

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1156      June 2007

直立浮上式防波堤の津波・風波に対する水理特性

有川 太郎  
中野 史文  
野村 逸人  
下迫 健一郎  
宮島 正悟  
小林 真  
虎石 龍彦  
荒井 清  
木原 一禎

独立行政法人 港湾空港技術研究所  
Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

要 旨	1
1. まえがき	4
2. 既往の研究と本研究の概要	4
3. 水理模型実験の方法	5
3.1 実験水路及び直立浮上式防波堤模型	5
3.2 実験ケース	6
3.3 実験方法	6
3.4 データ処理方法	6
4. 水理模型実験結果	8
4.1 透過率及び反射率	8
4.2 鋼管開口部の通過流速	9
4.3 表層流速	10
4.4 作用波圧	10
5. 数値シミュレーションによる考察	16
5.1 CADMAS-SURF/3D の概要	16
5.2 計算条件	17
5.3 計算結果事例	17
5.4 透過率	18
5.5 杭間流速	19
5.6 作用波圧	19
6. まとめ	19
6.1 主要な結論	20
6.2 今後の課題	20
謝 辞	20
参考文献	20
記 号 表	21

# 直立浮上式防波堤の津波・風波に対する水理特性

有川 太郎\*・中野 史丈\*\*・野村 逸人\*\*\*・下迫 健一郎\*\*\*\*・宮島正悟\*\*\*\*\*  
小林 真\*\*\*\*\*・虎石 龍彦\*\*\*\*\*・荒井 清\*\*\*\*\*・木原 一禎\*\*\*\*\*

## 要 旨

2004年12月26日に発生したインド洋大津波で多くの人命、財産が失われたことは記憶に新しい。迫り来る海溝型巨大地震では地震動による直接的な構造物被害のみならず津波による被害が予想されている。また、地球温暖化の影響で海面水位の上昇・台風の巨大化が危惧されており、高波・高潮による被害の危険度はますます高まっている。直立浮上式防波堤はこのような状況下で社会的要請に応えるべく開発中の新しいタイプの可動式防波堤である。本防波堤は、上部鋼管、下部鋼管から成る鞘管構造であり、津波、高波等の異常海象時にのみ上部鋼管が海底から浮上して背後施設を守るしくみである。

本防波堤は従来の直立壁形式の防波堤と異なり、隣り合う鋼管の間に若干の開口部を有することが特徴であるが、このような構造物の水理特性に関する研究事例は少ない。本研究では、背後への透過率（消波性能）や作用波圧等について、大規模水理模型実験及び数値シミュレーションにより検討を行った。その結果、津波、風波に対する防御効果が確認された。また、構造設計に用いる波圧についても、津波、風波各々に対して従来式と比較する形で提案した。

キーワード：可動式防波堤，直立浮上式防波堤，津波，風波，水理模型実験，数値シミュレーション

---

\* 津波防災研究センター 特任研究官  
\*\* 海洋・水工部 耐波研究室 研究員  
\*\*\* 海洋・水工部 耐波研究室 依頼研修生（株式会社ニュージェック）  
\*\*\*\* 海洋・水工部 耐波研究室長  
\*\*\*\*\* 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所  
\*\*\*\*\* 株式会社大林組  
\*\*\*\*\* 新日鉄エンジニアリング株式会社  
\*\*\*\*\* 東亜建設工業株式会社  
\*\*\*\*\* 三菱重工橋梁エンジニアリング株式会社

# Hydraulic Characteristics of Buoyancy-Driven Vertical Piling Breakwater for Tsunami and Wind Wave

**Taro ARIKAWA\***  
**Fumitake NAKANO\*\***  
**Hayato NOMURA\*\*\***  
**Kenichiro SHIMOSAKO\*\*\*\***  
**Shogo MIYAJIMA\*\*\*\*\***  
**Makoto KOBAYASHI\*\*\*\*\***  
**Tatsuhiko TORAISHI\*\*\*\*\***  
**Kiyoshi ARAI\*\*\*\*\***  
**Kazuyoshi KIHARA\*\*\*\*\***

## Synopsis

On 26<sup>th</sup> December 2004, the large scale tsunami occurred in the Indian Ocean and caused numerous deaths and serious damages in the coastal areas of the region. Large earthquakes, which are believed to be occurred in the oceanic trenches in the future, are also expected to cause damages not only by earthquake motion but also by associated tsunamis. With the sea level rise and larger typhoons due to the global warming, the risk of damages due to high waves and storm surges is becoming higher than ever. In this situation, the innovative ‘*buoyancy-driven vertical piling breakwater*’ is under development. This breakwater is mobile, and consists of the rows of upper piles and lower piles. The upper piles are encased in the lower piles which are set in the seabed and do not block sea traffics in ordinary time. When tsunamis or high waves are predicted, the upper piles quickly rise up to the water surface from the seabed and protect harbor facilities behind the breakwater.

The row of upper piles of this breakwater has narrow gaps between individual piles. Few researches have even been conducted on the hydraulic characteristics of this type of breakwater with gaps. In this study, hydraulic model experiments and numerical simulations are carried out to investigate the wave transmission through the breakwater and wave pressures acting on the piles.

As a result of the study, the breakwater’s performance against tsunamis and high wave attack is verified. In addition, wave pressures for the structural design are proposed in the form which is comparable with the existing formulae of the pressure for tsunamis and wind waves.

**Key Words:** mobile breakwater, buoyancy-driven vertical piling breakwater, tsunami, wind wave, hydraulic model test, numerical simulation

---

\* Project Researcher, Tsunami Research Center  
\*\* Member of Maritime Structures Division, Marine Environment and Engineering Department  
\*\*\* Trainee of Maritime Structures Division, Marine Environment and Engineering Department (NEWJEC Inc.)  
\*\*\*\* Head of Maritime Structures Division, Marine Environment and Engineering Department  
\*\*\*\*\* Nagoya Research and Engineering Office for Port and Airport, Chubu Regional Bureau  
\*\*\*\*\* OBAYASHI CORPORATION  
\*\*\*\*\* NIPPON STEEL ENGINEERING CO., LTD.  
\*\*\*\*\* TOA CORPORATION  
\*\*\*\*\* MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES BRIDGE & STEEL STRUCTURES ENGINEERING CO., LTD.

## 1. まえがき

津波、高波あるいは高潮から港湾施設を守るため、各港湾では防波堤の整備が進められている。2004年12月に発生したスマトラ沖大地震インド洋津波では、防波堤の設置効果が改めて確認されたところである。ただ、従来の固定式防波堤は航路に設置できなかったことから、航路から侵入してくる津波、高波を遮断し、より安全な港湾を整備することは難しい。

このような問題を解決すべく、常時は船舶航行の障害とならないように防波堤（鋼管）を海底面下に埋設し、津波や高波来襲時など必要な時にだけ鋼管を水面上に浮上させて港内を災害から守るという全く新しい形式の防波堤「直立浮上式防波堤」が提案され、その実用化に向けた研究・開発が進められている。

直立浮上式防波堤の構造例を図-1.1に、その浮上原理を図-1.2に示す。本防波堤は上部鋼管（内鋼管）と下部

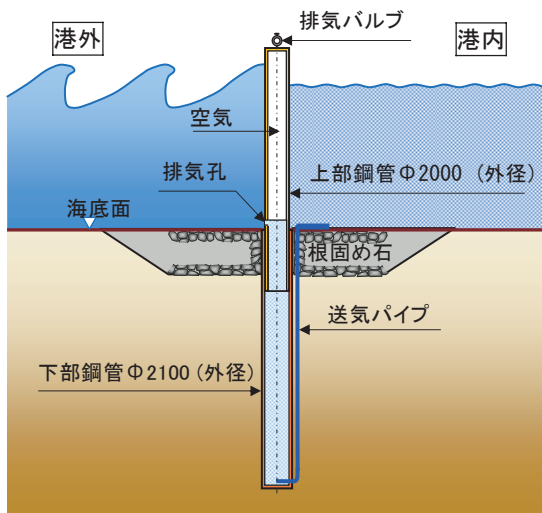


図-1.1 直立浮上式防波堤構造例（断面図）

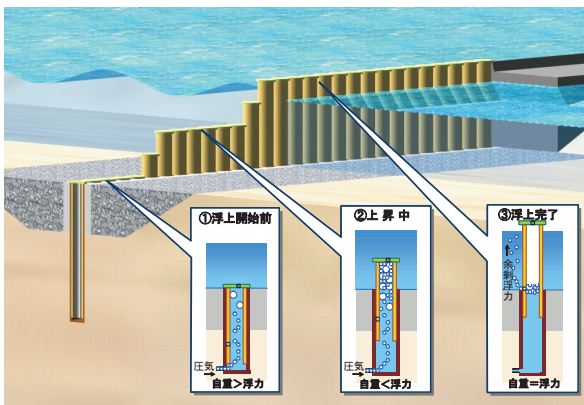


図-1.2 直立浮上式防波堤の浮上原理

鋼管（外鋼管）から形成される鞘管方式の二重鋼管を壁状に構築した構造物で、常時は海底に埋設された下部鋼管の中に上部鋼管が格納されている。

津波、高波来襲時など必要な時には、陸上に設置されたコンプレッサーから上部鋼管内に空気を圧送し、浮力によって上部鋼管を水面上に浮上させる。津波や高波がおさまると上部鋼管内の空気を排気することにより、鋼管は自重により徐々に降下し、再び海底に格納される。

直立浮上式防波堤の特長を以下に示す。

- ①常時は海底地盤中に格納されているため、船舶航行の障害とならない。また、潮汐や海流を妨げることがないため港内の海水交換性が高い。
- ②海底地盤中に格納されているため、地震に対する安全性が高い。
- ③鋼管の浮上には浮力を利用するため、大規模な駆動装置を必要としない。
- ④構成材料は施工実績の多い鋼管であるため、材料面での信頼性、安全性が高い。

一方、本防波堤は全く新しい形式であることから、実用化に向けては以下に示す課題がある。

- ①浮上後の隣り合う上部鋼管の間には開口部があるため、流入による防波堤背後の水位上昇量や作用波圧等の水理特性を定量的に評価しなければならない。
- ②津波来襲時には数分間で上部鋼管を確実に浮上させなければならない。
- ③上部鋼管に作用する波力等の下部鋼管への伝達機構、長期間浮上させた場合の耐久性について明らかにする必要がある。
- ④上部鋼管と下部鋼管との隙間からの土砂流入や鋼管表面の生物付着の影響を把握する必要がある。

本研究では、上記課題のうち、①の課題（水理特性）について、これまで実施した透過率、波圧及び鋼管開口部流速に関する大規模水理模型実験及び数値シミュレーション結果を示す。

なお、②～④の課題については、平成18年8月～10月に沼津港にて実施した実海域実証試験で検証された。これについては別の機会でご報告する予定である。

## 2. 既往の研究と本研究の概要

開口部を有する多柱列構造物の水理特性に関する研究としては、永井ら(1965)、林ら(1965, 1966)、角野ら(1993)の固定式鋼管防波堤の研究がある。永井らは水理模型実験により、隣り合う鋼管間の開口率5%（一定）に対する透過率、作用波圧を明らかにしているが、対象

とした波周期は最大で 7s 程度（現地換算）と短く、これより周期の長い波に対する検討は行われていない。これによると、開口率 5%に対する透過率は波高・周期に関係なく約 30%であった。林らは鋼管防波堤の開口率を変化させた実験を行っているが、短周期の波を対象とした検討である。一方、角野らは単列円柱構造（開口率 0.03～0.23）の透過率・反射率を数値解析（漸近展開法）により求めている。その際、開口部のエネルギー損失係数の評価が重要であることを指摘しており、実際の計算では実験結果に一致するように損失係数を調整している。

以上のように、従来の鋼管防波堤の研究はいずれも比較的短周期の波を対象としたものであり、また、周期や開口率に関する系統的な研究も少ない。しかし、本研究で対象としている津波に対する水理特性を明らかにするためには、周期の長さによる違い、エネルギー損失機構の検討などを行う必要がある。また、実験スケールの影響を受けるため、比較的大規模な実験を行う必要がある。

