

コンクリートの代替が可能な環境にやさしい 製鋼スラグ水和固化体*

川崎製鉄技報
34 (2002) 4, 195-200

Development of Environment-friendly Block Made of Steelmaking Slag as an Alternative to Concrete



木 正人
Masato Takagi
技術研究所
耐大物・スラグ研究部
門長・工博



松永 久宏
Hisahiro Matsunaga
技術研究所 耐大物・
スラグ研究部門 主任
研究員(主席掛長)



谷敷 多穂
Kazuho Tanishiki
水島製鉄所
企画部企画室
主査(課長補)

要旨

製鋼過程で発生する溶銑予備処理スラグを主原料にセメントや天然骨材を一切使用しない製鋼スラグ水和固化体を開発し、港湾土木材料への適用性を検討した。本固化体はコンクリートと同様な装置・手順で製造が可能であり、強度も海洋におけるコンクリートの基準を満足する。また、コンクリートに比べ耐摩耗性が高い、アルカリ溶出性が低いという特徴を有する。本固化体の実海域暴露を実施し、周辺の海水 pH に変化がないこと、コンクリートよりも生物付着性に優れることを明らかにした。また、本固化体を用いた人工石および被覆ブロック総量 14 万 t を水島港護岸工事にて使用し、施工、環境への影響がともに問題ないことを確認した。

Synopsis:

A block and an artificial stone without using cement and natural aggregates has been developed from steelmaking slag, and its applicability to marine structure has been investigated. The slag block has the following features: (1) Similar-manufacturing process for manufacturing conventional concrete can be used. (2) It has sufficient strength, satisfying adapt the standard of marine concrete. (3) It has excellent abrasion resistance characteristics and does not raise pH value of surrounding seawater. (4) More biofouling organisms than concrete were observed after exposure to tide way. In the repair work of Mizushima Port, artificial stones and cover blocks made of steelmaking slag totaling 140 thousand tons were used and their easiness of construction and low impact to ecology were confirmed during this work.

1 緒 言

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っている。こうした環境問題の意識の高まりの中で、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型社会への転換が急務となっている。鉄鋼スラグはその発生量が鉄鋼 1 t 当たり 400 kg 強と多いため、スラグの減量化、リサイクル・リユースの技術開発ばかりでなく、新しい利用技術の開発が必要である。そうした観点から、リサイクル材を土木材料として積極的に活用していこうという動きがある。この背景には土木材料として大量に使用される砂・石などの採取にともなう環境破壊の問題がある。天然資源代替材料としての鉄鋼スラグの役割は大きく、コンクリート骨材、土木用砂の代替材などとして期待されている。

このような背景のもと、筆者らは鉄鋼スラグの新しい利用法について、種々の開発を行ってきた。この中で、これまで利用価値の低かった溶銑予備処理スラグに着目し、これに高炉スラグや発電所の石炭灰などを組み合わせることによって、セメントや砂・砂利とい

った天然骨材を一切含まない製鋼スラグ水和固化体「フェロフォーム」ができることを見い出した¹⁾。また、本固化体はコンクリートと同等の強度を持ち、高密度であり、耐摩耗性が高いという港湾用ブロックに適した物性を持つのみならず、低アルカリ性で生物親和性が高く、非常に環境に優しい材料である²⁾。

本論文では、製鋼スラグ水和固化体の室内実験を中心とした硬化後の力学特性、港湾構造物としての適性、および大規模施工の状況について述べる。

2 溶銑予備処理スラグおよびその他の使用原料

製鋼スラグ水和固化体に用いられる原料を Table 1 に示す。主原料である溶銑予備処理スラグは、製鋼スラグの一種であり、溶けた鉄鉄中からケイ素やリンなどの鉄にとっては不純物となる元素を抜き取る溶銑予備処理プロセスで発生する副産物である。粗鋼生産量の 7 割を担う鉄鋼一貫プロセスにおける鉄鋼スラグの種類と発生量を Fig. 1 に模式的に示す。その発生量は日本国内で年間およそ 3500 万 t と推察される。溶銑予備処理スラグは主成分として CaO を 30%、SiO₂ を 15% 含むほか、金属鉄、酸化鉄などの鉄分を合計して約 18%、P₂O₅ を 5%、さらに Al₂O₃ や MgO を少量含んでい

