

論文 ジオポリマーを結合材として使用したポーラスコンクリートの基礎物性に関する研究

前川 明弘*1・三島 直生*2・畑中 重光*3

要旨: 近年, CO₂ガスの排出量を削減するために, セメントの使用量を減らすための検討が積極的に実施されている。本研究では, セメント代替材料としての利用が期待できるジオポリマーに着目し, それらをポーラスコンクリートの結合材として使用した場合における硬化体の基礎物性について検討した。その結果, ジオポリマーを結合材として使用したポーラスコンクリートでは, ポルトランドセメントを使用した一般的なポーラスコンクリートと, ほぼ同程度の圧縮強度レベル, 圧縮強度-空隙率関係, 透水係数, 乾燥収縮特性が得られることがわかった。

キーワード: ポーラスコンクリート, ジオポリマー, 高炉スラグ, 圧縮強度, 透水係数, 乾燥収縮

1. はじめに

セメントは安価で有用な建設材料であるが, 近年, その製造過程で地球温暖化の一因とされるCO₂ガスの大量排出が問題視されている。著者らは, CO₂ガスの排出量を低減するために, セメント代替材料としての利用が期待できるジオポリマーに着目し, それらをポーラスコンクリートの結合材として使用するための基礎的な課題について検討を進めている¹⁻³⁾。

ジオポリマーとは, アルミニウムシリケート粉末(活性フィラー)とアルカリシリカ溶液との反応によって得られる非晶質の重縮合体で, フランス人の Joseph Davidovits によって発表された固化技術である⁴⁾。ジオポリマーに関する研究は, これまでに多く行われているが⁵⁻⁸⁾, ポーラスコンクリートの結合材として使用する検討は少なく⁹⁾, 適用にあたっては十分に高い強度を確保しておく必要がある。

本研究では, 予備実験において, 高炉スラグと水ガラスを反応させたジオポリマー結合材が, 高温養生などの処理を行うことなく100N/mm²以上の強度を発現したことから, これらを使用したポーラスコンクリートを製造し, 基礎物性について評価した。

また, 使用材料である高炉スラグはカルシウム成分を多く含有していることから, 結合材の強度発現はカルシウム・シリケート・ハイドレート(C-S-H)ゲルの生成に起因している可能性が高く, アルカリ活性セメントといった表記も考えられるが, 本報ではジオポリマーとして記載した。同様に, 本実験で製造・評価した硬化体の結合材にはセメントが使用されていないが, ポーラスコンクリートとして記載した。

2. 実験概要

2.1 ポーラスコンクリート供試体の作製

(1) 使用材料

本実験の使用材料を表-1に, 高炉スラグ微粉末(以下, 高炉スラグとする)の化学組成およびX線回折パターンを, それぞれ表-2, 図-1に示す。本報で使用した高炉スラグは, 予備実験において, 市販の高炉スラグに比べ, 急結しにくくハンドリング時間がより確保できた2水石こうが添加されていないものとし(図-1参照), 水ガラスは原液のまま使用した。また, 結合材は, 乾燥収縮の差などを確認するために, ペーストとモルタルについて検討し, モルタルでは6号珪砂を使用した。ポーラスコンクリートの粗骨材には, 一般的に使用されてい

表-1 使用材料

結合材	高炉スラグ微粉末4000(記号:BS) 密度:2.91g/cm ³ 水ガラス(記号:WG) JIS K1408 2号 密度:1.45g/cm ³
細骨材	6号珪砂(記号:S) 粒径:0.2-0.4mm 表乾密度:2.68g/cm ³
粗骨材	碎石6号(記号:G) 粒径:5-13mm 表乾密度:2.72g/cm ³ 実積率:56.6%、吸水率:1.35% 産地:三重県佐奈山産

表-2 高炉スラグ微粉末の化学組成 (mass%)

Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	Ig. loss
13.67	30.53	46.00	0.33	0.36	5.09	0.24	0.22

*1 三重県工業研究所 ものづくり研究課 主幹研究員 博士(工学) (正会員)

*2 三重大学大学院工学研究科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 三重大学大学院工学研究科 教授 工博 (正会員)

る 6 号砕石を使用した。

(2) 製造方法

実験の要因と水準を表-3に、結合材およびポーラスコンクリートの調合表を表-4、5に示す。本論文では、ポーラスコンクリートの粗骨材を結合する材料を結合材と定義し、同一のペースト分を用いたペーストとモルタルは、異なる結合材として取扱う。

