

「フェロフォーム[®]」のコンクリート舗装への適用

Application of “FerroformTM” to Concrete Pavement

落合 健 OCHIAI Takeshi JFE スチール 建材センター 建材開発部 土木技術室 (課長)
井上陽太郎 INOUE Youtaro JFE スチール スチール研究所 スラグ・耐火物研究部 (副課長)
谷本 文由 TANIMOTO Fumiyoshi JFE ミネラル 技術サービス部 (部長)・博士 (工学)
新村 亮 SHINMURA Akira 株式会社大林組 生産技術本部 技術第一部 (上級主席技師)
片野啓三郎 KATANANO Keisaburo 株式会社大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 (主任)

要旨

鉄鋼スラグ水和固化体「フェロフォーム[®]」とは、製鋼スラグを骨材に用い、高炉スラグ微粉末を主な結合材として製造される環境調和材料である。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、フレッシュコンクリートの代替として利用可能である。本稿では、フェロフォームの現場打ち用途として、転圧コンクリート舗装、普通コンクリート舗装、海水練コンクリート舗装に適用した事例を紹介する。

Abstract:

Steel slag hydrated matrix “FerroformTM” is an environment-friendly material that consist of steelmaking slag as aggregate and ground granulated blast furnace slag as a main binder. Ferroform has the same strength and durability as concrete. It can be used as a substitute for cast-in-place concrete. This paper describes the application of Ferroform to RCCP (Roller Compacted Concrete Pavement), plain concrete pavement and concrete pavement with sea water.

1. はじめに

製鋼スラグの新しい利用技術として開発された環境調和材料である鉄鋼スラグ水和固化体「フェロフォーム[®]」はコンクリートの代替品として利用されている¹⁾。鉄鋼生産の製鋼過程で副産物として生成する製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末および水を必須材料とし、必要に応じてアルカリ刺激材(セメント)と共に練り混ぜ、打ち込み、養生することにより製造する²⁾。製造にはコンクリート用の設備を用い、天然石代替人工石材「マリンロック[®]」や消波ブロックなどのコンクリート二次製品等の港湾用工事材料として数多くの実績がある。

一方、JFE スチールの製鉄所内では、コンクリート用の設備で練り混ぜ、アジテータ車等で運搬することで陸域の工事で現場打ちコンクリートの代替としても使用している。とりわけコンクリート舗装工事には種々の工法により実施している。

一般的にコンクリート舗装の設計では、舗装版には圧縮応力に比して曲げ応力が卓越するため、曲げ強度を規定する。

製鉄所の様な重車両の混入率が高い道路舗装版では、曲げ強度 4.9 N/mm² 以上が求められ、圧縮強度に換算すると 40 N/mm² 程度となる。一方、フェロフォームが最も多く活

用されている港湾用工事材料では圧縮強度(設計基準強度) 10 N/mm²~24 N/mm² の強度レベルが主体である。また、若材齢における鉄鋼スラグ水和固化体の強度増進速度は、ポルトランドセメントを使用した通常のコンクリートと比べ硬化が遅い傾向がある。しかし、道路工事では早期交通解放が求められることが多い。すなわち、舗装用途にフェロフォームを適用するためには、高強度かつ、短い養生期間で所定の強度を発現させる必要がある。

そこで、転圧コンクリート舗装工法(Roller Compacted Concrete Pavement, 以下 RCCP という)の適用や海水練コンクリートの適用などを通じてこれらの課題を解決した。本稿では、これらの工法を用いてフェロフォームの現場打ち用途としてコンクリート舗装に適用した事例を紹介する。

2. RCCP 工法への適用

2.1 RCCP 工法

RCCP は、単位水量の少ない超固練りコンクリート(スランプ:0 cm)をアスファルトフィニッシャーで敷きならし、振動ローラおよびタイヤローラ等で締め固めて仕上げる舗装工法である³⁾。アスファルト舗装と同様の機械編成で施工でき、比較的大規模の施工ボリュームを効率的に舗設できる。また、初期耐力に優れ、早期交通開放が可能である。一方、舗装表面の仕上がりや走行性が悪いという短所があり、重荷重が作用するヤード等を中心に使用される例が多い。

表1 コンクリート舗装仕様 (RCCP)
Table 1 Pavement specification (RCCP)

