

論文 ポーラスコンクリートの各種性状に及ぼす運搬時間の影響に関する基礎的研究

藤木 諒将*1・森下 拓海*2・中川 武志*3・畑中 重光*4

要旨：本報では、混練後のフレッシュポーラスコンクリートを攪拌しつつ現場へ運搬する場合を想定した低速回転のミキサにより、フレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす低速攪拌時間の影響を検討した。これに加えて、外気温の条件が及ぼす影響についても検討を行った。その結果、目標空隙率 25%程度のポーラスコンクリートにおいては、水セメント比によらず低速攪拌時間の経過に伴い圧縮強度が低下傾向を示すこと、通常期 (20℃) 条件においては圧縮強度比の低下は比較的緩やかであること、目標空隙率 15%程度においては低速攪拌時間の経過による圧縮強度への影響がほぼ見られないことなどが明らかとなった。

キーワード：ポーラスコンクリート、運搬時間、圧縮強度、フレッシュ性状、暑中期条件

1. はじめに

ポーラスコンクリート (以下、POC と略記) は、粗骨材およびこれを結合するセメントペーストまたはモルタルにより構成され、連続する空隙を有する。

POC の製造・施工にあたって、混練後に POC を施工現場へ運搬する場合、普通コンクリートと比較してペースト分に乏しく、外気との接触面積が大きいことから、運搬によって生じるフレッシュ性状への影響がより大きいと予想される。すでに、POC の練混ぜから打ち終わりまでの時間の経過による圧縮強度の低下傾向が指摘されている^{2,3)}。

このため、日本コンクリート工学会(JCI)によるポーラスコンクリートの製造・施工指針 (試案)¹⁾においては、練混ぜから打ち終わりまでの時間は、普通コンクリートと同様に、気温 25℃以下の場合 120 分、気温 25℃を超える場合 90 分以内を標準としている。これに加えて、可能ならばそれぞれ 90 分、60 分以内が望ましいと定めている。

しかしながら、アジテータ車等による攪拌がフレッシュ POC の性状変化に及ぼす影響に関する系統的な検討

は、現時点ではほとんどなされていない。このため本研究では、混和剤が及ぼす影響の検討に先立ち、アジテータ車の攪拌速度を再現した低速回転のミキサで混和剤未添加のフレッシュ POC を最大 90 分間低速攪拌し、攪拌時間がフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響を検討する。これに加えて、攪拌時の温度条件に通常期 (20℃) および暑中期 (30℃) の二種を設定し、外気温が及ぼすフレッシュ性状等への影響の差異についても検討した。

2. 実験方法

2.1 実験の要因と水準

表-1 に実験の要因と水準を示す。表中の低速攪拌時間は、混練後のフレッシュ POC を一軸強制パン型ミキサに投入し、低速にて攪拌する時間を示す。また、POC の

表-1 要因と水準

要因	水準
外気温	通常期条件 (20℃), 暑中期条件 (30℃)
水セメント比 W/C	0.30, 0.45
目標空隙率 VR (%)	15, 25, 35
低速攪拌時間 (min)	30, 60, 90

[注] 〃: 基本水準を示す

表-2 POC の調査表

外気温	目標空隙率 VR (%)	W/C (-)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	G (kg/m ³)	実測 FL (mm)
暑中期条件 (30℃)	15	0.45	157.9	351.0	1554	267
	25		99.2	220.5	1554	279
	35	40.5	90.0	1554	273	
	25	0.30	82.2	274.1	1554	160
通常期条件 (20℃)	15	0.45	157.9	351.0	1554	300
	25		99.2	220.5	1554	292
	35	40.5	90.0	1554	273	
	25	0.30	82.2	274.1	1554	189

[注] W/C : 水セメント比, FL : ペーストフロー値

*1 三重大学大学院 工学研究科 修了生 (現在 大日本土木株式会社) (学生会員)

*2 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*3 (株) ファイナルマーケット 代表取締役 博士 (工学) (正会員)

