

産業副産物を使用したコンクリートの耐久性

About the durability of the concrete which uses an industrial by-product

北海道電力（株）総合研究所 ○正 員 五十嵐由一（Yoshiichi Igarashi）
正 員 植田国彦（Kunihiko Ueta）
新日鐵住金（株）室蘭製鐵所 上村竜介（Ryusuke Uemura）

1. はじめに

産業副産物（高炉スラグ・製鋼スラグ・石炭灰）として、新日鐵住金(株)室蘭製鐵所から、高炉で鉄鉱石を溶解・還元する過程で高炉スラグが、鉄を精錬する製鋼段階で製鋼スラグが発生する。それぞれのスラグの年間発生量（平成 23 年度）は、高炉スラグが約 70 万 t、製鋼スラグが約 30 万 t である。また、北海道電力(株)苫東厚真発電所（石炭火力）から発電時に年間 45 万 t（平成 23 年度）の石炭灰が発生しており、石炭の燃焼過程において、フライアッシュが生成される。

スラグ、石炭灰の利用用途（リサイクル）が、セメント原料、コンクリート混和材や土木資材であることから、景気変動の影響を受けやすいため、副産物を安定処分するには、更なる利用用途の拡大が必要である。

これまでに、製鋼スラグ・高炉スラグおよびフライアッシュを用いたコンクリートの研究は盛んに行われており、その中に FS コンクリート¹⁾があり、細骨材に製鋼スラグおよびフライアッシュを粗骨材に高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートを港湾構造物へ適用目的に研究され、耐久性（塩害・凍害）を確認している。

本研究では、北海道内にある製品化されているスラグ、石炭灰に着目し、港湾構造物への適用を目的に、セメント（結合材）の一部置換えに高炉スラグ微粉末、フライアッシュを骨材の置換えに製鋼スラグ（細骨材・粗骨材）を使用した重量コンクリートを開発し、耐久性を室内試験で検討した結果を報告する。

2. 試験概要

室内試験の概要を表-1 および以下に示す。

2.1 試験の目的

副産物混合コンクリートの強度特性および耐久性を確認し、波力による滑動や転倒への抵抗性が要求される海岸構造物、また、その他の外力に自重で抵抗する基礎構造物などの重量コンクリートとしての適用性について検討する。

2.2 使用材料

使用材料を表-2、製鋼スラグの粒度分布を図-1 に示す。

普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種は、日鉄住金セメント(株)製を、フライアッシュセメントのフライアッシュは苫東厚真発電所産 JIS II 種を使用し、骨材は胆振地区の陸砂・砕石を、混和剤にはフローリック

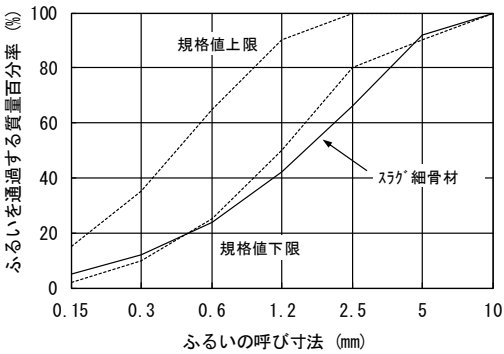
製（リグニンスルホン酸塩・オキシカルボン酸塩、高級脂肪酸系界面活性剤）を使用した。

表-1 試験概要

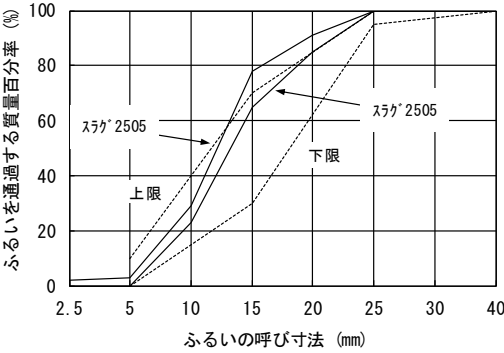
W/C (%)	セメント種類	記号	骨 材		強度特性		耐久性能	
			陸砂・砕石	製鋼スラグ	圧縮強度試験	摩耗試験	凍結融解試験	
50	普通ポルトランドセメント	NP	○	○	○			○
	高炉セメントB種	BB	○	○	○	○	○	○
	フライアッシュセメントB種	FB		○	○	○	○	○
	フライアッシュセメントC種	FC		○	○	○	○	○

