

強風下における消波護岸からの飛沫の発生とその低減工法

SPRAY GENERATION FROM WAVE-ABSORBING SEAWALL UNDER A STRONG WIND AND ITS REDUCTION METHODS.

松永信博¹・櫛田操²・香月理³

Nobuhiro MATSUNAGA Misao HASHIDA, and Osamu KATSUKI

¹正会員 工博 九州大学助教授 大学院総合理工学研究科
(〒816-0811 福岡県春日市春日公園6-1)

²正会員 工修 日本文理大学教授 工学部土木工学科 (〒870-0316 大分県大分市一本1727)

³学生員 九州大学大学院 総合理工学研究科
(〒816-0811 福岡県春日市春日公園6-1)

Various types of wave-absorbing works have been developed to prevent coasts from wave-induced disasters and have been used with remarkable success. However, the effective dissipation of wave energy generates a large amount of sea water spray. When it is transported landward by a strong wind, severe salt damage will be caused along the coastal region. In this study, the generation of spray from a typical wave-absorbing seawall has been investigated experimentally. A parapet installed on the top of the seawall is very effective for the reduction of spray quantity. A perforated seawall method, which is proposed as a new method to reduce the spray generation, has been also examined. As a result, the new method can decrease 30-50 % of spray quantity generated by the typical seawall method.

Key Words : sea water spray, wave-absorbing seawall, spray reduction method.

1. はじめに

近年、ウォーター・フロントの開発や海上空港をはじめとする人工島建設に伴い、沿岸域は親水空間としてまた居住空間として利用されるようになってきた。また、わが国では台風や冬期季節風による波浪災害が沿岸域で頻繁に発生するため、防災対策として消波ブロック被覆護岸工法が広く用いられてきた。しかしながら、この工法は波浪を砕くことにより波のエネルギーを消散させるという原理のために、強風時に多量の海水飛沫を発生させ、しばしば塩害を引き起こす。このような状況において、消波護岸から発生する飛沫の輸送機構を明らかにすることは沿岸域でのアメニティ向上や大気環境を保全という観点から重要なテーマとなっている。特に、石田ら¹⁾は波と構造物の相互作用によって生ずる飛沫に注目して、風応力を局所的に作用させる実験を行い、飛沫の飛散形態を調べた。また、松永ら^{2) 3)}は、大分県別府港に設置された消波護岸をモデルとして実験を行い、護岸背後に輸送される飛沫量の鉛直分布および風下方向の分布を調べた。

本研究では、広く用いられている消波護岸の模型を用いて飛沫の発生およびその輸送過程に関する実験を行った。また、バラベットの護岸上に取り付けた場合の飛沫の低減効果を調べた。さらに、消波効果を損なうことなく飛沫量を低減できると考えられる工法として多孔型護岸を提案し、消波ブロック被覆護岸と比較することにより飛沫の低減効果を検討した。

2. 実験装置および実験条件

実験は、消波ブロック被覆護岸からの飛沫の発生、バラベットによる飛沫の低減効果、および多孔型護岸からの飛沫の発生に3つに分けられる。実験には、長さ32 m、高さ0.94 m、幅0.6 mの矩形断面を有する風洞付き二次元造波水槽を用いた。図-1に、実験装置の概要を示す。水槽中央部に2種類の消波護岸の模型を設置し、護岸背後には陸域モデルとして長さ10 mにわたり水平床を設置した。

