閉鎖性海域における鉄鋼スラグ水和固化体の生物付着性

Biofouling on Steel Slag Hydrated Matrix in Enclosed Coastal Area

松永久宏¹・谷敷多穂²・藤井隆史³・綾野克紀⁴

Hisahiro MATSUNAGA, Kazuho TANISHIKI, Takashi FUZII and Toshiki AYANO

Biofouling on a steel slag hydrated matrix using steel-making slag as the aggregate and ground granulated blast-furnace slag as the main binder was investigated in enclosed coastal areas, and was compared with that on concrete and a natural rocky shore. The steel slag hydrated matrix tended to display larger microalgal density and diversity than concrete from the initial period at the start of the test, confirming that microalgae readily grow on the steel slag-based material. At a seawall where large-scale works were executed, the biofouling on the steel slag hydrated matrix was equal or superior to that on the natural rocky shore. Based on these results, the steel slag hydrated matrix was judged to be excellent in biofouling performance.

1. はじめに

環境への負荷が少ない循環型社会の形成を目的に、産業副産物やリサイクル材を有効利用する技術開発が進められている。このような背景のもと、コンクリートや天然石の代替が可能な新しい固化体として、骨材に鉄鋼生産の製鋼工程で副産する製鋼スラグ、主な結合材に高炉スラグ微粉末を用いた環境調和型材料である鉄鋼スラグ水和固化体が開発され、消波ブロックなどの異型ブロックや人工石材などとして主に港湾工事で利用されはじめている(松永ら, 2003a)。

一方、近年、港湾構造物の建設にあたっては、海域環境との調和が望まれるようになり、関西国際空港島護岸の藻場造成(尾崎ら, 2000)や直立構造物における環境機能付加に関する研究(中西ら, 2006; 村上ら, 2007)が行われている。

鉄鋼スラグ水和固化体は、コンクリートの代替として使用すれば、製造時のCO₂排出量を削減することが可能である(松永ら, 2003b)ことから、鉄鋼スラグ水和固化体が普及すれば、低炭素社会の実現へ寄与することができる。しかし、この普及には、生物親和性などの海域環境との調和が重要である。そこで、本研究では、港湾工事が比較的多い閉鎖性海域において、鉄鋼スラグ水和固化体の設置後初期における微細藻類の付着性および大規模施工後の生物付着性について調査し、その特性をコンクリートや自然磯浜と比較した。

図-1 鉄鋼スラグ水和固化体の製造方法

2. 鉄鋼スラグ水和固化体の製造方法

鉄鋼スラグ水和固化体の製造工程を図-1に示す。練混ぜ、打込み、養生の工程は、コンクリートと同様であるが、構成材料が異なる。鉄鋼スラグ水和固化体は、製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末および水を必須材料とし、必要に応じて、フライアッシュ、アルカリ刺激材、化学混和剤を使用する。

3. 調査概要

(1) 微細藻類の付着性

微細藻類の着生実験に用いた鉄鋼スラグ水和固化体の配合を表-1に、比較材として用いたコンクリートの配合を表-2に示す。鉄鋼スラグ水和固化体の配合は、フライアッシュ有無の2種類とした。スランブは特に値を設定せずに、材料分離が無かつ打込み可能であれば良いこととした。練混ぜた材料は5mmの篩いによりウェットスクリーニングをし、26mm×76mm×26mmの型枠に打込み、材齢28日まで20℃で水中養生して、試験体とした。試験体の圧縮強度は、鉄鋼スラグ水和固化体Aが27.1N/mm²、鉄鋼スラグ水和固化体Bが23.9N/mm²、コンクリートが32.9N/mm²であり、港湾工事に用いられる一般的なコンクリートブロックの設計基準強度である18N/mm²を満足した。

これらの試験体を2001年1月に東京湾に位置する千葉

1 正会員	工修	JFEスチール(株)スチール研究所 スラグ・耐火物研究部 主任研究員
2 正会員		JFEスチール(株)西日本製鉄所企画部 主査
3 正会員	博(工)	岡山大学大学院環境学研究科 助教
4 正会員	工博	岡山大学大学院環境学研究科 教授

表-1 微細藻類の着生実験に用いた鉄鋼スラグ水和固化体の配合

配合の記号	製鋼スラグの最大寸法 (mm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
				水	高炉スラグ微粉末	消石灰	フライアッシュ	製鋼スラグ	混和剤
A	20	2.0	88	252	621	62	0	1,449	2.20
B	20	2.0	88	228	364	36	260	1,455	3.60

