

上部直立壁を設置した非越波型護岸の 飛沫および越波の制御特性

REDUCTION OF WAVE OVERTOPPING AND WATER SPRAY ON NON-WAVE-OVERTOPPING TYPE SEAWALL WITH USING VERTICAL WALL

上久保祐志¹・村上啓介²・入江功³・竹鼻直人⁴・早坂健誠⁵・溝上浩平⁵
Yuji KAMIKUBO, Keisuke MURAKAMI, Isao IRIE, Naoto TAKEHANA, Kensei HAYASAKA
and Kouhei MIZOUE

¹正会員 工博 八代工業高等専門学校助手 土木建築工学科 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

²正会員 工博 宮崎大学助教授 工学部 (〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西1-1)

³正会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究科 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴正会員 工修 (株)神戸製鋼所 (〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)

⁵学生員 八代工業高等専門学校 土木建築工学科 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

Authors proposed a non-wave overtopping type seawall (refer as Flaring Shaped Seawall : FSS) with a deep circular cross section. Through a series of studies, they had already confirmed that the FSS satisfies a non-wave overtopping condition with an extremely lower crown height in comparison with a conventional wave absorbing upright seawall. In this study, the reduction effects of both wave overtopping and water spray by the FSS were investigated through hydraulic experiments. And then, in order to reduce the water spray on the FSS effectively, we proposed a vertical wall attached at the tip of the FSS as a technical device. It was confirmed that the vertical wall effectively reduces the spray on the FSS, and the quantity of spray becomes smaller than that on the upright seawall.

Key Words : Non-wave overtopping type seawall, Wave overtopping, Water spray transportation, Vertical wall

1. はじめに

近年, 沿岸域において多様なウォーターフロント開発が進められている。海岸におけるアメニティ向上の要請から, 護岸天端を低くして景観を妨げないこと, および, 護岸上を散策・魚釣りといったレクリエーションのために親水空間として開放することが望まれている。護岸上を安全に開放するためには越波の阻止が重要な課題となるが, 従来の直立消波護岸ではある程度の越波を許容し, 護岸上および護岸背後に排水施設を設けて施工しているために, 護岸上を一般の利用のために安全に開放し, 背後の生命・財産を確実に防護することはできない。そこで, 著者は, 根本的に越波量をゼロとし, 護岸上を安全に開放できる護岸の一つとして円弧状の護岸断面を有したフレア型護岸(図-1参照)を提案した。図-2に示すように, 従来の直立消波護岸では, 護岸に作用した水塊の運動ベクトルは岸向きを向いているため越波を生じ易くなるが, このフレア型護岸は前傾

した曲断面を有し, 護岸に作用した水塊の運動ベクトルを強制的に冲向きに変えさせるため, 越波が生じにくくなる。そのため, 国土の海側防護限界としての「計画防護線」の陸側に設置計画が可能で, コストおよび海岸へのインパクトを大幅に軽減できる。つまり, フレア型護岸のメリットとしては, 越波を

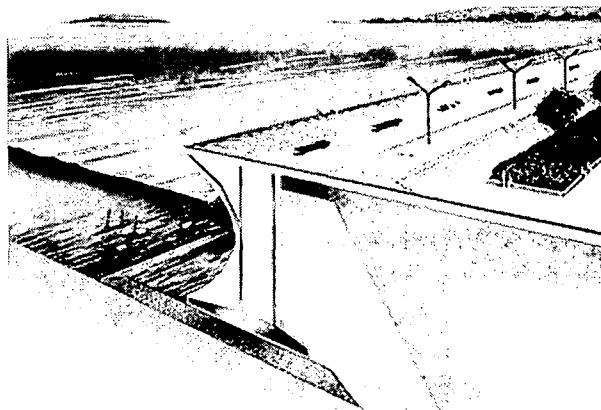


図-1 フレア型護岸

生じさせないことにより、護岸上を安全に開放してアメンティ性、親水性を高めることができ、また、護岸直背後に、空港や発電プラント等の高整備水準施設を建設可能であること等が挙げられる。

現在までに、フレア型護岸に関して種々の実験を行って基本的な性能を明らかにしてきた¹⁾²⁾³⁾。その結果、直立消波護岸よりも格段に越波が生じにくく、また、消波工を組み合わせることで十分施工可能な範囲まで波圧を低減でき、構造的安定性も確保できることがわかった。一方、実際に施工される際には、現地では護岸沖側から絶えず風が吹き寄せているため、フレア型護岸に波が作用した際に発生する飛沫が護岸背後に輸送されて塩害等の被害を引き起こす恐れがある。このため、実際にどの程度の飛沫が発生するかを把握することは現地に構造物を施工する際に重要な問題となる。フレア型護岸にとって、飛沫の発生が大きな問題となるようであれば、飛沫の発生を制御するために護岸断面を改良する必要がある。特に、護岸上の人や物が海へ転落するのを防ぐことを含めて、柵として護岸前部に直立壁を設置することが考えられる。

