

海岸護岸における越波量の時間的変動特性

TIME-RELATED FLUCTUATION OF WAVE OVERTOPPING DISCHARGE ON SEAWALLS

井上裕規¹・井上雅夫²・玉田 崇¹

Hironori INOUE, Masao INOUE and Takashi TAMADA

¹学生員 関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)²正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

The purpose of this study is to clarify the time-related fluctuation of wave overtopping discharge on seawalls by random wave using many experimental results until now.

Seawall shape with the object in this study are upright seawall, upright seawall with set back parapet, perforated upright seawall and gentle slope-type seawall.

To begin with, representative wave overtopping discharge by the definition equal to the representative wave height was obtained for these seawalls. Next, the shape parameter as the weibull distribution applied appearance probability distribution of wave overtopping discharge of individual wave was required. In addition, the relationship between this shape parameter and the relative water depth, wave steepness, relative crest height, wind velocity, etc. are discussed for the case of each seawall.

Key Words : wave overtopping, upright seawall, wave absorbing upright seawall, gentle slope-type seawall

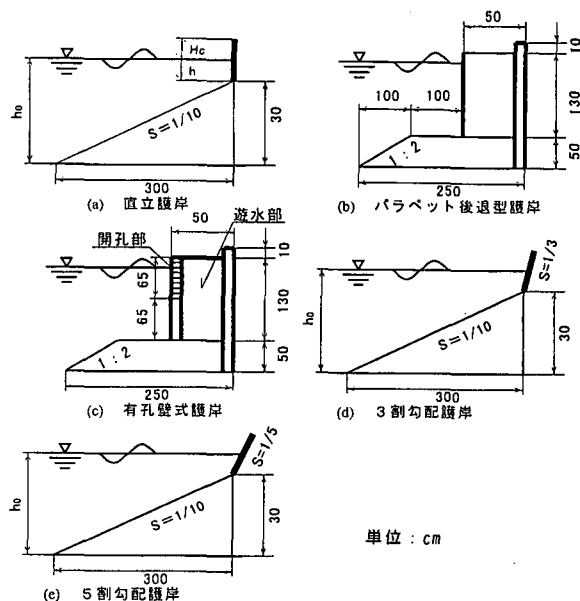
1. 緒 言

我が国の海岸には、波浪、高潮および津波などによる自然災害から住民の生命や財産を守るため、各種の海岸護岸が建設されている。なかでも、越波防止を目的とした海岸護岸の機能設計に際しては、合田ら¹⁾による越波流量の推定図表が用いられることが多い。しかし、これは数十分間程度の平均的な越波流量を与えるものであって、短時間、例えば1波当たりの越波流量は、合田らの推定図表による値よりも、かなり大きくなる場合が考えられる。したがって、護岸背後に十分な排水施設がなかったり、逆に人家などがある場合にはきわめて危険である。

このようなことから、この研究では、著者ら^{2)~6)}が従来行ってきた各種の海岸護岸の不規則波による越波実験の結果を用い、越波量の時間的変動特性を明らかにしようとした。

に述べよう。

実験では、2次元不規則波造波水槽（長さ30m、幅0.7m、深さ1.0m）内に、図-1(a)~(e)に示した5種類の模型護岸を設置して、それらの護岸を越波する1波ごとの越波量を測定した。入射波は有義波周期Tが



単位: cm

2. 解析に用いた実験結果の説明と解析方法

この研究で対象とした海岸護岸は、直立護岸、パラペット後退型護岸、有孔壁式護岸、勾配が3割および5割の緩傾斜護岸の5種類である。それぞれの実験結果については、参考文献2)~6)において、すでに詳述しているので、ここでは、その概要だけについて簡単

図-1 模型護岸

1.0sのBretschneider・光易型スペクトルを有する不規則波である。表-1には、そのほかの実験条件を、それぞれの護岸ごとに示した。

なお、こうした越波実験では造波板と模型護岸間の多重反射などのためにサーフピートが増幅され、護岸前面の水位が変動していることは間違いない。しかし、この影響を考慮して、各護岸の1波ごとの越波量を合理的に補正することは困難である。また、すべての実験において、造波板から護岸の設置位置までの距離、入射波周期および一様水深部の水深などの実験規模や越波量の測定時間に大きな違いはない。こうしたことから、ここでは前述の方法で測定した越波量の実験値をそのまま以下の解析に用いることにした。

