

運輸省港湾技術研究所

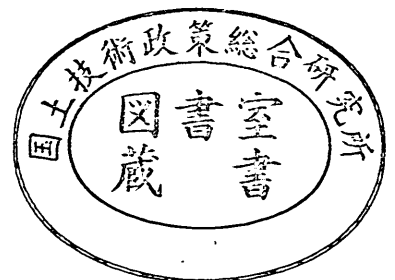
港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 24 NO. 2 JUNE 1985

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第24巻 第2号 (Vol. 24, No. 2) 1985年6月 (June 1985)

目 次 (CONTENTS)

1. An Effective Stress Analysis of Liquefaction at Ishinomaki Port during 1978 Miyagi-ken-oki Earthquake
..... Susumu IAI, Hajime TSUCHIDA and W. D. Liam Finn..... 3
(1978年宮城県沖地震の石巻港における液状化現象の有効応力解析
..... 井合 進・土田 肇・W. D. Liam Finn)
2. 不規則波に対する消波ブロックの安定性に関する実験的考察
..... 谷本勝利・原中祐人・山崎一雄.....85
(Experimental Study on the Stability of Wave Dissipating Concrete
Blocks against Irregular Waves.....Katsutoshi TANIMOTO,
Suketo HARANAKA and Kazuo YAMAZAKI)
3. 砂れん上の底質の浮遊過程を考慮した漂砂観測法に関する実験的研究
..... 入江 功・寺崎賢次・加藤一正... 123
(Laboratory Study on the Observation Methods of Sediment Transport
as Focussed on Suspension of Sediment above Sand Ripples
..... Isao IRIE, Kenji TERASAKI and Kazumasa KATOH)
4. 底質の移流沈降過程を入れた航路・港内埋没の予測
..... 入江 功・栗山善昭... 157
(Prediction of the Rate of Sedimentation in Channels and Basins by
Considering the Deposition Process Due to Convective Move of Bed
Materials..... Isao IRIE, Yoshiaki KURIYAMA)
5. 波力発電ケーソンに設置されたウェルズタービンの出力計算法
——波エネルギーに関する研究 第4報——
..... 高橋重雄・鈴木諭史・明瀬一行... 205
(Turbine Power of Pneumatic-type Wave Power Extractors Utilizing
Caisson Breakwaters
——A Study on Development of Wave Power, 4th Report——
..... Shigeo TAKAHASHI, Satoshi SUZUMURA and Kazuyuki MYOSE)
6. 淡塩二層密度界面の抵抗と混合特性.....中野 晋・鶴谷広一・一戸秀久... 239
(Friction and Entrainment at the Interface of Two-Layered Stratified
Flow Susumu NAKANO, Hiroichi TSURUYA and Hidehisa ICHINOHE)

7. コンクリートかさ上げの付着特性……………林 洋介・佐藤勝久… 275
(Bond Characteristics of Concrete Overlays
…………… Yousuke HAYASHI and Katsuhisa SATO)
8. 飽和砂地盤上の盛土の破壊振動実験と円形すべり安定解析
……………上部達生・北澤壮介・檜垣典弘… 305
(Shaking Table Tests and Circular Arc Analysis for Large Models
of Embankment of Saturated Sand Layers……………Tatsuo UWABE,
Sosuke KITAZAWA and Norihiro HIGAKI)
9. 土砂輸送パイプの摩耗に関する研究 (第2報)
——大口径ポリウレタンライニング管の耐摩耗性に関する現地実験
(苫小牧, 岸和田)——……………岡山義邦・浜田賢二・釜場和宏・中村裕二… 361
(Study on the Wear of Slurry Pipelines (2nd Report)——Field Tests
on Wear Resistance of Large Polyurethane Lined Pipe——
……………Yoshikuni OKAYAMA, Kenji HAMADA, Kazuhiro UKEBA
and Yuji NAKAMURA)

2. 不規則波に対する消波ブロックの安定性 に関する実験的考察

谷本勝利*・原中祐人**・山崎一雄***

要 旨

消波ブロック被覆堤の消波ブロックの安定性に関して、① 不規則波の作用と規則波の作用の相違、② 繰り返し実験による被害の変動特性、③ 波の諸元（周期、波高、継続時間）の影響、④ 乱積みと整積みの相違、について実験的に検討した。

不規則波と規則波の作用の比較では、ブロック重量4種、波の周期3種の実験結果から、 $H_{reg}/H_{1/3} = 1.5 \pm 0.37$ （平均値±標準偏差）、 $H_{reg}/H_{max} = 0.80 \pm 0.14$ の関係があり、波の周期や波高条件、さらには被害率によって変動することを示した。ここに、 H_{reg} 、 $H_{1/3}$ 、 H_{max} はそれぞれ同一の被害率を与える規則波の波高、および不規則波の有義波高、最高波高である。

