

図 - 2 鉄鋼スラグの製造過程

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おり、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する計画である。

液状化対策を実施する地盤条件は、細粒分含有率 $F_c = 46.0$ で細粒分が多い地盤であるため、SCP の設計は細粒分を考慮している。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 23%、改良目標 N 値を 4.65 に設定した。(1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻))

SCP による地盤改良エリアには 1,349 本の SCP 杭が必

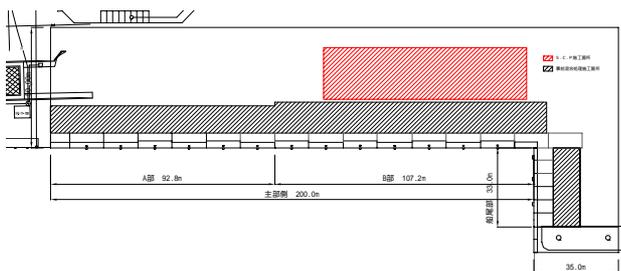


図 - 3 平面図

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。事業着手した平成 16 年度以降、さらなるコスト削減の可能性について検討してきたが、平成 18 年度に海上 SCP で実績がある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削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改めて検討することとした。

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 の中詰材の選定に当たり、従来の中詰材材料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であった。これをクリア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、さらに検討を進めることとした。

1) 天然砂の場合

陸上 SCP での利用実績は多い材料であるが、室蘭港近傍では天然砂の供給地が無く、現場周辺では白老町(室蘭港から 40km 程度)のみで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、SCP の中詰材として使用するには、粒度調整費 (75 μ m 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、調達面での工夫に限界があり、天然砂を使った SCP 工法ではコスト削減が困難であった。

2) 地盤改良用製鋼スラグの場合

天然砂に比べ、供給源が近いため調達面で有利である。また、そのため輸送にかかる二酸化炭素の排出抑制が可能となり、さらにリサイクル材料であるため環境負荷低減につながると考えられた。しかし、海上 SCP での利用実績はあるが、陸上での実績がなく、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課題となった。

(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する陸上 SCP 用改良型鉄鋼スラグを開発していることが判明した。これは、平成 18 年に(財)沿岸技術研究センターより²⁾「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おり、供給体制も整っていたことなどから、今回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る。前述の地盤改良用製鋼スラグを陸上 SCP 用中詰材

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 ³)	2.6~3.6	
	最小密度(g/cm ³)	1.60~2.10	
	最大密度(g/cm ³)	1.90~2.50	
力学的性質	湿潤単位体積重量(kN/m ³)	18~23	
	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 ² ・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 ² 以上		
膨張	80℃水浸膨張比	≦1.5%	JISA5015
呈色	呈色判定試験	合格	製鋼スラグを混合する場合 JISA5015

として改良・開発しており、表 - 1 のように品質管理されている。また、供給源が室蘭港内と近いことから材料費のコスト縮減が可能となる。陸上 SCP 用に粒度調整がなされているので、施工性に影響を与えることもない。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特徴がある。

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 - 4 は改良前 N 値、予測 N 値、及び SCP 改良後の杭間 N 値の深度分布を示したものである。同図より、液状化対策対象層である、全ての土層において目標 N 値 4.65 を満足していることが確認できた。さらに、SCP 改良後の杭間 N 値はばらついてはいるが、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が確認できた。

(2)施工性と出来形

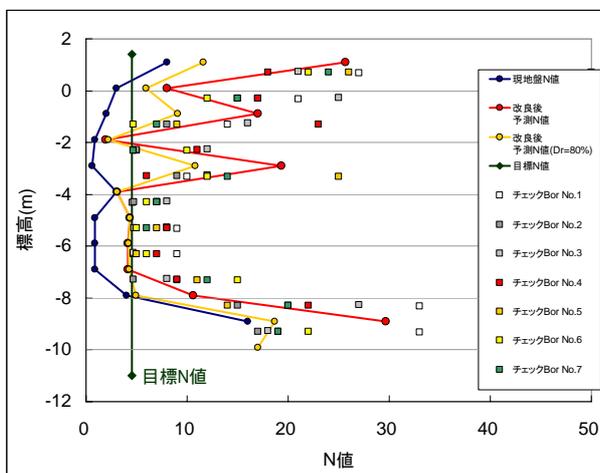


図 - 4 SCP 打設前後の杭間 N 値の深度分布図

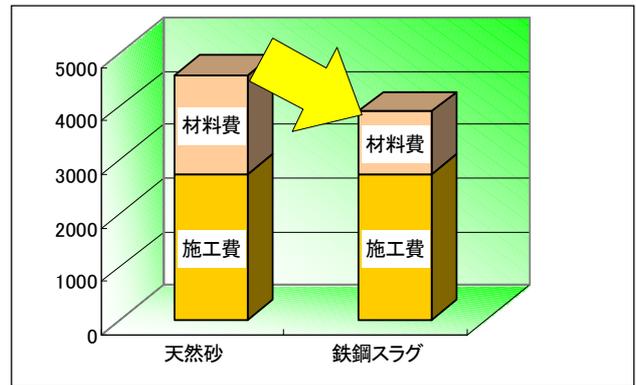


図-5 1m 当たりの単価

施工性については、SCP 施工中のケーシング閉塞原因となる細粒分が粒度調整により管理されているため、従来の天然砂と遜色なく施工が出来、補助機械等が必要なく従来の汎用機械が使用可能で施工能率も同等であった。杭頭部の出来形については、所定の杭径 700mm 以上で平均 716mm の出来形が確保されていることが確認された。

