

上面振動締固め試験によるポーラスコンクリート試験舗装の施工性評価に関する検討

EVALUATION OF WORKABILITY OF POROUS CONCRETE FOR TEST PABEMENT BY COMPACTION TEST WITH VIBRATION FROM ABOVE SURFACE OF SAMPLE

麓 隆行*

by Takayuki FUMOTO

1. はじめに

コンクリート舗装の一つであるポーラスコンクリート舗装は、騒音低減、透水による走行安全性や雨水の河川への流出抑制などの機能をもつ¹⁾。近年では、その長期耐久性も確認され²⁾、今後の適用拡大が期待されている。

ポーラスコンクリートのモルタル部分は、ダレずに粗骨材と付着するため、適切な流動性と材料分離抵抗性を有する必要がある。そのため、一般にポリマーなど高価な混和剤を使用している。これに対し、著者は、資源の有効利用や安価な施工を考慮し、増粘材として碎石・砕砂製造時に発生する碎石粉³⁾の利用を検討している。ただし、碎石粉を混合すると、モルタル部分の粘性が大きくなり、膜厚が増える傾向がある^{4)、5)}。

ポーラスコンクリート舗装の締固めには、適切な空隙率を確保するため、一般にアスファルトフィニッシャが用いられることが多い⁶⁾。そのポーラスコンクリートの締固め状態の評価として、VC振動締固め試験で5秒振動後の締固め度⁶⁾や振動数を40Hz⁷⁾とした締固め度が検討されている。しかし、前述の理由から、碎石粉を使用したポーラスコンクリートのVC振動締固め試験では、ペーストが分離していても、5秒程度の振動初期に締固め度が大きく変化し、適切に締固め状態を評価することが難しい。そこで、著者は、その締固め状態との類似性から、上面振動締固め試験を提案した⁴⁾。しかし、実施工での適用事例がなく、その適用の可能性が明確になっていない。

そこで、本研究では、アスファルトフィニッシャを使用したポーラスコンクリートの試験施工を行い、上面振動締固め試験の適用性について検討した。

2. 上面振動締固め試験の概要

上面振動締固め試験の様子と概念図を写真1、および図1に示す。直径240mm、高さ200mmの鋼製容

器の中に、7.25kgの試料を突き棒で2層、各25回で突き固めた。その後、振動機を固定した鋼板(合計20kg)を試料上面に設置した。本研究では、施工現場で使用するため、100Vで稼働する振動機を用いた。その結果、従来の筆者の研究^{4)、5)}と異なり、振動機の性能は最大振動力0.5kN、出力30W、100V/60Hzでの振動数3600rpm、振幅1mmであった。振動機を稼働し、振動時間が0、5、10、20および40秒に達するごとに試料の沈下量を4カ所計測した。その平均値を用いて、締固め密度を以下の式(1)から算定した。

$$\gamma_u = \frac{M}{12^2 \pi h} \quad (1)$$

ここで、 γ_u は締固め密度(g/cm^3)、 M は試料質量(g)、 h は振動後の試料平均高さ(cm)である。

また、式(2)により配合から求まる空隙率を0%とした試料密度と γ_u の比から、空隙率を求めることができる。



写真1 上面振動締固め試験の様子

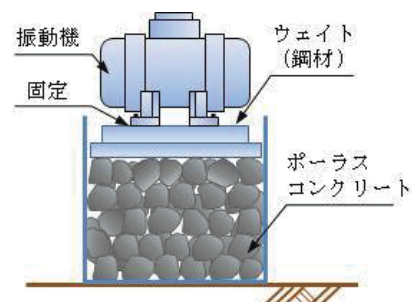


図1 上面振動締固め試験の概念図

* 近畿大学准教授 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1)

$$Q_u = 100 - \left(\frac{\gamma_u \times 1000}{W + C + S + G + F} \right) \times 100 \quad (2)$$

ここで、 Q_u は空隙率(%）、 W は単位水量(kg/m^3)、 C は単位セメント量(kg/m^3)、 S は単位細骨材量(kg/m^3)、 G は単位粗骨材量(kg/m^3)、 F は単位砕石粉量(kg/m^3)である。

