

水産基盤整備調査委託事業報告書

I. 課題名

「漁港漁場施設の性能規定化等技術検討」のうち
(6) 津波外力算定手法

II. 実施機関名、部局名及び担当者名

独立行政法人水産総合研究センター 水産工学研究所
水産土木工学部水産基盤グループ

八木 宏
大村智宏
杉松宏一

株式会社アルファ水工コンサルタンツ
東京本部 技術部

佐藤勝弘
上山美登里

国際気象海洋株式会社
技術部

桑原正博
門 安曇

III. 調査実施年度

平成 24～26 年度

IV. 緒言

水産庁漁港漁場整備部では「平成 23 年東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方」¹⁾を公表し、津波外力の算定方法を示しているが、被災地の漁港の復旧・復興および大規模地震が予想される地域の対策が急がれることより、現時点における地震・津波対策の基本的考え方を示したもので、今後、内容の精査・検証を行うこととしている。特に、津波に対する設計の考え方は、現時点の設計実績が十分でないことから、水理模型実験や数値シミュレーションを通じた妥当性の検証が望まれるとしている。このため、本調査では、これまで漁港施設の設計外力では考慮していない津波波力評価手法の検討を模型実験等により行い、適用性の高い津波外力算定式の確立を図ることを目的とする。

V. 方法

1) 既往の知見及び提案に基づく津波波力の評価方法に関する技術的課題の整理・検討

ア) 津波波力算定式

既往の津波波力の評価手法として海岸及び港湾の現行基準で標準とされている谷本³⁾による津波波力算定式があり、津波が堤体を越流しない場合に標準式として用いることが可能である。しかし、津波が堤体を越流する場合に適用すると、堤体背後の水圧が考慮されないために、過大設計に繋がるのが危惧される。また同式では、引き波時の作用に対する照査を行うことができない。そこでこれらを補うため、越流時や引き波時の作用波力を評価できる新たな波圧算定式（水工研式¹⁾²⁾が提案されている。

本調査では、これらを含めた既往の津波波力算定式について、適用条件等を整理し、今後の漁港施設の設計計算に適用するための技術的課題を検討した。具体的には、漁港施設の立地条件や規模を踏まえて、津波波向の影響や砕波（長い緩海底勾配上で津波の先端が切り立ち分裂波が発生して砕ける現象。大きな波力の発生が懸念される）を伴う津波、あるいは引き波時など様々な条件下での適用性を検討した。

イ) 直立消波式岸壁の照査式

直立消波式岸壁の被災現場では、部材が陸側上方への部材の飛散が顕著に見られ、この被災形態は、従来の波圧及び揚圧力を外力として与える滑動・転倒に対する照査方法では再現ができない。そこで、上部工及びブロックに作用する波圧や流れの力の評価方法を確立する必要がある。

本調査では、被災現場で顕著である上部工及びブロックの飛散のメカニズムを検討し、津波の流れによる水圧や揚力の評価方法と、照査式を新たに提案した。

ウ) マウンド被覆材の照査式

通常、防波堤のマウンド被覆材や消波工の照査ではハドソン式⁴⁾が適用されているが、津波の流速が支配的な状態では適用できない。そこで、流速値を外力とするイスバッシュ式⁵⁾について、同式の特性を踏まえた適用性の検証を行う必要がある。また、防波堤等を越流する場合については、堤体背面において防波堤を越流した津波水塊の打ち込み等の現象が生じることから、イスバッシュ式による評価が難しいと考えられる。

本調査では、イスバッシュ式の適用性を検討すると共に、マクロな水理量や構造諸元による合理的な安定性照査方法の検討を行った。

2) 模型実験等による検証

上記で整理した各課題に対応するため、以下の方法による検証を行った。

ア) 水理模型実験

水理模型実験により、津波波力式と被災メカニズムの検証を行った。水理模型実験は混成式防波堤を対象とした断面実験、直立消波式岸壁を対象とした断面および平面実験により、作用波圧、流速等の作用外力を検証した。

イ) 数値計算

数値波動水路（VOF法）により、構造物の表面に作用する水圧や流速を計算し、上記実験の検証とともに水理模型実験では再現できない長周期の津波を含めて外力評価方法の妥当性の検証を行った。

また、設計条件設定における津波シミュレーション（非線形長波式）の適用性を検

討した。

VI. 結果及び考察

1. 各算定式の概要

「平成 23 年東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方」¹⁾が公表された時点での各算定式の考え方を以下に示す。

1. 1 津波波力算定式

津波波力の算定の基本的な考え方を以下に示す。

- 防波堤の耐津波強化対策における設計条件の算定においては、原則津波シミュレーションを実施し、津波高または水位を設定する。
- 越流が発生する場合には、津波シミュレーションにより設計条件を決定することとする。津波波圧の算定には、現状では非越流時の算定方法として実績のある a) 谷本式³⁾を標準式として用いる。
- 谷本式の適応範囲を超えた施設背後に越流するような場合は背後水位の変動を考慮していないため波力を過大に算定する場合もある。したがって、前面波圧分布を静水圧と仮定し背後水位の変動を考慮した b) 水工研提案式による波圧算定手法と比較検討した上で、防波堤に作用する波圧を決定する。

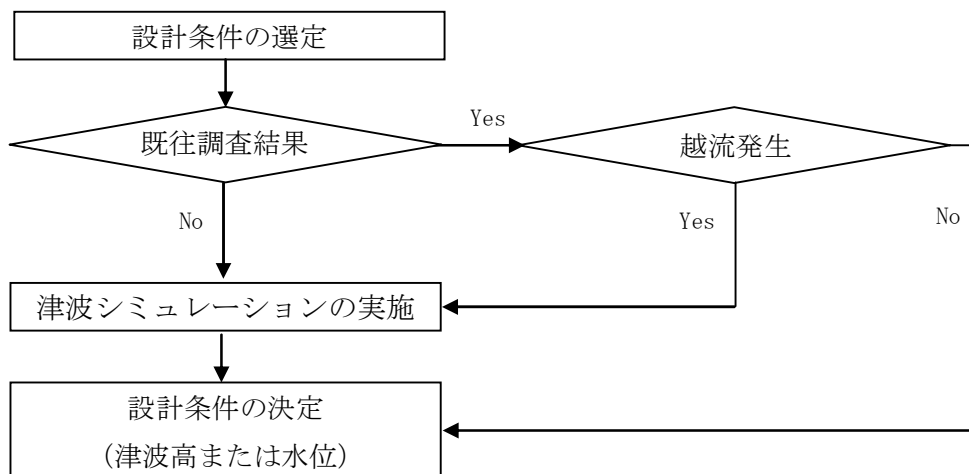


図 1.1.1 設計条件選定フロー図

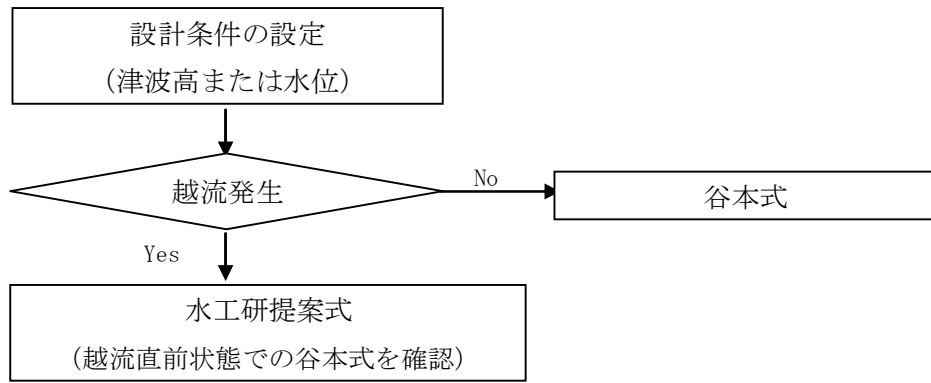


図 1.1.2 津波波圧算定フロー図

(1) 谷本式

谷本式の基本的な考え方を以下に示す。

- 直立壁に作用する波力は、作用点を $\eta^*(p=0)$ とし、静水面で $p_1 = 2.2\rho_0ga$ となる直線分布で、静水面以下は、一様な波圧分布となる。
- ソリトン分裂が発生し分裂波による波圧の増加が考えられるような条件下 ($h/L \geq 0.005$ 、 h は静水位時の水深、 L は津波の波長) においては、 $p_1 = 3.0\rho_0ga$ として設定する⁶⁾。津波波長 L は、次図に示すように最大波の波形の静水位上の時間を半周期 ($T/2$) として $L = \sqrt{gh} \cdot T$ より算定する。

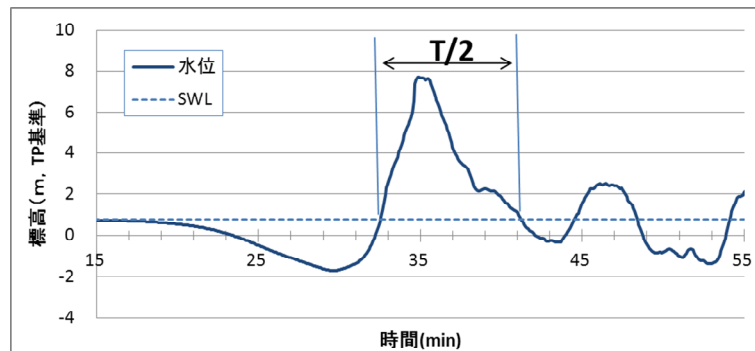


図 1.1.3 周期 T の設定方法

- 防波堤がある条件での数値シミュレーション結果を用いる場合には、堤体前面では反射波により津波波高は、防波堤のない場合のほぼ 2 倍 (重複波) になるため、 $\eta = 2a$ として取り扱う。設定水位は、津波来襲時の水位を基準とする。

$$\eta^* = 3a$$

$$p_1 = 2.2\rho_0ga$$

$$p_2 = (1 - h^*/\eta^*)p_1$$

$$p_u = p_1$$

$$h^* = \min(h_c, \eta^*)$$

ここで、

- η^* : 静水面上の波圧作用高さ (m)
- a : 入射津波の静水面上の高さ (振幅) (m)
- h' : 堤体の前面における水深 (m)
- h_c : 堤体の静水面上の高さ (m)
- ρ_0g : 海水の単位体積重量 (kN/m³)

- p_1 : 静水面における波圧強度 (kN/ m²)
 p_2 : 堤体上端部における波圧強度 (kN/ m²)
 p_u : 前面下端における揚圧力 (kN/ m²)

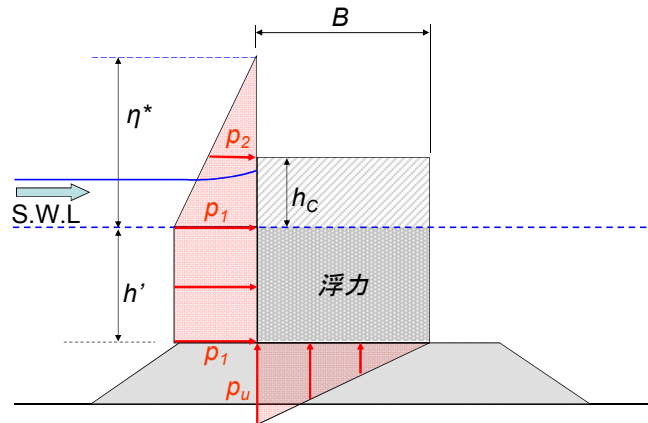


図 1.1.4 谷本式の波圧分布図

(2) 水工研式

水工研式の基本的な考え方を以下に示す。

- 直立壁に作用する波力の算定の際に、施設前後における波圧分布を静水圧分布形（三角形分布）と仮定し、前面及び背面における水位変動を考慮した圧力バランスを検討する。
- 流れの影響等による動水圧による影響は、係数 (a_I 及び a_{IB}) により与えることとし、これまでの調査結果や港湾等の水理模型実験により、施設前面の波圧は $a_I = 1.1$ 、背後圧は $a_{IB} = 0.9$ として設定する。
- 津波波力や段波・ソリトン分裂の影響等については知見が十分でないことから、今後も水理模型実験または数値シミュレーション（断面）による検証事例の蓄積を図る。
- 本提案式は、非越流時・越流時に同様の波圧式を用いる形となっている。浮力及び越流時に作用する揚力については、鉛直方向力 P_u として併せて評価されるものとしており、別途浮力及び揚力を評価する必要はない。また、引き波時の波圧の算定にも本波圧式を用いることができる。その場合、引き波時の主方向側を前面波圧側とし、シミュレーションより求められる施設前後の水位から波圧を算定すればよい。

- 前面波力 P_I の算定（非越流時は $p_2=0$ ）

$$p_1 = \rho_0 g (h' + \eta) \times a_I \quad , \quad p_2 = (\eta - h_C^*) / (h' + \eta) p_1 \quad , \quad h_C^* = \min(\eta, h_C)$$

$$P_I = \frac{1}{2} (p_1 + p_2) (h' + h_C^*)$$

- 背面波力 P_B の算定（非越流時は $p_4=0$ ）

$$p_3 = \rho_0 g (h' + \eta_B) \times a_{IB} \quad , \quad p_4 = (\eta_B - h_{CB}^*) / (h' + \eta_B) p_3 \quad , \quad h_{CB}^* = \min(\eta_B, h_C)$$

$$P_B = \frac{1}{2} (p_3 + p_4) (h' + h_{CB}^*)$$

- 鉛直方向力 P_U の算定（浮力を含む）

$$P_U = \frac{1}{2} (p_1 + p_3) B - \frac{1}{2} (p_2 + p_4) B$$

- 堤体重量

$$W = W_{dry}$$

ここで、

η : 静水面上の前面波圧の作用高さ (m)

η_B : 静水面上の背面波圧の作用高さ (m)

h' : 堤体の前面における水深 (m)

$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m³)

p_1 : 静水面における前面波圧強度 (kN/ m²)

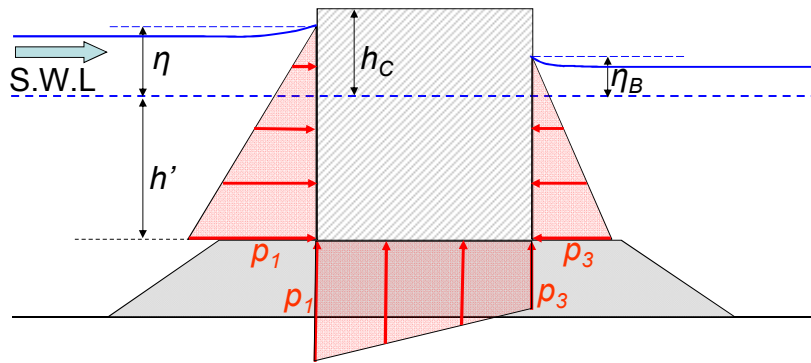
p_2 : 堤体上端部における前面波圧強度 (kN/ m²)

p_3 : 静水面における背面波圧強度 (kN/ m²)

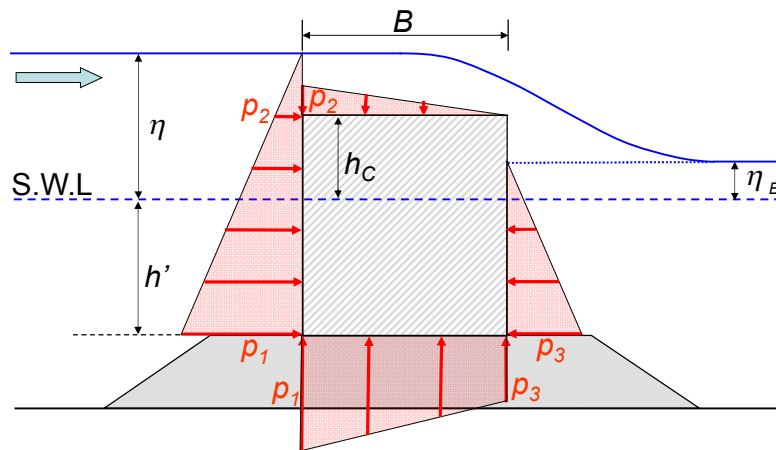
p_4 : 堤体上端部における背面波圧強度 (kN/ m²)

B : 堤体幅 (m)

W_{dry} : 堤体重量 (kN) (浮力を考慮しない重量とする。)



防波堤に作用する波圧分布図（非越流時）



防波堤に作用する波圧分布図（越流時）

図 1.1.5 水工研式の波圧分布図

越流時における堤体背面の静水面上の水位 η_B は津波水塊の落下位置よりも後ろの水面が平らとなる位置での水位を与えるものとする。また、堤体上面に作用する水圧 (p_2 及び p_4 からなる台形分布) は、上図では堤体の前面から背面において変化する水位を考慮した形として示しているが、津波シミュレーションのメッシュサイズと構造物の寸法から考えて p_2 及び p_4 を精度よく算出することが難しいと判断される場合は、防波堤上の平均的な水位による一様分布としてよいものとする。

なお、津波波力や段波・ソリトン分裂の影響等については知見が十分でないことから、静水圧分布を基本とする波圧分布と、流れの影響等に対する前面及び背面の係数 (a_I 及び a_{IB}) の妥当性を水理模型実験により検討するものとした。

1. 2 直立消波式岸壁の照査式

直立消波式岸壁の照査式の基本的な考え方を以下に示す。

- 直立消波ブロック式岸壁では、津波の作用に対し鉛直方向の抵抗力が小さい上部工や上段ブロックの被災が顕著であることから、その補強対策を講じる必要がある。
- 上部コンクリートや直立消波ブロックの飛散は、津波の流れに伴って作用する鉛直力が要因として考えられることから、以下に示す設計荷重を考慮した堤体の安定性及び部材照査を行うものとする。

設計荷重の考え方は、以下に示すとおりである。

(1) 非越流時

- 前面波圧分布は谷本式で算定
- 鉛直力は矩形分布とする
- 越流直前が最も厳しい状態となる

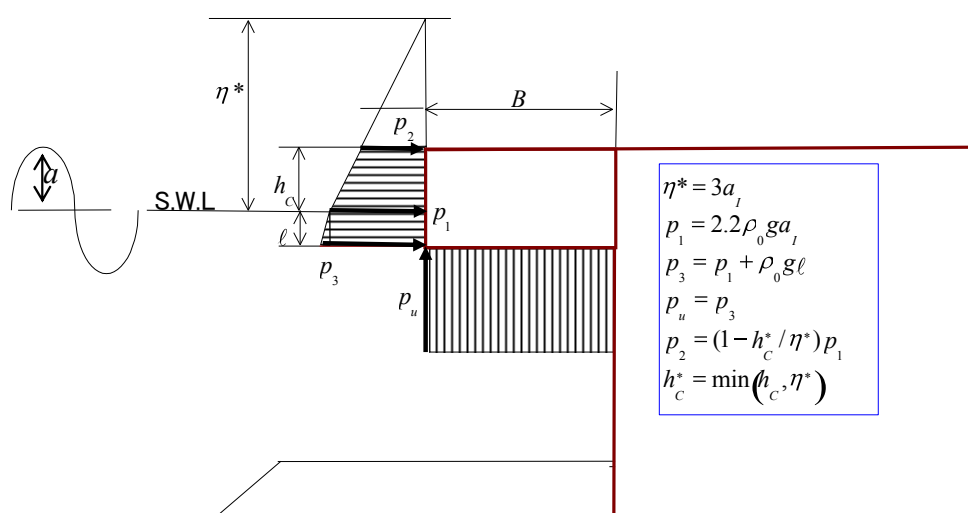


図 1.2.1 直立消波式岸壁の照査式と荷重分布図（非越流時）

(2) 越流時

- ・ 前面波圧分布は水工研提案式で算定
- ・ 上部工天端での津波の流れによって生じる鉛直力は矩形分布とし越流流速あるいは浸水深より算定
- ・ 越流直前での谷本式と確認

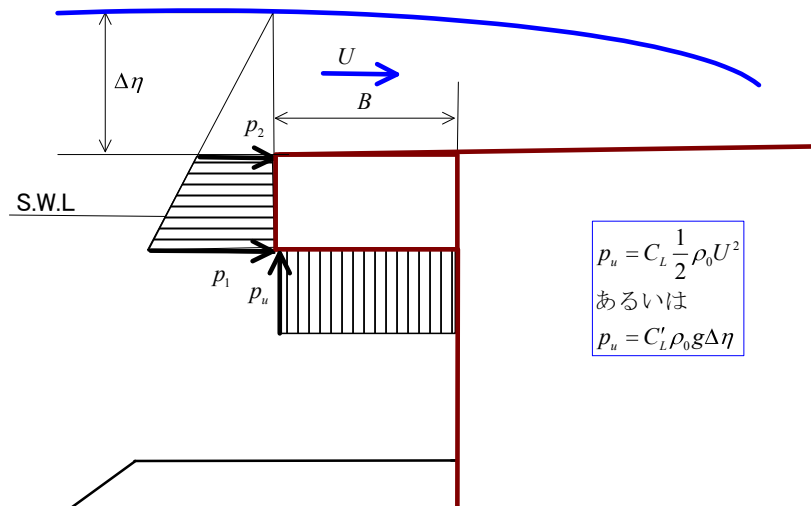


図 1.2.2 直立消波式岸壁の照査式と荷重分布図（越流時）

直立消波式岸壁の照査式については、越流時に作用する鉛直力の評価方法が明確にされていないことから、数値波動水路の計算に基づき検討することとした。

1. 3 マウンド被覆材の照査式

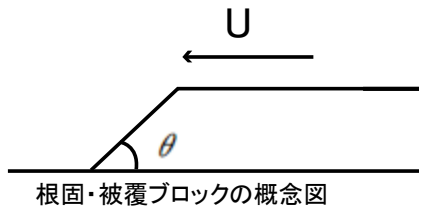
マウンド被覆材の照査式の基本的な考え方を以下に示す。

- イスバッシュ⁵⁾により提案されている捨石等の安定質量算定式を用いる。
- 越流が生じない場合の防波堤前後のマウンド被覆材については、潜堤マウンドの被覆材における岩崎ら⁷⁾の検証結果に準じるものとし、イスバッシュ定数は1.08を用いることとする。
- 越流が生じる場合の防波堤前後のマウンド被覆材については、防波堤を越流した津波水塊の打ち込みによる流速や落水位置を津波波伝播遡上シミュレーションで推定することが現時点で困難なため、港内側の被覆材の安定性の検討は水理模型実験により行うことが望ましいものとする。

$$M = \frac{\pi \rho_r U^6}{48g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3}$$

ここに、

- M : 安定質量 (t)
- ρ_r : 捨石等の密度 (t/m^3)
- U : 捨石等の上面における水の流れの速度 (m/s)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- y : イスバッシュの定数
- S_r : 捨石等の水に対する比重
- θ : 水路床の軸方向の斜面の勾配 ($^\circ$)



根固・被覆ブロックの概念図

図 1.3.1 イスバッシュ式

マウンド被覆材の照査式については、代表流速の与え方やイスバッシュの定数に関する知見が不足している。特に越流が生じる場合の防波堤前後のマウンド被覆材については、防波堤を越流した津波水塊の打ち込みによる流速や落水位置を津波波伝播遡上シミュレーションで推定することが現時点で困難である。そこで、水理模型実験による検討を行うものとした。

2. 防波堤に作用する津波外力の検証（断面実験）

2. 1 押し波時における防波堤に作用する津波外力の検証

(1) 実験施設と実験模型

実験施設は、水産工学研究所の大型造波水路（幅 1.0m×深さ 2.0m×長さ 100m）を使用した（図 2.1.1）。

模型縮尺は 1/81 とした。海底床模型を図 2.1.3 に示す。海底勾配は 1/30 とした。ただし、実験施設の水路長を勘案し、水路床とは勾配 1/10 で擦り付けた。

