

高炉スラグを用いて耐塩害性，耐凍害性，耐硫酸性を向上した緻密コンクリート「ハレーサルト」

細谷 多慶¹

¹ランデス株式会社 本部技術センター

ハレーサルトは，高炉スラグを用いて耐塩害性，耐凍害性，耐硫酸性を向上した低炭素型のコンクリートである．本研究では，結合材と細骨材に高炉スラグを用いたコンクリートの耐久性を検討した．高炉スラグを用いたコンクリートは，普通コンクリートに比べてCO₂の排出量が抑制でき，環境負荷低減に貢献可能な材料である．結合材の一部を高炉スラグ微粉末に置き換え，細骨材を高炉スラグ細骨材としたコンクリートは，十分な耐塩害性と耐凍害性があることがわかった．また，高炉スラグを細骨材に用いることで骨材表面とペーストの界面が強固となり，コンクリートの耐硫酸性が向上することがわかった．

キーワード：高炉スラグ微粉末，高炉スラグ細骨材，耐塩害，耐凍害，耐硫酸，低炭素

1. はじめに

高炉スラグは，銑鉄を製造する高炉において，鉄鉱石の鉄以外の成分が，副原料の石灰石やコークス中の灰分と一緒に分離回収されたものある．熔融状態のスラグから急冷処理された高炉水砕スラグは，コンクリートの細骨材として用いられる．また，高炉水砕スラグを微粉化した高炉スラグ微粉末は，高い潜在水硬性を有している．高炉水砕スラグは，国内で年間2,000万トン程度が生産され，その内，約90%が高炉セメントの原料およびコンクリート用混和材料として広く使用されている¹⁾．

高炉スラグ微粉末を結合材の一部に用いることで，長期強度の増進，水和熱の低減，硫酸塩等に対する抵抗性の向上，水密性の向上，アルカリ骨材反応の抑制等の効果が期待できる²⁾．一方で，若材齢における強度が小さく，とくに低温での強度発現に時間を要することから，寒冷地においての使用は一般的ではないとされている．高炉スラグ細骨材には，アルカリシリカ反応の恐れがなく，コンクリートの耐久性に悪影響を及ぼす有機不純物等を含んでいないといった特徴がある．

本論文は，高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を併用したコンクリートの耐塩害性，耐凍害性，耐硫酸性を調べたものである．ハレーサルトは，結合材の一部に高炉スラグ微粉末，細骨材に高炉スラグ細骨材を用いることで，耐塩害性，耐凍害性，耐硫酸性が向上すること，従来の一般的なプレキャストコンクリート製品と同等以上の品質を有しながら，製品材料ベースでのCO₂排出量が抑制でき，環境負荷低減に貢献できるコンクリート材料であることを示す^{3) 4) 5) 6) 7)}．

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合

結合材には，普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³，ブレン値：3,350cm²/g）および高炉スラグ微粉末（密度：2.92g/cm³，ブレン値：4,150cm²/g）を用いた．細骨材には，硬質砂岩砕砂（表乾密度：2.61g/cm³，吸水率：1.70%）および高炉スラグ細骨材（表乾密度：2.73g/cm³，吸水率：0.61%）を用いた．粗骨材には，硬質砂岩砕石（最大寸法：20mm，表乾密度：2.61g/cm³，吸水率：0.49%）を用いた．混和剤には，ポリカルボン酸系高性能減水剤を用いた．ハレーサルトの水結合材比は25%および26.2%とした．普通コンクリートの水結合材比は39%とした．ハレーサルトの単位水量は160kg/m³で，細骨材率は50%とした．普通コンクリートの単位水量は170kg/m³で，細骨材率は40%とした．高性能減水剤は，ハレーサルトのスランプフローが650±100mmとなるように，また，普通コンクリートのスランプが21cm程度となるように，練混ぜ水の一部として添加した．AE剤は使用していない．本実験に使用したコンクリートの配合を表-1に示す．

