

高炉水砕スラグを用いた地盤改良工法の試験施工結果と固結要因の検討

A Field Test of Granulated-Blast-Furnace-Slag for SCP-method and the Study of its Hydraulic-Property

尾島啓介*・小林延郎**・篠崎晴彦***

OJIMA, Keisuke , KOBAYASHI, Nobuo and SHINOZAKI, Haruhiko

* (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 主任研究員

** 鐵鋼スラグ協会 港湾工事材料WG 主査

*** 鐵鋼スラグ協会 港湾工事材料WG 委員

Granulated-blast-furnace-slag (GS) has properties of light-unit-weight and high internal-friction-angle, high-permeability as material of earthwork. The author investigated the possibility as sand-compaction-pile (SCP) to propagate the use for port construction. The result shows that the GS has sufficient strength for SCP but cannot be utilized for SCP which is required for permeability because of remarkable hardening by hydraulic-property. Therefore we studied factors for hydraulic-property of GS and the reason SCP had hardened remarkably.

KeyWords: granulated-blast-furnace-slag, SCP, hydraulic property, shear-strength, permeability

1. 高炉水砕スラグの特徴

高炉水砕スラグ (以下、水砕という) は、製鉄工程の高炉で鉄鉄と分離された溶融物を水で急冷して生成される砂状の副産物であり、その概観を図-1 に、化学成分を表-1 にそれぞれ示す。水砕は主にカルシウム、シリカ、アルミナ等を含むセメントと類似した化学組成を有し、水との水和反応によって固結する性質 (潜在水硬性) を有する。さらにこの潜在水硬性はアルカリの作用によって著しく促進されることから、従来主に高炉セメントの原料として用いられてきた。一方、土工用材料としての水砕については、平成元年 7 月に (財) 沿岸開発技術研究センターより「港湾工用水砕スラグ利用手引書」¹⁾ が刊行された。ここでは、軽量 ($\gamma_t \leq 1.3t/m^3$)・内部摩擦角大 ($\phi \geq 35^\circ$)、透水性大 ($k=10^{-1} \sim 10^{-2}cm/s$) という特性を有し、裏込め、路床等として有用な材料であることが示されている。



図-1 水砕の概観

さらに同センター及び鐵鋼スラグ協会では水砕の用途拡大のためサンドコンパクションパイプ (以下 SCP という) の適用性について、室内及び現場施工試験により調査した。以下に、結果について述べる。

表-1 水砕の化学成分の例 (港湾工用水砕スラグ利用手引書より抜粋)

化学成分	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	S	MnO	FeO
含有率(%)	33.4	41.0	14.5	6.0	1.0	0.7	0.4

2. 水砕の SCP 材としての室内、現場試験

水砕は固結に伴う粘着成分の付加により、せん断強度は増加する反面その透水性は低下することが既にいくつ

かの論文で明らかとなっている。²⁾そこで、現場試験施工に先立って室内試験により長期的な水砕のせん断強度・透水性の経時変化を調査した。

2.1 水砕の長期強度・透水性 (室内試験)

室内試験は、試験施工と同一産地の水砕を事前に実施した最小密度・最大密度試験 (JIS A 1224) の結果に基づき相対密度 60%, 80%, 100% の締固め状態にしてそれぞれ供試体を作成し、6ヶ月間のせん断強度・透水係数の変化を調査した。図-2 に供試体及び養生条件の概要を示す。図-3 に各相対密度での三軸圧縮試験 (CD) により内部摩擦角、粘着力の経時変化を、図-4 に透水係数の経時変化をそれぞれ示す。

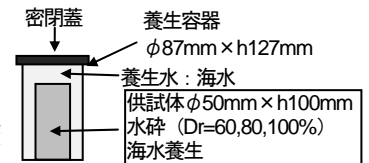


図-2 室内試験の供試体概要

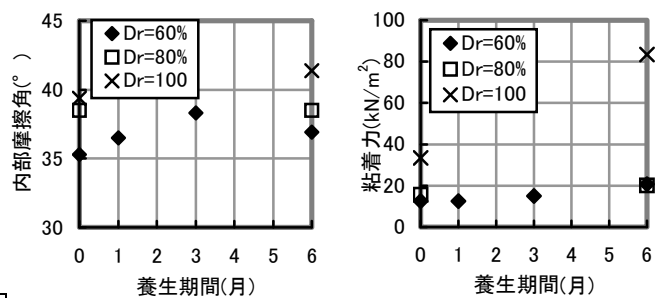


図-3 三軸 CD 試験によるせん断強度の経時変化

図より、内部摩擦角および粘着力はそれぞれ相対密度が大きいほど大きくなる。内部摩擦角については、いずれも 35° 以上確保しているが、その経時変化については明確ではない。また、相対密度 60%, 80% のケースにおけ

