

論文 小片凍結融解試験法による高炉スラグ細骨材 (BFS) のソルトスケールリング抵抗性の評価

田中 篤 悠登*1・羽原 俊祐*2・湊 俊顕*3・山本 英和*4

要旨: 近年, 高炉スラグ細骨材 (BFS) を使用した超耐久性コンクリートの開発が行われている。BFS は製鉄所間で化学組成, 物性や粒度分布が異なり, このことがソルトスケールリング抵抗性などのコンクリートの耐久性に影響を与える可能性がある。受入れ時の BFS の品質評価を行う上で, ソルトスケールリング抵抗性の評価方法が求められる。本研究でソルトスケールリング試験として提案する小片凍結融解試験法により, 製鉄所が異なる BFS の評価を行った。BFS の粒度分布および流動性を調整することで, ソルトスケールリング抵抗性に及ぼす BFS の品質の影響を評価することが可能である。

キーワード: 凍害, ソルトスケールリング, 高炉スラグ細骨材 (BFS), 小片凍結融解試験法, 品質評価

1. はじめに

積雪寒冷地では, 冬期の凍結融解作用による凍害が問題となっている。特に, 1991 年に「スパイクタイヤ粉じんの発生の防止に関する法律」が施行されて以降, 冬期の安全交通のため NaCl 等の凍結防止剤の散布が年々増大し, コンクリート構造物のスケール劣化が顕著になっている。この劣化現象はソルトスケールリングとも呼ばれている。ソルトスケールリングの対策の一つとして硬化コンクリートに適度な空気量の導入が行われており, 東北地方における凍害対策に関する参考資料 (案) において, 特に凍害危険度が高い地域ではフレッシュ時の空気量を 7.0%程度にすることが提案されている¹⁾。

一方, 水セメント比を低くし, 細骨材を高炉スラグ骨材に置換することで, NonAE コンクリートの場合においても, 高いソルトスケールリング抵抗性を得られることが報告されている^{2,3,4)}。しかし, 高炉スラグ細骨材は, 製鉄所間での化学組成および物性が異なるため, ソルトスケールリング抵抗性の変動があると考えられる。また, 高炉スラグ細骨材の粒度分布の違いによりソルトスケールリング抵抗性が異なることが報告されている⁵⁾。そのため,

ソルトスケールリング抵抗性における高炉スラグ細骨材の品質評価の試験法が求められている。

本研究では, ソルトスケールリング抵抗性の評価試験として小片凍結融解試験法^{6,7)}を提案している。小片凍結融解試験法は, ASTM C 672 法などのソルトスケールリング試験とある程度の整合性が有ることが確認されている⁷⁾。また, 試験体のサイズが小さく, 他の試験方法に比べて短時間で評価することが可能である。

そこで本研究では, 小片凍結融解試験法により高炉スラグ細骨材のソルトスケールリング抵抗性について評価し, 高炉スラグ細骨材の品質評価試験としての小片凍結融解試験法の有用性について調べた。

2. 実験概要

2.1 材料特性およびモルタル配合

(1) 高炉スラグ細骨材 (BFS) の特性

本研究では, 4 種類の高炉スラグ細骨材を使用した。高炉スラグ細骨材および砕砂の性状を表-1, 粒度分布を図-1 に示す。A, B および C 製鉄所で製造される, JIS A5011 に区分される高炉スラグ細骨材を使用した。高炉

表-1 高炉スラグ細骨材および砕砂の性状

記号	化学成分 (%)				性状		
	CaO	全硫黄	SO ₃	全鉄	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	ガラス化率 (%)
A	42.2	0.6	0.1 未満	0.4	2.76	0.33	99.5
B	41.0	0.8	0.1 未満	0.4	2.71	0.78	99.2
C 細	41.1	0.7	0.1 未満	0.3	2.64	0.52	99.7
C 粗	40.9	0.7	0.1 未満	0.3	2.65	1.36	95.5
砕砂					2.79	2.01	

*1 岩手大学 大学院 工学研究科 機械・社会環境システム工学専攻 修士(工) (学生会員)

