

環境配慮コンクリートセグメントのシールドトンネルへの適用

大成建設（株） 正会員 ○松元 淳一 直町 聡子
堀口 賢一 畑 明仁
木村 利秀 中野 文裕
小森 敏生 沖 慎一郎

1. 目的

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試みられている。コンクリートの分野では、産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの製造時の二酸化炭素排出原単位が、ポルトランドセメントのそれよりも小さいため、これらのコンクリート用混和材を積極的に使用することで、二酸化炭素排出量の削減に寄与できる。このような観点から、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「T-eConcrete」）の研究・開発を進めてきた^{1),2)}。環境配慮コンクリートは、幾つかの種類に分かれているが、本報文で紹介する環境配慮コンクリートは、セメント・ゼロ型を対象としている^{3),4),5)}。

セメント・ゼロ型はポルトランドセメントを全く使用せず、混和材の使用量を可能な限り高めた環境配慮コンクリートであり、より一層の二酸化炭素排出量の削減が期待できるが、その一方で圧縮強度などの強度発現が遅れ、型枠の脱型に通常よりも長い時間を要するなどの課題があった。これに対して、コンクリート二次製品は、従来から型枠の早期転用を図るために、蒸気養生などの給熱養生を行って強度発現を早めているため、環境配慮コンクリートの適用においては上述の課題に対して有利な条件になると考えられた。

そこで、環境配慮コンクリートをコンクリート二次製品、特にシールドトンネルで使用されるコンクリート製セグメントの強度発現性、製作性、構造性能および耐久性のうち中性化抵抗性について実験的検討を行い、大阪市内の海老江下水処理施設内のシールドトンネルに、構造体として、国内で初めて環境配慮コンクリートセグメント（以下、「T-eCon/Segment」）を適用した。ここでは、上記の性能評価実験の結果に加えて、工事適用に際して定めた、T-eCon/Segment の製造に関する品質管理手法についても併せて述べる。

2. 環境配慮コンクリートセグメントの強度発現性

(1) 配合および使用材料

表-1 および表-2 にコンクリートの配合と使用材料を示す。ここでは、環境配慮 3 ケースと同一強度レベルの通常仕様である普通配合 1 ケースの計 4 ケースにより検討を行った。

各配合の二酸化炭素排出量を表-1 に示す。これは、表-2 の二酸化炭素排出原単位から算定したもので³⁾、コンクリート 1m³ あたり 77.3~89.1kg/m³ となり、同一強度レベルの通常使用の普通ポルトランドセメントコンクリート 324.0 kg/m³ の 1/4 程度であった。

コンクリートの配合については、水結合材比（以下、W/B）を 3 水準とし、所定材齢の強度試験結果から結合材水比曲線を作成し、必要強度が発現する W/B を実施配合に選定することとした。

結合材は、高炉スラグ微粉末、消石灰、膨張材があり、目標とするスランプは 15±2.5cm とした。一方、空気量は 1.0% を中心に下限を-1.0%、上限を+1.5%、すなわち 0~2.5% の範囲とした。これは、セグメントの使用される環境が土中であり、凍結融解作用による凍害を受けることがないことから、通常のセグメントと同様に non-AE コンクリートとした。

(2) 強度発現性の確認

環境配慮コンクリートの強度発現に及ぼす水結合材比の影響を確認することを目的に、水結合材比を要因と

キーワード 環境配慮コンクリート、セグメント、CO₂ 排出量、構造性能、中性化抵抗性

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設株式会社 技術センター 材工研究室 TEL 070-2653-0137

表-1 コンクリート配合

コンクリート種類	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									二酸化炭素排出量 (kg/m ³)
			水 W	セメント C	高炉 BS	消石灰 TK	膨張材 Ex	細骨材① S1	細骨材② S2	粗骨材 G	SP (%)	
環境配慮	25	33.0	160	0	555	55	30	251	251	1045	0.725	89.1
	28	37.0			492	49		294	305	1023	0.650	82.7
	31	40.0			442	44		327	340	1005	0.600	77.3
通常普通	39	40.5	154	395	0	0	20	177	179	1097	0.570	324.0

