

# 脱炭素社会と新たな価値創造を実現する建設新材料 ジオポリマーコンクリートの開発

木 作 友 亮・倉 田 幸 宏

カーボンニュートラルの実現に向け、土木・建築分野でも CO<sub>2</sub> 排出の少ない材料が求められつつあり、大きく排出量を低減できるジオポリマーが注目されている。ジオポリマーの理解を深めるために様々な試験を実施し、圧縮強度と静弾性係数との間に線形の相関が見られること、高い耐酸性を有すること、線膨張係数はセメントコンクリートと大きく異なること等を確認した。実構造物への適用に向けては、下水道シールドセグメントを試作し、高い付着強度に注意すれば製造に大きな問題はないことが分かった。セグメントの単体曲げ試験では、セメントコンクリートと同等の構造性能が得られることを確認した。

キーワード：ジオポリマー、CO<sub>2</sub> 削減、メタカオリン、耐酸性、セグメント

## 1. はじめに

18世紀の産業革命以降、人類が排出する CO<sub>2</sub> は増加の一途をたどっている。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の報告<sup>1)</sup>によれば、気候変動対策を実施して21世紀末の気温上昇を約 1.5℃に抑えるシナリオ「SSP1-1.9」を実現できれば、2081～2100年の気温上昇を 1.0～1.8℃に抑えられると予測されている。シナリオ「SSP1-1.9」の実現には、2050年頃までに温室効果ガスの排出量を実質ゼロにするカーボンニュートラルが必要だとされており、2020年10月に我が国でも2050年カーボンニュートラルが宣言された。この実現は容易ではなく、産業界が一丸となって取り組むべき重要課題であると考えられ、土木・建築分野でもカーボンニュートラルに寄与する技術の開発が求められている。

これに対して近年では、産業副産物の高炉スラグ微粉末やフライアッシュを活用することでセメントの使用量を低減した環境配慮型コンクリートやCCU (Carbon dioxide Capture and Utilization) 技術を活用したコンクリート等が発表されている<sup>例えば2)</sup>。これらの他にも、セメントを全く使用しないことから CO<sub>2</sub> 排出量を削減することができ、高い耐酸性や耐熱性といった特徴を有する新素材のジオポリマーが注目されている。しかし、ジオポリマーは比較的新しい材料であることから、長い歴史を有するセメントコンクリートに比べれば、技術的な知見は限定的であると言える。そこで、ジオポリマーのさらなる理解を目的とし

て、主として基本特性に関わる様々な試験を実施する。また、構造物への適用に向けて鉄筋ジオポリマーコンクリートの二次製品を試作するとともに、構造試験で一般的な鉄筋コンクリート構造との差異を確認する。

## 2. ジオポリマーコンクリートの概要

ジオポリマーは、アルミナシリカ粉末 (以降、活性フィラーと呼ぶ) とアルカリ溶液との縮重合反応で硬化する固化体の総称であり、1990年代にフランスの Davidovits 博士によって命名された。ジオポリマーの反応機構を図-1に示す。活性フィラーの化学結合が、ジオポリマーに含まれるアルカリ成分によって切断され、ケイ素やアルミニウムを含むモノマーが生成される。これらが縮重合反応によって、カリウムやナトリウムを取り込みながらネットワークを形成し、ジオポリマーとして硬化する。

