

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月24日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360188

研究課題名（和文） 新しい高圧脱水成型機構を用いた超大型3Rソイルコンクリートの開発研究

研究課題名（英文） Development of a large-size soil-concrete using cement-mixing and high pressure mechanical dehydration

研究代表者

笠間 清伸（KASAMA KIYONOBU）

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：10315111

研究成果の概要（和文）：

(1) 均質な浚渫土ブロックを作製するためには、脱水終了時間を短縮し、固化材の固化反応による影響を小さくすることが有効である。(2) 一軸圧縮強さと水セメント重量比の間には、強い相関が見られたため、一軸圧縮強さは、母材の種類や固化材添加率によらず、水セメント重量比に支配される。(3) 本論文で作製した浚渫土ブロックは、12ヶ月間どの環境に暴露しても、コンクリートに匹敵する強度を維持できる。(4) 乾湿および海中暴露した浚渫土ブロックに付着した生物の出現種数は、対照区とほぼ同様であった。

研究成果の概要（英文）：

(1) In order to create uniform dredged soil blocks, it is necessary to shortening dehydration time. (2) There is close relationship between unconfined compressive strength and water-cement ratio. Therefore, it is concluded that unconfined compressive strength of dredged soil blocks are controlled by water-cement ratio. (3) Since the unconfined compressive strength exceeded 20MPa for more than cement content 22% in exposing test for 12 months, it is considered that dredged soil blocks have the sufficient durability. (4) The number of species of sessile organisms at dredged soil blocks exposed to tidal area and under seawater is equivalent to other marine structures. Therefore, dredged soil blocks can be alternatively used for construction material of marine structures such as concrete brick and block.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2011年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2012年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤環境工学，リサイクル，ヘドロ，固化処理，3R，脱水，高強度

1. 研究開始当初の背景

(1) 現在、地球に優しく快適で安全な生活を維持できる人間活動および生産活動を創造するために、環境への排出をできる限りゼロに近づける「ゼロエミッション型」の社会・産業・生産システムの構築が求められている。

ゼロエミッション・循環型社会の実現のために、多様な分野においてリサイクル技術の開発が行われてきた。しかしながら、最先端のリサイクル技術をもってしても、いくらかの廃棄物が発生している実情があり、それら究極のエミッションは最終手段として海洋環

境に投棄されている現状にある。世界的に見て、海洋投棄される廃棄物の中で最も多いのは、港湾の航路・泊地等の維持浚渫や船舶の大型化による海底増深などに伴う軟弱粘土（ソイル）であり、年間約2億9700万トンが海洋投棄されている。このような状況を抜本的に解決するためには、次々に発生する軟弱ソイルの減量・減容化、有効利用および資源循環ネットワーク化を同時に実現させることが必要であり、効率的かつ効果的な3R（Reduce, Recycle, Reuse）技術を開発することが重要になる。

(2)また、軟弱ソイルは、その堆積環境により、重金属類やダイオキシンなどの人工合成化学物質、さらに生体の成長や生殖などを阻害する環境ホルモンが存在することが明らかとなっており、人間および野生生物の生命および健康に大きな脅威となっている。したがって、従来の重金属や人工合成化学物質といった有害物質に加えて、環境ホルモンなどの21世紀型の新汚染物質などにも対応できる幅広い適用力のある無害化技術が必要となる。

2. 研究の目的

(1)軟弱な粘性土（ソイル）を超大型海洋コンクリート構造体として大量急速再生することで、ソイルの3R（ソイルの減量・減容化（Reduce）、ソイルの超大型コンクリートブロックとしての再利用（Recycle）、ソイルコンクリート製品・部品の再使用（Reuse））が可能である超大型ソイルコンクリートの開発を試みる。これまでに構築した「新たな高圧脱水成型機構」による材料再生技術は、熱を利用しない低コスト・低エネルギー成型技術であり、かつ自由度の高い超大型形状の製品化が可能である。特に、本研究課題では、この基礎的技術シーズ「新たな高圧脱水成型機構」を応用して、ソイルコンクリートを超大型構造ブロックとして製品化し、舗装タイルや消波ブロックとして高度に再利用できる実用化技術へと展開する。

