

技術論文

鉄鋼スラグ水和固化体の開発経緯と特徴および適用事例

Explanation about Development Process, Several Unique Characteristics and Application Examples
on Steel Slag Hydrated Matrix (SSHM)高野良広*
Yoshihiro TAKANO中川雅夫
Masao NAKAGAWA堤直人
Naoto TSUTSUMI篠崎晴彦
Haruhiko SHINOZAKI木曾英滋
Eiji KISO平嶋裕
Yutaka HIRASHIMA

抄 録

鉄鋼スラグ水和固化体は、無筋コンクリートの代替材、人工石材等への適用を目的として開発された、製鋼スラグの新しい利用技術である。従来、コンクリートのような水和硬化体の分野では、膨張性有無の選別が難しい製鋼スラグを硬化体中の骨材等の材料として用いることは許容されていなかったが、鉄鋼スラグ水和固化体は、この膨張影響を回避するための製鋼スラグの品質基準を明確化し、さらに製造の手順、利用上の留意事項について整理したものが公的機関による技術マニュアルとして公認化されている。公認化に至った技術上のポイントと特性面の特徴を解説し、実際の構造物や施設での適用事例について、利用の形態ごとに紹介した。

Abstract

Steel slag hydrated matrix (SSHM) is a new technology that has been developed to enable the use of steelmaking slag as a substitute for non-reinforced concrete and artificial stone. Formerly, in the field of concrete and other hydrated matrixes, the use of steelmaking slag as an aggregate for the hydrated matrix was prohibited because its expansion can hardly be evaluated accurately. In order to avoid the influence of inaccuracies in expansion measurements and to enable the use of steelmaking slag for the steel slag hydrated matrix, a technical manual that clarifies quality standards for steelmaking slag and provides a manufacturing procedure and relevant instructions has been recently approved by a public organization. In this paper, we shall explain the technical points and quality characteristics that have led to the official approval mentioned above and present examples of application of steel slag hydrated matrix to actual structures and facilities by evaluating various types of applications.

1. はじめに

鉄鋼スラグの一つである製鋼スラグは、多様な製鋼工程による品質のばらつき、フリーライム (f-CaO) やフリーマグネシウム (f-MgO) の水和による膨張、高アルカリ水の溶出等から利用用途が限られ、仮設路盤材、埋戻し材等の比較的lowグレードの用途に多く利用されてきた。特に近年、コンプライアンス対応への社会的ニーズがますます大きくなっていることから、陸上土木用途への無被覆での利用が難しくなりつつあり、新しい製鋼スラグの利用法開発が望まれていた。

鉄鋼スラグ水和固化体（以下、水和固化体：SSHM と称

す）は、このような背景の下、新しい製鋼スラグの利用技術として開発されたもので、2003年に、“鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル”として(財)沿岸技術研究センターより公認化され、その後2008年には、その技術改良を行った改定版が発刊されている。また2007年には、港湾関連民間技術の確認審査・評価として“鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材 フロンティアストーン フロンティアロック”が技術認証を受けており、これを用いた施工実績が評価され、2009年には、国土交通大臣表彰である“国土技術開発賞 優秀賞”を受賞している。

本論では、水和固化体の技術概要と公認化における技術的ポイントを概説し、利用用途毎の最近の適用事例を紹介

* 設備・保全技術センター 土木建築技術部 土木技術室長 千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511

表1 水和固化体の種別
Classification of SSHM

Classification		Steel making slag content	Main binder	Alkaline activator	
				Material	Range of addition
Type-I	A	100 wt.%	Ground granulated blast-furnace powder	Slaked lime Dust of quicklime	No regulations However, there is no effect that slaked lime content of the total quantity of slaked lime and ground granulated blast furnace powder more than 20%.
	B	From 50 wt.% to 100 wt.%			
Type-II	A	100 wt.%	Ground granulated blast- furnace powder	Portland cement	Portland cement weight ratio for the total quantity of ground granulated blast furnace powder and portland cement less than 70%.

する。

2. 水和固化体の概要

2.1 技術概要

水和固化体は、いわゆるコンクリートの代替技術であり、高炉スラグ微粉末、製鋼スラグ、水を必須材料とするリサイクル材活用技術である。高炉水砕スラグ（以下、水砕と称す）に代表される、ガラス化率が高く非晶質な材料は、潜在水硬性を有することが知られている。これは、水砕に水の供給下で適度なアルカリ刺激を加えると水和固化する特性であるが、微粉碎した水砕を用いると、セメントのような固化特性を示す。水和固化体は、水砕を粉碎した高炉スラグ微粉末にセメントの機能を、製鋼スラグにはアルカリ刺激材の機能を持たせつつ、コンクリートの骨材（粗骨材、細骨材）の機能も持たせたものである。製鋼スラグのアルカリ度が弱い場合には、必要に応じてセメントや消石灰等をアルカリ刺激材として加える。また、製鋼スラグの粒度構成が悪く、練上りのワーカビリティが悪くなる場合等は、水砕やフライアッシュ（以下、FA と称す）を添加し、性状を改善する。

