

# NRA 技術報告

NRA Technical Report Series

## 防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる 水深係数の適用範囲について

Applicability of Water Depth Coefficient in Evaluation for  
Tsunami Wave Force Acting on Seawall

石田 暢生、森谷 寛、中村 英孝、飯島 亨、川内 英史

Nobuo ISHIDA, Hiroshi MORITANI, Hidetaka NAKAMURA,  
Toru IJIMA and Hidefumi KAWAUCHI

安全技術管理官(地震・津波担当)付

Division of Research for Earthquake and Tsunami

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,  
Secretariat of Nuclear Regulation Authority(S/NRA/R)

原子力規制委員会

Nuclear Regulation Authority

平成 26 年 12 月  
December 2014

本技術報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究等の成果をまとめたものです。原子力規制委員会は、これらの成果が広く利用されることを期待し適時に公表することとしています。

なお、本技術報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、改めて原子力規制委員会としての判断が行われます。

本レポートの内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 安全技術管理官（地震・津波担当）付  
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル  
電 話：03-5114-2226  
ファックス：03-5114-2236

# 防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる 水深係数の適用範囲について

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ  
安全技術管理官（地震・津波担当） 付  
石田 暢生 森谷 寛 中村 英孝 飯島 亨 川内 英史

## 要旨

防潮堤は、津波防護施設の一つであり、原子力発電所敷地内への津波の浸水を抑制する重要な構造物である。そのため、津波に対して防潮堤の防護機能が十分保持できるよう、津波の波圧特性を適切に把握し、防潮堤の津波に対する構造健全性を評価する必要がある。

平成 25 年 6 月に制定された「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」では、津波防護施設の設計に当たって、「津波による荷重（波圧、衝撃力）の設定に関して、考慮する知見（例えば、国交省の暫定指針等）及びそれらの適用性」を確認することとしており、また、「耐津波設計に係る工認審査ガイド」でも同様の規定がある。国土交通省が平成 23 年 11 月にとりまとめた「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」では、設計上考慮する津波波圧は、構造物（以下「防潮堤」という。）の位置において、防潮堤がない場合を想定した津波の浸水深から得られる設計用浸水深の 3 倍（以下「水深係数 3」という。）の高さに相当する静水圧より求めることとしている。一方、津波の大きさ、海底面の形状、防潮堤の位置等の条件によっては、水深係数 3 を超える場合があることが既往研究から分かる。

本研究では、既往研究成果を踏まえ、水深係数 3 を防潮堤設計に適用するに当たって、その適用範囲を明確にするため、水理試験及び水理試験結果のシミュレーション解析、実規模モデルによる試解析を実施した。この結果、流体の慣性力と重力との比を表すフルード数が大きくなるに従って水深係数も大きくなり、フルード数が 1.5 程度を超える領域で水深係数 3 を超える場合があることを確認した。

Applicability of Water Depth Coefficient in Evaluation for Tsunami Wave Force Acting on  
Seawall

Nobuo ISHIDA, Hiroshi MORITANI, Hidetaka NAKAMURA, Toru IJIMA  
and Hidefumi KAWAUCHI

Division of Research for Earthquake and Tsunami

Regulatory Standard and Research Department,  
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

A seawall is one of the important structures for tsunami protection to prevent flooding at a nuclear power plant site. In order to maintain the tsunami protection function, it is necessary to well understand the characteristics of the tsunami wave force and evaluate the structural integrity of the seawall.

Regarding the design and evaluation of the tsunami protection measures, Regulatory Guide for Reviewing Design Basis Tsunami and Tsunami-Resistant Design, enforced in June 2013, requires to “confirm the technical basis to be considered on the loads due to tsunami such as wave pressure and impact force, (for example, the interim guideline of the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) and so forth) and its applicability”. Regulatory Guide for Reviewing Tsunami-Resistant Design on Construction Plan prescribes in the same manner. According to the MLIT’s interim guideline issued in 2011, the hydrostatic pressure corresponding to three times of the design tsunami inundation depth without the structure (hereinafter referred to as the seawall), or a value of water depth coefficient is 3, shall be applied for the design tsunami pressure distribution acting on the seawall. However, it is reported from previous studies done by other authors that the value of the water depth coefficient could be above 3 depending on the conditions such as tsunami magnitude, seafloor topography, and location of the seawall.

In this study, hydraulic model tests and their numerical simulations were conducted in order to clarify the applicability of the value of the water depth coefficient. As the results, it was confirmed that the value of the water depth coefficient increased with the Froude number, which is a non-dimensional number defined by the ratio of the inertia force to the gravitational force, and might exceed 3 when the Froude number became larger than 1.5.

## 目 次

1. 序論 .....	1
2. 防潮堤に作用する津波波圧評価手法 .....	2
2. 1 津波時に防潮堤が受ける波圧の概要 .....	2
2. 2 防潮堤設計に係る設計波圧算定手法 .....	2
3. 研究の概要 .....	3
3. 1 研究の全体構成 .....	3
3. 2 水理試験及び解析の手順 .....	5
4. 水理試験による設計波圧算定手法の検討 .....	7
4. 1 中規模水理試験 .....	7
4. 2 大規模水理試験 .....	13
5. 解析による設計波圧算定手法の検討 .....	19
5. 1 解析方法 .....	19
5. 2 中規模水理試験シミュレーション解析 .....	20
5. 3 大規模水理試験シミュレーション解析 .....	26
6. 実規模モデルによる試解析 .....	31
6. 1 解析方法 .....	31
6. 2 解析条件 .....	31
6. 3 解析結果 .....	33
7. 考察 .....	34
7. 1 中規模水理試験及び大規模水理試験の比較 .....	34
7. 2 中規模水理試験結果における水深係数 ( $\alpha$ ) のばらつきについて .....	34
7. 3 大規模水理試験と中規模水理試験における水深係数 ( $\alpha$ ) の差異について .....	35
7. 4 中規模水理試験における水深係数 ( $\alpha$ ) の傾向について .....	36
7. 5 水深係数 3 の適用範囲について .....	38
8. 結論 .....	39
謝 辞 .....	39
参考文献 .....	40
付録 水理試験で採用されている相似則及び縮尺の考え方について .....	41
「防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数の適用範囲について」の執筆者 .....	45

## 表 目 次

表 4. 1	中規模水理試験ケース一覧（通過波検定試験）	9
表 4. 2	中規模水理試験ケース一覧（波圧試験）	10
表 4. 3	大規模水理試験ケース一覧（通過波検定試験）	15
表 4. 4	大規模水理試験ケース一覧（波圧試験）	15
表 5. 1	解析概要	19
表 5. 2	空気及び水の物性値	19
表 5. 3	中規模水理試験シミュレーション解析ケース一覧	20
表 5. 4	大規模水理試験シミュレーション解析ケース一覧	26
表 6. 1	実規模モデルによる試解析ケース一覧	31

## 図 目 次

図 2. 1	防潮堤に作用する津波波圧	2
図 2. 2	暫定指針における設計波圧算定手法	3
図 3. 1	研究の全体構成	4
図 3. 2	水理試験に基づく検討手順	6
図 4. 1	中規模水理試験設備の概要	7
図 4. 2	中規模水理試験の波圧計設置位置	8
図 4. 3	中規模水理試験の状況	8
図 4. 4	中規模水理試験における汀線からの距離と最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ )、流速 ( $v_i$ ) の関係	11
図 4. 5	堤体位置と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係	12
図 4. 6	大規模水理試験の概要	13
図 4. 7	大規模水理試験の波圧計設置位置	13
図 4. 8	大規模水理試験の状況	14
図 4. 9	大規模水理試験における汀線からの距離と最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ )、流速 ( $v_i$ ) の関係	17
図 4. 10	堤体位置と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係	18

図 5. 1	中規模水理試験シミュレーション解析モデル	21
図 5. 2	沖側波高 ( $h(t)$ ) 及び浸水深 ( $\eta(t)$ ) 時刻歴	22
図 5. 3	流速 ( $v(t)$ ) 時刻歴	23
図 5. 4	最大波圧分布図	24
図 5. 5	水深係数 ( $\alpha$ ) と堤体位置の関係	24
図 5. 6	通過波解析と波圧解析の関係	25
図 5. 7	大規模水理試験シミュレーション解析モデル	26
図 5. 8	沖側波高 ( $h(t)$ ) 及び浸水深 ( $\eta(t)$ ) 時刻歴	28
図 5. 9	流速 ( $v(t)$ ) 時刻歴	29
図 5. 10	堤体位置と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係	30
図 6. 1	実規模モデルによる試解析モデル	32
図 6. 2	最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ )、流速 ( $v_i$ ) と防潮堤位置の関係	33
図 6. 3	防潮堤位置と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係	33
図 7. 1	フルード数 ( $Fr$ ) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係 (水理試験)	34
図 7. 2	大規模水理試験における堤体に作用する作用波のリーク状況	35
図 7. 3	フルード数 ( $Fr$ ) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係 (中規模水理試験及び大規模水理試験シミュレーション解析)	36
図 7. 4	解析におけるフルード数 ( $Fr$ ) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係	37
図 7. 5	解析における水路底面勾配と碎波位置の関係	37
図 7. 6	底面勾配 1/40 におけるフルード数 ( $Fr$ ) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係	38
図 7. 7	フルード数 ( $Fr$ ) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係	38

## 用語の定義

水深係数 ( $\alpha$ )	最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) と最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) に相当する静水圧との比を表す無次元数
フルード数 ( $Fr$ )	流体の慣性力と重力との比を表す無次元数で、流体の性状を示す指標の一つ
最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ )	津波遡上後の堤体がない場合の堤体の位置 $i$ における、津波深さの最大値
浸水深 ( $\eta(t)$ )	陸側における津波深さの時刻歴
沖側波高 ( $h(t)$ )	沖側における津波高さの時刻歴
流速 ( $v(t)$ )	津波の沖側及び陸側の流速の時刻歴
流速 ( $v_i$ )	堤体の位置 $i$ における、最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) の発生時点での流速
津波波圧	津波により防潮堤に作用する水平方向の圧力の総称
作用波	水理試験／解析に用いる模擬津波
孤立波	水理試験時の造波装置の変位挙動により発生する作用波
	$\text{変位挙動} = \frac{A}{2} \tanh \left\{ 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{1}{2} \right) \right\} + \frac{A}{2}$
	$A$ : 造波装置の振幅 $T$ : 造波装置の作動時間 $t$ : 時間 ( $0 \leq t \leq T$ )
正弦波	水理試験時の造波装置の変位挙動により発生する作用波
	$\text{変位挙動} = \frac{A}{2} \sin \left\{ 2\pi \left( \frac{t}{2T} - \frac{1}{4} \right) \right\} + \frac{A}{2}$
	$A$ : 造波装置の振幅 $T$ : 造波装置の作動時間 $t$ : 時間 ( $0 \leq t \leq T$ )
周期 (s)	上記の造波装置の作動時間
最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ )	作用波により位置 $i$ の堤体に作用する最大波圧
設計波圧算定手法	暫定指針(東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針:国土交通省)に示されている津波波圧算定式
堤体	本報告では、水理試験／シミュレーション解析に対して用いる模擬防潮堤と定義
汀線	本報告では、海岸線を意味する用語として水理試験／シミュレーション解析に使用

## 1. 序論

平成 25 年 7 月に施行された「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」<sup>(参1)</sup>（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号。以下「設置許可基準規則」という。）の第 5 条では、津波による損傷の防止のため、「設計基準対象施設は、その供用中に当該設計基準対象施設に大きな影響を及ぼすおそれがある津波（以下「基準津波」という。）に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。」と規定している。この規定は「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」<sup>(参2)</sup>（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定）で「別記 3 のとおりとする。」とされ、別記 3 の 3. に、この規定を満たすための基準津波に対する設計基準対象施設の設計に当たっての方針として、S クラスに属する設備を内包する建屋及び S クラスに属する設備に対しては、「基準津波による遡上波が到達する高さにある場合には、防潮堤等の津波防護施設及び浸水防止設備を設置すること。」を求めている。

また、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」<sup>(参3)</sup>（平成 25 年原子力規制委員会規則第 6 号）の第 6 条においても、津波による損傷の防止のため、「設計基準対象施設が基準津波により安全機能が損なわれるおそれがないよう、防護措置その他の適切な措置を講じなければならない。」と規定し、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」<sup>(参4)</sup>（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定）では別記 3 として、上述の設置許可基準規則の解釈と同様の内容を求めている。

これらの規定に関して、基準津波策定の厳格な妥当性確認に活用することを目的として策定した「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」<sup>(参5)</sup>（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定）では、荷重の設定に関して、「5. 施設・設備の設計・評価の方針及び条件」の 5.1 (2) ②において、「a) 津波による荷重（波圧、衝撃力）の設定に関して、考慮する知見（例えば、国交省の暫定指針<sup>(参6)</sup>等）及びそれらの適用性」とし、その設定の考え方を確認することとしている。

工事計画認可に係る耐津波設計の審査において、耐津波設計の厳格な妥当性確認に活用することを目的として策定した「耐津波設計に係る工認審査ガイド」<sup>(参7)</sup>（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定）では、4.5 荷重評価の ①において、「d) 入力津波の伝播及び遡上解析では、施設に作用する津波波圧の経時変化（段波波圧、持続波圧）に留意し、特に波圧が大きくなる段波波圧（衝撃波圧）が発生する場合、施設への影響を検討していることを確認する。また、衝撃的な波圧については、ばらつきが大きくなることから、規格及び基準類、既往の研究等を参考にして、衝撃的な波圧を考慮した、荷重係数等の安全係数を設定していることを確認する。」等を求めている。

暫定指針の中で、設計波圧は構造物（以下「防潮堤」という。）の位置において、防潮堤がない場合を想定した津波の浸水深から得られる設計用浸水深の 3 倍（以下「水深係数 3」という。）の高さに相当する静水圧より求めることとしている（2. 2 参照）。

一方、津波の大きさや海底面の形状、防潮堤位置等の条件によっては、水深係数 3 を超える場合があることが、既往研究から分かる（例えば、榊山, 2012<sup>(参8)</sup>; Asakura et al., 2002<sup>(参9)</sup>）。

そこで本研究では既往研究を踏まえ、津波波圧のうち持続波圧を対象に水深係数 3 を防潮堤設計に適用するに当たって、その適用範囲を明確にすることを目的に、水理試験、水理試験結果のシミュレーション解析及び実規模モデルによる試解析を実施し、適用範囲を確認した。

## 2. 防潮堤に作用する津波波圧評価手法

### 2. 1 津波時に防潮堤が受ける波圧の概要

防潮堤に作用する津波波圧は図 2. 1 に示すように、段波波圧と持続波圧がある。段波波圧は、最初に防潮堤に衝突する津波が与える継続時間の短い波圧のことである。一方、持続波圧は、段波波圧の後の継続時間の長い波圧のことであり、防潮堤には主に静的な波圧が加わる。防潮堤の設計に当たっては、このような 2 種類の津波波圧を考慮する必要がある。

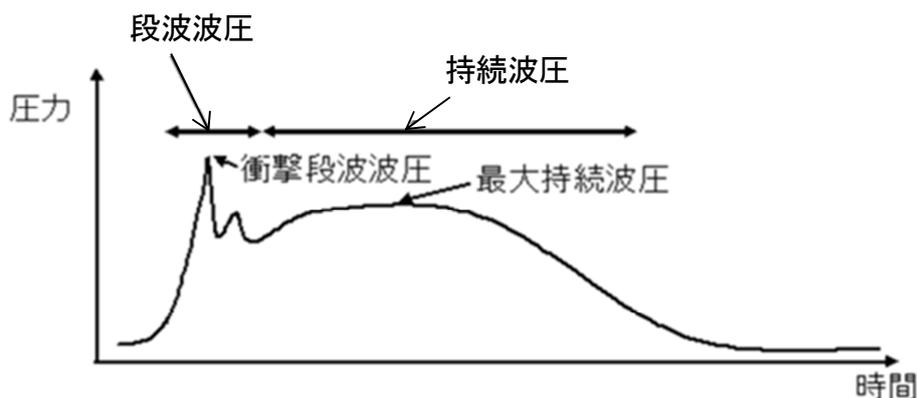
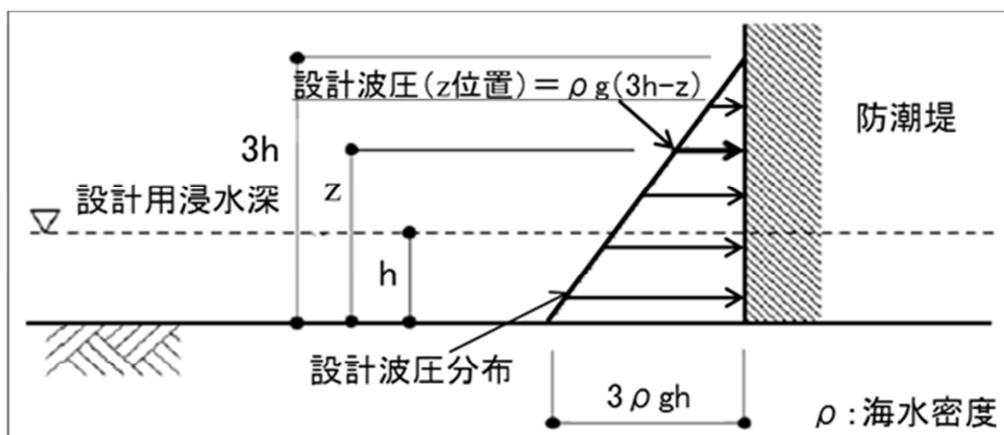


