

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

高橋重雄*・遠藤仁彦**・室 善一朗***

1. ま え が き

防波堤は、港湾施設の中で最も海に近づくことができ、親水性の施設として大きな魅力と可能性を秘めている。現在、市民が海を楽しむことのできる「親水性防波堤」は、和歌山マリーナシティの防波堤を始めとして、すでにいくつか計画や施工されている例があり、今後ますます増えるものと思われる。

防波堤は、従来安全上の観点から市民の立ち入りを禁止しており、「親水性防波堤」として一般に開放するためには、安全に関する十分な検討が必要である。自然条件により防波堤上の人が危険となる場合には、越波や風、地震などが原因となり、これらと人の危険性を明らかにすることにより、手すりや緊急時の避難場所などの安全対策を効果的に行うことができる。特に、通常の高さの防波堤では、年に数日から数十日も越波することから、越波は防波堤上の人命に関わる最も危険性の高い現象であり、実際、立ち入り禁止をしていた防波堤に釣り人が入り、越波のために人命が奪われた事例もある。

本報告では、防波堤上における様々な危険の中で越波現象に注目し、越波水の流れと人の転倒との関係を実験的に明らかにしている。さらに、簡単な越波水による人の転倒モデルを構築し、一般的な転倒限界の条件について考察している。

2. 越波による危険性の特徴と転倒モデル

(1) 越波状況と人の危険性

越波状況は、波高や周期、水深、天端高さなどによって変化する。図-1は、最も基本的なパラメータである波高と越波状況、防波堤上の危険性との関係を概念的に表したものである。越波状況は波高とともに変化し、比較的小さい波高で波しぶきが天端を越えるようになり、さらに波高が大きくなると、越波水本体が天端を越える

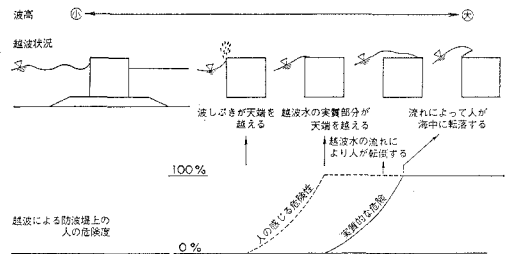


図-1 越波状況と防波堤上の危険性

ようになる。

越波に対する防波堤上の人危険は、人の感じる危険と実質的な危険の二つが考えられる。人の感じる危険は個人の経験によってその程度が異なるが、波しぶきが天端面を濡らす状況から危険を感じる人が多いと考えられる。波しぶき発生時の状況は、人に対して実質的には危険でないが、今後実質的な危険の生じる可能性があり、人の安全性を確保する指標として重要である。著者ら(1992)は、安全のために施設を利用制限する基準として、波しぶき発生時が有効であることを示している。

また、実質的な危険とは、越波水により転倒したり、流されて海に転落することであり、越波水の実質部分が天端を越えた状況から危険が生じる。この危険レベルは人の生死に関わるものであり、本報告ではこの実質的な危険を対象としている。なお、越波水本体が越える状況は、防波堤上を越波水が流れる「越流時」と、堤体前面において越波水が打ち上がる「打ち込み時」の二つの現象が特徴的であり、人の実質的な危険は越流時の卓越する波高の比較的小さい状況から始まると考えられる。

(2) 流れ中における人の転倒モデル

越波時における防波堤上の人転倒は、越波水による力と人の抵抗力によって決まり、越波水による力が大きくなると転倒が生じる。流れ中における人の転倒モデルは、水深と流速から人に作用する力を算定し、後述の二つの転倒条件で転倒を判断するものである。

越波水によって人に作用する力 F は、式(1)で示す抗力として表すことができる。この式中の A_0 は、流

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室長
 ** 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

