

アンボンドキャッピングが6号砕石ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響 Influence of Unbonded Capping System on Compressive Strength for No.6 Crushed Aggregate Porous Concrete

空隙率 振動締固め 締固め
硫黄キャッピング 標準偏差

会員外 ○石田 エミ* Emi ISHIDA
同 鈴木 美里* Misato SUZUKI
正会員 山本 貴正** Takamasa YAMAMOTO

1. はじめに

1.1 本報の背景・目的

既報^{1,2)}に引き続き6号砕石を用いたポーラスコンクリート(以下、POC)のJCI-SPO2-1「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)」の容積法に準拠して計測した空隙率の標準偏差、調合空隙率と実測空隙率の関係(以下、調合一実測空隙率関係)に及ぼす振動締固めの影響、圧縮強度試験におけるアンボンドキャッピング(JIS A 1108 付属書 A)の適用性について主に実験的に検討している。また、既報データを用いて、調合一実測空隙率関係に及ぼす加圧締固めの影響についてまとめている。以下、本論では断りがない限り、全空隙率を空隙率と表現する。

1.2 関連する既往研究

(a) 圧縮強度の標準偏差・変動係数

POCの圧縮強度の標本標準偏差は、著しい垂れが生じていなければ、JASS 5に示されている普通コンクリートのその値よりも小さい³⁾。また、空隙率を考慮した圧縮強度の標本変動係数は、レディミクストコンクリートにおいて良好な管理がなされているかの目安となる上限値10%程度であり、普通コンクリートに比べ若干ばらつきが大きいと見なすことができる³⁾。

(b) 圧縮強度－空隙率関係

POCの圧縮強度(F)-全空隙率(P)関係は、一般的な脆性多孔質材料に用いられる次の指数関数式で近似でき、既報⁴⁾において次式が示されている。

$$\frac{F}{A} = \exp(-6.92P) \quad (1)$$

ここに A : 結合材の圧縮強度

式(1)の適用は、骨材破壊が生じていない、および結合材の著しい垂れが生じていないことが条件となる。

1.3 本報における造語の定義

本報中で用いる造語を次のように定義する。

- ・ 管理用型枠：内径100mm×内高200mmの円柱型枠
- ・ 締固め後の空隙率：JCI-SPO2-1の容積法に準拠して計測した空隙率
- ・ 締固め抵抗率：締固め前の空隙率に対する締固め後の空隙率
- ・ 詰込み抵抗率：調合空隙率に対する締固め前の空隙率
- ・ 締固め前の空隙率：JCI-SPO2-1の容積法において、締固め後の試験体の高さを管理用型枠の公称内高200mmとして算出した空隙率
- ・ 調合空隙率：式(3)(後述3.2節)を満たす空隙率の調合値

2. 空隙率に及ぼす締固めの影響(既報データ)

既報データ^{1,2)}を対象として、管理用型枠で作製したPOCの詰込み抵抗率と詰込み抵抗率の関係(以下、締固め－詰込み抵抗率関係)および空隙率の標準偏差についてそれぞれ触れる。既報^{1,2)}では、POCの作製において、混練後のフレッシュPOCを管理用型枠へ2層15回突きで詰め込み、そして各型枠の上面に揃うようになっている。その後、4.5kgランマー(落下高さ100mm)による加圧締固めを施している。落下回数は、加圧による沈下量の標本変動係数が収束する18回としている。

2.1 締固め抵抗率と詰込み抵抗率の関係

図-1(a)に、締固め－詰込み抵抗率関係に及ぼす結合材の設計フロー値の影響を示す。図中の実線は、最小二乗法による累乗近似式[式(2)]である。

$$\frac{P}{P_e} = 0.995 \left(\frac{P_e}{P_c} \right)^{-0.258} \quad (2)$$

ここに P , P_e , P_c : POCの締固め後、締固め前および調合空隙率

締固め抵抗率の近似値に対する実測値(以下、実測値/近似値)の標本平均は1.001、標本標準偏差は0.021である。

* 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)

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.

