

不規則波における越波量の出現分布特性

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。著者らは、こうした災害を防止軽減するためには、海岸護岸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。しかし、不規則波における越波量の出現分布については、これまで高田(1978)の計算例や著者ら(1988)の室内実験による結果が報告されているが、いずれも限定された条件のものであり、これらをそのまま実際上の問題に適用することはむずかしい。このようなことから、本研究では、越波現象を支配する入射波の波形勾配、のり先水深・波長比および相対護岸天端高などの無次元量を系統的に変化させた場合の不規則波による越波実験を行い、代表波法と同じ定義にしたがって求めた代表越波量や越波量分布の一般的な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

実験では、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の片側一部ガラス張りの鋼製二次元水槽内に勾配が1/10の傾斜海浜を設置し、その背後にある鉛直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。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、越波実験のまえに、すべての実験条件に対する入射波の検定を行った結果、いずれの場合についても、その再現性が保たれていることを確認した。なお、入射波高は入・反射波分離推定法で求め、越波量の測定は著者ら(1988)による方法によった。実験条件は、有義波の波形勾配

$H_{1/3}/L_{1/3}$ が 0.02, 0.03, 0.04 および 0.05 の 4 種類、のり先水深・波長比 $h/L_{1/3}$ は 0, 0.006, 0.013, 0.019 および 0.026 の 5 種類、相対護岸天端高 $H_c/H_{1/3}$ は 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 および 1.0 の 5 種類とし、これらを適当に組み合わせることによって、代表越波量や越波量の出現分布に及ぼす波形勾配、のり先水深・波長比および相対護岸天端高の影響を調べた。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 (合田の越波流量と同じもの) 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値) 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。

3. 実験結果および考察

3.1 代表越波量

図-1 は、平均越波量と代表波法にしたがって求めた他の代表越波量との関係を示したものであり、縦軸は各代表越波量と平均越波量との比 Q/Q_m 、横軸は $h/L_{1/3}$ である。なお、上図は越波した波だけを、下図は全波数をそれぞれ対象にした場合のものである。上図の場合に

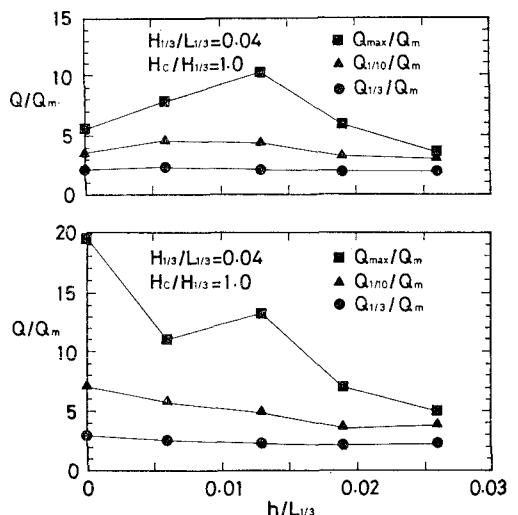


図-1 代表越波量比とのり先水深・波長比との関係

* 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

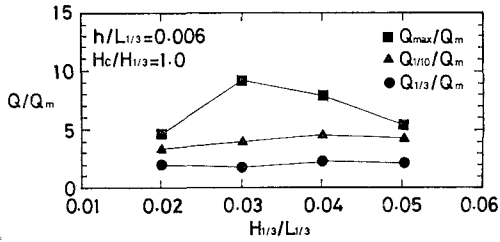


図-2 代表越波量比と波形勾配との関係

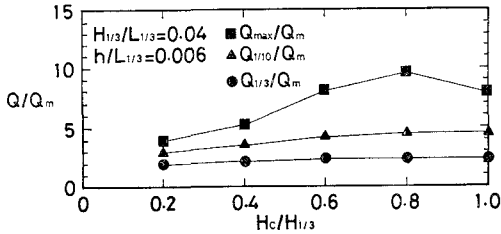


図-3 代表越波量比と相対護岸天端高との関係

は、 $Q_{1/3}$ は Q_m の約 2 倍で、のり先水深・波長比の影響はみられず、ほぼ一定値を示している。 $Q_{1/10}$ は Q_m の約 3～5 倍で、のり先水深・波長比の影響が若干現れている。また、 $Q_{\max}$ についてはのり先水深・波長比の影響が顕著に現れ、 $h/L_{1/3}=0.013$ で最大値を示し、 Q_m の約 10 倍である。下図の場合には、いずれの Q/Q_m も越波した波だけを対象にした上図の場合のものよりも大きい値を示している。特に、 $Q_{\max}$ については非常に異なり、 $h/L_{1/3}=0$ で最大値を示し、 Q_m の 20 倍にも達している。これは、全波数を対象にした場合には、対象とする波数が多くなり、 Q_m の値が小さくなるためである。