れ中の人の水平投影面積であり、越波時の水位や人の体格と体勢、流れの上流方向と人の正面とのなす角度 θ によって変化する。また、 C_D は抗力係数であり、人の向き θ と人の体勢、服装によって変わると考えられる。

$$F = \frac{w_0}{2g} C_D A_0 U^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 w_0 ：海水の単位体積量、 U ：越波水の流速。

人の抵抗は、床と靴との間の滑りに対する抵抗と、転倒に対する抵抗の二通りがあり、これにより転倒の形態を以下のように分けることができる。

- ①滑り型：流れによって人に作用する外力が摩擦抵抗力を上回った場合に生じる転倒
- ②倒れ込み型：足の一部を支点とした外力モーメントが自重による抵抗モーメントを上回った場合に生じる転倒

- ③複合型：滑り型と倒れ込み型が複合した転倒

実際には複合型が多いと考えられるが、ここでは比較的簡単な滑り型と倒れ込み型を対象として、転倒モデルを考えている。また、人間は外力に対して重心位置を変化させたり、体勢を変えて安定を保つ能力があるが、転倒限界を安全側に考えるために、転倒モデルでは安全性を増加させる人間の動的特性を考慮せず、静的に扱っている。

滑り型の転倒条件は、床と靴との静摩擦係数 μ_s が主要なパラメータとなっており、式(2)で表すことができる。また、倒れ込み型の転倒条件は、人の重心位置と倒れるときの支点との水平距離 l_g 、および流れによる水平力の重心と転倒支点との鉛直距離 h_g が主要パラメータとなっており、式(3)で表すことができる。なお、式中の W_0 は人の水中重量を示しており、標準的な体型の人をもとに関数化した流れの中の人の体積から求めている。

$$F \geq \mu_s W_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$F \cdot h_g \geq W_0 \cdot l_g \quad \dots\dots\dots (3)$$

3. 実験の概要

(1) 摩擦の測定

滑り型転倒の主要なパラメータである静摩擦係数を数種類の床面と靴を対象として測定した。床面はコンクリートを対象とし、表面が滑らかなもの、粗いもの、藻で覆われているもの、海藻で覆われているものの4種類、靴は2種類の運動靴と2種類の革靴で行った。計測は3種類の重りで各10回繰り返して行い、その平均値を用いている。

図-2 は、静摩擦係数の測定結果を示したものである。運動靴では床面の状況により摩擦係数が 0.4~0.9 となり、革靴では 0.6~0.9 となった。また、通常の状

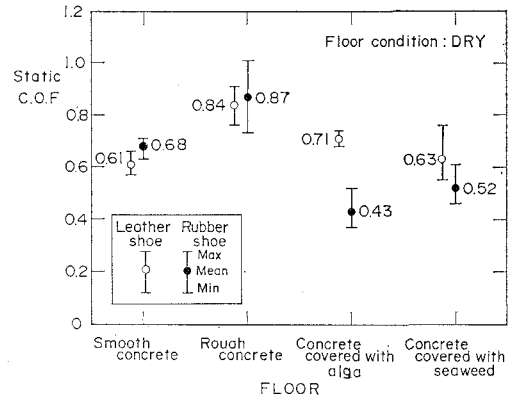


図-2 床と靴との摩擦係数

況を想定している表面が粗い場合や滑らかな場合では、運動靴の摩擦係数が革靴よりやや大きい。しかし、表面が藻や海藻で覆われている場合には、運動靴の摩擦係数が革靴に比べて低下するのが特徴である。摩擦は対象物の材質に依存するものと形状に依存するものがあり、藻などで覆われているときの革靴では、踵の形状による摩擦が相対的に大きくなっていると考えられる。なお、Andres ら (1984) も、靴と床面との摩擦係数を測定しており、床面がコンクリートの場合静摩擦係数が 0.4~0.8 とほぼ同様の値になっている。

(2) 室内実験

図-3 に示す大型の還流水槽 (20 m×50 m) において、越波時の流れを定常流として実スケールで再現し、実際の人間を用いて実験を行った。実験では、大きく分けて以下の二つを実施している。

