

論文

[2005] 寸法効果を考慮したコンクリートの圧縮構成関係に関する実験的研究

近藤洋右^{*1}・畑中重光^{*2}・水野英二^{*3}・谷川恭雄^{*4}

1. はじめに

コンクリートの圧縮強度の寸法効果は、引張・曲げ・せん断強度の寸法効果に比べて小さく、実大部材の圧縮強度は、通常の供試体（断面φ10cm～15cm）の圧縮強度のおよそ80～90%と考えられている[1]が、高強度になるほど寸法効果が大きくなるとの報告[2, 3, 4]も見られる。また、圧縮下のコンクリートのピーク応力以後の破壊性状は、供試体寸法の増大に伴い、かなり脆性的になり、このような寸法効果もまたコンクリート強度に依存して異なるようである[4, 5]。

筆者らは昨年度までの一連の研究により、高強度レベルに至るまでの三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす各種要因の影響を明らかにしてきた[6, 7]。しかし、用いた供試体は、断面の直径あるいは一辺が10cmであり、実部材と比べるとかなり小さい。そのため、これまで得た知見を実部材の挙動解析に適用するには供試体寸法の影響をも論じておく必要がある。

本研究では、一軸および三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす供試体寸法の影響を実験的に調べる。また、破壊後の供試体の破壊片の大きさを定量的に調べることによって、供試体内部のひび割れパターンの分析を行う。

2. 実験方法

表-1に、実験の概要を示す。実験要因としては、供試体の断面寸法(D)、コンクリートの圧縮強度(F_c)、および横拘束圧の大きさ(σ_{LY})を取り上げた。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。本実験は、受働型の三軸圧縮実験である。すなわち、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[6]。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。尚、供試体の製作、載荷、および測定方法は既報[6]に準じている。

表-1 実験概要

D (cm)	F_c (kgf/cm ²)	σ_{LY} (kgf/cm ²)
10	400	0, 25, 50
15	700	0, 50
20	1000	0, 50, 100

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

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)
95.2	2560	3.2	3.6 (20.2)	26.3
			7.2 (16.6)	52.6
			14.5 (9.3)	105.2
156.2	2600	4.5	6.4 (32.7)	24.7
			12.9 (26.2)	49.4
			25.7 (13.4)	98.8
204.4	3130	5.8	6.9 (44.2)	24.1
			13.9 (37.2)	48.2
			27.8 (23.3)	96.5

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

- * 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 名古屋大学助教授 工学部土木工学科, Ph.D (正会員)
- * 4 名古屋大学教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)

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に鋼輪のひずみから計算した供試体の側圧（計算側圧）の一例を示す。図および他の実験結果によれば、コンクリートの強度に拘らず、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。このことから、本実験を受働型の三軸圧縮実験と見なすことができる。

3.2 応力-ひずみ曲線

図-2に、縦応力-縦ひずみ曲線（以下、 $\sigma_1-\varepsilon_1$ 曲線）に及ぼす側圧の影響を示す。

図-3は、 $\sigma_1-\varepsilon_1$ 曲線に及ぼす供試体寸法の影響を示したものである。図および他の実験結果によれば、供試体寸法の増大と共に、ピーク応力および圧縮靱性の低下が顕著にみられる。このような寸法効果は、コンクリート素材の力学挙動における寸法効果に加え、鋼輪のクリアランスの絶対量の差異にも依存している可能性がある。そのため、 $F_c=700$ シリーズについて、鋼輪のピッチ S を $D/8$ とした供試体を製作し同様な実験を行ったが、応力-ひずみ曲線の実測値は、 $S=D/4$ と $D/8$ ではほとんど相違しなかった。

3.3 ピーク点に及ぼす供試体寸法の影響

図-4(a)および(b)にピーク時の応力 σ_P およびひずみ ε_P におよぼす供試体寸法の影響を示す。図によれば、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、ほぼ比例的に低下している、多くの場合、 $\phi 20\text{cm}$ 供試体の σ_P の値は、 $\phi 10\text{cm}$ の場合の約80~90%、 ε_P については約80%に低下している。

