

フレア型護岸の飛沫の発生および 輸送特性と音環境について

STUDY ON CHARACTERISTICS OF TRANSPORT OF SPRAY AND SOUND ENVIRONMENT BY NON-WAVE-OVERTOPPING TYPE SEAWALL

上久保祐志¹・入江功²・村上啓介³・神田一紀⁴・鮎川慶一郎⁵・片岡保人⁶

Yuji Kamikubo, Isao Irie, Keisuke Murakami, Kazunori Kanda, Keiichiro Ayukawa
and Yasuto Kataoka

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 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)

³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)

⁴学生員 九州大学大学院 工学研究科 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

⁵学生員 九州大学工学部 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

⁶正会員 工修 ㈱神戸製鋼所 (〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)

Authors have proposed a non-wave overtopping type seawall (Flaring Shaped Seawall) with deep circular cross section in order to facilitate a safe and excellent use of coastal space for various purposes. The seawall satisfies a non-wave overtopping condition with extremely lower crown height in comparison with conventional upright seawall. In this study, wind field near the seawall, water spray transported behind the seawall and sounds when waves running up were measured in the experiments, and compared with an upright seawall.

Key Words : Non-wave-overtopping type seawall, overtopping, , transport of spray, wind field, sound environment, sound level, spectrum of sound pressure

1. はじめに

沿岸域での様々なウォーターフロント開発に伴い、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、根本的に越波量をゼロとし、護岸上を安全に開放できる非越波型防波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、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

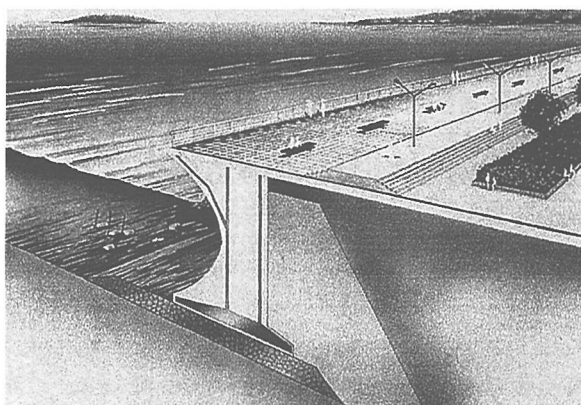


図-1 フレア型護岸の概念図

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。さらに、フレア型護岸はその形状により、風が護岸先端上部で剥離し、護岸上の風速が弱まって遮風域が形成される利点が考えられ、護岸の持つ利点の一つとして検討すべき課題である。また、水理模型実験では、波が護岸に作用する際に発生する衝撃音は、直立護岸のそれに比べてかなり大きいと感じる場合が多く、現地に施工した際には、騒音として背後地域の音環境へ影響を及ぼすことも考えられる。

本研究では、波・風作用時における風速場と飛沫輸送量および碎波音の発生特性の測定を行い、直立護岸と比較することにより、フレア型護岸における風速場、飛沫、音に着目した環境的特性を明らかにすることを目的としている。

2. 水槽実験の方法

(1) フレア型護岸近傍の風速場の測定

フレア型護岸はその形状により、護岸に作用した風が天端先端上部で剥離し、護岸上の風速が弱まる遮風効果が期待できる。この遮風効果によって、より安全に護岸上を開放できるわけであるが、どの程度の遮風効果を有するのかは不明である。ここでは、フレア型護岸近傍の風速場について、ドライアイスを用いた可視化実験⁴⁾を行い、さらに護岸周りの風速場を風速計を用いて測定し、その遮風域の形成範囲を確認する。また、比較の対象として直立護岸に関しても風速場の検討を行う。

a) ドライアイスを用いた可視化実験

ドライアイスを用いた可視化実験では、図-2に示すように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た。可視化実験では、フレア型護岸の護岸高さを $B=40.0\text{cm}$ 、天端高さを $h_c=15.0\text{cm}$ および 25.0cm とした。可視化実験方法としては、ドライアイスの昇華を利用したミスト法を用いた。ミスト法を用いた可視化実験では、速い風速で実験を行うことができないために、遅い断面平均風速 $U_0=2.0\text{m/s}$ の風を起こし、護岸前面にドライアイスを投入してビデオカメラで撮影した。実験において造波は行っていない。

b) 護岸近傍の風速の測定に関する実験

護岸近傍の風速を測定する実験では、図-2に示す風洞実験水槽の内部に勾配1/20の不透過傾斜海浜を設置し、その上に護岸高さ $B=40.0\text{cm}$ のフレア型護岸および直立護岸を設置した上で、断面平均風速 $U_0=5.0\text{m/s}$ の風を起こして護岸近傍の風速をベーン式風速計により測定した。風速の測定地点は、護岸上部先端より岸側水平方向に $0.0\text{cm}\sim 50.0\text{cm}$ の範囲で、鉛直方向に $2.0\text{cm}\sim 2.5\text{cm}$ 間隔で測定した。また、