*4 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

表-3 各作業工程におけるミキサ種別, 回転数および時間の組み合わせ

作業工程	回転数(rpm)	時間	使用ミキサ
セメントペースト練混ぜ	50	30秒	揺動攪拌型ミキサ
セメントペースト練混ぜ	200	90秒	揺動攪拌型ミキサ
POC練混ぜ	200	120秒	揺動攪拌型ミキサ
POC攪拌	10	30, 60, 90分	一軸強制パン型ミキサ

運搬時間を想定し, 低速攪拌で最低 30 分間実施するものとした。

2.2 使用材料および調査

表-2に POC の各調査を示す。また, POC の材料として, 6号砕石(実積率: 58.1%, 密度: 2.73g/cm³), 普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³) および上水道水(密度: 1.00g/cm³) を用いた。

2.3 試験体の作製方法

POC の混練には, 攪拌羽根がなくゴム製の底部により高粘度の材料でも均質に練混ぜが可能である, 容量 30L の揺動攪拌型ミキサ(通称: オムニミキサ)を用い, 練混ぜ方法はセメントペースト先練りとした。セメントおよび水を投入し, 50rpm で 30 秒間練り混ぜた後, ミキサ内部の付着物を掻き落として, 200rpm で 90 秒間練り混ぜた。混練の後, 採取後の調査が表-2 と合致するように, 所定量のセメントペーストを採取し, フロー値の測定を行うとともにプラスチック製円柱型枠(φ50×100mm)に打ち込んだ。これと並行して, ミキサに粗骨材を投入し, 200rpm で 120 秒間練り混ぜた。(表-3 参照)

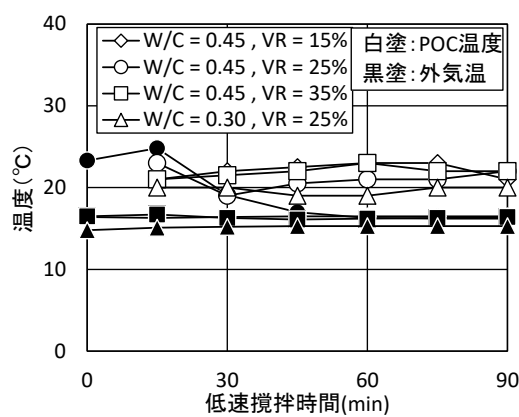
練混ぜ後, フレッシュ POC を容量 100L の一軸強制パン型ミキサに移し, 蓋を閉めて 10rpm で攪拌を行った。ここで, アジテータ車のドラムの回転速度は通常 2rpm 程度である。本研究では写真-1 に示すようにインバータ(同写真右側)を用いて, ミキサの回転数の低減化を図り, 実測した最低回転数である 10rpm を攪拌時の回転数として設定している。また, 攪拌の際には実際の運搬条件を考慮し, ミキサは日射を受ける野外に設置した。

フレッシュ POC は同調査の試験体の低速攪拌時間による影響を検討するため, 30 分毎にミキサから所定量を採取し, プラスチック製円柱型枠(φ100×200mm)に打ち込んだ。ただし, アジテータドラムの容量に対する最大混合容量は約 50%程度が一般的であるが, 本研究では低速攪拌時のミキサ容量(100L)に対する, フレッシュ POC の容積比は, 低速攪拌時間 30 分毎に 25%, 18% 10% となっている。また, 試験体を作製する際, 目標空隙率に近い試験体を作成するため, 調査表より型枠の容積に応じた POC の質量を算出し, 所定量を計量しながら打ち込みを行った。

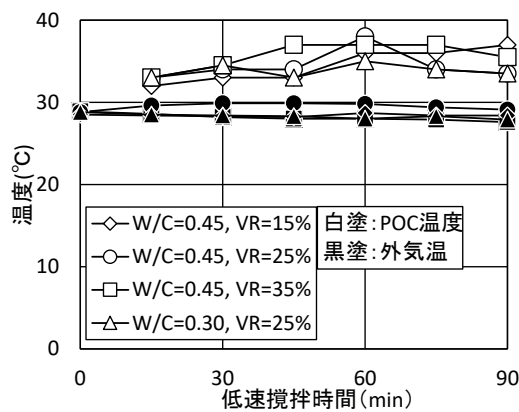
締固めは 2 層に分けて行い, 各層突き棒による突固めおよびジグギングによる締固めを行った。また, 低速攪拌時間 30, 60 分においては各 3 本, 試験体端面での骨材



