

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289149

研究課題名(和文) 浚渫土防災ブロックを活用した新形式津波防波堤の開発研究

研究課題名(英文) Development of a new-type Tsunami resilient breakwater using soil blocks with cement-mixing and mechanical dehydration technology

研究代表者

笠間 清伸 (Kasama, Kiyonobu)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10315111

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、これまでに構築した「浚渫土ブロック化技術」を活用して、浚渫土砂から製造した道路ブロックや港湾防災ブロックの材料特性、強度・耐久性および環境安全性などを評価した。さらに、浚渫土砂ブロックを、防波堤の捨石マウンドや消波ブロックなどの港湾防災ブロックとして活用する場合を想定し、津波の襲来を考えた際の基礎地盤の浸透破壊・支持力破壊を防止できる新形式津波防波堤を新たに構築した。つまり、津波の波力と浸透力に対抗できる港湾防災ブロックの最適な形状と重量を決定するための手法を提案し、防波堤の耐津波性能を向上させるために最も効果的な港湾防災ブロックの形状と安定重量を提示した。

研究成果の概要(英文)：Mechanical properties and the applicability for road pavement and coastal protection of soil block produced by cement-mixing and mechanical dehydration are evaluated. In addition, this study proposes a formula to calculate the stable weight of soil block underneath breakwater foundation in consideration of the overflow and seepage flow induced by tsunami based on the theoretical force balance between frictional resistance of soil block, the tractive force of the water flow over the caisson to the soil block and seepage force thorough underneath breakwater foundation. A series of hydraulic model experiments were conducted on the scale of 1/100 for Kamaishi Bay breakwaters as the subject in order to confirm the effectiveness of the proposed formula. Using the test results, the stability of the soil block underneath breakwater foundation was evaluated from the geotechnical engineering point of view as well as the hydrodynamical point of view.

研究分野：防災地盤工学

キーワード：浚渫 リサイクル 高強度 大型化 固化処理土 防災 津波 消波

1. 研究開始当初の背景

(1) これまでゼロエミッション・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浚渫土であり、年間約2億9700万トンが海洋投棄されている。

(2) 平成23年3月11日の東北地方太平洋沖地震に起因して大量の震災瓦礫が発生し、陸上だけでなく港や湾内などの海底にも広域に堆積している状況にある。これら大量・広域に存在する浚渫土砂ならびに震災瓦礫の再生利用に対しては、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。

(3) 東北地方太平洋沖地震において、大規模津波により甚大な被害を受けた防波堤や防潮堤の被害メカニズムが調査・研究され、津波に対してより強固な構造を有する新形式の津波防波堤の構築が希求されている。

2. 研究の目的

これまでの基礎研究により、図-1に示すような「最大強度 26MPa (固化処理土として国内最大強度)」かつ海域環境において十分な「長期耐久性・環境安定性」を有する浚渫土ブロックの製造技術シーズを得ている。

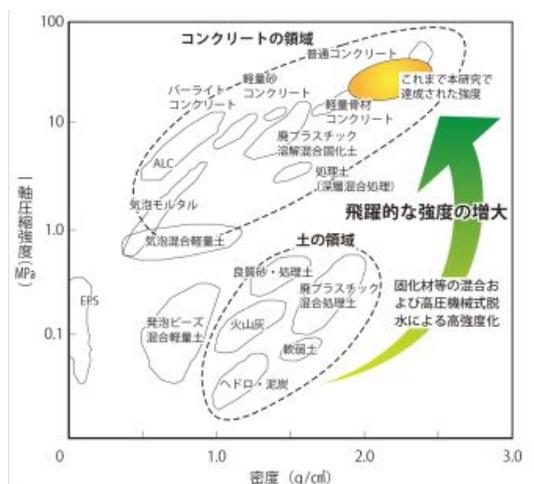


図-1 開発した浚渫土砂ブロックの強度

この「浚渫土ブロック化技術」を応用し、浚渫土ならびに震災瓦礫を自由度の高い超大型形状の防災ブロック (捨石マウンドや消波ブロックなど) として再生できる実用化技術へと展開する。さらに、製造した浚渫土防災ブロックを高波浪エネルギーの消散・吸収

