

緩傾斜護岸の越波特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE CHARACTERISTICS OF WAVE OVERTOPPING ON GENTLE SLOPE-TYPE SEAWALLS

玉田 崇¹・手塚崇雄¹・井上雅夫²

Takashi TAMADA, Takao TEZUKA and Masao INOUE

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 characteristics of wave overtopping on gentle slope-type seawall. Therefore, experiments on wave overtopping by irregular waves were carried out for gentle slope-type seawalls. Using the results, effects of the ratio of the water depth to the wave height, the relative crown height of the seawall, the sea bottom slope and the slope gradient of the seawall on the wave overtopping rate of gentle slope-type seawalls were discussed. And, an optimum combination between slope gradient of the seawalls and sea bottom slope was examined from the wave overtopping prevention of view. In addition, frequency of appearance distribution of wave overtopping rate was also investigated.

Key Words: Wave overtopping, wave overtopping rate, gentle slope-type seawall

1. 緒言

近年, 我が国における海岸整備に関しては, 親水性が要求されることから, 天端高をできるだけ低く抑えた緩傾斜護岸の建設事例が増加傾向にある。この緩傾斜護岸における越波現象は, 水理現象のなかでもきわめて複雑なものであり, それに関わる要因のわずかな違いによって, 越波量などが大幅に変化する微妙な現象でもある。従来, こうした問題に関しては, 若干の実験的な検討^{1),2)}は行われているものの, その全容が明らかにされているわけではない。また最近, 護岸の緩傾斜化については, 護岸前面にわずかに残されていた自然海浜の大半をコンクリートで覆うため, 人為的な海岸侵食を助長するなどの問題点も指摘されている³⁾。

したがって, この研究では, 緩傾斜護岸の越波現象に関わる無次元量を種々変化させた一連の越波実験を行い, 緩傾斜護岸の越波特性に及ぼす諸要素の影響を検討し, その系統的な傾向の把握を試みた。また, 護岸断面を小さくしても, 優れた越波防止機能が発揮できる最適な護岸ののり面勾配と海底勾配

との組み合わせを調べるとともに, 越波特性の時間的変動についても検討を加えた。

2. 実験概要

この研究では, 大別して二種類の実験を行った。一つは, 緩傾斜護岸の越波特性を調べるもので, いま一つは, 越波防止の観点から, 緩傾斜護岸ののり面勾配と海底勾配の最適な組み合わせを見出そうとするものである。

まず, 越波特性に関する実験では, 2次元不規則波造波水槽(長さ25.0m, 幅0.5m, 深さ0.6m)内に設けた傾斜海浜上に緩傾斜護岸を設置して, 越波現象に関係するのり先水深・波高比 h/H_0 , 相対護岸天端高 h_c/H_0 , 波形勾配 H_0/L_0 などの無次元量を種々変化させて, 反射率 K_r , 越波率 r_0 および越波流量 q の測定を行った。図-1には, これらの記号の定義を示した。実験に用いた入射波は, 有義波周期 T が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, 基本的な実験条件を示したが, 一部の試験では, H_0/L_0 を0.02および0.04, h_c/H_0

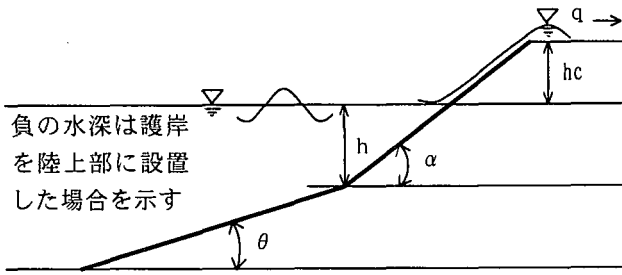


図-1 記号の定義

表-1 実験条件

沖波面勾配	H_0/L_0	0.017, 0.036
のり先水深・波高比	h/H_0	-0.27, 0, 0.18, 0.36, 0.71
相対護岸天端高	h_c/H_0	0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5
海底勾配	$\cot \theta$	10, 30
護岸のり面勾配	$\cot \alpha$	3, 5, 7

を0.24および0.48とした。

また、海底勾配とのり面勾配の組み合わせを変化させた実験では、それらをいずれも7, 10および20割の3種類に変化させ、それぞれを組み合わせた合計9ケースについては、1波ごとの越波流量も計測し、代表波法と同じ定義による代表越波量比を計算した。さらに、1波ごとの越波流量の出現頻度分布から、その超過発生確率についても検討した。

