

コンクリート円柱供試体の寸法が動的力学特性に及ぼす影響

INFLUENCE OF CYLINDRICAL SPECIMEN SIZE ON DYNAMIC PROPERTIES OF CONCRETE

別府万寿博*, 新井信裕**, 上林勝敏***, 藤掛一典****, 大野友則*****

Masuhiko BEPPU, Nobuhiro ARAI, Katsutoshi UEBAYASHI, Kazunori FUJIKAKE and Tomonori OHNO

* 博(工) 防衛大学校助手 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

** 防衛大学校学生 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*** 博(工) 防衛庁研究員 装備開発実験隊 (〒410-1432 静岡県駿東郡小山町須走 481-27)

**** 博(工) 防衛大学校講師 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

***** 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード: コンクリート円柱供試体, 寸法効果, ひずみ速度効果, コンクリートの動力学特性

(cylindrical concrete specimen, size effect, strain-rate effect, dynamic properties of concrete material)

1. はじめに

コンクリートの力学的諸特性の中でも強度特性は、載荷速度の影響を大きく受けることが知られている。土木・建築の分野において、落石・土石流などの自然的要因あるいは車両・船舶・航空機等の衝突事故、爆薬・火薬・ガス等の爆発事故などに起因する人為的要因によって発生する種々の衝撃荷重を受けると、鉄筋コンクリート構造物の構成材料であるコンクリートや鉄筋には $10^{-1} \sim 10^2 (1/\text{sec})$ 程度のひずみ速度が発生すると言われている¹⁾。したがって、衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃設計法を確立するためには、まずその基礎的データとなる高ひずみ速度下におけるコンクリート材料の力学的特性を定量的に把握することが重要である。

ところで、コンクリート供試体は、試験における供試体寸法の増大に伴い圧縮強度は低下する現象(寸法効果)が存在することが報告されている²⁾。また、供試体寸法の増大に伴い応力～ひずみ曲線の下降域が急になり、脆性的な破壊形態を示すことも知られている³⁾。こうした寸法効果は、供試体中の欠陥量の多少に依存する容積効果に起因するといった確率・統計理論⁴⁾(確率過程理論)により従来説明がなされてきた。例えば、谷川ら²⁾や永松ら⁶⁾はコンクリートの圧縮強度について確率統計理論に立脚した寸法効果の表示式を提案している。しかし、最近では破壊力学的観点からの説明⁵⁾も試みられるようになってきており Kim ら⁷⁾は破壊力学的アプローチから寸法効果の表示式を導いている。

このように、衝撃荷重を受けるコンクリートは、ひずみ速度効果と寸法効果の影響を同時に受けることになるが、それぞれの影響の程度は明らかではない。本研究は、載荷速度(ひずみ速度)、コンクリート強度および供試体寸法をパラメータとする急速一軸圧縮試験を行い、供試体寸法がコンクリートの動的圧縮特性に及ぼす影響を調べ、定性的および定量的に評価することを目的としている。

2. 試験概要

2.1 試験パラメータ

急速一軸圧縮荷重を受けるコンクリートの圧縮強度、供試体寸法および載荷速度がコンクリートの動力学特性に及ぼす影響を把握するために、表-1に示す試験パラメータを設定した。

試験に用いたコンクリート供試体の設計圧縮強度は $\phi 100 \times 200 (\text{mm})$ の供試体を基準として 2 種類で、それぞれ $f'_c = 39.3, 77.7 (\text{N/mm}^2)$ である。ここでは、これらのコンクリートを、それぞれ普通強度シリーズおよび高強度シリーズと呼ぶことにする。供試体寸法は、使用した試験装置の最大載荷能力の制約から普通強度シリーズが $\phi 50 \times 100 (\text{mm})$ 、 $\phi 100 \times 200 (\text{mm})$ および $\phi 125 \times 250 (\text{mm})$ の 3 種類のものを、高強度シリーズは $\phi 50 \times 100 (\text{mm})$ 、 $\phi 100 \times 200 (\text{mm})$ の 2 種類のものを準備した。

