

循環型社会に貢献する鉄鋼スラグの利用技術

New Application of Iron and Steelmaking Slag, Contributing to Recycling-Oriented Society

藪田 和哉 YABUTA Kazuya 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(副部長)・工博
戸澤 宏一 TOZAWA Hirokazu JFE スチール スチール研究所 スラグ・耐火物研究部長
高橋 達人 TAKAHASHI Tatsuhito JFE スチール 技術企画部 主任部員(部長)・工博

要旨

鉄鋼スラグは、鉄鋼製造工程において副産物として生成する。これまで、鉄鋼スラグは、セメントや土木用骨材として広く利用されている。本稿では、JFE スチールグループで開発した、天然骨材をまったく使用せずスラグを主原料とした環境調和型ブロック「フェロフォーム」、高炉水砕スラグ覆砂材や鉄鋼スラグ炭酸固化体「マリンプロック」の沿岸環境改善材、ヒートアイランド抑止保水材について紹介する。

Abstract:

Iron and steelmaking slag is a by-product of an iron and steelmaking process. Slag has been widely used for cement, road construction and concrete aggregate. JFE Steel Group has been promoting new effective use of slag and gets ahead of other companies. This paper introduces an environment-conscious block (Ferroform) which excludes natural aggregate, a sand capping material and a large carbonic solid (Marine Blocks) to improve the environment of sea area and a water-retaining material for pavement to reduce urban heat island phenomena.

1. 緒言

近年、地球温暖化や環境破壊が顕在化し地球環境問題に関する関心が高まり、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重要視されてきている。鉄鋼産業においても、鉄鋼製造過程で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。

我が国における鉄鋼スラグは、年間3658万トン(2003年度実績)が生産されている。鉄鋼スラグは、高炉において銑鉄を製造する過程で副生する高炉スラグと、転炉または電気炉などにおいて鋼を製造する過程で副生する製鋼スラグに大別される。それぞれの量は、前者が2435万トン、後者が約1222万トンである。

これらの鉄鋼スラグは、有用なりサイクル資材として、セメント、路盤材、コンクリート骨材など主として土木分野において活用されており、そのリサイクル率はほぼ100%であり、循環型社会の構築に大きく貢献している。しかし、近年の公共事業縮小や再生路盤材、フライアッシュなどのリサイクル資材との競合により、これまで主要用途であった分野への需要が顕著に減少する傾向にあり、新たな利用技術の開発が急務となっている。

このような背景のもと、JFE スチールグループでは、鉄鋼スラグの新しい利用技術として、(1)コンクリートの代替が可能な環境調和型ブロック「フェロフォーム」、(2)沿岸海域環境修復材料「マリンプロック」、および「マリンベース」、(3)ヒートアイランド抑止保水材を開発・販売している。本稿では、これらの循環型社会に貢献する鉄鋼スラグの新しい利用技術について紹介する。

2. 鉄鋼スラグを用いた環境調和型ブロック「フェロフォーム」の開発

高炉スラグ微粉末を結合材として、石炭火力発電所の副産物であるフライアッシュを混和材として用いた環境調和型ブロックを開発した¹⁻³⁾。

このブロックは、普通コンクリートに比べて、(1)密度が高い、(2)アルカリ成分の溶出性が低い、(3)耐摩耗性に優れる、(4)沿岸環境下における生物付着性に優れるなどの特長があり、「フェロフォーム(鉄鋼スラグ水和固化体)」と名付けて消波ブロック、被覆ブロックなどの異形ブロック、ケーソンの上部工、捨石代替材などの港湾土木材料向けに積極的に展開してきた。ここでは、環境調和型ブロック「フェロフォーム」の諸特性と港湾工事における適用例について紹介する。

2.1 フェロフォームの基本特性

2.1.1 製造方法

普通コンクリートと比較したフェロフォームの配合例を Fig. 1 に示す。フェロフォームでは、コンクリートのセメントに相当する材料が高炉スラグ微粉末、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）であり、細骨材および粗骨材に相当する材料が製鋼スラグである。フェロフォームは、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。この工程は、コンクリートと同じであり、コンクリート用の製造設備をそのまま使用することができる。

