

非越波型護岸の飛沫輸送特性とその制御方法の開発

上久保祐志* ・村上啓介** ・入江 功***
吉田明德**** ・山城 賢***** ・竹鼻直人*****

著者らは、護岸上を安全で快適な親水空間として利用する目的で非越波型護岸（フレア型護岸）を提案し、その越波阻止機能や耐波安定性について研究を進めてきた。安全で快適な海岸空間を確保するためには、フレア型護岸の越波制御機能や耐波安定性に加えて、護岸背後への飛沫の輸送特性や低減対策についても十分に検討しておく必要がある。本研究では、フレア型護岸の飛沫輸送特性を明らかにするとともに、飛沫を制御する方法として護岸頂部に上部直立壁を設けることを提案し、その効果を検討した。その結果、上部直立壁を設置することで背後地への飛沫輸送量が大幅に低減でき、フレア型護岸が越波と飛沫に関して高い制御機能を持つことを明らかにした。

1. はじめに

多様化する沿岸域の利用に伴い、波浪から国土を保全するために整備される海岸護岸に対して、従来の防護機能に加えて、護岸天端を低くして景観を妨げないことや、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併せて要請されている。

護岸上を安全な空間として開放するためには越波の阻止が重要な課題となる。従来の直立消波護岸は、基本的にある程度の越波を許容して設計されるため（合田，1990）護岸上を一般の利用のために安全な空間として開放することは困難である。そこで、著者らは、越波量をゼロとすることが可能で、護岸上を安全な空間として開放できる非越波型護岸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（村上ら，1998）。

図-1 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、フレア型護岸は前傾した曲断面を有するので、護岸に作用した水塊の運動ベクトルを強制的に沖向きに変えるために越波が生じにくくなる。フレア型護岸は、直立消波護岸と同等かそれ以下の大きさの護岸断面で非越波条件を満足するため、国土保全の最前線となる「計画防護線」をより陸側に設けることが可能で、コストおよび海岸へのインパクトを大幅に軽減できる可能性がある。

フレア型護岸の越波阻止機能や耐波安定性に関する基本的な水理特性については既に検討を重ねてきた（例えば、上久保ら，1999，2000）。一方、実際の海岸への適用を考えると、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は、飛沫が発生する。この飛沫に関して、護岸背後への輸送状況および輸

送量について検討しておくことは、背後地の利用環境を保全するためにも重要である。また、フレア型護岸によって飛沫の発生が問題となるようであれば、飛沫量の低減策についても考える必要がある。

本研究では、フレア型護岸の越波量および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（上部直立壁と呼ぶ）を提案し、その飛沫量低減効果と越波制御機能を水理模型実験により検討することを目的としている。

2. 越波制御機能に関する実験

フレア型護岸から発生する飛沫量を低減させるとともに、越波量についても低減機能が期待できる上部直立壁（図-2 参照）をフレア型護岸上に設置することを考えた。ここでは、まず上部直立壁を設置したフレア型護岸の越波制御機能について述べ、次章で飛沫の輸送特性と低減効果について述べる。

（1）実験方法と実験条件

上部直立壁を設置したフレア型護岸の越波制御特性を検討する目的で水理模型実験を行った。実験は、図-3 に示す 2 次元造波水槽（長さ 20.0 m，高さ 1.0 m，奥行き

