

不規則波に対する護岸の越波流量特性について

合 田 良 実*・岸 良 安 治**

1. ま え が き

海岸保全施設の主要施設である堤防・護岸の計画にあたっては、その越波特性を把握し、高波時の越波量を許容値以下に抑えることが重要である。特に、現実の波浪は実験室内の規則的な波とは異なり、不規則性がその基本的性質であるので、不規則波に対する越波流量を求めておく必要がある。このため、先に著者の一人は種々の実験資料を借用して期待越波流量の算定図表を作成した¹⁾。しかし、この図表は水深の浅い所に適用できず、また海底勾配や波形勾配の影響を無視したものであった。このためもあってか、新潟東港での実測値²⁾とは必ずしも一致しなかった。一方、沼田³⁾は消波護岸について波形勾配の影響を考慮した天端高算定法を示している。

著者らは運輸省港湾局防災課から依頼があったのを機会に、1973 年以来、直立壁および消波工被覆型の護岸について、汀線および陸上部を包含する系統的な不規則越波実験を実施し、新しい越波流量推定図表をとりまとめた⁴⁾。また、最近では護岸の天端高をできるだけ低く抑える傾向にあるので、低天端型護岸構造 5 種類について若干の実験を行い、越波特性を検討した⁵⁾。本論文は、これらの実験成果の紹介であり、今後の海岸保全施設の設計の合理化に資することができれば何よりも幸いである。

2. 実験条件および実験方法

実験の対象とした護岸の型式および主要諸元は表一1のとおりである。ただし、寸法は縮尺 1/33.3 としての換算値である。

実験波は現地換算で $H_{1/3} \approx 5.5$ m, $T_{1/3} \approx 10, 13, 16$ sec, 波形勾配 $H_0/L_0 \approx 0.012, 0.017$ および 0.036 であり、Bretschneider—光易型の単一ピークのスペクトルを与えた。そして、これらのスペクトル形状に対する不

表一1 護岸の型式および主要諸元

型 式	水深 (m)	海底勾配	そ の 他
a. 直立壁	6.8~3.0	1/10, 1/30	天端高 2.3~7.9 m
b. 消波工被覆型	6.8~0.0	1/10, 1/30	ブロック天端 2 列並び
c. 消波工拡幅型	4.5, 1.5	1/10, 1/30	// 1, 3, 4 列並び
d. 階段護岸	0	1/10, 1/30	のり勾配 2 割
e. 離岸堤設置型	4.5	1/30	離岸距離 $l=15\sim60$ m
f. バラベツ後退型	4.5	1/30	後退距離 $x=4.5\sim45$ m
g. 縦スリットケーン	6.8	1/30	空隙率 14~33%

規則波形 3 種類を作成し、各波形とも約 200 波を連続して模型護岸に作用させた。なお、低天端型護岸に関しては $H_0/L_0 \approx 0.037$ (風波に相当) の波についてのみ実験を行なった。

実験では連続する不規則波による全越波量を精密型荷重計 (精度 0.05%) を用いて重量として測定し、これから各波形ごとに平均越波流量を求めてから、3 種類の不規則波形についての総平均値を算出した。また、沖合に相当する箇所に $\Delta l=20$ cm 離して 2 台の波高計を設置して波形を同時に測定し、そのフーリエ成分の計算に基づいて、入・反射波高を分離・推定した^{6), 11)}。越波流量の測定結果は、この入射波高から換算した相当深水波高 H_0' を用いて無次元化して整理した。

なお、造波水路内では現地海岸に比べてサーフビート現象が増幅されていると考えられる⁷⁾。この補正の方法として、越波流量の実験値の整理にあたっては計算上の水深を $(0.1\sim0.15) H_0'$ 程度増加させ、天端高を同じ量だけ減少させて取り扱った^{4), 5)}。

