

論文 ポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に及ぼす骨材粒径の影響

山本 貴正^{*1}・小池 狭千朗^{*2}・牧野 智英^{*3}・畑中 重光^{*4}

要旨：本研究では、ポーラスコンクリートの品質管理の精度向上を目指し、その空隙率および圧縮強度の変動に及ぼす骨材粒径の影響について実験的に検討を行った。使用した骨材は、単粒度碎石 5 号（粒径：13-20mm）、6 号（粒径：5-13mm）および 7 号（粒径：2.5-5mm）の 3 種類である。実験の結果、各骨材粒径ともに、実測空隙率が低いほど空隙率の変動係数が大きくなること、また圧縮強度の変動係数は空隙率の変化に対して特定の傾向を示さないことが明らかとなった。なお、これらの傾向に及ぼす骨材粒径の影響はほとんど認められなかった。

キーワード：単粒度碎石、空隙率、圧縮強度 - 空隙率関係、平均値、変動係数、標準偏差

1. はじめに

環境負荷低減型コンクリートの一種であるポーラスコンクリートは、連続した空隙によって、透水や吸音性などの機能を有し、また生物が生息することも可能である。このようなことから、ポーラスコンクリートは環境保全や自然環境との調和を担う構造材料として注目されており、近年、路盤材や植生基盤などに利用され、その普及が進んでいる。

コンクリートの強度試験結果には、必ずバラツキを伴うことが知られている¹⁾が、ポーラスコンクリートのバラツキに関してはあまり実験データが得られておらず、現状では、実施設計に適用されるまでに至っていない。

筆者らは、これまでに単粒度碎石 6 号（粒径：5-13mm）を使用したポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度のバラツキに及ぼす設計空隙率、結合材の設計フロー値および結合材強度の影響について検討を行い、i) 空隙率の変動係数は、設計空隙率が低いほど、および結合材フロー値が高いほど、大きくなること、ii) 圧縮強度の変動係数は、各要因の変化に対してほぼ一定の値（約 10%）となること、などの知見を得た²⁾。なお、使用する骨材粒径が変化した場合、内部の結合材の分布および膜厚、並びに空隙の分布などが異なり、空隙および強度のバラツキも変化することが考えられる。そこで、本研究

では、既報²⁾に引き続き、ポーラスコンクリートの品質管理の精度向上を目指し、その空隙率および圧縮強度の変動に及ぼす骨材粒径の影響について実験的に検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験の概要を表-1 に試験体一覧として示す。実験要因として、設計空隙率および骨材粒径を取り上げた。設計空隙率は 15、20、25 および 30% の 4 種類、骨材粒径は単粒度碎石 5 号（粒径：13-20mm）、6 号（粒径：5-13mm）および 7 号（粒径：2.5-5mm）の 3 種類とした。結合材の水セメント比は 25%、および設計フロー値は 220mm である。試験体の締固め方法は表面振動とし、標本数は各 22 体とした。

2.2 使用材料

表-2 に調合表一覧を、表-3 に使用材料一覧を示す。セメントは普通ポルトランドを使用

表-1 試験体一覧

W/C	設計 空隙率	骨材粒径 (単粒度碎石)	設計 フロー値	締固め 方法	標本数
[%]	[%]		[mm]		
25	15	5号 6号 7号	220	表面振動	22
	20				
	25				
	30				
[註] W/C：結合材の水セメント比					

*1 小山工業高等専門学校 建築学科助教 博士（工学）（正会員）

*2 愛知工業大学 工学部都市環境工学科教授 博士（工学）（正会員）

*3 静岡市役所 都市局建築部 修士（工学）

*4 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻教授 工学博士（正会員）

し、骨材はそれぞれ微粒分を水洗いして取り除き、それらを表乾状態としたものを用いた。

2.3 試験体製作・試験方法

ポーラスコンクリートの練混ぜ方法は、ペースト先練りとし、セメントおよび水を投入後 270 秒まで練り混ぜた後、骨材を投入してさらに 90 秒間練り混ぜた。なお、ポーラスコンクリートの混練には、容量 100l の二軸強制練りミキサを使用した。練り上がったコンクリートは、直径 100mm、高さ 200mm の円柱形型枠に 3 層で詰め、

