

論文 強度レベルの異なるコンファインド軽量コンクリートの圧縮挙動

島崎宗厳*¹ 畑中重光*² 谷川恭雄*³

要旨：昨年度の研究では、W/C= 45%の軽量および普通コンクリートの圧縮性状を比較した。本研究では、昨年度の研究をさらに広い範囲で検証するため、圧縮強度を広範囲に変化させた軽量コンクリート1種について、横補強筋による拘束効果を調べた。また、既に報告した普通コンクリートに関する実験結果との比較を行うとともに、高さ-直径比が2のコンファインドコンクリート円柱体について、昨年度（普通コンクリート、軽量コンクリート）得られた応力-ひずみ曲線を数式表示した。

キーワード：軽量コンクリート、高強度コンクリート、コンファインドコンクリート、圧縮、応力-ひずみ曲線

1. はじめに

昨年度の研究[1]では、W/C=45%の軽量および普通コンクリートの圧縮性状を比較した。その結果、普通コンクリートと比べ、軽量コンクリートでは、高強度になるほど1軸および3軸圧縮下の強度及び靱性がかなり小さいこと、その理由として、軽量コンクリートの三軸圧縮挙動そのものが普通コンクリートに比べて脆性的であること、などが明らかとなった。

本研究の目的は、昨年度の研究をさらに広い範囲で検証するため、圧縮強度を広範囲に変化させた軽量コンクリート1種について、他の研究者の実験結果[2, 3]も含めて、横補強筋による拘束効果を調べることにある。また、既に報告した普通コンクリートの実験結果[4, 5]との比較をも行うとともに、高さ-直径比が、2のコンファインドコンクリート円柱体について、昨年度（普通コンクリート、軽量コンクリート）得られた応力-ひずみ曲線を数式表示する。

2. 実験方法

(1) 実験概要

表-1に、実験の概要を示す。実験要因としては、コンクリートの圧縮強度 (F_c :目標値) および横拘束圧の大きさ (σ_{LY} :目標値) を取り上げた。供試体の断面寸法は $\phi 10\text{cm}$ 、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はほぼ均等に加わるためには、供試体全体が

表-1 実験概要

D (cm)	F_c (kgf/cm ²)	σ_{LY} (kgf/cm ²)
10	200, 400, 600	0, 8, 15, 52

注) D: 供試体呼び寸法, F_c : コンクリート強度の目標値, σ_{LY} : 鋼輪降伏時の側圧の目標値, 高さ-直径比は1, 鋼輪ピッチは $D/4$

にほぼ均等に与えられる。側圧が供試体全体にはほぼ均等に加わるためには、供試体全体が均様に膨張する必要がある。そのため、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。全鋼輪が降伏した場合に供試体にかかる側圧を表-2に示す。

なお、 F_c , σ_{LY} および f_y の値は、kgf/cm² 単位とし、図中などでは、単位を省略する。

(2) 供試体の製作

- *1 昭和コンクリート工業(株)、工修 (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)

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、および鋼輪を使用した。コンクリートの圧縮強度 (F_c) は、200, 400および600 (kgf/cm^2)である。使用した人工軽量骨材の性質は、既報[1]と同様である。供試体は、材令1日目に脱型し、4週から5週間、養生室内の水槽中 (温度 $25 \pm 1^\circ\text{C}$) で水中養生を行い、研磨の後、1, 2週間の気乾養生を行った。供試体の個数は、プレーンコンクリートは各3個、データが比較的安定して得られるコンファインドコンクリートについては、各要因毎に2個とした。

(3) 载荷および測定方法

载荷には、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}) で载荷した。また、载荷端面には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。ひずみの測定方法は既報[1]と同様である。

3. 実験結果および考察

3. 1 鋼輪のひずみおよび側圧の分布状況

図-1は、供試体各位置の鋼輪のひずみから計算された側圧 (計算側圧) の変化を示している。なお、図中には、供試体の側面図に各鋼輪位置を示した。図によれば、軽量コンクリートの計算側圧曲線は、普通コンクリートの場合と同様な傾向を示している。すなわち、鋼輪の降伏以前では、若干ばらつくが、軸ひずみが進行すれば、すべての鋼輪が降伏強度に至っている。

