

令和元年5月30日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04420

研究課題名（和文）越波実験における実用的な風速設定法の確立

研究課題名（英文）PRACTICAL SETTING METHOD OF AN APPROPRIATE WIND VELOCITY IN MODEL EXPERIMENTS ON WAVE-OVERTOPPING

研究代表者

山城 賢（YAMASHIRO, Masaru）

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70336014

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,300,000円

研究成果の概要（和文）：越波（波が構造物を越えて背後に流入する高波災害）を検討する主な手段として水理模型実験が行われるが、越波の実験においては風速を適切に設定するための相似則が無いため、風の影響を定量的に検討することができない。本研究では、越波の水理模型実験における模型風速の設定方法を提案することを目的に、現地観測と模型実験を行った。観測、実験ともに、護岸背後の越波流量の空間分布を計測し、それを風速と越波流量（単位幅あたりの総量）で表す式を構築した。最終的に、現地と模型の式を対応させて、現地と同じ結果になる模型風速を求める式を導いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

護岸等の海岸防護構造物は、これまで、「総量」としての越波流量を抑えるよう整備されており、この目的はほぼ達成されてきた。しかし、量は少なくとも越波に伴って飛散する水塊や飛沫によって、沿岸道路の交通障害や周辺地域の塩害などが生じている。本研究の成果により、風の影響を考慮した水理模型実験によって強風時の越波に関する定量的な評価が可能となり、荒天時の海岸道路の規制や、護岸背後の距離に応じた越波防災や塩害対策など、将来的な海岸防護の高度化および質の高い沿岸域の環境整備に大きく寄与することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In the process of wave-overtopping, a large amount of sea water leaps up at the front face of a seawall, is transported by wind and finally falls to the ground behind the seawall. However, the spatial distribution of wave-overtopping rate is usually not considered in the planning/design of the coastal structures.

In this study, field observations on the spatial distributions of wave-overtopping behind a vertical seawall were conducted. Next, laboratory experiments were conducted by using a two-dimensional wind-wave flume with a 1/45 scale model of the seawall. From both the field observation results and the experimental results, the spatial distributions were formulated as an exponential function of wave-overtopping rate and wind velocity. From the formulas, an equation to calculate the appropriate wind velocity in the model experiments on wave-overtopping was obtained.

研究分野：海岸工学

キーワード：水工水理学 海岸工学 越波 現地観測 水理模型実験

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(波が構造物を越えて背後に流入する高波災害)は古くから海岸防護上の重要な課題であり、現在では、これを防ぐための各種海岸防護施設の設計体系が構築されている。しかし現実には、暴浪時には越波による被害が頻繁に生じる。越波は大きく二つのタイプに分けられ、一つは海水が護岸天端を越流するタイプであり、もう一つは打ち上がった水塊が風に押されて護岸背後の陸域に落下するタイプである。後者の場合、護岸からの距離に応じて落下してくる海水量は異なり、すなわち単位面積当たりの越波流量(単位時間あたりの越波量で護岸等の設計における重要な指標)は空間的に分布を有する。したがって、特に後者の越波のタイプでは風が強く影響するけれども、越波に対する風の影響については、1960年代から80年代前半にかけて複数の代表的な研究例がみられるものの、それ以降は限られており、また、実際の護岸等の計画・設計では、まったく考慮されていない。これは、主たる検討手段である水理模型実験において、風速を適切に設定するための相似則が無いことが大きな原因となっている。石田ら¹⁾の検討を参考にすると、越波の実験で風速を設定する場合、飛沫が飛散する機構については重力が支配的であるためフルードの相似則を適用することになるが、飛沫の生成機構については水の表面張力が影響することからウェーバー則を考慮すべきと考えられる。この2つの相似則を同時に満足することは不可能であり、風速を適切に設定できないため、越波に対する風の影響について定量的な検討ができないのである。なお、表面張力や密度を調整した流体を用いて相似則を満足させることも考えられるが、著者が知る限り、そのような都合のよい液体は見当たらず、また、存在したとしても入手コストや排水処理等が問題にならないとも限らない。

2. 研究の目的

本研究では、将来的な海岸防護の発展および海岸利用の高度化に寄与することを目的に、水理模型実験による風の影響を含めた越波の定量的な検討を可能とするため、越波実験における模型風速の設定方法を実用的な形で提案する。