各層を突き棒で 15 回突き、その後、バイブレーティングタンパ（起振力 1225N）で、10 秒間締固め、翌日脱型の後に水中養生を行った。

空隙率は文献³⁾に示されている容積法を用いて計測した。なお、本報に示す空隙率とは、全空隙率である。圧縮強度試験は 2000kN 級耐圧試験機を用いて行い、荷重載荷は単調中心圧縮とした。試験体の上面および下面には、平滑性を確保するためにセメントペーストキャッピングを施した。

表 - 2 調査表一覧

試験体名称	W*/C [%]	設計 フロー値 [mm]	骨材 [kg/m ³]	SP/C [%]
C25-__L-220			1624	
C25-__M-220-1	25	220	1589	2.0
C25-__M-220-2			1540	
C25-__S-220			1584	

[註] W* : 水+SP(質量), C : セメント(質量)

SP : 混和剤(質量)

試験体名称 : C 25 - 25 M - 220 - 1
i) ii) iii)

i) 設計空隙率

15 : 15%, 20 : 20%, 25 : 25%, 30 : 30%

ii) 骨材(単粒度砕石)

L : 5号, M : 6号, S : 7号

iii) 同一実験変数の試験体が
数体ある場合の番号

3. 実験結果・考察

表 - 4 に本研究の実験結果一覧を示す。なお、

表 - 3 使用材料一覧

セメント	普通ポルトランドセメント 密度 : 3.16 g/cm ³
	JIS5号砕石(粒径 : 13-20mm) 表乾密度 : 2.65 g/cm ³ 実積率 : 60.0 %
骨材	JIS6号砕石(粒径 : 5-13mm) 表乾密度 : *2.65 g/cm ³ , **2.61 g/cm ³ 実積率 : *60.9 %, **59.0 %
	JIS7号砕石 粒径(2.5-5mm) 表乾密度 : 2.63 g/cm ³ 実積率 : 60.2 %
混和剤	高性能AE減水剤 密度 : 1.09 g/cm ³

[註] *C25-__M-220-1, **C25-__M-220-2に使用

表 - 4 実験結果一覧

試験体名称	W/C [%]	設計 空隙率 [%]	実測空隙率 m s / m [%]	骨材 (単粒度砕石)	フロー値 設計値 実測値 [mm]	実測圧縮強度 m s / m [MPa]	標本数
C25-15L-220		15	20.2 0.074		213	23.3 0.084	22
C25-20L-220		20	25.7 0.033		220	16.1 0.116	22
C25-25L-220		25	30.2 0.027	5号	219	12.7 0.094	21
C25-30L-220		30	34.6 0.021		223	7.7 0.180	22
C25-15M-220-1		15	15.0 0.079		218	27.0 0.108	22
C25-15M-220-2			11.2 0.086		211	37.5 0.131	21
C25-20M-220-1		20	25.4 0.038		222	16.8 0.129	22
C25-20M-220-2	25		23.8 0.048	6号	211	29.3 0.110	22
C25-25M-220-1		25	27.8 0.020		224	14.9 0.116	21
C25-25M-220-2			24.1 0.037		218	20.6 0.198	21
C25-30M-220-1		30	33.9 0.025		219	8.1 0.144	22
C25-30M-220-2			31.0 0.022		215	9.7 0.152	22
C25-15S-220		15	16.8 0.060		219	20.1 0.184	22
C25-20S-220		20	23.1 0.039	7号	218	12.7 0.153	22
C25-25S-220		25	29.0 0.031		220	8.6 0.141	22
C25-30S-220		30	33.5 0.040		216	3.8 0.140	21

[註] m : 平均値, s : 標準偏差

$m = \sum x_i / n$, $s = (\sum |x_i - m| / n)^{0.5}$, ただし $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ はデータ

施工時の締固め不良，試験時の計測不良および偏心荷重が加わったと思われる試験体についてはデータを棄却した。棄却した試験体は計5体で，そのうち空隙率の計測不良と考えられる試験体が2体，偏心荷重が加わったと考えられる試験体が3体であった。本報では，既報²⁾と同様に空隙率および圧縮強度の確率分布は議論を簡単にするために正規分布に従うとして進める。

3. 1 変動係数

図-1に，空隙率の変動係数と実測空隙率の関係に及ぼす骨材粒径の影響を示す。図の縦軸は空隙率の変動係数，横軸は空隙率の平均値である。図中の菱形，円形および四角形は，それぞれ単粒度砕石5号，6号および7号の試験体を表している。図より，各骨材粒径ともに実測空隙率が高いほど，空隙率の変動係数が小さくなることわかる。この傾向は前報²⁾とほぼ同様である。なお，この傾向に及ぼす骨材粒径の影響はほとんど認められない。

