

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420438

研究課題名(和文) 硬化遅延を施した高炉水砕スラグの低置換率SCP工法への適用

研究課題名(英文) Application of Granulated Blast Furnace Slag to the SCP Method with Low Sand Replacement Area Ratio by Delaying the Hydration Reaction

研究代表者

松田 博 (MATSUDA, HIROSHI)

山口大学・創成科学研究科・教授

研究者番号：50136131

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：高炉水砕スラグを低置換率SCP工法に適用するにあたり、海砂混合が硬化遅延に及ぼす効果について調べ、最適な海砂混合率の提案を行うとともに、その適用性について模型土槽実験によって確認した。得られた主な知見は以下のとおりである。高炉水砕スラグと海砂を混合すると高炉水砕スラグの硬化の進行が抑制される。強度が発現する養生日数は、海砂混合率に影響されない。海砂混合率が増加すると、高炉水砕スラグの水和反応率及び強度は減少する傾向を示す。養生初期においては、海砂混合によって透水係数が増加する傾向を示す。高炉水砕スラグを低置換率SCP工法に適用するにあたって、最適な海砂混合率は30%である。

研究成果の概要(英文)：To apply the granulated blast furnace slag (GBFS) to the SCP method with the low sand replacement area ratio, by mixing the natural sand with GBFS at the various sand mixing ratios in the range from 0% to 40%, the specimen was cured in the water and the change of the unconfined compressive strength, hydration reaction ratio and the permeability were measured with time. The main conclusions are as follows. By mixing the natural sand with GBFS, the development of hydration is inhibited. The curing duration until when the unconfined compressive strength starts to increase is the same irrespective of the natural sand mixing ratio. The hydration reaction ratio and the unconfined compressive strength decrease with the natural sand mixing ratio. By mixing the natural sand with GBFS, a larger permeability was confirmed at the beginning of curing. When applying GBFS to the SCP method with the low sand replacement area ratio, the most appropriate natural sand mixing ratio would be 30%.

研究分野：地盤工学

キーワード：高炉水砕スラグ SCP工法 強度 水和 海砂 潜在水硬性

1. 研究開始当初の背景

軟弱な粘性土地盤の改良工法として、高置換率の SCP 工法に加えて、置換率 30%以下の低置換率の SCP 工法が用いられている。高炉水砕スラグの SCP 工法への適用については幾つか報告されており、高置換率 SCP 工法では一種の強制置換工法と捉える事ができ、地盤の圧密沈下は短期に終了するため問題視されることは少ない。一方、置換率 30%以下の低置換率 SCP 工法の場合、SCP 杭の支持力のみではなく、杭がドレーン材の役割を果たし、杭間粘性土の圧密促進による密度増加に基づいた強度や支持力の増進も期待する。しかし高炉水砕スラグを用いて造成した SCP 杭は、潜在水硬性により、きわめて大きな支持力を発現すると同時に透水性が著しく低下することが明らかにされた。実際、現地調査により、施工時は砂と同程度であった高炉水砕スラグの透水係数 ($k=10^{-2}\text{cm/sec}$ 程度)が施工後半年足らずで $k=10^{-7}\text{cm/sec}$ 付近まで低下したことを確認した。そのため、低置換率 SCP 工法において SCP 杭に要求される高い透水性が保持できないことや杭体への応力集中が生じるため、現行設計法における基本思想では、杭間粘性土の密度増加を期待する当工法の杭材料として高炉水砕スラグ単体を用いることは難しい状況にある。

2. 研究目的

高炉水砕スラグは粒度組成が自然砂に類似しており大量に供給できるため、環境保護の観点から採取規制が敷かれている自然砂の代替材として活用できると考えられる。高炉水砕スラグを軟弱地盤改良のため低置換率 SCP 工法に適用するにあたっては、高炉水砕スラグは水と反応して著しく硬化する性質(潜在水硬性)を持つため、SCP 杭として利用した場合、過度な支持力発現や透水性低下が生じる。低置換率の SCP 工法は、SCP 杭のドレーン効果によって杭間粘性土の密度増加も期待するため、高炉水砕スラグ単体では当工法への適用が難しいのが現状である。本研究では、低置換率 SCP 工法に高炉水砕スラグを適用するため、海砂を混合した場合の基礎的特性を把握するとともに、その定量化を試みることを目的とする。

