

越波流量の空間分布に対する風の影響に関する研究

山城, 賢

九州大学大学院工学研究院附属アジア防災研究センター : 准教授

仲村, 渉

九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻

片山, 紗也香

京都市上下水道局

上久保, 祐志

熊本高等専門学校建築社会デザイン工学科 : 准教授

<https://hdl.handle.net/2324/7178620>

出版情報 : Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering). 71 (2), pp.I_835-I_840, 2015-11-10. Japan Society of Civil Engineers

バージョン :

権利関係 : © 2015 by Japan Society of Civil Engineers



越波流量の空間分布に対する 風の影響に関する研究

山城 賢¹・仲村 渉²・片山 紗也香³・上久保 祐志⁴

¹正会員 九州大学大学院准教授 アジア防災研究センター (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

E-mail: yamashiro@civil.kyushu-u.ac.jp

²学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

E-mail: 2TE15230K@s.kyushu-u.ac.jp

³京都市上下水道局 (〒601-8004 京都府南区東九条東山王町12)

E-mail: sy.katayama@suido.city.kyoto.jp

⁴正会員 熊本高等専門学校准教授 建築社会デザイン工学科 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

E-mail: kamikubo@kumamoto-nct.ac.jp

越波により護岸背後の陸域に落下する海水量の空間分布(単位面積当たりの越波流量の空間分布)について検討するには、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、越波流量の空間分布に強く影響する風について適切な相似則が存在しないため定量的な検討が難しい。本研究では、越波の実験における模型風速と現地風速との対応を把握するため、まず、Fukuda et al.¹⁾による現地観測結果を対象に、越波流量の空間分布について、越波流量の大きさと風速に基づく近似式を構築し、ついで、現地観測の条件を参考に水理模型実験を行い、実験結果についても同様に越波流量空間分布の近似式を得た。最後に、これらの近似式の比較から、現地風速と模型風速との対応について検討した。

Key Words : wave-overtopping, wind effect, field observation, model experiment, regression analysis

1. はじめに

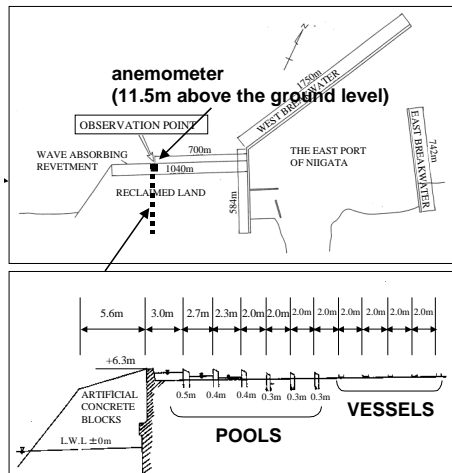
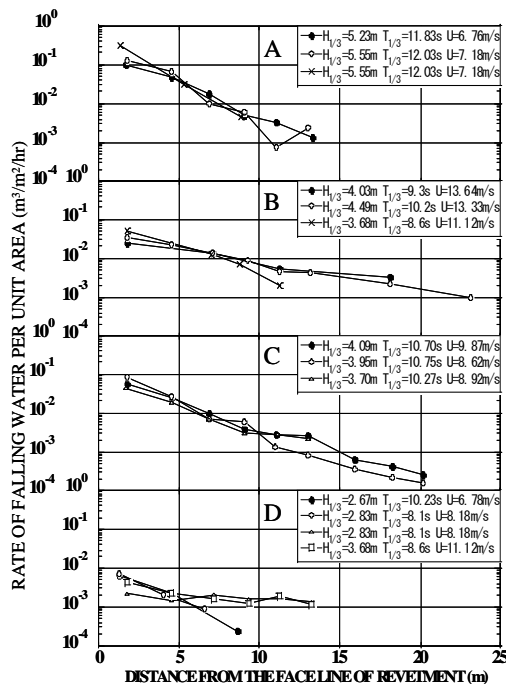
越波は大きく二つのタイプに分けられ、一つは海水が護岸天端を越流するタイプであり、もう一つは写真-1に示すように打ち上がった水塊が風に押されて護岸背後の陸域に落下するタイプである。後者の場合、護岸からの距離に応じて落下してくる海水量は異なり、すなわち単位面積当たりの越波量(越波流量でも同様)は空間的に分布を有する。既往の研究(例えば、Fukuda et al.¹⁾, Pullen et al.²⁾など)から、その分布形状は護岸からの距離に対して指数関数的に減少することが分かっているが、分布形状に対する風の影響など不明な点が多い。越波流量の空間分布特性を明らかにすることができれば、荒天時の海岸道路の規制や、護岸背後の距離に応じた越波防災など、海岸防護の高度化に繋がるものと期待される。