水和固化体は、表1に示すように、主なアルカリ刺激材の種類によりI種、II種、骨材中の製鋼スラグの割合により、I種、II種の下にA、Bと区別するようにしており、I-A種が、リサイクル材の使用比率が最も高い種別となる。またII種については、アルカリ刺激材中のポルトランドセメントの比率によりII-1、II-2と区分する場合もある。

2.2 公認化における課題と解決策

コンクリート分野では、アルカリ骨材反応等のような、反応性骨材を用いて発生した構造物の膨張ひび割れの問題を契機に、骨材に膨張性のあるものを用いることはタブーとされてきた。そのため原料中にf-CaOやf-MgO等の水和膨張成分を含む製鋼スラグを骨材として用いる手法は、認可の土俵に上がることもしなかった。しかし、製造者側の分別管理の徹底等を背景に、一部のスラグについては骨材として認められるようになり、電気炉酸化スラグ等がJIS認可を取得している。また、リサイクル材を用いた固化体として、FSコンクリート¹⁾やNAクリート²⁾のような、骨

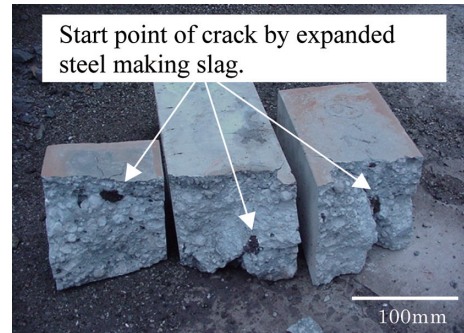


写真1 水和固化体の膨張割れの例
Typical expansion crack by steel making slag

材の一部に製鋼スラグを用いる技術も開示されている。

水和固化体に用いる製鋼スラグは、膨張成分を全く含まないものを選別することが実質困難なため、適用可能な製鋼スラグの品質基準を如何にするかが、最も大きな課題であった。製鋼スラグの膨張特性は、一般には、JIS A 5015 付属書2に示される水浸膨張比にて評価される。これは製鋼スラグの持つ平均的な膨張量を評価する手法として、広く流布している。しかし水和固化体では、製鋼スラグ粒子の周囲に水和マトリックスが存在し、その強度も大きく拘束が大きいため、粒1個の膨張割れがひび割れを誘引し、ひいては構造全体の崩壊に繋がる危険性がある。写真1は、水和固化体のひび割れが生じた供試体の破断面であるが、1粒の製鋼スラグの膨張割れが、ひび割れの起点となることが見て取れる。

このことから、水和固化体の公認化には、製鋼スラグの膨張特性を粒レベルで検出できる手法の構築が必須となった。粒レベルの膨張を評価する手法が具備すべき要件として、

- (1) 使用するスラグ全体を評価できるよう、評価に用いる試料の量を一定量以上確保できるものであること
 - (2) 試験方法を汎用化するため、評価の過程で特殊な装置を用いなくても実施可能な方法とすること
- を掲げ、製鋼スラグ粒の膨張破壊の現象分析を積み重ねて、評価法を構築した。そして以下の知見から、“粉化率”と“MgO含有率”を指標とした製鋼スラグの品質基準を設定した。

- (a) 膨張の懸念のある製鋼スラグ粒は、膨張過程で粒に割れが生じ、結果として粒度の変化が起こる。すなわち促進環境下で粒度が細くなった量（粉化率）を定量すれば、膨張割れの可能性のあるスラグ粒の比率が評価できる（図1）。
- (b) f-CaOに起因する粉化率は、80℃の温水中に連続で10日程浸漬すれば、評価できる。この条件は、供用50年以上の促進条件と推察され、実用上は問題ないと考えられる。
- (c) 膨張に時間を要するf-MgOに起因する割れは、80℃温水10日間の条件では収束が難しく、オートクレーブによる評価が必要である。但し、MgO含有量が一定量以下の製鋼スラグであれば、温水での評価が可能である。これらの知見をもとに、種々の粉化率、MgO含有率の製鋼スラグを用いた水和固化体について、温水浸漬による膨張安定性を評価した結果、図2に示すように、“粉化率2.5%以下”、“MgO含有量8.5%以下”の製鋼スラグを用いれば、膨張割れの問題を回避できることを知見し、これを品質基準とした。

2.3 配合設計方法

水和固化体の配合設計は、利用用途に必要な強度目標を設定した後、図3に示す強度指数と圧縮強度の関係から、必要な強度指数を求めることから始まる。強度指数は、材料や配合の異なる水和固化体の試験結果をもとに、強度と