図 2. 1 防潮堤に作用する津波波圧

Figure 2. 1 Tsunami Pressure Acting on Seawall

### 2. 2 防潮堤設計に係る設計波圧算定手法

暫定指針では防潮堤に作用する設計波圧は図 2. 2 に示すように、設計用浸水深を防潮堤がない場合の設計津波の敷地内への遡上解析から求めた浸水深に基づき設定し、一部の要件に該当する場合を除き、この設計用浸水深の 3 倍の高さに相当する静水圧より求めることとしている。



※出典：(参6) 1.4 図 4-1 に対して一部加筆

図 2. 2 暫定指針における設計波圧算定手法

Figure 2. 2 Evaluation Method for Design Pressure by Interim Guidelines

### 3. 研究の概要

#### 3. 1 研究の全体構成

2. 1 に示すように、防潮堤には段波波圧と持続波圧が作用するが、本研究は持続波圧を対象とし、水理試験、水理試験結果のシミュレーション解析及び実規模モデルによる試験解析をそれぞれ実施し、これらに基づいた検討を行った。これらの研究の全体構成を図 3. 1 に示す。

なお、水理試験及び水理試験データの整理は、委託研究事業の受託者である独立行政法人港湾空港技術研究所が実施した。

#### (1) 水理試験

- ・水理試験は、津波の海上伝播及び陸への遡上を模擬することのできる水路を用い、造波装置により津波を模擬した作用波を発生させた。
- ・水理試験に用いた水路は、実規模での海岸線から防潮堤までの距離 0m、50m 及び 100m を模擬した中規模水理試験設備（実規模に対する縮尺：1/40）と、海岸線から防潮堤までの距離 0m、30m 及び 60m を模擬した大規模水理試験設備（実規模に対する縮尺：1/10）の 2 種類とした。中規模水理試験で詳細な試験を行い、大規模水理試験ではその傾向を確認した。
- ・防潮堤を模擬した堤体の位置、水路底面の勾配等を試験パラメータとした。
- ・水理試験はそれぞれ、通過波検定試験及び波圧試験の 2 種類の試験を実施した。

(2) 水理試験結果のシミュレーション解析

中規模水理試験と大規模水理試験のシミュレーション解析を行い、水理試験の結果と比較することにより、フルード数 ( $Fr$ ) や水深係数 ( $\alpha$ ) 等に係る解析手法の妥当性を確認するとともに、沖側波高 ( $h(t)$ ) や遡上後の浸水深 ( $\eta(t)$ 、 $\eta_{i, \max}$ )、流速 ( $v(t)$ 、 $v_i$ )、最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) に対する考察を行った。

(3) 実規模モデルによる試解析

上記 (1) 及び (2) で妥当性が確認されたモデル化手法及び解析手法を用いて実規模モデルに対する試解析を行った。

(4) 暫定指針における水深係数 3 の適用範囲の検討

(1) ~ (3) の検討結果より、暫定指針における水深係数 3 を防潮堤設計に適用するに当たって、その適用範囲について検討した。

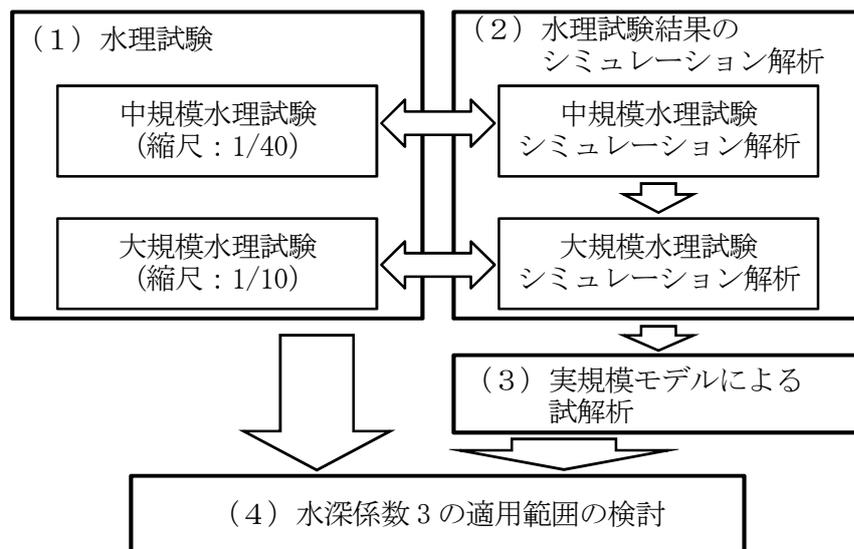


図 3. 1 研究の全体構成

Figure 3. 1 Overall Framework of the Study

### 3. 2 水理試験及び解析の手順

水理試験（中規模水理試験、大規模水理試験）に基づく検討手順を以下及び図 3. 2 に示す。なお、水理試験結果のシミュレーション解析（中規模水理試験シミュレーション解析、大規模水理試験シミュレーション解析）及び実規模モデルによる試解析についても、同様の手順に従った。

#### （1）通過波検定試験

水理試験で、堤体を設置しない場合の作用波の沖側測定位置の沖側波高 ( $h(t)$ )、流速 ( $v(t)$ )、各堤体位置における浸水深 ( $\eta(t)$ ) 及び流速 ( $v(t)$ ) の時刻歴データを得た。さらに、各堤体位置における作用波の最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) 及びその時点の流速 ( $v_i$ ) を、時刻歴データから得た。

#### （2）波圧試験

堤体を設置した場合の堤体位置における最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) を水理試験から得た。水深係数 ( $\alpha$ ) は、各堤体位置における最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) 及び最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) から算出した。

#### （3）フルード数 ( $Fr$ ) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係整理

中規模水理試験及び大規模水理試験のそれぞれの結果を統一的な尺度で比較するため、無次元数であるフルード数 ( $Fr$ ) を導入し、フルード数 ( $Fr$ ) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係について整理を行った。

フルード数 ( $Fr$ ) は、（1）及び（2）で得られた各堤体位置における最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) 及びこの時点の流速 ( $v_i$ ) から算出した。

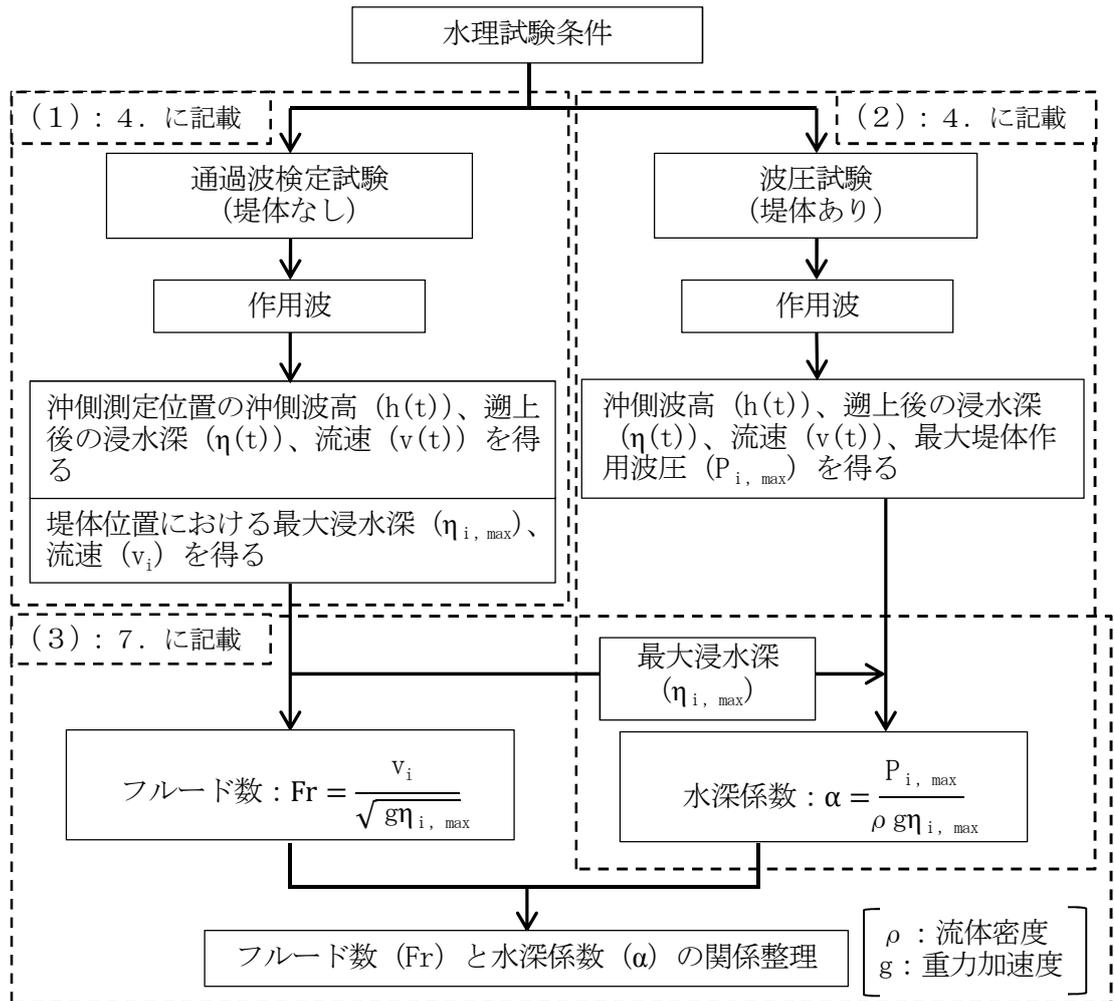


図 3. 2 水理試験に基づく検討手順  
Figure 3. 2 Evaluation Procedure Based on Hydraulic Test

#### 4. 水理試験による設計波圧算定手法の検討

##### 4. 1 中規模水理試験

##### 4. 1. 1 中規模水理試験設備の概要

図 4. 1 に中規模水理試験設備の概要として、堤体位置、水路中の波高計及び流速計の設置位置を示す。水路は長さ 105m、幅 0.78m である。図 4. 2 に堤体に設置する波圧計設置位置を示す。堤体は、高さ 1.0m、幅 0.26m の壁 3 体で構成し、堤体壁面に波圧計を設置した。また、図 4. 3 に中規模水理試験の状況を示す。

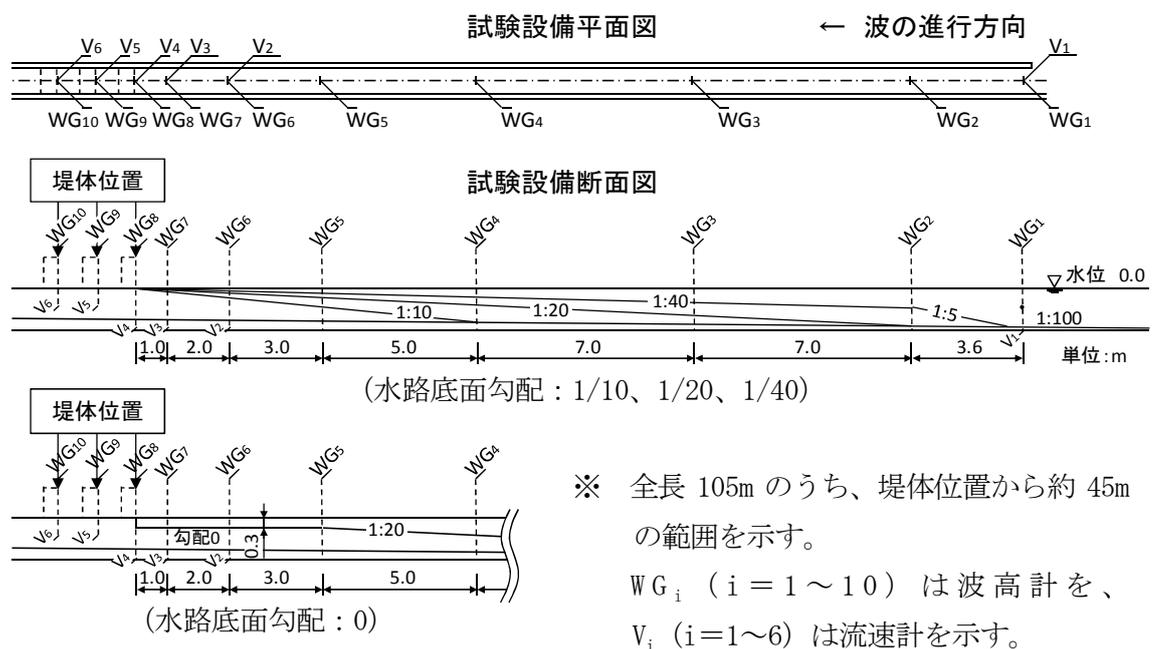
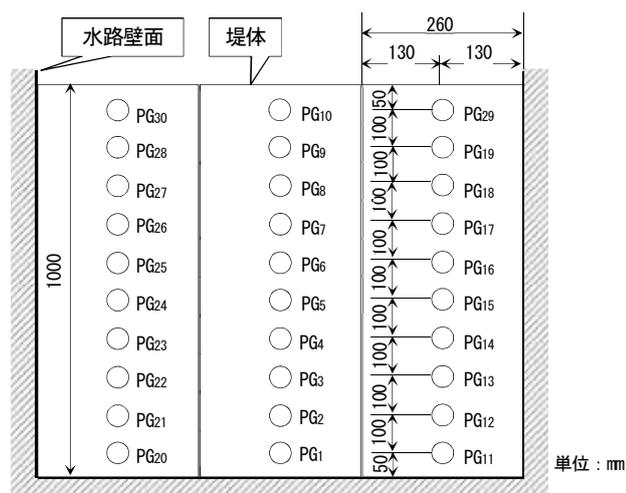


図 4. 1 中規模水理試験設備の概要

Figure 4. 1 Overview of Middle Scale Hydraulic Test Facilities



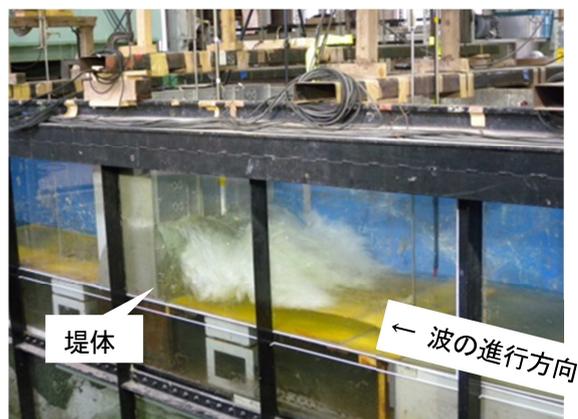
※ PG<sub>i</sub> (i=1~30) は波圧計を示す。

図 4. 2 中規模水理試験の波圧計設置位置

Figure 4. 2 Position of Pressure Gauge on Seawall Model (Middle Scale Hydraulic Test)



堤体設置前



堤体設置後

(独立行政法人港湾空港技術研究所提供)

図 4. 3 中規模水理試験の状況

Figure 4. 3 Overview of Middle Scale Hydraulic Test

(1) 計測項目及び計測データ収録

計測項目は、沖側波高 ( $h(t)$ )、浸水深 ( $\eta(t)$ )、最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ )、流速 ( $v(t)$ 、 $v_i$ ) 及び最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) であり、合計 46 個の計測センサを設置した。データの収録に際しては、水路底面勾配、堤体の位置及び堤体の形状を踏まえ、計測センサから試験データを同時収録・処理した。

データ収録のサンプリング間隔は 0.0005s (2,000Hz) とした。

(2) 計測センサ

波高、流速及び波圧について、次に示す計測センサを用い、ノイズ対策と防水対策を考慮して試験を実施した。

- ・波高計：水路上の波高及び遡上後の浸水深は容量式波高計を用いて測定した。波高計の測定範囲は  $WG_1 \sim WG_6$  は  $0 \sim 1,000\text{mm}$ 、 $WG_7$  は  $0 \sim 1,200\text{mm}$ 、 $WG_8 \sim WG_{10}$  は  $10 \sim 1,200\text{mm}$  であり、精度は  $\pm 0.5\%/FS$  (FS：フルスケール) である。図 4. 1 に示した位置に波高計を 10 個設置した。
- ・流速計：水中の流速及び遡上後の流速は電磁流速計及びプロペラ式流速計を用いて測定した。電磁流速計の測定範囲は  $0 \sim \pm 4,000\text{mm/s}$  であり、精度は  $\pm 2\%/FS$  である。プロペラ式流速計の測定範囲は  $\pm 30 \sim \pm 4,000\text{mm/s}$  ( $V_6$  のみ  $\pm 30 \sim \pm 10,000\text{mm/s}$ ) であり、精度は  $\pm 30\text{mm/s}$  以内である。図 4. 1 に示した位置に流速計を 6 個設置した。 $V_1$ 、 $V_2$  は電磁流速計、 $V_3 \sim V_6$  はプロペラ式流速計である。
- ・波圧計：堤体に作用する波圧は P310V 型波圧計を用いて測定した。波圧計の測定範囲は  $0 \sim 19.6\text{kN/m}^2$  であり、精度は使用状況によるが  $\pm 1\%$  程度である。図 4. 2 に示した堤体の壁面に 30 個の波圧計を設置した。