3.4 一軸圧縮下のコンクリート供試体の破碎状況

一軸圧縮下のコンクリートの破碎状況を写真-1に示す。破壊片は原則として、径の大きいものから順に右へ並べてある。また、上下方向の位置については、供試体内の元の位置に対応するように配慮した。

(1) コンクリート強度の影響

破壊片の表面状態を見ると、 $F_c=400$ シリーズでは、凹凸が顕著であるのに対し、 $F_c=1000$ シリーズでは、凹凸が少ない。大径のものについて破壊片の長さを見ると、 $F_c=400$ シリーズでは、供試体高さを2または3分割する破壊片が多いのに対し、 $F_c=1000$ シリーズでは、供試体高さと同じ長さの破壊片の数が多くなる。これは、 $F_c=400$ シリーズでは、ひび割れが骨材を迂回して起こるのに対し、 $F_c=1000$ シリーズでは、ほとんどの骨材が破壊して、ひび割れが載荷軸方向にほぼ貫通するようになるからである。また、細かい破壊片の量（各写真中の右下の細片群）は、供試体寸法に拘らず、コンクリート強度の増大に伴って減少している。

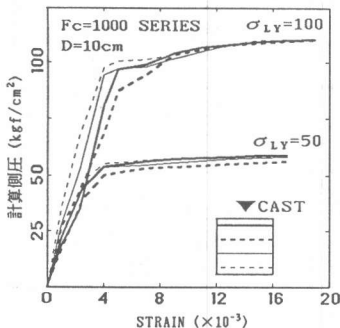


図-1 計算側圧曲線

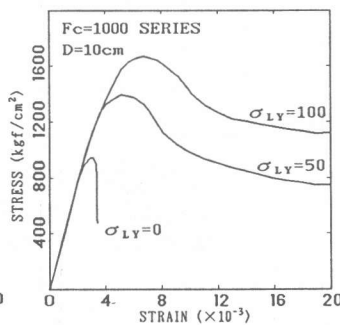


図-2 応力-ひずみ曲線
(側圧の影響)

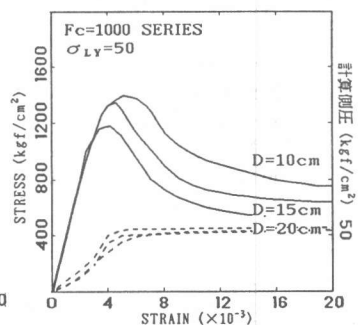


図-3 応力-ひずみ曲線
(供試体寸法の影響)

(2) 供試体寸法の影響

写真-1は、全ての供試体が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。写真において、これらの破壊片のうち比較的大きなものを概観すると、破壊片の大きさは、供試体寸法によってあまり変化せず類似している。すなわち、大径の破壊片は、ほぼ供試体の寸法比に応じた大きさになっているといえる、細径の破壊片も含めた定量的な分析は、次項で行う。

3.5 供試体の破碎状況の分析

ここでは、側圧 $\sigma_L=0$ および50シリーズについて、体積が 2 cm^3 以上の破壊片の体積分布および度数分布を調べた。 $\sigma_L=50$ シリーズの供試体は、载荷終了後（軸ひずみがおよそ 20×10^{-3} の時点で载荷を終了）、周囲の鋼輪を切断、除去し、再度一軸圧縮によって破碎した。したがって、支配的なひびわれのパターンは、およそ $\varepsilon=20 \times 10^{-3}$ 時点のものを見なすことができる。

