

論文 ポーラスコンクリートの振動締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

藤木 諒将*1・三島 直生*2・畑中 重光*3・中川 武志*4

要旨：本報では、ポーラスコンクリートの現場での施工を想定した振動締固めによって締固めた区画と、隣接する区画および水平方向の空隙率の分布に及ぼす影響に関し、型枠試験体を用いて検討を行った。その結果、締固めの程度が進行した状態においては振動締固めによる隣接区画の隆起量は調査によらずほぼ一定であること、隣接区画の隆起量は振動締固めを実施した区画との境界から 20~60mm 程度離れた点で最大となること、振動締固めを実施した区画との境界および型枠の付近では空隙率が增大する傾向を示すこと等が明らかとなった。

キーワード：ポーラスコンクリート、舗装、空隙率、振動締固め、締固め度

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。

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つけられ、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-1 に示す破線内部（型枠端部付近）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。

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。なお、振動締固め

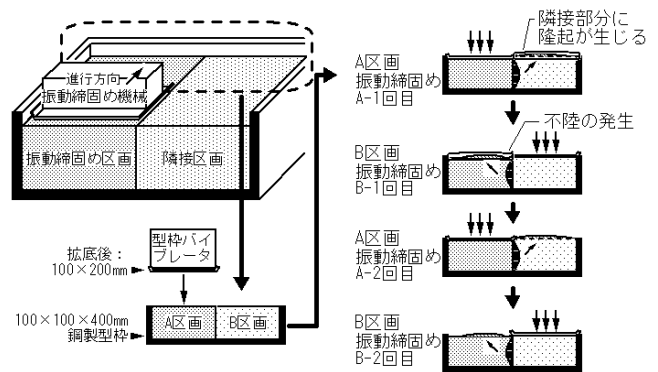


図-1 再現する領域および不陸発生概念図

表-1 要因と水準

要因	水準
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

[注]振動締固め回数 例) A-1: 振動締固め区画-締固め回数

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査で一定とするため、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。

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%）、セメントペーストのフロー値の調節のため、セルロース系増粘剤を使用した。表-2にPOCの調査を示す。

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、水および混和剤をミキサーに投入し、50rpmにて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

*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 工博（正会員）

*4 (株)ファイナルマーケット 代表取締役 博士（工学）（正会員）

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秒間練り混ぜを行った。

練り上がったフレッシュPOCは各調合につき1本、角柱鋼製型枠(100×100×400mm)に打ち込んだ。目標空隙率に近い試験体の製造のため、調合表より試験体の容積(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、振動締固め実施後の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、柔軟で骨材の移動を妨げない0.01mmのビニルシートにより、各領域を区分して所定量のフレッシュPOCを打ち込んだ。コテによる敷均しは試験体高さが100mm程度となるように調整し、その後、鋼製の仕切り板のみを取り除き、レーザー変位計による表面形状の測定を実施した。

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、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、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(ここで、左右の向きは後掲の**図-4**の試験結果と対応している)。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。

フレッシュPOCは、時間経過によるワーカビリティーの変化が大きく、練り混ぜから打ち終わるまでの時間は気温25度以下で90分以内が望ましいとされる。このため、本実験においてはフレッシュPOCの振動締固めを4回完了するまでの時間は、フレッシュ性状への影響が少ないと予想される、練上がりから45分以内とした。この間に大きな流動性の変化は確認されなかった。

脱型後、**写真-1**に示すように、試験体を設置したビニルシートに沿って、AおよびB区画に分割し、水平変位を測定した。

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。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。

表-2 POCの調合表

W/C	締固め度 (%)	VR(%)	単体量(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：セルローズ系増粘剤

