

論文 ジオポリマーを用いた水蒸気透過性を有する剥落防止材料の開発

島田 昌紀*1・有賀 俊記*2・千頭 啓司*3・中村 大輔*4

要旨：ジオポリマーを用いた剥落防止材料の設計を行い、その水蒸気透過性と、モルタル材料に含まれた水分の排出量を経時的に評価した。その結果、ジオポリマー系剥落防止材料はポリマーセメント系剥落防止材料と比べ 2.8 倍の水蒸気透過係数を有し、モルタルに含まれた飽和状態の水分を 30 日後には 1.8 倍排出することを確認した。また、モルタル上面に水を貯めた状態で行った浸透性評価においても含水量の増加速度が緩やかであることを確認することができた。これらの結果により、ジオポリマーを用いた剥落防止材料は、従来の材料と比較して年間を通してコンクリート中の水分を抑制できることが示唆された。

キーワード：ジオポリマー、剥落防止、水蒸気透過、高架橋、アルカリ骨材反応

1. はじめに

コンクリート構造物の剥落対策として、樹脂系材料やポリマーセメント系材料による表面被覆が多く行われている。表面被覆は水の浸入を防ぐためには有効だが、他の経路から水が浸入してしまった場合は排出を妨げる可能性があり、滞留した浸入水は様々な劣化を引き起こす要因となるため注意が必要である¹⁾。特に北陸地方のコンクリート構造物では、アルカリ骨材反応が原因と考えられる変状が確認されており²⁾³⁾、これは融雪のための散水がコンクリート中に浸透することが原因の一つである。図-1に示すように、床版下面に剥落対策として表面被覆した場合、水分の排出が妨げられることによってアルカリ骨材反応が促進される可能性があり、水の排出は無視できない問題である。

一方で、環境への負荷が少ない材料として近年注目を集めているジオポリマー⁴⁾は、樹脂系材料やポリマーセメント系材料と比較して透水性や水蒸気透過性が高いという特徴があり⁵⁾、広く活用が検討されている⁶⁾⁷⁾。そこで、本研究ではジオポリマーを用いた剥落防止材料の設計を行い、水蒸気透過性について評価を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1にジオポリマーの使用材料を示す。アルカリ溶液は、水ガラス3号(AS)、48%水酸化ナトリウム水溶液(SH)、イオン交換水(W)、SBR系エマルジョン(A)を24時間攪拌したものを使用した。配合割合は、 $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 三成分系の相図⁸⁾から得られる水溶液の安定性と活性を考慮して選定した。活性フィラーには、粉砕により活性化処理を行ったメタカオリン(MK)と、炭酸化により低活性化処理を行った高炉スラグ微粉末4000(BS)を所定の割合で混合したものを使用した。これらの処理により、常温硬化においても十分な強度と可使用時間を両立することができている。

図-3に剥落防止材料の構成を、表-2にその使用材料を示す。最初に母材に対してプライマー処理を行い1時間乾燥した。次にジオポリマーを塗布し、直後に基材の貼付けを行い、更にジオポリマーを含浸塗布した。翌日、仕上剤を塗布し、剥落防止材料を得た。

比較のための材料としては、表-3、表-4に示す一般的な剥落防止材を使用した。

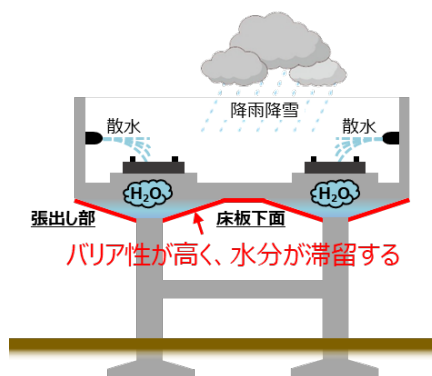


図-1 従来の剥落防止材料

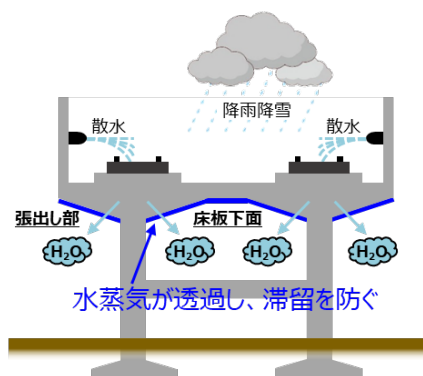


図-2 ジオポリマー剥落防止材料の狙い

*1 積水化学工業(株) 環境・ライフラインカンパニー 総合研究所 修士(工学)(正会員)

