

スリット式直立消波護岸背後の越波流量空間分布に関する現地観測

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

岡, 昂作

月島機械株式会社水環境事業本部プラント技術部

児玉, 充由

九州大学工学部技術部

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

他

<https://hdl.handle.net/2324/7178621>

出版情報 : Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering). 75 (2), pp.I_727-I_732, 2019-10-17. Japan Society of Civil Engineers

バージョン :

権利関係 : © 2019 by Japan Society of Civil Engineers



スリット式直立消波護岸背後の越波流量 空間分布に関する現地観測

山城 賢¹・岡 昂作²・児玉 充由³・上久保 祐志⁴・横田 雅紀⁵

¹正会員 九州大学大学院准教授 工学研究院附属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月島機械株式会社 水環境事業本部プラント技術部 (〒104-0053 東京都中央区晴海3丁目5番1号)

³九州大学 工学部技術部 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

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

⁵正会員 九州産業大学准教授 建築都市工学部都市デザイン工学科

(〒813-0004 福岡県福岡市東区松香台2-3-1)

E-mail:m.yokota@ip.kyusan-u.ac.jp

越波流量の空間分布を十分に把握できれば、荒天時の海岸道路の通行規制や護岸背後の距離に応じた越波防災など、将来の海岸防護の高度化に繋がると期待される。本研究では、スリット式直立消波護岸を対象に越波飛沫の現地観測を実施し越波流量空間分布の推定式を得た。また、以前に著者らが構築した消波護岸に対する同様の推定式との比較から、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。その結果、スリット式直立消波護岸についても越波流量空間分布を定式化でき、その推定式は観測結果をよく表せることを示した。さらに、スリット式直立消波護岸は大きく打ち上がる越波形態のため、消波護岸に比べて越波流量空間分布に対する風速の影響が数倍程度大きいことなど新たな知見が得られた。

Key Words : wave-overtopping, slit-type seawall, field observation, wind effect, regression analysis

1. はじめに

護岸で激しく打ちあがるタイプの越波が生じる場合、護岸からの距離に応じて落下してくる海水量は異なり、単位面積当たりの越波量あるいは越波流量は空間分布を有する。こ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既往の研究^{1) 2)}から明らかとなっているが、分布形状に対する風の影響など不明な点は多い。越波流量の空間分布特性を把握することができれば、荒天時の海岸道路の通行規制や護岸背後の距離に応じた越波防災など、将来の海岸防護の高度化に繋がると期待される。このような観点から、著者らはこれまでに、Fukuda et al.³⁾の新潟東港における現地観測結果をもとに、消波護岸背後の越波流量空間分布の推定式を構築し風の影響等について検討した。さらに、現地の条件をもとに実施した水理模型実験との比較から、適切な相似則が存在しない越波実験における模型風速の設定についても検討した^{3) 4)}。しかし、護岸形式が異なると越波の状況も異なるため越波に対する風の影響と越波流量空間分布に

差異が生じる。そこで本研究では、スリット式直立消波護岸を対象に越波飛沫の現地観測を実施し越波流量空間分布の推定式を得た。また、以前に著者らが構築した消波護岸に対する同様の推定式との比較から、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。

2. 越波飛沫の現地観測

(1) 現地観測の概略

観測は図-1に示す山口県下関市の廃棄物処理場の一部で実施した。護岸形式は写真-1に示すスリット式直立消波護岸である。図-2に代表断面を示す。天端高はL.W.L+5.0 mで、天端幅は9.0 mである。護岸背後に排水路があり、その背後の地盤高は護岸天端から-1.5 mである。この場所は日本海に面しており、冬季風浪時には暴風暴浪に晒され写真-2に示すような激しい越波が生じる。そこで、観測は冬季風浪が発達し降水量が少なかった平成29年12月5日、平成30年1月9日、1月23日、2月4日、2月

