

港 湾 技 研 資 料

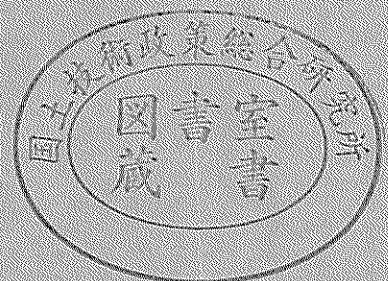
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 321 June. 1979

不規則波による消波ブロック被覆堤の模型実験例

谷 本 勝 利
北 谷 高 雄
大 里 睦 男

運輸省港湾技術研究所



目 次

| | |
|----------------------------------|----|
| 要 旨 | 3 |
| 1. ま え が き | 3 |
| 2. 実験水路および模型 | 3 |
| 2.1 実験水路 | 3 |
| 2.2 模 型 | 4 |
| 3. 実験波の特性 | 5 |
| 3.1 不規則波の発生および解析法 | 5 |
| 3.2 模型設置水深39 cm に対する実験波の特性 | 5 |
| 3.3 模型設置水深42 cm に対する実験波の特性 | 9 |
| 3.4 模型設置水深48 cm に対する実験波の特性 | 10 |
| 4. 反射・伝達波に関する実験 | 12 |
| 4.1 反 射 実 験 | 12 |
| 4.2 伝 達 波 実 験 | 13 |
| 5. 消波ブロック安定実験 | 20 |
| 5.1 実 験 の 方 法 | 20 |
| 5.2 実 験 結 果 | 21 |
| 6. 直立部の滑動波力実験 | 30 |
| 6.1 実 験 の 方 法 | 30 |
| 6.2 実 験 結 果 | 33 |
| 7. ま と め | 38 |
| 8. あ と が き | 40 |
| 参 考 文 献 | 40 |
| 付録A 反射率に関する実験データ | 41 |
| 付録B 伝達波に関する実験データ | 42 |
| 付録C 滑動に関する実験データ | 50 |

A Model Experiment of Irregular Wave Action on a Caisson Breakwater armored with Wave Dissipating Concrete Blocks

Katsutoshi TANIMOTO*
Takao KITATANI**
Mutsuo OSATO***

Synopsis

A model experiment of irregular wave action on a caisson type breakwater armored with wave dissipating concrete blocks has been carried out in order to investigate the following:

- (1) wave reflection and transmission
- (2) stability of wave dissipating concrete blocks
- (3) wave forces on a caisson.

The experiment on wave reflection is performed in the water depth of 39 cm. Reflection coefficient is indicated for the range of relative water depth $h/L_{1/3}$ from 0.081 to 0.436. Transmitted waves due to incident waves with significant wave period of 2.5 seconds are tested in the depth of 39, 42, and 48 cm. The relation between relative crest height of breakwater and transmission coefficient is presented.

The experiment on stability of wave dissipating concrete blocks is performed in the water depth same as the experiment on transmitted waves. The K_D -value in Hudson's formula in terms of the percentage damage are investigated for two different types of artificial concrete blocks.

The stability of caisson against irregular waves of 2.5 seconds in the significant wave period is tested in the depth of 39 and 42 cm. Wave forces are estimated on the basis of critical wave height and critical weight of caisson against sliding.

* Chief of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division
** Member of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division
*** Ex-Member of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

不規則波による消波ブロック被覆堤の模型実験例

谷本 勝利*
北谷 高雄**
大里 睡男***

要 旨

消波ブロック被覆堤の反射、伝達波、ブロックの安定性、および直立部の滑動波力に関して、特定条件のもとでの不規則波による模型実験を行い、実験の方法およびその結果をとりまとめた。

反射実験は堤体設置水深 $h = 39$ cm の条件で、有義波波長に対する相対水深 $h/L_{1/3}$ が $0.081 \sim 0.436$ の範囲で行ったもので、周期による反射率の変化を示した。伝達波に関しては有義波周期 $T_{1/3}$ を 2.5 s で一定とし、 $h = 39, 42, 48$ cm の三種について実験した。相対天端高に対する伝達率の変化を示したほか、不規則伝達波の諸特性をまとめている。

消波ブロックの安定性に関する実験は伝達波実験と同じ周期、水深条件で行ったもので、2種のブロック模型について有義波高と被害率、被害率と Hudson 公式における K_D 値の関係などを示した。

直立部の滑動実験は水深 $h = 39, 42$ cm について、 $T_{1/3} = 2.5$ s の条件で行った。波高および壁体の重量を種々に変え、滑動限界波高および滑動限界重量から滑動波力を逆算し、波高と平均波力の関係、実験波力と合田式において $\alpha_2 = 0$ とした計算波力の比、すなわち消波ブロック被覆による波力のてい減率などを示した。

ただし、こうした消波ブロック被覆堤の不規則波による実験例はまだ少なく、一般的結論を得たものではない。特に、消波ブロックの安定性、直立部に作用する波力については、さらに不規則波に対する実験手法を検討するとともに、広範囲の条件にわたって実験を積み重ねていかなければならない。

1. まえがき

直立壁前面に消波ブロックを適切に投入することによって、反射、越波、波力等が軽減される。この防波堤構造を消波ブロック被覆堤と呼ぶ。わが国における比較的水深の浅い所での防波堤の主流型式の一つとなっていることは周知のとおりである。そのため、設計上の水理的諸問題に対し多くの研究が行われてきた^{1)~4)}。しかし、消波工という新しい要因が加わるため、通常の混成堤ほどにはその設計法は確立されておらず、必要に応じて模型実験により検討しなければならない。特に、消波ブロックの安定性といった問題については波の不規則性との関連が明白でなく、不規則波による実験が好ましい。

しかしながら、消波ブロック被覆堤の設計上の問題について具体的に不規則波により検討した例はまだほとんどないのが現状である。本資料は、特定の条件に限定し

たものであるが、消波ブロック被覆堤について不規則波による以下の実験を行ったので、その結果をとりまとめたものである。

- (1) 反射および伝達波に関する実験
- (2) 消波ブロックの安定実験
- (3) 直立部の滑動実験

2. 実験水路および模型

2.1 実験水路

本実験に用いた水路は中型平面水槽 ($30\text{ m} \times 20\text{ m} \times 1\text{ m}$) 内に設けた波力実験仮設水路である。この仮設水路は図-2.1に示しているように平面水槽の一部を幅 5 m で区分し、その中に幅 50 cm の水路を設けたものであり、堤体模型設置付近の片面は長さ約 3 m にわたり、観測用ガラス窓となっている。造波板と幅 50 cm の水路の始点との間は 6.6 m の距離を設けてあり、模型堤体

* 水工部 防波堤研究室長
** 水工部 防波堤研究室
*** 前水工部 防波堤研究室

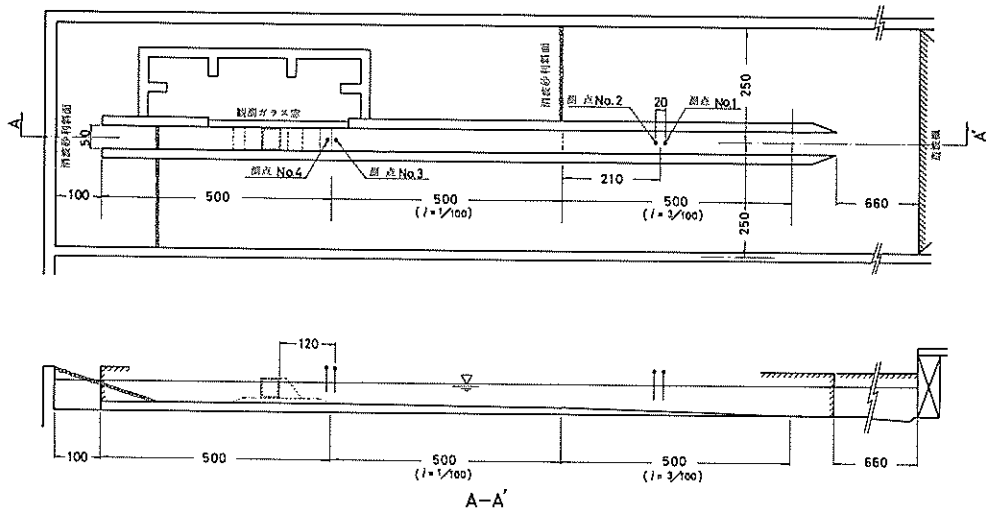


図-2.1 実験水路図 (単位: cm)

からの反射波が分散し、造波板からの再反射波の影響を軽減できる。特に今回の実験の場合、対象断面が消波ブロック被覆堤で後述するように反射率が低く、再反射波の影響はほとんどない。なお、実験水深によっては大きな波高を得るために水路沖側端両側壁に長さ1.8 mの導波板を設け先端で幅1.0 mとなるようにした。この場合においても再反射波の影響は無視できる。

水路床は造波板中立位置を基点として7.6 mから12.6 mの5 m区間が3/100こう配、つづいて17.6 mまでの5 m区間が1/100こう配となっており、その岸側は水平床である。堤体模型はマウンドの堤外側の尻が1/100こう配上に位置させて設ける。

2.2 模 型

(1) 堤体模型

図-2.2に堤体模型の標準断面を示す。直立壁体位置での水深を h 、静水面上天端高を h_s 、消波工天端幅を B_s 、消波工前斜面と水平面とのなす角度を α で表わしている。これらは実験ケースによって変化する諸元である。水深 h は39、42、48 cmの3種とした。

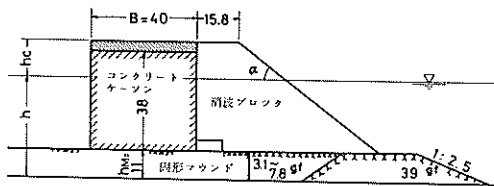


図-2.2 堤体模型の断面 (単位: cm)

直立壁体の模型は幅40 cm、高さ38 cm、水路幅方向の長さ47 cmのコンクリートケーソンに、上部工として木製版を固定して天端高を調節する。このコンクリートケーソンの内側はアクリル合成樹脂板の箱としており、上板を固定したとき水密構造となる。空中における重量は77.7 kgfであり、これに木製上部工の重量を加えたものが最小重量である。壁体重量の調節は空あるいは水詰めの内室に鉛の方塊を入れて行う。

マウンドについては、直立壁体の沖側は常に図-2.2に示している砕石をそのまま用いた。壁体の岸側方向への滑動面となる部分については砕石をセメントモルタルで固めた版を用いた場合が多い。これは滑動によりマウンドの状態が変わることを防ぎ、常に同じ状態で繰返し実験ができるようにしたものである。これを固形マウンドと呼ぶ。これに対し滑動面の部分を含めて全体を砕石としたものを捨石マウンドと呼ぶ。後述する滑動実験では一部両者による実験を行っている。

(2) 消波ブロックの模型

実験で用いた主たるブロックはAブロックとBブロックの2種である。

表-2.1に模型ブロックの諸元を示した。Aブロックについては総数298個、Bブロックについては250個の模型の空中重量および水中重量を測定し、その平均値を用いて算定した体積、単位体積重量などを示したものである。空中重量はAブロックが743.3 gf、Bブロックが647.2 gfであり、単位体積重量はそれぞれ2.32 gf/cm³、2.28 gf/cm³である。重量の相

表-2.1 模型ブロックの諸元

| ブロックの種類 | 高さ (cm) | 空中重量 (gf) | 標準偏差 (%) | 水中重量 (gf) | 体積 (cm ³) | 単位体積重量 (gf/cm ³) |
|---------|------------|--------------|-------------|--------------|--------------------------|---------------------------------|
| Aブロック | 10.5 | 743.3 | 2.63 | 423.0 | 320.3 | 2.32 |
| Bブロック | 12.0 | 647.2 | 3.17 | 363.0 | 284.2 | 2.28 |

対標準偏差はAブロックが2.63%, Bブロックが3.17%であり, Bブロックの方がややばらつきが大きい。ただし, ブロックの空中重量は表面気乾状態で測定したものである。

3. 実験波の特性

3.1 不規則波の発生及び解析法

(1) 造波機及び不規則波の入力信号

実験に用いた造波機は低慣性直流電動機駆動の可搬式ピストン型のもので, 入力信号の波形に追隨して任意波形状の波を造波することができる。造波板長は4.8mである。

不規則波の入力信号の作成方法は次のとおりである。まず白色雑音発生器で白色雑音を発生させ, これを所定のかたちとするため予め計算で得た値を用いて, バンドパスフィルターの目盛を設定することにより修正し, データ・レコーダに収録する。次に所定の周期を得るために2台のデータ・レコーダを用いて速度変換を行い, 実験に用いる入力信号とする。

本実験においては, Bretschneider・光易型のスペクトルを目標として種々の周期に対し用意してある

標準入力信号のうち, G波を用いることにした。ここに, G波はこの標準入力信号に名づけた符号であり, 同一の目標スペクトルに対し, 4種の波群が設定してある。これらを各々G1, G2, G3, G4波と呼ぶ。以下こうした記号を用いて記述する。

(2) 波形測定及び解析

入射波形の測定は前掲図-2.1中に示しておいたように模型設置後における直立壁前壁位置から造波機側へ8.2m地点にNo.1, それから20cm岸側へNo.2, 及び直立壁から造波機側へ1.2m地点にNo.3, その20cm岸側つまり直立壁から1m地点にNo.4の合計4台の容量式波高計によるのを標準とした。ここに, 沖側のNo.1, No.2は3/100こう配上のほぼ中央, 堤前のNo.3, No.4は1/100こう配上にあたる。なお, 波形の測点No.1, No.2の平均水深を $h_{1,2}$, No.3, No.4の平均水深を $h_{3,4}$ と記して, 堤体設置位置の水深 h と区別する。

測定波形はデータ・レコーダに収録し, A・D変換のち電子計算機で処理する。図-3.1に波形記録, 解析のブロック図を示している。ゼロアップクロス法による波高の統計処理及びスペクトル解析などを行うほか, 入・反射波の分離による反射率の計算⁵⁾を行う。入射波

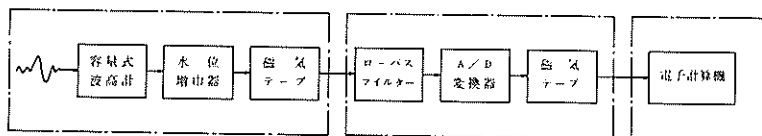


図-3.1 波形の記録・解析ブロック図

のデータ解析におけるデータのサンプリング周期は1/9s, データ個数は2048であり, 波数にして105~120波である。ただし, 第1波から最初の42s間の波は除外している。

3.2 模型設置水深39cmに対する実験波の特性

堤体模型位置での水深 h は2.2で述べたとおり, 39, 42, 48cmの3種に変化させた。まず, 模型設置水深39cmに対する実験波の特性を述べる。この場合, 幅0.5mの実験水路側壁の造波板側に長さ1.8mの導波板

を斜めに設け, 入口で幅1.0mとなるようにしている。

(1) スペクトル特性

実験波の波高は入力信号を造波機へインプットする際に, 入力規準電圧 e を制御することにより変化させる。図-3.2~3.5は入力電圧 e が0.30Vと0.55Vに対し, それぞれNo.1, No.3での測定波形のスペクトルを示したものである。測点No.1の水深は50.5cm, 測点No.3は39.5cmであり, 11cmの違いがある。スペクトル形状はG1~G4によって若干異なってい

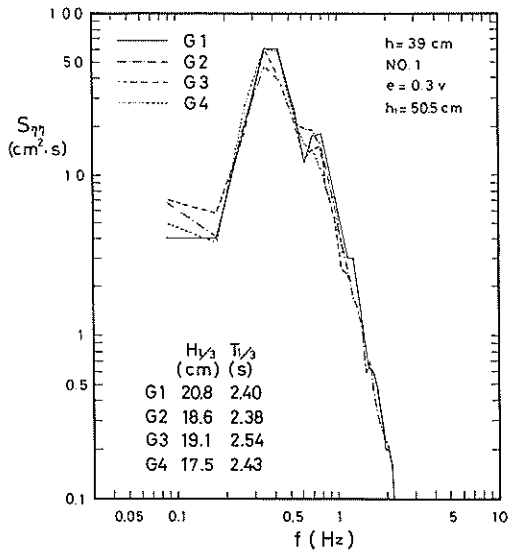


図-3.2 実験波のスペクトル ($h=39$ cm, $e=0.3$ V, No. 1)

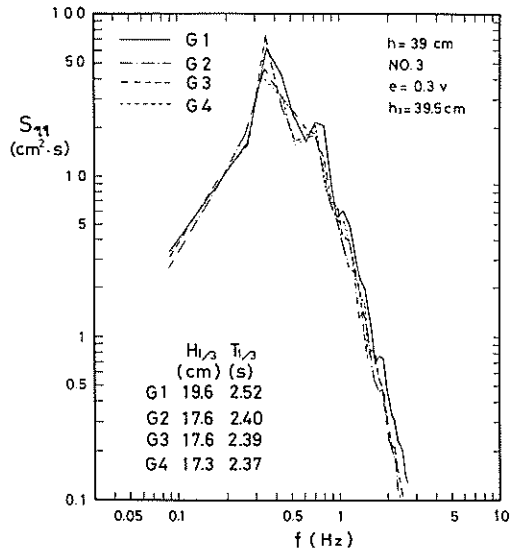


図-3.3 実験波のスペクトル ($h=39$ cm, $e=0.3$ V, No. 3)

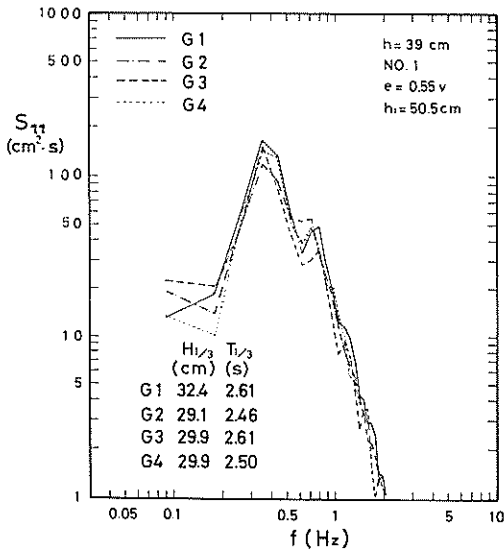


図-3.4 実験波のスペクトル ($h=39$ cm, $e=0.55$ V, No. 1)

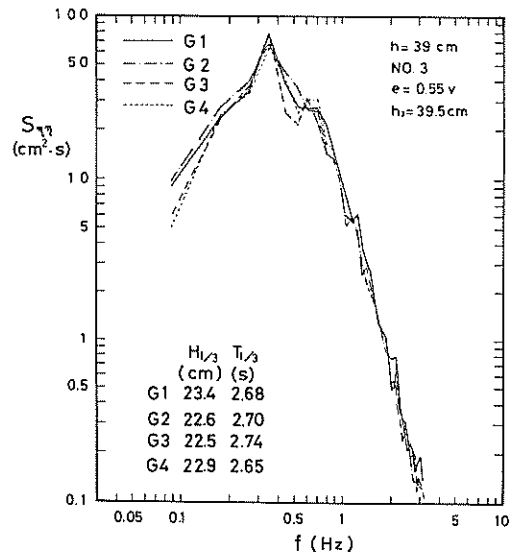


図-3.5 実験波のスペクトル ($h=39$ cm, $e=0.55$ V, No. 3)

るが、ピーク周波数はいずれも 0.35 Hz 付近にある。No. 1 と No. 3 の比較では 0.30 V については大差ないけれども、0.55 V についてはエネルギー密度のピーク値が $120 \sim 170 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ から $64 \sim 80 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ 程度に低下しており、破波変形の影響が明らかに認められる。図中にゼロアップクロス法による有義波高と有義波周期を示しておいた。

(2) 入力電圧 e と周期との関係

図-3.6~3.9はG1~G4波について入力電圧 e と有義波周期 $T_{1/3}$ 及び平均周期 \bar{T} をプロットしてみたものである。有義波周期は 2.2 s から 2.8 s 程度に分布している。平均的には有義波周期 2.5 s、平均周期 2.0 s 程度であるが、入力電圧が大きいくほど、また水深が浅いほどやや周期が長くなる傾向が認められる。

(3) 入力電圧 e と波高との関係

図-3.10~3.13は入力電圧 e と入射波高との関

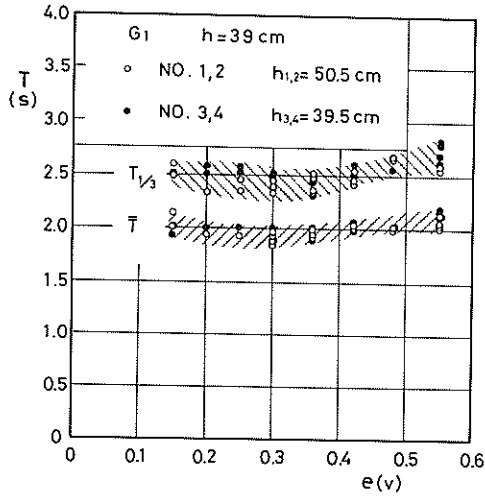


図-3.6 入力電圧 e と周期の関係
($h = 39$ cm, G1)

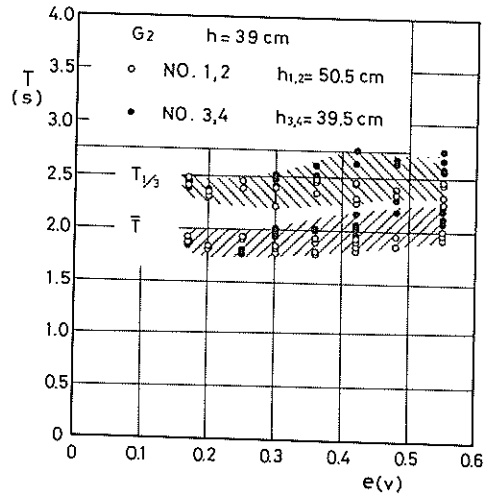


図-3.7 入力電圧 e と周期の関係
($h = 39$ cm, G2)

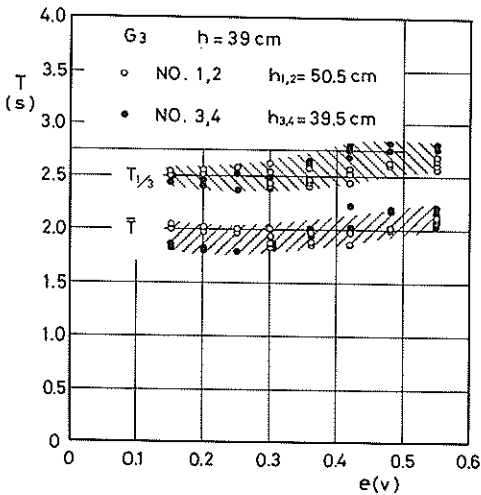


図-3.8 入力電圧 e と周期の関係
($h = 39$ cm, G3)

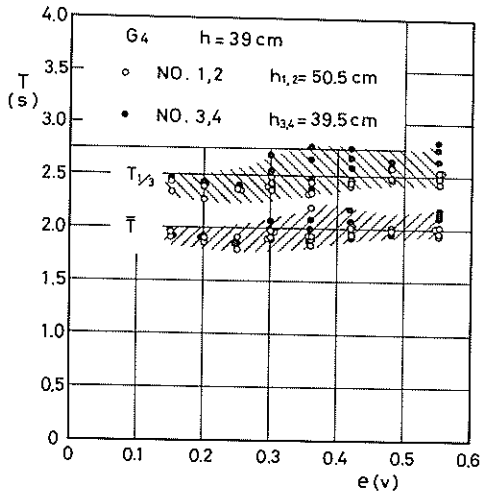


図-3.9 入力電圧 e と周期の関係
($h = 39$ cm, G4)

係を示したものである。ただし、図-3.10~3.13 最高波高 H_{max} と有義波高 $H_{1/3}$ のみである。

測点No. 1 と No. 2 の平均水深 $h_{1,2}$ は 50.5 cm, No. 3 と No. 4 の平均水深 $h_{3,4}$ は 39.5 cm である。そのため、入力電圧が大きくなるにつれて、特にNo. 3, 4 において碎波による波高増大の鈍化、頭打ちの傾向が顕著に認められる。沖側のNo. 1, 2 においてもややこうした傾向が現われており、碎波の影響を含んでいる。測点及び波群の種類により、特に H_{max} のばらつきが大きい。こうした波高のばらつきは不規則波特有のもので

あって、 H_{max} は理論的にも約 13% (100波の場合) の標準偏差を伴うことが知られている⁶⁾

(4) 各波高間の比

図-3.14 は測点No. 3, No. 4 のデータについて、 $H_{1/3}/h$ に対する $H_{max}/H_{1/3}$, $H_{1/10}/H_{1/3}$, $\bar{H}/H_{1/3}$ をプロットしたものである。データはばらついてはいるが、 $H_{1/3}/h$ が大きくなるにつれて $H_{max}/H_{1/3}$, $H_{1/10}/H_{1/3}$ は低下、 $\bar{H}/H_{1/3}$ はやや増大の傾向にあり、碎波変形の影響が認められる。

碎波の影響の小さい $H_{1/3}/h = 0.4$ 程度以下の範囲

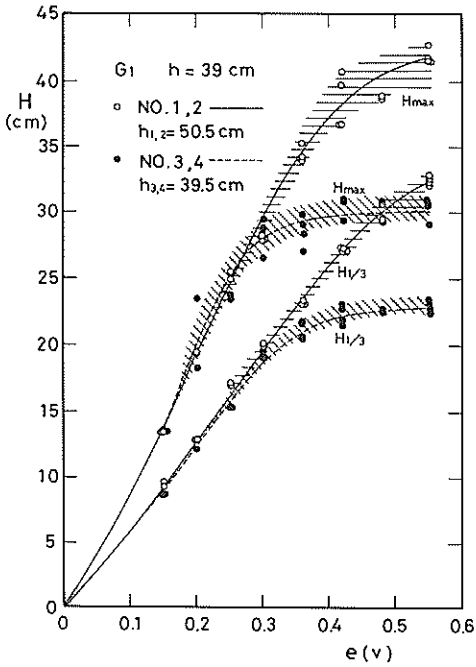


図-3.10 入力電圧 e と波高の関係
($h = 39$ cm, G1)

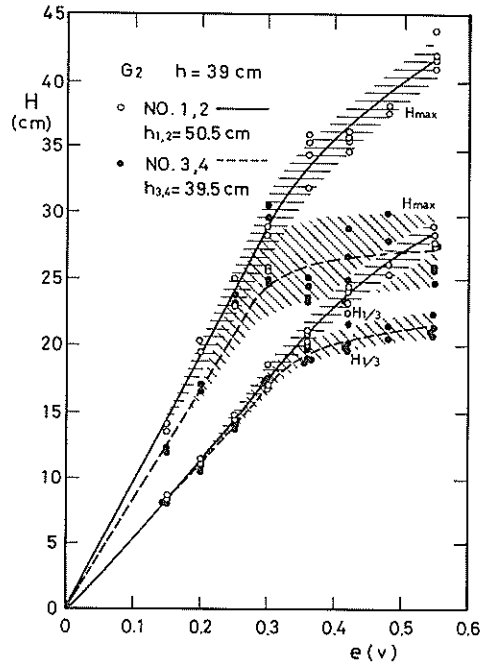


図-3.11 入力電圧 e と波高の関係
($h = 39$ cm, G2)

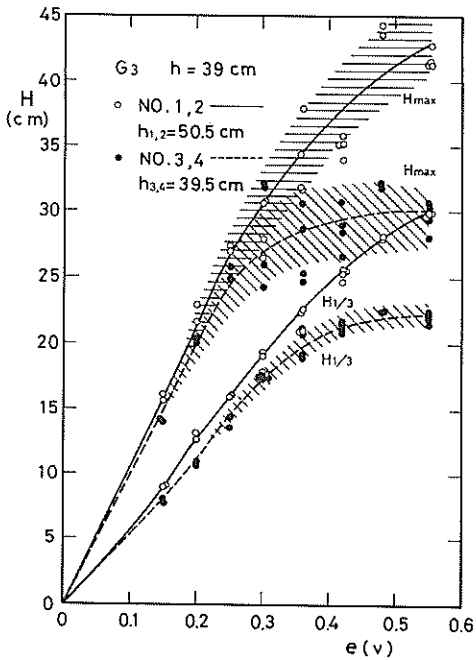


図-3.12 入力電圧 e と波高の関係
($h = 39$ cm, G3)

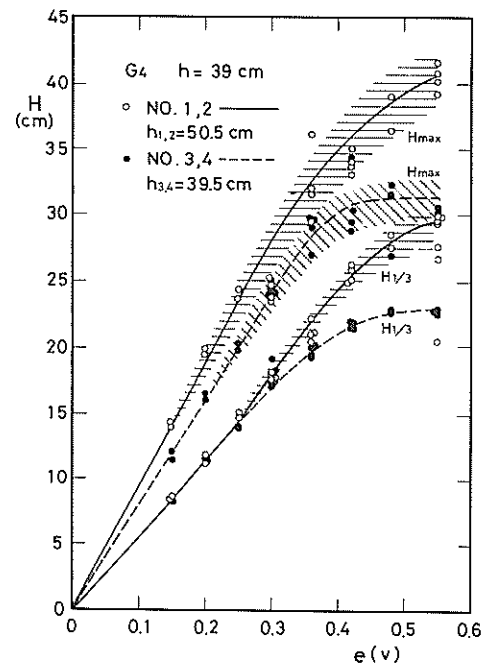


図-3.13 入力電圧 e と波高の関係
($h = 39$ cm, G4)

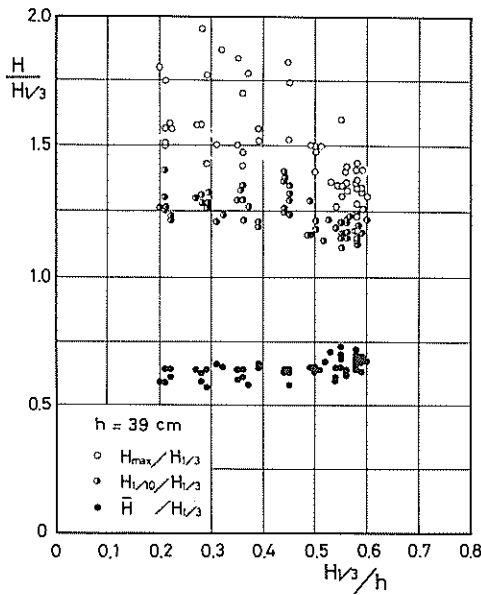


図-3.14 各代表波高間の比 ($h=39$ cm, G1~G4, No. 3, 4)

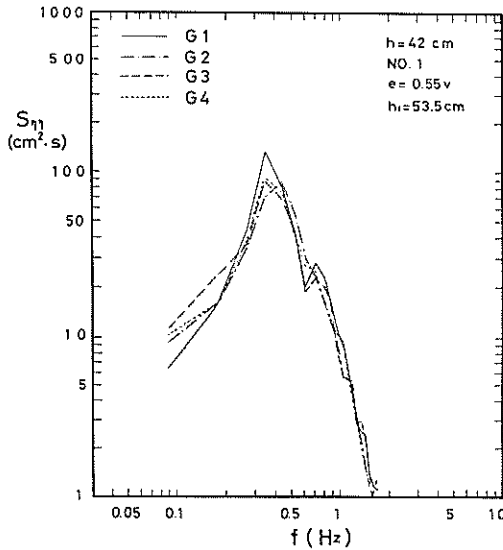


図-3.15 実験波のスペクトル ($h=42$ cm, $e=0.55$ V, No. 1)

がNo. 1では90~130 $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 程度であり, No. 3では60~90 $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 程度に低下している。これは砕波変形の影響と思われるが, $h=39$ cmの場合ほどではない。