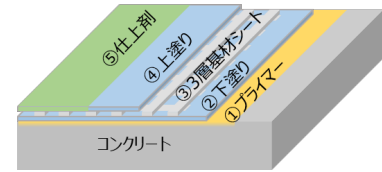
*2 積水化学工業(株) 環境・ライフラインカンパニー 機能材事業部

*3 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター 土木技術メンテナンスユニット 修士(工学)(正会員)

*4 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター 土木技術メンテナンスユニット 修士(農学)

表－１ ジオポリマーの使用材料

使用材料		記号	備考
アルカリ溶液	水ガラス	AS	JIS 3号
	水酸化ナトリウム	SH	48%水溶液
	水	W	イオン交換水
	エマルジョン	A	SBR系エマルジョン
活性フィラー	メタカオリン	MK	SiO ₂ ＝約50wt%、Al ₂ O ₃ ＝約45% BET比表面積＝約13m ² /g 粉碎処理
	高炉スラグ	BS	高炉スラグ微粉末4000 炭酸化处理



図－３ 剥落防止材料の構成

表－２ ジオポリマー剥落防止材料の使用材料

使用材料		配合比	使用量	備考	
①プライマー	主剤	5	150g/m ²	アクリル樹脂系	
	水	2		－	
	硬化剤	1		エポキシ樹脂系	
②④ジオポリマー	アルカリ溶液	11	下塗：400g/m ²	－	
	活性フィラー	10	上塗：800g/m ²		
③基材	ガラス不織布	－	1枚 オーバーラップ 5~10mm	目付25g/m ²	3層を積層し、 縫製により一体化
	ビニロン繊維3軸メッシュ			目付88g/m ²	
	PP不織布			目付30g/m ²	
⑤仕上剤		－	70g/m ²	カルシウム水溶液	

表－３ ポリマーセメント系剥落防止材の使用材料

使用材料		配合比	使用量	備考
プライマー		－	150g/m ²	エポキシ樹脂系
ポリマーセメント	混和液	5	3000g/m ²	アクリル樹脂エマルジョン
	粉体	13		短繊維配合プレミックスセメント
基材		－	1枚	2軸ビニロン－アラミド繊維
仕上剤		－	250g/m ²	水系アクリル弾性塗料

表－４ FRP系剥落防止材の使用材料

使用材料	使用量	備考
プライマー	150g/m ²	ウレタン樹脂系
貼付剤	1200g/m ²	ビニルエステル樹脂
基材	1枚 2000g/m ²	ガラス繊維補強 ビニルエステル樹脂

2.2 剥落防止材料の基本性能（押抜き、付着）

剥落防止材料としての基本性能を確認するため、付着強さ試験、および押抜き試験を行った。

（1）試験体作製方法

試験体の作製は、土木学会規準（JSCE-K 531.2013, JSCE-K 533.2013）に準拠して23℃50%RHの環境において行った。作製後は作製環境と同環境において、付着強さ試験体は7日間、押抜き試験体は30日間の養生を行った。押抜き試験体の作製は、事前にコンクリート板の浸漬を24時間行い、コンクリートに水を含んだ状態で実施する。ジオポリマー系剥落防止材は水蒸気透過性が高いため、施工後もコンクリートの水分量の変化が大きい。そのため、状態を安定させるため押抜き試験体の養生は長期間行っている。

以降全ての試験は、n=3で実施した。

（2）試験方法

付着強さ試験、および押抜き試験については、試験体作製と同様に、土木学会規準に従って行った。

付着強さ試験はJSCE-K 533.2013 4.1 標準状態試験体

の試験方法に従い、23℃50%RHの環境において行った。

押抜き試験はJSCE-K 533.2013に従い、23℃50%RHの環境において行った。

2.3 水蒸気透過性評価

剥落防止材料の水蒸気透過性を示すため、水蒸気透過係数の評価を行った。

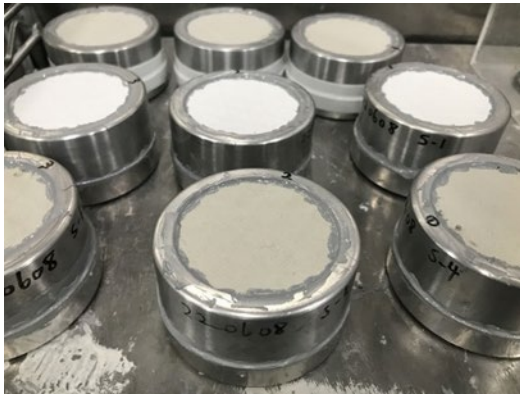
（1）試験サンプル作製方法

試験サンプルの作製は、23℃50%RHの環境において行った。剥落防止材料の施工は、母材としてJIS P 3801に規定される定性ろ紙 No.1 を使用して行った。定性ろ紙 No.1 にプライマーを含浸し、表－2、表－3の材料を用いて作製を行った。作製後は作製環境と同環境において、14日間の養生を行った。

