

# 地域特性を活かしたリサイクル材(鉄鋼スラグ)の利用によるコスト縮減について — 港湾施設の液状化対策SCP工法の中詰材として利用した場合 —

COST REDUCTION BY USING RECYCLE MATERIAL MAKING EFFECTIVE  
USE OF CHARACTERISTICS OF THE REGION(IRON AND STEEL SLAG)  
-THE CASE OF USING IT FOR SCP METHOD TO PREVENT LIQUEFACTION OF  
PORT FACILITIES-

岩崎幹平<sup>1</sup>・大沢佳宏<sup>1</sup>・今宗紀<sup>1</sup>・廣松智樹<sup>1</sup>・本間孝哉<sup>1</sup>・遠藤仁彦<sup>2</sup>  
Kanpei IWASAKI, Yoshihiro OOSAWA, Munenori KON,  
Tomoki HIROMATSU, Takaya HONMA, Kimihiko ENDO

<sup>1</sup>北海道開発局 室蘭開発建設部 室蘭港湾事務所 (〒051-0036 北海道室蘭市祝津町1丁目1-6)

<sup>2</sup>正会員 北海道開発局 港湾空港部港湾建設課 (〒060-8511 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

In recent years, reduction of environmental burdens and cost are needed in public projects. Muroran port office consider these social demands and used “iron and steel slag for SCP method on land” for material of pile of SCP method at aseismic quay construction in Irie district of Muroran port. This thesis reports the challenge of conventional material of pile of SCP method and applicability evaluation of “iron and steel slag for SCP method on land” which is used for this aseismic quay construction and test for effectiveness on actual construction and new knowledge and challenge of this new material.

**Key Words:** Recycle, cost reduction, characteristics of the region

## 1. まえがき

鉄鋼業や石油精製業などを有した臨海型重化学工業地域を形成する室蘭港は、平成14年にリサイクルポートの指定を受け、現在では環境負荷低減に繋がる企業活動が促進され、循環型産業が集積している(図-1)。

一方、室蘭港入江地区耐震岸壁改良工事は、内貿ユニットロードに対応した機能向上や、大規模地震時などの救援物資の輸送対応を目的として、平成16年度から現地着手され、平成19年度に完成している。大規模地震災害に備えた耐震強化岸壁への改良という社会的要請の緊急性から、早期完成が強く求められるとともに、コスト縮減や地域特性からリサイクル材の有効活用が求められていた。

これらの社会的要請に応えるため、岸壁本体の既存ケーソン部を有効活用することを前提とした構造を検討し、その直背後を鉄鋼スラグを用いた事前混

合処理工法、さらにはその背後の液状化対策にはサンドコンパクションパイル工法(以下、SCPと記す)を採用した。当事務所では、コスト縮減とリサイクル材の有効活用という要請に併せて対応するため、こ

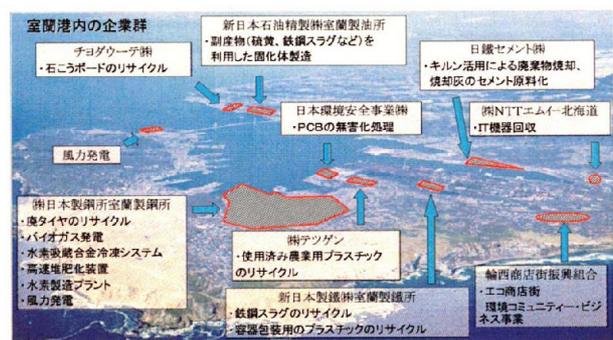


図-1 室蘭港内の企業群

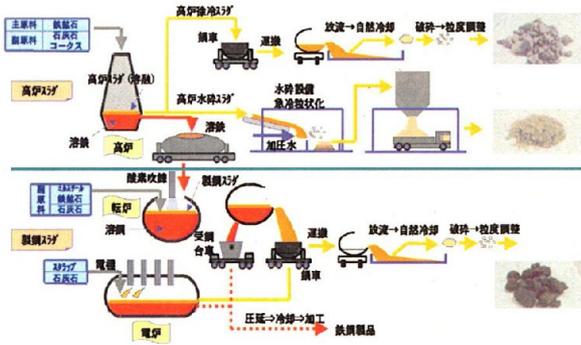


図-2 鉄鋼スラグの製造過程

の SCP 用中詰材に鉄鋼スラグの活用を検討した。そして、平成 18 年度に(財)沿岸技術研究センターによる港湾関連民間技術の認定技術において、改良された鉄鋼スラグによる陸上 SCP 用中詰材の有効性が示されたため、同年度工事の設計変更により、この新技術を全国の公共事業で初めて採用した。

