

ジオポリマーコンクリートを用いた断面補修

(株)大林組 正会員 ○木谷憶人 正会員 富井孝喜
正会員 青木峻二

ポゾリスソリューションズ(株) Siddharth Roychowdhury
日本製鉄(株) 上村竜介 正会員 寺田豊

1. はじめに

ジオポリマーは、アルミナシリカ粉末とアルカリ溶液との縮重合反応によって形成される固化体の総称である。従来のコンクリートの原料となるセメントの代替として、フライアッシュや高炉スラグ微粉末などの産業副産物を原料とするため、製造過程で発生する二酸化炭素量がセメントコンクリートに比べて少ないことや各種産業副産物を有効活用できることから、昨今の「カーボンニュートラル」といった社会的課題解決の有力な手段の一つとして期待されている。加えて、セメントコンクリートの弱点である、高温に対する抵抗性にも優れていることを特徴とし、特殊環境下での利用も期待されている。

近年、オーストラリアをはじめとする国外ではジオポリマーコンクリートの実用化が進んでおり、現場打設の適用例が報告されている。一方で、国内で開発が進んでいるジオポリマーは、粘性が非常に高い、可使時間が短い（製造後 20~30 分程度）、高温蒸気養生を必要とする、といった現場における施工面での課題があったりするため、現場打設よりもコンクリート二次製品としての適用が多くを占めているのが現状である。

既往研究²⁾によれば、フライアッシュをベースとしたジオポリマーの一部を高炉スラグ微粉末に置き換えることで、大幅に強度が改善し、凝結時間が早くなる、常温養生での強度発現が可能となるがワーカビリティや可使時間はスラグ量の増加に伴い急速に低下しフレッシュ時の取扱いが困難になるとされている。ワーカビリティは溶液量を増加させることによって改善可能であるが、圧縮強度に影響を与えてしまう。つまり、スラグ置換率が高く設計されるジオポリマーにはまだ発見されていない適切な凝結遅延剤が必要とされている。

そこで、筆者らはポゾリスソリューションズが開発したジオポリマー用の特殊混和剤（分散剤）の利用を試みた。この特殊混和剤は適切な量を添加すれば他の物性に大きな影響を与えることなく、凝結遅延効果が得られるものである。筆者らはこの特殊混和剤を含む配合を検討し、施工に適した流動性を保ちつつ、常温養生でも必要強度を確保可能なジオポリマーコンクリートを開発した。本稿では、ジオポリマーコンクリートを実現場の擁壁補修に適用することを目的として、一般的なコンクリート同様の施工方法で打設可能な配合を検討し、実施工に至るまでの事例を紹介する。

表-1 使用材料

項目	記号	材料
粉体 (P)	FA	フライアッシュ II 種品 密度：2.27g/cm ³
	BS	高炉スラグ微粉末 密度：2.91g/cm ³ ブレン値：4,100cm ² /g
	MS	シリカフェーム 密度：2.20g/cm ³
アルカリ溶液	GPW	アクティベーター，分散剤，水 密度：1.16g/cm ³
鋼繊維	SF	密度：7.85g/cm ³ (φ0.55mm, L=35mm)
細骨材	S	珪砂 密度：2.51g/cm ³
粗骨材	G	玄武岩 密度：2.82g/cm ³

2. 配合検討

2 時間後でもフローが低下せず、圧縮強度（材齢 28 日）30N/mm² が得られることを目標性能として室内試験により配合を検討した。

(1) 使用材料および配合

使用材料を表-1 に示す。粉体は、フライアッシュ（以下 FA）、高炉スラグ微粉末（以下 BS）、シリカフェームを用いた。アルカリ溶液には、アクティベーター、分散剤、消泡剤、水を混合して用いた。細骨材には珪砂、粗骨材は玄武岩を用いた。配合を表-2 に示す。BS の置換率をパラメータとして、BS の割合を 30% (OA) と 15% (OB) の 2 ケースとした。

キーワード ジオポリマー、常温養生、鉄筋コンクリート、ポンプ圧送、補修

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 (株)大林組 リニューアル技術部 TEL：03-5769-1332