3. 研究の方法

本研究では、以下の5項目を実施した。

(1) 越波流量空間分布の現地観測

山口県下関市の日本海側に面した直立護岸を対象に、越波流量の空間分布、風向風速の現地観測を計画し、冬季風浪が発達した期間に観測を実施した。越波流量の空間分布の計測には転倒升式雨量計を用いた。また、円筒形の金網籠にガーゼを巻いた塩分捕捉器を作成し、飛来塩分の観測も行った。加えて、波浪、潮位については公的機関の観測データを収集し、越波の状況は複数のビデオカメラで撮影した。

(2) 現地における越波流量空間分布の定式化

現地観測結果をもとに、護岸背後の越波流量空間分布は指数関数形で近似され、その係数が単位幅当たりの越波流量と風速で決まると考え、越波流量空間分布の定式化を行った。また、Fukuda et al.²⁾による消波護岸を対象にした現地観測結果を用いて、同様の定式化を行い、護岸形式による越波流量空間分布への風の影響の違い等について検討した。

(3) 水理模型による再現実験

現地観測を行った護岸を対象に、断面2次元造波風洞水路により水理模型実験を行った。

(4) 模型実験における越波流量空間分布の定式化

得られた実験結果から、現地観測と同様に、模型スケールでの越波流量空間分布の推定式を求めた。また、過去に実施した消波護岸における越波流量空間分布の水理模型実験結果を用いて、同様に推定式を求めた。

(5) 越波実験における模型風速の設定方法の確立

現地と模型との越波流量空間分布の推定式を比較し、現地の風速や越波流量の規模などから模型実験で設定すべき風速の算定式を導出した。

4. 研究成果

(1) 現地観測結果

写真-1は観測時の越波の状況である。観測場所は、冬季風浪が発達すると暴風暴浪に晒され激しい越波が生じ、強風により大量の飛沫が陸域に輸送される。図-1に、現地観測で得られた1時間当たりの飛沫量(mm/hr.)の平面分布の例を示す。図中の矢印は平均的な風向を示している。両時間帯で飛沫量は大きく異なるが、基本的に護岸背後で飛沫量が多く、護岸から離れるにつれて飛沫量が減少することが分かる。



写真-1 観測時の越波の状況

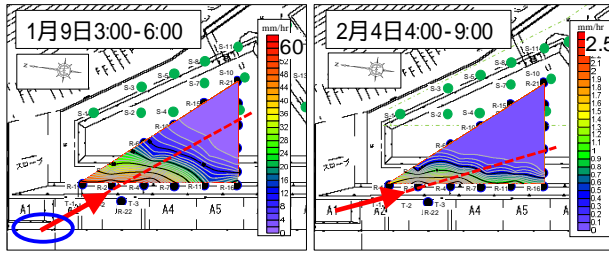


図-1 飛沫量の平面分布の例

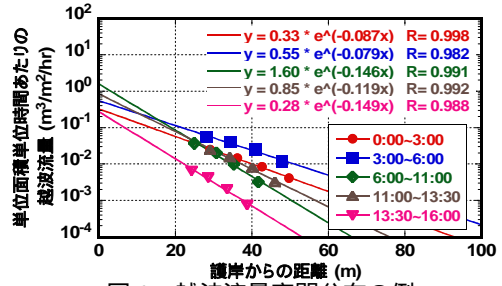


図-2 越波流量空間分布の例

また、越波は護岸に沿って一様に生じているわけではなく、左図の楕円で示したあたりで最も激しく越波が生じていた。そのため、その風下の位置で飛沫量が多くなっている。図-2は、図-1中に破線で示すように、飛沫量が最も多い観測点から風下方向に取った断面における単位面積単位時間あたりの越波流量($m^3/m^2/hr$)の空間分布を示している。縦軸は対数表示である。図中には指数関数による近似式を示しており、既往の研究で報告されているとおり、越波流量の空間分布が指数関数でよく表されることが分かる。また、観測の時間帯によって分布が異なることも見て取れる。