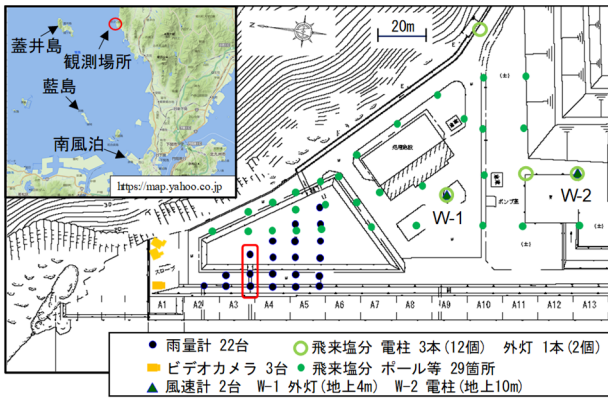


図-1 観測場所および観測機器の配置



写真-1 スリット式直立消波護岸

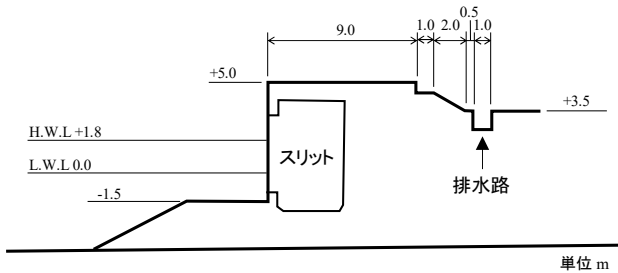


図-2 スリット式直立消波護岸の代表断面

5日に実施した。

観測項目は、飛沫量、飛来塩分量、風向風速であり、**図-1**に観測機器の配置を示している。なお、本処理場には護岸背後に沈砂池があるため、**写真-3**に示すように沈砂池内には足場を作成して計測器を設置した。飛沫量は**写真-4**に示す転倒桁式雨量計により護岸背後の22箇所で計測した。この雨量計は雨量0.2 mm毎にその時刻を記録するものであり、観測日の前日夕方から当日の夕方まで記録した。これによって計測した飛沫量の記録から越波流量を推定した。もし、観測中に雨が降った場合は、護岸から最も離れた雨量計の記録をもとに全ての雨量計の記録を補正することとした。飛来塩分は、円筒形の金網籠にガーゼを巻いた塩分捕捉器を作成し、ポールや電柱等を利用して護岸背後の広い範囲に43箇所設置した。しかし、本論文では越波飛沫と越波流量の空間分布に焦点を絞って議論することとし、飛来塩分量については議論



写真-2 観測時の越波の状況



写真-3 沈砂池内の観測用足場



写真-4 転倒桁式雨量計

しない。風向風速はプロペラ式風向風速計を外灯と電柱の2箇所（地上4.0mと10.0m）に設置して計測した。外灯の風向風速計は、10分間隔で平均風速、最大瞬間風速、16方位による平均風向および最大瞬間風速時における風向を、平成29年12月から平成30年2月に亘って記録した。一方、電柱の風向風速計は10秒間隔で連続的に計測を行い、風向は0～360°で計測している。この風向風速計による観測は、観測日前日の夕方から当日の夕方までである。また、越波の様子を複数のビデオカメラで撮影した。

(2) 観測実施日の気象概況

観測実施日の天候はいずれの日もほぼ曇りで、時折みぞれや雪が若干降ったものの、下関のアメダスによれば3時間降水量は0 mmであり、飛沫量や飛来塩分量の計測に影響するほどではなかった。観測実施日において最も風が弱かった平成29年12月5日と、逆に最も風が強かった平成30年1月9日の天気図（気象庁HP日々の天気図）

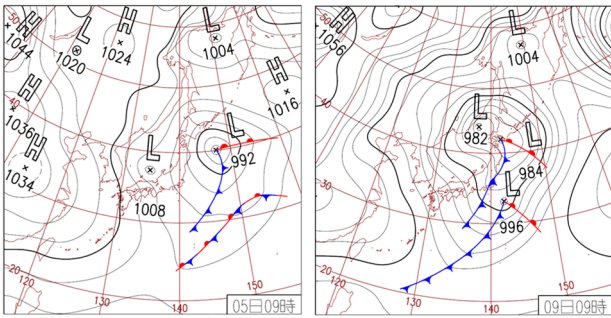


図-3 天気図 (左:平成29年12月5日, 右:平成30年1月9日)