越波流量の空間分布を検討するには、造波風洞水路を用いた縮尺模型実験が有用な検討手段となるが、越波流量の空間分布に強く影響する風速について、適切な相似則が存在しないため、定量的な検討が難しいという問題がある。このことは、従来の護岸等の計画・設計において風の影響が考慮されていないことの大きな要因である。



写真-1 越波の例

著者らは、過去に、消波護岸における越波流量の空間分布の観測事例を断面2次元造波風洞水路による縮尺模型実験で再現することを試み、現地での風速と模型実験での風速との対応について検討した。その結果、縮尺1/45の模型実験では風速を現地の1/3程度とすれば、越波流量の空間的な変化を再現できるという結論を得た^{3), 4)}。この結果は、特定の模型縮尺率ではあるものの、越波の模型実験において風速を設定する際の目安になるものと思われた。しかし、その後の検討により、単純なある一定の縮尺比では再現性が低く、風速の縮尺比は越波流量

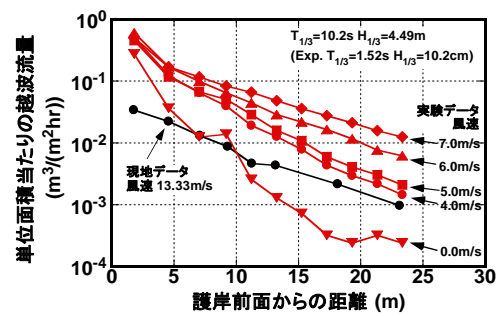
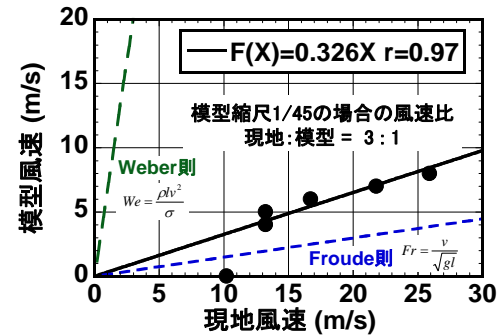
図-1 現地観測施設 (Fukuda et al.¹⁾に加筆)図-2 越波流量空間分布の観測結果 (Fukuda et al.¹⁾より作図)

の規模に応じて変化することが推測された。そこで本研究では、越波流量の空間分布の特性を把握すること、および、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に、まず、既往の現地観測結果について検討し、ついで、現地観測の条件を参考に水理模型実験を実施した。

2. 対象とする現地観測事例と過去の検討の概略

(1) 現地観測の概略

対象とする現地観測結果は、Fukuda et al.¹⁾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

図-3 越波流量空間分布の比較の例 (山城ら³⁾より作図)図-4 現地風速と模型風速の関係 (山城ら³⁾に加筆)

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。

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流量は小さくなり、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) 過去の検討の概略

過去に行った検討では、Fukuda et al.¹⁾による越波流量の空間分布の再現実験を縮尺1/45の模型を用いて行った。図-3は再現実験結果の一例である。観測結果と同様に、実験結果も護岸から離れるにつれて指数関数的に減少しており、また、風速(図中の風速は模型風速を示す)に応じて、空間分布の勾配が緩やかになる。そして、

ある実験風速において、越波流量の空間的な変化率（空間分布の勾配）が現地観測結果とよく一致する。このような再現実験を他の条件についても行い、実験での越波流量の空間分布の勾配が現地のそれに一致する風速を調べて図-4に示す結果を得た。図中にはフルード則およびウェーバー則による風速の関係を示す。石田ら⁵⁾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、著者らが知る限り、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。図-4より、再現実験から得られた現地風速と模型風速との対応関係は、フルード則とウェーバー則のどちらにも一致せず、縮尺 1/45 の模型での越波実験においては、現地風速と模型風速は概ね 3:1 の関係であるといえる。

この検討では、図-3に示すように、現地で得られた越波流量の空間分布の形状に近い実験結果を得るための模型風速を調べており、越波流量の大きさそのものについては、現地観測の条件に基づいて再現実験を行ったものの、現地と模型で差が生じているケースが複数みられた。この差の原因としては、現地における海底地形や越波の3次元性などが考えられた。その後、同様な検討を行う過程で、越波に対する風の影響の程度は、越波流量の大小に応じて変化するものと推測された。すなわち、図-3の結果において、実験結果の越波流量の規模が観測結果により近ければ、最終的に得られる風速の対応関係が異なっていた可能性が考えられる。これに加えて、図-4より、現地風速10m/s以下では対応する実験風速が0m/sとなっている点についても検討の余地がある。