表-2 配合表

配合名	GPW/P (W/C) (%)	単位量 (kg/m ³)						
		GPW (W)	P(C)			S	G	SF
			FA	BS	MS			
OA	36.8	184	300	150	50	800	850	40
OB	36.8	184	375	75	50	800	850	40
OR	(45)	(165)	(367)			802	938	40

アルカリ溶液と粉体の質量比 GPW/P は 31% とした。

(2) 練り混ぜおよび養生

練り混ぜは、温度 20°C の恒温室でパン型ミキサーを用いて行った。練り混ぜ手順は粉体と鋼繊維を入れて空練り 30 秒、アルカリ溶液を入れて 60 秒、掻き落とし後 120 秒間練り混ぜる方法とした。

養生は恒温恒湿室（温度 20°C，湿度 60%）で封緘養生とした。

(3) 試験結果

フレッシュ試験は、スランプフロー試験（JIS A 1150）と空気量試験（JIS A 1128）とした。圧縮強度試験（JIS A 1108）は、供試体φ100×200mm とした。

従来のジオポリマーコンクリート（GP）りと比較したスランプフローの経時変化を図-1 に示す。OA と OB のいずれの配合も練り混ぜ直後よりも 60 分経過後の値が大きくなり、その後は安定し、時間の経過とともに緩やかに低下した。OA に比べて、OB の値は全体として小さくなった。既往研究²⁾によれば、BS の添加率が高いほどフロー値が低下する傾向が示さ

れているが、本配合では逆の傾向を示す結果となった。これは、特殊混和材がもたらすワーカビリティへの影響が FA よりも BS の固化メカニズムに効いていることが一つの要因として考えられる。

練り混ぜ直後よりも 60 分経過後のフローが大きくなった原因は、分散剤の効果が現われるのに時間を要した可能性が考えられる。従来のジオポリマーが可使時間 45 分未満であるのに対し、OA、OB の両配合とも 120 分経過後まで施工に十分なワーカビリティを保持し、材料分離も起きなかった。

なお、空気量は OA が 1.6%、OB が 2.4% であった。

圧縮強度と材齢の関係を図-2 に示す。なお、OB は、材齢 1 日では脱型できなかった。初期強度（材齢 1 日）は従来のジオポリマーと同等であるものの、両配合とも材齢とともに圧縮強度が増加し、材齢 28 日で 30N/mm² 以上となった。蒸気養生を行わずとも必要な圧縮強度を得られることを確認した。また、OB より OA の圧縮強度が大きいのは、OA の方が BS 置換率が高いことに起因すると考えられる。この傾向については既往研究²⁾によって報告されているが、同時に BS の添加率が高いほど耐熱性が低下することが確認されているため、本配合検討では、BS の割合 30% を上限とした。