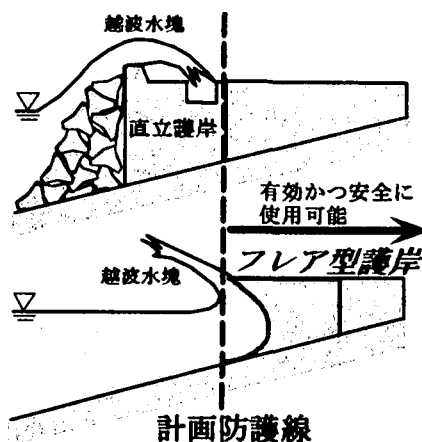


図-1 フレア型護岸の概念図

* 正会員 博(工) 八代工業高等専門学校 土木建築工学科

** 正会員 工 博 宮崎大学工学部 土木環境工学科

*** 正会員 工 博 九州大学大学院 工学研究院

**** 正会員 工 博 九州大学大学院 工学研究院

***** 正会員 博(工) 九州大学大学院 工学研究院

***** 正会員 工 修 神戸製鋼所(株)

0.5 m, 沖水深 $h_0=0.35$ m) 内に 1/20 の不透過傾斜海浜を設置し, 風洞装置により実験装置内部に風速 $U_0=8.0$ m/s の風を吹かせた。図-2 に示す各護岸断面(護岸高さ $B=22.5$ cm)について, 設置水深を $h=10.0$ cm, 15.0 cm の 2 種類, 上部直立壁の高さを $h_w=0.0$ cm, 2.5 cm, 5.0 cm, 7.5 cm の 4 種類を変化させ, 護岸の背後 1.0 m の位置に容器を設置し, 護岸の背後に越流した水量を越波量として測定した。なお, 本実験では, 造波装置による造波は行わずに, 風のみを風洞内に作用させた条件下で計測を行った。

(2) 実験結果と考察

図-4 は, フレア型護岸と直立護岸の越波流量(飛沫も含む)を比較したものである。横軸は相対水深, 縦軸は越波流量を有義波波高 $H_{1/3}$ で無次元化したものを示しており, プロットの違いは護岸形式および上部直立壁の高さ h_w の違いを示している。フレア型護岸の $h_w=7.5$ cm のプロットがグラフに書かれていないのは, このケースでは越波が全く生じていないためである。グラフより, 両護岸においても, 上部直立壁が高くなると越波流量は少なくなる傾向にあり, また, 直立護岸に比べてフレア型護岸の越波流量が少ないことがわかる。この結果より, フレア型護岸は, 上部直立壁を設置することにより越波流量が低減し, 越波制御機能が大幅に向上することがわかる。

図-5 は, 護岸の設置水深を $h=15.0$ cm とした場合について, 上部直立壁を設置することによる越波流量の低減率を示したものである。低減率は, それぞれの護岸頂部に上部直立壁を設置していない場合の越波流量を規準に定義している。横軸は, 上部直立壁の高さ h_w を天端高さ h_c ($h_c=7.5$ cm) で無次元化したもの, 縦軸は越波流量の低減率である。両護岸ともに, 上部直立壁を設けることで越波量が大幅に低減されることがわかる。特に, フレア型護岸においては, 護岸天端高さに対して 2 割程度の高さの上部直立壁を設置することで越波流量は 8 割程度低減されており, 越波制御機能が格段に高まることわかる。この効果は, 直立護岸に上部直立壁を設置する場合よりも高い。

3. 飛沫輸送特性に関する実験

(1) 実験方法と実験条件

上部直立壁を設置したフレア型護岸における飛沫の発生と輸送特性について検討する目的で実験をおこなった。実験は, 図-6 に示す長さ 20.0 m, 高さ 1.0 m, 幅 0.5 m の風洞実験水槽を用いて行った。水槽内部に勾配 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-2 参照)を設け, 護岸上に上部直立壁を設置した。風速 $U_0=8.0$ m/s, 護岸