- ① 流れ中で人に作用する力を測定する実験で、二分力計を埋め込んだ高さ 30 cm のマウンド (図-3 の B 部分) 上に被験者を乗せて力を測定した。この実験では主に人の向き θ や足の間隔 L_f 、服装による相違を検討している。

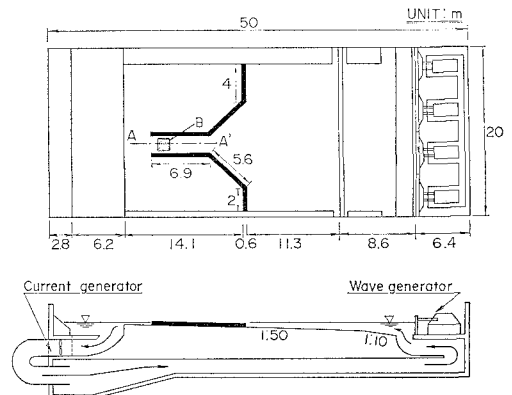


図-3 実験水槽

② 人の転倒実験で、水位および流速を変化させて行った。測定位置と水路床はコンクリートであり、実験に使用した靴と床面との静摩擦係数は平均 0.71 であった。また、実験では、コンクリート面が藻で覆われている状況を想定したものも実施しており、靴を滑りやすく加工 ($\mu_s=0.37$) して行った。この実験では、主に人の転倒モデルの妥当性を検討している。なお、被験者 A の身長は 183 cm に体重が 73 kg であり、被験者 B の身長は 165 cm で体重が 67 kg である。被験者 A は背が高いが、身長と体重の関係からは標準的な体格であることがわかる。被験者 B は背が標準的であるが、体重はやや標準よりも重い。

4. 越波水の流れと人の転倒特性

(1) 流れ中の人に作用する水平力

図-4 は、人の向き θ および足の間隔 L_f による作用水平力の違いを示したものであり、初期水深 30 cm、被験者 B の条件である。なお、ここでは θ や L_f による基本的な性質を検討するために、素足の形状に似ているロングブーツを履いている。例えば、足の間隔 L_f が 0 cm で流速 2 m/s のとき約 8 kgf の水平力が作用している。 L_f が 0 cm では向きの影響がほとんどないが、 L_f が 25 cm や 50 cm の場合に向きの影響が生じてくる。 $\theta=0^\circ$ の場合には L_f が大きいほど人に作用する力は小さくなり、 $\theta=45^\circ$ や 90° の場合には L_f が大きいほど作用水平力が大きくなる傾向がある。また、 $\theta=45^\circ$ と 90° では L_f によらず、ほぼ同程度の値となっており、特に L_f が 25 cm と 50 cm で $\theta=0^\circ$ のとき、他の向きに比べてやや小さな値を示している。向きや足の間隔による水平力の相違は、主に流れ中における人の投影面積の変化や 2 本の足の相互干渉、そして向きによる抵抗係数の違いによるものである。