本研究では、フレア型護岸の越波制御機能と飛沫輸送特性を水理模型実験により検討し、さらに、飛沫量を効果的に低減させる方法として、護岸上部に直立壁（上部直立壁）を設置することを提案し、上部直立壁を設置したフレア型護岸の越波および飛沫の制御特性を確認する。

2. フレア型護岸の基本的性能

(1) 越波制御機能

フレア型護岸の越波制御機能に関して、水理模型実験を行ってその基本的特性を把握した。

実験は、2次元造波水槽（長さ20.0m、高さ1.2m、奥行き0.6m、沖水深 $h_0=0.85\text{m}$ ）内に1/20の不透過傾斜海浜を設置し、図-3に示すフレア型護岸と直立護岸（護岸高さ $B=22.5\text{cm}$ ）について、規則波を作用させて行った。実験では沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.036$ のもとで入射波の波高を $H_0=6.0\text{cm}\sim 14.0\text{cm}$ の範囲で変化させ、設置水深 h を種々変えた場合に越波が生じない最小の天端高さ h_c （限界天端高さ）を求めた。なお、越波の有無は目視にて確認した。次に、越波が生じた際のフレア型護岸の越波流量を、 $H_0/L_0=0.012, 0.036$ の条件で求めた。この際、設置した不透過傾斜海浜の勾配は1/10と1/30の2種類とした。

図-4は、規則波を作用させた場合の、相対水深 h/H_0 に対する限界天端高さ h_c/H_0 の変化を示したものである。図中の○はフレア型護岸、□は直立護岸の限界天端高さをそれぞれ示している。図より、フレア型護岸の限界天端高さ h_c は直立護岸に比べて小さく、格段に高い越波阻止機能を持っていることがわかる。

図-5は、フレア型護岸と直立護岸の越波流量を示

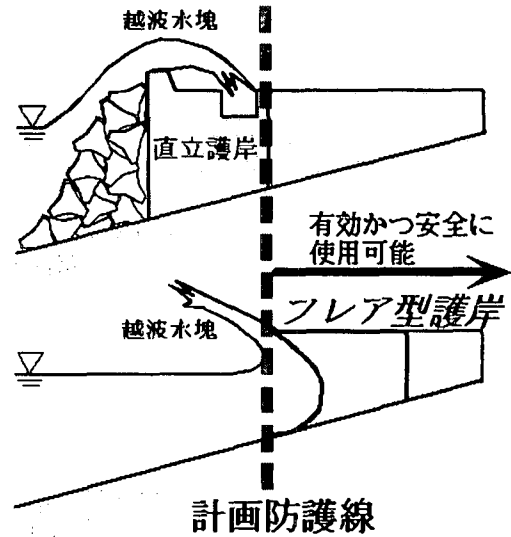


図-2 フレア型護岸の概念図

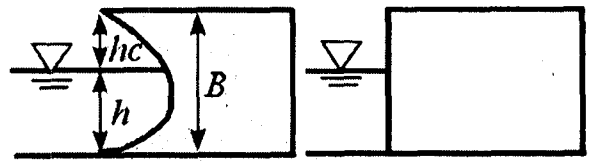


図-3 フレア型護岸と直立護岸

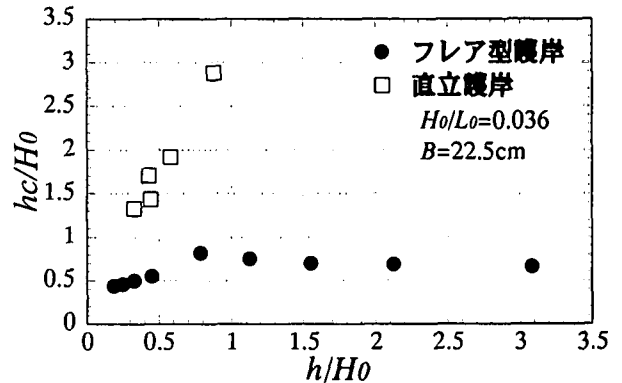
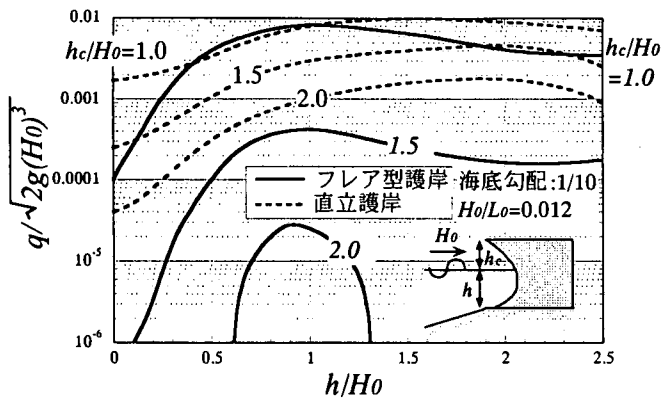