3. 越波特性に及ぼす諸要素の影響

(1) のり先水深・波高比 h/H_0 の影響

図-2には、反射率 K_r および越波率 r_0 とのり先水深・波高比 h/H_0 との関係を示した。図-2(a)および(b)は、相対護岸天端高 h_c/H_0 がそれぞれ0.5および1.5の場合のものである。

図-2(a)によると、いずれの護岸の K_r も、 h/H_0 が増大するにつれて、若干増大する傾向がみられる。特に、この傾向は3割勾配護岸のものに顕著にみられ、 h/H_0 が0.3程度よりも大きくなると、 K_r の最小値よりも場合によっては約30%も増大する。すなわち、のり面勾配が急なほど、 K_r に及ぼす h/H_0 の影響は大きい。一方、 r_0 は、いずれの護岸においても、 h/H_0 が-0.27~0の範囲では急激に増大し、 h/H_0 が約0.3よりも大きくなると、緩やかな増加傾向に変化する。

図-2(b)においても、 K_r には、図-2(a)と同様の傾向がみられる。一方、3割および5割勾配護岸の r_0 は、 h/H_0 が増大するにつれて増加し、 h/H_0 の影響が顕著であるのに対して、7割勾配護岸では、その影響はあまりみられない。なお、豊島⁴⁾は、波の打上げ高についても同様な傾向があることを指摘している。

図-3には、無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ および護岸のり先部における進行波としての有義波高と換算沖

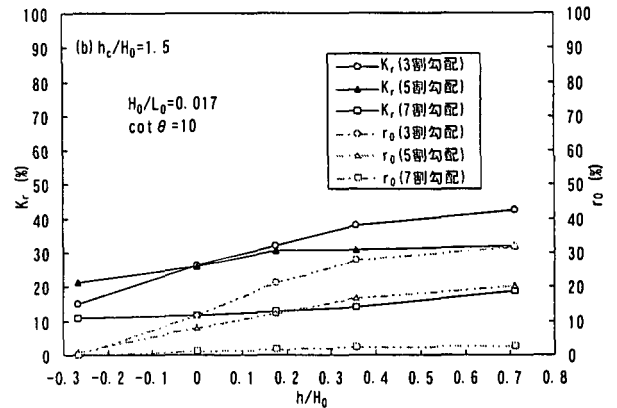
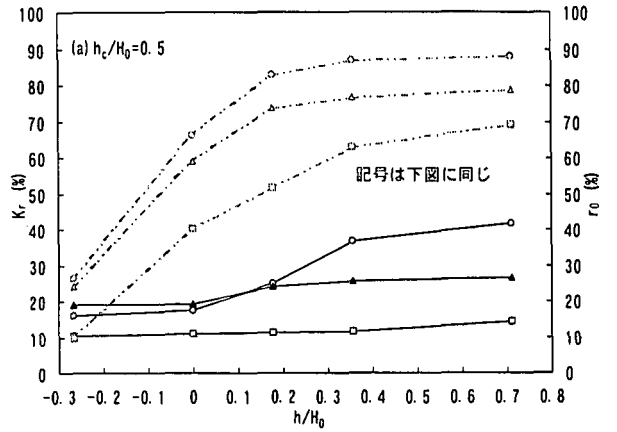