(2) 入力電圧 e と周期との関係

における各代表波高の比の平均値は次のとおりである。

$$H_{\max}/H_{1/3} = 1.60, \quad H_{1/10}/H_{1/3} = 1.27, \\ \bar{H}/H_{1/3} = 0.629$$

これはレーリー分布による関係にはほぼ一致している。

一方, 砕波の影響の強い $H_{1/3}/h=0.5\sim 0.6$ の範囲に対しては次のようになり, 砕波変形の影響が明らかである。

$$H_{\max}/H_{1/3} = 1.35, \quad H_{1/10}/H_{1/3} = 1.18, \\ \bar{H}/H_{1/3} = 0.666$$

3.3 模型設置水深42 cmに対する実験波の特性

(1) スペクトル特性

図-3.15, 16は入力電圧 e が0.55 Vに対して, それぞれ測点 No. 1, No. 3での測定波形のスペクトルを示したものである。各々の水深はNo. 1では53.5 cm, No. 3では42.5 cmである。

スペクトル形状はG1~G4によって若干異なっているが, ピーク周波数はいずれも0.35 Hz付近にある。No. 1とNo. 3の比較では, エネルギー密度のピーク値

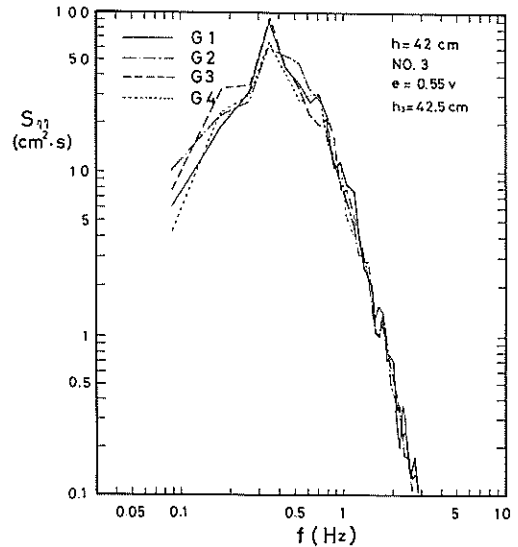


図-3.16 実験波のスペクトル ($h=42$ cm, $e=0.55$ V, No. 3)

図-3.17は入力電圧 e に対して測点 No. 3, No. 4における有義波周期 $T_{1/3}$ と平均周期 \bar{T} を一括してプロットしたものである。有義波周期は2.3~2.7 s, 平均周期は1.75~2.2 s程度に分布している。

(3) 入力電圧 e と波高の関係

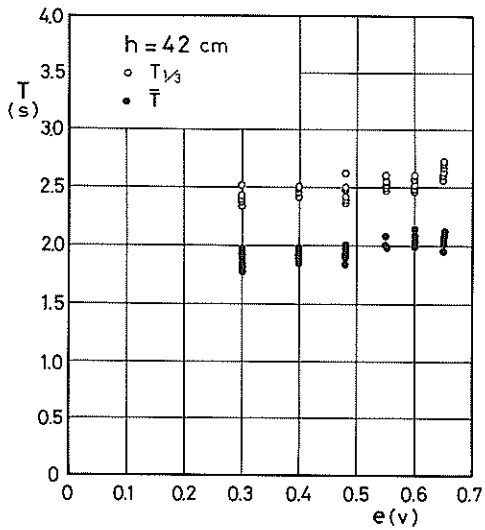


図-3.17 入力電圧 e と周期の関係 ($h = 4.2$ cm, G1~G4, No. 3, 4)

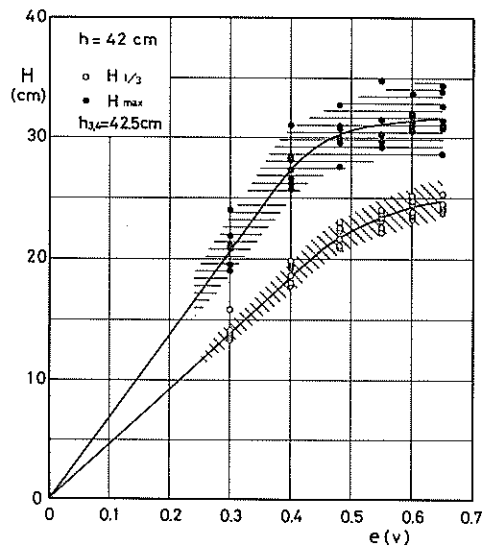


図-3.19 入力電圧 e と波高の関係 ($h = 4.2$ cm, G1~G4, No. 3, 4)

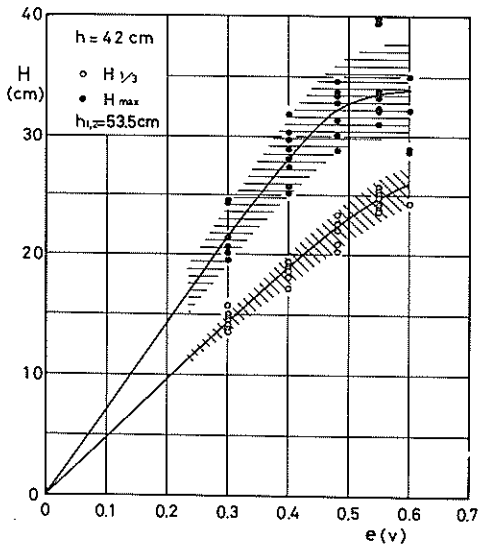


図-3.18 入力電圧 e と波高の関係 ($h = 4.2$ cm, G1~G4, No. 1, 2)

$$H_{max}/H_{1/3} = 1.45, \quad H_{1/10}/H_{1/3} = 1.26,$$

$$\bar{H}/H_{1/3} = 0.671$$

一方、砕波変形の影響の強い $H_{1/3}/h = 0.6$ 程度においては次のようになる。

$$H_{max}/H_{1/3} = 1.32, \quad H_{1/10}/H_{1/3} = 1.16,$$

$$\bar{H}/H_{1/3} = 0.671$$

図-3.18 は測点 No. 1, No. 2 に対する入力電圧と H_{max} , $H_{1/3}$ の関係, 図-3.19 は測点 No. 3, No. 4 に対する同様の関係を示したものである。それぞれ G1~G4 を一括してプロットしている。測点 No. 1 と No. 2 は水深 5.35 cm, No. 3 と No. 4 は 4.25 cm である。入力電圧 e が大きくなるにつれて有義波高 $H_{1/3}$ にも砕波による頭打ちの傾向が認められるが, $h = 3.9$ cm の場合のように No. 1, No. 2 の値と No. 3, No. 4 の値が著しく異なるということはない。

(4) 各波高間の比

図-3.20 は測点 No. 3, No. 4 のデータについて、各代表波高間の比をプロットしたものである。 $h = 3.9$ cm の場合と同様, $H_{1/3}/h$ が大きくなるにつれて $H_{max}/H_{1/3}$, $H_{1/10}/H_{1/3}$ は低下傾向, $\bar{H}/H_{1/3}$ はやや増大傾向を示す。

$H_{1/3}/h$ が 0.4 程度までにおける各代表波高間の比の平均値は次のとおりである。

3.4 模型設置水深 4.8 cm に対する実験波の特性

(I) スペクトル特性

図-3.21, 3.22 は入力電圧 e が 0.55 V に対して、それぞれ測点 No. 1, No. 3 での測定波形のスペクトルを示したものである。それぞれの水深は No. 1 では 6.0 cm, No. 3 では 4.9 cm である。

スペクトル形状は G1~G4 によって多少異なっている

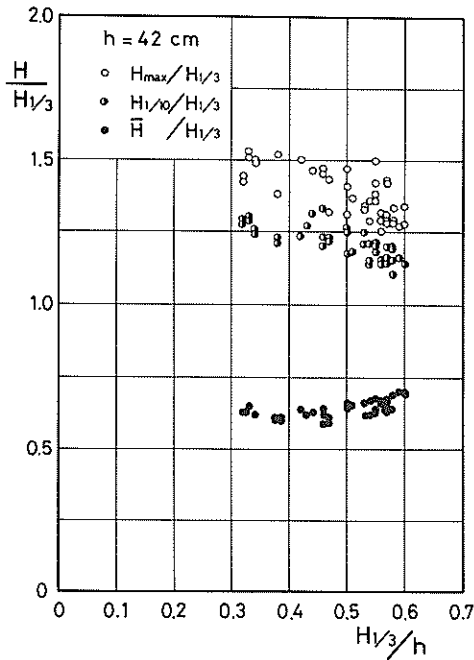


図-3.20 各代表波高間の比 ($h=42$ cm, G1~G4, No. 3, 4)

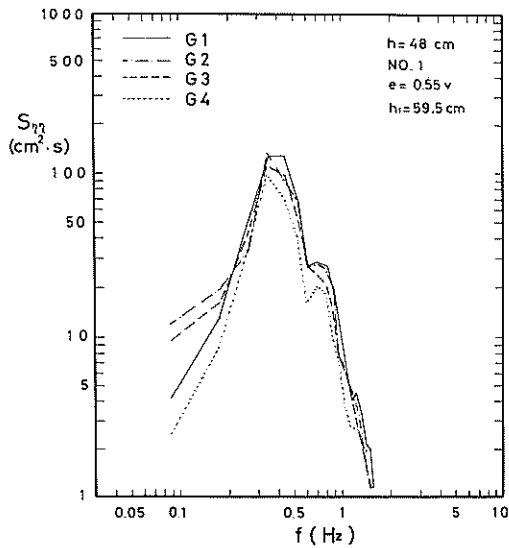


図-3.21 実験波のスペクト ($h=48$ cm, No. 1)

るが、ピーク周波数は、水深39、42 cmと同様にいずれも0.35 Hz付近にある。エネルギー密度のピーク値はNo. 1では100~130 $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 程度であり、No.

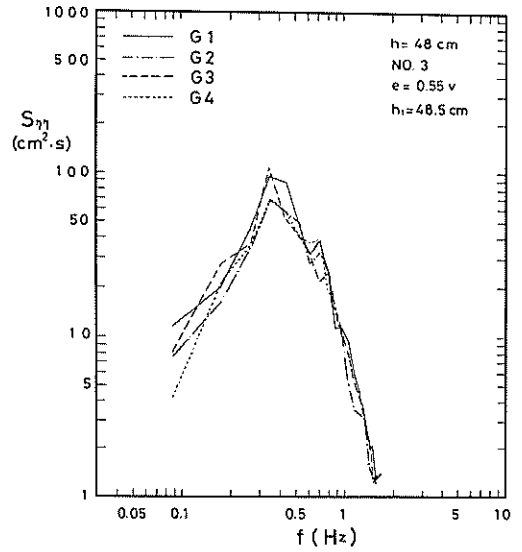


図-3.22 実験波のスペクトル ($h=48$ cm, No. 3)

3では70~100 $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 程度に低下している。これは他の水深と同様に、砕波変形の影響と思われる。

(2) 入力電圧 e と周期との関係

図-3.23は入力電圧 e に対して $T_{1/3}$ と \bar{T} をプロットしたものである。有義波周期は2.25~2.8 s, 平均周期は1.75~2.1 s程度に分布している。

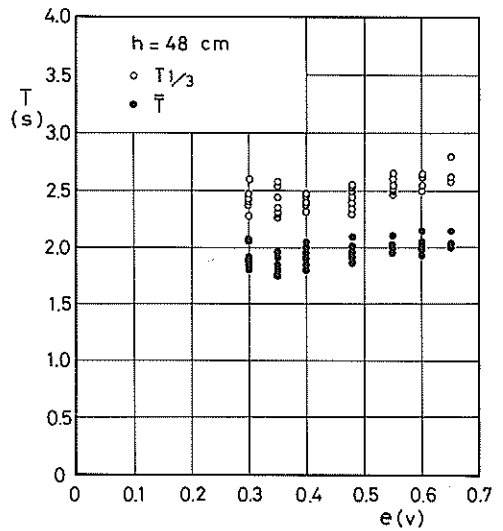


図-3.23 入力電圧 e と周期の関係 ($h=48$ cm, G1~G4, No. 3, 4)

(3) 入力電圧 e と波高との関係

図-3.24 は測点 No. 1, No. 2 に対する, 図-3.25 は測点 No. 3, No. 4 に対する入力電圧 e と H_{max} , $H_{1/3}$ の関係を示す。 $h = 42$ cm の場合と同様入力電圧の増大とともに砕波の影響による波高の頭打ち傾向が

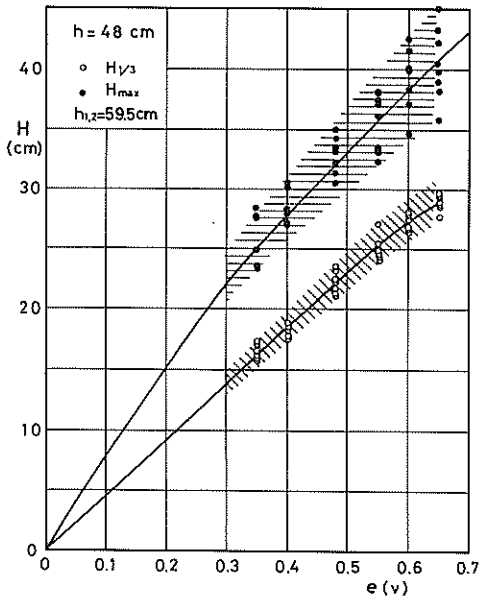


図-3.24 入力電圧 e と波高の関係 ($h = 48$ cm, G1~G4, No. 1, 2)

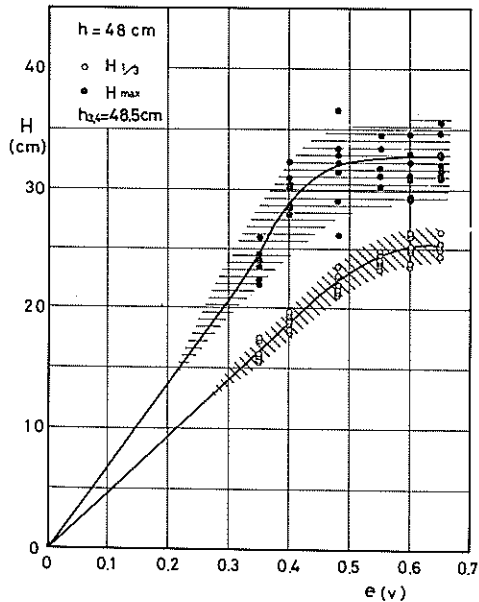


図-3.25 入力電圧 e と波高の関係 ($h = 48$ cm, G1~G4, No. 3, 4)

現われている。

(4) 各波高間の比

図-3.26 に各代表波高間の比を示す。 $H_{1/3}/h$ が 0.4 程度以下の範囲における各波高比の平均値は次のとおりである。

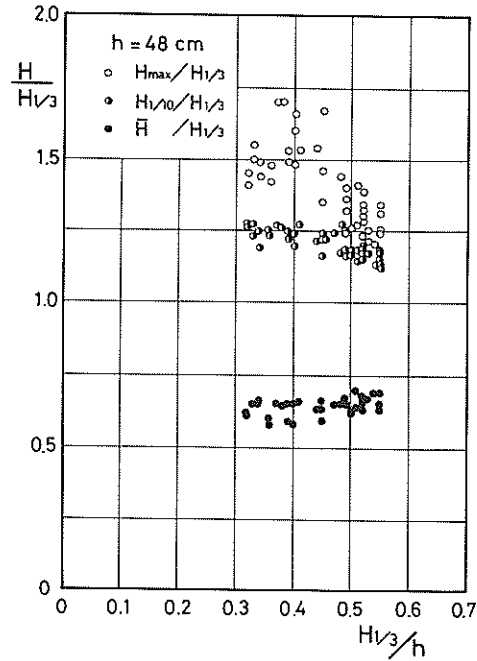


図-3.26 各代表波高間の比 ($h = 48$ cm, G1~G4, No. 3, 4)

$$H_{max}/H_{1/3} = 1.53, \quad H_{1/10}/H_{1/3} = 1.24, \\ \bar{H}/H_{1/3} = 0.631$$

一方, 砕波変形の影響の強い $H_{1/3}/h$ が 0.55 程度では次のようになる。

$$H_{max}/H_{1/3} = 1.27, \quad H_{1/10}/H_{1/3} = 1.16, \\ \bar{H}/H_{1/3} = 0.670$$

4. 反射・伝達波に関する実験

4.1 反射実験

(1) 実験の方法

反射波実験は堤体設置水深 $h = 39$ cm の条件のみについて行った。堤体の天端高 h_c は 13.8 cm, 消波工は全断面Aブロックとし, 天端幅は 2 列並び相当の 15.8 cm, 斜面こう配は 1 : 4/3 である。

実験波は有義波周期を 0.75 s から 2.5 s の範囲で 8

種類、波高はそれぞれの周期条件に対し2種類で、波形こう配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ が0.04および0.06程度となることを目標とした。

反射率は図-2.1に示した測点No.1, No.2の波高計による記録から入・反射波の分離計算を行って、それぞれの総エネルギーの比の平方根として定義する⁵⁾これは入・反射波の有義波高の比と考えることができる。2台の波高計の間隔 Δl は周期により10~20cm, 中心における水深は51cmである。データサンプリング時間間隔は周期により $1/25 \sim 1/9$ s, データ個数は1チャンネルあたり1586~2048とし, 反射率算定の周波数有効範囲は0.3~1.7Hzの範囲で周期により変化させた。

(2) 実験結果

図-4.1は相対水深 $h/L_{1/3}$ に対して, 反射率 K_R の変化を示したものである。 $h/L_{1/3}$ が0.1程度すなわち周期2s程度では反射率は0.3~0.5程度であり, $h/L_{1/3}$ が0.14程度以上すなわち周期1.6s程度以下では反射率は0.2~0.3程度である。

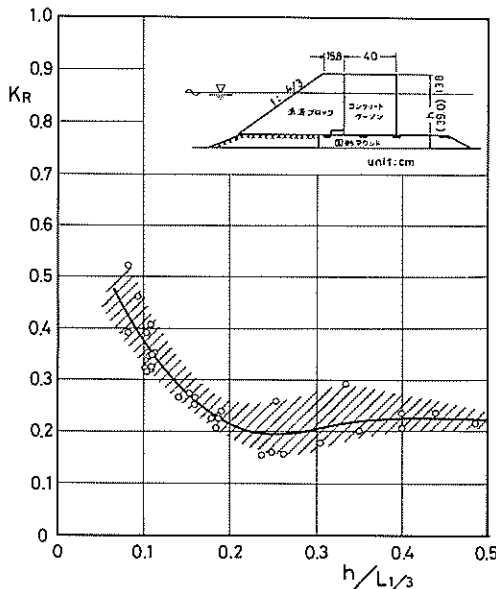


図-4.1 $h/H_{1/3}$ による反射率の変化

4.2 伝達波実験

(1) 実験の方法

伝達波に関する実験は堤体設置水深 h が39cm, 42, 48cmの3種について行った。図-4.2に堤体模型断面図を示している。壁体と水路側壁の間隙には木の薄板を詰め込み, そこから背後へ波が伝達しないようにし

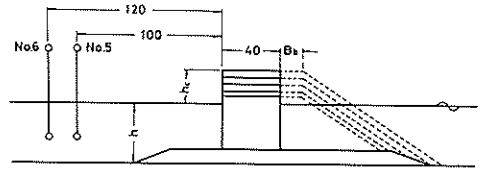


図-4.2 堤体模型と伝達波の測定位置

た。消波工は全断面Aブロックで天端高は常に直立壁天端に一致させた。天端幅は2列並び相当の15.8cmを標準とし, $h=42$ cmに対してのみ3列並び相当の25.3cmについても実験を行った。斜面こう配は1:4/3である。

伝達波の測定は図-4.2中に示しておいたように, 直立壁体背面から岸側に1m, および1.2m位置に設けた2台の容量式波高計による。これをそれぞれ測点No.5, No.6と呼ぶ。なお, 水路の岸側端は砕石斜面を中空三角ブロックで被覆した消波斜面としてあり, そのりじりと直立壁体背面の間の距離は約3mである。

伝達波の解析は, データ・レコーダに収録したアナログデータを高速データ処理装置でデジタル化したのち電算機で行う。A・D変換時のサンプリング間隔は $1/20$ sとし, データ個数は4096個である。データを解析した時間は堤体を設置する以前の入射波の場合の0.9倍であり, やや短い。

実験ケースを表-4.1に一括して示した。静水面上の天端高 h_c は, $h=39$ cmのとき1.03~1.88cmの3ケース, $h=42$ cmのとき7.3~25.8cmの5ケース, $h=48$ cmのとき4.8~19.8cmの4ケースである。波高は, $h=39$ cmのとき入力電圧 e が0.30~0.55Vの範囲で天端高により2~4ケース, $h=42$ cmのとき $e=0.35 \sim 0.65$ Vの範囲で3~6ケース, $h=48$ cmのとき $e=0.40 \sim 0.65$ Vの範囲で2~5ケースであり, それぞれG1~G4の4種の波群によるのを原則とした。

(2) 伝達波の波形

図-4.3は $h=42$ cm, Bブロック天端幅15.8cm, 天端高 $h_c=15.8$ cmで, G1波の $e=0.35$ Vおよび0.55Vのときの伝達波形記録(測点No.6)の一部を示したものである。入射波の有義波高は前者が1.68cm, 後者が2.40cmで, 相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ はそれぞれ0.94, 0.66に相当する。

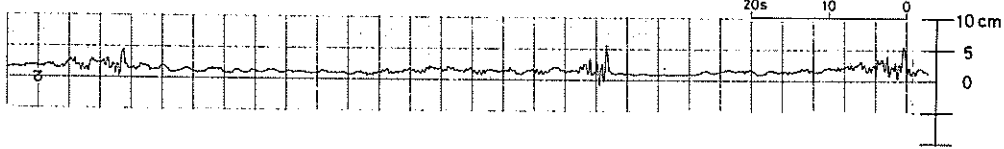
伝達波形は越波の打ち込みによる大きな波高の波と, 小さな擾乱波から成っており, 越波が断続的に生じるため波高が小さいときにはほとんど水面変動がない時間帯も認められる。また, 平均水位は越波の打ち込みによ

表-4.1 伝達波に関する実験ケース

| 水深 h (cm) | 消波工天端幅 (cm) | 天端高 h_z (cm) | 入射波の入力電圧 e (V) | $h_z/H_{1/3}$ の範囲 | ケース数 |
|----------------|----------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------|
| 39 | 15.8 | 10.3 | 0.30, 0.36, 0.42, | 0.452 ~ 0.606 | 12 |
| | | 13.8 | 0.30, 0.36, 0.42, 0.55 | 0.605 ~ 0.812 | 16 |
| | | 18.8 | 0.30, 0.36, 0.42, 0.55 | 0.825 ~ 1.11 | 16 |
| 42 | 15.8 | 10.8 | 0.35, 0.425, 0.45, 0.55 | 0.450 ~ 0.697 | 16 |
| | | 15.8 | 0.35, 0.425, 0.45, 0.55 | 0.658 ~ 1.02 | 16 |
| | | 20.8 | - - - - - , 0.65 | 0.825 ~ 0.849 | 4 |
| | | 25.8 | - - 0.45, 0.55, 0.60, 0.65 | 1.02 ~ 1.31 | 16 |
| 48 | 15.8 | 4.8 | 0.40, 0.45, 0.55, | 0.192 ~ 0.258 | 16 |
| | | 9.8 | 0.40, 0.45, 0.55, 0.60, 0.65 | 0.367 ~ 0.527 | 20 |
| | | 14.8 | 0.40, 0.45, 0.55, 0.60, 0.65 | 0.554 ~ 0.796 | 20 |
| | | 19.8 | - - 0.55, 0.60, 0.65 | 0.742 ~ 0.868 | 12 |
| 42 | 25.2 | 7.3 | 0.35, 0.45, 0.55, - | 0.304 ~ 0.471 | 12 |
| | | 10.8 | 0.35, 0.45, 0.55, 0.65 | 0.429 ~ 0.697 | 16 |
| | | 15.8 | 0.35, 0.45, 0.55, 0.65 | 0.627 ~ 1.02 | 16 |
| | | 20.8 | - 0.45, 0.55, 0.65 | 0.825 ~ 1.06 | 12 |
| | | 25.8 | - 0.45, 0.55, 0.65 | 1.02 ~ 1.31 | 12 |

$h=42$ cm, A Block, 天端幅 15.8 cm

$hc=15.8$ cm, $G1$ $e=0.35$ v, $H_{1/3}=16.8$ cm, $T_{1/3}=2.5$ s



$hc=15.8$ cm, $G1$ $e=0.55$ v, $H_{1/3}=24.0$ cm, $T_{1/3}=2.5$ s

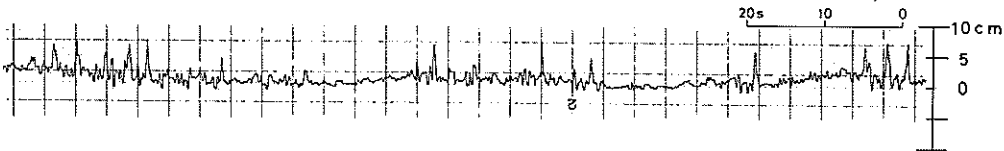


図-4.3 伝達波の波形記録例

て上昇し、特に波高の大きい場合、長周期の変動となって現われている。

図-4.4、4.5 は上記の例についてスペクトルを示したものである。3.で示した通過波のスペクトルとはかたちが著しく異なっている。低周波数域において高いエネルギー密度が生じているのは伝達波形における長周期変動を反映したものと考えられる。スペクトル密度は 0.2 Hz 付近で極小値となり、0.35 Hz 付近で極大値を示す。この極大点は入射波のピーク周波数に対応する

ものである。高周波側においてもこれの2倍、3倍周波数付近に極大が認められ、さらに1 Hz 以上の領域においても顕著な極大、極小が現われている。特に、1.4、1.8、2.7 Hz 付近の極大が顕著であり、エネルギー密度もかなり高い。これらは伝達波形に認められる小さな擾乱波に対応するものと考えられる。

さて、不規則伝達波の解析であるが、波形の記録やスペクトルに認められるように、長周期変動と直接越波がなくとも前の越波の擾乱として残っている短周期の小さ

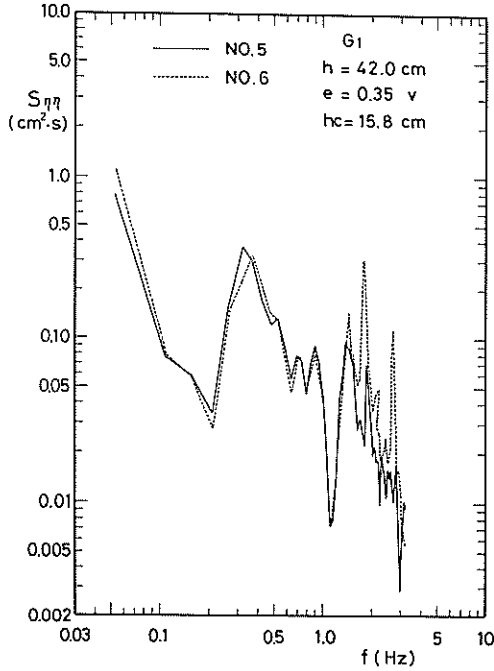


図-4.4 伝達波のスペクトル
($hc/H_1 V_3 = 0.94$)

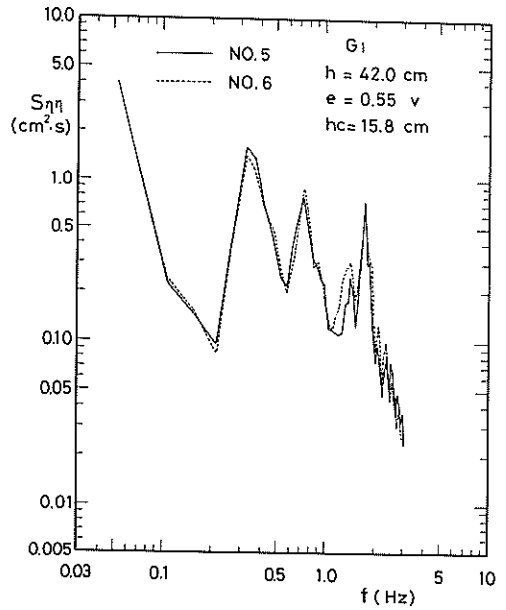


図-4.5 伝達波のスペクトル
($hc/H_1 V_3 = 0.66$)

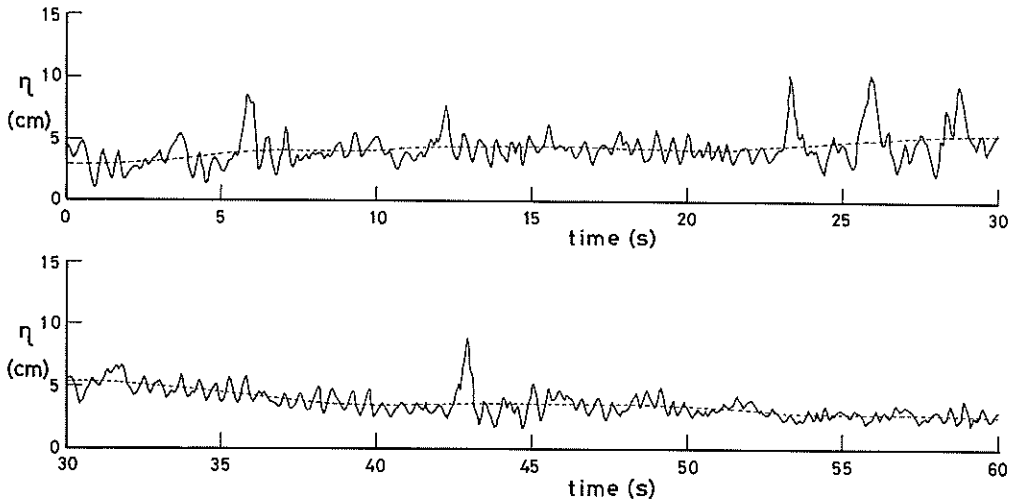


図-4.6 数値フィルターによる長周期成分のカット

な波の取り扱いが問題となる。まず、長周期変動であるが、これは越波がかなりあり、伝達波が比較的大きいときに顕著となる。図-4.6は図-4.3の $e = 0.55 \text{ V}$ の例について、波形をFFTにより分解したのち、 0.2 Hz 以下、すなわち 5 s 以上の成分による波形(破線)を原波形(実線)とともに示したものである。解析に用

いた波形約 205 s のうち、最初の 60 s 間の波形であり、図-4.3に示した記録は図-4.6のほぼ 21 s 以降に対応する。

長周期成分の抽出にあたって、 0.2 Hz 以下の成分としたのはスペクトルにおいてこの付近にいずれも極小値が現われていることによる。しかし、低周波数側でエネ

ルギー密度が急速に増大するのは0.1 Hz 以下である。そのため、実際計算においては0.1 Hz 以下を100%長周期成分とし、0.2 Hz までの間はフーリエ係数に周期数とともに直線的に減少する係数を乗じて遷移区間とした。この長周期成分による波形は図-4.6 で認められるように、短周期変動のほぼ平均線に対応する。今回の不規則伝達波の解析においては、この長周期成分をカットした波形についてゼロアップクロス法を適用することにした。

高周波については越波により短周期の波が生じるのは伝達波そのものの特性であるので、そのまま解析することにした。しかし、相対天端高が比較的大きい場合、越波が相当時間ないのにもかかわらず伝達波が常にあることになり、波数が著しく多くなるなどの問題点が残る。伝達波の起因である越波の回数との関連については全く検討しておらず、今後の課題としたい。