図-4 限界天端高さ

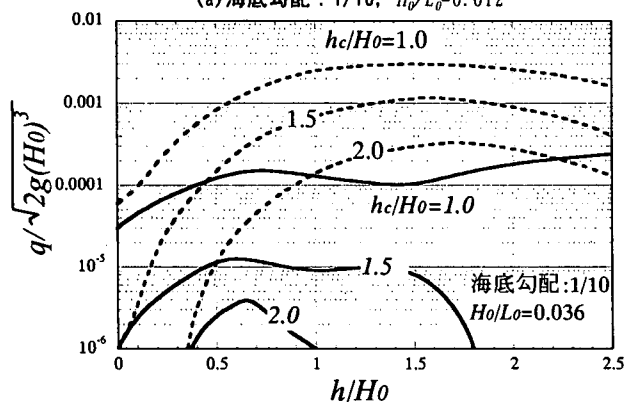
したものである。ただし、直立護岸の越波流量に関しては、直立護岸の越波流量推定図⁴⁾から読み取った値である。この図より、波形勾配や海底勾配に関係なく、フレア型護岸の越波流量は直立護岸の越波流量よりも小さくなっており、越波による被害を低減できると考えられる。

(2) 飛沫輸送特性

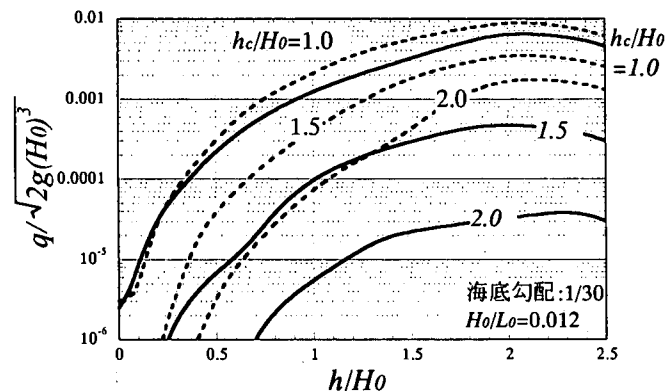
フレア型護岸および直立護岸に波が作用した際に発生する飛沫が、護岸上および護岸背後へ運ばれる輸送量を風洞実験によって求めた。実験は、2次元造波水槽に吸い込み式風洞装置を取り付けて行った。内部に勾配1/20の不透過傾斜海浜を設置し、その上にフレア型護岸および直立護岸を設け、規則波を造波させると同時に平均断面風速 $U_0=8.0\text{m/s}$ で風を吹かせて護岸から発生する飛沫量を測定した。実験は、護岸を沖浜帯（砕波点より沖側）に設置した場合と



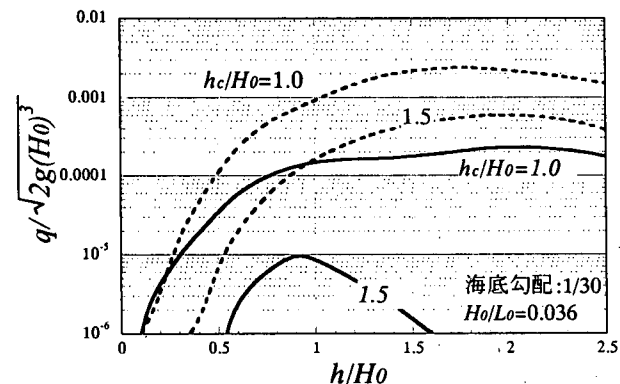
(a) 海底勾配: 1/10, $H_0/L_0=0.012$



(b) 海底勾配: 1/10, $H_0/L_0=0.036$



(c) 海底勾配: 1/30, $H_0/L_0=0.012$



(d) 海底勾配: 1/30, $H_0/L_0=0.036$

図-5 越波流量

砕波帯内(砕波点より岸側)に設置した場合について、それぞれ行った。沖浜帯では、護岸高さ $B=40.0\text{cm}$ で天端高さ $h_c=10.0\text{cm}$ 、波高 $H_0=11.0\text{cm}$ 、砕波帯内では、護岸高さ $B=22.5\text{cm}$ で天端高さ

