

フレア型護岸の道路護岸への 適用に関する基礎的検討

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE FLARING SHAPED SEAWALL APPLIED
FOR ROAD SEAWALL IN THE NEIGHBORHOOD OF SHORELINE

市川靖生¹・片岡保人²・竹鼻直人¹・濱崎義弘¹・入江功³・村上啓介⁴

Yasuo ICHIKAWA, Yasuto KATAOKA, Naoto TAKEHANA, Yoshihiro HAMAZAKI, Isao IRIE and
Keisuke MURAKAMI

¹正会員 工修 (株)神戸製鋼所 都市環境カンパニー 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 機械研究所 構造強度研究室 (〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)

³正会員 工博 九州大学教授 工学研究科 海洋システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴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) can make reduce crest height rather than conventional seawall in rough sea. However, the FSS has not been sufficiently made a study of application for road seawall in the neighborhood of shoreline. In order to clarify the hydraulic characteristics of the FSS as road seawall in that sea, two-dimensional wave experiments were carried out, and wave run-up height, overtopping rate, pressure distribution and others were measured. It is confirmed that the characteristics of the FSS are more superior to the vertical wall, and that are almost similar to the vertical wall protected with block mounds. So it is found that the FSS is suited to road seawall without wave-dissipating blocks.

Key Words : Flaring Shaped Seawall, crest height, wave run-up height, wave overtopping rate, wave pressure distribution, neighborhood of shoreline

1. はじめに

臨海部の汀線に沿って建設された道路護岸において、越波による通行止めや、越波流量そのものが少ない場合でも、打上げられた越波水塊によって乗用車のフロントガラスが破損するという事例が報告されている^{1), 2)}。このような場合の対策として、護岸高さの嵩上げや、護岸の沖側に消波ブロックの設置、あるいは沖側に新たな護岸を設ける新設護岸の前出しといった護岸改良が一般に行われている。しかし、護岸嵩上げは、背後地が道路の場合において海側の視界を遮り自動車通行の安全性確保が困難になることや、護岸背後から海への景観も遮ってしまうといった問題がある。消波ブロック設置は、護岸前面水域を消失させ漁場の確保や親水性の確保に問題があり、また景観上の面からも好ましいとは言えない。そして、新設護岸前出しは、現地条件によっては前出しが不可能であったり、経済性にも問題がある。(図-1参照)。

一方、著者らはこれまで、護岸前面が円弧形状で沖側に張り出したフレア型護岸^{3)~7)}を提案し、比較

的水深の深い海域で限界天端高さ(越波量がゼロとなるために必要な最小の天端高さ)が従来の消波ブロック被覆護岸に比べ極めて低く、沖波波高以下になることなどを示してきた³⁾。浅海域を対象とした特性も検討しているが⁶⁾、法先水深が0m付近といった、ごく浅い海域に関しては十分な検討がされていない。

そこで本研究は、汀線に沿う道路護岸にフレア型護岸を適用した場合、護岸高さを決定するのに欠か

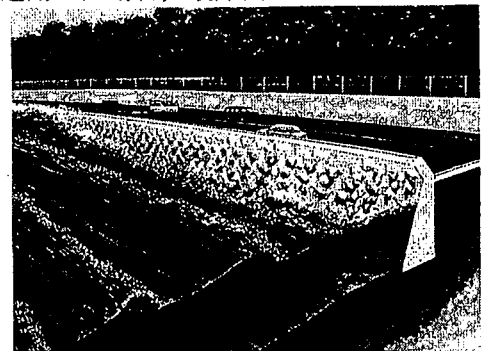


図-1 道路護岸における越波状況イメージ
(消波ブロック被覆護岸)