3. 越波流量空間分布に関する検討

(1) 検討手順の概略

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。

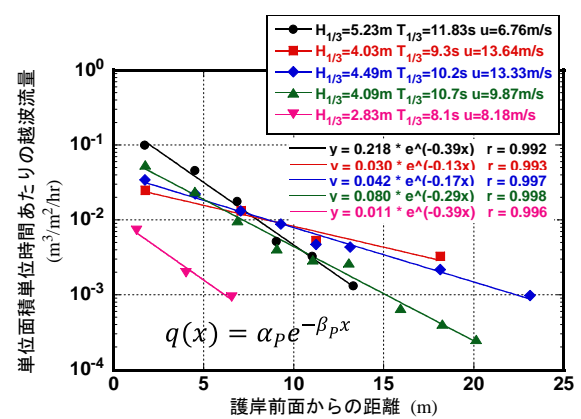


図-5 越波流量空間分布の観測結果例 (Fukuda et al.¹⁾より作図)

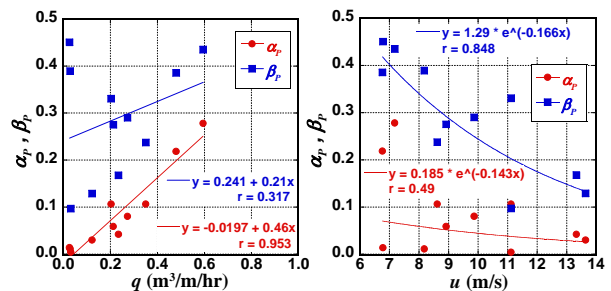
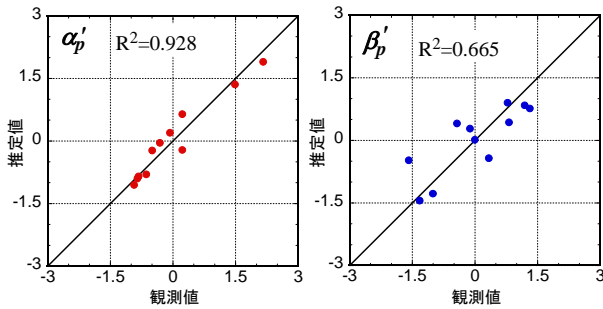


図-6 越波流量および風速と係数 α_p , β_p との関係

(2) 現地における越波流量の空間分布

図-5に図-2の観測結果の一部を示している。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、これらの空間分布は指数関数($\alpha_p e^{-\beta_p x}$)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^{1),2)}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-6は空間分布の近似式の係数 α_p , β_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-5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 α_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 β_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 α_p , β_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す力として作用すると考え、2乗

図-7 基準化した係数 α_p' , β_p' の重回帰式の精度

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 α_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 β_p には風速の影響が強い。図-7に推定精度を示す。図に示すとおり、係数 α_p については重回帰式による推定精度は非常に高く、 β_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。

(3) 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-8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、図-9に示すように、越波の際に水塊や飛沫が飛び散る高さの風速はほぼ一樣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、

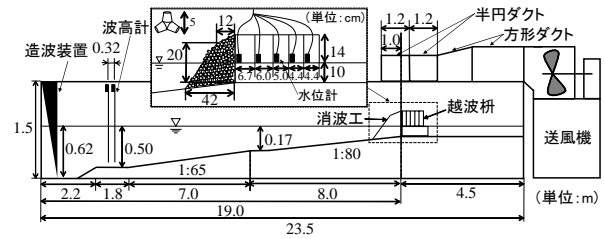


図-8 実験装置(反射吸収式断面2次元造波風洞水路)

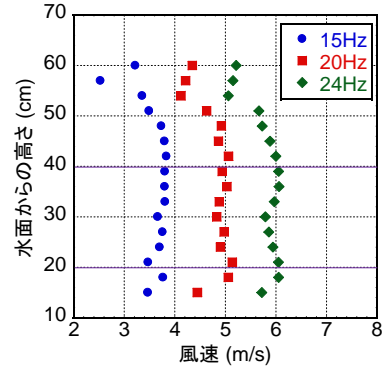


図-9 護岸壁面位置での風速の鉛直分布(凡例はファンの設定周波数)

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)までのみに取り付け、それより沖側には取り付けしていない(図-8参照)。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目的の一つであることから、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) 実験における越波流量の空間分布

図-10に実験で得られた越波流量の空間分布を現地換算して示している。 $(H_{1/3}, T_{1/3}) = (9cm, 1.5s)$ 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 α_M, β_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。