4. 1. 2 中規模水理試験条件

中規模水理試験は、通過波検定試験及び波圧試験からなり、試験パラメータは、水路底面勾配及び堤体位置を考慮し、作用波は孤立波とした。

(1) 通過波検定試験

堤体がない場合の各測定点における浸水深 ( $\eta(t)$ ) と流速 ( $v(t)$ ) を測定した。試験ケースを表 4. 1 に示す。

表 4. 1 中規模水理試験ケース一覧 (通過波検定試験)

Table 4. 1 Setting of Middle Scale Hydraulic Tests (Run-up Water Depth Evaluation Test)

試験条件			試験回数
水路底面 勾配	堤体位置 (m)	孤立波 沖側波高 ( $WG_1$ での目標値 : m)	
0 (汀線での水深 0.3m)	なし	0.2	3 回
1/10 (汀線での水深 0m)			2 回
1/20 (汀線での水深 0m)			3 回
1/40 (汀線での水深 0m)			10 回

(2) 波圧試験

堤体の各測定点における最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) を測定した。試験ケースを表 4. 2 に示す。

表 4. 2 中規模水理試験ケース一覧 (波圧試験)

Table 4. 2 Setting of Middle Scale Hydraulic Tests (Pressure Test)

試験条件			試験回数
水路底面 勾配	堤体位置 (m)	孤立波 沖側波高 ( $WG_1$ での目標値:m)	
0 (汀線での水深 0.3m)	0, 1.25, 2.5	0.2	各堤体位置に対して 15 回
1/10 (汀線での水深 0m)	0, 1.25, 2.5	0.2	各堤体位置に対して 15 回
1/20 (汀線での水深 0m)	0, 1.25, 2.5	0.2	各堤体位置に対して 15 回
1/40 (汀線での水深 0m)	0, 1.25, 2.5	0.2	各堤体位置に対して 15 回

#### 4. 1. 3 中規模水理試験結果

中規模水理試験における通過波検定試験及び波圧試験の結果を以下に示す。

##### (1) 通過波検定試験

堤体がない場合の各堤体位置における作用波の最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) 及びこの時点における流速 ( $v_i$ ) の計測値の関係を図 4. 4 に示す。ここで示すデータは、各試験ケースで得られた計測値を試験回数で平均したものである。

作用波は遡上すると、陸側への進行に伴い流速 ( $v_i$ ) が速くなる一方で最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) は低くなった。

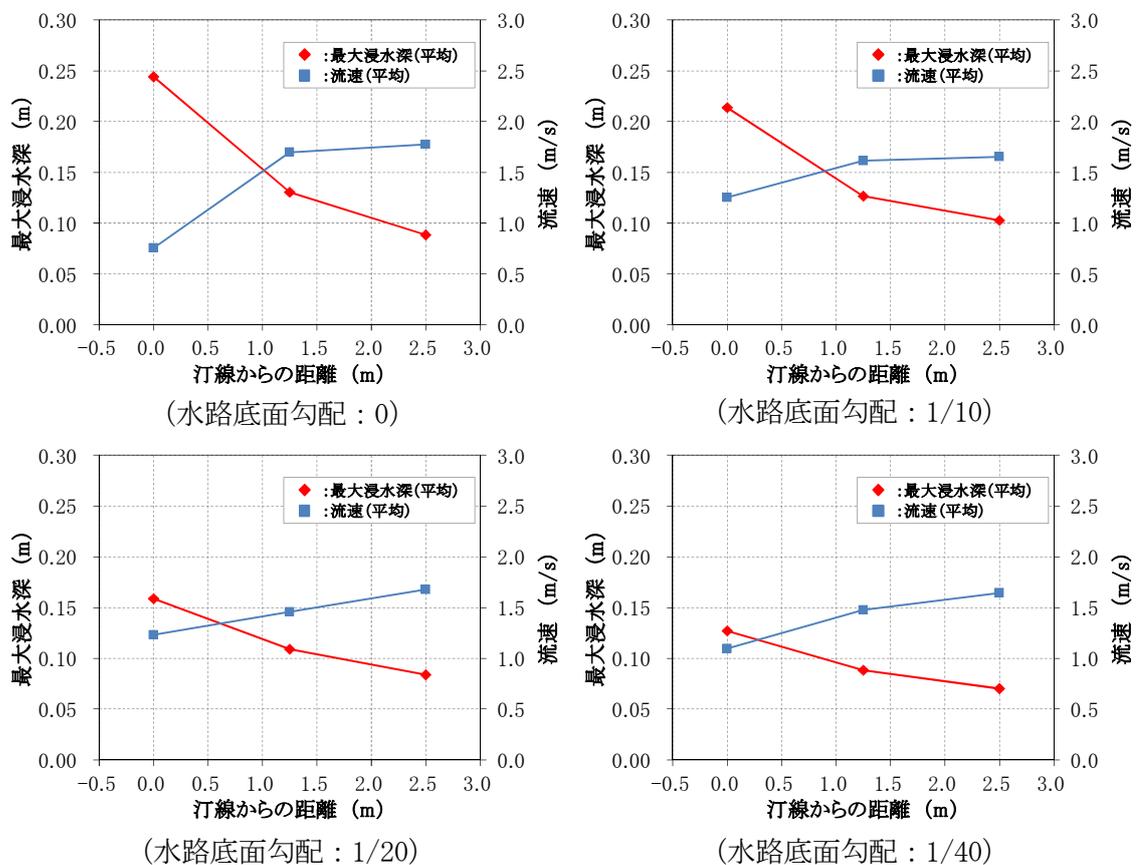


図 4. 4 中規模水理試験における汀線からの距離と最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ )、流速 ( $v_i$ ) の関係

Figure 4.4 Relationship between Distance from Shoreline and Max. Water Depth ( $\eta_{i, \max}$ ), Flow Velocity ( $v_i$ ) (Middle Scale Hydraulic Test)

(2) 波圧試験

作用波による各堤体に対する最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) の計測値と通過波検定試験で求めた最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) から水深係数 ( $\alpha$ ) を算出し、堤体位置と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係を得た。図 4. 5 に各堤体位置における水深係数 ( $\alpha$ ) を示す。ここで示すデータは、各試験ケースで得られた計測値の最大・最小値及び試験回数で平均したものである。

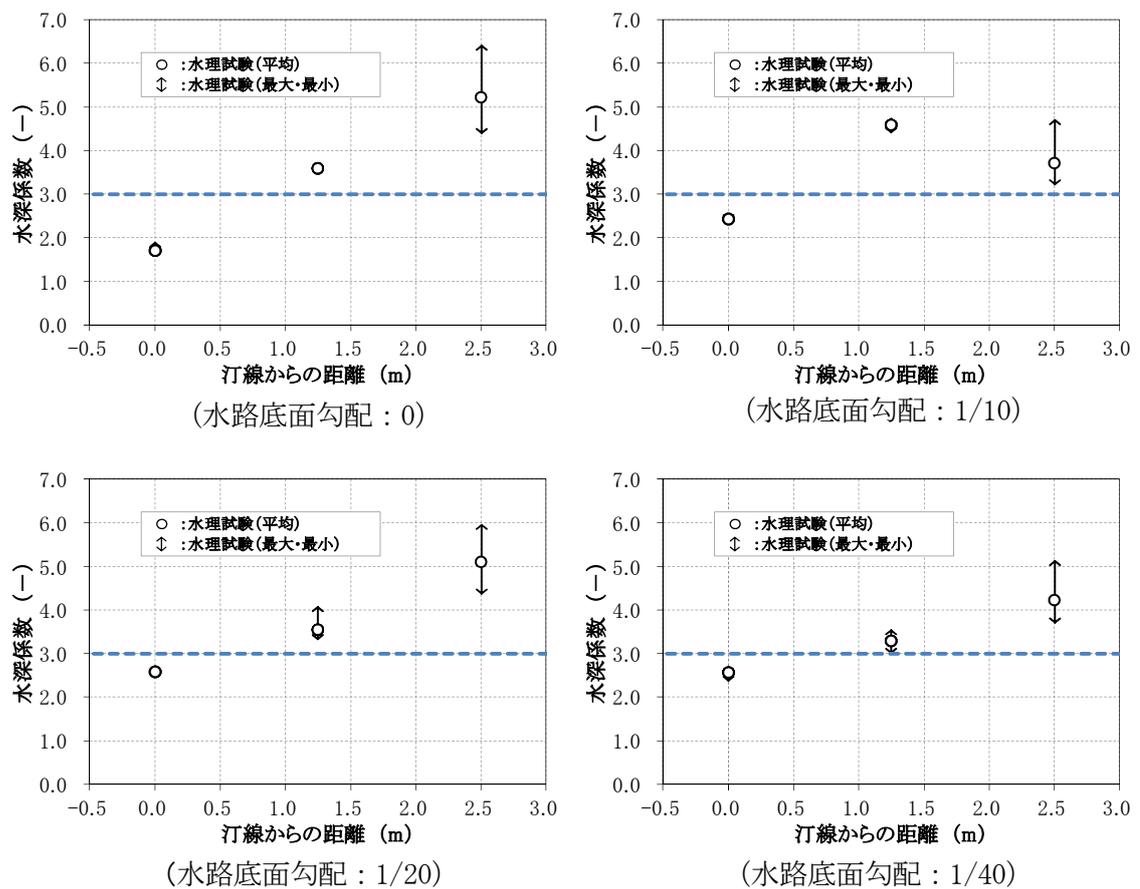


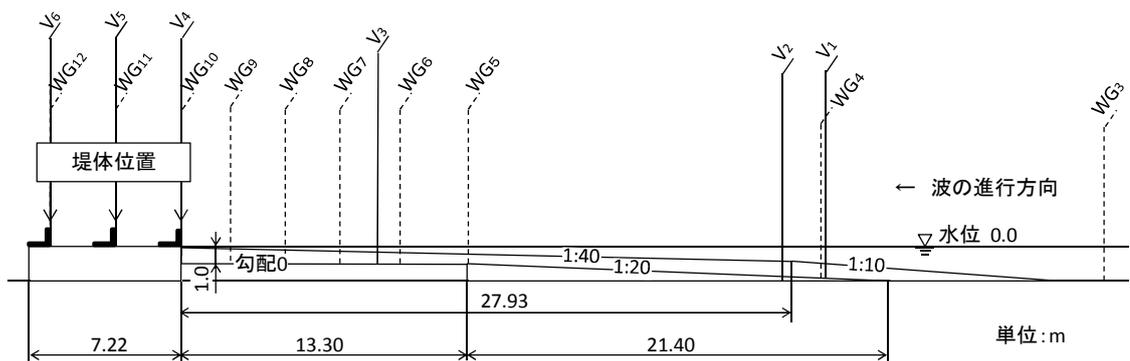
図 4. 5 堤体位置と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係

Figure 4. 5 Relationship between Seawall Position and Water Depth Coefficient ( $\alpha$ )

## 4. 2 大規模水理試験

### 4. 2. 1 大規模水理試験設備の概要

図 4. 6 に大規模水理試験設備の概要として、堤体位置、水路中の波高計及び流速計の設置位置を示す。水路は長さ 184m、幅 3.5m である。図 4. 7 に堤体に設置する波圧計設置位置を示す。堤体は、高さ 1.2m、幅 1.1m の壁 3 体で構成し、堤体壁面に波圧計を設置した。また、図 4. 8 に大規模水理試験の状況を示す。

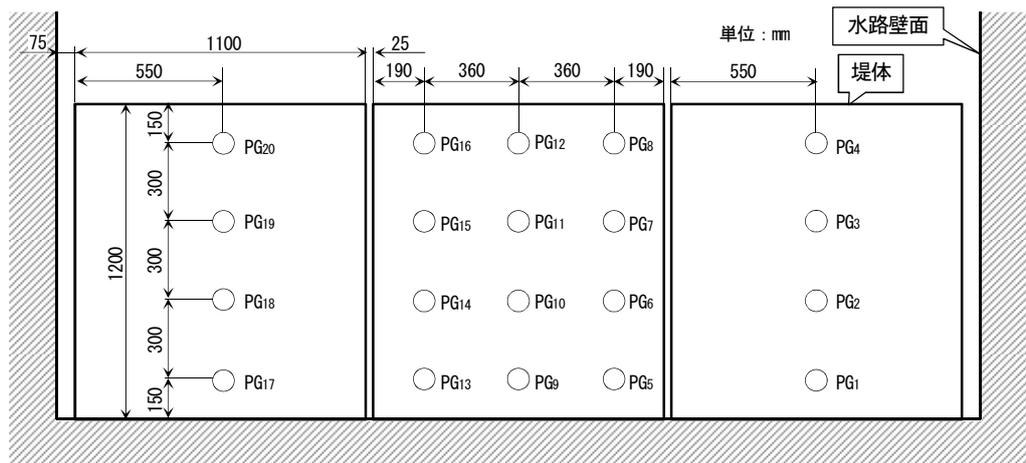


※ 全長 184m のうち、堤体位置から約 55m の範囲を示す。

WG<sub>i</sub> (i=3~12) は波高計を、V<sub>i</sub> (i=1~6) は流速計を示す。

図 4. 6 大規模水理試験の概要

Figure 4. 6 Overview of Large Scale Hydraulic Test



※ PG<sub>i</sub> (i=1~20) は波圧計を示す。

図 4. 7 大規模水理試験の波圧計設置位置

Figure 4. 7 Position of Pressure Gauge on Seawall Model (Large Scale Hydraulic Test)



(独立行政法人港湾空港技術研究所提供)

図 4. 8 大規模水理試験の状況

Figure 4. 8 Large Scale Hydraulic Test Facility

(1) 計測項目及び計測データ収録

計測項目は、沖側波高 ( $h(t)$ )、浸水深 ( $\eta(t)$ )、最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ )、流速 ( $v(t)$ 、 $v_i$ ) 及び最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) であり、合計 36 個の計測センサを設置した。データの収録に際しては、水路底面勾配、堤体の位置及び堤体の形状を踏まえ、計測センサから試験データを同時収録・処理した。

データ収録のサンプリング間隔は 0.0005s (2,000Hz) とした。

(2) 計測センサ

波高、流速及び波圧について、次に示す計測センサを用い、ノイズ対策と防水対策を考慮して試験を実施した。

- ・ 波高計：水路上の波高及び遡上後の浸水深は外洋型容量式波高計を用いて測定した。波高計の測定範囲は 0~4,000mm であり、精度は  $\pm 1.0\%/FS$  である。図 4. 6 に示した位置にそれぞれ波高計を 10 個設置した。
- ・ 流速計：水中の流速及び遡上後の流速は電磁流速計及びプロペラ式流速計を用いて測定した。電磁流速計の測定範囲は 0~ $\pm 4,000$ mm/s であり、精度は  $\pm 3.0\%/FS$  である。プロペラ式流速計の測定範囲は  $\pm 30$ ~ $\pm 10,000$  mm/s、精度は  $\pm 30$  mm/s 以内である。図 4. 6 に示した位置に流速計を 6 個設置した。 $V_1$ ~ $V_3$  は電磁流速計、 $V_4$ ~ $V_6$  はプロペラ式流速計である。
- ・ 波圧計：堤体に作用する波圧は P310V 型波圧計を用いて測定した。波圧計の測定範囲は  $PG_1$ 、 $PG_2$ 、 $PG_5$ 、 $PG_9$ 、 $PG_{17}$ 、 $PG_{18}$  は 0~98kN/m<sup>2</sup>、その他の波圧計が 0~196 kN/m<sup>2</sup> であり、精度は使用状況によるが  $\pm 1.0\%$  である。図 4. 7 に示した堤体の壁面に 20 個の波圧計を設置した。

#### 4. 2. 2 大規模水理試験条件

大規模水理試験は、通過波検定試験及び波圧試験からなり、試験パラメータは、水路底面勾配及び堤体位置を考慮し、作用波は正弦波とした。大規模水理試験では、中規模水理試験から得られた結果の傾向の確認の観点等から、水理試験結果の一部を用いた。

##### (1) 通過波検定試験

堤体がない場合の各測定点における浸水深 ( $\eta(t)$ ) と流速 ( $v(t)$ ) を測定した。試験ケースを表 4. 3 に示す。

表 4. 3 大規模水理試験ケース一覧 (通過波検定試験)

Table 4.3 Setting of Large Scale Hydraulic Tests  
(Run-up Water Depth Evaluation Test)

試験条件				試験回数
水路底面 勾配	堤体位置 (m)	正弦波		
		周期 (s)	沖側波高 (WG <sub>3</sub> での目標値:m)	
0 (汀線での水深 1.0m)	なし	15	0.5	2回
		20	0.4	2回
1/40 (汀線での水深 0m)	なし	15	0.5	2回
		20	0.3	2回
			0.4	2回

##### (2) 波圧試験

堤体の各測定点における最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) を測定した。試験ケースを表 4. 4 に示す。