を 図-3 に示す。観測実施日はいずれの日も西高東低の冬型気圧配置であり、下関のアメダスによる風向は西南西から西北西で、風速は風が弱かった平成29年12月5日で最大8 m/s、風が強かった平成30年1月9日で最大12 m/sであった。

3. 観測結果の概略

(1) 飛沫量および風向風速の経時変化

図-4に12月5日、1月9日および23日における観測結果を示す。上から、最寄りのナウファスの観測点である藍島(観測場所から南に約14 km, 位置は図-1参照)における有義波高および有義波周期、関門海峡の響灘側入口付近に位置する南風泊(観測場所から南に約18 km, 位置は図-1参照)における潮位(観測基準面上の水面高)、図-1中のW-2(地上10 m)で計測した風向風速、および、図-1中の赤枠で囲む3ヶ所の雨量計による累積の飛沫量(海側からR-4, 5, 6)である。

波は全体的に有義波高が2 m前後で有義波周期は6 s前後であるが、1月9日は有義波高が3 m近くまで発達している。波向きは示していないが、1月9日と23日は西から北西で、それ以外の日は北西から北北西であった。護岸に作用する来襲波浪については、観測場所の西の沖合にある蓋井島による回折やその後の屈折などの影響があると思われるが、観測場所の護岸は西に面しているため、1月9日および23日は他の日に比べて、より直角に近い角度で護岸に入射していたと思われる。南風泊における潮位は、12月5日および紙面の都合で示していないが2月4日で潮位差が大きく150 cm弱で、逆に1月9日は小さく70 cm程度である。風向は全体的に北西から北北西で、12月5日が最も北寄り、1月9日と23日は概ね北西の風であった。風速については、図中の赤線は観測結果を平滑化したもので、それによると強い時で10 m/sを越えている。飛沫量(雨量計による計測の単位はmm)の時系列をみると、1月9日が最も飛沫量が多く、次いで、1月23日が多く、12月5日が最も少ない。また、海側の観測点で飛沫量が最も多く、護岸から離れるにつれ少なくなっている。なお、飛沫量の図は観測日によって縦軸の値が違うことに注意されたい。

1月9日は前述したとおり、波が護岸により小さい入射角で作用していたと思われ、入射波高も大きく風速も強かったことから飛沫量が多かったと思われる。実際に、1月9日は全ての観測日のうち最も激しく越波が生じていたことを観察している。1月9日の飛沫量の記録をみると、例えば3:00-6:00は飛沫量の増加率(曲線の傾き)が大きく、激しい越波により飛沫量が多かったことを示してい