3. 研究の方法

高炉水砕スラグに他の地盤材料を混合して潜在水硬性による硬化を遅延させることによって、低置換率 SCP 工法へ適用を可能とすることを目指し、まず、以下のような硬化遅延に係わる要因を抽出する。

- (1) 混合材料の選出：高炉水砕スラグに混合する材料(粘土～砂質土)を幾つか選出する。混合する材料の粒度組成やコンシステンシー特性が異なる場合、スラグ SCP 杭の支持力発現や透水性に影響を及ぼすと考えられる。
- (2) 混合材料の物性：高炉水砕スラグに混合

する材料の物性を検討する。材料の含水比等が異なる場合、スラグ SCP 杭の支持力発現や透水性に影響を及ぼすと考えられる。

(3) 粒子破碎の影響：高炉水砕スラグは、打設時の締固めの影響によって粒子破碎を起こすことが予想される。粒子破碎が生じるとスラグの比表面積が増大し、水和反応が促進されるため、透水性の低下を引き起こすことが考えられる。

(4) その他の影響：高炉水砕スラグに関する研究成果や他の研究者による文献を調査し、上記以外の要因を抽出する。

(1) で検討した高炉水砕スラグの硬化遅延に及ぼす要因をパラメータとした要素実験を実施し、他の材料を混合した高炉水砕スラグの透水性や支持力・強度特性の経時変化を明らかにする。実験は以下の要領で実施する。

- ① 混合する土質と物性をそれぞれ数種類変化させて、高炉水砕スラグと混合する。
- ② 混合材料を円筒型カラムに詰めて養生する。この時、上載圧を加えながら養生するパターンにも着手し、スラグの粒子破碎の程度を変化させる。
- ③ 所定の期間養生した供試体に対して、透水試験、一軸圧縮試験、水和反応率試験を実施する。
- ④ ブランクとして高炉水砕スラグ単体の場合においても同様の試験を実施する。

①～④で得られた結果をもとに、低置換率 SCP 工法において適切と考えられる混合材料・混合率等を選定し、実際の施工現場を模擬した土槽模型実験装置作製を試みる。

4. 研究成果

(1) 実験概要

① 試料及び実験方法

試料は、製鉄所で製造された高炉水砕スラグを用いた。高炉水砕スラグに混合する材料としては、粒度特性が類似する玄海産の海砂を用いた。両試料の物理特性および粒径加積曲線を表-1、図-1 に示す。最大・最小間隙比は高炉水砕スラグが大きいことがわかる。実験において、高炉水砕スラグと海砂を混合するにあたっては、硬化履歴のない高炉水砕スラグ(以下：未水和スラグ)を 2mm ふるいでふるい分けた後、所定の割合で海砂と混合する。その後、真空容器内で脱気して直径 5 cm、高さ 10 cm のプラスチックモールドに

表-1 試料の物理特性

	GBFS	Marine sand
Soil particle density ρ_s (g/cm^3)	2.705	2.650
Maximum void ratio e_{max}	1.242	0.885
Minimum void ratio e_{min}	0.866	0.615
Ignition loss Li (%)	0.231	4.213
Permeability k ($Dr=80\%$) (m/s)	1.35×10^{-3}	1.11×10^{-3}