以上の結果を鑑み、適度なフローが持続し、2 つの配合の中では圧縮強度を早期に発現する OA が現場での施工に適していると考えた。

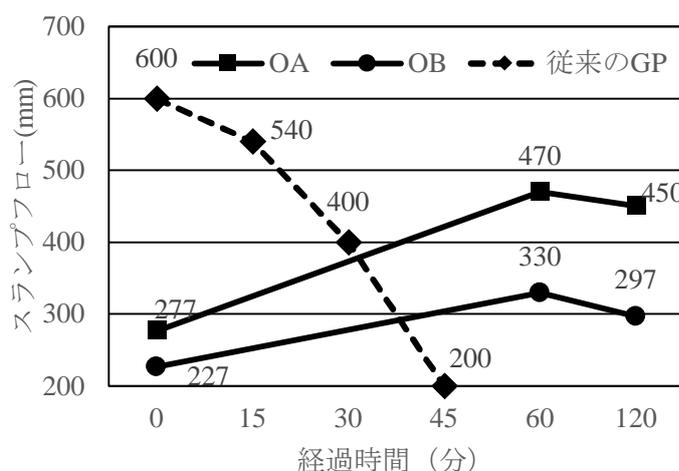


図-1 スランプフローの経時変化

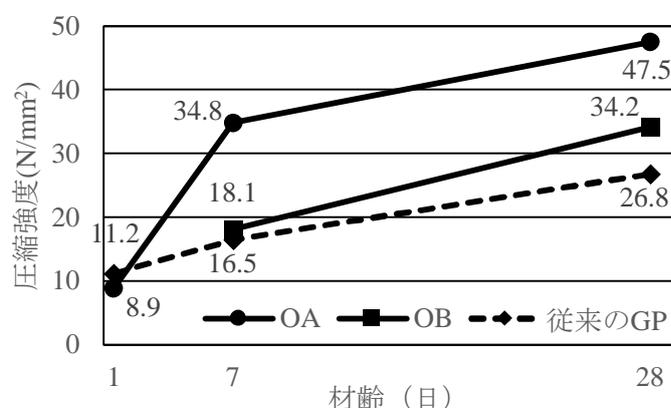


図-2 圧縮強度

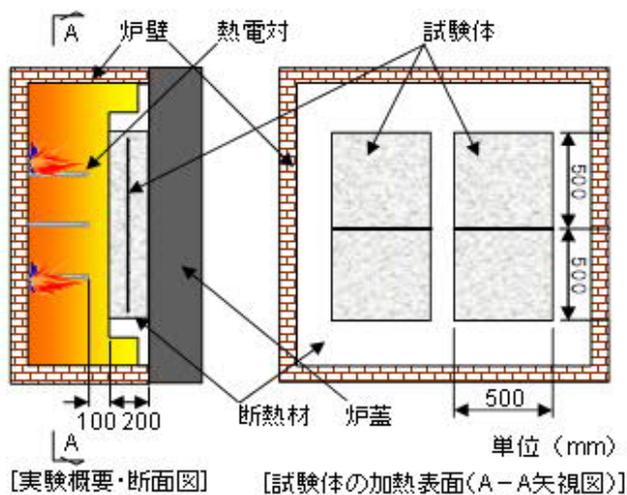


図-3 加熱試験概要

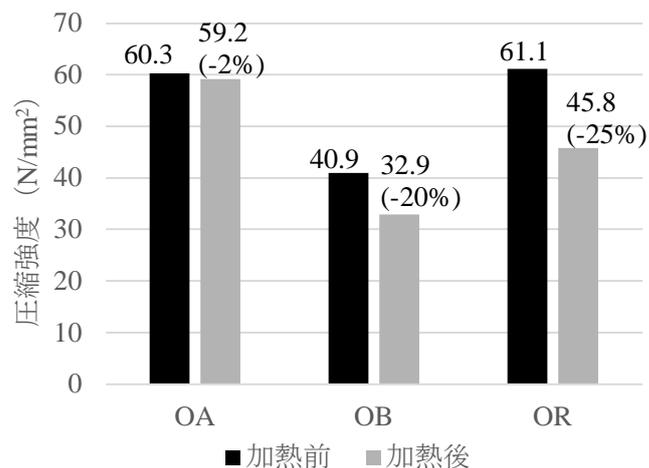


図-4 圧縮強度 (室内加熱試験)

表-3 加熱前後の供試体表面状況

	OA	OR
加熱前		
加熱後		

3. 室内加熱試験

前章の室内試験に加えて、OA と OB および比較対象として普通コンクリート (OR) で作製した供試体に対して加熱試験 (図-3) を実施し、各配合の圧縮強度の低下率から耐熱性を比較した。

(1) 加熱試験方法

各配合の練り混ぜ方法は前章と同様とし、OR の作製には普通ポルトランドセメント (密度 : 3.15g/cm³) を用い、OX と圧縮強度値を合わせるよう表-2 に示す配合とした。

供試体寸法は、縦 500×横 500×厚さ 200mm の盤型とし、恒温恒湿室 (温度 20℃、湿度 60%) で 28 日間の封緘養生と 14 日間の気乾養生を行った。その後、壁式加熱炉に供試体を設置し、側面から加熱を行った。加熱は 5 分間で 600℃まで昇温し、5 時間保持させ、その後自然冷却を行った。加熱終了後、盤型供試体からφ100×200mm の円柱供試体をコアボーリングによって採取し、圧縮強度試験 (JIS A 1108) を実施した。

