

不規則波の越波量分布

井上雅夫*・島田広昭**・本田清高***・殿最浩司****

1. 緒 言

現在、海岸堤防や埋立護岸の機能設計に際しては、合田ら¹⁾が不規則波による模型実験および越波計算に基づいて作成した越波流量の推定図表を用いる場合が多いようである。また、木村ら^{2),3)}は波高の grouping 特性を考慮した短時間越波量の概念を提案するとともに、その排水対策と堤内地の安全性について検討を行っている。したがって、堤内地に十分な排水設備などを有する場合には、このような設計方式で越波に対処することができるが、護岸のすぐ背後までの土地が利用され、特に人家などが存在するような箇所では、わずか1波の越波でもきわめて危険であり、これに近い実例として台風6626号による吉原海岸の災害を挙げることができよう⁴⁾。このような事態を防ぐためには、従来の越波流量や短時間越波量に加えて、1波当りの許容越波量を計画の対象に加えるべきであろう。しかし、不規則波による越波量の分布については、高田⁵⁾によって若干の計算例が示されているに過ぎず、不規則波群の1波ごとの越波量を実測した例は、これまでほとんどないようである。このようなことから、本研究では、不規則波造波機で発生させた不規則波の1波ごとの越波量を詳細に測定することによって、その分布を実験的に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、高さ1.0mの片面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。なお、この実験では、潜堤の越波防止効果も同時に明らかにするため、傾斜海浜の先端部に潜堤を設置した場合についても越波量の測定を行った。不規則波のスペクトルは有義波周期 $T_{1/3}$ が1.0sの Bretschneider・光易型を用い、有義波の波形勾配

$H_{1/3}/L_{1/3}$ は0.02である。また、護岸ののり先水深・波長比 $h/L_{1/3}$ は0.006と0とした。潜堤は表と裏ののり勾配がいずれも1:1の不透過性の台形堤であり、相対天端幅 $B/L_{1/3}$ は0.013、相対天端上水深 $R/H_{1/3}$ は2.95である。ここに、 B は天端幅、 R は天端上水深である。波高の測定は容量式波高計を用い、造波板から8.5mの位置と傾斜海浜の先端部の位置で測定したが、後者のものを入射波の分離を行って入射波高 H_i とした。また、越波量の測定は造波開始2~4分後の不規則波の1波ごとの越波量 Q を測定した。この越波量の測定に際しては、あらかじめ多くの小容器を準備しておき、それらを用いて護岸背後で1波ずつ順次測定を行ったが、不規則波群全体を1回の造波で測定することはきわめて困難であるため、入射波の再現性をきびしくチェックしながら、数回の造波(15~20回程度)を行うことによって、不規則波群全体に含まれる1波ごとの越波量の測定を行った。さらに、護岸付近の波の挙動をビデオカメラで撮影し、これから越波時間を測定した。なお、この場合の越波時間は、ひとつの入射波が護岸にあたり、次の波が護岸にあたるまでの時間とした。

3. 実験結果および考察

3.1 越波量の時間的变化

図-1および2は、のり先水深・波長比 $h/L_{1/3}$ がそれぞれ、0.006および0の場合における護岸単位幅あたりの1波ごとの越波量 $Q(\text{cm}^3)$ と入射波高 $H_i(\text{cm})$ の時間的变化であり、それぞれの(a)図は潜堤を設置していない場合、(b)図は潜堤を設置した場合のものである。なお、図中には、代表波法による定義にしたがって求めた(越波した波だけを対象)最大越波量 $Q_{\max}$ 、1/10最大越波量 $Q_{1/10}$ 、有義越波量 $Q_{1/3}$ 、平均越波量 Q_m も示した。

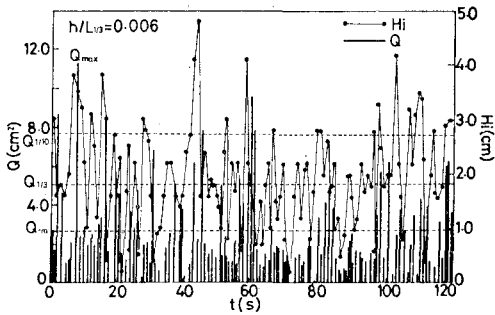
図-1の場合において、潜堤を設置しないときの単位時間当りの越波量、すなわち越波流量を q_0 、潜堤を設置したときのそれを q とすると、 q/q_0 は約0.9であり、潜堤の設置による越波流量の低減効果はほとんどみられない。しかし、個々の波について比較してみると、その越波量は潜堤を設置することによってかなり変化してい