図-2に示すように、実験対象とした消波ブロック被

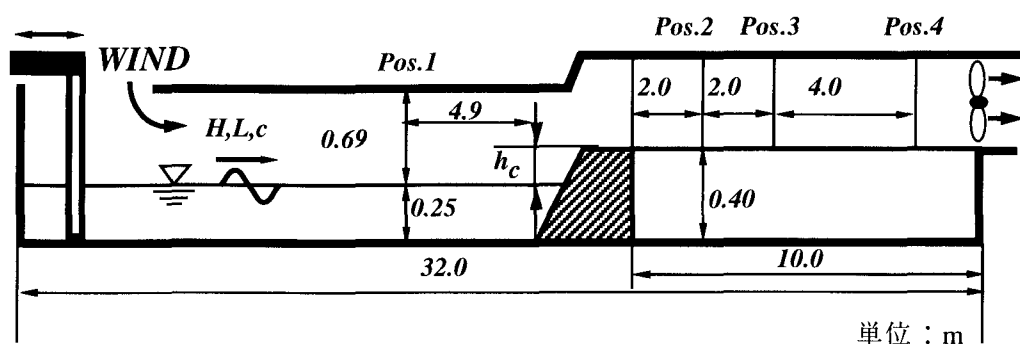


圖-1 實驗裝置

覆護岸は3.2t型テトラポッドの2層積みで、天端2個並びである。テトラポッドの1/25模型を用い、砕石砂利（径20～40mm）の傾斜堤法面を被覆した。水平床の高さを40cm、一様水深部の水深を25cmとした。護岸天端高さ h_c は15cmに設定した。周期 $T=1.0$ sの二次元規則波を造波し、水域全体で碎波が生じる様に強風を吹かせた。碎波しながら進行する波の波長は156cm、波高は11.2cmであった。水平床上における断面平均風速 U_m を13.6, 16.1, 18.6 m/sに変化させた。平均風速および飛沫量の測定はPos. 1～Pos. 4で行った。風速はベーン式風速計を用いて、鉛直上向きに2 cm間隔で測定した。飛沫量の測定には、直径3 cm、深さ5 cmの円筒容器に脱脂綿を詰めたものを用いた。その円筒容器を鉛直上向きに4 cm間隔で取り付け、飛沫の捕集を行った。パラペットは護岸最前部に取り付け、その高さを2, 4, 6, 8cmと変化させ、 $U_m=13.6, 16.1, 18.6$ m/sの風に対して飛沫量の計測を行った。

図-2 消波ブロック被覆護岸断面図

表-1 多孔型護岸形状

Run	D(mm)	l(mm)
1	26	44
2	26	88
3	26	132
4	38	44
5	38	88
6	38	132
7	60	44
8	60	88
9	60	132

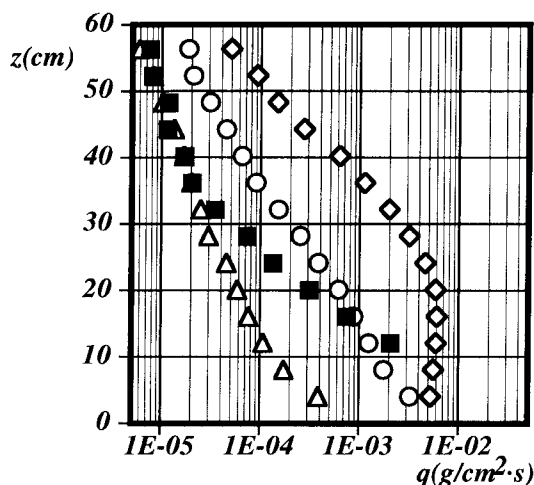
3. 結果と考察

(1) 消波ブロック被覆護岸における飛沫量分布

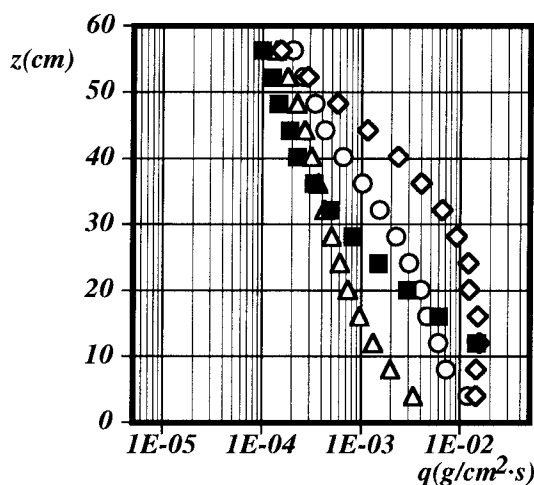
図-5(a), (b), (c)は, それぞれ $U_m=13.6, 16.1, 18.6$ (m/s)における飛沫量の鉛直分布が風下方向にどのように変化するかを示したものである²⁾³⁾⁴⁾。ここで, z は沖合い海域 (Pos.1) では平均水面から, 陸域 (Pos.2~4) では水平床から鉛直上向きにとった座標である。空気中の単位面積当たりの飛沫量 q ($\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$)は, 測定前後の質量差, 捕集容器の断面積および捕集時間で割ることにより求められた。波が消波護岸に激しく衝突するため, Pos.2において飛沫量はかなり上方まで大きな値をとる。風下方向に輸送されるにつれ, 飛沫量は鉛直方向に指数関数的に減少する傾向が認められる。これは, 風による飛沫の移流と重力による沈降が釣り合った移流沈降領域が形成されていることを示す。また, 図-5(a)のように風速が小さい場合には, 風下方向に飛沫量は急速に減少する。一方, 風速が大きくなると図-5(b)に示すように, 飛沫量の風下方向の低減率は小さくなる。これは, 風速が大きき場合には, 重力による飛沫の沈降よりも風による移流効果が卓越するためである。水平床上においては, 底面からの飛沫の供給がないため, Pos.4における飛沫量は $z \leq 30\text{cm}$ において水面上の飛沫量よりも少なくなる。