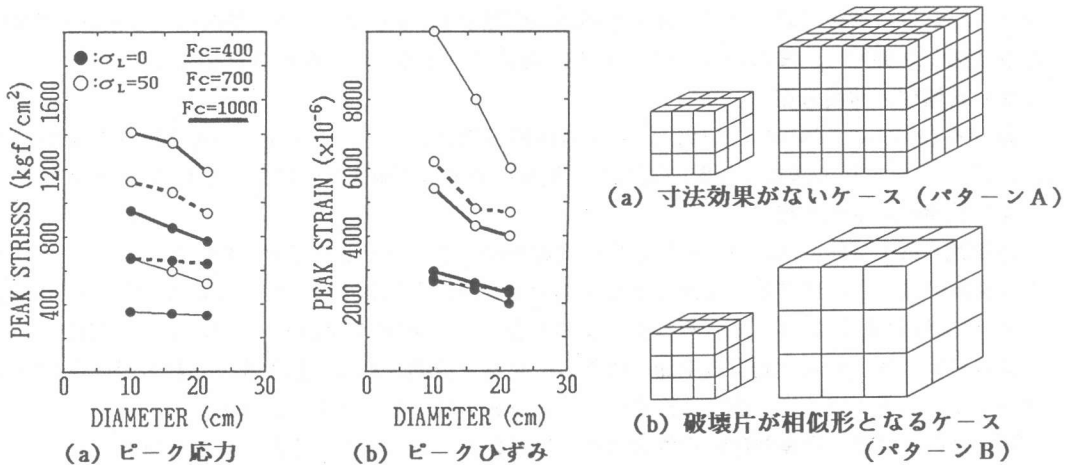


図-4 ピーク応力およびピークひずみの寸法効果 図-5 供試体の典型的な破壊パターン

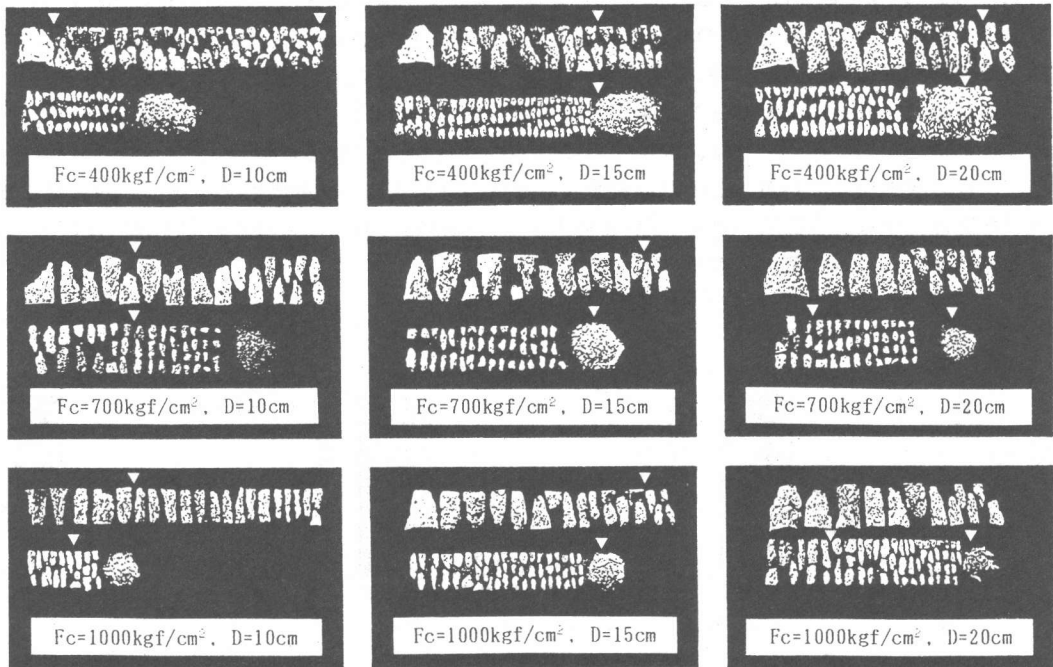


写真-1 一軸圧縮時のコンクリートの破碎状況

(1) 理想的な破壊パターン

図-5 (a)および(b)は、コンクリート供試体の破壊パターンの概念図を示したものである。(a)図は寸法効果がないパターンを、(b)図は最も明解な寸法効果を示すと思われるパターンで、破壊片が供試体寸法比に応じて拡大、縮小するケースである。本研究では、実際の破壊片の分布をこれらの二つのパターンと対照しながら考察する。

