

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. 33 NO. 1 MAR. 1994

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第33巻 第1号 (Vol.33, No.1), 1994年3月 (Mar.1994)

目次 (CONTENTS)

1. 手すりによる越波時の人の転落防止効果に関する研究
—親水性港湾構造物に関する水工的研究 (第3報)— ……高橋重雄・遠藤仁彦・室 善一郎…………… 3
(Experimental Study on People's Carriage into the Sea Caused by Overtopping Waves
on Breakwaters — A Study on Amenity-oriented Port Structures (3rd Rept.) —
……………Shigeo TAKAHASHI, Kimihiko ENDOH and Zen-ichirou MURO)
2. グチ式造流堤による流れの解析 —模型実験と数値計算による検討—
……………古川恵太・平野隆幸・細川恭史……………37
(Flow Analysis on Tidal Flow Generator
—Hydraulic Experiments and Numerical Simulation —
……………Keita FURUKAWA, Takayuki HIRANO and Yasushi HOSOKAWA)
3. 港内の波浪及び係留船舶の動揺のリアルタイム予測システムの開発 (第1報)
—システムの開発及び現地への設置—
……………上田 茂・永井紀彦・平石哲也・白石 悟・木内里美・小林昭男……………67
(Predicting System of Wave Conditions and Movements of Moored Ships in Harbour
……………Shigeru UEDA, Toshihiko NAGAI, Tetsuya HIRASHI, Satoru SHIRASHI,
Satomi KIUCHI and Akio KOBAYASHI)

1. 手すりによる越波時の人の転落防止効果に関する研究 ～親水性港湾構造物に関する水工的研究(第3報)～

高橋重雄*, 遠藤仁彦**, 室善一朗***

要 旨

防波堤は、安全上の観点から従来より人の立ち入りを禁止してきたが、実際には侵入防止柵を乗り越えて入ってくる人が多いのが現状である。こうした人達の中には、高波浪時に生じる越波により転倒し海中へ転落することがあり、重大な事故となったことも少なくない。しかしながら、年間の大部分は越波することがないために、適切な安全管理を行えば、防波堤を安全で快適な親水空間とすることも可能となる。親水性防波堤とは、人に対する安全対策を積極的に施し、その天端上を魚釣りや散策のために開放するものである。

港湾技術研究所では、1990年より親水性港湾構造物の研究を開始して、主に親水性防波堤上の施設の耐波安定性(波力的な問題)や人の安全に対する検討を加えてきた。第一報では、親水性防波堤上の波に対する様々な検討をする上で最も基本となる、防波堤上の越波水の運動や天端上の施設に働く波力について検討した。第二報では、越波時における防波堤上の人の転倒について検討し、転倒が生じるような越波状況を防波堤前面での波の打ち上げ高さや波高などで定量的に表し、その基準となる転倒限界打ち上げ高さを提案した。本報告は、これら一連の研究の第三報であり、越波に対する人の危険においてさらに危険度の高い海中への人の転落について検討したものである。

本研究の主要な結論は以下のとおりである。

- (1)防波堤上の港外側に設置した手すりには、越波時に手すり背後の水位を低減させる効果がある。これは手すり開口率が小さくなるほど、水位が低減する傾向にある。また、防波堤上の港内側に設置した手すりでは、越波時に手すり位置での水位の堰上げが見られる。手すりの開口率が低く透過性が小さくなるほど、堰上げが大きくなる。港内および港外側の手すりが及ぼす水位への影響を、それぞれ手すりの開口率と高さをパラメータとした実験式を提案した。
- (2)通常の防波堤の場合、港外側から港内側へ向かう流れによって人が流され、港内側に転落する。波浪条件などが同じ場合、港内側に設置する手すりの開口率が小さいほど転落しやすくなった。また、転落限界の条件としては、転落する位置(通常の防波堤の場合では港内側堤端)における最大水位が身長約17%になったときであることがわかった。
- (3)典型的な条件における転落限界打ち上げ高さを提案した。例えば、水平天端型で港内および港外側の両端に柵型の手すりを設置した場合、転落限界打ち上げ高さは2.1mとなる。一方、手すりを設置しないときには、転落限界の打ち上げ高さは0.7mとなり、手すりを設置することによる転落防止効果が大きいことが分かった。さらに、越波水の運動モデルをもとにして、波高と打ち上げ高さを関係付け、転落限界時の波高が算定できる式を提案した。

キーワード：親水性防波堤、越波、人、安全、転落、手すり

*水工部 耐波研究室長

**水工部 耐波研究室

***海洋水理部 海水浄化研究室(旧 水工部 海洋エネルギー利用研究室)

1. Experimental Study on People's Carriage into the Sea Caused by Overtopping Waves on Breakwaters - A Study on Amenity-oriented Port Structures (3rd Rept.) -

Shigeo TAKAHASHI*, Kimihiko ENDOH**, Zen-ichiro MURO***

Synopsis

Access by the public into breakwater areas is generally prohibited in Japan due to safety reasons. However, many people nevertheless enter into such areas to enjoy the comfortable sea environment. The public utilization of breakwaters as "amenity areas" has recently received much attention, and consequently, the Japanese Ministry of Transport (MOT) has developed a new concept in which "Promenade Breakwater" can be constructed to serve the dual purpose of protecting a harbor from storm waves while also providing the public with amenity areas.

The studies on amenity-oriented port 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 acting on amenity and safety facilities on breakwaters. The second report also has been published which discussed the stability of a person on a breakwater under the overtopping wave's flow. This is the third report of the project and discusses the carriage of a person on a breakwater into the sea caused by overtopping waves.

A series of model tests on the carriage of a person into the sea are conducted in a long wave channel. In the experiments, the wave motion on a breakwater are measured by high speed video. Also the movement of a model of human's body are measured. The major conclusion are as follows;

- 1) The overtopping wave motions on a breakwater is deformed by the shape of handrails which can be described by the height and opening ratio of the handrails.
- 2) The person's carriage into the sea will occur when the maximum water elevation above the handrails at the port side is over 17 percentage of the person's height.
- 3) A simple formula is developed to describe quantitatively the critical wave crest height and wave height to carry a person into the sea. It was found that caisson handrails can effectively prevent this accident i.e., with handrails, the critical wave crest to carry a person into the sea is 2.1 m, whereas only 0.7 m without them.

Key Words : Promenade breakwater, Overtopping wave, people, safety, falling, hand-rail

*Chief of Maritime Structures Labo., Hydraulic Engineering Div.

**Member of Maritime Structures Labo., Hydraulic Engineering Div.

***Member of Purification Hydraulics Labo., Marine Hydrodynamics Div.

目 次

要旨	3
1. はじめに	7
2. 親水性防波堤上における人の安全の研究	8
2.1 越波水の運動に関する研究	8
2.2 越波と人の危険に関する研究	9
2.3 施設の安全性に対する考え方とその評価方法	10
2.4 本研究の目的と内容	10
3. 実験の概要	10
4. 手すりによる越波水の運動の変化	15
4.1 水平天端型における手すり設置効果	15
4.2 パラペット後退型における手すり設置効果	20
5. 越波水中の人の運動と転落の特徴	21
5.1 水平天端型での転落状況	21
5.2 パラペット後退型での転落状況	23
6. 越波による人の転落限界条件	26
6.1 転落限界時の打ち上げ高さ	26
6.2 転落限界時の波高の算定	30
7. まとめ	32
参考文献	32
主要記号一覧表	33
付録 危険限界波高の算定方法	34

1. はじめに

防波堤は、安全上の観点から従来より人の立ち入りを禁止してきたが、実際には侵入防止柵を乗り越えて入ってくる人が多いのが現状である。こうした人達の中には、高波浪時の越波水により転倒して海中へ転落する人もあり、重大な事故となったことも少なくない。

しかしながら、年間の大部分は越波することがないために、適切な安全管理を行えば、防波堤を安全で快適な親水空間とすることも可能となる。親水性防波堤とは、人に対する安全対策を積極的に施し、その天端上を魚釣りや散策のために開放するものである。例えば、写真-1は、名古屋港の知多半島に位置する高潮堤で、その天端上に手すりを設置するなどして改良し、平成4年より一般市民に魚釣り施設として開放している。写真-2は、北海道網走港の親水性防波堤で、市民が散策できるような施設として、現在建設中（一部は完成）のものである。これらの事例のほかにも、計画中のものを含めると、その数は少なくない。



写真-1 名古屋港の親水性防波堤
(高潮堤を魚釣り施設として開放したもの)

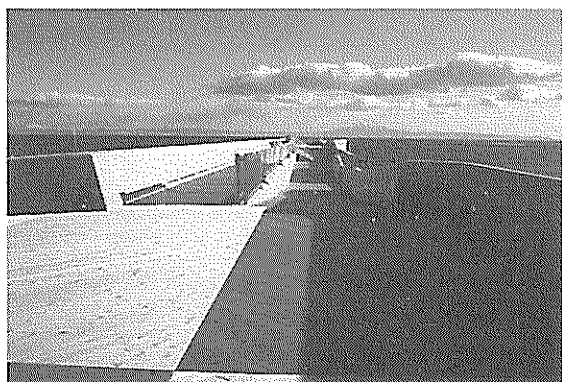


写真-2 網走港の親水性防波堤
(既存の防波堤を親水化したもの)

港湾技術研究所では、1990年から親水性港湾構造物の研究を開始しており、主に親水性防波堤上の施設の耐波安定性（波力問題）や人の安全に対する検討を加えてきた。第一報¹⁾では、親水性防波堤上の波に対する様々な検討をする上で最も基本となる、防波堤上の越波水の運動について検討した。また、親水性防波堤上に設置される階段斜面などの施設に対する波力についても実験的に検討し、波力が算定できる実験式を提案している。第二報²⁾では、越波時における防波堤上の人の転倒について検討した。転倒がどのようなメカニズムで発生するのかを明らかにし、人が転倒する状況を防波堤前面における波の打ち上げ高さや波高などで定量的に表し、転倒限界打ち上げ高さなどを提案した。本報告は、これら一連の研究の第三報であり、越波に対する人の危険の中でも危険度の高い海中への人の転落について検討したものである。

親水性防波堤には、人に対する安全対策として様々な安全施設が設置される。例えば、緊急時の放送施設や救命用の浮輪や梯子などが安全施設として位置づけられている。また、最も基本的な安全施設は転落防止を目的とする手すりである。この手すりは人が立ち入ることができる場所と海との境界、つまり安全な場所と危険な場所との境界を示している。このように、港内側や港外側の端に設置した手すりは通常の利用時に市民が海へ誤って転落するのを防いでいる。

一方、越波時において防波堤上に人が取り残された場合、防波堤上での波の打ち上げがある程度高くなると、人は越波水によって転倒し、さらに海中へ転落してしまうことも考えられる。しかし、防波堤上に転落防止を兼ねた手すりが港内側に設置されていると、手すりに人が引っかかり、最も最悪の状況である海中への転落を防ぐことができるのではないかと考えられる。また、港外側堤端に設置される手すりが比較的不透過で小さなパラベットを兼ねた構造になっている場合には、実際に人の危険が問題となるような波浪状況において、越波そのものがある程度低減することも期待できる。

本研究は、水理模型実験によって、手すりを設置したことによる越波水の運動の変化を把握するとともに、手すりによる人の転落防止効果を明らかにするものである。なお、通常の防波堤の場合、手すりは港外側だけでなく港内側堤端にも設置される。ここでは、これら二つの手すりの効果について検討を行っている。また、防波護岸特有の形状としてみられる、天端上に大きなパラベットが港外側堤端よりも後退して設置している場合（パラベット後退型）も検討対象としている。このような形状の堤体の場合、手すりは港外側端のみに設置される。

第二章では、これまでの親水性防波堤に関わる一連の研究を簡単にレビューし、本報告で対象としている危険（越波時の人の転落）の位置づけと本研究の目的を明らかにしている。また、親水性防波堤上での人の安全性を評価する方法についても述べる。第三章では、実験の概要について説明している。第四章では、手すりが防波堤上の越波水に及ぼす影響について検討している。第五章では、越波時における防波堤上での人の挙動について検討している。第六章では、越波によって人が海中へ転落する条件を検討しており、転落する限界条件を防波堤前面における波の打ち上げ高さや波高を用いて表している。

2. 親水性防波堤上における人の安全の研究

2.1 越波水の運動に関する研究

著者ら¹⁾は、防波堤上の越波水の運動について実験的に検討しており、その結果越波水の運動モデルを構築している。図-1は、越波水の運動モデルの概念図を示すものである。越波水の運動モデルとは、波浪条件・水深条件・堤体条件等から防波堤上での越波水の最大水位や最大流速を求めることができる、いわゆる実験式である。なお、このモデルは、当初直立堤および混成堤（通常の矩形ケーソン）を対象とし、波高の適用範囲が水深波高比で0.4以下と比較的低波浪域となっていた。その後、菅原ら³⁾によって、スリットケーソン堤や消波ブロック被

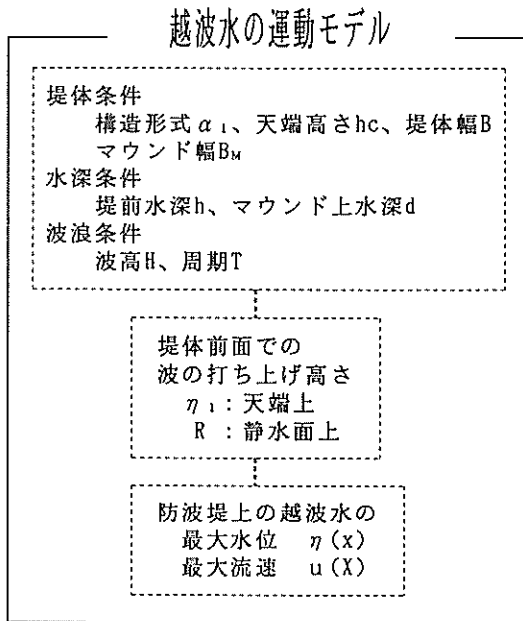


図-1 越波水の運動モデルの概要

覆堤にも適用でき、しかも碎波領域も含む比較的高波浪域にも適用できるように拡張されている。

ここでは、越波水の運動モデルの中で本報告に関わる以下の部分について、具体的に説明を加えることにする。

①波高と防波堤前面での打ち上げ高さの関係

②防波堤上での越波水の最大水位分布

まず始めに、①防波堤前面で越波の生じない波高では、波が重複波的な運動を示し、越波量が増加すると部分重複波的な運動となる。越波水の運動モデルでは、打ち上げ高さを考える際に、多少有限振幅性を考慮した重複波を基本として、越波による打ち上げ低減効果を考えた実験式を提案している。これによると、越波時の堤体前面での波の打ち上げ高さ η_1 （天端面を基準にとったもの）は、式(1)~(5)で示される。

$$\eta_1 = K \cdot H - h_c \quad (1)$$

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

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

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

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

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 ）

て、それぞれの危険が生じるときの打ち上げ高さを検討している。また、前節で説明した越波水の運動モデルを用いて、各危険が生じ始めるときの波高（有義波高、最高波高）が求められるように検討を加えている。なお、これまでの個々の検討では、必ずしも記号の整合性がとれていないので、前掲図-3の中に定義し直している。表-1は、各限界時の打ち上げ高さや波高の記号をまとめたものである。また、それぞれの波高の算定方法については、本報告で対象としている転落限界時のものを含めて、付録にまとめている。

表-1 危険限界打ち上げ高さや波高の記号

	堤体前面での波の打ち上げ高さ	有義波高	最高波高
波しぶき発生限界時	η_{1s}	H_{ss}	H_{ms}
越波発生限界時	η_{1o}	H_{so}	H_{mo}
転倒限界時	η_{1t}	H_{st}	H_{mt}
転落限界時	η_{1d}	H_{sd}	H_{md}

2.3 施設の安全性に対する考え方とその評価方法
 波浪に対して人の安全を確保する手段としては、以下の二つの方法がある。⁶⁾

- ①入園禁止基準を設け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な高さにする。
- 既往の親水性施設では、利用上や経済的な理由から①の方法が多いのが現状である。ただし、かなり遮蔽された場所や水深の浅い場所に建設される場合には、出現する波高の大きさが限られてくるので、②の方法が現実的になるとことも考えられる。

図-4は、波浪に対する人の危険状況と施設の安全を評価する方法を概念的に示したものである。施設の安全性を評価する指標としては、以下の二つが考えられる。

- I. 頻度的な評価
- II. 時間的な評価

頻度的な評価とは、前に示した4つの危険段階となる波高と親水性防波堤周辺での波高出現頻度確率との相対的な関係から、施設の安全度や危険度を確率的に表すものである。利用限界の波高を定めると、その有義波高（ここでは H_{su} とする）以下の出現頻度（未超過確率）が施設の稼働率となり、一つの安全性を示す指標である。また、各危険の限界有義波高以上の出現頻度（超過確率）がその施設の潜在する危険を示す指標となる。