機構として高度に利用し、防波堤直下の地盤破壊 (浸透破壊および支持力破壊) を防止できる新形式の津波防波堤を構築することを最終的な目標とする。

3. 研究の方法

(1) 高压脱水成型装置の開発

浚渫土ならびに震災瓦礫を捨石マウンドや消波ブロックなどの大型防災ブロックとして利用するために、これまでの科学研究費補助金により整備・開発した写真-2a)に示す最大載荷力2MNの油圧シリンダーを搭載する高压脱水成型装置を用いて、固化材の配合や排水条件及び載荷圧などの最適な成型条件を明確にする。また、成型の大型化に最適な型枠構造や形態を提案することを目的として、固化材の脱水作用および固結効果を考慮した成型解析を行ない、スケールアップに伴う課題の抽出と解決策の検討を実施する。

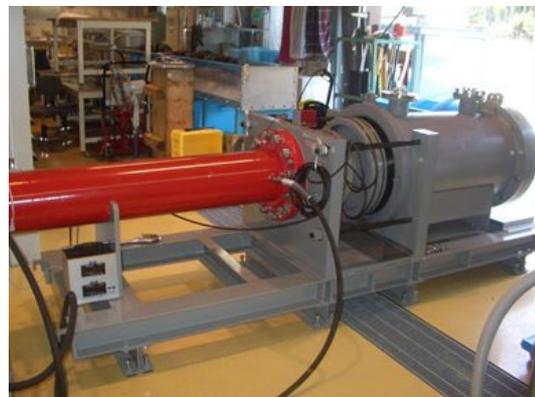


写真-2 高压脱水固化装置

(2) 長期耐久性及び環境工学的な安定性評価

浚渫土防災ブロックの長期養生した浚渫土防災ブロックを圧縮試験する。その結果をもとに、最大強度が発揮される混合条件、加圧条件および養生条件を検討する。

さらに、実海洋環境条件における長期耐久性および環境安全性を評価するために、写真-1に示すように、福岡市人工島アイランドシティの一画において、岸壁付近の気中、乾湿 (潮の干満域) および海中に3年間の長期暴露試験を行う。1年および3年間暴露したブロックから一軸圧縮試験用供試体をコアリングし、一軸圧縮試験および耐久性試験を行う。さらに、乾湿および海中に暴露したブロックにおいては、環境工学的な安全性を調べるために生物付着状況調査も実施する。

(3) 防災ブロック併用型防波堤の模型実験

津波による防波堤や防潮堤などの港湾施設の被災の原因として、防波堤全面と背面の水位差に起因して作用する水平力、防波堤の越流水ならびに目地で発生する流水による捨石マウンドの洗掘、捨石マウンドの浸透破壊ならびに支持力の低下などが考えられている。写真-3に示す防波堤に來襲する津波を模擬した水理模型実験装置を用いて、

本研究で構築する浚渫土防災ブロックを捨石マウンドおよび消波ブロックとして併用する新形式の津波防波堤を模擬した模型実験を実施する。

#### (4) 津波・防波堤・直下地盤の変形解析

津波の水理学的な衝撃力、防波堤の抵抗力および直下地盤の浸透現象および支持力発現を同時に解析できる津波防波堤の安定解析手法を地盤工学的な力学体系に基づき構築する。また、津波波力を作用させた状態における模型防波堤の支持力実験結果と比較することで、提案する安定解析手法の精度を定量的に評価する。さらに、今回新たに構築する浚渫土防災ブロックを併用した新形式防波堤の安定解析を実施し、その特徴、利点および緊急時安定性・信頼性を理論的および実験的に検証する。

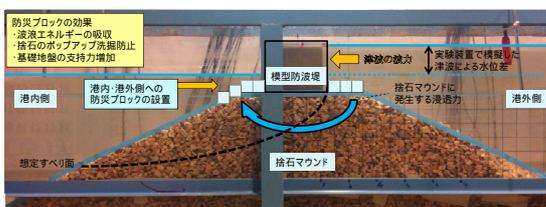


写真-3 津波を模擬した防波堤の模型実験

### 4. 研究成果

#### (1) 被覆材の浸透破壊と安定重量計算式

図-2 に示すように、津波作用時に防波堤の港内外に水位差が生じると、捨石マウンド内に浸透流が発生する。そこで、最初に浸透流に起因する被覆材の浸透破壊を判定した。浸透破壊の発生メカニズムは、被覆材の重量を浸透力が上回ることによって、次々に被覆材が安定性を失うということが考えられる。そこで、このメカニズムに基づき、理論的に浸透破壊が発生する限界動水勾配  $i_c$  を計算したものが式(1)である。

$$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e} \cos \theta \quad (1)$$

