

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630210

研究課題名(和文) 造波風洞水路による高度な越波実験のための風速設定法の確立

研究課題名(英文) Study on appropriate wind velocity for wave-overtopping model experiments using a two-dimensional wind-wave flume

研究代表者

山城 賢 (YAMASHIRO, Masaru)

九州大学・工学(系)研究科(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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：海岸堤防や護岸等の越波(波が構造物を越えて背後に流入すること)に対する防止性能を検討する場合、造波風洞水路による縮尺模型実験が有用な手段となるが、越波の実験において風速に関する適切な相似則が存在しないため、風の影響まで含めて定量的に評価することは難しい。本研究では、まず、過去の越波の現地観測結果を検討し、ついで、現地観測の条件を参考に水理模型実験を行い、それらの結果の比較から、越波の模型実験における現地風速と模型風速との対応関係を求めた。

研究成果の概要(英文)：The correspondence of wind effects on the wave-overtopping in small-scale model experiments to that in real phenomena has not been clarified so far. In this study, the correspondence of the wind velocity in the wave-overtopping experiments to the one in the real coast was investigated. First, on the basis of the field observation results by Fukuda, et al. (1974), the characteristics of spatial distributions of the wave-overtopping rate were investigated. Then, laboratory experiments were conducted by using a two-dimensional wind-wave tank with a 1/45 scale model. From both the field observation results and the experimental results, the approximations for the spatial distributions were obtained as the exponential functions of wave-overtopping rate and wind velocity. Furthermore, comparing the approximations, the appropriate wind velocity in the laboratory model experiments on wave-overtopping was discussed.

研究分野：海岸工学

キーワード：越波 風速 造波風洞水路 水理模型実験 現地観測

1. 研究開始当初の背景

越波は古くから海岸防護上の重要な課題であり、現在では、各種海岸防護施設の設計体系が構築されている。しかし、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く、定量的な評価が出来ないことが原因であり、さらに、風によって飛散する海水飛沫が人命や構造物の破壊に係わることはないという実務上の考えも影響している。

石田ら(1982)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、これが、これまで越波に対する風の影響について定量的な検討ができなかった理由である。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、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。

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、この目的はほとんどの場合達成されてきたといえよう。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。近年では、風による越波流量の増加や越波水の飛散による塩害などについて国内外で関心が高まっており、強風時の越波の状況を把握するための現地観測(例えば、EU諸国によるCLASHプロジェクトなど)が積極的に行われている。加えて、海岸工学に関する模型実験では、一般的に、風を外力として考える必要が無いことが多いため、現状では、風洞装置を備えた造波水路(風洞装置は既存の造波水路に設置可能)を所有する研究機関は少なく、越波の検討についても、この30年間で実験手法に大きな進展はない。もし越波の模型実験において適切に風速を設定できれば、造波風洞水路による風を考慮した越波実験手法が確立され、強風時の越波に関する定量的な評価が可能となり、将来的には、交通障害対策や塩害対策を含めた、より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される。

2. 研究の目的

本研究では、越波の検討において風の影響を定量的に評価することを可能とし、将来的

な海岸構造物の設計体系の発展に寄与するため、越波に対する風の影響について現地と模型での対応を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、まず、既往の観測結果から越波流量の空間分布を越波流量の規模と風速で表す定式化を行った。ついで、越波流量の空間分布に関する水理模型実験を行い、実験スケールでの空間分布について同様に定式化を行い、最後に、現地と模型実験における空間分布の式を比較することにより、越波に対する風の影響について現地と模型での対応を検討した。

(1) 対象とした現地観測事例

対象とする現地観測結果は、Fukudaら(1974)により、新潟東港で1971~1972年に得られたものである。観測施設は、図-1に示す観測位置において、護岸背後にコンクリート壁で6つの取水溝を作り、それより陸側には適宜半切りのドラム缶を設置したもので、これにより越波水を集水している。護岸前面の平均水深は4.5mであり、海底勾配は約1/80で非常に緩い。1回の観測時間は3時間であり、越波流量に加え、入射波および風向風速も観測されている。波高は観測場所の沖合(水深-24.2m)に設置した超音波式波高計により計測し、風向風速については、図中に示す位置の地上11.5mの高さで観測を行っている。なお、波高は換算沖波波高、風速は海上風に補正し整理されている。このように、越波流量の空間分布に加え、入射波や潮位、風向風速についても計測・整理されているデータは貴重な観測結果といえる。