(3) 相対天端高と伝達率

相対天端高と最高波高, 1/10最大波高, 有義波高, 平均波高など, 各代表波高間同志の伝達率を検討する。これらの各種伝達率を次のように定義する。

最高波の伝達率 (K_{Tmax})

$$= \frac{\text{伝達波の最高波高 } (H_{i\max})}{\text{入射波の最高波高 } (H_{i\max})}$$

1/10最大波の伝達率 ($K_{T1/10}$)

$$= \frac{\text{伝達波の1/10最大波高 } (H_{i1/10})}{\text{入射波の1/10最大波高 } (H_{i1/10})}$$

有義波の伝達率 ($K_{T1/3}$)

$$= \frac{\text{伝達波の有義波高 } (H_{i1/3})}{\text{入射波の有義波高 } (H_{i1/3})}$$

平均波の伝達率 (K_{Tmean})

$$= \frac{\text{伝達波の平均波高 } (\bar{H}_i)}{\text{入射波の平均波高 } (\bar{H}_i)}$$

ただし、入射波の波高は通過波の測点 No. 3, 4 に対する入力電圧 e と波高の関係から与える。

まず、図-4.7 は消波工天端幅15.8 cmのときの有義波の伝達率を示したものである。水深 $h = 39, 42, 48$ cmの結果をまとめてプロットしてあるが、水深による変化は著しくない。図中の実線は今回の実験による相対天端高と有義波の伝達率の平均的関係を示したものであり、破線は近藤・佐藤⁴⁾による規則波実験による関係である。 $h_c/H_{i1/3}$ が小さい領域ではやや今回の不規則波による結果が小さく、 $h_c/H_{i1/3}$ が0.4程度より大きい領域でやや大きい。有義波の伝達率は規則波の結果とそれほど遠くない。 $h_c/H_{i1/3} = 0.6$ では伝達率は0.15~0.20程度であり、平均的には0.17である。

図-4.8 は消波工天端幅25.3 cmの場合の結果を示したものである。 $h = 42$ cmの結果のみであるが、図-4.7と比較して $h_c/H_{i1/3} = 1.0$ 程度以下で伝達率はやや小さくなっている。

図-4.9 は消波工天端幅15.8 cmの場合の最高波, 1/10最大波, 平均波の伝達率を示したものである。横軸の h_c/H_i の H_i はそれぞれ入射波の最高波高, 1/10最大波高, 平均波高である。ばらつきはあるが、各代表波同志の伝達率は異なっており、特に最高波の伝

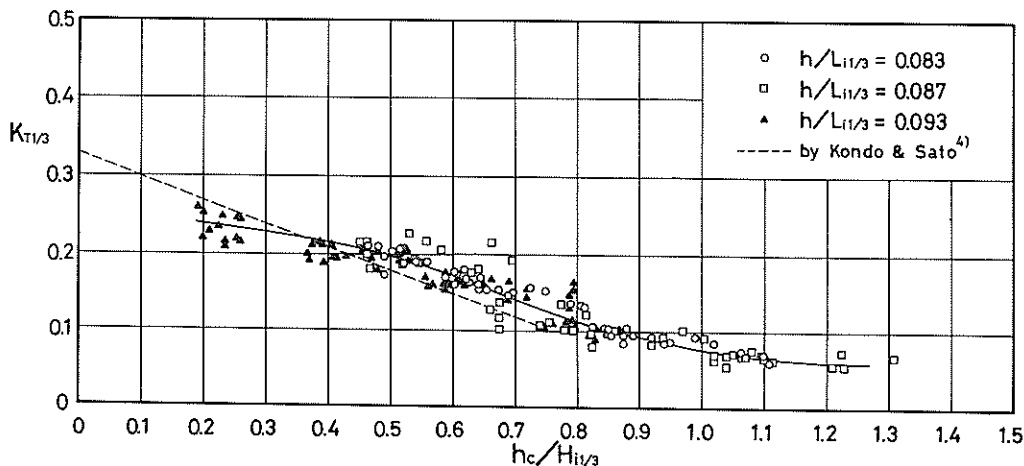


図-4.7 相対天端高と有義波の伝達率 (消波工天端幅15.8 cm)

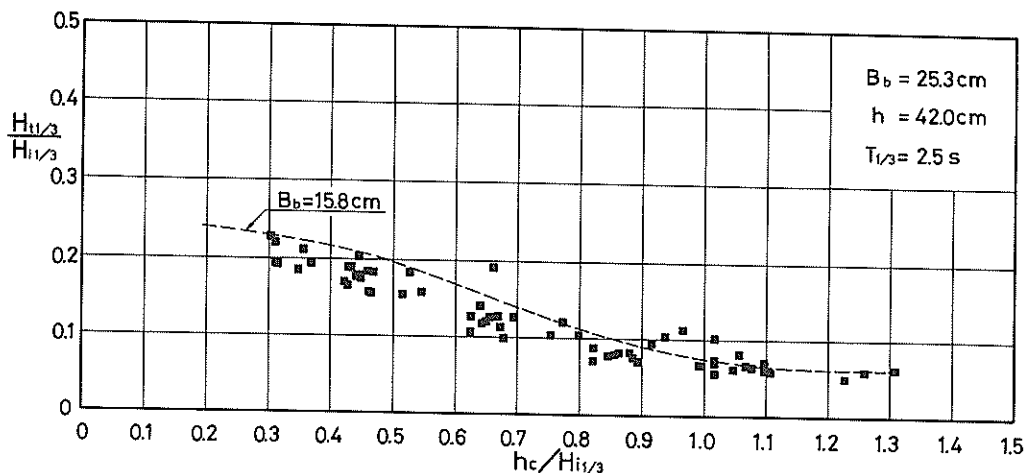


図-4.8 相対天端高と有義波の伝達率 (消波工天端幅 2.53 cm)

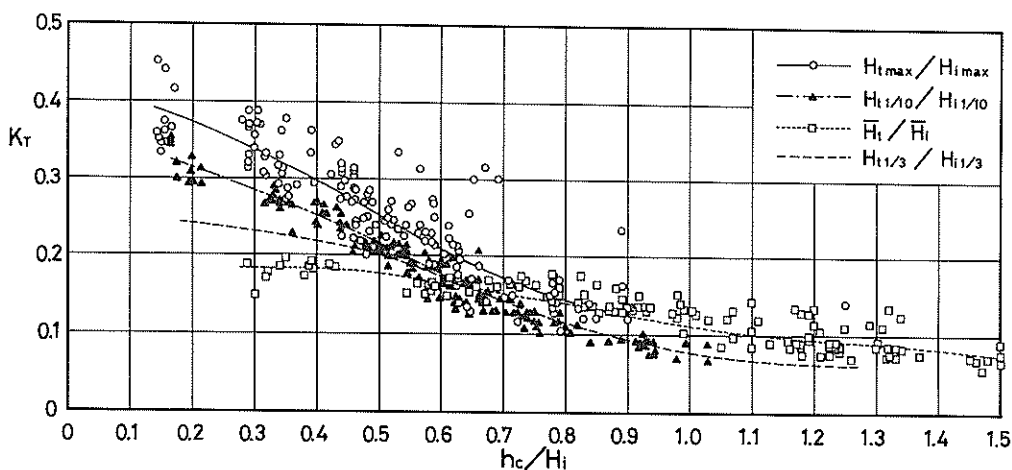


図-4.9 各代表波の伝達率 (消波工天端幅 1.58 cm)

達率は有義波の伝達率より大きくなるようである。

なお、図-4.10は(2)で述べた長周期成分をカットしない原波形のまま、平均水位をゼロ線として解析した有義波の伝達率を示したものである。有義波に関する図-4.7の結果とは、特に $h_c/H_{i1/3}$ の小さい領域で異なり、長周期変動をカットした場合より伝達率が大きくなる。これはゼロ線のとり方により、特に小さな波高の伝達波を含むか含まないかに違いがあり、波数が著しく異なっていることによる。伝達波の波数に関係のない最高波の伝達率には大差がない。

(4) 伝達波の波高の分布

図-4.11、4.12は図-4.3に示した伝達波の波高の相対度数分布を示したものである。前者は $h_c/H_{i1/3}$

$= 0.94$ 、後者は $h_c/H_{i1/3} = 0.66$ の場合の例である。波高の分割の仕方が異なっているが、いずれにしても H/\bar{H} は8.45以上にまで分布しており、レーリー分布とは著しく異なっている。

図-4.13は横軸に有義波の伝達率をとり、伝達波の有義波高に対する最高波高、1/10最大波高、平均波高の比をプロットしたものである。特に最高波高の比がばらついており、 $H_{tmax}/H_{i1/3}$ は1.8~5.2に広く分布している。しかし、平均的には有義波の伝達率に対し傾向的变化が認められ、 $K_{T1/3}$ が大きくなるにつれて $H_{tmax}/H_{i1/3}$ は小さくなるようである。1/10最大波高および平均波高の比は最高波高に比較するとばらつきは小さい。 $H_{t1/10}/H_{i1/3}$ は1.4~1.8に分布しており、

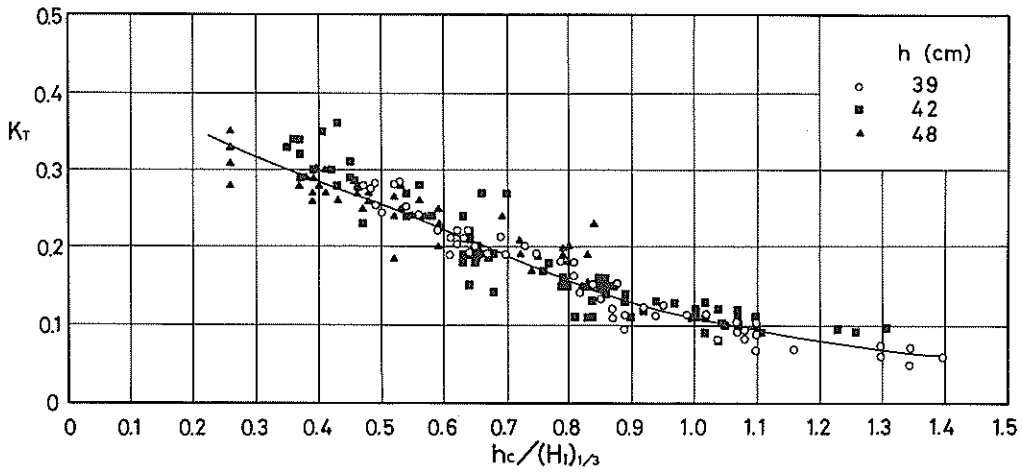


図-4.10 長周期成分をカットしないときの有義波の伝達率 (消波工天端幅 15.8 cm)

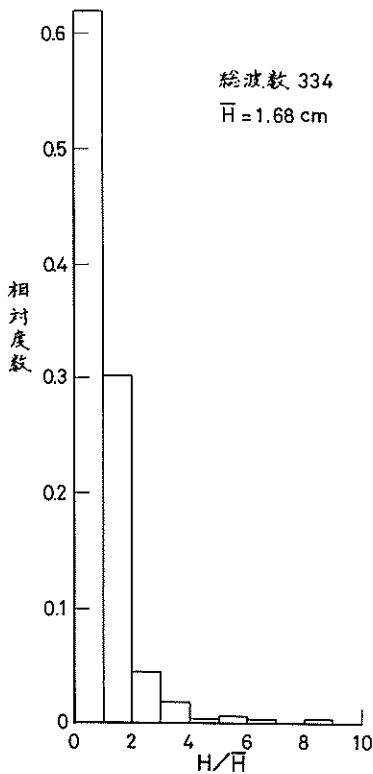


図-4.11 伝達波の波高の度数分布の例
($h_c/H_{i1/3} = 0.94$)

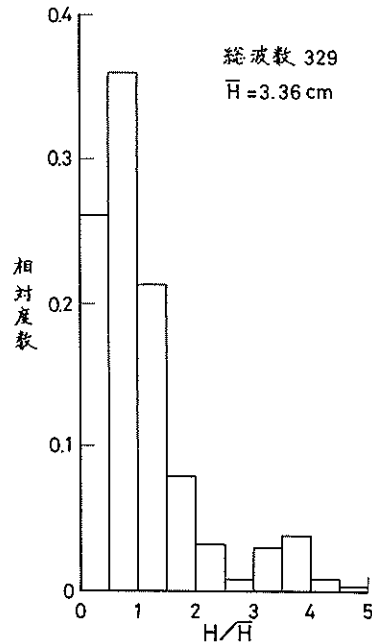


図-4.12 伝達波の波高の度数分布の例
($h_c/H_{i1/3} = 0.66$)

平均的には $K_{T1/3}$ が小さくなるにつれてやや減少傾向にある。 $\bar{H}_i/H_{i1/3}$ は 0.5 ~ 0.6 程度で変化は小さい。

(5) 伝達波の周期

図-4.14, 4.15は図-4.11, 4.12と同様図-4.3の伝達波の例に対する周期の相対度数分布を示したものである。前者の総波数344のうち最も長い周期は2.74sで、平均周期の4.50倍、後者の329波のうち最も長い周期は2.01sで、平均周期の3.24倍である。

図-4.16は相対天端高 $h_c/H_{i1/3}$ を横軸にとり、

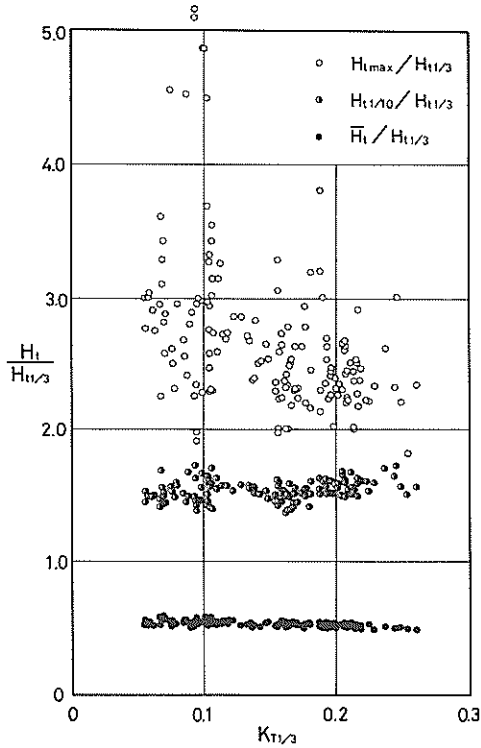


図-4.13 伝達波の各代表波高間の関係

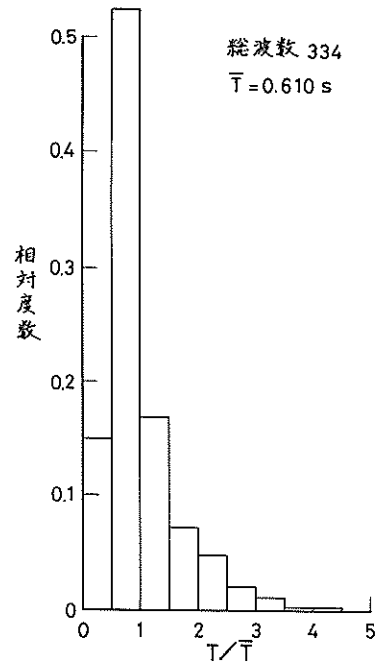


図-4.14 伝達波の周期の度数分布の例
($h_c / H_{i1/3} = 0.94$)

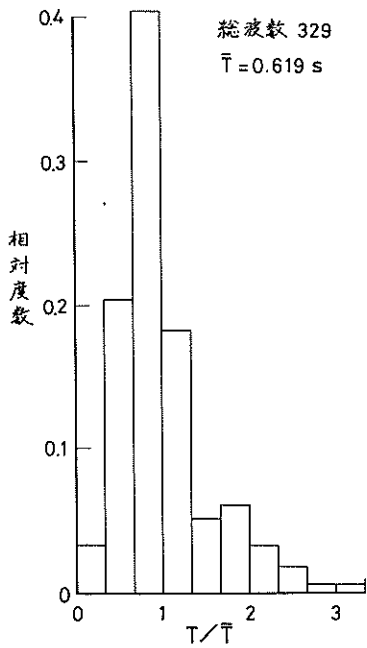


図-4.15 伝達波の周期の度数分布の例
($h_c / H_{i1/3} = 0.66$)

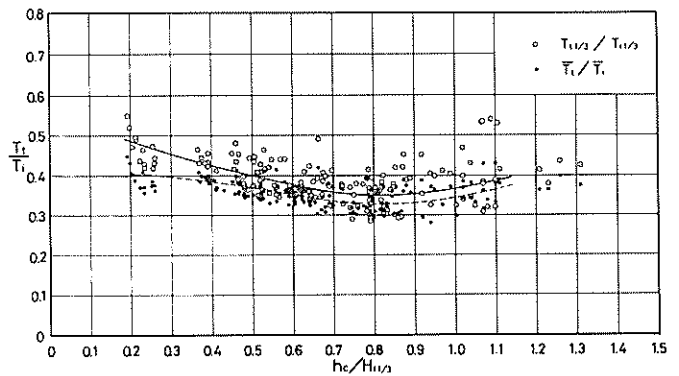


図-4.16 相対天端高と周期比の関係

入射波の周期に対する伝達波の周期の比を示したものである。有義波周期比と平均周期比の両方をプロットしてある。結果はばらついているけれども、相対天端高が0.8程度で極小となる変化を示している。図中の線は平

均的關係を示したもので、有義波周期比が平均周期比より全体にやや大きい。 $h_c/H_{1/3} = 0.6$ に対して $T_{1/3}/\bar{T}_1 = 0.38$ 、 $\bar{T}_1/\bar{T}_1 = 0.35$ 程度で、伝達波の有義波周期は入射波の約 $1/2.6$ 、平均周期は約 $1/2.9$ と小さくなる。

5. 消波ブロック安定実験

5.1 実験の方法

(1) 消波工の断面

実験は堤体模型位置での水深 h が39 cm, 42 cm,

48 cmの3種について行う。表-5.1にこれらの水深毎の消波工断面の諸元を示しておいた。マウンドの厚さはどのケースにおいても11 cmで一定としている。AブロックとBブロックで同じ断面諸元としており、いずれも全断面乱積みである。ただし、 $h = 39$ cmの場合には小型ブロックで中詰めし、Aブロック2層で被覆した断面についても実験を行っている。

消波工の天端幅15.8 cmはAブロック2列並びの幅に相当する。Bブロックの2列並びの標準幅はAブロックの幅よりも広くなるが、今回の実験では同じとした。のりこう配は $1:4/3$ を標準とし、 $h = 48$ cmのA

表-5.1 消波工の諸元

| 前面水深 h (cm) | ケーソン基面水深 h' (cm) | 天端高 h_c (cm) | 消波工全高 (cm) | 消波工天端幅 (cm) | 消波工のりこう配 | ブロックの種類 |
|------------------|-----------------------|-------------------|---------------|----------------|----------|----------|
| 39.0 | 28.0 | 13.5 | 41.5 | 15.8 | 1:4/3 | A, Bブロック |
| 42.0 | 31.0 | 13.0 | 44.0 | 15.8 | 1:4/3 | A, Bブロック |
| 48.0 | 37.0 | 12.0 | 49.0 | 15.8 | 1:4/3 | A, Bブロック |
| 48.0 | 37.0 | 12.0 | 49.0 | 15.8 | 1:2 | Aブロック |

表-5.2 使用ブロック数(水路幅50 cm)

| 前面水深 h (cm) | 消波工 のりこう配 | 総 個 数 | |
|------------------|--------------|---------|---------|
| | | Aブロック | Bブロック |
| 39.0 | 1:4/3 | 145~150 | 110~135 |
| 42.0 | 1:4/3 | 160~164 | 139~145 |
| 48.0 | 1:4/3 | 181~190 | 163~175 |
| 48.0 | 1:2 | 290 | - |

ブロックについて、 $1:2$ の実験も行った。

幅50 cmの水路における消波ブロックの使用個数は表-5.2に示したとおりである。積み換え繰り返しによって個数が若干異なっている。一般に標準の空隙率はAブロック50%, Bブロック60%であり、Bブロックの方が大きい。そのため、個々の体積ではBブロックがAブロックより小さいのにもかかわらず、個数が少なくなっている。

(2) 波のかけ方および被害率の定義

消波ブロックの安定性はブロックの特性や波浪条件のほかに積み方、締め具合などによっても異なる。本実験では、小さな波によってある程度たたかれ、締め固められたあとの安定性をとらえることにした。そのため、新しく消波ブロックを乱積みしたのち、ブロックが移動しない程度の小さい波高の波を100~200波作用させ

て初期状態とした。しかるのち所定の実験波を作用させるわけであるが、ここにおいても波高の小さい波から作用させ、大きな波高の波に移るとき、前の波による状態をそのままとして、移動ブロックの個数はそれ以前のものも含めた累計で数えるのを標準とした。最後の波まで終了して初めて、消波ブロックを積み直し、これを2~3回繰り返すわけである。ただし、 $h = 48$ cmの一部については所定の波高の波ごとに積み変えた実験も行っている。実験ケース毎の具体的な波のかけ方、波数等については実験結果のところでも述べる。

今回の実験における被害率 D は次の式で定義する。

$$D = \frac{n}{N} \times 100 (\%) \quad (5.1)$$

ここに、

n : 当初の位置より1個分程度以上移動したブロックの累積数

N : 断面を構成するブロックの総数

ブロックが移動したかどうかは、実験時における観察により判定した。かなり激しく動揺してもほぼ元の位置に留まるものとか、若干移動したとしても結果的にはほぼ元の位置に戻るものについては移動ブロックとして数えていない。また、ほぼ同地点でたとえ半回転して向きを変えたものについても移動ブロックとしていない。他

実験との比較などにおいては、この被害ブロックの判定基準に注意する必要がある。

5.2 実験結果

(1) $h = 3.9 \text{ cm}$ の場合の被害状況

本水深条件においては全断面Aブロック、全断面Bブロックのほか、Aブロックについては中詰めとして被覆層の約 $1/3$ の重量の同一型ブロックを用いた場合の実験を行った。この場合、被覆層は2層乱積みである。

波のかけ方は $e = 0.30 \sim 0.36 \text{ V}$ から 0.55 V まで、各入力電圧ごとにG1～G4の波を各1回ずつ作用させるのを原則とした。各1回の波の作用時間は4分15秒であり、したがって同一の入力電圧でG1からG4の4種、計17分間である。これを2～3回積み換え繰り返

えした。

$e = 0.55 \text{ V}$ のときのG1～G4の有義波高の平均値は 2.22 cm であるが、3種の断面すべてについて、ブロックは動揺するものの、1個程度分以上移動するものはなかった。

写真-5.1、5.2はAブロック2層被覆の場合の波の作用以前の状態を示したものであり、写真-5.3、5.4は $e = 0.36 \text{ V}$ 、 0.42 V 、 0.55 V の波の作用を受けた最後の状態を示したものである。両者を比較すると、側面写真でブロック天端が若干沈下しており、正面写真で個々のブロックが向きを変えているのが認められる。本実験ではこの程度の変化に対しては被害率を0とした。つまり、これは波の作用によって締め固められる

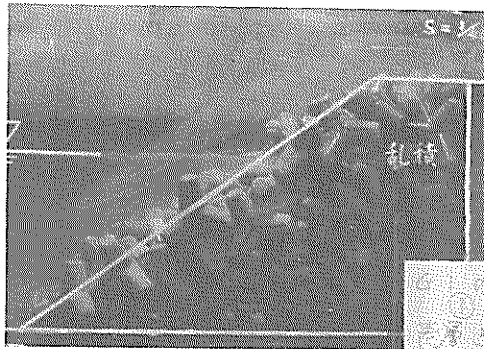


写真-5.1 Aブロック作用前側面写真
($h = 3.9 \text{ cm}$)

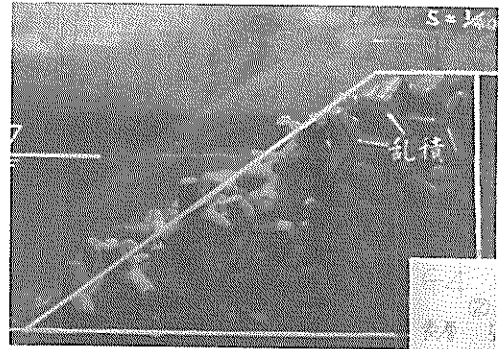


写真-5.3 Aブロック作用後側面写真
($h = 3.9 \text{ cm}$)



写真-5.2 Aブロック作用前正面写真
($h = 3.9 \text{ cm}$)

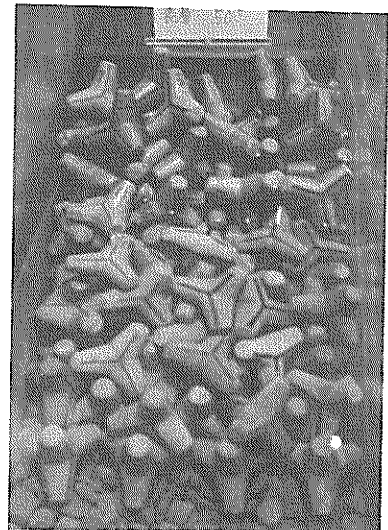


写真-5.4 Aブロック作用後正面写真
($h = 3.9 \text{ cm}$)

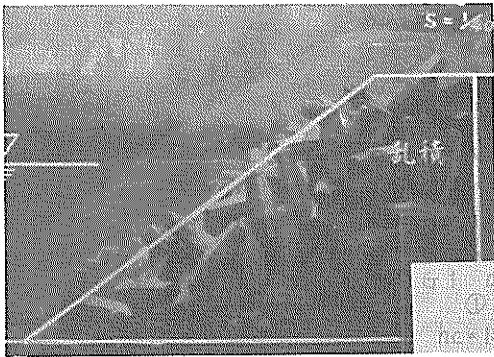


写真-5.5 Bブロック作用前側面写真
($h = 3.9$ cm)

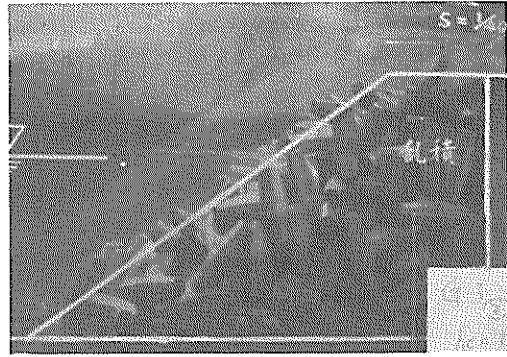


写真-5.7 Bブロック作用後側面写真
($h = 3.9$ cm)



写真-5.6 Bブロック作用前正面写真
($h = 3.9$ cm)

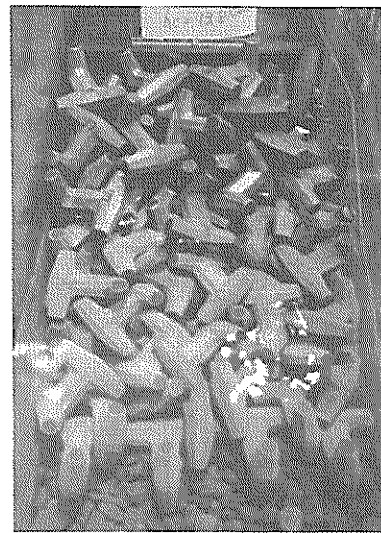


写真-5.8 Bブロック作用後正面写真
($h = 3.9$ cm)

過程における変形であると考えたわけである。

写真-5.5~5.8はBブロックについての波の作用前後の状態を示したものである。多少向きを変えたり、沈下したりしているものも認められるが、Aブロックの場合ほどではない。

(2) $h = 4.2$ cm の場合の被害状況

本水深条件については全断面Aブロックと全断面Bブロックの2種の実験を行った。結果を表-5.3~5.5に示す。表-5.3は $e = 0.425$ V, 0.48 VのG1波をかけたのち、 $e = 0.55$ VのG1~G4波を1回づつ作用させたもので、Bブロックについては2回、Aブロックについては3回積み方を変えて繰り返した。繰り返

返しにより移動したり、しななかったりしている。移動個数の多いものでBブロック1回目2個、被害率1.4%である。

表-5.4, 5.5はAブロックについては $e = 0.48 \sim 0.65$ V, Bブロックについては $e = 0.40 \sim 0.65$ Vの範囲でG1~G4の波をそれぞれ2回づつかけたときの結果である。同一の入力電圧に対して計8回、3.4分間の作用時間となる。A, B両ブロックについてそれぞれ2回づつ積み換えて実験を行っている。 $e = 0.65$ V, 有義波高2.48 cmまでの実験で移動個数はAブロック1~2個, Bブロック0~1個である。

(3) $h = 4.8$ cm の場合の被害状況

表-5.3 被害ブロック個数 ($h=42\text{ cm}$, $e=0.55\text{ V}$)

| 波 種 | e (V) | $H_{1/3}$ (cm) | 被害ブロック個数 (累計) | | | | |
|-----------|------------|-------------------|-------------------|-----|-----|-------------------|-----|
| | | | Aブロック ($N=160$) | | | Bブロック ($N=145$) | |
| | | | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 1回目 | 2回目 |
| G1 | 0.425 | 20.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| G1 | 0.48 | 22.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| G1 | 0.55 | 24.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| G2 | 0.55 | 23.2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| G3 | 0.55 | 23.4 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| G4 | 0.55 | 23.5 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 最終被害率 (%) | | | 0.63 | 0.0 | 0.0 | 1.4 | 0.0 |

表-5.4 Aブロックの被害個数 ($h=42\text{ cm}$, $\cot \alpha=4/3$)

1回目 $N=164$

| e (V) | $H_{1/3}$ (cm) | G 1 | | G 2 | | G 3 | | G 4 | | 小 計 | 累 計 | 被害率 (%) |
|------------|-------------------|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|-----|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | | |
| 0.48 | 21.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.55 | 23.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0.61 |
| 0.60 | 24.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.61 |
| 0.65 | 24.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.61 |

2回目 $N=160$

| e (V) | $H_{1/3}$ (cm) | G 1 | | G 2 | | G 3 | | G 4 | | 小 計 | 累 計 | 被害率 (%) |
|------------|-------------------|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|-----|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | | |
| 0.48 | 21.7 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0.63 |
| 0.55 | 23.5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1.25 |
| 0.60 | 24.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1.25 |
| 0.65 | 24.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1.25 |

表-5.5 Bブロックの被害個数 ($h=42\text{ cm}$, $\cot \alpha=4/3$)

1回目 $N=139$

| e (V) | $H_{1/3}$ (cm) | G 1 | | G 2 | | G 3 | | G 4 | | 小 計 | 累 計 | 被害率 (%) |
|------------|-------------------|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|-----|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | | |
| 0.40 | 18.6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.48 | 21.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.55 | 23.5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0.72 |
| 0.60 | 24.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.72 |
| 0.65 | 24.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.72 |

2回目 $N=139$

| e (V) | $H_{1/3}$ (cm) | G 1 | | G 2 | | G 3 | | G 4 | | 小 計 | 累 計 | 被害率 (%) |
|------------|-------------------|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|-----|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | | |
| 0.40 | 18.6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.48 | 21.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.55 | 23.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.60 | 24.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.65 | 24.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |

本水深条件では、消波工のりこう配1:4/3のほか、Aブロックについては1:2の場合の実験を行った。

表-5.6~5.10にのりこう配1:4/3の場合の結果を示す。表-5.6は $h=42\text{ cm}$ の場合の表-5.

