

高炉水砕スラグを用いた低置換率サンドコンパクションパイル工法の設計法の提案

山口大学工学部 正会員 松田博，復建調査設計(株) 正会員○来山尚義
 長棟興産(有) 正会員 中野恭夫，山口大学工学部 正会員 高宮晃一
 山口大学工学部 学生会員 村上剛敏，山口大学工学部 大平尚美

1. まえがき 低置換率サンドコンパクションパイル(SCP)工法における砂杭材料には強度・透水性が要求され、これまでは主に海砂が用いられてきた。ところが、近年は環境問題等から海砂の採取が困難になっており、代替材の開発が求められている。一方、銑鉄の生成過程において生産される高炉水砕スラグは、海砂と同等の強度・透水性を持つ材料であり、海砂の代替材料として期待される。しかし、筆者らがこれまでに行った実験結果によると、高炉水砕スラグは時間とともに硬化する潜在水硬性を有していて、潜在水硬性の発現により強度増加が生じ透水性が低下した¹⁾。さらに高炉水砕スラグを締固めると透水性の低下が著しくなる、との報告もある²⁾。そこで、高炉水砕スラグを締固めを伴わないサンドドレーン(SD)工法に適用した場合、施工直後においては砂杭の強度増加は期待できないが高い透水性を確保でき、また時間とともに硬化して強度増加が生じる。一方、透水性は低下するがこの場合においても 10^{-3}cm/s オーダー程度の透水性が確保でき、長期的には SCP 工法と同等の効果が期待できると考えられる。本報告は、これまでの実験結果を整理し、高炉水砕スラグを SD 工法として用いる場合、砂柱の硬化後に適用する SCP 工法での設計計算式について提案を行ったものである。

2. 複合地盤の強度評価について 図-1、図-2 は所定の相対密度でモールドに詰めた高炉水砕スラグを海水中および水道水中で長期間養生した場合(図中 BF slag②)¹⁾、および定常浸透状態に保った場合(図中 BF slag⑤)³⁾の CD 試験結果から求めた粘着力 c_d と内部摩擦角 ϕ_d の経時変化を示したものである。図-1 は粘着力の経時変化を示したものであって、非通水の場合は時間とともに増加するのに対し、定常浸透状態に保った場合は非通水に比べて増加の程度は小さい。しかし、いずれの場合においても約 4 ヶ月経過すれば $c_d=10\text{kPa}$ 以上となっている。図-2 は内部摩擦角の経時変化を示したものであって、定常浸透状態に保った場合においても $\phi_d=35^\circ$ 以上となっている。これより、高炉水砕スラグが硬化した場合の粘着力 c_s および内部摩擦角 ϕ_s として、 $c_s=10\text{kPa}$ および $\phi_s=35^\circ$ を採用する。したがって、高炉水砕スラグが硬化した場合、高炉水砕スラグ+粘土の複合地盤のせん断抵抗力は、一般に用いられる計算式⁴⁾に砂杭の粘着力項 $a_s \cdot c_s$ を考慮した次式により与える。 $\tau = (1-a_s)(C_0+kz+\mu_c \sigma_z \Delta C/\Delta P \cdot U) + (\gamma_s z + \mu_s \sigma_z)a_s \tan \phi_s \cos^2 \theta + a_s \cdot c_s$ (1)

ここに、 c_s ：硬化した高炉水砕スラグの粘着力(10kPa)

次に、式(1)において粘着力項 $a_s \cdot c_s$ および $\phi_s=35^\circ$ がせん断抵抗力 τ に及ぼす影響について検討する。

表-1 は検討条件の一覧表を示したものである。このうち Case1 は粘性土地盤の強度が低い工事開始直後の地盤を、Case2 は段階施工途中において粘性土地盤の強度が増加した状態を想定したものである。各々の