図-5 は、服装による抗力係数の違いを示したもので

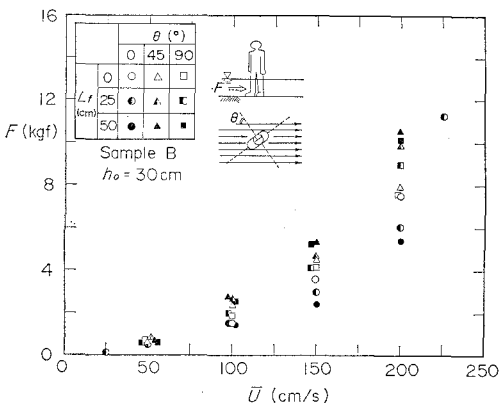


図-4 流れ中の人に作用する力

あり、 $\theta=0^\circ$ $L_f=25$ cm の条件である。縦軸の抗力係数は、実測の水平力、流速および流れ中の人の投影面積から式 (1) を用いて逆算しており、横軸には水深 η を股下 h_f で無次元化したものをとっている。なお、服装は、ロングブーツとドライスーツ、スラックスの 3 種類で行っている。実際の服装として想定しているスラックスは、素足の形状に近いロングブーツに比べて表面抵抗が増加し、1.2~2.0 倍程度抗力係数が大きくなっている。また、転倒実験の際に着用したドライスーツは、スラックスとほぼ同程度の抗力係数となっていることがわかり、水深の影響が小さく、平均で 1.2 程度の一定値となっている。次節で示す転倒実験におけるモデルの適用を検討する際には、抗力係数として 1.2 を用いている。

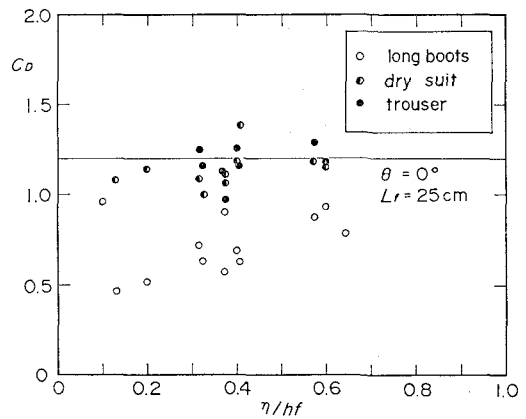


図-5 人の抗力係数

(2) 流れ中の安定性

図-6 は、水深および流速に対する転倒状況を示したものである。外力に対して重心の移動を許容しており、倒れ込み型転倒が生じないようにした場合である。なお、実験条件は被験者 A で $\theta=0^\circ$ 、 $L_f=25$ cm、 $\mu_s=0.37$ である。実験では、水深 50 cm のときに流速が 180 cm/s 程度で滑り型転倒が生じており、水深が大きくなると転倒限界流速が小さくなっている。また、図中の実線に示す滑り型の転倒限界の計算値は、実験での転倒限界とほぼ一致しており、滑り型の転倒モデルが妥当であることがわかる。

図-7 は、水深および流速と転倒状況を示したものであり、人の重心位置を足の中央に保持した場合である。なお、実験条件は被験者 A で $\theta=0^\circ$ 、 $L_f=25$ cm、 $\mu_s=0.37$ である。この条件では、水深 50 cm のときに流速 150 cm/s で複合型の転倒となり、図-6 の場合より転倒しやすくなっている。また、図中の実線および点線は、式 (2)、(3) で計算した滑り型および倒れ込み型の転倒限界を示している。なお、倒れ込み型のパラメータで

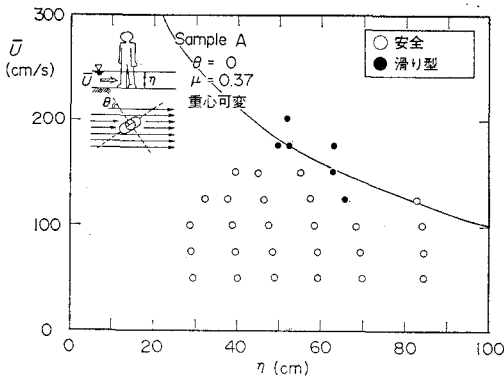


図-6 水深および流速と転倒状況 (重心可変)

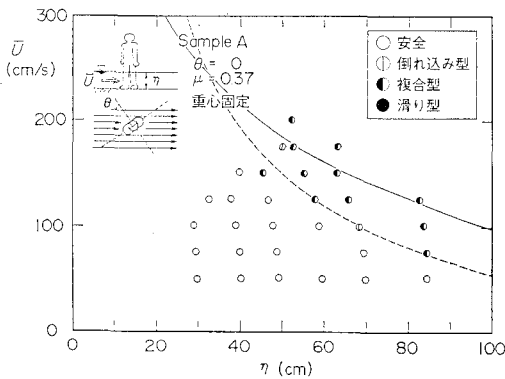


図-7 水深および流速と転倒状況 (重心固定)