表-2 使用材料の仕様および二酸化炭素排出原単位³⁾

使用材料	産地・仕様	二酸化炭素排出原単位 (kg-CO ₂ /ton)
普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³	768.6
高炉スラグ微粉末	無水せっこう添加品、密度2.89g/cm ³	26.5
消石灰	密度2.20g/cm ³ 、600μmふるい全通	844.5
膨張材	石灰系、密度3.15g/cm ³	768.6
細骨材①	兵庫県姫路産、密度2.57g/cm ³	3.7
細骨材②	橋本市須河産、密度2.67g/cm ³	3.7
粗骨材	兵庫県姫路産、密度2.63g/cm ³	2.9
水	上水道水	0.2
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系	0.2

高炉スラグ微粉末の SO₃ 量 : 2.15%

した圧縮強度の測定を行った。図-1 に養生パターンの一例を示す。養生は、①前置き、②前養生、③本養生、および④後養生の4つの工程から成る。①前置きは、セグメントの打込み開始から、型枠の伏せ型枠を取外してコンクリート表面を仕上げるまでの工程である。②前養生は、表面仕上げ完了から蒸気養生開始までセグメントを静置する工程である。③本養生は、高温蒸気で所定の温度まで一定の昇温速度で加温し、所定の温度を一定時間保持して、その後は一般的には自然冷却により緩やかに外気温まで降温させる工程である。④後養生は、型枠の脱型から設計基準強度の管理材齢までに施す養生の工程であり、水中養生、封緘養生、気中養生などを単独、もしくは組み合わせて実施する。

ここでの養生方法は、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℃に到達後3時間保持）、後養生：水中（標準養生水槽）3日、それ以降は気中（屋内20℃恒温室）とした。

図-2 に結合材水比と圧縮強度の関係を示す。セグメント用コンクリートの設計基準強度は材齢28日で42N/mm²とし、変動を考慮して目標強度を55N/mm²とした。図-2によれば、環境配慮コンクリートでも結合材水比と圧縮強度が比例関係であることがわかる。また、材齢28日の圧縮強度については、結合材水比が4.0（水結合材比25%）の配合のみ目標とする圧縮強度の55N/mm²を満足する結果であった。また、

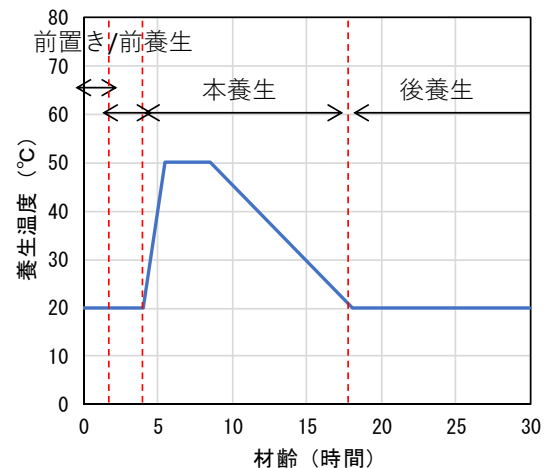


図-1 養生パターンの一例

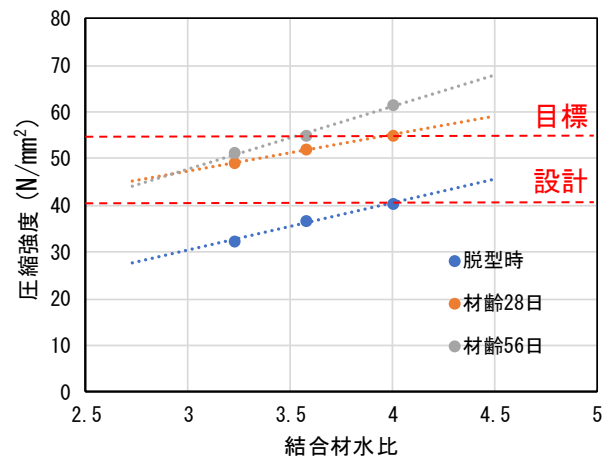


図-2 結合材水比と圧縮強度の関係

水結合材比が小さいと高炉スラグ量が多くなるため、材齢経過に伴う強度増進も認められていた。

通常、セグメントの脱型時強度は $15\sim 20\text{N/mm}^2$ 程度が必要とされており⁶⁾、本実験の検討の範囲であれば、現配合はいずれの結合材水比も必要強度を上回っており、強度発現性は良好であった。