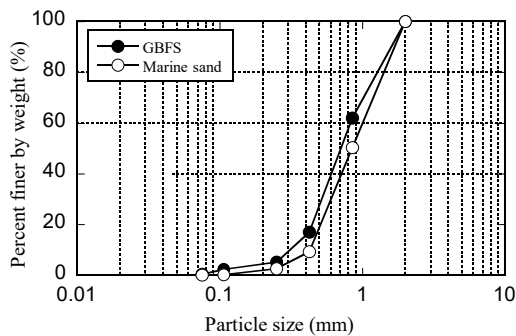


図-1 粒径加積曲線

水中落下法で所定の相対密度となるように充填する。高炉水砕スラグは、その粒子から溶出するカルシウムやシリカなどによって、セメントと同様な水和反応が生じ、硬化が進行する。既往の研究では、常温の水道水を用いた場合、高炉水砕スラグが硬化して自立に至るまでに180日程度要することが報告されている。一方、高炉水砕スラグの硬化促進を図る手法として、高温の養生水を用いて養生する方法が採用されていることから、本研究においても80℃で養生することとした。海砂混合の割合は、高炉水砕スラグの乾燥質量に対して0, 20, 30, 40%とした。混合試料の供試体作成に当たっては、海砂混合率が0%での相対密度80%を基準とし、海砂混合率にかかわらず乾燥密度が一定となるようにした。供試体を詰めたプラスチックモールドは、養生水中にて養生した。その際、供試体と養生水の質量比で定義される固液比は、1:1.4、養生日数は0, 3, 7, 14, 28, 56, 84日とした。養生後に供試体を取り出し一軸圧縮試験、水和反応率試験および変水位透水試験を実施した。

②水和反応率の測定

水和反応率の測定方法としては、リートベルト法や選択溶解法などが一般的に用いられている。本研究では、サリチル酸・アセトン・メタノール混合溶液を用いる選択溶解法によって水和反応水和反応率の測定を行った^①。本手法によると、高炉水砕スラグは溶解しないが生成された水和物の大部分が溶解する。

水和反応率試験は、まず、アセトン70mL、メタノール30mL、サリチル酸5.0gを溶解させた混合溶液と、110℃で炉乾燥したスラグ試料1.0g (mとする)を準備する。次に、混合溶液と試料1.0gを共栓付き三角フラスコに投入する。その後、マグネチックスターラーを用いて350rpmの攪拌速度で1時間攪拌し、約24時間静置する。静置後、孔径1μmの定量ろ紙を用いて吸引ろ過し、得られた残渣をメタノールで洗浄する。残渣をろ紙とともにろつばに移し、850℃で約1時間強熱してろ紙を灰化させ、秤量する (Mhとする)。本研究では、養生水に海水を用いるため、乾燥過程で粒子表面に付着する塩分が混合溶

液に溶解することを考慮し、塩分量の補正を行った。

水和反応率Rは式[1]、[2]によって得られる。

$$R_i = \frac{M_h}{M \left(1 - Li_g \left(\frac{100-r}{100} \right) - Li_m \cdot \frac{r}{100} \right) - m_{sa}} \times 100 \quad [1]$$

$$R = 100 - R_i \quad [2]$$

ここに、R_i:未反応率(%), M_h:強熱後の混合砂の質量(g), M:混合砂の質量(g), M_{sa}:塩分質量(g), R:水和反応率(%), Li_g:水砕スラグの強熱減量(g), Li_m:海砂の強熱減量(g), r:海砂混合率(%)である。

なお、本研究で用いる高炉水砕スラグについて、上記の手法により水和反応率を測定したところ、養生前の未水和水砕スラグの水和反応率Rは約0.4%であった。

(2) 海砂混合が水砕スラグの硬化特性に及ぼす影響

図-2は、海砂混合率を、0%, 20%, 30%, 40%としたときの水和反応率の経時変化を示したものである。いずれの海砂混合率においても、養生日数の増加に伴い水和反応率は増加しているが、海砂混合率が高いほど水和反応率は減少する傾向を示している。同図は養生期間が84日までの結果を示しているが、海砂の混合によって水和反応の進行は抑制されることがわかる。

そこで、海砂混合率が高炉水砕スラグの水和反応の進行に及ぼす影響を調べるため、水和反応率を供試体中の高炉水砕スラグが占める割合で正規化した。これを正規化反応率として次式で定義する。

$$R_n = \frac{R}{\left(1 - \frac{r}{100} \right)} \times 100 \quad [3]$$

ここに、R_n:正規化反応率(%), R:供試体の水和反応率(%), r:海砂混合率(%)である。

図-3は、養生に伴うR_nの経時変化を示したものであって、海砂混合率が0%, 20%では、R_nはほぼ一致しているのに対して、海砂混合率が増加すると正規化反応率は減少する傾

