

大水深非越波型護岸における飛沫対策の検討

山城 賢* ・ 吉田明德** ・ 吉岡孝通***
橋本裕樹**** ・ 森屋陽一*****

著者らは、沖合の人工島護岸のような大水深域護岸を対象に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、強風が作用する場合には飛沫が発生する。本研究では、まず、上久保ら (2003) によるフレア型護岸におけるパラベットの用いた飛沫対策の効果について実験的に検討したが、大水深域を対象とした本非越波型護岸では、パラベットによる飛沫低減効果を期待できないことがわかった。ついで、非越波型護岸により波を沖向きに返す際に、水の膜に切れ目を入れることで飛沫の発生量を抑える対策工を考案し、模型を試作して実験を行ったところ、飛沫対策としての可能性を確認できた。

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 (例えば、山城ら, 2003)。この護岸は、通常の直立護岸に比べ高い越波防止機能を有していることから、低天端を達成し、かつ護岸上を安全に開放できるという利点がある。しかし、通常暴浪時には同時に強風が作用するため、非越波型護岸により沖向き上方に返された水塊は風を受けて飛沫となり護岸背後の陸域に輸送される。本研究では、上久保ら (2003) による浅海域を対象とした非越波型護岸 (フレア型護岸) の飛沫対策を参考に、著者らが対象とする大水深域非越波型護岸における上部直立壁 (パラベット) の飛沫の低減効果を水槽実験により把握し、ついで非越波型護岸により返された水塊が風を受けて飛沫を生じる過程の考察から新たな飛沫対策を考案し、その効果について水槽実験により検証を行った。

2. 越波に対する風の影響

(1) 実験内容

本研究では九州のある現地護岸の条件をもとに、非越波型護岸を設計した場合を想定し実験を行った。地形条件は海底勾配が急で、波が碎波することなく直接護岸に作用するため、陸域に接する護岸ではあるが著者らが開発している大水深域非越波型護岸の適用を想定し得る条

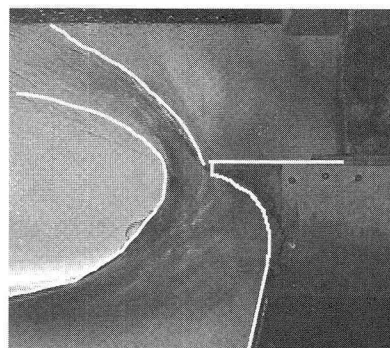


図-1 非越波型護岸

件といえる。使用した装置は図-2 に示す反射吸収式二次元造波風洞水槽で、非越波型護岸の模型は現地の条件を考慮して直線部の上に曲線部をもった形状とし、模型縮尺は1/45とした。曲線部の形状については、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、曲線部の曲率を護岸先端で0となるように徐々に小さくしている。実験条件は表-1 に示す通りで、入射波や潮位に関しては異常気象時を想定しており、きわめて厳しい条件であるため、非越波型護岸といえども越波し易い状況になっている。なお、入射波については修正 Bretschneider-光易型スペクトルをもとに不規則波を作成し、図-2 に示す位置で水面変動を測定して入射波分離推定法 (合田ら, 1976) により所定の入射波が造波できていることを確認した。また、越波流量の測定は箱型の枡を護岸の背後に並べて、造波終了後の枡に溜まった水量から単位面積あたりの越波流量を求めた。なお、水槽の幅は60 cm であるが、水槽の幅方向の水面変動が越波流量の計測に影響することを極力避けるため、越波は中央の10 cm の範囲でのみで集水した。越波の計測時間については、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に11分間とし、水槽内が定常となる造波開始1分後から越波量の計測を行った。実験風速は護岸上の

* 正 会 員 博(工) 九州大学助手 大学院工学研究院環境都市部門

** 正 会 員 工博 九州大学助教授 大学院工学研究院環境都市部門

*** 大分県 別府土木事務所 河港砂防課

**** 学生会員 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻

***** 正 会 員 工博 五洋建設株式会社 技術研究所

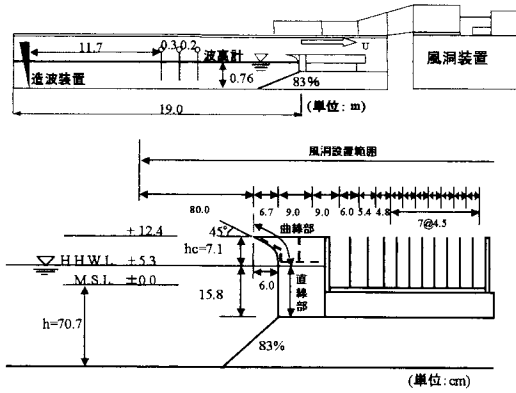


図-2 実験装置

表-1 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 Δh	2.4 m	5.3 cm
天端高 (平均水位上) hc	5.6 m	12.4 cm