結合材の水ガラス/高炉スラグ比は、ポーラスコンクリートの打設終了まで急結が発生せず、供試体底部に垂れが生じにくい条件とした。練上り後の実測フロー値は、ペーストで 212, モルタルで 192 であった。また、モルタルについては、結合材に対する細骨材の比容積（細骨材/結合材）を 40%に設定した。

練混ぜは、まず、水ガラス、高炉スラグおよび細骨材（モルタルの場合にのみ使用、練混ぜ前に、30 秒間のから練りを実施）をパン型ミキサに投入し、60 秒間練混ぜた。次に、練混ぜが終了した結合材に粗骨材を投入し、90 秒間練り混ぜることでポーラスコンクリートを製造した。

打設は、目標とする空隙率が得られるよう調合から投入量を算出し、すべて 2 層打ちにより行った。

締固めは、突き棒を使用し、各層ごとに棒突きを行った後、表面振動機（振動部の質量 4kg, モーターの回転数 8000rpm）で 10 秒間締固めを行った。このとき、算出量全量を打設できなかった試料は、その量を計測することにより空隙率を補正した。結合材は、2 層打ちとし各層ジッキングにより締め固め、表層をコテにより仕上げた。

2.2 圧縮強度試験

ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率との関係などを把握するために、結合材およびポーラスコンクリートの圧縮強度試験（JIS A1108 に準拠）を実施した。材齢は、標準養生が 3, 7, 28, 91 日、気中養生が 28, 91 日とし、供試体サイズは、結合材が φ50×100mm, ポーラスコンクリートが φ100×200mm とした。また、圧縮強度試験を行う前に、ポーラスコンクリート供試体の端面には硫黄キャッピングを施し、結合材供試体は研磨して端面を整形した。

2.3 透水試験

材齢 28 日における標準養生を行った供試体を使用し、一般的なポーラスコンクリートの透水試験方法¹⁰⁾に従い、透水係数を測定した。

2.4 乾燥収縮試験

結合材およびポーラスコンクリート供試体を使用し、コンタクトゲージ法による乾燥収縮試験（JIS A1129-2 に準拠）を実施した。供試体サイズは、結合材が 40×40×160mm, ポーラスコンクリートが 100×100×400mm と

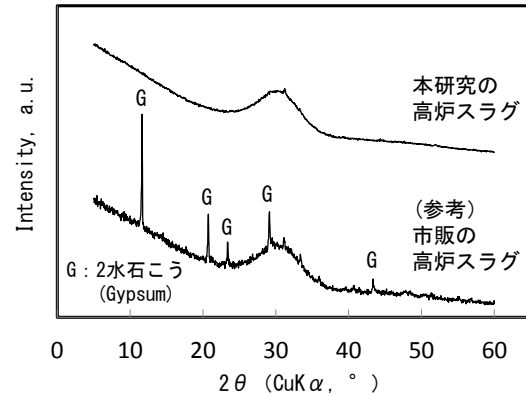


図-1 高炉スラグの X 線回折パターン

表-3 実験の要因と水準

要因	水準
結合材種類	ペースト, モルタル
目標空隙率	15%, 25%, 35%
養生方法	標準養生、気中養生

表-4 結合材の調合表

結合材	WG/BS (%)	単位量 (g/L)		
		BS	WG	S
ペースト	60	1320	792	-
モルタル	80	670	536	1072

し、各供試体側面（打設方向に対し垂直となる面）には、計測のためのゲージプラグを貼り付けた。ゲージプラグは、銅板に鋼球を打ち込んで作製されたものであるため、供試体表面が凹凸であるポーラスコンクリートの場合には、ゲージを直接貼り付けることが困難であった。そこで、貼り付け部分に無収縮な止水セメントでキャッピングを施し、その上にゲージプラグを貼りつけた（図-2 参照）。

