論文　ポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に関する基礎的研究

山本　貴正[*1]・畑中　重光[*2]・小池狹千朗[*3]・三島直生[*4]

要旨：これまでに，ポーラスコンクリートの品質管理上の問題となる強度および空隙率のバラツキに関してはほとんど明らかにされていない。そこで本研究は，ポーラスコンクリートの圧縮特性の変動に関する基礎的な資料を得ることを目的として，圧縮強度および空隙率の変動について実験的に検討を行なった。その結果，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こと，空隙率が低いほど，およびフロー値が高いほど，空隙率の変動係数が大きくなること，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となることが明らかとなった。

キーワード：空隙率，フロー値，確率分布，平均値，変動係数

１．はじめに

近年，路盤材や植生基盤など，環境保全や自然環境との調和を担う構造材料としてポーラスコンクリートが注目されている。

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，その連続空隙によって透水性および吸音性の機能を有し，またそれにより生物が生息することも可能である。これまでに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研究が行なわれ，これらの機能を充分に活かすための各用途に適した空隙率および強度に関する報告がなされている[1)]。

ポーラスコンクリートの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おり，この相互関係に及ぼす諸要因の影響を明らかにすることを目的とした研究が行なわれている。しかし，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おり，従来から普通コンクリートのバラツキに関する研究が多く行なわれている[2)]が，ポーラスコンクリートの強度と空隙率のバラツキに関する研究は，筆者らが知る限りではほとんど行なわれておらず，これらの確率分布形状や変動については明らかにされていない。

そこで，本研究では，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関する基礎的な資料を得ることを目的として，空隙率20～30%および結合材フロー値170～270mm程度のポーラスコンクリート試験体を作製し，それらの圧縮強度試験および空隙率試験の結果をもとに圧縮強度および空隙率の変動について検討を行なった。

２．既往の研究

ポーラスコンクリートの基本的力学性状を把握するために，その圧縮特性に関する実験的研究が数多く行なわれている。それらの研究では，主としてポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係について検討が行われており，例えば，文献[3)]ではポーラスコンクリート河川護岸の要求性能に応じた圧縮強度および空隙率の適用範囲を示している。

既往の研究では，主に結合材強度，結合材フロー値（以下，フロー値），粗骨材粒径および締固め方法などが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影響について検討されてい

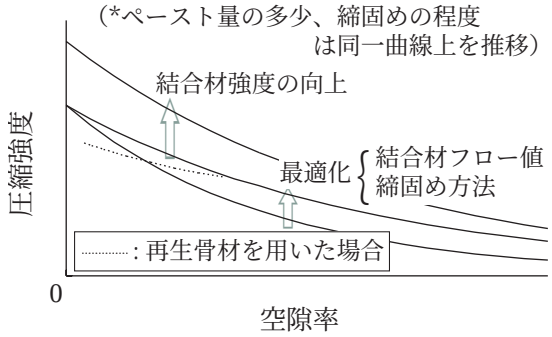


図-１　圧縮強度と空隙率の関係（概念図）[4)-7)]

*1 三重大学　創造開発研究センター　研究員　博士（工学）（正会員）
*2 三重大学　工学部建築学科教授　工学博士　（正会員）
*3 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）
*4 三重大学　工学部建築学科助手　博士（工学）（正会員）

表 - 1　既往の研究で得られている(1)式の定数

文献	*A* [MPa]	使用骨材	設計空隙率 [%]	設計フロー値 [mm]	振動エネルギー [N·m/m^2]	練り混ぜ	*B*
4)	*135	単粒度砕石６号	25	150〜230	0〜90	揺動撹拌型	0.084
6)	*129	単粒度砕石５号	15〜35	150〜230	90	揺動撹拌型	0.07
		単粒度砕石６号					0.08
		単粒度砕石７号					0.10
7)	*135	単粒度砕石６号	15〜35	190	90	揺動撹拌型	0.086
	*110						0.084
	* 70						0.076
	* 29						0.075
8)	** 61	単粒度砕石５,６,７号	0〜25	200	-	強制二軸	0.06