図-6は, 飛沫量 q を鉛直方向に積分した値 $Q(\text{g}/\text{cms})$ を護岸からの距離 x (m)に対してプロットしたものである。この図より積分値 Q は, 風下方向に指数関数的に減少することがわかる。また, 風速が大きくなるにつれて風下方向の低減率は小さくなり, 風による移流効果が卓越することがわかる。

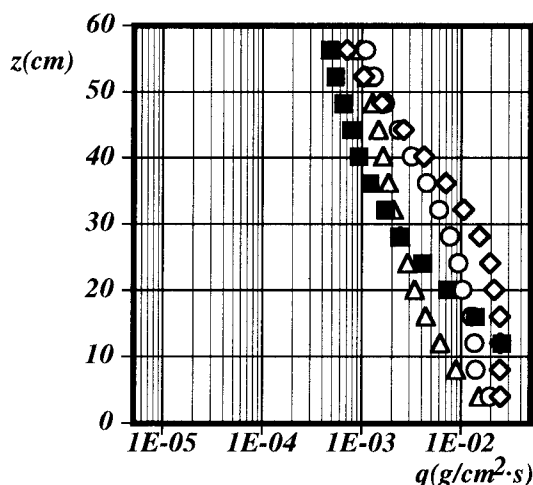
図-7は, Pos.2 (護岸直後の測定点) の飛沫積分量 Q_0 を用いて図-6を無次元表示したものである。ここで,



(a) $U_m=13.6$ m/s



(b) $U_m=16.1$ m/s



(c) $U_m=18.6$ m/s

図-5 飛沫量の鉛直分布

(■;Pos.1, ◇;Pos.2, ○;Pos.3, △;Pos.4)

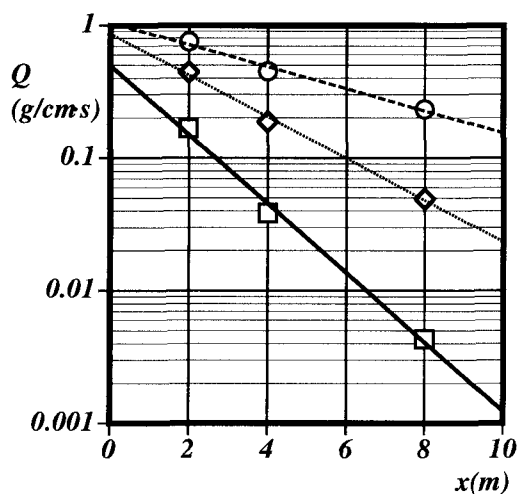


図-6 飛沫積分量の流下方向の変化

(□; $U_m=13.6\text{m/s}$, ◇; 16.1m/s , ○; 18.6m/s)