3. 試験施工の概要

3. 1 使用材料と配合

表1に示す、早強ポルトランドセメント、高槻産砕石、砕石粉および高性能AE減水剤を用いた。砕石粉には、表2のように、既往の研究⁵⁾での結果から、表面粗さが同程度で、粒径が異なる2種類を用いた。なお、いずれも砕石、砕石製造時に乾式で回収した砕石粉である。

表1 使用材料

種類	記号	備考
水	W	水道水
セメント	C	早強ポルトランドセメント 密度 $3.14\text{g}/\text{cm}^3$
粗骨材	G	硬質砂岩 1505 砕石、表乾密度 $2.68\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 = 0.24 %、実積率 = 59.1 %
砕石粉	CSP	A 石英斑岩、密度 = $2.74\text{g}/\text{cm}^3$ 、 平均粒径 = $18.3\ \mu\text{m}$
		B 流紋岩、密度 = $2.69\text{g}/\text{cm}^3$ 、 平均粒径 = $55.3\ \mu\text{m}$
混和剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物

表2 砕石粉の品質

種類	A	B
岩種	石英斑岩	流紋岩
密度 (g/cm^3)	2.74	2.69
充填率 (%)	42.9	63.1
BET比表面積 A_b (m^2/g)	4.18	2.76
90%D (μm)	48.59	113.44
50%D (μm)	18.31	55.31
10%D (μm)	1.23	4.9
球形比表面積 A_s (m^2/g)	0.48	0.23
表面積比 A_b / A_s	8.71	12.16

表3 試験施工で用いた配合

配合 記号	砕石粉 の種類	W/C (%)	目標空隙 率 (%)	p/g* 1 (%)	Km* 2	単位量(kg/m^3)				
						水 W	セメント C	砕石粉 CSP	粗骨材 G	混和剤 SP
A	A	25.5	18	54	1.33	111	452	79	1426	4.5
B	B	25.5	18	54	1.32	111	453	78	1424	4.5

*1 : p/g は、粗骨材とペーストの体積比、*2 : Km は、ペースト粗骨材空隙比

ここで、各物性は以下の方法で計測した。JIS A 1202「土粒子の密度試験」に準じて密度を求めた。また、自動比表面積測定装置 GEMINI2360 (島津製作所製) を使用して、窒素吸着による BET 多点法により BET 比表面積を求めた。そして、レーザー回折式粒度分布計 SALD200V (島津製作所製) で粒度を測定した。その粒度から、粒子を球形と仮定して、球形比表面積を求めた。さらに BET 比表面積を球形比表面積で除した値を表面の粗さを表す指標、すなわち、表面積比として算定した。

表3に使用した配合を示す。この配合は、実験室内での同材料を使用した試験練り結果と、生コンプラントの状況を考慮し、決定した。

3. 2 練混ぜと試験施工の手順

生コンプラント (大阪府枚方市) にて練混ぜを行った。容量 1.5m^3 の強制2軸練りミキサを使用した。練混ぜ容量を 1m^3 とし、セメント、骨材、砕石粉を30秒練り混ぜた後、水と高性能AE減水剤を加えて90秒練り混ぜる手順でポーラスコンクリートを作製した。

3 バッチ連続で練り混ぜ、計 3m^3 となったポーラスコンクリートをダンプトラックに載せた。その後、試料表面を保護シートで覆い、現場へと輸送した。輸送開始から現場到着までの時間は、配合Aの場合で47分、配合Bの場合で42分であった。写真2に、生コンプラントでの練混ぜ直後の様子を示す。

大阪府枚方市の施設敷地内で2009年12月18日に試験施工を行った。各配合で、舗装厚 $0.15\text{m} \times$ 幅 $3.25\text{m} \times$ 延長 5m の舗装を計画した。現場でダンプトラックから荷卸しされたポーラスコンクリートを、アスファルトフィニッシャーで一度に敷き均した。施工で使用したアスファルトフィニッシャーのタンパの回転数は 1200rpm 、バイブレーターの振動数は 1750rpm であり、施工速度は $1.8\text{m}/\text{min}$ であった。当日の天候は快晴、最高気温 6.8°C 、最低気温 0.6°C 、平均 3.4°C 、風速 $2.9\text{m}/\text{s}$ であった。施工状況を写真3に示す。