ここで、 $e$ : 被覆材の間隙比、 $\theta$ : マウンド勾配、 $G_s$ : 被覆材の比重である。また、津波越流発生時の港内側の捨石の安定条件について Hudson 式の誘導を参考にしながら再検討した。図-2 に示すような港内側マウンドの被覆材一個に関する力の釣合から、津波が発生した時に被覆材が動く限界の重量（安定重量  $W_s$ ）を算出する式を理論的に提案した。この式は、Hudson 式が浸透流を考慮していないことを改善するため、浸透流に起因する一個の被覆材が受ける浸透力を導入して再計算したものである。以下にその式を示す。

$$W_s = \frac{k_a^3 \gamma_s C_D^3 u^6}{8k_v^2 g^3 \left[ \left\{ f \left( \cos \theta - \frac{1+e}{G_s-1} i \right) - \sin \theta \right\} (G_s - 1) \right]^3} \quad (2)$$

ここで、 $C_D$ : 抗力係数、 $u$ : 越流水が港内側マウンドに突入するときの流速、 $g$ : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>]、 $f_r$ : 被覆材のかみ合わせおよび摩擦係数、 $\gamma_s$ : 捨石の単位体積重量[kN/m<sup>3</sup>]、 $i$ : 動水勾配、 $k_a$ 、 $k_b$  はそれぞれ被覆材の形状より決まる体積係数、面積係数である。

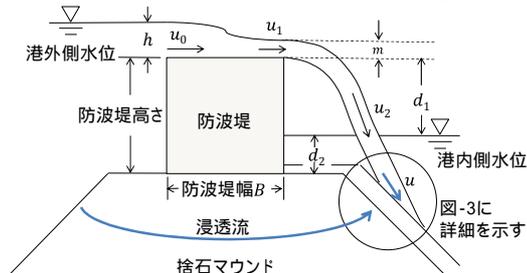


図-2 津波作用時の防波堤の越流・浸透流

#### (2) 被覆材形状に着目した水理模型実験

被覆材の形状や重量の違いによる被災形態の違いを明らかにし、提案した式の妥当性を評価するために、釜石港湾口防波堤をモデルとして全6パターンの被覆材の形状、配置の組み合わせを用いて水理模型実験を実施した。その縮尺は1/100とした。

図-3、4 に、港内外における水位差と被覆材の被害率  $D$  を、それぞれの配置方法についてまとめたものを示す。なお、被害率  $D$  は、以下の式を用いて計算した。