3. 研究の方法

(1)浚渫土ブロックには、母材としてカオリン粘土および博多港で浚渫された土砂（博多港土砂）を用い、固化材として高炉セメントB種を使用した。母材の物理特性を表-1に示す。母材を初期含水比 $1.5w_L$ に加水調整し、所定添加率の固化材を加え、十分に攪拌混合を行った。攪拌混合した試料を図-1に示す大型脱水固化装置に振動を与えながら密実に充填した。脱水圧力2MPaで30分間載荷した後、5MPaの定圧で載荷を行った。排水条件は、両面排水とし、3t法により求められた圧密終了時間で脱水を終了し、浚渫土ブロックの作製を行った。

表-1 物理特性

母材	カオリン粘土	博多港土砂
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.713	2.686
液性限界 w_L (%)	50.6	68.1
塑性指数 I_p	21.2	32.5
粘土分含有率 P_c (%)	52.8	15.6

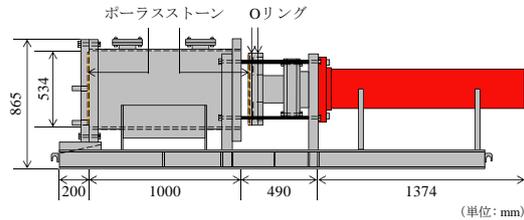


図-1 大型脱水固化装置

(2) 固化材を母材の乾燥重量に対して20, 40および60%添加して作製した浚渫土ブロック（ $\phi 53.4\text{cm} \times H$ 約50cm）から、含水比試験（JIS A 1203）および一軸圧縮試験（JIS A 1216）を行う供試体を計25本くり抜いた。含水比試験は、含水比試験用供試体（ $\phi 5\text{cm} \times H$ 約50cm）1本を高さ方向に5cmずつに分けて行った。一軸圧縮試験は、恒温湿潤条件で7, 14, 28および91日間養生した一軸圧縮試験用供試体（ $\phi 5\text{cm} \times H$ 10cm）を用いて行った。

(3) 母材に博多港土砂を使用し、固化材添加率を11, 22および33%として作製した浚渫土ブロックの暴露実験を行った。浚渫土ブロックは、固化材添加率および暴露条件ごとに2体ずつ作製し、計18体作製した。暴露は、ふくおかアイランドシティの一面において、岸壁付近の気中、乾湿（潮の干満域）および海中に1, 3および12ヶ月行った。所定期間暴露したブロックから一軸圧縮試験用供試体を6本ずつくり抜き、一軸圧縮試験を行った。また、乾湿および海中に19ヶ月間暴露したブロックの生物付着状況調査も行った。写真-1に生物付着状況調査の状況を示す。