防波堤模型はケーソン式混成堤で、代表的な形状とした（図 2.1.2）。防波堤諸元を以下に示す。

堤体高：11cm（現地 9m）

堤体幅：14cm（現地 11m）

設置水深：9cm（現地 7.3m）

マウンド上水深：5cm（現地 4.1m）

静水面上の天端高 6cm（現地 4.9m）



図 2.1.1 大型造波水路



図 2.1.2 防波堤模型

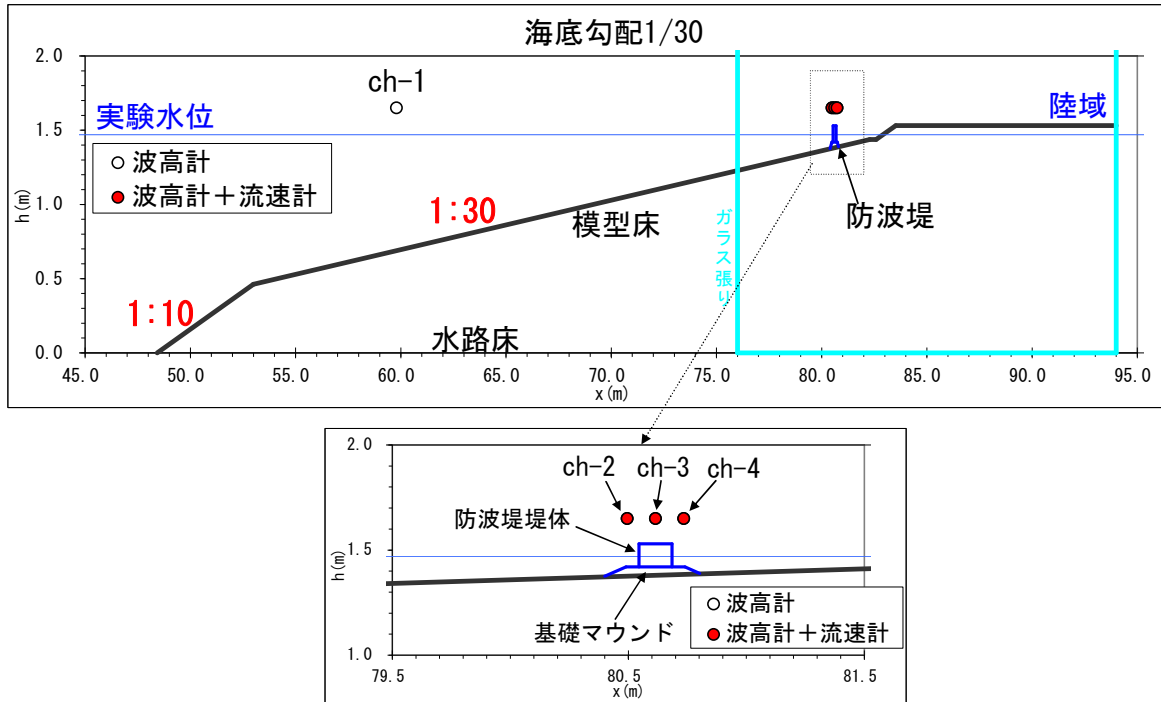


図 2.1.3 海底床模型と計測位置概要

(2) 計測項目

計測項目と計測機器を表 2.1.1 に示す。

表 2.1.1 計測機器と計測内容一覧

項目	水位	流速	
機器名	容量式波高計	電磁流速計	プロペラ式流速計
製造	ケネック	ケネック	ケネック
型式	CHT6-40 CHT6-100 (沖に使用)	VMT2-200-04P	VOT2-100-10(プロペラ径10mm)
測定範囲	最大 40cm/150cm	最大 200cm/s	最大 100cm/s
サンプリング間隔	20ms(50Hz)	20ms(50Hz)	20ms(50Hz)
サンプリング時間	60s	60s	60s
分解能	12bit	12bit	12bit



項目	津波波力(波圧)	津波作用状況
機器名	半導体型動歪み式波圧計	高速CCDカメラ
製造	SSK	カトウ光研
型式	P310-02	k-II
測定範囲	最大 0.2kgf/cm ²	
サンプリング間隔	1ms(1kHz)	フレームレート 50fps
サンプリング時間	60s	
分解能	16bit	
備考	移動平均処理:10Hz	シャッタースピード1/1000



(3) 実験方法

実験波浪を表 2.1.2、実験波形を図 2.1.4 に示す。実験波浪は、周期 25~40s の押し初動の長周期波（正弦波）を基本とし、参考として引き初動の長周期波、及び孤立波の実験も行った。津波波力の計測には、設計対象とする津波（発生頻度の高い津波）を模した実験津波に対して安定な堤体模型を使用した。

波圧計の設置位置を図 2.1.5 に示す。波圧計は港外側直立壁（前面）、港内側直立壁（背面）、天端面、及び底面に設置し、作用津波力を計測した。

表 2.1.2 実験波浪一覧

波浪 No.	種別	沖					備考	
		波高(cm)	周期(s)	ストローク(cm)	初期位相(°)	波数		
1	長周期波	押し初動	8.05	25	148	270	0.75	現地: 沖波高 6.5m, 片周期 113s
2			6.55	30	148	270	0.75	現地: 沖波高 5.3m, 片周期 135s
3			4.94	40	148	270	0.75	現地: 沖波高 4.0m, 片周期 180s
4		引き初動 (参考)	8.04	25	148	180	0.75	現地: 沖波高 6.5m, 片周期 113s
5			6.94	30	148	180	0.75	現地: 沖波高 5.6m, 片周期 135s
6			5.49	40	148	180	0.75	現地: 沖波高 4.4m, 片周期 180s
7	孤立波 (参考)			72.07			現地: 沖波高 5.6m	
8				77.50			現地: 沖波高 6.3m	

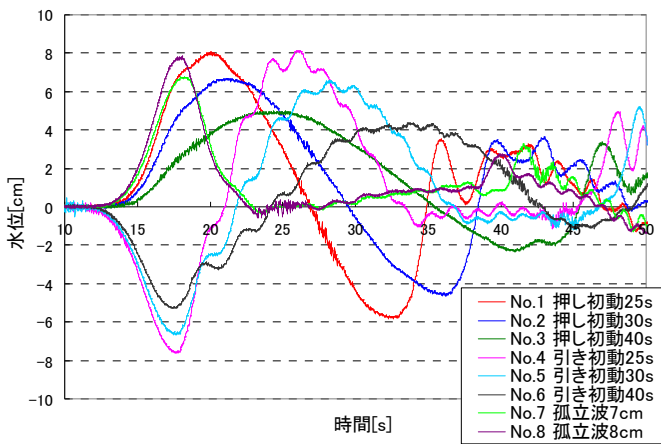


図 2.1.4 実験津波波形 (計測位置: 沖)

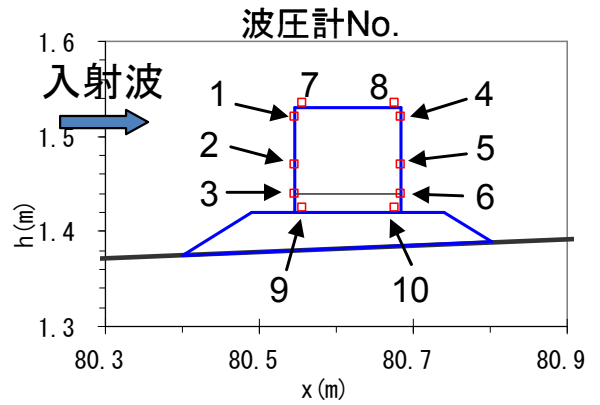


図 2.1.5 波圧計設置位置

(4) 実験結果

1) 波圧の時間波形

波圧の時間波形を図 2.1.6～図 2.1.9 に示す（長周期波押し初動 25s）。前面及び背面の水位上昇に伴い、波圧は連続的な波形となっている。

各面に作用する波力（波圧合力）の時間波形を図 2.1.10、図 2.1.11 に示す。各面に作用する波力は、各測定点の波圧を積分することにより求めた。

背面、天端、及び底面では、33s 前後に第 2 のピークが見られるが、これは陸側からの反射による影響であるため、以後の整理では除外して検討を行った。

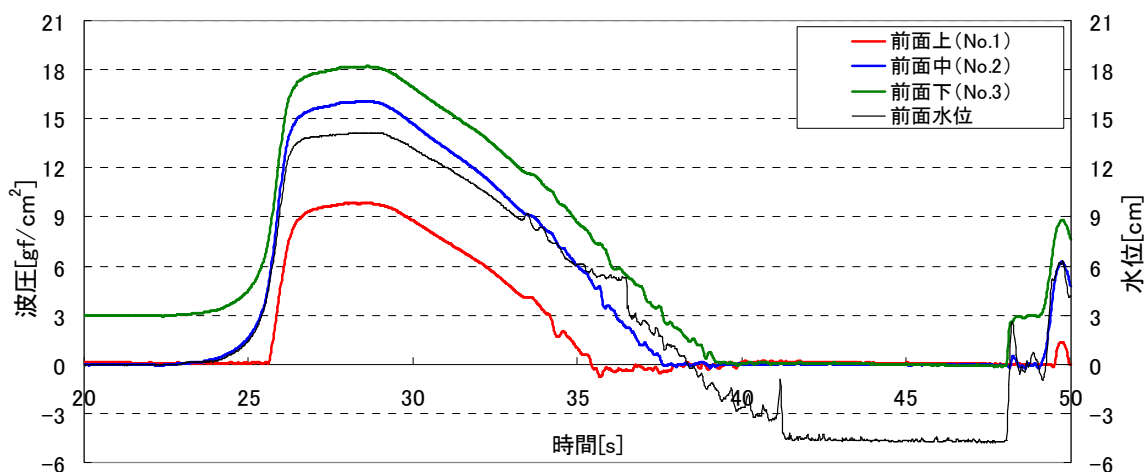


図 2.1.6 前面波圧の時間波形（長周期波押し初動 25s）

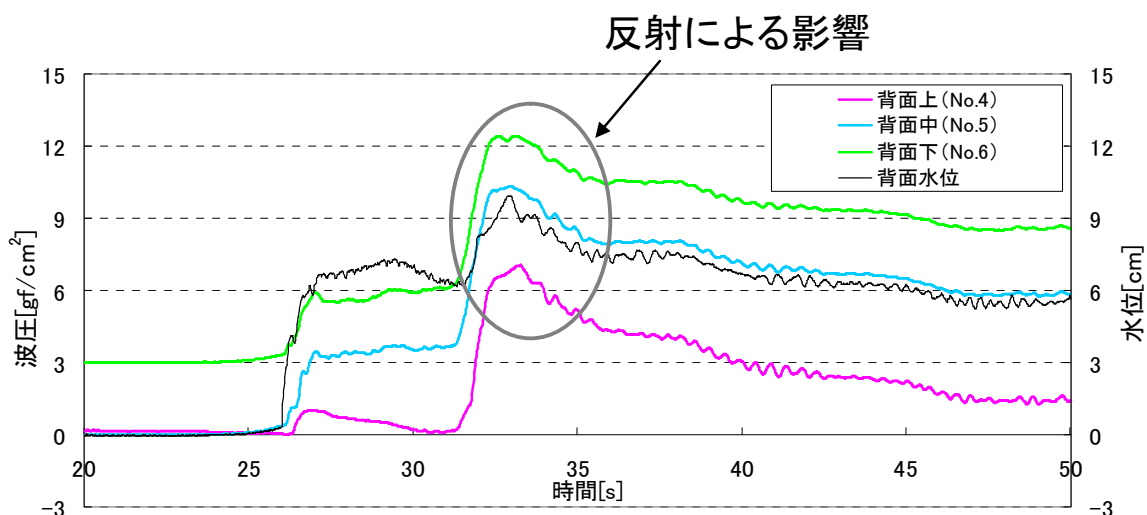


図 2.1.7 背面波圧の時間波形（長周期波押し初動 25s）

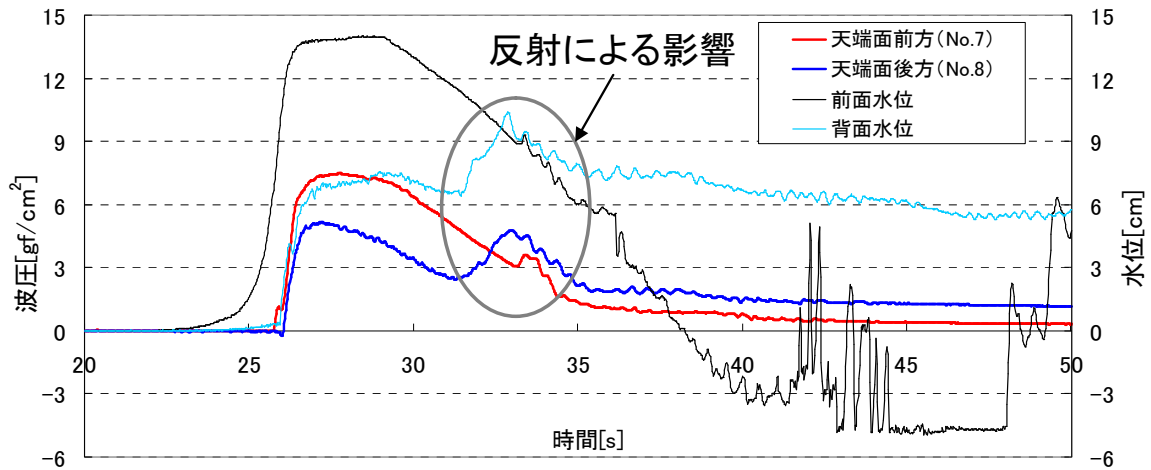


図 2.1.8 天端波圧の時間波形（長周期波押し初動 25s）

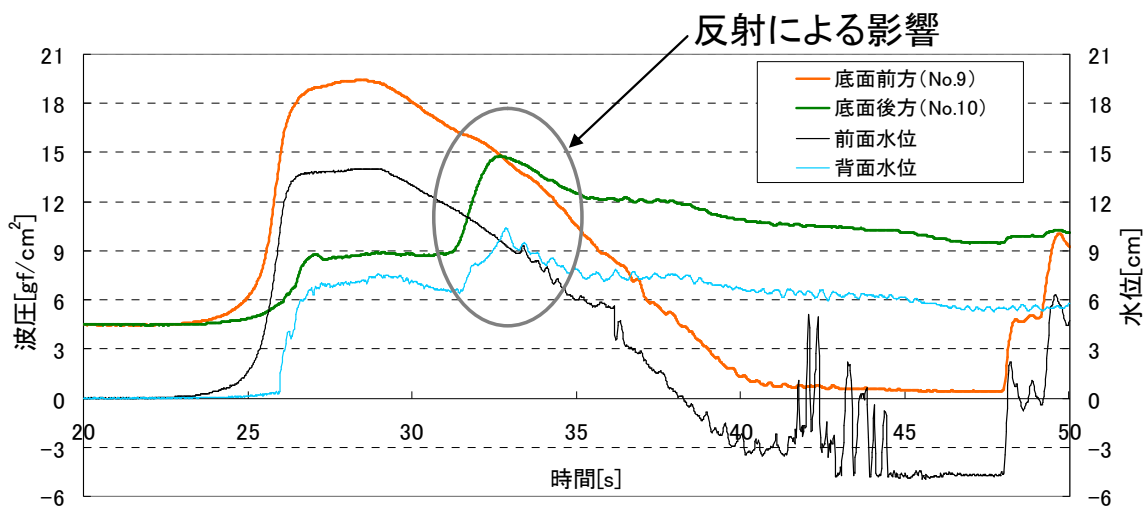


図 2.1.9 底面波圧の時間波形（長周期波押し初動 25s）

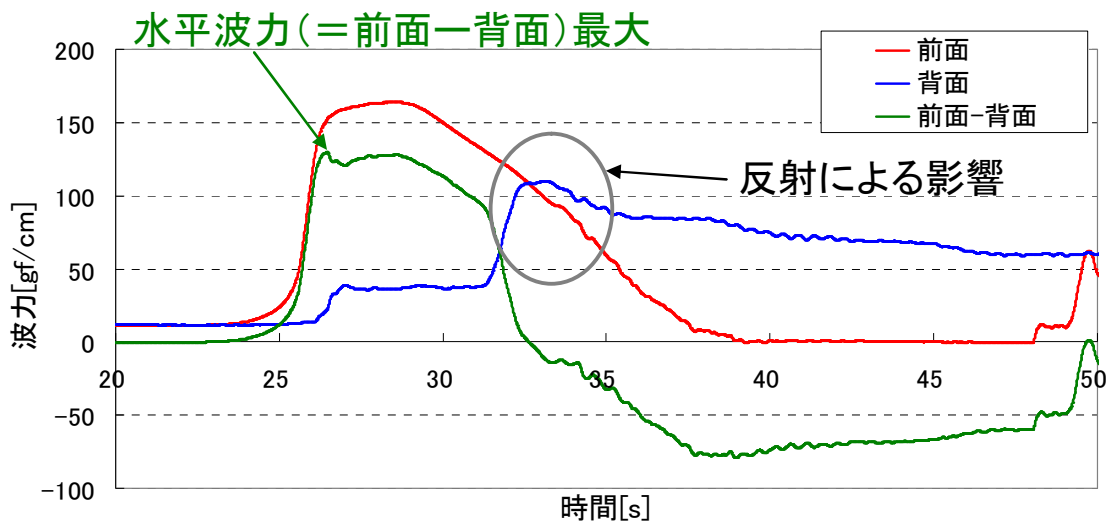


図 2.1.10 前面・背面波力の時間波形（長周期波押し初動 25s）

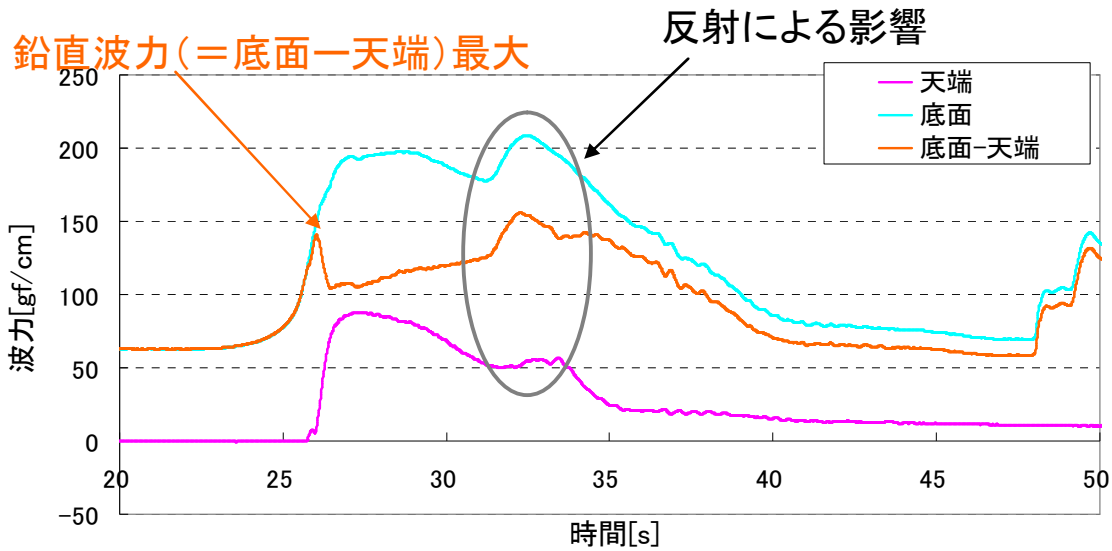


図 2.1.11 天端・底面波力の時間波形（長周期波押し初動 25s）

2) 波圧分布

波圧分布を図 2.1.12～図 2.1.14 に示す。波圧は、水平波力（＝前面波力－背面波力）最大時の同時波圧であり、前面および背面水位による静水圧を合わせて示した。尚、天端の静水圧は撮影画像から読み取った天端上の水位を使用した。

前面波圧は静水圧よりやや高く、背面波圧は静水圧よりやや低い傾向となっている。

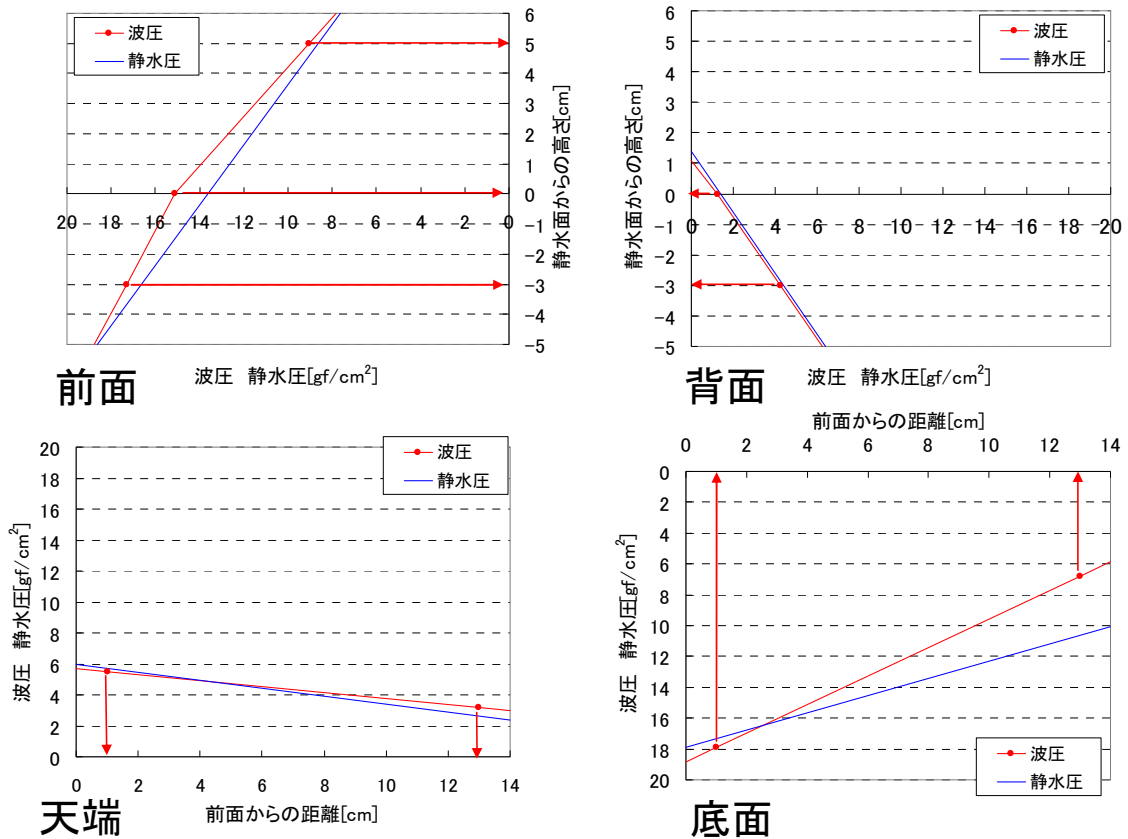


図 2.1.12 波圧分布（長周期波押し初動 25s）

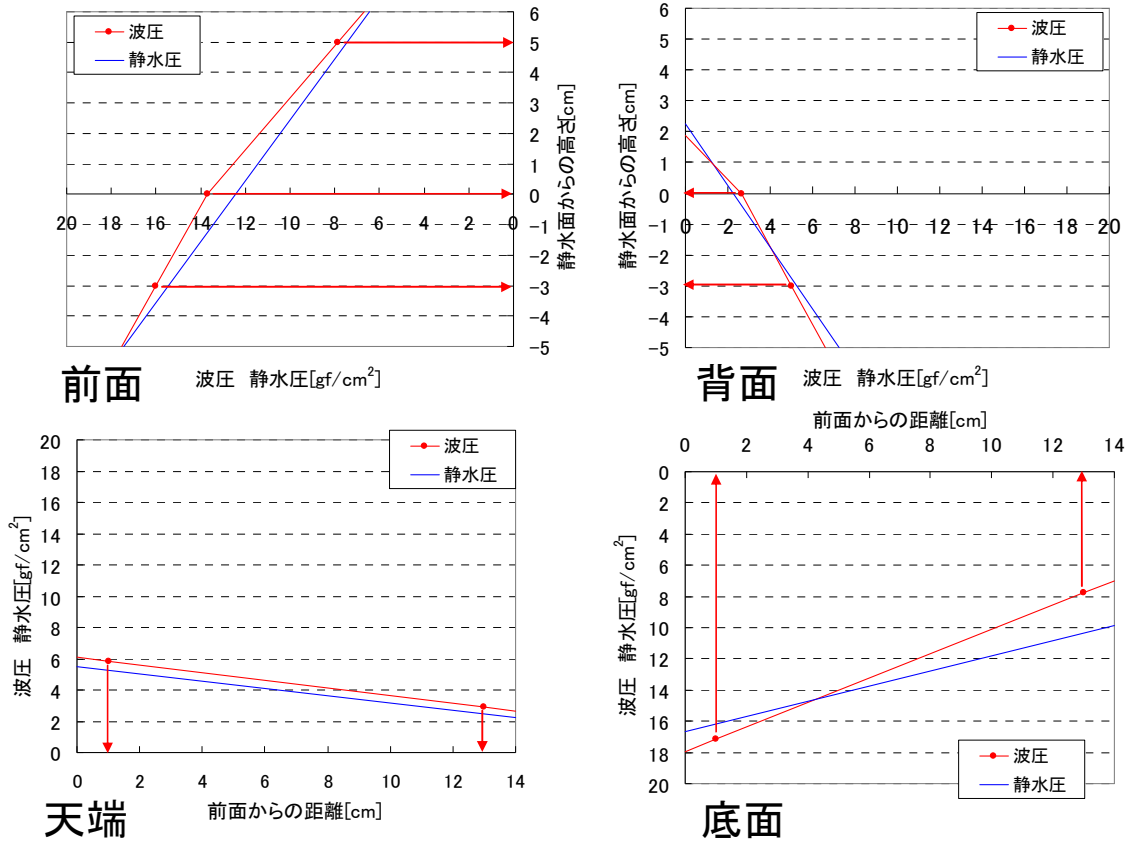


図 2.1.13 波圧分布 (長周期波押し初動 30s)

