

平成 30 年 6 月 16 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01263

研究課題名(和文) 津波・高波による浸水被害機構の解明と対策法の研究

研究課題名(英文) Investigation on the mechanism of coastal disaster by a tsunami and waves, and examination of measures

研究代表者

山本 吉道 (Yamamoto, Yoshimichi)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：70366087

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：1) 津波浸水対策検討時の注意点を2016年東海大学紀要に発表。漂砂量係数算定図を作成し、津波地形変化数値モデルによる津波対策計画検討結果を2018年6月のISOPE国際会議で発表。さらに、発展的内容を土木学会論文集に投稿中。

2) 現地海岸に適用出来るように改良した堤体からの吸出し量算定式、本吸出し防止法、堤体前面洗堀算定図を2015年土木工学論文集で、裏込め材の均等係数と乾燥密度も考慮出来る吸出し量算定式を2016年土木工学論文集で発表。CADMAS-SURFと吸出し算定モデルを組合せた計算システムを2018年7月のICEAST国際会議で発表予定。さらに、発展的内容を土木学会論文集に投稿中。

研究成果の概要(英文)：1) We reported the notes for planning of tsunami flood measures with the bulletin of Tokai University in 2016, proposed diagrams to estimate the suitable coefficient of a bed load rate and presented the effect evaluation results of tsunami measures using a topographical change numerical model with the ISOPE international conference in 2018. Moreover, we have submitted a paper of expanded contents to the journal of JSCE.

2) We proposed improved equations for estimating suction rates from a coastal dike and a seawall with the journals of JSCE in 2015 and 2016. Moreover, we proposed measures to prevent the suction and diagrams to estimate the maximum scour depth in front of them with the journal of JSCE in 2015. Furthermore, we are due to present a numerical model which consists of a prediction model of the suction rate and CADMAS-SURF with the ICEAST international conference in 2018, and have submitted a paper of expanded contents to the journal of JSCE.

研究分野：海岸工学

キーワード：洗堀 吸出し 津波対策 高波対策 三面張り堤防 二面張り護岸 洗堀予測数値モデル 吸出し量予測数値モデル

1. 研究開始当初の背景

2011年東日本大震災後、レベル2の超巨大津波への対応が求められ、粘り強い堤防と避難施設の整備が国と地方自治体によって進められている。海岸林の効果については、首藤(1985)、原田ら(2000, 2003, 2005)、浅野ら(2006, 2007, 2010)、田中ら(2007, 2009)、山本ら(2008, 2009)などの研究がある。田中ら(2012)は、樹林の破壊を考慮した数値モデルを開発し、海岸林の津波被害軽減機能の定量評価と海岸林の破壊限界について多くの知見を導いた。海岸林内通路や河川などが津波を内陸へ容易に浸入させることから、津波対策では、海岸林、道路、河川と、堤防の粘り強さもセットにした面的防御という観点から検討する必要がある。海岸堤防・護岸の津波に対する安定性評価については、破壊の主な直接的原因が過大な進入時津波力か、戻り流れ時の沖向き流体力であることから、進入波に対する津波力評価法を松富(1991)、朝倉ら(2000)、飯塚・松富(2000)、池野ら(2001, 2005)、水谷・今村(2002)などが、戻り流れに対する安定性評価法を山本ら(2005, 2006, 2011)などが提案した。そして、堤防・護岸や命山の安定性には浸食・洗掘の影響が無視できないことから、高橋ら(1993, 1999, 2008)、山本ら(2009~2013)などが平面二次元的な浸食機構を明らかにして予測モデルを、野口ら(1997)、後藤ら(2002)、山本ら(2009~2013)が鉛直二次元的な洗掘機構を明らかにして予測モデルを、水谷ら(2012)は三次元予測モデルを開発した。今後は、底質の粒径や締固めの違いが漂砂量に及ぼす影響を明らかにして、堤防や命山周辺の洗掘を精度良く予測できる方法を構築する必要がある。