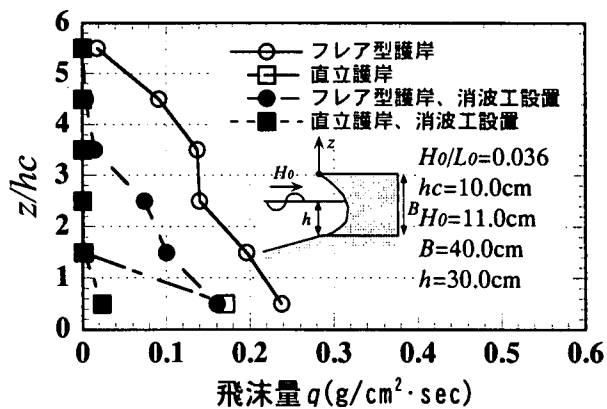


図-6 飛沫輸送量(沖浜帯)

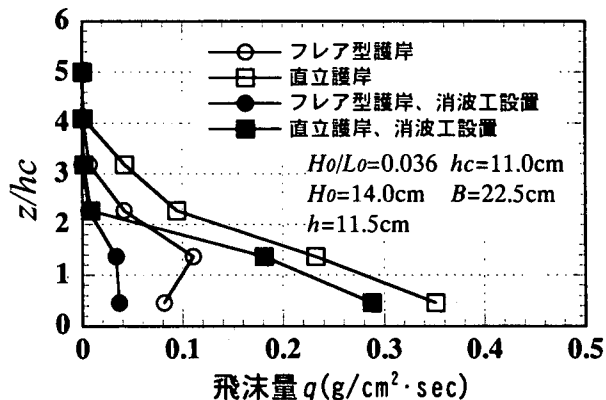


図-7 飛沫輸送量(砕波帯内)

$h_c=11.0\text{cm}$ 、波高 $H_0=14.0\text{cm}$ の条件で実験を行った。飛沫量の採取に関しては、飛沫採取ケース(直径 3.2cm 、長さ 4.5cm)を鉛直方向に 10.0cm 毎に 6 個設置し、単位時間・単位面積当たりに輸送される飛沫量 $q(\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ の鉛直分布を求める方法⁵⁾⁶⁾⁷⁾を用いた。実験において採取される飛沫量と現地レベルでの飛沫量についてスケールに相似性を持たせることは困難であるが、今回は実験室レベルでの護岸・実験条件の違いによる飛沫量の相違を比較することを目的としている。測定位置は護岸先端とし、護岸前面に消波工を設置した場合についても実験を行った。

図-6は護岸を沖浜帯に設置した場合の、護岸頂部先端における飛沫輸送量を示しており、縦軸は鉛直方向の測定位置 $z(\text{cm})$ 、横軸は飛沫量 $q(\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ を示している。グラフより護岸頂部での飛沫量は、直立護岸に比べフレア型護岸の飛沫量が多いことがわかる。これは、直立護岸では越波が生じており、風によって発生する飛沫量は少ないが、フレア型護岸では沖向きに返される水塊は薄い膜を形成し、風によって薄い膜は細粒化され容易に岸側へ輸送されるためである。消波工を設置した場合には、消波工を設置しない場合に比べて飛沫量は減少している。

図-7は護岸を砕波帯内に設置した場合の飛沫輸送量を示しており、沖浜帯での結果とは逆に、直立護岸に比べてフレア型護岸の飛沫量は少ない。直立護岸では砕波後の波が護岸作用時に上方高く打ち上げられ、打ち上げられた水塊は風によって容易に岸側へ輸送されるが、フレア型護岸では沖浜帯で見ら

れる薄い膜が形成されずに水塊が細粒化されることがなく、また、水塊は沖側斜め上方に打ちあがるため直立護岸よりも打ち上げ高さが小さく、同時に水塊の速度ベクトルが沖側を向いているため、岸側への飛沫輸送量は大幅に低減されていると考えられる。また、碎波帯内に護岸を設置した場合も、消波工を護岸前面に設置した場合には、飛沫量は減少している。

以上より、フレア型護岸を碎波帯内に設置した場合には、その飛沫量は直立護岸と比較して大幅に少なくなることがわかったが、沖浜帯に設置した場合には、飛沫量が増大してしまう問題が発生した。

3. 上部直立壁を設置したフレア型護岸の性能

先述のように、フレア型護岸には沖浜帯において飛沫量が増大する欠点が見出された。この欠点を補うため、フレア型護岸の断面を改良することが必要となる。そこで、より優れた飛沫制御機能を備えるために、フレア型護岸に図-8に示す上部直立壁を設置することを考案した。ここでは、上部直立壁を設置したフレア型護岸の越波制御機能と飛沫輸送特性について、水理模型実験によって検討する。