* 平成14年7月1日原稿受付

Table 1 Chemical composition of materials

Materials	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S	Total Fe
Pre-treatment slag	34	15	2	4	5	0.2	18
Blast furnace slag	42	33	7	13	0	0.8	0.1
Fly ash	1	63	0	28	—	0.4	5
cf. Converter slag	44	12	7	2	2	0.1	17

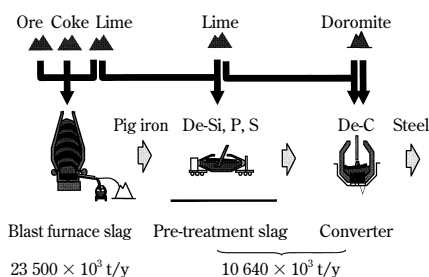


Fig. 1 Steel-making process and generated slags

る。鉱物相は大部分が β -Ca₂SiO₄ と Ca₂Al₂SiO₇ からなり、鉄は金属鉄、FeO、Fe₂O₃、Fe₃O₄ とさまざまな形態で存在する。CaO と Ca(OH)₂ を合わせてなる遊離石灰の含有量は 0.5%~1% である。溶鉄予備処理スラグは鋼として好ましくない元素を多く含んでいるため、鉄の製造プロセスにリサイクルすることは望ましくない。また、粉状になりやすいことと遊離石灰による水和膨脹性を示す^{3,4)}ことから、その用途は仮設路盤材などに限られており、新たな用途開発が急務であった。

3 製鋼スラグ水和固化体「フェロフォーム」

溶鉄予備処理スラグは遊離石灰の水和だけでなく、内在する他の鉱物も水和反応を生じ、長期間かかって硬化する活性も有している⁵⁾。そこでこの溶鉄予備処理スラグの反応性を逆に利用し、高炉スラグ微粉末と組み合わせることによってセメントを用いずに水和硬化させ、コンクリートに匹敵する強度を持つ固化体「フェロフォーム」を製造することに成功した。また、同時にこれまで問題にされたスラグの膨脹も、添加したシリカ含有物質によって遊離石灰が消費されるため抑制できるようになった。

3.1 製造方法

製鋼スラグ水和固化体の製造方法を Fig. 2 に示す。製造方法は通常のコンクリートと同様、混練、打設、養生の工程からなる。実

験に用いた固化体の配合を Table 2 に示す。溶鉄予備処理スラグはエージング処理し、JIS A 5015 による水浸膨脹比が 1.1% 以下になったものを使用した。

3.2 室内試験による固化体の基本物性の評価

3.2.1 圧縮強度、曲げ強度、引張り強度および静弾性係数

圧縮強度 (JIS A 1108)、曲げ強度 (JIS A 1106)、引張り強度 (JIS A 1113)、静弾性係数 (JSCE-G 502) を評価した。

圧縮強度の経時変化を Fig. 3 に示す。製鋼スラグ水和固化体の圧縮強度は材齢とともに増大し、91 日強度が 28 日強度の 1.3 倍程度と長期強度の伸びが大きい。