また、利用限界となってから実際に様々な危険状況となるまでの余裕時間も、施設の安全性を示す重要な指標

である。実際の施設管理を考えると、利用限界となってから人々が退避するまでにはある程度時間が必要であり、施設のもつ危険に対する余裕時間は施設の延長や危険情報の伝達システムにも密接に関わってくる。

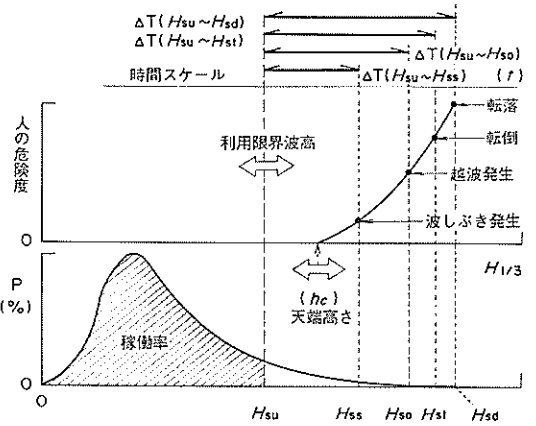


図-4 親水性防波堤上の人の安全性の評価方法

これらの頻度的または時間的な安全指標は、施設周辺の地形的条件や海象条件などによって異なるばかりでなく、利用限界条件の設定や天端高さの設定によって変化する相対的なものである。したがって、これらの指標をもとに利用限界波高や天端高さを適切に設定することが重要である。

2.4 本研究の目的と内容

本研究では、前節2.3で説明した親水性防波堤の人の安全性評価方法を確立するために必要な一つの危険段階である、越波時の人の転落現象を把握することを一つの目的としている。また、もう一つの重要な目的は、人にとって最も危険な状況となる海への転落を手すりによってどの程度防ぐことができるかを把握することにある。以下に主な検討内容を示す。

- ①手すりを設置したときに、防波堤上の越波水の運動がどのように変化するかを明らかにする。
- ②越波時において、人が転倒してから転落するまでの運動特性を明らかにする。
- ③手すりを設置することで人の転落に防止効果があるかどうかを明らかにする。

3. 実験の概要

(1)実験水路および堤体模型

実験は、図-5に示す長さ163m(造波板前面より消波装

置までは150m)、幅1.0m、深さ1.5mの長水路で行った。堤体模型は造波板から100mの水平床上に設置し、堤体位置での実験水深 h は70cmとした。また、実験波は規則波とし、周期は1.44~3.48sの5種類とした。このとき、相対水深 h/L は0.08~0.249となり、実験縮尺1/20を想定して現地水深を14mと考えると、現地周期は6.4~15.6sに相当する。なお、波高と打ち上げ高さを検討する際にはこの5周期を対象としたが、人の転落に関する実験では周期1.92s(現地換算8.6s)を中心に行った。波高は、波高水深比 H/h で0.1~0.37とした。

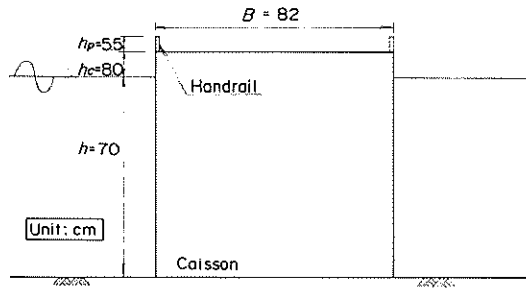


図-6 実験堤体(水平天端型)

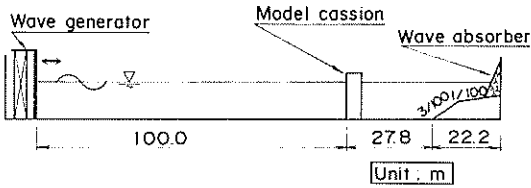


図-5 実験水路

堤体模型は、以下に示す2種類のものを用いている。

- ①水平天端型(通常の混成堤を対象)
- ②パラベット後退型

(後退した位置にパラベットがある護岸を対象)

図-6は、水平天端型の実験模型を示したものであり、矩形ケーソンの直立堤で、ケーソン形状としては一般的なものである。天端高さ h_c は8.0cm、天端幅 B が82cmであり、天端上の港外側堤端と港内側堤端の2カ所に手すり模型が設置できるようになっている。なお、本論文では、次に説明するパラベット後退型に対して、この形状を水平天端型と呼んでいる。図-7は、パラベット後退型の堤体模型を示したものである。通常、パラベットは堤体前面に設置されることが多いが、この形状は港内側へパラベットがやや後退して設置されている。防波堤ではこのような形状はあまりみられないが、防波護岸において越波低減を目的としてこのような形状のものが用いられることがあり、親水性護岸ではパラベットの前面を利用することが多い。パラベット後退型の堤体は、防波堤のように前面水深が比較的深い防波護岸を想定したものである。この模型は、水平天端型の堤体の上部にパラベットを設置したものであり、堤体の天端高さ h_c は同じく8.0cmである。パラベットの高さは、下段の天端面を越波した水塊がパラベットを越えないように設定しており、その高さを50cmとした。また、パラベットの位置は、港外側堤端からの距離 x_p が20, 41cmの2カ所に設置することができ、その港外側堤端には手すりが設置できるようになっている。

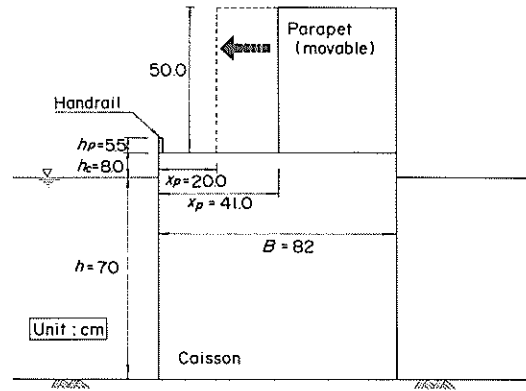


図-7 実験堤体(パラベット後退型)

(2)一般的な手すり形状と手すり模型

図-8は、親水性防波堤上に設置される一般的な手すり形状の分類を示したものである。手すり形状は、柵型・壁型・その他(混合型やチェーン型)に分けることができる。柵型は、橋梁で設置されている高欄や道路の横断防止柵等のように、鋼管などで作られているものが多く、壁型は小さなパラベットを兼ねたコンクリート製のものである。例えば、茨城県大洗の魚釣り防砂堤では、柵型の手すりが設置されており、和歌山県マリナーシティの親水性防波堤の港外側堤端にはパラベットと兼用した壁型の手すりが設置されている。また、福岡県新門司マリナーの親水性防波堤には、チェーン型の手すりが採用されている。一般的には、柵型か壁型を用いる事例が比較的多くなっている。

図-9は、柵型の手すりを中心にして、手すり形状を調べた結果を示すものである。横軸には支柱間隔 l を、縦軸には支柱の直径 D をとっている。白抜きのプロットが橋梁や道路などで用いられている高欄または転落防止柵を示し、黒塗りのプロットが親水性施設(防波堤や護岸)で用いられているものを示している。これによると、親水性施設で設置する手すりは、その他のものに比べて、

支柱間隔が狭く、かつ支柱の直径が大きくなる傾向がある。これは、親水性施設特有の外力として越波時の波力があり、厳しい外力条件に対して部材強度を確保するために、構造上そのような特徴になっているものと考えられる。また、親水性施設の手すりは、その高さ h_p が110cm程度のもが多い。

一方、手すりの開口部の投影面積を全投影面積で除したもの（ここでは、手すりの開口率と呼ぶ。）でその形状特性をみていくと、橋梁などで用いられている一般的な柵型手すりは、開口率が0.65~0.85のものが多く、平均で0.78となっている。親水性施設で用いられる柵型の手すりは、支柱間隔が狭くなっているなどの理由で、一般的なものと比べて開口率がやや小さく、平均0.69となっている。

実験で用いた手すり模型は、実際の手すりに比べて単純な形状のものを考え、手すりの形状は開口率を変える

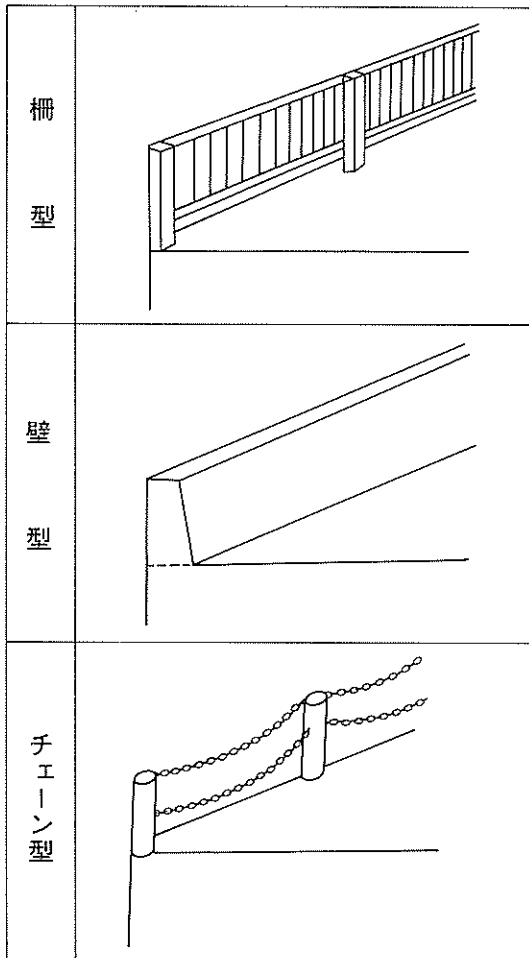


図-8 手すり形状の分類

ことで表している。図-10は、手すり模型の正面図と側面図を示したものである。一般に、転落防止を目的とした手すりの高さ h_p は110cmであるので、模型の高さは実験縮尺1/20を想定して5.5cmとした。手すり模型は、4種類の開口率（0.61, 0.44, 0.24, 0）のものを用いている。開口率0.61は一般的な柵型のを想定し、開口率0は壁型のを想定している。また、開口率0.44や0.24は、壁型に穴の開けたものを想定している。なお、実験においてこれらの手すりは、堤体模型の港外側と港内側堤端に設置されるが、本論文では、それぞれの位置の手すり開口率を ε_1 （港外側）、 ε_2 （港内側）として表している。

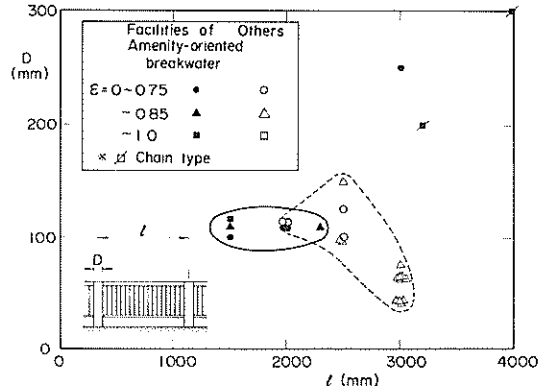


図-9 手すりの支柱間隔と支柱径との関係

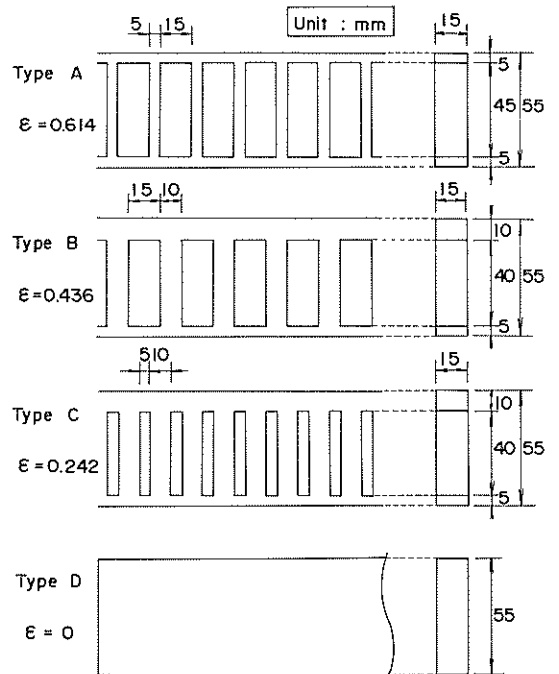


図-10 手すり模型

(3)人体模型

後述の越波時の人の転落実験では、人体を想定した模型を使用している。実際の人体形状は複雑であるが、実験で用いる人体模型には単純な形状を考え、円柱を用いることにした。また、対象とした身長は、第二報²⁾において転倒限界の基準値を考える際に対象とした12歳の平均身長152cmを考え、実験縮尺1/20より人体模型の高さを76mmに設定した。

人の比重は、肺の中の空気を除いたときに1.05程度⁷⁾であるが、肺の影響を考慮すると1.0よりもやや小さくなる。越波によって防波堤上から転落するときには、衣服を着用しているで、その影響で浮力が増加して水中重量が減少することが考えられる。浮力が大きくなるほど、また水中重量が小さくなるほど、越波水によって流されやすくなるとともに海中へ転落しやすくなる。そこで、衣服による浮力の影響を考慮して、人体模型の比重を0.8とした。

次に、人体模型の直径は、予備実験を行い越波によるその人体模型の転倒限界の打ち上げ高さが従来の標準的な値(実スケールで、 $\eta_{1s} = 50\text{cm}$)に近くなるものを用いることにした。図-11は、予備実験で用いた人体模型を示すものであり、3種類の模型で行った。予備実験は、水平天端型の堤体模型上の港外側堤端から10cmの位置に人体模型を置き、規則波を起こして、越波時にその転倒の有無を観測した。なお、1起波につき7~10波分転倒の有無を観測し、転倒した回数を観測波数で除して、転倒率 P_T として表した。

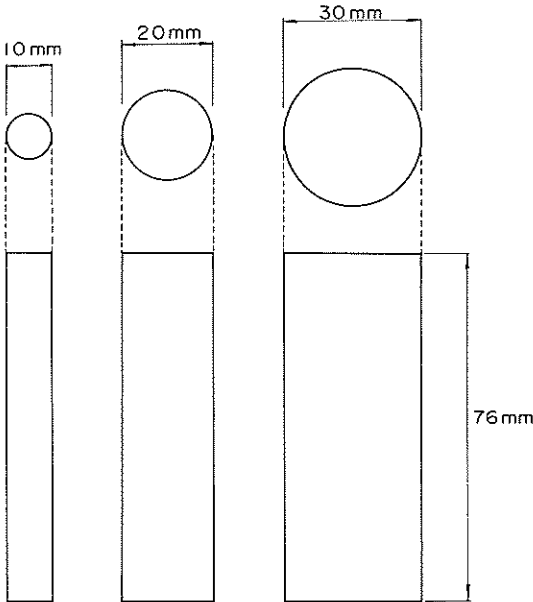


図-11 人体模型

図-12は、予備実験の結果であり、防波堤前面での波の打ち上げ高さ η_1 と各模型での転倒率 P_T の関係を示したものである。横軸には、堤体天端面からの打ち上げ高さ η_1 と、縦軸には転倒率 P_T をとっている。これによると、当然のことながら、打ち上げ高さがある値になると転倒が生じ始め、打ち上げ高さが大きくなるほど転倒率が上昇するのが分かる。また、人体模型の直径が大きくなるほど転倒する限界の打ち上げ高さが大きくなり、転倒しにくくなっているのが分かる。一方、標準的な体型で身長76mm(実スケールで152cm)における転倒限界時の打ち上げ高さは2.5cm(実スケールで50cm)である。打ち上げ高さ2.5cmでは、人体模型の直径が10mmのときに転倒率が100%、直径20mmのとき30%、直径30mmのとき0%となっており、転倒限界が2.5cmと比較的近くなるのは直径20mmの模型である。したがって、本実験に用いる人体模型は直径を20mmにすることにした。

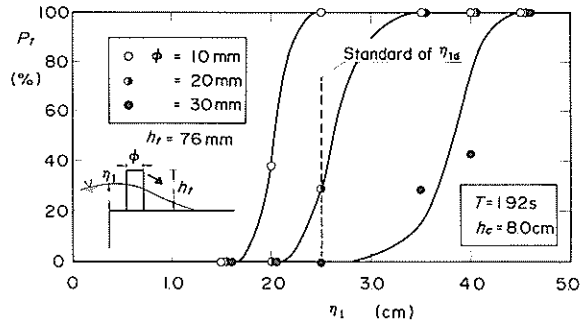


図-12 波の打ち上げ高さ η_1 と転倒率 P_T

(4)実験内容と測定方法

実験は、大きく分けて以下の2種類を実施している。

- I. 越波水の運動測定実験
- II. 転落実験

越波水の運動測定実験は、手すり⁸⁾が防波堤上の越波水の運動に及ぼす影響を把握することを目的として、防波堤前面の打ち上げ高さ η_1 と防波堤上の水位、流速を測定するとともに、毎秒200フレームの画像を取り込むことのできる高速ビデオで天端上の越波水面形状を測定した。防波堤上の水位は、堤体上の3カ所の下部に箱のついた穴が開いており、そこに波高計を設置して測定している。流速の測定には、直径3mmの羽根が2枚あるプロペラ式流速計を用いた。なお、水平天端型の堤体に対する実験では、港内側と港外側の手すりの影響をそれぞれ分けて検討するために、港外側堤端だけに手すりを設置した実験と港内側だけに手すりを設置した実験を別々に行った。

