

日鉄住金セメント(株)における高炉スラグを活用した 高機能建設製品

High Performance Construction Products Using Highly Pulverized Blast Furnace Slag in Nippon Steel & Sumikin Cement Co., Ltd.

若 杉 伸 一*
Shinichi WAKASUGI

金 沢 智 彦
Tomohiro KANAZAWA

小 倉 東
Tsukasa OGURA

佐 川 孝 広
Takahiro SAGAWA

抄 録

高炉セメントは長期強度の増進、水和熱の抑制、耐久性向上などの優れた特徴を有し、国内セメント使用量の25%を占めている。高炉セメントに使用されるスラグ微粉末の比表面積は4000cm²/g程度であるが、高炉スラグの更なる優れた特性を引き出す手段の一つに高微粉末化がある。日鉄住金セメント(株)は、高炉スラグの高微粉末化と材料設計技術により、高機能を有するセメント系固化材、地盤注入用超微粒子セメント、およびコンクリート補修材などの開発を行ってきた。

Abstract

Portland blast-furnace slag cement has superior characteristics such as a long-term strength increase, the restraint of heat of hydration, the durable improvement, and occupies 25% of domestic cement consumption. Specific surface area of a ground granulated blast furnace slag used for slag cement is approximately 4000cm²/g, but the fine pulverizing is one of the means to draw a further superior characteristic of the blast furnace slag. Nippon Steel & Sumikin Cement Co., Ltd. have been developing high performance solidification materials, superfine cement for grout and durable concrete repair materials by using highly pulverized slag and material design technology.

1. はじめに

日鉄住金セメント(株)は1954年に北海道室蘭市で創業し、新日鐵住金(株)室蘭製鉄所から副生する高炉スラグを原料に高炉セメントおよび普通ポルトランドセメント等を製造、北海道と東北を中心に販売を行っている。近年の販売量は年100万t前後で推移し、サハリンへの高炉セメント輸出実績も有している。

一方、汎用セメントから派生し、高炉スラグの特徴を活用した様々な高機能建設製品を開発し、国内はもとより北米等海外にも販路を拡大しつつある。本報では日鉄住金セメントの高機能建設製品の概要を紹介する。

2. 高炉スラグ高微粉末の利用

高炉セメントは、長期強度の増進、アルカリシリカ反応抑制、耐海水性、水和熱抑制などの特徴があり、国内での使用量はセメント全体の約25%を占めている。流通し

ている高炉セメントのほとんどは高炉セメントB種であり、その原料となるスラグ微粉末は、ブレン比表面積は4000cm²/g程度、スラグ分量は40～45%の限定された領域で使用されている。

このような一般的な高炉セメントの性質を改善し、更に高炉スラグの優れた特性を引き出す手段の一つにスラグの高微粉末化がある。たとえば表1りに示すように通常の4000cm²/gに対し、比表面積を高め適切な置換率を設定することにより、フレッシュコンクリートの性質の改善や、強度の増進、耐久性の向上を図ることが可能となる。

日鉄住金セメントは、高炉スラグの高微粉末化および材料設計技術により、高機能を有するセメント系固化材、地盤注入用超微粒子セメントおよびコンクリート補修材など、多様な建設製品の開発を行っている。

3. セメント系固化材

セメント系固化材²⁾とは、土の固化を目的にセメントの

* 日鉄住金セメント(株) 製品開発部長 北海道室蘭市仲町64番地 〒050-8510

表1 高炉スラグ微粉末の比表面積と置換率の組合せがコンクリートの性質に及ぼす影響¹⁾

Influence of ground granulated blast-furnace slag fineness and substitution ratio on concrete properties

