

論文 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

エルドン オチル^{*1}・藤木 諒将^{*1}・三島 直生^{*2}・畑中 重光^{*3}

要旨：本報では、歩道および建物外構を想定したポーラスコンクリート舗装から切出した供試体（コア供試体）と型枠に打ち込んだ供試体（型枠供試体）による強度および空隙率の比較を行い、現場施工されたポーラスコンクリートの現実的な品質管理手法に関して検討を行った。その結果、設計時点での目標空隙率と締固め度により現場施工されたポーラスコンクリートの空隙率を概ね予測できること、型枠供試体による圧縮強度－空隙率および曲げ強度－空隙率の関係曲線は、そのまま現場のポーラスコンクリートに使用可能である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、現場施工、品質管理、圧縮強度、曲げ強度、空隙率

1. はじめに

ポーラスコンクリート（以下、POC）は、その内包する多量の空隙により普通コンクリートでは得られない多くの機能を持たせることができるため、環境共生分野などへの適用が注目されている材料である。

普通コンクリートと異なり、POCは施工時の締固めの程度により空隙率が変化し、これに準じて品質が大きく変動する。そのため、品質評価には、現場施工されたPOCから採取されたコア供試体を用いることが最も望ましいといえるが、簡便性の点で問題がある。また、文献¹⁾には、POCの強度管理方法試案として、型枠供試体によって強度と空隙率の関係式を求め、現場で実測した空隙率、または設計時点での目標空隙率および締固め度により推定した空隙率を代入して現場のPOCの強度を推定する方法が提案されている。

本報では、歩道および建物外構を想定したPOC舗装を、実際の施工方法に準じて施工し、そこから得られたコア供試体（円柱体）および切出し供試体（角柱体）と、型枠供試体（円柱体および角柱体）による強度および空隙率の比較を行い、現場施工されたPOCの空隙率に着目した現実的な品質管理手法に関して検討する。

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。POCの調合上の設計空隙率は25%で一定とし、締固めの程度をえることで実際の空隙率を変化させた。締固めは、コテ仕上げのみ、および写真-1に示す仕上げ機（市販のタンパーの底板を拡幅したもの、底板0.55×0.30 m²）の通過回数（1回、4回）の3水準とした。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
W/C	0.30, 0.45
POCの締固め程度	コテ仕上げのみ、 仕上げ機1回（締固め小）、 仕上げ機4回（締固め大）
路床	改良土、砕石、コンクリート

[注] __：基本水準を示す



重量：43.0 kg
 転圧板面積：
 0.55×0.30 m²
 起振力：4.9 kN
 振動数：91.7 Hz

写真-1 本実験で使用した仕上げ機

セメントペーストの水セメント比 W/C は 0.30 および 0.45 の 2 水準とした。また、締固めの程度に影響を及ぼすと考えられる路床の条件を 3 水準に変化させた。路床のうち改良土とは、まさ土 1m³ に対して普通ポルトランドセメント 50kg を混合し、敷均しおよびタンパーでの締固めの後に散水して養生したものを用いた。砕石路床は地盤上に厚さ 100mm の 6 号砕石および 7 号砕石を混合したものを敷き均し、タンパーで締め固めた。コンクリート路床は、W/C = 0.62、細骨材率 s/a = 46%、目標圧縮強度 = 24N/mm² の普通コンクリートを 100mm 厚さで施工した。上部の POC 舗装（厚さ 100mm）の施工は、上記路床の施工の 1 週間後とした。表-2 および図-1 に、

*1 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）

*2 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授 博士（工学）（正会員）

*3 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 教授 工学博士（正会員）

表-2 施工区画と要因・水準の組合せ

No.	目標空隙率 (%) *	W/C	締固め方法	路床
1	30	30	コテ	改良土
2	24		仕上げ機 4回	
3	30		仕上げ機 1回	コンクリート
4				砕石
5	45	仕上げ機 4回	改良土	
6				
7				