次に、転落実験は、①越波時の人の運動特性を把握す

ること、②転落する条件を把握すること、③手すりによる人の転落防止効果を明らかにすること、を目的として行った。実験では、前述の人体模型を用いて、越波時の人体模型の運動を高速ビデオで測定した。なお、測定は1起波につき7波分、転落の有無を繰り返し観測した。

水平天端型の場合には、港外側に手すりを設置しないで、港内側のみを設置しており、主に港内側手すり近傍での人体模型の動きを観測した。パラペット後退型では、港外側に手すりを設置して、パラペットから手すりの間における人体模型の動きを観測した。

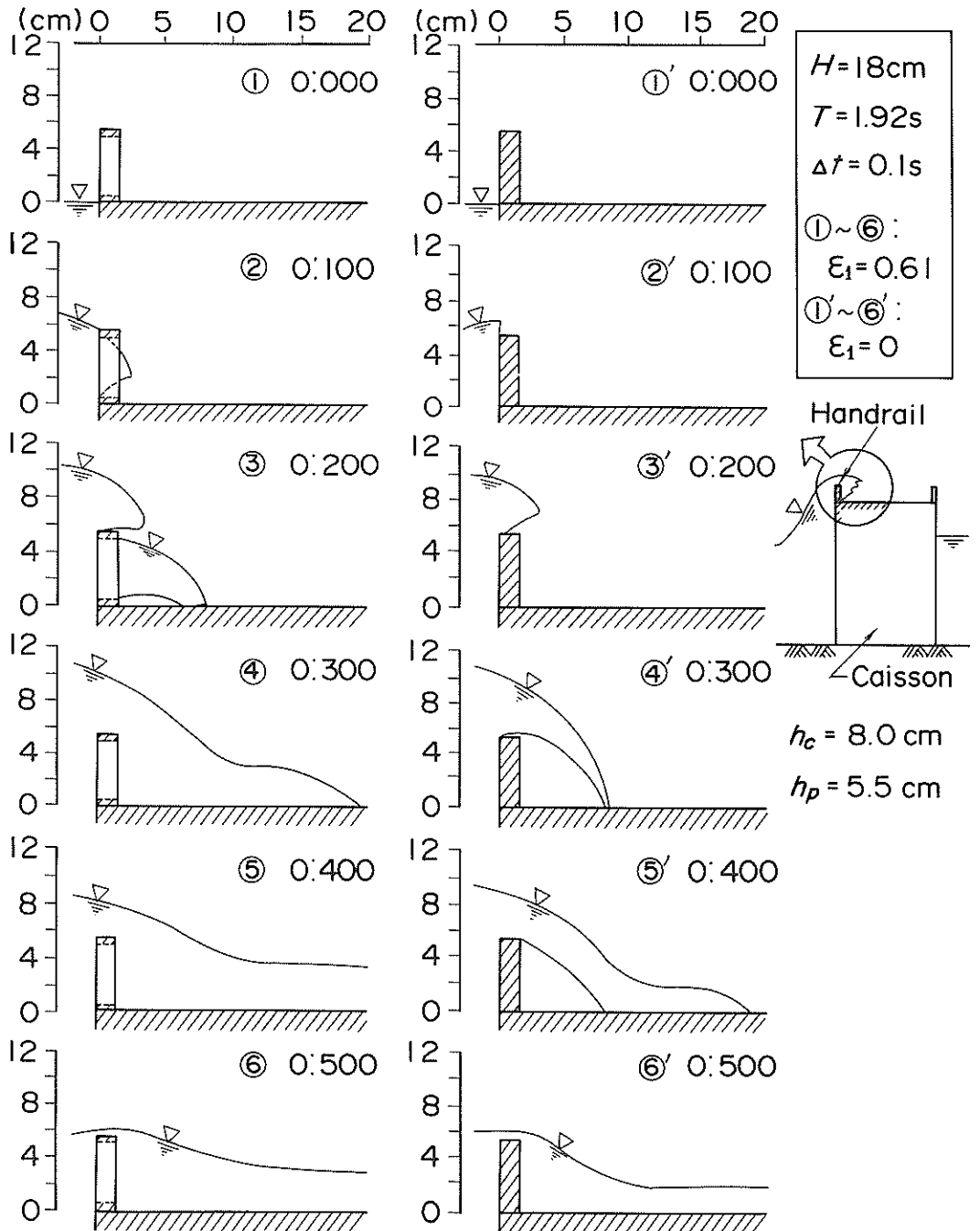


図-13 港外側手すり近傍での越波水面形状の0.1sおきの経時変化

4. 手すりによる越波水の運動の変化

4.1 水平天端型における手すり設置効果

(1) 港外側手すりによる越波低減効果

図-13は、港外側手すり近傍における越波水の水面形の経時変化を示したものであり、左側(①~⑥)が開口率 $\varepsilon_1=0.61$ 、また右側(①'~⑥')が開口率 $\varepsilon_1=0$ の手すりを設置した場合で、両者とも波高18cmの条件である。なお、①または①'は波面がちょうど天端面に達したときであり、それ以降0.1sおきの水面形状を示している。まず始めに、開口率0.61の越波状況についてみていくと、②では、手すりを透過して越波水が打ち込んできており、③において、それらが天端面に落下している様子が見られる。手すり上を越える越波水は、手すりを透過しているものよりもやや遅れて打ち込んでおり、③の後にそれらが合わさって、④の状態になっている。その後、越波水が港内側に進行(⑤、⑥)するとともに、堤体前面の水位が低下している。これに対して右側(開口率0の手すり設置時)の越波状況は、手すりが不透過であるために、越波水が手すりの上から打ち込んでくるような状況(③'④')になる。

図-14は、前掲図-13と同様の実験条件において防波堤上各点での最大水位の分布を示したものであり、防波堤上の港外側堤端より20cmまでの範囲について図示している。実線は不透過な手すり($\varepsilon_1=0$)、また破線は開口率0.61のものを示している。なお、図中には同様の実験波高における手すりが無い条件のものも示しており、点線で表している。手すりの無い状況における最大水位分布(点線)は、これまで得られた知見と同様に前掲の図-2で示されるような分布になっており、港外側堤端から約15cmの範囲で最大水位が直線的に減少し、それより港内側はほぼ一定水位になっている。これに比べて、開口率0の手すりの場合(実線)には、手すり近傍でやや水位が高くなるが、手すりからある程度離れた位置で逆に水位が低くなるのが特徴である。また、その分布形状は港外側近傍で変化している水位分布の傾きが急であり、その水位変化も直線的にはならない。ただし、手すりから10cm以上離れた位置ではほぼ最大水位が一定となっており、やや港内側の位置で一定水位になるという特徴は手すりが無いものと同じである。次に、手すりの開口率0.61の場合(破線)には、手すり近傍の最大水位が手すりの無いものと比べてやや大きくなっているものの、開口率0のものよりは小さくなっているのが分かる。また、手すりからある程度離れた位置での最大水位は、手すりの無いものと比べてやや小さくなっているが、その

差は小さい。したがって、開口率が小さい形状の手すりほど、手すり近傍の打ち上げが局所的に大きくなるが、越波量は手すりによって低減されると考えられ、ある程度手すりから離れた位置での最大水位が手すりを設置しない場合に比べて小さくなるのが特徴である。

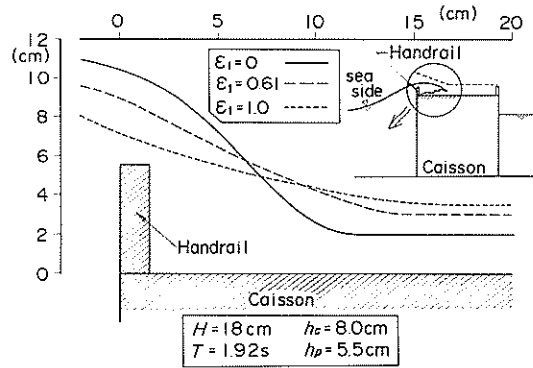


図-14 手すり開口率の違いによる天端上の各点での最大水位分布

図-15は、港外側手すり(開口率 ε_1)による一定水位の領域の最大水位の低減効果を示すものである。横軸に、堤体天端面から測った堤体前面での打ち上げ高さ η をとり、縦軸には港外側堤端から40cmの位置での越波水の最大水位を示している。この位置は、すべての実験ケースにおいてその最大水位が場所的にほぼ一定となる領域である。なお、図中の $\varepsilon_1=1.0$ (○)は、手すりの無いときの実験値を示している。この条件での η_1 と $\eta(x)$ の関係はほぼ比例関係であり、 $\eta(x)$ が η_1 のほぼ0.4倍となることが分かる。これは、これまでの実験結果(著者ら、1991)と同様の傾向を示している。次に、港外側に手すりを設置した場合、 η_1 が同じときの最大水位 $\eta(x)$ は手すりがない場合に比べて低下しており、手すりの開口率が小さいほどその傾向が強くなっている。例えば、港外側に手すりがない場合、前面の打ち上げ高さ η_1 が14.5cmのときに $\eta(x)$ の実験値が5.5cmとなっているのに対して、不透過な手すりを設置した場合、同程度の打ち上げ高さのときに $\eta(x)$ が3.8cmと低下している。ここで、手すりがない場合と不透過な手すりを設置している場合について $\eta(x)$ の低下する高さを比べてみると、丁度手すり高さ分だけ低下しているのが分かる。また、もう一つの特徴は、 η_1 に対する $\eta(x)$ の変化率が手すりの有無に関わらずほぼ一定となる傾向を示すことである。つまり、手すりがない場合に η_1 に対する $\eta(x)$ の変化率が0.4であったが、手すりがある場合にも $\eta(x)$ の低下は認められるものの、

その変化率は同様にほぼ0.4となっている。

したがって、港外側手すりによる越波低減効果を考慮した一定水位領域での最大水位 $\eta(x)$ は、手すり開口率 ε_1 と手すり高さ h_p をパラメータとして式(8)に表すことにした。なお、式中の手すり開口率が入っている項にかかっている乗数は、手すり開口率が小さいときに $\eta(x)$ の低減が比較的小さくなるという傾向を示したものであり、実験結果より定めている。

$$\eta(x) = 0.4(\eta_1 - h_p(1 - \varepsilon_1)^2) \quad (8)$$

図中の各線は式(8)の計算値を示したものである。実験値はややばらつきがあり、特に開口率0.61の手すりの実験値が計算値よりも小さくなっている。ただし、式(8)に示す計算値は、実験値の全体的な傾向を概ね表すことができているのが分かる。

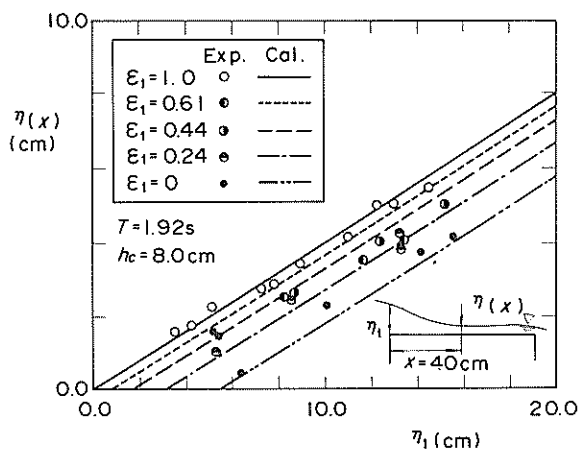


図-15 波の打ち上げ高さ η_1 と港内側の水位 $\eta(x)$ との関係

(2)港内側手すりによる堰上げ効果

写真-3は、港内側に手すりを設置した条件での手すり近傍の越波状況を示しており、手すり開口率 ε_2 が0.61、波高20cm、周期1.92sの条件のものである。なお、この実験では、主に港内側の手すりの影響をみるために、港外側の手すりは設置していない。①は越波し始めの状況であり、写真の範囲には越波水が見られない。②では越波水が段波状に天端上を進行しており、③で手すりに到達している。手すりは比較的透過性が高いので、大部分の越波水は手すりを透過して港内側に落水しているが、一部手すり上に打ち上がる越波水もみられる(④)。⑤、⑥では、天端上の越波水が港内側へ落水するにたがって、天端上の水位も低下していく様子が見られる。

写真-4は、写真-3と同様に港内側手すり近傍の越波状況を示すものであり、開口率0の不透過な手すりを設置している条件である。なお、波高、周期ともは前掲写真-3と同様である。①において、越波水が天端上を段波状に進行しており、②で手すりに衝突している。手すりに衝突した後の越波水は、手すりが不透過なために上方に打ち上げられ(③)、④および⑤に示されるようにその一部は20cm以上も打ち上がり、しぶき状になって飛散している水塊が比較的多いのが分かる。その後、越波水は、手すりを乗り越えるようにして港内側へ落水していく様子が見られる。

次に、図-16は、写真-3と同じ条件での天端上各点での最大水位分布と手すり近傍での最大水平流速を示したものである。なお、最大水位は、越波水の実質部分のみを示しており、しぶき状に飛散しているものは含めていない。図に示す範囲は、手すりが全く無い条件において一定水位となる領域であり、同様の波浪条件ではその水位が約6cmであった。開口率0.61の手すりを設置した条件では、手すり近くを除いてほぼ同程度の水位になっていることが分かる。また、手すりのごく近傍で2cmほど水位が上昇している。一方、天端上の最大流速は、場所による違いはあまりなく、1.2m/s程度となっていることが分かる。したがって、このように比較的透過性が高い場合には、手すりによる影響が少なく、手すり近傍での越波水の堰上げも小さい。

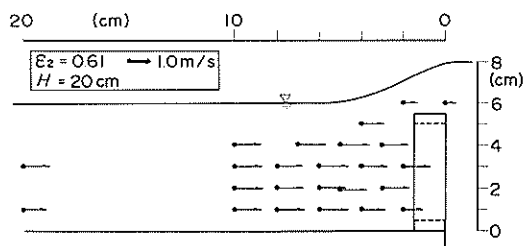


図-16 港内側手すり近傍での最大水位と最大流速 (手すり開口率0.61)

図-17は、写真-4と同じ条件での天端上各点での最大水位分布と手すり近傍での最大水平流速を示したものである。この条件では、手すりから20cm程度離れたと最大水位が約6cmとなっており、その位置では手すりの影響がないと考えられる。しかしながら、手すりに近づくとともに、最大水位が大きくなっているのが特徴であり、透過性の手すり(前掲図-16)に比べて手すり位置での最大水位が大きい。これは、前掲の連続写真で分かるように、不透過な手すりの場合には手すりによって越波水が