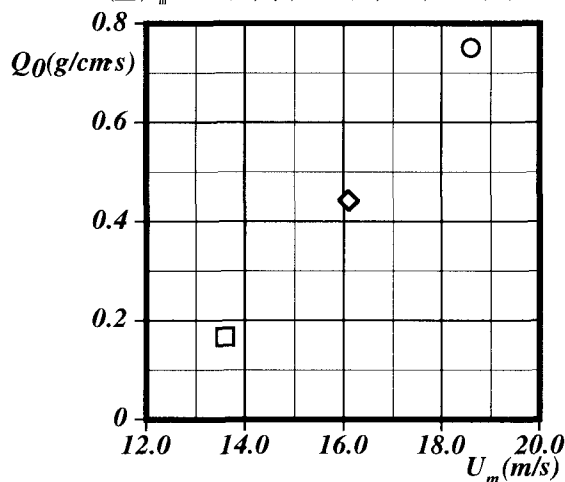


図-8 護岸直後の飛沫積分量と平均風速の関係

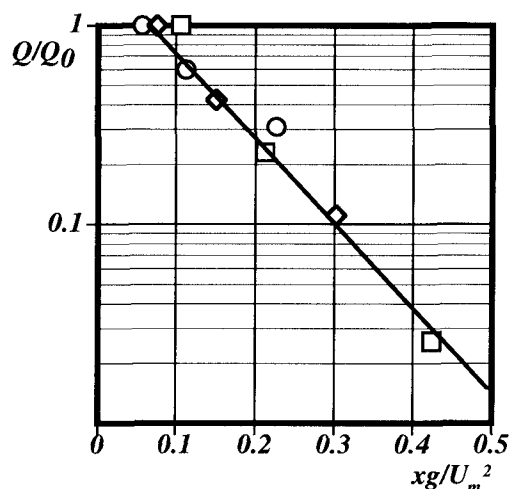
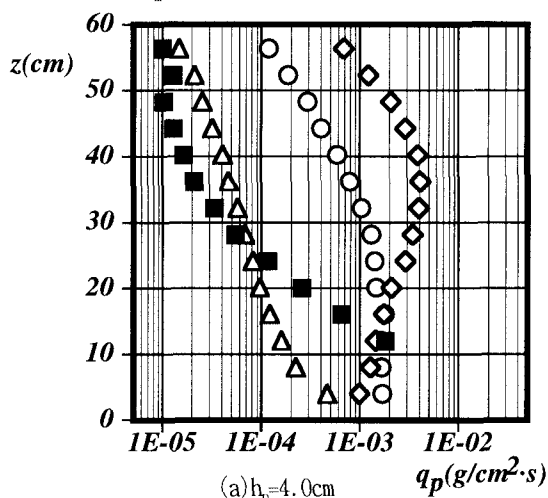
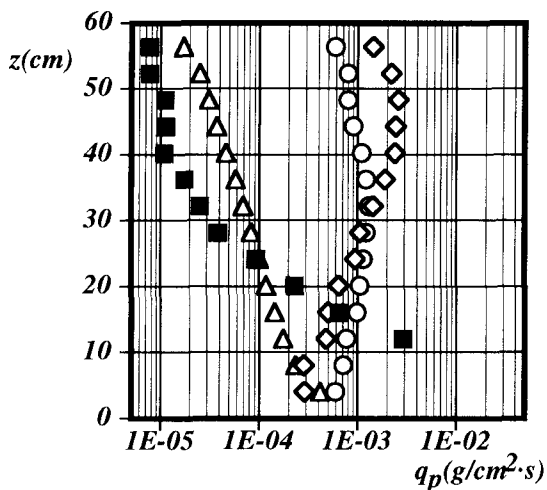


図-7 無次元飛沫積分量と無次元流下距離の関係

(□; $U_m=13.6\text{m/s}$, ◇; 16.1m/s , ○; 18.6m/s)



(a) $h_p=4.0\text{cm}$



(b) $h_p=6.0\text{cm}$

図-9 パラペット設置における飛沫量の鉛直分布

(■; Pos. 1, ◇; Pos. 2, ○; Pos. 3, △; Pos. 4, $U_m=13.6\text{m/s}$)

g は重力加速度である。 Q/Q_0 は図中の実線とよく一致しており、飛沫積分量の風下方向の変化が普遍的に表される。

図-8は、Pos. 2における飛沫積分量 Q_0 と断面平均風速 U_m との関係を示したものである。今回の実験範囲では、 Q_0 は風速の増加に伴い急激に増加することがわかる。図-7と8の結果から任意の x における飛沫積分量を定量的に評価することが可能となる。