3. 2 応力-ひずみ曲線

図-2は、計算側圧の平均値と縦応力-縦ひずみ曲線の関係を示したものである。なお、図中の

表-2 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)
98.3	2100	1.7	2.8 (22.2)	8.1
			5.0 (20.0)	14.5
			18.0 (7.0)	52.2

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

の矢印はピーク応力点から側圧曲線に下ろした垂線である。この図によると、 $W/C=45$ および33%の場合には、ピーク応力点の横拘束圧は鋼輪降伏時の値に達していない。すなわち、図-3に示した普通コンクリートの場合[4]と比べると、低いひずみレベルでピーク応力点を迎えることに加え、側圧の加わり方が若干遅い。既報[1]では、 $W/C=45\%$ のコンクリートに

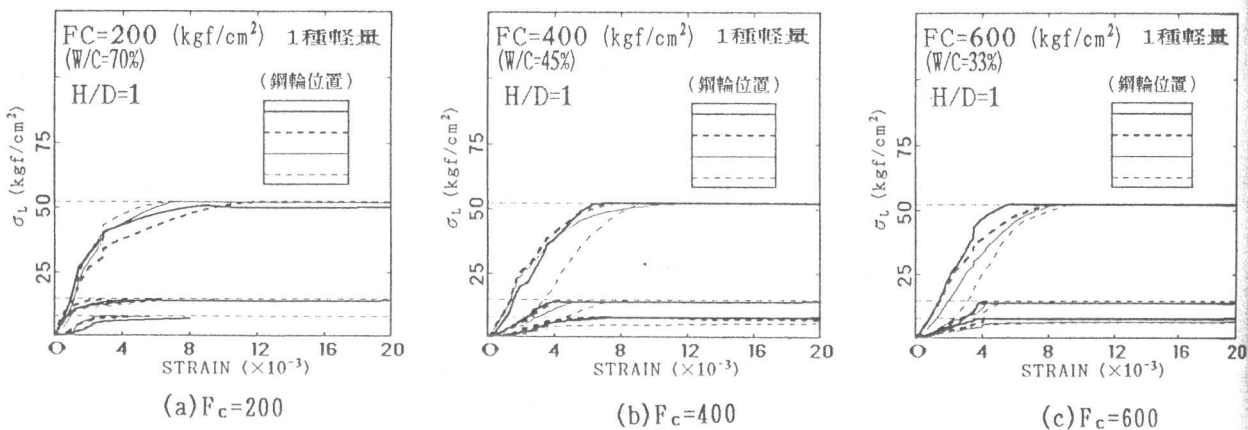
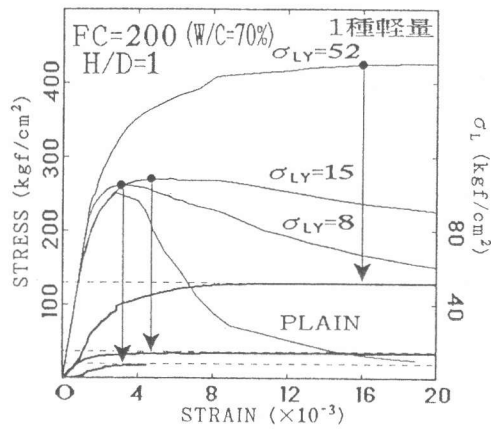
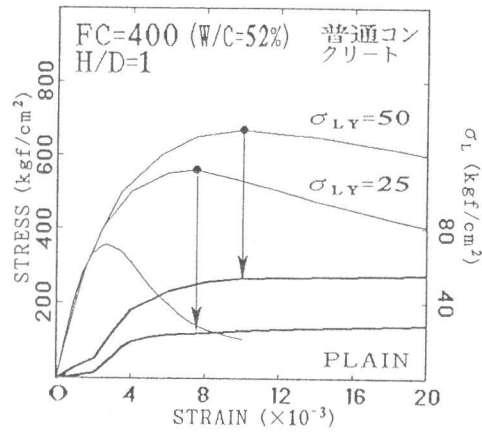