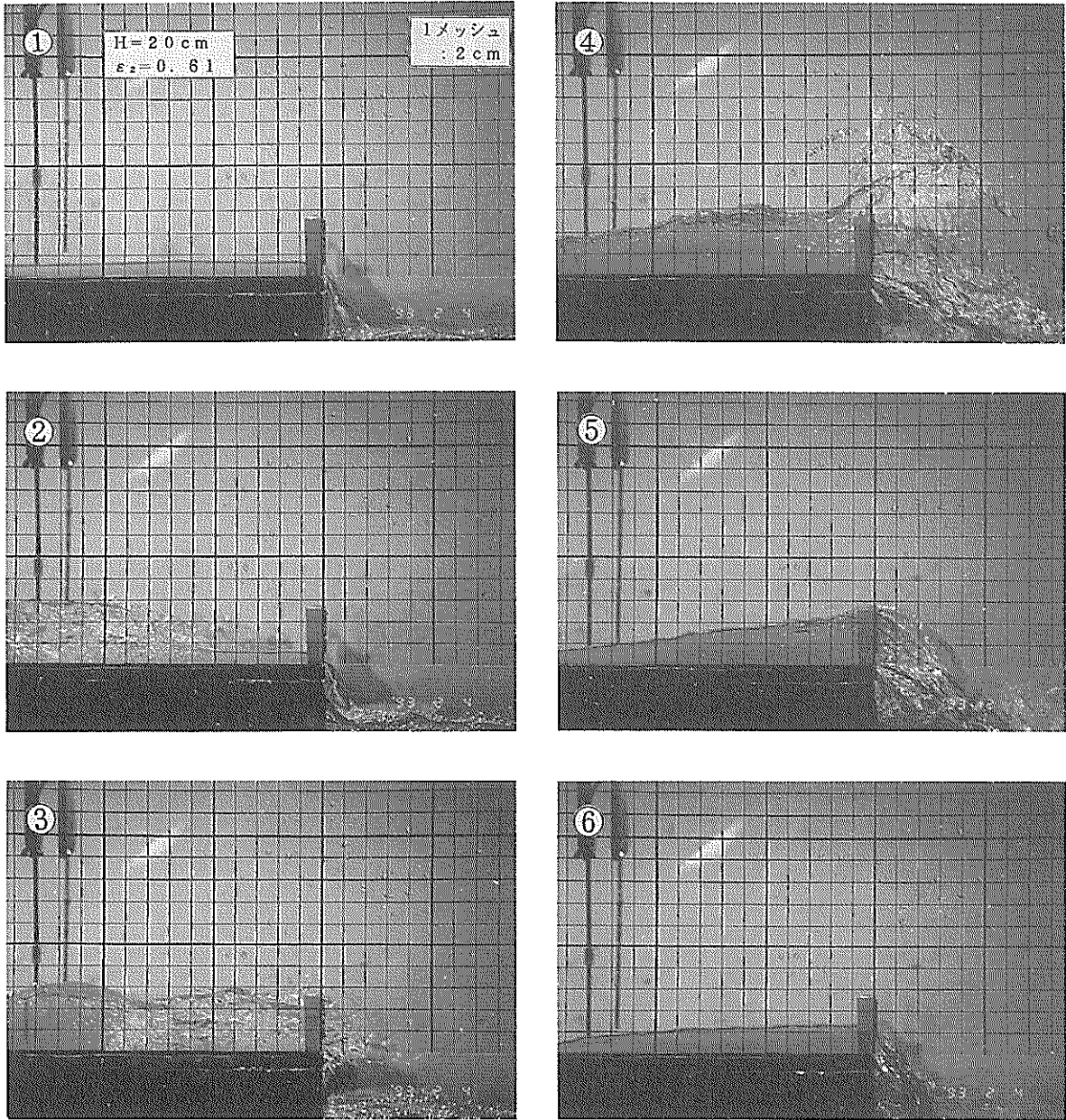


写真-3 港内側手すり近傍での越波状況の連続写真 ($\epsilon_2=0.61$ 、波高20cm)

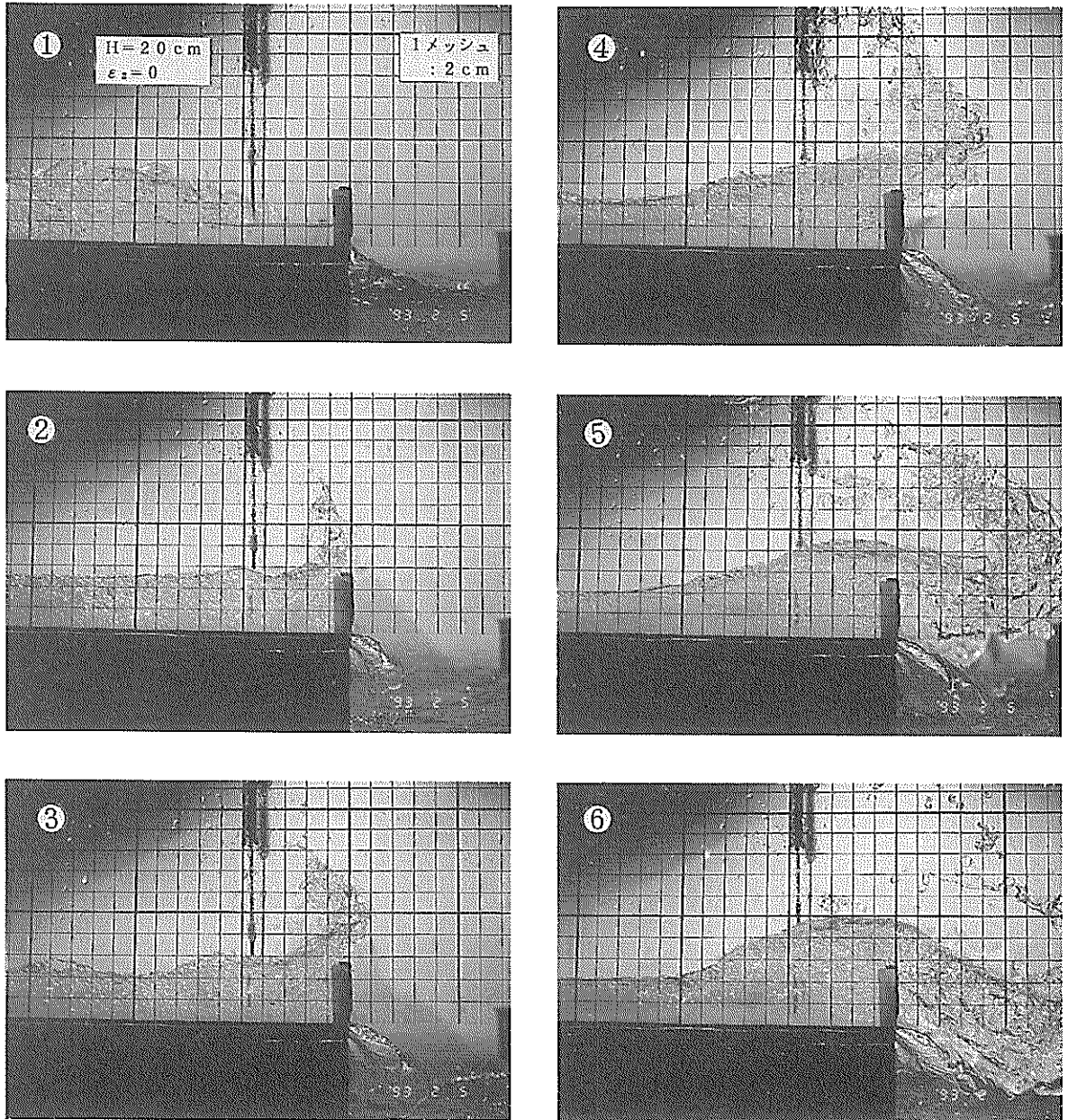


写真-4 港内側手すり近傍での越波状況の連続写真 ($\epsilon_2=0$ 、波高20cm)

堰止められ、上方に打ち上がりながらそれを乗り越えるように越流していくために、水位が高くなっているものと考えられる。一方、最大水平流速についてみると、手すりからやや離れた20cmの位置の流速に比べて、手すり近傍で手すりよりも低い位置での流速が小さく、それよりも高い位置での流速が比較的大きくなっているのが分かる。このように、水平流速分布からも手すりを乗り越えるように越波水が越えていくのが分かる。

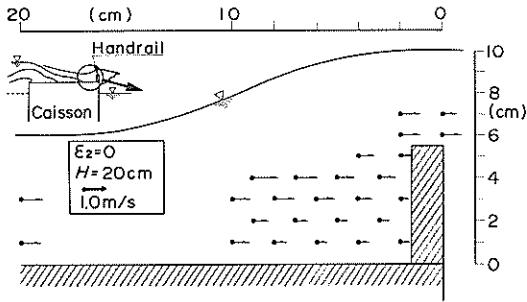


図-17 港内側手すり近傍での最大水位と最大流速 (手すり開口率0)

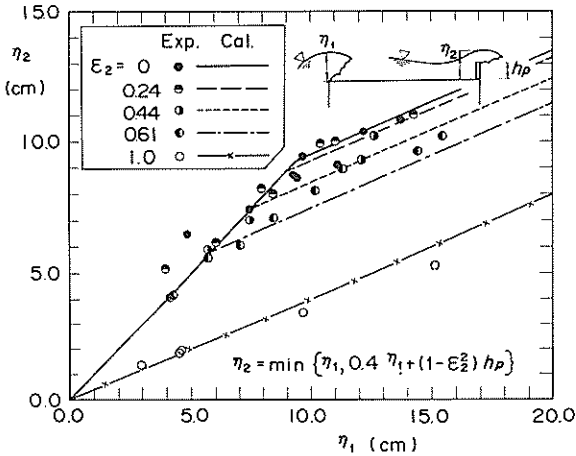


図-18 波の打ち上げ高さ η_1 と港内側手すり位置での最大水位 η_2 との関係

図-18は、港内側堤端の手すり位置における最大水位 η_2 について示したものであり、横軸に堤体前面の打ち上げ高さ η_1 、縦軸に η_2 をとっている。なお、港外側には手すりは設置してなく、港内側のみ手すり ($\epsilon_2=0\sim 0.61$) を設置したもの他に、手すりを設置しない条件 ($\epsilon_2=1.0$) でも行っている。手すりのある条件での実験値は、手すりのないものに比べてばらつきが大きくなっているのが分かる。これは、前掲写真-4などで示されているように

手すり衝突時にしぶきの発生があり、越波水本体としぶきとの境を分離するのが難しいためである。実際には、ビデオから目視で本体部分のみを読みとるようにしている。

港内側の手すり位置は、港外側堤端より82cmであり、最大水位は一定となる領域である。したがって、港内側に手すりがない条件 ($\epsilon_2=1.0$) では、 η_2 が η_1 のほぼ0.4倍となり、港外側堤端から40cmの位置での水位 $\eta(x)$ と η_1 の関係を示している前掲の図-15と同様の結果となっている。次に、港内側の手すりがある場合 ($\epsilon_2 < 1.0$) には、手すりがない条件での実験値に比べて、明らかに手すり位置での水位 η_2 が大きくなっていることが分かる。これは、すでに説明したように、港内側手すりによる堰上げ効果のためである。手すりによって堰上げられた最大水位の特徴の一つは、前面の打ち上げ高さ η_1 が比較的小さいときに、手すり開口率による相違が小さく、 η_2 が η_1 とほぼ同程度になっていることである。もう一つの特徴は、 η_1 がある程度大きいと、手すりの透過性が低いほど堰上げが大きくなることである。このとき、 η_1 に対する η_2 の変化率は、手すりがない場合と同様にほぼ0.4となっている。また、開口率0の手すりを設置した場合の水位は、手すりがない場合に比べて手すりの高さ h_p だけ堰上げられているのが分かる。

したがって、港内側手すり位置での最大水位 η_2 は、手すり開口率 ϵ_2 と手すり高さ h_p 、 η_1 をパラメータとして、次式により示すことにした。なお、手すり開口率と水位の堰上げ高さとの関係は比例でないので、式(9)では手すり開口率 ϵ_2 を2乗として実験の傾向を表した。

$$\eta_2 = \min\{\eta_1, 0.4\eta_1 + (1 - \epsilon_2^2)h_p\} \quad (9)$$

図中の各線は式(9)を用いた計算値であり、概ね実験値の傾向を示しているのが分かる。また、この式は港外側に手すりがない条件での実験結果から検討したものであり、式中の η_1 は手すりがない条件に限定される。ただし、実際には港外側にも手すりが設置されることがほとんどであるために、手すりの影響を受ける港外側堤端での打ち上げ高さ η_1 ではなく、手すり背後の一定水位領域での最大水位 $\eta(x)$ を用いて式(9)を表したほうが都合がよい。そこで、港外側の手すりがない場合には $\eta(x) = 0.4\eta_1$ の関係がほぼ成り立つことから、これを式(9)に代入して次式を導いた。

$$\eta_2 = \min\{2.5\eta(x), \eta(x) + (1 - \epsilon_2^2)h_p\} \quad (9')$$

前掲式(8)と式(9)'を用いると、港内外両端の手すりを設置

した場合の η_1 と η_2 の関係が下式に示される。

$$\eta_2 = \min\{\eta_1 - h_p(1 - \varepsilon_1)^2, 0.4\{\eta_1 - h_p(1 - \varepsilon_1)^2 + (1 - \varepsilon_2^2)h_p\}\} \quad (9)''$$

4.2 パラペット後退型における手すり設置効果

図-19は、パラペット後退型での越波水の運動の一例を示したものであり、0.1秒おきの水面形(①~⑩)を示している。これは、パラペット位置が港外側堤端より20cm、港外側堤端での手すり開口率0.61、波高20cm、周期1.92sの条件である。図は上下2段となっているが、同一波の越波状況である。上段は越波水が打ち込んでからパラペットの位置で水位が最大となるまで(押し波時；①~⑥)を示しており、下段はその後パラペットの位置で打ち上がった越波水が港外側へ戻っていく(引き波時；⑥~⑩)の様子を示している。なお、越波水が天端面にちょうど達したときから0.1sおきに水面形を読みとっており、その始めの状況が図中の①に相当する。②では、手すりを越波水が透過して、打ち込んでくる状況が見られ、その越波水はまだ天端面に落下していない。③では、手すりを透過した越波水は天端面に落下しているが、手すり上から打ち込み始めている越波水もあるのが分かる。④では、それらの越波水が合わさって、段波状に天端面を進行している様子が分かる。このように①から④までの越波状況は、水平天端型での越波状況(前掲の図-13左側の①~④)とほぼ同じになっている。その後、パラペットに衝突するとともに、越波水が上方に打ち上がり、⑥においてパラペット位置での水位が最大となる。この条件では、パラペット位置での最大打ち上げ水位は堤体前面での最大水位の約1.6倍になった。

次に、引き波時には、打ち上がった越波水が⑦に示すようにその先端を巻き込みながら落下していく様子が見られる。巻き込みながら落下していく越波水は、天端上に残っている越波水に突入してそれらが合わさり、⑧に示すような水位の分布になる。この越波水突入時には、非常に複雑な流れの状況となっており、パラペット近傍で反時計回りの渦が見られる。その後、越波水が港内側に落水しているが、パラペットからの突入してきた越波水が手すり位置に到達するときに手すり位置において水位がやや堰上げられている(⑨)。なお、引き波時における港外側堤端(手すり位置)での最大水位は約6.5cmであり、打ち込み時の同位置での最大水位の約65%、パラペット位置での最大水位の約40%となっている。

図-20は、港外側堤端での押し波時における最大水位

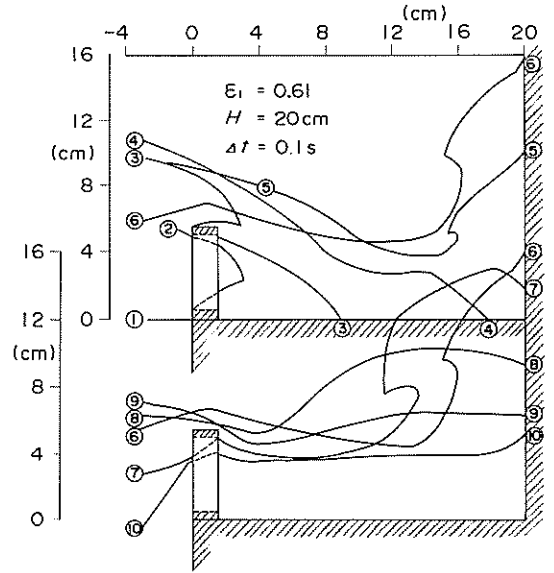


図-19 パラペット後退型での越波水面形の経時変化の一例 ($\varepsilon_1=0.61$ 、 $H=20\text{cm}$)

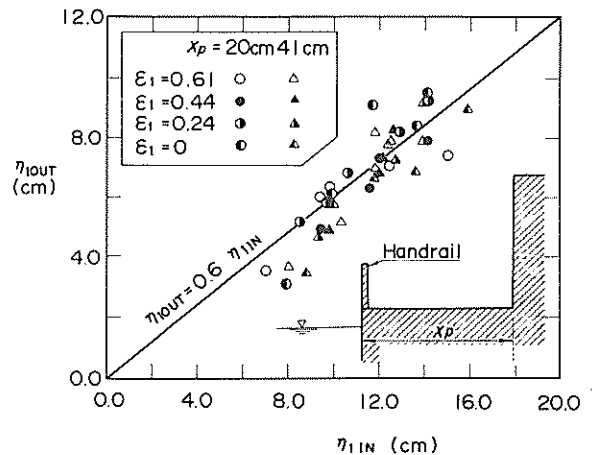


図-20 押し波時と引き波時における防波堤前面の最大水位 η_{1IN} 、 η_{1OUT}

η_{1IN} と引き波時における最大水位 η_{1OUT} との関係を示すものであり、横軸に η_{1IN} 、縦軸に η_{1OUT} をとっている。また、図中には、二つのパラペット位置による結果を合わせて示している。引き波時に越波水が手すりに衝突するときには、かなりのしぶきが生じるものもあったが、全て越波水本体のみを対象として、 η_{1OUT} をビデオ画像から目視で読みとっている。ただし、しぶきがかかり発生する状況では、越波水の実質部分のみを分離するのが難しく、 η_{1IN} が比較的大きな条件における実験値のばらつきは、

