

6号砕石ポーラスコンクリートの空隙率と吸引力の関係についての基礎研究

Fundamental Study on Relationship between Void Ratio and Suction Force of No.6 Crushed Aggregate Porous Concrete

締固め 円柱試験体 角柱試験体
平均値 標準偏差

会員外 ○西村 十和* Towa NISHIMURA
同 石井 雄大* Yudai ISHII
正会員 山本 貴正** Takamasa YAMAMOTO
同 平岩 陸*** Takashi HIRAIWA

1. はじめに

既報¹⁾に引き続きポーラスコンクリート(以下, POC)の空隙率を, 簡易かつ高精度に計測することを目的として, 6号砕石を用いたPOCの円柱試験体(公称径100mm, 公称高さ200mm)および角柱試験体(公称寸法100×100×400mm)の表面の吸引による圧力(吸引力)とJCI-SP02-1の容積法に準拠して計測した空隙率(以下, 容積法空隙率)の関係について実験的に検討した。また, 角柱試験体の容積法空隙率の標準偏差についても検討している。なお以下, 本報では断りがない限り, 全空隙率を空隙率と表現する。

2. 実験概要

2.1 実験要因・水準

本報の実験要因は, 図-1および表-1に示すように, 試験体形状(円柱, 角柱), 吸引力計測箇所, 調合空隙率および振動締固めの有無である。

2.1 使用材料・調合

結合材の水は水道水, セメントは普通ポルトランド(密度3.15g/cm³)を使用した。骨材は瀬戸産の6号砕石(表乾密度2.71g/cm³, 吸水率0.52%, JIS容器実積率57.7%)とした。

結合材の水セメント比は, 角柱試験体は35%, 円柱試験体は40%である。混和剤は使用していない。骨材の容積率の調合値は, JIS A 1104に準拠して測定した実積率としている。

2.2 試験体作製

各調合で混練したPOCの結合材を同一にするため, POCを, 既報²⁾と同一の工程で, 結合材であるセメントペーストのみ, 次に調合空隙率0%, 20%, 25%, 30%の順でPOCを混練し型枠へ打設した。角柱試験体の工程も同様

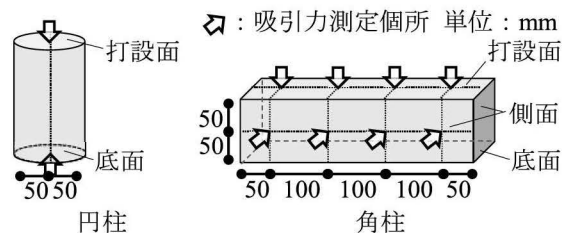


図-1 試験体

表-1 実験要因

試験体	円柱	角柱
実験要因 [水準]	調合空隙率 0, 20, 25, 30%	調合空隙率 振動締固め 20, 25, 30% 有無
同一条件 試験体数	5 上記30%は15体	1
空隙率試験 試行回数/体	1	3
吸引面	打設面, 底面	打設面, 側面, 両側面
吸引回数/箇所	3	

であるが, 結合材のみの打設はしていない。作製した同一調合のサンプル数については, 円柱試験体は5体である。ただし, 各POCともに, 最終混練の量が, 調合値を超えていたため, 調合空隙率30%の群は15体である。角柱試験体は2体である。

混練は, 容量100lの二軸強制練ミキサを使用している。なお, POCを, 円柱型枠では, 棒突き回数2層30回突きで詰め込み, 次に, 型枠の上面に揃うようにならした。角柱試験体は, 打設面を100×400mmの面とし, 型枠に2層50回突きで詰め込み, そして, 各型枠の上面に揃うようにならした。POCの円柱試験体および角柱試験体の同一

* 愛知工業大学工学部建築学科 学部生

** 愛知工業大学工学部建築学科 准教授 博士(工学)

*** 名城大理工学部建築学科 准教授 博士(工学)

Undergraduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Meijo Univ., Dr. Eng.

調合のサンプル数2のうち1体を、それぞれ打設後、手動による時間10秒でバイブレーションタンパ(起振力1.23kN)による振動締固めを施した。型枠に打設した結合材とPOCは、材齢1日に脱型し水中養生をした。

2.3 試験方法

空隙率試験は、JCI-SP02-1の容積法に準拠した。なお、角柱試験体は、各1週間後に3回実施している。円柱試験体は材齢1週間後に1回実施した。

吸引力は、市販の家庭用掃除機(吸引仕事率25W)の吸引箇所市販のダイヤル式の圧力計(測定圧力±5kPa)を設置し測定した。測定箇所は、前掲図-1に示すように、角柱試験体については、長手方向の各表面中央において、左右から50mm、150mmの4箇所、円柱試験体は、上面の打設面、その反対側の下面である側面の2箇所である。なお、1箇所につき3回計測している。家庭用掃除機のホースの先端に、径1.5mmの穴が千鳥配置されている穴あきアルミシートを固定した。なお、ホース先端の公称内径は35mm、吸引箇所の孔の数は126である。試験体の吸引力は、最小値を使用している。ホースの先を封して計測した最小吸引力は-3.96 kPaである。この値を空隙率0%の最小吸引力とした。

