

フレア型護岸の不規則波による 水理特性の検討

EXPERIMENTAL STUDY ON HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF THE FLARING SHAPED SEAWALL BY IRREGULAR WAVES

片岡保人¹・市川靖生²・榊原健男³・竹鼻直人²・塙洋二¹・入江功⁴
Yasuto KATAOKA, Yasuo ICHIKAWA, Takeo SAKAKIBARA, Naoto TAKEHANA,
Yoji HANAWA and Isao IRIE

¹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)

²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)

³(株)コベルコ科研 尼崎事業所 振音流動技術室(〒660-0083 尼崎市道意町6-32)

⁴正会員 工博 九州大学教授 工学研究科 海洋システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

A Flaring Shaped Seawall (FSS) can drastically reduce a crest height and wave overtopping quantity in comparison with a conventional upright one. In this study, systematic hydraulic experiments by irregular waves were carried out using a two-dimensional flume. As a result, a diagram to estimate the crest height and overtopping rate of the FSS was made, and it is found that the overtopping rate and reflection coefficient of the FSS are almost similar to those of an upright seawall covered with wave-dissipating blocks. Furthermore pressures by regular waves were compared with ones by irregular waves, and a wave force formula for the FSS in an extreme shallow sea was investigated.

Key Words : Flaring Shaped Seawall, irregular wave, wave overtopping rate, reflection coefficient
wave force formula

1. はじめに

外洋に面した空港、発電所などの重要施設や、臨海部の汀線に沿って建設される道路用護岸に要求される機能のなかで、特に重要なもののひとつに越波阻止性能がある。著者らはこれまで、図-1に示すような、護岸前面が円弧形状で沖側に張り出したフレア型護岸^{1)~6)}を提案し、限界天端高さ(越波量をゼロにす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て極めて低く、低天端でありながら、非越波を実現できることなどを示してきた。

しかしながら、設計波は統計的に決められるため、実際には非越波が完全に満足されとは限らない。また、非越波を絶対条件とはせず、ある程度の越波量を許容するほうが設計上は合理的な場合もある。このため、本報では、不規則波による系統的な水槽実験を行い、フレア型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、港湾の基準⁷⁾に示されている越波流量推定図と同様の整理を試みた。そのほかに、沖合の船舶航行などに影響を及ぼすと考えられる護岸の反射率についても調べた。

また、著者等は前報⁸⁾において、フレア型護岸の極浅海域における沿岸道路用護岸への適用を考え、基礎的検討結果について述べた。そこでは主に、道路用護岸として、その天端高さを決定する上で欠かせない要素のひとつである水塊打ち上げ高さについて示した。本報では、規則波および不規則波による系統的な水槽実験により、堤体の構造設計や施工方法を決定するために必要となる波圧・波力を計測するとともに、フレア型護岸の波力算定式についても検討した。

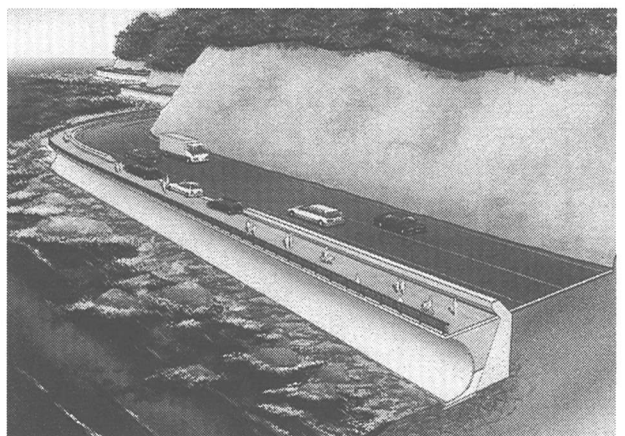


図-1 フレア型護岸のイメージ図

2. 越波流量推定図と反射率

(1) 実験方法および条件

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型護岸モデルを鋼製治具で固定して行った（図-2参照）。護岸モデルの高さは24cmを基本とし、一部高さ16cmのものも用いている。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⁵⁾、護岸の円弧部奥行き深さ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 $h_o=65\text{cm}$ とした。