比較のためのモルタル板試験サンプルは、JIS R 5201 9.4 に準拠して作製された市販のモルタル板（φ68×10mm）を使用した。

（2）試験方法

JIS A1171 ポリマーセメントモルタルの試験方法 7.12 透湿度試験（放湿による方法）に準拠し、アルミニ



図－４ 水蒸気透過性測定サンプル

ウム製円筒容器に試験サンプルを図－４の様に接着し、10mL のイオン交換水を入れ密封した。得られたサンプルを 20℃60%RH の環境に静置し、14 日間 24 時間ごとに時間 t (日)，および重量 m_t (g) を記録した。

2.4 モルタル含水量評価

水蒸気透過性能がコンクリート中の水分量に与える影響を確認するため、剥落防止材料を施工したモルタル板の排出性と滞留性に関する評価を行った。

(1) 試験サンプル作製方法

排出性に関する試験サンプル作製は、JIS R 5201 9.4 に準拠して作製された市販のモルタル板 (100×100×20mm) を使用して行った。モルタル板の側面 4 面をエポキシ樹脂にてシーリングする。その後、表－2，表－3，表－4 の材料を用いて剥落防止材料の作製を行った。作製および養生は 23℃50%RH の環境において行い、養生期間は 7 日間とした。乾燥前のモルタル板

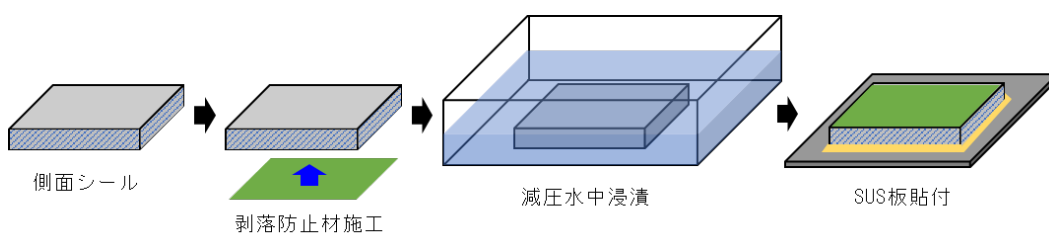
の状態を合わせるため、養生後 23℃にて水中に浸漬し、浸漬した状態で 100Pa 以下となるまで減圧した後、減圧を止めて 24 時間かけてモルタル板の吸水を行った。吸水後は剥落防止材料を施工していない面に変成シリコンにてステンレス板を貼り付け、水分の排出が施工面からのみ起こるようにして試験サンプルとした。作製イメージを図－5 に示す。

滞留性に関する試験サンプル作製も同様に行ったが、試験開始前のモルタル板の状態を合わせるため、105℃にて 24 時間乾燥を行ったモルタル板を使用して作製した。作製後は剥落防止材料を施工していない面にアクリル製の枠を取付け、水道水を高さ 2cm まで貯めた状態をもって試験サンプルとした。作製イメージを図－6 に示す。

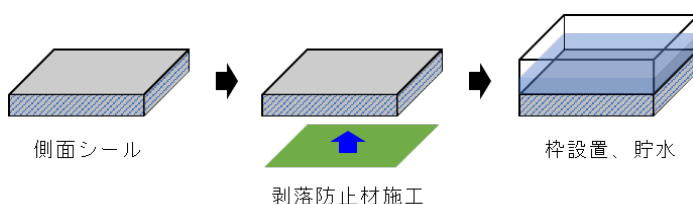
(2) 試験方法

図－7 に示す通り、試験サンプルを 20℃60%RH の環境に静置し、24 時間ごとに重量を記録した。排出性に関する試験サンプルは試験体をそのまま測定している。滞留性に関する試験サンプルは貯めている水を一度抜き取り、表面水を軽く拭き取った状態で重量を測定した。重量測定後は再び水道水を高さ 2cm まで貯め、静置を行った。静置の際は、合板で蓋をすることによって水面からの水分の蒸発を防止している。

