

令和元年6月19日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06517

研究課題名(和文) 風外力場における越波と飛沫の系統的な水理実験に基づく定量的評価と護岸設計への反映

研究課題名(英文) Quantitative evaluation of wave overtopping and splash based on a series of hydraulic experiment and reflection to seawall design

研究代表者

村上 啓介 (Murakami, Keisuke)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：60219889

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、風速をパラメータに含む護岸越波量の推定モデル式を提案し、その適用性を評価した。個々波の最大越波量、有義越波量および平均越波量は風速に伴って増大し、直立護岸に関しては、提案したモデル式で有風時の各越波量を推定できることを確認した。他方、フレア型護岸に関しては、有義越波量と平均越波量は提案したモデル式で推定できるが、最大越波量については、提案したモデル式での推定が難しい結果となった。このことは、直立護岸とフレア型護岸とでは、護岸前面で打上げられた水塊の強風下での挙動に違いがあり、モデル式に含まれる越波増加係数とモデル係数の相関の程度が護岸形式によって異なることに起因している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

風による越波や飛沫の増大、あるいは越波流量の出現頻度を考慮した護岸設計の必要性は以前から指摘されてきた。本研究は、風作用下における越波流量、飛沫量、個々波に対する越波流量の出現頻度に関する系統的なデータの蓄積と定量的評価を行ない、風外力の影響を現行の護岸設計に反映させる方法を提案するもので、風の影響を考慮した新たな護岸設計手法の構築への発展が期待される点に工学的意義がある。また、風作用下における越波流量の増加関数や越波流量の確率分布特性を系統的なデータに基づいて定量的に評価した研究事例はなく、これらを明らかにする点に学術的特色がある。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a model equation to estimate a maximum wave overtopping rate, a significant wave overtopping rate and an averaged wave overtopping rate under wind blowing conditions. This study also evaluated the applicability of the model equation by comparing the calculated results with the measured ones that were obtained in a series of hydraulic experiments. This study confirmed that the model equation estimates those rates with good correlation in the case of an upright seawall. On the other hand, the model equation estimated the maximum wave overtopping rate with poor correlation in the case of a flared type seawall, though the equation estimated the significant wave overtopping rate and averaged one with good correlation. There is a difference in the behavior of wave uplift in front of each seawall, and the applicability of the proposed equation was affected by the correlation between the model coefficient and the wave overtopping increasing coefficient.

研究分野：海岸工学

キーワード：海岸護岸 越波流量 風外力 不規則波 水理模型実験 個々波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

越波流量が強風の影響によって増大することは早くから議論されてきた。岩垣ら(1965)は直立護岸を対象に風洞水槽実験を実施し、越波流量は風速に応じて増大し、その影響の程度は護岸法先水深によって異なることを示している。また、井上ら(1992)は、緩傾斜護岸を対象に風洞水槽実験を実施し、護岸の法面勾配によっては風速の増大に伴って越波流量が減少する場合があるなど、直立護岸との相違点を指摘している。ただし、これらの研究成果は、限られた実験ケースを基に、平均的な越波流量に対する風の影響を検討したもので、風外力を考慮した設計手法の構築に活用できるほどの系統的なデータの蓄積には至っていない。

不規則な波群によって越波が発生する場合、一波ごとに越波流量は大きく変動する。その中で、最大越波流量は護岸背後の構造物の安全性や越波排水施設の設計に関わる留意すべき問題の一つである。井上ら(1988)や泉宮ら(2006)は、越波流量の確率分布特性を水理模型実験や現地観測で検討しているが、ここでは風の影響は考慮されていない。これに対し、山城ら(2012)は、画像解析手法を用いて個々波に対する越波流量を計測し、風作用下での越波流量の出現頻度を検討している。ただし、越波流量に対する風の定性的な影響を検討するに止まり、風外力を考慮した設計手法の構築に資するほどの系統的なデータの蓄積には至っていない。今後、風外力を考慮した新たな設計手法を検討するためには、風作用下における個々波ごとの最大越波流量や有義越波流量の出現頻度や定量的評価手法の確立が重要となる。