実験条件を表-1に示す。実験で用いた不規則波の波形勾配は $Ho'/Lo=0.036$ とし（ Ho' : 沖波有義波高, Lo : 沖波波長）, $Ho'=5.2\sim 10.8\text{cm}$, 護岸設置水深は $h=3\sim 17\text{cm}$ の範囲とした。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、入射分離⁶⁾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⁷⁾も同時に計測した。

(2) 結果と考察

a) 越波流量

図-3に越波流量試験結果を示す。横軸は、護岸設置水深 h を沖波有義波高 Ho' で除した値、縦軸は、無次元越波流量を示しており、 h/B （設置水深／護岸高さ）ごとに記号を変えている。そして、各 h/B に対して、結果を示す点のほぼ中央をとる近似曲線をひいている。図より、設置水深が深いほど（ h/B が大きいほど）越波流量が増加すること、 h/B が同じ、すなわち設置水深が同じならば、波高が小さいほど越波流量が少なくなる（近似曲線が右下がりになっている）ことがわかる。また、それぞれの結果自体にはかなりばらつきはあるものの、各 h/B に対する近似曲線は交差していない。これらのことより、本実験が実用上十分な精度で行われていたものと考えられる。

図-4は、図-3の結果をもとに、港湾基準⁷⁾に示されている越波流量推定図と同様の整理を試みた結果である。横軸および縦軸は、図-3と同様で、静水面上の護岸天端高さ hc を沖波波高 Ho' で除した値をパラメータとしている。実線がフレア型護岸に対する結果、破線が比較のために

表-1 実験条件（越波流量および反射率）

海底勾配	波形勾配 Ho'/Lo	護岸高さ $B(\text{cm})$	設置水深 $h(\text{cm})$	沖波有義波高 $Ho'(\text{cm})$
1/10	0.036	24	9~17	5.2~10.8
		16	3~7	5.2~10.8

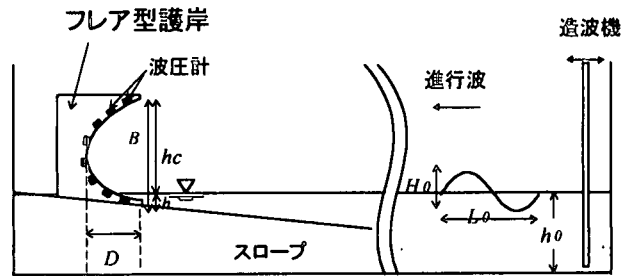


図-2 実験状況の概要

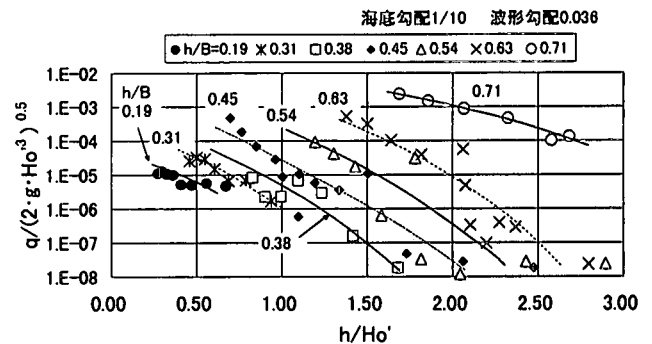


図-3 越波流量試験結果

載せた直立護岸に対する結果で、港湾基準⁷⁾に示されている図から読みとったものである。本フレア型護岸の推定図作成にあたっては、まず、 $h/Ho'-q/(2 \cdot g \cdot Ho'^{0.5})$ 平面上で、 hc/Ho' をパラメータとする等高線図を作成し、その後、合田ら⁹⁾が述べている越波流量推定図を作成する際の方針を参考にした。すなわち、無次元越波流量と相対水深 h/Ho' の関係曲線は滑らかに変化するものと考え、パラメータ hc/Ho' の値が隣接する曲線群にあつては、曲線の形状が相似であるとした。図-4の結果より、同じ天端高さの場合、フレア型護岸は直立護岸に比べて、越波流量を1/10~1/100程度と大幅に低減できることがわかる。また、その低減効果は、 h/Ho' が1.0~2.0あたりの間で顕著である。

