

鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材「フロンティアロック™」

“Frontier rock™,” an Artificial Stone Made by Steel Slag Hydrated Matrix

宇田川悦郎 UDAGAWA Etsuro JFE ミネラル 技術研究所 基礎材料開発センター 主任研究員 (部長)
松永 久宏 MATSUNAGA Hisahiro JFE スチール スチール研究所 スラグ・耐火物研究部 主任研究員 (課長)

要旨

鉄鋼スラグ水和固化体「フェロフォーム®」は、2003年に(財)沿岸技術研究センターから技術マニュアルが刊行され、港湾工事用のコンクリートブロックなどへの利用が推進されている。その後、水和発熱性と流動性(圧送性)の改善による高品質化を図ってきた。本報告では、鉄鋼スラグ水和固化体およびこれらを破碎して製造した人工石材「フロンティアロック™」の製造、基本特性および適用事例について紹介した。

Abstract:

The technical guideline of hydrated matrix, “Ferroform” with iron and steel-slag has published by Coastal Development Institute of Technology in 2003. After that, the improvement on its reduction of heat of hydration and workability (pumping easiness) have been carried out then it can be used for high-quality concrete structures for the harbor construction, etc. In this paper, the manufacturing, basic property, and the applications of the hydrated matrix and the artificial stone “Frontier rock™” are introduced.

1. はじめに

2000年に循環型社会形成推進基本法が制定され、鉄鋼業においても、鉄鋼製造工程で副産物として生成される鉄鋼スラグの減量化、再使用技術および再生利用技術の開発を続けている。鉄鋼スラグは、鉄鋼生産工程において高炉スラグと製鋼スラグに大別され、2006年度のわが国における生成量は、高炉スラグが2477万トン、製鋼スラグが1387万トンである¹⁾。高炉スラグは、高炉セメントの原料などとして、100%有効利用されている。

中でも、製鋼スラグは鋼の成分調整を行う過程で生成し、溶銑予備処理スラグ、転炉スラグなどに分別されている。溶銑予備処理スラグは、溶けた銑鉄中からケイ素やリンなどの不純物を除去する溶銑予備処理プロセスで生成する。製鉄所ごとのプロセスによって多少異なるが、表1に示す

表1 予備処理スラグの化学組成
Table 1 Composition of pretreatment slag

Composition	(mass%)						
	Total-Fe	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅
Pretreatment slag	16.9	20.4	34.0	5.74	4.86	6.34	3.98

2007年11月13日受付

ように、鉄分を17%、P₂O₅を4%、CaOを34%程度含んでいる。溶銑予備処理スラグは、道路用路盤材、土木工事用材などに利用されている。

JFEスチールと新日本製鐵(株)は、製鋼スラグを骨材、高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどを結合材として、天然骨材を使用しないリサイクル材料からなる一種のコンクリート材(鉄鋼スラグ水和固化体)の共同開発を行い^{2,3)}、2003年に(財)沿岸技術研究センターより技術マニュアル⁴⁾が刊行された。その後、2007年にはその改定版⁵⁾が刊行されている。

さらに、鉄鋼スラグ水和固化体を加工して製造した人工石材の天然石代替材としての性能に関する技術評価については、JFEスチール、新日本製鐵(株)、東亜建設工業(株)の3社共同で2007年11月に、(財)沿岸技術研究センターが定める「港湾関連民間技術の認定審査・評価事業」において審査証明を取得した。なお、この人工石材については、JFEスチールと新日本製鐵(株)にて、5kg/個以上の大型石材「フロンティアロック™」、0~300mmの小型石材「フロンティアストーン™」として、商標出願もされている。

本報では、鉄鋼スラグ水和固化体および人工石材の製造、品質の概要、護岸補修工事向けの被覆石、および漁礁・藻礁向けの大型石材として実用に供した結果について紹介する。

2. 製造方法

JFE スチール西日本製鉄所倉敷地区における人工石材の試作を例に、以下製造方法について述べる。製造方法は鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル（沿岸開発技術ライブラリー No. 16；以下、技術マニュアル）に示すように、通常の生コンクリートと同様の混練、打ち込み、および養生からなる。ただし、流動性に関しては、低スランプ（5～10 cm）を指向した。

また、無定形の人工石材の製造においては、打ち込み後に適当な強度（3～10 N/mm²；養生1～3日目に相当するが、強度指数（結合材/水比）⁵⁾、および気温によって異なる）となったところでブレーカーによる粗破碎を行い石材形状に加工する工程と、製品サイズごとにふるい分ける