る粘着力の6ヵ月間の増加はわずかであるが、100%のケースでは6ヵ月間で大幅な増加が認められた。また、透水係数は相対密度が大きくなるにつれて小さくなる傾向を示しており、6ヵ月後にはいずれの相対密度においても養生0ヵ月に比べて小さくなるが、 10^{-2}cm/s 以上と良好であった。今回の室内試験においても「港湾工用水砕スラグ利用手引書」に示される内部摩擦角 $\phi \geq 35^\circ$ 、透水係数 $k=10^{-1}\sim 10^{-2}\text{cm/s}$ が確認できた。

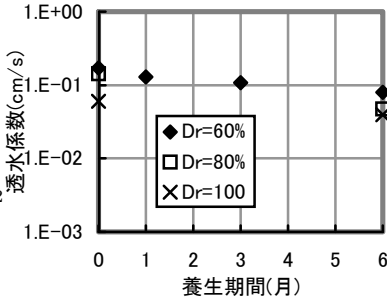


図-4 透水係数の経時変化

2.2 水砕 SCP 現場試験施工

今回の試験施工現場は海上の埋立予定地であり、外周護岸部は高置換 SCP (改良率 80%)、中仕切護岸部は低置換 SCP (改良率 30%) で地盤改良された。各杭の仕様はいずれも杭長 $L=11.5\text{m}$ 、 $\phi=2.0\text{m}$ であり、その内水砕 SCP は高置換部 42 本、低置換部 34 本の計 76 本打設した。

調査は、打設直後 1.5, 3, 6, 12 ヵ月後にボーリングを行ない採取した現地サンプルを用いて一軸及び三軸圧縮試験 (CD)、透水試験、さらに低置換改良部ではドレン効果の評価として杭間粘土の一軸圧縮試験をそれぞれ実施した。表-2 には、今回 SCP に用いた水砕及び天然砂の密度を図-5 に SCP 打設前後の粒度分布を示す。表-2 より水砕は砂に比べて粒子密度は同様であるが最小・最大密度とも軽量であり、これは粒子がポーラスであること及び粒度分布が単粒度に近いことによる。尚、水砕 SCP 打設後の粒度分布については、粒度曲線の両端のみ示した。

表 2 各材料の密度 (()内の数字は間隙比)

試験項目	水砕	砂
土粒子の密度 JISA 1202	2.691 g/cm ³	2.630 g/cm ³
砂の最小密度 ・最大密度 JISA 1224	1.105g/cm ³ (1.435)	1.404 g/cm ³ (0.917)
	1.404g/cm ³ (0.917)	1.604 g/cm ³ (0.640)

図-5 より水砕は SCP 施工により、細粒分含有量が増加しており、打設前の平均粒径 $D_{50}=1.374\text{mm}$ に対して打設後は $D_{50}=0.617\sim 1.063\text{mm}$ (平均 $D_{50}=0.856\text{mm}$)であった。

