

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560993

研究課題名(和文)硬化した高炉水砕スラグの破壊・自己修復能力の定量化

研究課題名(英文)Quantitative evaluation of self-restration capacity of granulated blast furnace slag

研究代表者

松田 博(Matsuda, Hiroshi)

山口大学・理工学研究科・教授

研究者番号：50136131

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：高炉水砕スラグは潜在水硬性によって硬化後、地震などの外的負荷によって破壊等が生じた場合においても、再び強度・変形特性が回復する自己修復能力を有することを確認している。そこで、未水和スラグと自然環境下において著しく硬化が進行した施工後11年経過した盛土スラグを用いて、一度硬化した水砕スラグを解砕～再養生し、水和反応と強度の変化を実験的に調べ、自己修復能力を定量的に評価した。さらに、得られた一連の試験結果から、養生環境、養生温度、破壊履歴の有無を考慮した水砕スラグの強度予測に資する実験式を提案した。

研究成果の概要(英文)：GBFS (granulated blast furnace slag) has a capability of self-restoration in shear strength by its hydration reaction. In this study, in order to investigate the self-restoration characteristics of GBFS under different curing conditions, including those which was taken from the test embankment constructed 11 years ago, the quantitative change in the unconfined compressive strength and the hydration reaction were observed. Furthermore, based on the relation between the shear strength and the hydration reaction, it is clarified that the shear strength of GBFS under long term curing in natural condition increases with the hydration reaction and based on the relation between the strength and the hydration reaction, a new equation to evaluate the shear strength of GBFS concerning the curing conditions and the shear deformation histories was proposed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・リサイクル工学

キーワード：高炉水砕スラグ 潜在水硬性 せん断強さ

1. 研究開始当初の背景

銑鉄の製造過程において生成される高炉水砕スラグは、人工的に一定の製法で生産されていることから、粒度および土粒子密度等の物理的性質が安定している他、強度・透水性に優れかつ軽量である。また、高炉水砕スラグは一定の条件下で時間とともに硬化し、強度増加する潜在水硬性を有していることから、地盤の安定上さらに有利となる可能性がある。高炉水砕スラグは年間約 2,000 万 t が生産され(平成 17 年度)、セメント材料として主に用いられてきたが、近年の公共工事縮減等によりセメントの国内消費量が減少傾向にある。そのため、地盤工学の分野において、高炉水砕スラグの有効利用促進が期待されている。

潜在水硬性を有する高炉水砕スラグのような材料は自然界には存在しないため、地盤工学の分野においてもその力学特性等に関して研究例はきわめて少なく、この状況は、海外においても同様である。さらに、高炉水砕スラグの潜在水硬性を活用した新しい耐震構造物への適用も考えられるが、硬化後のスラグ構造物に対する維持管理および補修方法に関する検討は行われていない。特に、硬化後地震等によって負荷を受けたスラグ構造物に対する検討は、地震が多発するわが国にとって必要不可欠となるが、ほとんど研究は進んでおらず、その対応策も検討されていない。

2. 研究の目的

高炉水砕スラグは、銑鉄の製造過程で生成される副産物であり、水と反応して硬化する性質(水硬性)を有する。すでに地盤材料としての適用方法が検討され、港湾構造物等における、液状化対策など硬化が必要な構造物への適用も考えられる。しかしながら、硬化後、地震等によって負荷を受けたスラグ構造物に対する維持管理・補修に対する検討は行われていない。本研究では、高炉水砕スラグの初期硬化後にも残存すると考えられる未水和反応部に着目し、硬化後破壊した高炉水砕スラグの再硬化特性(自己修復能力)に関する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

硬化した高炉水砕スラグの再硬化特性(自己修復能力)を把握するために、まず、高炉水砕スラグを養生する。初期養生では養生水(淡水、海水)、供試体の相対密度、含水比を調整し、一定期間放置後の初期硬化を確認する。供試体に対して、静的および動的(繰返し)せん断試験を実施し、高炉水砕スラグ供試体の強度定数および液状化強度を把握する。破壊の程度の目安として、せん断ひずみの大きさを制御して実験を行う。動的せん断試験では、実地震動を負荷できる多方向単純せん断試験も同時に実施し、実地盤を模擬

