

鉄鋼スラグから製造した環境にやさしい固化体 「フェロフォーム[®]」

Environment-Friendly Block, “Ferroform,” Made from Steel Slag

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)
谷敷 多穂 TANISHIKI Kazuho JFE スチール 西日本製鉄所 企画部土木・建築室 主任部員(課長)
辻本 和仁 TSUZIMOTO Kazuhito JFE スチール 建材センター 建材技術部土木技術室 主任部員(課長)

要旨

骨材に製鋼スラグ、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「フェロフォーム[®]」を開発した。フェロフォームは、コンクリートと同様な強度特性・耐久性を有し、コンクリートや準硬石代替材としての利用が可能である。フェロフォームは、これまでに水島港における護岸補強工事および防潮堤築造工事において、各種ブロックや人工石材として使用されている。また、フレッシュコンクリート代替としても使用されている。

Abstract:

A new environment-friendly block, called “Ferroform,” consisting mainly of steelmaking slag (corresponds to aggregate), ground granulated blast furnace slag (corresponds to binder) was developed. Ferroform has the same strength and durability as concrete. It can be used a substitute for concrete blocks, natural stones and fresh concrete. In repair work at Mizushima Port, 150 000 t of Ferroform were used as cover blocks and artificial stones.

1. はじめに

大量生産・大量消費・大量廃棄型の社会から、物質の効率的な利用やリサイクルを進めることにより、天然資源の消費を抑制し、環境への負荷を低減することを目的に、循環型社会形成推進基本法が2000年に制定された。鉄鋼業においても、鉄鋼製造工程において副産物として生成する鉄鋼スラグの減量化、並びに鉄鋼スラグ製品の製造・加工・利用技術の開発を続けている。

鉄鋼スラグは、生成する工程により高炉スラグと製鋼スラグに大別される。わが国における生成量は、2007年度において高炉スラグが2477万トン、製鉄スラグが1387万トンである¹⁾。高炉スラグは、高炉セメントの原料および道路用路盤材などとして、100%が有効利用されている。一方、製鋼スラグは、有効利用率が98%と高いものの、土木工用仮設道路材などの比較的付加価値の低い用途としての利用にとどまっている¹⁾。

このような背景のもと、製鋼スラグの新しい利用技術として、骨材に製鋼スラグ、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「フェロフォーム[®]」を開発した^{2,3)}。フェロフォームは、コンクリート代替および準硬石相当の天然石代替としての利用が可能であり、JFE スチールでは被覆ブロックなどの異型ブロック、捨石代替材などの港湾工用材料として、積極的に使用してきた。また、JFE スチールと新日本製鐵(株)は、(独)港湾空港技術研究所および(財)沿岸技術研究センターと共同で鉄鋼スラグ水和固化体を港湾工事材料として適用する技術を検討し、2003年には沿岸技術研究センターより技術マニュアル⁴⁾が、2007年にはその改訂版⁵⁾が発刊されている。さらに、フェロフォームを適切に破砕して製造した人工石材は、JFE スチール、新日本製鐵(株)、東亜建設工業(株)の3社共同で依頼した沿岸技術研究センターが定める港湾関連民間技術の確認審査・評価事業において、2007年11月に評価証が授与された。

本稿では、フェロフォームの基本特性と港湾などの実工事への活用事例について紹介する。

2. フェロフォームの基本特性

2.1 製造方法

普通コンクリート(以下、コンクリート)と比較したフェ

2007年11月6日受付

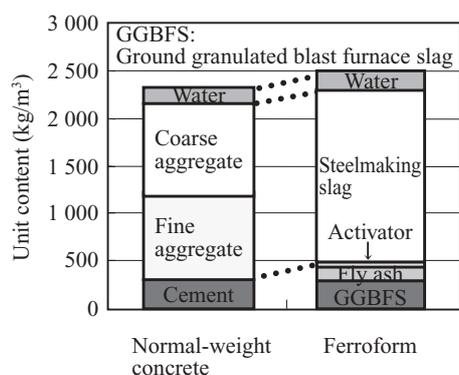


図1 普通コンクリートとフェロフォームの配合の比較
Fig.1 Comparison between Normal-weight concrete and Ferroform

