

フレア護岸の水理特性におよぼすマウンドの影響 AN EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECTS OF MOUND ON HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF THE FLARING SHAPED SEAWALL

市川靖生¹・片岡保人²・榊原健男³・竹鼻直人¹・入江功⁴・村上啓介⁵
Yasuo ICHIKAWA, Yasuto KATAOKA, Takeo SAKAKIBARA, Naoto TAKEHANA,
Isao IRIE and Keisuke MURAKAMI

- ¹正会員 工修 (株)神戸製鋼所 都市環境・エンジニアリングカンパニー 構造技術部 (〒657-0845 神戸市灘区岩屋中町4-2-15)
- ²正会員 工修 (株)神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所 (〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)
- ³(株)コベルコ科研 技術本部 エンジニアリングメカニクス事業部 試験評価部 (〒660-0083 尼崎市道意町6-32)
- ⁴正会員 工博 九州大学教授 工学研究院 海洋システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
- ⁵正会員 工博 宮崎大学助教授 工学部 土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

A Flaring Shaped Seawall (FSS), a new type of one, can drastically reduce a crest height and wave overtopping quantity in comparison with a conventional upright one. The FSS will usually be set on a mound from the point of a cost of manufacturing and construction. Thus, in this paper, effects of the mound on hydraulic characteristics of the FSS (a wave overtopping rate, a wave run-up height and a reflection coefficient) are clarified from experiments using a two-dimensional flume. Furthermore a method for the FSS on the mound is proposed, and it is shown that the method is adequate under the condition of experiments in this paper.

Key Words : Flaring shaped seawall, mound, wave overtopping rate, reflection coefficient, wave run-up height

1. はじめに

海岸線領域において、台風等による高波・高潮で越波が起こり、背後の人家に被害を及ぼすことや、臨海道路が通行止めになるといったことが頻発している。国土交通省による「港湾の技術開発長期政策」の中にも「良好な沿岸域環境の継承と創造」「安全で安心な暮らしを支える港湾」が掲げられている。このような安全の確保に筆者らはこれまで水理特性、景観性等に優れたフレア護岸^{1)~8)}を提案してきた。フレア護岸とは、写真-1のように、護岸前

面が沖側に張り出した独特の円弧形状により、低天端でありながら越波を大幅に低減できる護岸である。前報⁷⁾では、不規則波による系統的な水槽実験を行い、フレア護岸の越波量を計測し、直立護岸および消波ブロック被覆護岸のそれと比較検討した。その際、実設計における利用の便も考え、港湾の技術上の基準・同解説⁹⁾に示されている越波流量推定図と同様の整理を行った(図-1)。

実際にフレア護岸を設計する場合、経済性や施工性などの面からフレア護岸を捨石マウンド上に設置

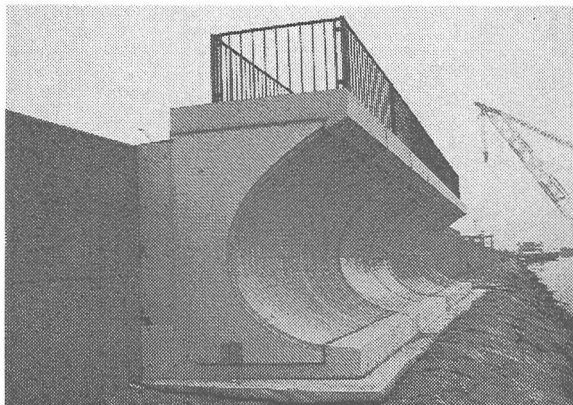


写真-1 フレア護岸の試験設置例⁸⁾

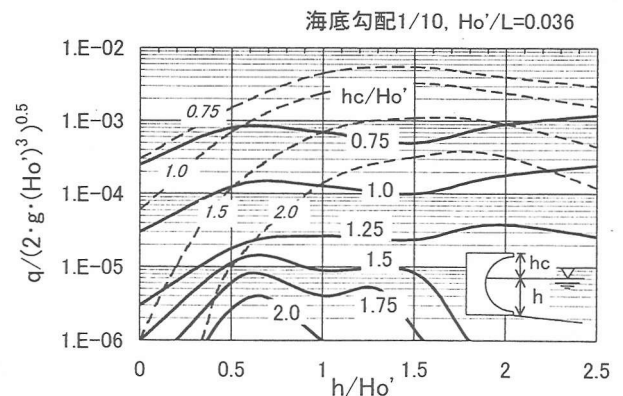


図-1 フレア型護岸の越波流量推定図⁷⁾
(実線…フレア護岸, 破線…直立護岸)