2. 研究の目的

本研究では、越波および飛沫に対する風速の影響を考慮した新たな護岸設計手法の構築を念頭に、風作用下における越波流量、飛沫量、および個々波に対する越波流量の出現頻度に関する系統的なデータの蓄積と定量的評価を行ない、風外力の影響を現行の護岸設計へ反映させる方法を提案する。具体的には、幾つかの代表的な護岸断面を対象に、強風が作用する場において水理模型実験を行って平均越波流量を計測し、風外力に対する越波流量の増加関数を明らかにする。次に、風作用下における個々波に対する越波流量を計測し、風速に対する個々波の越波量の発生特性や確率分布特性を明らかにする。これらの結果を踏まえ、平均越波や個々波の越波量に対する風外力の影響を現行の護岸設計に反映させる方法を提案する。

3. 研究の方法

実験は、図-1(a)に示す長さ 15m、幅 0.6m、高さ 1m の風洞付きの二次元不規則波造水路を用いて行った。実験水路の下流末端部には排気ファンが備わっており、水路の上流側の風洞部の開口部から吸気して風洞内に気流を発生させた。本実験では、排気ファンの回転数を調整して風速を設定した。

対象とした護岸タイプは、図-1(b)に示す直立護岸、直立消波護岸、フレア型護岸の 3 つで、実験内容に応じて護岸断面を選択した。実験の縮尺は 1/25 程度を想定した。水路内に勾配 1/10 の海底斜面を設け、この斜面上に護岸模型を設置して実験を行った。水路沖側の一定水深部の深さは $h_f=0.66m$ である。

直立消波護岸の前面には、消波工として高さ約 5.5cm の消波ブロック模型(テトラポッド模型)を配置した。消波工は乱積みとし、消波工の天端幅はブロック 2 個並びとした。フレア護岸の奥行き深さは 0.06m (護岸高さの半分)で、静水面は護岸円弧の最奥部に一致する。

風作用下で護岸背後に輸送される越波水量は、護岸天端面上を越流する水量と、飛沫となって輸送される水量が合算されたものである。本実験では、護岸天端面上を越流する水量に着目して計測を行った。

