

高炉スラグ微粉末を高含有した 低炭素型コンクリートの実工事への適用

ECM（エネルギー・CO₂ ミニマム）コンクリート

辻 大二郎・小島 正 朗

鉄鋼製造の副産物である高炉スラグ微粉末をセメント中に6～7割と高含有させ、さらに収縮性能を高めた低発熱・低環境負セメントである ECM（エネルギー・CO₂ ミニマム）セメント（以下、本セメント）を NEDO 助成下の共同研究チーム^{a)}で開発し、2017年3月号で紹介した。本稿ではその後の普及展開の進捗状況と適用実績及び地上・地下全躯体に高炉スラグ微粉末を用いた低炭素型コンクリートを適用した事例について紹介する。

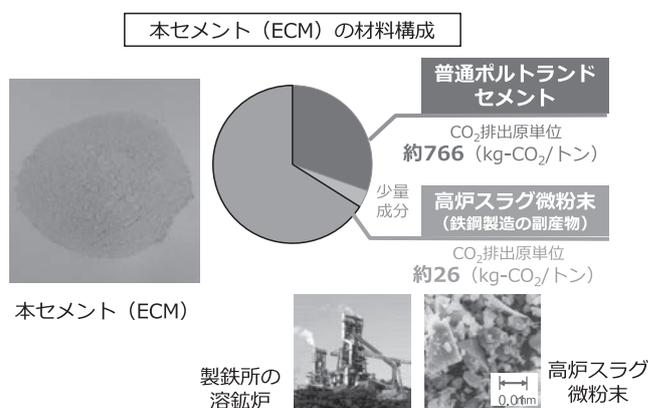
キーワード：低炭素，二酸化炭素，高炉セメント，高炉スラグ，地上躯体，実適用

a) (国研) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「省エネルギー革新技術開発事業／実用化開発／エネルギー・CO₂ ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステムの研究開発」による ECM 共同研究開発チーム：(株)竹中工務店、(株)鹿島建設、(株)デイ・シー、日鉄高炉セメント(株)、太平洋セメント(株)、日鉄セメント(株)、竹本油脂(株)、国立大学法人東京工業大学

1. はじめに

世界的に CO₂ 排出量削減に向けた取り組みが加速している。筆者らは、2017年3月号にて「二酸化炭素 (CO₂) 排出量を6割削減できる高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの実工事への適用 ECM (エネルギー・CO₂ ミニマム) セメント・コンクリートシステム¹⁾」と題して、開発したセメントの特徴及び建築地下躯体への適用例²⁾を紹介した。その後6年が経ち、現在までに更に適用が進んでおり、2023年3月時点累計81件(自社分のみ)のプロジェクトに適用している。本稿では、本技術の進捗状況及び適用実績の近況について報告する。また、建築物の地上・地下全躯体に適用した事例について紹介する。

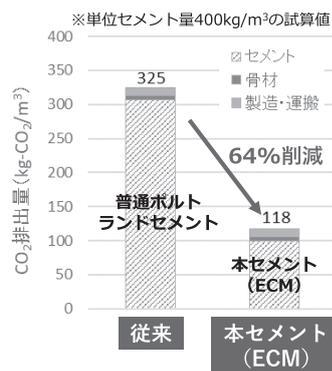
や収縮性能を改善させた低発熱・低環境負荷セメントであり、環境性能と基本性能(施工性、強度、耐久性)の両立を図っていることが開発コンセプトである。ま



図一 本セメント (高炉スラグ高含有セメント) の概要³⁾

2. 本セメントの概要

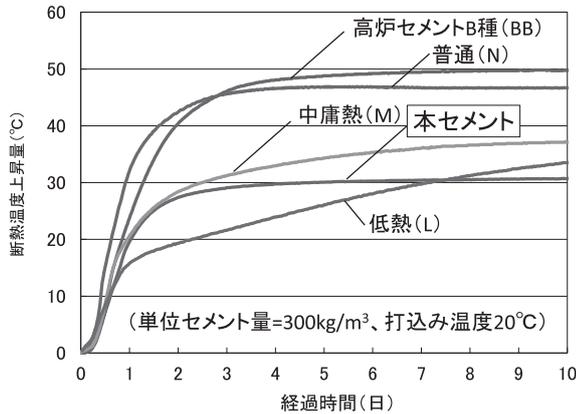
本セメント (高炉スラグ高含有セメント) の材料構成を図一に示す。本セメントは普通ポルトランドセメントに対して CO₂ 排出量が小さい高炉スラグ微粉末を60～70%使用することで図二に示すようにコンクリートの材料由来 CO₂ 排出量を6～7割削減することができる。本セメントは、高炉セメント B 種の高炉スラグ混合率を更に高めて発熱を低減させ、少量混合成分としてせっこうの少量添加により三酸化硫黄量 (以下 SO₃ 量) を増加させることで初期強度