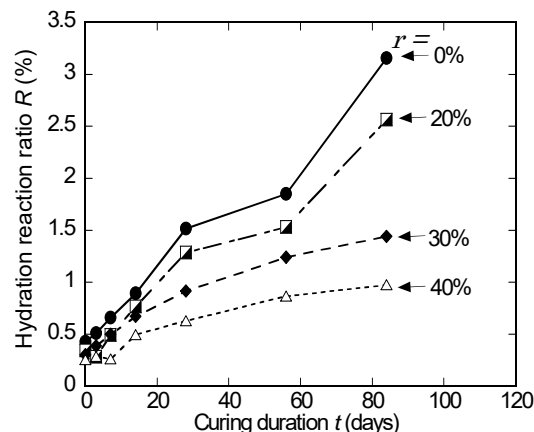


図-2 水和反応率の経時変化

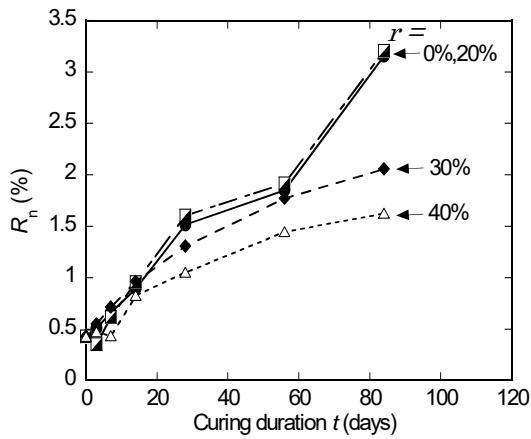


図-3 正規化水和反応率の経時変化

向を示している。これは、海砂混合率が高いほどカルシウム等の成分が溶出し水和反応が生じやすい環境に移行するまでに時間を要するためと推察される。このことから、海砂を混合すると単に水和反応率が減少するだけでなく、水和反応が生じやすい環境への移行期間が長くなる。

図-4 は、一軸圧縮強さと養生時間の関係を示したものであって、一軸圧縮強さがゼロのプロットは自立しなかったことを意味している。いずれの海砂混合率においても養生日数7日後から養生日数の増加に伴って一軸圧縮強さも増加している。このことから、海砂混合率によらず、一軸圧縮強さは同時期に強度発現が始まるといえる。

すでに水砕スラグの強度増加は養生時間の平方根に比例して進行することを明らかにしているが、海砂を混合した場合にも同様の傾向がみられることから、一軸圧縮強さを次式により近似する。

$$q_u = A\sqrt{t} + C \quad [4]$$

ここに、A, C: 実験定数, t: 養生日数である。

図-5 は、一軸圧縮強さと養生時間の対数の関係を示したものであって、いずれの海砂混合率においても両者は良く一致している。図-6 は、海砂を混合した水砕スラグについて定水位透水試験を行って、透水係数と養生期間

