

# 既存直立堤の飛沫低減工法に関する実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDY ON COUNTERMEASURES AGAINST WATER SPRAY CAUSED AT A VERTICAL BREAKWATER

山城 賢<sup>1</sup>・吉田明徳<sup>2</sup>・西井康浩<sup>3</sup>・橋本裕樹<sup>4</sup>・加嶋武志<sup>5</sup>・石堂 濯<sup>6</sup>  
Masaru YAMASHIRO, Akinori YOSHIDA, Yasuhiro NISHII, Hiroki HASHIMOTO,  
Takeshi KASHIMA and Aroh ISHIDOH

<sup>1</sup>正会員 博(工) 九州大学助手 工学研究院環境都市部門 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 九州大学助教授 工学研究院環境都市部門 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

<sup>3</sup>正会員 株式会社三洋コンサルタント (〒750-0067 山口県下関市大和町1-5-7)

<sup>4</sup>正会員 工修 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)

<sup>5</sup>学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

<sup>6</sup>非会員 若築建設株式会社 (〒812-0035 福岡県福岡市博多区中呉服町2-1)

At Waku fishing port, facing to Japan Sea, in Yamaguchi prefecture, people are troubled with heavy water spray caused by sever waves and strong winds in winter at a vertical type breakwater constructed in front of the mouth of the port to protect the inside against incoming waves. To reduce the generation of and the damage from the water spray, three different types of countermeasures were proposed: 1) the construction of an artificial reef some distance ahead of the breakwater, 2) the construction of an offshore breakwater some distance ahead of the breakwater, and 3) the covering of the breakwater with wave dissipating blocks. Experiments using a wave flume with a wind tunnel were conducted to study the effects of suppressing the water spray generation. It was found that the countermeasure No.3 is the most effective means and it can reduce the water spray drastically.

**Key Words :** vertical breakwater, artificial reef, absorbing breakwater, offshore breakwater, wave dissipating blocks, wind tunnel, water spray

### 1. はじめに

従来の防波堤等の設計においては、飛沫の発生や周辺地域への影響は考慮されていない。その理由としては、飛沫が構造物の破損等重大な損害を生じないことや飛沫の発生および輸送過程が複雑であることなどが挙げられる。しかし、実際には沿岸部で生じる飛沫により、海岸道路の交通障害や塩害等の被害を受け快適な生活環境が損なわれるという問題は各地で発生している。山口県下関市にある和久漁港地区も飛沫による塩害が生じている地域であり、そこでは漁港の沖に建設された直立防波堤により港内を静穏に保てるようになったものの、高波と同時に強風が作用する場合に大規模な越波飛沫が生じ、周辺地域の生活環境が悪化している(図-1参照)。本研究では、当該地区で発生する越波飛沫を対象に、3通りの対策工を提案し、風洞装置を有する2次元造波水路