(2) パラペットによる飛沫低減効果

図-9 (a), (b)は、それぞれ消波ブロック被覆護岸に高さが4 cmと6 cmのパラペットを取り付けた場合における飛沫量 q_p ($\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$)の鉛直分布を示したものである。この図から、護岸直後のPos. 2ではパラペットが高くなるにつれ、水平床近傍の飛沫量は顕著に減少することがわかる。しかしながら、 $z \geq 30\text{cm}$ においては図-5と比べて飛沫量はむしろ増大する。これは、パラペットからの剥離流による飛沫の供給と密接に関係があると思われる。

図-10は、飛沫量 q_p ($\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$)を鉛直方向に積分した値 Q_p を x に対してプロットしたものである。護岸直後

では、パラペットの高さが大きくなるにつれて飛沫積分量は小さくなり、飛沫の低減効果は明確である。しかしながら、風下方向に輸送されるにつれ、パラペットの高さによる飛沫積分量の差は小さくなり、 $x=8\text{m}$ ではパラ

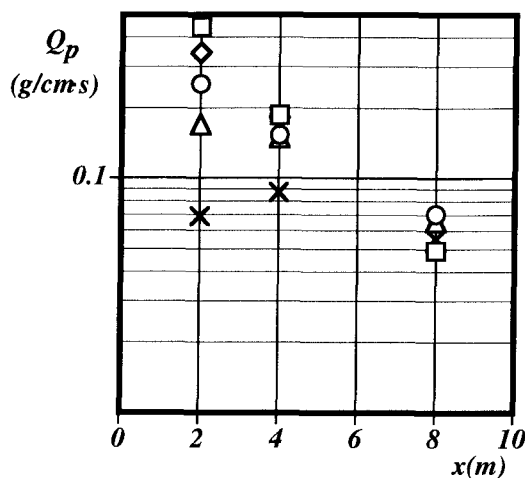


図-10 パラペット設置における飛沫積分量

($U_m=16.1\text{m/s}$, $\square$; $h_p/h_c=0$, $\diamond$; 1.33, $\circ$; 2.67, $\triangle$; 4.00, $\times$; 5.53)

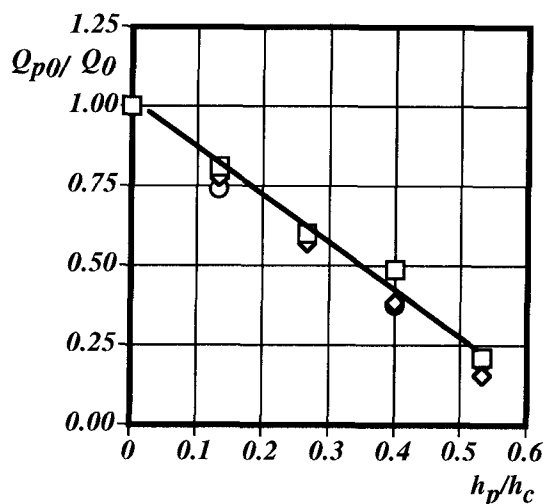


図-11 パラペット設置時における護岸背後の飛沫積分量

とパラペット高さの関係 ($\square$; $U_m=13.6\text{m/s}$, $\diamond$; 16.1m/s, $\circ$; 18.6m/s)

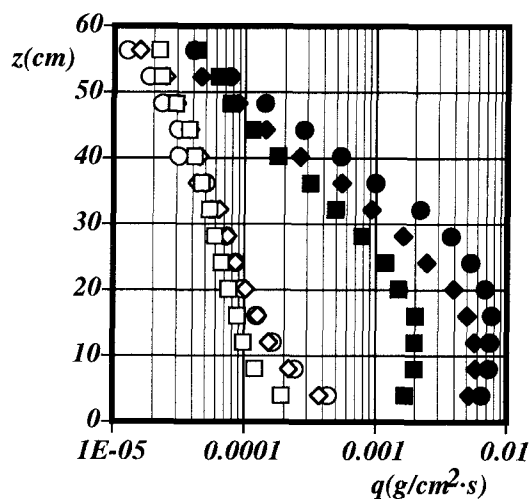


図-12 多孔型護岸からの飛沫量に及ぼすDの影響

($\square$; Run1, $\diamond$; Run4, $\circ$; Run7, 黒印はPos. 2, 白印はPos. 4 におけるデータ)

