

Title	高波浪域における消波ブロックの耐波安定性と断面変形に伴う消波工の機能変化に関する研究
Author(s)	久保田, 真一
Citation	大阪大学, 2011, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/2477">https://hdl.handle.net/11094/2477</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

高波浪域における消波ブロックの耐波安定性と  
断面変形に伴う消波工の機能変化に関する研究

2011年3月

久保田 真一



# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 概説	1
1.2 研究の目的	2
1.3 本論文の構成	3
参考文献	5
<b>第2章 高波浪域における消波ブロックの耐波安定性</b>	<b>6</b>
2.1 緒言	6
2.2 消波ブロック被覆堤	7
2.2.1 実験条件および実験方法	7
2.2.2 天端幅による相違	10
2.2.3 被覆層厚による相違	11
2.3 消波ブロック傾斜堤	15
2.3.1 実験条件および実験方法	15
2.3.2 天端幅による相違	16
2.3.3 被覆層厚による相違	18
2.4 結語	21
参考文献	21
<b>第3章 耐波安定性に及ぼす流速場の影響と消波ブロックのかみ合いの効果</b>	<b>23</b>
3.1 緒言	23
3.2 消波工形式と耐波安定性の関係	24
3.2.1 実験条件および実験方法	24
3.2.2 実験結果	26
3.3 消波工まわりの流速場	28
3.3.1 実験方法	28
3.3.2 ケーソン前面水位	29
3.3.3 被覆層外縁における流速	30
3.3.4 被覆層内外の遡上波形	32
3.4 消波ブロックのかみ合い	36

3.4.1	実験方法	36
3.4.2	表層ブロックの変位可能量	38
3.5	結語	38
	参考文献	39
<b>第4章</b>	<b>消波ブロックの抵抗力を考慮した耐波安定性の評価</b>	<b>41</b>
4.1	緒言	41
4.2	斜面上のブロックの安定性	42
4.2.1	Hudson 式	42
4.2.2	Svee 式	43
4.3	安定質量と引抜き抵抗力の関係	44
4.3.1	Svee 式の適用	44
4.3.2	安定質量の評価式	45
4.4	引抜き抵抗力に関する検討	46
4.4.1	実験方法	46
4.4.2	かみ合わせパターンと変位可能量の関係	49
4.4.3	かみ合わせパターンと引抜き抵抗力の関係	52
4.4.4	引抜き抵抗力の期待値	56
4.5	消波ブロックが有する抵抗力	57
4.5.1	実験方法	57
4.5.2	変位可能量	59
4.5.3	かみ合わせパターンの出現確率	61
4.5.4	消波ブロックの抵抗力	62
4.6	抵抗力による耐波安定性の評価	67
4.6.1	耐波安定性の評価	67
4.6.2	評価手法の妥当性	67
4.7	結語	68
	参考文献	69
<b>第5章</b>	<b>消波工の断面変形と消波機能の変化</b>	<b>71</b>
5.1	緒言	71
5.2	消波工の被災形態に関する検討	72
5.2.1	被災事例の収集	72

5.2.2	消波工の被災形態	73
5.3	消波工の断面変形に関する実験的検討	75
5.3.1	実験条件	75
5.3.2	実験方法	76
5.3.3	断面形状の変化	77
5.3.4	消波工の変形過程の評価	79
5.4	波力減殺機能に関する実験的検討	82
5.4.1	実験条件	82
5.4.2	実験方法	84
5.4.3	規則波実験における波圧・波力の特性	85
5.4.4	不規則波実験における消波工断面形状と作用波力の関係	95
5.5	消波工の断面変形を考慮した防波堤の設計に向けて	102
5.5.1	防波堤設計法の現状	102
5.5.2	消波工の断面変形を考慮した波力の算定と今後の課題	103
5.6	結語	105
	参考文献	106

## 第6章 結論 109

## 謝辞 112

## 関連論文 114



# 第 1 章 序論

## 1.1 概説

海辺を歩くと消波ブロックを目にする機会があるだろう。そのため、海辺の情景として消波ブロックを思い描く人は多いのではないだろうか。私自身、幼い日に手を引かれ歩いた海岸の記憶の中にも消波ブロックが登場する。消波ブロックの歴史はテトラポッドの登場に始まり、我が国では、昭和 30 年代の中頃から普及し始めた。波の打ち上げや越波量、波力の低減効果が実験的に認められてからは、海岸堤防や防波堤の前面を消波ブロックで被覆する施工事例が急速に増加し、今日では全国津々浦々でその役割を果たしている。

港や入り江を意味する津や浦を用いた「全国津々浦々」という表現は、古来よりいたる所に海運の拠点があったことを物語っている。四面環海の我が国では、古くから海運が栄え、荷物や人の輸送に船が主役をつとめてきた。交通機関の発達した現在においても、貿易貨物の 99.7%、国内貨物輸送の約 4 割は海運が担っており、我が国の経済・国民生活を支えるライフラインである（国土交通省，2010）。海上交通の拠点として不可欠である港湾の諸施設や船舶は、外郭施設によって外海の波浪から防護される。外郭施設は、港湾の骨格をなすともいえる重要な施設であり、その中でも特に重要な機能をもつのが防波堤といえる。我が国における本格的な防波堤の建設は、西欧技術の導入を契機に 19 世紀末に始まり、近年では港湾規模の拡大に伴って、外洋に面した高波浪域においても防波堤が建設されるに至った。高波浪域においては、波浪減殺機能を発揮する消波工として消波ブロックを有するタイプの防波堤が設計されることが多い。

消波ブロックを用いた消波工の設計において最も重要であるのは、設計波浪条件に対して消波ブロックの安定性を確保すること、すなわち、消波ブロックの所要質量を決定することである。これまで、消波工として、設計波に対して安定である同一の消波ブロックを全断面に用いる形式の実績が多く、その所要質量は Hudson 式 (Hudson, 1959) に



より算定されてきた。Hudson 式は、消波ブロックの形状や設置状態、その他の安定性に関係するパラメータをすべて安定係数に集約した簡便な式ではあるが、その妥当性は多くの施工実績から認められるところである。ただし、波の特性や構造物の特性を十分に反映することができないため、必ずしも経済的になっているとは限らないことが指摘されてきた。そのため、より合理的に消波ブロックの所要質量を決定するための研究（高橋ら,1998）が行われており、波数や砕波の程度といった波の特性を考慮した所要質量の算定ができるようになった。しかし、消波工の種々の諸元を直接的に評価するまでにはいたっていない。近年は、建設コストの縮減が重要かつ緊急性の高い問題となっており、経済的な構造諸元を持つ消波工断面の合理的な設計が望まれるが、上述したように消波工の構造諸元と消波ブロックの安定性の関係は必ずしも明確となっていない。

一方、設計波を大きく上回る波が来襲した場合には、消波ブロックが飛散して消波工の断面形状が変化し、それに伴う作用波力の増大により消波工背後のケーソンが滑動するといった被害が想定される。下迫ら（2006）は、混成堤直立部であるケーソンの滑動量を考慮した設計法（下迫・高橋,1998）を消波ブロック被覆堤に拡張している。しかし、供用期間中に消波ブロックが被災しないものとして滑動量を算出しており、消波ブロック被災時に生じるケーソンへの作用波力の変化が考慮されていない。山縣ら（2002）や高山ら（2007）は、消波ブロックの被災による作用波力の変化を考慮したケーソンの滑動量について検討している。しかし、消波ブロックの被災形態は一律であるとして、全て消波工天端の沈下でモデル化し、消波工の沈下による衝撃波圧の発生を考慮した高橋ら（2000）の式により波力を評価している。実現象に即した消波工の変形過程とそれに伴う波力低減機能の変化については、必ずしも明確となっていない。

## 1.2 研究の目的

所要の耐波安定性を発揮することのできる消波工の最適な設計のためには、その構造諸元と安定性の関係を把握することが重要である。とりわけ、消波ブロックに高い安定性が要求される高波浪域では、消波工の規模も大きくなるため、構造諸元の適切な設定が要求される。しかし、高波浪で使用されることの多い消波ブロックであるドロスに関しては、消波工の構造諸元と耐波安定性の関係に関する検討はほとんどなされていない。また、近年、導入が進められている性能設計の観点からは、消波工が被災して断面が変形した際の機能の変化について把握しておくことが重要である。消波工の機能としては、背後のケーソンに作用する波力減殺機能が挙げられる。これまで、施工実績の多いテトラポッドを対象として、テトラポッド被災時の作用波力の変化を考慮したケーソン滑動量の算定が行われているが、消波工の変形形状については詳しい議論はされておらず、

前述のように変形を全て天端の沈下で代表させて、作用波力を算定する手法が採られている。しかしながら、実際の現象は、天端の沈下のみでなく消波工幅の減少も起こるため、実現象に即した消波工断面の変形に基づき、作用波力の変化を把握することが必要である。

本研究は、高波浪域で使用されることの多い消波ブロックであるドロスに関し、所要の安定性を発揮できる消波工の合理的な設計を目的として、消波工の構造諸元と耐波安定性の関係について検討する。また、これまで施工実績の多いテトラポッドに関し、消波工の断面変形と波力減殺機能変化の関係解明を目的として、被災により変形した消波工の断面形状とケーソン作用波力の関係について検討する。

### 1.3 本論文の構成

本論文は、本章を含めて6章から構成されている。本研究の流れを図1.1に示すとともに、各章の内容を以下に示す。

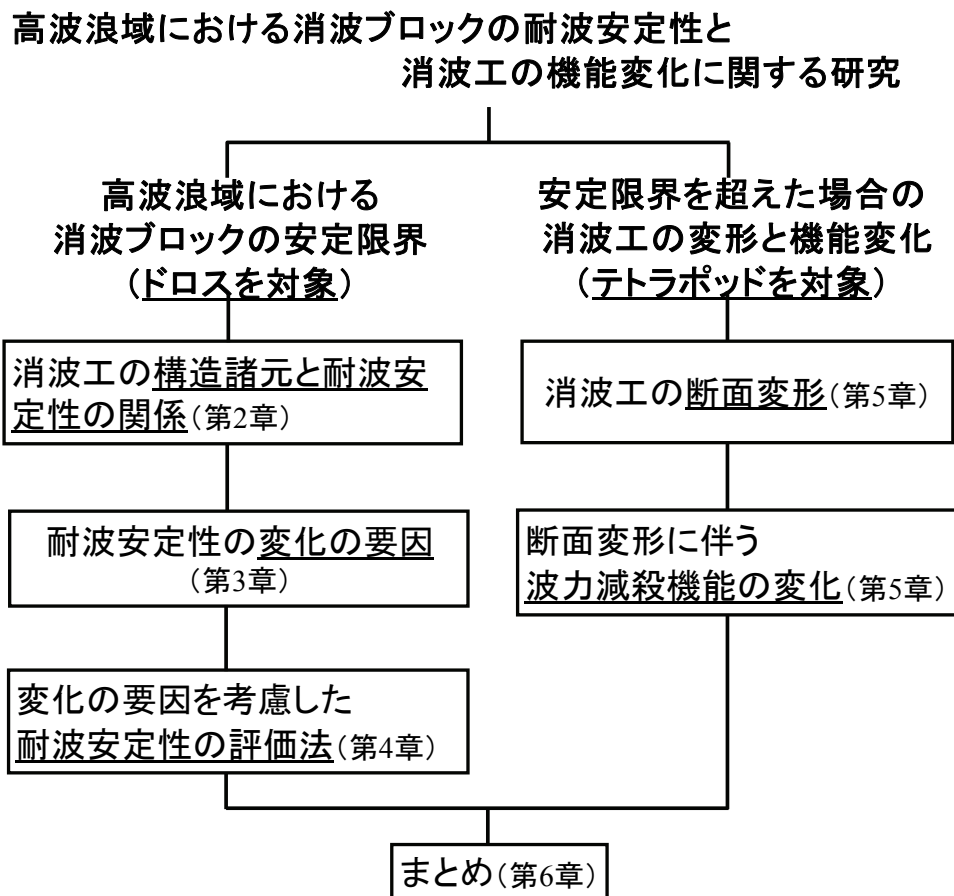


図 1.1 研究の流れ

**第2章**では、消波ブロック被覆堤および消波ブロック傾斜堤の安定性を水理実験により明らかにする。ドロス消波工の天端幅、被覆層厚を変化させ、それらが安定性に及ぼす影響について検討する。

**第3章**では、消波ブロック被覆堤の被覆層厚と中詰め材の変化に伴う耐波安定性の変化を系統的な水理実験によって検討する。さらに、消波工周辺の流速場および消波ブロックのかみ合わせの度合いを実験により明らかにし、消波ブロックに作用する外力と抵抗力の観点より、耐波安定性の変化の要因について検討する。

**第4章**では、消波ブロックの抵抗力に着目した耐波安定性の評価手法を検討する。消波ブロック被覆堤の被覆層厚と消波ブロックの抵抗力の関係を実験的に明らかにし、抵抗力が耐波安定性に及ぼす影響を評価する。

**第5章**では、消波ブロック被覆堤における消波工の被災形態を被災事例で把握するとともに、水理実験により消波工の変形過程を把握する。消波工の変形過程に基づき決定した被災断面形状を対象として、消波工の断面形状とケーソンに作用する波力の関係を水理実験により明らかにする。

**第6章**では、本研究のとりまとめを行い、主要な結論を示す。

## 参考文献

国土交通省 (2010) : 平成 21 年度国土交通白書, pp.136

下迫健一郎・高橋重雄 (1998) : 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港湾技術研究所報告, 第 37 号, 第 3 号, pp. 3-30.

下迫健一郎・大寄奈々子・中野史丈 (2006) : 滑動量を要求性能に設定した混成堤の信頼性設計法, 港湾空港技術研究所報告, 第 45 号, 第 3 号, pp.3-23.

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.

高橋重雄・大木泰憲・下迫健一郎・諫山貞男・石貫国朗 (2000) : 台風 9918 号による護岸の被災とその対策に関する水理模型実験, 港湾技研資料, No.973, 50p.

高山知司・辻尾大樹・安田誠宏 (2007) : 消波ブロック被覆堤の変状による波力増大を考慮した期待滑動量算定法の検討, 海岸工学論文集, 第 54 卷, pp.906-910.

山縣延文・西原考美・中山政勝・上原幸生・富安良一・半沢稔 (2002) : 災害に強い港湾構造物の考察, 海岸工学論文集, 第 49 卷, pp.916-920.

Hudson, R.Y (1959) : Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol.85, WW3, pp.93-119.

## 第2章 高波浪域における消波ブロックの耐波安定性

### 2.1 緒言

近年、外洋に面した高波浪域に消波ブロックを有するタイプの防波堤が建設されている。高波浪域において、消波ブロックに高い耐波安定性が要求されることは言うまでもない。耐波安定性の高いブロックのひとつとして、ドロスが挙げられる。ドロスとは、南アフリカ共和国イーストロンドン港のエンジニアである E.M.Merrifield によって開発されたブロックであり、隣接するブロックが強固にかみ合うことで、高い安定性を発揮するブロックである (Merrifield and Zwamborn, 1966)。我が国では、設計波高が 10m を越える海域での、消波ブロック被覆堤や消波ブロック傾斜堤において使用実績がある。

一般に、消波ブロックの所要質量は、後述する Hudson 式で算定される。式中で安定係数として与えられる  $K_D$  値は、構造物の特性や被覆材の特性等の影響を受けることが指摘されている。構造物の特性による影響としては、防波堤の構造形式の違いや消波工の天端幅や法勾配の違いによる影響等が、被覆材の特性による影響としては、被覆層厚の違いによる影響等が挙げられる。しかしながら、こうした、防波堤の構造形式や消波工の構造諸元の違いが、ドロスの安定性に与える影響について言及した研究はほとんどない。これまで、捨石傾斜堤の表層をドロスで被覆した場合の実験 (Merrifield and Zwamborn, 1966) で得られた  $K_D$  値に基づいた設計がなされており、その実績も蓄積されているものの、条件によっては、耐波安定性が確保されていない可能性もあり、適切な消波工の設計のためには、構造諸元に伴う  $K_D$  値の変化を把握する必要がある。

本章では、消波ブロック被覆堤および消波ブロック傾斜堤を対象として、消波工諸元とドロスの耐波安定性の関係を調べることを目的とした検討を行う。消波工諸元として、建設コストに直接的に影響を及ぼす天端幅およびドロスの被覆形式に着目する。被覆形

式は、施工性に優れた全断面に同一の消波ブロックを用いるタイプ（全断面被覆形式）の実績が多い。しかし、ドロスは鉄筋補強されており、鉄筋を用いないテトラポッド等の他の消波ブロックと比較して製作コストが高い。そのため、消波工の表層のみに耐波安定性の高いドロスを用い、下層部には例えば小型のテトラポッドや石材を使用するタイプ（層被覆形式）の適用事例が増えてくることが想定される。そこで、層被覆形式におけるドロスの被覆層厚と耐波安定性の関係について検討を行う。

## 2.2 消波ブロック被覆堤

### 2.2.1 実験条件および実験方法

#### (1) 実験条件

水理模型実験は、図 2.1 に示す長さ 50m、幅 1.0m、高さ 1.5m の 2 次元造波水路を用いて行った。水路の一端にはピストン型造波機が設置され、他端に向けて 26m の水平部を経て 1/30 の勾配を持つ水路床が設置されている。造波制御として、ソフトウェアによる反射波吸収制御を行っている。それに伴い、制御用の波高計 2 本を造波板近くに設置した。通過波検定は、波高計を沖側一様水深部に 2 本と堤体位置前後に 2 本設置して行った。合田ら（1976）の入反射波分離推定法を用い、入射波成分を通過波として検定を行った。波高計の間隔は、入反射波分離の際に、分離有効周波数帯に周波数のピークが含まれるように設定した。不規則波の理論スペクトルは修正 Bretschneider-光易型を用いた。取得した水位データを解析して得られる有義波高と有義周期および周波数スペクトルの形状が目標値と一致するまで、造波信号の修正を繰り返した。通過波検定の後に、1/30 勾配の水路床上に消波ブロック被覆堤を設置した。

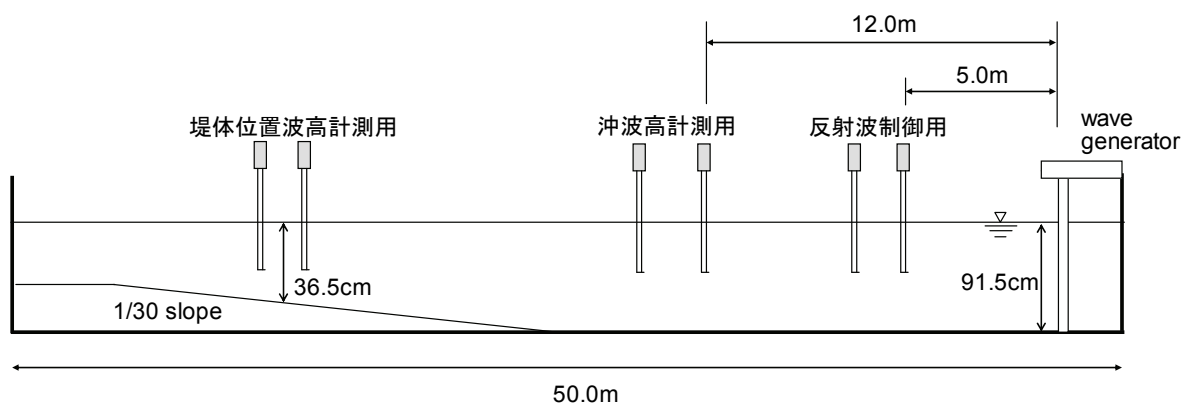


図 2.1 実験水路

実験条件を表 2.1 に示す。実験は 2 つのシリーズに分かれている。各シリーズの実験内容は以下のとおりである。シリーズ 1 は、消波工の天端幅の違いによるブロックの安定性の変化について調べたものである。実験は全断面被覆形式で行った。天端幅  $B$  は、これまで標準的な幅としての施工事例が多いドロス高さ  $h$  の 1.8 倍 ( $1.8h$ ) と、それより幅を狭くした 1.2 倍 ( $1.2h$ ) としている。シリーズ 2 は、層被覆形式での被覆層厚  $t$  の違いによるブロックの安定性の変化について調べたものである。ドロスの被覆層厚をドロス高さ  $h$  の 1.8 倍 ( $1.8h$ )、1.6 倍 ( $1.6h$ )、1.4 倍 ( $1.4h$ ) の 3 種類とし、それぞれに対して、中詰め材をテトラポッドとした断面を検討断面とした。実験回数は、シリーズで異なる。シリーズ 2 では、安定実験における被害のばらつきを考慮して、耐波安定性を詳細に調べるために実験回数を増やしている。各シリーズを通じて、消波工の法勾配と天端高は一定の値としている。消波工の法勾配は、これまでに実績のある標準的な値である 1:1.5 とし、静水面からの天端高は、現行設計で用いられている被害率 1% の  $K_D$  ( $K_D=20$ ) と法勾配 1:1.5 から、後述する Hudson 式を用いて波高を逆算して、求めた波高の 0.6 倍に相当する高さとした。ドロスの形状を図 2.2 に示す。

入射波の周期は、シリーズ 1 が  $T_{1/3}=1.64s, 1.87s, 2.11s$  の 3 周期であり、シリーズ 2 は、 $T_{1/3}=1.40s, 1.64s, 1.87s, 2.11s$  の 4 周期である。有義波高は、各シリーズともに  $H_{1/3}=6cm \sim 20cm$  である。各シリーズでの堤体断面を図 2.3 に示す。消波ブロック模型はモルタル製である。質量は、ドロスが 135.8g、テトラポッドが 117.8 g であり、密度は、ドロスが  $2.367g/cm^3$ 、テトラポッドが  $2.300g/cm^3$  であった。ドロスのブロック高さ  $h$  は 7.2cm である。

表 2.1 実験条件

	構造形式	天端幅 $B$	被覆層厚 $t$	実験回数 (回)
シリーズ 1	全断面被覆形式	$1.8h$		3
		$1.2h$		3
シリーズ 2	層被覆形式	$1.8h$	$1.8h$	16
		$1.8h$	$1.6h$	12
		$1.8h$	$1.4h$	8

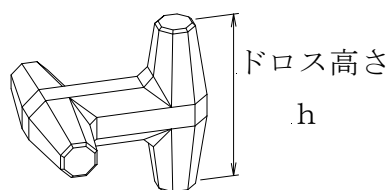
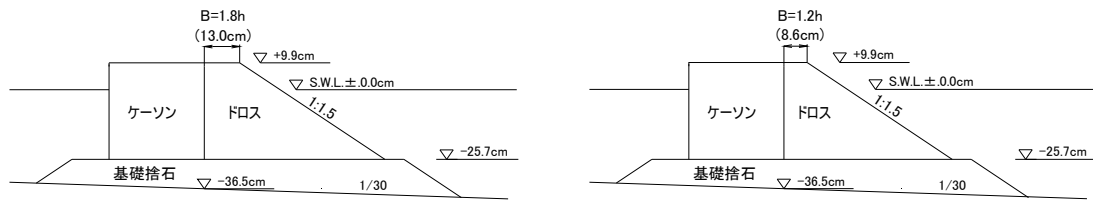
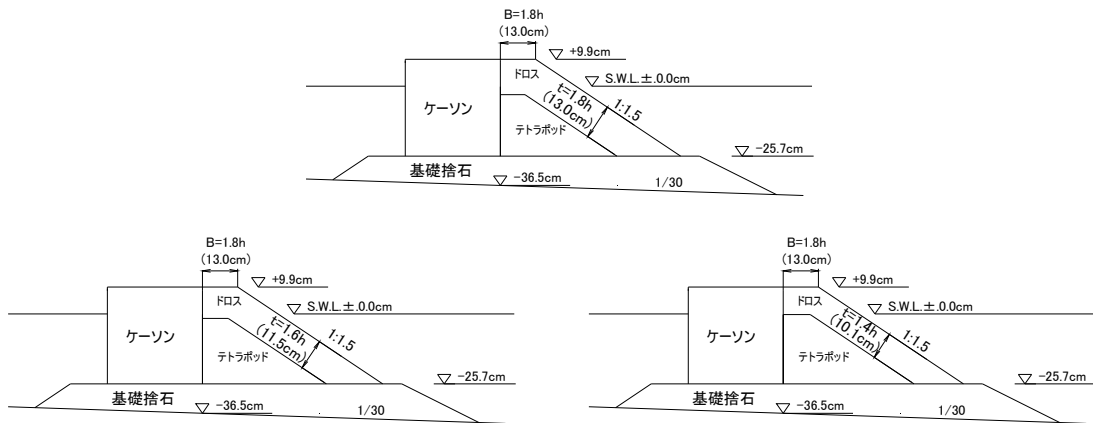


図 2.2 ドロス形状図



a) シリーズ 1



b) シリーズ 2

図 2.3 実験断面

## (2) 実験方法

実験断面に不規則波を作用させ、ブロックの挙動を目視およびビデオカメラを用いて観察した。ブロックの移動が生じないような小さな波から作用させ、約 1cm ピッチで順次波高を増加させた。同一波高レベルでの波の作用は 1000 波を標準とした。波高を増加させる際、ブロックの積み直しは行わず、被害個数はそれまでの被害個数に当該波高条件で新たに発生した被害個数を加えた累計数とした。本実験では、転落（ブロックの大きさの 1 個以上移動）および移動（45 度以上回転，ブロックの大きさの半分以上移動）したブロックの個数を被害として計上した。

実験結果は、被害率  $D(\%)$  に対する  $K_D$  で評価した。被害率  $D(\%)$  は、次式で定義される。

$$D = \frac{n}{N} \times 100 \quad (2.1)$$

ここに、 $N$  は検査域でのブロックの総数、 $n$  は当該波高条件での累積被害個数である。 $N$  は、被覆形式によらず、消波工の全断面にドロスを用いた場合のブロック総数とした。検査域は、通常のブロック相互のかみ合わせが発現できない水路壁近傍を除外した範囲とした。除外した範囲は、水路幅方向に水路両壁からブロックの代表径  $D_n$  の範囲である。ブロックの代表径  $D_n$  は次式で与えられる。



$$D_n = \left( \frac{M}{\rho_r} \right)^{1/3} \quad (2.2)$$

ここに、 $M$  はブロックの質量、 $\rho_r$  はブロックの密度である。  $K_D$  は、以下に示す Hudson 式 (Hudson, 1959) で与えられる係数であり、ブロックの安定性を示す指標とされている。その値が大きいほどブロックの所要質量は小さくなる。

$$M = \frac{\rho_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (2.3)$$

ここに、 $M$  はブロックの質量、 $\rho_r$  はブロックの密度、 $H$  は波高、 $S_r$  はブロックの水に対する比重、 $\theta$  は消波工法面が水平面となす角度である。

### 2.2.2 天端幅による相違

シリーズ 1 の実験結果を図 2.4 に示す。縦軸は  $K_D$  で、横軸は被害率  $D(\%)$  を示している。いずれの周期においても、 $B=1.2h$  のケースが  $B=1.8h$  のケースよりも大きな被害率に達しており、天端幅が狭くなるとブロックの安定性が低下する傾向にあるといえる。一般に消波ブロックの所要質量  $M$  は、 $D=1.0\%$  での  $K_D$  を用いて算定されており、前述のように、現在設計で用いられているドロスの  $K_D$  は 20 である。図 2.4 には  $D=1.0\%$  を実線で示してある。本実験結果において、 $D=1.0\%$  での  $K_D$  を内挿して求めると、その平均値は、 $B=1.8h$  のケースで 31.6、 $B=1.2h$  のケースで 23.1 であり、両ケースとも  $K_D=20$  を上回っている。ただし、下限値に着目すると  $B=1.2h$  のケースで  $K_D=20$  を大きく下回る。

各ケースのブロックの挙動に着目すると、 $B=1.2h$  のケースでは、消波工の法肩においてブロックの動揺が生じやすく、その結果、消波工の天端付近でのブロックに被害が生じる傾向にあった。また、被害の進行とともに消波工の天端が下がる現象も観察された。一方、 $B=1.8h$  のケースでは、消波工の静水面付近のブロックに被害が生じる傾向にあり、消波工天端の顕著な低下は観察されなかった。消波工天端の低下は、消波工背後のケーソンに作用する波力の増大を引き起こす (森平ら, 1967)。そのため、消波工の天端が沈下しやすい  $B=1.2h$  のケースは、消波工の被災時にケーソン作用波力が変化しやすいと考えられる。

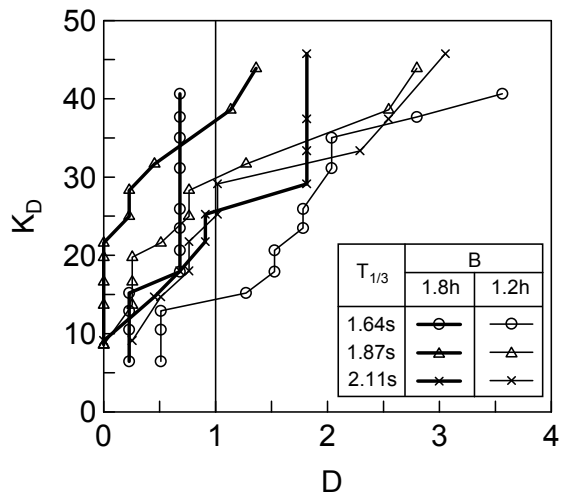
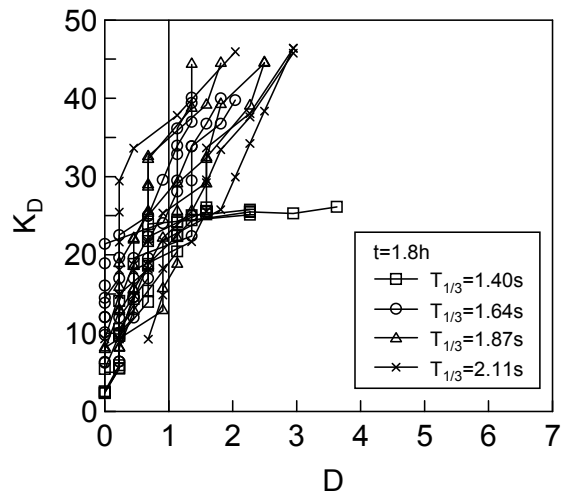


図 2.4  $K_D$ の天端幅による相違

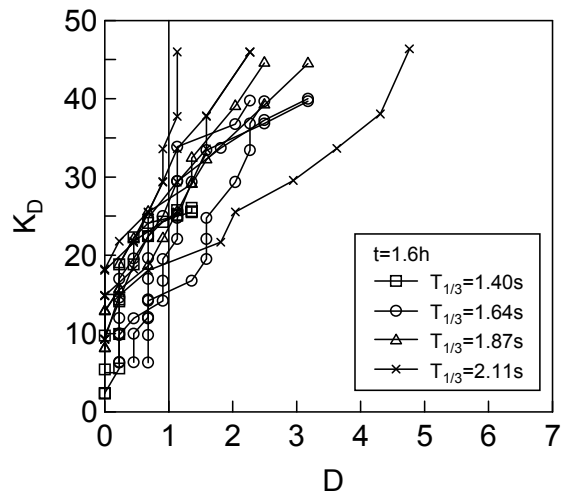
### 2.2.3 被覆層厚による相違

#### (1) 被害率 $D\%$ に対する $K_D$

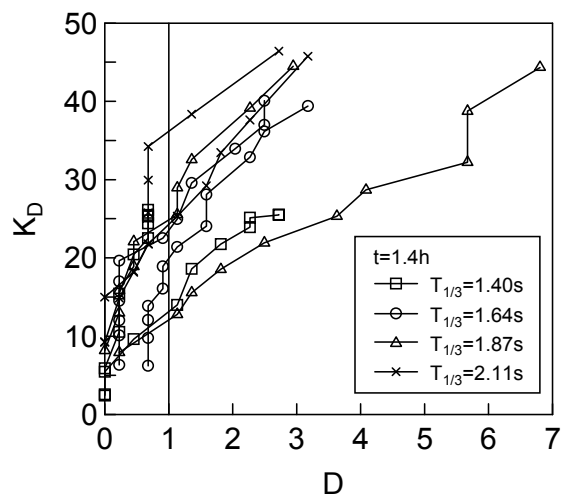
シリーズ2の結果を図2.5に示す。縦軸は  $K_D$  で、横軸は被害率  $D(\%)$  を示している。層厚が小さいほど、大きな被害率に達しており、被覆層厚が小さくなるとブロックの安定性が低下する傾向にあるといえる。また、被覆層厚が小さいほど、同一の被害率  $D$  となる  $K_D$  がばらつくことが分かる。表2.2に、内挿して求めた  $D=1.0\%$  相当の  $K_D$  の平均値  $\mu_{D1\%}$  および標準偏差  $\sigma_{D1\%}$ 、変動係数  $\delta_{D1\%}$  を示す。  $t=1.2h$  のケースのサンプル数が、  $t=1.8h$  および  $t=1.6h$  のケースのサンプル数よりも少ないことによる影響もあるのかもしれないが、被覆層厚が小さくなるほど、平均値  $\mu_{D1\%}$  が小さくなり、  $\delta_{D1\%}$  が増加している。このことから、被覆層厚が小さいと、安定性が低下するのみでなく、  $K_D$  の変動性が大きくなることが分かる。本実験においては、周期と安定性の関係は明瞭ではなかった。



a)  $t=1.8h$



b)  $t=1.6h$



c)  $t=1.4h$

図 2.5  $K_D$ の被覆層厚による相違

表 2.2 被害率 1%相当の  $K_D$

被覆層厚 $t$	1.8h	1.6h	1.4h
サンプル数	16	12	7
下限～上限	16.99～37.01	15.39～35.29	12.07～36.18
平均値 $\mu_{D1\%}$	25.63	25.11	22.00
標準偏差 $\sigma_{D1\%}$	6.11	5.31	8.15
変動係数 $\delta_{D1\%}$	0.24	0.21	0.37

(2)  $K_D$  の度数分布

前述のように、 $K_D$  は変動性を有するものであり、その値は実験毎にばらついている。そこで、 $D=1.0\%$  の  $K_D$  に着目し、その値を確率変数として、被覆層厚ごとの  $K_D$  の特性を調べることにした。まず、被害率 1%相当の  $K_D$  をその平均値で規準化し、相対度数を得た。図 2.6 は、各層厚における  $K_D$  の相対度数を示している。横軸の階級幅は 0.25 とし、度数を数えるとき下現値を含めていない。縦軸は、その階級幅で相対度数を割って確率密度で表している。図中の曲線は、谷本ら（1985）を参考に、理論曲線として次式で示される対数正規分布をあてはめたものである。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2\right] \quad (2.4)$$

ここに、 $x$  は確率変数、 $\lambda$  は  $\ln x$  の平均値、 $\xi$  は  $\ln x$  の標準偏差である。谷本ら（1985）の研究は、テトラポッド全断面被覆形式の消波ブロック被覆堤を対象としたものである。ドロス層被覆形式の  $K_D$  の相対度数分布に関しても、対数正規分布が実験結果の傾向を概ね表しているようである。 $\chi^2$  乗検定を行い対数正規分布の妥当性を調べたところ、全てのケースにおいて、有意水準 5% で対数正規分布の妥当性が確認された。

図 2.7 は、図 2.6 に示した理論曲線より、 $D=1\%$  の  $K_D$  とその未超過確率を求めたものである。これより、ある  $K_D$  での未超過確率を推定することができる。図中には、現行設計でドロスの所要質量算定に用いられている  $K_D=20$  に対応する未超過確率の値を示している。 $t=1.8h$  と  $t=1.6h$  の場合の未超過確率はほぼ同じで 20%弱である。しかしながら、 $t=1.4h$  の場合は、未超過確率が約 50%となる。 $t=1.4h$  の断面を  $K_D=20$  で設計した場合には、質量不足によりドロスが不安定となる可能性が高まるといえる。

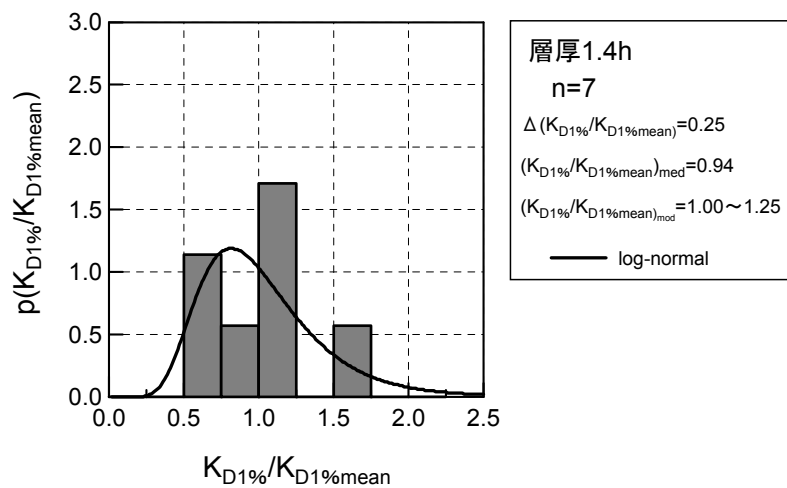
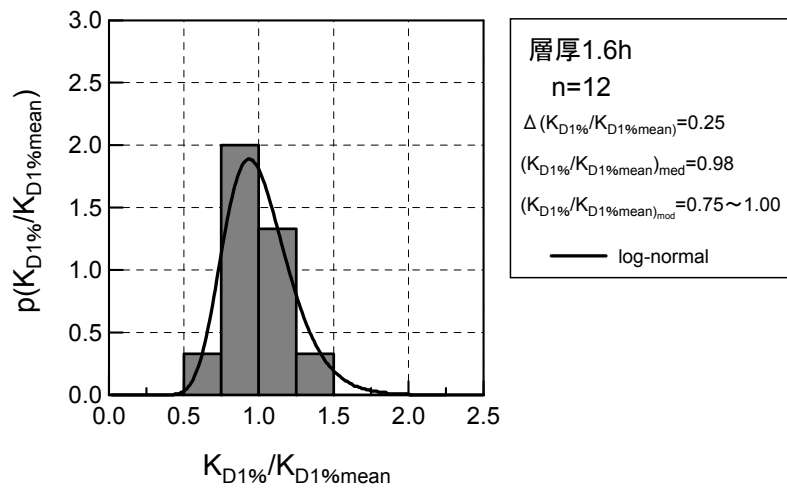
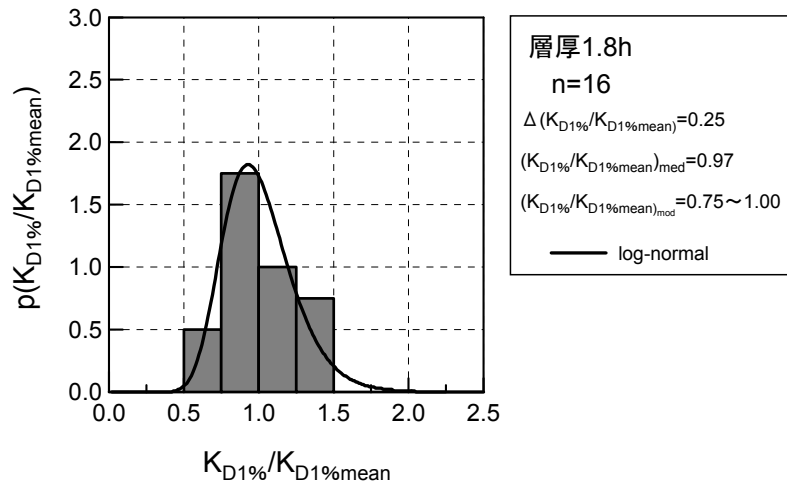