* 正 会 員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

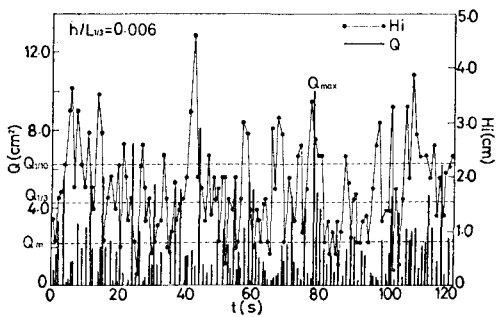
** 正 会 員 関西大学助手 工学部土木工学科

*** 正 会 員 工修 日興証券(株)

**** 学生会員 関西大学大学院 工学研究科

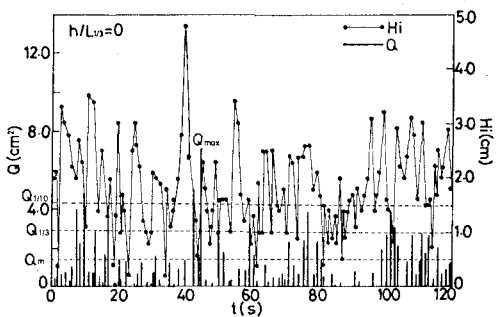


(a) 潜堤がない場合

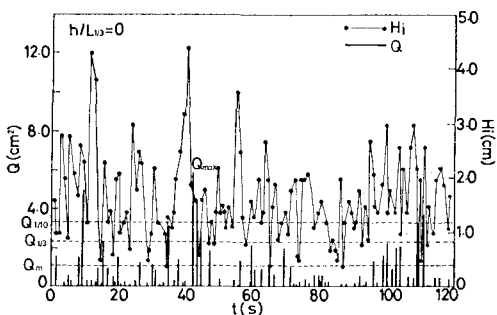


(b) 潜堤がある場合

図-1 越波量と波高の時間的変化



(a) 潜堤がない場合



(b) 潜堤がある場合

図-2 越波量と波高の時間的変化

る。たとえば、潜堤設置前に $t=8\text{ s}$ に出現していた $Q_{\max}$ は潜堤を設置することによって約 $1/4$ に減少しており、 $t=8\text{ s}$ 前後には多量の越波はみられない。また、 $t=80\text{ s}$ 近くでの越波量については、設置前は Q_m 程度であったものが潜堤の設置によって $Q_{\max}$ となっている。図-2 の場合には、前述した q/q_0 の値は約 0.6 であり、潜堤による越波流量の低減効果がみられることから、潜堤設置後のほうが設置前よりすべての波について、越波量が少なくなっていると考えがちであるが、個々の波の越波量については逆に多くなる場合もある。たとえば、潜堤を設置する前には、 $t=42\text{ s}$ に出現していた $Q_{1/10}$ 程度の越波量は、潜堤を設置することによって約 1.5 倍に増大し、 $Q_{\max}$ になっている。また、これらのことは、越波量をそれぞれの越波時間で除した越波流量 q についても同様の結果がみられた。

図-3 および 4 は、 $h/L_{1/3}$ がそれぞれ、 0.006 および 0 の場合の護岸単位幅あたりの 1 波ごとの越波量 Q (cm^2) と前述の越波流量 q (cm^2/s) との関係を調べたものであり、図中には両者の関係を明確にするために勾配が $1:1$ の直線を記入した。これによると、ほとんどの

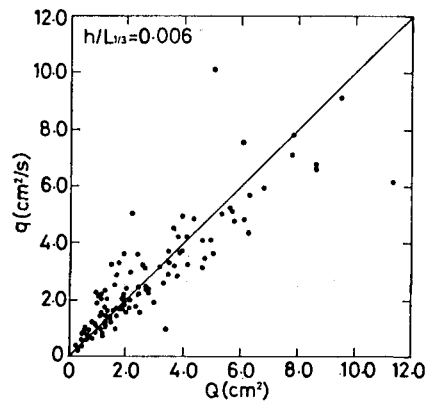


図-3 越波量と越波流量との関係

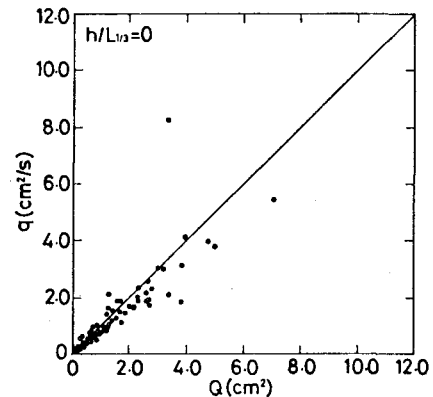


図-4 越波量と越波流量との関係

実験値は、この直線の近傍にプロットされているが、いずれの場合においても、越波量とそれを越波時間で割った越波流量とが、非常に異なる場合もある。このことは、不規則波の越波現象が規則波の場合と異なって、1 波ごとにその越波時間が違うためである。