*結合材の強度　**[参考値](1)式から算出した近似値

る。それらの研究成果をもとに，ポーラスコンクリートの強度性能に及ぼす諸要因の影響についてまとめると，**図 - 1** に示すような概念図が得られる[4)-7)]。図に示すように，圧縮強度は，空隙率が低いほど，結合材強度が高いほど，および結合材のフロー値と締固め方法が最適化されるほど高くなる傾向がある。なお，粗骨材寸法の影響については，それぞれの研究で異なる見解が得られており，今後検討すべき課題の一つである。

同図に示す圧縮強度ー空隙率関係曲線は，一般的な脆性多孔質材料に用いられる(１)式の様な指数関数の形式で近似することができるとされている[4)]。

$$F_{poc} = A\,e^{-B \cdot P_{poc}} \qquad (1)$$

ここに，F_{poc}：ポーラスコンクリートの圧縮強度
A　：空隙率０％の圧縮強度
P_{poc}：ポーラスコンクリートの全空隙率
B　：実験定数

なお，空隙率０％の圧縮強度 A は，粗骨材の破壊の影響がないと仮定して，結合材の強度を使用する。[4),7)]。

(１)式の実験定数 B に関しては**表 - 1** に示す値が得られている。ただし，振動締固め時間(以下，締固め時間)が長すぎると，著しい結合材の垂れが生じて，ポーラスコンクリートの上層の結合材量が著しく低下し，圧縮強度が大きく低下する[4),8)-10)]ので，このような場合は上述したような圧縮強度ー空隙率関係が得られない。

以上のように，ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす諸要因の影響についてはある程度明らかにされつつある。しかし，ポーラスコンクリートの品質管理上の問題となる強度のバラツキに関しては詳細な実験データが得られていないため，現状では，これまでの研究成果が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では，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ので，蓄積されてきた普通コンクリートの圧縮強度のバラツキの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。そこで，本研究では既報[4)-7)]に引き続き，ポーラスコンクリートの調合設計法の確立を目指した取り組みの一つとして，ポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に及ぼす空隙率および結合材フロー値の影響について検討を行なう。

３．実験概要

３．１　試験体

本実験の概要を**表- 2** に試験体一覧として示す。実験要因として，設計空隙率および結合材の設計フロー値を取り上げた。設計空隙率は20，25および30%の３種類，設計フロー値は170，220および270mmの３種類とした。結合材の水セメント比は25%とし，骨材にはJIS6号砕石を使用した。試験体の標本数は，試験体名称**A25-220**が40体，それ以外は各20体または22体である。

３．２　使用材料

表- 3 (a),(b)に，それぞれ調合表および使用材料を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し，骨材にはJIS ６号砕石から微粒分を水で取り除き，それを表乾状態としたものを用いた。ポーラスコンクリートの混練には，容量100*l*の二軸強制練りミキサを使用した。

３．３　試験方法

ポーラスコンクリートの練り混ぜ方法は，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。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2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秒加振して，翌日脱型の後に水中養生を行なった。

空隙率は文献11)に従い，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の値である。圧縮強度試験は2000kN級耐圧試験機を用いて行ない，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硫黄キャッピングを施した。また，結合材の圧縮強度を測定するために，ペースト練り混ぜ後に直径50mm，高さ100mmの円柱形型枠に結合材を採取し，それをポーラスコンクリートと同じ材齢で圧縮試験を行なった。

4．実験結果および考察

表-4に本研究の実験結果一覧を示す。なお、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棄却した。棄却した試験体は計9体で、そのうち締固めの不良により空隙率と圧縮強度がそれぞれともに他と比較して異なる試験体は2体，計測不良に

