

高炉スラグ細骨材によるモルタル、コンクリートの塩分共存下での凍結融解抵抗性の改善効果

Effect of Blast Furnace Slag Fine Aggregate for Freezing-and-Thawing Durability of Mortar and Concrete under Salt Existence Environment

高橋 克則 TAKAHASHI Katsunori JFE スチール スチール研究所 スラグ・耐火物研究部 主任研究員 (部長)・博士 (工学)
渡辺 圭児 WATANABE Keiji JFE スチール スチール研究所 スラグ・耐火物研究部長・博士 (工学)
二井谷教治 NIITANI Kyoji オリエンタル白石 (株) 技術研究所 所長・博士 (工学)
細谷 多慶 HOSOTANI Kazuyoshi ランデス (株) 常務執行役員 技術部 副部長・博士 (工学)

要旨

高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、配合条件を適切に整えれば高い凍結融解抵抗性をもつことが分りつつある。本研究では、高炉スラグ細骨材を用いたモルタルおよびコンクリートについて、塩分が共存する凍害環境での耐久性を調査し、また、コンクリート床版を試作して輪荷重走行試験による疲労耐久性を検討した。塩分共存下でのモルタル、コンクリートの凍結融解抵抗性は、高炉スラグ細骨材の適用で明確に改善された。骨材とペースト界面の反応の寄与および塩分浸透の抑制による効果が示唆された。輪荷重走行試験では、70 N/mm² レベルの高炉スラグ細骨材コンクリートを評価し、湿潤環境で載荷荷重 200 N/mm²、88 000 回以上の走行数でも破壊に至らず、一定の耐久性が確認された。

Abstract:

Cement concrete using blast furnace slag fine aggregate (BFSA) has been found to have excellent freezing-and-thawing durability, in case mixture conditions are appropriate. In this study, freezing-and-thawing durability under salt existence environment was investigated for mortar and concrete using BFSA, and testing of fatigue durability of concrete slab was conducted. Resistance of concrete to freezing and thawing in NaCl (aq) was improved by using BFSA. Reaction between BFSA and cement paste boundary and suppression of salt penetration might have a role for the improvement. BFSA concrete with compressive strength of 70 N/mm² showed enough load bearing ability after 88 000 tracks in wheel loading fatigue test with applied load of 200 kN under wet condition.

1. はじめに

高度成長期に整備された高速道路など社会インフラの老朽化、劣化が進行しつつあり、例えば高速道路では約4割が供用30年以上となっている。特に山間部などにおいてはコンクリートが土砂化した激しい劣化も認められており、劣化原因評価によれば、重交通による疲労の影響はあまり大きくなく、内在塩分や凍結防止剤などによる塩分共存下での凍害との複合劣化が主要因と推定されている¹⁾。

高炉スラグ細骨材 (以下、BFSA) は、高炉で発生する溶融状態の複合酸化物 (高炉スラグ) を水流で急冷して得られるガラス質の粒子を軽破碎することで製造される。そのため、塩化物や有機物を含まないという長所がある一方で、適切な配合設計をしないとブリーディングが多くなる等の短所があることが知られている^{2,3)}。最近の研究では、ブリー

ディングを抑制した配合条件を整えることができた場合、乾燥収縮の低減などの優位な効果が期待でき^{4,5)}、凍結融解に対しても十分な性能があるとの知見が得られつつある^{6,7)}。しかしながら、凍結融解の改善、特に、塩分が共存する環境での凍害複合劣化に対する効果発現のメカニズムは明確になっていない。

ブリーディング量などの管理を確実に実行し、高炉スラグ細骨材による上記特性を有効に発揮させるためには、コンクリート二次製品への適用が最も有効であると考えられる。一方でコンクリート二次製品の場合には、製品出荷までに強度等の品質確保などが要求されるため、セメントの種類の限定や蒸気養生の適用など、通常の生コンクリートとは異なる条件の影響も考えられ、特に蒸気養生した材料については早期劣化の可能性があるとされている⁸⁾。