表 4. 4 大規模水理試験ケース一覧 (波圧試験)

Table 4.4 Setting of Large Scale Hydraulic Tests (Pressure Test)

試験条件				試験回数
水路底面 勾配	堤体位置 (m)	正弦波		
		周期 (s)	沖側波高 (WG <sub>3</sub> での目標値:m)	
0 (汀線での水深 1.0m)	0, 3, 6	15	0.5	各堤体位置に対して2回
		20	0.4	各堤体位置に対して2回
1/40 (汀線での水深 0m)	0, 3, 6	15	0.5	各堤体位置に対して2回
		20	0.3	各堤体位置に対して2回
			0.4	各堤体位置に対して2回

#### 4. 2. 3 大規模水理試験結果

大規模水理試験における通過波検定試験及び波圧試験の結果を以下に示す。

##### (1) 通過波検定試験

堤体がない場合の各堤体位置における作用波の最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) 及びこの時点における流速 ( $v_i$ ) の計測値の関係を図 4. 9 に示す。

最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) は、作用波が遡上すると陸側への進行に伴い低くなるが、堤体位置 3m と堤体位置 6m ではほとんど変わらなかった。流速 ( $v_i$ ) は、作用波が遡上すると陸側への進行に伴い速くなるが、堤体位置 6m においては低下する結果を得た。この要因としては、流路抵抗によるエネルギー損失の可能性が考えられる。

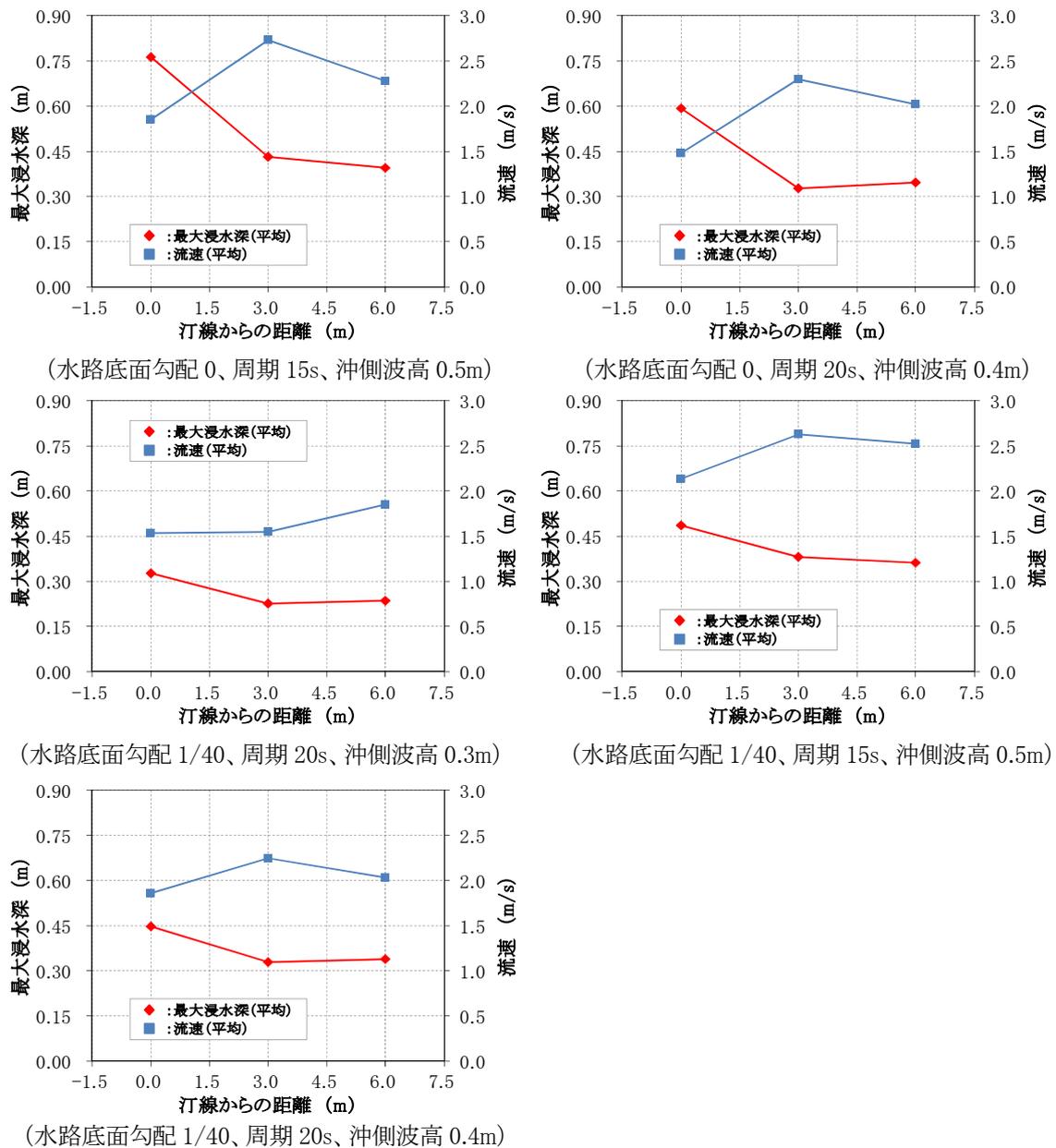


図 4. 9 大規模水理試験における汀線からの距離と最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ )、流速 ( $v_i$ ) の関係

Figure 4. 9 Relationship between Distance from Shoreline and Max. Water Depth ( $\eta_{i, \max}$ ), Flow Velocity ( $v_i$ ) (Large Scale Hydraulic Test)

(2) 波圧試験

作用波による各堤体に対する最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) の計測値と、通過波検定試験で求めた最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) から水深係数 ( $\alpha$ ) を算出した。図 4. 10 に堤体位置と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係を示す。ここで示すデータは、各試験ケースの計測値である。

堤体が汀線から陸側に設置されるに従い水深係数 ( $\alpha$ ) は大きくなるが、堤体位置 3m と堤体位置 6m では水深係数 ( $\alpha$ ) はほとんど変わらないか、又は小さくなる場合があった。

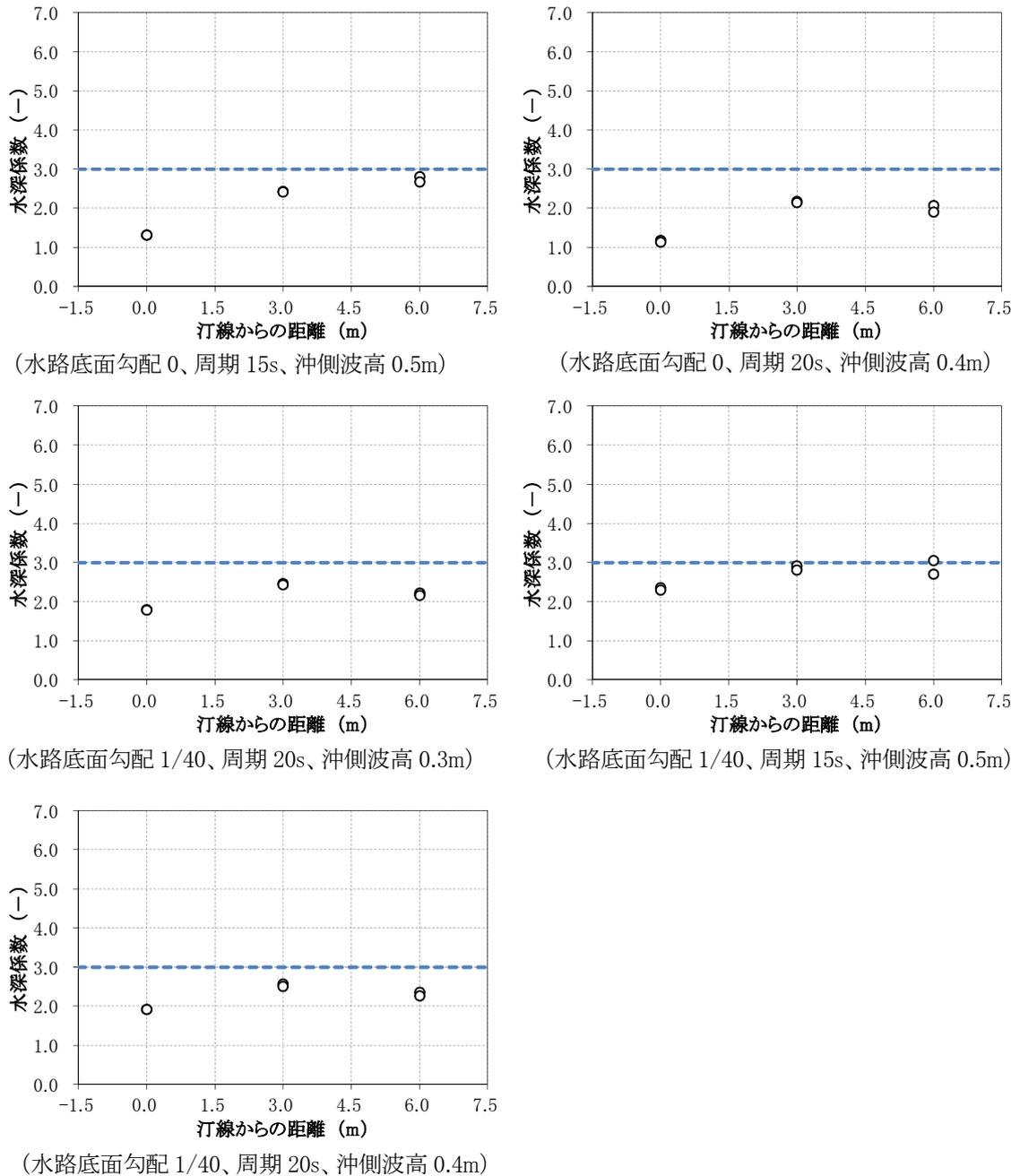


図 4. 10 堤体位置と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係

Figure 4. 10 Relationship between Seawall Position and Water Depth Coefficient ( $\alpha$ )

## 5. 解析による設計波圧算定手法の検討

### 5. 1 解析方法

水理試験結果のシミュレーション解析を実施した。ここでは、非圧縮性粘性流体と仮定した空気及び水の気液二相流解析を実施した。解析コードは流体解析コード FINAS/CFD を用いた。

解析概要を表 5. 1 に、解析に用いた空気及び水の物性値を表 5. 2 に示す。FINAS/CFD は、非圧縮性粘性流体に対する連続の式及び Navier-Stokes 方程式を基礎式としており、その Navier-Stokes 方程式を有限体積法 (Finite Volume Method) により離散化することで、不規則な格子配列のメッシュ (例えば、格子配列の一部に三角形が含まれるメッシュ等) による計算を可能としている。また、FINAS/CFD では混相流解析における界面捕捉法に VOF (Volume of Fluid) 法を採用しており、境界条件には流速がゼロとなるノンスリップ境界条件、圧力がゼロとなる自然流出条件及び任意の波形が入力可能な流入境界条件を用いることができる。ここでは、水路底面及び防潮堤を剛体と仮定し、これらと流体の境界部をノンスリップ境界条件、津波が流入する側の解析モデル端部を流入境界条件、その他を自然流出境界条件とした。なお、流入境界には、水理試験で計測された沖側波高 ( $h(t)$ ) 及び流速 ( $v(t)$ ) の時刻歴波形を入力した。

表 5. 1 解析概要

Table 5. 1 Outline of Analysis

基礎方程式	気相及び液相についての非圧縮性粘性流体の Navier-Stokes 方程式と連続の式
空間の離散化	有限体積法
界面捕捉法	VOF 法
境界条件	水路底面・防潮堤と流体との境界部：ノンスリップ境界条件 上記以外の境界部：自然流出又は流入境界条件
造波方法	流入境界に水理試験で計測された沖側波高 ( $h(t)$ ) 及び流速 ( $v(t)$ ) の時刻歴波形を入力

表 5. 2 空気及び水の物性値

Table 5. 2 Physical Property of Air and Water

物性	空気	水
密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1.2	$1.0 \times 10^3$
粘性係数 [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]	$1.8 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$

## 5. 2 中規模水理試験シミュレーション解析

### 5. 2. 1 解析条件

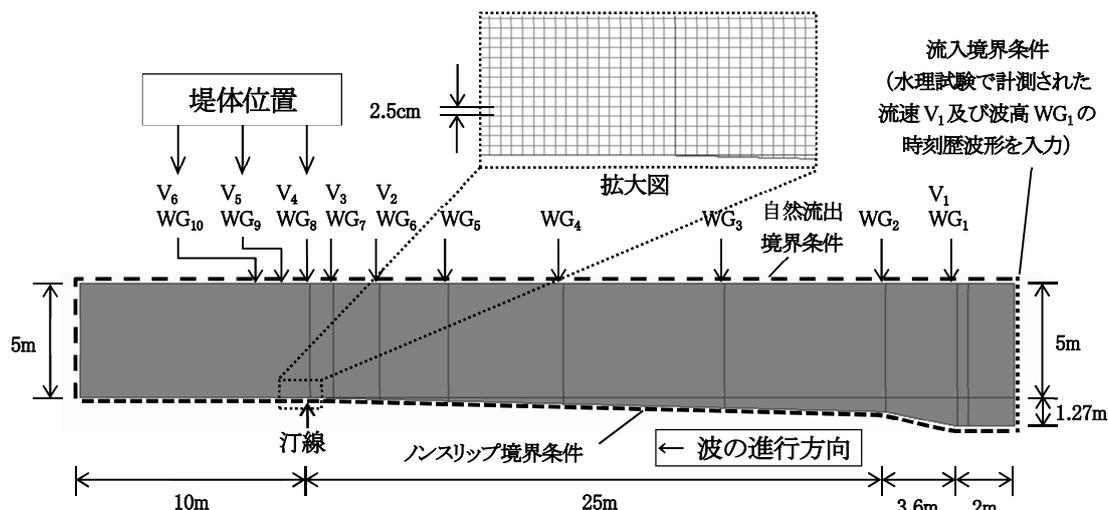
中規模水理試験シミュレーション解析の解析ケース一覧を表 5. 3 に、解析モデルを図 5. 1 に示す。

解析では、中規模水理試験設備の汀線を基準に沖側へ 30. 6m まで及び陸側へ 10m までの範囲をモデル化した。また、沖側のモデル端部の境界面に中規模水理試験で計測された沖側波高 ( $h(t)$ ) 及び流速 ( $v(t)$ ) の時刻歴に基づいた波形を入力した。堤体位置近傍のメッシュサイズは 2. 5cm×2. 5cm、計算での時間刻みは 0. 002 秒とした。

表 5. 3 中規模水理試験シミュレーション解析ケース一覧

Table 5. 3 Simulation Analyses of Middle Scale Hydraulic Tests

沖側波高 (WG <sub>1</sub> での計測値：m)	水路底面 勾配	堤体位置 (m)	解析ケース
0. 2	1/40 (汀線での 水深 0m)	なし	Case1-1
		0	Case1-2
		1. 25	Case1-3
		2. 50	Case1-4
	1/20 (汀線での 水深 0m)	なし	Case2-1
		0	Case2-2
		1. 25	Case2-3
		2. 50	Case2-4
	1/10 (汀線での 水深 0m)	なし	Case3-1
		0	Case3-2
		1. 25	Case3-3
		2. 50	Case3-4
	0 (汀線での 水深 0. 3m)	なし	Case4-1
		0	Case4-2
		1. 25	Case4-3
		2. 50	Case4-4



※  $WG_i$  ( $i=1\sim 10$ ) は沖側波高 ( $h(t)$ ) 及び浸水深 ( $\eta(t)$ ) 出力位置を、 $V_i$  ( $i=1\sim 6$ ) は流速 ( $v(t)$ ) 出力位置を示す。

図 5. 1 中規模水理試験シミュレーション解析モデル

Figure 5.1 Simulation Analysis Model of Middle Scale Hydraulic Test

## 5. 2. 2 解析結果

中規模水理試験結果のシミュレーション解析結果を以下に示す。この解析結果より、モデル化手法とそのシミュレーション解析手法は妥当であると考えられる。

### (1) 通過波解析

水路底面勾配 1/40 で堤体がない解析ケース (Case1-1) の解析結果と水理試験結果の比較を行った。図 5. 2 に沖側波高 ( $h(t)$ ) 及び浸水深 ( $\eta(t)$ ) を示す。各測定位置における沖側波高 ( $h(t)$ ) 及び浸水深 ( $\eta(t)$ ) について、中規模水理試験結果とそのシミュレーション解析結果を比較したところ、両者の結果は良く一致した。

なお、作用波の進行に伴う遷移傾向として水理試験、解析ともに以下の傾向が見られた。 $WG_1\sim WG_4$  では、水深の減少に伴い、沖側波高 ( $h(t)$ ) は上昇し周期は短くなった。一方、 $WG_5\sim WG_7$  では、碎波が生じ波が崩れ、沖側波高 ( $h(t)$ ) は低くなり、 $WG_8\sim WG_{10}$  では、陸への作用波の遡上に伴い浸水深 ( $\eta(t)$ ) は小さくなった。