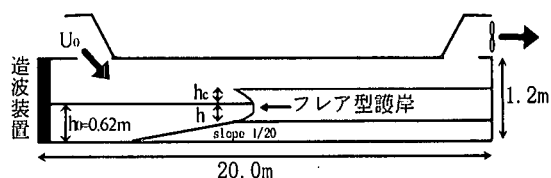


図-2 実験装置図（風速場の測定）

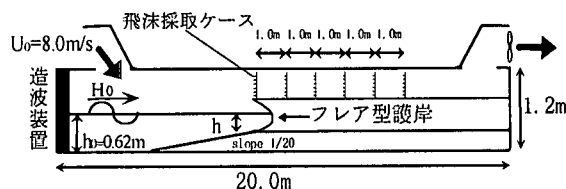


図-3 実験装置図（飛沫量の測定）

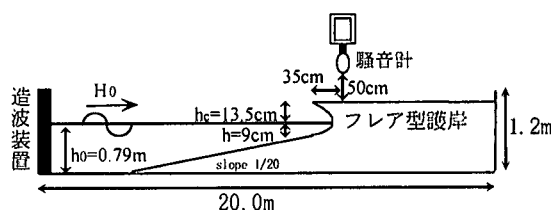


図-4 実験装置図（音の測定）

この実験においても波は造波させていない。

(2) フレア型護岸背後の飛沫輸送量の測定

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る⁵⁾⁶⁾⁷⁾。実験は、図-3に示す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。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 $H_0=11.0\text{cm}$ 、碎波帯内では、護岸高さ $B=22.5\text{cm}$ で天端高さ $h_c=11.0\text{cm}$ 、波高 $H_0=14.0\text{cm}$ の条件で実験を行った。飛沫量の測定位置は、護岸先端から岸側方向に対して 1.0m 毎に4～6断面を取り、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・単位面積あたりに輸送される飛沫量 $Q(\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ の鉛直分布を求めた。また、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。

(3) フレア型護岸の波作用時における発生音の測定

これまでの水理模型実験において、フレア型護岸に波が作用する際に発生する音は、直立護岸のそれに比べてかなり大きい衝撃音を発生する場合が多かった。そこで、護岸に波が作用した際に発生する音を実験室レベルで測定して検討し⁸⁾⁹⁾、音を緩和させる方法を見出す必要がある。実験は、図-4に示す2次元造波水槽（長さ 20.0m 、高さ 1.2m 、幅 0.6m ）に勾配1/20の不透過傾斜海浜を設け、その上にフレア型護

岸断面および、直立護岸断面（ $B=22.5\text{cm}$ ）を設置して行った。また、護岸前面に直径 2.2cm の塩ビパイプを格子状に組み合わせた、空隙率 43.1% の消波工（岸沖方向 198mm 、天端高さ 40mm ）を設置した場合についても実験を行った。設置水深は $h=9\text{cm}$ 、沖水深は $h_0=79\text{cm}$ とし、入射波としては、波形勾配 $H_0/L_0=0.036$ のもと、 $H_0=6.0\text{cm}\sim 12.0\text{cm}$ の規則波を用いた。測定は、リオン（株）製の精密騒音計（NA-27）をA特性として接続し、1/3オクターブ分析機能を用いて、 0.02 秒間隔の瞬時値を連続 1000 画面（ 20 秒間）計測した。騒音計は、護岸天端先端より高さ 50cm 、岸方向に 35cm の位置に設置した。