図 2.6 被害率 1%相当の  $K_D$  の相対度数分布

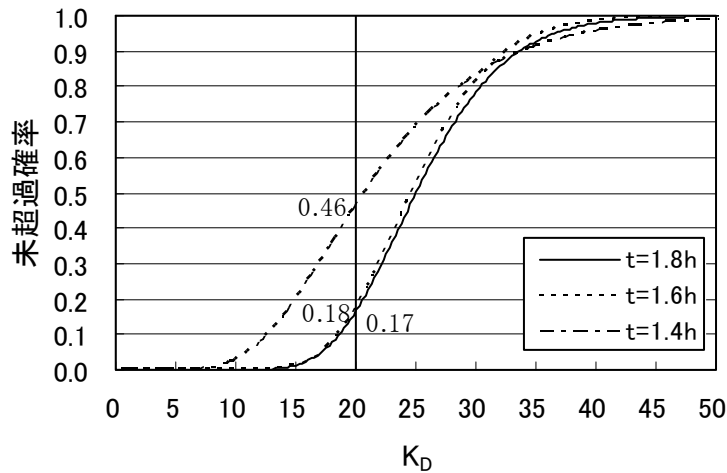


図 2.7 被害率 1%の  $K_D$  と未超過確率

## 2.3 消波ブロック傾斜堤

### 2.3.1 実験条件および実験方法

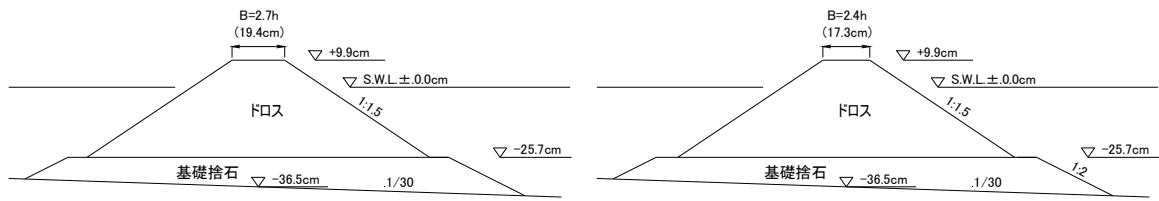
#### (1) 実験条件

水理模型実験は、2.2.1(1)と同様に図 2.1 に示す 2 次元造波水路を用いて行った。通過波検定も 2.2.1(1)に示した方法と同様である。通過波検定の後に、1/30 勾配の水路上に消波ブロック傾斜堤を設置した。

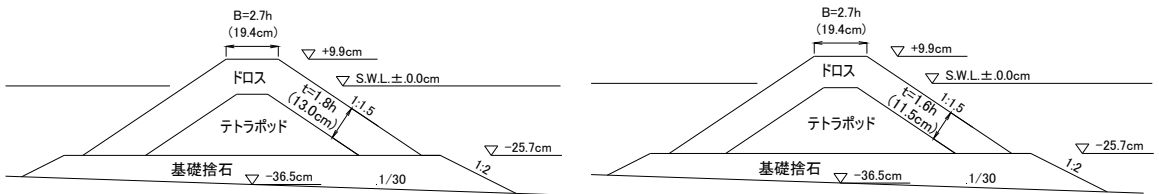
実験条件を表 2.3 に示す。実験は 2 つのシリーズに分かれている。各シリーズの実験内容は以下のとおりである。シリーズ 1 は、消波工の天端幅  $B$  の違いによるブロックの安定性の変化について調べたものである。実験は全断面被覆形式で行った、天端幅は、ドロス高さ  $h$  の 2.7 倍 ( $2.7h$ ) と、それより幅を狭くした 2.4 倍 ( $2.4h$ ) としている。シリーズ 2 は、層被覆形式でのブロックの安定性について調べたものである。ドロスの被覆層厚  $t$  はドロス高さ  $h$  の 1.8 倍 ( $1.8h$ ) と 1.6 倍 ( $1.6h$ ) で、中詰め材をテトラポッドとした断面を検討対象とした。なお、シリーズ 2 における天端幅は、ドロス高さ  $h$  の 2.7 倍

表 2.3 実験条件

	構造形式	天端幅 $B$	被覆層厚 $t$	実験回数 (回)
シリーズ 1	全断面被覆形式	$2.7h$		11
		$2.4h$		4
シリーズ 2	層被覆形式	$2.7h$	$1.8h$	20
			$1.6h$	8



a) シリーズ 1



b) シリーズ 2

図 2.8 実験断面

(2.7h) とした。入射波の周期は、シリーズ 1, 2 とともに、 $T_{1/3}=1.40s, 1.64s, 1.87s, 2.11s$  の 4 周期である。有義波高は、各シリーズともに  $H_{1/3}=6cm\sim 22cm$  である。各シリーズでの堤体断面を図 2.8 に示す。消波ブロック模型はモルタル製である。質量は、ドロスが 135.8g, テトラポッドが 117.8 g であり、密度は、ドロスが  $2.367g/cm^3$ , テトラポッドが  $2.300g/cm^3$  であった。ドロスのブロック高さ  $h$  は 7.2cm である。

## (2) 実験方法

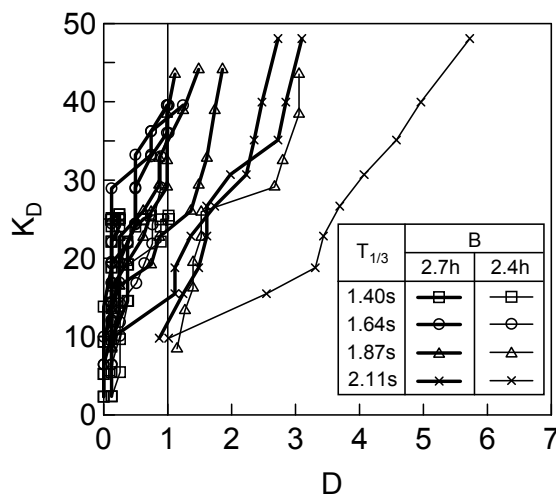
実験方法は、2.2.1(2)で示した方法と同様である。実験断面に不規則波を作用させ、ブロックの挙動を観察した。実験結果は、被害率  $D(\%)$  に対する  $K_D$  で評価した。

### 2.3.2 天端幅による相違

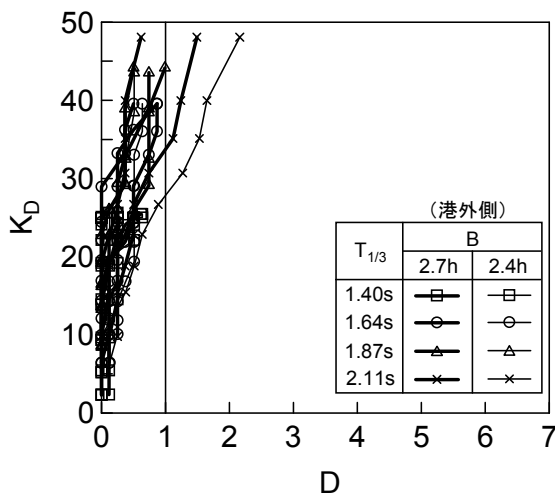
シリーズ 1 の実験結果を図 2.9 に示す。縦軸は  $K_D$  で、横軸は被害率  $D(\%)$  である。傾斜堤全体の被害個数より算出される被害率、港外側における被害個数より算出される被害率、港内側における被害個数より算出される被害率を各々示している。全体の被害率の傾向をみると、天端幅が狭い  $B=2.4h$  のケースの安定性が  $B=2.7h$  よりも低くなる傾向にある。また、周期  $T_{1/3}$  が長くなると、いずれのケースにおいても安定性が低下している。天端幅が狭く、周期の長い  $B=2.4h$  で  $T_{1/3}=2.11s$  の場合は、 $K_D=10$  程度において被害率が  $D=1.0\%$  程度となり、その後の被害の進行も顕著である。港外側および港内側の被害率に着目すると、被害は港内側で生じやすく、周期が長いほど、その後の被害も進行しやすいことが分かる。初期被害は、港内側の法肩に位置するブロックで生じやすく、港外側のブロックは、港内側のブロックよりも安定であった。港内側の法肩に位置する

ブロックは、波の入射方向に対して背後の抑えがないため、被害が生じやすいと考えられる。また、周期が長いほど、天端幅  $B$  が波長  $L_{1/3}$  で代表されるような波のスケールに対して小さくなるので、港内側の法肩においても波の影響を受け易くなることが想定される。

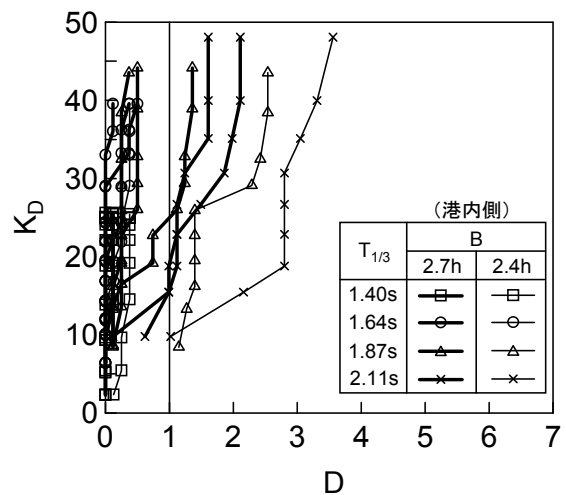
図 2.10 は、 $K_D$  と  $B/L_{1/3}$  の関係を示している。図中には、全体の被害率が  $D=0.5\%$  から  $D=2.0\%$  に相当する  $K_D$  を示した。ばらつきはあるものの、 $B/L_{1/3}$  が小さくなると  $K_D$  は低下する傾向にある。 $D=1.0\%$  に着目すると  $B/L_{1/3}$  が 0.06 より小さくなると  $K_D$  が 20 を下回っている。



a) 全体の被害率



b) 港外側の被害率



c) 港内側の被害率

図 2.9  $K_D$  の天端幅による相違



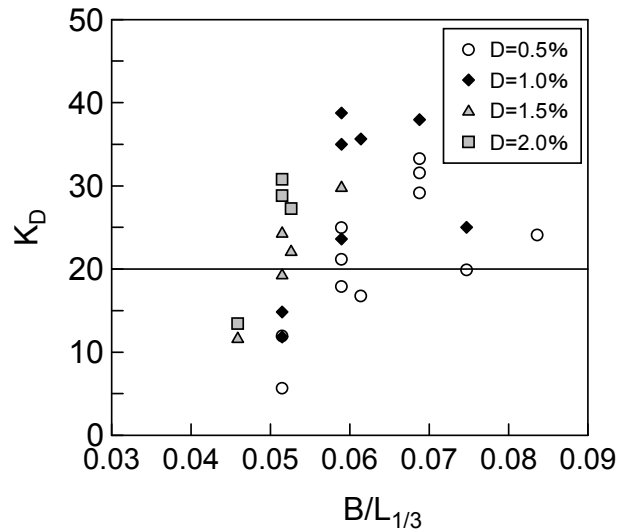
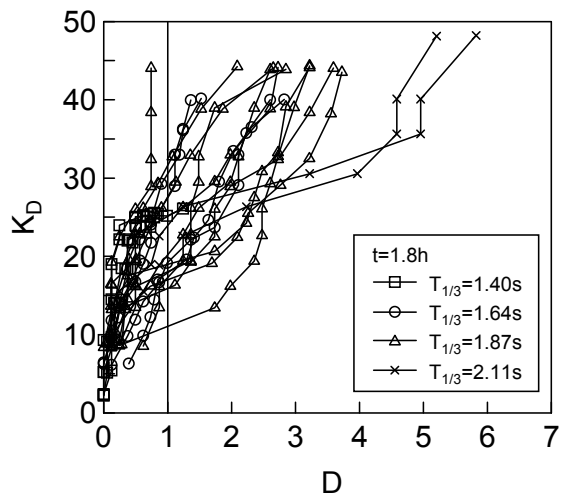


図 2.10  $K_D$  と  $B/L_{1/3}$  の関係

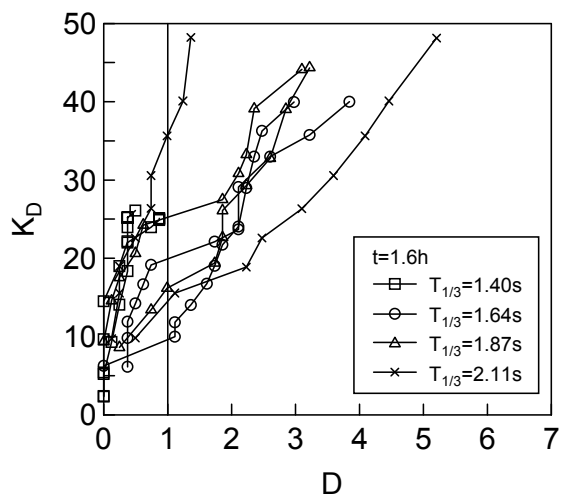
### 2.3.3 被覆層厚による相違

#### (1) 被害率 $D\%$ に対する $K_D$

シリーズ 2 の実験結果を図 2.11 に示す．縦軸は  $K_D$  で，横軸は被害率  $D(\%)$  を示している．被覆層厚の違いによる  $K_D$  の差異は顕著でないことが分かる．なお，2.3.2 と同様に，被害は港内側の法肩で生じやすく，港外側のブロックは，港内側のブロックよりも安定であった．表 2.4 に，内挿して求めた  $D=1.0\%$  相当の  $K_D$  の平均値  $\mu_{D1\%}$  および標準偏差  $\sigma_{D1\%}$ ，変動係数  $\delta_{D1\%}$  を示す．平均値  $\mu_{D1\%}$  は，被覆層厚によらずほぼ同等である．表 2.2 に示した，消波ブロック被覆堤における  $t=1.8h$  および  $t=1.6h$  での  $\mu_{D1\%}$  と比較すると，傾斜堤における  $\mu_{D1\%}$  は小さな値をとる．消波ブロック傾斜堤におけるドロスの安定性は，消波ブロック被覆堤における安定性と比較して，低下することが分かる．また，ここでは， $t=1.4h$  のケースについては検討していない．図 2.5 に示したように，消波ブロック被覆堤においては， $t=1.8h$ ， $t=1.6h$  では安定性がほぼ同等であっても，さらに被覆層厚を小さくした  $t=1.4h$  では安定性が低下している．消波ブロック傾斜堤と消波ブロック被覆堤では，波の作用状況，被災形態が異なる．そのため，消波ブロック被覆堤において把握された被覆層厚の減少に伴う安定性の低下の傾向が，消波ブロック傾斜堤においても生じるとは一概にはいえないが，被覆層厚が減少することで，外力に対するドロスの抵抗力が低下するとすれば，消波ブロック傾斜堤においても同様の傾向をとると考えられる．



a)  $t=1.8h$



b)  $t=1.6h$

図 2.11  $K_D$ の被覆層厚による相違

表 2.4 被害率 1%相当の  $K_D$

層厚	1.8h	1.6h
サンプル数	20	8
上限～下限	31.96～11.04	35.79～9.6
平均値 $\mu_{D1\%}$	22.76	21.56
標準偏差 $\sigma_{D1\%}$	5.75	8.22
変動係数 $\delta_{D1\%}$	0.25	0.38

## (2) $K_D$ の度数分布

2.2.3(2)と同様に、被害率 1%相当の  $K_D$  をその平均値で規準化し、相対度数を調べた。図 2.12 は、各層厚における  $K_D$  の相対度数を示している。図中の曲線は、理論曲線として対数正規分布をあてはめたものである。消波ブロック被覆堤の場合と同様、消波ブロック傾斜堤においても対数正規分布が実験結果の傾向を概ね表しているといえる。

図 2.13 は、図 2.12 に示した理論曲線より、被害率  $D=1\%$  の  $K_D$  とその未超過確率を求めたものである。図中には、現行設計でドロスの所要質量算定に用いられている  $K_D=20$  に対応する未超過確率の値を示している。 $t=1.8h$  のケースでは、未超過確率は約 35% である。 $t=1.6h$  のケースでは、未超過確率が 50% となり、 $t=1.8h$  のケースより大きな値となる。

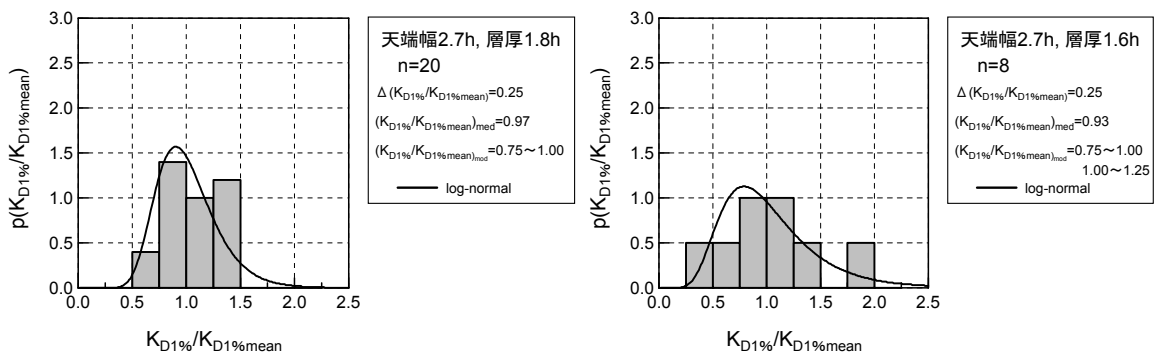


図 2.12 被害率 1%相当の  $K_D$  の相対度数分布

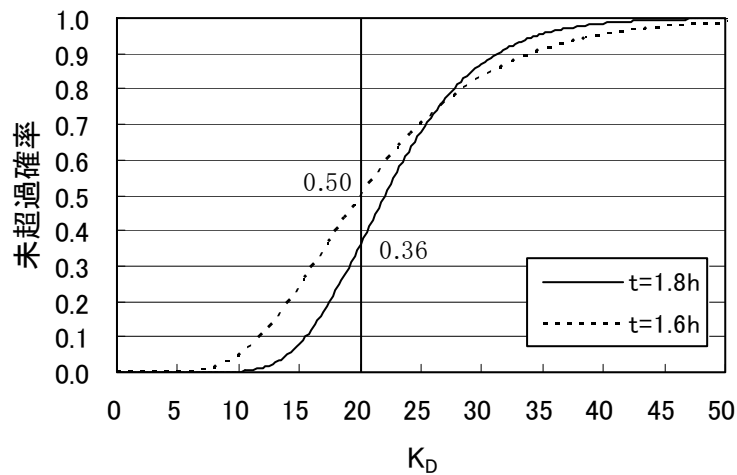


図 2.13 被害率 1%の  $K_D$  と未超過確率

## 2.4 結語

本章では、ドロスを用いた消波ブロック被覆堤および消波ブロック傾斜堤を対象とした水理実験を行い、消波工諸元とドロスの耐波安定性に関する検討を行った。今後、採用が増えると思われる層被覆形式については、安定実験における被害のばらつきを考慮して、耐波安定性を詳細に調べるために実験を繰り返し行い、被害率  $D=1\%$  の  $K_D$  の確率特性について調べた。

本章で得られた結果を以下に要約する。

- 1) 消波ブロック被覆堤で、消波工の天端幅が狭いケースにおいて、ドロスの耐波安定性は低下する傾向にある。天端幅が狭くなると法肩付近のドロスが動揺しやすくなるとともに、天端付近で被害が生じることから、消波工の天端が沈下しやすい。
- 2) 消波ブロック被覆堤で、被覆層厚を小さくしたケースにおいて、ドロスの耐波安定性は低下する傾向にあり、 $D=1.0\%$  の  $K_D$  を確率変数とした場合の  $K_D=20$  における未超過確率は大きくなる。
- 3) 消波ブロック傾斜堤で、消波工の天端幅が狭いケースにおいて、ドロスの耐波安定性は低下する傾向にある。天端幅が狭くなると、港内側法肩のブロックが移動しやすく、周期が長い場合には被害の進行が顕著となる。
- 4) 消波ブロック傾斜堤では、被覆層厚を消波ブロック被覆堤の場合と同程度にとった場合においても、ドロスの安定性が相対的に低下する傾向にある。

## 参考文献

合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976)：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No.248，24p.

谷本勝利・原中祐人・山寄一雄 (1985)：不規則波に対する消波ブロックの安定性に関する実験的考察，港湾技術研究所報告，第 24 巻，pp.85-121.

森平倫平・柿崎秀作・菊池 徹 (1967)：異型ブロックの波力減殺効果に関する研究，港湾技術研究所報告，第 41 巻，pp.1-31.

Hudson, R.Y (1959) : Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol.85, WW3, pp.93-119.

Merrifield, E.M. and J.A. Zwamborn (1966) : The economic value of a new breakwater armour unit 'dolos', Proceedings of 10th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp.885-912.

## 第3章 耐波安定性に及ぼす流速場の影響と消波ブロックのかみ合いの効果

### 3.1 緒言

直立壁前面に消波工を有する消波ブロック被覆堤は，わが国の主要な防波堤構造のひとつである．既に，第2章でふれたように，消波ブロック被覆堤の消波工構造としては，施工性に優れた全断面に同一のブロックを用いるタイプの実績が多い．しかし，表層のみに所要質量のブロックを用い，下層には小型のブロックや石材を中詰め材として使用するタイプも，経済性の観点から今後は更に適用事例が増えてくることが想定される．Hudson (1959) や van der Meer (1987) の傾斜堤を対象とした研究によれば，中詰め材を有しその表層を被覆する被覆石の安定性は，被覆層厚および中詰め材の透水性の影響を受けるとされている．消波ブロック被覆堤における層被覆形式の消波ブロックの安定性も，被覆層厚および中詰め材の影響を受けるものと考えられる．このような中詰め材と消波ブロック被覆堤の消波ブロックの安定性との関係については，鹿島ら (1994) が中詰め材の天端高さを変えた研究を行っているが，安定実験結果の提示にとどまっており，ブロックへ作用する外力や外力に対する抵抗と関連させた系統的な研究はなされていない．

本章では，消波ブロック被覆堤を対象として，全断面被覆形式と層被覆形式の消波ブロックの耐波安定性について，被覆層厚および中詰め材を変化させた系統的な水理模型実験により検討した．さらに，作用外力および消波ブロックの抵抗力の観点からその耐波安定性の差異に及ぼす要因を明らかにすることを目的として，消波工まわりの流速場の計測および消波ブロックのかみ合いの程度の評価を試みた．

## 3.2 消波工形式と耐波安定性の関係

### 3.2.1 実験条件および実験方法

#### (1) 実験条件

水理模型実験は、図 3.1 に示す長さ 55m、幅 1.2m、高さ 1.5m の 2 次元造波水路を用いて行った。水路の一端にはピストン型造波機が設置され、他端に向けて 29m の水平部を経て 1/30 の勾配を持つ水路床が設置されている。造波制御として、ソフトウェアによる反射波吸収制御を行っている。それに伴い、反射波制御用の波高計 2 本を造波板近くに設置した。通過波検定は、波高計を沖側一様水深部に 2 本と堤体位置前後に 2 本設置して行った。合田ら（1976）の入射波分離推定法を用い、入射波成分を通過波として検定を行った。波高計の間隔は、入射波分離の際に、分離有効周波数帯に周波数のピークが含まれるように設定した。不規則波の理論スペクトルは修正 Bretschneider-光易型を用いた。取得した水位データを解析して得られる有義波高と有義周期および周波数スペクトルの形状が目標値と一致するまで、造波信号の修正を繰り返した。通過波検定の後に、1/30 勾配の水路床上に消波ブロック被覆堤を設置した。

実験断面の構造条件を表 3.1 に示す。全断面被覆形式および層被覆形式を対象として実験を実施した。層被覆形式の実験は、被覆層厚および中詰め材の種類を変えた 6 つの断面 a)~f)で行っている。各断面には断面名称を与えている。被覆層厚  $t$  は  $1.8h$  あるいは  $1.2h$  とし、中詰め材は、テトラポッドあるいは石材とした。中詰め材を石材とした断面では、石材を被覆ブロックの一種であるエクスブロックで被覆した断面を基本としているが、石材の上に直接ドロスを設置した断面についても実験を行った。消波工の法勾配と天端高は一定の値としている。消波工の法勾配は、これまで実績のある標準的な値である 1:1.5 とし、天端高は、現行設計で用いられている被害率 1% の  $K_D$  ( $K_D=20$ ) と法勾配 1:1.5 から Hudson 式により波高を逆算して、求めた波高の 0.6 倍に相当する高さ

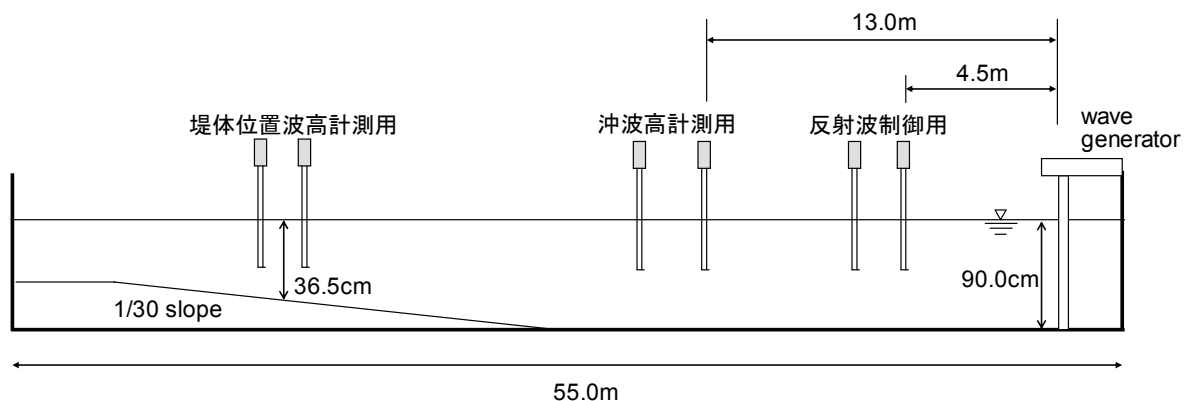


図 3.1 実験水路

とした。図 3.2 に実験断面 a)~f)を示す。表 3.2 に水理模型実験に用いた実験波を示す。不規則波は耐波安定実験および流速場の計測に，規則波は流速場の計測に用いた。消波ブロック模型はモルタル製である。ドロスが 83.7g/個 ( $h=6.1\text{cm}$ ,  $\rho_r=2.35\text{g/cm}^3$ )，テトラポッドが 80.2 g/個 ( $h=4.9\text{cm}$ )，エックスブロックが 31.7g/個である。

表 3.1 断面構造条件

消波工構造	被覆層厚	中詰め材	断面名称	断面
全断面被覆形式	—	—	全断面	a)
層被覆形式	1.8h	テトラポッド	1.8hTP	b)
	1.2h	テトラポッド	1.2hTP	c)
	1.8h	石材+エックスブロック	1.8h 石材	d)
	1.2h	石材+エックスブロック	1.2h 石材	e)
	1.2h	石材	1.2h 石材(XB無)	f)

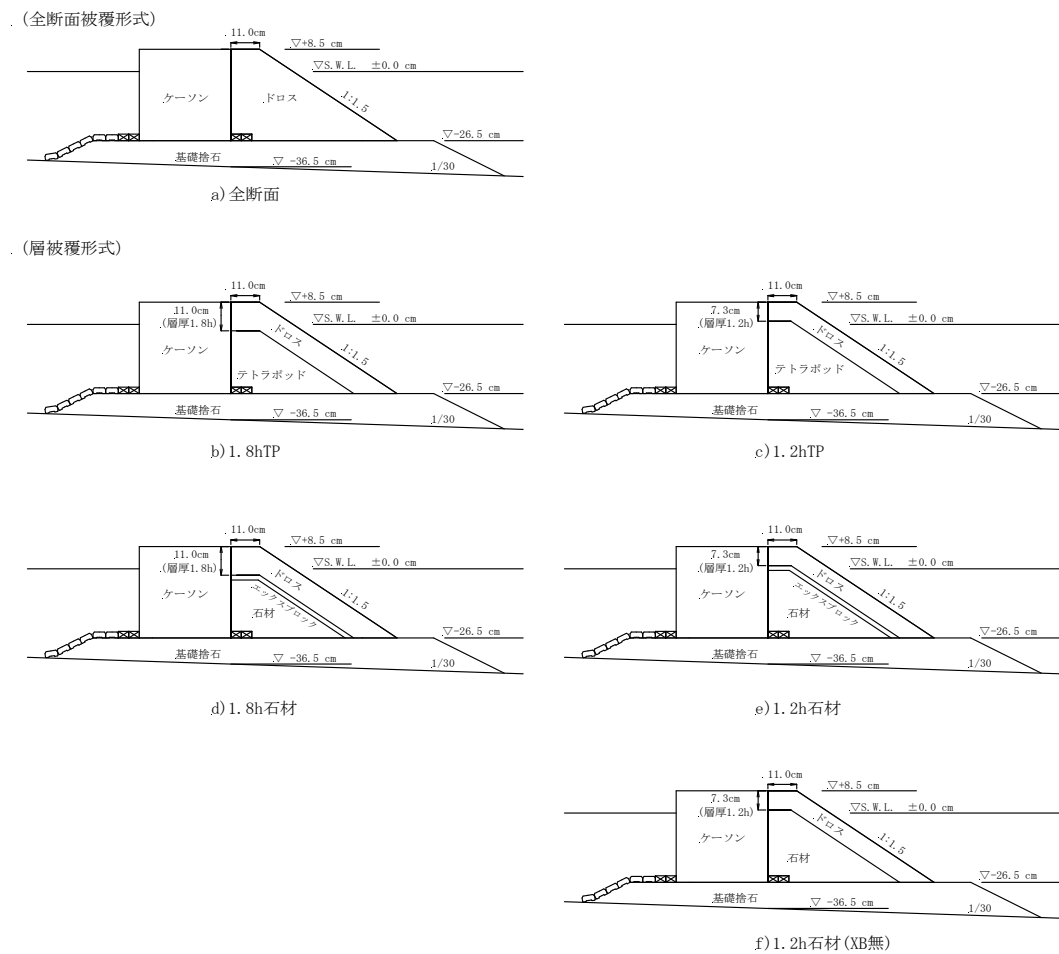


図 3.2 実験断面図



表 3.2 実験波一覧

	周 期	波 高	備 考
不規則波	$T_{1/3} = 1.63\text{s}$	$H_{1/3} = 6\sim 18\text{cm}$	安定実験 a)~f) 流速場の計測
	$T_{1/3} = 1.95\text{s}$	$H_{1/3} = 8\sim 18\text{cm}$	安定実験 b)のみ
規則波	$T = 1.63\text{s}$	$H = 5\sim 17\text{cm}$	流速場の計測
	$T = 1.00\text{s}$	$H = 4\sim 12\text{cm}$	流速場の計測

## (2) 実験方法

ドロソ被覆堤模型に表 3.2 に示した不規則波を作用させ、ドロソの挙動を観察した。ドロソの移動が生じないような小さな波から作用させ、約 1cm ピッチで順次波高を増加させた。同一波高レベルでの波の作用は 1000 波を標準とした。波高を増加させる際、ドロソの積み直しは行わず、被害個数はそれまでの被害個数に当該波高条件で新たに発生した被害個数を加えた累計数とした。本実験では、転落（ブロックの大きさの 1 個以上移動）および移動（45 度以上回転、ブロックの大きさの半分以上移動）したドロソを被害として計上した。

### 3.2.2 実験結果

図 3.3 は、a)~f)の各断面における安定実験結果を示している。縦軸は  $K_D$  で、横軸は被災度  $N_0$  を示している。被災度  $N_0$  とは、van der Meer (1987) によって導入された、被害の割合を示す指標である。 $N_0$  は堤体法線方向においてブロックの代表長  $D_n$  (式(2.2)参照) の幅当たりに生じたブロックの被害個数を意味している。被害率  $D$  は、ブロック総数に対する被害個数の割合を示すため、対象とするブロック総数の取り方でその値が変化するため、その定義に曖昧さが残されていた。その点、被災度  $N_0$  では、そうした曖昧さが解消されており、ブロックの被災の表現としては合理的といえる。a)全断面には、実験結果より得られる平均的な値（以降において、全断面平均と称す）を実線で示している。この値を全断面被覆形式の平均的な値として他断面の安定性との比較を行った。b)1.8hTP においては、全断面平均付近に安定数が分布している。実験結果のばらつきを考慮すると、全断面と同等の安定性を概ね確保しているものと考えられる。これより、層被覆形式において全断面被覆形式と同等の安定性を確保するためには、被覆層厚を 1.8h 程度確保する必要があるといえる。c)1.2hTP においては、全ての安定実験結果が全

断面平均を下回っている。第2章で示したように、被覆層厚が薄くなることで、表層ブロックの安定性が低下するといえる。d)1.8h 石材においても、全ての安定実験結果が全断面平均を下回っている。被覆層厚として1.8h 確保しても、中詰め材を石材とすると安定性が低下することが分かる。e)1.2h 石材および f)1.2h 石材(XB 無)においても全ての安定実験結果が全断面平均を下回っている。d)1.8h 石材と比較しても安定性がより低下している。全ての安定実験結果を図3.4にまとめて示す。

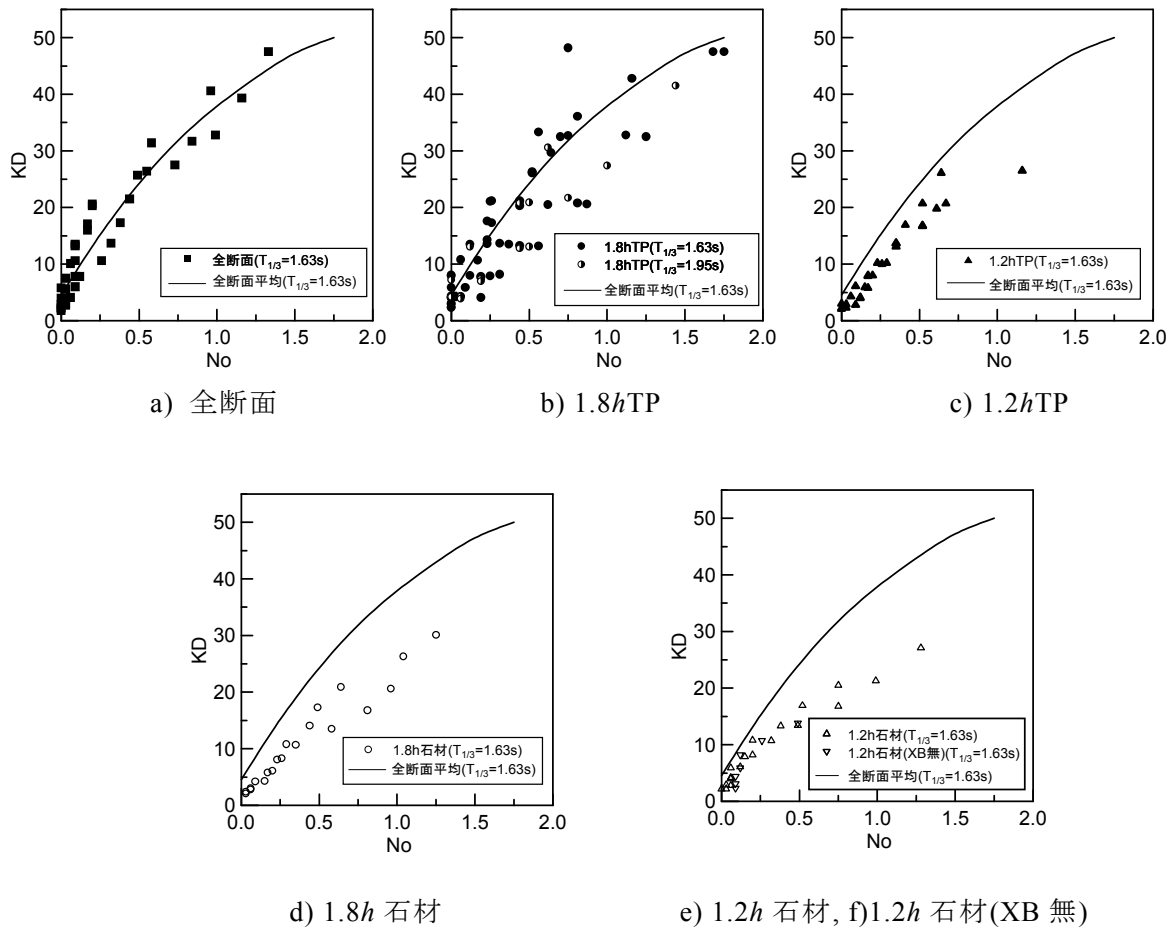


図 3.3 ドロス安定実験結果

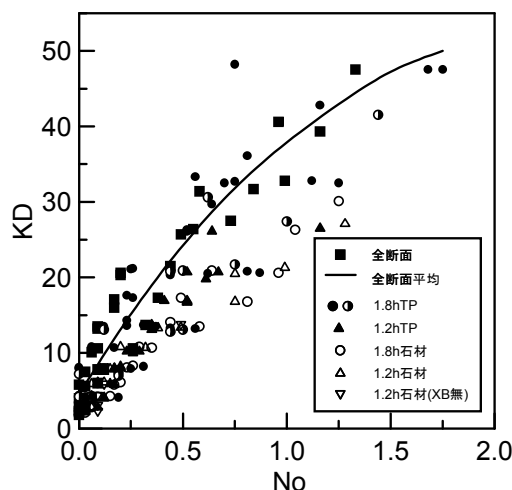


図 3.4 ドロス安定実験結果

以上の結果より、消波工構造の違いによりドロスの安定性に差異が生じることが分かった。すなわち、層厚が薄い場合にドロスの安定性が低下しており、中詰め材として石材を用いた場合もドロスの安定性が低下する傾向にある。その要因のひとつとしては、van der Meer (1987) が傾斜堤を対象とした研究で指摘しているように中詰め材の透水性の低下に伴う表層ブロックの安定性の低下が挙げられる。ドロス（空隙率 57.5%）やテトラポッド（空隙率 50.0%）といった空隙率の高い消波ブロックの透水性と比較して、空隙率の低い石材（空隙率約 40%）の透水性は低下する。そのため、中詰め材として石材を使用した場合の表層のドロスの安定性は低下するものと考えられる。被覆層厚が薄くなると消波ブロックの安定性が低下する傾向については、Hudson (1959) が指摘しているものの、その要因についてはふれられていない。そこで、ドロス被覆堤の消波工構造の違いによる安定性の差異の要因を明らかにするために、以下において、消波工まわりの流速場の計測およびドロスのかみ合いの程度の評価を試みた。

### 3.3 消波工まわりの流速場

#### 3.3.1 実験方法

安定実験で用いた 6 つの断面（図 3.2）を対象として、ケーソン前面の水位変動、被覆層近傍流速、遡上波形（被覆層内および被覆層外）の計測を行い、各断面における消波工近傍の流速場の特性を把握することを試みた。計測機器の設置状況を図 3.5 に示す。ケーソン前面の水位変動は、波高計をケーソンの沖側壁前面に沿って設置し、消波工内の水位変動を計測した。被覆層外縁において斜面に沿う流速を、電磁流速計によって計測した。流速は斜面上向き方向を正とした。被覆層外部 3.0cm の位置（表層より 0.5h 上側）および被覆層内部 2.7cm の位置（表層より 0.45h 内側）に斜面に沿って遡上計を設

