

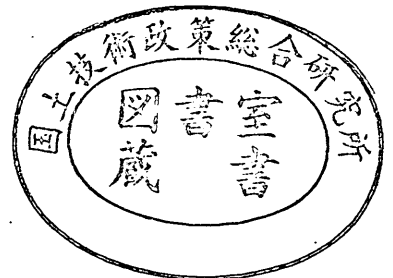
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 31 NO. 4 DEC 1992

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第31巻 第4号 (Vol. 31, No. 4) 1992年12月 (Dec. 1992)

目 次 (CONTENTS)

1. 越波時における防波堤上の人の転倒に関する研究
— 親水性港湾構造物に関する水工的研究 (第2報) —
..... 高橋重雄・遠藤仁彦・室 善一郎 3
(Experimental Study on People's Safety Against Overtopping
Waves on Breakwaters
— A study on Amenity-oriented Port Structures (2nd Rept.) —
..... Shigeo TAKAHASHI, Kimihiko ENDOH, and Zen-ichiro MURO)
2. 繰返し水平荷重下で大変形する砂地盤中の杭の挙動
..... 菊池喜昭・高橋邦夫・鈴木 操 33
(Lateral Resistance of Single Piles under Large Repeated Loads
..... Yoshiaki KIKUCHI, Kunio TAKAHASHI, and Misao SUZUKI)
3. 我が国の正規圧密された海成粘性土の静的コーン貫入試験から得られる特性
..... 田中洋行・榊原基生・後藤健二・鈴木耕司・深沢 健 61
(Properties of Japanese Normally Consolidated Marine Clays
Obtained from Static Piezocone Penetration Test.
..... Hiroyuki TANAKA, Motoo SAKAKIBARA, Kenji GOTO, Kouji SUZUKI
and Takeshi FUKAZAWA.)

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第31巻 第4号 (Vol. 31, No. 4) 1992年12月 (Dec. 1992)

目 次 (CONTENTS)

1. 越波時における防波堤上の人の転倒に関する研究
— 親水性港湾構造物に関する水工的研究 (第2報) —
..... 高橋重雄・遠藤仁彦・室 善一朗 3
(Experimental Study on People's Safety Against Overtopping
Waves on Breakwaters
— A study on Amenity-oriented Port Structures (2nd Rept.) —
..... Shigeo TAKAHASHI, Kimihiko ENDOH, and Zen-ichiro MURO)
2. 繰返し水平荷重下で大変形する砂地盤中の杭の挙動
..... 菊池喜昭・高橋邦夫・鈴木 操 33
(Lateral Resistance of Single Piles under Large Repeated Loads
..... Yoshiaki KIKUCHI, Kunio TAKAHASHI, and Misao SUZUKI)
3. 我が国の正規圧密された海成粘性土の静的コーン貫入試験から得られる特性
..... 田中洋行・榊原基生・後藤健二・鈴木耕司・深沢 健 61
(Properties of Japanese Normally Consolidated Marine Clays
Obtained from Static Piezocone Penetration Test.
..... Hiroyuki TANAKA, Motoo SAKAKIBARA, Kenji GOTO, Kouji SUZUKI
and Takeshi FUKAZAWA.)

1. 越波時における防波堤上の人の転倒に関する研究

— 親水性港湾構造物に関する水工的研究(第2報) —

高橋 重雄*・遠藤 仁彦**・室 善一朗***

要 旨

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重要な港湾構造物である。防波堤は一般に、港の施設として最も外海側にあり、しかも海に突き出した形状をしており、快適な海環境を楽しむことのできる親水性施設として、大きな魅力と可能性を秘めている。しかしながら、やはり防波堤は荒波を防ぐ施設であり、市民にとって必ずしも安全な場所ではない。ただし、越波するような高波浪は多くとも年間数十日程度であり、適切な安全施設を設置し安全管理を行うことによって、市民が海を楽しむ場所とすることも可能である。最近では、我国でも快適な海環境を楽しむ人々が増加しており、市民が海を楽しむことのできる「親水性防波堤」のニーズも増加している。実際、和歌山マリナーシティの防波堤を始めとして、すでにいくつかの親水性防波堤が計画あるいは施工されており、今後ますます増えるものと思われる。

港湾技術研究所では、これらの情勢に対応して、1990年から親水性の港湾・海岸構造物の研究を開始している。その第1報では、親水性防波堤における基本的な問題である越波水の運動を検討した。本報告は第2報であり、越波時における防波堤上の人々の安全性について検討している。

本報告で対象とした危険は、越波水による人の転倒であり、実際の人を用いて実スケールの流れを水槽内で再現した水理実験を実施し、また流れ中の人の転倒を判定する「転倒モデル」を構築して、越波と人の転倒を定量的に検討している。主要な結果は、以下のとおりである。

- (1) 人が越波水によって転倒する場合には、力学的なメカニズムから、「滑り型転倒」と「倒れ込み型転倒」に分けて考えることができる。
- (2) 流れ中の人に作用する力は、流速の二乗に比例する抗力として考えることができる。人の抗力係数は、足の間隔 L_f や人の向き θ が主なパラメータであり、足の間隔がない場合には人の向きによらず、抗力係数がほぼ1.1となった。
- (3) 流れ中における人の「転倒モデル」を提案した。これは、水位と流速を用いて人に作用する力を算出し、外力と抵抗力との釣合から「滑り型転倒」と「倒れ込み型転倒」の限界を判断するものである。
- (4) 実際の人を用い、実スケールの流れを再現して、転倒モデルの検証実験を行った。実験では、滑り型転倒と倒れ込み型転倒を再現でき、実験と計算による転倒限界がほぼ一致することが分かった。
- (5) 転倒モデルを用いた計算によって、床面と靴との摩擦係数、人の向きや足の間隔、防波堤上の位置、身長や体格などが人の転倒に及ぼす影響を明らかにした。
- (6) 転倒限界時における防波堤前面での打ち上げ高さは、0.5mを用いることを提案する。このとき水位は0.5mで流速1.3m/sであり、最大流量が0.64m³/m/sとなる。なお、この値は12才の標準的な体型を対象としたものである。
- (7) 転倒限界条件は、人の安全性の観点から、不規則波中において最高波に対応すると考えられる。また、このときの最高波は、海洋構造物の設計に用いられている $H_{max} = 2.0H_{1/3}$ を準用して、有義波高の2.0倍を用いることを提案する。

キーワード：親水性防波堤、越波、転倒、人間、アメニティ、ウォーターフロント、摩擦係数、安全

* 水工部 耐波研究室長
** 水工部 耐波研究室
*** 水工部 海洋エネルギー利用研究室

1. Experimental Study on People's Safety against Overtopping Waves on Breakwaters

—A study on Amenity-oriented
Port Structures (2nd Rept.)—

Shigeo TAKAHASHI
Kimihiro ENDOH**
Zen-ichirou MURO***

Synopsis

On a sunny day, people can enjoy very comfortable sea environment on a breakwater which is projected into the sea. Although a breakwater is a port facility to keep a harbor calm, people become aware of another use of the breakwater as an amenity space. However, to make a breakwater really an amenity space, the safety of people on the breakwater should be preserved.

The studies on amenity-oriented port and coastal structures are being conducted as one of the special projects at PHRI from 1990. The first report has already been published which described the motion of overtopping waves and the wave forces on amenity and safety facilities on breakwaters. This is the second report of the project and discusses the safety of the people on breakwaters against overtopping waves.

A series of prototype tests on the stability of a person in a flow are carried out in a large current basin to investigate the safety of people on a breakwater against overtopping waves. In the experiments, current force on the men's body was measured, and falling of man was observed. The major conclusions are as follows:

- 1) The falling can be classified into two major types; slipping type and tumbling type. A model to describe the both types of falling is proposed. The critical condition of the current velocity and the water level for falling can be evaluated by the model.
- 2) The horizontal force on the body can be evaluated as a drag force of which coefficient can be approximated as 1.1 from the experiments. The drag coefficient varies with the interval and direction of the feet.
- 3) The friction factors between shoes and floors for various condition are measured. For example, the friction factor of the rubber shoes is about 0.4 on the wet concrete floor covered with alga.
- 4) The calculated values of the critical current velocity and water level for falling agree with the experimental values.
- 5) The critical wave runup height for the falling in front of breakwater is estimated as 50 cm.

Key Words : Amenity, Safety of People, Wave Overtopping, Breakwater, Coefficient of Friction, Falling

* Chief of Maritime Structures Labo., Hydraulic Eng. Div.
** Member of Maritime Structures Labo., Hydraulic Eng. Div.
*** Member of Ocean Energy Utilization Labo., Hydraulic Eng. Div.

目 次

1. ま え が き	7
2. 既 往 の 研 究	7
3. 越波時における人の転倒の特徴と転倒モデル	9
3.1 越波と人の危険の概念	9
3.2 転倒の特徴とモデル化	10
4. 実物実験による転倒モデルの評価	12
4.1 実験の概要	12
4.2 流れの中の人に作用する力	16
4.3 転倒実験と転倒モデルとの比較	19
5. 転倒モデルによる転倒限界条件の検討	22
5.1 計算の方法	22
5.2 転倒限界の特性	23
6. 現 地 へ の 適 用	26
6.1 転倒限界条件の基準値とその適用方法	26
6.2 防波堤上における人の安全性の検討例	27
6.3 転倒限界波高の特性	28
7. 結 論	29
参 考 文 献	30
主要記号一覧表	30
付録 利用限界, 越波限界, 転倒限界波高の計算方法	31

1. まえがき

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重要な港湾構造物である。防波堤は一般に、港の施設として最も外海側にあり、しかも海に突き出した形状をしており、快適な海環境を楽しむことのできる親水性の施設として、大きな魅力と可能性を秘めている。しかしながら、やはり防波堤は荒波を防ぐ施設であり、市民にとって必ずしも安全な場所ではない。ただし、越波するような高波浪は多くとも年間数十日程度であり、適切な安全施設を設置し安全管理を行うことによって、市民が海を楽しむ場所とすることも可能である。最近では、我国でも快適な海環境を楽しむ人々が増加しており、市民が海を楽しむことができる「親水性防波堤」のニーズも増加している。実際、和歌山マリナーシティの防波堤を始めとして、既にいくつかの親水性防波堤が計画あるいは施工されている。また、このような施設は今後ますます増えるものと思われる。

港湾技術研究所では、これらの情勢に対応して、1990年から親水性の港湾・海岸構造物の研究を開始している。その第1報では、親水性防波堤における基本的な問題である越波水の運動を検討した。すなわち、混成防波堤上の越波水の運動について、水理模型実験によりその基本的な特徴を明らかにして、防波堤上の水位や流速を推定するために、防波堤上の越波水の運動をモデル化した。さらに波力実験を実施して、各種天端上の構造物に作用する越波波力特性を検討し、その算定法を提案した¹⁾。本報告は、親水性の港湾・海岸構造物の研究の第2報であり、越波時における防波堤上の人々の安全性について検討している。

防波堤は、従来安全上の観点から人の立ち入りを禁止してきた構造物である。このような防波堤を「親水性防波堤」として一般の人々に開放するためには、安全性に関する十分な検討が必要となる。防波堤上の人々が危険となるときの要因は強風、雷雨、降雪など様々なものが考えられるが、最も危険なものとして波浪をあげることができる。波が高くなると、防波堤上に波しぶきが打ち上がったたり、防波堤を越波するなどの現象がみられ、防波堤上の人にとって非常に危険な状況になる。実際に、立入禁止の防波堤に釣り人が入り、越波によって海中に転落し、死亡するという事故も少なくない。陸続きの防波堤であっても、避難する方向が一方向に限られ、また安全な場所まで避難する距離も長い。したがって、防波堤上の危険の定量的評価など、安全に対する事前の検討が重要であり、避難場所の設置方法などの安全対策の確立

が望まれている。

防波堤上の越波に対する危険は、その程度から大きく分けて、「感覚的な危険」と「実質的な危険」の二つが考えられる。感覚的な危険は、天端面が波しぶきで濡れる程度の越波状況で生じ、防波堤上の人に対して不快感や恐怖感などを与えるが、実質的には危険でない。それに対して、実質的な危険とは、越波水本体が防波堤天端上を流れるような越波状況で生じ、防波堤上の人々が越波水によって転倒したり、海中に転落してしまうことがある。

本研究は実質的な危険を対象とし、越波水の流れによる人の転倒特性を明らかにすることが目的であり、水理実験や簡単な計算から、越波と人の転倒を定量的に検討している。第2章では、越波水の運動や人の転倒、越波と人の安全について既往の研究を紹介している。第3章では、越波と人の危険の概念についてまとめており、本報告で対象とする危険の全体的な位置づけを明らかにしている。また、越波時における人の転倒の特徴を検討し、転倒現象を簡単に力の釣合からモデル化している。次に、第4章では、防波堤上の越波状況を定常流として実スケールで再現し、実際の人を対象にした実物実験を実施して、転倒モデルの妥当性を検討している。第5章では、転倒モデルを用いて、人の向きや床面と靴との摩擦係数などと人の転倒限界の関係を検討しており、転倒限界時の打ち上げ高さなどを明らかにしている。第6章では、転倒限界条件を実際に現地に適用させるために、波の不規則性に対する考え方を示している。さらに、防波堤の断面を想定して、波浪条件と人の危険性を定量的に検討している。

2. 既往の研究

防波堤は、従来より安全上の観点から人の立ち入りを禁止してきたために、越波に対する人の安全性に関する研究はほとんど行われていない。また、人の立ち入りを考えている護岸でも、人の安全を考慮した越波流量の設定などについての研究が行われた例があるものの、その数は少ない。したがって、本報告と直接類似する研究は少ないが、既往の研究の中で関連する項目を挙げると、

- ① 越波水の運動に関する研究
- ② 人の転倒に関する研究
- ③ 越波と人の安全に関する研究

に分けることができる。ここでは、これら三つの項目に対して既往の研究を説明した。以下それぞれの概要を説明する。

- (1) 越波水の運動に関する研究

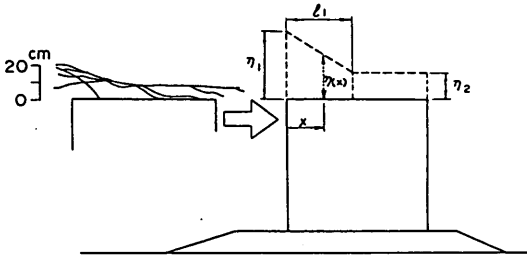


図-1 越波水の運動のモデル(越流時)の概要

著者ら¹⁾は、防波堤上を越波する現象について、基礎的な研究を行っており、波浪条件や防波堤の形状による越波特性を系統的な水理模型実験によって明らかにしている。越波現象は、堤体前面で越波水が打ち上がってから天端面に落下するまでの「打ち込み時」と、その後の天端上を越波水が流れる「越流時」の二つに分類することで、重複波領域から砕波領域まで連続的に考えることができることを示している。本研究で対象としている人の転倒が生じる始める状況は比較的越波初期であり、越流時の現象が卓越している状況と考えられる。図-1は、越流時の状況と越波水の運動モデル(越流時のモデル)の概要を示したものである。越流時における越波水の運動のモデルは、堤体前面での最大水位 η_1 が最も基本的なパラメータであり、 η_1 を用いて越波時の最大水位や最大流速が計算できる。なお、 η_1 は下式に示すように、天端高さ、波高、前面水深などから求められる。

$$\eta_1 = KH - h_c \quad (1)$$

$$K = \frac{1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c' / h_m}}{2} \quad (2)$$

$$h_c' = \frac{H/h_m}{2 \frac{H}{h_m} - \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c / h_m}}{2\alpha_1}} h_c \quad (3)$$

$$h_m = \begin{cases} d & : B_M/L \geq 0.16 \\ d + (h - d) \frac{0.16 - B_M/L}{0.05} & : 0.11 \leq B_M/L < 0.16 \\ h & : 0.11 < B_M/L \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 α_1 : 防波堤形式による補正係数、 h_c : 天端高さ、 h_m : マウンド高さを考慮した換算水深、 B_M : マウンドの肩幅、 L : 堤体前面水深における波長、 d : マウ