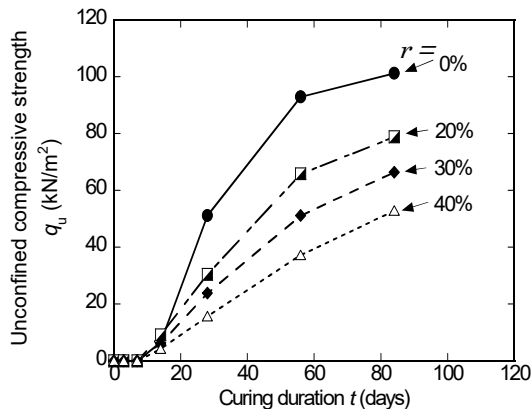


図-4 一軸圧縮強さの経時変化

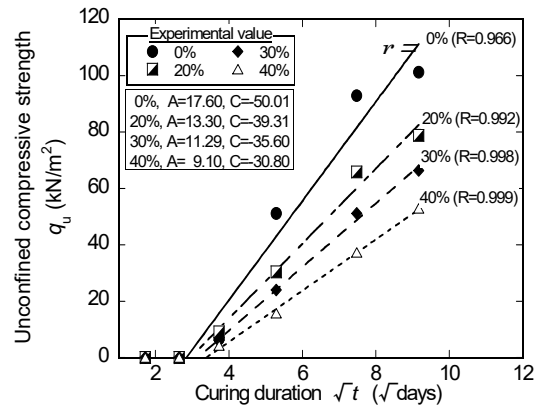


図-5 一軸圧縮強さの近似直線

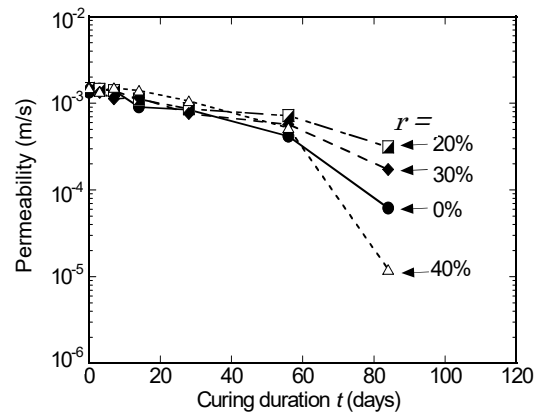


図-6 透水係数の経時変化

の関係を示したものである。いずれの海砂混合率においても、養生日数56日目までは透水係数は徐々に低下し、海砂混合率による差異はほとんどみられない。しかし、養生日数56日以降は海砂混合率によって大きく異なり、養生日数84日では海砂混合率40%の透水係数が最も低い値を示している。

図-7 は、一軸圧縮強さと次式で定義される水和反応率増分 ΔR の関係を示したものである。

$$\Delta R(\%) = R - R_0 \times \left(1 - \frac{r}{100}\right) \quad [5]$$

ここに、 R_0 : 養生前の高炉水砕スラグの水和反応率(%)である。

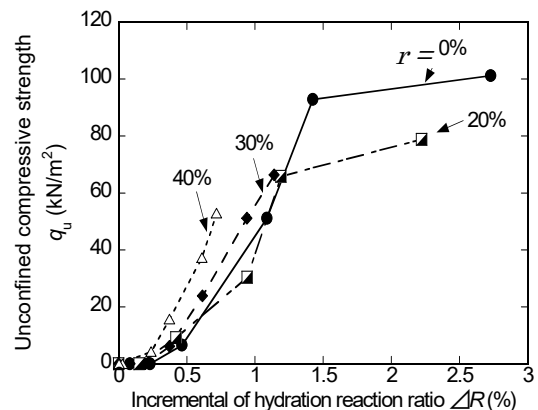


図-7 一軸圧縮強さと水和反応率増分

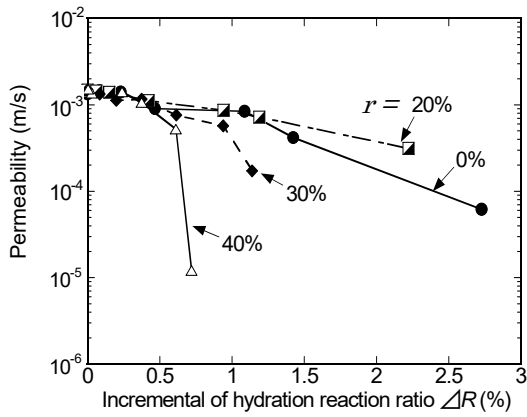


図-8 透水係数と水和反応率増分の関係

いずれの海砂混合率においても、水和反応率の増加に伴って一軸圧縮強さは増加している。また、同じ水和反応率においては海砂混合率が高いほど、一軸圧縮強さも大きくなる傾向を示している。

図-8は、透水係数と水和反応率増分 ΔR の関係を示している。いずれの海砂混合率においても、 ΔR の増加に伴って透水係数は低下している。また、海砂混合率が高いほど透水係数の低下が大きくなっている。