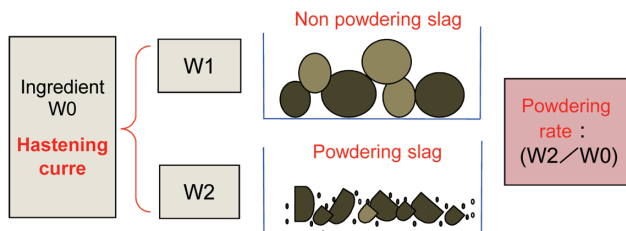


図1 粉化率の概念
Concept of powdering rate

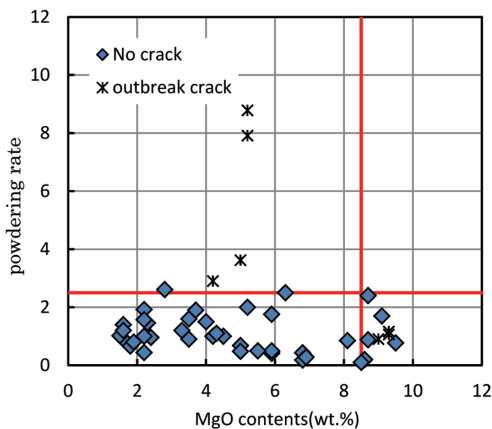


図2 製鋼スラグの品質基準
Quality reference of steel making slag for steel slag hydrated matrix (SSHM)

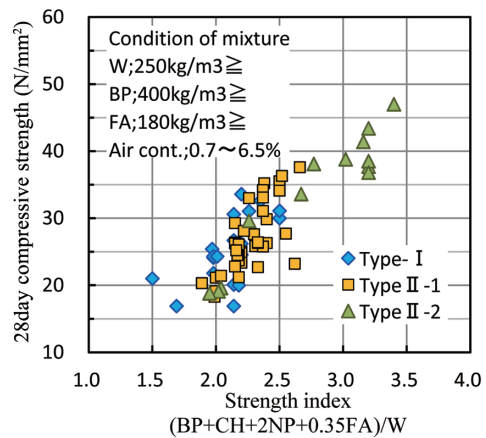


図3 強度指数と圧縮強度の関係
Relationship between strength index and compressive strength

一次相関のあるパラメータとして導出された実験式であり、(1)式にて表わされる。

$$\text{強度指数} = \frac{BP + CH + 2NP + 0.35FA}{W} \quad (1)$$

ここに、BP：高炉スラグ微粉末の配合量 (kg/m³)

CH：アルカリ刺激材の配合量 (kg/m³)

NP：普通ポルトランドセメントの配合量 (kg/m³)

FA：フライアッシュの配合量 (kg/m³)

W：単位水量 (kg/m³)

強度指数を設定した以降は、コンクリートと同様、目標スランプを得るための単位水量、ワーカビリティを得るための混和剤等を配合試験により確認して配合を設定する。

2.4 各種特性

2.4.1 力学特性

水和固化体の強度発現は、普通コンクリートよりも遅い傾向にあり、材齢3日以内の若材齢強度が求められる場合は注意が必要である。既往の研究では、低温下での強度発現は、I種の方が優れている³⁾ことや、曲げ強度や引張強度は、同等圧縮強度の普通コンクリートと同等以上の強度であること、また、ヤング係数は、同等強度の普通コンクリートと比較し、若干小さめであること等が示されている⁴⁾。

2.4.2 耐久性

(1) 断熱温度上昇特性

コンクリートの水和熱ひび割れの要因となる断熱温度上昇特性は、例えば土木学会コンクリート標準示方書では、(2)式にて表わされる。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \quad (2)$$

ここに、Q(t)：材齢t(日)における断熱温度上昇量(℃)

Q_∞：終局断熱温度上昇量(℃)