また、RC床版の代表的な損傷として、ひび割れ損傷、押し抜きせん断破壊が知られており、その評価として輪荷重走行疲労試験が適用されている⁹⁾。高炉スラグ細骨材を多

量に使用した RC 床版の事例はほとんどなく、床版としての実用性評価のためにはその評価も必要となる。

本報では、複数の高炉スラグ細骨材を用いて、塩分共存状態での凍害劣化に対する効果、および、塩化物イオンの浸透抑制効果について調査し、高炉スラグ、セメント等の材料との相関、養生方法の影響等を調査した結果を報告する。また、コンクリート二次製品として実用化を想定して湿潤環境下での輪荷重走行疲労試験を実施し、疲労劣化耐久性について調査した結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 高炉スラグ細骨材を用いたモルタル、コンクリートでの塩分共存条件での凍結融解試験

細骨材は、高炉スラグ細骨材および砂岩砕砂（表乾密度 2.59 g/cm³、吸水率 1.5%）を用いた。高炉スラグ細骨材の物性を表 1 に示す。A は、粗粒率が高く、ガラス化率がやや低くなっており、B~D はガラス化率が 99% 以上のものである。結合材は、モルタル試験では普通ポルトランドセメントを用い、コンクリート試験では早強セメント、高炉セメントでの比較も実施した。コンクリート試験時の粗骨材には砂岩砕砂（表乾密度 2.75 g/cm³、吸水率 0.6%）を用いた。

モルタルでの凍結融解試験の配合を表 2 に示す。水セメント比 (W/C) は、50%、40% とし、細骨材のみを入れ替

表 1 使用した高炉スラグ細骨材の物性

Table 1 Properties of blast furnace slag fine aggregate

BFSA sample		A	B	C	D
Chemical composition	CaO (%)	41.0	41.8	43.4	42.5
	S (%)	0.5	0.7	0.8	0.9
	SO ₃ (%)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	FeO (%)	0.3	0.3	0.3	0.5
Density in oven-dry (g/cm ³)		2.65	2.77	2.73	2.64
Density in saturated surface (g/cm ³)		2.69	2.78	2.75	2.68
Water absorption (%)		1.35	0.21	0.69	1.42
Bulk density (kg/L)		1.56	1.63	1.58	1.55
Material ratio ≤75 μm		1.3	3.9	3.1	2.0
Fineness modulus		3.53	2.13	2.60	2.43
Glass phase content (%)		95.8	99.5	99.5	99.2

表 2 モルタルの配合

Table 2 Mix proportion of cement mortar

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
	W	C	S	
			CS	BFSA
40	274	684	1 350	0
50	300	600	0	1 390

CS: Crushed sand stone sand

表 3 テストに適用した代表的なコンクリート配合

Table 3 Mix proportion of typical cement concrete

W/B (%)	BFS/S (%)	Air (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)					HWRS (Bx%)	AE (Bx%)	
				W	B		S				G
					OPC	BB	CSS	BFS			
40	0.0	2.0	5.0	175	438		883		913	0.5	0.004
	0.0				438	876		906	0.4	0	
	33.3				438	590	290	906	0.4	0	
	66.7				438	292	593	906	0.4	0	
	100.0				438	0	889	906	0.4	0	

えることとした。混練したモルタルは、40 mm×40 mm×160 mm の型枠に成型、脱型し、材齢 14 日、28 日および 91 日まで水中養生を行った。

モルタル小片を用いた凍結融解試験は、水中養生したモルタルから 10 mm の立方体の小片を切り出して試験片とした。ガラスピーカーにモルタル小片 5 個（約 14 g）を入れ、試験溶媒は、RILEM CDF 法¹⁰⁾、羽原らの結果¹¹⁾をもとに 3% NaCl 水溶液を液固重量比が 10 となるように加えた。塩水環境での凍結融解のサイクルは温度幅を -18℃ と 20℃ とし、昇降温に各 3 時間、1 サイクル 24 時間で実施した。所定サイクルの融解工程終了後に、モルタル小片を取り出し、崩れ落ちた部分を取り除いて質量を測定して推移を調査した。また、回収サンプルの微構造を偏光顕微鏡、走査型電子顕微鏡、EPMA 分析で評価した。