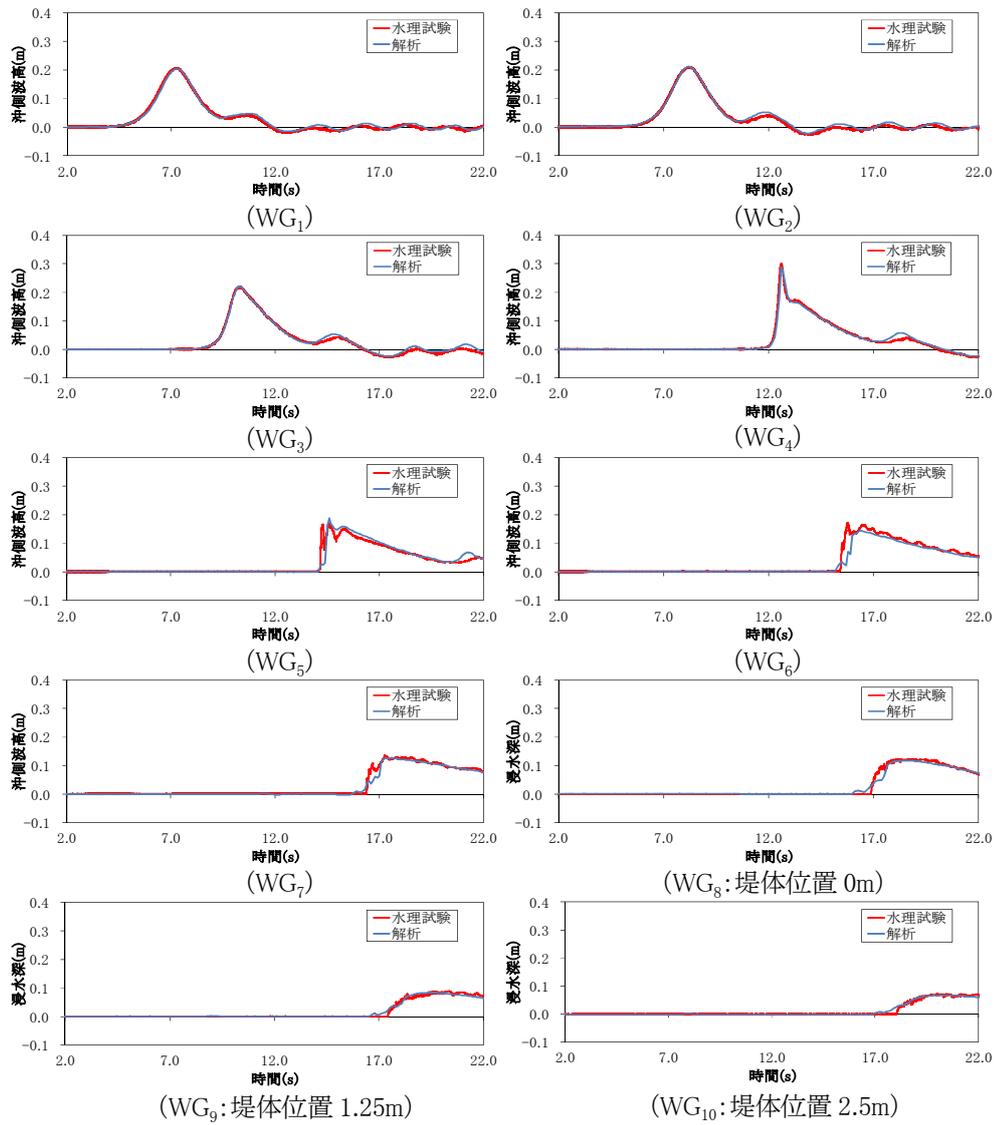


図 5. 2 沖側波高 ( $h(t)$ ) 及び浸水深 ( $\eta(t)$ ) 時刻歴

Figure 5. 2 Time History of Offshore Wave Height ( $h(t)$ ) and Water Depth ( $\eta(t)$ )

図 5.3 に水理試験結果と解析結果における流速 ( $v(t)$ ) の比較を示す。 $V_3$ において、シミュレーション解析結果は水理試験結果よりも小さくなったが、他の位置においては、中規模水理試験結果とそのシミュレーション解析結果は概ね一致した。

なお、作用波の進行に伴う遷移傾向として水理試験、解析ともに、 $V_1$ に比べ $V_2$ 、 $V_3$ では、碎波に伴い流速 ( $v(t)$ ) は上昇し、 $V_4 \sim V_6$ では、陸への作用波の遡上に伴い ( $v(t)$ ) は上昇した。

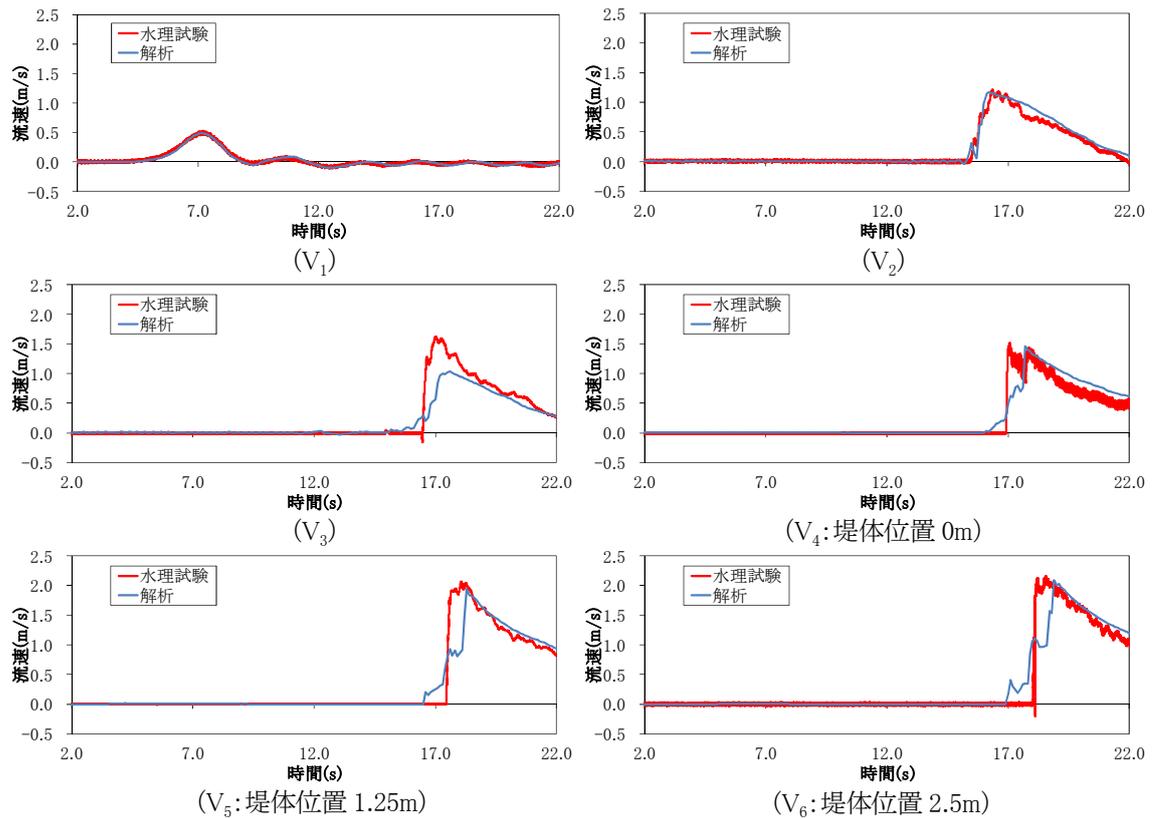


図 5.3 流速 ( $v(t)$ ) 時刻歴

Figure 5.3 Time History of Flow Velocity ( $v(t)$ )

## (2) 波圧解析

水路底面勾配 1/40 で、堤体位置が汀線から 0m、1.25m 及び 2.5m の場合の各解析ケース (Case1-2、3 及び 4) の水理試験結果とシミュレーション解析結果の比較を行った。図 5.4 に各堤体位置における最大波圧分布を、図 5.5 に水深係数 ( $\alpha$ ) と堤体位置の関係をそれぞれ示す。中規模水理試験結果とそのシミュレーション解析結果を比較すると、堤体位置 2.5m における水深係数 ( $\alpha$ ) にやや差異が見られるものの、両者は概ね一致した。

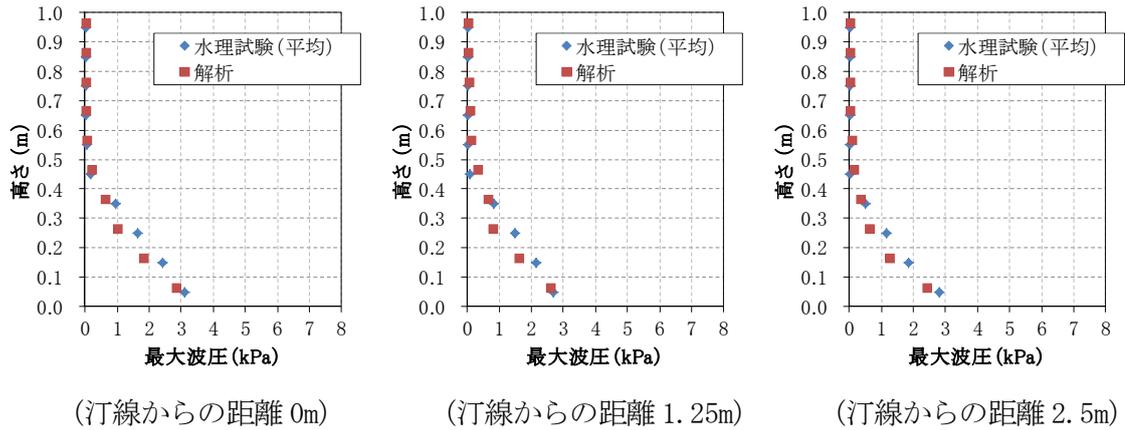


図 5. 4 最大波圧分布図

Figure 5. 4 Vertical Distribution of Maximum Pressure

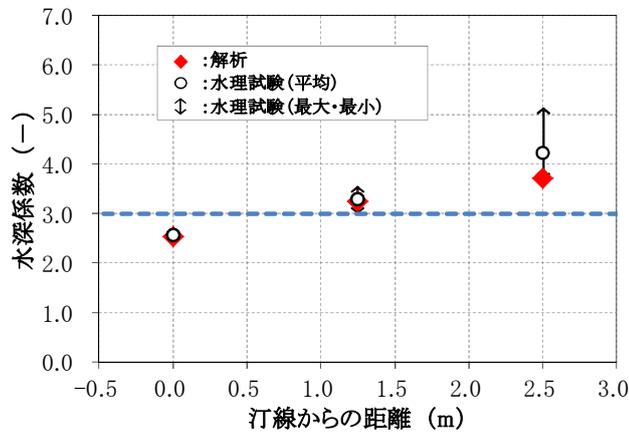


図 5. 5 水深係数 ( $\alpha$ ) と堤体位置の関係

Figure 5. 5 Relationship between Water Depth Coefficient ( $\alpha$ ) and Seawall Position

### (3) 通過波解析と波圧解析の関係

図 5. 6 に水路底面勾配 1/40 の場合の、通過波解析と波圧解析の関係を示す。

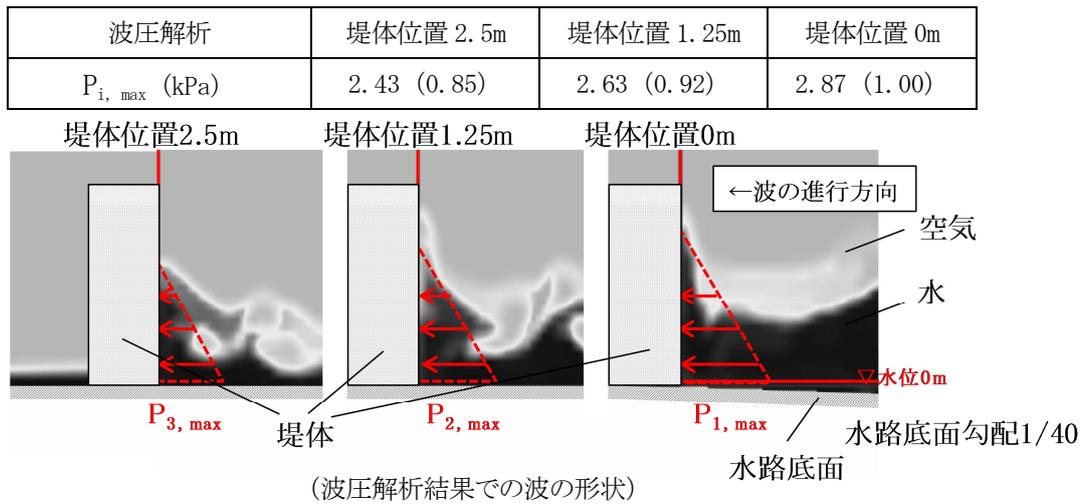
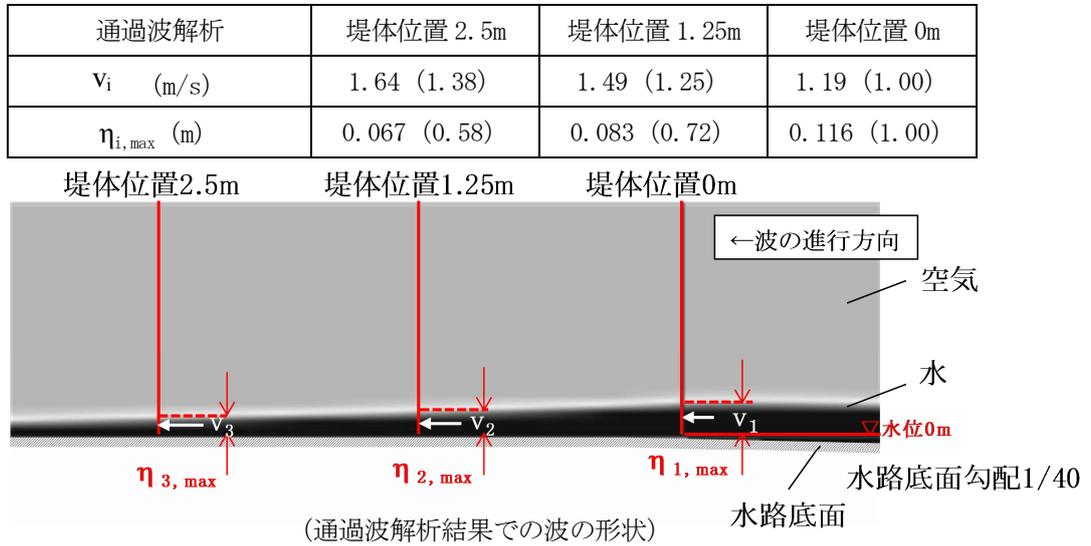
通過波解析では、流速 ( $v_i$ ) は遡上した作用波の陸側への進行に伴い速くなった。これに伴い、最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) は低くなり、堤体位置 2.5m における最大浸水深 ( $\eta_{3, \max}$ ) は堤体位置 0m に比べ 58%程度となった。

波圧解析では、各堤体位置における最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) は陸側の方が低下し、堤体位置 2.5m における最大堤体作用波圧 ( $P_{3, \max}$ ) は堤体位置 0m に比べ 85%程度となった。

堤体位置 2.5m における最大浸水深 ( $\eta_{3, \max}$ ) と最大堤体作用波圧 ( $P_{3, \max}$ ) を比べると、最大浸水深 ( $\eta_{3, \max}$ ) の方がより低下した。

このため、最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) と最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) に相当する静水圧との比を表す水深係数 ( $\alpha$ ) は、陸側の堤体ほど大きくなった。

同様に、最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) と流速 ( $v_i$ ) の関係から得られるフルード数 (Fr) も陸側ほど大きくなり、堤体位置 2.5m でのフルード数 (Fr) は 2.02、水深係数 ( $\alpha$ ) は 3.72 となった。



	堤体位置 2.5m	堤体位置 1.25m	堤体位置 0m
水深係数 ( $\alpha$ )	3.72	3.25	2.53
フルード数 (Fr)	2.02	1.65	1.12

※ ( )内の数値は堤体位置 0m の値に対する比を示す。

図 5. 6 通過波解析と波圧解析の関係

Figure 5.6 Relationship between Run-up Water Depth Evaluation Analyses and Pressure Analyses