r：温度上昇速度に関する定数

この内、Q_∞とrについて、水和固化体では図4、図5に

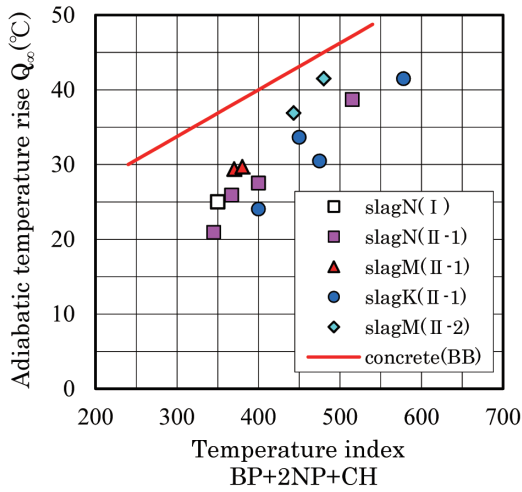


図4 水和固化体の終局断熱温度上昇量
Adiabatic temperature rise on SSHM

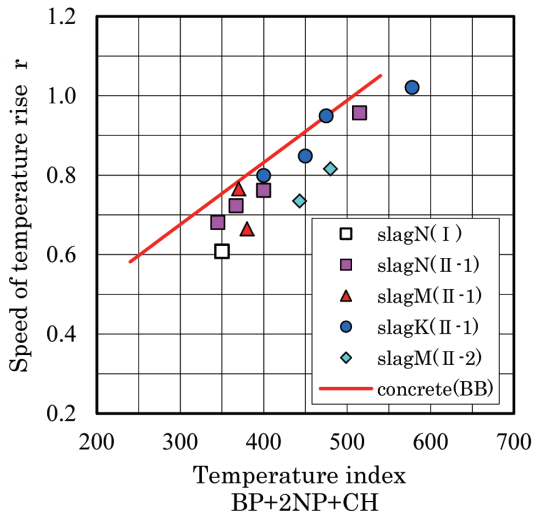


図5 水和固化体の温度上昇速度定数
Speed of temperature rise on SSHM

示すような結果を得ており、高炉セメントを用いたコンクリートに比べ温度上昇量が低く、温度上昇速度が緩慢な傾向にあることがわかっている。

(2) 乾燥収縮特性

水和固化体の乾燥収縮量は、材齢約100日で150～350 μ と、同等単位水量の普通コンクリートの1/2程度であることが示されており⁹⁾、収縮特性には優れている。ただし、乾燥による強度への影響が大きい場合があり、乾燥の影響を受けた水和固化体の曲げ強度は、絶乾程度まで乾燥すると約56%まで低下するという報告がある⁹⁾。

(3) 凍結融解性能

水和固化体の凍結融解性能は、コンクリートと同様に、エントレインドエアを一定量以上入れ込めば確保可能である。図6は、空気量の異なる水和固化体の凍結融解試験結果である。空気量が大きいほど相対動弾性係数は大きく、

凍結融解抵抗が大きいことがわかる。なお、製鋼スラグは表面がポーラスで吸水率が大きいものが多く、骨材修正係数を割り引いた上で空気量を確保すること、空気量増大により強度が漸減するため、設計基準強度を高めにする必要がある。

2.4.3 環境特性

(1) アルカリ溶出特性

水和固化体のアルカリ溶出特性の一例として、体積比15倍の海水中での変化を調べたのが図7⁶⁾である。これより、水和固化体のpH溶出はコンクリートよりも小さく、またフライアッシュを添加するとさらに小さくなる。このことから水和固化体のアルカリ溶出は、コンクリートより小さいと評価される。

(2) 生物付着性

水和固化体は、けい素や鉄分等のミネラル成分を含む材料を用いるため、海藻類の付着性に優れる。図8⁶⁾は、水和固化体とコンクリートのブロックを干満帯に設置し、一定期間経過後の生物の付着量を調べたものである。これより、水和固化体は、時間経過とともに生物付着量が増大している。

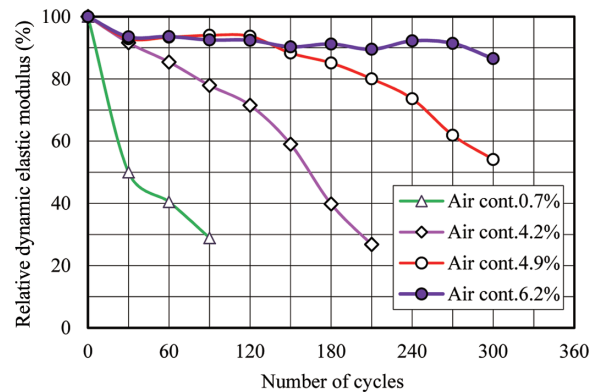


図6 空気量の異なる水和固化体の凍結融解性能
Performance of freezing and thawing test on vary air volume condition

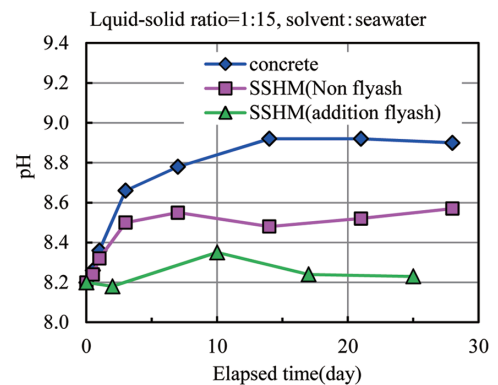


図7 水和固化体の海水中でのpH溶出特性⁶⁾
Alkalinity of SSHM in seawater

(3) CO₂ 排出量

水和固化体は、材料としてセメントをほとんど用いない。セメントは製造過程で、石灰石 (CaCO₃) を生石灰 (CaO) にする際に多量の CO₂ を排出する。したがって、セメントをほとんど使用しない水和固化体は、CO₂ 排出の少ない資材である。図9は、CO₂ 排出量の試算結果であるが、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに対し 76%、高炉セメントを用いたコンクリートに対し 60%の CO₂ 排出量削減が可能である。