図-2 反射率および越波率とのり先水深・波高比との関係

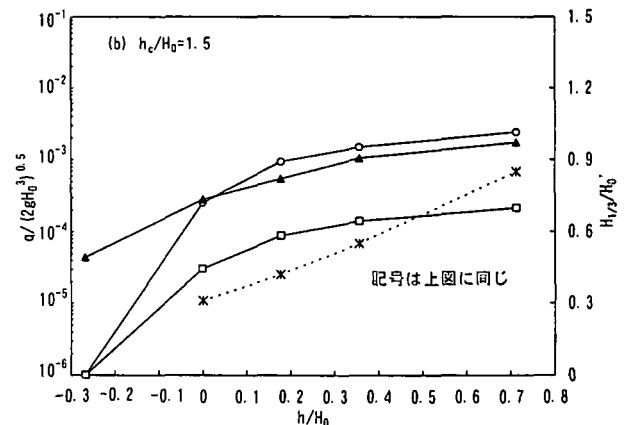
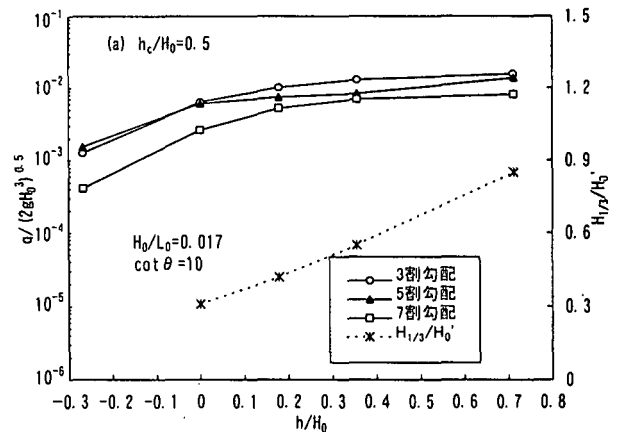


図-3 無次元越波流量とのり先水深・波高比との関係

波高の比 $H_{1/3}/H_0$ 'とのり先水深・波高比 h/H_0 との関係を図-2と同様に示した。この $H_{1/3}/H_0$ 'の値は合田⁵⁾によるものである。

図-3(a)によると、いずれの護岸においても、 h/H_0 が増大するにつれて、 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ も増大する。この原因は、のり先水深が大きくなると、碎波変形に伴う波高減衰の影響があまりみられないまま、波高の大きな波が護岸を越波するためと考えられる。このことは、合田⁵⁾による既往の研究結果と概ね一致しており、 $H_{1/3}/H_0$ 'も同様に増大していることがわかる。

図-3(b)においても、図-3(a)と同様の傾向がみられる。なお、この傾向は図-2で示した r_0 と同様であり、越波率と越波流量との間には相関のあることがわかる。また、 h/H_0 が $-0.27\sim 0$ の範囲では、3割勾配護岸の $q/\sqrt{2gH_0^3}$ は、5割勾配護岸のものよりも小さくなる。したがって、のり面勾配が急な3割勾配護岸でも、それを陸上部に設置した場合に限っては、その越波防止効果が期待できる。このように、越波特性に及ぼすのり先水深の影響は、護岸ののり面勾配によっても異なり、このことは、緩傾斜護岸の計画上、特に注意しなければならない。

(2) 相対護岸天端高 h_c/H_0 の影響

図-4には、反射率 K_r および越波率 r_0 と相対護岸天端高 h_c/H_0 との関係を示した。図-4(a)および(b)は、のり先水深・波高比 h/H_0 がそれぞれ0および0.71の場合のものである。

図-4(a)によると、いずれの護岸の K_r も、 h_c/H_0 が増大しても、若干の変動がみられるものの、その値はほぼ一定であり、実験値の変動範囲内にある。すなわち、 K_r には、 h_c/H_0 の影響はほとんどないものと考えられる。一方、いずれの護岸の r_0 も、 h_c/H_0 が大きくなると急激に減少し、 h_c/H_0 の影響が顕著に現れている。

図-4(b)においても、 K_r に及ぼす h_c/H_0 の影響はほとんどみられず、ほぼ一定値を示すが、その値は図-4(a)のものに比べて大きい。特に、3割勾配護岸の場合には、約40%にもなる。したがって、このような場合には、緩傾斜護岸であっても反射波の影響を無視することはできない。

図-5には、無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ と相対護岸天端高 h_c/H_0 との関係を図-4と同様に示した。

図-5(a)によると、いずれの護岸においても、図-4に示した r_0 と同様に、 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ に及ぼす h_c/H_0 の影響がみられ、 h_c/H_0 の増大に伴い、 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ は減少する。特に、7割勾配護岸において、その影響が顕著である。このことから、越波防止対策としての護岸の嵩上げは、のり面勾配が緩いと効果的であるが、緩傾斜護岸の天端を嵩上げすることは、その長所を喪失しかねない。

