

非越波型護岸の越波防止効果に対する風の影響

山城 賢*・吉田 明德**・橋本 裕樹***
久留島 暢之***・入江 功****

著者らは、波を沖方向に返し低天端を達成する非越波型護岸の開発を行っている。この護岸は、波を沖向き上方に返すため、返された水塊に対する風の影響が懸念されるが、越波に対する風の影響を水槽実験により調べる際には、越波実験における風速の相似則が不明という問題がある。そこで本研究では、まず、越波の現地観測結果をもとに現地風速と実験風速の対応を調べた。その結果、本研究で用いた 1/45 縮尺模型では実験風速は現地風速の約 1/3 程度となることがわかった。ついで、非越波型護岸の越波防止効果に対する風の影響を調べた結果、風速が大きくなると越波流量が急激に増大するため、無風時と異なる断面上の工夫が必要であることがわかった。

1. はじめに

沿岸部では、風浪による越波や飛沫により、護岸背後の施設に多大な被害を生じることがある。著者らは、沖合いの人工島護岸のような大水深域護岸を対象に、図-1 に示すような形状により、波を沖方向に返し越波を防ぐ非越波型護岸の開発を行っている(山城ら, 2003)。この護岸は、通常用いられる直立護岸に比べ低天端を達成し、さらに護岸上に安全に開放することができるといった利点がある。しかし、非越波型護岸では波を沖向き上方に返すため、返された水塊に対する風の影響が懸念される。従来の直立及び消波護岸の設計においては、越波に対する風の影響は考慮されていないが、非越波型護岸を現地に適用することを考えた場合、越波防止効果に対する風の影響を把握することは重要である。一方で、越波を対象とした水槽実験において、風速の相似則が不明で定量的な評価が難しいという問題があり、このことが従来の護岸の設計において風の影響を考慮していないことの大きな要因ともなっている。本研究では、まず、過去に行われた越波の現地観測結果をもとに、越波実験における現地と風洞水槽実験における風速の対応を調べ、ついで、非越波型護岸の越波防止効果に対する風の影響について実験的に検討した。

2. 現地風速と風洞水槽内風速との対応

(1) 現地観測の概要

対象とする現地観測結果は、著者らの一人を含むグループにより、新潟東港で 1971~1972 年に得られたものである(Fukuda ら, 1974)。護岸背後の越波流量の空間分布を現地で観測した例は少なく、この現地観測結果は貴重なデータといえる。観測施設は、図-2 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

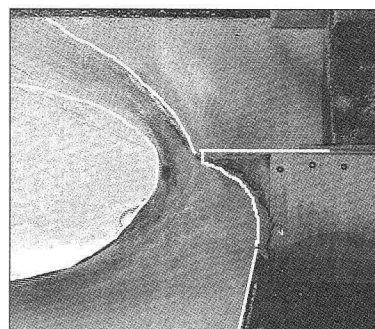


図-1 非越波型護岸

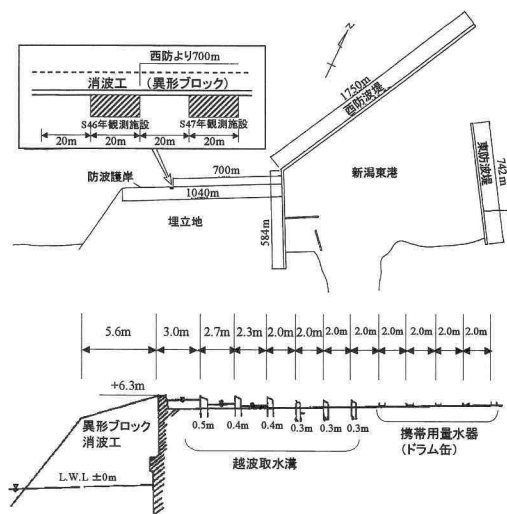


図-2 現地観測施設 (Fukuda ら (1974) より引用)