せない要素のひとつである水塊打ち上げ高さや越波流量などの水理特性を明らかにすることを目的とした。

2. 水槽実験条件及び方法

(1) 実験条件

水槽実験は、2次元造波水槽（長さ30m、高さ1.2m、幅0.6m）中に1/20海底勾配を模擬した斜面を設置し、その斜面上に護岸モデルを置いて行った(図-2参照)。護岸モデルは、図-3に示すように、直立護岸・フレア型護岸・消波ブロック被覆護岸の3種類の護岸で、護岸高さは23cm（フレア護岸のみ24cm）及び16cmの2種類とした。実験は基本的に23cm高さのモデルを用いているが、造波水槽の性能限界内に収まるよう、縮尺を代えて16cm高さのモデルでも実験を行っている。フレア型護岸の形状は図-2のようにフーチング（下部の迫り出し）を設けており⁷⁾、護岸奥行き深さDと護岸高さBの比D/Bは0.52とした。設置水深hに関しては0～6cmまで変化させている。碎波領域を対象とし、入射波は規則波もしくは不規則波を用い、波高を数種類変化させた。波形勾配は $H_0'/L=0.012$, 0.016の2種類とした。規則波と不規則波の関係は、構造物の設計において一般に用いられる、規則波沖波波高 $H_0=1.8 \cdot H_0'$ の関係⁹⁾を用い規則波と不規則波実験の対応を取った。そのため規則波での沖波波形勾配は $H_0/L=0.022$, 0.029に相当する。詳細な実施実験条件は表-1の通り。

(2) 実験方法

本研究では、規則波にて水塊打ち上げ高さ及び作用波圧を、不規則波にて越波流量及び反射率を計測した。打ち上げ高さ・波圧に関しては規則波のみで実験を行い不規則波に関しては計測していない。それぞれの測定方法を以下に記す。

- a) 水塊打ち上げ高さ測定；水槽側面からデジタルビデオ撮影し、1波ごとに水塊の打上げ高さが最大となる瞬間を画像ファイルに変換し、水面からの打ち上げ高さを読み取った。Raveは造波開始から30波の平均値とした。
- b) 波圧測定；受圧面直径が8mmの小型圧力計を用い、図-2のようにほぼ等間隔となるよう護岸前面の中心線上に設置した。波圧計の数は護岸高さ・形状にもよるが4～8個とした。造波開始後から2分間計測し、出力信号を1kHzサンプリングでデジタル収録し、各波のピーク値の平均を作用波圧とした。
- c) 不規則波実験；不規則波は造波開始1分後の約16分30秒間の波を一つの波群とし、修正Bretschneider-光易型の標準スペクトルを基準とした。越波流量はモデル上部に30cm幅の水路を設け、単位時間・単位幅の越波流量を算出した。また反射率は入反射分離により算出した。

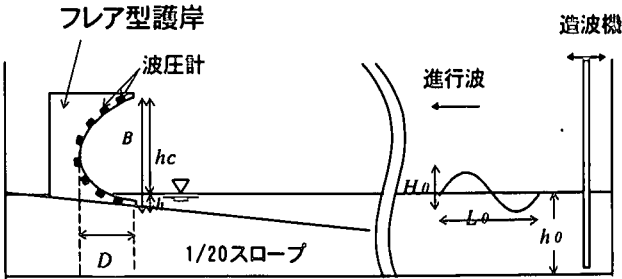


図-2 実験状況の概要

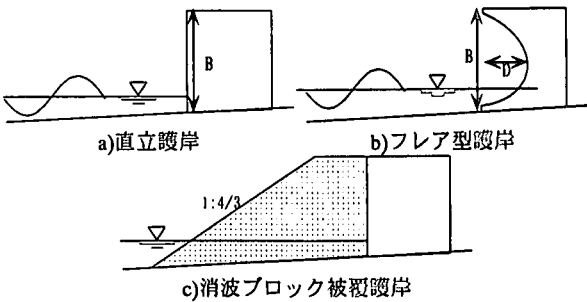


図-3 実験に用いた模型

表-1 実験条件

護岸高さ B [cm]	水深 h [cm]	換算沖波波高 H_0' [cm]	波形勾配 H_0'/L	
			0.016	0.012
24 (フレア型)	0.0	10.1	○	○
		11.8	▲	▲
	2.0	8.9, 10.1	○	○
23 (その他)	3.0	10.1	○	○
	4.0	8.9	○	○
	6.0	10.1	○	○
		11.8	▼	▼
16	4.0	6.8	○	▲
		8.9, 9.5, 10.1	○	—
	4.3	9.5, 10.1	○	—
	4.6	10.1	○	—