工程が入る。人工石材の製造工程を図1に示す。

2.1 使用原料および固化体のフレッシュ性状

固化体の製造に用いた原料の仕様を表2に示す。骨材となる製鋼スラグ（溶銑予備処理スラグ）は、エージングにより JIS A 5015 附属書2による水浸膨張比が0.6%、また技術マニュアル附属書3の測定方法による粉化率が0.25%となった倉敷地区製を使用した。高炉スラグ微粉末は、石膏を5%含むブレン値 4 400 cm²/g の JFE ミネラル福山製造所製を用いた。フライアッシュは中国電力（株）製の JIS II 種相当品とし、少ない粉体量でペーストの流動性を向上させるためのベアリング効果を期待して添加した。

固化体の配合を表3に、練り上がり直後、および30 min 後のフレッシュ性状を表4に示す。配合に占める予備処理スラグの重量比率は約78%と高比率となった。また、予備

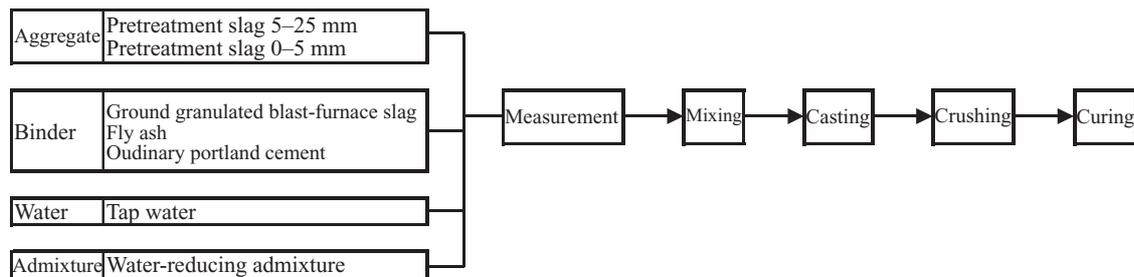


図1 製造フロー

Fig.1 Manufacturing process of Frontier rock™

表2 使用原料

Table 2 Specification of used materials

Material	Mark	Specification	Supplier	Density (g/cm ³)
Ground granulated blast-furnace slag	BP	Fineness: 4 400 cm ² /g	Fukuyama Works, JFE Mineral	2.89
Fly ash	FA	JIS II class	Chugoku Electric Power, Co., Inc.	2.2
Ordinary portland cement	C	—	Taiheiyo Cement Corp.	3.15
Pretreatment slag	PT	0-5 mm, 5-25 mm	Kurasiki Works, JFE Mineral	3.6*
Water-reducing admixture	Ad	21LV-B	Kao Corp.	—
Water	W	Tap water	—	—

*Density in saturated surface-dry condition

表3 配合表

Table 3 Specified mix proportion

Aggregate	Binder-water ratio (BP+2C+0.35FA)/W	s/a	Quantity of material per unit volume of concrete (kg/m ³)							Air content	Density (kg/m ³)
			W	BP	FA	C	PT: 0-5	PT: 5-25	Ad		
Pretreatment slag	2.6	60	174	316	63	57	1 279	832	2.61	2%	2 721

表4 フレッシュコンクリートの性状

Table 4 Properties of fresh concrete

Immediately after mixing				30 min after mixing			
Temperature (°C)	Slump (cm)	Air content (%)	Density (kg/m ³)	Temperature (°C)	Slump (cm)	Air content (%)	Density (kg/m ³)
26.3	10.5	4.2	2.64	26	5.5	4	2.65



写真1 打設, 破碎作業

Photo 1 Manufacturing process of Frontier rock™

処理スラグは0～5 mmの細骨材と、5～25 mmの粗骨材に分けて使用することで、細骨材率制御によって流動性の操作を可能とし、フライアッシュの使用と合わせて細骨材率60%で流動性が良くなることを見出した。練り上がり直後のスランプは10.5 cm、30 min後のスランプは5.5 cmとなった。このことから、コンクリート温度が26℃では、練り上がりから打設までは30 min以内とする必要があることが分かった。

2.2 打ち込みと粗破碎

練り上がったフレッシュな状態はアジテータ車（またはショベル）によって打ち込み場まで運搬され、人工石材の端材、および骨材スラグ（サイズは0～40 mm）からなる堰を利用して、300 mmおよび800 mmの高さに打ち込んだ。重機のバケットで掻き揚げても再流動化せず好適な打ち込み性が得られた。打ち込み後、バケットの底でエア面に揺動を加えて締め固めを行った。

打ち込み後数時間、凝結の始発タイミングで粗破碎サイズの目印となるマークを入れた。ブレイカーによる破碎は、固化体の圧縮強度が3 N/mm²以上、10 N/mm²以下で行った。これは、3 N/mm²未満では強度不足のため破碎時に粉分の発生が多くなること、また10 N/mm²を超えるとブレイカーへの負担が大きく破碎効率も低下するためである。