図-2に，圧縮強度の変動係数と実測空隙率の関係に及ぼす骨材粒径の影響を示す。図の縦軸は圧縮強度の変動係数，横軸は空隙率の平均値である。図中の記号は図-1と同様である。図-2より，圧縮強度の変動係数は，各骨材粒

径ともに空隙率の変化に対して特定の傾向を示さないことがわかる。この傾向は前報²⁾とほぼ同様である。また，骨材粒径の変化に対する特定の傾向もほとんど認められない。

3. 2 標準偏差

図-3に，空隙率の標準偏差と実測空隙率の平均値の関係に及ぼす骨材粒径の影響を示す。図中の記号は図-1と同様である。図-3より，本実験の範囲では，空隙率の標準偏差の上限は，おおよそ図中の実線で示す以下の式で表すことができる。

$$s = 1.5 \quad (1)$$

ここに， s ：空隙率の標準偏差 [%]

図-4に，圧縮強度の標準偏差と実測圧縮強度の平均値の関係に及ぼす骨材粒径の影響を示す。図の実線はJASS 5⁴⁾で示されている普通コンクリートの調合設計上の標準偏差を示している。なお，図中の記号は図-1と同様である。図-4より，本実験の範囲では，JASS 5に示された値（図中の実線）より若干大きい値が得られた。また，本実験の範囲では，標準偏差の上限は，おおよそ図中の破線で示す以下の式で表すことができる。

$$s = 0.1 F + 1.5 \quad (2)$$

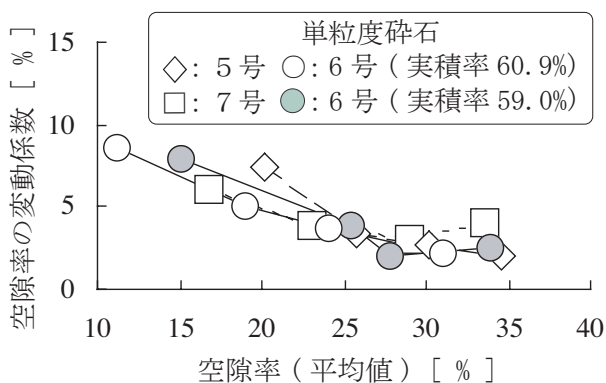


図-1 空隙率の変動係数

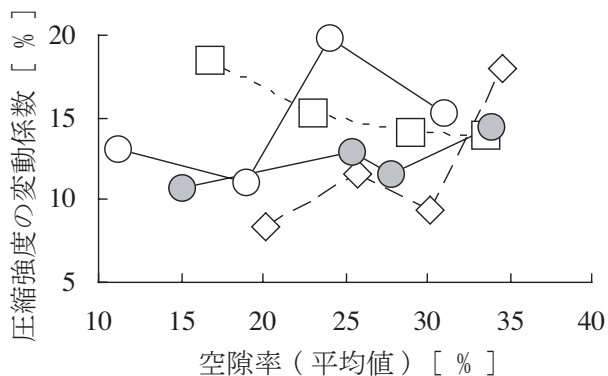


図-2 圧縮強度の変動係数

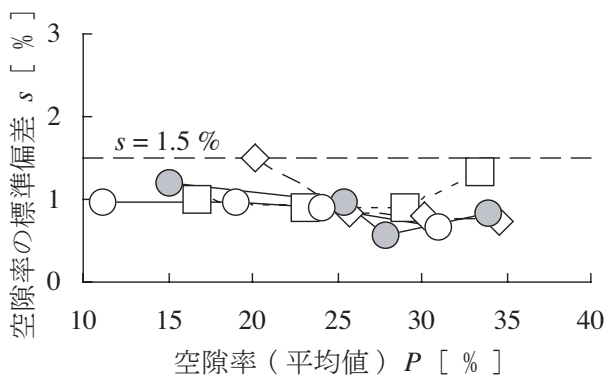


図-3 空隙率の標準偏差

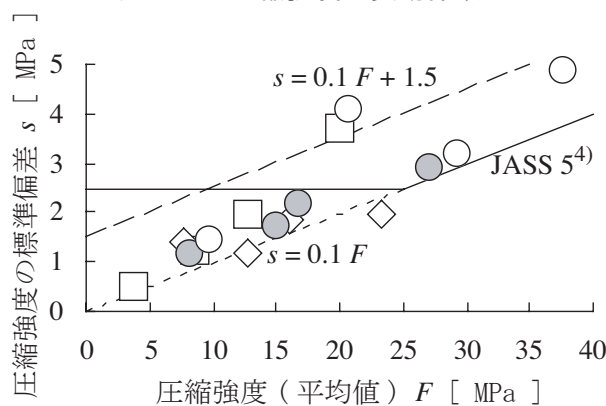


図-4 圧縮強度の標準偏差

ここに、 s ：圧縮強度の標準偏差 [MPa]