地球温暖化による海面上昇と台風の大型化が進む中、四方を海に囲まれた日本での台風防災技術の向上は一層重要になりつつある。海岸防災上の主役である海岸堤防・護岸の破壊は、波力に対する構造物の力負けより、洗掘・吸出しが主原因である場合が少なくないため、洗掘・吸出しによる空洞化に基づく破壊機構の理解を深め、これを考慮した安定性検討法を確立することが重要である。この裏込め材の吸出しについて、単純な構造の護岸に対してならば、前野ら(2002)、後藤と原田(2001, 2006)などの吸出し予測モデルがある。表ノリだけでなく天端と裏ノリも被覆した三面張り直立堤防などに対しては、山本ら(2008~2014)が、せん断抵抗力に基づく吸出し発生判別法、吸出しの有無と越波量による安定性評価法、および、多様な裏込め材粒度特性を考慮した吸出し量予測法を提案した。海岸堤防・護岸からの吸出し防止法については、加藤ら(1996)が堤体前面砂浜部を捨石根固め工に置換える方法を、山本ら(2009, 2011)は堤体内の吸出し部を予め石裏込め材に置換えておく方法などを提案している。今後は、裏込め材の粒径組成や締固めの違いが吸出し現象に及ぼす影響を明らかにして、安全性の高い高波防災計画策定法を提案する必要がある。

2. 研究の目的

今後30年以内に南海トラフで巨大地震の発生する確率は70%であり、レベル2の巨大津波が堤防を越流することを前提に、粘り強い堤防を整備することが要求されている。これを合理的に実現するため、堤防・護岸の波力や洗掘による破壊を考慮しながら、CSG堤防、命山、掘り、海岸林などによる被害低減効果を精度良く評価できる数値モデルを開発する。本数値モデルが、面的防護による安全度の高い防護施設の計画・設計を、低コストで実施できる手段を提供する。

計画外力を上回る波力による直接的破壊より、長い時間作用し続ける高波によって、堤体前面の洗掘が進むと、裏込め材の吸出しが発生し、これによる堤体内の空洞化から破壊に至る場合が多い。それゆえ、裏込め材粒径(中央粒径、均等係数、乾燥密度)について自由度の高い吸出し量算定式を求め、実用的な吸出し量数値予測モデル(任意形状の三面張り堤防・二面張り護岸、二次元から三次元)を開発する。さらに、有効な吸出し対策工法を提案して、海岸防護施設の安定性評価・設計法の拡充に貢献する。

3. 研究の方法

津波による各種施設の被害データや浸水低減効果データを、過去の収集済み分に、自治体訪問、現地聞き取り、既往文献から追加し整理する。不足データは各種模型実験から補充する。そして、これらのデータ分析から洗掘量評価式などを改良し、開発済みの津波に対する浸水低減効果や洗掘量の数値予測モデルを改良する。さらに、この改良数値モデルを用いて、自治体の津波対策計画を対象に、効果評価を試み、その成果をまとめる。

高波による堤防前面の洗掘や堤体からの吸出しに関する被災事例を、過去の収集済み分に、現地踏査や既往文献から追加し整理する。また、裏込め材の粒径組成の違いが及ぼす影響や過剰間隙水圧分布に関する知見を増やすため、水理模型実験も追加実施する。そして、これらのデータ分析から吸出し量算定式を改良し、開発済みの洗掘量や吸出し量の数値予測モデルを改良する。さらに、上記のデータから得られる知見と、改良された数値予測モデルを活用して、効果的な洗掘・吸出し対策法を提案する。

4. 研究成果

(1) 津波対策施設の計画・設計法の開発

① 通常のPCを用いて、広範囲・小格子間隔での予測計算を実行できるように、山本ら(2009)が開発した平面二次元的な地形変化予測数値モデル(防潮林の低減効果と構造物の有無を考慮できる)の入出力法を簡便にして、マニュアルも作成したので、近日中に一般公開すべく準備中である。

本モデルはデカルト座標系を用いた浸水流の質量保存則と運動量保存則より成るが、浸水は構造物以外の空間を流れるので、平面二次元コントロールボリューム内の流域面

積比 S を用いる。

連続方程式：

$$\frac{\partial f_y q_x}{\partial x} + \frac{\partial f_x q_y}{\partial y} + \frac{\partial S \eta}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

x 方向運動方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{S q_x^2}{d} \right) + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{S q_x q_y}{d} \right) \\ + g d \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left[d v_t S \frac{\partial (q_x / d)}{\partial x} \right] \\ - \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial y} \left[d v_t S \frac{\partial (q_x / d)}{\partial y} \right] + \frac{f_c}{d^2} Q q_x = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