(2) 塩水浸せき試験

塩水浸せき試験は，浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験方法(案)（JSCE-G 572-2010）に準拠して行った．塩水は濃度10%の塩化ナトリウム水溶液とし，浸せき期間は365日とした．試験には，蒸気養生を行ったφ100×200mmの円柱供試体を用いた．蒸気養生は，2012年制定土木学会コンクリート

表-1 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/B (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
				W	C	GGBF* ¹	BFS* ²	S	G1	G2	AD* ³
20	25.0	2.0	50.0	160	256	384	828	—	284	527	6.8
20	26.2	2.0	50.0	160	244	366	842	—	229	535	6.5
20	39.0	2.0	40.0	170	436	—	—	690	421	631	2.7

*1 GGBF: 高炉スラグ微粉末, *2 BFS: 高炉スラグ細骨材, *3 AD: 高性能減水剤

標準示方書 [施工編] ⁸⁾に示される方法に従い、打設後3時間型枠内に静置した後、1時間あたりに20℃の速さで65℃まで昇温させ、その後3時間保持した後、自然冷却によりコンクリートの温度を下げた。蒸気養生後は、水中養生を材齢28日まで行った。全塩化物イオン分布の測定は、EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析方法(案) (JSCE-G 574-2010) に準拠して行った。測定元素はCl, Al₂O₃, CaO, SO₃とした。

(3) 凍結融解試験

凍結融解試験は、コンクリートの凍結融解試験方法 JIS A 1148-2010 に規定される水中凍結融解試験方法 (A法) に準拠して行った。試験には、蒸気養生を行った100×100×400mmの角柱供試体を用いた。蒸気養生は、2012年制定土木学会コンクリート標準示方書 [施工編] に示される方法に従い行った。蒸気養生後は、水中養生を材齢28日まで行った。

複合劣化試験は、凍結融解試験に用いる凍結水に質量パーセント濃度で10%の塩化ナトリウム水溶液を用いて行った。使用した供試体は、ハレーサルと普通コンクリートを用いて作成したプレキャストコンクリート製の歩車道境界ブロックとした。

(4) 耐硫酸性試験

耐硫酸性試験は、日本下水道事業団「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル」(付属資料3) 断面修復用モルタルに関する品質試験方法に準拠して行った。試験には、蒸気養生を行ったφ100×200mmの円柱供試体を用いた。蒸気養生は、2012年制定土木学会コンクリート標準示方書 [施工編] に示される方法に従い行った。蒸気養生後は、材齢13日まで気中養生を行い、24時間水中浸せきした後、硫酸浸せき試験を実施した。硫酸浸せき試験には、質量パーセント濃度で5%の硫酸を用いた。浸せき期間は119日とした。

3. 実験結果と考察

(1) 塩水浸せき試験

図-1、図-2に塩水浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験結果、図-3にEPMA面分析試験結果を示す。ハレーサルと普通コンクリートの塩化物イオン濃度が1.2kg/m³となる浸せき深さは7mm、普通コンクリートの塩化物イオン濃度が1.2kg/m³となる浸せき深さは42mm

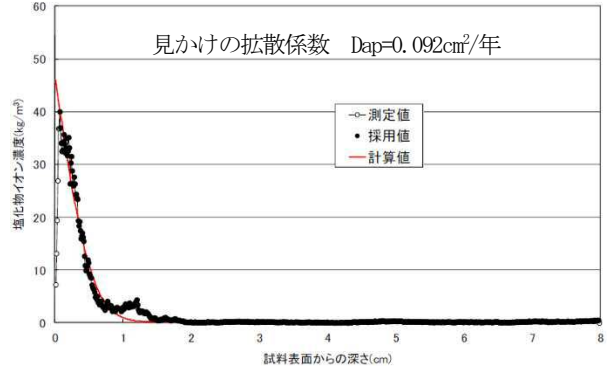


図-1 塩水浸せき試験結果 (ハレーサル)

