

環境配慮コンクリート（T-eConcrete）の 電力洞道新設工事におけるシールドインバート部材への実装

松元 淳一^{*1}・堀口 賢一^{*1}・俵積田 新也^{*2}・橋本 聡^{*3}・宮口 往久^{*4}・出雲 力斗^{*5}

Keywords : environmentally friendly concrete, cement-zero type, carbon-recycle, coal gasification slag fine aggregate, shield Invert
環境配慮コンクリート, セメント・ゼロ型, Carbon-Recycle, 石炭ガス化スラグ細骨材, シールドインバート

1. はじめに

近年、地球温暖化対策のひとつとして、各方面において二酸化炭素排出量を抑制することが推進されている。コンクリートの分野では、二酸化炭素排出原単位が小さい、コンクリート用混和材を積極的に使用することが考えられている。このような背景のなかで、著者らは高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を、従来の混合セメントよりも多く使用したコンクリート（以下、環境配慮コンクリートと称する）の研究・開発を進めている^{1)~8)}。

図-1に、混和材を使用してポルトランドセメントの使用量の低減によりCO₂排出量を抑制した環境配慮コンクリート（T-eConcrete）を示す。この中で、ポルトランドセメントを使用せず、代替として副産物である高炉スラグ微粉末を消石灰などの刺激材で硬化させるセメント・ゼロ型は、コンクリートの使用材料や製造段階での計量・投入方法や品質管理項目を定め、多くの構造物へ展開を行っている。一例として、写真-1にはシールドトンネル構造物に適用した事例を示しているが、シールドセグメントやインバートブロックへ大量の施工実績を積み上げている。一方、カーボンリサイクル技術によりCO₂を資源として転換した炭酸カルシウムを環境配慮コンクリートに添加し、「カーボンネガティブ」を実現したCarbon-Recycleは、写真-2に示すように、弊社技術センター内の実験施設に設けた橋の基礎部に適用を行っており、二次製品工場で通常のコンクリート製品と同様の工程で製作することができ

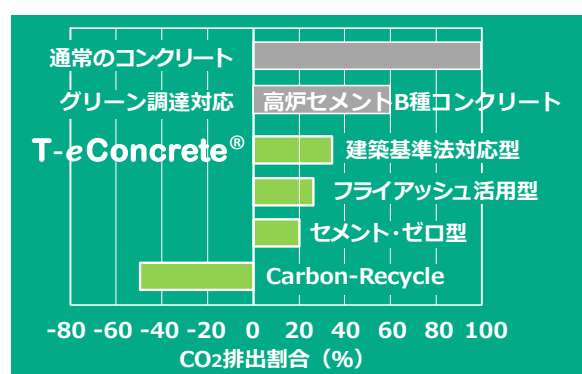


図-1 T-eConcrete の CO₂ 排出削減効果
Fig.1 CO₂ emissions reduction effect of T-eConcrete



写真-1 セメント・ゼロ型の現場展開製品
Photo.1 On-site application status of cement-zero type



写真-2 Carbon-Recycle の現場設置状況
Photo.2 On-site application of carbon-recycle

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 コンクリートGX研究室
*2 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室
*3 千葉支店 土木室

*4 千葉支店 土木工事作業所
*5 東京電力パワーグリッド（株）

た。今後はこれらのセメント・ゼロ型やCarbon-Recycleの更なる展開を推進する。

ここでは、セメント・ゼロ型および Carbon-Recycle の現地適用性の評価、現場適用状況について述べる。

2. インバート部材への適用に向けた検討

2.1 コンクリート物性評価

環境配慮コンクリートのセメント・ゼロ型や Carbon-Recycle は高炉スラグ微粉末を多量に使用するため、塩化物イオン浸透に対する抵抗性や硫酸塩抵抗性は高い。ここでは、製造工場で選定した配合の圧縮強度発現性について述べる。また、一部のインバート部材には、環境配慮コンクリートのセメント・ゼロ型を構成する材料の細骨材部分に、次世代発電システムとして注目されている、発電量当たりのCO₂排出量を下げた石炭ガス化複合発電で得られる副産物（以下、石炭ガス化スラグ細骨材と称する）を取り入れ、更なる副産物利用を目指したコンクリートを適用しており、その代表的な適用性検討結果についても併せて述べる。