載荷速度は、載荷開始点から最大圧縮応力点までの平均ひずみ速度を指標とし、静的および高速の 2 種類である。各載荷速度は静的載荷では 1.2×10^{-5}

表-1 試験パラメータの一覧

試験ケース	試験パラメータ							試験数
	圧縮強度		供試体寸法 (mm)			载荷速度		
	普通強度 (NS)	高強度 (HS)	φ50×100	φ100×200	φ125×250	静的 (S)	高速 (H)	
NS-φ50-S	○		○			○		3
NS-φ50-H	○		○				○	3
NS-φ100-S	○			○		○		3
NS-φ100-H	○			○			○	3
NS-φ125-S	○				○	○		3
NS-φ125-H	○				○		○	3
HS-φ50-S		○	○			○		3
HS-φ50-H		○	○				○	3
HS-φ100-S		○		○		○		3
HS-φ100-H		○		○			○	3

表-2 コンクリートの配合

呼 称	G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							空気量 (%)	スランプ (cm)
				W	C	S	G	AE減水剤	高性能 AE減水剤	SF		
普通強度	10	55	55	205	373	894	748	640cc	—	—	5.0	18.0
高強度	10	30	55	151	566	891	751	—	14	129	5.0	18.0

(1/sec), 高速载荷が 2.0×10^0 (1/sec)である. 試験ケース数は, 普通強度シリーズが (供試体寸法の数)×(载荷速度の数)= $3 \times 2=6$ ケース, 高強度シリーズが (供試体寸法の数)×(载荷速度の数)= $2 \times 2=4$ ケースである. 試験は, それぞれのケースに対して3回 (全試験数: 30回) 行っている.

2.2 供試体の製作

試験に用いる供試体の寸法はφ50×100(mm), φ100×200(mm)およびφ125×250(mm)の3種類である. 本実験で使用したコンクリートの配合を, 表-2 に示す. コンクリートの材料は, 普通ポルトランドセメント(密度 3.16 g/cm³)を使用し, 細骨材には山砂(岩井寺産, 密度 2.57 g/cm³, 吸水率 2.02%)を, 粗骨材には最大粗骨材寸法 10(mm)の硬質砂岩碎石(青梅産, 密度 2.65 g/cm³, 吸水率 0.54%)を使用した. 供試体は, 打設後 1日 でキャッピング, 脱型した後水中養生を 14日間行い, その後は試験室内にて気中養生を行った. 試験は材令 63日目から2日間で行った.

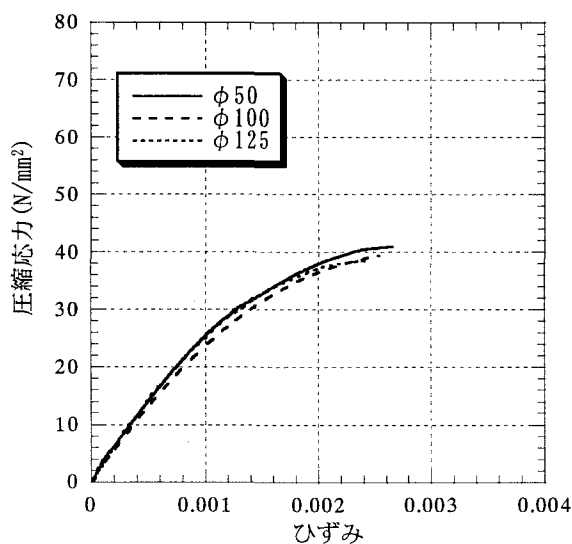
2.3 試験方法

急速一軸圧縮試験は, サーボ制御式急速载荷装置

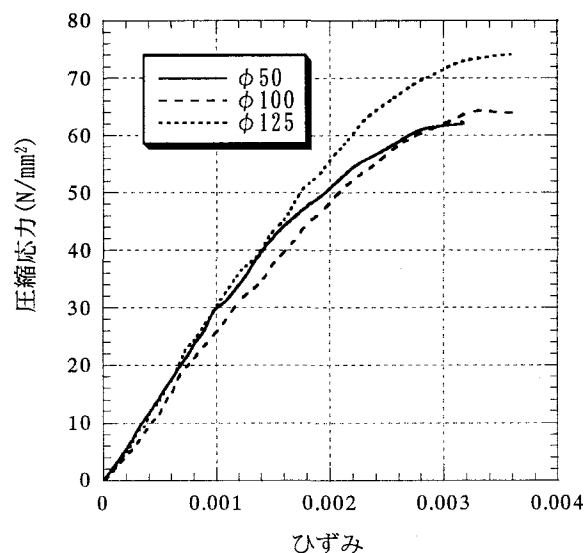
(最大载荷力 980kN, 最大载荷速度 4m/sec)を用いて行っている. 本試験における計測項目は, 供試体に作用する荷重ならびに供試体の軸方向の変形量である. 急速一軸圧縮試験でコンクリート円柱供試体に作用する荷重を計測する場合, 供試体に近い位置で慣性力の影響を排除して計測することが望まれる⁸⁾. そこで本試験では, ロードセルを供試体直下の固定端側に設置するとともに载荷棒を極力短くし供試体の載荷面に近い位置で計測している. 供試体の軸方向のひずみは, 供試体の中央位置に貼付した2枚のひずみゲージ (ゲージ長 60mm) で計測している.