コンクリート試験時の標準配合を表 3 に示す。水セメント比として 40% および 35% とし、細骨材、結合材を置き換えて試験に供した。粗骨材には硬質砂岩砕砂（最大寸法：20 mm、表乾密度：2.74 g/cm³、吸水率：0.64%）を用いた。混和剤には、高性能 AE 減水剤、消泡剤、増粘剤を適用した。コンクリートは 100 mm×100 mm×400 mm の型枠に成型、脱型し、60℃ の蒸気養生および所定期間の水中養生を施した。

コンクリートの凍結融解試験は、JIS A 1148 (2010) の A 法に準拠し、ただし、凍結融解時の試験液として 10% 塩化ナトリウム (NaCl) 水溶液を用いた。

2.2 高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの塩化物イオン浸透性

細骨材は、高炉スラグ細骨材および砂岩砕砂（表乾密度 2.64 g/cm³、吸水率 1.8%）を用いた。結合材は、普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比は 50% として、細骨材を入れ替えて比較した。

塩化物イオンの浸透試験は、JSCE-G 572-2013 「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法 (案)」に準拠して行った。モルタルは、φ100×200 mm の円柱型枠へ打込み後、24 時間後まで型枠内で養生を行い、脱型後は、水中養生を材齢 7 日まで行った。供

試体は、円形の切断面1面以外の面をエポキシ樹脂で被覆し、エポキシ樹脂を完全に硬化させるために材齢14日まで気中に静置した。硬化を確認した後、質量パーセント濃度が10%のNaCl水溶液に浸漬させた。浸漬開始後、0.3年(105日)、1年(365日)および3年(1092日)でNaCl水溶液から取り出し、深さ方向の塩化物イオン量の分布を測定した。

2.3 高炉スラグ細骨材を用いたプレキャスト床版の輪荷重走行試験¹²⁾

輪荷重走行試験に適用したコンクリートの供試体条件を図1に示す。サンプルの構造は、既設で標準的と推定される昭和39年の鉄筋コンクリート道路橋設計方書¹³⁾に基づく条件とした。配合は、基準材として、砕砂を用いて、既設の標準材に該当する設計強度35 N/mm²材のコンクリートとした(以後、S1)。高炉スラグ細骨材適用材は、現在床版の架け替えて適用されているものと同等材を想定し、水セメント比40%、設計強度は70 N/mm²とした(S2)。

輪荷重走行試験の模式図を図2に示す。コンクリート床版の耐久性に対しては水の存在が影響することが知られていることから、サンプルは開始前に十分散水して24時間放置し、試験中は十分に湿潤させたウエスを上面におき、朝