3. 水和固化体の適用事例

3.1 無筋コンクリートブロック代替としての適用

水和固化体の無筋コンクリート代替としての適用事例に

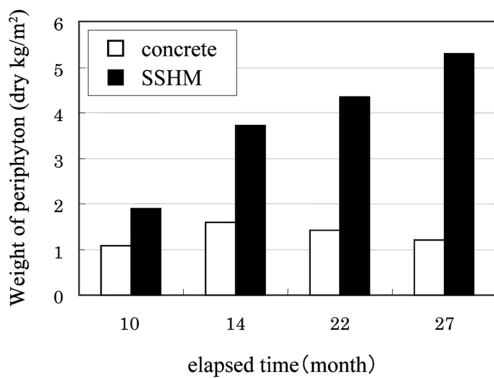


図8 水和固化体への生物付着性⁶⁾
Performance of biofouling to SSHM

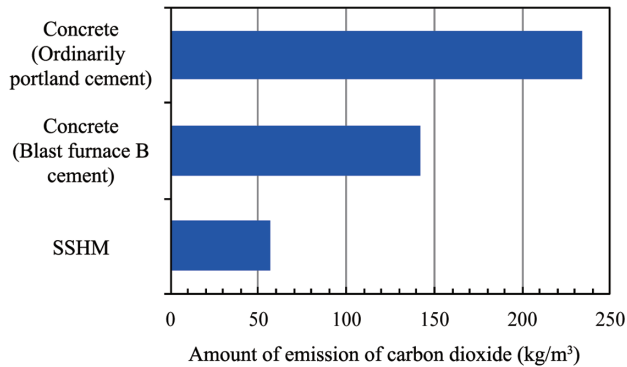


図9 コンクリートと水和固化体の CO₂ 排出量
Amount of emission of carbon dioxide on concrete and SSHM

は、消波ブロック、被覆ブロック、漁礁ブロック等がある。ここでは、大型消波ブロックへの適用事例を紹介する。

適用対象は、80トン型の消波ブロックで、国内では最大のものである。実施においては、マスコンクリートである半面、冬場の施工となったため、水和熱による温度ひび割れに配慮した施工を行った。実施配合を表2に示す。混和剤として高性能減水剤を用いて単位水量を極力抑え、結合材全体の量やアルカリ刺激材であるセメントを少なくして、水和発熱を抑えた配合とした。施工過程では、図10に示すように、内部に熱電対を設置し、施工直後から温度変化を計測した。また若材齢を含む強度発現も確認し、前述した水和固化体の断熱温度上昇特性をもとに、計測された温度を熱伝導解析により再現した。

温度解析結果を図11に示す。解析値と実測値は比較的良く一致している。また、熱伝導解析結果と強度発現デー

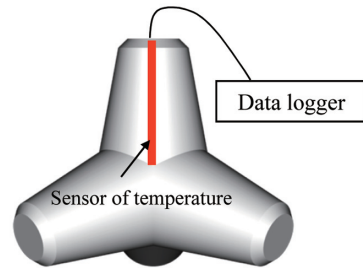


図10 内部温度計測用熱電対の位置
Measurement position of internal temperature

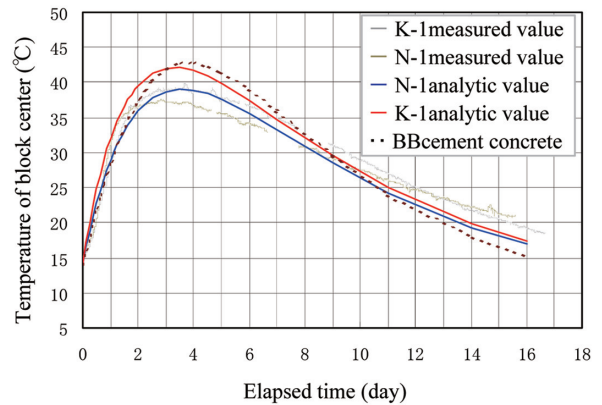


図11 内部温度の経時変化の実測値と解析値の比較
Comparison of internal temperature by analytic value and measured value

