

平成 29 年度
修士論文

ポーラスコンクリートの諸特性に及ぼす
運搬時間と施工方法の影響に関する研究

指導教員 畑中重光 教授

三重大学大学院工学研究科
建築学専攻

藤木諒将

第一章 序論	... 1
1.1 はじめに	.....2
1.2 ポーラスコンクリートとは	.....2
1.3 本研究の背景と目的	.....2
1.4 本論文の構成	.....3
第二章 既往の研究	... 4
2.1 はじめに	.....5
2.2 製造方法	.....5
2.2.1 構成材料	
2.2.2 調合設計	
2.3 各種特性	.....7
2.3.1 空隙率	
(1) 空隙の種類	
(2) 締固め	
2.3.2 圧縮強度	
2.4 実施工	.....11
2.4.1 調合	
2.4.2 運搬・練混ぜ	
2.4.3 敷均し（打設）	
2.4.4 締固めおよび仕上げ	
2.4.5 養生	
第三章 運搬時間が諸特性に及ぼす影響（実験 A-I）	.. 15
3.1 はじめに	.....16
3.2 実験方法	.....16
3.2.1 要因と水準	
3.2.2 使用材料	
3.2.3 調合および試験体の作製方法	
(1) 調合表	
(2) 練混ぜおよび攪拌	
(3) 試験体作製方法	
(4) 試験体の材齢と作業内容および養生方法	
3.2.4 試験項目および試験方法	
(1) 外気およびフレッシュ POC の温度測定	
(2) フレッシュ性状の評価	
(3) 圧縮強度試験	
3.3 実験結果および考察	.....19
3.3.1 外気温および POC 温度	
3.3.2 フレッシュ性状	

3.3.3	圧縮強度	
(1)	水セメント比の異なる POC の圧縮強度の変化	
(2)	目標空隙率の異なる POC の圧縮強度の変化	
3.3.4	圧縮強度と空隙率の関係	
3.4	まとめ	.....25
第四章 混和剤（凝結遅延剤，高性能 AE 減水剤遅延型）の影響（実験 A-II）		.. 26
4.1	はじめに	.....27
4.2	実験方法	.....27
4.2.1	要因と水準	
4.2.2	使用材料	
4.2.3	調合および試験体の作製方法	
(1)	調合表	
(2)	練混ぜおよび攪拌	
(3)	試験体作製方法	
(4)	試験体の材齢と作業内容および養生方法	
4.2.4	試験項目および試験方法	
(1)	外気およびフレッシュ POC の温度測定	
(2)	フレッシュ性状の評価	
(3)	圧縮強度試験	
4.3	実験結果および考察	.....30
4.3.1	恒温槽内気温および POC 温度	
4.3.2	フレッシュ性状	
4.3.3	圧縮強度	
(1)	ミキサ種類による POC の圧縮強度の変化	
(2)	混和剤による POC の圧縮強度の変化	
4.4	まとめ	.....33
第五章 実施工条件における運搬時間が 諸特性に及ぼす影響（実験 A-III）		.. 34
5.1	はじめに	.....35
5.2	実験方法	.....35
5.2.1	要因と水準	
5.2.2	使用材料	
5.2.3	調合および試験体の作製方法	
(1)	調合表	
(2)	練混ぜおよび運搬	
(3)	施工条件および試験体作製方法	
(4)	試験体の材齢と作業内容および養生方法	
5.2.4	試験項目および試験方法	
(1)	外気およびフレッシュ POC の温度測定	

(2)	フレッシュ性状の評価	
(3)	圧縮強度試験	
5.3	実験結果および考察	.....39
5.3.1	外気温および POC 温度	
5.3.2	フレッシュ性状	
5.3.3	空隙率	
(1)	容積法と質量法の比較	
(2)	空隙率分布	
(3)	運搬時間および通過回数による平均空隙率の変化	
(4)	振動締固めエネルギーと POC スラブの空隙率の関係	
5.3.4	圧縮強度	
5.3.5	圧縮強度と空隙率の関係	
5.4	まとめ	.....48
第六章 振動締固めが隣接区画に及ぼす影響		.. 49
6.1	はじめに	.....50
6.2	実験方法	.....51
6.2.1	要因と水準	
6.2.2	使用材料	
6.2.3	調合および試験体の作製方法	
(1)	調合表	
(2)	練混ぜ	
(3)	試験体作製方法	
6.2.4	試験項目および試験方法	
(1)	レーザー変位計による表面形状の測定	
(2)	空隙率の測定	
6.3	実験結果および考察	.....54
6.3.1	表面形状	
(1)	測定結果	
(2)	振動締固めによる隣接区画の隆起量	
(3)	水平方向の変位	
(4)	平坦性の評価	
6.3.2	空隙率	
(1)	質量法による全空隙率	
(2)	締固め度	
(3)	水平方向の空隙率分布	
6.4	まとめ	.....62
第七章 結論		.. 63
7.1	総括	.....64

7.2 今後の課題

.....65

付録①：修士論文梗概

付録②：発表資料

付録③：学位論文要旨及び論文目録

付録④：ポーラスコンクリートの振動締固め段階が及ぼす隣接区画への影響に関する再現解析

第一章 序論

1.1 はじめに

近年、利便性の追求、経済発展および人口増加に伴い、各地において大気や水質の汚染、また地球温暖化などの大規模な環境問題が深刻化している。交通や空調等により、莫大なエネルギーを消費する都市圏においては、ヒートアイランド現象および集中豪雨などの問題が顕著である。これらの問題は、感染症等の拡大や食料の不足など、より深刻な問題への発展が懸念されている。

道路や建築物などに広く用いられるコンクリートは、人類の発展に大きく貢献してきたが、生物の生息地への影響や、非透水性による都市型水害の誘発など、依然として課題も多い。環境への配慮がコンクリートに求められる中、ポーラスコンクリートは内部の空隙により、透水性や吸音性を有し、これらの性質を透水性舗装などに利用すべく、様々な研究が進められてきた。

1.2 ポーラスコンクリートとは

ポーラスコンクリートとは、粗骨材とこれを連結するセメントペーストまたはモルタルにより構成される、オコシ状のコンクリートである。

文献¹⁾による空隙分類においては、ポーラスコンクリート表面から連続し容易に排水・飽水が可能な連続空隙、排水・飽水に多少の時間を要する準連続空隙、表面から連続した箇所を持たない独立空隙の三種が定義されている。

上記の内部に有する空隙により、透・排水性、吸音性、生物・植物許容性および軽量性等の性質を有しており、その適用範囲の広さから環境共生型のコンクリートとしての利用が期待される材料である。

1.3 本研究の背景と目的

POC に関する研究は多く報告がなされており、第二章に後述するように、POC の諸特性に関する研究は比較的進んでいる。

また、POC の実施工は図-1.1¹⁾に示すような施工フローを経て供用に至るため、各施工段階における影響を把握することは現場施工 POC の品質を保証する上で肝要となる。このため、実施工条件での検討も行われており、森鼻らによる報告²⁾においては、施工標準の作成に向けた提案がなされた。

しかしながら、現場施工 POC に関しては、十分に検討がなされていない点もある。POC の運搬においては、練混ぜをプラントで行い、アジテータ車等により運搬を実施する場合、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⁾では、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(25℃超:90分, 25℃以下:120分)を標準と定めている。しかしながら、運搬時間が及ぼす POC の諸特性への影響に関する系統的な検討は現時点では少ない。

また現場への運搬後、POC の締固めを表面振動機等により、振動締固めを実施する場合、与える振動締固めエネルギーが過大であれば、不陸が生じることが予想される。しかしながら、

不陸の発生状況およびこれに伴う POC の各種特性への影響に関して、定量的な把握はなされていない。

したがって本研究では、現場施工 POC の品質の保証を目的として、以下に列挙する点に関して検討した。

- (1) 運搬時間が POC の諸特性に及ぼす影響の定量的な把握
- (2) 振動締固めによる不陸の発生が POC の諸特性に及ぼす影響の定量的な把握

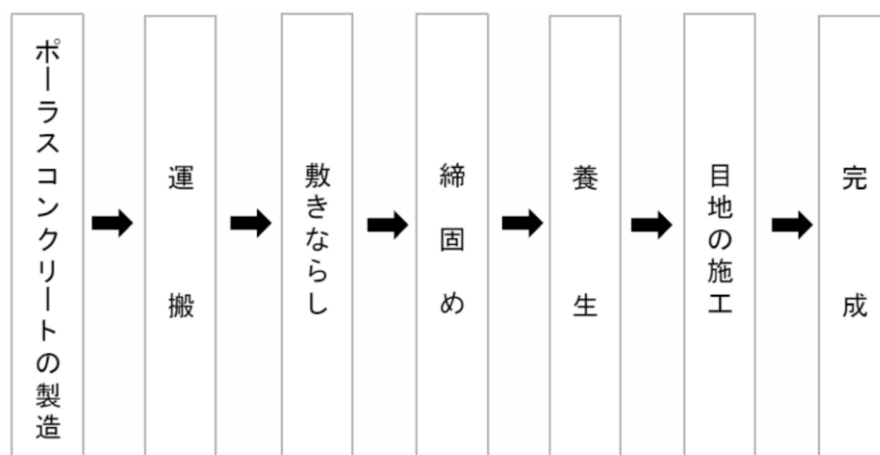


図-1.1 POC の製造・施工フローの一例¹⁾

1.4 本論文の構成

本論文は、全七章よりなる。

第一章では、POC の概説および研究の背景と目的を示す。第二章では、POC の各種特性および実施工に関連した既往の研究を整理した。

第三章から第五章までは、運搬時間が POC の諸特性に及ぼす影響を明らかにするため、各種検討を行った。(実験 A)

第三章においては暑中期および通常期条件で、最長 90 分間フレッシュ POC を低速撹拌し、低速撹拌時間が POC のフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響を検討した。第四章では、暑中期を再現した条件のもと、フレッシュ性状の維持を目的として混和剤（高性能 AE 減水剤、凝結遅延剤）を用いた POC の諸特性に及ぼす低速撹拌時間の影響を検討した。第五章では、第三・四章の結果を受けて、実施工条件で検討を行い、運搬時間が諸特性に及ぼす影響と、フレッシュ性状の低下が振動締固めエネルギー空隙率関係に及ぼす影響を検討した。

第六章では、不陸に伴う POC の諸特性への影響の定量的な把握を目的として検討を行った。(実験 B)

第七章では本研究の総括を行うとともに、今後の展望について示す。

第二章 既往の研究

2.1 はじめに

POC は、内部に有する空隙による透・排水性，吸音性，通気性等の性質を有し，環境共生分野への適用が期待される。これらの多岐にわたる性質の評価および試験方法の検討がなされるとともに，製造・施工の指針についても整備がなされ，今日においてはエココンクリートに位置づけられている。

透水性舗装用途の POC は，ハイドロプレーニング現象の抑制および雨水等の流出遅延効果による都市型水害の被害の低減が期待され，透水性能に関する研究が行われている。これに加え，舗装への供用であるため，曲げ疲労耐久性，耐摩耗性，空隙率および曲げ強度が必要な品質として要求される事が多く，実施工においてこれらの性能を満足するためには，各工程における品質の管理が肝要である。

本研究の議論に先立ち本章では，POC の製造方法，空隙，圧縮強度および現場施工に関する既往の研究の整理を行う。

2.2 製造方法

2.2.1 構成材料

POC を構成する材料は，粗骨材と，粗骨材を連結するセメントペーストで構成される。また，セメントペーストに対して，ペースト分のダレ落ちの防止，乾湿繰り返しに対する耐久性の向上の効果を見込んで少量の細骨材を使用し，モルタルとすることもある。

この他，ペースト分のフロー値を調節する目的で，高性能 AE 減水剤や増粘剤等の化学混和剤も使用する。POC の使用材料およびそれらの特徴を以下の表－2.1¹⁾に示す。

表－2.1 ポーラスコンクリートの使用材料¹⁾

セメント	普通ポルトランドセメント，高炉セメント， 早強ポルトランドセメント
水	上水道水，回収水，地下水など (JIS A 5308 附属書 C に準拠)
粗骨材	河川護岸用：10～20mm 程度 舗装用：5～15mm 程度
細骨材	最大寸法 5mm 以下，あるいはより最大寸法の小さい細目砂
混和剤	AE 減水剤，もしくは高性能 AE 減水剤 その他，品質の確認がなされている混和剤
混和材	収縮低減剤，繊維，高炉スラグ微粉末， シリカフュームおよびフライアッシュ等使用目的に応じた材料

2.2.2 調合設計

POC の調合は、粗骨材の実積率を単位容積中の充填率とみなし、粗骨材量を決定する。その後、単位容積中の粗骨材容積および目標とする空隙量を除いた空間を、セメントペーストおよびモルタルの容積とする。これにより定まったセメントペーストおよびモルタル中の、細骨材量、水量およびセメント量を決定する。この際、粗骨材間にセメントペーストおよびモルタルが入り込むことにより、粗骨材の実積率まで充填することが困難となる可能性があるため、実積率に補正係数 α (一般に 0.93～0.99) を乗じた数値を用いる場合がある。

以下に単位容積 1m^3 の調合計算手順の一例を示す。

単位粗骨材量の算定

$$G = S_G \times \rho_G \times \alpha \quad (2.1)$$

ペースト量の算定

$$V_b = \left(1 - \frac{S_G}{100} - \frac{C_{VR}}{100}\right) \times 1000 \quad (2.2)$$

単位セメント量、単位細骨材量および単位水量の決定

$$C = \frac{V_b}{\frac{\frac{W}{C} + 1}{\rho_w + \rho_c}} \quad (2.3)$$

$$W = \left(\frac{W}{C}\right) \times C \quad (2.4)$$

ここに、 G : 単位粗骨材質量(kg/m^3)

S_G : 粗骨材実積率(%)

ρ_G : 粗骨材密度(g/cm^3)

α : 補正係数(-)

V_b : セメントペースト容積(m^3)

C_{VR} : 目標空隙率(%)

C : 単位セメント質量(kg/m^3)

W/C : 水セメント比(-)

ρ_w : 水の密度(g/cm^3)

ρ_c : セメント密度(g/cm^3)

W : 単位水質量(kg/m^3)

2.3 各種特性

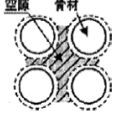
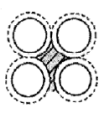
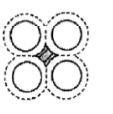
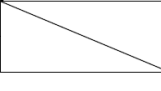
2.3.1 空隙率

(1) 空隙の種類

POC はセメントペーストあるいはモルタルにより，粗骨材同士を連結する構造上，空隙を有する。空隙の種類について，文献¹⁾においては連続空隙，準連続空隙および独立空隙が定義される。

各空隙の分類を表－2.2 に，定義を表－2.3 に示す。また，全空隙率や連続空隙率等の名称は，単位容積中に占める各空隙の割合を示す。

表－2.2 空隙の種類¹⁾

空隙のイメージ				
飽水・排水の状況		容易	時間を要する	困難
空隙の名称		連続空隙	準連続空隙	独立空隙
		全空隙		
影響する主な特性		← 透水性 → ← 揚水・保水性 → ← 強度・力学特性 →		
2003 年版報告書における空隙の名称	容積法	連続空隙	独立空隙	
		全空隙		
	質量法	全空隙		

表－2.3 各空隙の定義¹⁾

連続空隙	供試体表面から見て，連続している空隙であり，容易に水で飽和，排水される空隙
準連続空隙	供試体表面から見て，連続しているものの，水で飽和，排水するには若干の時間を要する空隙
独立空隙	供試体表面から見て独立している空隙であり，水で飽和，排水が困難な空隙
全空隙	供試体内全ての空隙を合わせたもの

(2) 締固め

POC おける締固めの影響は，内部の空隙分布，空隙率および底面のペーストのダレ落ち等の性状に大きく影響する。締固めの方法として，打撃による突固め，振動締固めおよび加圧締固めが主に挙げられる。機械施工が困難な中規模程度の現場施工においては，表面振動機あるいは写真－2.1¹⁾に示すような転圧板の拡底により不陸の発生を抑えた POC 仕上げ機等による振動締固めが採用されることがある。

表面振動機を用いる締固めにおいては，図－2.1，2.2³⁾に示すように締固め時間，締固め

エネルギーおよび空隙率に一定の関係が見られる。



写真-2.1 POC スラブの振動締固め ¹⁾

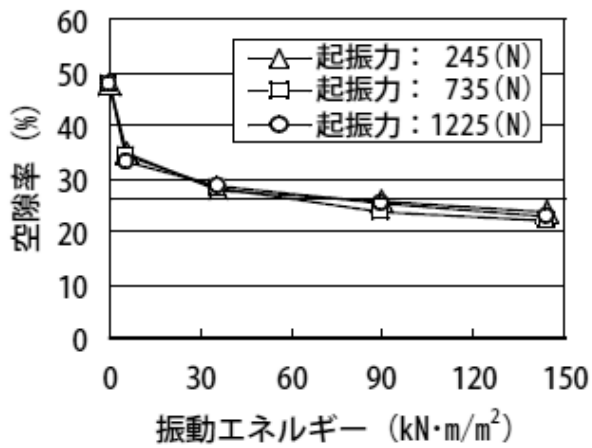


図-2.1 振動締固めエネルギーと空隙率の推移の例 ³⁾

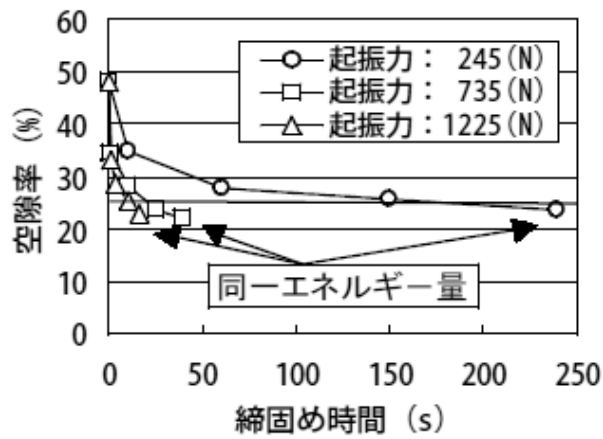


図-2.2 振動締固め時間と空隙率の推移の例 (左図より変換) ³⁾

また、単位容積あたりの調合量に対して、実際に打込みができた割合を示し、施工方法、締固め方法および締固め時間等の施工時の影響の指標として、締固め度が用いられることもある。通常、コンクリートの締固め度は 100% であるが、POC は空隙の増減により実積部分が変動しやすく、締固め度に変化が生じる。締固め度は、以下の式(2.6)および式(2.7)により定義される。

$$D_{poc} = m_f / m_p \times 100 \quad (2.6)$$

$$D_{poc} = (100 - A_f) / (100 - A_p) \times 100 \quad (2.7)$$

ここに、 D_{poc} ：締固め度(%), m_f ：施工時の単位体積あたりの質量(kg),
 m_p ：調合上の単位体積あたりの質量(kg), A_f ：施工時の空隙率(%),
 A_p ：調合上の目標空隙率(%)

2.3.2 圧縮強度

POC の圧縮強度試験は、JIS A 1108 が広く用いられ、普通コンクリート同様に、円柱供試体を用いることが一般的とされる。また、POC の表面には凹凸が生じるため、載荷面となる上下端面に対しては、セメントペーストあるいは硫黄による端面処理を実施する。ただし、キャッピングの方法および材料により、圧縮強度に差が生じる報告がなされているため、必要に応じ、用いたキャッピング方法の報告を要する。

POC の圧縮強度推定式として、既往の研究^{4,5)}にて式(2.8)、(2.9)が提案されている。

$$F_c = 12.6k(0.48(C/W) - 0.87)e^{0.61Dd - 0.06Va} \quad (2.8)$$

ここに、 k ：セメント種類による影響係数

(普通、早強ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種については、 $k=1$)

C/W ：セメント水比、 Dd ：骨材の絶乾密度(g/cm^3)、 V_a ：空隙率(%)

$$Y = A \exp(-Bx) \quad (2.9)$$

$$B = 0.0024C + 0.0602$$

ここに、 Y ：圧縮強度(N/mm^2)、 A ：結合材強度(N/mm^2)、 x ：全空隙率(%)、

C ：粗骨材の粒径範囲の最大粒径と最小粒径の平均値(mm)

いずれの推定式においても、圧縮強度に対して影響を与える要因は、セメントペーストおよびモルタルの強度、粒径等の骨材の性質および空隙率等であることが読み取れる。これらの影響を概念的に示したものが図-2.3⁵⁾となる。

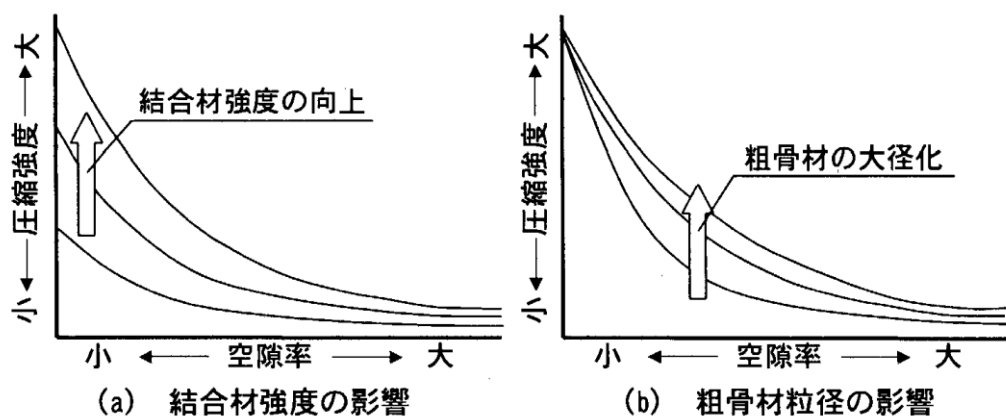


図-2.3 圧縮強度－空隙率に与える各要因の影響⁵⁾

この他、圧縮強度に影響を及ぼす要因としては、キャッピング方法および高さ直径の比 h/d などが挙げられる。

キャッピング方法については、硫黄キャッピングとセメントペーストキャッピングの比較が行われ、POC の強度が低い場合において、硫黄キャッピングを施した POC の強度が僅かに高くなる結果が報告されている。

高さ直径の比 h/d については、図-2.4⁶⁾に示す結果が報告されており、これを元に算出された POC の補正係数は、通常のコンクリートの規定値と比較し僅かに小さいとされ、式 (2.10) に示すような圧縮強度の補正式が提案されている。

$$n = 1 / [a \times \exp \{b(2 - x)\} + c] \quad (2.10)$$

ここに、 n : 圧縮強度補正係数、 x : 供試体の h/d 比 ($0.5 \leq h/d \leq 2.0$)

a, b, c : 実験定数 $a = 0.03, b = 2.2, c = 0.97$

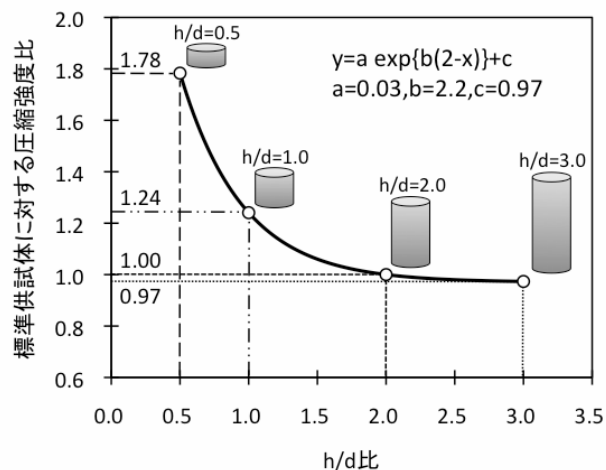


図-2.4 h/d の圧縮強度への影響⁶⁾

2.4 実施工

2.4.1 調合

文献 7)によれば，“道路舗装を想定した場合，ポーラスコンクリートの調合は，水セメント比 30～35%，単位結合材量 350～450kg 程度とされることが多い^{8,9)}。このような富調(配)合の結合剤を用いたポーラスコンクリートの供給体制を整えることは，レディーミクストコンクリートプラントに，製造，運搬，そして洗車の各作業において，新たな負担を強いることになる。また，施工者に対しても，とくに夏場の施工や品質管理には工夫と経験が要求される。”との記述のほか，“重交通を対象としない歩道や駐車場等で，地盤または路床が適度に剛であれば，水セメント比が 50%近くで単位結合材量が少なく，圧縮強度 10N/mm²，曲げ強度 2N/mm² 程度のポーラスコンクリートを使用しても，強度的には実用上何ら問題はないと考えられる。ただし，摩耗や剥奪といった表層の問題には別途対処する必要がある。”とも記載されている。このため，要求される強度レベルに加えて，プラントでの製造，アジテータ車での運搬および現場における施工を考慮した，適切なフレッシュ性状を有する POC の調合設計が肝要であると考えられる。