断面平均風速で代表し、無風および4.0 m/s～8.0 m/sを1.0 m/s 間隔で変化させた。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若干沖側あたりまでに限定して取り付けた。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調べることを目的としており、風速を変化させた場合においても、風が非越波型護岸により沖向きに返された水塊のみに影響し、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

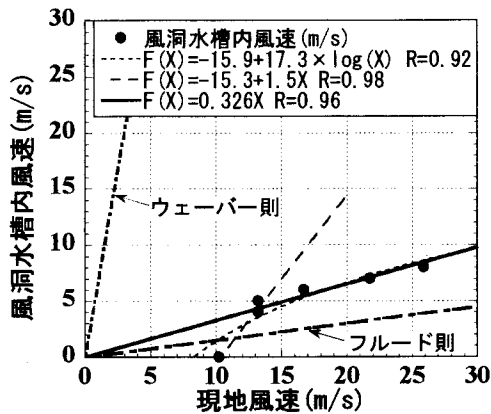


図-3 現地風速と実験風速の対応

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。ところで、これまで越波を対象とした風洞実験において、現地と風洞水槽内の風速の対応に関しては風速の相似則が不明という問題があった。著者らは、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風速と風洞水槽内の風速の対応を調べ、図-3に示すように1/45縮尺模型では風洞水槽内風速は現地風速のおよそ1/3に対応するという結論を得た(山城ら, 2004)。本研究においても、風速についてはこの対応を目安とした。

(2) 風による越波流量の増加

図-4は無風時および実験風速8.0 m/sの場合について越波流量の分布を天端高が同じ非越波型護岸と直立護岸とで比較したものである。横軸は護岸前面からの距離、縦軸は単位面積あたりの越波流量を対数表示しており、ともに現地換算している。また、凡例には実験風速に対応した現地風速を括弧内に示している。無風時では護岸の直背後で直立護岸の越波流量が非越波型護岸に比べ格段に多い。非越波型護岸と直立護岸との越波流量の差について図-5に示す実験時の様子から考察すると、無風時においては図-5左図にみられるように、非越波型護岸の場合は天端高以上の大きな波が作用しても、護岸の曲面で波をほぼ完全に沖向きに返しているため越波はほとんど生じない。これに対し、直立護岸では波により水位が護岸の天端高を越えると水塊が越流して護岸直背後の柵に流れ込むため護岸直背後の越波流量に大きな差が生じる。一方、暴風時を想定した実験風速8.0 m/s(現地風速で24.5 m/sを想定)の場合は、護岸前面から6 m(現地換算)までの範囲では直立護岸の越波流量が多いのに対し、それ以降では非越波型護岸の越波流量が多い。これは図-5右図にみられるように、直立護岸では水塊が越流するために風の影響が小さく、護岸から離れ

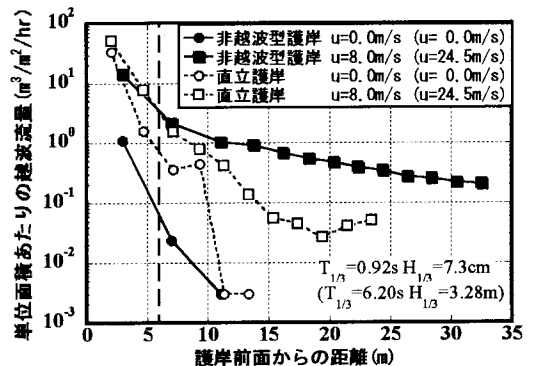


図-4 越波流量の水平分布
(非越波型護岸と直立護岸の比較)



図-5 打ち上げが生じた瞬間の様子

た位置へ越波水は運ばれない。しかし、非越波型護岸では波を冲向き上方に、また護岸に沿って膜状で返すために風の影響を強く受け、多量の飛沫が生じ護岸から離れた位置まで飛沫が運ばれるためである。