[注] *: 文献³⁾, 文献⁴⁾を参考に算出

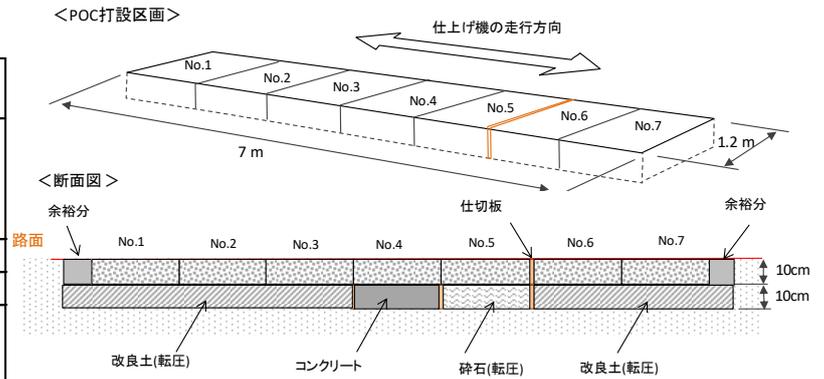


図-1 施工区画と要因・水準の組合せ

施工区画と要因・水準の組合せを、写真-2 に完成した路床の様子を示す。ここで、表-2 中の目標空隙率とは、締固め方法ごとに異なる空隙率を、文献³⁾と文献⁴⁾を参考に予測した概算値である。ここに、仕上げ機を1回と4回通過させた場合 (No.2 から No.7) は、文献³⁾の実測値を参考に予測した。コテ仕上げの場合 (No.1) は、文献⁴⁾の結果から、仕上げ機を1回通過した場合と同値になっているため、上記の仕上げ機を1回通過した場合と同値と予測した。ただし、本実験の目標空隙率は、締固め前の初期空隙率のバラツキを無視して予測されている。

2.2 使用材料および調査

POCの使用材料として、セメントには普通ポルトランドセメントを、粗骨材には硬質砂岩の砕石6号 (表乾密度: 2.65g/cm³, 吸水率: 1.29%, 実積率: 58.2%) を用いた。細骨材は使用していない。粗骨材の吸水方法に関しては、24時間以上吸水させた粗骨材を練混ぜ直前に表面乾燥状態まで乾燥させた。表-3 に、POCの調査表を示す。ここで、表中の設計空隙率とは、POC中の粗骨材が実積率相当まで充填された場合の空隙率を指す。

2.3 試験体の作製方法

POCの練混ぜは、W/C=0.30の調査については、セメントペーストのみ強制1軸パン型ミキサで先練りし、ペーストフロー値 (実測値: 179) を計測した後に、大型の鋼製容器に粗骨材と一緒に投入し、油圧ショベルを用いて均質になるまで練り混ぜた。W/C=0.45については、セメントペーストの流動性が高くなるため、粗骨材およびセメントを大型鋼製容器に投入後に、油圧ショベルを用いて空練りを行い、その後に水を投入して練り混ぜた。写真-3 に、POCの練混ぜの様子を示す。

練り上がったPOCは、レーキで敷き均した後に、所定の締固めおよび仕上げ作業を行った (仕上げ機による仕上げの様子は写真-1を参照)。

舗装以外に、各POCの調査に対して、角柱型枠 (100×100×400mm) および円柱型枠 (φ100×200mm) を用いて、各調査につき6体ずつ供試体を作成した。同供試



写真-2 完成した路床の様子 (手前が No7)

表-3 ポーラスコンクリートの調査表

W/C	設計空隙率 (%)	単位量 (kg/m ³)		
		W	C	G
0.3	25	81	272	1527
0.45	25	98	218	1527



写真-3 油圧ショベルによる POC の練混ぜの様子

体は、設計空隙率 (本実験では 25%) となるように質量管理を行い、突き棒、ジッキングおよび型枠振動機を用いて打込みおよび締固めを行った。

POC 以外に、POC で用いたセメントペーストのみを別のバッチで練り混ぜ、角柱体 (40×40×160mm) および円柱体 (φ50×100mm) を各6本ずつ作成した。ここで、W/C=0.45 では、セメントペースト供試体の作成時のみ

