

越波による人の転倒限界条件とその現地への適用

Wave Height and Overtopping rate in Relation to the Risk of Falling on Promenade Breakwaters

高橋重雄*、遠藤仁彦**、室善一朗***

Shigeo Takahashi, Kimihiko Endoh, Zen-ichirou Muro

As the number of promenade breakwaters increases, the various risk to which sightseers are exposed becomes increasingly important. In this paper, one of the crucial dangers, falling on the breakwater due to wave overtopping is discussed, and a method to evaluate the relationship among wave height, overtopping rate, and the risk of falling is proposed.

Keywords: Promenade breakwater, Safety of people, Marine leisure, Wave overtopping

1. はじめに

防波堤は、高波浪から背後の施設を守り、静穏な海域を創造することを目的とした構造物で、この付近への市民の立ち入りは原則的に禁止されている。しかしながら近年、防波堤を魚釣りや散策などができる親水施設として利用することが考えられるようになってきた。ただし、防波堤は人にとって危険な施設であり、市民に開放するに当たっては、安全に対して十分に配慮することが必要である。

高波浪は、防波堤上にいる市民にとって危険な状況の一つであり、特に越波するような場合には危険度がかなり高くなる。平均的な天端高さの防波堤では、そのような状況が年間数日あるいは数十日程度も生じてしまう。したがって、その安全対策が不可欠であるが、その方法として①入園禁止基準を定めて施設の入園管理を行う、②天端高さをほとんど越波しないように設定する、という二種類が考えられる。いずれの場合にも、効果的な安全対策を講じるためには、波浪状況（越波状況）と人の危険性との関係を定量的に把握しておくことが重要である。

高波浪時における人の危険を定量的に評価する方法としては、以下の二つが考えられる。

I. 波の打ち上げ高さによる評価

II. 越波流量による評価

越波流量の関する研究は数多くあり、天端高さや波浪状況などと越波流量の関係は概ね明らかにされている。ただし、これらの研究は、護岸背後の被災に対処するためのものであり、越波流量は平均値として表されている。人が危険となる状況は、平均値ではなく、むしろ瞬間的な越波量によって決まるため、それを平均的な越波流量と関係づけるのは困難である。また、越波流量は、人が直感的に危険度を把握する指標として適しているとはいえない。したがって、著者らは、その危険を目視等でも把握できる「波の打ち上げ高さ」を用いて評価する方法を主に検討してきた。

波浪による人に対する危険は、感覚的なものから実質的なものまで考えられるが、次の4つの危険段階に分けてその状況を考えることにしている。

- ①波しぶきが発生する状況
- ②越波が生じる状況
- ③越波によって、人が転倒する状況
- ④越波によって、人が海中に転落する状況

これまで、①と②の危険状況が生じ始める波の打ち上げ高さとその時の波高の算定方法を提案している。¹⁾ 本報告では、越波による転倒発生時の危険状況を対象とし、人が転倒するときの打ち上げ高さ²⁾についてとりまとめるとともに、そのときの波高の算定方法を提案することを目的とする。また、転倒限界時の越波流量についても、断面条件などを限定して計算と実験を行っており、従来の許容越波流量との関係を検討している。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室長 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室

*** 運輸省港湾技術研究所 水工部 海洋エネルギー利用研究室

2. 転倒限界時の条件

(1) 転倒限界時の打ち上げ高さ特性とその基準値

越波が次第に大きくなり、波の打ち上げ高さが大きくなると防波堤天端上の人転倒するようになる。越波水による転倒限界について、算定モデルを作り、これを実スケールの実験で検証を行った。図-1はその結果を示すものであり、身長と転倒限界時の波の打ち上げ高さ η_{cr} の関係を示すものである。転倒限界時の打ち上げ高さは、防波堤天端面の滑り易さ（摩擦係数）や人の姿勢等によっても異なるが、この図はコンクリート面に藻などの付着物がある場合を想定した摩擦係数0.4、足の間隔が肩幅、また防波堤上で最も転倒しやすい位置において流れに対して正面に向いて立っている場合のものである。なお、ここで打ち上げ高さ（ η_1 ）とは、防波堤の前面で重複波となった波の峰の防波堤天端面からの高さであり、波のしぶきを含まない実質部分の高さである。