3. 不規則波の碎波変形モデルによる越波計算

不規則な波浪が斜面上で碎けて変形する過程について先に著者の一人は、選択的碎波の現象をモデル化した波高変化の計算方法を発表した⁷⁾。この方法を用いれば、沖合から汀線までの任意の地点における波高の確率密度関数 $p(x)$ が数値的に求められる。ただし、 $x=H/H_0'$ である。今、護岸の越波流量を吉川ほか⁸⁾の越流モデルを用いて計算することにし、不規則波に対する期待越波流量の考え方を導入すると、

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部

** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部 (前)
(現・第四港湾建設局下関調査設計事務所)

$$\frac{q_{\text{exp}}}{\sqrt{2g(H_0')^3}} = \int_0^\infty q^*(x)p(x)dx \dots\dots\dots (1)$$

ここに

$$q^* = A_0 \left(\frac{K}{1+K} \right)^{3/2} x^{3/2} \left[1 - \frac{h_c}{H_0'} \cdot \frac{1}{Kx} \right]^{5/2} \dots\dots\dots (2)$$

$K = \eta_c/H$: 波頂高比

ただし、原モデルに比べ、波頂高比が増大するにつれて波の山の継続時間が短くなる効果が導入されている。

越流係数に対応する定数 A_0 は、実験値との照合に基づいて $A_0=0.10$ とした。また波頂高比パラメーター K については重複波の非線型増幅効果その他を勘案して、式 (3) のような表示を試行的に用いた。

$$K = \min \left\{ \left[1.0 + a \frac{xH_0'}{h} + \frac{b}{K_{sb}} \left(\frac{xH_0'}{h} \right)^2 \right], c \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\min [A, B]$ は A または B のいずれか小の値、 K_{sb} は非線型浅水変形および碎波減衰による 1/3 最大波高の変化率⁷⁾である。

式 (3) 中の係数としては越波流量の実験値との比較による試行の結果として次の値を用いた。

$$\left. \begin{array}{l} \text{直立壁: } a=1.0, b=0.8, c=10 \\ \text{消波護岸: } a=0.5, b=0 \sim 0.4, c=5 \end{array} \right\} \dots\dots (4)$$

このモデルによって直立壁の越波流量を試算した 1 例が 図-1 であり、海底勾配の影響が $h/H_0'=2.5$ 付近から現われる。また、波形勾配の影響は水深のかなり深い地点から顕著に現われる。

4. 直立護岸の越波特性

実験結果を計算値と比較した例が 図-2 である。水深 h' 、天端高 h_c' のダッシュはサーフビート補正を示す。

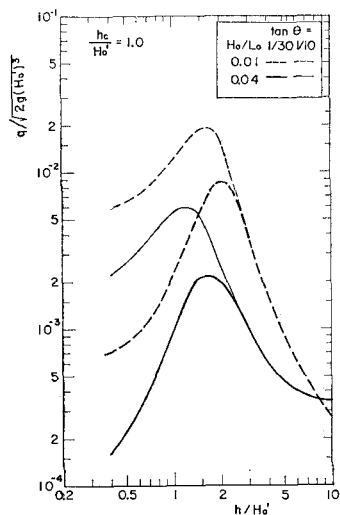


図-1 理論計算による直立壁の越波流量の変化

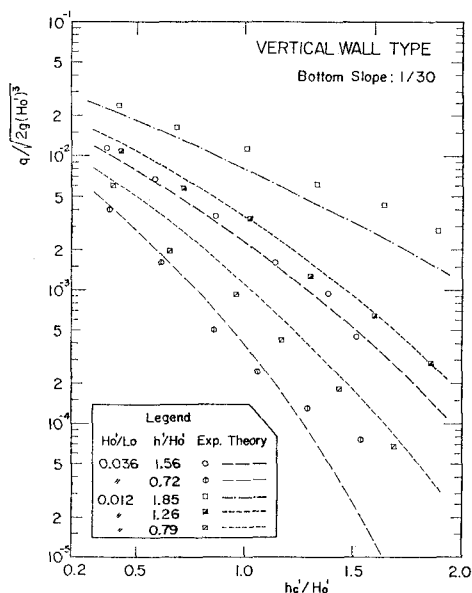


図-2 直立壁の越波流量の計算値と測定値の比較

個々のデータについては不一致も見られるが、 $h/H_0' \geq 0.5$ では全体として良く一致していた。そこで、計算による越波流量曲線を尊重しながら越波流量推定図表を作成した。このうち $H_0'/L_0=0.036$ のものを 図-3 に示す。他の波形勾配については付図-1 および文献⁴⁾を参照して頂きたい。