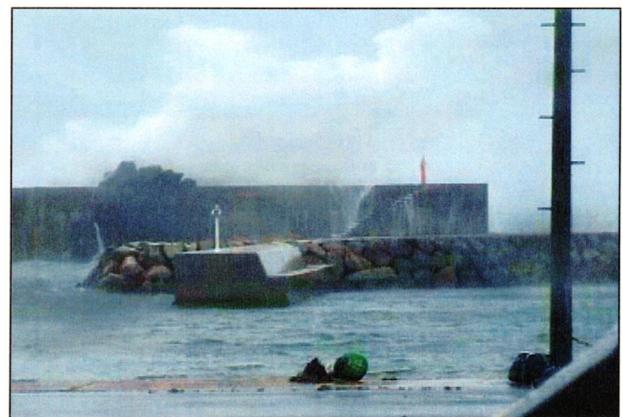


図-1 和久漁港における越波飛沫の発生状況

を用いて波と風を同時に作用させる実験を行って、各対策工による越波飛沫の低減効果を比較検討した。



図 - 2 和久漁港地区の位置および概略

## 2. 和久漁港における越波飛沫の概略

対象地域である和久漁港は山口県下関市にあり、日本海に面している。図 - 2に当該地区の位置および概略を示す。和久漁港は北西方向に港口を有しており、特に冬季風浪時には暴風暴浪に晒される。そのため、港口から約70m沖に直立防波堤（天端高7.1m、堤体幅13.1m、延長140m）が設置され、これにより暴浪を防ぎ港内の静穏度が確保されている。しかしながら、暴浪時には直立堤で図 - 1に示すような大規模な打上げが頻繁に生じ、発生した飛沫や海塩粒子が強風で陸域に運ばれ、地区全体で塩害が生じている。地域住民によれば、40m以上の打上げが生じ、地区の中央を通る国道付近まで飛沫が雨のように降ることもあるとのことであった。

## 3. 対策工法の選定

既存の直立防波堤の断面図を図 - 3(a)に示す。これに対し、対策工法として、来襲波浪の低減効果を期待し、図 - 3(b)から図 - 3(d)に示す消波ブロックによる前面消波、消波ブロックによる離岸堤および近郊に施工実績がある人工リーフを選定した。各対策工の設計においては、設計潮位をH. W. L.+1.80m、入射波を当該海域の30年確率波（沖波波高 $H_o=9.6m$ 、周期 $T=12.7s$ ）として、安定性を検討し、ブロックの必要重量や堤体幅等の諸元を決定した。なお、離岸堤は波浪低減が目的であること、および