(2) 分析方法

図-6 は、大径(体積 $v=36\text{cm}^3$)、中径($v=2\sim 36\text{cm}^3$)、および小径($v=2\text{cm}^3$ 以下)の破壊片の占有率を各供試体毎に示したものである。ここで、破壊片の区分けの目安とした値は、2および 36cm^3 である(写真-1中に▽印で示した)。 $v=2\text{cm}^3$ は、最大寸法 $\phi_a=1.5\text{cm}$ の粗骨材が球と仮定した場合の体積 $v=4\pi(\phi_a/2)^3/3=1.8\text{cm}^3$ にほぼ相当する。一方、 $v=36\text{cm}^3$ は、破壊片の度数を増分 $\Delta v=2\text{cm}^3$ 毎の階級で求めた場合に、各階級の度数が0とならないための階級のおよその最大値である(図-9参照)。また $v=36\text{cm}^3$ は、 $2.7\phi_a$ を直径とする球の体積にほぼ相当する。

(3) 破壊片の体積分布

図-6 (a)および(b)によれば、破壊片の体積分布は、コンクリートの圧縮強度 F_c および側圧 σ_L に拘らず供試体寸法毎に比較的類似しており、その平均値を示せば図-6 (c)のようになる。

(4) 破壊片の度数分布

i) 総数: 各供試体の 2cm^3 以上の破壊片の個数を図-7および8に示す。図-7によれば、破壊片の総数 N は、供試体寸法の増大とともに増加するが、供試体の体積比ほどは増加しない。図中のゾーン(A)および(B)は、それぞれ図-5の破壊パターン(A)および(B)に対応する。図によれば供試体の破壊は、およそ両者の中間に位置していると推測される。破壊片の総数 N の値を供試体寸法 D の一次式で表せば、側圧に拘らずほぼ表-3の式(1)のようになる。

図-8によれば、圧縮強度 F_c の増大に伴って総数 N は減少する。また、供試体寸法、コンクリート強度、および側圧に拘らず $v=2\sim 36\text{cm}^3$ の中径の破壊片の個数が、大部分を占めている。

ii) 中径・大径の破壊片の度数分布: 図-9に各階級の体積の破壊片の度数分布を示す。(a)図は中径の破壊片、(b)図は大径の破壊片の実測例である。(a)図の縦軸は相対度数であり、 N は中径の破壊片の総数である。体積 v の階級は、 $v=2\text{cm}^3$ を最小値とし、増分 $\Delta v=2\text{cm}^3$ を与えて $v=36\text{cm}^3$ までの17階級とした。したがって各階級の中央値 v_m は、 $(2m-1)\text{cm}^3$ (m は、 $2\sim 18$ の整数)である。図によれば、相対度数 n/N は、破壊片の体積 v の増加とともに急激に減少し、その傾向は供試体寸法に拘らず類似している。この径の破壊片群では、コンクリート強度および側圧に拘らずほぼ同様な関係、すなわち破壊パターン(A)に相当する関係が得られた。これらの関係は、ほぼ表-3中の式(2)のような関数で表すことができる。

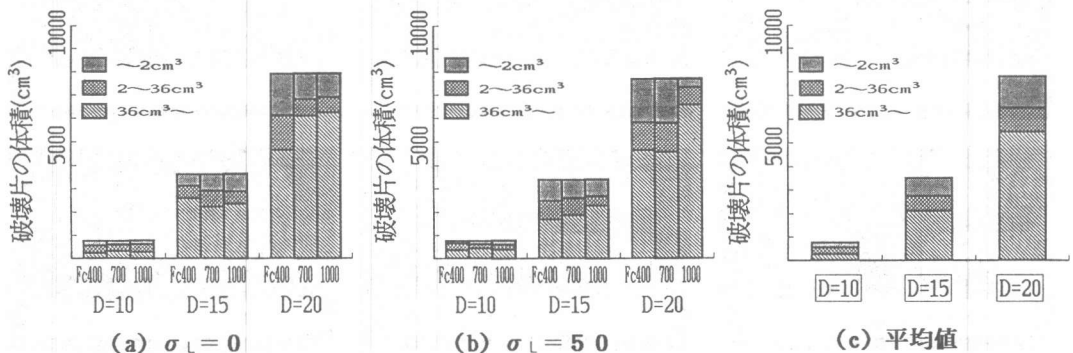


図-6 破壊片の体積分布

(b)図の体積 v の階級は、 $v_m=V/3$ （ここに、 V ：供試体体積）を最大値とし、 $v=36\text{cm}^3$ 程度までを最大値からの0.5倍ピッチで刻んである。この相対体積に対する大径の破壊片の個数は、供試体寸法、コンクリート強度および側圧に拘らずほぼ一定の関係にあり、直線式で表せば、表-3中の式(3)のようになる。このことは、大径の破壊片の分布が図-5に示した破壊パターン(B)（相似形）に相当することを示唆しており、3.4(2)項で写真-1を概観した際に推測された寸法効果と一致するものである。