した破断面を作製する。次に、せん断した供試体の破断面付近において、水砕スラグ粒子間にある反応生成物の SEM(走査型電子顕微鏡)映像により、破断直後の水砕スラグ粒子間の状況を把握する。比較対象として、自然環境下で長期間計測を継続しているスラグ試験盛土よりブロックサンプリングを行い、供試体を成形後、同様の手順で試験を行う。

初期硬化後にせん断を受けた供試体を用いて、初期硬化後の供試体に未水和反応部が残存しているかどうかの確認を行う。ここでは、せん断を受けた供試体に対して、粒子内の未水和反応部の接触面を増やすため、人工的に供試体の破碎を行う。粒度調整を行った数種類の供試体を同様の養生方法により再養生させ、せん断試験を実施する。初期硬化時の供試体との強度定数および液状化強度の比較から、未水和反応部が再び水和反応を起こすことによって高炉水砕スラグが再硬化(自己修復)を示すことを明らかにする。さらに、初期硬化後にせん断を受けた供試体をそのまま再度養生し、実際の地震等を想定した破断面においても再硬化特性(自己修復能力)を示すかどうかを検討する。本研究では、破断面付近で粒子破碎が発生し、初期硬化時に水和反応を示さなかった粒子内の未水和反応部からカルシウムイオン等が流出し、再硬化(自己修復)するものと予測している。再養生した供試体に対して、反応生成物の SEM(走査型電子顕微鏡)映像により、破断面付近における再養生後の水和反応の状況を把握する。その後、せん断試験を実施する。初期硬化時の供試体との強度定数および液状化強度との比較により、実際に負荷を受けることによって生じた供試体の破断面においても再硬化特性(自己修復能力)を示すことを確認する。

上記によって得られた基礎データをもとに、硬化後供試体が受けた負荷の程度と再硬化(自己修復能力)との関係についての定量的評価を行う。

4. 研究成果

(1) 硬化履歴が再硬化特性に及ぼす影響

試料および実験方法

本研究では、硬化履歴に差異がある水砕スラグを準備した。まず、水和反応が進行していない水砕スラグを未水和スラグと呼ぶ。用いた未水和スラグの SEM 画像を Fig.1 に示す。

実験では 2mm のふるいを通じた未水和スラグを $\phi=50\text{mm}$, $H=100\text{mm}$ のプラスチック製の円筒形モールドに相対密度 80% となるように詰め、供試体を作製した。養生水は淡水、海水、アルカリ水を用い、室温を 20 に調節して養生した。アルカリ水には $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の飽和水溶液を用いた。アルカリ水は強度発現を促進させるためアルカリ刺激剤として用いた。また、淡水、海水については 80 に調節した乾燥炉内で養生するケースも行った。養生期間は 0, 3, 7, 14, 28, 56, 84, 112 日

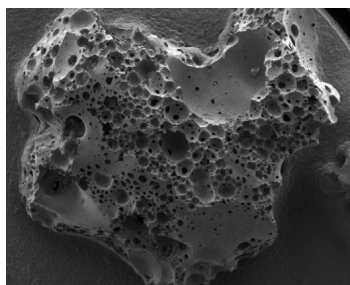


Fig.1 未水和スラグのSEM 画像

と設定した．養生後の供試体に対し，一軸圧縮試験，強熱減量試験，サリチル酸・アセトン・メタノール混合溶液を用いた選択溶解法による水和反応率試験(以下，反応率試験)を実施した．