以上のことから、水砕スラグは海砂を混合することにより、水和反応の進行が抑制されることが確認できた。しかし、図-7、図-8で示したように同じ水和反応率で比較すると海砂混合率が高いほど一軸圧縮強さは大きく、また透水係数は小さくなる傾向を示した。これは、高炉水砕スラグと海砂の粒子間に生成される水和物量が相対的に多くなり、粒子間のセメンテーション効果や間隙水の移流を阻害する効果が大きくなったためと考えられる。

以上の結果より、高炉水砕スラグを低置換率SCP工法に適用するにあたって、最適な海砂混合率は30%であると考えられる。なお、この結果は本研究で用いた試料、実験条件に基づいて得られたものであって、実際の適用に当たってはさらに詳細な検討が必要である。

(3) 模型土槽試験

所定の割合で海砂を混合した高炉水砕スラグの低置換率SCP工法への適用を想定して模型土槽試験を行った。試験装置の概要及び圧密中の状況を示したものが図-9、図-10である。模型土槽はアクリル製で、内径は幅30cm×高さ40cm×奥行10cmである。载荷は図-10に示したシリンダーによって行い、荷重変換機にて载荷重の測定を行った。また土槽底面4か所に設けた排水孔位置において間隙水圧の測定を行った。また、アクリル板の内面にはメンブレンを貼ることによって壁面摩擦の低減をはかっている。

図-11は、 $\sigma_v=40\text{kPa}$ で圧密終了時の状況を

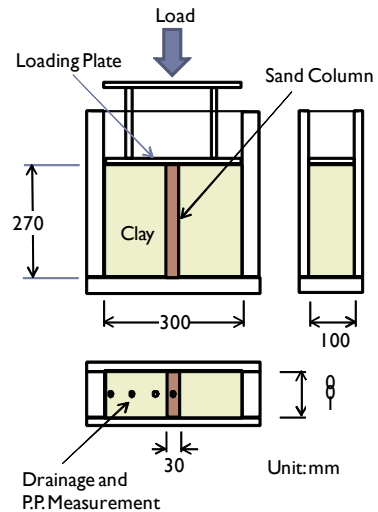


図-9 模型土槽の概要

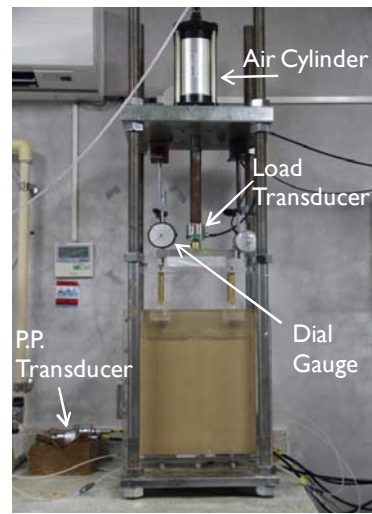


図-10 模型土槽

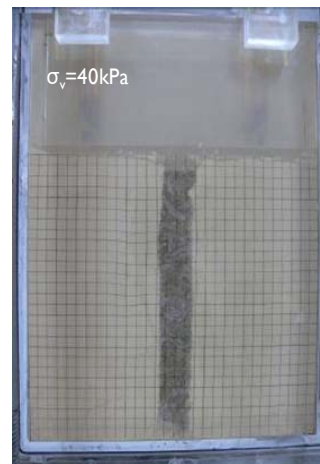


図-11 海砂を混合した高炉水砕スラグ柱と粘土の複合地盤 ($\sigma_v=40\text{kPa}$)

示したものである。土槽前面のメンブレンには格子状のラインを描いており粘土と砂柱の変形状況を確認できる。また、図-12は土槽底面に4か所設けた孔(砂柱側からそれぞれPP-1, PP-2, PP-3, PP-4)における過剰間

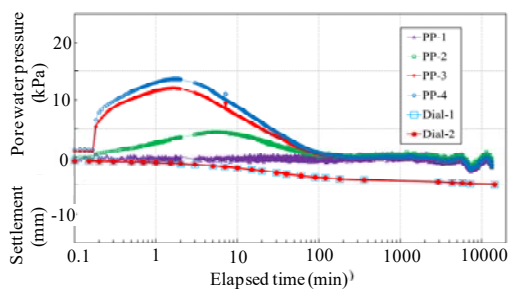


図-12 土槽底面での過剰間隙水圧～時間関係

隙水圧と土槽表面の沈下の経時変化を示している。砂柱から最も遠いPP-4についても、100分経過後過剰間隙水圧はほぼ消散しており海砂混合によって粘土層からの排水が行われていることが確認できた。