実験に用いた供試体は、圧縮強度試験が直径 10cm×高さ 20cm の円柱供試体であり、乾燥収縮試験については□100×100×400mm の角柱供試体である。コンクリート型枠打込み後の養生については、(1) 前置き、(2) 前養生、(3) 本養生、および (4) 後養生の 4 つの工程とし、養生温度および時間は、前置き：製造から仕上げまでの 3～5 時間、前養生：20℃-4 時間（20℃一定で 4 時間保持）、本養生：50℃-3 時間（最高温度 50℃到達後 3 時間保持）、後養生：気中（屋内 20℃恒温室）とし、管理材齢は 14 日とした。なお、試験の材齢は材齢 1 日、材齢 7 日および材齢 14 日とした。

セメント・ゼロ型は 4 つの異なる工場、Carbon-Recycle は製造工場の圧縮強度の経時変化を図-2 に示す。ここで、セメント・ゼロ型は 4 つの異なる工場のなかで、D 工場のみ、練混ぜ性や施工性を向上させるために、単位水量を幾分増加させた配合である。また、Carbon-Recycle については、CO₂ 排出量をマイナスにするために炭酸カルシウムを混入するが、それにより、練混ぜ性や施工性が低くなるため、高炉スラグ微粉末などの結合材料を少なくさせた配合とした。

図-2 によれば、セメント・ゼロ型の場合、脱型時の初期強度はいずれも参考値（セグメント脱型時強度 15～20N/mm²）を上回っていたが、工場により強度差が認められた。これに対して、脱型後以降の強度発現

性は通常のコンクリートと同じく良好であり、材齢 14 日では、水結合材比を幾分大きくした D 工場を除き、ほぼ同程度の強度発現性であった。

Carbon-Recycle は高炉スラグ微粉末などの結合材量が少ないため圧縮強度発現性も低いが、材齢とともに強度増加傾向が認められている。なお、適用予定のシールドインバート部材の設計基準強度は 30N/mm² であり、管理材齢 14 日では十分に上回っていた。

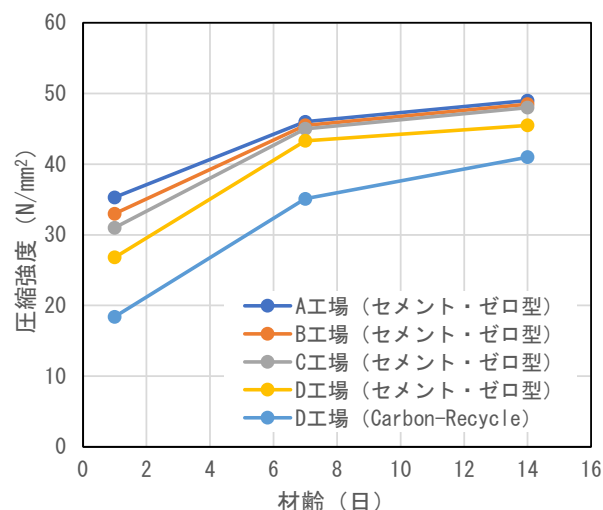


図-2 圧縮強度の経時変化

Fig.2 Compressive strength of Concrete



写真-3 セメント・ゼロ型の打込み状況
Photo.3 Cement-zero type casting



写真-4 インバートの脱型後の外観
Photo.4 Condition after invert demolding

2.2 シールドインバート部材の製作性評価

2.2.1 セメント・ゼロ型

写真-3 にセメント・ゼロ型の打込み状況を示す。セメント・ゼロ型は粉体量が多いため粘性が高かったが、振動締固めを行うことで、打込み性は通常のコンクリート製品と同様であった。また、コテ仕上げにおいても均すことに若干時間を要したが、こちらも通常のコンクリートと同じく、良好な仕上げ性であった。

写真-4 にセメント・ゼロ型で製造したインバート部材の脱型後の外観を示す。ひび割れや色むらなどの変状は見られなかった。また、脱型後の寸法検査においても、0mm～+2.0mm 内の許容範囲にあった。