表2 大型消波ブロックの水和固化体の配合例
Combination example of SSHM on large wave extinguish block

Mark of combination	Classification	Maximum size of steel-making slag (mm)	Strength index (BP+2NP+CH+0.35FA)/W	Slump (cm)	Air content (%)	Unit weight (kg/m³)						
						Service water (W)	Ground granulated blast-furnace powder (BP)	Alkaline activator (portland cement) (NP)	Fly ash (FA)	Steel making slag (1) (SS1)	Steel making slag (2) (SS2)	Water deducing admixture (AD1)
K-1	II-A	20	2.59	12±2.5	2.0±1.5	174	297	53	134	1999		2.94
N-1	II-A	25	2.18	10±2.5	2.0±1.5	186	259	48	144		1852	2.18

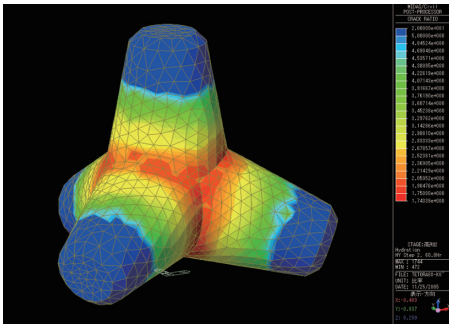


図 12 温度応力解析コンター図
Result of temperature stress analysis

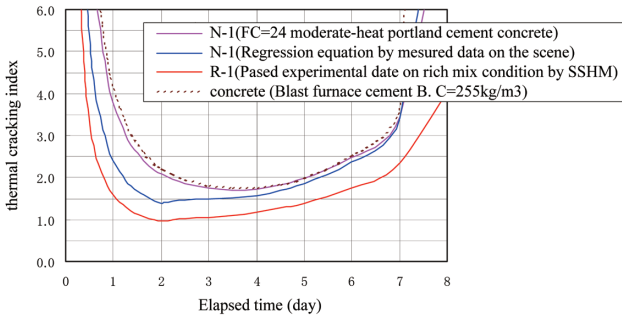


図 13 温度ひび割れ指数の経時変化
Change of the time of thermal cracking index

タをもとに、温度応力解析を行い、応力分布（図 12）とひび割れ指数の経時変化（図 13）を求めた。強度発現モデルにもよるが、配合 N-1 では、ひび割れ指数は 1.5 以上確保され、実ブロックにおいてもひび割れは確認されなかった。

3.2 人工石材としての適用

3.2.1 埋立用材としての利用（フロンティアストーン）

羽田 D 滑走路築造工事は工期が厳しく、埋立後の地盤改良を行う工程が確保できないため、埋立材には、海中に投入するだけの施工で、以下の性能を確保することが求められた。

- (a) 地震時に液状化しないこと（透水係数 $\geq 3\text{cm/sec}$ ）
- (b) 設計に必要な強度を有すること（せん断抵抗角 $\geq 35^\circ$ ）
- (c) 沈下しないこと（2次圧縮係数 $\leq 0.02\%$ ）

この性能を満足する手法として、粒度構成を一定範囲内に制御することを着想し、表 3 に示すような粒度規定を設けた。

上記の粒度制御法によりフロンティアストーンの製造を行い、実工事では、図 14 の中仕切堤を主体に約 100 万トンが使用されている。

3.2.2 河川護岸、防波堤被覆石への利用（フロンティアロック）

河川護岸への適用例としては、東京都中川および隅田川の事例がある。双方とも護岸根固め工として利用され、中

表 3 羽田 D 滑走路のフロンティアストーンの商品目標
Quality of “Frontier Stone” for Haneda Airport D Runway

Quality items	Approach granularity index for satisfaction quality	Control value
Non quick sand	Quick sand is affected by coefficient of permeability. Especially, fine particle fraction concern quick sand. Then, we analyze relationship 10 % passage particle size between quick sand.	$D_{10} \geq 1\text{mm}$
Keep of bearing power	Bearing power depend on friction of particle reciprocal stone. For keep of bearing power have to increase range of particle size. So, we evaluated equality coefficient (U_c).	$U_c \geq 5$
Save of sinking	For save sinking, range of particle size increase. Because if particle size is narrow, lead to enlargement of aperture. Then, we reached minimum U_c by making full use of the data.	$U_c \geq 5$

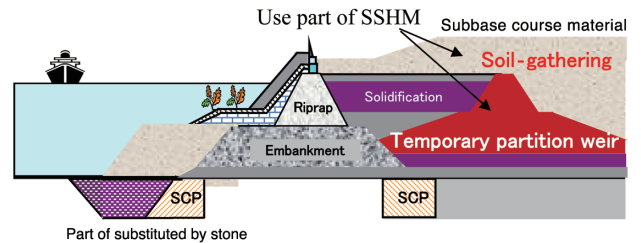


図 14 羽田 D 滑走路への適用部位
Part of used “Frontier Stone” for “D Runway” of Haneda Airport



写真 2 フロンティアストーン埋立作業状況
View of reclamation work by “Frontier Stone”