y 方向運動方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{S q_y q_x}{d} \right) + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{S q_y^2}{d} \right) \\ + g d \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left[d v_t S \frac{\partial (q_y / d)}{\partial x} \right] \\ - \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial y} \left[d v_t S \frac{\partial (q_y / d)}{\partial y} \right] + \frac{f_c}{d^2} Q q_y = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 q_x と q_y は x と y 方向の線流量成分、 η は水位、 f_x と f_y は対象となる計算格子の x と y 方向に平行な辺の流域部分の割合、 S は計算格子内の流域面積の割合、 d は水深、 g は重力加速度、 v_t は浸水に対する渦動粘性係数（渦の大きさは水深相当を想定）、 f_c は構造物・樹木による抵抗係数である。

そして、掃流砂量には算定精度の高い Ribberink (1998) の次式を用いる。

$$q_b = \begin{cases} C_b \left\{ |\theta_s(t) - \theta_c| \right\}^{1.65} \frac{\theta_s(t)}{|\theta_s(t)|} \sqrt{\Delta g D_{50}} & (\theta_s(t) \geq \theta_c) \\ 0 & (\theta_s(t) < \theta_c) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 q_b は掃流砂量 ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$)、 $\theta_s(t)$ はシールズ数、 θ_c は van Rijn (1993) による限界シールズ数、 Δ は掃流砂の相対密度、 D_{50} は掃流砂の中央粒径、 C_b は掃流砂量係数で検証計算から決定する。

さらに、浮遊砂についても、底面に沈降する浮遊砂量 C_s と底面より巻き上がる浮遊砂量 C_{ut} を次式で考慮する。

$$C_s = w_s C \left(\frac{w_s}{2} \right), \quad C_{ut} = -v_t \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=z_a} \quad (5)$$

ここで、 $C(z)$ は浮遊砂濃度の鉛直分布で、全域がシートフロー状態と仮定し、次式から求める。

$$C(z) = C_a \left(\frac{z}{z_a} \right)^{-b}, \quad b = \frac{w_s}{\kappa u_*} \quad (6)$$

$$C_a = \frac{0.331 (\theta_s - 0.045)^{1.75}}{1 + 0.720 (\theta_s - 0.045)^{1.75}}, \quad z_a = 2D_{50} \quad (7)$$

w_s は砂粒子の沈降速度、 κ はカルマン定数、 u_* は摩擦速度である。

そして、局所的底面変化高 ζ は、次の漂砂量保存式で与えられる。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{1}{1 - \varepsilon_s} \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} - C_s + C_{ut} \right) \quad (8)$$

ここで、 q_{bx} と q_{by} は x と y 方向の掃流砂量、 ε_s は砂層の空隙率である。

② Ribberink (1998) の算定式の掃流砂量係数を、底質の中央粒径、均等係数、乾燥密度によって決定できる算定関（図-1参照；掃流砂量係数 $C_b = C_{b0} \times C_{b1} \times C_{b2}$ ）を提案し、2011年東日本震災による宮城県での津波被害に対する検証に基づく、海岸堤防・避難マウンド周辺での洗掘予測結果を2018年6月のISOPE国際会議で発表予定（決定）であり、さらに、発展内容を土木学会論文集B2に投稿中である。

