

高炉水砕スラグを低置換率 SCP 工法材として適用した 改良地盤の変形特性

九州大学大学院 学生会員 ○坂田智美

九州大学大学院 フェロー会員 安福規之 正会員 石蔵良平

1. はじめに

高炉水砕スラグは、銑鉄を製造する過程で発生する産業副産物である。平成 28 年度の年間製造量は、高炉スラグの生産量の約 2,500 万 t に対し高炉水砕スラグは約 2,000 万 t であり、約 8 割を占める¹⁾。高炉水砕スラグの特徴には、高炉水砕スラグは粒度分布が自然砂に類似し、軽量であり透水性に優れ、水と接触すると自硬性を発揮する等が報告されている²⁾。利用方法として、主に 7 割以上が高炉セメント等のセメント材料であるが、他のリサイクル材との競合などによりスラグの有効利用率が低下することが予想されるため、今後も利用用途拡大の検討が必要である。本研究では、高炉水砕スラグを地盤改良工法の中でより経済的な置換率 30 % 程度の低置換サンドコンパクションパイル工法の置換材に適用することを想定し、高炉水砕スラグの強度や透水性の経時変化を検討してきた³⁾。そこで今回は高炉水砕スラグと比較材料の自然砂を砂杭材として使用した施工事例を有限要素法による二次元地盤変形解析を用いて行い、高炉水砕スラグが有する土質特性が改良地盤の挙動に及ぼす影響について解析を通して考察した。

2. 解析手法

高炉水砕スラグを低置換 SCP 改良として軟弱地盤の改良に適用することを目的としており、置換率 30 % の SCP 杭を想定した。図-1 に示すように、図-2 の従来工法の低置換率 SCP 工法改良仕様を二次元化(軸対象条件)し、検討断面は杭半径 1 m、杭間粘土は図-2 より SCP 杭間粘土の距離を算出し 0.77m とした。盛土高は 12 m、杭深は 20 m でモデル化した。構成モデルは、粘性土は修正カムクレイモデル、造成杭は Mohr-Coulomb 破壊基準による弾塑性モデル、盛土は線形弾性モデルでモデル化した。また、高炉水砕スラグを改良杭として適用すると想定したとき、粘着力と内部摩擦角、そして透水係数を経時的な変形係数として設定し硬化特性を表現した。解析に使用した土質パラメーターを表-1 に示す。高炉水砕スラグ造成杭の変形係数については、既往の研究による調査値を参考に値を設定した³⁾⁴⁾⁵⁾。検討ケースを表-2 に示す。また、盛土の载荷ステップは 10 日間で 1.2m として施工することを想定した。

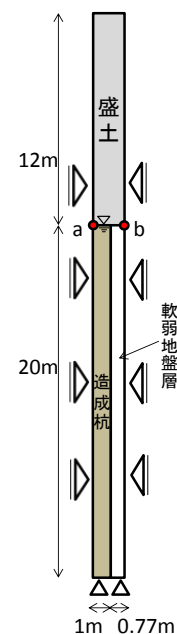


図-1 検討断面

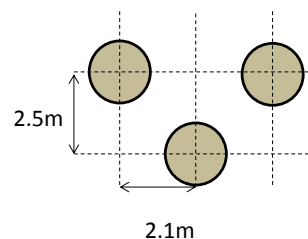
図-2 SCP 杭位置
(置換率 30%, 従来工法)

表-1 解析に使用した土質パラメーター

パラメーター	記号	原地盤 (粘性土)	盛土材	砂杭	高炉水砕スラグ			
					0日	100日	160日	220日
圧縮係数	λ	0.521	-	-	-			
膨潤指数	κ	0.052	-	-	-			
飽和単位体積重量(kN/m ³)	γ_{sat}	16	20	17	16			
初期間隙比	e_0	3	-	0.68	0.94			
限界状態応力比	M	1.2	-	-	-			
過圧密比	OCR	1	1	-	-			
静止土圧係数	K_0	0.5	-	-	-			
ポアソン比	ν'	0.3	0.3	0.3	0.3			
透水係数(m/sec)	k	8.1×10^{-9}	1.0×10^{-5}	3.6×10^{-4} (経時変化なし)	4×10^{-5}	5×10^{-7}	2×10^{-8}	2×10^{-9}
弾性係数(MPa)	E	-	7	5 (経時変化なし)	5	200	300	400
内部摩擦角(°)	ϕ	30	-	30 (経時変化なし)	30	35	35	35
粘着力(kN/m ²)	c_d	0	-	0 (経時変化なし)	0	300	400	600

表-2 検討ケース一覧

case No	観測点	杭材	材料特性	改良率	杭の強度 (地盤安定後)
case1	a	自然砂	硬化しない 透水性変化なし	SCP30%	ϕ :30 c:0
	b				
case2	a	高炉水砕スラグ	経時的に硬化 透水性急低下	SCP30%	ϕ :35 c:600
	b				