乾燥収縮試験の実験フローを表-6に示す。供試体は型枠脱型後、材齢 12 日になるまで標準養生を行い、その後、20℃、60%で管理された恒温恒湿室内で気中養生すると共に、長さ変化の測定を行った。なお、乾燥収縮率（長さ変化率）は、式(1)により算出した。

$$\epsilon = \frac{(X_{01} - X_{02}) - (X_{i1} - X_{i2})}{L_0} \quad (1)$$

ここに、 ϵ : 長さ変化率 ($\times 10^{-6}$), L_0 : 基長

X_{01}, X_{02} : それぞれ基準とした時点における標準尺および供試体の測定値

X_{i1}, X_{i2} : それぞれ時点 i における標準尺および供試体の測定値

表-5 ポーラスコンクリートの調合表

結合材	WG/BS (%)	目標空隙率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			BS	WG	S	G
ペースト	60	15	375	225	-	1540
		25	243	146		
		35	111	67		
モルタル	80	15	190	152	305	1540
		25	123	99	197	
		35	56	45	90	

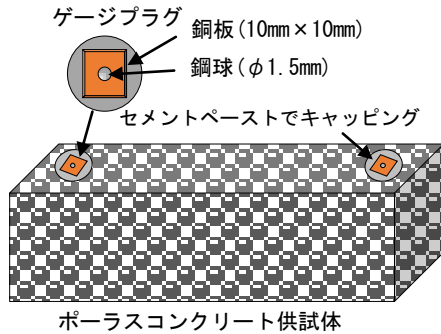


図-2 乾燥収縮試験の供試体

表-6 乾燥収縮試験のフロー

材齢	養生状態	作業内容
1日	型枠内養生	脱型
1-12日	標準養生 (20°C, 水中)	キャッピング, ゲージプラグの貼付け
12-19日	気中養生 (20°C, 60%RH)	2~3日毎に長さを測定
19-150日		1週間毎に長さを測定

また、長さ変化の測長後、全ての供試体質量を計測し、基長日と各測定日の質量の差から、質量変化率 (%) を算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

標準養生を行った材齢 28 日におけるポーラスコンクリート供試体の圧縮強度と全空隙率との関係を図-3 に示す。同図では、結合材強度 (ペースト 90.5N/mm², モルタル 84.6N/mm²) を全空隙率 0%の圧縮強度とし、養生による影響を確認するために、材齢 12 日以降、気中養生に切り換えた供試体(乾燥収縮試験の養生条件と同一、表-6 参照)の圧縮強度試験結果についても記載した。

図-3 より、ジオポリマーを結合材として使用したポーラスコンクリートの圧縮強度と全空隙率との間には、セメントを使用した一般的なポーラスコンクリート¹⁾と同様に高い相関関係が認められ、その関係は指数関数で近似することができた。また、これらの関係には、結合

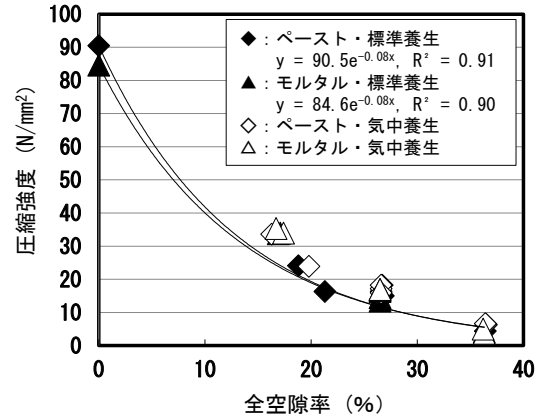


図-3 ポーラスコンクリートの圧縮強度と全空隙率との関係 (材齢 28 日)

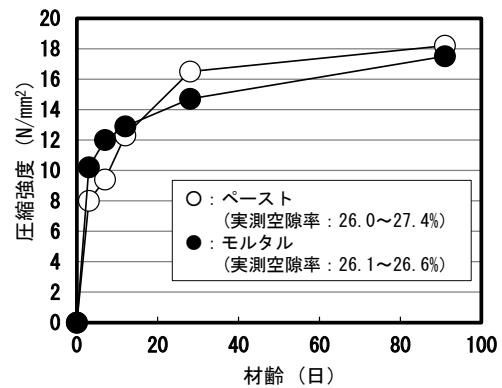


図-4 ポーラスコンクリートの圧縮強度と材齢との関係 (目標空隙率 25%・標準養生)