$$D = \frac{\text{被災した被覆材の数}}{\text{被覆材総数}} \times 100 [\%]$$

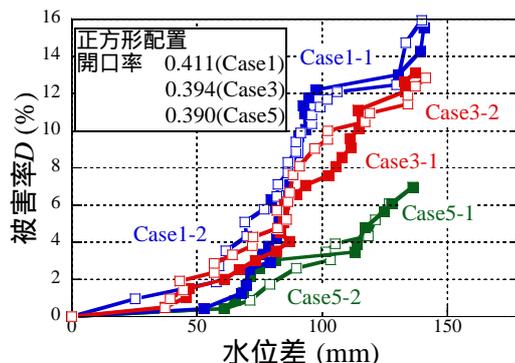


図-3 正方形配置での被害率  $D$  と水位差

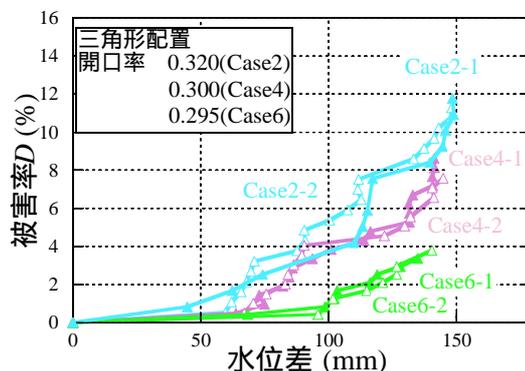


図-4 三角形配置での被害率  $D$  と水位差

正方形・三角形配置の違いによらず、高さ比  $H/R$  が大きくなるほど被害率が小さくなる

ことがわかる。どのケースにおいても、越流が発生した水位差 120mm 程度となる以前から法面上の模型被覆材が一部滑り落ちるように移動する現象が見られた。これは捨石マウンド内に発生した浸透流により、模型被覆材が浮き上がったためと考えられる。さらに、越流が生じてからは被害率の増加が顕著であり、越流水の打ち込み位置付近で大きく模型被覆材が被災した。

### (3) 浸透流破壊に対する安全性評価

図-5 に、水位差 140mm の時点における浸透破壊に対する安全率を求めたコンター図をそれぞれ示す。なお、浸透破壊の判定は、式(1)に示す捨石マウンド表面における被覆材に作用する力の釣合から求めた限界動水勾配  $i_c$  と、実験によって得られたマウンド内の動水勾配  $i$  との比をとり、安全率を算出することで行った。ここでは、安全率が 1 を下回ったときに浸透破壊が発生するとしている。

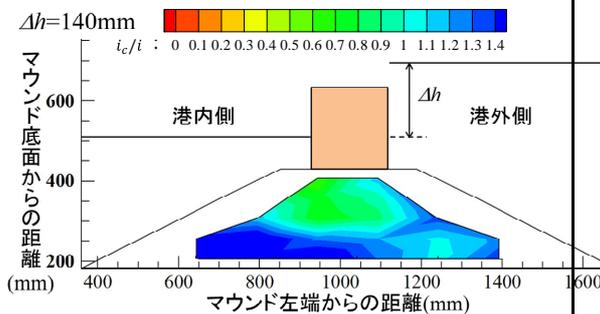


図-5 浸透破壊に対する安全率(140mm)

### (4) 越流・浸透破壊に対する安全率

図-6 に越流発生時の模型被覆材の安全率と越流水深の関係を示す。ここでの安全率は式(2)を用いて求めた安定重量と模型被覆材の重量の比であるとした。ここでも、安全率が 1 を下回ったときに崩壊するとしている。

この図より、高さ比が大きくなるほど越流・浸透破壊に対してより安定であるということがわかる。これは前節で述べた理論式の考察や水理模型実験の結果と一致している。また、同じ高さ比の被覆材は比較的近い安全率を示していることから、越流・浸透破壊に対する安定性は配置の違いよりもその高さ比に大きく影響されていることがわかる。

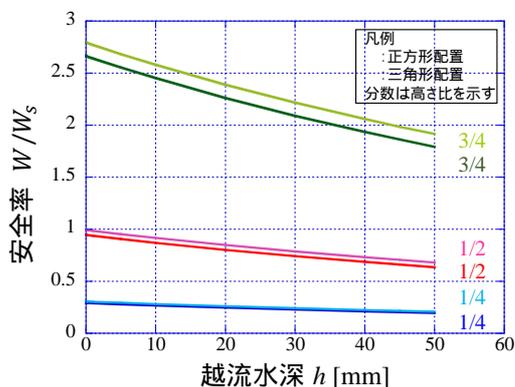


図-6 被覆材の形状による安全率の比較

### (5) 津波・浸透流を考慮した有限要素解析

有限要素法解析には、沿岸技術研究センターにおいて浸透流解析の機能を追加するなど改良が進められているプログラム GeoFem を用いた。捨石マウンドと腹付工には Mohr-Coulomb の破壊基準に従う弾・完全塑性体のモデルを適用した。また、ケーソンの自重ならびに作用する偏心傾斜荷重は、ケーソンと捨石マウンドが接する面に作用する分布荷重としてモデル化した。