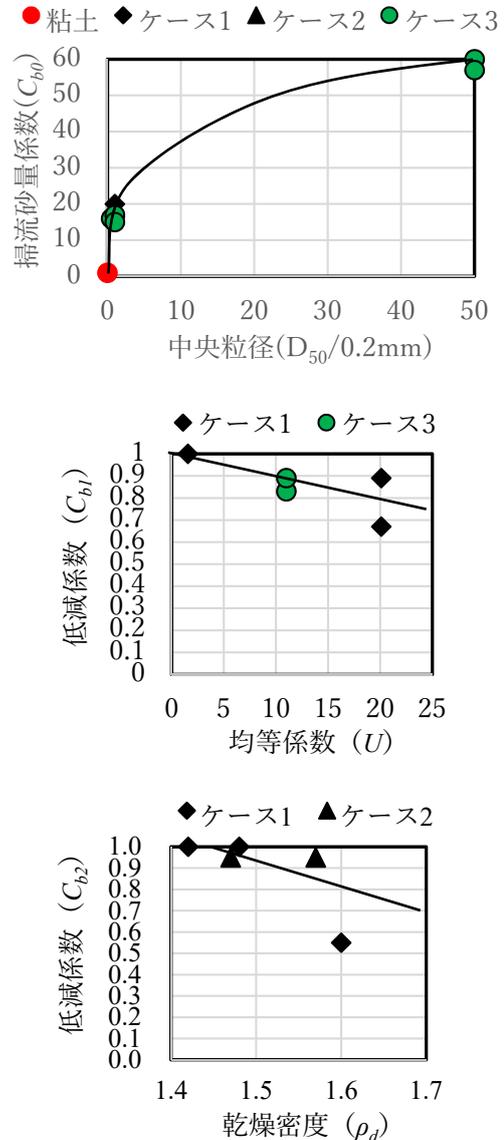


図-1 掃流砂量係数と中央粒径との関係、および、均等係数と乾燥密度による掃流砂量低減係数（ケース1～3の区別は、上流側水槽の水位落差45cm～65cmの違い）

以上から、堤防の安定性と洗掘状況を考慮しながら、各種対策工による被害低減効果を評価できる数値モデルを概成出来たと言える。図-1の実験データは同一ケースを複数回測定することで信頼性を確保するよう努めたが、データ不足は否めないため、今後データを拡充する予定である。

(2) 高波による洗掘・吸出し対策法の開発

① 学生と共に、裏込め材の中央粒径の違いを考慮して、海岸堤防や護岸の前面下端からの裏込め材吸出し量を予測できる算定式と CADMAS-SURF との組合せ計算法を発表し

ていたが、現地海岸で使える様に改良した式(9)~(11)に示す算定法と、裏込め材吸出しに対する防止法を2015年の土木学会論文集B2で発表した。

$$\frac{q}{\omega D_{50}} = \beta(\theta - \theta_c) \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{\alpha t}{T_{1/3}} \right) \right) \quad (9)$$

$$\theta = \frac{\tau_f}{(\rho_s - \rho_w)gD_{50}}, \quad \theta_c = \frac{\tau_r}{(\rho_s - \rho_w)gD_{50}} \quad (10)$$

$$\beta = 0.00218 \times e^{-0.038 \left(\frac{D_{50}}{0.2\text{mm}} \right)} \left\{ \begin{array}{l} 1 \leq \frac{D_{50}}{0.2\text{mm}} \leq 50 \\ \beta = 0.056 \times e^{-0.69 \left(\frac{D_{50}}{0.2\text{mm}} \right)^{0.72}} \end{array} \right. \quad (11)$$

ここで、 q は堤体前面下端からの空隙を含む吸出し量($\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$)、 ω はRubeyの沈降速度(m/s)、 D_{50} は中央粒径(m)、 τ_f と τ_r は五百蔵・山本(2012)の最大吸出し力と有効吸出し抵抗力、 ρ_s は砂層の密度、 ρ_w は海水の密度、 g は重力加速度、 $T_{1/3}$ は入射波周期(s)、 t は吸出し開始後の経過時間(s)で、 α と β は実験データと被災事例データから求めた経験式である。

また、裏込め材の均等係数と乾燥密度の影響も考慮できる算定式と、前述の組合せ計算法の改良法を、2016年の土木学会論文集B2で発表した。さらに、通常のパーソナル・コンピュータを用いて準三次元的に時々刻々の吸出し量と吸出し断面を予測できる数値計算システムも構築した。これは、CADMAS-SURFを用いて、堤体内裏込め部の戻り流れ(吸出し)時の過剰間隙水圧 p_{CAD} と流速の分布を求めて、式(10)と次の式(12)から裏込め材の吸出し量を算定する。その際、CADMAS-SURFでは、裏込め材の粒度組成の違いを十分に考慮出来ないので、式(13)、(14)で補正した過剰間隙水圧 p を用いる。そして、次の入射波に対して、先の吸出しによって生じた堤体内の空洞を考慮した過剰間隙水圧と流速を求めて、新しい吸出し量を算定する。これを繰り返す計算システムである(図-2参照)。本計算システムを2018年7月のICEAST国際会議で発表予定(決定)であり、さらに、現地海岸へ適用した成果を土木学会論文集B2へ投稿中である。

$$\frac{q}{w_s D_{50}} = \beta(\theta - \theta_c), \quad \beta = 0.142 e^{-0.25 \left(\frac{D_{50}}{0.2\text{mm}} \right)} \quad (12)$$