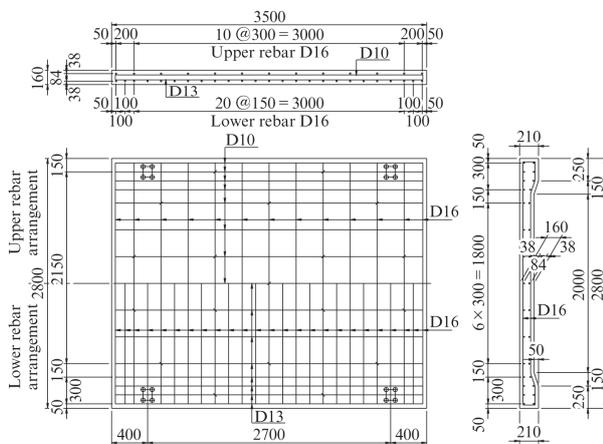


図1 輪荷重走行試験のコンクリート供試体条件

Fig. 1 Size and dimension of concrete slab for wheel load running fatigue test

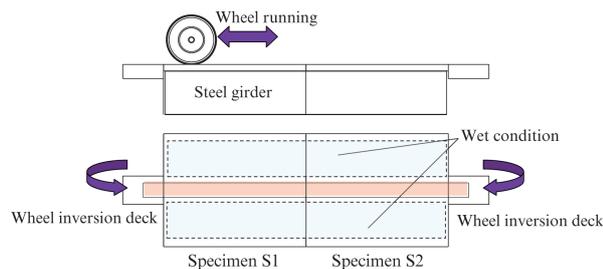


図2 輪荷重走行試験の模式図

Fig. 2 Schematic diagram of wheel load running fatigue test

夕に散水した。2つのサンプルは並べて設置し、載荷荷重は200 kNで一定として、航空機用ゴムタイヤをサンプル両端の先のデッキ部のところで折り返して走行させた。走行数が1, 10, 100, 200, 500, 1000, 2000, 10000回およびその後10000回おきに中央部のたわみ量を評価した。載荷背面のクラックについても観察した。

3. 結果および考察

3.1 モルタルおよびコンクリートでの塩分共存条件下での凍結融解抵抗性

水セメント比50%での28日養生後のモルタルでの塩水凍結融解サイクル試験後の残存重量推移を図3に示す。砂岩砕砂を用いたモルタルではほとんど塊状部が残っておらず、10サイクルで崩壊してしまったのに対して、高炉スラグ細骨材は塊が残存していることが確認された。細骨材を高炉スラグ細骨材に変えることだけで、塩水環境での凍結融解に対して優位な特性が得られた。また高炉スラグ細骨材間

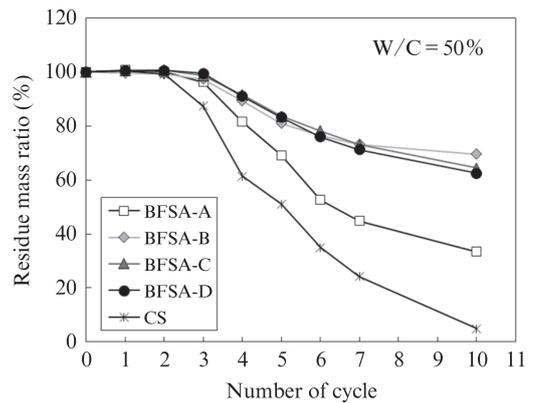


図3 各種細骨材を用いたモルタル小片の塩水凍結融解試験での塊状部の残存重量の変化

Fig. 3 Residue mass ratio of mortar using several types of fine aggregate after small size freezing-and-thawing test

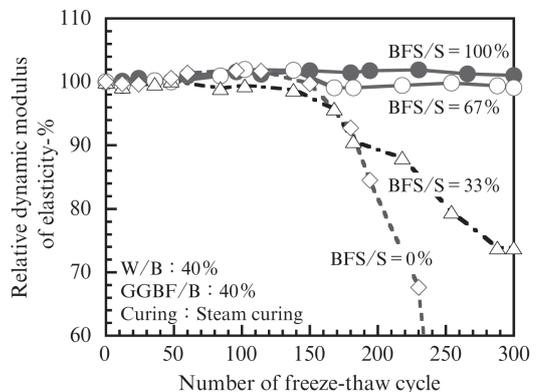


図4 コンクリートの塩分共存下での凍結融解抵抗に対する高炉スラグ細骨材の置換の効果

Fig. 4 Effect of replacement of BFS on resistance of concrete to freezing and thawing action in NaCl (aq)

