

論文 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

松元 淳一*1・堀口 賢一*2

要旨：本研究では、ポルトランドセメントの使用を止めて代替として副産物である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メント・ゼロ型の更なる展開を目指して、幾つかの工場で製作した環境配慮コンクリートの物性、耐久性を実験により確認した。その結果、二次製品工場の違いがコンクリートの性能に及ぼす影響は認められず、強度発現は良好であり、かつ乾燥収縮ひずみも小さいことが分かった。また併せて、本稿では、実際の構造物への適用状況として、部材の製作性、仕上げ性および設置状況についても取りまとめた。

キーワード：カーボンニュートラル、環境配慮コンクリート、セメント・ゼロ型、物性・耐久性評価、現場実装

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推進されており、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（T-eConcrete®：以下、環境配慮コンクリート）の研究・開発を進めている¹⁾⁴⁾。

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を示す。このなかで、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⁵⁾⁶⁾、多くの構造物へ展開を行っている。一例として、写真-1はシールドトンネル構造物に適用した事例であるが、シールドセグメントやインパートブロックへ大量の施工実績を積み上げている。これらについては4章にて、製造状況等を含めて示す。

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も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た。今後はセメント・ゼロ型、Carbon-Recycleの更なる展開を推進する。

本稿では、環境配慮コンクリートのうち、セメント・ゼロ型の二次製品を対象に、一般環境および下水環境への適用範囲の拡張を目指して行った実験の結果について報告する。

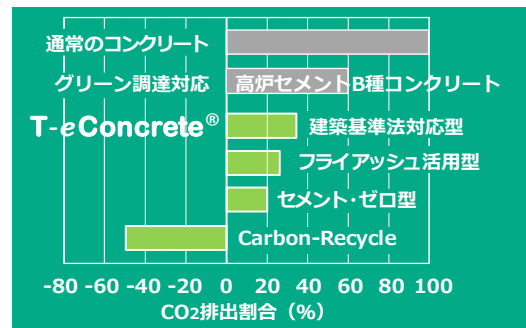


図-1 環境配慮コンクリートのCO₂排出削減効果



シールドセグメント



インパートブロック

写真-1 セメント・ゼロ型の現場展開製品

*1 大成建設株式会社 技術センター 社会基盤技術研究部 主任研究員 工博 (正会員)

*2 大成建設株式会社 技術センター 社会基盤技術研究部 主席研究員 工博 (正会員)

2. 検討内容

環境配慮コンクリートのセメント・ゼロ型は高炉スラグ微粉末を多量に使用するため、塩化物イオン浸透抵抗性や硫酸塩抵抗性は高い²⁾。ここでは、幾つかの工場で選定した配合の圧縮強度発現性や乾燥収縮特性の物性に加えて、中性化抵抗性およびすり減り抵抗性に関する評価結果について述べる。

2.1 圧縮強度発現性、乾燥収縮特性の検討内容

(1) コンクリート仕様

表-1 に使用したコンクリートの特徴を示す。これまでの実績に基づき、コンクリートの水結合材比を 25% とし、4 つの工場の製造時のスランブフローは 500±75mm を目標として配合を定めた。環境配慮コンクリートのセメント・ゼロ型の二酸化炭素排出量は二酸化炭素排出原単位から算定したもので、ある一つの工場を参考にすると、コンクリート 1m³ あたり 88.1kg/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の 1/4 程度であった。

養生は、1 つの工場のみ打込み終了後に蒸気養生とし、残りの 3 つの工場は打込み終了後に気中養生とした。なお、蒸気養生は、(1) 前置き、(2) 前養生、(3) 本養生、および (4) 後養生の 4 つの工程から成るが、ここでは、(1) 前置き：製造から仕上げまでの 3～5 時間、(2) 前養生：20℃-4 時間 (20℃一定で 4 時間保持)、(3) 本養生：50℃-3 時間 (最高温度 50℃到達後 3 時間保持)、(4) 後養生：気中 (屋内 20℃恒温室) とした。また、いずれの工場でも、材齢 14 日で設計基準強度である 42N/mm² を上回ることを目標とした。

(2) 実験概要

実験に用いた供試体の形状は、圧縮強度試験が Φ10×20cm の円柱供試体であり、乾燥収縮試験が □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、上述の通り、蒸気養生を基本とした。試験材齢として、圧縮強度試験は、材齢 1 日 (脱型時)、材齢 7 日および材齢 14 日で行った。一方、乾燥収縮試験は、材齢 28 日経過した後に、JISA 1129 に準拠して、室温 20℃、湿度 60% の乾燥環境に静置し、材齢 182 日まで計測を行った。なお、本検討については 4 つ