(2) 越波流量空間分布の推定式と護岸形式による違い

越波流量の空間分布は指数関数($\alpha e^{-\beta x}$)で非常によく表すことができ、指数関数の係数 α, β が分かれば越波流量の空間分布を推定できるといえる。越波流量空間分布については、越波流量が大きいと分布の勾配が急で、越波流量が少なく風速が強いと勾配が緩やかになるという全体的な傾向から、近似式の係数 α, β について、越波流量(一般的な単位幅あたりの越波流量 $q(m^3/m/hr)$ で図-2に示す越波流量空間分布の積分値に相当)と風速 u の2乗を説明変数とした重回帰分析を行い、以下の推定式を得た。

$$\alpha' = 0.980q' - 0.245u^2 \quad (1)$$

$$\beta' = 0.128q' - 0.941u^2 \quad (2)$$

各変数は平均値と標準偏差により基準化しており、「 $'$ 」は基準化していることを示す。この式から、近似式の切片である α については越波流量が大きいほど大きくなり、逆に風速が大きくなるほど越波流量の空間分布がなだらかになるため小さくなる。一方、近似式で空間的な低減率を表す β については、越波流量が大きいほど大きくなり急激に減少する分布を表し、風速が大きいと小さくなり緩やかに減少する分布を表す。

Fukuda et al.²⁾による消波護岸を対象にした現地観測結果から同様に得た推定式は以下のとおりである。

$$\alpha' = 1.054q' - 0.147u^2 \quad (3)$$

$$\beta' = 0.262q' - 1.000u^2 \quad (4)$$

直立護岸の式(1),(2)と比較すると、直立護岸は消波護岸に比べて、どちらの係数に対しても風速の影響が相対的に大きく、このことは越波流量空間分布に対する風の影響が護岸形式によって異なることを示している。直立護岸では、越波が生じる際に波が高く打ち上がるため、風によって護岸から離れた場所に飛沫が大量に輸送される。一方、一般的に消波護岸では激しく波が打ち上がるような越波は生じにくい。このような護岸形式による越波形態の違いが越波流量空間分布に対する風の影響の差異を生じていると考えられる。

(3) 水理模型での越波流量空間分布の推定式

図-3に示す造波風洞水路を用いて、不規則波と風速を変化させて縮尺1/45で水理模型実験を行った。護岸模型の背後に設置した複数の越

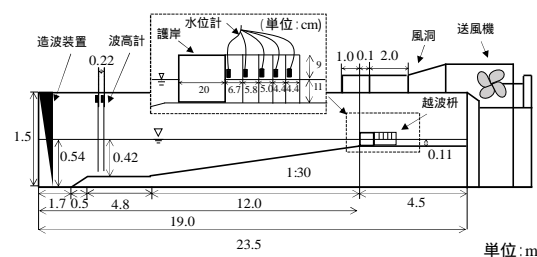


図-3 断面2次元造波風洞水路

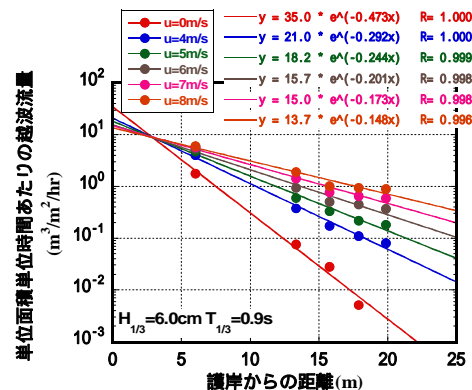


図-4 越波流量空間分布の実験結果の例

波柵により越波流量空間分布を計測した。図-4 に実験結果の例を示す。越波流量は現地換算して表示している。現地観測結果と同様に、越波流量空間分布は指数関数でよく近似される。したがって、同様の考えで推定式の定式化を行った。

$$\alpha_M' = 0.930q_M' - 0.257u_M'^2 \quad (5)$$

$$\beta_M' = 0.322q_M' - 0.847u_M'^2 \quad (6)$$

下付きの M は実験結果から得られたことを示す。式(5), (6)を現地観測から得られた式(1), (2)と比較すると、係数 α については、現地と模型で越波流量 q と風速 u の 2 乗の寄与が同程度であるが、係数 β については、現地の方が模型に比べて風速の 2 乗の影響が相対的に大きく、スケール効果により、現地と模型での越波に対する風の影響に違いが表れていると考えられる。