表-2 微細藻類の着生実験に用いたコンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
					水	普通ポルトランドセメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	12.0	4.5	65	46	162	254	797	1,031	2.54

表-3 護岸工事で使用した鉄鋼スラグ水和固化体の配合例

製鋼スラグの最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
				水	高炉スラグ微粉末	消石灰	フライアッシュ	製鋼スラグ	混和剤
40	8.0	2.0	36	265	340	70	244	1,360	2.10

図-2 調査地点の位置図

港の海中（試料位置の水深：大潮干潮時0.5m，大潮満潮時：2.5m）に1～30日間暴露した。回収した試験体は、光学顕微鏡により、試験体の端部から5mm以内を除いて無作為に選んだ12ヶ所を倍率200倍で観察し、微細藻類の種類数および付着数を測定した。

(2) 大規模施工をした護岸における生物付着性

瀬戸内海に位置する岡山県水島港において、鉄鋼スラグ水和固化体の被覆ブロックおよび人工石材を使用して護岸補強工事を行った（施工量：被覆ブロック7,800トン，人工石材25,000m³）。この工事で使用した鉄鋼スラグ水和固化体の配合例を表-3に示す。この護岸は、これまで直立護岸であったが、本工事により傾斜護岸となり海藻が自然に着生し藻場を形成した。そこで、施工から約2年後の2003年5月と約3年後の2004年6月に生物付着性を調査した。また、2004年6月の調査時には、隣接する既存のコンクリート製直立護岸および付近の自然磯浜についても同様な調査を行い、鉄鋼スラグ水和固化体との生物付着性を比較した。

調査地点の位置図を図-2に示す。測線①から測線③が

図-3 傾斜護岸の断面構造と観察部位

鉄鋼スラグ水和固化体の傾斜護岸、測線④が既存のコンクリート製直立護岸、測線⑤から測線⑦が傾斜がおおよそ1:7から1:20の岩を主体とする自然磯浜である。鉄鋼スラグ水和固化体の調査区域は、南方に位置する濃地諸島から大型褐藻の種苗供給を受けていると考えられたため、自然磯浜の調査区域は、濃地諸島から鉄鋼スラグ水和固化体の調査区域までの距離とほぼ等距離に設定した。測線①から測線③の傾斜護岸の断面構造と観察部位を図-3に示す。観察はD.L.+3.5mからD.L.-2.0mの間を0.5m毎に1m×1mの範囲で、海藻および付着動物の種類の記録をした。自然磯浜についても同様の水深範囲を観察した。また、各測線の1層（D.L.+0.5m）について50cm×50cm方形枠内に生育する生物を採取し、種類の同定、種類別の湿重量の測定を行った。

4. 調査結果および考察

(1) 微細藻類の付着性

微細藻類の付着数の変化を図-4に示す。微細藻類数は、鉄鋼スラグ水和固化体がコンクリートよりも約5倍多く推移した。微細藻類の出現種類数の変化を図-5に示す。微細藻類の出現種類数は、鉄鋼スラグ水和固化体がコンクリートよりも多く推移し、14日では約2倍、30日では

約1.2倍であった。また、配合が異なる鉄鋼スラグ水和固化体の配合Aと配合Bを比較すると、付着数および出現種類数とも有意差が見られなかった。

試料表面における海水pHの変化を図-6に示す。試料表面における海水pHは、コンクリートでは暴露初期において高いが、鉄鋼スラグ水和固化体では暴露初期から対照区の海水と同じであった。したがって、鉄鋼スラグ水和固化体は、コンクリートよりもアルカリ成分の溶出性が小さいと言える。

なお、本試験地点の沖合である千葉航路の同時期の海水pHは8.1(千葉県, 2001)であるのに対して、本調査における対照区の海水pHは約7.3と低い。この理由は、一般的な海水中の塩素イオン濃度が約19g/Lである(国

土交通省, 2007)のに対して、本試験期間における海域の塩素イオン濃度が3.6g/Lから7.6g/Lと低かったことから、試験地点付近に流入する河川水の影響によるものと思われる。

これらの結果より、鉄鋼スラグ水和固化体は、海域に設置後の初期においてコンクリートよりも微細藻類が着生しやすいことが確認された。この理由として、鉄鋼スラグ水和固化体のアルカリ成分の溶出性が、コンクリートよりも小さいことがあげられる。また、微細藻類の付着性に及ぼす鉄鋼スラグ水和固化体の構成材料による影響は、小さいと推察される。