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 ~ 3.6 g/cm³，天然骨材 2.7 ~ 2.8 g/cm³），その単位容積質量は、標準的な配合で 2.4 ~ 2.6 t/m³（普通コンクリート約 2.3 t/m³）と大きくなり、沿岸環境において動的な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。

2.1.2 硬化後の特性

圧縮強度の経時変化を Fig. 2 に示す。フェロフォームの強度発現挙動は、普通コンクリートと同様に材齢とともに増加する。フェロフォームは、材齢 91 日強度が 28 日強度の 1.3 倍程度であり、91 日以降も強度が増加し、コンクリート⁴⁾よりも長期強度の伸びが大きい。この理由として、硬化反応が長期間にわたり継続することが考えられる。

その他の特性を Table 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。静弾性係数はやや小さいことから、コンクリートよりも柔らかい材料である。また、すりへり係数がコンクリートの約 1/2 と小さく、沿岸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。さらに、細孔径が小さく緻密であるため、塩分が浸透しにくい特徴を有する。

直径 100 mm × 高さ 200 mm の供試体を人工海水へ浸漬した後の海水の pH 変化を Fig. 3 に示す。フェロフォームは、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに

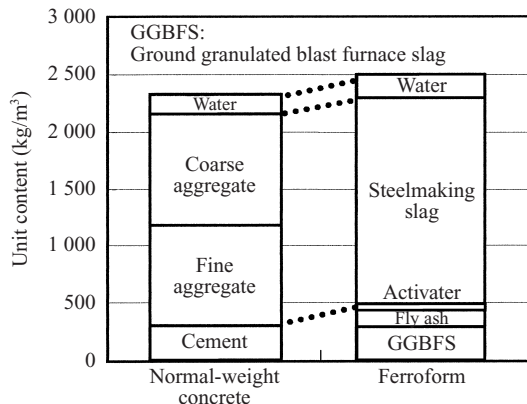


Fig. 1 Comparison between normal-weight concrete and Ferroform

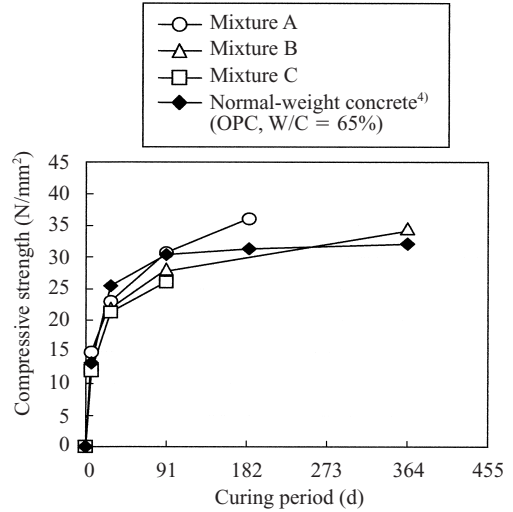


Fig. 2 Relation between compressive strength and curing period

Table 1 Comparison of mechanical properties between Ferroform and normal-weight concrete

| Item | Ferroform | Normal-weight concrete |
|---|-------------|------------------------|
| Modulus of elasticity* (N/mm ²) | 21 500 | 26 100 |
| Tensile strength* (N/mm ²) | 2.14 | 2.22 |
| Flexural strength* (N/mm ²) | 3.89 | 4.05 |
| Abrasive coefficient* (cm ³ /cm ²) | 0.043 | 0.095 |
| Density (kg/m ³) | 2 400–2 600 | 2 300 |
| Median pore size (μm) | 0.02 | 0.09 |

* Compressive strength: 30 N/mm²

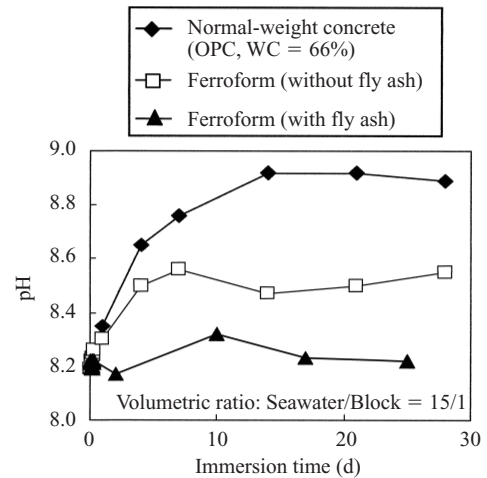


Fig. 3 Change in seawater pH observed after immersion of the test blocks in the laboratory