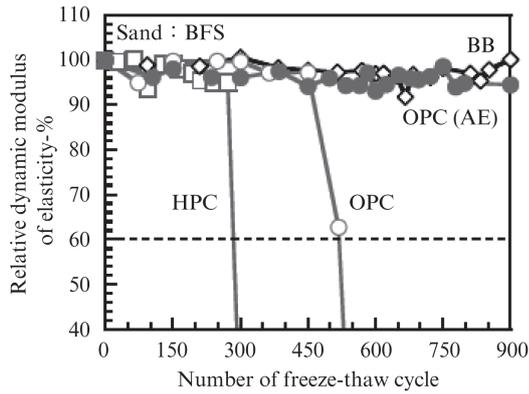


図5 結合材種を変えたコンクリートの塩分共存化での凍結融解試験結果

Fig. 5 Effect of cement types on resistance of concrete to freezing and thawing action in NaCl (aq)

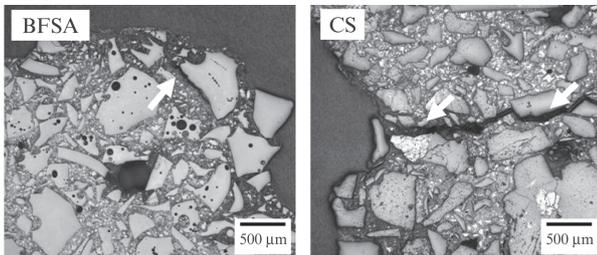


図6 細骨材を変えたモルタルでの凍結融解試験時の残留部の亀裂状況

Fig. 6 Internal crack of mortar using BFSA or CS aggregate after freezing and thawing test in NaCl (aq)

の材料差を比較すると、ガラス化率の低いAがやや低位となっていた。

図4に細骨材を砂岩砕砂から高炉スラグ細骨材に置換したコンクリートにおける塩分共存下での凍結融解抵抗性の試験結果を示す。なお、コンクリートはNon-AEで製造し、養生は蒸気養生としている。高炉スラグ細骨材の置換率が高くなるほどコンクリートの凍結融解抵抗性は向上し、細骨材の33%に高炉スラグ細骨材を用いると、耐凍害性の目安となる、凍結融解の繰返しを300サイクル与えても相対動弾性係数は60%を上回ることが確認された。

図5に高炉スラグ細骨材を用いたNon-AEコンクリートの凍結融解抵抗性に対するセメント種類の影響を示す。早強ポルトランドセメント(HPC)を用いたものは300サイクル程度で、普通ポルトランドセメント(OPC)を用いたものは500サイクル程度で、それぞれ、相対動弾性係数が低下した。これに対し、高炉セメントB種(BB)を用いたものは、1200サイクルまで凍結融解を作用させても、相対動弾性係数は90%以上であった。強度発現の遅いセメントほど、凍結融解抵抗性が向上している可能性があり、今後、セメントゲル化等の反応や結合水の残留状態の影響などの検証と、セメント種類に応じた配合等の適正化が必要である。

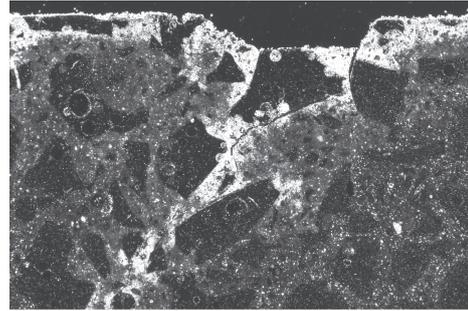


図7 薄片化した高炉スラグ細骨材使用モルタルの塩水接触表面の偏光顕微鏡写真

Fig. 7 Polarizing microscope photograph of mortar surface using BFSA after freezing and thawing test in NaCl (aq)

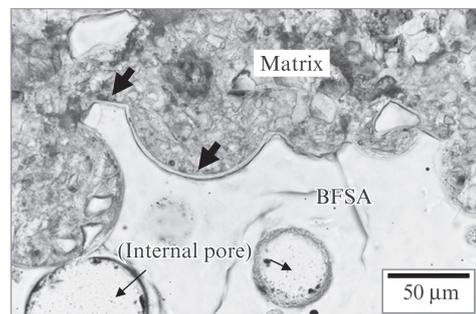


図8 高炉スラグ細骨材界面の透過顕微鏡写真

Fig. 8 Transmission microscope photograph of boundary area between BFSA and cement matrix

