

水中不分離性鉄鋼スラグ水和固化体の実構造物への適用

五洋建設株式会社	○保木本 智史
新日鐵住金株式会社	菅野 浩樹
新日鐵住金株式会社	高野 良広
新日鐵住金株式会社	山越 陽介
五洋建設株式会社	澤田 巧

1. はじめに

環境負荷の低減のために、副産物を有効活用することが求められている。製造業、建設業における副産物を有効活用する技術の一つとして、鉄鋼スラグ水和固化体¹⁾がある。鉄鋼スラグ水和固化体は、製鋼スラグや高炉スラグ微粉末といった副産物に、水のほか少量のアルカリ刺激材を必要に応じて添加することで固化（硬化）させたものであり、その物性はコンクリートとほぼ同様である。また、アルカリ成分の溶出が少なく、生物の生育に必要な元素 Fe、Si などを多く含んでいるため、港湾土木材料として使用すると、藻類や貝類などの付着が多いという特徴が有る。

筆者らは、これまでに鉄鋼スラグ水和固化体の適用性を拡大し、より環境負荷低減を図ることを目的に、従来の水中コンクリートに代わる水中不分離性鉄鋼スラグ水和固化体を開発してきた²⁾。本稿では、水中不分離性鉄鋼スラグ水和固化体を実工事へ適用することを前提に、その配合を設定するために実施した室内試験練りの結果と、実工事で得られた各種データを取りまとめた結果について報告する。

2. 室内試験練り

2.1 使用材料

今回の室内実験および実工事で使用した材料を表-1に示す。これらのうち、今回使用した製鋼スラグの外観を写真-1に示す。製鋼スラグは、溶銑、スクラップなどを精錬し、靱性、加工性に富む鋼を製造する製鋼工程で生成する CaO、SiO₂などを主成分とする無機物である。一般には、砕石状の外観を呈し、粒子密度は天然の砂や砂利よりも大きい。

表-1 材料特性

記号	種類・品質
W	水道水
BP	高炉スラグ微粉末 (密度:2.91g/cm ³ , 比表面積:4200cm ² /g)
BB	高炉セメント B種 (密度:3.04g/cm ³ , 比表面積:3820cm ² /g, 高炉スラグ置換率:47%)
SG	製鋼スラグ粗骨材 (表-2、図-1 参照)
SS	製鋼スラグ細骨材 (表-2、図-1 参照)
SP	高性能 AE 減水剤
Vi	水中不分離性混和剤

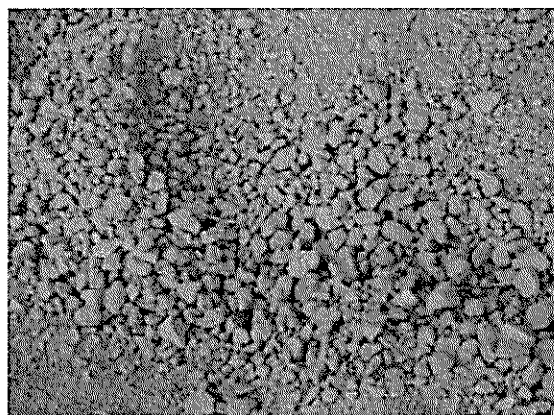


写真-1 製鋼スラグの外観

製鋼スラグは鉄鋼スラグ水和固化体を構成するための必須材料であり、細骨材、粗骨材相当の材料として使用する。また、高炉スラグ微粉末の水硬性を加速させるアルカリ刺激材としても作用する。製鋼スラグの品質試験結果と、鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル¹⁾による規格値を表-2と図-1に示す。

表-2 製鋼スラグの品質試験結果

項目	単位	規格値	SG	SS
最大粒径	mm	≦25	25	5
粉化率	%	≦2.5	0.2-0.5	
表乾密度	g/cm ³	-	3.13	3.01
絶乾密度	g/m ³	2.6≦	3.07	2.85
吸水率	%	-	1.99	5.63
微粒分量 [※]	%	-	-	9.8
粗粒率	-	-	6.71	3.04

