コンクリートの代替が可能な 環境にやさしい製鋼スラグ塊成化技術の開発

高木正人^{*1)} 松永久宏^{*2)} 小菊史男^{*3)}
谷敷多穂^{*4)} 相川真紀子^{*2)}

1. はじめに

近年、地球温暖化や環境破壊が顕在化し、また最終処分場のひっ迫も深刻な社会問題となり、従来の大量生産・大量消費・大量廃棄型社会からゼロエミッション社会への転換が急務となっている。鉄鋼産業においても副生する鉄鋼スラグは発生量が極めて大量であるため、減量化、再生利用技術および中間処理技術の開発を続けている。

鉄鋼スラグを大別すると、銑鉄を製造する時に発生する高炉スラグと、銑鉄から炭素、珪素、リン等の不純物を取り除く精練過程で発生する製鋼スラグに分かれる。高炉スラグはセメント原料、路盤材等として利用され、リサイクル率100%であるが、製鋼スラグはfree-CaOによる水和膨脹性⁽¹⁾⁽²⁾と粉状になり易い性質からリサイクル率こそ97%と高いが、その用途は路盤材、仮設材等の限られたものとなっており、新たな利用技術の開発が急務であった。

一方、土木用途には、砂・石等の天然材料が多量に使用される。現在、これらの資源の採取にともなう環境破壊が問題になりつつあり、リサイクル材の活用が積極的に検討されはじめている。

このような背景のもと、筆者らは利用価値の低い製鋼スラグを土木資材として活用する方法を種々検討してきた。製鋼スラグは主にライム、シリカ、およびアルミナから構成されるがCa分に富むため、シリカ含有物質と組み合わせ

CSHゲルを生成することが期待できる。そこで製鋼スラグとシリカ含有物質として高炉スラグ微粉末や石炭火力発電の副産物であるフライアッシュとの反応を検討した結果、コンクリートに匹敵する強度を持つ固化体がセメントを一切使わずに製造できることを見出した⁽³⁾。また筆者らはこの固化体が通常のコンクリートに比べて、高比重であり緻密な組織を持つこと、低摩耗性などの優れた機械特性を有するのみならず、アルカリ溶出性が低い、生物親和性が高い等、環境に非常に優しい材料であることを見だし、「フェロフォーム」と名付けて港湾土木材料向けに積極的に展開してきた。本稿では本低環境負荷型水和固化体「フェロフォーム」の開発の経緯と諸特性について紹介する。

2. 開発の経緯

(1) 製鋼スラグ水和固化体「フェロフォーム」

「フェロフォーム」の製造工程を図1に示す。製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末(およびフライアッシュ)、必要に応じて少量の添加剤を混合後、水を加え、混練、打設、および常温で養生することにより製造する。

土木資材としては、汎用性の高い製造プロセスが求められる。「フェロフォーム」の製造プロセスは通常のコンクリートと全く同様であり、既存の生コンクリート製造設備が使用できるなど、汎用性が非常に高いことが特長である。

「フェロフォーム」の圧縮強度は18~35 N/mm²であり、

* 川崎製鉄株式会社

技術研究所：1)耐火物・スラグ研究部門部門長

2)耐火物・スラグ研究部門主任研究員

3)主任研究員

水島製鉄所：4)企画部主査

Development of Environment-friendly Block Made of Steel Slag as an Alternative to Concrete; Masato Takagi, Hisahiro Matsunaga, Fumio Kogiku, Kazuho Tanishiki, Makiko Aikawa (Kawasaki Steel Corporation)

2001年10月31日受理

図1 スラグ水和固化体の製造方法。

普通用途のコンクリートと同等である。圧縮強度の経時変化を図2に示す。コンクリートに比べ長期強度の伸びが大きいのが特徴である。また、物理特性を表1に示す。曲げ強度および引張強度は同一圧縮強度のコンクリートと同レベルであるが、静弾性係数はやや小さい。磨り減り係数がコンクリートの半分と小さく耐磨耗性に優れる、比重が2.5と大きい、細孔径が小さく緻密であるという特徴を有する。

図3にφ100 mm×200 mmの供試体を24リットルの人工海水に浸漬した時のpH変化を示す。セメントを使用しない「フェロフォーム」は、コンクリートに比べpH上昇が低い。特にフライアッシュを配合するとほとんどpH上昇が見られなかった。

図2 スラグ水和固化体の圧縮強度の経時変化。

表1 スラグ固化体とコンクリートの特性比較。

項 目	スラグ水和 固化体	コンクリート (18-8-20N)
引張強度* (N/mm ²)	2.14	2.22
曲げ強度* (N/mm ²)	3.89	4.05
静弾性係数* (N/mm ²)	21500	26100
磨り減り係数* (cm ³ /cm ²)	0.043	0.095
比 重	2.5	2.3
平均細孔径 (μm)	0.02	0.1

