

鉄鋼スラグ水和固化体の性質および活用事例について

Properties and Applications of the Block Made of Steel Slag

元木卓也*・鶴谷広一**

MOTOKI, Takuya and TSURUYA, Hiroichi

* (財) 沿岸開発技術研究センター 企画部 研究員

** 東海大学 海洋研究所 教授 (前 (財) 沿岸開発技術研究センター 理事)

The present paper describes fundamental properties of the slag block that was mainly made of blast furnace slag, steel making slag (contains pretreatment slag). This slag block was investigated for marine structure and shows a good wear resistance and durability in seawater with elevated temperature. It does not raise the pH value of seawater around the block, so it has no problem for sea environment.

Key Words : slag block, circulative society, steel slag, sea environment

1. はじめに

近年、地球温暖化や環境破壊が注目され、最終処分場のひっ迫も重要な社会問題となっており、従来の大量生産・大量消費・大量廃棄型社会から循環型社会への転換が急務とされている。鉄鋼産業においても、鉄鋼生産に伴って副生する鉄鋼スラグは、発生量が極めて大量であることから、処理、処分にあたり業界、事業者等において、減量化および有効利用技術の研究開発に努力を続けている。

一方、港湾土木材料としては、砂・石等の天然材料や、コンクリート・鉄といった工業製品が多量に使われているが、そうした中で港湾土木材料も耐久性の向上、リサイクル材の活用、低環境負荷といった観点での見直しが必要になっている。

以上のような背景のもとで、鉄鋼業界の副産物である製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を主要原料とし、必要に応じてフライアッシュ、高炉水砕スラグを配合した、セメント、砂利、および砂を全く使用しない鉄鋼スラグ水和固化体を開発した。本論文では、鉄鋼スラグ水和固化体の製造および性質について述べるとともに、消波ブロックなどに使用した活用事例およびそのときの環境特性について述べる。

2. 固化体の原料

本固化体は、主に製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末、フライアッシュに水を加えて混ぜ合わせることで製造する。

2.1 原料

(1) 製鋼スラグ

製鋼スラグは、鉄鉱石とコークスと石灰を主原料として高炉で作られた銑鉄から不要な成分を除去し、靱性・加工性のある鋼にする製鋼工程で生じるスラグ（溶銑予

備処理スラグを含む）であり、日本国内では年間約1,000万トン発生する。表-1に代表的な化学組成、写真-1に外観を示す。ライム、シリカ、アルミナの他、生物に必要とされるリンや鉄分が含まれている。また free-CaO の水和だけでなく、内在する他の鉱物相も水和反応を生じ、長期間かかって硬化する活性も有している。

開発当初は、溶銑予備処理スラグのみを原料としていたが、現在ではそれを含んだ製鋼スラグを原料とするよう検討が進んでいる。

(2) 高炉スラグ微粉末

高炉スラグ微粉末は、溶けた高炉スラグに大量の冷却水流を接触させ、2, 3ミリの粒状に急激に冷やし固めた水砕スラグを、セメントを製造するのと同様な微粉碎ミルで微粉碎して得られる。潜在水硬性を示し、セメント混和材としてセメントに混ぜられ、高炉セメントとして広く用いられている。表-1に代表的な組成、写真-2に外観を示す。

(3) フライアッシュ

石炭火力発電所で発生するフライアッシュも、セメント混和材としてセメントに混ぜられ、フライアッシュセメントとして広く利用されている。スラグ固化体にも混ぜ込むことが可能で、混ぜ込むことにより、長期強度の増進やアルカリ性の一層の低減化を図ることができる。表-1に代表的な組成、写真-3に外観を示す。

(4) 消石灰（アルカリ刺激剤）

潜在水硬性を持つ高炉スラグ微粉末と製鋼スラグを水とともに混練しただけでは、固化するまでに非常に長い時間を必要とするため、消石灰を用いアルカリによる刺激を与えることで固化の速度を速めることができる。

2.2 硬化機構と各材料の役割

本固化体の硬化は、図-1のように、材料である高炉スラグ微粉末とフライアッシュが CSH ゲルを生成することによって起こる。消石灰などのアルカリは高炉スラグ微

表-1 原料の化学組成の一例

(mass%)

原料名	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S	Total-Fe
製鋼スラグ (溶銑予備処理スラグ)	34	15	2	4	5	0.2	18
高炉スラグ微粉末	42	33	7	13	0	0.8	0.1
フライアッシュ	1	63	0	27	—	0.4	5

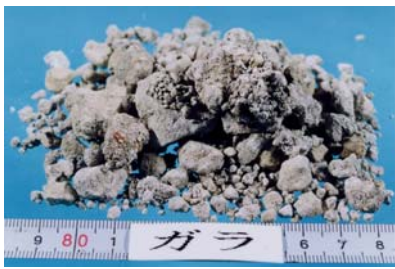


写真-1 製鋼スラグ (溶銑予備処理スラグ)