固化体の各種物理特性を Table 3 にまとめる。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

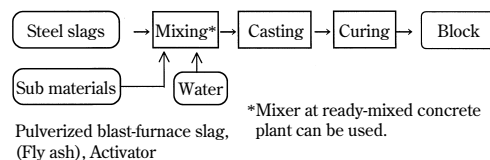


Fig. 2 Manufacturing process of Ferroform

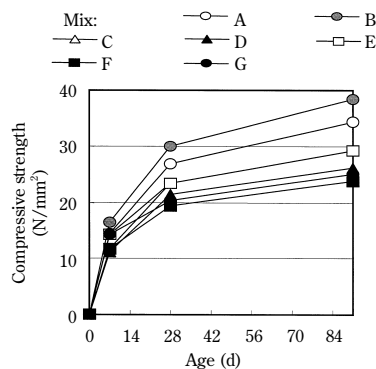


Fig. 3 Growth of compressive strength of Ferroform

Table 2 Specified mixes of Ferroform

	Specified mix (kg/m ³)						Slump (cm)	Air (%)
	PT	BFS	Fly ash	Ca(OH) ₂	Water	Ad		
A	1 462	607	0	61	291	0	9.0	—
B	1 415	607	0	61	291	0	19.0	—
C	1 463	313	313	38	238	2.2	20.0	2.5
D	1 773	421	0	41	246	0	13.0	2.3
E	1 743	276	138	41	242	0	15.0	1.7
F	1 824	307	0	30	274	0	11.0	2.7
G	1 829	205	103	30	260	0	12.0	2.3
H	1 446	620	0	62	277	0	10.5	—
I	1 410	403	202	61	270	0	10.5	—

PT: Pre-treatment slag, BFS: Ground granulated blast furnace slag, Ad: Water-reducing admixture

Table 3 Comparison of physical properties between Ferroform and concrete

Properties	Ferroform	Concrete (18-8-20 N)
Tensile strength* (N/mm ²)	2.14	2.22
Flexural strength* (N/mm ²)	3.89	4.05
Elastic modulus* (N/mm ²)	21 500	26 100
Abrasion ratio* (cm ³ /cm ²)	0.043	0.095
Density (t/m ³)	2.5	2.3
Average pore size (μ m)	0.02	0.1

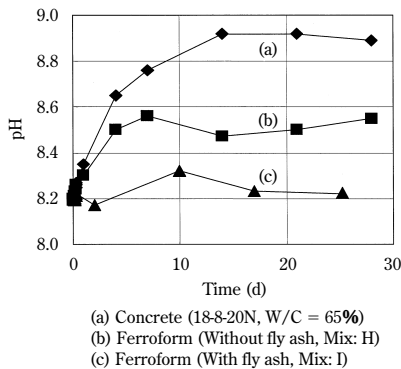
*At 30 N/mm² of compressive strength

Fig. 4 pH change of artificial sea water after immersion of block

係数はやや小さい。また、溶鉄予備処理スラグは鉄分を多く含んでいるため、密度が 3 g/cm³ と他の石材に比べ大きいのが特徴である。したがって、本スラグを多量に含むフェロフォームはコンクリートに比べて、見かけ密度が 2.5 t/m³ と大きく、海域での使用では耐波浪安定性が大きく有利である。

3.2.2 アルカリ溶出性

$\phi 100 \times 200$ mm の供試体を材齢 28 日まで 20°C、湿度 60% で水中養生後、容積 15 倍の人工海水に浸漬して海水の pH を測定しアルカリ溶出性を調べた。

pH 変化を Fig. 4 に示す。製鋼スラグ水和固化体は、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに比べ pH 上昇が小さい。特にフライアッシュを配合すると pH 上昇がほとんどない。この理由として、海水に直接接するペースト部分を構成する結合材の CaO/SiO₂ が低いことが考えられる。

3.2.3 耐摩耗性および高温海水養生による圧縮強度の変化

製鋼スラグ水和固化体を消波ブロックなどの海洋構造物に適用する場合、漂砂による摩耗および海水との長期間にわたる化学反応に対する耐久性が求められる。これらの評価指標として、ASTM C418 すりへり特性および高温海水養生後の圧縮強度低下の有無について調べた。

サンドブラストによるすりへり係数をコンクリートと比較した結果を Fig. 5 に示す。鉄鋼スラグ水和固化体は、圧縮強度 20 N/mm² 以上においてコンクリート⁹⁾よりもすりへり係数が小さく、耐摩耗性が優れる。

28 日間の標準養生 (20°C 水中養生) 後、40°C の海水に浸漬した固化体の圧縮強度の経時変化を W/C = 66% のコンクリート (18-8-20 N) と比較して Fig. 6 に示す。浸漬 6 ヶ月では、鉄鋼スラグ水和固化体の圧縮強度は低下するどころか 30 N/mm² 程度から 50 N/mm² と、1.7 倍に増加しており、海水による組織劣化は特に認められなかった。コンクリートも強度低下していないが、強度増

