

製鋼スラグを用いた SCP 工法「スマートコンパクション[®]」 の開発

Development of SCP Method Using Steelmaking Slag

本田 秀樹 HONDA Hideki JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (課長)
恩田 邦彦 ONDA Kunihiko JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (課長)
粟津 進吾 AWAZU Shingo JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (係長)

要旨

SCP 工法の中詰材として製鋼スラグを用いた「スマートコンパクション[®]」の開発に取り組んでいる。港湾構造物の耐震性評価では、製鋼スラグで改良した港湾構造物の動的解析を行い、天然砂よりも地盤改良幅を約 10% 縮小可能であることを示した。長期透水性評価では、塩基度 1.0 以下の製鋼スラグを用いた通水試験を行い、低置換改良工法への適用可能性を示した。さらに、液状化対策工法への利用に関して、施工 4.5 年経過後のスラグ杭の pH への影響と膨張挙動のモニタリング調査の結果、周辺地盤の pH 上昇は見られず、蒸気エージング処理したスラグ杭では膨張影響がないことを確認した。

Abstract:

SCP (Sand Compaction Pile) method using steelmaking slag as a stuffing material has been developed. Dynamic analysis of port structures improved by steelmaking slag showed that the improvement width could be reduced by about 10% than natural sand. In the evaluation of long term permeability, the laboratory test was carried out using steelmaking slag having basicity less than 1.0, and it was found that it can be applied to SCP method with low replacement ratio. Monitoring investigation of pH influence around pile and expansion behavior of pile 4.5 years after construction showed that no pH increase around the pile ground was observed, and it was confirmed that the steelmaking slag pile treated with the steam aged did not have the expansion effect.

1. はじめに

サンドコンパクションパイル工法 (以下、SCP 工法) は、地盤内に SCP 杭を打設して、周辺地盤を締固めることにより、地盤強度を増加 (地盤の密度増加) させる方法であり、海域における粘性土地盤の改良や陸域での液状化対策として用いられている。この中詰材には、一般的に天然砂が用いられているが、近年、環境保全やリサイクル材の活用の観点から、鉄鋼生産の副産物である製鋼スラグの利用も行われている¹⁾。製鋼スラグは、天然砂よりもせん断抵抗角が大きい特性を有しており、円弧すべりによる安定計算では、天然砂よりも改良幅の縮小が可能である。ところが、阪神・淡路大震災を契機に、港湾構造物の耐震設計にレベル 2 地震動の考え方が導入され、構造物の要求性能に応じた照査が必要となった。構造物の変形照査は、地震応答解析による方法があるが、製鋼スラグの動的特性に関する検討事例は少なく、解析手法の構築が課題であった。一方、製鋼スラグは、経時的に透水性が低下する傾向がある。このため、海域における製鋼スラグの適用対象は、杭体に透水性を期

待しない高置換率の改良に限定されており、低置換改良への適用性が課題である。また、2011 年の東日本大震災では、関東地方の沿岸部でも液状化による建物被害が発生しており、液状化対策のニーズが高まりつつある。陸上での SCP 施工においては、海域で用いられる振動締固めでは騒音・振動の発生が問題になることから、低騒音・低振動である静的締固めが行われる。製鋼スラグを用いた静的締固めによる改良効果は、施工試験により確認²⁾したが、周辺地盤への長期的な環境影響を確認する必要があった。そこで、本論文では、製鋼スラグを用いた SCP 工法「スマートコンパクション[®]」の開発として取り組んだ 3 つの課題について報告する。最初に、製鋼スラグの動的特性の把握と重力式岸壁を対象とした耐震性評価を述べる。次に、低置換改良の SCP 材への適用性を明らかにする目的で実施した長期透水性評価、最後に、液状化対策として施工試験を行った SCP 材のモニタリング調査結果を述べる。

2. 製鋼スラグで地盤改良された港湾構造物の耐震性評価

2.1 室内試験による製鋼スラグの動的特性

2.1.1 試験に用いた材料

試験材とした製鋼スラグの最大粒径は 26.5 mm、粒度分布は、技術マニュアル¹⁾に記載されている粒度範囲の中間値(均等係数 $U_c=75$)に調整した。また、比較材として豊浦標準砂(以下、豊浦砂)を用いた。試験材の物性値を表 1 に示す。