### 5. 3 大規模水理試験シミュレーション解析

#### 5. 3. 1 解析条件

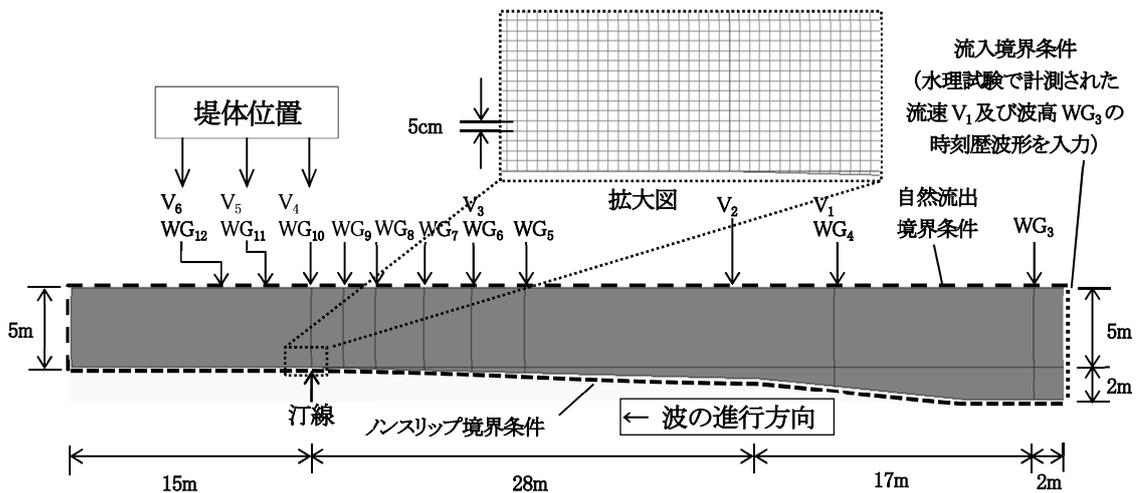
大規模水理試験シミュレーション解析の解析ケースを表 5. 4 に、解析モデルを図 5. 7 にそれぞれ示す。

解析では、大規模水理試験設備の汀線を基準に沖側へ 47m まで及び陸側へ 15m までの範囲をモデル化し、沖側のモデル端部の境界面に大規模水理試験で計測された沖側波高 ( $h(t)$ ) 及び流速 ( $v(t)$ ) の時刻歴に基づいた波形を入力した。堤体位置近傍のメッシュサイズは  $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 、計算での時間刻みは 0.005 秒とした。

表 5. 4 大規模水理試験シミュレーション解析ケース一覧

Table 5. 4 Simulation Analyses of Large Scale Hydraulic Tests

正弦波		水路底面 勾配	堤体位置 (m)	解析ケース
周期(s)	沖側波高 (WG <sub>3</sub> での計測値:m)			
20	0.4	1/40 (汀線での水深 0m)	なし	Case5-1
			0	Case5-2
			3	Case5-3
			6	Case5-4



※ WG<sub>i</sub> (i=3~12) は沖側波高 ( $h(t)$ ) 又は浸水深 ( $\eta(t)$ ) 出力位置を、V<sub>i</sub> (i=1~6) は流速 ( $v(t)$ ) 出力位置を示す。

図 5. 7 大規模水理試験シミュレーション解析モデル

Figure 5. 7 Simulation Analysis Model of Large Scale Hydraulic Test

### 5. 3. 2 解析結果

大規模水理試験結果のシミュレーション解析結果を以下に示す。

#### (1) 通過波解析

堤体がない解析ケース (Case5-1) の解析結果と水理試験結果を比較した。図 5. 8 に沖側波高 ( $h(t)$ ) 及び浸水深 ( $\eta(t)$ ) の時刻歴を示す。各測定位置における沖側波高 ( $h(t)$ ) 及び浸水深 ( $\eta(t)$ ) について、大規模水理試験結果とそのシミュレーション解析結果を比較したところ、両者は良く一致した。

なお、作用波の進行に伴う遷移傾向として水理試験、解析ともに中規模水理試験及び中規模水理試験シミュレーション解析結果と同様の傾向が見られた。

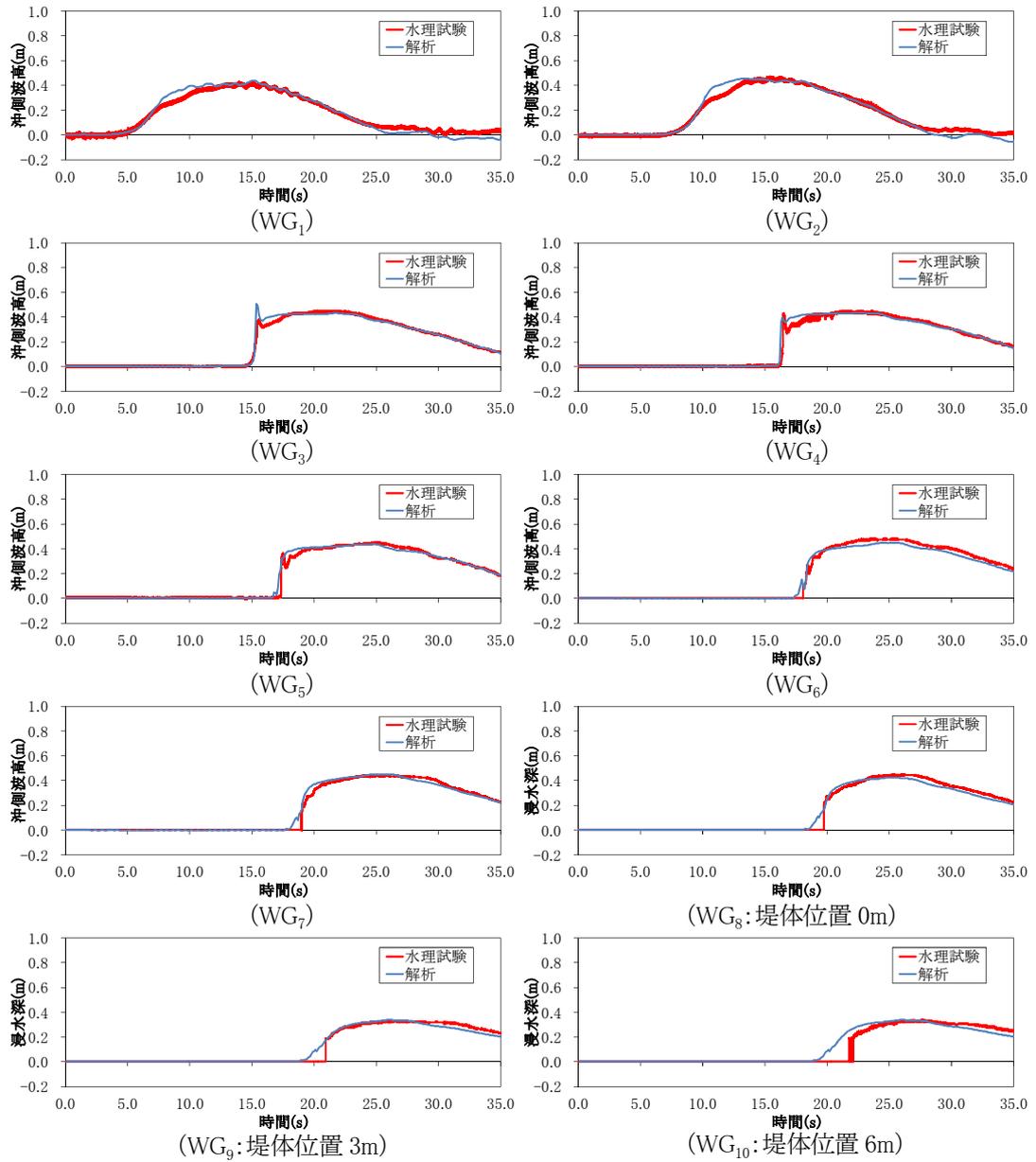


図 5. 8 沖側波高 ( $h(t)$ ) 及び浸水深 ( $\eta(t)$ ) 時刻歴

Figure 5. 8 Time History of Offshore Wave Height ( $h(t)$ ) and Water Depth ( $\eta(t)$ )

図 5. 9 に流速 ( $v(t)$ ) の時刻歴を示す。シミュレーション解析結果は水理試験結果よりもやや大きくなったが、その経時変化の様子は大規模水理試験結果とそのシミュレーション解析結果で概ね一致した。

なお、作用波の進行に伴う遷移傾向として水理試験、解析ともに中規模水理試験及び中規模水理試験シミュレーション解析結果と同様の傾向が見られた。

これらの解析結果より、モデル化手法とそのシミュレーション解析手法は妥当であると考えられる。

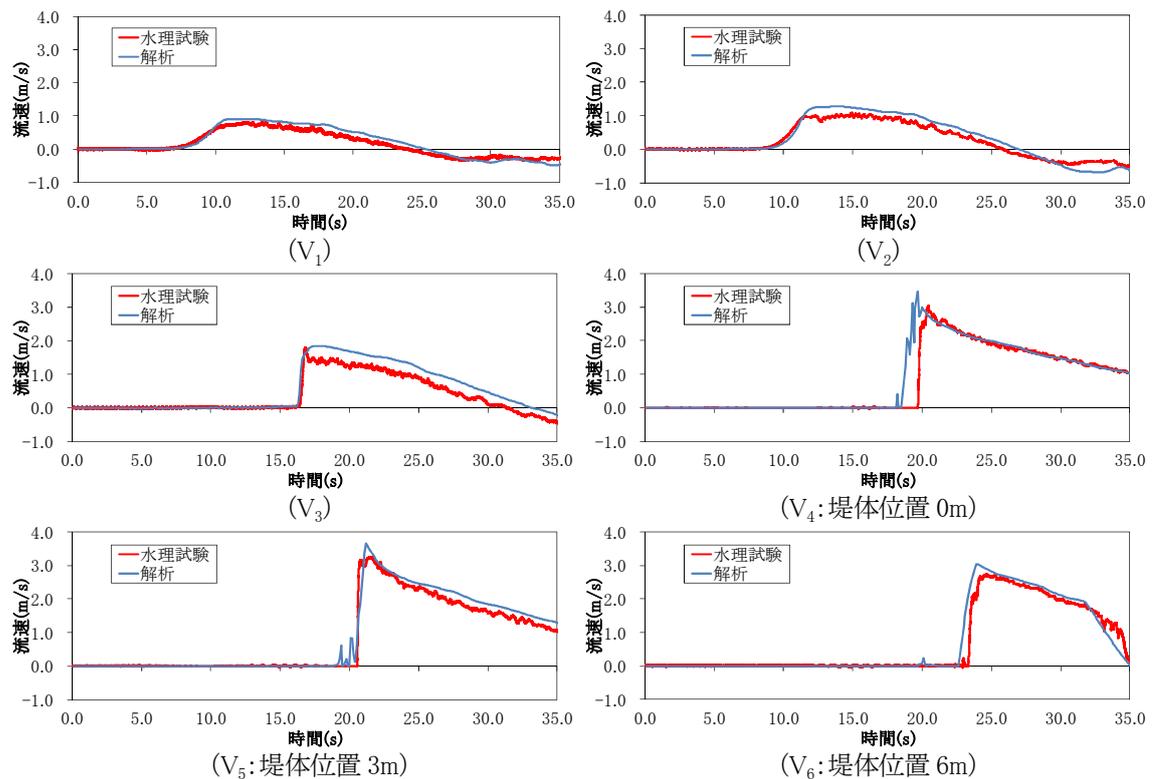


図 5. 9 流速 ( $v(t)$ ) 時刻歴  
Figure 5. 9 Time History of Flow Velocity ( $v(t)$ )

## (2) 波圧解析

堤体位置が汀線から 0m、3m 及び 6m の場合の各解析ケース (Case5-2、3 及び 4) の解析結果と水理試験結果を比較した。図 5. 10 に水深係数 ( $\alpha$ ) と堤体位置の関係を示す。大規模水理試験結果と大規模水理試験シミュレーション解析結果を比較すると、大規模水理試験の水深係数 ( $\alpha$ ) がやや小さくなる傾向が見られた。さらに、大規模水理試験シミュレーション解析では水深係数 ( $\alpha$ ) は連続的に大きくなったが、大規模水理試験では堤体位置 6m において水深係数 ( $\alpha$ ) が低下した。

なお、中規模水理試験結果と中規模水理試験シミュレーション解析結果は、5. 2. 2 (2) に記述したように良く一致し、このような差異は見られなかった (図 5. 5 参照)。

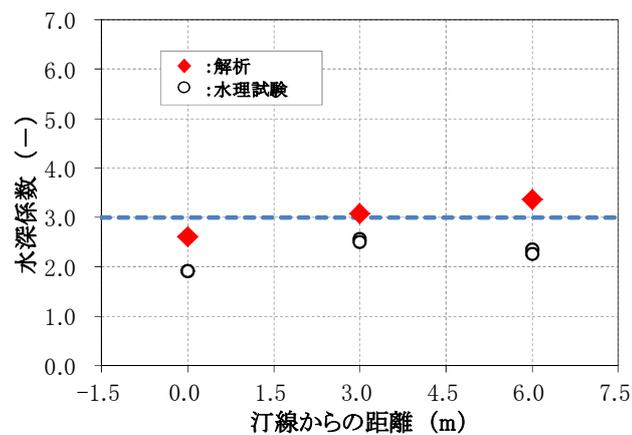


図 5. 10 堤体位置と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係

Figure 5. 10 Relationship between Seawall Position and Water Depth Coefficient ( $\alpha$ )

## 6. 実規模モデルによる試解析

### 6. 1 解析方法

中規模水理試験シミュレーション解析及び大規模水理試験シミュレーション解析から、その妥当性が確認されたモデル化手法及び解析手法を実規模モデルに適用し、試解析を実施した。解析方法は5. 1と同様とし、実規模モデルには、中規模水理試験シミュレーションで作成した解析モデルを、相似則（付録参照）に従い実規模スケールに換算（40倍）したものを用いた。

### 6. 2 解析条件

表6. 1に解析ケース一覧を、図6. 1に解析モデルをそれぞれ示す。解析では、海岸線を基準に沖側へ1,224mまで及び陸側へ400mまでの範囲をモデル化し、沖側のモデル端部の境界面に、中規模水理試験で計測された沖側波高 $(h(t))$ を40倍及び流速 $(v(t))$ を $\sqrt{40}$ 倍（水平方向長さを40倍、時間を $\sqrt{40}$ 倍）した時刻歴波形を入力した。防潮堤位置近傍のメッシュサイズは100cm×100cmとした。

表 6. 1 実規模モデルによる試解析ケース一覧

Table 6. 1 Setting of Full Scale Model Analysis

沖側波高 (沖側 1,224m 位置:m)	海底面 勾配	防潮堤位置 (m)	解析ケース
8	0 (海岸線での 水深 12m)	なし	Case6-1
		0	Case6-2
		50	Case6-3
		100	Case6-4
	1/40 (海岸線での 水深 0m)	なし	Case7-1
		0	Case7-2
		50	Case7-3
		100	Case7-4

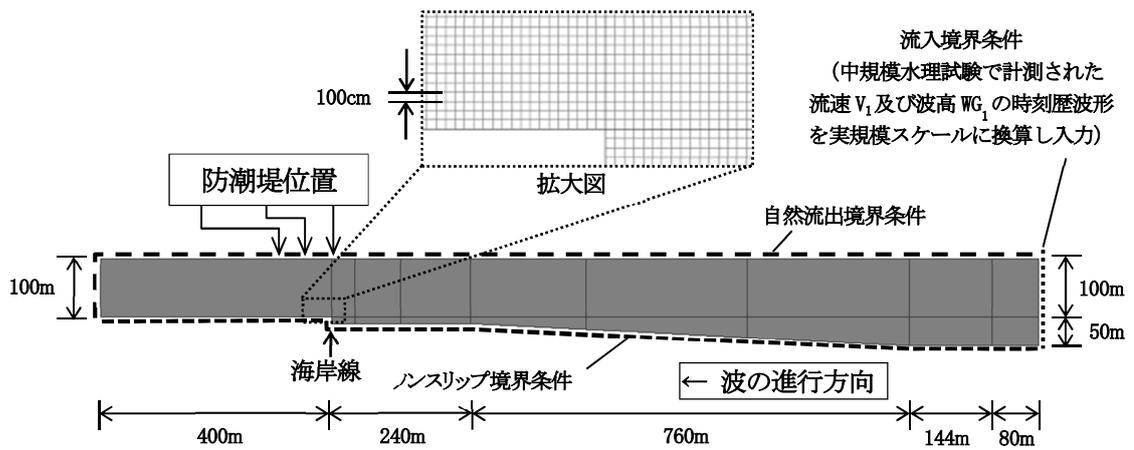


図 6. 1 実規模モデルによる試解析モデル

Figure 6. 1 Preliminary Analysis Model using Full Scale Model

### 6. 3 解析結果

防潮堤位置が、海岸線から 0m、50m 及び 100m の場合の各解析ケースでの最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ )、流速 ( $v_i$ ) と防潮堤位置の関係を図 6. 2 に、水深係数 ( $\alpha$ ) と防潮堤位置の関係を図 6. 3 にそれぞれ示す。