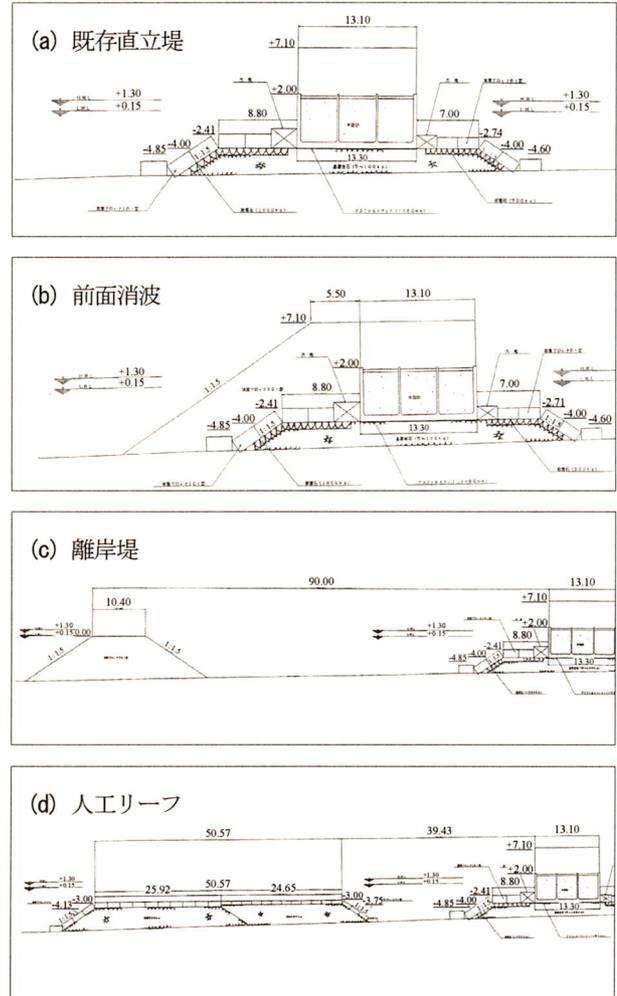


図 - 3 既存直立堤および各対策工の断面図

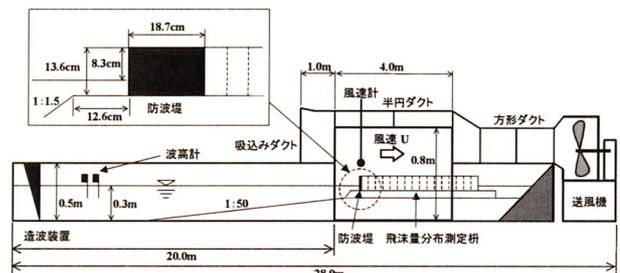


図 - 4 反射吸収式造波風洞水路

大規模になると建設費用が増大することから、天端高をL. W. L.までに抑えている。また、人工リーフの天端水深は-3.15mとしている。

## 4. 水理模型実験

### (1) 実験内容

実験には図 - 4に示す反射吸収式二次元造波風洞水路を用いた。この水路は、越波や飛沫の発生状況がよく観察できるように、一部に広いガラス面（観察部）を有して

いる。水路の末端には送風機が設置されており、空気を吸い込むことによって水路内に風を発生させる。なお風洞は、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に配慮して、防波堤上の風速が安定するための必要最小限の範囲にのみ取り付けた。模型縮尺は1/70とし、沖側の水深は30cmとした。海底勾配は現地の深浅測量図から読み取り1/50とした。入射波は、現地を対象に2004年9月7日の台風18号来襲時における来襲波浪をエネルギー平衡方程式により推算した結果に基づき決定した。この理由は、著者ら自身が台風18号来襲時に現地における越波飛沫の発生状況を観察し、大規模な打上げの発生を確認した事例であることによる。波浪推算結果から、造波水路における沖側一定水深位置に対応する現地の位置での波高と周期を読み取ると有義波高 $H_{1/3}=3.8\text{m}$ 、有義周期 $T_{1/3}=9.2\text{s}$ であったため、これをフルードの相似則により縮小して、 $H_{1/3}=5.41\text{cm}$ 、 $T_{1/3}=1.1\text{s}$ の修正Bretschneider-光易型スペクトルから2波群の不規則波列を作成した。全ての実験において図-4に示す波高計設置位置で水面変動を測定し、図-5に示すように、入射波分離推定法<sup>1)</sup>により入射波の確認を行った。なお、それぞれの波群の造波時間は15分間とし、水路内の波が定常となるまでの造波開始1分後から越波流量の計測を開始した。したがって、各ケースにおいて計30分間造波し、28分間の測定を行っている。ただし、強風作用時には、防波堤直後の柵が造波時間の途中で満水になるケースもあったため、この場合は満水になった時点で実験を終了し、実質の波作用時間で越波流量を算出した。風速は護岸天端上の鉛直断面について計測を行い、断面平均風速を代表値として、3.0m/sから6.0m/sまで1.0m/s間隔で変化させた。越波量(飛沫量)の測定は、防波堤の背後に箱型の柵を並べ、それぞれの柵に溜まった水量から単位面積あたりの越波流量を算出した。これにより防波堤から飛散し風によって陸側に落下する水量の空間分布を計測して、対策工の飛沫低減効果の比較を行った。各対策工の模型については、図-3に示す断面図をもとに、前面消波は40t型の消波ブロックをほぼ1/70に縮尺したブロック模型の乱積みにより作成し、離岸堤も同じブロックで作成した。人工リーフはアクリル板で作成し不透過性の模型とした。

## (2) 再現性の検討

越波実験においては、越波や飛沫に対する風の影響を実験で再現するための風速の相似則が確立されていない。したがって、単に波と風を同時に作用させた実験を行い、越波流量の分布を比較した場合、構造形式による相対比較は可能であるが、実験の結果から現地での効果を推測することができない。

対象地域の和久漁港地区では、2005年12月から2006年2月の冬季風浪来襲時に波浪、風向風速および飛沫量が観測されている。そこで、対策工の効果を比較するための実験に先立ち、現地での越波飛沫について再現実験を行った。なお、飛沫量は図-2に示す●の位置に雨量計を