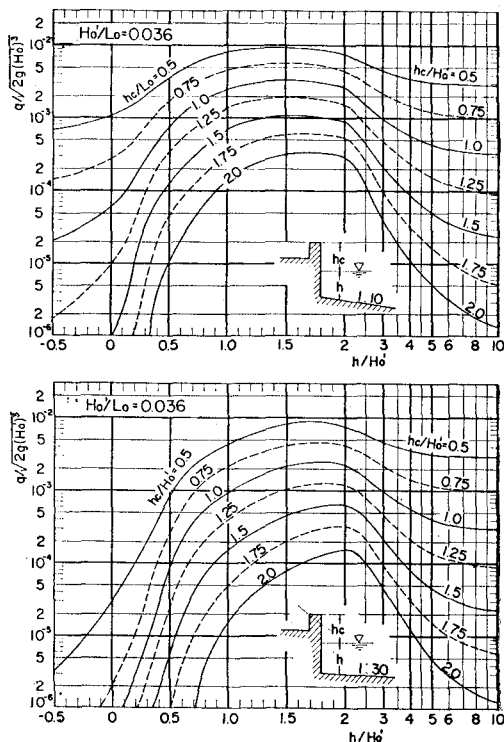


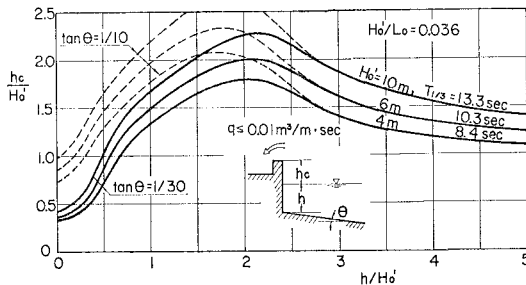
図-3 直立護岸の越波流量の推定図表 (風波)

こうした図表は当然のことながら推定誤差を伴う。図表作成の際の実験データのばらつきや、二、三の現地測定値との比較結果などを勘案すると、今回の図表の精度は表—2のようなものではないかと思われる。誤差は無次元越波流量が小さいほど大きい。ただし、これは hc/H_0' による $q/\sqrt{2g(H_0')^3}$ の変化が急激なためで、相対天端高 hc/H_0' の幅でいえば $\pm 10 \sim 20\%$ 程度である。

なお、この図表を用い、越波流量の許容値を $q=0.01 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ と仮定して直立護岸の所要天端高を算定すると図—4の結果が得られる。波高の絶対値が大きいかほど相対天端高 hc/H_0' を大きくする必要がある。また、所要天端高が最大になる水深は $h/H_0'=1.5 \sim 2.0$ であり、従来考えられていた $h/H_0' \approx 1$ よりも深い所にあらう。

表—2 越波流量の推定値に対する真値の想定範囲

$q/\sqrt{2g(H_0')^3}$	直立護岸	消波護岸
10^{-2}	0.7~1.5倍	0.5~2倍
10^{-3}	0.4~2倍	0.2~3倍
10^{-4}	0.2~3倍	0.1~5倍
10^{-5}	0.1~5倍	0.05~10倍

