

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

辻 大二郎・小 島 正 朗・檀 康 弘

鉄鋼製造の副産物を用いた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・低環境負荷セメントである 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)} で開発した。本セメントは発熱が小さいこと、初期強度を向上できること、収縮が小さいこと、塩化物や酸などの化学抵抗性が高いことが特長である。本セメントを国内初の建築地下躯体に適用することで、CO₂ 排出量を従来セメント比で 6 割程度低減することができた。
キーワード：低炭素、二酸化炭素、高炉セメント、高炉スラグ、地下躯体、実適用

1. はじめに

近年、国内外の CO₂ 排出削減対策の動向が急激に変化しつつある状況であり、COP21 (国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議) における 2030 年度温室効果ガス排出削減目標の達成に向けて、具体的な施策を打ち出すための新たな段階にきている。今後、建設産業分野も適切な対応を図っていくことが求められている。

一方、国内の温室効果ガス総排出量の約 4% がセメント産業と言われており、この 4% のうち約 6 割に相当する 2.4% がセメントを製造する中間製品であるクリンカを製造するプロセスで原料 (石灰石) から化学反応によって発生するものであり、その排出削減は困難である。こうした中、一般社団法人日本建設業連合会は 2016 年 4 月にパンフレット「低炭素型コンクリートの普及促進に向けて」^{b)} を出版し、建設業に高炉スラグやフライアッシュなどの産業副産物を有効利用したコンクリートを普及することでコンクリート工事における CO₂ 排出削減に取り組み始めている。

このような背景のもと、著者らの研究グループ^{a)} は、一般に流通されている高炉セメント B 種 (高炉

スラグ含有率 40～45%) よりも更に高炉スラグ微粉末の混合率を 1.5 倍程度の 60～70% まで向上させ、CO₂ 排出量をポルトランドセメント比で約 60% 削減できる低炭素型のセメントの開発とそのセメントの利用技術の開発¹⁾ に取り組んできた。ここでは、本セメントの特長および実工事に適用した結果を報告する。

2. 本セメントの概要

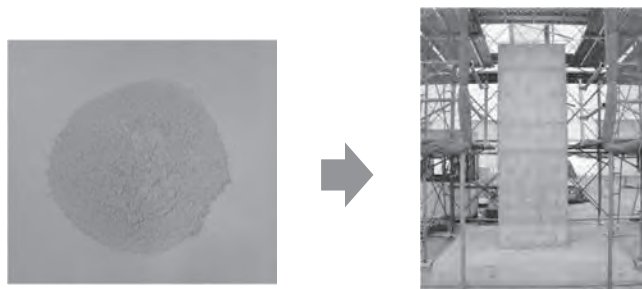
(1) 概要

本セメントは、特に地下躯体コンクリートの使用に適した特性を有する低発熱・低環境負荷セメントである。高炉スラグ微粉末を 60～70% 程度、普通ポルトランドセメントを 30% 程度含有し、高炉セメント C 種の JIS 規格に適合するセメントである。写真—1 に本セメントと本セメントを用いた構造体の例を示す。また、図—1 に本セメントの基本構成と CO₂ 排出量の目安を示す。CO₂ 排出量はポルトランドセメント製造時の 764.3 (kg-CO₂/t)²⁾ に対し、鉄鋼製造副産物を用いた高炉スラグ微粉末は 26.5 (kg-CO₂/t)³⁾ と 1/30 程度であることから、高炉スラグ含有率を高めるほどセメントの CO₂ 排出量は低減することとなる。本セメントは従来セメントの普通ポルトランドセメント (以下、N) に比べて約 65%、高炉セメント B 種 (以下、BB) に比べて約 45% の CO₂ 削減が期待できる。