図-5は、フレア型護岸と消波ブロック被覆護岸（以下、消波護岸とする）の越波阻止性能を比較したものである。フレア型護岸に対しては図-4と同じ結果を実線で示しており、消波護岸に対しては、港湾基準の図から読みとったものを破線で示している。相対水深 h/Ho' が約1より大きい範囲では、消波護岸に比べてフレア型護岸のほうが越波流量が少なくなっている。これは、消波護岸の場合、相対水深 h/Ho' が比較的大きく、すなわち深くなると、消波ブロック斜面上を波が岸向きにさかのぼることにより、

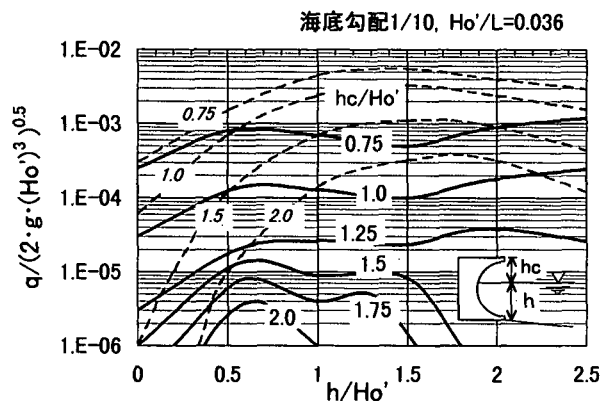


図-4 フレア型護岸の越波流量推定図
(直立護岸との比較)

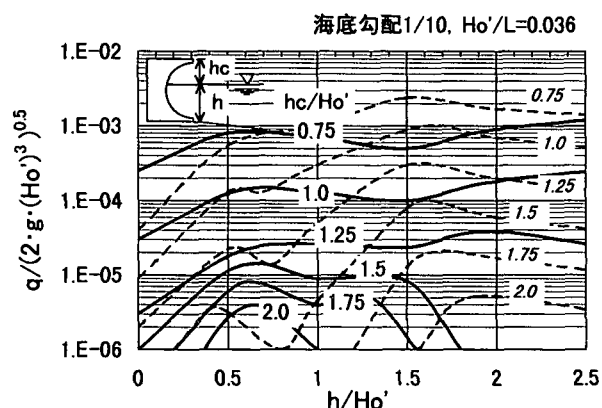


図-5 フレア型護岸の越波流量推定図
(消波ブロック被覆護岸との比較)

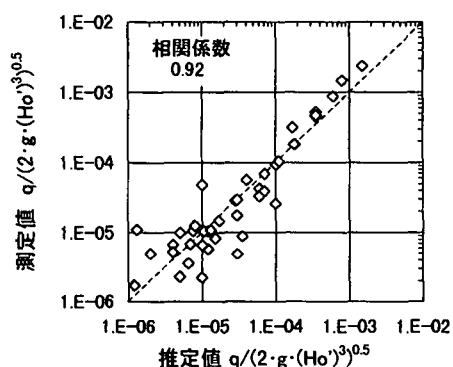


図-6 越波流量の推定値と測定値の比較

越波が生じ易くなるためと考えられる。これに対して、フレア型護岸の場合は、多少水深が深くなっても、上部が沖側に張り出した形状により、波を冲向きに返すので、越波流量が少ない。(ただし、相対水深が深くなると、フレア型護岸の場合、波を返すことによる反力として、護岸が受ける波力が大きくなる傾向にあるので^{1,3)}、設計の際には、この点について十分注意を払う必要がある。) また、 h/Ho' が1よりも小さい範囲では、一部消波