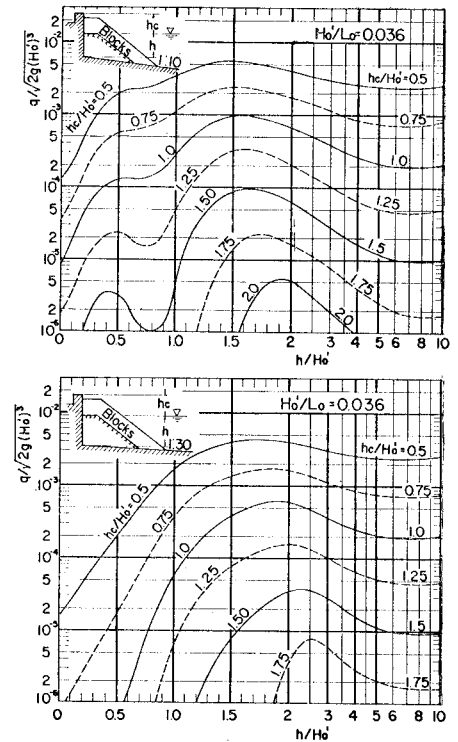


図—4 許容越波流量 $0.01 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ に対する直立護岸の所要天端高

5. 消波護岸の越波特性

直立護岸と同様にして消波護岸の越波流量推定図表を作成した中から $H_0'/L_0=0.036$ のものを示したのが図—5である。実験に用いた消波ブロックは模型重量 250 gr および 480 gr のテトラポッドで、砕石マウンド上の2層整積み、天端部分は下層が2列並びである。消波工の天端はパラペットよりも約 $0.1H_0'$ 低い。図—5の挿図のように、根固工や波返し工は設けていない。この図表の推定精度は表—2のとおりで、直立護岸よりもやや悪い。

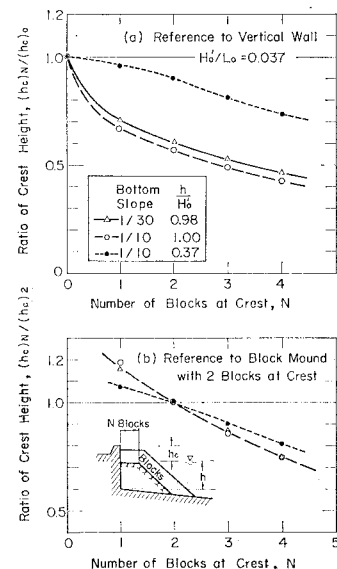
消波護岸の越波流量推定図表を直立護岸のものと比較してみると、同一越波流量を与える天端高は後者の $60 \sim 70\%$ であることが分る。ただし、海底勾配 $1/30$ で $h/H_0' \leq 0.4$ の浅水部ではこの差が縮まる。また海底勾配 $1/10$ のときは $h/H_0'=0 \sim 0.8$ の範囲では消波工の



図—5 消波護岸の越波流量の推定図表 (風波)

効果が小さく、特にうねり性の波では消波工への乗り上げのために越波量が増大し、直立護岸よりも高い天端高を必要とする場合がある(付図—2, 3 参照)。

消波工の天端幅を広げることの効果は図—6のように表わされる。これは各実験条件ごとに無次元越波流量と相対天端高の関係曲線を描き、それを直立護岸のデータ



図—6 消波工の天端幅と所要天端高比の関係

と比較して、同一越波流量に対する所要天端高の比率を求めたもので、図の(b)は基準として天端ブロック2列並びの消波護岸を採用した場合のものである(無次元越波流量は $2 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$ を対象とした)。実験条件が限定されているので確言できないが、図-3, 5などの図表の比較などから考えると、 $h/H_0' \geq 0.5$ (海底勾配 1/30) あるいは $h/H_0' \geq 1$ (海底勾配 1/10) の範囲については、直立護岸に対する消波護岸の所要天端高比が次のようになるものと思われる。すなわち、天端部分のブロック(下層)が1, 2, 3および4列並びでは、所要天端高が直立護岸のそれぞれ70~80%, 60~70%, 50~60%, および45~55%である。

6. 階段護岸の越波特性

階段護岸はレクリエーション海浜などで採択されることが多い。設置水深がほぼ0の場合についての実験結果を図-6と同様に、直立護岸と同一の越波流量を与える所要天端高比として表わしたのが図-7である。実験ではのり勾配を1:2として階段の高さを30, 20および0cm(滑斜面)に変えたが、やはり段高が大きいかほど所要天端高が低くて済む。ただし、直立壁よりは高い天端が必要である。このように、汀線近傍においても護岸形状によって越波量が変わり、直立壁が最小値を与えることは、すでに Saville⁹⁾ も報告している。