2.1.2 試験条件

製鋼スラグの変形特性と液状化特性を把握するための室内試験を実施した。試験条件を表 2 に示す。なお、供試体のサイズは、直径 300 mm×高さ 600 mm とした。

2.1.3 製鋼スラグの変形特性

製鋼スラグと豊浦砂のせん断剛性率の比較を図 1 に示す。製鋼スラグのせん断剛性率は、豊浦砂の 3 倍程度の値であった。せん断ひずみ $1 \times 10^{-4} \%$ におけるせん断剛性率 G_0 で正規化したせん断剛性比とせん断ひずみの関係を図 2 に示す。

表 1 試験に用いた材料

Table 1 Materials for experiment

	Median grain size	Density	Maximum density	Minimum density	Maximum void ratio	Minimum void ratio
	mm	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	—	—
Steelmaking slag	7.3	3.38	2.64	2.24	0.508	0.281
Toyoura sand	0.16	2.64	1.64	1.34	0.980	0.608

表 2 試験条件

Table 2 Experiment condition

Cyclic triaxial test to determine deformation properties	Relative density Dr	%	60, 80
	Confining pressure	kN/m ²	50, 100, 200
	Load frequency	Hz	0.1
Cyclic undrained triaxial test	Relative density Dr	%	60, 80
	Confining pressure	kN/m ²	100

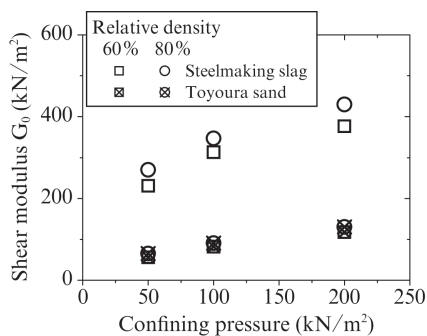


図 1 製鋼スラグと豊浦砂のせん断剛性率の比較

Fig. 1 Comparison of shear modulus

製鋼スラグは、豊浦砂と比較して、ひずみの増加によるせん断剛性比の低下割合が大きくなっているが、これは碎石などのレキ材料で行われた実験結果³⁾と同様の傾向であった。

2.1.4 製鋼スラグの液状化特性

相対密度 60%、繰返し応力比 0.894 における製鋼スラグの試験結果を図 3 に示す。軸ひずみ振幅は、伸張側に偏っており、過剰間隙比 0.95 程度に至っても軸ひずみの急激な増加はみられなかった。繰返し応力比と繰返し载荷回数の比較を図 4 に示す。図中には、液状化強度 R_{L20} (軸ひずみの両振幅 $DA=5\%$ 、繰返し回数 20 回)を示している。その結果、豊浦砂の $R_{L20}=0.133$ に対して、製鋼スラグは $R_{L20}=0.840$ であった。これらの試験結果より、製鋼スラグは豊浦砂に比べて液状化しにくい材料といえる。

2.2.1 数値解析の概要

解析対象は、水深-7m と水深-14m の重力式岸壁とした。検討断面を図 5 に示す。SCP 改良率 78.5%、製鋼スラ

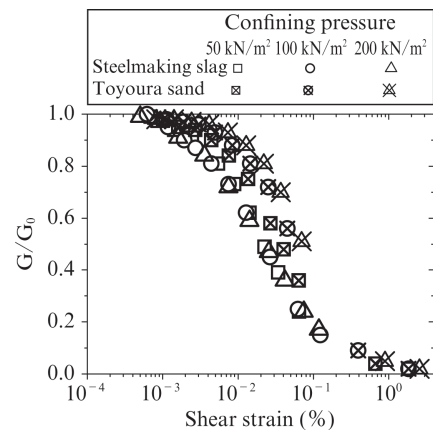


図 2 せん断剛性比 G/G_0 とせん断ひずみの関係 ($Dr=80\%$)