また、図-2 および 3 は、図-1 と同様に代表越波量比におよぼす $H_{1/3}/L_{1/3}$ と $H_c/H_{1/3}$ の影響を越波した波だけを対象にした場合について示したものである。これらによると、図-1 の上図の場合と同様に、 $Q_{1/3}$ は Q_m の約 2 倍でほぼ一定値を示し、 $Q_{1/10}$ は Q_m の約 3～5 倍で波形勾配や相対護岸天端高の影響が若干現れている。 $Q_{\max}$ については、波形勾配や相対護岸天端高の影響が顕著に現れ、その最大値は Q_m の約 10 倍になっている。なお、図示はしていないが、全波数を対象にした場合には、越波した波だけを対象にした場合よりも若干大きい値を示している。

このように、平均越波量と他の代表越波量との関係については、 $Q_{1/3}/Q_m$ にはのり先水深・波長比、波形勾配および相対護岸天端高の影響はほとんどなく一定値を示すのに対し、 $Q_{1/10}/Q_m$ には前述の三つの無次元量の影響が若干あることがわかった。また、表-1 には実験を行った全ケースについて、 $Q_{1/3}/Q_m$ と $Q_{1/10}/Q_m$ の平均値および標準偏差値を示した。これによると、これ

表-1 代表越波量比

	$Q_{1/3}/Q_m$	$Q_{1/10}/Q_m$
越波した波だけを対象にした場合	2.17±(0.17)	3.84±(0.56)
全波数を対象にした場合	2.46±(0.22)	4.76±(1.11)

注) 数値は[平均値±(標準偏差値)]を表す

らは各代表波高と平均波高との比よりも大きい値を示している。 $Q_{\max}/Q_m$ については、前述の無次元量の影響が顕著に現れるため、表-1 には示していないが、 $Q_{\max}$ の最大値は Q_m の 10～20 倍程度になる。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、背後の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、たとえわずか 1 波の越波でも被災の可能性があるといえよう。

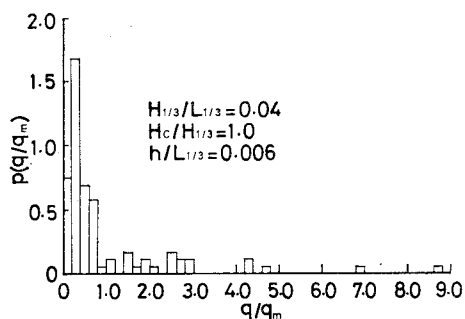
3.2 越波量の出現分布

図-4 は、越波した波だけを対象とした場合の 1 波ごとの越波量を各越波時間で除した越波流量 q の出現分布を $H_{1/3}/L_{1/3}=0.04$ 、 $H_c/H_{1/3}=1.0$ の場合について示したものであり、(a) および (b) 図は、それぞれ $h/L_{1/3}$ が 0.006 および 0.019 である。なお、図の縦軸はその出現確率密度 $p(q/q_m)$ 、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 である。なお、この場合の確率密度 $p(q/q_m)$ は次式によるものである。

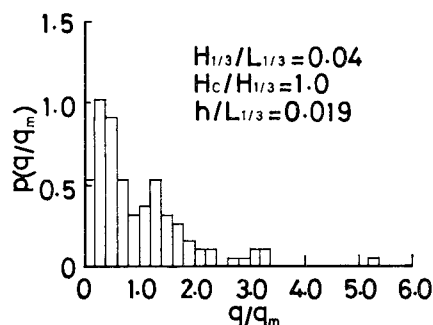
$$p(q/q_m) = \frac{\text{相対度数}}{\Delta(q/q_m)} = \frac{1}{\Delta(q/q_m)} \cdot \frac{NN(q/q_m)}{N} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 N は全測定越波数、 $\Delta(q/q_m)$ 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 $q/q_m + \Delta(q/q_m)$ の範囲にある越波数である。