(4) まとめ

本研究では、高炉水砕スラグを低置換率SCP工法に適用するにあたり、海砂混合が硬化遅延に及ぼす効果について調べ、最適な海砂混合率の提案を行うとともに、適用性について模型土槽実験によって確認した。得られた主な知見は以下のとおりである。

- ①高炉水砕スラグと海砂を混合すると高炉水砕スラグの硬化の進行が抑制される。
- ②強度が発現する養生日数は、海砂混合率に影響されない。
- ③海砂混合率が増加すると、水砕スラグの水和反応率及び強度は減少する傾向を示す。
- ④養生初期においては、海砂混合によって透水係数が増加する傾向を示す。
- ⑤高炉水砕スラグを低置換率SCP工法に適用するにあたって、最適な海砂混合率は30%である。
- ⑥海砂を混合した高炉水砕スラグの低置換率SCP工法への適用性について土槽模型実験によって確認した。

<引用文献>

- ①近藤連一，大沢栄也：高炉水砕スラグの定量およびセメント中のスラグの水和反応速度に関する研究，窯業協会誌，Vol. 77，pp. 39-46，1969。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① Hiroshi Matsuda, Shoya Nakamura, Tran Thanh Nhan, Hiroyuki Hara, Masahiro Wada and Ryohei Ishikura, Application of granulated blast furnace slag to the sand compaction pile method with low sand replacement area ratio, , 69th Annual Canadian Geotechnical Conference, GEOVANCOUVER 2016, 査読有, 3824, 2016.
- ② Hiroshi Matsuda and Tran Thanh Nhan, Shear Strength and Permeability of granulated Blast Furnace Slag Mixed with Marine sand from

Low to High Mixing Ratio, Proceedings of the International Conference, VIETGEO 2016, 査読有, pp.63-70, 2016.

- ③ Hiroshi Matsuda, Hiroyuki Hara, Naoyuki Igawa and Shoya Nakamura, Evaluation of self-restoration characteristics of GBFS by using hydration reaction, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol.2, No.56, pp.1934-1939, 査読有, 2015.
- ④ Hiroshi Matsuda, Application of granulated blast furnace slag as a geotechnical material, Proceedings of 2nd International Conference, HANOIGEO 2015, 査読有, pp.75-84, 2015.

〔学会発表〕(計4件)

- ① 松田 博, Tran Thanh Nhan, 堤 祥亮, 原 弘行, 海砂混合に伴う高炉水砕スラグの硬化・透水特性の変化, 第72回土木学会年次学術講演会, 2017年9月11-13日. 九州大学(福岡県福岡市)
- ② 中村 奨哉, 松田 博, 原 弘行, 徳増晃希, 海砂混合が高炉水砕スラグの硬化・透水特性に及ぼす影響, 第51回地盤工学研究発表会, 2016年9月15日. 岡山大学(岡山県岡山市)
- ③ 中村 奨哉, 松田 博, 原 弘行, 石井 祐充, 海砂を混合した高炉水砕スラグの強度特性, 第50回地盤工学研究発表会, 2015年9月1-3日. 北海道科学大学(北海道札幌市)
- ④ 中村 奨哉, 松田 博, 原 弘行, 石井 祐充, 高炉水砕スラグの強度発現に及ぼす海砂混合の影響, 第67回土木学会中国支部研究発表会, 2015年5月23日. 山口大学(山口県宇部市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況(計0件)
- 取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 博 (MATSUDA, Hiroshi)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授
研究者番号：50136131

(2) 研究分担者

原 弘行 (HARA, Hiroyuki)

宮崎大学・工学部・助教
研究者番号：00588709

石藏 良平 (ISHIKURA, Ryohei)

九州大学・工学研究院・助教
研究者番号：90510222