※公称目開き 75μm のふるいを通過するもの

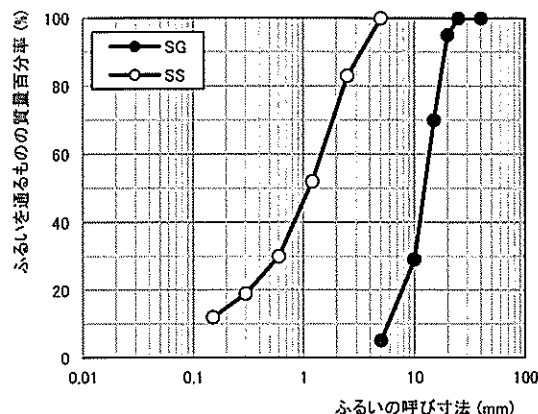


図-1 製鋼スラグの粒度分布

2. 2 使用材料

実工事での配合を決定するに際して、表-3に示す6種類の配合を検討対象とした。配合を決定する上での条件は、スランプフローは 550±30mm、空気量は 4%以下とした。水中不分離性混和剤の添加率は、JSCE-D104 の水中分離度試験で示される方法による SS と pH の値がそれぞれ 50mg/l 以下、12 以下を満足する値として、試験練りにより 1.1%に設定した。なお、強度指数とアルカリ刺激材率は式(1)と(2)で定義される。

$$\text{強度指数} = \text{BP} + 2\text{NP} \cdots (1)$$

$$\text{アルカリ刺激剤率} = 0.53\text{BB} / (\text{BB} + \text{BP}) \cdots (2)$$

表-3 配合選定ケース

Case	強度指数	アルカリ刺激材率(%)	単位量 (kg/m ³)					SP (C×%)	Vi (W×%)
			W	BP	BB	SS	SG		
1.3-15	1.3	15	250	203	80	851	1082	2.00	1.10
1.8-0	1.8	0	250	450	0	771	980	2.00	1.10
1.8-5	1.8	5	250	388	40	782	994	2.00	1.10
1.8-15	1.8	15	250	281	111	801	1018	2.00	1.10
1.8-25	1.8	25	250	190	170	817	1039	2.00	1.10
2.3-15	2.3	15	250	358	142	751	954	2.00	1.10

2. 3 室内実験結果

2. 3. 1 強度指数と圧縮強度の関係

強度指数と強度の関係を把握するために、アルカリ刺激材率 15%の気中作製供試体について圧縮強度を確認した。各強度指数 (1.3、1.8、2.3) の圧縮強度の発現を図-2 に、また強度指数と材齢 28 日における圧縮強度との関係を図-3 に示す。強度指数が高いほど強度も高く、鉄鋼スラグ水和固化体と同様に、水中不分離性鉄鋼スラグ水和固化体においても強度指数と圧縮強度の間には線形の相関関係が認められた。

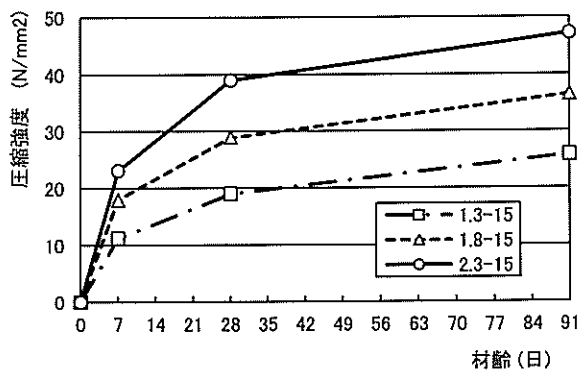


図-2 強度指数と圧縮強度発現の関係

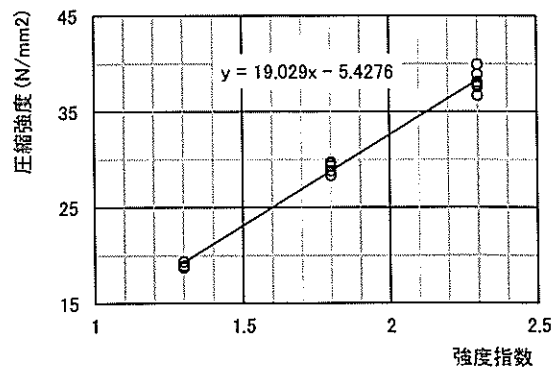


図-3 強度指数と材齢 28 日圧縮強度の関係

2. 3. 2 アルカリ刺激材率と圧縮強度の関係

アルカリ刺激材率と強度の関係を把握するために、強度指数 1.8 の気中作製供試体における強度を確認した。各アルカリ刺激材率における圧縮強度を図-4 に、各材齢におけるアルカリ刺激材率と圧縮強度の関係を図-5 に示す。