3. 上部直立壁による飛沫対策

(1) 非越波型護岸における飛沫対策

非越波型護岸は直立護岸に比べ越波流量そのものは強風時においても相当に低減できるものの、風速の増加に伴い飛沫の発生量も著しく増加することを確認した。上久保ら(2003)によれば浅海域を対象とした非越波型護岸(フレア型護岸)が碎波帯内に設置された場合は、上部直立壁(パラペット)を設置することで飛沫量を大幅に低減でき、沖浜帯に設置された場合には直立護岸と同程度の飛沫量に抑えることができるとしている。そこで著者らが対象とする大水深域非越波型護岸の先端にパラペットを設置した場合について同様の実験を行い、パラペットによる飛沫低減効果を調べた。入射波や護岸模型等の実験条件は先の実験と同じとし、風速を無風、4.0 m/s および 8.0 m/s の3通り、パラペットの高さ hw については現実的な高さを考慮し、 $hw=1$ cm, 2 cm, 3 cm (現地換算45, 90, 135 cm) と変化させて実験を行った。

(2) パラペットによる飛沫の低減効果

図-6 にパラペットを設置した場合の越波流量の水平分布を示す。図より風速によらずパラペットを設置することにより、護岸直背後の越波流量が減少していることがわかる。図-7 は実験風速 8.0 m/s においてパラペットがない場合と高さ 3 cm のパラペットを設置した場合の打ち上げが生じたときの様子である。この図からわかるように、非越波型護岸といえども、曲線部で沖に返しきれないほどの大きな波が作用した際には護岸上を水塊が越流するため、パラペットがない場合は越流した水塊が護岸直背後の柵に流れ込む。しかし、パラペットを設置した場合は、パラペットが水塊の流入を防ぐために護