図-5(b)においても、図-5(a)と同様の傾向がみら

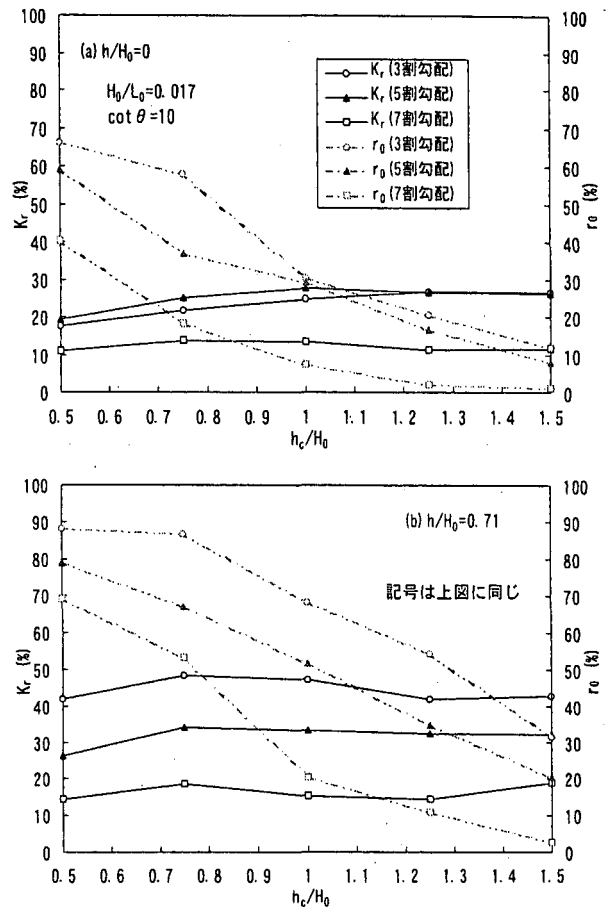


図-4 反射率および越波率と相対護岸天端高との関係

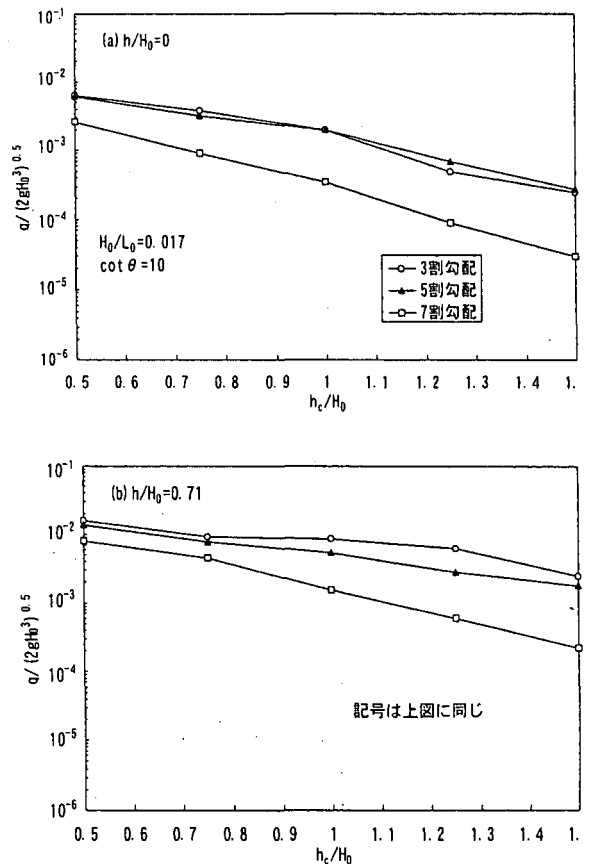


図-5 無次元越波流量と相対護岸天端高との関係

れる。また、いずれの相対護岸天端高においても、のり面勾配が緩いものほど越波流量は小さい。このように、のり面勾配が緩やかになると、緩傾斜護岸の越波流量は減少する。その要因は、のり面勾配が緩い場合には、急勾配のものに比べて、のり面の長さが長くなり、砕波した波が護岸上を遡上する際に、その波のもつエネルギーが失われるためである。

(3) 海底勾配の影響

図-6には、反射率 K_r および越波率 r_0 と海底勾配 $\cot \theta$ との関係を示した。図-6(a)は波形勾配 H_0/L_0 が0.017で相対護岸天端高 h_c/H_0 が0.5の場合、図-6(b)は波形勾配 H_0/L_0 が0.02で相対護岸天端高 h_c/H_0 が0.48の場合のものである。