Fig. 2 Relation between shear modulus ratio and shear strain

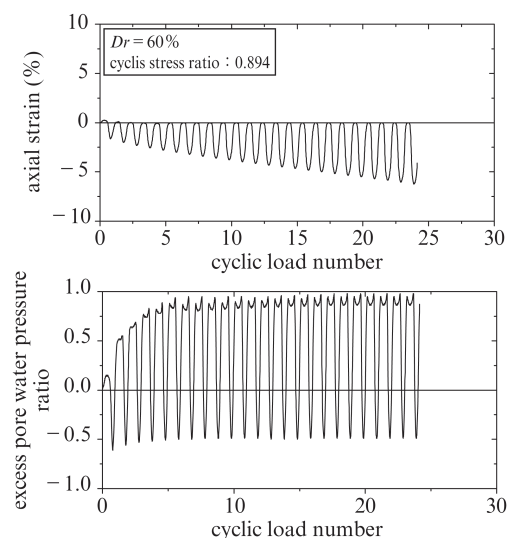


図 3 製鋼スラグの繰返し非排水三軸試験結果 ($Dr=60\%$)

Fig. 3 Result of cyclic undrained triaxial test (steelmaking slag)

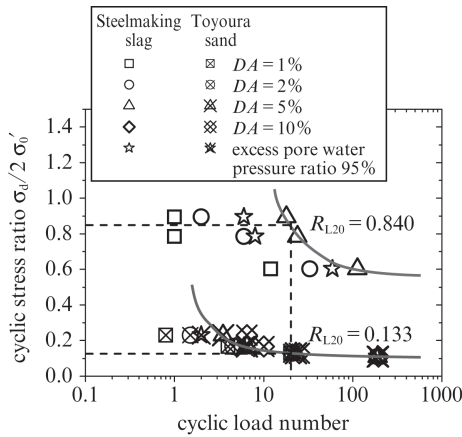


図4 繰返し応力比と繰返し载荷回数との関係 (Dr=60%)

Fig. 4 Relation between cyclic stress ratio and cyclic load number

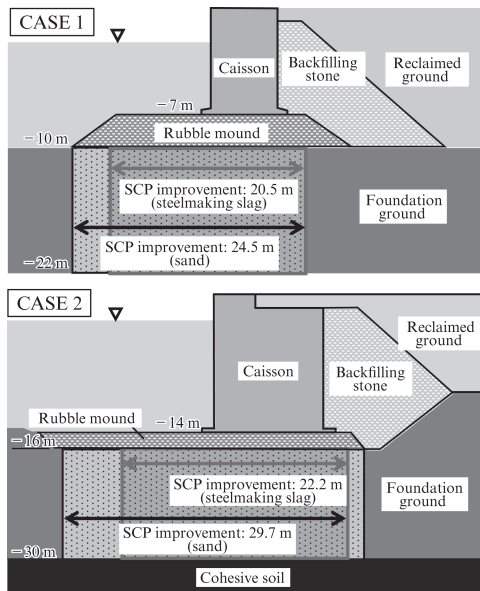


図5 検討断面

Fig. 5 Cross section of models

グのせん断抵抗角 40° 、天然砂のせん断抵抗角 35° の条件に対して、円弧すべりによる安定計算の結果、製鋼スラグによる SCP 改良幅は、天然砂よりも約 20% 縮小した¹⁾。解析は、液状化による構造物被害予測プログラム FLIP を用いた⁴⁾。解析に用いた地盤定数は、「港湾構造物設計事例集」⁵⁾ を参考とした。SCP 改良部に関して、天然砂の解析定数は、等価 N 値を 20 と仮定して簡易設定法⁶⁾ を用い、液状化パラメータは設定していない。製鋼スラグは、室内試験において豊浦砂よりも高いせん断剛性率と液状化強度が得られているが、ここでは、天然砂と同様に等価 N 値を 20 と仮定して簡易設定法で設定した。また、せん断抵抗角は、等価 N 値 20 と有効上載圧から Meyerhof の提案式で求めた相対密度に対して、製鋼スラグの三軸圧縮試験結果¹⁾ をもとに設定した。製鋼スラグの相対密度とせん断抵抗角の関係を図 6、SCP 改良部の主な解析定数の比較を表 3 に示す。入力地震動は、