ンド上の水深、 h : 堤体前面における水深、 K : 波頂高比(静水面からの打ち上げ高さ R を波高 H で無次元化したもの R/H)

菅原ら²⁾は、著者ら¹⁾の混成防波堤上の越波水の運動に関する基礎的な研究を、スリットケーソン堤や消波ブロック被覆堤に適用範囲を広げるために、砕波領域を含んだ水理模型実験を実施している。これによると、防波堤形式による補正係数 α_1 は、下式のように示されている。

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1.0 & : \text{直立堤, 混成堤} \\ 0.5 & : \text{消波ブロック被覆堤} \\ 0.5 & : \text{上床版なしスリットケーソン堤} \\ 0.5 \sim 1.0 & : \text{上床版ありスリットケーソン堤} \end{cases} \quad (5)$$

越流時の最大水位は、前掲の図-1の破線に示すように堤体前面からある範囲まで減少し、それより港内側がほぼ一定水位となる特徴がある。したがって、港外側端より x の距離の場所での最大水位 $\eta(x)$ は、堤体の港外側端で打ち上げ高さを η_1 、港外側端からの最大水位の変化距離を l_1 として、式(6)で示している。また、越流時の流速 $U(x)$ は、広頂せきの考え方を参考にして η_1 から最大流量 q_{max} を求めて、連続の式を用いて式(8)のように表している。なお、同じ越波条件の場合には、防波堤上の全ての位置で最大流量 q_{max} を一定としており、 η_2 の領域の水位が η_1 の0.4倍になっているために、 η_2 の領域の流速は港外側端 (η_1 の領域) に比べて2.5倍になる。また、港外側端と港内側(最大水位が η_2 の領域)の水位が同じになる条件を比較すると、打ち上げ高さが異なり、港内側における流速が港外側端に比べて4.0倍になる。

$$\eta(x) = \begin{cases} \frac{l_1 - 0.6x}{l_1} \eta_1 & : x < l_1 \\ 0.4\eta_1 & : x \geq l_1 \end{cases} \quad (6)$$

$$l_1 = C_m \sqrt{\frac{1.2\eta_1^2}{g(\eta_1 + h_c)}} \quad (7)$$

$$U(x) = q_{max} / \eta(x) = (C_1 \cdot \alpha_2 \cdot \eta_1^{3/2}) / \eta(x) = C_1 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_2 \cdot \eta(x)^{1/2} \quad (8)$$

$$\alpha_3 = \begin{cases} \{l_1 / (l_1 - 0.6x)\}^{3/2} & : x < l_1 \\ 4.0 & : x \geq l_1 \end{cases} \quad (9)$$

ここに、 α_2 : 水深波高比によって変化する流量係数の

越波時における防波堤上の人の転倒に関する研究
 ～親水性港湾構造物に関する水工的研究(第2報)～

補正係数(5章での検討では1.12の一定値と仮定), a_s : 防波堤の位置による補正係数, C_f : 流量係数($1.61 \text{ m}^{0.5}$ /s), C_m : 水深 h_m における波速, g : 重力加速度

(2) 人の転倒に関連する研究

流れ中における人の転倒を直接的に取り扱った研究は、著者らの調査の範囲ではなかった。ただし、人の転倒を検討する際には、人に作用する流体力が重要であり、流水中の物体に作用する力は、古くから多くの研究が行われている。その力は表面抵抗、造波抵抗および渦抵抗に大別することができる。造波抵抗および渦抵抗は、物体の形状などによって変化し、それらを分離して考えることが困難なことから、全体抵抗すなわち抗力として表されている。また、人の脚の断面形状は円柱に類似しており、抗力に対して表面抵抗が比較的小さいことから、人に作用する力は抗力のみを考えればよい。一般に、抗力は流速の二乗と流れ中の投影面積、および抗力係数によって表され、抗力係数は物体の形状や粗度、流れの方向、レイノルズ数などにより変化する特徴がある。例えば、円柱の抗力係数⁹⁾は、レイノルズ数によって変化するが、 $10^3 < Re < 2 \times 10^6$ の場合には抗力係数が1～1.2のほぼ一定値となる。

人の転倒は、後掲の3.2で示すように、外力とそれに抵抗する力によって説明できる。その抵抗する力の最も基本的なパラメータの一つとして、靴と床面との摩擦係数を挙げることができる。靴と床面との摩擦係数に関する研究は、転倒による労働災害を予防することを主要な目的として、主にヨーロッパ各国やアメリカで実施されている。これらの研究では、摩擦係数測定機の開発が主要な課題の一つであり、例えば Anders. R. O¹⁰⁾ や Skiba. R⁶⁾, L. Strandberg⁷⁾ が測定機の開発研究を行っている。特に、Anders. R. O¹⁰⁾ は、数種類の床と靴を対象にして系統的な実験を実施しており、各組合せにおける動摩擦係数と静摩擦係数を測定している。これによると、コンクリート面と靴との動摩擦係数は0.2～0.7となり、床面が濡れていると摩擦係数が低下している。また、静摩擦係数はデータ数が少ないが、0.4～0.8となっている。

人の転倒では、人間自体の形状や重さも重要である。特に、人体の比重は重要なパラメータの一つであり、人体の比重から水中重量を計算できる。小川⁸⁾ は、8～12才の児童を対象として人体の比重の測定を実施しており、平均で1.05であることを示している。なお、人体の比重とは肺の中の空気を除いた状態のもので、実際に人が転倒したりする場合には1.0よりもやや小さくなると考えられる。

(3) 越波と人の安全に関する研究

福田ら⁹⁾ は、防波護岸の越波に関する現地観測を実施しており、複数の港湾技術者が越波状況のビデオ画像を通して背後地におよぼす影響度を視覚的に評価し、背後地の利用を考慮した許容越波流量を示している。これによると、護岸背後に歩行者がいる場合、50%安全度の平均越波流量が $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$ となり、自転車の場合は $2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$ となる。一方、通常の護岸の設計では、許容平均越波流量が $0.01 \sim 0.06 \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$ ^{10) 11)} で設計されており、人を考慮した越波流量は通常の値に対してかなり小さくなっていることがわかる。

3. 越波時における人の転倒の特徴と転倒モデル

3.1 越波と人の危険の概念

越波に対する防波堤上の人への危険は、越波状況などにより様々な状況が考えられる。図-2は、越波状況と防波堤上の人に対する危険を概念的に示したものである。波高が大きいほど、また越波量が多くなるほど、防波堤上の人への危険性は増す。ここでは、危険をその程度から以下の二つに分けて考えている。

- ① 感覚的な危険
- ② 実質的な危険

感覚的な危険とは、防波堤上の人への波に対する恐怖感や不安感のようなものであり、越波していない場合でも防波堤前面の波が大きく、前面での打ち上げ高さが大きくなると、人は危険を感じる。波の状況と人の恐怖感の程度は、個人の経験によって異なるが、波しぶきが天端面を濡らす状況が視覚的に認識しやすく、この状況から危険を感じる人が多いと考えられる。人が感じるこのような危険は、人に対して実質的に危険ではないが、さらに波高が大きくなると、実質的な危険の生じる可能性がある。したがって、実質的な危険を予防するためにも、感覚的な危険レベルは重要となる。著者ら¹²⁾ は、安全のために施設の利用を制限する基準として、波しぶきの発

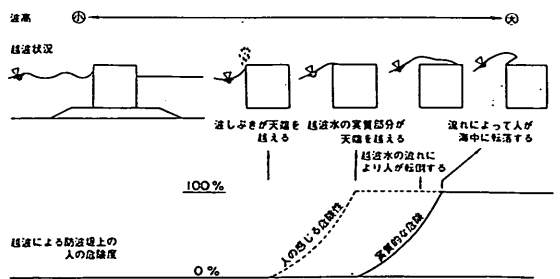


図-2 越波状況と防波堤上の人に危険

生時が有効であることを示している。

実質的な危険とは、防波堤上を越波水が流れることによって人に力が作用して転倒したり、転倒後に流されて防波堤上から海に転落するような状況であり、人の生死に関わる場合も考えられる。実質的な危険が生じ始めるときの越波状況は、比較的越波量が少なく、越波水の実質部分が天端面を越えて流れるような場合であり、越流時の現象が卓越する状況と考えられる。さらに波高が大きくなると、越波状況は堤体前面での波しぶきの発生が多くなり、堤体前面での越波水塊の打ち上げも大きくなっていく。このような状況は、人にとって非常に危険であり、一般にこのようなときに人が防波堤に立ち入ることは考えられない。また、明らかに越波しているような場合には、親水性防波堤への人の立ち入りを禁止すべきである。したがって、最も危険な状況は、例えば200波中1波だけ越波するようなとき、つまり防波堤上の人越波を予想することが困難な場合である。そこで、本報告では、実質的な危険の中で、越波が頻繁に生じない状況、つまり越波初期の越流時が卓越する状況に生じると考えられる人の転倒について検討している。

3.2 転倒の特徴とモデル化

(1) 越波時に人に作用する力

越波したときに防波堤上に人がいた場合、越波水の流れることによって人に力が作用する。このとき、防波堤上での人の転倒は、越波水による力と人の抵抗力によって決まり、越波水による力が抵抗力を上回るときに転倒が生じると考えられる。流れ中における人の「転倒モデル」とは、立っている位置での水位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によって転倒の有無を判定するものである。

越波水が流れているときに人に作用する力 F は、流れ中の比較的細い柱状の物体に作用する力と類似していると考え、流速の二乗に比例する抗力で下式のように表すことができる。

$$F = \frac{w_0}{2g} A_0 \cdot C_D U^2 \quad (10)$$

ここに、 w_0 ：海水の単位体積重量、 U ：越波水の断面平均流速

式(10)中の A_0 は、流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。なお、人の抗力の特性および抗力係数については、4.2において詳しく説明する。

(2) 転倒形態と転倒基準

外力に対する抵抗力は、人が立っている状態を想定すると、大きく二つに分けて考えることができる。一つは、流れ方向に作用する抗力に対して、靴面と床面との間に摩擦抵抗力が生じる。もう一つは、足の一端を支点とした、外力による転倒モーメントに対して、主に自重による抵抗モーメントが生じる。越波時に人が転倒する状況は、これらの抵抗力に対して、外力が上回るときに生じると考えられる。転倒の形態は、力学的なメカニズムから以下のように分類することができる。

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

(防波堤のケーソンの安定では滑動に相当する)

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

(防波堤のケーソンの安定では転倒に相当する)

人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ために、実際の抵抗力は変動する特徴がある。これらは、人が越波を予想できている場合と予想せずに突然越波した場合で異なり、予想しない場合には、予想できている場合に比べて低下するものと考えられる。転倒モデルでは、様々な状況の中で人が最も危険となる条件を想定しているため、安定性を増加させる人間の動的反応を考慮せず、静的に扱っている。また、二つの転倒形式に分けて、それぞれ静的な力の釣

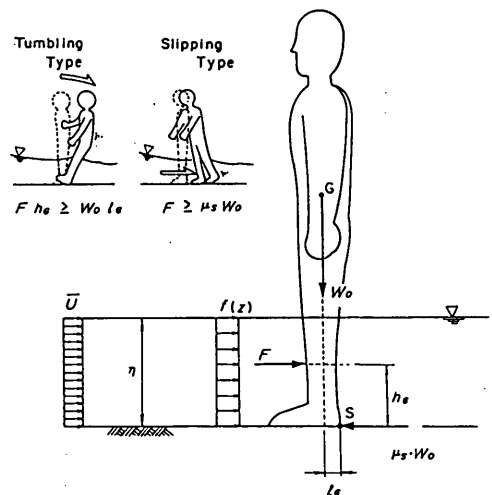


図-3 転倒モデルの概要

合から転倒条件を求めている。

図-3は、転倒モデルの概要を示したものである。滑り型の転倒条件は、床面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、水平方向の力の釣合を考えると、人に作用する抗力 F と人の水中重量 W_0 から求められる摩擦抵抗力 $\mu_s \cdot W_0$ を用いて式(11)で表すことができる。

$$F \geq \mu_s \cdot W_0 \quad (11)$$

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 が主要なパラメータとなっており、図中のS点周りのモーメントの釣合を考えると、式(12)で表すことができる。

$$F \cdot h_G \geq W_0 \cdot l_G \quad (12)$$

転倒モデルにおいて、 h_G は抗力が流れ中の体に一樣に作用していると仮定し、流れ中の面積比より力の重心から求めている。また、 l_G は人の重心の位置によって変化するが、転倒実験の結果より逆算すると、人の向き θ が 0° (人の正面方向と流れの上流方向とのなす角度)の場合につま先から踵までの長さのほぼ1/4となり、人の向きが 90° の場合に両足の中心間隔の1/4となった。

(3) 標準体型のモデル化

人間の体は複雑な形状をしており、人の投影面積や体積を詳細に関数化するのが困難である。ここでは、人の体を比較的簡単な形状に置き換えることにより、流れ中の人の投影面積 A_0 と水中重量 W_0 を関数化する。なお、水中重量 W_0 は、水中体積 V_0 と人体比重1.05から求める。人の体型は、比較的標準的なものほかに痩せ型や肥満型などがある。ここでは、比較的標準と考えられる体型についてモデル化し、痩せ型と肥満型については標準体型をもとに水平方向に縮小、または拡大して考えた。標準体型のモデルは、実体重が標準体重に対して-2.3%である後掲の転倒実験を行った被験者Aを参考に考えた。なお、標準体重は身長によってほぼ決まり、身長 h_t の標準体重が $(h_t - 100) \cdot 0.9$ で簡易的に計算される。

図-4は、モデル化した標準体型の正面図、横断面図および上面図を示したものであり、各サイズを身長 h_t で無次元化して表している。モデル化した脚は下部直径が $0.05h_t$ で上部直径 $0.08h_t$ の円錐台であり、股下の長さが $0.48h_t$ とし、足の部分は長さ $0.16h_t$ 、幅 $0.05h_t$ 、高さ $0.04h_t$ の直方体として考えた。胴体部分は横幅 $0.22h_t$ 、厚さ $0.11h_t$ の楕円柱とし、長さは股上より $0.38h_t$ とし

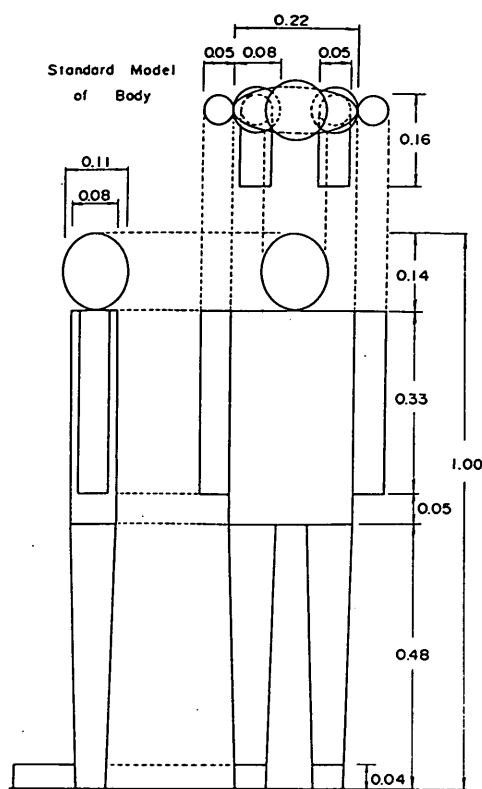


図-4 標準体型のモデル

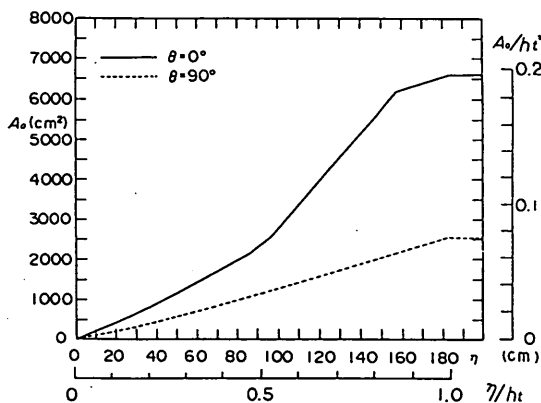


図-5 水中投影面積 ($h_t=183\text{cm}$)