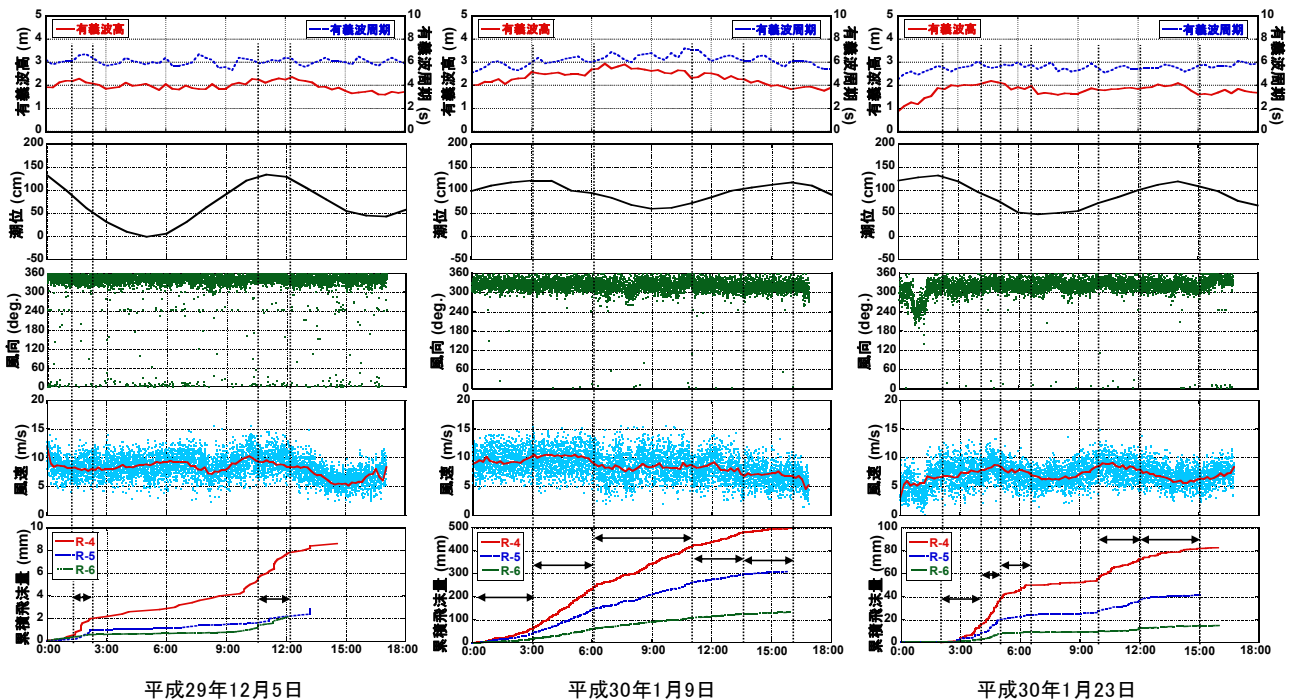


図-4 観測結果の時系列(上から有義波高・有義波周期(藍島)、潮位(南風泊)、風向、風速、累積飛沫量)

る。この時間帯は、有義波高が2 m以上で潮位は比較的高く、風は10 m/s以上で最も強い時間帯であった。6:00-11:00は、波高は最も高かったが、潮位は若干下がり風速も少し小さくなっており、飛沫量の増加が僅かに緩やかになっている。このように、時々刻々変化する波浪や風況に応じて越波の状況も当然変化することから、飛沫量の増加率がほぼ一定の時間帯は越波の状況がほぼ定常であると判断し、以降では図中に両矢印で示す時間帯を対象に越波流量の空間分布について議論することとした。なお、図に示してはいないが、2月4日および5日についても同様に検討対象の時間帯を設定した（表-1参照）。

(2) 越波流量の空間分布

図-5に、1月9日3:00-6:00および2月4日4:00-9:00について、単位時間当たりの飛沫量(mm/hr.)の平面分布を示す。図中の矢印は各時間帯における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。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。特に、飛沫量が格段に大きい1月9日については、2月4日に比べて風下方向に飛沫量が減少している様子が明確に認められる。

図-6は、図-5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当たりの越波流量($m^3/m^2/hr.$)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。

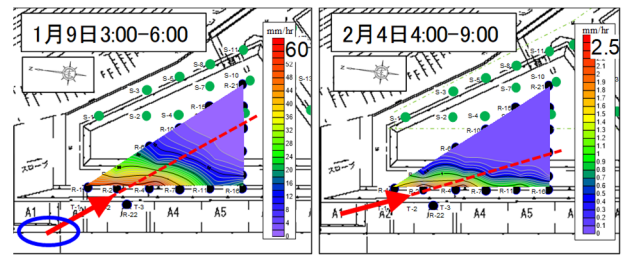


図-5 飛沫量の平面分布の例

4. 越波流量空間分布の検討

(1) スリット式直立消波護岸背後の越波流量空間分布の推定式

図-6で示したように、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る。逆に、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。著者らは以前に、消波護岸背後の越波流量の空間分布について、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 を越波流量（一般的な単位幅あたりの越波流量で図-6に示す越波流量空間分布の積分値に相当）と風速の2乗を説明変数とした重回帰式で表した^{3,4)}。この推定式は、単位幅あたりの越波流量が、風によって護岸背後にどのように分布するかということを表すものといえる。本研究では、図-6に示す越波流量空間分布の近似式をもとに、同様の手順でスリット式直立消波護岸における越波流量空間分布の推定式を求める。