比べて海水の pH 上昇が小さく、アルカリ成分の溶出が少ない。特に、フライアッシュを配合すると、pH 上昇はほとんどない。この理由として、主な結合材である高炉スラグ微粉末は、普通ポルトランドセメントよりも低アルカリ性であること、またフライアッシュは SiO₂ が主成分であり、より低アルカリ性であることがあげられる。

2.1.3 沿岸環境下における生物付着性

1999 年 12 月にフェロフォームおよびコンクリートから

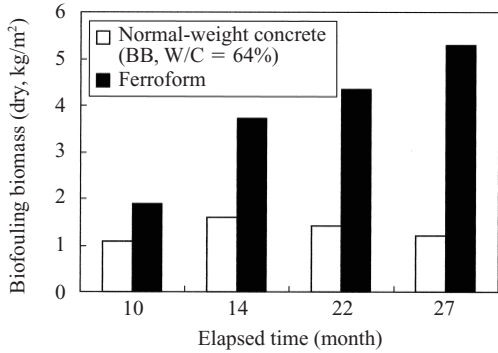


Fig. 4 Change in biomass of biofouling organisms on the Ferroform block and normal-weight concrete block when exposed to the sea

なる高さ約 2.0 m の 5 トン型消波ブロックを製造し、2000 年 2 月に瀬戸内海の岡山県水島港の干満帯で暴露した。付着生物は、消波ブロックの 4 ヶ所から、それぞれ面積 20 × 20 cm の正方形部分を刈り取り、60°C で 24 h 乾燥後の質量測定および生物種の同定を行った。

付着生物質量の経時変化を Fig. 4 に示す。付着生物質量は、コンクリートでは経過時間によりほとんど変わらないが、フェロフォームでは経過時間とともに増加した。付着生物の種類は、コンクリートの場合では 10 ヶ月後では 17 種類と少なく、時間とともに徐々に増加したが、フェロフォームの場合には 10 ヶ月後の段階から 32 種類と多かった。

フェロフォームは、主な材料である製鋼スラッグ中に生物の成育に必須の元素である Fe, Si などを含むこと、またアルカリ成分の溶出性が小さいため、生物の成育環境としてコンクリートよりも好適になると考えられる。

2.2 大規模工事への適用例

JFE スチール西日本製鉄所倉敷地区での護岸補修工事（工期 2000 年 9 月～2002 年 9 月）において、フェロフォームを用いた人工石材および被覆ブロックを製造・施工した。練混ぜには連続式ミキサを用い、被覆ブロックは通常のコンクリートブロックと同様に型枠に流込み・養生することにより製造した。また、人工石材はヤードに打込んだフェロフォームを粗破砕することにより製造した。

護岸補修工事状況の例を Photo 1 に示す。この工事では内海に面する延長 652 m の施工区域に、36 千トン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、起重機船を用いて重量約 10 トンの被覆ブロックを 776 個据付けた。フェロフォーム製の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り扱いが可能であった。

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、多くの生物の生息が確認された。また施工 1.5 年後には、Photo 2 に示すようにホンダワラ類およびワカメを主とする藻場が形成され、護岸補修効果だけでなく、環境

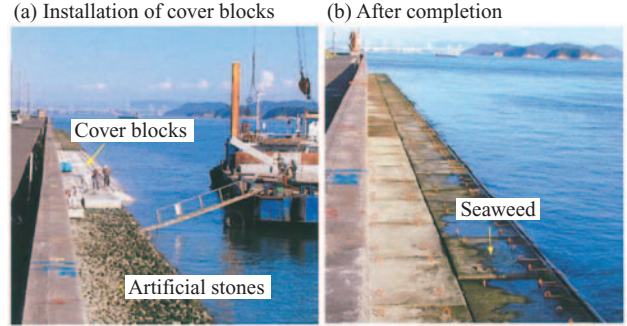


Photo 1 Execution of port and harbor construction using artificial stones and cover blocks