まず、それぞれの護岸における1波ごとの越波量から代表波法と同じ定義による Q_{max} 、 $Q_{1/10}$ 、 $Q_{1/3}$ および Q_m を求めた。さらに、それらを用いて代表越波量比を計算した。次に、1波ごとの越波流量の出現頻度分布を求め、それにWeibull分布を当てはめた場合の形状母数 α を護岸の形状ごとに求めた。なお、この形状母数は、いずれの場合にも実験値をもとに確率密度を求める段階で形状母数を0.1ずつ変化させて計算し、それと実験値との間で χ^2 検定を行って、その検定値が最小になるものを採用した。このようにして、各種護岸についての代表越波量比やWeibull分布の形状母数と越波量に及ぼす諸要素との関係について検討を行った。なお、以上の解析に際しては、すべて越波した波だけを対象とした。

表-1 実験条件

護岸形状	直立護岸	パラペット後退型護岸
有浪波形勾配	H_0/L_0 0.02, 0.03, 0.04, 0.05	0.04
護岸天端高	H_c (cm) 1.3, 3.1, 4.7, 6.2, 7.8	3.1
のり先水深	h (cm) 0, 1, 2, 3, 4	15, 16, 17, 18
一様水深	h_0 (cm) 30, 31, 32, 33, 34	30, 31, 32, 33
相対護岸天端高	H_c/H_0 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0	0.5
のり先水深・波長比	h/L_0 0, 0.006, 0.013, 0.019, 0.026	0.096, 0.103, 0.109, 0.115
無次元風速	$V/\sqrt{gH_0}$ 0, 4, 8	0, 3, 6
海浜勾配	S 1/50	1/10
無次元遊水部幅	B/H_0 —	0.8

護岸形状	有孔壁式護岸	3割および5割勾配護岸
有浪波形勾配	H_0/L_0 0.03, 0.04, 0.05	0.04
護岸天端高	H_c (cm) 2.3, 3.1, 3.9	6.2
のり先水深	h (cm) 15, 16, 17, 18	0, 1, 2, 3, 4
一様水深	h_0 (cm) 30, 31, 32, 33	30, 31, 32, 33, 34
相対護岸天端高	H_c/H_0 0.5	1.0
のり先水深・波長比	h/L_0 0.096, 0.103, 0.109, 0.115	0, 0.006, 0.013, 0.019, 0.026
無次元風速	$V/\sqrt{gH_0}$ 0, 3, 6	0, 4, 8
海浜勾配	S 1/50	1/10
護岸前面の開孔率	$K(\%)$ 0, 15, 30, 45	—
無次元遊水部幅	B/H_0 0.31, 0.69, 0.8	—
無次元粒径	d/H_0 —	0, 0.001, 0.013, 0.058, 0.236

3. 海岸護岸における越波量の時間的変動特性

(1) 直立護岸

図-1(a)に示したように、1/10の傾斜海浜上に直立護岸を設置した場合について検討する。

図-2には、各代表越波量比 Q/Q_m および形状母数 α とのり先水深・波長比 h/L_0 との関係を示した。

これによると、 $Q_{1/3}/Q_m$ と $Q_{1/10}/Q_m$ は、 h/L_0 が0.006の場

合に、それぞれ2と5の最大値を示すが、これらには h/L_0 による変動は小さい。一方、 Q_{max}/Q_m には h/L_0 による変動が大きく、 h/L_0 が0.013の場合に最大値10を示す。また、形状母数 α はいずれの h/L_0 においても、1.0以上となり、特に、 h/L_0 が0.019の場合に1.3の最大値を示す。なお、形状母数 α が小さくなることは、平均越波量よりも大きなものが現れる確率が高くなることを意味している。したがって、たとえば、 h/L_0 が変化しても α の値が変化しないか、あるいは大きくなるものが優れた越波低減機能を有していることになる。