材強度による差があるものの、結合材の種類、すなわち、ペーストおよびモルタルによる顕著な差はなかった。

養生条件による影響については、結合材の種類にかかわらず、気中養生が標準養生を多少上回る結果となったが、その差は僅かである。

目標空隙率 25%、標準養生を行うことにより作製したポーラスコンクリート供試体の材齢 3, 7, 12, 28, 91 日における圧縮強度を図-4 に示す。

図-4 より、ペースト、モルタル共に材齢 3 日で材齢 28 日の 50%以上の強度発現が認められた。材齢 28 日から 91 日においても、結合材の種類に係らず緩やかに強度が増加する傾向が続いており、今後も緩やかに強度増進していくことが期待できる。また、材齢 7 日までの初期材齢においては、モルタルを結合材として使用した供試体がペーストを用いたものより高い強度を有する傾向となったが、材齢 28 日ではペーストがモルタルを用いた供試体の強度を上回り、材齢 91 日では、再度、モルタル供試体の強度が増進し、ほぼ同等の圧縮強度となる結果が得られた。

以上の結果より、ポーラスコンクリートの結合材としてジオポリマーを使用しても、一般的なポーラスコンク

リートと同程度の圧縮強度が得られ、圧縮強度に及ぼす結合材の種類(ペーストとモルタル)や養生条件(標準養生と気中養生)の影響は小さいことが確認できた。

3.2 透水性

標準養生を行った材齢 28 日のポーラスコンクリート供試体の透水係数と全空隙率との関係を図-5 に示す。同図には、6 号砕石を使用し、結合材にセメントペーストを使用した一般的なポーラスコンクリートの透水係数¹²⁾も併記した。

図-5 より、本実験で作製したポーラスコンクリート供試体の透水係数は 0.03~3.01cm/s であった。これらの数値は、透水性アスファルト舗装で規定される透水係数の下限値 0.01cm/s 以上であり、実用上問題のない透水性能が得られることが確認できた。しかしながら、一般的なポーラスコンクリートと比較すると、透水性能が低くなる傾向となっており、特に、ジオポリマーペーストを使用した供試体において、その差が大きい結果であった。これらの原因としては、結合材のフロー値が大きく流動性が高いため、締固め時、表層部においてペーストの垂れに起因する空隙の閉塞が生じ易い可能性などが考えられる。

3.3 乾燥収縮

(1) 結合材

結合材単体の乾燥期間 147 日までの乾燥収縮率および質量変化率を図-6 に示す。ここで、乾燥期間 0 日目は、供試体作製後 12 日目(表-6 参照)であり、図中のデータは全て供試体 3 本による平均値である。

図-6 (a) に示す結合材の測定結果からは、乾燥期間 147 日におけるモルタルの乾燥収縮率は 2771×10^{-6} 、同ペーストでは 5451×10^{-6} となり、ペーストはモルタルの約 2 倍の収縮率であるという結果が得られ、ジオポリマーにおいても細骨材の混入が収縮低減に有効であった。また、セメントペーストの乾燥収縮率について検討し

た既往の文献¹³⁾によれば、本実験におけるジオポリマーペーストの収縮率は、W/C が 35% の同一強度レベルのセメントペーストの 2 倍程度となっており、かなり大きい数値であることが明らかとなった。

一方、質量変化率(図-6 (b))の結果では、その傾向が逆転し、時間に伴う質量減少量はモルタルの方が大きい結果となった。これは、モルタルの水ガラス粉体比がペーストよりも大きいため、その内部組織がより粗雑となり、自由水の乾燥が起りやすいといったことも一因かと思われるが、現時点では明らかにできておらず、今後、さらに詳細な検討を要する。

(2) ポーラスコンクリート

結合材にペーストを使用したポーラスコンクリート供試体の乾燥期間 147 日までの乾燥収縮率および質量変化率を図-7 に、結合材にモルタルを使用した結果を図-8 に示す。ここで、図中全てのデータは、ポーラスコンクリート供試体 2 本による平均値である。