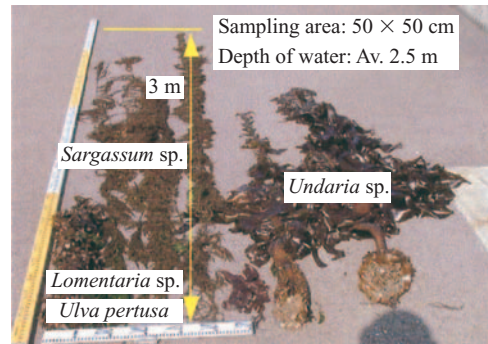


Photo 2 Adhered seaweeds on coverblock made from Ferroform at 1.5 years after completion

修復効果も大きい。

2003 年 3 月には、沿岸開発技術ライブラリー No. 16 として鉄鋼スラッグ固化体技術マニュアル⁵⁾が発刊され、国土交通省直轄工事 2 件を含め、これまでに 17 万トンを製造・施工しており、環境調和型ブロックとしての普及が期待されている。

3. 鉄鋼スラッグによる沿岸環境改善技術

高度経済成長にともなう沿岸域の過度の開発による藻場の激減、水産資源の大幅な減少というような海岸、沿岸域の自然環境の劣化にあつて、美しい海環境の回復に対する取り組みが全国的に本格化しており、国会でも自然再生推進法（平成 14 年法律第 148 号）が立法化されている。瀬戸内海においても、海砂利採取問題を契機として、貴重な自然や生態系の保全、修復についての関心が高まっており、今後、地域の特性に応じた新たな環境修復・創造施策を展開していくことが求められている。

ここでは、高炉水砕スラッグ覆砂材「マリンベース」、藻場造成礁「マリブロック」、鉄鋼スラッグを組合せた浅場造成による環境改善技術について紹介する。

3.1 高炉水砕スラッグ覆砂材「マリンベース」

3.1.1 H₂S 発生抑制効果

高炉水砕スラッグを底泥の堆積した海底に設置し、水砕ス

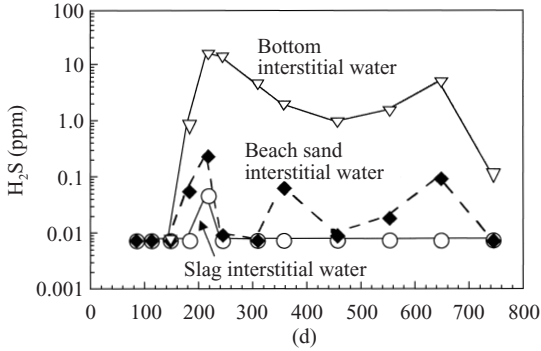


Fig.5 Change of H₂S in seawaters

スラグ間隙水などの硫化水素濃度を測定した結果⁶⁾をFig.5に示す。水砕スラグ間隙水の硫化水素は、2年間にわたり、底泥間隙水、海砂間隙水よりも大幅に小さい値で推移した。水砕スラグは、間隙水のpHが8.2～8.6で推移しており⁶⁾、硫酸還元菌の活性を弱め⁷⁾、硫酸還元菌による海水中硫酸イオンの還元を抑制したと考えられる。これは、水砕スラグが、硫化水素の発生を積極的に抑制する特性を有し、天然砂以上の青潮発生抑制効果があることを示唆している。

3.1.2 ケイ酸塩供給効果

底泥が堆積した海底に水砕スラグを設置して容器で覆い、容器内部の海水のケイ酸塩濃度を測定した結果、水砕スラグ設置区は底泥区よりも高いケイ酸塩濃度を示し、海水中へケイ酸塩を供給することが明らかになった⁷⁾。また、ケイ藻は渦鞭毛藻の競合種であり、ケイ藻類による赤潮予防の可能性も指摘されている⁸⁾。水砕スラグのケイ酸塩供給効果は、海の生産性向上と渦鞭毛藻赤潮抑制の可能性を有している。

3.2 藻場造成礁「マリンプロック」

藻場造成礁「マリンプロック」は、製鋼工程から発生するスラグを原料として成型し、この成型体にCO₂を吹き込むことにより製造される。マリンプロックの組織をPhoto3に示す。スラグ粒子の周囲に数十～百μm厚さの珊瑚や貝殻と同じ炭酸カルシウムを主成分とする被膜が存在し、その組織がネットワーク状に広がっている構造である。このブロックの単位容積質量は2.0～2.4t/m³、気孔率は25～42%、圧縮強度は10～19N/mm²であり、一般のポーラスコンクリートと同様である⁹⁾。