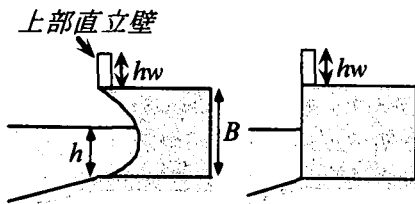


図-2 上部直立壁を設置した護岸模型

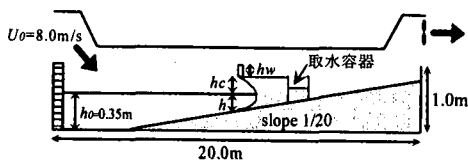


図-3 水理実験水槽

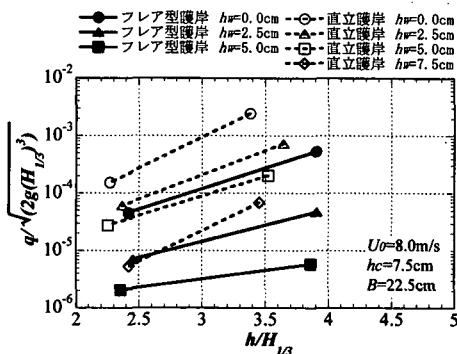


図-4 越波流量

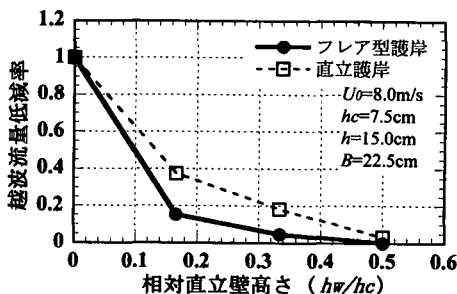


図-5 越波流量の低減率

設置水深 $h=5.0$ cm および 15.0 cm とし, 上部直立壁の護岸上部からの高さ h_w が 0 cm, 2.5 cm, 5.0 cm の場合について, 護岸背後に輸送される飛沫量を計測した。実験は造波装置により波高 $H_0=4.0$ cm $\sim$ 12.0 cm (沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.036$) の波を発生させた状態で行った。飛沫量の測定位置は, 護岸先端から岸側方向に対して 1.0 m 毎に取った 3 断面で, 松永ら(1994, 1995)の方法を参考に, 各断面において円筒形の飛沫採取ケース(直径 3.0 cm, 長さ 4.5 cm)を鉛直方向に 10.0 cm 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 ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) を求めた。

(2) 実験結果と考察

図-7 は、沖波波高 $H_0=12.0$ cm、設置水深 $h=5.0$ cm における飛沫量の空間的な分布をコンター図で示しており、護岸は砕波帯内に設置されている。グラフの (a) (b) (c) はフレア型護岸、(d) (e) (f) は直立護岸の結果であり、上部直立壁の高さは、(a) (d) は $h_w=0.0$ cm、(b) (e) は $h_w=2.5$ cm、(c) (f) は $h_w=5.0$ cm である。グラフの横軸は護岸先端から水平方向陸向きの距離 x (cm)、縦軸は、護岸上から鉛直方向上向きの距離 z (cm) を表している。両護岸ともに、護岸先端付近において飛沫量は最も多く、岸方向あるいは鉛直上方向に向かうと飛沫量は少なくなる傾向がある。特に、上部直立壁がない場合についてみると、フレア型護岸の飛沫分布量は、直立護岸に比べて格段に少なくなっている。また、上部直立壁を設置した際、上部直立壁の高さ h_w が高くなるほど、両護岸ともに護岸背後に輸送される飛沫量は少なくなり、飛沫の輸送距離も短くなっている。これらの結果より、砕波帯内にフレア型護岸を設置する場合に、護岸背後に輸送される飛沫量は直立護岸に比べて少なく、

また、上部直立壁を設けることにより飛沫量をさらに低減することが可能であることがわかる。

図-8 は、沖波波高 $H_0=6.0$ cm、設置水深 $h=15.0$ cm における飛沫量の空間的な分布をコンター図で示したもので、護岸は沖浜帯に設置されている。グラフの (a) (b) (c) はフレア型護岸、(d) (e) (f) は直立護岸の結果であり、上部直立壁の高さは、(a) (d) は $h_w=0.0$ cm、(b) (e) は $h_w=2.5$ cm、(c) (f) は $h_w=5.0$ cm である。グラフの横軸は、図-7 と同様に護岸先端から水平方向陸向きの距離 x (cm)、縦軸は、護岸上から鉛直方向上向きの距離 z (cm) を表している。上部直立壁がない図-8 (a) と (d) を比較すると、フレア型護岸を沖浜帯に設置した場合の飛沫量は直立護岸に比べて多くなっている。この