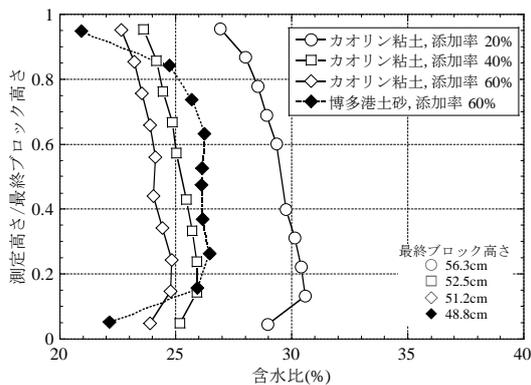


写真-1 福岡市アイランドシティにおける暴露試験

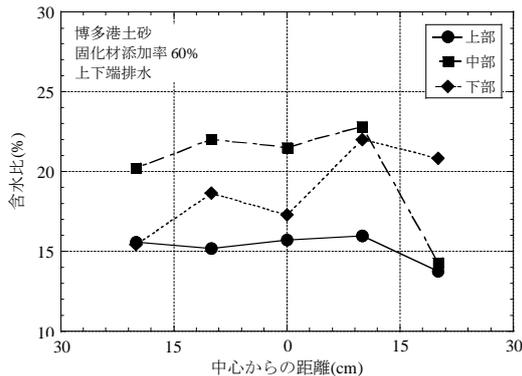
4. 研究成果

研究の方法(1)から(3)で得られた研究成果を以下にまとめる。

(1) 浚渫土ブロックの均質性を評価するため、ブロック内の含水比分布を測定した。図-2(a)に高さ方向の含水比分布を、図-2(b)に博多港土砂の固化材添加率60%における半径方向の含水比分布を示す。ここで、図-2(a)の縦軸は、含水比の測定高さを最終ブロック高さで除し、ブロック上端を1.0とする値を用いた。カオリン粘土の高さ方向の含水比分布幅は、固化材添加率によらず小さかった。博多港土砂の含水比分布幅は、高さ方向で5.5%、半径方向で8.5%であった。カオリン粘土と比較してブロック中央部の含水比が高くなったのは、カオリン粘土よりも脱水時間が長いから、固化材の固化反応によってブロック中央部の水が抜けにくくなったためと考えられる。したがって、浚渫土ブロックをより均質にするためには、脱水終了時間を短縮し、固化材の固化反応による影響を小さくすることが有効と考えられる。



(a) 高さ方向



(b) 半径方向

図-2 含水比分布

(2) 図-3 に養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。図中の曲線は、各固化材添加率における一軸圧縮強さの回帰曲線である。カオリン粘土の固化材添加率60%のケースを除いた3つの実験ケースでは、固化材添加率および養生日数の増加に伴って一軸圧縮強さが増

加した。カオリン粘土の固化材添加率60%では、養生日数28日において一軸圧縮強さの減少が見られた。これは、固化材添加率の増大に伴い、混練試料の不均一性が顕著となり、一軸圧縮強さのばらつきが大きくなったことが要因として挙げられる。しかし、養生日数が91日と長期になると一軸圧縮強さのばらつきが小さくなったことから、試料混練の不均一性が長期的な一軸圧縮強さの増加に与える影響は、小さいと考えられる。また、カオリン粘土において、固化材添加率60%では7日養生で、固化材添加率40%では14日養生で20MPaの一軸圧縮強さを有する浚渫土ブロックの作製ができた。したがって、軟弱な浚渫土砂に脱水固化処理を施すことで、コンクリートに匹敵する一軸圧縮強さを有する浚渫土ブロックの作製が可能といえる。