しぶきの影響と考えられる。

η_{IN} と η_{OUT} との関係は、大まかに見るとおおむね比例関係になっており、 η_{OUT} は η_{IN} のほぼ0.6倍になっていることが分かる。図中の実線は、下式の関係を示したものである。

$$\eta_{OUT} = 0.6 \eta_{IN} \quad (10)$$

この関係は、手すりの開口率によって明確な違いがないのが大きな特徴である。これは、越波水に及ぼす手すりの影響が押し波時と引き波時に異なっていることが原因していると考えられる。つまり、押し波時におけるパラベット後退型の手すりは、水平天端型で港外側に設置した手すりと同様の越波低減効果があり、引き波時には水平天端型における港内側の手すりと同様の堰上げ効果がある。例えば、手すり開口率が小さいほど越波量が減少して、押し波時に手すり背後の最大水位が低下するが、引き波時には越波水が堰上げられ、水位が増加する。水平天端型では、越波時の水位に及ぼす港内側と港外側の開口率の影響がそれぞれ非線形であり、単純にはそれらの影響が相殺されない。しかしながら、パラベット後退型の場合には、水平天端型に無い現象として越波水のパラベットへの衝突があり、その影響を含んだ2つの水位 η_{OUT} と η_{IN} の間には手すり開口率による明確な違いが見られず、押し波時と引き波時における手すりの効果が結果的に相殺されているものと考えられる。

また、もう一つの特徴は、パラベット位置によっても η_{IN} と η_{OUT} の関係があまり変化しないことである。押し波時における最大水位が比較的小さな条件では、パラベット位置が港外側堤端より離れているほうが引き波時の水位がやや低下しているが、 η_{IN} が大きくなるとその差はほとんどなくなる。人の転落が問題となるような状況は、 η_{IN} が比較的大きな条件であり、本実験でのパラベット後退距離の範囲ではパラベット位置による影響がなかった。一方、実際のパラベット後退型の護岸を考えると、パラベット後退距離はある程度限られており、本実験で想定したパラベット距離(現地換算4m, 8.2m)の範囲内になることが多いと考えられる。したがって、実際の条件を想定した範囲では、 η_{IN} と η_{OUT} との関係にパラベット後退距離の影響を無視しても問題ないと考えられる。

5. 越波水中の人の運動と転落の特徴

5.1 水平天端型での転落状況

(1)波高と人の運動状況

図-21は、波高の違いによる人体模型の運動状況を示したものであり、人体模型が移動し始めてから0.1sおきの人体模型の重心の軌跡と人体模型を示している。実験条件は、港内側および港外側に手すりを設置していないときのものであり、上段が波高13cm, 中段が15cm, 下段が17cmである。また、図中左側が港外側であり、図示しているのは港内側堤端から20cmの範囲である。

まず始めに、波高13cmについてみると、天端上を段波状に進行してくる越波水によって人体模型が倒れ込み型の転倒²⁾をしながら港内側へ越波水によって運ばれているのが分かる。ただし、この条件では、最終的に港内側堤端付近で止まっており、海中へは転落していない。波高15cmになると、滑り型の転倒²⁾が生じており、港内側に転落しているのが分かる。このように、水平天端型の防波堤において、越波水により人が転落する場合には、港外側から港内側への越波水の流れによって港内側へ落ちるのが特徴である。さらに波高が大きくなると越波量やその水位が増加するために、人体模型が転倒せずに運ばれている様子が分かる。また、手すりがない条件では、転落限界の波高が13cmから15cmの間に存在しているのが分かる。

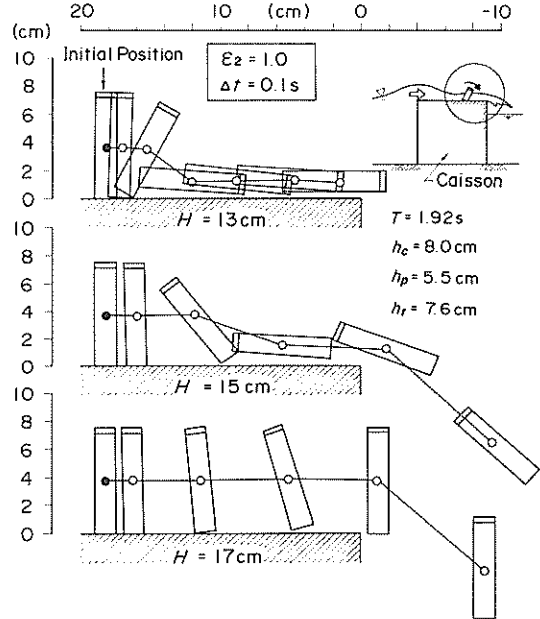


図-21 越波水中の人の運動状況
(水平天端型、手すり無し)

図-22は、前掲の図-21と同様の図であり、港内側に開口率0の不透過な手すりを設置した場合である。図中に

は三種類の波高での運動状況を示しており、上段より波高16cm, 18cm, 20cmである。波高16cmでは、越波水によって転倒せずに港内側へ移動し、手すり付近で倒れ込みながらやや上方へ持ち上げられている。その後、手すりから反射した戻り流れで港外側へ移動しており、港内側への転落は生じていない。波高が18cmになると、滑り型の転倒が生じており、人体模型が手すりの高さまで打ち上がっているが転落していない。波高20cmになると、人体模型は海中へ転落してしまっている。このとき、手すりを越える際の人体模型の重心高さは、当初立っていたときの重心高さに比べて、身長約65%ほど大きくなっている。また、不透過な手すりを設置した条件では、転落する限界の波高が18cmから20cmの間であり、手すりを設置していない条件に比べて大きくなっており、手すりを設置することによって転落がある程度抑制されているのが分かる。

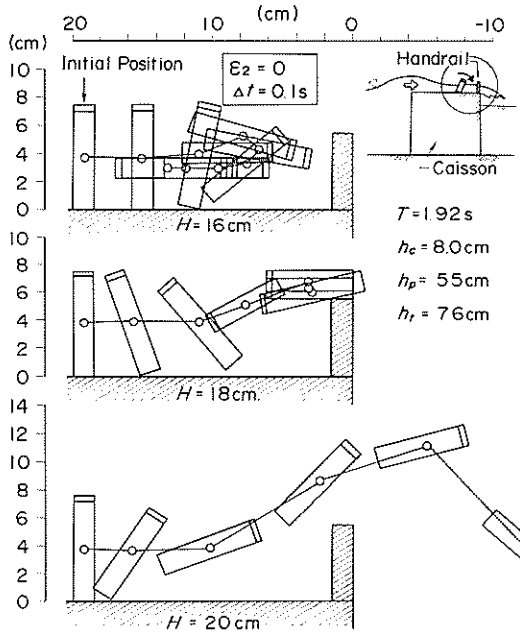


図-22 越波水中の人の運動状況
(水平天端型、手すり有り、 $\epsilon_2=0$)

図-23は、前掲の図-21と同様の図であり、港内側に開口率0.61の手すりを設置した場合の人体模型の運動状況を示したものである。図中上段より波高16cm, 20cm, 24cmで周期1.92sの条件である。手すりの開口率0のときに波高20cmで転落が生じていたのに対して、比較的透過性の高い開口率0.61の手すりでは同じ波高でも転落が生じていない。この条件では、波高24cmで人体模型が港内

側に転落しており、不透過な手すりよりもさらに転落の抑制効果があることが分かる。なお、手すりを越えた際の人体模型の重心高さは、通常立っているときの重心高さに比べて手すり位置において身長約25%ほど上がったただけであった。

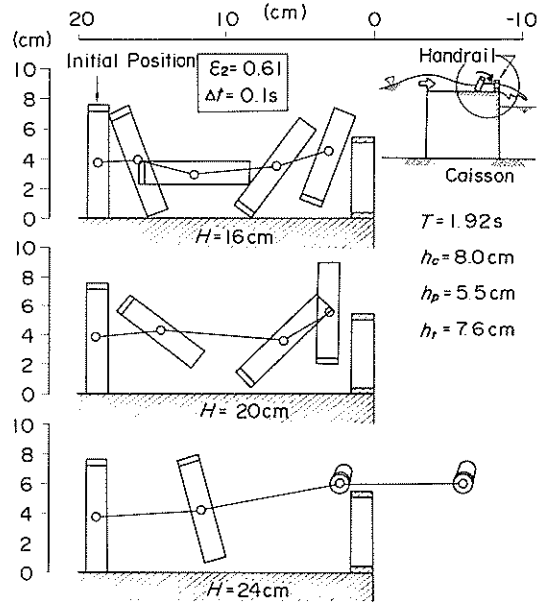


図-23 越波水中の人の運動状況
(水平天端型、手すり有り、 $\epsilon_2=0.61$)

(2)手すり開口率と人の運動状況

図-24は、港内側の手すり開口率 ϵ_2 による人体模型の運動状況の相違を示した例であり、波高は全て20cmである。図中には四つ条件での運動状況が示しており、上段より開口率0.61, 0.44, 0.24, 0の手すりを設置した条件のものであり、下段にいくほど手すりの開口率が小さくなっている。比較的開口率大きい手すり ($\epsilon_2=0.61, 0.44$) を設置した条件において、人体模型は水平方向に移動するが、手すりに衝突するが転落していない。やや開口率が小さい手すり ($\epsilon_2=0.24$) の場合、手すりからある程度離れたところでは、開口率の大きいものと同様に人体模型が水平移動しているが、手すりに近づくとやや上方に押し上げられて港内側へ転落している。また、開口率が0の場合 ($\epsilon_2=0$) には、上方に押し上げられる領域が広くなるとともに、その高さも高くなっている。これらより、開口率が小さい方が手すり位置での人体模型の打ち上げが大きくなっているのが分かる。手すり開口率による人体模型の動きの違いは、4.1(2)で説明した港内側手すり近傍での越波水の流況特性から説明することが

できる。つまり、港内側手すりの開口率の小さいほど手すり近傍での堰上げが大きくなり、手すりを乗り越えるような越波状況になるために、人体模型が転落し易くなっていると考えられる。

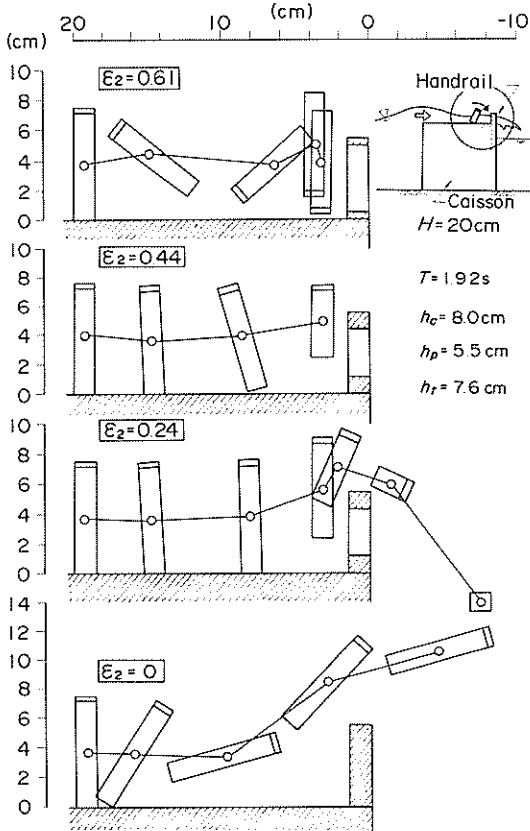


図-24 手すりの違いによる人の運動特性 (波高20cm)

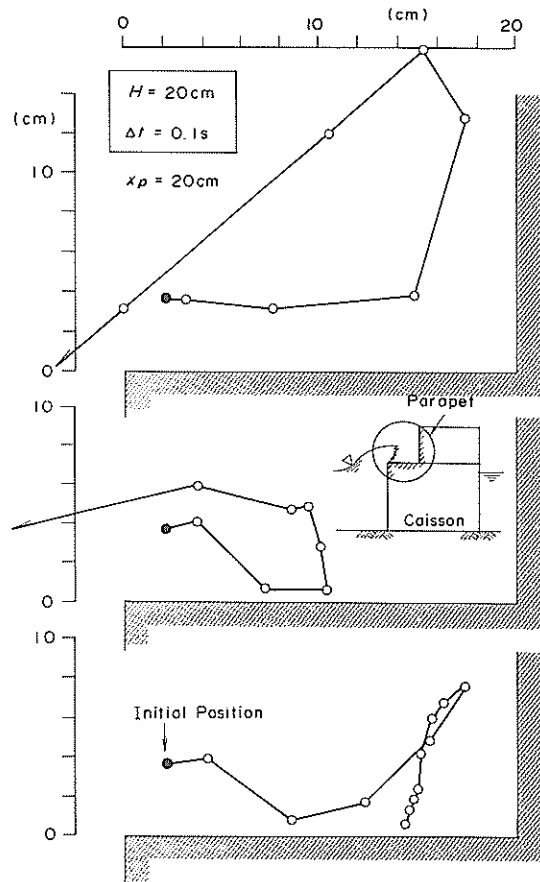
5.2 パラペット後退型での転落状況

(1)手すりを設置していない場合の人の運動状況

図-25は、パラペット後退型における越波時の人体模型の運動状況を示したものであり、0.1sおきの重心の軌跡を示している。なお、港外側堤端には手すりを設置しておらず、波高20cmの条件である。また、図には三つの運動状況を示しているが、これらは全て同じ実験条件のものである。パラペット後退型堤体上における越波水の運動は比較的複雑であるために、同じ実験条件でも人体模型の動きにばらつきが生じる。

上段の図では、段波状に進行してくる越波水の先端部によって人体模型が運ばれたようになっており、パラペット位置での越波水の打ち上げとともに人体模型もかなり高さまで打ち上がっている。その後、越波水の落下と

ともに人体模型も港外側へ落下している。中段の図では、人体模型が倒れ込み型の転倒となっており、その後床面に押しつぶされたようになっている。このとき、越波水は既にパラペット前面で高く打ち上がっており、その落水によって人体模型が港外側へ落下していく状況となる。下段の図では、中段の図と同様に倒れ込み型の転倒が生じており、その後パラペット近くで打ち上がっているが、港外側に転落していない。これは、人体模型が越波水の先端よりも遅れて進行したために、戻り流れに乗り遅れたものと考えられる。



$T=1.92s$ $h_c=8.0cm$ $h_p=5.5cm$ $h_r=7.6cm$

図-25 パラペット後退型での人の運動状況 (手すり無し、波高20cm)

図-26は、波高の違いによる人体模型の運動状況を示しており、港外側に手すりを設置していない条件のものである。前掲の図-25で説明したように同じ条件でも人体模型の動きにばらつきがあるが、ここでは人体模型が越波水の先端部によって運ばれているものについて示してい

る。また、図中には三つの運動状況を示しているが、上段よりそれぞれ波高20cm, 18cm, 14cmで周期1.92sの場合である。これによると、波高の大きい方が、パラベットの位置での人体模型の打ち上げが大きくなっていることが分かる。波高14cmでは、パラベットの近傍での打ち上げがほとんどないのに対して、波高18cmで重心位置が身長約80%ほど、波高20cmで約170%ほど打ち上がっている。また、この図中において最も小さい波高14cmでも転落が生じていることが分かる。

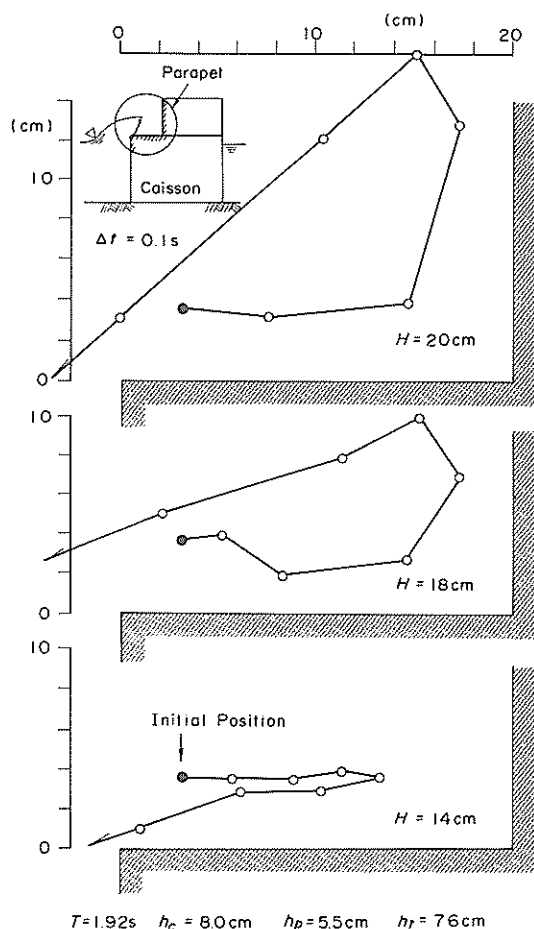


図-26 波高と人の運動状況
(パラベット後退型、手すり無し)