これらによると、 q/q_m が 1 以下、すなわち平均越波流量より小さい越波流量の出現分布の形状は、 $h/L_{1/3}$ によってかなり変化するが、この範囲における出現率はいずれの $h/L_{1/3}$ でも全越波数の約 2/3 程度になる。しかし、海岸護岸などの設計に用いられている期待越波流量は平均越波流量 q_m を対象としているため、防災上特に問題になると考えられるのは、 q/q_m が 1 以上の越波である。この q/q_m が 1 以上の出現率については、のり先水深・波長比の影響が顕著に現れている。このため、このことをわかりやすくしたものが図-5 である。この図の横軸は $h/L_{1/3}$ であり、実線は q/q_m の最大値、すなわち $q_{\max}/q_m$ を、破線は q/q_m が 0.8～2.0 の比較的平均越波流量に近い越波の出現確率 p_1 を示している。これらによると、 $q_{\max}/q_m$ と p_1 とはまったく逆の傾向を示している。すなわち、 $q_{\max}/q_m$ は、 $h/L_{1/3}=0.006$ で最大値を示し、 $h/L_{1/3}$ がそれ以上に大きくなると $q_{\max}/q_m$ は減少するのに対し、 p_1 は $h/L_{1/3}=0.006$ で最小値

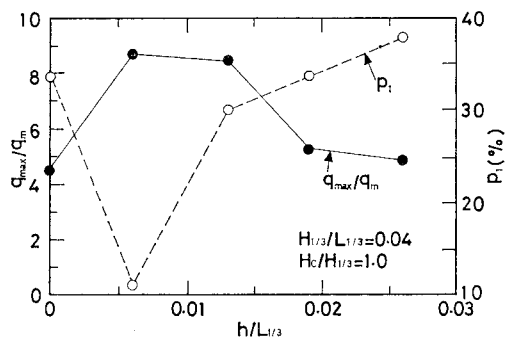


(a)



(b)

図-4 越波流量の出現分布

図-5 q_{max}/q_m と p_1 の出現確率特性

を示し、 $h/L_{1/3}$ がそれ以上に大きくなると p_1 は増加している。なお、 q_{max}/q_m と p_1 とが逆の傾向を示すことは、 $H_{1/3}/L_{1/3}$ や $H_c/H_{1/3}$ を変化させた場合についてもまったく同様である。これらのことから、1波ごとの越波流量分布には、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顕著であり、1波ごとの最大越波流量が平均越波流量に比べて大きい場合には、平均越波流量程度の出現率が小さくなり、逆に1波ごとの最大越波流量が平均越波流量に近づくとき平均越波流量程度の出現率が大きくなることがわかる。

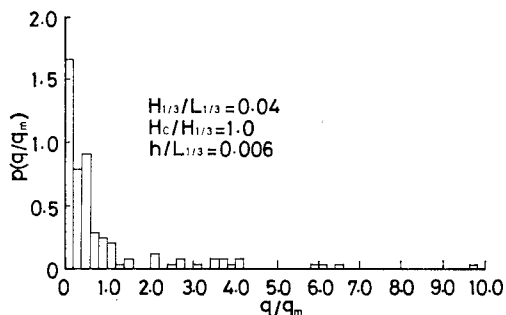
図-6 (a) および (b) は、全波数を対象にした場合の

1波ごとの越波流量 q の出現分布を図-4 (a) および (b) に対応して示した。これらによると、越波した波だけを対象にした場合とは異なり、 q/q_m が $0 \sim 0.2$ の間に全波数の約 $20 \sim 40\%$ が分布し、 q/q_m の増大にしたがって出現率は若干ばらつくものの全般的には減少している。また、 q_{max}/q_m は全波数を対象にしたほうが大きい。これは、全波数を対象にすると q_m が小さくなるためである。

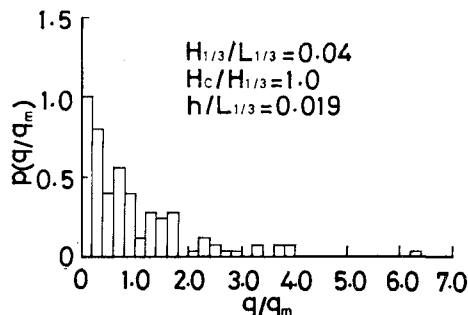
図-7 は、越波流量の超過発生確率の一例を示したものであり、縦軸は越波流量の超過発生確率 $P(q/q_m)$ を百分率で示したもの、横軸は出現越波流量と平均越波流量との比 q/q_m である。なお、図中の曲線は Weibull 分布の超過発生確率である。

Weibull 分布の形状母数 n の決定方法については、いずれの場合も実験値をもとに確率密度 $p(q/q_m)$ を求める段階 (図-4 および 6 の出現分布を求めた段階) で、 n 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。