フェロフォームの配合例を図1に示す。フェロフォームでは、コンクリートの細骨材および粗骨材に相当する材料が製鋼スラグであり、セメントに相当する材料が高炉スラグ微粉末（熔融状態の高炉スラグを水により急冷・細粒化した後、乾燥・微粉碎して得られた微粉末）、フライアッシュおよびアルカリ刺激材（石灰ダスト、消石灰、セメントなど）である。これらのうち、必須材料は、製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末および水である。回収水などの水を使用すれば、すべてリサイクル材料からフェロフォームを製造することも可能である。

フェロフォームは、コンクリートと同様に、これらの材料を練混ぜ、打込み、養生することにより製造する。したがって、製造にはコンクリート用の設備を用いることができる。

2.2 強度・密度特性

圧縮強度の経時変化を図2に示す。また、本章の実験で用いた配合を表1に示す。フェロフォームは、コンクリートと同様に材齢とともに強度が増加する。この理由は、結合材である高炉スラグ微粉末やフライアッシュの硬化反応が長期間にわたり持続するためと考えられる。なお、コンクリートの圧縮強度は、水セメント比（W/C）と相関性があることが知られている⁶⁾が、フェロフォームも材料に用

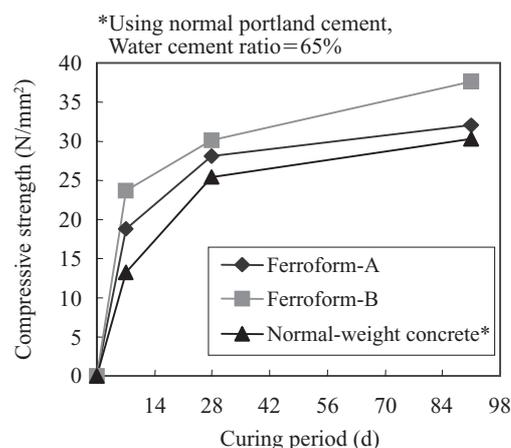


図2 圧縮強度の経時変化
Fig.2 Relation between compressive strength and the curing period

いる高炉スラグ微粉末、アルカリ刺激材、フライアッシュと水の配合量を指標として、圧縮強度の制御が可能である⁵⁾。なお、フェロフォームの強度設計の範囲は、一般的には材齢28日において35 N/mm²程度以下である。この強度範囲は、コンクリートでは普通コンクリート、石材では準硬石の範疇である。

フェロフォームの引張強度、曲げ強度、ヤング係数およびすりへり係数などの力学的特性は、コンクリートと同様に圧縮強度と相関性がある。フェロフォームの各種特性値

表2 フェロフォームと普通コンクリートの各種特性の比較
Table 2 Comparison of various properties between Ferroform and normal-weight concrete

| Item | Ferroform | Normal-weight concrete |
|--|-----------|------------------------|
| Young's modulus* (kN/mm ²) | 24 | 25 |
| Tensile strength* (N/mm ²) | 2.2 | 1.9 |
| Flexural strength* (N/mm ²) | 4.0 | 3.4 |
| Abrasive coefficient** (cm ³ /cm ²) | 0.04 | 0.09 |
| Density (t/m ³) | 2.4-2.6 | 2.3 |
| Median pore size (μm) | 0.02 | 0.09 |

*Compressive strength 24 N/mm² **30 N/mm²

表1 本室内試験におけるフェロフォームの示方配合
Table 1 Mixture proportions of Ferroform used in this study

| Number | Slump (cm) | Air (%) | Unit content (kg/m ³) | | | | | | Water reducing agent (g/m ³) |
|--------|------------|---------|-----------------------------------|-------|-----------|----|---------|-------------------|--|
| | | | Water | GGBFS | Activator | | Fly ash | Steel-making slag | |
| | | | | | CH | NP | | | |
| A | 17.5 | 2.2 | 202 | 300 | 0 | 50 | 97 | 2 019 | 2 682 |
| B | 19.5 | 2.8 | 187 | 300 | 0 | 50 | 130 | 2 019 | 4 796 |
| C | — | 2.0 | 173 | 413 | 0 | 83 | 83 | 1 920 | 5 780 |
| D | 22.0 | 3.0 | 186 | 371 | 37 | 0 | 273 | 1 527 | 2 700 |
| E | 18.0 | 3.1 | 245 | 420 | 42 | 0 | 210 | 1 470 | 2 520 |

GGBFS : Ground granulated blast furnace slag
CH : Calcium hydroxide NP : Normal portland cement