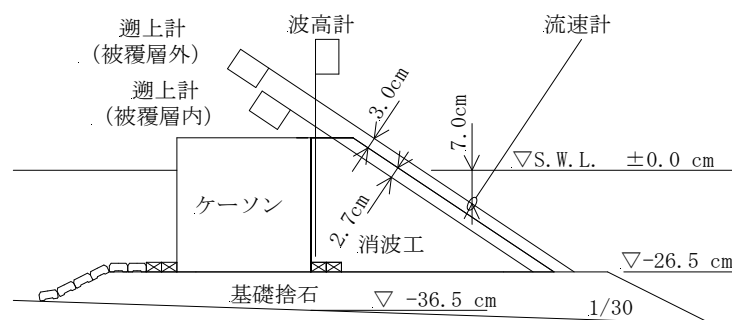
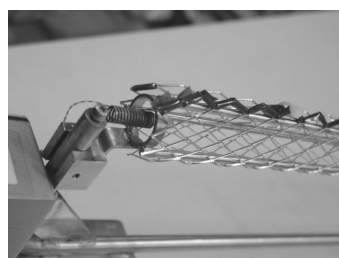


図 3.5 計測機器設置状況

置いて遡上波形を計測した。遡上計は、榊山・斉藤（1988）を参考として容量式波高計の容量線まわりに直径 3.0cm のステンレス製のサポーター（図 3.6 参照）を設けて使用した。被覆層内部に設置した場合も、容量線が消波ブロックの干渉を受けない構造となっている。なお層外、層内の遡上波形は、同時計測ではなく各々について個別に計測を行った。



a) サポーター設置状況



b) 容量線まわりの状況

図 3.6 容量線サポーター

### 3.3.2 ケーソン前面水位

ケーソン前面の水位変動の測定結果を図 3.7, 図 3.8 に示す。縦軸には、寄せ波時の最大水位と引き波時の最低水位を示してある。横軸は波高である。中詰め材の違いにより、引き波時のケーソン前面の最低水位に差が生じている。最低水位は、全断面被覆および中詰め材をテトラポッドとした場合が最も低くなり、その値はほぼ同一である。中詰め材に透水性の低い石材を用いた場合は、他条件と比較して水位の低下が小さい。この傾向は、堤体内部に過剰ヘッドを引き起こし、被覆材の安定性を低下させる要因となることが指摘されており（Bruun and Johannesson, 1976; Bruun and Günbak, 1977），すでに述べた中詰め材に石材を用いた場合の表層のドロスの安定性の低下傾向と一致する。

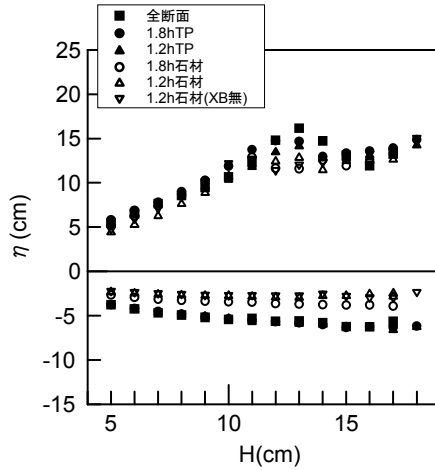


図 3.7 ケーソン前面水位（規則波）

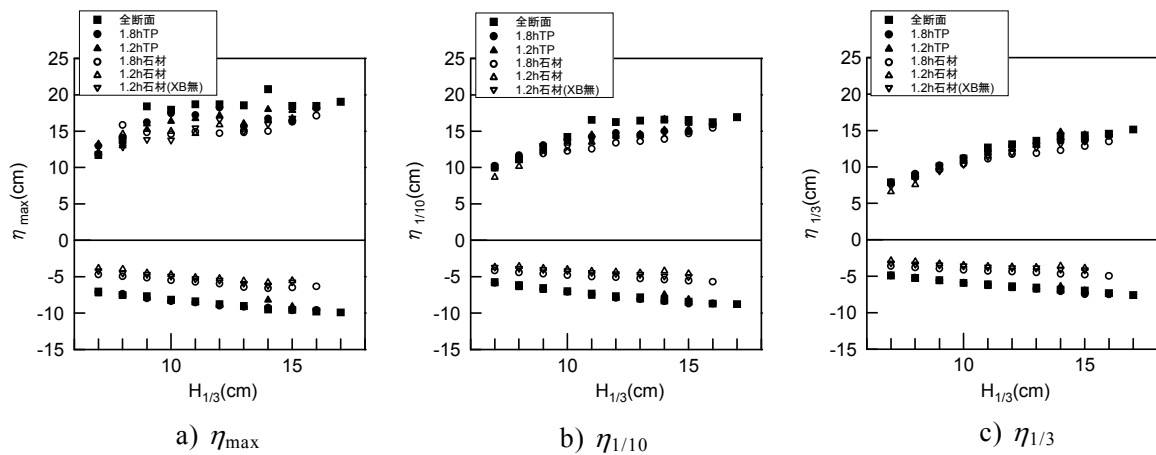


図 3.8 ケーソン前面水位（不規則波）

### 3.3.3 被覆層外縁における流速

被覆層外縁流速の測定結果を図 3.9, 図 3.10 に示す. 被覆層厚による流速の変化は明瞭ではない. 一方, 中詰め材の違いにより流速に差異が生じていることが分かる. 中詰め材として石材を用いた方が, 流速値が大きくなっており, 中詰め材の透水性の低下にともなって, 表層のブロックに作用する抗力が増加するものと推察される. この中詰め材の種類が流速に及ぼす影響を検証するために数値波動水路(磯部ら, 1999)により規則波計算を行った. 結果を図 3.11 に示す. ここで  $u$  は波進行方向,  $w$  は鉛直上向きを正とし, 水深は全域で 36.5cm とした. 石材の諸量は空隙率 0.44, 抵抗係数 1.00, 慣性力係数 1.20 とした. 消波ブロックの空隙率は, ドロスが 0.575, テトラポッドを 0.5 とし, 抵抗係数および慣性力係数は両者ともに 0.9, 1.5 とした. 計算結果からも中詰め材の透水性が小さいと斜面に沿う流速も大きくなることがわかる. また被覆層の外側へ向かう

流速が中詰め材の透水性が小さいほど大きくなっている。

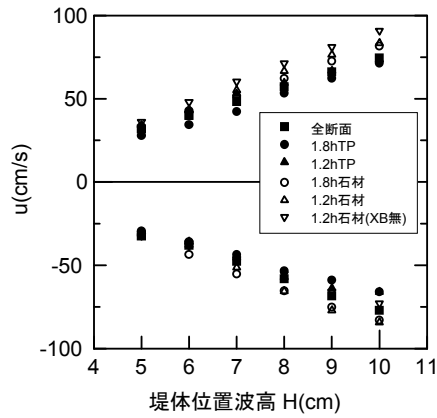


図 3.9 被覆層外縁流速（規則波）

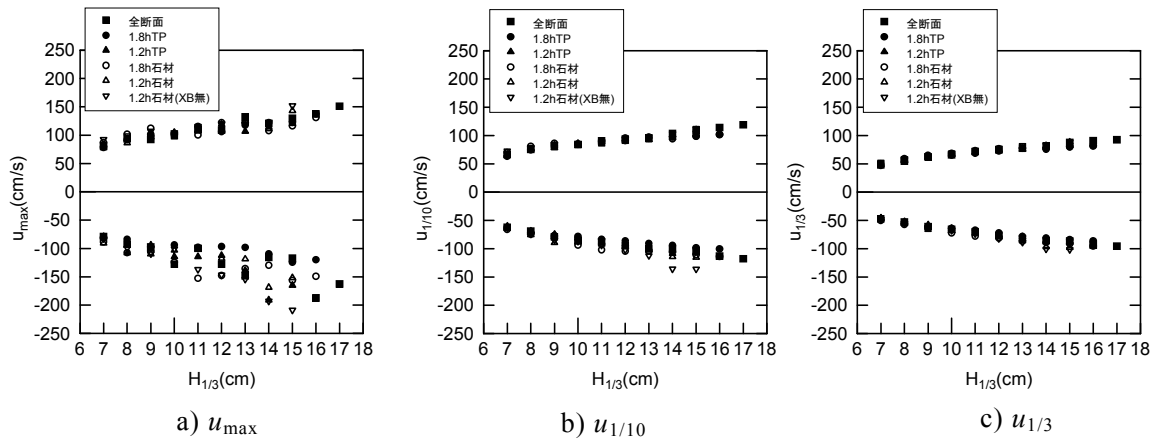


図 3.10 被覆層外縁流速（不規則波）

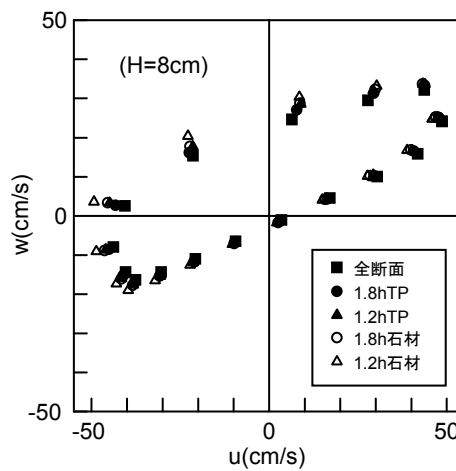


図 3.11 被覆層外縁における水平・鉛直流速の計算値（規則波）

### 3.3.4 被覆層内外の遡上波形

#### (1) 遡上高さ

被覆層内外の遡上高さの測定結果を図 3.12, 図 3.13 に示す. 被覆層外においては, 中詰め材に石材を用いた場合に, 全断面および中詰め材がテトラポッドの場合より流下時

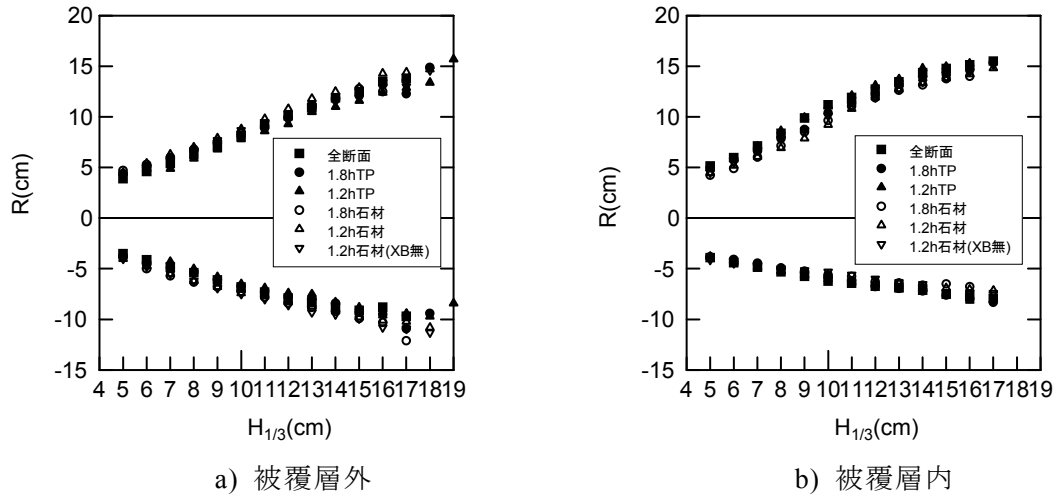


図 3.12 遡上高 (規則波)

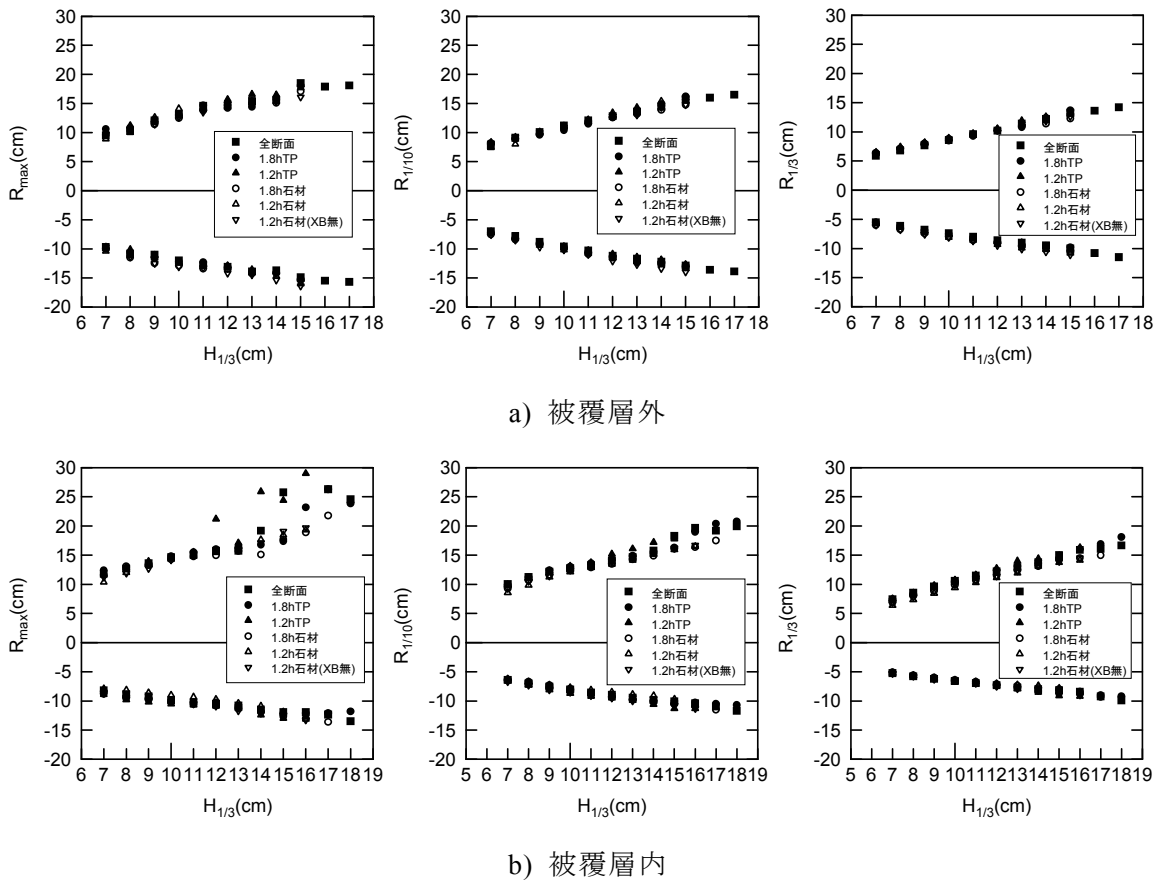


図 3.13 遡上高 (不規則波)

の水位の低下が大きくなる。被覆層内においてはその傾向が異なっており、全断面および中詰め材がテトラポッドの場合の方が流下時の水位の低下が大きくなる。被覆層厚による遡上高の明瞭な差異は見られない。中詰め材の透水性の違いにより、水面の変動の傾向が異なることがわかる。

## (2) 遡上波先端速度

計測した遡上波形を時間微分することで遡上波の先端速度を求めた。この先端速度は、波の遡上および流下時の平均的な流速と考えられる。不規則波および規則波における被覆層内外の遡上波先端速度を図 3.14, 図 3.15 に示す。被覆層外においては、中詰め材として石材を用いた場合がテトラポッドを用いた場合より遡上速度および流下速度ともに大きな値をとることがわかる。この傾向は被覆層外縁の流速と同様であり、中詰め材の透水性が低下すると、表層ブロックに作用する抗力が大きくなると考えられる。この作用外力の増大が安定性を低下させる要因として挙げられる。被覆層内の流下速度は、被覆層外における傾向と異なり透水性の低下に伴い小さくなる。前述したケーソン前面水位, 被覆層外縁における流速, 被覆層内外の遡上波形の解析結果を基にした中詰め材の違いによる被覆層内外における流れの模式図を図 3.16 に示す。

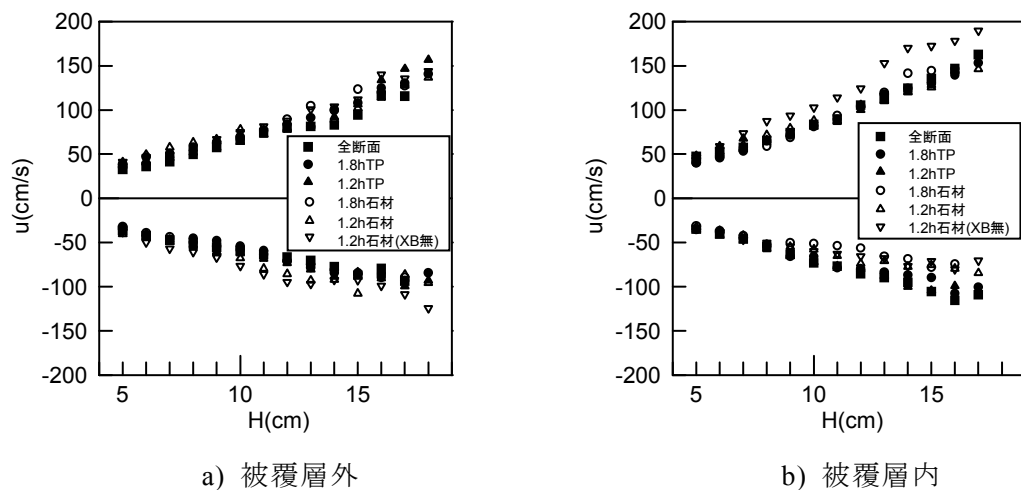
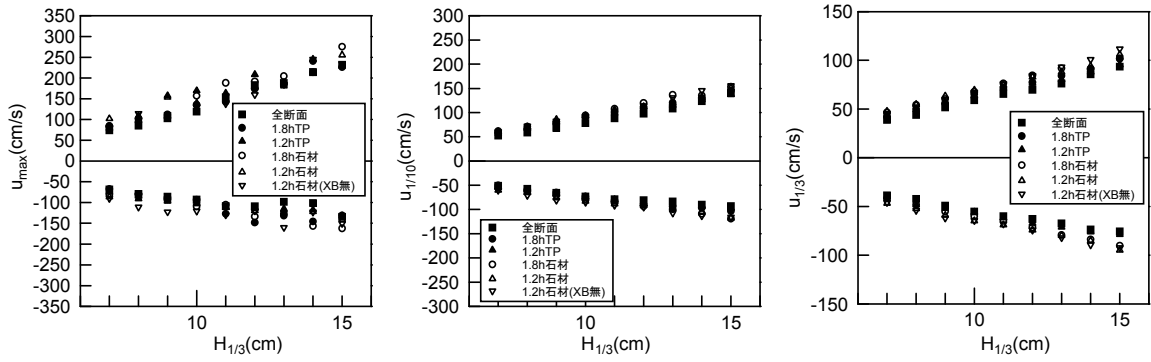
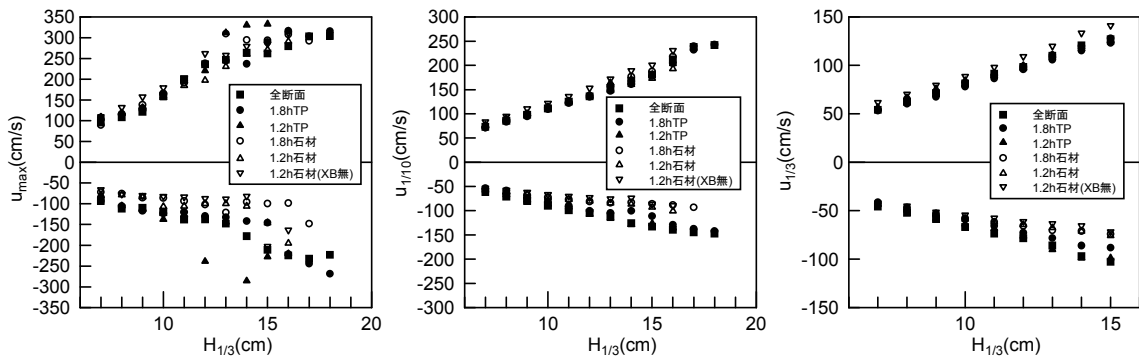


図 3.14 遡上波先端速度 (規則波)





a) 被覆層外



b) 被覆層内

図 3.15 遡上波先端速度 (不規則波)

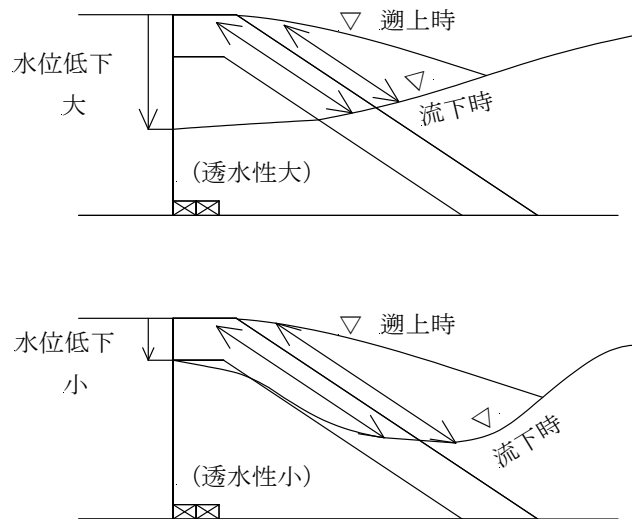


図 3.16 被覆層内外における流れの様相

被覆層内外の流下速度の差を図 3.17, 図 3.18 に示す. 縦軸は被覆層外の流下速度より被覆層内の流下速度を引くことで得られる流下速度差 $\Delta u$ を示している.  $\Delta u$  は, 表層ブロックの転がりやすさを示す指標と考えられる.  $\Delta u$  が負値をとる場合には被覆層内の流下速度の方が大きい, 正值をとる場合には被覆層外の流下速度の方が大きくなり, 表層のブロックが斜面を下向きに転がる作用をより大きく受けることが類推される (図 3.19 参照).  $\Delta u$  は中詰め材の透水性が高い場合には負値をとり, 透水性が低い場合は正值をとることがわかる. 中詰め材の透水性が低くなることで表層のブロックは, 斜面を下向きに転がる作用を受けるため, 安定性が低下すると考えられる. 以上より, 中詰め材の透水性が低くなれば表層のブロックに作用する抗力が増大し, 流下時には斜面を下向きに転がる作用を大きく受けることで安定性が低下すると考えられる.

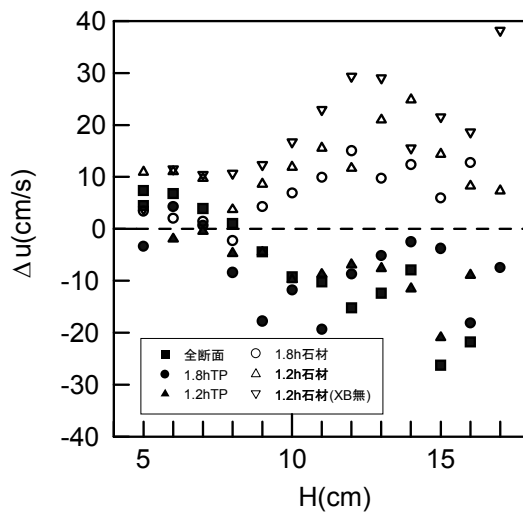


図 3.17 流下速度差 (規則波)

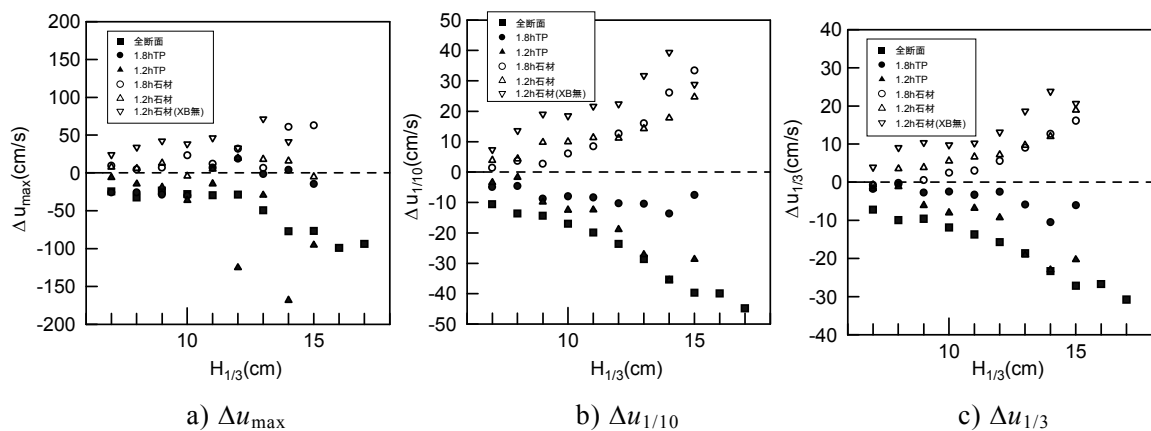


図 3.18 流下速度差 (不規則波)

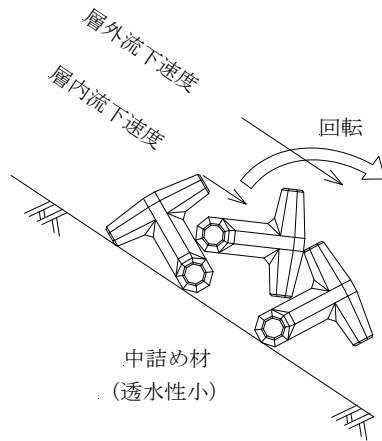


図 3.19 表層ブロックの転がりやすさ

### 3.4 消波ブロックのかみ合い

#### 3.4.1 実験方法

測定箱内に全断面被覆形式および層被覆形式に対応するドロス被覆層を形成し，表層に位置するドロスの変位可能量（後述）の測定を行うことで，その大小によってブロックの移動に対するブロックのかみ合いの効果について検討した．ブロックの変位量測定に用いた装置を図 3.20 に示す．測定装置は，振動装置と測定箱よりなる．振動装置は，

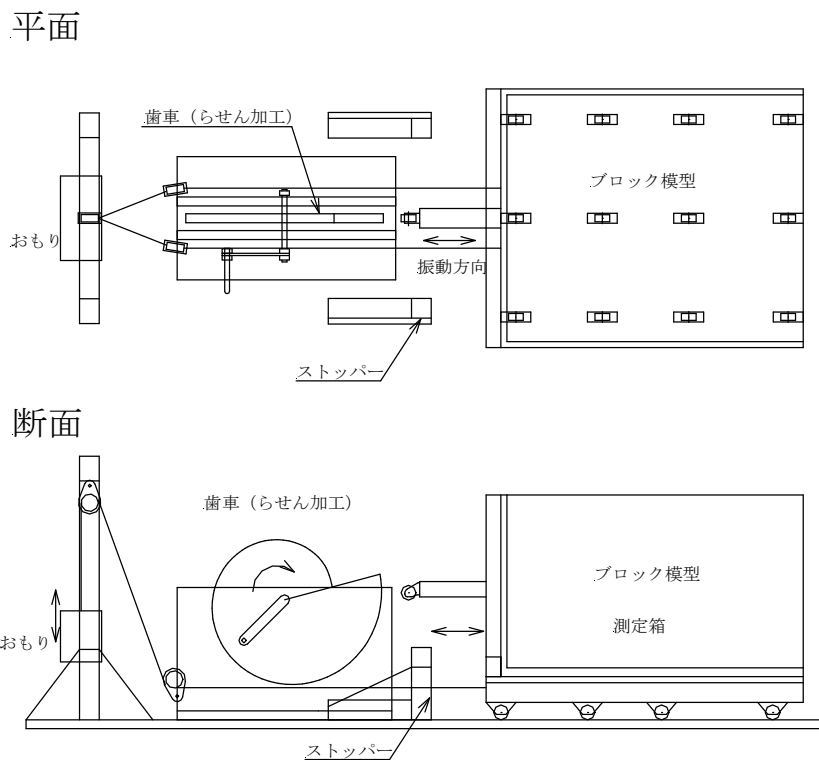


図 3.20 ブロック変位量測定装置

おもりとつながる測定箱に、歯車によって水平方向の振動を加える構造である。測定箱内に全断面被覆形式（層厚  $5.7h$ ）、層被覆形式（層厚  $1.8h, 1.2h$ ）に対応するドロス被覆層を形成し、振動装置にて加振した後に測定を行った。

測定箱を図 3.21 に示す。脚端中心をマーキングしたドロス模型を用いて、測定箱内にドロス被覆層を形成した。実験に使用したドロス模型は  $83.7\text{g}/\text{個}$  ( $h=6.1\text{cm}$ ,  $\rho_r=2.35\text{g}/\text{cm}^3$ ) である。形成後に振動装置にて測定箱に 50 回の振動を加えることで、波作用による消波ブロックの初期の締め固めを模擬した。測定箱の天端面は、 $6.3\text{cm} \times 6.1\text{cm}$  の格子状に区切られており、計 30 点の格子点の直下に位置する表層のブロックを測定対象とした。格子点を図 3.22 に示す。振動を加えた方向に対して、測定対象ブロックが隣接するブロックに接触するまでの距離である変位可能量（図 3.23 参照）を定規にて測定した。

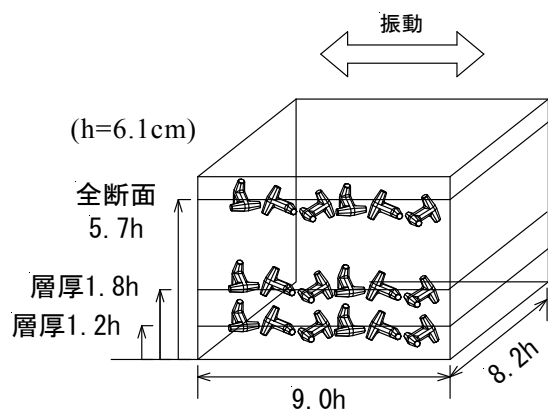


図 3.21 測定箱

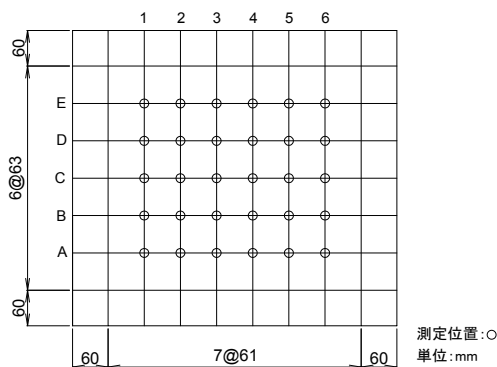


図 3.22 測定格子点

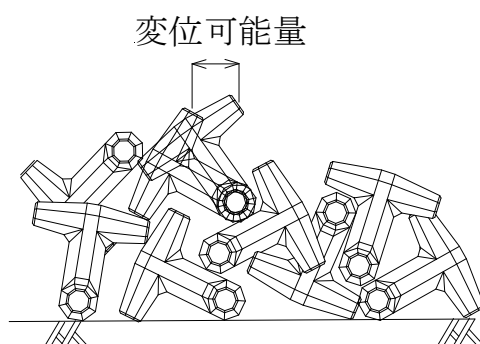


図 3.23 変位可能量

### 3.4.2 表層ブロックの変位可能量

同一の外力に対して被覆層が不安定となるのは、一定レベルの閾値以下の抵抗力となるブロックの多寡によるものと考えられる。そこで、測定した変位可能量を超過確率で整理した。超過確率は、ある値以上の出現度数が全度数に占める割合で表される。超過確率の定義を次式に示す。

$$p(x_i) = \frac{N - \sum n_{i-1}}{N} \quad (3.1)$$

ここに、 $p(x_i)$  は変位可能量  $x_i(\text{mm})$  における超過確率、 $N$  は全度数、 $\sum n_{i-1}$  は変位可能量  $x_{i-1}(\text{mm})$  以下の度数の合計である。

実験結果を図 3.24 に示す。図より、層厚が薄くなるにつれて変位可能量が大きなブロックが多く存在していることが分かる。この結果より、層厚が薄くなるにつれて抵抗力としてのかみ合わせの効果が小さくなるために、耐波安定性が低下することが類推される。

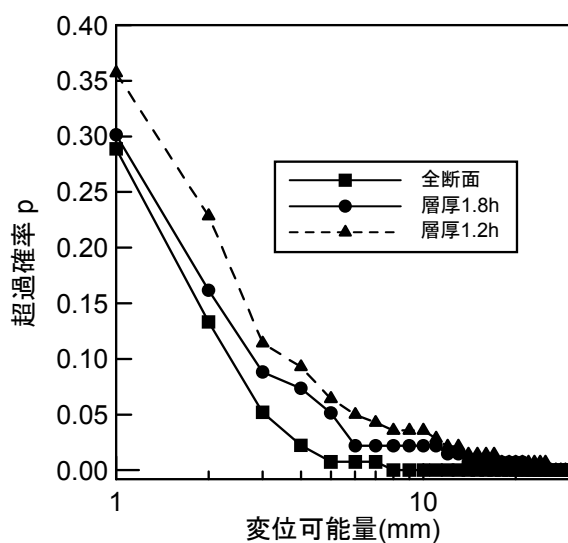


図 3.24 変位可能量の超過確率

### 3.5 結語

本章では、ドロス被覆堤を対象として、全断面被覆形式と被覆層厚および中詰め材を変化させた層被覆形式のドロスの耐波安定性を把握した。さらに、消波ブロックに作用する外力と抵抗力の観点より、消波工まわりの流速場および消波ブロックのかみ合いの効果について調べ、耐波安定性の変化の要因について検討した。

本章で得られた結果を以下に要約する。

- 1) 全断面被覆形式の場合が最も安定性が高い。層被覆形式で中詰め材をテトラポッドとしてドロスの被覆層厚を  $1.8h$  とした場合には、ほぼ全断面被覆形式と同等の耐波安定性が確保できる。
- 2) 層厚が  $1.8h$  よりも薄い場合、あるいは中詰め材が石材等で透水性が低い場合には安定性が低下する。
- 3) 中詰め材の透水性が低いと、表層ブロックに作用する流速が大きくなる。また被覆層内外での流下速度の差より、表層のブロックは斜面を下側に転がる作用を受け、安定性が低下する。
- 4) 被覆層が薄くなると、表層のドロスの変位可能量が大きくなる。このことより、被覆層が薄くなると、外力に対するかみ合わせの効果による抵抗力が小さくなることが類推される。

## 参考文献

- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・榊山 勉・藤間功司・川崎浩司・蔣 勤・秋山 実・大山洋志 (1999): 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究－VOF 法基本プログラムの作成－, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp.321-326.
- 鹿島遼一・榊山 勉・清水琢三・関本恒浩・窪 泰浩 (1994): 消波工の変形量の時間変化の予測と変形に及ぼすコアの影響, 第 41 回海岸工学論文集, pp.771-775.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No.248, 24p.
- 榊山 勉・斉藤昭三 (1988): 消波ブロック被覆堤の反射率と遡上波特性, 電力中央研究所報告, No.U-88023
- Bruun, P. and P.Johannesson (1976): Parameter affecting stability of rubble mounds, Proc.ASCE, Vol.102, WW2, pp.141-164.

Bruun, P. and A.R.Günbak (1977) : Stability of sloping structures in relation to  $\xi = \tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$  risk criteria in design, Coastal Engineering, Vol.1, pp.287-332.

Hudson, R.Y (1959) : Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol.85, WW3, pp.93-119.

Van der Meer, J.W. (1987): Stability of breakwater armour layer design formulae, Coastal Engineering, Vol.11, pp.219-239.