3. 環境配慮コンクリートセグメントの製作性

実際のシールド工事で使用されるセグメントと同じ形状・配筋の供試体を製作した。1リングの外径は6,400mmであり、これを6分割したうちのAセグメントを製作した。セグメントの弧長、幅、厚さは、それぞれ3,830mm、1,200mm、300mmである。配筋については、円周方向にSD345のD19、D16を上下二段に配置した。

(1) 打込み性能

写真-1 に環境配慮コンクリートの打込み状況を示す。環境配慮コンクリートは粉体量が多いため、高粘性であるが、打込み性能は良好であり、特殊な機材等を用いなくても、通常のコンクリートセグメントと同じように打込みをすることができた。製作の際の打込み位置はセグメント中央頂部に設けているため、セグメント中央頂部と端部でコアを採取して、骨材分布が一樣であるのかを目視により確認した。

環境配慮コンクリートセグメントより採取したコアの表面の状況を写真-2 に示す。セグメント端部における粗骨材の分布状況は、中央頂部の打込み位置と同様であり、型枠端部まで材料分離せずにコンクリートが充填されていることが認められた。

(2) 仕上げ性

写真-3 にコテ仕上げ時および仕上げ完了の状況を示す。粘性が高いため、コンクリートを均すことに若干時間を要したが、通常のコンクリートと同じく、良好な仕上げ性が確認できた。



写真-1 セグメント型枠への打込み状況



写真-2 骨材分布状況

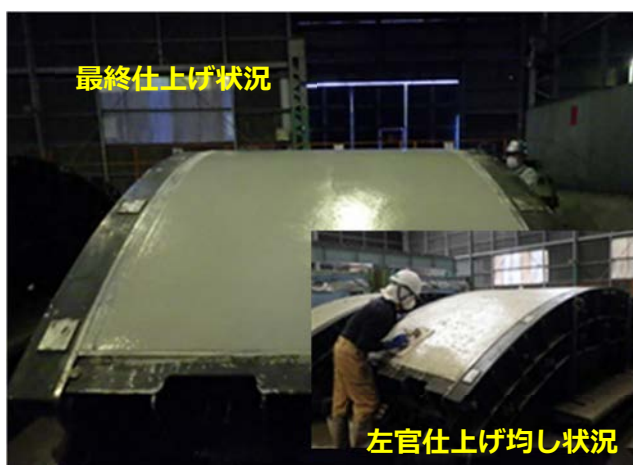


写真-3 セグメント仕上げ状況



写真-4 セグメント脱型後の外観

(3) 外観・寸法

写真-4 に環境配慮コンクリート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～+1.0mm 内の許容範囲にあった。これより、粘性が高い環境配慮コンクリートセグメントの製作は、特別な機材等を用いなくても、通常のコンクリートセグメントと同じようにできることが認められた。

4. 環境配慮コンクリートセグメントの構造性能と中性化抵抗性

(1) 構造性能

構造性能に関する各試験時の環境配慮コンクリートの圧縮強度、静弾性係数は、それぞれ 58.0N/mm²、3.34N/mm² であった。

a) 曲げ試験結果

図-3 に曲げ試験方法を示す。また、表-3 には曲げ試験結果を取りまとめて示した。環境配慮コンクリートセグメントのひび割れ発生時の荷重、破壊荷重はそれぞれ 146kN、414kN であり、実際のシールド工事における設計荷重 118kN、終局荷重 263kN を大幅に上回っており、十分な曲げ性能を有していることが確認できた。また、同一強度レベルの通常の普通コンクリートに比べて、ひび割れ発生荷重は同程度、終局荷重は大きくなる結果であった。

b) 継手曲げ試験

図-4 に継手曲げ試験方法を示す。また、表-4 には継手曲げ結果を取りまとめて示した。環境配慮コンクリートセグメントのひび割れ発生荷重、破壊荷重はそれぞれ 80.0kN、181kN であり、実際のシールド工事における設計荷重 66.2kN、終局荷重 124kN を大幅に上回る曲げ継手性能が確認できた。また、同一強度レベルの通常の普通コンクリートに比べて、ひび割れ発生荷重は小さくなったが、終局荷重は同程度であった。

c) ジャッキ推力試験

環境配慮コンクリートでも通常のコンクリートと同じく、現地で使用する形状のシールドマシンのジャッキ推力より算出した 2000kN を超えても、コンクリートに損傷等は認められなかった。