を表2に示す。引張強度、曲げ強度などの強度特性値は、ブロック類の一般的な配合強度である圧縮強度 24 N/mm^2 における値を示した。フェロフォームの引張強度、曲げ強度およびヤング係数は、コンクリートとほぼ同様な値である。したがって、コンクリートと同様な強度設計をすることが可能である。

また、フェロフォームは、天然骨材よりも高密度である製鋼スラグを材料に用いることから（表乾密度：製鋼スラグ $2.8 \sim 3.6 \text{ g/cm}^3$ 、天然骨材 $2.7 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$ ）、その単位容積質量は、標準的な配合で $2.4 \sim 2.6 \text{ t/m}^3$ （普通コンクリート 2.3 t/m^3 ）と大きくなり、海洋環境において動構造物として使用した場合、波浪安定性に優れる特長を有する。

2.3 耐久性

フェロフォームを港湾構造物として使用する場合、その耐久性指標は、強度だけでなく漂砂による摩耗や波浪による衝撃なども考慮する必要がある。そこで、ASTM（米国材料試験協会）C418-98によるすりへり特性と曲げ疲労特性をコンクリートと比較した。

すりへり係数は、表2に示したようにコンクリートよりも小さいことから、海洋環境下での漂砂による摩耗に対する耐久性に優れることが期待できる。

フェロフォームと普通コンクリートの曲げ疲労寿命を図3に示す。本実験では、曲げ強度の60%の応力を7Hzで繰り返し与え疲労寿命を測定した。フェロフォームと普通コンクリートの曲げ疲労寿命は同等であることから、波浪の衝撃に対する耐久性も同等であると考えられる。

$\phi 125 \times 250 \text{ mm}$ のフェロフォーム製試験体を実海域の飛沫帯、干満帯および海中へ暴露した際の圧縮強度の変化を図4に示す⁵⁾。圧縮強度は、暴露1ヶ月から1年になると、飛沫帯、干満帯および海中においてほぼ同様に増加している。また、暴露1年から6年になってもほとんど変わらない。

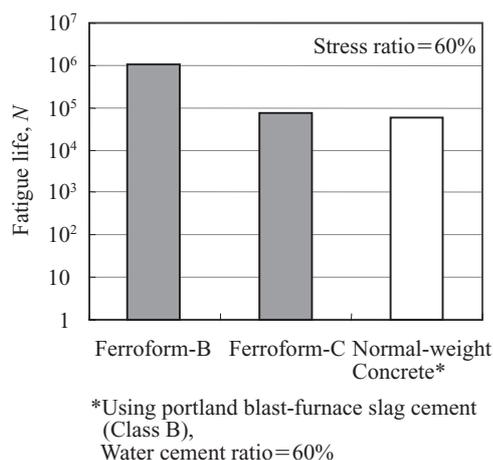


図3 フェロフォームと普通コンクリートの曲げ疲労寿命の比較
Fig.3 Comparison of fatigue life of flexure between Ferroform and normal-weight concrete

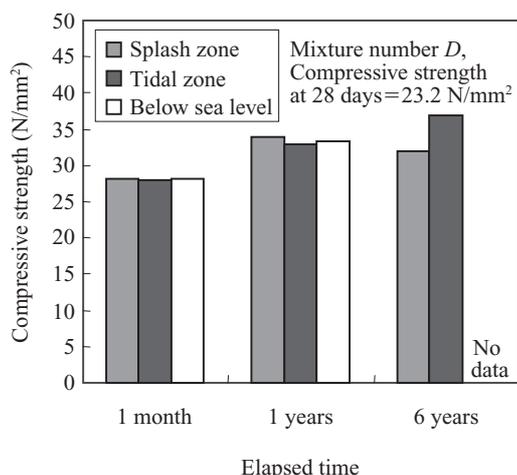


図4 海域へ暴露したフェロフォームの圧縮強度の変化
Fig.4 Change in compressive strength of Ferroform blocks when exposed to the sea

い。

これらの結果より、フェロフォームの海洋環境下における必要な耐久性は、確保されていると考えられる。

2.4 環境への影響

直径 $100 \text{ mm} \times$ 高さ 200 mm の供試体を体積比で10倍の人工海水へ浸漬した後の海水の水素イオン濃度変化を図5に示す。フェロフォームは、普通ポルトランドセメントや高炉セメントを使用したコンクリートに比べて海水の水素イオン濃度上昇が小さく、アルカリ成分の溶出が少ない。すなわち、施工後の環境負荷を小さくすることができる。アルカリ成分の溶出が少ない理由は、主な結合材である高炉スラグ微粉末が普通ポルトランドセメントや高炉セメントよりも低アルカリ性であるためと考えられる。