図-7 (a)、図-8 (a) によれば、ポーラスコンクリートの乾燥収縮率の最大値は、モルタルの結合材で

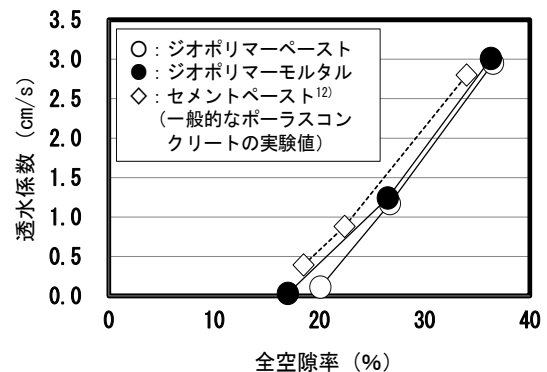


図-5 異なる養生条件におけるポーラスコンクリートの透水係数と全空隙率との関係

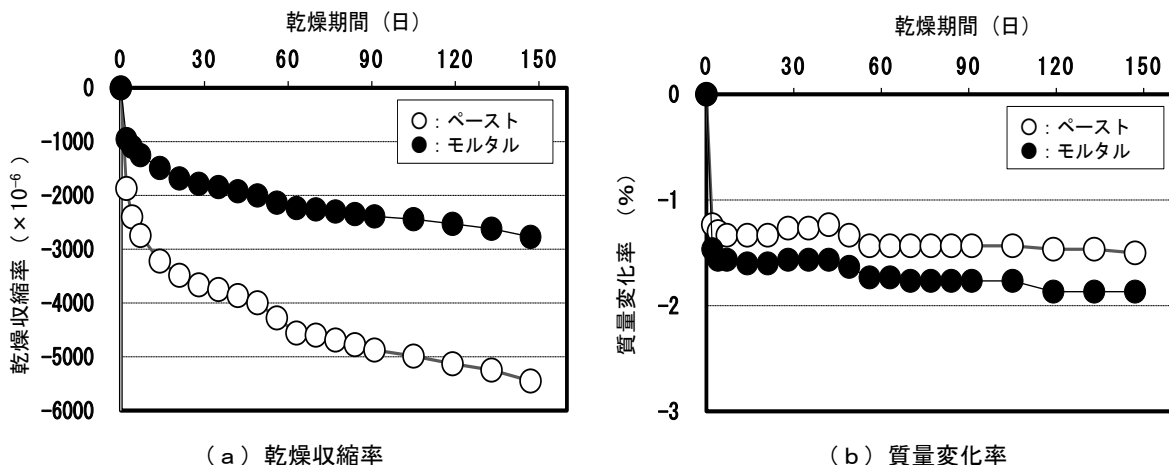
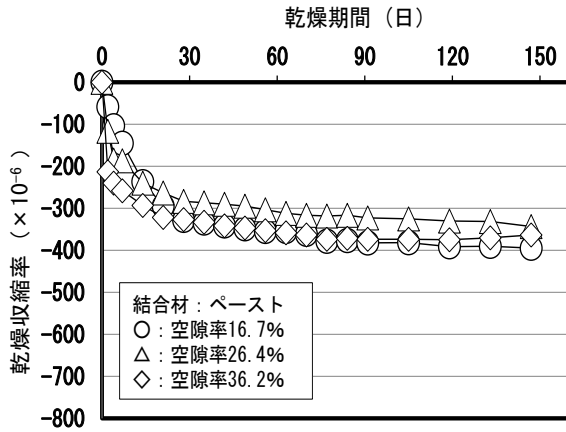
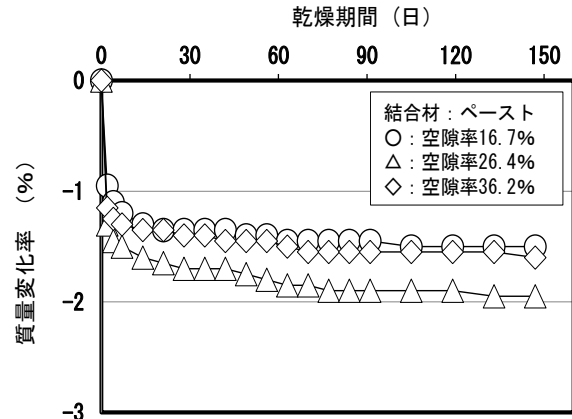