津波の作用条件として 0m~15m を想定し、有限要素法を用いて定常浸透流解析を行った。津波が作用している状態は、港外側の捨石マウンドの境界条件を津波作用高に応じて増加させることで模擬した。捨石マウンドの自重解析を行い初期の応力分布を計算した。浸透流解析で得られた捨石マウンド内の水圧分布から、変形解析で使用する各要素に発生する浸透力を計算し、各要素の接点に作用する外力として与えて変形解析を行った。この時点において、捨石マウンドには、自重と津波に起因した浸透力による変形が生じている。津波作用時におけるケーソンに作用する水平外力とケーソンの自重による偏心傾斜荷重をケーソンの設置面にステップ載荷し、各ステップにおける荷重と変形量の関係を明らかにした。ここで、津波作用時においてケーソンに生じる水平外力は、港内側と港外側の静水圧差をもとに計算した。

以上の解析から得られた防波堤の支持力特性や捨石マウンドに発生する塑性領域の形状などをもとに、浸透力ならびに水平外力に起因した防波堤の安定性を検討した。

図-7 に、解析より得られた荷重沈下曲線を示す。縦軸は、ケーソンの鉛直変位を基礎幅で割って正規化した。津波による水位差の大きにかかわらず、載荷初期において弾性的に挙動し、降伏点を示した後、極限荷重に至る荷重沈下曲線を示す。載荷初期における荷重沈下曲線の勾配は、津波による水位差によらずほぼ一定値を示した。しかしながら、降伏荷重ならびに極限荷重は、津波による水位差が大きくなるとともに減少した。

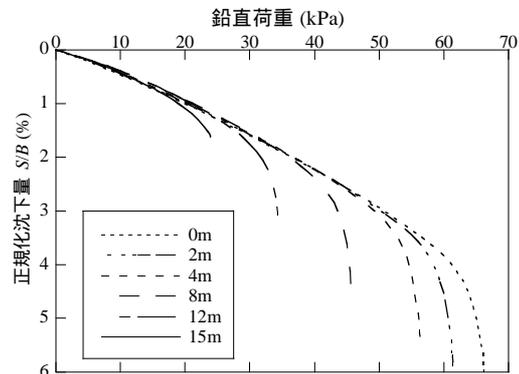


図-7 載荷沈下曲線

図-8は、実測値ならびに有限要素法を用いた変形解析により得られた捨石マウンドの支持力保持率と水位差の関係である。支持力保持率とは、津波作用時の支持力を平常時の模型蛇籠なしの条件での極限支持力で正規化した値である。実験結果に着目すると、捨石マウンドの粒径の大きさによらず、水位差の増加とともに支持力保持率は、顕著に減少した。今回の実験では、145mmの津波(実スケールで14.5m)が作用したときには、支持力が約40%まで低減する結果となった。この水位差に伴う支持力低減量は極めて大きく、津波作用時には水位差に起因して発生する浸透力が防波堤の安定性にきわめて大きな影響を与えることを指摘している。一方、模型蛇籠の支持力改善効果は、極めて小さく、特に、水位差が大きくなるほど減少した。

さらに、解析結果に着目すると浸透力を考慮した変形解析により得られた支持力保持率は、実測値による支持力保持率とほぼ一致する結果が得られた。したがって、捨石マウンド内の浸透力ならびにケーソンに作用する水平力を考慮した有限要素法解析により、津波による捨石マウンドの支持力低減量を計算できると言える。

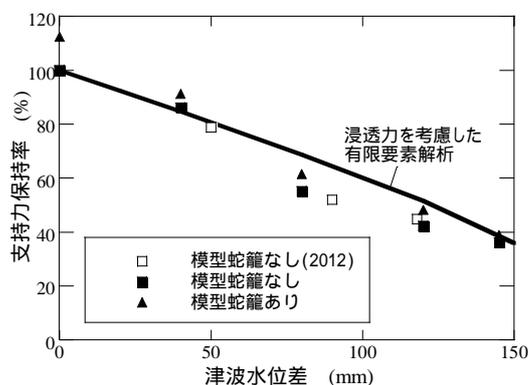


図-8 支持力保持率の比較

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計14件)

Kiyonobu KASAMA, Kouki Zen, Yasuo Kasugai, Stability evaluation for the caisson-type composite breakwater under tsunami condition, Proceedings of The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol. 2 (2015), No. 72, p. 2465-2468, 2016.  
井上翔太, 笠間清伸, 平澤充成, 善功企, 古川全太郎, 八尋裕一, 越流・浸透流を考慮した捨石マウンドの安定重量に関する水理模型実験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 71, No. 2, p. I\_1059-I\_1064, 2015.  
Kiyonobu KASAMA, Andrew J. Whittle, Effect of spatial variability on the

slope stability using Random Field Numerical Limit Analyses, Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2015.