2.2.2 Carbon-Recycle の製作性

写真-5 に Carbon-Recycle のスランプフロー試験終了後のコンクリートの広がり状況を示す。練上り時の流動性は高粘性による充填不良を防ぐため、スランプフローは $600 \pm 75\text{mm}$ で管理した。工場の実機練りミキサにて練混ぜを行った後のスランプフロー試験では所定の流動性も得られ、その広がり状況は、材料分離もなく極めて良好であった。

写真-6 および写真-7 に Carbon-Recycle の打込み状況、脱型後の外観をそれぞれ示す。セメント・ゼロ型と同じく粘性は高かったが、工場設備の範囲内で振動締固めや仕上げを行い、シールドインバート部材なども十分に製造できることを確認した。また、脱型後の外観も良好であり、ひび割れや色むら等の変状は認められなかった。また、脱型後の寸法検査においても、所定の許容範囲内にあった。これにより、粘性が高い環境配慮コンクリート二次製品の製作は、特別な機材等ではなく、通常のコンクリート製品と同様にできることを確認した。

3. 石炭ガス化スラグ細骨材のセメント・ゼロ型への適用性検討

3.1 石炭ガス化スラグ細骨材

石炭ガス化複合発電は、蒸気のみで発電する一般的な発電ではなく、石炭をガス化し、ガス・蒸気タービンを使った発電であり、同じ発電電力量で比較すると、通常のものに比べ、石炭の使用量を約 15%抑えられ、これに伴い、 CO_2 排出量も 15%削減できると示されている（図-3）。石炭ガス化スラグ骨材は、石炭をガス化する際に生成されるものであり、コンクリート用骨材の物性としては、密度は大きく、吸水率は小さい⁹⁾。写真-8 に IGSS スラグ細骨材を示した。



写真-5 Carbon-Recycle の広がり状況
Photo.5 Slump flow spread of Carbon-Recycle



写真-6 Carbon-Recycle の打込み状況
Photo.6 Carbon -Recycle casting



写真-7 Carbon-Recycle の脱型後外観
Photo.7 Condition after invert demolding

3.2 検討内容

3.2.1 ブリーディング

既往の文献によると、石炭ガス化スラグ骨材を用いた場合、ブリーディングは大きくなるとの結果が得られている⁹⁾。その一方で、環境配慮コンクリートは粉体量が多いため、ブリーディングは殆ど認められない。これらを組み合わせるによるブリーディングの抑止効果について検討を行った。

3.2.2 アルカリシリカ反応

既往の文献によると、石炭ガス化スラグ骨材はナトリウム、カリウムを多く含んでいるものが多い。そのため、アルカリシリカ反応による膨張性は大きくなる結果が認められている⁹⁾。一方、環境配慮コンクリートは極限まで高炉スラグ微粉末を使用しているため、アルカリシリカ反応性は低い。これらを組み合わせるによるアルカリシリカ反応の抑止効果について検討を行った。

3.3 検討結果

3.3.1 ブリーディング

図-4 に各コンクリートのブリーディング測定結果を示す。石炭ガス化細骨材はガラス化質であり、保水性に乏しいため、ブリーディングは大きくなる傾向があると言われているが、環境配慮コンクリートと組み合わせることで、ブリーディングの発生を抑止できることが分かった。ただし、そのなかでも、混合率が大きくなるとブリーディング量は多くなる傾向は認められている。

3.3.2 アルカリシリカ反応

図-5 にモルタルバー法における膨張率の経時変化を示す。これによれば、比較用の普通コンクリート（石炭ガス化スラグ細骨材混合率 50%）は膨張率が 0.1% を上回ったが、高炉スラグ微粉末を大量に使用する環境配慮コンクリートに混入した場合、膨張は認められず、特に石炭ガス化スラグ細骨材の混合率が 50% 以上でも抑止効果が確認できた。

3.4 インバート製作性評価

上述の検討結果を受けて、一部の区間に石炭ガス化スラグ細骨材を用いたセメント・ゼロ型のインバート部材を適用した。

写真-9 には、石炭ガス化スラグ細骨材を全細骨材の 50% に混合したセメント・ゼロ型のスランプフローの広がり状況を示す。環境配慮コンクリートは粘性が高いが、石炭ガス化スラグ細骨材を用いると、粘性がやや弱まる傾向にあった。また、脱型時の状況（写真-10）は、通常のセメント・ゼロ型のインバート部材と同じく、コンクリートのひび割れや欠け等の不具合は認められず、極めて良好であった。