表-2　試験体一覧

試験体名称	W/C [%]	使用骨材	設計空隙率 [%]	設計フロー値 [mm]	締固め時間 [s]	標本数
A25-220	25	JIS 6号砕石	25	220	10	40
B20-170			20	170		22
B25-170			25			
B30-170			30			
B15-220			15	220		
B20-220			20			
B25-220			25			20
B30-220			30			22
B20-270			20	270		20
B25-270			25			22
B30-270			30			

W/C：結合材の水セメント比

試験体名称：**A 25 - 220**
- 220 → 設計フロー値 [mm]
- 25 → 設計空隙率 [%]
- A → 標本数 **A**：40 **B**：20, 22

表-3　調合表および使用材料一覧

(a)　調合表

試験体名称	W*/C [%]	設計空隙率 [%]	設計フロー値 [mm]	水 [kg/m³]	セメント [kg/m³]	骨材 [kg/m³]	SP/C [%]
A25-220	25	25	220	65	283	1540	2.0
B20-170		20	170	91	371		0.5
B25-170		25		69	283		
B30-170		30		48	195		
B15-220		15	220	106	461		2.0
B20-220		20		86	372		
B25-220		25		65	283		
B30-220		30		45	195		
B20-270		20	270	78	372		4.0
B25-270		25		60	283		
B30-270		30		41	195		

(b)　使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.16kg/m³
骨材	JIS6号砕石 粒径：5～13mm 表乾密度：2.61kg/m³ 実積率：59.0%
混和剤	高性能AE減水剤 密度：1.09kg/m³

W*：水+高性能AE減水剤(質量)
C：セメント(質量)
SP：高性能AE減水剤(質量)

表-4　実験結果一覧

試験体名称	W/C [%]	設計空隙率 [%]	n	実測空隙率 $\bar{x}$ [%]	実測空隙率 s [%]	実測空隙率 $s/\bar{x}$	フロー値 設計 [mm]	フロー値 実測 [mm]	実測圧縮強度 $\bar{x}$ [MPa]	実測圧縮強度 s [MPa]	実測圧縮強度 $s/\bar{x}$	材齢 [day]	結合材 密度 [kg/m³]	結合材 圧縮強度 [MPa]
A25-220	25	25	40 (1)	28.4	1.12	0.039	220	208	18.4	1.50	0.079	46	-	-
B20-170		20	22 (1)	20.0	1.69	0.084	170	183	29.5	1.84	0.062	28	2.23	75.1
B25-170		25	22 (0)	28.3	0.53	0.019		158	16.9	1.44	0.085	28		
B30-170		30	22 (2)	32.9	0.36	0.011		178	12.7	0.78	0.061	28		
B15-220		15	22 (0)	15.2	1.08	0.071	220	208	33.5	3.27	0.098	28	2.14	70.5
B20-220		20	22 (0)	17.5	1.44	0.082		210	28.1	2.56	0.092	28		
B25-220		25	20 (2)	30.3	0.89	0.030		215	14.9	0.73	0.049	28		
B30-220		30	22 (1)	33.6	0.53	0.016		238	13.3	0.75	0.057	28		
B20-270		20	20 (1)	19.9	2.99	0.150	270	257	21.3	2.89	0.136	28	2.11	63.0
B25-270		25	22 (2)	26.2	1.05	0.040		257	21.2	1.22	0.057	28		
B30-270		30	22 (0)	31.6	0.70	0.022		265	14.3	1.01	0.071	28		

$\bar{x}$：平均値　s：標準偏差

n：標本数（( ) 内は，締固め不良，計測不良などにより解析の対象外とした試験体のデータ数）

$\bar{x} = \Sigma x_i / n$　$s = (\Sigma |x_i - \bar{x}| / n)^{0.5}$ ただし $x_1, x_2, x_3, \cdots x_n$ はデータ