3と同じ波のかけ方をしたもので、Aブロック、Bブロックについてそれぞれ3回づつ積み方を変えている。移動ブロック数はAブロックが3~5個、Bブロックが0~2個とAブロックの方が明らかに多くなる。

表-5.6 被害ブロック個数 ($h=48\text{ cm}$, $e=0.55\text{ V}$)

| 波種 | e (V) | $H_{1/3}$ (cm) | 被害ブロック個数 (累計) | | | | | |
|-----------|------------|-------------------|---------------|-----|-----|---------------|-----|-----|
| | | | Aブロック $N=190$ | | | Bブロック $N=175$ | | |
| | | | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 1回目 | 2回目 | 3回目 |
| G1 | 0.425 | 20.2 | 0 | 2 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| G1 | 0.48 | 23.0 | 1 | 2 | 3 | 2 | 0 | 0 |
| G1 | 0.55 | 25.0 | 2 | 2 | 4 | 2 | 0 | 0 |
| G2 | 0.55 | 22.8 | 2 | 3 | 4 | 2 | 0 | 0 |
| G3 | 0.55 | 23.8 | 5 | 3 | 4 | 2 | 0 | 0 |
| G4 | 0.55 | 24.2 | 5 | 3 | 5 | 2 | 0 | 0 |
| 最終被害率 (%) | | | 2.6 | 1.6 | 2.6 | 1.1 | 0.0 | 0.0 |

表-5.7 被害ブロック数 ($h=48\text{ cm}$, $e=0.60\text{ V}$)

| 波種 | e (V) | $H_{1/3}$ (cm) | 被害ブロック数 (累計) | | | | | |
|-----------|------------|-------------------|---------------|-----|-----|---------------|-----|-----|
| | | | Aブロック $N=190$ | | | Bブロック $N=175$ | | |
| | | | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 1回目 | 2回目 | 3回目 |
| G1 | 0.60 | 26.0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| G2 | 0.60 | 23.8 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 |
| G3 | 0.60 | 25.1 | 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 0 |
| G4 | 0.60 | 24.9 | 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 最終被害率 (%) | | | 3.2 | 1.1 | 0.5 | 1.1 | 1.1 | 0.6 |

表-5.8 被害ブロック数 ($h=48\text{ cm}$, $e=0.65\text{ V}$)

| 波種 | e (V) | $H_{1/3}$ (cm) | 被害ブロック数 (累計) | | | | | |
|-----------|------------|-------------------|---------------|-----|-----|---------------|-----|-----|
| | | | Aブロック $N=190$ | | | Bブロック $N=175$ | | |
| | | | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 1回目 | 2回目 | 3回目 |
| G1 | 0.65 | 26.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| G2 | 0.65 | 25.0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 |
| G3 | 0.65 | 26.5 | 2 | 2 | 5 | 0 | 1 | 1 |
| G4 | 0.65 | 25.3 | 2 | 2 | 5 | 0 | 1 | 1 |
| 最終被害率 (%) | | | 1.1 | 2.1 | 2.6 | 0.0 | 0.6 | 0.6 |

表-5.9 Aブロックの被害個数 ($h=48\text{ cm}$, $\cot \alpha=4/3$)

1回目 $N=181$

| e (V) | $H_{1/3}$ (cm) | G 1 | | G 2 | | G 3 | | G 4 | | 小計 | 累計 | 被害率 (%) |
|------------|-------------------|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|----|----|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | | |
| 0.40 | 18.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0.55 |
| 0.48 | 22.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 3 | 1.66 |
| 0.55 | 24.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 | 6 | 3.31 |
| 0.60 | 25.0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 8 | 4.42 |
| 0.65 | 25.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 4.42 |

2回目 $N=181$

| e (V) | $H_{1/3}$ (cm) | G 1 | | G 2 | | G 3 | | G 4 | | 小計 | 累計 | 被害率 (%) |
|------------|-------------------|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|----|----|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | | |
| 0.40 | 18.7 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 | 1.10 |
| 0.48 | 22.1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 4 | 2.21 |
| 0.55 | 24.0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5 | 2.76 |
| 0.60 | 25.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 2.76 |
| 0.65 | 25.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 2.76 |

表-5.10 Bブロックの被害個数 ($h=48\text{ cm}$, $\cot \alpha=4/3$)

1回目 $N=163$

| e (V) | $H_{1/3}$ (cm) | G 1 | | G 2 | | G 3 | | G 4 | | 小計 | 累計 | 被害率 (%) |
|------------|-------------------|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|----|----|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | | |
| 0.35 | 16.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.40 | 18.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0.61 |
| 0.48 | 22.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.61 |
| 0.55 | 24.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1.23 |
| 0.60 | 25.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1.23 |
| 0.65 | 25.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1.23 |

2回目 $N=163$

| e (V) | $H_{1/3}$ (cm) | G 1 | | G 2 | | G 3 | | G 4 | | 小計 | 累計 | 被害率 (%) |
|------------|-------------------|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|----|----|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | | |
| 0.35 | 16.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.40 | 18.7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0.61 |
| 0.48 | 22.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.61 |
| 0.55 | 24.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.61 |
| 0.60 | 25.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.61 |
| 0.65 | 25.9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1.23 |

表-5.7, 5.8は $e=0.60\text{ V}$, 0.65 V に対してG 1~G 4波をそれぞれ1回づつ作用させた場合の結果である。波の作用時間は計18分となる。積み方を変えて3回づつ繰り返しているが、移動ブロック数はAブロックの方が多し。

表-5.9, 5.10は $h=42\text{ cm}$ の場合の表-5.4, 5.5と同じ波のかけ方をしたときの結果である。 $e=0.65\text{ V}$, 有義波高25.9 cmまでの波の作用で、移動個数はAブロックが5~8個, Bブロックが2個である。

写真-5.9~5.16は表-5.8に結果を示した $\theta = 0.65V$ のときの波の作用前後の状態を示す。Aブロックは3回目のものであり、移動ブロック数は5個である。その内訳は転倒移動したもの2個、のり先まで転落したもの1個、直立壁体上部工の上に乗り上げたもの2個で、いずれも静水面から上にあったブロックである。写真-5.12には上部工上に2個あがっているのが認められる。また、1個は半分ほど乗り上げている。

Bブロックは2回目のものを示したものであるが、この場合の移動数は1個であり、写真-5.16に認められる上部工へ乗り上げているのがそれである。

ブロックの移動は大体において静水面付近以上の斜面上のものは転落、天端にあるブロックは上部工への乗り上げの傾向を有する。個々のブロックの動揺の程度は概

してBブロックの方が大きいようであるが、かみ合わせがよいため移動するものは少ない。

表-5.11はAブロックについてのりこう配1:2の場合の結果を示したものである。波はG1~G4波各1回づつで、約500波の作用によるものである。被害ブロック数が1:4/3の場合より小さくなっているけれども、作用波数が表-5.9の場合の1/2である点、注意が必要である。また、本実験においてはブロック数として、投入全ブロックを数えているため、 $N=290$ とこう配1:3/4に比較して約1.6倍となっている。このため、被害ブロック数が同じであっても、被害率はこう配1:3/4の場合の1/1.6に小さくなる点にも注意が必要である。

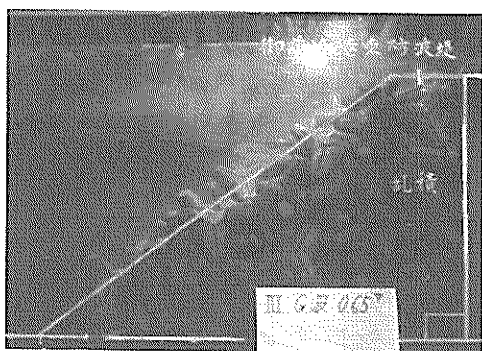


写真-5.9 Aブロック作用前側面写真
($h = 4.8 \text{ cm}$)

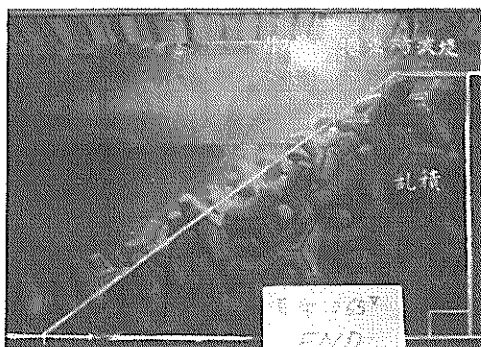


写真-5.11 Aブロック作用後側面写真
($h = 4.8 \text{ cm}$)



写真-5.10 Aブロック作用前正面写真
($h = 4.8 \text{ cm}$)

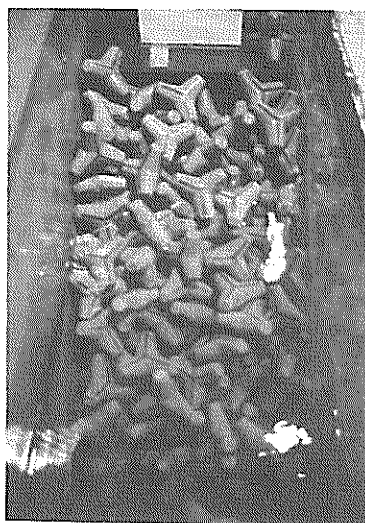


写真-5.12 Aブロック作用後正面写真
($h = 4.8 \text{ cm}$)

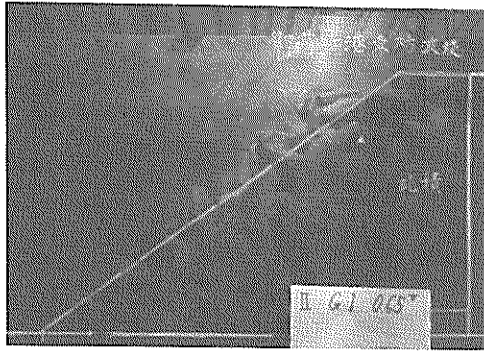


写真-5.13 Bブロック作用前側面写真
($h=48\text{ cm}$)

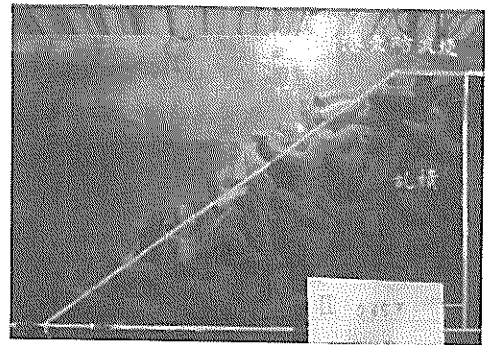


写真-5.15 Bブロック作用後側面写真
($h=48\text{ cm}$)

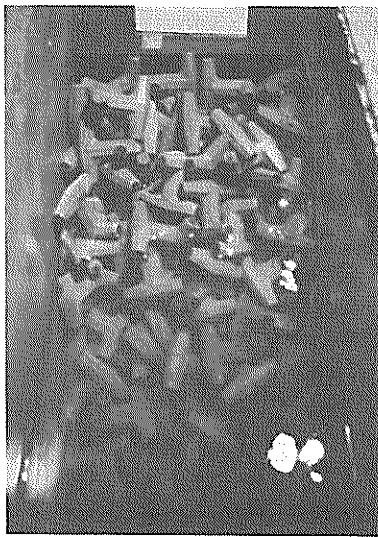


写真-5.14 Bブロック作用前正面写真
($h=48\text{ cm}$)

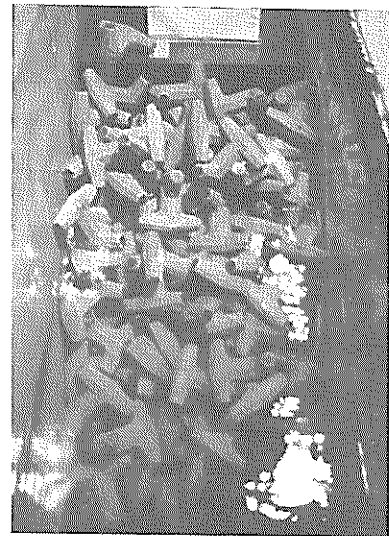


写真-5.16 Bブロック作用後正面写真
($h=48\text{ cm}$)

(4) 波高と被害率の関係

図-5.6 はAブロックについて有義波高と被害率の関係を示したものである。表-5.4, 5.9の結果をプロットしたもので、各有義波高の波群ごとに約1000波の作用による。2回の繰り返してばらつきが認められるが、 $h=42\text{ cm}$ の場合 $H_{1/3}=2.35\sim 2.48\text{ cm}$ で被害率0.6~1.2%程度である。 $h=48\text{ cm}$ の場合は、被害率0となる $H_{1/3}$ は推定で1.5~1.7 cm, $H_{1/3}=2.48\text{ cm}$ で被害率2.8~4.4%程度であり、 $h=42\text{ cm}$ に比較して被害率は高い。すなわち、同じ有義波高であっても水深により被害率は異なる。 $h=39\text{ cm}$ の

場合には被害率が0%であったから、本実験条件の範囲では水深が大きいほど被害率が高くなる傾向を示している。

図-5.2は表-5.5, 5.10から同様にBブロックについて示したものである。 $h=42\text{ cm}$ の場合、Aブロックよりややよい程度である。 $h=48\text{ cm}$ の場合には $H_{1/3}=2.59\text{ cm}$ でも被害率1.2%でAブロックより明らかに低い。結局、移動数が1~2個の初期の被害ではAブロックとBブロックに大差ないけれども、波高増大につれてAブロックの被害は進行するのに対し、Bブロックの場合にはそれほど進行しないといえる。

図-5.3はAブロックについてのりこう配1:2の

表-5.11 Aブロックの被害個数
($h=48\text{ cm}$, $\cot \alpha=2$)

1回目 $N=290$

| e (V) | $H_{1/3}$ (cm) | G 1 | G 2 | G 3 | G 4 | 小計 | 累計 | 被害率 (%) |
|------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|----|----|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | | |
| 0.40 | 18.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.48 | 22.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.55 | 24.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.60 | 25.0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0.69 |
| 0.65 | 25.9 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 | 4 | 1.38 |

2回目 $N=290$

| e (V) | $H_{1/3}$ (cm) | G 1 | G 2 | G 3 | G 4 | 小計 | 累計 | 被害率 (%) |
|------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|----|----|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 0 | | | |
| 0.40 | 18.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.48 | 22.1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0.34 |
| 0.55 | 24.0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 3 | 1.03 |
| 0.60 | 25.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1.03 |
| 0.65 | 25.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1.03 |

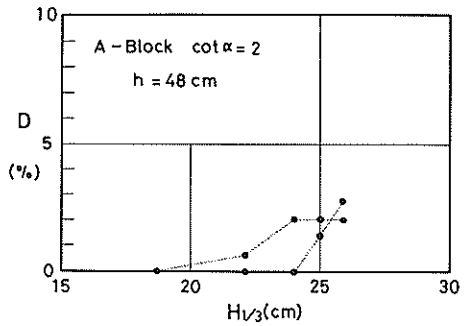


図-5.3 有義波高と被害率の関係
(Aブロック, $\cot \alpha=2$)

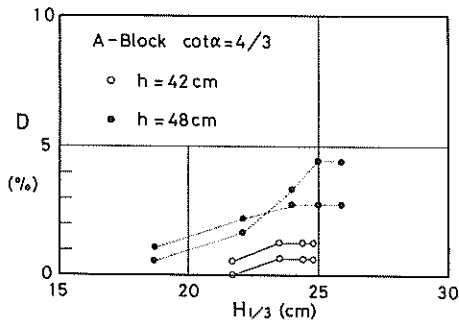


図-5.1 有義波高と被害率の関係
(Aブロック, $\cot \alpha=4/3$)

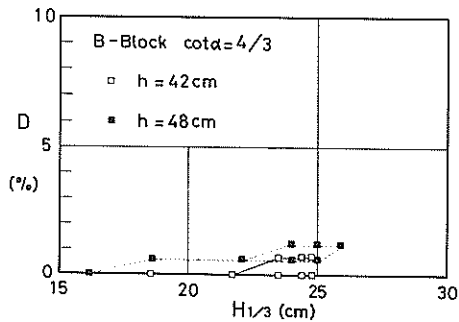


図-5.2 有義波高と被害率の関係
(Aブロック, $\cot \alpha=4/3$)

場合の有義波高と被害率の関係を示したものである。ただし、この図における被害率は表-5.11の値を2倍

にしてある。これは波の作用数を図-5.1, 5.2の場合と同じく約1000波としたため、被害率は作用波数に比例して増大すると仮定したものである。実際、たとえば表-5.9において同じ波を2回づつ繰り返して作用させた結果を示しているが、G1~G4波で1番目のシリーズ(表中1, 3, 5, 7の欄)の総被害個数と2番目のシリーズ(表中2, 4, 6, 8の欄)の総被害個数は同程度であり、ある程度妥当な仮定と考えることができる。結果は $H_{1/3} = 25.9\text{ cm}$ において被害率2.0~2.8%程度であり、特に $H_{1/3} = 24\text{ cm}$ 以下の条件において、図-5.1ののりこ配1:4/3と比較して被害率は小さくなっている。

なお、有義波高が同じであっても水深によって被害率が異なる主因は、最高波高と有義波高の比が水深が浅くなるにつれて小さくなることと考えられる。図-5.4, 5.5は図-5.1, 5.2に示した結果を、横軸に約1000波のうちの最高波高 H_{max} をとって書き換えたものである。結果はある程度同一傾向となる方向に向かう。さらに、砕波帯内の最高波高の測定結果は変動が著しいので、これを合田による算定図⁷⁾から推定した

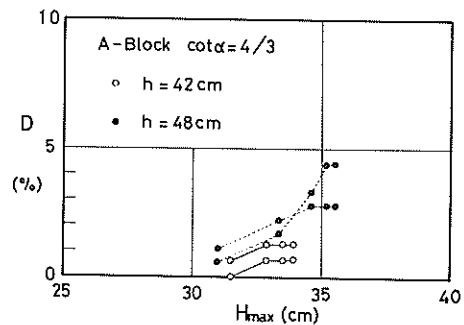


図-5.4 最高波高と被害率の関係
(Aブロック)

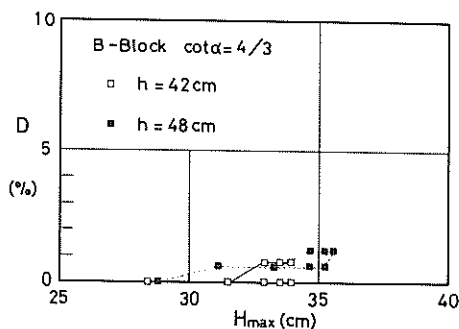


図-5.5 最高波高と被害率の関係 (Bブロック)

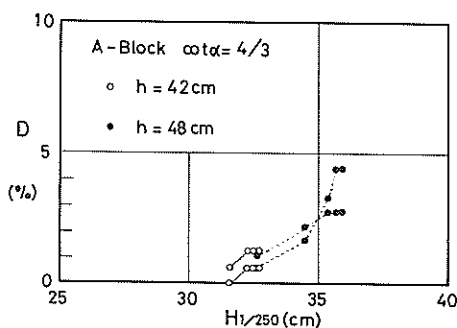


図-5.6 1/250最大波高と被害率の関係 (Aブロック)

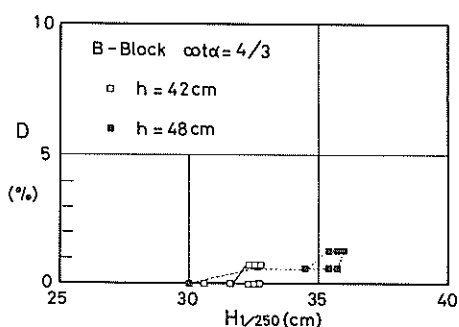


図-5.7 1/250最大波高と被害率の関係 (Bブロック)

$H_{1/250}$ を用いて書き換えると図-5.6, 5.7 のようになる。ここに、 $H_{1/250}$ は実測有義波高から換算沖波有義波高 H'_0 を逆算して、その H'_0 に対する実験水深での値として図より求めたもので、約 400 波の最高波高の平均値に相当する。結果は水深による違いがほとんど認められなくなっており、消波ブロックの安定性においても代表波高として最高波高を用いるのが簡明であることを示唆している。これについては今後さらに検討を進め

ていくことにしたい。

(5) K_D 値

以上、実験値のまま消波ブロックの安定実験結果を述べたが、AブロックとBブロックでは重量、単位体積重量等が異なる。そのため、一般に消波ブロックの所要重量算定の基本式として用いられている Hudson 公式における K_D 値を本実験結果から求めてみる。ただし、約 1000 波の作用による表-5.4, 5.5, 5.9, 5.10 の結果のみを対象とする。

Hudson 公式⁸⁾は周知のように次式で与えられる。

$$W = \frac{r_r H^3}{K_D (s_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (5.2)$$

ここに、

- W : 被覆材の所要重量
- r_r : 被覆材の単位体積重量
- s_r : 流体に対する被覆材の比重
- α : 斜面と水平面とのなす角度
- H : 波高
- K_D : 無次元係数

波高 H としては現行では有義波高 $H_{1/3}$ を適用することになっている。これを用いて実験結果から K_D 値を逆算し、被害率に対してプロットしたのが図-5.8, 5.9である。前者がAブロック、後者がBブロックに対する結果であり、相対水深 $h/L = 0.087$ は $h = 42$ cm, $h/L = 0.093$ は $h = 48$ cm の場合である。図中の実線、破線はそれぞれの条件における被害率と K_D 値の平均的関係を表わす。Aブロックの被害率 0% に対する K_D 値は $h = 42$ cm の場合 9.0, $h = 48$ cm の場合 4.0 程度で(2)の有義波高と被害率の関係のみたように水深により異なる。 $h = 48$ cm の場合の被害率 1% に対する K_D 値は 7.5 程度、2% に対して 11 程度である。

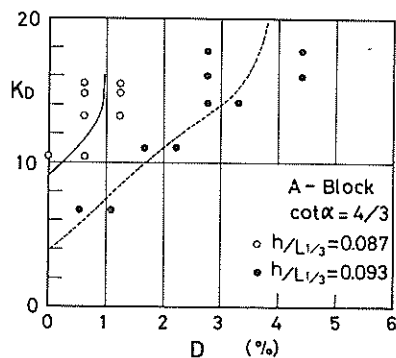


図-5.8 被害率と K_D 値の関係 (Aブロック)

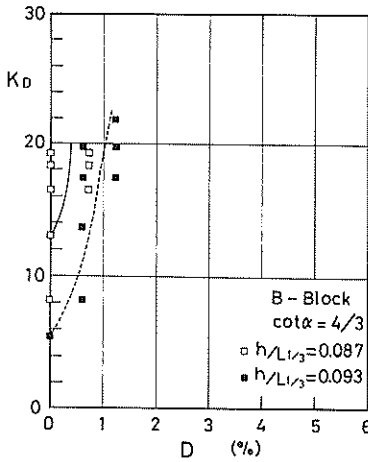


図-5.9 被害率と K_D 値の関係(Bブロック)

Bブロックの場合には被害率0%に対して、 $h=42$ cmの場合1.3、 $h=48$ cmの場合5.5程度であり、 $h=48$ cmの被害率1%に対しては2.0程度となる。

ただし、以上はブロック重量を一定として波高を変化させたときの被害率と K_D 値の関係であり、波高を一定としてブロックの重量を変化させるとこれと違った関係となるかもしれない。また、周期によっても変化するといわれている⁸⁾したがって、Hudson 公式における K_D 値は一つの値で与えられるならばそれは種々の条件を包含した代表値であり、個々の条件では相当程度変化するものであると考えるべきである。

6. 直立部の滑動波力実験

6.1 実験の方法

(1) 堤体模型

本実験は堤体設置位置での水深 h が39 cmと42 cmの2ケースについて実施した。図-6.1、6.2はそれぞれのケースの断面を示したものである。

消波ブロックはBブロックを主体とし、 $h=39$ cmのケースにおいて一部Aブロックを用いた実験を行っている。消波工の天端は直立部の天端と一致させ、天端幅はAブロックの2列並びに相当する15.8 cmを標準とし、 $h=42$ cmのケースにおいて、天端幅23.7 cmに広くした条件についても検討した。消波工の前のりこう配は1:4/3である。

マウンドは $h=39$ cmのケースにおいては捨石マウンドと固形マウンドの両方による実験を行い、 $h=42$ cmのケースにおいては固形マウンドのみとした。

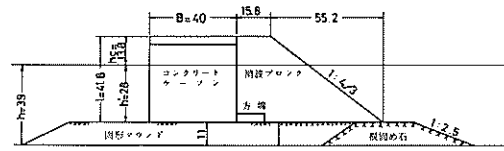


図-6.1 水深 $h=39$ cmの模型断面図 (単位: cm)

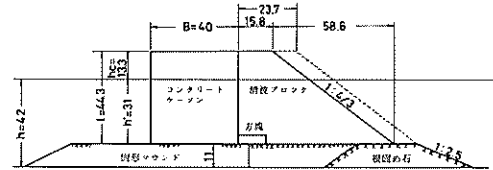


図-6.2 水深 $h=42$ cmの模型断面図 (単位: cm)

(2) 滑動波力の算定法

直立壁体に働く波力については以下の測定法がある。

- (i) 波圧計により局所的波圧を測定して、波圧分布を明らかにする方法
- (ii) 波力作用下での滑動量を測定して、滑動限界状態に対し滑動波力を逆算する方法
- (iii) ロードセルや分力計により壁体全体に働く波力を直接測定する方法

いずれも一長一短があり、実験の目的により適切な方法が採用される。今回の実験においては消波ブロックの圧力を含めた滑動に対する安定性を検討することに主眼を置き、(ii)の滑動実験の手法を用いることにした。

滑動実験において滑動限界状態を求める方法には次の二つがある。

- (i) 壁体重量を一定にしておいて、波高を種々に変化させたときの滑動量を測定し、滑動量が丁度0となる滑動限界波高を見出す方法
- (ii) 波の条件を一定にしておいて、壁体重量を種々に変化させたときの滑動限界重量を見出す方法

今回の実験ではこの両方を適用している。いずれの方法においても、滑動限界状態に対し、波力と摩擦抵抗との間に次の釣合式が成り立つと考える。

$$P_c = \mu (W_0 - U) \quad (6.1)$$

ここに、

P_c : 滑動限界水平波力(合力)

μ : 摩擦係数

W_0 : 直立壁体の静水中重量

U : P_c が作用しているときの揚圧力(合力)
 ただし、 W_0 は滑動限界重量を見出す場合には、滑動限界重 W_{0c} である。摩擦係数 μ の値は検定試験により求めることができる。したがって、式(6.1)において、 μ 、 W_0 は既知であるが、 U は未知であるから、もう一つの仮定が必要となる。これに対し、波圧分布は合田式において $\alpha_2 = 0$ としたときと相似と仮定し、揚圧力と水平波力の比が合田式によるものと等しいとおく。このとき、式(6.1)は式(6.2)のように書き換えられる¹⁰⁾。

$$P_c = \frac{\mu W_0}{1 + \mu U_c / P_c} \quad (6.2)$$

ここに、

U_c : 合田式において $\alpha_2 = 0$ としたときの揚圧力

P_c : 同上水平波力

したがって、滑動実験により滑動限界波高 H_c を求めれば、それに対し式(6.2)中の U_c / P_c を計算でき、 P_c を決定できる。滑動限界重量を見出す場合には H_c として不規則波群中の最高波高 H_{max} を用いる。

滑動限界波高 H_c を見出すとき、今回用いた手順は以下のとおりである。

1) 堤体を設置する以前の通過波高を直立壁予定位置よりやや沖側の測点No. 3, 4(図-2.1参照)で測定する。

2) 測定波形の所定期間に対し、ゼロアップクロス波の波高を求め、波高の超過出現率 P_{ex} (%)の図を作成する。このときNo. 3とNo. 4で同一期間に対し必ずしも波数は一致しないが、それぞれの波数を用いて同一図面にプロットし、両者の結果を平均化した線を引く(後掲図-6.3参照)。

3) 2)で作成した平均的関係を同一種の波(たとえばG1)の種々の入力電圧について、同一図面に写す(後掲図-6.4の点線)。これから、入力電圧と波高の大きさの関係および全体の傾向を考慮して、滑らかな曲線を描きこれを H と P_{ex} の関係として用いる。

4) 滑動実験により、波の解析を行ったときと同一の期間における滑動回数を測定して、式(6.3)により滑動出現率を求める。

$$P_s = \frac{n_s}{N} \times 100 \quad (6.3)$$

ここに、

P_s : 滑動の出現率(%)

n_s : 滑動回数

N : 作用波の総数、測点No. 3とNo. 4の波

数の平均値

5) 式(6.3)による P_s に等しい P_{ex} に対する波高を読み取って、滑動限界波高 H_c とする。

以上の手順によるわけであるが、これは造波板による再反射波の影響が無視できる場合のみ有効である。実際今回の実験の場合、測点No. 1, No. 2の分離入射波高は堤体の有無にかかわらずほとんど一致しており、造波板からの再反射波の影響は無視できる。これが無視できないときには、再反射の影響による入射波高の増大を考慮しなければならない。

なお、滑動量については壁体背面の水路幅方向の中心に変位計を取りつけ、ペン書きオシログラフに記録することにした。今回の実験に用いた変位計は差動トランス式変位計で、これをアクリルパイプカバーにより水密加工をしている。この変位計を用いて最大10cmの滑動量を連続して測定することができる。滑動量は自動平衡型ペン書きオシロに実寸相当の倍率で記録し、各波の作用による残留変位を読みとる。これが0.3mm程度であっても1回の滑動と見なすこととした。

(3) 波高の超過出現率

滑動限界波高を見出すために通過波の波高の超過出現率が必要であるので、これを示しておく。図-6.3

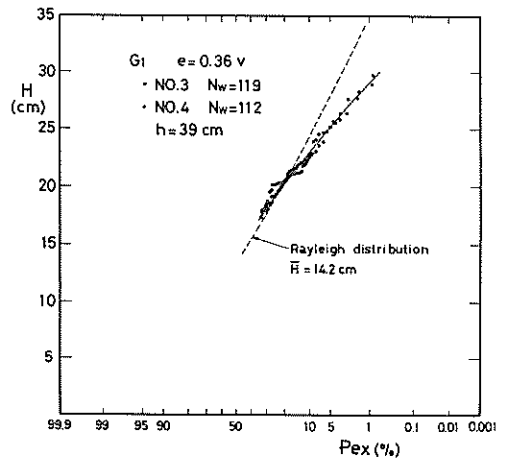


図-6.3 波高の超過出現率($h = 39$ cm, G1, $e = 0.36$ V)

は1例として $h = 39$ cmのケースにおけるG1波、 $e = 0.36$ Vの場合の超過出現率 P_{ex} を示している。この例の場合、同一解析時間における波数はNo. 3で119波、No. 4において122波と若干異なっている。それぞれの総波数に対し、大きい方から1/3程度の波高までの

超過出現率をプロットしたものである。図中破線は平均波高を一致させたときの Rayleigh 分布を参考に示したものである。

図-6.4~6.7に $h=39\text{ cm}$ の場合のG1~G4波について各入力電圧に対する波高の超過出現率をまとめて示している。図中点線はNo. 3, No. 4の結果の平均的關係をそのまま示したものであり、実線は入力電圧による変化の傾向を考慮してそれを滑らかにしたものである。点線と実線で相当程度異なるものもあるけれども、前述したように滑動実験のデータ整理では実線の関係を用いる。なお、図中の()内の数字はNo. 3とNo. 4の波数の平均である。

図-6.8および図-6.9~6.12は $h=42\text{ cm}$ のケースに対して同様な波高の超過出現率を示したものである。

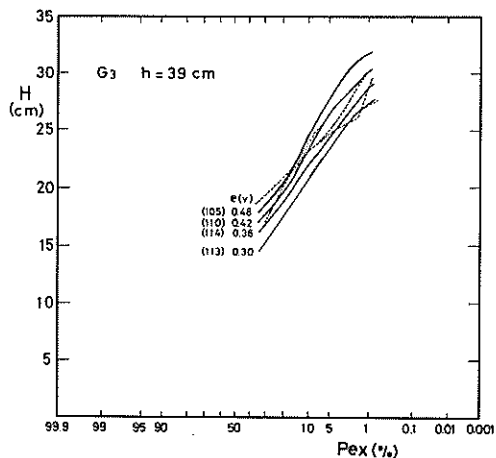


図-6.6 波高の超過出現率 ($h=39\text{ cm}$, G3)