そこで、本研究では、比較的長い周期の波を起こすことのできる大規模波動地盤総合水路を用いて、現地換算で 10s 前後の比較的短周期の波及び 60s 前後の比較的長周期の波の水理特性を検討するとともに、数値シミュレーションを用いて、杭間流速、エネルギーの損失などを検討する。水理模型実験では、消波性能（透過率・反射率）を計測するとともに、鋼管円柱に作用する波圧、鋼管間の開口部を通過する流れの速度、鋼管前面の表層流速について計測を行った。数値シミュレーションでは、複雑な碎波現象なども表現することが可能である数値波動水路「CADMAS-SURF/3D」(有川ら, 2005)を用いた狭領域（鋼管及び水路）を対象とした検討を行い、消波性能、開口部流速及び鋼管表面の波圧について調べた。以上より、消波性能及び波圧等の評価を行った。

### 3. 水理模型実験

#### 3.1 実験水路及び直立浮上式防波堤模型

実験は、図-3.1 に示す大規模波動地盤総合水路を用いて行った。同水路は、基本水路の長さが 184m、深さ 12m、幅 3.5m であり、水槽中央部に長さ 67m、深さ 4m の砂地盤層を有する。造波機はピストン型で、風波の場合は最大 8m、津波の場合は最大 14m のストロークを持ち、反射波吸収装置を備えている。本造波機で発生させることが可能な波高は周期と水深により大きく異なり、周期 7s 程度で 3.5m、周期 25s で 1m 程度である。比較的長い周期においても大きな波高が造波できる。

実験は水平・鉛直縮尺とも 1/5 の模型で行った。実験断面は、図-3.1 に示すように 1/30 勾配の斜路部（30m 区間）と水平部（20m 区間）からなる。斜面法肩から 2.7m 位置の水平部に鋼管直径約 0.4m の直立浮上式防波堤模型 7 本を水路幅方向に設置した。ここで、鋼管直径は実機に使用する既設鋼管直径 2.0m の 1/5 に相当する。模型は、図-1.1 に示す本防波堤の上部鋼管が浮上した状態を検討対象として、上部鋼管のみモデル化を行った。なお、下部鋼管は完全に海底面下にあるのでモデル化は行わない。鋼管天端レベルは、所定の入射波で越波（越流）しないように設置した。

写真-3.1 に鋼管模型の背面（消波ブロック側）と上面の状況を示す。鋼管模型は砂地盤中に埋設した鋼製基礎（山留め H400 鋼）上面に固定し、安定性を確保した。固定方法は、5%、10%、15%の各開口率が実現できるように、鋼管下端のプレートを着脱可能な締付プレートで抑える構造とし、開口率は両端部の調整部材を取り替え、鋼管を均等配列することで変化させた。また、開口幅の精度を高めるため、隣り合う鋼管の間には開口率に対応したスペーサーを挟みこんでいる。

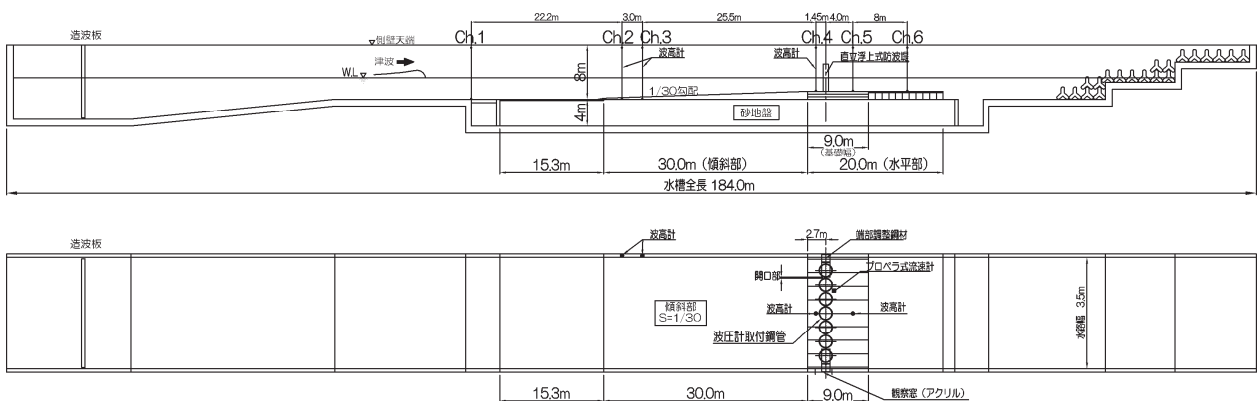


図-3.1 実験水路及び模型

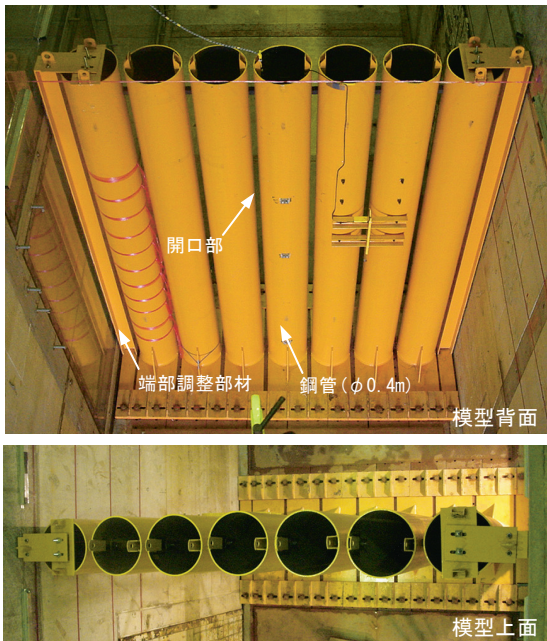


写真-3.1 実験模型

### 3.2 実験ケース

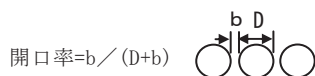
実験ケースを表-3.1 に示す。風波対象波（3.6s～5.4s：現地換算値 8s～12s）はすべて規則波であり，津波対象波（20.1s～26.8s：現地換算値 45s～60s）は単一波である。

表-3.1 実験ケース

No.	$h$ (m)	$H_1/a_1$ (m)	$T$ (s)	杭径 (m)	開口率	開口幅 (m)	備考
1	2.0	0.8	25.0	0.4064	0.05	0.021	津波対象波
2	2.0	0.4	26.8	0.4064			
3	2.0	0.8	20.1	0.4064			
4	2.0	0.8	5.4	0.4064			
5	2.0	0.8	3.6	0.4064			
6	2.0	0.8	25.0	0.4064	0.10	0.045	津波対象波
7	2.0	0.4	26.8	0.4064			
8	2.0	0.8	20.1	0.4064			
9	2.0	0.8	5.4	0.4064			
10	2.0	0.8	3.6	0.4064			
11	2.5	0.8	25.0	0.4064			
12	2.5	0.8	5.4	0.4064	0.15	0.072	津波対象波
13	2.0	0.8	25.0	0.4064			
14	2.0	0.4	26.8	0.4064			
15	2.0	0.8	20.1	0.4064			
16	2.0	0.8	5.4	0.4064			
17	2.0	0.8	3.6	0.4064	風波対象波		

※ $H$ : 風波対象波の場合: 波高

※ $a_1$ : 津波対象波の場合: 津波高(静水面上の水位)



開口率は，本防波堤の施工性（鋼管打設間隔）を考慮

して 0.10 を標準とし，0.05 間隔で増減させた。事前に実施した数値解析結果から 0.15 以上の開口率では防御効果はかなり小さくなると予想されるため 0.15 を上限とした。

水深は本防波堤の設置が想定される航路部の平均的水深である 10m 水域を対象とした。

なお，実験は全ケースについて 2 回ずつ造波を行い，平均値を採用した。

### 3.3 実験方法

計測項目は本研究の概要でも述べたように，以下の 4 項目である。

- (1) 消波特性（透過率／反射率）
- (2) 鋼管への作用波圧
- (3) 開口部通過流速
- (4) 鋼管前背面の表層流速

- (1) 消波特性（透過率／反射率）

消波特性は，図-3.1 に示すように排水ピット，斜路法先付近及び鋼管模型前面及び背後に容量式波高計を設置し，水位変動の測定を行った。

鋼管背後に設置した透過率計測用の波高計は水路端部からの反射の影響を受けにくくするため鋼管中心から 4m 程度の位置とした。また，傾斜部法先付近に設置する波高計は，鋼管を設置した際の反射波測定のための波高計であり，入・反射波分離解析が行えるよう波高計の間隔を設定した。

- (2) 鋼管への作用波圧

鋼管に作用する波圧の測定は，小型波圧計を用いて鋼管の前面，側面（45°）及び背面で行った。波圧計の配置は図-3.2 に示す通りで，鋼管前面及び側面（45°）に各々 5 台（合計 10 台），鋼管背後に 3 台取り付けて計測を行った。

- (3) 鋼管開口部流速及び鋼管前面の表層流速

鋼管開口部の通過流速は，図-3.2 に示すようにプロペラ式流速計を鋼管開口部の直背後に取り付けて表層部の流速測定を行った。また，鋼管前面の表層流速は，フロートの移動距離と移動時間から概略の流速を算出した。

### 3.4 データ処理方法

以下に，主要計測項目である，水位，流速，波圧のデータ処理方法について述べる。なお，データのサンプリング間隔は，津波対象波及び風波対象波ともに  $\Delta t = 2ms$

とした。

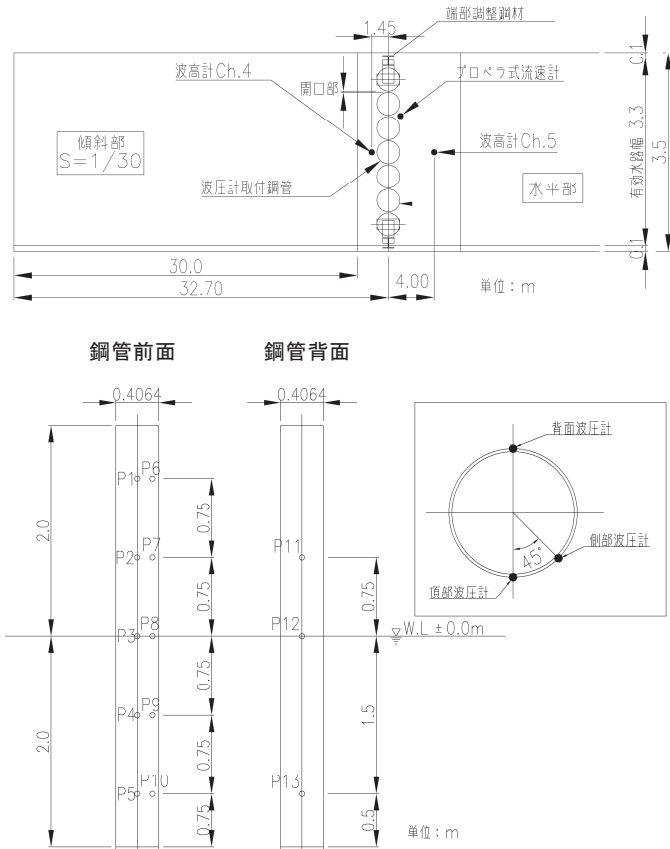


図-3.2 波圧・流速測定位置

(1) 水位データ

周期 5.4s, 3.6s の風波対象波については以下の事例のようにデータ処理を行った。

最初に、鋼管模型がない状態で本実験と同一の水深で波高検定を行った。図-3.3 に波高計 Ch.4 (鋼管模型設置予定位置の直前面) における検定の一例を示す。

同図に示すように波高が安定した 5 波のデータを抽出し、ゼロアップクロス法により波高及び周期を算出した。その後、5 波の平均値を算出し、実験用の入射波として整理した。

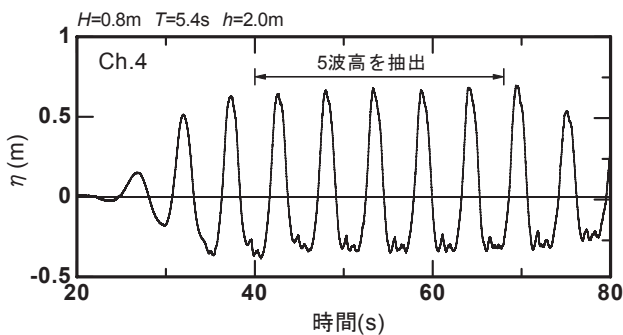


図-3.3 検定波の時系列 (風波対象波)