材料分離を低減するために、セルロース系増粘剤をセメント質量に対して 0.5% 添加している。

POC 舗装の養生は、材齢 3 日まで 1 日に 1 回の散水を行い、養生シートをかけた状態で初期養生を行った。その後は屋外暴露養生とした。型枠供試体については、材齢 3 日まで実験室内封緘養生とし、その後脱型して、各調合の半数の 3 本は標準水中養生、残りの 3 本は POC 舗装の横で屋外暴露養生とした。

POC 舗装からは、材齢 2 週の時点で、コンクリートカッターおよびコアドリルを用いて、切り出し供試体 (100 × 100 × 400mm) およびコア供試体 (φ 100 × 100 ~ 120mm) を、各条件につき 3 本ずつ採取し、材齢 28 日まで POC 舗装の横で屋外暴露養生した。供試体の採取時には、コテ仕上げの水準 (表-2 中の No.1) の一部の供試体で、骨材の剥離による供試体の角欠けが確認されたが、他の水準ではほとんど見られなかった。採取された供試体の例を写真-4 に示す。

2.4 試験方法

(1) 空隙率試験

硬化後の POC 供試体については、全ての供試体に対して、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)⁵⁾ に準拠して、質量法および容積法の測定を行った。ここで、上記の空隙率試験方法 (案)⁵⁾ では角柱供試体は対象としていないが、本実験では角柱供試体に対しても円柱供試体と全く同じ方法を適用している。

また、施工直後の POC 舗装から直接空隙率を測定する新しい方法として、フレッシュ状態の POC 舗装の一部を切り出し、質量法で空隙率を測定する手法を試行した。測定方法は、φ 120 × 140mm および φ 150 × 140mm の 2 種類の鋼管をフレッシュ POC 舗装に型枠振動機で振動させながら打ち込み、鋼管内部のフレッシュ POC を採取して質量を計測するとともに、鋼管内部の POC のかさ容積 (舗装厚さ × 鋼管内部断面積) を計測し、質量法で空隙率を算定した。ここで、舗装厚さは、鋼管の高さと埋め込まれた鋼管が周囲の POC から出ている高さの差として計測した。

測定対象は、POC 舗装の No.1, 2, 7 とした。測定数は、舗装の損傷などを考慮し各径の鋼管を 1 本ずつとした。

写真-5 に測定の様子を示す。

(2) 圧縮強度試験

ポーラスコンクリートの圧縮強度試験には、円柱供試体およびコア供試体の上下端面に硫黄でキャッピングしたものを使用した。試験は、JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) に準拠して行い、試験材齢は 28 日とした。コア供試体については、供試体の高さ と直径の比 (H/D) が 1.0 ~ 1.2 程度となったため、文献⁶⁾ を参考に補



(a) No.1 (コテ仕上げ) (b) No.3 (仕上げ機 1 回)

写真-4 POC 舗装から採取された供試体の例



(a) 型枠振動機による鋼管の打ち込み (b) フレッシュ POC に打ち込まれた鋼管



(c) 鋼管内部の試料の採取後 (d) 採取されたフレッシュ POC

写真-5 現場施工されたフレッシュ POC の空隙率試験の様子

正した値を用いた。ポーラスコンクリートとは別に、セメントペーストで作成した円柱供試体に対しても、材齢 28 日において圧縮強度試験を行った。供試体の端面は研磨して試験に供した。

(3) 曲げ強度試験

ポーラスコンクリートの曲げ強度の測定は、JIS A 1106 (コンクリートの曲げ強度試験方法) に準拠して、打ち込み時の供試体側面を載荷面とした 3 等分点載荷で行った。供試体の支点および載荷点の位置に止水セメントでキャッピングを施して試験を行った。試験材齢は 28 日とした。