注 ○：実施 ▲：消波護岸は実施せず ▼：直立護岸は実施せず
規則波沖波波高 H_0 は H_0' の1.8倍

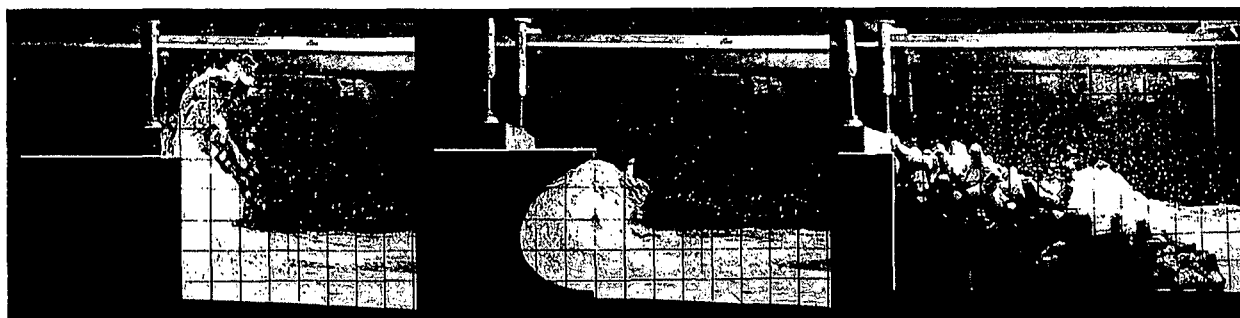
3. 実験結果と考察

(1) 水塊打ち上げ高さ

a) 実験結果

まず、写真-1に直立護岸・フレア型護岸・消波ブロック被覆護岸の水塊打ち上げ状況を撮影した写真の一例を示す。フレア型護岸は護岸前面の円弧形状によりスムーズに波を返し、直立護岸よりも打ち上げ高さが低く押さえられている。また、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。

続いて図-4に、打ち上げ高さ波高比 $Rave/H_0$ と水深波高比 h/H_0 の関係でまとめたものを示す^{1), 2)}。い

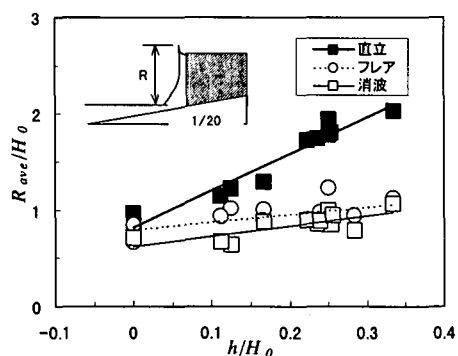


a) 直立護岸

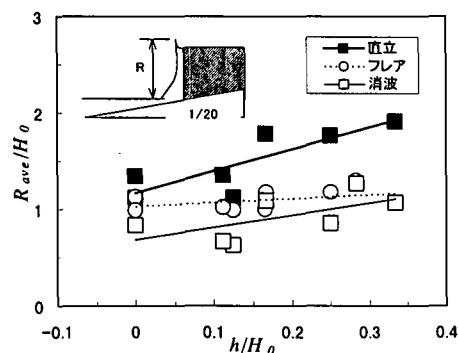
b) フレア型護岸

c) 消波ブロック被覆護岸

写真-1 水塊打ち上げ状況 ($H_0=18\text{cm}$, $H/L=0.012$, $h=3\text{cm}$)



a) $H/L=0.016$



b) $H/L=0.012$

図-4 水深波高比と打ち上げ高さの関係

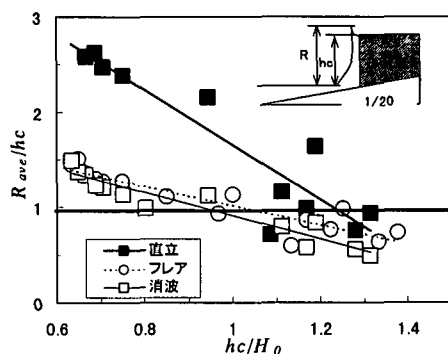
ずれの護岸も R_{ave}/H_0 は h/H_0 とともに増大する傾向にあり、直立護岸の打ち上げ高が他に比べ大きい。波形勾配の違いに関しては、傾きに違いがあるものの傾向は同じである。