図-6(a)によると、いずれの護岸の K_r と r_0 についても、海底勾配が緩くなると減少する傾向がみられる。特に、 r_0 にその傾向が顕著にみられる。

図-6(b)においても、7割勾配護岸や10割勾配護岸については、図-6(a)と同様の傾向がみられる。しかし、20割勾配護岸の K_r や r_0 の変動傾向は他のものとは異なる。特に K_r は、海底勾配が1/7の場合に、のり面勾配が急な護岸のものよりも大きいが、これについては、20割勾配護岸からの戻り流れが他の護岸の場合とは異なっていることが考えられる。

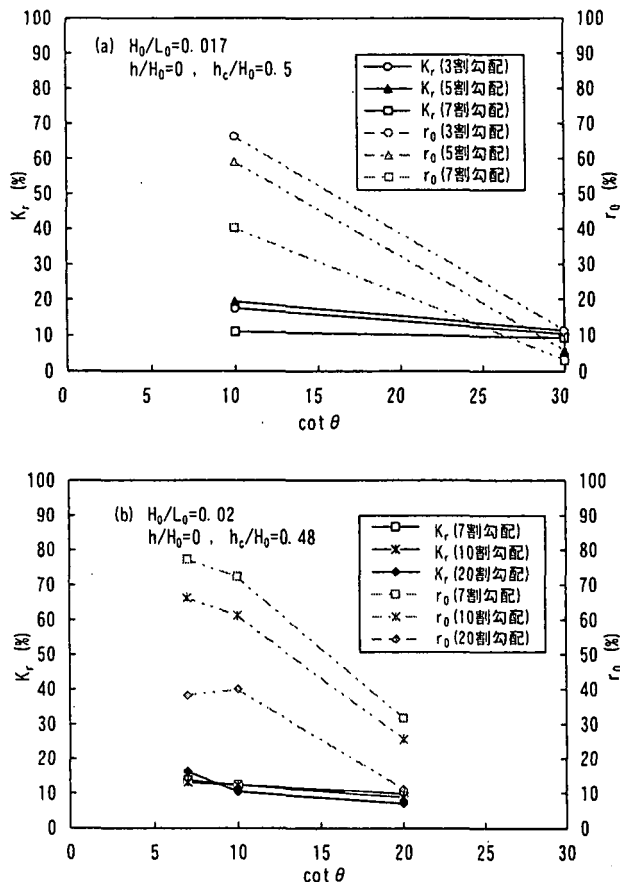


図-6 反射率および越波率と海底勾配との関係

図-7には、無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ および前述した $H_{1/2}/H_0'$ と海底勾配 $\cot \theta$ との関係を図-6と同様に示した。

図-7(a)によると、海底勾配、のり面勾配のいずれも急なものほど、 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ は大きい。これは、砕波帯が岸側に出現することが多くなり、波のエネルギーがほとんど減衰されないまま、短いのり面を這い上がるように越波するためである。

一方、図-7(b)においては、7割および20割勾配護岸の $q/\sqrt{2gH_0^3}$ は、海底勾配が緩くなるにつれて減少するのに対して、10割勾配護岸のものは、海底勾配が1/10の場合に最大値を示す。このように、海底勾配とのり面勾配の組み合わせによっては、のり面勾配が緩いにもかかわらず、それが急なものよりも越波流量が大きくなる場合がある。換言すれば、のり面勾配が急な護岸であっても、海底勾配を緩やかにすると、その越波防止機能を向上させることができる。