護岸天端面を越流する水量を計測するため、護岸天端上にピットを設け(図-1(c)参照)、ピット部に容量式波高計を挿入して越

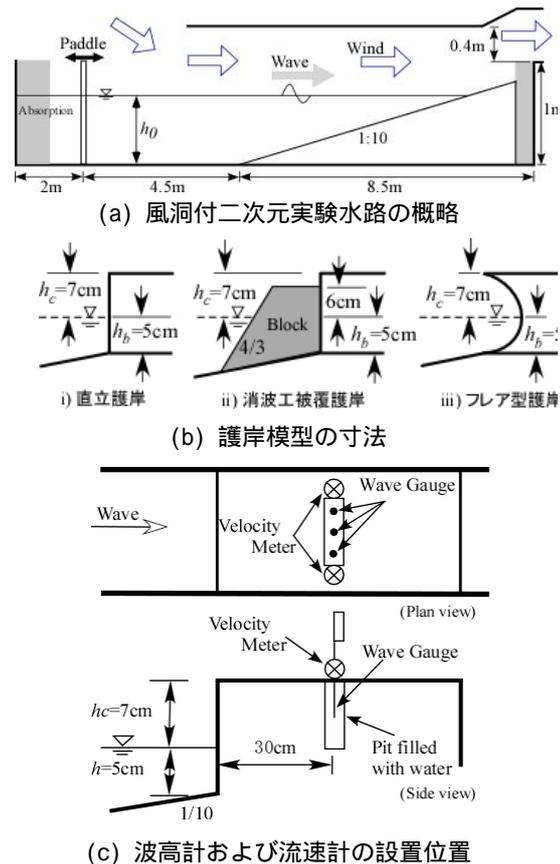


図-1 風洞付二次元実験水路と護岸模型

流水深を計測した。護岸を越流する流れは水路奥行き方向に均一ではないので、本実験では3本の波高計を挿入して計測を行い、それらの平均値を越流水深とした。また、ピットの両脇にプロベラ式流速計を1台ずつ設置し、水位と同期して流速を計測した。水位計測と同様に、2台の流速計で計測した値の平均値を越流流速とした。水位と流速の計測サンプリング周波数は50Hzである。

不規則波の有義波高は $H_{1/3}=0.07\text{m} \sim 0.13\text{m}$ で適宜選択し、有義波周期は $T_{1/3}=1.6\text{s.}, 2.0\text{s.}$ として不規則波を造波した。不規則波のスペクトルはブレードシュナイダー・光易型を採用した。風作用下における越波実験では、模型縮尺と風速の間の相似則は不明である。一方、実験時の風速を現地風速の1/3程度に設定すると、実験で計測した越波量が現地観測結果と概ね一致することが経験的に知られている。本実験では、この結果を参考に、実験時の風速を $U=0, 4, 6, 8\text{m/s.}$ の4通りとした。風速 8m/s. は、現地では 24m/s. 程度の風速に相当する。

4. 研究成果

(1) 越波量の発生頻度分布に対する風速の影響

図-2は、定義に従って求めた個々波の越波量を降順に50波まで示したものである。いずれの護岸断面も、個々波の越波量は強風下で増大している。図-3は、個々波の越波量の発生頻度分布を、直立護岸を例に示したものである。各階級における越波の発生頻度は護岸断面によって異なるが、最も越波量が小さい階級 ($0 \sim 1 \times 10^{-6}\text{m}^3$) について見ると、風速の増加により越波量が増加するため、この階級の越波量の発生頻度は減少する傾向が各護岸断面で見られた。一方、それより大きい階級では、越波の発生頻度は風速に従って増す傾向にあった。

(2) 平均越波量および有義越波量に対する風速の影響

図-4は、風速に対する有義越波量の特徴を、直立護岸、直立消波護岸、フレア型護岸について示したものである。風速が増加するに従って有義越波量は増加する傾向が各護岸断面で確認できる。平均越波量についても同様である。風速に対する平均越波量と有義越波量の増加割合は、護岸断面形状や入射波特性によって異なるが、風速が 8m/s. の場合の平均越波量と有義越波量は、無風時の1.5~3倍程度であった。

(3) 風速をパラメータに含む越波量比の推定

図-5は、無風時に対する有風時の有義越波量の比を(以下、無風時と有風時の越波量の比を越波量比と呼ぶ)、直立護岸を例に示したものである。図中には指数関数を仮定した回帰曲線を示している。越波量の計測では実験データのバラツキが若干見られ、特に風速が小さい条件で越波量比が $V_r < 1$ なる場合が見られた。このことは、平均越波量比についても同様であった。

実験条件によっては、平均越波量比および有義越波量比にバラツキが見られたが、本研究では各越波量比が式(1)の指数関数で表されると仮定し、各実験条件について式中の(以下、を越波増加係数と呼ぶ)を求めた。