b) 考察

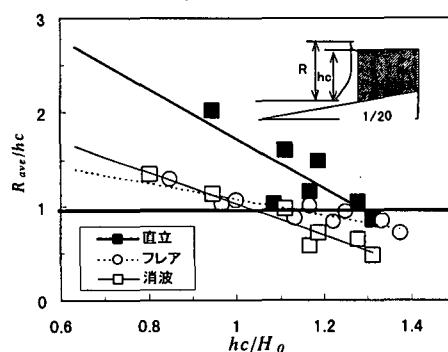
フレア型護岸と他の護岸を比較すると、直立護岸との比較では、水深のごく浅い $h=0\text{cm}$ の場合にはあまり差がないが、水深波高比が大きくなるとその差が大きくなり、打ち上げ高を半分程度にまで低減できることがわかる。一方消波ブロック被覆護岸とでは、設置水深 $h=0\text{cm}$ 付近でフレア型護岸がやや打ち上げ高さが大きい、水深波高比が大きくなるに従い差が小さくなる。

一方、図-5は天端高さと打ち上げ高さとの関係に図-4を書き換えたもので、 R_{ave}/hc と天端高波高比 hc/H_0 の関係としている。このように書き換えることにより、天端高さ以上に波が打ちあがっているか否

か判断しやすくなる。これにより、水深 h が大きく (天端高 hc が小さく)、また波高 H_0 が大きいほど各護岸の打ち上げ高さが大きくなることわかる。また、フレア型護岸の打ち上げ高さは水深 0cm 近傍の条件で消波ブロック被覆護岸に比べ大きくなることを前述したが、水深 $h=0\text{cm}$ 付近のような、水深が小さく天端高 hc が大きい領域では、打ち上げ高が天端高さ以下であり越波が生じない程度であることもわかる。このようになるのは写真-1のように、フレア型護岸は円弧形状であるためにスムーズに波をはね返すためである。



a) $H/L=0.016$



b) $H/L=0.012$

図-5 天端高さ波高比と打ち上げ高さの関係

この結果に基づき、フレア型護岸の天端高さを決定すれば打ち上げ高さが推定できるよう、逆に打ち上げ高さの制限を設ける場合の必要天端高さが求められるよう、フレア型護岸に関する推定式を重回帰分析により求めた。

$$\frac{R}{hc} = 0.47 \frac{h}{H_0} - 1.63 \frac{H_0}{L_0} - 36.40 \frac{S}{H_0 L_0} - 0.33 \frac{L_h}{B} + 2.19 \dots \dots \dots (1)$$

但し、パラメータは図-6a)に示す通り、
 R ; 打ち上げ高さ(平均値), hc ; 護岸天端高さ,
 h ; 護岸設置水深, B ; 護岸高さ
 H_0 ; 規則波沖波波高, L_0 ; 沖波周期,
 S ; 沖側壁面下の沖側壁面と静水面の間で挟まれた面積(斜線部),
 L_h ; 静水面上の円弧長さ である。

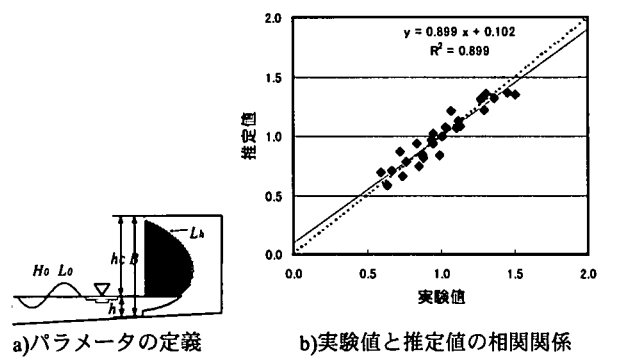


図-6 打ち上げ高さ推定式の定義と相関

式(1)から求めた打ち上げ高さ推定値(R/hc)と実験値との相関を図-6b)に示す。寄与率 R^2 は0.90と高く、今回の実験条件に関しては式(1)が精度良く推定していることがわかる。