た。腕部分は直径 $0.05h_t$ 、長さ $0.33h_t$ の円柱とした。また、頭部分は上下の外径 $0.14h_t$ 、左右の外径 $0.08h_t$ の楕円球としている。

水中投影面積 A_0 は、流れに対する人の向き θ によ

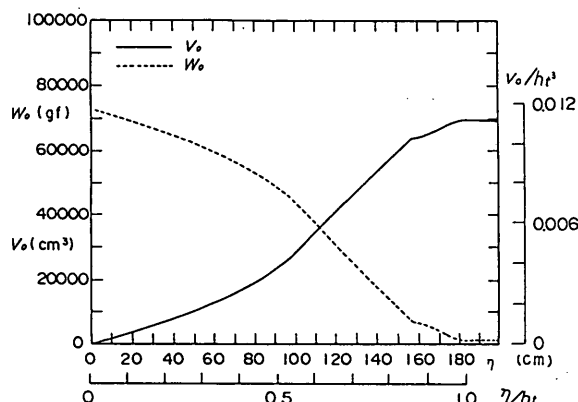


図-6 水中重量と水中体積 ($h_1=183\text{cm}$)

て変化するが、ここでは $\theta=0^\circ$ と 90° についてモデル化した。図-5は、各方向での水中投影面積の計算値を示したものであり、標準体型のモデルとなった被験者A(身長183cm)の場合である。水深が股下の場合、 θ が 90° の水中投影面積は、 θ が 0° に比べて半分程度になっている。水位が腰よりも高いとき、 θ が 0° において、水中面積の増加が大きくなり、全投影面積が $\theta=90^\circ$ の約2.5倍となる。一方、図の右側の縦軸には、水中面積 A_0 を身長 h_1^2 で無次元化したものも併記している。これによると、 θ が 0° において全身の水平投影面積は、 h_1^2 の約20%である。

図-6は、水中体積 V_0 および水中重量 W_0 の計算値を示したものであり、図-5と同様の条件である。水中体積は、水位が大きくなるほど増加し、それに伴い浮力の影響によって水中重量が減少している。例えば、水位が50cmの場合、水中体積が 0.01m^3 となり、水中重量が約62kgfとなっている。なお、実験によって転倒モデルを検証する際には、流体の単位体積重量を 1.0gf/cm^3 とし、実際の海域を対象とした計算の際には 1.03gf/cm^3 を用いた。一方、図の右側に縦軸には、水中体積 V_0 を身長 h_1^3 で無次元化したものも併記している。これによると、人の全体積は h_1^3 の約1%である。

一般に、人の身長は年齢や性別によって異なっている。図-7は、年齢と平均身長の間を男女別に示したものであり、1989年度の調査結果である。¹³⁾ 図中の実線は男性の平均身長で、点線が女性の平均身長を示している。男性では、15才まで急激に身長が大きくなり、その後緩やかに大きくなり、20才以降ではほぼ一定の身長となっている。女性においても同様の傾向があり、13才まで急激に大きくなり、16才以降ではほぼ一定の身長となっている

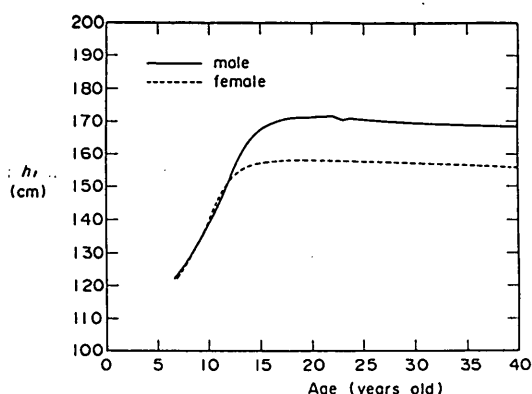


図-7 年齢と平均身長の関係

ことがわかる。例えば、10才の男性で平均身長は138.6cmであり、女性で139.5cmとなる。男女ともほぼ一定身長となっている20才では、男性で171.4cm、女性で158.1cmとなる。また、12才までは男女ともほぼ同じ身長であるが、12才以降では女性よりも男性の方が身長が大きくなる。

4. 実物実験による転倒モデルの評価

4.1 実験の概要

(1) 靴と床面との静摩擦係数の測定

a) 測定方法

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種類で行った。なお、床面は乾燥状況と湿潤状況について測定した。藻や海藻を対象とした乾燥状況とは、完全に乾燥した状況でなく、生物自体にやや水分が含んでいる状況であり、湿潤状況とは表面に水がある程度溜まっている状況を示している。藻や海藻を対象とした測定は、横須賀市の南部に位置する平作川河口の導流堤上で実施した。写真-1は、測定した導流堤であり、左側が藻で覆われており、右側が海藻で表面が薄く覆われている。また、写真-2は、実験に用いた靴であり、2種類の運動靴と2種類の革靴で行った。

計測方法は、靴の上に重錘を載荷して、最大50kgf測定可能なロードセル付きの牽引ロープで靴を引っ張り、ペンレコーダで記録した。計測は5、10、15kgの3種類の重錘を用い、重量を変えて行い、各10回繰り返し平均値を求めている。

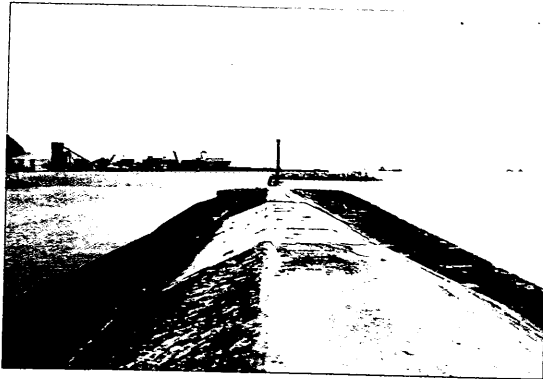


写真-1 摩擦係数の測定場所



写真-2 実験に用いた靴

図-8は、床面が乾燥状態での静摩擦係数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となる。また、通常の状況を想定している表面が粗い場合や滑らかな場合では、運動靴が革靴より摩擦係数がやや大きい。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。一般に、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。

図-9は、床面が湿潤状態での静摩擦係数を示したものである。付着物で覆われていない滑らかなコンクリートの場合、乾燥している状況と床面が湿っている状況でほとんど差がみられない。粗いコンクリート面の場合には、乾燥状況よりもばらつきが大きく、0.75～1.5となっている。表面が海藻で覆われている場合には、摩擦係数が

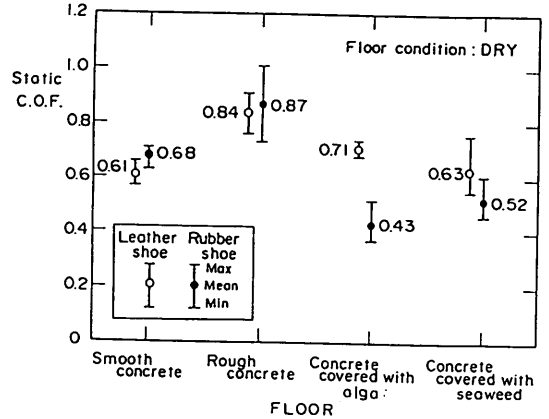


図-8 床面が乾燥状態での静摩擦係数

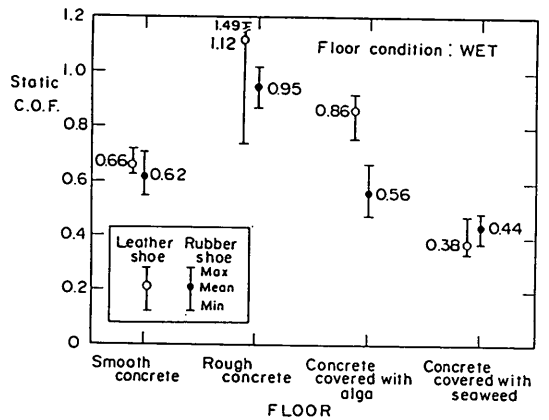


図-9 床面が湿潤状態での静摩擦係数

かなり低下するのが特徴であり、運動靴で0.38～0.49、革靴で0.34～0.48となる。また、表面が藻で覆われている状況では、乾燥状況より摩擦係数が約0.1程度大きくなっているが、測定日時の違いによる藻の付着量の相違が原因となっているものと考えられる。

越波時には床面が濡れた状況となり、付着物で覆われていない場合には、滑らかなコンクリート面を想定すると0.6を代表値と考えることができる。また、藻などの付着物で覆われた場合には、0.4程度を代表値として考えることができる。

(2) 抗力測定および転倒実験

a) 実験水路および模型

図-10に示す大型の還流水槽(20m×50m)におい

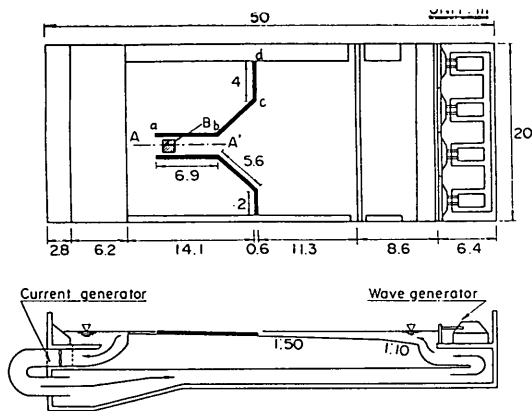


図-10 実験水槽

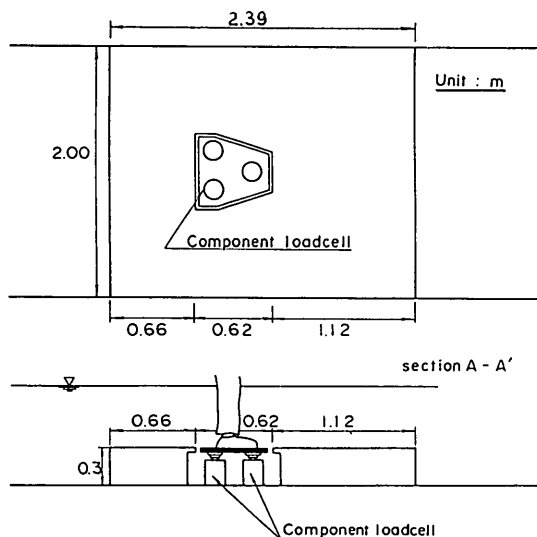


図-11 実験断面 I



写真-3 流れ発生時の水槽の状況

て実験を行った。水路床は、流れ吹き出し口付近で 1/10 勾配であり、測定部付近が 1/50 勾配となっている。水槽の下部には、入力信号に応じて翼の回転数および回転方向を変化させることのできる流れ発生装置が設置してある。この流れ発生装置は、1 台につき最大流量 150 m³/min を発生できるポンプ 4 台から構成されており、水深 1.2m で最大 42cm/s の流れを起こすことができる。実験では、現地の越波状況を実スケールで再現するために、速い流れが必要となり、水槽内に導流壁を設けて図中の B の測定部における幅を全水槽幅の 1/10 に絞った。なお、図中に示している b-d 区間の導流壁は、高さ 70cm のコンクリートブロックを用い、a-b 区間は高さ 90cm の防水性の合板を用いている。水深が深い実験ケースでは、a-b 区間において越流していないが、b-c-d 区間においてブロック上を越流する場合もある。写真-3 は、流れ発生時の水槽の状況であり、写真の右下

より左上に向かって流れている。

測定部 B には、後述の実験種類によって断面 I、II の 2 種類がある。図-11 は、断面 I を示しており、一部不透過な幅広マウンドの中に抗力測定装置を埋め込んでいる。抗力測定装置は、3 台の 2 分力計から構成されており、上面の受圧板を 3 台の 2 分力計で支持している。また、断面 II はマウンドのない場合である。

b) 実験方法および実験内容

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以下の実験を実施した。

- ① 抗力測定実験
- ② 転倒実験

抗力測定実験とは、流れ中で人に作用する力を測定するもので、抗力測定装置上に被験者が立っている状態で、水位および流速を変えて人に作用する水平力を測定した。この実験では、主に人の向き θ や足の間隔 L_f 、服装による抗力特性を検討している。人の向き θ は 0, 45, 90° の三種類で、両足の間隔は 0, 25, 50cm で行っている。また、服装は、ロングブーツとドライスーツ、スラックスの三種類で行った。ロングブーツは、表面が滑らかなゴム製で比較的素足の形状に似ており、基本的な足の形状に対する性質を検討するために用いた。ドライスーツは転倒実験の際に着用したものであり、スラックスが実際の服装を想定したものである。写真-4 は、実験で用いた三人の被験者を示しており、左から被験者 A, B, C である。なお、写真中の被験者 A はスラックス、被

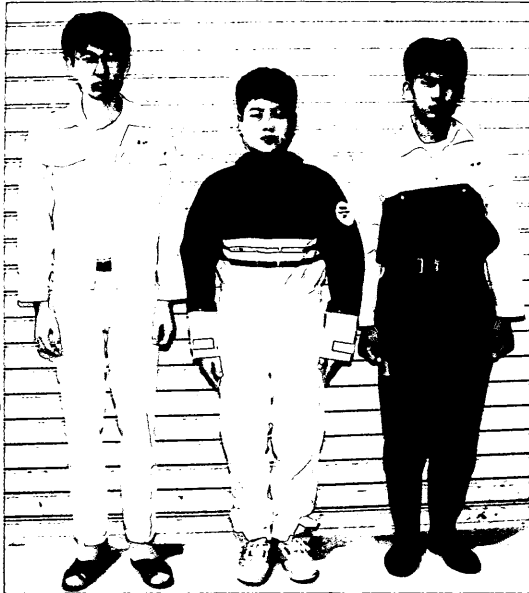


写真-4 実験で用いた三人の被験者

表-1 被験者の体格

	被験者 A	被験者 B	被験者 C
身長	183cm	164cm	174cm
体重	73kg	65kg	64kg
標準体重との差	-2.3%	12.8%	-3.9kg
股下	88cm	73cm	80cm
ウエスト	78cm	80cm	76cm

験者 B がドライスーツ、被験者 C がロングブーツを着用している。また、表-1には、それぞれの身長や体重などを示している。被験者 A は、身長が平均よりも大きい、実体重が標準体重に比べて2.3%軽く、身長に対してはほぼ標準的な体格である。被験者 B は、身長が平均的であるが、標準体重より12.8%重い。被験者 C は、身長が平均よりもやや高めで、標準体重より3.9%軽い。

転倒実験は、主に流れ中の人(被験者 A, B)が転倒するかどうかを観察するものであり、マウンドがない断面 II において水位および流速を変化させて行った。測定位置の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