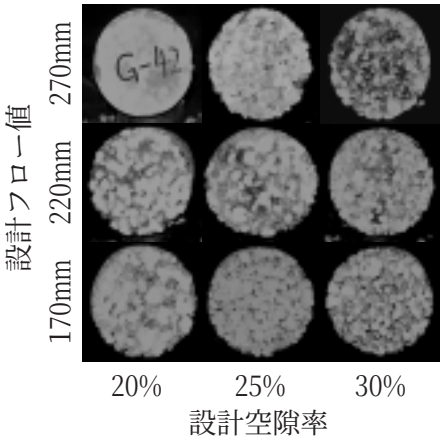
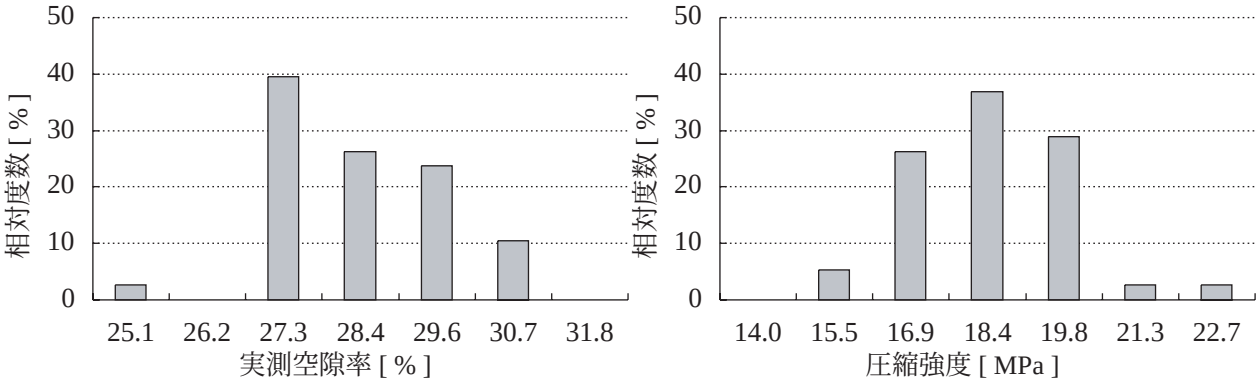


写真 -1　試験体底面の様子

表 -5　確率紙上における置換関数と実験値の関係の単相関係数

試験体名称	空隙率			圧縮強度		
	正規	対数正規	Weibull	正規	対数正規	Weibull
A25-220	0.979	0.978	0.955	0.994	0.995	0.982
B20-170	0.920	0.942	0.897	0.977	0.975	0.967
B25-170	0.988	0.987	0.983	0.934	0.907	0.945
B30-170	0.966	0.967	0.957	0.962	0.970	0.930
B15-220	0.989	0.988	0.974	0.983	0.978	0.981
B20-220	0.979	0.970	0.983	0.979	0.976	0.979
B25-220	0.949	0.946	0.977	0.975	0.979	0.948
B30-220	0.969	0.967	0.984	0.953	0.954	0.916
B20-270	0.988	0.986	0.976	0.956	0.971	0.938
B25-270	0.973	0.988	0.982	0.991	0.991	0.978
B30-270	0.971	0.973	0.940	0.986	0.985	0.976
平均値	0.971	0.971	0.965	0.970	0.969	0.956
変動係数	0.022	0.016	0.027	0.017	0.023	0.023



(a)　空隙率　　**(b)　圧縮強度**

図 -2　度数分布の例(A25-220)

より空隙率のみが他と比較して異なる試験体は６体，および偏心荷重が加わったことにより強度が他と比較して低い試験体は１体である。

４．１　ペーストの垂れ

写真 -1 は縦方向を結合材フロー値（以下，フロー値），横方向を空隙率の順に並べた試験体底面の状況である。湯浅らの研究結果[3)]と同様に，空隙率が低いほど，およびフロー値が高いほどペーストの垂れが生じやすくなる傾向があり，特に空隙率20%かつフロー値270mm(**B20-270**)については著しいペーストの垂れを観察した。