滞留性に関する試験サンプルは重量がほぼ安定した 90 日後に中断し、図－8 に示す通り貯水面をエポキシ樹脂にて封止して水分の排出が施工面からのみ起こるようにし、続けて乾燥段階の重量測定を継続した。



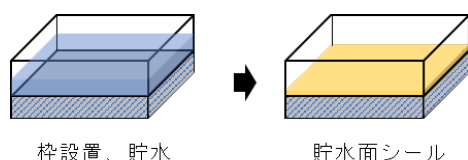
図－５ 排出性に関する試験サンプル作製イメージ



図－６ 滞留性に関する試験サンプル作製イメージ



図－７ モルタル含水量評価



図－8 貯水面の封止

3. 実験結果および考察

3.1 剥落防止材料の基本性能

土木学会規準（JSCE-K 531.2013，JSCE-K 533.2013）に準拠して行った付着強さ試験，および押抜き試験の結果を表－5に示す。

東日本旅客鉄道株式会社が編集する土木工事標準仕様書によれば，コンクリートの剥落防止を目的とした表面被覆工は，付着強度 1.0N/mm² 以上，押抜き荷重 1.5kN 以上の規格を満足する必要がある。ジオポリマー系剥落防止材料は両方の基準を満たしており，剥落防止材料とし必要な強度を有することが確認できた。

3.2 水蒸気透過係数評価

n=3 の測定により得られた重量 m_t と時間 t を基に，図－9 の様に最小二乗法による切片を 0 とする直線近似をそれぞれ行い，直線の傾きの平均から水蒸気透過度 G (g/日) を求めた。

得られた G ，及び表面積 A (m²)，試験体の厚さ S (m)，差圧 P (Pa) から，式(1)に基づき水蒸気透過係数 δ (kg/m・s・Pa) を算出した。差圧 P は，アルミニウム製円筒容器の中の相対湿度を 100%RH と仮定し，20℃100% RH と 20℃60%RH における飽和水蒸気圧の差 935.6Pa を用いた。水蒸気透過係数 δ は材料自体の水蒸気を透過させる能力を表している。

$$\delta = \frac{G \times 10^{-3}}{24 \times 3600} \times \frac{S}{P \times A} \quad (1)$$

モルタル板，ポリマーセメント系剥落防止材料についても同様の評価を行い，水蒸気透過係数 δ を算出した。モルタル板は重量変化が安定するまで時間を要したため，7 日経過後を 0 日として計算している。

それぞれ n=3 で算出した各材料の水蒸気透過係数の平均値を図－10 に示す。水蒸気透過係数が高いほど水蒸気を透過させる能力が高いことを示している。この結果により，ジオポリマー系剥落防止材料の水蒸気を透過させる能力は，ポリマーセメント系剥落防止材料に比べて約 2.8 倍高いことを確認することができた。

3.3 モルタル含水量評価

図－5 に示した試験体を用いて行った排出性に関する試験結果を図－11 に示す。減圧水中浸漬によりモ

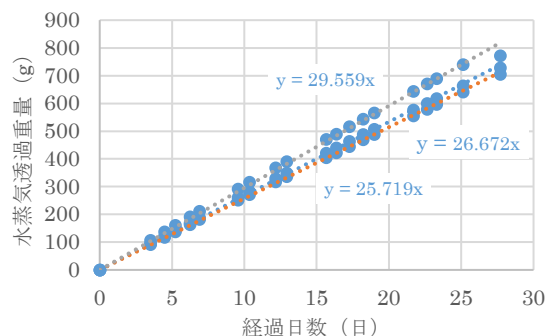
表－5 ジオポリマー系剥落防止材の基本性能

試験項目	試験方法	試験結果	平均
付着強さ試験	JSCE-K 531	3.53N/mm ²	3.2N/mm ²
		2.87N/mm ²	
		3.28N/mm ²	
押抜き試験	JSCE-K 533	2.60kN	2.5kN
		2.43kN	
		2.37kN	

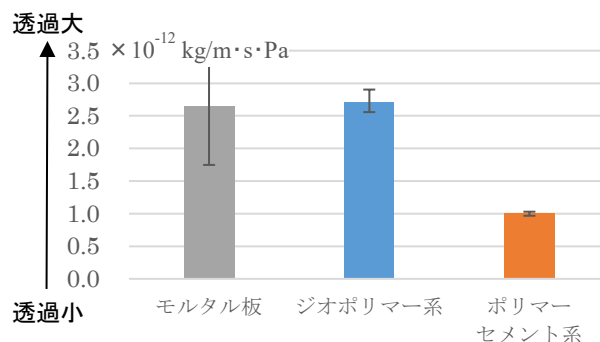
ルタル板中に吸収された水分が，時間経過と共に剥落防止材料の施工面から排出されていく推移を表している。比較のため，施工面からの排出がほぼ期待できない FRP 系剥落防止材料の結果についても併記している。