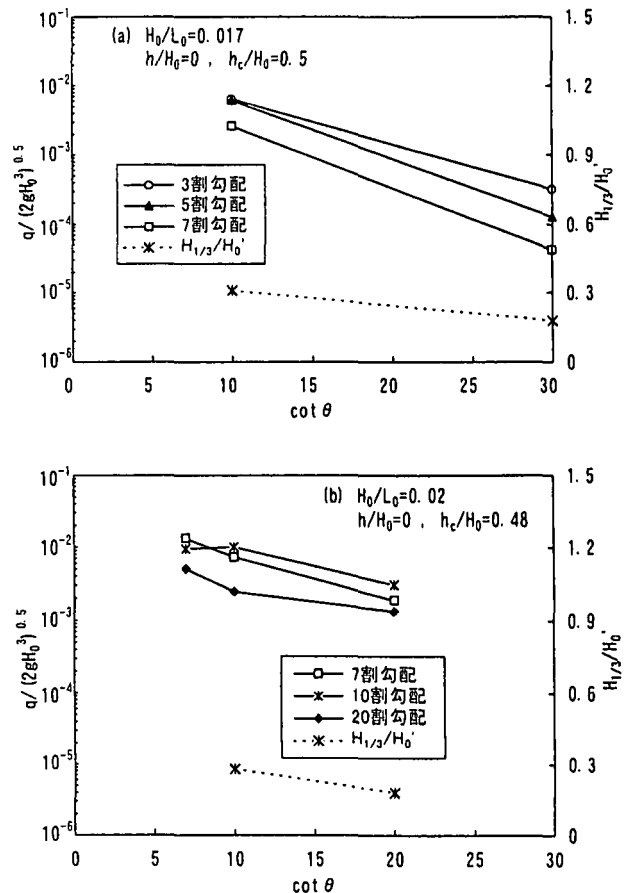


図-7 無次元越波流量と海底勾配との関係

(4) のり面勾配の影響

図-8には、反射率 K_r 、越波率 r_0 および無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ とのり面勾配 $\cot \alpha$ との関係を示した。ここに、図-8(a)は、波形勾配 H_0/L_0 が0.017で相対護岸天端高 h_c/H_0 が0.5の場合、図-8(b)は、波形勾配

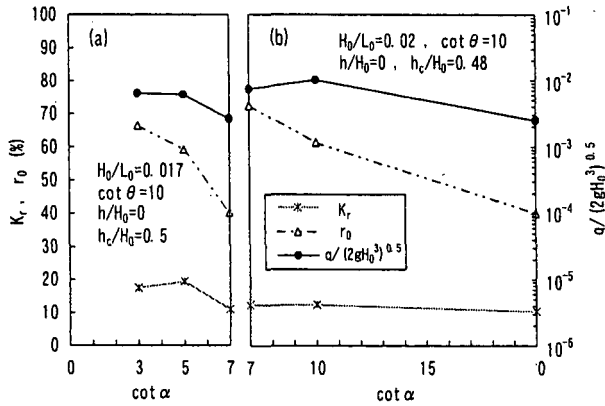


図-8 反射率，越波率および無次元越波流量とのり面勾配との関係

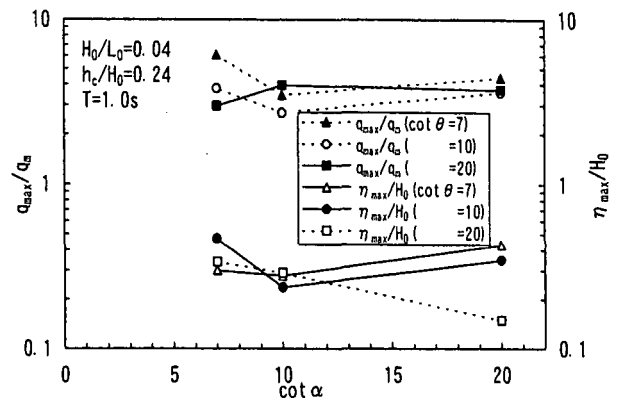


図-9 最大越波流量比および越波時の水位とのり面勾配との関係

H_0/L_0 が0.02で相対護岸天端高 h_c/H_0 が0.48の場合についてのものである。

これらの図によると、 K_r は、のり面勾配の違いによる変動があまりみられず、特に、7割勾配護岸よりも緩やかになると、その値はほぼ一定である。 r_0 については、のり面勾配が7割の場合に図-8(a)と図-8(b)の値には、かなりの差がみられるものの、のり面勾配が緩くなるとともに減少する傾向がみられる。また、この傾向は、のり面が7割勾配よりも急な護岸の $q/\sqrt{2gH_0^3}$ についても同様にみられる。しかし、7割よりも緩いものについては、のり面勾配の違いによる変動はあまりみられない。このように、護岸ののり面勾配を7割程度まで緩くすれば、ある程度の越波低減効果が期待できるが、海底勾配との組み合わせによっては、それ以上緩くしてもあまりその効果が発揮できない場合もある。