次に、鋼管背後の透過波の時系列の一例を図-3.4 に示す。透過波も検定波と同様に安定した最初の 5 波の平均で整理した。

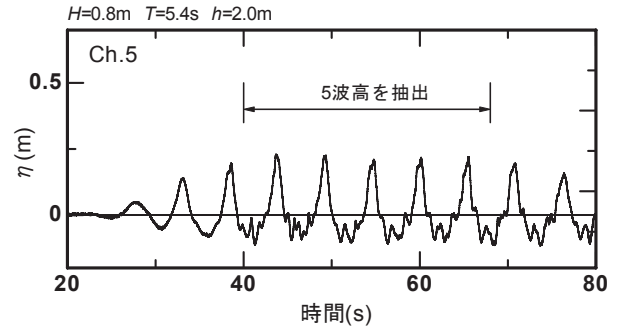


図-3.4 透過波の時系列 (風波対象波)

反射率は、合田ら(1972)による入・反射波分離解析法により算出した。その際、水槽内で多重反射した波が定常状態になった後、20 波以上のデータを取得して解析対象波とした。

津波対象波については風波対象波と同様に、鋼管模型がない状態で波高検定を行った。

図-3.5 に波高計 Ch.1 (排水ピット付近)、Ch.4 の検定波の時系列の一例を示す。

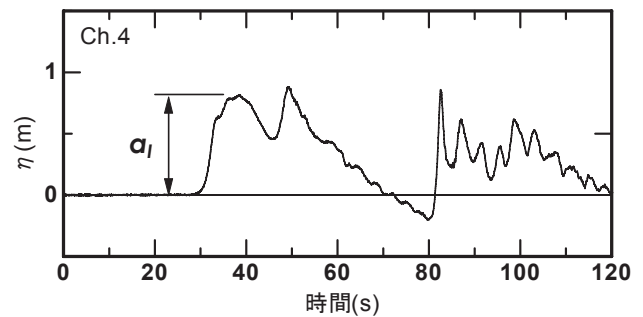
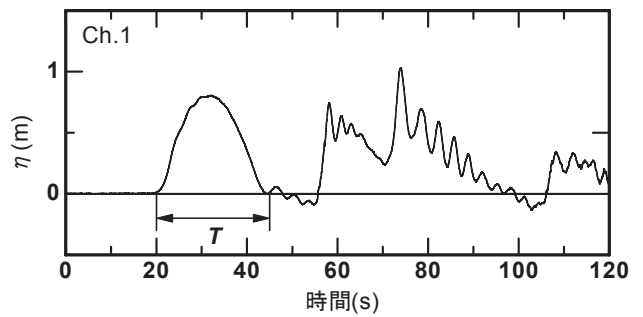


図-3.5 検定波の時系列 (津波対象波)

津波対象波の周期は図-3.5 の波高計 Ch.1 の図に示す



ように、静水面を横切る時間として定義した。また、波高は波高計 Ch.4 のデータから、最も水位が高くなったときの値を読み取り、それを津波高  $a_t$ （静水面からの水位上昇値）とした。

一方、鋼管模型背後の透過波については、図-3.6 に例示するように、主要な水位変動に短周期の波形が重なり合う現象が見られた。短周期波は、鋼管の前・背面で水位差が生じ、開口部から落下した水塊が水面を叩くことにより発生している。

ただし、これら短周期波のエネルギーは主要な水位変動に比較して明らかに小さく、本防波堤の消波特性に及ぼす影響は小さいと考えられるため、移動平均処理により透過した後の津波高  $a_t$  を算出した。

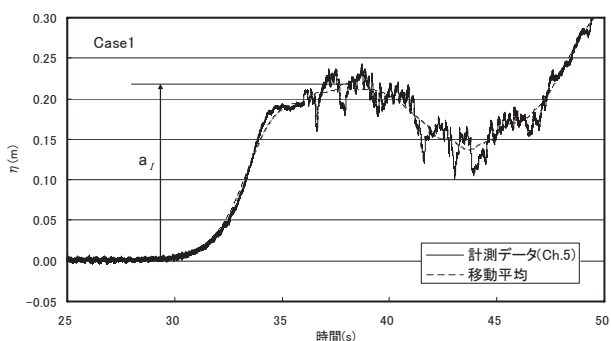


図-3.6 透過波の時系列（津波対象波）

#### (2) 流速データ

鋼管開口部の流速は、時系列データから最大流速と平均流速を算出した。また、鋼管前面の表層流速はフロートの移動距離を移動時間で除して算出した。

#### (3) 波圧測定データ

本実験の入射波はすべて非砕波であったが、測定データに高周波の波形が現れた。そのため、カットオフ周波数 1.0Hz のローパスフィルターを用いて高周波成分の処理を行った。

波圧データの解析は、規則波を対象としたケースでは、水位変動データの解析と同様、波高が安定した 5 波に対応する波圧データの平均値で整理した。

また、各波圧計の測定データから、鋼管前面、側面及び背面における鋼管単位幅当たりの合成波力を算出し、その合成波力が最大となる時の各波圧測定点の同時波圧についても整理を行った。

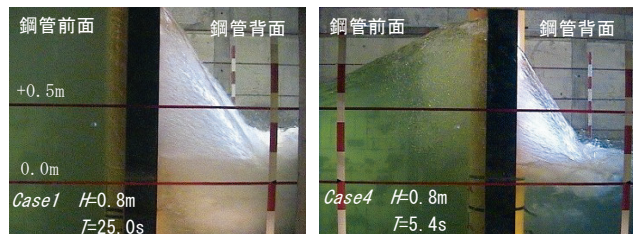
### 4. 水理模型実験結果

写真-4.1 に鋼管背後から撮影した透過波の状況、写真

-4.2 に水槽側壁の観測窓から撮影した透過波の状況を示す。写真-4.2 より、同一入射波高の条件における鋼管背後の渦の規模は、津波対象波の方が風波対象波よりかなり大きいことが分かる。



写真-4.1 鋼管背後から見た透過波の状況（津波対象波）



①津波対象波（Case1） ②風波対象波（Case4）

写真-4.2 観測窓から見た透過波の状況

### 4.1 透過率及び反射率

#### (1) 透過率

図-4.1 に、全 17 ケースの入射波周期と透過率の関係を示した。なお、透過率  $K_T$  は、鋼管背後（Ch.5）の透過波高を波高検定時の入射波高で除した比で定義した。

風波対象波グループと津波対象波グループに分類した場合、同一グループ内では周期が長い方が透過率は大きくなる。また、同一周期であれば、開口率の増加とともに透過率は大きくなる。一方、グループ分けを行わない場合、津波対象波グループの方が透過率は小さい。また、設置水深が 2.0m と 2.5m の場合を比較すると、水深が深い場合に透過率が小さくなる傾向にある。

上述の「津波対象波グループ（長周期側の波）の方が透過率が小さくなる現象」について若干の考察を加える。

透過性構造物背後への波高伝播に関する一般的傾向として、周期が長い波の方が背後水域での透過率は大きくなると言われている。今回の実験では、波が鋼管開口部を通過する際のエネルギー損失で透過率が決定される。

写真-4.2 から分かるように、観測窓から見た鋼管前・背面の水位形状は、風波対象波の場合は開口部を波動が連続的に伝播しており、縮流効果によるエネルギー損失が支配的である。一方、津波対象波の場合は鋼管前面で比較的長時間にわたり水位が上昇し続け、落差工のように水塊が背後へと流出しており、縮流効果に加えて水塊落下によるエネルギー損失が生じていると考えられる。すなわち、今回の実験範囲では、鋼管開口部におけるエネルギー損失は津波対象波の方が風波対象波より大きいと考えられる。その他の理由として、鋼管背後の水域面積の影響も考えられる。いずれにしても、今後は数値シミュレーションによるパラメータスタディが必要である。

一方、永井ら(1965)の鋼管防波堤に関する過去の研究では、波周期 5s~7s (現地換算値) の範囲では、周期と透過率の間に明確な傾向はないと報告されている。

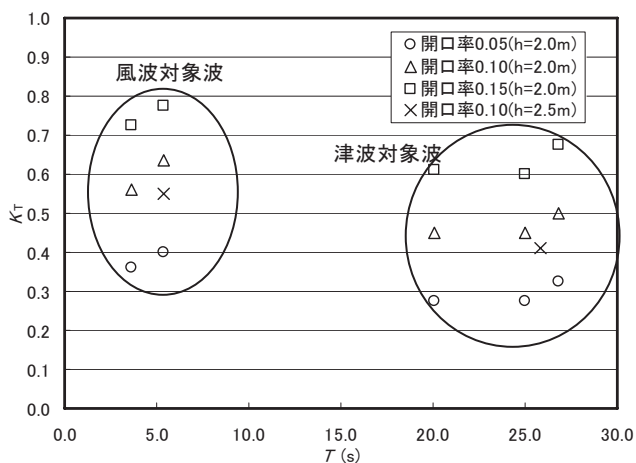


図-4.1 入射波周期と透過率の関係

図-4.2 に開口率と透過率の関係について示す。

同図より、今回実験で行った範囲内では開口率が大きくなるに従って透過率が大きくなっていることが分かる。この現象は波の通過しやすさを考えると容易に推察できる。なお、標準的な開口率 0.10 の場合、周期によっても異なるが、風波対象波に対して透過率 0.56~0.63、津波対象波に対して透過率 0.45~0.5 となる。

## (2) 反射率

図-4.3 に、風波対象波の入射波周期と反射率の関係を示す。なお、津波対象波は単一波のため反射率の計測を行っていない。

同図より、各開口率ともに周期が長くなるに従って反射率が小さくなっている。反射率と透過率は相反関係にあるため、透過率が大きい場合には反射率は小さく、透過率が小さい場合には反射率が大きくなる。

図-4.4 に、開口率と反射率の関係を示す。

開口率が大きくなるに従って反射率は小さくなる傾向にある。これは、透過率の検討でも述べたように、開口率が大きくなると波が通過しやすくなるため、鋼管部分からの反射波が小さくなるからである。

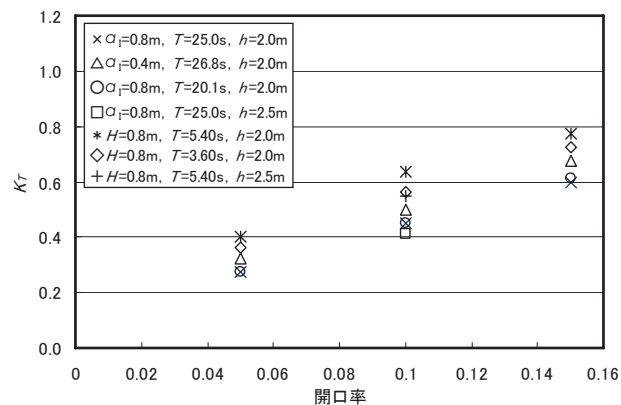


図-4.2 開口率と透過率の関係

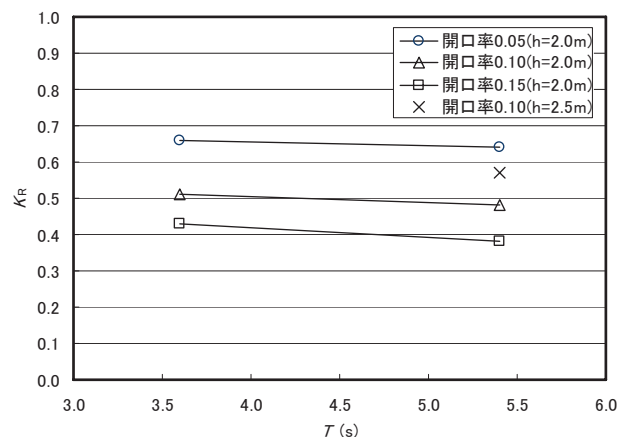


図-4.3 入射波周期と反射率の関係 (風波対象波)