なお、有害成分の溶出については、フェロフォームだけ

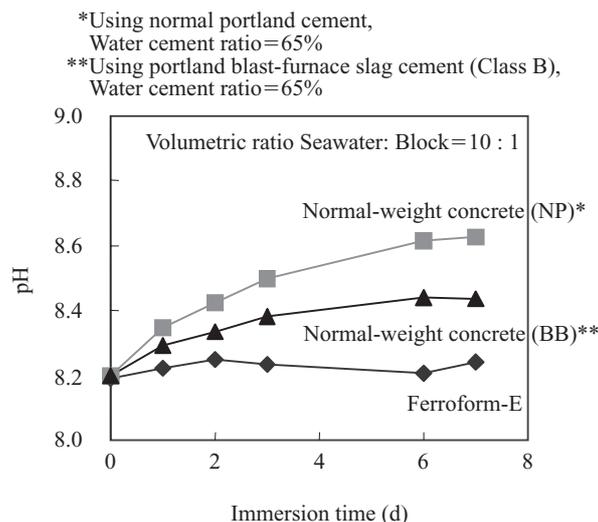


図5 試験体を人工海水へ浸漬した際の水素イオン濃度変化
Fig.5 Change in artificial seawater pH observed after the immersion of the test blocks in the laboratory

でなく、材料に用いる製鋼スラグについても、海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律（水底土砂に係わる判定基準）を満たすことを確認している。

3. 施工事例

3.1 コンクリートブロック・天然石代替としての使用

JFE スチール西日本製鉄所倉敷地区（水島港）での護岸補修工事（工期 2000～2002 年）において、フェロフォーム製人工石材および被覆ブロックを合計で約 15 万トン製造・施工した。フェロフォームの練混ぜには連続式ミキサを用いた。被覆ブロック（9.8t/個）は通常のコンクリートブロックと同様に型枠に打ち込み・養生して製造した。また、人工石材（10～200 kg/個）は、ヤードに打込んだフェロフォームをコンクリート破砕機により適切に粗破砕して製造した。

護岸補修工事の状況を写真 1 に示す。この工事では外海に面する延長 652 m の施工区域に、36 000 t の人工石材をグラブ船から海上より投入、潜水士による仕上げ整形を行った後、起重機船を用いて 7 600 t（776 個）の被覆ブロックを据付けた。フェロフォーム製人工石材および被覆ブロックは、天然石材やコンクリートブロックと同様の取扱いが可能であった。

この工事区域では、施工 1.5 年後には藻場が自然に形成された。刈取った海藻類を写真 2 に示す。着生していた海藻は、主にホンダワラ類（*Sargassum* sp.）およびワカメ（*Undaria* sp.）である。小動物を含めた生物付着量（湿重量）は、15 kg/m² と多量であった。これより、フェロフォームは、海藻類の着生に優れ、藻場形成による沿岸の環境修復効果もあることが分かった。

また、JFE スチール西日本製鉄所倉敷地区における防潮堤築造工事（工期 2005～2006 年）において、大型張りブロック（1 000 mm × 1 000 mm × 200 mm）として使用した。

ブロックの成型は写真 3⁵⁾ に示すように振動・加圧成形



Installation of artificial stones Installation of cover blocks

写真 1 人工石材および被覆ブロックを用いた護岸補修工事の状況

Photo 1 Execution of port and harbor construction using artificial stones and cover blocks

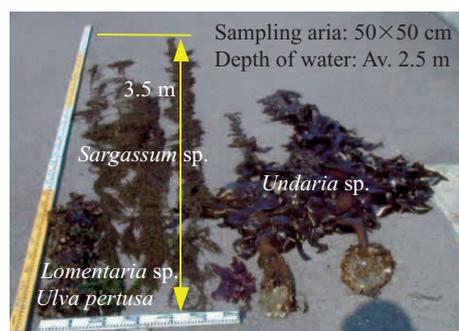
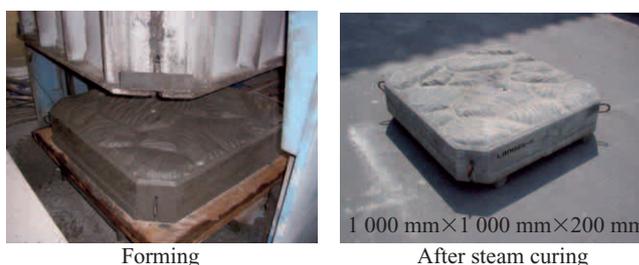