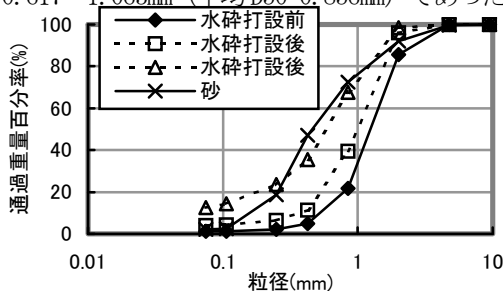


図-5 SCP 打設前後の水砕の粒度分布

これは、SCP 打設の締固めにより粒子が破碎されたことによるものである。一方、砂の場合粒子破碎は殆ど見られなかった。図-6 には、水砕及び天然砂の内部摩擦角、粘着力の経時変化を図-7 には、透水係数の経時変化をそれぞれ示す。図より、打設後 1.5 ヵ月までは、水砕 SCP 杭の固結は殆どないと考えられるが、3ヵ月以降は粘着力が $200\sim 400\text{kN/m}^2$ と固結がみられるとともに透水係数は 10^{-5}cm/s と低下した。粘着力は、12 ヵ月後には $600\sim 800\text{kN/m}^2$ となった。一軸圧縮強さについては示していないが、粘着力とほぼ同様な傾向がみられ、12 ヵ月後には $2000\sim 5500\text{kN/m}^2$ まで強度発現が確認された。透水係数についても12ヵ月後には 10^{-7}cm/s とさらに低下した。一方、内部摩擦角については、 40° を超える大きな値も見られるが、 35° 以上はほとんど確保されている。また、大きな経時変化は見られない。

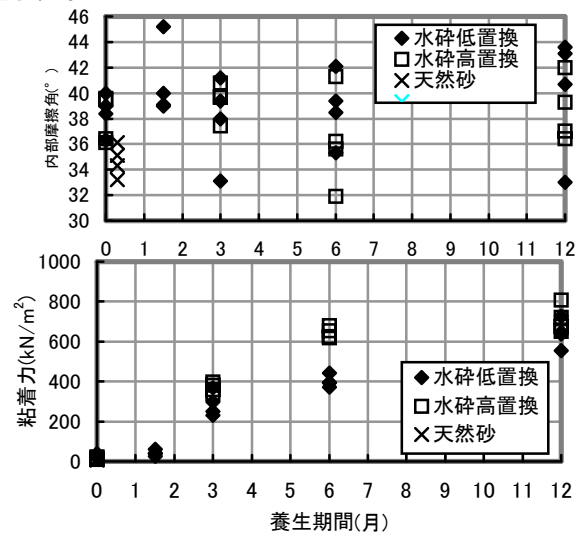


図-6 現場 SCP 杭のせん断強度の経時変化

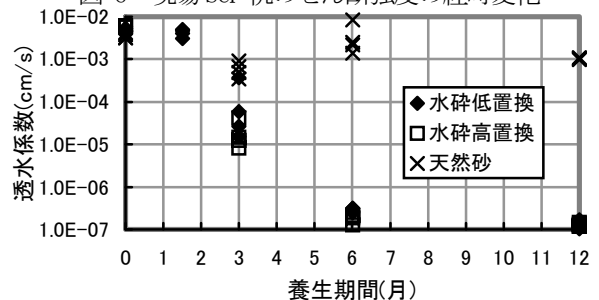


図-7 現場 SCP 杭の透水係数の経時変化

砂杭のせん断強度についての試験は打設後のみであるが、内部摩擦角は $30\sim 35^\circ$ 程度と水砕に比べて小さい。

また、透水係数については 12 ヵ月までほぼ $10^{-2}\sim 10^{-3}\text{cm/s}$ とほとんど変化はなかった。図-8 には、低置換改良部における水砕と天然砂の杭間粘土の改良効果を示す。図より水砕 SCP による杭間粘土の改良効果は3ヶ月まで見られたが、その後は殆ど増加していない。一方、天然砂 SCP の場合には、経時的に粘土の強度上昇が見られ、水砕 SCP 部よりも大きな改良効果が認められる。これは、水砕 SCP の固結により透水係数が低下しウェルレジスタ

ンスが生じたこと、杭へ盛土荷重の応力集中が生じて粘土に応力が伝わりにくくなったためと考えられる。以上の現場試験結果により、水砕は SCP として天然砂以上の強度を有し、固結によりさらに高強度化することが確認され、高置換 SCP として十分利用可能であることが分かった。一方、強度だけでなくドレン効果も期待する SCP への利用については、固結と透水性低下による影響を適切に評価することが必要である。尚、今回の試験施工においては事前に実施した室内試験の結果と大きく異なっており、この原因について次章で検討する。