破線、一点破線および点線は、それぞれ近似値 $\pm 1s$, $2s$ および $3s$ (s : 標本標準偏差)を表している。また、図中には、自然対数の縦軸と横軸の相関係数が r 示してある。なお、母相関係数の区間推定値 (有意水準 $[\alpha] 0.05$) は $-0.87 \sim -0.68$ である。図-1(b)に、標準化 (z 変換) した実測値/近似値の相対誤差と空隙率の関係を示す。

同図(a)(b)より、自然対数の締固め抵抗率と詰込み抵抗率は、負の相関が認められる。このことから、締固め一詰込み抵抗率関係は、適切な締固めを施せば、空隙率および結合材フロー値が影響することなく同一曲線上を推移すると推測される。

2.2 締固め前と後の空隙率の標準偏差

締固め前と後における空隙率の標準偏差の差について、等分散性の F 検定をすると、表-1 に示すように、有意差 ($\alpha=0.05$) は認められない。これらより、空隙率の標準偏差に及ぼす加圧締固め有無の影響は小さいと推測される。

3. 実験概要

3.1 実験要因・水準

実験要因・水準として、調査空隙率を 20%, 15% および 10%, 圧縮試験における試験体端面の処理を硫黄およびアンボンドキャッピングとした。

3.2 使用材料・割合

水は水道水、セメントは普通ポルトランドセメント (密度 $=3.15\text{g/cm}^3$) を使用した。混和剤は使用していない。粗骨材は瀬戸産の 6 号砕石 (粒径 $=5\text{-}13\text{mm}$, 表乾密度 $=2.70\text{g/cm}^3$, 吸水率 $=0.52\%$, 実積率 $=57.7\%$) を用いた。調査設計は、次式を満たすようにした。

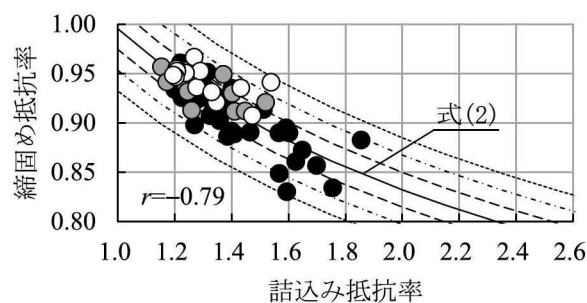
$$1.0 = P_c + V_G + V_B \quad (3)$$

ここに P_c : 調査空隙率 V_G , V_B : 骨材および結合材の容積率の調査値

骨材の容積率の調査値は JIS A 1104 に準拠して測定した実積率 ($=57.7\%$), 結合材の容積率の調査値は空気量ゼロとしている。結合材の水セメント比は 40% である。

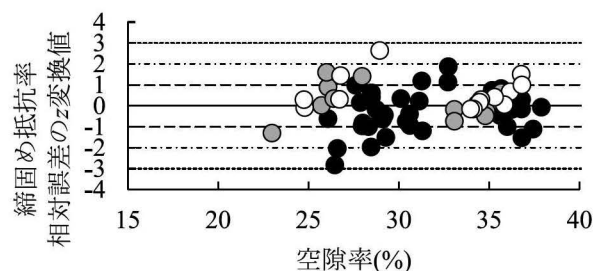
3.3 試験体作製

POC を容量 100l の二軸強制練ミキサで混練して作製した。まず結合材であるセメントペーストを先練し、ミキサ内の結合材を管理用型枠に打設した。続いて、結合材が残存しているミキサ内に粗骨材を投入し、POC を混練した。混練後のフレッシュ POC を、管理用型枠に 2 層 30 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⁴⁾。その後、手動による時間 10 秒でバイブレーティングタンパ (起振力 1.23kN) による振動締固めを施した。