3.2 代表越波量と代表越波流量

表一および 2 は平均越波量と他の代表越波量との関係であるが、 $h/L_{1/3}=0.006$ の場合には、入射波のすべてが越波するが、 $h/L_{1/3}=0$ の場合には、潜堤設置前では入射波の 76.5%、潜堤設置後では 67.2% の波しか越波しない。このため越波した波だけを対象にした場合と越波しない波も含めた全波数を対象とした場合とでは各代表越波量は変化する。そこで、表一では越波した波だけを対象とした場合を、表二では $h/L_{1/3}=0$ の越波しない波も含め、全波数を対象にした場合について示した。また、表三および 4 は平均越波流量と他の代表越波流量との関係を表一および 2 と対応させて示したものである。これらによると、いずれの場合においても潜堤の有無に関係なく、それぞれの代表越波量と平均越波

量との比および代表越波流量と平均越波流量との比は、各代表波高と平均波高とのものよりも大きい値を示している。すなわち、越波した波だけを対象にした場合には、 $Q_{1/3}/Q_m$ と $q_{1/3}/q_m$ は約 2、 $Q_{1/10}/Q_m$ と $q_{1/10}/q_m$ は約 3~4、 Q_{max}/Q_m と q_{max}/q_m は約 4~7 になっている。また、全波数を対象にした場合には、さらにこれらの値は大きくなるが、この原因は平均越波量や各代表越波量などを求める際に対象とする波数が異なるためである。このことから、 Q_m および q_m だけを対象として、海岸堤防や護岸を設計した場合には、1. でも述べたように背後の排水施設が十分に整備されている場合には問題はないが、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ことを示しているといえよう。

3.3 越波量分布

図一5 および 6 は、潜堤設置前と設置後の場合について、越波した波だけを対象として越波流量の出現分布を示したものであり、縦軸は越波流量の出現確率 $p(q/q_m)$ 、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、この場合、出現確率 $p(q/q_m)$ は式 (1) によるものである。

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

ここに、 N ：全測定越波数、 $\Delta(q/q_m)$ ：越波流量の読み取り間隔（この場合には 0.2 とした）、 $NN(q/q_m)$ ： 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。

図一5 に示した $h/L_{1/3}=0.006$ の場合、(a) 図の潜堤設置前のものは、越波流量分布は q/q_m が 0.6~0.8 で極大値を示し、1 以下のものが多く、全越波数の 2/3 近くにもなる。さらに、 q/q_m が 1 以上に大きくなると、1.2~1.4 でいったん増加しているが、一般的には減少する傾向がある。また、 q/q_m が 4 以上になるようなものはみられない。(b) 図の潜堤設置後のものも、設置前と同様に q/q_m が 1 以下の範囲で全越波数の 2/3 近くになり、極大値は 0.2~0.4 で現われ、0~0.2 の出現率は設置後のほうがかなり大きくなっている。このことから、潜堤の設置により、 q/q_m の値の小さい越波流量を有する波数の割合が増加していることがわかる。また、 q/q_m が 1 以上になると、潜堤設置前後でかなり変化しており、 q/q_m が 4 以上になる越波流量も潜堤の設置後には存在しているが、設置前には存在していない。すなわち、潜堤を設置したほうが q/q_m の値はやや広範囲に分布することがわかる。

図一6 に示した $h/L_{1/3}=0$ の場合、(a) 図の潜堤設置前のものは、図一5 (a) と同様に、 q/q_m が 1 以下の

表一 平均越波量と他の代表越波量との関係
(越波した波だけを対象にした場合)

$h/L_{1/3}$		$Q_{1/3}/Q_m$	$Q_{1/10}/Q_m$	Q_{max}/Q_m
0	潜堤設置前	2.11	3.17	5.23
	潜堤設置後	2.28	3.89	6.14
0.006	潜堤設置前	1.92	2.90	4.33
	潜堤設置後	1.98	2.95	4.79

表二 平均越波量と他の代表越波量との関係
(全波数を対象にした場合)

$h/L_{1/3}$		$Q'_{1/3}/Q'_m$	$Q'_{1/10}/Q'_m$	Q'_{max}/Q'_m
0	潜堤設置前	2.41	3.80	6.84
	潜堤設置後	2.59	4.94	9.14