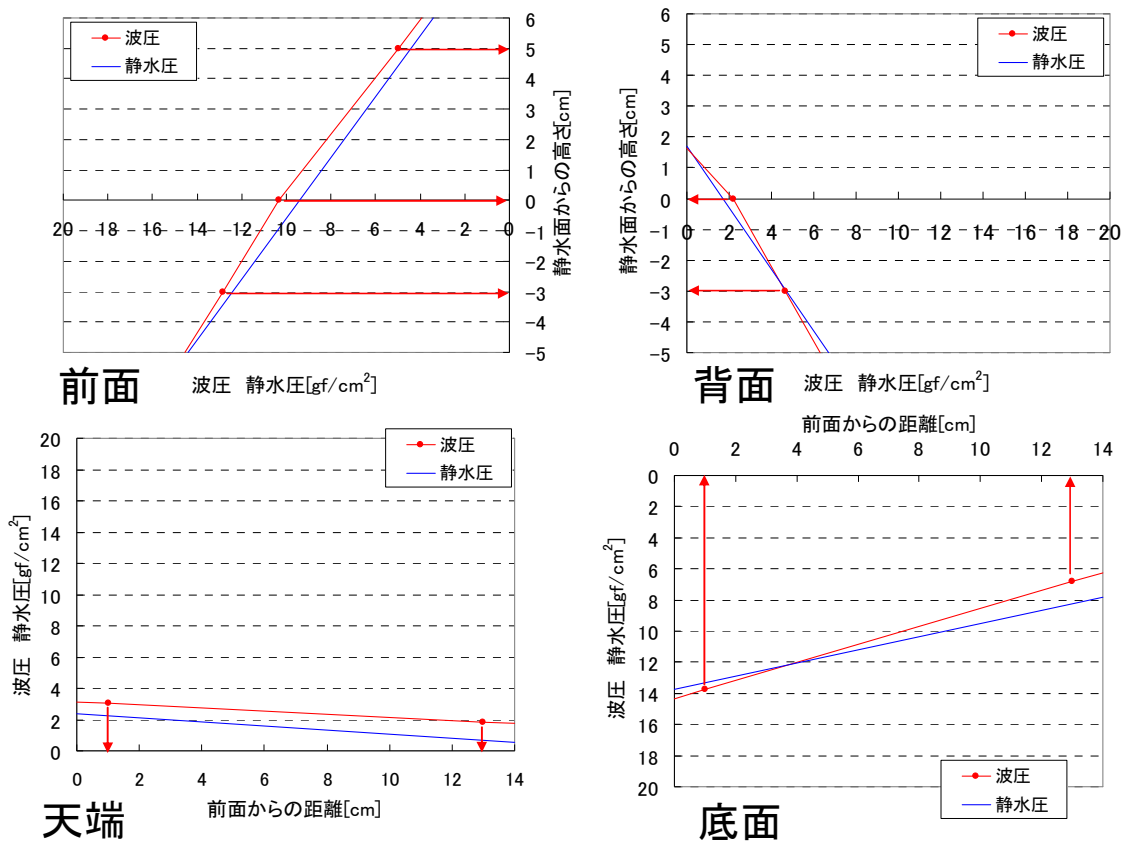


図 2.1.14 波圧分布（長周期波押し初動 40s）

3) 波圧算定式（水工研式）の検証

図 2.1.15 に、越流時における防波堤に作用する波圧分布の概念図を示す。前面・背面については波圧係数（＝波圧／静水圧）の検討を行い、底面・天端については前面・背面波圧との関係について検証を行った。

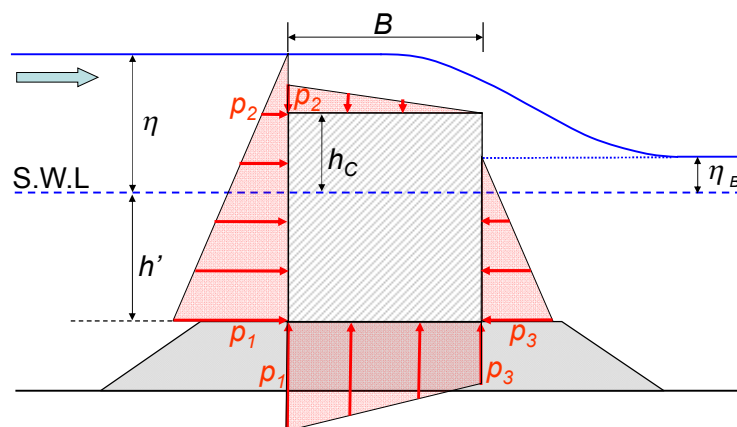


図 2.1.15 防波堤に作用する波圧分布図（越流時）

前面及び背面波圧について、静水圧との比較結果を図 2.1.16、図 2.1.17 に示す。回歸直線による波圧係数は、前面で 1.08 程度、背面で 0.93 程度となった。

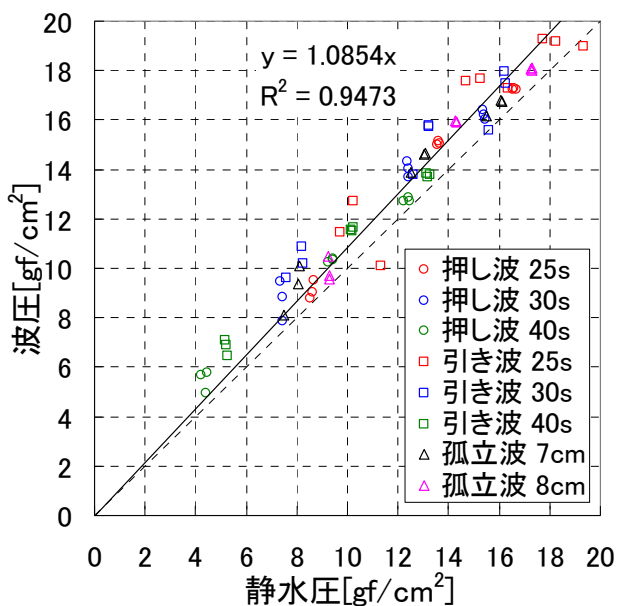


図 2.1.16 前面波圧と静水圧の比較

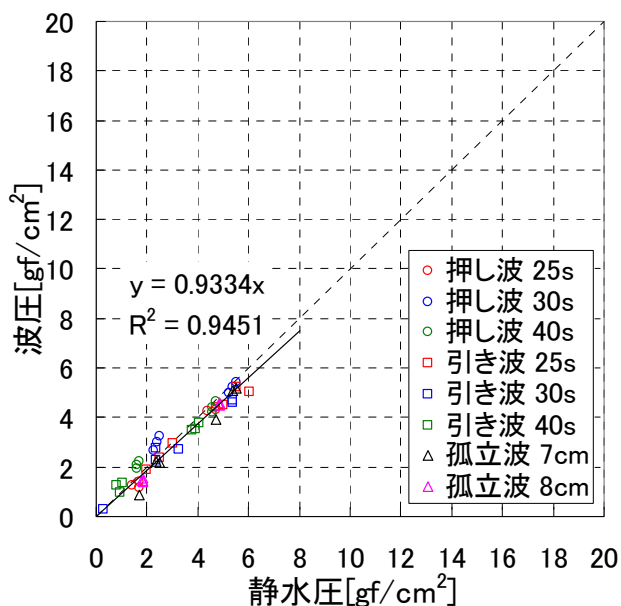


図 2.1.17 背面波圧と静水圧の比較

底面の波圧について、底面前端と前面下端の比較を図 2.1.18、底面後端と背面下端の比較を図 2.1.19 に示す。両者ともほぼ傾き 1 の直線上となることから、底面の波圧は前面および背面下端の波圧とほぼ等しいことが確認された。

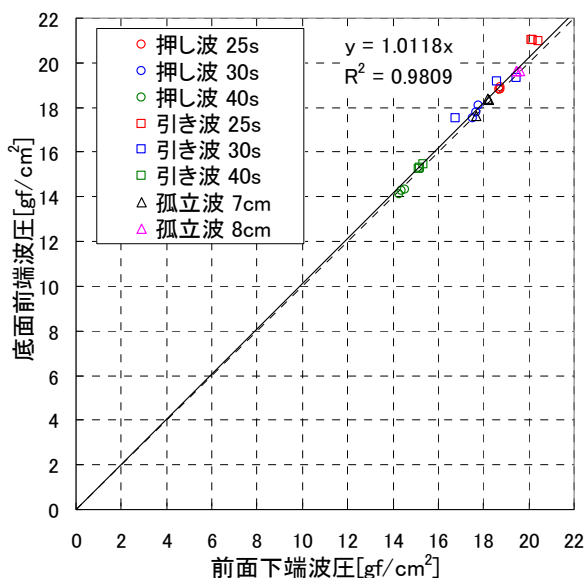


図 2.1.18 底面前端と前面下端の比較

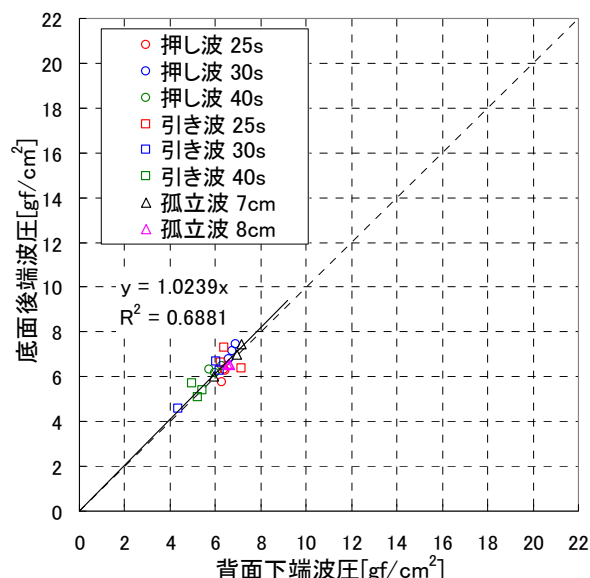


図 2.1.19 底面後端と背面下端の比較

天端前端と前面上端の波圧の比較を図 2.1.20 に示す。天端前端の波圧は前面上端よりも小さくなっており、両者が等しいとは言えない。

天端波圧と天端上の水位による静水圧との比較結果を図 2.1.21、図 2.1.22 に示す。ややばらつきがあるものの、天端の波圧は静水圧に近づいている。

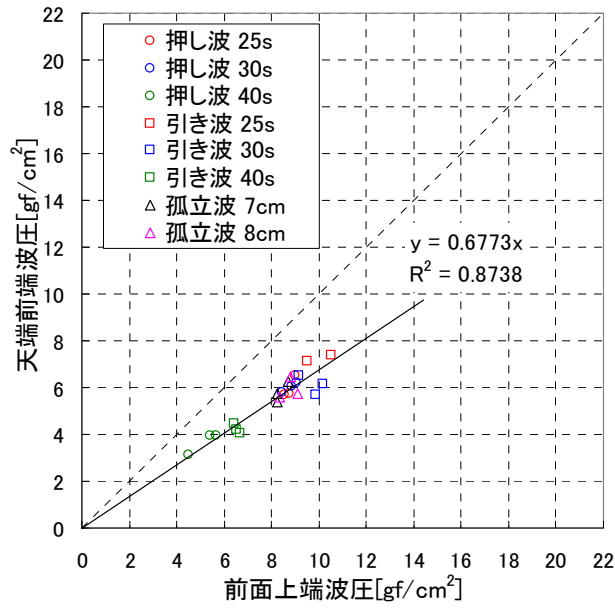


図 2.1.20 天端前端と前面上端の比較 (p₂)

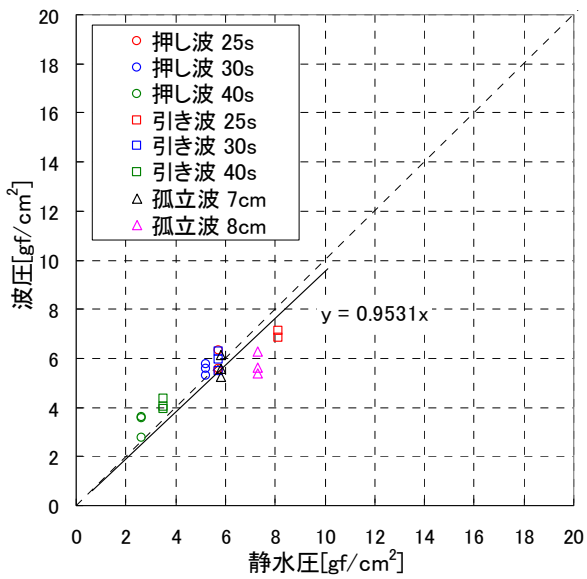


図 2.1.21 天端前端波圧と静水圧の比較

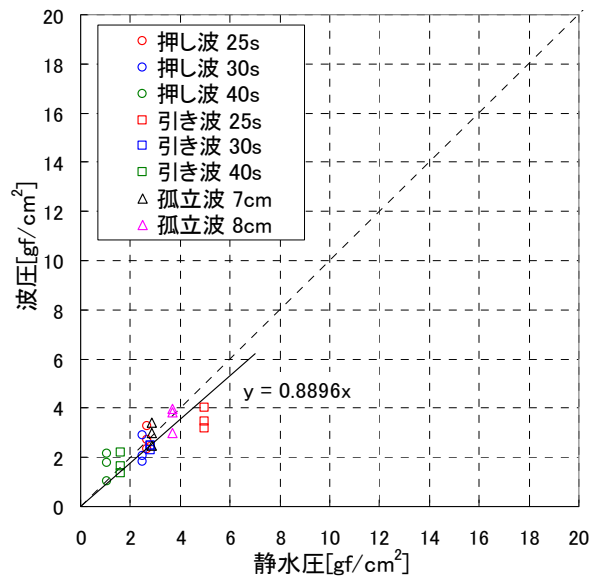


図 2.1.22 天端後端波圧と静水圧の比較

2. 2 パラペット付防波堤に作用する津波外力の検証

(1) 実験施設と実験模型

実験施設は、水産工学研究所の大型造波水路（幅 1.0m×深さ 2.0m×長さ 100m）を使用した。模型縮尺は 1/81 で、海底勾配は 1/10 とした。

防波堤模型はケーソン式混成堤で、上部パラペットは代表的な形状をモデル化した（図 2.2.1）。防波堤諸元を以下に示す。

- ・堤体高：11cm（現地 9m）
- ・堤体幅：14cm（現地 11m）
- ・設置水深：9cm（現地 7.3m）
- ・マウンド上水深：5cm（現地 4.1m）
- ・静水面上の天端高（パラペット含む）6cm（現地 4.9m）
- ・パラペット形状 高さ：2.6cm（現地 2.1m）、天端幅：4.5cm（現地 3.6m）
背面法勾配：1:0.5

上部パラペット

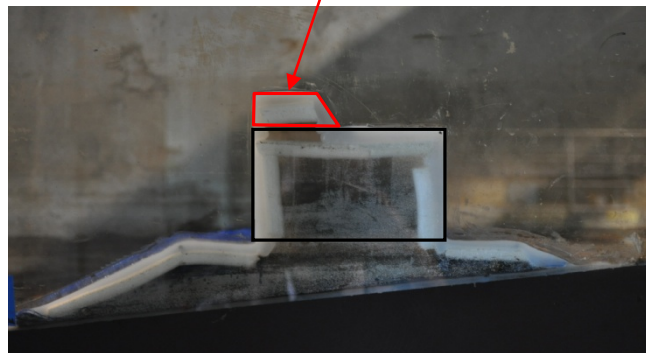


図 2.2.1 パラペット付断面模型設置状況

(2) 計測項目

計測項目を以下に示す（表 2.1.1 参照）。

- ・圧力（半導体型動歪み式波圧計）
- ・水位（容量式波高計）
- ・流速（プロペラ式流速計）
- ・越流状況（VTR 撮影）

(3) 実験方法

津波諸元は、長周期波の押し初動を標準とし、長周期波の引き初動、および孤立波についても参考として実験を行った（表 2.1.2 参照）。

片周期：12.5～20s（現地 113s～180s）

沖波高：5～8cm（現地 4.0～6.5m）

作用津波波力は、波圧計を前面 3 箇所、背面 3 箇所および天端 3 箇所（パラペット上、パラペット背面、天端後端）の計 9 箇所に設置し計測した（図 2.2.2）。

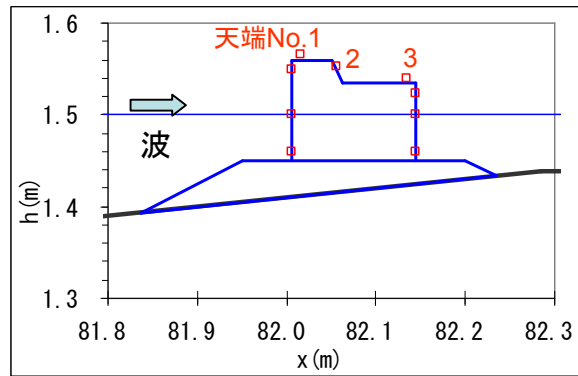


図 2.2.2 波圧計測位置

(4) 実験結果

静水圧と波圧の関係について、実験結果を図 2.2.4～図 2.2.8 に示す。尚、前面の静水圧は前面水位による静水圧であり、背面の静水圧は港内側の安定となった水域の水位による静水圧とした。また天端の静水圧は、撮影画像から読み取った天端上の水位による静水圧である。

前面および背面の波圧については、パラペット無しの場合とほぼ同じ傾向であり、前面は静水圧から静水圧の 1.1 倍程度、背面は静水圧より低い傾向となっている。

天端の波圧については、位置による違いが見られる。パラペット上（天端 No.1）では静水圧より低いが、パラペット背面（天端 No.2）では静水圧並となり、後端（天端 No.3）では静水圧よりやや高くなる。天端全体で見ると概ね静水圧となっていると考えられる。

水産庁「平成 23 年東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方」²⁾において、天端面に作用する津波波力については以下の記載がある。「堤体上面に作用する水圧 (p_2 及び p_4 からなる台形分布) は、上図では堤体の前面から背面において変化する水位を考慮した形として示しているが、津波伝播シミュレーションのメッシュサイズと構造物の寸法から考えて p_2 及び p_4 を精度よく算出することが難しいと判断される場合は、防波堤上の平均的な水位による一様分布として扱ってよいものとする。」

実験結果より、パラペット付断面の場合についても、天端の波圧は天端上の平均的な水位による一様分布として扱って良いものと考えられる。

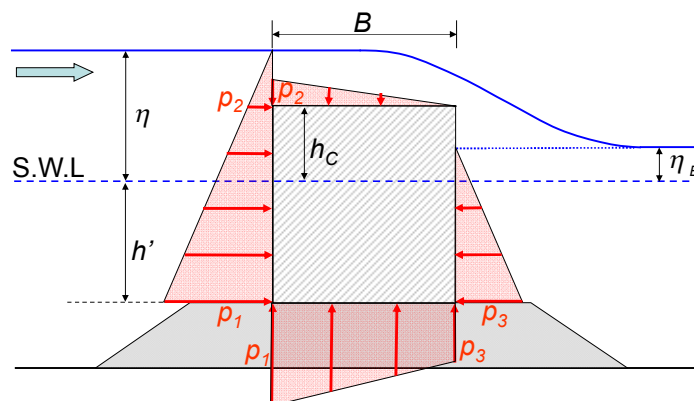


図 2.2.3 防波堤に作用する波圧分布図（越流時）

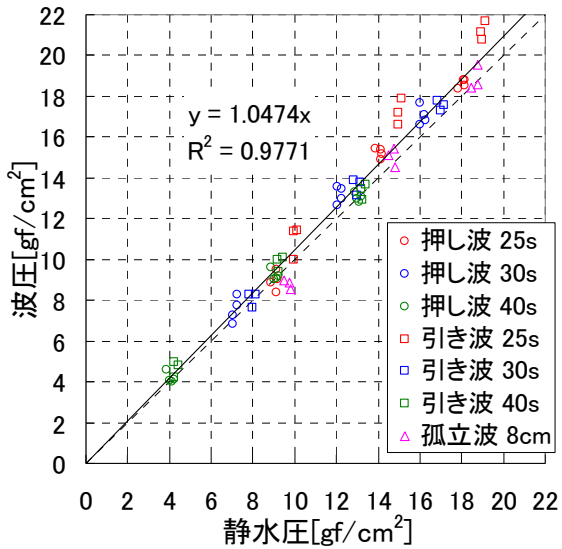


図 2.2.4 前面波圧と静水圧の比較

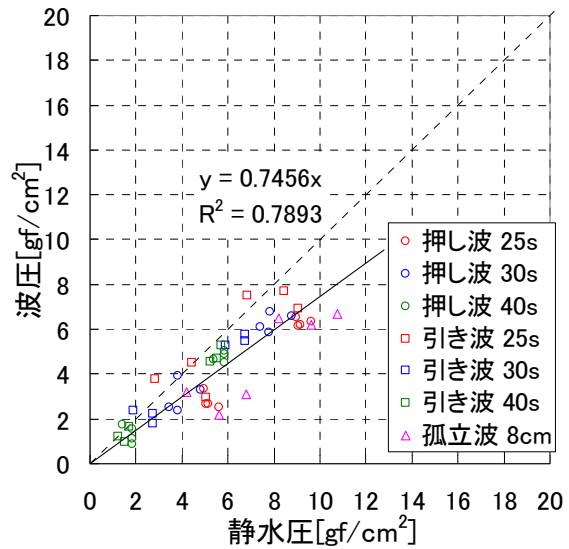


図 2.2.5 背面波圧と静水圧の比較

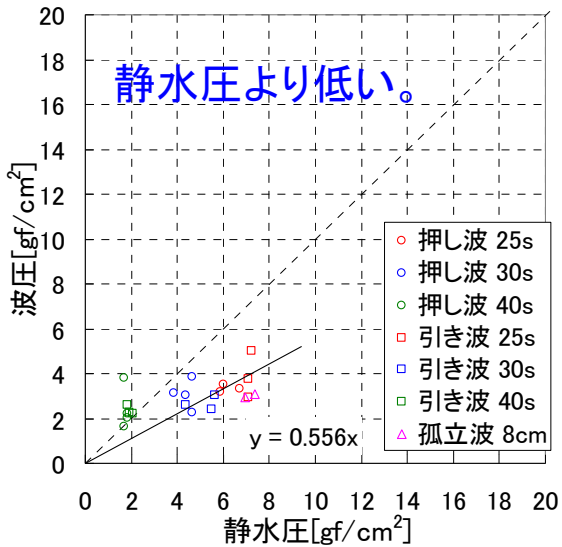


図 2.2.6 天端波圧と静水圧の比較
位置：天端 No. 1 (パラペット上)