	Type	Ground granulated blast-furnace slag 4000	Ground granulated blast-furnace slag 6000	Ground granulated blast-furnace slag 8000
	Blaine specific surface area (cm ² /g)	3000 ≤ < 5000	5000 ≤ < 7000	7000 ≤ < 10000
	Substitution ratio (%)	30 50 70	30 50 70	30 50 70
Property of fresh concrete	Fluidity	○ ○ ○	◎ ◎ ◎	◎ ◎ ○
	Bleeding	○ ○ △	◎ ◎ ◎	◎ ◎ ◎
	Setting delay effect	◎ ◎ ◎	◎ ◎ ◎	○ ◎ ◎
	Adiabatic temperature rise	- - ◎	- - ◎	- - ◎
	Heat generation rate restraint	○ ◎ ◎	○ ○ ◎	○ ○ ◎
Property of strength	Initial strength	○ △ △	○ ○ △	○ ○ ○
	28 days strength	○ ○ △	○ ◎ ◎	◎ ◎ ◎
	Long-term strength	○ ◎ ◎	○ ◎ ◎	◎ ◎ ◎
	High strength	○ △ △	○ ◎ ◎	◎ ◎ ◎
Property of durability	Drying shrinkage	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Carbonation	- - △	- - △	- - △
	Freeze thaw	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Water-tightness	○ ◎ ◎	○ ◎ ◎	○ ◎ ◎
	Salt shield	○ ◎ ◎	○ ◎ ◎	○ ◎ ◎
	Seawater resistant	○ ◎ ◎	○ ◎ ◎	○ ◎ ◎
	Acid resistant, sulfates resistant	○ ◎ ◎	○ ◎ ◎	○ ◎ ◎
	Heat resistant	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Alkali-silica reaction restraint	○ ◎ ◎	○ ◎ ◎	○ ◎ ◎
	Abration resistance	○ ○ ○	○ ○ ◎	○ ◎ ◎

Symbol
 ◎ : Good property is provided in comparison with no mixture concrete
 ○ : At the same level or a little good property is provided
 △ : Attention is necessary for use
 - : Property varies according to a condition

特定成分や粒度を調整した特殊セメントで、建築基礎地盤の改良、道路の路床、路盤の安定処理、発生土の改良工事等に用いられ、全国需要は2012年度で700万tに達する。

日鉄住金セメントが立地する北海道の特徴的な地盤として泥炭がある。泥炭は湿性植物の遺体が低温多湿の条件下で、分解が不十分のまま自然堆積したものであり、北海道には約2000km²に及ぶ泥炭地が分布³⁾している。泥炭は大半が有機物からなり、高含水、高有機質のため、高炉セメントや一般軟弱土用の固化材での固化は困難であった。

この泥炭を固化するために開発されたのがセメント系固化材“日鉄アースタイト ET-201”である。泥炭にET-201および各種固化材を添加した一軸圧縮強度を図1³⁾に示す。ET201は高炉セメント等では固化しない泥炭に対しても、

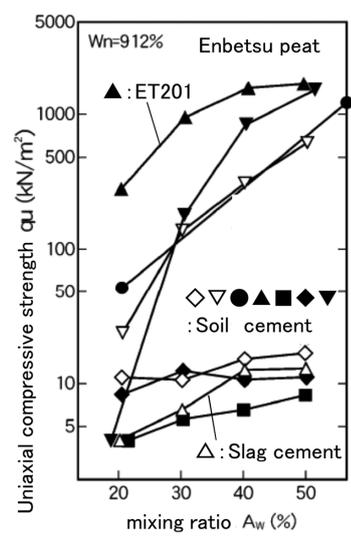


図1 改良材混合比と一軸圧縮強度³⁾
 Uniaxial compressive strength and mixing ratio of soil cement