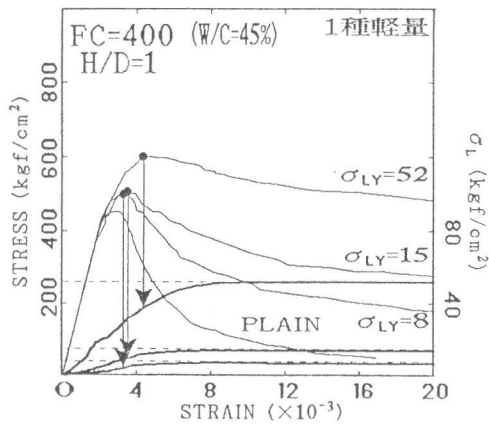
図-1 供試体 (図中に側面図) 各位置での計算側圧の変化 (軽量コンクリート)



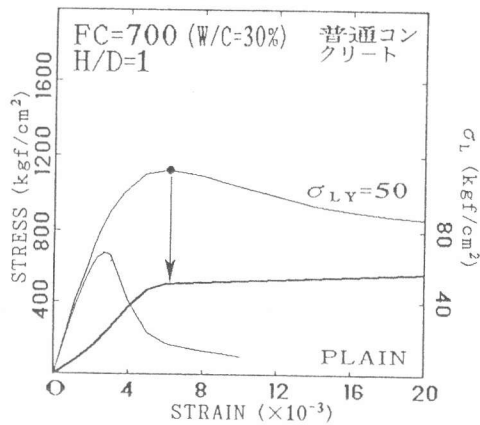
(a) $F_c=200$



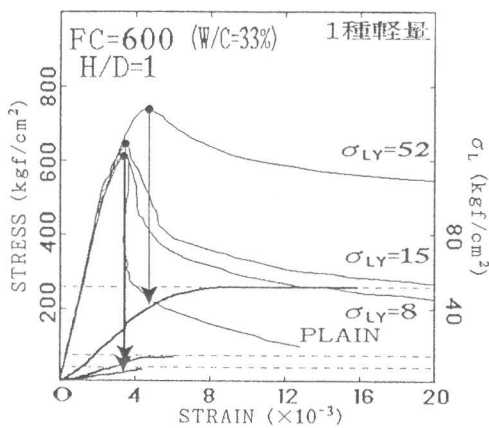
(a) $F_c=400$



(b) $F_c=400$



(b) $F_c=700$



(c) $F_c=600$

図-2 計算側圧の平均値と応力-ひずみ曲線の関係 (軽量コンクリート)

図-3 計算側圧の平均値と応力-ひずみ曲線の関係 (普通コンクリート) [4]

ついて、ピーク応力点で鋼輪がほぼ降伏に達した。従ってこの強度レベル ($F_c=400 \text{ kgf/cm}^2$) が、ピーク応力点で鋼輪降伏に達するか否かの限界であろうと推測される。

3.3 ピーク応力

(1) 理想的三軸状態における拘束効果

載荷初期の段階から (能動的に) 均等側圧 ($\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_L$) を受けるコンクリートの最大応力 ($\sigma_1 = \sigma_1$) に関する主な表示式の比較を図-

4 [5] に示す。図中の縦軸である係数 k は、下式(1)中の拘束係数 k を表す。

$$\sigma_1 = f_{c0} + k \cdot \sigma_L \quad (1)$$

ここで、 σ_1 : 圧縮強度 ($=\sigma_1$)、 f_{c0} : 無拘束時の一軸圧縮強度、 σ_L : ($=\sigma_2 = \sigma_3$)

文献[6]によると、能働型側圧実験では、軽量コンクリートでも普通コンクリートとほぼ同様な拘束効果 ($\sigma_L / f_{c0} \leq 0.2$ の範囲) が得られるとしている。

