

ジオポリマーコンクリート（セメノン®）の本体構造物への適用

加取 新^{*1}・川又 篤^{*2}

概 要

セメントコンクリートと比較して硫化水素に対する耐酸性が約 17 倍高く、かつセメントと同等の強度特性を有するジオポリマーコンクリート（GPC）を用いたシールドトンネル用セグメントを、2024 年 11 月、大阪府吹田市発注の下水道管渠整備工事において、国内で初めてシールド工法に適用した。本報では、GPC の基礎的性状、本体構造物への適用に向けた製造および性能試験の結果、ならびに本設導入時の施工状況について報告する。

キーワード：シールド，セグメント，ジオポリマーコンクリート，耐酸性，CO₂削減

APPLICATION OF GEOPOLYMER CONCRETE (CEMENON®) TO MAIN STRUCTURES

Arata KATORI^{*1}, Atsushi KAWAMATA^{*2}

Abstract

Geopolymer concrete (hereinafter "GPC"), improve acid resistance against hydrogen sulfide by approximately 17 times compared to cement concrete (hereinafter "CC"), while maintaining strength characteristics equivalent to CC. Segments for shield tunnels, which are made of GPC were applied, on our initiative, for the first time in Japan in November 2024 in the shield construction of a sewer tunnel project commissioned by Suita City, Osaka Prefecture. This report presents the fundamental properties of GPC, the results of manufacturing and performance tests conducted for the application to main structure, and the construction conditions during field implementation

Keywords: Shield tunnel, Segment, Geopolymer concrete, Acid resistance, Reduction of CO₂ emissions

^{*1} Associate General Manager, Machinery & Electrical Engineering Department, Civil Engineering Division

^{*2} Senior Principal Researcher, Material Group, Research & Development Center

ジオポリマーコンクリート（セメノン[®]）の本体構造物への適用

加取 新^{*1}・川又 篤^{*2}

1. はじめに

近年、下水道施設においては硫化水素が起因するコンクリート劣化が深刻な問題として認識されている。また、カーボンニュートラルの実現に向け、CO₂排出量削減を目指した環境配慮型コンクリートの開発も進められている。今回、セメントコンクリート（以下 CC）に比べて 17 倍の耐酸性、および CO₂排出量削減効果を有するジオポリマーコンクリート（以下 GPC）に着目し、GPC を用いたシールドトンネル用セグメントの実用化に取り組んだ。

GPC とは、アルカリに活性な粉体（アルミナシリカ粉末）と水ガラスなどのアルカリシリカ溶液との縮重合反応（分子同士が水分子を放出しながら結合して高分子化する反応）で形成されるジオポリマーに、骨材（細骨材、粗骨材）を加えた建設材料である。なお、代表的なアルミナシリカ粉末として、メタカオリン、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末などが挙げられる。その中でも本検討の GPC は、アルミナシリカ粉末にカルシウムを含む高炉スラグ微粉末を使用しないため、カルシウム成分をほとんど含まない純粋なジオポリマーに分類され、CC に比べ高い耐酸性を有している。

また、CC の CO₂排出量は、大部分がセメント製造時の高温焼成に起因するが、本検討の GPC は、従来の CC に比べて CO₂排出量を最大で約 80% 削減（LCI データベース IDEA の CO₂排出量原単位による試算）できるため、環境に配慮した新材料として位置付けられる。

2024 年 11 月に大阪府吹田市発注の下水道管渠整備工事において、GPC を用いたセグメントを、国内で初めてシールド工事に適用した。本報では、基礎的性状および本設導入に向けた製造・性能試験と本設導入時の施工状況等について報告する。

2. 基礎的性状試験概要¹⁾

2.1 基礎的性状試験項目

試験項目は、1) フレッシュ性状、2) 圧縮強度・割裂引張強度・静弾性係数、3) 耐酸性、4) 耐摩耗性、5) シールドトンネル用セグメント単体曲げ試験による耐荷力の 5 項目である。試験体は、GPC、比較用の CC とともに、セグメント用の設計基準強度 42N/mm² 相当の配合で製作した。