Shota Inoue, Kiyonobu KASAMA, Mitunari Hirasawa, Kouki Zen, Zentarō Furukawa, Yuichi Yahiro, Calculation and hydraulic model experiments for the stable weight of rubble-mound considering the overflow and seepage flow, Proceedings of The 6th Japan-China Geotechnical Symposium, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol. 1 (2015), No. 6, p. 58-62, 2015.

Kayo Doumoto, Kiyonobu KASAMA, Mitunari Hirasawa, Kouki Zen, Zentarō Furukawa, Yuichi Yahiro, Masato Nakamichi, Mitsunobu Sakamoto, Tatsuya Ueda, Masaaki Katagiri, Shuji Yamamoto, Osamu Kawahara, Toshiyuki Nagano, Mechanical and load transmission properties of soil-concrete block, Proceedings of The 6th Japan-China Geotechnical Symposium, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol. 1 (2015) No. 5, p. 27-31, 2015.

井上翔太, 笠間清伸, 平澤充成, 善功企, 古川全太郎, 八尋裕一, 越流・浸透流を考慮した捨石マウンドの浸透破壊と安定重量に関する水理模型実験, 地域性を考慮した地盤防災減災技術に関するシンポジウム論文集, pp.27-32, 2015.

堂本佳世, 笠間清伸, 平澤充成, 善功企, 古川全太郎, 八尋裕一, 中道正人, 坂本光信, 上田達也, 片桐雅明, 山本修司, 川原修, 長野敏之, 高圧脱水固化して作製した浚渫土砂ブロックの材料特性, 第11回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.343-346, 2015.

笠間清伸, ヘドロから大型・高強度ブロックをつくる, 土木学会誌, 第100巻, 第4号, 2015.

笠間清伸, 善功企, 春日井康夫, 平澤充成, 古川全太郎, 八尋裕一, 固結効果に着目したスラグ石灰混合浚渫土の圧密挙動, 地盤改良シンポジウム論文集, 2014.

Kiyonobu KASAMA, Andrew J. WHITTEL, Slope Reliability Analysis using Random Field Numerical Limit Analyses, The 14th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (14IACMAG), 2014.

竹下知希, 笠間清伸, 善功企, 春日井康夫, 高圧脱水固化したスラグ石灰混

合浚渫粘土の力学特性, 土木学会論文  
集 B3( 海洋開発 ), Vol.70, No.2, I\_894,  
I\_899, 2014.

笠間清伸, 善功企, 春日井康夫, 浸透  
流に着目したケーソン式混成防波堤の  
安定性評価, 地盤工学会特別シンポジ  
ウム-東日本大震災を乗り越えて-発表  
論文集 CD-ROM, 3-86.pdf, 2014.

Toshiki TAKESHITA, Kiyonobu KASAMA,  
Yasuo KASUGAI, Kouki ZEN, The Strength  
Property of Slag and Lime Mixed and  
Dehydrated Clay, Proceedings of The  
7th International Joint Symposium on  
Problematic soils and Geoenvironment  
in Asia JS-Okinawa 2013, 89, 92, 2013.

笠間清伸, 善功企, 春日井康夫, 浸透  
流に着目したケーソン式混成防波堤の  
安定性に関する水理模型実験, 土木学  
会論文集 B2 ( 海岸工学 ), Vol. 69, No.  
2, pp.1\_966-1\_970, 2013, 2013.

[学会発表](計11件)

Kiyonobu KASAMA, Kouki Zen, Yasuo  
Kasugai, Stability evaluation for the  
caisson-type composite breakwater  
under tsunami condition, Proceedings  
of The 15th Asian Regional Conference  
on Soil Mechanics and Geotechnical  
Engineering, Japanese Geotechnical  
Society Special Publication, Vol. 2  
(2015), No. 72, p. 2465-2468, 2016.