凍結融解5サイクル後の残留部を埋め込み研磨した材料の顕微鏡写真を図6に示す。モルタル表面から内部に向かって亀裂が認められ、ペーストと骨材の界面に沿うように進展している。亀裂深さは、高炉スラグ細骨材の場合がモルタルの最表面近傍に限定しているのに対して、砂岩砕砂を用いた場合には内部に深く亀裂が進展している。図7にモルタル表面周辺部を偏光顕微鏡で観察した結果を示す。表面で組織の脆化が起こっているが、同様の劣化が亀裂周辺においても確認される。亀裂進展に伴って塩水が内部まで浸透し、組織の劣化を加速しているものと推定され、これが高炉スラグ細骨材と砂岩砕砂のモルタルにおける塩分共存下の耐久性の差異の原因の1つと推定される。

図8に骨材界面近傍を偏光顕微鏡観察した結果を、図9に凍結融解試験後のモルタル表面近傍のSEM-EDX (Ca)の観察結果を示す。高炉スラグ細骨材の周縁部には厚さ2μm程度の反応相が存在していることが確認される。SEM-EDXからは、砂岩砕砂の場合、骨材界面に元素が希薄なエリアがみられ、遷移帯等の脆弱部の存在が示唆されるのに対して高炉スラグ細骨材の場合、溶媒に接触する表面側は低Ca域があるものの、数10μm程度深い位置では骨材周辺とマトリックスのCa, Si等に大きな差がみられなかった。高炉スラグ細骨材が何らかの形で反応して界面が強化され、浸透抑制、亀裂進展抑制がおり、塩分共存化での凍結融

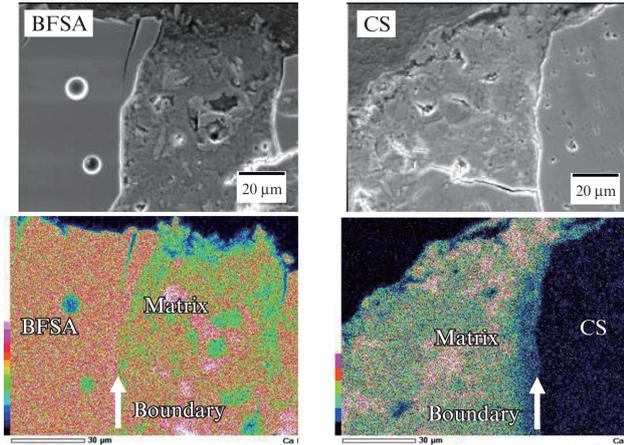


図9 凍結融解試験後のモルタル表面近傍のSEM写真およびCaマッピング

Fig. 9 SEM and Ca-mapping images of mortar surface after freezing and thawing test in NaCl (aq)