1997年より、藻場造成礁としての機能評価のために、全国10ヶ所の海域で、コンクリートブロックとの比較試験を実施している。どの海域においても、コンクリートブロックを上回る藻の着生効果が認められた。Photo4には、神奈川県城ヶ島海域に設置したマリンプロックを、7ヶ月後の2002年7月に撮影した概観を示す。コンクリート上面にはほとんど藻が着生しないのに対し、マリンプロックでは、ブロックが認識できないほど、藻が着生している。これは、

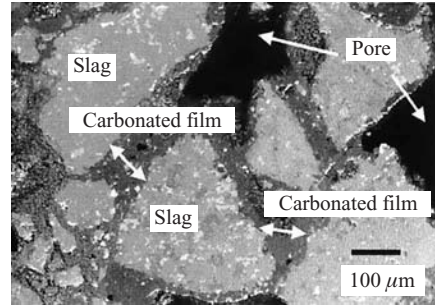


Photo 3 Microstructure of “Marine Block”



Concrete block “Marine block”

Photo 4 Comparison between “Marine Block” (1 × 1 × 1 m) and portland cement concrete block in ocean at Jyogashima, Kanagawa Pref.

マリンプロック表面の炭酸カルシウムの生物親和性が大きいと考えている。

3.3 鉄鋼スラグによる浅場造成

3.3.1 浅場造成

広島県因島市椋浦地区を試験海域とし、2002年3月に製鋼スラグ塊および水砕スラグ「マリンプラス」を敷設して約30m×20mの浅場を設け、マリンプロックを20個沈設した(Fig.6)。浅場モデル完工後、約2年間にわたり、生物着生機能について検証した。本浅場モデルの造成は、2001年度の広島県環境関連産業創出推進協議会の補助事業として実施した。

3.3.2 浅場への生物着生

Fig.7に、水砕スラグ区および浅場区域外の原地盤砂泥区における生物数、湿重量、種類数の推移を示す。水砕スラグ覆砂区では、総出現個体数、湿重量、種類数いずれも、原地盤砂泥区を大幅に上回っている結果であった。

一方、マリンプロックには、アカモク、ボウアオノリ、フクリンアミジなど計12種類の海藻が観察された。2003年2月では、一年生の大型海藻であるアカモク、シダモク、タマハハキモクが水面上からも容易に観察できるほど生長した。2004年2月では、アカモク、シダモクなどが再生産されていたほか、多年生の大型褐藻類のノコギリモク、クロモも確認された。

これらの結果から、水砕スラグおよびマリンプロックを用いた浅場が、天然の浅場と同様に多種多様な生物の生息する環境を創造し、浅場に求められる機能を有することが明らかとなった。