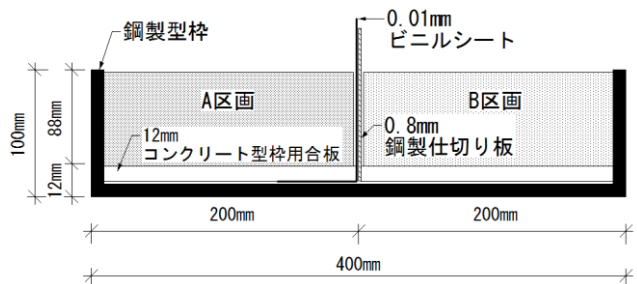


図-2 使用した型枠と仕切りの状況



写真-1 脱型後の試験体の形状の例

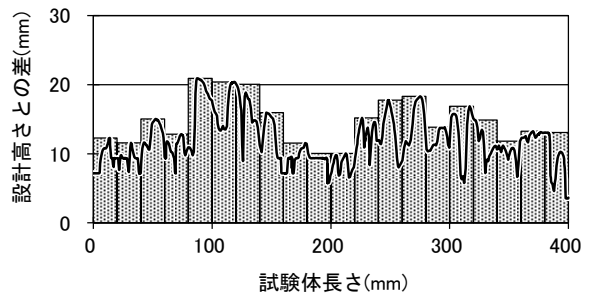


図-3 区間内代表値の導出の例 (VR = 35%)

このため、**図-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³⁾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プロファイ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。

(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

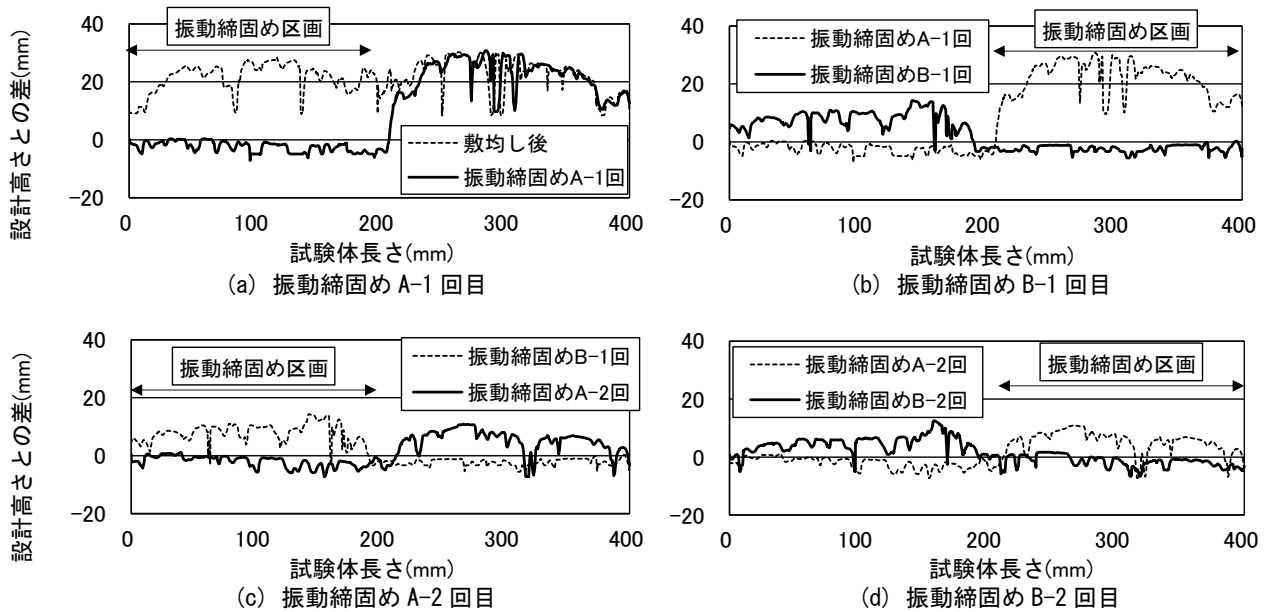


図-4 レーザー変位計による表面形状の測定結果の例 (VR = 15%)