水和反応率試験

水和反応率試験は未水和状態の水砕スラグ自身は溶解しないが，水和反応により生成した水和物の大部分を溶解させることができるため，水砕スラグの水和反応率を求めることが可能である．また，この試験で得られる水和反応率は，全質量に対する水砕スラグ粒子表面に生成された水和物の質量百分率として求められる．本試験は，本来高炉セメント中の水砕スラグの水和反応率を測定するために実施されるものであり，粉体の水砕スラグを対象としたものである．しかし，水砕スラグは粒状体として用いており，強度発現に寄与する水和物は粒子表面に生成された水和物が支配的であると考えられること，また粉体で反応率試験を行うと，ろ過過程においてフィルターの目詰まりが原因となり，多大な時間を要するため，本研究では粉体化せず粒状体のまま反応率試験に供した．

反応率試験は以下の手順で行った．サリチル酸 5g，アセトン 70mL，メタノール 30mL の混合溶液に粒状体の水砕スラグ 1.0g を投入する．その後，マグネチックスターラーを用いて 350rpm で 1 時間攪拌し，1 日静置した後，ろ過して得られた残留物をろ紙とともにろ紙に移し，850 で約 1 時間強熱し，ろ紙を灰化させ秤量した．水和反応率の算出には式(1)，(2)を用いた．

$$R_i = \frac{m_h}{m_d \times (1 - IL/100)} \times 100 \quad (1)$$

$$R = 100 - R_i \quad (2)$$

ここに， R_i は未反応率(%)， m_h は強熱後の水砕スラグの質量(g)， m_d は溶液浸漬前の水砕スラグの質量(g)， IL は強熱減量(%)， R は水和反応率(%)である．また，養生水に海水を用いた場合，乾燥過程において粒子表面に海水の塩分が付着し，混合溶液に塩分が溶解し，式(1)，(2)を用いた算出方法では反応率が過大に評価するため，海水を養生水としたケースのみ塩分量の補正を行った．同様に，強熱減量の算出時にも塩分量補正を行った．今回用いた海水の塩分濃度は一般的な海水

濃度と同程度であったため，含水比から塩分質量を算出し，補正を行った．

Fig.2 に一軸圧縮強さの経時変化を示す．図中において q_u がゼロについては供試体が自立しないことを意味している．20 の各養生水での結果を比較すると，アルカリ水養生が早期に強度が発現していることがわかる．また，80 の各養生水での結果を比較すると，海水養生のほうが早期に強度が発現していることがわかる．これらのことから，アルカリ水，海水といった養生水や温度には硬化促進効果があることがわかる．Fig.3 に水和反応率と一軸圧縮強さの関係を示す．養生水に依らず，水和反応率が 0.8%程度で強度発現する傾向を示しており，これより，水和反応

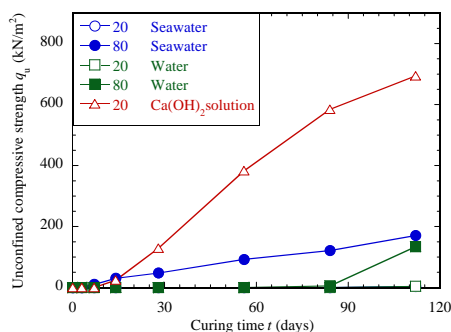


Fig.2 一軸圧縮強さの経時変化

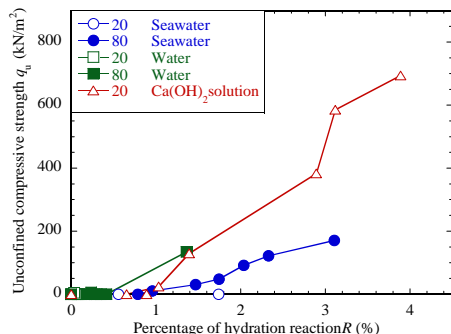


Fig.3 一軸圧縮強さと水和反応率の関係

率には閾値が存在し，閾値以上の値を示したときに自重に耐えて自立すると考えられる．また，養生環境によって，水和物が強度へ寄与する割合にも違いがみられた．これは，明確ではないが，養生水によって生成される水和物の種類が異なり，強度の発現傾向に差が生じたのではないかと考えられる．