3. 試験結果および考察

普通強度および高強度シリーズの各シリーズにおいて, 静的ならびに高速载荷で得られた代表的な応力~ひずみ関係を図-1, 2 に示す. 図より, 普通強度シリーズにおいては, 最大圧縮応力の 70~80%程度で非線形挙動を示すのに対して, 高強度シリーズではほぼ直線的な脆性的挙動を示している. また, コンクリート強度および供試体寸法によらず载荷速度の増加によって強度および変形能が向上している. 応力~ひずみ関係に供試体寸法が及ぼす影響は, 静的载荷に比べて高速载荷の方が大きい傾

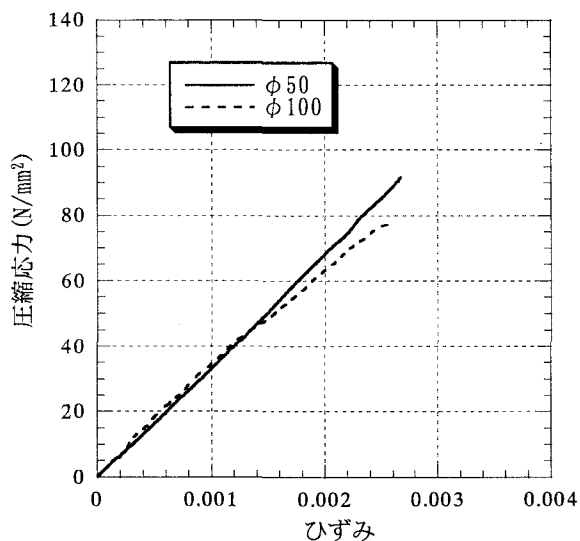


(a) 静的載荷

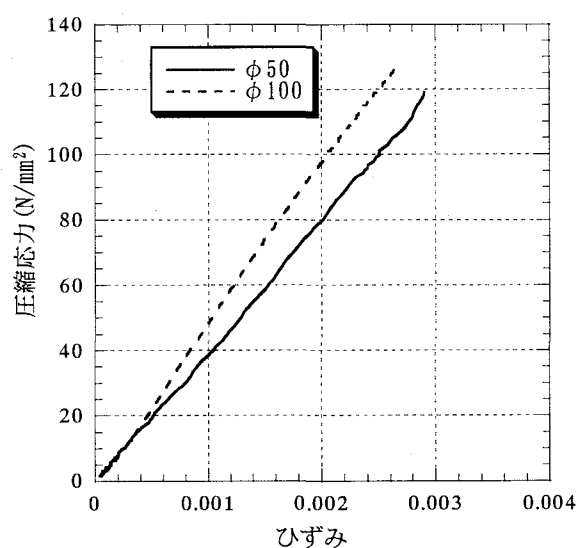


(b) 高速載荷

図-1 応力～ひずみ関係（普通強度）



(a) 静的載荷



(b) 高速載荷

図-2 応力～ひずみ関係（高強度）

向にある。ちなみに、ひずみは供試体表面に貼付したひずみゲージによって計測しているが、最大圧縮応力付近で生じる巨視的なひび割れによってゲージが破断または剥がれたため、最大圧縮応力以降の軟化挙動を計測することができなかった。

以下に、静的および動的試験結果に対する既往の寸法効果式の適合性や評価法を検討する。

3.1 静的圧縮試験

ここでは、標準的なコンクリート円柱供試体であるφ100×200(mm)を基準として、各強度シリーズにおける材料特性値（最大圧縮応力、最大ひずみ、弾性係数）に供試体寸法（体積比）が及ぼす影響について検討する。