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(1)に示す締め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。

$$D_{poc} = (100 - A_f) / (100 - A_p) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 D_{poc} : 締め固め度(%), A_f : 施工時の空隙率(%),
 A_p : 調査上の目標空隙率(%)

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。

3. 実験結果と考察

3.1 レーザー変位計による表面形状の測定結果

(1) 測定結果

図-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回目の締め固め後を比較して示すが、締め固めた領域(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回目の締め固め後とB-1回目の締め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回目の締め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。これらの各締め固め段階における状況はすべての調査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、振動締め固めによる不陸の発

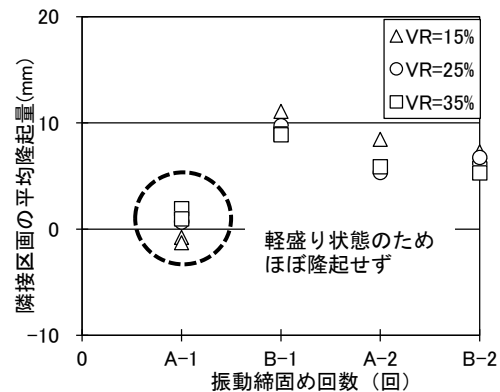


図-5 振動締め固め回数と隣接区画の平均隆起量の関係

生が確認された。

(2) 振動締め固めによる隣接区画の隆起量

図-5に、振動締め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め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、振動締め固め回数による振動締め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回目の締め固めの時を除き、振動締め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、振動締め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、他方の締め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。

(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

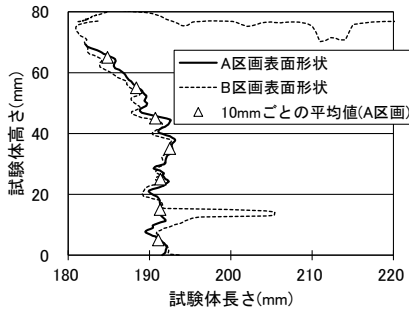


図-6 水平変位量の導出の例
(VR = 15%)

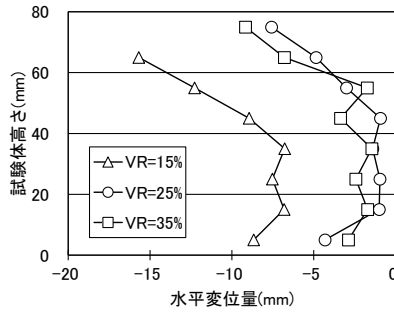


図-7 A区画の水平方向の変位量

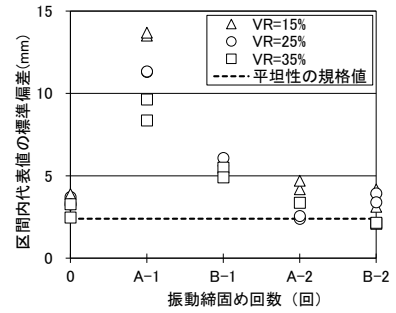
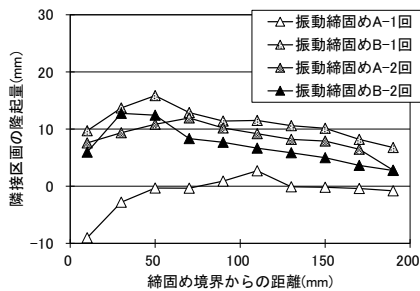
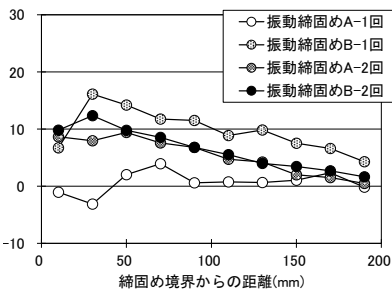