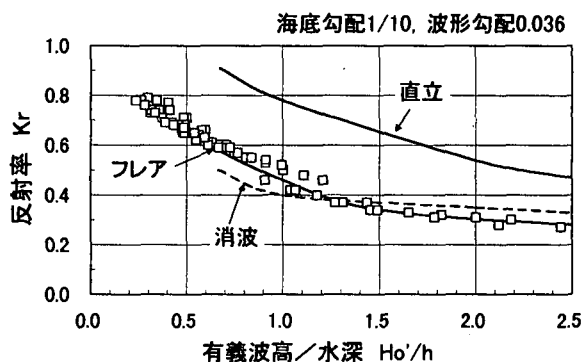


図-7 反射率試験結果

護岸のほうが越波流量が小さいところもあるが、ほぼ同等の越波阻止性能を示している。

図-6は、図-4、5に示したフレア型護岸の越波流量推定図により推定した値と、水槽実験で実際に計測された値とを比較したものである。無次元越波流量が多いときは測定値と推定値の差異は小さいが、越波流量が少なくなると差異が増大する。これは、推定の精度が悪いというよりも、波の不規則性に起因する実験値の変動によるものが大きいのではないと思われる。しかしながら、両者の相関係数は0.92であり、越波流量という変動が大きい現象を取り扱っているわりには、比較的高い値を示していると考えられる。上記検討結果より、本海底勾配、波浪条件において、実設計上はほぼ問題なく、図-4(あるいは図-5)の推定図を用いて、フレア型護岸の越波流量を推定したり、逆に、規定された許容越波流量に対して必要となる護岸天端高さを算出することができるものと考えられる。

b) 反射率

図-7はフレア型護岸の反射率の測定結果を示している。図中には、同じ海底勾配、波形勾配に対する直立護岸、消波ブロック被覆護岸の結果⁹⁾も載せている。反射率 K_r は、横軸に沖波波高 Ho' /設置水深 h をとって整理すると、ほぼ1本の曲線にのった。これは、反射率に対しては、波の浅水変形や碎波変形という Ho'/h によってほぼ決まってくる量の影響が支配的であるためと考えられる。 Ho'/h が0.5より小さい領域では、波が重複波に近く、反射率は0.6~0.8程度となっているが、 Ho'/h が大きくなるにしたがって、浅水変形、碎波変形の影響があらわれ、反射率もしだいに小さくなり、 Ho'/h が1.5以上の碎波後の領域では約0.3となっている。また、直立護岸の反射率と比較すると、フレア型護岸のほうが若干小さくなっている。これは、フレア型護岸が、上部の円弧形状により波を沖に返す際に、護岸前面の波をかく乱するためではないかと考えられる。一方、消波ブロック被覆護岸と比較すると、本条件の場合、フレア型の反射率はほぼ同程度で、特に Ho'/h が1.5以上の領域では、実用上十分に小さいと考えられる。

表-2 実験条件 (波圧・波力)

(1)規則波

海底 勾配	波形 勾配 Hr/Lo	護岸 高さ B (cm)	設置 水深 h (cm)	沖波波高 Hr (cm)
1/10	0.0216	24	0, 3, 6	8, 11, 14, 17
	0.0648		0, 3, 6	11, 14, 17, 20

(2)不規則波

海底 勾配	波形 勾配 Ho'/Lo	護岸 高さ B (cm)	設置 水深 h (cm)	沖波有義 波高 Ho' (cm)
1/10	0.012	24	0, 3, 6	8.6, 7.6
	0.036		0, 3, 6	10.8, 7.6

3. 波圧・波力特性

フレア型護岸は護岸であるため、完成時には護岸背面に裏込土等があり、波圧・波力はあまり問題にならないと考えられる。しかしながら、施工時には、その方法によっては裏込土がなく、防波堤のような状態になることもある。本章ではフレア型護岸に作用する波圧・波力について検討した。