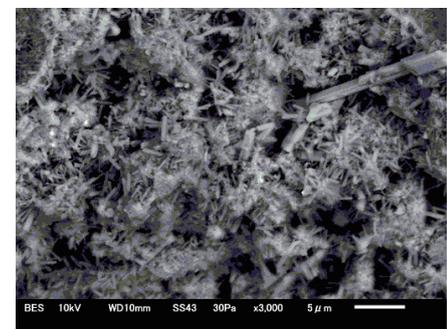


写真1 ET201水和物のSEM写真
 SEM photograph of ET201 paste

低混合比から高強度を発現することがわかる。この優れた強度発現は、セメント鉱物、高微粉高炉スラグおよび石膏の最適配合によって、多量の水を含む針状結晶のエトリンガイト (3CaO · Al₂O₃ · 3CaSO₄ · 32H₂O) (写真1) が生成することに起因する。

地盤固化材アースタイト (ET) シリーズは、一般軟弱土用 ET104 · ET101, 特殊土用 ET104C, 泥炭用 ET201 および発塵抑制型 ET104 プラスをラインナップしている。

4. 地盤注入用超微粒子セメント

ダム基礎遮水処理やトンネル掘削および土質地盤の止水・安定化工事において、岩盤クラックや土粒子間隙に固結材料を浸透注入する、いわゆる注入工法が用いられる場合がある。使用材料は、大きく薬液系と非薬液系 (セメント系) に分類され、セメント系は通常の汎用セメントと、より粒子径の小さい注入用の超微粒子セメントがある。

4.1 超微粒子セメントの開発経緯

超微粒子セメントの開発は、青函トンネルに23万tの納入実績を有する日鉄高炉コロイドセメント⁴⁾に始まる。

1971年、日本鉄道建設公団、日本化学工業(株)、日鉄住金セメントで構成される“青函トンネル注入材開発研究委員会”においてグラウト用セメントに以下の品質目標が設定された。

- (1) 微細クラックへ注入できる超微粉セメント
- (2) 高温多湿なトンネル内貯蔵でも風化しがたい
- (3) Labiles Wasserglass (LW) グラウトのゲルタイムが3分以上
- (4) 強度は材齢3日で40kgf/cm²以上で、硬化体は海水に浸食されないこと

当時の技術では高炉セメントをブレン比表面積4500cm²/g以上に粉砕することは困難であり、この粒度では微細クラックへの注入は不可能であった。

この課題に対し、粉砕時のアグロメレーションのメカニズム解明と粉砕助剤の膨大な研究から、ジエチレングリコールを添加することより比表面積7000cm²/gまで粉砕が可能で、セメントの耐風化性も著しく向上することを見だし、微粒子の高炉コロイドセメント(6000cm²/g)の量産化に成功した。

また高炉コロイドセメントのスラグ分量は、耐海水性とゲルタイム目標から高含有領域である55%と設定された。施工から30年経過した注入固化体調査⁹⁾の結果、コア中の硬化物は堅硬で、強度も要求性能を満たしており、過酷な海水環境における高炉スラグ系注入材の長期耐久性が実証されている。

これ以降も、全国のダム建設における基礎グラウチングに対応するため、1979年に超微粒子セメント“日鉄スーパーファイン”(以下SFと略す)を開発、その後、海水・熱水用SF-L(1990年)や早期硬化型SF-X3(2006年)を製品化し、2007年からは極超微粒子注入材“HNP-1500”の生産に着手し、液状化防止、耐震補強工事等への市場開拓を進めている。

4.2 注入用超微粒子セメントの浸透性能

日鉄住金セメントのセメント系注入材の粒度分布を図2に示す。平均粒径は高炉セメント(BB)の20μmに対し、微粒子のコロイドセメント(NC)は8μm、超微粒子のスーパーファイン(SF)は4μmである。もっとも細かい極超微粒子注入材HNP-1500の平均粒径は1.5μmに達する。図3に示すように平均粒径が小さくなるに従って適用可能な地盤は拡大し、HNP-1500は従来薬液系のみで可能だったシルト混じり細砂への浸透も可能となっている。