の異なる二次製品工場で供試体を製作し、試験に供した。

2.2 中性化抵抗性の検討内容

(1) コンクリート仕様

実験に用いた供試体は表-1 に示したコンクリートの特徴にて製作したものである。ここでは、異なる 2 つの二次製品工場で製作した供試体にて試験を行った。なお、いずれの工場においても対象部材はセグメントとしており、コンクリート部材の形状も考慮して、スランブの目標値を 15±2.5mm に変更して配合を定めた。

(2) 実験概要

実験に用いた供試体は、□100×100×400mm の角柱供試体であり、コンクリート型枠打込み後の養生については、上述の通り、蒸気養生を基本とした。試験開始材齢は、2 つの工場で作成した供試体とも、材齢 28 日経過した後に、JISA 1153 に準拠して、CO₂濃度 5% 環境室内に静置し、材齢 182 日まで測定を行った。

2.3 すり減り抵抗性の検討内容

地中にある下水環境や一般環境、例えば導水のための水路トンネル等への環境配慮コンクリートのセメント・ゼロ型の適用を目指すことが想定される場合、要求される性能として、すり減り=摩耗に対する抵抗性がある。ここでは、単位粗骨材量を変化させてすり減り抵抗性の評価を行った。

(1) コンクリート仕様

表-2 に使用したコンクリートの特徴を示す。実験は、設計基準強度が 54N/mm²、すなわち材齢 28 日目標強度が 60N/mm² の高強度配合とし、目標とするスランブは、ここでは、設計基準強度や単位粗骨材量を変化させて、18±2.5cm、60±5cm とした。また、混和剤としてポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤を使用した。

(2) 実験概要

実験供試体の形状・寸法を写真-2 に示す。供試体は、□150×290×60mm の専用型枠にコンクリートを打ち込み、コテ均し面が試験面となるため、打込み直後と養生開始前の 2 回コテ均しを行った。コンクリートの養生は 2.1 (1) に示した温度履歴とした。

すり減り抵抗性試験は、写真-3 に示すような、奥田式に準拠し、試験は開始から 6 時間行うこととした⁷⁾。こ

表-1 使用したコンクリートの特徴 (圧縮強度発現性/乾燥収縮特性/中性化抵抗性)

コンクリート種類	スランブフロー	水結合材比 (%)	単位量						二酸化炭素排出量 (kg/m ³)
			水	セメント	高炉	刺激材	細骨材	粗骨材	
環境配慮コンクリート セメント・ゼロ型	50±7.5cm	25	160	0	555	85	513	1050	88.1
比較用コンクリート		39	158	431	0	20	853	933	335.8

CO₂原単位は土木学会コンクリートライブラリー152に基づいて算出した。

の試験は、供試体を回転ドラム内側に固定した後に、ドラム内部に炭素鋼シルペップを25個入れ、60rpmの回転速度で水量20リットル/分の水を6時間流し続けるものである。評価は、すり減り係数 (mm^3/cm^2) (= [(すり減り減量 (g) / コンクリート密度 (g/cm^3)) × 1000 / すり減り面積 (cm^2)] ※すり減り減量 (g) : 試験開始前からの質量変化量, すり減り面積 (cm^2) : すり減り作用を受ける部分の表面積) を算出して行った。なお、試験は各供試体とも材齢28日経過後に開始した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度発現性

図-2に4つの異なる二次製品工場で作成したコンクリート供試体の圧縮強度の経時変化を示す。ここで、4つの工場のコンクリートは水結合材比や結合材は同じであるが、骨材等は異なるものである。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、工場によって最大 7.7N/mm² の開きがあった。一方、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日では圧縮強度が50N/mm²程度を発現していた。また、工場間による圧縮強度の差も小さく、4つの異なる工場ともほぼ同程度の強度発現性であった。

3.2 乾燥収縮特性

図-3に4つの異なる二次製品工場で作成したコンクリート供試体の乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。ここで、4つの工場のコンクリートは、上述のように、水結合材比や結合材は同じであるが、骨材等は異なるものである。今回の実験の範囲内では、環境配慮コンクリートのセメント・ゼロ型は、いずれの工場でも乾燥収縮ひずみは試験26週 (試験材齢182日) で 100×10^{-6} 程度以下と小さくなる結果であり、膨張材使用の効果が得られているのではないかと考えられた。特に、D工場の乾燥収縮ひずみが小さかったが、この工場の骨材種類は石灰岩であるため乾燥収縮が抑えられたものと推察された。