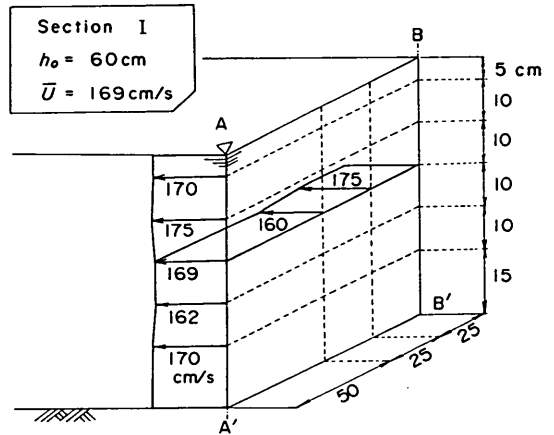


図-12 断面 I での流速分布の一例

したのもも実施しており、靴の裏面にアクリル板を張り付けて滑りやすく加工し、静摩擦係数0.37で行った。流れ中の人の体勢は、直立としゃがんだ状況で行い、直立の場合では θ が 0° , 90° , 180° 、足の間隔が25 cmで行い、しゃがんだ状況においては θ が 0° で行った。また、人は外力に対して重心位置を制御すると転倒しにくくなるので、重心の制御は以下の二通りを行っている。

- A. 重心固定
- B. 重心可変

「重心固定」とは、外力が作用したときも体勢を変えずに、重心を固定して一定の姿勢を保つものである。この条件は、人を静的に考えている転倒モデルでの仮定と同じであり、外力の作用状況によって倒れ込み型や滑り型の転倒が生じる。また、「重心可変」とは、外力が作用したときに外力の作用する方向と反対向きに体を前傾させ、転倒に対して安定性を増すものである。この条件では、倒れ込み型転倒が生じにくく、滑り型の転倒のみとなった。

- c) 水槽中の流れ

前掲の図-10に示すように水槽内には、流れを制御するハの字型の導流堤があり、最狭部の水路内では様な流速が得られない場所もある。測定部は、極力様な流速が得られるように隅角部より5 m下流側の位置としている。図-12は、マウンドがある断面 I での流速分布の一例を示しており、初期水位60 cm、水路中央の断面平均流速169 cm/sの条件である。B-B'は導流板の位置、A-A'が水路の中央を示している。流速分布はA-A'断面ではほぼ一様となり、最も大きな変動でも4%程度である。また、A-B断面方向でもほぼ様な流速分

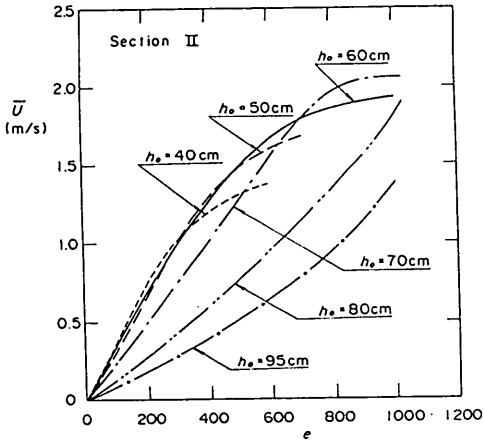


図-13 ポンプの入力レベルと流速

布となり、最大5%程度の変動が認められる。マウンドがない断面IIにおいても同様の傾向となり、測定位置ではほぼ一様の流速分布が得られている。

図-13は、ポンプの入力レベル e と測定位置での流速の関係を示しており、断面IIの条件である。横軸にポンプの入力レベルを、また縦軸に流速をとっている。なお、流速は、ポンプ始動後ある程度時間を経過させ、一定値に収束したときのものである。各初期水深ともポンプの入力レベルが大きくなると、流速も大きくなる傾向がある。また、初期水深70cm以下では、ある程度流速が大きくなると流速の発生効率が低下している。初期水深80cm以上では、導流壁のb-d区間での越流が多くなるために、初期水深70cm以下に比べて、流速の発生効率の低下が認められる。

図-14は、ポンプの入力レベルと測定位置における初期水深からの定常水位の変化量の関係を示しており、断面IIの条件である。横軸にポンプの入力レベルを、また縦軸に水位の変化量をとっている。水位は、流速と同様、ポンプ始動後一定時間変化し、その後定常状態となる。測定位置における定常水位は、ポンプの入力レベルが上昇するとやや低下するが、ある程度ポンプの入力レベルが大きくなると逆に初期水位よりも大きくなる傾向がある。

4.2 流れ中の人に作用する力

(1) 水位および流速と抗力

図-15は、水位および流速と抗力の時間変化を示した例であり、被験者Bで初期水深50cm、最大流速175

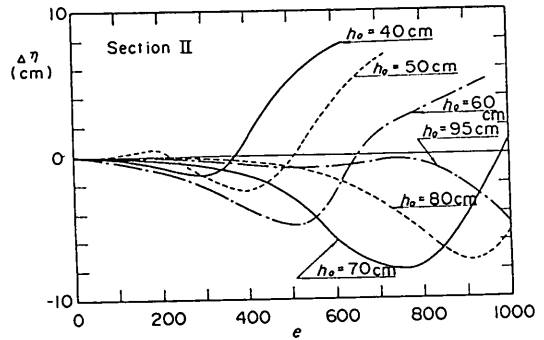


図-14 ポンプの入力レベルと定常水位の変化量

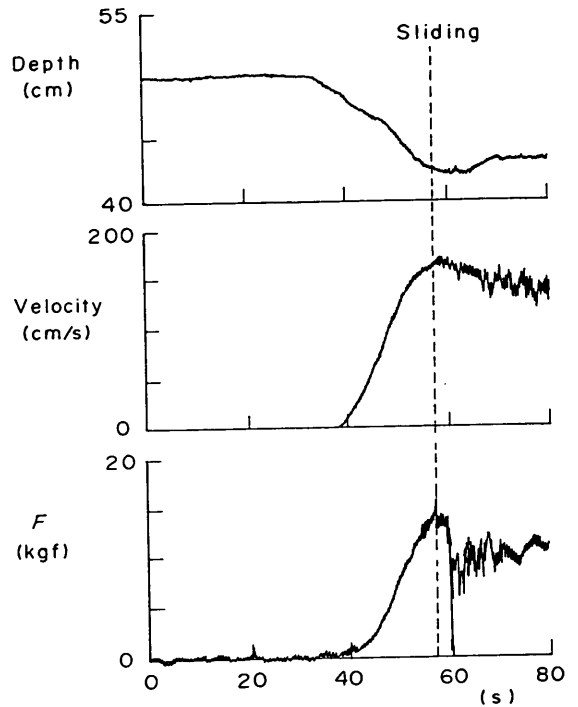


図-15 水位および流速と抗力の時間変化

cm/sの条件である。流れ発生装置は35sに始動しており、約20秒間で徐々にポンプの回転数を上げている。その間、測定位置での水位は時間とともにやや低下し、流速と人に作用する抗力が増加しているのがわかる。流れ発生より22秒後の約57sにおいて抗力は約14kgfとなり、滑り型の転倒が生じている。このとき、流速は165cm/sで水位が42.5cmであり、流れ中の投影面積が775.4cm²で、抗力係数が1.3となった。なお、この場合

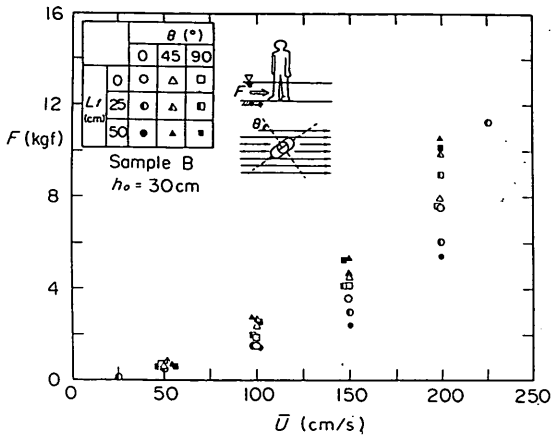


図-16 流速と抗力の関係(被験者B)

775.4cm²で、抗力係数が1.3となった。なお、この場合は、床面と靴との摩擦係数が0.3とかなり滑り易くしたものであり、転倒時における摩擦抵抗力が14.1kgfとなり、摩擦抵抗力とはほぼ同じ外力が作用したときに、滑り型の転倒が生じている。実際の抗力測定実験では、摩擦係数が0.8程度で、しかも重心可変の条件としており、転倒しない条件で行っている。また、抗力の測定は、水位および流速が定常状態となったときに行っている。

図-16は、各条件における流速と抗力について示しており、初期水深30cmで被験者Bがロングブーツを履いている場合である。抗力は、水位や流速が同じ条件でも人の向き θ や足の間隔 L_f によって異なっている。例えば、足の間隔 L_f が0cmで流速が2m/sのとき約8kgfの水平力が作用しており、 L_f が50cmで θ が90°のとき約10kgfの水平力となる。また、抗力は流速とともに大きくなる傾向がある。例えば、足の間隔 L_f が0cmで流速が1m/sのとき約2kgfの水平力が作用しており、流速が2m/sの場合は、抗力が1m/sの場合の4倍となり、人に作用している力が流速の二乗に比例しているのがわかる。

(2) 足の間隔がない場合の人の抗力係数

図-17は、 $\theta = 0^\circ$ で $L_f = 0$ cmの条件における人の抗力係数を示している。縦軸は実測の抗力と流速、水中投影面積から計算した抗力係数であり、横軸は水位 η を股下の長さ h_f で無次元化したものを用いている。なお、水中の投影面積は、服装や流速によって変化するために、実際の値を用いるのが難しく、服装による投影面積の増加を考慮せずに素足の形状から計算したのものを用いている。抗力係数は被験者による違いがほとんどないが、服

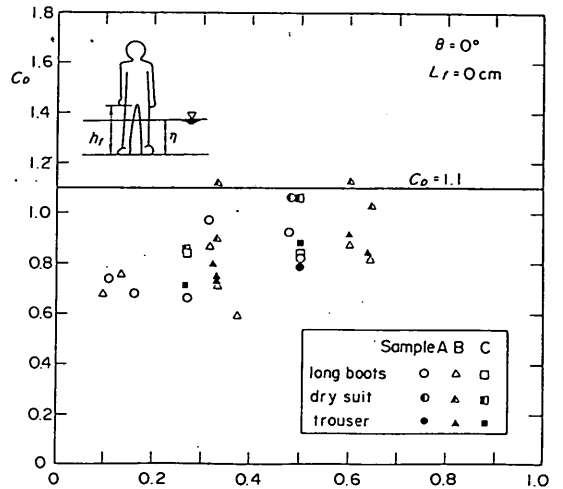


図-17 人の抗力係数($\theta = 0^\circ$, $L_f = 0$ cm)

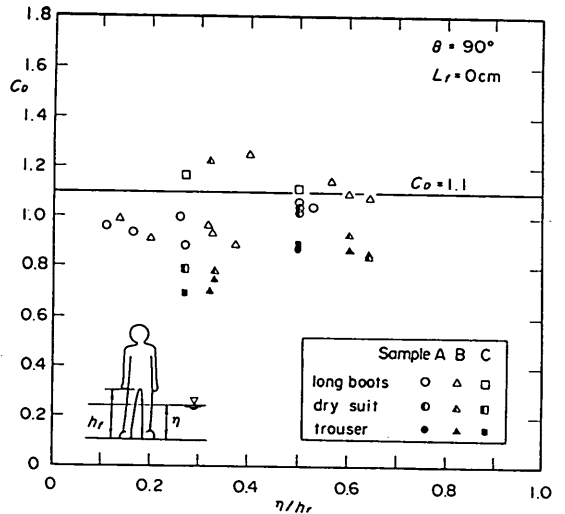


図-18 人の抗力係数($\theta = 90^\circ$, $L_f = 0$ cm)

装によってやや違いがある。服装による抗力係数の相違は、投影面積の違いを考慮していないためと考えられる。ドライスーツでは抗力係数が0.9~1.15、またロングブーツやスラックスでは0.6~1.0となっており、全体的にばらつきが大きくなっているのがわかる。また、実際に転倒が生じる水深は、後述の転倒実験の結果から η/h_f が0.4以上であり、その範囲においてドライスーツを着用したときの抗力係数がおおむね1.1と最も大きくなっている。したがって、転倒モデルに用いる抗力係数は、足

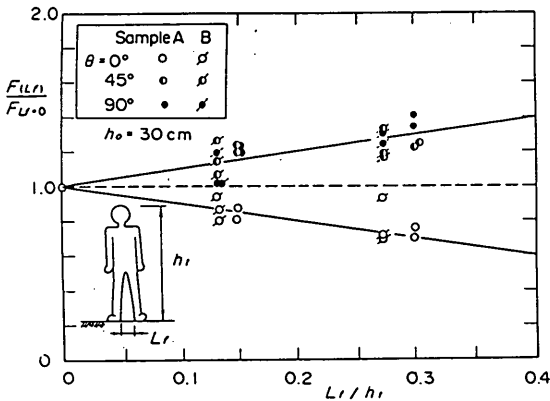


図-19 足の間隔 L_j による抗力の変化
(初期水深30cm)

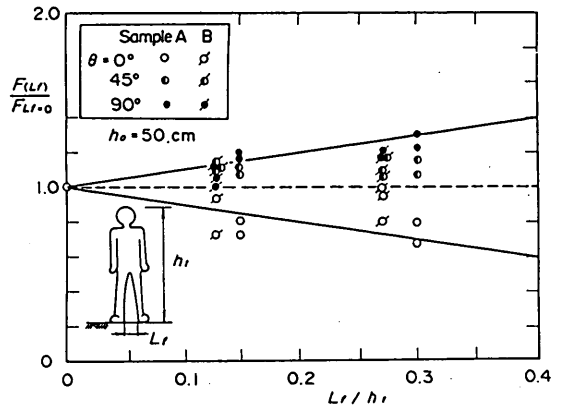


図-20 足の間隔 L_j による抗力の変化
(初期水深50cm)

の間隔がなく θ が 0° のとき、水深によらずに1.1の一定値と考えた。

図-18は、 $\theta = 90^\circ$ で $L_j = 0$ cmの条件における人の抗力係数を示しており、縦軸と横軸は図-17と同様である。 θ が 0° の条件と同様に、被験者による違いは少ないが、服装による違いがややある。ロングブーツの場合の抗力係数は0.9~1.2、またドライスーツやスラックスの場合が0.7~1.0となっている。転倒モデルに用いる際の抗力係数は、転倒時の条件である η/h_i が0.4以上を想定して、水深によらずに1.1の一定値と考えた。

(3) 足の間隔や向きによる抗力と抗力係数の変化

図-19は、足の間隔 L_j による抗力の変化を示しており、初期水深30cmの条件である。なお、横軸は足の間隔 L_j を身長 h_i で無次元化したもので、縦軸が足の間隔 L_j における抗力 $F(L_j)$ を L_j が0cmの同条件での抗力 $F_{L_j=0}$ で除した値を用いている。人の向きによって足の間隔による抗力の変化の特徴が異なっているのがわかる。例えば、人の向きが 0° では、 L_j/h_i が0.15のときに $F(L_j)/F_{L_j=0}$ が約0.8、 L_j/h_i が0.30のときに $F(L_j)/F_{L_j=0}$ が約0.7となり、足の間隔が大きいくほど抗力が低下しているのがわかる。また、人の向き θ が 45° および 90° では、両者ともほぼ同様の傾向になり、足の間隔が大きいくほど抗力が大きくなる。すなわち、 L_j/h_i が0.15のときに $F(L_j)/F_{L_j=0}$ が約1.2、 L_j/h_i が0.30のときに $F(L_j)/F_{L_j=0}$ が約1.3となっている。足の間隔による抗力の違いは、二本の足に伴う流れの相互干渉の影響が主な原因と考えられる。特に、 θ が 0° と 90° の場合には、 L_j によって投影面積 A_0 は変わらないため、抗力係数が変化していると考えられる。 θ が 0° の場合、足を流れに