本論文では、従来の SCP 用中詰材を本工事に適用する場合の課題と鉄鋼スラグによる陸上 SCP 用改良型中詰材の適用性評価、その実施工での出来高や施工性などの有効性の検証結果を示し、さらに新たに得られた知見や今後の課題などについて報告する。

## 2. 鉄鋼スラグの概要

図-2 に示すように、鉄鋼スラグは鉄鋼製造に伴い生成される副産物である。また、本工事においては、製鉄所が臨海地域に位置するため、海上輸送により大量かつ安定的に供給可能な材料であるといえる。

鉄鋼スラグは、その生成過程から高炉スラグと製鋼スラグに分類され、高炉スラグはさらに高炉水砕スラグと高炉徐冷スラグに分類される。



写真-1 入江地区(工事完成後)

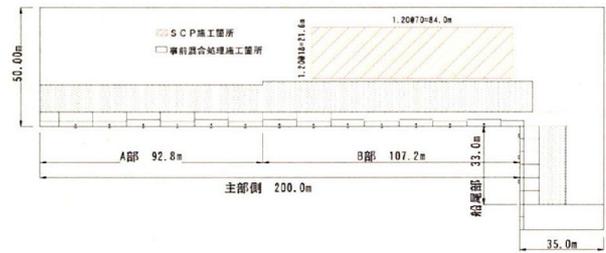


図-3 平面図

高炉水砕スラグは砂状の外観をしており、溶融スラグに加圧水を噴射するなどして、急激に冷却することで生成される。

高炉徐冷スラグは結晶質の碎石状であり、溶融スラグを冷却ヤードに流し込み、自然放冷と適度の散水によって冷却することで生成される。

製鋼スラグは、高炉で製造された溶銑に成分調整や副材料を投入することで靱性・加工性のある鋼にする製鋼工程で生成され、高炉徐冷スラグと同様に碎石状である。

## 3. 工事概要と SCP コスト削減の視点

本工事の施工範囲は、写真-1 の中央に位置し、その概要は、図-3 に示すように、岸壁延長主部側 200m・船尾側 33m で、震度 6 弱の地震に耐えられるよう整備を行ったものである。本施設の建設は、コスト削減の観点から既設ケーソン部を最大限に活用することを基本としている。このため、図-4 に示すように、そのケーソン直背面に事前混合処理土を投入することで既設ケーソンへ作用する土圧軽減を図り、さらにその背面のエプロン部分にあたる地盤の液状化対策として SCP による地盤改良を実施した。

液状化対策を実施する地盤条件は、細粒含有率  $F_c = 46.0$  と細粒分が多い地盤であるため、SCP の設計はこれによって、改良効果が低くなることを考慮している。今回、現地盤の N 値が最も低い N 値 0.5 を基準とし、改良率(改良範囲における改良体の割合)を 23%、目標 N 値を 4.65 に設定した<sup>1)</sup>。