打ち込みから破碎までの作業の様子を写真1に示す。写真は約800 mm角の立方体（0.5 m³、1.2 t）を切り出しているところを示している。切り出した人工石材は、グリズリーを通して0～300 mm、300 mm以上、および800 mm角に分別回収し積み付けを行った。製品の分類としては、0～300 mmが岩ズリ相当、300～800 mmが捨石相当、800 mm角が被覆石などである。写真2に、100～300 kg/個サイズの捨石を示す。

2.3 強度と水素イオン濃度

山積みした人工石材は、出荷まで適宜散水し養生した。JISA 1108により、別途作製した円柱供試験体（φ100×200 mm；標準養生）を用いた圧縮強度の測定、また積み付け山の0～300 mmから採取した試料を用いた



写真2 100～300 kg/個サイズの捨石

Photo 2 Piled stone from 100–300 kg/piece in weight

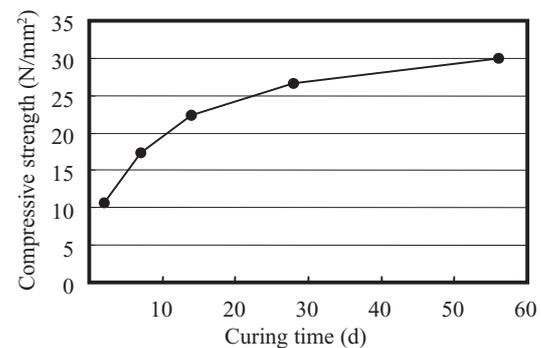


図2 供試体強度と標準養生日数の関係

Fig.2 Relation between compressive strength and curing time

水素イオン濃度の測定は、(社)地盤工学会基準 JGS0211-2000（修正法；人工海水の使用、液/個比=5、最大粒径50 mm、粒度分布は均等係数U_c=7）に準じて行った。出荷までの養生期間にわたって圧縮強度と海水浸漬時の水素イオン濃度を測定することで、出荷判定とした。

図2に圧縮強度の測定結果を示す。28日強度は26.6 N/mm²、56日では30 N/mm²となった。水素イオン濃度は、打ち込み後3週間の養生で海域への排水基準（9.0以下）を下回り、2ヶ月の養生では8.4未満となった。今回の試験施工向け各種石材は、2ヶ月以上養生し水素イオン濃度が8.4未満となったものを出荷した。

3. 石材の品質

表5に、JISA 5003に示される天然石材との比較と合わ

表5 人工石材と天然石材の品質比較 (JIS A 5003)
Table 5 Properties of Frontier rock™ and natural stone

Classification	Compressive strength (N/cm ²)	Reference value			
		Absorption (%)	Density (g/cm ³)	Bulk density (t/m ³)	Angle of internal friction (°)
Frontier Rock	3 000	From 8 to less than 10	From 2.4 to 2.6	From 1.2 to 1.7* ²	More than 35* ²
Hard stone	More than equal to 4 903	Less than 5	From 2.5 to 2.7	—	—
Semi-hard stone	From 981 to less than 4 903	From 5 to less than 15	From 2 to less than 2.5	—	—
Soft stone	Less than 981	More than 15	Less than 2	—	—

*¹Density in oven-dry condition*²Uc is more than 5

せて人工石材の特性を示す。人工石材の強度は準硬石相当であること、吸水率、密度(105℃乾燥状態)は、準硬石と同等であることが分かる。鉄鋼スラグ水和固化体は、天然骨材よりも高密度である製鋼スラグを材料とすることから(表乾密度は、製鋼スラグ2.8～3.6 g/cm³、天然骨材2.7～2.8 g/cm³)、密度で約2.5 g/cm³と普通コンクリートの2.3 g/cm³に比べて大きく、海洋環境において波浪安定性に優れることが期待される。

高密度や内部摩擦角は、石材の粒度分布によるので単純な比較はできないが、人工石材は準硬石相当の天然石材と同等以上の特性を有することを確認している⁶⁾。

4. 試験施工

JFE スチール西日本倉敷地区で試験製造した大型被覆石、およびJFE スチール東日本千葉地区で同様のプロセスで製造した藻礁の試験施工について述べる。

4.1 護岸補修工事

工事は、岡山県の許可を得て、台風で損壊した護岸の被覆石による補修の一部に試験的に採用されたものである。試験適用にあたっては、人工石材の密度が2.5 g/cm³と、硬石と同等であることから、被覆石としての性能(重量)が期待されたものである。