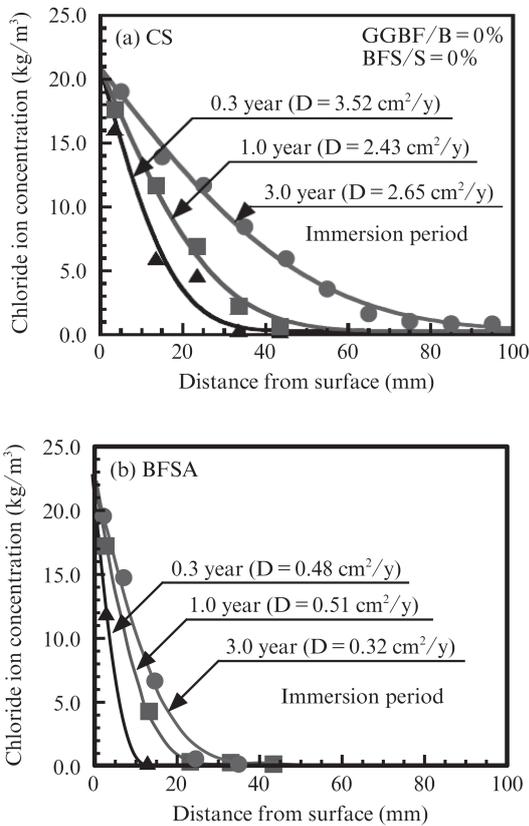


図10 細骨材を変えたモルタルでの10%-NaCl水溶液浸漬後の塩化物イオン濃度分布の変化

Fig. 10 Chloride ion concentration in mortar using BFSA or CS aggregate after varied immersion period in NaCl (aq.)

解抵抗性が改善された可能性が考えられる。

3.2 高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの塩化物イオン浸透性

図10に細骨材を変えて塩水浸漬させたモルタルの塩化物イオン濃度分布を示す。普通ポルトランドセメントと砂岩砕

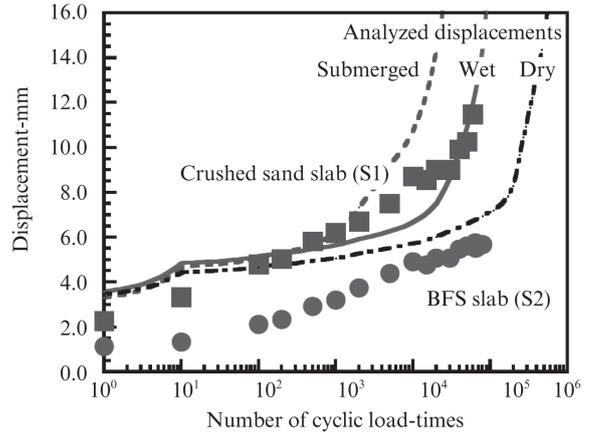


図11 輪荷重載荷試験時のサンプル中央たわみ量の推移

Fig. 11 Displacement of concrete slab specimens during wheel load running fatigue test

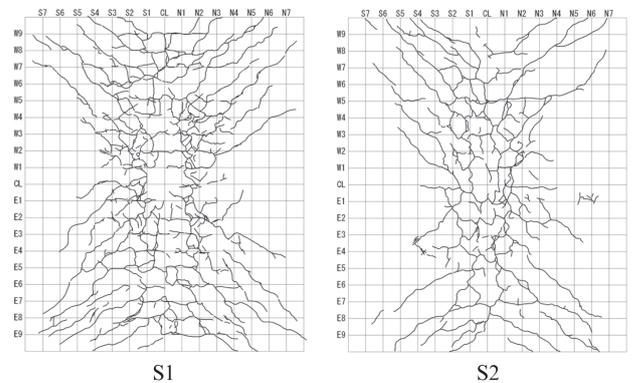


図12 50,000回終了時のクラックパターン

Fig. 12 Crack pattern of concrete slab after 50,000 times loading

砂を用いた場合、3年間塩水に浸漬させると供試体表面から100 mmの位置まで塩化物イオンが検出され、塩化物イオンの見かけの拡散係数は $2.65 \text{ cm}^2/\text{年}$ であった。一方、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた場合、塩化物イオンの検出表面から30 mm程度の位置までに留まっていた。見かけの拡散係数は $0.32 \text{ cm}^2/\text{年}$ と大きく低下しており、また、浸漬期間が延びるほど低下している。これらの結果は、前節の高炉スラグ細骨材が反応していることと合致し、遮塩性能の改善にも寄与している可能性が高い。

3.3 輪荷重走行試験結果

図11に輪荷重走行試験中の試験体中央のたわみ量の推移と、DuCOM¹⁴⁾による非線形FEM解析結果を示す。試験体のたわみ量は走行数が増えるにしたがって増加し、S1は12 mmに到達して破壊した。この測定結果は、DuCOMの湿潤環境でのシミュレーション結果と良く一致していた。一方、S2は約90,000回の走行数でもたわみ量は6 mm以下とS1の半分以下であった。