モルタル板は乾燥開始直後から乾燥による急激な水分の排出がみられ，ジオポリマー系剥落防止材料を施工した場合も同様の重量変化が見られた。一方で FRP 系剥落防止材料やポリマーセメント系剥落防止材料の重量変化の動きは鈍く，ジオポリマーとポリマーセメント系の 30 日後の数値を比較した所，総水蒸気排出量に約 1.8 倍の差があることが確認できた。

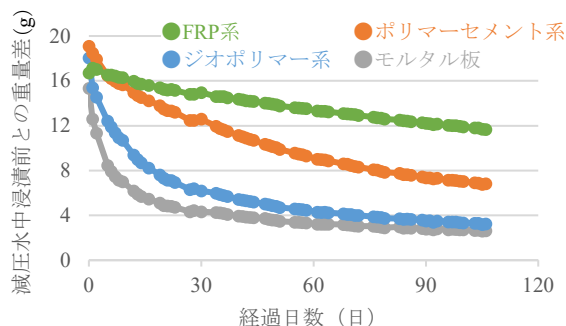
同様に，図－6 に示した試験体を用いて行った滞留性に関する試験結果を図－12 に示す。絶乾状態のモルタル板が，浸透水により時間経過と共に水分を滞留していく推移と，90 日間吸収した水分が剥落防止材料の施工面から排出されていく推移を表している。



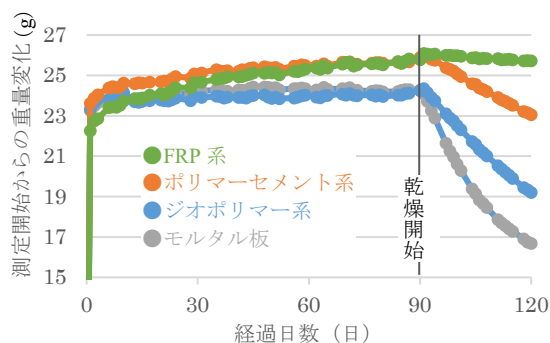
図－9 ジオポリマー系剥落防止材料の水蒸気透過度



図－10 各材料の水蒸気透過係数



図－１１ モルタル含水量推移（乾燥）



図－１２ モルタル含水量推移（貯水→乾燥）

モルタル板とジオポリマー系剥落防止材料を施工した試験体は、早い段階で重量の変化がほとんど見られなくなった。排出性に関する試験で行った減圧浸漬と、吸水に関する試験で行った絶乾の結果から、モルタル板の飽和含水量は約 30g と推測している。モルタル板とジオポリマー系剥落防止材料では、この飽和含水量よりも低い数値で平衡含水量を迎えることができた。

一方で FRP 系剥落防止材料やポリマーセメント系剥落防止材料を施工した試験体は、長期間にわたって重量が増加し続けており、平衡含水量もモルタル板に比べて高い数値となっていることが確認できた。これは貯水面から浸透する水分量が、施工面から排出される水分量を上回っていることを示唆していると考えられる。

また 90 日後から開始した乾燥工程においても、モルタル板とジオポリマー系剥落防止材料は乾燥開始直後から急激な重量の減少がみられ、モルタル板内の水分が排出されていることが確認できた。

これらの結果から、ジオポリマーを用いた剥落防止材料がコンクリート中の水分に与える影響は、散水期間中は従来の材料と比較して若干低い滞留水量を維持すること、散水が終わって乾燥期間になれば含まれている水分が排出され、素早く水分量が低い状態に戻ることで確認することができた。またこれらの効果により、従来の材料と比較して年間を通してコンク

