

不規則波による緩傾斜護岸の越波特性

井上雅夫*・島田広昭**・殿最浩司***

1. 緒 言

海岸護岸のすぐ背後までの土地が利用され、特に人家などがそこに存在するような箇所では、たとえわずか1波の越波でもきわめて危険な場合があり、これに近い被災例として台風6626号による吉原海岸の災害を挙げることができよう。井上ら(1988, 1989)は、こうした災害を防止軽減するためには、海岸堤防の機能設計に際して、従来の合田ら(1975)による越波流量、木村ら(1981, 1982)による短時間越波量に加えて、1波当りの許容越波量をも計画の対象に加えるべきことを主張してきた。一方、近年面的な海岸防護方式の導入にともなって、緩傾斜護岸が多く建設されるようになってきた。この護岸の表のり勾配については、当初は3割程度のものがほとんどであったが、最近では5割、ときにはそれより緩やかなものも採用されているようである(豊島, 1988)。しかし、こうした緩傾斜護岸の越波特性、特に不規則波による越波量の出現分布については、あまり十分な検討は行われていないようである。このようなことから、本研究では、傾斜海浜上に設置された緩傾斜護岸を対象として不規則波による越波実験を行うとともに、それらの結果を従来の鉛直護岸のものと比較することによって、緩傾斜護岸についての代表越波量(代表波法と同じ定義によるもの)や越波量の出現分布特性を明らかにしようとしたものである。

2. 実験装置および方法

実験は、電気油圧サーボ式不規則波造波機を有する、長さ30m、幅0.7m、深さ1.0mの二次元水槽内に勾配が1/10の傾斜海浜を設置し、その背後にある緩傾斜護岸を越える不規則波群の1波ごとの越波量を測定した。緩傾斜護岸の表のり勾配は3割、5割および6割の3種類に変化させた。なお、傾斜海浜と護岸模型はいずれも滑面固定床である。不規則波の期待スペクトルは有義波周期が1.0sのBretschneider・光易型であり、入射波高

は入・反射波分離推定法で求めた。実験条件は、有義波の波形勾配 $(H/L)_{1/3}$ を0.04, 相対護岸天端高 $H_c/H_{1/3}$ を1.0と一定にし、越波現象を支配するもっとも重要な無次元量であるのり先水深・波長比 $h/L_{1/3}$ だけを0, 0.006, 0.013, 0.019 および0.026の5種類に変化させ、鉛直護岸の結果と比較できるようにした。なお、本研究で対象とした代表越波量は、最大越波量 Q_{max} , 1/10最大越波量 $Q_{1/10}$, 有義越波量 $Q_{1/3}$ および平均越波量 Q_m である。また、越波量をそれぞれの越波時間(ビデオ撮影による実測)で除した1波ごとの越波流量 q についても同様な取り扱いを行い、それら統計量の相互間の関係を検討した。さらに、越波量の出現分布については、すべての波を対象とした場合と越波した波だけを対象とした場合のそれぞれについて、Weibull分布の適合性を検討した。

3. 実験結果および考察

3.1 越波率および越波流量

図-1は、不規則波群の越波率 r_0 とのり先水深・波長比 $h/L_{1/3}$ との関係である。なお、この場合の越波率は、不規則波群のうち越波する波数を全入射波数で除したものである。これによると、越波率はのり面傾斜角が緩くなるほど小さくなることがわかる。また、3割、5割および6割勾配護岸では、 $h/L_{1/3}$ の増大とともに越波率もほぼ増加する傾向がみられる。それに対し鉛直護岸では、 $h/L_{1/3}$ が0~0.019までは、緩傾斜護岸の場合と同様に、 $h/L_{1/3}$ の増大とともに越波率も増加しているが、

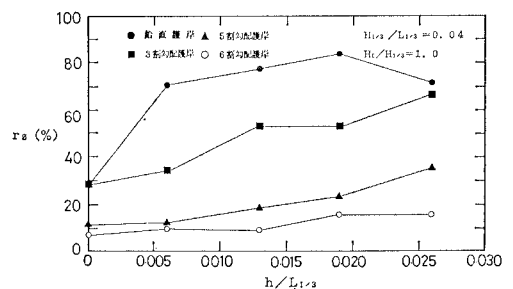


図-1 越波率とのり先水深・波長比との関係

* 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 関西大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 (株)新日本技術コンサルタント