図-7 によると、実験値は若干のばらつきはあるものの、Weibull 分布によく適合している。また、このように Weibull 分布への適合度がよく、前述した検定値が統計学で用いられる有意水準 5% を満たしていたものは、実験を行った合計 24 ケース中 17 ケースであった。

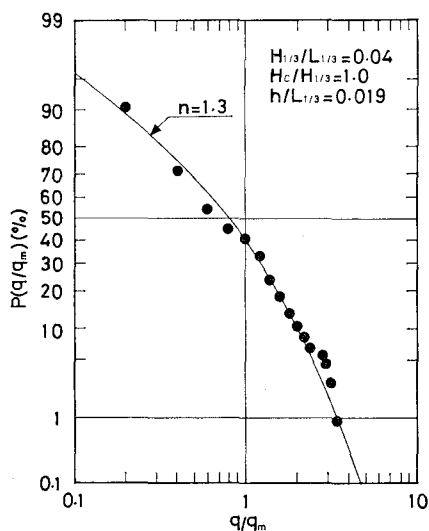


(a)

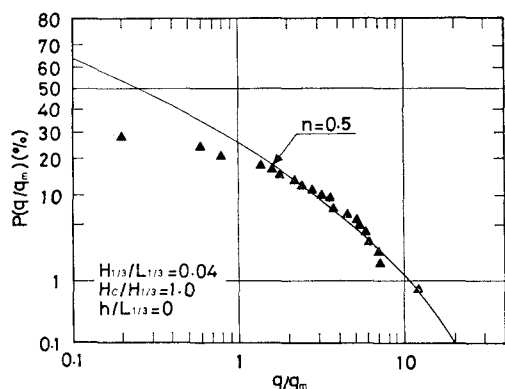


(b)

図-6 越波流量の出現分布



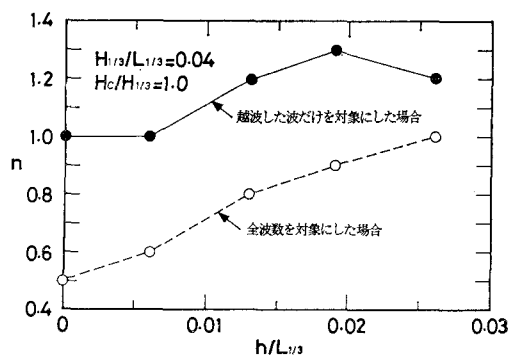
図—7 越波流量の超過発生確率



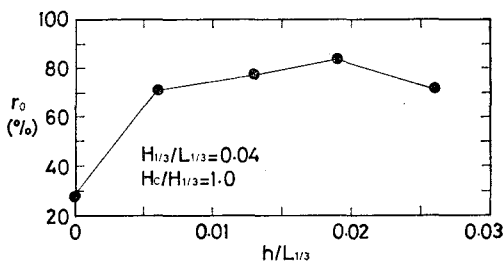
図—8 越波流量の超過発生確率

図—8 は、図—7 と同様に越波流量の超過発生確率を示したものであり、適合度のあまりよくなかったものの一例である。これによると、 q/q_m が 1 以下すなわち平均越波流量より小さいところで実験値は Weibull 分布より小さい値を示している。しかし、この範囲における各越波流量は小さく、 q/q_m が 1 以上のところでは実験値は Weibull 分布によく適合している。したがって、このような場合にも Weibull 分布に適合しているとみなしても、特に問題はないものと考えられる。

このように、1 波ごとの越波流量分布に Weibull 分布を適合した結果、越波した波だけを対象にした場合と全波数を対象にした場合のいずれも、2, 3 のケースを除けば Weibull 分布はかなりよく適合することがわかった。また、この適合度の悪かったのは、越波量が他の場合に比べて少なく、波が飛沫となって越えるもののほうが多かったためと考えられるが、その詳細は明らかでな