(2) 硬化した高炉水砕スラグの自己修復特性 施工後 11 年経過した試験盛土の概要と試験方法

試験盛土は，宇部市において 2001 年 11 月に施工を行っており，施工後約 11 年が経過している．Fig.4 に試験盛土の概要を示す．試験盛土は水砕スラグを盛土材料として用い，17m × 23m × 2m (盛土厚) の規模で施工を行っている．図中に示すとおり，盛土の中心を境に左右で 1 層あたりの撒き出し層厚が異

なる．左方は1層0.3m, 右方は1層1.0mで3回/層の転圧回数で施工を行っている．当該試験盛土スラグは，一軸圧縮強さ：約1,000kPa, 水和反応率：10.6%, 強熱減量：3.3%を示しており，著しく硬化が進行したものである．

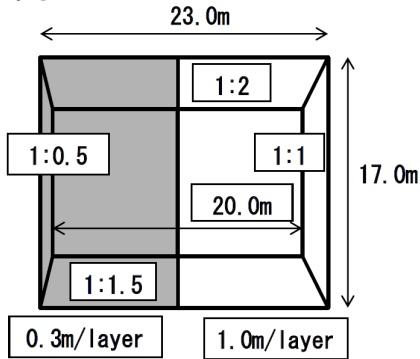


Fig.4 試験盛土の概要図

本研究では，撒き出し層厚 1.0m の試験盛土を用いた．ここでも先述と同様の条件で供試体を作製し，養生水には海水を用い，80で養生した．所定の期間養生した供試体を解砕し，再びプラスチック製の円筒形モールドに詰め，再度養生した．盛土スラグはブロックサンプリング後解砕し，2mm のふるいを通した試料を用いた．その試料を相対密度 $D_r=80\%$ となるように供試体を作製し，所定の期間養生を行った．本研究では，最初に硬化を受けた期間を初回硬化日数，解砕し再養生した期間を養生日数，両者の期間の和を積算日数と定義した．実験では初回硬化日数を 0, 14, 28, 56 日とし，養生日数を 0, 3, 7, 14, 28, 56, 84, 112 日と設定した．前述のように，盛土スラグについては自然環境下で硬化が進行しているために施工後からの期間を初回硬化日数とし，再度，養生した後の供試体に対し試験を行った．

硬化した水砕スラグの再硬化特性

Fig.5 に一軸圧縮強さの経時変化を示す．Fig.5(a)は積算日数，Fig.5(b)は養生日数でまとめたものである．いずれのケースにおいても，強度の発現がみられた．また，(b)より，初回硬化日数 0 日の場合と比較し，他のケースでは強度の発現が小さくなる傾向を示した．Fig.6 に水和反応率の経時変化を示す．初回硬化日数に依らず，一様に強度増加する傾向を示しており，解砕が水和反応の進行に及ぼす影響は小さいことがわかる．水和反応率と強熱減量の関係を示したものがFig.7 であって，初回養生日数に依らず，両者には一義的な関係があることがわかる．