3.3 中性化抵抗性

2つの異なる二次製品工場で作成したコンクリート供

試体の促進中性化試験の結果を図-4に示す。環境配慮コンクリートの中性化速度係数は2つの工場それぞれ、18.7mm[√]/年、17.0mm[√]/年と同程度であるが、通常の高炉セメントB種コンクリートは6.0mm[√]/年に比べて大きくなる結果を示した。ここで、促進中性化試験で得た中性化速度係数より、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針 (案)」に示される下記の換算式により⁸⁾、実環境での速度係数に換算した。その結果、A工場、B工場それぞれで、1.87mm[√]/年、1.70mm[√]/年であった。

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

- 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CO₂濃度 (0.05%)
- αCO₂ : 促進中性化試験のCO₂濃度 (5%)

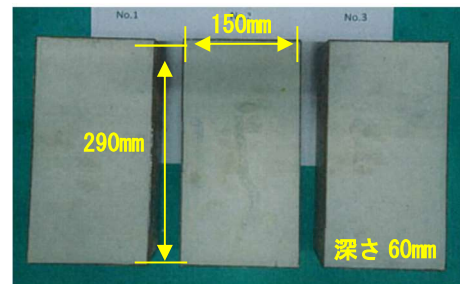


写真-2 供試体形状・寸法



写真-3 すり減り試験状況

表-2 コンクリート供試体の特徴 (すり減り抵抗性)

配合	配合名	スランブフロー	材齢28日の目標強度 (N/mm ²)	使用粉体	粗骨材量 (kg/m ³)
A	環境配慮コンクリート セメント・ゼロ型	60±5cm	60	P	875
B		18±2.5cm			1050
C	比較用コンクリート	18±2.5cm	60	N	1050