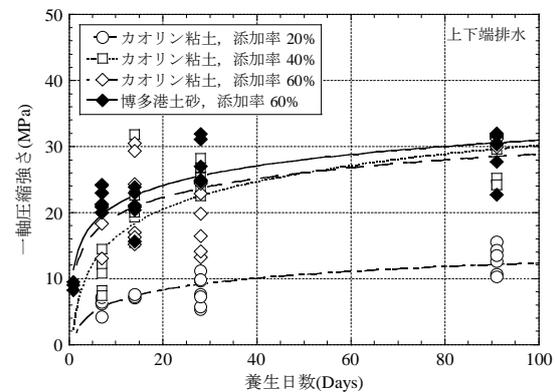


図-3 養生日数と一軸圧縮強さ

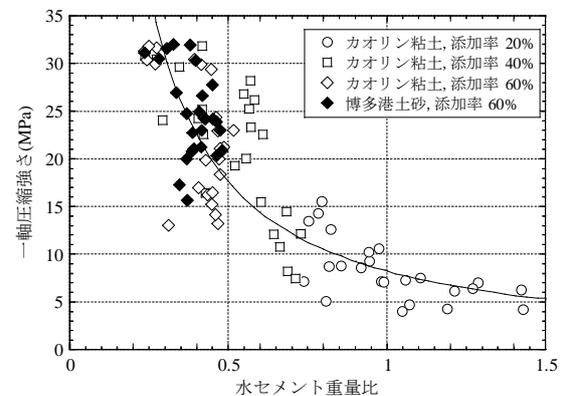


図-4 水セメント重量比と一軸圧縮強さ

図-4 に水セメント重量比と一軸圧縮強さの関係を示す。水セメント重量比とは、一軸圧縮試験後における浚渫土ブロック内のセメントに対する水の重量比である。水セメント重量比と一軸圧縮強さとの間には、強い相関が見られたため、一軸圧縮強さは、母材の種類や固化材添加率によらず、水セメント重量比に支配されると推察できる。したがって、浚渫土ブロックの高強度化は、水セメント重量比を小さくすることが重要といえる。また、

図-4 より得られた一軸圧縮強さの推定式を式(1)に示す。

$$q_u = 8.25(w/c)^{-1.09} \quad (1)$$

ここで、 q_u は一軸圧縮強さ、 w/c は一軸圧縮試験時の水セメント重量比である。式(1)の相関係数は、0.87 と高いことから、浚渫土ブロックの一軸圧縮強さは、式(1)から推定できると考えられる。

(3) 図-5 に 12 ヶ月間暴露を行った浚渫土ブロックの固化材添加率と一軸圧縮強さの関係を示す。どの暴露条件においても、固化材添加率の増加に伴い一軸圧縮強さは増加した。最大の一軸圧縮強さをとった暴露条件は、固化材添加率 11%および 22%では気中暴露、固化材添加率 33%では乾湿暴露であった。

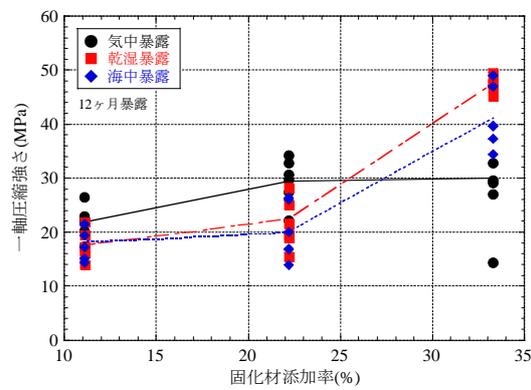


図-5 固化材添加率と一軸圧縮強さ

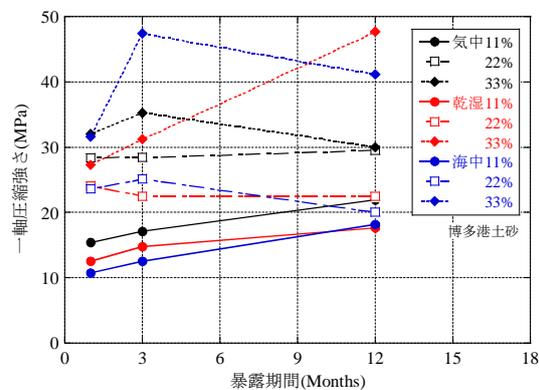
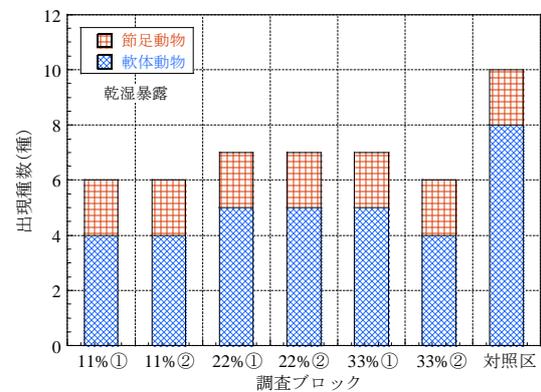