(1) 越波制御機能

a) 実験方法と実験条件

まず、上部直立壁を設置したフレア型護岸の越波制御特性に関する実験を行う。実験は、図-9に示す2次元造波水槽（長さ20.0m、高さ1.0m、奥行き0.5m、沖水深 $h_0=0.35$ m）内に1/20の不透過傾斜海浜を設置し、図-8に示す各護岸断面（護岸高さ $B=22.5$ cm）について、上部直立壁の高さ hw （ $hw=0.0$ cm, 2.5cm, 5.0cm）を変化させ、規則波を作用させて行った。実験では沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.036$ のもとで入射波の波高を $H_0=4.0$ cm~12.0cmの範囲で変化させ、設置水深 h を種々変えた場合に越波が生じない最小の天端高さ hc （限界天端高さ）を求めた。なお、越波の有無は目視にて確認した。

また、同様の実験水槽を用いて、風洞装置により実験装置内部に風速 $U_0=8.0$ m/sの風を吹かせ、図-8に示す各護岸断面（護岸高さ $B=22.5$ cm、設置水深 $h=15.0$ cm、天端高さ $hc=7.5$ cm）について、上部直立壁の高さ hw （ $hw=0.0$ cm, 2.5cm, 5.0cm, 7.5cm）を変化させ、護岸の背後1.0mの位置に容器を設置し、護岸の背後に越えて流れ出た越波量を測定した。この際、造波はさせておらず、風波のみを護岸に作用させた。

b) 実験結果と考察

図-10は、規則波を作用させた場合の、相対水深 h/H_0 に対する限界天端高さ hc/H_0 の変化を示したものである。それぞれのプロットは、フレア型護岸と直立護岸のそれぞれに上部直立壁（ $hw=0.0$ cm, 2.5cm, 5.0cm）を設置した場合の結果を表している。ただし、限界天端高さは護岸頂部から水面までの距離を下向きを正として表しているため、