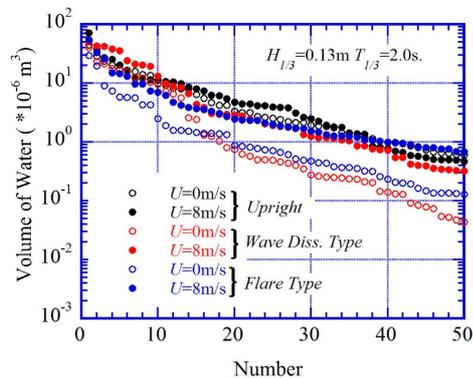


図-2 越波量に関する波別解析結果の一例

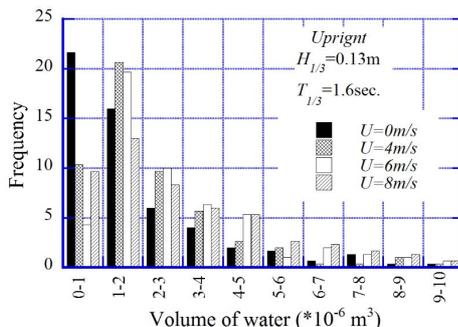
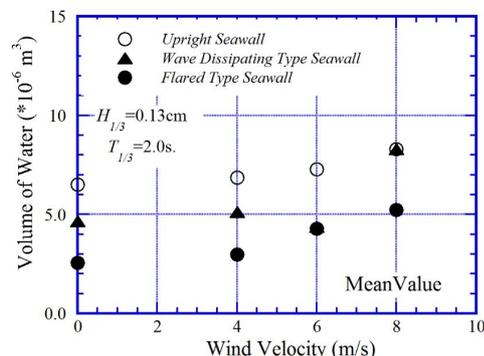
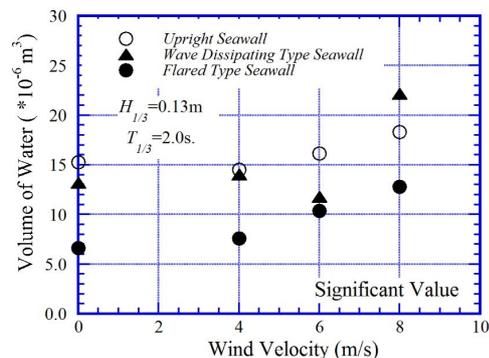


図-3 風速と越波量の発生頻度の関係例

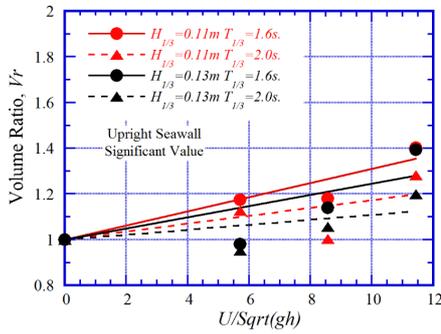


(a) 平均越波量



(b) 有義越波量

図-4 風速に対する個々波の越波量の特徴例



(a) 直立護岸

図-5 風速に対する有義越波量比の特性例

$$Vr = \text{Exp} \left(\alpha \frac{U}{\sqrt{gh}} \right) \quad (1)$$

ここで、 U は風洞内の風速、 h は護岸前面の水深、 g は重力加速度である。

係数 α は、風速に対する越波量の増加割合を示し、入射波条件や護岸断面によって異なる値を取る。本研究では、沖波波高と波長を護岸天端高さで除した係数 $(H_{1/3}/h_c) \times (L_0/h_c)$ (以下、モデル係数と呼ぶ) に対する越波増加係数の特性を考察した。

図-6は、モデル係数と越波増加係数の関係を示したものである。図中には、各プロットに対する回帰直線も示している。モデル係数に対する越波増加係数の増減特性は護岸断面によって異なる結果となった。直立護岸や直立消波護岸では、モデル係数の増加に伴い越波増加係数が減少する傾向を示している。一方、フレア型護岸では、モデル係数の増加に伴い越波増加係数が増加する傾向を示している。波高や波長が大きくなると護岸円弧部での波返しがより顕著になり、波返した水塊の一部が風によって陸側に押しもどされ、結果として越波量が増え易くなるためと考えられる。