Fig.8 に一軸圧縮強さの近似曲線を示す．近似曲線は次式を用い，最後に自立しなかった点 ($q_u=0$) を通るよう，重み付き最小 2 乗法で近似化した．

$$q_u = A\sqrt{t} \quad (3)$$

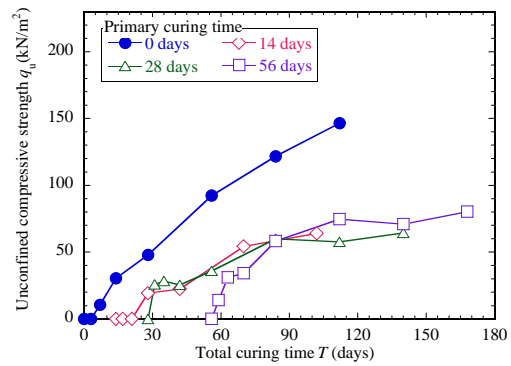


Fig.5(a) 盛土に用いた水砕スラグの一軸圧縮強さと積算日数の関係

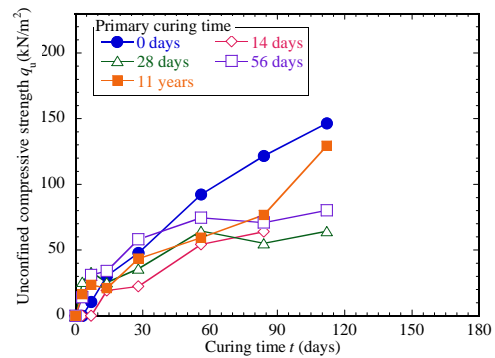


Fig.5(b) 盛土に用いた水砕スラグの一軸圧縮強さと養生日数の関係

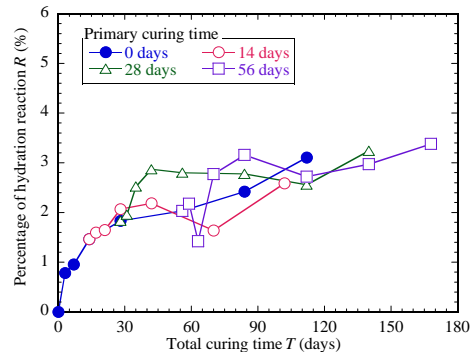


Fig.6 水和反応率の経時変化

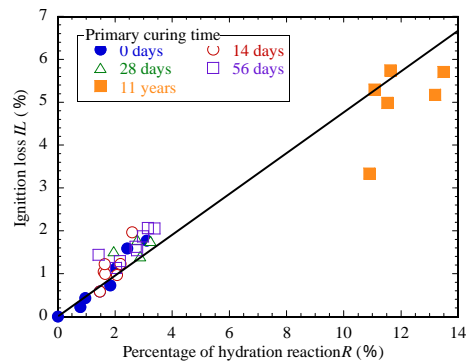


Fig.7 強熱減量と水和反応率の関係

いずれのケースにおいても近似曲線に大きな相違はみられず、相関係数Rは0.9以上となり精度よく近似できた。Fig.9に初回養生日数と A/A_0 の関係を示す。ここに、 A/A_0 は式(3)で得られた定数Aについて破碎履歴の無い初回硬化日数 A_0 日を1として求めた。Fig.9の下方の点線は初回硬化日数0日を省いたケースについて A/A_0 の値を平均したものである。初回硬化日数0日に対し、一度硬化した水砕スラグは初回硬化日数に依らず、6割程度の強度が発現することがわかる。このことより、硬化履歴を有する水砕スラグの自己修復能力は未水和スラグと比較した場

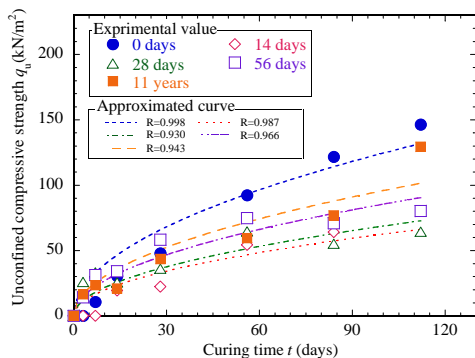


Fig.8 一軸圧縮強さの経時変化

合、6割程度であるといえる。

(3)再硬化時の強度推定式

水和反応率と強熱減量には養生環境や破碎履歴の有無に依らず一義的な関係があることを示した。そこで、ここでは、再硬化時の強度推定式により現場において簡易に強度を予測できる式を示す。Fig.10に水和反応率の近似曲線を示している。これは、式(4)を用いて実験結果を最小2乗法により近似化したものである。80℃淡水のケースのみ養生90日付近で急激に水和反応率の増加がみられたため、反応率値が増加した範囲を対象として近似を行っている。