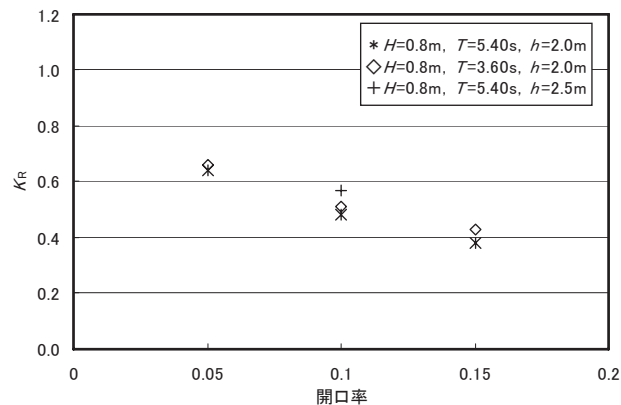


図-4.4 開口率と反射率の関係 (風波対象波)

## 4.2 鋼管開口部の通過流速

図-4.5 に、津波対象波における開口部通過流速の時系

列を示す。また、図-4.6に開口率と開口部通過流速（最大値，時間平均値）の関係を示す。なお，開口部通過流速  $u$  は  $a_1\sqrt{g/h}$ （津波流速）で無次元化した値を用いて検討を行った。同図より，無次元最大流速については開口率 0.1 で最大値 3.8 となり，次いで開口率 0.05, 0.15 の順に流速が小さくなっている。一方，無次元平均流速については，開口率 0.1 で最大値 2.0 となるものの，開口率 0.05 及び開口率 0.15 の流速との差異は小さい。

なお，本実験においては，開口率 0.05 に対する流速が開口率 0.10 の場合の流速より小さくなる現象が見られたが，この要因として，開口率 0.05 については他の開口率のケースに比べて水塊落下に伴う流速波形の乱れが非常に大きいことから，水平方向の最大流速が正確に計測されていない可能性があることが考えられる。ただし，本実験の流速測定のための目的は，開口部からの水塊が落下している表層に流速計 1 台のみを設置して，通過流速のオーダーを捕らえることであり，その意味では当初の目的を達成したと考えている。

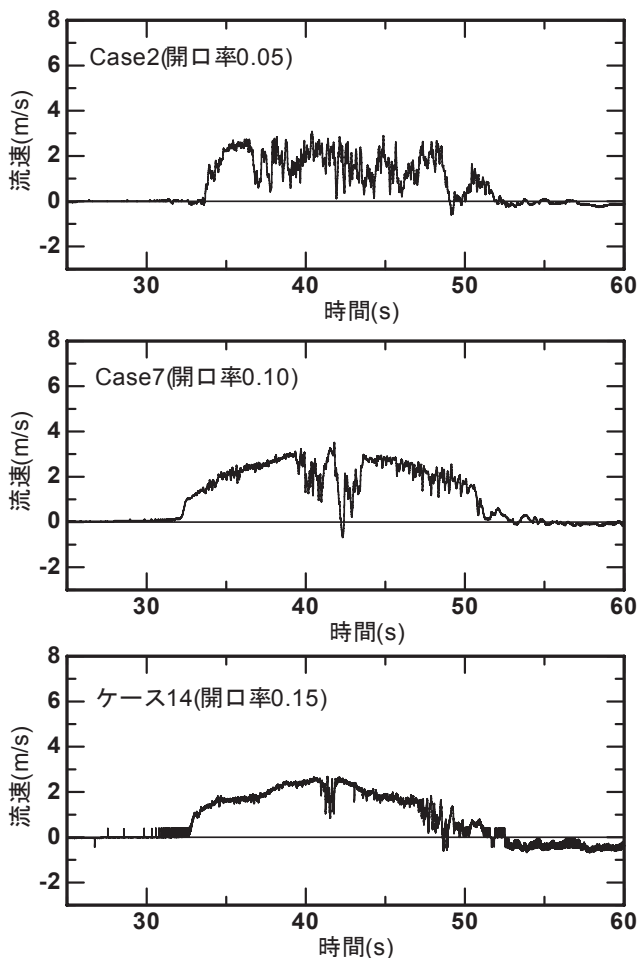


図-4.5 開口部通過流速の時系列  
(津波対象波:  $a_1=0.4\text{m}$ ,  $T=26.8\text{s}$ )

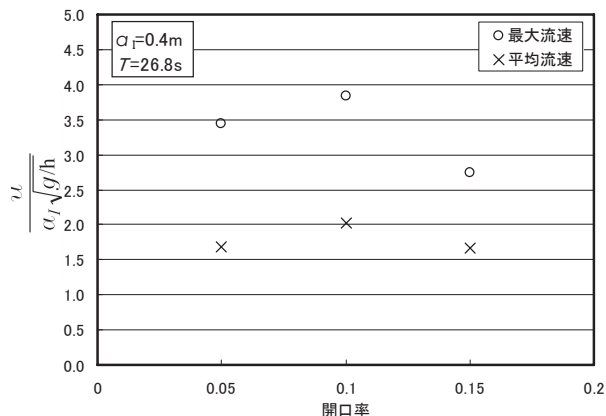


図-4.6 開口率と開口部を通過する流速の関係  
(津波対象波:  $a_1=0.4\text{m}$ ,  $T=26.8\text{s}$ )

### 4.3 表層流速

図-4.7に，津波対象波について，開口率と鋼管前面の表層流速の関係を示す。なお，表層流速  $u_s$  は，津波流速  $a_1\sqrt{g/h}$  で無次元化した。

同図より，開口率が大きくなるに従い無次元表層流速も大きくなる傾向にある（理論的には，開口率 1.0 で無次元表層流速は 1.0 となる）。開口率が大きくなると，鋼管背後へ通過する水塊量が増加するため，表層流速もその水塊を補うために速くなったものと考えられる。

また，開口率が同じ場合，波高に関わらず無次元表層流速は同じになる。

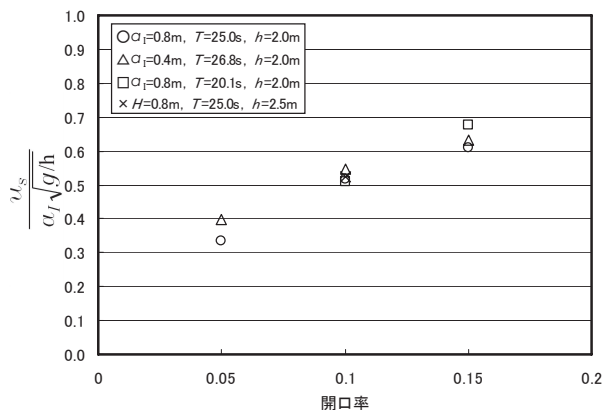


図-4.7 開口率と表層流速の関係（津波対象波）

### 4.4 作用波圧

#### (1) 波圧波形

図-4.8に，津波対象波（Case1）作用時の鋼管前面波圧波形を示す（P1～P5：図-3.2参照）。同図より，水位が到達していない P1 を除く P2～P5 については，水位と波圧の位相は良く一致していることが分かる。また，

本実験では非砕波の津波のみを対象としていることから、衝撃波圧の発生時に見られるような作用時間が短く鋭いピークを持つ波形は現れていない。

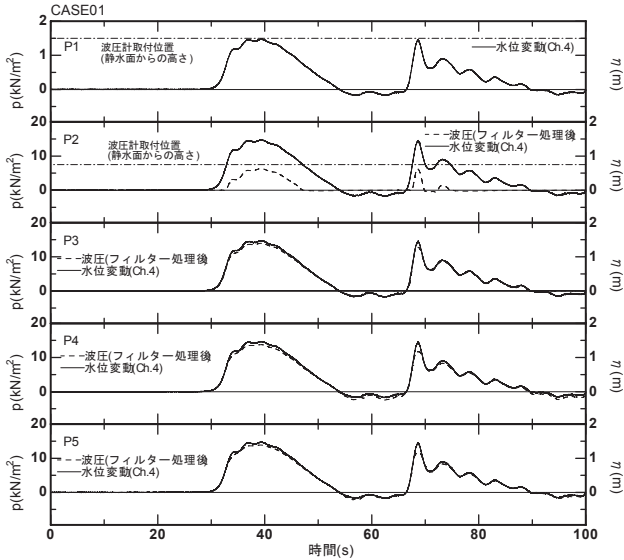


図-4.8 鋼管前面波圧の時系列

(Case1 :  $a_1=0.8\text{m}$ ,  $T=25.0\text{s}$ ,  $h=2.0\text{m}$ )

図-4.9に、風波対象波 (Case4) 作用時の鋼管前面波圧を示す。同図より、P1及びP2を除く位置については、水位波形と波圧波形の位相が良く一致しており、波圧変化は水位変化に対応していることが分かる。また、風波対象波全ケースで非砕波の波を対象としており、津波対象波と同様に衝撃波圧は生じていない。

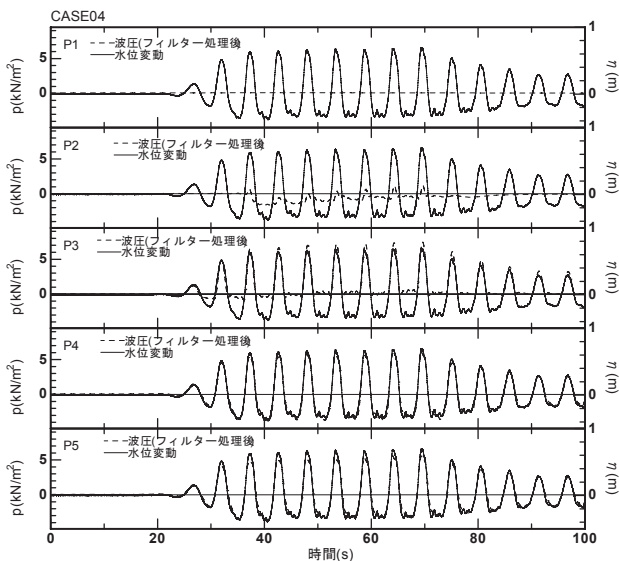


図-4.9 鋼管前面波圧の時系列

(Case4 :  $H=0.8\text{m}$ ,  $T=5.4\text{s}$ ,  $h=2.0\text{m}$ )

(2) 鋼管に作用する最大波圧

図-4.10に波圧分布図の座標軸を示す。ここで、縦軸  $z$  は静水面上の高さである。

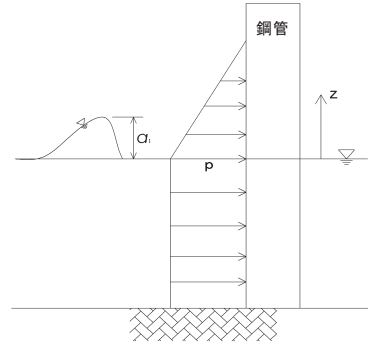


図-4.10 波圧分布と座標軸

ここでは、津波対象波に対する結果のみを示す。風波対象波の波圧特性は(3)で示す。

図-4.11に、鋼管に作用する最大波圧  $p_{\max}$  の鉛直分布を示す。ここで述べる最大波圧とは発生時刻に関係なく各測点の最大値を抽出したものである。なお、縦軸及び横軸ともに、津波高  $a_1$  を用いて無次元化しており、波の進行方向に作用する波圧を正とした (以降の図も同様)。

同図より、鋼管前面の無次元最大波圧  $p_{\max}$  (以下、単に最大波圧と称す) は、静水面で最も大きく、静水面より上方で小さくなる。一方、静水面以下については、静水面とはほぼ等しい波圧が均等に作用している。これは、4.4 (1) でも述べたように、鋼管には砕波が作用しておらず、鋼管前面水位に対応した波圧が生じたためと考えられる。