3. 実験結果・考察

3.1 円柱試験体

(a) 吸引力

表-2に、各円柱試験体の打設面および底面それぞれ

表-2 円柱試験体の打設面・底面の最小吸引力

空隙率 設計 (%)	最小吸引力		p値	空隙率 設計 (%)	最小吸引力		p値		
	実測 (-kPa)	標本平均 (-kPa)			実測 (-kPa)	標本平均 (-kPa)			
0	4.14	2.43	3.63	0.000	23.7	2.08	2.53	0.003	
	1.51	1.95	3.78	0.000	20.2	2.08	2.55	0.001	
	4.35	2.31	3.91	0.000	23.7	2.17	2.26	0.055	
	6.50	2.04	3.88	0.000	22.7	1.78	2.86	0.000	
	3.56	1.88	3.92	0.000	26.3	1.99	2.13	0.189	
20	13.8	1.91	3.62	0.000	22.6	1.96	2.42	0.002	
	15.2	2.01	3.32	0.000	26.2	1.90	2.28	0.000	
	13.4	1.91	3.34	0.000	30	31.2	1.99	2.46	0.003
	13.7	2.02	3.92	0.000	24.4	1.95	3.20	0.000	
	11.8	1.90	3.73	0.000	26.1	2.05	2.38	0.000	
25	17.9	2.09	2.88	0.001	24.6	1.93	2.52	0.000	
	17.9	2.03	3.75	0.000	24.3	2.04	2.31	0.000	
	16.8	1.98	3.73	0.000	32.5	1.80	2.49	0.000	
	20.7	1.83	2.62	0.000	19.4	1.82	3.13	0.000	
	18.3	2.10	2.73	0.003	25.1	2.06	2.15	0.190	

p値:吸引力(打設面と底面)の平均値の差(α=0.05)

3回計測した最小吸引力の標本平均と標本変動係数を示す。表中には、各試験体群の打設面および底面で計測した最小吸引力の平均値の差について、F検定(分散分析)で得られたp値が示してある。

同表に示すように、平均値の差は30体中27体にて有意差(α=0.05)がある。また、各打設面ともに最小吸引力の絶対値は、底面のそれと比較して小さいことが認められる。

(b) 空隙率と吸引力の関係

図-2に、容積法空隙率と打設面および底面の最小吸引力の関係を併せて示す。図の横軸の最小吸引力は、標本平均値である。三角印は、結合材の垂れが著しく断面の均質性が確保されていない³⁾と考えられる試験体である。図中には、三角印を除く各試験体の底面の容積法空隙率と最小吸引力の相関係数[r]を示した。なお、母相関係数の区間推定値(α=0.05)は、-0.90~-0.57である。この線形近似式は、最小二乗法により図中の実線で示す式(1)となる。

$$P = -7.44S + 42.6 \quad (1)$$

ここに P:容積法空隙率(%) S:最小吸引力(-kPa)

同図より、三角印を除く各試験体の各底面の容積法空隙率と最小吸引力は、負の相関が認められる。一方、打

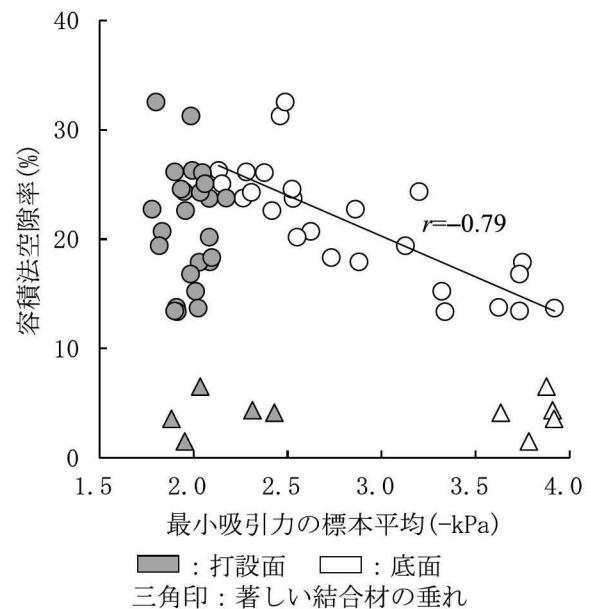


図-2 容積法空隙率と最小吸引力の関係

表-3 式(1)による近似値に対する実測値

近似式	サンプル数	実測値/近似値(実/計比)			
		標本平均	標本標準偏差	最大値	最小値
式(1)	25	1.001	0.155	1.35	0.75

設面は無相関と考えられる。これは、締固めかつ試験体形状が起因していると考えられるが、詳細については今後の検討課題である。表-3に、式(1)による近似値に対する実測値(以下、実/計比)の基本統計量が示してある。