3.6 破砕モデル

(1) 理想的な破壊パターンとの関係

本実験で得られたコンクリートの破壊パターンは、既に図-5で示したパターン(A)および(B)の中間にあるようである。すなわち、ひびわれ単位面積当たりの破壊吸収エネルギーが供試体寸法に拘らず一定であるとすると、供試体全体としての平均的なエネルギー吸収能力には自ずと供試体寸法の影響が現れることになる。

(2) 破砕モデル

本実験で得られた結果からコンクリートの圧縮破壊パターンの概念図を示せば、図-10のようになる。但し、各階級（径）の破壊片の比率は、表-3中の式(1)～(3)で表されたように供試体寸法、およびコンクリート強度によって異なる。

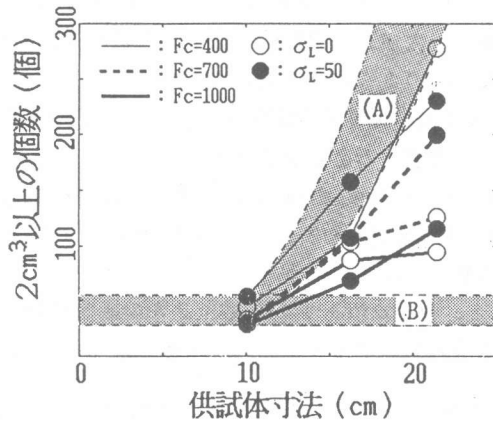


図-7 破壊片（大径・中径）の総数 N

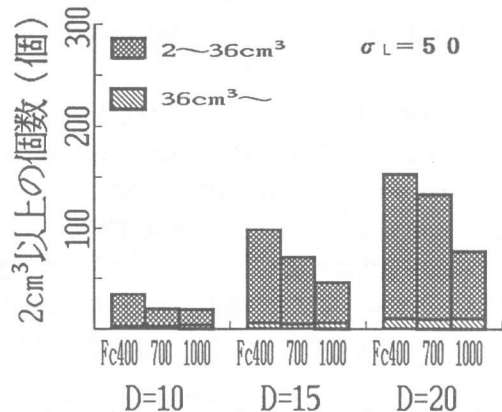
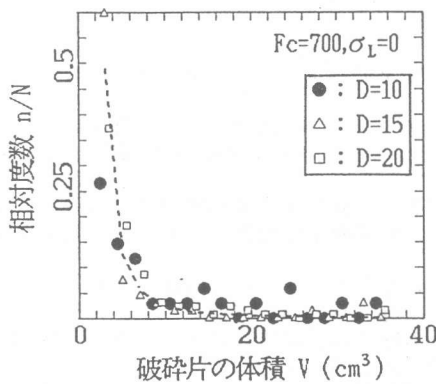
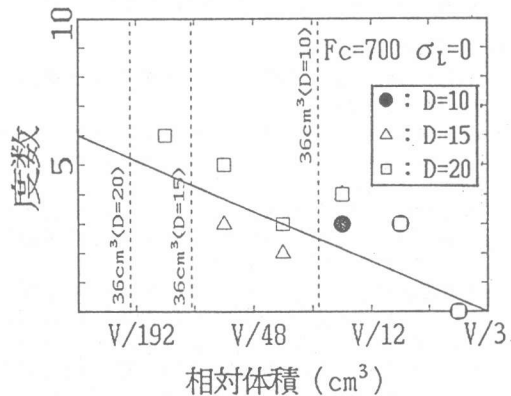