なお、鋼管側面及び背面においても前面と同様の波圧分布形状となっている。

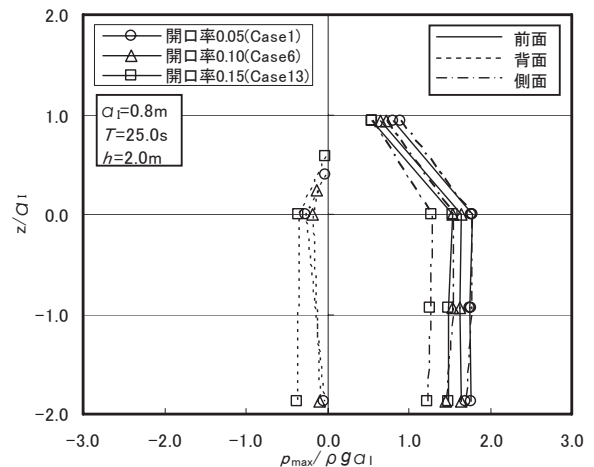


図-4.11 最大波圧の鉛直分布

(津波対象波 :  $a_1=0.8\text{m}$ ,  $T=25.0\text{s}$ ,  $h=2.0\text{m}$ )

次に、最大波圧に及ぼす開口率の影響をみると、鋼管前面及び側面においては、開口率が大きくなるに従い波圧が小さくなる。一方、鋼管背後については、開口率が大きくなるに従い波圧が大きくなっている。これは、開口率が大きくなると透過性が大きくなり、鋼管前面の水位は低減する一方、背面水位は高くなることから容易に推察できる。

図-4.12 に、津波高  $a_1$  を 1/2 (0.4m) に低減したケースの結果を示す。同図より、鋼管前面最大波圧の静水面下の鉛直分布形状は津波高が 0.8m のケースと同様である。

これらのことから、津波高が本実験ケースの範囲内であれば、最大波圧の分布形状は図-4.11 と同様と考えられる。

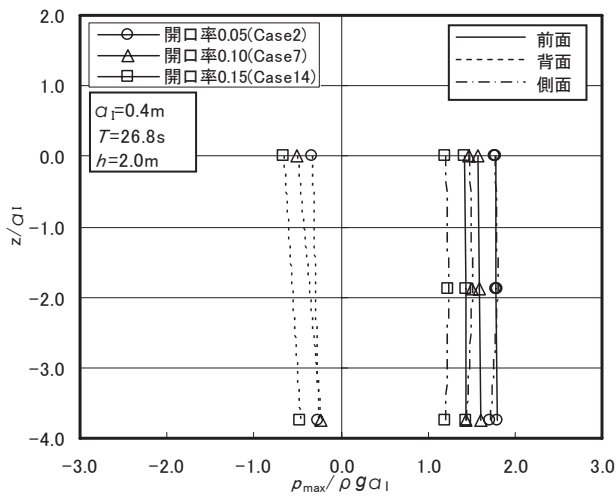


図-4.12 最大波圧の鉛直分布  
(津波対象波 :  $a_1=0.4\text{m}$ ,  $T=26.8\text{s}$ ,  $h=2.0\text{m}$ )

図-4.13 に、周期を短くしたケースの最大波圧分布を示す。

同図より、周期を短くした場合でも、波圧値、分布形状とも図-4.11 と同様となっている。

以上、図-4.11～図-4.13 の結果より、鋼管前面に作用する最大波圧  $p_{\max}$  は、開口率ごとに以下のようになる。

$$\text{開口率 } 0.05 : p_{\max} = 1.8 \rho g a_1$$

$$\text{開口率 } 0.10 : p_{\max} = 1.7 \rho g a_1$$

$$\text{開口率 } 0.15 : p_{\max} = 1.6 \rho g a_1$$

なお、本実験の範囲では、波圧係数は周期にはほとんど影響されない。

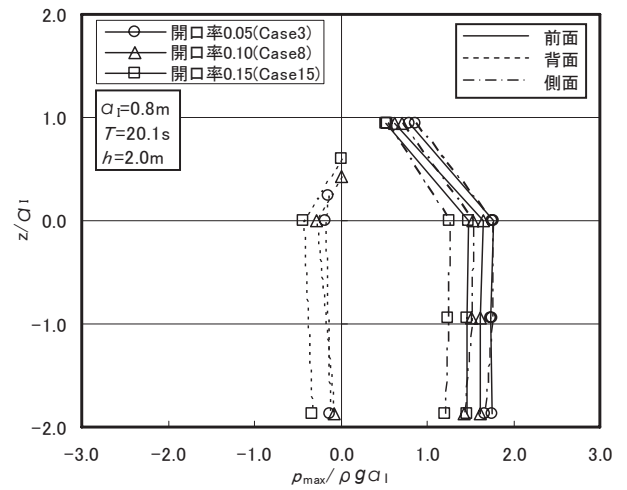


図-4.13 最大波圧の鉛直分布  
(津波対象波 :  $a_1=0.8\text{m}$ ,  $T=20.1\text{s}$ ,  $h=2.0\text{m}$ )

図-4.14～図-4.16 に、開口率ごとの最大波圧の分布を示す。これらの図より、開口率 0.05 の場合は前面波圧と側面波圧は一致しており、開口率が大きくなるに従って、側面波圧の方が若干小さくなる。これは、開口率が大きくなるほど側面の水位が低下していくためと考えられる。また、背面波圧は開口率が大きいほど大きくなる。

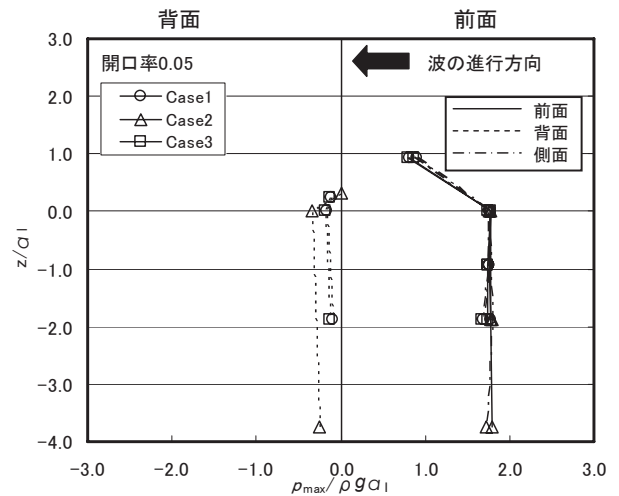


図-4.14 最大波圧の鉛直分布  
(津波対象波 : 開口率 0.05)

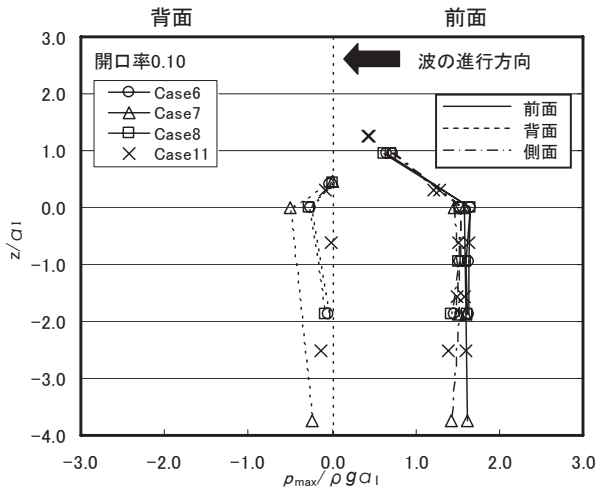


図-4.15 最大波圧の鉛直分布  
(津波対象波：開口率 0.10)

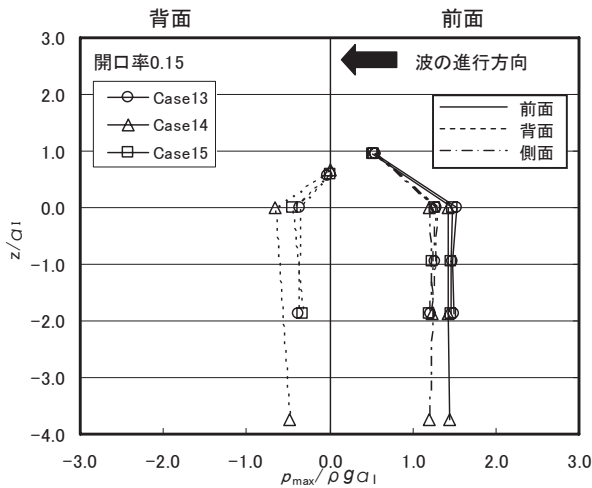


図-4.16 最大波圧の鉛直分布  
(津波対象波：開口率 0.15)

### (3) 鋼管に作用する合成波力及び同時波圧

ここでは、鋼管に作用する合成波力を定義し、次いで合成波力最大時における各計測点の波圧の分布について検討を行う。この波圧分布をここでは同時波圧  $p^*$  と定義する。

入射波方向の合成波力算出方法を図-4.17 の模式図で説明する。まず、静水面以下については、波圧に各波圧計の分担面積を乗じて波力を算出した。一方、静水面上については、三角形の波圧分布を設定して、各計測点の波圧と波のはい上がり高（作用高さ）から波力を算出した。合成波力は、これらを鉛直方向に合算して、鋼管単位幅当たり換算した波力 (kN/m) であり、鋼管前面、側面、背面各々について算出した。

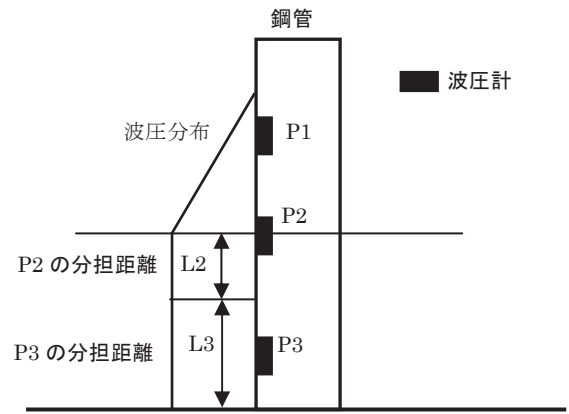


図-4.17 合成波力の算定方法の模式図

図-4.18 に、鋼管の前面、側面及び背面に作用する合成波力の時系列の一例を示す (Case11)。なお、図中上段は、鋼管前面及び背面の水位変動である。

同図より、鋼管前面水位が最大となる時刻に前面及び側面の合成波力が最大値となり、鋼管背面水位が最大となる時刻に背面合成波力が最大となっており、水位と合成波力の位相はほぼ一致している。なお、この傾向は今回実験を行った全ケースで共通である。

よって、ここでは、前面の合成波力が最大となる時刻における同時波圧  $p^*$  を用いて結果の整理を行う。

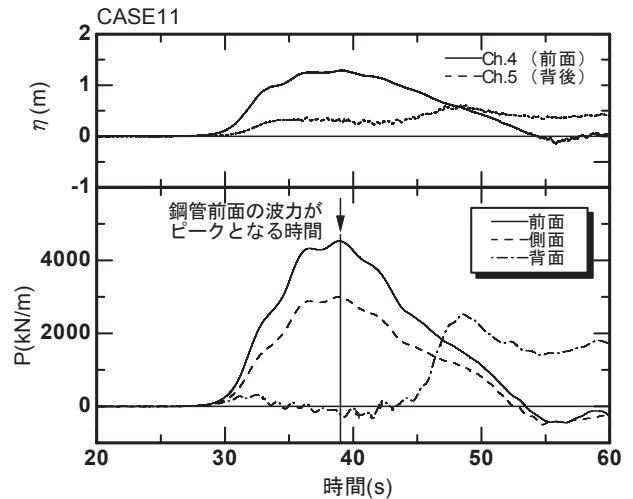


図-4.18 合成波力の時系列の一例 (Case11)

図-4.19、図-4.20 に、風波対象波について、無次元同時波圧  $p^* / \rho g H$  (以下、単に同時波圧と称す) の鉛直分布を示す。

図-4.19 は、 $H=0.8\text{m}$ 、 $T=5.4\text{s}$  のケースにおける同時波圧の分布を示している。なお、図中には合田式から求めた波圧分布も併記した。同図より、同時波圧は静水面で最も大きく、水深方向に次第に小さくなっている。