3.2 角柱試験体

(a) 容積法空隙率

表-4に、各角柱試験体の3回計測した容積法空隙率の標準偏差を示す。参考のため、平均値についても記載してある。なお、表中には、平均値および標準偏差の信頼区間(有意水準 α 0.05)、および各調査空隙率群の締固め有無による標準偏差の差について、等分散性の検定で得られたp値が示してある。

同表に示すように、調査空隙率25%と20%群は、締固め有無による標準偏差の差は、有意差(α =0.05)なしである。なお、表では示していないが、締固め有の群を対象として、各調査空隙率の標準偏差の差についてLeveneの等分散検定をすると、有意差(α =0.05)はなかった。これらより、容積法による空隙率の標準偏差は、調査空隙率の影響を受けにくいと考えられる。

(b) 吸引力

表-5に、各角柱試験体の打設面およびその反対側(以下、底面)それぞれ4箇所て3回計測した最小吸引力の標本平均を示す。参考のため、標本標準偏差についても掲載してある。なお、表中には、各調査空隙率の締固め有無群の各面における4箇所の最小吸引力の平均値の差について、F検定(分散分析)で得られたp値が示してある。

同表に示すように、最小吸引力の平均値の差は、6体計12面中8面において有意差(α =0.05)がある。また、各打設面ともに最小吸引力の絶対値は、底面のそれと比較して小さいことが認められる。これは、前述3.1(a)の円柱試験体と同様の傾向である。

表-4 角柱試験体の容積法空隙率

調査空隙率 (%)	締固め	標本平均 (%)	標本標準偏差 (%)	信頼区間				p値
				平均値		標準偏差		
				上限 (%)	下限 (%)	上限 (%)	下限 (%)	
30	無	29.3	0.141	29.7	29.0	0.884	0.073	0.026
	有	24.9	0.864	27.1	22.8	5.428	0.450	
25	無	28.4	0.299	29.1	27.6	1.880	0.156	0.189
	有	25.7	0.260	26.3	25.0	1.634	0.135	
20	無	27.3	0.181	27.8	26.9	1.135	0.094	0.430
	有	22.5	0.374	23.4	21.6	2.349	0.195	

締固め:振動 空隙率の測定回数:3

p値:各調査空隙率群の締固め有無による標準偏差の差

表-6に、角柱試験体側面の最小吸引力を示す。なお、各両側面において4箇所て3回計測した最小吸引力の標本平均が示してある。同表と表-5を比較すると、各側面ともに最小吸引力の絶対値は、締固め有無に関係なく、打設面と比較して大きいことがわかる。

表-5 角柱試験体の打設面・底面の最小吸引力

調査空隙率 (%)	締固め	吸引箇所	最小吸引力				p値
			上段:標本平均(-kPa)				
			下段:標本変動係数(%)				
30	無	打設面	1.650	1.607	1.657	1.607	0.125
			2.19	0.72	1.94	1.90	-
	底面	2.100	2.063	2.150	2.237	0.055	
		0.95	2.67	5.28	1.44	-	
	有	打設面	1.937	1.847	1.867	1.890	0.196
			3.44	0.83	3.27	1.40	-
底面	2.233	2.393	2.427	2.450	0.000		
	2.02	0.48	1.04	0.00	-		
25	無	打設面	1.317	1.383	1.257	1.283	0.072
			5.49	0.83	4.08	3.84	-
	底面	1.583	1.527	1.473	1.613	0.003	
		0.96	3.03	2.18	1.56	-	
	有	打設面	1.510	1.527	1.463	1.570	0.016
			2.39	1.65	2.85	0.00	-
底面	2.787	2.310	2.120	1.907	0.000		
	1.98	1.56	1.25	0.61	-		
20	無	打設面	1.590	1.447	1.473	1.477	0.008
			1.96	1.17	0.63	0.82	-
	底面	1.840	2.143	1.837	1.863	0.000	
		2.88	1.44	3.35	2.07	-	
	有	打設面	1.667	1.750	1.620	1.543	0.000
			1.73	2.86	1.23	0.75	-
底面	2.580	2.227	2.523	1.983	0.000		
	1.69	1.13	1.27	2.38	-		

p値:各面群の吸引箇所の平均値の差

表-6 角柱試験体の側面の最小吸引力

調査空隙率 (%)	締固め	最小吸引力の標本平均(-kN)			
		上下段:各片面4箇所計測			
30	無	2.220	2.320	2.133	2.067
		2.257	2.450	2.307	2.230
	有	2.790	2.390	2.193	2.153
		2.203	2.320	2.530	2.417
25	無	1.700	1.650	1.623	1.757
		1.470	1.633	1.463	1.383
	有	2.233	1.867	1.843	1.707
		1.843	1.747	1.693	1.777
20	無	1.880	2.030	2.030	1.867
		1.957	1.943	2.003	1.753
	有	2.017	2.423	2.273	1.943
		2.097	2.273	2.320	2.017