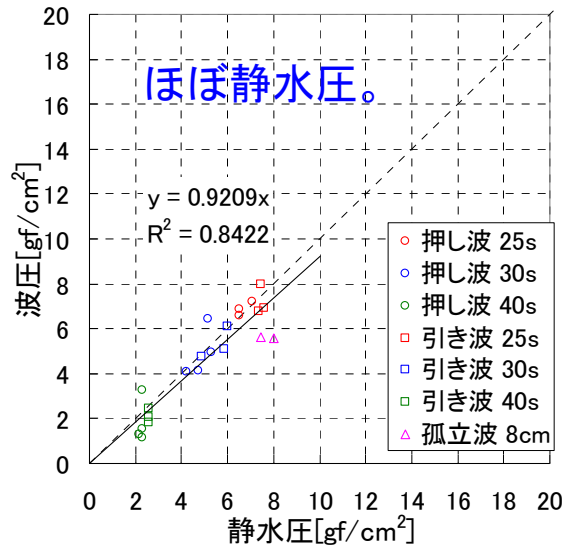


図 2.2.7 天端波圧と静水圧の比較
位置：天端 No. 2 (パラペット背面)

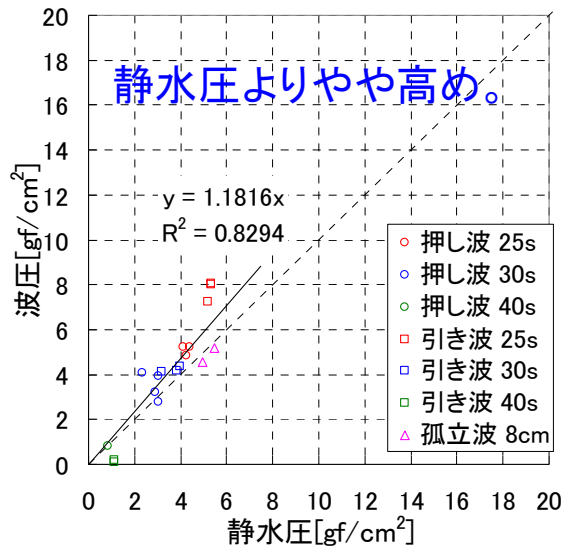


図 2.2.8 天端波圧と静水圧の比較 位置：天端 No. 3 (後端)

2. 3 消波工付、及び引き波時における影響の検討

消波工付防波堤や引き波時の条件下で断面実験を行い、津波波力式の適用性を検討した。

(1) 実験施設と実験模型

1) 実験施設 (図 2.3.1 参照)

- ・大型造波水路 (幅 1.0m×深さ 2.0m×長さ 100m)
- ・海底勾配: 1/30

2) 実験模型 (図 2.3.2 参照)

- ・模型縮尺: 1/50

防波堤模型はケーソン式混成堤とした。模型諸元を以下に示す。

- ・堤体高: 11cm (現地 9m)
- ・堤体幅: 14cm (現地 11m)
- ・設置水深: 9cm (現地 7.3m)
- ・マウンド上水深: 5cm (現地 4.1m)
- ・静水面上の天端高: 6cm (現地 4.9m)
- ・消波工模型: 質量約 60g (現地 30t 相当)、天端上段 2 個並、斜面勾配 1:4/3

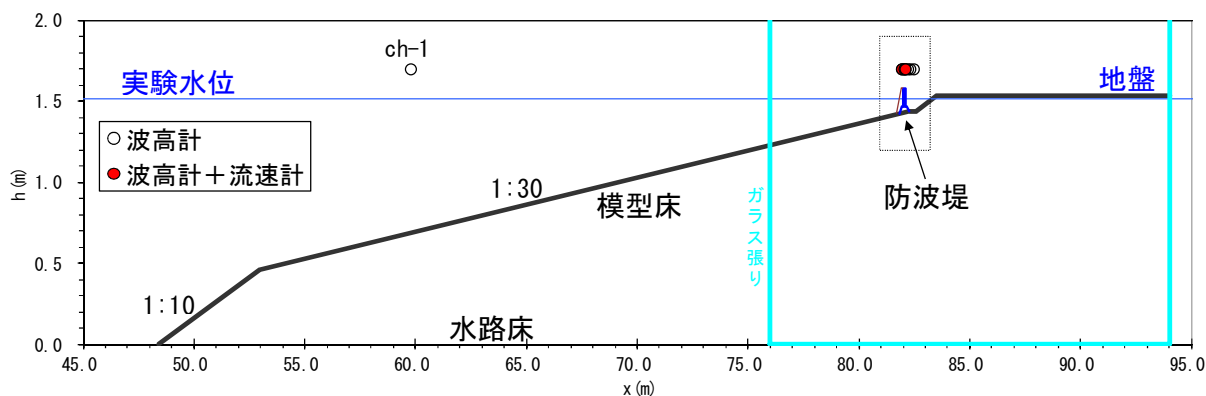


図 2.3.1 断面実験模型概要



図 2.3.2 消波工付防波堤模型

(2) 計測項目

計測項目を以下に示す (表 2.1.1 参照)。

- ・圧力 (半導体型動歪み式波圧計)

- ・ 水位（容量式波高計）
- ・ 流速（プロペラ式流速計）
- ・ 越流状況（VTR 撮影）

（3）実験方法

津波諸元は、長周期波の押し初動を標準とし、長周期波の引き初動、および孤立波についても参考として実験を行った（表 2.1.2 参照）。

片周期：12.5～20s（現地 113s～180s）

沖波高：5～8cm（現地 4.0～6.5m）

作用津波波力は、波圧計を前面 3 箇所、背面 3 箇所、天端 2 箇所および底面 2 箇所の計 10 箇所に設置し計測した（図 2.3.3）。

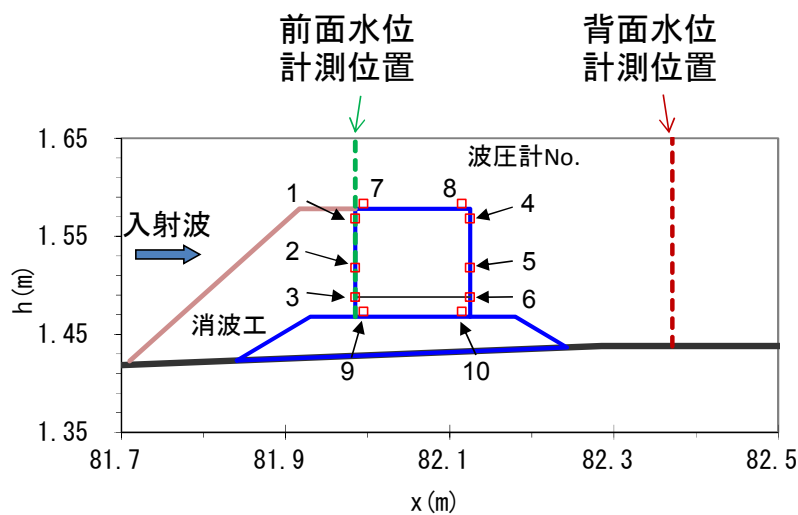


図 2.3.3 波圧計設置位置

（4）実験結果

1) 消波工による影響の検討

静水圧と波圧の関係について、消波工有りの場合の実験結果を図 2.3.4、図 2.3.5 に、参考として消波工無しの場合を図 2.3.6、図 2.3.7 示す。なお波圧は、水平波力（前面波力と背面波力の差）最大時の同時波圧で整理を行った。消波工無しの場合の静水圧補正係数は、前面で 1.1、背面で 0.9 であったが、消波工有りの場合についても大きな相違はなく、消波工無しの場合よりもやや静水圧に近い傾向となっている。

消波工有無による流線の比較を行った。染料を入れた画像の比較を図 2.3.8 に示す。背面側では大きな差異はないが、前面近傍で水面形に差異があり、消波工有りの方が消波工無しよりもやや水位が低くなっていることが分かる。

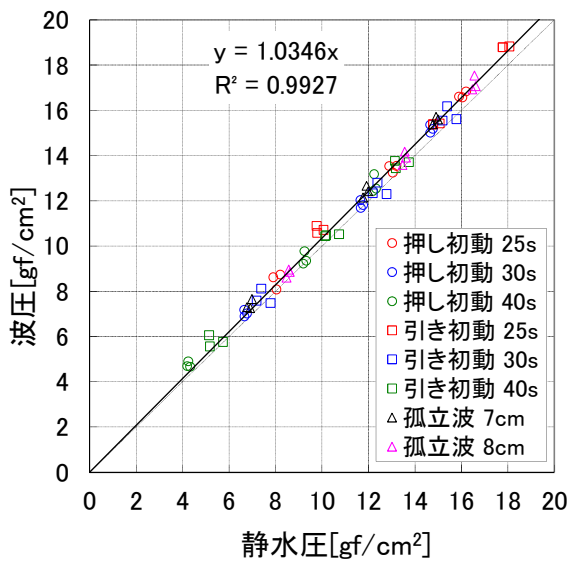


図 2.3.4 消波工有り (前面波圧)

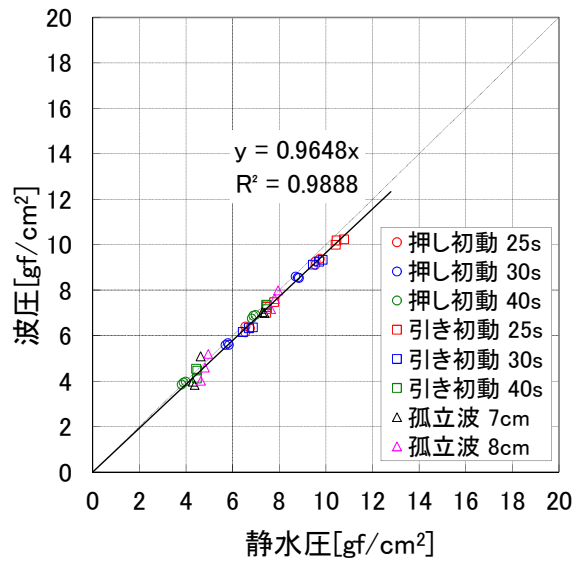


図 2.3.5 消波工有り (背面波圧)

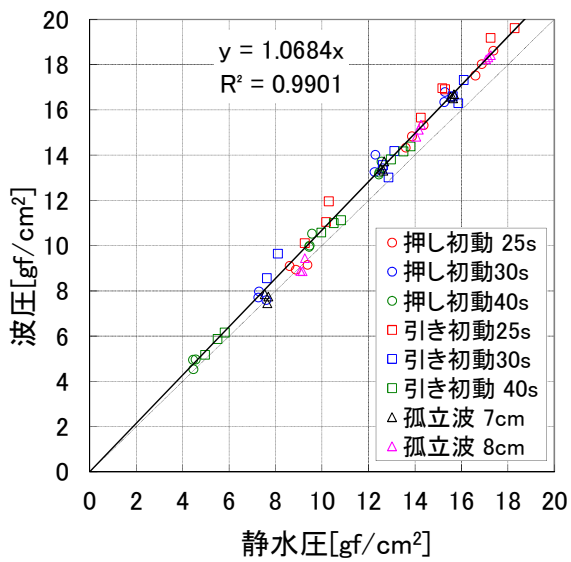


図 2.3.6 消波工無し (前面波圧)

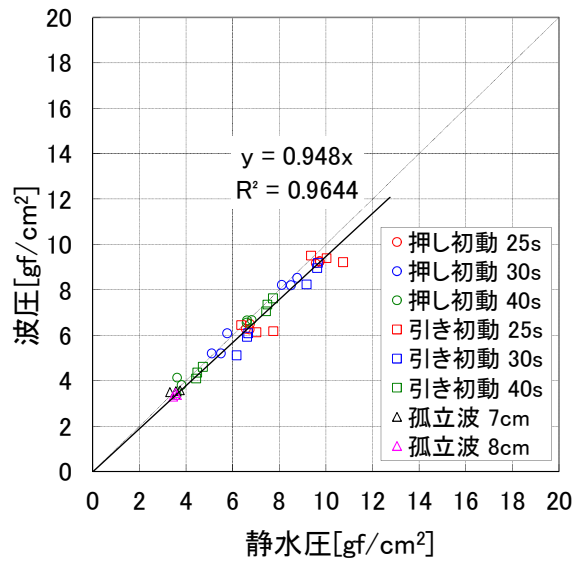
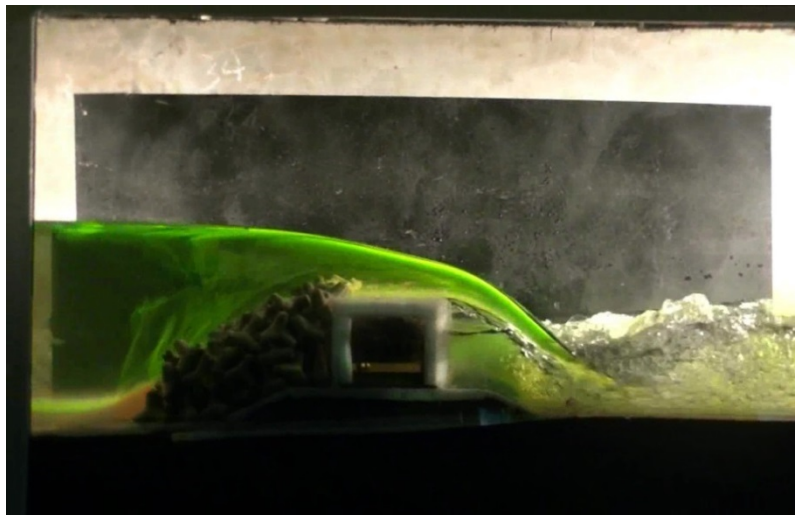


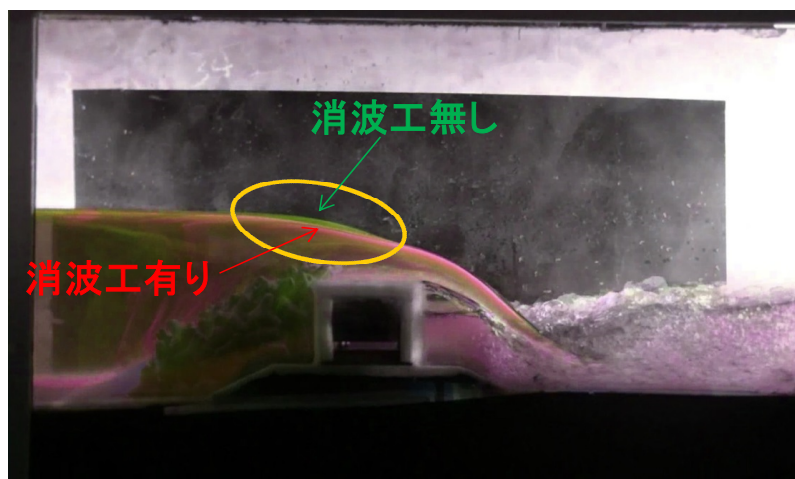
図 2.3.7 消波工無し (背面波圧)



(a)消波工無し



(b)消波工有り



(c)消波工無し（緑）と消波工有り（赤）の合成

図 2.3.8 消波工有無による比較（押し初動 周期 25s、造波から 27s 後）

2) 引き波時の影響の検討

陸側に衝立を設置し、港内側からの戻り流れを再現することにより、引き波時の実験を行った。図 2.3.9、図 2.3.10 に模型概要と実験状況を示す。衝立の位置は汀線から 0cm, 30cm, 60cm の 3 ケースである。

静水圧と波圧の関係について、引き波時の消波工無しの結果を図 2.3.11、図 2.3.12 示す。港内側は静水圧から静水圧の 1.1 倍の範囲内となっている。港外側はややばらつきがあるが、静水圧から静水圧の 0.9 倍程度となっている。以上から、引き波時の場合は流れの上流側を前面として水工研式を適用し、波圧を算定して概ね問題ないことが確認された。

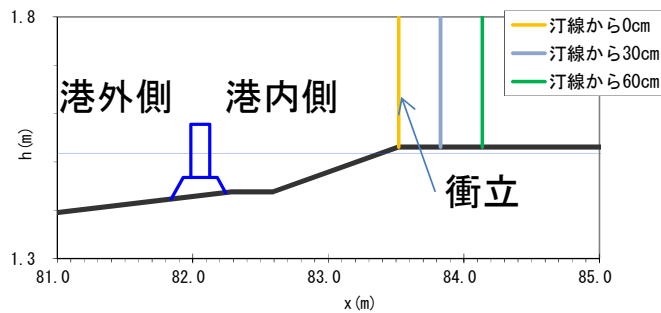


図 2.3.9 引き波時模型概要



図 2.3.10 実験状況（押し初動 25s、衝立位置：汀線から 0cm）

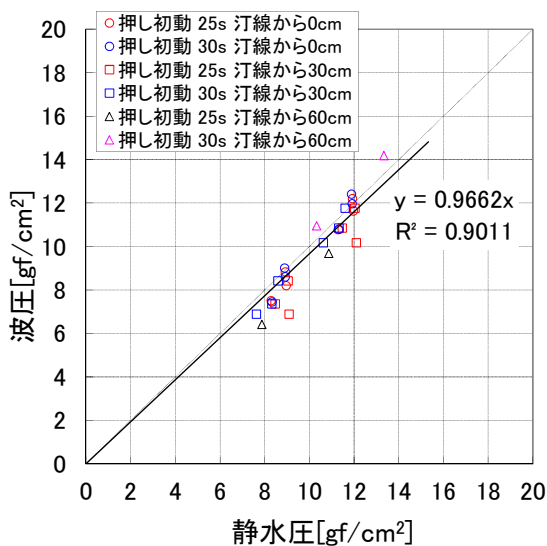


図 2.3.11 引き波時（港外側）

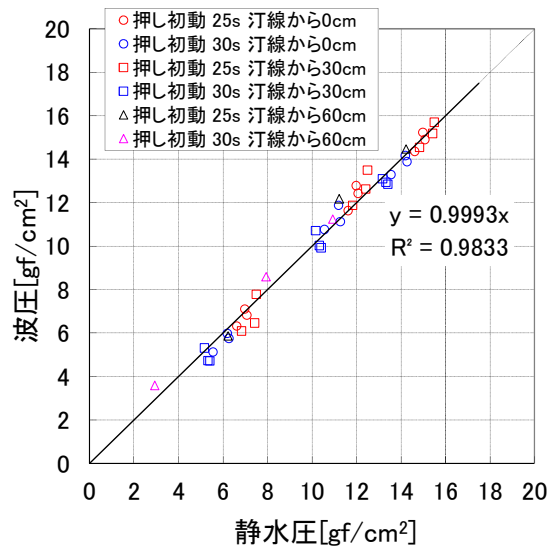


図 2.3.12 引き波時（港内側）

3. 直立消波式岸壁の照査方法の検討

3. 1 断面実験による検討

(1) 実験施設と実験模型

実験施設は、水産工学研究所の大型造波水路（幅 1.0m×深さ 2.0m×長さ 100m）を使用した（図 2.1.1 参照）。

模型縮尺は 1/50 とした。海底床模型を図 3.1.1 に示す。海底勾配は 1/10 とした。

直立消波式岸壁の模型は上部工、直立消波ブロック 3 段、及び底板により構成し、代表的な形状をモデル化した（図 3.1.2）。模型諸元を以下に示す。

上部工：厚さ 2cm（現地 1m）、幅 9cm（現地 4.5m）

直立消波ブロック：高さ 3.4cm（現地 1.7m）、遊水部 7.4cm（現地 3.7m）

底板：厚さ 0.8cm（現地 0.4m）

設置水深：9.4cm（現地 4.7m、D.L-4.0m）

静水面上の天端高：3.6cm（現地 1.8m、G.L=D.L+2.5m）

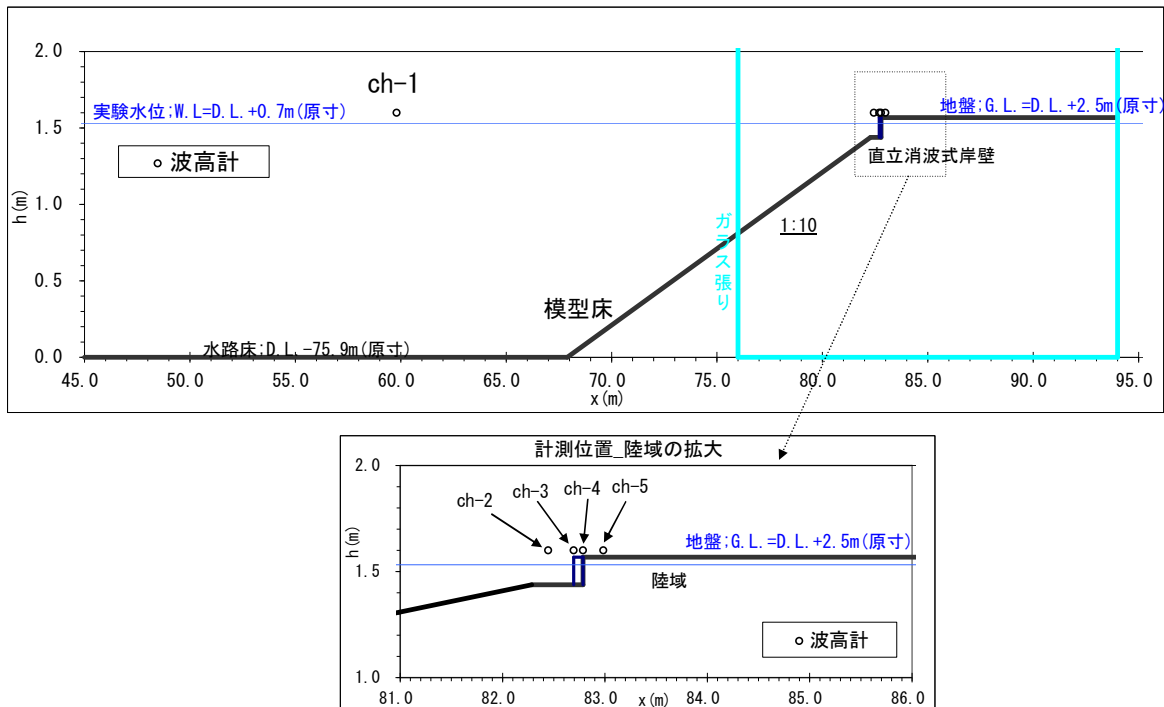


図 3.1.1 海底床模型と計測位置概要

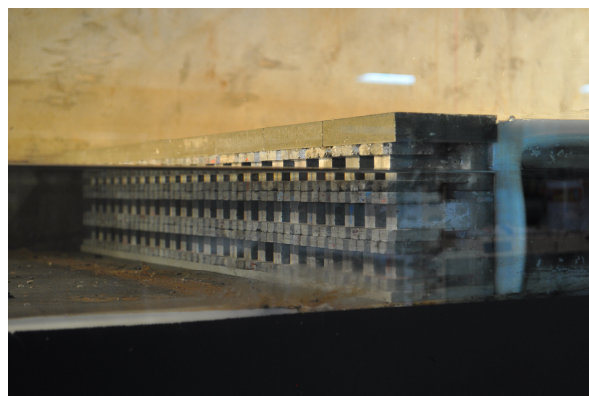


図 3.1.2 直立消波式岸壁模型

(2) 計測項目

計測項目を以下に示す（表 2.1.1 参照）。

- ・ 圧力（半導体型動歪み式波圧計）
- ・ 水位（容量式波高計）
- ・ 流速（プロペラ式流速計）
- ・ 越流状況（VTR 撮影）

(3) 実験方法

津波諸元は、長周期波の押し初動を標準とし、長周期波の引き初動、および孤立波についても参考として実験を行った（表 2.1.2 参照）。

片周期：12.5～20s（現地 113s～180s）

沖波高：5～8cm（現地 4.0～6.5m）

津波波力の計測時には、上部工及び直立消波ブロックが動かないよう固定して計測を行った。計測機器設置位置を図 3.1.3 に示す。波圧計は上部工の上面 3 箇所、下面 3 箇所、及び前面 1 箇所の計 7 箇所に設置し、作用津波力及び揚力を計測した。また、流速計は上部工上の高さ 2cm（現地 1m）の 3 箇所（前、中央、後）に設置した。

