

論文 ポーラスコンクリートの空隙率・圧縮強度の変動に関する実験的研究

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

要旨: これまで筆者らは、ポーラスコンクリートの基本的特性である空隙率および圧縮強度のバラツキについて、研究報告をしてきた。本研究では、これら既報に対して新たな実験水準を追加し、一般によく使用されている単粒度砕石6号（粒径：5-13mm）を有するポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度の変動に及ぼす水セメント比，設計空隙率，およびフロー値の影響について総合的に再検討を行った。その結果，空隙率が低いほど空隙率の変動係数が大きくなること，圧縮強度および空隙率が高いほど圧縮強度の標準偏差が大きくなること，などが明らかとなった。

キーワード: 水セメント比，フロー値，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

ポーラスコンクリートは，その連続した空隙により，透水性および透気性に優れている。これにより植生，生物生息，水質浄化，吸音などが可能であり，環境保全や自然環境との調和を担う材料として，路盤材や植生基盤などに利用されている。また，これにあわせ，ポーラスコンクリートの物性および適用性に関する様々な実験的・理論的研究が行われており，それら機能を十分に活かすための各用途に適した空隙および強度に関する報告がなされている¹⁾。

コンクリートの各種試験結果には，必ずバラツキを伴うことが知られている²⁾。しかし，ポーラスコンクリートについては，その特性を示す空隙，強度などのバラツキに関してあまり詳細な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。ポーラスコンクリートは，内部に空隙や結合材の分布が生じるなど，特有のバラツキの原因が存在する。従って，普通コンクリートの強度などのバラツキに関するデータをポーラスコンクリートにそのまま適用することはできないと考えられる。よって，筆者らは，これまでに，ポーラスコンクリートの基本的特性である空隙率および圧縮強度のバラツキに及ぼす水セメント比，空隙率，フロー値および骨材粒径の影響について実験的に検討を行った^{3),4)}。その結果，i) 空隙率および圧縮強度の確率分布は，ともに正規分布と強い相関性がある。ii) 空隙率の変動係数は，設計空隙率が低いほど，および結合材の垂れが顕著なほど大きくなる，iii) 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，iv) 圧縮強度の変動係数は，著しい結合材の垂れおよび骨材破壊の影響が小さい場合，上限10%程度である，v) 圧縮強度と空隙率の関係式から算出した圧縮強度の計算値に対するそ

表-1 実験概要

使用骨材	単粒度砕石6号
W/C (%)	25, 30, 35
設計空隙率 (%)	20, 25, 30, 35
設計フロー値 (mm)	170, 220, 270
混練用ミキサ	二軸強制練りミキサ
締固め方法	表面振動
起振力 (N)	1225
締固め時間 (s)	10
試験体端面処理	セメントペーストキャッピング
標本数	22

[注] W/C：結合材の水セメント比

の実測値の比は，おおよそ $2s$ （ここに， s ：標準偏差）である，などの知見を得た。

そこで，本研究では，一般によく使用されている単粒度砕石6号（粒径：5-13mm），また試験体端面処理をセメントペーストキャッピングとしたポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度の変動に及ぼす水セメント比，設計空隙率，およびフロー値の影響を，これら全ての組合せについて検討し，また既報^{3),4)}の結果を併せ，総合的に再検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験の概要を表-1に示す。実験要因として，水セメント比，設計空隙率および設計フロー値を取り上げた。水セメント比は25, 30および35%の3種類，設計空隙率は15, 20, 25および30%の4種類，設計フロー値は170, 220および270mmの3種類とした。骨材粒径は単粒度砕石6号（粒径：5-13mm）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。

*1 豊田工業高等専門学校 建築学科講師 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）

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セメントを使用し、骨材は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ーを使用した。練り上がったコンクリートは、直径100mm、高さ200mmの円柱型枠に2層で詰め、各層を突き棒で15回突き、その後、バイブレーションタンパ(起振力1225N)で、10秒間締め固め、翌日脱型の後に水中養生を行った。

空隙率は文献⁵⁾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、材齢28日目で圧縮強度試験を行った。

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、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7体で、そのうち空隙率の計測不良と考えられる試験体が3体、偏心荷重が加わったと考えられる試験体が4体であった。本報では、既報^{3),4)}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正規分布に従うとして進める。