図-6 暴露期間と一軸圧縮強さ

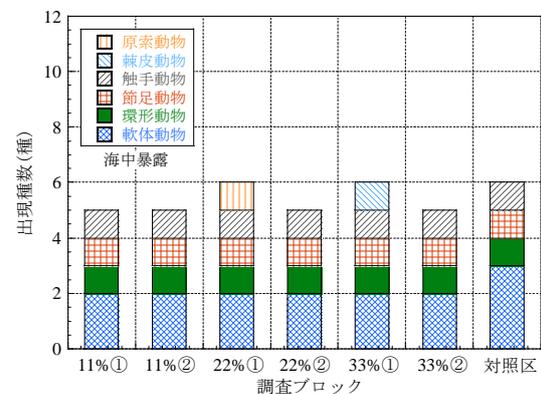
図-6 に暴露期間と一軸圧縮強さの平均値の関係を示す。暴露期間 3 ヶ月までは、暴露期間の増加に伴って一軸圧縮強さも増加した。暴露期間が 3 ヶ月を過ぎると、主に固化材添加率 33%において一軸圧縮強さが減少するケースも確認できた。これは、暴露期間が長くなるにつれ、暴露した浚渫土ブロックの微小クラックが増加し、一軸圧縮強さの増大を阻害するためと推察できる。固化材添加率 22%以上における一軸圧縮強さは、暴露条件

によらず 20MPa を超えており、本論文で作製した浚渫土ブロックは、12 ヶ月間どの環境に暴露しても、コンクリートに匹敵する強度を維持できるといえる。

(4) 図-7 (a)および(b)に乾湿および海中に暴露した各浚渫土ブロックにおける付着生物の出現種数を示す。図中の対照区とは、暴露した浚渫土ブロックの生物付着状況と比較するために選出した比較対照区域であり、乾湿暴露では近傍のコンクリート製の垂直護岸を、海中暴露では近傍の護岸を対照区とした。乾湿暴露における主な出現種は、節足動物のシロスジフジツボ、軟体動物のアマガイ、タマキビおよびマガキであった。海中暴露における主な出現種は、節足動物のタテジマフジツボ、軟体動物のナミマガシワ科およびイタボガキ科であった。乾湿暴露した浚渫土ブロックに付着した生物の出現種数は、暴露供試体では 6~7 種、対照区では 10 種であった。これは、対照区が観察の容易な垂直護岸であるのに対し、調査ブロックは囲いと隙間から覗き込んでの観察であるため、観察が難しかったことが要因と考えられる。したがって乾湿暴露において、対照区との出現種数に大きな差異はないと推察できる。また、海中暴露した浚渫土ブロックに付着した生物の出現種数は、暴露供試体では 5~6 種、対照区では 6 種であり、ほぼ同様の結果となった。



(a) 乾湿暴露



(b) 海中暴露

図-7 付着生物出現種数

(5) 図-8 に浚渫土ブロックの配合決定フローを示す。式(2)および式(3)は、実験から得られた回帰式であり、それぞれの相関係数は、0.95 および 0.99 である。

$$(w/c)' = 2.50(w/c) - 0.34 \quad (2)$$

$$(w/c)' = 2.13(w/c) + 0.66 \quad (3)$$

目標強度 q_u を設定し、式(1)および式(2)から脱水直後の水セメント重量比 $(w/c)'$ を決定する。固化材添加率 C および最終ブロック高さ H_f を設定し、自然含水比 w_n から求めた脱水前の水セメント重量比 $(w/c)''$ の妥当性を式(3)により検討する。妥当であれば脱水前の水重量を m_w'' とし、妥当でない場合は式(3)から得られた水重量を最終的な脱水前の水重量とし、脱水前の配合を決定する。