セメント系注入材の浸透性能向上には粒子の細粒化が必須であるが、単純に微粉化しただけでは、粒子凝集や水和物生成に起因する粗大粒子が形成し、浸透性向上は望めない。日鉄住金セメントの注入材は高性能粉砕・分級機の導入による高微粉砕化と材料設計⁹⁾、すなわち粒径別の高炉スラグ量制御、セメント鉱物組成の調整による初期水和

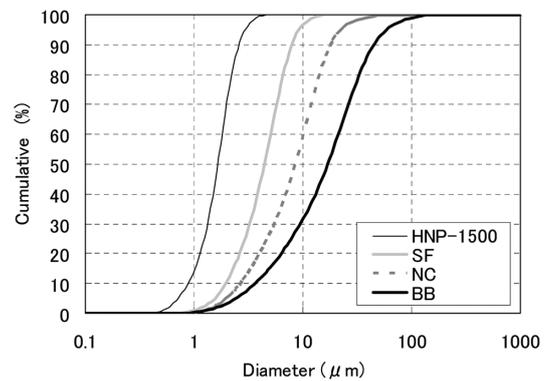


図2 セメント系注入材の粒度分布
Particulatesize distribution of injection cement

Grain size (mm)	2		0.42		0.074	0.005
	Gravel	Sand		Silt	Clay	
Soil		Coarse	Fine			
Permeability (cm/s)	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
Chemical solution grout	—————▶					
HNP-1500	—————▶					
Nittetsu Superfine	—————▶					
Nittetsu Colloid cement	—————▶					
Slag cement	—————▶					

図3 セメント系注入材の適用可能地盤
Ground coverage of grout

の制御、専用ポリカルボン酸系分散剤による分散性保持および特殊高速攪拌技術により優れた浸透性能を実現している。

4.3 超微粒子セメントの施工事例

超微粒子セメントは、1979年以降、全国のダムやトンネルで200箇所以上の納入実績を有している。ここでは最近の施工事例を紹介する。

4.3.1 倉敷国家石油ガス備蓄基地(SF-X3)

倉敷国家石油ガス備蓄基地は、LPG備蓄能力40万tの水封式地下岩盤貯槽であり、EL.-160~180mに配置された幅14m、高さ24m、最長640mのトンネル空洞4本で構成される。

この貯槽建設にあたり岩盤貯槽の周囲8mに、湧水量抑制と地下水圧確保を目的にグラウトによる低透水改良帯が構築⁷⁾された。岩盤の改良目標値は平均0.35Lu(Lu:ルジオン値≒1.0×10⁻⁵cm/s)と非常に高品質であることから、浸透性に優れた超微粒子セメントが採用された。しかし超微粒子セメントは浸透性に優れるが、硬化時間が長い問題点があり、この課題に対応すべく開発⁸⁾を進めたのがSF-X3である。SF-X3はSFと同等の浸透性(図4)を保ちながら、加圧脱水後の凝結時間はSFの1/4の4時間を達成し、貯槽の水封機能確保と掘削工程短縮に大きく貢献した。

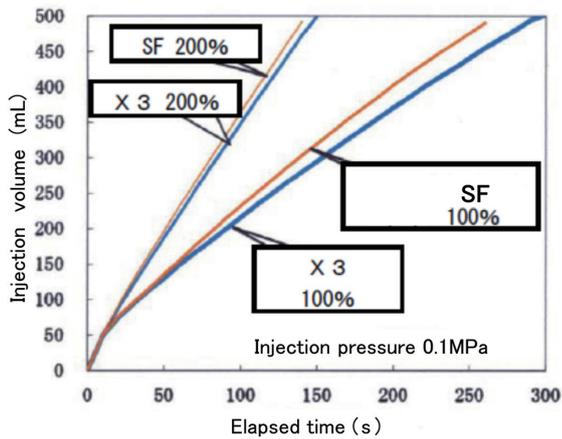


図4 スリット注入試験結果
Injection volume of SF and SF-X3 in slit test

4.3.2 北の峰トンネル (HNP-1500)