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 4.5 m であり、護岸前面の海底勾配は約 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-24.2 m)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ピラム式

* 正 会 員 博(工) 九州大学助手 大学院工学研究院

** 正 会 員 工 博 九州大学助教授 大学院工学研究院

*** 学生会員 九州大学大学院工学府

**** 正 会 員 工 博 九州大学名誉教授

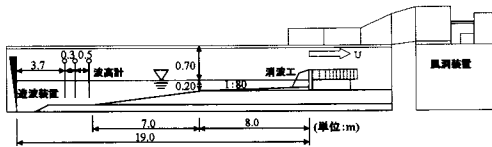


図-3 実験装置

表-1 現地波浪および風速と実験波

	現地観測			実験	
	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)	U (m/s)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)
Case-A	11.83	5.23	6.76	1.79	12.3
	12.03	5.55	7.18		
	12.03	5.55	7.18		
Case-B	9.3	4.03	13.64	1.52	10
	10.2	4.49	13.33		
	8.6	3.68	11.12		
Case-C	10.7	4.09	9.37	1.6	8.8
	10.75	3.95	8.62		
	10.27	3.7	8.92		
Case-D	10.23	2.67	6.78	1.79	12.3
	8.1	2.83	8.18		
	8.1	2.83	8.18		
	8.6	3.68	11.12		

風向風速計（1971年）およびコーシンペーン型風向風速計（1972年）により観測を行っている。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。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） 現地観測の再現実験

実験には図-3に示す反射吸収式二次元造波風洞水槽を用いた。縮尺は1/45とし、図-2に示す現地の観測施設を参考に模型を作成した。現地観測と実験における入射波をまとめたものを表-1に示す。なお、表中の U (m/s)は風速の現地観測結果であるが、護岸に垂直な成分の風速である。実験においては、現地観測結果のA～Dの4ケースについて、それぞれ表-1中の太字で示す波を代表波としてフルード則を適用し有義波高と有義波周期を設定してBretschneider-光易型スペクトルをもとに入射波を作成した。また、実験中に図-3に示す位置で水面変動を測定し、入射波分離推定法（合田ら、1976）を用いて入射波を確定した。造波時間は現地の入射波周期と観測時間を考慮し30分とした。風速の測定は、図-4に示す護岸上部および50cm沖側と50cm岸側の位置で風速の鉛直分布を測定し、断面平均風速を求めた。図-4には、風速の鉛直分布を測定した例を示している。本研究における実験風速としては護岸上の断面平均風速で代表しており、護岸上の断面平均風速を0 m/s～8 m/sまで1 m/s間隔で変化させた。したがって、以後の検討

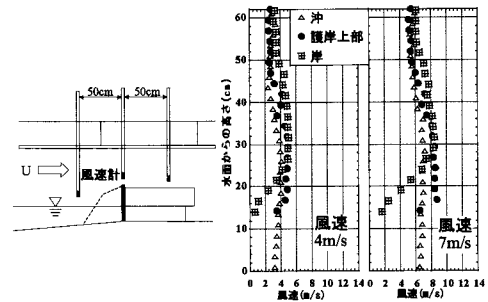


図-4 風速測定位置と風速鉛直分布

においては護岸上の断面平均風速と現地観測による海上10 mにおける風速との対応を調べていることになる。ただし、風速3 m/s以下では風速が安定せず、実際に発生できた風速は4 m/s以上である。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槽内に風を発生させる方式のもので、風洞は装置から護岸の消波ブロック法先あたりまでのみに取り付けた（図-3参照）。この理由は、本研究では、一定の入射波条件において風による護岸背後の越波流量分布の変化を現地観測結果と比較することで風速の対応を調べることを考えており、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槽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。以上の実験条件において、波と風を同時に作用させて、護岸の背後に並べた柵により越波流量を測定した。