2.2 養生方法

GPC の養生方法は、前置き 2 時間、60℃で 14 時間（昇温は 20℃/h）、その後は自然冷却とした。

GPC の硬化は、水和反応ではなく縮重合反応であるため、自然冷却後に水中養生を実施しなかった。

一方、CC の養生方法は、シールドトンネル工法用セグメントと同条件とし、40℃で 4 時間（昇温は 13.3℃/h）、その後は自然冷却とした。CC の硬化は水和反応であるため、自然冷却後に水中養生を 24 時間実施した。

以降の養生条件は、GPC、CC とともに実際のセグメント製品と同様に環境温度での気中養生とした。

3. 試験結果

3.1 耐酸性

耐酸性試験は「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術および防食技術マニュアル」参考文献に基づき、φ100×200mm の試験体を 112 日間硫酸水溶液に浸漬した後の質量変化率を測定した。耐酸性試験前の試験体を写真-1 に、耐酸性試験後の試験体を写真-2 に示す。また、耐酸性試験結果を図-1 に示す。質量変化率は、CC が-42.2% であるのに対し、GPC が-2.4%であり、GPC は CC の約 17 倍の耐酸性を有していることが確認された。

*1 土木本部 機電部 担当部長

*2 建設技術総合センター 研究開発センター 材料グループ 主幹研究員

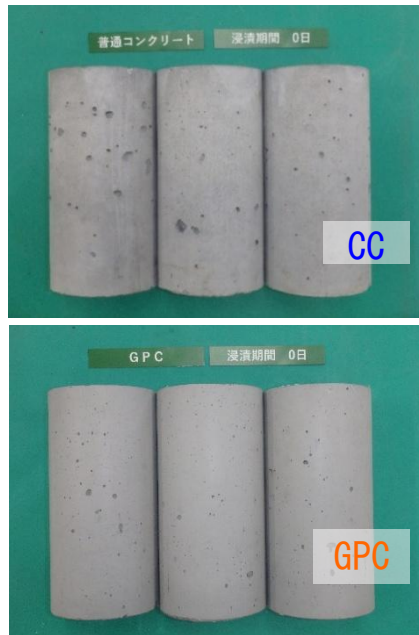


写真-1 耐酸性試験前の試験体 (上 CC, 下 GPC)

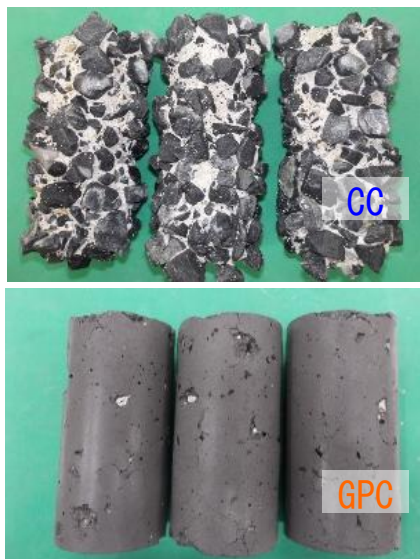


写真-2 耐酸性試験後の試験体 (上 CC, 下 GPC)

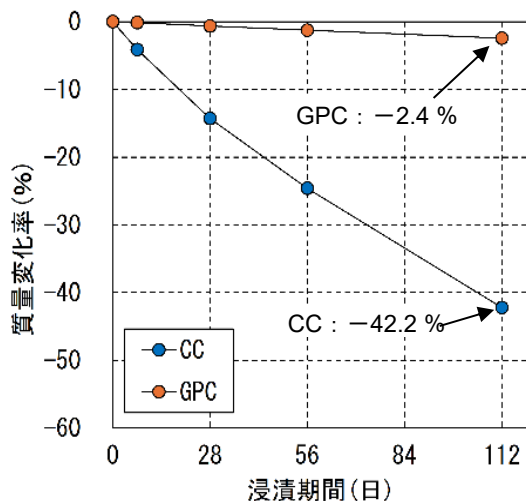


図-1 耐酸性試験結果

3.2 フレッシュ性状

GPCおよびCCのフレッシュ性状を表-1に示す。コンクリート温度はGPCでは縮重合反応の反応熱が短時間で進行するため高温であったが、スランプはCCとGPCは同等であり、打設時の施工性はいずれも良好であった。

3.3 圧縮強度・割裂引張強度・静弾性係数

圧縮強度、割裂引張強度および静弾性係数の結果を図-2～図-4に示す。材齢1年（364日）の結果で比較すると、GPCの圧縮強度および割裂引張強度はCCよりも高い結果となった。一方、GPCの静弾性係数は、CCとほぼ同等であったことから、GPCとCCが同等強度の場合には、GPCの方が低い静弾性係数になると考えられる。