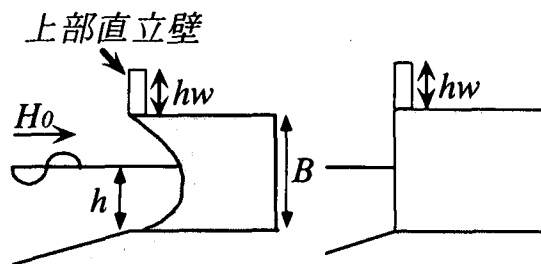


図-8 上部直立壁を設置した護岸模型

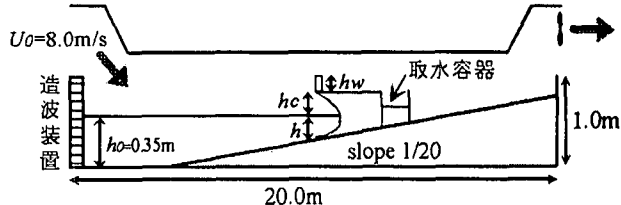


図-9 実験装置図

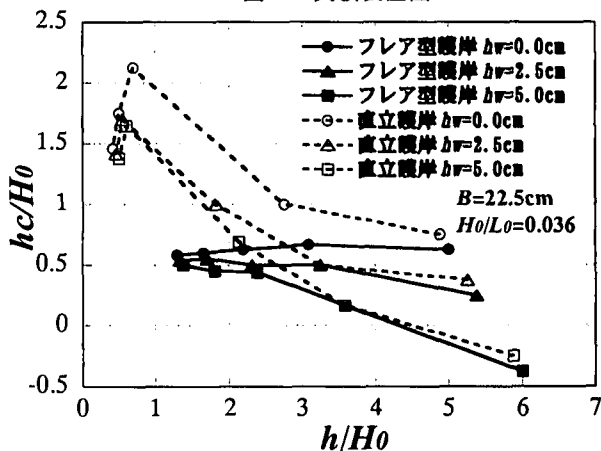


図-10 上部直立壁を設置した際の限界天端高さ

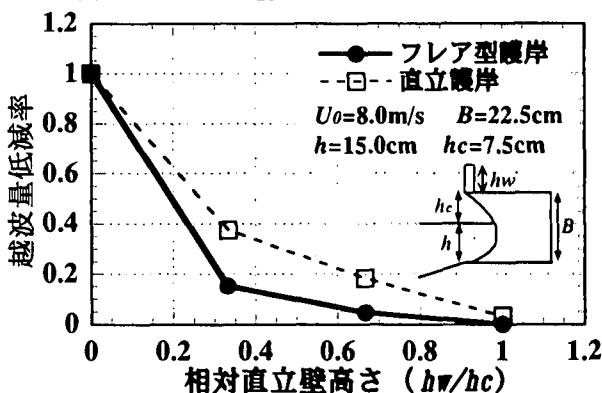


図-11 越波量低減率

静水面が上部直立壁にある際には負の値をとる。図より、相対水深が小さい場合には、フレア型護岸の限界天端高さは小さく、越波が生じにくいと考えられる。しかし、相対水深が大きい場合には、フレア型護岸と直立護岸の限界天端高さはほとんど変わらない。これは、波高が小さい場合には越波が生じにくいために設置水深が深くなり、水面が護岸上部、場合によっては上部直立壁付近に位置することもあり、フレア型護岸の断面形状が有効に働かないためである。また、上部直立壁の高さが高いほどフレア型護岸の限界天端高さが低くなることがわかる。

図-11は、上部直立壁を設置することによる越波量の低減率を、上部直立壁を設置しない場合の越波量を1としてグラフにしたものである。横軸は、上部直立壁の高さ hw を天端高さ hc で無次元化したもの、縦軸には、フレア型護岸、直立護岸それぞれの場合において、上部直立壁が無い場合の越波量を1とした時の越波量の割合を示している。このグラフより、フレア型護岸においては、護岸天端高さに対して30%程度の高さの上部直立壁を設置することで、格段に越波制御機能が高まることわかる。その効果は、直立護岸に上部直立壁を設置する場合よりも、より効果的であることがわかる。

(2) 飛沫輸送特性

a) 実験方法と実験条件

次に、上部直立壁を設置したフレア型護岸の飛沫輸送特性について検討を行う。実験は、図-12に示す長さ20.0m、高さ1.0m、幅0.5mの風洞実験装置を用いて行った。内部に勾配1/20の不透過傾斜海浜を設置し、その上に護岸高さ $B=22.5$ cmのフレア型護岸および直立護岸(図-8参照)を設け、護岸上に上部直立壁を設置した。上部直立壁の護岸上部からの高さ hw (0cm, 2.5cm, 5.0cm)を変化させ、風速 $U_0=8.0$ m/s、護岸設置水深 $h=15$ cmとした場合に発生する飛沫を計測した。飛沫量の測定位置は、護岸先端から岸側方向に対して1.0m毎に3断面を取り、各断面において飛沫採取ケース(直径3.0cm、長さ4.5cm)を鉛直方向に10.0cm毎に5個設置し、単位時間、単位面積に輸送される飛沫量 q ($g/m^2 \cdot s$)の鉛直分布を求めた。また、風速 $U_0=8.0$ m/sのもと、波高 $H_0=4.0$ cm~ 12.0 cm(沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.036$)の波を造波させた際の飛沫量も同様に測定した。この際、護岸設置水深は $h=5$ cmと $h=15$ cmの2種類を測定した。

b) 実験結果と考察

図-13は、同一条件下(風速 $U_0=8$ m/s、護岸設置水深 $h=15.0$ cm)の元で、フレア型護岸および直立護岸の飛沫量の鉛直分布を比較したものである。横軸に飛沫量 q ($g/cm^2 \cdot sec$)、縦軸に飛沫採取ケースの鉛直方向の設置位置 z (cm)を無次元化したものを示しており、観測位置 $x=0.0$ cmおよび $x=200.0$ cmにおける飛沫量の鉛直分布を、上部直立壁の高さ hw 別に示したものである。このグラフより、いずれの護岸においても、飛沫量の鉛直分布は、下方では多く、上方では少なくなっており、直立護岸に比べてフレア型護岸の方が飛沫輸送量は少ないことがわかる。また、上部直立壁 hw の違いによって、 hw が大きいほど飛沫量は低減している。特に、上部直立壁がない場合($hw=0.0$)に対し、上部直立壁を設置した場合には、格段に飛沫量の鉛直分布が低減されている。また、観測位置 $x=200.0$ cmに設置した場合にも、飛沫量の鉛直分布、および上部直立壁の効果に関しては、先述と同様の傾向があり、両護岸において観測位置 $x=0.0$ cmの時よりも飛沫量の鉛直分布が大幅に低減している。以上で明らかになったように、上部直立