* 圧縮強度 30 N/mm² における値

図3 人工海水に浸漬した際のpH変化。

(2) 「フェロフォーム」の港湾土木材料としての適用性評価

基本特性からみて、「フェロフォーム」は消波ブロック、被覆ブロック、および根固め石等の港湾土木材料として適している。すなわち、比重が高いため波浪に対する安定性が高く、すり減り係数が低いため波浪による浸食を受けにくい。さらに、組織が緻密であるため塩分浸透および中性化に抵抗を示し、耐久性に優れると考えられる。また、海水へのアルカリ溶出性が低いことは、生物の付着性にも優れた効果を及ぼすと考えられる。そこで港湾土木材料への適用性について詳しく検討した。

打設後20℃の水中で28日間養生した後、40℃の海水に長期間浸漬した固化体の圧縮強度を図4に示す。フェロフォームの圧縮強度の低下は6ヶ月を経過しても認められず、逆に30 N/mm² から50 N/mm² へと強度が1.7倍に増加した。一方、コンクリートの強度増加は1.3倍にとどまった。

岡山県水島港の干満帯に8ヶ月暴露した後の供試体の塩分浸透および中性化深さを図5に示す。「フェロフォーム」はコンクリートと比較して、塩分浸透および中性化深さが小さい。これらの結果より、「フェロフォーム」は、海水に対してコンクリートと同等以上の耐久性を有すると言える。

また、同海域で消波ブロックおよび魚礁ブロックを10ヶ月暴露(2000年2月～11月)し、生物付着性を調査した。平均生物付着量は「フェロフォーム」が1700 g/m²、コンクリートが1070 g/m² となり、「フェロフォーム」はコンクリー

図4 40℃海水浸漬による圧縮強度の経時変化。

図5 8ヶ月海水暴露後の塩分浸透および中性化深さ。

図6 分類毎の存在生物の種類.

トの約1.6倍の生物付着性を示した。また、付着生物の種類数を図6に示す。藻、ゴカイ、節足動物の付着種類数は、「フェロフォーム」がコンクリートよりも遙かに多い。また、「フェロフォーム」の生物付着性は近傍の天然石と同等以上であった。「フェロフォーム」が生物付着性に優れる理由として、アルカリ溶出性が低いこと、および製鋼スラグ含有するため生物の成長に必要なリン、鉄等を溶出しやすいことが考えられる。

以上、スラグ水和固化体「フェロフォーム」は海洋環境下での耐久性が高いことに加えて環境負荷が低く、優れた港湾土木材料であることを明らかにした。

3. 実用化状況

2000年8月に川崎製鉄千葉製鉄所において被覆石として1000tを施工した。さらに、2000年9月より岡山県水島港(川崎製鉄水島製鉄所)にて、護岸補強用根固め石および被覆ブロックの製造・施工を開始し、2001年9月時点で9万トンの施工を完了、2002年4月までにさらに5万トンの製造、施工を予定している。根固め石および被覆ブロックの施工状況を図7に示す。施工場所の一部は火力発電所向けの冷却用海水導入用の水路(幅35m)であり、常時18~38 cm/secの流れがあるため、下流域への溶出アルカリの拡散が懸念されたが、図8に示すようにpH上昇は見られず、大規模施工においても低環境負荷であることを確認できた。また、施工1~2週間後にしてすでに藻類の付着を観測した。

4. まとめ

(1) 製鋼スラグを主原料にして、セメント、天然骨材を使用せずに海洋用コンクリートと同等の強度を持つ製鋼スラグ水和固化体「フェロフォーム」を開発した。

図7 根固め石および被覆ブロックの施工状況(水島港).

図8 スラグ水和固化体投入量と周辺海域のpH推移.

(2) 「フェロフォーム」は、海水に対してコンクリートと同等以上の耐久性を有する。

(3) 「フェロフォーム」は、アルカリ溶出性が低く、また生物付着性に優れる。

(4) 上記より、「フェロフォーム」は低環境負荷型の優れた港湾土木材料であると結論した。

5. 工業所有権

特開2001-049310, 特開2001-114550, 特開2001-114547, 特開2001-270746など国内26件を出願済み。

外国には、米国No. 09/417053, ヨーロッパNo. 99120254.0-2309など7ヶ国に出願済みである。

文献

- (1) 成田貴一, 尾上俊雄, 高田仁輔: 鉄と鋼, 64(1978), 1558.
- (2) 水渡英昭, 横幕豊一, 林田由美子, 高橋愛和: 鉄と鋼, 63(1977), 2316.
- (3) 高木正人, 奥村樹郎, 松永久宏, 谷敷多穂: 土木学会, 55回学術講演会, (2000), 350.