*2 岩手大学 理工学部 システム創成工学科 社会基盤・環境コース 教授 博士(工) (フェロー会員)

*3 岩手大学 工学部 社会環境工学科

*4 岩手大学 理工学部 システム創成工学科 社会基盤・環境コース 准教授 博士(理)

表-2 高炉スラグ細骨材の調整粒度

粒度 (mm)	0.15 以下	0.15-0.30	0.30-0.60	0.60-1.20	1.20-2.50	2.50 以上
割合 (%)	0	20	40	35	5	0

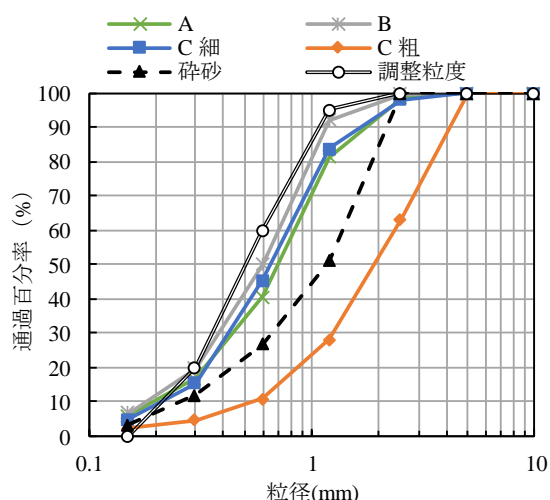


図-1 高炉スラグ細骨材と砕砂の粒度分布

スラグ細骨材は、砕砂に比べ密度および吸水率が低い。また、高炉スラグ細骨材は、セメントペースト中の CH と反応し、骨材表層に厚さ数 μm 程度の反応層が生じる可能性がある事が報告されている⁴⁾。他の製鉄所とは異なり、C 製鉄所ではコンクリート用細骨材の需要が多く、粒度の細かい地元山砂と混合のため、粗目の粒度に調整する製造方法を行っている。そのため、本研究ではこの粗粒についても試験を行った。B 製鉄所の CaO 量が他の製鉄所よりも 1%高いものの、化学組成については製鉄所の影響は小さい。その他の性状については、A、B および C 細粒については製鉄所による影響は小さく、ガラス化率が 99%以上である。C 製鉄所の粗粒は 4%程度の結晶相がみられ、吸水率が高い。

粒度分布がスケーリング抵抗性に影響すること⁵⁾から、高炉スラグ骨材の粒度分布の調整を行った。JIS Z 8811 に規定される公称 2.5mm, 1.2mm, 600 μm , 300 μm , 150 μm のふるいによりふるい分け、高炉スラグ細骨材の実粒度分布を考慮して表-2 に示す粒度分布に統一した。比較として、岩手県盛岡市黒川産砕砂(表乾密度: 2.85g/cm³) についても同様の試験を行った。砕砂の粒度は、図-1 に示すように、粒径が 2.5mm 以下とした。

(2) モルタル配合および供試体作製

セメントは市販の普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm³) を使用した。砕砂および高炉スラグ細骨材は、105°Cの大型乾燥機で 1 日乾燥させた後、乾燥機から取り出し室温(20°C)になるまで放置した後に使用した。水セメント比は 0.5 とした。高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートでは、砕砂や川砂を使用した場合に比べ、流動性が低下し、巻き込み空気(エントラップドエア)

が多くなりやすい。本研究では高炉スラグ細骨材を用いる水準については、細骨材セメント比 1.65-2.25 の範囲でモルタルの流動性を評価し、型枠への突き固めが可能な細骨材セメント比を決定した。後述するモルタルのフロー試験結果(図-3)より細骨材セメント比を 2.0 とした。

決定した配合で、JIS R 5201 セメントの物理試験方法に従い、供試体を作製した。供試体は、1 日型枠内で初期養生し、脱型後に材齢 28 日まで水中養生を行った。