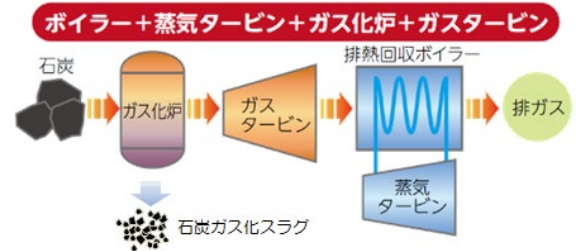


図-3 石炭ガス化複合発電概要¹⁰⁾

Fig.3 Overview of integrated coal gasification combined cycle power generation

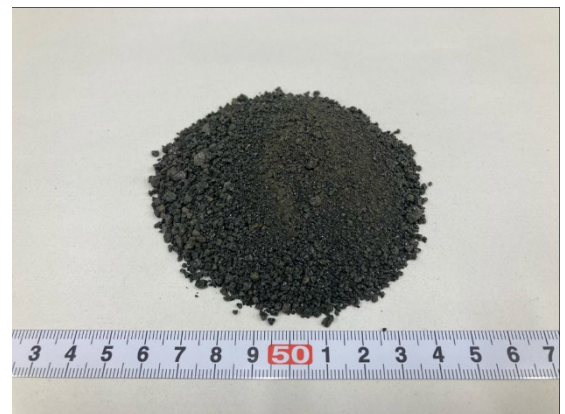


写真-8 IGCC スラグ細骨材¹¹⁾

Photo.8 Coal gasification slag fine aggregate

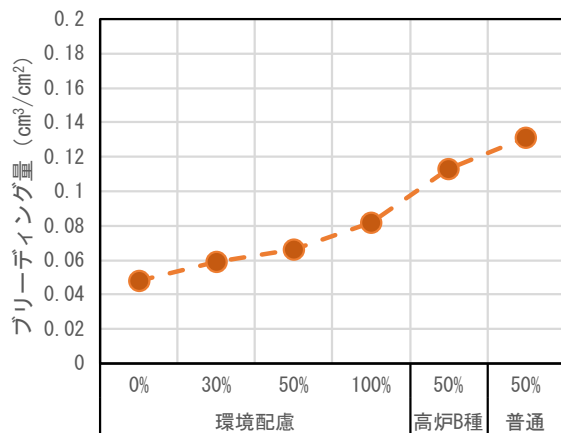


図-4 ブリーディング量

Fig.4 Bleeding amount

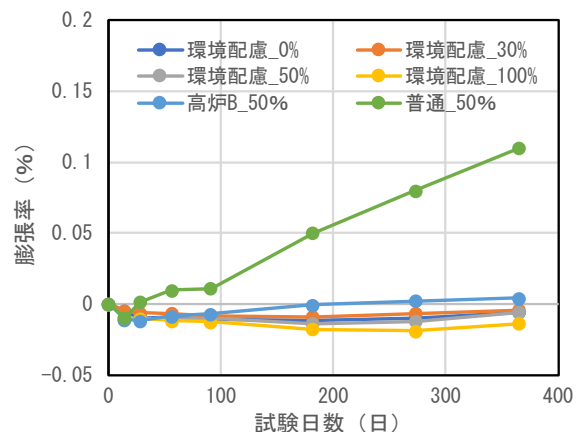


図-5 膨張率の経時変化

Fig.5 Change in expansion rate over time

4. 現地シールドインバート部材への適用

上述の環境配慮コンクリートの強度発現性、製作性、その他の検討の知見を受けて、環境配慮コンクリート製のインバートブロック材を、写真-11 および写真-12 に示すように、シールドトンネル内に適用した。適用に当たっては、コンクリートの品質低下につながるような欠陥が生じないようにするため、コンクリート製造に関する使用材料、計量・投入、管理項目を定めたことから、初期欠陥のない環境配慮コンクリートインバート部材を製造・適用することができた。

なお、今回の工事への適用数量は、シールドトンネル内のほぼ全線に渡って、セメント・ゼロ型が 1,537m³、Carbon-Recycle を 52m³ であった。これにより、二酸化炭素排出量を 410ton 削減し、産業副産物で