表-4 実験結果一覧

W/C	設計空隙率 (%)	実測空隙率		フロー値		実測圧縮強度		標本数
		m (%)	s/m (%)	設計値 (mm)	実測値 (mm)	m (MPa)	s/m (MPa)	
15	15.1	0.130	170	161	31.2	0.157	21	
		11.2	0.086	220	211	37.5	0.131	21
		18.3	0.111	270	270	26.2	0.116	22
20	20.6	0.051	170	180	29.6	0.137	22	
		19.0	0.050	220	211	29.3	0.110	22
		24.3	0.064	270	267	21.2	0.124	22
25	23.8	0.048	170	160	18.1	0.203	22	
		24.2	0.036	220	218	20.2	0.217	22
		27.7	0.057	270	275	16.4	0.167	22
30	30.8	0.018	170	165	11.4	0.093	21	
		31.0	0.022	220	215	9.7	0.152	22
		35.0	0.023	270	262	7.0	0.163	22
15	12.7	0.139	170	181	31.6	0.112	22	
		10.6	0.092	220	212	33.0	0.169	22
		15.2	0.082	270	270	22.8	0.128	22
20	18.0	0.078	170	182	22.1	0.177	22	
		15.3	0.090	220	218	24.5	0.180	22
		22.3	0.080	270	262	20.2	0.097	22
30	26.3	0.036	170	182	12.8	0.243	22	
		25.1	0.045	220	210	16.2	0.133	22
		29.5	0.039	270	277	13.9	0.157	22
30	31.3	0.047	170	168	8.5	0.148	21	
		29.7	0.045	220	230	11.8	0.110	22
		32.7	0.015	270	273	8.9	0.101	22
15	14.5	0.072	170	173	22.9	0.092	22	
		10.5	0.104	220	222	31.9	0.074	21
		11.5	0.084	270	278	28.9	0.121	22
20	26.0	0.028	170	172	13.4	0.150	22	
		15.2	0.094	220	213	23.6	0.096	21
		14.0	0.097	270	267	23.7	0.149	22
35	29.6	0.021	170	169	9.3	0.187	22	
		25.6	0.046	220	225	12.8	0.170	22
		23.7	0.055	270	270	13.8	0.162	22
30	34.5	0.017	170	175	5.3	0.149	22	
		30.2	0.017	220	217	8.3	0.155	22
		30.2	0.022	270	280	8.2	0.155	21

[注] m: 平均値, s: 標準偏差

$$m = \sum x_i / n, \quad s = (\sum |x_i - m|^2 / n)^{0.5}$$

ただし $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ はデータ

表-2 調合表一覧

W*/C (%)	設計フロー値 (mm)	骨材 (kg/cm ³)	HAE/C (%)
25	170	*1540	*0.50
	220		*2.00
	270	**1624	*4.00
30	170	*1540	-
	220		*0.40
	270	**1624	*0.80
35	170	*1540	*1.00
	220		-
	270	**1624	**0.35

[注] W*: 水+HAE(質量), C: セメント(質量)
骨材: *実積率60.9% **実積率60.5%
HAE: 混和剤(質量) *高性能AE減水剤 **増粘剤

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
骨材	JIS6号砕石(粒径: 5-13mm) 表乾密度: *2.66 g/cm ³ , **2.61 g/cm ³ 実積率: *60.9%, **59.0%
混和剤	高性能AE減水剤 密度: 1.09 g/cm ³ 増粘剤

[注] *, ** は表-2と同じ

3.1 空隙率の変動

図-1(a)-(c)に、設計フロー値170, 220, および270mmそれぞれの空隙率の変動係数と設計空隙率に対する空隙率の平均値の比 P_{ave}/P_{des} に及ぼす設計空隙率の影響を示す。図中の円印, 三角印, 四角印および菱形印は、それぞれ設計空隙率15, 20, 25および30%を、また黒塗印は著しい結合材の垂れが生じたものを表している。同図より、各設計フロー値ともに、設計空隙率が15%および著しい結合材の垂れが生じた場合を除き、空隙率の変動係数は、おおよそ10%以下であることがわかる。また、著しい結合材の垂れが生じた場合を除き、 P_{ave}/P_{des} が小さいほど空隙率の変動係数は大きくなる傾向がある。