(1)実験方法および条件

実験は、越波流量試験と同様の水槽を用い、高さ $B=24\text{cm}$ の護岸モデルを勾配1/10の不透過斜面上に、鋼製治具で固定して行った (図-2参照)。実験に用いた波は、規則波および不規則波とした。実験条件を表-2に示す。護岸設置水深は $h=0, 3, 6\text{cm}$ と極浅海域を対象とした。ここで、規則波と不規則波の関係は、港湾構造物の設計において一般的に用いられている $H_{\max}=1.8H_{1/3}$ の関係⁹⁾ をもとに、その対応をとった。すなわち、規則波の沖波波形勾配 H_r/L_o は、不規則波の波形勾配 H_o'/L_o の1.8倍とした。

波圧測定は、受圧面直径が8mmの小型圧力計を用い、図-2に示したように8個をほぼ等間隔となるよう護岸前面の中心線上に配置した。規則波に対しては、造波開始から2分間、不規則波に対しては、造波開始1分後から11分間の波圧データを、カットオフ周波数500Hzのローパスフィルターを通し、サンプリング周波数1kHzでデジタル収録した。

(2)結果と考察

a)規則波波圧

図-8,9に、規則波実験による波圧分布を白印と実線で示す (黒印と破線についてはcで述べる)。図-8は波形勾配 $H_r/L_o=0.0216$ 、図-9は $H_r/L_o=0.0648$ に対する結果である。縦軸は、静水面を原点とし鉛直上向きを正にとった座標で波圧計測位置を表しており、護岸高さ B で無次元化している。横軸は、護岸面に対して法線方向の波圧を規則波の沖波波高相当の静水压で無次元化している。ここで、 w_o は流体の単位体積重量である。図-8,9には、各波高 H_r に

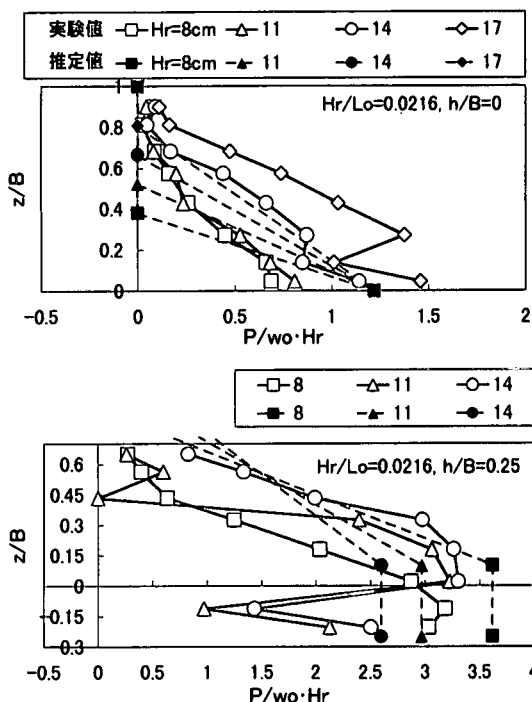


図-8 規則波波圧分布 ($H_r/L_o=0.0216$)

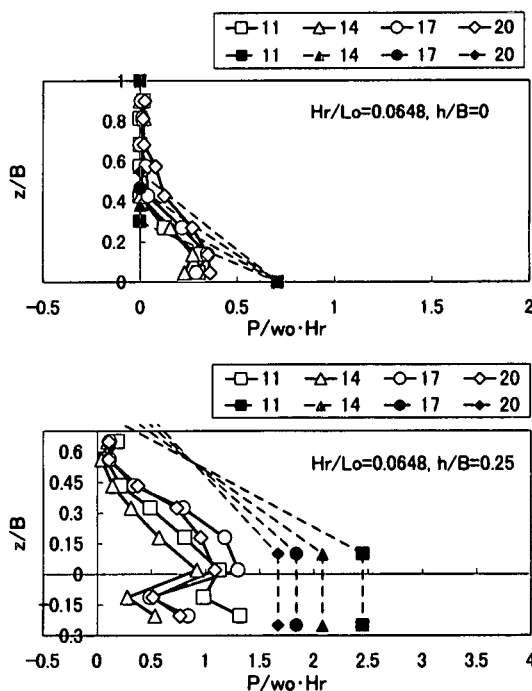


図-9 規則波波圧分布 ($H_r/L_o=0.0648$)