表-2 使用材料

種 類	諸 元
セメント	普通 普通ポルトランドセメント（日鉄住金セメント(株)製）
	高炉B 高炉セメントB種（日鉄住金セメント(株)製）
フライアッシュ	JIS II 種灰（北海道電力(株)苫東厚真発電所産）
細 骨 材	登別産陸砂
粗 骨 材	白老町敷生川産砕石2505
	白老町敷生川産砕石4020
製鋼スラグ細骨材	新日鐵住金(株)製
製鋼スラグ粗骨材	新日鐵住金(株)製2505
混和剤	AE減水剤 フローリックS（(株)フローリック製）
	AE剤 フローリックAE-9B（(株)フローリック製）
練混ぜ水	上水道水



(a) 製鋼スラグ細骨材



(b) 製鋼スラグ粗骨材（2505）

図-1 粒度分布

表-4 配合およびフレッシュ性状

記号	骨材最大寸法 (mm)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								フレッシュ性状				
			W	C	(FAの割合)	天然砂・砕石			製鋼スラグ		混和剤		スランブ (cm)	空気量*2 (%)	コンクリート温度 (℃)
						S	G1 (2505)	G2*1	SS	SG1 (2505)	AE 減水剤	AE剤 (g/m ³)			
NP	25	48	162	324		871	578	384			3.240	0	9.5	6.0	20.0
NP-S	25	48	162	324					1066	1181	3.240	1.620	9.0	4.8 (6.6)	20.0
BB	40	44	131	262		877	665	444			2.620	0	7.5	4.5	21.8
BB-S	25	48	162	324					1063	1175	3.240	1.8144	8.0	4.6 (6.4)	20.0
FB-S	25	48	154	308	(46)				1081	1196	3.140	3.3284	8.0	4.8 (6.6)	20.5
FC-S	25	48	147	294	(88)				1089	1209	3.060	5.2020	7.0	4.5 (6.3)	20.0

* 1 : NP→G2(1505) , BB→G2 (4020)を使用

* 2 : () 内は骨材修正係数による補正前の値

表-3 配合条件

水セメント比 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)
50	25	8±2.5	4.5±1.5	175以下
	40			

2.3 配合条件

目標スランブは土木工事を想定し 8±2.5 cmとし、空気量の目標値を 4.5±1%とした。配合条件を表-3 に示す。

2.4 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

コンクリートの配合(表-4)は、試験練りを行って、目標の配合条件(表-3)が得られるように調整した。

2.5 試験項目・方法

表-5 に試験項目および方法を示す。

副産物混合コンクリートの耐久性能を確認するために、強度特性(硬化後の強度)、耐凍害性(凍結融解試験)および耐摩耗性(スチールロッド式摩耗試験、掃流式摩耗試験)を評価するための試験を実施した。

スチールロッド式摩耗試験は、コンクリートの衝撃摩耗に対する抵抗性を確認するための試験で、図-2 に示す回転するドラムの外側に 6 つの供試体(135×150×300mm、摩耗面の面積 367.5cm²)を設置し、摩耗材(スチールロッドφ19×φ40mm×25 個、総重量約 2.2kg)を入れ、流量 0.5m³/h の水を流しながら、ドラムを 50rpm の速度で回転させることにより、供試体の摩耗面に対して直角に作用する突き砕き力を主に与え、摩耗させるものである。