ポーラスコンクリートとは別に、セメントペーストで作成した角柱供試体に対しても、JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) に準拠して、材齢 28 日において曲げ強さの測定を行った。

3. 実験結果とその考察

3.1 供試体のセメントペーストの垂れの状況

写真-6 に、角柱型枠供試体の底部のセメントペーストの垂れの状況を示す。W/C = 0.45 でセメントペーストの垂れが確認され、その程度は三本の供試体のうち、一本は大きく、二本は小さかった。後述する曲げ強度実験結果によれば、各供試体の曲げ強度が明確な差が見られないため、本実験では、セメントペースト垂れの影響が無視できる範囲以内にあるとして考察を進める。また、POC 舗装から採取した角柱および円柱供試体では、明確なセメントペーストの垂れは確認されなかった。これは、締固め方法の違いの影響と考えられる。型枠 POC では、所定の質量が打ち込まれるまで型枠振動機を用いて締固めを行っているため、振動が過剰となりがちであること、および鋼製型枠にも振動が伝わり上面以外からも振動が加えられることなどにより、一定の通過回数で上面のみから締固められる POC 舗装と比べて、セメントペーストの垂れが促進されたものと考えられる。



(a) W/C = 0.30 (b) W/C = 0.45

写真-6 型枠供試体の底部のセメントペーストの垂れの状況

3.2 空隙率

(1) フレッシュ POC の現場空隙率

図-2 に、フレッシュ POC に対して、鋼管を用いて行なった現場空隙率試験による全空隙率と、コア供試体を用いて質量法で測定した全空隙率の比較を示す。ここに、現場空隙率試験による全空隙率は、鋼管の直径(ϕ 120mm および ϕ 150mm)の違いによる影響がほとんど見られなかったため、直径が 120mm の場合と 150mm の場合の平均値を示す。図によれば、現場空隙率試験の結果が 5% 程度大きく測定される傾向がある、これは、鋼管を打ち込む際に振動機を使用したためにセメントペーストの垂れが発生したこと、および鋼管を打ち込む際に周囲の POC 表面が盛り上がりしてしまうため、舗装厚さを過大評価したこと、などの理由によると考えられる。このように、舗装の空隙率の実測方法には問題が残るものの、両者の間には一定の相関関係が見られるため、本方法は施工後の POC の迅速な空隙率測定方法となり得る可能性がある。

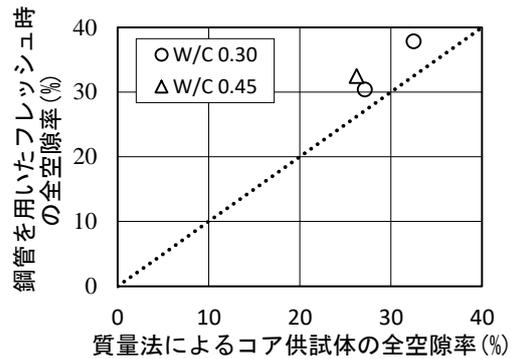


図-2 フレッシュ時の現場空隙率試験結果とコア供試体の質量法による空隙率試験結果の比較

試験後には、鋼管を抜き POC を再度穴に充填して補修したが、その際、タンパーや仕上げ機などにより、鋼管打込み部周囲の盛り上がりや補正する必要がある。

(2) 硬化 POC の空隙率

図-3 に、硬化ポーラスコンクリート試験体を用いて、質量法により測定した全空隙率の測定結果を示す。同図は、型枠試験体については 6 体、他は 3 体の平均値を示す。図によれば、型枠試験体については、打込み時に質量管理を行って作成しているため、ほぼ設計空隙率の 25% を満足している。