2.4.2 運搬・練混ぜ

POC をプラントで製造後，現場に運搬し施工をする場合，普通コンクリートと比較してペースト分が乏しく，外気と接する面積が大きい POC は，時間の経過によるフレッシュ性状等への影響が大きいものと予想される。すでに，練混ぜから打ち終わりまでの時間により，図-2.5⁷⁾および図-2.6¹⁰⁾に示すような POC の圧縮強度低下の傾向が報告されている。

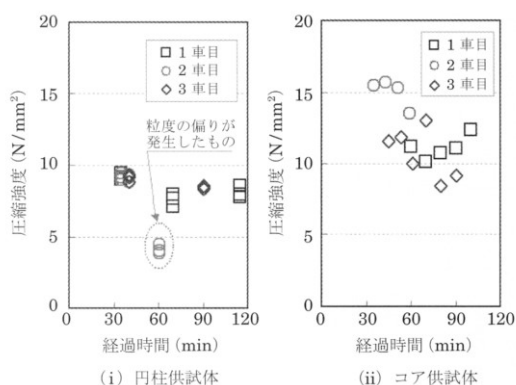


図-2.5 打設した POC の圧縮強度と練上がり後時間の関係 (コテ仕上げ)⁷⁾

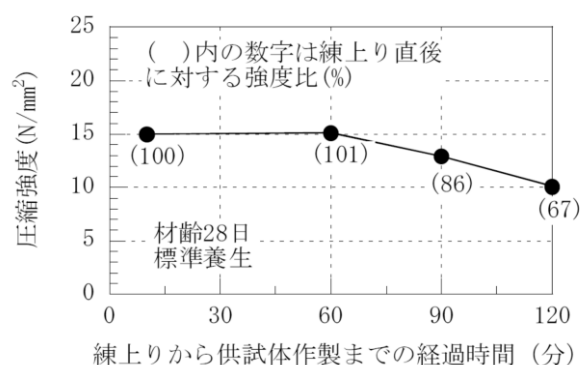


図-2.6 練上りからの経過時間が圧縮強度に及ぼす影響¹⁰⁾

また，時間の経過による POC の乾燥を防ぐ対策としては，養生シートにより覆う方法のほか，写真-2.2¹⁾に示すような噴霧を行うこともある。しかし，噴霧を行う際にはペースト分が流出しないよう注意を要する。

写真-2.2 POC に対する噴霧の例 ¹⁾

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、第三章以降において、運搬時間が及ぼす POC のフレッシュ性状および圧縮強度への影響を詳細に検討する。

2.4.3 敷均し(打設)

POC の敷均し(打設)には、写真-2.3 ¹⁾に示す車道舗装用の施工機械が用いられるほか、中規模面積(数百 m²)および小規模面積における POC の敷均し(打設)には写真-2.4 ¹⁾に示すような POC 敷均し機が用いられることがある。

中規模および小規模面積における、POC 敷均し機およびレーキによる敷均しの影響に関して検討した森鼻 ²⁾によれば、仕上げ前においては、POC 敷均し機と比較してレーキによる敷均しは POC の空隙率が大きくなる傾向を示すものの、仕上げ後にはほぼ同程度となることが報告されている。

写真-2.3 道路用フィニッシャ ¹⁾写真-2.4 POC 敷均し機 ¹⁾

2.4.4 締固めおよび仕上げ

実施工における、POC の仕上げ（締固め）方法には、コテ仕上げおよび表面振動機を用いた締固め（振動締固め）などが用いられる。コテ仕上げは人力で行うため、大規模な施工には不向きである。一方で、表面振動機を用いた締固めは一回の通過で、過剰に締固める（空隙率が小さくなる）などの問題がある。文献¹¹⁾においては、これらのことを踏まえて、POC 仕上げ機が提案されている。POC 仕上げ機を用いた森鼻の検討²⁾では、式(2.11)および(2.12)で定義される振動締固めエネルギーと締固め度（原文表記：締固め率 β ）の関係より、現場で施工された POC の空隙率制御の可能性が示された。

$$E = 2a \left(W + \frac{F}{2} \right) n \cdot t \cdot \frac{1}{S} \quad (2.11)$$

$$a = \frac{\frac{F}{m}}{\omega^2} = \frac{\frac{F}{m}}{(2\pi n)^2} \quad (2.12)$$

ここに、 E ：振動締固めエネルギー($\text{N} \cdot \text{m}/\text{m}^2$)、 a ：片振幅(m)、 W ：振動機重量(N)、 F ：起振力(N)、 m ：振動機質量(kg)、 n ：振動数(Hz)、 ω ：角振動数(rad/sec)、 t ：締固め時間(sec)、 S ：転圧面積(m^2)

しかしながら、振動締固めにおいては不陸の発生状況およびこれによる空隙率への影響の定量的な検討はほぼなされておらず、このため第六章にて検討した。

2.4.5 養生

POC は普通コンクリートと異なり、外部と連続した空隙を有するため、初期養生条件が POC の諸特性に与える影響が予想される。図-2.7¹²⁾に、動弾性係数と養生期間との関係を示す。文献¹²⁾によれば、” POC の動弾性係数は普通コンクリートのそれに比べて水中養生の場合、動弾性係数は初期に上昇し、材齢 14 日程度までに材齢 56 日の値の 95%以上となり以降上昇勾配が緩やかになることを示している。これは、POC が、連続空隙を有するため、水に直接接するペーストの表面積が多く、水和が早期に完了するためと考えられる。”としている。

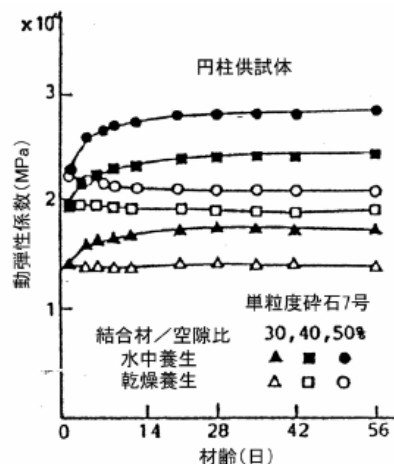


図-2.7 動弾性係数と養生期間との関係¹²⁾

初期養生条件による POC の圧縮強度に及ぼす影響に関しても、図-2.8²⁾に示すように検討がなされており、養生条件に関わらず材齢 3 日までに急激な圧縮強度の発現が確認され、これ以降の強度発現は緩やかとなる傾向を示している。この他、高湿度状態での気中養生およびシート養生は水中養生と比較して、材齢 28 日における圧縮強度が 8 割程度発現しており、現場施工においてはシート養生を行うことが望ましいとの報告がなされている。

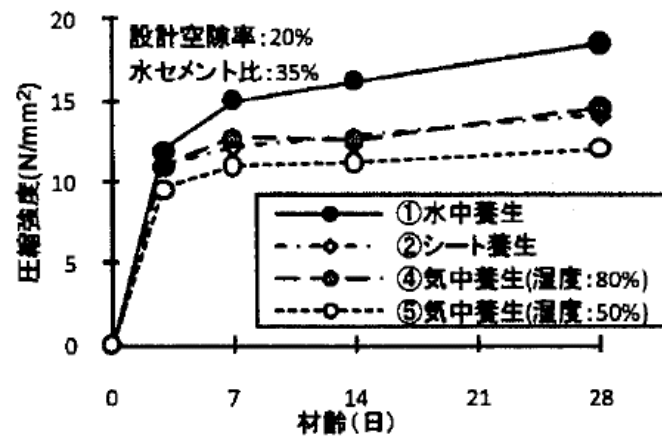


図-2.8 圧縮強度に初期養生条件が及ぼす影響²⁾

第三章

運搬時間が諸特性に及ぼす影響

（実験 A-I）

3.1 はじめに

POC の製造・運搬にあたり，時間の経過による圧縮強度の低下傾向が報告されているものの，アジテータ車等による運搬が POC のフレッシュ性状等に及ぼす影響に関して，系統的な検討がほとんどなされていない点については，2.4.2 節で述べたとおりである。

このため本章では，低速回転のミキサでフレッシュ POC を最大 90 分間攪拌し，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，低速攪拌時の温度条件に通常期（25℃以下）および暑中期（25℃超）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関しても検討した。

3.2 実験方法

3.2.1 要因と水準

表－3.1 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。

POC の水セメント比は，混和剤を使用しない条件においても，混練後のペースト分の流動性が良好な $W/C = 0.45$ を，目標空隙率は強度および透水の両性能がある程度確保可能な $VR = 25\%$ を基本水準とした。

低速攪拌時間は，JCI による”ポーラスコンクリートの製造・施工指針（試案）”¹⁾における，暑中期条件での練混ぜから打ち終わりまでの時間に基づき，最大 90 分とし，運搬時間の経過による影響を検討するため，練混ぜから 30 分毎に試験体を作製した。

また，外気温について通常期条件（25℃以下）および暑中期条件（25℃超）の二種を設け，外気温が及ぼすフレッシュ性状への影響に関しても検討した。

表－3.1 要因と水準

要因	水準
外気温	25℃以下, 25℃超
水セメント比 W/C	0.30, 0.45
目標空隙率 VR (%)	15, 25, 35
運搬(低速攪拌)時間(min)	30, 60, 90

[注] —: 基本水準を示す

3.2.2 使用材料

POC の材料として表－3.2 に示すように，6 号碎石（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。

表－3.2 使用材料の種類と特性値

種類	特性値
水	水道水
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm ³
粗骨材	単粒度碎石6号(5-13mm) 三重県度会郡南伊勢町神津佐産, 表乾密度: 2.73g/cm ³ , 実積率: 58.1%

3.2.3 調合および試験体の作製方法

(1) 調合表

表－3.3 に本実験で使用した POC の調合表を示す。ただし、粗骨材間へのペースト分の充填による粗骨材実積率への補正係数は $\alpha=0.98$ とした。

表－3.3 POC の調合表

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)
25℃超	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
25℃以下	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

(2) 練混ぜおよび攪拌

POC の混練には、まず容量 30L の揺動攪拌型ミキサを用い、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、所定量のセメントペーストを採取し、フロー値の測定およびセメントペースト試験体の作製を行った。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－3.4 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 で低速攪拌を行った。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－3.1 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 を低速攪拌時の回転数として設定している。また、低速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。

表－3.4 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低速攪拌	10	30, 60, 90分	一軸強制パン型ミキサ



写真－3.1 フレッシュ POC の低速攪拌に用いた一軸強制パン型ミキサとインバータ

(3) 試験体作製方法

POC 試験体は、低速攪拌時間 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供試体（ $\phi 50 \times 200\text{mm}$ ）に打ち込んだ。この際、目標空隙率に近い試験体を作成するため、調合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。

(4) 試験体の材齢と作業内容および養生方法

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 時間乾燥後に硫黄キャッピングを実施している。

3.2.4 試験項目および試験方法

(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、試験体を作製する低速攪拌時間 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, 13)}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。

3.3 実験結果および考察

3.3.1 外気温および POC 温度

図-3.1(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℃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。

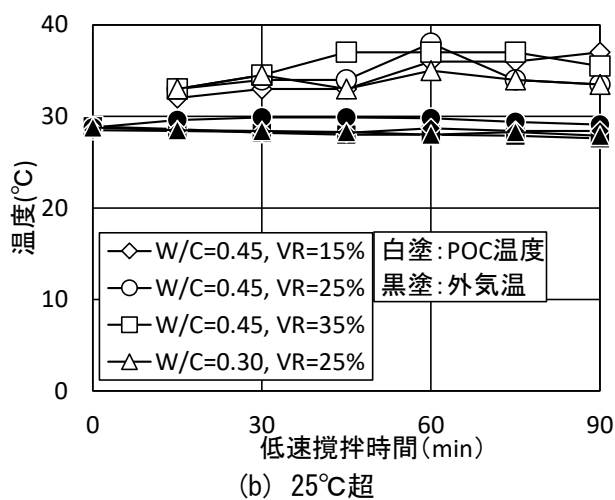
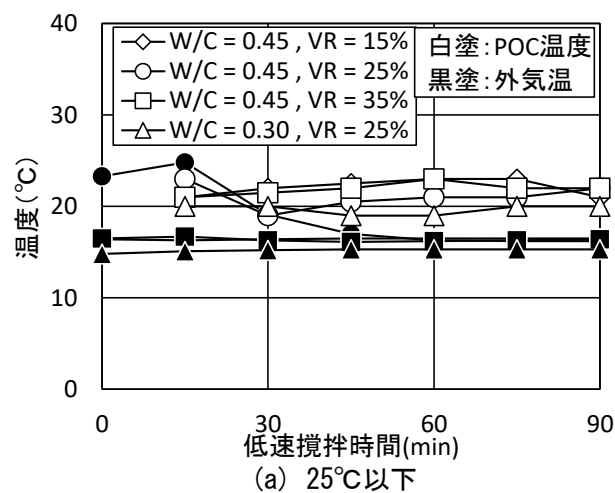











図-3.1 外気温および POC 温度の変化

3.3.2 フレッシュ性状

表－3.5 に暑中期条件における，低速撈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¹³⁾と，ペースト分の状態の評価を併記している。

表より，低速撈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。

表－3.5 暑中期条件（外気温 25℃超）における撈拌時間によるフレッシュ状態の変化

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


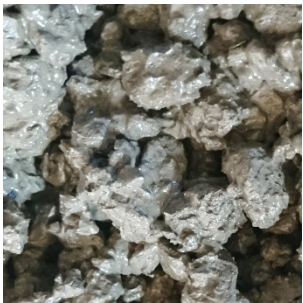
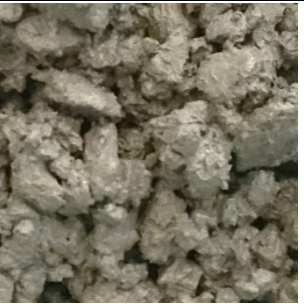






[注] POC のフレッシュ状態（目視による評価）…

- △ (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)

また、通常期条件における POC のフレッシュ状態の、低速撹拌時間による変化を表-3.6 に示す。前掲した暑中期条件と同様に、表中の写真はそれぞれ 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、暑中期条件と比較して緩やかであるものの、低速撹拌時間の経過によるペースト分の乾燥が確認された。この傾向は、暑中期条件と同様に、目標空隙率が 25%以上の試験体で顕著であり、施工性の低下も確認された。

表-3.6 普通条件（外気温 25℃以下）における撹拌時間によるフレッシュ状態の変化

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

〔注〕POC のフレッシュ状態（目視による評価）…

- △ (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、ぱさついている)

3.3.3 圧縮強度

(1) 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、低速撹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、低速撹拌時間 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-3.3 によれば、暑中期条件の試験体が低速撹拌時間 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、前項の低速撹拌時間によるフレッシュ性状の変化(表-3.5 および表-3.6 参照)で示したように、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、低速撹拌時間 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。

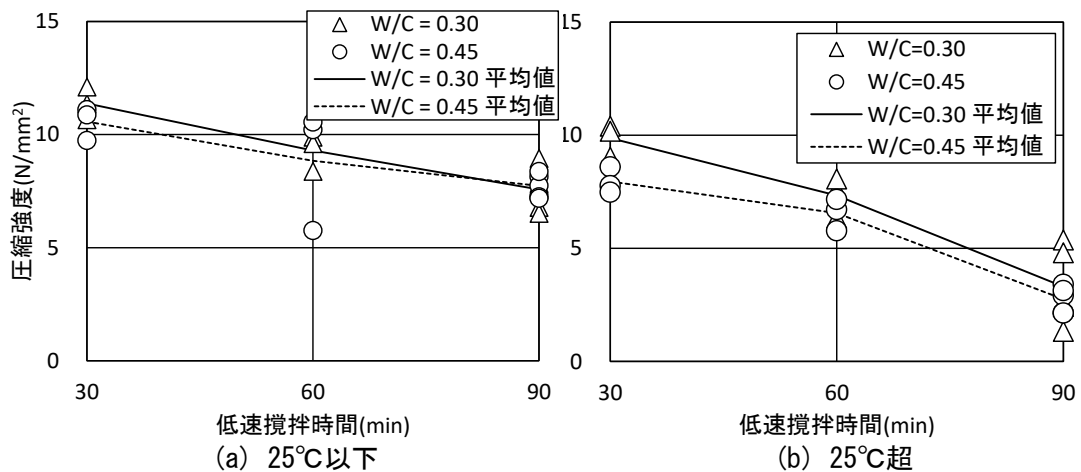


図-3.2 水セメント比が異なる POC の圧縮強度の変化

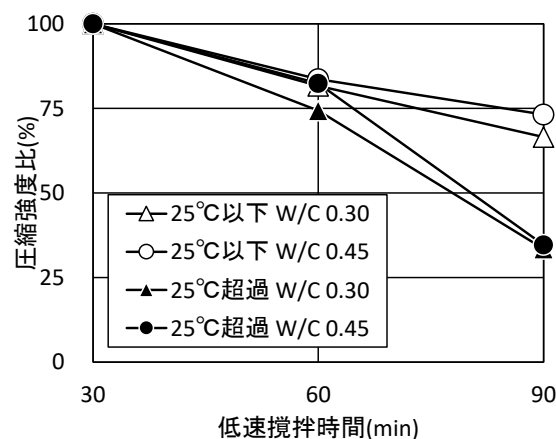


図-3.3 低速撹拌時間の経過に伴う圧縮強度比の変化

(2) 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-3.4 (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/mm^2) 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、低速撈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-3.2 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、撈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、低速撈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 において低速撈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、打込みまでに水和反応（凝結）が進行していたことと、これに加え、図-3.5 に示すように、ペースト分の乾燥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などが考えられる。

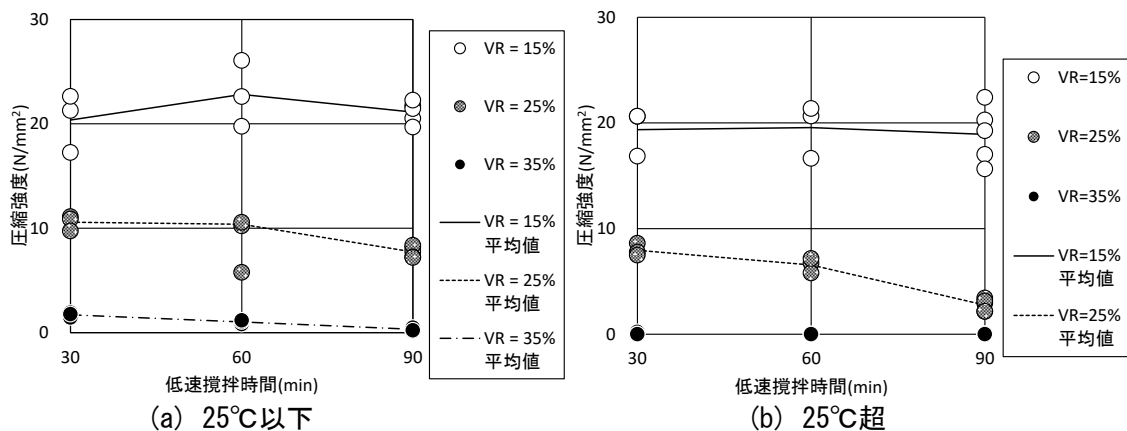
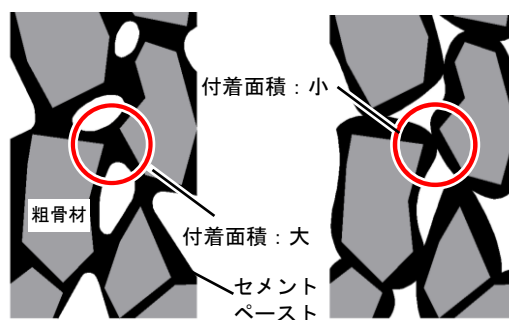


図-3.4 目標空隙率が異なる POC の圧縮強度の変化

写真-3.2 骨材の剥落が生じた POC (25°C 超, $VR = 35\%$, 低速撈拌時間 60 分)



(a) ペースト流動性：良 (b) ペースト流動性：悪

図－3.5 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

3.3.4 圧縮強度と空隙率の関係

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^{1,5)}において提案された、以下の圧縮強度比－空隙率の関係式(3.1)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式(3.1)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。

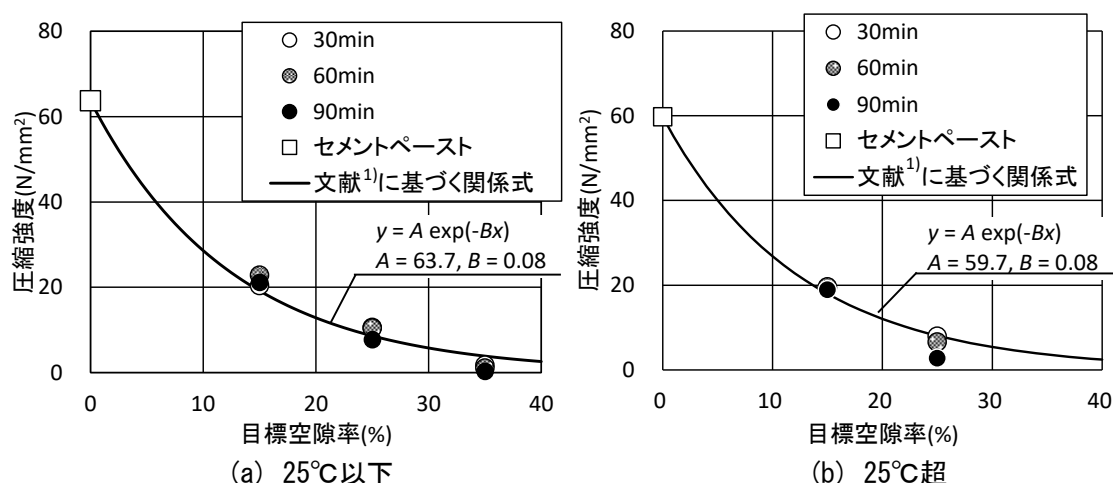


図-3.6 目標空隙率と圧縮強度の関係

3.4 まとめ

本章では、練混ぜ後の低速撹拌時間および低速撹拌時の外気温がポーラスコンクリートに及ぼす、フレッシュ性状および圧縮強度への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、低速撹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°C以下の試験体は、25°Cを越える条件のものと比較して、低速撹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、低速撹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。

本章における検討では、低速撹拌時間による圧縮強度の低下傾向が確認された。しかしながら、POC のフレッシュ性状の維持を目的とした混和剤の使用および低速撹拌時のミキサ種別による POC の諸特性への影響に関しての検討はなされていない。

このため、第四章においては、暑中期条件で傾胴式ミキサを用い、POC の諸特性に及ぼす混和剤の影響を検討する。

第四章

混和剤（凝結遅延剤，高性能 AE 減水剤 遅延型）の影響（実験 A-II）

4.1 はじめに

前章では，一軸強制パン型ミキサを用いて暑中期および通常期条件における，低速撹拌時間が POC のフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響を検討した。その結果，目標空隙率 25% 程度では水セメント比によらず低速撹拌時間の経過に伴い圧縮強度が低下すること，外気温が比較的低い通常期条件においては圧縮強度の低下傾向が緩やかになること，ペースト分が多い目標空隙率 15% においては低速撹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が明らかとなった。

また，外気温の条件にかかわらず，目標空隙率 25% 以上のフレッシュ性状は低下傾向が確認されており，プラントでの製造，アジテータ車での運搬および現場における施工性に影響を及ぼすことが予想される。フレッシュ性状の改善およびペースト分の流動性の維持するためには，混和剤を使用することが望ましいが，フレッシュ POC の経時変化に及ぼす混和剤の影響に関する検討はほぼなされていない。