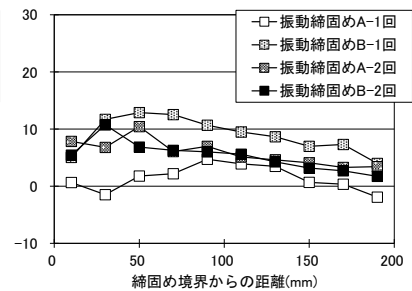
図-8 振動締め回数と区間内代表値の標準偏差の関係



(a) VR = 15%



(b) VR = 25%



(c) VR = 35%

図-9 締め境界からある距離における隣接区画の隆起量の分布

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-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たことが確認できる。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、試験体表面のビニルシートが隣接区画の方向に移動していることが確認されるなど、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、振動締め区画の骨材の移動可能な領域が、加圧面および型枠面の壁効果により制限されているためであると考えられる。

(4) 平坦性の評価

図-8に、振動締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 $\sigma = 2.4(\text{mm})^2$ 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、締め回数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-9(a)~(c)に振動締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。

3.2 空隙率試験結果

(1) 質量法による全空隙率

図-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、データの不備のため棄却している。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、いずれの調査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、型枠側面および底面の壁効果によるものと、これに加えて振動締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

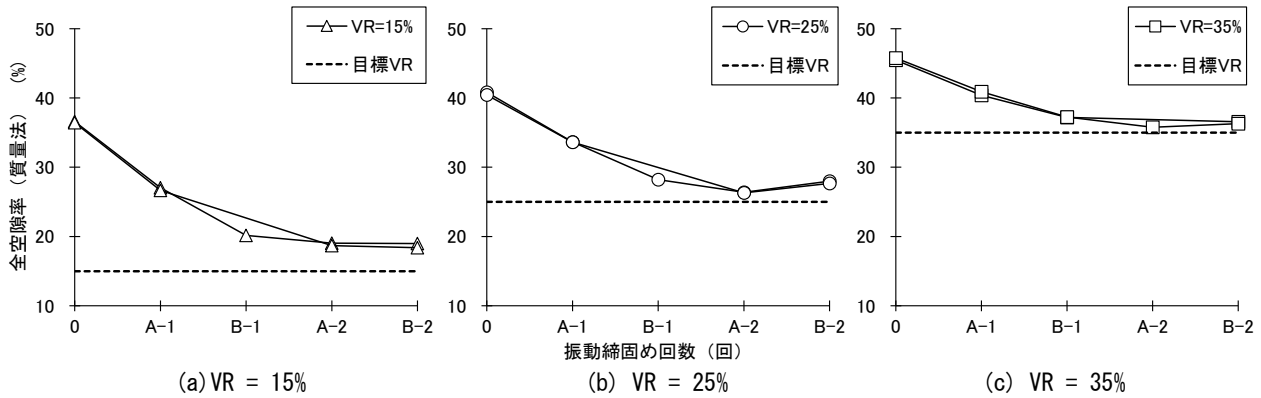


図-10 質量法による全空隙率と締固め回数との関係

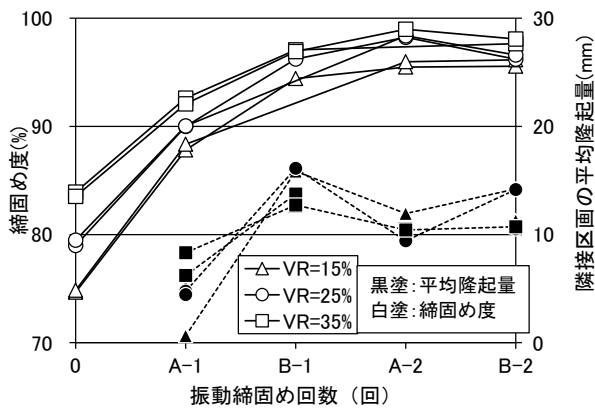


図-11 締固め度および隣接区画の最大隆起量と振動締固め回数との関係

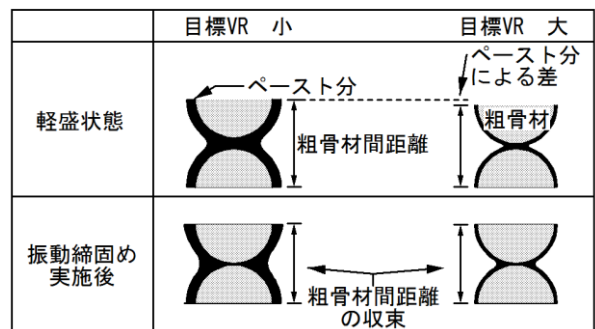


図-12 目標空隙率による粗骨材間距離の変化

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。

(2) 締固め度