表三 平均越波流量と他の代表越波流量との関係
(越波した波だけを対象にした場合)

$h/L_{1/3}$		$q_{1/3}/q_m$	$q_{1/10}/q_m$	q_{max}/q_m
0	潜堤設置前	2.09	3.37	6.67
	潜堤設置後	2.21	3.55	5.53
0.006	潜堤設置前	1.84	2.65	3.85
	潜堤設置後	1.96	2.99	4.47

表四 平均越波流量と他の代表越波流量との関係
(全波数を対象にした場合)

$h/L_{1/3}$		$q'_{1/3}/q'_m$	$q'_{1/10}/q'_m$	q'_{max}/q'_m
0	潜堤設置前	2.39	3.91	8.72
	潜堤設置後	2.56	4.58	8.21

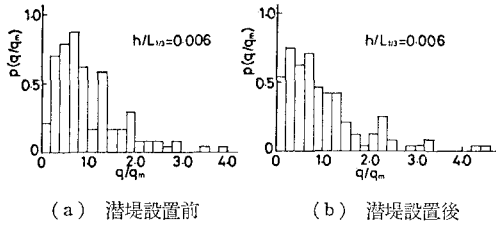


図-5 越波流量の出現分布 (越波した波だけを対象)

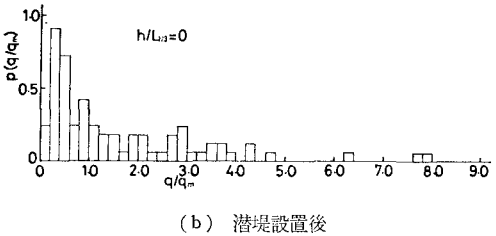
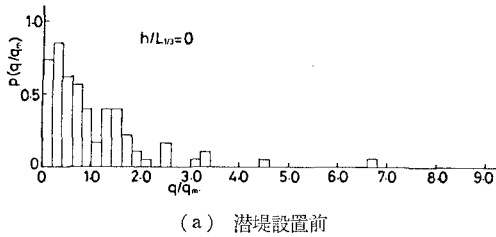


図-6 越波流量の出現分布 (越波した波だけを対象)

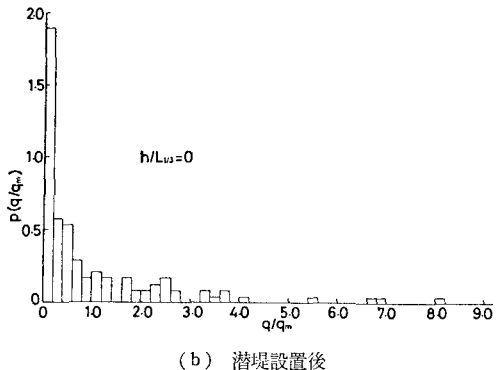
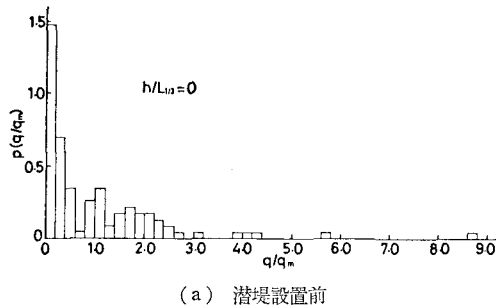
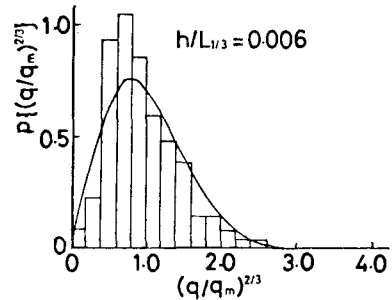
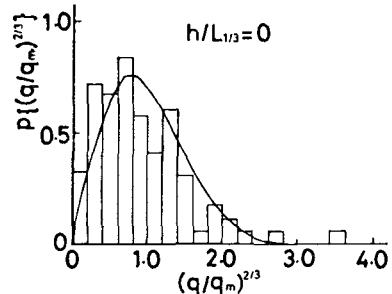


図-7 越波流量の出現分布 (全波数を対象)

越波流量が多く、全越波数の $2/3$ 近くになる。また、 $0.2 \sim 0.4$ で極大値を示し、 q/q_m が 1.1 までは q/q_m が大きくなるにしたがって出現率も小さくなるが、 $1.2 \sim 1.6$ でふたたび極大値を示し、それ以後は多少ばらつくものの減少し、 q/q_m が 6 以上になる越波流量もみられる。(b)図の潜堤設置後のものは、 q/q_m が $0.2 \sim 0.6$ の間の範囲のものが多くみられ、出現率の小さいものが広範囲に分布しており、 q/q_m が 8 程度になる越波もみられる。これは、 $q_{1/10}$ 程度の越波流量は潜堤を設置してもあまり変化しないが、 q_m については潜堤を設置することによって小さくなるためと考えられる。