するのが合理的と思われる。しかしフレア護岸を設計するにあたって重要である越波流量推定図⁷⁾は基本的に直接地盤上に設置した場合を想定したものであり、捨石マウンド上にフレア護岸を設置した場合の設計に適用すると越波量を過大評価することがわかった。

また既存の越波を抑える消波ブロック被覆護岸は、捨石による影響を考慮するような構造にはなっておらず、この設計手法を使ってフレア護岸を設計することは不可能である。さらに既存の港湾構造物で捨石を考慮に入れた構造物は防波堤しかなく、波圧式が捨石の影響を含んだ形になっている。

そこで本研究では、ある条件のもとで、捨石マウンド上にフレア護岸を設置する際の設計手法を提案し、その妥当性を水理実験により明らかにすることを目的とした。

2. マウンド設置時のフレア護岸の設計手法

護岸の断面設計において、直立護岸や消波ブロック被覆護岸の場合には設置堤脚水深 h 、沖波換算波高 H_0' 等の設計条件を元に、港湾の技術上の基準・同解説に示された越波流量推定図を用いて許容越波流量を満たすよう天端高さを決定する、もしくは打上げ高さ算定図¹⁰⁾を用いて天端高さを決定し、その後、堤体の安定計算等を行い、標準断面を決定するのが一般的である。

越波流量推定図、打上げ高さ算定図はともに斜面上にこれらの護岸を設置したものであるが、護岸の基礎にマウンドを設置した場合においても堤脚水深 h で越波流量もしくは打上げ高さを算定すればよい。

一方フレア護岸においては、マウンド設置時に同様の設計手法を適用すると、フレア護岸はその特殊な形状ゆえに、マウンドの高さによりフレア護岸の形状が変化してしまう。つまり、堤脚水深 h 、天端高さ hc をある値に決定しても、図-2のようにマウンドの高さが異なり、フレア護岸本体の大きさが相対的に異なる場合が想定され、最適なフレア護岸形状の決定が困難である。

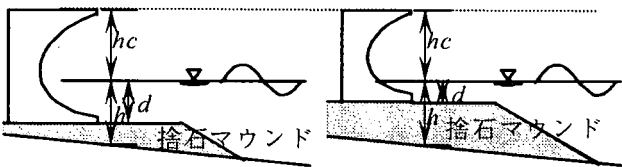


図-2 同一堤脚水深・天端高さのフレア護岸断面例
a)マウンドが低い場合 b)マウンドが高い場合

そこで、マウンド設置時のフレア護岸の天端高さを決定するにあたり、図-3のように海底勾配が陸側に続いているものと仮定し、設置マウンド上水深 d とマウンドがない場合の前面水深 h が同じ場合、沖波換算波高 H_0' が同じであれば、マウンド上の波高

と、勾配を延長した位置での波高がほぼ等しいものとする。この考えに基づき護岸の最適断面を決定する手法を試みる。

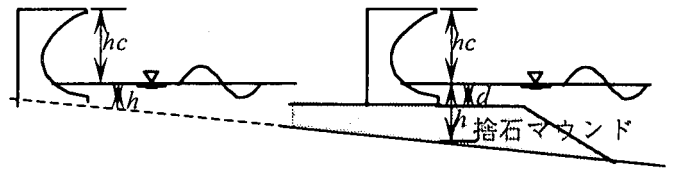


図-3 海底勾配延長の仮定方法

3. 水槽実験方法および条件

(1) 実験条件

今回の実験で対象としたのは、内湾で波浪が比較的穏やかである箇所を想定し、護岸高さ $B=3.5\sim 4.5m$ 、縮尺 $1/22\sim 1/27$ 、沖波換算波高 $H_0'=1.2\sim 1.9m$ 、設置マウンド高さを約 $1m$ 又は $2m$ の2種類を想定して行った。

護岸モデルの高さ B は $16cm$ とし、形状は円弧部奥行き深さ D と護岸高さ B の比は $D/B=0.52$ とした。また、水槽の沖側（造波板側）水深は $h_0=76cm$ とした。

実験は、不規則波、規則波で行い、不規則波で越波流量及び反射率を、規則波で水塊打ち上げ高さを計測した。実験で用いた入射波はいずれも $H/L=0.012, 0.024$ の2種類とした。不規則波実験では、沖波有義波高 $H_0'=5.5\sim 7cm$ 、設置マウンド上水深 $d=5\sim 12cm$ の範囲とし、規則波実験では沖波波高 $H_0=5\sim 11cm$ 、護岸設置水深 $h=0\sim 3cm$ の範囲とした。実験条件のまとめを表-1に記す。