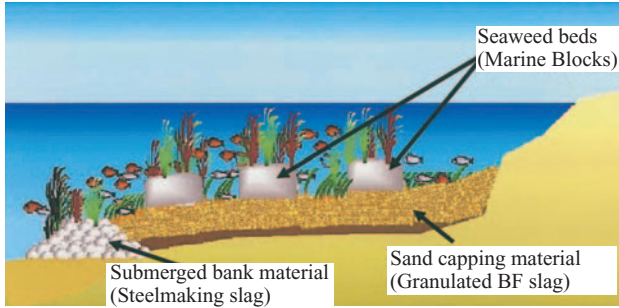


Fig. 6 Scheme of coastal environment restoration model by using steelmaking slag

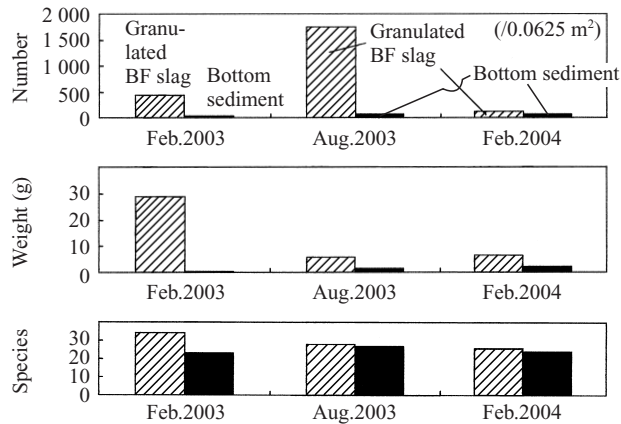


Fig. 7 Observational results of benthonic organisms

4. ヒートアイランド抑止舗装用保水材

都心部の気温が郊外に比べて高くなるヒートアイランド現象が、都市型環境問題として深刻化している。建物やアスファルト舗装など地表面被覆の人工物が原因の一つと考えられ、水を内部に保持する道路構造（保水性舗装）を舗装面の50%に導入することなどの対策で、気温30°Cを超える地域・時間が現状より約21%減少すると予測されている¹⁰⁾。JFEスチールグループは、鉄鋼副産物である高炉スラッグを原料とした保水材およびそれを排水性アスファルト舗装空隙に部分的に注入した透排水性を兼備した保水性舗装を開発した。

高炉スラッグ微粉末に副原料を組み合わせた保水材に水を加えて混練し、スラリーを打設・養生すると無数の気孔を持つ硬化体となる。硬化体の特徴は以下のとおりである。

- (1) 気孔率は0.6～0.65 ml/gで、1μm付近にシャープな気孔径分布を持ち、路面冷却性および冷却効果の持続性に優れる。
- (2) 鉄鋼副産物を原料に用いたりサイクル製品であり、かつ有害成分の溶出がない。

4.1 部分注入型保水性舗装

スラリーを排水性アスファルト舗装などの空隙に部分注入した舗装（部分注入型保水性舗装、Fig. 8）は、舗装空隙

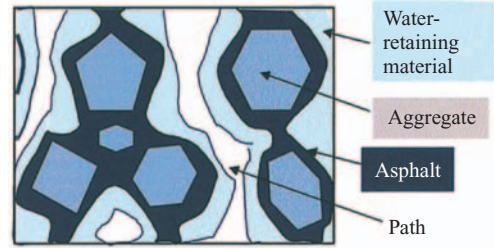


Fig. 8 Cross sectional pattern diagram of partially slurry filled asphalt-slag complexed pavement

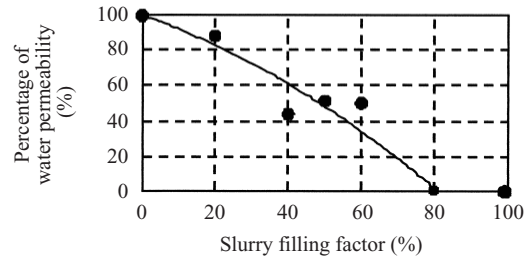


Fig. 9 Relation between slurry filling factor and water permeability

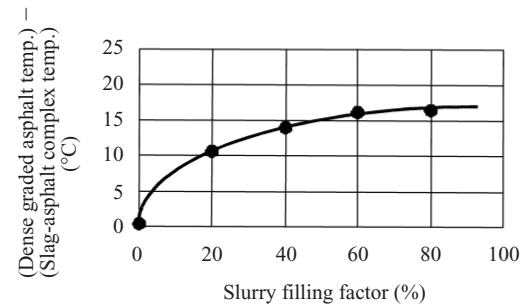


Fig. 10 Relation between slurry filling factor and temperature difference

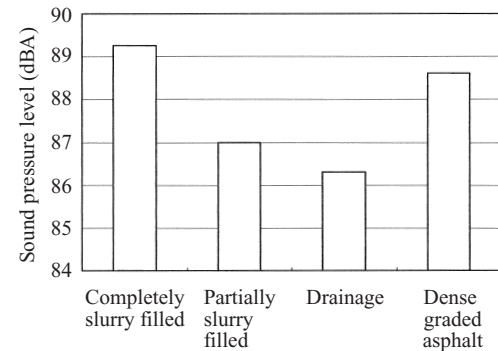


Fig. 11 Sound absorption test results of various pavements (velocity 40 km/h)

が残存するため、雨水排水性が保持され、かつ騒音低減効果が期待できる。保水材注入率と透水性の関係を Fig. 9 に示す。注入率が70%程度までは透水性が保持されるが、注入率80%以上で透水性が失われることが確認された。