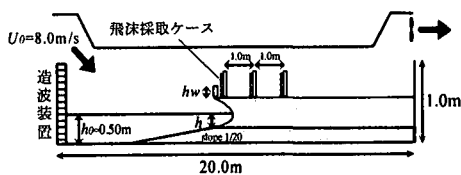


図-6 水理実験水槽

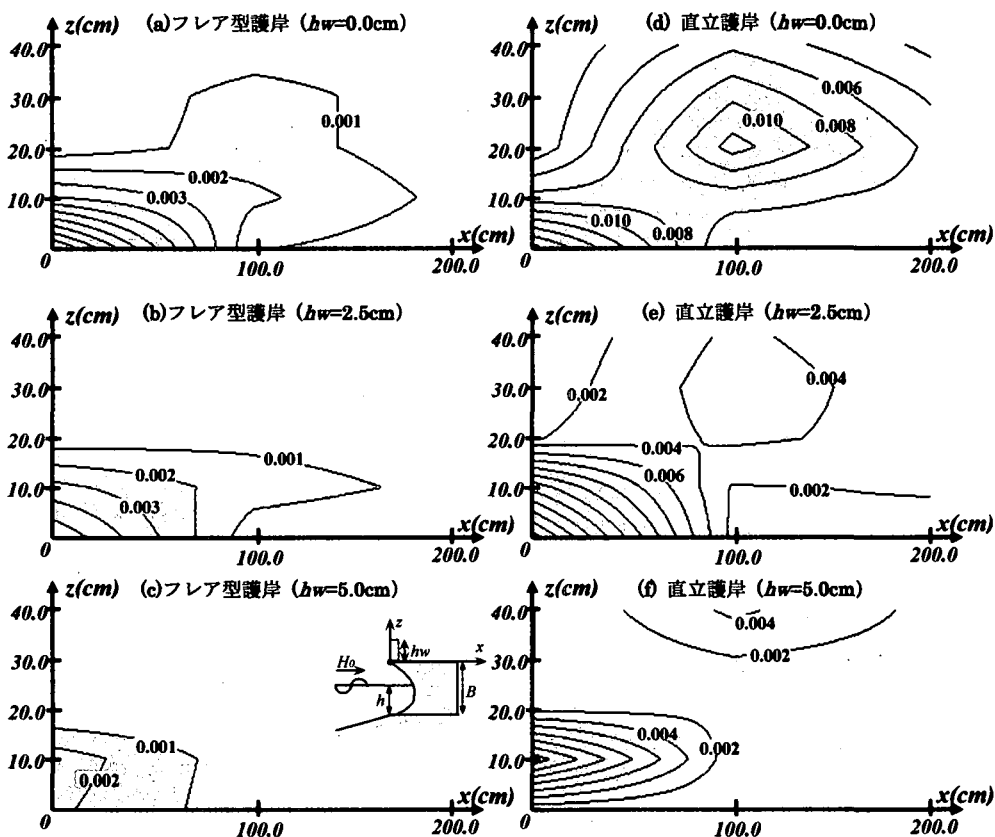


図-7 飛沫輸送分布 (砕波帯内)

理由としては、直立護岸では護岸に作用した水塊により多量の越波が生じており ((e) (f) でも発生していた)、その影響で飛沫が発生しにくくなっているためである。両護岸ともに、護岸上部に上部直立壁を設置した場合、その高さ h_w が高くなるほど、護岸背後に輸送される飛沫量は少なくなり、飛沫が輸送される距離も短くなる傾向は図-7と同様である。ただし、上部直立壁による飛沫量の低減効果は砕波帯内における効果よりも小さい結果となった。また、フレア型護岸背後に輸送される飛沫量は直立護岸とほぼ同程度か若干小さくなる程度で、砕波帯に設置した場合ほど大きな違いは見られなかった。

図-9および図-10は、上部直立壁をフレア型護岸上に設けることによる飛沫量の低減割合を示したものである。低減割合は、水平方向の各測定地点において、フレア型護岸の鉛直方向の飛沫量を積分した値を求め、各上部直立壁高さについて $x=0.0$ cmにおける飛沫量を規準に定義した。図-9は、フレア型護岸を砕波帯内に設置した図-7の結果をもとに計算したものである。また、図-10はフレア型護岸を沖浜帯に設置した図-8の結果をもとに計算したものである。グラフの横軸は護岸先端から水平方向陸向きの距離 x (cm)、縦軸は飛沫量の低減