図-6 結合材の乾燥収縮率および質量変化率

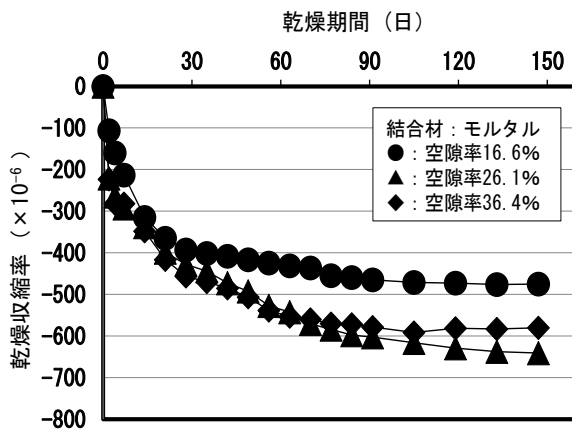


(a) 乾燥収縮率

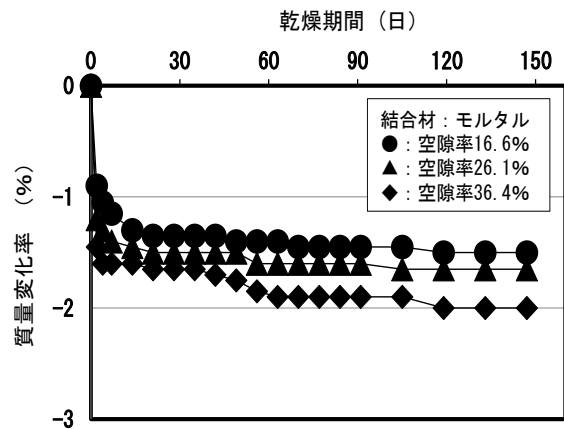


(b) 質量変化率

図-7 結合材としてペーストを使用したポーラスコンクリートの乾燥収縮率および質量変化率



(a) 乾燥収縮率



(b) 質量変化率

図-8 結合材としてモルタルを使用したポーラスコンクリートの乾燥収縮率および質量変化率

641×10^{-6} , 同ペーストでは 395×10^{-6} と、結合材単体と逆転する結果となった。空隙率が及ぼす影響に関しては、一般的なポーラスコンクリートの場合、調査上、結合材量が多くなる低空隙率の場合ほど収縮率が大きくなるが、本実験ではそのような明確な傾向は得られなかった。

既報¹³⁾によれば、同種の粗骨材を使用し、結合材強度が同程度のセメントペースト (W/C=35%) で製造した設計空隙率 20%の一般的なポーラスコンクリートの材齢 166 日における乾燥収縮率は 600×10^{-6} 程度であり、本実験のモルタルを使用した結果とは $\pm 50 \times 10^{-6}$ 程度の差となり、ほぼ同程度となることが確認できた。一方、ジオポリマーペーストを使用した場合と比較すると、全ての空隙率においてセメントペーストを下回る結果となることが確認できた。

図-7 (b), 図-8 (b) によれば、結合材の種類によらずポーラスコンクリートの質量減少率は、1.5~2.0%の範囲であり、空隙率が及ぼす影響については乾燥収縮率の結果と同様に、明確な傾向などは認められなかった。この傾向は、一般的なポーラスコンクリートの場合¹⁴⁾と、

同様である。

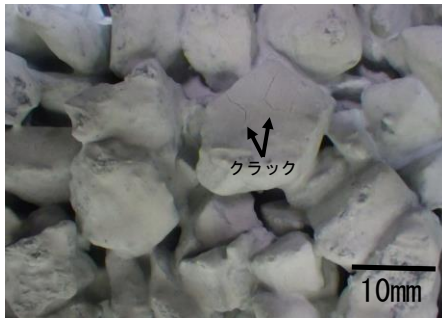
また、ペーストを使用した供試体表面の一部において、視認できるクラックの発生が認められた。これらは骨材の接合部分には無く、目標空隙率 15%の供試体の一部と 25%のごく一部の骨材上部のみに現れたが、モルタルを用いた供試体には発生しなかった (図-9 参照)。

現時点において、結合材にモルタルを使用したポーラスコンクリートが、ペーストを用いたものより乾燥収縮率が大きくなる理由や、空隙率が乾燥収縮率に及ぼす影響などについて明確にできていない。これらについては、結合材のフロー値により締固め性状が異なることに起因する供試体内部の結合材量や骨材配列への影響、モルタルの方が骨材接合部に結合材が集まり易く、結合材の膜厚が大きくなることによる影響などが想定されるが、今後、更に詳細な検討を要する。