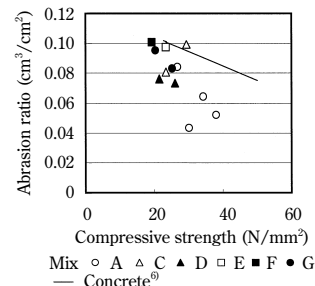


Fig. 5 Relationship of abrasion ratio and compressive strength

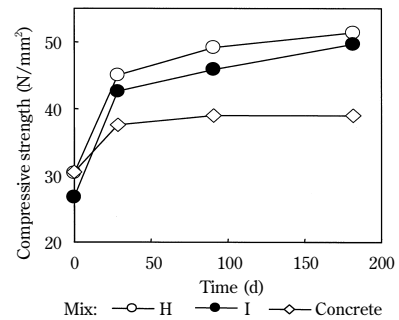


Fig. 6 Change of compressive strength after immersion into sea water at 40°C

加は 1.3 倍にとどまり、強度の絶対値もスラグ固化体の方が大きい。これらの結果より、製鋼スラグ水和固化体は、コンクリートと同等以上の耐久性を有すると考えられる。

4 実大施工実験による施工性の評価と施工体の暴露状況

4.1 施工実験の概要

5t 型消波ブロック 2 体、4t 型被覆ブロック 2 体、人工石材 5 m³ の 3 種を製造し、コンクリート (18-8-40 BB) と性状を比較した。配合を Table 4 に示す。

混練は 2 軸式強制型ミキサー (容量 2.5 m³) を持つ生コンプラントで実施した。原料を投入し 60 s 混練後、すぐにアジテータ車に積み込み、約 20 min かけて打設現場まで運搬した。

打設は、消波ブロック上部のバケット打ちを除いてアジテータ車附属のシュートで直打設とした。締め固めは、棒状バイブレーターを用いて行った。表面の仕上げは、ブリーディング終了後、人力による金鍍仕上げを行った。養生はすべて現場気中養生とし、打設後 3d に脱型した。なお、養生期間中の平均気温は 8.3°C であった。

人工石材製造では、打設後 3d に、0.25 m³ 級油圧破砕機を使用して人頭大に破砕処理を行った。

4.2 フレッシュ時の評価

試験結果を Table 5 に示す。運搬による状態変化は、スランプロスが 0.6 cm/20 min、空気量の増加が 0.2% とわずかであり、施工上問題のないレベルにある。

4.3 硬化後の評価

比較材のコンクリートと変わらない脱型作業性を有し、鋼製型枠への付着物も特に多くはない。圧縮強度は 28 日強度で予備強度の

Table 4 Specified mixes of Ferroform and concrete

Type	Design strength (N/mm ²)	Slump (cm)	Size of Agg. (mm)	Specified mixes (kg/m ³)				
				BFS	FA	PT slag	W	CH
SL-1	21	15	0-40	613	0	1 433	274	61
SL-2	21	5~12	0-80	345	246	1 378	268	35

Concrete

Type	Design strength (N/mm ²)	Slump (cm)	Size of Agg. (mm)	Specified mixe (kg/m ³)					
				BB	G	SS	CS	W	Ad
BB	18	8	0-40	245	1 137	560	240	157	2.45

Agg: Aggregates, BFS: Ground granulated blast furnace slag, FA: Fly ash, PT: Pre-treatment slag, W: Water, CH: Calcium hydroxide, BB: Portland blast furnace slag cement B-type, G: Gravel, SS: Sea sand, CS: Crush sand, Ad: Admixture

Table 5 Comparison of properties of fresh Ferroform and concrete

Type	Test items	Immediately after mixing	After transportation
Ferroform	Slump (cm)	14.9	14.3
	Air (%)	1.8	2.0
	Bleeding (%)	0.40	
Concrete	Slump (cm)	8.5	8.3
	Air (%)	4.8	4.8
	Bleeding (%)	2.70	



Photo 1 Breakwater blocks and cover blocks of Ferroform at Mizushima Port (Exposure from February, 2000)