写真-1 フレッシュ POC の攪拌に用いた一軸強制パン型ミキサとインバータ



(a) 通常期条件 (20°C)



(b) 暑中期条件 (30°C)

図-1 外気温および POC 温度の変化

の剥落等が予測される低速攪拌時間 90 分に関しては, 各 5 本の円柱供試体を作製した。

試験体は材齢 5 日まで封かん養生とし, 脱型後から材齢 28 日まで標準水中養生を行った。ただし, 養生期間中の材齢 27 日に試験体を水中より取り出し, 約 1 時間乾

表-4 低速攪拌時間の経過に伴う各 POC のフレッシュ性状の変化 (30°C, W/C = 0.45)

		低速攪拌時間(分)		
		30	60	90
目標空隙率(%)	15			
		○(3)	○(3)~○(2)	○(2)
		25		
	○(2)		○(2)~×(1)	×(1)
	35			
		×(1)	×(1)	×(1)

[注] POCのフレッシュ状態(ペースト分の状態)¹⁾ △(4:ペーストが糸を引く状態)
 ○(3:ペーストがやや糸を引く)
 ○(2:ペーストは糸を引かないがやや粘りがある)
 ×(1:粘りがなく、ばさついている)

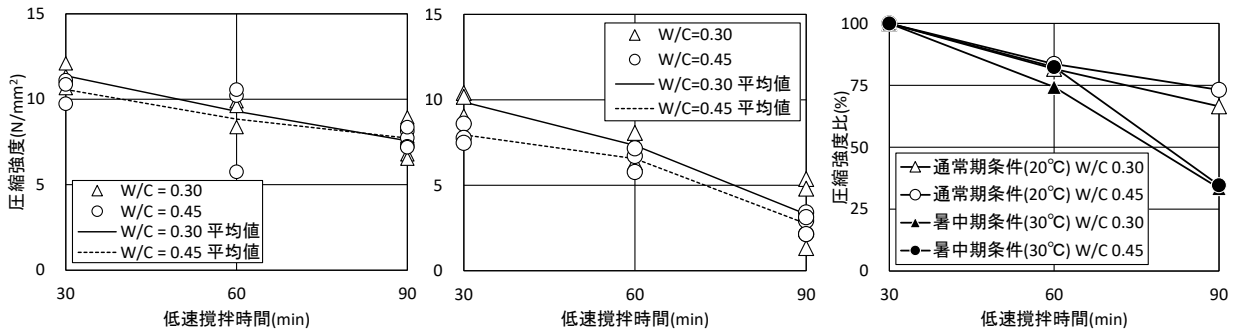


図-2 水セメント比が異なる POC の圧縮強度の変化 (VR = 25%)

図-3 攪拌時間の経過に伴う圧縮強度比の変化

燥後に硫黄キャッピングを実施している。

2.4 試験方法

(1) 外気およびフレッシュ POC の温度測定

外気およびフレッシュ POC の温度は、低速攪拌時間 15 分毎に計測を実施した。外気温は日陰で風通しが良い位置に設置された抵抗温度計で、フレッシュ POC はミキサ内部の試料を液体温度計で計測した。ただし、フレッシュ POC の温度は、低速攪拌時間 15 分時点から計測している。

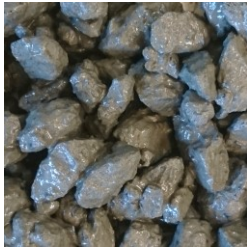





(2) フレッシュ性状の評価

POC のフレッシュ性状の評価は、試験体を作製する攪拌時間 30, 60, 90 分時点で、目視によるフレッシュ状態の評価手法^{1,4)}に基づき、簡易的な評価を行った。