親水性防波堤では、様々な人が利用すると考えられるため、この図では横軸を身長にとり、標準体型（実線）、標準よりも20%痩せ型（点線）、標準よりも20%肥満型（破線）を対象とした転倒限界の打ち上げ高さを示している。身長が大きいくほど、転倒限界時の打ち上げ高さは大きくなり、転倒しにくくなる。また、痩せ型では、標準型に比べて転倒限界打ち上げ高さが大きくなり、比較的転倒しにくくなっている。例えば、身長160cmにおける転倒限界時の打ち上げ高さは、標準型の体型で53cm、20%痩せ型で57cm、20%肥満型で48cmとなる。一般的に、転倒限界時の水位は、防波堤上の港外側端に立っている人の場合、膝よりやや高い程度であり、港内側に立っている場合、水位が膝の半分程度となる。

12才以下の子供には保護者が同伴していると想定すると、主に12才以上の人を対象として転倒限界の基準値を検討するのが適切と考えられる。12才の標準的な体格を対象とすると、男女とも平均身長が152cm³⁾であり、そのときの転倒限界時の打ち上げ高さが0.5mとなる。したがって、実用的な転倒限界の基準値としては、堤体前面における天端上の打ち上げ高さとして0.5mを用いることを提案する。なお、施設の特性上、さらに小さな子供を対象にしなければならない場合には、6才を対象とし、同様の検討で求めた打ち上げ高さ0.34mが参考になる。

(2) 転倒限界時の波高の算定法

親水性防波堤の安全性の検討においては、転倒限界時の打ち上げ高さ η_{cr} だけでなく、その時の波高を知ることとも重要である。波高と打ち上げ高さとの関係は、越波水の運動モデル⁴⁾を用いて計算できる。これは、水理模型実験をもとにつくられた実験式であり、主に以下のパラメータを用いて打ち上げ高さを計算できる。

①水深条件：堤体前面の水深 h 、マウンド上の水深 d

②堤体条件：天端高さ B 、防波堤の構造形式、マウンド肩幅 B_m

③波浪条件：波高 H 、周期 T

すなわち、転倒限界時の打ち上げ高さ η_{cr} と波高 H の関係は、次式で示される。

$$\frac{h_c + \eta_{cr}}{H} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c' / h_m}}{2} \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 α_1 は防波堤の構造形式による打ち上げ高さの違いを補正する係数であり、 h_m はマウンド高さを考慮した計算に用いる換算水深を示しており、以下の式で表される。

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1.0 & \text{直立堤、混成堤} \\ 0.5 & \text{上床版なしスリット堤、消波ブロック被覆堤} \\ \begin{cases} 0.5 & H/h_m < 1.0 \\ 1.0 - \frac{H/h_m}{(H/h_m)^{1.5} + 1.0} & H/h_m \geq 1.0 \end{cases} & \text{上床版ありスリット堤} \end{cases} \quad \dots\dots (2)$$

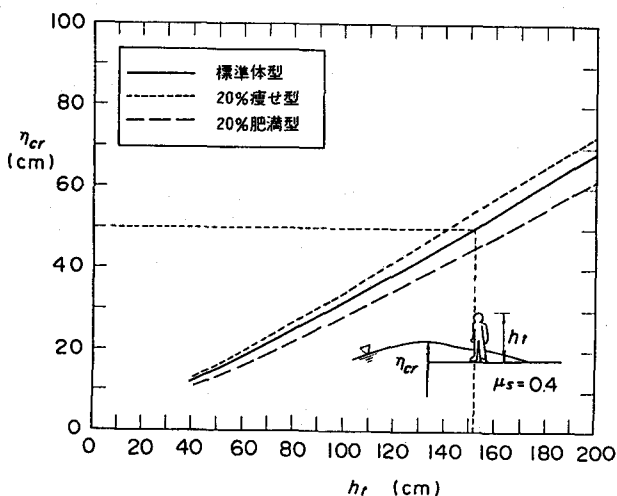


図-1 転倒限界時の打ち上げ高さ

$$h_m = \begin{cases} d & : B_M/L \geq 0.16 \\ d + (h-d) \frac{0.16 - B_M/L}{0.05} & : 0.11 \leq B_M/L < 0.16 \\ h & : B_M/L < 0.11 \end{cases} \quad \dots\dots (3)$$