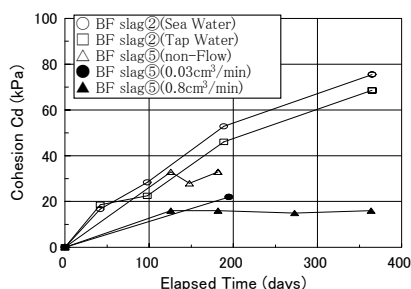


図-1 粘着力経時変化

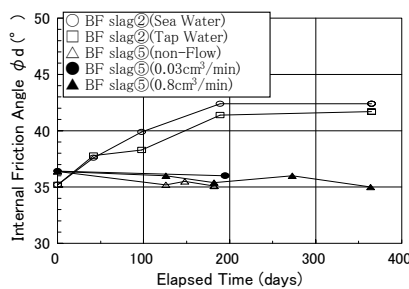


図-2 内部摩擦角経時変化

表-1 検討条件一覧表

Case	a_s	γ_c (kN/m^3)	$\Delta C/\Delta P$	σ_z	U	地盤条件 材料
1-1	0.3	15	0.3	100	0.8	初期地盤 スラグ
	3	7	1.5Z	35	20	
1-2	0.3	15	0.3	100	0.8	初期地盤 海砂
	3	10	1.5Z	30	0	
2-1	0.3	15	0.3	100	0.8	段階施工中 スラグ
	3	7	30+1.5Z	35	20	
2-2	0.3	15	0.3	100	0.8	段階施工中 海砂
	3	10	30+1.5Z	30	0	

キーワード 高炉水砕スラグ，サンドコンパクションパイル工法，せん断強度，応力分担，圧密速度
 連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学工学部社会建設工学科 TEL 0836-85-9324

ケースについて、深度 $z=5, 10, 15, 20\text{m}$ およびすべり面と水平面のなす角 $\theta=0\sim 90^\circ$ における高炉水砕スラグのせん断抵抗力 τ_{slag} と海砂のせん断抵抗力 τ_{sand} の比較を行った。図-3 は Case2 において $\tau_{\text{slag}}/\tau_{\text{sand}}$ と θ の関係を示したものである。同図によるといずれの場合においても $\tau_{\text{slag}}/\tau_{\text{sand}}$ は 1.0 以上となっていて、高炉水砕スラグの柱が潜在水硬性により硬化した場合、海砂で打設したサンドコンパクションパイルと同等かそれ以上の安全率を確保できる。

3. 応力分担比および沈下低減係数について 砂柱に応力集中がある場合の中空円柱の圧密方程式は吉国⁵⁾によって与えられている。図-4 は、図-1 および図-2 と同じ CD 試験結果から求めた E_{50} の経時変化を示したものである。 E_{50} は拘束圧が 200kPa 以下における平均値を示した。同図より、未硬化(養生 0 日)状態、硬化状態ともにばらつきが大きい、それぞれ最小値である $E_{50}(\text{未硬化})=7000\text{kPa}$ 、および $E_{50}(\text{硬化})=14000\text{kPa}$ を採用する。また、表-1 に示した Case1 のモデル地盤において、深さ 10m の位置における粘着力は $c=15\text{kPa}$ であり、 $E_{50}=100 \cdot c$ と仮定すると、 $E_{50}=1500\text{kPa}$ である。Case2 では同様に $c=45\text{kPa}$ 、

$E_{50}=4500\text{kPa}$ となる。高炉水砕スラグおよび粘性土のポアソン比 ν_s 、 ν_c を 0.3 と仮定してそれぞれのせん断剛性率 G を決定する。そして $a_s=0.3$ 、 $d_e=1.25\text{m}$ とすると、 $d_w=2.28\text{m}$ 、 $n=2$ であり、これらより圧密方程式を解く。この結果、沈下低減率(β_2)は Case1 の未硬化では 0.56、硬化では 0.38、Case2 では未硬化で 0.81、硬化で 0.65 を得る。また、応力分担比(β_3/β_4)は Case1 の未硬化では 3.5、硬化では 6.7、Case2 では未硬化で 1.2、硬化で 2.5 となる。これらより、硬化した場合に得られた値は、現状の低置換サンドコンパクションパイル工法の設計において用いられている値($a_s=0.3$ において応力分担比 $m=3$ 、沈下低減率 $\beta=0.625$)とほぼ等しく、硬化した高炉水砕スラグを用いる場合においても現行設計法と同等の取り扱いを行うことが出来ると考えられる。なお、未硬化の場合においても砂柱に応力集中が生じている結果となっているが、設計上は安全を考慮しこれを考慮しないこととする。