対して並列に配置した二本の円柱と類似していると考えることができ、円柱の間隔が狭いほど、相互干渉の影響で抗力係数が大きくなるというこれまでの研究結果¹⁴⁾と一致している。また、 θ が 90° の場合、流れに対して直列に配置した円柱と類似して考えることができ、間隔が広いほど、相互干渉の影響で抗力係数が大きくなる¹⁴⁾ことと一致している。

図-20は、初期水深50cmにおける足の間隔 L_j による抗力の変化を示したものであり、図-19と同様の傾向になっている。したがって、足の間隔による抗力の変化の特徴は、水深による違いが少ないと考えられ、 L_j の違いによる抗力係数の違いを補正係数 δ で示すことにした。 δ は図の縦軸の $F(L_j)/F_{L_j=0}$ に対応するものであり、これを直線近似することによって、式(13)となった。すなわち、足の間隔や向きを考慮した抗力係数 C_D は、各向きにおいて足の間隔がない条件での抗力係数 C_{D0} と補正係数 δ を用いて、式(14)で表すことができる。なお、図-19、20中の直線は式(13)による計算値を示している。

$$\delta = F(L_j)/F_{L_j=0} = \begin{cases} 1 - L_j/h_i; & \theta = 0^\circ \\ 1 + L_j/h_i; & \theta = 90^\circ \end{cases} \quad (13)$$

$$C_D = \delta \cdot C_{D0} \quad (14)$$

ここに、 C_{D0} : 足の間隔がない場合での抗力係数 (θ が $0^\circ, 90^\circ$ とともに1.1)

図-21は、式(14)で補正した抗力係数を用いた抗力の計算値と実験値の比較をしたものであり、抗力測定実験の全データを示している。横軸には抗力の実験値を、また縦軸に計算値をとっており、図中の実線は計算値と実験値が一致したときのものである。実験における抗力が

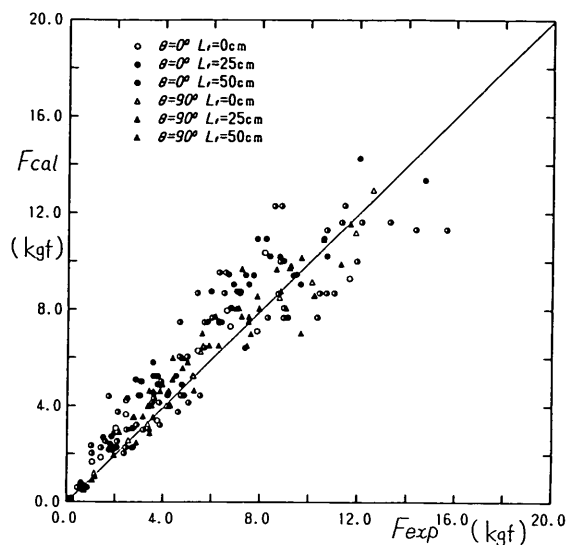


図-21 抗力の実験値と計算値

比較的小さい5 kgf 以下では、やや計算値の方が大きくなっているが、抗力が比較的大きな領域においては、平均的にみると計算値と実験値が一致しているのがわかる。したがって、人の向きや足の間隔によって補正した抗力係数がおおむね妥当であることがわかる。

4.3 転倒実験と転倒モデルとの比較

(1) 転倒の状況

写真-5(a)～(d)は、倒れ込み型転倒時の状況を示したものであり、重心固定の条件である。被験者の前の3本のロープは、体との距離を確認し、姿勢を保つための目標物である。(a)はポンプ始動直後における転倒前の状況であり、(b)で転倒限界に達し、転倒し始めている。その後、(c)、(d)と流れの下流方向に倒れ込んでいる様子が見える。写真の実験条件では、足の位置を固定しているために、倒れ込んで転倒が生じているが、実際に足の位置を変えることを許容すると、下流方向に片足を後退させて転倒しない場合も考えられる。ただし、その場合、両足の荷重配分が変化して、荷重が減少した片方の足が滑り、滑り型の転倒が生じやすくなることもある。なお、実際の重心固定での実験では、被験者の安全を確保するために、倒れ込み型転倒が生じ始めたら足を移動を許容している。その場合、足の移動によって足の荷重配分が変化し、滑り型転倒が生じるものもあったが、転倒の分類は転倒のきっかけとなった倒れ込み型とした。

写真-6(a)～(d)は、滑り型転倒時の状況を示したものであり、重心可変の条件である。転倒前の(a)の状況では、重心位置を変えて安定を保つために、写真-5(a)

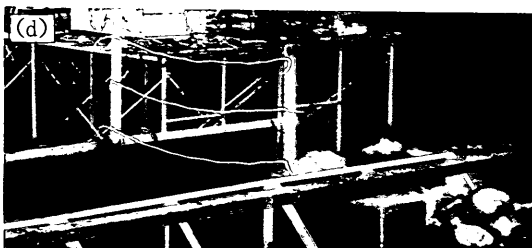
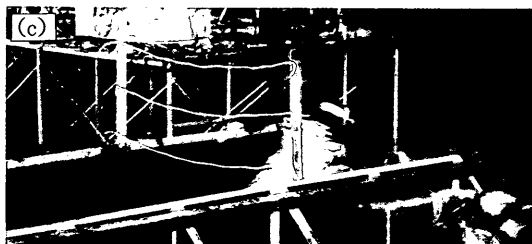
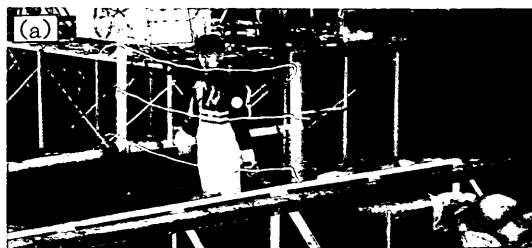


写真-5 倒れ込み型転倒の状況

に比べて流れの上流方向に重心があるのが見える。(b)でやや滑り始め、一旦スライディングが生じ始めると、靴と床面との摩擦係数が低下するために、(c)のように急激に滑り型の転倒が生じ、流れの上流方向に倒れ込んでいるのがわかる。

(2) 向きや姿勢による転倒特性

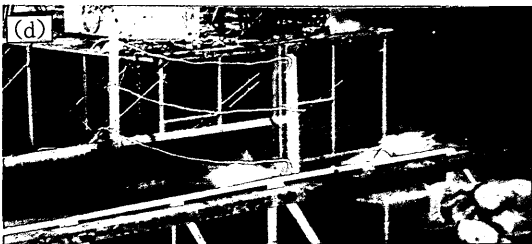
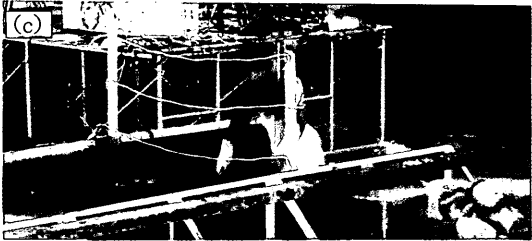
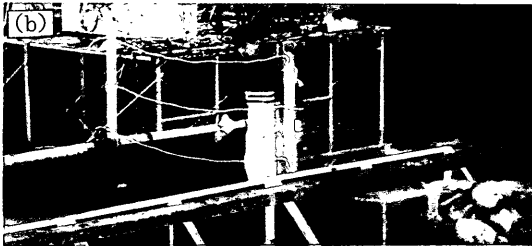
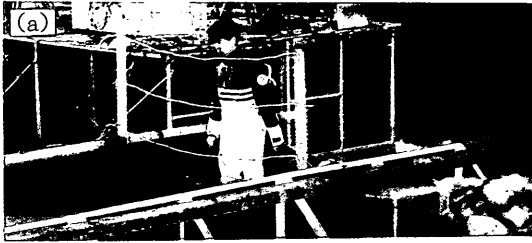


写真-6 滑り型転倒の状況

図-22は、水位および流量と転倒の関係について示しており、被験者Aで $\theta = 0^\circ$ 、摩擦係数0.37、立った状態、重心固定の条件のものである。横軸は水位、また縦軸が流量をとっており、図中の白丸が転倒しなかったもの、それ以外が各転倒形式で転倒したものを示している。転倒は水位によらず、ある一定以上の流量で生じて

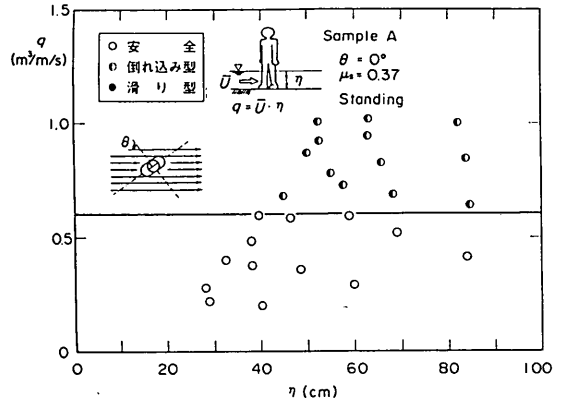


図-22 水位および流量と転倒（立っている状態）

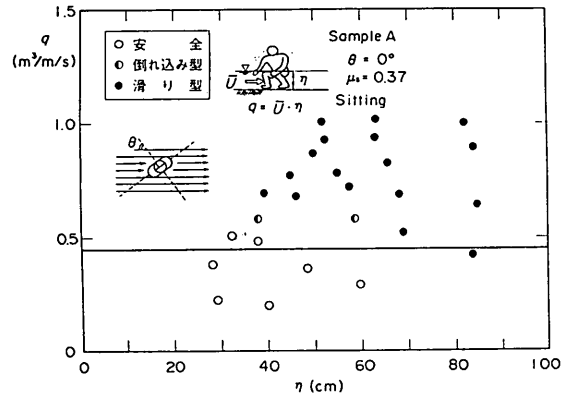


図-23 水位および流量と転倒（しゃがんだ状態）

おり、この条件では約 $0.6\text{m}^3/\text{m/s}$ が転倒の限界になっている。また、転倒形式は、すべて倒れ込み型となった。

図-23は、図-22と同様の関係について示しており、被験者Aで $\theta = 0^\circ$ 、摩擦係数0.37、しゃがんだ状態、重心固定の条件のものである。図-22と同様に、ある一定以上の流量で転倒が生じており、約 $0.45\text{m}^3/\text{m/s}$ が転倒の限界になっている。座っている状態では、立っている状態に比べて同じ水位の時に水中重量が減少し、流れ中の投影面積が増加するために、人に作用する抗力が増加する。したがって、転倒する流量の限界値は75%程度となり、立っているときよりも転倒しやすくなっている。また、この条件での転倒は、滑り型が最も多かった。

図-24は、人の向き θ や体勢、靴と床面との摩擦係数の違いによる転倒限界流量の実験値をまとめたものであり、重心が固定している条件のものを示している。な

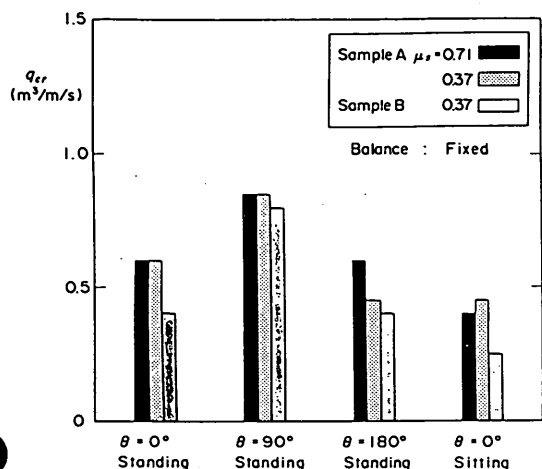


図-24 転倒限界時の流量

お、足の間隔は全て25cmである。 θ が 0° で立っている条件では、被験者Aは摩擦係数に関わらずに転倒限界が $0.6\text{m}^3/\text{m/s}$ であり、被験者Bが $0.4\text{m}^3/\text{m/s}$ となっている。 θ が 90° の立っている条件では、転倒限界の流量が全て $0.85\text{m}^3/\text{m/s}$ 程度となり、 θ が 0° よりも転倒しにくくなっていることがわかる。 θ が 180° で立っている条件では、 θ が 0° と流れ中の投影面積が同じになるために、人に作用する抗力もほぼ同程度と考えられ、実験での転倒限界流量はおおむね θ が 0° と一致している。しゃがんでいる条件では、前掲の図-23で説明したように、立っている条件に比べて転倒限界の流量が小さくなっており、 $0.25\sim 0.45\text{m}^3/\text{m/s}$ となっている。また、各向きや姿勢の条件において、被験者Bの転倒限界となる流量は、被験者Aに比べて小さくなる傾向がある。これは、身長による違いが主な原因と考えられ、同じ水深でも身長が低いほうが、流れ中に占める人の体積の割合は大きくなり、転倒しやすくなっていることが考えられる。

(3) 転倒モデルの妥当性

図-25は、水深および流速に対する転倒状況を示しており、外力に対して重心の移動を許容している「重心可変」の条件である。なお、実験条件は被験者Bが立っている状況で $\theta = 0^\circ$ 、 $L_f = 25\text{cm}$ 、 $\mu_s = 0.37$ である。また、図中の実線は、前掲の式(1)による滑り型の転倒限界の計算値を示したものであり、計算では摩擦係数を0.37、抗力係数が式(4)から求めた値0.95としている。この条件では、転倒時の形式が滑り型のみとなるので、滑り型の転倒モデルの計算値と実験値を比較している。実験

では、水深50cmのときに転倒限界の流速が約 180cm/s 、また水深65cmのとき転倒限界の流速が約 120cm/s となっており、水深が大きくなるほど転倒限界の流速が小さくなっている。転倒限界の計算値は、実験値と同様に水深が大きくなるほど転倒限界流速も小さく、水深50cmで転倒限界の流速が 178cm/s 、水深65cmで 144cm/s となっている。転倒限界流速の計算値は、実験における転倒限界と比べてやや大きくなっているが、ほぼ転倒限界を表している。

図-26は、図-25と同様の関係を示したものであり「重心固定」の場合である。なお、実験条件は被験者Aが立っている状況で $\theta = 0^\circ$ 、 $L_f = 25\text{cm}$ 、 $\mu_s = 0.37$ の場合である。図中の実線は、倒れ込み型転倒モデルによる転倒限界の計算結果である。重心固定の転倒限界は、重心可変の場合に比べて小さく、やや転倒しやすくなっている。これは、人間が外力に対して重心を制御すると

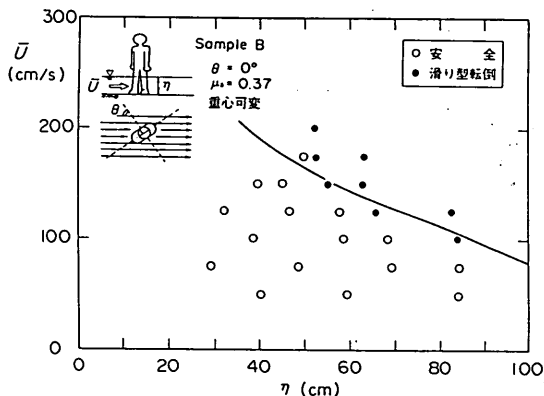


図-25 水位および流速に対する転倒状況
(重心可変、 $\theta = 0^\circ$)