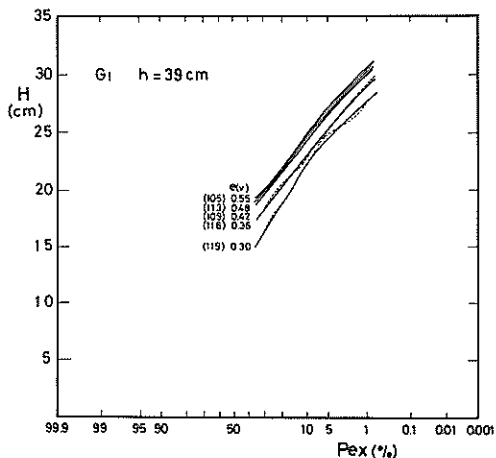


図-6.4 波高の超過出現率 ($h=39\text{ cm}$, G1)

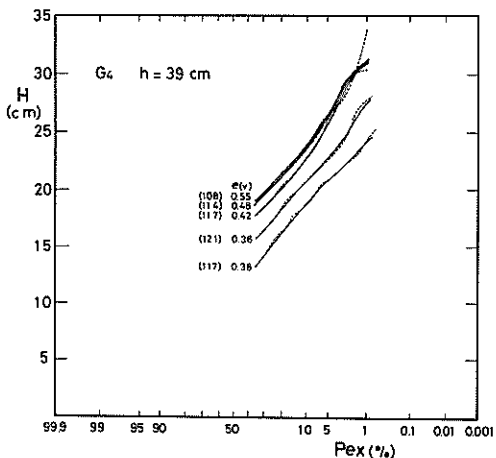


図-6.7 波高の超過出現率 ($h=39\text{ cm}$, G4)

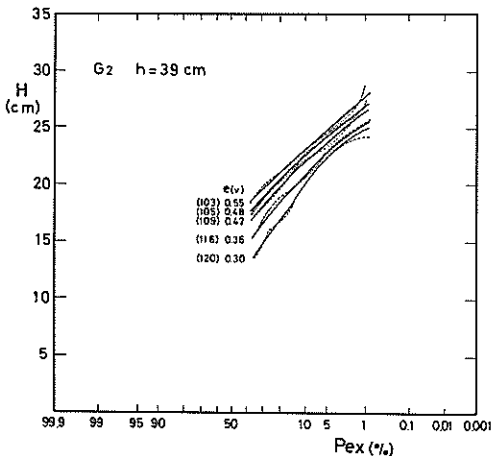


図-6.5 波高の超過出現率 ($h=39\text{ cm}$, G2)

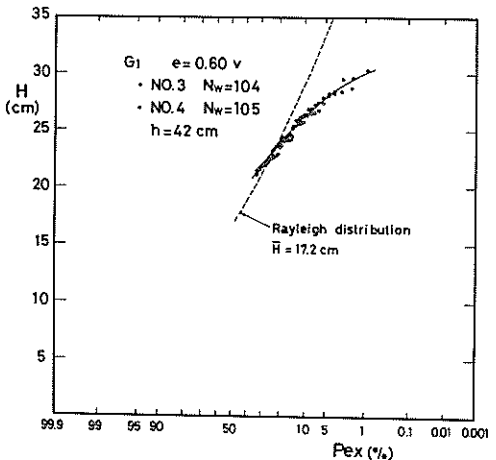


図-6.8 波高の超過出現率 ($h=42\text{ cm}$, G1, $e=0.60\text{ V}$)

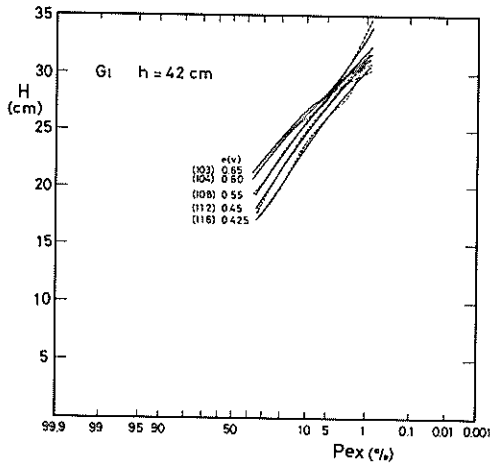


図-6.9 波高の超過出現率 ($h=42$ cm, G1)

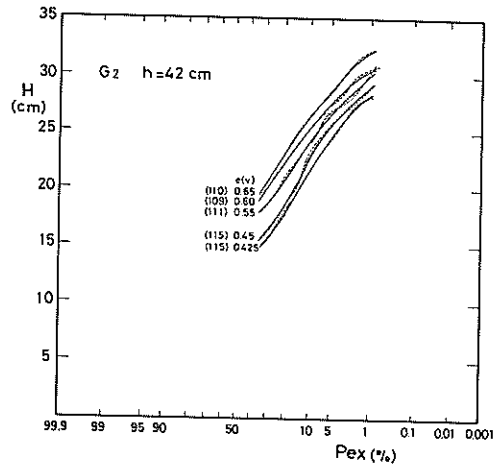


図-6.10 波高の超過出現率 ($h=42$ cm, G2)

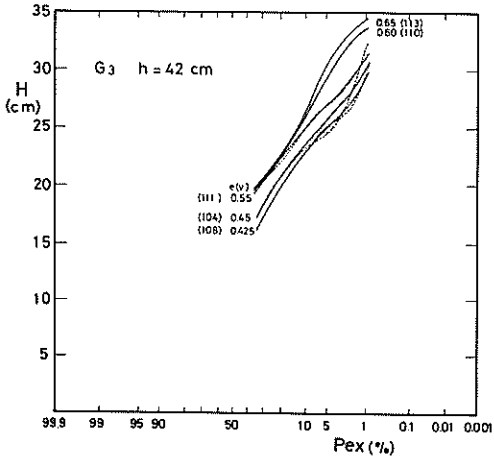


図-6.11 波高の超過出現率 ($h=42$ cm, G3)

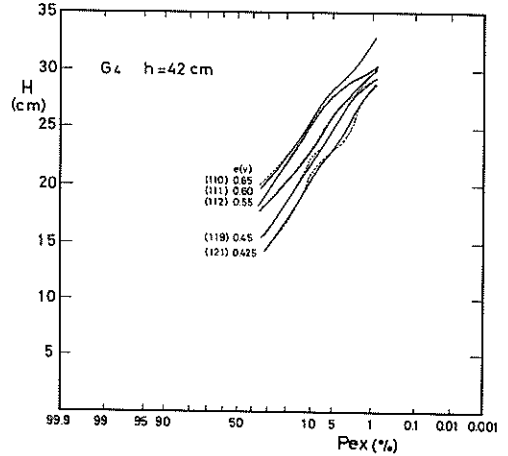


図-6.12 波高の超過出現率 ($h=42$ cm, G4)

(4) 摩擦係数の検定

摩擦係数の検定は、図-6.13に示すように直立壁体を実験時と同じマウンドの上に設置し、摩擦係数検定装置を用いて実施する。この検定装置は滑車を通したワイヤーロープを壁体にとりつけ、その鉛直方向端に重すい

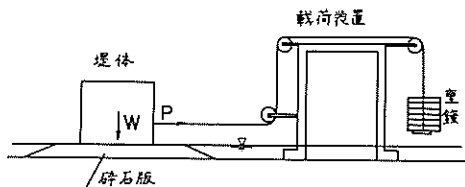


図-6.13 摩擦係数検定の方法

を載荷して、水平荷重を与えるものである。壁体の移動は変位計により記録するのが普通であるが、今回は目視観測によった。重すいは1 kgfごとを静かに載荷し、壁体が移動し始めたときの重量を滑動限界荷重とする。壁体の重量は8.8 kgfづつ5～6段階に変化させた。

捨石マウンド及び固形マウンドの検定結果を図-6.14に示す。これから、それぞれの摩擦係数を次のように決定した。

| | |
|-------------|------|
| 捨石マウンドの摩擦係数 | 0.60 |
| 固形マウンドの摩擦係数 | 0.65 |

6.2 実験結果

(1) 壁体重量と滑動量

まず、種々の有義波高の波群に対する壁体重量と滑動

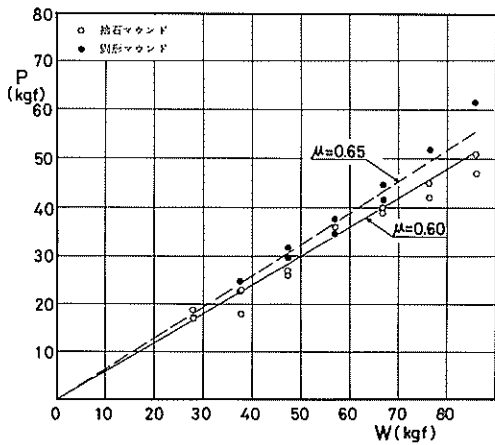


図-6.14 摩擦係数検定試験の結果

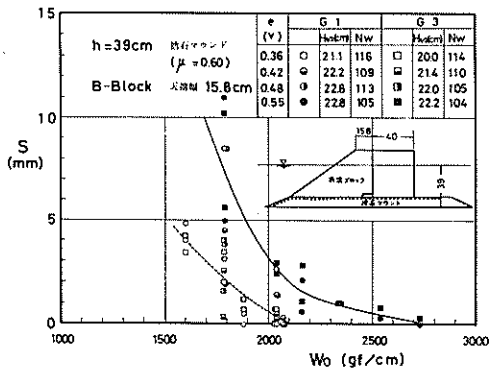


図-6.15 壁体重量 W_0 と滑動量($h=39$ cm)

量の関係のみをみる。

図-6.15は $h=39$ cm, Bブロック天端幅15.8 cm, 捨石マウンドの条件で行った壁体静水中重量 W_0 と滑動量 S の関係を示したものである。ここに、滑動量は各波群1回の作用による総滑動量であり、波数は図中表に示しているように104~116波である。波群の種類はG1とG3の2種のみによっており、2回繰り返し実験を行うのを原則としたが、一部1回のみケースもある。入力電圧 e は0.36 Vから0.55 Vまでの4種類であるが、これによる堤前での有義波高は2.00 cmから2.28 cmとあまり変化しない。これは2.2で述べたように砕波によって頭打ちとなる領域にあることによる。

図中実線は $e=0.55$ V, 点線は $e=0.36$ Vの波に対する平均的な関係を示したものである。 $e=0.36$ Vおよび0.55 Vに対する滑動限界重量は2200 gf/cm, 2800 gf/cm程度であり, G1, G3波の最高波高 H_{max} を31 cm, 32 cmとすると, \bar{P}/w_0

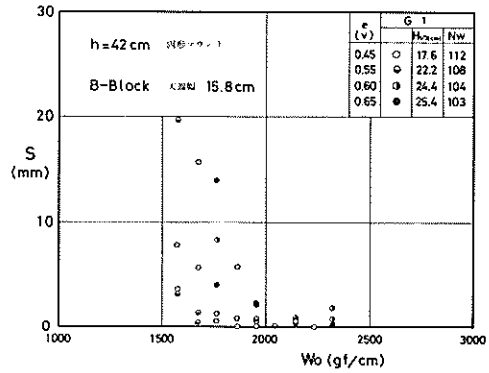


図-6.16 壁体重量と滑動量($h=42$ cm, G1)

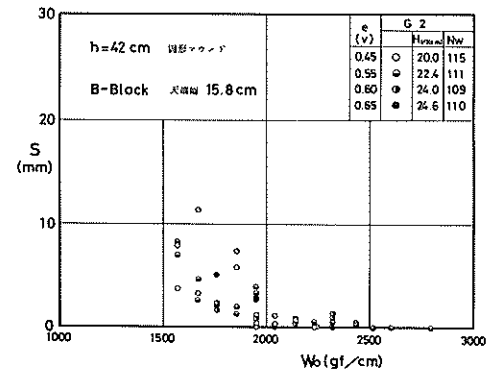


図-6.17 壁体重量と滑動量($h=42$ cm, G2)

H_{max} はそれぞれ0.79, 0.98となる。この違いは $e=0.36$ Vと0.55 Vで H_{max} に大差ないのにもかかわらず、滑動限界重量がかなり異なることによる。特に、 $h=39$ cmの場合2.2で述べたように、実験波が測点No.1, 2(水深5.1 cm)でたとえばG1波の $e=0.55$ Vのとき $H_{1/3}=3.22$ cm, $H_{max}=4.17$ cmと相当大きいのに対し、測点No.3, 4では $H_{1/3}=2.28$ cm, $H_{max}=3.0$ cmと著しく減衰している。実験結果の整理にはこの減衰した波高を用いるが、堤前波高として大差なくても波群の強さとして違いがあるのかもしれない。

図-6.16~6.19は $h=42$ cm, Bブロック天端幅15.8 cm, 固形マウンドの条件における壁体重量と滑動量の関係をG1~G4波ごとに示したものである。波数は波群によって103~115波である。滑動量はばらつきが著しく、波高を大きくしても小さくなったり、重量を大きくしても大きくなったりしている結果も認められる。

これをG1~G4の同一入力電圧による波群を一連の

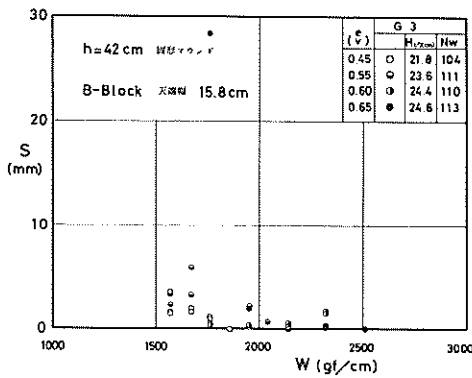


図-6.18 壁体重量と滑動量 ($h=42$ cm, G3)

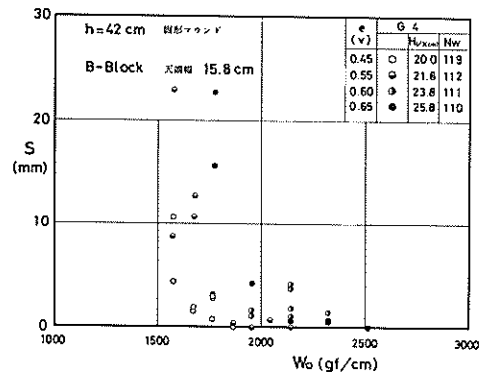


図-6.19 壁体重量と滑動量 ($h=42$ cm, G4)

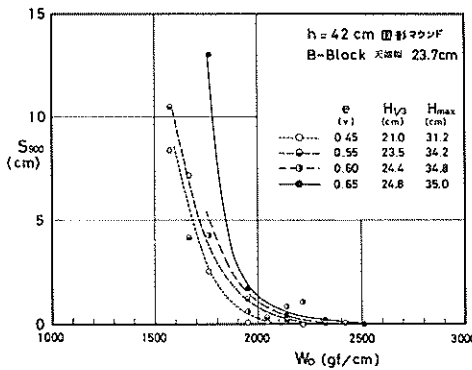


図-6.20 900波あたりの滑動量 ($h=42$ cm, 消波工天端幅1.58 cm)

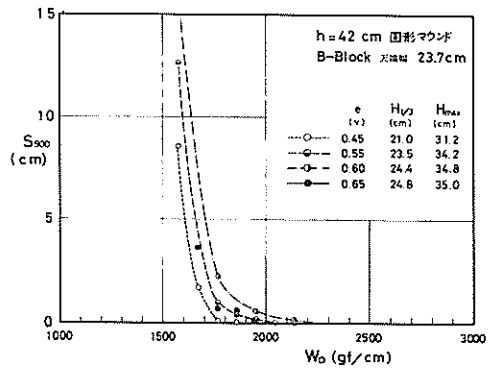


図-6.21 900波あたりの滑動量 ($h=42$ cm, 消波工天端幅2.37 cm)

波とみなし、各2回づつの繰り返しによる滑動量を総計して、約900波の作用による総滑動量 S_{900} で示すと図-6.20のようになる。図中の $H_{1/3}$ はG1~G4の有義波高を平均したものである。滑動量は若干入りまじっているが、かなりならされて傾向的となる。曲線はこの傾向から各有義波高の波群に対して滑動量の変化を表わしたものである。いずれも壁体重量の増加につれて滑動量は減少していくが、特に大きな波群に対して滑動量は容易に0とはならず横に長く伸びる傾向が認められる。これから滑動量が0となる滑動限界重量を求めると、たとえば有義波高2.48 cmの波群に対して2500 gf/cmとなる。ただし、固形マウンドを用いた摩擦係数0.65での結果であり、標準の0.6に対しては約2700 gf/cmに相当する。

図-6.21は同様にBブロック天端幅2.37 cmの場合の約900波の作用による滑動量の変化を示したものである。有義波高2.48 cmの波群に対して、滑動限界

重量は2300 gf/cmとなり、天端幅1.58 cmの条件に比較してやや小さくなる。

(2) 滑動限界波高

6.1の(2)において滑動実験の手法を述べたが、不規則波による滑動実験は伊藤ほか¹¹⁾の報告があるのみで、まだ一般的に行われているものではない。そのため、ここでは、波群によって滑動限界波高がどのように変化するか、また滑動限界波高を用いて求めた波力がどのように現われるかをみてみることにする。

図-6.22~6.25は $h=42$ cm, Bブロック天端幅1.58 cm, 固形マウンドの条件において求めた、4種の壁体重量 W_0 に対する滑動限界波高を示したものである。G1~G4の4種の波群を入力電圧を変えて、同一条件で各々2回づつ作用させるのを標準とし、各波群の有義波高を横軸にとっている。有義波周期は2.5 s程度ではば一定である。波力が波高だけで決まるならば、同一の堤体重量に対し、滑動限界波高は一定になるはず

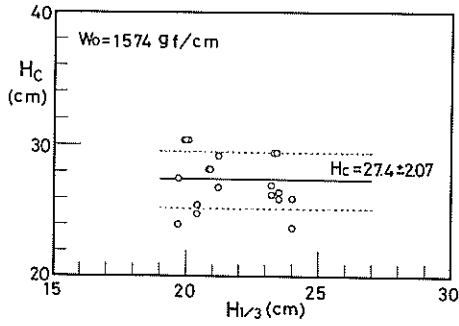


図-6.22 滑動限界波高 ($W_0 = 1574 \text{ gf/cm}$)

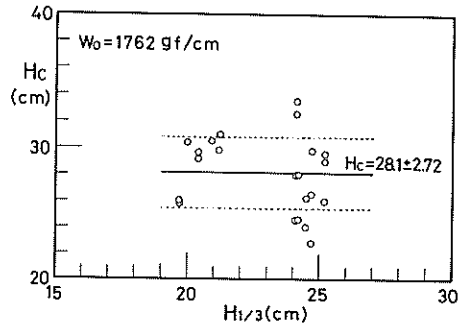


図-6.23 滑動限界波高 ($W_0 = 1762 \text{ gf/cm}$)

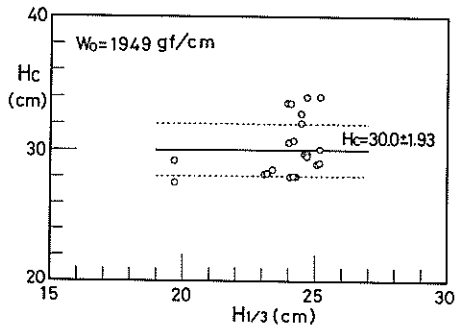


図-6.24 滑動限界波高 ($W_0 = 1949 \text{ gf/cm}$)

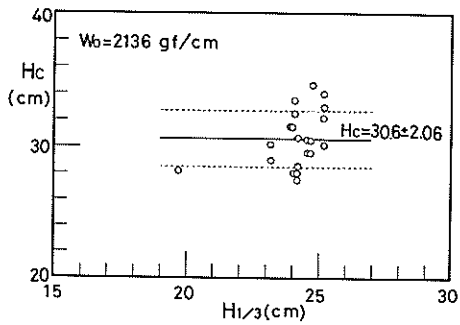


図-6.25 滑動限界波高 ($W_0 = 2136 \text{ gf/cm}$)

である。実際には、結果は実験の繰り返し、波群の種類によってばらついている。しかし、波群の規模すなわち有義波高の変化に対してはばらつくけれども、それほど傾向の変化は認められない。図中の実線は滑動限界波高の平均値、点線は標準偏差の範囲を示す。壁体重量の増大につれて平均滑動限界波高は大きくなっている。標準偏差は平均値の6~10%である。

図-6.26は $h = 4.2 \text{ cm}$, Bブロック天端幅 $1.5.8 \text{ cm}$ の他の結果も合わせて、壁体重量と平均滑動限界波高の関係を示したものである。図中数字はデータ数で、全ての重量に対し同一の波群のケースを試験したわけではなく、また滑動が生じなかったケースもあり、データ数

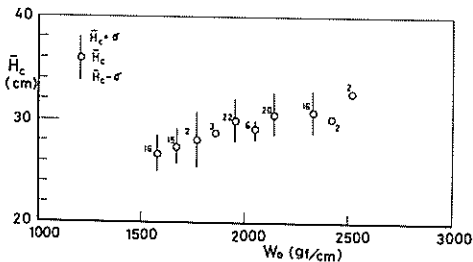


図-6.26 壁体重量と滑動限界波高 (図中の数字はデータ数)

は2~24と重量によって著しく異なる。壁体重量の増大につれて平均滑動限界波高は大きくなる傾向を示しているが、中には低下しているものもある。これはデータ数が少ないこともあって、実験のばらつきによるものと考えられる。

図-6.27は個々の波群による滑動限界波高から式(6.2)により波力を求めて、無次元平均波力強度 $\bar{p}/w_0 H$ のかたちで示したものである。横軸には滑動限界波高を水深で割った H/h をとっている。図中、実験データは直立壁体の重量によりクラス分けして記号を変えてプロットしてある。したがって、同一記号のデータはほぼ同じ壁体重量に対する種々の波群による結果を表わす。

滑動限界波力 P_c 、したがって平均波力強度 \bar{p} は実際には波の条件にかかわらず壁体重量によって決まると考えてよい。事実、 P_c において波の条件に係るのは式(6.2)からわかるように $1 + \mu U_c/P_c$ のかたちであり、これは波高が多少変わったとしてもほとんど同じ値をとる。したがって、図-6.27中において同一記号のデータで $\bar{p}/w_0 H$ の値が変化しているのは、先にみたように滑動限界波高がばらつくことによる。もし、どんな波群が作用しても滑動限界波高が同じであれば、図-6.27中の同一記号のデータは一点に集中する。

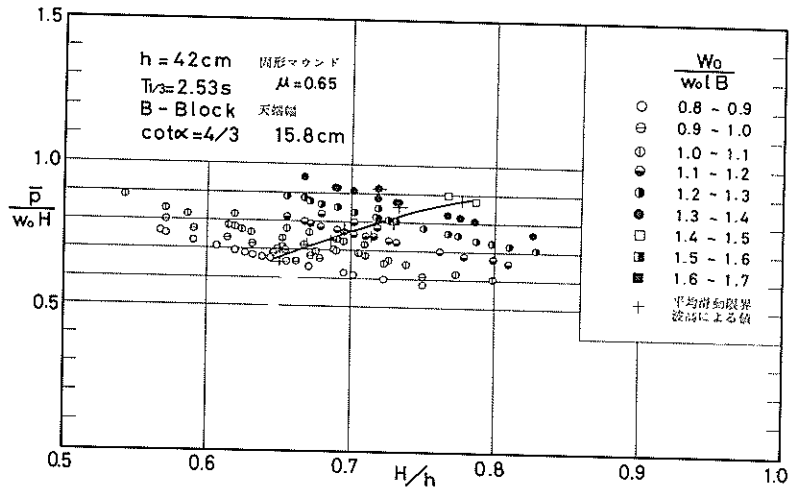


図-6.27 個々の滑動限界波高から求めた平均波力係数の例

実際には、滑動現象そのものがばらつきが大きいものであること、および不規則波群における個々の波高の周期がさまざまであるため、滑動を生じさせる波が波高のみによって決まらず、波群が異なれば違った滑動限界波高となることのため、広く分布してしまうわけである。

図-6.27中に、図-6.26で示した各壁体重量に対する平均滑動限界波高を用いて求めた \bar{p}/w_0H を合わせてプロットした。これは同一壁体重量に対する個々の滑動限界波高から求めた値のほぼ平均に対応しており、この平均的關係を波高と波力の関係として扱うのが妥当であろう。以後、平均滑動限界波高を単に滑動限界波高

と呼ぶ。

なお、滑動実験における問題点の一つは滑動の判定基準をどこにおくかということである。本実験においては変位計による記録から残留変位が認められるもの全てを1回の滑動と見なしている。この見方によっては滑動回数が変わり、結果も違ってくる。また、同一条件であっても実験の繰り返しによって、滑動回数は違ってくる。本実験では2回を標準としたが、結果が著しく異なる場合がある。現在、不規則波の滑動実験手法については、通常の混成堤を対象として実験を行いさらに検討中であるが、本報告はとりあえず今回の実験結果をとりまとめ

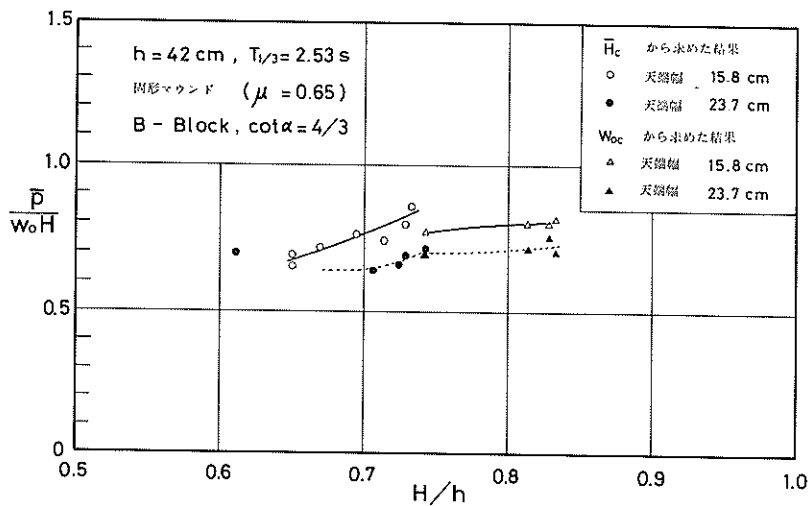


図-6.28 波高と波力の関係

たものである。

(3) 平均波力強度および波力てい減率

実験は $h = 39 \text{ cm}$ についても実施したが、実験データの多い $h = 42 \text{ cm}$ に対する結果のみを示す。

図-6.28 はBブロックの天端幅が 15.8 cm および 23.7 cm の場合の平均波力強度を無次元化して示したものである。(2)で述べた滑動限界波高から求めた値と(1)で述べた900波の作用に対する滑動限界重量から求めた値の両方をプロットしている。ただし、前者は平均滑動限界波高を求めるときのデータ数が5以上の場合に限っており、後者はG1~G4の最高波高を用いたものである。天端幅 15.8 cm の場合の滑動限界波高から求めた結果は H/h が $0.65 \sim 0.73$ の範囲で $\bar{p}/w_0 H$ は $0.65 \sim 0.85$ 程度であり、波高が大きくなるにつれて波力係数が増大する傾向を示している。滑動限界重量から求めた結果は H/h が $0.74 \sim 0.83$ の範囲で、 $\bar{p}/w_0 H$ は $0.77 \sim 0.82$ 程度とそれほど変化しない。

一方、天端幅 23.7 cm の場合の滑動限界波高から求めた結果は H/h が $0.61 \sim 0.74$ の範囲で、 $\bar{p}/w_0 H$ は $0.64 \sim 0.71$ 程度である。滑動限界重量からは H/h が $0.73 \sim 0.83$ に対し、 $\bar{p}/w_0 H$ が $0.69 \sim 0.75$ 程度であり、いずれも天端幅 15.8 cm の条件に比較して小さな滑動波力となる。

図-6.29 は実験による波力 P_E を計算による波力 P_C との比で示したものである。ここに、計算による波力は合田式において $\alpha_2 = 0$ として求めた波力であり、 P_E/P_C は消波ブロック被覆による波力のてい減率 λ に相当する。天端幅 15.8 cm の結果は $0.74 \sim 0.99$ の範囲にあり、天端幅 23.7 cm の場合には $0.73 \sim 0.86$ の

範囲となる。各種の規則波実験を調べた結果¹²⁾では H/h が 0.7 程度以上に対し、この値は $0.4 \sim 0.8$ に分布していたが、今回の不規則波による結果ではこれよりもやや大きくなった。規則波と不規則波の波力の違いによるものか、あるいは実験手法によるものか、さらにデータを集積していかなければならない。

7. まとめ

以上、消波ブロック被覆堤の不規則波による実験結果を実験値のまま述べた。本章においてはその主要な結果をまとめるが、量的に理解を容易にするため、模型縮尺を $1/40$ として現地量に換算して記述する。ただし、消波ブロックの重量についてはフルードの相似則ではAブロック 47.6 tf 、Bブロック 41.4 tf となる。ハドソン公式の関係を用いてかつブロックの現地単位体積重量を 2.3 tf/m^3 とすると、Aブロック 58.3 tf 、Bブロック 47.1 tf となるが、ここではこれらをそれぞれ 50 トン型Aブロック 、 40 トン型Bブロック と呼ぶ。また、水深は潮位を含めたものである。

(1) 反射実験は水深 $h = 15.6 \text{ m}$ で、有義波周期 $4.7 \sim 16 \text{ s}$ に対して実施した。有義波高は $1.7 \sim 9.9 \text{ m}$ の範囲で、周期により変化させている。消波工は 50 トン型Aブロック 天端2列並びで、のりこう配は $1:4/3$ である。この条件のもとで、反射率は周期によって変化し、 $h/L_{1/3}$ が 0.1 程度すなわち周期 12.6 s 程度では $0.3 \sim 0.5$ 程度であり、 $h/L_{1/3}$ が 0.14 程度以上すなわち周期が 10 s 程度以下では $0.2 \sim 0.3$ である。