(3) 圧縮強度試験

POC の圧縮強度試験用の円柱試験体は、上下端面に硫黄キャッピングを施して試験に供した。試験材齢は 28 日とし、JIS A 1108 および JCI によるポーラスコンクリートの室内試験方法¹⁾に基づいて試験を実施した。

表-5 温度条件が異なるフレッシュ POC の比較 (VR = 25%, W/C = 0.45)

		低速攪拌時間(分)		
		30	60	90
外気温度	20°C			
		○(3)~○(2)	○(3)~○(2)	○(2)
外気温度	30°C			
		○(2)	○(2)~×(1)	×(1)

50mm

[注] POCのフレッシュ状態(ペースト分の状態)¹⁾
 △(4:ペーストが糸を引く状態)
 ○(3:ペーストがやや糸を引く)
 ○(2:ペーストは糸を引かないがやや粘りがある)
 ×(1:粘りがなく、ぼさついている)

3. 実験結果および考察

3.1 外気温およびフレッシュ POC の温度計測結果

図-1(a)(b)に外気温およびフレッシュ POC の温度計測の結果を示す。

図に示すように外気温の条件によらず、ミキサ内部のフレッシュ POC の温度は外気温と比較して約5°C程度高くなっていることが確認できる。これは、セメントの水和熱に加えてミキサが日射を受け、ミキサの内部温度が上昇したためであると考えられる。

3.2 フレッシュ状態の目視評価

表-4 に暑中条件における、低速攪拌時間の経過に伴う POC のフレッシュ状態の変化を示す。表中の写真の範囲は、それぞれ 50mm×50mm とし、写真の下部には目視によるフレッシュ状態の評価と、ペースト分の状態の評価を併記している。

表より、低速攪拌時間が長くなるに従って、明確なペースト分の乾燥が確認された。この傾向は、目標空隙率が25%以上の試験体で顕著となり、ペースト分の流動性および粘性の低下によって、締め固め時に試験体表面に隆起が発生しやすくなるなどの施工性の低下も見られた。

3.3 水セメント比の異なる POC の圧縮強度の変化

図-2(a)(b)に、各温度条件下で作製された、水セメント比が異なる POC の圧縮強度の変化を示す。同図より、低速攪拌時間の経過に伴って圧縮強度の低下傾向が見られ、水セメント比による明確な差は見られなかった。

一方で、低速攪拌時間 30 分時点の圧縮強度を 100%とした圧縮強度比の変化を示した図-3 によれば、暑中期

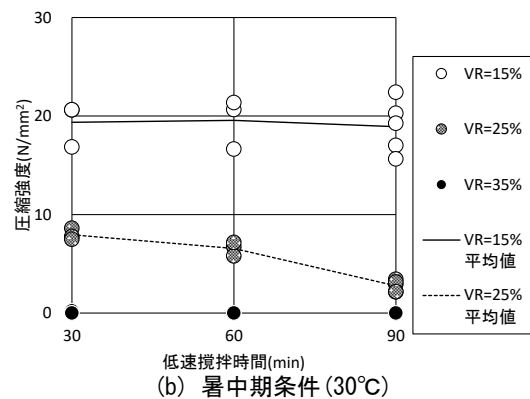
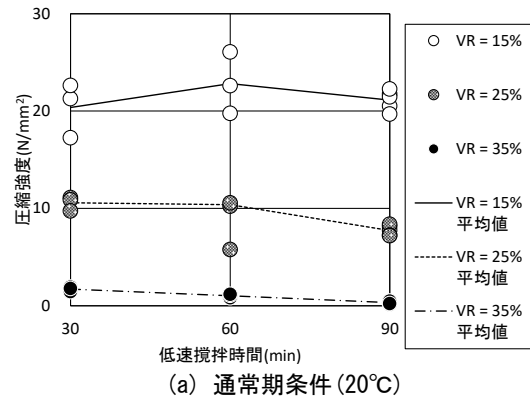