表-1に各観測時間帯における平均風速および越波流量空間分布の近似式の係数 α 、 β を整理している。係数 α は図-6に示す越波流量空間分布の切片であり、係数 β は空間分布の距離による減少の程度を表している。また、 α/β は近似式の積分であり、近似式から求めた単位幅あ

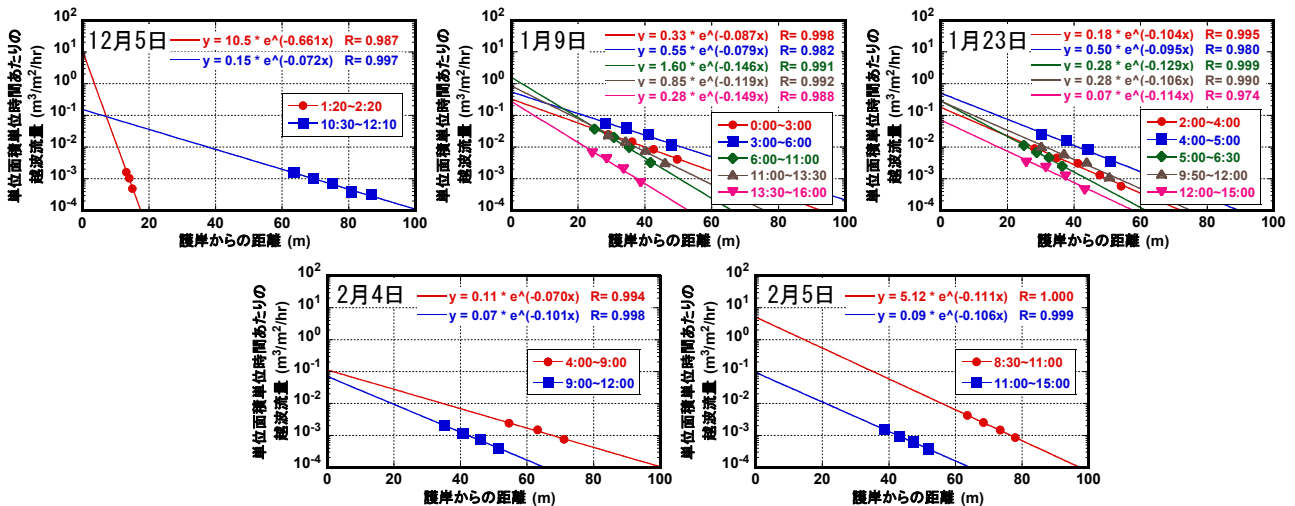


図-6 越波流量空間分布

表-1 平均風速および近似式の係数の一覧

年月日	時間	平均風速 u (m/s)	α	β	α/β
平成29年 12月5日	1:20-2:20	8.41	10.470	0.661	15.84
	10:30-12:10	9.66	0.154	0.072	2.14
平成30年 1月9日	0:00-3:00	9.55	0.329	0.087	3.77
	3:00-6:00	9.70	0.551	0.079	7.02
	6:00-11:00	8.68	1.597	0.146	10.94
	11:00-13:30	8.11	0.845	0.119	7.10
1月23日	13:30-16:00	6.91	0.277	0.149	1.86
	2:00-4:00	7.41	0.178	0.104	1.71
	4:00-5:00	8.39	0.504	0.095	5.30
	5:00-6:30	7.16	0.284	0.129	2.20
	9:50-12:00	8.24	0.280	0.106	2.65
	12:00-15:00	6.92	0.072	0.114	0.63
2月4日	4:00-9:00	9.66	0.113	0.070	1.62
	9:00-12:00	7.98	0.071	0.101	0.70
2月5日	8:30-11:00	10.12	5.123	0.111	46.15
	11:00-15:00	8.71	0.094	0.106	0.89