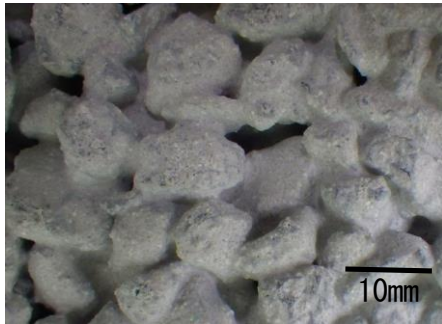
4. まとめ

本研究では、以下に示す知見が得られた。

- 1) ジオポリマーを結合材として使用したポーラスコンク



(a) 目標空隙率 15%・ペースト結合材



(b) 目標空隙率 15%・モルタル結合材

図-9 乾燥収縮率測定用供試体表面の一例
(材齢 147 日)

リートの圧縮強度と全空隙率には高い相関が認められ、両者の関係は、ポルトランドセメントを用いた一般的なポーラスコンクリートと同様に指数関数で表示できる。

- 2) ジオポリマーを結合材として使用したポーラスコンクリートの透水性能は、一般的なポーラスコンクリートの数値より低い傾向となるものの、透水性舗装で要求される性能はクリアできる。
- 3) ジオポリマーペーストを使用した結合材の乾燥収縮率は、セメントペーストの約 2 倍と大きいですが、ジオポリマーを用いたポーラスコンクリートの場合には、セメントペーストとほぼ同等かそれ以下となる。
- 4) ジオポリマーを結合材として使用したポーラスコンクリートの質量変化率は、一般的なポーラスコンクリートとほぼ同等である。

謝辞

本研究は、独立行政法人 科学技術振興機構「研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) フィージビリティスタディ【FS】ステージ探索タイプ」の成果の一部である。本実験を遂行するに当たり、日鉄住金高炉セメント株式会社から高炉スラグをご提供頂き、中島圭二氏 (三重総合試験センター株式会社)、高橋みゆきさん (三重大学大学院生)、岩村拓哉君 (三重大学卒業生) のご助力を得た。付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) T.Chareerat, K.Pimraksa, P.Chindapasirt, A.Maegawa, S.Hatanaka.; Composition and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Containing Rice Husk Ash, Technology and Innovation for Sustainable Development Conference, pp.168-171, 2008
- 2) 前川明弘, 三島直生, 畑中重光: ジオポリマーの圧縮強度に関する基礎的研究(その 1: 使用材料の影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.1383-1384, 2013.8
- 3) 三島直生, 前川明弘, 畑中重光: ジオポリマーの圧縮強度に関する基礎的研究(その 2: 水ガラス/粉体比, 粉体の混合使用, および養生条件の影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.1385-1386, 2013.8
- 4) Joseph DAVIDOVITS: GEOPOLYMER CHEMISTRY AND APPLICATIONS, Institute GEOPOLYMER, 2011
- 5) 国枝稔, 李虎, 上田尚史, 中村光: ジオポリマーコンクリートおよびモルタルの曲げ破壊性状, コンクリート工学年次論文集, vol.35, No.1, pp.1999-2004, 2013
- 6) 上原元樹, 佐藤隆恒: 石炭灰を主原料としたジオポリマー硬化体における高炉スラグ添加の影響, 粘土科学討論会講演要旨集, 第 55 号, pp.208-209, 2011.9
- 7) 一宮一夫, 原田耕司, 津郷俊二, 池田攻: 活性ファイラーにフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーの耐酸性と高温特性, コンクリート工学年次論文集, vol.35, No.1, pp.2005-2010, 2013
- 8) 橋本忍, 鎌田隼人, 山崎裕司, 武田はやみ: ジオポリマーの耐火材料への適用, 耐火物, pp.446-451, 2012
- 9) V.Sata, A.Wongsa, P. Chindapasirt: Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates, Construction and Building Materials, Vol.42, pp.33-39, 2013
- 10) 日本コンクリート工学協会: 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, 2003
- 11) 湯浅幸久, 畑中重光, 三島直生, 前川明弘, 宮本高秀: ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.552, pp.37-44, 2002
- 12) 前川明弘, 畑中重光, 三島直生, 山本晃: 小粒径ポーラスコンクリート基礎的特性に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.264-270, 2006
- 13) 張茂剛, 三島直生, 畑中重光: ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性とその予測式に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.647, pp.25-31, 2010