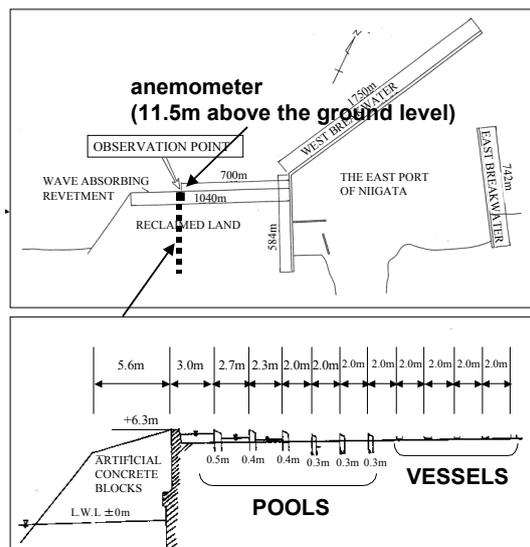


図-1 現地観測施設 (Fukudaら(1974))

観測結果を図-2に示す。縦軸は単位面積あたりの越波流量を対数表示しており、横軸は

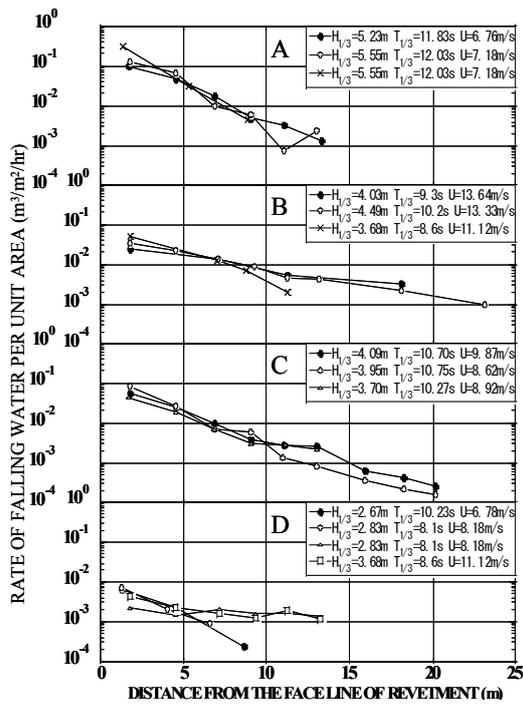


図-2 越波流量空間分布の観測結果 (Fukuda ら (1974) より作図)

護岸前面からの距離である。また、図中に示されている風速は、護岸に垂直な風速成分である。観測結果は越波流量の水平分布の傾向によって、A~D の 4 つのケースに分けられており、護岸から離れるほど越波量は小さくなり、また越波流量が多いほど水平分布の勾配が急になるといった特徴がある。

## (2) 水理模型実験

水理模型実験における越波流量の空間分布の特性を調べるため、反射吸収式二次元造波風洞水路を用い、前述の現地観測の条件をもとに、縮尺 1/45 の模型で実験を行った。図-3 に実験装置を示す。護岸前面の水深は 10cm で、波高計位置の水深は 50cm である。入射波および風速は、様々な越波流量の空間分布が得られるよう複数の条件を選定した。入射波については現地の条件を参考に、修正 Bretschneider-光易型スペクトルを有する( $H_{1/3}$ ,  $T_{1/3}$ ) = (9cm, 1.5s), (10cm, 1.6s), (12cm, 1.8s) の 3 通りとし、各入射波の条件について、風速を 0.4, 5.6m/s の 4 通りに変化させた。なお、模型実験での風速については、護岸壁面上の鉛直分布を計測したところ、越波の際に水塊や飛沫が飛び散る高さの風速はほぼ一様であることが確認されたため、護岸壁面上での水面から 20~40cm の範囲で断面平均風速を求め、それを模型実験での代表風速とした。したがって、以後の検討においては護岸上のある範囲の断面平均風速と現地観測における海上 10m の風速との対応を調べていることになる。また、実験に使用した風洞装置は護岸模型の背後に設置したファンにより空気を吸い込み水路内に風を発生させる方式のもので、風洞は護岸前面から 1m (消波ブロック法先あたり)