21 N/mm² 到達し、供試体間のばらつきも 20.9~23.2 N/mm² と比較的狭い範囲にあった。

4.4 固化体の暴露状況と生物付着性

本固化体は水島港の干満帯での暴露試験を 2000 年 2 月から開始し、現在も継続中である(Photo 1) (消波ブロック下端潮位: MP + 1.50 m, 平均潮位: MP + 1.90 m, 大潮平均満潮位: MP + 3.27 m, 大潮平均干潮位: MP + 0.53 m)。暴露約 10 ヶ月後の 2000 年 11 月と約 13 ヶ月後の 2001 年 3 月に生物付着状況を調査した。生物付着サンプルは、消波ブロックの正面(海側)上部, 正面下部, 背面(陸側)上部, 背面下部から面積 20 × 20 cm の正方形部分を採取した。サンプルは 5% ホルムアルデヒドを添加した海水中に保存後、

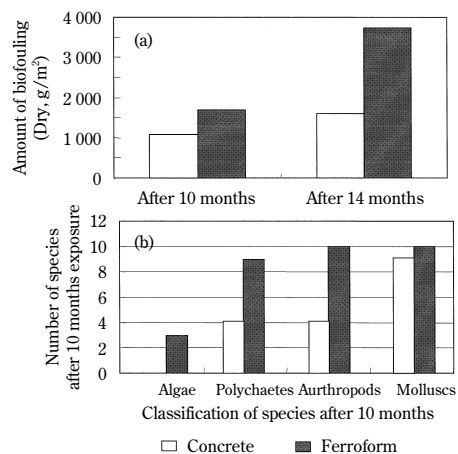


Fig. 7 (a) Amount of biofouling and (b) number of species on Ferroform and concrete

生物種ごとに分別し、付着量および生物種を同定した。

ブロックに付着した生物の平均質量を Fig. 7 (a) に示す。生物付着量は鉄鋼スラグ水和固化体の方がコンクリートよりも 10 ヶ月後で 1.7 倍, 13 ヶ月後で 2.3 倍とはるかに多い。主な付着生物はフジツボおよび二枚貝である。

海水暴露 10 ヶ月後の付着生物の種類を生物種ごとに整理した結果を Fig. 7 (b) に示す。軟体動物の付着種類数は、製鋼スラグ水和固化体とコンクリートで同等であるが、藻類, ゴカイ, 節足動物の種類ははるかに製鋼スラグ水和固化体の方が多い。製鋼スラグ水和固化体が生物付着性に優れる理由は、アルカリ溶出性が低いこと, 製鋼スラグを利用しているため鉄など生物の成長に必要な成分を含むことなどが考えられる。

5 大規模施工

5.1 施工実績

製鋼スラグ水和固化体からなる人工石材 1000 t を川崎製鉄千葉製鉄所において製造し、千葉港内の取水管被覆石として施工した(2000 年 7-8 月)。また、同社水島製鉄所において人工石材および被覆ブロック合計 14 万トンを作製し、水島港の鋼矢板式護岸の補強工事に使用した。

5.2 製造プラントの概要

水島製鉄所における製造プラントは 30 m³ 粉体サイロ 3 基, 粉体切出し装置 2 基, ベルトフィーダー付き骨材ホッパー 1 基, 連続式

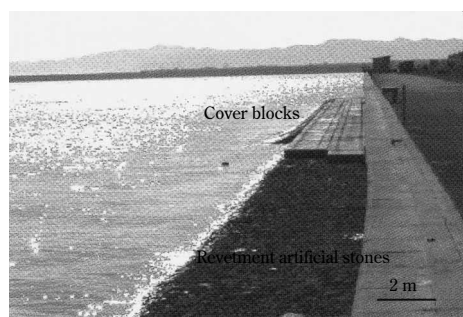


Photo 2 Revetment artificial stones and cover blocks of Ferroform at Mizushima Bay