ある高炉スラグを 901ton 有効活用したことになることと試算された。

5. 結論

本稿では、環境配慮コンクリートのうち、ポルトランドセメントの使用を止め、高炉スラグ微粉末を刺激材で硬化させるセメント・ゼロ型、およびのカーボンリサイクル技術により CO₂ を資源として転換した炭酸カルシウムを添加し、「カーボンネガティブ」を実現した Carbon-Recycle の強度発現性および製作性を確保していることを実験により確認し、実際のシールドトンネルインバート部材へ適用した。また、Carbon-Recycle に当たっては、一つの現場での数量として数多く適用することができた。今回実施した性能評価や実用化展



写真-9 コンクリートの広がり状況
(石炭ガス化スラグ細骨材使用)
Photo.9 Slump flow spread of Cement Zero type
(Coal gasification slag fine aggregate)

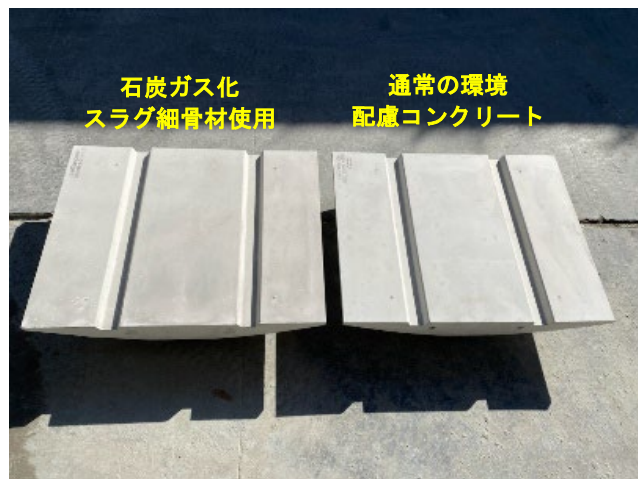


写真-10 脱型後の状況
(石炭ガス化スラグ細骨材使用)
Photo.10 Condition after invert demolding
(Coal gasification slag fine aggregate)



写真-11 セメント・ゼロ型の現場設置状況
Photo.11 On-site installation status of Cement-zero type



写真-12 Carbon-Recycle の現場設置状況
Photo.12 On-site installation status of Carbon-Recycle

開を生かして、セメント・ゼロ型や Carbon-Recycle の環境配慮コンクリート二次製品の更なる適用を加速し、カーボンニュートラルへ貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 宮原茂禎, 荻野正貴, 大脇英司, 中村英佑: 高炉スラグ微粉末を大量使用した環境配慮コンクリートの曝露試験および室内試験における耐久性, セメント・コンクリート論文集, 70 巻, 1 号, pp.443-449, 2016
- 2) 堀口賢一, 松元淳一, 河村圭亮, 坂本淳: 低炭素型コンクリートを使用したコンクリート二次製品の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.213-218, 2016.7
- 3) 大脇英司, 宮原茂禎, 岡本礼子, 荻野正貴, 坂本淳, 丸屋 剛: 環境配慮コンクリートの基本性状, 大成建設技術センター報, Vol.47, No.06, pp.06-1-06-6, 2014.12
- 4) 荻野正貴, 大脇英司, 白根勇二, 中村英佑: 複数の環境に約2年間曝露した低炭素型のコンクリートの強度と耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.220-225, 2014.7
- 5) 岡本礼子, 宮原茂禎, 坂本淳, 丸屋剛: 高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮型コンクリートの物性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1981-1986, 2013.7
- 6) 荻野正貴, 大脇英司: 炭酸カルシウムを利用したカーボンリサイクル・コンクリートの基本性状について, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, 2023
- 7) 梅津真見子ほか, リサイクル炭酸カルシウムを添加したコンクリートの基本性状, 第 78 回土木学会年次学術講演会, V-588, 2023
- 8) 松元淳一, 堀口賢一: 環境配慮コンクリートセメント・ゼロ型の物性・耐久性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1180-1185, 2023.7
- 9) 土木学会コンクリートライブラリー163: 石炭ガス化スラグ細骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針, 2023.6
- 10) 勿来 IGCC パワー合同会社・広野 IGCC パワー合同会社, 福島復興電源・石炭ガス化複合発電 IGCC パンフレット参照
- 11) 東京電力ホールディングス(株)より提供