2.2 小片凍結融解試験法

小片凍結融解試験法^{6,7)}は、ASTM C 672 および RILEM CDF などのソルトスケーリング抵抗性の評価試験に比べ、簡略的に短期間で評価が可能である。これまでの研究⁸⁾では、試験前の質量や試験後洗浄後の質量などの恒量を取るために、試験体の作製後に 40°Cで 24 時間乾燥の水和停止を行っている。また、多くの試験水準で試験を行っており、試験開始材齢を揃えるため、40°C乾燥を行っている。一方、綾野らは本試験方法を改良して 40°C乾燥を行わず、続けて試験(湿潤連続)を行っている³⁾。本研究では、この二つの前処理方法を採用して試験を行った。試験概要を図-2 に示す。

(1) 試験体の作製

材齢 28 日まで水中養生したモルタル角柱供試体(4×4×16cm)を湿式ダイヤモンドカッターにより、1 辺が 8 ± 2mm の立方体に切り出し、これを試験体とした。カット面の影響を考慮するため、立方体の 5 面以上をカット面の試料について試験した。

(2) 試験条件

凍結融解サイクルは、-20°Cの冷凍庫で 16 時間放置の凍結工程と、20°C(室温)で 8 時間放置の融解工程で行った。試験体を濃度 3%NaCl 水溶液に浸漬させ試験を行った。NaCl 水溶液と試験体の質量比が 10 : 1 になるように NaCl 水溶液を準備した。

(3) 40°C乾燥および湿潤連続について

40°C乾燥と湿潤連続とでは、試験体の個数、試験前の処理方法と質量測定時の試験体の状態が異なる。40°C乾燥の場合、凍結融解サイクル毎に試験体を 1 組 3 粒とし、3 組準備して試験を行った。湿潤連続では、1 組 1 粒とし、5 組の試験体を継続して凍結融解サイクルを与え、規定凍結融解サイクル毎に質量を測定した。

試験前の試験体の処理方法では、40°C乾燥の場合、試験体の作製後に 40°Cに設定した電気恒温乾燥機に試験体を入れ 24 時間乾燥させた。試験前に試験体の質量を

測定し、NaCl 水溶液に浸漬させ試験を開始した。湿潤連続の場合、試験体作製後の乾燥処理を行わず、表乾状態の質量を測定し、NaCl 水溶液中に浸漬させ試験を開始した。

規定サイクル後での質量測定について、40°C乾燥の場合、試験体と NaCl 水溶液をろ過分離し、試験体を 40°C で 24 時間乾燥させた。ろ過の際に、蒸留水で NaCl 水溶液を洗い流した。湿潤連続の場合、2.5mm ふるい上に留まる試験体表面の NaCl 水溶液を拭き取り、試験体を表乾状態にした。

試験前の質量と規定凍結融解サイクルでの質量から式(1)に従い、凍結融解サイクル毎の質量残存率を算定した。

$$R_n = \frac{m_n}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

R_n : n サイクル時の質量残存率 (%)

m_0 : 試験前の試験体の質量 (g)

m_n : n サイクル後 2.5mm ふるい上に留まる試験体の質量 (g)

各凍結融解サイクルの質量残存率は、40°C乾燥の場合では 3 組、湿潤連続の場合では 5 組の中央値とした。

<ul style="list-style-type: none"> 試験体の作製 練混ぜ：JIS R 5201 水中養生28日 供試体：4×4×16cm供試体を8mm立方体に切斷 凍結融解条件 浸漬水溶液：3mass%NaCl水溶液（固液比=1：10） 凍結融解サイクル：凍結 -20°C 16時間 融解 20°C（室温） 8時間 質量測定サイクル：1, 3, 5, 7, 10, 14 サイクル後 前処理方法の違い 		
	40°C乾燥	湿潤連続
試験体数	1組3粒 サイクル毎に3組	1組1粒 5組を継続的に評価
前処理	40°C24時間乾燥	無し（湿潤）
質量測定試験体の状態	40°C乾燥 24時間後 （ろ過分離後）	表乾状態 （表面 NaCl水溶液 拭き取り後）
浸漬時の写真		