本研究では、越波増加係数 α がモデル係数を用いて次式で近似できると仮定した。式中の係数 a と b は護岸形式ごとに異なる定数である。

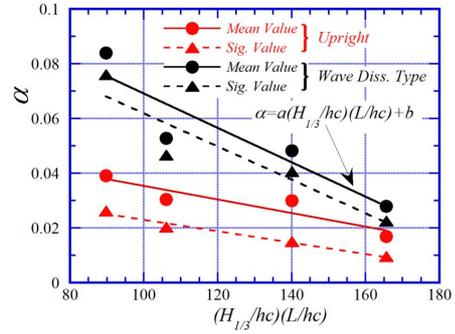
$$\alpha = a \left(\frac{H_{1/3}}{h_c} \right) \left(\frac{L_0}{h_c} \right) + b \quad (2)$$

図-7は、式(1)と式(2)を用いて計算した結果を実験結果と比較した結果を示したものである。平均越波量比および有義越波量比ともに、計算値と実験値は良好な相関を示している。

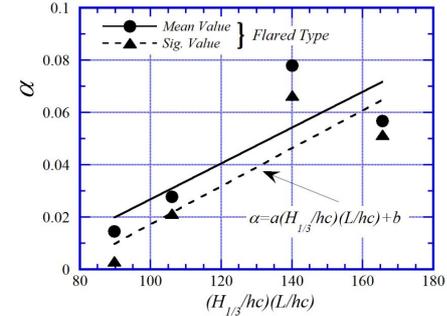
(4) 最大越波量に対する風速の影響

図-8は、無風時に対する有風時の最大越波量比を直立護岸とフレア型護岸について示したものである。実験条件によっては、バラツキの程度が大きくなる場合もあったが、本研究では各越波量比が式(1)の指数関数で表されると仮定し、各実験条件について式中の α を求めた。

図-9は、モデル係数と越波増加係数の関係を示したものである。直立護岸では、モデル係数の増加に伴い越波増加係数が減少する傾向を示しているが、フレア型護岸では、モデル係数の増加に伴い越波増加係数が増加する傾向を示している。最大越波量に関しても、平均越波量や有義越波量と同様の理由が考察される。以上の結果を踏まえ、最大越波量比に関しても、越波増加係数 α がモデル係数を用いて式(2)で近似できると仮定し、モデル式から求めた値と実験値との相関を検討した。