（3） 現地風速と風洞水槽内風速の対応

図-5に越波流量が多いCase-Aと風速が大きいCase-Bについて、現地観測と実験結果との越波流量分布の比較を示す。縦軸は単位面積あたりの越波流量を対数で表しており、横軸は護岸前面からの距離である。図より、現地観測結果および実験結果ともに越波流量は護岸から離れるほど減少している。また、現地観測結果に比べて実験結果は全体的に越波流量が大きい。この理由としては、現地観測結果に影響していると考えられる護岸前面の海底地形や越波の3次元的な変動は、2次元水槽実験では十分に考慮できないことが挙げられる。しかしながら、越波流量の分布形状についてみると、実験結果は明らかに風速によって分布形状が異なり、風速が大きくなるほど、分布の勾配が緩やかになっている。したがって、実験結果は全体的に現地観測結果を上回っているものの、越波流量の分布については、風速によって現地観測結果と実験結果とで非常によく似た形状を示すことが分かる。

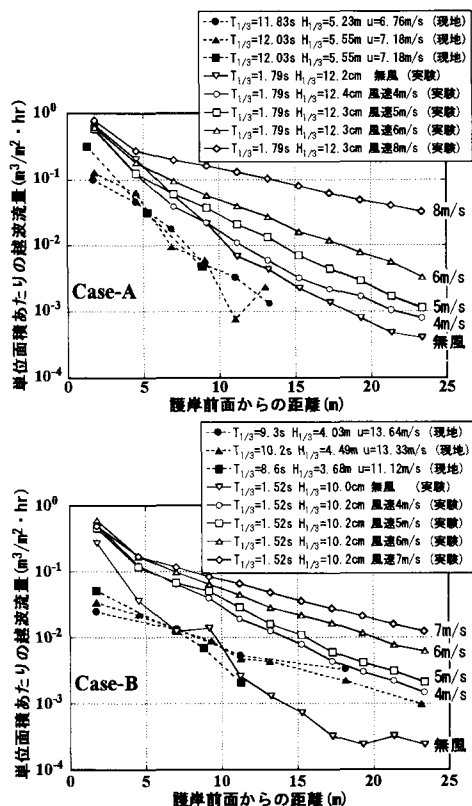


図-5 実験値と観測値の越波流量分布の比較

Fukuda ら (1974) は、図-5 に示す越波流量分布より、風速をパラメータとして単位面積あたりの越波流量 Q と越波流量水平分布の勾配との関係を示している。図-6 は Fukuda ら (1974) による図に加筆したもので、縦軸の単位面積あたりの越波流量 Q を越波流量推定図表から求める期待越波流量 q と堤前水深 h の比で無次元表示している。図中の実線は等風速線（護岸に垂直な方向の風速）である。Fukuda ら (1974) はこの図より、越波流量に対する風の影響は、一般に越波流量が少ないときには風による増加が著しく、越波流量が多くなると風の影響が相対的に減少することを示した。

図中には幾つかの実験結果について風速毎に整理し示している。実験結果においても、単位面積あたりの越波流量が多いほど越波流量水平分布の勾配が大きいたことがわかる。また、実験風速が大きいたほど風速の大きな等風速線に沿ってプロットされている。この図をもとに現地風速と風洞水槽内風速の対応を把握するため、まず等風速線の回帰式を求めることを考えた。幾つかの回帰曲線を比較した結果、4 次の多項式による近似が最も適合した。そこで、現地観測結果の回帰式を風速の関数として以下のように定めた（山城ら、2004）。