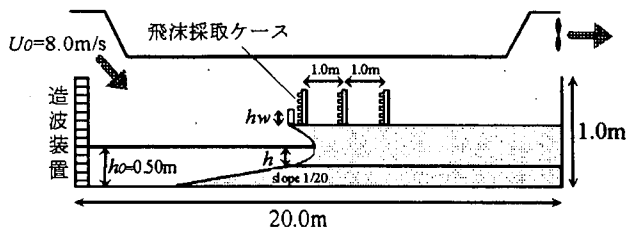


図-12 実験装置図

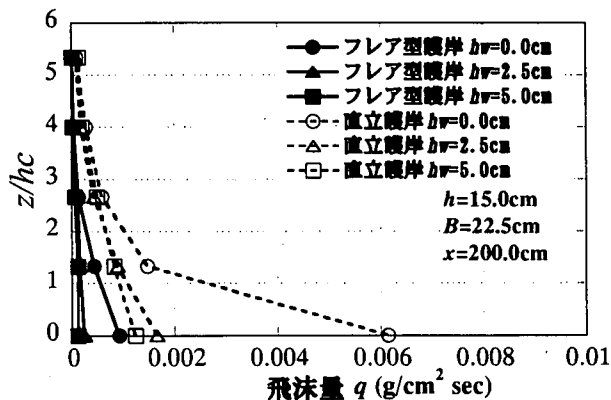
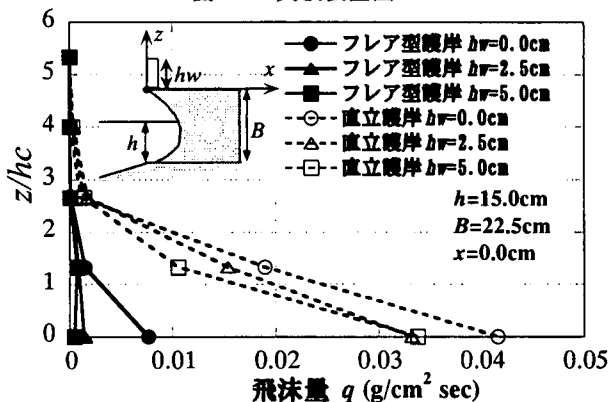


図-13 飛沫量分布 (風速 $U_0=8$ m/s)

壁を設置したフレア型護岸は、格段に高い飛沫制御機能を有していることがわかった。

図-14は、風速 $U_0=8$ m/s、波高 $H_0=6$ cmにおける飛沫量の結果を示しており、(a)は設置水深 $h=15$ cm測定位置 $x=0.0$ cm、(b)は設置水深 $h=5$ cm測定位置 $x=0.0$ cm、(c)は設置水深 $h=5$ cm測定位置 $x=200.0$ cmの結果である。実験条件が(a)の場合、つまり、設置水深が深く護岸を沖浜帯に設置して風と波を護岸に作用させた条件では、上部直立壁を設置しない場合($hw=0.0$)にフレア型護岸よりも直立護岸の飛沫輸送量が少ない。これは、図-6に示した結果同様、直立護岸では越波が発生しているために飛沫がほとんど発生していないためである。しかし、上部直立壁を設置することで、直立護岸は越波が生じず飛沫の発生が顕著になるために両者の飛沫量はほとんど同じになり、上部直立壁を設置した効果が表れていることを示す。一方、(b)のように、設置水深が浅く護岸を砕波帯内に設置した条件では、直立護岸に比べてフレア型護岸の方が飛沫輸送量は少ないことがわかる。また、上部直立壁 hw の違いによって、 hw が大きいほど飛沫量は低減しており、フレア型護岸に上部直立壁を設置したケースが最も飛沫量を低減できることが分

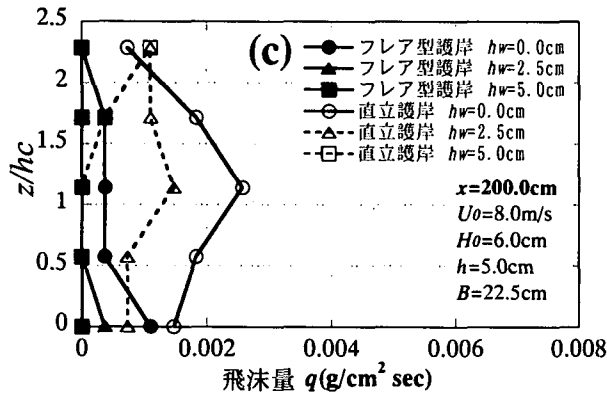
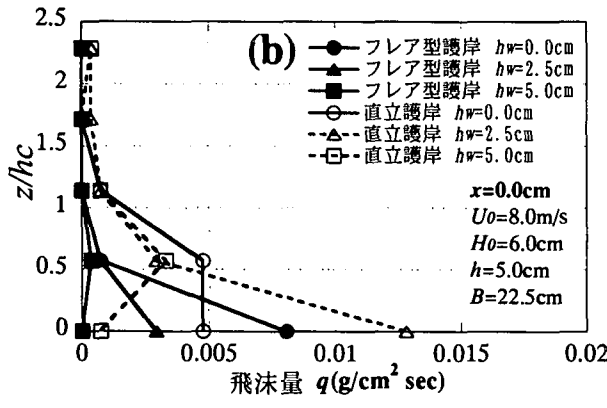
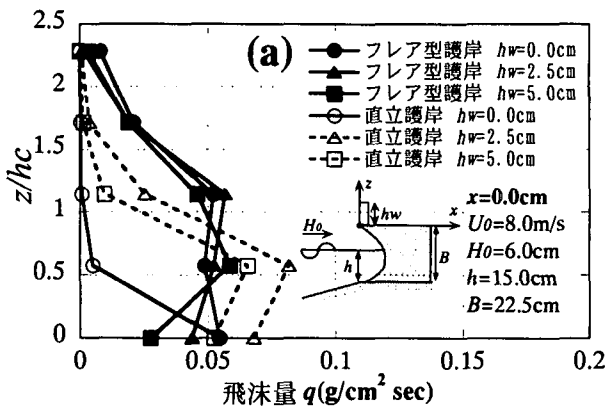