4. 越波特性の時間的変動

(1) 最大越波流量比および越波時の最大水位

図-9には、越波した波だけを対象とした場合の1波ごとの最大越波流量比 q_{max}/q_m および η_{max}/H_0 とのり面勾配 $\cot \alpha$ との関係を示した。ここに、 η_{max}/H_0 は、護岸天端上における越波時の最大水位 η_{max} を沖波波高 H_0 で除して無次元化したものである。

これによると、のり面が20割勾配の場合、いずれの海底勾配においても、 q_{max}/q_m は3.4~4.4であり、大差はみられない。一方、のり面が7割勾配の場合、海底勾配が1/20のものと同組み合わせると、 q_{max}/q_m は3程度であるのに対して、海底勾配も1/7のものと同組み合わせると、その値は6にも達する場合があり、防災上きわめて危険である。また、10割の一樣勾配護岸では、 q_{max}/q_m が最も小さく、2.6である。このように、海底勾配とのり面勾配の組み合わせの違いによって、 q_{max}/q_m は大きく変動するため、緩傾斜護岸の計画に際しては、細心の注意が必要である。

また、海底勾配が1/7と1/10の場合の q_{max}/q_m は、 η_{max}/H_0 とほぼ同様の傾向を示しながら変動しており、両者の間にはある程度の相関がみられる。

(2) 越波流量の出現頻度分布

図-10には、越波した波だけを対象とした場合における1波ごとの越波流量 q の出現分布の一例を、波形勾配 H_0/L_0 が0.04で相対護岸天端高 h_c/H_0 が0.24の場合について示した。いずれの図も、縦軸は1波ごと

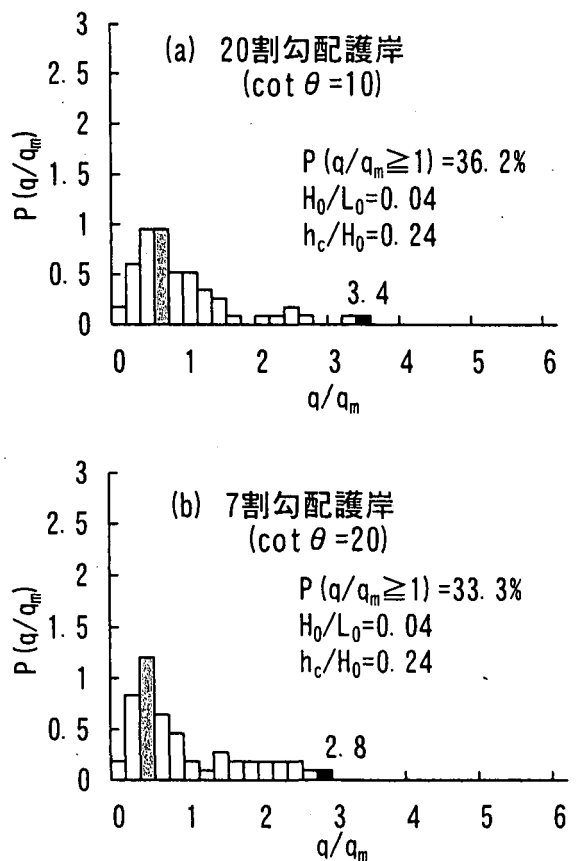


図-10 越波流量の出現頻度分布 (越波した波だけを対象とした場合)

の越波流量 q の出現確率 $P(q/q_m)$, 横軸は1波ごとの越波流量と平均越波流量との比 q/q_m である⁷⁾. なお, 図-10(a)は海底勾配が1/10, のり面勾配が20割の場合, 図-10(b)は海底勾配が1/20, のり面勾配が7割の場合のものである.

図-10(a)によると, $P(q/q_m)$ の最大値の出現する q/q_m は, 0.6~0.8であり, この値はのり面勾配が7割の場合の0.2~0.4や10割のもの0.2~0.4よりも大きい. さらに, 平均越波流量よりも大きな越波流量の出現確率 $P(q/q_m \geq 1)$ は36.2%であり, 他の護岸のものに比べて小さいが, q_{max}/q_m は3.4にもなる. このことから, 平均越波流量だけで機能設計を行うことは, 背後地の条件によっては, 危険な場合が生じることもあり, 特に, のり面勾配が20割のような超緩傾斜護岸においては, その機能設計に際して, 十分な注意が必要である.