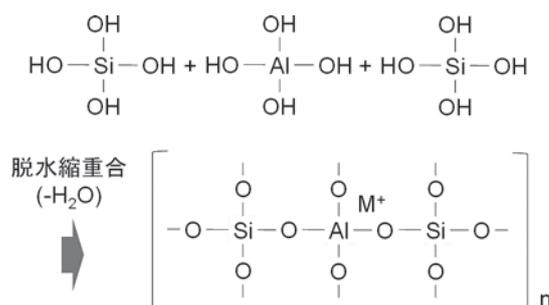


図-1 一般的なジオポリマーの反応機構

ここでは、主に土木や建築向けの構造体に適用することを想定し、セメントコンクリートと同様に細骨材や粗骨材を使用することを前提とする。本書では、骨材を含まないものをジオポリマーペースト、細骨材のみを含むものをジオポリマーモルタル、両者を含むものをジオポリマーコンクリートと呼ぶことにする。土木・建築向けのジオポリマーコンクリートは、活性フィラーにフライアッシュと高炉スラグ微粉末を使用したものが主流であるが、これらはカルシウム成分を多く含むものであり、厳密にはジオポリマー（区分 GP）と区別するために AAMs (Alkali Activated Materials) と呼ばれている<sup>3)</sup>。著者らは、横浜国立大学およびアドバンエンジンとともに、メタカオリンを主体とした GP に該当する「セメノン™」を開発した。以降は、「セメノン™」のことを単にジオポリマーと表現する。

### 3. ジオポリマーコンクリートの基本特性と応用可能性

#### (1) 圧縮強度およびスランプ

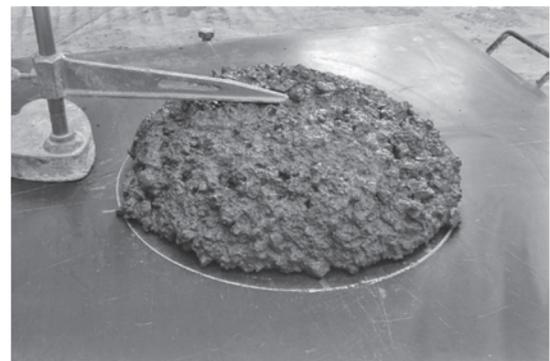
ジオポリマーコンクリートは、配合によって強度発現性が異なるものの、常温でも硬化は可能である。しかし、加温養生を行うことで、より短期的にその性能を高めることができる。開発したメタカオリン主体のジオポリマーコンクリートは、加温養生を行うことによって、100 N/mm<sup>2</sup> 程度の圧縮強度を得ることができる。同配合でスランプやスランプフローを測定すると、概ね中流動コンクリートと同等の 21 cm、400 mm 程度が得られる（写真—1）。ただし、アルカリ剤を含むジオポリマーコンクリートの粘度は、セメントコンクリートに比して大きいため、スランプが大きいからといって容易にポンプ圧送できるわけではない点に注意が必要である。

#### (2) 圧縮強度と静弾性係数の関係

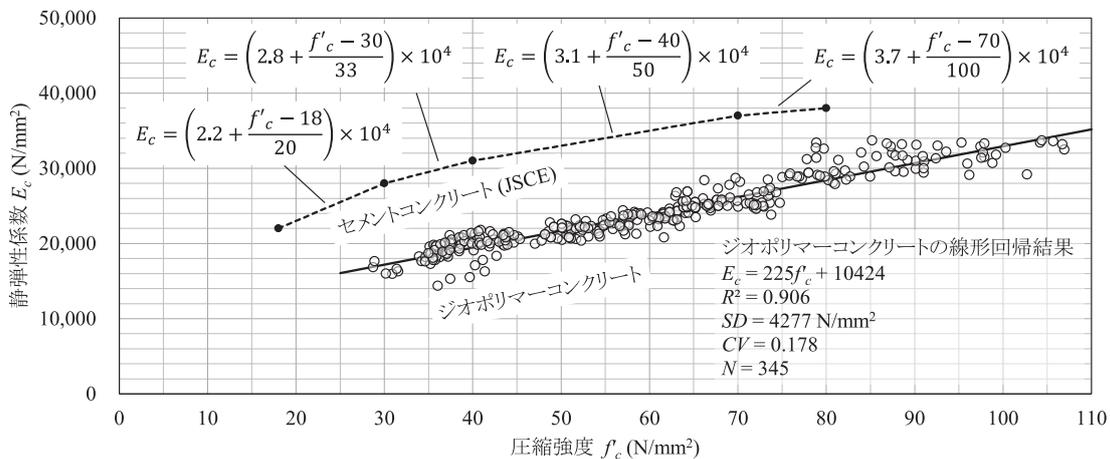
セメントコンクリートとジオポリマーコンクリートは、それぞれ水和反応と縮重合反応といった異なるメカニズムで硬化することから、圧縮強度が同じでも変形特性は異なる。開発したメタカオリン主体のジオポリマーコンクリートについて、圧縮強度と静弾性係数の関係を図—2 に示す。参考のため、土木学会のコンクリート標準示方書<sup>4)</sup> に掲載されているセメントコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係も示している。同一の圧縮強度であれば、セメントコンクリートに比べて、ジオポリマーコンクリートの静弾性係数は小さいことが分かる。図—2 に示した試験データは、活性フィラーの組合せ、アルカリ剤の組合せ、加温養生条件等が様々であるが、それでも広い圧縮強度の範囲で、静弾性係数との間に線形関係が認められる。