このため，本章では POC のフレッシュ性状の低下が著しいと予想される暑中期を再現した条件で，混和剤（凝結遅延剤，高性能 AE 減水剤遅延型）が及ぼす影響を明らかにするため，混和剤の種類および低速撹拌時間を要因とする実験を行った。また本実験では，アジテータ車による運搬条件により近い，傾胴式ミキサを用いて撹拌を行った。

4.2 実験方法

4.2.1 要因と水準

表－4.1 に実験の要因と水準を示す。表中の低速撹拌時間は，高速(32rpm)で所定の時間練混ぜを行った後，低速（1.5～2rpm）にてフレッシュ POC の撹拌を行う時間を示している。

本章では，混和剤が及ぼす POC のフレッシュ性状および圧縮強度への影響を検討するため，凝結遅延剤，高性能 AE 減水剤遅延型および両混和剤を使用する水準を設けた。

表－4.1 要因と水準

要因	水準
混和剤	なし
	凝結遅延剤
	高性能AE減水剤遅延型
	凝結遅延剤および高性能AE減水剤遅延型
運搬(低速撹拌)時間(min)	30, 60, 90

4.2.2 使用材料

POC の使用材料を表－4.2 に示す。

化学混和剤として，ペースト分の流動性の維持を目的として凝結遅延剤を，流動性の改善を目的として高性能 HE 減水剤（遅延型）を用いた。

表－4.2 使用材料の種類と特性値

種類	特性値
水	上水道水，密度：1.00g/cm ³
セメント	普通ポルトランドセメント，密度：3.16g/cm ³
粗骨材	単粒度碎石6号(5-13mm) 三重県度会郡南伊勢町神津佐産，表乾密度：2.73g/cm ³ ，実積率：58.1%
化学混和剤	ポリヒドロキシカルボン酸系凝結遅延剤，密度：1.22-1.28g/cm ³ ポリカルボン酸系高性能AE減水剤遅延型，密度：1.04-1.22g/cm ³

4.2.3 調合および試験体の作製方法

(1) 調合表

表－4.3 に POC の各調合を示す。凝結遅延剤および高性能 AE 減水剤遅延型のセメント量に対する添加量は，予備実験の結果より決定した。

表－4.3 POC の調合表

使用混和剤	VR (%)	W/C (-)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	G (kg/m ³)	添加量/C (%)	
						HAE(遅延型)	凝結遅延剤
なし	25	0.3	82.2	274.1	1554	—	—
凝結遅延剤						—	0.20
高性能AE減水剤(遅延型)						0.40	—
凝結遅延剤 + 高性能AE減水剤(遅延型)						0.40	0.20

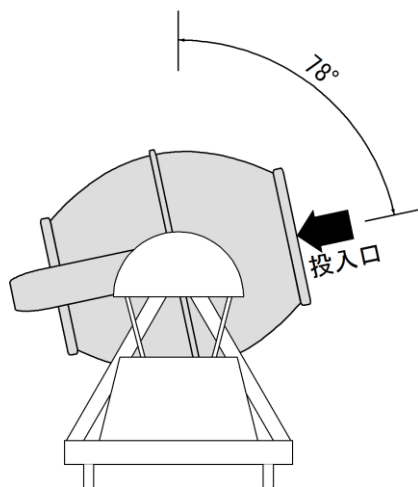
[注] W/C：水セメント比，FL：ペーストフロー値

(2) 練混ぜおよび攪拌

POC の練混ぜおよび低速攪拌時には傾胴式ミキサを用い，図－4.1 に示すようにドラムの角度を 78° とした。

練混ぜは，粗骨材およびセメントをミキサに投入し，32rpm で 60 秒間混練した後，ミキサ内部の付着物を掻き落として水を投入し，32rpm で 180 秒間練り混ぜた。

その後，傾胴式ミキサの蓋を閉めて低速回転(1.5～2rpm)で攪拌を行った（表－4.4 参照）。なお，練混ぜおよび低速攪拌は，暑中期の気温条件を再現した気温 35℃，相対湿度 50%の恒温槽内で実施した。



図－4.1 練混ぜおよび低速撹拌時のドラム角度の概念図

表－4.4 各作業工程におけるミキサ角度，回転数および時間の組み合わせ

作業工程	回転数(rpm)	時間	ドラム角度(°)
粗骨材・セメント練混ぜ	32	60秒	78
POC練混ぜ	32	180秒	
POC低速撹拌	1.5～2.0	30, 60, 90分	

(3) 試験体作製方法

POC 試験体は，低速撹拌時間 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供試体（φ 50×200mm）に打ち込んだ。この際，目標空隙率に近い試験体を作成するため，調合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，低速撹拌時間 30, 60 分においては各 3 本，試験体端面での骨材の剥落等が予測される低速撹拌時間 90 分に関しては，各 5 本の円柱供試体を作製した。

(4) 試験体の材齢と作業内容および養生方法

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 時間乾燥後に硫黄キャッピングを実施している。

4.2.4 試験項目および試験方法

(1) 外気およびフレッシュ POC の温度測定

恒温槽内気温およびフレッシュ POC の温度は，低速撹拌時間 15 分毎に計測を実施した。気温は恒温槽内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，低速撹拌時間 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，試験体を作製する低速撹拌時間 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, 13)}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。

4.3 実験結果および考察

4.3.1 恒温槽内気温および POC 温度

図-4.2 に恒温槽内の気温とフレッシュ POC の温度の変化を示す。図より，使用する混和剤によらず，POC 温度は低速撹拌時間の経過に伴い，恒温槽内の気温とほぼ同等になることが確認できる。これは，本実験では恒温槽で暑中期条件を再現しており，日射によるミキサ内部の温度上昇が生じないため，前章と比較してフレッシュ POC の温度上昇は緩やかになったものと考えられる。

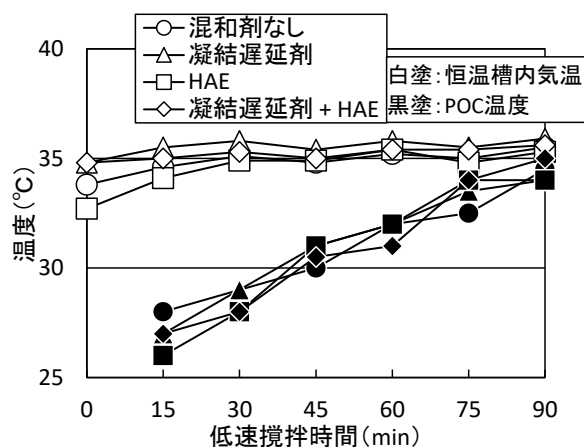






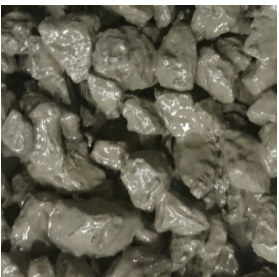
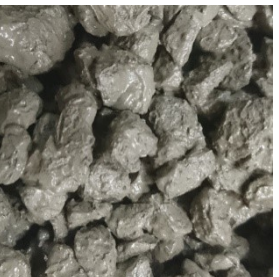
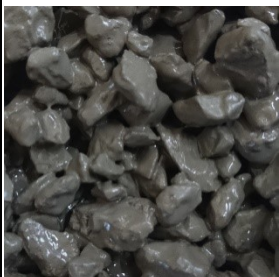





図-4.2 恒温槽内気温および POC の温度変化

4.3.2 フレッシュ性状

表-4.5 に各調合の低速撹拌時間によるフレッシュ性状の変化を示す。表中の写真の範囲は 50mm×50mm とし，写真下部に示す記号および番号は，POC のフレッシュ状態の目視による評価およびペースト分の詳細な状態を示している。

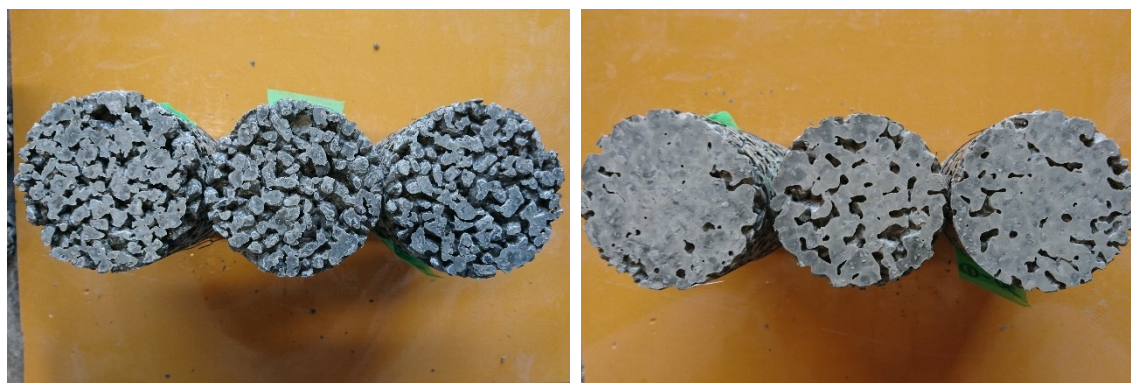
同表より，混和剤を用いない POC と比較して，混和剤を使用した POC はその種類によらず，低速撹拌時間 90 分時点においても良好なフレッシュ性状を維持することが確認された。しかしながら，高性能 AE 減水剤を用いた調合においては，低速撹拌時間 30 分時点のペースト分の流動性が著しく高いため，写真-4.1 に示すようにペースト分の底面だれが確認された。

表－4.5 各調合の攪拌時間によるフレッシュ状態の変化 (VR = 25%, W/C = 0.30)

		低速攪拌時間（分）		
		30	60	90
混和剤種類	混和剤なし			
		○ (2)	○ (2)	△ (2～1)
	凝結遅延剤			
		○ (3)	○ (3)	○ (2)
	HAE			
		△ (4～3)	○ (3)	○ (3)
	HAE ＋ 凝結遅延剤			
		△ (4～3)	○ (3)	○ (3)

[注] POC のフレッシュ状態（目視による評価）…

- △ (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、ぱさついている)



(a) 混和剤なし

(b) HAE（遅延型）のみ

写真-4.1 円柱試験体底面のペーストだれの状況（低速攪拌時間 30 分）

4.3.3 圧縮強度

(1) ミキサ種類による POC の圧縮強度の変化

図-4.4 に低速攪拌時に用いるミキサの種類による、圧縮強度の変化の比較を示す。同図より、一軸強制パン型ミキサを用いた POC と比較して、傾胴式ミキサの試験体は低速攪拌時間の経過に伴う圧縮強度の低下傾向はほとんど見られない。これは、一軸強制パン型ミキサは形状の性質上、フレッシュ POC が内部で広がりやすく、傾胴式ミキサと比較して外気と接触する面積が大きくなる。これに加えて、アジテータ車の攪拌速度(約 1~2rpm)と比較して、10rpm 程度と攪拌速度が速いため、ペースト分の乾燥がより促進されたものと考えられる。

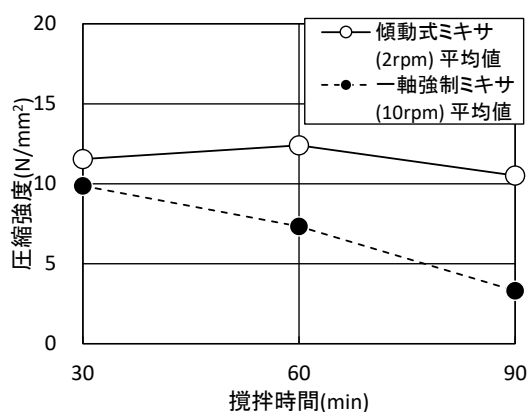


図-4.4 攪拌時のミキサの種類による圧縮強度の変化の比較

(2) 混和剤による POC の圧縮強度の変化

各 POC 試験体の圧縮強度の結果を図-4.5 に示す。同図より、混和剤を用いない POC と比較して、混和剤を用いた POC はいずれの混和剤種類によっても圧縮強度が増加する傾向が得られた。これは、4.3.2 項に示したように、混和剤の添加によりペースト分の流動性が改善され、3.3.3 節で示したように（図-3.5 を参照）、粗骨材間の付着面積がより増大した

ものと考えられる。

また、混和剤の有無によらず、低速撈拌時間の経過に伴う圧縮強度の低下傾向は明確には確認されなかった。これは先述の通り、傾胴式ミキサによる低速撈拌時には、フレッシュ POC が外気と接する面積が小さく、撈拌中の水分の逸散が少ないことに加えて、混和剤を使用した POC に関しては、表-4.5 に示したように混和剤の凝結遅延効果により、ペースト分の流動性が良好に維持されたため、粗骨材間の付着状況が撈拌時間によらずほぼ同等に保たれたものと考えられる。

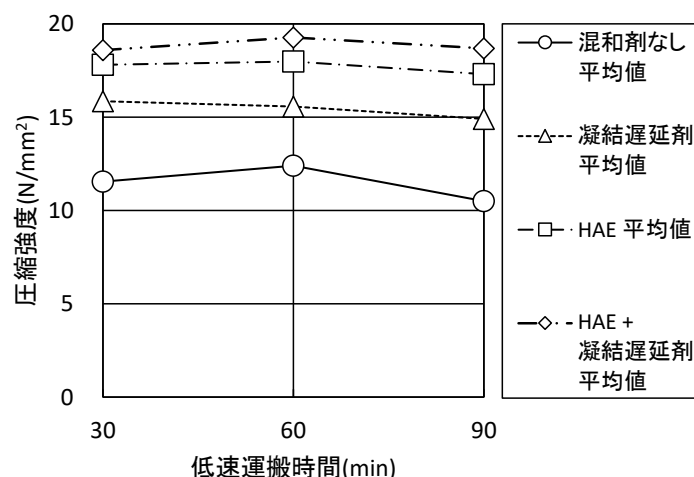


図-4.4 低速撈拌時間と全空隙率（質量法）の関係

4.4 まとめ

本章では、混和剤がポーラスコンクリートに及ぼす、フレッシュ性状および圧縮強度への影響に関して検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 凝結遅延剤および高性能 AE 減水剤（遅延型）を使用したポーラスコンクリートにおいて、低速撈拌時間 90 分時点においても良好なフレッシュ状態を示す。
- (2) 混和剤を用いないポーラスコンクリートと比較して、混和剤を用いたポーラスコンクリートの圧縮強度は約 25～80% 程度増加する傾向が見られた。
- (3) 低速撈拌に傾胴式ミキサを用いたポーラスコンクリートは、混和剤の有無によらず、撈拌時間による圧縮強度への影響はほぼ見られなかった。

第五章

実施工条件における運搬時間が 諸特性に及ぼす影響 （実験 A-III）

5.1 はじめに

前章では、傾胴式ミキサを用いて、低速攪拌時間および混和剤が POC のフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響を検討した。その結果、一軸強制パン型ミキサによる検討と比較して低速攪拌時間 90 分時点においても、圧縮強度の低下傾向があまり見られないこと、混和剤の使用によるペースト分の流動性向上に起因すると考えられる POC の圧縮強度の増大が確認された。

しかしながら、これまでの検討の中でも確認された低速攪拌時間の経過による、フレッシュ性状の低下が、施工性に及ぼす影響に関して定量的な検討は十分にはなされていない。

このため本章では、アジテータ車によるフレッシュ POC の運搬および締固めに POC 仕上げ機を用いる実施工条件で POC スラブを作製し、運搬時間が POC のフレッシュ性状に及ぼす影響と、これに加えて振動締固めエネルギー空隙率関係に及ぼす影響に関して検討を行う。

5.2 実験方法

5.2.1 要因と水準

表－5.1 に実験の要因と水準を示す。表中の運搬時間は混練後のフレッシュ POC を、アジテータ車で低速攪拌しつつ運搬する時間を示す。

フレッシュ POC を敷き均した後の POC 仕上げ機の通過回数について、振動締固めエネルギー空隙率関係に運搬時間が及ぼす影響を検討するため、通過回数の水準を 1, 2, 4 回設けた。なお、基本水準である POC 仕上げ機の通過回数 2 回は、既往の研究²⁾より、練上がり直後の POC について、締固め度 95%程度となるため、これを定めた。

また、現場における POC スラブの施工の際には、ワーカビリティの改善を目的としてフレッシュ POC への噴霧を実施することも報告がなされている¹⁾。このため、本章においては、噴霧による POC のフレッシュ性状および圧縮強度への影響に関しても検討した。

表－5.1 要因と水準

要因	水準
POC仕上げ機通過回数(回)	1, 2, 4
運搬時間(min)	30, 60, 90
噴霧	あり, なし

[注] 〃: 基本水準を示す

5.2.2 使用材料

POC の材料として、表－5.2 に示すように、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。

表－5.2 使用材料の種類と特性値

種類	特性値
水	上水道水, 密度: 1.00g/cm^3
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm^3
粗骨材	単粒度碎石6号(5-13mm), 表乾密度: 2.73g/cm^3 , 実積率: 58.1%

5.2.3 調合および試験体の作製方法

(1) 調合表

表－5.3 に調合表を示す。ただし、POC 施工時の天候は雨天であったため、粗骨材の表面水率を 1.3% とし、調合実施時の水量の補正を行っている。

表－5.3 POC の調合表

VR (%)	W/C (-)	単位量(kg/m^3)			表面水率(%)
		W	C	G	
25	0.45	99	220	1554	1.3

[注] VR: 目標空隙率, W/C: 水セメント比

(2) 練混ぜおよび運搬

POC の練混ぜおよび運搬時には写真－5.1 に示すような、アジテータ車を用いた。

練混ぜは、粗骨材およびセメントをミキサに投入し、14rpm で空練りを行った。その後、粗骨材およびセメントが十分に混ざったことを確認し、水を順次投入して 14rpm で混練した。

練混ぜ状態を目視で確認した後、アジテータ車のドラムを低速回転(1.6rpm)とし、運搬条件の再現を行った。なお、施工当時の天候は雨天、気温 18°C 、湿度 86% であった。



写真－5.1 実験に使用したアジテータ車

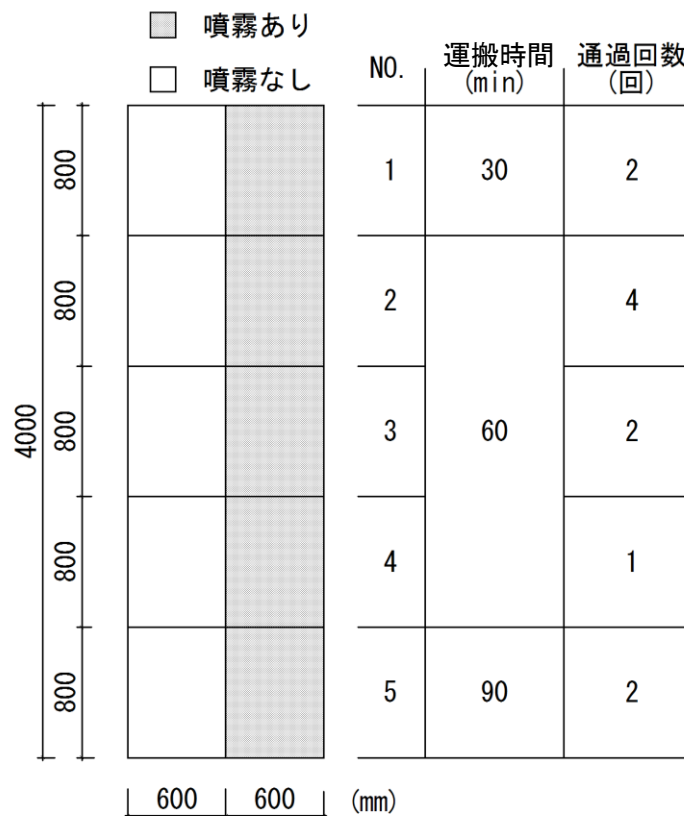
(3) 施工条件および試験体作製方法

POC 試験体および POC スラブは、運搬時間 30 分毎にミキサから所定量を採取し、それぞれプラスチック製円柱供試体 ($\phi 50 \times 200\text{mm}$) および図－5.1 に示す施工区画

（1200×100×800mm）に打ち込んだ。この際、円柱試験体に関しては、目標空隙率に近い試験体を作成するため、調合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込みを行った。

POC スラブは、フレッシュ POC を施工区画に投入後コテで敷均しを行い、POC 仕上げ機（表－5.4 参照）の通過により締固めを行った。円柱試験体については、締固めを 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、圧縮強度試験および容積法による空隙率試験に供するコアおよび円柱試験体は各 3 本作製した。

また POC スラブは、POC 仕上げ機の通過により締固めを行う性質上、コア抜きを実施する位置により空隙率の変動が予想されるため、前述の 3 本に加え、追加で 6 本コア抜きを実施し、計 9 本を質量法による空隙率試験に供した。



図－5.1 POC スラブ施工区画（スラブ厚さ 100mm）と水準の組み合わせ

表－5.4 POC 仕上げ機諸元表

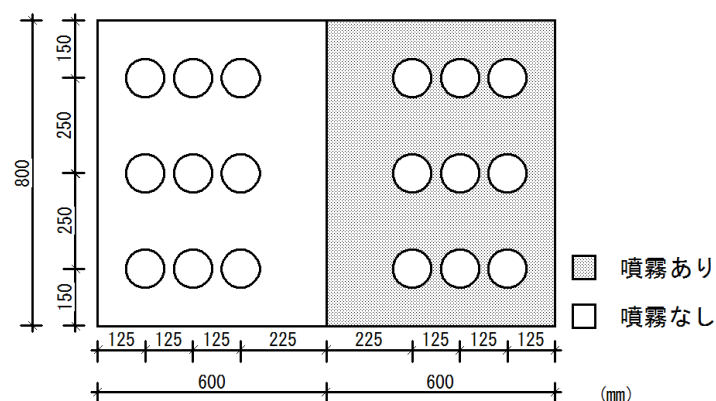
転圧板	長さ* ¹ (mm)	310	
	幅* ¹ (mm)	570	
	面積* ¹ (m ²)	0.177	
重量* ¹ (kg)		44.0	
振動数* ² (Hz)		91.7	
起振力* ² (kN)		4.9	
振幅* ³ (mm)		0.335	
最大速度* ¹ (m/min)		6	
振動締固めエネルギー* ³ (kN・m/m ²)		1 回	3.1
		2 回	6.2
		4 回	12.4

[注] *¹:実測値, *²:エンジンのカタログ値, *³:理論値

(4) 試験体の材齢と作業内容および養生方法

現場に施工した POC はシート養生とし、散水を毎日実施した。材齢 14 日目にコア抜きを実施し、採取されたコア試験体は材齢 28 日まで標準水中養生とした。円柱試験体は材齢 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。

ただし各試験体について、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 時間乾燥後に硫黄キャッピングを実施している。



図－5.2 POC スラブのコア抜き実施位置

5.2.4 試験項目および試験方法

(1) 外気およびフレッシュ POC の温度測定

外気温およびフレッシュ POC の温度は、運搬時間 30 分毎に計測を実施した。気温は風通しが良い日陰に設置された抵抗温度計で、フレッシュ POC は打込み時に採取した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、運搬時間 30 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、試験体を作製する運搬時間 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⁾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コア試験体および円柱試験体は、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。

ただし、コア試験体は高さ直径比 h/d が 1.0 程度であるため、式(2.10)に基づき圧縮強度の補正を行っている。

5.3 実験結果および考察

5.3.1 外気温および POC 温度

図-5.3 に外気温およびフレッシュ POC の温度の計測結果を示す。同図より、3.3.1 節に示した結果と同様に、外気温と比較して POC 温度が高くなる傾向が得られた。

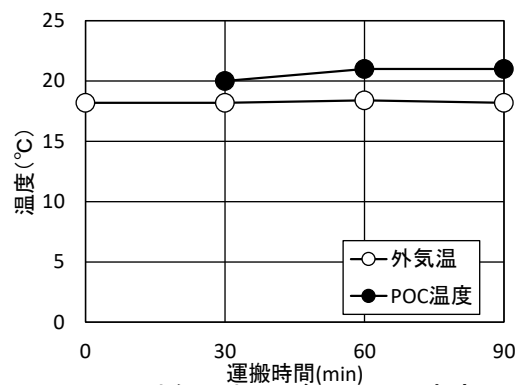








図-5.3 外気温および POC の温度変化

5.3.2 フレッシュ性状

表－5.5 に運搬時間および噴霧の有無によるフレッシュ性状の変化を示す。表中の写真の範囲は 50mm×50mm とし、写真下部に示す記号および番号は、POC のフレッシュ状態の目視による評価およびペースト分の詳細な状態を示している。