施工当日に養生マット敷設後、湿潤状態を保つためにポリシートにてラッピングし、押さえとして防



写真2 生コンプラントでの練混ぜ直後の様子



写真3 アスファルトフィニッシャによる締固めの様子

点線=目地, 実線=舗装の境目, 丸=コア採取位置

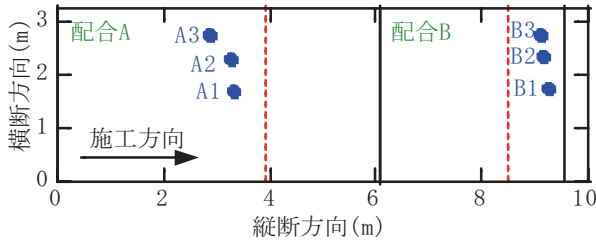


図2 コア採取の位置

炎シートを設置した。その後、施工翌日と施工3日後の合計2回散水し、ポリシートと防災シートによる湿潤養生を1週間実施した。なお、施工翌日に、下地の既設コンクリート舗装の目地も考慮し、原則4mの間隔で横断目地を設置した。目地を1枚刃（厚さ3~4mm）でのカッティング（深さ5cm）とし、目地材の充填は行わなかった。

3.3 計測概要

上面振動締固め試験機が1台であったため、施工前日に生コンプラントで試し練りを行い、その際に生コンプラント横の試験室で上面振動締固め試験を行った。この結果を生コンプラントでの性状とみなした。施工当日には、現場に到着したダンプトラックから試料を採取し、現場近くの試験室にて上面振動締固め試験を行った。

また、施工1週間後に、施工開始位置から2mほど離れた横断方向の中央から端にかけて、3カ所で直径100mmのコア採取を行った。コア採取の位置を図

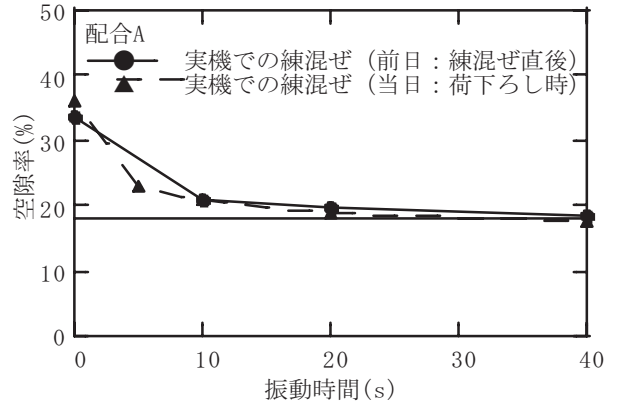


図3 配合Aでの上面振動締固め試験結果

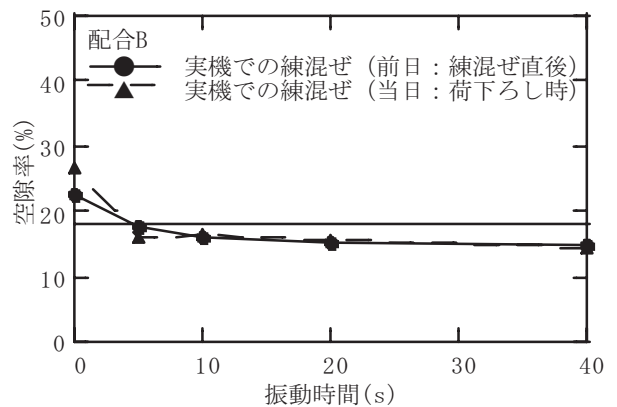


図4 配合Bでの上面振動締固め試験結果

2に示す。

施工表面からの空隙率の変化を調べるため、採取したコア試験体のX線CT画像解析を行った。X線CT装置^{8), 9)}にて、X線管の電圧190kV、電流95 μ AでX線を照射し、1200プロジェクション、0.1226mm/voxelの解像度で、6本のコア試験体を撮影した。そのX線CT画像を市販の産業用画像解析ソフトにより、コア試験体上面から5cmごとの空隙率を求めた。その後、採取したコア試験体が円柱となるように下端を切断し、舗装調査・試験法便覧B073Tに準じて、容積法にて全空隙率を算定した。