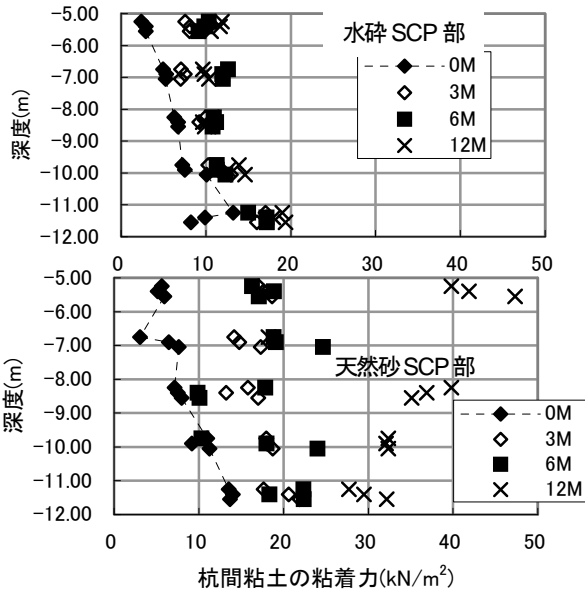


図-8 杭間粘土の強度変化

3. 水砕 SCP 材の早期固結原因の検討

水砕 SCP の固結及び透水性低下の原因解明のため、現場と室内の結果と条件の違いについて表-4 に整理した。

表-4 室内(相対密度 60%)と現場における試験結果及び条件の比較

試験	室内(Dr=60%)	現場
強度 (6 月)	$\phi=36.9^\circ$ $C=20.8\text{kN/m}^2$	$\phi=31.9\sim 42.1$ (平均: 37.5°) $C=350\sim 680\text{kN/m}^2$
透水係数	$6.56 \times 10^{-7}\text{cm/s}$	$10^{-5}\sim 10^{-7}\text{cm/s}$
間隙比	1.112	1.042~1.264 (平均: 1.142)
温度	室温	20°C程度以下と考えられる
水分条件	固液比 371%※1	含水比 39.3~47.4%※2
拘束圧	なし	あり
粒度 mm	$D_{50}=1.093$	当初 $D_{50}=1.374$ →施工後 $0.617\sim 1.063$ (平均 0.856, 当初に対して約 60%)

※1 供試体中の全養生水重量 / 供試体中の全水砕の乾燥重量

※2 現場の水分条件は不明であるが、飽和として算出

現場条件は不明な部分も多いが、水分条件、拘束圧、粒度はいずれも室内試験と異なっていると考えられる。

そこで、各要因が水砕の固結に与える影響を総合的に評価した。試験は産地の異なる A, B2 種類の水砕を用いて図-9 に示す容器に相対密度 60% の締固め条件で試料を作成し、80°C の恒温水槽内で促進養生した。

表-5 に各水砕の密度、表-6 に試験条件を示す。

供試体の水分は、絶乾、含水比 10%、飽和 (含水比: A 水砕 48%, B 水砕 39%) と試験施工前の室内試験と同じ

表 5 各水砕の密度 (()内の数字は間隙比)

試験項目	A 水砕	B 水砕
土粒子の密度 JIS A 1202	2.702 g/cm ³	2.668 g/cm ³
砂の最小密度・最大密度 JIS A 1224	1.052/cm ³ (1.568)	1.162 g/cm ³ (1.257)
	1.258g/cm ³ (1.148)	1.417 g/cm ³ (0.883)