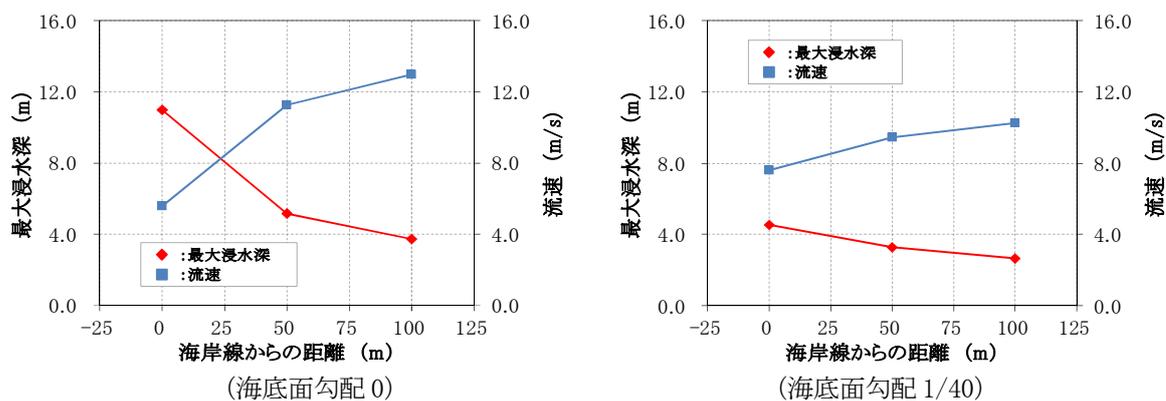


図 6. 2 最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ )、流速 ( $v_i$ ) と防潮堤位置の関係

Figure 6. 2 Relationship between Max. Water Depth ( $\eta_{i, \max}$ ), Flow Velocity ( $v_i$ ) and Seawall Position

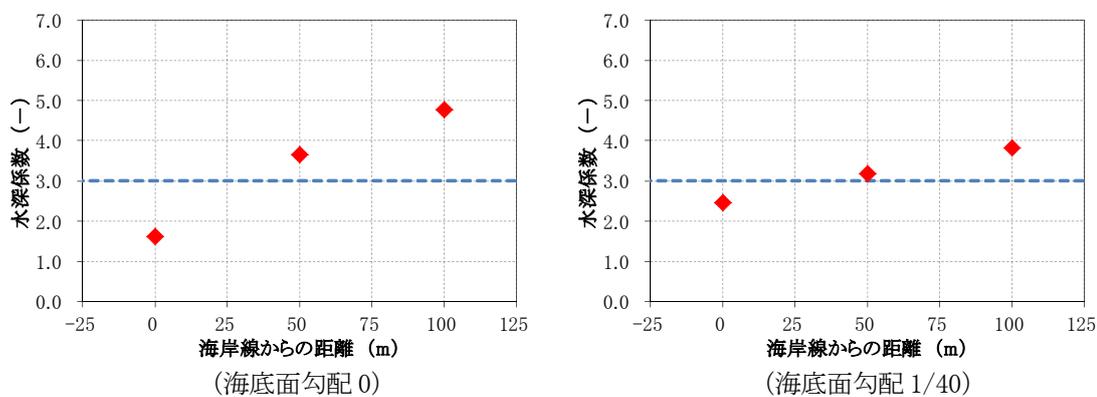


図 6. 3 防潮堤位置と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係

Figure 6. 3 Relationship between Seawall Position and Water Depth Coefficient ( $\alpha$ )

## 7. 考察

### 7. 1 中規模水理試験及び大規模水理試験の比較

図 7. 1 に中規模水理試験結果と大規模水理試験結果の関係を示す。ここで、図 7. 1 では、両水理試験結果を統一的な尺度で表すため、無次元数であるフルード数 (Fr) を導入し、フルード数 (Fr) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係について整理した。この結果、以下の傾向が見られた。

- (1) 中規模水理試験において、フルード数 (Fr) が大きいほど水深係数 ( $\alpha$ ) のばらつきが大きい。
- (2) 中規模水理試験結果に比べ、大規模水理試験結果の水深係数 ( $\alpha$ ) がやや小さい。
- (3) 中規模水理試験結果のフルード数 (Fr) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係は、水路底面勾配 0 と 1/20 及び 1/10 と 1/40 の 2 グループに分けられ、両者の傾向は異なる。

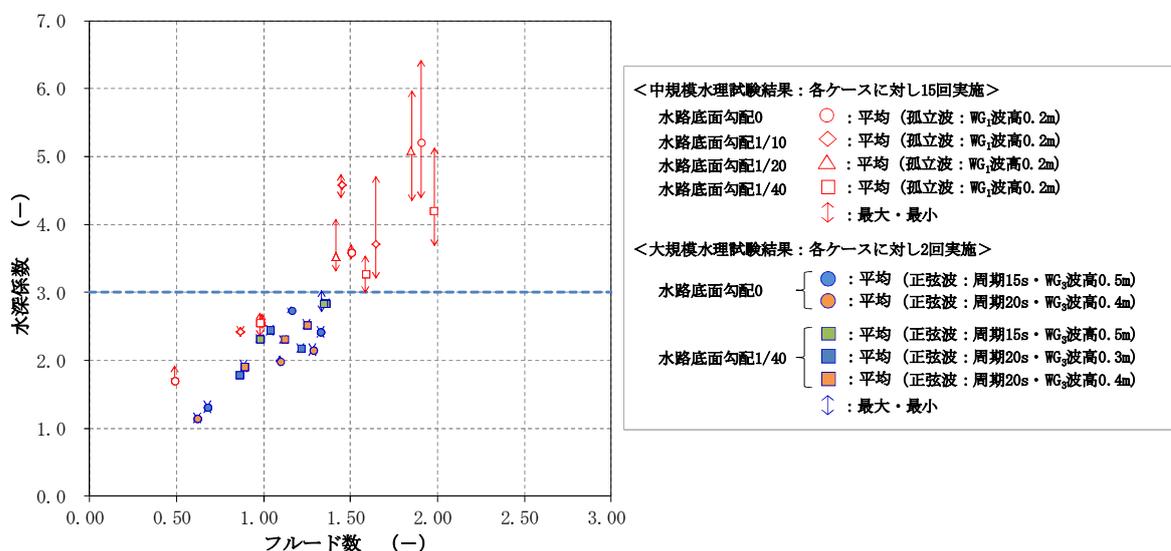


図 7. 1 フルード数 (Fr) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係 (水理試験)

Figure 7.1 Relationship between Froude Number (Fr) and Water Depth Coefficient ( $\alpha$ ) (Hydraulic Test)

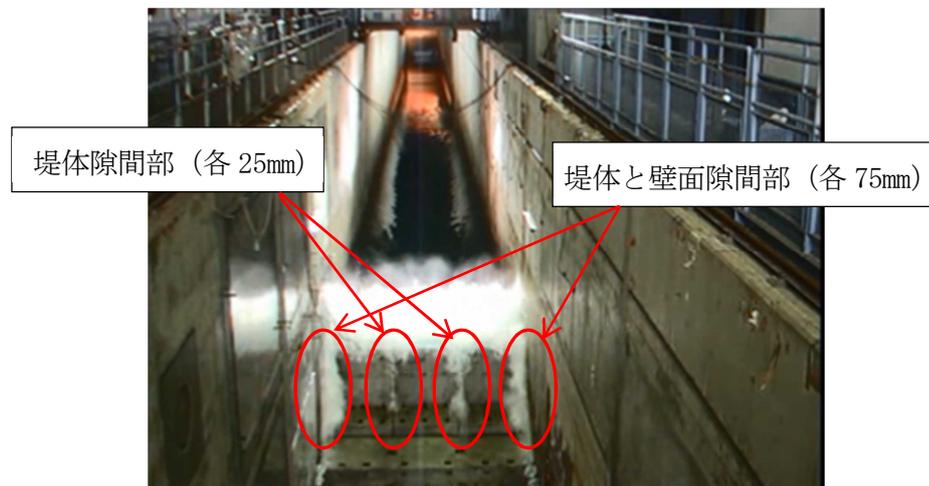
### 7. 2 中規模水理試験結果における水深係数 ( $\alpha$ ) のばらつきについて

7. 1 (1) については、水深係数 ( $\alpha$ ) は最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) と最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) に相当する静水圧の比より求めるが、5. 2. 2 (3) に記したように、堤体が陸側に設置されるほど最大浸水深 ( $\eta_{i, \max}$ ) が浅くなるため、水深係数 ( $\alpha$ ) のばらつきに影響を与えた可能性が考えられる。さらに、波高計の精度は4. 1. 1 (2) に記したように測定範囲 10~1,200mm に対し、 $\pm 0.5\%$ /FS であるため、堤体が陸側にある方がその測定結果にばらつきが生じ、結果としての水深係数 ( $\alpha$ ) のばらつきが大きくなった可能性がある。

### 7. 3 大規模水理試験と中規模水理試験における水深係数 ( $\alpha$ ) の差異について

7. 1 (2) については、図 7. 2 に示すように、3 分割された堤体の隙間部及び堤体と壁面の隙間部からの作用波のリークにより圧力低下が生じ、最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) が小さくなったものと考えられる。

図 7. 3 に大規模水理試験シミュレーション解析結果と中規模水理試験結果の比較を示す。ここで、大規模水理試験のシミュレーション解析では、作用波のリークは考慮していない。図 7. 3 に示すように、作用波のリークがない条件での解析結果では、水深係数 ( $\alpha$ ) の低下は見られず、さらに中規模水理試験結果とも良く一致した。このことから、大規模水理試験の水深係数 ( $\alpha$ ) が中規模水理試験の水深係数 ( $\alpha$ ) よりも小さくなった要因として、作用波のリークが考えられる。リークが生じていなければ大規模水理試験における水深係数 ( $\alpha$ ) は、中規模水理試験の結果と同一の傾向を示すと考えられる。



(独立行政法人港湾空港技術研究所提供)

図 7. 2 大規模水理試験における堤体に作用する作用波のリーク状況

Figure 7.2 Leakage of Tsunami Wave Acting on Seawall Model

(Large Scale Hydraulic Test)

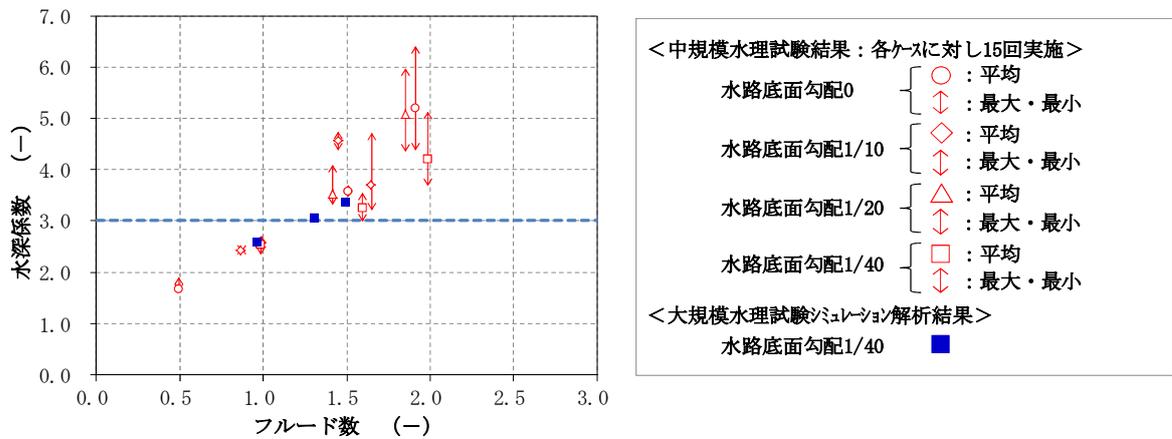


図 7.3 フルード数 (Fr) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係 (中規模水理試験  
及び大規模水理試験シミュレーション解析)

Figure 7.3 Relationship between Froude Number (Fr) and Water Depth Coefficient ( $\alpha$ ) (Middle Scale Hydraulic Test and Simulation Analysis of Large Scale Hydraulic Test)

#### 7. 4 中規模水理試験における水深係数 ( $\alpha$ ) の傾向について

7. 1 (3) について、次のような検討を行った。図 7. 4 に中規模水理試験を対象にした解析結果からフルード数 (Fr) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係を示す。図 7. 1 と比較して、シミュレーション解析においても、フルード数 (Fr) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係は、水路底面勾配 1/10 と 1/40 及び 0 と 1/20 の 2 グループに分類でき、水理試験結果と同様の傾向が見られた。

その要因として、水路底面勾配の違いにより、作用波の砕波位置が異なり、堤体に作用する最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) に差異が生じたものと考えられる。

図 7. 5 に 5. 2. 2 の中規模水理試験シミュレーション解析結果から得られた水路底面勾配と砕波位置の関係を示す。図 7. 5 から分かるように、水路底面勾配 1/10 では砕波していない。また、1/40 では堤体から離れた沖側で砕波が生じており、その影響が堤体まで及んでいないことにより、最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) が小さかったことが考えられる。

一方、水路底面勾配 0 及び 1/20 では堤体近傍で砕波が生じており、最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) が大きくなったものと考えられる。水路底面勾配の違いにより生じる作用波の砕波の有無及び砕波位置の差異が、最大堤体作用波圧 ( $P_{i, \max}$ ) に与える影響については、今後、更に定量的な評価が必要である。

なお、実規模の防潮堤を想定した場合の適用性を検討するため、水路底面勾配と海底面勾配を 1/40 に統一した条件で水理試験 (中規模水理試験、大規模水理試験)、解析 (中規模水理試験シミュレーション解析、大規模水理試験シミュレーション解析) 及び実規模モデルに

よる試解析の結果を比較した。この結果を図 7. 6 に示す。

大規模水理試験の水深係数 ( $\alpha$ ) が他に比べ下回る理由は 7. 3 に記したとおりであるが、この大規模水理試験の結果を除けば、それぞれの結果は同一の傾向となっており、互いの相似則は成り立っているものと考えられる。

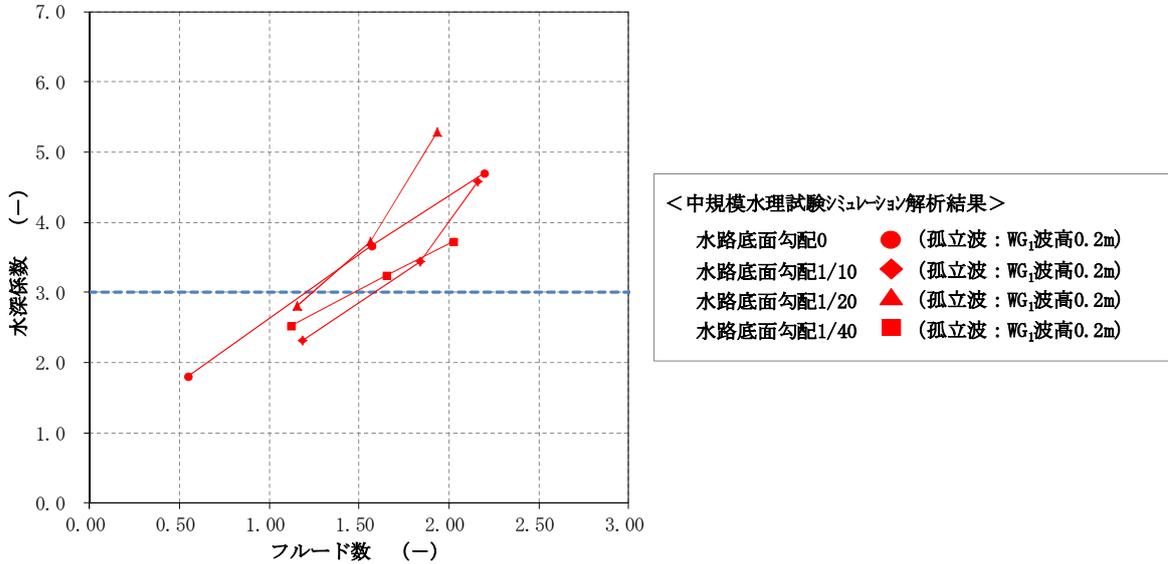


図 7. 4 解析におけるフルード数 (Fr) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係

Figure 7.4 Relationship between Froude Number (Fr) and Water Depth Coefficient ( $\alpha$ ) Obtained from Analysis