Design flexural strength	$\sigma_{bk} \geq 4.9 \text{ N/mm}^2$
Proportioning strength	$\sigma_{br} \geq (\sigma_{bk} + \sigma_p) \times p = 6.2 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_p = 0.8 \text{ N/mm}^2, p = 1.09$
Target strength to open traffic	$\sigma \geq \sigma_{br} \times 70\% = 4.4 \text{ N/mm}^2$
Slump	0 cm
Degree of compaction	$\geq 96\%$
Pavement thickness	t = 25 cm
Joint spacing	$\leq 5 \text{ m}$

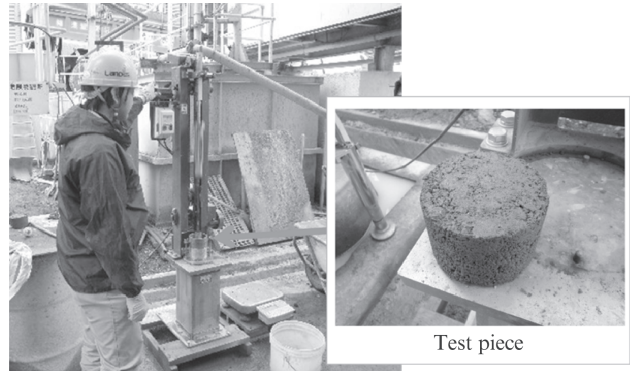


写真1 突き固め試験

Photo 1 Compaction test

RCCPは、大きな締め固めエネルギーを用いれば単位水量が少ない高強度、高密度な転圧コンクリート版を作り出せることに着目した工法である。粗骨材が多く、単位水量の少ない配合であることが特徴であり、骨材品質が強度やワーカビリティに大きく影響する。

2.2 フェロフォーム®の適用事例

JFE スチール西日本製鉄所倉敷地区において、フェロフォーム®を用いたRCCPを施工した。施工面積はA=5441m²である。本工事では、交通を維持しつつ施工する必要があったため早期交通開放が求められた。本工事でのコンクリート舗装仕様を表1に示す。重ダンプトラック、ホイールローダーなど重車両が通行する路線であることから、舗装厚t=25cm、設計基準曲げ強度 $\sigma_{bk}=4.9 \text{ N/mm}^2$ の舗装仕様(N₆交通相当)とした。配合強度は締め固めの変動割増を考慮⁴⁾し $\sigma_{br}=6.2 \text{ N/mm}^2$ とし、配合強度の70%を交通解放時の目標強度と設定した。

RCCPへフェロフォームを適用した場合の配合と同強度のコンクリートのRCCP配合例の比較を表2に示す。単位体積重量は2837kg/m³とコンクリートのRCCP(2521kg/m³)と比較しても高密度である。また、単位水量は、コンクリートのRCCPでは100kg/m³(W/C=36%)とかなり少ないが、フェロフォーム配合では89kg/m³(W/C=27%)とさらに少ない。

コンシステンシーの評価として、マーシャル突き固め試験を実施し、突き固め率を96%以上で管理した。試験の実施状況および、供試体を写真1に示す。交通開放に際し現場

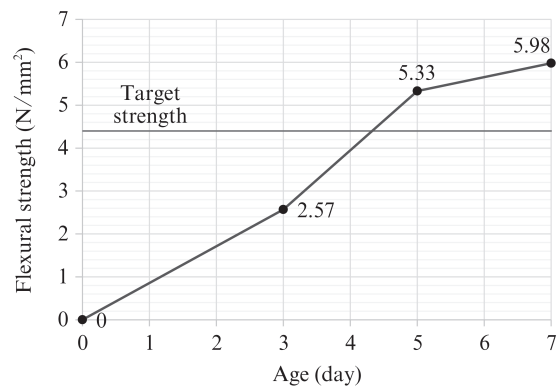


図1 曲げ強度の経時変化

Fig. 1 Flexural strength at different ages

養生供試体の曲げ強度で管理し、養生7日間で目標強度を満足した。強度特性を図1に示す。アスファルトフィニッシャーでのフェロフォームの敷きならし状況を写真2に、転圧ローラによる転圧状況を写真3に示す。コンクリートでのRCCPと同様に施工可能であり、施工性に差異なく同等な品質の舗装版を施工できた。