北の峰トンネルは、旭川十勝道路において計画されている延長約3 kmのトンネルである。本トンネルは被圧帯水層の下を低かぶりで通過することから止水注入区間が計画され、一部には恒久的な止水性と強度が要求されるバルクヘッド部が設定された。

対象地盤は、懸濁系では浸透困難な細砂に相当する扇状地堆積物のため、超微粒子注入材等との室内比較試験⁹⁾が行われ、浸透性と強度発現に優れる極超微粒子注入材HNP-1500が選定された。

試験施工の結果、コア観察による注入材の確実な浸透と、透水係数の改良 (10^{-5} cm/s オーダー) が認められた。またバルクヘッド掘削時(写真2)の坑内湧水量は予測値以下に抑制され、高品質な止水注入工¹⁰⁾によるバルクヘッドの有効性が確認された。

4.3.3 Arrowhead Tunnels (SF)

アローヘッドトンネル(写真3)は、アメリカ南カルフォルニアのサンバーナーディーノ山脈近くに位置する延長15.6km(東トンネル9.2km、西トンネル6.4km)の水路トンネルである。Tunnel Boring Machine (TBM) 施工で、地質条件は非常に複雑であり、水資源確保のためトンネル内への地下水流入が制限された。止水のためのプレグラウト材料として、水ガラス、ポリウレタン、コロイダルシリカおよびマイクロファインセメント(日鐵スーパーファイン)が使用された。

5. セメント系補修材

近年、コンクリート構造物の高齢化による劣化が社会問題となり、適正な補修、補強による長寿命化が一層重要になっている。コンクリートを補修する工法には、ひび割れ注入、断面修復、表面被覆、電気防食工法等があり、使用材料はエポキシ樹脂などの有機系とポリマーセメントモルタルなどの無機系がある。1984年、高炉スラグ高微粉末



写真2 北の峰トンネルの切羽状況
Face of Kitanomine Tunnel



写真3 アローヘッドトンネル
Arrowhead Tunnels

8000にセメントとスラグ細骨材を組み合わせ、高強度・高耐久性モルタル組成物“NEM”を開発¹¹⁾し、この技術を応用し無機系補修材シリーズを製品化した。

5.1 “NEM-R シリーズ”超微粒子高炉スラグ系補修用モルタル

NEMは以下に示す高炉スラグの水和メカニズムを活用し、高流動性、高強度、高耐摩耗性、耐凍結融解性、耐塩分浸透性など多機能を発揮するモルタルである。

- (1) 粒度分布の異なる3粉体、高炉スラグ高微粉末、セメント、スラグ細骨材の構成による密充填
- (2) 高炉スラグ部の高微粉末化による初期強度の増進と、緩慢な初期水和水による施工性維持の両立
- (3) ゲル水を多く含むスラグ水合物¹²⁾の生成による毛細管空隙の密充填
- (4) 高微粉末スラグの水和反応によるセメント水和水由来の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 結晶の消費
- (5) 高炉スラグ細骨材の表面潜在水硬性による、骨材とペーストの化学的結合による一体化
- (6) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 低減によるスラグ細骨材表面の脆弱な溶脱層形成の抑制

NEM-Rは $60\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の高強度を示し耐摩耗性が高く、毛細管空隙の減少による凍結水量の低減により凍結融解抵抗性にも優れ、写真4に示す北海道内の幹線水路¹³⁾

に適用されている。

また $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の減少と緻密化による透過性低下により耐化学抵抗性に優れ、耐硫酸性が要求される下水道施設（関東地区）（写真5）に採用されている。

5.2 “ハイガード”超微粒子高炉スラグ系高耐久性表面被覆材

ハイガード（HG）は高炉スラグの塩分固定能力と緻密組織により塩化物イオンの遮蔽能力に優れ、特に海洋構造物の表面被覆に適している。HGの1mm塗装により塩化物イオンの実効拡散係数は、無塗装コンクリートの $2.7 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ に対し $1.2 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ に低減が可能である。ま