3. 実験の結果と検討

(1) フレア型護岸近傍の風速場の測定

a) ドライアイスを用いた可視化実験

ドライアイスを用いて可視化した実験の結果を図-5に示す。このスケッチはビデオで撮影されたドライアイスの軌跡を簡単にスケッチしたものである。図中の矢印は、ドライアイス煙のおおまかな軌跡を表している。図-5(a)は護岸高さを $h_c=15.0\text{cm}$ とした場合であり、図-5(b)は護岸高さを $h_c=25.0\text{cm}$ とした場合である。どちらの図においても護岸天端上で剥離が生じている様子が見られており、特に護岸高さが高い(b)の場合の方が、剥離の効果が大きい様子を確認できた。この剥離層の中は風速が小さいので、護岸上の人や物が受ける風や飛沫の影響を軽減できる可能性が高いと思われる。また、フレア型護岸と静水面の間には渦が生じており、護岸高さによってはこの渦があることによって護岸断面に沿って上昇する風があまり生じず、剥離の効果が小さくなる場合もある。

b) 護岸近傍の風速の測定に関する実験

図-6は、風速計によって求められた護岸近傍における風速 U を沖側断面平均風速 U_0 で除した値 U/U_0 についてのコンター図を示したものである。4つのグラフはそれぞれ護岸の種類および天端高さが異なっており、横軸に $X(\text{cm})$ 、縦軸に $Z(\text{cm})$ を護岸先端からの距離として取っている。風速が大きい領域は色を濃く、風速が小さい領域は色を薄くして示している。この図より、フレア型護岸の上部には風速が小さくなる領域が生じており、ある程度の遮風効果があるものと考えられ、その効果は、フレア型護岸の方が直立護岸よりも、また、天端高さが低い方よりも高い方が大きい。

(2) フレア型護岸背後の飛沫輸送量の測定

図-7(a)～(c)は護岸を沖浜帯に設置した場合の、護岸頂部先端を0とした測定位置 $X(\text{m})$ 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、横軸は飛沫量 $Q(\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{s})$ を示している。護岸頂部での飛沫量を測定した図-7(a)を見ると、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