図-2 小片凍結融解試験法の概要

3. 実験結果

3.1 モルタル配合の決定

水セメント比を 0.5 一定で、高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの細骨材セメント比とフロー値との関係を図-3 に示す。A と B 製鉄所の場合、細骨材セメント比を変えた場合でも、フロー値の変化は比較的小さく、細骨材セメント比 2.0 程度であれば砕砂のフロー値 192mm と同程度になる。一方、C 製鉄所の場合、細骨材セメント比 2.0 でのフロー値は細粒で 140mm、粗粒で 152mm と、A および B 製鉄所に比べて小さくなった。細骨材セメント比 1.65 で砕砂と同程度の流動性を確保する結果となる。フロー値が 140mm 以上であれば、モルタルの締固め可能であることから、細骨材セメント比は 2.0 と定めた。

3.2 高炉スラグ細骨材のソルトスケーリング抵抗性の評価と前処理方法の影響

小片凍結融解試験の結果を図-4 に示す。40°C乾燥での 2.5mm ふるい上に留まる試験体の形状観察の結果を図-5 に示す。図-5 の空白の箇所は、試験体の塊が残らず全て 2.5mm ふるいを通過したことを示す。砕砂の場合、前処理方法に関係なく、3 サイクル目から質量残存率が低下し、5 サイクル時で 20%を下回り、10 サイクル時に 0%となる。試験体は、凍結融解サイクルの経過により、表面および隅角部からセメントペーストまたは骨材が剥離し、球状となり、10 サイクル時にセメントペーストと骨材とが分離した状態となった。

A および B 製鉄所では、40°C乾燥の質量残存率の推移は、砕砂と同様であり、3 サイクル時では 60%程度、5 サイクル時では 30%となる。形状変化を比較すると、砕砂は 3 粒すべてが同程度の大きさであるものの、A および B 製鉄所の場合大きさにバラつきが見られる。10 サイクル以降において、A および B 製鉄所の場合では 2.5mm ふるい上に留まる試験体があるものの、砕砂の場合では全