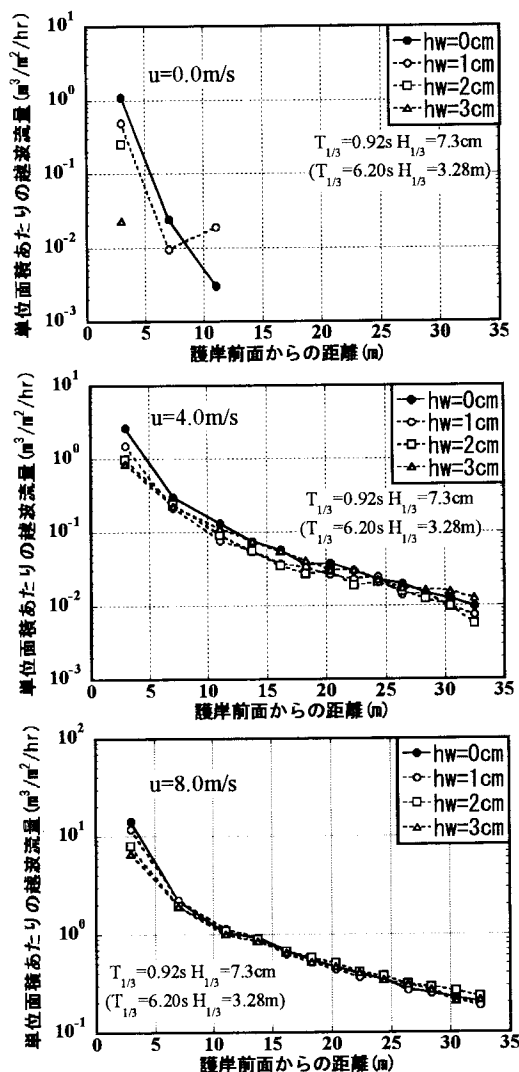


図-6 パラペットによる越波流量水平分布の変化

岸直背後の越波流量が減少する。一方、越波流量の水平分布(図-6)を全体的に比較すると、無風時では越波流



図-7 パラベットによる飛沫低減効果の確認実験の様子

量が護岸背後に広く分布しておらず、パラベットにより越波流量の総量が顕著に減少しているが、実験風速4.0 m/s および8.0 m/s の場合には、パラベットにより護岸直背後の越波流量は減少しているものの、護岸背後の広い範囲にわたって、パラベットの高さによらず同じように越波流量が分布している。これは図-7 にみられるように、パラベットの有無に関わらず、護岸上部で多量の飛沫が発生し風により護岸背後に運ばれているためである。つまり、パラベットを設置することで護岸直背後への水塊の越流を低減し越波流量そのものは減少するものの、パラベットにより飛沫の発生および輸送を防ぐことは難しく、パラベットによる飛沫の低減効果は低いと思われる。浅海域を対象としたフレア型護岸が碎波帯内に設置された場合にはパラベットを設置することで飛沫量を大幅に低減できることが確認されているが、これはフレア型護岸では碎波後の段波状に（水平に）来襲する波を曲面で冲向きに返すために水塊がそれほど高く打ち上がらないことによる。これに対し、本研究における大水深域非越波型護岸では波が碎波せずに直接作用し、護岸前面の流体は護岸に沿って鉛直上向きに勢いよく飛び出し、飛沫を生じながら高く打ち上がるため、パラベットは飛沫対策として有効に機能しない。

4. 新たな飛沫対策の検討

(1) 飛沫対策工の提案

非越波型護岸では波が薄い膜状になって沖側上方に高く返され、その水の膜に風を受けることによって飛沫が発生する。この飛沫発生メカニズムを考慮し、新たな飛沫対策として図-8 に示す対策工（以後、導水工と呼ぶ）を考案した。この飛沫対策は導水工を非越波型護岸の曲面に一定の間隔で設置することにより、波が冲向きに返される際に水の膜に切れ目を作ると同時に、水塊を集約して返すことで風への抵抗を増して飛沫量を減少させるというものである。現時点では導水工の形状や大きさおよび設置位置などについて最適条件は不明なため、図に示すような底面が一辺2 cm の正三角形とした三角錐の形状のものをゴム素材で作成して、その効果を実験

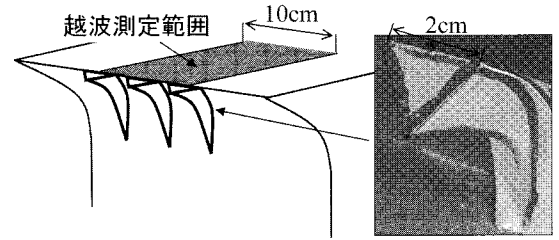


図-8 導水工による飛沫対策の概略

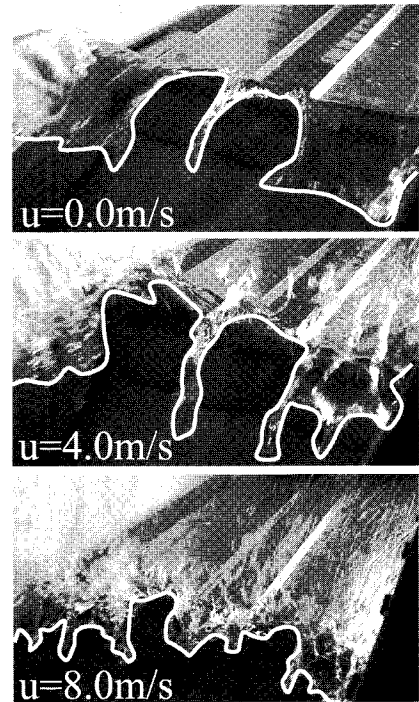


図-9 導水工による飛沫低減効果の確認実験の様子

により検証した。実験においては、護岸前面に沿う越波計測範囲の10 cm に2つおよび3つ等間隔に取り付け、それぞれのケースについて、導水工の上端を護岸天端に合わせた場合と、天端から1 cm 下に取り付けた場合について、越波流量の分布を計測した。入射波等その他の実験条件は、これまでの実験と同じである。

(2) 導水工の飛沫低減効果

図-9 は導水工を2つ天端高に合わせて設置した場合における無風時および風速4.0 m/s, 8.0 m/s の実験の様子である。当初の想定どおり、多少風がある状況でも導水工により水の膜に切れ目が生じていることがわかる。しかし、暴風時を想定した風速8.0 m/s の場合については、水しぶきが激しく飛び散っており、実験の観察からは導水工の効果を把握できない。図-10 は護岸背後における単位面積あたりの越波流量の空間分布である。図より、無風時においては、そもそも越波流量は少なく、飛