Fig. 10 に、保水材注入率と温度差の関係を示す。注入率が60%以上で、保水性舗装と密粒度アスファルト舗装との温度差はおおむね一定であり、100%注入とほぼ同等の冷却効果が得られる。

部分注入型保水性舗装と、排水性舗装空隙に保水材をお



Photo 5 Asphalt-slag complexed pavement

おむね 100% 充填した全注入型保水性舗装を試験施工し、吸音測定 (Fig. 11) を行った。全注入型保水性舗装では、音圧は密粒度舗装と変わらないが、部分注入型保水性舗装では音圧が約 2 db 低下し、騒音低減効果を維持していることが示された。

4.2 実路保水性舗装

2002 年 3 月に東日本旅客鉄道(株) 千葉駅前東口広場道路環境整備工事において、本保水材の注入施工を行った。保水材の施工性は良好で、施工 2 時間 30 分後に道路開放を行った。保水材は、排水性舗装空隙の 60% 部分注入とした。Photo 5 は、施工後の外観を示したものである。

保水性舗装部および比較の密粒舗装部に熱電対を設置し、路面温度を測定した。施工後約 4.5 ヶ月経過した 7 月 11 日の測定結果を Fig. 12 に示す。11 時頃に最大温度差 13°C を記録し、15 時すぎまで 10°C 以上の温度差を維持し、高い保水性能が立証された。

2004 年 6 月現在、東京都、大阪市、日本道路公団などで採用されており、さらなる拡大が期待されている。

5. 結言

我が国の鉄鋼スラグは、年間約 3 660 万トン生成している。リサイクル社会の到来とともに、鉄鋼スラグを有効活用することがますます重要になってきている。

JFE スチールグループは、本稿で述べた新しい用途開拓

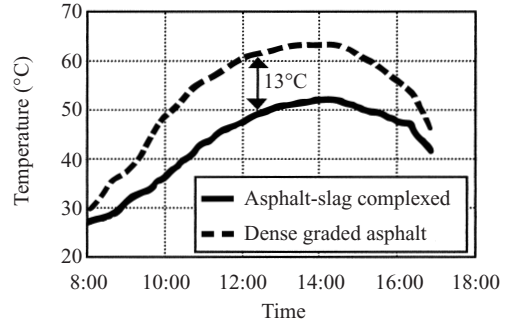


Fig. 12 Temperature surveyed at the bus lane in front of Chiba Station

をさらに推し進め、リサイクル社会に貢献したいと考えている。

参考文献

- 1) 小菊史男, 濱田秀則, 山路徹, 松永久宏. 港湾技研資料. no. 990, 2001. p. 1.
- 2) 松永久宏, 小菊史男, 高木正人, 谷敷多穂. コンクリート工学. vol. 41, no. 4, 2003, p. 47.
- 3) 松永久宏, 小菊史男, 高木正人. 鉄と鋼. vol. 89, no. 4, 2003, p. 74.
- 4) 日本コンクリート工学協会. コンクリート技術の要点 '01. 2001, p. 60.
- 5) 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 鉄鋼スラグ水和硬化体技術マニュアル-製鋼スラグの有効利用技術-. 2003-03.
- 6) 宮田康人, 沼田哲始, 豊田恵聖, 佐藤義夫, 小田静, 岡本隆. “高炉水砕スラグの底質改善効果”. 土木学会第 25 回海洋開発シンポジウム海洋開発論文集. 16, 2000, p. 345-350.
- 7) 沼田哲始, 宮田康人, 藪田和哉, 高橋達人, 豊田恵聖, 佐藤義夫. 鉄鋼スラグによる沿岸環境改善技術. NKK 技報. no. 177, 2002, p. 47-51.
- 8) 今井一郎. 赤潮生物の防除. 赤潮セミナー・赤潮発生の抑制と対策講演要旨集. 日本海水学会西日本支部主催, 1997, p. 49-68.
- 9) 港湾空間高度化環境研究センター 藻場着生基盤技術研究会編. 鉄鋼スラグ炭酸固化体利用マニュアル. 2004-06.
- 10) 環境省. ヒートアイランド実態解析調査検討委員会検討結果概要.



藪田 和哉



戸澤 宏一



高橋 達人