写真-2 高炉スラグ微粉末



写真-3 フライアッシュ (JIS II)

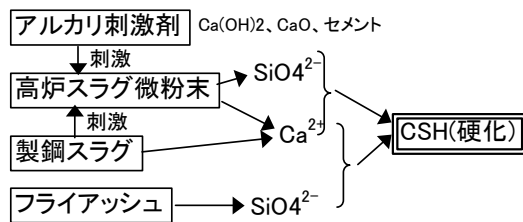


図-1 固化体の硬化機構

粉末の刺激剤、製鋼スラグから放出されるCaは、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの刺激剤として、反応を促進する。各材料の役割については、表-2に示す。

表-2 各材料の役割

材料の種類	作用・役割
高炉スラグ微粉末	ガラス質であり、刺激剤の存在下で水和反応が促進され硬化現象を示す。ここではアルカリ刺激剤の存在で結合材として働いている。
フライアッシュ	①Ca(OH) ₂ とポゾラン反応を起こし硬化する。結合材として働く。②乾燥収縮を抑制しヘアークラックを防ぐ。③全体のアルカリ溶出性を下げている。
製鋼スラグ	①Caを放出し高炉スラグ微粉末に対する刺激剤の働きをしている。②フライアッシュのポゾラン反応のCa供給源となっている。③骨材としても働く。
アルカリ刺激剤	高炉スラグ微粉末の硬化反応を助ける。フライアッシュのポゾラン反応を促進する。NaOHは強アルカリであるので避け、Ca(OH) ₂ 、CaO、セメント、石灰ダストなどが用いられる。

表-3 固化体の配合

記号	単位量(kg/m ³)						スランプ (cm)	空気量 (%)
	製鋼スラグ	高炉スラグ微粉末	フライアッシュ	消石灰	水	混和剤		
1	1,339	574	0	57	268	0	21.0	—
2	1,342	383	192	35	254	0	19.0	—
3	209	268	134	40	227	0	15.0	—
4	1,446	620	0	62	277	0	10.5	—
5	1,773	421	0	41	246	0	13.0	2.3
6	1,743	276	138	41	242	0	15.0	1.7
7	1,824	307	0	30	274	0	11.0	2.7
8	1,829	205	103	30	260	0	12.0	2.3
9	1,463	313	313	38	238	2.2	20.0	2.5

3. 固化体の性質

製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末、フライアッシュを重量比を変えて配合を変化させ、室内試験を実施し、次の3.1~3.3にあげる性質を確認した。試験に使用した配合を表-3に示す。

3.1 密度

固化体の密度は、図-2のように、製鋼スラグの量が多くなるほど、密度が大きくなる。これは、製鋼スラグが鉄分を18%含み、単身の密度が3g/cm³と重いためである。予備処理スラグ量が65~85mass%の範囲では、密度は2.4~2.6g/cm³となる。圧縮強度との関係では、製鋼スラグ量が85%を越えると圧縮強度が低下する傾向があり、28日20°C水中の標準養生で20N/mm²を得るには、製鋼スラグ量として80%前後が必要で、そのときの密度は2.5cm³である。

3.2 圧縮強度

図-3に固化体の材令と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度の測定は、JIS A 1108-1999に従った。初期強度が小さく長期強度が大きいのが特徴であり、材令91日の圧縮強度は材令28日の1.3倍になっている。