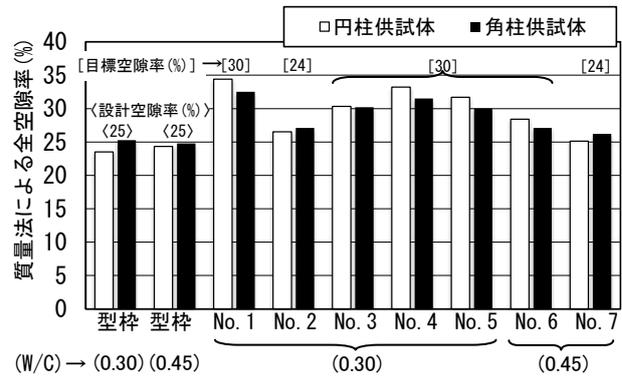
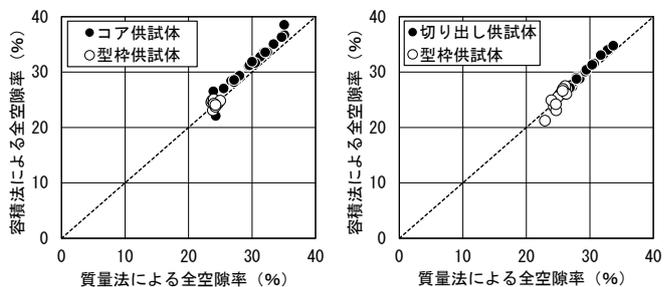


図-3 質量法による全空隙率の測定結果

舗装から採取した試験体 (No.1~7) については、表-2 に示した目標空隙率を $\pm 5\%$ の範囲内に納まっている。本調査では仕上げ機を 4 回通過させた場合 (No.2,7) に、



(a) 円柱供試体 (b) 角柱供試体

図-4 容積法と質量法による全空隙率の比較

設計空隙率とほぼ同じ空隙率 25% が得られている。また、コテ仕上げ (No.1) で空隙率が大きくなっているのは予想通りの結果である。路床を変化させた No.3~5 について

は、No.4 の路床にコンクリートを用いたものが他と比べて空隙率が大きくなる傾向が見られるが、他の結果は空隙率 30%程度でほぼ一定となった。以上の結果からは、路床の種類が締固めの程度に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、No.3~5 の場合は No.6 の場合より空隙率が大きくなった。これは、No.3~5 の場合はペーストの W/C が 0.30 で、No.6 の場合は W/C が 0.45 であり、W/C が小さい方は流動性が低く、軽盛り状態（締固め前の状態）の骨材間の距離が大きくなるため、締固め前の初期空隙率が大きくなったことによると考えられる。

図-4 に、容積法と質量法による全空隙率の測定結果の比較を示す。図によれば、容積法による空隙率が僅かに大きくなる傾向はみられるものの、ほぼ同じ空隙率が測定されている。また、ここではデータは割愛するが、容積法による全空隙率と連続空隙率の値は、ほぼ同じ結果が得られており、本実験における空隙率のレベル（設計空隙率 25%）では、独立空隙はほぼ存在しないといえる。

3.3 圧縮強度

図-5 にセメントペーストの、図-6(a)、(b) にポーラスコンクリートの型枠およびコア供試体の圧縮強度試験結果をそれぞれ示す。図-6 中には、ポーラスコンクリートの圧縮強度(y) - 空隙率(x)の近似式（累乗指数は W/C ごとに変化）も併示した。ここで、空隙率 0%における圧縮強度には、図-5 のセメントペースト供試体の圧縮強度がプロットしてある。また、近似曲線の y 切片は水中養生の各 W/C のセメントペーストの圧縮強度を用いた。これらの図によれば、W/C の影響に着目すると、W/C=0.45 と 0.30 の圧縮強度の差は、セメントペーストの場合は明確であるが、POC の場合は空隙率 25~35%の範囲では、ごくわずかであった。

図-6(a)に示す型枠供試体の結果からは、圧縮強度に及ぼす養生方法の影響について、明確な差は見られない。図-6(a)と(b)によれば、型枠供試体とコア供試体の空隙率の範囲は異なっているものの、両者のデータはほぼ同じ曲線上にあると見ることができる。