表-1 フレッシュ性状一覧

種別	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	外気温 (°C)
CC	22.5	2.3	31.5	35.5
GPC	23.5	1.8	40.5	34.0

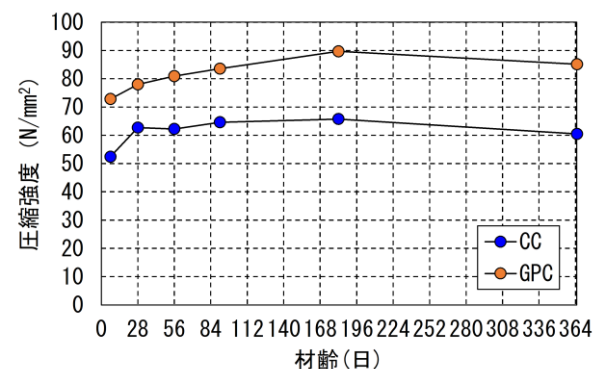


図-2 圧縮強度

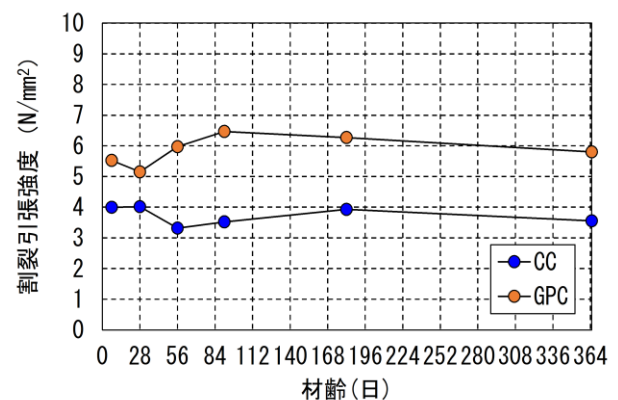


図-3 割裂引張強度

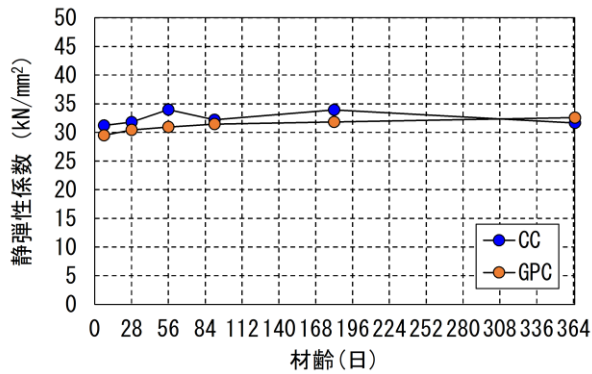


図-4 静弾性係数



写真-3 耐摩耗性試験状況

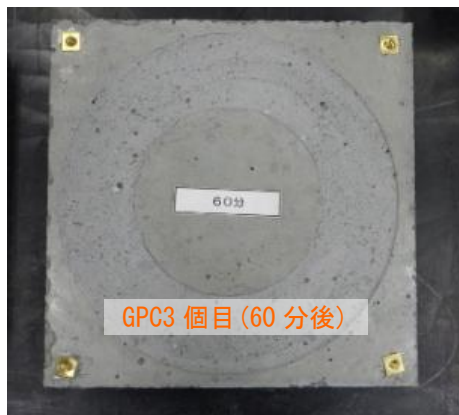


写真-4 耐摩耗性試験後の試験体

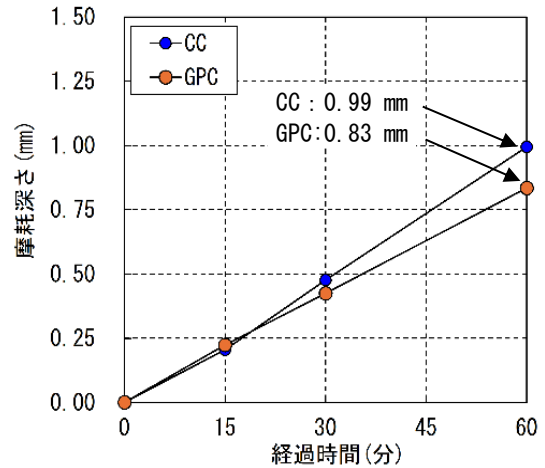


図-5 耐摩耗性

セグメントの仕様 (単位 mm)