表-5 試験条件

要因	試験条件
水分	絶乾, 含水比 10%, 飽和, 固液比(260~290%)※1
粒子破碎	原粒度, 破碎粒度 3 種類
圧力	0, 98kN/m ²

※1: 固液比の定義

供試体の間隙水を含む容器内の全水量

$$\text{固液比(\%)} = \frac{\text{水砕の乾燥重量}}{\text{供試体の間隙水を含む容器内の全水量}} \times 100$$

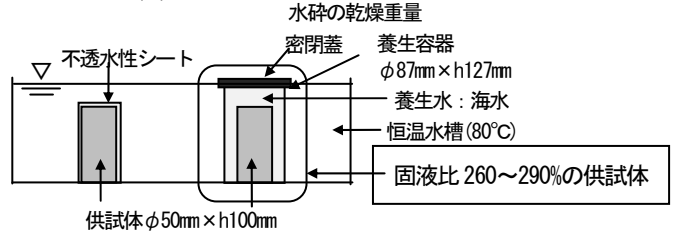


図-9 室内試験の概要

条件 (表-5※1 に定義する固液比で A 水砕 290%, B 水砕 260%) と設定した。粒子破碎は、水砕をロサンゼルスすりへり試験機で破碎し、破碎 1 (破碎時間 3 分), 破碎 2 (現場 SCP の実績から D_{50} を原粒度に対して 60% 小さくした粒度), 破碎 3 (破碎時間 90 分) の 3 通りの粒度を設定した。固結の程度は、一軸圧縮強さの径時変化により評価した。図-10 に破碎前後の粒度分布を示す。図中の記号は原粒度 (A0, B0) 破碎 1 (A1, B1), 破碎 2 (A2, B2), 破碎 3 (A3, B3) とした。図より破碎によりいずれも粒度曲線は左側へ移動し、細粒分含有率は増加する。最も破碎時間の長い破碎 3 においては初期の粒度分布の異なる A, B 水砕の粒度曲線は殆ど重なっている。

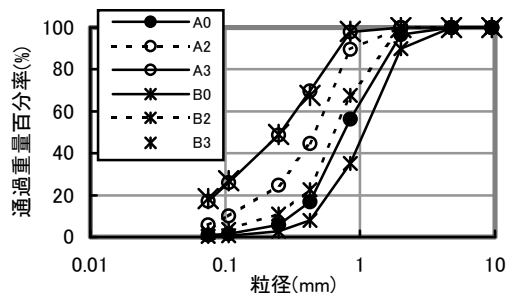


図-10 破碎前後の粒度分布の変化

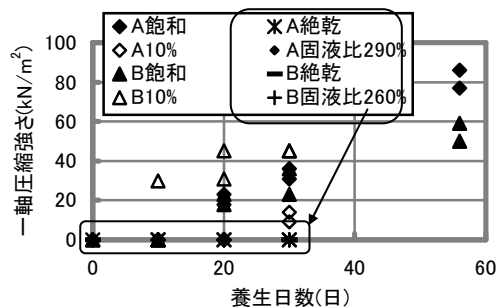


図-11 水分条件の影響

図-11 に水分条件の異なる各ケースにおける一軸圧縮強さの経時変化を示す。飽和または、含水比 10%のケースは 10~20 日以降、一軸圧縮強さが測定できたが、絶乾状態、固液比 260~290%のケースは供試体が自立しなかった。これより、水砕の固結には水分が必要であるが、反応水が多すぎても固結しにくいことが分かった。なお、今回の試験では上載圧として 0 及び 98kN/m² の 2 通りで一軸圧縮強さを比較したが、この程度の上載圧での差は観察されなかった。

図-12 は、粒子破碎の影響を示したものである。図中記号は図-10 と同様である。図より粒子破碎の程度が大きいほど一軸圧縮強さは大きくなっていることが分かる。90 分破碎した水砕は 10 日までの強度上昇が特に促進され、最大で 1600kN/m² と極めて大きな強度となっている。

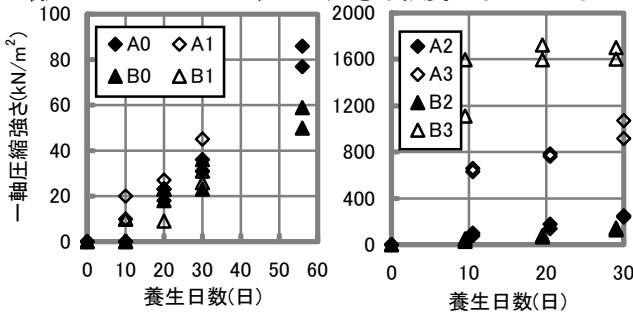


図-12 粒子破碎の影響

以上より、水砕が固結するための条件として、水分、粒子破碎、アルカリの影響が大きく、特に粒子破碎の影響は顕著で、現場での早期固結は粒子破碎が最も大きな原因と考えられる。図-13 に水砕の固結メカニズムを示すが、図より水砕が水と接すると、そのガラス構造から隙間水へ溶出したカルシウム、シリカ、アルミナ等のイオンが反応し、C-S-H(珪酸カルシウム水和物)等が粒子表面に形成される。このとき粒子接触点では、生成した水和物により、粒子同士が結合され固結が生じる。このメカニズムと試験結果から以下のことが考察できる。水砕の固結には水分が必要であるが、水分が少ない場合には固結するほどの水和物が生成せず、多すぎる場合には溶出イオン濃度が高まらないため、水和物が生成しにくい固結しにくくまた、粒子破碎は比表面積の増大によって固結の起点となる接触点が増加するという物理的効果によって説明できる。