## 第4章 消波ブロックの抵抗力を考慮した耐波安定性の評価

### 4.1 緒言

第3章において、ドロス被覆堤を対象として、中詰め材や被覆層厚の違いが耐波安定性に与える影響について検討を進め、中詰め材の透水性が変化すると消波工まわりの流速場が変化するため耐波安定性が変化することを明らかとした。しかし、被覆層厚の違いが耐波安定性に与える影響に関しては、被覆層厚の変化によりブロックのかみ合いの効果による抵抗力が変化するために、耐波安定性が変化することが類推されたものの、層厚の変化に伴う抵抗力と耐波安定性の関係を定量的に把握するには至っていない。

これまで、消波ブロックの抵抗力に関して検討された例は少ない。Svee (1962) は、ブロック被覆層の破壊機構として、着目したブロックの斜面法線方向への移動を想定して、ブロック間のかみ合わせによる抵抗を考慮した所要質量算定式を導いている。しかし、1層被覆ブロックを対象としており、被覆層厚の違いが、かみ合わせによる抵抗力に与える影響については議論されていない。Price (1979) や Peene and Wang (1987) は、被覆層表層のブロックを強制的に引抜く際に要する力（引抜き抵抗力）を用いて、消波ブロックの抵抗力の検討を行っている。しかし、検討対象が2層被覆に限定されており、抵抗力に及ぼす被覆層厚の影響にまで踏み込んだ検討はされていない。

本章では、消波ブロックの抵抗力と耐波安定性の関係を定量的に明らかにするために、抵抗力に着目したブロックの安定性評価手法について検討を行う。Svee 式 (Svee,1962) において、被覆表層に位置するブロックの引抜き抵抗力をブロックのかみ合わせによる抵抗力として与えることで、抵抗力とブロックの安定質量の関係を導く。その後、被覆層厚と引抜き抵抗力の関係を実験的に明らかとし、消波ブロックの抵抗力が耐波安定性に及ぼす影響について検討する。



## 4.2 斜面上のブロックの安定性

### 4.2.1 Hudson 式

斜面上の捨石やブロックの安定条件として、図 4.1 に示すように、斜面方向の力の釣り合い ( $F_T=R_T$ ) あるいは斜面法線方向の力の釣り合い ( $F_N=R_N$ ) が考えられる。これらの釣り合い条件より外力と安定質量の関係を与えることで、ブロックの安定性が評価される。

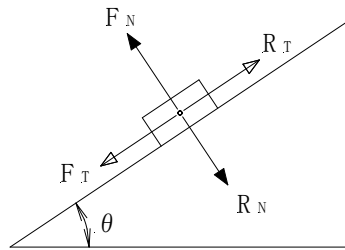


図 4.1 斜面上のブロックの釣り合い

Hudson (1959) は、斜面上におかれた単体の捨石あるいはブロックに作用する斜面方向の力と摩擦力との平衡関係 ( $F_T=R_T$ ) より求められた式をさらに一般化し、複数のブロックが敷き詰められた状態におけるブロックの安定質量を次式で与えた。

$$M = \frac{\rho_r H^3}{K_D \left( \frac{\rho_r}{\rho_w} - 1 \right)^3 \cot \theta} \quad (4.1)$$

ここに、 $K_D$  はブロックの形状などにより定まる係数、 $M$  はブロックの安定質量、 $\rho_r$  はブロックの密度、 $\rho_w$  は水の密度、 $H$  は波高、 $\theta$  は斜面勾配である。係数  $K_D$  にブロックのかみ合わせの効果が含まれるが、その効果を明示的に与える式とはなっていない。また、斜面方向の釣り合い状態を表しているため、波力による斜面法線方向の引抜きに抵抗するブロック間のかみ合わせの効果を直接的に与えることが困難である。そこで、ブロックの形状はそのまま、かみ合わせの効果を仮想的に質量が増加するものとして与え、その増加率を  $\chi$  とおく。ブロックの体積は変化せず質量のみが増加すると考え、Hudson 式の導出にならって、抵抗力と外力の釣り合い式を整理すると、安定質量は次式で表される。

$$M = \frac{\rho_r H^3}{K_D \left( \frac{\chi \rho_r}{\rho_w} - 1 \right)^3 \cot \theta} \quad (4.2)$$

ブロックのかみ合わせの効果を質量の増加率  $\chi$  で表現した場合、その効果の 3 乗が安定

質量に影響する。質量の増加率 $\chi$ として後述する引抜き抵抗力  $F/W$  を与え、安定質量と引抜き抵抗力の関係について検討したところ、安定実験結果に対して引抜き抵抗力の影響が過大に評価された。よって以降の検討においては、後述する Svec 式を用いることとした。

#### 4.2.2 Svec 式

Svec (1962) は、寄せ波時と引き波時のそれぞれの斜面上のブロックの安定性について検討している。斜面勾配が緩やかな場合は寄せ波時に、斜面が急になるにつれて引き波時にブロックの移動が生じるものとし、その境界の斜面勾配 $\theta$ を  $\cot\theta=2.5\sim 3.0$  としている。本研究において対象としているドロソ被覆堤の斜面勾配は  $\cot\theta=1.5$  であり、引き波時にブロックの移動が生じることになる。安定実験におけるドロソの被害も斜面上に集中しており、引き波時に沖側に移動あるいは転落する被災形態が支配的であった。よって、ここでは引き波時における安定質量の定式化について示す。

引き波時に生じるブロック被覆層の破壊は、斜面法線方向に働く力によるものであり、斜面と平行に作用する力は斜面上方のブロックより、順次下方のブロックに伝わるだけであり破壊に寄与しないと仮定した。着目したブロックに作用する外力と抵抗力について、斜面法線方向の釣り合いを次式で与えた。

$$G_w \cos \theta + n_w G_w \cos \theta + n_a G \cos \theta = (1 + n_w) \bar{P}_u \quad (4.3)$$

ここに、 $G$  は空中重量、 $G_w$  は水中重量、 $\theta$  は斜面勾配、 $\bar{P}_u$  は着目したブロックとその下方にあるブロックに働く波力の斜面法線方向成分の平均値、 $n_a$ 、 $n_w$  は図 4.2 に示すように着目したブロックが移動するときにそれとともに動く、それぞれ上方、下方に存在するブロックの個数である。ここでは、抵抗力としてブロック間の摩擦は無視し、ブロック間のかみ合わせのみを考慮して定式化されている。

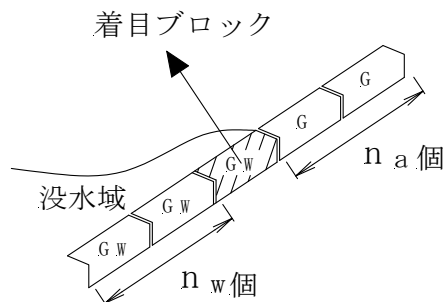


図 4.2 引抜き抵抗に寄与するブロック個数

ブロックのかみ合わせは、堤体延長方向に関して考慮されておらず、堤体断面方向のみを対象としてブロックの個数  $n_a$ ,  $n_w$  が与えられる。ここで Svec は、 $n_a$ ,  $n_w$  を用いてブロックのかみ合わせ係数  $r$  を導入している。

$$r = 1 + \frac{n_a}{1+n_w} = \frac{1+n_w+n_a}{1+n_w} \quad (4.4)$$

かみ合わせ係数  $r$  は、引き波時に没水状態にあり波力が作用するブロックの個数に対して、その波力に抵抗する全ブロック個数の比として与えられ、外力に対する抵抗力の比率を示す指標であると考えられる。式(4.3)の釣り合い条件とかみ合わせ係数  $r$  より、引き波時における外力と安定質量の関係を示す次式が導かれた。

$$M = K \frac{\rho_r H^3}{\left(\frac{\rho_r}{\rho_w} r - 1\right)^3 \cos^3 \theta} \quad (4.5)$$

ここに、 $M$  はブロックの安定質量、 $K$  はブロックの形状により定まる係数である。

### 4.3 安定質量と引抜き抵抗力の関係

#### 4.3.1 Svec 式の適用

##### (1) 検討モデル

Svec は、ブロック被覆層の破壊機構として、着目したブロックの斜面法線方向への移動を想定している。すなわち、Svec 式は、着目ブロックが引抜かれる際に、周囲に存在する複数のブロックが一体となって抵抗する現象の定式化と考えられ、引抜き抵抗力を斜面法線方向の釣り合いに的確に取り込むことができると考えられる。よって、ブロックの抵抗力を適切に評価することができる安定質量算定式として、式(4.5)を適用することとした。引抜き抵抗力の無次元量  $F/W$  ( $F$  は引抜き抵抗力、 $W$  はブロックの自重) を以降において引抜き抵抗力と称す。引抜き抵抗力を一つのブロックを引抜く際の抵抗に寄与するブロックの存在範囲を示す指標として用い、Svec 式におけるかみ合わせ係数  $r$  を与えるブロック個数  $n_a$  および  $n_w$  を  $F/W$  で評価することで、安定質量と引抜き抵抗力の関係を導くことを試みる。Svec 式においてかみ合わせ効果は、堤体断面方向にのみ発揮され、堤体延長方向の効果は考慮されていない。しかしながら、実際の消波ブロックは、被覆層の厚さに応じた堤体断面方向および堤体延長方向にかみ合わせ効果を発揮する。そこで、消波ブロックの双方のかみ合わせ効果を考慮して、Svec 式に適用できる平面的なモデルを構築する。

## (2) ブロック離脱時の影響範囲

被覆表層に平面積  $D_n^2$  ( $D_n=V^{1/3}$ ,  $V$  はブロックの体積) のブロックが複数個存在するものとする。図 4.3 に示すように、一つのブロックが被覆表層より離脱する際に影響がおよぶ範囲を一辺が  $(1+2\alpha)D_n$  の矩形とし、その面積を  $D_n^2$  の  $\lambda$  倍として式(4.6)で与えた。

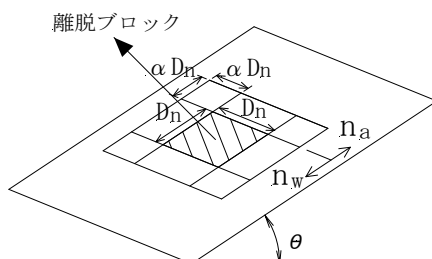


図 4.3 ブロック離脱時の影響範囲

$$\lambda D_n^2 = \{(1+2\alpha)D_n\}^2 \quad (4.6)$$

引抜き抵抗に寄与するブロック個数  $n_a$  および  $n_w$  は、 $\alpha$  を用いて式(4.7)、式(4.8)で表される。

$$n_a = \frac{(2\alpha+1)D_n \cdot \alpha D_n}{D_n^2} = 2\alpha^2 + \alpha \quad (4.7)$$

$$n_w = \frac{(2\alpha+1)D_n \cdot (\alpha+1)D_n - D_n^2}{D_n^2} = 2\alpha^2 + 3\alpha \quad (4.8)$$

よって、 $\alpha$  を決定することで、式(4.4)よりかみ合わせ係数  $r$  が決定される。

### 4.3.2 安定質量の評価式

引抜き抵抗力  $F/W$  は、引抜き時の抵抗力が、ブロック自重の何倍であることを示しており、引抜き時の周囲のブロックへの影響範囲を示す指標としてとらえられる。そこで、ブロック離脱時の影響範囲を示す式(4.6)において、 $\lambda$  を  $F/W$  で表現できるものとする。  $\lambda = F/W$  とすることにより  $\alpha$  が次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{\sqrt{F/W} - 1}{2} \quad (4.9)$$

式(4.7)および式(4.8)を式(4.4)に代入し、さらに式(4.9)を考慮することにより、Svee 式におけるかみ合わせ係数  $r$  が引抜き抵抗力  $F/W$  を用いて次式で与えられる。

$$r = \frac{2}{1 + 1/\sqrt{F/W}} \quad (4.10)$$

式(4.5)に式(4.10)を代入することで、安定質量と引抜き抵抗力の関係が次式で与えられる。

$$M = K \frac{\rho_r H^3}{\left( \frac{\rho_r}{\rho_w} \left( \frac{2}{1 + 1/\sqrt{F/W}} \right) - 1 \right)^3 \cos^3 \theta} \quad (4.11)$$

## 4.4 引抜き抵抗力に関する検討

### 4.4.1 実験方法

#### (1) 実験装置

Price (1979) や Peene and Wang (1987) は、2層厚の消波ブロック被覆層を対象として引抜き抵抗力を計測し、消波ブロック抵抗力の特性について検討している。しかしながら、層厚が変化した場合の消波ブロック抵抗力についてはこれまで検討されていない。そこで、層厚の変化に伴う消波ブロック抵抗力の特性を明らかにするため、引抜き抵抗力の計測を行った。

消波ブロックの引抜き抵抗力の測定方法を検討した結果、自動昇降装置に荷重計を取付け引上げる手法で、良好にデータが取得できることを確認した。そこで、測定箱内に、層厚を変化(4.0h, 1.8h, 1.2h h:ドロスの高さ)させてドロス被覆層を形成し、引抜き抵抗力を計測した。図 4.4 に測定装置を示す。測定箱には、歯車を介しておもりがつながれており、おもりの上下運動によって、測定箱に水平方向の振動を与えることができる。測定箱内の引抜きの対象となる消波ブロックは、ワイヤーを介して荷重計につながれている。荷重計を自動昇降装置に取付けて、上昇させることで消波ブロックを引抜き、その引抜き抵抗力が計測できるようにした。使用したドロス模型は、質量が  $M = 135.7\text{g}$  (体積:  $V = 57.16\text{cm}^3$ , 高さ:  $h = 7.2\text{cm}$ ) である。引抜き対象ブロックは、中央部を穿孔してワイヤーをビス止めしてあり、ワイヤーにフックを掛けて引き上げた。

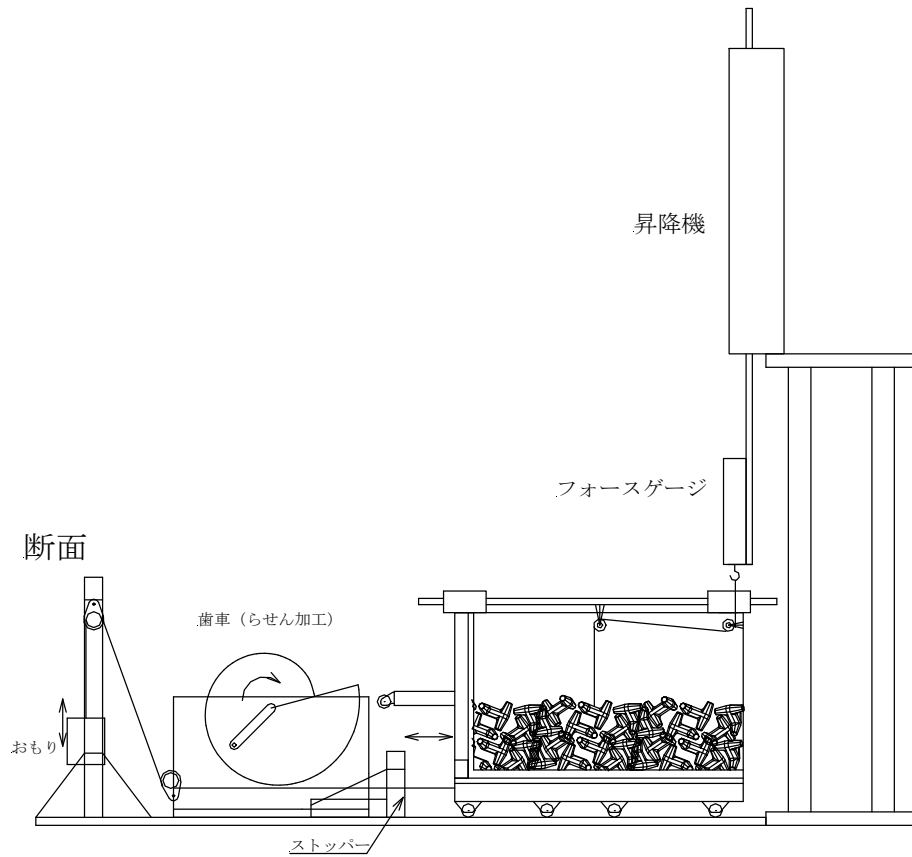


図 4.4 引抜き抵抗測定装置

(2) 実験手順

測定箱内に被覆層を形成する．被覆層表層に，引抜き対象となるブロックを3個配置し，測定箱に50回振動を加えることで波作用後のブロックのかみ合わせを模擬した．引抜き対象ブロックの配置状況（加振後）を図4.5に示す．配置間隔は，ブロック高さ  $h$  の2倍以上とした．円内のブロックが，ワイヤーを備え付けた引抜き対象ブロックである

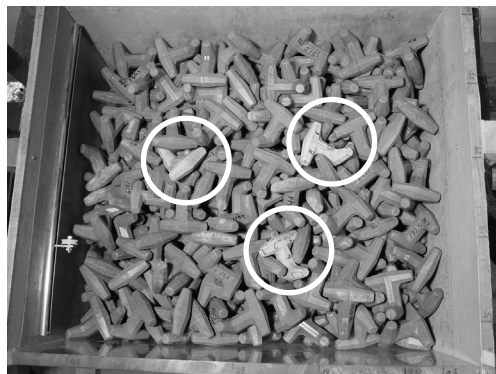


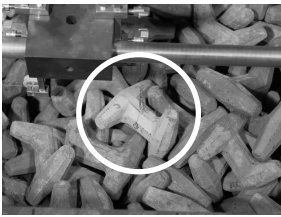
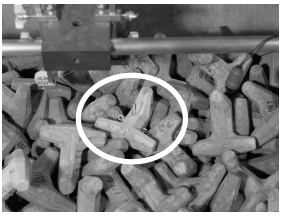

図 4.5 引抜き対象ブロックの配置状況

る。加振後に引抜き対象ブロックのかみ合わせのパターン（周囲のブロックによる拘束の状態）を記録し、あわせて変位可能量（隣のブロックに接するまでの距離）を測定した。かみ合わせのパターンとして、他のブロックにより拘束されていない状態、側方のみを拘束されている状態、上方から拘束されている状態の3パターンに分類し、パターンの名称をそれぞれⅠ、Ⅱ、Ⅲとした。各パターンに分類されるブロックの状況を表4.1に示す。

実験は、以下に示す①から⑤の手順で行った。①各層厚に相当する個数のブロックを測定箱内に投入し、ワイヤーを取り付けた引抜き対象ブロックを表層に設置する。②振動装置にて50回の振動を加える。③引抜き対象ブロックのかみ合わせパターンを記録する。④引抜き対象ブロックの振動方向の変位可能量を測定する。⑤引抜き対象ブロックを自動昇降装置で上昇させ、荷重計で引抜き抵抗力を測定する。

引抜き抵抗力は、サンプリングタイム50msで5秒間計測した。1回の被覆層形成で3つの引抜き力データが得られる。層厚ごとに20回の被覆層形成および加振を行い、引抜き力の時系列を60データ（3種類の層厚で計180データ）取得した。

表 4.1 かみ合わせパターン

かみ合わせパターン	かみ合わせの状況	状況写真
Ⅰ	他のブロックより拘束されていない状態	
Ⅱ	ブロック側方のみを拘束されている状態	
Ⅲ	他のブロックにより上方から拘束されている状態	

#### 4.4.2 かみ合わせパターンと変位可能量の関係

##### (1) かみ合わせパターンの特徴

目視にて得られた各かみ合わせパターンの特徴を以下に列記する。パターンⅠは、単独で設置された状態に近く、他のブロックとのかみ合わせがほとんどない。外力に対して自重のみで抵抗すると考えられる。パターンⅡは、側方が他のブロックと接触し押さえつけられている状況である。ブロック同士のかみ合いは、自重および側面の摩擦力で発揮されるものの、局所的なかみ合いといえる。側面の摩擦力は、斜面勾配の有無で変化すると考えられるため、引抜き力は斜面勾配の影響を受けることが想定される。パターンⅢは、上方から他のブロックによって拘束され、周囲のブロックと相互にかみ合っている。引抜く際に、他のブロックにおよぼす影響範囲が広く、周辺のブロックを含めて抵抗するため、面的で強固なかみ合いといえる。

##### (2) かみ合わせパターンの出現確率

層厚毎の各かみ合わせパターン出現確率を図 4.6 に示す。層厚  $4.0h$  では、各パターンともほぼ同程度の出現確率であるが、層厚が減少するとパターンⅠの割合が増加し、パターンⅢの割合が低下する。上述したかみ合わせパターンの特徴を考慮すると、層厚の減少に伴って、ブロック相互のかみ合わせの効果を発揮せず、外力に対して自重のみで抵抗するブロックが増加することを示している。このことから、層厚の減少に伴い、ドロスの抵抗力が減少することが示唆される。

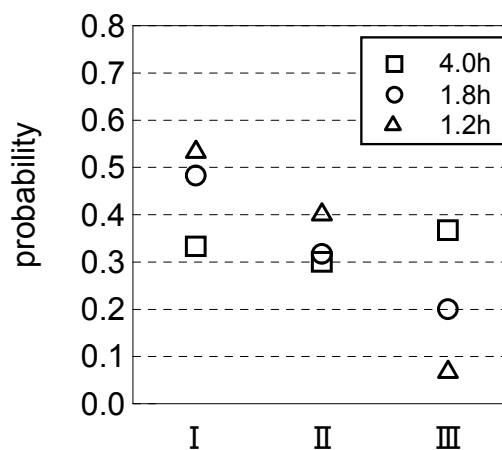


図 4.6 かみ合わせパターンの出現確率



### (3) 変位可能量

変位可能量  $l$  をブロック高さ  $h$  で除した無次元量  $l/h$  で整理した。これ以降は、無次元量である  $l/h$  を変位可能量と称する。変位可能量は、隣りあうブロックに接するまでのぐらつき具合の指標である。ぐらつき具合が大きいブロックが、初期に被害を生じる可能性が高く、抵抗力の観点からブロックの安定性を議論する際の有力な指標になると考えられる。変位可能量の平均値,標準偏差,変動係数を表 4.2 に示す。変位可能量の確率分布を超過確率として図 4.7 に示す。層厚が減少すると、変位可能量の大きなブロックが多く存在するようになる。すなわち、層厚の減少に伴い大きくぐらつくブロックが多くなることが示された。

表 4.2 変位可能量の平均値,標準偏差,変動係数 (層厚別)

層厚	変位可能量 ( $l/h$ )		
	平均値 ( $\mu$ )	標準偏差 ( $\sigma$ )	変動係数 ( $\delta$ )
4.0h	0.079	0.220	2.785
1.8h	0.060	0.155	2.516
1.2h	0.068	0.166	2.441

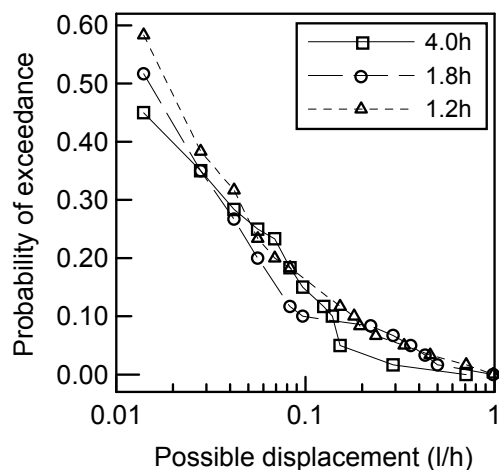


図 4.7 変位可能量の超過確率

(4) かみ合わせパターンと変位可能量の関係

各層厚において得られた変位可能量の全データを図 4.8 に示す。各測定値にばらつきはあるものの、かみ合わせパターンに応じて、変位可能量が変化する傾向が見受けられる。かみ合わせパターンごとの変位可能量の平均値, 標準偏差, 変動係数を表 4.3 に、かみ合わせパターンと変位可能量の平均値の関係を図 4.9 に示す。パターン I とパターン II および III の場合では、変位可能量が著しく異なる。パターン I の変位可能量の平均値は、他のパターンと比較して相対的に大きな値をとることがわかる。このことから、層厚の減少に伴ってパターン I の出現確率が大きくなると、結果として大きな変位可能量を有するブロックが多く存在すると考えられる。上述した、かみ合わせパターンと変位可能量の関係より、かみ合わせパターンは変位可能量を用いて定量的に判別することが可能であると考えられる。

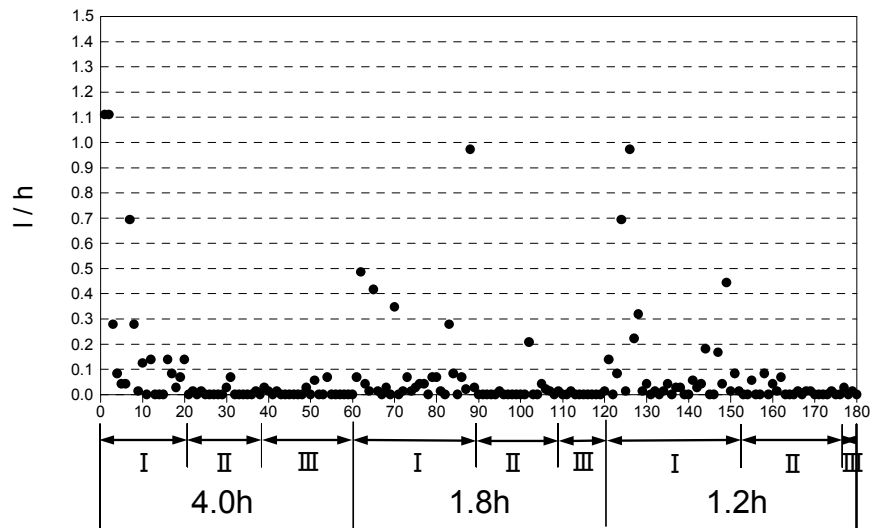


図 4.8 変位可能量の全データ

表 4.3 変位可能量の平均値, 標準偏差, 変動係数 (パターン別)

層厚	変位可能量 ( $l/h$ )								
	平均値 ( $\mu$ )			標準偏差 ( $\sigma$ )			変動係数 ( $\delta$ )		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
4.0h	0.219	0.008	0.010	0.344	0.017	0.019	1.571	2.125	1.900
1.8h	0.111	0.016	0.004	0.210	0.048	0.006	1.892	3.000	1.500
1.2h	0.116	0.013	0.011	0.217	0.024	0.013	1.871	1.846	1.182

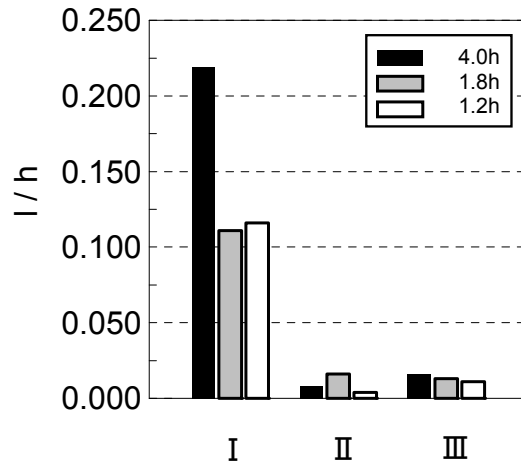


図 4.9 パターンごとの変位可能量

#### 4.4.3 かみ合わせパターンと引抜き抵抗力の関係

##### (1) 引抜き抵抗力の時系列

引抜き抵抗力  $F/W$  は、計測データ時系列における最大値  $F$  を自重  $W$  で除すことで得た。図 4.10 は、層厚  $4.0h$  における引抜き抵抗力の時系列をかみ合わせパターンごとに示した一例である。パターン I は、明確なピーク値をもたず、自重に近い値でなだらかな変化を示す。パターン II は、明確なピーク値が存在しており、ピーク値をはさんで値が減少する。パターン III は、他のパターンよりも大きなピーク値をとるとともに、長時間にわたって抵抗力を発現している。実験ケースによっては、ピークが複数現れる場合があるが、これは、複数の箇所でのかみ合いが、順次失われていくためと考えられる。

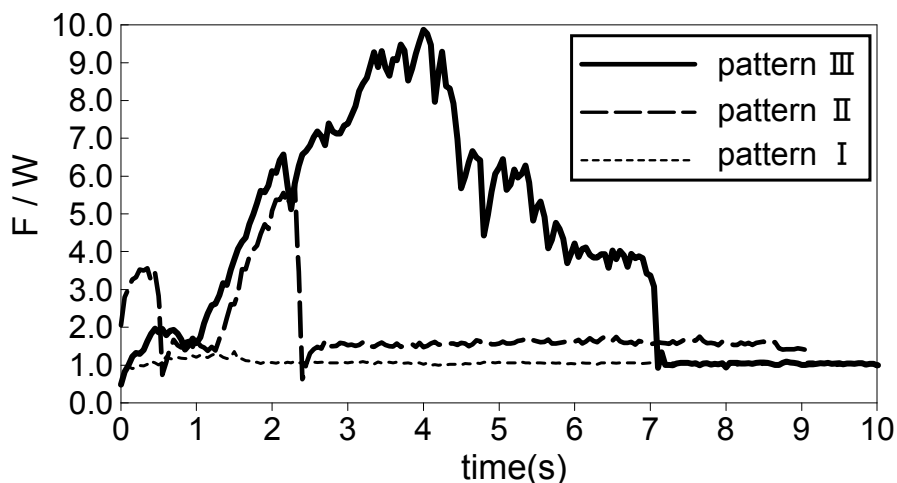


図 4.10 引抜き抵抗力の時系列 (層厚  $4.0h$ )

(2) 引抜き抵抗力の平均値

引抜き抵抗力の平均値, 標準偏差, 変動係数を表 4.4 に示す. 各層厚において得られた引抜き抵抗力の全データを図 4.11 に示した. 図中には, 変位可能量も同時に示してある. 各測定値にばらつきはあるものの, かみ合わせパターンに応じて, 引抜き抵抗力が変化する傾向が見受けられる. また, 引抜き抵抗力と変位可能量は相反する関係となっていることが分かる.

各層厚におけるかみ合わせパターンごとの引抜き抵抗力の平均値, 標準偏差, 変動係数を表 4.5 に, かみ合わせパターンと引抜き抵抗力の平均値の関係を図 4.12 に示す. 他のブロックの拘束がないパターン I と拘束があるパターン II および III の引抜き抵抗力を比較すると, その大小関係は明瞭であり, パターン I の引抜き抵抗力が小さい. このことより, 従来から定性的に指摘されていた, かみ合いがよいほど消波ブロックの抵抗力が

表 4.4 引抜き抵抗力の平均値, 標準偏差, 変動係数 (層厚別)

層厚	引抜き抵抗力 ( $F/W$ )		
	平均値 ( $\mu$ )	標準偏差 ( $\sigma$ )	変動係数 ( $\delta$ )
4.0h	3.071	2.880	0.938
1.8h	1.835	1.329	0.724
1.2h	2.186	1.598	0.731

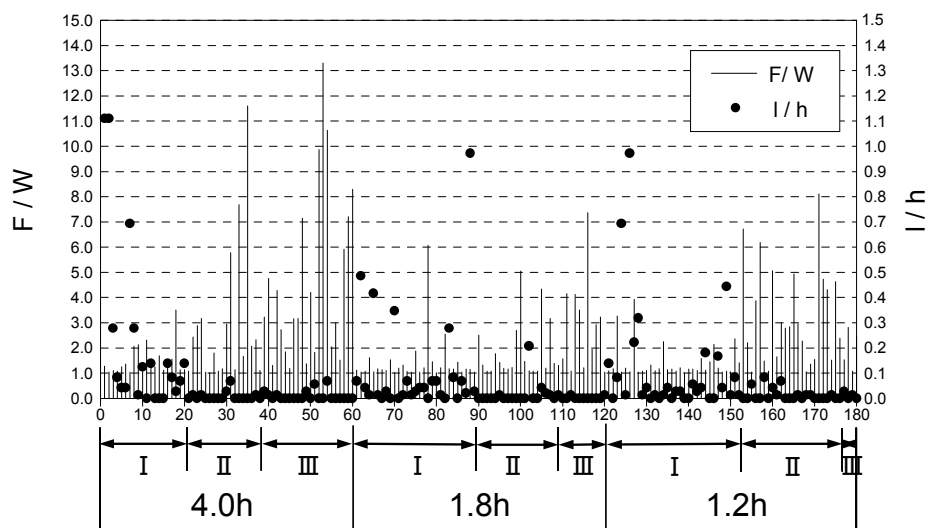


図 4.11 引抜き抵抗力, 変位可能量の全データ

表 4.5 引抜き抵抗力の平均値, 標準偏差, 変動係数 (パターン別)

層厚	引抜き抵抗力 ( $F/W$ )								
	平均値 ( $\mu$ )			標準偏差 ( $\sigma$ )			変動係数 ( $\delta$ )		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
4.0h	1.508	2.892	4.639	0.602	2.805	3.417	0.399	0.970	0.737
1.8h	1.421	1.862	2.790	0.950	1.174	1.862	0.669	0.631	0.667
1.2h	1.420	3.242	1.980	0.673	1.966	0.812	0.473	0.606	0.410

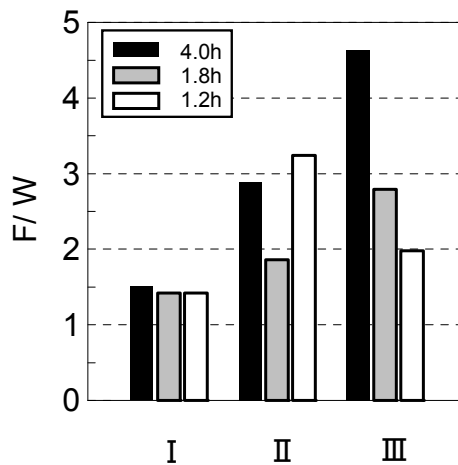


図 4.12 パターンごとの引抜き抵抗力

大きくなるという現象が, かみ合わせパターンごとの引抜き抵抗力の変化として評価できると考えられる. パターン I の引抜き抵抗力は, 層厚によらずほぼ同一の値をとることが分かる. パターン II の引抜き抵抗力と層厚の関係は明瞭でないが, パターン III の引抜き抵抗力は, 層厚によって変化し, 層厚が大きくなると引抜き抵抗力が大きくなる.

### (3) 引抜き抵抗力の確率分布

図 4.13 に, 引抜き抵抗力の超過確率を層厚ごとに示す. Peene and Wang (1987) によると, 引抜き抵抗力を確率変数とした確率分布は, 対数正規分布に従う. 対数正規分布については, 式(2.4)を参照されたい. 図中には実験値から回帰させた対数正規分布を実線で示した.  $\rho$  は実験値と回帰式との相関係数である. いずれの層厚においても, ほぼ対数正規分布に従うと考えられる. 引抜き抵抗力は, 他のブロックによる拘束の有無で変化すると考えられるため, かみ合わせのパターンごとに超過確率を整理した. 図 4.14 にパターンごとの引抜き抵抗力の超過確率を示す. この図から, パターン II, III が, より対数正規分布に近いことが分かる.

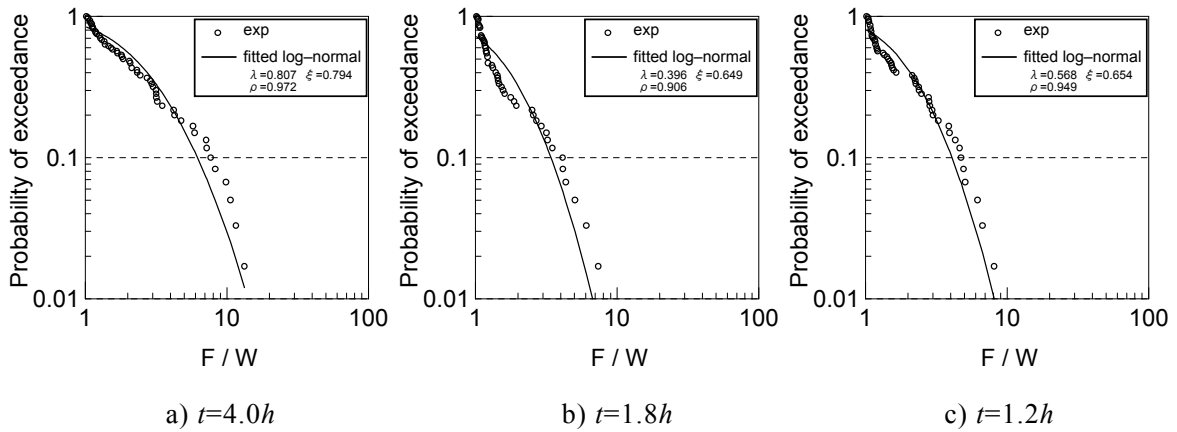


図 4.13 引抜き抵抗力の超過確率

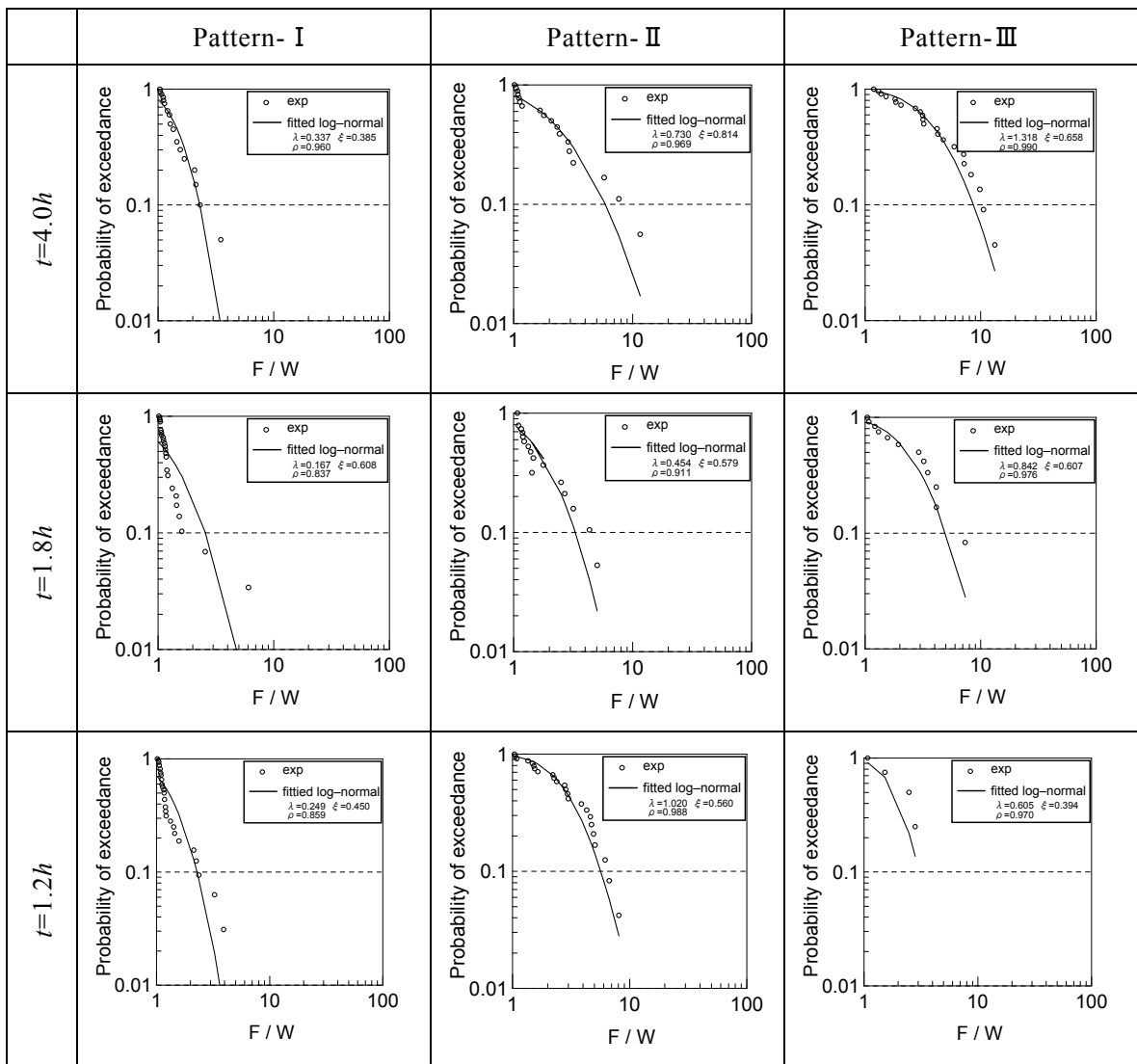


図 4.14 引抜き抵抗力の超過確率

#### (4) かみ合わせパターンと引抜き抵抗力の関係

かみ合わせパターンと引抜き抵抗力の平均値に有意な関係があるかどうか検定する。検定方法として、分散分析法を用いた（例えば和田ら,1975）。分散分析法とは、いくつかの正規母集団の平均値に関する検定法である。実験値に影響を及ぼす要素の中で、特に考慮される要素が因子であるが、ここでは、3つのかみ合わせパターンが因子（ $i=I, II, III$ ）となる。各因子ごとに得られた引抜き抵抗力の自然対数  $\log x$  は、正規母集団  $N(\mu_i, \sigma^2)$  の標本変数の実現値であるとして、正規母集団の平均値に関する帰無仮説  $H_0$ （かみ合わせパターン間の引抜き力の自然対数の平均値に有意な差がない）を検定する。帰無仮説が棄却されれば、パターン間の平均値に有意な差があると認められることになる。表 4.6 に層厚ごとに検定した結果を示す。引抜き抵抗力は、対数正規分布に従うものとした。得られた分散比は、F分布に従う統計量であり、有意水準 5%( $F_{60}^2(0.05)$ )で評価した。検定により、全ての層厚において帰無仮説は棄却され、各層厚において、パターンごとの引抜き抵抗力の平均値に有意な差があると認められた。

表 4.6 検定結果

	分散比	$F_{60}^2(0.05)$	帰無仮説 $H_0$
4.0h	11.65	3.15	棄却
1.8h	6.54	3.15	棄却
1.2h	16.34	3.15	棄却

#### 4.4.4 引抜き抵抗力の期待値

これまでの検討より、引抜き抵抗力の大きさは、かみ合わせパターンによってほぼ決定されると考えられる。そこで、かみ合わせパターンの出現確率と引抜き抵抗力の平均値より次式で算定される期待値により、消波ブロックの抵抗力が与えられるものとした。

$$\frac{F_R}{W} = \sum_i P(i) \times \frac{F(i)}{W} \quad (4.12)$$

ここに、 $F_R/W$  は引抜き抵抗力の期待値、 $P(i)$  はかみ合わせパターン（ $i=I, II, III$ ）の出現確率、 $F(i)/W$  はかみ合わせパターン（ $i=I, II, III$ ）ごとの引抜き抵抗力である。式(4.9)から式(4.10)における  $F/W$  を期待値  $F_R/W$  に置き換えると、式(4.13)から式(4.15)となる。

$$\alpha = \frac{\sqrt{F_R/W} - 1}{2} \quad (4.13)$$

$$r = \frac{2}{1 + 1/\sqrt{F_R/W}} \quad (4.14)$$

$$M = K \frac{\rho_r H^3}{\left( \frac{\rho_r}{\rho_w} \left( \frac{2}{1 + 1/\sqrt{F_R/W}} \right) - 1 \right)^3 \cos^3 \theta} \quad (4.15)$$

## 4.5 消波ブロックが有する抵抗力

### 4.5.1 実験方法

水理模型実験は、長さ 30m、幅 0.5m、高さ 1.5m の 2 次元造波水路を用いて行った。水路の一端にはピストン型造波機が設置され、他端に向けて水平部を経て 1/30 の勾配を持つ水路床が設置されている。通過波検定は、波高計を沖側一様水深部に 2 本と堤体位置前後に 2 本設置して行った。合田ら (1976) の入反射波分離推定法を用い、入射波成分を通過波として検定を行った。不規則波の理論スペクトルは修正 Bretschneider-光易型を用いた。取得した水位データを解析して得られる有義波高と有義周期および周波数スペクトルの形状が目標値と一致するまで、造波信号の修正を繰り返した。通過波検定の後に、1/30 勾配の水路床上に消波ブロック被覆堤を形成した。