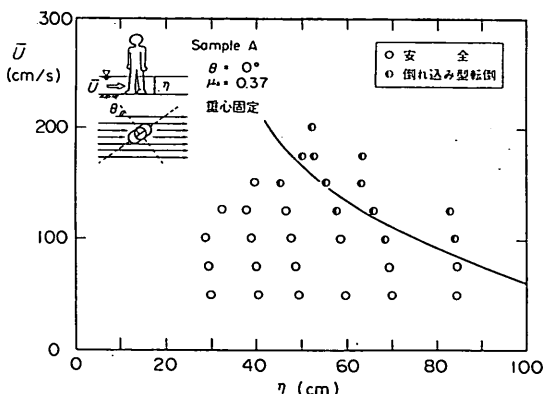


図-26 水位および流速に対する転倒状況
(重心固定、 $\theta = 0^\circ$)

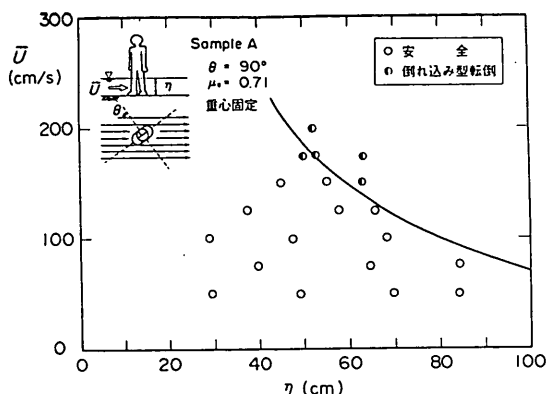


図-27 水位および流速に対する転倒状況
(重心固定, $\theta = 90^\circ$)

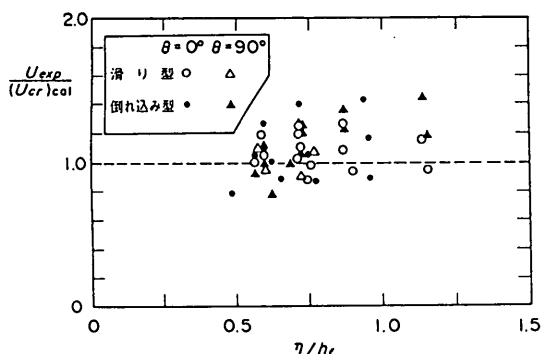


図-28 転倒時の流速の実験値と転倒限界流速の計算値の比

安定性を増すこととも一致している。実験では、水深50 cmのとき約170 cm/s、水深65 cmのとき約100 cm/sが転倒限界の流速となっており、すべて倒れ込み型の転倒となっているのが特徴である。また、実験と計算の転倒限界はほぼ一致している。

図-27は、図-26と同様の関係を示したものであるが、 $\theta = 90^\circ$ でかつ摩擦係数が0.71とやや大きい場合である。なお、実験条件は被験者Aが立っている状況で「重心固定」、 $L_f = 25$ cmの場合である。また、図中の実線は、倒れ込み型の転倒限界の計算値を示している。転倒限界の流速は、水深50 cmのとき約170 cm/sで、水深65 cmのとき約150 cm/sとなり、 θ が 0° の場合と比べてやや大きく、転倒しにくくなっている。転倒形式は倒れ込み型となり、この実験条件において滑り型の転倒がなかった。また、計算による倒れ込み型の転倒限界は、実験での転倒限界とほぼ一致しているのがわかる。

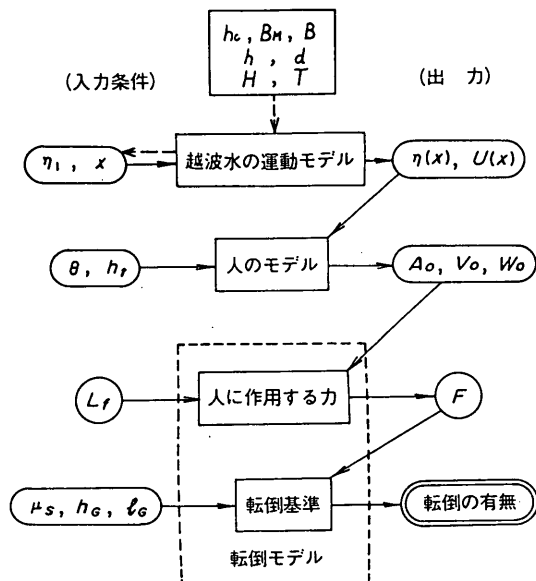


図-29 計算のフロー

図-28は、実験と計算との転倒限界を比較したものであり、重心可変の条件で生じる滑り型転倒と、重心固定の条件で生じる倒れ込み型転倒について計算モデルの妥当性を検討したものである。横軸には水位 η を股下の長さ h_f で無次元化したものを、縦軸には実験において転倒したときの流速 U_{exp} と同じ水位における転倒限界流速の計算値 $(U_{cr})_{cal}$ との比 $U_{exp} / (U_{cr})_{cal}$ をとっている。また、 U_{exp} は転倒の限界値でなく、転倒が生じている全てのデータを対象としている。したがって、転倒モデルによる転倒限界が実験結果と一致する場合には、 $U_{exp} / (U_{cr})_{cal}$ が1.0を境にして1.0以上に分布する。滑り型転倒では、 θ が 0° のとき $U_{exp} / (U_{cr})_{cal}$ が0.95~1.3となり、 θ が 90° のとき0.9~1.1となっている。また、倒れ込み型転倒では、 θ が 0° のとき $U_{exp} / (U_{cr})_{cal}$ が0.8~1.45となり、 θ が 90° のとき0.9~1.45となっている。 $U_{exp} / (U_{cr})_{cal}$ はやや1.0を下回るものもあるが、平均的にみると1.0以上に分布しており、ほぼ転倒モデルによる転倒限界が実験と一致していることがわかる。

5. 転倒モデルによる転倒限界条件の検討

5.1 計算の方法

本章では、身長や摩擦係数、人の向き、足の間隔の違いによる転倒限界条件を転倒モデルの計算によって検討した。ここでは、単に水位や流速の流れの条件と人の転倒について基本的な検討を行うだけでなく、実際の越波

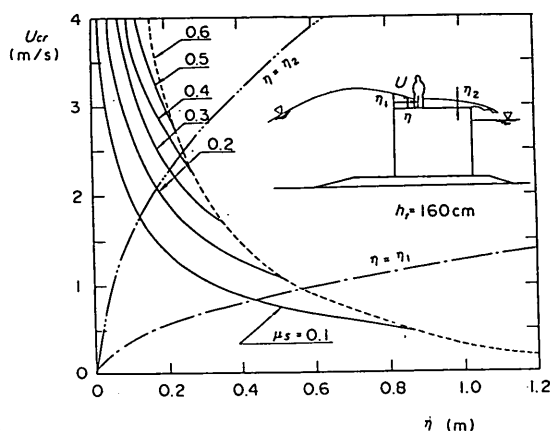


図-30 静摩擦係数による転倒限界の変化

状況を想定して、その時の堤体前面での打ち上げ高さに関係づけて、人の転倒限界を検討している。

図-29は、基本的な計算の流れをまとめたものである。堤体前面での打ち上げ高さ η_1 と防波堤上の位置 x (港外側端からの距離)から、越波水の運動モデル(前掲の式(6)と(8))を用いて水位 $\eta(x)$ と流速 $U(x)$ が計算される。次に、人の向き θ と身長 h_i を初期条件として、人のモデルから水中投影面積 A_0 、水中体積 V_0 、および水中重量 W_0 が計算される。また、 A_0 と $U(x)$ 、および θ と L_f から式(13)と(14)を用いて補正した抗力係数を用いて、式(10)から人に作用する抗力が求められ、前掲の式(11)と(12)に示す転倒基準から転倒の有無が計算される。なお、転倒基準での入力条件となっている h_0 (抗力の重心位置を示すパラメータ)は、抗力が等分布になっていると考えることで、人のモデルから計算できる。また、 l_0 (人の重心位置を示すパラメータ)は、 θ が 0° のとき足のつま先から踵までの長さの $1/4$ とし、 θ が 90° のとき両足の間隔の $1/4$ としており、人のモデルから計算できる。したがって、計算上の未知数は η_1 、 x 、 θ 、 h_0 、 L_f 、 μ_s であり、各条件を仮定しながら計算を行っている。なお、堤体形状や波浪条件から η_1 は求めることができる。堤体形状や波浪条件と転倒限界の関係については、6.3において検討する。したがって、ここでは主に、転倒限界時の打ち上げ高さについて検討している。

5.2 転倒限界の特性

(1) 摩擦係数による変化

図-30は、床面と靴との静摩擦係数による転倒限界の変化を示したものであり、身長160cmの場合である。図中の実線は滑り型転倒が生じているときの転倒限界を

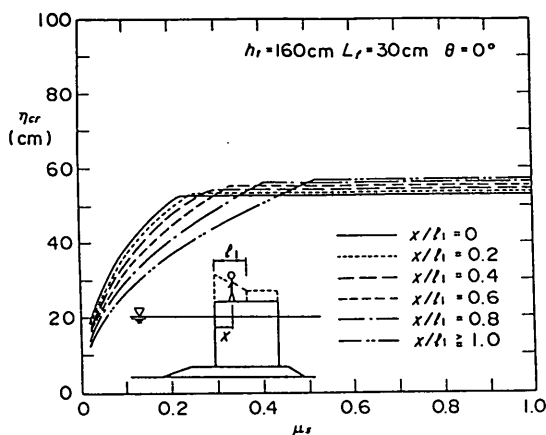


図-31 静摩擦係数と転倒限界時の打ち上げ高さ

示しており、点線は倒れ込み型転倒が生じているときの転倒限界を示したものである。比較的水位が低いときに滑り型の転倒が卓越しており、水位が高いときに倒れ込み型の転倒が卓越している。例えば、摩擦係数が0.3の場合、点線と実線の交点である水位35cm、流速1.7m/sが滑り型と倒れ込み型の境界となっており、それよりも水位が低いときに滑り型の転倒が生じる。また、滑り型の転倒が生じる範囲では、摩擦係数が小さいほど転倒限界の流速が小さくなり、転倒しやすくなっている。

一方、図中の一点鎖線および二点鎖線は、堤体上の港外側端および水位が η_2 となる位置(港内側)での越流時の水位と流速の関係を示したものであり、それらと転倒限界を示す実線および点線との交点が、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などの付着物で覆われている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、点線と一点破線との交点であり、水位 η が56cmで流速 U が95cm/sのときである。このとき、港外側端であるので水位が堤体前面における打ち上げ高さ η_1 に等しく、 η_1 が56cm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、実線と二点破線との交点であり、水位 η が24cmで流速が240cm/sのときである。この状況を堤体前面での打ち上げ高さ η_1 で考えると、 η_1 が η_2 の2.5倍であることから、 η_1 は24cmの2.5倍で60cmとなる。したがって、この条件では、港外側の端にいる人のほうが転倒限界時の打ち上げ高さが小さく、港内側端にいる場合に比べてやや小さな波高で転倒してしまうことがわかる。これ以降の転倒限界特性の検討では、転倒限界時の条件として、堤

体前面の打ち上げ高さ η_1 を用いている。

図-31は、靴と床面との静摩擦係数 μ_s と転倒限界時の打ち上げ高さ η_{cr} の関係を示したものである。横軸には μ_s をとり、縦軸に η_{cr} をとっている。なお、 η_{cr} とは、天端面からの打ち上げ高さであり、堤体前面における最大水位となる。計算条件は、身長160cm、足の間隔30cm、人の向き 0° であり、各防波堤上の位置 $x/l_1 = 0 \sim 1.0$ について計算している。摩擦係数が大きくなると転倒限界時の打ち上げ高さは大きくなり、ある摩擦係数以上で転倒限界時の打ち上げ高さが一定になる。摩擦係数によって転倒限界打ち上げ高さが増える領域は、滑り型の転倒が生じていることを示しており、転倒限界打ち上げ高さが一定になる領域が倒れ込み型転倒となる。また、 x/l_1 が大きくなるほど、水位が低く流速が大きくなるために、転倒限界に及ぼす摩擦係数の影響が大きくなっていることがわかる。例えば、港外側端 ($x/l_1 = 0$) では、摩擦係数0.23が倒れ込み型転倒と滑り型転倒との境界となっており、摩擦係数0.23以下において摩擦係数が小さいほど、小さな打ち上げ高さで転倒することがわかる。それに対して、港内側端 ($x/l_1 \geq 1.0$) では、二つの転倒形式の境界が摩擦係数0.52となっている。

(2) 足の間隔や向きによる変化

図-32は、足の間隔と転倒限界時の打ち上げ高さの関係を示したものであり、身長160cmで摩擦係数0.6 (床面が滑らかなコンクリート面に相当)、人の向き 0° の場合である。横軸には足の間隔 L_r をとり、縦軸に転倒限界時の打ち上げ高さ η_{cr} をとっている。なお、図中の線の違いは、防波堤上の位置の違いを示している。この条件では、すべて倒れ込み型の転倒が生じ、港外側ほど

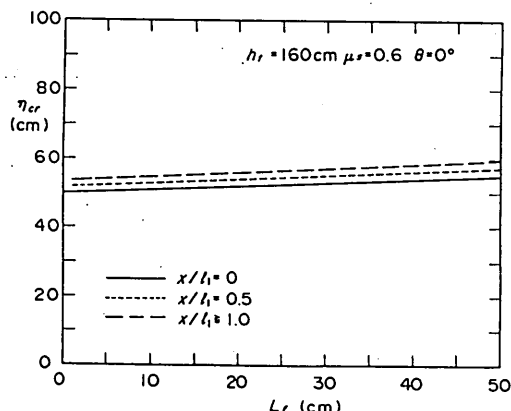


図-32 足の間隔と転倒限界時の打ち上げ高さ ($\theta = 0^\circ$)

転倒限界打ち上げ高さが小さく、小さな波高で転倒する。また、 θ が 0° では、足の間隔が大きいほど、人に作用する抗力が減少するために、転倒限界の打ち上げ高さがやや大きくなっているが、その差は小さい。例えば、港外側端 ($x/l_1 = 0$) において足の間隔が0cmの場合、転倒限界打ち上げ高さが50cmであるのに対して、足の間隔が50cmになると転倒限界打ち上げ高さが55cmになっている。

図-33は、図-32と同様の図であり、計算条件が身長160cmで摩擦係数0.6、人の向き 90° の場合である。人の向きが 90° の場合、足の間隔が大きいほど、人に作用する抗力が大きくなるが、倒れ込み型の転倒領域では足の間隔が大きくなるほど安定性が増す (l_0 が大きくなる) ために、倒れにくくなる。例えば、港外側端 ($x/l_1 = 0$) では、すべて倒れ込み型の転倒となり、足の間隔がないときに転倒限界打ち上げ高さが68cmに対して、足の間隔が50cmのとき転倒限界打ち上げ高さが78cmと大きくなっている。また、 $x/l_1 = 0.5$ の位置では、足の間隔が25cm以下で転倒限界打ち上げ高さが増加傾向であるが、25cm以上で減少傾向となっている。これは、足の間隔が25cm以上で滑り型の転倒となるために、抗力が増加することにより、転倒限界時の打ち上げ高さが小さくなっている。 $x/l_1 \geq 1.0$ の位置では、すべて滑り型の転倒となるので、足の間隔があるほど、転倒限界時の打ち上げ高さが小さくなり、小さな波高で転倒してしまう。