４．２　確率分布

表 - 5 に空隙率および圧縮強度の正規分布，対数正規分布および Weibull 分布のそれぞれの確率紙上における置換関数と実験値の単相関係数を示す。表より，空隙率および圧縮強度の確率分布はそれぞれ各分布と強い相関関係にあり，特に正規分布および対数正規分布と強い相関性があることがわかる。なお，**図 -2** には **A25-220** の空隙率および圧縮強度の度数分布が示してある。

以上より，以降の考察では空隙率および圧縮強度の確率分布は簡単に正規分布に従うとして，次式に示す変動係数 v について議論する。

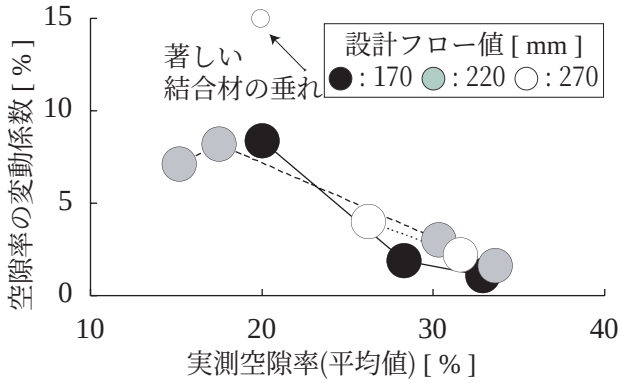
$$v = s / \bar{x}$$
$$s = \left(\frac{\Sigma |x_i - \bar{x}|}{n}\right)^{0.5},\ \bar{x} = \Sigma x_i / n \qquad (2)$$

ここに，$x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$ はデータ

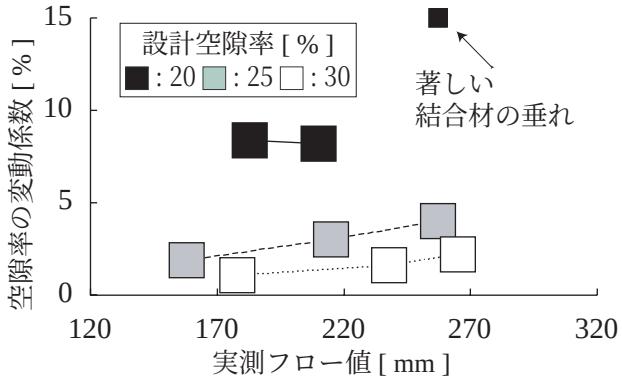
４．３　空隙率および圧縮強度の変動係数

図 -3 および **図 -4** に，**A25-220** を除く試験体の空隙率および圧縮強度の変動係数に及ぼす諸要因の影響をそれぞれ示す。なお，**写真 -1** に示したペーストの垂れが著しい **B20-270** は，他と比較して高い変動係数を示したので，除外して考察する。

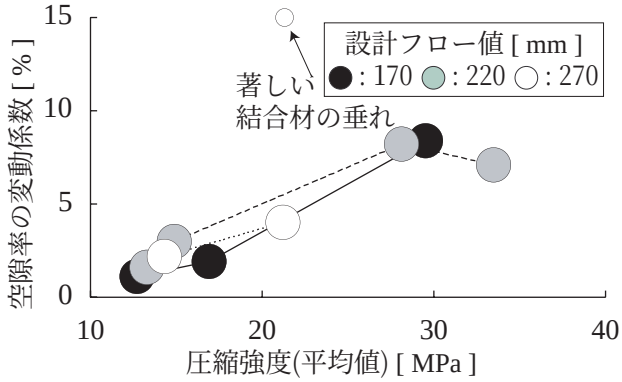
図 - 3 より，空隙率の変動係数は,空隙率が低いほど，フロー値が高いほど，および圧縮強度が高いほど大きくなることがわかる。なお，**写真 -1** に示したように，空隙率が低いほどおよびフロー値