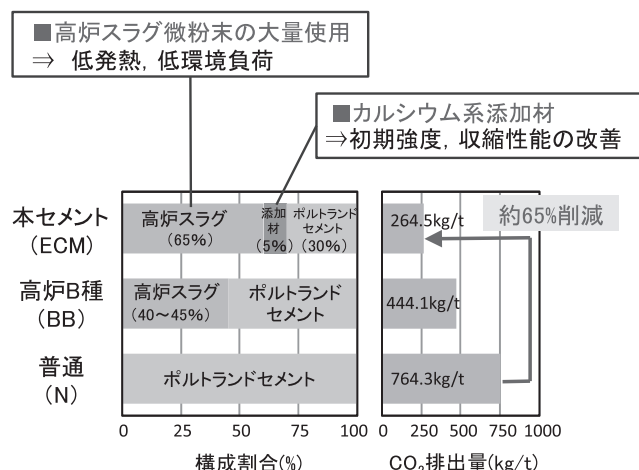
性能面では、JIS 規格の範囲内でカルシウム系添加材としてセッコウを少量添加しており、強度性状や収縮性能を改善し、高炉セメントのひび割れ抵抗性を向

a) 国立研究開発法人新エネルギー・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)アイ・シー、日鉄住金高炉セメント(株)、太平洋セメント(株)、日鉄住金セメント(株)、竹本油脂(株)、国立大学法人東京工業大学

b) 一般社団法人日本建設業連合会 HP
<http://www.nikkenren.com/publication/detail.html?ci=237> (2016 年 12 月確認)



写真一 本セメント (ECM) と本セメントを用いた構造体の例

図一 本セメントの基本構成成分と CO₂ 原単位の目安

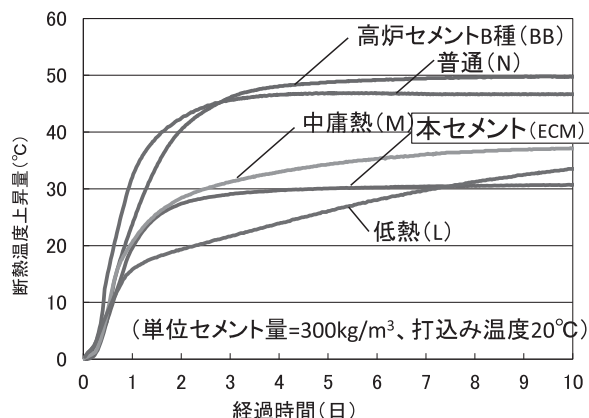
上させている。従来の高炉セメント B 種は、建築用コンクリートのような強度の高い領域で用いると、逆に発熱が大きくマスコン用として不向きとされ敬遠される傾向があった。本セメントは、高炉セメント B 種よりも高炉スラグ混合率を更に高めて発熱を低減させ、セッコウ少量添加により初期強度や収縮性能を改善させた低発熱・低環境負荷セメントであり、環境性能と基本性能（施工性、強度、耐久性）の両立を図っていることが開発コンセプトである。

(2) 特長

本セメントは高炉スラグを高含有すること、そして SO₃ 量を適切に設定することで以下の特長を有している。

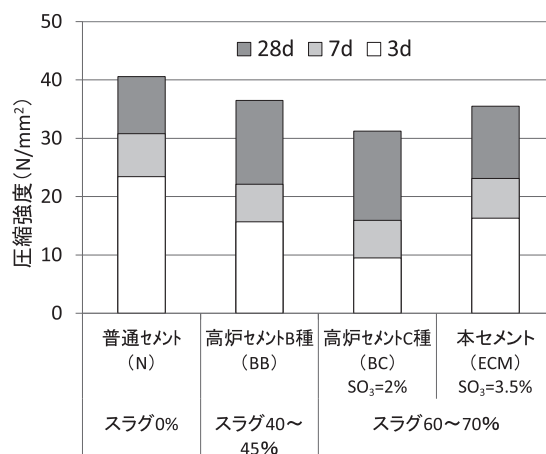
①水和熱が小さく、部材内の温度上昇を抑制できること

図一 2 に単位セメント量 300 kg/m³、打込み温度 20℃ の場合のコンクリートの断熱温度上昇量測定結果の一例⁴⁾を示す。本セメントは N や BB より断熱温度上昇量は 20℃ 程度小さく、中庸熱セメントとほぼ同等の発熱特性を有している。水和熱が小さいことは、マスコン部材の温度上昇を抑制でき、温度ひび割れの低減に効果が期待できる。