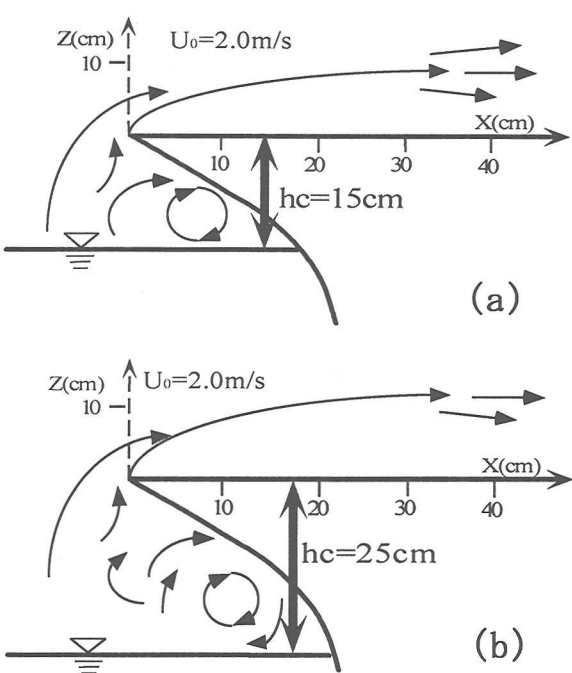


図-5 ドライアイスの流れの様子

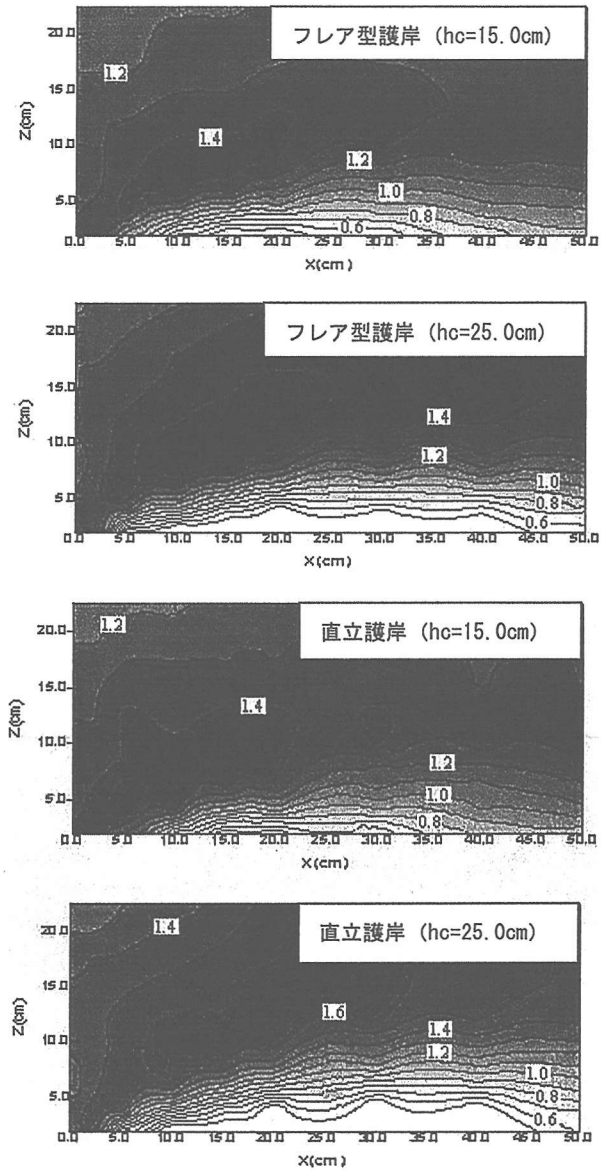


図-6 等風速図

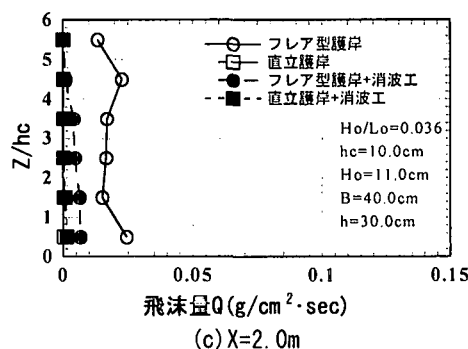
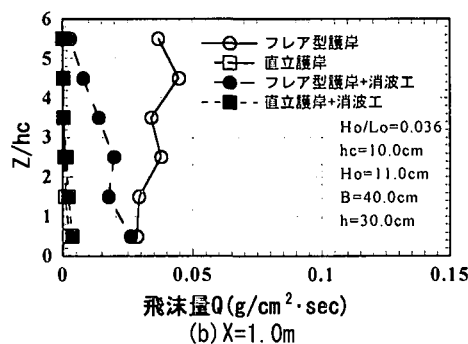
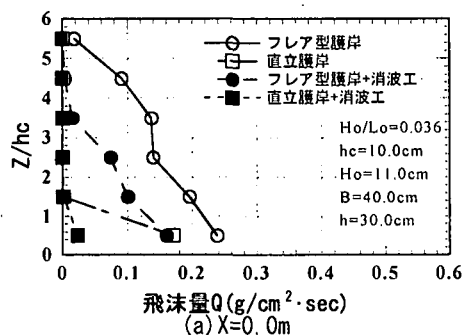


図-7 飛沫輸送量（沖浜帯）

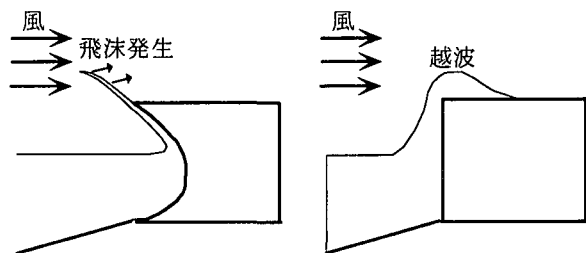


図-8 飛沫発生の様子（沖浜帯）

これは、図-8 に示すように、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、フレア型護岸では冲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。さらに、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が、これは消波工を設置することによって波高が減衰され、護岸に作用した際の打ち上げ高さが小さくなるためである。また、飛沫量は、護岸頂部において最も多く、護岸先端から岸側に移動するにしたがって飛沫量は減少しているが、消波工を設置しない場合のフレア型護岸から発生した飛沫が、より遠くまで運ばれていることがわかる。