(a)　空隙率の影響

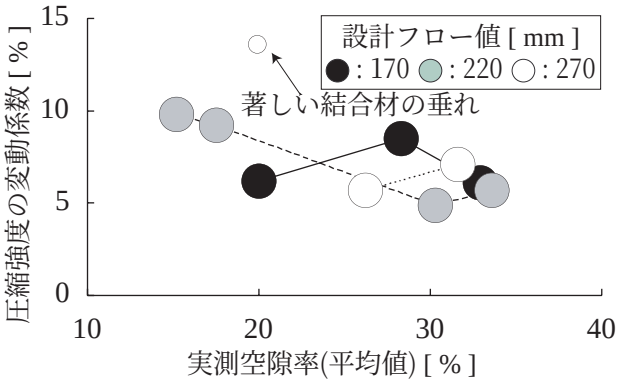


(b)　フロー値の影響

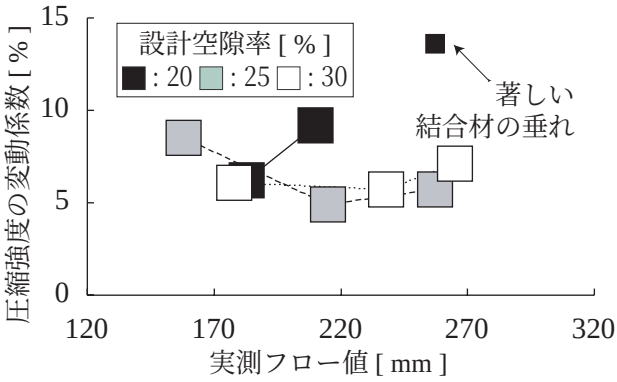


(c)　圧縮強度の影響

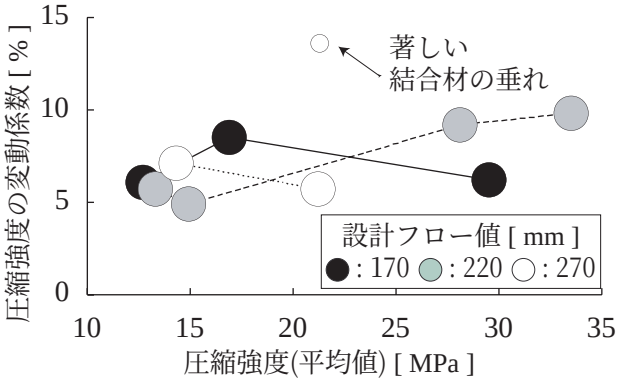
図 - 3　空隙率の変動係数



(a)　空隙率の影響



(b)　フロー値の影響



(c)　圧縮強度の影響

図 - 4　圧縮強度の変動係数

が高いほどペーストの垂れが生じやすくなることから，空隙率の変動係数はペーストの垂れの度合いに大きく影響を受けると考えられる。

図 - 4 より，圧縮強度の変動係数は，空隙率の場合と同様の傾向が若干見られるものの，各要因の変化に対してほぼ一定の値を示すことがわかる。

４．４　圧縮強度と空隙率の関係

図 - 5 に **A20-220** および **B20-270** を除く試験体の圧縮強度と空隙率の関係を示す。図の縦軸は，圧縮強度を結合材の圧縮強度 A で除したものを表

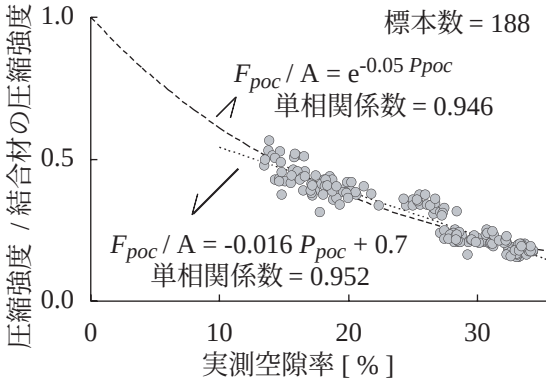


図 - 5　圧縮強度と空隙率の関係

している。図中の破線および点線はそれぞれ,(1)式に示す指数関数をAで除して近似した曲線および線形近似した直線である。なお，空隙率０％の圧縮強度Aは，粗骨材の破壊の影響がないと仮定して結合材の圧縮強度を用いている。図より，近似曲線および近似直線と実測値の間には高い相関性があることがわかる。以下では，ポーラスコンクリートの調合設計時に用いる圧縮強度推定式を検討する。その際，圧縮強度推定式には，文献4)を参考に，一般的な脆性多孔質材料の強度式としても用いられている指数関数の強度実験式を使用する。