#### (3) 線膨張係数

セメントコンクリートとジオポリマーコンクリートの両者について、中心に埋込み型ひずみ計を設置した 100×100×400 mm の角柱供試体を作製した。硬化後に雰囲気温度を 20℃ から 70℃ の範囲で変化させ、昇温時における硬化体の内部温度とひずみとの関係か



写真—1 コンсистенシーの確認



図—2 圧縮強度と静弾性係数の関係

ら、線膨張係数を求めた。その結果を図-3に示す。ジオポリマーコンクリートの線膨張係数は、 $9.5 \mu/\text{C}$ であり、一般的なセメントコンクリートの $10 \mu/\text{C}$ と同程度もしくは僅かに小さい結果を示した。

#### (4) 硬化体の pH

セメントコンクリートの pH は、12～13程度と言われている<sup>例え5)</sup>。鉄筋コンクリート構造内の鉄筋は、アルカリ環境下で不動態被膜が発生することで発錆が抑制されている。ジオポリマーコンクリートであっても、補強材として内部に鉄筋を配置することが考えられるため、ジオポリマーマトリクスの pH を測定した。セメントペースト硬化体（普通ポルトランドセメント、水セメント比 46%）とジオポリマーペースト硬化体を  $75 \mu\text{m}$  以下の粉末に粉碎し、固液比 1:1 の割合で純水に成分を溶出させ、pH 計で液相の pH を測定した。図-4に示すように、セメントペーストの pH が 13.4 であったのに対し、ジオポリマーペーストの pH は 13.1 であった。配合にもよるが、ジオポリマーペーストの pH は、概ねセメントコンクリートペーストと同程度であることが分かった。