図二 コンクリートの CO₂ 排出量と CO₂ 削減効果 (試算)³⁾

た本セメント (ECM) は JIS A 5211 の高炉セメント C 種に適合している。

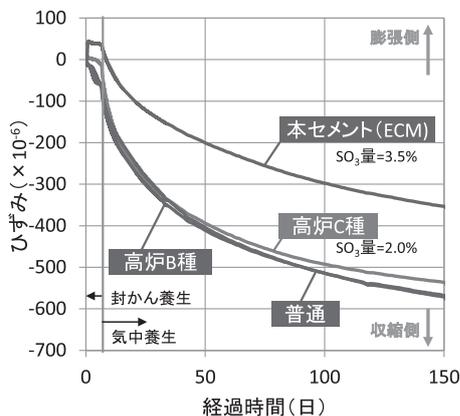
本セメントを用いたコンクリートは、図—3 に示すように低発熱型のポルトランドセメント (M, L) と同程度の断熱温度上昇量となり、通常セメント (N, BB) よりも水和発熱が小さいため、マスコンクリートの温度応力ひび割れの抑制に効果が期待できる。



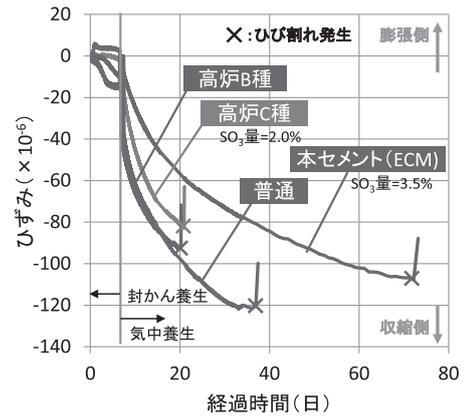
図—3 断熱温度上昇量測定結果の一例³⁾

また、SO₃ 量を最適化して 3.5% 程度まで増加させた本セメント (ECM) を用いたコンクリートは、図—4 に示すように従来のセメント (N, BB) に比べて収縮率を小さく抑えることができる³⁾。また、SO₃ 量を通常の 2% 程度とした高炉セメント C 種と比べても収縮ひずみが小さくなる。その結果、図—5 に示す鋼材外フレームを用いた外部拘束試験では、いずれのセメントよりもひび割れが発生する材齢が遅くなっており、乾燥収縮ひび割れの抑制に対して有利であることが分かる⁴⁾。

その他に本セメント (ECM) は、高炉スラグ微粉末を高含有しているため、高炉セメント B 種よりもさらに高いアルカリシリカ反応の抑制を有すること⁵⁾、塩化物イオン侵入に対する高い抵抗性を有すること⁶⁾、



図—4 コンクリートの自由収縮ひずみ⁴⁾



図—5 拘束試験体の拘束鋼材のひずみ⁴⁾

耐硫酸性・耐硫酸塩性の向上⁷⁾ などの耐久性向上の特長を持っている。

3. 普及展開

本セメント (ECM) を用いたコンクリートは国の資金による NEDO 研究開発の成果であることから普及を目指して当初から段階的に技術をオープンにしていく計画であった。そのために、NEDO 研究開発の終了後である 2014 年に ECM 共同研究開発チームが中心となって「コンクリート構造物の環境負荷低減と高品質の両立を図るために、高炉スラグ微粉末を用いたセメント・コンクリートの普及発展、研究開発、情報収集、国内外の研究機関との連携ならびに会員相互の技術交流を図る」ことを目的に、日本スラグセメント・コンクリート技術研究会を発足した。