同表より、噴霧なしのフレッシュ POC においては、これまでの検討と同様にフレッシュ性状の低下が確認された。一方で、噴霧ありの POC においては、低下したフレッシュ性状の改善を目的として噴霧を実施しているため、運搬時間によらずフレッシュ性状はほぼ一定であることが確認できる。

表－5.5 運搬時間によるフレッシュ状態の変化（VR = 25%, W/C = 0.45）

		運搬時間（分）		
		30	60	90
噴霧の有無	噴霧なし			
		○ (2)	○ (2)	△ (2～1)
	噴霧あり			
		○ (3)	○ (3)	○ (3)

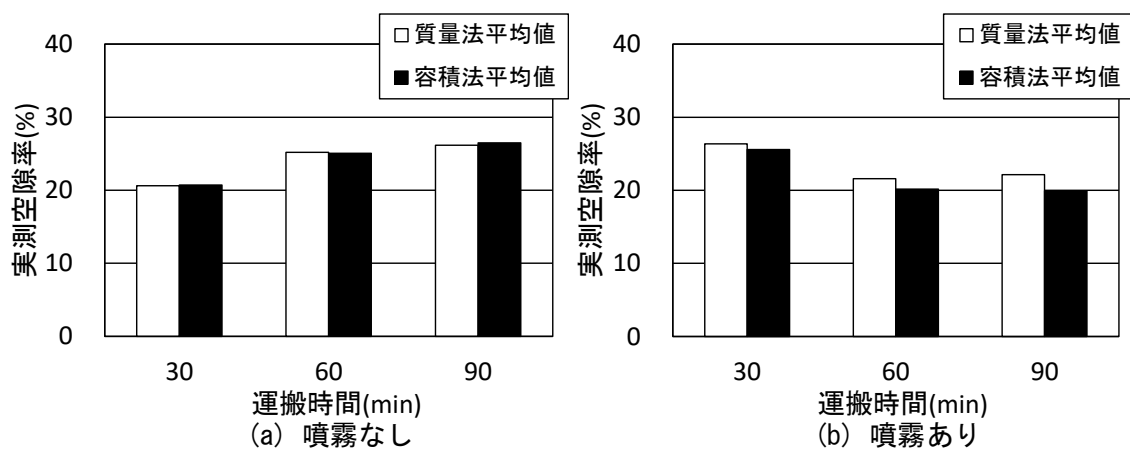
[注] POC のフレッシュ状態（目視による評価）…
 △（4：ペーストが糸を引く状態）
 ○（3：ペーストがやや糸を引く）
 ○（2：ペーストは糸を引かないがやや粘りがある）
 ×（1：粘りがなく、ぱさついている）

5.3.3 空隙率

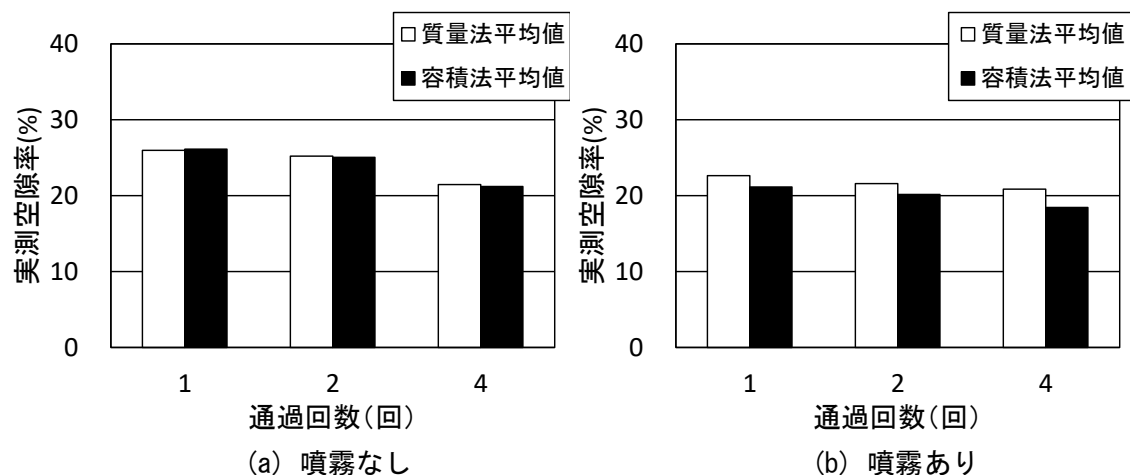
(1) 容積法と質量法の比較

図－5.4 および図－5.5 に運搬時間および締固め回数による、容積法および質量法により計測された空隙率の変化を示す。同図より、噴霧を実施していない試験体と比較して、噴霧を行った試験体は、測定方法によって空隙率に差が生じていることが確認できる。これは、噴霧により増加した単位水量が、質量法による算出時に考慮されていないため、容積法と比較して過大に評価されたものと考えられる。

この結果を踏まえ、後述する空隙率分布および POC スラブの平均空隙率の算出の際には、質量法により得られた全空隙率に対して補正を行うものとした。



図－5.4 運搬時間による容積法および質量法空隙率の変化（通過回数 2 回）



図－5.5 締固め回数による容積法および質量法空隙率の変化（運搬時間 60 分）

(2) 空隙率分布

施工区画ごとに 9 本の試験体を，質量法による空隙率試験に供し，得られた POC スラブ内の空隙率分布を図－5.6，5.7 および 5.8 に示す。ただし，前項にも記した通り，質量法および容積法により算出される空隙率には差異があるため，質量法のみの実施となる各施工区画 6 本の試験体については，両試験方法を実施した 3 本の試験体から式（5.1）による空隙率の補正を行い，空隙率を算出した。

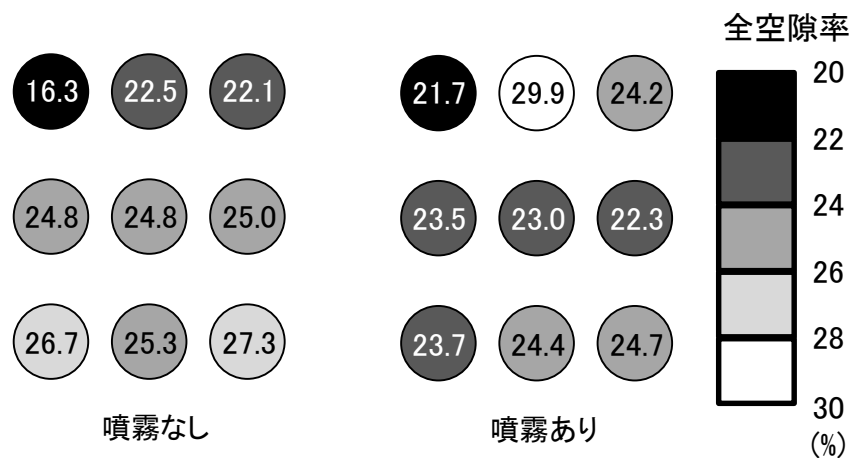
$$A_H = A_t \times \frac{A_t}{A_c + A_s} \quad (5.1)$$

ここに， A_H ：補正後の全空隙率(%), A_t ：質量法による全空隙率(%),

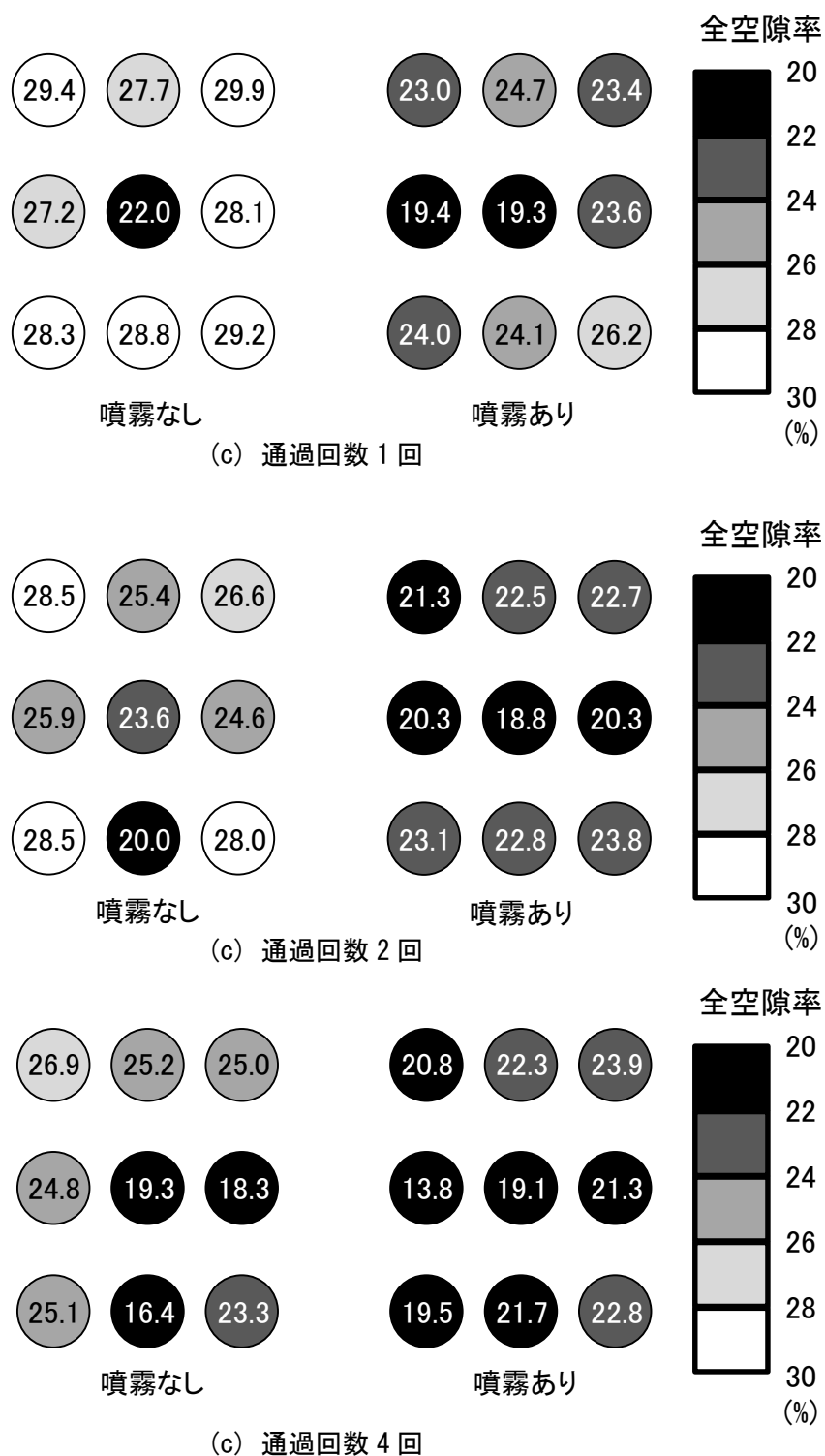
A_c, A_s ：容積法による連続空隙率および準連続空隙率(%)

なお，本章において平均空隙率を記載する際には，上記の方法により得られた各施工区画 9 本の空隙率の平均値を記載している。

同図より，噴霧の有無によらず，POC スラブの中央部付近のコア試験体は，空隙率が比較的低いことが確認できる。これは，図－5.9 に示すように，POC 仕上げ機の通過経路において，振動締固めが行われる領域が重複するため，他のコア試験体と比較して締固めが進行したと考えられる。



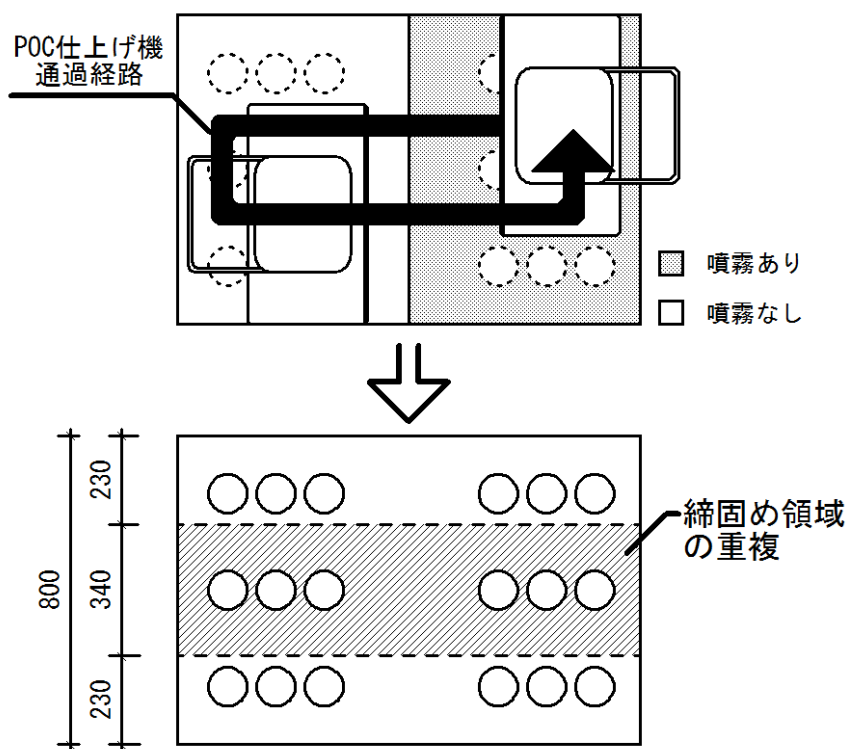
図－5.6 運搬時間 30 分時点における空隙率分布（通過回数 2 回）



図－5.7 運搬時間 60 分時点における空隙率分布



図－5.8 運搬時間 90 分時点における空隙率分布（通過回数 2 回）



図－5.9 POC 仕上げ機の通過経路による締固めの重複の概念図

(3) 運搬時間および通過回数による平均空隙率の変化

図－5.10 および図－5.11 に，運搬時間および締固め回数による，各施工区画のコア試験体 9 本の平均空隙率の変化を示す。

運搬時間による POC スラブの平均空隙率への影響を検討した図－5.10 においては，噴霧なしの POC スラブでは運搬時間の経過に伴う平均空隙率の増大が確認された。これは，噴霧を行わない POC は，時間の経過に伴いペースト分の流動性が低下し，これにより締固め

に要するエネルギーが増加するため、POC スラブの平均空隙率が増大したものと考えられる。

一方で、噴霧を実施した POC スラブにおいては、平均空隙率は減少する傾向が得られた。これは噴霧により、POC のペースト分の容積が増大したことに加え、ペースト分の流動性の改善により同程度の振動締固めエネルギーにおいても、より締固めが容易になったためと考えられる。

また、図-5.11 より、噴霧の有無によらず、振動締固めの進行に伴って POC スラブの平均空隙率は低下する傾向が得られた。加えて噴霧ありの POC スラブにおいては、噴霧なしのものと比較して、平均空隙率はより低くなる傾向が確認された。これも、前述したとおり、噴霧によるペースト容積の増加と、流動性の改善によるものと考えられる。

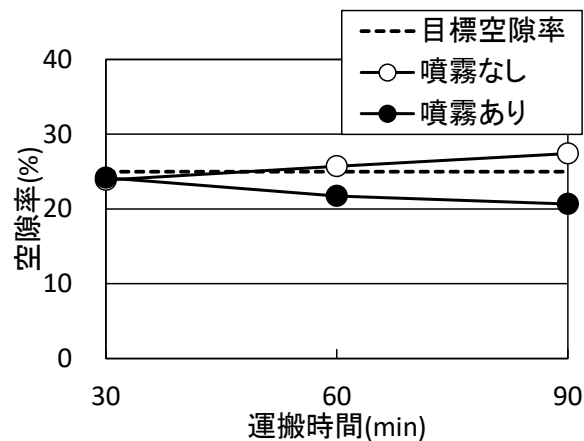


図-5.10 運搬時間による POC スラブ平均空隙率の変化（通過回数 2 回）

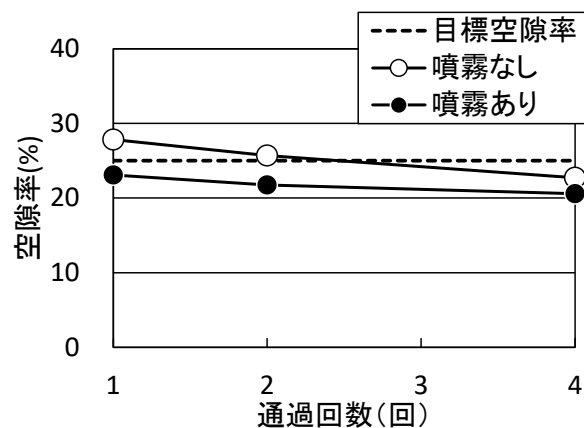


図-5.11 締固め回数による POC スラブ平均空隙率の変化（運搬時間 60 分）

(4) 振動締固めエネルギーと POC スラブの空隙率の関係

図-5.12 に、振動締固めエネルギー-空隙率関係を示す。図中に示す運搬時間 0 分の点は、既往の研究²⁾で報告された同調合の試験結果をプロットしたものである。

同図より、運搬時間 0 分の振動締固めエネルギー-空隙率関係と概ね類似している点から、運搬時間 60 分時点においても、振動締固めエネルギーと空隙率の間には一定の関係が維持されるものと考えられる。また、前述のとおり、同程度の振動締固めエネルギーを加える場合、運搬時間の増大に伴い、空隙率が増大する傾向が確認された。

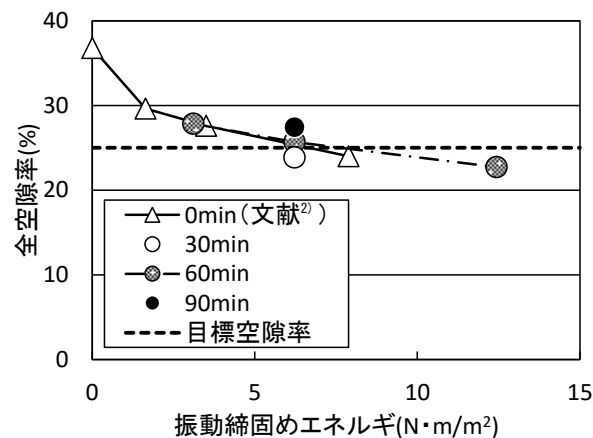


図-5.12 振動締固めエネルギーと空隙率の関係 (VR = 25%, W/C = 0.45, 噴霧なし)

5.3.4 圧縮強度

図-5.13 および図-5.14 に、運搬時間および通過回数による圧縮強度の変化を示す。両図より、噴霧ありのコア試験体においては、運搬時間および通過回数が及ぼす圧縮強度への影響はほぼ見られなかった。これは、前述した噴霧による空隙率の低下と、ペースト分の流動性の改善に伴う粗骨材間の良好な接着により圧縮強度は増加するものの、噴霧により水セメント比が変動し、セメントペースト強度の低下が生じるため、圧縮強度がほぼ一定となったものと考えられる。

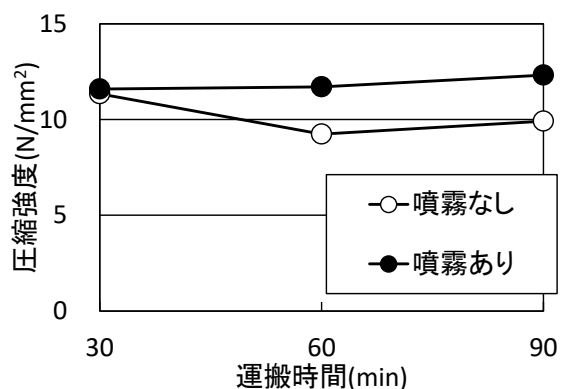


図-5.13 運搬時間による圧縮強度の変化
(コア試験体, 通過回数 2 回)

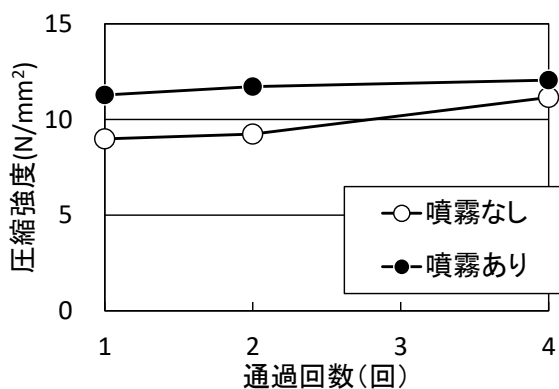


図-5.14 通過回数による圧縮強度の変化
(コア試験体, 運搬時間 60 分)

また、噴霧なしの POC について、円柱試験体とコア試験体の圧縮強度の比較を図-5.15 に示す。同図より、円柱試験体と比較して、コア試験体は運搬時間 60 分時点で圧縮強度が約 80%程度となっていることが確認できる。これは既往の研究²⁾で報告された、シート養生と標準水中養生の強度発現の差異とほぼ合致する結果であるため、初期養生条件の違いによるものと考えられる。

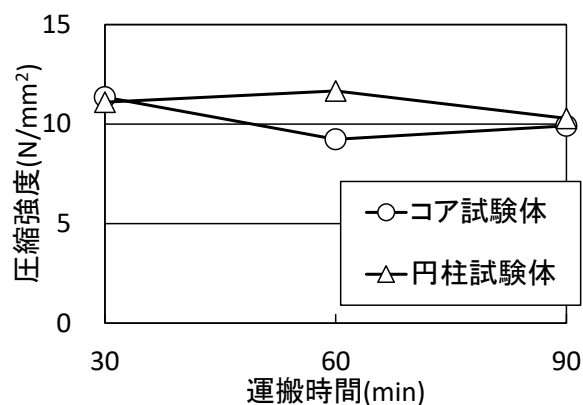


図-5.15 コア試験体および円柱試験体の圧縮強度の変化

5.3.5 圧縮強度と空隙率の関係

図-5.16 に、容積法による空隙率と圧縮強度の関係を示す。なお、図中の全空隙率 0% には、第三章の 25℃ 以下の条件で作製された同調合のセメントペースト強度を参考値として示している。

同図より運搬時間によらず、各コア試験体の圧縮強度は、文献¹⁾に基づく関係式とほぼ合致している。このことから、本実験の範囲においては、運搬時間の経過による空隙率－圧縮強度関係に及ぼす影響はほぼないと考えられる。

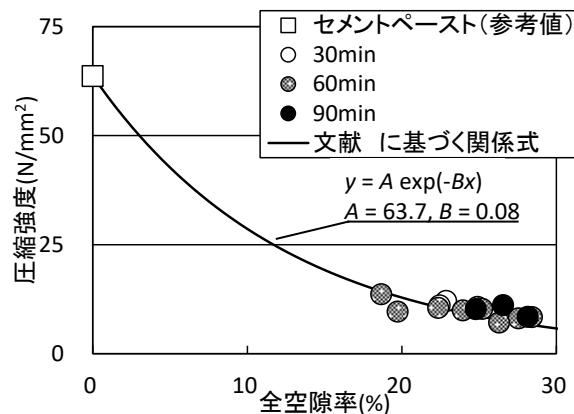


図-5.16 空隙率（容積法）と圧縮強度の関係

5.4 まとめ

本研究では、現場施工ポーラスコンクリートのフレッシュ性状、圧縮強度および振動締固めエネルギー空隙率関係に運搬時間が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) 噴霧の実施により、POC のフレッシュ性状の維持は可能であるが、噴霧を実施しない POC と比較して、2～7%程度の空隙率の低下傾向が見られる。
- (2) 運搬時間 60 分時点においても、振動締固めエネルギーと空隙率には一定の関係性が見られる。
- (3) 振動締固め時に加えるエネルギーが同程度であれば、運搬時間の経過に伴い空隙率が増大する傾向を示す。
- (4) 空隙率－圧縮強度関係に運搬時間はほぼ影響しない。