表-7 に、角柱試験体の各表面で計測した最小吸引力それぞれの中央値の平均値を示す。なお、表中には、各調合空隙率の締固め有無群の底面と側面の最小吸引力について、中央値の平均値の差を t 検定して得られた p 値が示してある。同表に示すように、最小吸引力の平均値の差は、6 体中 5 体において有意差 ($\alpha=0.05$) が無い。底面と側面については、ほぼ同等の測定値とみなすことができる。

(c) 空隙率と吸引力の関係

表-8 に、角柱試験体の各表面における式(1)による実/計比を示す。表中には、平均値および標準偏差を前掲表-3 の標本平均および標本標準偏差として求めた実/計比の z 値(標準化得点)が示してある。

同表に示すように、全表面ともに、実/計比は z 値が ± 2 範囲内、換言すると、 $\pm 2\sigma$ (σ : 標準偏差) 範囲内であることがわかる。このことから、円形試験体と異なり角柱試験体においては、打設面も含め各面において式(1)を適用することが可能であると推察される。これは、円柱試験体と比較して、角柱試験体は高さが小さいこと、また容積法空隙率の標準偏差(前述 3.2(a) 参照)が起因していることなどが理由として考えられるが、詳細については今後の検討課題である。

4. おわりに

既報¹⁾に引き続き 6 号砕石を用いた POC の円柱試験体および角柱試験体の表面の最小吸引力と JCI-SP02-1 の容積法空隙率の関係について実験的に検討した。本報で得られた知見を、次のように整理する。

- 1) 円柱および角柱試験体の打設面の最小吸引力の絶対値は、底面のそれと比較して小さい。
- 2) 著しい結合材の垂れが生じておらず、断面の均質性が確保されている円柱試験体の底面の容積法空隙率と最小吸引力は、負の相関が認められる。なお、これら関係について、最小二乗法より、線形近似式[式(1)]を得た。
- 3) 円柱試験体の打設面の容積法空隙率と最小吸引力は、無相関である。
- 4) 角柱試験体の側面は、締固め有無に関係なく、最小吸引力の絶対値が、打設面と比較して大きい。
- 5) 円形試験体と異なり角柱試験体においては、打設面も含め各面において式(1)を適用することが可能である。

謝辞

本稿の研究成果は、2019 年度愛知工業大学研究特別助

表-7 角柱試験体の各面の最小吸引力(中央値)

調合空隙率 (%)	締固め	最小吸引力(-kPa)			p値
		打設面	底面	側面	
30	無	1.628	2.135	2.230	0.179
	有	1.895	2.378	2.381	0.975
25	無	1.300	1.538	1.584	0.562
	有	1.513	2.275	1.831	0.018
20	無	1.490	1.920	1.941	0.785
	有	1.643	2.325	2.181	0.307

p値: 各締固め群の底面と側面の平均値の差

表-8 角柱試験体の式(1)による実/計比

空隙率設計 (%)	実測 (%)	締固め	実測値/近似値(実/計比) [z値]		
			打設面	底面	側面
30	29.3	無	1.16 [1.04]	1.01 [0.07]	0.99 [-0.09]
	24.9	有	0.92 [-0.54]	0.81 [-1.23]	0.81 [-1.23]
25	28.4	無	1.25 [1.58]	1.16 [1.00]	1.14 [0.90]
	25.7	有	1.06 [0.35]	0.86 [-0.94]	0.96 [-0.25]
20	27.3	無	1.13 [0.83]	1.00 [-0.02]	0.99 [-0.05]
	22.5	有	0.89 [-0.72]	0.74 [-1.68]	0.77 [-1.50]

成の支援による。また本実験を遂行するにあたり、愛知工業大学部生の石田エミさん、鈴木美里さん、石川達嗣君、諸戸陽斗君のご助力を得た。

参考文献

- 1) 平岩陸: 吸引法によるポーラスコンクリートの空隙率推定に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 1, pp. 1421-1426, 2019. 7
- 2) 山本貴正, 大畑卓也, 河野伊知朗: 6 号砕石を有するポーラスコンクリートの静弾性係数・圧縮強度と粗骨材の容積率の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 1, pp. 245-250, 2020. 7
- 3) 畑中重光(編著): 透水性コンクリート(POC)の基礎と実践, コンクリート新聞社, 初版, 2019. 8