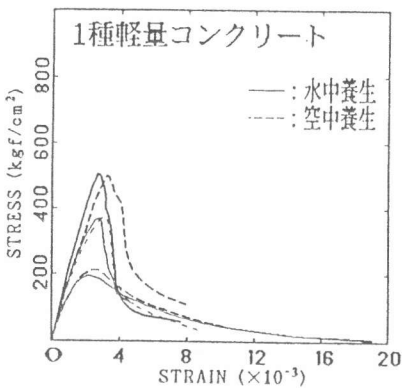
(a) 砕石コンクリート



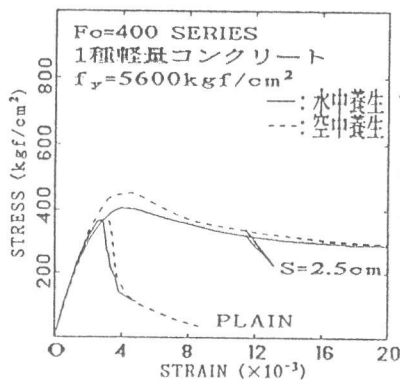
(a) 砕石コンクリート



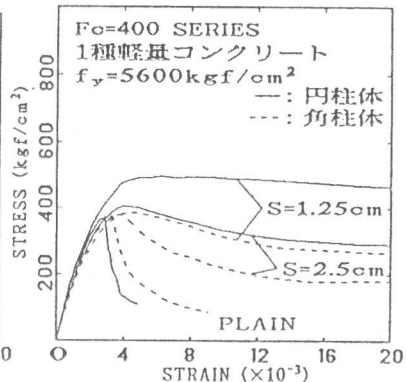
(a) 砕石コンクリート



(b) 1種軽量コンクリート



(b) 1種軽量コンクリート



(b) 1種軽量コンクリート

図-5 養生方法の影響
(円柱体, プレーン)

図-6 養生方法の影響
(円柱体, コンファインド)

図-7 帯筋形状の影響

3. 実験-II

実験 I の結果からも明らかのように、軽量コンクリートに対する横補強筋の拘束効果は砕石コンクリートに比べてかなり小さい。この原因としては次の点が考えられる。すなわち、i) 横補強筋が降伏に至らないこと（拘束力自体が小さいこと）、ii) たとえ横補強筋が降伏しても、軽量コンクリートの圧縮靱性はあまり増大しないこと、などである。実験 II ではこの点を明らかにするために受働型の三軸圧縮実験を行った。

3.1 実験方法

表-4 に、実験の概要を示す。実験要因としては、横拘束圧の大きさ (σ_{LY}) を取り上げた。圧縮強度は $F_c=400$ (kgf/cm²)、供試体断面寸法は $\phi 10$ cm、供試体の高さ-直径比 (H/D) は 1、帯筋のピッチ (S) は D/4 とした。本実験では、側圧は、コンクリート外周部の鋼輪によって与えられる。側圧が供試体全体にほぼ均等に加わるためには、供試体全体が一様に膨張する必要がある。そのために、本実験では、比較的均等な破壊が期待できる H/D=1 の円柱体を供試体として用いた [7]。全鋼輪が降伏した場合に供試体にかかる側圧を表-5 に示す。供試体は養生室内で空中養生し、試験材令を 60 日とした。載荷面には 2 枚のポリプロピレンシート (厚さ 0.05mm) にシリコングリスを塗布した減摩パッドを挿入した。応力上昇域の軸ひずみは、鋼製枠に取り付けた一対の変位計 (軸ひずみの検長は 0.9H である) で、下降域のひずみは、鋼製枠を外した後、載荷板間に取り付けた一対の変位計でそれぞれ測定した。鋼輪のひずみは、所定の鋼輪に貼付した一対のワイヤストレインゲージ (W.S.G.) によって測定した。その他の実験方法は、実験 I と同様である。

3.2 実験結果および考察

図-8 に各鋼輪のひずみから計算した供試体の各位置での側圧 (計算側圧) の推移を、図-9 に軸方向の応力-ひずみ曲線と側圧の平均値との対応を示す。図-8 によれば、鋼輪による側圧は降伏 (σ_{LY}) 以前では若干ばらつく傾向があるが、降伏時の側圧は供試体全体にほぼ一様にかかっている。また、図-9 によれば、各位置での側圧を平均した値 (σ_L) は軸応力のピーク点で

表-4 実験概要 (実験 II)

D (cm)	H/D	F_c (kgf/cm ²)	S (cm)	σ_{LY} (kgf/cm ²)
10	1	400	D/4	0, 25, 50

注) D: 供試体呼び寸法, F_c : コンクリートの目標圧縮強度, f_y : 補強筋の強度, S: 横補強筋のピッチ

表-5 鋼輪降伏時の側圧の計算値

D (mm)	f_y (kgf/cm ²)	t (mm)	d (c) (mm)	σ_{LY} (kgf/cm ²)
95.2	2560	3.2	3.6 (20.2) 7.2 (16.6)	26.3 52.6