$$R = \alpha \sqrt{t - \beta} \quad (4)$$

ここに、 α , β は定数である。

Fig.11に水和反応率と一軸圧縮強さの関係を示す。先述したように、水和反応率には閾値が存在すると考えられることから、ここではFig.3に示した実験結果から各養生環境に閾値を設定し、次式で近似した。ここに、 γ , m は実験定数である。

$$q_u = \gamma \cdot R - m \quad (5)$$

式(4), (5)より次式が得られる。

$$q_u = \alpha \cdot \gamma \sqrt{t - \beta} - m \quad (6)$$

一方、自己修復能力は解砕時期によって変化しないことから、自己修復を考慮した一軸圧縮強さ $q_{u,Re}$ は次式で表される。

$$q_{u,Re} = A/A_0 \cdot q_u \quad (7)$$

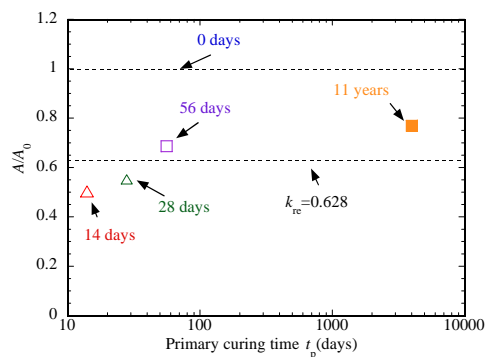


Fig.9 初回硬化日数と A/A_0 の関係

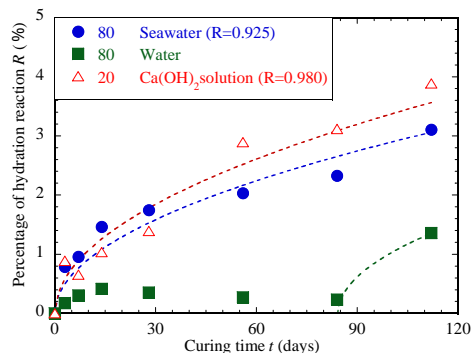


Fig.10 水和反応率の近似

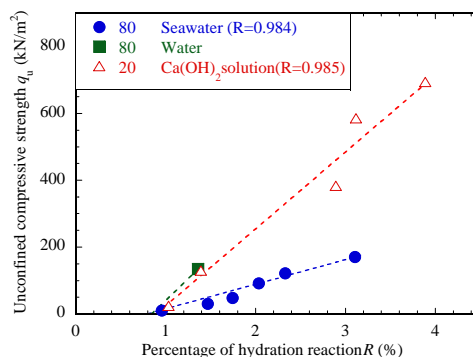


Fig.11 一軸圧縮強さと水和反応率の関係

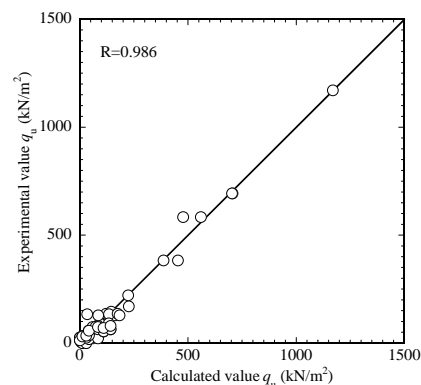


Fig.12 実験結果と計算値の関係

一軸圧縮試験で得られた実験値と式(7)より求めた計算値の関係がFig.12である。両者はよく一致しており、再硬化時の強度推定が可能である。

(4)まとめ

本研究では、様々な養生環境が硬化に及ぼす影響を水和物の生成と強度の関係に着目して調べ、硬化後供試体が受けた負荷の程度と再硬化（自己修復能力）との関係についての定量的評価を行った。実験では、未水和スラグと自然環境下において著しく硬化が進行した施工後 11 年経過した盛土スラグを用いて自己修復能力について定量的に評価するとともに、自己修復を考慮した強度推定式を提案した。