図-10(b)によると, $P(q/q_m \geq 1)$ は33.3%で, この値は, のり面勾配が緩やかなものよりも小さく, しかも, q_{max}/q_m も2.8である. このようなことから, 海底勾配が1/20のようにやや緩やかな場合には, のり面が7割程度のものと組み合わせると, 短時間越波特性の面からも, 非常に優れた越波防止機能が期待できる.

5. 結 語

以上, 緩傾斜護岸の越波防止機能の向上を図るため, 緩傾斜護岸の越波現象に関わる無次元量を種々変化させた一連の越波実験を行い, 緩傾斜護岸の越波特性に及ぼす諸要素の影響を検討してきた. その結果, 以下のようなことが明らかになった.

- 1) いずれの護岸についても, 反射率 K_r には, 相対護岸天端高 h_c/H_0 の影響はほとんどみられず, のり先水深・波高比 h/H_0 や海底勾配がその支配要因となる. すなわち, K_r は h/H_0 が増大したり, 海底勾配が急になるとともに増大し, 特に, 3割勾配護岸で h/H_0 が0.71の場合における K_r は40%程度にもなる.
- 2) 越波率 r_0 および $H_{1/3}/H_0$ と越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ との間には相関がみられる. すなわち, これらは, 越波現象に関わる各々の無次元量の変化に伴い, ほぼ同様の傾向を示しながら変化する. また, 越波率 r_0 や越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ は, h/H_0 の増大や h_c/H_0 の減少に伴い増大し, 護岸ののり面勾配や海底勾配が緩くなると減少する場合が多い. 特に, のり面勾配が5割より緩い緩傾斜護岸の越波低減機能は優れている.
- 3) のり面勾配が急な3割勾配護岸では, 陸上部に設

置した場合に限って, その越波防止効果が期待できる. また, 護岸ののり面勾配と海底勾配を同じにすると, のり面勾配が緩いにもかかわらず, それが急なものよりも $q/\sqrt{2gH_0^3}$ は増大することがある. すなわち, 海底勾配との組み合わせによっては, のり面勾配が比較的急な緩傾斜護岸においても, その越波防止機能を向上させることができる.

4) 最大越波流量比 q_{max}/q_m は, 海底勾配が1/7および1/10の場合には, 10割勾配護岸のものが最も小さくなり, その値は3程度である. また, 平均越波流量よりも大きなものの出現確率は, 20割勾配護岸が最も小さいが, 最大越波流量比 q_{max}/q_m は他のものに比べて大きい. このため, 20割勾配のような超緩傾斜護岸の計画に際しては, 平均越波流量だけでなく, 短時間越波流量についても十分に考慮しなければならない.

5) 1/20の傾斜海浜上に7割勾配護岸を設置した場合, $P(q/q_m \geq 1)$ が最小値の33.3%を示すとともに, 最大越波流量比 q_{max}/q_m も2.8になり, 短時間越波特性の面からも非常に優れた越波防止機能を発揮する.

謝辞: 本研究の実験や資料整理には, 現在, 関西大学大学院の田中克彦, 矢作建設工業の野崎裕史の両君, また, 論文のまとめには関西大学大学院の片山敦史君が大いに助力してくれたことを明記して謝意を表す. なお, この研究には, 平成14年度関西大学学術研究助成基金を使用した.

参考文献

- 1) 井上雅夫: 親水性護岸における越波特性, 第29回水工学に関する夏期研修会講義集, Bコース, pp.B-6-1~B-6-15, 1994.
- 2) 玉田 崇・井上裕規・井上雅夫: 緩傾斜護岸における越波流量算定図の提案と時間的変動特性に関する考察, 海洋開発論文集, 第17巻, pp.311~316, 2001.
- 3) 宇多高明: 緩傾斜護岸に係わる様々な問題点の整理, 海洋開発論文集, 第15巻, pp.523~528, 1999.
- 4) 豊島 修: 続・緩傾斜護岸Q&A, 海岸, No.28, pp.51~60, 1988.
- 5) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 運輸省港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp.59~106, 1975.
- 6) 合田良実: 碎波指標の整理について, 土木学会論文報告集, No.180, pp.39~49, 1970.
- 7) 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分布特性, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.618~622, 1989.