対する結果を記号を変えて示している。なお、各点の波圧値は測定した圧力波形のピーク値の平均値をとっている。全体的に、波形勾配が小さいほうが、そして水深が深いほうが波圧は大きくなっている。また、図-10は、相対水深 h/H_r を横軸にとり、沖波波高相当静水压で無次元化した滑動合成波圧 P_s を示している¹⁰⁾。図中白印は $H_r/L_o=0.0216$ 、黒印は $H_r/L_o=0.0648$ に対する結果である。ここで、

$$P_s = P_H + \mu \cdot P_v \quad \dots\dots\dots (1)$$

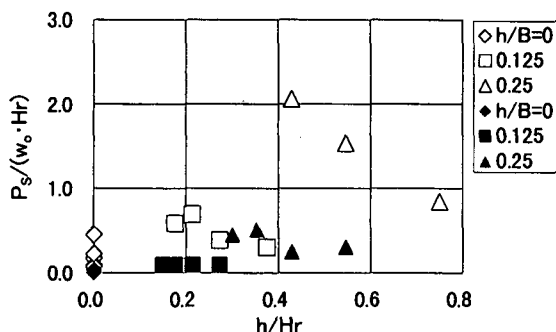


図-10 規則波の滑動合成波圧

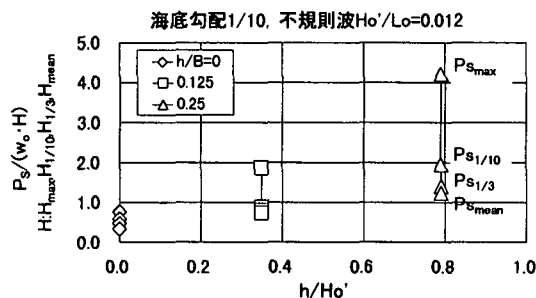


図-11 不規則波の滑動合成波圧

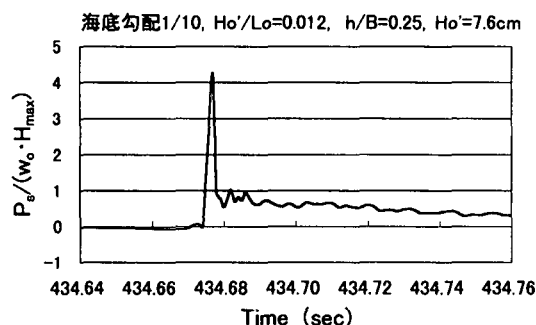


図-12 不規則波波形の例

で、 P_H は護岸法線方向単位幅あたりに作用する全水平方向波力を受圧投影面積（護岸高さ $B \times 1\text{cm}$ ）で割った値で、岸向きを正としている。また、 P_V は法線方向単位幅あたりに作用する全鉛直方向波力を受圧投影面積（図-2中の護岸円弧部奥行き $D \times 1\text{cm}$ ）で割った値で、上向きを正としている。 P_H 、 P_V を算出する際には、図-8、9に示した各波圧計での波圧値の水平成分、鉛直成分を求め、それらの値を護岸面に沿って積分した。 μ は摩擦係数で、ここでは0.6としている。 P_s が大きいほど、堤体を滑動させる波力が大きいことを示している。図-8においては、無次元化波圧が局所的に3.5付近の値を示している点もあるが、 P_s のように受圧面で平均化すると最大でも2程度の値になる。