図-3には、各代表越波量比 Q/Q_m および形状母数 α と波形勾配 H_0/L_0 との関係を示した。

これによると、 $Q_{1/3}/Q_m$ と $Q_{1/10}/Q_m$ は、 H_0/L_0 が0.04の場合に、それぞれ2と4の最大値を示すが、これらには H_0/L_0 による変動は小さい。一方、 Q_{max}/Q_m は H_0/L_0 による変動が大きく、 H_0/L_0 が0.03の場合に約10の最大値を示す。形状母数 α は H_0/L_0 が増大すると減少すること、前述したように波形勾配が大きくなると、平均越波量よりも大きな越波量が現れる確率が高くなることを示している。したがって、直立護岸は h/L_0 の増大よりも、 H_0/L_0 の増大に対して好ましくない越波特性をもっているといえよう。しかし、形状母数 α に及ぼす波形勾配の影響は、前述ののり先水深・波長比の場合ほど複雑ではない。

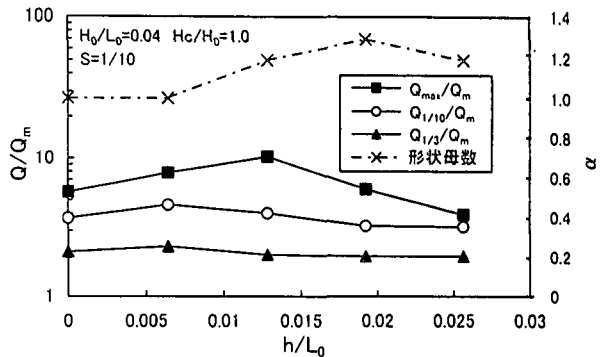


図-2 各代表越波量比および形状母数 α とのり先水深・波長比との関係

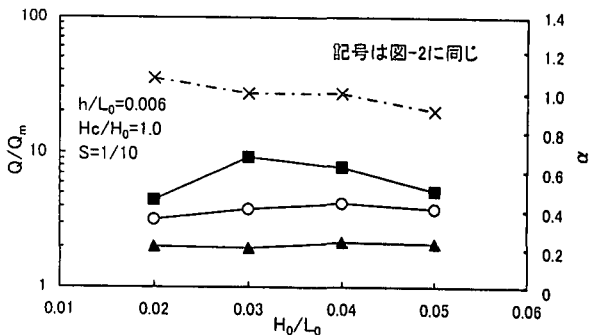


図-3 各代表越波量比および形状母数 α と波形勾配との関係

図-4には、各代表越波量比 Q/Q_m および形状母数 α と相対護岸天端高 H_c/H_0 との関係を示した。

これによると、いずれの Q/Q_m も H_c/H_0 が1.0に近づくほど、大きくなる傾向がみられる。特に、 Q_{max}/Q_m は H_c/H_0 が0.6以上になると、その値は8~10程度にもなる。形状母数 α は H_c/H_0 が0.2~0.6の範囲では減少し、 H_c/H_0 が0.6の場合に0.8の最小値を示す。しかし、 H_c/H_0 が0.6以上になると増加する。このように、形状母数 α に及ぼす相対護岸天端高の影響はきわめて微妙であるため、直立護岸の機能設計に際しては、特に注意が必要である。

図-5には、各代表越波量比 Q/Q_m および形状母数 α と無次元風速 $V/\sqrt{gH_0}$ との関係を示した。

これによると、いずれの Q/Q_m にも $V/\sqrt{gH_0}$ による変動はほとんどみられない。このように直立護岸の代表越波量比に及ぼす風の影響は小さいといえる。形状母数 α も $V/\sqrt{gH_0}$ によって変動せず、風の有無に関わらず1.2以上と大きな値を示している。

このように、直立護岸の $Q_{1/3}/Q_m$ や $Q_{1/10}/Q_m$ には、 h/L_0 、 H_0/L_0 および H_c/H_0 の影響はあまりなく、ほぼ一定値を示すのに対し、 Q_{max}/Q_m には、これらの3つの無次元量の影響が大きい。なお、風の影響だけについては、ほとんど考慮しなくてもよい。これらのことから、平均越波量だけを対象として、海岸護岸を設計した場合、排水設備が十分に整備されている場合にはあまり問題はないが、そうでない場合には、例えばわずか1波の越波でも被災の可能性があると見えよう。