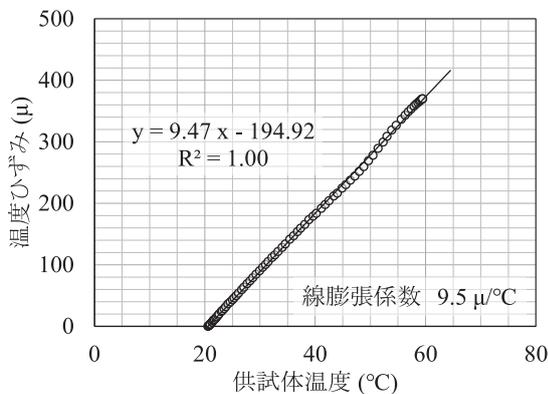


図-3 昇温時の内部温度とひずみの関係

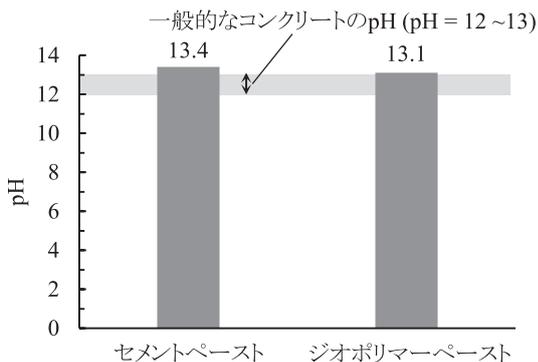


図-4 pH の比較

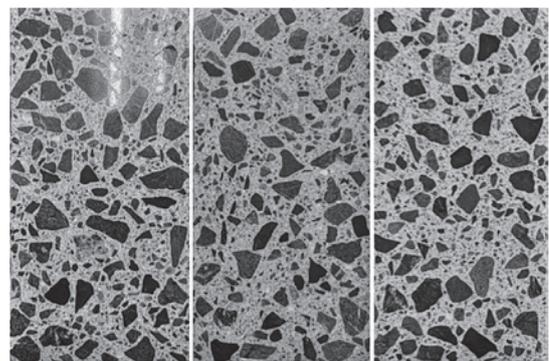
#### (5) マクロ組織

セメントコンクリートとジオポリマーコンクリートのマクロ組織を比較するため、デジタルマイクロスコープによって硬化体の断面を観察した。スランブ 8～12 cm 程度の普通コンクリート（普通ポルトランドセメント、単位水量  $155 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、水セメント比 62%）、スランブ 21 cm 程度の中流動コンクリート（普通ポルトランドセメント、単位水量  $170 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、水セメント比 46%）、ジオポリマーコンクリートの 3 種類を観察対象とした。 $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$  の円柱供試体の中心を縦方向に切断し、鏡面研磨した切断面を観察面とした（写真-2）。観察面に赤染料を塗布してから溶剤で拭き取り、欠陥部を赤く染色してからデジタルマイクロスコープで観察した。

各材料の観察結果を図-5に示す。普通コンクリートは、気泡や細骨材をつなぐひび割れが観察された。中流動コンクリートは、ひび割れは少なかったが、ブリーディングが影響したと考えられる骨材界面の遷移帯が観察された。一方、ジオポリマーコンクリートは、セメントコンクリートのように色合いにムラがなく、一様なペーストマトリクスを形成していた。また、骨材周囲や気泡周りにもマイクロクラックや欠陥は見当たらなかった。

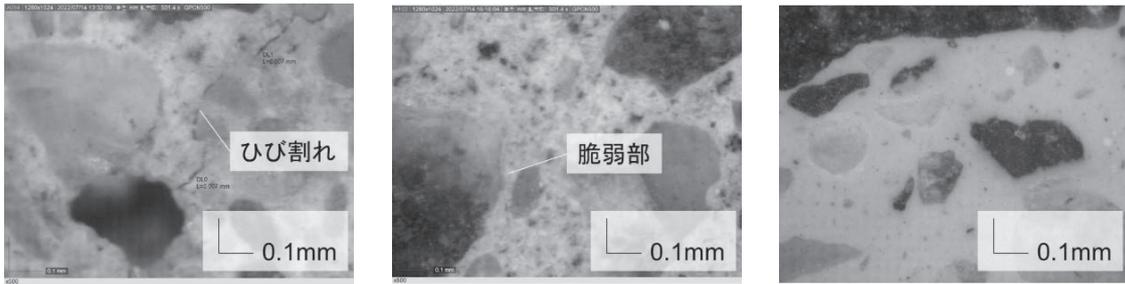
#### (6) 透水性

物質の浸透性を比較するため、代表的にセメントコンクリート（普通ポルトランドセメント、単位水量  $170 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、水セメント比 46%）とジオポリマーコンクリートの透水試験を行った。本試験では、水の浸透深さと加圧条件から透水係数を求めるインプット法を採用し、 $5.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$  の水圧を 2 時間加えて拡散係数を求めた<sup>6)</sup>。各材料の透水試験結果を図-6に、割裂後の供試体断面を写真-3に示す。ジオポリマーコン