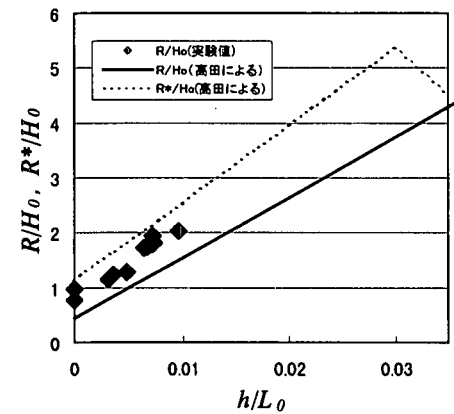


図-7 直立護岸打ち上げ高さ推算式^{10), 11)}と実験値の適合性 ($H/L=0.016$)

また、本実験の適合性を確認する上で、高田が示した規則波での直立護岸打ち上げ高さ推算式^{10), 11)}から求めた水塊の打ち上げ高さ R/H_0 と飛沫の打ち上げ高さ R^*/H_0 を図-7に示す。本実験結果はやや大きい値を示しているものの推定線の傾きに関してはほぼ一致している。本実験結果と推定値との差異の要因は、実験の縮尺の問題や、推定式そのものの課題として推算値と実験値に相当のばらつきを示すことがあるためと思われる。

(2) 越波流量・反射率

図-8に波浪条件を一定にして、設置水深を変化させた越波流量図を示す。ただし無次元越波流量が $1.0E-07$ 以下のオーダーに関しては、水塊による越波ではなく、大半がしぶきによる越波流量である。フレア型護岸は直立護岸に比べ1/10～1/100程度と