(2) パラペット後退型護岸

1/50の傾斜海浜上に図-1(b)に示したものを設置した場合について検討する。

図-6には、図-2と同様なものをパラペット後退型護岸について示した。

これによると、いずれの Q/Q_m も h/L_0 が0.103の場合に最大値を示すが、 h/L_0 による変動はほとんどみられない。このように、パラペット後退型護岸の代表越波量比に及ぼすのり先水深・波長比の影響は、直立護岸の場合に比べて小さい。しかし、形状母数 α は h/L_0 によって大きく変動し、 h/L_0 が0.103の場合に最小値の0.6を示している。このことは最大越波量に近い越波量が現れる確率の高いことを意味しており、注意が必要である。このように、 h/L_0 によって形状母数 α が大きく異なる場合には、護岸の機能設計に際して詳細な検討が必要である。

図-7には、図-5と同様なものを示した。

これによると、いずれの Q/Q_m も $V/\sqrt{gH_0}$ が増大しても変動はなく、ほぼ一定値を示す。形状母数 α も $V/\sqrt{gH_0}$ の増大とともに大きくなる。したがって、パラペット後退型護岸の越波特性に及ぼす風の影響は、直立護岸の場合と同様に小さいといえる。

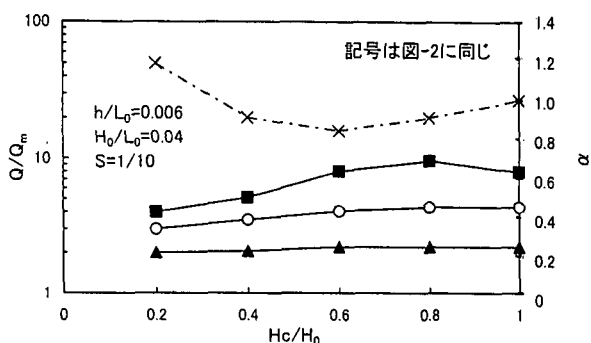


図-4 各代表越波量比および形状母数 α と相対護岸天端高との関係

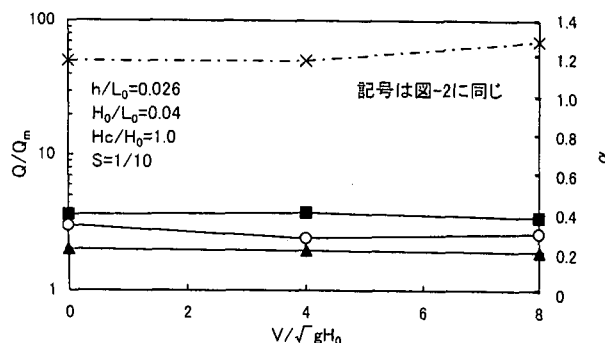


図-5 各代表越波量比および形状母数 α と無次元風速との関係

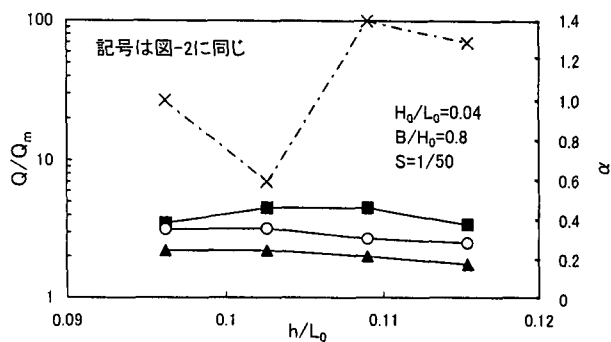


図-6 各代表越波量比および形状母数 α とのり先水深・波長比との関係

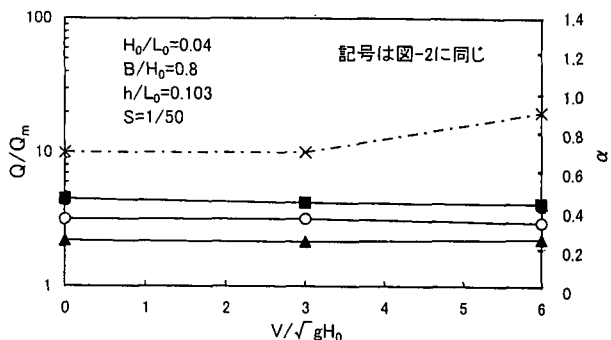


図-7 各代表越波量比および形状母数 α と無次元風速との関係

(3) 有孔壁式護岸

1/50の傾斜海浜上に図-1(c)に示した有孔壁式護岸を設置した場合について検討する。

図-8には、図-2と同様なものを有孔壁式護岸について示した。

これによると、 $Q_{1/3}/Q_m$ と $Q_{1/10}/Q_m$ には h/L_0 による変動はあまりみられないが、 Q_{max}/Q_m は h/L_0 が0.109の場合に最大値の6となり、 h/L_0 の影響がみられる。形状母数 α は、 h/L_0 が0.109の場合に最小値0.9を示す。このように有孔壁式護岸についての形状母数 α は、のり先水深・波長比の変化によって急激に変化するが、形状母数そのものの値は大きい。