$h/L_{1/3}$ が 0.019 以上になると、越波率は減少している。 $h/L_{1/3}$ が 0.019 以上になると、越波率が減少する原因としては、鉛直護岸の場合、のり先水深が大きくなると、護岸前面で重複波が形成される割合が多くなるためと考えられる。また、鉛直護岸と 3 割勾配護岸では、 $h/L_{1/3}$ の影響が顕著に現れているのに対し、5 割および 6 割勾配護岸は、その影響があまりないことがわかる。なお、豊島(1986)は、波のうちあげ高についても同様な傾向のあることを指摘している。

図-2 は、無次元越波流量 $q/\sqrt{2g(H_{1/3})^3}$ とのり先水深・波長比 $h/L_{1/3}$ との関係である。これによると、いずれののり面傾斜角についても、越波流量は $h/L_{1/3}$ が 0.006 以上では、その増大とともに増加する傾向がある。また、越波流量は、 $h/L_{1/3}$ が 0~0.006 の場合には、のり面傾斜角によってほとんど変化しないが、 $h/L_{1/3}$ が 0.01 程度以上になると、のり面傾斜角の影響が顕著に現れ、3 割勾配護岸がもっとも大きく、ついで鉛直、5 割勾配、6 割勾配護岸の順に減少し、その減少の割合は $h/L_{1/3}$ が大きいほど著しい。また、図-1 からわかるように、越波率は、鉛直護岸のほうが 3 割勾配護岸よりも大きいにもかかわらず、越波流量については、 $h/L_{1/3}$ が 0.006 以上になると、3 割勾配護岸のほうが多くなっ

ている。このことから、3 割勾配護岸のほうが鉛直護岸よりも越波量の大きな波が多いことがわかる。以上のように、緩傾斜護岸の越波防止機能は、のり面傾斜角が 5 割あるいは 6 割で、 $h/L_{1/3}$ が大きい場合に秀れていることがわかる。

3.2 代表越波量

図-3 および 4 は、平均越波量と代表波法の定義にしたがって求めた他の代表越波量との関係であり、それぞれ越波した波だけを対象とした場合とすべての波を対象とした場合のものである。なお、いずれも (a) 図はのり先水深・波長比 $h/L_{1/3}=0.006$ 、(b) 図は $h/L_{1/3}=0.026$

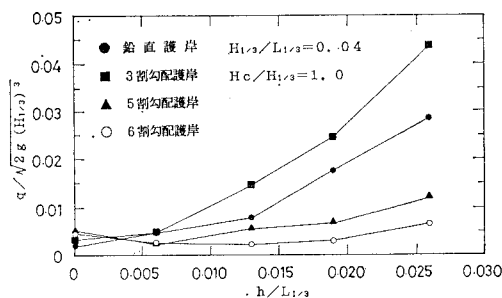
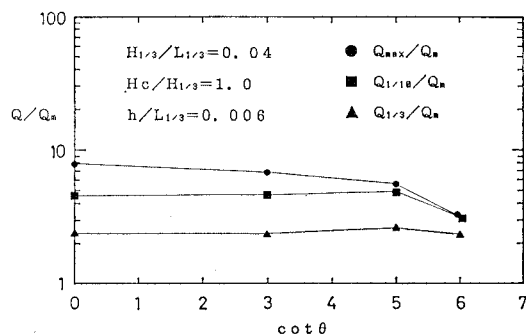
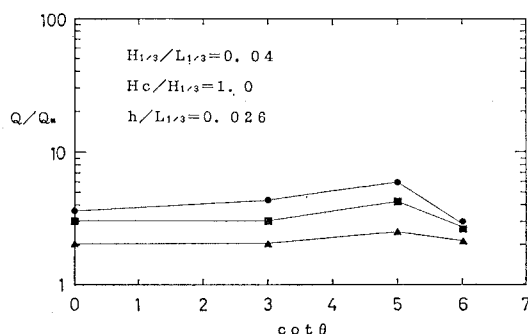