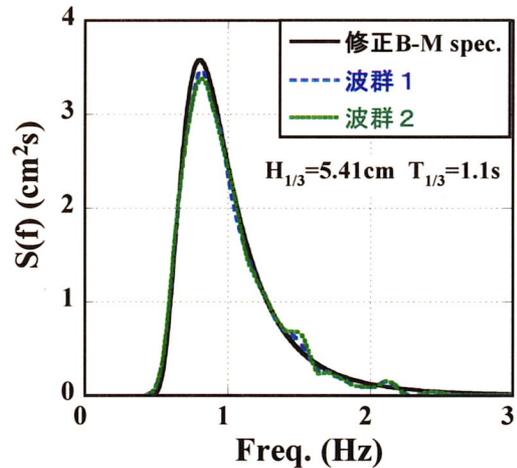


図-5 入射波スペクトル

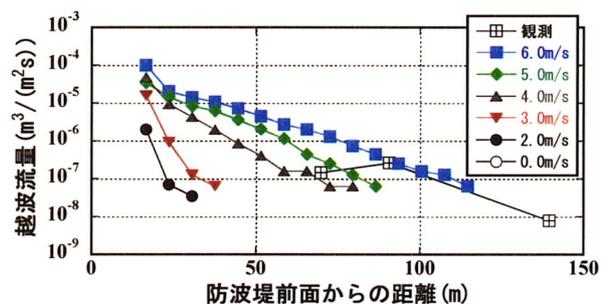


図-6 越波流量の空間分布(再現実験)

設置して計測しており、風向風速は○の位置にある岩の上に設置した風向風速計(約DL+12m)で観測している。また、入射波は防波堤の沖約200mの反射波が影響しない位置に海底設置型の波高計を設置して観測している。再現実験の対象とした観測結果は2005年12月22日の冬季風浪が発達した時期のものであり、当日の波浪条件は有義波高 $H_{1/3}=2.2\text{m}$ 、有義周期 $T_{1/3}=7.3\text{s}$ 、平均風速は $9.6\text{m/s}$ で風向はNWであった。防波堤に垂直方向の風速成分は $7.9\text{m/s}$ である。この条件から、実験における入射波は観測結果をそのままフルード則により縮小有義波高 $H_{1/3}=3.2\text{cm}$ 、有義周期 $T_{1/3}=0.88\text{s}$ と設定して30分間連続して造波した。風速は無風に加え、2.0m/sから6.0m/sまで1.0m/s間隔で変化させた。その他の実験条件は前述のとおりである。図-6は越波流量の水平分布について、実験結果と観測結果を比較したものである。図の縦軸は越波流量を対数表示しており、横軸は防波堤前面からの距離で、ともに現地換算をしている。なお、現地観測結果は防波堤から観測位置までの垂線の距離で整理している。ここでの越波流量とは、防波堤により打ち上がった水塊が分裂し、飛沫となって風に運ばれ落下した水量を意味している。したがって、本実験では、ある地点に落下する水量を再現することを試みており、個々の飛沫の粒径や挙動を再現するものではない。図より、越波流量の水平分布は、風速が増加するにつれて勾配が緩やかになり、防波堤から離れた位置に落下する水量が増加していることが分かる。