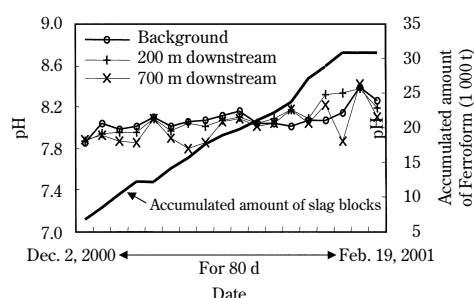


Fig. 8 pH variation of seawater of construction zone

ミキサー 1 基、定置型コンクリートポンプ 1 基より構成され、 $25 \text{ m}^3/\text{h}$ の製造能力を有する。このプラントで前述の根固め用の人工石材と被覆ブロックの 2 種類を製造した。

5.3 施工状況

岡山県水島港内の鋼矢板式護岸の補強工事は次の 2 ケ所からなる。

施工例 (1) 外海に面する延長 652 m の護岸工事。人工石材 36 000 t のをグラブ船にて海上より投入、潜水士による仕上げ整形を行った後、起重機船を用いて 7 800 t (776 個) の被覆ブロックを据え付けた。この際、石材やコンクリートブロックに比べ施工性に何ら遜色がないことを確認した (Photo 2)。施工 2 ヶ月後に人工石材の間隙状況を潜水して調べたところ、カニ、メバル、ゴンズイなど多くの生物の生息が確認された。この場所はこれまで垂直護岸であったが、人工石材を施工し傾斜護岸となり、生物が生息しやすい環境に変化した。

施工例 (2) 火力発電所冷却用海水の導入水路 (幅 35 m, 延長 526 m)。波浪の影響がないため、陸上から 6 000 t の人工石材を投入し、敷き均す方法で根固め補強を行った。この水路は常時一定方向に $18 \sim 38 \text{ cm/s}$ の流れがあることから、人工石材からのアルカリ溶出性を調査するのに適する施工場所である。人工石を施工した周辺海域の pH 変化を Fig. 8 に示す。施工区域の下流 200 m および 700 m とともに上流 500 m のバックグラウンドとほぼ同様の pH 値が観測されており、人工石材の投入による周辺海水の有意な pH 変化は見られなかった。また、2000 年 8 月の千葉製鉄所内に建設中の発電用冷却水取水管の根固め石施工 (1 000 t) において、スラグ中に含有する Ca, Fe, P, S の溶出と濁度についても一般海域との差が見られないことを確認した。これらの結果より、製鋼スラグ水和固化体は、天然石およびコンクリートと同様な施工が可能であること、また環境負荷が低いことが実証された。

Table 6 Specified mix of concrete

W/C	Specified mix (kg/m^3)				
	Cement, N	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate	Admixture
65.8	248	163	940	1 002	0.6

6 環境負荷の低減

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試算を行った。年間全国で発生する溶銲予備処理スラグの $1/3$ に当たる 100 万トン Table 4 の配合 SL-2 にしたがってフェロフォームを製造し、Table 6 の配合で製造されるコンクリート量に代替するものと仮定した。なお、各原料製造時にともなう CO_2 排出量は、ポルトランドセメント $757.9 \text{ kg}/\text{t}^7$ 、高炉スラグ微粉末 $24.1 \text{ kg}/\text{t}^7$ 、フライアッシュ $17.9 \text{ kg}/\text{t}^7$ 、および石灰 $433 \text{ kg}/\text{t}^8$ とした。

鉄鋼スラグ水和固化体の製造量：

$$(1\,000\,000 \text{ t}/\text{y}) / (1.378 \text{ t}/\text{m}^3) = 726 \text{ 千 m}^3/\text{y} \dots\dots\dots (1)$$

天然骨材使用量削減：

$$(0.940 \text{ t}/\text{m}^3 + 1.002 \text{ t}/\text{m}^3) \times 726\,000 \text{ m}^3/\text{y} = 1\,410 \text{ 千 t}/\text{y} \dots\dots\dots (2)$$

セメント製造にともなう CO_2 排出量削減：

$$757.9 \text{ kg}/\text{t} \times 0.248 \text{ t}/\text{m}^3 \times 726\,000 \text{ m}^3/\text{y} = 136 \text{ 千 t}/\text{y} \dots\dots\dots (3)$$

高炉スラグ微粉末製造にともなう CO_2 排出増加量：

$$24.1 \text{ kg}/\text{t} \times 0.345 \text{ t}/\text{m}^3 \times 726\,000 \text{ m}^3/\text{y} = 6\,303 \text{ t}/\text{y} \dots\dots\dots (4)$$