b)不規則波波圧

図-11は、波形勾配 $H_o'/L_o=0.012$ の不規則波実験による無次元化した滑動合成波圧 P_s を示している（規則波

$H_r/L_o=0.0216$ に対応している）。なお、波形勾配0.036に対する結果もこれとほぼ同様の傾向を示し、値としては小さかった。各 h/B に対して、最も大きい値は P_s 波形のピーク値の最大値 $P_{s,max}$ 、2番目に大きい値は1/10最大波圧 $P_{s,1/10}$ （大きいほうから数えて1/10の数の P_s 波形のピーク値の平均値）、3番目の値は1/3最大波圧 $P_{s,1/3}$ （大きいほうから数えて1/3の数の P_s 波形のピーク値の平均値）、最も小さい値は平均波圧 $P_{s,mean}$ （すべての P_s 波形のピーク値の平均値）を示している¹¹⁾。また、無次元化にあたっては、それぞれの P_s 値を、不規則波中の対応する波高 H_{max} 、 $H_{1/10}$ 、 $H_{1/3}$ 、 H_{mean} 相当の静水圧で割っている。図-11で $h/B=0.25$ の場合、 $P_{s,max}$ は $4w_o \cdot H$ を越えるかなり高い値を示している。このときの P_s の波形を図-12に示す。ゼロから波形のピーク値までの立ち上がり時間は、約3msecと非常に短時間である。本実験では、護岸モデルを比較的剛な不透過斜面上に直接設置し（すなわち砂地盤やマウンドを設けず）、鋼製治具で固定しているので、短時間に立ち上がる衝撃波圧が実際よりも生じやすい状況になっていると考えられる。また、谷本ら¹¹⁾も不規則波実験により $5w_o \cdot H$ を越えるような衝撃波圧を測定しているが、作用時間の非常に短い衝撃波力が作用する場合、そのピーク値がそのまま滑動に寄与するわけではなく、マウンド、地盤の変形を考慮した動的応答としてとらえることが必要であると指摘している。合田¹²⁾はそうした動的モデルによる計算を行っているが、その結果衝撃力の滑動に対する静的に等価な平均波圧は最大でも2~3 $w_o \cdot H$ 程度と推定している。そして、Takahashiら¹³⁾は、衝撃碎波力係数を提案しているが、これを用いた場合でも最大波圧は3 $w_o \cdot H$ 程度である。これらのことと図-10に示した規則波による結果より、本実験条件におけるフレア型護岸の滑動合成波圧は1~2 $w_o \cdot H$ 程度ではないかと推測される。

また、実験ケースが少なく直ちに結論は出せないが、図-10と11を比較すると、不規則波試験による1/10最大波圧値（ $P_{s,1/10}$ ）が規則波試験による波圧値とほぼ同程度になっており、規則波と不規則波の対応をとる際のひとつの目安になるのではないかとと思われる。図-13は、図-11の結果に対して、前述の水平方向平均波圧 P_H と鉛直方向平均波圧 P_V に分けて示したものである。この図より、本実験条件の場合、波圧が大きくなるほど、鉛直下向きの波力が発生し、フレア型護岸のフーチングが有効にはたらく、滑動に対して抵抗していることがわかる。