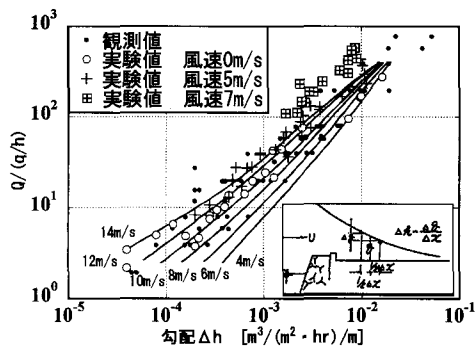


図-6 越波流量分布の勾配に対する風の影響（Fukuda ら (1974) に加筆）

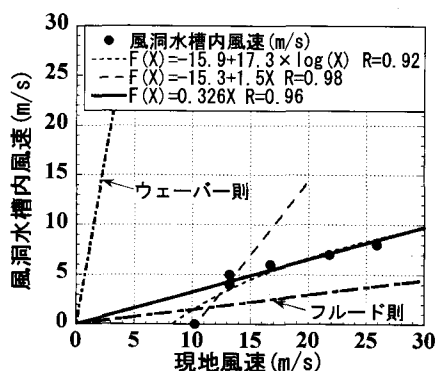


図-7 現地風速と実験風速の対応

$$f(x) = C_0 + C_1 \cdot x + C_2 \cdot x^2 + C_3 \cdot x^3 + C_4 \cdot x^4 \cdots \cdots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} C_0(U) &= -0.446 + 0.0263U + 0.0129U^2 \\ C_1(U) &= 5675 - 370U + 174U^2 \\ C_2(U) &= -1.43 \times 10^6 + 8.37U \times 10^5 - 55866U^2 \\ C_3(U) &= 1.98 \times 10^8 - 7.14U \times 10^7 + 4.18U^2 \times 10^6 \\ C_4(U) &= -5.14 \times 10^9 + 1.74U \times 10^9 - 1.02U^2 \times 10^8 \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (2)$$

この回帰式を、相対自乗誤差が最小となるように実験結果にフィッティングすることで各実験風速と現地風速との対応を取ったものが図-7 である。石田ら (1982) によれば、飛沫の発生と飛散を対象とした実験における風速の設定において、ウェーバー則では過大であり、フルード則では過小であるとしている。本実験結果でも同様の結果となり、図中の実線で示すように、縮尺 1/45 の模型では現地風速の約 1/3 の実験風速で越波流量分布を再現できることがわかる。ただし、前述のとおり、現地風速 10 m/s 以下の範囲では、海底地形や越波の 3 次元性が越波流量分布に大きく影響するため現地風速と実験風速との対応が取れていない。しかしながら、風速が小さい場合には越波流量分布に及ぼす風の影響は微小であること

から、現地風速 10 m/s 以下においても、図-7 に示す実線から類推して、現地風速の約 1/3 の風速が実験風速として対応すると考えても差し支えないものと思われる。

3. 非越波型護岸の越波防止効果に対する風の影響

(1) 実験内容

現地風速と風洞水槽内風速との対応をふまえ、非越波型護岸の越波防止効果に対する風の影響を調べるため水槽実験を行った。実験に用いた模型を図-8 に示す。この模型は、海底勾配が急で、波が砕波することなく直接作用する地形条件を想定しており、潮位や入射波に関しては異常気象時を想定したものである。したがって、極めて厳しい条件であり、非越波型護岸といえども越波を生じ易い状況といえる。なお、模型の縮尺比は、前述した現地風速と風洞水槽内風速との対応を調べた実験と同じく 1/45 としている。想定した現地の条件と実験における条件を表-2 に示す。また、非越波型護岸の断面形状は直立護岸の上部を円弧状にしたもので、上久保ら (1998) が開発している砕波帯より岸側に設置する浅海域を対象とした非越波型護岸とは異なり、大水深の重複波領域を対象とした、山城ら (2003) による非越波型護岸の形状に近い。ただし、円弧部の形状は、上久保ら (1998) を参考に、鉛直波力の低減と飛沫の抑制を考慮して、護岸先端の射出角を 45° とし、円弧部の曲率を護岸先端で 0 となるよう徐々に小さくしている。この条件において造波し、無風時および風速 4 m/s～8 m/s の有風時における