図-2 無次元越波流量とのり先水深・波長比との関係

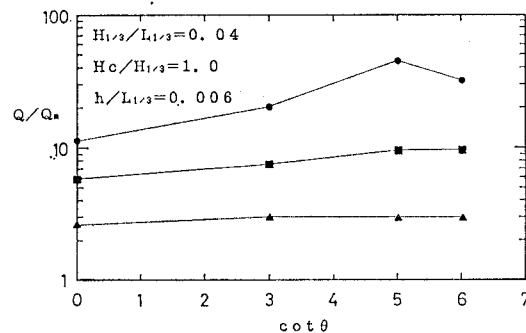


(a) $h/L_{1/3}=0.006$

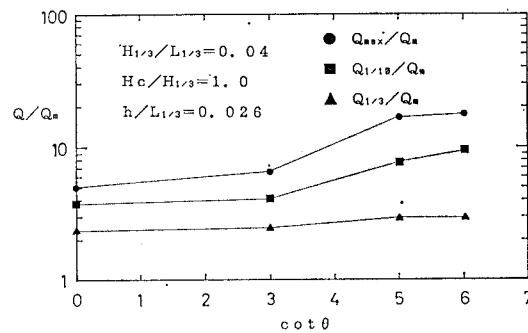


(b) $h/L_{1/3}=0.026$

図-3 代表越波量比とのり面傾斜角との関係(越波した波だけを対象とした場合)



(a) $h/L_{1/3}=0.006$



(b) $h/L_{1/3}=0.026$

図-4 代表越波量比とのり面傾斜角との関係(すべての波を対象とした場合)

のものであり、各図の縦軸は各代表越波量と平均越波量との比 Q/Q_m である。

図-3 に示した以外のすべての $h/L_{1/3}$ を含め、越波した波だけを対象にした場合、有義越波量 $Q_{1/3}$ は平均越波量 Q_m の約 2～3 倍であり、この値はのり面傾斜角によってほとんど変化しない。また、1/10 最大越波量は平均越波量 Q_m の 3～7 倍、最大越波量 Q_{max} は Q_m の 3～10 倍になり、これらの値はのり面傾斜角によって変化し、特に Q_{max} の場合には顕著である。さらに、図-3 (a) に示したように、 $h/L_{1/3}=0.006$ の小さい場合の Q/Q_m は、のり面傾斜角が緩くなるにつれて減少している。このことは、緩傾斜護岸のもつ防災上好ましい特性といえよう。しかし、図-3 (b) に示した $h/L_{1/3}=0.026$ の場合には、5 割勾配で Q/Q_m の値は最大になり、このことは緩傾斜護岸の機能設計上、特に注意しなければならないことである。

図-4 のすべての波を対象にした場合には、いずれも図-3 の越波した波だけを対象とした場合よりも、 Q/Q_m の値は $Q_{1/3}$ のものを除いて、かなり大きくなる。特に、5 割および 6 割勾配護岸については、(a) 図の $h/L_{1/3}=0.006$ の場合には Q_{max} が Q_m の約 30～50 倍にも達し、(b) 図の $h/L_{1/3}=0.026$ の場合でも約 20 倍に達している。これは、すべての波を対象にすると、 Q_m の値が小さくなるためである。なお、これらのことは、図示はしていないが、越波量をそれぞれの越波時間で除した 1 波ごとの越波流量についてもほぼ同様の結果であった。