(2) 伝達波に関する実験は水深 15.6 m 、 16.8 m 、

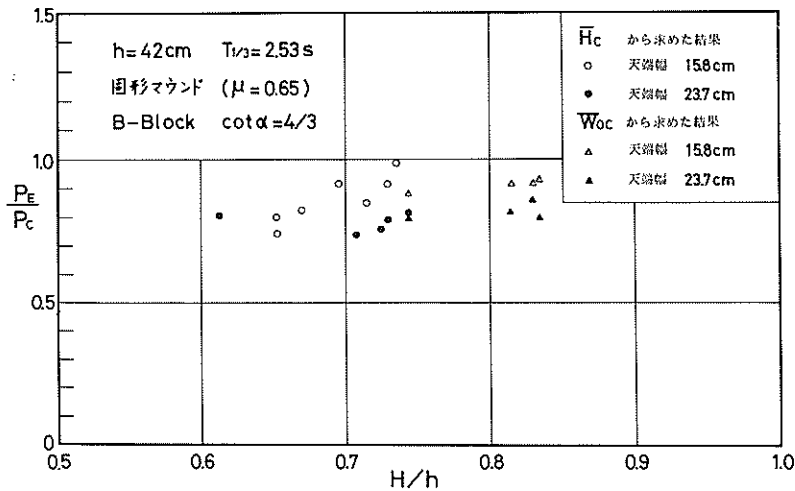


図-6.29 実験波力と計算波力の比

1.9.2 mの3種で、周期は1.6 sと一定とした。消波工は50トン型Aブロックで天端高は常に直立壁に一致させ、天端幅は2列並び相当の6.3 mのほか、 $h = 1.6.8$ mの条件では3列並び相当の1.0.1 mについても検討した。のりこう配は1:4/3である。天端高 h_c を2.9~1.1.5 m、入射波の有義波高 $H_{1/3}$ を6.2~1.0.7 mの範囲で変化させ、 $h_c/H_{1/3}$ の実験範囲は0.2.6~1.4.0である。伝達波の測定は直立部背面から4.0 m付近で行い、解析において周期約1分以上の長周期成分は数値フィルターによりカットした。本実験により次の点が指摘できる。

i) 伝達波の波高分布は入射波のものと著しく異なる。本実験の範囲における伝達波の各代表波高間の関係は次のとおりである。

$$H_{1 \max} / H_{1/3} = 1.8 \sim 5.2,$$

$$H_{1/10} / H_{1/3} = 1.4 \sim 1.8,$$

$$\bar{H}_1 / H_{1/3} = 0.5 \sim 0.6$$

特に、 $H_{1 \max} / H_{1/3}$ の値が大きく、かつ広く分布する。平均的には伝達率が小さくなるにつれて、 $H_{1 \max} / H_{1/3}$ は小さくなる傾向にある。

ii) 不規則波の伝達率を最高波、1/10最大波、有義波、および平均波の各代表波同志で検討した。それぞれの代表波高に対する相対天端高が同じであっても、各代表波の伝達率は異なる。特に、最高波の伝達率が高い。

iii) 有義波の伝達率と既往の規則波による結果と比較した。相対天端高が0.4程度以上で不規則波による伝達率がやや大きくなるが、違いはそれほど大きくない。消波工天端幅6.3 mのとき、 $h_c / H_{1/3} = 0.6$ に対して、 $H_{1/3} / H_{1/3}$ は0.1.7程度である。

iv) 消波工の天端幅を1.0.1 mとすると、 $h_c / H_{1/3} = 1.0$ 程度以下の範囲で伝達率がやや小さくなる。 $h_c / H_{1/3} = 0.6$ に対して、 $H_{1/3} / H_{1/3}$ は0.1.4程度である。

v) 伝達波の周期は入射波に比して短くなる。有義波周期、平均周期ともに、本実験の範囲では入射波の周期の0.5程度以下となった。 $h_c / H_{1/3} = 0.6$ に対して、 $T_{1/3} / T_{1/3}$ は0.3.8、 \bar{T}_1 / \bar{T}_1 は0.3.5程度で、波数は約3倍となる。

(3) 消波ブロックの安定性は伝達波実験と同じ水深、周期の条件で検討した。消波工は50トン型Aブロック、40トン型Bブロックの2種で、天端幅は6.3 mで一定としたが、のりこう配は1:4/3のほか、 $h = 1.9.2$ mにおいてAブロック1:2の実験も行っている。ブロック1個分程度以上移動したものを被害ブロックとし、

使用したブロックの総数で割って被害率を定義した。これについて主な結果は以下のとおりである。

i) ブロックの安定性は有義波高が同じであっても、水深によって異なる。 $h = 1.5.6$ m、のりこう配1:4/3の条件では、A、B両ブロックとも $H_{1/3} = 8.9$ mとしても被害率は0であった。

ii) $h = 1.6.8$ m、1.9.2 mと水深が大きくなるにつれてブロックの被害が生じる。 $h = 1.6.8$ mの条件における各代表波高の波群ごとに約1.0.0.0波の作用による被害率は、Aブロックの場合 $H_{1/3} = 9.4 \sim 9.9$ mで0.6~1.2%程度、Bブロックは0~0.7%程度である。

iii) $h = 1.9.2$ mにおいては、Aブロックの場合 $H_{1/3} = 9.9$ mで被害率は2.8~4.4%程度に増加する。しかし、Bブロックの場合は $H_{1/3} = 1.0.4$ mで1.2%程度と増加がゆるやかである。Aブロックについてののりこう配1:2としたとき、 $H_{1/3} = 1.0.4$ mに対して被害率2.0~2.8%程度となる。ただし、この場合の使用ブロックの総数はのりこう配1:4/3の場合の1.6倍である。

iv) ハドソン公式における K_D 値を求めてみたが、これも水深によって変化する。 $h = 1.9.2$ m、のりこう配1:4/3の条件で被害率1%に相当する K_D 値は、Aブロックの場合7.5程度、Bブロックの場合2.0程度であった。

v) A、B両ブロックを比較すると、被害の初期の段階では大差ないけれども、Aブロックが有義波高の増大につれて被害率が大きくなるのに対し、Bブロックはあまり被害が進行しないという特徴を有する。ただし、動揺は激しく、本実験ではブロック自身の強度の相似性は考慮していない。

vi) 最高波高と被害率の関係を調べてみたが、有義波高の場合より水深による変化が小さくなる。このことは、消波ブロックの安定性についても、代表波高として最高波高を用いた方が簡明であることを示唆しているものといえる。

(4) 直立部の滑動実験は $h = 1.5.6$ m、1.6.8 mの2種、波の周期1.6 sの1種について実施した。消波工は40トン型Bブロックを主体とし、のりこう配は1:4/3である。天端幅は6.3 mのほか、 $h = 1.6.8$ mにおいては9.5 mについても実験を行った。主たる結果は次のとおりである。

i) $h = 1.5.6$ mの条件において、 $H_{1/3} = 7.9$ m、 $H_{\max} = 1.2.4$ mの波群に対する滑動限界重量は3.5.2 t f/m程度であり、平均波力強度 \bar{p} を逆算すると0.7.9 $w_0 H_{\max}$ となる。 $H_{1/3} = 9.5$ m、 $H_{\max} = 1.2.8$ mの波群に対しては4.4.0 t f/mとなり、 $\bar{p} = 0.9.8 w_0 H_{\max}$

と大きくなる。ただし、後者は沖で波高をいくら大きくしても、 $h = 1.5.6$ m付近では碎波によってほとんど増大しない領域での結果であり、沖では相当に大きい波高のときの結果である。

ii) 不規則波実験により滑動回数と波高の出現率を対応させて求めた滑動限界波高は実験の繰り返し、波群の種類、規模などによってばらつく。 $h = 1.6.8$ mの条件での実験の場合、平均値に対する標準偏差は6~10%程度であった。しかし、有義波高の違いに対してはばらつくけれども、滑動限界波高の傾向的变化は認められなかった。

iii) $h = 1.6.8$ mの条件に対して、滑動限界波高および約900波の作用による滑動限界重量から滑動波力を逆算した。消波工の天端幅6.3mの場合、 $H/h = 0.65 \sim 0.82$ の範囲で $\bar{p}/w_0 H$ は0.65~0.85程度である。天端幅9.5mの場合には、 $H/h = 0.61 \sim 0.83$ に対して $\bar{p}/w_0 H$ は0.64~0.75とやや波力が減少する。

iv) この実験波力と合田式において $a_2 = 0$ とした計算波力との比、すなわち波力の減率は、天端幅6.3mの場合0.74~0.99、9.5mの場合0.73~0.86となる。既往の規則波による実験結果では、 H/h が0.7程度以上に対し0.4~0.8であったが、今回の実験結果ではこれより大きな値となった。

8. あとがき

防波堤の設計上の諸問題について、不規則波による模型実験で検討した例はまだ少ない。本資料は、第五港湾建設局の要請により、御前崎港東防波堤の模型実験を不規則波を用いて行ったのを機会に、消波ブロック被覆堤の反射、伝達波、消波ブロックの安定性、直立部の滑動波力の結果をとりまとめたものである。実験は昭和53年7月から11月にかけて実施した。検討項目が多岐にわたり、期間も限定されていたので、個々の項目について一般的結論を得たものではない。特に、消波ブロックの安定性、直立部に作用する波力については、さらに不規則波による実験手法を検討するとともに、広範囲の条件にわたって実験を積み重ねていかなければならない。

なお、本実験には昭和53年度港湾技術研究所研修員石川 卓氏(技研興業株式会社)が参加した。ここに記して同氏の熱心な御協力に対し謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 森平倫生・柿崎秀作・菊谷 徹：異形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6巻 第4号，1967，pp. 3~31
- 2) 鴻上雄三・時川和夫：施工段階における消波工の波圧減殺効果に関する実験的研究，北海道開発局土木試験報告，第53号，1970，pp. 81~95
- 3) 堀川清司・宮崎和行：混成堤直立部に作用する波力および揚圧力に関する実験的研究，第20回海岸工学講演会論文集，1973，pp. 271~277
- 4) 近藤徹郎・佐藤 功：防波堤の天端高に関する研究，北海道開発局土木試験所月報，第117号，1964，pp. 1~15
- 5) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治：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. 248，1976，24 p.
- 6) Goda, Y.: Numerical experiments on statistical variability of ocean waves, *Rept. Port and Harbour Res. Inst.*, Vol. 16, No. 2, 1977, pp. 3~26
- 7) 合田良実：浅海域における波浪の碎波変形，港湾技術研究所報告，第14巻 第3号，1975，pp. 59~106
- 8) Hudson, R. Y.: Laboratory investigation of rubble mound breakwater, *Proc. ASCE*, Vol. 85, WW3, 1959, pp. 93~121
- 9) たとえば，Final report of the International Commission for the Study of Waves, *P. I. A. N. C. Congress*, Annex to Bulletin No. 25, Vol. III, 1976, 27 p.
- 10) 谷本勝利・原中祐人・高橋重雄・小松和彦・轟 正彦・大里睦男：各種ケーソン式混成堤の反射・越波および波力特性に関する模型実験，港湾技研資料，No. 246，1976，38 p.
- 11) 伊藤喜行・藤島 睦・北谷高雄：防波堤の安定性に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol. 5, No. 14, 1966, 134 p.
- 12) 谷本勝利：混成防波堤に作用する波力について，昭和51年度港湾技術研究所講演会講演集，1976，pp. 1~26

付録A 反射率に関する実験データ

反射率に関する実験データを付表-A 1に示す。

付表-A 1 反射率に関する実験データ

$h = 39 \text{ cm}$, Aブロック天端幅15.8 cm, $\cot \alpha = 4/3$

| 合成波周期* (s) | | 分離入射波高* (cm) | | | 反射率 K_R | 波長**(cm) $L_{1/3}$ | $\frac{h}{L_{1/3}}$ |
|------------|-----------|--------------|-----------|-----------|--------------|-----------------------|---------------------|
| $T_{1/3}$ | \bar{T} | $H_{1/10}$ | $H_{1/3}$ | \bar{H} | | | |
| 0.76 | 0.73 | 5.72 | 4.39 | 2.76 | 0.235 | 89.4 | 0.436 |
| 0.72 | 0.71 | 5.64 | 4.37 | 2.79 | 0.215 | 80.6 | 0.484 |
| 0.80 | 0.78 | 7.93 | 6.15 | 3.80 | 0.236 | 98.5 | 0.396 |
| 0.80 | 0.78 | 7.04 | 5.86 | 3.73 | 0.205 | 98.5 | 0.396 |
| 0.88 | 0.87 | 9.34 | 6.32 | 3.83 | 0.291 | 117 | 0.333 |
| 0.86 | 0.80 | 7.52 | 5.81 | 3.55 | 0.206 | 113 | 0.347 |
| 0.93 | 0.89 | 9.89 | 7.76 | 4.86 | 0.182 | 129 | 0.302 |
| 1.05 | 0.99 | 10.2 | 7.74 | 4.63 | 0.161 | 157 | 0.248 |
| 1.04 | 0.94 | 10.9 | 7.40 | 4.57 | 0.259 | 155 | 0.251 |
| 1.02 | 1.05 | 20.3 | 14.7 | 8.83 | 0.155 | 150 | 0.259 |
| 1.08 | 1.05 | 13.7 | 11.3 | 7.66 | 0.154 | 164 | 0.237 |
| 1.28 | 1.15 | 9.2 | 6.93 | 4.52 | 0.225 | 210 | 0.185 |
| 1.27 | 1.15 | 11.1 | 7.84 | 5.09 | 0.239 | 208 | 0.187 |
| 1.32 | 1.23 | 19.1 | 14.1 | 9.15 | 0.226 | 219 | 0.178 |
| 1.30 | 1.26 | 16.9 | 13.3 | 8.70 | 0.206 | 215 | 0.182 |
| 1.49 | 1.21 | 13.0 | 9.78 | 6.03 | 0.273 | 257 | 0.152 |
| 1.44 | 1.23 | 11.9 | 9.86 | 6.08 | 0.266 | 246 | 0.159 |
| 1.50 | 1.32 | 18.8 | 15.0 | 9.38 | 0.248 | 246 | 0.159 |
| 1.59 | 1.36 | 24.1 | 17.6 | 10.4 | 0.266 | 279 | 0.140 |
| 1.99 | 1.62 | 18.9 | 15.3 | 8.77 | 0.406 | 363 | 0.107 |
| 1.98 | 1.63 | 17.8 | 13.9 | 8.66 | 0.345 | 361 | 0.108 |
| 2.00 | 1.69 | 29.5 | 23.4 | 13.7 | 0.349 | 365 | 0.107 |
| 2.08 | 1.74 | 28.1 | 22.4 | 14.1 | 0.320 | 382 | 0.102 |
| 1.96 | 1.67 | 22.8 | 16.8 | 10.0 | 0.325 | 357 | 0.109 |
| 2.09 | 1.64 | 23.3 | 17.4 | 10.3 | 0.320 | 384 | 0.102 |
| 2.02 | 1.73 | 31.7 | 24.7 | 15.6 | 0.313 | 370 | 0.106 |
| 2.03 | 1.72 | 30.2 | 24.1 | 15.2 | 0.338 | 372 | 0.105 |
| 2.52 | 1.95 | 23.2 | 16.8 | 9.97 | 0.523 | 472 | 0.0826 |
| 2.24 | 1.79 | 19.2 | 14.5 | 9.07 | 0.459 | 415 | 0.0939 |
| 2.56 | 1.99 | 30.0 | 23.0 | 14.4 | 0.392 | 481 | 0.0812 |
| 2.22 | 1.85 | 25.0 | 20.1 | 12.9 | 0.390 | 411 | 0.0949 |

* 水深51 cmでの値

** 水深39 cmでの値

付録B 伝達波に関する実験データ

伝達波に関する実験データを付表-B 1~B 16に示す。それぞれ以下の条件に対応する。

付表-B 1~B 3: $h = 39$ cm, Bブロック,

$B_b = 15.8$ cm

付表-B 4~B 7: $h = 42$ cm, Bブロック,

$B_b = 15.8$ cm

付表-B 8~B 11: $h = 48$ cm, Bブロック,

$B_b = 15.8$ cm

付表-B 12~B 15: $h = 42$ cm, Bブロック,

$B_b = 25.3$ cm

ここに, B_b は消波工天端幅であり, のりこう配はいずれも $1:4/3$ である。

付表-B 1 伝達波に関する実験データ(1)

$h = 39$ cm, Bブロック天端幅 15.8 cm, $h_c = 10.3$ cm

| e (V) | 波種 | $H_{i1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波周期 (s) | | | | $H_{i1/3}$ | | h_c | |
|----------|-----|--------------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | $H_{i\max}$ | $H_{i1/10}$ | $H_{i1/3}$ | \bar{H}_i | $T_{i\max}$ | $T_{i1/10}$ | $T_{i1/3}$ | \bar{T}_i | $H_{i1/3}$ | $H_{i1/3}$ | $H_{i1/3}$ | $H_{i1/3}$ |
| 0.30 | G 1 | 19.0 | 8.18 | 5.53 | 3.67 | 1.95 | 1.35 | 1.12 | 0.887 | 0.661 | 0.193 | 0.542 | | |
| | G 2 | 17.0 | 7.53 | 4.45 | 2.86 | 1.50 | 1.49 | 1.13 | 0.880 | 0.689 | 0.168 | 0.606 | | |
| | G 3 | 17.5 | 7.95 | 4.60 | 3.02 | 1.60 | 0.911 | 1.08 | 0.885 | 0.656 | 0.173 | 0.589 | | |
| | G 4 | 17.0 | 8.27 | 4.59 | 2.97 | 1.52 | 1.43 | 1.09 | 0.876 | 0.658 | 0.175 | 0.606 | | |
| 0.36 | G 1 | 21.1 | 8.38 | 6.29 | 4.15 | 2.28 | 1.09 | 1.11 | 0.909 | 0.698 | 0.197 | 0.488 | | |
| | G 2 | 18.4 | 8.84 | 5.46 | 3.58 | 1.85 | 1.33 | 1.07 | 0.881 | 0.670 | 0.195 | 0.560 | | |
| | G 3 | 20.0 | 9.05 | 6.16 | 4.11 | 2.19 | 0.779 | 1.05 | 0.877 | 0.688 | 0.206 | 0.515 | | |
| | G 4 | 19.8 | 7.89 | 5.64 | 3.71 | 1.94 | 1.02 | 1.05 | 0.881 | 0.677 | 0.187 | 0.520 | | |
| 0.42 | G 1 | 22.2 | 9.37 | 6.94 | 4.69 | 2.57 | 1.37 | 1.15 | 0.978 | 0.712 | 0.211 | 0.464 | | |
| | G 2 | 20.5 | 9.60 | 6.28 | 4.17 | 2.23 | 0.860 | 1.20 | 0.935 | 0.703 | 0.203 | 0.502 | | |
| | G 3 | 21.4 | 10.87 | 6.88 | 4.44 | 2.36 | 1.78 | 1.10 | 0.941 | 0.696 | 0.207 | 0.481 | | |
| | G 4 | 21.5 | 9.97 | 6.79 | 4.46 | 2.46 | 1.48 | 1.12 | 0.928 | 0.705 | 0.207 | 0.479 | | |

付表-B 2 伝達波に関する実験データ (2)

 $h = 39 \text{ cm}$, Bブロック天端幅 15.8 cm, $h_c = 13.8 \text{ cm}$

| σ (V) | 波種 | $H_{i1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波周期 (s) | | | | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
|-----------------|-----|--------------------|--------------|-------------|------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|-----------------------------|------------------------|
| | | | $H_{i \max}$ | $H_{i1/10}$ | $H_{i1/3}$ | \bar{H}_i | $T_{i \max}$ | $T_{i1/10}$ | $T_{i1/3}$ | \bar{T}_i | | |
| 0.30 | G 1 | 19.0 | 6.72 | 4.37 | 3.00 | 1.61 | 1.02 | 0.884 | 0.822 | 0.667 | 0.158 | 0.726 |
| | G 2 | 17.0 | 6.10 | 3.56 | 2.25 | 1.21 | 1.11 | 0.988 | 0.929 | 0.717 | 0.132 | 0.812 |
| | G 3 | 17.5 | 5.74 | 3.65 | 2.40 | 1.30 | 1.03 | 1.02 | 0.896 | 0.700 | 0.137 | 0.789 |
| | G 4 | 17.0 | 5.51 | 3.64 | 2.32 | 1.21 | 1.28 | 1.01 | 0.968 | 0.720 | 0.136 | 0.812 |
| 0.36 | G 1 | 21.1 | 6.44 | 4.77 | 3.27 | 1.75 | 0.859 | 0.972 | 0.859 | 0.664 | 0.155 | 0.654 |
| | G 2 | 18.4 | 6.47 | 4.25 | 2.82 | 1.49 | 0.933 | 1.02 | 0.877 | 0.666 | 0.153 | 0.750 |
| | G 3 | 20.0 | 7.16 | 4.59 | 3.29 | 1.78 | 1.30 | 1.04 | 0.814 | 0.657 | 0.165 | 0.690 |
| | G 4 | 19.8 | 7.16 | 4.41 | 3.03 | 1.59 | 1.26 | 0.926 | 0.810 | 0.652 | 0.153 | 0.697 |
| 0.42 | G 1 | 22.2 | 8.52 | 5.25 | 3.70 | 2.08 | 1.31 | 1.01 | 0.919 | 0.678 | 0.167 | 0.622 |
| | G 2 | 20.5 | 7.12 | 4.65 | 3.20 | 1.73 | 1.03 | 1.04 | 0.882 | 0.693 | 0.156 | 0.673 |
| | G 3 | 21.4 | 8.15 | 5.28 | 3.64 | 1.98 | 1.67 | 1.05 | 0.876 | 0.673 | 0.170 | 0.645 |
| | G 4 | 21.5 | 6.68 | 4.79 | 3.34 | 1.75 | 1.00 | 0.958 | 0.856 | 0.656 | 0.155 | 0.642 |
| 0.55 | G 1 | 22.8 | 7.33 | 5.02 | 3.66 | 2.06 | 1.03 | 1.10 | 0.920 | 0.671 | 0.161 | 0.605 |
| | G 2 | 21.5 | 6.97 | 4.85 | 3.48 | 1.99 | 1.36 | 1.11 | 0.898 | 0.669 | 0.162 | 0.642 |
| | G 3 | 22.3 | 8.65 | 5.68 | 4.00 | 2.26 | 1.29 | 1.05 | 0.957 | 0.701 | 0.179 | 0.619 |
| | G 4 | 22.0 | 9.24 | 5.25 | 3.64 | 2.03 | 1.43 | 1.02 | 0.906 | 0.668 | 0.165 | 0.627 |

付表-B 3 伝達波に関する実験データ (3)

 $h = 39 \text{ cm}$, Bブロック天端幅 15.8 cm, $h_c = 18.8 \text{ cm}$

| σ (V) | 波種 | $H_{i1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波の周期 (s) | | | | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
|-----------------|-----|--------------------|--------------|-------------|------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|-----------------------------|------------------------|
| | | | $H_{i \max}$ | $H_{i1/10}$ | $H_{i1/3}$ | \bar{H}_i | $T_{i \max}$ | $T_{i1/10}$ | $T_{i1/3}$ | \bar{T}_i | | |
| 0.30 | G 1 | 19.0 | 3.91 | 2.59 | 1.74 | 0.970 | 1.20 | 1.09 | 1.01 | 0.744 | 0.092 | 0.989 |
| | G 2 | 17.0 | 3.02 | 1.95 | 1.31 | 0.705 | 1.39 | 1.09 | 1.35 | 0.859 | 0.077 | 1.11 |
| | G 3 | 17.5 | 3.68 | 2.00 | 1.31 | 0.680 | 1.08 | 1.16 | 1.34 | 0.854 | 0.075 | 1.07 |
| | G 4 | 17.0 | 2.97 | 1.52 | 1.02 | 0.550 | 1.72 | 1.68 | 1.32 | 0.777 | 0.060 | 1.11 |
| 0.36 | G 1 | 21.1 | 3.90 | 2.84 | 1.98 | 1.10 | 1.02 | 1.09 | 0.979 | 0.716 | 0.094 | 0.891 |
| | G 2 | 18.4 | 3.95 | 2.34 | 1.54 | 0.850 | 1.46 | 1.23 | 1.17 | 0.770 | 0.084 | 1.02 |
| | G 3 | 20.0 | 4.15 | 2.50 | 1.72 | 0.980 | 1.21 | 1.05 | 1.01 | 0.746 | 0.086 | 0.940 |
| | G 4 | 19.8 | 4.90 | 2.62 | 1.75 | 0.955 | 1.20 | 1.00 | 0.997 | 0.733 | 0.088 | 0.949 |
| 0.42 | G 1 | 22.2 | 5.90 | 3.34 | 2.29 | 1.28 | 1.24 | 0.900 | 0.928 | 0.696 | 0.103 | 0.847 |
| | G 2 | 20.5 | 4.46 | 2.79 | 1.91 | 1.04 | 1.16 | 0.999 | 1.13 | 0.775 | 0.093 | 0.917 |
| | G 3 | 21.4 | 5.13 | 3.26 | 2.23 | 1.21 | 1.03 | 1.01 | 0.970 | 0.750 | 0.104 | 0.879 |
| | G 4 | 21.5 | 4.85 | 2.75 | 1.81 | 1.01 | 1.01 | 1.10 | 1.05 | 0.720 | 0.084 | 0.874 |
| 0.55 | G 1 | 22.8 | 5.55 | 3.40 | 2.42 | 1.35 | 0.873 | 0.918 | 0.999 | 0.745 | 0.106 | 0.825 |
| | G 2 | 21.5 | 3.86 | 2.81 | 2.02 | 1.18 | 2.05 | 1.17 | 1.13 | 0.779 | 0.094 | 0.874 |
| | G 3 | 22.3 | 5.33 | 3.29 | 2.33 | 1.30 | 0.918 | 0.928 | 0.915 | 0.720 | 0.104 | 0.843 |
| | G 4 | 22.0 | 6.25 | 3.05 | 2.08 | 1.13 | 1.01 | 1.13 | 1.05 | 0.744 | 0.095 | 0.855 |

付表-B 4 伝達波に関する実験データ (4)

 $h = 42 \text{ cm}$, Bブロック天端幅 1.58 cm , $h_c = 1.08 \text{ cm}$

| e (V) | 波種 | $H_{i1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波の周期 (s) | | | | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
|------------|-----|--------------------|--------------|-------------|------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|-----------------------------|------------------------|
| | | | $H_{i \max}$ | $H_{i1/10}$ | $H_{i1/3}$ | \bar{H}_i | $T_{i \max}$ | $T_{i1/10}$ | $T_{i1/3}$ | \bar{T}_i | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
| 0.35 | G 1 | 16.8 | 9.66 | 4.89 | 3.03 | 1.70 | 1.91 | 1.38 | 1.06 | 0.725 | 0.180 | 0.643 |
| | G 2 | 15.5 | 11.3 | 4.81 | 2.97 | 1.67 | 1.01 | 1.19 | 1.03 | 0.739 | 0.192 | 0.697 |
| | G 3 | 17.2 | 8.95 | 4.78 | 3.04 | 1.70 | 1.57 | 1.11 | 1.02 | 0.724 | 0.177 | 0.628 |
| | G 4 | 16.3 | 8.80 | 5.61 | 3.51 | 1.95 | 1.42 | 1.45 | 1.23 | 0.846 | 0.215 | 0.663 |
| 0.425 | G 1 | 20.0 | | | | | | | | | | 0.540 |
| | G 2 | 18.6 | 10.2 | 6.33 | 3.81 | 2.02 | 0.659 | 1.25 | 1.11 | 0.770 | 0.205 | 0.581 |
| | G 3 | 20.0 | 10.3 | 6.01 | 3.83 | 2.06 | 1.73 | 1.18 | 1.05 | 0.751 | 0.192 | 0.540 |
| | G 4 | 19.4 | 10.0 | 6.81 | 4.22 | 2.29 | 0.654 | 1.37 | 1.18 | 0.832 | 0.218 | 0.557 |
| 0.45 | G 1 | 21.3 | 11.4 | 7.37 | 4.36 | 2.23 | 2.09 | 1.18 | 1.12 | 0.771 | 0.205 | 0.507 |
| | G 2 | 19.7 | 11.8 | 5.98 | 3.68 | 2.04 | 1.70 | 1.35 | 1.10 | 0.801 | 0.187 | 0.548 |
| | G 3 | 20.9 | 8.99 | 6.06 | 3.92 | 2.08 | 1.56 | 1.13 | 1.02 | 0.750 | 0.187 | 0.517 |
| | G 4 | 20.4 | 10.1 | 7.03 | 4.57 | 2.49 | 1.71 | 1.37 | 1.16 | 0.824 | 0.224 | 0.529 |
| 0.55 | G 1 | 24.0 | 11.2 | 8.17 | 5.16 | 2.63 | 2.26 | 1.41 | 1.14 | 0.770 | 0.215 | 0.450 |
| | G 2 | 23.2 | 10.2 | 6.32 | 4.16 | 2.23 | 1.63 | 1.27 | 1.13 | 0.762 | 0.180 | 0.466 |
| | G 3 | 23.4 | 11.0 | 7.47 | 4.70 | 2.52 | 0.898 | 1.15 | 1.09 | 0.799 | 0.201 | 0.462 |
| | G 4 | 23.5 | 11.0 | 7.59 | 5.06 | 2.74 | 1.73 | 1.44 | 1.20 | 0.829 | 0.215 | 0.460 |

付表-B 5 伝達波に関する実験データ (5)

 $h = 42 \text{ cm}$, Bブロック天端幅 1.58 cm , $h_c = 1.58 \text{ cm}$

| e (V) | 波種 | $H_{i1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波の周期 (s) | | | | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
|------------|-----|--------------------|--------------|-------------|------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|-----------------------------|------------------------|
| | | | $H_{i \max}$ | $H_{i1/10}$ | $H_{i1/3}$ | \bar{H}_i | $T_{i \max}$ | $T_{i1/10}$ | $T_{i1/3}$ | \bar{T}_i | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
| 0.35 | G 1 | 16.8 | 6.65 | 2.47 | 1.47 | 0.750 | 1.27 | 0.814 | 0.732 | 0.577 | 0.0875 | 0.940 |
| | G 2 | 15.5 | 7.45 | 2.49 | 1.44 | 0.750 | 0.988 | 0.815 | 0.758 | 0.596 | 0.0930 | 1.02 |
| | G 3 | 17.2 | 7.25 | 2.32 | 1.42 | 0.745 | 0.798 | 0.890 | 0.778 | 0.585 | 0.0825 | 0.919 |
| | G 4 | 16.3 | 7.50 | 2.61 | 1.67 | 0.935 | 0.811 | 1.03 | 0.803 | 0.654 | 0.102 | 0.969 |
| 0.425 | G 1 | 20.0 | 6.80 | 3.54 | 2.17 | 1.15 | 1.20 | 0.845 | 0.726 | 0.583 | 0.109 | 0.790 |
| | G 2 | 18.6 | 8.80 | 3.02 | 1.81 | 1.02 | 0.787 | 0.953 | 0.776 | 0.617 | 0.0975 | 0.849 |
| | G 3 | 20.0 | 6.00 | 3.06 | 2.03 | 1.10 | 0.725 | 0.921 | 0.735 | 0.575 | 0.102 | 0.790 |
| | G 4 | 19.4 | 6.70 | 3.62 | 2.35 | 1.35 | 0.851 | 0.903 | 0.758 | 0.630 | 0.121 | 0.814 |
| 0.45 | G 1 | 21.3 | 7.65 | 3.82 | 2.24 | 1.19 | 1.43 | 0.934 | 0.775 | 0.607 | 0.105 | 0.742 |
| | G 2 | 19.7 | 7.60 | 3.31 | 2.01 | 1.12 | 1.19 | 0.924 | 0.823 | 0.617 | 0.102 | 0.802 |
| | G 3 | 20.9 | 7.65 | 3.71 | 2.35 | 1.30 | 1.38 | 0.948 | 0.737 | 0.604 | 0.112 | 0.756 |
| | G 4 | 20.4 | 6.95 | 4.27 | 2.78 | 1.51 | 1.17 | 0.948 | 0.765 | 0.646 | 0.136 | 0.775 |
| 0.55 | G 1 | 24.0 | 8.65 | 4.80 | 3.03 | 1.62 | 1.57 | 0.970 | 0.805 | 0.606 | 0.127 | 0.658 |
| | G 2 | 23.2 | 7.85 | 3.90 | 2.40 | 1.30 | 1.07 | 0.997 | 0.833 | 0.638 | 0.103 | 0.681 |
| | G 3 | 23.4 | 7.45 | 4.30 | 2.73 | 1.47 | 1.22 | 1.02 | 0.804 | 0.614 | 0.117 | 0.675 |
| | G 4 | 23.5 | 9.20 | 5.05 | 3.25 | 1.84 | 1.12 | 0.966 | 0.816 | 0.623 | 0.138 | 0.672 |

付表-B 6 伝達波に関する実験データ(6)