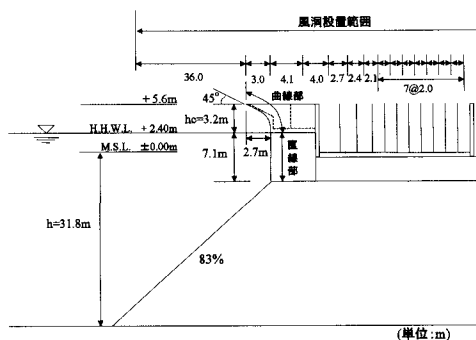


図-8 非越波型護岸の実験模型

表-2 実験条件

	現地	模型
沖波有義波高 H_0	3.28 m	7.3 cm
沖波有義波周期 T_0	6.2 s	0.92 s
沖波有義波長 L_0	59.97 m	133.3 cm
平均水深 h	31.8 m	70.7 cm
潮位上昇量	2.4 m	5.3 cm
天端高 (平均水位上) h_0	5.6 m	12.4 cm

越波流量の分布を非越波型護岸の背後に並べた升により計測した。なお、前述の風速の対応を調べた実験と同じく、風洞は護岸の若干沖側からのみ設置しており、入射波は Bretschneider-光型スペクトルを基に作成し、実験中に水面変動を測定した結果から入反射波分離推定法 (合田ら, 1976) により確定した。また、造波した不規則波に含まれる最低周波数成分が 200 波程度含まれるよう造波開始 1 分後から 10 分間計測を行った。

(2) 越波防止効果に対する風の影響

図-9 に越波流量の分布を示す。図の横軸は護岸前面からの距離であり、縦軸は単位面積あたりの越波流量で、ともに現地換算している。また、図中の凡例には実験風速と図-7 の実線から読み取った現地風速を併せて示している。この図より、風速の増加に伴い、越波流量が護岸背後の全域で増加していることがわかる。図-10 は図-9 の越波流量分布を積分した単位幅当りの越波流量を風速に対して示している。越波流量に対する風の効果は徐々に大きくなり、風速が大きくなると、越波流量が急激に増大する。この越波流量の急激な変化について考察する。図-11 は実験時の様子で、非越波型護岸に比較的大きな波が作用した瞬間を示している。図中にはその実験における現地換算風速と実験時の風速を示している。

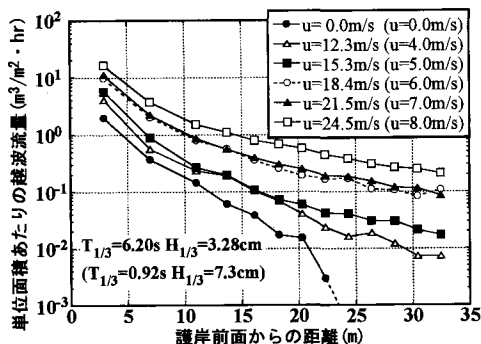


図-9 風による越波流量分布の変化(括弧内は実験における設定値)