図二 断熱温度上昇量測定結果の一例⁴⁾

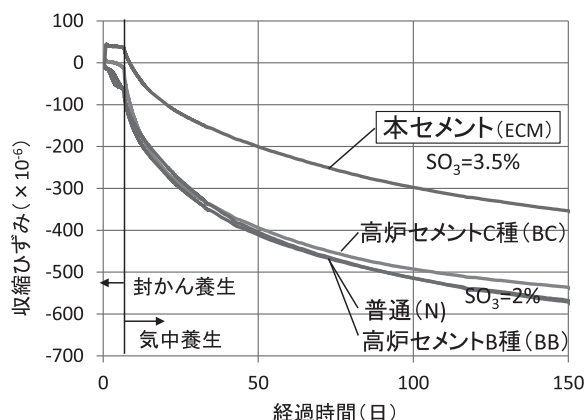
②初期強度を向上できること

図一 3 に圧縮強度特性の一例⁵⁾を示す。高炉セメントは初期強度の発現が小さく、特に高炉スラグの含有率が高いほどその傾向が顕著となり、短工期を指向する実工事の支障となる。本セメントは SO₃ 量を、通常の市販セメントの一般的な SO₃ 量 (2% 程度) より、少量添加して 3.5% 程度とすることで、初期強度 (3 日強度) の向上を図っている。

図三 圧縮強度特性の一例⁵⁾

③収縮ひずみを低減できること

図一 4 に収縮ひずみ測定結果の一例⁵⁾を示す。10 × 10 × 40 cm の試験体に対し、打込み後材齢 7 日までの自己収縮（封かん養生）と材齢 7 日以降の乾燥収縮（気中養生）の足し合わせの収縮ひずみを示している。本セメントの収縮ひずみは、初期にセッコウ添加によるエトリンガイト生成により 50μ 程度膨張し、その後の乾燥収縮ひずみは従来セメントの N, BB および通常の SO₃ 量である BC よりも材齢 91 日で 200μ 程度低減される傾向を示した。収縮ひずみを低減することで、高炉セメントの収縮ひび割れが生じやすい欠点の改善を期待できる。

図—4 自由収縮ひずみ測定結果の一例⁵⁾

④化学抵抗性が高く、塩化物や酸・硫酸塩の浸入に高い抵抗性を有すること

高炉セメントコンクリートの一般的な特長として、普通ポルトランドセメントコンクリートに比べて、耐海水性や化学抵抗性が高く、鉄筋を保護する性能に優れている。また高炉セメント硬化体は、全空隙が小さく緻密化することで水密性が高い性質を有し、長期に渡って圧縮強度が増進して安定した硬化体が形成される。本セメントを用いた高炉セメントC種相当の場合においても塩化物イオンの見掛けの拡散係数が小さく⁶⁾、また耐酸性、耐硫酸塩性に対する抵抗性が高く⁷⁾、アルカリシリカ反応 (ASR) が生じ難いこと⁸⁾を確認している。

(3) 適用部位

本セメントは以上のような特長を有する長所がある一方で、ポルトランドセメント使用量が少ないため、水和物である水酸化カルシウム生成量が少ないことで既存の普通ポルトランドセメントより中性化抵抗性は劣る。したがって、本セメントを使用する場合には、コンクリートを使用する部位などの条件を考慮し、その性能が十分に発揮されるように配慮する必要がある。

本セメントを用いたコンクリートは、耐圧盤・基礎や場所打ち杭などの地下躯体への適用が適している。耐圧盤・基礎の大きな断面の部材に用いた場合はマスコンの発熱量抑制による温度ひび割れの抑制が期待でき、場所打ち杭に用いた場合は地中の酸・海水など劣化因子やピット内の腐食性劣化因子に対して耐久性を向上が期待できる。本セメントを場所打ち杭に用いた場合の品質は施工実験を通して施工性、強度発現とも良好であることを確認している⁹⁾。施工例を写真—2に示す。