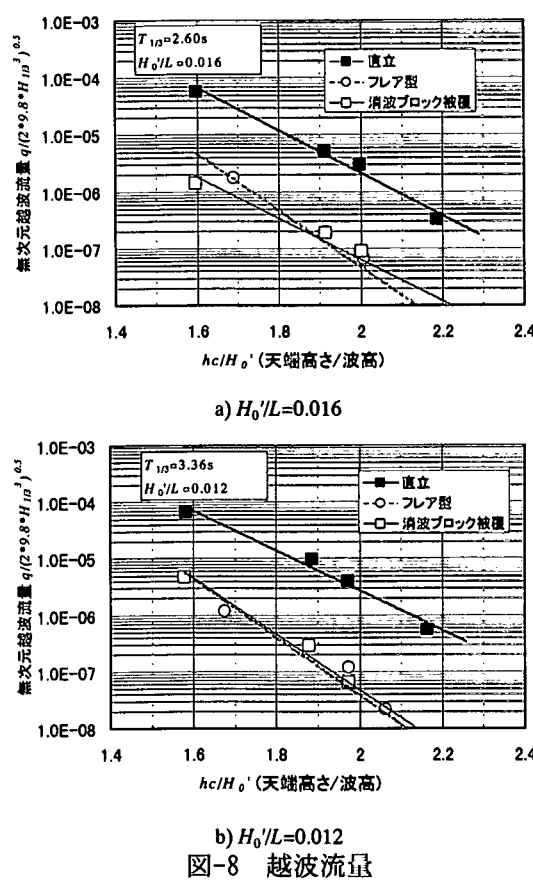


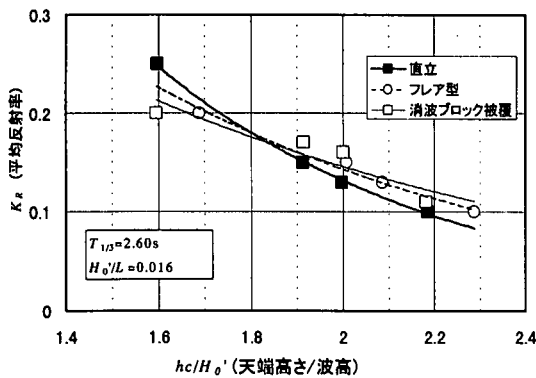
図-8 越波流量

大幅に越波流量を低減でき、消波ブロック被覆護岸とほぼ同様の越波流量になることがわかる。

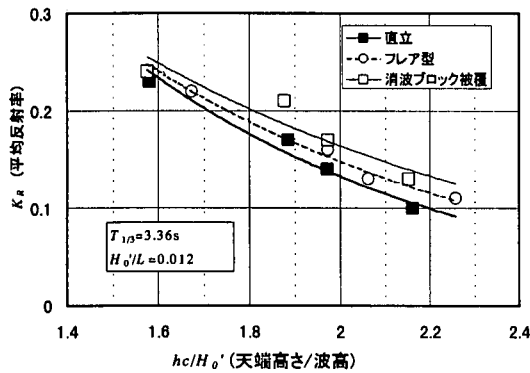
一方、越波流量と同条件での反射率をまとめたものを図-9に示す。今回の条件ではいずれの護岸も反射率が小さく、0.1～0.25程度となっている。表-2に通常護岸設計に用いられる反射率の概略値⁹⁾を示すが、実験で取り上げた3種類の護岸の反射率は天然海浜に近い値である。水深が浅く砕波の影響によるものと思われる。今回の実験条件では、消波ブロック被覆護岸の反射率が、直立護岸よりも大きくなっている。同様の結果が合田他による試験結果¹²⁾でも得られている。この理由は、次のように考えられる。一般に消波ブロックを設置すると、消波ブ

表-2 護岸設計に用いられる反射率⁹⁾

構造様式	反射率
直立護岸(天端は静水面上)	0.7～1.0
消波ブロック被覆護岸	0.3～0.5
天然海浜	0.05～0.2



a) $H_0'/L=0.016$



b) $H_0'/L=0.012$

図-9 平均反射率(実験による)

ロックに到達した波は、そのままブロック内を進む透過波とブロック表面で反射される反射波とに分かれる。水深が浅く砕波現象のため反射率がもともと低い護岸では、消波ブロック被覆で新たに生じた反射波により、反射率が増大したと考えられる。

(3) 護岸作用波圧

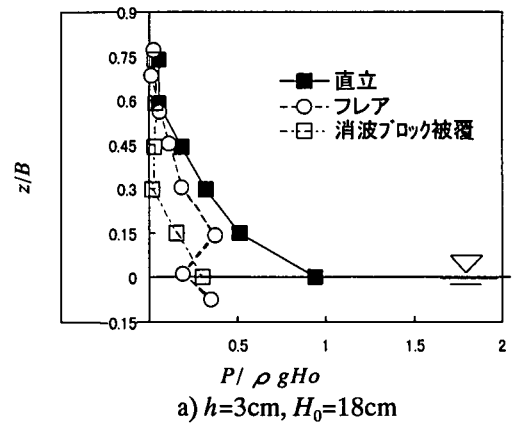
図-10に各護岸に作用する波圧を、水深3cmと6cmの場合について示す。波形勾配はいずれも $H/L=0.016$ である。作用波圧は消波ブロック被覆護岸が最も小さく、フレア型護岸は直立護岸と同程度もしくは小さい波圧となる。直立・フレア型護岸はやや水深の深い6cmの場合に波圧が大きくなるが、いずれも静水圧の1.5倍以下である。

フレア型護岸はその特徴である凹形状により衝撃波圧が作用する問題を抱えているが、今回のような水深が浅く、砕波する領域においては衝撃的な波圧は生じない。

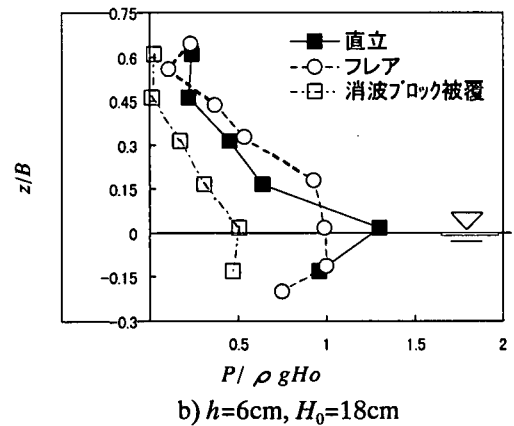
ただし、今回の結果は規則波によるもので、実際の設計には不規則波の結果が必要である。