強度指数一定の条件では、アルカリ刺激材率が高いほど、強度は高くなる傾向が認められた。ただし、アルカリ刺激材率が 15% を上回ると、強度の増加傾向は緩慢になる。また、アルカリ刺激材率が 0% の場合においても正常な強度の発現が認められた。

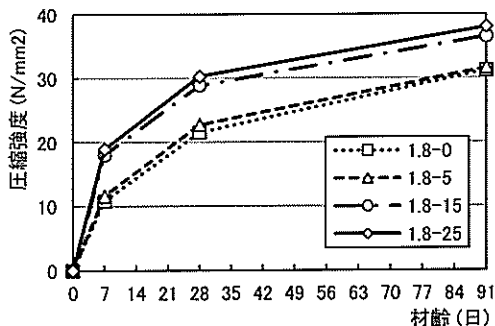


図-4 アルカリ刺激材率と圧縮強度の発現との関係

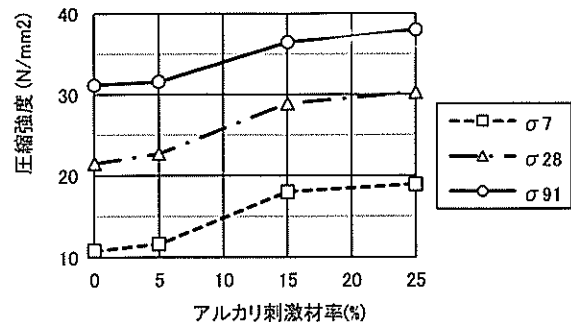


図-5 アルカリ刺激材率と各材齢での圧縮強度の関係

2. 3. 3 密度

水中不分離性鉄鋼スラグ水和固化体の密度を把握するために、圧縮強度試験の供試体の密度を確認した。材齢 28 日における水中作製供試体の密度と、単位製鋼スラグ量との関係を図-6 に示す。

単位骨材量が多いと密度は高くなる傾向にある。目標スランプ、細骨材率、アルカリ刺激材率一定の条件下では、強度指数が低いほど、単位骨材量は大きくなる。単位粗骨材量 1800kg/m³ 以上の場合、密度は 2.5t/m³ 程度を見込むことができる。

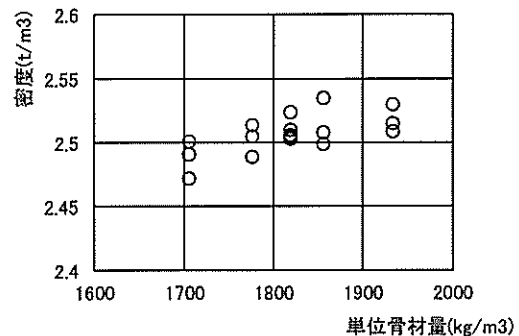


図-6 密度と単位製鋼スラグ量の関係

2. 3. 4 収縮特性および質量変化率

強度指数 1.3、1.8 および 2.3 のアルカリ刺激材率が 15% の配合に対して、打設後 7 日まで水中養生後、基長を測定し、気中存置、水中存置の条件で JIS A 1129-3 「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法-第 3 部:ダイヤルゲージ方法」に準拠して長さ変化試験を実施した。結果を図-7 に示す。なお、凡例の末尾が-A は気中存置、-W は水中存置を示す。