3.3 越波量の出現分布

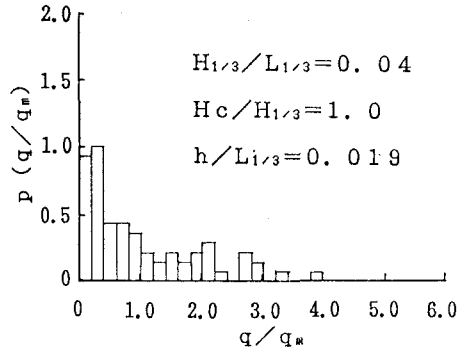
図-5 (a)～(d) は、越波した波だけを対象とした場合の 1 波ごとの越波量 q の出現分布であり、それぞれ $h/L_{1/3}$ が 0.019 の場合の 3 割、5 割、6 割勾配護岸および鉛直護岸のものである。なお、横軸は出現越波流量 q と平均越波流量 q_m との比 q/q_m で、縦軸は確率密度 $P(q/q_m)$ であり、次式で示されるものである。

$$P(q/q_m) = \frac{\text{相対度数}}{d(q/q_m)} = \frac{1}{d(q/q_m)} \cdot \frac{NN(q/q_m)}{N} \quad \dots\dots\dots (1)$$

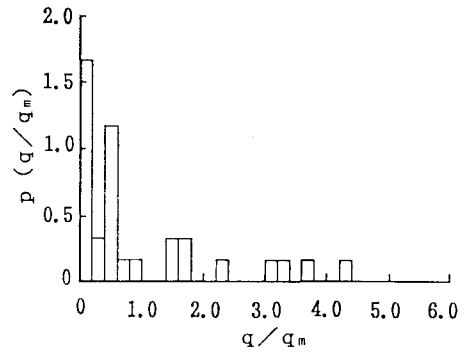
ここに、 N は全測定越波数、 $d(q/q_m)$ は越波流量の読み取り間隔(この場合には 0.2 とした)、 $NN(q/q_m)$ は q/q_m が q/q_m と $q/q_m + d(q/q_m)$ の範囲にある越波数である。

これらによると、 $P(q/q_m)$ の極大値の出現位置については、のり面傾斜角が緩くなるほど、0 に移行するようである。また、緩傾斜護岸の q/q_m の最大値は、いずれも鉛直護岸に比べて小さくなる傾向がみられる。さらに、 q/q_m が 1 以下、すなわち q_m より小さい越波流量が出現する割合はいずれも全体の約 2/3 以上を占めており、3 割勾配護岸の場合がもっとも小さい。