(3) 防波堤上の位置による変化

図-34は、防波堤上の人の位置と転倒限界時の打ち上げ高さ η_{cr} の関係を示したものであり、身長160cmで

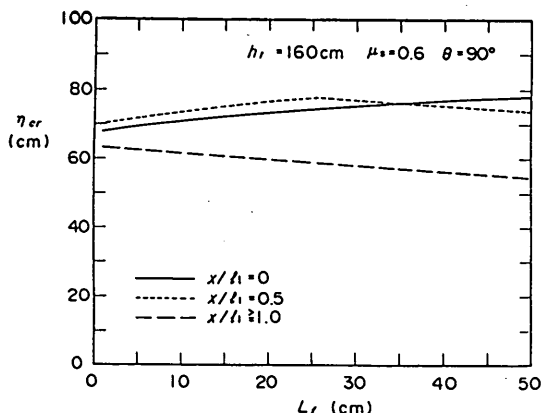


図-33 足の間隔と転倒限界時の打ち上げ高さ ($\theta = 90^\circ$)

越波時における防波堤上の人の転倒に関する研究
 ～親水性港湾構造物に関する水工的研究(第2報)～

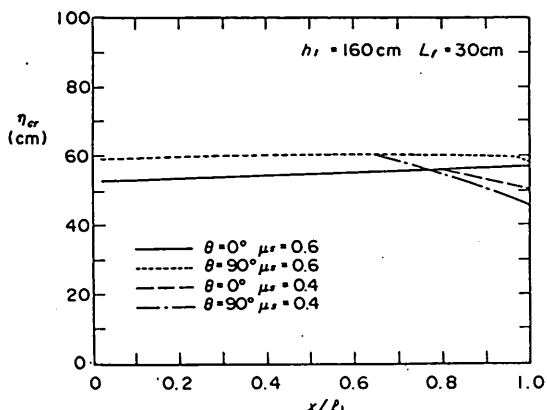


図-34 防波堤上の位置と転倒限界時の打ち上げ高さ

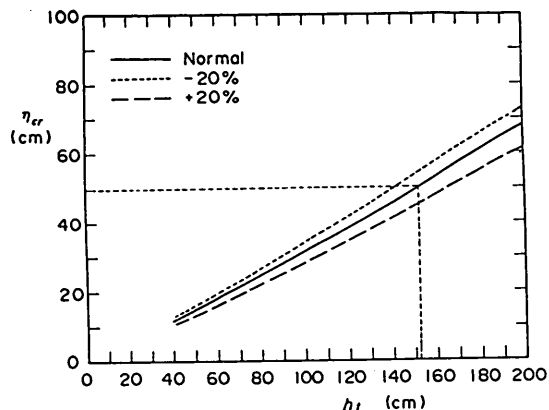


図-35 身長と転倒限界時の打ち上げ高さ

足の間隔30cmの条件において、人の向き0および90°、摩擦係数0.4および0.6について計算している。横軸には防波堤上の位置を示すパラメータ x/l_f を、縦軸に転倒限界時の打ち上げ高さ η_{cr} をとっている。防波堤上の港外側ほど水位が高く流速が比較的遅いために、転倒時には倒れ込み型となる傾向があり、港内側の位置になると滑り型の転倒が生じる傾向がある。防波堤上に位置による転倒形式は、摩擦係数などにより異なるが、人の向きが0°で摩擦係数0.4のとき、 x/l_f が0.8以下で倒れ込み型の転倒となる。また、倒れ込み型の領域では、防波堤上の港内側ほど、転倒限界時の打ち上げ高さがやや大きくなっている。例えば、港外側端で人の向きが0°、摩擦係数0.6の場合、転倒限界時の打ち上げ高さが53cmであるが、港内側 ($x/l_f \geq 1.0$) において57cmとなっている。

(4) 身長と転倒限界条件

図-35は、身長および体格と転倒限界時における打ち上げ高さ η_{cr} の関係を示したものである。なお、計算条件は、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とする。図中の実線は標準体型を対象とした転倒限界打ち上げ高さで、点線が標準よりも20%痩せ型、破線が標準よりも20%肥満型を示している。転倒限界時の打ち上げ高さは、身長が大きいほど大きくなり、転倒しにくくなっている。また、痩せ型では、標準型に比べて水中投影面積が小さくなるために、人に作用する抗力も減少し、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。肥満型では、逆に標準型より転倒限界時の打ち上げ高さが小さくなり、転倒しや

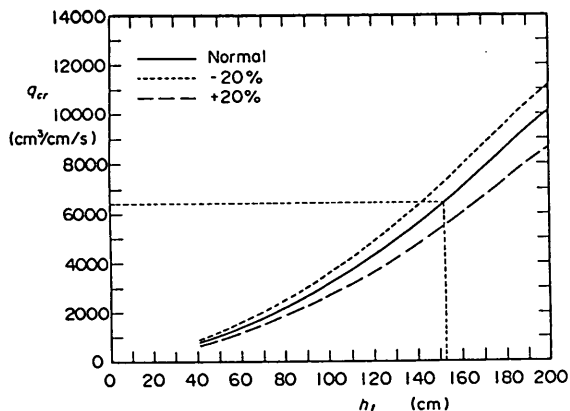


図-36 身長と転倒限界時の流量

すくなっていることがわかる。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となっている。一般的に、転倒限界の水位は、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 ($x/l_f \geq 1.0$) に立っている場合、水位が膝の半分程度である。

図-36は、身長と転倒限界時における流量 q_{cr} の関係を示したものであり、計算条件は図-35と同様である。転倒限界時の流量は、身長が大きいほど大きくなっているのがわかる。また、体型による違いは、図-35に示す打ち上げ高さの関係と同様に、痩せ型ほど転倒限界時の流量が大きくなり、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流量は、標準型の体型で0.7m³/m/s、20%痩せ型で0.8m³/m/s、20%肥満型

で $0.6\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ となっている。

6. 現地への適用

6.1 転倒限界条件の基準値とその適用方法

(1) 転倒限界打ち上げ高さ

親水性防波堤などの親水性施設では、不特定の人が訪れることが考えられ、対象とする人によって転倒限界の条件が異なってくる。諸条件に対する転倒限界の特性は、前章において詳しく検討しているが、ここでは対象とする人を6, 12, 18才の標準的な体型に絞って考える。なお、男女によって平均身長が異なるが、身長が低いほど小さな打ち上げ高さで転倒するので、各年齢の転倒限界条件を検討する際には男女の中で身長の高い方を対象とした。表-2は、各年齢における転倒限界時の打ち上げ高さを示したものである。例えば、12才を対象とすると、平均身長は男子152.4cm、女子151.9cmであり、やや身長の高い女子で計算すると、転倒限界時の打ち上げ高さが0.5mで、そのときの流量が $0.64\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ となっている。

ここでは、12才以下の子供に保護者が同伴していると想定し、主に12才以上の人を対象として転倒限界の基準値を考える。身長が低いほど小さな波高で転倒するので、想定した人の中で最も弱者は12才となる。したがって、

表-2 年齢による転倒限界時の打ち上げ高さの目安

年齢 (才)	転倒限界時の打ち上げ高さ
6	37 cm
12	50 cm
18	52 cm

表-3 波数による最高波高の平均値と有義波の関係

波数 N	平均値 $\overline{H_{max}}$
50	$1.50 H_{max}$
100	$1.61 H_{max}$
200	$1.72 H_{max}$
500	$1.84 H_{max}$
1,000	$1.94 H_{max}$
2,000	$2.02 H_{max}$
5,000	$2.12 H_{max}$
10,000	$2.19 H_{max}$

実用的な転倒限界の基準値としては、堤体前面における打ち上げ高さ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才を対象とした打ち上げ高さ0.34mが参考になる。

(2) 不規則波中の位置づけ

人は越波に対して非常に弱く、越波時の水位が膝よりやや低い程度で転倒してしまう。したがって、実際の不規則な波浪条件において、越波に対して人の安全性を確保するためには、不規則波中の最高波において安全でなければならない。したがって、前節で示した転倒限界時の打ち上げ高さは、不規則波中の最高波に対応すると考える。

表-3は、波高がレーリー分布をしていると仮定したときの波数と最高波高の期待値の関係¹⁵⁾を示したものである。通常的设计では、設計対象とする施設などによって $H_{max} = 1.6 \sim 2.0 H_{1/3}$ とすることが多い。防波堤などの波力の計算では、砕波の影響を受けない場合に $H_{max} = 1.8 H_{1/3}$ を用いており、 H_{max} がレーリー分布における最高波高の平均値とすると、約370波のときの期待値に相当する。一方、石油掘削用プラットフォームなどの海洋構造物は、上部に作業基地があることが多く、その設計では $H_{max} = 2.0 H_{1/3}$ を用いることが多い。また、著者ら¹²⁾は親水性防波堤や護岸の利用限界時の状況が、防波堤上に波しぶきが上がった時と想定しており、利用限界波高の算定式を提案している。このとき非砕波時における最高波高と有義波高との関係には、 $H_{max} = 1.8 H_{1/3}$ を用いており、波の周期が6秒と仮定すると40分間に1回の割合で最高波高が出現することになる。越波時の人の転倒が生じる状況は、利用限界時に比べても非常に危険であり、安全性を確保するために、さらに出現確率の小さい最高波高まで検討する必要がある。したがって、人の転倒を検討する際には、海洋構造物の設計時に用いられる最高波高を準用し、 $H_{max} = 2.0 H_{1/3}$ を用いることを提案する。この状況は、波数が約1700波としたときに有

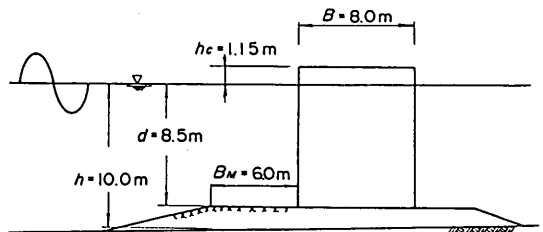


図-37 検討対象の防波堤断面

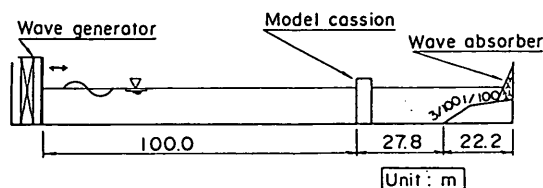


図-38 実験水路

義波の2倍の最高波高が出現する場合に相当し、周期6秒程度の波を想定すると継続時間が3時間程度となる。

6.2 防波堤上における人の安全性の検討例

(1) 検討の概要

a) 検討対象断面と検討内容

図-37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、通常の防波堤における天端高さの設定方法で考えると、設計有義波高が2mとなり、やや遮蔽された海域の防波堤を対象にしていると考えられる。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、波浪条件は周期が7.3秒とした。

ここでは、主に打ち上げ高さによって人の危険性がどのように変化するかを検討している。なお、対象とした人は12才の標準的な体型としており、転倒限界の打ち上げ高さが50cmを用いている。

b) 実験の概要

実験では、図-38に示す当所の長水路(長さ163m、幅1m、深さ1.5m)を用いた。水路床は造波板より127.8mの地点まで水平床で、それより134.4mまで3/100勾配、それより146.9mまで1/100勾配、それ以降水路端までは水平床となっている。水路端には消波装置を設けて、反射波を減じている。堤体模型の設置位置は造波板より100mの地点の水平床上であり、この部分は片面ガラス張りで側方からの観察が可能となっている。

実験縮尺は1/14.3とし、規則波と不規則波を用いて、実施した。実験波は、波高水深比 H/h が規則波で0.13~0.4、不規則波で0.06~0.4の範囲で、すべて重複的な波である。

(2) 打ち上げ高さとの危険性

図-39は、相対天端高さ h_c/H と堤体前面での打ち上げ高さ R の関係を示したものである。図中の実線は前掲の式(2)などによる計算値、プロットが規則波実験による実験値であり、白丸が越波していないものを、また黒丸が越波しているものを表している。なお、実験値は

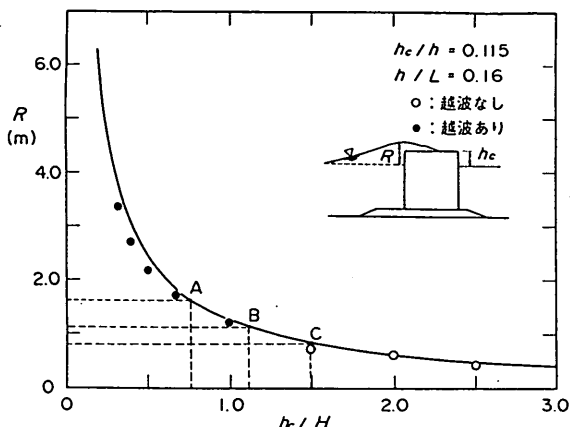


図-39 相対天端高さとし打ち上げ高さ

現地量に換算して示している。波高が大きくなり、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のがわかる。

実線上のA点は、転倒限界時の状況であり、静水面からの打ち上げ高さ R が1.65mで、天端高さ1.15mよりも転倒限界時の打ち上げ高さ0.5mだけ高い場合である。この点での相対天端高さ h_c/H は0.75であり、波高が1.54mとなる。この波高が最高波高に対応すると考えると、 $H_{max} = 2.0H_{1/3}$ を用いて転倒限界時の有義波高 $H_{1/3}$ が0.77mで、相対天端高さ $h_c/H_{1/3}$ が1.50となる。また、本論文では詳細に記述しないが、不規則波実験も同時に行っており、実験や数値計算から、転倒限界時における越波流量も補足的に検討している。これによると、転倒限界時の平均越波流量は、福田ら⁹⁾の示す歩行者を対象とした許容越波流量 $2 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{m/s}$ と同程度になることがわかった。

実線上のB点は、越波する限界の状況であり、打ち上げ高さ R が天端高さ1.15mに等しいときのものである。この点での相対天端高さは1.11であり、波高が1.04mとなっている。この波高を最高波高として、有義波高で表すと、 $H_{max} = 1.8H_{1/3}$ を用いて、 $h_c/H_{1/3}$ が2.0、 $H_{1/3}$ が0.56mとなる。また、実験においてもB点を境界にして、これより波高の大きなきに越波が生じており、計算値による越波限界が実験結果と一致していることがわかる。

また、著者ら¹⁰⁾は、親水性施設の利用限界となる条件

を打ち上げ高さをもとに整理しており、利用限界時の波高として、打ち上げ高さが天端高さの0.7倍に達した場合を提案している。実線上のC点は、利用限界時の状況を示したものであり、打ち上げ高さが天端高さ1.15mの0.7倍、つまり0.81mの場合である。この点での相対天端高さは1.52であり、波高が0.76mとなる。また、有義波高として表すと、 $H_{max} = 1.8H_{1/3}$ を用いて、 $h_c/H_{1/3}$ が2.74、 $H_{1/3}$ が0.42mとなる。

以上まとめると、この例では天端高さが1.15mであり、転倒限界、越波限界、利用限界の有義波高は0.77、0.56、0.42mである。

6.3 転倒限界波高

本節では、転倒限界時の最高波高(H_{max})_{cr}をその限界時の打ち上げ高さ η_{cr} や天端高さ h_c を用いて示すことを考える。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、越波水の運動モデルより、前掲の式(2)の波頂高比 $K (= R/H)$ の式を用いると、静水面からの打ち上げ高さ R が天端高さ h_c より η_{cr} だけ高いとして、次式で示される。

$$\frac{h_c + \eta_{cr}}{H} = \frac{1 + \sqrt{(1 + 4\alpha_1 h_c' / h_m)}}{2} \quad (15)$$

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(H_{max})_{cr}は、次式のようになる。

$$(H_{max})_{cr} = \frac{2(h_c + \eta_{cr})}{1 + \sqrt{(1 + 4\alpha_1 h_c' / h_m)}} \quad (16)$$