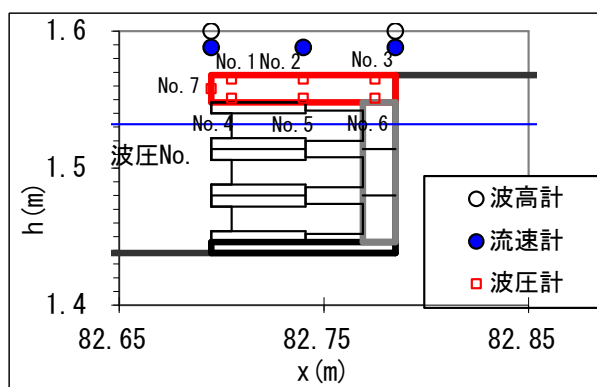


図 3.1.3 計測機器設置位置

(4) 実験結果

1) 波圧の時間波形、圧力分布

波圧の時間波形の例を図 3.1.4、圧力分布の例を図 3.1.5 に示す。

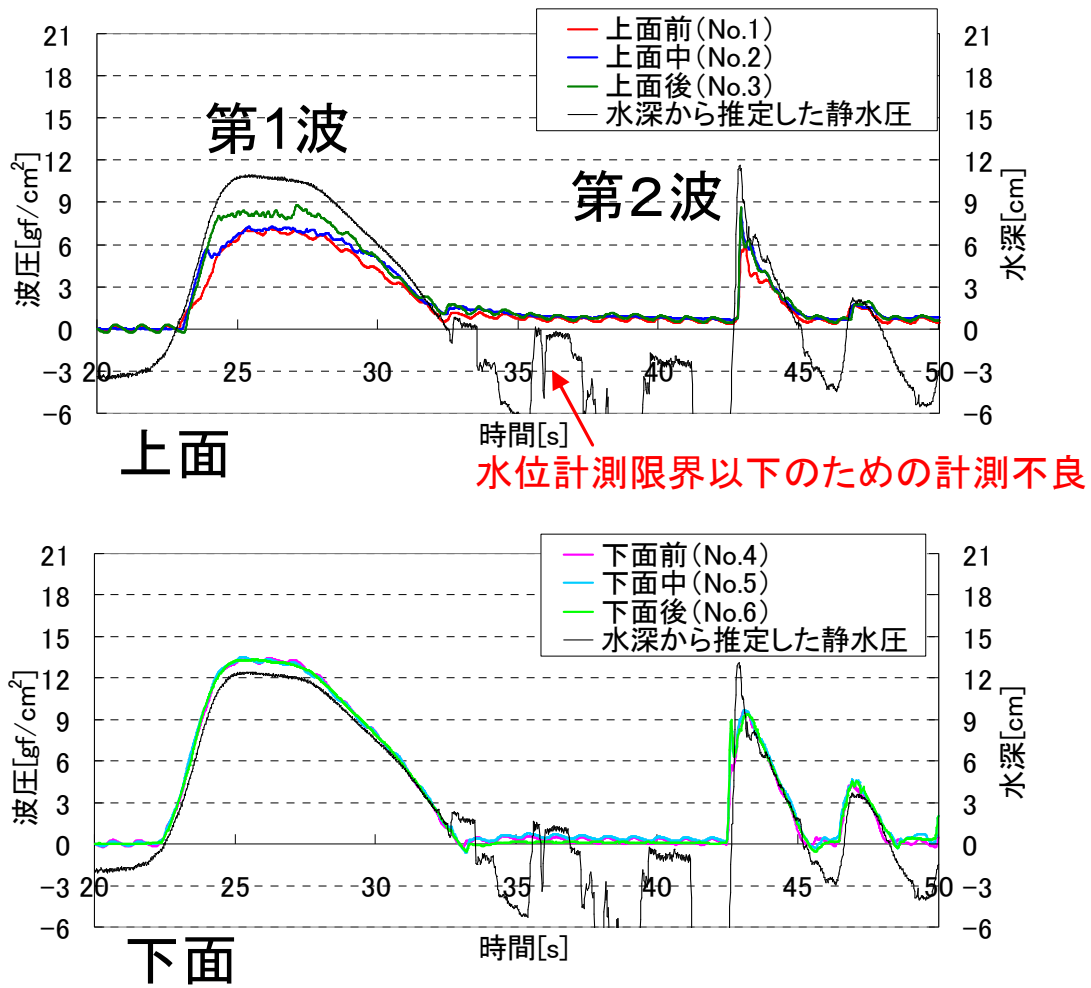


図 3.1.4 波圧の時間波形 (押し初動、周期 25s)

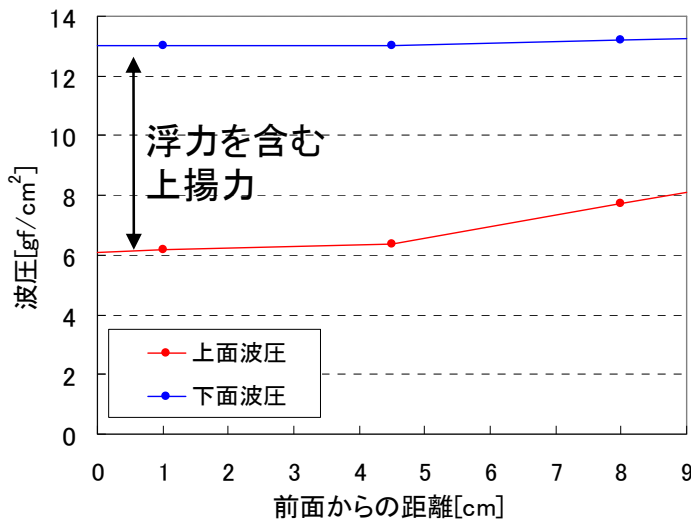


図 3.1.5 上揚力最大時の圧力分布 (押し初動、周期 25s)

2) 波圧と静水圧の比較

揚力最大時について、波圧と静水圧の比較結果を図 3.1.6、図 3.1.7 に示す。ここで、静水圧は前面の浸水深 h_1 から推定した静水圧である。(赤：周期 25s、青：周期 30s、緑：周期 40s)

上面は静水圧より低く、上流側ほど低い傾向となっている。下面は静水圧よりやや高くなっている。また前面は静水圧から 1.1 倍の範囲内となっている。

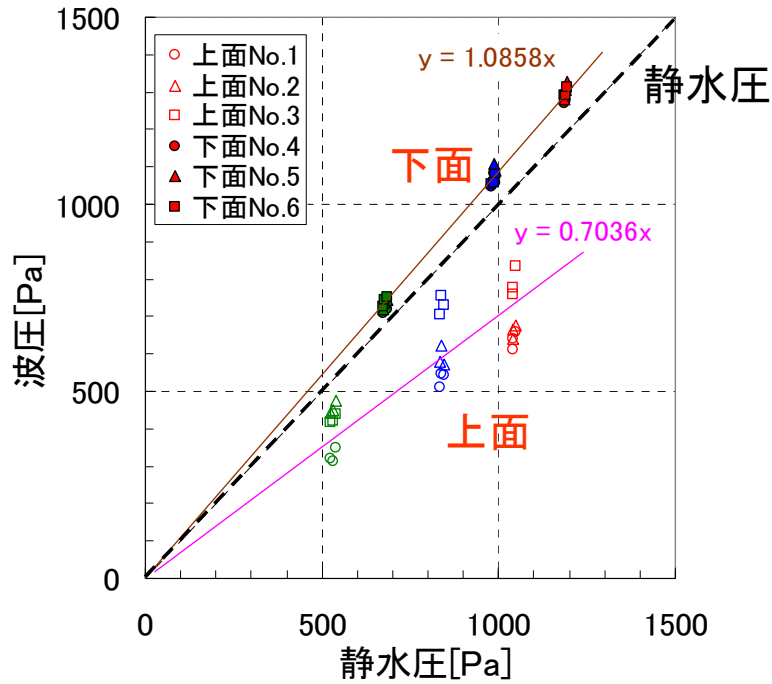


図 3.1.6 波圧と静水圧の比較 (上面・下面)

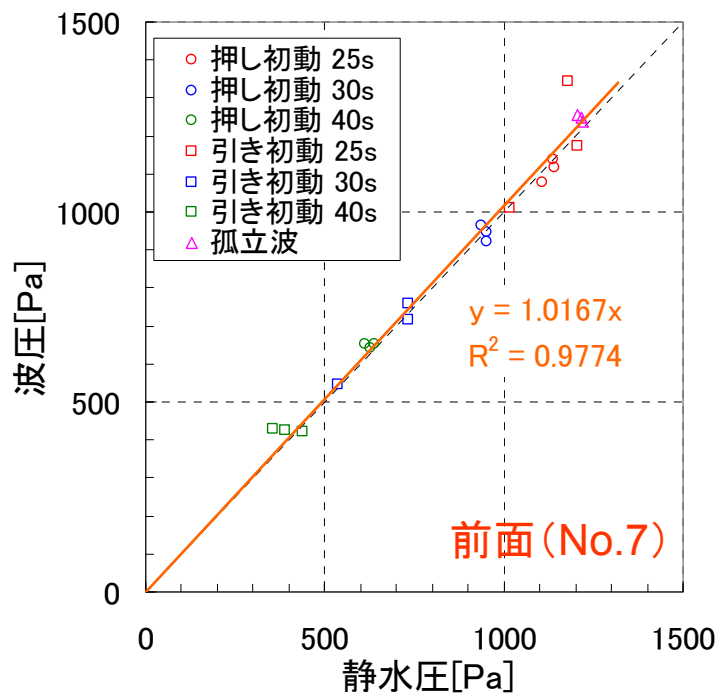


図 3.1.7 波圧と静水圧の比較 (前面)

3) 揚力係数の評価 (断面実験・数値計算)

実験結果に加え、数値波動水路 (CADMAS-SURF) による計算結果も合わせて揚力係数の評価を行った。数値計算で検討した断面形状は以下の4種である。

- 形状1 : 遊水部 4.0m、上部工厚 1.0m
- 形状2 : 遊水部 6.0m、上部工厚 1.0m
- 形状3 : 遊水部 4.0m、上部工厚 0.5m
- 実験と同一断面 (押し波初動)

揚力係数 C_L の算出については、上部工の上下面に作用する圧力の差 (上向きに作用する圧力) から、浮力を差し引いたものを揚力 p_u として求め、以下の式より算出した。

$$B \cdot p_u = B \cdot C_L \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (B: \text{上部工の幅}, U: \text{流速}, \rho: \text{水の密度})$$

代表流速として、上部工断面平均流速を使用した場合の揚力係数を図 3.1.8 に示す。揚力係数は 1.3~2.4 に分布し、実験と計算の整合性も高い。

また、代表流速として、 $\sqrt{gh_1}$ を使用した場合の揚力係数を図 3.1.9 に示す。これは水産庁の基本的な考え方²⁾で示された水位表示の評価式に相当するものである。揚力係数は 0.6~1.2 に分布している。

$$B \cdot C_L \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 = B \cdot C_L \cdot \frac{1}{2} \rho g \cdot h_1 = B \cdot C_L' \cdot \rho g \cdot \Delta \eta$$

これらの実験結果は、ソリトン分裂波のような段波状の津波は対象としていないため留意が必要である。

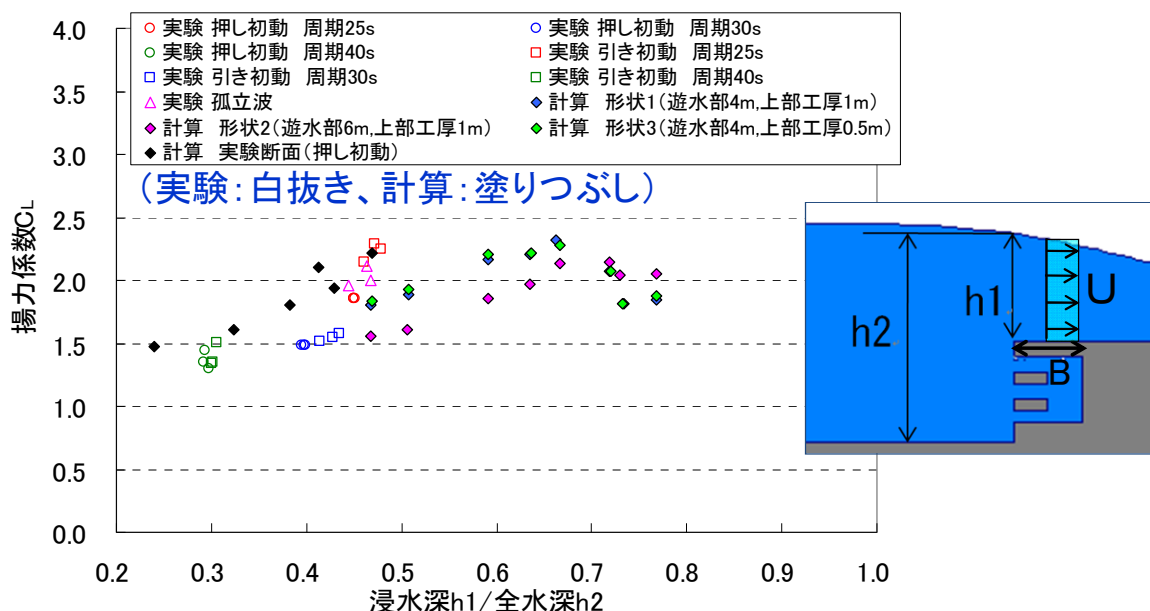


図 3.1.8 揚力係数 (代表流速 : 上部工断面平均流速)

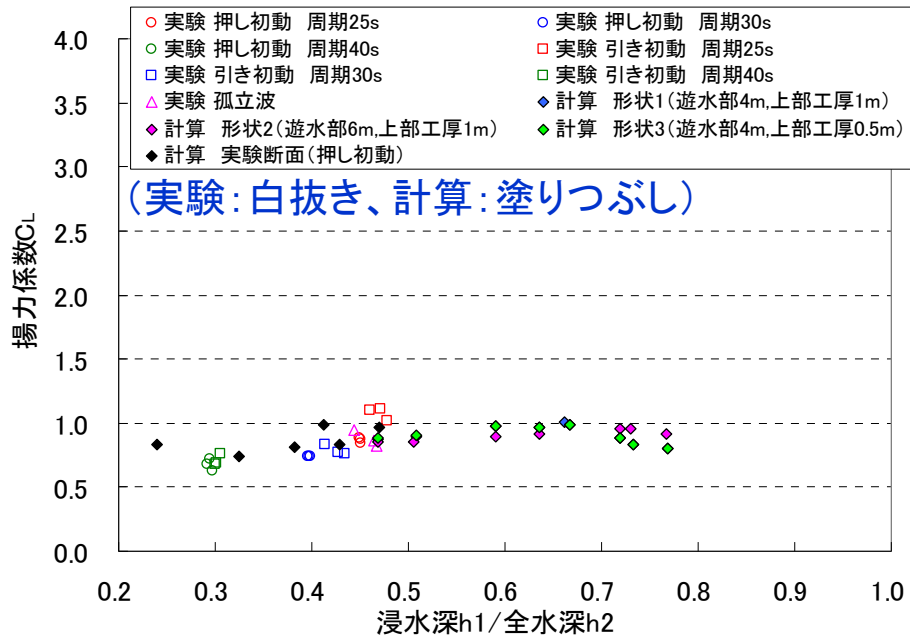


図 3.1.9 揚力係数 (代表流速 : $\sqrt{gh_1}$)

4) 直立消波式岸壁の移動実験

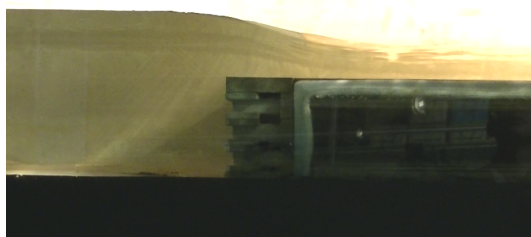
上部工及び直立消波ブロックの被災の様子を確認するため、直立消波式岸壁の模型を固定せずに移動実験を行った (図 3.1.10)。

上部工と上部ブロックを一体化した場合、浸水深 8.5cm (現地 4.3m) では被災せず、浸水深 10.5cm (現地 5.3m) では上部工と上部ブロックが繋がったままめくれ上がり飛散した。

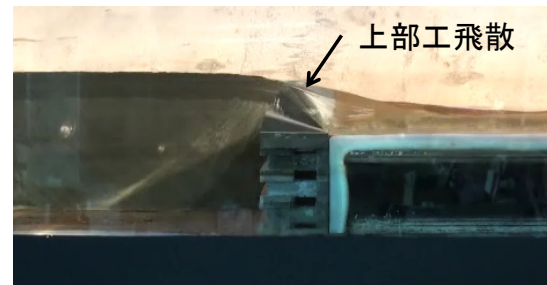
上部工と上部ブロックを一体化しない場合、浸水深 8.5cm (現地 4.3m) 及び 10.5cm (現地 5.3m) では上部工のみがめくれて被災したが、ブロックは被災しなかった。

【上部工と上部ブロックを一体化した場合】

【上部工と上部ブロックを一体化しない場合】



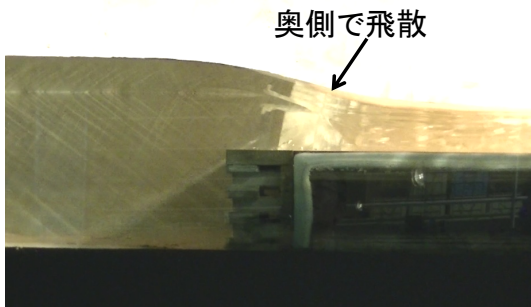
被災なし。



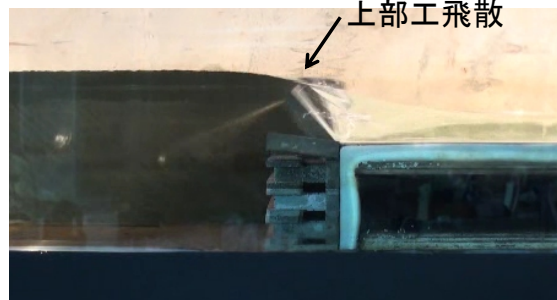
上部工飛散

浸水深8.5cm
(長周期波 周期30s)

上部工のみがめくれて飛散(10個中9個)。
ブロックは被災しない。



奥側で飛散



上部工飛散

上部工とブロックが繋がったまま
めくれ上がり飛散。

浸水深10.5cm
(長周期波 周期25s)

上部工のみがめくれて飛散(10個中10個)。
ブロックは被災しない。

図 3.1.10 直立消波式岸壁の移動実験

3. 2 平面実験による検討

平面実験により津波波向の影響を調査し、算定式の適用性を検討した。

1) 実験施設と実験模型

(a) 実験施設 (図 3.2.1 参照)

- ・平面水槽、多方向不規則波造波装置 (長さ 35m×幅 20m×深さ 0.8m)
- ・海底勾配 : 1/30

(b) 直立消波式岸壁模型 (図 3.2.2 参照)

- ・模型縮尺 : 1/50

直立消波式岸壁の模型は上部工、直立消波ブロック 3 段、及び底板により構成し、代表的な形状をモデル化した。模型諸元を以下に示す。

上部工 : 厚さ 2cm (現地 1m)、幅 9cm (現地 4.5m)

直立消波ブロック : 高さ 3.4cm (現地 1.7m)、遊水部 7.4cm (現地 3.7m)

底板 : 厚さ 0.8cm (現地 0.4m)

設置水深 : 9.4cm (現地 4.7m、D.L-4.0m)

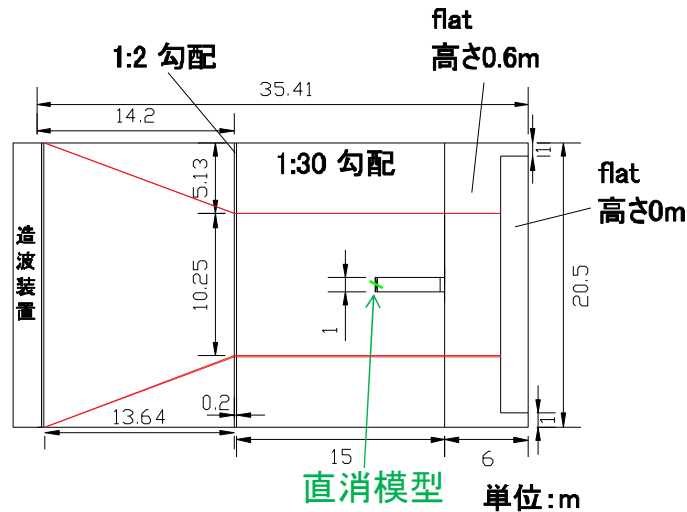


図 3.2.1 平面実験模型形状 (平面図)

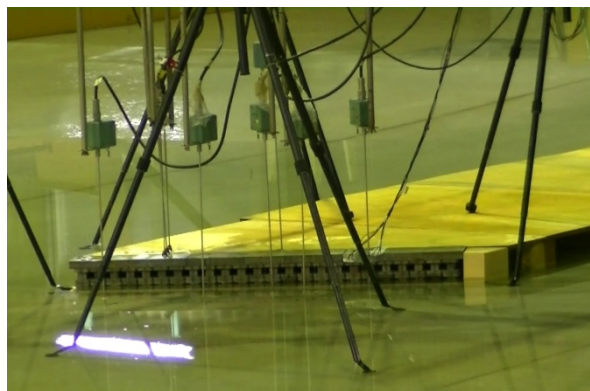


図 3.2.2 直消模型設置状況 (入射角 30°)

2) 計測項目

- ・水位 : 容量式波高計 (沖・岸壁前面)
- ・波圧 : 半導体型動歪み式波圧計
- ・流速 : プロペラ式流速計

計測機器設置位置を図 3.2.3 に示す。波圧計は上部工の上面 3 箇所、下面 3 箇所、及び前面 1 箇所の計 7 箇所に設置し、作用津波力及び揚力を計測した。また、流速計は上部工上の高さ 2cm (現地 1m) の 3 箇所 (前、中央、後) に設置した。

3位置の平均流速(高さ2cm、現地1m)

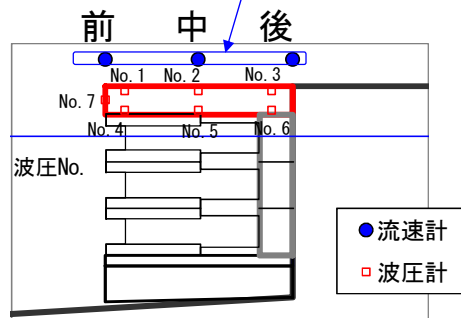


図 3.2.3 波圧・流速計測位置

3) 実験方法

(a) 津波諸元

- ・押し初動 片周期 2s, 3s, 4s (現地片周期 14s, 21s, 28s)
 浸水深 h_1 : 5~13cm (現地 2.5~6.5m)
 (浸水深 h_1 / 全水深 h_2 = 0.28~0.47)

(b) 入射角

岸壁模型を回転させて、入射角を変更した。
 入射角 : $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の 5 種類

4) 実験結果

図 3.2.4~図 3.2.6 揚力係数、揚力 (浮力除く) および断面平均流速と入射角の関係を示す。

揚力係数 C_L の算出については、上部工の上下面に作用する圧力の差 (上向きに作用する圧力) から、浮力を差し引いたものを揚力 p_u として求め、以下の式より算出した。

$$B \cdot p_u = B \cdot C_L \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (B: \text{上部工の幅}, U: \text{流速}, \rho: \text{水の密度})$$

入射角が大きくなるにつれて、全般的に揚力は小さくなり、平均流速は横ばいかやや大きくなる傾向がある。これらの値を使用して揚力係数として整理すると、揚力係数は入射角が大きいかほど小さくなる傾向となる。以上から、斜め入射の場合でも、直入射 (0°) で評価すれば安全側の設計となることが言える。