 $h = 42 \text{ cm}$, Bブロック天端幅15.8cm, $h_c = 20.8 \text{ cm}$

| e (V) | 波種 | $H_{1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波の周期 (s) | | | | $\frac{H_{1/3}}{H_{1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{1/3}}$ |
|------------|-----|-------------------|--------------|------------|-----------|-------------|--------------|------------|-----------|-------------|---------------------------|-----------------------|
| | | | $H_{I \max}$ | $H_{1/10}$ | $H_{1/3}$ | \bar{H}_I | $T_{I \max}$ | $T_{1/10}$ | $T_{1/3}$ | \bar{T}_I | | |
| 0.65 | G 1 | 25.2 | 7.11 | 3.55 | 2.39 | 1.36 | 0.882 | 0.859 | 0.754 | 0.598 | 0.0950 | 0.825 |
| | G 2 | 25.2 | 5.90 | 3.21 | 2.00 | 1.08 | 1.28 | 0.948 | 0.808 | 0.621 | 0.0790 | 0.825 |
| | G 3 | 24.5 | 5.48 | 3.51 | 2.40 | 1.35 | 1.36 | 0.843 | 0.753 | 0.603 | 0.0980 | 0.849 |
| | G 4 | 24.2 | 6.76 | 3.54 | 2.45 | 1.44 | 0.714 | 0.742 | 0.727 | 0.607 | 0.101 | 0.860 |

付表-B 7 伝達波に関する実験データ(7)

 $h = 42 \text{ cm}$, Bブロック天端幅15.8cm, $h_c = 25.8 \text{ cm}$

| e (V) | 波種 | $H_{1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波の周期 (s) | | | | $\frac{H_{1/3}}{H_{1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{1/3}}$ |
|------------|-----|-------------------|--------------|------------|-----------|-------------|--------------|------------|-----------|-------------|---------------------------|-----------------------|
| | | | $H_{I \max}$ | $H_{1/10}$ | $H_{1/3}$ | \bar{H}_I | $T_{I \max}$ | $T_{1/10}$ | $T_{1/3}$ | \bar{T}_I | | |
| 0.45 | G 1 | 21.3 | 3.66 | 1.82 | 1.22 | 0.655 | 1.09 | 1.06 | 1.04 | 0.731 | 0.0575 | 1.21 |
| | G 2 | 19.7 | 4.71 | 2.21 | 1.31 | 0.690 | 0.836 | 1.00 | 1.06 | 0.749 | 0.0665 | 1.31 |
| | G 3 | 20.9 | 3.45 | 1.67 | 1.15 | 0.650 | 0.796 | 0.885 | 0.945 | 0.725 | 0.0550 | 1.23 |
| | G 4 | 20.4 | 6.82 | 2.35 | 1.50 | 0.820 | 1.26 | 0.928 | 1.09 | 0.795 | 0.0735 | 1.26 |
| 0.55 | G 1 | 24.0 | 4.56 | 2.81 | 1.83 | 1.05 | 1.05 | 0.852 | 0.802 | 0.680 | 0.0755 | 1.08 |
| | G 2 | 23.2 | 4.17 | 2.17 | 1.37 | 0.745 | 1.07 | 0.989 | 1.04 | 0.758 | 0.0590 | 1.11 |
| | G 3 | 23.4 | 3.44 | 2.16 | 1.53 | 0.900 | 0.988 | 0.736 | 0.802 | 0.663 | 0.0655 | 1.10 |
| | G 4 | 23.5 | 5.55 | 2.48 | 1.62 | 0.965 | 1.16 | 0.941 | 0.973 | 0.766 | 0.0690 | 1.10 |
| 0.60 | G 1 | 24.7 | 5.51 | 2.55 | 1.68 | 0.985 | 0.746 | 1.03 | 0.864 | 0.691 | 0.0680 | 1.04 |
| | G 2 | 24.7 | 3.73 | 2.07 | 1.35 | 0.745 | 0.744 | 1.14 | 1.08 | 0.763 | 0.0545 | 1.04 |
| | G 3 | 24.1 | 4.63 | 2.38 | 1.65 | 0.970 | 1.09 | 0.881 | 0.771 | 0.628 | 0.0685 | 1.07 |
| | G 4 | 24.2 | 5.08 | 2.56 | 1.64 | 0.930 | 0.923 | 0.890 | 0.965 | 0.725 | 0.0675 | 1.07 |
| 0.65 | G 1 | 25.2 | 5.04 | 2.60 | 1.75 | 1.02 | 1.22 | 0.981 | 0.851 | 0.686 | 0.0695 | 1.02 |
| | G 2 | 25.2 | 4.26 | 2.34 | 1.55 | 0.815 | 0.744 | 1.12 | 0.994 | 0.740 | 0.0615 | 1.02 |
| | G 3 | 24.5 | 4.38 | 2.47 | 1.70 | 0.970 | 0.860 | 0.859 | 0.814 | 0.664 | 0.0695 | 1.05 |
| | G 4 | 24.2 | 4.69 | 2.36 | 1.59 | 0.935 | 1.34 | 0.969 | 0.951 | 0.723 | 0.0655 | 1.07 |

付表-B 8 伝達波に関する実験データ(8)

 $h = 48 \text{ cm}$, Bブロック天端幅15.8cm, $h_c = 4.8 \text{ cm}$

| e (V) | 波種 | $H_{1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波の周期 (s) | | | | $\frac{H_{1/3}}{H_{1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{1/3}}$ |
|------------|-----|-------------------|--------------|------------|-----------|-------------|--------------|------------|-----------|-------------|---------------------------|-----------------------|
| | | | $H_{I \max}$ | $H_{1/10}$ | $H_{1/3}$ | \bar{H}_I | $T_{I \max}$ | $T_{1/10}$ | $T_{1/3}$ | \bar{T}_I | | |
| 0.40 | G 1 | 18.6 | 13.7 | 7.87 | 4.55 | 2.34 | 2.31 | 1.48 | 1.11 | 0.749 | 0.245 | 0.258 |
| | G 2 | 18.6 | 11.7 | 6.55 | 4.02 | 2.08 | 1.76 | 1.27 | 1.08 | 0.723 | 0.216 | 0.258 |
| | G 3 | 18.8 | 10.1 | 6.65 | 4.10 | 2.17 | 0.770 | 1.21 | 1.05 | 0.750 | 0.218 | 0.255 |
| | G 4 | 18.8 | 10.6 | 7.55 | 4.57 | 2.33 | 1.32 | 1.48 | 1.18 | 0.769 | 0.243 | 0.255 |
| 0.45 | G 1 | 21.5 | 13.3 | 8.68 | 5.07 | 2.62 | 1.72 | 1.39 | 1.09 | 0.741 | 0.236 | 0.223 |
| | G 2 | 20.5 | 10.8 | 7.24 | 4.30 | 2.24 | 2.19 | 1.25 | 1.05 | 0.712 | 0.210 | 0.234 |
| | G 3 | 20.5 | 11.1 | 7.14 | 4.38 | 2.24 | 0.823 | 1.17 | 1.07 | 0.742 | 0.214 | 0.234 |
| | G 4 | 21.0 | 11.5 | 8.18 | 5.20 | 2.70 | 2.39 | 1.49 | 1.16 | 0.815 | 0.248 | 0.229 |
| 0.55 | G 1 | 25.0 | 15.2 | 10.2 | 6.49 | 3.18 | 1.80 | 1.67 | 1.37 | 0.902 | 0.260 | 0.192 |
| | G 2 | 22.8 | 12.1 | 8.32 | 5.20 | 2.57 | 1.97 | 1.44 | 1.24 | 0.775 | 0.228 | 0.211 |
| | G 3 | 23.8 | 11.7 | 8.50 | 5.27 | 2.65 | 1.25 | 1.44 | 1.18 | 0.813 | 0.221 | 0.202 |
| | G 4 | 24.2 | 11.1 | 9.30 | 6.13 | 3.01 | 1.77 | 1.63 | 1.30 | 0.859 | 0.253 | 0.198 |

付表-B9 伝達波に関する実験データ(9)

 $h=48\text{ cm}$, Bブロック天端幅15.8cm, $h_c=98\text{ cm}$

| e (V) | 波種 | $H_{i1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波の周期 (s) | | | | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
|------------|----|--------------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-----------------------------|------------------------|
| | | | $H_{i\max}$ | $H_{i1/10}$ | $H_{i1/3}$ | \bar{H}_i | $T_{i\max}$ | $T_{i1/10}$ | $T_{i1/3}$ | \bar{T}_i | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
| 0.40 | G1 | 18.6 | 10.1 | 6.15 | 3.84 | 2.13 | 1.38 | 0.991 | 0.915 | 0.683 | 0.206 | 0.527 |
| | G2 | 18.6 | 10.6 | 5.68 | 3.52 | 1.80 | 1.17 | 1.12 | 0.983 | 0.721 | 0.189 | 0.527 |
| | G3 | 18.8 | 9.14 | 5.49 | 3.61 | 1.90 | 0.829 | 1.02 | 0.969 | 0.712 | 0.192 | 0.521 |
| | G4 | 18.8 | 8.48 | 5.86 | 3.75 | 1.99 | 2.03 | 1.26 | 1.07 | 0.745 | 0.199 | 0.521 |
| 0.45 | G1 | 21.5 | 11.6 | 7.27 | 4.38 | 2.27 | 1.62 | 1.18 | 1.01 | 0.707 | 0.204 | 0.456 |
| | G2 | 20.5 | 9.57 | 5.98 | 3.67 | 1.88 | 0.877 | 1.11 | 0.954 | 0.685 | 0.179 | 0.478 |
| | G3 | 20.5 | 10.2 | 6.58 | 4.21 | 2.18 | 0.850 | 0.982 | 0.992 | 0.708 | 0.205 | 0.478 |
| | G4 | 21.0 | 9.28 | 6.24 | 4.09 | 2.25 | 1.27 | 1.12 | 0.960 | 0.717 | 0.195 | 0.467 |
| 0.55 | G1 | 25.0 | 12.5 | 8.33 | 5.15 | 2.70 | 1.16 | 1.39 | 1.11 | 0.786 | 0.206 | 0.392 |
| | G2 | 22.8 | 10.8 | 7.18 | 4.51 | 2.37 | 1.84 | 1.17 | 1.04 | 0.725 | 0.198 | 0.430 |
| | G3 | 23.8 | 11.3 | 7.48 | 4.64 | 2.40 | 1.02 | 1.13 | 1.02 | 0.740 | 0.195 | 0.412 |
| | G4 | 24.2 | 12.5 | 7.82 | 5.12 | 2.69 | 0.813 | 1.21 | 1.09 | 0.780 | 0.212 | 0.405 |
| 0.60 | G1 | 26.1 | 13.2 | 8.61 | 5.57 | 2.89 | 0.869 | 1.28 | 1.11 | 0.796 | 0.213 | 0.375 |
| | G2 | 23.8 | 11.2 | 7.45 | 4.64 | 2.41 | 0.881 | 1.20 | 1.03 | 0.736 | 0.195 | 0.412 |
| | G3 | 25.1 | 10.7 | 8.45 | 5.31 | 2.74 | 1.37 | 1.26 | 1.14 | 0.802 | 0.212 | 0.390 |
| | G4 | 24.9 | 12.0 | 8.28 | 5.28 | 2.77 | 1.49 | 1.20 | 1.08 | 0.775 | 0.212 | 0.390 |
| 0.65 | G1 | 26.7 | 12.3 | 8.28 | 5.32 | 2.77 | 1.25 | 1.39 | 1.16 | 0.814 | 0.199 | 0.367 |
| | G2 | 25.0 | 11.2 | 7.70 | 4.77 | 2.56 | 1.39 | 1.22 | 1.06 | 0.759 | 0.191 | 0.392 |
| | G3 | 26.5 | 13.2 | 8.27 | 5.08 | 2.58 | 1.07 | 1.24 | 1.08 | 0.771 | 0.192 | 0.370 |
| | G4 | 25.3 | 11.7 | 8.17 | 5.25 | 2.73 | 0.778 | 1.29 | 1.08 | 0.790 | 0.208 | 0.387 |

付表-B10 伝達波に関する実験データ(10)

 $h=48\text{ cm}$, Bブロック天端幅15.8cm, $h_c=148\text{ cm}$

| e (V) | 波種 | $H_{i1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波の周期 (s) | | | | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
|------------|----|--------------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-----------------------------|------------------------|
| | | | $H_{i\max}$ | $H_{i1/10}$ | $H_{i1/3}$ | \bar{H}_i | $T_{i\max}$ | $T_{i1/10}$ | $T_{i1/3}$ | \bar{T}_i | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
| 0.40 | G1 | 18.6 | 8.37 | 4.75 | 3.03 | 1.59 | 0.931 | 0.991 | 0.891 | 0.690 | 0.163 | 0.796 |
| | G2 | 18.6 | 9.45 | 4.67 | 2.88 | 1.55 | 0.887 | 0.893 | 0.988 | 0.732 | 0.155 | 0.796 |
| | G3 | 18.8 | 6.63 | 3.86 | 2.47 | 1.35 | 0.894 | 0.944 | 1.04 | 1.09 | 0.131 | 0.787 |
| | G4 | 18.8 | 7.09 | 4.13 | 2.79 | 1.57 | 1.35 | 1.11 | 1.04 | 0.792 | 0.148 | 0.787 |
| 0.45 | G1 | 21.5 | 8.79 | 5.45 | 3.53 | 1.85 | 0.882 | 0.998 | 0.934 | 0.697 | 0.164 | 0.688 |
| | G2 | 20.5 | 8.29 | 4.81 | 3.13 | 1.72 | 0.856 | 1.02 | 0.933 | 0.734 | 0.146 | 0.722 |
| | G3 | 21.5 | 7.72 | 4.61 | 3.06 | 1.65 | 0.790 | 0.912 | 0.939 | 0.755 | 0.142 | 0.688 |
| | G4 | 20.5 | 8.55 | 4.91 | 3.23 | 1.79 | 1.20 | 1.04 | 0.945 | 0.744 | 0.158 | 0.722 |
| 0.55 | G1 | 25.0 | 9.71 | 6.62 | 4.41 | 2.38 | 1.88 | 1.12 | 0.934 | 0.713 | 0.176 | 0.592 |
| | G2 | 22.8 | 10.3 | 5.88 | 3.70 | 1.93 | 1.75 | 1.06 | 0.966 | 0.730 | 0.162 | 0.649 |
| | G3 | 23.8 | 9.20 | 5.77 | 3.80 | 1.99 | 1.12 | 0.962 | 0.901 | 0.735 | 0.160 | 0.622 |
| | G4 | 24.2 | 9.92 | 6.05 | 3.97 | 2.20 | 2.06 | 1.02 | 0.932 | 0.745 | 0.164 | 0.612 |
| 0.60 | G1 | 26.1 | 9.77 | 6.31 | 4.21 | 2.35 | 1.51 | 1.10 | 0.868 | 0.706 | 0.161 | 0.567 |
| | G2 | 23.8 | 9.23 | 6.07 | 4.00 | 2.15 | 0.842 | 1.04 | 0.934 | 0.715 | 0.168 | 0.622 |
| | G3 | 25.1 | 11.9 | 6.10 | 3.89 | 2.05 | 1.12 | 0.977 | 0.905 | 0.718 | 0.155 | 0.590 |
| | G4 | 24.9 | 9.44 | 6.16 | 3.99 | 2.20 | 1.62 | 0.997 | 0.877 | 0.712 | 0.160 | 0.594 |
| 0.65 | G1 | 26.7 | 10.5 | 6.60 | 4.54 | 2.51 | 1.67 | 1.02 | 0.941 | 0.729 | 0.170 | 0.554 |
| | G2 | 25.0 | 10.8 | 6.10 | 3.95 | 2.21 | 1.77 | 1.06 | 0.908 | 0.699 | 0.158 | 0.592 |
| | G3 | 26.5 | 10.7 | 6.62 | 4.13 | 2.18 | 1.22 | 0.983 | 0.923 | 0.745 | 0.156 | 0.558 |
| | G4 | 25.3 | 9.81 | 6.33 | 4.21 | 2.30 | 1.25 | 0.975 | 0.902 | 0.724 | 0.162 | 0.585 |

付表-B 11 伝達波に関する実験データ (1)

$h = 48 \text{ cm}$, Bブロック天端幅 15.8 cm , $h_c = 19.8 \text{ cm}$

| e (V) | 波種 | $H_{i1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波の周期 (s) | | | | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
|------------|----|--------------------|--------------|-------------|------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|-----------------------------|------------------------|
| | | | $H_{i \max}$ | $H_{i1/10}$ | $H_{i1/3}$ | \bar{H}_i | $T_{i \max}$ | $T_{i1/10}$ | $T_{i1/3}$ | \bar{T}_i | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
| 0.55 | G1 | 25.0 | 7.74 | 4.60 | 2.91 | 1.63 | 0.829 | 0.852 | 0.733 | 0.618 | 0.116 | 0.792 |
| | G2 | 22.8 | 7.25 | 3.82 | 2.40 | 1.29 | 0.876 | 0.824 | 0.738 | 0.618 | 0.105 | 0.868 |
| | G3 | 23.8 | 6.21 | 3.41 | 2.15 | 1.13 | 0.683 | 0.891 | 0.781 | 0.659 | 0.090 | 0.832 |
| | G4 | 24.2 | 6.98 | 3.67 | 2.35 | 1.27 | 0.954 | 1.11 | 0.851 | 0.661 | 0.097 | 0.818 |
| 0.60 | G1 | 26.1 | 7.36 | 4.39 | 2.84 | 1.59 | 1.26 | 0.977 | 0.804 | 0.632 | 0.109 | 0.759 |
| | G2 | 23.8 | 7.82 | 3.99 | 2.49 | 1.35 | 1.12 | 0.947 | 0.766 | 0.639 | 0.105 | 0.832 |
| | G3 | 25.1 | 6.41 | 4.15 | 2.59 | 1.44 | 0.860 | 0.873 | 0.715 | 0.647 | 0.103 | 0.789 |
| | G4 | 24.9 | 7.20 | 4.19 | 2.64 | 1.43 | 0.866 | 0.955 | 0.828 | 0.673 | 0.106 | 0.795 |
| 0.65 | G1 | 26.7 | 9.09 | 4.30 | 2.74 | 1.52 | 1.87 | 0.963 | 0.798 | 0.634 | 0.103 | 0.742 |
| | G2 | 25.0 | 9.28 | 4.13 | 2.62 | 1.55 | 0.827 | 0.912 | 0.756 | 0.598 | 0.105 | 0.792 |
| | G3 | 26.5 | 7.98 | 4.38 | 2.72 | 1.49 | 0.636 | 0.912 | 0.726 | 0.620 | 0.103 | 0.747 |
| | G4 | 25.3 | 7.79 | 4.52 | 2.86 | 1.63 | 0.761 | 0.920 | 0.776 | 0.635 | 0.113 | 0.783 |

付表-B 12 伝達波に関する実験データ (2)

$h = 42 \text{ cm}$, Bブロック天端幅 25.3 cm , $h_c = 7.3 \text{ cm}$

| e (V) | 波種 | $H_{i1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波の周期 (s) | | | | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
|------------|----|--------------------|--------------|-------------|------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|-----------------------------|------------------------|
| | | | $H_{i \max}$ | $H_{i1/10}$ | $H_{i1/3}$ | \bar{H}_i | $T_{i \max}$ | $T_{i1/10}$ | $T_{i1/3}$ | \bar{T}_i | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
| 0.35 | G1 | 16.8 | 9.74 | 5.09 | 3.19 | 1.67 | 1.17 | 1.09 | 0.847 | 0.629 | 0.190 | 0.435 |
| | G2 | 15.5 | 9.86 | 4.62 | 2.85 | 1.54 | 1.66 | 1.29 | 0.950 | 0.659 | 0.184 | 0.471 |
| | G3 | 17.2 | 9.32 | 5.05 | 3.94 | 1.47 | 1.12 | 1.08 | 0.900 | 0.660 | 0.171 | 0.424 |
| | G4 | 16.3 | 9.80 | 5.58 | 3.32 | 1.71 | 1.59 | 1.17 | 0.959 | 0.668 | 0.204 | 0.448 |
| 0.45 | G1 | 21.3 | 10.6 | 7.11 | 4.12 | 2.06 | 1.53 | 1.37 | 1.07 | 0.725 | 0.193 | 0.343 |
| | G2 | 19.7 | 10.2 | 6.32 | 3.83 | 1.98 | 1.66 | 1.22 | 0.978 | 0.693 | 0.194 | 0.370 |
| | G3 | 20.9 | 9.42 | 6.74 | 3.88 | 1.96 | 1.47 | 1.24 | 0.833 | 0.698 | 0.186 | 0.349 |
| | G4 | 20.4 | 10.8 | 7.16 | 4.32 | 2.22 | 1.45 | 1.32 | 1.10 | 0.728 | 0.212 | 0.358 |
| 0.55 | G1 | 24.0 | 12.3 | 8.52 | 5.44 | 2.67 | 2.00 | 1.67 | 1.22 | 0.794 | 0.227 | 0.304 |
| | G2 | 23.2 | 10.4 | 7.13 | 4.48 | 2.30 | 1.73 | 1.35 | 1.06 | 0.719 | 0.193 | 0.315 |
| | G3 | 23.4 | 10.3 | 7.65 | 4.55 | 2.32 | 1.85 | 1.31 | 1.08 | 0.741 | 0.194 | 0.312 |
| | G4 | 23.5 | 12.4 | 8.42 | 5.17 | 2.65 | 1.28 | 1.33 | 1.10 | 0.761 | 0.220 | 0.311 |

付表-B 13 伝達波に関する実験データ(13)

 $h = 42 \text{ cm}$, Bブロック天端幅 25.3 cm, $h_c = 1.08 \text{ cm}$

| e (V) | 波種 | $H_{i1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波の周期 (s) | | | | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
|------------|----|--------------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-----------------------------|------------------------|
| | | | H_{tmax} | $H_{t1/10}$ | $H_{t1/3}$ | \bar{H}_t | T_{tmax} | $T_{t1/10}$ | $T_{t1/3}$ | \bar{T}_t | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
| 0.35 | G1 | 16.8 | 8.04 | 4.03 | 2.39 | 1.30 | 1.26 | 1.06 | 0.725 | 0.629 | 0.142 | 0.643 |
| | G2 | 15.5 | 8.02 | 3.23 | 1.99 | 1.16 | 1.74 | 1.14 | 0.866 | 0.644 | 0.128 | 0.697 |
| | G3 | 17.2 | 8.19 | 3.47 | 2.21 | 1.19 | 0.941 | 1.01 | 0.547 | 0.691 | 0.128 | 0.628 |
| | G4 | 16.3 | 9.20 | 4.93 | 3.13 | 1.65 | 1.23 | 1.07 | 0.894 | 0.714 | 0.192 | 0.663 |
| 0.45 | G1 | 21.3 | 9.67 | 5.70 | 3.45 | 1.80 | 1.50 | 1.15 | 0.501 | 0.656 | 0.162 | 0.507 |
| | G2 | 19.7 | 9.30 | 5.03 | 3.14 | 1.67 | 1.19 | 1.12 | 0.890 | 0.660 | 0.159 | 0.548 |
| | G3 | 20.9 | 7.70 | 5.29 | 3.27 | 1.69 | 1.06 | 1.08 | 0.841 | 0.684 | 0.156 | 0.517 |
| | G4 | 20.4 | 9.80 | 6.12 | 3.78 | 1.98 | 1.13 | 1.04 | 0.890 | 0.702 | 0.185 | 0.529 |
| 0.55 | G1 | 24.0 | 9.92 | 6.80 | 4.22 | 2.20 | 1.16 | 1.26 | 1.04 | 0.734 | 0.176 | 0.450 |
| | G2 | 23.2 | 10.7 | 5.94 | 3.66 | 1.94 | 1.79 | 1.15 | 0.929 | 0.651 | 0.158 | 0.466 |
| | G3 | 23.4 | 9.10 | 6.39 | 3.73 | 1.91 | 1.59 | 1.26 | 0.949 | 0.706 | 0.159 | 0.462 |
| | G4 | 23.5 | 10.9 | 7.15 | 4.35 | 2.35 | 1.66 | 1.10 | 0.987 | 0.720 | 0.185 | 0.460 |
| 0.65 | G1 | 25.2 | 11.2 | 7.64 | 4.81 | 2.43 | 1.58 | 1.40 | 1.10 | 0.754 | 0.191 | 0.429 |
| | G2 | 25.2 | 9.93 | 6.78 | 4.20 | 2.24 | 2.17 | 1.17 | 0.961 | 0.681 | 0.167 | 0.429 |
| | G3 | 24.5 | 9.46 | 7.08 | 4.39 | 2.35 | 1.28 | 1.19 | 0.950 | 0.703 | 0.179 | 0.441 |
| | G4 | 24.2 | 10.7 | 6.92 | 4.36 | 2.26 | 0.970 | 1.15 | 1.03 | 0.734 | 0.180 | 0.446 |

付表-B 14 伝達波に関する実験データ(14)

 $h = 42 \text{ cm}$, Bブロック天端幅 25.3 cm, $h_c = 1.58 \text{ cm}$

| e (V) | 波種 | $H_{i1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波の周期 (s) | | | | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
|------------|----|--------------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-----------------------------|------------------------|
| | | | H_{tmax} | $H_{t1/10}$ | $H_{t1/3}$ | \bar{H}_t | T_{tmax} | $T_{t1/10}$ | $T_{t1/3}$ | \bar{T}_t | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
| 0.35 | G1 | 16.8 | 5.62 | 2.78 | 1.74 | 1.02 | 1.10 | 1.12 | 0.957 | 0.700 | 0.104 | 0.940 |
| | G2 | 15.5 | 5.48 | 2.53 | 1.58 | 0.895 | 1.54 | 1.10 | 1.02 | 0.718 | 0.102 | 1.02 |
| | G3 | 17.2 | 7.21 | 2.59 | 1.65 | 0.930 | 0.926 | 1.03 | 0.989 | 0.772 | 0.096 | 0.919 |
| | G4 | 16.3 | 6.47 | 2.97 | 1.85 | 1.05 | 1.22 | 1.05 | 1.02 | 0.775 | 0.113 | 0.969 |
| 0.45 | G1 | 21.3 | 7.92 | 3.99 | 2.44 | 1.30 | 1.26 | 0.967 | 0.832 | 0.695 | 0.115 | 0.742 |
| | G2 | 19.7 | 8.05 | 3.50 | 2.04 | 1.13 | 0.926 | 0.846 | 0.910 | 0.660 | 0.104 | 0.802 |
| | G3 | 20.9 | 9.87 | 3.55 | 2.17 | 1.18 | 0.455 | 0.939 | 0.860 | 0.708 | 0.104 | 0.756 |
| | G4 | 20.4 | 7.52 | 4.01 | 2.49 | 1.34 | 0.661 | 0.964 | 0.944 | 0.733 | 0.122 | 0.775 |
| 0.55 | G1 | 24.0 | 7.62 | 4.77 | 3.08 | 1.64 | 0.889 | 0.890 | 0.803 | 0.655 | 0.128 | 0.658 |
| | G2 | 23.2 | 6.29 | 3.66 | 2.31 | 1.25 | 0.912 | 0.886 | 0.914 | 0.684 | 0.100 | 0.681 |
| | G3 | 23.4 | 6.65 | 4.12 | 2.67 | 1.49 | 0.479 | 0.906 | 0.802 | 0.682 | 0.114 | 0.675 |
| | G4 | 23.5 | 8.54 | 4.78 | 3.02 | 1.64 | 1.54 | 0.959 | 0.862 | 0.694 | 0.129 | 0.672 |
| 0.65 | G1 | 25.2 | 8.12 | 4.82 | 3.26 | 1.82 | 0.992 | 0.930 | 0.870 | 0.661 | 0.129 | 0.627 |
| | G2 | 25.2 | 6.55 | 4.22 | 2.71 | 1.50 | 1.23 | 0.989 | 0.840 | 0.644 | 0.108 | 0.627 |
| | G3 | 24.5 | 7.40 | 4.48 | 2.92 | 1.57 | 1.06 | 0.939 | 0.819 | 0.676 | 0.119 | 0.645 |
| | G4 | 24.2 | 9.41 | 4.51 | 2.95 | 1.61 | 1.72 | 1.03 | 0.920 | 0.711 | 0.122 | 0.653 |

付表-B 15 伝達波に関する実験データ (15)

$h = 42 \text{ cm}$, Bブロック天端幅 25.3 cm, $h_c = 20.8 \text{ cm}$

| e (V) | 波種 | $H_{i1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波の周期 (s) | | | | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
|------------|-----|--------------------|--------------|-------------|------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|-----------------------------|------------------------|
| | | | $H_{i \max}$ | $H_{i1/10}$ | $H_{i1/3}$ | \bar{H}_i | $T_{i \max}$ | $T_{i1/10}$ | $T_{i1/3}$ | \bar{T}_i | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
| 0.45 | G 1 | 21.3 | 3.54 | 2.26 | 1.52 | 0.880 | 0.728 | 1.14 | 1.07 | 0.779 | 0.071 | 0.977 |
| | G 2 | 19.7 | 5.27 | 2.47 | 1.64 | 0.940 | 1.08 | 1.03 | 1.02 | 0.739 | 0.083 | 1.06 |
| | G 3 | 20.9 | 3.65 | 2.07 | 1.43 | 0.845 | 0.573 | 1.31 | 1.19 | 0.821 | 0.068 | 0.995 |
| | G 4 | 20.4 | 3.92 | 2.17 | 1.54 | 0.910 | 0.752 | 1.04 | 1.15 | 0.859 | 0.075 | 1.02 |
| 0.55 | G 1 | 24.0 | 5.54 | 2.99 | 1.98 | 1.12 | 1.09 | 1.10 | 0.950 | 0.718 | 0.083 | 0.867 |
| | G 2 | 23.2 | 4.36 | 2.39 | 1.64 | 0.965 | 0.778 | 0.966 | 0.577 | 0.804 | 0.071 | 0.897 |
| | G 3 | 23.4 | 4.37 | 2.66 | 1.77 | 1.03 | 0.965 | 0.940 | 0.917 | 0.734 | 0.076 | 0.889 |
| | G 4 | 23.5 | 5.53 | 3.00 | 1.96 | 1.15 | 0.759 | 0.930 | 1.01 | 0.784 | 0.083 | 0.885 |
| 0.65 | G 1 | 25.2 | 5.97 | 3.28 | 2.22 | 1.27 | 1.03 | 1.00 | 0.899 | 0.680 | 0.088 | 0.825 |
| | G 2 | 25.2 | 5.04 | 2.74 | 1.81 | 1.05 | 1.01 | 1.12 | 1.01 | 0.745 | 0.072 | 0.825 |
| | G 3 | 24.5 | 5.24 | 2.79 | 1.90 | 1.12 | 1.65 | 1.10 | 0.967 | 0.724 | 0.078 | 0.849 |
| | G 4 | 24.2 | 6.30 | 3.03 | 1.97 | 1.14 | 1.17 | 0.967 | 0.977 | 0.734 | 0.081 | 0.860 |

付表-B 16 伝達波に関する実験データ (16)