(2) 室内加熱試験結果

各供試体の圧縮強度試験結果を図-4 に、OA と OR の加熱前後の供試体表面状況を表-3 に示す。加熱後の

供試体については、OA は加熱面が若干茶色に変化したが、ひび割れや爆裂などは確認されなかった。OR については一部ひび割れと欠落が見られた。圧縮強度については、加熱前、OA と OR は同程度の圧縮強度を示したが、加熱後において、OA は他配合と比較してほとんど強度低下しなかった。一方、OR は加熱前と比較して 25% の強度低下を示した。OB については、加熱前の圧縮強度が他配合に比べて小さく、加熱後の強度低下率も 20% と大きい結果となった。OB が加熱前後通して圧縮強度が小さかったことと、「BS 置換率の増加に伴い耐熱性は低下する」といった既往の知見²⁾と反する結果となった要因としては、FA の含有量と養生期間が関係していると考えられる。すなわち、FA 含有量の多い OB では、十分な圧縮強度を発現するための硬化反応を完了させるには養生期間が不足していたものと考えられる。養生期間を十分にとれば OB の方がより高い圧縮強度を示す可能性も考えられる。また、既往実験と異なり片面から加熱したことも影響していると考えられる。

以上のことから、フライアッシュと高炉スラグ微粉末の配合割合がジオポリマーコンクリートの耐熱性に大きく影響を及ぼし、高熱環境下においては OA の配合がより優位な配合条件であることが分かった。

4. 現場適用

前章までの検討を鑑み、OA の配合を用いて実現場における鉄筋コンクリート擁壁の断面補修を実施した。

(1) 施工概要

配合 OA のジオポリマーコンクリートを 2020 年 11 月 24 日に日本製鉄(株)東日本製鉄所鹿島地区構内の鉄筋コンクリート擁壁補修に適用した。補修範囲は、延長 24.7m×高さ 1.3m×厚さ 0.1m (打設数量: 約 3.2m³) であった。擁壁の正面図を **図-5**、断面図を **図-6** に示す。

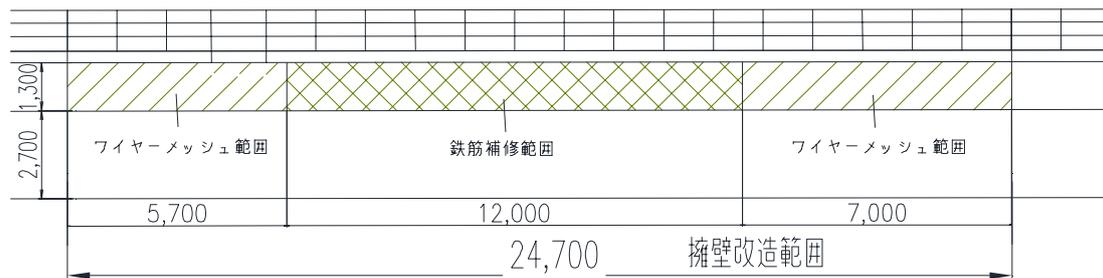


図-5 擁壁正面図

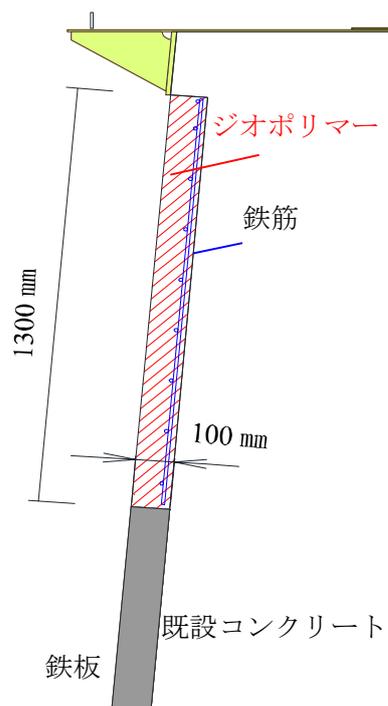


図-6 擁壁断面図



写真-1 鉄筋組立



写真-2 型枠建込

準備工として、擁壁劣化部分を表面から 100mm 程度はつり除去し、鉄筋の劣化が著しい箇所については D13@200mm の配筋を復旧した後（写真-1）、配筋にφ6@150mm のワイヤーメッシュを固定した。その後、既設擁壁面にプライマーを塗布したのち、型枠を設置した。打設口は型枠天端部に設けた（写真-2）。