なお、浅水部の護岸では頂部に波返し工を設けることによって、越波量がかなり大きく減少する。

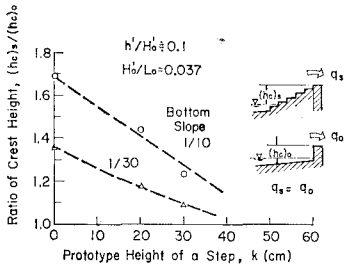


図-7 階段の段高と所要天端高比の関係

7. 離岸堤設置型護岸の越波特性

実験に用いた離岸堤は砕石マウンド上に現地換算17.8tのテトラポッドを3段に整積み(下から順に4, 3, および2列並び)したもので、最上面の高さが約 $0.4H_0'$ 、下面の高さが約 $-0.6H_0'$ である。実験では直立護岸を固定し、勾配1/30の斜面上で離岸堤を移動したので、砕石マウンドの厚さは場所によって異なっている。

この離岸堤のみを $h \approx 1.2H_0'$ の地点に設置したときの波高伝達率は、沖波波高を基準として0.27であった。しかし、直立壁を併置すると離岸堤との間でサーフビー

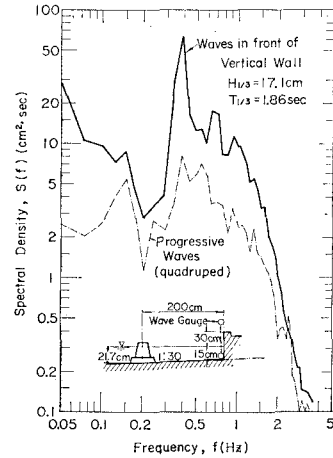


図-8 離岸堤設置護岸の前面の波のスペクトル

トが発達し、平均水位が上昇し、前面波高が伝達波高の3~4倍に増大する。図-8は前面波および伝達波のスペクトルを比較したものである。ただし、後者は線型重複波が形成されるものとしてスペクトル密度を4倍した値を示してある。前面波のスペクトルに見られる三つのピークは離岸堤⇔直立壁の多重反射によるものである。

離岸堤設置時の越波流量の測定結果を同一越波流量の直立壁の所要天端高に対する比率として表示したのが図-9である。横軸は相対距離 l/L である。本実験のように不規則波を透過性の離岸堤に作用させたときには、楕木ほか¹⁰⁾の述べるような $\Delta l = L/4$ ごとの規則的变化は現われず、 $l/L \approx 0.6 \sim 0.8$ で越波流量が最小、所要天端高が最低となる。なお、図-9で $q/\sqrt{2gH_0^3} = 10^{-4}$ のデータが 10^{-3} のものよりも所要天端高比が大きいのは、離岸堤の天端高を固定したためと思われる。

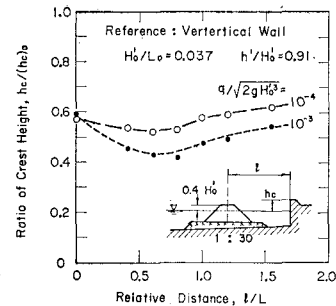


図-9 離岸堤の設置距離と所要天端高比の関係

8. パラペット後退型護岸の越波特性

直立護岸において越波量を減少させる一つの方策は、パラペットを背後へ引き下げることである。後退距離を $x/H_0' = 0.8 \sim 8.5$ としたときの実験結果は図-10のようになった。この図も、同一条件における直立護岸の所

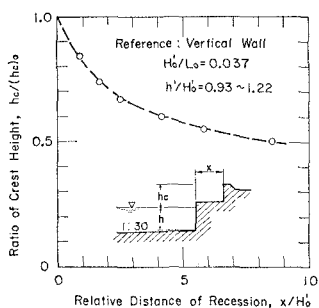


図-10 パラベット後退距離と所要天端高比の関係

要天端高に対する比率として表示してある。基準とした無次元越波流量は $10^{-4} \sim 10^{-3}$ であり、この範囲ではあまり差が見られない。

パラベット後退の効果は、たとえば $x=4H_0'$ で所要天端高を約 60% に低減できるなど、かなり大きなものである。ただし、水叩きの天端が低いときに後退距離が不十分であると波力が異常に増大することがあると考えられるので、注意が肝要である。