- ・外径 : $\phi 3100$
- ・幅 : 1000
- ・厚さ : 200

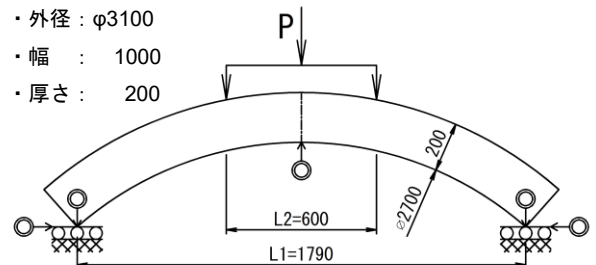


図-6 単体曲げ試験

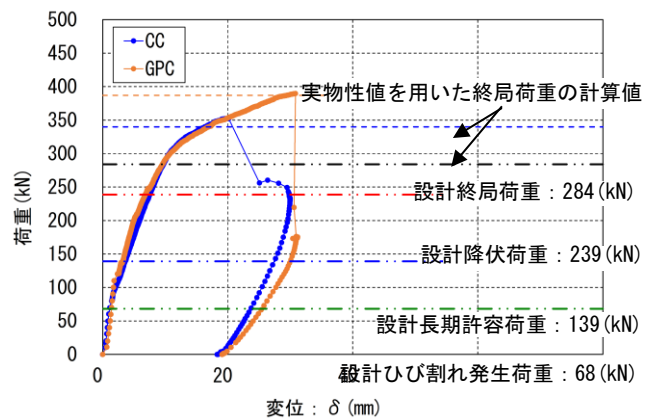


図-7 荷重変位関係図

3.4 耐摩耗性

耐摩耗性については、ASTM C779 (水平コンクリート表面の耐摩耗性のための標準試験方法) に沿った試験方法とした。試験では、写真-3 の試験機を用いて、一定荷重を負荷した状態で試験体に触れる直径 6cm の回転円盤を、研磨材を定量供給しながら 280rpm で自転させ、更にその上の直径 30cm の円盤により 12rpm で公転させた。試験後の摩耗深さ 24 点を計測し、その平均値を比較した。試験結果を写真-4、図-5 に示す。GPC は CC の約 1.2 倍の耐摩耗性を有することを確認した。

3.5 シールドトンネル用セグメント試験体による単体曲げ試験

シールドトンネル用セグメント試験体による単体曲げ試験は、図-6 に示すようにセグメント単体を両端可動支点とするアーチ状の梁とし、外面側から 2 点集中載荷し、荷重と変位を測定する試験である。

単体曲げ試験における荷重変位の関係は図-7 に示すように、ひび割れ発生後、勾配が変化し、

GPC、CC ともに最大荷重は設計終局耐力以上であった。また、破壊性状はセグメント外面側の圧壊であった。

4. 本体構造物への適用に向けた製作・試験²⁾

4.1 GPC 製セグメント製作

基礎的性状試験で確認した高い耐酸性および CO₂ 排出量の削減効果を有する GPC を使用したシールドトンネル用セグメント（外径φ3.2m、幅 0.6m、厚さ 0.196m）を製作した。フレッシュ性



写真-5 GPC フレッシュ性状



写真-6 GPC 打設状況

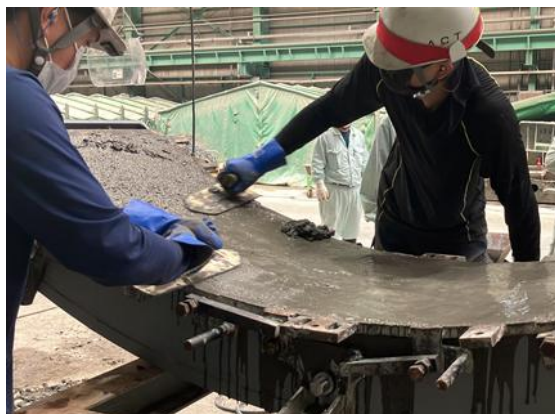


写真-7 GPC 仕上げ状況

状の確認状況を写真-5 に、コンクリート打設を写真-6 に、表面仕上げ状況を写真-7 に示す。GPCセグメントは、CCセグメントと同様の打設・仕上げ手順で製作され、通常の工程で製造できることを確認した。なお、養生方法は基礎的性状試験と同様とした。