(1) 最大圧縮応力

コンクリートの力学特性の寸法効果に関する既

往の研究の中には、最大応力は供試体寸法が大きくなるほど対数的に低下する傾向を報告しているものがある。しかし、これは引張破壊を対象としたもので、圧縮試験の場合、破壊過程・破壊形態の複雑さから破壊力学のアプローチによって圧縮強度の寸法効果を説明できるまでに至っていない⁹⁾。そこで、本研究では確率・統計理論に基づき提案された次式^{2),6)}の適用性について検討する。

$$\frac{f'_s}{f'_b} = \left(\frac{V}{V_b} \right)^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (1)$$

ここで、

f'_s : 圧縮強度(N/mm²)

f'_b : 基準となる供試体の圧縮強度(N/mm²)

V : 供試体の体積(mm³)

V_b : 基準となる供試体の体積(mm³)

β : 材料定数

図-3 に、静的載荷における圧縮強度比と体積比の関係を示す。縦軸は静的一軸圧縮試験で得られた最大圧縮応力 f'_s を、 $\phi 100 \times 200$ (mm) の供試体の静的な平均一軸圧縮強度で無次元化した圧縮強度比を、横軸は各供試体の体積を $\phi 100 \times 200$ (mm) の供試体の体積で無次元化した値をそれぞれ示す。また、図には、式(1)による谷川($\beta=20$)および永松($\beta=27$)の式を併せて示している。図より、普通強度の試験結果は谷川および永松の式とよく一致している。一方、高強度の試験結果に対しては、既往の式は体積比の増加に伴う強度の減少を9%程度小さめに評価している。ここで、式(1)の材料定数 β を本試験結果に対して調べたところ、普通強度では $\beta=24$ 、高強度では $\beta=12$ で本試験結果にほぼ適合した。

(2) 最大圧縮応力時のひずみ

図-4 に、最大圧縮応力時のひずみ比と体積比の関係を示す。縦軸は最大圧縮応力時のひずみ ε を $\phi 100 \times 200$ (mm) の供試体の最大圧縮強度時のひずみ $\varepsilon_{\phi 100}$ で割った無次元化ひずみを示す。図よりコンクリート強度によらず、供試体寸法の増加にともない最大圧縮応力時のひずみは減少する傾向にある。

(3) 弾性係数

図-5 に弾性係数と体積比の関係を示す。弾性係数は、1/3 割線係数で与えている。図よりコンクリート強度によらず、弾性係数に供試体寸法が及ぼす顕著な影響は認められない。

3.3 急速一軸圧縮試験

(1) 既往の試験結果との比較

動的圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係を調べた既往の Watstein¹⁰⁾、竹田ら¹¹⁾、Dilger et al.¹²⁾、Ahmad et al.¹³⁾、山口ら¹⁴⁾、Tang et al.¹⁵⁾、藤掛ら^{16),17)}、白井ら¹⁸⁾の試験結果と、本試験結果を併せて図-6 に示す。ここで、本試験結果の無次元化には、静的載荷における各強度シリーズの $\phi 100 \times 200$ (mm)の圧縮強度を使用した。図より、本試験結果のうち普通強度シリーズの $\phi 50 \times 100$ (mm)と $\phi 100 \times 200$ (mm)については、既往の試験結果と類似した傾向を示している。これに対して、 $\phi 125 \times 250$ (mm)の試験結果はやや大きめ、高強度シリーズの試験結果はやや小さめの傾向をそれぞれ示した。これは、既往の急速一軸圧縮試験で用いられて

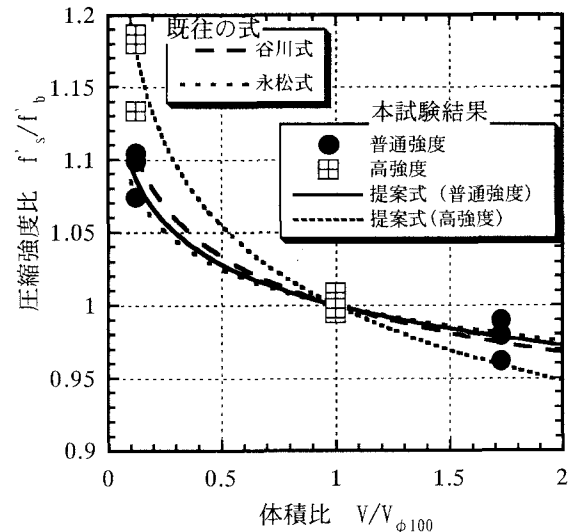


図-3 圧縮強度比と体積比の関係 (静的載荷)