4. 結果と考察

4.1 フレッシュ状態での締固め特性

施工前日と施工当日の生コンプラントで練り混ぜた場合の上面振動締固め試験の結果を図3および図4に示す。これらの図を比較すると、施工前日、施工当日ともに、生コンプラントで練り混ぜた場合、振動時間と空隙率との関係がほぼ一致した。配合Aの場合、40秒間の振動後の空隙率は18%程度となった。一方、配合Bの場合、5秒間程度の振動後、初期の空隙率が18%程度となり、40秒間の振動を与えた結果では、空隙率が14%となった。

以上から、生コンプラント練りでの練混ぜ性状は安定しており、経時変化も小さかったと考えられる。ただし、既往の計測で早強ポルトランドセメントの粒径は $13\mu\text{m}$ 程度であったことから⁵⁾、それより粒径の大きい砕石粉 B を用いた場合、粗骨材の微粒分量や含水状態の影響を受けて、目標とした状態よりもペーストの粘性が低下したと推察される。

4. 2 採取したコア試験体の空隙特性

コア試験体の採取位置と空隙率との関係を図5および図6に示す。白丸のポイントはコア密度から算出した全空隙率を、また黒色から灰色のポイントはX線CT画像解析から求めた5cmごとの空隙率を示している。また、各コアのX線CT撮影後の断面画像を写真4および写真5に示す。

図5から、配合Aの場合、コア密度から算出した全空隙率は、23~25.9%で端部になるほど少し大きくなった。スクリーンでの端部へのポーラスコンクリートの移動や、端部での締固め不足が原因と考えられる。X線CT画像解析から求めた空隙率は20.3~22.3%と3%ほど小さかった。コア試験体の側面の凹凸や画像解析での計測範囲による誤差と考えられる。深さ方向では、深さ0~10cmでは、横方向の位置

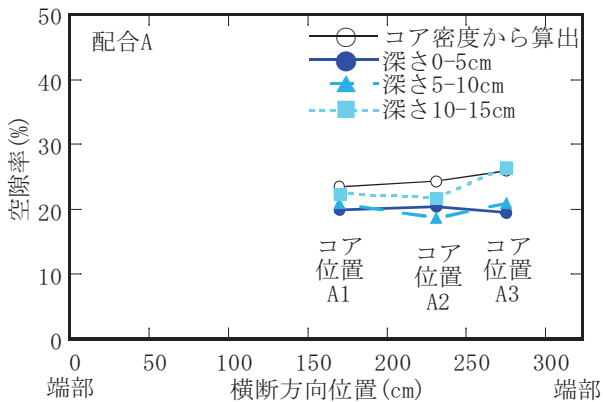


図5 配合Aでのコア採取位置と空隙率の関係

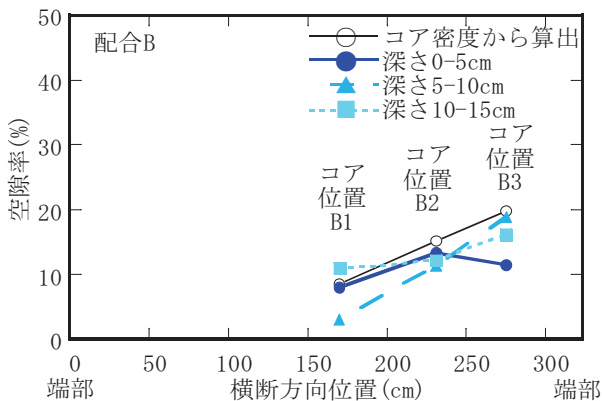


図6 配合Bでのコア採取位置と空隙率の関係

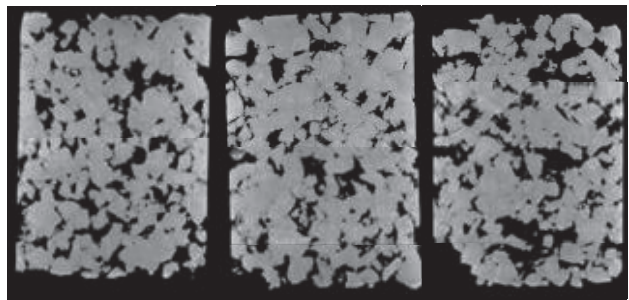
に関係なく、空隙率は同等であった。しかし、深さ10cm以下となると、深さ0~10cmに比べて、空隙率が2%以上増加した。特に、端部にあるコア位置3では、より顕著であった。これは、端部での締固め不足が原因だと考えられる。ただし、写真4では、コア試験体下部での空隙率の増加は判別できなかった。