なお、実験では水量の計量限界が0.1g程度であり、それ以下の微量な分布は不明なため $10^{-8}(\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s}))$ 以下のプロットはない。現地観測結果をみると実験とは異なった分布をしており、一見すると実験風速6.0m/sの結果とよく一致しているようにみえる。しかしながら、直立堤から約90mの位置と約140mの位置で得られた現地観測結果には直立防波堤で生じた飛沫以外に、雨量計を設置した港口の防波堤で発生した飛沫が多く含まれているため実験結果と直接には比較できない。これに対し、直立堤から約70mの位置で得られた観測結果は、ほぼ純粋に直立堤で生じた飛沫のみを計測しており、他の2点に比べて信頼性が高いデータといえる。したがって、ただ1点のみの比較となるが、この観測結果と実験結果を比較すると、実験風速4.0m/s～5.0m/sの実験結果と対応していることがわかる。現地における平均風速は、防波堤に垂直な風速成分で7.9m/sであったことから、現地風速は実験風速の1.6～2.0倍ということになる。著者ら<sup>2)</sup>は以前に、消波護岸における越波を対象に、現地観測結果と風洞水路での実験結果との比較から越波実験における現地風速と実験風速との対応について検討した。その結果、1/45縮尺実験においては、現地の観測結果を再現するために、概ね1/3程度の風速を設定すればよいという知見を得た。しかし、図-6の結果では、より小さな1/70縮尺モデルによる実験で大きな風速を設定しなければならないということになる。この矛盾について原因を考察すると、まず、構造形式の違いが考えられる。以前に行った検討では消波護岸が対象であったが、本研究では直立防波堤が対象である。構造形式の違いが越波実験における現地風速と実験風速の対応に影響する程度は不明であるが、消波護岸と直立堤では飛沫の発生メカニズムが異なるため現地風速と実験風速の対応に何らかの差異があるものと思われる。また、本再現実験そのものの精度も大きく影響している。本再現実験で対象とした現地観測結果は、防波堤から70m以上離れた位置で得られたものであり、そもそも越波流量が $10^{-7}(\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s}))$ 程度と非常に小さい。実験では0.1gの水量(水滴の大きさによるが数滴程度の量)が計量可能な限界であるため、誤差が生じやすい微量な範囲で比較していることになる。その他、現地における現象の3次元性や越波実験の結果そのものが有する変動性なども影響していると考えられる。このように実験結果と現地観測結果との比較においては、考慮すべき点が多々あるが、本研究における以後の検討においては、図-6で示した結果を目安とする。

## 5. 飛沫低減効果の比較

### (1) 越波流量分布の比較

図-7に越波流量の水平分布を示す。縦軸は越波流量を対数表示しており、横軸は防波堤前面からの距離で、ともに現地換算をしている。図中には実験で作用させた風速を示している。また、この結果は2波群の実験結果の

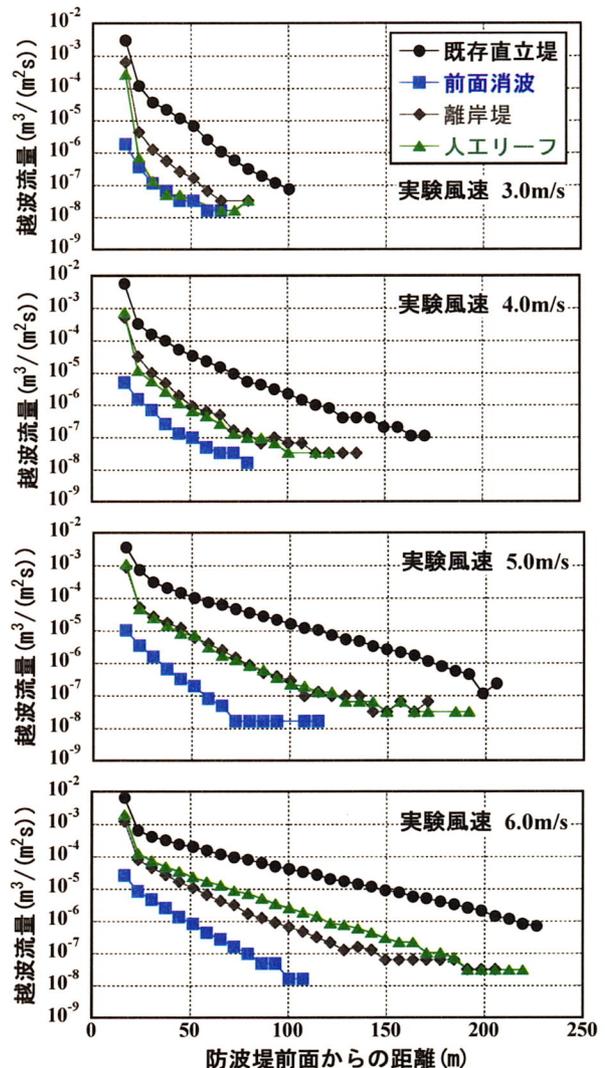


図-7 越波流量の空間分布 (効果比較実験)