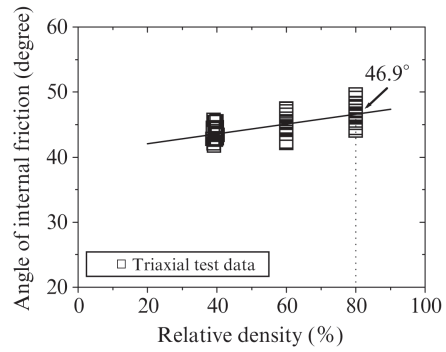


図6 製鋼スラグの相対密度とせん断抵抗角の関係

Fig. 6 Angle of internal friction of steelmaking slag

表3 SCP 改良部の主な解析定数の比較

Table 3 Analysis condition

Item	Unit	SCP improvement material	
		Steelmaking slag	Natural sand
Unit weight below water level	kN/m ³	16.0	10.0
Shear modulus	kN/m ²	1.31E + 05	1.31E + 05
Damping ratio		0.24	0.24
Internal friction angle	°	46.9	41.4
Cohesive force	kN/m ²	0	0

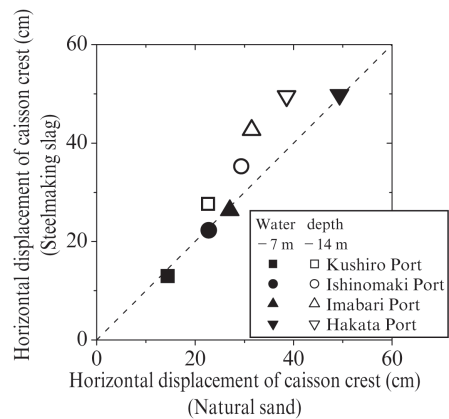


図7 岸壁天端の残留水平変位の比較

Fig. 7 Result of horizontal displacement of caisson crest

港湾用のレベル 1 地震動として公開されている波形から、卓越周期の異なる 4 波 (釧路港, 石巻港, 今治港, 博多港) を選択した⁷⁾。入力加速度振幅は、照査用震度 0.17 (水深 -7 m), 0.18 (水深 -14 m) となるように、一次元地震応答解析で決定した。

2.2.2 解析結果

岸壁天端の残留水平変位の比較を図 7 に示す。水深 -7 m の場合、地震波の卓越周期により変位量は異なるが、今回実施した全ての地震波において、製鋼スラグにより SCP により改良された岸壁天端の変位量は、天然砂の場合と同程度であった。一方、水深 -14 m の場合、製鋼スラグで SCP

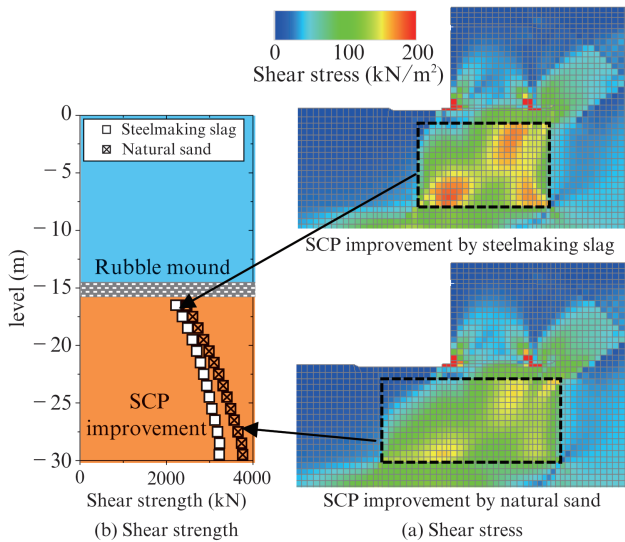


図8 せん断応力コンターとせん断力の比較 (水深-14 m)
Fig. 8 Comparison of shear stress and shear strength

表4 SCP 改良幅の比較

Table 4 Result of SCP improvement width

	Improvement width (m)	Residual displacement (cm)
Natural sand	29.7	22.6
Steelmaking slag (circular arc analysis)	22.2	27.6
Steelmaking slag (numerical analysis)	26.2	23.2