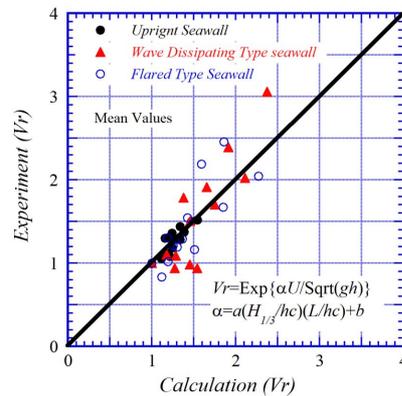


(a) 直立護岸および直立消波護岸

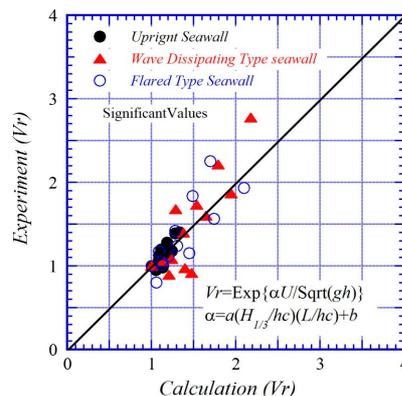


(b) フレア型護岸

図-6 モデル係数と α の関係

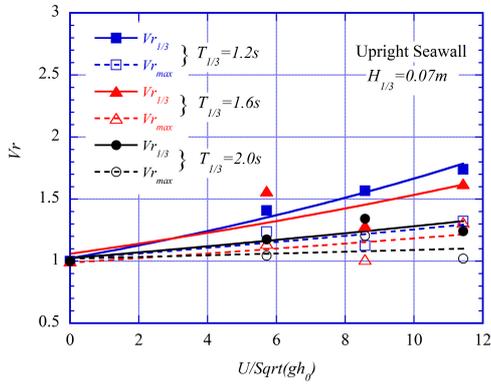


(a) 平均越波量比に関する相関

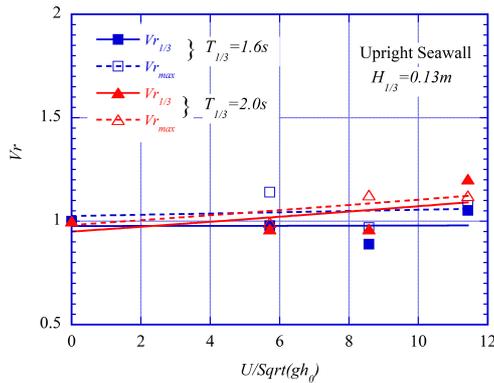


(b) 有義越波量比に関する相関

図-7 計算結果と実験結果の相関

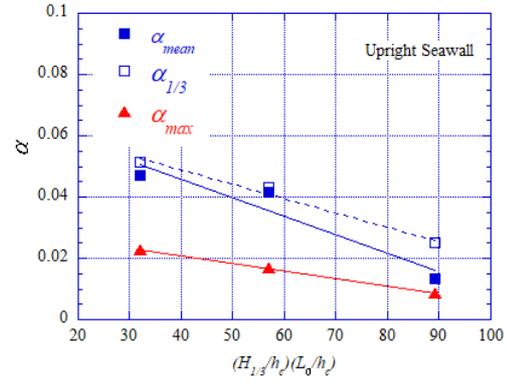


(a) 直立護岸

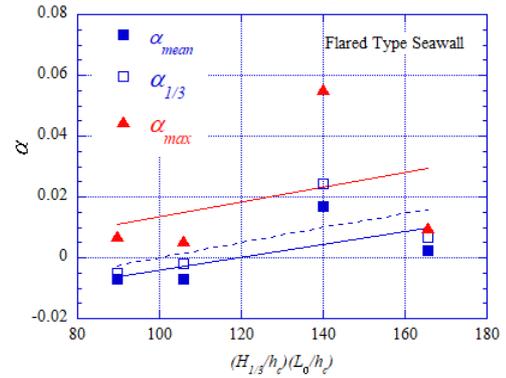


(b) フレア型護岸

図-8 風速に対する最大越波量比の特性

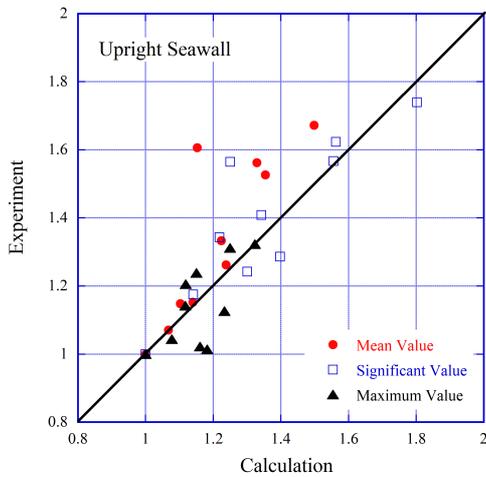


(a) 直立護岸

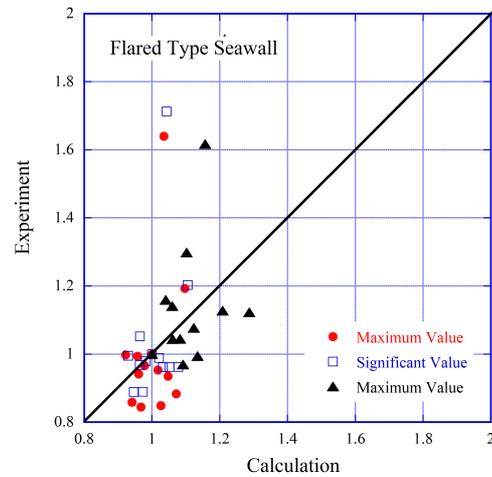


(b) フレア型護岸

図-9 モデル係数と係数 の関係



(a) 直立護岸



(b) フレア型護岸

図-10 計算結果と実験結果の相関

図-10 は、式(1)と式(2)を用いて計算した結果を実験結果と比較した結果を示したものである。直立護岸に関しては、モデル式で求めた値は実験値と概ね良い相関を示していることが確認できる。一方、フレア型護岸に関しては、最大越波量の相関の程度は悪い結果となった。その理由として、図-9に示すように、最大越波量に関するモデル係数と越波増加係数の相関がフレア型護岸では悪いことが考えられる。

以上の結果より、直立護岸と直立消波護岸に関しては、本研究で提案した式(1)と式(2)を用いて有風時の平均越波量、有義越波量、最大越波量が推定できることを確認した。また、フレア型護岸に関しても、同様の手法で有風時の平均越波量と有義越波量が推定できる。他方、最大越波量に関しては、越波増加係数を適切に示すパラメータの設定が課題として残される。

< 引用文献 >

- 岩垣雄一,他2名,風洞水槽を用いた海岸堤防の越波に関する研究(2)-鉛直堤の越波におよぼす風の影響に関する実験,第12回海岸工学講演集,pp.186-192,1965
- 井上雅夫,他2名,不規則波における越波量の出現分布特性,海岸工学論文集,第36巻,pp.618-622,1989

井上雅夫,他 2 名,緩傾斜護岸の越波特性に及ぼす風の影響,海岸工学論文集,第 39 巻,pp.586-590,1992
泉宮尊司,他 2 名,消波護岸の越波流量の確率分布特性に関する研究,海岸工学論文集,第 53 巻,pp.716-720,2006
山城賢,他 3 名,水理模型実験における画像解析を用いた越波量計測手法の有用性について,土木学会論文集 B2 (海岸工学),Vol.68,No.2,I_736-I_740,2012