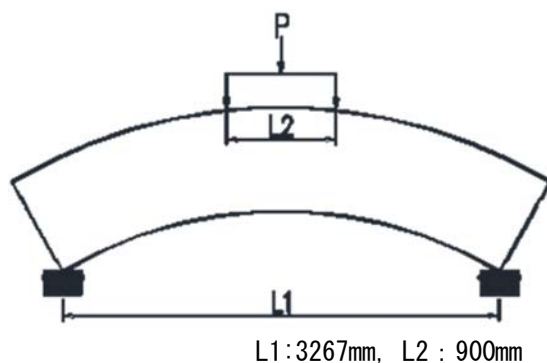


図-3 実大セグメントの曲げ試験方法

表-3 実大セグメントの曲げ試験結果

	規格値 (kN)	環境配慮 コンクリート (kN)	通常普通 コンクリート (kN)
ひび割れ 発生荷重	—	146	140
設計荷重	118	—	—
最終荷重	263	414	385

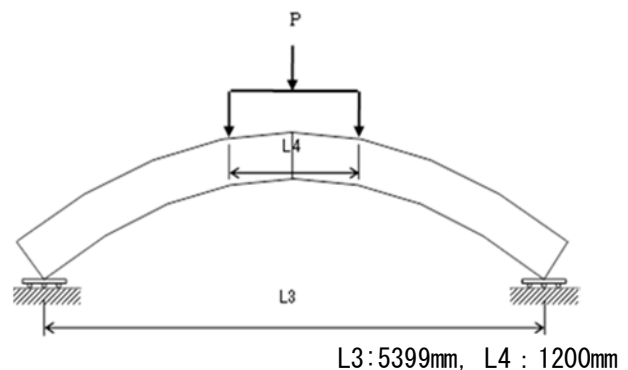


図-4 実大セグメントの継手曲げ試験方法

表-4 実大セグメントの継手曲げ試験結果

	規格値 (kN)	環境配慮 コンクリート (kN)	通常普通 コンクリート (kN)
ひび割れ 発生荷重	—	80.0	105
設計荷重	66.2	—	—
最終荷重	124	181	185

d) 吊手金具引抜試験

環境配慮コンクリートでも通常のコンクリートと同じく、規格値（1 リング重量の 1.5 倍以上）を超えてもコンクリートに損傷等は認められなかった。

(2) セグメントの組立性

写真-5 に水平仮組試験状況を示す。この水平仮組試験はセグメント 2 リングを組み立てて、リング間のずれがないことや、欠損・ひび割れ等がないことを確認する試験である。水平仮組試験結果より、セグメントリング間のずれや浮き等も認められず、セグメント自体の角欠損やひび割れも確認されなかった。

上述の構造性能や組立性の各試験結果を受けて、セメントを使わない高強度の環境配慮コンクリートは、セグメントとして適用できるだけの性能を十分に有することを実証できた。

(3) 中性化抵抗性

既往の検討結果から、環境配慮コンクリートは通常のコンクリートに比べて、中性化抵抗性が低いことが明らかになっていた⁷⁾。そこで、本工事に使用する配合においても、CO₂ 濃度 5% 環境での促進中性化試験を実施し、実環境における鉄筋腐食が開始するまでの期間を推定した。なお、配合は表-1 の環境配慮コンクリート 3 ケースであり、養生方法以外の養生期間や供試体の形状・寸法は JIS A 1153 に準拠した。また比較用として、既往文献⁵⁾ の高炉セメント B 種コンクリートの結果も併せて示した。

図-5 に促進中性化試験の結果を示す。環境配慮コンクリートの配合は既往の同一強度レベルの高炉セメント B 種コンクリートに比べて⁷⁾、中性化の進行が早くなる結果であった。

そこで、促進中性化試験で得た中性化速度係数から、式 1) の換算式⁸⁾ により、実環境での速度係数に換算して、中性化に対する環境配慮コンクリートの耐久性を評価した。

$$A = A' \sqrt{\frac{CO_2}{\alpha CO_2}} = A' \times 10 \quad 1)$$

A : 実環境における中性化速度係数の推定値
A' : 促進中性化試験による中性化速度係数
CO₂ : 実環境の二酸化炭素濃度 (0.05%)
 α CO₂ : 促進中性化試験の二酸化炭素濃度 (5%)