川で約 1600 m^3 、隅田川で約 4200 m^3 が施工されている（写真 2）。適用部位を図 15、図 16 に示す。強度と密度の品質基準は、それぞれ 24 N/mm^2 以上、2.5 t/m^3 以上であったが、全て基準値以上であった。写真 3 にフロンティアロックの出荷状況を、写真 4 に投入状況を示す。投入前後で pH の変化を確認したが、投入直後に 0.3 程度上昇するものの、数分で投入前の pH に回復し、以後は変化がなかった。

一方、防波堤への適用事例では、震災復興事業として実施されている釜石港湾口防波堤がある。適用部位は、図 17 に示す基礎石の部分で、800 $\text{kg} \sim 1\text{t}$ の被覆石材として

利用され、施工完了分で既に約7万tのフロンティアロックが投入されている。

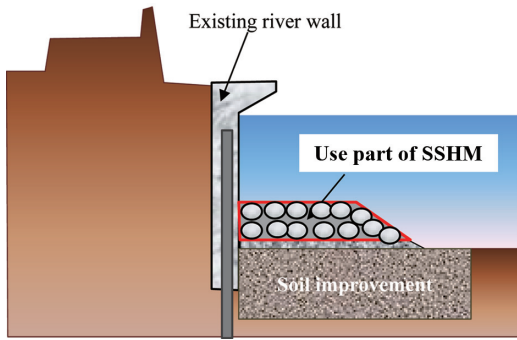


図 15 中川護岸のフロンティアロック適用部位
Part of used of "Flontier Rock" for river wall of Nakagawa

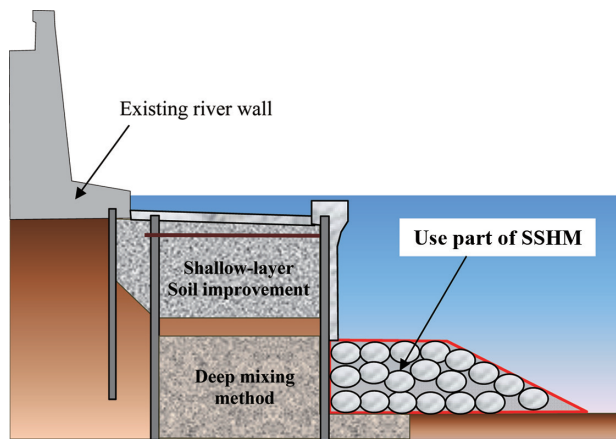


図 16 隅田川護岸のフロンティアロック適用部位
Part of used of "Flontier Rock" for river wall of Sumidagawa



写真3 フロンティアロックの出荷状況
View of shipping "Flontier Rock"



写真4 フロンティアロック投入状況
View of throwing "Flontier Rock"

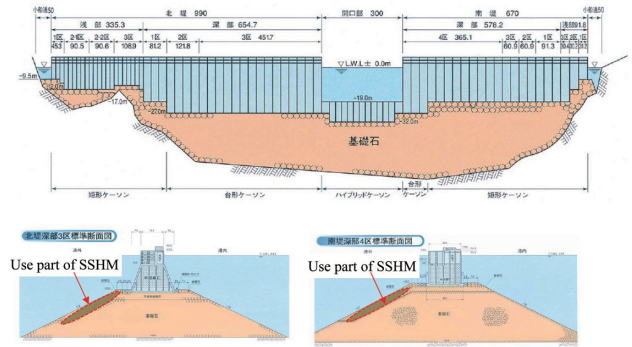


図 17 釜石港湾口防波堤とフロンティアロック適用部位
(出典：国土交通省 釜石港湾事務所 HP)
Part of used of "Flontier Rock" for breakwater of Kamaishi Port