平均値である。

図の越波流量は前述のとおり計量柵により集水した水量を単位面積あたりの越波流量として整理したものであるため、防波堤直背後の越波流量には越流により流入した越波水が含まれているが、それ以外の柵では風により輸送された越波水、つまり飛沫として飛来した水量を計測していることになる。したがって、防波堤直背後の越波流量が突出しており、その背後では急激に減少している。ただし、風速が大きくなるにつれ飛沫量は増加し、防波堤背後の広い範囲に飛沫が拡散している。本研究は、飛沫対策が主たる目的であるため、防波堤背後に輸送される飛沫量に着目すると、いずれの風速のケースにおいても既存直立堤に比べて対策工を施した場合には飛沫量が減少している。また、対策工による飛沫の低減効果を比較すると、風速が小さい場合には対策工による顕著な差は見られないが、風速が大きくなるにつれ飛沫低減効果に明確な差が現れている。最も効果が高い対策工は前面消波であり、例えば実験風速6.0m/s(図-6の結果から現地風速では約10～12m/sと推測される)の場合で既存直立堤と比較すると、防波堤から100mの位置での越波流

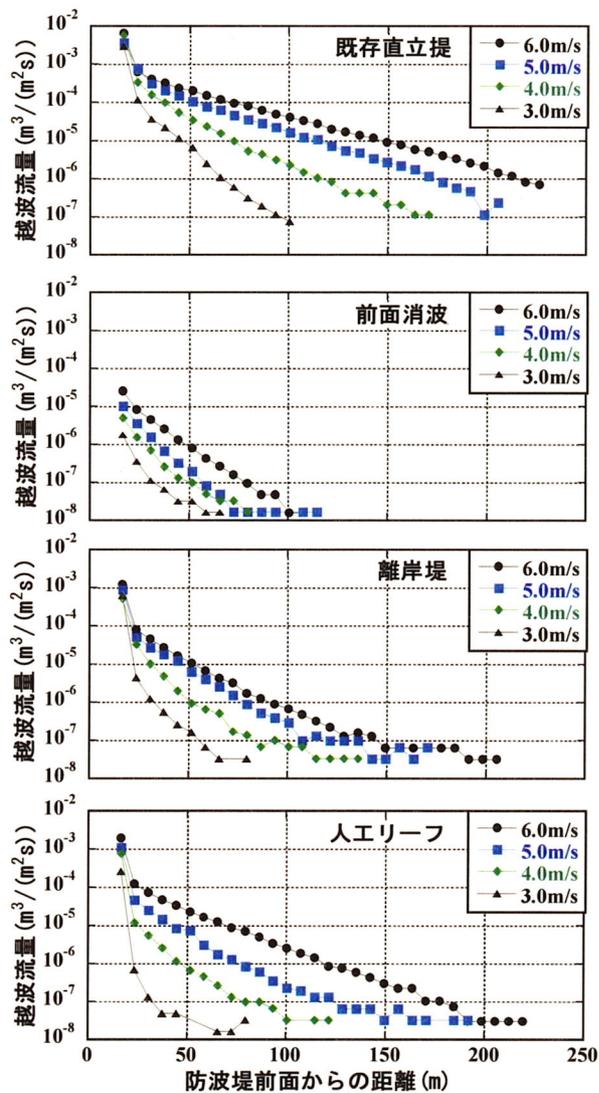


図-8 各対策工の越波流量空間分布の風速による変化

量(飛沫量)が1/1000以下になっている。ついで、人工リーフと離岸堤が同程度の低減効果を示している。人工リーフと離岸堤の結果がほぼ同程度であった理由は、本研究における離岸堤は天端高を水面以下に設定したため、潜堤として機能し人工リーフと同程度の波高低減効果を有していたことによると考えられる。

図-8は図-7に示した実験結果を対策工ごとの越波流量の水平分布として整理したものである。既存直立堤では、防波堤直背後の越波流量は無風時においても越流により流れ込む水量が卓越しているため、風による影響は比較的少ない。しかし、より背後域では、風の影響が強くなり、風が強くなるにつれ越波流量分布の勾配が緩やかになり、飛沫量が大幅に増大していることがわかる。前面消波の場合も、風速が大きくなるにつれ飛沫量は増大しているが、直立堤に比べると風の影響は小さい。特に越波流量の分布の勾配はそれほど変化していないようである。離岸堤および人工リーフについては、既存直立堤に比べて増加の程度は小さいものの、風の影響により飛沫量が増大し、広い範囲に飛沫が輸送されている。