リート中の水分の滞留を抑制する可能性について示唆することができた。

4. 現場施工

開発したジオポリマー系剥落防止材料を用いて、実際の新幹線高架橋で施工を行った。

(1) 施工場所、施工位置

施工を行った新幹線高架橋を表－６に示す。

新幹線高架橋における施工位置は、水蒸気透過性が最も必要だと考えられる図－１３に示す床版下面を対象としている。高所作業車を使用し、天井向き作業にて施工を行った。

(2) 施工結果

施工は表－２の材料を用いて行い、A高架橋にて実際の施工に要した時間を表－７に示す。表中の作業時間は、工程間の待ち時間を含めない純粋な作業時間を示している。

高所作業であること、天井向き作業であることを考慮すると問題のない作業時間内で施工を完了しており、並行して行ったポリマーセメント系剥落防止材料と比べても短時間で作業を終えることができた。また、ジオポリマー系剥落防止材料はローラーによる施工を採用しているため、現場作業員からは左官作業に比べて作業姿勢が楽で疲れにくいという所感を得ることもできた。

本施工場所では埋込センサーによるコンクリート内部の水分量を定期的に計測しており、開発した剥落防止材料の水分排出効果について検証していく。

表－６ 施工場所

名称	A高架橋	B高架橋
駅間	燕三条・新潟	燕三条・新潟
部位	床版 下面	床版 下面
面積	14m ² ×2スパン	13m ² ×2スパン
施工時期	2023年11月	2023年11月



図－１３ 施工位置、及び施工風景

表－７ 施工時間

工程	ジオポリマー系 作業時間/14m ²	ポリマーセメント系 作業時間/14m ²
①プライマー	24分	
②下塗り	42分	
③シート貼り	36分	
④上塗り	42分	
⑤仕上剤	17分	
合計	161分	210分

5. まとめ

本検討では、コンクリート内部に浸入した水分の排出を妨げにくい、水蒸気透過性の高い剥落防止材料を得るため、ジオポリマーを用いた剥落防止材料の設計および評価を行った。検討により得られた主な知見を以下にまとめる。

- (1) ジオポリマーを用いた剥落防止材料は、付着強さ試験および押抜き試験において十分な強度を示し、剥落防止材料として必要な基本性能を満たしていることが確認できた。
- (2) アルミカップを用いた水蒸気透過性評価では、高い水蒸気透過係数を示し、ジオポリマー材料の特徴である高い水蒸気透過性を確認することができた。水蒸気を透過させる能力はポリマーセメント系剥落防止材料の約 2.8 倍であり、コンクリート構造物を構成する材料であるモルタルとほぼ同等であった。そのため、剥落防止材料の施工によって生じる水分の排出性能の低下は軽微に抑えられると推測される。
- (3) モルタル板を使った含水量評価では、水蒸気透過性能が含水量に与える影響について確認することができた。水蒸気透過性の低い剥落防止材料を施工すると、水を貯めた状態においては水の排出速度が浸透速度よりも遅くなり、モルタル板に滞留する水分量は徐々に増加する。乾燥状態においても、水の排出速度は剥落防止材料を施工していない試験体に比べて大幅に遅くなることが確認できた。一方で水蒸気透過性の高いジオポリマー系剥

落防止材料では、水を貯めた状態においても乾燥状態においても施工していない試験体に近い水分量の推移を示し、水の排出性能の低下が少ないことを確認することができた。これらの結果によりジオポリマー系剥落防止材料は、従来の材料と比較して年間を通してコンクリート中の水分の滞留を抑制できる可能性が示唆された。

- (4) 実際の新幹線高架橋を用いて行った施工において、ジオポリマー系剥落防止材料は現場でも問題なく施工出来る事を確認することができた。

参考文献

- 1) 土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，pp.118，2013
- 2) 松田 芳範，隈部 佳，木野 淳一，岩田 道敏：アルカリ骨材反応の JR 東日本版抑制策の制定について，コンクリート工学，Vol.50，No.8，pp. 669-675，2012
- 3) 大野 龍馬：上越新幹線高架橋アルカリ骨材反応の実態と対策方法の考察，第 42 回土木学会関東支部技術研究発表会予稿，VI-33，2015
- 4) Davidovits, J. : Gopolymers : Inorganic polymeric new materials, Journal of Thermal Analysis, Vol.37, pp.1633-1656, 1991
- 5) 日本コンクリート工学会 月刊コンクリート技術 2017 年 6 月号参照：https://www.jci-net.or.jp/j/concrete/technology/201706_article_1.html (閲覧日：2024 年 12 月 26 日)
- 6) 日本コンクリート工学会：建築分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017
- 7) 土木学会：土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会成果報告書，2022
- 8) 富士化学株式会社 珪酸製品紹介ページ『Na₂O-SiO₂-H₂O 三成分系の領域図』参照：https://www.fuji-chemical.com/products/silicic_acid/ (閲覧日：2024 年 12 月 26 日)