(2) 拘束効果に及ぼす各種要因の影響

図-5は、高さ-直径比(H/D)が1の供試体について、拘束筋降伏時の側圧と圧縮強度の関係を示したもので、筆者らの過去の実験結果[1, 4, 7]も併せて示してある。図-5より普通コンクリートの場合、ピーク応力を式(1)で表せば、拘束効果を表すkの値は、およそ8~9であり、軽量コンクリートでは、およそ3~4である。図-6は、H/D=2の供試体について、図-5と同様な関係を調べたものである。図によれば、拘束係数kの値は、H/D=1の供試体に比べて小さく、普通コンクリートで3~5、軽量コンクリートで1.5~3である。

(3) まとめ

図-4~6を参照して、式(1)中の拘束係数kの概略値を示せば、表-3のようにまとめられる。ここで、圧縮強度 σ_c の値は、式(1)が適用できるとすると拘束圧 σ_{LY} の値が決まればある程度推定できる。しかし、表-3にまとめたように、kの値は一定ではない。kの値が変化する要因として、表-3に示した供試体のH/D、骨材種類、側圧の載荷経路の他に、コンクリート強度 f_{co} 、拘束筋の降伏強度 f_y などが挙げられる。

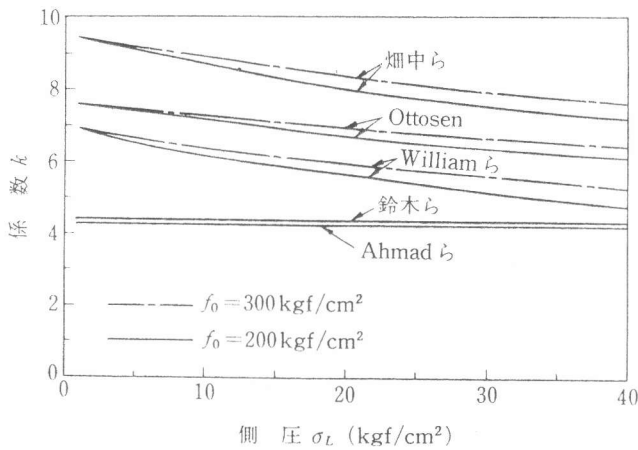


図-4 均等側圧を受けるコンクリートの最大応力に関する主な表示式の比較[7]

表-3 拘束係数kの概略値

コンクリートの種類	供試体 H/D	側圧の加力方法	
		受働	能働
普通	1	6~9	6~9
	2	3~5	
1種軽量	1	3~4	6~9
	2	1.5~3	

(注) 側圧 σ_L : $0 \leq \sigma_L \leq 40 \text{ kgf/cm}^2$

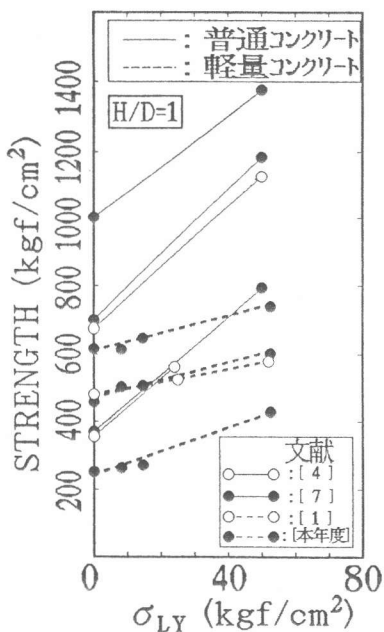


図-5 拘束筋降伏時側圧と圧縮強度の関係 (H/D=1)