表-1 実験条件

		実験値	想定護岸
海底勾配		1/10	
波形勾配 H_0'/L		0.012・0.024	
護岸高さ B		16cm	3.5~4.5m
縮尺		—	1/22~1/27
不規則波	沖波有義波高 H_0'	5.5~7.0cm	1.2~1.9m
	マウンド上水深 d	5.0~12.0cm	1.1~3.2m
規則波	沖波波高 H_0	5.0~11.0cm	1.2~1.9m
	マウンド上水深 d	0.0~3.0cm	0.0~0.8m
マウンド高さ	A	4.0cm	0.9~1.1m
	B	8.5cm	1.9~2.3m
マウンド肩幅		16cm	3.5~4.5m

(2) 実験方法

水槽実験は、2次元吸収制御式造波水槽（長さ $30m$ 、高さ $1.2m$ 、幅 $0.6m$ ）中に $1/10$ 海底勾配を模擬した塩化ビニル製の不透過斜面を設置し、その斜面上に同じく塩化ビニル製のフレア護岸モデルを鋼製治具で

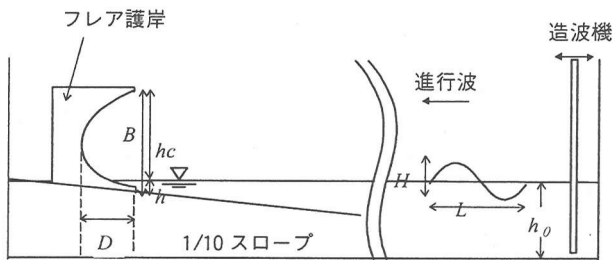
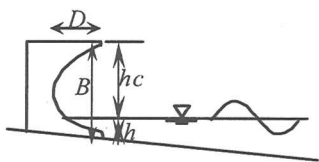
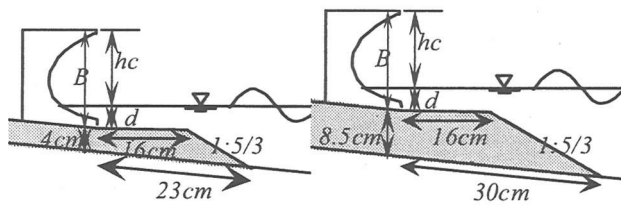


図-4 実験状況の概要



a)マウンドなし



b)マウンドA設置時 c)マウンドB設置時

図-5 実験に用いたモデル

固定して行った(図-4)。護岸モデルは、図-5に示すように、直接スロープ上に設置した場合と図のような形状のマウンドA・Bの2種類のマウンドを設置した場合の3種類とした。マウンドの影響を明らかにするため、マウンド上水深 d 及びマウンドが無い時の堤脚水深 h が等しくなるようにスロープ上に設置した。マウンドは2~5cm程度の径の石を敷き詰め、形状が崩れないよう、表面を2.5mm角のメッシュの金属網で覆った(写真-2)。



写真-2 実験に用いたマウンド拡大写真
(マウンドA)

○不規則波実験・・・不規則波は、修正Bretschneider-光易型の周波数スペクトルを基準とし、作成した波の入射波のスペクトルがこれとほぼ一致するようにした。ここで、入射波は、造波板から7m岸側に2本の波高計を設置し、入射波分離により求めた。不規則波は造波開始1分後から11分間(最長の有義周期の波が最低200波入る時間)の波をひとつの波群とした。越波流量は、護岸モデル上に30cm幅の水路を

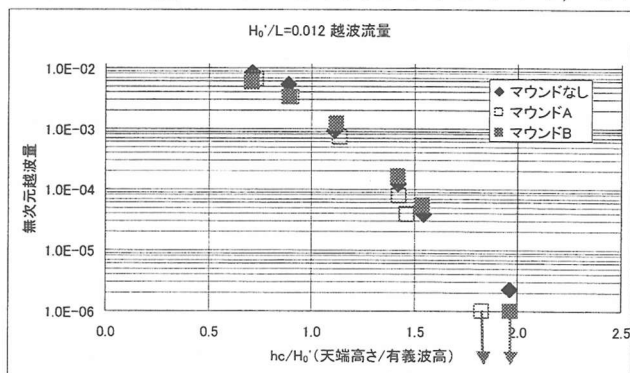
設け、岸側容器に越波水を回収し、単位時間、単位幅あたりの量を算出した。水路は、肉厚0.5mmの金属板で作製し、越波流量への水路肉厚の影響が極力小さくなるようにした。越波流量はひとつの設置水深、波浪条件に対して、2回ないし3回計測し、平均値を求めた。また、護岸の反射率¹¹⁾も同時に計測した。