により改良した岸壁天端の変位量は、天然砂の場合よりも大きくなる結果であった。水深-14 mにおけるせん断応力 τ_{xy} コンター(図8 (a)), SCP改良部のせん断力分布を(図8 (b))に示す。図8 (b)は、図8 (a)のSCP改良部(図中の点線内)における、深さごとのせん断応力 τ_{xy} にメッシュ面積を掛け合わせたせん断力の合計値を示している。この結果より、製鋼スラグは天然砂よりもせん断抵抗角が高いため、製鋼スラグのせん断応力は、天然砂よりも大きいが、せん断力の合計値で比較すると、天然砂を用いたSCPよりも約10%小さくなることがわかった。水深-7 mの条件における同様の比較では、製鋼スラグのせん断力合計値は、天然砂よりも高くなっていた。これらのことから、ここで検討している水深-14 mの場合、天然砂の場合と同等の耐震性を確保するには、円弧すべりによる安定計算で求めた製鋼スラグのSCP改良幅を広げる必要がある。そこで、水深-14 mの条件に対して、製鋼スラグを用いた場合の岸壁天端の変位量が、天然砂と同等(誤差5%以内)となるSCP改良幅の検討結果を(表4)に示す。必要となる製鋼スラグのSCP改良幅26.2 mであり、天然砂によるSCP改良幅29.7 mと比較して、約12%縮小できることがわかった。

3. 製鋼スラグの長期透水性評価

3.1 通水試験の概要

3.1.1 試験に用いた材料

試験材は、塩基度1.0以下の製鋼スラグ3種類とした。試験材の外観を(写真1)、物性試験結果を(表5)に示す。試験材のpHについて、JIS K0058-1の溶出量試験方法に準じて、利用有姿の試料に、その10倍量の蒸留水を加えて、200回転/分で6時間攪拌後に計測した結果、試験材のpHは10.4~11.4であった。なお、試験材の最大粒径は26.5 mm、細粒分含有率は5%以下であった。

3.1.2 試験方法

試験は、塩ビ製の容器(直径200 mm×高さ200 mm)内に、相対密度80%となるように試験材を突き固めた供試体を作製して、人工海水(金属腐食試験用アクアマリン、八洲薬品株式会社)を上向流で通水させた。試験状況を(写真2)に示す。本試験は、低置換改良のSCP材への適用検討であることから、通水6か月後の透水係数 1×10^{-3} cm/s確保を目

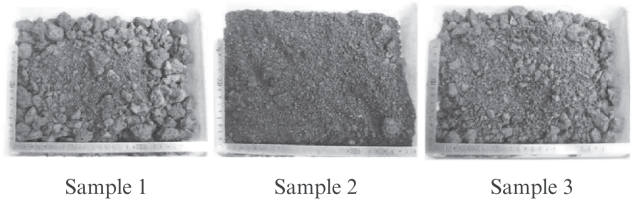


写真1 試験材料の外観
Photo 1 Test materials

表5 試験材の物性値

Table 5 Physical properties of test materials

item		unit	Sample 1	Sample 2	Sample 3
Grain Size	Maximum grain size	mm	26.5	26.5	26.5
	Fines content	%	1.8	3.8	2.2
pH			10.4	11.0	11.4
Density of test piece (Relative density $D_r = 80\%$)		kN/m ³	15.4	21.9	17.1

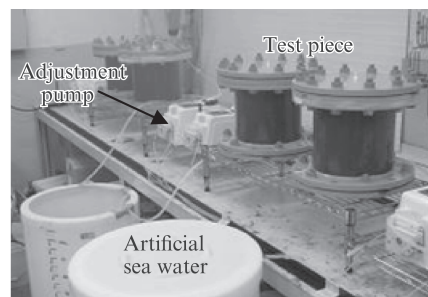


写真2 通水試験の状況
Photo 2 Situation of permeability test

標とした。また、製鋼スラグの経時的な透水性低下は、間隙水 pH に関連していると考えられる。このため、通水速度は、 $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ (試料 1, 2, 3) と $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ (試料 2, 3) の 2 条件で行い、通水期間 1 年間 (通水速度 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ は 6 ヶ月間) とした。透水係数は、通水前と通水後 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12 ヶ月に透水試験を行い、透水係数を計測した。透水試験は、試料を乱さないように通水試験の容器をそのまま利用して、試料容器の上部にスタンドパイプを取り付けて、変水位透水試験を行った。また、間隙水 pH 変化にともなう Ca や Mg の析出有無を調べるため、スラグ試料通水後の人工海水を採取して、Ca と Mg イオンの分析を行った。

3.2 試験結果

3.2.1 透水係数の経時変化

通水速度 $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ における、透水係数の経時変化を図 9 に示す。その結果、今回実施した製鋼スラグ 3 種類全て、目標とした透水係数 (通水 6 ヶ月後の透水係数 $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 確保) を満足することが確認できた。通水速度 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ での透水係数の経時変化を図 10 に示す。通水速度 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ においても、透水係数の目標値を満足することを確認した。試料 2 の透水係数は、通水速度 $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ よりも若干低くなる傾向がみられたが、試料 3 の透水係数は