この傾向は、 $H=0.8\text{m}$ 、 $T=3.6\text{s}$  のケース（図-4.20 参照）でも同様である。また、開口率が大きくなるほど前面水位が低下し、同時波圧が小さくなる傾向にある。また、合田式から求めた波圧分布と比較すると、静水面においては同時波圧の方が10%（開口率0.05）～20%（開口率0.15）程度小さくなっている。この傾向は、合田式が「開口部の無い直立壁」に作用する波圧算定式であることから考えても明らかである。

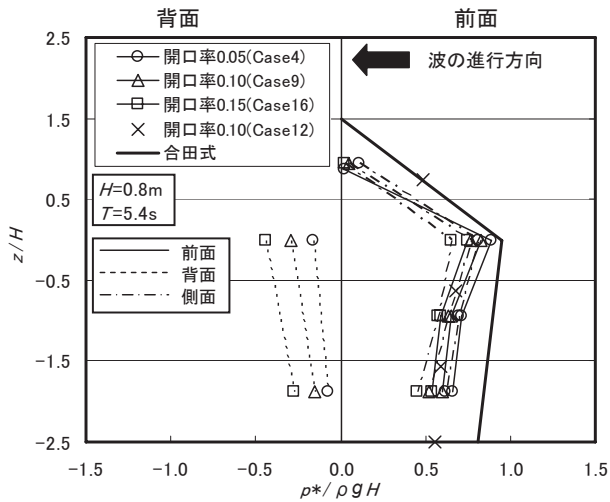


図-4.19 同時波圧の鉛直分布  
(風波対象波： $H=0.8\text{m}$ 、 $T=5.4\text{s}$ )

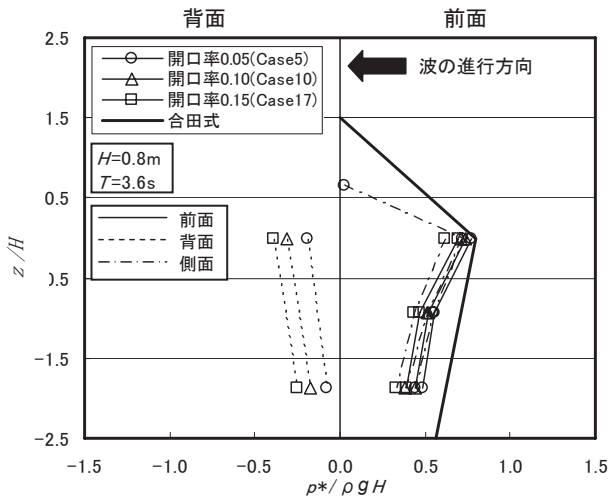


図-4.20 同時波圧の鉛直分布  
(風波対象波： $H=0.8\text{m}$ 、 $T=3.6\text{s}$ )

図-4.21 に、実験から求めた合成波力と合田式から計算した波力との比を示す。図より、鋼管に作用する合成波力は、開口率の増加とともに合田波力に比較して小さくなる。これは、同時波圧の分布でも述べたように、開

口率が大きくなるほど前面水位が低下することから容易に推察できる。

以上より、鋼管に作用する波力は開口率ごとに以下のようなになる。

開口率 0.05： $P=0.78P_G$

開口率 0.10： $P=0.72P_G$

開口率 0.15： $P=0.65P_G$

ここに、 $P_G$ ：合田式による延長単位幅当たりの波力

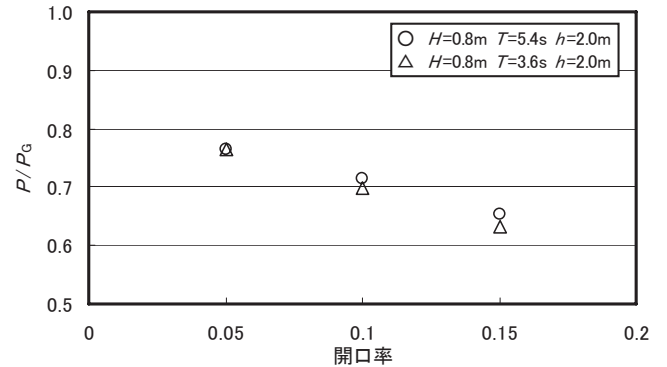


図-4.21 合田波力との比較（風波対象波）

図-4.22～図-4.24 に、津波対象波について、鋼管前面及び背面の無次元同時波圧  $p^*/\rho g a_1$ （以下、単に同時波圧と称す）の鉛直分布を示す。

図-4.22、図-4.23 より、同時波圧は津波高によらず同一である。また、開口率が小さいほど前面波圧が大きく、背面波圧が小さくなるため、鋼管前後の圧力差（作用力）は非常に大きくなる傾向にある。

図-4.22、図-4.24 より、本実験ケースの範囲では、周期が波圧に及ぼす影響はほとんど見られない。

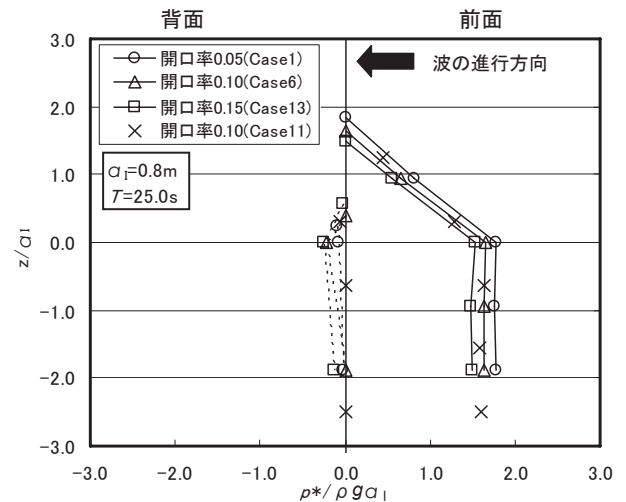


図-4.22 同時波圧の鉛直分布  
(津波対象波： $a_1=0.8\text{m}$ 、 $T=25.0\text{s}$ )

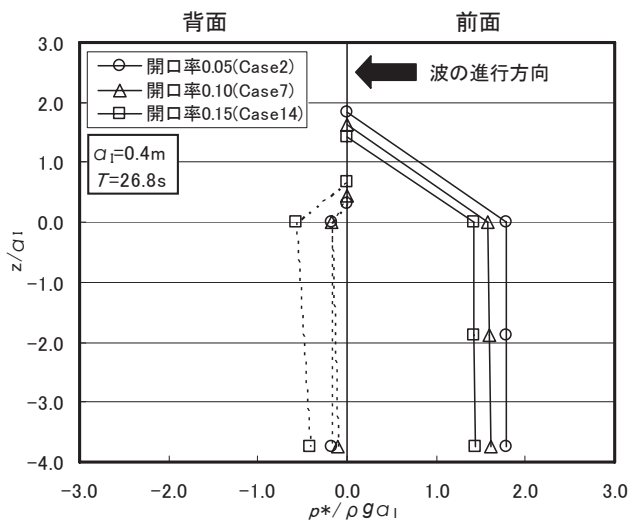


図-4.23 同時波圧の鉛直分布  
(津波対象波:  $a_1=0.4\text{m}$ ,  $T=26.8\text{s}$ )

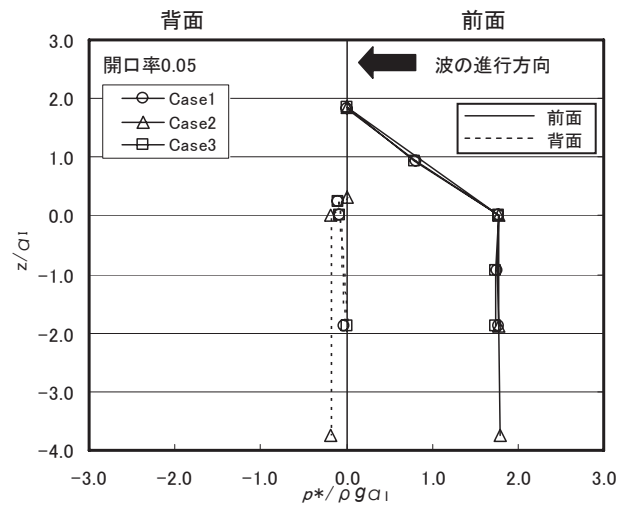


図-4.25 同時波圧の鉛直分布 (開口率 0.05)

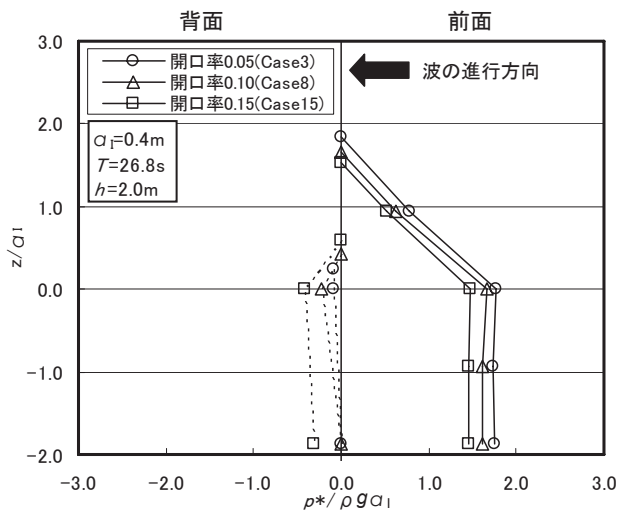


図-4.24 同時波圧の鉛直分布  
(津波対象波:  $a_1=0.8\text{m}$ ,  $T=20.1\text{s}$ )

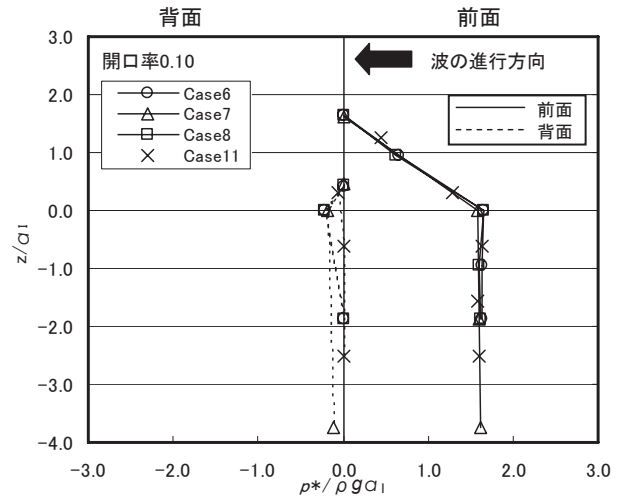


図-4.26 同時波圧の鉛直分布 (開口率 0.10)

図-4.25～図-4.27 に、同時波圧の鉛直分布を開口率ごとに示す。これらの図より、前面及び側面の同時波圧は開口率ごとにほぼ同一であることが分かる。

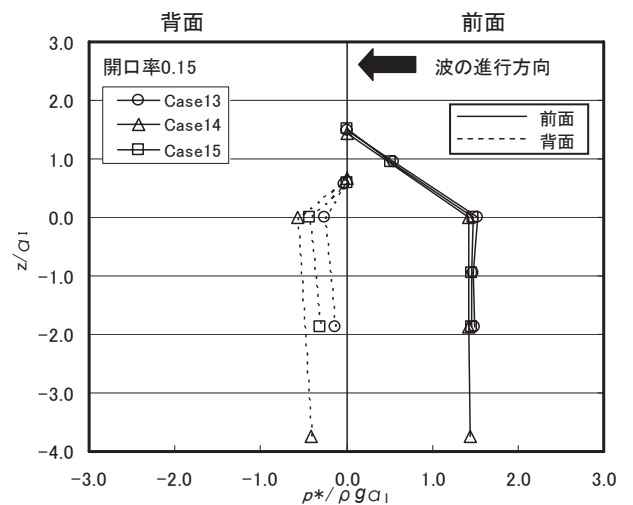


図-4.27 同時波圧の鉛直分布 (開口率 0.15)



以上の結果から、津波対象波の波圧算定式は波周期によらず、波高と開口率により決定できると考えられる。

以下に、鋼管前面の静水面における同時波圧  $p^*$  を開口率ごとに示す。なお、静水面下の波圧は静水面と同一とする。

開口率 0.05 :  $p^* = 1.8\rho g a_1$

開口率 0.10 :  $p^* = 1.7\rho g a_1$

開口率 0.15 :  $p^* = 1.6\rho g a_1$

図-4.28 に、鋼管前面での無次元同時波圧  $p^* / \rho g a_1$  と谷本らが提案した「直立壁に作用する津波力算定式」による波圧分布を比較した結果を示す。