SCP による地盤改良エリアには、1,349 本の SCP 杭が必要であり、当初、一般的で実績が多い天然砂を SCP 用中詰材として設計していた。しかし、事業着

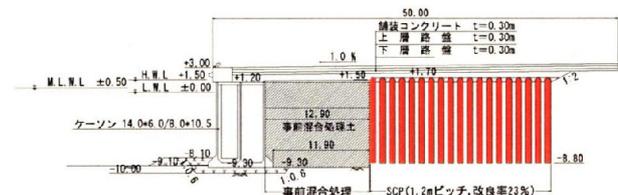


図-4 断面図

表-1 エコガイアストンの品質特性

	項目	エコガイアストーン	備考
物理的 特性	粒度範囲(mm)	40~0	粒度範囲は、砕石コンパクションパイルの実績範囲にあること
	土粒子密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.6~3.6	
	最小密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.60~2.10	
	最大密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.90~2.50	
	湿潤単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )	18~23	
力学的 性質	摩擦(非固結)タイプと固結タイプの2種類あり、それぞれ以下の強度を満足する。 ・摩擦(非固結)タイプ; 内部摩擦角35°以上かつ一軸圧縮強さ(材齢28日)0kN/m <sup>2</sup> ・固結タイプ; 内部摩擦角35°以上かつ一軸圧縮強さ(材齢28日)60kN/m <sup>2</sup> 以上		
	膨張	80°C水浸膨張比	≦1.5%
呈色	呈色判定試験	合格	JISA5015

手した平成16年度以降、さらなるコスト縮減の可能性について検討した結果、平成18年度に海上SCPで実績がある地盤改良用製鋼スラグをエプロン下の陸上SCP用中詰材として適用できればコスト縮減効果が高いことが分かったため、その適用性について技術的課題を検討した。

#### 4. 従来のSCP用中詰材の課題と陸上SCP用改良型鉄鋼スラグの適用性

##### (1)従来のSCP用中詰材の課題

SCP用中詰材の選定に当たり、従来の中詰材である天然砂と地盤改良用製鋼スラグの特徴や本工事への適用性を検討した結果、以下に示すとおり一長一短があることがわかった。このため、双方の短所を解消できる材料を見出し、採用することが本工事を実行していく上で有用と考え、さらに検討を進めた。

##### 1)天然砂の場合

天然砂は、陸上SCPでの利用実績は多いが、室蘭港近傍では供給地が無く、現場周辺では白老町(室蘭港から40km程度)でのみ産出可能であるため、相当程度の輸送費が必要となる。また、天然砂をSCP用中詰材として使用するには、採取後、粒度調整(75μm以下の細粒分含有率が15%未満、シルト分含有率が15%未満)が必要となることから、天然砂を使ったSCPではコスト縮減が困難であった。

##### 2)地盤改良用製鋼スラグの場合

本材料は、天然砂に比べ、供給源が近いこと輸送費が低減され、輸送にかかる二酸化炭素の排出抑制が可能となる。また、本材料は、リサイクル材であるため、環境負荷低減にも貢献できる。しかし、海上SCPでの利用実績はあるが、陸上SCPでの実績が少なく、また、海上SCPと比べ、陸上SCPでは改良径が700mm程度と小さくなることから、ケーシングパイプの閉塞を防止するための粒度調整が懸念され

た。

##### (2)陸上SCP用改良型鉄鋼スラグの新規性と適用性の評価

さらに調査を進めた結果、室蘭港の地域内で両者の長所を満足し、短所を克服する陸上SCP用改良型鉄鋼スラグが開発されていることが判明した。これは、平成18年度に(財)沿岸技術研究センターより<sup>2)</sup>「港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第06001号 エコガイアストーン」として有効評価を受けているものである。

さらに、供給源が室蘭港内と近いこと等から材料費のコスト縮減が可能であること、陸上SCP用に粒度調整がなされているので施工性に問題がないこと、適用条件は天然砂と同等に使用することが可能であり、設計方法も天然砂の場合と同様に行うことができることから、設計が完了している段階でも利用できること、といった長所を有しており、供給体制も整っていたことから、本工事において、全国の公共事業で初めてこの中詰材を採用することとした。

この陸上SCP用改良型鉄鋼スラグは、前述の高炉スラグ、転炉系製鋼スラグの単体もしくはそれらの混合材であり、今回は試験実績が多かったことから混合材を採用した。また、これは前述の地盤改良用製鋼スラグを陸上SCP用中詰材として改良・開発したものであり、表-1のように品質管理されている。

なお、今回、公共事業として国内初適用であるため、SCP杭間地盤のN値確認や、出来形等の一般的な品質確認項目に加え、SCP杭体自体のN値等も確認することとした。

#### 5. 実施工における陸上SCP用改良型鉄鋼スラグの有効性の検証

##### (1)地盤改良効果

図-5は改良前後の杭間N値を示したものである。左側にある折れ線が改良前の原地盤N値、右側にある折れ線が予測N値、プロットされた点がSCP改良後の杭間N値の深度分布であり、縦の直線が目標N値4.65である。同図より、液状化対策の対象層である、全ての土層において改良後の杭間N値が目標N値4.65を満足していることが確認できる。さらに、SCP改良後の杭間N値はばらついており、改良前のN値に対して上昇しており、予測N値に対してもほぼ同等以上のN値が得られていることも確認できる。