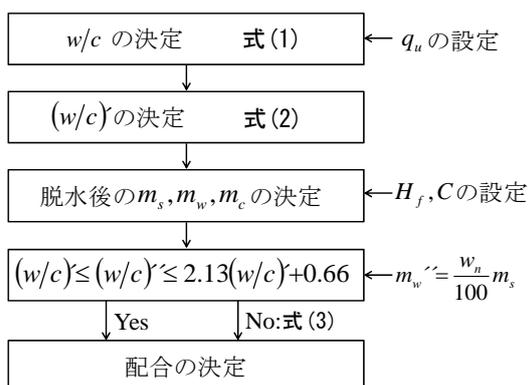


図-8 配合決定フロー

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計14件)

① Junki TAJIRI, Kiyonobu Kasama, Kouki Zen, Yasuo KASUGAI, GUANGQI CHEN, Consolidation properties of dredged clay mixed with steel slag, Proceedings of International Joint Symposium on Urban Geotechnics for Sustainable Development JS-Seoul2012, 2012.

② Toshiki TAKESHITA, Kiyonobu Kasama, Yasuo Kasugai, Kouki Zen, The Strength Property of the Dredged Soils Produced by Steel Slag Mixing and Dehydration, Proceedings of International Joint Symposium on Urban Geotechnics for Sustainable Development JS-Seoul2012, 2012.

③ 笠間清伸, 善 功企, 春日井康夫, 脱水固化処理により作製した浚渫土ブロックの長期強度特性, 第10回地盤改良シンポジウム論文集, pp.263-266, 2012.

④ 竹下知希, 笠間清伸, 善 功企, 春日井康夫, 高圧脱水固化処理したスラグ混合浚渫土の一軸圧縮強度特性, 第10回地盤改良シンポジウム論文集, pp.297-300, 2012.

⑤ 田尻隼也, 笠間清伸, 善 功企, 春日井康夫, ひずみ速度に着目したスラグ混合浚渫土の圧密特性, 第10回地盤改良シンポジウム論文集, pp.501-504, 2012.

⑥ Toshiki TAKESHITA, Kiyonobu KASAMA, Yasuo KASUGAI, Kouki ZEN and Guangqi CHEN, The Strength Property of Slag-Mixed and Dewatered Clay, The 8th International Symposium on Lowland Technology (ISLT 2012), pp.214-217, 2012.

⑦ Junya TAJIRI, Kiyonobu KASAMA, Yasuo KASUGAI, Kouki ZEN and Guangqi CHEN, The Dewatering Properties of Dredged Clay Mixed with Steel Slag, The 8th International Symposium on Lowland Technology (ISLT 2012), pp.102-105, 2012.

⑧ 山下祐佳, 善 功企, 陳光齊, 笠間清伸, 脱水固化処理による大型浚渫土ブロックの均質性および強度特性, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.67, No.2, pp.I_440-I_444, 2012.

⑨ Yuka YAMASHITA, Kiyonobu KASAMA, Kouki ZEN and Guangqi CHEN, Dehydration and Strength Properties of Cement-mixed and Dehydrated Clay, The International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE 2011), pp.151-155, 2011.

⑩ 山下祐佳, 善 功企, 陳光齊, 笠間清伸, 脱水固化処理された大型ソイルブロックの強度特性, 第9回地盤改良シンポジウム論文集, pp.45-48, 2010.

⑪ 佐野将輝, 善 功企, 陳光齊, 笠間清伸, 水セメント重量比に着目した脱水固化処理土の強度推定, 第9回地盤改良シンポジウム論文集, pp.313-316, 2010.

⑫ Masaki SANO, Kouki ZEN, Guangqi CHEN and Kiyonobu KASAMA, Effects of Physical Property on the Unconfined Compressive Strength of Cement-Mixed and Dehydrated Clay, The 7th International Symposium on Lowland Technology (ISLT 2010), pp.70-73, 2010.

- ⑬ Yuka YAMASHITA, Kouki ZEN, Guangqi CHEN and Kiyonobu KASAMA, Scale-up Test for Producing High-strength Clay by Cement Mixing and Mechanical Dehydration, The 7th International Symposium on Lowland Technology (ISLT 2010), pp.74-78, 2010.