図-7(a) および (b) は、 $h/L_{1/3}=0$ で、それぞれ潜堤設置前と設置後の越波しない波も含めた全波数を対象にした場合の越波流量の出現分布を示したものである。これらによると、越波した波だけを対象としたものとはかなり異なり、全波数を対象とした場合には、潜堤の有無に関係なく、 q/q_m が $0 \sim 0.2$ の間に全波数の約 $3 \sim 4$ 割が分布し、 q/q_m の増大にしたがって出現率は多少ばらつくものの全般的に減少している。

図-8 および 9 は、各越波流量と平均越波流量との比を $2/3$ 乗した $(q/q_m)^{2/3}$ の出現確率 $p\{(q/q_m)^{2/3}\}$ (越波した波だけを対象) を示したものであり、図中の曲線は Rayleigh 分布を示している。これらについて、 χ^2 -検定を行うと、図-8 の $h/L_{1/3}=0.006$ の場合は、自由度 $\nu=8$ 、 $\chi^2=14.3 < \chi^2_{0.05}(8)=15.5$ であり、図-9 の $h/L_{1/3}=0$ の場合は、自由度 $\nu=7$ 、 $\chi^2=13.3 < \chi^2_{0.05}(7)=12.0$

図-8 $(q/q_m)^{2/3}$ の出現確率分布図-9 $(q/q_m)^{2/3}$ の出現確率分布

≈ 14.1 となる。したがって、これらの結果は、 $(q/q_m)^{2/3}$ の発生確率が Rayleigh 分布に従うという仮説を有意水準 5% で採択している。

高田⁵⁾ は汀線に設置された鉛直護岸(海底勾配 1/10)に、有義波の波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}=0.04$ の波が入射したときの、越波流量の出現確率を、a) $T=\text{const}$ の場合、b) H_0 と T^2 との相関係数 $\sigma=0$ の場合、c) H_0 と T^2 との相関係数 $\sigma=1$ の場合について計算を行っている。その結果、これらの各成分波は、 $(q/q_m)^{1/3}$ の発生確率が Rayleigh 分布に近似するという結果を得ている。高田による計算結果と著者らのものと異なる原因は、波形勾配の違いによるものと考えられる。

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) 越波流量の表現では、潜堤の越波防止効果は $h/L_{1/3}=0$ の場合が顕著であり、 $h/L_{1/3}=0.006$ の場合には、ほとんど期待できない。しかし、いずれの場合にも、1波ごとの越波量は変動が大きく、越波流量だけで潜堤の越波防止効果を単純に論じることはいできない。

2) それぞれの代表越波量と平均越波量との比は、各代表波高と平均波高とのものよりも大きい値になり、 $Q_{\max}$ が Q_m の 4~7 倍に達する。なお、これらのことは、1波ごとの越波流量についても、まったく同じ傾向を示す。

3) 1波ごとの越波流量の出現分布については、越波しない波も含む全波数を対象としたものと越波した波だけを対象としたものとはかなり異なっており、全波数を

対象にした場合には、 q/q_m が 0~0.2 の間に全波数の約 3~4 割が分布し、 q/q_m の増大にしたがって出現率は減少する。しかし、越波した波だけを対象とした場合には、0.2 から 0.8 の間で極大値を示すような分布をする。

4) 高田は計算により $(q/q_m)^{1/3}$ の出現確率が Rayleigh 分布に近似することを示したが、著者らの結果は $(q/q_m)^{2/3}$ が近似する。

以上のようなことを明らかにすることができたが、これらの結果はいずれも波形勾配が 0.02 の場合だけであるため、他の波形勾配についても検討する必要がある。

最後に、本研究を遂行するにあたり、実験や図面作成に対して熱心に助力してくれた現兵庫県の古川 仁君ならびに大阪府の仲石 淳・山倉久弥の両君に感謝の意を表する。

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4号, pp. 1~14, 1976.
- 2) 木村 晃・瀬山 明・山田敏彦: 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, 1981.
- 3) 木村 晃・瀬山 明: 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, 1982.
- 4) 富永康照・橋本 宏・中村・降: 台風 26 号による吉原海岸の災害について, 第14回海岸工学講演会講演集, pp. 206~213, 1967.
- 5) 高田 彰: 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, 1978.