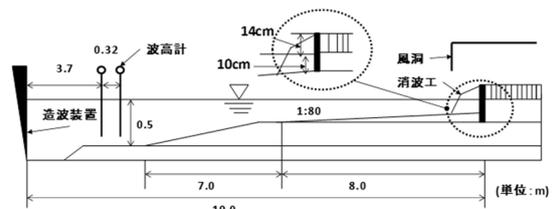


図-3 実験装置 (反射吸収式断面 2 次元造波風洞水路)

までのみに取り付け、それより沖側には取り付けていない (図-3 参照)。この理由は、本研究では、護岸背後の越波流量空間分布の変化に対する風の影響を調べることが一つの目的であることから、風速を変化させた場合においても、風が越波水のみに影響し、できるだけ入射波が変化しないよう配慮したためである。なお、風洞の取り付け範囲を変えた場合について風洞水路内風速の変化を事前に調べており、風洞の取り付け範囲により護岸近傍の風速場が大きく変化しないことを確認している。実験での造波時間は 1 ケースにつき 20 分間 (現地の約 2 時間に相当) であり、越波量は護岸の背後に集水枡を並べて、枡内の水位変化を水位計で計測することで測定し、その記録から越波流量を算定した。

## 4. 研究成果

### (1) 現地における越波流量の空間分布

図-4 に図-2 の観測結果のうちの幾つかを示している。縦軸は単位面積単位時間あたりの越波流量を対数表示しており、横軸は護岸前面からの距離である。越波流量の空間分布は基本的に、護岸から離れるにつれて急激に減少する。そして、空間的な減少の割合は条件によって異なっているものの、図中に示す近似式からわかるように、これらの分布は指数関数 ( $\alpha_p e^{-\beta_p x}$ ) で表される。前述したように、分布形状が指数関数形で表されることは既往の研究でも報告されている。図より、越波流量の空間分布の全体的な傾向として、越波流量が大きいと勾配が急で、越波流量が少なく風速が強いと勾配が緩やかになっていることがわかる。すなわち、越波流量の空間分布は越波流量の規模と風の強さによって変化するといえる。図-5 は空間分布の近似式の係数  $\alpha_p$ ,  $\beta_p$  と越波流量および風速との関係を示している。なお、図中の越波流量は単位幅単位時間あたりの越波流量で、図-4 に示す越波流量空間分布の積分値に相当する。図より、指数関数の切片である  $\alpha_p$  については、越波流量の大きさが強く影響しており、空間分布の勾配を示す係数  $\beta_p$  については風速の影響が大きい。これを踏まえ、越波流量の空間分布を簡潔に表現するために、図中に示す近似式の係数  $\alpha_p$ ,  $\beta_p$  を越波流量と風速で表すことを考えた。定式化にあたり、越波流量はそのままの形で影響し、風速は、打ち上がった水塊を押し力

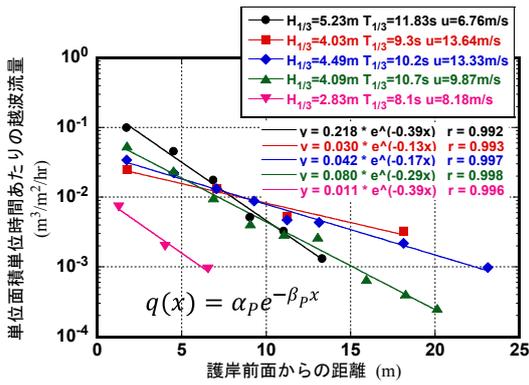


図-4 越波流量空間分布の観測結果例 (Fukuda ら (1974) より作図)