図-9には、図-3と同様なものを示した。

これによると、 H_0/L_0 が0.03の場合には、いずれの Q/Q_m にも差はほとんどなく、2程度の値を示す。しかし、 H_0/L_0 が増大すると、いずれの Q/Q_m も増大する。特に、 Q_{max}/Q_m は、 H_0/L_0 の増大とともに単調増加し、 H_0/L_0 が0.05の場合には、8程度にもなる。このように、波形勾配が大きくなると防災上好ましくない特性を示すことは、この護岸の大きな欠点である。

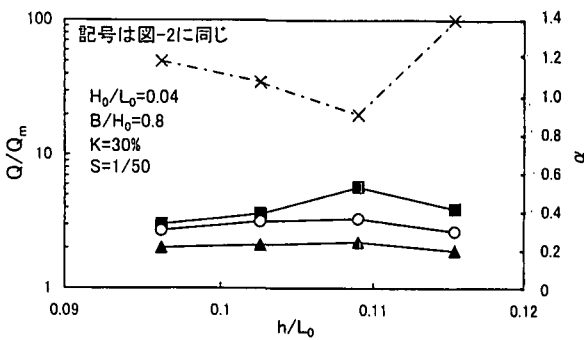


図-8 各代表越波量比および形状母数 α とのり先水深・波長比との関係

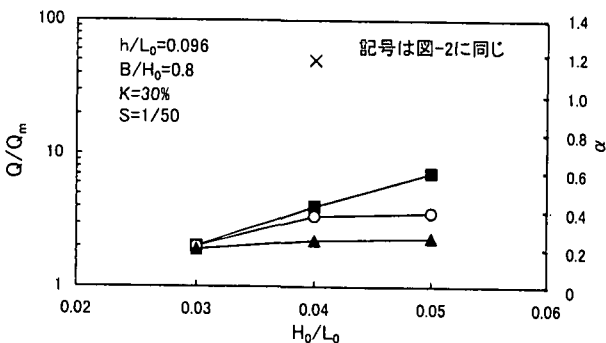


図-9 各代表越波量比および形状母数 α と波形勾配との関係

図-10には、図-5と同様なものを示した。

これによると、いずれの Q/Q_m も $V/\sqrt{gH_0}$ の増大とともにやや大きくなる。このように、有孔壁式護岸の各代表越波量比に及ぼす風の影響は、前述したパラベット後退型護岸の場合よりも大きい。形状母数 α

も $V/\sqrt{gH_0}$ が増大すると単調に減少する傾向を示す。このことも、防災上きわめて都合の悪い特性である。

図-11には、各代表越波量比 Q/Q_m および形状母数 α と護岸前面の開孔率 K との関係を示した。

これによると、 $Q_{1/3}/Q_m$ と $Q_{1/10}/Q_m$ には、 K による変動はあまりみられないが、 Q_{max}/Q_m は、 K が15%までは増加し、 K が15%の場合に最大値を示し、15%以上になると減少する。しかし、有孔壁式護岸の Q_{max}/Q_m に及ぼす護岸前面の開孔率 K の影響はあまり大きくはない。形状母数 α にも K による変動はほとんどみられないが、その値は、0.5か0.6であり小さい。したがって、このことも有孔壁式護岸の欠点である。

図-12には、各代表越波量比 Q/Q_m および形状母数 α と無次元化した遊水部幅 B/H_0 との関係を示した。

これによると、 B/H_0 が0.31から0.69の間では、いずれの Q/Q_m にも変動はあまりみられないが、 B/H_0 が0.69よりも大きくなると、いずれの Q/Q_m も若干減少する。すなわち、有孔壁式護岸の遊水部幅を大きくすれば、代表越波量比をやや小さくすることができる。形状母数 α の B/H_0 による変動はほとんどみられないが、その値は0.5か0.6で小さい。このことについても、前述の開孔率の場合と同様のことがいえる。