写真—2 本セメントを用いた場所打ち杭の例

3. 実工事への適用

本セメントを実工事の地下躯体 (耐圧盤) に適用した。施工性、圧縮強度の品質管理結果およびCO₂削減効果について、既報¹⁰⁾に一部写真を加えた形で報告する。

(1) 適用概要

建物と適用部位の概要を表—1に示す。写真—3に完成予想パースを示す。本コンクリートを医療施設となる建築物の地下耐圧盤 (鉄筋コンクリート造) の一部に適用した。耐圧盤は厚さ 800 mm であり上部は勾配を施すために増打ちコンクリートが施工される部位である。施工時期は 2014 年 10 月の標準期で、コンクリート数量が約 950 m³ であるため、ポンプ車 2 台を用いて 1 日で打設した。大阪府内のレディーミクス

表—1 適用概要

種別	項目	内容
建物	用途	医療施設 (大阪府内)
	構造	RC 造、一部 S 造
	規模	地下 2 階、地上 13 階、塔屋 2 階
適用部位	部位	耐圧盤の一部 (約 950 m ³)
	施工時期	2014 年 10 月初旬



写真—3 適用プロジェクト

トコンクリート工場で製造し、現場までの運搬時間は30～50分程度であった。

(2) 使用材料

セメントの試験成績表を表—2に、使用材料を表—3に示す。本セメントは密度 2.97 g/cm^3 、比表面積 $4060 \text{ cm}^2/\text{g}$ であり高炉スラグ微粉末を65%程度含んでいる。化学混和剤は高炉スラグが高含有した場合の運搬時のスランプの低下を抑制するために改良されたAE減水剤を使用した。

(3) コンクリート調合

コンクリート調合を表—4に示す。設計基準強度 (F_c) は 30 N/mm^2 に対して、実験により定めた出荷工場の構造体補正強度 (S値) の 6 N/mm^2 を加えて呼び強度を36と設定した。W/Cと単位水量 (W) は試験練の結果からそれぞれ46.0%, 176 kg/m^3 と定めている。目標スランプ (SL) は $15 \pm 2.5 \text{ cm}$ 、目標空気量は $4.5\% \pm 1.5\%$ とした。

表—2 セメント

		高炉セメント C 種 (JIS R 5211)	本セメント の試験値
密度	g/cm^3	—	2.97
比表面積	cm^2/g	3300 以上	4060
安定性	パット法	良	良
凝結	水量 %	—	29.2
	始発 h-min	60 min 以上	3-10
	終結 h-min	10 h 以下	5-30
圧縮強さ	3d	7.5 以上	18.2
	7d	15.0 以上	32.0
	28d	40.0 以上	51.1
化学成分	MgO	6.0 以下	4.33
	SO_3	4.5 以下	3.55
	強熱減量	5.0 以下	0.96

表—3 使用材料

項目		産地・銘柄
セメント (C)		ECM セメント (高炉セメント C 種) 密度 2.97 g/cm^3 、比表面積 $4060 \text{ cm}^2/\text{g}$
水 (W)		上澄水
細骨材 (S1)	30%	大分県津久見産 石灰砕砂 表乾密度: 2.65 g/cm^3 、吸水率 1.03%, FM: 2.90
細骨材 (S2)	70%	兵庫県家島産 砕砂 表乾密度: 2.57 g/cm^3 、吸水率 1.66%, FM: 2.90
粗骨材 (G)		兵庫県家島産 碎石 (2010と1505を1:1で混合) 表乾密度: 2.62 g/cm^3 、吸水率 0.92%, FM: 6.70
混和剤 (Ad)		AE 減水剤高機能タイプ (変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体)

(4) 適用結果

(a) フレッシュ性状

受入検査の試験結果を表—5に示す。 150 m^3 毎に各3回×7ロットの計21回の試験を実施した。スランプ試験の状況を写真—4に、スランプ試験結果を図—5に、空気量試験結果を図—6に示す。混和剤使用量は $C \times 0.7 \sim 0.9\%$ の範囲であった。受入検査のフレッシュ性状は管理値を満足し、概ね安定したコンクリートが供給できた。但し、交通渋滞などの影響により運搬時間が30分から60分まで差が生じたことや、施工中の外気温 ($22 \sim 27^\circ\text{C}$) の変化が大きいことなど種々の要因によって、スランプや空気量にややばらつきが生じたが、管理値の範囲内を満足した。コンクリート温度は $24 \sim 27^\circ\text{C}$ であり、塩化物イオン量は $0.01 \sim 0.02 \text{ kg/m}^3$ で規定値を満足した。