写真4 幹線用水路における断面修復工
Repair of irrigation canal



写真5 下水道施設における断面修復工
Repair of sewage facility

た関東地区の栈橋における11年間の暴露試験の結果、図5¹⁴⁾に示すように下地への塩分浸透が抑制され、飛来塩分のほとんどがHG層内に固定されていることが確認されている。

その他の補修材としてグラウト用無収縮ポリマーセメントモルタル“ハイフレント”，超微粒子スラグ系ひび割れ注入材“ハイスタッフ”，半たわみ性舗装注入材“ペープラン”をラインナップしている。

6. 特殊粉体

6.1 “FSショット”高品質吹付コンクリート用混和材

2005年に着工された北海道新幹線において、道内における安定供給、環境負荷低減、コスト縮減の観点から、リサイクル材であるフライアッシュとスラグ微粉末に着目した吹付け用混和材の開発が、鉄道・運輸機構を中心に行われた。その結果、従来のシリカフェームと石灰石微粉末による混和材と比べ、圧縮強度は管理基準強度を満足し、作業環境や施工性も従来配合に比べ改善¹⁵⁾されるなど良好な結果（表2）が得られた。

日鉄住金セメントではフライアッシュと高炉スラグ微粉末4000を7：3の割合でプレミックスし、高品質吹付コンクリート用混和材“FSショット”として供給している。この混和材は2011年から鉄道運輸機構の高品質吹付けコン

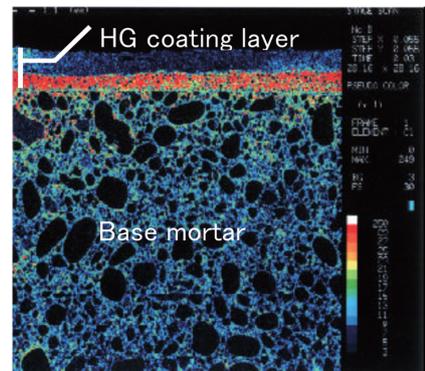


図5 塩素イオンの濃度分布
Distribution of Cl in HG coating and base mortar

表2 試験施工結果一覧¹⁵⁾
Field test results

Field test results	Unit	Standard value	Current mixture		New mixture		
			Measurements (mean)	Number of sample	Measurements (mean)	Number of sample	
Slump	cm	8±2	8.6	451	—	—	
	cm	18±2	—	—	18.9	358	
Compressive strength	3 hour σ_{3h}	N/mm ²	≥ 1.5	1.75	50	2.21	35
	24 hour σ_{24h}	N/mm ²	≥ 8.0	12.02	50	16.47	35
	28 day σ_{28}	N/mm ²	≥ 18.0	31.24	50	31.54	35
Dust quantity	mg/m ³	≤ 3.0	2.09	39	2.15	49	
Accelerating agent dosage	%	—	6.33	—	6.5	—	
Spraying efficiency	%	—	88.4	4	90.8	25	
Machine trouble	time/day	—	0.26	—	0.18	—	

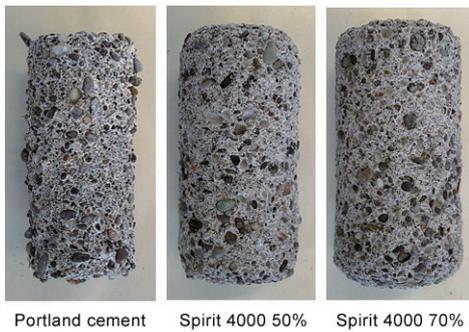


写真6 硫酸(5%)浸漬試験結果

Specimens after sulfuric acid solution (5%) immersion

クリート設計・施工指針に正式に採用されている。

6.2 “スピリッツ”高炉スラグ微粉末

“スピリッツ”はコンクリート用高炉スラグ微粉末(JIS A 6206 準拠)で4000, 6000, 8000の3種類がある。コンクリートの低発熱化, 高強度, 高流動, 耐酸性, アルカリシリカ反応抑制, 製品肌面改良を目的に用いられる。スピリッツの置換により $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が低減し写真6に示すように耐硫酸性が改善される。