(a) 普通コンクリート (b) 中流動コンクリート (c) ジオポリマーコンクリート

写真-2 マクロ組織の観察用試料



(a) 普通コンクリート (b) 中流動コンクリート (c) ジオポリマーコンクリート

図-5 デジタルマイクロスコープによる観察結果

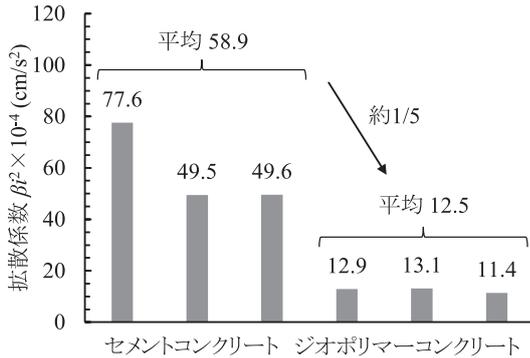


図-6 各材料の透水試験結果

マーコンクリートは内部欠陥が少ないからだと考えられる。

(7) 耐酸性

ジオポリマーコンクリートは、耐酸性が高いことで知られている。そこで、下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル<sup>7)</sup>に基づき、セメントコンクリートとジオポリマーコンクリートの耐酸性を比較した。各材料の円柱供試体を5%硫酸水溶液に112日浸漬し、質量変化を測定した。その結果を図-7に示す。セメントコンクリートの質量が48%低下したのに対し、ジオポリマーの質量は3.4%の低下に留まり、高い耐酸性を有することが確認された。

(8) 中性子遮蔽ジオポリマーの実現性

各種放射線の中でも、中性子線は遮蔽が難しい。遮蔽に有効な物質としてホウ素が挙げられ<sup>8)</sup>、ホウ素を含む中性子遮蔽コンクリートが開発されてきた。しかし、ホウ素が水和反応を阻害して強度を著しく低下させる問題があった。そこで、全く硬化反応が異なるジオポリマーについて、ホウ素含有の可能性を検証し



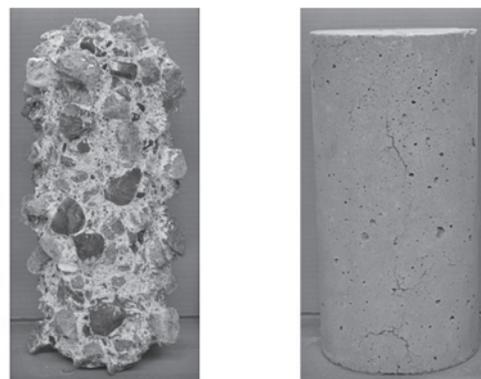
(a) セメントコンクリート



(b) ジオポリマーコンクリート

写真-3 透水試験後の供試体断面

クリートの拡散係数 ( $12.5 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ) は、セメントコンクリート ( $58.9 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ) の1/5程度であることが分かった。普通コンクリートでは、骨材周囲等で局所的に深く浸透する領域が見られたが、ジオポリマーコンクリートの浸透深さは場所によらず一定であった。こうした違いが生じるのは、デジタルマイクロスコープの観察で明らかとなったように、ジオポリ



3体平均の質量減少率 48% (a) セメントコンクリート  
3体平均の質量減少率 3.4% (b) ジオポリマーコンクリート

図-7 耐酸性の比較

た。ホウ素を含む鉱物であるコレマナイトを細骨材としたジオポリマーモルタルの圧縮強度試験結果を表一1で比較する。コレマナイトを細骨材に使用した場合でも  $47.4 \text{ N/mm}^2$  の圧縮強度を示し、陸砂から18%の強度低下にとどまった。このことから、ジオポリマーであれば、コレマナイトを含む配合であっても、構造物に適用できる程度の圧縮強度が得られることが分かった。

#### 4. ジオポリマーコンクリート製セグメントの試作

##### (1) 概要

3章では、主にジオポリマーコンクリートの基本特性を紹介したが、実際には鉄筋を配置した鉄筋ジオポリマーコンクリートとして利用されることが多いと想定される。ここでは、ジオポリマーコンクリートによる二次製品の試作例や載荷試験の例を紹介する。