注) D: 供試体寸法 (鋼輪の内径), f_y : 鋼輪の降伏点, t: 肉厚, d: 鋼輪幅, c: 鋼輪のクリアランス (すなわち、 $S=d+c$), σ_{LY} : 鋼輪降伏時の計算側圧
 $\sigma_{LY} = (2 \cdot t \cdot d / S \cdot D) \times f_y$ で算定

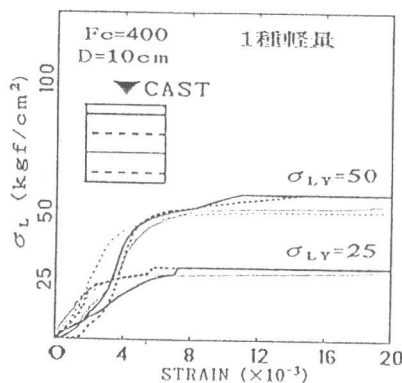


図-8 計算側圧の推移

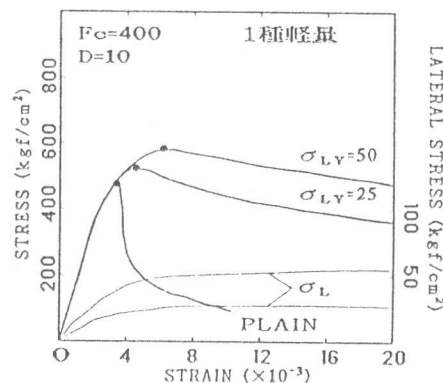


図-9 応力-ひずみ曲線と側圧の平均値との関係

はほぼ鋼輪降伏時の値 (σ_{Lr}) に達しており、この点では普通コンクリートの場合[7]と同様である。したがって、図-3および図-4で見られた普通コンクリートと軽量コンクリートに対する横補強筋量の拘束効果の差異は、拘束圧の大きさの違いではなく、これらのコンクリートの三軸圧縮挙動そのものの差異に起因する現象と解釈するのが妥当であろう。

4. まとめ

1) 本実験で用いた軽量骨材の場合、コンクリート強度-セメント水比関係の折れ曲がり点のおよその推定値として、1種軽量コンクリートでは $F_c=550\text{kgf/cm}^2$ 、2種軽量コンクリートでは $F_c=500\text{kgf/cm}^2$ が得られた (図-1)。

2) 軽量骨材コンクリート強度の増進に寄与する保水性の効果は、単位セメント量の極めて多い高強度コンクリートの場合でも十分に期待できる (図-2)。

3) 1種軽量コンクリートでは、砕石コンクリートに比べて応力上昇域の剛性が小さい。またプレーンおよびコンファインドコンクリートを問わず破壊後の圧縮靱性も小さい (図-3, 4)。

4) コンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす骨材種類 (骨材強度) の影響は、コンクリートの強度レベルが高いほど、また横拘束力が大きいほど顕著になる。ただし、 $F_c=200\text{kgf/cm}^2$ 程度のコンクリートでは、その差異は無視し得る (図-3)。

5) 受働型三軸圧縮実験の結果によれば、横補強筋による拘束圧の発現速度には、軽量および普通コンクリートの間であまり大きな差異がない (図-8, 9)。

6) 横拘束圧が同じ場合、軽量コンクリートの圧縮靱性の増加量は、普通コンクリートのそれに比べて小さい。すなわち、軽量コンクリートでは、三軸圧縮挙動が普通 (砕石) コンクリートとは異なり、より脆性的であると考えられる。

[謝辞]

本実験研究に際しご協力を得た、小池狭千朗先生 (愛工大)、小林正知君、松田哲君 (以上、三重大学生) および畑中研究室の諸氏に深謝に致します。なお、本研究費の一部は、平成5年度・文部省科学研究費・総合研究 (A) (研究代表者・野口博千葉大学教授) によったことを付記する。

[参考文献]

- 1) 建築学会：高強度人工軽量コンクリートを用いた建築物の設計と施工 pp. 22~37, 1992.
- 2) 栢田・安田・山下・高羽・橋爪：高強度コンクリートの横拘束時の力学特性，日本建築学会大会学術講演梗概集 A (九州)，pp. 506~508, 1989. 10.
- 3) 高羽・栢田・安田・山下： $F_c=360\text{kgf/cm}^2$ 級の高強度コンクリートの基礎的性質，日本建築学会大会学術講演梗概集 A (北陸)，pp. 367~368, 1992. 8.
- 4) 友澤・野口・小野山：高強度・超高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する調査，日本建築学会大会学術講演梗概集 A (中国)，pp. 497~498, 1990. 10.
- 5) 椎葉・本田・荒木：高強度軽量コンクリートの力学的性状に及ぼす各種要因の影響，コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 14, No. 1, pp. 291~296, 1992. 4.
- 6) 谷川・中村・柴田：高強度・超高強度コンクリートの圧縮破壊性状に及ぼす粗骨材品質の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 13, No. 1, pp. 209~214, 1991. 3
- 7) 近藤・畑中・水野・谷川：寸法効果を考慮したコンクリート圧縮構成関係に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15, No. 2, pp. 33~38, 1993.