割合を表している。それぞれのプロットの違いは上部直立壁の高さ h_w の違いを示している。

図-9に示す砕波帯内での結果を見てみると、上部直立壁を設けることにより、陸方向へ輸送される飛沫量は格段に減少し、高い低減効果が得られることがわかる。一方、沖浜帯に設置した場合の結果である図-10を見てみると、陸方向への飛沫量の低減割合は上部直立壁の高さに強く依存していないことがわかる。

図-11および図-12は、フレア型護岸および直立護岸を砕波帯内に設置した場合の、飛沫および越波が発生する様子の写真である。護岸頂部には上部直立壁 ($h_w=2.5$ cm) を設置している。フレア型護岸では、波の打ち上げ高さが小さく、護岸頂部から射出された水塊は上部直立壁により護岸背後に輸送されずに効果的に阻止されている様子がわかる。一方、直立護岸では、護岸前面に作用した水塊は鉛直上向きに打ちあがり、岸向きの風によって容易に背後に輸送される。このように、フレア型護岸に上部直立壁を組み合わせることで、越波および飛沫の背後への輸送は効果的に制御できる。

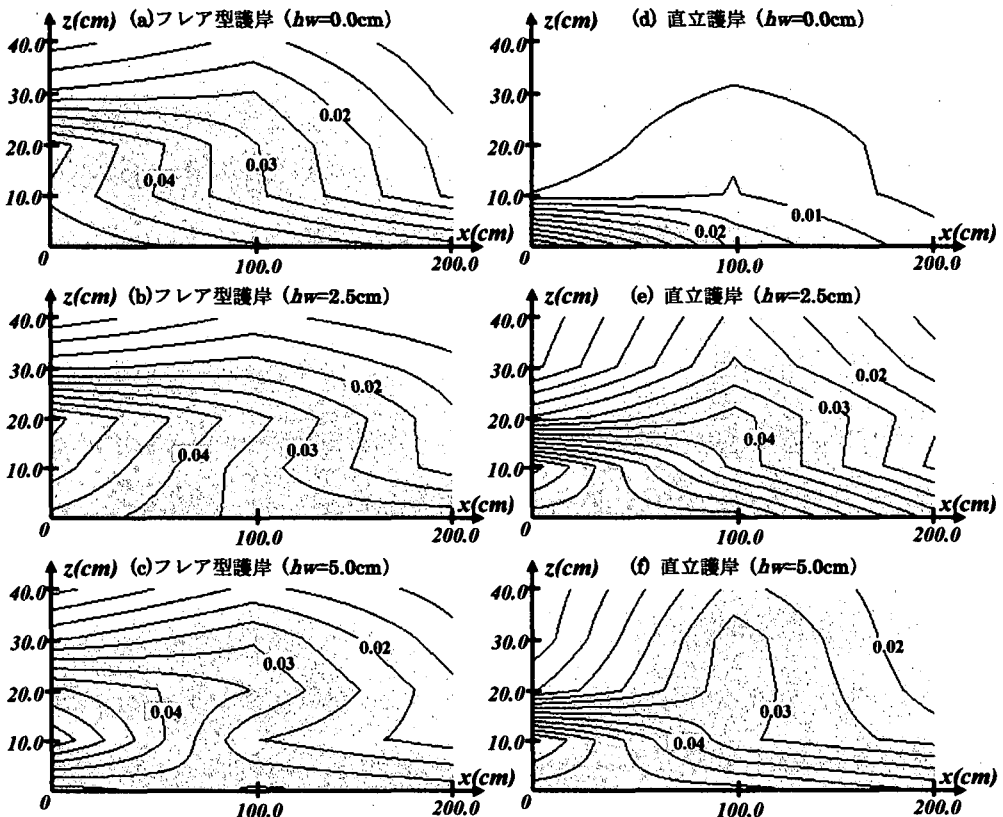


図-8 飛沫輸送分布 (沖浜帯)