ある人の重心と転倒支点との水平距離 l_g は、足の大きさの $1/4$ として計算している。実験では複合型の転倒が多く、その限界では倒れ込み型の計算値とほぼ一致している。複合型では倒れ込み型がきっかけとなって転倒が生じており、倒れ込み型の転倒モデルが妥当であることがわかる。

5. 転倒モデルによる転倒限界条件

(1) 計算の概要

本章では、主に身長や摩擦係数の違いによる転倒限界条件を計算によって検討している。転倒の判定基準は、前掲の式 (2), (3) に示す滑り型と倒れ込み型の条件を用いている。人の形状は、比較的標準的な体型の被験者をもとに決めており、身長の違いは相似で考えている。なお、人の密度は等分布として、小川 (1985) が示している実測の人体比重 1.05 を用いている。また、足の間隔 L_f は肩幅程度、人の向き θ が 0° を仮定しており、抗力係数は 1.2 としている。

一方、筆者ら (1991) は、防波堤上における越波水の運動を検討しており、越波時の水位や流速を実験式で表している。越波時 (特に越流時) における防波堤上の水

位は、堤体の港外側端で打ち上げ高さ η_1 となり、ある程度港外側端から離れると $\eta_2 (=0.4\eta_1)$ となる。また、越波時の流速は港外側端において式 (4) となり、水位が η_2 の領域ではその 2.5 倍で、水位を η_2 で表わすと式 (5) となる。

$$U_1 = C_1 \alpha_2 \eta_1^{1/2} \quad (4)$$

$$U_2 = 4.0 C_1 \alpha_2 \eta_2^{1/2} \quad (5)$$

なお、式中の α_2 は高波水深比によって変化する係数であるが、1.12 の一定値を用いている。また、 C_1 は流量係数であり、 $1.61 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ としている。本章では、越波水の運動モデルを用いて、転倒限界時の越波流量の打ち上げ高さも検討している。

(2) 摩擦係数による転倒限界

図-8 は、床面と靴との静摩擦係数による転倒限界の変化を実線で示したものであり、身長 160 cm の場合である。水深が浅いときに滑り型転倒、水深が深いときに倒れ込み型転倒が生じており、例えば摩擦係数が 0.3 のとき水深約 35 cm が滑り型と倒れ込み型の境界となっている。また、水深が浅いほど滑り型転倒のパラメータである摩擦係数の影響が大きくなり、摩擦係数が小さいほど転倒限界流速も小さくなる傾向がある。

一方、図中の点線は、堤体上の港外側端 ($\eta = \eta_1$) および水位が η_2 となる位置での越流時の水位と流速の関係を示したものであり、実線と点線の交点は、防波堤上の越波状況を考慮した転倒限界となる。例えば、コンクリート面が藻で覆われていたときを想定した摩擦係数 0.4 の場合、港外側の端にいる人が転倒する限界は、水位 η が 57 cm で流速 U が 95 cm/s のときであり、打ち上げ高さ η_1 が 57 cm となる。また、摩擦係数が同じ場合、港内側 (水位が η_2 の領域) にいる人の転倒限界は、水位 η が 25 cm で流速が 250 cm/s のときである。このとき打ち上げ高さ η_1 が 63 cm となり、港外側の端にいる人のほうが危険であることがわかる。なお、摩擦係数が港外側端で 0.2 以上、水位 η_2 の位置で 0.5 以上ではすべて倒れ込み型の転倒となり、摩擦係数に関係なく転倒限界の条件が決まる。これは、身長が変化しても同様の傾向となる。