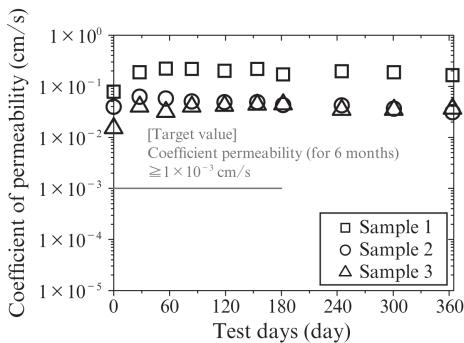


図 9 透水係数の経時変化 (通水速度 $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$)
Fig. 9 Result of coefficient of permeability

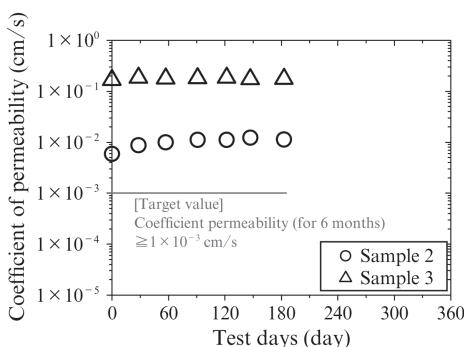


図 10 透水係数の経時変化 (通水速度 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$)
Fig. 10 Temporal change of coefficient of permeability

同程度であり、今回の実験では、透水性に対する通水速度の顕著な影響はみられなかった。

3.2.2 間隙水の pH と人工海水中の Ca, Mg の経時変化

試料 3 を通水後の人工海水の pH の経時変化を図 11 に示す。間隙水の pH は、通水直後に最大値 9.7 を示し、通水 60 日後には 8.6 程度に低下した後、8.5 程度で推移していた。これは、海水中の Mg イオンが水酸化物として析出する目安と考えられる pH10 以下であった。試料 1, 試料 2 も同様の pH 傾向であった。試料を通水後の人工海水に含まれる Ca と Mg の測定結果を図 12 に示す。その結果、Ca は、通水直後において、人工海水の含有値よりも多くなっていった。これは、製鋼スラグからの溶出に起因していると考えられ、この影響により通水直後の間隙水 pH が上昇している。Mg は、通水直後において、人工海水の含有値よりも少なくなっていた。これは、間隙水の pH 上昇により、海水中の Mg の一部が水酸化物としてスラグ間隙に析出しているものと考

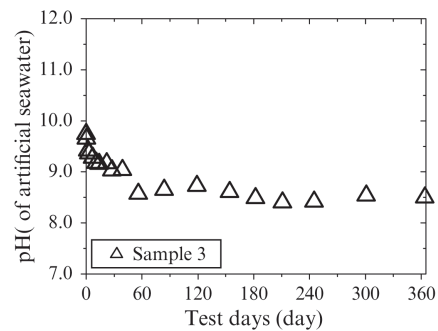


図 11 間隙水 pH の経時変化
Fig. 11 Temporal change of pore water pH

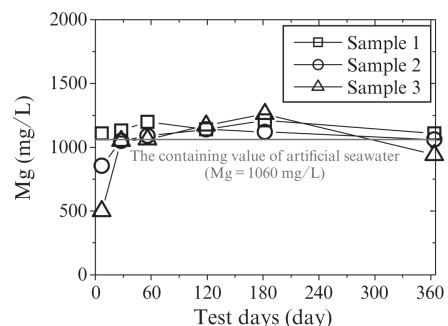
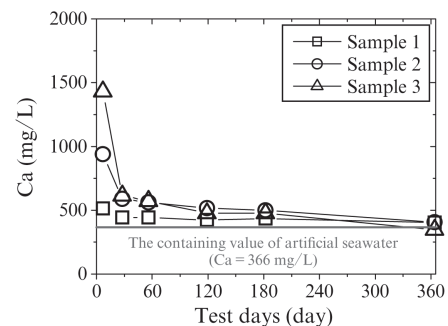