ここで、セグメントの鉄筋の最小かぶりを設計上の 30mm とすると、文献⁹⁾ では、中性化が鉄筋の 10mm 手前に達すると鉄筋の腐食が始まるとしていることから、かぶり 30mm から 10mm (中性化残りと呼ぶ) を差し引くと = 20mm となる。すなわち、中性化深さが 20mm を超えると腐食が開始することになる。

促進中性化試験の促進材齢 26 週までの結果から中性化速度係数を換算して求めた実環境での速度係数より供用期間 100 年後の中性化を推定した。これによれば、W/B25%、28%、31% で、それぞれ 18.7mm、24.6mm、28.9mm であり、中性化抵抗性の観点からも、W/B は 25% 以下とする必要があることが確かめられた。



写真-5 水平仮組状況

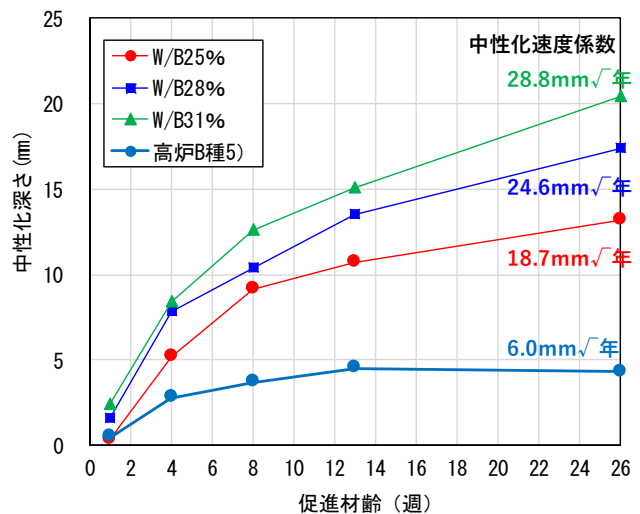


図-5 中性化深さの経時変化 (JIS 法)

5. 品質管理手法の確立

(1) 製造手順に沿った品質管理手法

上述の環境配慮コンクリートの強度発現性、セグメントの製作性、構造性能および耐久性のうち中性化抵抗性の結果を受けて、T-eCon/Segment を大阪市内の海老江下水道処理施設内のシールドトンネルへ適用した。構造体としては、国内で初めての現地適用であることをから、T-eCon/Segment の品質管理手法や製造マニュアルを定めて、製造管理を行った。

T-eCon/Segment の製造手順に沿った品質管理手法を写真-6 に示す。

a) 配筋検査

内部鉄筋の径や空きおよび組立状況、およびセグメント型枠内に配置した際の鉄筋のかぶりが設計図面と一致していることを確認する。

b) コンクリートの品質管理試験

実機ミキサでコンクリートを練混ぜ、所定のスランプや空気量であることを確認するとともに、コンクリートの状態が材料分離等なく、打込みに適したものであるかを判断する。

c) 打込み

セグメント型枠への打込みを行い、下端振動により締固めを行い、型枠端部までコンクリートが分離することなく流動していることを確認する。

d) 仕上げ

打込み終了直後にセグメント型枠上蓋を取り外し、金コテによる仕上げを行った。その際に、セグメント表面に気泡等が残っていないことを確認する。

e) 蒸気養生/型枠脱型

セグメントの蒸気養生は、実験結果（温度 50℃、保持時間 3 時間）の通りに養生設備が設定、運用されているこ



a) 配筋検査



b) コンクリートの品質管理試験



c) 打込み



d) 仕上げ



e) 蒸気養生/型枠脱型



f) 水中養生

写真-6 環境配慮コンクリートセグメント（T-eCon/segment）の製造手順

とを確認する。蒸気養生終了後の型枠脱型は角欠け等を生じないように慎重に行う。

f) 水中養生

養生水槽内にヒーターを設け、養生槽内の温度が 20℃一定に保たれていることを確認する。

(2) コンクリート製造におけるマニュアル化

環境配慮コンクリートセグメント「T-eCon/Segment」を構造体に適用するため、セグメント製造において、コンクリートの品質低下につながるような欠陥がないように、コンクリートセグメント製造に関する使用材料、計量・投入、管理項目および記録を定めた。