図-2(a)(b)に、本研究および既報^{3),4)}それぞれの単粒度砕石6号を有するポーラスコンクリートの空隙率の変動係数と実測空隙率の関係を示す。図の横軸は実測空隙率の平均値である。図中の円印, 四角印および菱形印は、それぞれ設計フロー値170, 220および270mmを、また黒塗印は著しい結合材の垂れが生じたものを表している。同図より、設計フロー値に関わらず、空隙率の平均値が小さいほど、空隙率の変動係数が大きくなることわかる。なお、本実験および既報の実験の範囲では、設計空隙率が15%および著しい結合材の垂れが生じたも

のを除き、空隙率の変動係数 V (%) の上限は、おおよそ以下の式で表すことができる。

$$V = -0.34 P + 14.5 \quad (1)$$

ここに、 P : 実測空隙率の平均値 (%)

3.2 圧縮強度の変動

図-3(a)-(c)に、設計フロー値170, 220, および270mmそれぞれの圧縮強度の変動係数と水セメント比の関係に及ぼす設計空隙率の影響を示す。図中の記号は図-1と同様である。同図より、各設計フロー値ともに、圧縮強度の変動係数は、水セメント比および設計空隙率の変化に対して特定の傾向を示さないこと、多くの場合おおよそ20%以下であること、がわかる。しかし、既報³⁾では、著しい結合材の垂れが生じた場合を除き、圧縮強度の変動係数の上限値は10%程度である結果が得られている。これは、本研究ではセメントペーストキャッピング、既報³⁾は硫黄キャッピングを施していることから、平滑面を確保するためのキャッピングが影響しているものと考えられる⁵⁾。しかし、これらキャッピングがポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に及ぼす影響については、詳細なデータが得られていないため、今後の課題となる。

図-4に、圧縮強度の標準偏差と圧縮強度の平均値の

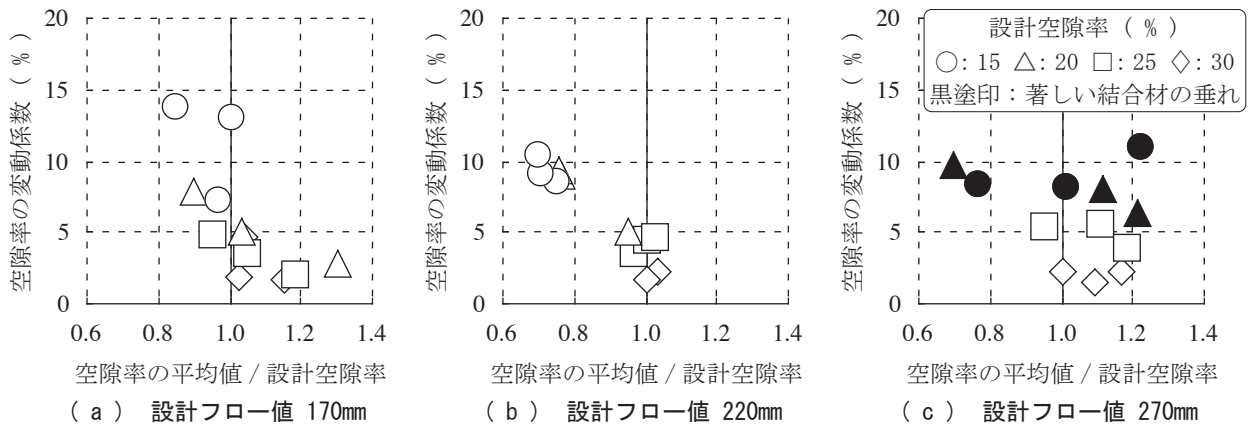


図-1 空隙率の変動係数と空隙率の平均値に対する設計空隙率の比の関係に及ぼす設計空隙率の影響 (本研究)