$h = 42 \text{ cm}$, Bブロック天端幅 25.3 cm, $h_c = 25.8 \text{ cm}$

| e (V) | 波種 | $H_{i1/3}$ (cm) | 伝達波高 (cm) | | | | 伝達波の周期 (s) | | | | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
|------------|-----|--------------------|--------------|-------------|------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|-----------------------------|------------------------|
| | | | $H_{i \max}$ | $H_{i1/10}$ | $H_{i1/3}$ | \bar{H}_i | $T_{i \max}$ | $T_{i1/10}$ | $T_{i1/3}$ | \bar{T}_i | $\frac{H_{i1/3}}{H_{i1/3}}$ | $\frac{h_c}{H_{i1/3}}$ |
| 0.45 | G 1 | 21.3 | 2.33 | 1.66 | 1.28 | 0.775 | 1.96 | 1.34 | 1.27 | 0.919 | 0.060 | 1.21 |
| | G 2 | 19.7 | 3.29 | 1.79 | 1.27 | 0.750 | 1.02 | 1.29 | 1.36 | 0.894 | 0.064 | 1.31 |
| | G 3 | 20.9 | 1.85 | 1.40 | 1.08 | 0.670 | 2.91 | 1.85 | 1.55 | 0.967 | 0.051 | 1.23 |
| | G 4 | 20.4 | 2.17 | 1.56 | 1.22 | 0.765 | 1.99 | 1.62 | 1.65 | 1.05 | 0.060 | 1.26 |
| 0.55 | G 1 | 24.0 | 4.48 | 2.28 | 1.55 | 0.885 | 1.15 | 1.08 | 1.03 | 0.820 | 0.065 | 1.08 |
| | G 2 | 23.2 | 2.82 | 1.85 | 1.40 | 0.875 | 0.692 | 1.45 | 1.10 | 0.801 | 0.060 | 1.11 |
| | G 3 | 23.4 | 3.52 | 1.96 | 1.43 | 0.845 | 0.955 | 1.03 | 1.07 | 0.800 | 0.071 | 1.10 |
| | G 4 | 23.5 | 3.99 | 2.41 | 1.69 | 1.01 | 0.822 | 0.778 | 1.03 | 0.799 | 0.062 | 1.10 |
| 0.65 | G 1 | 25.2 | 4.10 | 2.56 | 1.78 | 1.04 | 1.25 | 0.971 | 1.02 | 0.777 | 0.071 | 1.02 |
| | G 2 | 25.2 | 3.37 | 1.96 | 1.40 | 0.845 | 0.999 | 1.23 | 1.29 | 0.862 | 0.056 | 1.02 |
| | G 3 | 24.5 | 2.92 | 2.14 | 1.53 | 0.930 | 1.13 | 0.953 | 1.03 | 0.777 | 0.062 | 1.05 |
| | G 4 | 24.2 | 4.63 | 2.30 | 1.61 | 0.995 | 1.83 | 1.13 | 1.16 | 0.832 | 0.067 | 1.07 |

付録C 滑動に関する実験データ

滑動に関する実験データを付表-C 1~C 11に示す。
それぞれ以下の条件に対応する。

付表-C 1~C 2 : $h = 39$ cm, 捨石マウンド,

$$B_b = 15.8 \text{ cm}$$

付表-C 3~C 7 : $h = 42$ cm, 固形マウンド,

$$B_b = 15.8 \text{ cm}$$

付表-C 8~C 11 : $h = 42$ cm, 固形マウンド,

$$B_b = 23.7 \text{ cm}$$

いずれもBブロック, のりこう配 1 : 4/3 である。

付表-C 1 滑動に関する実験データ (1)

$h = 39$ cm, 捨石マウンド, Bブロック天端幅 15.8 cm

| 波種 | σ (V) | W_0 (gf/cm) | 滑動回数 n_s | 滑動量 S (mm) | 滑動限界波高 H_c (cm) |
|----|-----------------|------------------|---------------|-----------------|----------------------|
| G1 | 0.360 | 1600 | 7 | 4.8 | 24.8 |
| G1 | 0.360 | 1600 | 6 | 4.0 | 25.1 |
| G3 | 0.360 | 1600 | 7 | 4.2 | 23.8 |
| G3 | 0.360 | 1600 | 6 | 3.4 | 24.3 |
| G1 | 0.360 | 1787 | 7 | 8.5 | 24.8 |
| G1 | 0.360 | 1787 | 5 | 3.1 | 25.7 |
| G3 | 0.360 | 1787 | 5 | 3.4 | 24.8 |
| G3 | 0.360 | 1787 | 2 | 2.0 | 27.4 |
| G1 | 0.360 | 1881 | 3 | 1.2 | 27.0 |
| G1 | 0.360 | 1881 | 2 | 0.7 | 28.0 |
| G3 | 0.360 | 1881 | 1 | 0.5 | 29.0 |
| G3 | 0.360 | 1881 | 0 | | |
| G1 | 0.360 | 2038 | 4 | 2.6 | 26.3 |
| G1 | 0.360 | 2038 | 1 | 0.2 | 29.2 |
| G1 | 0.360 | 2038 | 2 | 0.7 | 28.0 |
| G3 | 0.360 | 2038 | 1 | 0.4 | 29.0 |
| G3 | 0.360 | 2038 | 0 | | |
| G1 | 0.420 | 1787 | 6 | 3.5 | 26.2 |
| G1 | 0.420 | 1787 | 8 | 8.4 | 25.2 |
| G3 | 0.420 | 1787 | 3 | 2.5 | 28.3 |
| G3 | 0.420 | 1787 | 1 | 0.3 | 30.3 |
| G1 | 0.420 | 2038 | 2 | 0.5 | 29.0 |
| G1 | 0.420 | 2038 | 2 | 1.4 | 29.0 |
| G3 | 0.420 | 2038 | 1 | 0.3 | 30.3 |
| G3 | 0.420 | 2038 | 1 | 0.3 | 30.3 |
| G1 | 0.420 | 2068 | 1 | 0.3 | 30.1 |
| G1 | 0.420 | 2068 | 1 | 0.2 | 30.1 |
| G3 | 0.420 | 2068 | 0 | | |

付表-C2 滑動に関する実験データ (2)

$h = 39$ cm, 捨石マウンド, Bブロック天端幅 15.8 cm

| 波種 | e (V) | W_0 (gf/cm) | 滑動回数 n_s | 滑動量 S (mm) | 滑動限界波高 H_c (cm) |
|----|------------|------------------|---------------|-----------------|----------------------|
| G1 | 0.480 | 1787 | 6 | 3.8 | 26.7 |
| G1 | 0.480 | 1787 | 2 | 1.9 | 29.3 |
| G3 | 0.480 | 1787 | 6 | 4.0 | 27.2 |
| G3 | 0.480 | 1787 | 3 | 1.6 | 30.0 |
| G1 | 0.550 | 1787 | 5 | 5.0 | 27.4 |
| G1 | 0.550 | 1787 | 9 | 11.0 | 25.4 |
| G3 | 0.550 | 1787 | 5 | 5.6 | 25.2 |
| G3 | 0.550 | 1787 | 4 | 10.2 | 26.0 |
| G1 | 0.550 | 2038 | 2 | 0.7 | 29.4 |
| G1 | 0.550 | 2038 | 3 | 1.4 | 28.4 |
| G3 | 0.550 | 2038 | 3 | 2.4 | 26.8 |
| G3 | 0.550 | 2038 | 4 | 2.9 | 26.0 |
| G1 | 0.550 | 2136 | 3 | 2.1 | 28.4 |
| G1 | 0.550 | 2136 | 2 | 0.6 | 29.4 |
| G3 | 0.550 | 2136 | 2 | 1.1 | 28.4 |
| G3 | 0.550 | 2136 | 2 | 2.8 | 28.4 |
| G1 | 0.550 | 2349 | 2 | 1.0 | 29.4 |
| G3 | 0.550 | 2349 | 3 | 1.0 | 26.8 |
| G1 | 0.550 | 2536 | 1 | 0.3 | 30.6 |
| G3 | 0.550 | 2536 | 2 | 0.8 | 28.4 |
| G1 | 0.550 | 2723 | 1 | 0.2 | 30.6 |
| G3 | 0.550 | 2723 | 1 | 0.3 | 30.2 |

付表-C3 滑動に関する実験データ (3)

$h = 42 \text{ cm}$, 固形マウンド, Bブロック天端幅 15.8 cm

| 波種 | e (V) | W_0 (gf/cm) | 滑動回数 n_s | 滑動量 S (mm) | 滑動限界波高 H_c (cm) |
|----|------------|------------------|---------------|-----------------|----------------------|
| G1 | 0.450 | 1574 | 6 | 7.9 | 26.8 |
| G1 | 0.450 | 1574 | 3 | 3.7 | 29.2 |
| G2 | 0.450 | 1574 | 9 | 33.0 | 24.0 |
| G2 | 0.450 | 1574 | 3 | 19.2 | 27.5 |
| G3 | 0.450 | 1574 | 2 | 3.5 | 28.2 |
| G3 | 0.450 | 1574 | 2 | 1.5 | 28.2 |
| G4 | 0.450 | 1574 | 5 | 4.3 | 25.5 |
| G4 | 0.450 | 1574 | 6 | 10.6 | 24.8 |
| G1 | 0.450 | 1668 | 4 | 15.7 | 28.2 |
| G1 | 0.450 | 1668 | 4 | 5.8 | 28.2 |
| G2 | 0.450 | 1668 | 4 | 11.3 | 25.8 |
| G2 | 0.450 | 1668 | 9 | 32.0 | 24.0 |
| G3 | 0.450 | 1668 | 2 | 1.6 | 28.2 |
| G3 | 0.450 | 1668 | 2 | 2.0 | 28.2 |
| G4 | 0.450 | 1668 | 3 | 1.5 | 27.4 |
| G4 | 0.450 | 1668 | 3 | 1.9 | 27.4 |
| G1 | 0.450 | 1762 | 2 | 1.3 | 29.8 |
| G1 | 0.450 | 1762 | 1 | 1.6 | 31.0 |
| G2 | 0.450 | 1762 | 4 | 8.8 | 25.8 |
| G2 | 0.450 | 1762 | 5 | 7.9 | 26.0 |
| G3 | 0.450 | 1762 | 1 | 1.0 | 30.5 |
| G3 | 0.450 | 1762 | 1 | 1.2 | 30.5 |
| G4 | 0.450 | 1762 | 1 | 0.7 | 29.2 |
| G4 | 0.450 | 1762 | 3 | 2.9 | 27.4 |
| G3 | 0.450 | 1855 | 0 | | |
| G4 | 0.450 | 1855 | 0 | | |
| G2 | 0.450 | 1949 | 1 | 0.4 | 29.2 |
| G2 | 0.450 | 1949 | 3 | 1.1 | 27.5 |
| G2 | 0.450 | 1949 | 0 | | |
| G2 | 0.450 | 2043 | 3 | 1.1 | 27.5 |
| G2 | 0.450 | 2043 | 1 | 0.3 | 29.2 |
| G2 | 0.450 | 2136 | 2 | 0.7 | 28.2 |
| G2 | 0.450 | 2230 | 0 | | |
| G1 | 0.450 | 2230 | 0 | | |

付表-C 4 滑動に関する実験データ (4)

$h=42$ cm, 固形マウンド, Bブロック天端幅 15.8 cm

| 波種 | e (V) | W_0 (gf/cm) | 滑動回数 n_s | 滑動量 S (mm) | 滑動限界波高 H_c (cm) |
|-----|------------|------------------|---------------|-----------------|----------------------|
| G 1 | 0.550 | 1574 | 10 | 19.6 | 26.0 |
| G 1 | 0.550 | 1574 | 17 | 35.1 | 23.8 |
| G 2 | 0.550 | 1574 | 5 | 8.3 | 27.0 |
| G 2 | 0.550 | 1574 | 6 | 7.0 | 26.3 |
| G 3 | 0.550 | 1574 | 2 | 1.6 | 29.5 |
| G 3 | 0.550 | 1574 | 2 | 1.6 | 29.5 |
| G 4 | 0.550 | 1574 | 5 | 8.8 | 26.5 |
| G 4 | 0.550 | 1574 | 10 | 22.9 | 26.0 |
| G 1 | 0.550 | 1668 | 1 | 0.4 | 31.5 |
| G 2 | 0.550 | 1668 | 4 | 2.6 | 27.5 |
| G 2 | 0.550 | 1668 | 4 | 4.6 | 27.5 |
| G 3 | 0.550 | 1668 | 3 | 3.3 | 28.5 |
| G 3 | 0.550 | 1668 | 5 | 5.9 | 27.2 |
| G 4 | 0.550 | 1668 | 5 | 10.6 | 26.5 |
| G 4 | 0.550 | 1668 | 8 | 12.5 | 24.8 |
| G 1 | 0.550 | 1885 | 0 | | |
| G 2 | 0.550 | 1885 | 0 | | |
| G 2 | 0.550 | 1885 | 3 | 1.9 | 28.2 |
| G 2 | 0.550 | 1885 | 2 | 1.2 | 29.0 |
| G 3 | 0.550 | 1885 | 0 | | |
| G 4 | 0.550 | 1885 | 1 | 0.4 | 29.2 |
| G 2 | 0.550 | 1949 | 3 | 3.3 | 28.2 |
| G 3 | 0.550 | 1949 | 3 | 2.0 | 28.5 |
| G 3 | 0.550 | 1949 | 3 | 2.0 | 28.5 |
| G 4 | 0.550 | 1949 | 0 | | |
| G 1 | 0.550 | 1949 | 2 | 0.8 | 30.5 |
| G 1 | 0.550 | 1949 | 2 | 0.5 | 30.5 |
| G 2 | 0.550 | 1949 | 3 | 3.9 | 28.2 |

付表-C5 滑動に関する実験データ(5)

$h = 42 \text{ cm}$, 固形マウンド, Bブロック天端幅15.8 cm

| 波種 | e (V) | W_0 (gf/cm) | 滑動回数 n_s | 滑動量 S (mm) | 滑動限界波高 H_c (cm) |
|-----|------------|------------------|---------------|-----------------|----------------------|
| G 1 | 0.550 | 2043 | 0 | | |
| G 2 | 0.550 | 2043 | 1 | 1.4 | 30.2 |
| G 2 | 0.550 | 2043 | 1 | 0.5 | 30.2 |
| G 2 | 0.550 | 2043 | 0 | | |
| G 3 | 0.550 | 2043 | 2 | 0.7 | 29.5 |
| G 3 | 0.550 | 2043 | 0 | | |
| G 4 | 0.550 | 2043 | 2 | 0.7 | 28.5 |
| G 1 | 0.550 | 2136 | 1 | 0.6 | 31.5 |
| G 1 | 0.550 | 2136 | 1 | 0.4 | 31.5 |
| G 2 | 0.550 | 2136 | 2 | 0.8 | 29.0 |
| G 2 | 0.550 | 2136 | 1 | 0.5 | 30.2 |
| G 3 | 0.550 | 2136 | 0 | | |
| G 4 | 0.550 | 2136 | 0 | | |
| G 1 | 0.550 | 2230 | 0 | | |
| G 2 | 0.550 | 2230 | 1 | 0.5 | 30.2 |
| G 2 | 0.550 | 2230 | 0 | | |
| G 2 | 0.550 | 2323 | 1 | 0.5 | 30.2 |
| G 2 | 0.550 | 2323 | 1 | 0.5 | 30.2 |
| G 2 | 0.550 | 2417 | 1 | 0.5 | 30.2 |
| G 2 | 0.550 | 2417 | 1 | 0.3 | 30.2 |
| G 2 | 0.550 | 2511 | 0 | | |
| G 2 | 0.550 | 2604 | 0 | | |

付表-C6 滑動に関する実験データ (6)

$h = 42$ cm, 円形マウンド, Bブロック天端幅 15.8 cm

| 波種 | e (V) | W_0 (gf/cm) | 滑動回数 n_s | 滑動量 S (mm) | 滑動限界波高 H_c (cm) |
|-----|------------|------------------|---------------|-----------------|----------------------|
| G 1 | 0.600 | 1762 | 10 | 8.4 | 26.5 |
| G 2 | 0.600 | 1762 | 5 | 2.3 | 22.8 |
| G 2 | 0.600 | 1762 | 2 | 1.1 | 29.8 |
| G 3 | 0.600 | 1762 | 1 | 0.3 | 33.5 |
| G 3 | 0.600 | 1762 | 2 | 0.6 | 32.5 |
| G 4 | 0.600 | 1762 | 3 | 2.4 | 28.0 |
| G 4 | 0.600 | 1762 | 3 | 2.4 | 28.0 |
| G 1 | 0.600 | 1949 | 3 | 0.7 | 29.5 |
| G 1 | 0.600 | 1949 | 1 | 0.2 | 32.0 |
| G 2 | 0.600 | 1949 | 2 | 0.8 | 29.8 |
| G 2 | 0.600 | 1949 | 2 | 1.0 | 29.8 |
| G 3 | 0.600 | 1949 | 1 | 0.3 | 33.5 |
| G 3 | 0.600 | 1949 | 1 | 0.4 | 33.5 |
| G 4 | 0.600 | 1949 | 3 | 1.1 | 28.0 |
| G 4 | 0.600 | 1949 | 3 | 1.6 | 28.0 |
| G 1 | 0.600 | 2136 | 3 | 1.0 | 29.5 |
| G 1 | 0.600 | 2136 | 3 | 0.8 | 29.5 |
| G 2 | 0.600 | 2136 | 1 | 0.5 | 30.5 |
| G 2 | 0.600 | 2136 | 1 | 0.3 | 30.5 |
| G 3 | 0.600 | 2136 | 1 | 0.3 | 33.5 |
| G 3 | 0.600 | 2136 | 2 | 0.5 | 32.5 |
| G 4 | 0.600 | 2136 | 6 | 4.1 | 27.5 |
| G 4 | 0.600 | 2136 | 5 | 3.7 | 28.0 |
| G 4 | 0.600 | 2136 | 3 | 1.0 | 28.0 |
| G 4 | 0.600 | 2136 | 4 | 1.8 | 28.5 |
| G 1 | 0.600 | 2323 | 4 | 1.8 | 29.5 |
| G 1 | 0.600 | 2323 | 3 | 0.8 | 28.9 |
| G 2 | 0.600 | 2323 | 3 | 1.3 | 29.0 |
| G 2 | 0.600 | 2323 | 3 | 0.9 | 29.0 |
| G 3 | 0.600 | 2323 | 4 | 1.5 | 30.8 |
| G 3 | 0.600 | 2323 | 4 | 1.8 | 30.8 |
| G 4 | 0.600 | 2323 | 3 | 1.4 | 28.0 |
| G 4 | 0.600 | 2323 | 3 | 1.5 | 28.0 |

付表-C7 滑動に関する実験データ(7)

h = 42 cm, 固形マウンド, Bブロック天端幅15.8 cm

| 波種 | e (V) | W ₀ (gf/cm) | 滑動回数 n _s | 滑動量 S (mm) | 滑動限界波高 H _c (cm) |
|-----|----------|---------------------------|------------------------|---------------|-------------------------------|
| G 1 | 0.650 | 1762 | 4 | 4.1 | 29.0 |
| G 1 | 0.650 | 1762 | 13 | 14.0 | 26.0 |
| G 2 | 0.650 | 1762 | 4 | 2.1 | 29.6 |
| G 2 | 0.650 | 1762 | 7 | 5.1 | 28.9 |
| G 3 | 0.650 | 1762 | 12 | 28.4 | 26.2 |
| G 3 | 0.650 | 1762 | 18 | 38.1 | 24.0 |
| G 4 | 0.650 | 1762 | 14 | 22.7 | 24.6 |
| G 4 | 0.650 | 1762 | 14 | 15.6 | 24.6 |
| G 1 | 0.650 | 1949 | 4 | 2.1 | 29.0 |
| G 1 | 0.650 | 1949 | 2 | 2.3 | 30.1 |
| G 2 | 0.650 | 1949 | 5 | 1.9 | 29.0 |
| G 2 | 0.650 | 1949 | 3 | 1.7 | 34.0 |
| G 3 | 0.650 | 1949 | 4 | 2.7 | 32.0 |
| G 3 | 0.650 | 1949 | 3 | 1.3 | 32.7 |
| G 4 | 0.650 | 1949 | 2 | 1.0 | 30.7 |
| G 4 | 0.650 | 1949 | 6 | 4.2 | 28.0 |
| G 1 | 0.650 | 2136 | 1 | 0.6 | 33.0 |
| G 1 | 0.650 | 2136 | 2 | 0.7 | 30.1 |
| G 2 | 0.650 | 2136 | 3 | 0.8 | 34.0 |
| G 2 | 0.650 | 2136 | 1 | 0.3 | 32.2 |
| G 3 | 0.650 | 2136 | 1 | 0.3 | 34.7 |
| G 4 | 0.650 | 2136 | 2 | 0.6 | 30.7 |
| G 1 | 0.650 | 2323 | 1 | 0.4 | 33.0 |
| G 1 | 0.650 | 2323 | 0 | — | — |
| G 2 | 0.650 | 2323 | 0 | — | — |
| G 2 | 0.650 | 2323 | 1 | 0.2 | 32.2 |
| G 3 | 0.650 | 2323 | 1 | 0.4 | 34.7 |
| G 3 | 0.650 | 2323 | 1 | 0.3 | 34.7 |
| G 4 | 0.650 | 2323 | 1 | 0.6 | 32.6 |
| G 4 | 0.650 | 2323 | 2 | 0.5 | 30.7 |
| G 1 | 0.650 | 2511 | 1 | 0.3 | 33.0 |
| G 1 | 0.650 | 2511 | 0 | — | — |
| G 2 | 0.650 | 2511 | 1 | 0.2 | 32.2 |
| G 2 | 0.650 | 2511 | 0 | — | — |
| G 3 | 0.650 | 2511 | 0 | — | — |
| G 4 | 0.650 | 2511 | 0 | — | — |

付表-C8 滑動に関する実験データ(8)

$h = 42 \text{ cm}$, 固形マウンド, Bブロック天端幅23.7 cm

| 波種 | e (V) | W_0 (gf/cm) | 滑動回数 n_s | 滑動量 S (mm) | 滑動限界波高 H_c (cm) |
|-----|------------|------------------|---------------|-----------------|----------------------|
| G 1 | 0.450 | 1574 | 3 | 6.4 | 29.0 |
| G 2 | 0.450 | 1574 | 13 | 27.9 | 21.9 |
| G 3 | 0.450 | 1574 | 7 | 5.7 | 25.2 |
| G 4 | 0.450 | 1574 | 4 | 1.7 | 26.3 |
| G 4 | 0.450 | 1574 | 7 | 3.9 | 24.2 |
| G 1 | 0.450 | 1668 | 1 | 0.8 | 31.0 |
| G 1 | 0.450 | 1668 | 3 | 2.6 | 29.0 |
| G 1 | 0.450 | 1668 | 6 | 3.8 | 28.8 |
| G 2 | 0.450 | 1668 | 3 | 4.9 | 27.4 |
| G 2 | 0.450 | 1668 | 3 | 7.0 | 27.4 |
| G 3 | 0.450 | 1668 | 1 | 0.3 | 30.6 |
| G 3 | 0.450 | 1668 | 0 | — | — |
| G 4 | 0.450 | 1668 | 0 | — | — |
| G 1 | 0.450 | 1762 | 1 | 0.3 | 31.0 |
| G 1 | 0.450 | 1762 | 0 | — | — |
| G 2 | 0.450 | 1762 | 1 | 0.3 | 29.2 |
| G 2 | 0.450 | 1762 | 1 | 0.8 | 29.2 |
| G 2 | 0.450 | 1762 | 2 | 0.7 | 28.2 |
| G 2 | 0.450 | 1762 | 0 | — | — |
| G 3 | 0.450 | 1762 | 0 | — | — |
| G 4 | 0.450 | 1762 | 0 | — | — |
| G 1 | 0.450 | 1855 | 1 | 0.4 | 31.0 |
| G 1 | 0.450 | 1855 | 0 | — | — |
| G 2 | 0.450 | 1855 | 1 | 0.3 | 29.2 |
| G 2 | 0.450 | 1855 | 0 | — | — |

付表-C9 滑動に関する実験データ(9)

 $h=42$ cm, 固形マウンド, Bブロック天端幅23.7 cm

| 波種 | ϵ (V) | W_0 (gf/cm) | 滑動回数 n_s | 滑動量 S (mm) | 滑動限界波高 H_c (cm) |
|-----|-------------------|------------------|---------------|-----------------|----------------------|
| G 1 | 0.550 | 1574 | 16 | 31.2 | 24.0 |
| G 2 | 0.550 | 1574 | 11 | 17.2 | 24.2 |
| G 3 | 0.550 | 1574 | 12 | 10.8 | 24.8 |
| G 4 | 0.550 | 1574 | 5 | 4.1 | 26.3 |
| G 1 | 0.550 | 1762 | 3 | 4.9 | 29.6 |
| G 1 | 0.550 | 1762 | 2 | 1.6 | 30.3 |
| G 2 | 0.550 | 1762 | 2 | 0.9 | 29.1 |
| G 2 | 0.550 | 1762 | 1 | 0.3 | 30.4 |
| G 3 | 0.550 | 1762 | 1 | 0.3 | 31.5 |
| G 3 | 0.550 | 1762 | 1 | 0.4 | 31.5 |
| G 4 | 0.550 | 1762 | 1 | 1.2 | 29.8 |
| G 4 | 0.550 | 1762 | 1 | 0.3 | 29.8 |
| G 1 | 0.550 | 1855 | 6 | 7.5 | 27.7 |
| G 1 | 0.550 | 1855 | 0 | — | — |
| G 2 | 0.550 | 1855 | 4 | 2.6 | 27.5 |
| G 2 | 0.550 | 1855 | 4 | 3.2 | 27.5 |
| G 3 | 0.550 | 1855 | 1 | 0.6 | 31.5 |
| G 3 | 0.550 | 1855 | 0 | — | — |
| G 4 | 0.550 | 1855 | 1 | 0.4 | 29.8 |
| G 4 | 0.550 | 1855 | 1 | 0.3 | 29.8 |
| G 1 | 0.550 | 1949 | 1 | 0.4 | 31.5 |
| G 1 | 0.550 | 1949 | 1 | 0.7 | 31.5 |
| G 2 | 0.550 | 1949 | 1 | 0.3 | 30.4 |
| G 2 | 0.550 | 1949 | 1 | 0.3 | 30.4 |
| G 3 | 0.550 | 1949 | 0 | — | — |
| G 4 | 0.550 | 1949 | 0 | — | — |
| G 1 | 0.550 | 2043 | 0 | — | — |
| G 2 | 0.550 | 2043 | 1 | 0.3 | 30.4 |
| G 2 | 0.550 | 2043 | 1 | 0.5 | 30.4 |
| G 2 | 0.550 | 2136 | 0 | — | — |
| G 2 | 0.550 | 2136 | 1 | 0.3 | 30.4 |
| G 2 | 0.550 | 2230 | 1 | 0.4 | 30.4 |
| G 2 | 0.550 | 2230 | 1 | 0.3 | 30.4 |
| G 2 | 0.550 | 2323 | 0 | — | — |

付表-C 10 滑動に関する実験データ (10)

$h = 42 \text{ cm}$, 固形マウンド, Bブロック天端幅23.7 cm

| 波種 | e (V) | W_0 (gf/cm) | 滑動回数 n_s | 滑動量 S (mm) | 滑動限界波高 H_c (cm) |
|-----|------------|------------------|---------------|-----------------|----------------------|
| G 1 | 0.600 | 1574 | 8 | 24.2 | 27.2 |
| G 1 | 0.600 | 1574 | 11 | 35.8 | 26.2 |
| G 2 | 0.600 | 1574 | 4 | 4.4 | 28.4 |
| G 2 | 0.600 | 1574 | 12 | 17.1 | 25.0 |
| G 3 | 0.600 | 1574 | 7 | 11.1 | 26.4 |
| G 3 | 0.600 | 1574 | 7 | 13.3 | 26.4 |
| G 4 | 0.600 | 1574 | 9 | 25.3 | 26.2 |
| G 4 | 0.600 | 1574 | 11 | 28.1 | 25.4 |
| G 1 | 0.600 | 1762 | 3 | 2.2 | 29.6 |
| G 1 | 0.600 | 1762 | 3 | 5.0 | 29.6 |
| G 2 | 0.600 | 1762 | 5 | 1.8 | 27.8 |
| G 2 | 0.600 | 1762 | 2 | 0.7 | 29.8 |
| G 2 | 0.600 | 1762 | 2 | 1.2 | 29.8 |
| G 2 | 0.600 | 1762 | 3 | 1.1 | 29.0 |
| G 3 | 0.600 | 1762 | 5 | 2.9 | 29.8 |
| G 3 | 0.600 | 1762 | 2 | 1.7 | 32.8 |
| G 4 | 0.600 | 1762 | 6 | 4.7 | 27.5 |
| G 4 | 0.600 | 1762 | 5 | 4.6 | 28.0 |
| G 1 | 0.600 | 1949 | 2 | 1.4 | 30.5 |
| G 1 | 0.600 | 1949 | 2 | 0.6 | 30.5 |
| G 2 | 0.600 | 1949 | 3 | 1.0 | 29.0 |
| G 2 | 0.600 | 1949 | 1 | 0.6 | 30.5 |
| G 3 | 0.600 | 1949 | 1 | 0.3 | 33.5 |
| G 3 | 0.600 | 1949 | 1 | 0.3 | 33.5 |
| G 4 | 0.600 | 1949 | 2 | 1.1 | 29.4 |
| G 4 | 0.600 | 1949 | 2 | 0.6 | 29.4 |
| G 4 | 0.600 | 1949 | 0 | — | — |
| G 1 | 0.600 | 2136 | 0 | — | — |
| G 2 | 0.600 | 2136 | 0 | — | — |
| G 3 | 0.600 | 2136 | 1 | 0.3 | 33.5 |
| G 4 | 0.600 | 2136 | 1 | 0.3 | 30.2 |

付表-C 11 滑動に関する実験データ (1)

$h = 42 \text{ cm}$, 円形マウンド, Bブロック天端幅 23.7 cm

| 波種 | e (V) | W_0 (gf/cm) | 滑動回数 n_s | 滑動量 S (mm) | 滑動限界波高 H_c (cm) |
|-----|------------|------------------|---------------|-----------------|----------------------|
| G 1 | 0.650 | 1668 | 3 | 2.1 | 30.0 |
| G 1 | 0.650 | 1668 | 3 | 5.8 | 30.0 |
| G 2 | 0.650 | 1668 | 2 | 1.1 | 31.4 |
| G 2 | 0.650 | 1668 | 4 | 2.5 | 29.6 |
| G 2 | 0.650 | 1668 | 1 | 0.6 | 32.2 |
| G 2 | 0.650 | 1668 | 2 | 0.6 | 31.4 |
| G 3 | 0.650 | 1668 | 4 | 6.0 | 32.0 |
| G 3 | 0.650 | 1668 | 10 | 14.3 | 26.8 |
| G 4 | 0.650 | 1668 | 5 | 2.7 | 28.6 |
| G 4 | 0.650 | 1668 | 0 | — | — |
| G 1 | 0.650 | 1762 | 1 | 0.5 | 33.0 |
| G 1 | 0.650 | 1762 | 1 | 0.3 | 33.0 |
| G 2 | 0.650 | 1762 | 1 | 0.4 | 32.2 |
| G 2 | 0.650 | 1762 | 1 | 0.3 | 32.2 |
| G 3 | 0.650 | 1762 | 2 | 0.8 | 33.6 |
| G 3 | 0.650 | 1762 | 2 | 2.7 | 33.6 |
| G 4 | 0.650 | 1762 | 2 | 1.3 | 30.7 |
| G 4 | 0.650 | 1762 | 1 | 0.4 | 32.6 |
| G 1 | 0.650 | 1855 | 1 | 0.3 | 33.0 |
| G 1 | 0.650 | 1855 | 2 | 0.6 | 31.4 |
| G 2 | 0.650 | 1855 | 0 | — | — |
| G 3 | 0.650 | 1855 | 1 | 0.6 | 34.7 |
| G 4 | 0.650 | 1855 | 1 | 1.6 | 32.6 |
| G 4 | 0.650 | 1855 | 1 | 1.5 | 32.6 |
| G 1 | 0.650 | 1949 | 1 | 0.3 | 33.0 |
| G 1 | 0.650 | 1949 | 0 | — | — |
| G 2 | 0.650 | 1949 | 0 | — | — |
| G 3 | 0.650 | 1949 | 0 | — | — |
| G 4 | 0.650 | 1949 | 1 | 0.5 | 32.6 |
| G 4 | 0.650 | 1949 | 1 | 0.3 | 32.6 |

港 灣 技 研 資 料 No. 321

1 9 7 9 · 6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 日 青 工 業 株 式 会 社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.