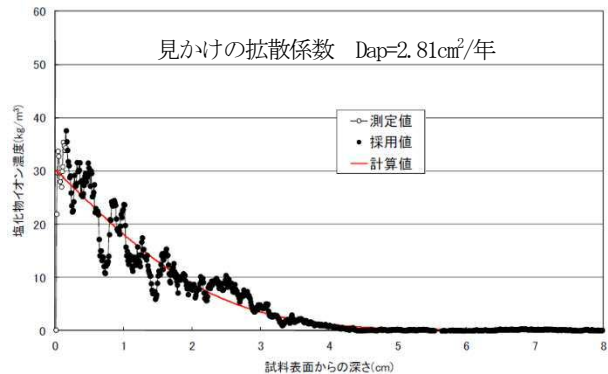


図-2 塩水浸せき試験結果 (普通コンクリート)

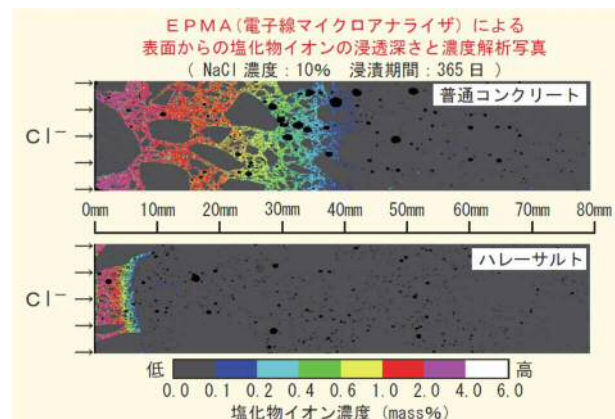


図-3 EPMA面分析結果 (JSCE-G 574-2010)

であった。ハレーサルは普通コンクリートに比べて浸せき深さで5倍以上優れていることがわかる。

(2) 凍結融解試験

図-4にコンクリートの凍結融解試験方法 JIS A 1148-2010 (A法) による凍結融解試験結果を示す。●はハレ

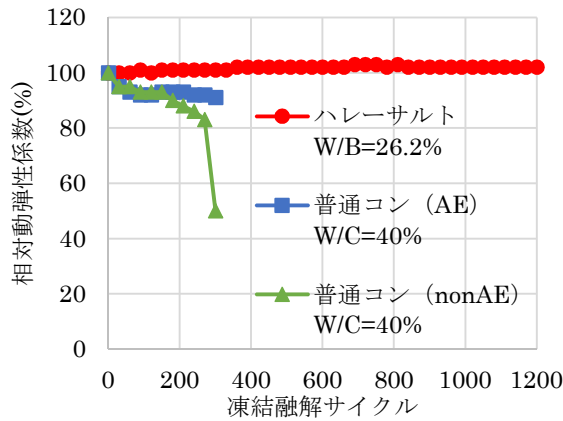


図4 凍結融解試験結果 (JISA 1148-2010 A法)

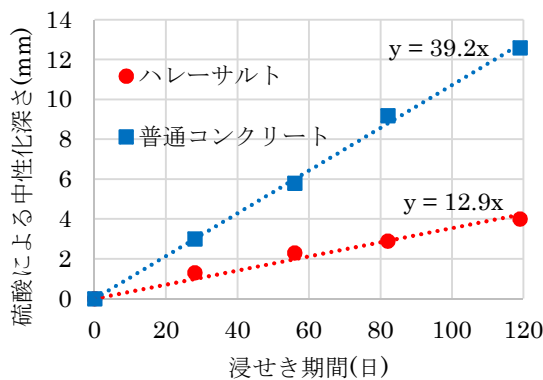


図5 耐硫酸性試験結果

ハレーサルトの試験結果を示す。AE剤を用いた普通コンクリート■ならびにAE剤を用いない普通コンクリート▲は、寒地土木研究所の試験データを参考した⁹⁾。AE剤を用いていない普通コンクリートは、凍結融解サイクル300回で相対動弾性係数が低下するが、ハレーサルトはAE剤を用いていないにもかかわらず、凍結融解サイクル1200回においても相対動弾性係数が低下していない。