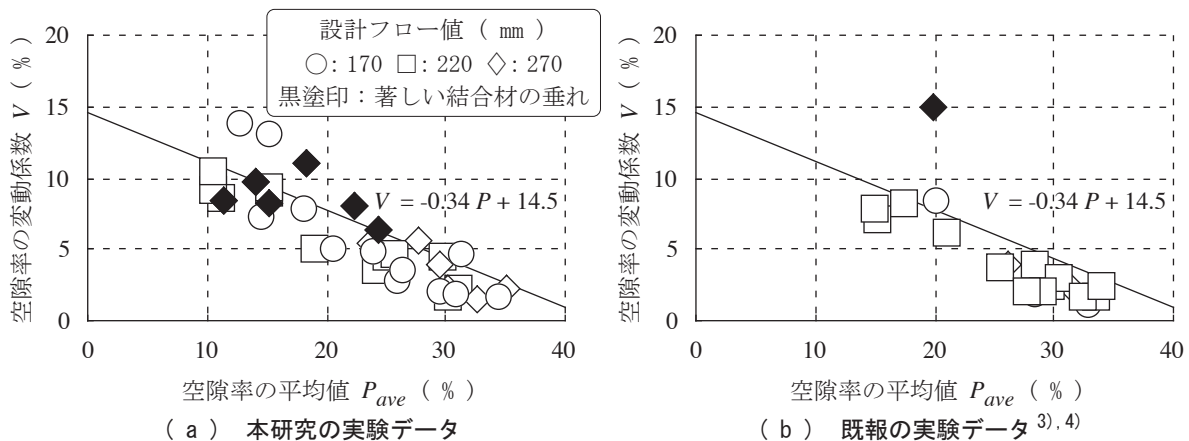


図-2 空隙率の変動係数と空隙率の平均値の関係に及ぼす設計フロー値の影響

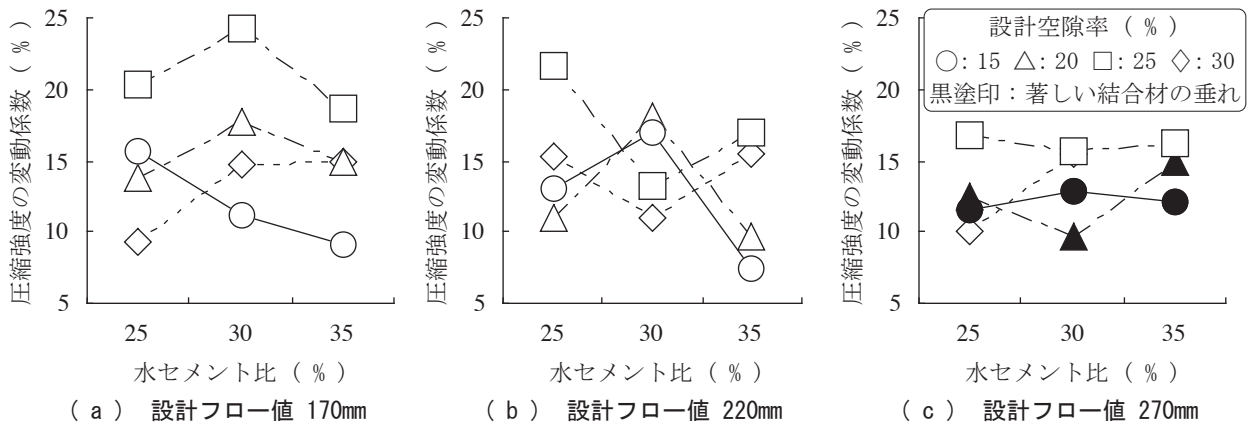


図-3 圧縮強度の変動係数と水セメント比の関係に及ぼす設計空隙率の影響（本研究）

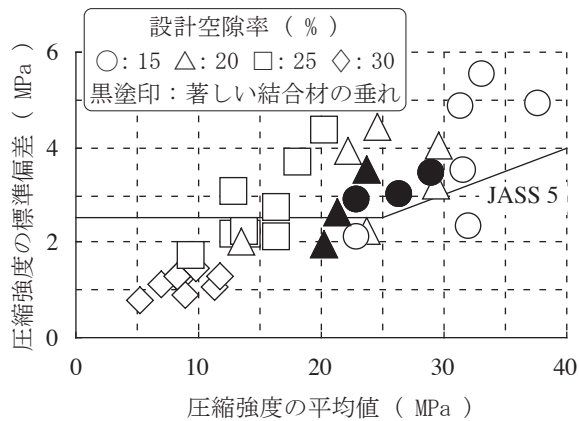


図-4 圧縮強度の標準偏差（本研究）

関係を示す。図中の記号は図-1と同様である。実線は JASS 5⁶⁾ で示されている普通コンクリートの調査設計上の標準偏差を示している。同図より、圧縮強度が低い設計空隙率 30%を除き、圧縮強度の標準偏差は、JASS 5に示された普通コンクリートの値より大きいことがわかる。また、圧縮強度が高いほど圧縮強度の標準偏差が大きくなることがわかる。