##### (2)施工性と出来形

軟弱地盤に圧入する際に使用するケーシングパイプの閉塞を防ぐため、SCPに用いる中詰材は、粒度分布が適正に管理されていることが求められる。そこ

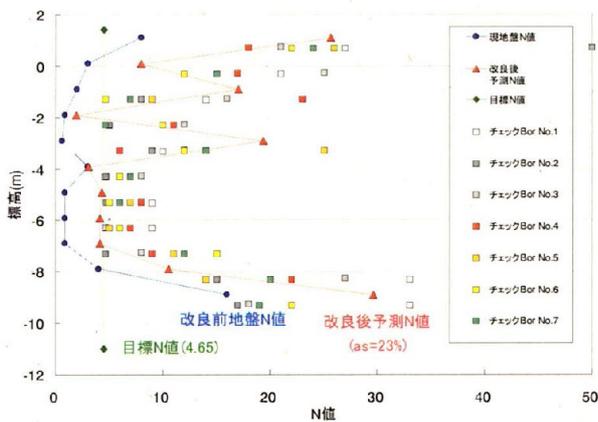


図-5 SCP 打設前後の杭間 N 値の深度分布

で、実施工において、 $500\text{m}^3$  に 1 回の割合で粒度試験を行った。その結果、図-6 に示すとおり、全ての試験において所定の粒度分布に収まっていた。このため、実施工において、補助機械等が必要なく従来の汎用機械が施工が可能であり、施工業者からのヒアリングからも天然砂と比較して施工性が同等であることが確認できた。

また、杭頭部の出来形については、所定の杭径 700mm 以上に対して平均 716mm の出来形が確保されていることが確認できた。

### (3) コスト縮減効果

室蘭港は、北海道内で唯一製鉄所が隣接しているため、鉄鋼スラグを有利に調達することが可能である。また、SCP に用いられる天然砂は、採取後に粒度調整が必要となり、コストアップとなる。このことから、地域特性を考慮し、陸上 SCP 用改良型鉄鋼スラグを用いることで、天然砂を利用するよりも安価に材料調達が可能となった。

施工性が天然砂と同等であるため、施工費については同等であるが、材料費が低減されるため、材料を含んだコストについては、15% 縮減が可能となった(図-7)。

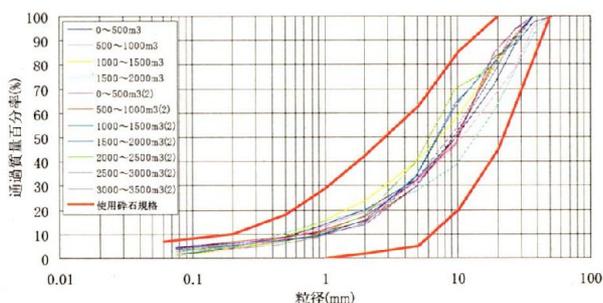


図-6 粒度試験結果

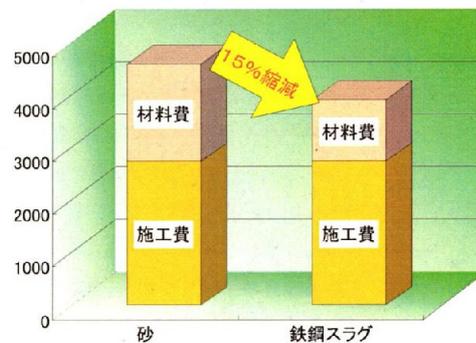


図-7 1m 当たりの単価

## 6. 今回得られた知見と今後の課題

### (1) 改良体の強度について

図-8 は、改良前の N 値 (①)、既存の実績から得られた近似曲線より求めた杭芯の予測 N 値 (②)、及び今回の調査により得られた杭芯の N 値 (③) に関する深度分布である。