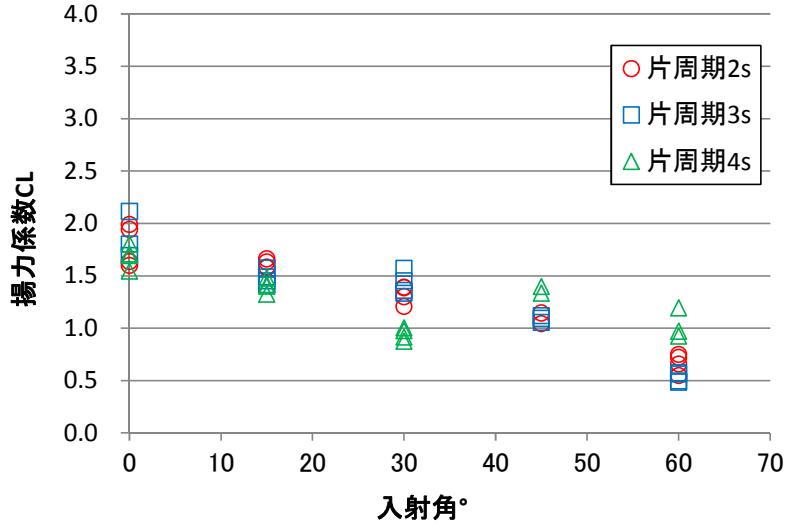


図 3.2.4 揚力係数と入射角の関係

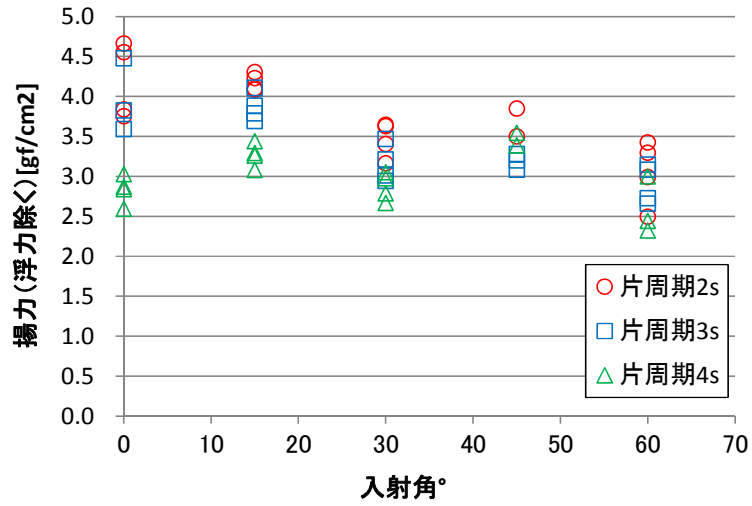


図 3.2.5 揚力（浮力除く）と入射角の関係

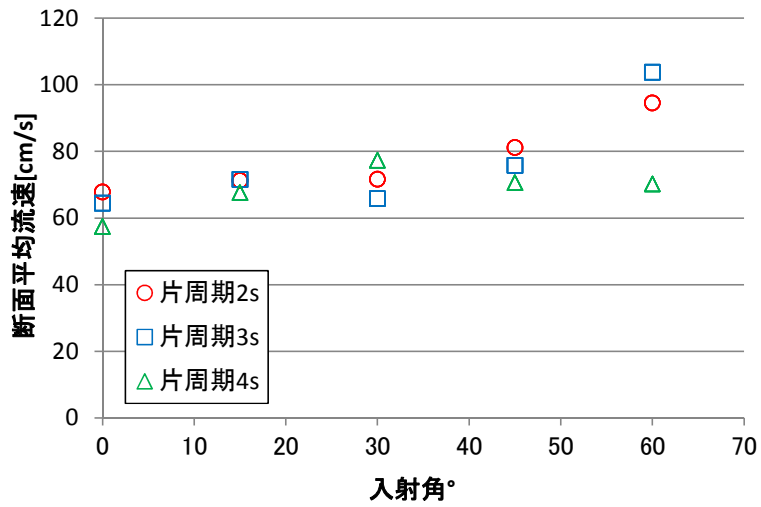


図 3.2.6 断面平均流速と入射角の関係

3. 3 数値波動水路による検討

(1) 検討概要

直立消波式岸壁の照査式においては、津波の流れが越流する場合に作用する鉛直力の算定式が示されている。ところが、その式に与える鉛直力の係数の与え方が不明確であるため、標準的な数値を定める必要がある。そこで、本検討では、数値波動水路を用いて幾つかの典型的な直立消波式岸壁の形状を作成し、鉛直力の係数を求めることとした。

(2) 検討条件

本検討では、解析モデルとして典型的な直立消波堤の規模（水深-4m,天端高 2.5m,遊水部 4m）を想定し、片振幅 5m として周期 10分,15分の2種類の余弦波を水深 120m から作用させた。その際、一定勾配(1/20)に 150m の泊地(-4m)が接続し端部に直立消波堤がある地形を想定した。

検討形状は次の3形状である。

- 形状1：遊水部 4.0m、上部工厚 1.0m
- 形状2：遊水部 6.0m、上部工厚 1.0m
- 形状3：遊水部 4.0m、上部工厚 0.5m

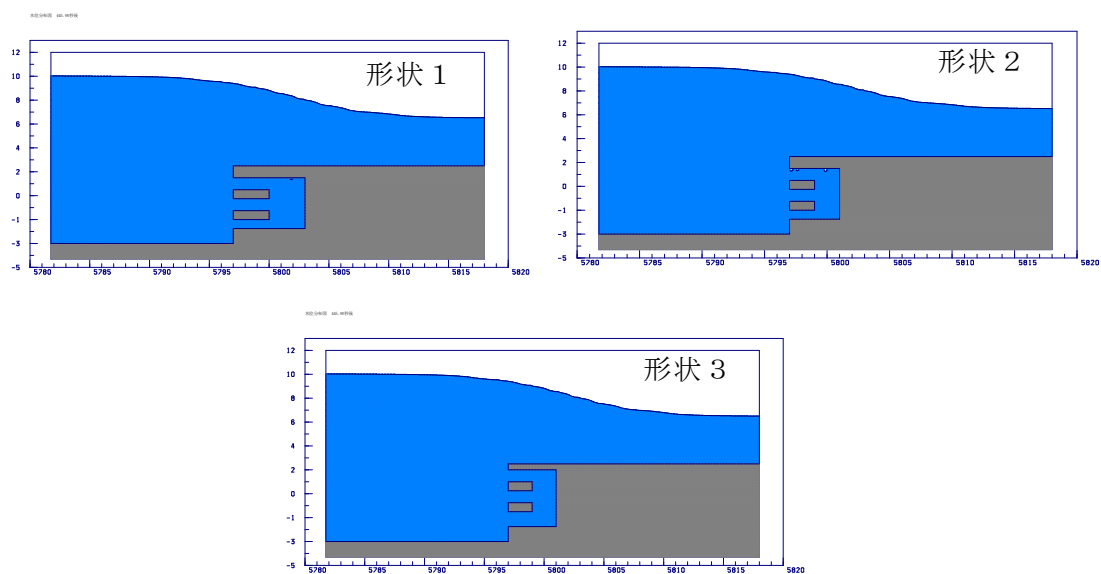


図 3.3.1 検討形状

(3) 結果の整理方法

解析結果の整理にあたっては、上部工の上下面に作用する圧力の差（上向きに作用する圧力）を求め、平均値と流速の関係を調べた。上向き作用する圧力と流速を水頭表示しその比率（浮力を引いた鉛直力の係数 C_L ）として整理した。

$$C_L = (\Delta P / \rho g) / (U_2 / 2g)$$

流速については、以下の 3 つの位置での平均流速を検討した。

- 上部工の上面範囲の平均流速
- 上部工先端での断面平均流速
- 前面 5 m 位置での断面平均流速

(4) 検討結果

検討結果は以下のとおりである。

- 鉛直力の係数は、岸壁の水深、天端高、堤体幅、直立消波ブロックの形状等によって微妙に変化するが、その差は概ね一定の範囲内に収まるものと考えられる。
- 前面水深-3.0m、天端高+3.0m、堤体幅 4.0~6.0m、上部工厚 0.5~1.0m という数値波動水路モデルを作成し、鉛直力の係数を試算した結果、上部工の上面範囲の平均流速に対する係数 C_L のまとまりがよく、最大 $C_L=2.4$ 程度となる。

図 3.3.2~図 3.3.4 に、各位置での平均流速を整理したものを示す。

1) 上部工の上面範囲の平均流速

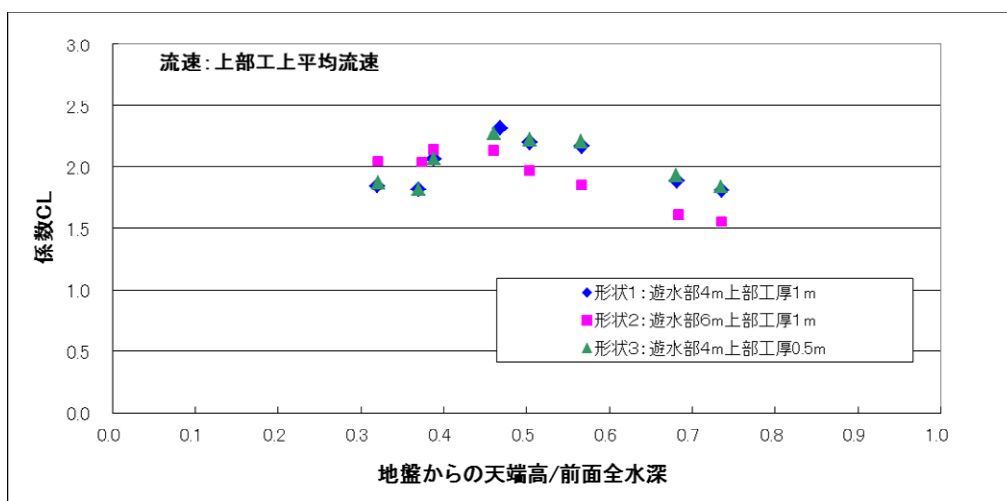
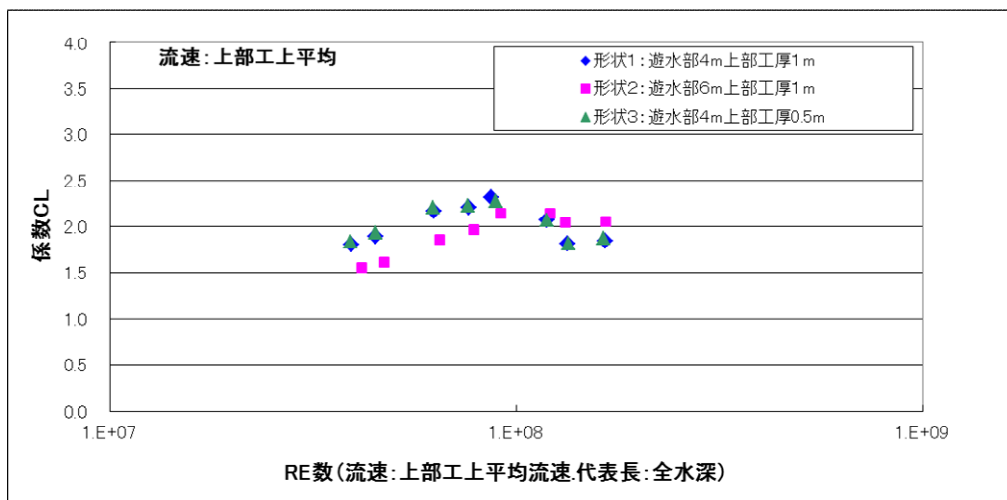
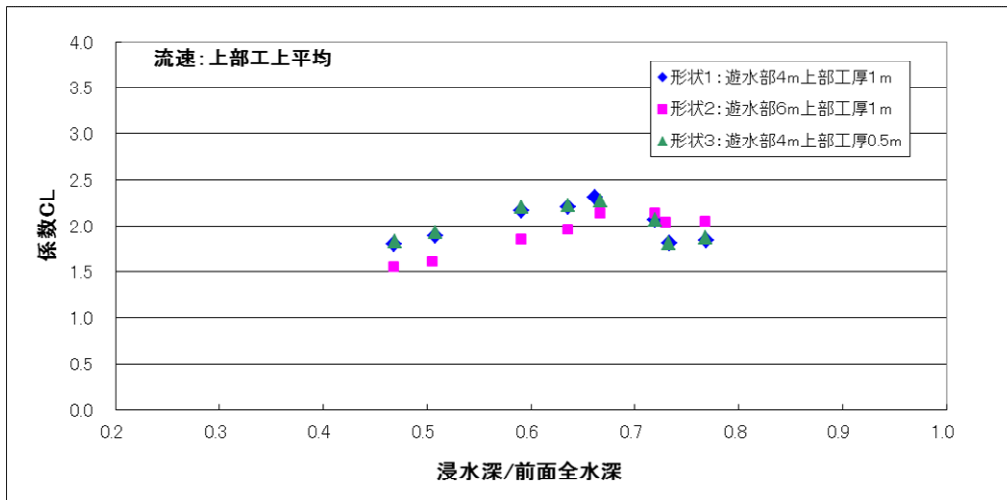


図 3.3.2 上部工の上面範囲の平均流速

2) 上部工先端での断面平均流速

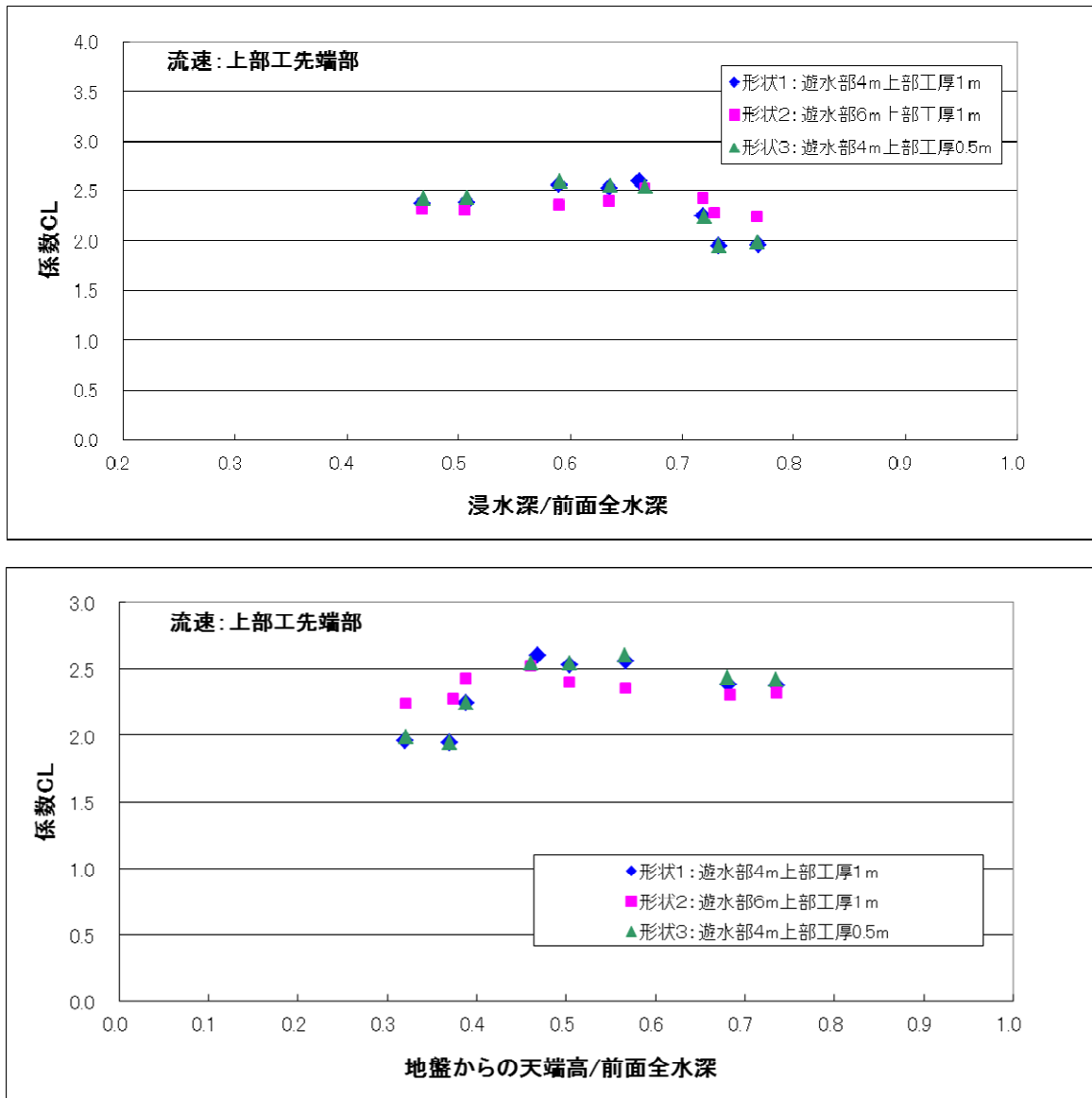


図 3.3.3 上部工先端での断面平均流速

3) 前面 5m 位置での断面平均流速

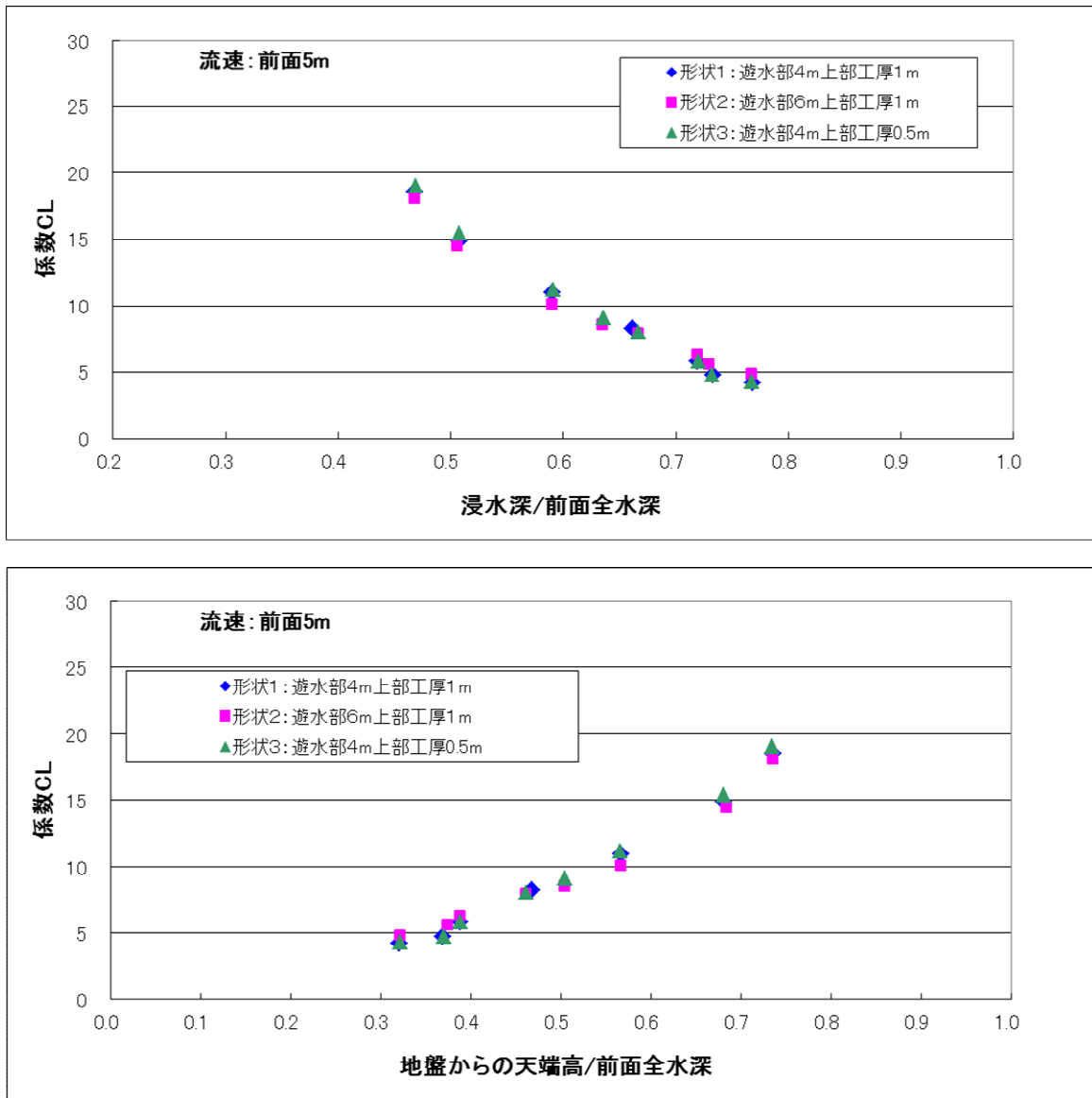


図 3.3.4 前面 5m 位置での断面平均流速

(5) 水理模型実験と同一の断面形による流速の検討

水理模型実験の断面形に周期の外力（押波初動）の同一条件で数値波動水路による計算を行い、実験測定位置の流速と断面平均流速の関係を整理した。

周期4種類，波高2～4種類，最小格子間隔0.25m,現地スケールで実施した。

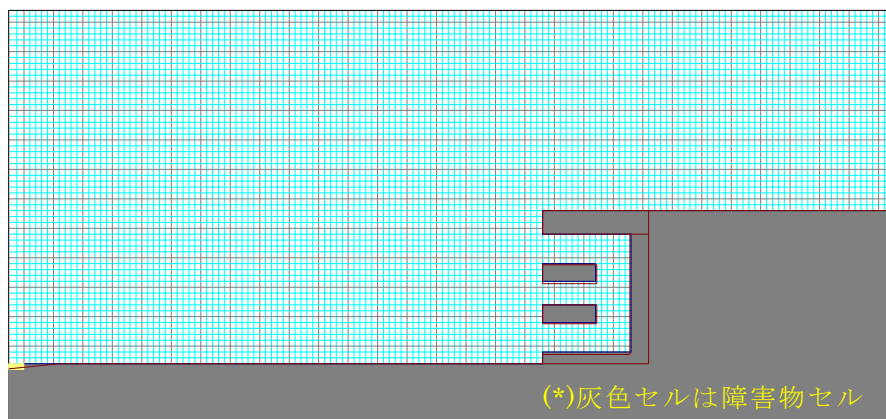


図 3.3.5 直立消波式岸壁周辺の格子図

実験測定位置で流速の計算結果例(時間変化)を図 3.3.6 に示す。図より高さ 1.0m の 3 点平均（実験では高さ 2cm）は上部工上の平均流速の時間変化と良く対応していることが分かる。また、高さ 0.5m での平均流速の時間変化の様子も模型実験で測定された急激な速度の減少等の変化傾向と良く対応している。