3. 普通コンクリート舗装への適用

3.1 普通コンクリート舗装

RCCPは、アスファルトフィニッシャーや転圧ローラ等のアスファルト舗装の施工機械を用いることで広い面積の施工

表2 フェロフォーム®とコンクリートの配合比較
Table 2 Comparison between FerroformTM and concrete

Type	Maximum aggregate size (mm)	Water-Binder ratio (%)	Unit weight (kg/m ³)							Admixture	Slump (cm)
			Water	Binder		Steel making slag		Aggregate:			
				NP	GGBFS	Fine	Coarse	Fine	Coarse		
Concrete	25	36	100	280	-	-	-	876	1 265	0.56	0
Ferroform	25	27	89	110	219	1 195	1 223	-	-	1.64	0

GGBFS: Ground granulated blast furnace slag NP: Normal portland cement



写真2 アスファルトフィニッシャーによる敷均し
Photo 2 Laying Ferroform™ with asphalt finisher



写真3 転圧ローラーによる転圧
Photo 3 Roller compaction

に適している。しかし、日施工量が少ない、施工幅員が狭い、曲率半径が小さい等で機械施工の適用が困難な場合や不経済となる場合は人力施工を適用するが、材料分離・締固め不足などの懸念がある。

一方、普通コンクリート舗装の工法としては、あらかじめ設置した型枠内にコンクリートを流し込むセットフォーム工法や、コンクリートの供給・締固め・成形の機能を有した機械により舗設するスリップフォーム工法などがある。また、機械施工が不適である施工条件下では、人力施工も適切に施工可能である。普通コンクリート舗装は機械施工とする場合、スランプ 2.5 cm～5 cm 程度の固練りのコンクリートが用いられるが、簡易フィニッシャーによる施工や人力施工に適した材料とするためには、ワーカビリティを考慮しスランプ 12 cm 程度のものも用いられる。

ここでは、RCCP 等による機械施工のしにくい条件での舗装に適用するべく、簡易フィニッシャーや人力施工による普通コンクリート舗装へのフェロフォーム®適用について述べる。

3.2 フェロフォーム®の適用事例

製鉄所内の道路では、コイル搬送車や重ダンプ等の操業車輛による、過酷な荷重条件下にある。特に交差点部では、タイヤねじれ作用などにより劣化進行が早い。JFE スチール東日本製鉄所千葉地区の道路交差点部では、アスファルト舗装からコンクリート舗装に置き換える工事を推進しており、フェロフォーム®を多く適用している。

交差点部の施工では、操業車輛の交通を維持しつつ施工するために施工工区を分割する必要があり、日施工量が少なくなる。また、コーナー部は曲率半径が小さく機械施工に不適であり人力施工が有効である。

重交通交差点部において普通コンクリート舗装（人力施工又は、簡易フィニッシャー）にフェロフォームを適用する際の施工仕様を表3に示す。重車輛が通行することから、前述のRCCP適用事例と同様に舗装厚 $t=25\text{ cm}$ 、設計基準曲げ強度 $\sigma_{bk}=4.9\text{ N/mm}^2$ の舗装仕様（ N_6 交通相当）とした。一般的にコンクリート舗装では、配合強度の70%まで養生を行えば、その後繰り返し作用を受けてもコンクリートの曲げ強度の発現に問題ないとされるが⁵⁾、ここでは、材料のばらつきやコンシステンシーの経時変化等を考慮し、交通解放時の目標強度を設計基準強度以上と設定した。

フェロフォーム配合の例を表4に示す。単位体積重量は 2765 kg/m^3 とコンクリートと比較し高密度である。本配合は、早期交通開放とするため、7日強度で設計基準強度を満たす様、結合材（ 691 kg/m^3 ）を多くし、水結合材比 28.9%

表3 コンクリート舗装仕様（普通コンクリート舗装）
Table 3 Pavement specification (Plain concrete pavement)

Design flexural strength	$\sigma_{bk} \geq 4.9\text{ N/mm}^2$
Target strength to open traffic	$\sigma \geq 4.9\text{ N/mm}^2$
Pavement thickness	$t = 25\text{ cm}$
Joint spacing	$\leq 5\text{ m}$

表4 フェロフォーム®の配合
Table 4 Mixture proportion of Ferroform™

Maximum aggregate Size (mm)	Water-binder ratio (%)	Unit weight (kg/m^3)					Slump flow (cm)	
		Water	Binder		Aggregate: Steel making slag			Admixture
			NP	GGBFS	Fine	Coarse		
25	28.9	200	200	491	894	978	2.07	40 ± 10