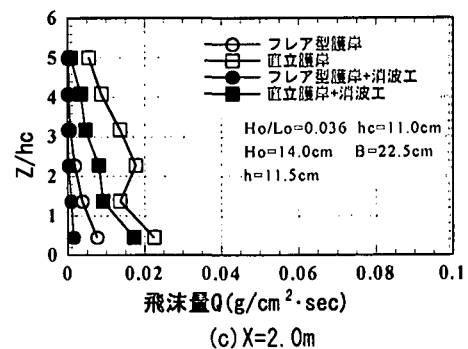
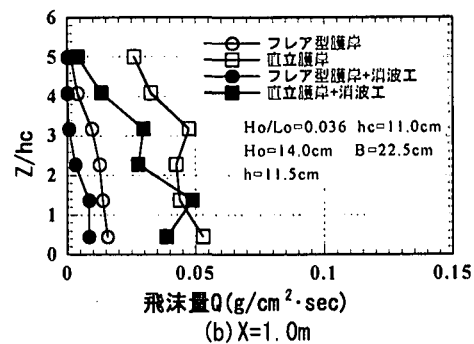
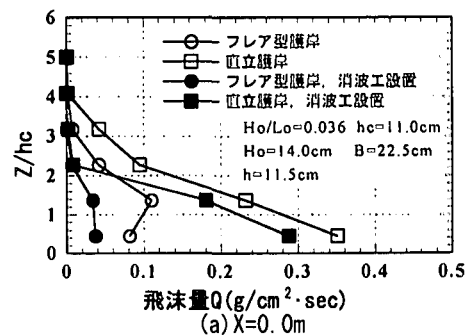


図-9 飛沫輸送量（碎波帯内）

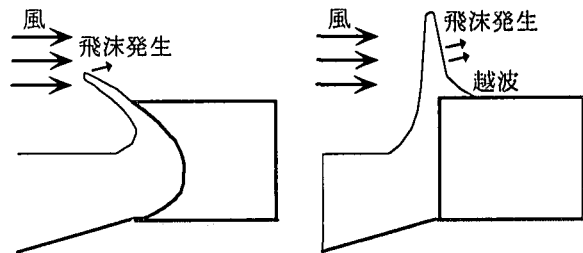


図-10 飛沫発生の様子（碎波帯内）

図-9(a)～(c)は護岸を碎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。この理由としては、図-10 に示すように、直立護岸では碎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岸側へ輸送される。一方、フレア型護岸では、沖浜帯で見られた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、護岸に作用した際の打ち上げ高さが小さくなるために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。飛沫量は、護岸頂部において最も多く、護岸先端から岸側へ移動するにしたがって飛沫量は減少している。

以上より、フレア型護岸を砕波帯内に設置した場合には、沖浜帯に設置した場合よりも飛沫量を大幅に低減できることがわかった。

(3) フレア型護岸の波作用時の音の測定

音の発生状況は、波面形状の位相によって異なっている。図-11は各位相 (PHASE) において発生した音の騒音レベルを示しており、横軸のPHASEは、図-12に示す波面の形状を表している。つまり、護岸に波を作用させる際に、騒音レベルがピークを示す特徴的な現象を、PHASE 1(引波時)、PHASE 2(砕波時)、PHASE 3(消波工作用時)、PHASE 4(護岸作用時)、PHASE 5(落水時)として示したものである。CASE1はフレア型護岸、CASE2は消波工を設置したフレア型護岸、CASE3は直立消波護岸を示している。図-11より、護岸に波が衝突するPHASE4で最大の騒音レベルを示した。また、CASE1では、CASE3に比べ騒音レベルが大きくなるが、CASE2のように消波工を設置することで緩和することが可能であり、CASE3と同程度となる。これは、消波工を設置することで護岸に作用する際の波の形が崩れ、また、作用する水塊の速度や量を減少させることができるためであると考えられる。図-13～図-15は、それぞれCASE1、CASE2およびCASE3における音圧スペクトルを示している。図-13に示すように、フレア型護岸に波が作用したときに発生する音は、160～250kHzで特有のピークを示す傾向があり、衝撃砕波圧の発生と関連性が考えられる。また、図-14のように護岸前面に消波工を設置することにより、図-13にみられたピークはなくなり、図-15に示す直立消波護岸と類似した音圧スペクトルを示した。したがって、フレア型護岸前面に消波工を設置すれば、直立消波護岸と比較しても、音環境的に問題はないと考えられる。

4. 結論

本研究では、波・風作用時における飛沫輸送量と衝撃音の発生特性の測定を行い、フレア型護岸の飛沫と音に着目した環境的特性を検討した。主要な結論を以下に示す。

- (1) フレア型護岸の上部では風の剥離が生じて護岸上の風速が弱まっていることが確認でき、遮風効果が直立護岸に比べて高い。また、護岸高さが高いほど、風速が小さくなる領域は大きくなり、遮風効果が大きい。
- (2) 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。
- (3) 護岸を砕波帯内に設置した場合には、直立護