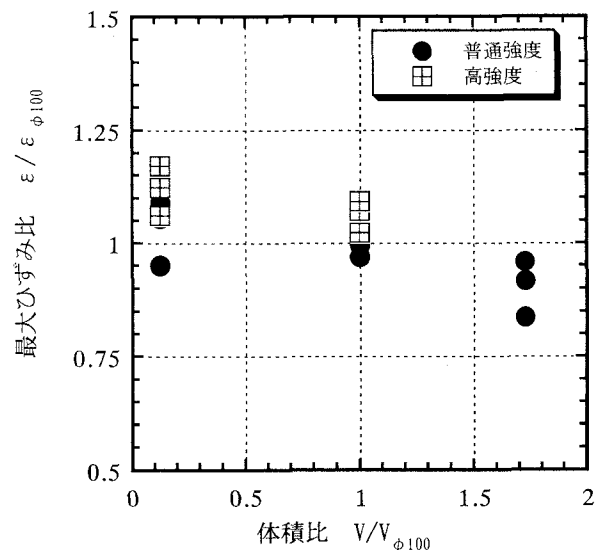


図-4 最大ひずみ比と体積比の関係 (静的載荷)

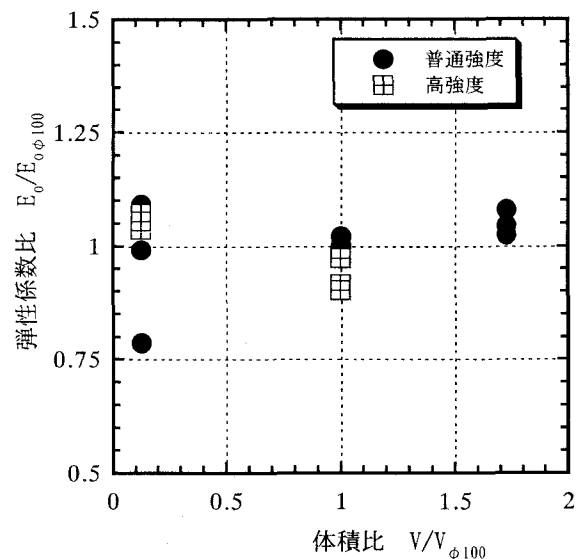


図-5 弾性係数比と体積比の関係 (静的載荷)