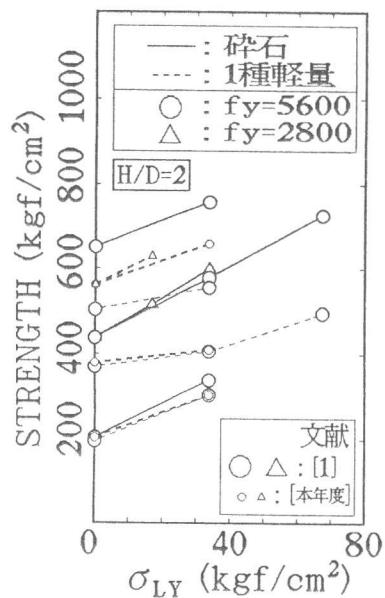


図-6 拘束筋降伏時側圧と圧縮強度の関係 (H/D=2)

3. 4 応力-ひずみ曲線の表示式

筆者らは既報[8]において、円形スパイラル筋を用いたH/D=2のコンファインド高強度コンクリートの1軸圧縮試験を行い、応力-ひずみ曲線の表示式を提案した。ここでは、既報[8]と同様の手法を用い、かつ表-3のkの値を組み込んで、H/D=2の円形コンファインドコンクリートに対する表示式を作成した。表示式の一覧を表-4に示す。プレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線に関する情報は、原則として実測によるものとし、データが得られない場合は、圧縮強度のみから推定曲線が得られるように、プレーンコンクリートに関する本実験データの表示式を参考値として示してある。図-7は、過去に行ったコンファインド普通コンクリート(H/D=2)[1]について、実験結果と表-4の表示式による応力-ひずみ曲線を比較したものである。なお図中のハッチ部分部分は、kの値を表-3中の範囲で変化させた場合の応力-ひずみ曲線の範囲を表す。実験結果は提案式によって、比較的よく推定されている。図-8は、コンファインド軽量コンクリートの実験結果[1]と表-4の表示式を用いて得られる応力-ひずみ曲線を比較した例である。また、図-9は梶田らの行った研究[3]と比較した例である。式中のパラメータは推定値を入力している(拘束域は、帯筋の中心間とした)。これらの図から、高強度、高拘束圧の場合に対しても比較的よく推定できるといえる。

表-4 応力-ひずみ曲線の表示式 (H/D=2, 受働型側圧)

応力-ひずみ曲線		ピーク点 (σ_t, ε_t)		入力パラメータ
上昇域	$\frac{\sigma}{\sigma_t} = \frac{N_n \cdot (\varepsilon / \varepsilon_t)}{N_n - 1 + (\varepsilon / \varepsilon_t)^{N_n}}$	圧縮強度	$\frac{\sigma_t}{f_{co}} = 1 + k \cdot \frac{H\sigma_{LY}}{f_{co}}$	f_{co} k $H\sigma_{LY}$
下降域	$\frac{\sigma}{\sigma_t} = \frac{1}{N_d} + \frac{(N_d - 1) \cdot X}{(N_d - 1) + X^{N_d}}$	圧縮強度 時ひずみ	$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{co}} = 1 + 0.49 \cdot \frac{(k+2) \cdot H\sigma_{LY}}{(f_{co}/61)^A}$	E_i *1 ε_{co} *1 N_{do} *1

注1) $N_n = E_i / (E_i - E_t)$, $E_t = \sigma_t / \varepsilon_t$, $N_d = F / \{(B_1 \cdot F + B_2) \cdot H\sigma_{LY}^{B_3} + 1\} + 1$, $F = N_{do} - 1$
 $X = (\varepsilon / \varepsilon_t)^m$, $H\sigma_{LY} = 2 \cdot A_s \cdot f_y / (S \cdot D)$

注2) *1: プレーンコンクリートの実測値。実測値の得られない場合の参考値として;
 $E_i = p \cdot 10^4 f_{co}^{0.5}$, $\varepsilon_{co} = q \cdot 10^{-4} f_{co}^{0.25}$, $N_{do} = 1 + r \cdot f_{co}$ 。ここで、 f_{co} (kgf/cm²)

注3) σ : 応力, ε : ひずみ, σ_t : 圧縮強度, ε_t : 圧縮強度時ひずみ, f_{co} : プレーンコンクリートの圧縮強度
 E_i : 初期弾性係数, $H\sigma_{LY}$: 計算側圧, ε_{co} : 無拘束供試体の圧縮時ひずみ, f_y : 拘束筋の降伏強度, A_s : 拘束筋の断面積