9. 縦スリット式ケーソン護岸の越波特性

直立護岸で越波量を減少させるもう一つの方法は、直立消波構造の採用である。図-11 は、縦スリット式ケーソン護岸について前面開口比を 14~30% に変えたときの反射率および直立護岸に対する越波流量比を示したものである。ただし、ケーソンの天端は $h_{ca}/H_0' = 0.3 \sim 0.4$ とし、背後のパラベットの高さ h_c' のみを変化させた。また、前面だけでなく天端面にも開口比 29~43% のスリットを設けてある。この天端スリットは重要であ

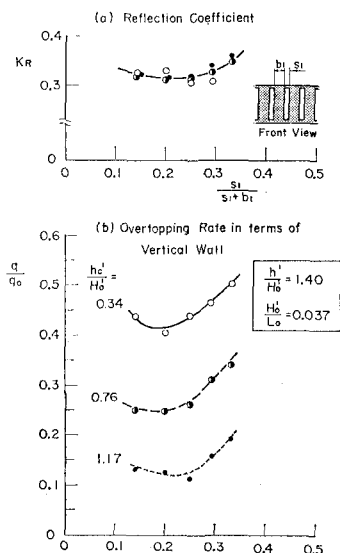


図-11 縦スリット式ケーソンの前面開口比と反射率および越波流量比の関係

り、これを塞ぐと反射率、越波流量ともに増大する。

今回の実験では前面開口比 20% (天端面開口比 40%) が最適値であったので、これについて直立護岸の所要天端高に対する比率を求めた結果が 図-12 である。実験を行なった構造では、無次元越波流量が大きいものほどスリットによる越波減少効果が顕著であり、消波ブロック 2 列並びの消波護岸よりも効果的である。ただし、越波流量の少ないときは減少効果が薄れる傾向にある。

今回の実験では縦スリット式ケーソンを模型海底面上に直接設置したけれども、これを砕石マウンド上に置くなどの工夫を凝らせば、さらに越波減少効果が高まるのではないと思われる。

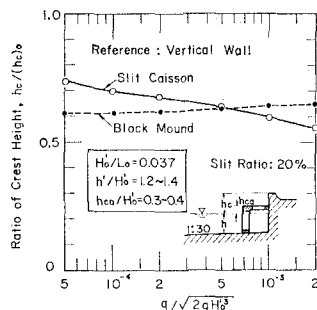


図-12 縦スリット式ケーソンの無次元越波流量と所要天端高比の関係

10. あとがき

先に著者の発表した越波流量算定図表を今回の推定図表と比べてみると、旧図表は海底勾配が 1/10 で波形勾配が 0.036 のものとはほぼ近く、特に直立護岸については 0.5~2.0 倍の範囲内にあるものが多い。しかし、他の条件の場合にはかなり異なる結果を与えるので、今後は新図表を使用して頂くようお願いする次第である。

また、波浪実験の中でも越波実験は護岸の形状効果が大きく、僅かの条件の差で越波量が相当に変化することが少なくない。特に、今回提示した低天端型構造のデータは限定された条件下のものである。具体的な個々の事例については水理模型実験、それもできるだけ不規則波による実験で越波量を求めることが必要と思われる。

なお、本実験の実施にあたっては運輸省港湾局防災課の関係各位より種々御助力頂いた。また、実験は港湾技術研究所 海洋水理部 波浪研究室の神山 豊技官および菊地 治技官の全面的協力によって実施されたものである。ここに記して謝意を表する次第である。