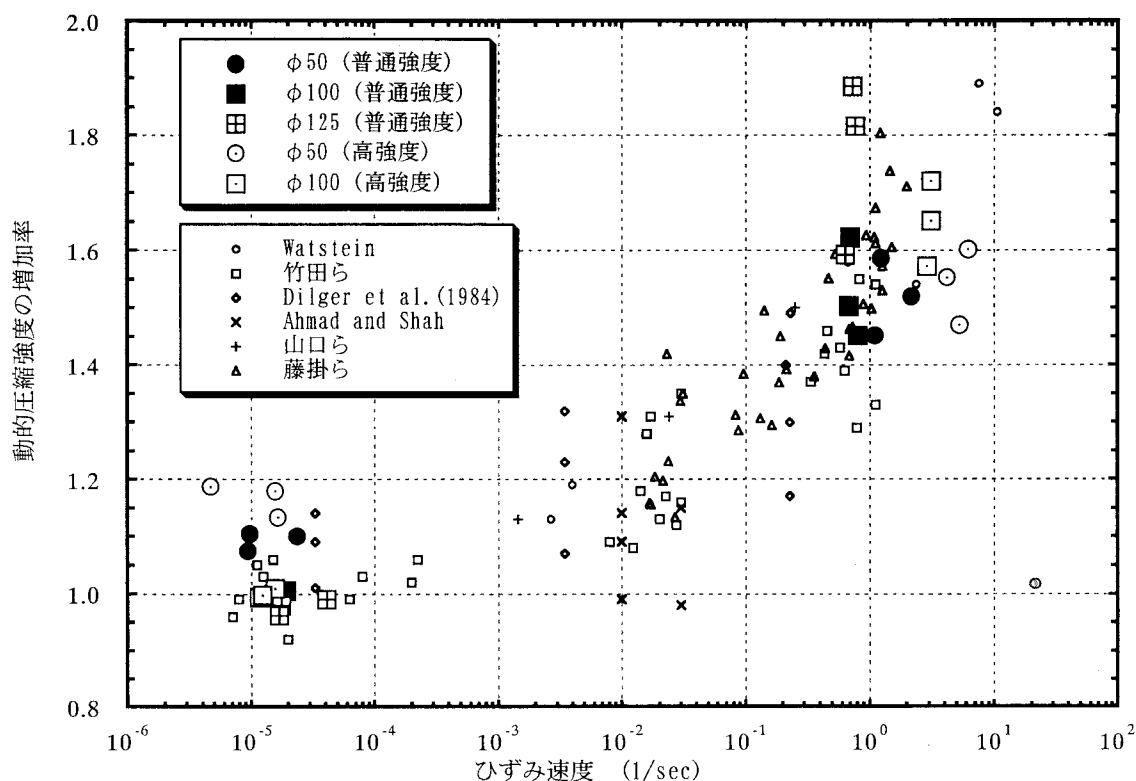
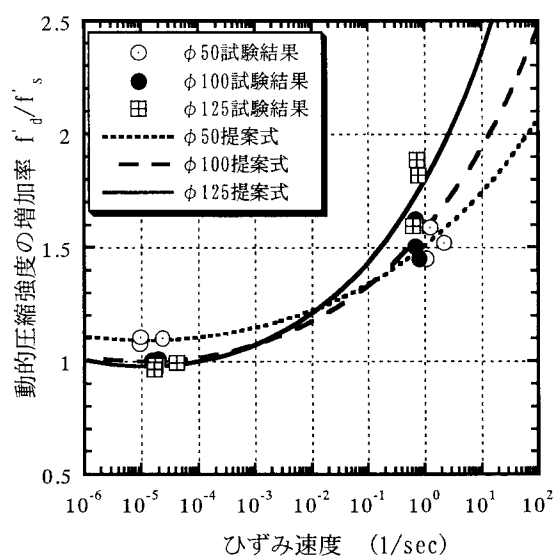
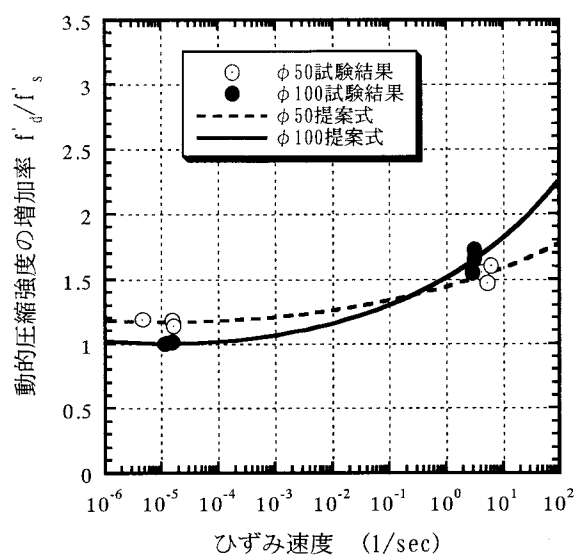


図-6 既往の試験結果との比較
(動的圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係)



(a) 普通強度



(b) 高強度

図-7 動的圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係

いる供試体が普通強度であること、また一般にφ100×200(mm)の寸法が用いられていることに関連していると考えられる。またコンクリート強度によらず、供試体寸法が大きいほどひずみ速度効果が大きくなる傾向がみられた。

(2) 寸法効果の影響を考慮した動的一軸圧縮強度の増加率の定式化

動的一軸圧縮強度の増加率とひずみ速度ならび

に供試体の体積比の関係について重回帰分析を行った。その結果、次式を得た。

$$f'_d = f'_s \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{\alpha \log_{10} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)} \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_s$ は静的載荷のひずみ速度 [1.2×10^{-5} (1/sec)], $\dot{\epsilon}$ は急速載荷時のひずみ速度(1/sec), f'_s は

静的載荷時の寸法効果を考慮した圧縮強度 (N/mm^2) (式 (1)), f_d' は寸法効果を考慮した動的圧縮強度 (N/mm^2) であり, 動的載荷に対する寸法効果を表す係数 α は次式で与えられる.

$$\text{普通強度: } \alpha = 0.0032 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0.0053 \quad (3a)$$

$$\text{高強度: } \alpha = 0.0041 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0.0033 \quad (3b)$$

式(1), (2), (3)を試験結果とともに図-7に示す. 本試験の範囲内においては, 動的圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係は提案した式を用いて概ね評価することができると言える.