図-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-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-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（調査設計の基本状態）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出されるために、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。

(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

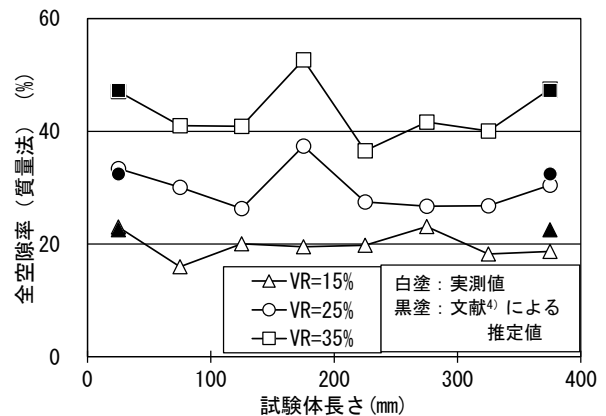


図-13 質量法による全空隙率の水平方向の分布

毎に切断した各試験片の全空隙率を図-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⁴⁾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

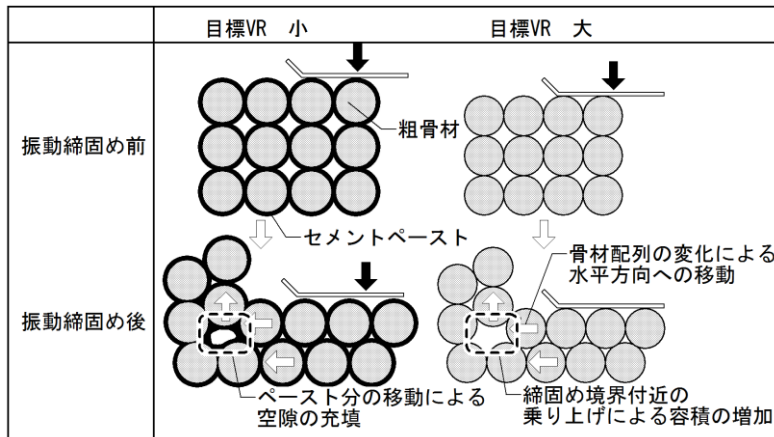


図-14 振動締固めに伴う隣接区画の空隙率変化の概念図

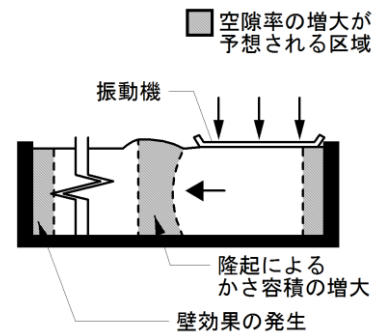


図-15 空隙率の増大が予想される区画の概念図

率が增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增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-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。しかしながら、同図の現象に起因する空隙径の変動の定量的評価は現時点では困難であり、今後の検討を要する。

このことから、VR = 25%以上の空隙率の高い POC においては、図-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。

4. まとめ

本報では、ポーラスコンクリートの振動締固めが、締固め隣接区画へ及ぼす影響を知ることが目的として、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。今後、実大の現場実験を行い、同様の検討を行うことで、現場打ち POC の品質保証の向上につなげたい。

謝辞

本実験を実施するにあたり、CHEA CHHAY 君（三重大学大学生）の助力を得た。本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) 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
- 3) 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
- 4) 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