以上の結果から、POC のフレッシュ性状の維持を目的とした噴霧は、ペーストの流動性および施工性の向上に一定の効果を示すものの、空隙率の変動およびこれに伴う諸特性への影響が生じることが予想される。このため、混和剤の使用によるフレッシュ性状の維持に関して、より詳細な検討を要するものと考えられる。

第六章

振動締固めが隣接区画に及ぼす影響

6.1 はじめに

道路舗装に POC を適用する際には、耐荷性や路面排水性が要求されるが、いずれの性能も POC に所定の空隙率が得られているか否かによって大きく左右される。

現場で施工される POC は、施工する区画に POC を敷き均した後、上面から振動機を用いて振動締固めを行うことがあり、振動締固めが POC の空隙率に及ぼす影響についても報告²⁾がなされている。

この際、POC に伝達されるエネルギーが過大であれば、POC の沈降に応じて骨材が押し下げられ、隣接する区画の上面に不陸が生じることが予測されるが、その変位量および影響範囲に関する検討はほとんど行われていない。

このため本研究では、型枠試験体を用いて、POC に発生する不陸が特に生じやすいと推測される図-6.1 に示す点線内部の条件に加えて、骨材の水平移動が一方向となるような拘束条件を追加し、隆起量が最大となる場合について振動締固め実験を行った。隣接区画への影響については、レーザー変位計による表面形状の計測結果に基づいた定量的な評価を試み、不陸の発生状況および水平方向の空隙率分布を把握する。

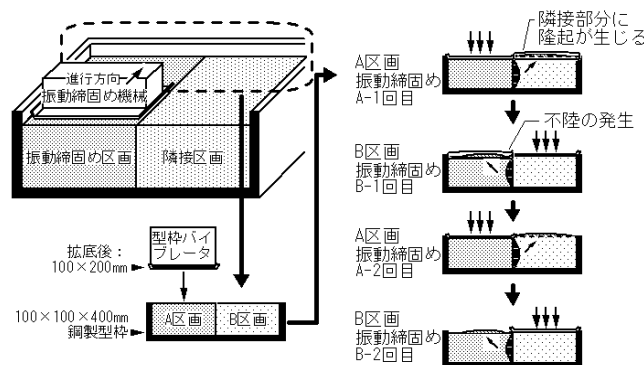


図-6.1 再現する領域および不陸発生概念図

6.2 実験方法

6.2.1 要因と水準

表－6.1 に実験の要因と水準を示す。なお、振動締固めについて、締固めの程度すなわち目標空隙率の達成度を各調合で一定とするため、打込みの際には、所定の試験体の高さを満足するよう管理を行った。

表－6.1 要因と水準	
要因	水準
目標空隙率(%)	15, 25, 35
振動締固め回数(回)	0, A-1, B-1, A-2, B-2

6.2.2 使用材料

POC の材料として表－6.2 に示すように、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。

表－6.2 使用材料の種類と特性値

種類	特性値
水	水道水
セメント	普通ポルトランドセメント，密度：3.16g/cm ³
粗骨材	単粒度砕石6号(5-13mm) 三重県度会郡南伊勢町神津佐産，表乾密度：2.73g/cm ³ ，実積率：58.1%

6.2.3 調合および試験体の作製方法

(1) 調合表

表-6.3 に POC の調合を示す。ただし、目標空隙率 15% の試験体については、ペーストフロー値の調整のため、セルロース系増粘剤を使用している。

表－6.3 POC の調合表

W/C	締固め度 (%)	VR(%)	単位量(kg/m ³)			SCA/C (%)
			W	C	G	
0.3	100	15	130.9	436.4	1554.4	0.03
0.3	100	25	82.2	274.1	1554.4	－
0.3	100	35	33.6	111.9	1554.4	－

[注] VR：目標空隙率，SCA：セルロース系増粘剤

(2) 練混ぜ

POC の練混ぜには容量 30L の揺動攪拌型ミキサを用い、練混ぜ方法はセメントペースト先練りとした。セメント、水および混和剤をミキサに投入し、50rpm にて 30 秒間練り混ぜた後、ミキサ内壁の付着物をかき落とし、200rpm で 90 秒間練り混ぜた。採取したセメントペーストに JIS R 5201 に従ってフロー試験を実施し、所定のフロー値が得られたことを確認した後に、粗骨材をミキサに投入して 200rpm にて 120 秒間練混ぜを行った。



写真-6.1 脱型後の試験体の形状の例

6.2.4 試験項目および試験方法

(1) レーザー変位計による表面形状の測定

POC の表面形状の測定は、レーザー変位計を用いて行った。測定は試験体の長手方向とし、型枠付近の摩擦の影響を考慮して型枠より 40mm の位置 2 ヶ所で計測を行った。また、POC の振動締固めに伴う水平方向の変位の測定に関しても、試験体断面部分に対して同様の方法で計測を行った。

得られた POC の表面形状は空隙による凹凸部分を含む。このため、図-6.3 に示すように、試験体長さ 20mm 毎に区間を設定し、区間内の最大試験体高さを代表値として用いた。

また、日本道路協会の舗装性能評価法¹⁴⁾に基づいて POC の平坦性の評価を実施した。ただし、平坦性は 3m プロフィールメータによって計測された波形の 1.5m 毎の任意の点の標準偏差により求まるが、本報では上記の区間内代表値の標準偏差により評価を行った。

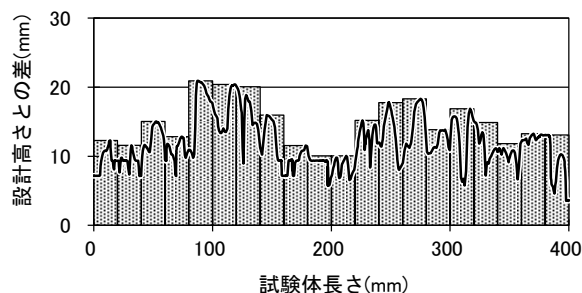


図-6.3 区間内代表値の導出の例
(VR = 35%)

(2) 空隙率の測定

POC の空隙率試験は、日本コンクリート工学会によるポーラスコンクリートの空隙率試験方法（案）¹⁾に基づき、質量法による全空隙率の測定を実施した。この際、かさ容積は隆起量と同様に 20mm 区間代表値を用いて算出を行った。また、式(6.1)に示す締固め度の算出についても、上記の質量法による全空隙率の算出方法を用いた。

$$D_{poc} = (100 - A_f) / (100 - A_p) \times 100 \quad (6.1)$$

ここに、 D_{poc} ：締固め度(%), A_f ：施工時の空隙率(%),

A_p ：調合上の目標空隙率(%)

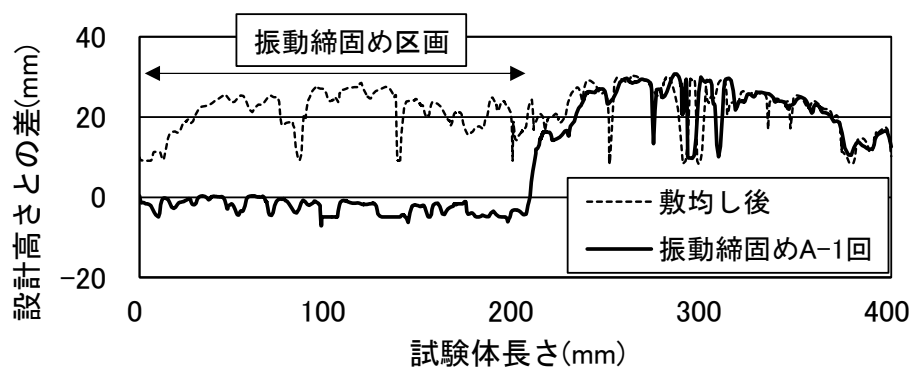
また、試験体を 50mm 毎に切断し、得られた各試験片においても質量法による全空隙率の測定を実施した。ただし、試験体中央部より採取した試験片については、レーザー変位計により得られた水平変位よりかさ容積を算出した。

6.3 実験結果および考察

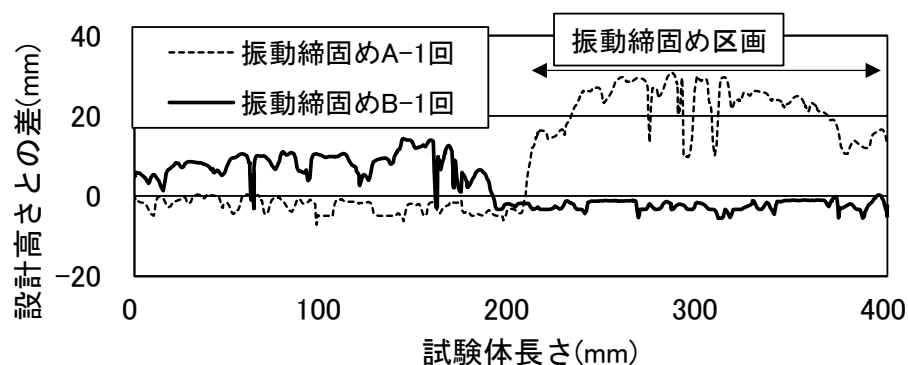
6.3.1 表面形状

(1) 測定結果

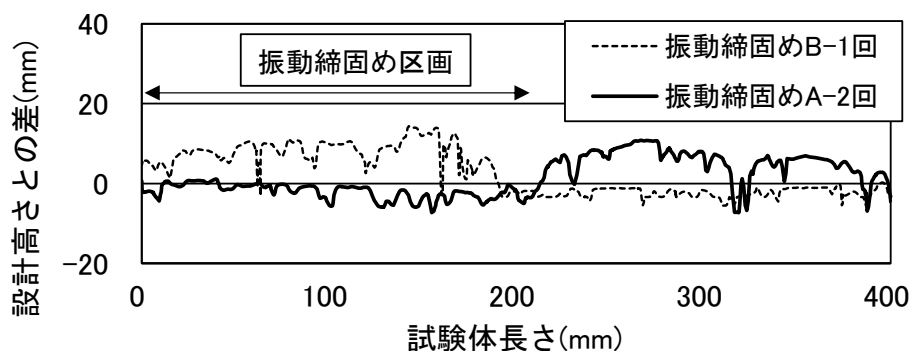
図-6.4(a)～(d)に、レーザー変位計による測定結果の例を示す。図(a)には、敷均し後と A-1 回目の締固め後を比較して示すが、締固めた領域（左半分）は規定高さまで締め固められており、締め固めていない右半分の高さには変化が見られない。図(b)には、A-1 回目の締固め後と B-1 回目の締固め後の比較を示す。締め固めた右半分は規定高さまで締め固められているが、左半分は最大で 10mm 程度隆起している。図(c)および図(d)には、同様に B-1 回目と A-2 回目および A-2 回目と B-2 回目の締固め後の比較を示す。いずれも締め固めた領域は、規定の高さまで締め固められるものの、その隣接区画では隆起が発生している。これらの各締固め段階における状況はすべての調合においてほぼ同様であった。以上の結果から、小型の型枠試験体における、振動締固めによる不陸の発生が確認された。



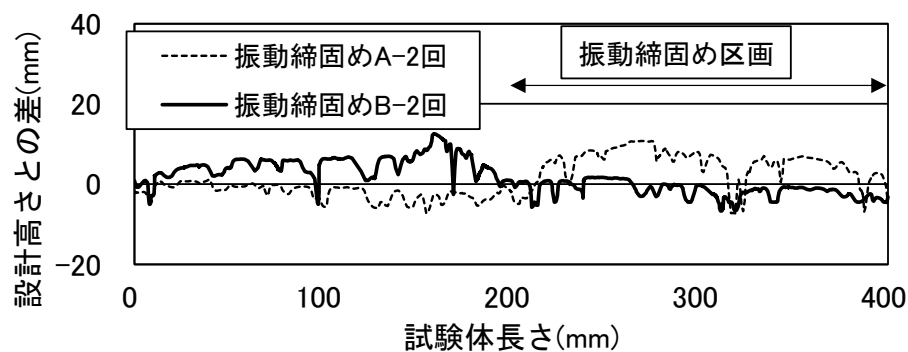
(a) 振動締固め A-1 回目



(b) 振動締固め B-1 回目



(c) 振動締固め A-2 回目



(d) 振動締固め B-2 回目

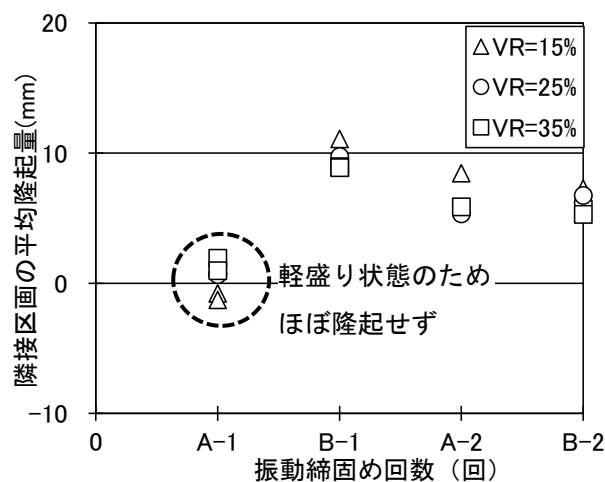
図－6.4 レーザー変位計による表面形状計測結果

(2) 振動締固めによる隣接区画の隆起量

図－6.5 に、振動締固め回数と隣接区画の平均隆起量の関係を示す。なお隣接区画の平均隆起量とは、20mm 区間内代表値の振動締固め前後の変化量の平均値により算出を行っている。

同図より、振動締固め回数による振動締固め実施時の隣接区画の平均隆起量は、目標空隙率にかかわらずほぼ同程度であり、A-1 回目の締固めの時を除き、振動締固め回数が多いほど平均隆起量が減少する傾向が見られた。

これは、振動締固めが複数回実施されることにより、当該位置の POC がより密になり、他方の締固め時に生じる骨材の水平移動に対して抵抗するためであると推測される。



図－6.5 振動締固め回数と隣接区画の平均隆起量の関係

(3) 水平方向の変位

水平変位量を導出するにあたって、図-6.6 に示すように、底面から 10mm ごとに、A 区画の試験体長さの平均値を算出した。得られた平均値と、打込み実施時の仕切り板の設置位置 (200mm) との差を、水平方向の変位量として図-6.7 に示す。

図より、目標空隙率 $VR = 25\%$ 、 35% の試験体と比較し、 $VR = 15\%$ の試験体の水平変位が大きいことが確認できる。これは、 VR が小さいほどペースト分が多くなっており、骨材が水平方向へ押出されやすいためと考えられる。また、設置したビニルシートの隣接区画への移動が試験体表面で確認されるなど、試験体上面および底面で水平変位量が大きくなる傾向が見られた。これは、振動締固め区画の骨材の移動可能な領域が、締固め加振面および型枠面により水平方向に制限されているためであると考えられる。

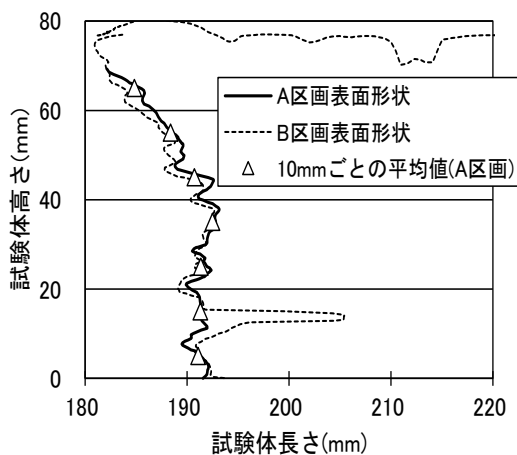


図-6.6 水平変位量の導出の例 ($VR = 15\%$)

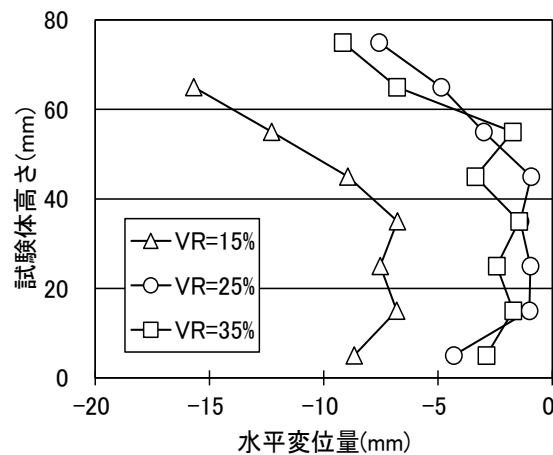


図-6.7 A 区画の水平方向の変位量

(4) 平坦性の評価

図-6.8 に、振動締固め回数と区間内代表値の標準偏差の関係を示す。また図中には参考値として、舗装性能評価法における平坦性の規格値のうち縦断凹凸の標準偏差 $\sigma = 2.4(\text{mm})$ ¹⁴⁾を記載している。ここで、区間内代表値は試験体全体を対象として、標準偏差を算出した。

図より、締固めの回数が増えるにつれて平坦性は向上するものの、振動締固め B-2 回を実施後の試験体でも、VR = 35%を除き規格値を満足しない値となった。VR = 35%の試験体については、他の試験体と比較してペースト分が少なく、振動締固めに伴う骨材の移動による、隣接区画の隆起量が僅かに小さいため、規格値を満足したと考えられる。

また、図-6.9(a)～(c)に振動締固め境界からの距離と、その位置での隣接区画の隆起量の分布を示す。図より、締固め区画との境界から少し離れた、20～60mm 程度の位置において隆起量が最大となり、以降は境界から離れるにつれて隆起量が減少する傾向を示した。これは、振動締固め区画との境界付近においては粗骨材がかみ合い、連続しているために、隆起が抑制されたものと考えられる。

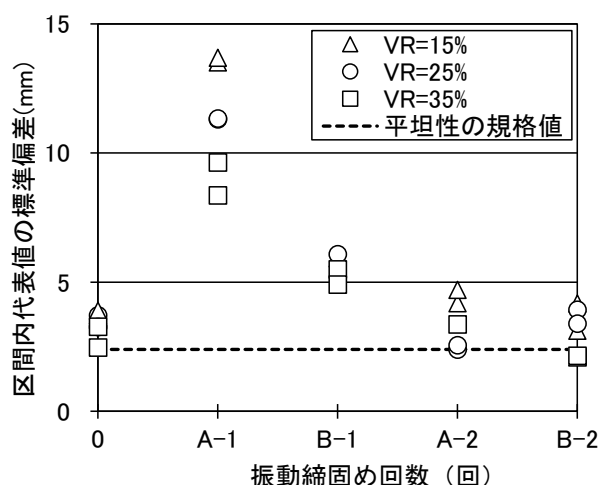


図-6.8 振動締固め回数と区間内代表値の標準偏差の関係

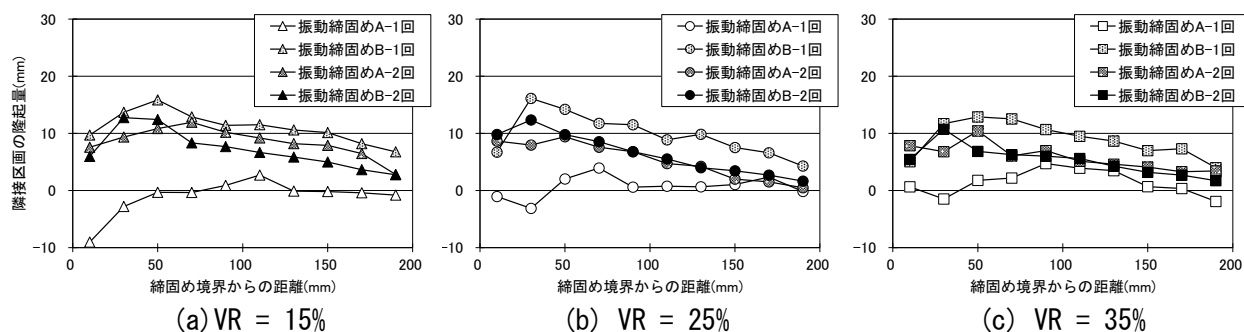


図-6.9 締固め境界からある距離における隣接区画の隆起量の分布

6.3.2 空隙率

(1) 質量法による全空隙率

図-6.10(a)～(c)に、質量法による全空隙率の測定結果を示す。ただし、VR=15%, 25%のB-1回目およびVR=35%のA-2回目のプロットは、基準面高さがレーザー変位計の測定範囲外であったため、データを棄却している。なお、かさ容積は先述の通り20mm区間内代表値を用いて算出した。VR=25%, 35%の試験体は目標空隙率 $\pm 3\%$ を満足しているものの、いずれの調合も目標空隙率と比較し、全空隙率が大きく計測される傾向が見られた。これは、振動締固めに伴う隣接区画のかさ容積の増大によるものと考えられる。質量法による全空隙率の算定上、かさ容積の変化量に対し、全空隙率の変化量が大きくなるVR=15%の試験体においては、他の試験体と比較して全空隙率が大きく計測されたものと推測される。

加えて、締固め回数B-1回目以降、全空隙率の変化は緩やかになっている。すなわち、隆起および締固めによるかさ容積の変化量がほぼ等しいため、本実験における締固め条件では目標空隙率の達成は困難であることが予想される。

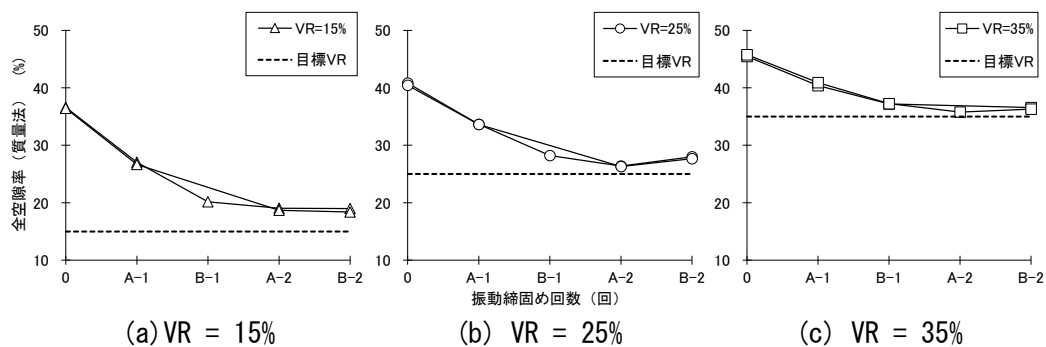


図-6.10

質量法による全空隙率と締固め回数の関係

(2) 締固め度

図-6.11に、振動締固め実施後の試験体全体の締固め度¹⁾および隣接区画の最大隆起量と振動締固め回数との関係を示す。なお、図-6.10と同様、VR=15%, 25%のB-1回目およびVR=35%のA-2回目のデータは棄却している。図より、目標空隙率が低いものほど、敷均し後の軽盛り状態では締固め度が小さくなる傾向を示している。これは、図-6.12に示すように、目標空隙率が低いフレッシュPOCはペースト量が多く、実施上は、粗骨材実積率の測定状態（調合設計の基本状態）よりも、粗骨材間距離が大きくなるためであると考えられる。B-2回目における隣接区画の最大隆起量は、いずれの調合においても10～15mmとなり、調合による明確な差は見られなかった。これは、振動締固めの進行により、粗骨材周辺のペースト分が押しのけられるために、どの調合においても粗骨材が接触あるいはそれに近い状態に変化しているためであると推測される。また、他方の区画の締固めが実施されていないA-1回目においては、振動締固めB-2回目と比較して隣接区画の最大隆起量は小さい。