(2)手すりを設置した場合の人の運動状況

図-27は、開口率0.61の手すりを港外側堤端に設置した場合における0.1sおきの人の運動状況を示すものであり、波高20cmの場合である。この場合には、7回の試行のうち転落は1回しか生じていない。ここでは転落したものを上段の図に人体模型の重心の軌跡と人体模型の位置を

示している。また、転落していないものの中で代表的な2例を中段と下段の図に、人体模型の重心のみについて示している。港外側に転落した事例では、倒れ込み型の転倒をしながらパラベットのほうに移動し、パラベット位置で上方に押し上げられている。その後、引き波時において、港外側に倒れ込みながら移動し、ついには落下している。

転落が生じていない事例では、大きく二つのパターンがある。一つは下段の図に示されているように、人体模型が段波状に進行する越波水の先端に乗ってパラベット位置での打ち上がりも大きくなるが、引き波時に手すりに衝突して転落していない。もう一つは中段の図に示されているように、パラベット付近での打ち上がりが小さく、越波水の中に潜り込んでしまうものである。これは、越波水の先端よりも人体模型がやや遅れて運動しており、引き波時の落水が人体模型に衝突し、その渦に巻き込まれて人体模型が回転している。このような場合、引き波時における手すり位置での水位が最大となる時に、必ずしも人体模型が手すり位置に到達していないのが特徴である。

この様にパラベット後退型では、人体模型の動きが複雑であり、パラベットや手すりに衝突する際に大きな力が生じたり、潜り込み時間が長くなるなど、転落が生じていなくてもかなり人体にとって危険な状況になることがあることに注意する必要がある。

図-28は、前掲の図-27と同様の実験条件であり、不透過な手すりを設置した場合である。この実験条件では、7回の試行の内、1度も転落が生じていない。図中には、三つの運動状況が示してあるが、これらは全て同じ波高であり、7回の試行の中で特徴のあるものをあげている。この実験では、人体模型の初期位置が港外側堤端から6cmとなっている。この場合手すりが不透過なために、越波水が手すり上から巻き込みながら打ち込んでくるような状況となる。打ち込む範囲の中に人体模型の初期位置があり、人体模型は上から打ち込んでくる越波水によって倒れ込み型の転倒が生じ易くなっている。例えば、上段の図では、打ち込んだ越波水によって人体模型は床面に倒れ込んでおり、その後パラベット位置で打ち上げられずに戻り流れによって手すり近傍でやや打ち上げられている。中段の図では、上段のように始め倒れ込み型の転倒が生じているが、パラベット位置でやや打ち上げられているのが特徴である。このとき、戻り流れにやや遅れて打ち上がっているために、港外側へはそれほど移動していない。なお、不透過な手すりの場合の特徴は、パラベット位置での人体模型の打ち上げが、透過性の手すり

に比べて小さくなっていることである。

手すりのある場合の越波状況は、手すりからある程度離れるとどのような開口率の手すりでもほぼ一方の流れになるが、手すり近傍では開口率によってその状況がかなり異なっている。透過性の低い手すりほど、手すり近傍で上からの打ち込みが相対的に増加し、このためその近くに人体模型がある場合には越波水の打ち込みによって倒れ込み型の転倒となることが多いと考えられる。

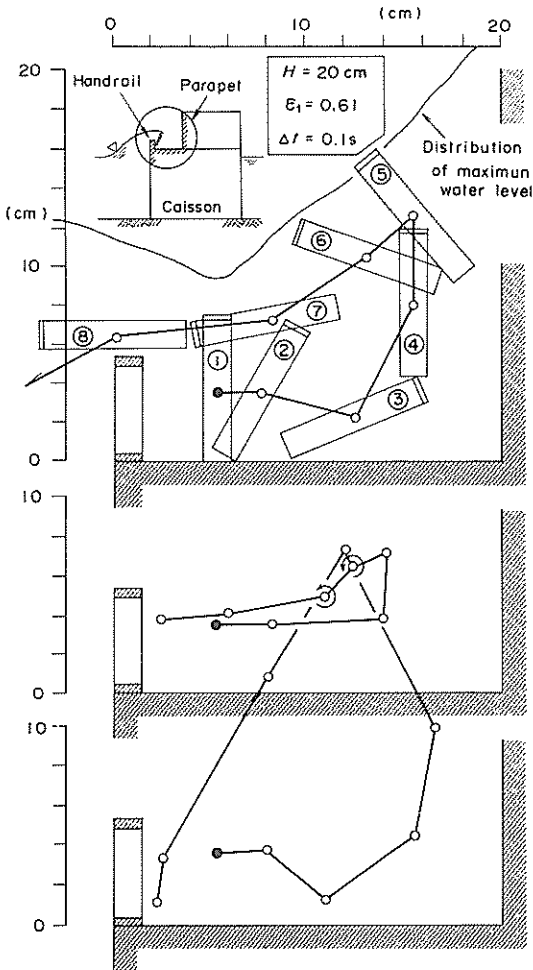
(3)人の立っている位置による運動状況の違い

図-29は、人体模型の初期位置を変え、その0.1sおきの運動状況を示したものであり、手すり開口率0.61、波高24cmの条件のものである。上段の図は人体模型の初期位置が手すり直後にある場合、中段の図が堤体前面より20cmの位置にある場合、下段の図がパラペット直前にある

場合である。なお、パラペットの位置は港外側堤端より41cmに設置している。

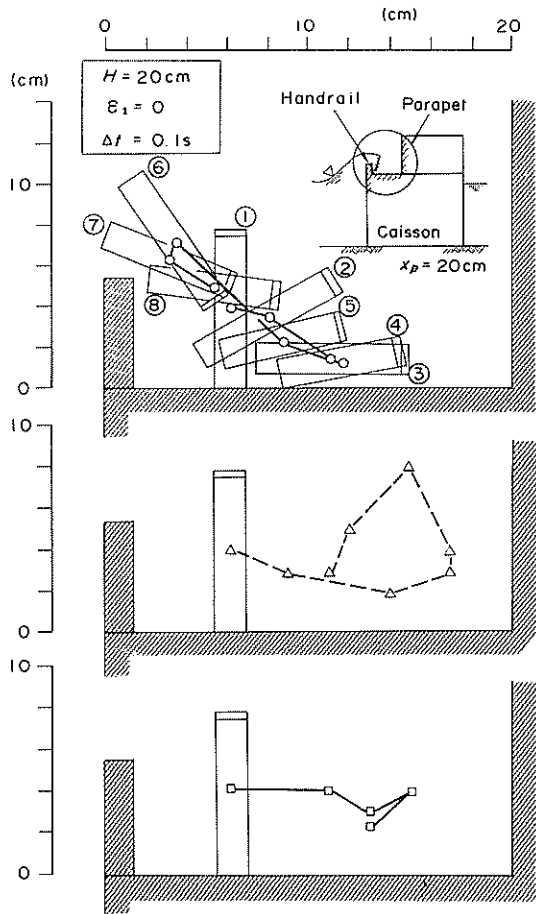
上段では、越波水が手すり上から打ち込んでくる範囲に人体模型があるために、倒れ込み型の転倒が生じている。その後、床面に衝突して、パラペットの方へ運ばれながら、パラペット近傍でやや打ち上がっていく様子が分かる。倒れ込んで床面に衝突している間に、越波水が人体模型よりも先行して進行しているために、パラペットには衝突していない。また、打ち上がった人体模型は、戻り流れとともに港外側へ進行している。

中段の図に示されるように、手すりからやや離れた位置に人体模型がある場合、人体模型の初期位置が越波水の打ち込み範囲外であり、人体模型には段波状に進行してくる越波水が作用する。この条件では、人体模型は滑



$T=1.92s$ $h_c=8.0cm$ $h_p=5.5cm$ $h_r=7.6cm$

図-27 パラペット後退型での人の運動状況 (手すり有り、 $\epsilon_2=0.61$ 、波高20cm)



$T=1.92s$ $h_c=8.0cm$ $h_p=5.5cm$ $h_r=7.6cm$

図-28 パラペット後退型での人の運動状況 (手すり有り、 $\epsilon_2=0$ 、波高20cm)

り型の転倒を示しており、段波状に進行してくる越波水の先端部分によってパラペット方向に運ばれている。したがって、パラペット位置における越波水の打ち上げが最も大きくなるときに、人体模型の打ち上げも大きくなり、上段の図に比べてその最大高さが大きくなっているのが分かる。また、引き波時にも最も流速が速くなる部分に人体模型が乗っているために、その際の移動速度が速く、転落は生じていないものの、かなりの速さで手すりに衝突している。

パラペット直前に人体模型がある場合(図中下段)、段波状に進行してきた越波水が人体模型に衝突するが、背後にパラペットがあるために転倒は生じていない。その後、越波水がパラペットの上方へ打ち上がるとともに、人体模型も上方へ上がっていった。引き波時には、戻り流れとともに港外側へ移動するが、その速度は比較的小さくなっている。これは、人体模型がパラペット前面で上昇し、最も打ち上がったときには、最も速い戻り流れが生じる越波水の先端部分は既に港外側へ進行して

いるために、残った越波水が港外側へ排水される比較的ゆっくりとした速度で港内側へ移動するためである。

このように人のいる位置によって危険の種類が変わってくる。港外側の端に近いほど、越波水が直接打ち込んでくる可能性が高いために、波面の衝突と倒れ込んで転倒する際の床面への衝突の危険が高くなる。港外側からある程度離れた位置では、越波水の先端部に運ばれるために、パラペットへの衝突や引き波時の手すりへの衝突の危険が高くなる。そこで、本実験の結果からは、どの位置でも危険の程度はそれほど変わらないものと考えられる。ただし、実際の平面的な越波現象では、有限区間で越波するために港外側からある程度離れると横方向へも越波水が分散することが考えられる。したがって、港外側からなるべく離れた方が、人体への危険は比較的小くなる可能性がある。

6. 越波による人の転落限界条件

6.1 転落限界時の打ち上げ高さ

(1) 天端上の最大水位と転落率との関係

図-30は、天端上から人が転落する位置における最大水位と転落率 P との関係を表したものである。なお、転落する位置は、水平天端型の場合に港内側堤端となり、パラペット後退型の場合に港外側堤端となる。図中横軸には、それらの位置での手すり上の最大水位(η_2-h_p または $\eta_{OUT}-h_p$)とそれを身長で無次元化したもの($(\eta_2-h_p)/h_t$ または $(\eta_{OUT}-h_p)/h_t$)をとっている。図中には、水平天端型の堤体を○、またパラペット後退型を●としており、パラペット後退型では二つのパラペット位置($x_p=19, 41$ cm)における結果を合わせて示している。手すり位置での最大水位 η_2 (または η_{OUT})が手すり高さ h_p よりも小さいときには、人体模型が手すりに引っかかるために天端上から転落しないが、その水位が手すりよりもある程度高くなると転落が生じ始める。例えば、水平天端型では手すり上の最大水位が η_2-h_p が身長 h_t の約17%から転落し始めており、 η_2-h_p が身長 h_t の40%程度で約50%の転落率、 η_2-h_p が身長 h_t の55%以上になるとほぼ100%転落しているのが分かる。また、パラペット後退型では、転落し始める水位は水平天端型とほぼ同じになっているが、手すり上の水位が高くなっても水平天端型ほど転落率が上がらずに、転落率のばらつきも比較的大きいのが特徴である。これは、パラペット後退型での越波状況が、比較複雑であることが原因していると考えられる。つまり、水平天端型の場合、港内側手すり位置での水位が最大となるときに人体模型が転落することが多く単純であるが、パ

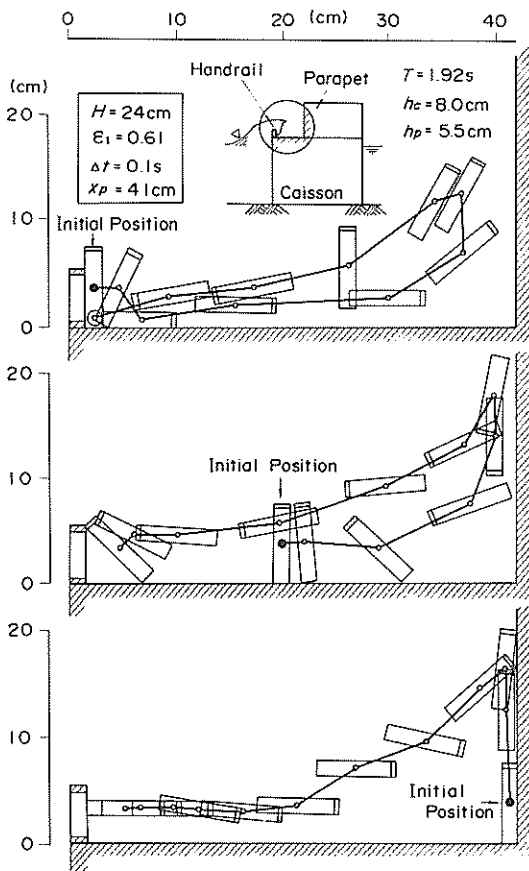


図-29 人の位置による運動状況の違い

ラベット後退型の場合、引き波時の水位が最大となる時間と人体模型が手すり位置に運ばれる時間に位相差があることが多くなるなど複雑なためである。

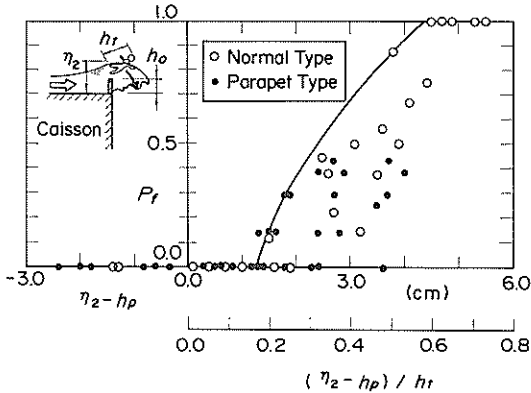


図-30 転落位置での最大水位と転落率 P_f との関係

図中の実線は、二つの構造形式を合わせた実験値の上限を包絡したものである。前述のとおり、手すり位置での最大水位と転落率との関係にばらつきがあるが、転落する限界の水位がほぼ一致していることが分かる。この限界水位は、手すり上からの最大水位で考えると、身長 h_t の約17%であった。すなわち、人が転落する限界の最大水位 η_{2cr} および η_{1OUTcr} は、以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \eta_{2cr} &= 0.17h_t + h_p \\ \eta_{1OUTcr} &= 0.17h_t + h_p \end{aligned} \quad (11)$$

なお、図に示していないが、手すりが無い場合にも転落限界の状況における転落位置での最大水位が身長 h_t の約17%となり、 $h_p = 0$ とすると式(11)に一致した。

(2)転落限界時の打ち上げ高さの算定方法

図-31は、越波時における人の転落の有無や転落限界の打ち上げ高さなどを求める方法をまとめたフローである。堤体条件や波浪条件などと打ち上げ高さ η_1 との関係は、越波水の運動モデルによって求めることができる。これについては第1報で既に検討しており、その概要は2.(1)で紹介している。なお、天端上に手すりを設置した場合の波高と打ち上げ高さとの関係については、6.2で検討している。水平天端型の堤体を越えた越波水は、まず始めに港外側堤端に設置する手すりによって越波量が減少し、手すり背後の最大水位が低下する。この水位の低下は手すりの開口率などによって異なり、前掲の式(8)では港外側堤端に設置した手すりの影響を考慮した水位を求めることができる。その後、越波水が港内側の手すり位

置に到達すると、手すり近くで越波水が堰上げられる。堰上げられる高さは手すりの形状によって異なり、前掲の式(9)では港内側の手すりを考慮した最大水位を計算することができる。したがって、波高などの条件が分かれば、堤体前面での打ち上げ高さが分かるとともに港内側堤端での手すりの影響を考慮した最大水位が分かる。天端上での人の転落の有無は、転落する位置での最大水位から分かり、前掲の式(11)によって転落する限界の最大水位が計算される。また、これまで説明したフローを逆に考えれば、転落限界となる打ち上げ高さや波高などを計算することができる。

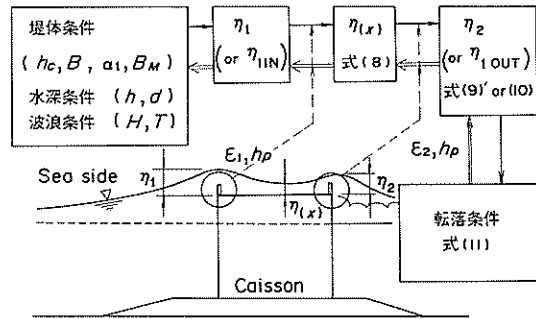


図-31 転落限界打ち上げ高さ η_{1a} を計算するフロー

パラベット後退型においても水平天端型と同じように転落限界となる打ち上げ高さなどを求めることができる。押し波時における港外側堤端での最大水位 η_{1IN} は水平天端型での η_1 に相当し、引き波時での同位置の最大水位 η_{1OUT} は η_2 に相当する。前掲式(10)では、 η_{1IN} と η_{1OUT} との関係を計算することができ、 η_{1IN} によって転落の有無が分かる。