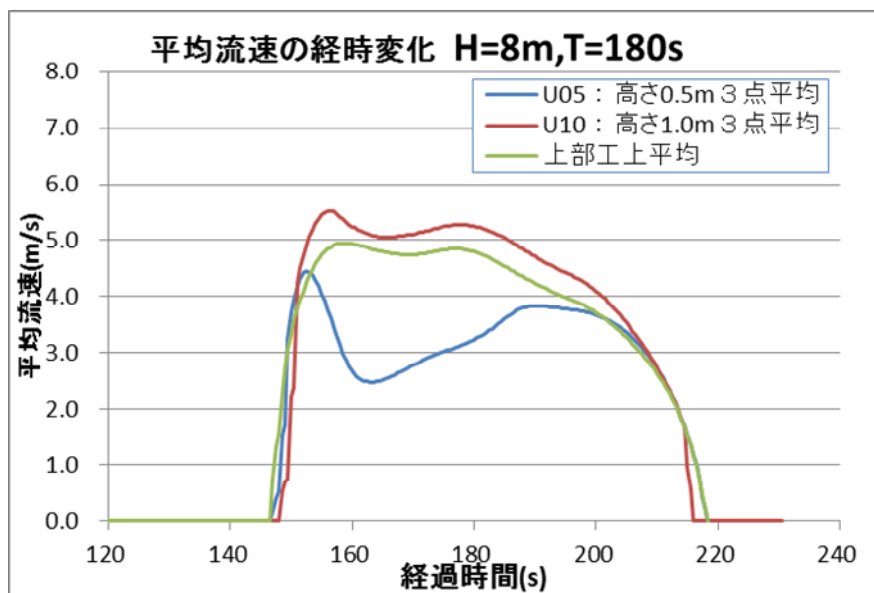


図 3.3.6 実験測定位置の平均流速と上部工上平均流速の時間変化例

図 3.3.7 は、実験測定位置平均流速と上部工上平均流速の関係を整理したものである。図より高さ 1 m 位置の平均流速（実験では高さ 2cm）は上部工平均流速との線形関係は良好で、次の関係にある。

$$\text{高さ 1 m 位置の平均流速} = 1.1 \times \text{上部工上平均流速}$$

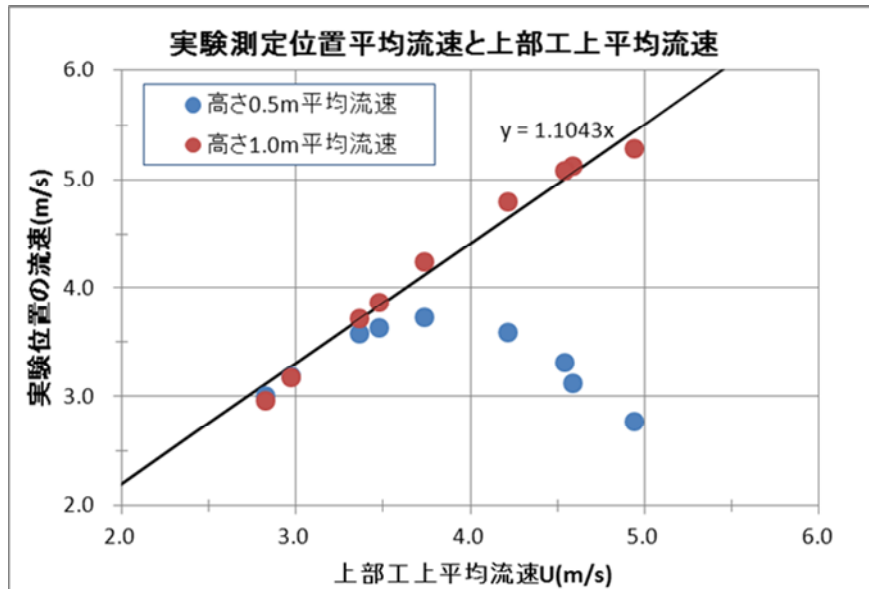


図 3.3.7 実験測定位置の平均流速と上部工上平均流速の比較

既に、図 3.1.8, 図 3.1.9 に示されるように数値波動水路で求めた上部工に作用する揚圧力の揚力係数は、代表流速を上部工断面平均流速とした場合も $\sqrt{gh_1}$ とした場合も水理実験で測定された範囲に収まっており、設計に際しての有効な方法の 1 つであることが確認された。

3. 4 津波シミュレーション（非線形長波方程式）の適用性の検討

水理模型実験と同一の断面形と波浪条件（押波初動の長周期波）で数値波動水路による計算を行い、実験測定位置の流速と断面平均流速の関係を整理した結果、次のことが確認された。

- ①実験測定位置平均流速と上部工上平均流速の関係より、実験で測定された高さ1 m位置の平均流速=1.1×上部工上平均流速となること。
- ②数値波動水路で求めた上部工に作用する揚圧力の揚力係数は、代表流速を上部工断面平均流速とした場合も $\sqrt{gh_1}$ とした場合も水理実験で測定された範囲に収まっており、流速を推定する有効な方法となること。

図 3.4.1 に数値波動水路による計算での格子図を示す。検討対象施設周辺は格子間隔 0.25m（現地スケール換算）で詳細に検討されている。

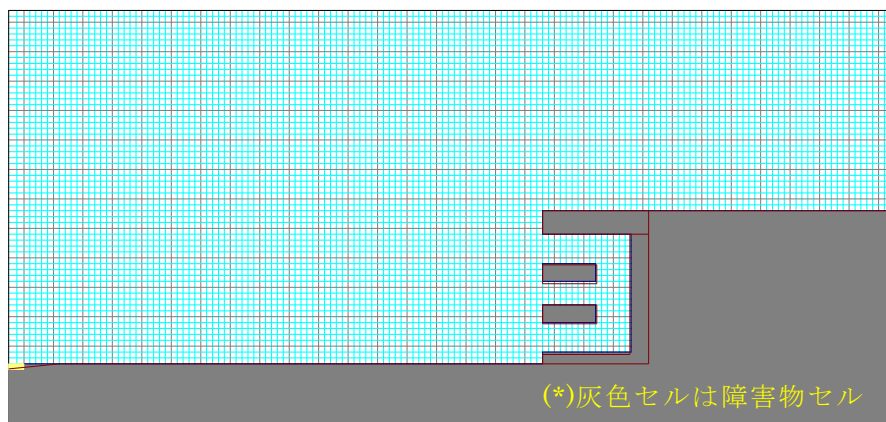


図 3.4.1 直立消波式岸壁周辺の格子図

ここでは水理模型実験の断面について、設計津波に対する水位・流速等の外力を算定する際に通常用いる非線形長波方程式による津波シミュレーションを実施し、上部工の浸水深が最大時の水位と流速の関係を調べた。また、数値波動水路の計算結果と比較整理した。

非線形長波式の計算条件を、周期 3 種類、波高 6 種類、格子間隔 3 種類 (5m, 2.5m, 1.25m) の組み合わせとして実施した。格子間隔 5m は漁港の施設を対象とした津波シミュレーションでは標準的な格子間隔であるが、数値波動水路計算 (VOF) の格子間隔に比べて 20 倍大きな間隔である。格子間隔 2.5m, 1.25m の場合でもそれぞれ数値波動水路の計算格子間隔の 10 倍、5 倍大きな間隔である。直立消波式岸壁の上部工の幅は 5m 程度であり、格子間隔が 5m の場合は 1 ないし 2 格子、格子 1.25m の場合は 4 格子程度の格子が上部工上に配置される。

図 3.4.2 に非線形長波式と数値波動水路の水位の計算結果の比較を示す。図 3.4.3 に断面平均流速の比較を示す。これらの図より、次の傾向が見られた。

- ①直立消波式岸壁の上部工の範囲（0～5m）では、非線形長波式の格子間隔 5m の場合(図中の青丸)は、数値波動水路の計算結果（図中の白抜き赤丸）に比べて、水位はやや大きく、流速はやや小さく計算される傾向にある。
- ②非線形長波式の格子間隔を小さくすると水位・流速共に数値波動水路の計算結果に近づく傾向にある。
- ③非線形長波式の場合は、格子間隔に関わらず岸壁前面位置（距離=0）の水位・流速はほぼ同じ値となる傾向にある。また、上部工上の最初の陸側格子点の流速値は格子間隔の違いによる差が大きいですが、次の陸側格子（2点目）の流速は格子間隔に関わらず同程度の値となる傾向にある。
- ④岸壁より上流側（距離マイナス側）の水位については、非線形長波式と数値波動水路の計算結果の差は小さく、良く一致している。

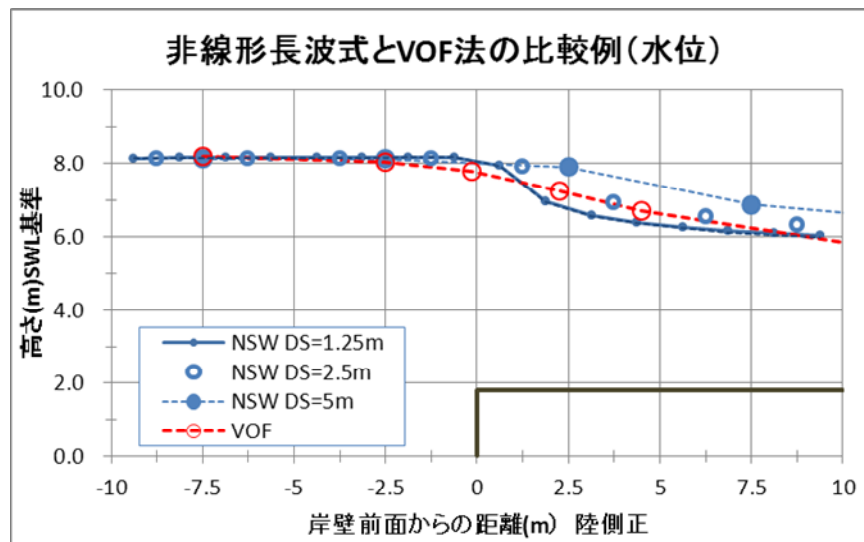


図 3.4.2 非線形長波式と数値波動水路の計算結果の比較例（水位）

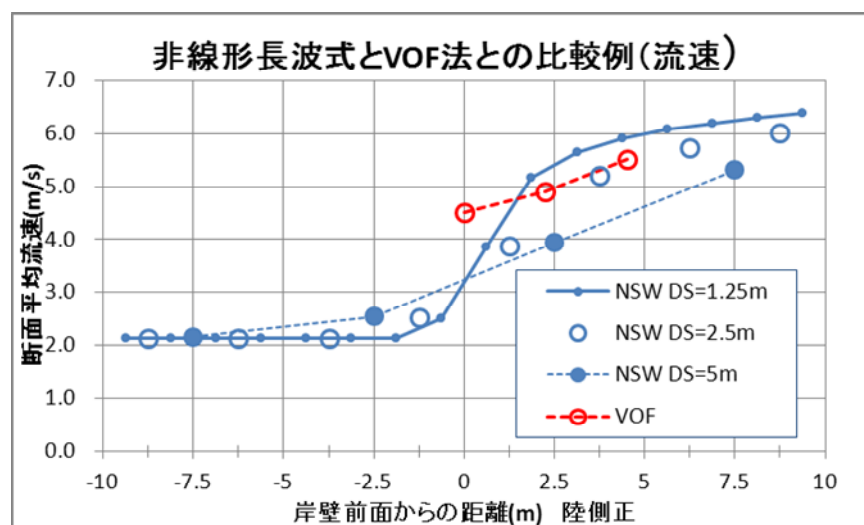


図 3.4.3 非線形長波式と数値波動水路の計算結果の比較例（流速）

以上の非線形長波式の計算結果の傾向を考慮して、直立消波式岸壁の上部工に作用する揚力を算定に必要な「上部工上の断面平均流速」の設定方法について検討した。

図 3.4.4 は、計算結果について浸水深と上部工上の断面平均流速の比較をしたものである。非線形長波式の流速として、岸壁から陸側にある最初の格子点の流速（塗り潰し丸）と次の 2 番目の陸側格子の流速（白抜き丸）の 2 種類格子点の流速の値を示している。図中には浸水深と流速から算定したフルード数 $Fr(=u/\sqrt{g\Delta\eta})$ が 0.6,0.7,0.8 の曲線を合わせて示した。なお、水理実験では $Fr=0.7$ に近い関係にあった。

図より、同じ浸水深の場合には非線形長波の 2 種類の格子の流速のうち、第 2 番目の格子点の流速値の方が、数値波動水路の流速に近い傾向にある。格子間隔に係わらず同じ傾向となった。

非線形長波での「上部工上の断面平均流速」としては第 2 番目の格子を使用するのが最適であるかどうかは、今後検討ケースを増やし詳細に検討する必要がある。

少なくとも、漁港の施設を対象とした場合の標準的な格子間隔 $DS=5m$ サイズでは岸壁周辺の局所的な流速の変化は平滑化され、流速がやや小さくなるのが分かった。したがって、非線形長波式を用いた場合には、上部工の揚力算定に使用する流速は上部工上の格子点と周辺数点の格子の流速値を考慮して大きい方を設定する必要がある。

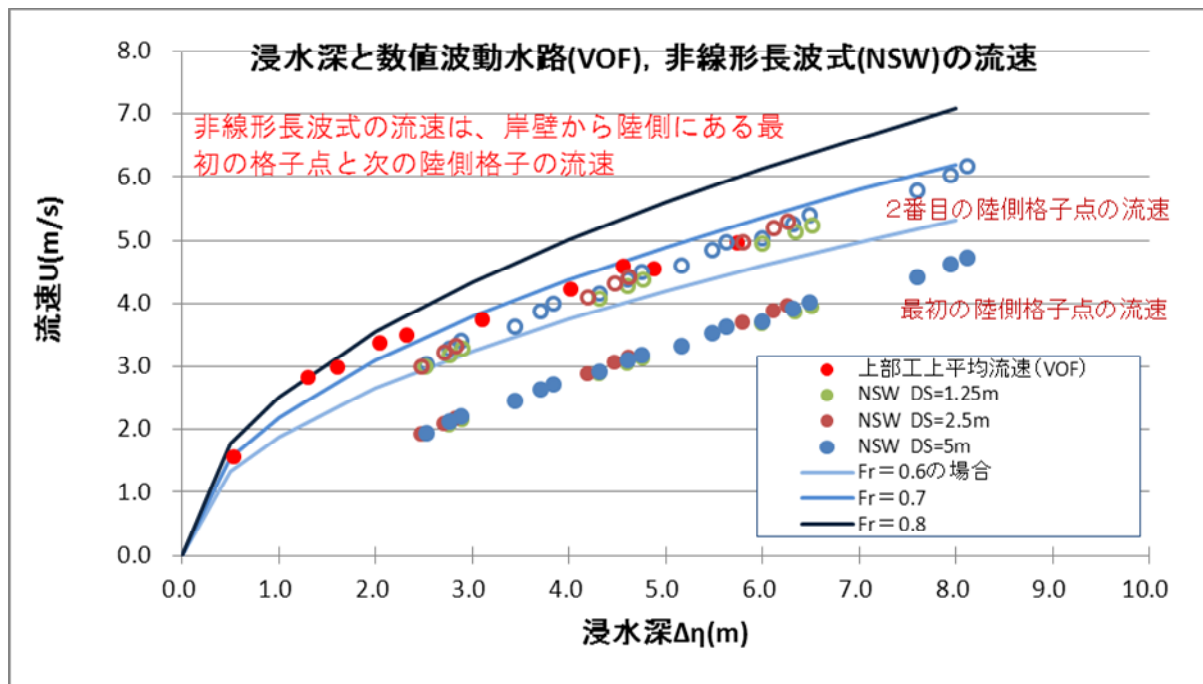


図 3.4.4 浸水深と上部工上の断面平均流速の関係（計算結果）

4. 被覆材の安定性照査の検討

4. 1 イスバッシュ式の適用性の検討

(1) 実験施設と実験模型

実験施設は、水産工学研究所の大型造波水路（幅 1.0m×深さ 2.0m×長さ 100m）を使用した。

模型縮尺は 1/81 とした。マウンド被覆材模型の概要を図 4.1.1 に示す。実験模型は防波堤なし、防波堤ありの 2 種類とした。尚、防波堤諸元は「2. 1 押し波時における防波堤に作用する津波外力の検証」と同一である。

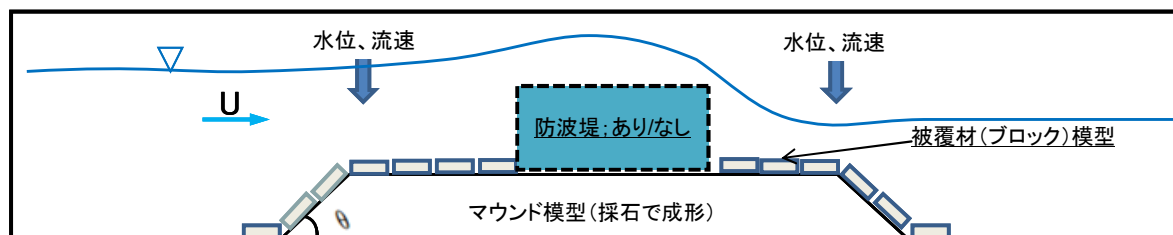


図 4.1.1 マウンド被覆材模型概要図

(2) 計測項目

計測項目と計測機器を以下に示す。

- ・流速：電磁流速計、プロペラ式流速計
- ・水位：容量式波高計
- ・被覆材の移動、被災状況：VTR 撮影

(3) 実験方法

被覆材はモルタル製で、形状は孔の無い単純な方塊型とした。被覆材の重量は、イスバッシュ式で算定した所要重量を参考に設定した。今回使用した被覆材の諸元を以下に示す。

- ・表乾重量：55g（現地 30t）
- ・寸法：40mm×40mm×15mm

作用流速を段階的に変え、被災数のカウント、被災位置、飛散状況等の記録を行った。

(4) 実験結果

1) 実験ケース①（防波堤なし）

- ・模型：防波堤なし（マウンド+被覆材）
- ・被覆材：55g（現地 30t）、マウンド天端 6 個並
被覆材設置状況を図 4.1.2 に示す。

↓ 入射波



図 4.1.2 被覆材設置状況（防波堤なし）

流速と被災率の関係を図 4.1.3 に示す。尚、流速はマウンド天端上 1cm 付近での計測値であり、被災率は移動した被覆材の割合である。被災が始まる流速は 70cm/s 前後であった。流速から逆算によりイ斯巴ッシュ定数 (y) を求めると、1.08 程度と推定される。

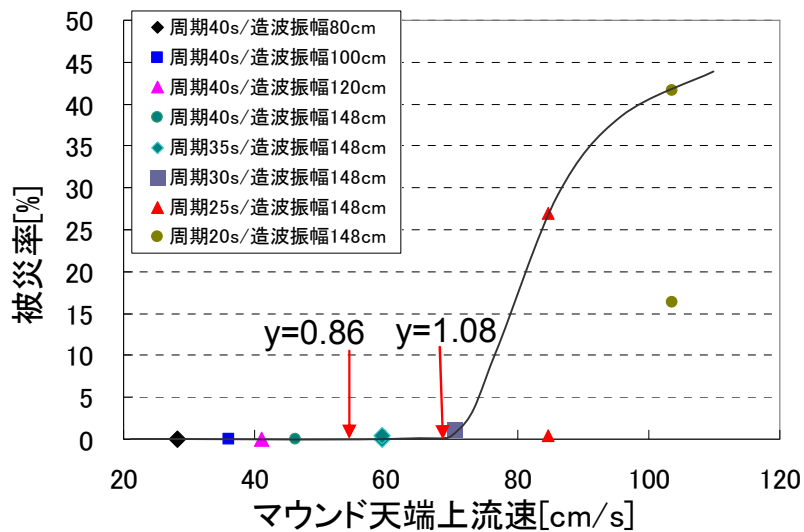


図 4.1.3 流速と被災率の関係（防波堤なし）

2) 実験ケース②（防波堤あり）

- ・ 模型：防波堤あり（マウンド+防波堤+被覆材）
- ・ 被覆材：55g（現地 30t）、天端 1 個並

被覆材設置状況と流速計測位置を図 4.1.4 に示す。

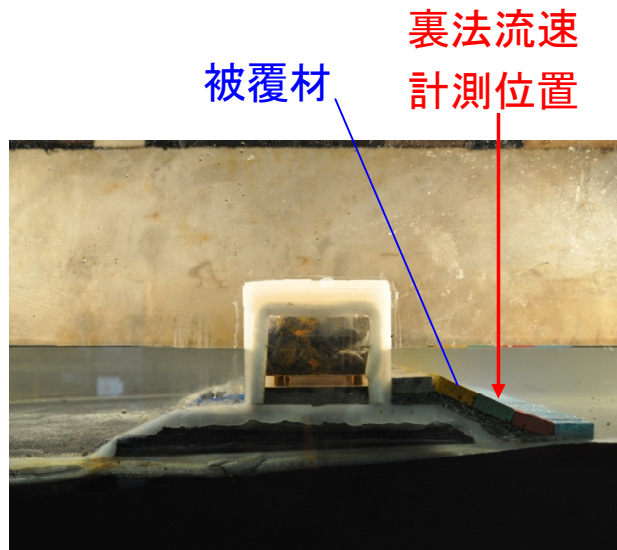


図 4.1.4 被覆材設置状況（防波堤あり）

裏法流速と被災率の関係を図 4.1.5 に示す。防波堤なしのケースに比べ、流速の遅い条件で被災が始まっている。被覆材の被災状況の例を図 4.1.6 に示す。越流水が裏法に打ち込み、被覆材がめくれ上がるケースが見られる。被災の要因としては、流速のみならず、越流水の打ち込み位置や落下距離等の影響も考えられる。

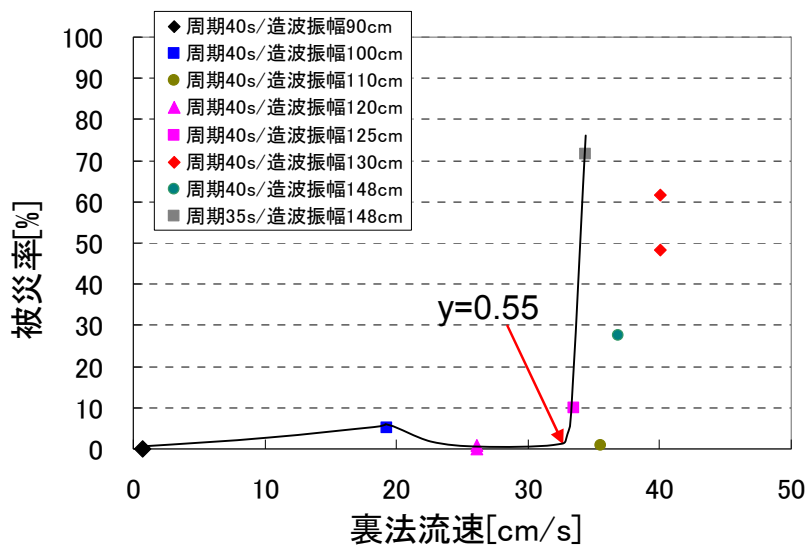


図 4.1.5 流速と被災率の関係（防波堤あり）

裏法に打ち込み、被覆材がめくれ上がる

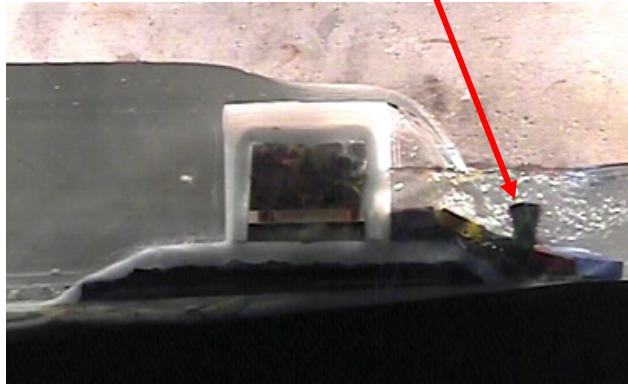


図 4.1.6 被覆材被災状況（防波堤あり）

4. 2 マクロな水理量や構造諸元による安定性照査方法の検討

(1) 実験施設

実験施設と模型縮尺、津波諸元を以下に示す。造波水路の実験に加えて、継続時間の長い津波を検討するため定常流水路でも実験を行った。

- ・定常流水路（幅 0.5m×深さ 1.0m）
模型縮尺：1/50
津波の継続時間：定常状態になってから現地換算 15 分（模型約 2 分）
- ・大型造波水路（幅 1.0m×深さ 2.0m×長さ 100m）
模型縮尺：1/81
津波諸元：長周期波（押し初動）現地換算片周期約 3 分（模型片周期 18～20s）