4. 結論

本研究は, コンクリートの圧縮強度, 供試体寸法および載荷速度をパラメータとする急速一軸圧縮試験を行い, 各パラメータが動的圧縮強度に及ぼす影響を調べたものである. 本研究で得られた結果をまとめて以下に示す.

- (1) 供試体寸法の増大に伴い圧縮強度が低下するといった寸法効果は, 高強度コンクリートほど顕著に表れる.
- (2) コンクリート強度によらず供試体寸法が増大するほどひずみ速度効果が大きくなる.
- (3) コンクリート供試体の寸法効果の影響を考慮した動的圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係を定式化した.

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会: 構造物の衝撃挙動と設計法, 構造工学シリーズ 6, 1993.12.
- 2) 谷川恭雄, 山田和夫: コンクリートの圧縮強度の寸法効果について, 日本建築学会論文報告集, 第 262 号, pp.13-21, 1977.
- 3) 小池狭千朗, 奥藤一夫, 小林 尚: 供試体寸法の異なるコンクリートの塑性変形挙動と $\sigma - \varepsilon$ 曲線の表示式, セメント技術年報, 41, pp. 319-322, 1992.
- 4) H.Mihishi and Izumi: A Stochastic Theory for Concrete Fracture, Cement and concrete Research, Vol.7, pp.411~422, 1977.
- 5) 長谷川俊昭, 岡田武二: コンクリート材料の破壊と寸法効果, セメント技術年表, 40, pp.241~244, 1992.
- 6) 永松静也: モルタル, コンクリートの寸法効果について, セメント技術年報, XXX, pp.219~223, 1977.
- 7) J.K.Kim and S.H.Eo: Size effect in concrete specimens with dissimilar initial cracks. Magazine of Concrete Research, 42, No.153, pp.233-238, 1990.
- 8) 藤掛一典, 篠崎敬一, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 急速一軸圧縮載荷を受けるコンクリートのポストピーク挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.627, V-44, pp.37-54, 1999.8.
- 9) 野口貴文: 高強度コンクリートの基礎力学的特性に関する研究, 東京大学博士学位論文, pp.4-1~pp.4-78, 1995.3.
- 10) Watstein, D.: Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete, ACI J., V.49, No.8, pp.729-744, Apr., 1953.
- 11) 竹田仁一, 立川博之, 藤本一男: コンクリートと衝撃 - 衝撃を受けるコンクリートの性状と実験 -, コンクリート工学, Vol.14, pp.1-11, 1977.4.
- 12) Dilger, W. H., Koch, R. and Kowalczyk, R.: Ductility of plain and confined concrete under different strain rates, ACI J., V.81, pp.73-81, Jan.-Feb., 1984.
- 13) Ahmad, S. H. and Shah, S. P.: Behavior of hoop confined concrete under high strain rates, ACI J., V.82, pp.634-647, Sep.-Oct., 1985.
- 14) 山口弘, 藤本一男, 野村設郎: 高圧 3 軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係 その 2 高速載荷, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 396 号, pp.50-59, 1989.2.
- 15) Tang, T., Malvern, L. E. and Jenkins, D. A.: Rate effects in uniaxial dynamic compression of concrete, Journal of Engineering Mechanics, Vol.118, No.1, pp.108-124, Jan., 1992.
- 16) 藤掛一典, 大野友則, 小暮幹太, 喜多龍一郎: 高速圧縮載荷を受けるコンクリートの材料特性, 土木学会第 51 回年次学術講演会概要集第 5 部, pp.546-547, 1996.9.
- 17) 藤掛一典, 山根茂樹, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 急速一軸引張試験においてコンクリート円柱供試体の高さ寸法の違いが引張特性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.592/V-39, pp.83-95, 1998.5.
- 18) 白井孝治, 島村和夫, 實晃司, 伊藤千浩, 大沼博志: コンクリート強度のひずみ速度依存性の定式化 - ホプキンソン棒法式衝撃試験方法の適用と圧縮強度試験結果 -, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1793-1804, 1998.3.