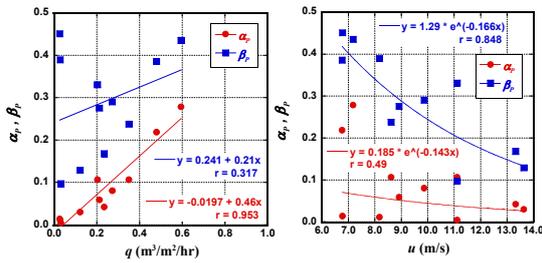


図-5 越波流量および風速と係数 $\alpha_p$ ,  $\beta_p$ との関係

として作用すると考え、2乗の形で影響するものとして、重回帰分析を行って最終的に以下の式を得た。

$$\alpha_p' = a_{p1}q_p' + b_{p1}u_p'^2 = 0.904q_p' - 0.148u_p'^2 \quad (1)$$

$$\beta_p' = a_{p2}q_p' + b_{p2}u_p'^2 = 0.055q_p' - 0.796u_p'^2 \quad (2)$$

ただし、 $q_p'$ は単位幅単位時間あたりの越波流量( $m^3/m/hr$ ) (空間分布の積分値に相当)、 $u_p'$ は風速( $m/s$ ) (護岸に垂直な風速成分)であり、各変数は平均値と標準偏差により基準化している (変数の右肩に「'」を付して基準化していることを示す)。重回帰式より、係数 $\alpha_p$ には越波流量そのものの寄与が大きく、風速は係数を減少させるように作用する。また、分布の勾配を表す $\beta_p$ には風速の影響が強い。図-6に推定精度を示す。図に示すとおり、係数 $\alpha_p$ については重回帰式による推定精度は非常に高く、 $\beta_p$ の推定精度も比較的高い。したがって、越波流量の空間分布は越波流量の規模と風速で決まるといえる。

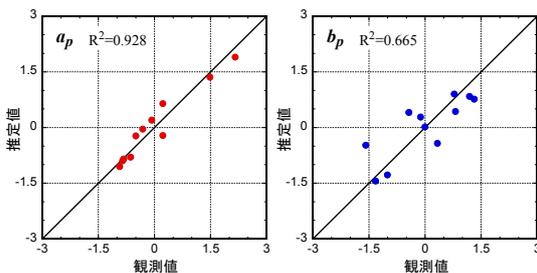


図-6 係数 $\alpha_p$ ,  $\beta_p$ の重回帰式の精度

## (2) 実験における越波流量の空間分布

図-7に実験で得られた越波流量の空間分布の例を現地換算して示している。(H<sub>1/3</sub>, T<sub>1/3</sub>) = (9cm, 1.5s)で風速 0m/sのケースは越波を生じていない。図より現地観測の結果と同様に、指数関数( $\alpha_M e^{-\beta_M x}$ )的に減少していることがわかる。空間分布の近似式の係数 $\alpha_M, \beta_M$ について、現地観測結果と同様に重回帰分析を行い以下の式を得た。

$$\alpha_M' = a_{M1}q_M' + b_{M1}u_M'^2 = 1.104q_M' - 0.385u_M'^2 \quad (3)$$

$$\beta_M' = a_{M2}q_M' + b_{M2}u_M'^2 = 0.557q_M' - 0.901u_M'^2 \quad (4)$$

ただし、 $q_M$ は現地換算した単位幅単位時間あたりの越波流量( $m^3/m/hr$ ) (空間分布の積分値に相当)、 $u_M$ は実験での風速( $m/s$ )であり、現地結果の重回帰分析と同様に各変数は平均値と標準偏差により基準化している (「'」を付して基準化していることを示す)。図-8に重回帰式の推定精度を示す。係数 $\alpha_M, \beta_M$ ともに、現地観測結果の場合 (図-6) と同程度の精度である。