粒子の接触部では早期に水和物により粒子が結合し固結が生じる。



水砕から隙間水中に溶出したイオンが沈殿し、水和物を粒子表面に生成

図-13 水砕の固結メカニズム

そこで、SCP 施工で最も固結への影響が大きいと考えられる粒子破碎について単位体積あたりの接触数を求めることにより、物理的に固結の程度が評価できるものと考えた。1 粒子あたりの接触数を配位数 \bar{N} といい、既に

種々の検討がされている。Field³⁾は、配位数の平均値として空隙比 e の関数として(1)式を提案している。

さらに、スラグ粒子を直径が d の球とすると、単位体積 V あたりのスラグ粒子の個数 N_s は(2)式で示される。

$$\bar{N} = \frac{12}{1+e} \quad (1) \quad N_s = \frac{V/(1+e)}{(1/6)\pi d^3} = \frac{6V}{\pi(1+e)d^3} \quad (2)$$

(1)(2)式より体積 V 当りの粒子の接触点数は(3)式となる。

$$N = \frac{1}{2} \times N_s \times \bar{N} = \frac{36V}{\pi(1+e)^2 d^3} \quad (3)$$

この(3)式から求めた接触数 N と、30 日養生した供試体の一軸圧縮強さとの関係を求めると図-14 のようになる。図より粒子接触数と一軸圧縮強さは、相関性が高く、現場採取試料の固結は SCP 打設時の影響が大きいと言える。

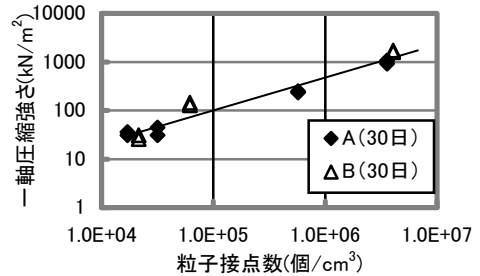


図-14 粒子の接触点数と一軸圧縮強さの関係

以上より、水砕 SCP の適用性に関して以下のことが明らかとなった。

- (1) 杭材としての強度は天然の砂より大きく、設計上 $\phi \geq 35^\circ$ として評価可能である。また、主に締固めによる粒子破碎で早期に固結し、強度は経時的に向上する。
- (2) 固結により透水性は早期に低下し、ドレン機能を前提とした SCP への利用は困難である。

しかし、現状の SCP の設計手法では杭体の固結特性を十分に反映できないため、今後は現場での強度をより正確に室内で評価できる方法の検討とともに、固結特性を有効に活用した新たな設計法の開発が望まれる。

本論文に示した検討内容は、(財)沿岸開発技術研究センターと鉄鋼スラグ協会の共同研究テーマである「鉄鋼スラグの港湾工事事用材料としての適用研究」(高橋邦夫委員長；(独)港湾空港技術研究所理事)の成果の一部を抜粋したものである。関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) (財)沿岸開発技術研究センター、鉄鋼スラグ協会：港湾工事事用水砕スラグ利用手引書、1989.7
- 2) 例えば、西 勝、佐藤 康文他：水砕スラグ地盤の土質特性第 36 回土木学会年次学術講演会、1981.9
- 3) MASANOBU ODA, CO-COORDINATION NUMBER AND ITS RELATION TO SHEAR STRENGTH OF GRANULAR MATERIAL, SOILS AND FOUNDATION Vol. 17No. 2, June 1977
- 4) 高橋邦夫、菊池喜昭、尾島啓介他：高炉水砕スラグの固結への影響(その 1：各種諸条件の影響)、第 57 回土木学会年次学術講演会投稿中、2002.9
- 5) 高橋邦夫、菊池喜昭、元木卓也他：高炉水砕スラグの固結への影響(その 2：粒度の影響)、第 57 回土木学会年次学術講演会投稿中、2002.9