一方、配合Bの場合、図6のように、全空隙率は、中央から端部方向に空隙率が大きくなった。X線CT画像解析から求めた空隙率は同傾向だったが、配合Aと同様に、1~4%ほど小さくなった。これは、施工時に分離気味であったため、ポーラスコンクリートがスクリーンで端部に均等に移動せず、中央部にペーストがとどまったことが原因だと考えられる。

深さ方向では、コア供試体B1およびB2では、ダレたペーストが、5~10cmの位置でとどまり、空隙率が最も小さくなった。コア供試体B3では、コア供試体B1やB2に比べて、0~5cmの位置の空隙率が5cm以上の深さよりも小さくなった。ダレるペースト量が少なく、端部の締固めも不足することから、少し高い位置でペーストがとどまったためと考えられる。なお、この目詰まりの状態は写真5でも確認できる。ただし、下部では空隙が多い。

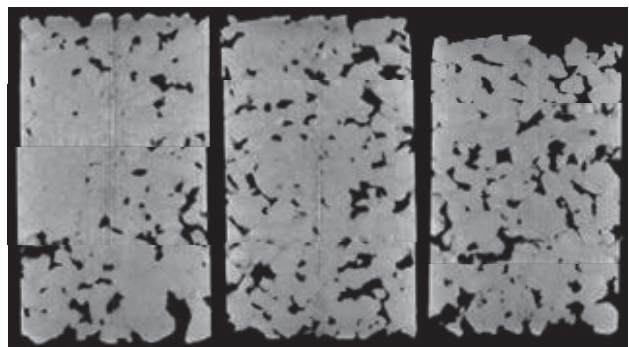
4. 3 コア試験体の空隙特性と上面振動締固め試験結果との比較

図7~図9に配合Aにおける施工現場での振動締



コア試験体A1 コア試験体A2 コア試験体A3

写真4 配合Aでのコア試験体断面X線CT画像



コア試験体B1 コア試験体B2 コア試験体B3

写真5 配合Bでのコア試験体断面X線CT画像

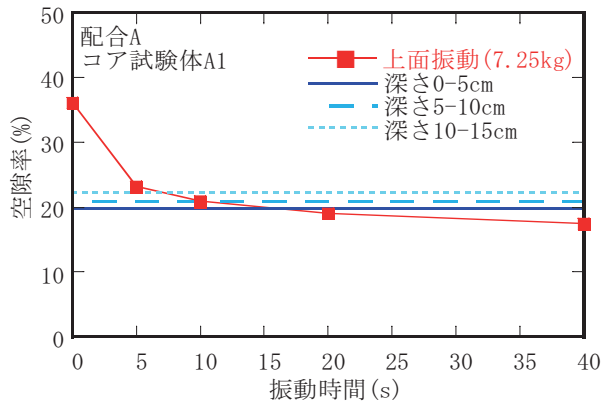