(応力および弾性係数の単位はすべてkgf/cm², 断面積はcm²)

コンクリートの種類	表示式中の実験定数							
	m	A	B ₁	B ₂	B ₃	p	q	r
普通コンクリート	1.2	2	1.3x10 ⁻³	2.3x10 ⁻³	1.5	1.3	4.8	0.57
1種軽量コンクリート	2	2.5	2x10 ⁻²	2x10 ⁻²	0.8	0.9	5.7	0.76

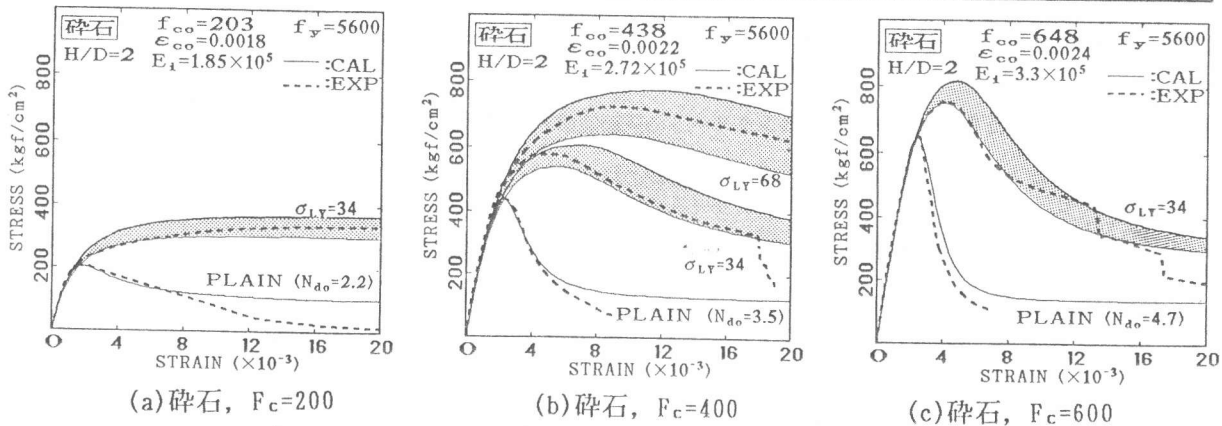
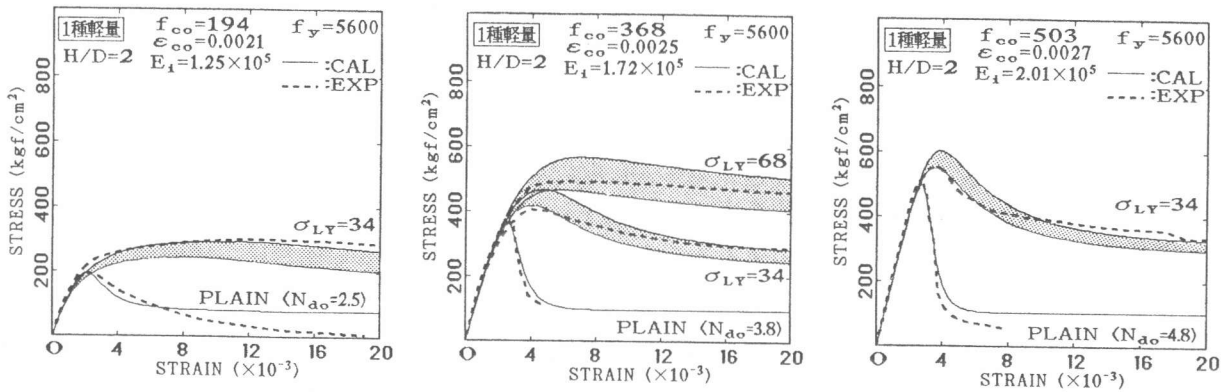
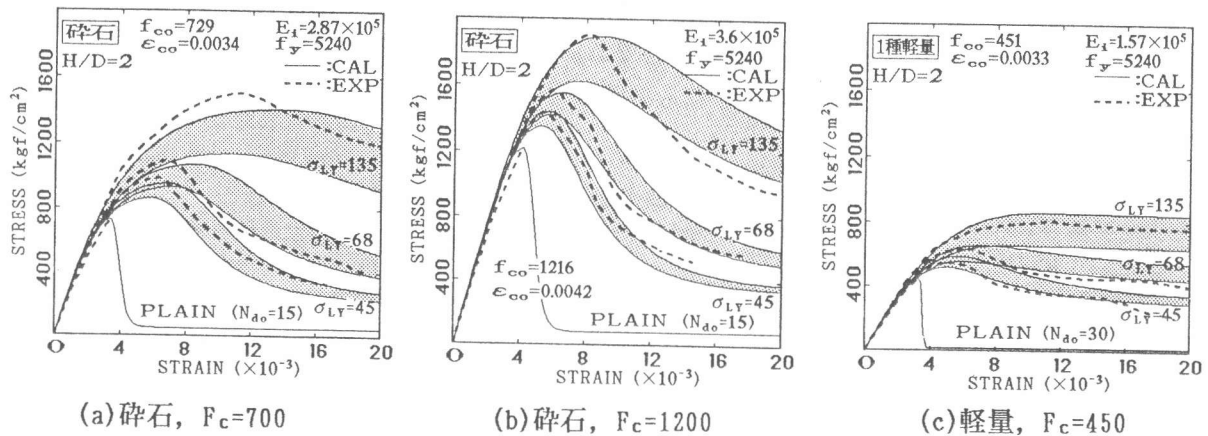