なお、 h_s はスリット部上端の静水面上の高さ、 L は堤体前面水深での波長である。また式(1)中の h_c' は、換算天端高さであり、越波する限界の状況のときに $1.0h_c$ で、さらに波高が大きくなると $0.5h_c$ に近づく式で表される。ただし、転倒限界時では、 η_{cr} が $0.5m$ 程度であり、天端高さ h_c に比してそれほど大きくない。したがって、転倒限界時における静水面からの打ち上げ高さ $h_c + \eta_{cr}$ が h_c に近似されるとすると、 h_c' は $1.0h_c$ と考えられる。さらに、波高を不規則波中の最高波高と考えると、転倒限界時の波高は式(4)となる。

$$(H_{max})_{cr} = \frac{2(h_c + \eta_{cr})}{1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c / h_m}} \quad \dots\dots (4)$$

なお、転倒限界時の波浪を有義波高で表す場合、越波時の転倒はかなり危険度が高い現象であるので、 $(H_{max})_{cr} = 2.0(H_{1/3})_{cr}$ を用いることを提案する。この式を式(4)に代入すれば、転倒限界時の有義波高が求まる。ただし、堤体前面の水深が非常に浅い場合には波が砕波するため適用できない。

図-2は、直立堤または混成堤 ($\alpha_1=1.0$) における転倒限界時の相対天端高さ $h_c/(H_{max})_{cr}$ の計算値を示したものであり、図-3は上床版がないスリットケーソン堤と消波ブロック被覆堤 ($\alpha_1=0.5$) を対象とした同様の図である。横軸には h_c/h_m をとり、 η_{cr}/h_c をパラメータとして $0.05 \sim 0.5$ まで変化させている。転倒限界時の波高は、式(4)によって算定されるばかりでなく、これらの図から h_c/h_m や η_{cr}/h_c がわかると読み取ることができる。例えば、天端高さ h_c が $2.5m$ の混成堤を考えると、 η_{cr} を $0.5m$ として、 η_{cr}/h_c が 0.2 となる。ここで、マウンド高さを考慮した換算水深が $10m$ であると仮定すると h_c/h_m が 0.25 であり、図-2から $h_c/(H_{max})_{cr}$ が 1.0 となることがわかる。したがって、このときの転倒限界時の最高波高は $2.5m$ となり、有義波高は $1.25m$ となる。また、同じ条件で換算水深が $5m$ と小さくなれば、転倒限界の有義波高は $1.10m$ と小さくなる。一方、消波ブロック被覆堤では、同じ条件で換算水深が $10m$ であれば、前掲図-3から転倒限界時の有義波高が $1.33m$ となり、通常の混成堤に比べると転倒限界波高が大きく、やや転倒しにくくなっていることがわかる。なお、上床版があるスリットケーソン堤では、前掲式(2)に示すように α_1 が波高によって変化するが、転倒限界時の波高の概略を検討する際には図-3が参考になる。

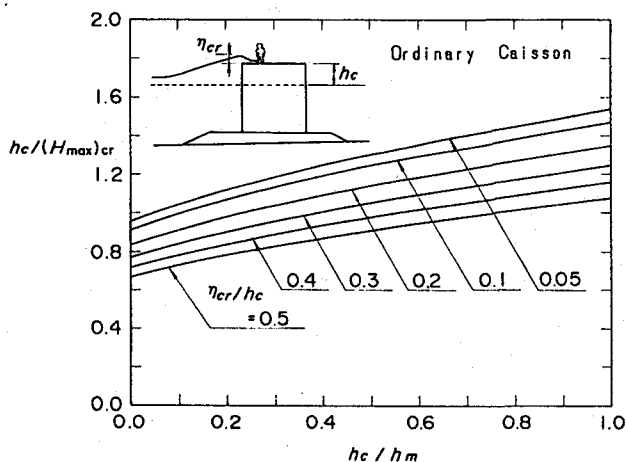


図-2 転倒限界時の波高 ($\alpha_1=1.0$)