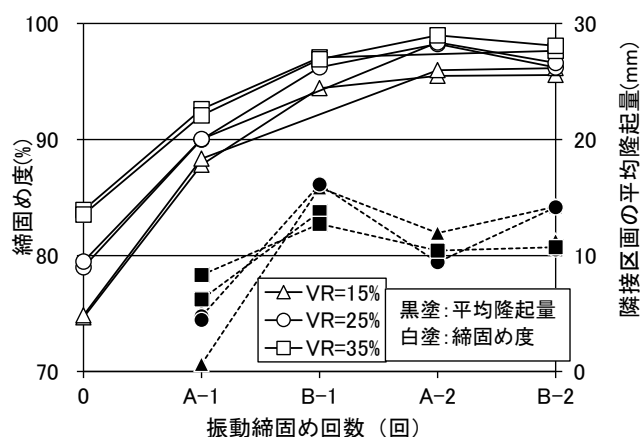


図-6.11 締固め度および隣接区画の最大隆起量と振動締固め回数の関係

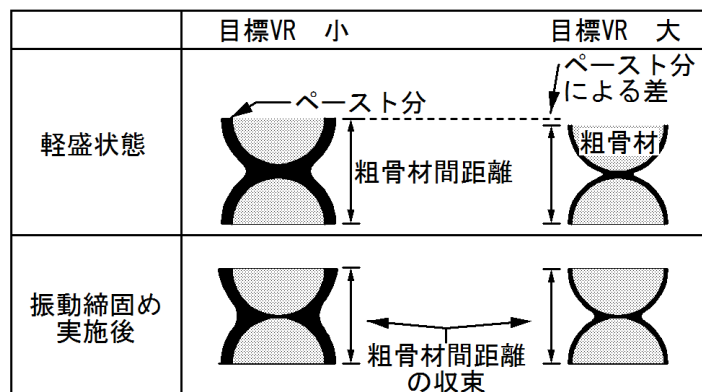


図-6.12 目標空隙率による粗骨材間距離の変化

(3) 水平方向の空隙率分布

振動締固め B-2 回目が終了後、試験体長さ方向の 50mm 毎に切断した各試験片の全空隙率を図-6.13 に示す。先述の通り、試験体中央部付近より採取された試験片のかさ容積は、水平方向の変位量の計測結果により算出している。

また、既往の研究¹⁵⁾によれば型枠付近において空隙率が局所的に増大する壁効果は、全体の空隙率と比較して底面で 1.1～1.3 倍程度、側面で 1.46 倍程度とされている。図に併記した黒塗の点は、平均空隙率に対して底面 1.2 倍、側面 1.46 倍の空隙率を有し、壁効果の生じる範囲を平均骨材粒径 (9mm) の半分と仮定した推定値を示している。

図より、試験体の端部付近の試験片について、全空隙率が増大する傾向が見られ、先述した推定値とほぼ同様の値を示していることから、鋼製型枠による壁効果によるものと考えられる。

また、VR=25%、35%について締固め区画との境界付近の試験片の全空隙率が増大する傾向が見られた。これは、振動締固めに伴う POC のせん断変形により、図-6.14 に示すように骨材の乗り上げ効果 (ダイラタンシー) が生じ、締固め境界付近のフレッシュ POC のかさ容積が増大したためであると考えられる。

一方で、VR=15%においては、振動締固め境界付近での空隙率の増加は見られなかった。これは、他の試験体と比較して粗骨材間にはペースト分がより多く入り込んでおり、振動締固めに伴う骨材の水平移動時に、ペースト分がより多く移動したためと考えられる。

このことから、VR=25%以上の空隙率の高いPOCにおいては、図-6.15に示すように振動機の通過に伴うPOCのせん断変形および壁効果により、空隙率の増大する領域が発生する可能性があり、品質のばらつきの原因となる。また、コア抜き等による測定においては空隙率の過大な評価につながる可能性がある。

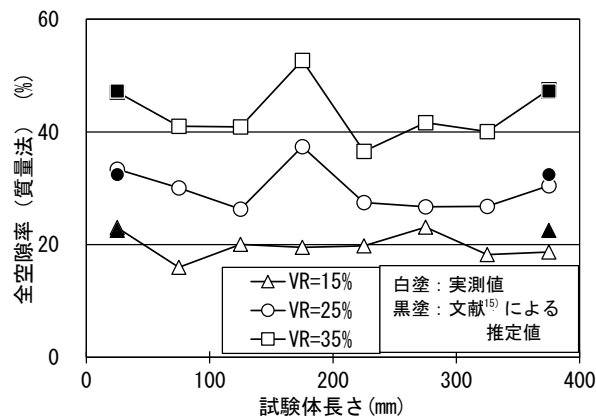


図-6.13 質量法による全空隙率の水平分布

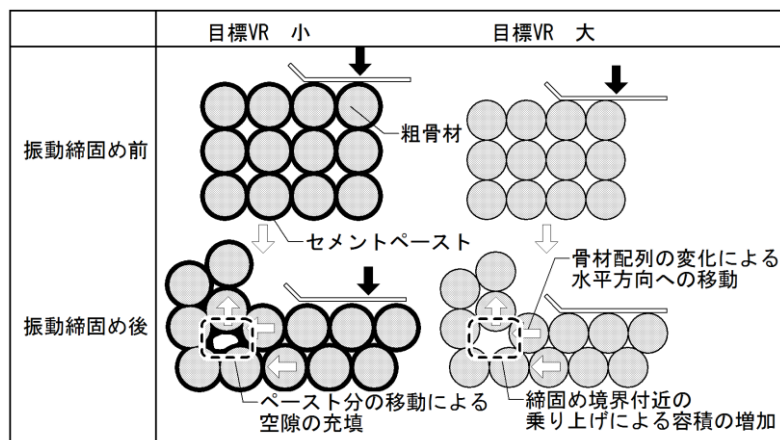


図-6.14 振動締固めに伴う隣接区画の空隙率変化の概念図

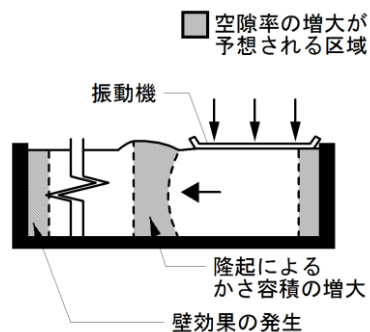


図-6.15 空隙率の増大が予想される区画の概念図

6.4 まとめ

本章では、ポーラスコンクリートの振動締固めにおいて不陸が生じる場合、締固め隣接区画へ及ぼす影響を知ることを目的として、小型試験体を用い、目標空隙率および締固め回数を要因とする実験的な検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 振動締固めを実施する際、隣接区画が十分に締め固まっている場合、締固めにより生じる隆起量は目標空隙率によらず、ほぼ一定の値を示した。
- (2) 振動締固めによる隆起量は、振動締固めを実施した境界から 20～60mm 程度離れた位置において最大となり、その外側では境界から離れるほどに減少する傾向を示した。
- (3) 全空隙率 25%以上のポーラスコンクリートにおいて、振動締固めを実施後、隣接区画との境界付近では POC の隆起により、空隙率が増加する傾向を示した。

第七章

結論

7.1 総括

本論文では、POC の現場施工における品質の保証を主眼に、系統的な検討例が少ない運搬時間および不陸の発生が諸特性に及ぼす影響に関して種々の検討を行った。

1.3 節に示した本研究の目的を以下に示し、本論文の研究成果の整理を行う。

(1) 運搬時間が POC の諸特性に及ぼす影響の定量的な把握

フレッシュ性状の低下の対策を行っていない POC においては、攪拌方法、外気温度および調合によらず、ペースト分の流動性の低下が確認された（第三章、第四章および第五章）。凝結遅延剤および高性能 AE 減水剤遅延型の使用は、フレッシュ性状の低下の防止に有効であり、これに加えて圧縮強度が増加する傾向も見られた。一方で、高性能 AE 減水剤遅延型を用いる場合には、ペースト分の流動性の向上による底面だれが生じる可能性が有り、注意を要する（第四章）。フレッシュ性状の維持を目的とした噴霧は、ペースト分の流動性確保および圧縮強度の維持が可能であるが、噴霧を実施しないものと比較して空隙率の低下傾向が見られた（第五章）。

施工性に及ぼす運搬時間の影響に関して、運搬時間 60 分時点においても、振動締固めエネルギーと空隙率との間には一定の関係性が見られる。しかしながら、運搬時間の増加に伴い、加える振動締固めエネルギーが同程度であっても、POC スラブの平均空隙率は増大する傾向を示した（第五章）。

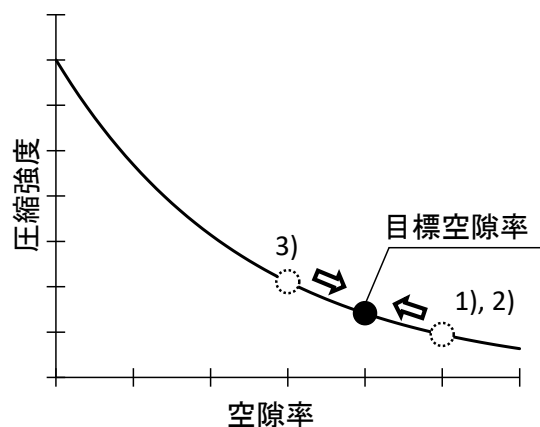
圧縮強度に及ぼす運搬時間の影響は、ペースト分の乾燥が著しい場合には圧縮強度の低下傾向が見られる（第三章）ものの、実際の運搬に用いるアジテータ車およびこれと攪拌方法が近い傾胴式ミキサにおいては、圧縮強度の低下傾向は明確には見られない（第四章および第五章）。また、運搬にアジテータ車を用いる場合には、圧縮強度－空隙率関係に運搬時間はほぼ影響しないことが確認された。（第五章）。

上記の、運搬時間が POC の諸特性に及ぼす影響より、POC 施工指針における、練混ぜから打ち終わりまでの時間を 25℃超では 90 分、25℃以下を 120 分以内を標準とし、可能ならば各々 60、90 分以内が望ましいとする記述は、概ね妥当であると考えられる（第三章、第四章および第五章）。ただし、運搬時間の経過に伴う施工性の低下と、これに起因する POC スラブの空隙率の増加には注意を要するものと考えられる。

フレッシュ性状の低下に伴う、施工性の低下の対策として、本研究の結果から以下の三点の対応が考えられる。（図－7.1 参照）

- 1) 振動締固めの追加実施
- 2) 混和剤によるフレッシュ性状の維持
- 3) 締固め度による補正

各対策の詳細は次のとおりである。対策 1)は施工性の低下に対し、振動締固めエネルギーをより多く加え、施工時の空隙率を目標空隙率に近付ける方法である。対策 2)は、混和剤によりフレッシュ性状を維持し、施工性の低下を予め防止する。対策 3)は、予備実験等により得られた締固め度に基づき、設計空隙率に対して補正をする手法である。



図－7.1 施工性低下対策の概念図

(2) 振動締固めによる不陸の発生が POC の諸特性に及ぼす影響の定量的な把握

振動締固め時に不陸が生じる場合において、振動締固め境界付近では骨材の乗り上げに伴う容積の増大により、空隙率が増大する領域が局所的に発生する可能性がある。(第六章)

7.2 今後の課題

本研究の結果を踏まえ、今後の課題について検討を行う。

運搬時間が POC の諸特性に及ぼす影響において、本研究の範囲では実験室実験と現場施工実験の定量的な比較は十分にはなされおらず、データの蓄積およびこれに基づく検討を要するものと考えられる。

また、施工性低下の対策を実施するにあたって、フレッシュ性状の良否を定量的に判断できる手法についても検討を要する。

[参考文献]

- 1) 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：日本コンクリート工学協会，2015.6
- 2) 森鼻泰大：現場施工ポーラスコンクリートの施工標準と品質管理手法に関する研究，三重大学修士学位論文，2011
- 3) 湯浅幸久，宮本高秀，三島直生，畑中重光：ポーラスコンクリートの内部構造に及ぼす表面振動締固めの影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1, pp.1263-1268, 2002
- 4) 大谷俊浩，村上聖，佐藤嘉昭，三井宜之，平居孝之：ポーラスコンクリートの圧縮強度推定式の構築に関する研究，日本建築学会構造系論文集，70(590), pp.25-30, 2005.4
- 5) 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，70(594), pp.17-23, 2005.8
- 6) 中川武志，畑中重光，三島直生：供試体の高さ／直径費がポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.23, No.650, pp.695-699, 2010.4
- 7) 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
- 8) セメント協会，舗装技術専門委員会：舗装用ポーラスコンクリート共通試験結果報告書 R-11，1999.11
- 9) 日本道路協会舗装委員会舗装設計施工小委員会：透水性舗装ガイドブック，pp.25-33, 2007.8
- 10) 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
- 11) 中川武志：複層ポーラスコンクリートの現場施工と品質管理に関する実験的研究，三重大学博士学位論文，2009.9
- 12) 玉井元治：まぶしコンクリートの動弾性係数と凍結融解に対する抵抗性，セメント・コンクリート論文集，No.43, 1989
- 13) 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
- 14) 舗装性能評価法－必須および主要な性能指標の評価法編－（平成 25 年度版）：日本道路協会，2013.4
- 15) 関本亮太，松岡卓，三島直生，畑中重光：ポーラスコンクリートの水平方向透水性能に及ぼす壁効果の影響と内部の水の流速分布に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.1743-1748, 2016

謝辞

謝辞

本研究にあたりご指導くださった、三重大学大学院畑中重光教授，株式会社ファイナルマーケット代表取締役中川武志氏に深く感謝を申し上げます。

また，実験にあたって，三重大学工学部森下拓海氏，三重大学技術職員和藤浩氏，山本好弘氏，（株）川島工業の職人の方々および畑中研究室の皆様にご助力を頂きました。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。ここに付記して謝意を表します。

藤木諒将

ポーラスコンクリートの諸特性に及ぼす運搬時間と施工方法の影響に関する研究

畑中研究室 藤木 諒将

1. 序論

1.1. 研究の背景と目的

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、連続する空隙を有する。

現場施工 POC は、図－1¹⁾に示すように製造後、運搬、締固めおよび養生などの工程が存在し、これらの各作業が適切に行われるか否かにより品質が左右される。このため、現場施工 POC の品質の保証にあたり、各施工段階における影響を定量的に把握することが肝要となる。

製造後の 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、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。

また、フレッシュ POC の締固めの段階において、表面振動機等により振動締固めを実施する場合、与える振動締固めエネルギーが過大であれば、不陸が生じることが予想される。しかしながら、不陸の発生状況およびこれに伴う POC の各種特性への影響に関して、定量的な検討はなされていない。

したがって本研究では、現場施工 POC の品質保証を目的として、以下に列举する二点に関して検討を行った。

- (1) 運搬時間が POC の諸特性に及ぼす影響の定量的な把握（実験 A）
- (2) 振動締固めによる不陸の発生が POC の諸特性に及ぼす影響の定量的な把握（実験 B）

1.2. 本論文の構成

本論文の構成を図－2 に示す。第三章から第五章までは運搬時間を、第六章では不陸の発生が諸特性に及ぼす影響をそれぞれ検討している。

2. 運搬時間が諸特性に及ぼす影響（実験 A-I）

本章では、低速回転の一軸強制パン型ミキサにより最

大 90 分低速攪拌を実施し、運搬（低速攪拌）時間が POC の圧縮強度およびフレッシュ性状に及ぼす影響を検討した。また、暑中期（25℃超）および通常期（25℃以下）の、温度条件による影響の差異に関しても検討した。

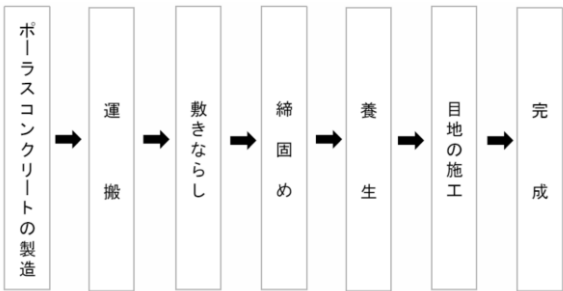
2.1. 実験概要

表－1 に実験の要因と水準を示す。表中の運搬（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。

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。

表－2 に本実験で使用した POC の調合表を示す。

POC の混練には、まず容量 30L の揺動攪拌型ミキサを用い、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



図－1 POC の製造・施工フローの一例¹⁾

第一章	序論
第二章	既往の研究
第三章	運搬時間が諸特性に及ぼす影響（実験 A-I）
第四章	混和剤（凝結遅延剤、高性能 AE 減水剤遅延型）の影響（実験 A-II）
第五章	実施工条件における運搬時間が諸特性に及ぼす影響（実験 A-III）
第六章	振動締固めが隣接区画に及ぼす影響（実験 B）
第七章	結論

図－2 本論文の構成




表－1 要因と水準（実験 A-I）	
要因	水準
外気温	25℃以下, 25℃超
水セメント比W/C	0.30, 0.45
運搬（低速攪拌）時間(min)	30, 60, 90
目標空隙率VR (%)	15, 25, 35

[注] ー: 基本水準を示す

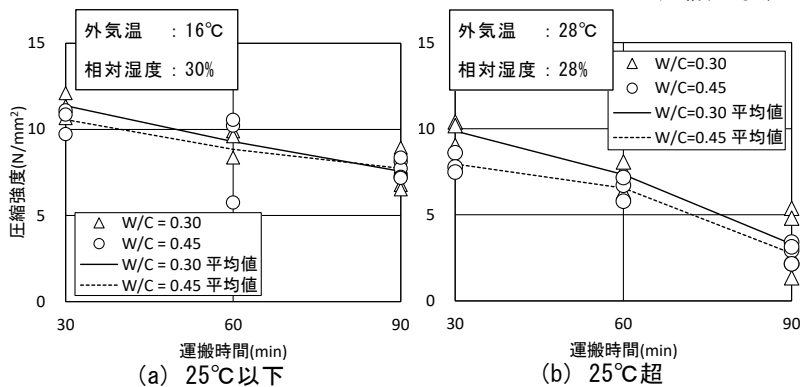
表－2 POC の調合表（実験 A-I）				
目標空隙率VR(%)	W/C(-)	W(kg/m ³)	C(kg/m ³)	G(kg/m ³)
15	0.45	157.9	351.0	1554
25		99.2	220.5	1554
35		40.5	90.0	1554
25	0.30	82.2	274.1	1554

[注] W/C：水セメント比，FL：ペーストフロー値

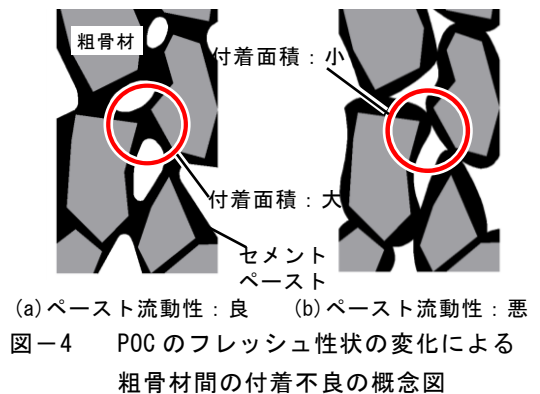
表－3 運搬（低速攪拌）時間によるフレッシュ性状の変化（実験 A-I, W/C = 0.45, 25℃超）

		攪拌時間(分)		
		30	60	90
目標空隙率(%)	25			
		○(2)	△(2～1)	×(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－3 運搬（低速攪拌）時間と圧縮強度の関係（目標空隙率 25%）



図－4 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

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、所定量のセメントペーストを採取し、フロー値の測定およびセメントペースト試験体の作製を行った。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。

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。本研究ではインバータを用いて、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。

2.2. 試験項目および試験方法

外気およびフレッシュ POC の温度は、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 は運搬（低速攪拌）時間 15 分時点からミキサ内部の試料を液体温度計で計測した。

POC のフレッシュ性状の評価は、試験体を作製する運搬（低速攪拌）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。

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。

2.3. 実験結果および考察

2.3.1. フレッシュ性状

表－3 に暑中期条件における、運搬（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、運搬（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。

2.3.2. 圧縮強度

図－3(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(a)より、運搬（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。また、同図(b)に示す外気温 25℃以下の試験体においても比較的緩やかではあるものの、圧縮強度が低下する傾向が見られた。

これは、図－4 に示すように、ペースト分の流動性の低下に伴い、粗骨材間の付着面積が減少するため、圧縮

強度が低下したものと考えられる。

一方で、このような運搬（低速攪拌）時間による圧縮強度の低下傾向は、ペースト分の多い目標空隙率 15%においてはほぼ見られなかった。

3. 混和剤（凝結遅延剤、高性能 AE 減水剤遅延型）の影響（実験 A-II）

前章では、ペースト分の乾燥が著しい場合、運搬（低速攪拌）時間の経過に伴う圧縮強度の低下傾向が見られた。このため、本章ではフレッシュ性状の維持を目的に、混和剤を使用し、これが POC の諸特性に及ぼす影響について検討する。

3.1. 実験概要

実験 A-II の要因と水準を表－4 に示す。

POC に用いる粗骨材、セメントおよび水は前章で示したものと同様である。本章ではこれに加えて、POC のフレッシュ性状の維持を目的として、凝結遅延剤および高性能 AE 減水剤（遅延型）を用いた。

POC の調合は目標空隙率 25%，水セメント比 0.3 とし、セメントに対する混和剤の添加量は凝結遅延剤は 0.2%，高性能 AE 減水剤（遅延型）は 0.4%とした。

POC の練混ぜおよび攪拌時には傾胴式ミキサを用いた。練混ぜは、粗骨材およびセメントをミキサに投入し、32rpm で 60 秒間混練した後、ミキサ内部の付着物を掻き落として水を投入し、32rpm で 180 秒間練り混ぜた。

その後、傾胴式ミキサの蓋を閉めて低速回転(1.5～2rpm)で攪拌を行った。なお、練混ぜおよび攪拌は、暑中期の気温条件を再現した気温 35℃、相対湿度 50%の恒温槽内で実施した。

POC の試験体作製方法および養生条件は、前章に示した条件と同様に実施した。

3.2. 試験項目および試験方法

温度測定、フレッシュ性状および圧縮強度試験の方法は前章と同様の方法を用いた。ただし、恒温槽温度は、槽内に設置した抵抗温度計により測定を行っている。

3.3. 実験結果および考察

3.3.1. フレッシュ性状

写真－1(a)(b)に、混和剤なしおよび両混和剤を用いた POC の、運搬（低速攪拌）時間 90 時点のフレッシュ性状を示す。写真の範囲は 50mm×50mm としている。

同写真より、混和剤を用いない POC と比較して、混和剤の使用により、運搬（低速攪拌）時間 90 分時点においても良好なフレッシュ性状が確保可能であることが確認された。しかしながら、高性能 AE 減水剤を用いる調合においては、運搬（低速攪拌）時間 30 分時点のペースト分の流動性が著しく高いため、ペースト分の底面だれが確認された。

表－4 要因と水準（実験 A-II）

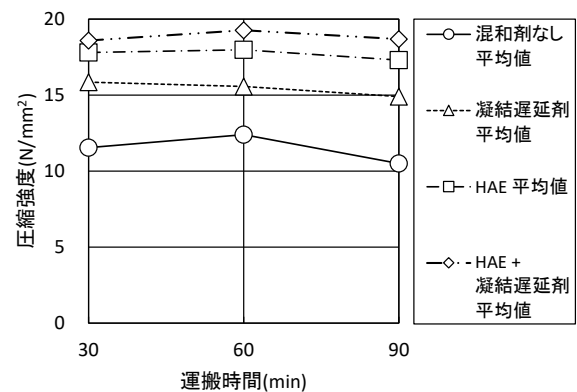
要因	水準
混和剤	なし
	凝結遅延剤
	高性能AE減水剤遅延型
	凝結遅延剤および高性能AE減水剤遅延型
運搬(低速攪拌)時間(min)	30, 60, 90



(a) 混和剤なし

(b) 凝結遅延剤 + HAE 遅延型

写真－1 混和剤によるフレッシュ性状の比較
(実験 A-II, 運搬時間 90 分)



図－5 圧縮強度と運搬（低速攪拌）時間の関係
(W/C = 0.3, 目標空隙率 25%)

表－5 要因と水準（実験 A-III）

要因	水準
通過回数(回)	1, 2, 4
運搬時間(min)	30, 60, 90
噴霧	あり, なし

[注] ー: 基本水準を示す

3.3.2. 圧縮強度

圧縮強度と運搬（低速攪拌）時間の関係を図－5 に示す。同図より、混和剤を用いない POC と比較して、混和剤を用いた POC はいずれの混和剤種類によっても圧縮強度が増加する傾向が得られた。これは、既に図－4 に示したように、混和剤の添加によりペースト分の流動性が改善され、付着面積がより増大したためであると考えられる。