また, 近年コンクリート構造物の信頼性向上の観点から, 混和材の自己修復性に関する研究が行われており, スラグ微粉末の自己修復性能¹⁶⁾も報告されている。

7. おわりに

日鉄住金セメントは1971年の青函トンネル向け高炉コロイドセメントを嚆矢とし, 高炉スラグの特性と微粉碎技術を活用したセメント系固化材, 超微粒子セメント, コンクリート補修材などの高機能製品を開発, 販売を行ってきた。今後もこれら高炉スラグを活用した製品の開発を通じて, 社会基盤整備, 防災・減災対策, エネルギー安定供給, インフラストラクチャ長寿命化および CO_2 削減に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説. 東京, 丸善, 2001, p. 30
- 2) (社)セメント協会: セメント系固化材による地盤改良マニュアル. 第4版. 東京, 技報堂出版, 2012, p. 3
- 3) (独)土木研究所 寒地土木研究所: 泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル. 札幌, 2011, p. 2, p. 146
- 4) 岩淵俊次: 青函トンネルの止水用セメント. 粉体と工業. 19 (3), 53 (1987)
- 5) 秋田勝次: セメント系薬液注入材の耐久性に関する研究. 京都大学博士論文. 2011
- 6) 金沢智彦: 極超微粒子セメントの地盤工学への応用. 岡山大学博士論文. 2012

- 7) 小林伸司 ほか: 倉敷基地 LPG 岩盤貯槽における高圧水下のグラウト施工実績と改良効果の評価について. 第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演集. 2014, p. 125
- 8) 宮嶋保幸 ほか: 水封式 LPG 地下備蓄岩盤空洞において開発・適用した止水対策技術. 土木学会第68回年次学術講演会. VI-198, 2013
- 9) 千葉哲也 ほか: 帯水層におけるトンネル施工のための止水注入とその管理について. 第55回北海道開発技術研究発表会, 2011
- 10) 小林暁 ほか: 帯水層における非排水構造トンネルの施工について. 第56回北海道開発技術研究発表会, 2012
- 11) 日本国特許 第1869484号. 1994年9月6日
- 12) 佐川孝広 ほか: 高炉セメントの水和物組成と空隙構造特性. 土木学会論文集 E. 66 (3), 311 (2010)
- 13) 館ヶ澤真哉 ほか: 既設水路橋の補強・補修工法の施工事例について. 第57回北海道開発技術研究発表会. 2013
- 14) 根本正幸 ほか: 超微粒子高炉スラグ系補修塗装の海洋耐久性確認. 土木学会第57回年次学術講演会. 2002
- 15) 種田昇 ほか: リサイクル材を有効活用した混和材を使用した高品質吹付けコンクリート. トンネル工学報告集. 21, 50 (2011)
- 16) 濱幸雄 ほか: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の混入によるコンクリートの自己修復効果. セメント系材料の自己治癒に関するシンポジウム論文集. 2011, p. 163



若杉伸一 Shinichi WAKASUGI
日鉄住金セメント(株) 製品開発部長
北海道室蘭市仲町64番地 〒050-8510



金沢智彦 Tomohiro KANAZAWA
日鉄住金セメント(株) 製品開発部
製品開発課 課長研究員 博士(環境学)



小倉 東 Tsukasa OGURA
日鉄住金セメント(株) 製品開発部
品質管理課長



佐川孝広 Takahiro SAGAWA
日鉄住金セメント(株) 製品開発部
製品開発課 課長研究員 博士(工学)