実験装置の設置状況を図 4.15 に示す。自動昇降装置により、荷重計を上昇させることで消波ブロックを被覆層斜面法線方向に引抜くことができるようにした。使用したブロック模型は、ドロスが  $M = 135.7\text{g}$  (体積:  $V = 57.16\text{cm}^3$ , 高さ:  $h = 7.2\text{cm}$ ) で、テトラポッドが  $M = 124.9\text{g}$  (体積:  $V = 52.79\text{cm}^3$ , 高さ:  $h = 5.8\text{cm}$ ) である。実験断面の構造条件を表 4.7 に、実験断面を図 4.16 示す。実験は、ドロス被覆堤とテトラポッド被覆堤を対象として行った。テトラポッド被覆堤は、ドロス被覆堤における実験結果と比較するために行ったものである。なお、テトラポッド被覆堤の結果は、本節の末尾にまとめて示す。波浪条件を表 4.8 に示す。

現地におけるかみ合わせを模擬するため、予備波を 500 波、設計波相当の波を 1000 波作用させた。波作用後に、被覆表層をドロスのブロック高さ  $h$  で格子状に区切り、計 48 点の格子の真下に位置するブロックを測定対象とした。測定対象ブロックのかみ合わせパターンを記録し、あわせてブロックの変位可能量を測定した。その後に、かみ合わせパターンごとに、1 個の引き抜き対象ブロックを選定して、ブロックの引抜き抵抗力を計測した。この手順を断面ごとに 5 回繰り返した。



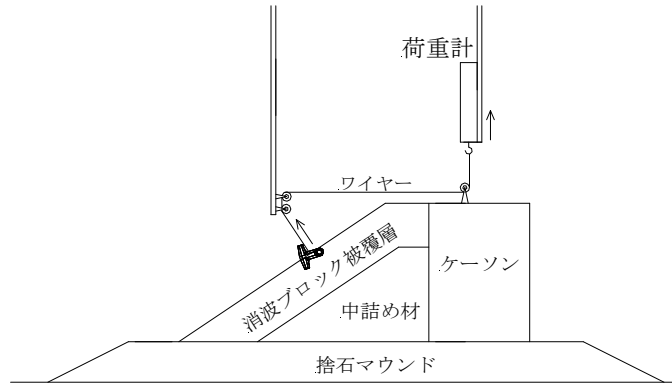


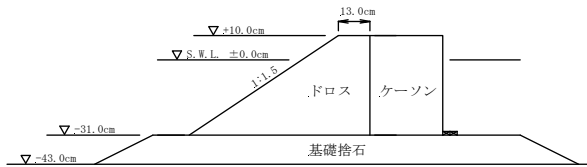
図 4.15 実験装置

表 4.7 断面構造条件

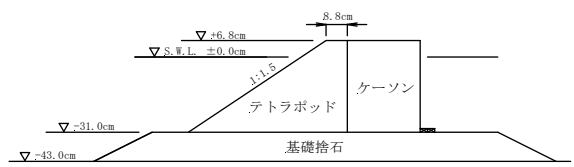
	層厚	中詰め材	断面名称	実験断面図
ドロス被覆堤	全断面	—	全断面	a)
	1.8h	テトラポッド	1.8h	b)
	1.2h	テトラポッド	1.2h	c)
テトラポッド被覆堤	全断面	—	全断面	d)
	4/3h	砕石	4/3h	e)

ドロス被覆堤

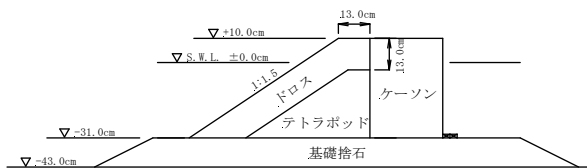
テトラポッド被覆堤



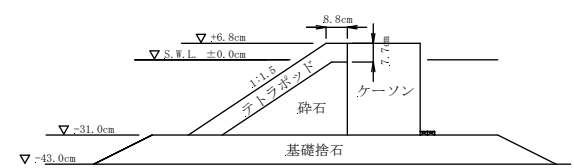
a) 全断面



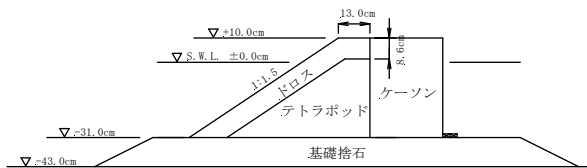
d) 全断面



b) 1.8h



e) 4/3h



c) 1.2h

図 4.16 実験断面図

表 4.8 波浪条件

a) ドロス被覆堤

	予備波 ( $K_D = 2.3$ 相当)	実験波 ( $K_D = 20$ 相当)
周期 $T_{1/3}$	1.76s	1.76s
波高 $H_{1/3}$	8.0cm	16.4cm
波数	500 波	1000 波

b) テトラポッド被覆堤

	予備波 ( $K_D = 1.0$ 相当)	実験波 ( $K_D = 8.3$ 相当)
周期 $T_{1/3}$	1.76s	1.76s
波高 $H_{1/3}$	5.6cm	11.3cm
波数	500 波	1000 波

#### 4.5.2 変位可能量

表 4.9 に変位可能量を示す。測定箱を用いた結果（表 4.2）と比較すると、全ての層厚で変位可能量の平均値が低下している。本実験では、表層に位置するブロックは、自重によって下方のブロックにもたれかかる。斜面勾配が無い場合（測定箱）と比較して、ブロックが変位するのに可能な空間が少なくなるため、変位可能量の平均値が低下したと考えられる。層厚ごとの違いに着目すると、層厚が減少すると変位可能量が大きくなる。層厚が減少するほど、隣あうブロックとの距離が大きくなり、ぐらつきの程度が大きくなることを示している。

かみ合わせパターンごとの変位可能量を表 4.10 および図 4.17 示す。パターン I とパターン II, III とで、変位可能量が著しく異なる。他のブロックによる拘束が有るパターンでは、ブロックの変位が小さくなるといえる。このことは、変位可能量が、他のブロックによる拘束の有無を判別する定量的な指標となり得ることを示している。

表 4.9 変位可能量の平均値, 標準偏差, 変動係数 (層厚別)

層厚	変位可能量 ( $l/h$ )		
	平均値 ( $\mu$ )	標準偏差 ( $\sigma$ )	変動係数 ( $\delta$ )
全断面	0.018	0.081	4.500
1.8h	0.022	0.109	4.955
1.2h	0.030	0.086	2.867

表 4.10 変位可能量の平均値, 標準偏差, 変動係数 (パターン別)

層厚	変位可能量 ( $l/h$ )								
	平均値 ( $\mu$ )			標準偏差 ( $\sigma$ )			変動係数 ( $\varepsilon$ )		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
全断面	0.096	0.010	0.003	0.197	0.029	0.010	2.052	2.900	3.333
1.8h	0.129	0.007	0.005	0.278	0.025	0.019	2.155	3.571	3.800
1.2h	0.117	0.005	0.005	0.150	0.008	0.014	1.282	1.600	2.800

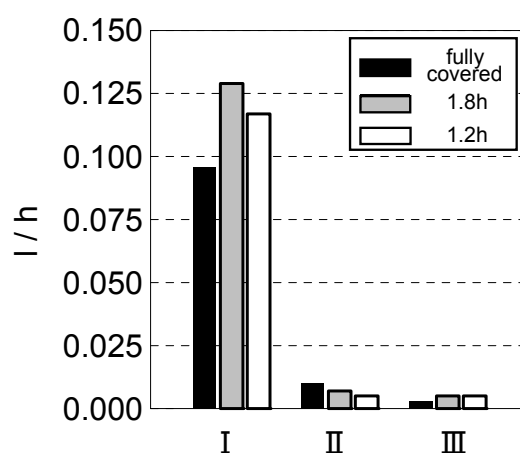


図 4.17 パターンごとの変位可能量

変位可能量の出現確率を超過確率で図 4.18 示す. 変位を生じるブロックの割合が, 測定箱を用いた結果 (図 4.7) と比べて減少している. これは, 斜面に位置するブロックが, 自重によって下方のブロックにもたれかかるためと考えられる. しかしながら, 層厚の減少に伴い, 変位可能量が大きなブロックの存在確率が大きくなる傾向は, 斜面勾配の有無に関係なく同様である.

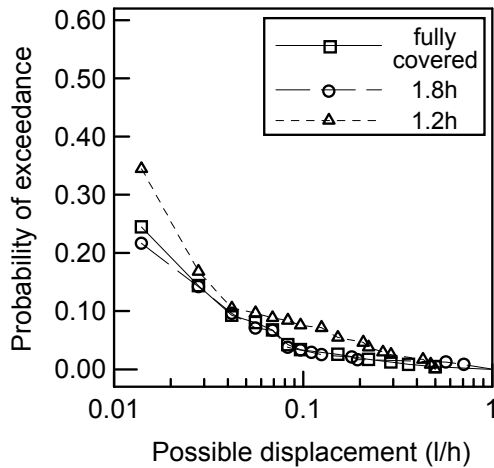


図 4.18 変位可能量の超過確率

#### 4.5.3 かみ合わせパターンの出現確率

層厚ごとのかみ合わせパターンの出現確率を図 4.19 に示す。他のブロックの拘束が無く，外力に対して自重のみで抵抗すると考えられるパターン I が出現する確率は，全断面および層厚 1.8h より層厚 1.2h の方が大きくなる。他のブロックによる拘束が有るパターン II およびパターン III については，出現確率の層厚による明瞭な差異はみうけられない。測定箱を用いた結果（図 4.6）と比較すると，パターン I の出現確率が減少し，パターン III の出現確率が増加していることが分かる。斜面に位置するブロックが，自重によって下方のブロックにもたれかかるため，パターン I に分類されるブロックが減少し，パターン III に分類されるブロックが増加したと考えられる。消波ブロックの初期被害に大きな影響を与えると考えられるパターン I については，層厚の減少によって，その出現確率が大きくなる傾向にあることがわかる。

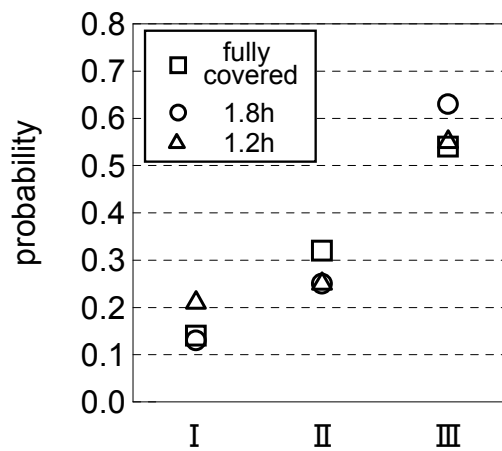


図 4.19 かみ合わせパターンの出現確率

#### 4.5.4 消波ブロックの抵抗力

##### (1) 引抜き抵抗力の平均値

各層厚のかみ合わせパターンごとの引抜き抵抗力の平均値, 標準偏差, 変動係数を表 4.11 に, かみ合わせパターンと引抜き抵抗力の平均値の関係を図 4.20 に示す. パターン I および II 引き抜き力は, 層厚によらずほぼ一定値をとっている. このことより, パターン I および II の個々のブロックが他のブロックに及ぼすかみ合わせの影響範囲は, 層厚によらずに一定であると考えられる. パターン III の引抜き力は層厚によって異なるため, かみ合わせの影響が層厚方向にも及ぶと考えられる.

表 4.11 引き抜き力の平均値, 標準偏差, 変動係数 (パターン別)

層厚	引抜き抵抗力 ( $F/W$ )								
	平均値 ( $\mu$ )			標準偏差 ( $\sigma$ )			変動係数 ( $\delta$ )		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
全断面	1.113	2.666	7.123	0.045	1.920	2.522	0.040	0.720	0.354
1.8h	1.998	3.182	6.020	0.814	1.218	2.536	0.407	0.383	0.421
1.2h	1.300	2.627	4.234	0.392	0.845	2.681	0.302	0.322	0.633

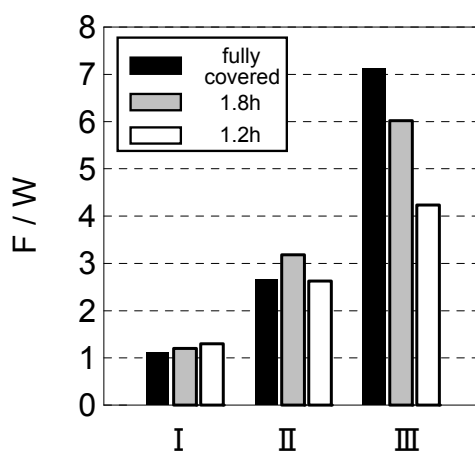


図 4.20 パターンごとの引抜き抵抗力

##### (2) ドロスが有する抵抗力

図 4.19 に示したかみ合わせパターンの出現確率と図 4.20 に示したパターンごとの引抜き抵抗力を用いて, 式(4.12)より引抜き抵抗力の期待値, すなわちドロスが有する抵抗力  $F_R/W$  を算出した. 図 4.21 に  $F_R/W$  を示す. ドロスの抵抗力は層厚に依存することがわかる. 全断面と 1.8h では同程度であるが, 1.2h の抵抗力は, 全断面および 1.8h と比較して 3 割程度減少している. この傾向は, 層厚減少に伴う安定性の減少傾向と合致す

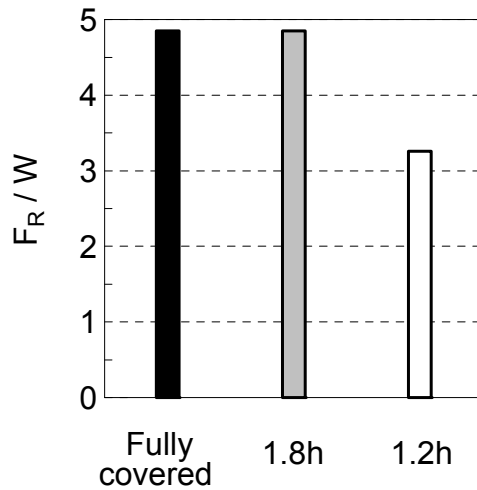


図 4.21 ドロスが有する抵抗力

る．層厚によりドロスの安定性が変化するの、抵抗力の変化が大きく影響しているといえる．

### (3) テトラポッドが有する抵抗力の評価

比較のため実施した、テトラポッド被覆堤の結果を以下に示す．

#### a)かみ合わせパターンの出現確率

層厚ごとの各かみ合わせパターンの出現確率を図 4.22 に示す．パターン I およびパターン II が同程度の比率で、パターン III の比率がそれらより大きくなる．パターン I のブロックは層厚が減少すると多くなり、パターン III のブロックは層厚が減少すると少くなる傾向が見受けられる．ドロス被覆層におけるかみ合わせパターンの出現確率と比較すると、パターン I の比率が増加し、パターン III の比率が低下している．このことより、テトラポッドの抵抗力がドロスの抵抗力より小さくなると考えられる．

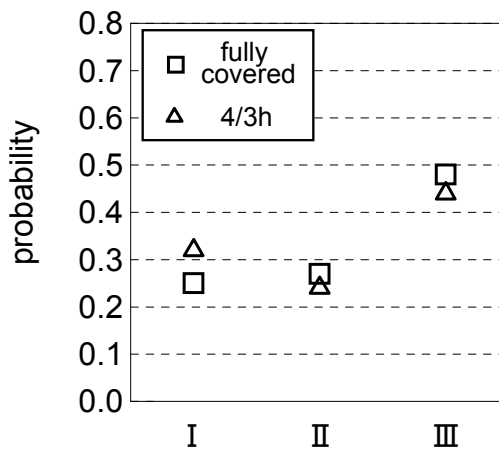


図 4.22 かみ合わせパターンの出現確率

b)変位可能量

層厚ごとの変位可能量を表 4.12 および図 4.23 に示す。変位可能量の平均値は、層厚によらずほぼ同程度である。かみ合わせパターンごとの変位可能量を表 4.13 に、図 4.24 に示す。パターン I の値が、他のパターンと比較して著しく大きい。この傾向は、ドロス被覆層の変位可能量と同様である。変位可能量の出現確率を超過確率で図 4.25 に示した。層厚によらず、ほぼ同様である。

表 4.12 変位可能量の平均値, 標準偏差, 変動係数 (層厚別)

層厚	変位可能量 ( $l/h$ )		
	平均値 ( $\mu$ )	標準偏差 ( $\sigma$ )	変動係数 ( $\delta$ )
全断面	0.021	0.059	2.809
4/3h	0.017	0.041	2.412

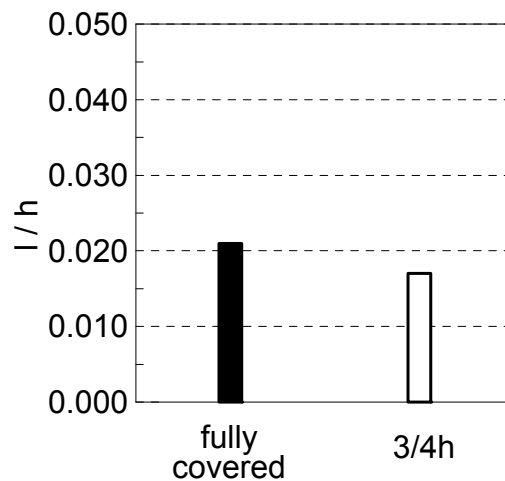


図 4.23 層厚ごとの変位可能量

表 4.13 変位可能量の平均値, 標準偏差, 変動係数 (パターン別)

層厚	変位可能量 ( $l/h$ )								
	平均値 ( $\mu$ )			標準偏差 ( $\sigma$ )			変動係数 ( $\delta$ )		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
全断面	0.067	0.003	0.008	0.101	0.007	0.025	1.507	2.333	3.125
4/3h	0.044	0.002	0.004	0.062	0.010	0.012	1.409	5.000	3.000

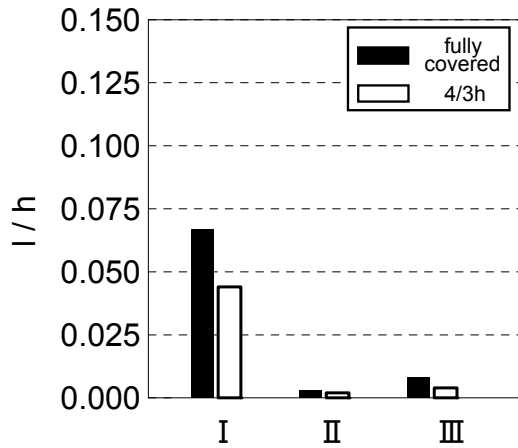


図 4.24 パターンごとの変位可能量

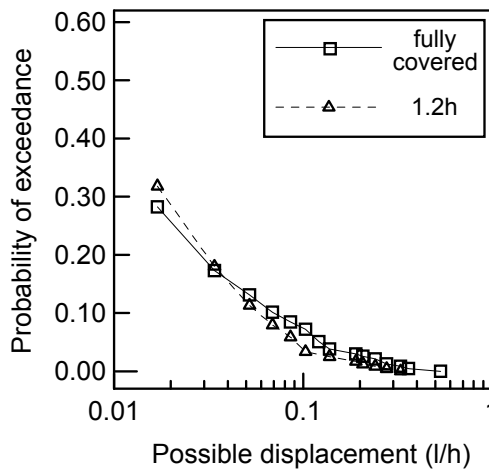


図 4.25 変位可能量の超過確率

#### c) テトラポッドが有する抵抗力

各層厚のかみ合わせパターンごとの引抜き力を表 4.14 および図 4.26 に示す。かみ合わせパターンが I から III へと変化するにつれて引抜き力が大きくなる傾向は、ドロスの場合と同様である。しかし、層厚による顕著な変化はない。ブロック形状の違いにより、テトラポッドはドロスと比較して、引抜き力に対する被覆層厚の影響が少ないと考えられる。

図 4.22 に示したかみ合わせパターンの出現確率と図 4.26 に示したパターンごとの引抜き抵抗力を用いて、式 (4.12) より算出されるテトラポッドが有する抵抗力を図 4.27 に示す。層厚による変化は小さいことが分かる。本実験で対象とした 2 種類の層厚については、その抵抗力は同程度である。テトラポッドの形状はドロスと大きく異なっており、ドロスのように強いかみ合いによる抵抗は発現できない。そのため、層厚の違いによる



抵抗力の差異がほとんどないと考えられる。

表 4.14 引抜き抵抗力の平均値, 標準偏差, 変動係数 (パターン別)

層厚	引抜き抵抗力 ( $F/W$ )								
	平均値 ( $\mu$ )			標準偏差 ( $\sigma$ )			変動係数 ( $\delta$ )		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
全断面	1.852	2.350	4.464	0.995	0.574	1.876	0.537	0.244	0.420
4/3h	1.496	2.662	4.216	0.271	0.521	1.896	0.181	0.196	0.450

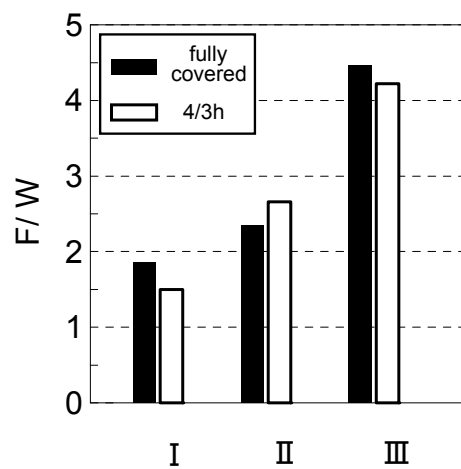


図 4.26 かみ合わせパターンごとの引抜き抵抗力

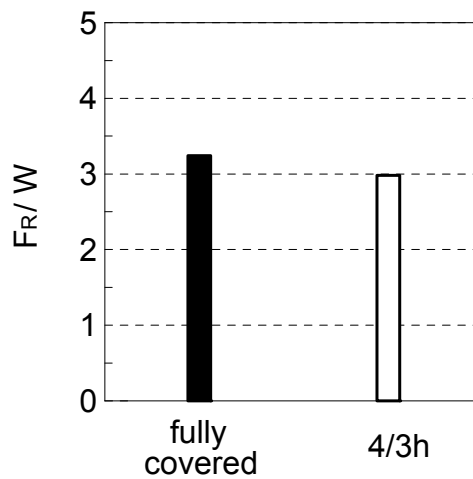


図 4.27 テトラポッドが有する抵抗力

## 4.6 抵抗力による耐波安定性の評価

### 4.6.1 耐波安定性の評価

安定質量  $M$  と消波ブロックの抵抗力  $F_R/W$  の関係は、すでに式(4.15)に示した。式(4.15)を用いて安定質量を与えるには、ブロック固有の係数である  $K$  を決定する必要がある。ここでは、 $K$  を与えて、直接的に安定質量を算出することで耐波安定性の評価を行うのではなく、異なる層厚における安定質量の比を求めることで、耐波安定性を評価することとした。異なる2種類の層厚 A および層厚 B の安定質量は  $M_A, M_B$  は式(4.15)で与えられ、その比  $M_B/M_A$  は式(4.16)となる。

$$\frac{M_B}{M_A} = \left( \frac{\frac{\rho_r}{\rho_w} r_A - 1}{\frac{\rho_r}{\rho_w} r_B - 1} \right)^3 \quad (4.16)$$

ここに、 $r_A, r_B$  は層厚 A, B におけるかみ合わせ係数を示している。表 4.15 に示すドロスの抵抗力  $F_R/W$  を用いて、式(4.14)より算定されるかみ合わせ係数を表 4.16 に示す。実験条件より  $\rho_r=2.37\text{g/cm}^3, \rho_w=1.00\text{g/cm}^3$  とし、表 4.16 に示した  $r$  を用いて、式(4.16)より各層厚における安定質量の比を求めた。その結果、層厚  $1.2h$  の場合に必要な安定質量は、全断面あるいは層厚  $1.8h$  の場合に必要な安定質量の 1.35 倍と算定された。

表 4.15 ドロスの抵抗力

	全断面	1.8h	1.2h
抵抗力 $F_R/W$	4.85	4.85	3.26

表 4.16 かみ合わせ係数  $r$

	$F_R/W$	$r$
全断面・1.8h	4.85	1.38
1.2h	3.26	1.29

### 4.6.2 評価手法の妥当性

図 4.28 は 3.2.2 で示した安定実験結果に基づき、層厚  $1.2h$  および  $1.8h$  それぞれの安定質量  $M_{1.2h}, M_{1.8h}$  の比率  $M_{1.2h} / M_{1.8h}$  を横軸に被災度  $N_0$  をとって示したものである。図中には式(4.16)より算定される安定質量の比率も併せて示してある。設計のベースとして通常用いられている被災度 0.3 前後の条件では、提案モデルによる値は安定実験による値とほぼ一致している。このことより、本手法を用いることで、耐波安定性に及ぼすドロ

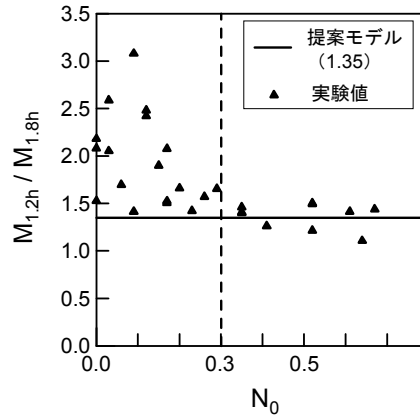


図 4.28 ブロックの質量比

スの抵抗力の影響を評価し得ると考える。しかしながら、被災度の小さな範囲において、実験値が提案モデルによって評価された値を上回る傾向にある。提案モデルによる値と実験値に差が生じる要因の一つとして、提案モデルにおける抵抗力  $F_R/W$  の与え方が挙げられる。 $F_R/W$  は、被覆表層に存在するブロックのかみ合わせパターン( $i=I, II, III$ )の出現確率  $P(i)$  と各々のパターンが有する引抜き力  $F(i)/W$  から定まる期待値  $\sum P(i)F(i)/W$  で与えられる。被災度  $N_0$  の小さな領域は、ブロック被覆層において初期の被害が生じる領域で、その多くは、周囲とのかみ合わせが期待できないブロックにおいて被害が生じると考えられる。そうした場合、実際に発揮される抵抗力は、かみ合わせの期待できないブロックのみで決定されることになり、提案モデルで用いた期待値として与えられる  $F_R/W$  を下回ると考えられる。引抜き試験時に実施したブロックのかみ合わせ状況の観察より、被覆層厚が減少すると、周囲とのかみ合わせが期待できないブロックが増加する傾向が確認されている。このことから、層厚が薄い  $1.2h$  の場合は、実際に発揮される抵抗力と提案モデルで用いた期待値との差が大きくなる傾向にあるといえる。

以上より、各々の被災度において、被害が生じるブロックのかみ合わせの状況を明らかにし、被災度のレベルに応じた抵抗力を考慮することで、提案した手法をさらに改良することが可能である。

#### 4.7 結語

消波ブロックの抵抗力に着目した耐波安定性の評価手法を検討するとともに、消波ブロック被覆堤の被覆層厚と消波ブロックの抵抗力の関係を実験的に明らかにし、抵抗力が耐波安定性に及ぼす影響を評価した。

本章で得られた結果を以下に要約する。

- 1) 消波ブロックの引抜き抵抗力を一つのブロックが被覆層より離脱する際にその影響が及ぶ範囲を示す指標として取り扱い, 斜面法線方向の釣り合い式である Svec 式に適用して安定質量の算定式を導いた.
- 2) 引抜き抵抗力を計測し, その特性を把握した. 引抜き抵抗力は, ブロック相互のかみ合いの状況に応じて異なる. かみ合いの状況は, 他のブロックによる拘束がない状態 (パターンⅠ), ブロックの側方のみを拘束されている状態 (パターンⅡ), 他のブロックにより上方から拘束されている状態 (パターンⅢ) の3つに大別される. 強いかみ合っているブロック (パターンⅢ) ほど引抜き抵抗力が大きくなる傾向にあった.
- 3) 層厚の変化に伴い, 被覆層表層におけるかみ合わせパターンの出現確率が変化する. 層厚が減少すると, 自重のみで外力に抵抗するブロック (パターンⅠ) が増加し, かみ合わせの効果で外力に抵抗するブロック (パターンⅢ) が減少する.
- 4) 消波ブロックが有する抵抗力をかみ合わせのパターンの出現確率とかみ合わせのパターンごとの引抜き抵抗力の平均値から算出される期待値で評価した. その結果, ドロスが有する抵抗力は, 全断面被覆と層厚  $1.8h$  において同程度であり, 層厚  $1.2h$  においては減少することが分かった. テトラポッドが有する抵抗力は, ドロスと比較して, 層厚による変化が少ない.
- 5) 被覆層厚の減少に伴うドロスの耐波安定性の低下は, ドロスが有する抵抗力の低下により説明可能である.

## 参考文献

合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No.248, 24p.

和田秀三・御園生善尚・鈴木義也・岡安隆照・吾妻一興 (1975): 統計学大要, 養賢堂, pp.149-156.

Hudson, R.Y (1959) : Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol.85, WW3, pp.93-119.

Peene, S. J. and H. Wang (1987) : Laboratory study on the resistance of breakwater armor units, Rep. Dep. Coastal Oceanographic Eng., Univ. of Florida, Rep. UFL/COEL-87/007.

Price, W. A. (1979) : Static stability of rubble-mound breakwaters, The Dock and Harbor Authority, Vol. 60, pp.2-7.

Svee, R. (1962) : Formulas for design of rubble-mound breakwaters, Proc.ASCE, vol.88, WW2, pp.11-21.

## 第5章 消波工の断面変形と消波機能の変化

### 5.1 緒言

構造物の設計法においては、性能設計体系への移行が進められており、海岸及び港湾構造物においても性能設計に関連した種々の研究が行われている。こうした中、防波堤の主要な形式である混成堤については、ケーソンの滑動量を考慮した設計法（例えば下迫・高橋, 1998）が確立されてきているものの、消波ブロック被覆堤に関しては未だ検討の余地が残されている。すなわち、性能設計では、構造物の被害とそれに伴う機能劣化を適切に予測することが必要となるため、消波ブロック被覆堤においては消波工の変形過程の予測・評価が必須であり、消波工の変形に応じた消波工機能の変化を評価する必要がある。

下迫ら（2006）は、直立堤における滑動量を考慮した設計法を消波ブロック被覆堤に対して拡張しているが、供用期間中に消波ブロックが被災しないものとして滑動量を算出しており、消波ブロック被災時に生じるケーソンへの作用波力の増大が考慮されていない。山縣ら（2002）や高山ら（2007）は、消波ブロックの被災を天端の沈下で置き換えることで、消波ブロックの被災による作用波力の増加を考慮したケーソンの滑動量について検討している。しかしながら、消波工の被災形態は、波浪条件や堤体の構造条件等で異なるものと考えられ、消波工の変形過程のより適切なモデル化を行い、ケーソン作用波力の議論を行う必要があるといえる。

本章では、消波ブロック被覆堤における消波工の被災形態を把握するとともに、その変形過程を水理模型実験により把握する。その後、消波工の変形形状とケーソンに作用する波力の関係について実験的な検討を行う。

## 5.2 消波工の被災形態に関する検討

### 5.2.1 被災事例の収集

消波ブロックの被災形態を把握するために、消波ブロック被覆堤の被災事例を収集、整理した。主要港湾における防波堤の被災に関する全体的な調査は、被災防波堤集覧（北島ら，1968；武山・仲山，1975；服部ら，1984；宮井ら，1993）としてとりまとめられており、掲載されている全被災例（254例）の中から該当事例を収集して、被災前後の断面図を比較することで、消波ブロックの被災形態を把握することとした。また、波浪条件および構造条件と消波ブロックの被災形態を関連付けることで、消波工断面の変形に影響を及ぼすと考えられる要因について考察した。

解析対象として収集したのは、被災前後の断面図が示されているもので、潮位を含めた被災時の波浪条件が明確な事例である。収集した事例を表 5.1 に示す。同一の時化による同一港湾での被災であっても、構造条件が異なる断面や被災形態が異なる断面については各々の断面を解析対象とすることとした。その結果、計 15 断面を収集した。

表 5.1 収集事例

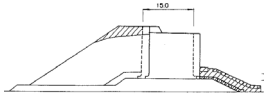

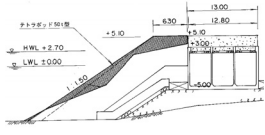
No.	地区名称	被災年月日	集覧 発刊年
1	中の作港	S.46.9.11-13	1975
2	留萌港(A-A 断面)	S53.11.19-20	1984
3	留萌港(B-B 断面)	S53.11.19-20	1984
4	留萌港(C-C 断面)	S53.11.19-20	1984
5	鷺泊港	S57.10.24-25	1984
6	むつ小川原港	S57.3.21-24	1984
7	八戸港	S55.12-23-24	1984
8	久慈港	S57.3.21-22	1984
9	鼠ヶ関港	S55.10.26-28	1984
10	小名浜港	S56.8.22-23	1984
11	鹿島港(A-A 断面)	S55.12.24-25	1984
12	鹿島港(B-B 断面)	S55.12.24-25	1984
13	上屋永田港	S57.8.26	1984
14	鷺泊港	S61.3.16-18	1993
15	渡嘉敷港	S62.8.29-30	1993

### 5.2.2 消波工の被災形態

収集した事例の被災断面図より，消波工の被災形態を分類したところ，表 5.2 に示す 3 つのパターンに大別された．パターンⅠは主に消波工天端付近で被災が生じている場合（4 事例），パターンⅡは主に消波工法面で被災が生じている場合（7 事例），パターンⅢは消波工天端および法面の両方で被害が生じている場合（4 事例）である．

鹿島ら（1986）は，直立堤・混成堤被覆材の被災事例を被災時相対波高で整理している．被災時相対波高とは，被災時有義波高の消波ブロック安定限界波高に対する比であり，消波ブロック安定限界波高は消波ブロックの質量と  $K_D$  値より前述した Hudson 式を用いて逆算される．被災事例は被災時相対波高が 1.0 付近に集中していることを指摘している．図 5.1 に被災時相対波高をパターン毎に示す鹿島らの指摘と同様に，被災時相対波高は，1.0 付近に集中しているのが分かる．パターン間での被災時相対波高の平均的な傾向を比較すると，パターンⅠとパターンⅢは同程度であり，パターンⅡが相対的

表 5.2 消波工の被災形態

パターン	消波工の被災状況	該当事例 No.
Ⅰ	主に天端付近が被災  No.14 駕泊港	7
		8
		12
		14
		(計 4 事例)
Ⅱ	主に法面が被災  No.6 むつ小川原港	1
		3
		4
		5
		6
		9
11		
(計 7 事例)		
Ⅲ	天端および法面が被災  No.13 上屋永田港	2
		10
		13
		15
(計 4 事例)		



に小さい。このことから、被災時相対波高が大きくなるにつれ、被災形態がパターンⅡからパターンⅠあるいはパターンⅢへと変化することが想定される。被災時相対波高が大きくなるにつれ、ブロックに被害を生じさせるような波作用が消波工の天端まで達するために、被災形態が変化すると考えられる。図 5.2 に被災時相対天端高（被災時水位から消波工天端までの距離を被災時波高で除した値）をパターン毎に示す。被災時相対天端高は、約 0.2 から 0.9 の範囲に分布している。パターン間での被災時相対天端高の平均的な傾向を比較すると、パターンⅡが大きくパターンⅠおよびパターンⅢが小さい。被災時相対天端高が大きい場合はパターンⅡの被災形態となり、被災時相対天端高が小さくなるにつれパターンⅠあるいはパターンⅢの被災形態となる。被災時相対天端高が大きいとブロックに被害を生じさせるような波作用は法面付近に集中し、小さいと天端に集中するためと考えられる。そこで、以降の水理模型実験においては、設計相対天端高  $h_c/H_D$  ( $h_c$ : 実験時水位から消波工天端までの距離,  $H_D$ : 消波ブロックの安定限界波高) が異なる断面を対象とすることとした。

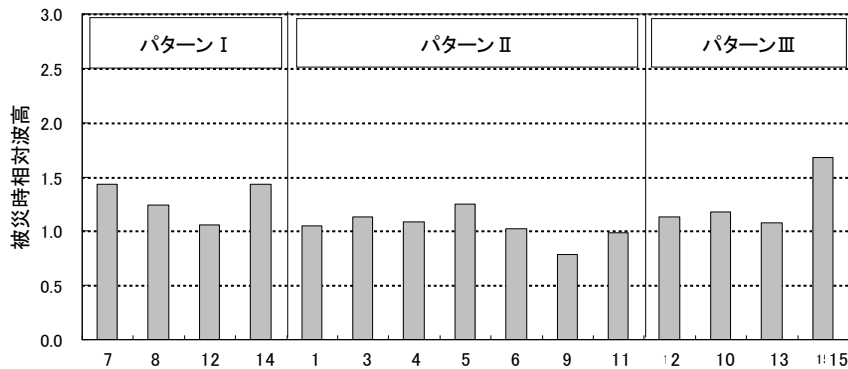


図 5.1 被災時相対波高

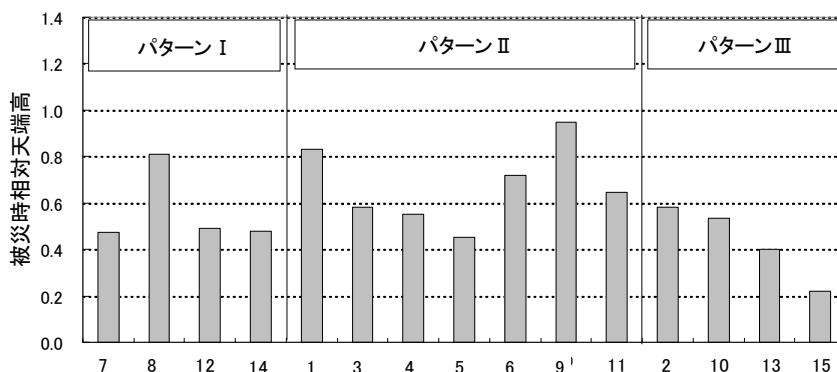


図 5.2 被災時相対天端高

## 5.3 消波工の断面変形に関する実験的検討

### 5.3.1 実験条件

水理模型実験は、図 5.3 に示す長さ 50m、幅 1.0m、高さ 1.5m の 2 次元造波水路を用いて行った。水路の一端にはピストン型造波機が設置され、他端に向けて 26m の水平部を経て 1/30 の勾配を持つ水路床が設置されている。造波制御として、ソフトウェアによる反射波吸収制御を行っている。それに伴い、制御用の波高計 2 本を造波板近くに設置した。通過波検定は、波高計を沖側一様水深部に 2 本と堤体位置前後に 2 本設置して行った。合田ら (1976) の入反射波分離推定法を用い、入射波成分を通過波として検定を行った。波高計の間隔は、入反射波分離の際に、分離有効周波数帯に周波数のピークが含まれるように設定した。不規則波の理論スペクトルは修正 Bretschneider-光易型を用いた。取得した水位データを解析して得られる有義波高と有義周期および周波数スペクトルの形状が目標値と一致するまで、造波信号の修正を繰り返した。通過波検定の後に、1/30 勾配の水路床上に消波ブロック被覆堤を設置した。設計相対天端高  $h_c/H_D$  が 0.39, 0.60, 1.03 の 3 種類の堤体 (堤体 A, 堤体 B, 堤体 C) を実験対象とした。実験断面図の一例を図 5.4 に、実験条件を表 5.3 に示す。消波ブロックはテトラポッドを使用した。

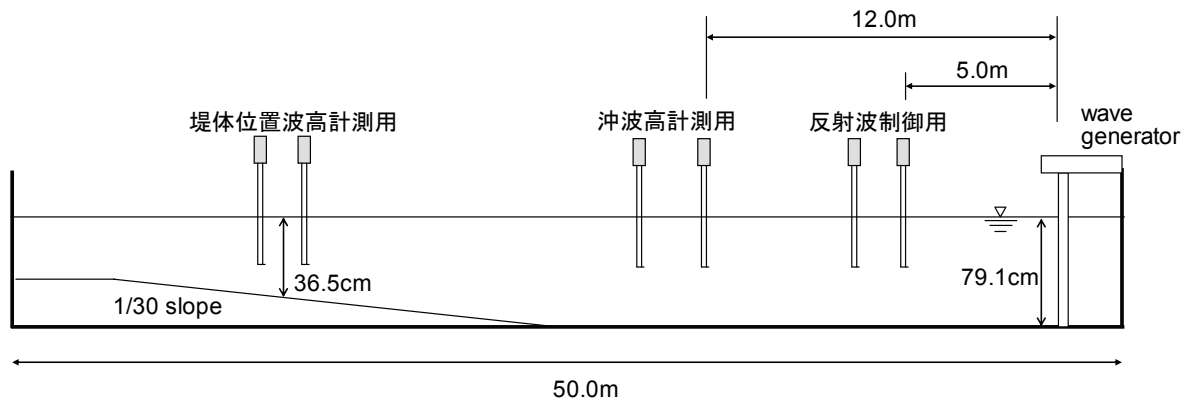


図 5.3 実験水路

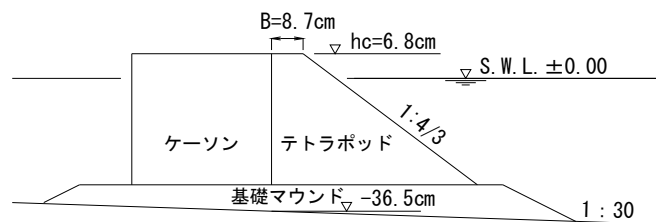


図 5.4 実験断面図 ( $h_c/H_D=0.60$ )

表 5.3 実験条件

	堤体 A	堤体 B	堤体 C
設計相対天端高 $h_C/H_D$	0.39	0.60	1.03
水深 $h$	36.5cm		
天端高 $h_C$	4.4cm	6.8cm	11.6cm
天端幅 $B$	8.7cm		
使用ブロック	テトラポッド		
質量 $M$	124.3g		
密度 $\rho_r$	2.352g/cm <sup>3</sup>		
代表径 $D_n (= (M/\rho_r)^{1/3})$	3.75cm		
安定限界波高 $H_D$	11.3cm		
波浪種別	不規則波		
周期	$T_{1/3}=1.87s$		
波高	$H_{1/3}=9.8cm\sim 22cm$		

### 5.3.2 実験方法

入射波高  $H_{1/3}$  として  $H_D$  を下回る波から大きく越える波まで作用させた ( $H_{1/3}/H_D \doteq 0.9, 1.0, 1.2, 1.5, 1.9$ ). 同一波高ランクの波の作用は約 1000 波とし, 消波工を積み替えることなく, 順次波高を上げていくこととした. 途中 250 波毎に, 断面形状の計測を行った. 測定箇所の一例を図 5.5 に示す. 岸沖方向に 12 測線とし, 測線の間隔を  $2D_n$  (代表径の 2 倍) とした. 測点は, 消波工の大規模な変形もとらえるために基礎マウンドの法先にいたるまでの広範囲に設けた. 測点の間隔は, 消波工天端で  $0.5B$  とし, それ以外は  $D_n$  とした. 測定は, タッチセンサー式砂面計を用いて行った.