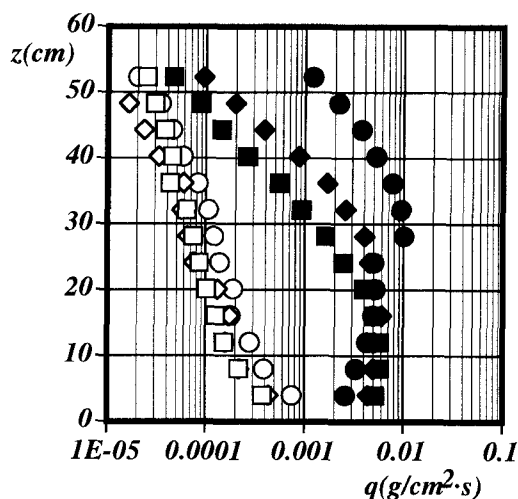


図-13 多孔型護岸からの飛沫量に及ぼすlの影響

($\square$; Run4, $\diamond$; Run5, $\circ$; Run6, 黒印はPos. 2, 白印はPos. 4 におけるデータ)

ペット高さの効果は認められなくなる。このことから、パラペットが高いほど、護岸近傍で大きな粒径の飛沫を遮断しているが、護岸からの無次元距離 $x g/U_m^2 = 0.424$ 以上では、沈降しにくい霧状の飛沫が存在しているためパラペットのない場合とほぼ同じ値を取ると考えられる。

図-11は、Pos. 2における飛沫積分量 Q_{p0} を Q_0 で規格化し無次元高さ h_p/h_c に対してプロットしたものである。無次元飛沫積分量 Q_{p0}/Q_0 は、ばらつきがあるもののほぼ一つの直線に乗っており、護岸直後の飛沫積分量は、相対パラペット高さ h_p/h_c の増加とともに線形的に減少することがわかる。

(3) 多孔型護岸による飛沫低減効果

図-12は、多孔型護岸のDの違いによる飛沫の低減効果を示したものである。この図より、Pos. 2ではDが小さいほど飛沫量は低減され、特に水平床近傍ほどその効果は顕著である。Pos. 4では、Pos. 2程の差はないが、飛沫量の値が大きい水平床近傍で飛沫量がDの減少とともに低減していることがわかる。図-13では、多孔型護岸のlの違いによる飛沫の低減効果を示したものである。Pos. 2ではlが短いほど飛沫量は低減され、Dによる効果の場合とは逆に風洞水槽天井近傍においてその効果が顕著に認められる。Pos. 4では、ほとんどlによる低減効果の差は見られない。図-14(a)および(b)は、多孔型護岸から発生する飛沫積分量Qを示したものである。図中の直線は、消波ブロック被覆護岸からの飛沫積分量を表す。