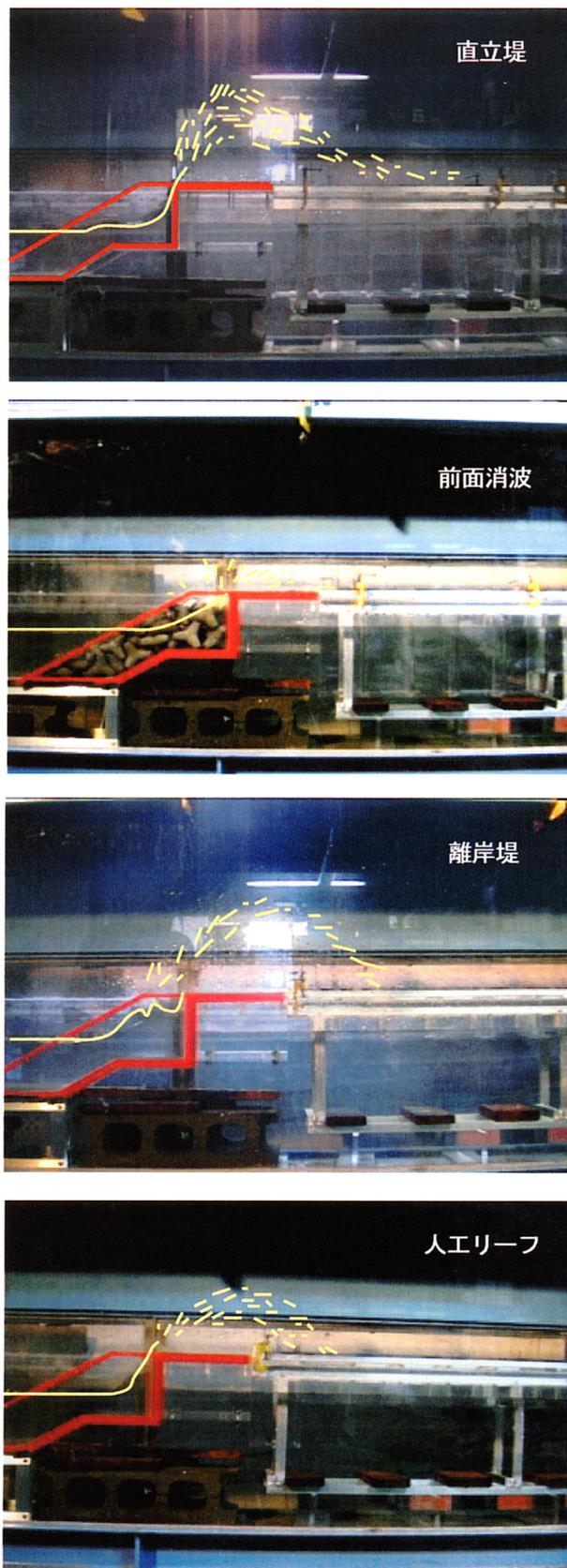


図-9 飛沫発生時の様子

## (2) 飛沫発生メカニズムに関する考察

実験時の観察から各対策工における飛沫発生メカニ

ズムを考察し、飛沫低減効果に差が生じる理由について検討する。図-9に各対策工における打上げの様子を示す。図はいずれの工法においても同一の波が作用した瞬間であり、風速は6.0m/sである。既存直立堤での飛沫の発生は直立堤前面で生じる打上げが最も大きな原因となる。この打ち上がった水塊が強風により細粒化し飛沫となり、さらに風によって防波堤背後の広い範囲に輸送される。現地では、打上げに伴う飛沫の発生以外にも強風により海面から直接飛沫が発生する状況が見られるが、打上げに起因する飛沫量に比べれば微量といえる。前面消波では天端まで設置した消波ブロックにより、波が直立堤に直接作用することがなく、また、流体運動が妨げられるため、打上げはほとんど生じなかった。したがって、飛沫は波がブロックに衝突した際にわずかに発生する程度であり、飛沫の発生量そのものが少ないために背後域へ輸送される量も非常に少ない結果となった。なお、消波ブロックが直立堤の中ほどの高さまでしか設置されず、直立壁が露出する場合には、露出した直立壁に波が作用して打上げが生じ、飛沫量が増大する様子が見られた。離岸堤と人工リーフについては、直立堤に作用する波の波高低減が目的であり、入射波が直接直立堤に作用する場合に比べて打上げ高が低減でき、それに伴って発生する飛沫量も減少している。しかしながら、直立壁に波が作用することには変わりはないため、波高は小さくとも、前面消波に比べると飛沫量は格段に多い。なお、離岸堤の天端が海面よりもある程度高ければ、より効果的であったと推測される。