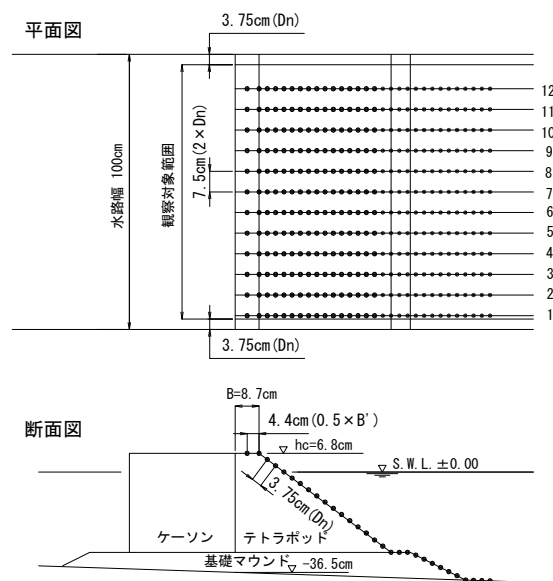
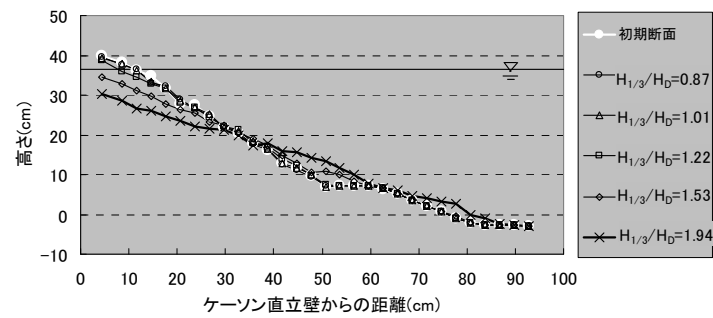


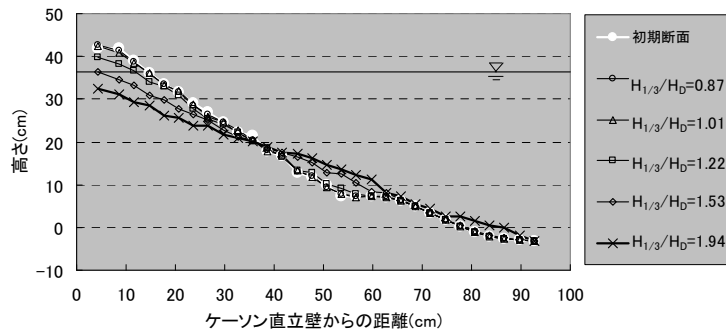
図 5.5 消波工断面測定位置 (堤体 B,  $h_C/H_D=0.60$ )

### 5.3.3 断面形状の変化

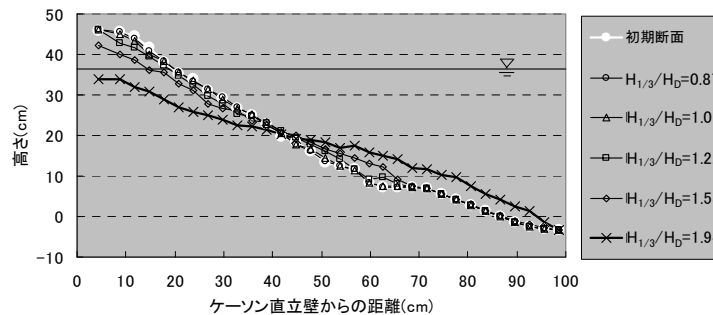
$H_{1/3}/H_D=1.0$  程度までは、被害が局部的に生じるが、被害ブロック個数は少なく顕著な断面変形は生じなかった。 $H_{1/3}/H_D=1.22$  より断面変化が明瞭となり、波高ランクが上がるにつれ、横断方向に平均的な断面変形が生じた。 $H_{1/3}/H_D=1.94$  に至ると、著しい断面の変形が観察された。図 5.6 に各波高ランクの波を 1000 波作用させた後の消波工の断面形状を堤体毎に示す。ここでは、12 側線の平均値を示した。波高ランクの増大に伴い、消波工の変形が進行する状況をよく捉えていることが分かる。



a) 堤体 A ( $h_c/H_D=0.39$ )



b) 堤体 B ( $h_c/H_D=0.60$ )



c) 堤体 C ( $h_c/H_D=1.03$ )

図 5.6 消波工の断面形状

以降において、各波高ランクにおける入射波高  $H_{1/3}$  を用いて算出される  $h_c/H_{1/3}$  を相対天端高と称する。表 5.4 に各波高ランクに対応した相対天端高を示す。断面変形が明瞭となる  $H_{1/3}/H_D=1.22$  では、各堤体の相対天端高が、図 5.2 に示した被災時相対天端高の分布範囲 (0.2~0.9) とほぼ一致している。そこで、被災事例との関連を検討するために、 $H_{1/3}/H_D=1.2$  における堤体 A ( $h_c/H_{1/3}=0.32$ ) と堤体 C ( $h_c/H_{1/3}=0.84$ ) の断面形状に着目することとした。各々の堤体の断面形状および初期断面からの鉛直方向の変位を図 5.7 に示す。図中には初期断面の形状を白線で示している。鉛直変位は  $D_n$  で無次元化し、横軸は相対水平距離  $x/B$  ( $x$ : ケーソン直立壁からの水平距離,  $B$ : 消波工の天端幅) で

表 5.4 相対天端高 ( $h_c/H_{1/3}$ ) の変化

$H_{1/3}/H_D$	$h_c/H_{1/3}$		
	堤体 A ( $h_c/H_D$ =0.39)	堤体 B ( $h_c/H_D$ =0.60)	堤体 C ( $h_c/H_D$ =1.03)
0.87	0.45	0.69	1.18
1.01	0.39	0.59	1.02
1.22	0.32	0.49	0.84
1.53	0.25	0.39	0.67
1.94	0.20	0.31	0.53

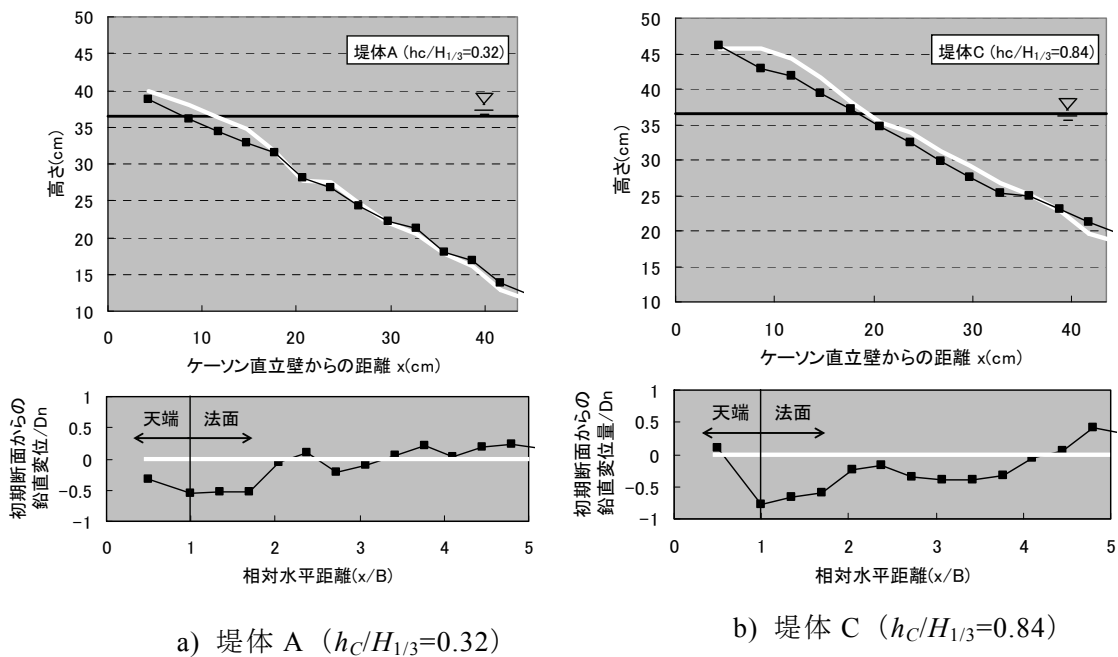


図 5.7 断面形状および鉛直変位

示した。堤体 A は、消波工天端が沈下しており、沈下の範囲が  $x/B=1.5$  程度まで及んでいる。堤体 C は、消波工の法肩位置で沈下が生じているが、天端中央は沈下していない。しかしながら、法面の沈下は、 $x/B=4.0$  程度まで及んでおり、堤体 A より広範囲で法面が変形していることが分かる。こうした変形の状況は、被災時相対天端高が大きいと法面が、小さいと天端が被災する被災事例の傾向と概ね一致している。

### 5.3.4 消波工の変形過程の評価

#### (1) 変形過程の評価方法

被災事例および水理模型実験の結果を踏まえ、天端の沈下および法面の変形の程度を把握するため、図 5.8 に示す天端沈下率  $\eta'/h_c$  と水平減少率  $l'/l_0$  を定義した。ここで、水平減少率  $l'/l_0$  とは被災断面における静水面での水平方向の消波工厚さの減少量  $l'$  と被災前の消波工厚さ  $l_0$  の比であり、天端沈下率  $\eta'/h_c$  とは被災断面における天端中央での鉛直方向の沈下量  $\eta'$  と被災前の静水面から消波工天端までの高さ  $h_c$  の比である。水理模型実験で取得した断面形状のデータを用いて、天端沈下率および水平減少率を算出し、消波工の変形過程の定量的な評価を試みた。

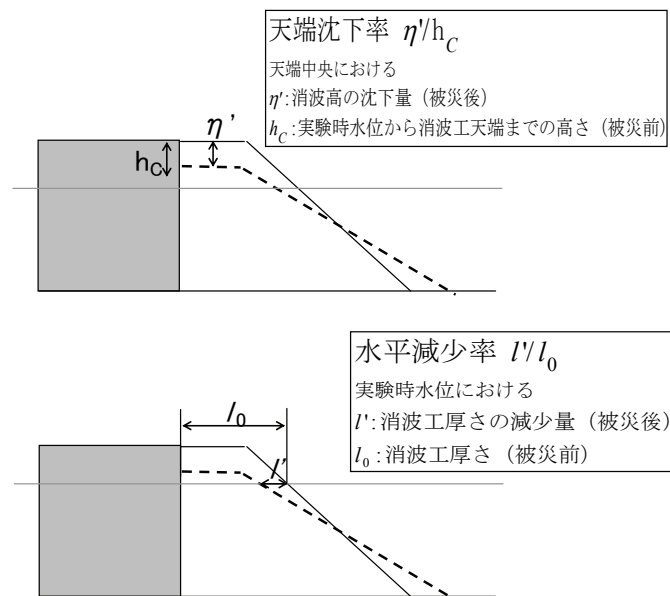


図 5.8 天端沈下率および水平減少率

## (2) 波数が消波工の変形に及ぼす影響

標準的な設計相対天端高である堤体 B ( $hc/H_D=0.60$ ) における，波数による天端沈下率および水平減少率の変化を図 5.9 に示す．天端沈下率および水平減少率ともに，12 測線の平均値を示している．各値とも  $H_{1/3}/H_D$  が 1 以下ではほとんど変化しておらず，顕著な断面変化は生じていないことが分かる． $H_{1/3}/H_D$  が 1.22 で変化が生じ始めるが，その際，最初の 250 波で天端の沈下や法面の変形が起こり，その後 1000 波までは，断面の変形が進行していない． $H_{1/3}/H_D$  が 1.53 以上では，波数の増加に伴い断面の変形が進行していることが分かる．こうした傾向は，堤体 A，堤体 C ともに同様であった．

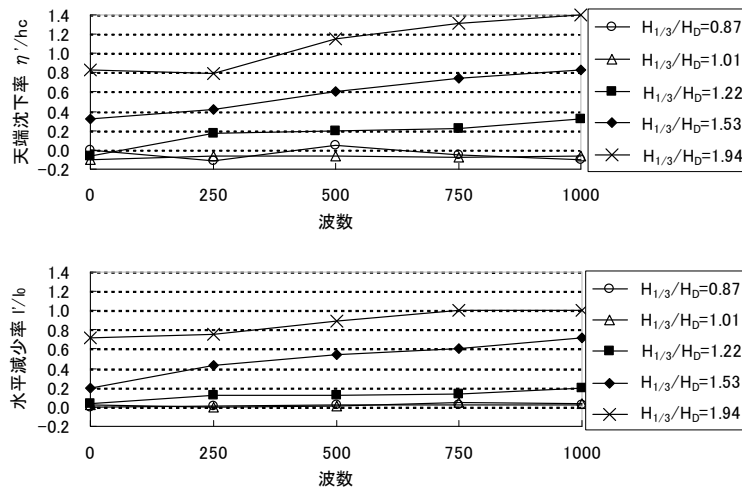
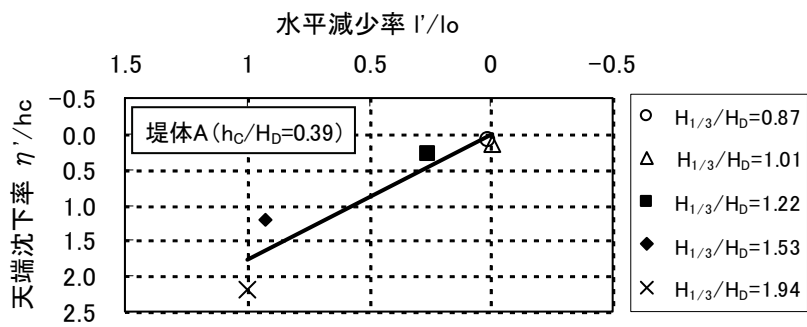


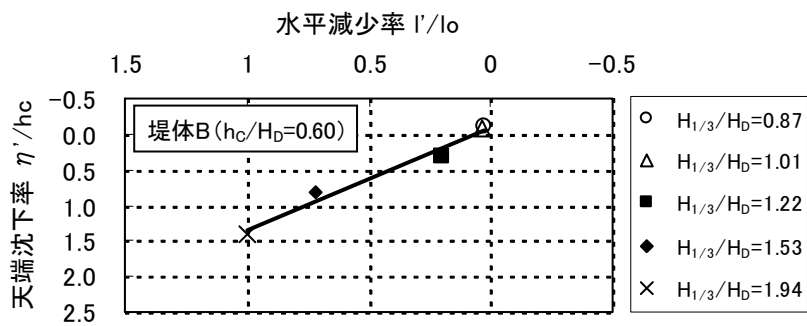
図 5.9 波数による天端沈下率および水平減少率の変化

## (3) 水平減少率と天端沈下率の関係

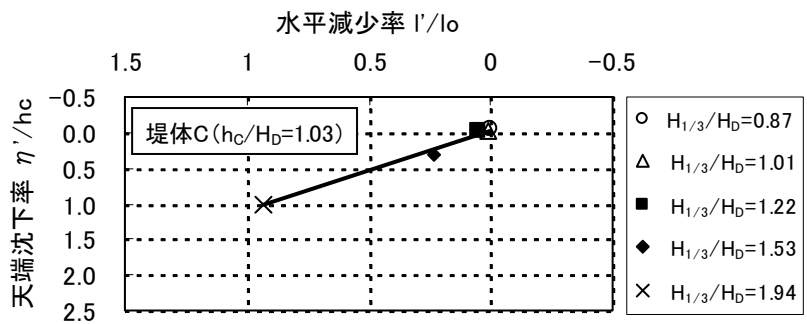
図 5.10 に水平減少率と天端沈下率の関係を堤体毎に示す．天端沈下率および水平減少率ともに，12 測線の平均値を示している．図中には，近似直線もあわせて示した．入射波高  $H_{1/3}$  の増加に伴い，水平減少率および天端沈下率ともに増加しており，同じ水平減少率の場合，設計相対天端高が小さいほど天端沈下率が大きくなることが分かる．この傾向は，被災事例の傾向と符合するものである．



a) 堤体 A ( $h_c/H_D=0.39$ )



b) 堤体 B ( $h_c/H_D=0.60$ )



c) 堤体 C ( $h_c/H_D=1.03$ )

図 5.10 水平減少率と天端沈下率の関係



## 5.4 波力減殺機能に関する実験的検討

### 5.4.1 実験条件

前節で得た、消波工の水平減少率  $l'/l_0$  と天端沈下率  $\eta'/h_c$  に基づいて被災断面を模擬した。図 5.11 に、港湾の防波堤において標準的な仕様である相対天端高  $h_c/H_D=0.6$  ( $h_c$ : 消波工天端高,  $H_D$ : 消波ブロックの安定限界波高) における水平減少率と天端沈下率の関係を示す。白丸 (○) は安定実験時の実測断面より得られた値であり、その近似線を実線で示している。被災断面は、実測断面の近似線を用いて模擬することとし、黒丸 (●) で示すように、水平減少率が 0.25 毎 ( $l'/l_0=0.25, 0.50, 0.75, 1.00$ ) に 4 断面を設定した。表 5.5 に検討断面を示す。比較のため消波工無しの断面も検討対象とした。

前節で示した消波工の変形形状は、ほぼ直線的であった。そこで、消波工の法面形状は直線で模擬することとした。鹿島ら (1992, 1993a, 1993b) は、消波工 ( $h_c/H_D=1.41, 2.19$ ) の変形形状について、「天端が低い」場合や「作用波高が大きく変形が著しい」場合は、変形形状が直線的になることを報告している。前節の実験条件 ( $h_c/H_D=0.39, 0.60, 1.03$ ) は、鹿島らの実験と比較して相対的に「天端が低く」「作用波高が大きく変形が著しい」場合に相当している。

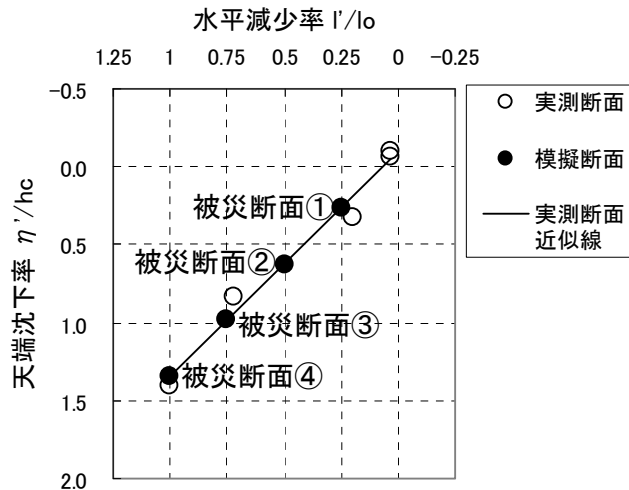


図 5.11 水平減少率と天端沈下率の関係

表 5.5 検討断面

断面名称	断面図
初期断面	
被災断面① $l'/l_0=0.25$ $\eta'/hc=0.27$	
被災断面② $l'/l_0=0.50$ $\eta'/hc=0.63$	
被災断面③ $l'/l_0=0.75$ $\eta'/hc=0.98$	
被災断面④ $l'/l_0=1.00$ $\eta'/hc=1.34$	
消波工無し	

## 5.4.2 実験方法

水理模型実験は、図 5.12 に示す長さ 55m、幅 1.2m、高さ 1.5m の 2 次元造波水路を用いて行った。水路の一端にはピストン型造波機が設置され、他端に向けて 26m の水平部を経て 1/30 の勾配を持つ水路床が設置されている。造波制御として、ソフトウェアによる反射波吸収制御を行っている。それに伴い、制御用の波高計 2 本を造波板近くに設置した。通過波検定は、波高計を沖側一様水深部に 2 本と堤体位置前後に 2 本設置して行った。合田ら (1976) の入反射波分離推定法を用い、入射波成分を通過波として検定を行った。波高計の間隔は、入反射波分離の際に、分離有効周波数帯に周波数のピークが含まれるように設定した。不規則波の理論スペクトルは修正 Bretschneider-光易型を用いた。取得した水位データを解析して得られる有義波高と有義周期および周波数スペクトルの形状が目標値と一致するまで、造波信号の修正を繰り返した。通過波検定の後に、堤体を設置した。

実験断面の一例 (初期断面) を図 5.13 に示す。水路内の勾配 1/30 のモルタル床上に、消波ブロック被覆堤模型を設置し、ケーソン (アクリル製) に作用する波圧を波圧計で、波力を 3 分力計で計測した。波圧計は、ケーソン壁面の 8 箇所 (PG1~PG8) に取り付けられた。なお、ケーソンと消波工の間に 0.5cm のクリアランスを設け、消波工として用いたテトラポッドが直接波圧計に接触するのを防いでいる。ケーソンは、波圧計測用と波力計測用に分かれており (図 5.14 参照)、波圧計、3 分力計をそれぞれ取り付けた。表 5.6 に実験条件を示す。実験は、規則波および不規則波で行い、1000Hz でデータをサンプリングした。規則波実験で、波圧および波力の基本的な特性を把握した後に、不規則波実験において、消波工の断面形状と作用波力の変化について検討することとした。不規則波実験では、実験波を約 1000 波作用させている。

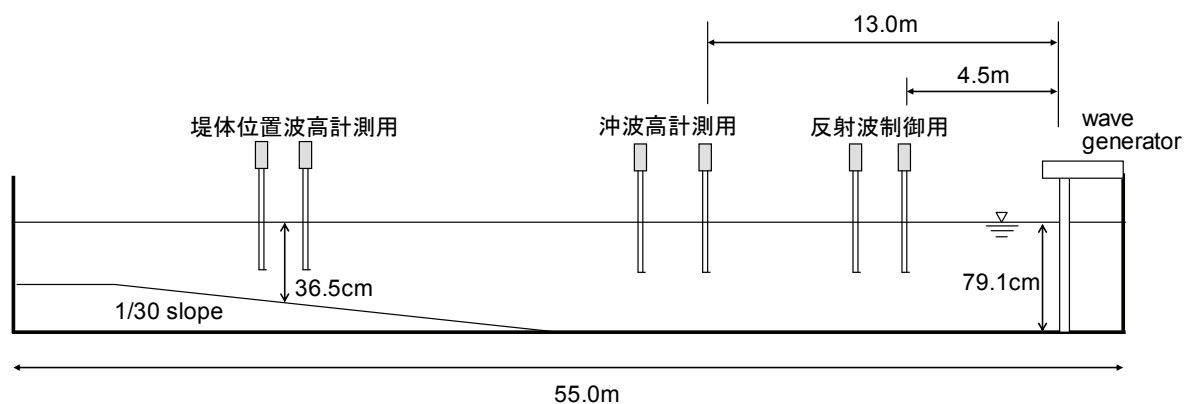


図5.12 実験水路

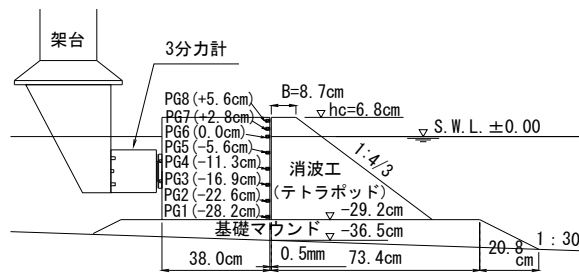


図 5.13 実験断面（初期断面）

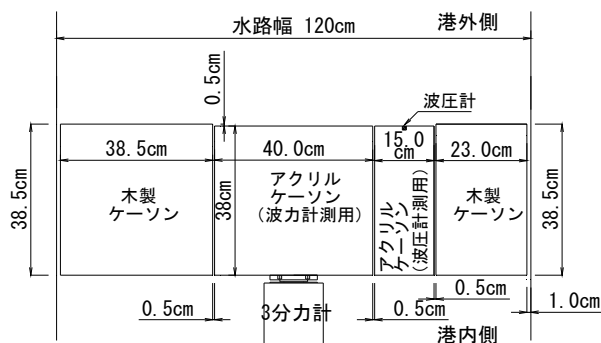


図 5.14 ケーソン平面配置図

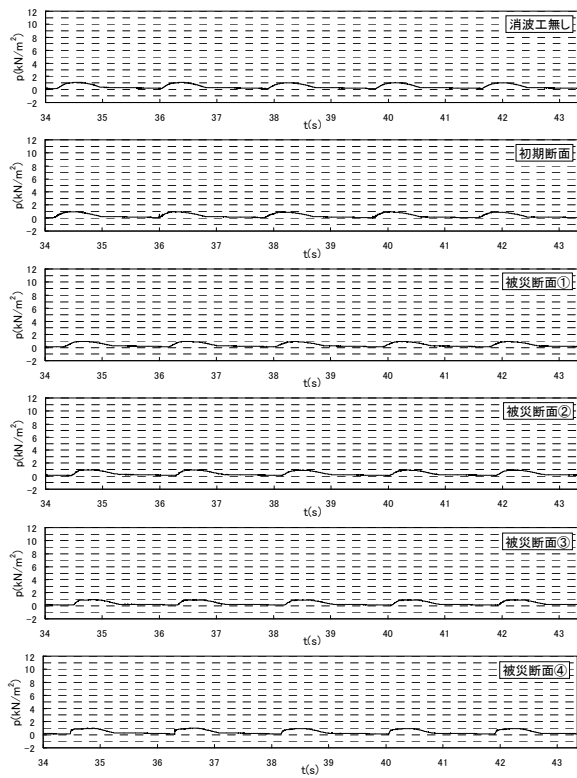
表 5.6 実験条件

設計相対天端高 $h_c/H_D$	0.60	
水深 $h$	36.5cm	
天端高 $h_c$	6.8cm	
天端幅 $B$	8.7cm	
使用ブロック	テトラポッド	
質量 $M$	124.3g	
密度 $\rho_r$	2.352g/cm <sup>3</sup>	
代表径 $D_n (= (M/\rho_r)^{1/3})$	3.75cm	
安定限界波高 $H_D$	11.3cm	
波浪種別	規則波	不規則波
周期	$T=1.87s$	$T_{1/3}=1.87s$
波高	$H=8cm \sim 28cm$ ( $H/h=0.21 \sim 0.77$ )	$H_{1/3}=10cm \sim 20cm$ ( $H_{max}/h=0.52 \sim 0.91$ )

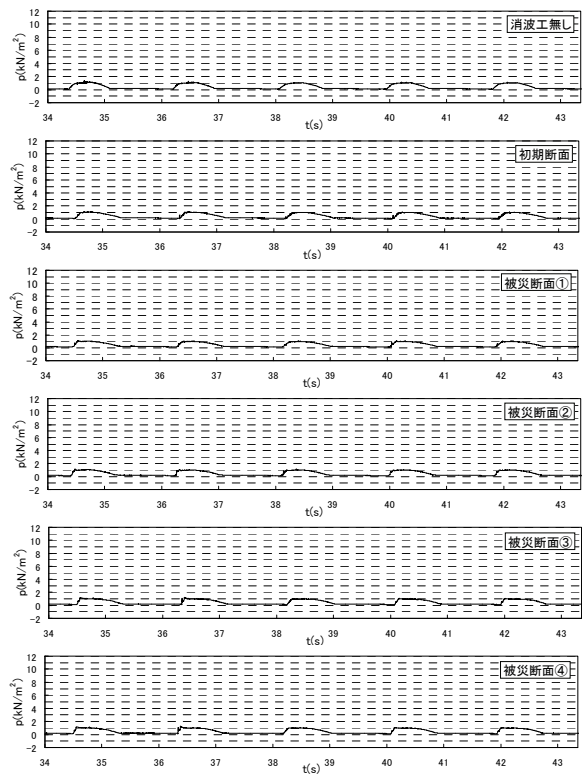
### 5.4.3 規則波実験における波圧・波力の特性

#### (1) 波圧の時系列

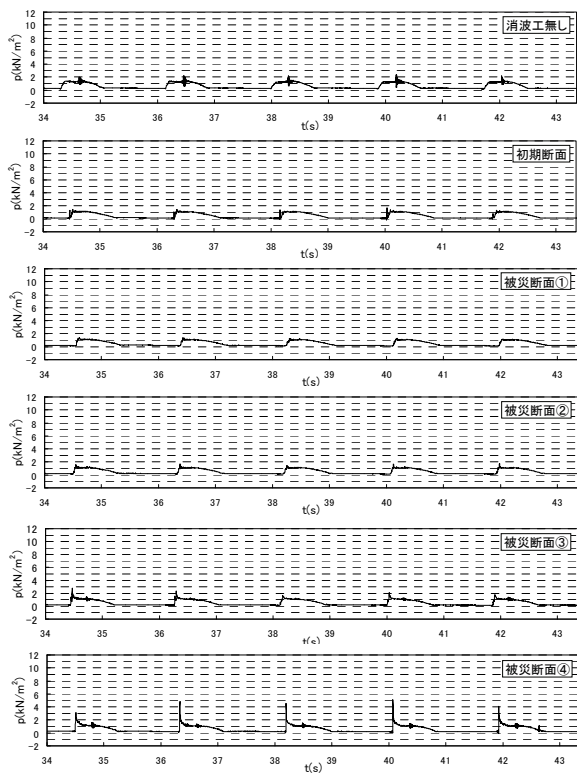
既往の波力算定法においては、静水面位置における波圧が波力算定の基準とされてい



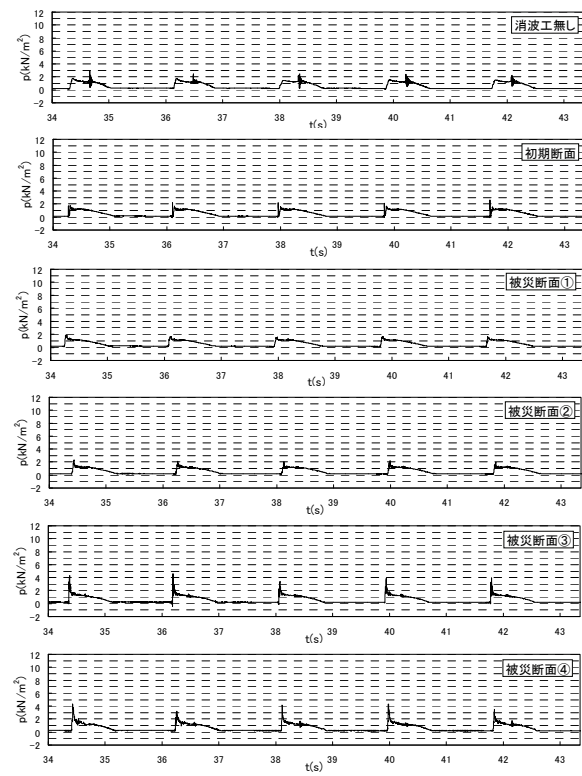
a)  $T=1.87s, H=7.8cm, H/h=0.21$



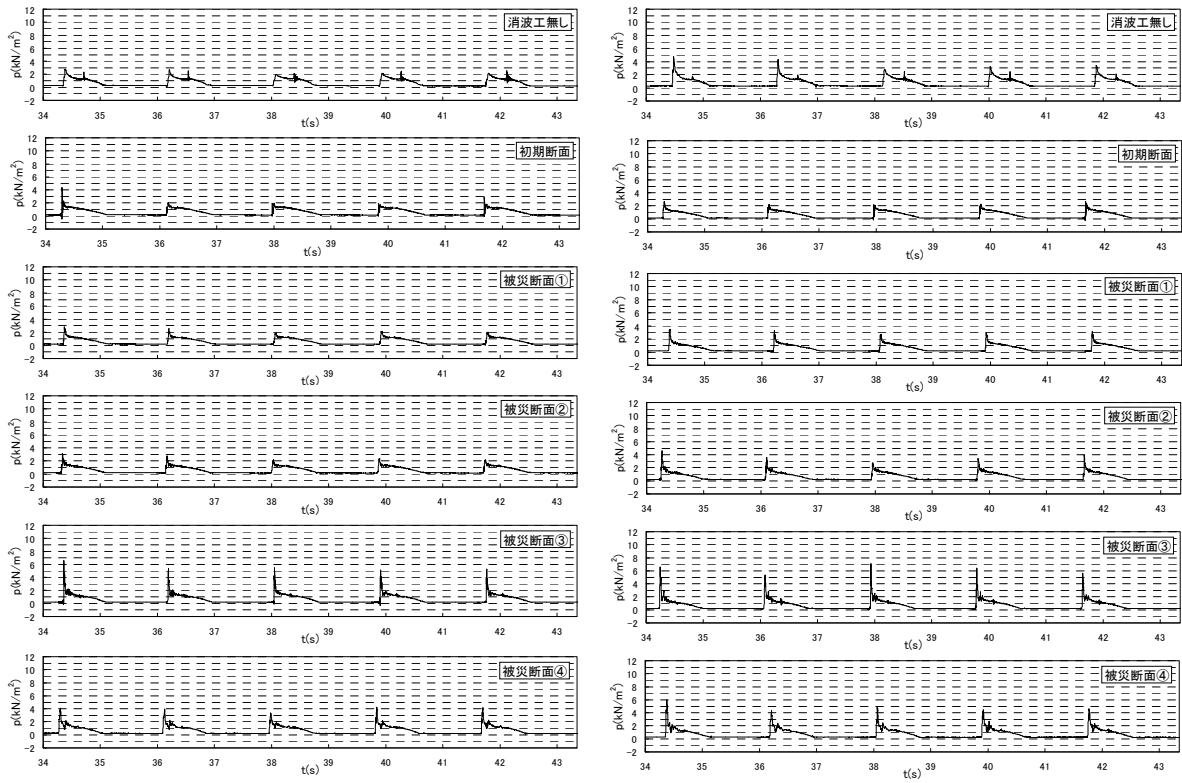
b)  $T=1.87s, H=10.8cm, H/h=0.30$



c)  $T=1.87s, H=14.5cm, H/h=0.39$

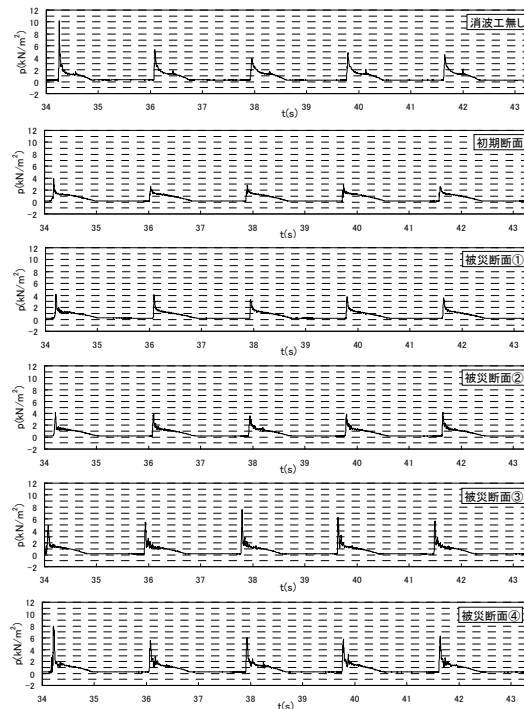


d)  $T=1.87s, H=18.0cm, H/h=0.49$



e)  $T=1.87s, H=21.5cm, H/h=0.59$

f)  $T=1.87s, H=26.0cm, H/h=0.71$



g)  $T=1.87s, H=28.0cm, H/h=0.77$

图 5.15 波压時系列

る．そこで静水面位置（PG6）で測定された波圧に着目し，その時系列を波高水深比  $H/h$  毎に図 5.15 に示す． $H/h=0.21, 0.30$  のケースでは，断面形状が変化するにつれ，波形の立ち上がりが若干急にはなるものの，波圧の大きさは，消波工の有無，消波工の断面形状にかかわらず，いずれもほぼ同じである．このことは，現行設計において波圧算定式として用いられている合田式（例えば合田，2008）で， $H/h \leq 0.3$  では消波工の波圧低減効果が見込まれないことと合致する．すなわち  $H/h$  が小さく，重複的な波作用を受ける場合，波圧は消波工の影響を受けない．一方， $H/h=0.39 \sim 0.77$  のケースでは，消波工の被災断面形状に応じて波圧が変化することが分かる．

図 5.16 に  $H/h=0.49$  のケースを拡大して示す．消波工の変形が進むと，波形のピークが鋭くなり，波圧の最大値も大きくなるのが分かる．初期断面から被災断面②では，波圧波形に大きな変化は見受けられない．しかしながら，被災断面③以降では，波形が急激に立ち上がり，衝撃的な波圧が発生していることが分かる．被災断面③は，消波工天端がほぼ静水面に位置しており，これまで指摘されているように，衝撃的な波圧が発生しやすい条件といえる．