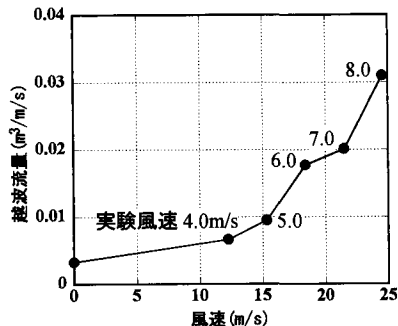


図-10 越波流量と風速の関係

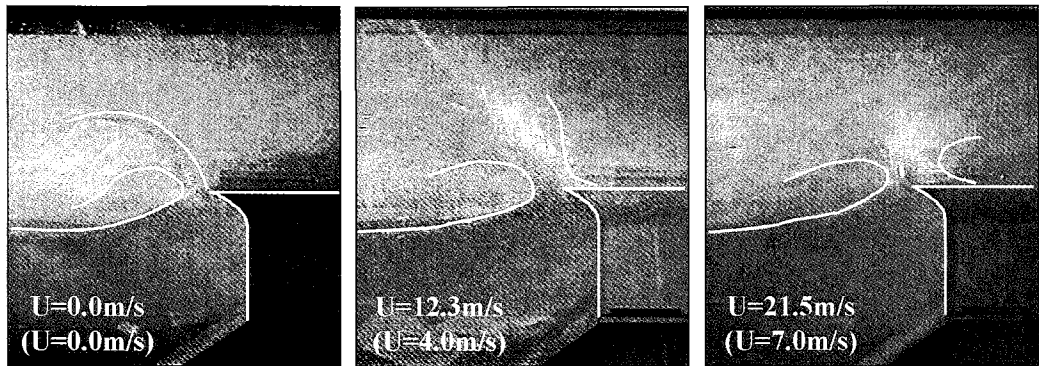


図-11 非越波型護岸により波が返された瞬間の様子

なお、全てのケースで同じ波を作用させており、各図は造波開始約2分後のほぼ同じ瞬間を比較したものである。この図より、来襲波は天端高以上の高い波であるものの、無風時ではほぼ完全に波を冲向きに返しており越波防止効果が充分発揮されていることがわかる。また、風速が小さい条件においても、来襲波の大部分の水塊は冲向きに返され、越波する水塊は少ない。しかしながら、風速が大きくなると、冲向きに高くしかも護岸に沿って膜状で返される水塊が風に押し戻されている。このような状態になると、越波流量が急激に増大する。上久保ら(2003)は浅海域を対象とした非越波型護岸の越波防止効果に対する風の効果を実験的に調べており、風の影響で増大する越波と飛沫を護岸上部に小さなパラベットを設置することで劇的に軽減できることを示している。浅海域を対象とした非越波型護岸は、碎波後の段波状に来襲する水塊を返すもので、冲向きに返された水塊はそれほど上方高くには打ち上がらない。それに比べて、重複波領域を対象とした非越波型護岸では、来襲波は碎波せず、護岸壁面に沿って水塊が下から上に向かって運動するため、図-11に示すように水塊は上方に高く打ち上がり、風の影響を受けやすい。したがって、護岸先端に小さなパラベットを設置する程度では、劇的な効果は期待できず、風の影響を軽減するためには、護岸先端の射出角を小さくし、波をできるだけ低く、しかも大きな射出速度で冲向きに返すことができる断面形状の工夫、および護岸に沿う膜状の打上げを分断して波を返す工夫が必要と考えられる。

4. おわりに

越波を対象とした水槽実験における風洞水槽内の風速と現地風速の対応を調べるため、過去に新潟東港で行わ

れた越波の現地観測の再現実験を行った。その結果、本研究で用いた1/45縮尺模型では、実験風速は現地風速のおよそ1/3程度となることがわかった。この風速の対応をふまえ、強風時を想定し重複波領域における非越波型護岸の越波防止効果に対する風の影響を調べた結果、風速が大きくなると、冲向きに返された水塊が風に押し戻され、越波流量が急激に増大することがわかった。今後は、風による越波流量の増大を防ぐための断面形状の工夫が必要と思われる。

謝辞：本研究を行うにあたり、風洞実験の実施において八代高等専門学校の上久保助手には多くのご指導とご助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 石田 昭・花田昌彦・細井正延 (1982): 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.
- 上久保祐志・入江 功・村上啓介・神田一紀 (1998): 護岸上の完全開放を目的としたフレア型護岸の特性について, テクノーション98論文集, pp. 129-132.
- 上久保祐志・村上啓介・入江 功・吉田明德・山城 賢・竹鼻直人 (2003): 非越波型護岸の飛沫輸送特性とその制御方法の開発, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 646-650.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治 (1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248.
- 山城 賢・吉田明德・久留島暢之・井ノ口洋平・入江 功 (2003): 大水深域における非越波型護岸の開発, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 641-645.
- 山城 賢・吉田明德・橋本裕樹・久留島暢之・入江 功 (2004): 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.
- Fukuda, N., T. Uno and I. Irie (1974): Field Observations of Wave Overtopping of Wave Absorbing Revetment, Coastal Engineering in Japan, Vol. 17, pp. 117-128.