図-4 目標空隙率が異なる POC の圧縮強度の変化

条件の試験体が低速攪拌時間 90 分で圧縮強度が急速に減少するのに対し、通常期条件の圧縮強度比の減少は比較的緩やかであることが確認できる。

これは、温度条件のみ異なる POC のフレッシュ性状を比較した表-5 に示すように、外気温が低い通常期条件

においては、ペースト分の乾燥が暑中期条件のものに比べて遅く、低速攪拌時間 90 分時点においても、ペースト分に一定の流動性が保持されるため、圧縮強度の急速な低下が抑制されたと考えられる。

3.4 目標空隙率の異なる POC の圧縮強度の変化

同じ水セメント比 (W/C=0.45) で、目標空隙率のみを変化させた各 POC 試験体の圧縮強度試験の結果を、図-4(a) (b)に示す。ただし同図(b)に示す暑中期条件で作製した VR = 35%について、粗骨材の剥落等により圧縮強度試験への供用が不可能であった試験体は、圧縮強度 $F_c = 0$ (N/mm²)としてプロットしている。

図より、VR=15%の試験体については、低速攪拌時間の経過に伴う圧縮強度の低下はほとんど見られなかった。これは、目標空隙率が低く、POC のペースト分が多いため、流動性の低下をもたらすセメントペーストの乾燥の影響が小さくなったものと考えられる。

一方で、暑中期条件の VR = 35%試験体においては、写真-2 に示すような粗骨材の剥落が著しく、圧縮強度試験への供用が不可能であった。これは、ペースト分が少ないため、攪拌中の水分の逸散による流動性の低下が、他の調合と比較して大きく影響したのと考えられる。また、通常期条件で作製された VR = 35%の POC についても、低速攪拌時間の経過に伴い、圧縮強度の低下が確認された。

以上のように、目標空隙率 25%以上の POC において低速攪拌時間の経過に伴う圧縮強度の低下傾向が生じた理由は以下のように推察される。すなわち、図-5 に示すように、ペースト分の乾燥等による流動性の低下によって、粗骨材間の付着面積の低下が生じたことが考えられる。

3.5 圧縮強度と目標空隙率の関係

図-6(a) (b)に、W/C = 0.45 の POC における圧縮強度と目標空隙率の関係を示す。なお、図中に示す点には試験体の平均圧縮強度を用いた。ただし、圧縮強度試験に供した試験体数が著しく少ない暑中期条件の VR = 35%については、試験結果をプロットしていない。

また図中には、既往の研究¹⁾において提案された、以下の圧縮強度比-空隙率の関係式(1)を併記した。

$$y = A \exp(-Bx) \quad (1)$$

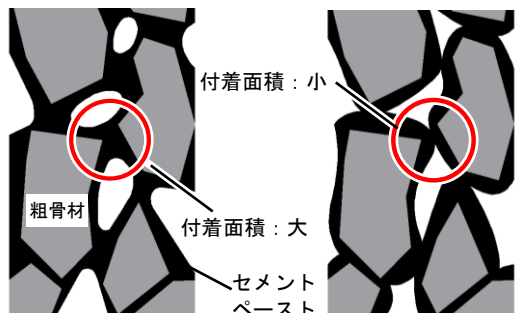
ここに、 y : 圧縮強度(N/mm²)、 A, B : 実験定数、 x : 空隙率(%)

実験定数 A について、各温度条件で作製されたセメントペースト試験体の圧縮強度の平均値を、実験定数 B は既往の研究¹⁾中で提案された圧縮強度比-空隙率関係より $B = 0.08$ を用いた。