得られた主な結論は以下のとおりである。養生環境が異なると水和物の生成量やその強度への寄与率に差異がある。

水砕スラグは水和反応の進行によって、自己修復する。また、硬化履歴がある水砕スラグでは初回硬化日数が長いほど早期に強度発現し、初回硬化日数に依らず、同程度の強度を発現する。

養生日数・強熱減量で自己修復を考慮した強度を推定できる式を提案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

和田正寛, 松田博, 原弘行, 石藏良平, 新舎良典, 井川尚之, せん断破壊した高炉水砕スラグの再硬化特性, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム, 査読有, 2013, 159-162. 松田博, 石藏良平, 和田 寛, 来山尚義, 白元珍, 谷信幸, 軽量盛土材として用いた高炉水砕スラグの特性の経年変化, 地盤工学会, 地盤工学ジャーナル, 査読有, 2012, Vol.7, No.1, 339-349.

新舎良典, 和田正寛, 正木理久, 松田博, 石藏良平, 硬化した高炉水砕スラグの自己修復特性に関する考察, 第 10 回地盤改良シンポジウム論文集, 査読有, 2012, 463-466.

M. Wada, H. Matsuda, R. Ishikura & Y. Shinya, Self-Restoration characteristics of granulated blast Furnace Slag as an earthquake resistant material, 15World Conference on earthquake Engineering, 査読有, 2012, Paper Number, 3224.

H. Matsuda, T.T. Nhan, R. Ishikura, T. Inazawa, P.H. Andre, New Criterion for the Liquefaction Resistance under Strain-Controlled Multi-Directional Cyclic Shear, 15World Conference on earthquake Engineering, 査読有, 2012, Paper Number, 4149.

〔学会発表〕(計 8 件)

中村奨哉, 松田博, 原弘行, 和田正寛, 水和反応からみた高炉水砕スラグの自己修復能力の評価, 第 49 回地盤工学研究発表会, 2014.7.15-17, 北九州市国際会議場(北九州市)

和田正寛, 松田博, 原弘行, 井川尚之, 中村奨哉, 高炉水砕スラグの効果に及ぼ

す養生環境の影響, 第 49 回地盤工学研究発表会, 2014.7.15-17, 北九州市国際会議場(北九州市)

和田正寛, 井川尚之, 新舎良典, 松田博, 原弘行, 石藏良平, 硬化した高炉水砕スラグのせん断破壊後の水硬性に関する研究, 第 48 回地盤工学研究発表会, 367, pp.733-734, 2013.7.24, 富山国際会議場(富山市)

井川尚之, 松田博, 原弘行, 和田正寛, 自然環境下で硬化した高炉水砕スラグの自己修復特性に関する研究, 第 65 回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, III-26, 2013.5.25, 鳥取大学(鳥取市)

新舎良典, 和田正寛, 正木理久, 松田博, 石藏良平, 一度硬化した高炉水砕スラグの自己修復特性, 土木学会第 67 回年次学術講演会, -023, pp.45-46, 2012.9.5-7, 名古屋大学(名古屋市)

新舎良典, 和田正寛, 正木理久, 松田博, 石藏良平, 硬化後長期間放置した高炉水砕スラグの再硬化特性に関する研究, 第 47 回地盤工学研究発表会, 238, pp.473-474, 2012.7.14-16, 八戸工業大学(八戸市)

正木理久・和田正寛・新舎良典・松田博・石藏良平, 地盤工学材料としての高炉水砕スラグの再硬化特性, 第 64 回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, -20, 2012.6.9, 呉高専(呉市)

新舎良典, 和田正寛, 正木理久, 松田博, 石藏良平, 著しく硬化した高炉水砕スラグの再硬化特性に関する研究, 第 64 回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, -21, 2012.6.9, 呉高専(呉市)

〔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・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 5 0 1 3 6 1 3 1

(2)研究分担者

石藏 良平(ISHIKURA Ryohei)

九州大学・工学(系)研究科・助教

研究者番号: 9 0 5 1 0 2 2 2

原 弘行(HARA Hiroyuki)

山口大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 0 0 5 8 8 7 0 9