(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、地域の特性を考慮し陸上 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であった。

施工能率が天然砂と同等であるため、施工費については同等となるが、材料を含んだコストについては、15% 縮減を可能とした(図 - 5)。

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

改良前の N 値、今回の調査により確認された杭芯の N 値、及び既存の実績から得られた近似曲線より求めた杭

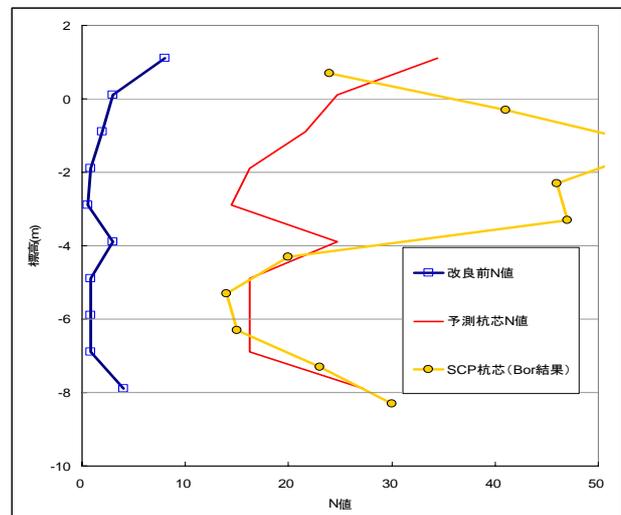


図 - 6 杭芯チェックボーリング結果

芯の予測N値に関する深度分布を図-6に示す。

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値は、天然砂で改良した場合の予測N値に対して同等以上の結果が得られていることが確認された。

また、陸上SCP用改良型鉄鋼スラグによる杭体のせん断強度を確認した結果、内部摩擦角は表-1の品質特性の35°に対して58°以上と非常に大きく、粘着力 C_d は気中養生1日で200kN/m²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。既往のデータ分析より、杭芯N値の増加に伴い杭間N値も増加すると考えられるので、液状化対策効果も従来の天然砂より大きいと考えられる。

(2)経済設計の試験検討

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るため、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可能性があると考えられる。

図-7は横軸に天然砂で改良した時の目標N値、縦軸に陸上SCP用改良型鉄鋼スラグで改良した時の実測N値である。両者は正に相関しており(傾き1.818>1)、決定係数が0.55と近似曲線にも信頼性があるといえる。

当初設計では天然砂を用いることを前提とし、目標N値は4.65と設定したが、図-7より、陸上SCP用改良型鉄鋼スラグでの改良後のN値を4.65と設定した場合、天然砂の設計では目標N値が2.65を満足するように改良率

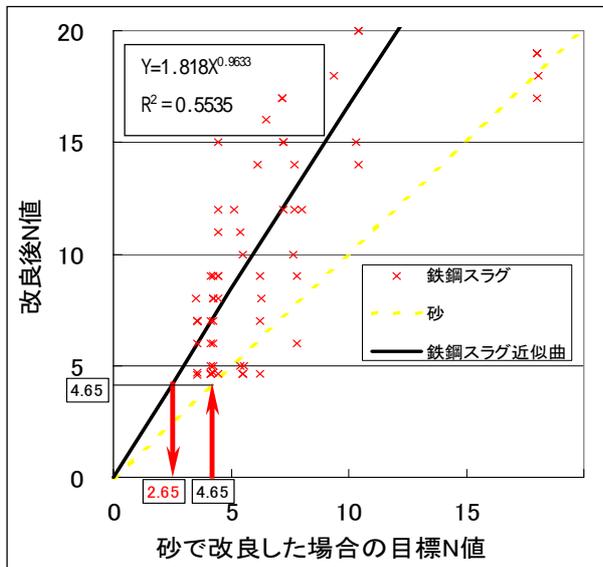


図-7 天然砂・陸上用改良型鉄鋼スラグによる改良後のN値の相関

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%

*今回の地盤条件・実証値より求めた場合に限る。

を決めれば良いこととなる。表-2に示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。

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。仮に、目標改良率16%で施工を行った場合、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出来る。

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)陸上SCP用改良型鉄鋼スラグは施工品質の検証より天然砂と遜色ない材料である事が確認できた。
- 2)中詰材に陸上SCP用改良型鉄鋼スラグを用いた場合、施工性は従来品と同等であることが確認され、地盤改良効果・杭芯強度等は従来品と同等以上の値となった。
- 3)室蘭地区においては天然材料と同じく陸上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。
- 4)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」etc、環境負荷や社会的コスト縮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出来た。
- 5)中詰材に陸上SCP用改良型鉄鋼スラグを用いた場合、天然砂の場合よりも改良体の強度が大きいいため、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出来る可能性もある。

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とさらなるコスト縮減につながる可能性もあるため、本報告を参考に各現場で活用事例が増えることを期待したい。

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いただきました。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) 「港湾の施設の技術上の基準・同解説」 平成 11 年 4 月 社団法人 日本港湾協会
- 2) 「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 財団法人 沿岸技術研究センター