掃流式摩耗試験は、コンクリートの掃流摩耗(すりみがき作用)に対する抵抗性を確認するために試験で、図-3 に示す半円環状のアーチ形供試体(内径 130mm、外形 250mm、幅 100mm、摩耗面の面積 204.2cm²)を設置し、摩耗材(粒状 1.2~2.5mm の砂、絶乾質量 2kg)を入れ、ドラム内部を水で満たし、本体左右に備えてある 3 枚の羽根のスクリーンの主軸を毎分 1440 回転で回転させ、供試体内曲面に流速約 9m/sec の掃流作用(すりみがき作用)を与え、摩耗させるものである。

表-5 試験項目および方法

試験項目	試験方法
フレッシュ コンクリート	スランブ試験
	空気量試験
	温度測定
強度特性	圧縮強度試験
	供試体寸法：φ125mm×h250mm 養生条件：標準養生
耐久性性能	スチールロッド式摩耗試験
	供試体寸法：□135mm×150mm×300mm 養生条件：標準養生、測定材齢56日 摩耗時間：10時間
	掃流式摩耗試験
凍結融解試験	供試体寸法：半円筒、内径130mm 外形250mm、幅100mm 養生条件：標準養生、測定材齢56日 摩耗時間：10時間
	JIS A 1148による 供試体寸法：□100mm×100mm×400mm 養生条件：標準養生、測定材齢56日 計測頻度：30サイクル毎 (300サイクルまで)

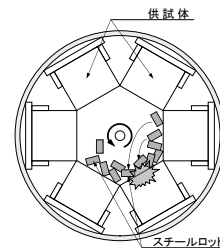


図-2 スチールロッド式摩耗試験機の模式図・写真

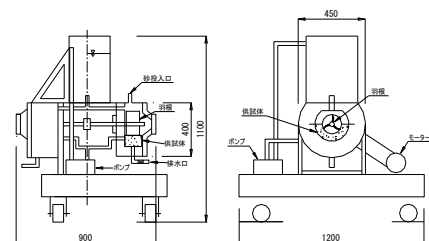


図-3 掃流式摩耗試験機

3. 試験結果と考察

3.1 圧縮強度試験結果

表-4 で得られた配合のコンクリートについて、標準養生で実施した圧縮強度試験の結果を図-4 に示す。

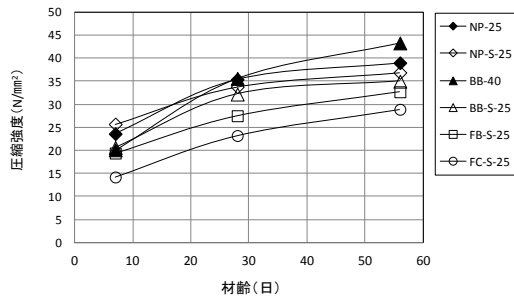


図-4 圧縮強度試験の結果

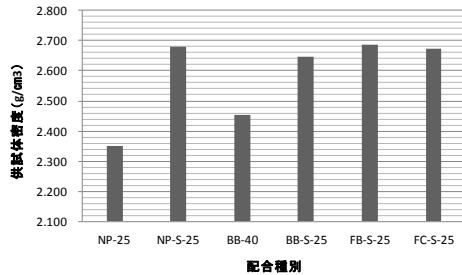


図-5 供試体密度

各種結合材の組合せによる強度発現では、NP>BB>FB>FC となっているが、フライアッシュを配合したFB、FC においては長期材齢になるほど強度の差が小さくなる傾向が見られる。

各種骨材の組合せによる強度発現では、天然砂・碎石>製鋼スラグの傾向があるが、供試体密度においては、製鋼スラグを使用することで高くなっている（図-5）。

3.2 スチールロッド式摩耗試験の結果

材齢 56 日の供試体を用いて行ったスチールロッド式摩耗試験の結果として、供試体摩耗面における単位面積あたりのコンクリートの摩耗量 (cm^3/cm^2) の経時変化を図-6 に、試験終了後の状況を写真-1 に示す。

圧縮強度と単位摩耗量の関係を図-7 に示す。

各種結合材の組合せによる耐久性（衝撃摩耗）は、僅かであるが BB>FB・FC となり、骨材の違いでは製鋼スラグ>天然砂・碎石となった。

3.3 掃流式摩耗試験の結果

材齢 56 日の供試体を用いて行った掃流式摩耗試験の結果として、供試体摩耗面における単位面積あたりのコンクリートの摩耗量 (cm^3/cm^2) の経時変化を図-8 に、試験終了後の状況を写真-2 に示す。