$$p = C_x C_d C_{D_{50}} p_{CAD} \quad (13)$$

$$\left. \begin{array}{l} C_x = 0.00022^{x/x_{\max}} \\ C_d = e^{\frac{0.269 - \frac{0.263}{d/d_{\max}} e^{44.996 - 23.715e^{-\frac{-(x/x_{\max}) - 3.265}{4.953}} \ln(d/d_{\max})}{4.953}}}{4.953}} \\ C_{D_{50}} = 0.65 \left(\frac{0.2}{D_{50}} \right)^{0.85} + 0.35 \end{array} \right\} \quad (14)$$

ここで、 x は堤体前面下端から堤体内側への水平距離、 x_{\max} は堤体前面下端から堤体内奥端までの水平距離、 d は距離 x での上方向裏込め層厚、 d_{\max} は距離 x での初期(最大)の上方向裏込め層厚である。

② 再現精度の高いことを確認した洗堀予測のための数値モデルを用いて、堤体前面の洗堀量を簡便に推定できる算定図(図-3を参照)も作成し、2015年の土木学会論文集B2で発表した。

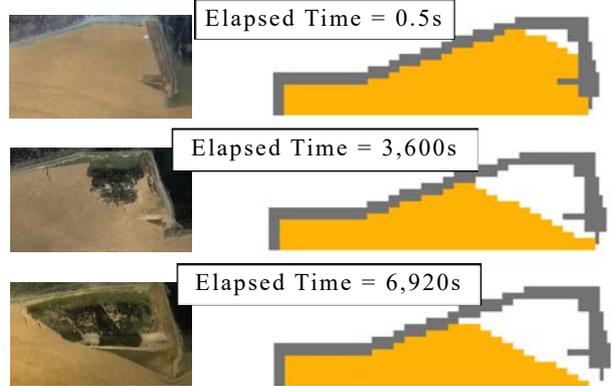
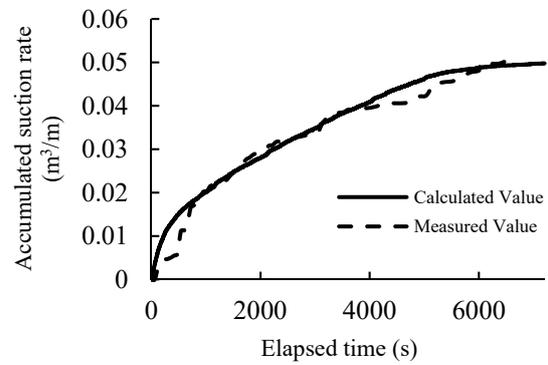
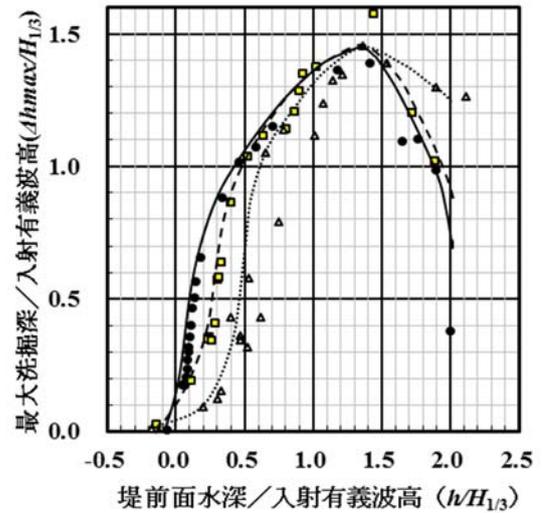