(2) 施工

粉体と骨材は、プレミックス材（0.5m³/袋）として準備し、現場練り型ミキサ（二構造回転式強制練り、容量 1.0m³）を用い 0.5m³/回で製造した。プレミックス材の投入には移動式クレーンを用いた。アルカリ溶液は都度計量してミキサに投入した。

練り混ぜは、プレミックス材を入れて空練り 60 秒、アルカリ溶液を入れて 180 秒、鋼繊維を入れて 120 秒とした。ミキサから排出後、コンクリートポンプ車で施工箇所まで圧送し高さ方向に 2 層に分けて打設した。（写真-3, 4）施工ピッチは材料投入～打設完了まで 1 バッチ（0.5m³）当たり 30～40 分程度であった。

なお、打設箇所は棒状バイブレーターの挿入が困難だったため、自己充填を基本とし、補助的に壁バイブレーターを使用した。

フローは、室内試験時よりも大きい 600mm 程度となった（写真-5）が、各回のバラつきは±100mm 程度に収まり、施工性は良好であった。

また、写真-5 に示すバッチにおいてはスランプ値の経時変化を測定した。その結果、練り混ぜ直後でスランプ 21.5cm、60 分後で 23.5cm、120 分後で 23.0cm となり、2 時間経過しても施工に適した流動性を保持することを確認した。図-7 は現場配合のスランプ値と従来のジオポリマーのフロー値において、初期値を 100% としたときの流動性の変化を百分率で示したものである。この保持特性により、コンクリートポンプ車の圧送による連続施工を遂行できたことに加え、使用後のポンプ車やミキサの洗いもセメントコンクリートと同様に行うことができた。

養生は現場の外気温（測定値：9.1～24.6℃）を考慮して、施工部が直接外気に触れない程度に型枠の上からシート養生をした。また、打設後 2 週間の型枠内部の温度を測定したところ 13.4～20.8℃であった。

5. 結果

施工完了後の擁壁を写真-6 に示す。コンクリート表面には大きな気泡などは確認されず。充填状況も良好

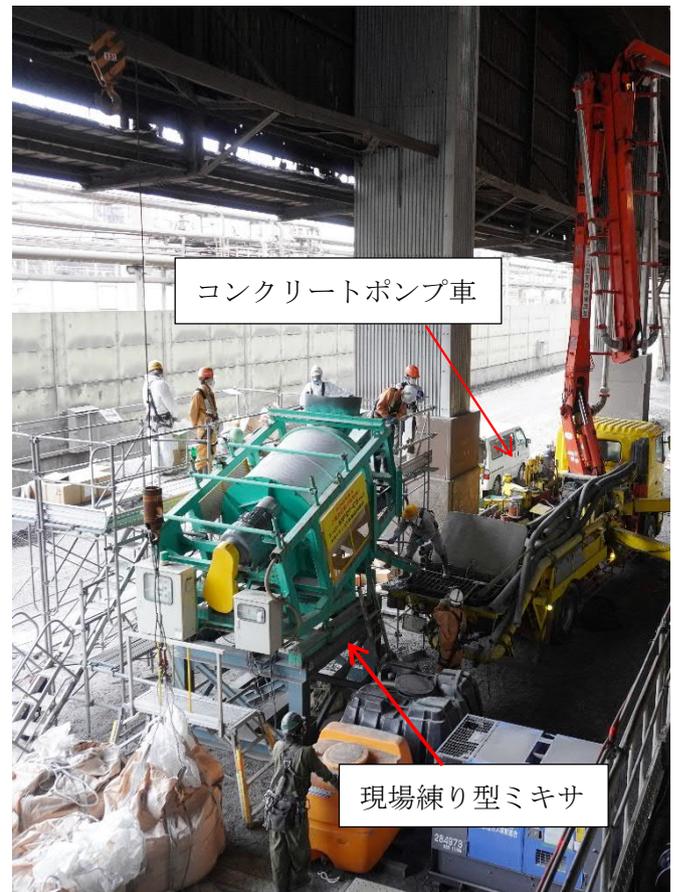


写真-3 打設状況



写真-4 排出状況



写真-5 スランプフロー試験

であった。

圧縮強度は、供試体を7日目までは現場封緘養生として、30N/mm²以上を確認したのち、8日目以降は恒温室(20°C)で封緘養生とした。28日強度は室内試験とほぼ同程度の49.1N/mm²を確認した(図-8)。