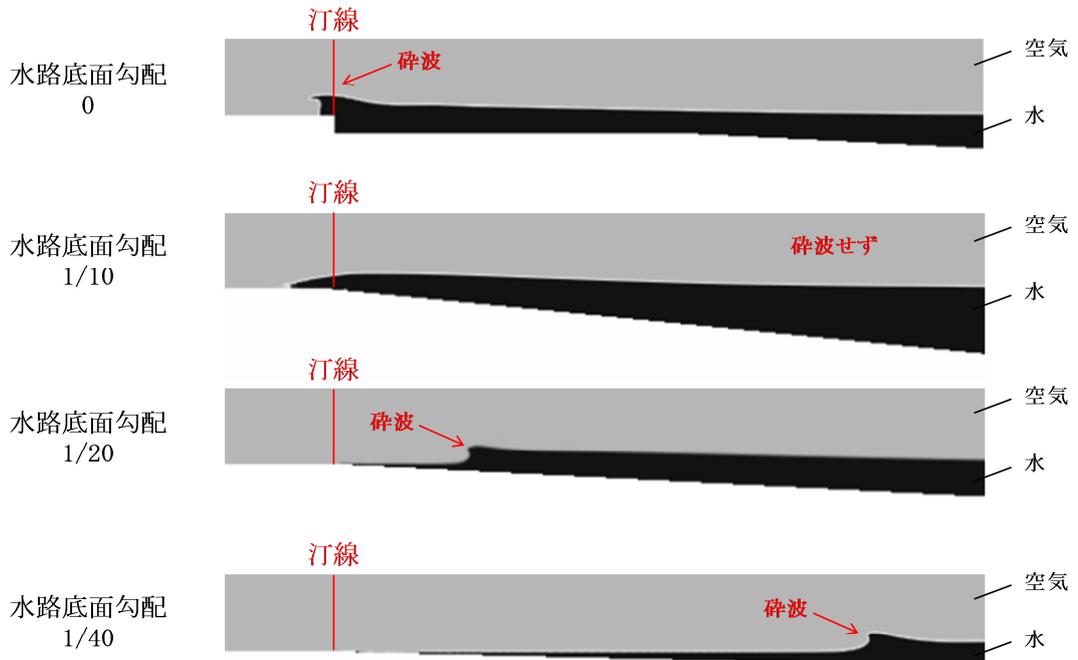


図 7. 5 解析における水路底面勾配と碎波位置の関係

Figure 7.5 Relationship between Flume Bottom Slope and Position of Water Break

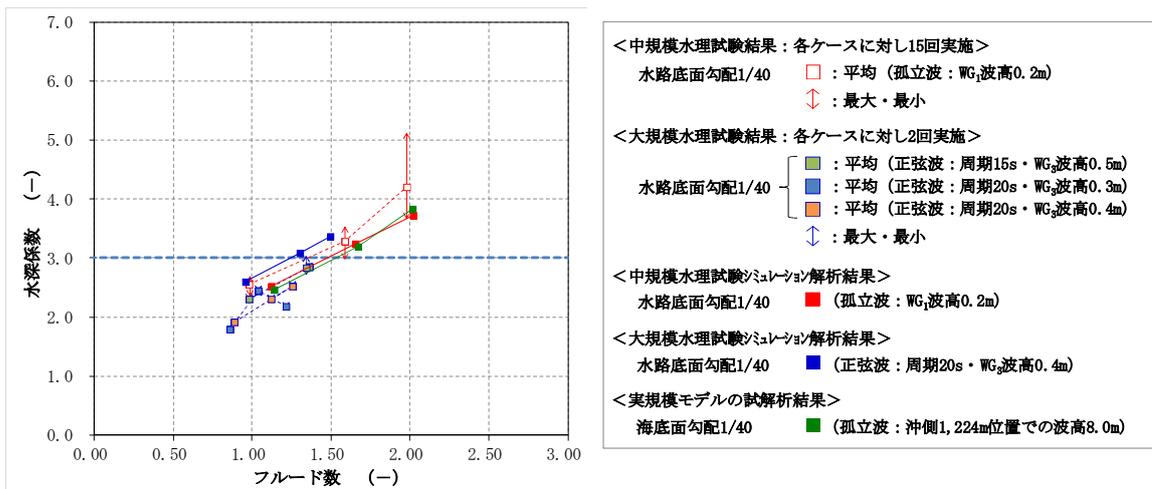


図 7. 6 底面勾配 1/40 におけるフルード数 (Fr) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係

Figure 7. 6 Relationship between Froude Number (Fr) and Water Depth Coefficient ( $\alpha$ ) (Flume Bottom Slope 1/40)

### 7. 5 水深係数 3 の適用範囲について

水理試験及び解析（中規模水理試験シミュレーション解析、大規模水理試験シミュレーション解析、実規模モデルによる試験解析）について、フルード数 (Fr) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係を整理した結果を図 7. 7 に示す。なお、7. 3 に記したように、大規模水理試験では作用波のリークによる圧力低下が見られたことから、本整理の対象から除外した。

図 7. 7 よりフルード数 (Fr) が 1.5 程度を超える領域で水深係数 ( $\alpha$ ) が 3 を超える場合があることを確認した。一方、フルード数 (Fr) が 1 以下の範囲では水深係数 ( $\alpha$ ) が 3 を超えるデータは得られなかった。

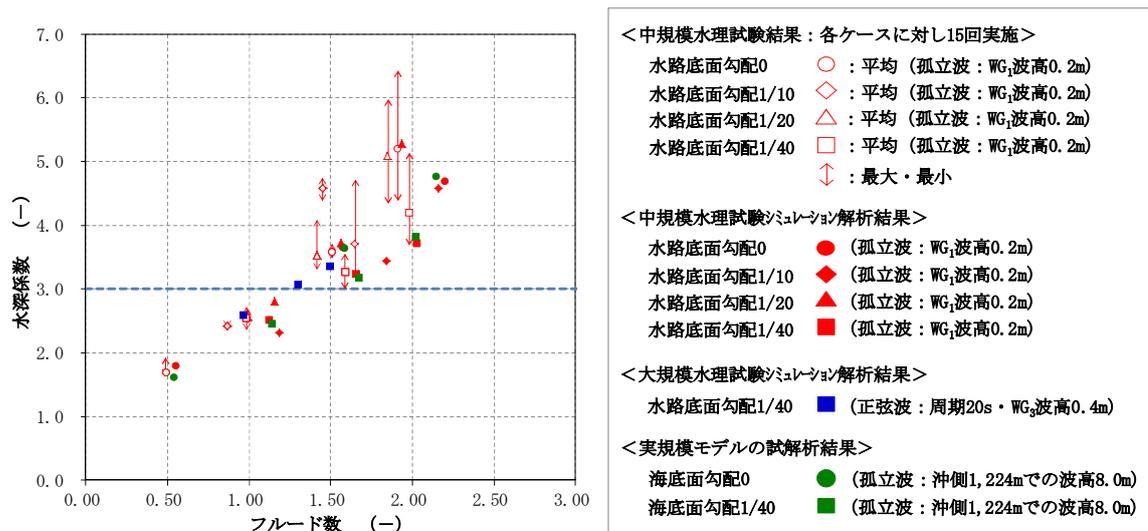


図 7. 7 フルード数 (Fr) と水深係数 ( $\alpha$ ) の関係

Figure 7. 7 Relationship between Froude Number (Fr) and Water Depth Coefficient ( $\alpha$ )

## 8. 結論

暫定指針では一部の要件に該当する場合を除き、水深係数 3 を用いている。この水深係数 3 を防潮堤設計に適用するに当たって、その適用範囲を明確にするため、持続波圧を対象に、水理試験及び水理試験結果のシミュレーション解析、実規模モデルによる試解析を実施した。

この結果、フルード数 (Fr) を用いた整理を行った場合には、フルード数 (Fr) が大きくなるに従って水深係数 ( $\alpha$ ) も大きくなり、フルード数 (Fr) が 1.5 程度を超える領域で水深係数 3 を超える場合があることを確認した。

なお、暫定指針では、津波波圧として段波波圧と持続波圧があることを明示していない。一方、「耐津波設計に係る工認審査ガイド」<sup>(参7)</sup>では、段波波圧と持続波圧に留意することを明示していることから、段波波圧が防潮堤に与える影響についても検討を行う必要がある。

## 謝 辞

本技術報告の水理試験に係る記載に当たっては、独立行政法人港湾空港技術研究所への委託研究事業で実施した水理試験から得られたデータの整理結果を使用した。また、独立行政法人港湾空港技術研究所の有川太郎氏より、本技術報告作成に当たり有益な意見を受けた。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 参 1 原子力規制委員会、実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則、原子力規制委員会規則第 5 号、平成 25 年 6 月 28 日
- 参 2 原子力規制委員会、実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈、原規技発第 1306193 号、平成 25 年 6 月 19 日
- 参 3 原子力規制委員会、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則、原子力規制委員会規則第 6 号、平成 25 年 6 月 28 日
- 参 4 原子力規制委員会、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈、原規技発第 1306194 号、平成 25 年 6 月 19 日
- 参 5 原子力規制委員会、基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド、原管地発第 1306193 号、平成 25 年 6 月 19 日
- 参 6 国土交通省、東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針、平成 23 年 11 月 17 日
- 参 7 原子力規制委員会、耐津波設計に係る工認審査ガイド、原管地発第 1306196 号、平成 25 年 6 月 19 日
- 参 8 榊山勉、陸上遡上津波の伝播と構造物に作用する津波波圧に関する研究、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、68、2、pp. I\_771- I\_775、平成 24 年
- 参 9 Asakura, R., Iwase, K., Ikeya, T., Takao, M., Kaneto, T., Fujii, N. and Ohmori, M., The Tsunami Wave Force Acting on Land Structures, Proc. of 28th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, 128, pp.1191-1202, 2002.

付録 水理試験で採用されている相似則及び縮尺の考え方について

本研究では、独立行政法人港湾空港技術研究所への委託研究として、対象とする実規模の系（以下「実機系」という。）を縮尺 1/40 で模擬する中規模水理試験と、縮尺 1/10 で模擬する大規模水理試験を実施した。

以下、これらの試験装置の設計で採用されている実機系との相似則及び縮尺の考え方について解説する。なお、当該試験装置は、実機系を水平方向（流れ方向）と鉛直方向の二次元で模擬しており、両方向の縮尺は同じ値（1/n）となるように設計されている。

相似則は、一般には、流れの基礎方程式を無次元化し、その係数として現れる無次元数から導出される。ただし、自由液面を有する水平流れはフルード数 $Fr$ により特徴付けられることが知られており、当該試験装置も、そこでのフルード数 $Fr_m$ が実規模の系でのフルード数 $Fr_p$ と同じとなるように設計されている。すなわち、以下の相似則が採用されている。

$$Fr_m = Fr_p \quad (1)$$

ここで、添字 p は実機系を、m は当該試験装置の系（以下「モデル系」という。）を意味する。また、 $Fr$ は次式で定義される。

$$Fr = v_0/\sqrt{gH_0} \quad (2)$$

ここで、 $v_0$ は代表速度 (m/s)、 $H_0$ は鉛直方向の代表長さ (m)、 $g$ は重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)を示す。本付録の 1. では、対象とする流れの基礎方程式を無次元化し、上記相似則を導出する。

一般に、こうした試験装置の設計では、相似則を満足するように、幾何形状の縮尺や、モデル系での物理量の実機系での物理量に対する比（以下「物理量の比」という。）を決めることになるが、その方法は単一ではない。そのうち、当該水理試験で採用されているものについて、本付録の 2. に示す。さらに、付録表 1 にその結果のまとめを示す。

付録表 1 幾何形状の縮尺及び各物理量の比

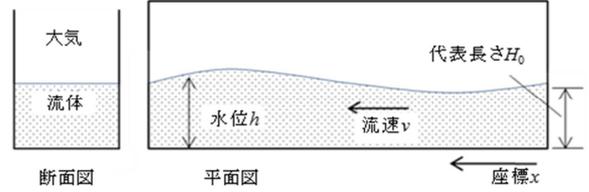
Appendix Table 1 Scale Ratio of Geometry and Physical Quantity

物理量	記号	単位	縮尺/物理量の比	実機系(p)での物理量とモデル系(m)での物理量の関係
鉛直方向長さ	$H$	m	1/n	$H_m = H_p/n$
水平方向長さ	$L$	m	1/n	$L_m = L_p/n$
時間	$t$	s	1/√n	$t_m = t_p/\sqrt{n}$
流速	$v$	m/s	1/√n	$v_m = v_p/\sqrt{n}$
圧力	$P$	N/m <sup>2</sup>	1/n	$P_m = P_p/n$
流体密度	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1.0	$\rho_m = \rho_p$

本表に示すとおり、当該水理試験では、幾何形状の縮尺は  $1/n$  としているのに対し、時間の比は  $1/\sqrt{n}$  である。すなわち、時間を歪ませる縮尺法(time-distorted scaling)を採用している点に特徴がある。

### 1. 基礎方程式の無次元化と相似則の導出

付録図 1 に、開渠内の水平層状流を模式的に示す。この場合、流体の一次元運動量保存方程式は、流速  $v$ (m/s)、水位  $h$ (m) 及び圧力  $P$ (N/m<sup>2</sup>) を従属変数として、次式で表現できる(付参 1, 2)。



付録図 1 開渠内の水平層状流の模式図

Appendix Figure 1 Profile of Flow in Flume

$$\rho \left( \frac{\partial}{\partial t} v + v \frac{\partial}{\partial x} v \right) = - \frac{\partial}{\partial x} P - \Delta \rho g \frac{\partial}{\partial x} h \quad (3)$$

ここで、 $t$  は時間(s)、 $x$  は流れ方向の座標(m)、 $\Delta \rho$  は流体と大気の密度差(kg/m<sup>3</sup>) である。簡略化のため、流体は非圧縮性と仮定し、壁面及び大気との界面での摩擦項等は無視した。なお、右辺第 2 項は、重力により液面を水平に保つように流体に作用する力(lateral gravitational force)を表している。式(3)を基礎方程式として、無次元化する。

まず、以下の無次元時間  $t^*$  及び無次元座標  $x^*$  を導入する。

$$t^* = v_0 t / L_0 \quad (4)$$

$$x^* = x / L_0 \quad (5)$$

ここで、 $L_0$  は流れ方向の代表長さ(m)、 $v_0$  は代表流速(m/s) である。さらに、無次元流速  $v^*$ 、無次元水位  $h^*$  及び無次元圧力  $P^*$  を次式で定義する。

$$v^* = v / v_0 \quad (6)$$

$$h^* = h / H_0 \quad (7)$$

$$P^* = P / (\rho v_0^2) \quad (8)$$

次に、式(4)から(8)までを式(3)に代入して、次式に示す無次元基礎方程式を得る。ただし、 $\Delta \rho / \rho$  を 1 と近似した。

$$\frac{\partial}{\partial t^*} v^* + v^* \frac{\partial}{\partial x^*} v^* = - \frac{\partial}{\partial x^*} P^* - \frac{1}{Fr^2} \frac{\partial}{\partial x^*} h^* \quad (9)$$

本式の各項の係数には、フルード数 $Fr$ のみが現れている。このことから、式(9)の解として求まる無次元量  $v^*$ ,  $h^*$  及び  $P^*$  は、二つの異なる系で $Fr$ が同一であれば、同一となることがわかる。すなわち、式(1)が満足されれば、実機系とモデル系で相似則が成立することが示された。

ただし、ここで採用した基礎方程式 (式(3)) では、流路内の流れを一次元で模擬し、かつ、液体の圧縮率や、壁面及び大気との界面での摩擦項等を見捨てしているため、相似則はそうした近似が成立する範囲で成立することに留意する必要がある。

## 2. モデル系での物理量の実機系での物理量に対する比の導出

実機系とモデル系で、相似則 (式(1)) が成り立つと仮定すると、式(2)より次式を得る。

$$\frac{v_{0,m}}{v_{0,p}} = \frac{Fr_m \sqrt{gH_{0,m}}}{Fr_p \sqrt{gH_{0,p}}} = \sqrt{\frac{H_{0,m}}{H_{0,p}}} = 1/\sqrt{n} \quad (10)$$

さらに、 $t^*$  及び  $x^*$  が両系で一致する条件より、式(4)、(5)及び(10)を用いて次式を得る。

$$t_m = t_p/\sqrt{n} \quad (11)$$

$$x_m = x_p/n \quad (12)$$

同様に、 $v^*$ ,  $h^*$  及び  $P^*$  が両系で一致する条件より、式(6)から(8)と(10)を用いて次式を得る。

$$v_m = v_p/\sqrt{n} \quad (13)$$

$$h_m = h_p/n \quad (14)$$

$$P_m = P_p/n \quad (15)$$

ただし、当該水理試験では流体として水を使っており、 $\rho_m = \rho_p$  で近似できるとした。

以上により、付録表 1 に示した物理量の比が導出された。

## 付録の参考文献

- 付参 1 Hirano, M. and Watanabe, T., Numerical Study on Shock Phenomena and Void Wave Propagation in Horizontal Stratified Flow, Nucl. Eng. & Des., 122, pp. 53-66, 1990.
- 付参 2 Rousseau, J. C. and Ferch, R. L., A Note on Two-Phase Separated Flow Models, Int. J. Multiphase Flow, 5, pp. 489-493, 1979.

付録の記号表

$Fr$	: フルード数 (-)
$g$	: 重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )
$H$	: 鉛直方向長さ (m)
$h$	: $h(x, t)$ 、水位 (m)
$h^*$	: $h^*(x^*, t^*)$ 、無次元水位 (-)
$L$	: 水平方向長さ (m)
$n$	: モデル系の実機系に対する縮尺の逆数 (-)
$P$	: $P(x, t)$ 、圧力 ( $\text{N/m}^2$ )
$P^*$	: $P^*(x^*, t^*)$ 、無次元圧力 (-)
$t$	: 時間 (s)
$t^*$	: 無次元時間 (-)
$v$	: $v(x, t)$ 、流速 (m/s)
$v^*$	: $v^*(x^*, t^*)$ 、無次元流速 (-)
$x$	: 流れ方向の座標 (m)
$x^*$	: 無次元座標 (-)
$\rho$	: 流体密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
$\Delta\rho$	: 流体と大気の密度差 ( $\text{kg/m}^3$ )

添字

m	: モデル系
p	: 実機系
0	: 無次元化に用いる代表値

「防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数の適用範囲について」の執筆者

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ

安全技術管理官（地震・津波担当）付

石田 暢生 上席技術研究調査官

森谷 寛 技術研究調査官

中村 英孝 上席技術研究調査官

飯島 亨 首席技術研究調査官

川内 英史 首席技術研究調査官