同図より、同時波圧分布は谷本らによる波圧分布に比べて約 20%小さくなる。また、波圧の作用高さについては、谷本らは津波高の 3.0 倍としているが、本防波堤については津波高の 2.0 倍程度と小さくなっている。

以上のように、開口部を有する本防波堤では波の透過を伴うため、波圧、打ち上げ高さとも直立壁に比較して小さくなる。この傾向は、開口率が大きくなるに従い顕著になる。

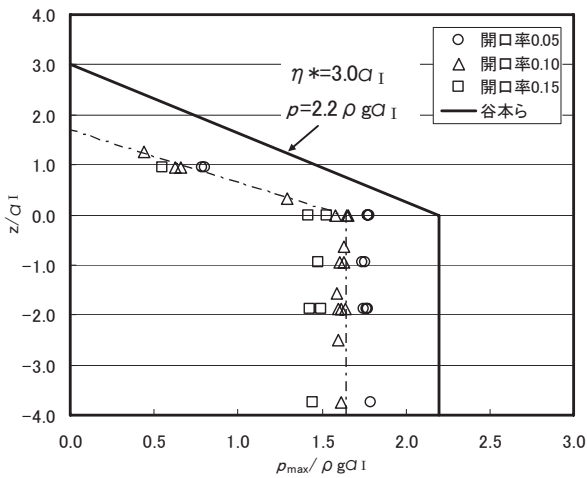


図-4.28 谷本式との比較

図-4.29 に、開口率と鋼管前面における無次元合成波力  $P / \rho g a_1 h$  の関係を示す。なお、無次元合成波力が最大となる条件は、波高 0.8m、開口率 0.05 の場合であり、その値は  $0.24 \rho g a_1 h$  となる。なお、本実験の範囲では、入射波周期の影響は非常に小さいと考えられる。

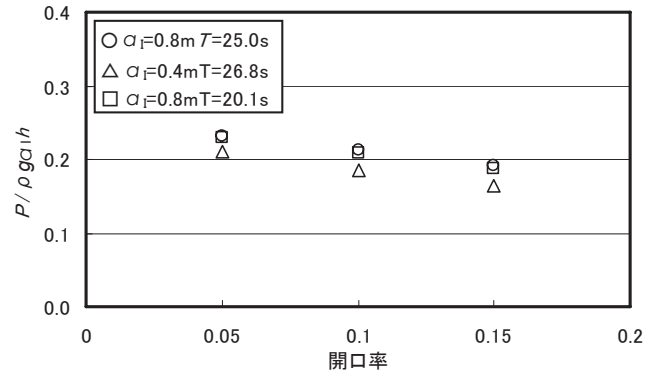


図-4.29 開口率と合成波力（鋼管前面）の関係

### 5. 数値シミュレーションによる考察

ここでは、数値シミュレーションを用いて、直立浮上式防波堤の防護効果について検討することを試みる。まず、3次元数値波動水槽（CADMAS-SURF/3D）を用いて、水理模型実験との比較検討を行い、伝達率、杭間流速、杭作用波圧を検証する。

#### 5.1 CADMAS-SURF/3D の概要

CADMAS-SURF/3D は、3次元非圧縮粘性流体を対象とした連続式および Navier-Stokes 方程式をポラスモデルに基づいて拡張した式(1)から式(4)を基礎方程式としており、また、海底斜面や透過性消波構造物等の複雑な形状を取り扱えるようにするために、表面形状の決定に VOF モデルを用いたものである。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_v S_p \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v u}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - \gamma_v D_x u - R_x + \gamma_v S_u \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u v}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v v}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w v}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} - \gamma_v D_y v - R_y + \gamma_v S_v \end{aligned} \tag{3}$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v w}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - \gamma_v D_z w - R_z + \gamma_v S_w - \frac{\gamma_v \rho^* g}{\rho} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_v &= \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \\ \lambda_y &= \gamma_y + (1 - \gamma_y) C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} R_x &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ R_y &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta y} (1 - \gamma_y) v \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ R_z &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで、 $t$ ：時間、 $x, y$ ：水平方向座標、 $z$ ：鉛直方向座標、 $u, v, w$ ： $x, y, z$ 方向の流速成分、 $\rho$ ：規準密度、 $\rho^*$ ：浮力を考慮する密度、 $p$ ：圧力、 $v_e$ ：分子動粘性係数 $\nu$ と渦動粘性係数 $\nu_t$ の和、 $g$ ：重力加速度、 $\gamma_v$ ：空陥率、 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ ： $x, y, z$ 方向の面積透過率である。 $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ は、 $C_M$ を慣性力係数とすれば次のように表され、右辺第2項が構造物から受ける慣性力の効果となる。 $D_x, D_y, D_z$ はエネルギー減衰帯のための係数、 $S_p, S_u, S_v, S_w$ は造波ソースのためのソース項であり、後述する。また、 $C_D$ を抵抗係数として多孔質体からの抵抗力 $R_x, R_y, R_z$ は、式(6)のように流速の2乗に比例する形でモデル化する。 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は $x, y, z$ 方向の格子間隔である。

自由表面解析モデルには、汎用性が高く、複雑な表面形状を解析可能であるVOF法を採用する。VOF法では、本来ステップ関数となる「流体である・ない」を表す関数を計算セル毎に平均化したVOF関数 $F$ の移流方程式と、表面の向きを逐次的に計算することにより、自由表面の挙動を解析するポーラスモデルに基づくVOF関数 $F$ の移流方程式を式(7)に示す。

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v F}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = \gamma_v S_F \quad (7)$$

ここで、 $S_F$ は造波のためのソース項である。

## 5.2 計算条件の設定

大型実験では、図3.1の断面を用いて行っており、数値計算では、そのすべてを再現することは、計算コストの問題から難しいので、今回は、図-5.1のように、杭1本分の領域を計算範囲とし、水理模型実験より幅を狭めて計算した。その際、両側壁は摩擦無しの壁面境界条件とした。

表-5.1に対象波の計算条件を示す。周期などは水理模型実験に合わせた。ケース7、およびケース8では、実験ではできなかった周期による検討を行った。

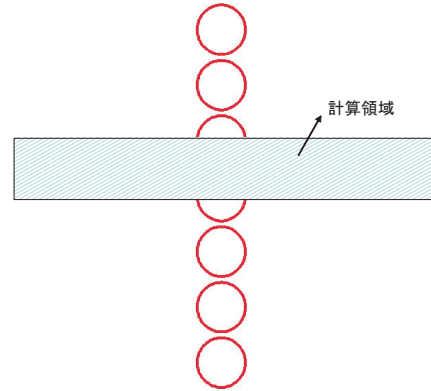


図-5.1 計算領域

表-5.1 対象波計算条件

Case	T(s)	H(m)	杭間(m)	開口率
1	26.8	0.8	0.021	0.05
2	26.8	0.4	0.021	0.05
3	20.1	0.8	0.021	0.05
4	8.0	0.8	0.021	0.05
5	26.8	0.8	0.042	0.1
6	12.0	0.8	0.042	0.1
7	8.0	0.8	0.042	0.1
8	5.4	0.8	0.042	0.1
9	3.6	0.8	0.042	0.1

## 5.3 計算結果事例

ケース4の計算事例ならびに水位に関する時系列波形を図-5.2、図-5.3にそれぞれ示す。図-5.2を見ると隙間を通るときに滝のように落ちていく様子が再現できていることがわかる。そこから、落下による渦でのエネルギー損失、スリット縮流によるエネルギー損失ならびに反射により、主に津波エネルギーが伝達されないことがわかる。図-5.3より、伝達率の低下には反射も大きく寄与していることがわかる。

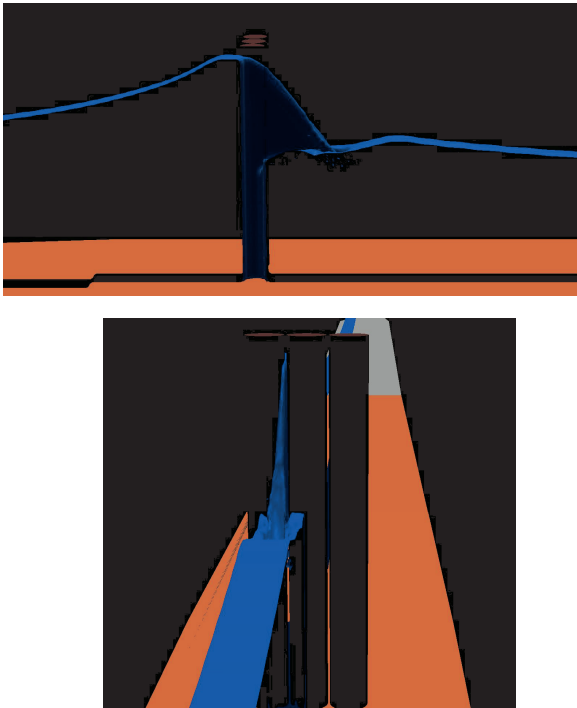


図-5.2 空間波形事例（上：断面図，下：正面図）

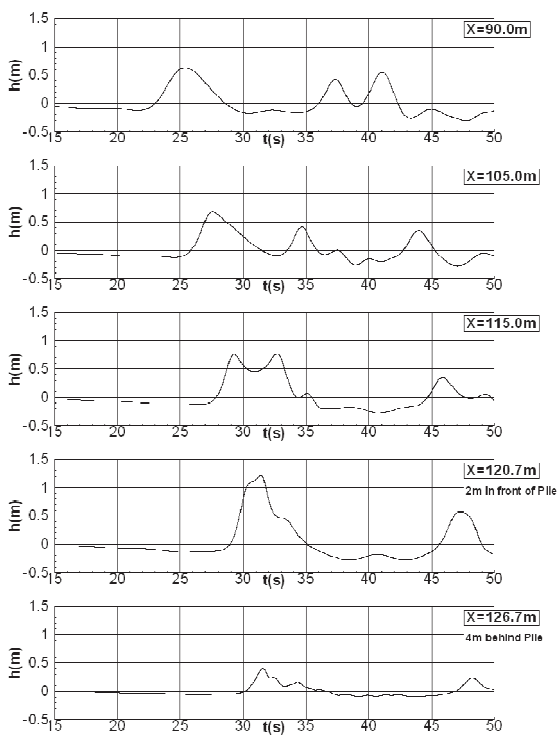


図-5.3 水位の時系列波形（case 4）

#### 5.4 透過率

透過率  $K_T$  と杭間との関係を表-5.2 に示す。表中の  $H_I$  は計算水位から読み取ることができる入射波高， $H_T$  は透過波高， $H_R$  は反射波高であり， $K_R=H_R/H_I$ ， $K_T=H_T/H_I$  である。ただし，うまく計算できなかったケースについては

空欄にしている。

$K_{loss}$  は，エネルギーの保存から，反射率，透過率を用いて計算されるエネルギー損失率であり，

$$1 = K_R^2 + K_T^2 + K_{loss}$$

の関係にある。表 3.3 を見るとわかるとおり，エネルギー損失率については，現時点では，まだ流速・波高などの相関は見られないが，おおよそ 30%程度はエネルギー損失していることがわかる。これは，図-5.5 に示されるように，水塊の落下によって生じる渦と水が通り抜けることによる渦が大きな原因と考えられる。

透過率の数值計算結果を図-5.4 に示す。開口率が 5% から 10% になると，実験同様透過率が上昇する結果となり，実験結果と整合している。ただし，実験のように周期による透過率の違いは明確に見られず，むしろほぼ一様の透過率であるように見える。

表-5.2 透過率

Case	$H_I$	$H_T$	$K_T$	$H_R$	$K_R$	$K_{loss}$
1	0.80	0.28	0.35	0.61	0.76	0.30
2	0.37	0.14	0.38	0.24	0.66	0.42
3	0.81	0.27	0.33	0.67	0.83	0.20
4	0.76	0.24	0.31			
5	0.81	0.45	0.56	0.51	0.63	0.29
6	0.78	0.43	0.56	0.43	0.55	0.38
7	0.75	0.39	0.51			
8	0.80	0.46	0.58			
9	0.80	0.40	0.50			