(4) 越波実験における模型風速の設定方法

越波の模型実験で現地と同じ越波流量空間分布を得るためには、推定式の係数 α, β が現地と模型で同じになるような風速を模型実験で設定すればよい。そこで、現地観測で得られた式(1), (2)と模型実験から得た式(5), (6)をもとに、模型実験で設定すべき風速を求める式を導出した。

$$u_M = \sqrt{0.38u^2 - 0.27q + 33.66} \quad (7)$$

この式から分かるように、実験風速は現地風速のみから一意的には決まらず、越波流量の規模が影響する。この式は、造波風洞水路を用いた直立護岸の越波実験における適切な風速の設定に資するものといえる。ただし、本研究で得られた推定式の適用範囲は明確ではなく、入射波がより大きくなり越波形態が打ち上げから越流が支配的になるにつれ、越波に対する風の影響度が変化するため、推定精度が次第に低下することが推測される。そのような状況については更なる検討が必要である。

< 引用文献 >

- 1) 石田 昭, 花田昌彦, 細井正延: 飛沫の発生に関する実験的研究, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp.385-388, 1982.
- 2) Fukuda, N., Uno, T. and Irie, I.: Field Observations of wave overtopping of wave absorbing revetment, *Coastal Engineering in Japan*, vol.17, pp.117-129, 1974.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- 山城 賢, 仲村 渉, 小川大輔, 児玉充由, 上久保祐志, 横田雅紀: 越波飛沫の輸送過程に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読有, 73 巻 2 号, 2017, p.L_847-L_852
DOI: https://doi.org/10.2208/kaigan.73.L_847
- 横田雅紀, 橋本典明, 山城 賢, 井手喜彦, 児玉充由: 有明海湾奥部における高潮発生時の波浪推算に関する検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読有, 74 巻 2 号, 2018, p.L_605-L_610
DOI: https://doi.org/10.2208/jscejoe.74.L_605

[学会発表] (計 11 件)

- 小川大輔, 仲村 渉, 山城 賢, 越波流量空間分布に基づいた越波の模型実験における現地と模型との風速の対応に関する研究, 平成 28 年度土木学会全国大会年次学術講演会, 2016
- 仲村 渉, 児玉充由, 山城 賢, 可視化実験と画像解析を用いた越波飛沫の輸送過程に関する研究, 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会, 2017
- 原 温紀, 小川大輔, 山城 賢, 現地観測結果に基づく越波流量空間分布の推定式の構築, 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会, 2017
- 山城 賢, 仲村 渉, 小川大輔, 児玉充由, 上久保祐志, 横田雅紀, 越波飛沫の輸送過程に関する実験的研究, 第 64 回海岸工学講演会, 2017
- 小川大輔, 山城 賢, 児玉充由, 上久保祐志, 横田雅紀, スリット式直立消波護岸背後の越波流量空間分布について, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, 2018
- 渡部敦史, 山城 賢, 児玉充由, 可視化実験による越波飛沫の輸送過程に関する研究, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, 2018
- 横田雅紀, 橋本典明, 山城 賢, 井手喜彦, 児玉充由, 有明海湾奥部における高潮発生時の波浪推算に関する検討, 第 43 回海洋開発シンポジウム, 2018
- 上久保祐志, 山城 賢, 横田雅紀, 池田太晟, 越波流量計測装置の試作と現地での観測結果 平成 30 年度日本沿岸域学会研究討論会, 2018
- 岡 昂作, 山城 賢, 児玉充由, 上久保祐志, 横田雅紀, スリット型直立護岸の越波流量空間分布に関する実験的研究, 平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会, 2019

古賀健太郎, 山城 賢, 児玉充由, 直立堤で生じる越波飛沫の風による飛散に関する実験的研究, 平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会, 2019
池田太晟, 上久保祐志, 山城 賢, 横田雅紀, 松田崇志, 越波流量計測装置の開発に関する研究, 平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会, 2019

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：上久保 祐志

ローマ字氏名：(KAMIKUBO, Yuji)

所属研究機関名：熊本高等専門学校

部局名：建築社会デザイン工学科

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：90332105

研究分担者氏名：横田 雅紀

ローマ字氏名：(YOKOTA, Masaki)

所属研究機関名：九州産業大学

部局名：建築都市工学部

職名：講師

研究者番号 (8 桁)：60432861

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

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。