本セメント (ECM) を用いたコンクリートの拡大普及の方策として、2013 年 8 月に竹中工務店・鹿島建設の 2 社で建築技術性能証明 (GBRC 性能証明 第 13-11 号)「高炉スラグ微粉末を高含有する結合材を用いた低発熱・低環境負荷コンクリート工法」を取得し、その後、2016 年 2 月に軽微な修正による改定を経て、2020 年 4 月に新たに上記の日本スラグセメント・コンクリート技術研究会を申請者に加えて、改定 2 回目の建設材料技術性能証明 (GBRC 材料証明 第 13-11 号 改 2) (図—6) を取得して現在に至っている。同研究会の会員の建設会社は、同証明の施工マニュアルに記載されている構造体強度補正値の標準値 (図—7) や、脱型・湿潤養生期間、中性化に対応する設計かぶり厚さの試算値など、設計・施工方法を定めるための拠り所として活用できるようになっている。同研究会では各社仕様の高炉スラグ微粉末の仕様の統一化を図り、低炭素型コンクリートが普及しやすい環境を整えることも検討している。

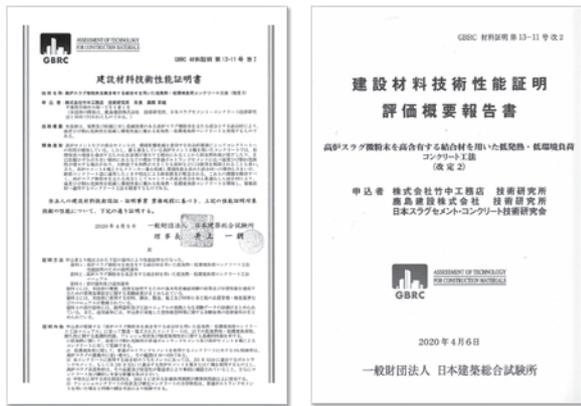


図-6 GBRC 建設材料技術性能証明書 (改定 2)⁸⁾

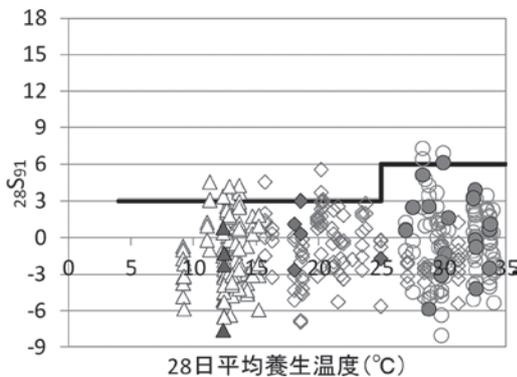


図-7 28工場におけるマスコンクリートの構造体強度補正值の実験結果⁸⁾

4. 建築物地上躯体への適用例

2017年3月に本セメント (ECM) を用いたコンクリートを地上・地下全躯体に適用しており⁹⁾、その際の材料・施工状況、品質管理状況を報告する。

(1) 適用概要

建築物と適用部位の概要を表-1に示す。建築物は定期借地10年の敷地に建設しており、建物の低環境負荷を目的として高炉スラグ高含有コンクリートの全躯体適用が採用された。地下部の耐圧盤・基礎が約300 m³、地上部の梁・床・耐力壁・パラペットが約250 m³であり、計550 m³のコンクリート量であった。また中性化対策として、地上部躯体の設計かぶり厚さは全て40 mm以上とした。施工時期は1~3月の冬期で、現場までの運搬時間は30分程度であった。

表-1 適用概要

種別	項目	詳細
建物	場所	東京都
	構造	RC造、一部S造
	規模	地上1階
コンクリート適用部位	部位	地下・地上部全て (計550 m ³)
	施工時期	2017年1月~3月 (冬期)

(2) コンクリートの使用材料および調合

使用材料を表-2に示す。本プロジェクトでは高炉セメントC種のプレミックスセメントでなく普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末4000を35:65の重量比とした結合材 (B) で使用した。高炉スラグ微粉末はJIS A 6206:2013に適合するが、収縮性能向上の観点からSO₃量を増加させた特注品を使用した。化学混和剤はAE減水剤 (高機能・収縮低減タイプ) を使用した。

コンクリート調合を表-3に示す。設計基準強度 (Fc) は24 N/mm² およびJASS5における計画供用期間の級 (標準65年) に対応する本コンクリートの耐久設計基準強度 (Fd) を実験により定めて30 N/mm² と設定し、大きい方を品質基準強度 (Fq) とした。