写真 2 施工 1.5 年後にフェロフォーム製被覆ブロックに付着していた海藻

Photo 2 Adhered seaweeds on coverblock made from Ferroform at 1.5 years after completion



Forming

After steam curing

写真 3 防潮堤用フェロフォーム製ブロックの製造状況

Photo 3 Production of Ferroform blocks for seawall



写真 4 フェロフォーム製ブロックを用いた防潮堤

Photo 4 After completion of seawall construction using Ferroform blocks

（即時脱型成形）、養生は蒸気養生とし、4 ヶ月で約 12 000 枚を工場内で製造した。振動・加圧成形性は、コンクリート製ブロックと同等であった。製造後のブロックは、写真 4 に示すように防潮堤（総延長 1 500 m）法面へ据付けた。

このように、フェロフォームは、振動・加圧成形による大型製品の大量製造も可能である。

3.2 フレッシュコンクリート代替としての使用

JFE スチール東日本製鉄所千葉地区の地下埋め戻し工事（2003 年）において、フレッシュコンクリート代替として使用した。練混ぜ・出荷量は、延べ 13 日間で 3 492 m³（平均 269 m³/日）である。

練混ぜたフレッシュな状態のフェロフォームは、コンク



placing by concrete pump

On placing

写真5 フェロフォームをフレッシュコンクリート代替として用いた地下埋め戻し工事の状況

Photo 5 Execution of fill in the basement by using fresh Ferroform

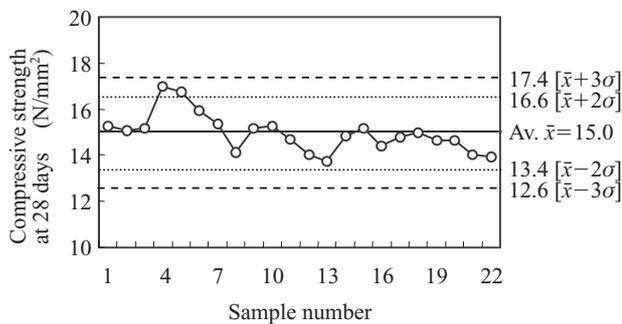


図6 材齢28日圧縮強度の変動

Fig.6 Fluctuation of compressive strength at 28 days

リートポンプを用いて吐出量 60 m³/h、管径 125 mm、水平換算距離 150 m の条件で圧送し、所定場所へ打設した。写真5に施工状況を示す。スランプの設定値は 21 cm である。高スランプであるにもかかわらず、材料分離などは見られず、良好なポンパビリティであった。

本製造における材齢 28 日圧縮強度の変動を図 6 に示す⁵⁾。配合強度 15 N/mm² に対して、平均圧縮強度は 15.0 N/mm²、変動係数は 5% である。良好な管理がなされているレディーミクストコンクリート工場の変動係数は 10% 以下であること⁶⁾ から、フェロフォームの強度は、コンクリートと同程度に管理できると考えられる。

フェロフォームは、港湾工事用のコンクリートブロックおよび天然石代替としてだけでなく、本工事のように埋め

戻しなどとして用いられるフレッシュコンクリート代替としての使用も可能である。

4. おわりに

骨材に製鋼スラグ、結合材に高炉スラグ微粉末を用いた鉄鋼スラグ水和固化体「フェロフォーム」は、コンクリートと同様な強度特性および耐久性を有する。また、コンクリートよりもアルカリ成分の溶出性が小さい。

フェロフォームは、主にコンクリートブロックおよび準硬石相当の天然石代替として港湾工事において使用されている。また、埋め戻しなどとして用いられるフレッシュコンクリート代替としての使用も可能である。

JFE グループでは、鉄鋼スラグの新しい利用技術を開発し、循環型社会形成に貢献したいと考えている。

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. 沿岸開発技術研究センター. 沿岸開発技術ライブラリー No. 16. 2003.
- 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) コンクリート技術の要点 '01. 日本コンクリート工学協会. 2001.



松永 久宏



谷敷 多穂



辻本 和仁