(2) 計測項目

計測項目を以下に示す。

- ・流速（電磁流速計、プロペラ式流速計）
- ・水位（容量式波高計）
- ・被覆材の移動、被災状況（VTR 撮影）

(3) 実験方法

使用した被覆材模型の形状は、方塊型、有孔型（開口率 10%）の 2 種類である。

被覆材の質量：定常流水路 現地換算 20t（模型 150g）
大型造波水路 現地換算 30t（模型 55g）

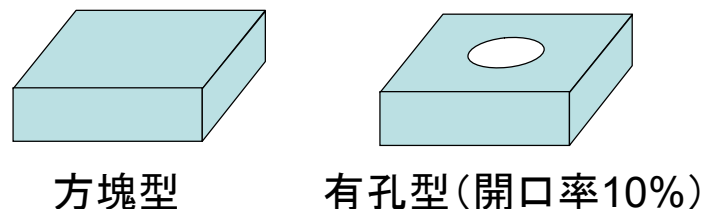


図 4.2.1 被覆材の模型形状

越流水深、及びマウンド上水深を段階的に変え、被災数のカウント、被災位置、飛散状況等の記録を行った。

被覆材の安定性の整理方法としては、三井ら⁸⁾の安定数 N を用いて整理を行った。

$$\text{安定数 } N \quad N = \frac{h_1}{(S_r - 1)D_n}$$

h_1 ：越流水深

S_r ：コンクリートの水に対する比重

D_n ：ブロック代表長さ（=ブロック体積 V の 3 乗根） $D_n = V^{\frac{1}{3}}$

被覆材の安定性に関して一般的に用いられる指標として、被災度を下記により算定し、被災度が 0.3 以上を被災ありと判定した。

被災度の算定式（ファン・デル・メーヤの定義）⁹⁾

被災度 N_0 = 防波堤法線方向の幅 D_n の範囲における移動したブロックの個数

D_n : ブロック代表長さ

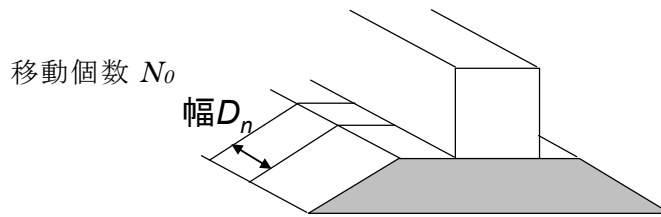


図 4.2.2 ブロックに対する被災度 N_0 の定義

防波堤の構造諸元を図 4.2.3 に示す。安定数に影響するパラメータとして、 d/H （または d_2/d_1 ）、 B/L を使用して整理を行った。

$d=d_2$: マウンド上（被覆材天端上）水深

H : マウンド上（被覆材天端上）堤体高

B : 港内側マウンド幅

L : 打ち込み位置の堤体からの距離

d_1 : 静水面上の天端高

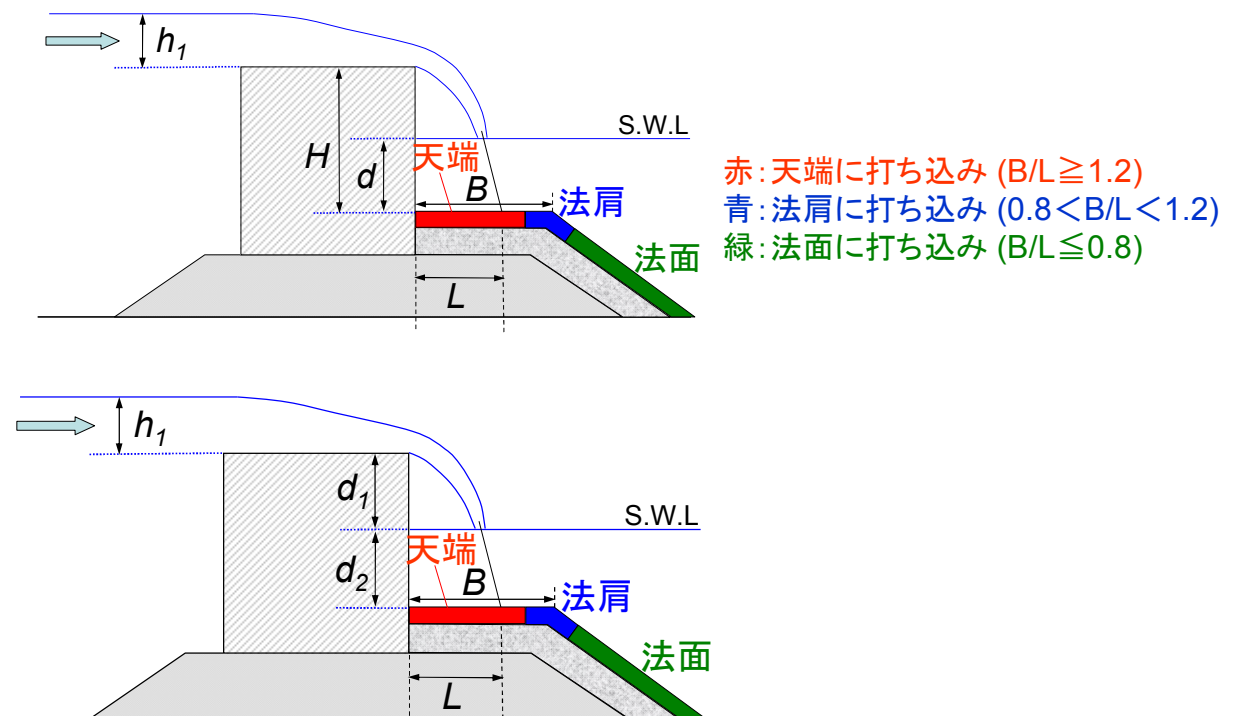


図 4.2.3 防波堤の構造諸元

(4) 実験結果

実験結果を図 4.2.4～図 4.2.6 に示す。図中の黒実線は、被災限界（被災度 0.3）を表し、被災限界を超えた安定数（越流水深）で被災が始まっている。

マウンド上水深が深いほど被災限界の安定数が高く、安定性が高くなる傾向となっている。また、方塊型では安定数が 0.6 程度であるが、有孔型は 0.8 程度で、有孔型の方が安定性が高い。また打ち込み位置は、法面よりも法肩付近 ($B/L \approx 1$) や天端の方が不安定となる傾向となっている。

- 塗りつぶし(■etc.): 被災度0.3以上
- 白抜き (□etc.): 被災度0.3未満
- 赤: 天端に打ち込み ($B/L \geq 1.2$)
- 青: 法肩に打ち込み ($0.8 < B/L < 1.2$)
- 緑: 法面に打ち込み ($B/L \leq 0.8$)

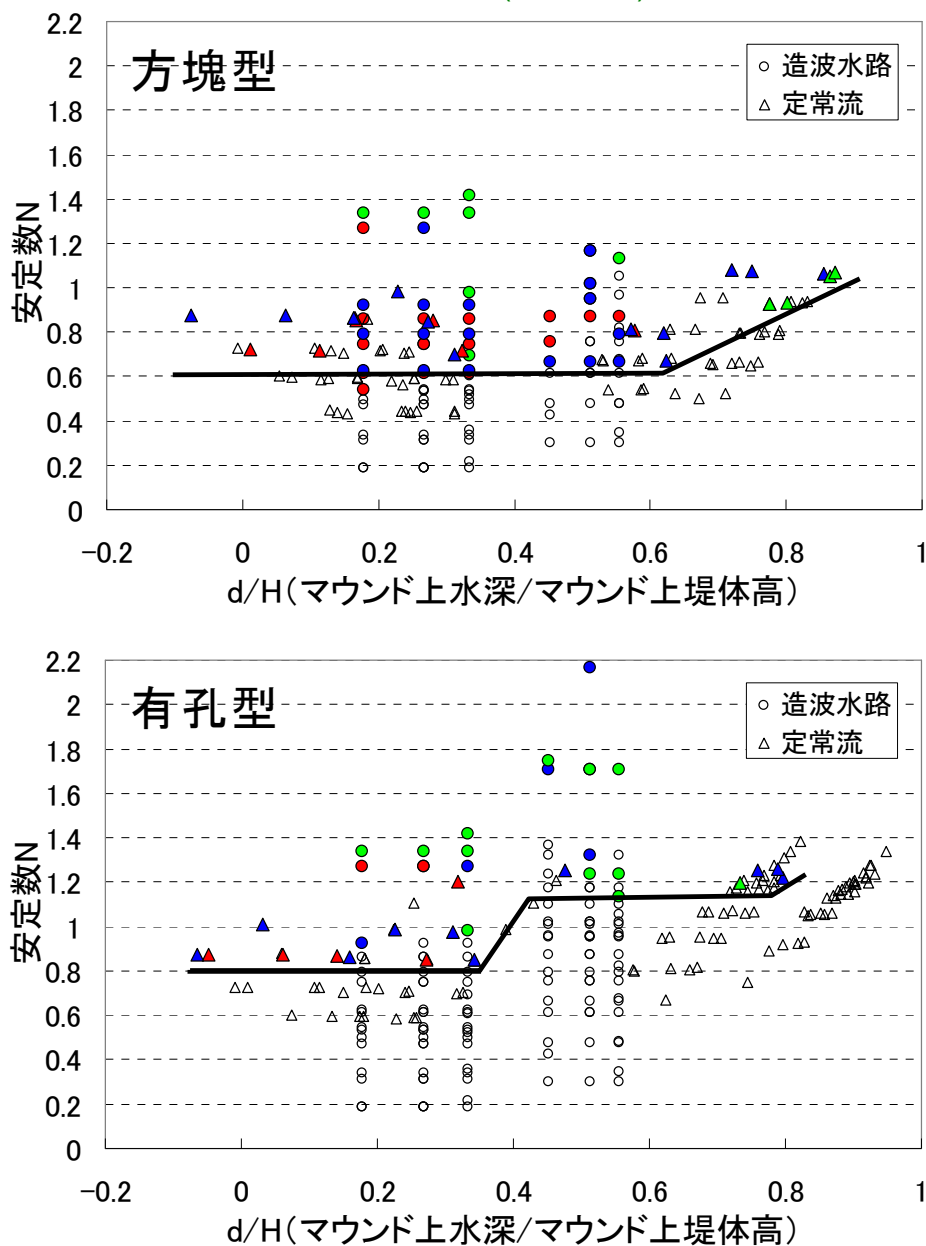


図 4.2.4 d/H (マウンド上水深/マウンド上堤体高) と安定数 N

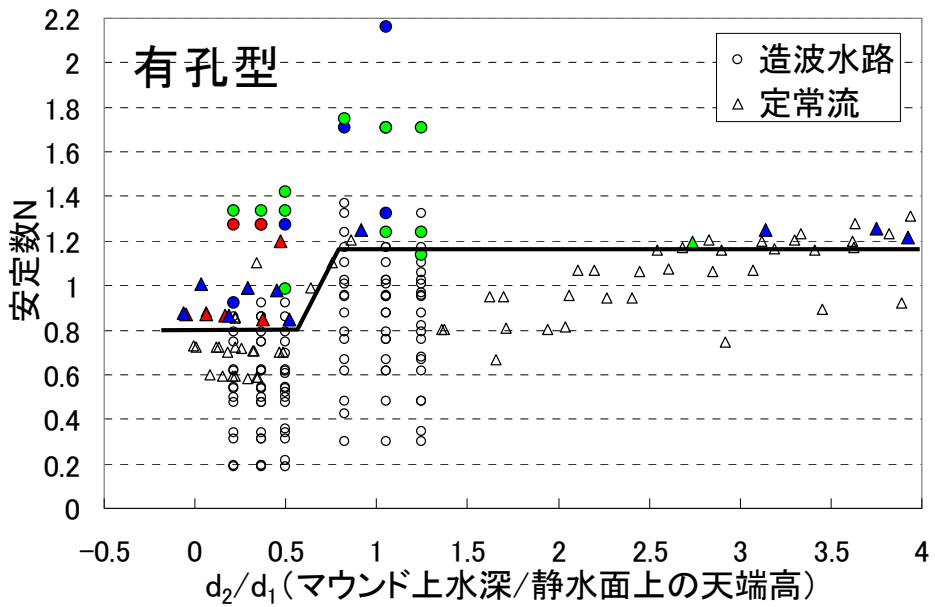
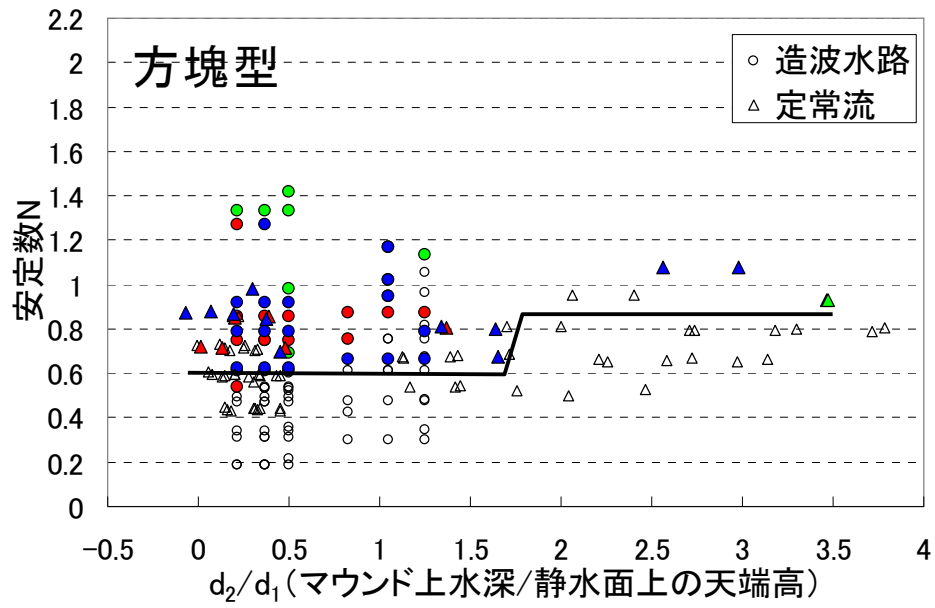


図 4.2.5 d_2/d_1 (マウンド上水深/静水面上の天端高) と安定数 N

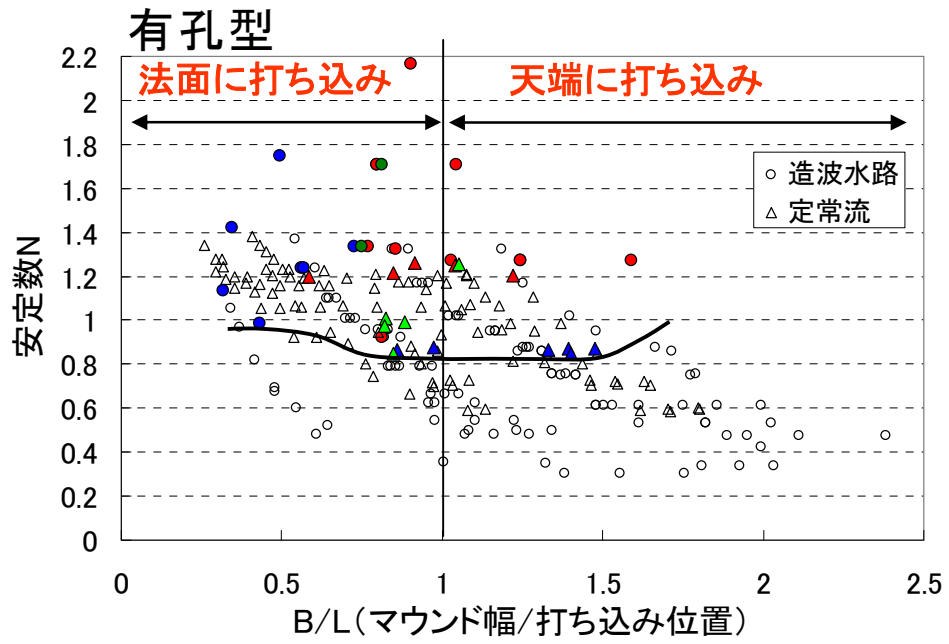
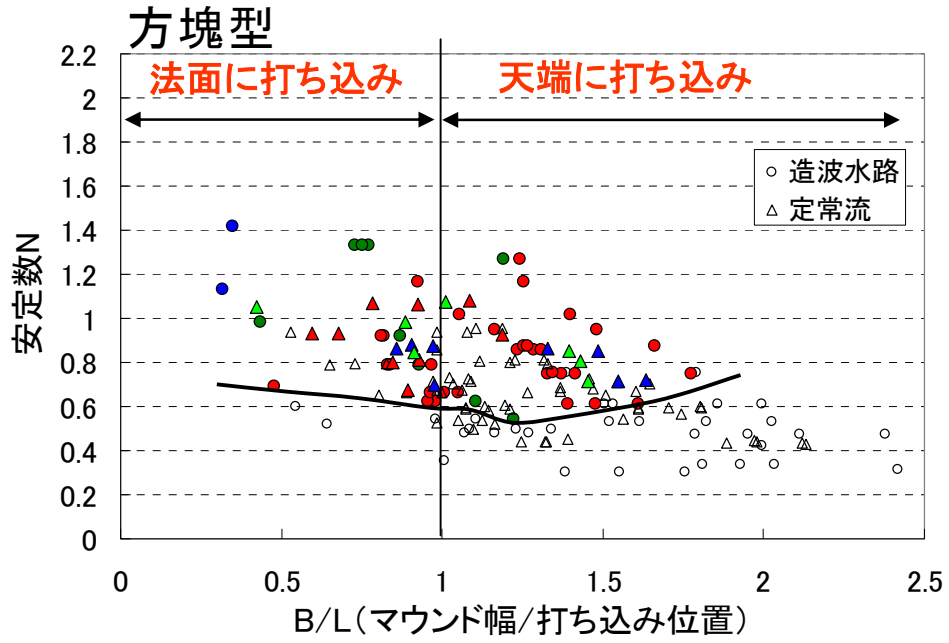


図 4.2.6 B/L (マウンド幅/打ち込み位置) と安定数 N

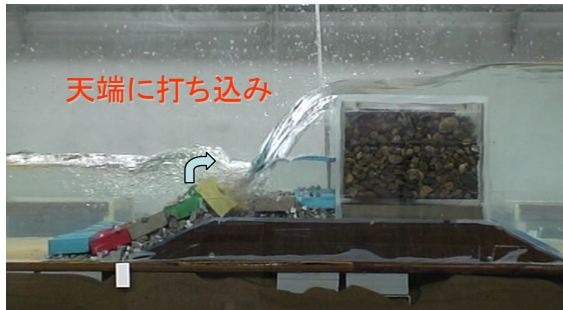
被覆材の被災形態の例を図 4.2.7 に示す。被災形態は、打ち込み位置付近の被覆材がめくれ上がる被災と、法面全体が滑る被災に大別された。越流水が堤体から近い天端や法肩付近に打ち込む場合、めくれによる被災が多く見られるが、越流水が堤体から離れ法面へ打ち込むようになると、法面全体が滑る被災が現れやすくなる。



めくれによる被災例1(天端3個並)



めくれによる被災例3(天端2個並)



めくれによる被災例2(天端3個並)
※数例のみの稀なケース



法面全体の滑りによる被災例(天端2個並)

図 4.2.7 被覆材の被災形態

VII. 摘要

1. まとめ

(1) 防波堤に作用する津波波力の検証

- ・津波が防波堤を越流する場合の断面実験を行った結果、消波工有無に係らず水工研式を適用することができ、静水圧補正係数は前面で 1.1、背面で 0.9 として設定して良いことを確認した。
- ・引き波時の場合の断面実験を行った結果、引き波時の流れの上流側を前面波圧側として水工研式を適用し、波圧を算定して概ね問題ないことを確認した。
- ・パラペット付断面の場合については、天端の波圧は天端上の平均的な水位による一様分布として扱って良いことを確認した。
- ・津波波圧を算定する際に設定する基準水面は、堤体の安定性が最も低くなる場合とする。一般的には朔望平均満潮面 (H.W.L.) とする場合が多い。
※津波の水位の設定根拠となる津波シミュレーションを行う場合、一般的に H.W.L. を基準水面として取り扱っている。これは、津波の水位や遡上範囲を安全側に計算することによるため。

(2) 直立消波式岸壁に作用する津波外力の検証

- ・水理模型実験と数値波動水路の計算により、上部工に作用する鉛直力（揚力）は揚力係数を用いた表現で評価が可能であることを確認した。
- ・代表流速を上部工上断面平均流速とした場合、揚力係数は最大 2.4 程度となるので、これを参考としてもよい。
- ・平面実験により津波波向の影響を調査した結果、入射角が大きくなるにつれて揚力係数は小さくなる傾向があり、斜め入射の場合でも、直入射 (0°) で評価すれば安全側の設計となることが分かった。
- ・非線形長波式を用いた場合には、上部工の揚力算定に使用する流速は上部工上の格子と隣接する周辺格子の流速値を考慮して過小評価しないように設定する必要がある。

(3) 被覆材の安定性照査の検討

- ・港外側及び津波が防波堤を越流しない場合の港内側の根固・被覆ブロック等の安定質量については、イスバッシュ式により算定することができ、イスバッシュの定数 1.08 を参考とすることができる。
- ・津波が防波堤を越流する場合の港内側の根固・被覆ブロック等の安定質量については、堤体背面において防波堤を越流した津波水塊の打ち込み等の現象が生じることから、イスバッシュ式による評価が難しい。簡便的な手法として、三井らによる安定数から安定質量を評価することが可能であることを確認した。
方塊型：安定数 0.6 程度が質量算定の目安となる。
有孔型：開口率等、形状依存性が考えられるため、形状ごとに実験による確認が必要となる。
- ・越流した水塊が基礎捨石の水平部から法肩の間に落下し打ち込む条件では、構造的な弱点となりやすくなるので注意が必要である。

2. 残された課題

(1) 防波堤に作用する津波波力

- ・断面実験により水工研式の適用性を確認しているが、平面的な検証は行っていない。斜め入射の場合や、堤頭部・隅角部等の津波波力の特性についても実験や数値計算により検討する必要がある。
- ・本調査では造波水路の制約により実験できなかったソリトン分裂や砕波を伴う津波については、数値計算等により別途検討が必要である。

(2) 直立消波式岸壁に作用する津波外力

- ・本調査による実験と数値計算では、ソリトン分裂や砕波を伴う津波については対象としていないため、数値計算等により別途検討が必要である。
- ・揚力係数の波向による低減効果は定式化には至っておらず、周期の長い津波等による更なる実験と数値計算が必要である。

(3) 被覆材の安定性照査

- ・根固・被覆ブロックの安定性は、ブロックの形状や積み方、堤体上部の形状（パラペットの有無）等により異なるため、実験等により更なる知見を集積する必要がある。

VIII. 引用文献

- 1) 水産庁、2012：平成23年東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方－防波堤・岸壁における耐震・耐津波強化対策方針（案）－平成24年4月13日
- 2) 水産庁、2014：平成23年東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方 平成26年1月23日、
<http://www.jfa.maff.go.jp/j/seibi/gyokogyojo/pdf/120406.html>
- 3) 谷本勝利・鶴谷広一・中野晋、1984：1983年日本海中部地震津波による津波力と埋立護岸の被災原因の検討、第31回海岸工学講演会論文集、pp.257-261.
- 4) Hudson, R.Y., 1959：Laboratory investigations of rubble-mound breakwaters, Proc.ASCE, Vol.85, WW3
- 5) Coastal Engineering Research Center, 1984: Shore Protection Manual, U.S.Army Corps of Engrs., Vol.II, pp.7_213-7_216.
- 6) 原子力土木委員会 津波評価部会、2007：津波評価手法の高精度化研究－津波水位の確率論的評価法ならびに分散性と砕波を考慮した数値モデルの検討－、土木学会論文集 B、Vol.63、No.2、pp.168-177.
- 7) 岩崎敏夫・真野明・中村武弘・堀越伸彰、1984：潜堤のマウンド材およびプレパックスド堤に作用する定常流流体力に関する実験的研究、第31回海岸工学講演会論文集、pp.527-531.
- 8) 三井順・松本朗・半沢稔・灘岡和夫、2013：防波堤港内側マウンド被覆材の津波越流に対する安定性照査方法の提案、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.69、No.2、pp.956-960.
- 9) 高橋重雄・半沢稔・佐藤弘和・五明美智男・下迫健一郎・寺内潔・高山知司・谷本勝利、1998：期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量、港湾技術研究所報告、

第 37 卷、第 1 号、pp.3-32.