圧縮強度と単位摩耗量の関係を図-9 に示す。

各種結合材の組合せによる耐久性（掃流摩耗）は、僅かであるが BB>FB>FC となったが、図-9 より圧縮強度が大きくなるほど摩耗量が小さくなる傾向が認められた。

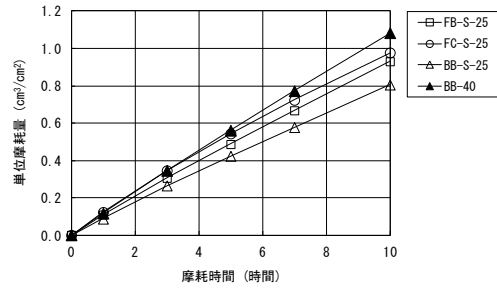


図-6 スチールロッド式摩耗試験の結果

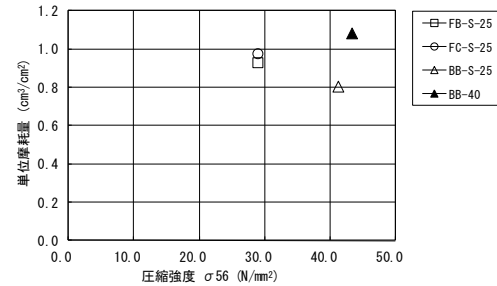
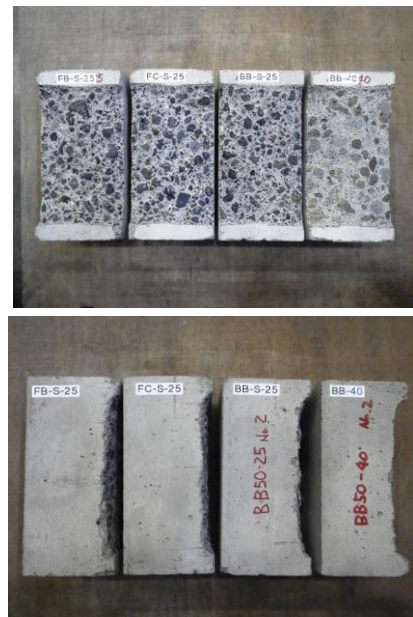


図-7 圧縮強度と単位摩耗量の関係



（上段：摩耗面，下段：側面）

写真-1 スチールロッド式摩耗試験供試体の状況
（左側から FB-S-25, FC-S-25, BB-S-25, BB-40）

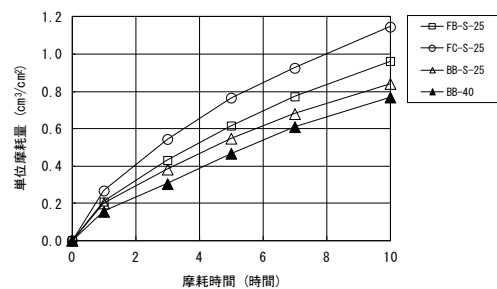


図-8 掃流式摩耗試験の結果

3.3 凍結融解試験の結果

材齢 56 日の供試体を用いて行った凍結融解試験（質量変化率と相対動弾性係数）の結果を図-10 に示す。

圧縮強度と質量減少率（240 サイクル）の関係を図-11 に示す。質量変化率の小さな結合材は $BB < FB < FC$ となり、3 種の結合材共に 180 サイクル以降は僅かに大きくなった。