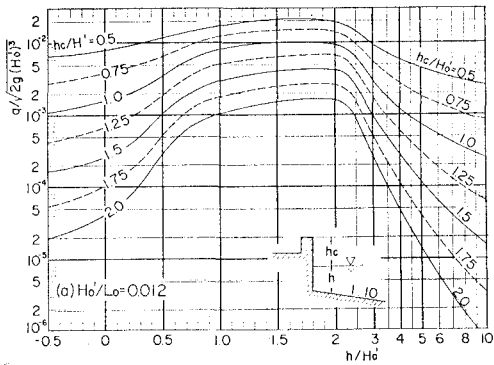
参考文献

- 1) 合田良実: 防波護岸の越波流量に関する研究, 港湾技研報告, 第9巻第4号, pp. 3-41, 1970.
- 2) 福田伸男・宇野俊泰・入江 功: 防波護岸の越

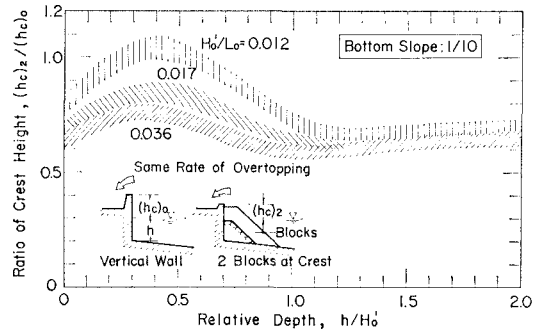
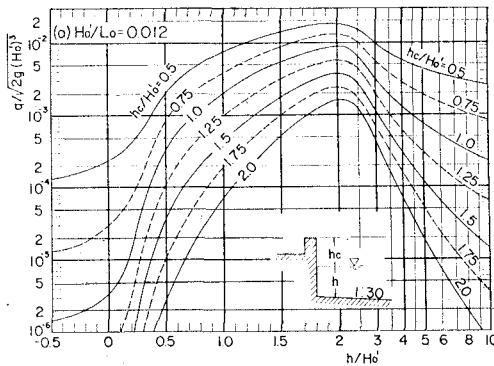
波に関する現地観測(第2報), 第20回海講, pp. 113-118, 1973.

- 3) 沼田 淳: 消波護岸の越波と天端高に関する研究, 第21回海講, pp. 429-433, 1974.
- 4) 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関する実験的研究, 港湾技研報告, 第14巻第4号, pp. 3-44, 1975.
- 5) 合田良実・岸良安治: 不規則波による低天端型護岸の越波特性実験, 港湾技研資料 No. 242, 1976.
- 6) 合田良実・鈴木康正・岸良安治: 不規則波浪実験とその特性, 第21回海講, pp. 237-242, 1974.
- 7) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技研報告, 第14巻第3号, pp. 59-106, 1975.

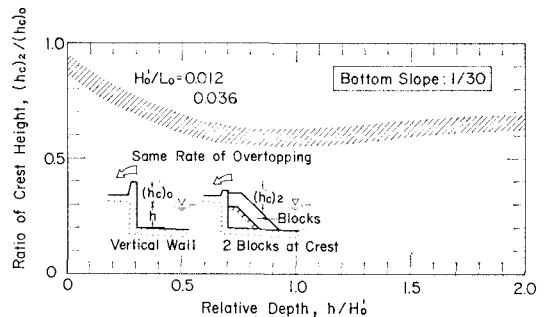
- 8) 吉川秀夫・椎貝博美・河野二夫: 海岸堤防の越波に関する基礎的研究, 第14回海講, pp. 118-122, 1967.
- 9) Saville, T., Jr.: Laboratory data on wave runup and overtopping on shore structures, B.E.B., Tech. Memo, No.64, 32p., 1955.
- 10) 榎木 亨・岩田好一郎・森永勝登: 海岸堤防前面波高に及ぼす離岸堤の設置距離の効果について(2次元モデルの場合), 第22回海講, pp. 415-420, 1975.
- 11) 合田良実ほか: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料 No. 248, 1976.



付図-1 直立護岸の越波流量の推定図表(うねり)



付図-2 消波護岸(ブロック2列並び)と直立護岸の所要天満高の比率—海底勾配 1/10—



付図-3 消波護岸(ブロック2列並び)と直立護岸の所要天端高の比率—海底勾配 1/30—