表-2 使用材料

項目	重量比	産地・銘柄
水 (W)		上水道水
セメント (C)	35	普通ポルトランドセメント 密度3.15 g/cm ³ , 比表面積3,350 cm ² /g
混和材 (BFS)	65	高炉スラグ微粉末4000 (JIS A 6206:2013) 密度2.86 g/cm ³ , 比表面積4,580 cm ² /g, SO ₃ 量=3.2%
細骨材 (S1)	65	千葉県富津市産 山砂 表乾密度2.62 g/cm ³ , 吸水率1.22%, 粗粒率1.98
細骨材 (S2)	35	青森県八戸産 石灰砕砂 表乾密度2.66 g/cm ³ , 吸水率1.18%, 粗粒率3.89
粗骨材 (G)		青森県八戸産 石灰岩碎石2005 表乾密度2.70 g/cm ³ , 吸水率0.60%, 粗粒率6.60
混和剤 (Ad)		AE減水剤 (高機能・収縮低減タイプ)

表-3 コンクリート調合

調合条件						単位量 (kg/m ³)							
Fc (N/mm ²)	Fd (N/mm ²)	SL (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	W	B (C+BFS)	C	BFS	S1	S2	G	Ad
24	30	18	4.5	43.0	43.0	177	412	144	268	471	253	983	6.18

※結合材 (B) = セメント (C) + 混和材 (BFS)

さらに実験により定めた出荷工場の構造体強度補正值 ($_{28}S_{91}$) の 3 N/mm^2 を加えて調合管理強度とし、呼び強度を 33 と設定した。調合は試験練りの結果から $W/B=43.0\%$ 、単位水量 (W) = 177 kg/m^3 と定めた。目標スランプ (SL) は $18 \pm 2.5 \text{ cm}$ 、目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

(3) 適用結果

コンクリート打込みは計 12 回(地下 7 回, 地上 5 回)の打込み日に分け、1 回の打込み量は約 $15 \sim 90 \text{ m}^3$ として、全 550 m^3 を打設した。フレッシュ試験の状況を写真-1 に示す。また、受入時のフレッシュ試験結果を表-4 に示す。全試験においてスランプ、空気量とも管理値内を満足し、フレッシュ性状は安定していた。コンクリート温度は $9 \sim 14^\circ\text{C}$ であり、塩化物イオン量は $0.019 \sim 0.067 \text{ kg/m}^3$ で規定値を満足した。フレッシュ性状は通常のコンクリートと変わりなく打ち込みが出来た。

標準養生材齢 28 日の圧縮強度試験結果 ($N=3$ 本 \times 全 12 回) を図-8 に示す。材齢 28 日の標準養生の強度は平均 50.5 N/mm^2 (標準偏差 3.01 N/mm^2) で呼び強度 33 を十分に満足した。

地上躯体の壁の型枠取り外し後の状況を写真-2 に示す。せき板の取外しは、打込み後 5~7 日後に現場封緘養生供試体で 15 N/mm^2 以上 (GBRC 材料証明の設計・施工マニュアルに記載) を確認後とした。打込

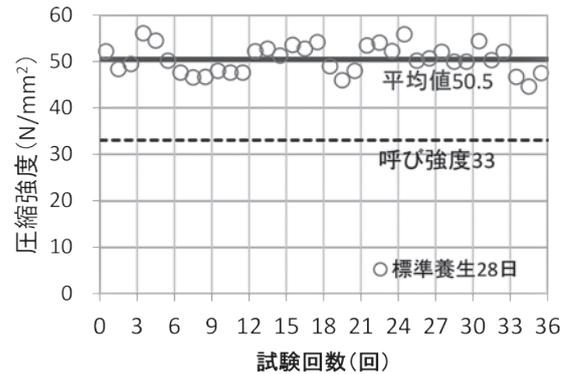


図-8 圧縮強度試験結果



写真-2 地上躯体壁の型枠取り外し後の状況

み後、壁・床部材にひび割れなどの変状は生じていなかった。

(4) CO₂ 削減効果

コンクリート 1 m^3 当たりの材料由来 CO₂ 排出量の試算結果を図-9 に示す。比較のための普通セメントコンクリートは出荷工場における同スランプ・空気量の標準配合を使用した。呼び強度 33 の普通セメントコンクリートは $305.1 \text{ (kg-CO}_2/\text{m}^3)$ であり、同呼び強度の本コンクリートと比較すると、本コンクリート (ECM) の CO₂ 排出量は 59.3% 低減できる試算結果となった。