図12に50,000回終了時の床版背面側のクラックパターン

を示す。クラックは、試験開始初期に長手方向に発生し、続いて各コーナーから中央に向かう放射状クラック、短軸方向のクラックが順次起こった。その後、走行数が増えるにしたがってクラック密度が増加していくことが確認された。S1とS2を比較すると、S2のほうがクラック密度は低く、高強度化が実使用条件でも有効であると考えられる

以上の結果より、コンクリートの高強度化によってたわみが抑制されて床版の寿命が向上できると考えられ、また、このような高強度床版に高炉スラグ細骨材を適用しても問題なく効果が発現することが確認された。

4. おわりに

高炉スラグ細骨材を用いたモルタル、コンクリートについて、塩分共存下での凍結融解抵抗性の評価および輪荷重走行疲労試験を実施し、以下の結果を得た。

- (1) 高炉スラグ細骨材を用いることによって、塩水環境での凍結融解特性が改善されることが、モルタル、コンクリートでともに確認された。
- (2) 凍結融解時の劣化は、骨材-ペースト界面に沿った亀裂で進展している。高炉スラグ細骨材では界面近傍で反応が起こることで脆弱部が強化され、亀裂進展が抑制されたと示唆される。
- (3) コンクリートにおいては、高炉スラグ細骨材の置換率が高くなるほど塩分共存下での凍結融解抵抗性が改善された。また、強度発現が遅いセメント種ほど良好であった。
- (4) 塩水浸漬時のモルタル内の塩化物イオン浸透は、高炉スラグ細骨材を用いることによって表層にとどまり、見かけの拡散係数は1/5以下に低下した。
- (5) 高炉スラグ細骨材を用いた高強度タイプのプレキャスト床版を試作し、輪荷重走行試験に供した結果、荷重疲労に対しても問題ないことが確認された。

本研究は、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」(管理人：NEDO)によって実施した。また、本研究の実施に際して、岡山大学綾野克紀教授に広くご指導、ご助言を頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 東・中・西日本高速道路株式会社. 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書. 2014.
- 2) 土木学会コンクリート委員会. 高炉スラグ骨材コンクリート施工指針. 1993.
- 3) 日本建築学会. 高炉スラグ細骨材を使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説. 2013.
- 4) 齊藤和秀, 木之下光男, 伊原俊樹, 吉澤千秋. コンクリート工学年次論文集. 2009, vol. 31, p. 139-144.
- 5) 金子宝以, 今本啓一, 清原千鶴, 大和田紗織. コンクリート工学年次論文集. 2014, vol. 36, p. 520-525.
- 6) 森 雅聡, 藤井隆史, Jariythitipong P., 綾野克紀. コンクリート工学年次論文集. 2015, vol. 36, p. 1078-1083.
- 7) 綾野克紀, 藤井隆史. 土木学会論文集 E2. 2014, vol. 70, p. 417-422.
- 8) 全国コンクリート製品協会東北支部. プレキャストコンクリート製品の早期劣化に影響を及ぼす製造的要因の研究 実験結果報告書, 2011.
- 9) 松井繁之. 道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究. 大阪大学, 1985, 博士論文.
- 10) TC 117-FDC, CDF Test—Test freeze-thaw resistance of concrete—tests with sodium chloride solution (CDF), 1996.
- 11) 羽原俊祐, 小山田哲也, 我満俊文, 中村大樹. セメント・コンクリート論文集. 2015, vol. 69, p. 433-439.
- 12) Ayano T.; Fujii T.; Niitani K.; Takahashi K.; Hosotani K. J. Disaster Res. 2017, vol. 12, p. 456-469.
- 13) 日本道路協会. 鉄筋コンクリート道路橋示方書. 1964.
- 14) Maekawa K.; Ishida T.; Kishi T. "Multiscale Modeling of Structural Concrete". Taylor and Francis, 2008.



高橋 克則



渡辺 圭児



二井谷教治



細谷 多慶