図7 配合Aでの振動締固め試験結果とコア試験体A1の内部空隙との関係

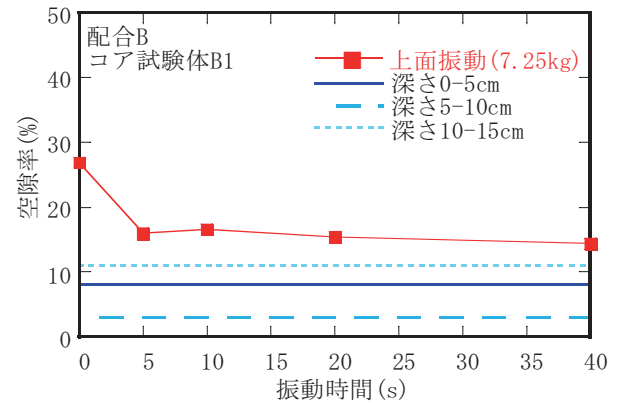


図10 配合Bでの振動締固め試験結果とコア試験体B1の内部空隙との関係

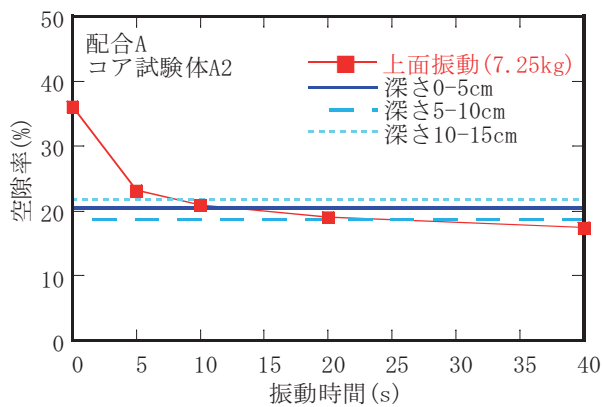


図8 配合Aでの振動締固め試験結果とコア試験体A2の内部空隙との関係

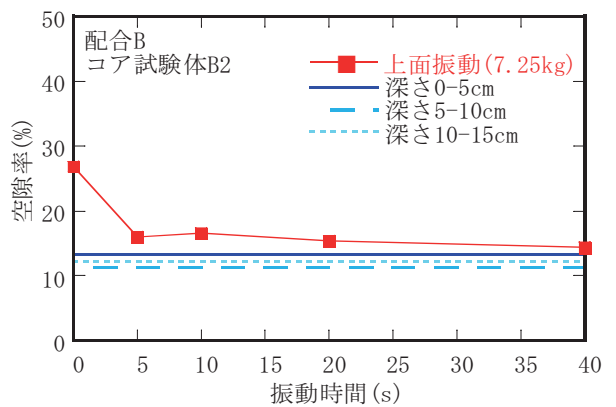


図11 配合Bでの振動締固め試験結果とコア試験体の内部空隙との関係

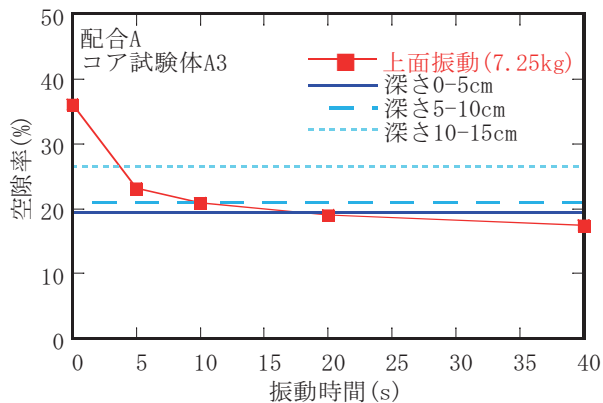


図9 配合Aでの振動締固め試験結果とコア試験体A3の内部空隙との関係

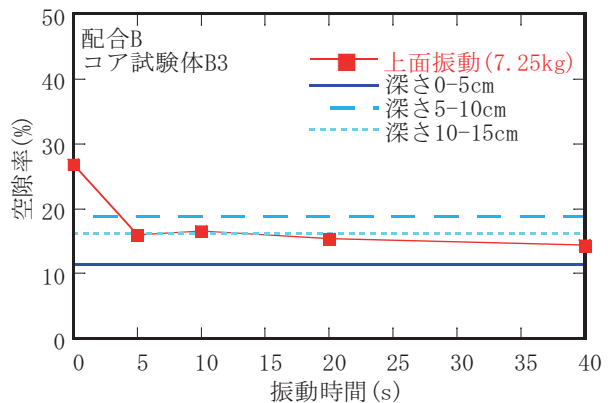


図12 配合Bでの振動締固め試験結果とコア試験体B3の内部空隙との関係

固め試験結果と、コア試験体の深さ5cmごとの空隙率との関係を示す。コア試験体で深さ0~10cmでの空隙率は、上面振動締固め試験の10~20秒での空隙率と同じとなることがわかる。したがって、現状の施工速度1.8m/minでの評価時間が10~20秒と明確となった。一方、施工速度を0.9m/min程度とすれば、上面振動締固め試験での40秒での結果と同程度の