大きさが約800 mm角、重量が1.2 t/個の被覆石と、中詰め用の20～50 kg/個サイズ、合わせて124 m³の工事量であった。施工範囲は、干満帯から飛沫帯(天端部)にか

けての約5 m、長手方向は、約5～10 mであった。着工は2007年2月16日、工期は約2週間であった。施工状況を写真3に示す。施工にあたっては、厚さが均一で効率が良いとの評価を得ることができた。飛沫帯はコンクリート(水和固化体)にとって厳しい環境である。

施工後の定期的な目視観察において、10ヶ月経過後もひび割れや磨り減りなどの異常は見られず、製鋼スラグに含まれる地金の発錆は観察されたものの施工直後の良好な表面状態が維持されている。また干満帯においては、周囲の天然石と比較してアオサの付着量が多いことが分かった。

4.2 漁港沖藻礁敷設

千葉県南房総の漁業協同組合と共同で、アワビ、サザエなどの育成に適した藻場の造成試験を行った。敷設は2006年11月で、期待していた藻類の胞子が着生する時期(10月ごろ)よりも若干遅かった。人工の藻場内の深さ11 m地点に、比較材として地元産の硬質砂岩と並べて敷設した。敷設後6ヶ月経過した2007年5月に潜水調査を行い、藻類の生育状況の観察を行った。写真4に、藻類の生育状況の比較を示す。6ヶ月経過時に、人工石材は硬質砂岩と比較して藻類の大きさにおいて明らかに優れていることが分かる。

5. おわりに

鉄鋼スラグの高付加価値利用推進の手段として、鉄鋼スラグ水和固化体からなる人工石材「フロンティアロック



写真3 護岸補修工事

Photo 3 Appearance of bank protection work using Frontier rock™

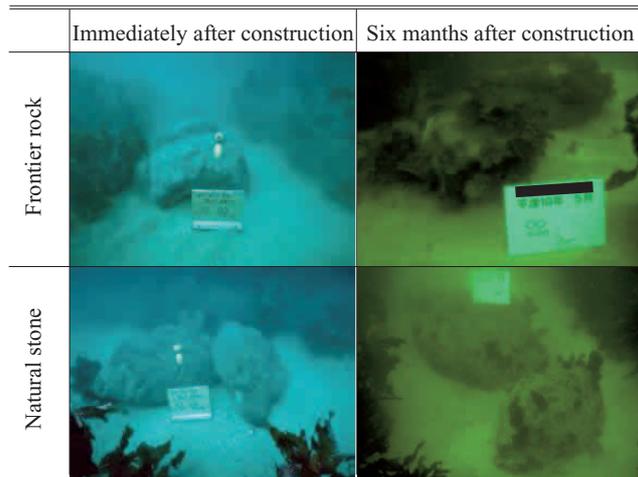


写真4 漁港沖での藻礁敷設

Photo 4 Appearance of the comparison examination of natural stone and Frontier rock™ for the creation of marine forest

ク™」を試作し、試用に供した結果、以下のことが分かった。

- (1) 舗装コンクリート並みの低スランプでも打ち込み可能、かつ良好な固化体性状が得られる施工方法を見出した。
- (2) 天然石（準硬石）と同等以上の特性を有することを確認した。
- (3) 低アルカリ溶出で、環境負荷が小さいことを明らかにした。
- (4) 天然石よりも生物付着性に優れることを明らかにした。

以上から、鉄鋼スラグ水和固化体は、港湾工事資材として天然石代替の利用が可能であると考えられる。今日の環

境問題を考えるに当たって、CO₂の削減、天然石材採取による自然破壊の防止などの観点から、リサイクル材からなる人工石材を天然石材の代替として利用する機会は拡大すると予想される。「フロンティアストーン™」（0～300 mmの小型石材）や「フロンティアロック™」（5 kg/個以上の大型品）は、これら社会的要求に十分応えうる基礎資材になるものと考えられる。

参考文献

- 1) 平成18年度鉄鋼スラグ生産・利用状況。鉄鋼スラグ協会。2007。
- 2) 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本的性状および港湾構造物への適用性に関する研究。港湾技研資料。2001，no.990，p.1-18。
- 3) 松永久宏，小菊史男，高木正人，谷敷多穂。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。2003，vol.41，no.4。
- 4) 鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル。（財）沿岸技術研究センター。沿岸開発技術ライブラリー2003。no.16。
- 5) 鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル改訂版。沿岸技術研究センター。2007。
- 6) 沿岸技術研究センター。港湾関連民間技術の確認審査報告書07001号。2007。



宇田川悦郎



松永 久宏