4. まとめ

フレア型護岸を道路護岸のようにごく浅い水深域に適用する際の水利特性が明らかとなった。以下にこうした条件に関するフレア型護岸の特性をまとめ



a) $h=3\text{cm}, H_0=18\text{cm}$



b) $h=6\text{cm}, H_0=18\text{cm}$

図-10 護岸作用波圧 ($H/L=0.016$)

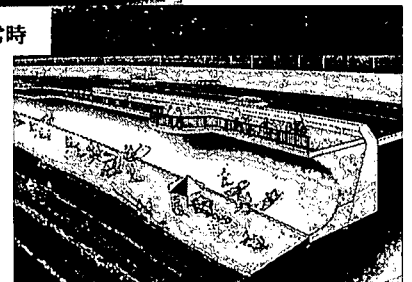
て記す。

① 水塊打ち上げ高さ

- ・直立護岸に比べ約2/3～半分程度となり、水深が深くなるほどより優位となる。
- ・消波ブロック被覆護岸との比較は水深が深い場合にはほぼ同等で、水深が浅い場合にはややフレア型護岸が劣る。しかしその際の打ち上げ高さは天端高以下である。



a) 異常時



b) 常時

図-11 フレア型護岸の道路護岸イメージ

- ② 越波流量に関しては、直立護岸の1/10～1/100、消波ブロック被覆護岸とはほぼ同等になる。
- ③ 護岸に作用する波圧は、今回の実験条件では直立護岸と同等もしくはそれ以下となる。

以上のように、フレア型護岸を道路護岸に適用する際には、消波ブロック被覆護岸とほぼ同様の打ち上げ高さ抑制効果・越波阻止性能をもつことがわかった。また波圧に関しても直立護岸と同等程度以下であるため、フレア型護岸は直立護岸のように護岸前面に消波ブロックを設置することなく、道路護岸に用いることが可能であることがわかった。

最後にフレア型護岸を道路護岸とした時のイメージを図-11に示す。異常時は波を防ぎ、常時は護岸前面を有効に使える護岸である。

ただし、今後の課題として、フレア型護岸は水深が深くなることにより、作用波圧が増加する傾向にあり、また前面形状の凹形により衝撃波圧が作用する可能性を有しているため、どのような波高条件・設置水深であれば作用波圧が問題ないかを把握しておく必要がある。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、室蘭工業大学工学部木村克俊助教授には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) 木村克俊，藤池貴史，上久保勝美，安倍隆二，石本敬志：道路護岸における波の打ち上げ特性に関する現地観測，海岸工学論文集第45巻，

1998

- 2) 藤池貴史，上久保勝美，木村克俊：道路護岸における波の打ち上げ特性に関する模型実験，第41回北海道開発局技術研究発表会，pp285-290，1998
- 3) 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，pp776-780，1996
- 4) 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，pp1-6，1999
- 5) 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，pp725-729，1999
- 6) 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，pp25-30，1999
- 7) 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，pp129-132，1998
- 8) 福田信男，宇野俊泰，入江功：防波護岸の越波に関する現地観測(第2報)，第20回海岸工学講演会論文集，pp113-118，1973
- 9) 合田良実：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会
- 10) 高田彰：規則波の打ち上げ高および越波量の定式化について，第22回海岸工学講演会論文集，pp113-123，1970
- 11) 高田彰：うち上げおよび越波，土木学会水理委員会水工学シリーズ77-B-2，1977
- 12) 合田良実，岸良安治，神山豊：不規則波による防波護岸の越波流量による実験的研究，港湾技術研究所報告第14巻第4号，1975