4. 圧密速度について 硬化した高炉水砕スラグは $k=10^{-3}\text{cm/s}$ オーダーであり、設計においてはウエルレジスタンスを考慮する。図-5 はドレーン径 $d_w=1.25\text{m}$ 、 $a_s=0.3$ ($d_e=2.28\text{m}$)、ドレーン長 20m 、粘土の圧密係数 $C_v=C_h=100\text{cm}^2/\text{day}$ 、粘土の透水係数を $k_c=1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ とし、砂柱の透水係数が $k_s=\infty \sim 1 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ まで変化した場合の時間と圧密度の関係を示したものである。同図より、砂柱の透水係数が $k_s=5 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ より低下すると、時間遅れが著しくなる。したがって、硬化後の透水係数が $k_s=1 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ であれば大きな圧密遅れは生じない。

5. まとめ 高炉水砕スラグをサンドドレーン工法の砂柱として用いると、長期的には硬化し、低置換率サンドコンパクションパイル工法と同等の効果が期待できることから、設計法の提案を行った。その主要な点は以下の通りである。①砂杭-粘土のせん断強度式で高炉水砕スラグが硬化後の粘着力を見込む、②応力分担比、沈下低減係数は現行の値を使用する、③透水性についてはウエルレジスタンスを考慮する。

参考文献 1)松田他：地盤工学において用いられる水砕スラグの特性、土と基礎、48-6, pp.22-24, 2000. 2)佐藤他：地盤改良材としての高炉水砕スラグの土質工学的性質とその経時変化について、土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集Ⅲ, pp.601-602, 1982. 3)来山他：海水浸透が高炉水砕スラグの潜在水硬性に及ぼす影響、第 36 回地盤工学研究発表会, pp.647-648, 2001. 4) 社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻），pp.557-565, 1999. 5) 吉国洋：バーチカルドレーン工法の設計と施工管理，技報堂，1979.

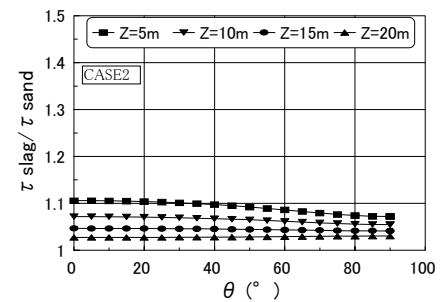


図-3 $\tau_{\text{slag}}/\tau_{\text{sand}}$ (CASE2)

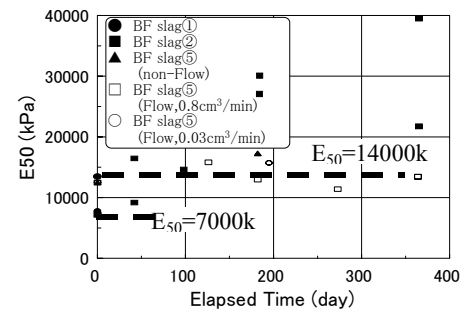


図-4 E_{50} の経時変化

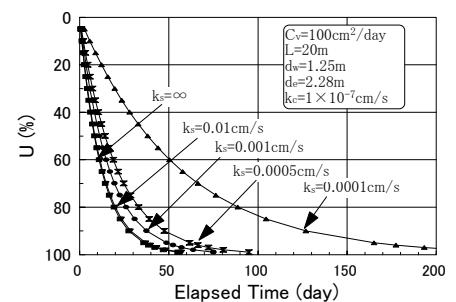


図-5 圧密度-時間関係