井上翔太, 笠間清伸, 平澤充成, 善功  
企, 古川全太郎, 八尋裕一, 越流・浸透  
流を考慮した捨石マウンドの安定重量  
に関する水理模型実験, 土木学会論文  
集 B3 ( 海洋開発 ), Vol. 71, No. 2, p.  
I\_1059-I\_1064, 2015.

Shota Inoue, Kiyonobu KASAMA,  
Mitunari Hirasawa, Kouki Zen, Zentaro  
Furukawa, Yuichi Yahiro, Calculation  
and hydraulic model experiments for  
the stable weight of rubble-mound  
considering the overflow and seepage  
flow, Proceedings of The 6th  
Japan-China Geotechnical Symposium,  
Japanese Geotechnical Society Special  
Publication, Vol. 1 (2015), No. 6, p.  
58-62, 2015.

Kayo Doumoto, Kiyonobu KASAMA,  
Mitunari Hirasawa, Kouki Zen, Zentaro  
Furukawa, Yuichi Yahiro, Masato  
Nakamichi, Mitsunobu Sakamoto,  
Tatsuya Ueda, Masaaki Katagiri, Shuji  
Yamamoto, Osamu Kawahara, Toshiyuki  
Nagano, Mechanical and load  
transmission properties of  
soil-concrete block, Proceedings of  
The 6th Japan-China Geotechnical  
Symposium, Japanese Geotechnical  
Society Special Publication, Vol. 1  
(2015) No. 5, p. 27-31, 2015.

井上翔太, 笠間清伸, 平澤充成, 善功  
企, 古川全太郎, 八尋裕一, 越流・浸透  
流を考慮した捨石マウンドの浸透破壊  
と安定重量に関する水理模型実験, 地  
域性を考慮した地盤防災減災技術に關  
するシンポジウム論文集, pp.27-32,  
2015.

堂本佳世, 笠間清伸, 平澤充成, 善功  
企, 古川全太郎, 八尋裕一, 中道正人,  
坂本光信, 上田達也, 片桐雅明, 山本  
修司, 川原修, 長野敏之, 高圧脱水固  
化して作製した浚渫土砂ブロックの材  
料特性, 第11回環境地盤工学シンポジ  
ウム発表論文集, pp.343-346, 2015.

笠間清伸, 善功企, 春日井康夫, 平澤  
充成, 古川全太郎, 八尋裕一, 固結効  
果に着目したスラグ石灰混合浚渫土の  
圧密挙動, 地盤改良シンポジウム論文  
集, 2014.

Kiyonobu KASAMA, Andrew J. WHITTEL,  
Slope Reliability Analysis using  
Random Field Numerical Limit Analyses,  
The 14th International Conference of  
the International Association for  
Computer Methods and Advances in  
Geomechanics (14IACMAG), 2014.

竹下知希, 笠間清伸, 善功企, 春日井  
康夫, 高圧脱水固化したスラグ石灰混  
合浚渫粘土の力学特性, 土木学会論文  
集 B3( 海洋開発 ), Vol.70, No.2, I\_894,  
I\_899, 2014.

笠間清伸, 善功企, 春日井康夫, 浸透  
流に着目したケーソン式混成防波堤の  
安定性評価, 地盤工学会特別シンポジ  
ウム-東日本大震災を乗り越えて-発表  
論文集 CD-ROM, 3-86.pdf, 2014.

Toshiki TAKESHITA, Kiyonobu KASAMA,  
Tasuo KASUGAI, Kouki ZEN, The Strength  
Property of Slag and Lime Mixed and  
Dehydrated Clay, Proceedings of The  
7th International Joint Symposium on  
Problematic soils and Geoenvironment  
in Asia JS-Okinawa 2013, 89, 92, 2013.

## 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: 1 0 3 1 5 1 1 1

### (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: 5 0 3 0 4 7 5 4

### (3)研究分担者

古川 全太郎 (FURUKAWA ZENTARO)  
九州大学大学院・工学研究院・助教  
研究者番号: 7 0 7 3 5 9 8 5