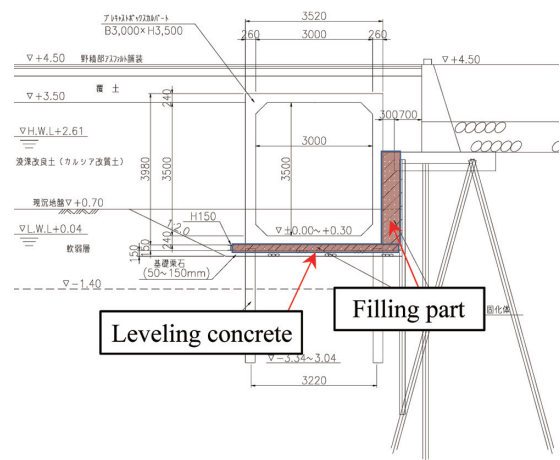


図 18 水中不分離水和固化体の施工部⁷⁾
Excution part of anti-washout under water by SSHM

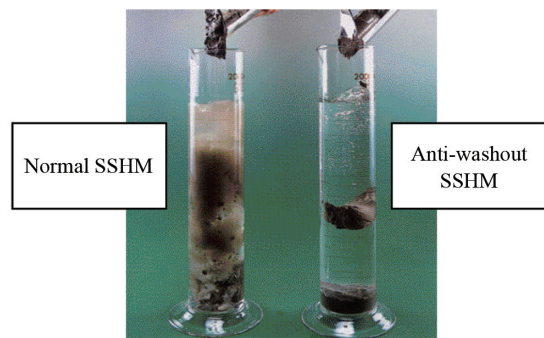


写真5 水中不分離性の確認⁷⁾
View of anti-washout under water

3.3 水中不分離コンクリート代替としての適用⁷⁾

従来の水和固化体の利用は、陸上で製品を製作し、水中に設置する方法がほとんどであったが、名古屋公有水面埋立てでは、現場で水中打設する水中不分離コンクリートの代替として利用されている。施工断面を図 18 に示す。プレキャストのボックスカルバートの均し材、既設護岸との空間の間詰め材として利用している。水中での分離を防止するため、増粘剤を添加し、高性能減水剤との併用により、自己充填性と分離抵抗性を確保している(写真5)。配合

表4 水中不分離型水和固化体の実施配合
Combination of SSHM with anti-washout performance

Case	Strength index	Alkaline activator ratio (%)	Sand-coarse aggregate ratio (%)	Unit weight(kg/m ³)					Anti-washout admixture (W×%)	Air-entraining and high-range water reducing admixture (C×%)
				Service water W	Ground granulated blast-furnace powder BP	Portland blast-furnace cement B BB	Steel making slag coarse aggregate SS	Steel making slag fine aggregate SG		
1.8-15	1.8	15	45	45	275	109	812	1031	1.125	2.0



写真6 均し部の施工状況 7)
View of leveling concrete by anti-washout SSHM



写真7 間詰め部の施工状況 7)
View of filling part by anti-washout SSHM

を表4に示す。水中不分離コンクリートとほぼ同様な思想で配合設計可能なことが確認された。施工状況を写真6、写真7に示す。流し込み施工時には濁りもほとんど発生しなかった。また施工過程での周辺のpH上昇も僅かであり、問題なく施工を完了した。

4. おわりに

以上、水和固化体の公認化経緯と特性、および最近の適用事例について述べた。水和固化体は、材料として広く流通していないものを用いるため、汎用的に利用されるには、まだ解決すべき課題が多いのが事実であるが、密度が大きく耐波浪性に優れること、スラグ中の鉄分の犠牲陽極的作用により鉄筋が錆びにくいこと、乾燥収縮が小さく収縮ひび割れが入りにくいこと等から、今後、港湾施設を中心に適用が拡大することが期待される。また粉状スラグ等、販売しづらいスラグの活用法としても有効な技術になると考えられる。

参考文献

1) 審良善和 ほか：産業副産物（高炉スラグ、製鋼スラグ、フ

ライアッシュ）を有効利用したコンクリートの品質および耐久性に関する研究. 港湾空港技術研究所報告. 47 (2), 2008, p. 111

- 2) 齊藤直 ほか：NAクリートに用いるスラグの品質について. 土木学会第56回年次学術講演会. 2001, p. 404
- 3) (財)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定版. 沿岸技術ライブラリー No. 28, 2008, p. 89
- 4) (財)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定版. 沿岸技術ライブラリー No. 28, 2008, p. 37-40
- 5) 高橋良輔 ほか：鉄鋼スラグ水和固化体の空港舗装適用に向けた基礎物性の検討. 港湾空港技術研究所資料. No.1153, 2007, p. 11-13
- 6) (財)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定版. 沿岸技術ライブラリー No. 28, 2008, p. 48-50
- 7) Sawada, T., Ogasawara, T., Takano, Y., Kanno, H., Yamagoshi, Y., Imamura, T.: Development of Steel Slag Hydrated Matrix with Anti-washout Performance: SCMT3. Kyoto, e228, August 2013



高野良広 Yoshihiro TAKANO
設備・保全技術センター 土木建築技術部
土木技術室長
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



篠崎晴彦 Haruhiko SHINOZAKI
設備・保全技術センター 土木建築技術部
スラグ利用技術室 主幹 博士(工学)



中川雅夫 Masao NAKAGAWA
五洋建設(株) 顧問
(前 新日鐵住金(株) スラグ・セメント事業
推進部 市場開拓室長)



木曾英滋 Eiji KISO
スラグ・セメント事業推進部
市場開拓室 主幹



堤 直人 Naoto TSUTSUMI
技術開発企画部 技術企画室
主幹 (部長代理)



平嶋 裕 Yutaka HIRASHIMA
スラグ・セメント事業推進部
スラグ営業推進室 主幹