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Keisuke Murakami, Daisuke Maki and Kei Ogino: EFFECT OF WIND VELOCITY ON WAVE OVERTOPPING, APAC2019, (2019 年 6 月 10 日受理,印刷中), 査読有
https://doi.org/10.2208/jscejoe.73.I_258

村上啓介,山下真奈,真木大介,荻野啓,荒木豪:不規則波列に含まれる個々波の越波に対する強風の影響 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.74, p. I_37-I_42, 2018.6
https://doi.org/10.2208/jscejoe.74.I_37, 査読有

村上啓介,都地亮博,川原永萌,荻野啓,真木大介:護岸越波量に及ぼす風速の影響について-水理模型実験による検討- 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.73, No.2, I_258-I_263, 2017.6, 査読有

〔学会発表〕(計 6 件)

不規則波に含まれる成分波の位相が最大越波量を生成する波に及ぼす影響 平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会, II-78, 2019.3 村上啓介, 真木大介, 黒木小雪
強風下における個々波の越波量特性に関する検討 土木学会第 73 回年次学術講演会概要集, 2018.9 山下真奈, 村上啓介, 真木大介, 荻野啓
波列に含まれる個々波の護岸越水量に対する風の影響について 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, II-11, 2018.3 山下真奈, 荒木豪, 村上啓介, 真木大介, 荻野啓
護岸前面での波の打ち上げに対する風の影響について 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, II-2, 2018.3 荒木豪, 村上啓介, 真木大介, 荻野啓
風作用下における越波と飛沫の評価に関する研究 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会, II-25, 2017.3 都地亮博, 村上啓介, 川原永萌, 真木大介, 荻野啓
風作用下における護岸越波の増加特性に関する実験的検討 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会, II-28, 2017.3 川原永萌, 村上啓介, 都地亮博, 真木大介, 荻野啓

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号(8桁):

(2)研究協力者

研究協力者氏名:真木大介

ローマ字氏名:MAKI, Daisuke

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。