図より、通常期条件で作製された POC の圧縮強度は、目標空隙率 35%の試験体を除き、低速攪拌時間によらず

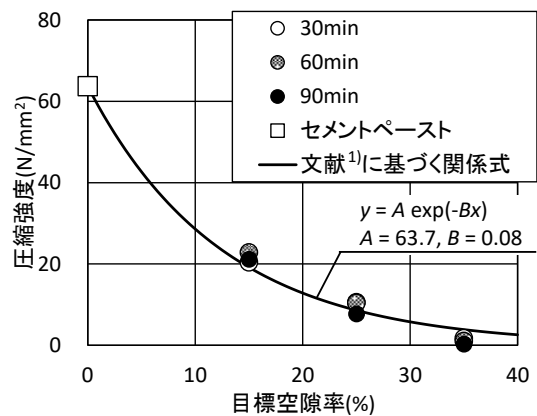


写真-2 骨材の剥落が生じた POC (30°C, VR = 35%, 攪拌時間 60 分)

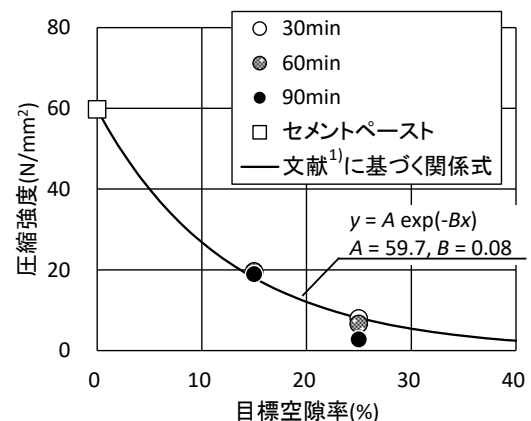


(a) ペースト流動性：良 (b) ペースト流動性：悪

図-5 POC のフレッシュ性状の変化による粗骨材間の付着不良の概念図



(a) 通常期条件 (20°C)



(b) 暑中期条件 (30°C)

図-6 目標空隙率と圧縮強度の関係

式(1)による圧縮強度－空隙率の関係に概ね合致する傾向が見られた。先述したように、VR=35%の試験体についてはペースト分が少なく、乾燥による圧縮強度の低下の影響を受けやすいため、関係式から下方に外れる傾向を示したものと考えられる。

また、暑中期条件のPOC試験体においては、低速攪拌時間 30 分では、圧縮強度－空隙率の関係式と概ね合致する傾向を示している。しかし、目標空隙率 25%の試験体においては、低速攪拌時間の経過に伴い、関係式から下方に推移する傾向が見られた。

4. 結論

本研究では、練混ぜ後の低速攪拌時間および攪拌時の外気温が、ポーラスコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響に関して検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 目標空隙率 25%のポーラスコンクリートにおいて、低速攪拌時間の経過に伴う圧縮強度の低下傾向は、水セメント比によらず、ほぼ同様であった。
- (2) 目標空隙率 25%のポーラスコンクリートにおいて、外気温が 25℃以下の試験体は、25℃を越える条件のものと比較して、低速攪拌時間による圧縮強度比の低下傾向は緩やかとなった。
- (3) 目標空隙率 15%のポーラスコンクリートにおいては、ペースト分を多量に含むため、低速攪拌時間の経過が圧縮強度に及ぼす影響はほとんど見られなかった。

今後、練上がり直後の各種性状との比較を行い、データを蓄積するとともに、混和剤およびミキサ種別を変化させて検討を行い、現場施工 POC の品質保証の向上につなげたい。

謝辞

本研究にあたっては、三重大学大学院三島直生准教授、三重大学技術職員藤浩氏、山本好弘氏にご助力を頂いた。また、本実験を実施するにあたり、研究費の一部は科学研究費補助金 基盤研究(B) (研究代表者:畑中重光) によった。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書，2015.6
- 2) 田中博一，上野久，中野慎一，萩原運弘，栗田守朗：河川護岸における場所打ちポーラスコンクリートの施工，土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集，V-243, 2000
- 3) 中川武志，畑中重光，三島直生，松村豪：住空間における意匠性に配慮した複層ポーラスコンクリート歩道の施工実験，コンクリート工学，Vol.46(2008), No.12, pp.20-27, 2008
- 4) 河野広隆，片平博：ポーラスコンクリートのフレッシュ性状迅速判定マニュアル（案），土木研究所資料，第 3765 号，2000.12