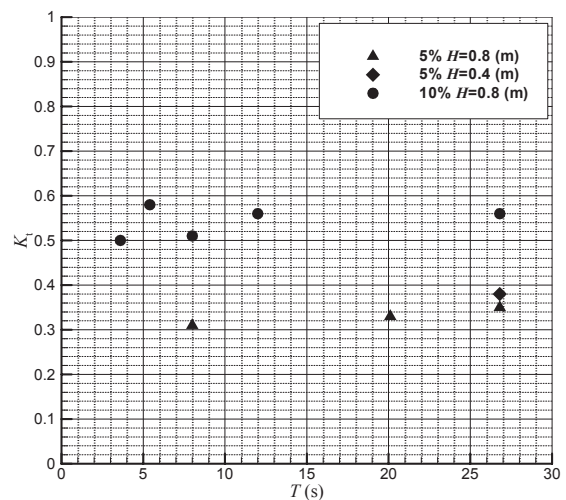


図-5.4 周期と透過率の関係

この傾向については、まだ議論の余地が残されていると考えるが、開口率5%の時には、30～40%の透過率であり、10%の時には、50～60%の透過率であることが示された。

図-5.5は、津波が直立浮上式防波堤を通過するときの空間的な流速分布である。赤い部分が5.0m/s、白い部分が0.0m/sとなる。直立浮上式防波堤の直背後ならびに、表層に強い流れが発生している。縦渦は、津波高さ、もしくは水深のオーダー程度のものが発生しており、横渦は、杭の直径程度のものが発生している。これより、津波高さ・管径にも透過率は依存することが予想される。

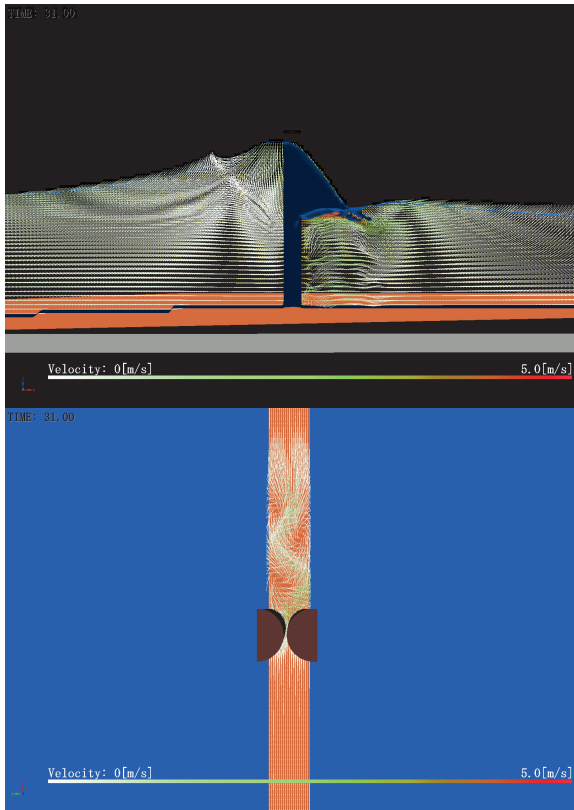


図-5.5 水塊の落下に伴う縦渦（上）と、水が通り抜けるときに生じる横渦（下）(case4)

### 5.5 杭間流速

次に、津波相当波としているCase1からCase4までの比較的周期の長い波の場合における杭間流速を表-5.3に示す。測定した場所は、杭の中央部付近であり、鉛直方向としては、静水面より下はほぼ一応分布であった。

杭間を流れる流速は、case1またはcase3（開口率5%、波高80cm）では、津波流速の3.4倍程度である。しかし、case2（開口率5%、波高40cm）では、津波流速の4.7倍程度であった。5%時のほうが、相対的にはより速い速度になっており、これについては今後検討する必要がある。

開口率による杭間流速の相対値の変化は、5%では、3.39、10%では、2.94であり、実験と比較すると5%ではほぼ同程度であり、10%では実験よりも低い値になっている。しかし、傾向としては、5%より10%のほうが低くなっており、物理的には理にかなっている。いずれにせよ、5%～10%の開口率では、線形津波流速の3～4倍になることがわかった。これから、背後水域面積との比較により簡易的な直立浮上式防波堤の防護効果を検討することができると考えられる。

表-5.3 杭間流速

Case	$U_{\max}$ (m/s)	$U_{\min}$ (m/s)	$\frac{U_{\max}}{a_1\sqrt{g/h}}$	$\frac{U_{\min}}{a_1\sqrt{g/h}}$
1	6.0	-3.0	3.39	-1.69
2	4.2	-1.9	4.73	-2.14
3	6.0	-3.0	3.39	-1.69
4	5.2	-2.3	2.94	-1.30

### 5.6 作用波圧

同様にCase1からCase4までの杭に作用する波圧を表-5.4に示す。杭に作用する波圧は、杭間が小さくなるほど全面波圧は大きくなることがあわかる。また、全面においては、10%時には、1.5倍程度となり、谷本ら(1984)の津波における防波堤に作用する波圧2.2倍よりも小さくなっている。これは、杭間より流体が逃げるためであるが、これは、実験結果とも整合している。

表-5.4 杭に作用する波圧

Case	$p_{\text{側壁}}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$p_{\text{中央}}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$p_{\text{前面}}$ (kN/m <sup>2</sup> )
1	2.84	11.84	12.20
2	1.13	5.78	5.70
3	2.57	10.64	11.02
4	3.36	10.62	10.96

Case	$p_{\text{側}}/\rho g H_1$	$p_{\text{中}}/\rho g H_1$	$p_{\text{前}}/\rho g H_1$
1	0.39	1.61	1.66
2	0.33	1.69	1.66
3	0.36	1.51	1.56
4	0.46	1.44	1.49

## 6. まとめ

水理模型実験結果と数値シミュレーション結果に基づき直立浮上式防波堤の水理特性を総括した結果を以下に示す。

## 6.1 主要な結論

### (1) 水理模型実験結果

- ①本防波堤の消波性能は、開口率により大きく変化する。標準的な開口率 0.10 の場合、周期によっても異なるが、風波対象波に対して透過率 0.56~0.63、津波対象波に対して透過率 0.45~0.5 となる。
- ②鋼管に作用する波圧は鋼管前面で最大となり、側面波圧は前面波圧の数%程度低下する。風波対象波の場合の前面波圧は、合田式による波圧の 10~20%減、津波対象波の前面波圧は谷本らの提案する津波波圧の約 20%減となる。
- ③鋼管開口部を通過する流速の時間平均値は、開口率 0.05~0.15 の場合に津波流速の約 2.0 倍となる。これより、開口部から背後水域へ通過する概略流量を計算できる。

### (2) 数値シミュレーションによる考察

- ①3次元水路モデルを用いた「CADMAS-SURF/3D」によるシミュレーションでは、消波性能だけでなく波圧及び開口部通過流速が明らかとなった。それらの結果は、水理模型実験結果とも整合している。
- ②透過率については、数値計算の結果からは周期による明確な違いは見られないものの、開口率 5%時は 30~40%の透過率であり、10%時は、50~60%の透過率であり透過率の傾向や大きさは実験と整合している。

## 6.2 今後の課題

- ①本研究では非碎波の津波・風波に対して検討したが、段波津波に対しても検討を行う必要がある。
- ②本水理模型実験では鞘管構造の上部鋼管分のみを固定して実施したが、上部・下部鋼管の隙間(ガタ)の影響を考慮した波圧等の評価が望まれる。
- ③数値シミュレーションにおいて、鋼管開口部における渦によるエネルギー損失をさらに精度良く評価する必要がある。
- ④今回のシミュレーションの結果をふまえ、より周期の長い場合における検討を行う必要がある。

(2007年3月9日受付)

## 謝辞

本研究は、近畿地方整備局よりご支援頂いて行われた研究であることを記し、深謝の意を表したい。

国土交通省国土技術政策総合研究所 山根隆行副所長(元港湾空港技術研究所海洋・水工部長)には、本研究に取り組むきっかけや、様々なアイデアを頂いた。

実験にあたり、鋼管模型製作では株式会社大林組機械工場の 上田達夫氏、ならびに、実験実施とデータ解析では株式会社エコーの宮里一郎氏のご協力を頂いている。

港湾空港技術研究所 高橋重雄研究主監、佐原 光一統括研究官、永井紀彦海洋・水工部長ならびに牛嶋龍一郎地盤・構造部長には日々のご指導及び研究支援をしていただいたおかげで、円滑に研究を進められた。

本研究は、「直立浮上式防波堤に関する共同研究」(独立行政法人港湾空港技術研究所、株式会社大林組、新日鉄エンジニアリング株式会社、東亜建設工業株式会社、および三菱重工橋梁エンジニアリング株式会社)および「直立浮上式防波堤の設計・施工法に関する共同技術開発」(国土交通省中部地方整備局、独立行政法人港湾空港技術研究所、株式会社大林組、新日鉄エンジニアリング株式会社、東亜建設工業株式会社、および三菱重工橋梁エンジニアリング株式会社)の研究開発の一環として行われた研究であり、三菱重工株式会社 野田節男顧問、新日本製鐵株式会社 川嶋康宏顧問、東亜建設工業 門司剛至執行役員専務、ならびに株式会社大林組 稲垣紘史常務執行役員には貴重なご助言を頂いた。また、研究会のなかで、数多くの方にご指導・ご助言を頂いている。ここに記し、感謝の意を表したい。

最後に、すべての名前を記すことができず恐縮ではあるが、本研究に関わられた技術職員、事務職員の皆様方に感謝する。

## 参考文献

- 1) 永井荘七郎、久保直、時川和夫(1965): 鋼管防波堤に関する研究(第1報)、第12回海岸工学講演会論文集、pp.209-218.
- 2) 林泰造、狩野徳太郎、白井増次郎、服部昌太郎(1965): 筒型透過性防波堤の水理特性について、第12回海岸工学講演会論文集、pp.193-197.
- 3) 林泰造、服部昌太郎、白井増次郎(1966): 透過性鋼管防波堤の水理、第13回海岸工学講演会論文集、pp.97-101.
- 4) 角野昇八、仲田義弘(1993): エネルギー損失を考慮した多列柱体列による波の透過と反射に関する研究、海岸工学論文集、第40巻、pp.661-665.
- 5) 合田良実、鈴木康正、岸良安治、菊地治(1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法、港湾技術資料 No.248.
- 6) 有川太郎、山田文則、秋山実: 3次元数値波動水槽における津波波力に関する適用性の検討、海岸工学論文集、第52巻、pp.46-50.

## 記号表

$a_1$  : 津波高

$b$  : 鋼管間隔 (開口幅)

$D$  : 鋼管(円柱)直径

$\frac{b}{D+b}$  : 開口率

$d$  : 水深

$g$  : 重力加速度

$H$  : 風波対象波の波高

$h$  : 設置水深 (一定水深)

$K_R$  : 反射率

$K_T$  : 透過率

$L$  : 波長

$P$  : 単位幅当たりの合成波力

$p$  : 圧力(一般的な波圧)

$p_{\max}$  : 最大波圧

$p^*$  : 同時波圧

$T$  : 波周期

$t$  : 時間

$\Delta t$  : 時間間隔, サンプル間隔

$u$  : 水平方向流速 (岸沖方向)

$u_s$  : 表層流速 (岸沖方向)

$v$  : 水平方向流速 (岸沖直角方向)

$w$  : 鉛直方向流速

$x$  : 水平座標 (岸沖方向)

$y$  : 水平座標 (岸沖直角方向)

$z$  : 鉛直座標

$\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  : 格子間隔

$\gamma_x$ ,  $\gamma_y$ ,  $\gamma_z$  : 面積透過率

$\eta$  : 水位

$\rho$  : 水の基準密度

港湾空港技術研究所資料 No. 1156

2007. 6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 新高速印刷株式会社

Copyright © (2007) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。