3.4 曲げ強度

図-7 に、セメントペーストの曲げ強度試験結果を示す。本実験の曲げ強度は、セメントペーストの試験結果が非常に小さい値となった。養生段階で収縮によると思われるひび割れが確認されており、これ主な原因と考えられる。

図-8(a)および(b)に、それぞれ POC の曲げ強度試験結果を示す。同図には、文献⁷⁾で報告された近似曲線も併示してある。ここで、近似曲線の y 切片の値はセメントペースト供試体の曲げ強度とすべきであるが、本実験

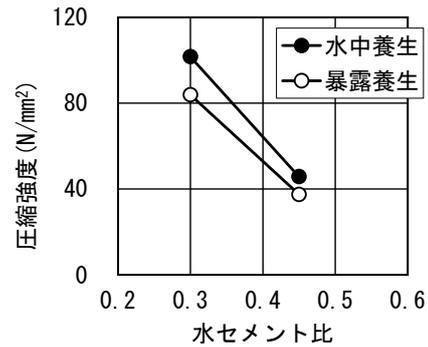
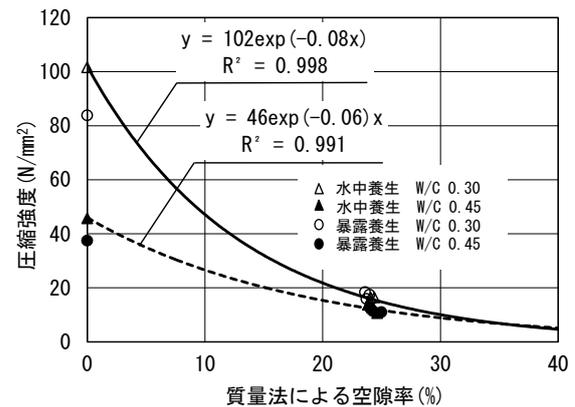
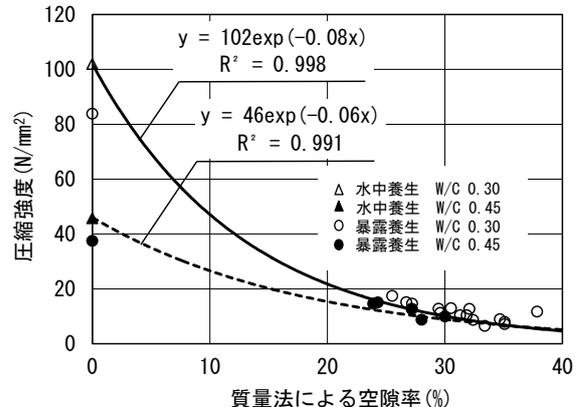


図-5 セメントペーストの W/C と圧縮強度の関係



(a) 型枠供試体



(b) コア供試体

図-6 POC の質量法による空隙率と圧縮強度の関係

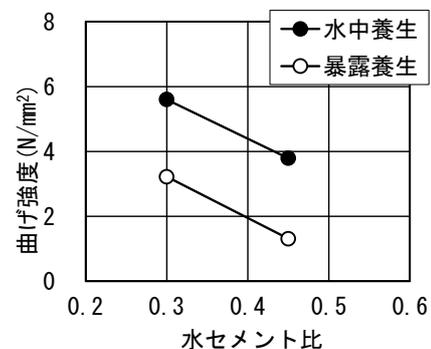


図-7 セメントペーストの W/C と曲げ強度の関係

では過去の実績と比べて非常に小さい値となっており、

また、POCの曲げ強度と比べても低い値となっていることから、より信頼性の高いと考えられる同一調合のセメントペーストから得られた文献⁸⁾の値を用いた。これらの図によれば、POCの曲げ強度は、型枠供試体および切出し供試体共に、ほぼ同じ曲線により近似できることが確認された。また、先に示した圧縮強度の結果と同様に、養生方法、および型枠とコアの違いによって曲げ強度—空隙率関係に明確な違いは見られない。