550 m^3 の適用量に対し、呼び強度 33 の普通コンクリートと比較した場合は約 100 ton の CO₂ 削減 (CO₂ 削減率 59.3%) が見込まれた。

$$(305.1-124.1) \text{ (kg-CO}_2/\text{m}^3) \times 550 \text{ (m}^3) = 99.5 \text{ (t-CO}_2)$$



写真-1 フレッシュコンクリート試験

表-4 フレッシュ試験結果

項目		管理値	平均	N 数	最大値	最小値	標準偏差
フレッシュ コンクリート 試験	スランプ (cm)	18 ± 2.5	18.8	28	20.5	17.0	0.98
	空気量 (%)	4.5 ± 1.5	3.8	28	4.8	3.2	0.45
	コンクリート温度 ($^\circ\text{C}$)	-	11.8	28	14	9	-
	外気温 ($^\circ\text{C}$)	-	8.7	28	16	5	-
	塩化物イオン量 (kg/m^3)	0.30 以下	0.036	12	0.061	0.012	0.020

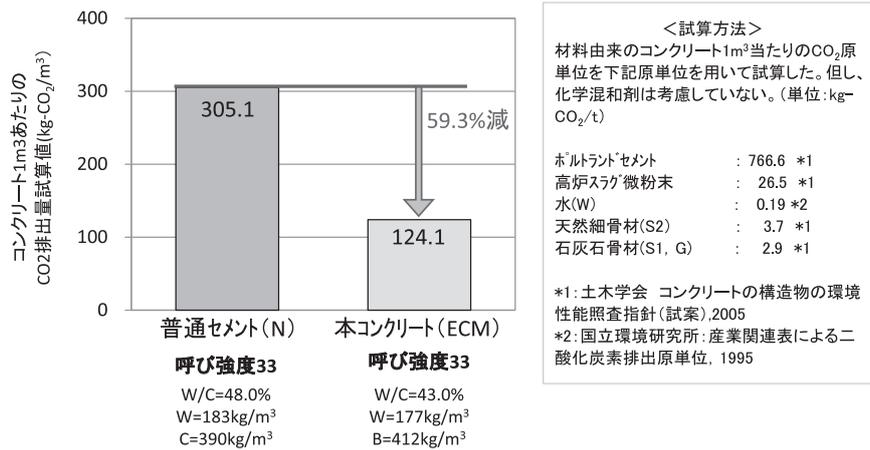


図-9 CO₂排出量の比較

(5) まとめ

高炉スラグ微粉末を結合材の65%混合した本コンクリート (ECM) を建築物の地上・地下全躯体に適用し、フレッシュ性状・強度性状とも良好であった。プロジェクトを通じて削減したCO₂削減量は呼び強度33と比較した場合に約100 ton程度と試算した。

5. 適用実績

本コンクリート (ECM) は現在まで弊社と鹿島建設の2社で適用展開を推進している。弊社のみ適用プロジェクト件数の推移を図-10に、適用コンクリート数量の推移を図-11に示す。2014年に超高層建築物の場所打ち杭に適用して以来、地下躯体(マツスラブ、基礎、基礎梁)を中心に適用し、2023年3月末時点で適用件数は計81件、適用数量は27万m³に達している。特に2021年からは多数のプロジェクトに脱炭素に貢献できる技術として引き合いが増加しており、適用実績が増加している。今後も都市圏を中心に本コンクリートの供給体制の整備を進めていく予定である。

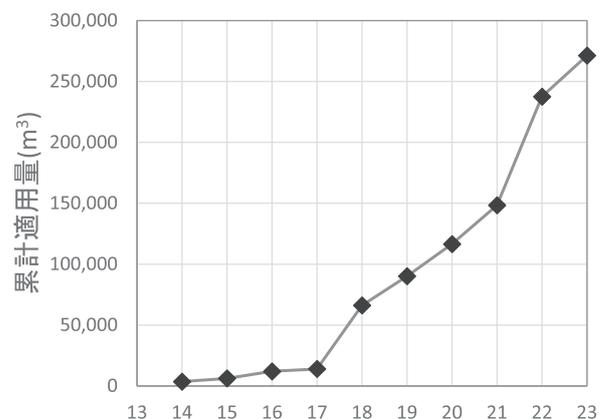


図-11 本コンクリート (ECM) の適用数量の推移 (弊社分のみ)