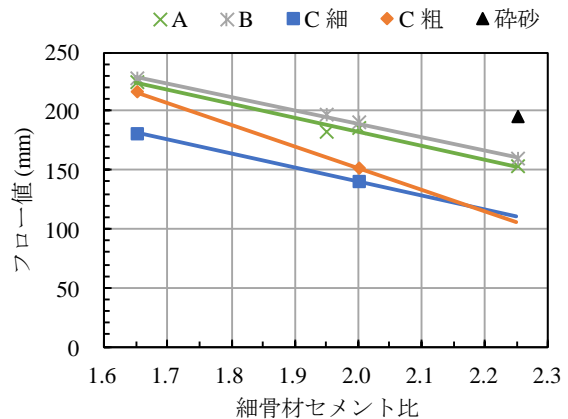


図-3 細骨材セメント比と流動性の関係

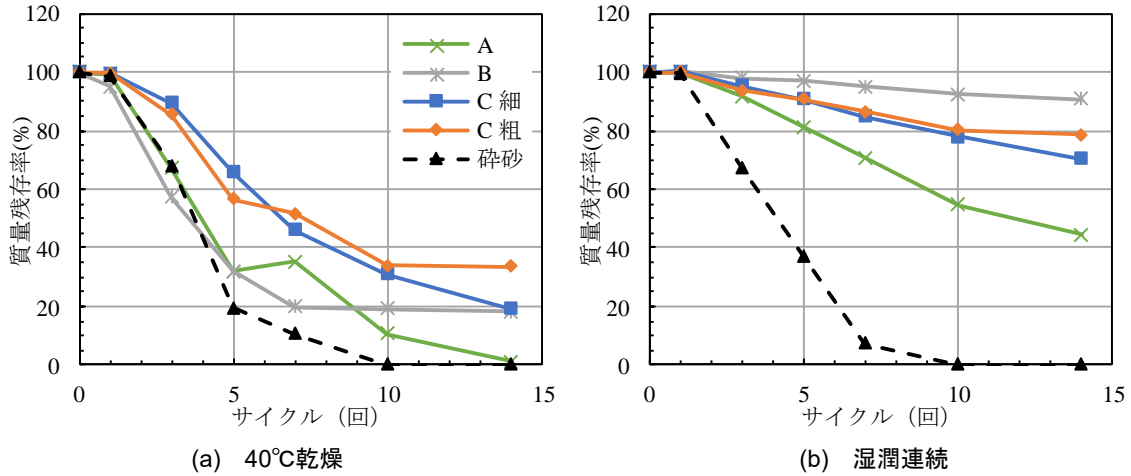


図-4 小片凍結融解試験 質量残存率の推移

乾燥試料	サイクル数					
	1	3	5	7	10	14
A						
B						
C 細						
C 粗						
碎砂						

(図の空欄部は試験体が2.5mmふるいを全通したことを示す。)

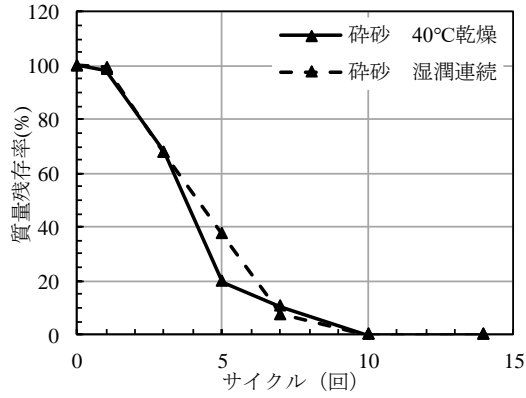
図-5 小片凍結融解試験 形状観察 (40°C乾燥)

て2.5mmふるいを通過する。そのため、AおよびB製鉄所は、碎砂よりもソルトスケール抵抗性が高い。AおよびB製鉄所の湿潤連続の場合、質量残存率の変化が碎砂と大きく異なり、高い質量残存率を保つ。B製鉄所の場合では、5サイクル後で質量残存率が90%程度と高いソルトスケール抵抗性を示した。A製鉄所の場合では、B製鉄所に劣るものの、5サイクル後で質量残存率が80%と碎砂よりもソルトスケール抵抗性が高いことを示した。

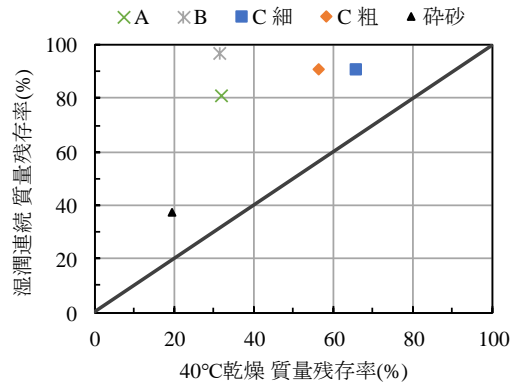
C製鉄所のスラグ細骨材は、元の粒度が細粒および粗

粒どちらも、前処理方法に関係なく、碎砂より質量残存率が高く、ソルトスケール抵抗性が高い結果となった。また、C製鉄所の場合、前処理方法の影響を比べると、AおよびB製鉄所と同様に、湿潤連続に比べ40°C乾燥の方が3サイクル以降の質量残存率が低くなる結果となった。

前処理方法が質量残存率に及ぼす影響を図-6に示す。(a)に前処理方法による碎砂の質量残存率の推移の比較を示す。5サイクル後の質量残存率が20%程度異なるものの、前処理方法による影響は小さい。(b)に各骨材の5