同図より、今回のボーリング調査から得られた陸上 SCP 用改良型鉄鋼スラグの杭芯の N 値 (③) は、天然砂で改良した場合の予測 N 値 (②) に対して同等以上の結果が得られていることが確認できる。既往のデータを分析した結果、杭芯 N 値の増加に伴い杭間 N 値も増加することが判明したため<sup>3)</sup>、陸上 SCP 用改良型鉄鋼スラグを用いた方が、より高い杭間 N 値を得られる、と考えられる。

また、天然砂の内部摩擦角  $\phi$  は、設計段階において  $30^\circ$ <sup>4)</sup>、粘着力  $c_d$  は一般的に期待しないこととされているのに対し、本工事で採用した陸上 SCP 用改良型鉄鋼スラグは、内部摩擦角  $\phi$  が表-1 の品質特性にあるように  $35^\circ$ 、粘着力  $c_d$  は期待しないこととされている。しかし、本工事において杭体のせん断強度を確認した結果、内部摩擦角  $\phi$  は表-1 の品質特性の  $35^\circ$  に対して  $58^\circ$  以上と非常に大きく、粘着力

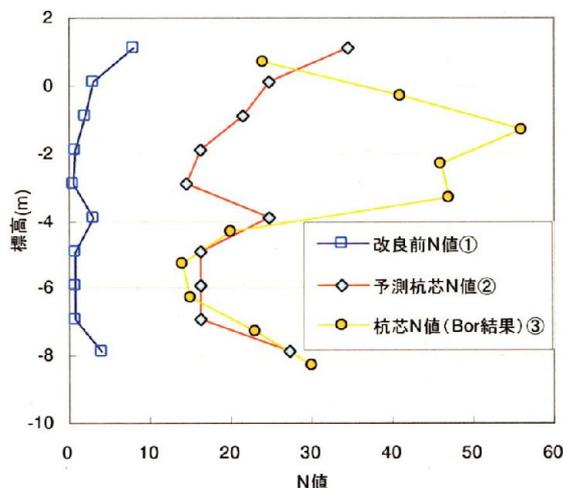


図-8 杭芯チェックボーリング結果

$c_d$  は気中養生 1 日で  $200\text{kN}/\text{m}^2$  以上発現しており、供

試体が自立する程度であった。

このことより、陸上SCP用改良型鉄鋼スラグを用いたSCPの杭体は、従来の天然砂によるものと同様以上の強度の杭が形成されていると考えられ、岸壁背面を複合地盤としてみた場合、エプロン地盤の支持力向上や地震時のせん断変形の抑制が期待できる。

これらのことから、陸上SCP用改良型鉄鋼スラグの液状化対策効果は従来の天然砂より大きいと考えられる。

## (2) 経済設計の検討

前述のように、陸上SCP用改良型鉄鋼スラグによる改良体は砂杭よりも高強度であり、高い杭間N値が期待できることから、施工ピッチを大きくしたり改良径を小さくして、改良率を天然砂の場合より小さくしても同程度の改良効果を期待できると考えられる。

図-9は、横軸が天然砂で改良した場合の目標N値、縦軸が天然砂、もしくは陸上SCP用改良型鉄鋼スラグで改良した場合の改良後N値である。また、点線が既往の実績から求められる天然砂の計算値であり、傾きは1である。そして、プロットされた点が陸上SCP用改良型鉄鋼スラグを使用した本施工における実測値、実線がその近似曲線であり、傾きは1.8である。この近似曲線は決定係数が0.55となっており、信頼性があると言える。

当初設計では天然砂を用いることを前提とし、改良後N値4.65を得るため、目標N値を4.65と設定した。しかし、図-9より、陸上SCP用改良型鉄鋼スラグを用いた場合、改良後N値4.65を得るために、天然砂の場合と同設計（同じ本数、同じピッチ）で設計すれば、目標N値が2.65を満足するように改良率を決めれば良いこととなる。このため、表-2に示