図-8 破壊片（大径・中径）の個数の内訳



(a) 中径の破壊片



(b) 大径の破壊片

図-9 破壊片の度数分布

表-3 破壊片の度数分布の表示

式(1)	$N = a \frac{(D-9) + 2.5}{a = -0.9\sqrt{F_c} + 35}$ ここに、 F_c : コンクリートの圧縮強度 D : 供試体寸法
式(2)	$\frac{n}{N} = \frac{2}{(v_m - 1)^2}$ ここに、 $v = 2m - 1$, m は 2~18 の整数
式(3)	$n = m, v_m = \frac{V}{3} \cdot 2^{-m} (m=1, 2, \dots)$ ここに、 $v_m \geq 3.6$

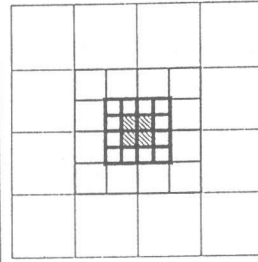


図-10 破壊パターンの概念図

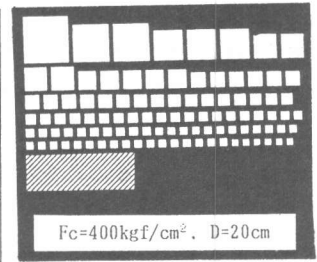


図-11 計算した破壊片の分布例

(3) 写真-1 との比較例

3.5節の分析結果(図-6(c))と、表-3中の式(1)~(3)を用いて計算した破壊片の分布例を図-11に示す。但し、ここでは便宜上、小径の破壊片($v=2\text{cm}^3$ 未満)をすべて $v=1\text{cm}^3$ の立方体として表した。総体積は必ずしも供試体の原体積と一致はしない(原体積 $\pm 10\%$ 以内)が、写真-1の破壊片と比較してほぼ類似した分布が得られているといえる。

4. まとめ

本研究では一軸および三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす供試体寸法の影響を実験的に調べた。また、破壊後の供試体の破壊片の大きさを定量的に調べ、供試体内部のひびわれのパターンを分析した。本研究の結果はおよそ次のようにまとめられる。

- (1) 三軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動に及ぼす供試体寸法の影響は、一軸圧縮下のそれよりも顕著である。実大部材の靱性の予測にはこの点を考慮する必要がある。
- (2) コンクリート供試体の破壊片の総数および分布、すなわち供試体の破壊パターンは、供試体寸法によって異なり、図-5に示す典型的なパターンの中間に位置する。この破壊パターンは、コンクリート強度の影響を受けるが、側圧の影響はあまり受けないようである。
- (3) コンクリート供試体の破壊片の分布結果に基づき、コンクリートの破壊モデルの概念を提示した。本モデルを定量化すれば、圧縮破壊における寸法効果のエネルギー論的取扱いが可能となる。

[謝辞] 本実験研究を行うに際し、御助力を得た小池狭千朗先生(愛知工業大学助教授)、安藤繁之君(矢作建設工業)、今西亮一君、島崎宗厳君(以上、三重大学大学院)、および高性能AE減水剤を提供して頂いた竹本油脂(株)に深謝致します。また、本研究費の一部は、文部省科研費総合研究(A)(代表者:千葉大教授・野口博)によったことを付記する。

[参考文献]

- 1) 塩屋俊幸, 長谷川俊昭: コンクリート構造物の寸法効果, コンクリート工学, Vol. 30, No. 8, pp. 5-15, 1992. 8.
- 2) Department of the Interior: Cement and Concrete Investigations—Mass Concrete Investigations, US Bureau of Reclamation, Boulder Canyon Project, Final Report, Part VII, Bulletin 4, 1965.
- 3) 香田伸次, 田中博幸, 坂口昇, 山崎庸行: 中心圧縮力を受ける超高強度コンクリート柱の寸法効果と横拘束効果に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C分冊(構造II), pp. 751-752, 1989. 10.
- 4) 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.
- 5) 小池狭千朗, 畑中重光: 横拘束コンクリートの圧縮特性に及ぼす供試体の形状・寸法の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 2, pp. 707-712, 1990.
- 6) 畑中重光, 服部宏己, 近藤洋右, 谷川恭雄: 三軸圧縮下の普通・高強度コンクリートの応力-ひずみモデル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 2, pp. 31-36, 1991.
- 7) 畑中重光, 近藤洋右, 谷川恭雄: 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.