F ：圧縮強度 [MPa]

本研究の適用範囲内におけるポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度の標準偏差の上限を、式(1)および式(2)で表した。ただし、本実験の結果は、ポーラスコンクリートの材料固有のものを見なすべきである。施工や測定方法などの影響とみなせるものについてはデータを棄却したが、この点については、今後、検討すべき課題である。

3.3 圧縮強度と空隙率の関係

ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係は高い相関関係があることが知られている。既往の研究成果⁵⁾⁻⁷⁾をもとに、ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係に及ぼす諸要因の影響をまとめると、図-5に示すような概念図が得られる。一般に、空隙率が小さいほど、また結合材強度が高いほど、圧縮強度が高くなる。同図に示す圧縮強度-空隙率関係は、一般的な脆性多孔質材料に用いられる次式の指数関数で近似することができるとされている⁵⁾。

$$F = A \exp(-B \cdot P) \quad (3)$$

ここに、 F ：圧縮強度 [MPa]

A ：空隙率 0% の圧縮強度 [MPa]

B ：実験定数 [MPa]

P ：空隙率 [%]

図-6に単粒度砕石6号を使用した試験体の圧縮強度と空隙率の関係を示す。図の縦軸は実測圧縮強度の平均値、横軸は実測空隙率の平均値である。図中の白抜印および黒塗印は、それぞれ骨材の実積率が60.9%および59.0%の試験体を示し、実線は本試験体とほぼ等しい水セメント比および単粒度砕石6号を有するポーラスコンクリートの試験結果を近似して得られた湯

浅らの提案式⁵⁾[式(4)]である。

$$F = 152 \exp(-0.084 P) \quad (4)$$

ここに、(4)式の適用に際しては、骨材破壊が結合材破壊に先行していないことが基本的な条件となる。

同図より、本研究の試験体は、各試験体ともに図中の実線で示す湯浅らの実験式の曲線上にほぼ位置することがわかる。なお、圧縮強度が高い試験体(C25-15M-220-1, C25-15M-220-2)は、湯浅らの実験式より低い強度側に位置する。これは、湯浅らの研究結果⁵⁾から判断すると、骨材破壊が結合材破壊より先行したことにより強度が低下したものと推測される。

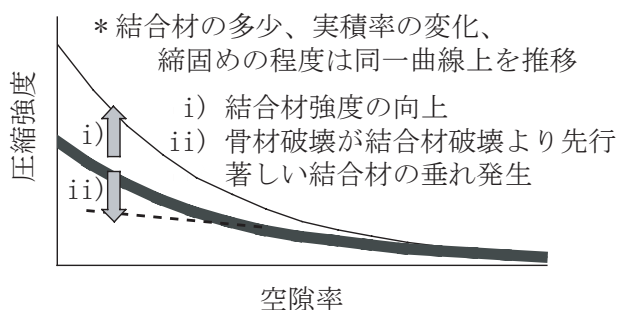


図-5 圧縮強度-空隙率関係(概念図)⁵⁾⁻⁷⁾

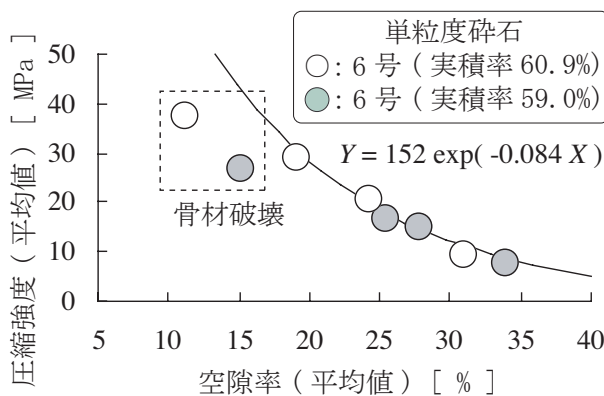


図-6 圧縮強度-空隙率関係の例(6号砕石)