GGBFS: Ground granulated blast furnace slag NP: Normal portland cement



写真4 スランプ試験
Photo 4 Slump test



写真5 フェロフォーム®のポンプ打設
Photo 5 Placing Ferroform™ by pumping

とした。一般的なコンクリートと比してコンシステンシーの経時変化やバラつきが大きいため練り混ぜ直後では、スランプフロー 40 ± 10 cm と規定したが、経時変化により練り混ぜ後1時間でスランプ 20 cm 程度となる。練り混ぜ後1時間のスランプ試験の状況を写真4に示す（スランプ = 21.5 cm）。

本工法では、JFE スチール東日本製鉄所千葉地区の道路交差点部等で10件の施工実績があるが、材齢7日で曲げ強度： $4.9 \sim 6.9$ N/mm²の結果が得られており、いずれも目標強度を満足している。施工性については、施工状況に応じてシュート打設による人力敷ならしおよび、簡易フィニッシャーによる敷均しが選択可能である。いずれも普通コンク

リートと同様の施工ができた。また、練り混ぜ後1時間以内であれば、ポンプ打設も施工できることを確認した。ポンプによる打設状況を写真5に示す。

4. 海水練コンクリートへの適用

4.1 海水練コンクリート

舗装コンクリートは、表面が摩耗すると滑りやすくなり、普通コンクリート舗装やRCCPの目地を有する構造では、目地が角欠することが弱点となり、耐摩耗性の優れた材料が有利である。RCCPはスランプが0 cmの単位水量が少ない高密度な材料を機械施工するため、耐摩耗性、耐ひび割れ、耐角欠に対し有利な材料である。普通コンクリートを人力施工する場合、所定のワーカビリティや強度の確保のため、単位水量、セメント量が多くなり、RCCPと比してそれらの性能が劣ることが考えられる。(株)大林組の研究により、高炉セメントを用いたコンクリートの混練水に海水を使用することで、初期強度の発現が促進され、耐久性を高められることが明らかになっている⁶⁾。これは、海水中の塩化物イオンの影響で高炉スラグ微粉末の水和反応が促進され、硬化体組織が緻密になるためであると考えられている⁷⁾。一方、JFEスチールの研究によりフェロフォーム®についてもすりへり特性および曲げ疲労特性が通常のコンクリートと比較し優れていることを報告した⁸⁾。

4.2 フェロフォーム®の適用事例

JFEスチールと(株)大林組は、共同でフェロフォーム®の混練水に海水を使用する技術(海水練フェロフォーム)を検討し、舗装コンクリートへの実用性を確認した。施工仕様は表2の普通コンクリート舗装と同様とした。

海水練フェロフォームの実用性の検証に際し、室内配合試験を実施し、混練水に水道水を用いたものと比較した⁹⁾。また、海水練には、亜硝酸カルシウムを主成分とする海水練用特殊混和剤(AN)を使用したものも比較対象とした。

上記3ケースの室内試験配合を表5に示す。材齢毎の圧縮強度および、曲げ強度の試験結果を図2および、図3に

表5 室内試験配合

Table 5 Mix proportions of laboratory test

Type	Maximum aggregate size (mm)	Water-binder ratio (%)	Unit weight (kg/m ³)								Slump flow (cm)
			Water	Binder		Aggregate: Steel making slag		Admixture			
				NP	GGBFS	Fine	Coarse	SP	AN		
1	25	31.6	Fresh water	180	207	363	1 347	735	5.97	—	50 ± 10
2	25	31.6	Sea water	180	207	363	1 347	735	6.84	—	50 ± 10
3	25	31.6	Sea water	180	207	363	1 347	735	6.84	13	50 ± 10

GGBFS: Ground granulated blast furnace slag NP: Normal portland cement
SP: Super plasticizer AN: Special admixture for sea water mixing