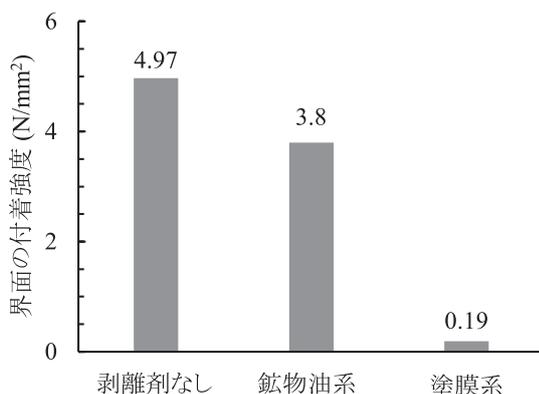
##### (2) 鋼製型枠への付着

ジオポリマーコンクリートは、セメントコンクリートに比べて金属に対する付着力が大きいことが知られている。そのため、鋼製型枠を用いてジオポリマーコンクリートの二次製品を製作する場合、適切な剥離剤を選定することが重要となる。そこで、建研式接着力試験器を用いて、鋼とジオポリマーコンクリート界面の付着強度を測定した。その結果を図一8に示す。剥

表一1 圧縮強度試験結果の比較

	Case 1	Case 2
細骨材	陸砂	コレマナイト
S/B (wt%)	3.01	4.03
圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	58.0 (1.00)	47.4 (0.82)

\* Sは細骨材, Bは結合材(活性フィラー)



図一8 界面条件を変化させた付着強度

離剤を用いない場合、界面の付着強度は  $4.97 \text{ N/mm}^2$  であり、非常に高い値を示すことが分かる。セメントコンクリート製品の製造で用いられる鉱物油系の剥離剤を用いることで、界面の付着強度は  $3.80 \text{ N/mm}^2$  まで低下したが、それでも一般的なセメントコンクリートの付着強度に比べて高い値となる。鹿島らの研究<sup>9)</sup>で付着強度の低減効果が見られた塗膜系の剥離剤を用いることによって、付着強度が  $0.19 \text{ N/mm}^2$  まで低下した。このことから、鹿島らの報告にあるように、塗膜系の剥離剤を用いてジオポリマーコンクリートと鋼を完全に遮断することが、有効な対策であると考えられる。一方、鋼と強力に付着することから、ジオポリマーコンクリートに埋め込んだ鉄筋は、セメントコンクリートに比べて引抜き抵抗力が大きくなる。このことから、ジオポリマーコンクリートでは、鉄筋の重ね継手長さやアンカーの定着長さを低減できる可能性があるものと推察される。

##### (3) セグメントの試作

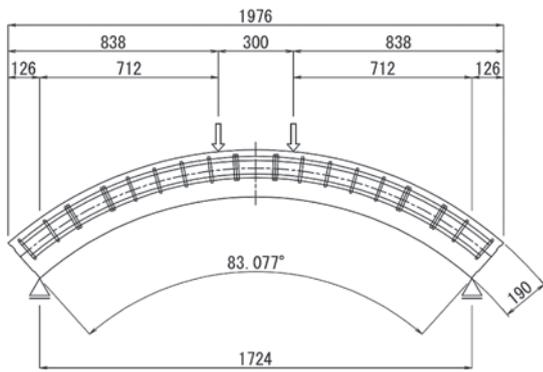
次に、ジオポリマーコンクリートでシールドセグメントを試作した。試作品の外観を写真一4に示す。剥離剤の選定に気を付けることで、セメントコンクリートと同様にジオポリマーコンクリートの二次製品を製作することができる。加温養生条件やジオポリマーの配合を変更することで、脱型時期を調整することも可能であるため、製作の実態に合わせて合理的な工夫を施す余地もある。