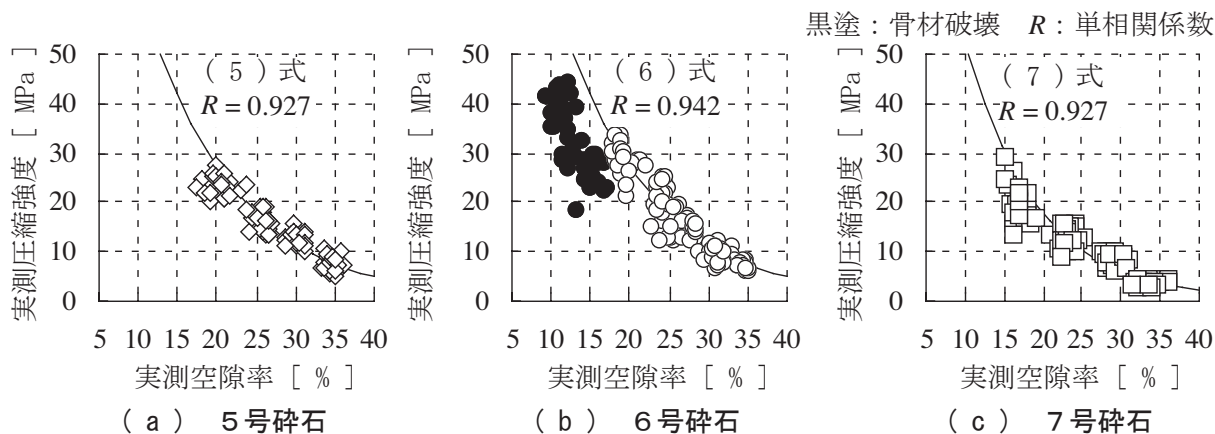


図-7 圧縮強度-空隙率関係

図-7(a), (b) および (c) に、それぞれ単粒度碎石 5 号、6 号および 7 号を使用した試験体の圧縮強度と空隙率の関係を示す。図の縦軸は実測圧縮強度、横軸は実測空隙率である。図中の実線は、各骨材粒径の圧縮強度と空隙率の関係を式(3)で近似した曲線である。それら近似曲線を次式に示す。

$$5 \text{ 号} : F = 152 \exp(-0.0863 P) \quad (5)$$

$$6 \text{ 号} : F = 152 \exp(-0.0860 P) \quad (6)$$

$$7 \text{ 号} : F = 152 \exp(-0.1073 P) \quad (7)$$

ここに、各式の切片は、図-7に示す傾向から、式(4)に示す湯浅らの提案式と同様に 152MPa とした。ここで 6 号碎石の圧縮強度-空隙率関係を近似する際、骨材破壊が結合材破壊より先行したことにより強度が低下したものと推測される試験体[図中、黒塗印(C25-15M-220-1, C25-15M-220-2)、図-6参照]は除外した。

図-8に式(5)-(7)から算出した各骨材粒径の圧縮強度の計算値に対するその実測値の比 F_{exp}/F_{cal} を正規分布、対数正規分布および Weibull 分布の確率紙上に示す。図より、 F_{exp}/F_{cal} の確率分布は、5 号および 6 号碎石ともに正規分布と高い相関性(確率紙上の近似直線の単相関係数 R はそれぞれ 0.997)がある、また 7 号碎石は対数正規分布と高い相関性(R は 0.994)があることがわかる。

図-9に、各骨材粒径の F_{exp}/F_{cal} の相対度数分布を示す。正規分布に従うとして算出した 5 号、6 号および 7 号碎石の F_{exp}/F_{cal} の標準偏差 s は、それぞれ 0.150, 0.146 および 0.256 である。なお対数正規分布に従うとして算出した 7 号碎石の $\ln(F_{exp}/F_{cal})$ の標準偏差は 0.255 である。