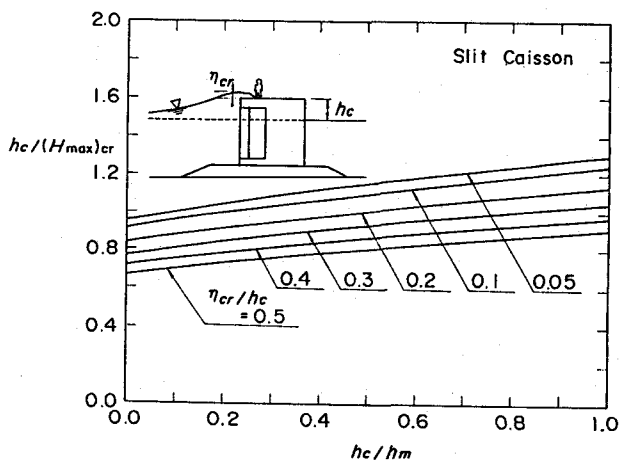


図-3 転倒限界時の波高 ($\alpha_1=0.5$)

3. 打ち上げ高さとの危険の検討例

(1) 検討の概要

本章では、打ち上げ高さとの危険について、実験および計算から検討している。ただし防波堤断面などの条件は限定しており、図-4は検討対象とした防波堤の断面図を示したものである。天端高さは $1.15m$ であり、通常の防波堤の天端高さの設定方法 ($h_c = 0.6H_{1/3D}$) が用いられていると考えると、設計有義波高 $H_{1/3D}$ が $2m$ と

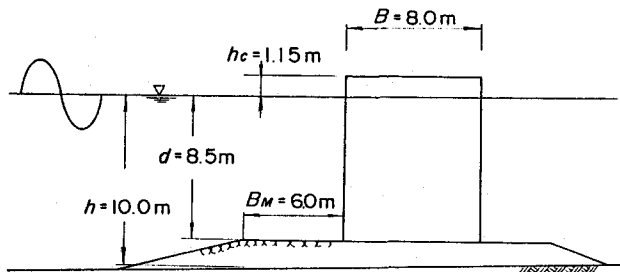


図-4 検討対象の防波堤断面

なり、遮蔽された海域の防波堤を想定していることになる。また、設置水深が10mであり、マウンド上の水深が8.5m、マウンド肩幅が6.0m、堤体幅が8mと考えた。なお、波の周期は7.3秒として検討している。

実験は、図-5に示す長水路（長さ163m、幅1m、深さ1.5m）で、実験縮尺を1/14.3として行った。堤体模型の設置位置は造波板より100mの地点に設置している。実験波は、規則波で波高水深比 H/h が0.13~0.4の範囲とし、すべて重複波的な波である。なお、次章の越波流量の検討のために、不規則波実験も実施しており、その波高水深比 $H_{1/3}/h$ は0.05~0.30とした。

(2) 打ち上げ高さとの危険状況

図-6は、相対天端高さ h_c/H と堤体前面での打ち上げ高さ R （ R は天端面からでなく、静水面上の高さ= η_1+h_c である）の関係を示したものである。図中の点が実験値（現地量に換算したもの）を示しており、○が越波していないものを、また●が越波しているものを表している。また、実線は、2. (2)において説明した越波水の運動モデルによる計算値を示すものである。当然のことながら、波高が大きく（相対天端高さが小さく）なると、打ち上げ高さは増加している。例えば、 h_c/H が2.0のとき打ち上げ高さが0.6mとなり、 h_c/H が0.5のとき打ち上げ高さが2.5mとなっている。また、実験値と計算値はほぼ一致しており、特に h_c/H が0.6以上の比較的波高が小さい領域でよく一致している。

実線上のA点は、前掲の式(4)で計算した転倒限界となる状況を示すものである。静水面からの打ち上げ高さ R は1.65mであり、天端高さ h_c 1.15mよりも0.5m（ η_{cr} の標準的な基準値）だけ高く、そのときの波高が1.54mとなり、相対天端高さ h_c/H は0.75である。この波高が H_{max} に相当し、そのときの $H_{1/3}$ は $H_{max}=2.0H_{1/3}$ を用いて0.77mとなる。したがって、この条件では H_{max} が天端高さの130%、また $H_{1/3}$ が天端高さの67%となるとときに転倒限界となっており、設計有義波高2mの38%の有義波高で転倒限界となることがわかる。