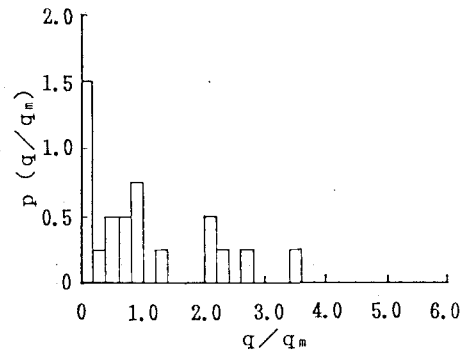
図-6 (a) および (b) は、3 割勾配護岸における 1 波



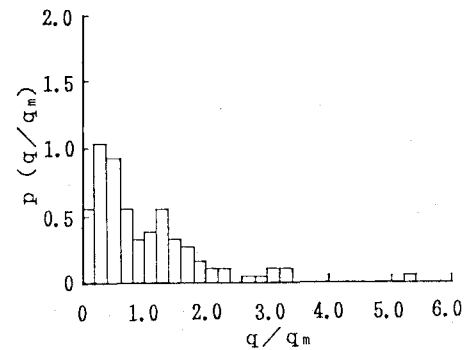
(a) 3 割勾配護岸



(b) 5 割勾配護岸

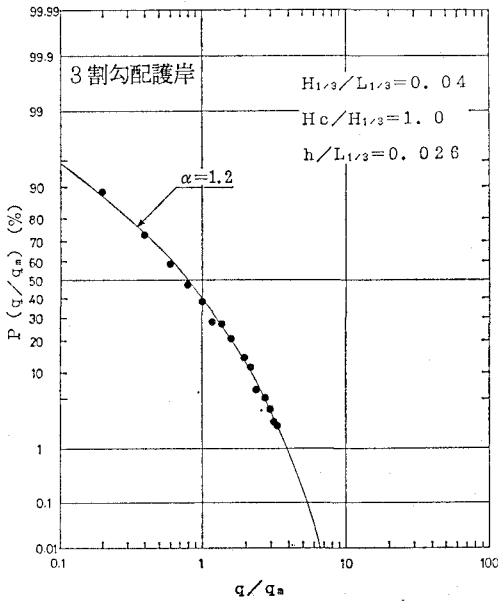


(c) 6 割勾配護岸

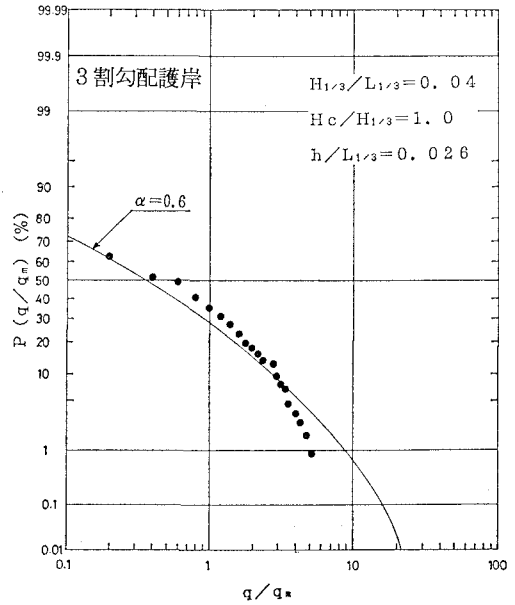


(d) 鉛直護岸

図-5 越波量の出現分布



(a) 越波した波だけを対象とした場合



(b) すべての波を対象とした場合

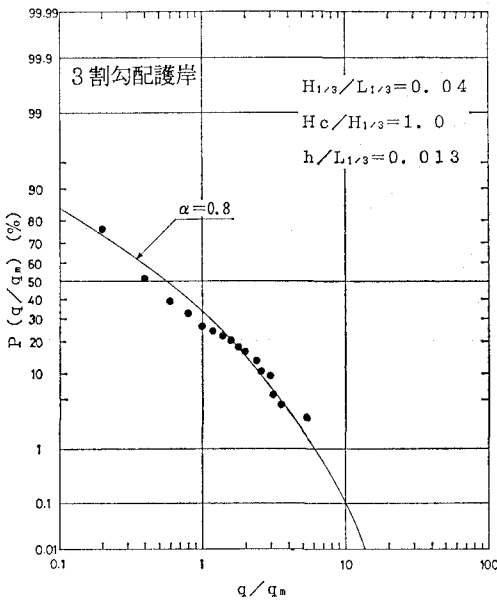
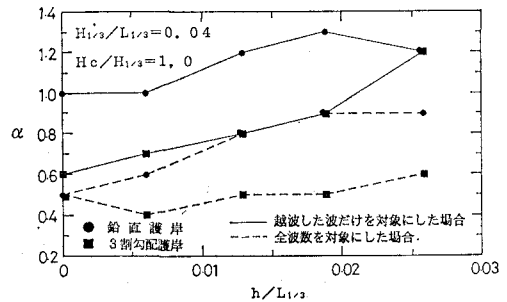
図-6 越波流量の超過発生確率 ($h/L_{1/3}=0.026$)図-7 越波流量の超過発生確率 ($h/L_{1/3}=0.013$)

図-8 Weibull 分布における形状母数ととり先水深・波長比との関係

と、(a) 図にみられるように越波した波だけを対象とした場合の実験値は Weibull 分布にきわめてよく一致している。

図-7 は、 $h/L_{1/3}$ が 0.013 の越波した波だけを対象とした場合について、図-6 と同様を示した。これによると、図-7 の場合については、図-6 のものよりも Weibull 分布への適合度が劣ることがわかる。一般に、越波した波だけを対象とした場合にもすべての波を対象とした場合にも、 $h/L_{1/3}$ が大きいものほど Weibull 分布への適合度がよくなる傾向がみられる。鉛直護岸の場合は、いずれの $h/L_{1/3}$ でも適合度がよかったことから、Weibull 分布への適合度は図-1 に示した越波率に関係し、越波率が大きい場合には Weibull 分布への適合度はよくなるものと考えられる。また、5 割および 6 割勾配護岸