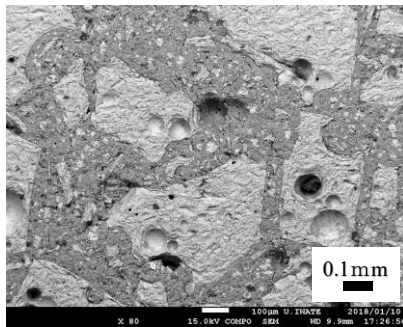


(a) 砕砂の比較

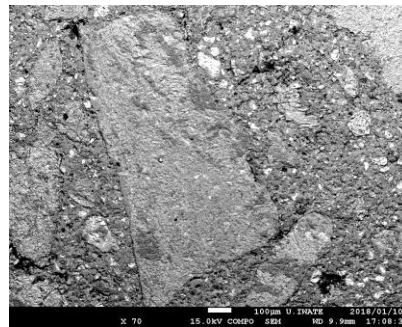


(b) 5サイクル後の質量残存率の比較

図-6 40°C乾燥法と湿潤連続の比較

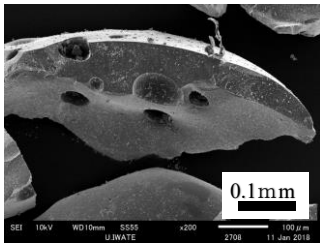


(a) B製鉄所

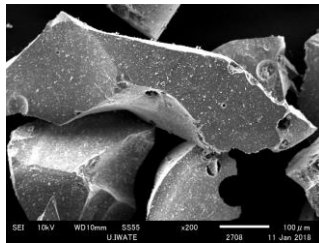


(b) 砕砂

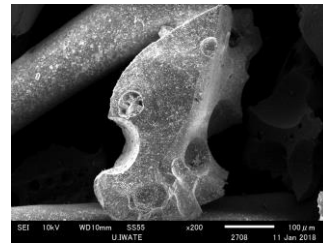
図-7 モルタルの反射電子像



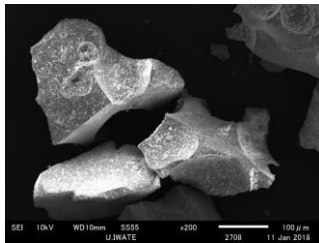
(a) A製鉄所



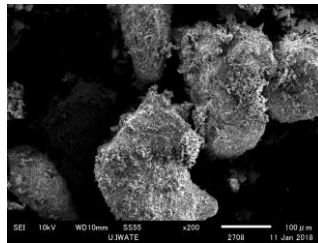
(b) B製鉄所



(c) C製鉄所 細粒



(d) C製鉄所 粗粒



(e) 砕砂

図-8 骨材の2次電子像

サイクル後の質量残存率の比較を示す。40°C乾燥の場合と比べ、湿潤連続の場合の質量残存率が高い傾向にある。高炉スラグ細骨材の場合、前処理方法による質量残存率の差が、砕砂を使用した場合に比べて大きい結果となった。特に、B製鉄所の場合、40°C乾燥では30%程度あるのに対し、湿潤連続では95%程度と、C製鉄所よりもソルトスケリング抵抗性が高い結果となった。4種類の

高炉スラグ細骨材をソルトスケリング抵抗性が高い順に並べると、40°C乾燥の場合ではC細、C粗、A=Bとなり、湿潤連続の場合では、B、C細=C粗、Aとなった。前処理方法により違いが認められた。C細およびC粗は、ガラス化率や吸水率に違いがあるが、ほぼ同じ抵抗性を示した。砕砂の場合で前処理方法の影響が小さいことから、高炉スラグ細骨材での前処理方法によるスケリン

グ抵抗性の変化は、セメントペーストそのものの組織変化の影響は小さく、骨材界面のセメントペーストの遷移帯組織に大きな影響を与えていると考えられる。

骨材の形状および表面性状の観察を行った。試験体作製後に 40°C 乾燥させたモルタル研磨面の反射電子像を図-7 に、骨材の 2 次電子像を図-8 に示す。高炉スラグ細骨材の場合、直径 10-100 μ m 程度の気泡を含むものが多く、骨材表面に円弧の形をした凹部（穴）が存在する。高炉スラグはガラス相であり、破断面はガラス状にツルツルした滑らかな面を有している。このように、高炉スラグ細骨材と砕砂とは形状および表面性状が異なる。砕砂では前処理の方法により相違は少ないが、高炉スラグ細骨材では両者の間に大きな相違が生じたのは、スラグの形状や表面性状の違いが関係すると考えられる。40°C 乾燥では、骨材とペーストの界面の接合力が低下するなどの原因が考えられる。