たりの越波流量($m^3/m/hr$)を意味している。図-6をみると、例えば12月5日のケースは、近似式の相関係数は高いものの係数の値が2つの時間帯で非常に大きく異なる。これは、護岸から離れた僅か数点の非常に小さな越波流量の結果から近似式を得ているためで、特に、係数 α が影響を受けやすく、観測値の僅かな違いで値が大きく変化する。1月9日の各時間帯をみると、係数 α は1つの時間帯を除いて1より小さい。1月9日は越波流量が大きくより妥当な近似式が得られていると思われる、他の観測日についても全体的に係数 α は1未満のケースが多い。また、単位幅あたりの越波流量(α/β)をみても、係数 α が大きいケースは越波流量が非常に大きく現実的ではない。さらに、1月9日13:30-16:00および1月23日2:00-4:00については、時間帯の設定が不適切であったためか、これらの2ケースを加えると、重回帰分析により得られる推定式の精度が低下する結果となったことから、推定式の定式化においては外すこととした。以上のことから、表-1に太字で示す10ケースのデータを用いて重回帰分析により係数 α 、 β 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。なお、越波流量 $q(m^3/m^2/hr)$ には表-1に示す α/β を用いている。各係数の p 値を確認すると式(2)の q の係数のみ有意水準5%を満たしておらず、 q を係数 β の説明変数とすることについて検討の余地があるが、後述の消波護岸に対する推定式との比較のため、本研究では式(2)のまま検討した。これらの式から、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、

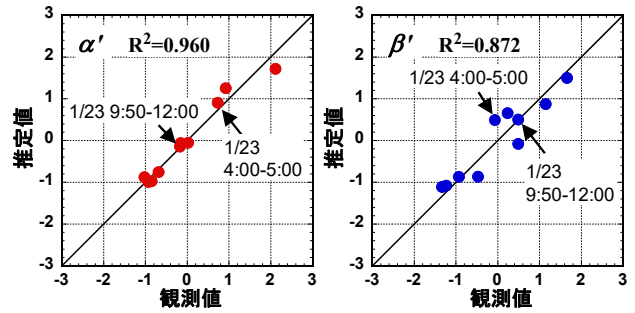


図-7 重回帰式の推定精度

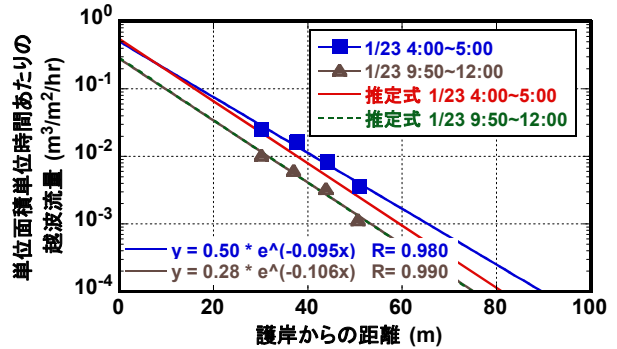


図-8 越波流量空間分布の推定

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。図-7に式(1)、(2)の推定精度を示す。どちらの式も非常に高い相関が得られているといえる。また、図-7に矢印で示す、係数 β の推定値と観測値に差がある1月23日4:00-5:00と両係数共に精度よく推定できている同日9:50-12:00について、越波流量空間分布を推定したものが図-8である。図より、9:50-12:00についてはほぼ完全に一致しており、また、4:00-5:00についても妥当に推定できていると思われる。