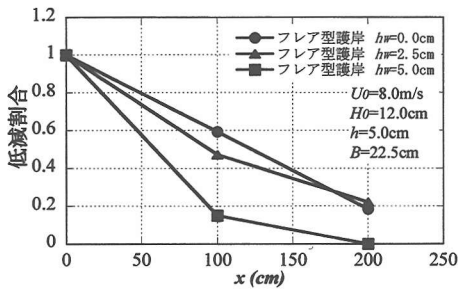


図-9 飛沫量の低減割合 (砕波帯内)

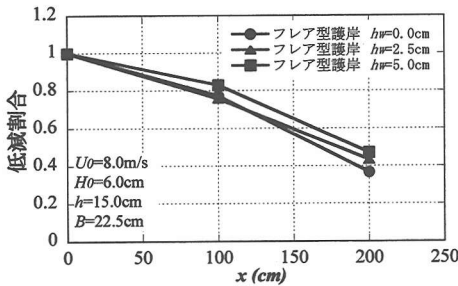


図-10 飛沫量の低減割合 (沖浜帯)

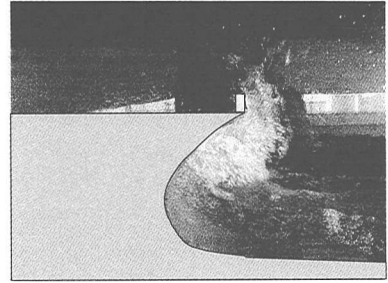


図-11 飛沫・越波の発生の様子 (フレア型護岸)

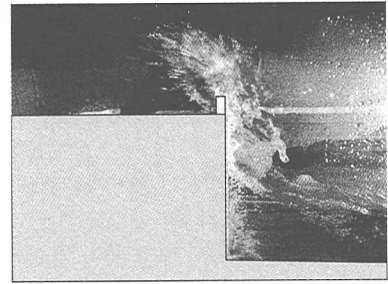


図-12 飛沫・越波の発生の様子 (直立護岸)

4. 結 論

本研究では、風浪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) フレア型護岸の天端上に護岸天端高さに対して20%程度の高さの上部直立壁を設置することで、越波制御機能を更に高めることができる。上部直立壁を設置することによる越波阻止機能の向上効果は、直立護岸に比べてフレア型護岸の方が高い結果となった。

(2) フレア型護岸を砕波帯内に設置する場合、上部直立壁の高さ h_w が高くなるほど護岸背後に輸送される飛沫量は少なくなり、飛沫が輸送される距離も短くなる。フレア型護岸と直立護岸を同じ上部直立壁高さの条件で比較すると、フレア型護岸は直立護岸に比べて飛沫量は格段に少ない結果となった。

(3) フレア型護岸を沖浜帯に設置する場合、上部直立壁の高さ h_w が高くなるほど護岸背後に輸送される飛沫量は少なくなり、飛沫が輸送される距離も短くなる。ただし、上部直立壁を設ける効果は、砕波帯内に護岸を

設置する場合に比べて小さい。

(4) フレア型護岸を砕波帯内に設置する場合、上部直立壁を設けることにより、陸方向へ輸送される飛沫量は格段に減少し、高い低減効果が得られる。一方、フレア型護岸を沖浜帯内に設置する場合、陸方向へ輸送される飛沫量の低減割合は上部直立壁の高さに強く依存しない。

参 考 文 献

- 上久保祐志・入江 功・村上啓介・神田一紀・片岡保人・濱崎義弘 (1999): 浅海域を対象とした非越波防波護岸断面の基礎的特性について, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 25-30.
- 上久保祐志・村上啓介・入江 功・神田一紀・鮎川慶一郎 (2000): 非越波型護岸の防災特性に関する研究, 海岸工学論文集(2), 第47巻, pp. 796-800.
- 合田良実 (1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 112-119.
- 松永信博・植田 操・入江 功 (1994): 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.
- 松永信博・植田 操・鶴崎賢一 (1995): 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.
- 村上啓介・上久保祐志・入江 功・香月 理・片岡保人・中岡威博 (1998): 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.