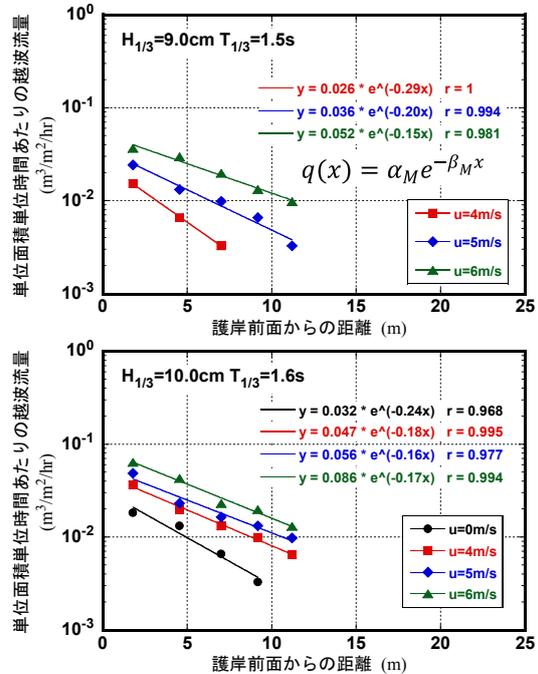


図-7 越波流量空間分布の実験結果の例

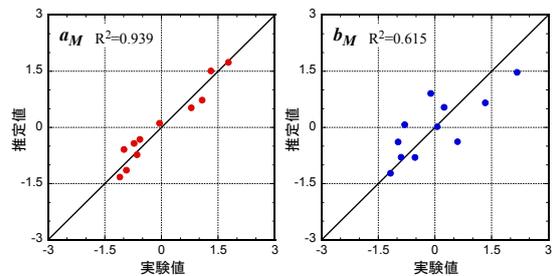


図-8 係数 $\alpha_M$ ,  $\beta_M$ の重回帰式の精度

## (3) 現地と模型の越波流量空間分布の比較

越波流量空間分布の近似式の係数について、現地観測結果と実験結果で得られた重回帰式

を比較すると、模型実験における係数 $\alpha_M$ に対する風速の影響が現地より大きく、係数 $\beta_M$ については、越波流量の影響が現地に比べ非常に大きくなっており、現地と模型実験とで越波流量の空間分布に対する風速と越波流量の影響の違いが明確に現れている。

現地と模型実験で越波流量の空間分布が一致するためには、近似式の係数が $\alpha_P = \alpha_M$ かつ $\beta_P = \beta_M$ （各係数は基準化されていない係数であることに注意）となる必要があり、また、単位幅あたりの越波流量が一致( $q_P = q_M$ ：ただし、 $q_M$ は現地換算した値)しなければならない。本研究では、係数 $\alpha, \beta$ を同じ形の式としたため、 $\alpha_P = \alpha_M$ と $\beta_P = \beta_M$ の2つの条件から本来は同一の式が得られることになるが、実際には、係数の推定式には誤差が含まれていることから、同一の式にはならない。そこで、より風速の影響が大きい係数 $\beta$ に着目し、 $\beta_P = \beta_M$ および $q_P = q_M$ から実験風速 $u_M$ （次元量）を求めると以下の式を得る。

$$u_M^2 = C_1 u_P^2 + C_2 q_P + C_3 \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{S_{\beta_P} b_{P2}}{S_{\beta_M} b_{M2}} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{S_{\beta_P} a_{P2}}{S_{\beta_M} b_{M2}} - \frac{S_{q_P} a_{M2}}{S_{q_M} b_{M2}} \quad (7)$$

$$C_3 = \frac{m_{\beta_P} - m_{\beta_M}}{S_{\beta_M} b_{M2}} - \frac{a_{M2}}{b_{M2}} \frac{m_{q_P} - m_{q_M}}{S_{q_M}} \quad (8)$$

$$u_M = \sqrt{S_{u_M} u_M^2 + m_{u_M}} \quad (9)$$

ただし、 $S_{\beta_P}, m_{\beta_P}$ などは、それぞれ $\beta_P$ の標準偏差と平均値であり、他も同様である。また、 $a_{P2}, a_{M2}$ などは、 $\beta_P, \beta_M$ の推定式(式(2)および式(4))の係数である。この式から、現地風速に対応する実験風速を求めて比較すると図-9のようになる。式(5)から分かるように、実験風速には現地の越波流量が影響するため、実験風速は現地風速のみから一意的には決まらないが、本研究で対象とした現地観測の条件においては、高い相関で対応している。

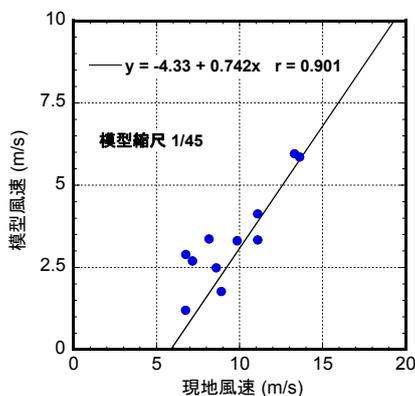


図-9 現地風速と模型風速の対応

<引用文献>

- ① Fukuda, N., T. Uno and I. Irie : Field Observations of Wave Overtopping of Wave Absorbing Revetment, *Coastal Engineering in Japan*, vol.17, pp.117-129, 1974.
- ② 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.

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)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 山城 賢, 越波実験における風速の縮尺について, 土木学会西部支部研究発表会, 2015 年 3 月 7 日, 琉球大学 (沖縄県中頭郡西原町)
- ② 山城 賢, 越波の水理模型実験における風の影響について, 土木学会西部支部研究発表会, 2014 年 3 月 8 日, 福岡大学 (福岡県福岡市)

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

上久保 祐志 (KAMIKUBO, Yuji)  
熊本高等専門学校・建築社会デザイン工学科・准教授  
研究者番号：90332105