##### (4) セグメント単体曲げ試験の例

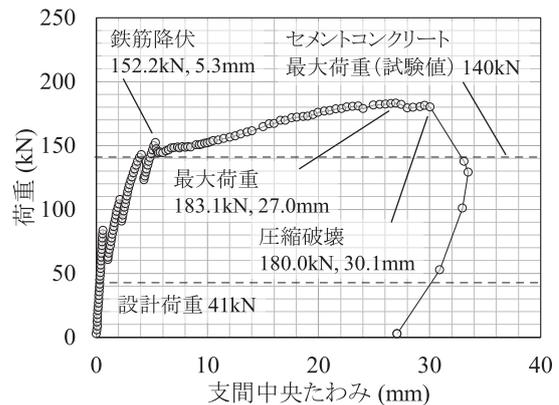
既報<sup>10)</sup>で、鉄筋ジオポリマーコンクリート梁の静的4点曲げ載荷試験の例を紹介したが、ここでは下水道シールドセグメントの単体曲げ試験(静的4点曲げ載荷試験)の例を紹介する。載荷試験の概要と試験状況をそれぞれ図一9および写真一5に示す。載荷試験の諸元は、日本下水道協会の規格<sup>11)</sup>に基づいている。アーチアクションの影響を低減するため、両支点とも回転と水平移動を許容する点が、梁の載荷試験とは異なる。試験で得た荷重と支間中央たわみの関係を



写真一4 セグメント試作品の外観



図一 9 荷重試験の概要



図一 10 荷重と支間中央たわみの関係



写真一 5 荷重試験の状況

J C M A

《参考文献》

- 1) Lee, H. et al, Synthesis report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6), Longer report, IPCC, 2023
- 2) 久田真ら, 環境配慮型コンクリートの全体像と今後の展望, コンクリート工学, Vol.60, No.10, pp.881-887, 2022
- 3) 土木学会, コンクリート技術シリーズ No.132, 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 (361 委員会) 成果報告書, 2022.
- 4) 土木学会, コンクリート委員会 コンクリート標準示方書改訂小委員会, 2022 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2023
- 5) 小林一輔, コンクリートの炭酸化に関する研究, 土木学会論文集, No.433, pp.1-14, 1991
- 6) 村田二郎, コンクリートの水密性の研究, 土木学会論文集, No.77, pp.69-103, 1961
- 7) 日本下水道事業団, 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル, 2017
- 8) 大石晃嗣, 原子炉施設の遮蔽材料, コンクリート工学, Vol.31, No.11, pp.49-53, 1993
- 9) 鹿島大雄ら, 各種離型剤によるジオポリマーモルタルと鋼板の剥離性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.2053-2058, 2017
- 10) 木作友亮ら, ジオポリマーコンクリート「セメノン」の開発とその特性, コンクリートテクノ, Vol.42, No.8, pp.68-73, 2023
- 11) 日本下水道協会, シールド工用標準セグメント 標準 RC セグメント, 2001

図一 10 に示す。荷重初期で荷重の増減が見られるが、これは下水道セグメントであることから、トンネル内面側にかぶりに加えて厚さ 50 mm の防食被覆層を設けていることが影響している。ジオポリマーコンクリートのセグメントであっても、鉄筋降伏の後に圧縮破壊に至る曲げ引張破壊を呈している。セグメントの曲げ耐力は設計荷重を大きく上回り、また同諸元のセメントコンクリートに比べて耐力やじん性は劣るものではないことが確認された。

5. おわりに

メタカオリンを主体とした GP である「セメノン™」について、基本特性、二次製品の製造性、構造性能について述べた。ジオポリマーコンクリートは、CO<sub>2</sub> 排出量が削減できるだけでなく、セメントコンクリートとは異なる特徴を有する材料である。ジオポリマーコンクリートだから実現できることに焦点をあて、特徴を活かした使い方をするのが今後の発展に有効だと考える。本研究に際しては、横浜国立大学の藤山知加子教授およびアドバンエンジの方々にご多大なご協力をいただきました。ここに、深く感謝を申し上げます。

【筆者紹介】



木作 友亮 (きさくともあき)  
 (株) IHI  
 技術開発本部 技術基盤センター  
 主任研究員



倉田 幸宏 (くらた ゆきひろ)  
 (株) IHI 建材工業  
 技術本部 開発部  
 部長