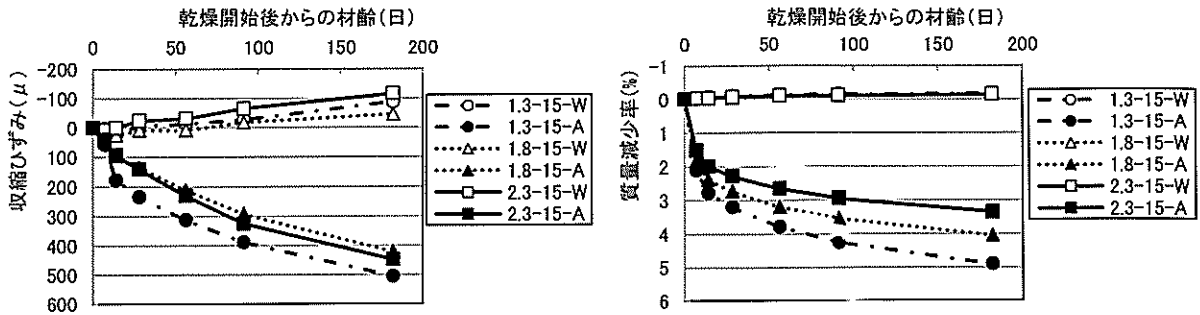


図-7 長さ変化および質量変化率試験結果

収縮ひずみは気中存置の条件では、強度指数 1.3 の配合が最も大きくなったが、1.8 と 2.3 での配合の方が若干大きくなった。収縮ひずみ量としては、気中存置後半年で 400~500 μ 程度である。水中存置の条件では、100 μ 程度の膨張傾向を示した。一方、重量減少率は、強度指数が小さいほど、大きくなった。これは、普通コンクリートと同程度であると考えられる。

2. 3. 5 膨張安定性

膨張安定性試験を実施した結果、全ての配合、供試体において、有害な変状は認められなかった。

3. 実工事への適用

3. 1 工事概要

水中不分離性鉄鋼スラグ水和固化体を実工事へ適用したが、その適用箇所は、ボックスカルバート据付前に打ち込む均しコンクリート、およびボックスカルバート据付後の裏込め部である (図-8 の斜線部)。施工状況、工事概要をそれぞれ写真-2、表-4 に示す。

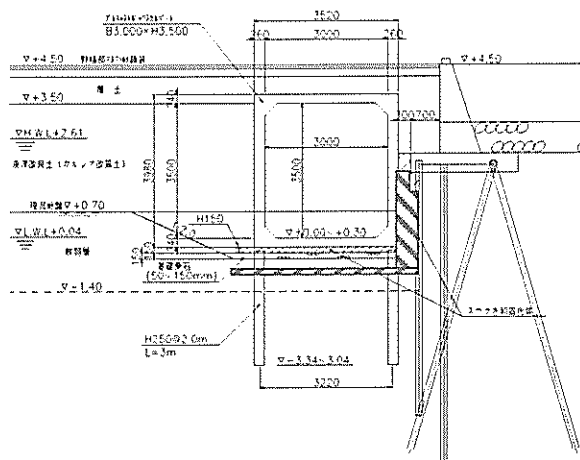


図-8 適用箇所



写真-2 施工状況

表-4 工事概要

No.	日付	適用箇所	打設時間	打設量	打設速度
1	H24.1.30	均しコンクリート	10:10-15:20	56m ³	11m ³ /h
2	H24.1.31	均しコンクリート	10:40-13:30	32m ³	11m ³ /h
3	H24.2.17	裏込めコンクリート	9:30-15:30	76m ³	13m ³ /h

本工事における要求性能は、水中作製供試体の材齢 28 日圧縮強度が 18N/mm² 以上、スランプフローが 550±30mm、空気量は 4.0%以下と設定された。実工事での配合を表-5 に示す。本配合は、室内配合実験でのケース (1.8-15) の配合を基に、強度指数、アルカリ刺激材率を決定し、実機試験練りにより単位水量を 245kg/m³、水中不分離性混和剤添加率を単位水量の 1.125%に決定した。

表-5 実工事での配合

Case	強度指数	アルカリ刺激剤(%)	単位量 (kg/m ³)					SP (C×%)	V _i (W×%)
			W	BP	BB	SS	SG		
1.8-15'	1.8	15	245	275	109	812	1031	2.00	1.125

3. 2 受入れ試験結果

合計 3 日にわたり施工した現場における水中不分離性鉄鋼スラグ水和固化体の受入れ試験結果を表-6 に示す。

表-6 受入れ試験結果

No.	受入れ試験結果				圧縮強度 (σ ₂₈)	
	外気温	コンクリート温度	スランプフロー	空気量	水中採取	気中採取
	(°C)	(°C)	(mm)	(%)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
1	3.0	9.0	520	2.8	31.9	35.2
2	5.0	9.0	560	2.9	29.9	31.3
3	5.0	8.0	560	2.1	26.8	28.8