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に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⁸⁾⁻¹⁰⁾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指数関数で近似することができる。また、単粒度6号砕石を有するポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係は、次式で近似できることが報告されている⁸⁾。

$$F = A \exp(-0.084 P) \quad (2)$$

ここに、 F ：圧縮強度（MPa）

A ：材料定数（MPa）

P ：空隙率（%）

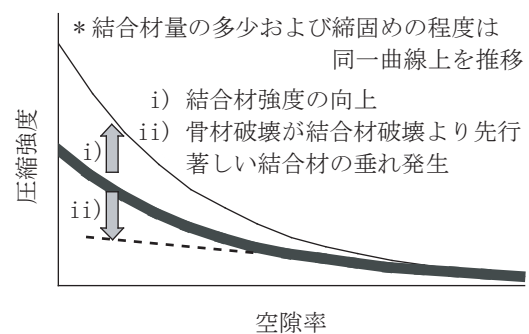


図-5 圧縮強度と空隙率の関係（概念図）

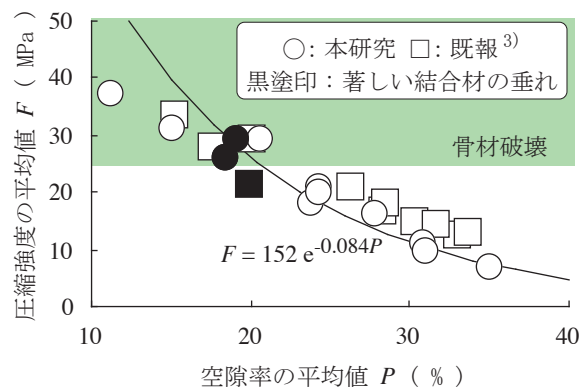


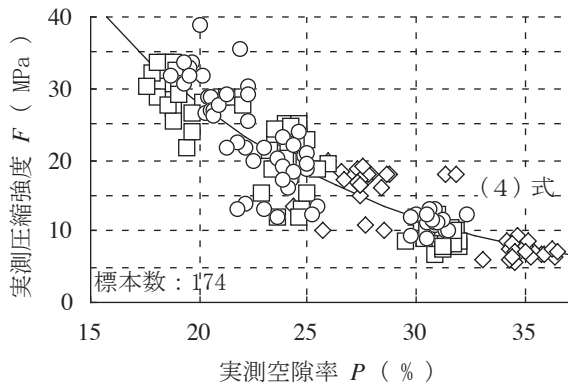
図-6 圧縮強度の平均値と空隙率の平均値の関係

なお、(2)式の適用に関しては、骨材破壊が結合材に先行していない、および結合材の著しい垂れが生じていないことが基本的な条件となる。

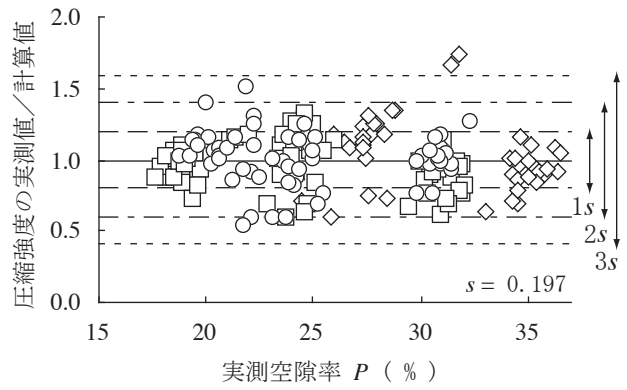
図-6に水セメント比 25%の場合の圧縮強度と空隙率の関係を示す。図の縦軸は圧縮強度の平均値、横軸は空隙率の平均値である。図中の円印および四角印は、それぞれ本研究のセメントペーストキャッピングおよび既報³⁾の硫黄キャッピングを施した実験データを表し、実線は、本試験体および既報³⁾の試験体とほぼ等しい水セメント比 25%および単粒度砕石 6号を有するポーラスコンクリートの試験結果を近似して得られた湯浅ら⁸⁾の提案式[(3)式]である。