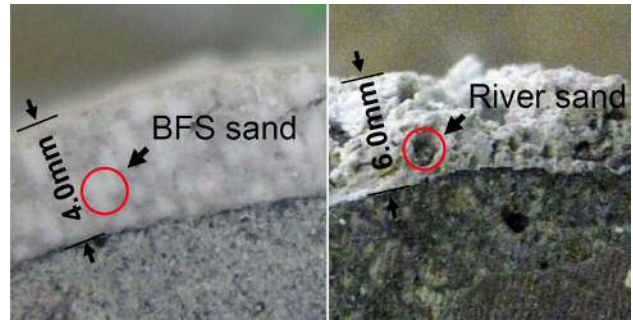
写真-1に複合劣化試験結果を示す。ハレーサルトは塩水を用いた複合劣化の環境下においても高い耐凍害性を有しており、融雪剤を使用する寒冷地や山間地域のコンクリートにも適用可能であると考えられる。

(3) 耐硫酸性試験

図-5に耐硫酸性試験結果を示す。ハレーサルトの硫酸による中性化速度係数は12.9mm/年であった。また、普通コンクリートの硫酸による中性化速度係数は39.2mm/年であった。ハレーサルトは普通コンクリートに比べて硫酸による中性化速度で3倍以上優れていることがわかる。材齢14日における圧縮強度は、ハレーサルト78.1N/mm²、普通コンクリート47.5 N/mm²であった。普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートは、高強度なものほど耐硫酸性が低下するが⁹⁾、ハレーサルトは、高強度であるにもかかわらず耐硫酸性に優れている。



ハレーサルト 普通コンクリート
写真-1 複合劣化試験結果



ハレーサルト 普通コンクリート
写真-2 二水石こうの連続性

表-2 コンクリートのCO₂排出量

材料	CO ₂ 排出量 原単位 kg-CO ₂ /t	ハレーサルト		普通 コンクリート	
		単位 量 kg/m ³	CO ₂ 排出 量 kg- CO ₂ /m ³	単位 量 kg/m ³	CO ₂ 排出 量 kg- CO ₂ /m ³
W	—	160	0.0	170	0.0
C	766.6	244	187.1	436	334.2
GGBF	26.5	366	9.7	0	0.0
BFS	0	842	0.0	0	0.0
S	3.7	0	0.0	690	2.6
G1	2.9	229	0.7	421	1.2
G2	2.9	535	1.6	631	1.8
AD	350	6.5	2.3	2.7	0.9
合計	—	—	201.4	—	340.7
削減率(%)		40.9		—	

写真-2に硫酸に浸せきしたハレーサルトならびに普通コンクリートの表面の二水石こうの連続性を示す。コンクリート表面には、コンクリート中の水酸化カルシウムと硫酸が反応して二水石こうが発生している。普通コンクリートでは細骨材に砕砂を使用しているため、細骨材と硫酸の反応がなく、細骨材と二水石こうの界面に隙間が生じている。一方、ハレーサルトは細骨材に高炉スラグ細骨材を使用しているため、細骨材周辺に集積する水酸化カルシウムがなくなり、骨材表面と二水石こうの界面が強固となり、コンクリート表面への硫酸の浸せきが抑制され、耐硫酸性が向上しているものと考えられる。

(4) 低炭素性

表-2にCO₂排出量原単位¹⁰⁾ ¹¹⁾に基づくハレーサルトならびに普通コンクリートのCO₂排出量を示す。ハレーサルトは、材料ベースで40%以上のCO₂排出量抑制が可能である。

4. 使用実績

(1) 耐塩害性

ハレーサルトの塩害環境での使用例を示す。写真-3では、海岸線沿いの道路を拡幅するため、プレキャストコンクリート製の張り出し歩道が採用された。車道形状は従来と同様で設計耐用年数を延長するため、コンクリートにハレーサルト、鉄筋にエポキシ鉄筋が採用された。写真-4は、港湾構造物に必要となるかぶりを確保し、プレキャストコンクリート製の護岸上部コンクリートにハレーサルトを使用した例である。

(2) 耐凍害性

ハレーサルトの凍害環境での使用例を示す。写真-5は、歩車道境界ブロックにハレーサルトを使用した例である。寒冷地や山間部の道路は、凍結防止剤を散布するため、海岸から0.1mから1 kmの距離にある構造物と同等の塩害環境にある¹²⁾。このような環境にあるコンクリート構造物は、凍害だけではなく塩害との複合劣化対策が必要であると考えられる。