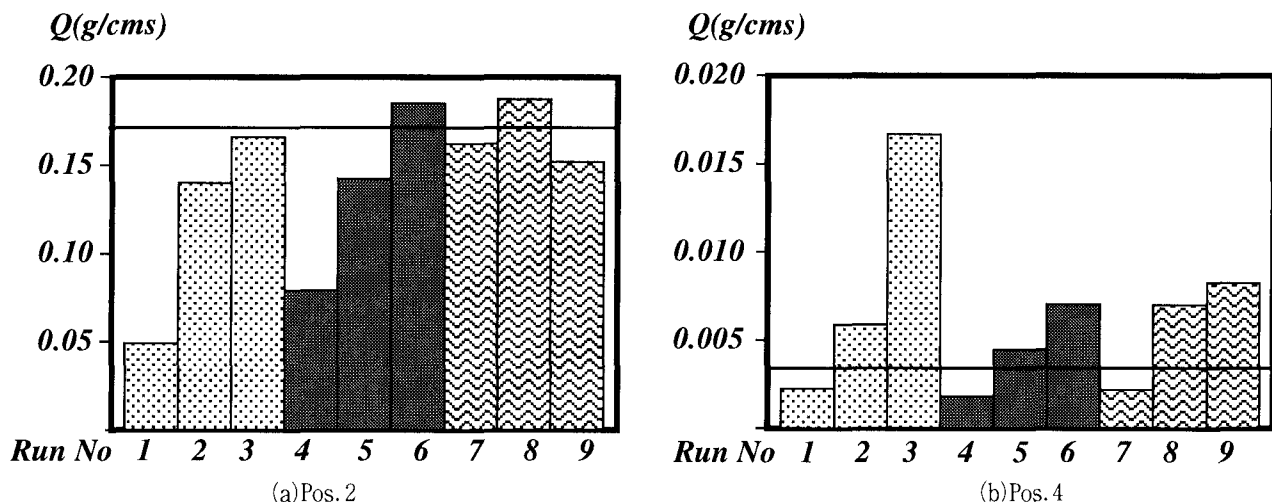


図-14 多孔型護岸による飛沫積分量と消波ブロック被覆護岸によるものとの比較
(—：消波ブロック被覆護岸からの飛沫積分量)

この図から明らかなようにPos. 2においては、多孔型護岸から発生する飛沫量は消波ブロック被覆護岸から発生する飛沫量よりも一般的に低いことがわかる。特に、Run1においては、消波ブロック被覆護岸からの飛沫量に比べて Pos. 2で約70%程度、Pos. 4で約50%低減している。Run No 1, 4, 7では、護岸背後における飛沫量は消波ブロック被覆護岸よりも低減することがわかる。この場合1は44mmであり、消波ブロックの1層積みの厚さに等しいことから、従来の消波護岸より薄い構造物で、飛沫量を低減できる可能性を示唆している。しかしながら、Pos. 4ではRun No2, 3, 5, 9の場合に消波ブロック被覆護岸よりも飛沫量積分値が増大している。この理由として、多孔型護岸の場合には、粒径の小さい飛沫が発生しやすいことから、飛沫はそれほど沈降せずに陸域に輸送されると考えられる。

4. 結論

本研究では、消波ブロック被覆護岸から発生する飛沫量を調べ、それと比較してパラベットの設置による効果および、飛沫発生量を低減できると考えられる多孔型護岸からの飛沫の低減効果を調べた。それらの主な結論を以下に示す。

- 1) 無次元飛沫量積分値 Q/Q_0 は、異なる風速に対して無次元距離 x/U_m^2 によって普遍化することができる。
- 2) パラベット設置の場合、底面付近の比較的大きな粒径の飛沫を遮断できパラベットにより、その低減効果が明確に認められた。
- 3) パラベット設置の場合、飛沫積分量 Q_0 を用いて規格化し、無次元パラベット高さ h_p/h_c に対してプ

ロットすることにより普遍的に表すことができる。

- 4) 多孔型護岸は従来工法に比べて飛沫発生量を最高70%程度、低減することができる。
- 5) 低減効果の高かったパイプの長さは、従来の消波護岸の消波ブロックの層厚さの半分と等しいことから、従来の消波護岸より薄い構造物で飛沫を低減できる可能性があることを示している。

今回の実験は限られた狭い条件のもとで行われたものであり、沿岸域から陸域に輸送される飛沫量を定量的に評価する為には今後さらに広範囲の条件下で実験を行う必要がある。また、今回提案した多孔型護岸に関しては消波工として設計上重要である、反射率、透過率、波力、超波量および打ち上げ高等の評価を行うことが今後の重要な課題である。

本研究は、平成九、十年度日本文理大学工学部土木工学科榎田研究室の卒業研究生の協力を得て行われたことを記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 石田昭，花田昌彦，細井正延：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, 1982.
- 2) Hashida, M. et. al. : Landward Transport of Spray Generated from a Wave Absorbing Sea Wall, Proc. 25 th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, 1022-1033, 1996.
- 3) 松永信博，榎田操，入江功：消波護岸によるしぶきの発生と護岸背後値への輸送，海岸工学論文集，第41巻，pp. 4046-4050, 1994.
- 4) 松永信博，榎田操，杉原裕司：巻き波砕波によって発生した飛沫の風による輸送，九州大学大学院総合理工学研究科報告，第16巻，pp. 353-358, 1994

(1998. 9. 30受付)