$$F = 152 \exp(-0.084 P) \quad (3)$$

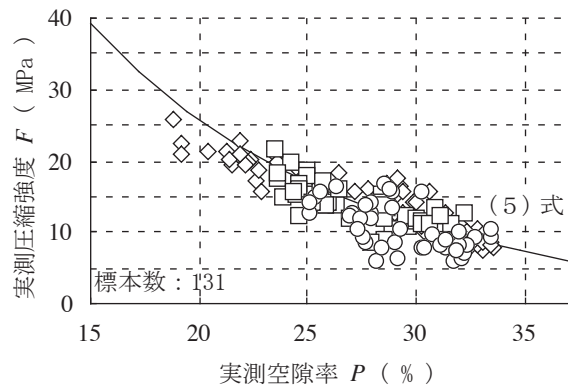
同図より、本研究の実験データは、比較的圧縮強度が低



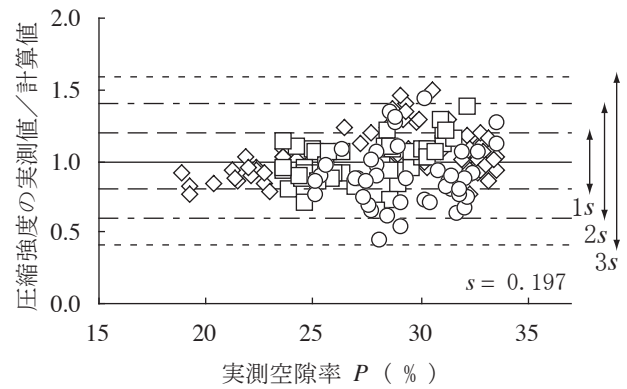
(a) 水セメント比 25%



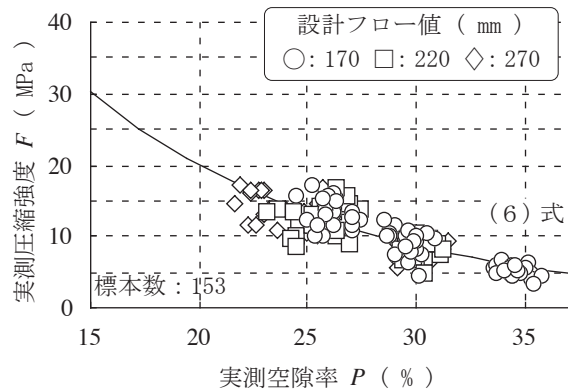
(a) 水セメント比 25%



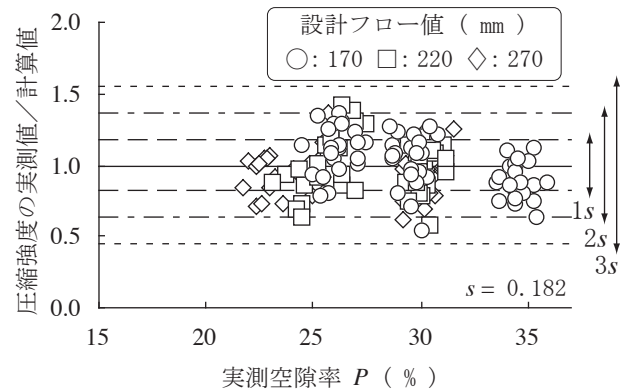
(b) 水セメント比 30%



(b) 水セメント比 30%



(c) 水セメント比 35%



(c) 水セメント比 35%

図-7 実測圧縮強度と実測空隙率の関係

図-8 圧縮強度の計算値に対する実測値

い範囲では、ほぼ曲線付近に点正在していることがわかる。なお、圧縮強度が高い範囲では、曲線より、低い強度側に位置する。これは、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。また、既報³⁾の実験データの圧縮強度は、比較的圧縮強度が低い範囲では、本研究のそれよりも高いことがわかる。これは、キャッピングが影響しているものと考えられる⁵⁾。しかし、これらキャッピングがポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響については、詳細なデータが得られていないため、今後の課題となる。