破線、一点破線、点線: 式(3) $\pm 1, 2, 3s$
 s : 実測値/近似値の標本変動係数と近似値の積

(a) 締固め一詰込み抵抗率関係



(b) 標準化した締固め抵抗率の相対誤差

設計フロー値 ○: 110mm ●: 220mm ●: 270mm

図-1 締固め抵抗率 (既報データ)

表-1 空隙率の標本標準偏差 (既報データ)

文献番号	調査空隙率 (%)	設計フロー値 (mm)	n	空隙率の標本標準偏差		P値
				締固め前 (%)	締固め後 (%)	
1)	20	110	12	2.12	1.75	0.263
	25	110	12	1.65	1.42	0.318
	30	110	12	2.96	2.22	0.176
2)	20	220	5	1.16	1.36	0.380
	30	220	6	1.62	1.72	0.446
	20	270	5	1.74	1.75	0.495
	30	270	5	0.64	0.57	0.406
	30	270	5	0.21	0.24	0.156

n : サンプル数 P 値: 等分散性の検定統計量

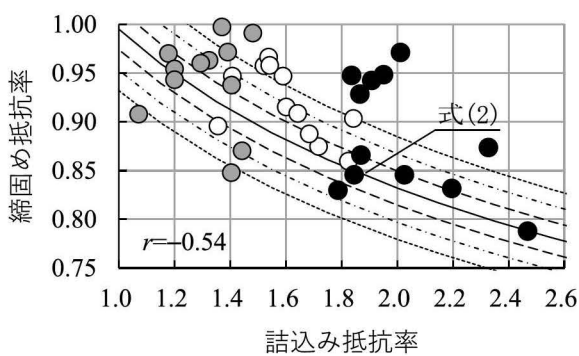
同一条件試験体群のサンプル数は、結合材の管理用試験体は 3, POC は 12 (内圧縮試験における端面処理としての硫黄およびアンボンドキャッピングそれぞれともに 6) である。型枠に打設した結合材と POC は、材齢 1 日に脱型し水中養生をした、各 1 週間経過後に空気量試験を 3 回実施している。

3.4 試験方法

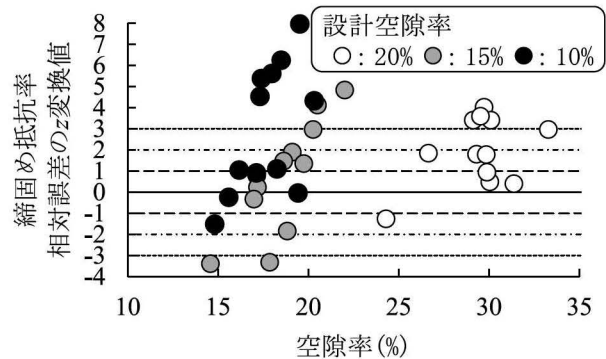
結合材であるセメントペーストのフロー値を JIS R 5201 に準拠して計測した。POC の空隙率試験は JCI-SPO2-1 の容積法に準拠した。圧縮強度は JIS A 1108 に準拠して計測した。なお、POC の圧縮強度試験では、試験

表-2 JCI-SP01-1の容積法で計測した空隙率の標準偏差の信頼区間(有意水準=0.05)