受入れ時のフレッシュ性状は、ポンプ車ホッパーへの荷卸時の流動性の変動や、ポンプ車の圧送圧力の変動も確認されることなく、一日を通して安定していた。硬化性状についても、全ての供試体において必要強度を確保することができた。膨張安定性試験用の供試体も打込み日毎に 3 体ずつ採取したが、全ての供試体においてひび割れの発生や変状は認められなかった。

3. 3 施工性の検討

水中不分離性鉄鋼スラグ水和固化体の施工性の確認として、セルフレベリング性、および流動勾配を測定した。なお、ここでは、内部振動機を使用することなくポンプ車の筒先の移動のみで天端均しをしたときの平坦性のことをセルフレベリング性、内部振動機を使用することなく、筒先も移動しない場合に筒先から流動した範囲において測定される自然に形成される勾配のことを流動勾配と定義した。測定結果を、図-9 に示す。

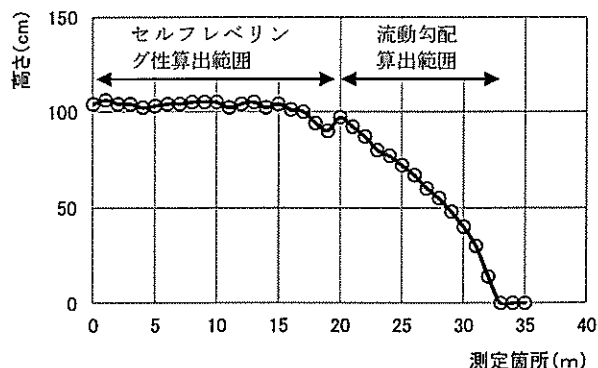


図-9 セルフレベリング性、流動勾配の測定結果

その結果、今回使用したスランブフロー550mm程度の水中不分離性鉄鋼スラグ水和固化体のセルフレベルリング性は±30mm、流動勾配は12%程度であった。

3. 4 水質への影響

施工時の水質への影響を確認するために、打込み箇所付近と、打込みの影響は受けないと考えられる打込み箇所から十分に離れた地点の pH および懸濁物質量を、打込み前から、打込み中、打込み完了後まで1時間毎に調査した。その結果、今回の施工では水質への影響は認められなかった。

4. まとめ

水中不分離性鉄鋼スラグ水和固化体の適用にあたり実施した、試験結果と施工時の試験結果から、以下の知見が得られた。

- ①圧縮強度は強度指数1.3～2.3の範囲では、普通コンクリートと同様の強度発現特性を示し、強度指数と1次の相関関係が認められた。
- ②強度指数一定の条件ではアルカリ刺激材率が高いほど、強度は高くなり、15%を超えると強度の増加傾向は緩慢になる。
- ③今回使用した配合では、水中不分離性鉄鋼スラグ水和固化体の密度は単位骨材量が1800kg/m³以上で2.5t/m³を見込むことができる。
- ④収縮特性は気中存置の場合、材齢6ヶ月で400～500μ程度であり、水中存置の場合、100μ程度の膨張挙動を示した。
- ⑤今回使用した材料では、膨張安定性試験において、供試体に変状は認められなかった。
- ⑥水中不分離性鉄鋼スラグ水和固化体の打込み速度は、ポンプ車の段取り換えの時間を含めて、11-13m³/hであった。
- ⑦今回使用したスランブフロー550mm程度の水中不分離性鉄鋼スラグ水和固化体のセルフレベルリング性は±30mm、流動勾配は12%程度である。
- ⑧今回使用した水中不分離性混和剤添加率1.1%の配合では、打込み箇所周辺の水質への影響は認められなかった。
- ⑨施工時における受け入れ試験、および性状の目視確認、圧縮強度試験結果から、水中不分離性鉄鋼スラグ水和固化体は、水中不分離性コンクリートと同様の良好な品質、施工性が認められた。

参考文献

- 1) (一財) 沿岸技術研究センター；鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル(沿岸技術ライブラリー No.28)、平成20年2月
- 2) Takumi Sawada, Tetsuya Ogasawara, Yoshihiro Takano, Hiroki Kanno, Yohsuke Yamagoshi² and Tadashi Imamura : Development of steel slag hydrated matrix with anti-washout performance : SCMT3 Kyoto, e228, August 2013