図 5.17 に被災断面③の波圧の時系列を鉛直方向の計測位置毎（PG1～PG8）に示す．縦軸は，波圧  $p$  を  $\rho g H$ （ $\rho$ ：水の密度， $g$ ：重力加速度， $H$ ：波高）で無次元化した値を示し

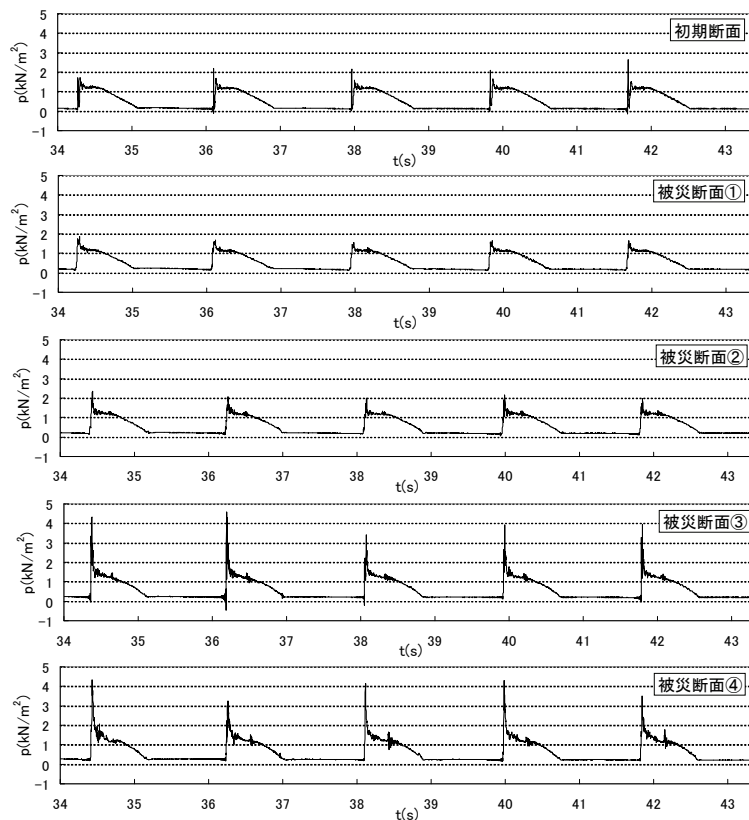


図 5.16 波圧時系列 ( $T=1.87s, H=18cm, H/h=0.49$ )

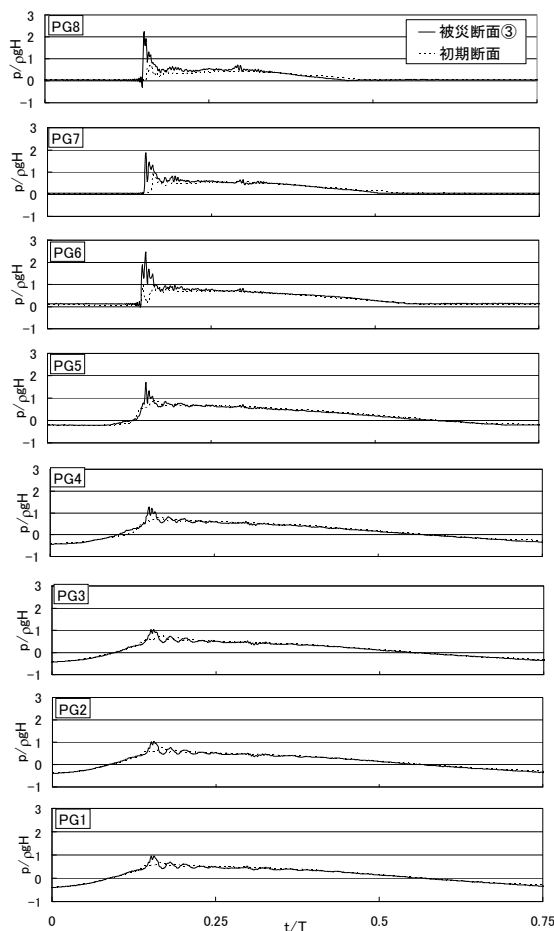


図 5.17 波圧時系列 ( $T=1.87s, H=18cm, H/h=0.49$ )

ており、横軸は時刻  $t$  を周期  $T$  で無次元化している。図中には初期断面での波圧も点線で示した。被災断面③では初期断面と比較して静水面位置 (PG6) での波圧が増大しているのみでなく、静水面下の消波工で被覆されている箇所 (PG1~PG5) においても波圧の増大が生じていることが分かる。関ら (2009) の指摘にもあるように、衝撃波圧発生時は、局所的な衝撃力だけでなくケーソン全体の作用波力の増大を引き起こすといえる。

## (2) 衝撃波圧成分と重複波圧成分の発生状況

静水面位置の波圧に着目し、波圧時系列で確認された衝撃波圧成分や重複波圧成分が被災断面形状に応じてどのように変化するかを検討した。図 5.18 に示すように、波圧の要素として、急激に変化する成分が衝撃波圧成分であり、緩やかに変化する成分が重複波圧成分である。図 5.19 に波圧時系列より得られた衝撃波圧成分および重複波圧成分の値を示す。縦軸は、波圧  $p$  を  $\rho g H$  で無次元化した値を示しており、横軸は波高水深比  $H/h$  である。各波圧成分の値は、規則波において解析対象とした 5 波の平均値である。衝撃



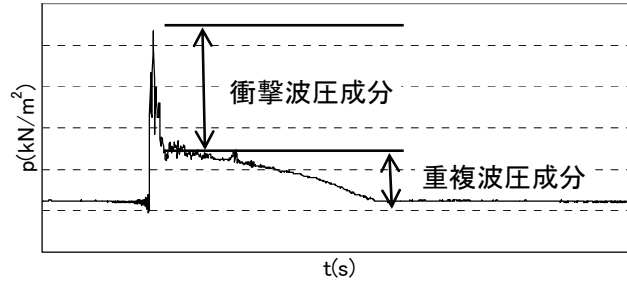


図5.18 衝撃波圧成分と重複波圧成分

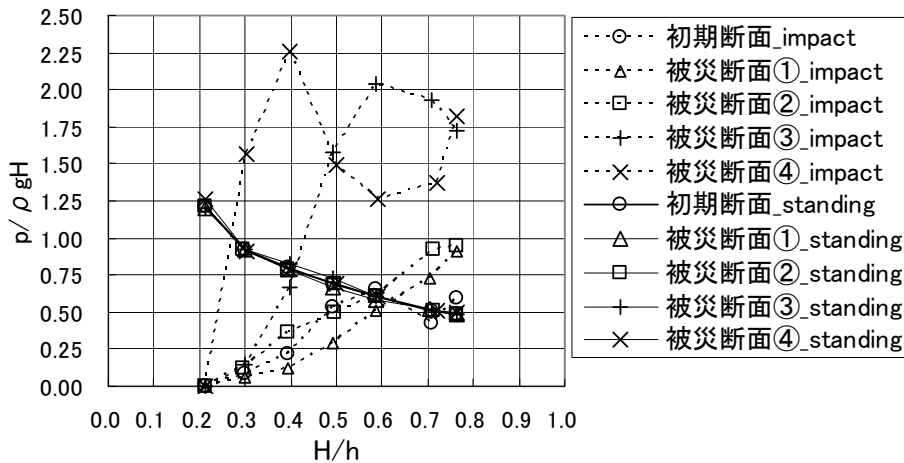
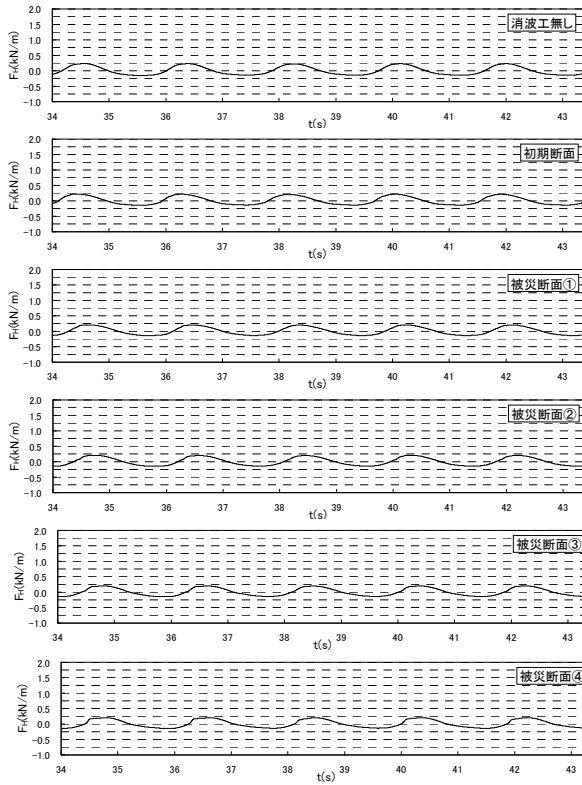


図5.19 衝撃波圧成分と重複波圧成分（規則波）

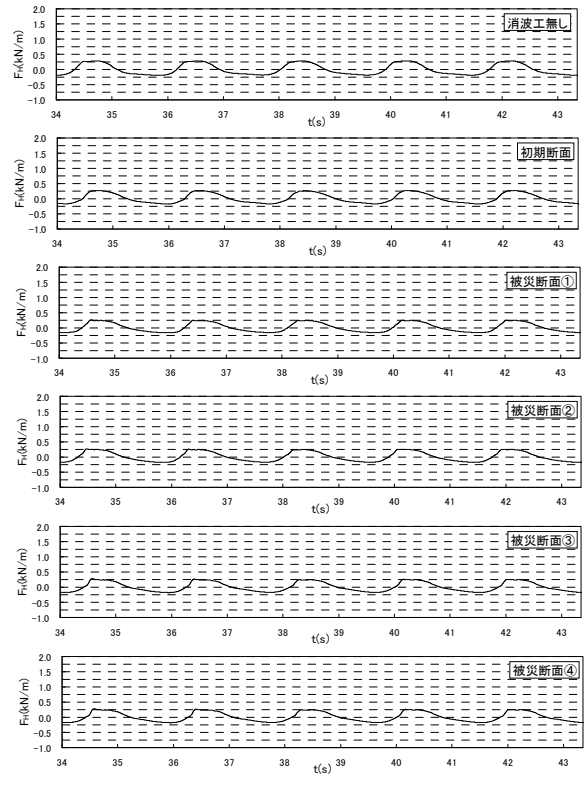
波圧成分は、 $H/h$  に比例して増加していることが分かる。このことは、関ら（2009）が指摘しているように、衝撃波圧を考慮した波圧算定式（高橋ら，1992）における衝撃波圧係数  $\alpha_{10}$  が波高に比例することに対応するものと考えられる。消波工断面毎の増加の割合に着目すると、被災の進行に伴い増加の割合が大きくなり、断面天端がほぼ静水面に位置する被災断面③および天端が没水した被災断面④においては著しい増加が確認できる。すなわち、消波工の断面形状が衝撃波圧成分の変化に及ぼす影響は大きいといえる。一方、重複波圧成分は  $H/h$  の増加に伴い減少するが、被災断面毎の変化はほとんど無く、消波工の断面形状が重複波圧成分の変化に及ぼす影響は小さい。

### (3) 波力の時系列

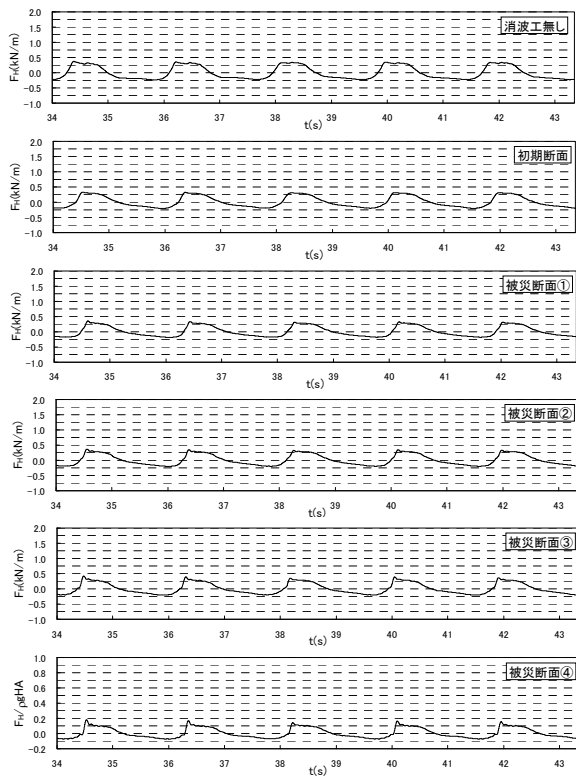
波力の時系列を波高水深比  $H/h$  毎に図 5.20 に示す。 $H/h=0.21, 0.30$  のケースでは、消波工の有無、消波工の断面形状にかかわらず、波圧波形はいずれもほぼ同じである。一方、 $H/h=0.39\sim 0.77$  のケースでは、消波工の被災断面形状に応じて波圧が変化することが分かる。このことは、図 5.15 に示した波圧波形の傾向と同じである。



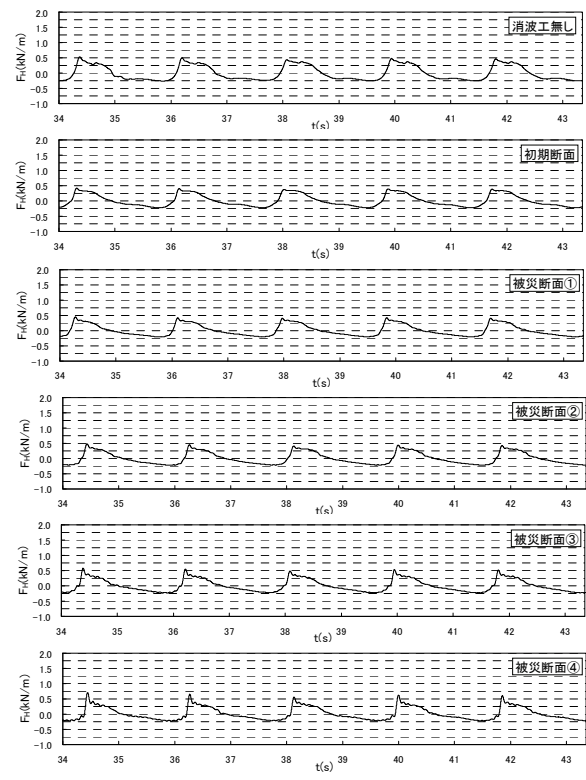
a)  $T=1.87s$ ,  $H=7.8cm$ ,  $H/h=0.21$



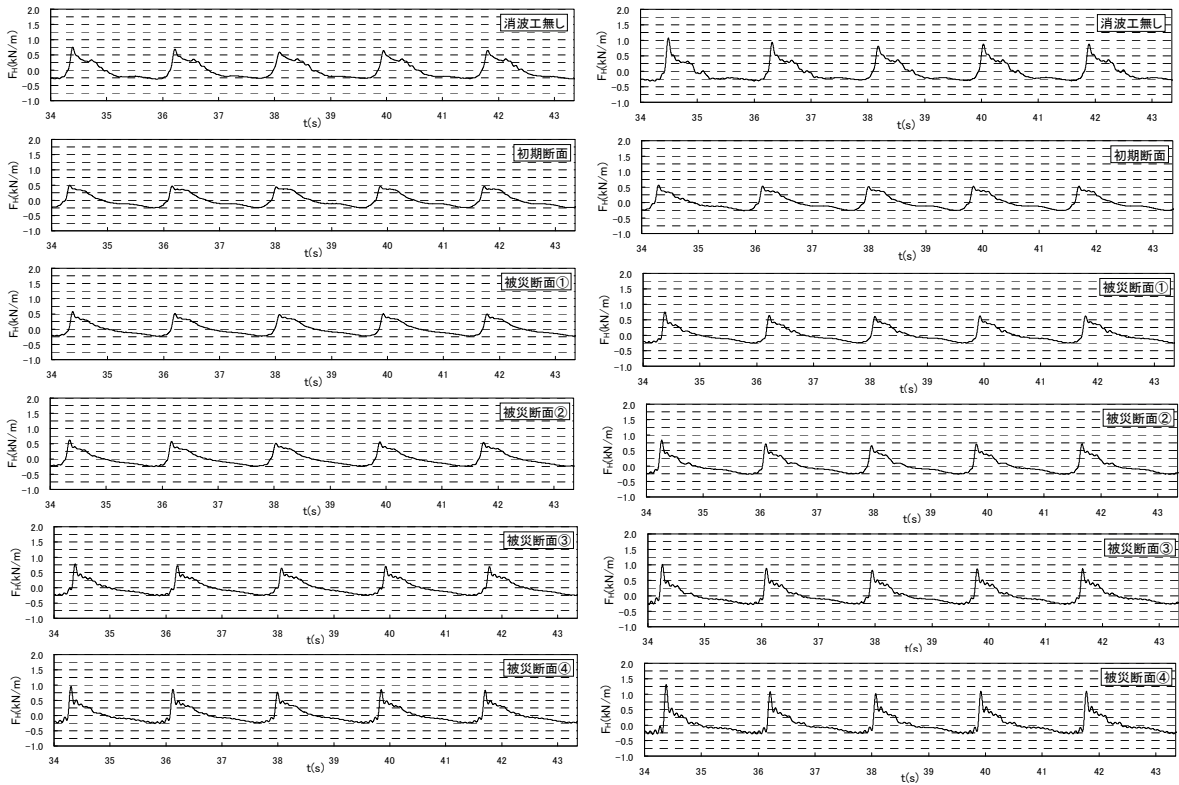
b)  $T=1.87s$ ,  $H=10.8cm$ ,  $H/h=0.30$



c)  $T=1.87s$ ,  $H=14.5cm$ ,  $H/h=0.39$

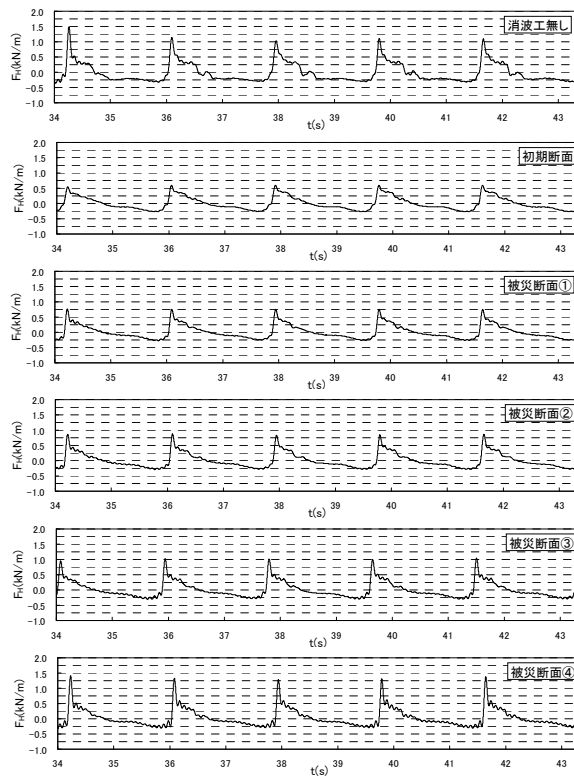


d)  $T=1.87s$ ,  $H=18.0cm$ ,  $H/h=0.49$



e)  $T=1.87s, H=21.5cm, H/h=0.59$

f)  $T=1.87s, H=26.0cm, H/h=0.71$



g)  $T=1.87s, H=28.0cm, H/h=0.77$

图 5.20 波力時系列

#### (4) 作用波力の比較

図 5.21 にケーソンに作用する水平波力  $F_H$  を断面形状毎に示す。縦軸は、各断面の無次元水平波力  $F_H/\rho g H A$  ( $A$ : 波力作用面積) を初期断面の無次元水平波力で除した水平波力比  $F_H'$  であり、横軸は波高水深比  $H/h$  である。 $H/h$  が 0.4 にいたるまでは、各断面の差はほとんどない。 $H/h$  が 0.4 以上では、各断面毎の  $F_H'$  の差異が顕著となる。被災断面④から被災断面①へと被災の規模が大きくなるにつれ  $F_H'$  も増加しており、被災断面④では初期断面に対して最大で 2.3 倍程度の波力が作用している。

図 5.22 に、各断面の無次元水平波力を消波工無し断面の無次元波力で除した波力比  $\lambda^*$  を示す。図中の実線は合田式で考慮されている消波工による波圧低減係数の値を示している。消波工天端が静水面付近に位置する被災断面③に至ると、消波工無し断面を上回る波力が発生することが分かる。

図 5.23 に、合田式で算定される波力に対する各断面の作用波力の比を示す。初期断面に作用する波力は、 $H/h=0.2$  で合田波力を若干上回るものの、ほぼすべての  $H/h$  において合田波力の値を下回る。被災の程度が大きくなるほど、合田波力を上回る波力が生じており、波力増大の割合は、消波工天端が静水面近傍、静水面以下となる被災断面③、被災断面④において著しい。また、消波工無し断面に作用する波力は  $H/h=0.2$  および  $H/h \geq 0.6$  で合田波力を上回っている。

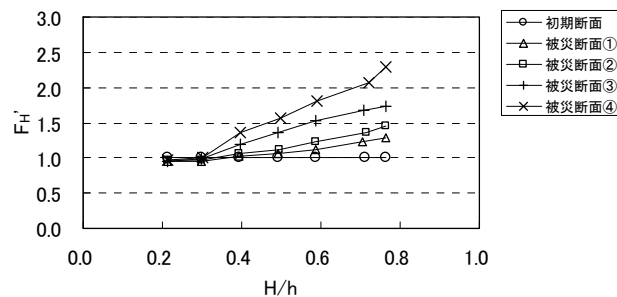


図 5.21 初期断面に対する水平波力の変化（規則波）

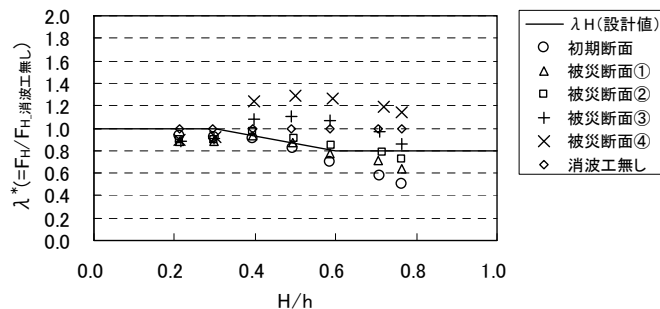


図 5.22 消波工無し断面に対する水平波力の変化（規則波）

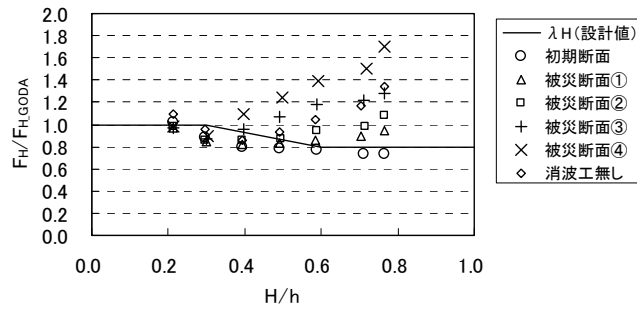


図 5.23 合田波力に対する水平波力の変化（規則波）

(5) 衝撃波力成分と重複波力成分の発生状況

図 5.24 に、波力波形の時系列の一例 ( $H/h=0.77$ ) を示す。初期断面に作用する波力を実線で、被災断面①から被災断面④に作用する波力を点線で示している。被災が進行するにつれて衝撃波力成分は大きくなる。重複波力成分は、衝撃波力成分と比較して大きな変化はなく、いずれの被災断面においても初期断面とほぼ同様の波形となっている。すなわち、波力でも波圧と同様に、消波工の断面形状が衝撃的な成分の変化に影響を及ぼすといえる。図 5.25 に衝撃波力成分および重複波力成分を無次元化した値を示す。被

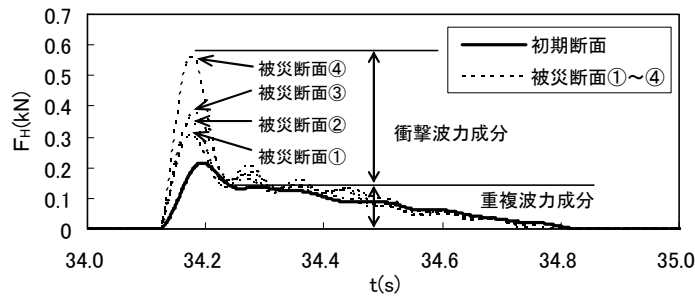


図 5.24 水平波力の時系列（規則波， $H/h=0.77$ ）

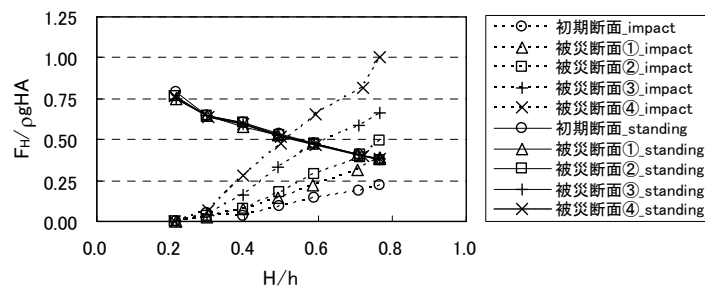


図5.25 衝撃波力成分と重複波力成分（規則波）

災断面に作用する衝撃波力成分は  $H/h=0.4$  を越えると増加しており，図 5.21 に示した断面毎の波力比の差異が  $H/h=0.4$  を越えると顕著となる傾向と一致する。

#### (6) 衝撃波力成分と重複波力成分の力積値

以上において，衝撃波力成分が，断面形状に応じて変化すること示した．しかしながら，その作用時間は短く，波力作用の結果として生じるケーソンの挙動は，衝撃波力成分により変化する波力のピーク値ではなく力積の大きさに支配されると考えられる．図 5.26 に，力積の定義と波力時系列より算出した力積の一例を示す．波力の力積に占める割合として，重複波成分の割合が大きいが，重複波成分の波形は断面形状による変化がほとんどないため（図 5.24 参照），力積も断面形状によらずほぼ一定となっている．全成分と重複波成分との差が衝撃波力成分である．重複波成分と比較して，全体に占める割合は小さいものの，衝撃波力成分の変化が全体の変化を引き起こすとともに，被災断面④においては力積の衝撃波力成分が全成分の約 3 割に達しており，ケーソン挙動の観点からも，断面変形に応じた衝撃波力成分の見積もりが重要といえる。

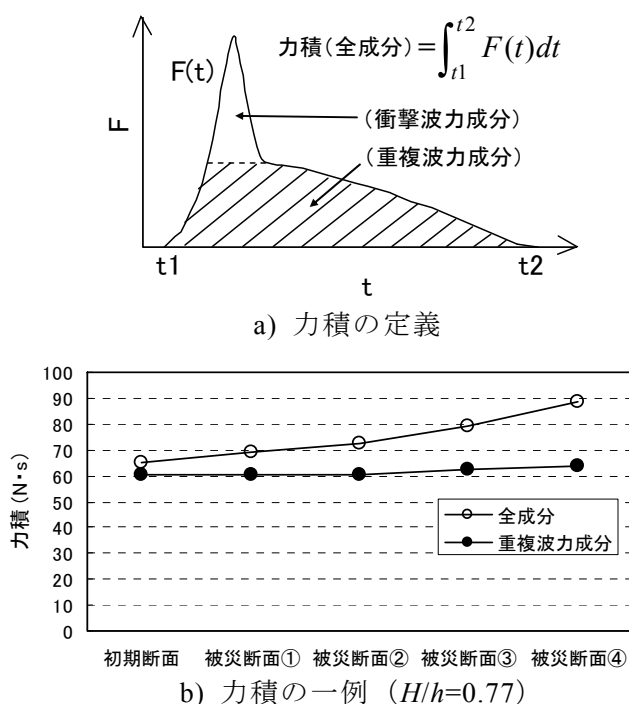


図5.26 波力時系列より算出される力積

#### 5.4.4 不規則波実験における消波工断面形状と作用波力の関係

##### (1) 波力・波圧の時系列

最大波力発生時刻近傍の波力波形と静水面位置で測定された波圧波形を  $H_{max}/h$  毎に図 5.27 から図 5.31 に示す．消波工の変形が進むにつれ作用波力が大きくなる． $H_{max}/h \geq 0.68$

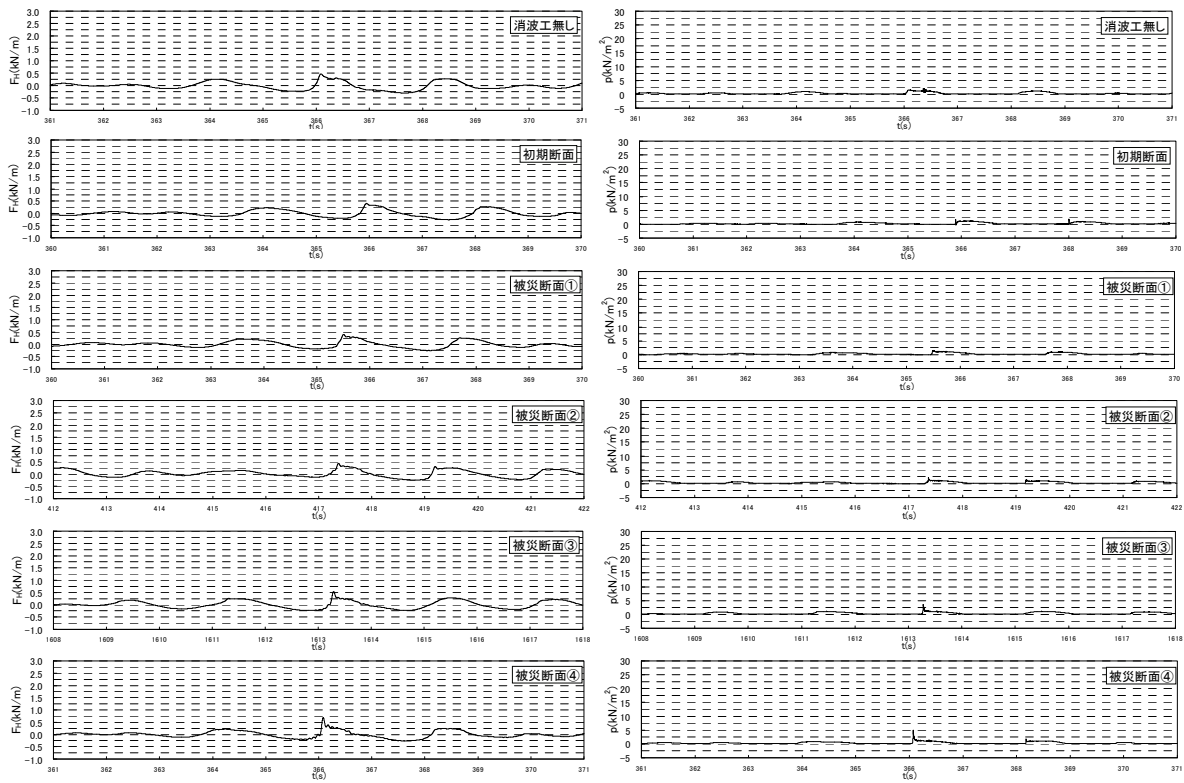


図 5.27 波力・波圧時系列 ( $T=1.87s, H_{max}=19.0cm, H_{max}/h=0.52$ )

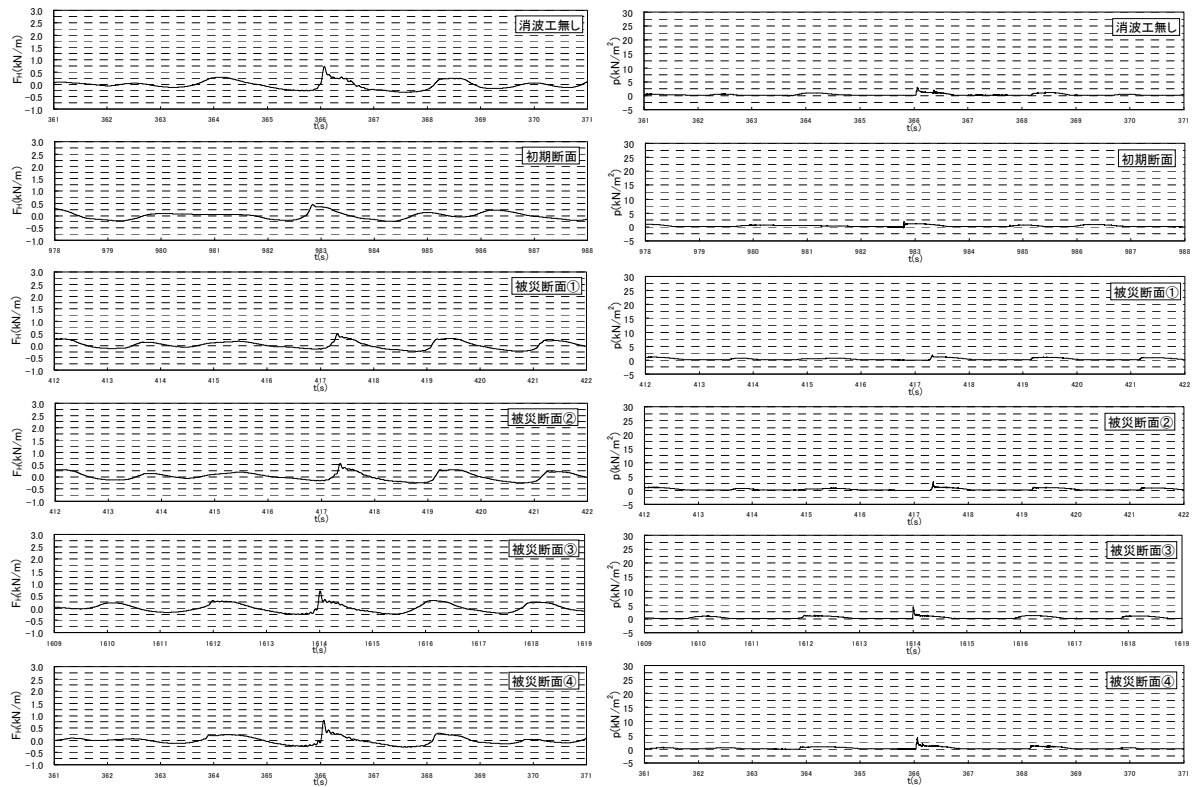


図 5.28 波力・波圧時系列 ( $T=1.87s, H_{max}=21.5cm, H_{max}/h=0.59$ )

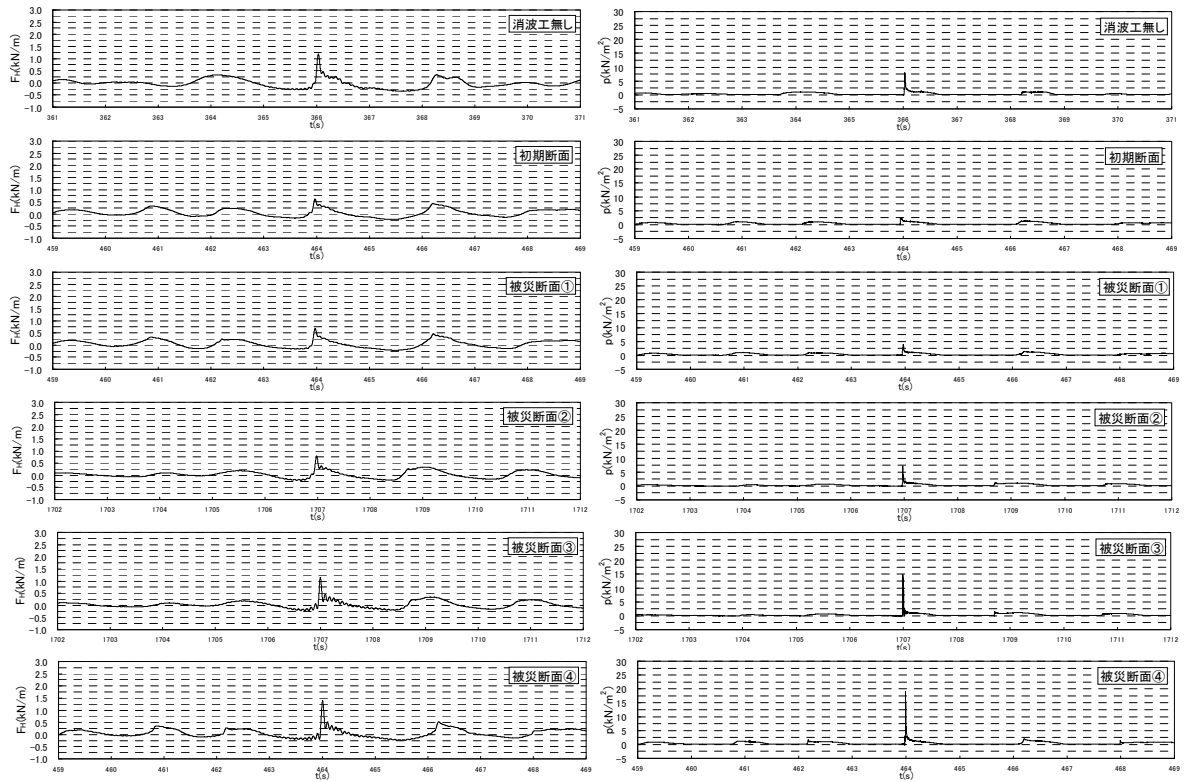


图 5.29 波力・波压時系列 ( $T=1.87s$ ,  $H_{max}=21.5cm$ ,  $H_{max}/h=0.68$ )

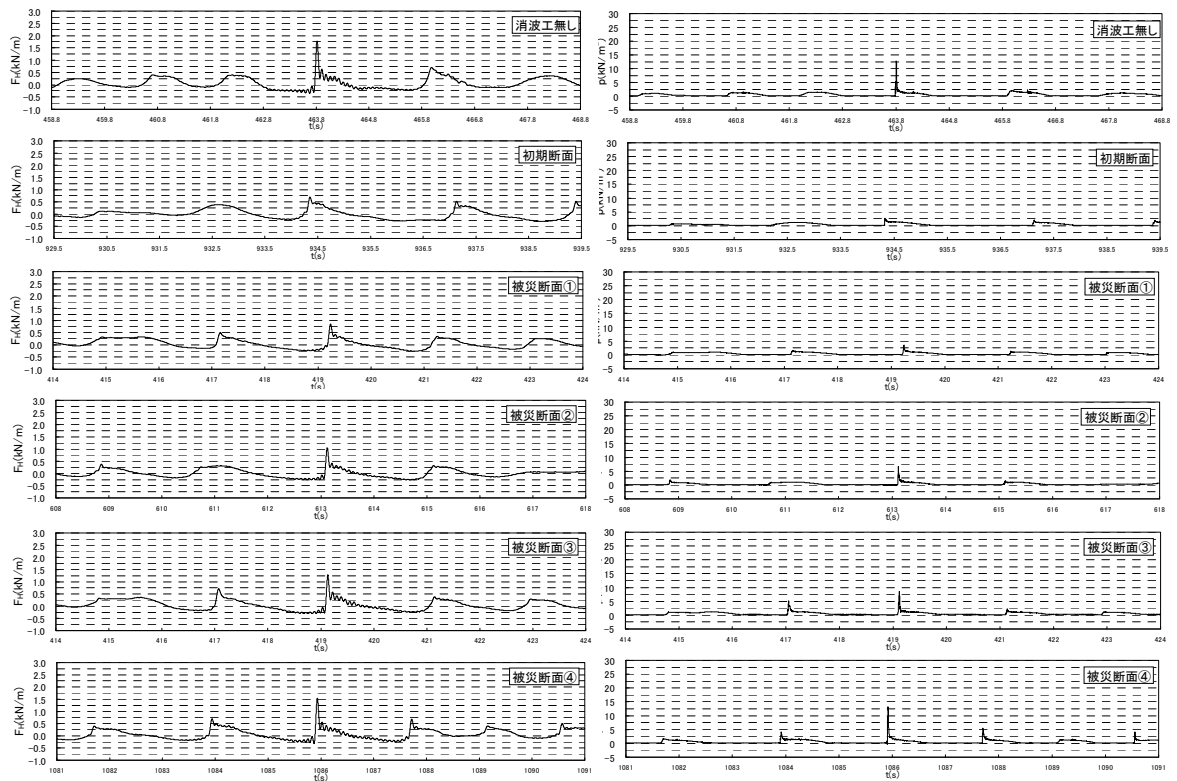


图 5.30 波力・波压時系列 ( $T=1.87s$ ,  $H_{max}=28.5cm$ ,  $H_{max}/h=0.78$ )