3. 解析結果および考察

図-3に図-1に示す観測点a, bにおける検討ケース case1, case2 の改良地盤の鉛直沈下量を示す。それぞれの case の観測点 a の改良杭表面の中心点と観測点 b の杭間粘土表面の中間点の鉛直沈下量を比較すると、いずれの case も観測点 b の沈下量が多いことがわかる。case1 と case2 を比較すると、同じ改良率でも case2 の高炉水砕スラグを杭材に用いた改良地盤は case1 の自然砂杭の改良地盤より鉛直沈下量は 1/2 程度になっている。今後は高炉水砕スラグの硬化が緩やかに変化する場合(例えば自然砂を混合するなど)の改良杭についても同様の条件で解析を行い、適切な改良材を検討する。

図-4 に解析結果より得られた盛土載荷完了直後の過剰間隙水圧分布を示す。case1 と case2 を比較すると杭内部の過剰間隙水圧の発生傾向は深さによる違いはあるが同程度の値が発生していることがわかる。今後は杭間粘土強度変化についても検討し、高炉水砕スラグの改良杭としての適用性を明らかにする予定である。

4. まとめ

高炉水砕スラグを低置換率 SCP 工法の置換材として適用することを想定し、有限要素法による二次元地盤変形解析を用いて改良地盤の挙動を解析した結果以下の知見が得られた。1) 同じ改良率で杭材を自然砂と高炉水砕スラグとした改良地盤は、自然砂と比べ高炉水砕スラグの改良地盤の鉛直沈下量は約 1/2 低減した。2) 過剰間隙水圧のコンター図より盛土載荷直後の高炉水砕スラグの過剰間隙水圧は自然砂と同程度の値が発生する結果となった。

【謝辞】本研究の一部は、科学研究費補助金(課題番号 JP 15K18114)の支援を得て実施したものです。また、解析を行うにおいて本研究室の甲斐田さんにご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】1) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報, 2017.7. 2) (社)地盤工学会：高炉水砕スラグの地盤工学的利用促進に関する研究委員会報告書, 2010. 3) 坂田智美他：地盤改良材としての適用を想定した高炉水砕スラグの強度・透水性の時間依存性, 第12回地盤改良シンポジウム論文集, pp.377-380. 2016. 4) 篠崎晴彦 他：高炉水砕スラグの硬化特性と地盤改良工法への適用, 土木学会論文集 C, Vol.62 No.4, pp.858-869, 2006. 5) 水野健太 他：高炉水砕スラグを用いた低置換率 SCP 改良地盤の強度・変形特性, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, No.3, pp.187-202, 2008.

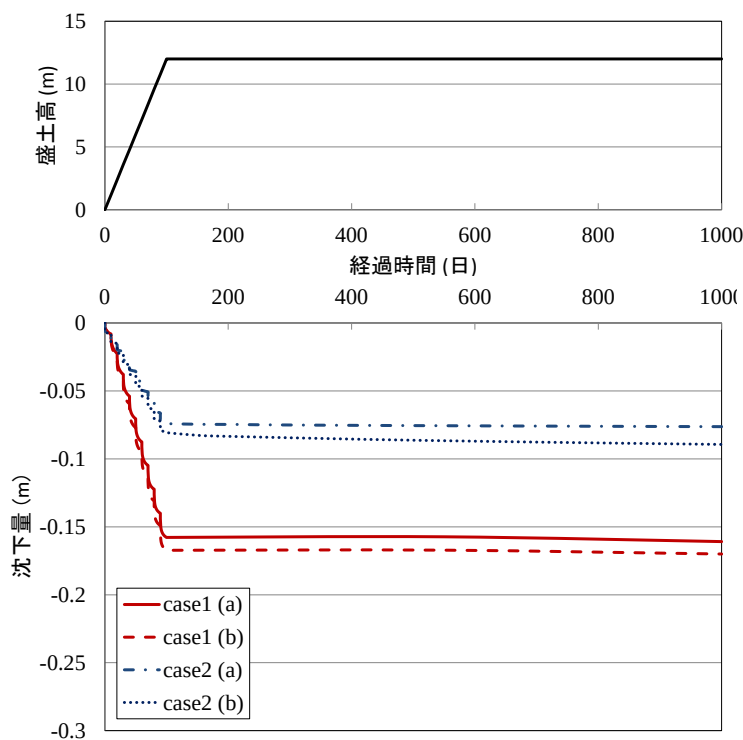
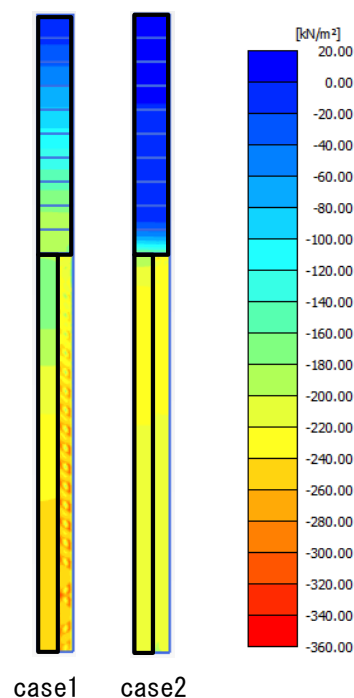


図-3 改良地盤の鉛直沈下量の経時変化

図-4 過剰間隙水圧コンター図
(盛土載荷完了直後)