(b) 圧縮強度

受入検査の圧縮強度試験結果を図—7に示す。材

表—4 コンクリート調合

調合条件					単位量 (kg/m^3)					
F_c (N/mm^2)	SL (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S1	S2	G	Ad
30	15	4.5	46.0	44.2	176	383	228	517	951	3.06

表—5 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
スランプ (cm)		15 ± 2.5	15.2	21	17.5	12.5	1.69
空気量 (%)		4.5 ± 1.5	4.2	21	5.7	3.1	0.59
圧縮強度 (N/mm^2)	標準養生 28 日	36 以上	44.3	21	46.0	40.9	1.51
	現場封緘養生 91 日	30 以上	44.3	21	48.5	39.3	2.42



写真-4 スランプ試験状況

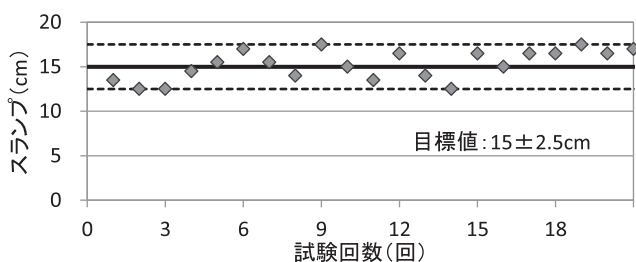


図-5 スランプ試験結果

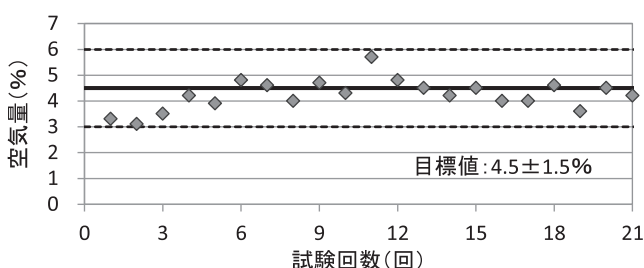


図-6 空気量試験結果

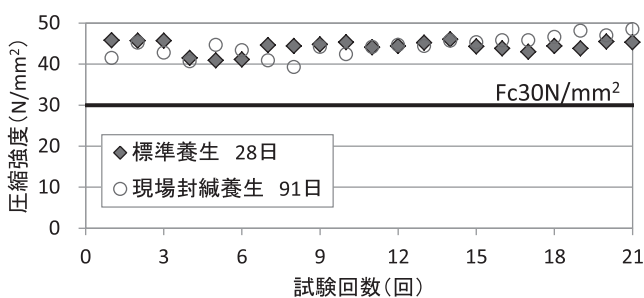


図-7 圧縮強度試験結果

齢 28 日の標準養生の強度は平均 44.3 N/mm^2 (標準偏差 1.51 N/mm^2) で呼び強度 36 を十分に満足した。また構造体強度の管理用として採取した材齢 91 日の現場封緘養生の強度は同様に平均 44.3 N/mm^2 (標準偏差 2.42 N/mm^2) であり、設計基準強度を十分に満足した。

(c) 施工性と硬化性状

耐圧盤打設状況を写真-5 に、本コンクリートの流動状況を写真-6 に示す。コンクリートポンプ車 2



写真-5 耐圧盤打設状況



写真-6 本コンクリートの流動状況

台で、計 950 m^3 を 11.5 時間 (7:30 ~ 18:00, 休息 30 分) で打設した。1 台当たりの打込み量は $41.3 \text{ m}^3/\text{h}$ となり通常の普通コンクリートとほぼ同等の歩掛りであった。ブームとフレキホース (20 ~ 30 m 程度) による圧送打込みを通常のコンクリート同様に実施できた。打設翌朝に床面 (金ゴテ 1 回押え) の硬化性状を確認し、ひび割れなどの変状は生じていなかった。