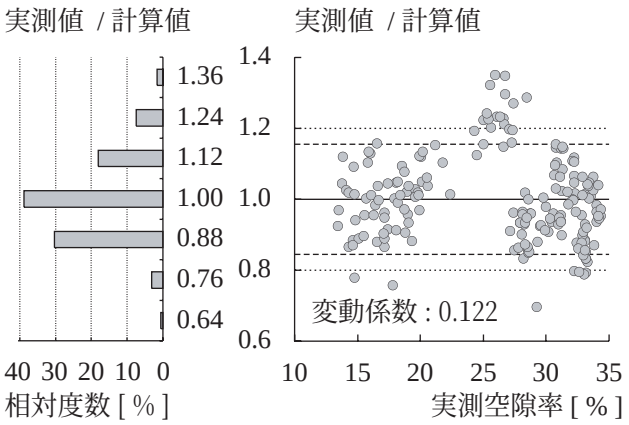
図-６に，**図-５**中に示す実験式から算出した計算値と実測値の関係を示す。図の縦軸は，実測値を計算値で除したものを，横軸は図(a)は相対度数を，図(b)は実測空隙率を表している。図(b)中の破線および点線はそれぞれ，不良率10%および不良率５％の範囲の上・下限値である。図より確率分布は正規分布と強い相関性が見られ(確率紙上における置換関数と実測値の関係の単相関係数は0.989)、その変動係数は0.122である。

５．まとめ

ポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に及ぼす空隙率および結合材フロー値の影響について実験的な検討を行い，次の知見を得た。

1) 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。
2) 空隙率が低いほど，フロー値が高いほど，および圧縮強度が高いほど空隙率の変動係数が大きくなる。
3) 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となる。

謝辞　本研究を進めるに当り湯浅幸久氏をはじめとする三重県科学技術振興センター工業研究部の皆様に協力頂きました。また，本実験について愛知工業大学の永田昇技術員，および平成16年度小池狹千朗研究室卒研生の諸君に御助力を頂きました。ここに記して深謝致します。



(a)　度数分布　　**(b)　実測空隙率の影響**

図 - ６　強度式から算出した計算値に対する実測値の比率のバラツキ

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，上村克郎 , 青木義次: コンクリートの圧縮強度に関する統計的分析 , セメント技術年報 , pp. 225-228, 1978
3) 先端建設技術センター: ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き , 2002.6
4) 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
5) 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
6) 村尾健: ポーラスコンクリートの強度 - 空隙率関係に関する実験的研究 , 三重大学修士論文 , 2004. 3
7) 湯浅幸久 , 畑中重光 , 三島直生 , 村尾健: ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす結合材強度の影響 , コンクリート工学年次論文集 , Vol. 26, No. 1, pp. 1425-1428, 2004
8) 大谷俊浩 , 村上聖 , 佐藤嘉昭 , 三井宜之 , 平居他考之: ポーラスコンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響因子に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 , No. 585, pp. 31-37, 2004. 11
9) 大谷俊浩 , 村上聖 , 佐藤嘉昭 , 三井宜之: 結合材の分布状態がポーラスコンクリートの強度特性に及ぼす影響 , コンクリート工学年次論文集 , Vol. 23, No. 1, pp. 139-144, 2001
10) 平岩陸 , 田中清人 , 谷川恭雄 , 森博嗣: ポーラスコンクリートの調合設計法に関する基礎的研究 , コンクリート工学年次論文集 , Vol. 23, No. 1, pp. 121-126, 2001
11) 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