フライアッシュ製造にともなう CO_2 排出量増加：

$$17.9 \text{ kg}/\text{t} \times 0.246 \text{ t}/\text{m}^3 \times 726\,000 \text{ m}^3/\text{y} = 3\,197 \text{ t}/\text{y} \dots\dots\dots (5)$$

消石灰使用にともなう CO_2 排出量増加：

$$433 \text{ kg}/\text{t} \times 56/74 \times 0.035 \text{ t}/\text{m}^3 \times 726\,000 \text{ m}^3/\text{y} = 8\,326 \text{ t}/\text{y} \dots\dots\dots (6)$$

*CaO の分子量/Ca(OH)₂ の分子量

CO_2 排出量削減：

$$\text{式 (3)} - (\text{式 (4)} + \text{式 (5)} + \text{式 (6)}) = 118 \text{ 千 t}/\text{y} \dots\dots\dots (7)$$

式 (2) に示したように 1 410 千 t/y の天然骨材の使用量削減、式 (5) に示すように 118 千 t/y の CO_2 排出量削減に寄与することが可能となる結果となった。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 1 229 百万 t- CO_2 (2000 年度 13 320 百万 t- CO_2) に対して 6% の 1 155 百万 t- CO_2 まで削減することになっているが、製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。

7 結 言

溶銲予備処理スラグを主原料とし、セメント、天然骨材を使用しない製鋼スラグ水和固化体に関する室内実験および実施工から得られた結果を以下に示す。

- (1) コンクリート製造と同様な装置、同様な手順で製造することができる。
- (2) 海洋コンクリートの基準に適合する強度を有する。
- (3) 静弾性係数と圧縮強度の関係は、普通コンクリートと軽量コンクリートの中間付近に位置する。
- (4) 耐摩耗性は、圧縮強度 $20 \text{ N}/\text{mm}^2$ 以上で普通コンクリートよりも向上する。
- (5) 圧縮強度は、6 ヶ月にわたる高温海水 (40°C , 60°C) への浸漬において低下することがない。

- (6) 普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートよりもアルカリ溶出性が低い。
- (7) 実施工において、人工石材、成型ブロックともに既存材料と比べ、取り扱いに遜色はない。
- (8) 大規模施工による海水への影響は認められない。
- (9) コンクリートよりも生物付着性に優れる。

以上のことより、鉄鋼スラグ水和固化体は無筋ブロック系の港湾構造物への適用が可能であると考えられる。また、仮に溶銹予備処理スラグを 100 万 t/y 使用し、鉄鋼スラグ水和固化体をコンクリート代替として製造した場合、天然骨材の使用量削減には

1410 千 t/y、CO₂ 排出量削減には 118 千 t/y の寄与が可能となる。

このように製鋼スラグ水和固化体「フェロフォーム」の使用による環境保全への寄与は大きく、今後さらに積極的な使用拡大を働きかけていきたい。

本研究を進めるにあたり、ご助言、ご協力いただきました（独）港湾空港技術研究所構造部材料研究室の濱田秀則室長をはじめ研究室の皆様、および付着生物の同定にご尽力をいただきました産業技術総合研究所 四国センター（当時 川崎製鉄技術研究所 客員研究員）の Dr. Kanavillil Nandakumar に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 高木正人, 奥村樹郎, 松永久宏, 谷敷多穂, 櫻谷敏和: 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, V-17(2000)
- 2) 小菊史男, 濱田秀則, 山路 徹, 松永久宏: 港湾技研資料, (2001) 990, 1
- 3) 成田貴一, 尾上俊雄, 高田仁輔: 鉄と鋼, 64(1978), 1558
- 4) 水渡英昭, 横幕豊一, 林田由美子, 高橋愛和: 鉄と鋼, 63(1977), 2316
- 5) 鳥居和之, 川村満紀: 材料, 40(1991)459, 2
- 6) 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, 37(1998)4, 149-171
- 7) 土木学会: 「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, (2002), I-87
- 8) 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」, (2000. 12), 1