○規則波実験・・・打ち上げ高さ計測は、水槽側面からデジタルビデオカメラで撮影し、その動画をパソコンに取り込んだ上で、2値化処理・平滑化処理・ピークサーチ等の画像解析を行い、1波ごとの水面からの水塊の打上げ高さ R を求めた。なお、水塊打上げ高さ R は造波開始から30波の平均値とし、打上げ高さ上位1/3波の平均値、下位1/3波の平均値も併せてプロットし、ばらつきの度合いを表した。

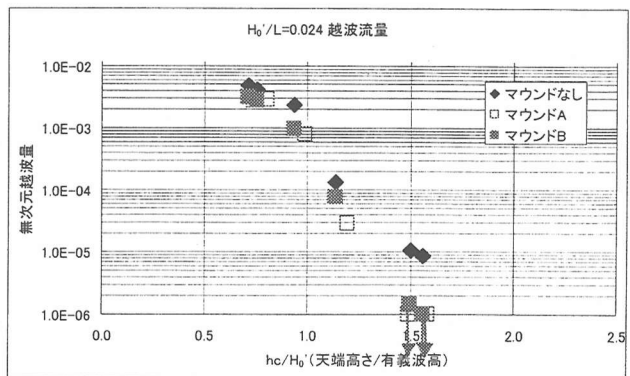
4. 実験結果と考察

(1) 越波流量

図-6に越波流量試験結果を示す。a)は波形勾配 $H_0'/L=0.012$ のケース、b)は波形勾配 $H_0'/L=0.024$ のケースを示している。横軸は護岸天端高さ hc を沖波有義波高 H_0' で除した hc/H_0' を、縦軸は無次元越波流量 $q/\sqrt{2g(H_0')^3}$ を示し、それぞれマウンドなし、マウンドA設置時、マウンドB設置時、計3種類のフレア護岸の越波流量をプロットしている。いずれも右肩下がりのはほぼ同じ分布であり、越波流量の少ないケースで値にばらつきが大きくなるものの、それ



a) 波形勾配 $H_0'/L=0.012$



b) 波形勾配 $H_0'/L=0.024$

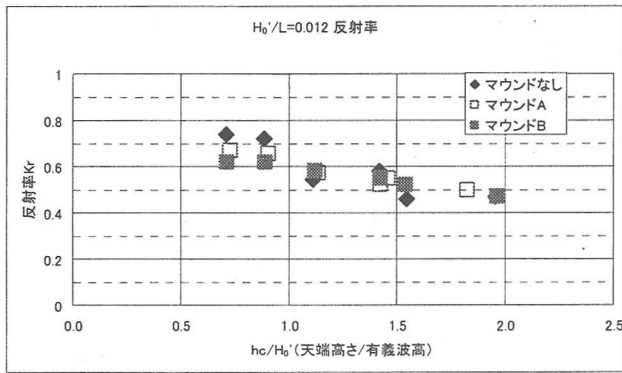
図-6 越波流量試験結果

を除けばどちらの波形勾配においてもほぼ同等の越波流量であるといえる。これは、フレア護岸の越波流量に関する水理特性が静水面上の円弧部の懐部分の形状、大きさが支配的であるためと思われる。

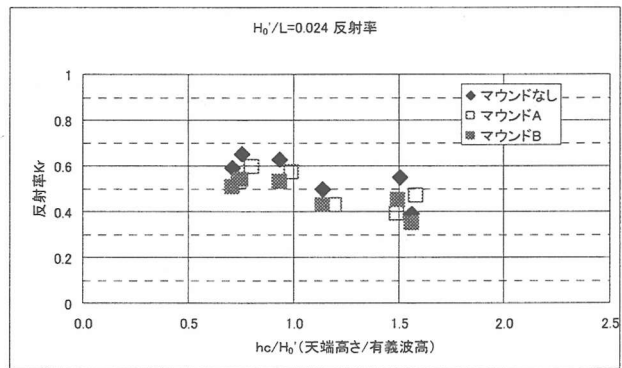
したがって越波流量に関しては、今回フレア護岸に関して提案したマウンドの設計法が妥当であるといえる。すなわち沖波換算波高 H_0' 及びマウンド上水深 d で水理特性が決まるため、これらを決めればマウンド設置時においても、前報でまとめた斜面上に設置した場合のフレア護岸の越波流量推定図を用い、天端高さを決定することができる。