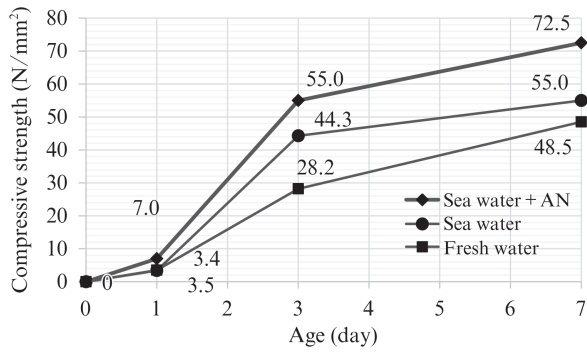


図2 圧縮強度の経時変化

Fig. 2 Compressive strength at different ages

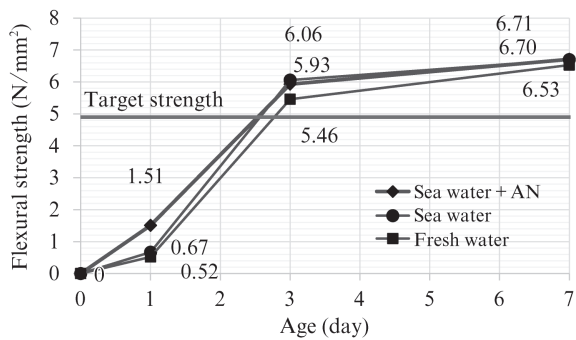


図3 曲げ強度の経時変化

Fig. 3 Flexural strength at different ages

示す。圧縮強度は、海水、さらに海水用特殊混和剤を使用することで増加している。一方、曲げ強度は材齢3日までは海水および、海水用特殊混和剤を併用した配合の方がやや高いが材齢7日では、同等である。コンクリートのラベリング試験による耐摩耗性評価において、圧縮強度が高いほどすりへり減量が改善するという報告¹⁰⁾があるため、海水、さらに海水用特殊混和剤を使用することで舗装の耐摩耗性が向上することが期待できる。

JFE スチール東日本製鉄所千葉地区の所内道路において海水練フェロフォームを適用した試験施工を実施した。舗装厚は $t=25\text{ cm}$ 、施工面積は約 $1\,000\text{ m}^2$ である。実機プラントを用いた施工試験においても海水練フェロフォームは、材齢7日で曲げ強度： $5.0\text{ N/mm}^2\sim 5.5\text{ N/mm}^2$ の結果が得られており、目標強度を確保できた。施工状況および、施工後の状況を写真6および、写真7に示す。施工性についても、従来の普通コンクリート舗装と同様に施工できた。

5. 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、JFE スチールの製鉄所構内における舗装版としての施工事例により、以下のことが分かった。



写真6 舗設状況

Photo 6 Casting FerroformTM pavement



写真7 施工後の舗装版

Photo 7 Pavement after construction

- (1) RCCP 工法、普通コンクリート舗装など一般のコンクリート舗装工法と同様の施工が可能である。
- (2) 一般的に若材齢における鉄鋼スラグ水和固化体の強度増進速度は、ポルトランドセメントを使用した通常のコンクリートと比べ遅い傾向があるが、RCCP工法の適用、結合材量の増加および、混練水に海水を用いることにより、設計基準強度 4.9 N/mm^2 、舗装厚 $t=25\text{ cm}$ の重交通対応の舗装版においても養生7日間で交通開放可能である。
- (3) 海水練フェロフォームの曲げ強度は、真水練と同等であるが、圧縮強度が増加するため摩耗に対する耐久性が向上することが期待される。

今後、舗装のみならず種々の構造物におけるフレッシュコンクリートの代替としての検討を進め、用途拡大を検討していく所存である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 沿岸技術研究センター. 鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル改訂版. 沿岸技術ライブラリー. 2008, no. 28.
- 3) 多田宏行. 転圧コンクリート舗装の現状と課題. 土木学会論文集. 1989. 8, vol. 408/V-11.
- 4) 日本道路協会. 転圧コンクリート舗装技術指針 (案). 1994. 10.

- 5) 土木学会. 舗装標準示方書. 2007.
- 6) 竹田宣典, 石関嘉一, 青木 茂, 入矢桂史郎. 海水および海砂を使用したコンクリート(人工岩塩層)の開発. コンクリート工学. 2011, vol. 49, no. 12.
- 7) 片野啓三郎, 竹田宣典, 小林久美子, 大即信明. 海水を使用したセメント硬化体の強度および内部組成に関する研究. コンクリート工学年次論文集. 2013, vol. 35, no. 1.
- 8) 松永久宏, 谷敷多穂, 辻本和仁. 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. JFE 技報. 2008, no. 19.
- 9) 新村 亮, 松本 伸, 片野啓三郎, 林 正宏, 落合 健, 井上陽太郎, 谷本文由. 海水練り鉄鋼スラグ水和固化体の舗装への適用. 土木学会第70回年次学術講演会概要集, 2015. 9, vol. 568.
- 10) 新村 亮, 桜井邦昭, 高山昌大, 石川 健. ラベリング試験による耐摩耗性の評価と各種耐摩耗性改善対策の効果検証. コンクリート工学年次論文集. 2011, vol. 33, no. 1.



落合 健



井上陽太郎



谷本 文由



新村 亮



片野啓三郎