図-10は、各骨材粒径についての F_{exp}/F_{cal} と実測空隙率の関係を表している。図中の破線、

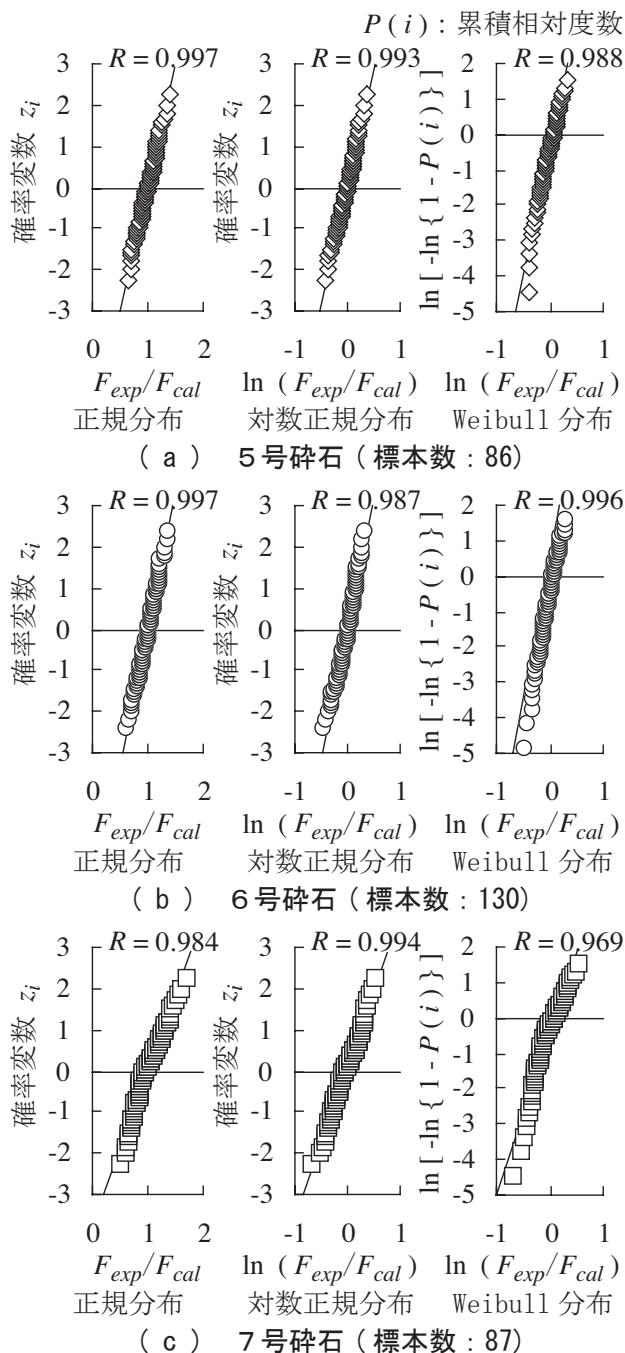


図-8 圧縮強度計算値に対する
その実測値の比の確率紙上の分布

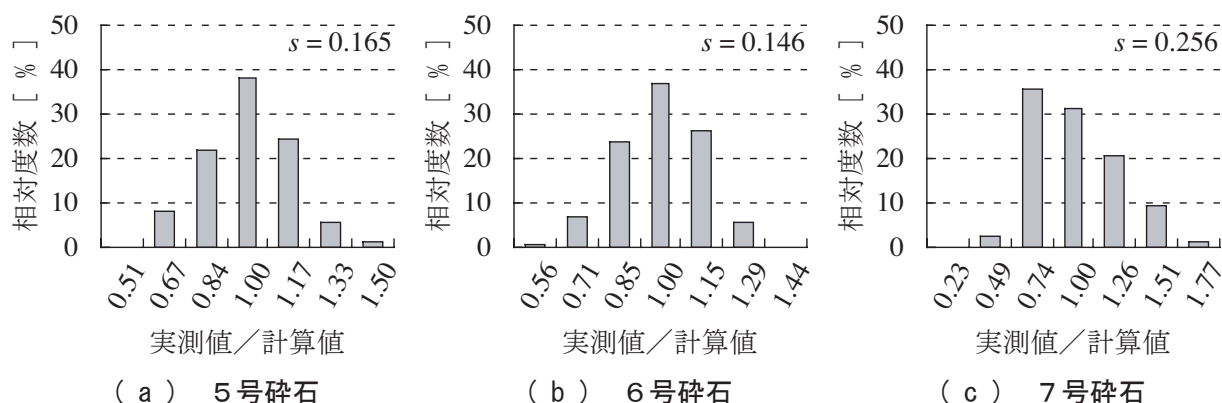


図-9 圧縮強度計算値に対するその実測値の比の度数分布

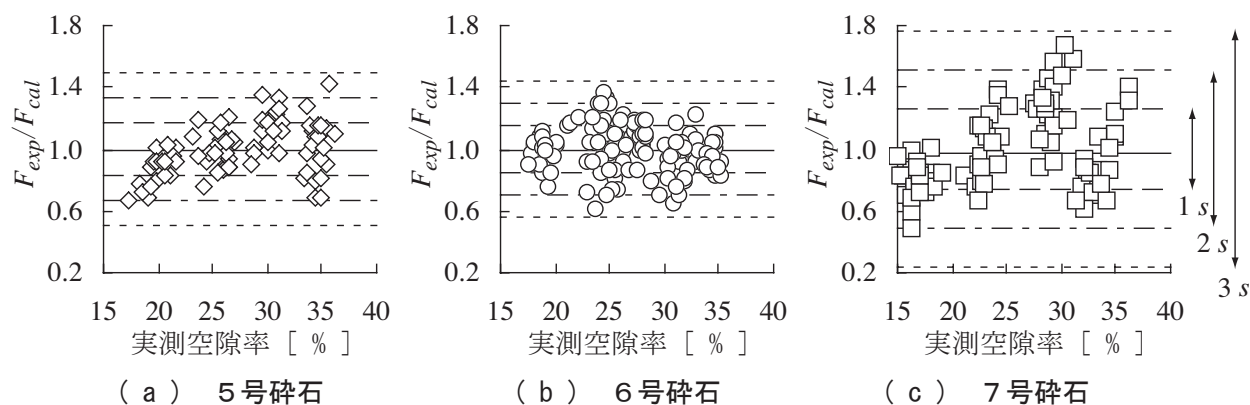


図-10 圧縮強度計算値に対するその実測値の比と空隙率の関係

一点鎖線および点線は、それぞれ $1s$ 、 $2s$ および $3s$ の範囲を表している。ここで、 F_{cal} の算定には式(5) - (7)を用い、確率分布は議論を簡単にするため正規分布と仮定した。図より、骨材粒径および実測空隙率によって平均値およびバラツキの傾向は異なるが、実測圧縮強度はほぼ図中の一点鎖線で示す $2s$ の範囲内に存在していることが確認できる。

4. まとめ

ポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度の確率変動に及ぼす骨材粒径の影響について実験的に検討を行った。本研究の範囲内で得た結果を以下に示す。

- 1) 空隙率の変動係数に及ぼす骨材粒径の影響はほとんど認められない。
- 2) 圧縮強度の変動係数は、骨材粒径の変化に対して特定の傾向を示さない
- 3) 空隙率の標準偏差 s の上限は、各骨材粒径ともにおおよそ 1.5% である。
- 4) 圧縮強度の標準偏差 s [MPa] の上限は、各骨材粒径ともにおおよそ式(2)で表すことができる。
- 5) 各骨材粒径の圧縮強度と空隙率の関係は式(5) - (7)で表すことができる。これらの式から算出した計算値に対する実測圧縮強度の比は、おおよそ $2s$ の範囲内に存在する事が確認できた。