設計 計 (%)	標本 平均 (%)	標本 標準偏差 (%)	信頼区間		設計 計 (%)	標本 平均 (%)	標本 標準偏差 (%)	信頼区間		設計 計 (%)	標本 平均 (%)	標本 標準偏差 (%)	信頼区間	
			上限値 (%)	下限値 (%)				上限値 (%)	下限値 (%)				上限値 (%)	下限値 (%)
20	33.3	0.006	0.056	0.005	15	22.0	0.002	0.012	0.001	10	20.3	0.004	0.041	0.003
	31.4	0.010	0.109	0.009		20.5	0.002	0.013	0.001		19.5	0.002	0.024	0.002
	30.1	0.008	0.083	0.007		20.3	0.010	0.065	0.005		19.4	0.005	0.028	0.002
	30.1	0.009	0.065	0.005		19.8	0.002	0.013	0.001		18.5	0.009	0.017	0.001
	29.9	0.013	0.038	0.003		19.1	0.005	0.032	0.003		18.3	0.006	0.009	0.001
	29.9	0.004	0.052	0.004		18.8	0.005	0.032	0.003		18.0	0.004	0.025	0.002
	29.7	0.013	0.110	0.009		18.7	0.008	0.049	0.004		17.4	0.004	0.031	0.003
	29.5	0.017	0.063	0.005		17.9	0.011	0.067	0.006		17.3	0.005	0.020	0.002
	29.1	0.050	0.317	0.026		17.2	0.015	0.094	0.008		17.1	0.001	0.012	0.001
	29.3	0.010	0.086	0.007		17.1	0.004	0.027	0.002		16.2	0.003	0.030	0.003
	26.7	0.017	0.081	0.007		17.1	0.004	0.024	0.002		15.6	0.004	0.027	0.002
	24.3	0.014	0.025	0.002		14.6	0.003	0.016	0.001		14.8	0.003	0.057	0.005



(a) 締固め-詰込み抵抗率関係



(b) 標準化した締固め抵抗率の相対誤差

図-2 締固め抵抗率(本報データ)

表-3 空隙率の標本標準偏差(本報データ)

調合 空隙率 (%)	設計 フロー値 (mm)	n	空隙率の標本標準偏差		P値
			締固め前 (%)	締固め後 (%)	
20	220	12	2.96	2.22	0.176
15		12	1.88	1.98	0.436
10		12	2.15	1.65	0.197

体両端面に対し硫黄およびアンボンドキャッピング(JIS A 1108 付属書 A)を施した。

4. 実験結果・考察

4.1 空隙率

(a) 空隙率の標準偏差

表-2に、JCI-SP01-1の容積法に準拠して計測した空隙率の各試験体の標本平均、標本標準偏差および標準偏差の信頼区間($\alpha=0.05$)を示す。同表、前掲表-1および後掲表-3の標本標準偏差を踏まえると、各試験体の空隙率の標準偏差は相対的に小さいため、以下、空隙率の計測で生じる誤差を無視する。

(b) 締固め抵抗率と詰込み抵抗率の関係

図-2(a)(b)は、前掲図-1(a)(b)の既報データを、本報データに置換している。実線は式(2)、破線、一点破線および点線の標準偏差は既報データ(=0.021:前述1.2節参照)を用いている。なお、自然対数の縦軸と横軸の母相関係数の区間推定値($\alpha=0.05$)は-0.73~-0.26である。

同図より、本報データの群においても、自然対数の締固め抵抗率と詰込み抵抗率は、負の相関が認められる。ただし、本報データの振動締固め群の締固め抵抗率は、既報データの加圧締固め群と比較して高い傾向がある。なお、設計空隙率10%の詰込み抵抗率が他と比較して高いのは、結合材の容積率の調合値が高いため、ミキサ内面、ハンドスコープ表面に、結合材が付着しやすいことが起因していると考えられる。

(c) 締固め前後の空隙率の標準偏差

本報データの各設計空隙率群を対象に、締固め前と後における空隙率の標準偏差の差について、等分散性のF

表-4 結合材の試験結果一覧

設計 空隙率*	フロー値		材齢 (weeks)	圧縮強度	
	0打 (mm)	15打 (mm)		標本平均 (N/mm ²)	標本変動係数 (%)
20	116	205	4	56.9	0.443
15	119	210	4	65.7	9.037
10	119	210	9	57.9	8.791

*該当するPOCの設計空隙率

検定をすると、表-3 に示すように、各設計空隙率群ともに、検定による有意差($\alpha=0.05$)は認められない。このことから、空隙率の標準偏差に及ぼす振動締固めの影響は小さいと考えられる。

4.2 結合材

表-4 に、結合材の管理用試験体の試験結果一覧を示す。同表に示すように、各圧縮強度の標本変動係数は、レディミクストコンクリートにおいて良好な管理がなされているかの目安となる上限値 10%以内である。