図-14 飛沫量分布 (風速 $U_0=8\text{m/s}$, 波高 $H_0=6\text{cm}$)

量を低減する方法としてフレア型護岸の上部に直立壁を設置することを提案し、その効果を検討した。

主要な結論を以下に示す。

(1) フレア型護岸を沖浜帯に設置した場合、直立護岸に比べフレア型護岸の飛沫輸送量は多く、より遠くまで飛沫が輸送される。護岸を砕波帯内に設置した場合には、直立護岸に比べフレア型護岸の飛沫量は少ない。

(2) 越波量に関しては、上部直立壁を設置しない場合に比べ、上部直立壁を設置することによる越波量は大幅に低下する。つまり、フレア型護岸は上部直立壁を設置することによって越波制御機能が大きく向上する。直立護岸と比較しても、同じ条件の上部直立壁を設置した場合、いずれも高い越波制御機能を有する。

(3) 飛沫量に関しては、風波のみが存在する条件では、上部直立壁を設置したフレア型護岸は、格段に高い飛沫制御機能を有している。特に、上部直立壁の有無による効果の相違は大きい。

(4) 風と波を同時に作用させた場合、沖浜帯で問題となった飛沫量の増大は、上部直立壁を設置することで直立護岸と同等のレベルまで飛沫量を抑えることができ、砕波帯内に設置した場合には、上部直立壁を設置することでさらにその飛沫量を低減できる。

以上より、上部直立壁を設置することで、低コストでフレア型護岸の性能を大幅に向上させることができると考えられる。

参考文献

- 1) 上久保祐志, 村上啓介, 入江功, 神田一紀, 鮎川慶一朗: 非越波型護岸の防災特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻(2), pp.796-800, 2000
- 2) 村上啓介, 上久保祐志, 入江功, 香月理, 片岡保人, 中岡威博: 低天端消波工による非越波型防波護岸に作用する衝撃波圧の低減, 海洋開発論文集, 第14巻, pp.375-380, 1999
- 3) 上久保祐志, 入江功, 村上啓介, 神田一紀, 片岡保人, 濱崎義弘: 浅海域を対象とした非越波防波護岸断面の基礎的特性, 海洋開発論文集, 第15巻, pp.25-30, 1999
- 4) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp.114-115, 1990
- 5) 松永信博, 樋田操, 入江功: 消波護岸によるしぶきの発生と護岸後背地への輸送, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.1046-1050, 1994
- 6) 松永信博, 樋田操, 鶴崎賢一: 波に作用する風応力としぶき量の関係, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.1031-1035, 1995
- 7) 松永信博: 強風時における護岸からの飛沫の発生と護岸後背地での飛沫の輸送プロセスに関する研究, 平成7年度~平成8年度科学研究費補助金研究成果報告書

かった。(c)のように観測位置 $x=200.0\text{cm}$ に設置した場合にも、飛沫量の鉛直分布、および上部直立壁の効果に関しては、(b)の場合と同様の傾向があり、(b)の場合よりも飛沫量の鉛直分布が大幅に低減している。

以上より、沖浜帯で問題となった飛沫量の増大は、上部直立壁を設置することで直立護岸と同等のレベルまで飛沫量を抑えることができ、砕波帯内に設置した場合には、上部直立壁を設置することでさらにその飛沫量を低減できることがわかった。

4. 結論

本研究では、波・風作用時におけるフレア型護岸の越波制御機能と飛沫輸送特性の検討を行い、飛沫