(2) 護岸形式による越波流量空間分布への風の影響の違い

式(1)、(2)における越波流量 q と風速の2乗 u^2 の係数を比較すると、 α については越波流量 q の係数が大きく、越波流量が風速の2乗の4倍寄与している。 β については、前述のとおり越波流量を説明変数とすることについて検討の余地があるが、同様に比較すると風速の2乗の方が7.4倍寄与していることになり、ほぼ風速で決まるといえる。著者らが以前に定式化した消波護岸における越波流量空間分布の係数の推定式 β' は以下のとおりである。

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

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

なお、これらの式を求める際に使用した観測結果³⁾は、越波の規模および風速とも、本研究の観測結果と概ね同程度である。式(3)、(4)の係数を比較すると、 α については越波流量の寄与が風速の2乗の7.2倍、 β については風速の2乗の寄与が越波流量の3.8倍となっており、スリット式直立消波護岸と同じく、 α は越波流量、 β は風速の2乗の影響が大きい。しかし、影響の程度は異なり、スリット式直立消波護岸の方が消波護岸に比べて、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。スリット式直立消波護岸では、通常の直立護岸と同様に、越波が生じる際には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。

5. おわりに

本研究では、スリット式直立消波護岸を対象に越波飛沫の現地観測を行い、越波流量の空間分布が越波流量の規模と風速に依存すると考え越波流量空間分布の推定式を得た。説明変数の妥当性など検討の余地はあるものの、推定式は観測結果をよく表すことができることを示した。したがって、本推定式により、ある越波流量と風速を想定した場合の越波流量空間分布を推定することができる。次いで、以前に同様の考えで定式化した消波護岸に対する推定式と比較し、スリット式直立消波護岸は、大きく打ち上がる越波形態のため、消波護岸に比べて越波流量空間分布に対する風速の影響が大きいことなどを示した。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

越波が支配的になるにつれ、越波に対する風の影響度が変化し、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。また、造波風洞水路による越波の模型実験においては、風速に関する適切な相似則がないことが問題となっている。著者らは以前の消波護岸での検討において、越波流量空間分布の推定式をもとに現地と模型との風速の対応について検討した^{3,4)}。スリット式直立消波護岸においては、消波護岸とは風速の影響が異なることから、現地と模型との風速の対応についても同様に検討が必要である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、現地観測には下関市が管理する施設内の敷地の一部を利用させて頂き、同市環境部環境施設課および当該施設の方々には、観測に御協力頂くとともに貴重な情報を頂きました。加えて、観測の際には、著者らが所属する研究室の多くの学生の協力を頂きました。また、本研究はJSPS科研費 JP16H04420 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, 仲村 渉, 片山紗也香, 上久保祐志: 越波流量の空間分布に対する風の影響に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No.2, pp.I_835-840, 2015.
- 4) 小川大輔, 山城 賢, 仲村 渉: 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概要集 CD-ROM, 2016.

(2019.3.13 受付)

FIELD OBSERVATION ON SPATIAL DISTRIBUTIONS OF WAVE-OVERTOPPING RATE BEHIND A SLIT-TYPE SEAWALL

Masaru YAMASHIRO, Kosaku OKA, Mitsuyoshi KODAMA,
Yuji KAMIKUBO and Masaki YOKOTA

In this study, field observations on wave-overtopping were conducted at a waste disposal plant in Shimonoeki city in the winter season. The plant faces the Japan Sea and has slit-type vertical seawalls. Seasonal storms often strike the plant in winter and cause intense wave-overtopping. The field observations were conducted five times on windy days. From the field observation results, the spatial distribution was formulated as an exponential function of wave-overtopping rate and wind velocity. Then, comparing the formula with the similar formulas for the seawall covered with wave-dissipating blocks formulated by Ogawa et al. (2016), the influences of the form of seawall on the spatial distributions of wave-overtopping rate were discussed. It was found that the spatial distribution of wave-overtopping rate behind the slit-type vertical seawall is strongly affected by wind compared to a seawall covered with wave-dissipating blocks.