(3)手すりが無い場合での転落限界時の打ち上げ高さ

手すりの無い場合には、身長152cmの人を対象とすると、転落位置での最大水位が26cmのときに転落限界となる。このとき、水平天端型の堤体では堤体前面の打ち上げ高さが65cmで、パラベット後退型では港外側堤端の最大水位が43cmとなる。したがって、パラベット後退型の方が小さな打ち上げ高さで転落し、水平天端型よりもやや転落しやすくなっているのが分かる。一方、越波によって人が転倒するときの打ち上げ高さは、身長152cmで標準型の体型を対象とした場合に0.5mとなる。このことから天端上の人が転倒するような越波状況の時には、越波水によって流され、海中へ転落してしまう可能性もかなり高いことが分かる。

(4)手すりがある場合での転落限界時の打ち上げ高さ

図-32は、水平天端型において身長 h_t と転落限界打ち上

げ高さ η_{1d} との関係を示したものである。計算に用いた手すりの高さ h_p は110cmであり、開口率がそれぞれ0と0.7の2種類手すりを組み合わせて港内側と港外側に設置した4ケースについて計算した。なお、開口率0の手すりはパラベットを兼ねた壁型の手すりを想定しており、開口率0.7は柵型の手すりを想定している。これによると、身長が大きくなると転落限界打ち上げ高さも大きくなり、やや転落しにくくなっているが、その差はそれほど大きくない。例えば、港内側と港外側の手すりが両者とも不透過な場合には、身長100cmで η_{1d} が約2.4m、身長180cmで約2.5mとなっている。また、手すり形状の各組み合わせを比較すると、港外側手すりが不透過なものが転落しにくく、港内側手すりが透過性になるとさらに転落しにくくなる傾向があることが分かる。

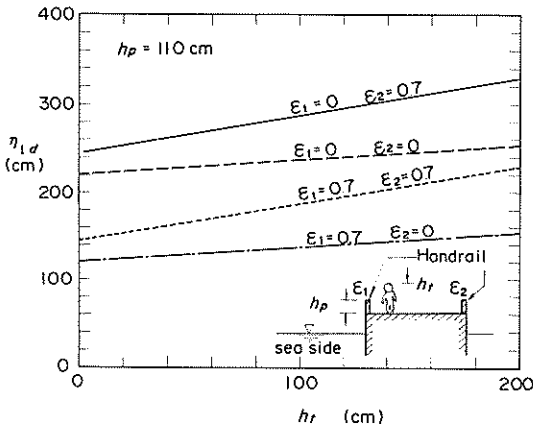


図-32 身長 h_t と転落限界打ち上げ高さ η_{1d} ($h_p=110$ cm)

前述のとおり、手すりのない条件での転落限界打ち上げ高さは身長152cmのとき0.7mであり、これと同じ身長を対象とした手すり設置時の転落限界打ち上げ高さを比較すると手すりによる転落防止効果が分かる。例えば、開口率0.7の手すりを港内外側両端に設置した場合、転落限界打ち上げ高さは2.1mであり、手すりのない場合に比べて約3倍となり、かなり転落しにくくなる。また、港外側の手すりを開口率0のものにすると、手すりのない場合に比べて4.4倍も大きくなり、さらに転落しにくくなること分かる。このように、防波堤上に設置する壁型や柵型の手すりは越波時における人の転落防止効果があることが明らかである。

図-33は、手すりの高さ h_p と転落限界打ち上げ高さ η_{1d} との関係を示したものである。堤体は水平天端型を対象とし、身長は152cmとして計算している。なお、手すり開口率は前掲の図-32と同様の組み合わせについて計算し

ている。人の転落は転落位置での最大水位によってほぼ決まるために、その位置に手すりを設置したときに手すりの高さによって転落限界打ち上げ高さもかなり変化する。例えば、防波堤上の両端に不透過な手すりを設置した場合には、その高さ h_p が50cmのときに転落限界打ち上げ高さ η_{1d} が1.3mとなっているが、 h_p が100cmと高くなると η_{1d} が2.3mとなっている。また、港外側の手すりが不透過な場合($\epsilon_1=0$)、開口率0.7の手すりよりも手すりの高さによる転落限界打ち上げ高さの変化が大きくなる。ただし、実際に転落防止用として用いられる手すりの高さは90から110cmが多く、その範囲では転落限界の打ち上げ高さが最大で±10%程度変化している。

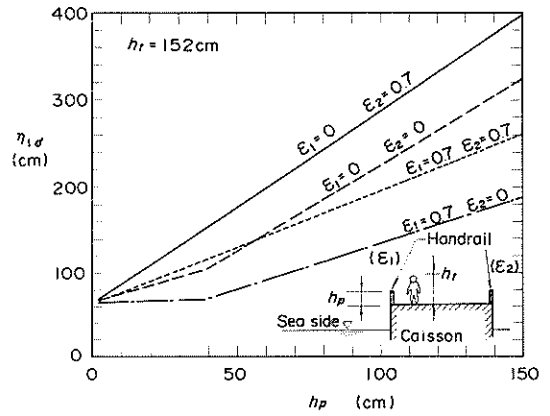


図-33 手すり高さ h_p と転落限界打ち上げ高さ η_{1d} ($h_t=152$ cm)

図-34(a)は、水平天端型における手すり開口率と転落限界打ち上げ高さとの関係を示すものであり、身長152cm、手すり高さ110cmの条件である。転落限界打ち上げ高さは、等高線によって図示している。これによると、港外側の手すり開口率が同じ場合、港内側の手すり開口率 ϵ_2 が0.5以下では転落限界打ち上げ高さが一定であるが、 ϵ_2 が0.5以上では ϵ_2 が大きいほど転落限界打ち上げ高さが大きくなり、転落しにくくなる。図-34(b)は、身長116cm、手すり高さ110cmで(a)と同様の図である。図-34(c)は身長152cm、手すり高さ90cm、図-34(d)は身長116cm、手すり高さ90cmの条件での転落限界打ち上げ高さを示したものである。手すり形状がわかれば、これらの図から転落限界打ち上げ高さを読みとることができる。なお、身長152cmは12才の平均身長であり、身長116cmは6才の平均身長である。また、手すり高さが90または110cm以外の場合には、転落限界打ち上げ高さが手すり高さに関して線形と考えて、表から読みとった値を用いて内

挿または外挿して求めることができる。ただし、図中において開口率 ϵ_2 が1.0の場合、手すりが越波水に影響を及ぼさないが、柵があるとして計算したものであり、手すりが無い条件ではない。

(5)転落限界時の打ち上げ高さの簡易設定方法

転落限界時の打ち上げ高さは、人の身長・手すりの高さ・手すりの開口率が主なパラメータになっていることを説明してきた。ここでは、簡易的な検討をする際に参考となる転落限界の打ち上げ高さを示す。これは、人の

身長などの基本的な条件を限定して、手すりの形状だけによって表すものである。対象とした人の身長は152cmを基本とした。この身長は、人の転倒を検討した際に用いたものと同様であり、12歳の平均身長に対応している。また、手すりの高さは、転落防止用として最もよく用いられている110cmとして考えている。手すりの形状は、前述のとおり柵型・壁型・チェーン型に分類でき、柵型と壁型についてはそれぞれの代表的な開口率と考えられる0.7、0を用いた。また、チェーン型は、支柱間のチェー

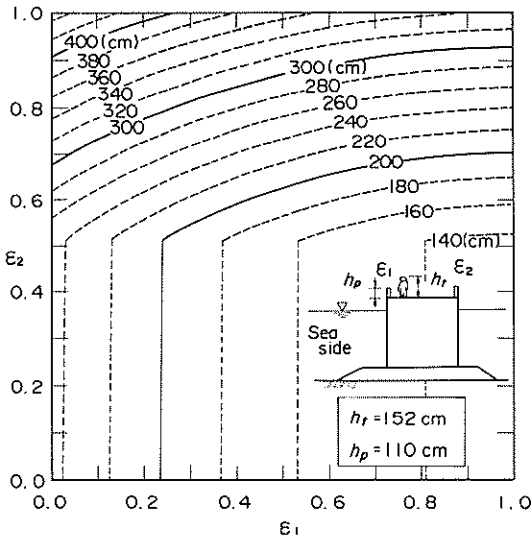


図-34(a) 手すり開口率と転落限界打ち上げ高さ η_{1d}
($h_t=152\text{cm}$ 、 $h_p=110\text{cm}$)

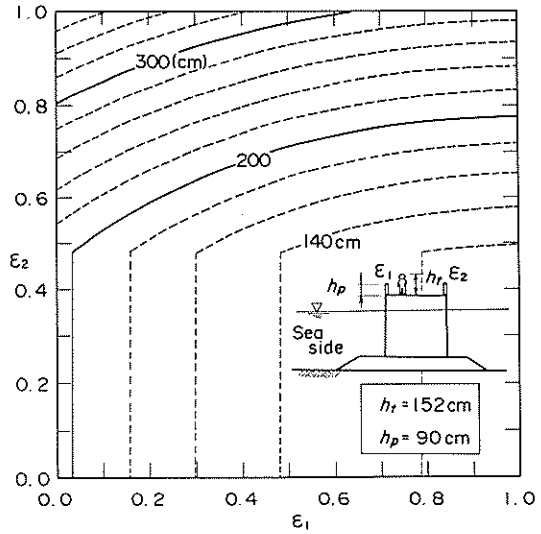


図-34(c) 手すり開口率と転落限界打ち上げ高さ η_{1d}
($h_t=152\text{cm}$ 、 $h_p=90\text{cm}$)

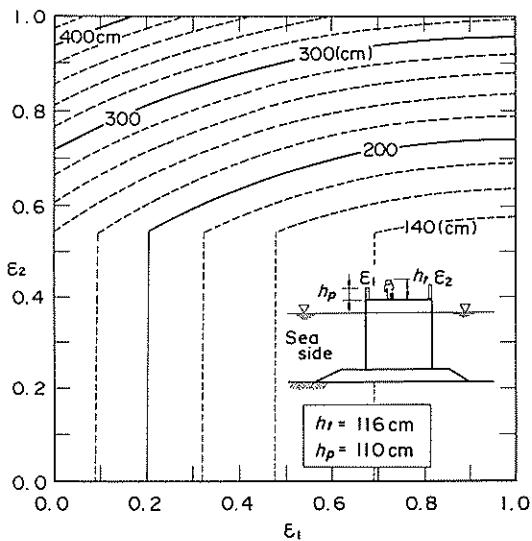


図-34(b) 手すり開口率と転落限界打ち上げ高さ η_{1d}
($h_t=116\text{cm}$ 、 $h_p=110\text{cm}$)

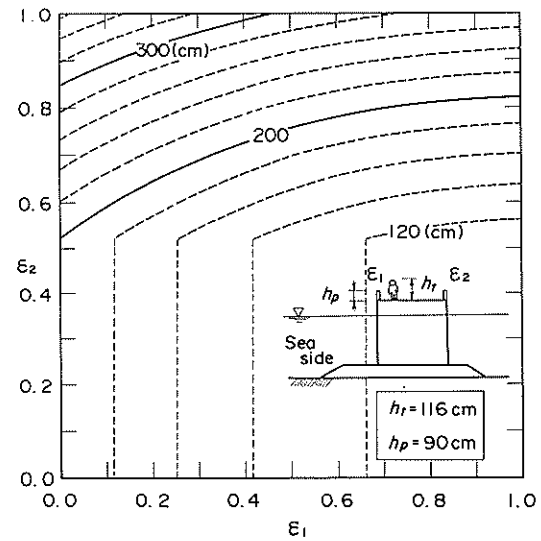


図-34(d) 手すり開口率と転落限界打ち上げ高さ η_{1d}
($h_t=116\text{cm}$ 、 $h_p=90\text{cm}$)

ンの本数にもよるが通常のタイプでは転落防止効果が低いと考えられるため、転落限界の条件を検討する上では手すりが無いものと同等と考えた。

以上の仮定に基づいて算出したのが、表-2, 3 に示しているものであり、手すりの形状が分かれば転落限界打ち上げ高さを求めることができる。表-2 は水平天端型を対象としたものであり、表-3 はパラペット後退型を対象としたものである。例えば、水平天端型の堤体において両端の手すりが壁型のとき転落限界打ち上げ高さは2.5mであり、それらが柵型になると2.1m、チェーン型または手すりが無い場合に0.7mとなる。最も転落防止効果の高い組み合わせは、港外側に壁型の手すりを設置し、港内側に柵型の手すりを設置した場合であり、そのときの転落限界打ち上げ高さは3.1mとなる。

表-2 代表的な条件での転落限界打ち上げ高さ η_{ld} (水平天端型)

港外側端 手すり	港内側端 手すり	転落限界打ち上げ高さ η_{ld} (m)
壁型	壁型	2.5
	柵型	3.1
柵型	チェーン型、 無	1.3
	壁型	1.5
チェーン型、 無	柵型	2.1
	チェーン型、 無	0.8
チェーン型、 無	壁型	1.4
	柵型	2.0
	チェーン型、 無	0.7

表-3 代表的な条件での転落限界打ち上げ高さ η_{ld} (パラペット後退型)

港外側手すり	転落限界打ち上げ高さ η_{ld} (m)
壁型、柵型	2.3
チェーン型、無	0.5

6.2 転落限界時の波高の算定

(1)波高と打ち上げ高さとの関係

図-35は、波高 H と打ち上げ高さ R (静水面を基準にしたもの)との関係を示すものであり、前掲の図-6の水平天端型の堤体で手すりを設置しないときの実験結果であ

る。実験周期は、1.44s~3.48sの5周期である。また、図中の点線は、越波水の運動モデルによる計算値であり、その算定式は前掲式(1)~(4)で示される。なお、越波水の運動モデルでは、周期の影響を考慮していないので、各周期の実験値に対して1本の線となっている。実験値では、波高が大きくなると、当然打ち上げ高さも大きくなっており、その関係はほぼ比例関係となっているのが分かる。周期による違いは比較的小さいが、周期1.92sでは打ち上げ高さがやや小さく、周期1.44sや3.48sではやや大きめとなっている。また、計算値は、実験値の上限値を示しており、越波水の運動モデルがほぼ妥当であることが今回の実験結果からも認められる。

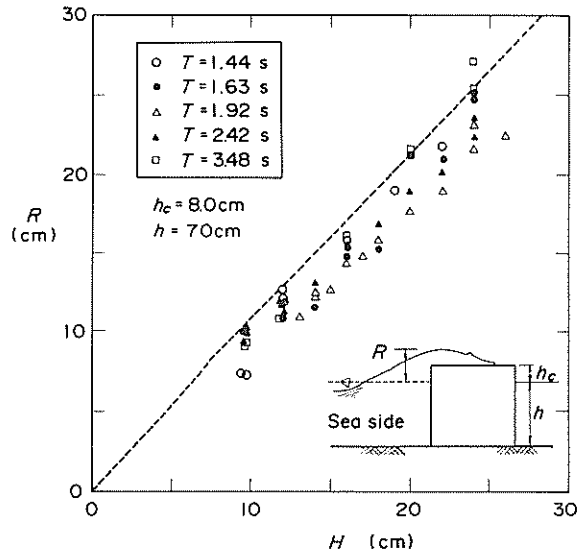


図-35 手すり無しでの波高 H と打ち上げ高さ R (静水面を基準)との関係

図-36は、手すりがある場合の波高と静水面上の打ち上げ高さ R との関係を示すものである。なお、実験波は周期1.92sのみを対象としている。実験は、港外側の手すり開口率0~0.61までの4種類と手すりの無いもの(図中には $\epsilon_1=1.0$ として表している)を行っている。また、図中には、越波水の運動モデルによる計算値も合わせて示しており、実線が天端高さ8cm(手すりを設置しないときの計算値に一致)での計算値を、また点線が天端高さ13.5cm(堤体の天端高さに手すりの高さを足し合わせたもの)での計算値を示している。手すりが無い条件の実験値は、同様の条件での計算値と比べてやや小さくなっている。これは、前掲の図-35で説明したように、周期1.92sの実験値が他の周期の中でも下限値となっているため

であり、他の周期の実験結果を合わせるとほぼ計算値に一致すると考えられる。比較的開口率が大きい手すり ($\epsilon_1=0.44, 0.61$ の2種類)を設置した条件での実験値では、手すりが無いものと打ち上げ高さがほぼ同じになっているのが、開口率0.24の手すりや不透過な手すり ($\epsilon_1=0.0$)では他の条件よりも打ち上げ高さがやや大きくなっているのが分かる。第一報の検討によると、天端高さが大きいほど、打ち上げ高さは大きくなる傾向が認められている。港外側堤端に不透過な手すりを設置した場合には、天端高さが手すりの高さ分だけ上がったのと同じことであり、その条件での打ち上げ高さが他よりも大きくなっていることはこれまでの知見と一致している。