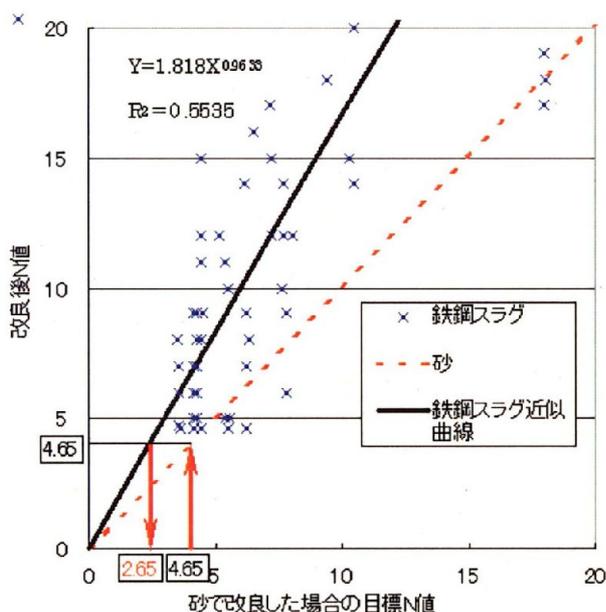


図-9 天然砂・陸上用改良型鉄鋼スラグによる改良後のN値の相関

す試算結果より目標改良率が16%で同等の効果があると言える。そのため、施工本数を天然砂の場合の7割程度に縮小でき、材料費によるコスト縮減と合わせると約40% ( $0.68 \times 0.85 = 0.578$ ) のコスト縮減が期待できる。

今後、陸上SCP用改良型鉄鋼スラグによる改良実績のデータが蓄積され、本工事と同様に天然砂よりも高強度であることが多岐にわたって確認されれば、前述のように設計方法を見直すことによって、材料費の縮減に加えて改良率の縮小によるコスト縮減も可能と考えられる。

表-2 設計方法の比較

設計方法	砂	鉄鋼スラグ
目標改良率	23%	16%
施工ピッチ	1.2m	1.5m
改良径	0.7m	0.7m
本数	1349本(71×19)	912本(57×16)
本数(率)	100%	68%

## 7. まとめ

本報告では、陸上SCP用改良型鉄鋼スラグについてその適用性と将来的な技術の可能性について明らかにすることができた。

主な結論は以下のとおりである。

- 1) 中詰材に陸上SCP用改良型鉄鋼スラグを用いた場合、施工性は従来品である天然砂と同等であることが確認され、地盤改良効果・杭芯強度は天然砂に対して、同等以上の値となった。
- 2) 室蘭地区においては天然砂と同様に、陸上SCP用改良型鉄鋼スラグが供給可能であり、中詰材に陸上SCP用改良型鉄鋼スラグを用いた場合と天然砂を用いた場合を比較すると、およそ15%のコスト縮減となった。
- 3) 公共工事においても、「リサイクル」、「リサイクルポート(港湾)」、「二酸化炭素の排出抑制」といった環境負荷の低減を目指す活動を求められている中、本工事においては、リサイクル製品を使用することにより港湾整備におけるリサイクルポートへの参加、天然資材の消費抑制等の社会的活動に貢献できた。
- 4) 本工事においては中詰材に陸上SCP用改良型鉄鋼スラグを用いることで天然砂の場合よりも改良体の強度が大きく、高い杭間N値が得られた。よって今後データが蓄積されれば、設計方法を見直し、改良率を縮小することによるコスト縮減ができる可能性もある。

最後に、本報告で示した新技術については、全国的な活用事例を積み重ねることにより、さらなるコスト削減の可能性も考えられるため、本報告を参考に、今後各現場で活用事例が増えることを期待する。

**謝辞:**本報告を作成するにあたり、様々な方々に SCP 工法、鉄鋼スラグについてご教授頂きました。また、開発者や施工者の方々に貴重な資料を提供して頂きました。謹んで感謝の気持ちを申し上げます。

#### 参考文献

- 1) (社) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), pp. 553, 平成 11 年 4 月.
- 2) (財) 沿岸技術研究センター：港湾関連民間技術の

確認審査・評価報告書 第 06001 号 鉄鋼スラグを原料として固結制御可能なサンドコンパクションパイル工法中詰材料, 平成 18 年 11 月.

- 3) (社) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), pp. 554, 平成 11 年 4 月.
- 4) (財) 沿岸技術研究センター：港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第 06001 号 鉄鋼スラグを原料として固結制御可能なサンドコンパクションパイル工法中詰材料, pp. 5, 平成 18 年 11 月.