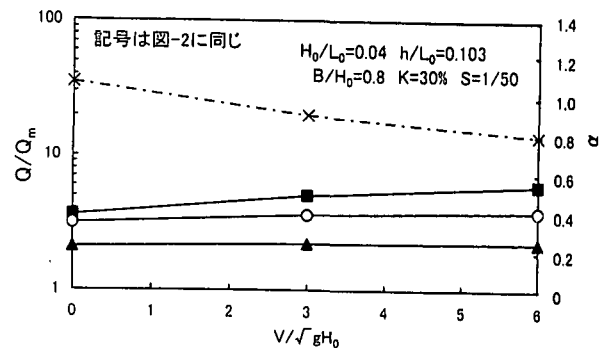


図-10 各代表越波量比および形状母数 α と無次元風速との関係

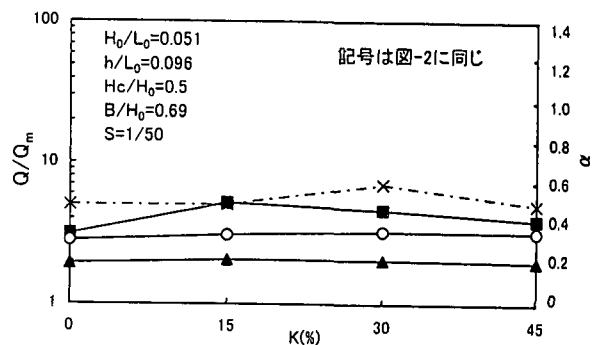


図-11 各代表越波量比および形状母数 α と開孔率との関係

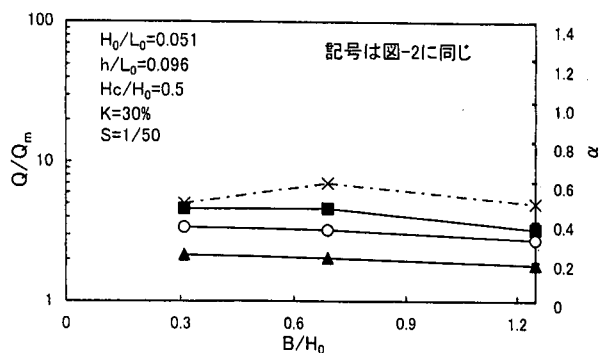


図-12 各代表越波量比および形状母数 α と無次元遊水部幅との関係

(4) 3割勾配護岸

1/10の傾斜海浜上に図-1(d)に示した3割勾配護岸を設置した場合について検討する。

図-13には、図-2と同様なものを示した。

これによると、 $Q_{1/3}/Q_m$ は h/L_0 によって、ほとんど変動せず、3程度でほぼ一定値を示す。しかし、他の Q/Q_m は h/L_0 の増大とともに減少する傾向がみられ、特に、 Q_{max}/Q_m は、 h/L_0 が0の場合には10であるが、 h/L_0 が0.026では5程度まで減少する。形状母数 α も h/L_0 が増大すると大きくなり、変動範囲も大きい。このように、3割勾配護岸の形状母数 α に及ぼすのり先水深・波長比の影響は大きく、 h/L_0 が大きくなると防災上好ましい特性を示している。

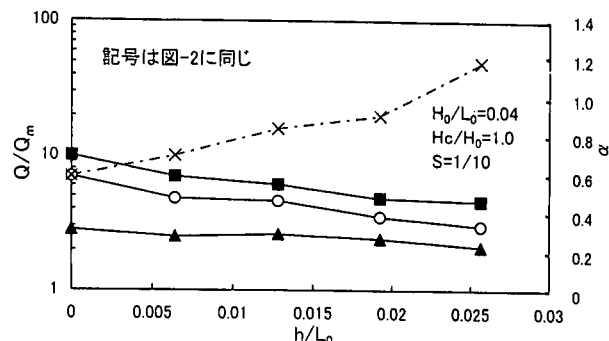


図-13 各代表越波量比および形状母数 α とのり先水深・波長比との関係

図-14には、図-5と同様なものを示した。

これによると、いずれの Q/Q_m にも $V/\sqrt{gH_0}$ による変動はほとんどみられなく、3割勾配護岸の各代表越波量比に及ぼす風の影響はほとんどないといえる。形状母数 α は $V/\sqrt{gH_0}$ が0の場合には1.2であるが、 $V/\sqrt{gH_0}$ の増大とともに小さくなり、このことは緩傾斜護岸の好ましくない越波特性である。