また、実線上のBおよびC点は、転倒とは別の危険指標である越波限界と波しぶき限界時の状況を示すものであり、著者らの提案している各危険状況の波高算定法¹⁾から求めたものである。ここでは、それぞれの波高 H_{max} は、1.04m(B)と0.76m(C)になる。このときの $H_{1/3}$ は、 $H_{max}=1.8H_{1/3}$ を用いて換算することができ、0.58m(B)と0.46m(C)となり、天端高さの50%と40%、設計有義波高の29%と23%となる。また、実験での越波限界は●と○の間にあるが、計算における越波限界を示すB点もその間に位置しており、越波限界波高の妥当性がわかる。

4. 転倒限界時の越波流量

(1) 越波流量の計算モデル

図-7は、不規則波中の越波流量の概念図を示したものである。越波流量は、通常ある時間 T_h での総越波量を時間平均した平均越波流量 $\bar{q}_T$ として表されている。しかしながら人が転倒する限界は、平均的な越波流量ではなく、不規則波中の最高波に対応する越波流量で、しかもその中の時間的に変化する流量のピーク値 q_{mp} （ここでは瞬間最大越波流量と呼ぶ、これは、一波一々の越波流量のピーク値 q_p の最大値でもある。）で決まる。したがって、ここでは、この瞬間最大越波流量と平均越波流量の関係を、簡単なモデルを用いて検討する。

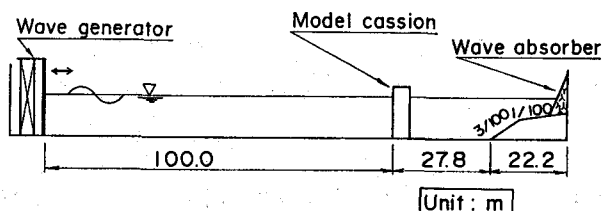


図-5 実験水路

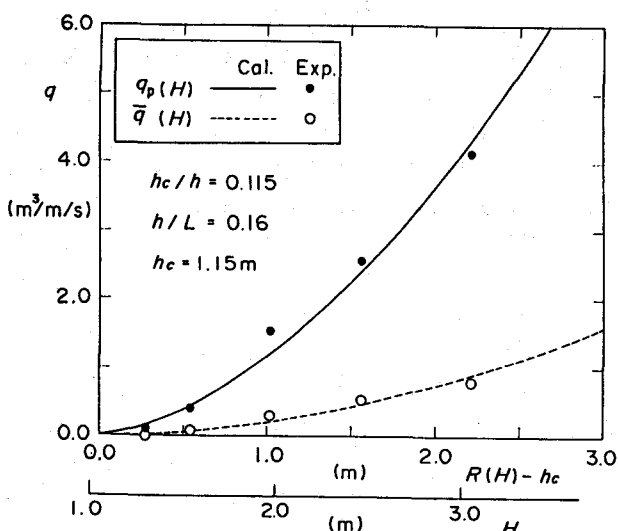


図-6 相対天端高さと打ち上げ高さおよび人の危険状況

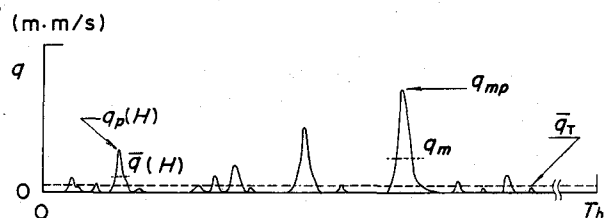


図-7 越波流量の概念図

一波の越波流量は、越波水の運動モデルを基本とし、その時間変化は微小振幅波を仮定して、式(5)に示す静水面上の波峰の高さ $r(t, H)$ を用いて表すことにした。なお、 $r(t, H)$ のピーク値が打ち上げ高さ R である。

$$r(t, H) = R \cdot \sin(2\pi t/T) \quad \dots\dots (5)$$

ここに t は時間である。波峰の高さ $r(t, H)$ が天端高さ h_c より大きくなるときに越波が生じ、その時の越波水の流量 $q(t, H)$ は、堰の考え方に基づいて、流量係数 C を用いて式(6)のように表すことができる。

$$q(t, H) = \begin{cases} C \cdot \{r(t, H) - h_c\}^{0.5} & : r(t, H) \geq h_c \\ 0 & : r(t, H) < h_c \end{cases} \quad \dots\dots (6)$$