高炉スラグ細骨材の場合、乾燥によりスケーリング抵抗性が低下することが考えられ、高炉スラグ細骨材の品質評価については、前処理時に乾燥を行わない湿潤連続を採用することが望ましい。

同一のモルタルを用いて、小片凍結融解試験法（前処理 40°C 乾燥）と表面湛水試験法（ASTM C672）との整合性を検討した結果⁷⁾によると、小片凍結融解試験の 5 サイクル後の質量残存率が 30% 以上であれば、スケーリング量 0.5kg/m²（僅かな表面スケーリング）⁹⁾を下回ることになる。この結果からみると、40°C 乾燥においても、すべての高炉スラグ細骨材において、ソルトスケーリング抵抗性は高い結果となった。

4.まとめ

小片凍結融解試験法により高炉スラグ細骨材のソルトスケーリング抵抗性について評価し、高炉スラグ細骨材の品質評価試験としての小片凍結融解試験法の有用性について調べた。以下にまとめる。

- (1) 高炉スラグ細骨材を用いた場合、砕砂に比べ、流動性が低下する。そのため、小片凍結融解試験を行う場合、流動性を確保する細骨材セメント比を調整して試験する必要がある。
- (2) 小片凍結融解試験方法により高炉スラグ細骨材のソルトスケーリング抵抗性の評価は可能である。砕砂の場合、40°C 乾燥と湿潤連続との相違は少ない。高炉スラグ細骨材の場合、40°C 乾燥では著しく、ソルトスケーリング抵抗性が低下する傾向がある。高炉スラグ細骨材のソルトスケーリング抵抗性の評価では試験前に 40°C 乾燥を行わない湿潤連続が有用である。
- (3) すべての高炉スラグ細骨材において、砕砂に比べて、

ソルトスケーリング抵抗性は高い結果となった。

謝辞

本研究の推進にあたり、JFE スチール（株）高橋克則氏の多大な協力を頂いた。ここに謹んで感謝の意を表す。本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人:NEDO)によって実施されたものであり、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 東北地方における凍害対策に関する参考資料（案）国土交通省 東北地方整備局, 2017.3
- 2) 綾野克紀, 藤井隆史: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.70, No.4, pp. 417-427, 2014
- 3) 中村大樹, 山本英和, 田中館悠登, 羽原俊祐, 小山田哲也: 凍結融解抵抗性, 硫酸塩抵抗性および硫酸抵抗性に及ぼす高炉スラグ細骨材の影響, Journal of MMIJ, Vol.133, No.7, pp. 151-156, 2017
- 4) 高橋克則, 渡辺圭児, 高橋晴香, 羽原俊祐: 高炉スラグ細骨材がモルタルの塩分共存下の凍害複合環境の耐久性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp. 835-840, 2017
- 5) 山内守, 中溝翔, 藤井隆史, 綾野克紀: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのスケーリングに与える粒度分布の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp. 963-968, 2016
- 6) 小山田哲也, 羽原俊祐, 高橋拓真, 高橋俊介: スケーリング劣化を考慮した新しい凍結融解試験法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp. 935-940, 2011
- 7) 菅野華果, 羽原俊祐, 小山田哲也, 越後貴司: 既存スケーリング試験方法に対する小片凍結融解試験方法の整合性, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, pp.419-425, 2014
- 8) 羽原俊祐, 小山田哲也, 我満俊文, 中村大樹: ソルトスケーリングにおよぼす冷却最低温度と凍結防止剤濃度およびモルタル配合の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol. 69, pp. 433-439, 2015
- 9) 月永洋一, 庄谷征美, 笠井芳夫: 凍結防止剤によるコンクリートのスケーリング性状とその評価に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol.8, No.1, pp. 121-133, 1999