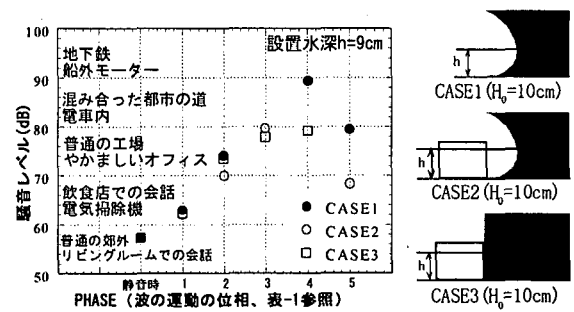


図-11 騒音レベルの相違

PHASE	波の位相の状態		波の位相の説明
	消波工なし	消波工あり	
PHASE 1			引き波時
PHASE 2			護岸前面で砕波した時
PHASE 3			消波工に波が作用して砕波した時
PHASE 4			護岸に波が衝突した時
PHASE 5			打ち上がった波が水面に落下した時

図-12 音が発生する各位相

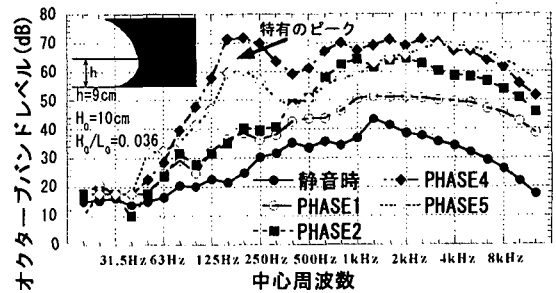


図-13 CASE1の音圧スペクトル

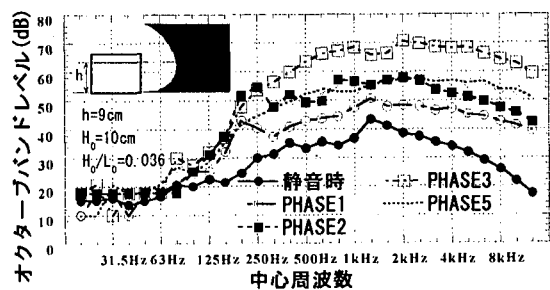


図-14 CASE2の音圧スペクトル

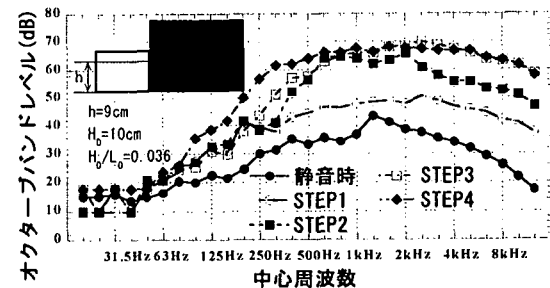


図-15 CASE3の音圧スペクトル

岸に比べてフレア型護岸の飛沫量は少ない。これは水塊の打ち上げ高さと水塊の打ち上がる形態に大きく関係していると考えられる。以上より、飛沫の発生を考慮してフレア型護岸の設置位置を考えると、沖浜帯よりも砕波帯内の方が有利である。

(4) 沖浜帯、砕波帯内において、消波工を設置した場合に飛沫量は低減していた。

(5) 波がフレア型護岸に作用する際に発生する音の騒音レベルは、他の条件に比べ大きい。消波工を設置することで緩和することが可能であり、直立消波護岸に比べても大きな値は示さない。

(6) フレア型護岸に波が作用したときに発生する音は、独特の周波数でピークを示し、衝撃砕波圧の発生と関連性があると考えられる。

参考文献

1) 村上啓介，入江功，上久保祐志：非越波型防波護岸の護岸天端高さと作用波圧について，海岸工学論文集，第43巻，pp. 776-780，1996
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) 流れの可視化学会：流れの可視化ハンドブック，朝倉書店，1986
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
8) 片山正敏：北部九州の海岸地区における音環境の基本的特性に関する計測調査，海洋開発論文集，第15巻，pp. 107-112，1999
9) 住友恒，村上仁士，伊藤禎彦：環境工学 これからの都市環境とその創造のために，理工図書