・使用材料

全ての材料が JIS に準拠した材料であること。

・材料の計量・投入

ミキサプラントにおける自動計量できない消石灰においては人力での計量となるため、計量ミスが無いように以下の 2 点を実施する。

練り混ぜ時の投入担当者と投入確認者を予め選定し、消石灰を所定量投入したことを互いに確認すること。

投入時は粉じんが舞う可能性があるため、製造工場責任の下、投入者には防塵マスクを着用させ、工場規定の安全衛生対策を徹底させる。

・管理項目および記録

環境配慮コンクリートセグメント「T-eCon/Segment」製造時には以下の管理項目について記録を残すこと。

- ① 実施配合（バッチ毎）
- ② 使用材料の成績書と骨材試験結果（ロット毎）
- ③ 使用材料の計量記録（バッチ毎）
- ④ 細骨材・粗骨材の表面水率（バッチ毎）
- ⑤ セグメント製造時のスランプ、空気量、コンクリート温度、塩化物含有量（リング毎）
- ⑥ 蒸気養生温度履歴、養生水槽温度（リング毎）
- ⑦ 脱型時、材齢 28 日圧縮強度（リング毎）
- ⑧ 製品寸法・外観（ピース毎）

製造時に品質管理項目を定め、それに基づいて管理を行ったため、初期欠陥のない環境配慮コンクリートセグメント「T-eCon/Segment」を製造・適用することができた。

6. 結論

本稿では、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環境配慮コンクリートセグメント「T-eCon/Segment」が、セグメントとして要求される強度発現性、製作性、構造性能および耐久性（中性化抵抗性）を確保していることを実験により確認した。また、これらの結果を受けて、実際のシールド工事に適用を行い、以下の知見が得られた。

・環境配慮コンクリートは、通常のコンクリートと同様に結合材水比と圧縮強度に比例関係が認められた。また、本検討における蒸気養生の方法として、前養生を 2 時間以上、本養生を 50℃・3 時間、後養生を水中 3 日+気中とすれば、脱型時と材齢 28 日の圧縮強度を安定的に発現させられることがわかった。

・特殊な装置等を設けなくても、通常の普通コンクリートセグメントと同じ設備で十分な製作性を有していることが分かった。

・本実験の範囲において、セグメント打込み時に材料分離することなく、セグメント端部まで骨材が一様に分布していることを確認した。

・仕上げ性、外観も良好であり、通常の普通セグメントと同等であることを確認した。

・セグメントの構造性能評価として、セグメント単体、継手部の曲げ性能試験を行ったが、本検討の範囲内において、通常の普通コンクリートセグメントと同じく、設計荷重や終局荷重を十分に上回っており、実構造物適用性を

十分に有していることが分かった。

・高炉セメント B 種相当のコンクリートと圧縮強度が同程度の環境配慮コンクリートの中性化抵抗性は低いですが、耐久性設計を適切に行うことで、所要の性能を確保できることが分かった。

・環境配慮コンクリートセグメント「T-eCon/Segment」品質管理手法を確立し、下水処理施設のシールドトンネルの一部に適用した。

今回実施した性能評価や実用化展開を生かして、セメント・ゼロの環境配慮コンクリートセグメントを含む高強度型二次製品の更なる適用（展開）を進め、カーボンニュートラルへ貢献していく所存である。

謝辞

躯体構造物であるシールドセグメントに環境配慮コンクリートセグメント「T-eCon/Segment」を国内で初めて適用するにあたり、多大なるご指導とご協力を頂きました。関係者の皆様には深く感謝の意を表します。また、今回の現地に適用する環境配慮コンクリートセグメントの実用化検討ならびに製造は、ジオスター株式会社橋本工場で行いました。ご協力頂いた工場各位に深く謝意を表します。

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) 土木学会：2006 年制定トンネル標準示方書 [シールド工法]・同解説，p.63，2006
- 7) 松元淳一，堀口賢一，坂本淳：環境配慮コンクリートを使用したセグメントの実用化検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，Vol.18，No.131，2018.10
- 8) 建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指 針・同解説，pp.99，2016
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書 2012 年版 [設計編：標準]，pp.145，2012