松永ら(2003b)は、鉄鋼スラグ水和固化体製とコンクリート製5トン型消波ブロックの設置後10ヶ月から27ヶ月の生物付着性を調査し、種類数、付着量とも鉄鋼スラグ水和固化体が多く推移した結果を得ている。本調査におけるコンクリート試験体は、約0.1kgと小型であることからpHが暴露7日と短期間で対照区の海水と同じ値になったと考えられるが、大型ブロックでは長期間を要すると推定される。今後データを蓄積する必要があるが、大型ブロックではアルカリ成分の溶出性が、長期にわたり生物付着性に影響を及ぼす可能性があると思われる。

(2) 大規模施工をした護岸における生物付着性

施工から2年後と3年後における鉄鋼スラグ水和固化体に着生した海藻の出現種類数を図-7に示す。施工3年後の出現種類数は、線測①、線測③とも施工2年後の約2倍に増加した。施工から2年後と3年後の杵取り調査に

図-4 微細藻類の付着数の変化

図-5 微細藻類の出現種類数の変化

図-6 試料表面における海水pHの変化

図-7 鉄鋼スラグ水和固化体に着生した海藻の出現種類数

図-8 鉄鋼スラグ水和固化体に着生した海藻の湿重量

よる鉄鋼スラグ水和固化体に着生した海藻の湿重量を図-8に示す。施工3年後の湿重量は、各測線ともに施工2年後よりも減少した。これは、施工2年後での優占種であったワカメが減少したことによる影響が大きい。

浅井ら(1997)によると、生物群集の遷移度は、試験塊の設置後、1年から3年の間にはほぼ一定となり、周辺の生物相と類似の状態に近づくと考えられている。また、細川ら(2000)によると、防波堤設置後、3年目から4年目で長期変遷後の状況に近づくと考えられている。鉄鋼スラグ水和固化体においても、施工3年後では出現種類数が増加していることから、長期変遷後の状況に近づいているものと推察される。

施工から3年後の枠取り調査による海藻の出現種類数の比較を図-9に示す。出現種類数全体としては、鉄鋼スラグ水和固化体が最も多く、次いで自然磯浜、コンクリート製直立護岸の順であった。藻場構成種は、鉄鋼スラグ水和固化体の測線①、②、③がタマハハキモクとワカメであり、コンクリート製直立護岸の測線④がワカメのみであり、自然磯浜の測線⑤がタマハハキモクとワカメ、測線⑥、⑦がタマハハキモクのみであった。施工から3年後の枠取り調査による海藻の湿重量を図-10に示す。褐藻綱および紅藻綱は、鉄鋼スラグ水和固化体が自然磯浜やコンクリート製直立護岸よりも多かった。鉄鋼スラグ水和固化体の湿重量が自然磯浜やコンクリート製直立護

岸よりも多いのは、タマハハキモクとワカメの着生量の差によるものである。

なお、各水位の目視観察結果では、緑藻綱は測線間の差がほとんど見られなかったが、褐藻綱は鉄鋼スラグ水和固化体が最も多く、次いで自然磯浜、コンクリート製直立護岸の順であった。また、紅藻綱についても、鉄鋼スラグ水和固化体が最も多く、次いで自然磯浜、コンクリート製直立護岸の順であった。

施工から3年後の枠取り調査による付着動物の出現種類数を図-11に示す。軟体動物門は鉄鋼スラグ水和固化体が最も多く、環形動物門は自然磯浜が最も多かった。節足動物門およびその他の動物は有意差が見られなかった。施工から3年後の枠取り分析による動物の湿重量を図-12に示す。軟体動物門は、鉄鋼スラグ水和固化体が最も多く、次いでコンクリート製直立護岸となり、自然磯浜では少なかった。環形動物門は、有意差が見られなかった。節足動物門は、鉄鋼スラグ水和固化体が最も多かった。

これらの結果を基に多様性指数を算出し、多様性を評価した。多様性指数は、情報理論に基づくShannon指数(H')とした。海藻の多様性指数と湿重量の関係を図-13に示す。海藻の多様性指数は、鉄鋼スラグ水和固化体が0.89から1.04、コンクリート製直立護岸が1.04、自然磯浜が0.25から1.53となった。鉄鋼スラグ水和固化体と自