c)波力算定式

極浅海域における碎波後の波が、直立護岸に作用する際の波力算定式として、富永・久津見の式¹⁴⁾（以下算定式とする）が提案されている。本式は下記のように表される。

$$p = 4w_o \{0.45 (H_r \cdot L_o)^{0.5} \tan \theta + 0.8h\} \quad \dots (2)$$

$$r' = 0.4h \quad \dots (3)$$

$$Ro' = 2h + 1.68 (H_r \cdot L_o)^{0.5} \tan \theta \quad \dots (4)$$

ここで、波圧分布としては、静水面上 r' (m)まで一様分布、

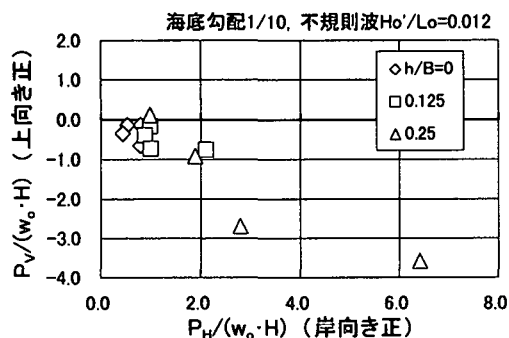


図-13 水平波力と鉛直波力の関係

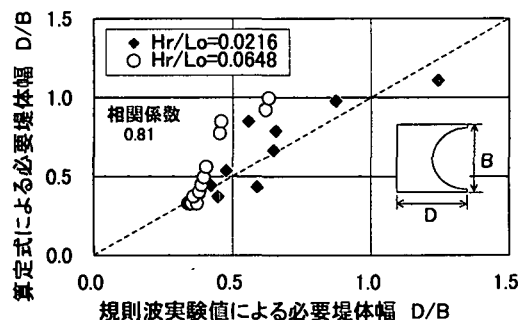


図-14 必要堤体幅の比較

Ro' (m)で0となる台形分布とし、 p_i は一様分布波圧（単位は kN/m^2 ）， H_r は沖波波高(m)， L_o は沖波波長， h は設置水深， $\tan \theta$ は海底勾配， w_o は流体の単位体積重量(kN/m^3)である。本算定式により、規則波の波圧分布を計算した結果を図-8、9中に黒印と破線で示している。算定式による結果は、実験結果と多少の差異はあるものの、砕波後の複雑な波に対して比較的良好に一致していると考えられる。

また図-14は、波力により堤体が滑動しないために必要な最小堤体幅を、図-8.9に示した規則波実験による波力と、算定式による波力に対して試算した結果を比較したものである。計算の際には、便宜上堤体の単位体積重量を2.1としている。D/Bが0.52以下のときは、フレア型護岸の円弧部分までで滑動に対して抵抗できることになる。図より、本算定式による結果は、全体的に見て多少安全側の評価になっているが、両者の相関係数は0.81と比較的良好に一致していると考えられる。これらの検討結果より、直立護岸の砕波後の波圧に対する富永・久津見の式が、フレア型護岸に対してもおおむね使えるものと考えられる。

4. まとめ

- (1) 系統的な不規則波水理実験により、フレア型護岸の越波流量推定図を作成した。本実験条件において、フレア型護岸の越波流量は、直立護岸の1/10～1/100で、消波ブロック被覆護岸とほぼ同程度であった。

- (2) 本実験条件範囲において、フレア型護岸の反射率は、消波ブロック被覆護岸とほぼ同等であった。
- (3) 極浅海域における規則波、不規則波による波圧試験を行い、フレア型護岸の波圧特性を示すと同時に、波力算定式についても検討した。

フレア型護岸は、本来非越波を実現できる護岸であるが、本報では、越波をある程度許容した場合の越波流量推定図や、波力算定式など実設計上有用と思われる結果を示した。今後、さらに広範囲の条件に対して同様なデータの蓄積が必要と考えられる。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、港湾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，小長野幸，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) 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。
- 8) 合田良実：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会。
- 9) 合田良実，岸良安治，神山豊：不規則波による越波流量に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，Vol. 14，No. 4，pp. 3-44，1975。
- 10) 谷本勝利，滑川伸孝，石丸敬純，関本恒浩：半円形ケーソン堤の水理特性に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，Vol. 28，No. 2，pp. 3-32，1989。
- 11) 谷本勝利，高橋重雄，明瀬一行：防波堤直立部に働く不規則波力に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，Vol. 23，No. 3，pp. 47-98，1984。
- 12) 合田良実：衝撃砕波圧を受ける混成防波堤の挙動に関する考察，港湾技術研究所報告，Vol. 12，No. 3，pp. 3-29，1973。
- 13) Takahashi, S., Tanimoto, K. and Shimosako, K.: Experimental study of impulsive pressures on composite breakwaters, *Rept. of Port and Harbour Res. Inst.*, Vol. 31, No. 5, pp. 33-72, 1993.
- 14) 富永正照，久津見生哲：海岸堤防に作用する砕波後の波圧，第18回海岸工学講演会論文集，pp. 215-221，1971。