6. まとめ

ジオポリマーコンクリートの配合検討から実施工を通して得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 特殊混和剤を含む配合により、フレッシュ性状を従来よりも長時間維持できるようになった。この改善により一般的なコンクリートポンプ車での圧送施工が可能となった。
- (2) 養生や加熱の条件によっては、BS置換率が低いほど耐熱性が向上する、と必ずしも言えない。
- (3) 圧縮強度は、常温における封緘養生で、材齢とともに増加し、所要の強度を確保できる。

7. 今後の展望

ジオポリマーの実用化に向けては、現状、設計施工指針類が確立しておらず明確な設計手法がないため、今後委員会等による制定が必要となってくる。基礎研究あるいは実用化に向けた研究が多くなされてきてはいるものの、実構造物への適用例はまだ多いとは言えない。規準類が整備されていない新規材料が市場に参入するには多くの労力と長い時間を要することが、普及の大きな障壁となる。まずは、多少の要求性能を満たさないことを許容したうえで、実構造物に適用してみるのが重要であると考え。施工実績は材料普及の強みとなる。また、実際の施工を通して、あるいは竣工後の現場環境暴露における経過観察からは、より実用的な知見が得られると考える。

筆者らは、今後もジオポリマーの実用化に向けた材料開発を続けつつ、社会的ニーズに則した市場開拓を目指し、総合的な開発を進めていく予定である。

また、本稿では未報告だが、著者らは長期的な耐熱性を評価することを目的として、現在暴露試験を継続中である(2021年10月頃完了予定)。常時20°Cの屋内一般環境と、常時100°Cの屋内高温環境にOA、ORの供試体を1, 3, 6, 12ヶ月暴露後に圧縮強度試験を実施する。この途中経過については別報³⁾を参照されたい。

参考文献

- 1) 原田耕司他：蒸気養生を行わないジオポリマーコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度特性について，土木学会第71回年次学術講演会，VI-700，2016
- 2) 日本コンクリート工学会九州支部 建設材料としてのジオポリマーに関する研究委員会：建設材料としてのジオポリマーに関する研究委員会報告書，2016
- 3) 寺田豊他：流動性を高めたジオポリマーコンクリートの耐熱性評価，土木学会第76回年次学術講演会，V-111，2021

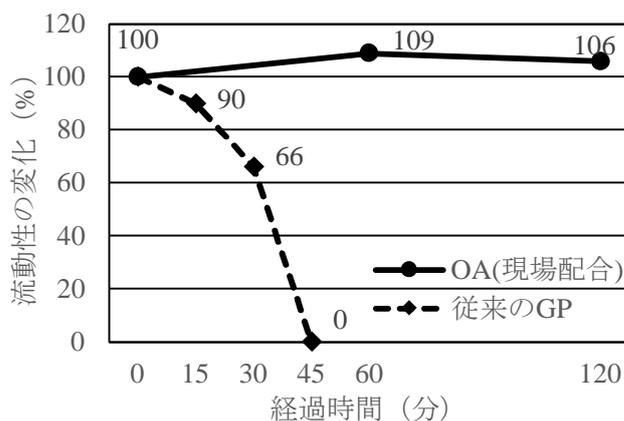


図-7 流動性の経時変化



写真-6 施工完了

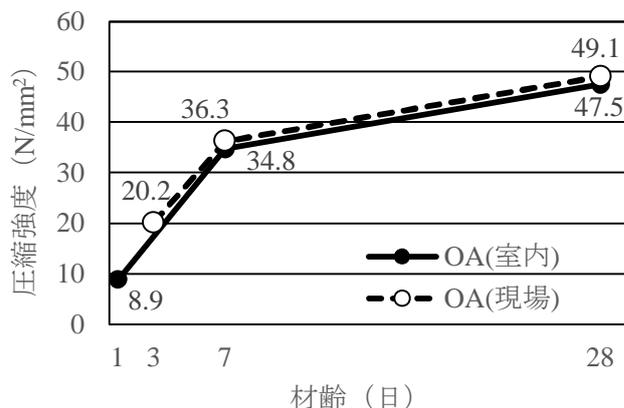


図-8 室内と現場の圧縮強度