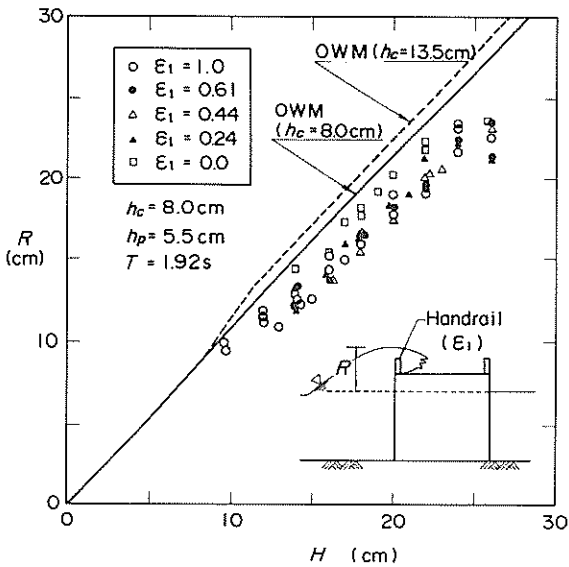


図-36 手すり設置時の波高 H と打ち上げ高さ R (静水面を基準)との関係

したがって、比較的透過性の高い手すりでは打ち上げ高さに及ぼす手すりの影響が小さいと考え、打ち上げ高さの算定には手すりのない条件での越波水の運動モデルを用いることができる。また、透過性の低い手すりや不透過な手すりでは、天端高さが手すり高さだけ高いとして、越波水の運動モデルを用いることにする。以下の式は手すりを考慮した場合の計算上の天端高さ h_c^* を示したものであり、手すりの影響がでてくる開口率として0.4以下を考えることにした。

$$h_c^* = \begin{cases} h_c & : \epsilon_1 < 0.4 \\ h_c + h_p & : \epsilon_1 \geq 0.4 \end{cases} \quad (12)$$

実験値と計算値を比較すると、いずれも実験値の方が小さくなっているが、透過性の手すりとは非透過性の手すりとの相対的な関係は、両者ともほぼ同様の傾向を示しているのが分かる。

(2)転落限界時における波高の算定方法

越波水の運動モデルでは、越波時における波高と打ち上げ高さの関係が線形関係ではなく、波高と天端高さとの比を主なパラメータとして波頂高比(静水面を基準とした打ち上げ高さ)と波高との比)が変化する。したがって、手すり等の条件により転落限界打ち上げ高さが決まったとしても、堤体の天端高さによってそのときの波高が変化する。越波水の運動モデルで表すと、式(13)により転落限界時の波高 H_{md} が表される。なお、不規則波で考えるときには H_{md} を最高波高に対応すると考えて、転落限界時の有義波高 H_{sd} を求める。また、そのときの有義波高と最高波高との関係は、約2000波程度の継続時間の期待値を考えて式(14)で表している。

$$H_{md} = \frac{2 \cdot (h_c + \eta_{1d})}{1 + \sqrt{1 + 4\alpha h_c^* / h_m}} \quad (13)$$

$$H_{sd} = \frac{1}{2} \cdot H_{md} \quad (14)$$

図-37は、実験波高 H を式(13)で計算される転落限界波高 H_d で無次元化したものと転落率 P_d との関係を示したものである。これによると、実験における転落は計算で求めた転落限界波高の約1.2倍程度の波高から生じているのが分かる。また、 H/H_d と転落率との関係は、手すりの種類によらず概ね同じ傾向を示している。したがって、計算では実際よりもやや大きな転落限界波高が算定されているが、手すりの開口率による違いをほぼ表すことができていると考えられ、式(13)で示される計算法がほぼ妥当であることが分かる。

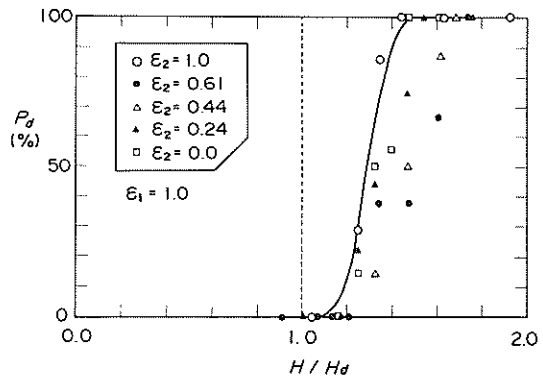


図-37 転落限界無次元波高 H/H_d と転落率 P_d との関係

7. まとめ

本研究により以下の主要な結果が得られた。

- (1)防波堤上の港外側に設置した手すりには、越波時に手すり背後の水位を低減させる効果がある。これは手すり開口率が小さなほど、水位が低減する傾向にある。また、防波堤上の港内側に設置した手すりによって、越波時に手すり位置での水位の堰上げが見られる。手すりの開口率が低く透過性が小さくなるほど、堰上げが大きくなる。この港内および港外側の手すりが及ぼす水位への影響をそれぞれ手すりの開口率と高さをパラメータとする実験式によって表した。
- (2)越波時に人が防波堤（天端面が水平な通常の混成堤）から海中へ転落するときには港内側へ落ちる。その転落状況は、港内側の手すりの形状によって異なり、透過性が高い手すりでは人は水平に移動して転落するのに対し、透過性が低いと手すり位置で人が上方へ押し上げられて転落する。人が転落する条件は、港内側端での手すり上の最大水位が身長 L の17%となったときである。
- (3)港外側手すりの開口率が小さいほど、また港内側手すりの開口率が大きいほど、転落限界時の打ち上げ高さは大きくなり、転落しにくくなる。典型的な条件における転落限界打ち上げ高さを提案することができた。例えば、水平天端型の堤体で港内および港外側の両端に柵型の手すりを設置した場合、転落限界打ち上げ高さは2.1mとなる。これに対して、手すりが無い場合にはわずか0.7mであり、手すりによって安全性がかなり高まることが分かった。
- (4)越波水の運動モデルをもとにして、波高と打ち上げ高さを関係付け、転落限界時の有義波高や最高波高が算定できる式を提案した。
- (5)パラベット後退型の堤体の場合についても同様の検討を行っている。
 - ①堤体前面の最大水位は、手すりの開口率やパラベット位置の変化に関わらず、引き波時が押し波時の約0.6倍になることがわかった。
 - ②パラベット後退型において人が転落する場合、押し波時によって一旦パラベットの方へ移動した後に、パラベットで反射した波が引くときに港外側へ移動し転落する。
 - ③パラベット後退型の場合には、引き波時における港外側端の最大水位が水平天端型の堤体と同じく身長 L の17%となったときである。また、転落限界時における打ち上げ高さは、港外側の手すり開口率によらず一定となる。港外側端に手すりを設置しているときには転落限界時の打ち上げ高さが2.3mであり、手すりが無い場合は0.5m

となる。

本研究を含むこれまでの一連の研究によって、波浪に対する防波堤上の人の危険の特性が明らかになり、様々な危険を定量的に波の打ち上げ高さや波高で示すことが可能となった。なお、防波堤上の危険は、①波しぶきが発生する状況、②越波が発生する状況、③越波水によって転倒する状況、④越波水によって海中へ転落する状況の4つを対象としており、本報告では④について明らかにしてきた。また、これらの成果によって、波浪に対する親水性施設での人の安全が評価できるようになった。つまり、施設の稼働率や各危険状況が生じるような確率を算出することができるようになり、施設の安全性を頻度的に評価することができる。さらに、施設が入園禁止となってから各危険となるまでの余裕時間を計算することができ、施設の安全性を時間的に評価することができるようになった。

これまでは主に断面的な検討で人の安全を検討してきたが、実際には平面的な越波特性に基づいた人の安全性の検討も重要であり、今後の検討課題の一つである。また、人の対する施設の安全性の評価を実際に施設の設計段階や運用段階に応用していくことも重要な課題の一つと考えている。

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。
(1993年11月30日受付)

参考文献

- (1) 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一郎：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（第一報）～、港湾技術研究所報告、第31巻、第1号、1992、pp.3-50
- (2) 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一郎：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（第二報）～、港湾技術研究所報告、第31巻、第4号、1992、pp.3-29
- (3) 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、pp.716-720
- (4) 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事例解析、海洋開発論文集、Vol.8、1992、pp.391-396
- (5) 高橋重雄・遠藤仁彦：越波による人の転倒限界条件とその現地への適用、海洋開発論文集、Vol.9、1993、pp.295-300

- (6) 遠藤仁彦・高橋重雄：親水性施設の越波に対する安全性の評価方法に関する事例研究，海岸工学論文集第40巻，1993，pp.1131-1135
- (7) 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.

η_{1outcr}	：パラベット後退型における転落限界時の港内側堤端での最大水位
η_{1t}	：転倒限界時の打ち上げ高さ（堤体天端高さを基準）
η_{1s}	：波しぶき発生時の打ち上げ高さ（堤体天端高さを基準）
η_{1o}	：越波発生時の打ち上げ高さ（堤体天端高さを基準）
η_{1d}	：転落限界時の打ち上げ高さ（堤体天端高さを基準）
$\eta(x)$	：天端上の最大水位
ϵ_1	：港外側堤端手すりの開口率
ϵ_2	：港内側堤端手すりの開口率

主要記号一覧表

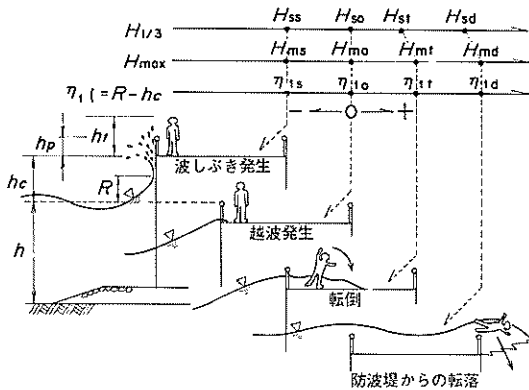
B_M	：マウンド肩幅
C_m	：換算水深 h_m における波速
d	：マウンド上の水深
g	：重力加速度
h	：堤体前面における水深
h_c	：堤体天端高さ
h_m	：マウンドを考慮した水深
h_t	：身長
h_p	：手すり高さ
H_{ss}	：波しぶき発生限界時の有義波高
H_{so}	：越波発生限界時の有義波高
H_{st}	：転倒限界時の有義波高
H_{sd}	：転落限界時の有義波高
H_{ms}	：波しぶき発生限界時の最高波高
H_{mo}	：越波発生限界時の最高波高
H_{mt}	：転倒発生限界時の最高波高
H_{md}	：転落発生限界時の最高波高
K	：波頂高比（ $=R/H$ ）
L	：堤体前面水深における波長
P_t	：転倒率
P_d	：転落率
R	：静水面を基準とした堤体前面における波の打ち上げ高さ
x_p	：パラベットの堤体前面からの後退距離
α_1	：堤体の構造形式による係数
η_1	：港外側堤端での天端面を基準とした打ち上げ高さ
η_2	：港内側堤端での越波時の最大水位
η_{1in}	：パラベット後退型における押し波時の港外側堤端での天端面を基準とした打ち上げ高さ
η_{1out}	：パラベット後退型における引き波時の港外側堤端での最大水位
η_{2cr}	：水平天端型における転落限界時の港内側堤端での最大水位

付録 危険限界波高の算定方法

付図-1は、波浪と人の危険状況について概念的に示したものである。防波堤上での人の危険は波高が大きくなるにつれて変化するが、ここでは以下に示す代表的な危険について検討の対象としている。

1. 波しぶきが発生する状況
2. 越波が発生する状況
3. 越波水によって人が転倒する状況
4. 越波水によって人が海中へ転落する状況

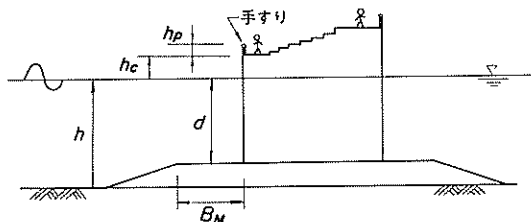
ここでは、これら四つの危険が生じる限界の有義波高と最高波高を計算する方法についてまとめている。なお、各危険限界時の波高を示す記号は、付表-1のとおりである。また、付図-2は堤体条件の記号を説明するものである。



付図-1 波浪と人の危険

付表-1 各危険限界打ち上げ高さ

	堤体前面での波の打ち上げ高さ	有義波高	最高波高
波しぶき発生限界時	η_{1s}	H_{ss}	H_{ms}
越波発生限界時	η_{1o}	H_{so}	H_{mo}
転倒限界時	η_{1t}	H_{st}	H_{mt}
転落限界時	η_{1d}	H_{sd}	H_{md}



付図-2 構造条件などに用いる記号

①波しぶき発生限界時の波高

波しぶきの発生は、堤体前面の打ち上げ高さが天端高さの7割に達したときに生じると考える。越波水の運動モデルを用いると式(1)によって最高波高が導かれる。有義波高は、最高波高から統計的な期待値を用いて式(2)により求める。なお、この関係は約400波程度の継続時間に相当する。

$$H_{ms} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2.8 \cdot \alpha_1 \cdot h_c / h_m}}{2\alpha_1} \cdot h_m \quad (1)$$

$$H_{ss} = \frac{1}{1.8} \cdot H_{ms} \quad (2)$$

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

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1.0 & : \text{直立堤, 混成堤} \\ 0.5 & : \text{消波ブロック被覆堤} \\ & \text{スリットケーソン堤} \end{cases} \quad (4)$$

- ここに、 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
 α_1 : 防波堤の形状による補正係数

②越波発生限界時の波高

越波発生限界は、越波水の運動モデルにおいて打ち上げ高さが天端高さに等しいとして式(5)を導いた。有義波高は、式(2)と同様の考え方で式(6)で求める。

$$H_{mo} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \alpha_1 \cdot (h_c + h_p^*) / h_m}}{2\alpha_1} \cdot h_m \quad (5)$$

$$H_{so} = \frac{1}{1.8} \cdot H_{mo} \quad (6)$$

$$h_p^* = \begin{cases} 0 & : \text{手すり開口率} \neq 0 \\ h_p & : \text{手すり開口率} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 h_p : 手すりの高さ

③越波によって人が転倒する限界の波高

越波時における波高と打ち上げ高さの関係は線形ではなく、波高と天端高さの比によって波頂高比（静水面を基準とした打ち上げ高さとの比）が変化する。したがって、越波水の運動モデルでは、転倒限界の波高を単純な形で表すことができないが、天端高さに比べて転倒限界の打ち上げ高さが非常に小さいという仮定をし、式(8)で示す転倒限界時の最高波高を導いた。また、転倒するような状況は、波しぶきが発生する状況と比べてかなり危険性が高まるために、そのときの有義波高は約2000波程度の継続時間の期待値を考えて、式(9)で求めるものとする。なお、付表-2は転倒限界時の打ち上げ高さを示している。

$$H_{mt} = \frac{2 \cdot (h_c^* + \eta_{1d})}{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \alpha_1 \cdot h_c^* / h_m}} \quad (8)$$

$$H_{st} = \frac{1}{2} \cdot H_{mt} \quad (9)$$

$$h_c^* = \begin{cases} h_c & : \text{手すり開口率} \geq 0.4 \\ h_c + h_p & : \text{手すり開口率} < 0.4 \end{cases} \quad (10)$$

付表-2 転倒限界時の打ち上げ高さ η_{1d}

	転倒限界打ち上げ高さ η_{1d}
通常の場合	0.50m
小さな子供が多数訪れる施設	0.34m

④越波によって人が海中へ転落する限界の波高

転倒時と同様の考え方で越波水の運動モデルを用いて、転落時の最高波高を導くと式(11)となる。なお、転落限界時の打ち上げ高さは付表-3, 4に示すとおりであり、手すりの形式によって変化する。また、そのときの有義波高は式(11)で求める。

$$H_{md} = \frac{2 \cdot (h_c + \eta_{1d})}{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \alpha_1 \cdot h_c^* / h_m}} \quad (11)$$

$$H_{sd} = \frac{1}{2} \cdot H_{md} \quad (12)$$

付表-3 転落限界打ち上げ高さ η_{1d} (水平天端型)

港外側端 手すり	港内側端 手すり	転落限界打ち上げ高さ η_{1d} (m)
壁型	壁型	2.5
	柵型	3.1
	チェーン型、 無	1.3
柵型	壁型	1.5
	柵型	2.1
	チェーン型、 無	0.8
チェーン型、 無	壁型	1.4
	柵型	2.0
	チェーン型、 無	0.7

付表-4 転落限界打ち上げ高さ η_{1d} (パラペット後退型)

港外側手すり	転落限界打ち上げ高さ η_{1d} (m)
壁型、柵型	2.3
チェーン型、無	0.5