図-2 水理模型実験データと本計算システムで再現計算した結果との比較

●入射有義波高 9 m ■入射有義波高 6 m
 ●入射有義波高 3 m



●入射有義波高 9 m ■入射有義波高 6 m
 ●入射有義波高 3 m

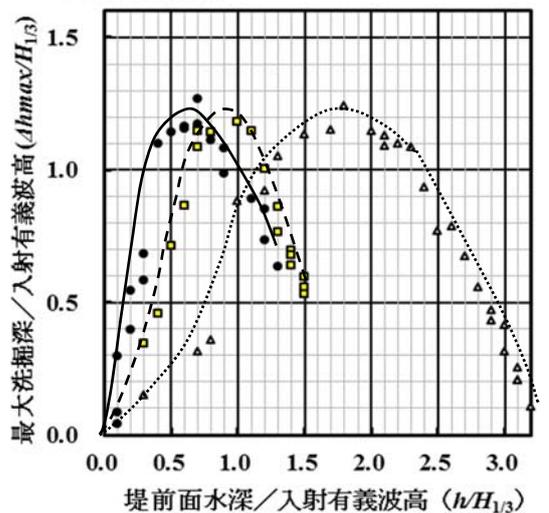


図-3 直立堤体(上)と消波工付き堤体(下)での前面最大洗掘深算定図の例

以上から、三面張り堤防や二面張り護岸に対する効果的な洗掘・吸出し対策検討を可能にする手法を提案出来たと言える。今後は、本計算システムで、裏込め材の均等係数と乾燥密度の違いを考慮出来るように、さらに、ブロック被覆による堤体の変形を考慮出来るように改良を続ける予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① Kornvisith Silarom・Yoshimichi Yamamoto・Nunthawath Charusrojthanadech, Development of a Numerical Simulation Model for Suction Rate Using CADMAS-SURF, *Proc. of 4th international Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology*, ICEAST, 査読有, 2018年7月発表決定. Indexed by SCOPUS
- ② S. Masihullah Ahmadi・Yoshimichi Yamamoto・Ryo Miyake, Examination to Some Problems on the Prevention and Mitigation of Tsunami Disaster, *Proc. 28th International Ocean and Polar Engineering Conference*, ISOPE, 査読有, pp.701-708, 2018. Indexed by SCOPUS
- ③ 山本吉道・Kornvisith SILAROM・吉澤章太, タイ国Chumphon河口港導流堤が周辺海岸に及ぼす影響と海岸侵食対策の検討, 土木学会論文集B 2 (海岸工学), 査読有, Vol.73, No.2, pp.I_1585-I_1590, 2017. DOI: https://doi.org/10.2208/kaigan.73.I_1585
- ④ 吉澤章太・山本吉道・Wirayut KUISORN, 海岸堤防・護岸の表ノリ下端からの吸出し量予測法の改良, 土木学会論文集B 2 (海岸工学), 査読有, Vol.72, No.2, pp.I_1147-I_1152, 2016. DOI: https://doi.org/10.2208/kaigan.72.I_1147
- ⑤ 山本吉道・Uba SIRIKAEW・Kornvisith SILAROM, タイ国Khlung Wan海岸での海岸侵食と保全施設改良の検討, 土木学会論

文集B 3 (海洋開発), 査読有, Vol.72, No.2, pp.I_73-I_78, 2016. DOI:

https://doi.org/10.2208/jscejoe.72.I_73

- ⑥ Wirayut Kuisorn・Nunthawath Charusrojthanadech・Yoshimichi Yamamoto, Improvement of Suction Rate Methods of Backfilling Materials from a Coastal Dike or a Seawall, *Proc. 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*, ISOPE, 査読有, pp.1473-1478, 2016. Indexed by SCOPUS
- ⑦ 三宅凌・山本吉道・梶田佳孝, 津波浸水および避難モデルに基づく二海岸での減災の検討, 東海大学紀要工学部, 査読有, Vol.56, No.1, pp.39-46, 2016.
- ⑧ 山本吉道・五百藏政文・大嶋義隆, 海岸堤防・護岸の破壊機構と吸出し量の評価法, 土木学会論文集B 2 (海岸工学), 査読有, Vol.71, No.1, pp.30-41, 2015. DOI: <https://doi.org/10.2208/kaigan.71.30>
- ⑨ Masafumi Ioroi, Yoshimichi Yamamoto, Yoshitaka Oshima, Improvement of a Suction Rate Formula from the Bottom of the Sheet Pile of a Coastal Dike, *Proc. 25th International Ocean and Polar Engineering Conference*, , ISOPE, 査読有, pp.1483-1488, 2015. Indexed by SCOPUS

[図書] (計 1 件)

- ① 鈴木猛康・山本吉道・他, 理工図書株式会社, 防災工学, 2018, p. 300 (担当: 第7章海岸防災) .

6. 研究組織

(1)研究代表者

山本 吉道 (YAMAMOTO, Yoshimichi)

東海大学・工学部・教授

研究者番号: 70366087