従って、波高 H の波による越波流量のピーク値 $q_p(H)$ は $q(\pi/2, H)$ であり、一波の平均越波流量 $\bar{q}(H)$ は $q(t, H)$ を一周分積分し、平均したものである。図-8は、前章の防波堤断面を対象にした一波の流量のピーク値 $q_p(H)$ と平均越波流量 $\bar{q}(H)$ の計算値と実験値を示したものであり、横軸には堤体前面における天端上の打ち上げ高さ $R(H) - h_c$ ($=\eta_1$) をとり、また波高 H も示している。なお、流量係数は $1.29 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ を用いている。この場合の $q_p(H)$ と $\bar{q}(H)$ の計算値は、両者ともほぼ実験値と一致しているのがわかる。

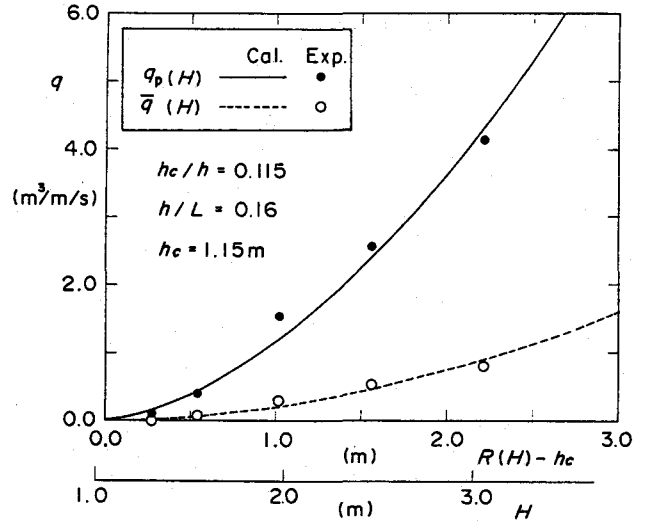


図-8 $q_p(H)$ と $\bar{q}(H)$

次に、不規則波中の平均越波流量については、波高の確率分布をレーリー分布と仮定して、期待値として表すことにした。なお、ここでは、簡単のため波高のみの不規則性を考え、周期については一定として考えている。図-9は、波高 H に対する波高の出現確率 $P(H)$ と一波の平均越波流量 $\bar{q}(H)$ との関係を示した例であり、 $H_{1/3}$ が 0.77 m ($H_{1/3}/h_c = 0.67$)と 1.5 m ($H_{1/3}/h_c = 1.3$)の条件でやはり前章の防波堤断面を対象にしたものである。このときの全体の平均越波流量 $\bar{q}_T$ は、 $\bar{q}(H)$ と $P(H)$ との積を波高に対して積分したものである。なお、 $H_{1/3}$ が 0.77 m の条件では、 $\bar{q}_T$ は $1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ となる。

(2) 転倒限界時の平均越波流量

図-10は、図-9と同じ条件に対して瞬間最大越波流量 q_{mp} と平均越波流量 $\bar{q}_T$ との比の期待値を示したものである。横軸は、最高波高と有義波高との比 $H_{max}/H_{1/3}$ と、非碎波の条件において $H_{1/3}$ を一定とすると波数 N の違いを表している。例えば、 $H_{max}/H_{1/3}$ が 1.8 で約400波、 $H_{max}/H_{1/3}$ が 2.0 で約1700波のときの最高波高の出現確率に相当する。 $H_{1/3} = 0.77 \text{ m}$ ($H_{1/3}/h_c = 0.67$)では、 $H_{max}/H_{1/3}$ が 1.8 のとき $q_{mp}/\bar{q}_T$ が約1800となっている。また、人の転倒を検討する際に用いる $H_{max}/H_{1/3}$ が 2.0 では、 $q_{mp}/\bar{q}_T$ が約3300となっており、 $H_{max}/H_{1/3}$ が 1.8 に比べて約2倍程度大きくなっている。また、 $H_{1/3} = 1.5 \text{ m}$ ($H_{1/3}/h_c = 1.3$)では、 $H_{max}/H_{1/3}$ が 2.0 でも、 $q_{mp}/\bar{q}_T$ が約250と低い値になっている。このように設計波に近い条件では、越波する頻度もかなり多くなるために、平均値とピーク値の差が比較的小さくなっているものと考えられる。