図-15には、各代表越波量比 Q/Q_m および形状母数 α とのり面の底質の中央粒径・波高比 d/H_0 との関係を示した。

これによると、 $Q_{1/3}/Q_m$ と $Q_{1/10}/Q_m$ は、 d/H_0 によってあまり変動しないが、 Q_{max}/Q_m は d/H_0 によって変動する。特に、 d/H_0 が0.0011や0.26の場合に大きくなり、6~7

程度の値を示す。このように、のり面に透水性をもたせた場合、 Q_{max}/Q_m が d/H_0 によって微妙に変動したり、形状母数 α も d/H_0 によって変化することは機能設計上、注意しなければならない。

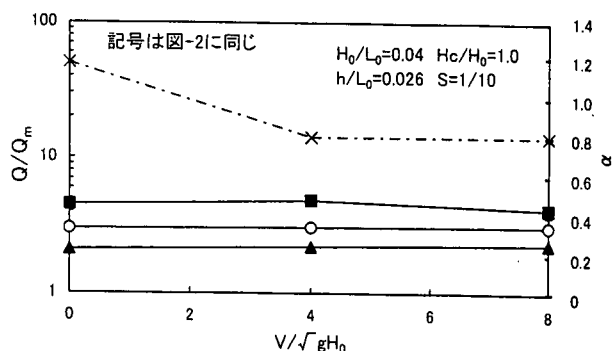


図-14 各代表越波量比および形状母数 α と無次元風速との関係

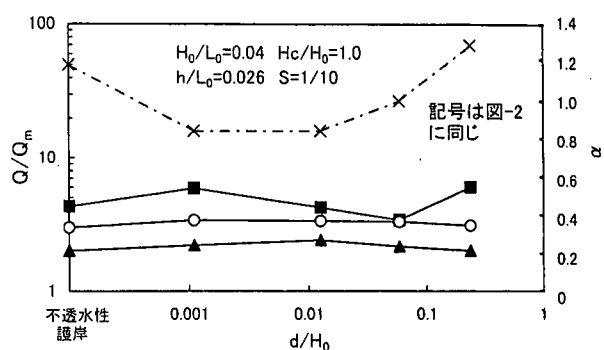


図-15 各代表越波量比および形状母数 α と無次元粒径との関係

(5) 5割勾配護岸

1/10の傾斜海浜上に図-1(e)に示した5割勾配護岸を設置した場合について検討する。

図-16には、図-2と同様なものを示した。

これによると、 $Q_{1/3}/Q_m$ は、 h/L_0 によって、ほとんど変動しなく、2~3程度でほぼ一定値を示す。しかし、 $Q_{1/10}/Q_m$ と Q_{max}/Q_m は、 h/L_0 が0の場合には小さいが、 h/L_0 が大きくなると若干増大する。

図-17には、図-5と同様なものを示した。

これによると、いずれの Q/Q_m も $V/\sqrt{gH_0}$ の増大とともに大きくなる。このように5割勾配護岸の場合には

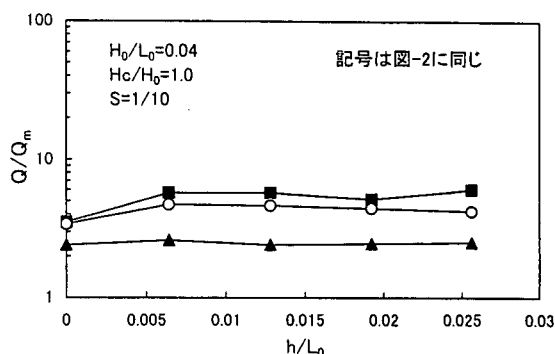


図-16 各代表越波量比とのり先水深・波長比との関係

風の影響がみられ、このことが3割勾配護岸との違いである。

図-18には、図-15と同様なものを示した。

これによると、 $Q_{1/3}/Q_m$ と $Q_{1/10}/Q_m$ には d/H_0 による変動はほとんどみられない。しかし、 Q_{max}/Q_m は d/H_0 が0.001以上になると大きくなり、 d/H_0 が0.236の場合には10程度にもなる。