(2) 反射率

図-7は越波流量計測時に併せて計測した反射率の測定結果を示している。横軸は越波流量図と同じく hc/H_0' で整理している。マウンド設置により、概ね反射率が低下する傾向にあり、マウンドの大きさが大きくなるほど反射率が低下するようである。また



a) 波形勾配 $H_0'/L=0.012$



b) 波形勾配 $H_0'/L=0.024$

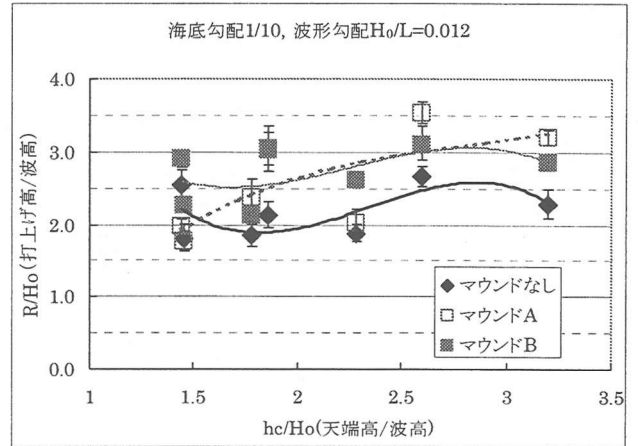
図-7 反射率

比較的水深の浅いケース ($hc/H_0' > 1.5$) だけを見ればいずれの反射率もあまり変わらないことがわかる。

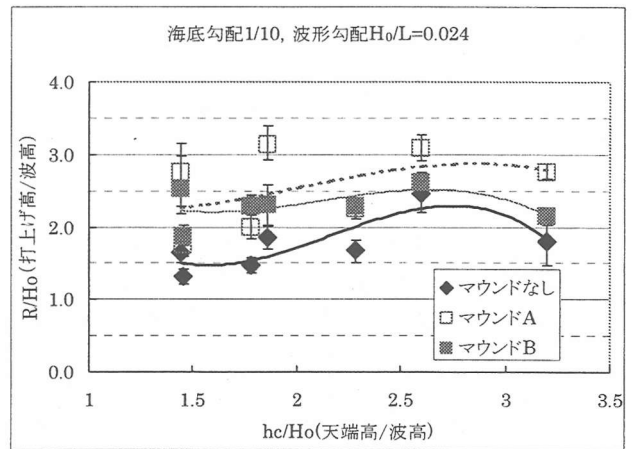
水深が深いケースは重複波に近いことと、フレア護岸本体が沖に波を返す際に水深が深いと護岸前面の波をかく乱する効果が小さくなるため、マウンドによる消波性能に依る部分が大きいですが、水深が浅くなるに従い、フレア護岸本体の消波性能が大きくなり、また波の浅水変形、碎波変形の影響も大きくなるため、反射率の違いが小さくなるものと思われる。

(3) 打上げ高さ

まず、写真-3に同一条件下における、マウンドなし・マウンドA設置時・マウンドB設置時の各フレア

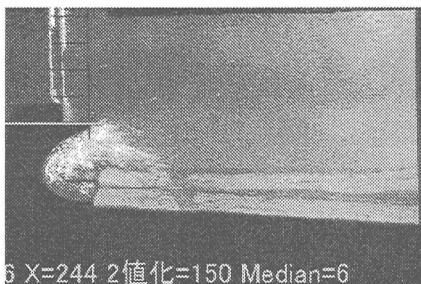


a) 波形勾配 $H_0'/L=0.012$

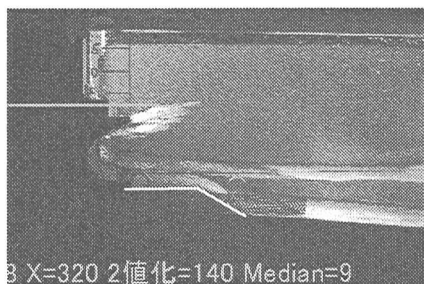


b) 波形勾配 $H_0'/L=0.024$

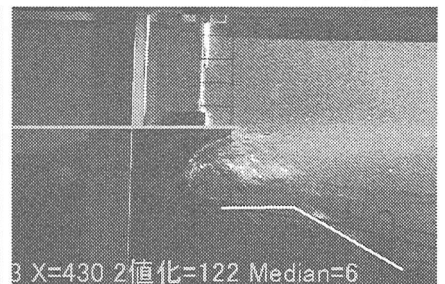
図-8 水塊打上げ高さ



a) マウンドなし



b) マウンドA設置時



c) マウンドB設置時

写真-3 フレア護岸水塊打上げ例
(波高 $H_0=5\text{cm}$, $H/L=0.024$, 水深 h or $d=3\text{cm}$)