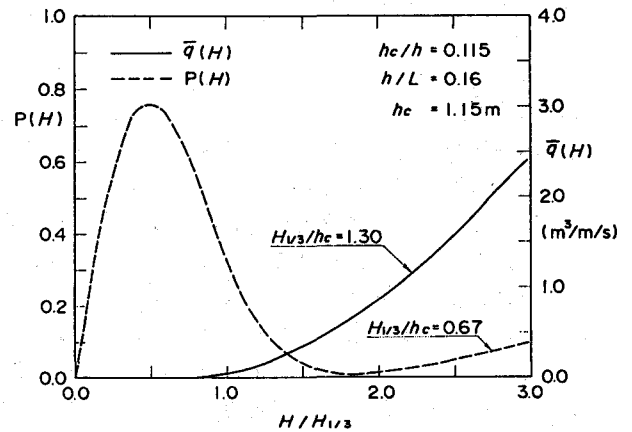


図-9 波高の出現確率 $P(H)$ と一波の平均越波流量 $\bar{q}(H)$

図-11は、有義波高 $H_{1/3}$ と平均越波流量 $\bar{q}_T$ および瞬間最大越波流量 q_{mp} との関係を示したものであり、 H_{max} の期待値が $H_{1/3}$ の2倍となる1700波で計算したものである。なお、図中の実線が $\bar{q}_T$ 、点線が q_{mp} の計算値を示しており、実験値は不規則波実験による $\bar{q}_T$ (●)のみを示している。 $\bar{q}_T$ の実験値は 10^{-5} から 10^{-1} までの範囲であり、計算値に比べてやや大きいものの、概ね傾向が一致している。計算結果によると、この条件では越波限界時の有義波高が 0.33 m であり、波高が越波限界よりも大きくなると、急激に $\bar{q}_T$ や q_{mp} が増加している。例えば、 $\bar{q}_T$ は、 $H_{1/3} = 0.5 \text{ m}$ のとき $1.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ であり、 $H_{1/3} = 1.0 \text{ m}$ のとき $1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ となっている。また、転倒限界時の波高は H_{max} が 1.53 m 、 $H_{1/3}$ が 0.77 m であり、このときの q_{mp} は $0.64 \text{ m}^3/\text{m/s}$ 、 $\bar{q}_T$ は前述のとおり $1.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m/s}$ である。

一般に、護岸等の設計の際には、許容越波流量を定めて天端高さを決定している。福田ら⁵⁾は、背後地の利用状況より許容越波流量を定めている。歩行者を対象とした場合、安全度50%の越波流量は $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m/s}$ で、安全度90%のとき $3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m/s}$ としている。今回の計算によると、安全度50%のとき $H_{1/3} = 0.80 \text{ m}$ 、安全度90%のとき $H_{1/3} = 0.68 \text{ m}$ に相当し、転倒限界時の平均越波流量が安全度50%に相当するものにほぼ一致していることがわかる。

永井ら⁶⁾は、背後地の重要度から許容越波流量を $0.01 \sim 0.05 \text{ m}^3/\text{m/s}$ とし、合田⁷⁾は、既往の被災事例から許容越波流量を $0.005 \sim 0.2 \text{ m}^3/\text{m/s}$ まで定めている。例えば、越波流量が $0.01 \text{ m}^3/\text{m/s}$ のときを考えると、今回想定した断面では有義波高が 1.35 m の場合に対応する。この状況では、約13波(95秒)に1回の確率で人が転倒するような越波が生じており、非常に危険な状況であることがわかる。これらの許容越波流量は、いずれも護岸背後の構造物や施設にとって危険となる状況であり、人を対象とした危険の限界状況と比較してかなり越波流量が多く、人にとっては非常に危険な状況であることがわかる。