ポーラスコンクリートの圧縮強度および空隙率のバラツキに影響を与える要因として、材料固有の要因の他に、施工方法、試験方法などの諸要因が考えられるが、これらの影響については今後の検討課題である。

謝辞

本研究および実験に関して、御助力を得た三重大学大学院工学研究科の三島直生助手、愛知工業大学の永田昇技術員および平成18年度小池狭千朗研究室卒研生の諸君に深謝致します。

参考文献

- 1) 例えば、谷川恭雄，山田和夫：セメント系複合材料の強度に関する確率論的研究（第2報：モルタルおよびコンクリート強度の確率分布指標について），日本建築学会論文報告集，No. 286，pp. 1-12，1979. 12
- 2) 山本貴正，畑中重光，小池狭千朗，三島直生，湯浅幸久：ポーラスコンクリートの圧縮強度特性の変動変動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No. 601，pp. 9-14，2006. 3
- 3) 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書，2003. 5
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，2003
- 5) 湯浅幸久，畑中重光，三島直生，前川明弘，宮本高秀：ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No. 552，pp. 37-44，2002. 2
- 6) 畑中重光，三島直生，湯浅幸久：ポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材粒径の影響に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No. 594，pp. 17-23，2005. 8
- 7) 畑中重光，湯浅幸久，三島直生：再生骨材を用いたポーラスコンクリートの圧縮強度性状に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No. 570，pp. 31-36，2003. 8