(3) 耐硫酸性

ハレーサルトの硫酸環境での使用例を示す。写真-6は、マンホールにハレーサルトを使用した例である。下水道の中では、生活排水が分解され、硫化水素、アンモニア、二酸化炭素およびメタン等が発生する。これらの気体の中で、硫酸塩還元細菌によって還元された硫化水素は、コンクリート表面で好気性の硫黄酸化細菌により硫酸に酸化され、コンクリートを激しく劣化させるため¹³⁾、耐硫酸性に優れるコンクリート製品が必要となる。

(4) 低炭素性

ハレーサルトの低炭素性での使用例を示す。写真-7は、L型擁壁にハレーサルトを使用した例である。普通コンクリート製のL型擁壁と同等以上の品質を確保し、環境負荷低減を目的として採用された。

5. まとめ

結合材と細骨材に高炉スラグを用いてコンクリートの耐久性を検討した。結合材の一部を高炉スラグ微粉末に置き換え、細骨材を高炉スラグ細骨材としたコンクリートは、十分な耐塩害性と耐硫酸性があることがわかった。また、AE材を用いなくても高い凍結融解抵抗性を有して



写真-3 塩害環境での使用例（張り出し車道）



写真-4 塩害環境での使用例（護岸上部コンクリート）



写真-5 凍害環境での使用例（歩車道境界ブロック）



写真-6 硫酸環境での使用例（マンホール）



写真7 低炭素性での使用例 (L型擁壁)

いることがわかった。塩水を用いた凍結融解試験でも十分な凍結融解抵抗性があることがわかった。

結合材の一部を高炉スラグ微粉末に置き換え、細骨材を高炉スラグ細骨材としたコンクリートは、十分な強度を満足しながら、普通コンクリートに比べてCO₂の排出量が抑制でき、環境負荷低減に貢献可能な材料であることがわかった。

謝辞：本研究の遂行に際し、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構事業大学発事業創出実用化研究開発事業費助成金(20年度新エネ研第0926003号)ならびに平成23年度、24年度新事業活動促進支援事業補助金(新連携支援事業)の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報(平成23年度実績), 2012.7
- 2) (社)日本材料学会編：コンクリート混和材料ハンドブック, エヌ・ティイー・エス, 2004.4

- 3) 財団法人下水道新技術推進機構, 建設技術審査証明(下水道技術)報告書「高炉スラグを用いた耐硫酸性コンクリート(ハレーサルト)」, 2011.3
- 4) ハレーサルト工業会：ハレーサルト製品技術マニュアル, 2010.8
- 5) 綾野克紀, 小河内誠, 藤井隆史, 入矢桂史郎：モルタルの耐硫酸性に細骨材の種類が及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.559-564, 2008.7
- 6) 藤井隆史, 細谷多慶, 松永久宏, 綾野克紀：高炉水砕スラグを用いたセメント硬化体の耐硫酸性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.847-852, 2009.7
- 7) 西野隆, 藤井隆史, 細谷多慶, 綾野克紀：硫酸環境下におけるコンクリートの耐久性設計に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.659-664, 2010.7
- 8) 土木学会コンクリート委員会：2012年制定コンクリート標準示方書[施工編], 土木学会, pp.355, 2012.3
- 9) 寒地土木研究所：コンクリートの凍害対策に関する研究「AE材, W/Cならびに骨材の品質がコンクリートの凍結融解に対する抵抗性に及ぼす影響」, 北海道開発局土木試験所月報第44号, 1957.1
- 10) 社団法人土木学会：コンクリート技術シリーズ, No.62, コンクリートの環境負荷評価(その2), 社団法人土木学会, pp.32-40, 2004.
- 11) 社団法人土木学会：コンクリートライブラリー, 125号, コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案), 社団法人土木学会, pp.52-54, pp.65-66, 2005.
- 12) 土木学会コンクリート委員会：2007年制定コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, pp.114, 2008.3
- 13) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'07「基礎編」, pp.51-54, 2007.1