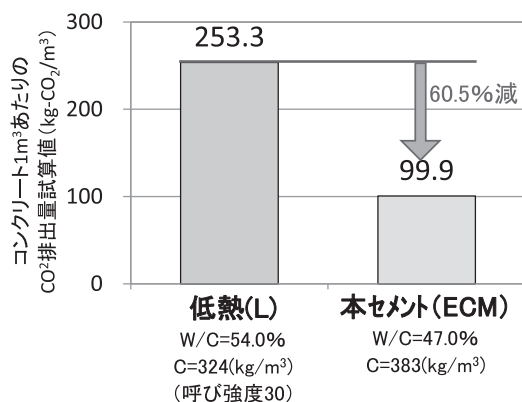
(d) CO_2 排出量

コンクリート 1 m^3 当たりの材料由来 CO_2 排出量の試算結果を図-8 に示す。耐圧盤に通常に使用される予定であった低熱セメントコンクリートと比較して、本セメントを用いたコンクリートの CO_2 排出量は 60% 程度低減できる試算結果となった。

従って、本工事に適用した本セメントを用いたコンクリートの適用量 950 m^3 の CO_2 削減量 (t-CO_2) は、
 $950 \times (253.3 - 99.9) \times (1/1000) = 145.4 \text{ (t-CO}_2\text{)}$
 であった。

4. 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を実工事の耐圧盤に適用



＜試算方法＞
材料由来のコンクリート1m³当たりのCO₂原単位を下記原単位を用いて試算した。但し、化学混和剤は考慮していない。また、石膏の原単位はゼロとした。(単位:kg-CO₂/t)

ポルトランドセメント	: 764.3 *1
高炉スラグ微粉末	: 26.5 *2
水(W)	: 0.19 *3
天然細骨材(S2)	: 3.7 *2
石灰石骨材(S1, G)	: 2.9 *2

*1: セメント協会 セメントのLCIデータの概要, 2013
*2: 土木学会 コンクリートの構造物の環境性能照査指針(試案), 2005
*3: 国立環境研究所 産業関連表による二酸化炭素排出原単位, 1995

図ー8 CO₂排出量の比較

した。その結果、所定のフレッシュ性状および硬化性状の管理値を満たし、通常コンクリート同様に施工できることが確認された。また、本コンクリートを実工事に適用することで、副産物である高炉スラグの有効利用を促進し、CO₂排出量を大きく削減できることを示した。今後、段階的に本コンクリートの技術を公開していく予定であり、コンクリート工事のCO₂削減に貢献していきたい。

謝 辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成による「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」の一環として、東京工業大学坂井悦郎教授、(株)竹中工務店、鹿島建設(株)、(株)デイ・シイ、日鉄住金高炉セメント(株)、太平洋セメント(株)、日鉄住金セメント(株)および竹本油脂(株)による共同研究として実施しました。本研究に関わられた関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。また実出荷に際しご協力を賜った阪南産業(株)港工場の関係各位に謝意を表します。

J C M A

【参考文献】

- 1) 米澤敏男, 坂井悦郎, 鯉渕清, 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) セメント協会: セメントのLCIデータの概要, 2013
- 3) 土木学会: コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案), 2005
- 4) 大塚勇介, 平本真也, 植木康知, 小倉東: 高炉スラグ高含有セメントの強度と発熱特性について, 第68回セメント技術大会講演要旨, pp.11-12, 2014.5 図5にNデータ追加

- 5) 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, Vol.38, No.1, 2016, pp.201-206.
- 6) Kamonratana Siripapa, 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酸性、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週(近畿), pp.279-280, 2014
- 8) 久我龍一郎, 辻大二郎, 田中敏嗣, 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(九州), pp.343-244, 2016
- 9) 辻大二郎, 村上裕貴, 若井修一, 小島正朗: 高炉スラグ高含有セメントを用いた場所打ち杭の品質, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, 2015, pp.1357-1362.
- 10) 辻大二郎ら: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの基礎躯体への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概週(関東), pp.539-540, 2015

【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 建設材料部門 構造材料グループ
主任研究員



小島 正朗(こじま まさろう)
(株)竹中工務店
技術研究所 建設材料部門 構造材料グループ
グループリーダー



檀 康弘(だん やすひろ)
日鉄住金高炉セメント(株)
技術開発センター
センター長