また、混和剤の有無によらず、運搬（低速攪拌）時間の経過に伴う圧縮強度の低下傾向は明確には確認されなかった。これは、傾胴式ミキサによる攪拌時には、一軸強制パン型ミキサと比較して、フレッシュ POC が外気と接する面積が小さく、加えてミキサの回転速度も遅いため、攪拌中の水分の逸散が抑制されたと考えられる。

4. 実施工条件における運搬時間が諸特性に及ぼす影響 (実験 A-III)

これまでの検討(実験 A-I および A-II)は、実験室実験であり、運搬時間の経過に伴うフレッシュ性状の低下が及ぼす、現場施工 POC への影響に関する検討が十分にはなされていない。このため、本章では実施工条件における運搬時間が及ぼす影響に関して検討を行った。

4.1. 実験概要

表-5 に実験の要因と水準を示す。表中の通過回数とは、施工区画全体 POC 仕上げ機による振動締固め実施された回数を示す。

使用材料は、2.1 節と同様の材料を用いた。

POC は目標空隙率 25%、水セメント比 0.45 とした。ただし、調合実施時は雨天であったため、表面水率を 1.3% として単位水量の補正を実施している。POC の練混ぜおよび攪拌時にはアジテータ車を用いた。

練混ぜは、粗骨材およびセメントをミキサに投入し、14rpm で空練りを行った。その後、粗骨材およびセメントが十分に混ざったことを確認し、水を順次投入して 14rpm で混練した。

練混ぜ状態を目視で確認した後、アジテータ車のドラムを低速回転(1.6rpm)とし、攪拌を行った。なお、練混ぜおよび運搬(攪拌)当時の天候は雨天、気温 18℃、湿度 86%であった。

POC スラブについては、施工区画(1200×100×800mm)にコテで敷き均した後、POC 仕上げ機(表-6 参照)による振動締固めを実施した。

圧縮強度試験および容積法による空隙率試験に供するコアおよび円柱試験体は各 3 本作製した。また、コア抜きを実施する位置により空隙率の変動が予想されるため、質量法による空隙率試験については、コア試験体 9 本を試験に供した。

現場に施工した POC はシート養生とし、散水を毎日実施した。材齢 14 日目にコア抜きを実施し、採取されたコア試験体は材齢 28 日まで標準水中養生とした。

4.2. 試験項目および試験方法

温度測定、フレッシュ性状の評価および圧縮強度試験は 2.2 節と同様に各種試験を実施した。

コア試験体の空隙率試験は、JCI によるポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)¹⁾に基づき、容積法および質量法による全空隙率の測定を実施した。

4.3. 実験結果および考察

4.3.1. フレッシュ性状

POC のフレッシュ性状について、噴霧を実施しない場合においては、実験 A-I および A-II と同様に、運搬時間の経過に伴いフレッシュ性状の低下が確認された。

4.3.2. 空隙率

図-6 に、振動締固めエネルギーと空隙率の関係を示す。

表-6 POC 仕上げ機の諸元(実験 A-III)

転圧板	長さ ^{*1} (mm)	310
	幅 ^{*1} (mm)	570
	面積 ^{*1} (m ²)	0.177
重量 ^{*1} (kg)		44.0
振動数 ^{*2} (Hz)		91.7
起振力 ^{*2} (kN)		4.9
振幅 ^{*3} (mm)		0.335
最大速度 ^{*1} (m/min)		6
振動締固めエネルギー ^{*3} (kN・m/m ²)	1回	3.1
	2回	6.2
	4回	12.4

[注意] ^{*1}: 実測値, ^{*2}: エンジンのカタログ値, ^{*3}:

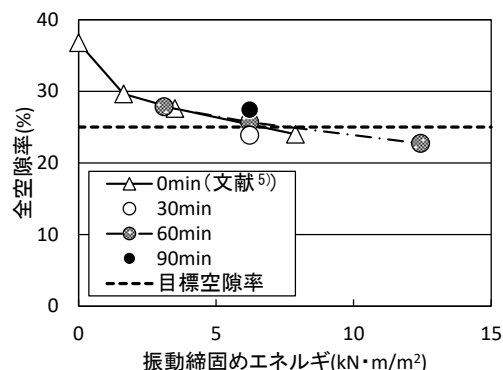


図-6 振動締固めエネルギーと全空隙率の関係

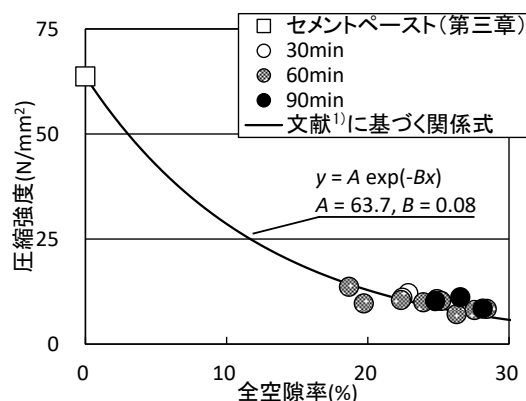


図-7 全空隙率と圧縮強度の関係

図中に示す運搬時間 0 分の点は、既往の研究⁵⁾で報告された同調合の試験結果をプロットしたものである。

同図より、運搬時間の経過に伴い、振動締固めエネルギーが同程度であれば、全空隙率が增大する傾向が見られた。これは、運搬時間の経過により、ペースト分の流動性が低下し、振動締固めに抵抗したものと考えられる。

また、運搬時間 0 分と比較して、本実験で作製された POC スラブの振動締固めエネルギー-空隙率関係は、概ね形状が類似しており、運搬時間 60 分時点においても、振動締固めエネルギーと全空隙率の間には一定の関係が見られる。

4.3.3. 圧縮強度と空隙率の関係

図-7 に、容積法による空隙率と圧縮強度の関係を示す。なお、図中の全空隙率 0% には、実験 A-I の 25℃ 以下の条件で作製された同調合のセメントペースト強度を参考値として示している。同図より運搬時間によらず、

各コア試験体の圧縮強度は、文献⁹⁾に基づく関係式とほぼ合致している。このことから、本実験の範囲においては、運搬時間の経過による空隙率－圧縮強度関係に及ぼす影響はほぼないと考えられる。

5. 振動締固めが隣接区画に及ぼす影響（実験 B）

振動締固めにより不陸が生じる場合、POC の空隙率およびこの水平方向の分布に及ぼす影響に関しては、定量的な検討がなされていない。このため本章では、特に不陸が生じやすい条件を小型の鋼製型枠で再現し、レーザー変位計による表面形状の計測結果に基づき、定量的な評価を試みた。

5.1. 実験概要

要因と水準を表－7 に示す。

本実験で使用した POC の材料は 2.1 節と同様の各種材料を用いた。ただし、目標空隙率 15% の試験体のみ、ペーストフロー値の調整のため、セルロース系増粘剤を用いている。

表－8 に、本実験の POC の調合表を示す。POC の練混ぜには揺動攪拌型ミキサを用い、練混ぜ方法はセメントペースト先練りとした。セメント、水および混和剤をミキサに投入し練り混ぜた後、ミキサ内壁の付着物をかき落とし、200rpm で 90 秒間練り混ぜた。採取したセメントペーストに JIS R 5201 に従ってフロー試験を実施し、所定のフロー値が得られたことを確認した後に、粗骨材をミキサに投入して 200rpm にて 120 秒間練り混ぜた。

練り上がった POC は各調合につき 1 本、角柱鋼製型枠に打ち込んだ。目標空隙率に近い試験体の製造のため、試験体の容積(76×100×400mm)に応じた POC 質量を算出し、打込み量の管理を行った。

振動締固めには、出力 280W、振動数 140～180Hz、加圧面寸法 100×200mm、振動機質量 5.9kg の型枠バイブレータを用いた。

締固めの手順は、コテで軽く敷き均した後のフレッシュ POC 試験体に対して、図－8 に示すように、試験体の左半分（A 区画）を A-1 回目、右半分（B 区画）を B-1 回目、再度左半分を A-2 回目、再度右半分を B-2 回目として、合計 4 回（同一区画では合計 2 回）の締固めで終了した。各締固めでは、計算上は目標空隙率となる試験体高さ（76mm）まで強制的に締め固めることとし、各締固めの間で試験体の表面形状の測定を実施した。

5.2. 試験項目および試験方法

POC の表面形状の測定は、レーザー変位計を用いて行った。測定は試験体の長手方向とし、型枠付近の摩擦の影響を考慮して型枠より 40mm の位置 2 ヶ所で計測を行った。また、POC の振動締固めに伴う水平方向の変位の測定に関しても、試験体断面部分に対して同様の方法で計測を行った。

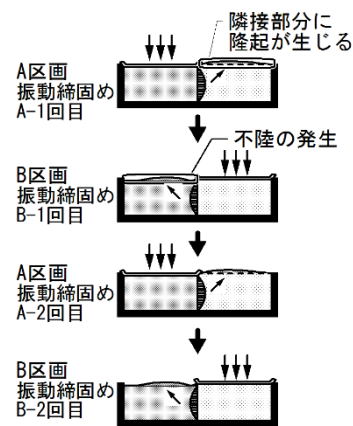
表－7 要因と水準（実験 B）

要因	水準
目標空隙率(%)	15, 25, 35
振動締固め回数(回)	0, A-1, B-1, A-2, B-2

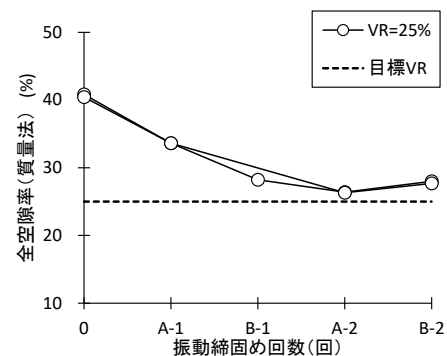
表－8 POC の調合表（実験 B）

W/C	締固め度 (%)	VR(%)	単位量(kg/m ³)			SCA/C (%)
			W	C	G	
0.3	100	15	130.9	436.4	1554.4	0.03
0.3	100	25	82.2	274.1	1554.4	—
0.3	100	35	33.6	111.9	1554.4	—

[注] VR：目標空隙率，SCA：セルロース系増粘剤



図－8 締固め手順の概念図



図－9 振動締固め回数と全空隙率の関係

得られた POC の表面形状は空隙による凹凸部分を含む。このため、試験体長さ 20mm 毎に区間を設定し、区間内の最大試験体高さを代表値として用いた。

また、質量法による全空隙率は 4.2 節と同様の方法で、各試験片を試験に供した。

5.3. 試験結果および考察

5.3.1. 振動締固め回数と全空隙率の関係

図－9 に、目標空隙率 25% の試験体における、振動締固め回数と質量法による全空隙率の関係を示す。なお、かさ容積は先述の通り 20mm 区間内代表値を用いて算出した。同図より、振動締固め B-2 回目終了時点で、目標空隙率と比較し、全空隙率が大きく計測される傾向が見られた。目標空隙率 15 および 35% 試験体においても、これと同様の傾向が見られた。これは、振動締固めに伴う隣接区画のかさ容積の増大によるものと考えられる。

加えて、締固め回数 B-1 回目以降、全空隙率の変化は緩やかになっている。すなわち、隆起および締固めによるかさ容積の変化量がほぼ等しいため、本実験における締固め条件では目標空隙率の達成は困難であることが予想される。

5.3.2. 水平方向の空隙率分布

振動締固め B-2 回目が終了後、試験体長さ方向の 50mm 毎に切断した各試験片の全空隙率を図-10 に示す。試験体中央部付近より採取された試験片のかさ容積は、水平方向の変位量の計測結果により算出している。

また、既往の研究⁹⁾によれば型枠付近において空隙率が局所的に増大する壁効果は、全体の空隙率と比較して底面で 1.1~1.3 倍程度、側面で 1.46 倍程度とされている。図に併記した黒塗の点は、平均空隙率に対して底面 1.2 倍、側面 1.46 倍の空隙率を有し、壁効果の生じる範囲を平均骨材粒径 (9mm) の半分と仮定した推定値を示している。図より、試験体の端部付近の試験片について、全空隙率が増大する傾向が見られ、先述した推定値とほぼ同様の値を示していることから、鋼製型枠による壁効果によるものと考えられる。

また、VR = 25%, 35% について締固め区画との境界付近の試験片の全空隙率が増大する傾向が見られた。これは、振動締固めに伴う POC のせん断変形により、骨材の乗り上げ効果 (ダイラタンシー) が生じ、締固め境界付近のフレッシュ POC のかさ容積が増大したためであると考えられる。

6. 結論

本研究では、現場施工 POC の品質保証を目的として、運搬時間および振動締固め時の不陸の発生が POC の諸特性に及ぼす影響について検討を行った。

以下に本研究における総括を示す

6.1. 運搬時間が POC の諸特性に及ぼす影響

(実験 A-I, A-II, A-III)

- 1) 攪拌方法、外気温および調合によらず、運搬時間の経過に伴い POC のフレッシュ性状は低下する傾向を示す。ただし、混和剤を用いることにより、良好なフレッシュ性状の維持が可能である。
- 2) 圧縮強度に及ぼす運搬時間の影響は、ペースト分の乾燥が著しい場合には圧縮強度の低下傾向が見られるものの、実際の運搬に用いるアジテータ車およびこれと攪拌方法が近い傾胴式ミキサにおいては、圧縮強度の低下傾向は明確には見られない。
- 3) 運搬にアジテータ車を用いる場合においては、圧縮強度-空隙率関係に運搬時間はほぼ影響しない。
- 4) フレッシュ性状の低下により、同程度の締固め程度の実現には、振動締固めエネルギーをより多く要する傾向を示す。

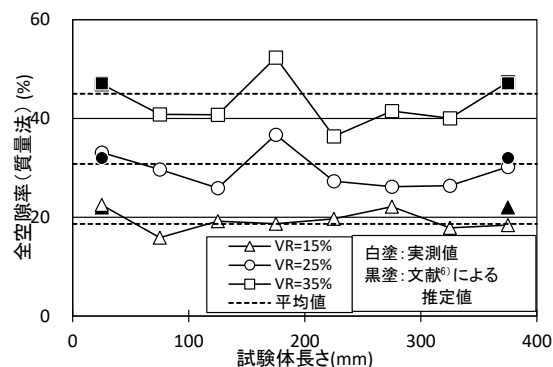


図-10 水平方向の空隙率分布

以上の結果から、フレッシュ性状の低下に伴う、施工性の低下に対して、以下の対応が考えられる。

- 1) 振動締固めの追加実施
- 2) 混和剤によるフレッシュ性状の維持
- 3) 締固め度による補正

6.2. 振動締固めによる不陸の発生が POC の諸特性に及ぼす影響 (実験 B)

- 1) 振動締固めにより不陸が発生する場合においては、隣接する区画の容積の増大により、目標空隙率の達成が困難であることが予想される。
- 2) 振動締固め時の不陸の発生により、振動締固め境界付近では骨材の乗り上げ効果が生じ、空隙率が増大する領域が局所的に発生する可能性がある。

参考文献

- 1) 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：日本コンクリート工学協会，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
- 5) 森鼻泰大：現場施工ポーラスコンクリートの施工標準と品質管理手法に関する研究，三重大学修士学位論文，2011
- 6) 関本亮太，松岡卓，三島直生，畑中重光：ポーラスコンクリートの水平方向透水性能に及ぼす壁効果の影響と内部の水の流速分布に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.1743-1748, 2016

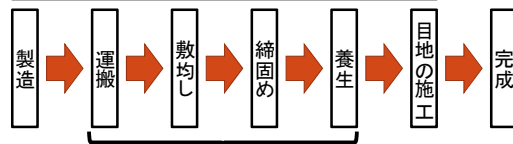
ポーラスコンクリートの諸特性に及ぼす 運搬時間と施工方法の影響に関する研究

工学研究科建築学専攻
畑中研究室 藤木諒将

序論 実験室実験 混和剤 実施工条件 結論

研究の背景

ポーラスコンクリート(POC)の製造・施工フロー

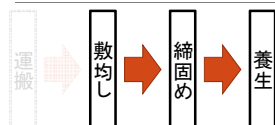


各工程の良否で品質が左右

品質保証には影響の定量的な把握が必要

序論 実験室実験 混和剤 実施工条件 結論

研究の背景



森鼻⁵⁾により検討

序論 実験室実験 混和剤 実施工条件 結論

研究の背景

運搬

運搬時間が圧縮強度・フレッシュ性状に及ぼす影響

締固め

不陸の発生による空隙率分布に及ぼす影響

論文の構成

第一章 序論

第二章 既往の研究

第三章 運搬時間が諸特性に及ぼす影響

第四章 混和剤(凝結遅延剤, 高性能AE減水剤遅延型)の影響

第五章 実施工条件における運搬時間が諸特性に及ぼす影響

第六章 振動締固めが隣接区画に及ぼす影響 (中間発表で発表済)

第七章 結論

論文の構成

第三章 運搬時間が諸特性に及ぼす影響

発表予定論文 2018年度日本建築学会大会 東海支部
日本コンクリート工学年次大会2018

第六章 振動締固めが隣接区画に及ぼす影響

既発表論文 2017年度日本建築学会大会 東海支部
日本コンクリート工学年次大会2017 年次論文奨励賞

序論

序論 実験室実験 混和剤 実施工条件 結論

論文の構成

第三章 運搬時間が諸特性に及ぼす影響

発表予定論文 2018年度日本建築学会大会 東海支部
日本コンクリート工学年次大会2018

第四章 混和剤(凝結遅延剤, 高性能AE減水剤遅延型)の影響

第五章 実施工条件における運搬時間が諸特性に及ぼす影響

第三章 運搬時間が諸特性に及ぼす影響

序論 実験室実験 混和剤 実施工条件 結論

研究の背景(第三章～第五章)

練混ぜから打ち終わり
25℃超 : 90分以内
25℃以下 : 120分以内 を標準とする
(ポーラスコンクリートの製造・施工指針(案)より)

第三章 運搬時間が諸特性に及ぼす影響

序論 実験室実験 混和剤 実施工条件 結論

研究の背景(第三章～第五章)

練混ぜから打ち終わり
25℃超 : 90分以内
25℃以下 : 120分以内 を標準とする
(ポーラスコンクリートの製造・施工指針(案)より)

製造 0分 養生 90分 (25℃超)

第三章 運搬時間が諸特性に及ぼす影響

序論 実験室実験 混和剤 実施工条件 結論

研究の背景(第三章～第五章)

練混ぜから打ち終わり
25℃超 : 60分以内
25℃以下 : 90分以内 が望ましい
(ポーラスコンクリートの製造・施工指針(案)より)

製造 0分 運搬 養生 60分 (25℃超)

第三章 運搬時間が諸特性に及ぼす影響

序論 実験室実験 混和剤 実施工条件 結論

研究の目的(第三章～第五章)

フレッシュPOCの運搬時間の経過

フレッシュ性状 圧縮強度 に及ぼす影響の検討例は少ない

↓

運搬時間による影響の定量的な把握を行う

第三章 運搬時間が諸特性に及ぼす影響

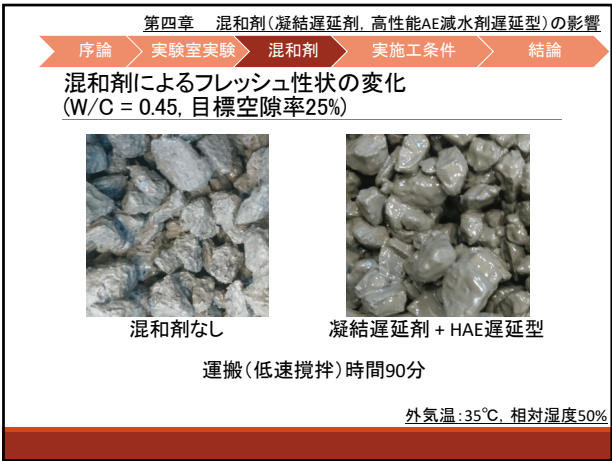
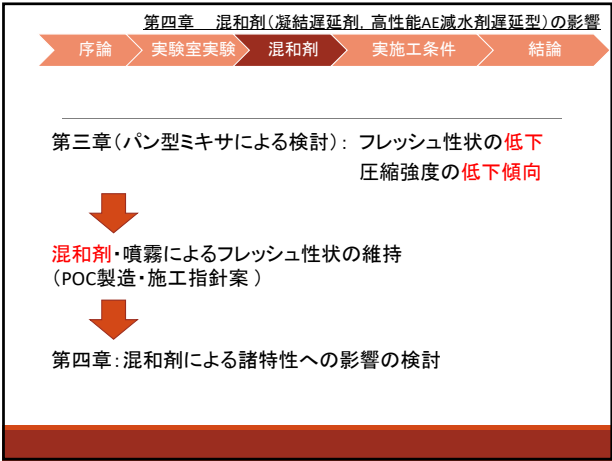
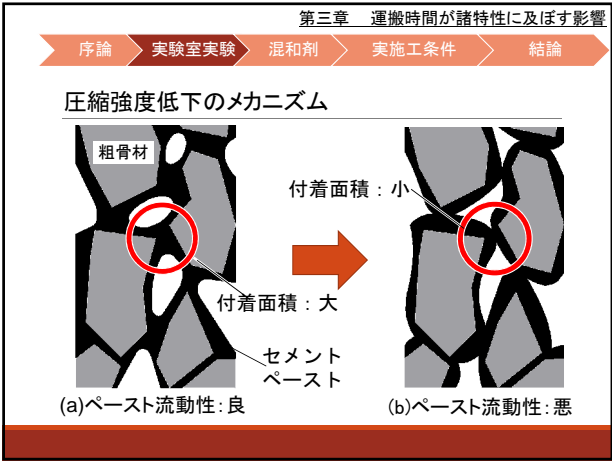
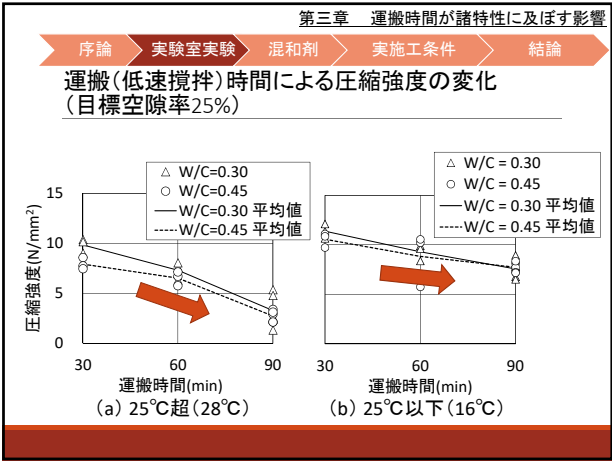
序論 実験室実験 混和剤 実施工条件 結論

第三章:実験概要

要因	水準
外気温	25℃以下, 25℃超
水セメント比W/C	0.30, 0.45
運搬(低速攪拌)時間(min)	30, 60, 90
目標空隙率VR (%)	15, 25, 35

[注] : 基本水準を示す

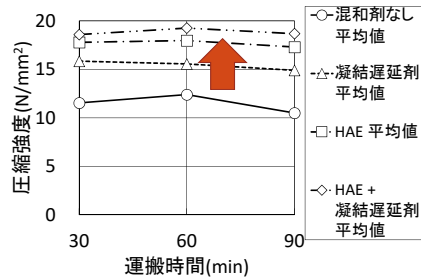
攪拌速度 : 10rpm
設置位置 : 屋外
実施時気温 : 16℃, 28℃



第四章 混和剤(凝結遅延剤, 高性能AE減水剤遅延型)の影響

序論 実験室実験 混和剤 実施工条件 結論

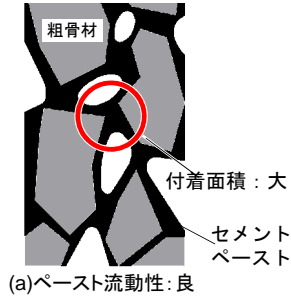
運搬(低速攪拌)時間による圧縮強度の変化
(目標空隙率25%)



第四章 混和剤(凝結遅延剤, 高性能AE減水剤遅延型)の影響

序論 実験室実験 混和剤 実施工条件 結論

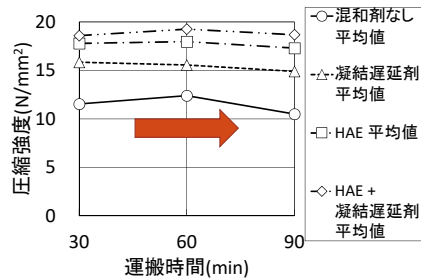
運搬(低速攪拌)時間による圧縮強度の変化
(目標空隙率25%)