3.5 空隙率と圧縮/曲げ強度の関係

以上より、同一調合、同一養生条件であれば、現場POC舗装から採取したコア供試体の圧縮強度および曲げ強度—空隙率関係は、型枠供試体の関係とほぼ同一と見なすことが可能である。すなわち、現場のPOC舗装の空隙率を測定することで、現場POC舗装の強度（圧縮、曲げ）をおおむね推定できるといえる。

4. まとめ

本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

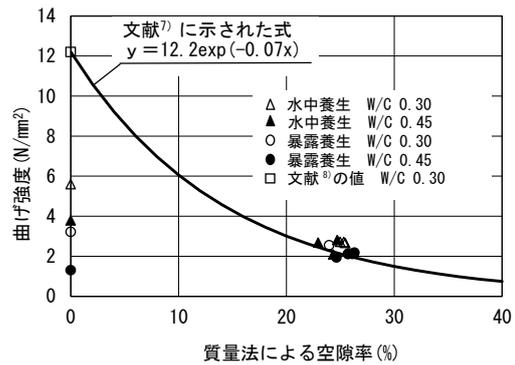
- 1) 調合設計上の空隙率に各締固め方法の影響を考慮して、現場のPOC舗装の空隙率を推定することで、現場POC舗装の強度（圧縮、曲げ）をおおむね推定できる。
- 2) 同一調合、同一養生条件であれば、現場POC舗装から採取したコア供試体の圧縮強度—空隙率関係および曲げ強度—空隙率関係は、型枠供試体の強度—空隙率関係からとほぼ同一と見なせると考えられる。
- 3) 現場施工されたPOCスラブ（厚さ100mm）の締固め程度に路床の種類が及ぼす影響は小さく、仕上げ機の通過回数など、締固め方法を固定し、締固め程度を管理することが重要である。

謝辞

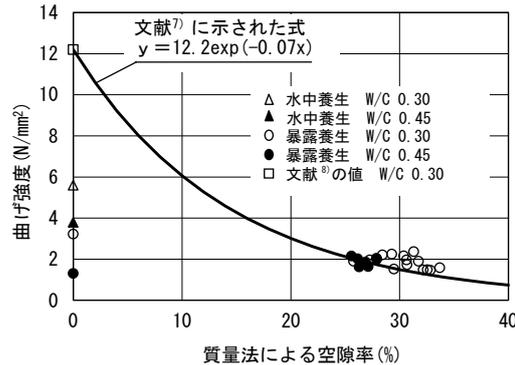
本研究を遂行するにあたり、中川武志氏（株式会社ファイナルマーケット）、内田寿久氏（株式会社安芸砂利）、中島圭二氏（三重総合試験センター株式会社）、前川明弘氏（三重県工業研究所）、松村豪氏（株式会社川島工業）、夏目実穂氏、関本亮太君（いずれも三重大学修了生）の助力を得た。本実験は、コンクリート工学会「性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会」（委員長：畑中重光）の共通実験の一環として行われた。付記して謝意を表す。

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，pp.1-157，2015.7
- 2) 畑中重光，三島直生，森鼻泰大，中川武志：ポーラ



(a) 型枠供試体



(b) コア供試体

図-8 POCの質量法による空隙率と曲げ強度の関係

スコンクリートの施工標準(案)の作成に向けて、コンクリート工学，Vol.49，No.4，pp.30-37，2011.4

- 3) 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
- 4) 森鼻泰大，中川武志，三島直生，畑中重光：ポーラスコンクリートの実施工における敷均しおよび仕上げ方法が空隙率に与える影響，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.1097-1098，2010.9
- 5) ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.179-180，2003.5
- 6) 中川武志，畑中重光，三島直生：供試体の高さ／直径比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，No.75（650），pp.695-699，2010.4
- 7) 平岩陸，畑中重光，岡本享久，梶尾聡，国枝稔，三島直生：ポーラスコンクリートの強度—空隙率関係に関する共通実験報告，コンクリート工学，Vol.54，No.4，pp.375-380，2016.4
- 8) エルドンオチル，三島直生，畑中重光：ポーラスコンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1345-1350，2015