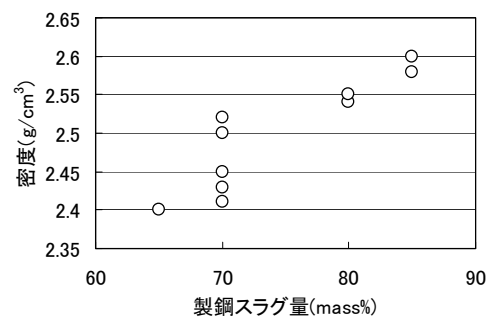


図-2 製鋼スラグ量と密度

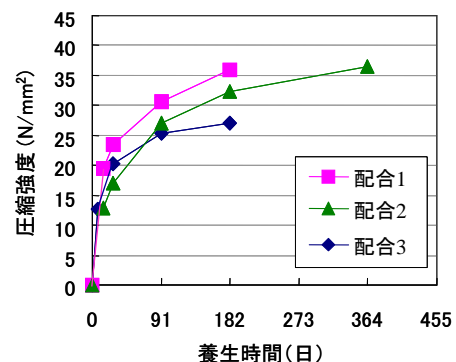


図-3 材令と圧縮強度

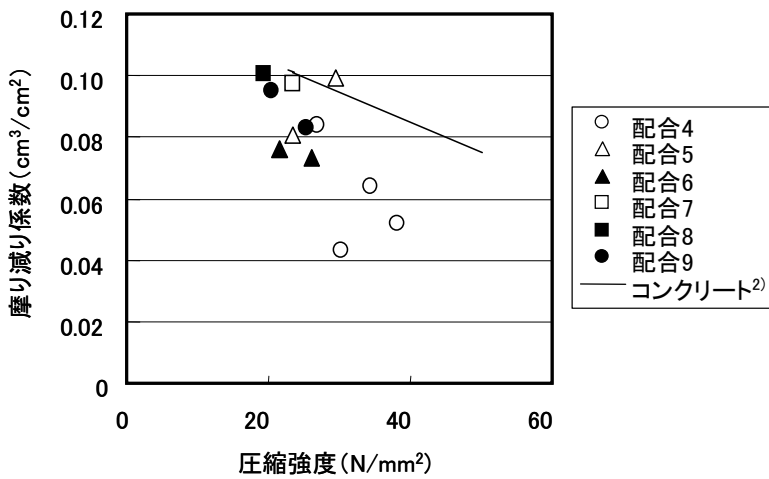


図-4 圧縮強度と擦り減り係数の関係¹⁾



写真-4 消波ブロック¹⁾



写真-5 人工石材³⁾



写真-6 被覆ブロック³⁾

3.3 擦り減り試験

消波ブロックに適用する場合、漂砂による摩耗に対して十分な耐久性を有しているか確認する必要がある。そのため、サンドブラスト装置を用いて固化体に砂を吹き付け、どれほど摩耗するか調べる ASTM C418-68C74 に準拠した方法で試験を実施した。その結果、図-4 に示すように圧縮強度と磨り減り係数の関係として表すと、実線で示したコンクリートの特性²⁾より擦り減り係数が小さくなっていた。これにより、漂砂による摩耗に対して耐久性に優れていることが確認できた。

4. 活用事例と環境特性

これまでに試験施工として製鉄所の鋼矢板式護岸の補強工事に、消波ブロック(写真-4)、人工石材(写真-5)、被覆ブロック(写真-6)など14万トンを施工した。

人工石材については、図-5 に示すように、常時一定方向に18~38cm/sの流れる水路が施工場所であったので、固化体のアルカリ溶出性について調査を行った。その結果、図-6にあるように、海水のpHは施工区域から下流200mおよび700mともに上流500mのバックグラウンドとはほぼ同様に変化しており、人工石材の投入による周辺海水のpHの上昇は見られなかった。

また、被覆ブロックについては、施工2カ月後に生物の

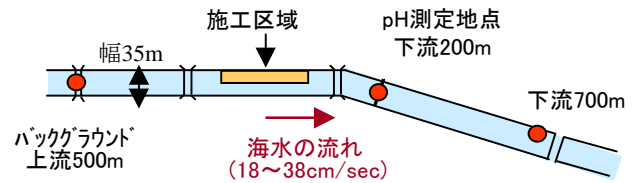


図-5 人工石材の施工位置と pH 測定地点

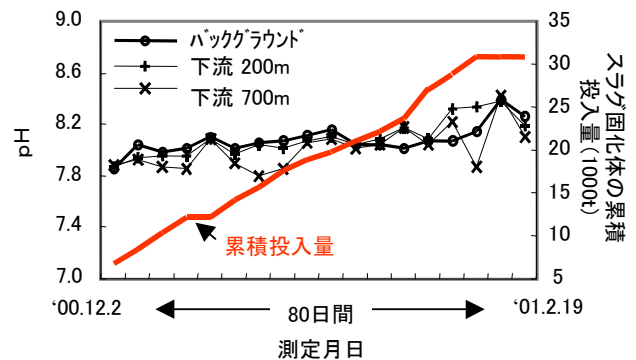


図-6 施工海域の pH 変化³⁾

生息状況について調査を実施し、カニ、ハゼ、メバル、ゴンズイなどの多くの生物の生息が確認された³⁾。今回の施工により垂直護岸であったものが傾斜護岸となったことも一要因と考えられるが、天然石およびコンクリートと同様な施工が可能であり、また環境負荷が小さいこと

が実証されたと考えられる。

室内試験についても、環境庁告示第46号（土壌の汚染に係る環境基準について）によった溶出試験および人工海水に対して環境庁告示第46号相当の溶出試験を実施し、その結果、すべての項目について基準値以下または不検出であることを確認した。