第四章 混和剤(凝結遅延剤, 高性能AE減水剤遅延型)の影響

序論 実験室実験 混和剤 実施工条件 結論

運搬(低速攪拌)時間による圧縮強度の変化
(目標空隙率25%)



第五章 実施工条件における運搬時間が諸特性に及ぼす影響

序論 実験室実験 混和剤 実施工条件 結論

第三章
第四章 : 実験室実験による検討

施工性低下の把握が不十分

第五章: 実施工条件による検討

第五章 実施工条件における運搬時間が諸特性に及ぼす影響

序論 実験室実験 混和剤 実施工条件 結論

第五章: 実験概要

要因	水準
通過回数(回)	1, 2, 4
攪拌時間(min)	30, 60, 90
噴霧	あり, なし

[注] ー: 基本水準を示す

攪拌速度 : 1.6rpm
外気温18℃, 相対湿度86%

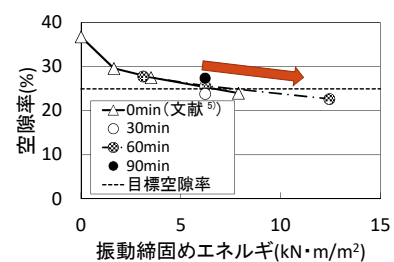
締固め : POC仕上げ機
エネルギー : 3110 N・m/m²・回



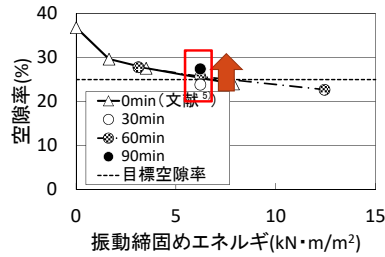
第五章 実施工条件における運搬時間が諸特性に及ぼす影響

序論 実験室実験 混和剤 実施工条件 結論

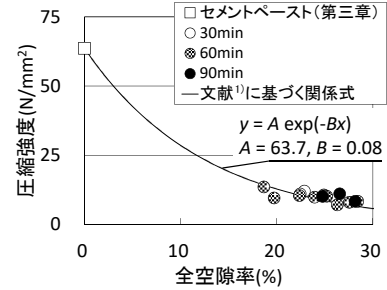
振動締固めエネルギーと空隙率の関係
(目標空隙率25%, 噴霧なし)



振動締固めエネルギーと空隙率の関係 (目標空隙率25%, 噴霧なし)



全空隙率と圧縮強度の関係 (目標空隙率25%, 噴霧なし)



総括(第三～第五章)

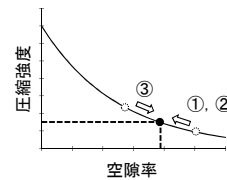
(1) ポーラスコンクリートの運搬時間が諸特性に及ぼす影響

- 1) 攪拌時間の増加に伴い、外気温および調合によらずフレッシュ性状は低下する傾向を示す。ただし、**混和剤の使用により良好に保つことが可能**である。
- 2) アジテータ車による運搬では、運搬時間が増加しても、**圧縮強度－空隙率関係はほとんど変わらない**。
- 3) 運搬後の施工性の低下に対し、以下の対応が考えられる。
 - ①振動締固めの追加
 - ②混和剤によるフレッシュ性状の維持
 - ③締固め度による補正

総括(第三～第五章)

3) 運搬後の施工性の低下に対し、以下の対応が考えられる。

- ①振動締固めの追加
- ②混和剤によるフレッシュ性状の維持
- ③締固め度による補正



総括(第六章)

(2) 振動締固めによる不陸の発生による影響

梗概参照

今後の課題

実験室実験および実施工実験による、混和剤・目標空隙率等の調合による諸特性への影響についてデータの蓄積

付録③：学位論文要旨及び論文目録

学位論文提出者	氏名	藤木 諒将	専攻	建築学	講座	建築マネジメント
研究領域名	G:社会基盤・生産					
学位論文題目	ポーラスコンクリートの諸特性に及ぼす運搬時間と施工方法の影響に関する研究					
論文審査委員	主査	畑中重光教授	副査	花里利一教授	副査	三島直生准教授
学 位 論 文 要 旨						
<p>ポーラスコンクリート(以下、POCと略記)は、粗骨材と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、連続する空隙を有している。この空隙により透水や、排水の機能を持つため、環境共生分野への利用が期待される。</p> <p>POCの製造・施工にあたり、混練後の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。このため、日本コンクリート工学会による”ポーラスコンクリートの製造・施工指針(試案)”では、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。</p> <p>また、施工現場に到着したPOCを表面振動機で締め固める場合、POCに伝達されるエネルギーが過大であれば、隣接する区画の上面に不陸が生じることが予測される。しかし、その変位量および空隙率への影響の定量的な検討はほとんど行われていない。</p> <p>このため本研究では、運搬時間がPOCのフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響と、振動締め固めによる不陸の発生状況および空隙率の分布への影響の定量的な把握を目的に、実験的な検討を行った。</p> <p>本論文は、全七章よりなる。</p> <p>第一章では、POCの概説および研究の背景と目的を示す。第二章では、POCの各種特性および実施工に関連した既往の研究を整理した。</p> <p>第三章においては暑中期および通常期条件で、最長90分間フレッシュPOCを攪拌し、攪拌時間がPOCのフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響を検討した。この結果、水セメント比によらず攪拌時間の経過に伴いフレッシュ性状および圧縮強度の低下傾向を示すこと、外気温が低い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が確認された。これを受けて、第四章では、暑中期を再現した条件のもと、混和剤(高性能AE減水剤、凝結遅延剤)を用いたPOCの諸特性に及ぼす運搬時間の影響を検討し、攪拌時間90分時点においても、混和剤を使用したPOCはフレッシュ性状が良好に保たれることが確認された。第五章では、実施工条件で検討を行い、第三・第四章と同様に、アジテータ車による攪拌においてもPOCのフレッシュ性状の低下傾向が示された。</p> <p>第六章では、型枠試験体を用いて、隆起量が最大となる場合について振動締め固め実験を行った。この結果、試験体表面の隆起に伴うかさ容積の増大により、振動締め固め境界付近においては全空隙率が増大する傾向が示された。</p> <p>第七章では本研究の総括を行うとともに、今後の展望について示す。</p>						
論 文 目 録						
<ul style="list-style-type: none"> ・ 藤木諒将, 中川武志, 三島直生, 畑中重光:ポーラスコンクリートの振動締め固めが及ぼす隣接区画への影響に関する基礎的研究, 日本建築学会東海支部研究報告書, No.55, pp.45-48, 2017.2 ・ 藤木諒将, 三島直生, 畑中重光, 中川武志:ポーラスコンクリートの振動締め固めが及ぼす隣接区画および水平方向の空隙率分布への影響に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, vol.39, No.1, pp.1483-1488, 2017.7 ・ エルドンオチル, 藤木諒将, 三島直生, 畑中重光:現場施工されたポーラスコンクリートスラブの品質評価に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, vol.39, No.1, pp.1489-1494, 2017.7 ・ 藤木諒将, 三島直生, 畑中重光, 中川武志:ポーラスコンクリートの振動締め固め段階が及ぼす隣接区画への影響に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.79-80, 2017.8 ・ 藤木諒将, 中川武志, 畑中重光:暑中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, 日本建築学会東海支部研究報告書, No.56, 2018.2 ・ エルドンオチル, 藤木諒将, 畑中重光, 三島直生:ポーラスコンクリートにおける空隙率と超音波伝播速度の関係に関する解析的研究, 日本建築学会東海支部研究報告書, No.56, 2018.2 ・ 藤木諒将, 森下拓海, 中川武志, 畑中重光: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, コンクリート工学年次論文集, vol.40, 2018.7, (投稿中) ・ エルドンオチル, 藤木諒将, 畑中重光, 三島直生:超音波法によるポーラスコンクリートの空隙率推定手法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 2018, (投稿中) ・ 藤木諒将, 畑中重光, 三島直生:コンクリート圧縮試験における供試体端面の圧力分布とその影響:日本建築学会構造系論文集, 2018, (投稿中) 						

ポーラスコンクリートの振動締固め段階が及ぼす隣接区画への影響に関する再現解析

1. はじめに

ポーラスコンクリート（以下、POC と略記）は粗骨材と、これを連結するセメントペーストまたはモルタルにより構成される、内部に空隙を有するコンクリートである。この空隙により透水性、排水の機能を持つため、環境共生分野への利用が期待される。

現場で施工される POC は、施工する区画に POC を敷き均した後、上面から振動機を用いて振動締固めを行うのが一般的であり、振動締固めが POC の空隙率に及ぼす影響についても報告²⁾がなされている。

この際、POC に伝達されるエネルギーが過大であれば、POC の沈降に応じて骨材が押しのけられ、隣接する区画の上面に不陸が生じることが予測される。

このため本報では、図-1 に示すような連続した POC スラブに対する検討の前段階として、斜線で示した POC スラブの断面を想定した 2 次元の締固め挙動の把握を試みた。本実験では、図-1 中に示すように、100×100×400mm の小型の鋼製型枠を用いることで隣接区画方向以外の変形を制限した。この場合、3 次元の実験と比較して、隣接区画の隆起量は最大となる。

これにより得られた各締固め段階の表面形状をレーザー変位計で測定し、有限要素法を用いて POC の鉛直および水平方向の変形の再現の可能性を検討した。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

表-1 に実験の要因と水準を示す。なお、振動締固めについて、締固め度すなわち目標空隙率の達成度を水準に含むため、打込みの際には、所定の試験体高さを満足するよう管理を行った。

2.2 使用材料および調査

使用材料として、セメントに普通ポルトランドセメント、粗骨材に硬質砂岩の砕石6号（実積率58.2%）を使用し、目標空隙率25%、単位粗骨材量を1554kg/m³とした。

2.3 試験体作製方法

POC の練混ぜには容量30Lの揺動攪拌型ミキサーを用い、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ミキサーに投入し、50rpmで30秒間練り混ぜた後、ミキサー内壁の付着物をかき落とし、200rpmで90秒間練り混ぜた。混練のあと、所定のフロー値が得られたことを確認した後に、粗骨材をミキサーに投入して200rpmで120秒間練り混ぜを行った。

練り上がったフレッシュPOCは各水準につき1本、角柱鋼製型枠(100×100×400mm)に打ち込んだ。目標空隙率に近

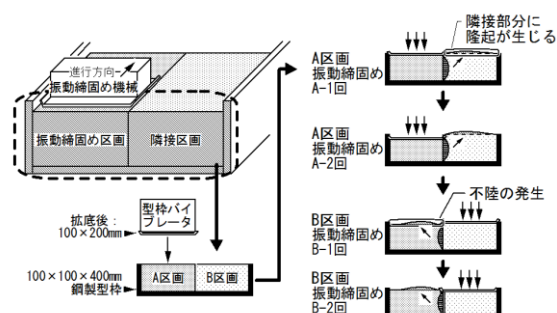


図-1 再現する領域および不陸発生概念図

表-1 要因と水準

要因	水準
締固め回数(回)	0, A-1, A-2, B-1, B-2

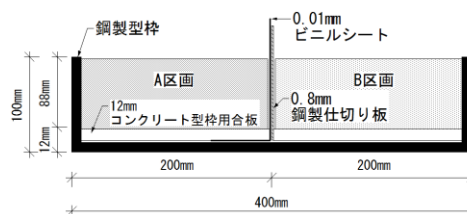


図-2 使用した型枠と仕切りの状況

い試験体の製造のため、試験体の容積(76×100×400mm)に応じたPOC質量を算出し、打込み量の管理を行った。また、骨材の水平移動の測定のため、図-2に示すように型枠中央で厚さ0.8mmの鋼製の仕切り板と、0.01mmのビニルシート（柔軟で骨材の移動を妨げない）により、各領域を区分して所定量のフレッシュPOCを打ち込んだ。その後、仕切り板のみを取り除き、試験体高さが88mm程度となるまでコテで敷均した。振動締固め後、レーザー変位計で表面形状を測定した。

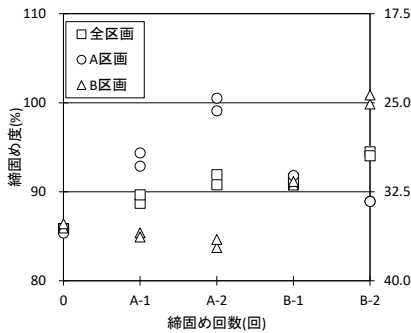
振動締固めには、出力280W、振動数140～180Hz、加圧面寸法100×200mm、振動機質量5.9kgの型枠バイブレータを用いた。

締固めの手順は、型枠内で軽くコテで敷き均した後のフレッシュPOCに対して、試験体の左半分（A区画）を締固め度93%まで締め固めた（A-1回）後、同区画を締固め度100%まで締め固める（A-2回）。その後、右区画（B区画）も同様に、締固め度93%（B-1回）まで締め固めた後、締固め度100%（B-2回）まで強制的に締め固めた。ただし、水平方向の変位の測定するため、試験体は水準毎に作製している。

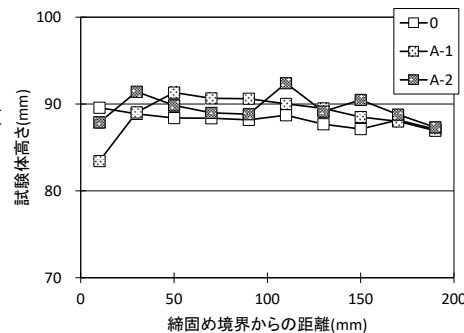
2.4 試験方法

(1) レーザー変位計による表面形状の測定

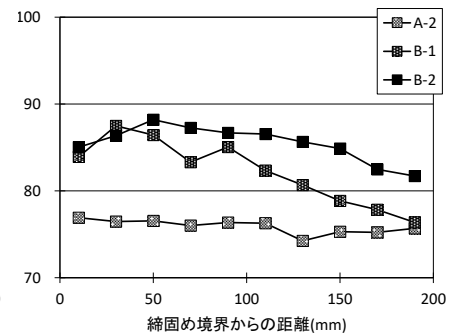
POCの表面形状の測定は、レーザー変位計を用いて行った。測定は試験体の長手方向とし、型枠付近の摩擦の影響を考慮して型枠より40mmの位置2ヶ所で計測を行った。得



図－3 締固め回数と締固め度
および全空隙率の関係



(a) A 区画振動締固め時



(b) B 区画振動締固め時

図－4 締固め境界からの距離と隣接区画の試験体高さの関係

られたPOCの表面形状は空隙による凹凸部分を含むため、試験体長さ20mm毎に区間を設定し、区間内の最大試験体高さを代表値として用いた。

POCの振動締固めに伴う水平方向の変位の測定に関しても、試験体断面部分に対して同様の方法で計測した。また、水平変位量の算出に用いる代表値は、10mm毎に区間を設定し、区間内の重み付き平均より算出した。

(2) 空隙率の測定

POCの空隙率試験は、日本コンクリート工学会によるポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)⁹⁾に基づき、質量法による全空隙率の測定を実施した。この際、かさ容積は20mm区間代表値を用いて算出を行った。また、締固め度も同様の算出方法を用いた。ただし、AおよびB区画の締固め度は、試験体長さを200mmで算出しており、フレッシュPOCの水平方向の移動を考慮していない。

(3) 有限要素法による変形の再現

AおよびB区画のPOCをモデル化し、等方弾性体(初期値: $88 \times 100 \times 199.5 \text{ mm}$)による線形静解析を実施した。有限要素法による線形静解析を実施するにあたり、解析プログラムには市販のFemap with NX Nastran v.9.1.0 Jを用いた。

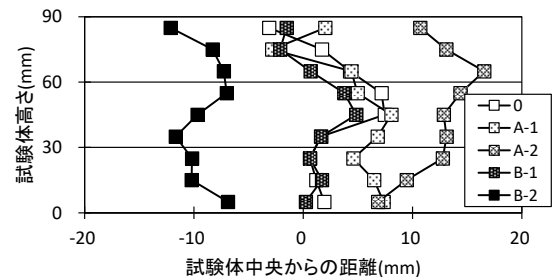
拘束条件として、摩擦力を考慮し、締固め加振面および型枠底面は全方向の並進、型枠側面は試験体長手方向の並進を拘束した。荷重条件は、振動締固め実施区画の、20mm区間代表値の平均値を変位として入力した。また、解析には、直前の解析結果に基づいて作製した、変形後のPOCモデルを用いた。

本解析においては、荷重条件および解析結果を変位のみにより入出力するため、POCモデルのヤング係数は $E = 1 (\text{N/mm}^2)$ と仮定した。またポアソン比 ν は、振動締固め段階A-1回目における解析値が、実測値を概ね再現可能となる値を設定し、以降の振動締固め段階における解析ではこれと同値とした。

3. 実験結果および考察

3.1 全空隙率および締固め度

図－3に締固め回数と締固め度および全空隙率の関係を



図－5 試験体中央(200mm)からの距離の分布

を示す。図より、振動締固め実施区画に関しては、目標締固め度を概ね満足しているが、締固め回数B-1回以降、A区画の締固め度が減少する傾向が見られた。これは、B区画の振動締固めに伴う骨材の移動により、A区画上面が隆起し、かさ容積が増加したためであると考えられる。

3.2 鉛直および水平方向の形状の変化

図－4(a), (b)に締固め境界からの距離と、隣接区画の試験体高さの関係を示す。図(a)より、隣接区画(B区画)は、隆起がほぼ生じていないことが確認できる。これは、B区画が輕盛状態であるためと考えられる。

また、図(b)より、A-2回の試験体高さと比較し、締固め回数B-1回では、締固め境界から20～60mm付近で試験体高さが最大となっていることが確認できる。一方で、B-2回においては、締固め境界から100mm以上の地点で試験体高さが増加する傾向が見られた。これは、振動締固めの進展に伴う水平変位の増大によるものと考えられる。

図－5に、各締固め回数の試験体中央(200mm)からの距離の分布を示す。図より、A区画の振動締固めにより、隣接区画への骨材の移動が生じていることが確認できる。また、B区画に振動締固めを実施した試験体においては、B-1回実施後にフレッシュPOCが試験体中央付近に戻り、その後のB-2回目では、隣接区画へのフレッシュPOCの移動量はA-2回目実施後と同程度となった。

4. 有限要素法による POC の挙動の再現

図－6(a)～(h)に、各締固め段階のPOCの表面形状の実測値と解析値を示す。なお、同図(a), (b)に示す振動締固めA-

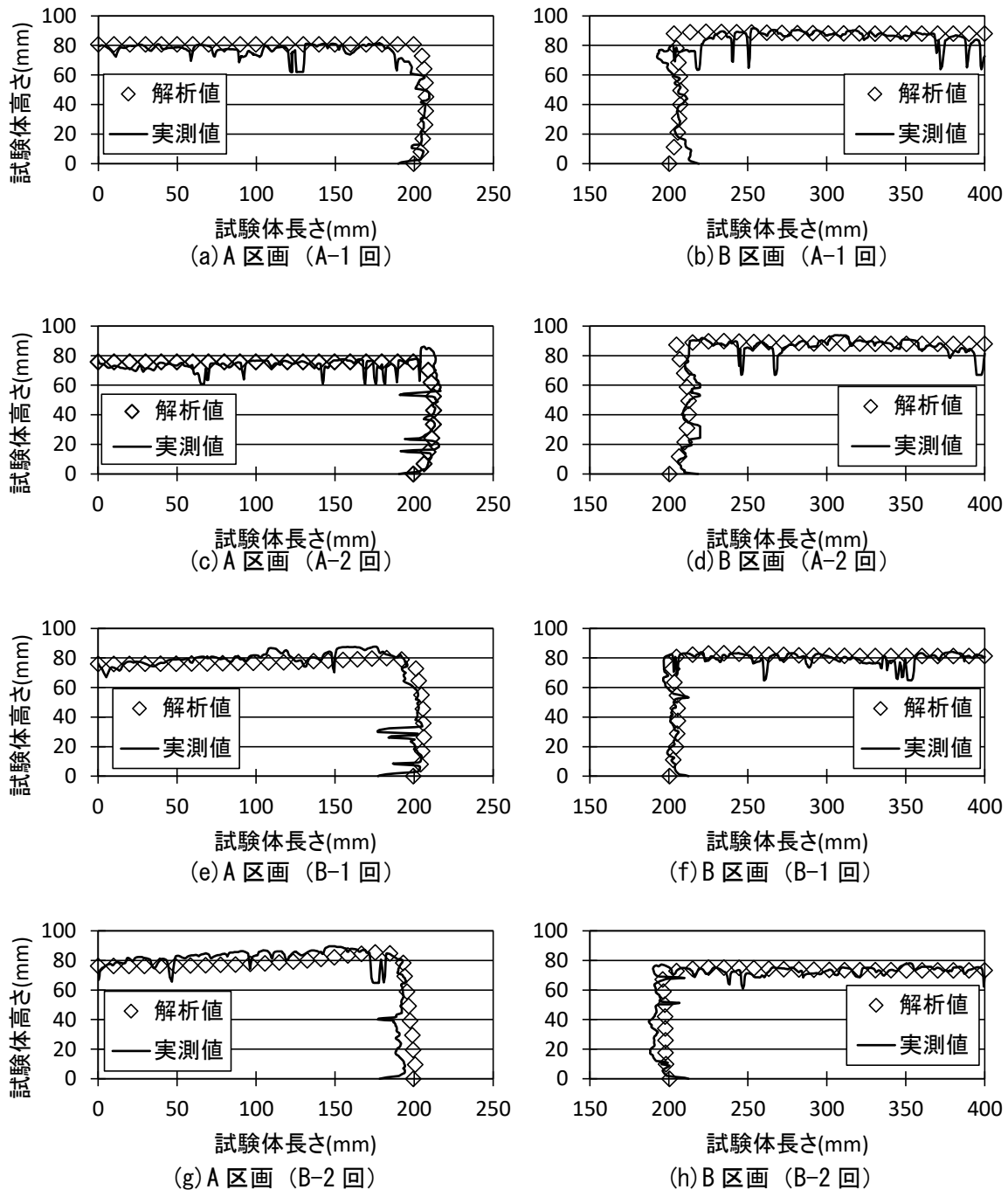
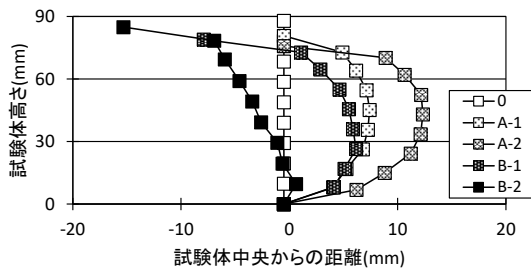


図-6 各締固め回数のPOC表面形状の実測値と解析値

図-7 試験体中央(200mm)からの距離の分布
(解析値)

1回目の解析値が得られた際のポアソン比は、輕盛状態(A-

1回およびA-2回におけるB区画)で $\nu = 0.15$ 、これ以外は $\nu = 0.475$ であった。各解析段階の試験体中央からの距離の分布を示した図-7より、実測値の図-5を比較して、B-1回目以降、試験体中央からの距離に5mm程度の差異が生じるものの、解析値は実測値を大まかに再現可能であることが確認できる。

5. まとめ

本報では、小型の型枠を用いたポーラスコンクリートの振動締固めに伴う形状の変化を、締固め度に応じて段階的

に把握するとともに、有限要素法による再現解析の可能性についても検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 隆起の生じる領域は、振動締固め境界から 20～60mm の地点で最大値となり、振動締固めの進行に伴い、隆起の確認される範囲は 100mm 以上の地点まで推移する傾向を示す。
- (2) 目標空隙率 25% のポーラスコンクリートにおける、鉛直および水平方向の変形後の表面形状は、有限要素法により大まかに再現可能である。

参考文献

- 1) 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：日本コンクリート工学協会，2015.6
- 2) 森鼻泰大，中川武志，三島直生，畑中重光：実施工における振動締固めがポーラスコンクリートの空隙率および諸特性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.1481-1486, 2011