図-7(a)-(c)に、それぞれ水セメント比25、30および35%の場合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

表-5 確率紙上における単相関係数

W/C (%)	正規	対数正規	Weibull
25	0.989	0.985	0.987
30	0.996	0.984	0.993
35	0.998	0.992	0.992

線は、各水セメント比での関係を(2)式で近似した曲線である。それら近似曲線式を以下に示す。

$$W/C=25\% : F = 149 \exp(-0.084 P) \quad (4)$$

$$W/C=30\% : F = 138 \exp(-0.084 P) \quad (5)$$

$$W/C=35\% : F = 107 \exp(-0.084 P) \quad (6)$$

近似する際、著しい結合材の垂れが生じたもの、および骨材破壊が結合材破壊より先行したため強度が低下し

たものと推測される試験体およびは除外した。また、表-5には、(4)-(6)式から算出した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分布それぞれの確率紙上で検討した結果が示してある。表中の数値は、それぞれの確率紙上における近似直線の単相関係数である。同表より、 F_{exp}/F_{cal} は、特に正規分布との相関性が高いことがわかった。よって、以下の考察では、 F_{exp}/F_{cal} は、正規分布に従うとして議論する。

図-8(a)-(c)に、それぞれ水セメント比25、30および35%の場合の F_{exp}/F_{cal} と実測空隙率の関係を示す。図中の破線、一点鎖線、および点線は、 $1s$ 、 $2s$ および $3s$ (s : 標準偏差) の範囲である。図より、設計フロー値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、圧縮強度はほぼ図中の一点鎖線で示す $2s$ 範囲内に存在していることが確認できる。

4. まとめ

一般によく使用されている単粒度砕石6号(粒径: 5-13mm)、また試験体端面処理をセメントペーストキャッピングとしたポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度の変動に及ぼす水セメント比、設計空隙率、およびフロー値の影響を、これら全ての組合せについて検討し、また既報^{3),4)}の結果を併せ、総合的に再検討を行った。本研究の範囲内で得た結果を以下に示す。

- (1) 設計空隙率が15%および著しい結合材の垂れが生じたものを除き、空隙率の変動係数 $V(\%)$ の上限は、おおよそ(1)式で表すことができる。
- (2) 圧縮強度の変動係数は、空隙率、水セメント比およびフロー値の変化に対して特定の傾向を示さず、多くの場合おおよそ20%以下である。
- (3) 圧縮強度が低い設計空隙率30%を除き、圧縮強度の標準偏差は、JASS 5に示された普通コンクリートの値より大きい。また、圧縮強度が高いほど圧縮強度の標準偏差が大きくなる。
- (4) 圧縮強度と空隙率の関係は式(4)-(6)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 $2s$ (s : 標準偏差) の範囲内に存在する事が確認できた。なお、標準偏差 s の値は、おおよそ0.2である。
- (5) セメントペーストキャッピングを施したものは、硫黄キャッピングを施したものと比較し、圧縮強度の平均値は低く、また変動が高い傾向がある。これらキャッピングがポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に及ぼす影響については、詳細なデータが得られていないため、今後の課題となる。

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教、愛知工業大学の永田昇技術員および平成17、18年度小池狭千朗研究室卒業生の諸君に深謝致します。

参考文献

- 1) 例えば、玉井元治、杉野守、芦田馨：連続空隙を有するポーラスコンクリートを用いた緑化に関する研究、コンクリート構造物の緑化に関するシンポジウム論文報告集、pp. 37-42, 1993. 9
- 2) 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)、日本建築学会論文報告集、No. 286, pp. 1-12, 1979. 12
- 3) 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
- 4) 山本貴正、小池狭千朗、牧野智英、畑中重光：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、コンクリート工学年次論文集、Vol. 29, pp. 301-306, 2007. 7
- 5) 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
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説、2003
- 7) 若林信太郎、谷川恭雄、中込昭、佐原晴也：小型モルタル供試体の圧縮強度に及ぼす供試体寸法および端面仕上げ方法の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 20, No. 2, pp. 847-852, 1998
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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