図-9 施工から3年後の海藻の出現種類数

図-10 施工から3年後の海藻の湿重量

図-11 施工から3年後の動物の出現種類数

図-12 施工から3年後の動物の湿重量

図-13 海藻の多様度指数と湿重量の関係

図-14 動物の多様度指数と湿重量の関係

然礫浜を比較すると、鉄鋼スラグ水和固化体は、自然礫浜と多様度指数がほぼ同じで湿重量が多い。動物の多様度指数と湿重量の関係を図-14に示す。動物の多様度指数は、鉄鋼スラグ水和固化体が1.19から1.48、コンクリート製直立護岸が1.60、自然礫浜が1.34から1.79となった。鉄鋼スラグ水和固化体と自然礫浜を比較すると、鉄鋼スラグ水和固化体は、自然礫浜よりも多様度指数がやや小さいものの湿重量が多い。

これらの結果を総合的に評価すると、鉄鋼スラグ水和固化体は、自然礫浜と比較して動物の多様度指数がやや小さいものの、海藻の多様度指数がほぼ同等であること、出現種類数および生物付着量が多いことから、自然礫浜と同等程度以上の生物付着性であると判断され、藻場形成基盤として効果があると考えられる。

5. まとめ

鉄鋼スラグ水和固化体の閉鎖性海域における生物付着性について調査し、その特性をコンクリートや自然礫浜と比較した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 微細藻類の付着性

出現種類数および付着数は、ともに鉄鋼スラグ水和固

化体がコンクリートよりも多く推移した。この理由として、鉄鋼スラグ水和固化体のアルカリ成分の溶出性が、コンクリートよりも小さいことがあげられる。

(2) 大規模施工をした護岸における生物付着性

海藻の出現種類数および湿重量は、鉄鋼スラグ水和固化体が最も多く、次いで自然礫浜、コンクリート製直立護岸の順であった。また、多様度指数は、鉄鋼スラグ水和固化体と自然礫浜がほぼ同等程度で大きく、コンクリート製直立護岸が最も小さかった。

これらの結果より、観測条件が限定されているものの、鉄鋼スラグ水和固化体の生物付着性は、コンクリートよりも優れ、岩を主体とした自然礫浜と同等程度以上であると判断される。港湾工事において、鉄鋼スラグ水和固化体をコンクリートや天然石代替として適切に使用すれば、製造時のCO₂排出量削減だけでなく、藻場形成などの環境創生へ寄与できる可能性が示唆される。

謝辞：大規模施工をした護岸の施工3年後における調査については、徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 上月康則教授、総合科学(株) 吉村直孝博士に多大なるご協力をいただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 浅井 正・小笹博昭・村上和男 (1997) : ブロック式構造物への海洋生物の着生実験とその着生条件について, 港湾技研資料, No.881, pp.1-41.
- 尾崎正明・伊藤利加・奥田泰永・二宮早由子 (2000) : 関西国際空港島護岸の藻場造成における環境創生効果について, 海岸工学論文集, Vol.47, pp.1196-1200.
- 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所 (2009) : 水質用語集, <http://www.ktr.mlit.go.jp/keihin/whole/word/suishitsu/item07/ensoion.htm>, 参照2009-05-14.
- 千葉県 (2001) : 公共用水域地点別水質測定結果データベース
- 中西敬・中村由行・川井浩史・勝海 務・斉藤安立・山田桂介 (2006) : 「ロープ式藻場」による垂直構造物への環境機能付加手法に関する基礎的実験及び考察, 海岸工学論文集, Vol.53, pp.1201-1205.
- 細川恭史・三好英一・桑江朝比呂・古川恵太 (2000) : 浦賀湾防波堤の付着生物調査, 港湾技研資料, No.962, pp.1-17.
- 松永久宏・小菊史男・高木正人・谷敷多穂 (2003a) : 鉄鋼スラグを利用した環境に優しい固化体の開発, コンクリート工学, Vol.41, No.4, pp.47-54.
- 松永久宏・高木正人・小菊史男 (2003b) : 鉄鋼スラグ水和固化体の基本特性と海洋環境下における生物付着性, 鉄と鋼, Vol.89, No.4, pp.74-80.
- 村上仁士・水口裕之・上月康則・伊福 誠・野田 徹・岩村俊平・山本秀一 (2007) : エコシステム式海域環境保全工法を導入した直立構造物の環境配慮機能の評価, 海岸工学論文集, Vol.54, pp.1281-1285.