図 12 通水後の Ca, Mg の経時変化
Fig. 12 Temporal change of Ca and Mg

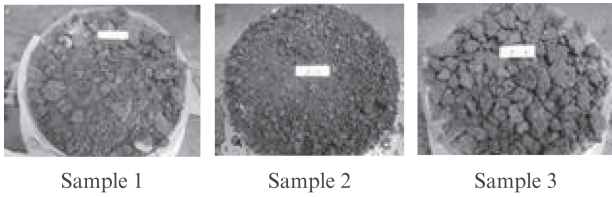


写真3 試験終了時の試験材の状態
Photo 3 Condition of test materials after test

えられる。一方、通水60日以降、CaとMgは、人工海水の含有値と同程度であり、また、間隙水pH8.5程度で推移していることから、スラグ間隙の析出が抑制されていると考えられる。試験終了時の試料を写真3に示す。試料3の一部で、手でほぐすことができる程度の弱い固化が見られたが、他の2種類に固化はみられなかった。また、CaやMgによる白色の析出物も観察されなかった。

4. 静的締固めによる SCP 中詰材に用いた製鋼スラグのモニタリング調査

4.1 モニタリング調査の概要

液状化対策を目的とした SCP 中詰材への製鋼スラグの適用性を実証するため、2012年2~3月にかけて、静的締固めによる現地施工試験を行い、地盤改良効果や施工中の騒音・振動などの施工性が天然砂と同等であることを確認した²⁾。施工試験後、SCP 中詰材に用いた製鋼スラグの周辺地盤への pH の影響とスラグ杭の膨張挙動のモニタリング調査を実施している。pH の測定位置を図13、スラグ杭の膨張測定を図14に示す。pH 計測は、杭芯、杭間(隣の SCP 杭との中間)、SCP 杭より 1.0 m と 3.0 m 地点の 4 ケ所で実施した。計測深度は、地下水位の表面 G. L. -1.5 m と計測井戸の最深部 G. L. -2.5 m とした。スラグ杭の膨張測定は、中詰材とした製鋼スラグの鉛直方向の膨張挙動の把握を目的としている。ここでは、スラグ杭の直上に荷重 5 kN/m²、10 kN/m² の鉄板を敷設して、基準点から鉄板 3 ケ所の浮き上がり量を計測した。また、中詰材に用いる製鋼スラグのエージング有無と膨張挙動の関係を明らかにするため、計

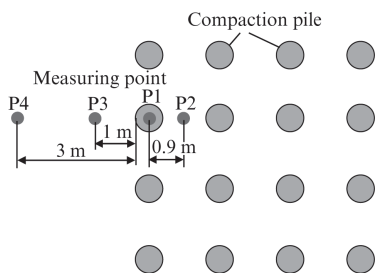


図13 周辺地盤の pH 測定位置
Fig. 13 Measuring point of pH

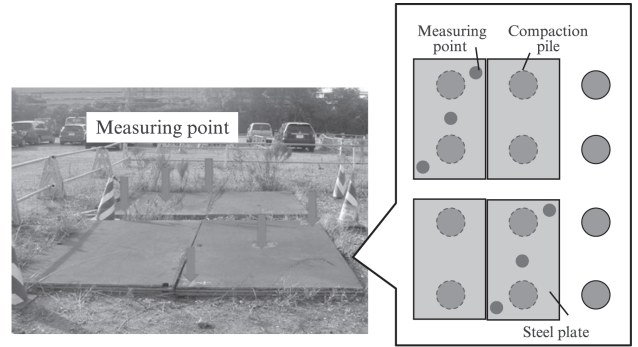


図14 スラグ杭の膨張測定

Fig. 14 Expansion measuring of steelmaking slag pile

測するスラグ杭は、蒸気エージング材と未エージング材の2種類を対象とした。

4.2 調査結果

周辺地盤の pH 測定結果を図15に示す。スラグ杭芯(P1)の pH は、ゆるやかな低下傾向がみられるが、施工4.5年経過後においても pH12 程度であった。一方、スラグ杭間(P2)、スラグ杭から 1.0 m (P3) と 3.0 m (P4) では、杭材に起因すると考えられる顕著な pH 上昇は観察されなかった。なお、今回の施工試験場所は、地表面から G. L. -1.2 m ~ -1.6 m にかけて、鉄鋼スラグ路盤材が存在しており、施工試験前の測定では pH9~10 程度であった。スラグ杭の膨張測定結果を図16に示す。縦軸のプラス方向は、スラグ杭の膨張に