4.2 圧縮強度の確認

圧縮強度の試験結果を表-2 に示す。GPC の圧縮強度は設計基準強度 42N/mm² を上回る強度を示し、特に初期強度の発現が大きく、材齢 28 日でも高い強度を保持していることを確認した。

4.3 製品検査

GPC を使用したセグメントの本体構造物への適用にあたり、製品検査として性能試験および寸法検査を実施した。

性能試験では、ジャッキ推力試験として写真-8 に示すシールドマシンジャッキ 1 本分に相当する荷重 (800kN) の載荷試験を実施するとともに、継手引抜き試験として把持金物に 1 リング重量の 1.5 倍相当の荷重 (84.0kN) の載荷試験を実施し、異常がないことを確認した。

また、寸法検査として、セグメント単体寸法を確認した。さらに写真-9 に示す通り、1 リング

表-2 圧縮強度試験結果

No.	脱型材齢 1 日 (N/mm ²)	材齢 28 日 (N/mm ²)
1	69.4	72.7
2	68.2	74.9
3	67.5	74.7
平均値	68.4	74.1



写真-8 ジャッキ推力試験

の水平仮組を行い、セグメント外径や継手ボルトピッチ径を計測し、いずれも許容誤差内であることを確認した。

5. 本体構造物への適用

適用箇所の平面図および横断図を図-8に、現場設置状況を写真-10に示す。前述の圧縮強度や製品検査項目について確認を行ったセグメントを、公共下水道事業におけるシールドトンネルの覆工用として、終端覆工の一部に本体構造物として適用した。

6. まとめ

シールドトンネル用セグメント配合として設計された GPC と CC による各種試験を実施し、性能を評価した。また、実際のセグメント製品を製造し、単体曲げ試験を行い、所定の強度が確保されることを確認した。さらに、GPC を使用したセグメントの製作から製品検査を行い、本体構造物への適用条件について満足することを確認した。

今後の展開として、高い耐酸性を有しかつ、CO₂を大幅に削減する GPC のさらなる適用拡大が期待される。特に、下水道の汚泥ピットや貯留管等、酸性環境下での耐腐食性能が求められる場所での利用が見込まれる。GPC を多くのプロジェクトで二次製品に適用することにより、持続可能な社会の実現に貢献できると考えている。



写真-9 水平仮組試験

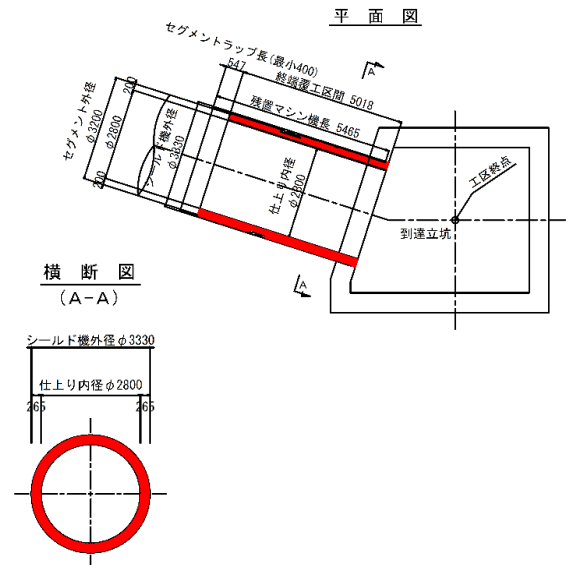


図-8 終端覆工施工箇所（着色部）



写真-10 GPC セグメント現地設置状況

謝辞

本報執筆にあたり、ジオポリマーコンクリート（セメノン®）の実用化に向けた各種試験を共同研究開発で実施した株式会社 IKK 関係者より、試験計画や結果に対する貴重なアドバイスをいただきました。心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 峯崎 晃洋ほか：セメントを使用しないジオポリマーコンクリート（セメノン®）の実用化（その1），土木学会第80回年次学術講演会 第V部門，2025.
- 2) 加取 新ほか：セメントを使用しないジオポリマーコンクリート（セメノン®）の実用化（その2），土木学会第80回年次学術講演会 第VI部門，2025.

2026年7月27日発行