FC-S-25 は、240 サイクルで相対動弾性係数が 60% を下回ったため試験を中止した。

4. まとめ

本研究は産業副産物（高炉スラグ・製鋼スラグ・石炭灰）を用いた重量コンクリートを開発し、港湾構造物への適用を目的に耐久性能について検討を行った。

コンクリートの結合材の一部を高炉スラグ微粉末・フライアッシュで置換え、砂・砕石を製鋼スラグで置換えた重量コンクリートである。

港湾構造物などの耐久性能についての検討結果は、以下のとおりである。

【製鋼スラグ】

- コンクリート重量は $2,600 \text{ kg/m}^3$ 以上となる。
(砂・砕石(40 mm)の場合 $2,450 \text{ kg/m}^3$ 程度)
- 耐久性能のうち衝撃摩耗に優れた材料である。
重量が重いことと衝撃摩耗に優れていることから構造物として、長期間要求性能を維持することができると思われる。

【高炉スラグ微粉末・フライアッシュ】

- 高炉スラグ微粉末、フライアッシュの置換率は市販されている高炉セメント B 種、フライアッシュセメント B 種と同程度とし、各種セメントによる耐久性能についても同程度である。

5. おわりに

室内試験で試験毎に耐久性能について検証したが、実構造物においては複合劣化での耐久性評価が必要となる。また、試験結果から、コンクリート強度と耐久性能に関係がみられることから、今後は、各種結合材のコンクリート強度を実構造物と合わせ、実物大のブロック供試体を作製し、耐久性能を確認したい。

最後に、本研究を実施するにあたりご協力を賜りました、新日鐵住金(株)室蘭製鐵所上村竜介主査ならびにフジコンサルタント(株)八島洋試験研究部長にご助力戴きました。あわせてここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 松藤ら：産業廃棄物（製鋼スラグ・フライアッシュ・鋼スラグ）を有効利用したコンクリートの品質および耐久性に関する研究，港湾空港技術研究所報告第 47 巻第 2 号（2008.6）

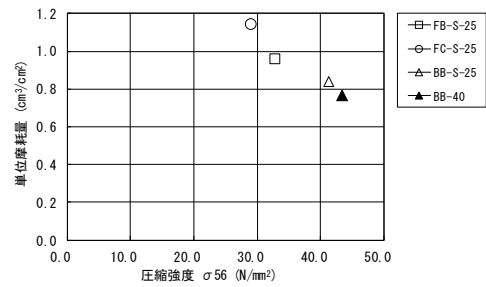
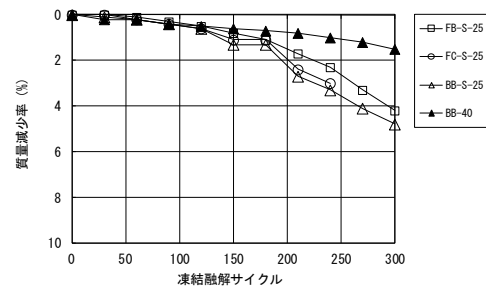


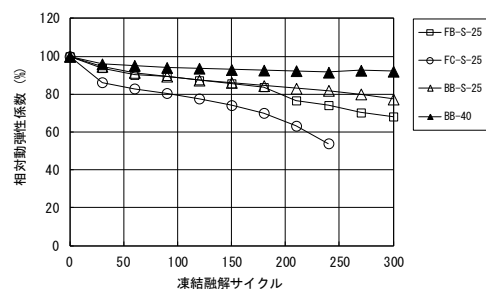
図-9 圧縮強度と単位摩耗量の関係



写真-2 掃流式摩耗試験供試体(磨耗面)の状況
(左側から FB-S-25, FC-S-25, BB-S-25, BB-40)



(a) 質量減少率



(b) 相対動弾性係数

図-10 凍結融解試験の結果

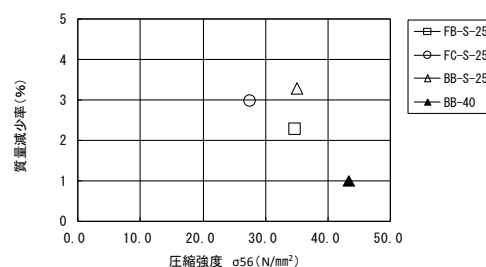


図-11 圧縮強度と質量減少率（240 サイクル）の関係