空隙率にできると推察される。また、深さ10cm以上の層では上面振動締固め試験の4~8秒での空隙率と同じとなった。この深さでは、アスファルトフィニッシャーでは締固めエネルギーが不十分で、深さ10cmまでに比べて、空隙率が2~6%大きくなることが推察される。

一方、図10~図12に配合Bにおける施工現場

での上面振動締固め試験結果と、コア試験体の深さ5cm ごとの空隙率との関係を示す。中央部では、上面振動締固め試験とは大きく異なる結果となった。これは、スクリード部によって、横断方向へ均一に輸送できず、端部に比べて中央のペーストが多い状態となったためと考えられる。すなわち、粗骨材の微粒分量や含水状態の影響を受けてペーストの粘性が下がり、運搬やアスファルトフィニッシャに移した際の振動で、ペーストがダレて偏ったのではないかと推察される。このような締固め状態を考慮すると、配合 B では、碎石粉 B の添加量を増やし、ペーストの粘性を改善することが必要だと考えられる。

以上から、上面振動締固め試験による締固め時間と施工速度との関係がある程度明確となるとともに、その施工性評価への有効性が確認された。また、ポーラスコンクリート舗装の施工性には、粗骨材の品質管理が重要性であることが示唆された。

5. 結論

2 種類の碎石粉を用いたポーラスコンクリートの試験施工に関する結果から得られた結論を以下に述べる。

- 1) セメントと同程度の粒径の碎石粉を用いた場合、粘性が高く、本研究の配合、締固め条件では、均一な締固め状態となることが確認できた。
- 2) セメントより大きな粒径の碎石粉を用いた場合、粗骨材の微粒分や含水状態の影響を受けやすく、本研究の締固め条件では、ダレが生じた。
- 3) 施工速度 1.8 m/min での深さ 10cm までの範囲における締固め状態の評価は、上面振動締固め試験での 10~20 秒で可能である。施工速度を 0.9m/min 程度とすれば、上面振動締固め試験での 40 秒での結果と同程度の空隙率にできると推察される。
- 4) 施工速度 1.8 m/min では、深さ 10cm 以上に対するアスファルトフィニッシャでの締固めエネルギーが不十分で、深さ 10cm までに比べて、空隙率が 2~6%大きくなる。

以上から、上面振動締固め試験のポーラスコンクリート舗装の施工性評価に適用できることが示された。

謝辞

試験施工は、新都市社会技術融合創造研究会の舗装用骨材資源の有効利用に関する研究プロジェクト（リーダー 大阪市立大学名誉教授 山田優）で実施した。ご尽力いただいた関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：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に関するシンポジウム 委員会中間報告書 (2013)
- 2) 梶尾聡, 村田芳樹, 國府勝郎：供用 5 年を経た車道用ポーラスコンクリート舗装の性能, 舗装, Vol. 41, No. 5, pp. 10-14 (2006)
- 3) 辻幸和, 真野孝次, 友澤史紀, 山本和成：コンクリート用碎石粉の品質の実態に関する調査研究, コンクリート工学, Vol. 48, No. 3 (2010)
- 4) 麓隆行, 柏木洗一：粗骨材粒子径が碎石粉を用いた舗装用透水性コンクリートの性状に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No. 62, pp. 269-276 (2008)
- 5) 麓隆行, 柏木洗一：碎石粉の物理的性質が舗装用ポーラスコンクリートの性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 1391-1396 (2010)
- 6) 加形護, 児玉孝善, 鶴田健, 君島健之：環境に優しいポーラスコンクリート舗装 = ハイペック舗装 =, コンクリートテクノ, Vol. 20, No. 8, pp. 49-56 (2001)
- 7) 鈴木徹, 八尋正典, 小関裕二, 加賀屋誠：車道用ポーラスコンクリートのコンシステンシー試験および基礎物性に関する考察, セメント・コンクリート論文集, No. 55, pp. 345-351 (2001)
- 8) 麓隆行：新しい機構の X 線 CT の開発とポリマーコンクリートの圧縮試験への適用, 土木学会論文集 E2, Vol. 69, No. 2, pp. 182-191 (2013)
- 9) 麓隆行, 平井慎一, 溝口達也, 松本嶺：X 線 CT 画像の 3 次元粒子計測による碎石の粒子形状の分析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 70-75 (2012)

(2015年2月2日受付 2015年3月6日受理)