5. 環境負荷低減効果についての考察

リサイクル材料からなる鉄鋼スラグ水和固化体をコンクリート代替として使用した際の環境負荷低減について、松永ら³⁾は以下のような試算を行っている。

仮定条件は、年間全国で発生する製鋼スラグの1割に当たる100万トンを用い、実験で使用した配合に基づいて鉄鋼スラグ水和固化体を製造するとして、この製造量を表-4の配合で製造されるコンクリート量に代替するものとしている。なお、セメント製造時に伴うCO₂排出量は435kg/t、石灰石製造に伴うCO₂排出量は433kg/tを用いている⁴⁾。

表-4 コンクリート(18-8-20N)の配合

W/C	単位量(kg/m ³)				
	セメント(N)	水	細骨材	粗骨材	混和剤
65.8	248	163	940	1002	0.6

鉄鋼スラグ水和固化体の製造量：

$$1,000,000\text{t/年} / 1.458\text{ t/m}^3 = 686\text{ 千 m}^3\text{/年} \quad (1)$$

天然骨材使用量削減：

$$0.940\text{ t/m}^3 + 1.002\text{ t/m}^3 \times 686,000\text{m}^3\text{/年} \\ = 1,332\text{ 千 t/年} \quad (2)$$

セメント製造に伴うCO₂排出量削減：

$$435\text{kg/t} \times 0.248\text{t/m}^3 \times 686,000\text{m}^3\text{/年} \\ = 74\text{ 千 t/年} \quad (3)$$

消石灰使用に伴うCO₂排出量増加：

$$433\text{kg/t} \times 56/74 \times 0.036\text{t/m}^3 \times 726,000\text{m}^3\text{/年} \\ = 8,600\text{t/年} \quad (4)$$

(*CaOの分子量/ Ca(OH)₂の分子量)

$$\text{CO}_2\text{排出量削減: 式(3) - 式(4) = 65 千 t/年} \quad (5)$$

式(2)に示すように天然骨材の使用量削減には1,332千t/年、(5)式に示すようにCO₂排出量削減には65千t/年の寄与し、京都議定書（地球温暖化防止京都会議）において、日本は基準年(1990年)の温室効果ガス排出量1,224百万tに対して6%の73百万tを削減することになっているが、鉄鋼スラグ水和固化体の使用によりこのうちの約0.1%の削減に寄与することが可能となる試算となっている。

試算に用いた数値の他にも、セメント製造に伴うCO₂排出量については、採掘からセメント製造、サービスステーションまでの運搬を含めると758kg/tになるという

データもあり⁵⁾、リサイクル材料である鉄鋼スラグ固化体をコンクリートの代替材として使用することによる環境負荷の低減への寄与は大きいと言える。

6. おわりに

平成13年7月より「鉄鋼スラグ水和固化体の活用開発調査検討会」を実施し、現在まで2回開催に至っている。検討会内で審議している今後の主たる課題として、固化体の膨張抑制機構の解明および本固化体に利用できるスラグの仕様の明確化がある。平成14年度も継続して検討会を実施し、上記課題について引き続き検討を行っていく予定となっている。また、本固化体のこれまでの研究成果および検討会の審議をまとめ、平成14年度中に手引き書を発刊する予定である。

謝辞

本研究は、独立行政法人港湾空港技術研究所、川崎製鉄株式会社、新日本製鐵株式会社、中国電力株式会社、電源開発株式会社、五洋建設株式会社、東亜建設工業株式会社、株式会社テトラ、株式会社ポゾリス物産、第一工業製菓株式会社および沿岸開発技術研究センターの共同研究として実施している。本論文をまとめるにあたり、本研究の関係者各位ならびに「鉄鋼スラグ水和固化体活用開発調査検討会」の委員の方々に、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小菊 史男、濱田 秀則、山路 徹、松永 久宏：鉄鋼スラグを用いた固化体の基礎的性状および港湾構造物への適用性に関する研究、港湾技術研究所資料、Vol. 40, No. 1, pp. 5～10, 2001.
- 2) 伊藤 正憲、福手 勤、田中 順、山路 徹：海洋環境下における再生コンクリートの適用性に関する研究、港湾技術研究所報告、Vol. 37, No. 4, pp. 149～171, 1998.
- 3) 松永 久宏、小菊 史男、高木 正人、谷敷 多穂、山路 徹：セメントおよび天然骨材を使用しない低環境負荷型固化体の開発—鉄鋼スラグ水和固化体—、コンクリート環境負荷シンポジウム、p. II-35～II-44, 土木学会, 2002.
- 4) 環境庁温室効果ガス排出量算定方法検討会：温室効果ガス排出量算定方法に関する検討結果、燃料の漏出及び工業プロセス報告書の要旨、pp. 1, 2000. 12.
- 5) 土木学会コンクリート委員会：コンクリートの環境負荷評価研究小委員会：コンクリートの環境負荷評価、コンクリート技術シリーズNo. 44, pp. I-26, 土木学会, 2002.