ここに、 h_m ：マウンドの高さを考慮した換算水深
式(16)中の換算天端高さ h_c' は、前掲の式(3)で示され、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 $0.5h_c$ に近づくものである。転倒限界時の状況は、 η_{cr} が0.5m程度であり、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 に近似されるとして、 h_c' を $1.0h_c$ と考えた。そこで、式(16)は次式のようになる。

$$(H_{max})_{cr} = \frac{2(h_c + \eta_{cr})}{1 + \sqrt{(1 + 4\alpha_1 h_c / h_m)}} \quad (17)$$

なお、転倒限界時の相対天端高さ $h_c / (H_{max})_{cr}$ は、次式のようになる。

$$\frac{h_c}{(H_{max})_{cr}} = \frac{1 + \sqrt{(1 + 4\alpha_1 h_c / h_m)}}{2(1 + \eta_{cr} / h_c)} \quad (18)$$

$h_c / (H_{max})_{cr}$ は、上式より防波堤の構造形式(α_1)、天端高さ h_c と換算水深 h_m の比 h_c / h_m 、また η_{cr} / h_c に

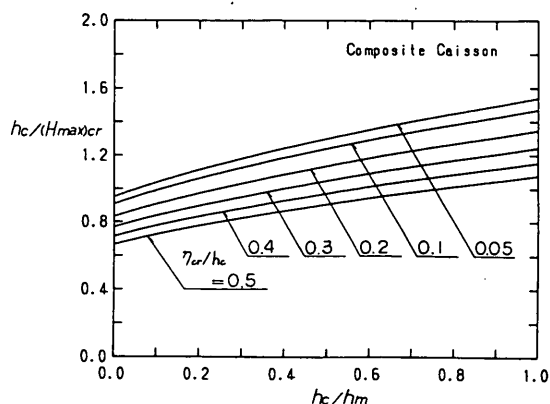


図-40 転倒限界時の相対天端高さ(直立、混成堤の場合)

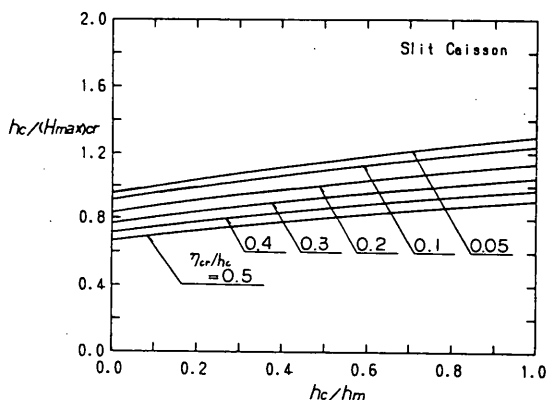


図-41 転倒限界時の相対天端高さ(上床版なしスリットケーソン堤、消波ブロック被覆堤の場合)

よって、変化することがわかる。

図-40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の計算値を示したものである。横軸は h_c / h_m 、縦軸は $h_c / (H_{max})_{cr}$ である。また、 η_{cr} / h_c は0.05~0.5まで変化させ、 η_{cr} が0.5mとして計算している。 η_{cr} / h_c が同じ場合において h_c / h_m が大きくなると、転倒限界時の相対天端高さは大きくなっている。なお、 η_{cr} は一定値であるので、 η_{cr} / h_c が同じ場合において h_c / h_m の違いは、水深 h_m の違いを表している。したがって、堤体前面の水深 h_m が大きくなると、相対天端高さが小さくなり、転倒限界時の波高が大きくなっている。つまり、これは水深が浅いほど、小さな波高で

越波時における防波堤上の人の転倒に関する研究
～親水性港湾構造物に関する水工的研究(第2報)～

転倒限界の状況になることを意味している。例えば、天端高さ h_c が2.5mであるとすると、転倒限界打ち上げ高さ η_{cr} が0.5mとして、 h_c/η_{cr} が0.2となる。また、マウンド高さを考慮した換算水深が10mであるとすると h_c/h_m が0.25であり、 $h_c/(H_{max})_{cr}$ が1.0となる。したがって、このときの転倒限界時の最高波高は2.5mとなることがわかる。

図-41は、消波ブロック被覆堤または上床版なしのスリットケソン堤 ($\alpha_1=0.5$) における転倒限界時の相対天端高さの計算値を示したものであり、図-40と同様のものである。図-40と同じく、 η_{cr}/h_c が同じ場合において h_c/h_m が大きくなると、転倒限界時の相対天端高さは大きくなっている。ただし、 $\alpha_1=1.0$ の条件に比べて、転倒限界時の相対天端高さの増加の割合が小さいのが特徴である。また、上床版ありのスリットケソン堤では、 α_1 が波高により0.5~1.0まで変化するが、転倒限界の状況では0.5に近い値になり、この図を参考にすることができる。

7. 結論

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実験的に検討した。特に、越波時における人の転倒特性を明らかにするとともに、人の転倒を計算できるモデルを構築し、転倒限界を定量的に示している。その主要な結果は以下のとおりである。

(1) 人が越波水によって転倒する場合には、力学的なメカニズムから、「滑り型転倒」と「倒れ込み型転倒」に分けて考えることができる。滑り型転倒とは、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ものである。また、倒れ込み型転倒とは、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ものである。

(2) 床面と靴との摩擦係数は、靴の種類や床面の状況によって異なる。滑らかなコンクリート面を想定すると床面と靴との摩擦係数は、付着物がない場合に0.6、藻などの付着物がある場合に0.4を代表値と考えることができる。

(3) 流れ中の人に作用する力は、流速の二乗に比例する抗力として考えることができる。人の抗力係数は、足の間隔 L_f や人の向き θ が主なパラメータであり、足の間隔がない場合には人の向きによらず、抗力係数がほぼ1.1となった。また、流れの上流方向に正面を向く場合 ($\theta=0^\circ$) には、足の間隔が大きくなるほど抗力が減少し、流れの上流方向に横面を向く場合 ($\theta=90^\circ$) には、足

の間隔が大きくなるほど抗力が増加する。

(4) 流れ中における人の「転倒モデル」を提案した。これは、水位と流速を用いて人に作用する力を算定し、外力と抵抗力との釣合から「滑り型転倒」あるいは「倒れ込み型転倒」の限界を判断するものである。このモデルに人体形状をモデル化したものと、そして防波堤上の越波水の運動モデルを用いることにより、越波と人の転倒の関係を明らかにできる。

(5) 実際の人を用い、越波時の流れを実スケールで再現して、転倒モデルの検証実験を行った。実験では、滑り型転倒と倒れ込み型転倒を再現することができ、実験と計算による転倒限界がほぼ一致することが分かった。

(6) 転倒モデルを用いた計算によって、人の転倒に及ぼす種々の要因の影響が明らかとなった。例えば、靴と床面との摩擦係数が比較的小さいときには、滑り型の転倒が生じ、摩擦係数が小さいほど転倒しやすくなる。倒れ込み型転倒が卓越する条件では、流れの上流方向に正面を向くとき、足の間隔が大きいくほど転倒しにくくなる。また、防波堤上の港外側ほど倒れ込み型の転倒が生じやすく、港内側では滑り型の転倒が生じやすくなる。

(7) 転倒限界時における防波堤前面での打ち上げ高さは、0.5mを用いることを提案する。このとき水位は0.5mで流速1.3m/sであり、最大流量が0.64m³/m/sとなる。なお、この値は12才の標準的な体型を対象としたものである。

(8) 転倒限界条件は、人の安全性の観点から、不規則波中において最高波に対応すると考えられる。また、このときの最高波高は、海洋構造物の設計に用いられている $H_{max}=2.0H_{1/3}$ を準用して、有義波高の2.0倍を用いることを提案する。

本報告では、波向きや波の方向分散性は考慮していない。実際の越波状況では、このような波の多方向性によって防波堤の延長上で越波する区間や越波しない区間が生じてくるために、人の安全を検討する際にも影響が大きく、さらに検討を加える必要がある。また、越波によって転倒した場合には、転倒した後に海中に転落するかどうかは人の生死にとって重要な問題となり、転倒後の人の動きも検討を加える必要がある。通常、親水性防波堤上には、転落防止用の手すりが設置されているので、手すりの転落防止効果も検討する必要がある。

本報告のとりまとめに関しては、高山水工部長に多くの御助言を頂いた。ここに記して、感謝の意を表する次第である。

(1992年9月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 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～親水性港湾構造物に関する水工的研究（第1報）～，港湾技術研究所報告，第31巻，第1号，1992.，pp.3-50.
- 2) 菅原邦彦・遠藤秀則・高橋重雄・遠藤仁彦・高野聖三：親水性防波堤上の手すりの耐波設計法，海岸工学論文集，第39巻，1992.
- 3) 日本流体力学学会編：流体力学ハンドブック，1987.，pp.232-233.
- 4) Robert O.Andres：Essential Design Criteria for an Ergonomically Sound Portable Slip-Resistance Tester, and Other Field Measurement Considerations., OSHA, 1985., pp.1-21.
- 5) Robert O.Andresら：An Ergonomic Analysis of Dynamic Coefficient of Friction Measurement Techniques, OSHA, 1984., PP.1-85.
- 6) R.Skibaら：Geräte zur Bestimmung der Reibung zwischen Schuh und Fußboden unter Berücksichtigung des menschlichen Ganges, Kautschuk+Gummi・Kunststoffe, Vol. 37, No. 6, 1984. pp.509-514
- 7) L.Strandberg：The effect of conditions under foot on falling and overexertion accidents. ERGONOMICS, Vol.28, No.1, 1985., pp.131-147.
- 8) 小川正行：皮厚等の身体諸計測値からのBody Density 予測に関する研究～第2報 学童の場合，日衛誌，第40巻，第5号，1985.，pp.841-848.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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書，Vol.9，No.4，pp.3-41.
- 12) 高橋重雄・遠藤仁彦：親水性護岸や防波堤の利用限界に関する研究，第17回海洋開発シンポジウム論文集，1992.，pp.391-396.
- 13) 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.
- 14) (株)国際海洋科学技術協会振動部会：海洋構造物の振動問題，1988.，pp.236-246.
- 15) 合田良実：波の不規則性を考慮した設計法について，港湾技術研究所講演会講演集概要，1971.，pp.1-1～1-33.

主要記号一覧表

A_0	：流れ中の人の投影面積
B_M	：マウンド肩幅
C_D	：人の抗力係数
C_I	：流量係数
d	：マウンド上の水深

F	：人に作用する抗力
g	：重力加速度
$(H_{max})_{cr}$	：転倒限界時における最高波高
H_{max}	：最高波高
$H_{1/3}$	：有義波高
h	：堤体前面水深
h_G	：流れによる抗力の重心と転倒支点との鉛直距離
h_c	：防波堤の天端高さ
h_c'	：換算天端高さ
h_f	：股下の長さ
h_m	：マウンドを考慮した換算水深
h_i	：人の身長
h_0	：初期水深
K	：波頂高比 (= R/H)
L_f	：両足の間隔
l_G	：人の重心位置と転倒支点との水平距離
l_i	：天端上において，越波時の最大水位が $\eta_1 \sim \eta_2$ に変化する距離
q_{cr}	：転倒限界時の流量
W_0	：人の水中重量
U	：越波時の最大流速
V_0	：流れ中の人の体積
α_1	：防波堤の構造形式を表す補正係数
α_2	：波高水深比によって変化する越波流量の補正係数
η_1	：堤体前面（港外側）の最大水位
η_{cr}	：転倒限界時における天端面からの打ち上げ高さ
θ	：流れの上流方向と人の正面とのなす角度
μ_s	：靴と床面との静摩擦係数

越波時における防波堤上の人の転倒に関する研究
 ～親水性港湾構造物に関する水工的研究(第2報)～

付録 利用限界, 越波限界, 転倒限界波高の計算方法

利用限界, 越波限界および転倒限界時の波高は, 堤体前面における打ち上げ高さを基本として算定するものである。各種防波堤における打ち上げ高さ R は, 高橋ら¹⁾や菅原²⁾らによって提案された実験式, 式(1)～(5)を用いる。

$$R = K \cdot H \quad (1)$$

$$K = \begin{cases} 1.0 + \alpha_1 \frac{H}{h_m} & : \frac{H}{h_m} < \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_d/h_m}}{2\alpha_1} \\ \frac{1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c/h_m}}{2} & : \frac{H}{h_m} \geq \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_d/h_m}}{2\alpha_1} \end{cases} \quad (2)$$

$$h_c' = \frac{H/h_m}{2 \frac{H}{h_m} - \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c/h_m}}{2\alpha_1}} h_c \quad (3)$$

$$h_m = \begin{cases} d & : B_M/L \geq 0.16 \\ d + (h-d) \frac{0.16 - B_M/L}{0.05} & : 0.11 \leq B_M/L < 0.16 \\ h & : 0.11 < B_M/L \end{cases} \quad (4)$$

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1.0 & : \text{直立堤, 混成堤} \\ 0.5 & : \text{消波ブロック被覆堤} \\ 0.5 & : \text{上床版なしスリットケーン堤} \\ 0.5 \sim 1.0 & : \text{上床版ありスリットケーン堤} \end{cases} \quad (5)$$

ここに, R : 堤体前面における静水面からの打ち上げ高さ, h_c : 天端高さ, h_c' : 換算天端高さ, h_m : マウンド高さを考慮した換算水深, B_M : マウンドの肩幅, L : 堤体前面水深における波長, d : マウンド上の水深, h : 堤体前面における水深, α_1 : 防波堤の形状による補正係数, H : 波高, h_d : 静水面とスリット部上端との距離

① 越波限界時の波高 H_{oi}

式(1)において打ち上げ高さが天端高さに等しいとして, 越波限界の波高 H_{oi} を求めると式(6)になる。

$$H_{oi} = h_m \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_d/h_m}}{2\alpha_1} \quad (6)$$

② 利用限界時の波高 H_u

利用限界時の波浪条件は, 高橋ら¹²⁾が現地事例解析によって検討しており, 打ち上げ高さが天端高さの7割に達した場合に波しぶきが生じ, 施設が使用できなくなる

ことを示している。したがって, 利用限界時の波高 H_u は, 式(1)において打ち上げ高さが天端高さの0.7倍に等しいとして, 式(7)を導いている。

$$H_u = h_m \frac{-1 + \sqrt{1 + 2.8\alpha_1 h_d/h_m}}{2\alpha_1} \quad (7)$$

③ 転倒限界時の波高 H_f

転倒限界時の打ち上げ高さを η_{cr} とすると, 静水面からの打ち上げ高さは $\eta_{cr} + h_c$ となり, 式(1)に代入すると下式ようになる。

$$H \frac{1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c'/h_m}}{2} = h_c + \eta_{cr} \quad (8)$$

ここに, h_c' は式(3)に示すように $0.5 \sim 1.0 h_c$ と波高によって変化する係数であり, 式(8)を波高について展開するのが困難である。一方, h_c' は, 天端高さ静水面からの打ち上げ高さが一致するときに $1.0 h_c$ で, 打ち上げ高さが大きくなるほど $0.5 h_c$ に近づく。人が転倒するときの打ち上げ高さは, 12才の人を対象にした場合50cmとなり, 越波限界時の打ち上げ高さよりもやや大きくなるものの, ほぼ同程度と考えることができる。したがって, h_c' を h_c と考えると, 転倒限界時の波高 H_f は式(9)のようになる。

$$H_f = \frac{2(h_c + \eta_{cr})}{1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c/h_m}} \quad (9)$$

ここに, η_{cr} : 転倒限界時の堤体前面における天端面からの打ち上げ高さ, 通常は12才を基準としたとき50cmを用いる。