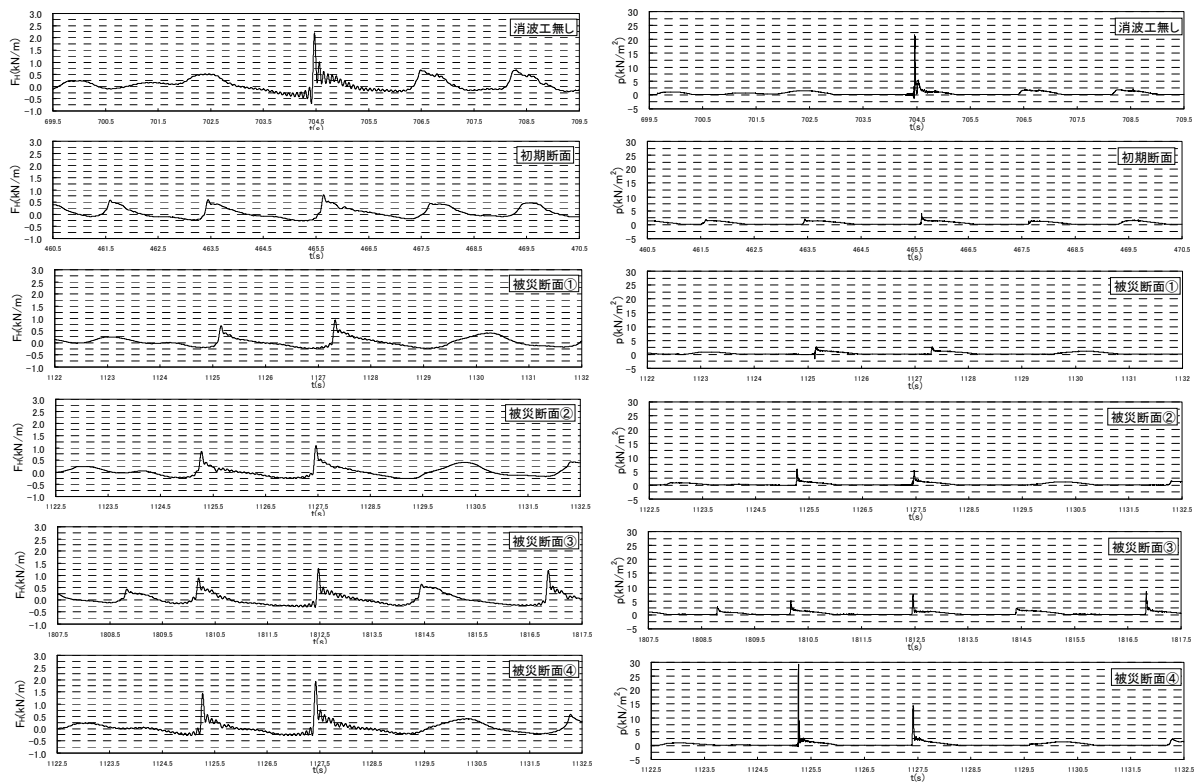


図 5.31 波力・波圧時系列 ( $T=1.87\text{s}$ ,  $H_{\max}=33.1\text{cm}$ ,  $H_{\max}/h=0.91$ )

における被災断面③、④では、最大波力作用時に大きな衝撃波圧が発生している。

## (2) 衝撃波圧成分と重複波圧成分の発生状況

図 5.32 に波圧時系列より得られた衝撃波圧成分および重複波圧成分の値を示す。縦軸は、波圧  $p$  を  $\rho g H_{\max}$  で無次元化した値を示しており、横軸は波高水深比  $H_{\max}/h$  である。重複波圧成分は、被災断面形状による値の変化はほとんどない。衝撃波圧成分は、断面形状の影響を大きく受けており、断面形状に応じて値が変化する。被災断面③と被災断面④では、 $H_{\max}/h=0.7$  近傍でかなり大きな値をとることが分かる  $H_{\max}/h$  が 0.7 付近になると、砕波がケーソン直立壁に作用しやすくなり、衝撃的で大きな波圧が発生すると考えられる。

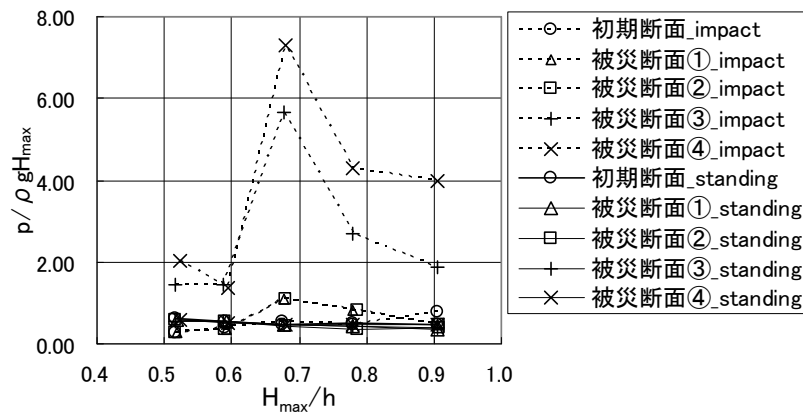


図 5.32 波圧成分の発生状況

### (3) 作用波力の比較

図 5.33 に波力の発生状況を断面形状毎に示す。縦軸は、各断面の無次元水平波力  $F_H / \rho g H_{\max} A$  を初期断面の無次元水平波力で除した水平波力比  $F_H'$  であり、横軸は波高水深比  $H_{\max}/h$  である。図中には、規則波実験で得られた水平波力比の値も細線で示している。不規則波実験と規則波実験では対象とした波高水深比の範囲が異なるが、 $F_H'$  の傾向は合致しており、被災断面①から被災断面④へと変化するにつれ  $F_H'$  は増大している。 $F_H'$  と  $H_{\max}/h$  の関係を見ると、 $H_{\max}/h$  が 0.7 付近で被災断面③および被災断面④の  $F_H'$  が急激に増加している。

図 5.34 に、各断面の無次元水平波力を消波工無し断面の無次元波力で除した波力比  $\lambda^*$  を示す。図中の実線は合田式で考慮されている消波工による波圧低減係数の値を示している。規則波の場合と同様に、消波工天端が静水面付近に位置する被災断面③に至ると、消波工無し断面を上回る波力が発生する可能性があることが分かる。

図 5.35 に、合田式で算定される波力に対する各断面の作用波力の比を示す。初期断面においては、 $H_{\max}/h$  が 0.7 程度以上の場合に合田波力を若干上回る。被災の程度が大きくなるほど、合田波力を上回る波力が生じており、波力増大の割合は、規則波と同様に、消波工天端が静水面近傍、静水面以下となる被災断面③、被災断面④において著しい。また、消波工無し断面に作用する波力は  $H_{\max}/h=0.6$  で合田波力を上回り、 $H_{\max}/h=0.8$  では 2 倍程度の値となる。合田式は、ケーソンの滑動に寄与する成分が算定されるよう考慮された式であり、衝撃的な成分が作用する場合は、必ずしも実測値と一致しないことが指摘されている。消波工無し断面では、 $H_{\max}/h$  が大きくなるほど、合田波力に対して波力が大きくなる。碎波により衝撃的な成分が大きくなるため、合田波力との差が生じたものと考えられる。

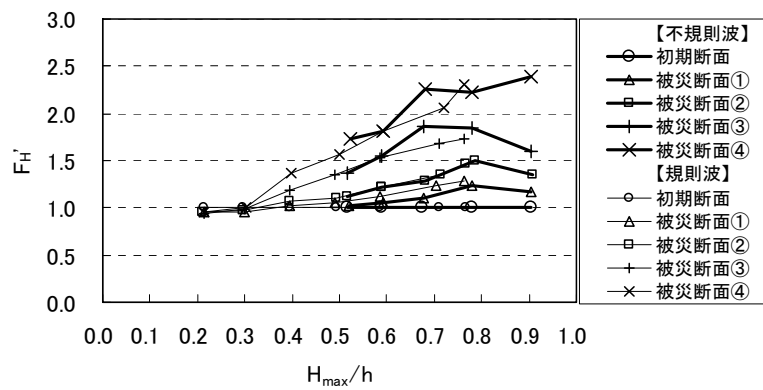


図 5.33 初期断面に対する水平波力の変化（不規則波，規則波）

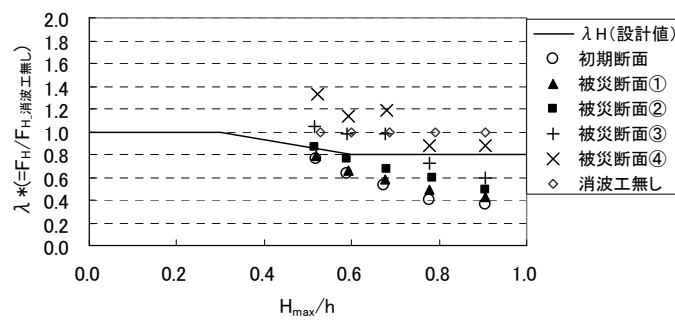


図 5.34 消波工無し断面に対する水平波力の変化（不規則波）

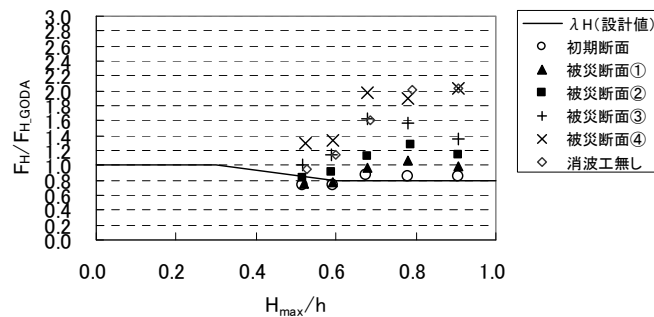


図 5.35 合田波力に対する水平波力の変化（不規則波）

(4) 衝撃波力成分と重複波力成分の発生状況

図 5.36 に衝撃波力成分および重複波力成分を無次元化した値を示す。  $H_{\max}/h$  が 0.7 付近で衝撃波力成分が増加していることから、規則波と同様に、波力の変化は衝撃波力成分の変化に起因することが分かる。

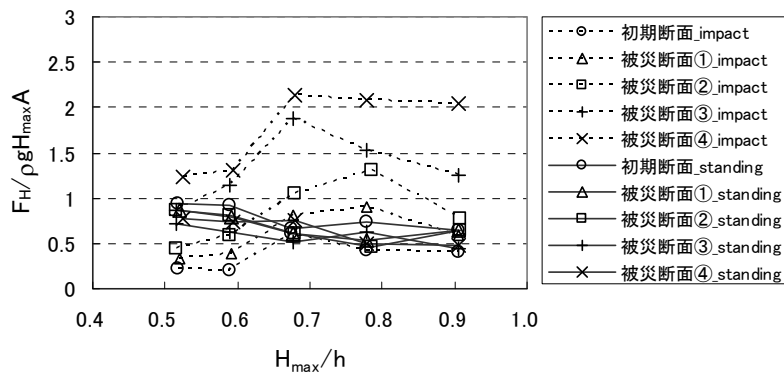


図 5.36 衝撃波力成分と重複波力成分（不規則波）

(5) 消波工断面形状の変化と波力変化の関係

不規則波における  $F_H'$  と  $H_{\max}/h$  の関係（図 5.33 参照）を踏まえ、消波工の変形の程度を表す天端沈下率および水平減少率に着目して  $F_H'$  を整理した。図 5.37 は水平減少率  $l'/l_0$  および天端沈下率  $\eta'/h_c$  と  $F_H'$  の関係を示している。  $H_{\max}/h$  が 0.6 以下と 0.7 以上の場合で、水平減少率および天端沈下率が波力比に与える影響が異なることが分かる。またこの傾向は、被災断面③に相当する水平減少率が 0.75、天端沈下率が 0.98（静水面における消波工幅が初期断面の 3/4 まで減少し、消波工天端が静水面付近まで沈下）にいたると顕著となり、  $H_{\max}/h$  が 0.7 の場合、初期断面に対して 1.9 倍程度の波力が作用することを示している。さらに被害が進行して消波工天端が没水すると、初期断面に対して 2.3 倍程度にまで波力が増大する。

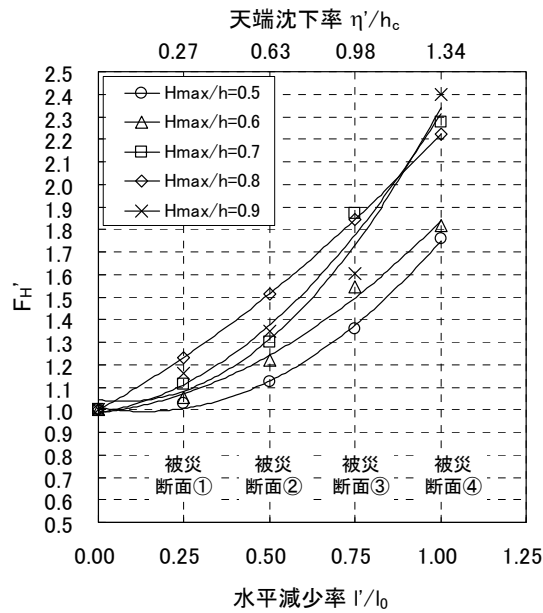


図 5.37 水平減少率および天端沈下率と波力比の関係

## 5.5 消波工の断面変形を考慮した防波堤の設計に向けて

### 5.5.1 防波堤設計法の現状

防波堤の設計法は、特に波力の算定をはじめとする耐波設計法に関して、これまでににおいてかなり整備されており、それらの算定公式を用いて安全性の高い防波堤が設計できるに至った。しかし、これまでの設計法では、防波堤直立部（ケーソン）が少しでも動く就被災と判断されてきた。すなわち、変形を許さない設計法である。また、1波のみの設計波を対象とした設計のため、決定論的な設計でもあるといえる。しかし、ケーソンが少し滑動した場合であっても、防波堤の性能がただちに失われるわけではなく、また、耐用期間中に設計波を上回る波高が発生する可能性もある。こうした従来の設計法に対して、下迫・高橋（1998）は、供用期間中における防波堤直立部の累積滑動量の平均値（期待滑動量）を指標とする設計法を提案した。この方法は、変形を考慮した設計法と確率論的な設計である信頼性設計法を組み合わせたものであり、これまでの安全率を介して間接的に安定性を示してきた設計法に対して、明示的に防波堤の性能を示すことのできるより高度な耐波設計法といえる。

山縣ら（2002）や高山ら（2007）は、下迫・高橋（1998）の方法を消波ブロック被覆堤に適用している。その際、消波ブロックの被害は全て消波工天端で生じるものと仮定し、消波工の沈下に伴う衝撃波圧の発生を考慮した高橋ら（2000）の波圧モデルを適用して、ケーソンに作用する波力の算定を行っている。下迫ら（2006）は、耐用期間中に消波ブロックが被災しないものとして滑動量を算出しており、消波ブロックが被災するこ

とによる波力の増大が考慮されていない。ケーソンの滑動量を考慮した設計法を消波ブロック被覆堤に拡張する際には、消波ブロックの被災によるケーソンへの作用波力の増大を適切に見積もる必要がある。前節までに述べたように、消波ブロックの被災形態は一律ではなく、条件に応じて消波工の断面形状が変化し、それに伴ってケーソンに作用する波力が変化する。ケーソン滑動量の算定精度を高めるためには、実際に生じる消波工の断面形状に即した波力増大を見積もることが重要である。また、防波堤の維持管理の観点からは、消波工の修復時期の判断に資する材料として、現地で生じた消波工断面の変形と波力増大の関係についての情報を提供できることは有益であると考えられる。

### 5.5.2 消波工の断面変形を考慮した波力の算定と今後の課題

消波工の断面変形に応じた波力変化を考慮する場合、いくつかの設計のレベルが考えられる。ここでは、第一段階として、ある来襲波浪が一時化作用した後の断面形状を予測し、その断面形状に次の波浪が来襲した際の波力を具体的に与える方法を示す。決定論的な設計レベルの範疇をこえないが、消波工の断面変形および波力の変化を考慮した設計法といえ、来襲波浪と消波工の断面変形および作用波力の変化を具体的にイメージするためには有益と考える。5.3 において、消波工の変形過程を水理模型実験により明らかにし、その変形形状を水平減少率  $l'/l_0$  と天端沈下率  $\eta'/hc$  によって示した。図 5.11 に示した設計相対天端高  $hc/H_D=0.6$  の堤体における被災断面の形状について、横軸を  $H_{1/3}/H_D$  とし、縦軸を各々  $l'/l_0$  と  $\eta'/hc$  として示したのが図 5.38 である。この図は、ある波高  $H_{1/3}$  が一時化（約 1000 波）作用した後の断面形状を示すものである。図 5.39 は、横軸を水平減少率  $l'/l_0$  とし、縦軸を天端沈下率  $\eta'/hc$  として、波力比  $F_H'$  を  $H_{\max}/h$  毎に示した等波力比線図である。図中直線上にある点は被災断面①から被災断面④の  $F_H'$  であり、その他の点は、 $l'/l_0$  および  $\eta'/hc$  に該当する断面における  $F_H'$  であり、新たに追加し

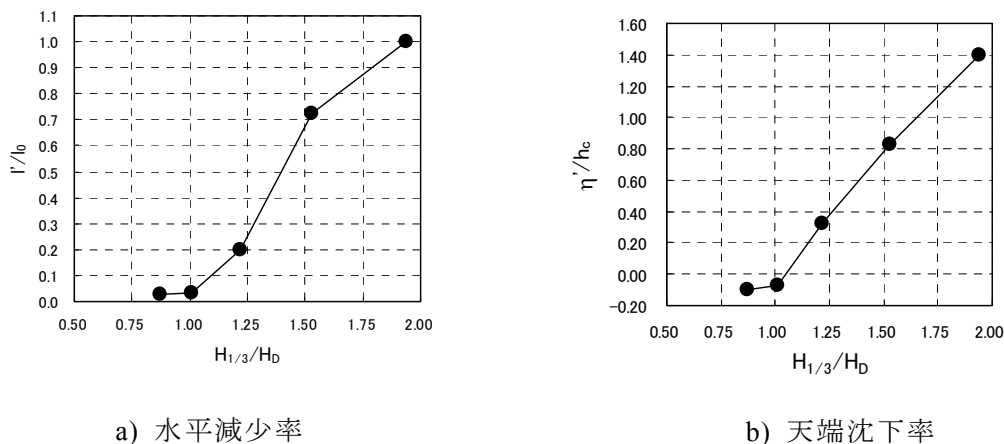


図 5.38 波高と断面形状の関係 ( $hc/H_D=0.6$ )

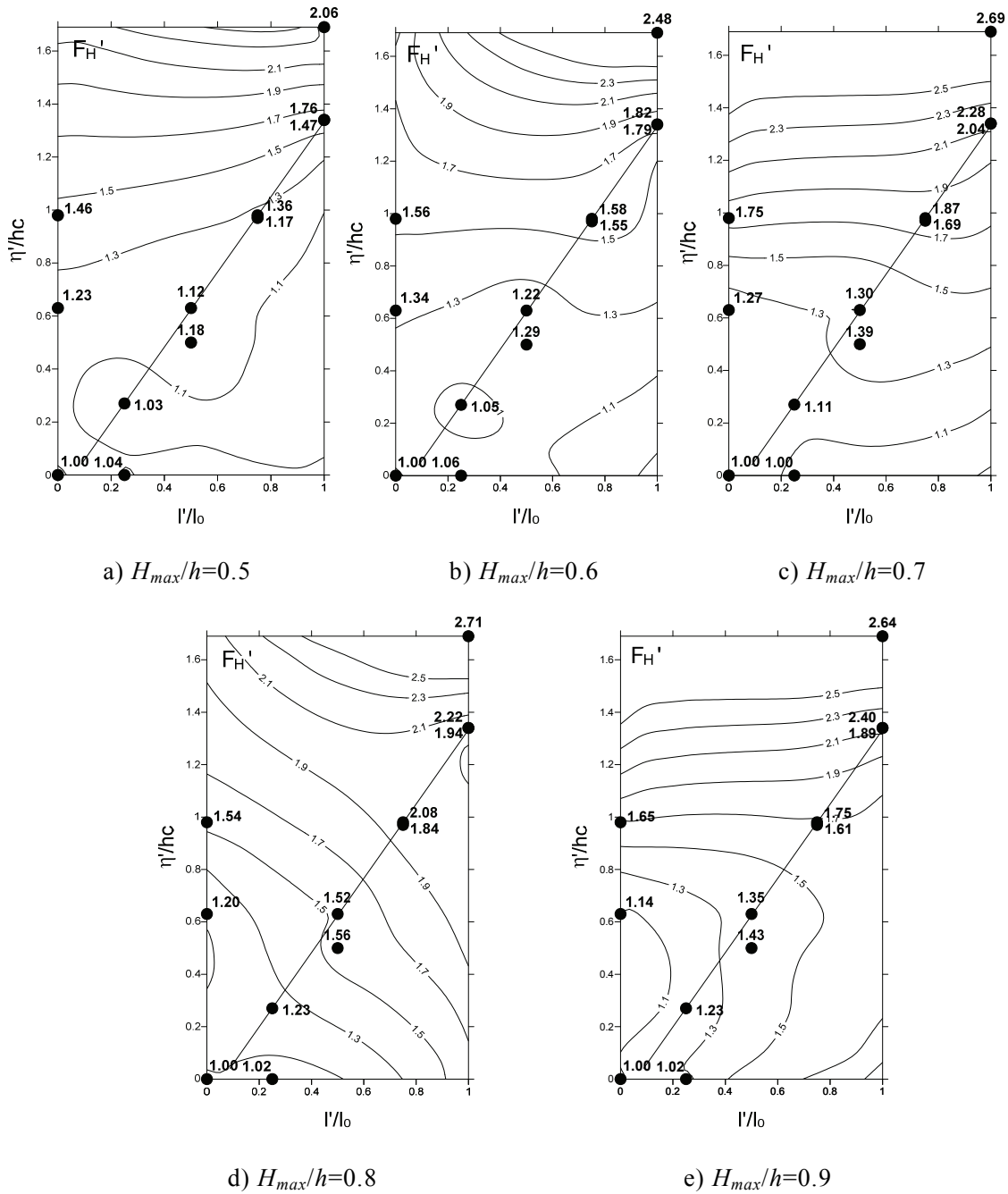


図 5.39 断面形状と波力比の関係 ( $hc/H_D=0.6$ )

た実験結果である。これより、 $l'/l_0$ と $\eta'/hc$ から、 $F_H'$ の値を得ることができる。例えば、テトラポッドの安定限界波高  $H_D$  を 1.5 倍上回る波高が来襲した場合を考える。図 5.38 より、変形後の断面は、水平減少率  $l'/l_0$  が約 0.7、天端沈下率  $\eta'/hc$  が約 0.8 となる。このような消波工断面に、例えば波高水深比  $H_{max}/h=0.7$  の波浪が来襲すると、図 5.39 より  $F_H'$  が約 1.5 程度となることが予測される。すなわち、初期断面に対して作用波力が 1.5 倍程度に増加するであろうことを意味する。

図 5.38 や図 5.39 に示した関係は、限られた実験条件において得られた結果である。

ここでは、得られた実験結果を設計に活用するための手法を紹介したものであり、今後、実験データを蓄積することで、妥当性を検証し、一般化を図ることが課題である。また、前述した方法は、一時化作用した後の断面形状を予測し、その断面形状に種々の波浪が来襲した際の波力を具体的に与える方法である。しかしながら、実際の消波工の断面形状は、一時化の間でも時々刻々と変化する。その変化を波力の計算に取り込むことが理想である。高山ら（2008）は、ケーソン滑動量の算定において、一時化の時間をいくつかの期間に分割し、その1期間で生じた消波工の変形を次の期間における作用波力の算定に反映させる手法を採っている。著者も図 5.9 に示したように、一時化（1000 波）を分割した少ない波数（250 波）毎の消波工断面の変形形状について一部検討を行っている。実際には、消波工の変形と同時に生じるであろう波力の変化をできるだけ時間差をおかずに、ケーソン滑動量の計算に反映させる手法が必要と考えられ、今後の課題といえる。

また、次の設計レベルとしては、信頼性設計の観点より、消波工の変形形状を確率的に示す必要がある。変形形状の確率分布を得るためには、詳細な測量を伴う多くの回数の実験が必要となるため、数値的な検討方法が有力なツールとなり得る。近年では、荒木・出口（1997）が、個別要素法を捨石防波堤の断面変形に適用した事例を端著として、捨石や消波ブロックの移動について、個別要素法を用いて検討する手法が広く研究されている。伊藤・東江（2004）は、堤体消波工の断面変化形状を確率的に評価することを試みているが、確からしきは定性的なレベルにとどまるとしている。こうした数値的な検討方法を活用しつつ、定量的なレベルでの消波工の変形形状の確率的な評価が今後の課題といえる。

## 5.6 結語

本研究では、消波ブロック被覆堤における消波工の被災形態および変形過程を把握することを目的として、被災事例調査および水理模型実験を実施した。また、把握した変形過程に基づき、消波工の断面形状とケーソンに作用する波圧・波力の関係についての知見を得ることを目的として、消波工の被災断面を模擬し、波圧・波力測定実験を行った。

本章で得られた結果を以下に要約する。

- 1) 消波ブロック被覆堤における消波工の被災形態は、主に消波工天端付近で被災が生じる場合、主に消波工法面で被災が生じる場合、消波工天端および消波工法面の両方で被災が生じる場合の3パターンに大別される。



- 2) 被災事例より，被災時相対天端高に応じて消波工の被災形態が異なることが示唆された．水理模型実験において，相対天端高  $h_c/H_{1/3}$  が大きいと法面が，小さいと天端が被災する傾向を把握した．
- 3) 設計相対天端高  $h_c/H_D$  の異なる消波工の変形過程を水平減少率および天端沈下率を用いて評価した．同じ水平減少率の場合，設計相対天端高が小さいほど天端沈下率が大きくなる．
- 4) 消波工の変形が進むと波圧波形のピークが鋭くなり，消波工天端が静水面近傍に位置する場合には，衝撃的な波圧が発生する．
- 5) 衝撃波圧・波力成分の大きさは消波工の断面形状に依存する．重複波圧・波力成分は，消波工の断面形状の影響を受けにくい．
- 6) 初期断面に対する被災断面の波力増大の割合を把握した．波高水深比に応じて，断面形状が波力に及ぼす影響が異なる．このことは，衝撃波力成分の変化に起因する
- 7) 波高に対する消波工の変形形状と作用波力の低減効果との定量的な関係を示した．今後，さらなる一般化を図ることで，消波工の変形を考慮することによるケーソン滑動量算定の精度向上や，被災時の復旧時期の検討などへの活用が期待できる．

## 参考文献

- 荒木進歩・出口一郎 (1997) : 捨石防波堤の断面変形に関する研究, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp.531-535.
- 伊藤一教・東江隆夫 (2004) : 消波ブロックの安定性に対して断面変形形状を考慮した信頼性設計法, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.861-865.
- 鹿島遼一・今泉正次・戸田泰和 (1986) : 被災事例から見た防波堤・防波護岸の波浪被災特性, 第 33 回海岸工学講演会講論文集, pp.626-630.

- 鹿島遼一・榊山勉・松山昌史・関本恒浩・京谷修 (1992) : 安定限界を越える波浪に対する消波工の変形と防波機能の変化について, 海岸工学論文集, 第 39 卷, pp.671-675.
- 鹿島遼一・榊山勉・松山昌史・関本恒浩・京谷修 (1993a) : 安定限界を越える人工島防波護岸の耐波安定性と越波特性, 海岸工学論文集, 第 40 卷, pp.686-690.
- 鹿島遼一・榊山勉・清水琢三・関本恒浩・国栖広志・京谷修 (1993b) : 不規則波に対する消波ブロック被覆工の変形量評価式について, 海岸工学論文集, 第 40 卷, pp.795-799.
- 北島昭一・中野拓治・堀井修身・柿崎秀作・降旗健一・花木芳雄 (1968) : 防波堤被災集覧, 港湾技研資料, No.58, 239 p.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976) : 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No.248, 24p.
- 合田良實 (2008) : 耐波工学, 鹿島出版会, 430p.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1998) : 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港湾技研報告, Vol.37, No.3, pp.3-30.
- 下迫健一郎・大寄奈々子・中野史丈 (2006) : 滑動量を要求性能に設定した混成堤の信頼性設計法, 港湾空港技術研究所報告, 第 45 号, 第 3 号, pp.3-23.
- 関克己・有川太郎・水谷雅裕 (2009) : 消波ブロック被覆堤における消波工被覆状態の波圧に及ぼす影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.816-820.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三 (1992) : 混成防波堤のマウンド形状による衝撃砕波力係数の提案, 海岸工学論文集, 第 39 卷, pp.676-680.
- 高橋重雄・大木泰憲・下迫健一郎・諫山貞男・石貫国朗 (2000) : 台風 9918 号による護岸の被災とその対策に関する水理模型実験, 港湾技研資料, No.973, 50p.

高山知司・辻尾大樹・安田誠宏 (2007) : 消波ブロック被覆堤の変状による波力増大を考慮した期待滑動量算定法の検討, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.906-910.

武山秀夫・仲山種清 (1975) : 防波堤被災集覧 (その 2) , 港湾技研資料, No.200, 255 p.

服部千佳志・柴田鋼三・大堀晃一 (1984):防波堤被災集覧(その 3), 港湾技研資料, No.485, 281 p.

宮井真一郎・大平勝司・塩見雅樹 (1993):防波堤被災集覧(その 4), 港湾技研資料, No.765, 248 p.

山縣延文・西原考美・中山政勝・上原幸生・富安良一・半沢稔 (2002) : 災害に強い港湾構造物の考察, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.916-920.

## 第6章 結論

本研究では、高波浪域で使用されることの多い消波ブロックであるドロスに関し、所要の安定性を発揮できる消波工の合理的な設計を目的として、消波工の構造諸元と耐波安定性の関係について検討した。また、これまで施工実績の多いテトラポッドに関し、消波工の断面変形と波力減殺機能変化の関係解明を目的として、被災により変形した消波工の断面形状とケーソン作用波力の関係について検討した。

本研究の各章で得られた結果を以下に示す。

**第1章**では、本研究の背景および目的を述べて、本研究の意義および方向性を示すとともに、本論文の構成と各章の概要を示した。

**第2章**では、ドロスを用いた消波ブロック被覆堤および消波ブロック傾斜堤を対象とした水理模型実験を行い、ドロス消波工の天端幅と被覆層厚を変化させた場合のドロスの耐波安定性について検討した。消波ブロック被覆堤で、消波工の天端幅が狭いとドロスの安定性は低下する。被覆層厚が薄い場合にもドロスの安定性が低下する。消波ブロック傾斜堤で、消波工の天端幅が狭いとドロスの安定性は低下する。その際、港内側の法肩に位置するブロックが移動しやすく、周期が長い波が作用した場合には、被害の進行が顕著となる。消波ブロック傾斜堤では、被覆層厚を消波ブロック被覆堤の場合と同程度にとった場合においても、ドロスの安定性が相対的に低下する傾向にある。

**第3章**では、ドロスを用いた消波ブロック被覆堤を対象として、被覆層厚および中詰め材の変化に伴う耐波安定性を系統的な水理模型実験により把握し、耐波安定性の変化の要因について、消波工周辺の流速場およびブロックのかみ合わせの程度を実験的に把握することで、ブロックに作用する外力と抵抗力の観点より検討した。その結果、中詰

め材が石材で透水性が低い場合、また被覆層厚が薄い場合に安定性が低下することが分かった。中詰め材の透水性が低いと、被覆層表層のブロックに作用する流速が大きくなる。また被覆層内外での流下速度の差より、ブロックが下側に転がる作用を受けやすい。被覆層厚が薄いと表層のブロックのぐらつき（変位可能量）が大きくなるため、抵抗力として発揮されるかみ合わせの効果が低下することが分かった。

**第4章**では、消波ブロックの抵抗力に着目した耐波安定性の評価手法を検討した。ブロックが被覆層より離脱する際にその影響が及ぶ範囲を消波ブロックが有する抵抗力の指標として取り扱い、斜面法線方向の釣り合い式である *Svee* 式に適用して安定質量算定式を導いた。被覆層から一つのブロックを引抜く際に要する力（引抜き抵抗力）の期待値を実験的に求め、その値をブロックが有する抵抗力として取り扱うことで、ドロス被覆堤の被覆層厚とドロスが有する抵抗力の関係を明らかにした。さらに、*Svee* 式より導いた安定質量算定式に基づき、ドロスが有する抵抗力を用いて、被覆層厚の違いによる耐波安定性の差異を評価した。その結果、被覆層厚の減少に伴う耐波安定性の低下は、ドロスが有する抵抗力の低下により説明可能であることが示された。

**第5章**では、消波ブロック被覆堤における消波工の被災形態を被災事例より把握するとともに、水理模型実験によりテトラポッド消波工の変形過程を把握した。消波工の変形過程に基づき決定した被災断面形状を対象として、断面形状とケーソンに作用する波圧・波力の関係を明らかにした。被災事例によると、消波工の被災は、消波工天端付近で生じる場合、消波工の法面で生じる場合、消波工天端および法面の両方で生じる場合の3パターンに大別された。また相対天端高が高いと消波工法面が、低いと消波工天端が被災する傾向にあった。水理模型実験により、消波工の変形過程を消波工法面の変形の程度（水平減少率）と天端の沈下の程度（天端沈下率）で評価した。消波工の変形が進むと衝撃的な波圧・波力が発生し、その大きさは消波工の断面形状に依存する。重複波圧・波力成分は消波工の断面形状の影響を受けにくい。波力実験結果に基づいて、消波工の変形形状と波力増大の割合を示すとともに、消波工の断面変形を考慮した設計法と今後の課題について言及した。

本研究により、ドロス消波工の構造諸元と耐波安定性の関係が明らかとなり、特にドロス被覆堤の被覆層厚と耐波安定性の関係が、ドロスの抵抗力の観点より明らかとなった。今後のドロス被覆層の設計において利用可能である。また、テトラポッド消波工が被災して断面が変形した際の波力減殺機能の変化についても基礎的なデータを取得し、

消波工の断面形状と波力の増大を関連付けて議論した。今後の課題ではあるが，消波工の断面形状と波力の関係について，さらに一般化が進めることで，消波工の変形を考慮することによるケーソン滑動量算定の精度向上や，被災時の復旧時期の検討などへの活用が期待できる。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、熱心な御指導とご助言を賜った大阪大学大学院 荒木進歩准教授に深甚なる感謝の意を表します。荒木准教授の海岸工学への熱意と何事にもエネルギーギッシュに取り組む姿から、多くのことを学ばせて頂きました。今後の糧として生かし、海岸・港湾に携わる技術者としてさらなる精進を続けたいと思います。また、本論文の内容について有益な御助言を頂いた大阪大学大学院 出口一郎教授に深く謝意を表します。出口教授は、著者が博士前期課程の学生時代における恩師であり、博士後期課程入学後も熱心な御指導を賜りました。今回、研究をまとめることができたのも、これまで御指導頂いてきた賜物と感謝いたします。また、著者の学部生時代の恩師である愛媛大学 中村孝幸准教授には、博士後期課程入学に際して相談に応じて頂くとともに、励ましのお言葉を頂きました。ここに、改めて感謝いたします。大阪大学大学院 有田 守助教には、ゼミにおいて有益な御助言を頂いたことに加え、学生生活を送る上で多くのご助力をいただきました。ここに感謝いたします。また、社会システム学ゼミで有益な御助言を頂いた大阪大学大学院 新田保次教授、西田修三教授、飯田克弘准教授、入江政安講師、猪井博登助教に深く感謝いたします。

Delaware 大学 小林信久教授には、研究全般において有益な御意見を頂くとともに、国際会議での発表において、数々のサポートならびに御助言を頂きました。ここに感謝いたします。独立行政法人 港湾空港技術研究所 水谷雅裕耐波研究室長、有川太郎主任研究官、関 克己特別研究員には、消波ブロック被覆堤の性能設計に関する勉強会を通じて、貴重な御助言を頂きました。感謝いたします。

本研究は、著者の勤務先である株式会社 テトラおよび株式会社 不動テトラ(H18年、合併のため株式会社 テトラから社名変更)において行ってきた研究を荒木准教授、出口教授の御指導のもとにとりまとめたものです。勤務先における上司、先輩をはじめとする多くの方々の御協力、また、御指導の蓄積がなければ、本論文が完成することはあり

ませんでした。この場を借りて厚く御礼申し上げます。博士後期課程への入学の機会を与えて頂くとともに、研究遂行に際し便宜を図って頂き、研究全般について御助言頂いた、株式会社 不動テトラ 松岡道男ブロック環境事業本部長、山本方人総合技術研究所長、松本 朗水理研究室長に深く感謝いたします。また、折に触れて御助言頂くとともに、公私ともに大変お世話になりました、株式会社 不動テトラ 半沢 稔ブロック環境事業本部副本部長に改めて感謝いたします。

最後に、これまでの研究を見守ってくれたであろう亡き両親に感謝を表したいと思います。



## 関連論文

久保田真一・小林茂高・松本 朗・半沢 稔・松岡道男 (2002) : 消波ブロックの耐波安定性に及ぼす被覆層厚と中詰め材の影響に関する研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.756-760.

久保田真一・松本 朗・半沢 稔・松岡道男 (2003) : 消波ブロックの引抜き抵抗力に及ぼす被覆層厚の影響に関する研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.746-750.

久保田真一・松本 朗・半沢 稔・松岡道男 (2004) : 引抜き抵抗力に着目した消波ブロックの耐波安定性評価手法の提案, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.711-715.

久保田真一・山本方人・松本 朗・半沢 稔 (2009) : 消波ブロック被覆堤における消波工の変形過程に関する実験的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), vol.B2-65, No.1, pp.906-910.

久保田真一・山本方人・松本 朗・半沢 稔・荒木進歩・出口一郎 (2010) : 消波工の変形過程が波力低減効果の変化に及ぼす影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), vol.66, No.1, pp.866-870.

Kubota, S., S. Kobayashi, A. Matsumoto, M. Hanzawa and M. Matsuoka (2003) : Effects of Layer Thickness and Core Material on Stability of Wave Dissipating Concrete Blocks, Proceedings of Coastal Structures 2003, ASCE, pp.126-136.

Kubota, S., A. Matsumoto, M. Hanzawa and M. Matsuoka (2004) : Effects of Layer Thickness and Core Material on Stability of Armor Units, Proceedings of 29th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp.3530-3542.