(3) 身長による転倒限界

図-9 は、身長と転倒限界時の越波流量および打ち上げ高さの関係を示したものであり、防波堤上で比較的危険な港外側端の位置で計算している。なお、摩擦係数は、倒れ込み型転倒が卓越する 0.2 以上としている。実線は、転倒限界時の越波流量を示しており、身長が大きいくほど大きくなり、身長 100 cm で越波流量 $0.38 \text{ m}^3/\text{m/s}$ 、身長 150 cm で越波流量 $0.51 \text{ m}^3/\text{m/s}$ が転倒限界となっている。また、点線は転倒限界時の打ち上げ高さを示しており、越波流量と同様、身長が大きくなるほど転倒

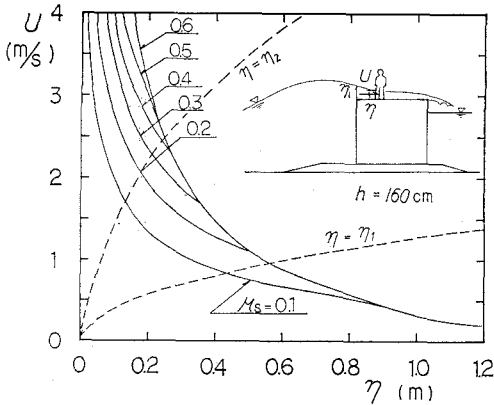


図-8 摩擦係数と転倒限界

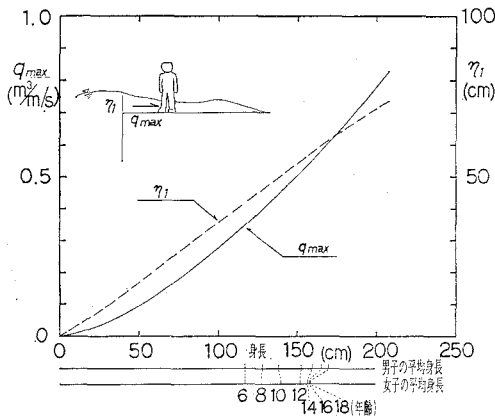


図-9 越波流量と打ち上げ高さ

限界の打ち上げ高さも大きくなる。例えば、身長 100 cm では打ち上げ高さ 35 cm が転倒限界となり、堤体前面において打ち上げ高さが人の膝よりやや高くなると転倒することがわかる。

一方, WIBA (1991) は年齢別の男子と女子の平均身長を示しており, 図-9 の横軸に合わせて示している。例えば, 13才を基準にすると, 男子と女子の平均身長は 157.2 cm であり, 転倒限界の条件が越波流量で $0.55 \text{ m}^3/\text{m/s}$, 打ち上げ高さで 57 cm となる。また, 18才を基準にすると, 男子と女子の平均身長は 164.5 cm であり, 転倒限界の条件が越波流量で $0.58 \text{ m}^3/\text{m/s}$, 打ち上げ高さで 60 cm となる。実用的には, 12才以上を想定すると, 越波流量 $0.5 \text{ m}^3/\text{m/s}$, 打ち上げ高さ 50 cm が転倒限界条件の目安になる。

6. まとめ

今回の検討により, 越波時における転倒限界の条件が越波流量と打ち上げ高さを用いて定量的に示すことができた。ただし, ここでの越波流量とは, 従来の不規則波中の平均的な値ではなく, 不規則波中の最大波に対応し, しかも時間的に変動する流量の最大値に対応している。そこで, 実際に用いる際には, 今回の越波流量を従来の平均越波流量に変換する必要がある, 今後検討を加える予定である。

参考文献

- 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.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗 (1991): 親水性防波堤上の越波水の運動に関する研究, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 501-506.
- 小川正行 (1985): 皮厚等の身体諸計測値からの Body Density 予測に関する研究, 日衛誌, 第 40 巻, 第 5 号, pp. 841-848.
- WIBA (1991): 医療福祉保健の総合年鑑 WIBA'90, pp. 766-767.
- Robert O. Andres, Keith Kreutzberg, and Eric M. Trier (1984): An ergonomic analysis of dynamic coefficient of friction measurement techniques, OSHA, PR85/003, pp. 1-85.