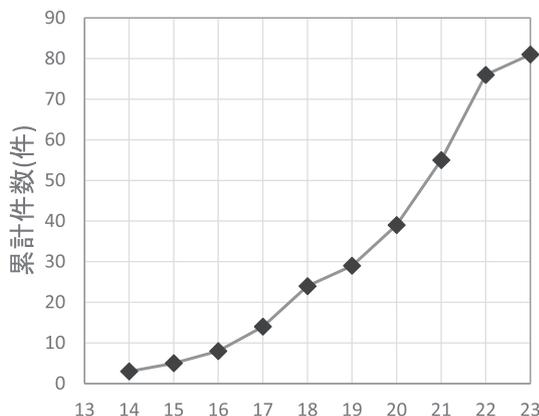


図-10 本コンクリート (ECM) の適用件数の推移 (弊社分のみ)

6. おわりに

高炉スラグを高含有した本セメント (ECMセメント) を使用したコンクリートについて、技術及び技術認証の概要と普及展開の状況を示した。また、その後の建築物の地上躯体に適用した事例を紹介するとともに、これまでの適用実績の推移を示した。今後も、本コンクリート (ECM) の技術を公開して適用展開を広め、コンクリート工事のCO₂削減に貢献していきたい。

謝辞

本研究開発に当たり多くのご指導を頂きました坂井悦郎東京大学名誉教授、共に実用化開発に携わった7企業の関係各位に謝意を表します。また、日本スラグセメント・コンクリート技術研究会において多大なるご指導を頂いている、大門正機東京工業大学名誉教授(会長)、長瀧重義東京工業大学名誉教授(顧問)、専門委員の先生方、特別会員の鉄鋼スラグ協会に、末尾ながら記して謝意を表します。

《参考文献》

- 1) 米澤敏男, 坂井悦郎, 鯉淵清, 木之下光男, 釜野博臣: エネルギー・CO₂ ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステム, コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp.69-73, 2010.9
- 2) 辻大二郎, 小島正朗, 檀康弘: 二酸化炭素 (CO₂) 排出量を6割削減できる高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの実工事への適用, 建設機械施工, Vol.69, No.3, pp.9~14, 2017.3
- 3) 竹中工務店/HP >ソリューション>脱炭素社会に貢献するECMコンクリート®, <https://www.takenaka.co.jp/solution/environment/ecm/> (2023年4月10日確認)
- 4) 辻大二郎, 小島正朗, 井上和政, 野口貴文: 高炉スラグ微粉末を高含有した結合材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の向上に関する実験検討, コンクリート工学年次論文集, Vo.38, No.1, pp.201-206, 2016. の図を一部修正
- 5) 久我龍一郎, 田中敏嗣, 辻大二郎, 小島正朗, 坂井悦郎: 高炉スラグ高含有セメントのアルカリシリカ反応 (ASR) 抵抗性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.343-344, 2016.8
- 6) Kamonratana Siriprapa, 佐伯竜彦, 斎藤豪, 辻大二郎: Study on chloride ion penetration characteristic of concrete containing high-volume replaced blast furnace slag, 第70回セメント技術大会講演要旨, pp.228-229, 2016
- 7) 伊藤是清, 小山智幸, 原田志津男: 高炉スラグ高含有セメントを用いたモルタルの耐硫酸および耐硫酸塩性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.279-280, 2014.9
- 8) 竹中工務店・鹿島建設・日本スラグセメント・コンクリート技術研究会: 建設材料技術性能証明 GBRC 材料証明 第13-11号改2「高炉スラグ微粉末を高含有する結合材を用いた低発熱・低環境負荷コンクリート工法 (改訂2), (一社)日本建築総合試験所, 2020.4
- 9) 辻大二郎, 小川亜希子, 小島正朗, 高木俊輔, 井上富太, 長田宗平, 井上孝之, 伊藤優: 高炉スラグ高含有コンクリートの建築物全躯体への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 材料施工, pp.57-58, 2016.8

【筆者紹介】

辻 大二郎 (つじ だいじろう)
 (株)竹中工務店
 技術研究所 建設基盤技術研究部 建設材料グループ
 グループ長



小島 正朗 (こじま まさろう)
 (株)竹中工務店
 技術研究所 建設基盤技術研究部
 主席研究員