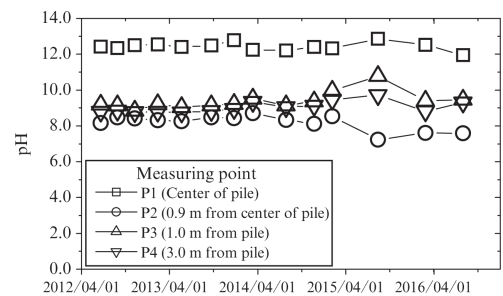


図15 スラグ杭周辺の pH 測定結果

Fig. 15 Temporal change of pH around steelmaking slag pile

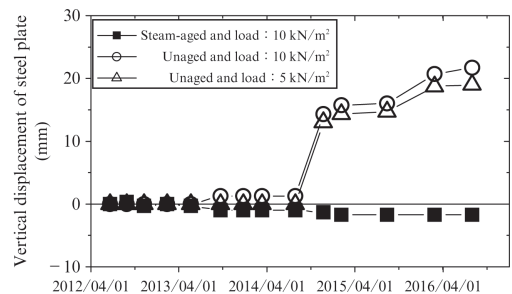


図16 スラグ杭の膨張測定結果

Fig. 16 Temporal change of expansion of steelmaking slag pile

よる鉄板の浮き上がり量を示している。中詰材に未エージングの製鋼スラグを用いた場合、上載荷重 5 kN/m^2 、 10 kN/m^2 の両方において、約 20 mm の浮き上がりが観察された。蒸気エージング処理を行った製鋼スラグ (JIS A 5015 附属書 B の水浸膨張試験による水浸膨張比 0.46%) の場合には、浮き上がりは生じていなかった。このことから、本工法への製鋼スラグ利用では、事前のエージング処理が望ましいと考えられる。

5. おわりに

SCP 材への製鋼スラグの利用技術として、海域の粘土地盤改良への利用に対する耐震性と長期透水性の評価、陸域の液状化対策に用いる場合の環境影響モニタリングを実施した。耐震性評価では、製鋼スラグの動的特性把握の室内試験と解析検討を行い、今回の条件では、製鋼スラグの SCP 改良幅を天然砂よりも約 10% 縮小しても、同等の耐震性を有することがわかった。長期透水性の評価では、塩基度 1.0 以下の製鋼スラグを用いた通水試験の結果、目標とした透水係数を満足することを確認し、低置換改良の SCP 材への適用可能性を示した。また、液状化対策用 SCP 材に用いた製鋼スラグの pH の影響や膨張挙動のモニタリング調査の結果、施工 4.5 年経過後においても、杭芯の pH は 12 程度だが、周辺地盤の顕著な pH 上昇はみられなかった。膨張挙動では、未エージング材には約 20 mm 程度の隆起が生じていることから、本工法にはエージング処理した製鋼スラグが望ましいことがわかった。

国内の沿岸域は、地盤が軟弱であることが多く、また、今

後の発生が懸念される大地震への対策・強化としての地盤改良技術は必要である。このようなインフラ整備の資材として、副産物である鉄鋼スラグを普及していくことで、環境負荷の少ない持続的発展が可能な社会の構築に貢献したいと考えている。

参考文献

- 1) (一財) 沿岸技術研究センター. 「港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル」. 2015. 2.
- 2) 恩田邦彦, 本田秀樹, 吉武英樹. 静的締固めによるサンドコンパクションパイルの中詰材としての鉄鋼スラグ「スマートコンパクション」の適用性検討. JFE 技報. 2013, no. 31.
- 3) 上部達生, 長田 信. 大型せん断リング土槽振動実験によるレキ材の動的変形特性. 港湾技研資料. 1990, no. 663.
- 4) Iai, S.; Matsunaga, Y.; Kameoka, T. Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility. Report of The Port and Harbour Research Institute. 1992, vol. 29, no. 4, p. 27-56.
- 5) (一財) 沿岸技術研究センター. 港湾構造物設計事例集. 2007.
- 6) 森田年一, 井合 進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博. 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法. 港湾技術研究所資料. 1997, no. 869.
- 7) 国土技術政策総合研究所港湾施設研究室
<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>



本田 秀樹



恩田 邦彦



粟津 進吾