4.3 圧縮強度

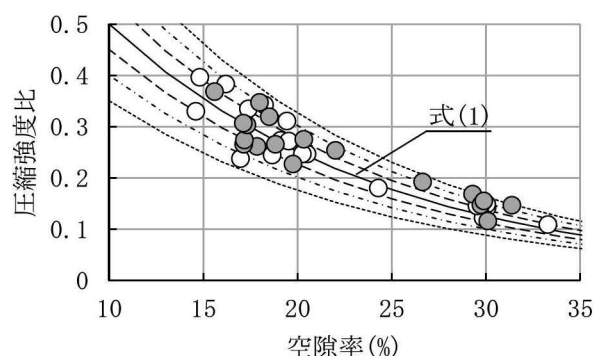
図-3(a)に、POC の圧縮強度-空隙率関係に及ぼすキャッピング方法の影響を示す。縦軸は、POC の圧縮強度を結合材の圧縮強度で除した圧縮強度比である。図中の実線は、式(1)である。破線、一点破線および点線は、それぞれ近似値 $\pm 1\sigma$ 、 2σ および 3σ [$\sigma:0.1$: 前述 2.1 参照] を表している。図-3(b)は、同図(a)の縦軸を標準化(z 変換)した相対誤差、横軸を試験体上端部の平滑度に置き換えている。標準化において近似値[式(1)]に対する実測値(実測値/近似値)の平均値を 1.0 とした。

同図(a)(b)より、硫黄とアンボンドキャンピング群それぞれの圧縮強度比は、近似値 $\pm 3\sigma$ 以内に存在していることが認められる。なお、硫黄とアンボンドキャンピング群の近似値[式(1)]に対する実測値の平均値の差は、 t 検定によると有意($\alpha=0.05$)ではないことから、硫黄とアンボンドキャンピング群の圧縮強度-空隙率関係の差はあるとは言えない。

同図(b)より、硫黄およびアンボンドキャンピング群の実測値/近似値と平滑度は、無相関検定によると有意ではないことから、相関があるとは言えない。このことから、硫黄とアンボンドキャンピング群の圧縮強度-空隙率関係に及ぼす平滑度の影響はないと考えられる。

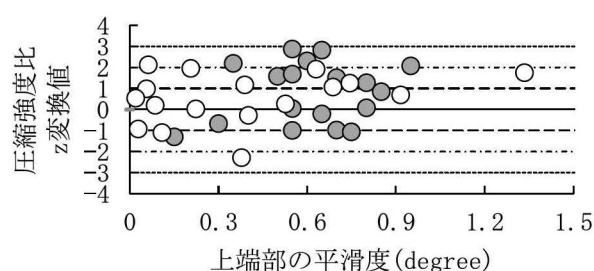
5. おわりに

6号砕石を用いた POC の JCI-SPO2-1 の容積法に準拠して計測する空隙率の標準偏差、締固め-詰込み抵抗率関係に及ぼす振動締固めの影響、圧縮強度試験へのアンボンドキャンピングの適用性について実験的に検討をした。



破線、一点破線、点線：式(1) $\pm 1, 2, 3\sigma$
 $\sigma=0.1$ (前述 2.1 参照)

(a) 圧縮強度-空隙率関係



(b) 標準化した圧縮強度比の相対誤差

キャッピング●：アンボンド○：硫黄

図-3 圧縮強度-空隙率関係

謝辞

本稿の研究成果は、2019年度愛知工業大学研究特別助成の支援による。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川達嗣君、諸戸陽斗君のご助力を得た。

参考文献

- 1) 山本貴正, 山田将也, 河野伊知朗, 小池狭千朗: 締固めの影響を考慮したポーラスコンクリートの空隙率に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 1475-1480, 2011
- 2) 山本貴正, 河野伊知朗, 須田裕哉: 6号砕石ポーラスコンクリートの全空隙率-調合空隙率関係と圧縮・曲げ強度の変動係数, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 1, pp. 1327-1332, 2015
- 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
- 4) 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