注) P: セメント・ゼロ型結合材, N: 普通ポルトランドセメント

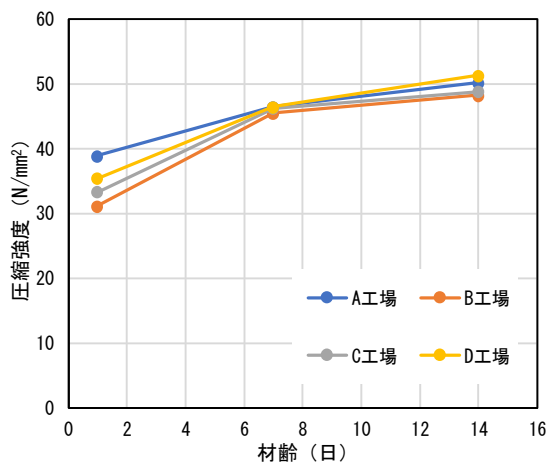


図-2 圧縮強度の経時変化

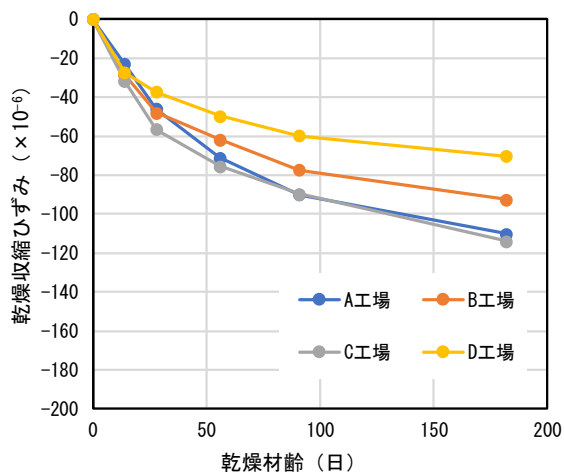


図-3 乾燥収縮ひずみの経時変化

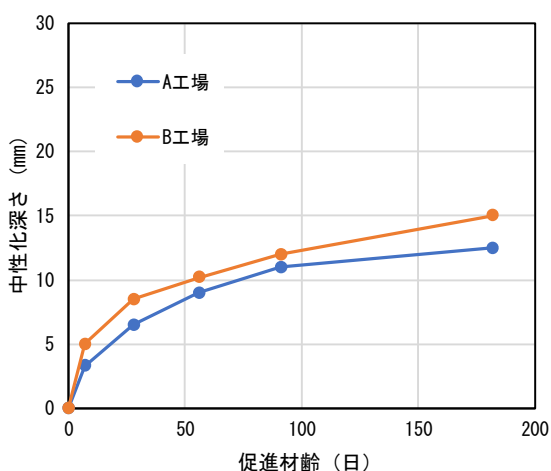


図-4 中性化深さの経時変化

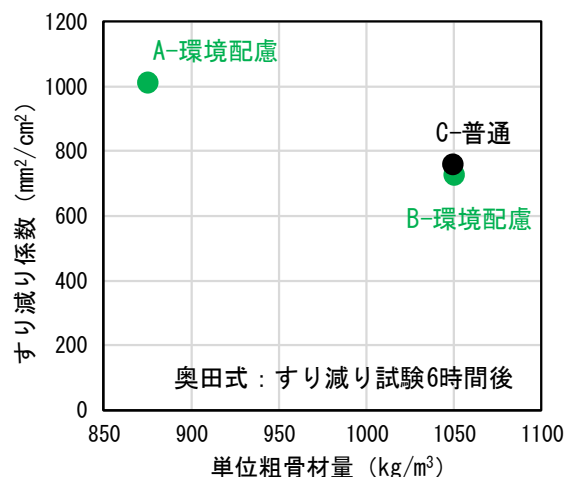


図-5 すり減り係数の経時変化

土木学会「コンクリート標準示方書 2017 年版〔設計編〕」によれば⁹⁾、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。今回、対象としたセグメントの鉄筋の最小かぶり厚は 30mm であるため、中性化深さが 20mm を超えると腐食が開始すると判定される。促進中性化試験で得られた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、100 年後の中性化深さを推定すると、2つの工場それぞれ、18.7mm、17.0mm であり、内部鋼材の腐食開始に至らない結果であった。

3.4 すり減り抵抗性

奥田式によるすり減り試験を 6 時間行った場合のすり減り係数を図-5 に示す。図中の凡例について、A、B・・・の表記は供試体の配合を示し、並びにコンクリートの種類を表記している。例えば、「A-環境配慮」は、材齢 28 日の圧縮強度が 60N/mm² 程度であり、粗骨材量が 1m³ あたり 875kg の環境配慮コンクリートのセメント・ゼロ型のことである。図-5 によれば、所定の強度を得るために、結合材量を多くし、単位粗骨材容積を 300L 程度と高流動コンクリート仕様にした場合、環境配慮コンクリートのセメント・ゼロ型のすり減り抵抗性は小さくなる傾向

にあった。これに対して、結合材量を変更せずに、細骨材率を下げ、コンクリート中の粗骨材量を通常の普通コンクリートと同程度とすることで、すり減り係数も普通コンクリートと同程度の性状にすることができた¹⁰⁾。これにより、本検討の範囲内であれば、コンクリートのすり減りが生じるような環境において、環境配慮コンクリートのセメント・ゼロ型を適用する場合には、細骨材率を下げ、普通コンクリートの単位粗骨材量と同程度、すなわち 1000kg/m³ 程度以上とすればよいことが分かった。

4. 環境配慮コンクリート/セメント・ゼロ型の適用事例

4.1 シールドセグメント

写真-4 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粘性が高かったが、振動締固めを行うことで、打込み性は良好であり、通常のコンクリートセグメントと同様の打込み性であることが分かった。

写真-5 にコテ仕上げ時および仕上げ完了の状況を示す。コンクリートの粘性が高いため、コンクリートを均

すことに若干時間を要したが、通常のコングリートと同じく、良好な仕上げ性が確認できた。

写真-6 に環境配慮コンクリート製のシールドセグメントの現地設置状況を示す。現地への設置についても、通常の製品と同様の施工方法で設置可能であることを確認した。また、設置中の角欠け等も認められなかった。

4.2 シールドインパートブロック

写真-7 に環境配慮コンクリートの打込み状況を示す。シールドセグメントと同じく、環境配慮コンクリートは高粘性であったが、打込み性は良好であり、通常のコングリートインパートと同様の打込み性であることが分かった。また、コテ仕上げにおいてもセグメントと同じく均すことに若干の時間を要したが、こちらも通常のコングリートと同じく、良好な仕上げ性であった。

写真-8 に環境配慮コンクリートで製造したプレキャストインパートブロックの現地設置状況を示す。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。