護岸の水塊打ち上げ状況を撮影した写真の一例を示す。いずれもフレア護岸の円弧形状によりスムーズに波を返しており、打ち上がった水塊の向きは他の護岸と逆の沖側で、越波し難い構造になっていることも分かる。またこの条件においてはマウンドAを設置した場合水塊が最も大きく打ち上がっていることがわかる。

続いて打ち上げ高さ波高比 R/H_0 と天端高さ波高比 hc/H_0 の関係をまとめたものを図-8に示す。越波流量のようにほぼ同等の打ち上げ高さとはいえないものの、全般的な傾向は似ており、何らかの係数を掛け合わせることによって、マウンドの特性の評価が出来るのではないかとと思われる。またマウンドAのケースで打ち上げ高さが大きくなったのは、入射波の条件とマウンドの形状から碎波点に近い条件となったためではないかと考えられる。

5. まとめ

フレア護岸をマウンド上に設置する場合の水理特性を斜面上に直接設置した場合の水理特性から推定する方法を提案し、比較的静穏な波浪条件のもとでの水理実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 越波流量に関しては、今回用いたマウンド及び実験条件においては、設置マウンド上水深 d と、マウンドなし条件で海底勾配を延長した水深 h が等しければ、同様の越波量であった。
- (2) したがって越波流量に関しては、本報で提案した設計手法が適用できるものと考えられる。つまり、沖波換算波高 H_0' とマウンド上水深 d で水理特性を決めることができる。
- (3) 反射率はマウンド部の消波効果により、マウンド設置時の方が概ね低減する傾向にある。
- (4) 水塊打ち上げ高さは、マウンドを設置した場合の方が打ち上げ高さが大きくなる傾向にある。これは、打ち上げ高さを計測した条件での前面水深が浅いため、碎波の影響が大きいためと考えられ、碎波点に近い条件であったと思われるマウンドA

設置時の時に打ち上げ高さが最も大きくなった。しかしながら、打ち上げ高さの分布の傾向は似ている。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、独立行政法人港湾空港技術研究所 耐波研究室 下迫健一郎室長には多くの貴重な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

- 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与作用波圧について, 海岸工学論文集第43巻, pp.776-780, 1996.
- 2) 村上啓介, 片岡保人, 竹鼻直人, 小長野宰, 上久保祐志：フレア型護岸の大水深域への適用における護岸水理特性の検討, 海洋開発論文集Vol.15, pp.1-6, 1999.
- 3) 片岡保人, 市川靖生, 大谷修, 上久保祐志, 村上啓介, 入江功：非越波型護岸の高波浪域への適用における消波工形式の基礎的検討, 海洋開発論文集Vol.15, pp.725-729, 1999.
- 4) 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Vol.15, pp.25-30, 1999.
- 5) 上久保祐志, 入江功, 村上啓介, 神田一紀：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, テクノオーシャン98論文集, pp.129-132, 1998.
- 6) 市川靖生, 片岡保人, 竹鼻直人, 濱崎義弘, 入江功, 村上啓介：フレア型護岸の道路護岸への適用に関する基礎的検討, 海洋開発論文集Vol.16, pp.251-256, 2000.
- 7) 片岡保人, 市川靖生, 榊原健男, 竹鼻直人, 塙洋二, 入江功：フレア型護岸の不規則波による水理特性の検討, 海洋開発論文集Vol.17, pp.61-66, 2001.
- 8) 三田村浩, 今野久志, 井上雅弘, 梅木宏也, 市川靖生, 竹鼻直人：新形式護岸（フレア護岸）の設計手法と試製作, 土木学会第56回年次学術講演会, VI pp.594-595, 2001.
- 9) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 1999.
- 10) 海岸保全施設築造基準連絡協議会：改定海岸保全施設築造基準解説, 1987.
- 11) 合田良実：港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会.