〔学会発表〕(計13件)

- ① Junki TAJIRI, Kiyonobu Kasama, Kouki Zen, Yasuo KASUGAI, GUANGQI CHEN, Consolidation properties of dredged clay mixed with steel slag, Proceedings of International Joint Symposium on Urban Geotechnics for Sustainable Development JS-Seoul2012, 2012.
- ② Toshiki TAKESHITA, Kiyonobu Kasama, Yasuo Kasugai, Kouki Zen, The Strength Property of the Dredged Soils Produced by Steel Slag Mixing and Dehydration, Proceedings of International Joint Symposium on Urban Geotechnics for Sustainable Development JS-Seoul2012, 2012.
- ③ 笠間清伸, 善 功企, 春日井康夫, 脱水固化処理により作製した浚渫土ブロックの長期強度特性, 第10回地盤改良シンポジウム論文集, pp.263-266, 2012.
- ④ 竹下知希, 笠間清伸, 善 功企, 春日井康夫, 高压脱水固化処理したスラグ混合浚渫土の一軸圧縮強度特性, 第10回地盤改良シンポジウム論文集, pp.297-300, 2012.
- ⑤ 田尻隼也, 笠間清伸, 善 功企, 春日井康夫, ひずみ速度に着目したスラグ混合浚渫土の圧密特性, 第10回地盤改良シンポジウム論文集, pp.501-504, 2012.
- ⑥ Toshiki TAKESHITA, Kiyonobu KASAMA, Yasuo KASUGAI, Kouki ZEN and Guangqi CHEN, The Strength Property of Slag-Mixed and Dewatered Clay, The 8th International Symposium on Lowland Technology (ISLT 2012), pp.214-217, 2012.
- ⑦ Junya TAJIRI, Kiyonobu KASAMA, Yasuo KASUGAI, Kouki ZEN and Guangqi CHEN, The Dewatering Properties of Dredged Clay Mixed with Steel Slag, The 8th International Symposium on Lowland Technology (ISLT 2012), pp.102-105, 2012.
- ⑧ Yuka YAMASHITA, Kiyonobu KASAMA, Kouki ZEN and Guangqi CHEN, Dehydration and Strength Properties of Cement-mixed and Dehydrated Clay,

The International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE 2011), pp.151-155, 2011.

- ⑨ Kiyonobu KASAMA and Kouki ZEN, Liquefaction Risk Analysis for Artificially Solidified Ground, The 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paper No.279, 2011.
- ⑩ 山下祐佳, 善 功企, 陳 光齊, 笠間清伸, 脱水固化処理された大型ソイルブロックの強度特性, 第9回地盤改良シンポジウム論文集, pp.45-48, 2010.
- ⑪ 佐野将輝, 善 功企, 陳 光齊, 笠間清伸, 水セメント重量比に着目した脱水固化処理土の強度推定, 第9回地盤改良シンポジウム論文集, pp.313-316, 2010.
- ⑫ Masaki SANO, Kouki ZEN, Guangqi CHEN and Kiyonobu KASAMA, Effects of Physical Property on the Unconfined Compressive Strength of Cement-Mixed and Dehydrated Clay, The 7th International Symposium on Lowland Technology (ISLT 2010), pp.70-73, 2010.
- ⑬ Yuka YAMASHITA, Kouki ZEN, Guangqi CHEN and Kiyonobu KASAMA, Scale-up Test for Producing High-strength Clay by Cement Mixing and Mechanical Dehydration, The 7th International Symposium on Lowland Technology (ISLT 2010), pp.74-78, 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笠間 清伸 (KASAMA KIYONOBU)
九州大学大学院・工学研究院・准教授
研究者番号：10315111

(2) 研究分担者

善 功企 (ZEN KOUKI)
九州大学大学院・工学研究院・特任教授
研究者番号：50304754