図-7 計算値と実験値の比較 (H/D=2, 砕石コンクリート)



(a) 軽量, $F_c=200$ (b) 軽量, $F_c=400$ (c) 軽量, $F_c=600$
 図-8 計算値と実験値の比較 (H/D=2, 軽量コンクリート)



(a) 碎石, $F_c=700$ (b) 碎石, $F_c=1200$ (c) 軽量, $F_c=450$
 図-9 計算値と実験値 (文献[3]) の比較 (H/D=2)

4. まとめ

- 1) 帯筋によって横拘束を受ける (コンファインド) 普通および軽量コンクリートの圧縮強度を式 (1) で表せば, 式中の拘束係数 k の値は, およそ表-3 のようにまとめられる。すなわち, k の値は, 供試体の H/D, 骨材種類, 側圧の載荷経路などによって変化する。
- 2) 強度レベルの異なるコンファインドコンクリート (普通および軽量コンクリート, 供試体形状 H/D=2 の円柱体) の応力-ひずみ曲線を数式表示した。本表示式はコンファインド普通コンクリートに対して, 過去に得られた表示式 [8] に, 式 (1) 中の拘束係数 k を組み込んだものである。

[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), 五十川知紀君 (積水ハウス), 沼田茂巳君 (三重大学・大学院) に深謝致します。なお, 本研究費の一部は, 平成6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) および平成3・4年度, 日本住宅総合センター調査・研究助成金によることを付記する。

[参考文献]

- 1) 島崎・畑中・谷川: 圧縮下の高強度軽量コンクリートの圧縮破壊と靱性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 657~662, 1994.
- 2) 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.
- 3) 樹田・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.
- 4) 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.
- 5) 小阪義夫監修: 最新コンクリート技術, 第4章, pp. 43~56, 1990.
- 6) 小林昭一・小柳治: 多軸圧縮下のコンクリートの巨視的破壊条件と設計への提言, 材料, pp. 22-232, 1973
- 7) 近藤・服部・畑中・谷川: 横補強筋形状の異なるコンファインド高強度コンクリートの有効側圧, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 2, pp. 967~972, 1992.
- 8) 谷川・畑中・柴田・服部: 高強度コンクリートの圧縮靱性に関する基礎的研究, 日本建築学会学術講演梗概集 (九州), pp. 511~514, 1989. 10.