以上より、粘性が高い環境配慮コンクリート二次製品の製作は、特別な機材等は必要なく、通常のコングリート製品と同じようにできることを確認した。また、これらの製作においては、コンクリートの品質低下につながるような欠陥がなくするためにも、例えば、コンクリート用材料の品質管理、投入管理、コンクリート練混ぜ時の表面水管理、強度発現管理など、コンクリート製造に関する使用材料、計量・投入、管理項目を定めることで製造・適用することができた。

5. まとめ

本稿はカーボンニュートラルに向けた技術開発として、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刺激材で硬化させるセメント・ゼロ型の環境配慮コンクリートにおいて、幾つかの工場で作成したコンクリート供試体にて行った物性・耐久性の実験結果および現場適用事例について取りまとめたものである。以下に結論を示す。

- ・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・ゼロ型の環境配慮コンクリートの強度発現は良好であり、4つの製造工場の脱型時の初期強度は幾分異なるが、材齢が進むといずれも同程度の強度であることを確認した。
- ・本検討の範囲内において、4つの二次製品工場の乾燥収縮ひずみは 100×10^{-6} 以下と小さいことが分かった。特に石灰岩を骨材に用いている工場の乾燥収縮ひずみは小さいことが認められた。
- ・二次製品工場に関係なく、高炉セメントB種相当のコ

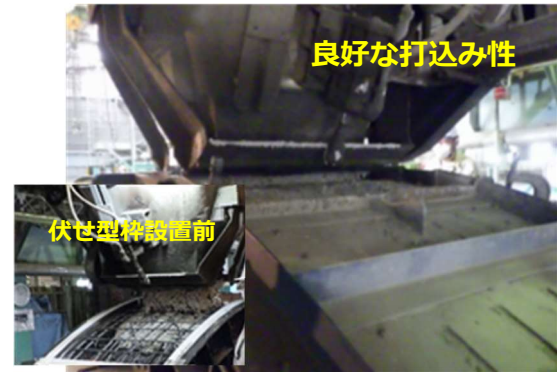


写真-4 環境配慮コンクリートのセメント・ゼロ型の打込み状況



写真-5 環境配慮コンクリートのセメント・ゼロ型の仕上げ状況



写真-6 環境配慮コンクリートのセメント・ゼロ型の現場設置状況

ング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酸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のセメント・ゼロ型のすり減り抵抗性は、コンクリート中の単位粗骨材量を多くし、普通コンクリートと同程度にすることで、すり減り係数を普通コンクリートと同レベルにすることができた。これにより、本検討の範囲内であれば、環境配慮コンクリートのセメント・ゼロ型を適用する場合には、細骨材率を下げ、普通コンクリートの単位粗骨材量と同程度、すなわち 1000kg/m^3 程度以上とすれば、普通コンクリートと同等の性状になると評価された。

- ・現場適用に際し、特殊な装置等を設けなくても、普通コンクリート製品と同じ設備で十分に打込み性、仕上げ性を有しており、通常の普通セグメントと何ら遜色ないことを確認した。
- ・本検討の範囲内において、コンクリート二次製品工場の違いが環境配慮コンクリートの製作性や物性、耐久性に及ぼす影響については認められず、どの製造工場でも同一の性能が得られることを確認した。

今回実施した性能評価や実用化展開を生かして、ポルトランドセメント使用せず、代替として副産物である高炉スラグ微粉末を刺激材で硬化させるセメント・ゼロ型の環境配慮コンクリートの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

今回の環境配慮コンクリートの物性・耐久性の検討については、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。

参考文献

- 1) 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
- 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) 松元淳一, 直町聡子, 堀口賢一, 木村利秀: 環境配慮コンクリートを使用したセグメントの性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1019-1024, 2021.7
- 5) 混和剤を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針, コンクリートライブラリー152, 土木学会, 2018
- 6) 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(VI)-高炉スラグ微粉末を結合材とした低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル(案)-共同研究報告書第476号, 土木研究所, 大成建設, 2016.1
- 7) 安東兼治ほか: 排砂路耐摩耗材の実験的研究, 電力土木, No.250, pp.47-58, 1994.3
- 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
- 10) 増田隆ほか: 高耐摩耗性コンクリート, コンクリート工学, Vol.32, No.7, pp.100-104, 1994.7



写真-7 環境配慮コンクリートのセメント・ゼロ型の打込み状況



写真-8 環境配慮コンクリートのセメント・ゼロ型の現地適用状況