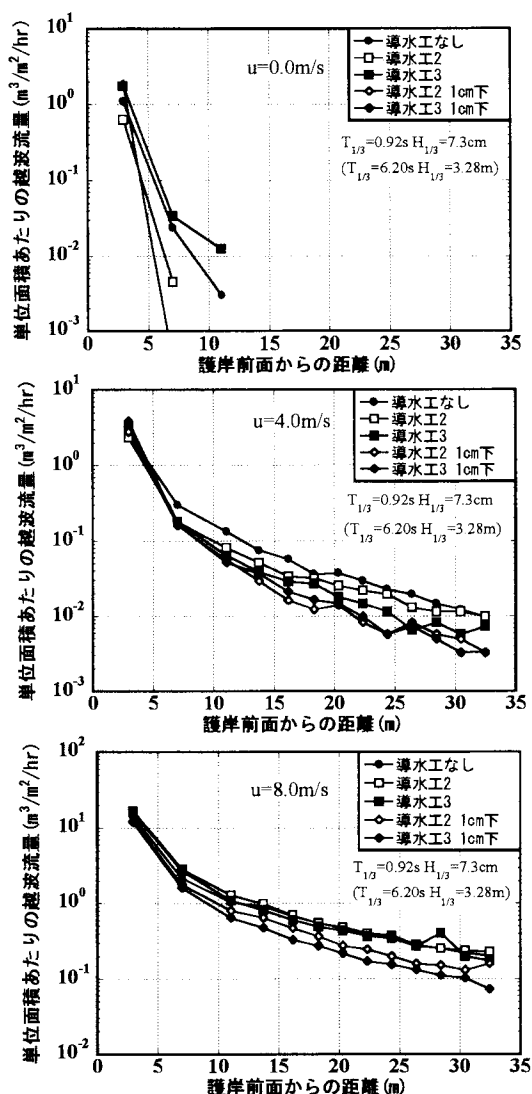


図-10 越波流量分布の比較

沫もほとんど発生しないため、導水工による飛沫低減効果は認められない。風速4.0 m/s および8.0 m/s においては、導水工を設置した場合に、護岸背後の広い範囲で越波流量が減少しており、これは導水工によって飛沫量が減少したことを示している。風速4.0 m/s の場合についてみると、導水工を護岸天端から1 cm 下に設置したケースで飛沫の低減効果が高く、護岸背後の広い範囲にわたって、最大で7割程度飛沫量が減少している。風速8.0 m/s の場合では、導水工を天端に合わせて設置した場合にはほとんど効果がみられないが、天端から1 cm 下に設置したケースでは効果が明らかに認められ、導水工の設置数は2つより3つと多い方が効果的であり、最大で6割程度飛沫量が減少している。これらのことから、

新たに考案した飛沫対策により飛沫量が減少していることを確認できる。なお、導水工を護岸天端に合わせるのではなく、天端から若干下の位置に設置することが効果的である理由については、現時点で明らかではなく、今後さらに幾つかのケースについて実験を行い検討する必要がある。

5. おわりに

強風時においても非越波型護岸は直立護岸に比べて越波防止効果が高いものの、非越波型護岸では風速が大きくなるにつれ、風の影響により越波流量が増加し飛沫が広範囲に分布する。この護岸背後への飛沫輸送を低減するため、浅海域における非越波型護岸であるフレア型護岸で検討された上部直立壁（パラベット）による飛沫対策を参考に、パラベットによる飛沫の低減効果について実験的に検討した。その結果、大水深域非越波型護岸では、波が碎波せずに直接作用し、非越波型護岸により波が薄い膜状になって沖側上方に高く返され、その水の膜に風を受けることによって飛沫が発生するため、パラベットは飛沫対策として機能せず、碎波帯内に設置されるフレア型護岸の場合ほどの効果は期待できないことがわかった。さらに、薄い水の膜に風を受けて飛沫が発生する過程に着目し、水の膜に切れ目を入れると同時に、水塊を集約して冲向きに返すことで飛沫量の低減を図る導水工を考案し、その効果について検証した。その結果、非越波型護岸の飛沫対策として導水工が有効な手段となり得ることを確認した。ただし、現時点では、導水工の形状、大きさ、配置法などは不明なため、今後の詳細な検討が必要である。

謝辞：本研究における風洞実験を行うにあたり、八代工業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

- 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, テクノフォーシオン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.