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

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

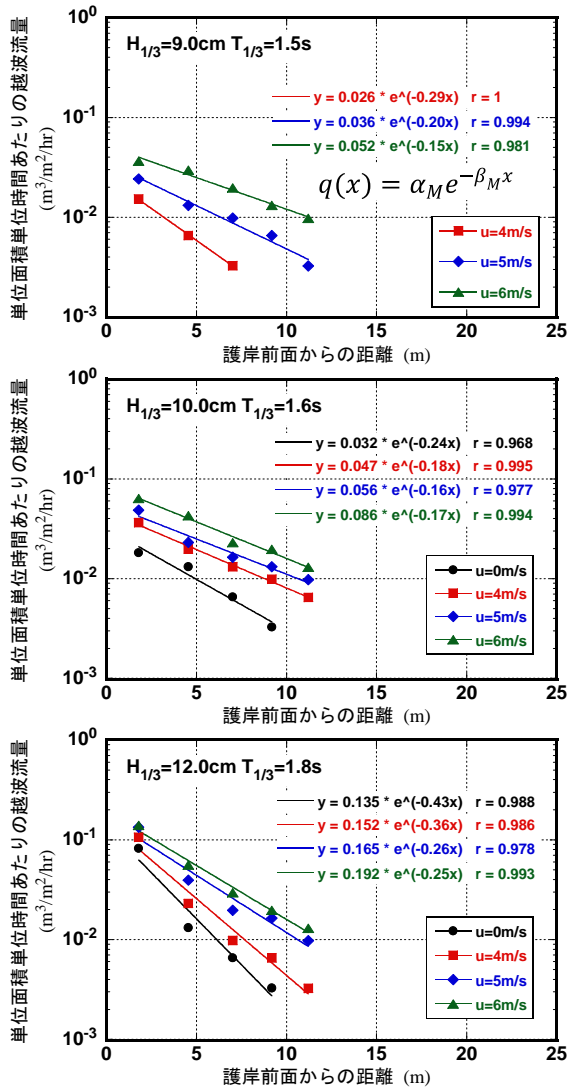


図-10 越波流量空間分布の実験結果

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(m³/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-11に重回帰式の推定精度を示す。係数 α_M, β_M ともに、現地観測結果の場合(図-7)と同程度の精度である。

係数 β_M の推定値と実験値に比較的大きな差が生じたケース(図中に○で示すケースに対応する係数 α_M についても同様に示す)について、重回帰式で推定した係数による越波流量空間分布を元の実験結果と比較したものを図-12に示す。図-11での推定値の誤差は、越波流量空間分布では図-12に示す程度の差となる。

4. 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、式(1)、(2)と式(3)、(4)を比較すると、模型実験における係数 α_M

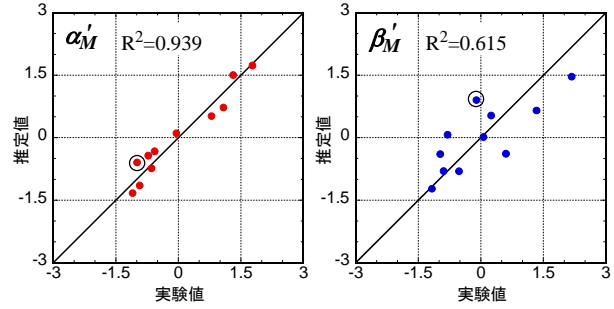
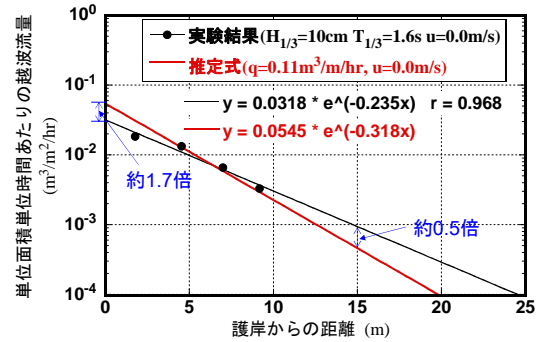
図-11 基準化した係数 α'_M, β'_M の重回帰式の精度