図—9 形状母数とりの先水深・波長比との関係

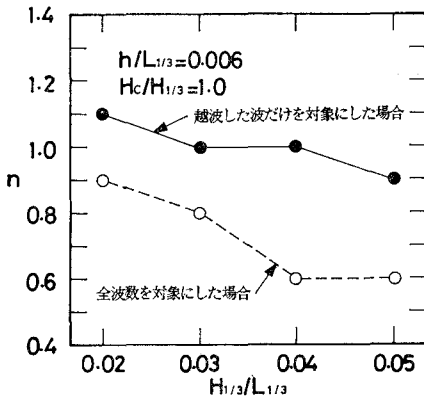


図—10 越波率とりの先水深・波長比との関係

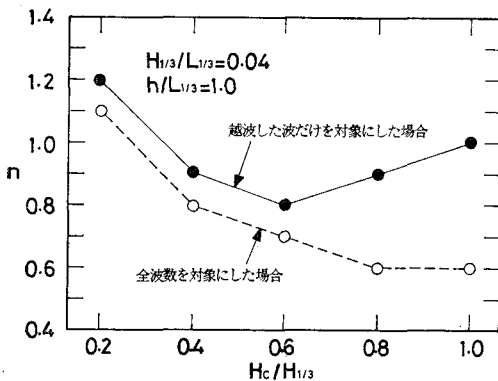
い。

図—9 は、実験値との適合度をもっともよかった Weibull 分布の形状母数 n とりの先水深・波長比との関係を示したものである。これによると、越波した波だけを対象にした場合は、 $h/L_{1/3} = 0.019$ で最大値を示し、その値は 1.3 である。一方、全波数を対象にした場合には、 $h/L_{1/3}$ が大きくなるにしたがって n は単調に増大している。また、越波した波だけを対象にした場合と全波数を対象にした場合との n の差は 0.2~0.5 程度であり、 $h/L_{1/3}$ が増大するにしたがってその差は小さくなる傾向がある。この原因については、図—10 に示した不規則波群の越波率 r_0 (越波した波数と全波数の百分率) とりの先水深・波長比との関係からもわかるように、 $h/L_{1/3}$ が 0.019 まではその増大とともに r_0 も増大し、越波した波だけを対象にした場合と全波数を対象とした場合との波数の差が小さくなるためである。

図—11 は、図—9 と同様に形状母数 n と波形勾配との関係を示したものである。これによると、全般的には波形勾配が大きくなるにしたがって n は減少する傾向があるが、形状母数におよぼす波形勾配の影響は、りの先水深・波長比の場合ほど顕著ではない。また、越波した波だけを対象にした場合と全波数を対象にした場合との n の差は 0.2~0.4 程度であり、 $H_{1/3}/L_{1/3}$ が増大するにしたがってその差は大きくなる傾向がある。これについても、図示はしていないが、 $H_{1/3}/L_{1/3}$ が大きくなると越



図—11 形状母数と波形勾配との関係



図—12 形状母数と相対護岸天端高との関係

波率が減少するためである。

図—12は、形状母数 n と相対護岸天端高との関係を示したものである。これによると、越波した波だけを対象にした場合については、 $H_c/H_{1/3} = 0.6$ で最小値を示し、その値は 0.8 である。一方、全波数を対象にした場合については、実験を行った範囲では $H_c/H_{1/3}$ が大きくなるにしたがって n は減少している。また、越波した波だけを対象にした場合と全波数を対象にした場合との n の差は 0.1~0.4 程度であり、 $H_c/H_{1/3}$ が増大するにしたがってその差は大きくなる傾向がある。これについても、 $H_c/H_{1/3}$ が大きくなると越波率が減少するためである。

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) 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 倍であり、この値は $h/L_{1/3}$ 、 $H_{1/3}/L_{1/3}$ および $H_c/H_{1/3}$ によってはほとんど変化しない。 $Q_{1/10}$ は Q_m の約 3~5 倍で、前述の三つの無次元量の影響が若干現れる。また、 Q_{max} は三つの無次元量の影響が顕著であり、その最大値は Q_m の 10~20 倍程度になる。

2) 越波した波だけを対象にした場合の 1 波ごとの越波流量 q の出現分布は、 $h/L_{1/3}$ 、 $H_{1/3}/L_{1/3}$ および $H_c/H_{1/3}$ によって非常に変化する。また、全波数を対象にした場合については、 q/q_m が 0~0.2 の範囲に全波数の約 20~40% が分布し、全般的には q/q_m の増大にしたがって、その出現率は減少する。

3) 越波した波だけを対象にした場合も全波数を対象にした場合のいずれについても、越波量の出現分布は Weibull 分布に適合し、それに及ぼす前述の無次元量の影響は、Weibull 分布の形状母数を用いて、定量的に表現することができる。

最後に、本研究に際して大いに助力してくれた現全日空ビルディング(株)の岸田浩二、日本道路公団の後藤由成、戸田建設(株)の天竺晃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.
- 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.
- 高田 彰 (1978): 不規則波の越波分布の推算について, 土木学会第 33 回年次学術講演会講演概要集, 第 2 部, pp. 740~741.