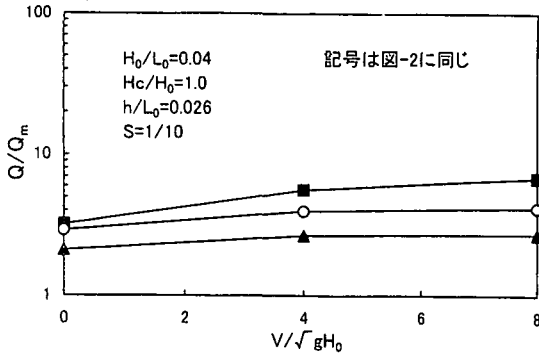


図-17 各代表越波量比と無次元風速との関係

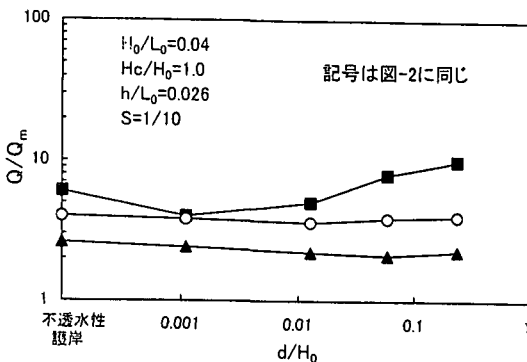


図-18 各代表越波量比と無次元粒径との関係

4. 結 語

以上、各種の海岸護岸における従来の実験結果を用い、その時間的変動特性について検討を行ってきた。その結果、以下のようなことが明らかになった。

(1) 直立護岸： Q_{max}/Q_m はのり先水深・波長比、波形勾配および相対護岸天端高の影響が大きく、場合によっては10程度にもなる。また、形状母数 α も前述の3つの無次元量によって変化し、その値は0.9～1.2である。

(2) パラペット後退型護岸：いずれの代表越波量比にものり先水深・波長比や風の影響はあまりない。しかし、形状母数 α はのり先水深・波長比によって大きなばらつきがみられる。

(3) 有孔壁式護岸： Q_{max}/Q_m はのり先水深・波長比、波形勾配および護岸前面の開孔率の影響がみられ、特に波形勾配が大きくなる場合には防災上好ましくない特性を示す。また、形状母数 α はのり先水深・波長比によって大きく変動し、その変動範囲は0.9～1.4である。

(4) 緩傾斜護岸：3割勾配護岸の場合の Q_{max}/Q_m に及ぼすのり先水深・波長比の影響は大きい。しかし、5割勾配護岸の場合には、いずれの Q/Q_m にものり先水深・波長比の変化による変動はあまりみられない。しかし、のり面に透水性をもたせた場合の Q_{max}/Q_m は底質の粒径によって大きく変動する。

謝 辞

この研究に用いた実験結果は、現在ニュージェックの殿最浩司氏、大阪府の円間弘起氏、坂本佳弘氏、大阪市の野村義一氏、東亜建設工業の藤野真人氏をはじめとする多くの関西大学海岸工学研究室の卒業生諸君の研究によって得られたものであることを明記して謝意を表す。また、この論文のとりまとめには、島田広昭助手にもお世話になった。なお、この研究には、関西大学学術研究助成基金を使用したことも明記する。

参考文献

- 1) 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，運輸省港湾技術研究所報告，第14巻，第4号，pp.3～44，1975。
- 2) 井上雅夫・島田広昭・殿最浩司：不規則波における越波量の出現頻度分布特性，海岸工学論文集，第36巻，pp.618～622，1989。
- 3) 井上雅夫・島田広昭・円間弘起：透水性を有する緩傾斜護岸の越波特性，海岸工学論文集，第38巻，pp.541～545，1991。
- 4) 井上雅夫・島田広昭・円間弘起：緩傾斜護岸の越波特性に及ぼす風の影響，海岸工学論文集，第39巻，pp.586～590，1992。
- 5) 井上雅夫・島田広昭・坂本佳弘：親水性護岸の越波防止機能，海岸工学論文集，第40巻，pp.701～705，1993。
- 6) 井上雅夫・島田広昭・野村義一・渡会英明・上山美登里：直立有孔壁護岸の越波特性とその越波量の推算，海岸工学論文集，第43巻，pp.706～710，1996。