図-12 係数の推定誤差の影響

に対する風速の影響が現地より大きく、係数 β_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。このことから、現地の越波流量と風速により実験風速を推定する式が得られる。なお、本研究では、係数 α, β 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関係式が得られることになるが、実際には、係数の推定式に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 β に着目し、 $\beta_P = \beta_M$ および $q_P = q_M$ から実験風速 u_M を求めることとした。すなわち、 $\beta_P = \beta_M$ を基準化変量の β_P' 、 β_M' を用いて $S_{\beta_P}\beta_P' + m_{\beta_P} = S_{\beta_M}\beta_M' + m_{\beta_M}$ (S_{β_P}, m_{β_P} は、 β_P の標準偏差と平均値。他の変数についても同様)とし式(2)と式(4)を代入する。さらに、式中の q_M' を、 $q_P = q_M$ から標準偏差と平均値を用いて q_P' に置き換え整理すると、以下のように実験風速 u_M (次元量) が得られる。

$$u_M = \sqrt{S_{u_M}^2 u_M'^2 + m_{u_M}^2} \quad (5)$$

$$u_M'^2 = C_1 u_P'^2 + C_2 q_P' + C_3 \quad (6)$$

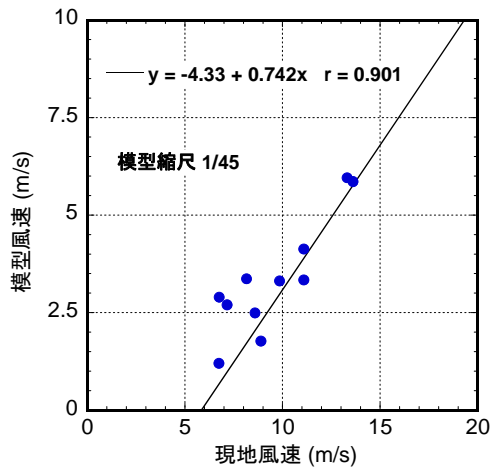


図-13 現地風速と模型風速の対応

$$C_1 = \frac{S_{\beta_P} b_{P2}}{S_{\beta_M} b_{M2}} \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{S_{\beta_P} a_{P2}}{S_{\beta_M} b_{M2}} - \frac{S_{q_P} a_{M2}}{S_{q_M} b_{M2}} \quad (8)$$

$$C_3 = \frac{m_{\beta_P} - m_{\beta_M}}{S_{\beta_M} b_{M2}} - \frac{a_{M2} m_{q_P} - m_{q_M}}{b_{M2} S_{q_M}} \quad (9)$$

ただし、 a_{P2} 、 a_{M2} などは β_P' 、 β_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-13のようになる。式(6)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。

5. おわりに

本研究では、越波流量の空間分布が越波流量の大きさと風速に依存すると仮定し、現地観測および水理模型実

験で得られた越波流量の空間分布をそれぞれ近似式で表して、それらの比較により、現地の風速と越波流量から実験風速を得る関係式を得た。これらの検討は、造波風洞水路を用いた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、越波流量空間分布の勾配を表す係数の近似式(式(2)および式(4))については、ある程度の誤差が含まれており、これらの近似式の精度が向上すれば、模型風速をより正確に推定できるものと思われる。そのためには、越波流量と風速以外の要素についても考慮が必要と思われる、今後の検討としたい。また、縮尺比が異なる場合、および、対象とする護岸の形式が異なる場合についても同様の検討が必要である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、実験模型の制作については九州大学技術職員の児玉充由氏に、実験の実施については九州大学学部生の小川大輔君にご協力頂きました。また、本研究はJSPS科研費 25630210の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Pullen T., Allsop, W., Bruce, T. and Pearson, J.: Field and laboratory measurements of mean overtopping discharges and spatial distributions at vertical seawalls, *Coastal Engineering*, Vol.56, pp.121-140, 2009.
- 3) 山城 賢, 吉田明德, 橋本裕樹, 久留島暢之, 入江功: 越波実験における風洞水槽内風速の現地風速への換算, 海洋開発論文集, 第20巻, pp.653-658, 2004.
- 4) Yamashiro, M., Yoshida, A., Hashimoto, H. and Irie I.: Conversion ratio of wind velocity from prototype to experimental model on wave-overtopping, *the 30th Int. Conf. on Coastal Engineering*, pp.4753-4765, 2007.
- 5) 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.

(2015.3.18 受付)

STUDY ON EFFECTS OF WIND ON SPATIAL DISTRIBUTIONS OF WAVE-OVERTOPPING RATE

Masaru YAMASHIRO, Wataru NAKAMURA, Sayaka KATAYAMA
and Yuji KAMIKUBO

In this study, on the basis of the results of field observations by Fukuda et al. (1974) in which spatial distributions of wave-overtopping rate were obtained in 1971-1972 at Niigata East Port in Japan, the characteristics of spatial distributions of the wave-overtopping rate were investigated first. Then, laboratory experiments were conducted by using a two-dimensional wind-wave flume with a 1/45 scale model of Niigata east port. Generating the wave and the wind at the same time, the spatial distributions of the wave-overtopping rate were measured. 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.