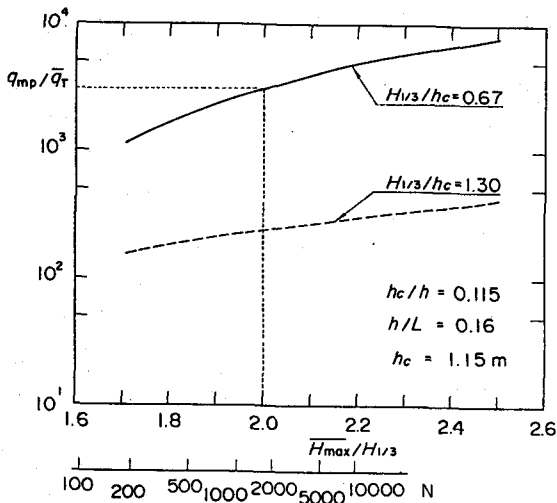


図-10 $H_{\max}/H_{1/3}$ と $q_{mp}/\bar{q}_T$ の関係

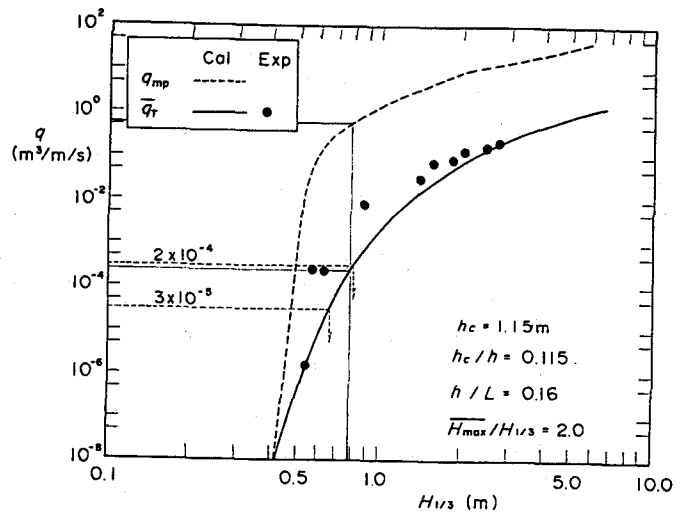


図-11 $H_{1/3}$ と $\bar{q}_T$ および q_{mp}

5. まとめ

親水性防波堤上の人の安全性を確保するために、最も危険度の高い現象の一つである越波時の人の転倒について、その状況が生じる打ち上げ高さについてまとめるとともに、そのときの波高を計算する方法を提案した。また、転倒限界時の越波流量は、護岸を設計する際に用いる許容越波流量に比べてかなり小さく、従来の許容越波流量が人の危険の判断にはそのまま適用できないことがわかった。

今後は、より危険な越波時の人の海中への転落について、検討を加える予定である。また、個々の危険状況が定量的に評価する方法が確立した後、それらを総合的に評価して人の安全性を検討する方法についても検討する予定である。この報告のとりまとめに当たっては、港湾技術研究所の高山知司水工部長から貴重な助言を得ている。ここに記して深甚なる感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 高橋重雄・遠藤仁彦(1992): 親水性護岸や防波堤の利用限界に関する事例解析、海洋開発論文集、Vol. 8、pp. 391-396.
- 2) 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗(1992): 親水性防波堤上における越波時の人の安全性に関する研究、海岸工学論文集、第39巻、pp. 721-725.
- 3) 日本医療企画WIBA編纂室: 医療・福祉・保健の総合年鑑WIBA'90、1990、pp. 766-767.
- 4) 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗: 混成防波堤上の越波水の運動と波力に関する実験的研究、港湾技術研究所報告、第31巻、第1号、1992、pp. 3-50.
- 5) 福田伸男・宇野俊泰・入江功: 防波護岸の越波に関する現地観測(第2報)、第20回海岸工学講演会論文集、1973、pp. 113-118.
- 6) 永井荘七郎・高田彰: 海岸堤防の越波に及ぼす消波堤の効果、第11回海岸工学講演集、1964、pp. 279-286.
- 7) 合田良実: 防波護岸の越波流量に関する研究、港湾技術研究所報告、第9巻、第4号、1970、pp. 3-41.