ごとの越波流量の超過発生確率の一例として、 $h/L_{1/3}$ が 0.026 のものについて示した。(a) 図は越波した波だけを、(b) 図はすべての波を対象とした場合である。なお、図中の曲線は Weibull 分布であり、この分布の形状母数 α の決定は、確率密度を求める段階で α 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 -検定を行い、その検定値が最小になるものを採用した。これによる

のものについては、越波率が小さいため、Weibull 分布の適合性を明確にすることができなかった。今後は、5割および6割勾配護岸についても越波率を大きくして、同様な検討が必要であろう。

図-8 は、Weibull 分布における形状母数 α とのり先水深・波長比 $h/L_{1/3}$ との関係である。なお、図中には、3割勾配護岸の場合とともに鉛直護岸の場合も同時に示した。これによると、3割勾配護岸の α は鉛直護岸のものよりも小さい値を示し、鉛直護岸の場合は、 $h/L_{1/3}$ が 0.019 で最大になるのに対し、3割勾配護岸の場合には、 $h/L_{1/3}$ の増大とともに α も増大する傾向がある。こうした形状母数 α と $h/L_{1/3}$ との関係は、図-1 に示した越波率と $h/L_{1/3}$ との関係によく対応している。

4. 結 語

以上、本研究での結果を要約するとつぎのようである。

- 1) 緩傾斜護岸の越波率は、のり面傾斜角が緩くなるほど小さくなり、その傾向は $h/L_{1/3}$ が大きいほど著しい。
- 2) 越波流量は、 $h/L_{1/3}$ が小さい場合には、のり面傾斜角によってほとんど変化しないが、 $h/L_{1/3}$ が 0.01 程度以上になると、のり面傾斜角の影響が現れ、3割勾配護岸がもっとも大きく、ついで鉛直、5割、6割勾配護岸の順に減少する。また、その減少の割合は $h/L_{1/3}$ が大きいほど著しい。
- 3) 越波した波だけを対象とした場合の平均越波量と他の代表越波量との関係については、 $Q_{1/3}$ は Q_m の約 2～3 倍であり、この値はのり面傾斜角や $h/L_{1/3}$ によってほとんど変化しない。 $Q_{1/10}$ は Q_m の 3～7 倍、 Q_{max} は Q_m の 3～10 倍に達し、これらの値はのり面傾斜角や $h/L_{1/3}$ によって変化し、特に Q_{max} の場合は顕著である。

さらに、すべての波を対象とした場合には、 Q_m が小さくなるため、これらの値は、 $Q_{1/3}$ を除いて、いずれもかなり増大する。

4) 越波した波だけを対象とした場合の 3割勾配護岸についての越波量出現分布は Weibull 分布に適合する。また、その形状母数は、 $h/L_{1/3}$ の増大とともに増大し、その適合度も向上する。これらの傾向は、鉛直護岸の場合とほとんど同じであるが、形状母数の値は鉛直護岸に対するものよりも小さくなる。形状母数と $h/L_{1/3}$ との関係は、越波率と $h/L_{1/3}$ との関係にきわめてよく対応している。5割と6割勾配護岸のものについては、越波率が小さいため、Weibull 分布の適合性は明確でない。

最後に、本研究に際して大いに助力してくれた現関西大学大学院の打谷一雄、円間弘起、平尾幹也の諸君に謝意を表する。

参 考 文 献

- 井上雅夫・島田広昭・本田清高・殿最浩司 (1988): 不規則波の越波量分布, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 582～586.
- 井上雅夫・島田広昭・殿最浩司 (1989): 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.
- 木村 晃・瀬山 明・山田敏彦 (1981): 不規則波の短時間越波量の確率特性, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 335～338.
- 木村 晃・瀬山 明 (1982): 越波の排水能力と浸水災害の発生確率について, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 375～379.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975): 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.
- 豊島 修 (1986): 緩傾斜護岸 Q&A, 海岸, 第 26 号, pp. 95～104.
- 豊島 修 (1988): 続・緩傾斜護岸 Q&A, 海岸, 第 28 号, pp. 51～60.