### (3) 越波流量の比較

図-10に単位幅あたりの越波流量（前述の越波流量分布の積分値）の対策工による比較を示す。図中には、直立堤および消波堤について越波流量算定図表より読み取った越波流量を併せて示している。この図より、既存直立堤の越波流量がもっとも大きく、次いで、離岸堤と人工リーフが概ね同程度であり、前面消波は圧倒的に少ないことが分かる。また、いずれの構造形式においても風速の増加に伴い越波流量が増加しており、これは無風条件における実験と強風時を想定した実験では、越波流量に有意な差が生じることを示唆するもので、越波流量への風の影響については詳細な検討が必要である。

## 6. おわりに

本研究では、和久漁港地区における飛沫発生状況を風洞水槽実験により再現し、提案した3通りの対策工について飛沫低減効果を実験的に把握した。その結果、直立

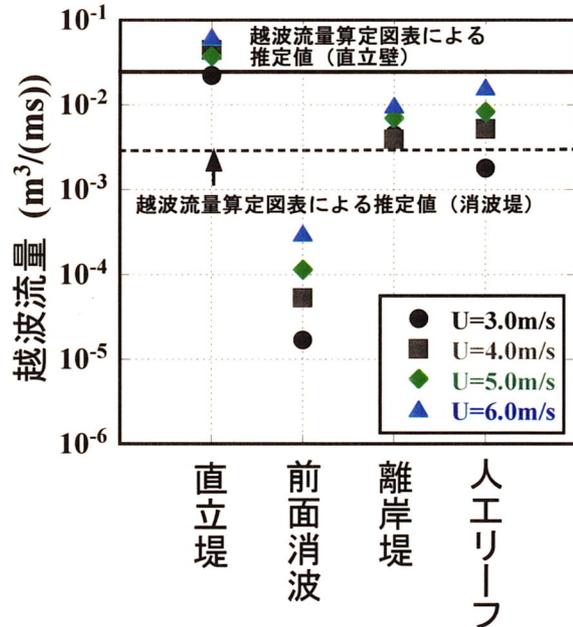


図-10 単位幅当たりの越波流量の比較

堤の沖にリーフ等を設置して直立堤に作用する波高を低減しても、壁面での飛沫の発生を抑えるのは難しいこと、一方、消波ブロックによる前面消波は飛沫低減効果が高く、越波流量そのものも大幅に低減できることを示した。これは、消波ブロックを直立堤前面に設置することで、波が直立堤に直接作用することを妨げると同時にブロックの層で波エネルギーを吸収して、大量の飛沫発生に繋がる波の打上げを防ぐことによる。ただし、直立壁面に露出部があると、そこで飛沫が発生することから、飛沫抑制の観点からは消波ブロックによる十分な高さの被覆が必要である。また前面消波による大幅な飛沫低減効果により、和久地区全域に塩害をもたらす海塩粒子の低減も期待される。

謝辞：本研究を実施するにあたり、下関市豊北総合支所水産振興課より貴重な資料を提供して頂きました。また実験データの整理等においては修士課程の小野貴也君に協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.