被害の変動特性については、2種のブロック重量に対し、同一スペクトルから作成した12種の波群を用いて、合計36回の繰り返し実験を行い、被害率、安定限界波高、 K_D 値等の分布および変動係数を明らかにした。たとえば、安定限界有義波高の変動係数は約0.1、 K_D 値の変動係数は約0.3である。

波の諸元の影響については、相対水深、相対波高、および波の継続時間について検討し、これらによって安定性つまり K_D 値が変化することを示した。また、特に不規則波の作用においては、最高波高の現れ方が重要な因子であることを指摘した。

最後の乱積みと整積みの相違については、整積みとしてブロック間のかみ合わせをよくすることによって、安定性が著しく改善されることを示した。

* 水工部 防波堤研究室長

** 水工部 主任研究官（水理計測担当）

*** 水工部 防波堤研究室

2. Experimental Study on the Stability of Wave Dissipating Concrete Blocks against Irregular Waves

Katsutoshi TANIMOTO*

Suketo HARANAKA**

Kazuo YAMAZAKI***

Synopsis

The following discussions on the stability of wave dissipating concrete blocks in front of a vertical wall have been made on the basis of experimental results:

- ① Difference between the actions of irregular waves and regular waves.
- ② Variability of damage in the repeated tests.
- ③ Influence of wave dimensions on the stability.
- ④ Difference in the stability between random placement and regular placement.

According to the tests for four different block weights and three different wave periods, the following relations between the actions of irregular waves and regular waves areas obtained:

$$H_{reg}/H_{1/3} = 1.5 \pm 0.37 \text{ (average} \pm \text{standard deviation)}$$

$$H_{reg}/H_{max} = 0.8 \pm 0.14$$

where, H_{reg} : wave height of regular waves, $H_{1/3}$, H_{max} : significant and highest wave height of irregular waves.

As to the variability of damage, total test runs of 36 times have been carried out repeatedly for two different block weights by using 12 different irregular wave trains which are produced from the same wave spectrum. According to the test results, the distributions and the coefficients of variance for the damage percent, zero damage wave height and K_D -value are made clear. For example, the coefficient of variance for the zero damage significant wave height and K_D -value are 0.1 and 0.3, respectively.

As to the influence of wave dimensions, the influences of relative water depth, relative wave height and duration of waves have been investigated. It is pointed out that the stability is changed by these parameters and, in particular, that the ratio of the highest wave height to the significant wave height is a very important parameter.

As to the difference in the stability between the random placement and regular placement, it is demonstrated that the regular placement improves the stability greatly comparing with the stability by random placement.

* Chief of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

*** Member of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

目 次

要 旨	85
1. ま え が き	89
2. 実験水路および方法	89
2.1 実験水路	89
2.2 模 型	89
2.3 実験の種類および実験の条件	90
2.4 実験の方法および被害率の定義	91
3. 実験波の特性	92
3.1 不規則波の発生および解析法	92
3.2 不規則実験波のスペクトル	92
3.3 不規則波の変動性	94
3.4 波高分布および代表波諸元の関係	95
3.5 実験有義波諸元の決定	98
3.6 規則実験波の特性	101
4. 実験結果および考察	105
4.1 不規則波と規則波の違い	105
4.2 被害率の変動性	109
4.3 波の諸元の影響	114
4.4 乱積みと整積みの違い	118
5. む す び	119
参 考 文 献	120
主要記号一覧表	120

1. まえがき

直立部の前面に消波ブロックを投入した消波ブロック被覆堤は、消波ブロック被覆による反射波・伝達波軽減効果、波力軽減効果があるため、比較的水深の浅いところでの既設混成堤の改良断面および新規断面として多く採用され、我が国における主要な防波堤構造様式の一つとなっている。しかし、その耐波設計法については、通常の混成堤ほどには確立されておらず、特に不規則波の作用に関して未解明な面が多い。そのため、筆者らは不規則波による直立部に働く波力、消波ブロックの安定性、伝達波等の諸特性を明らかにすべく、実験的研究に取り組んできた。

このうち、直立部に働く不規則波力については既に報告したところであるが¹⁾、本報告はこれに続き消波ブロックの安定性に関するこれまでの成果をとりまとめたものである。

消波ブロックを含めた斜面被覆材の所用重量は我が国では Hudson 式により算定するのが標準である²⁾。しかしながら、これを適用するに際して重要な要素である K_D の値については、消波ブロックの種類等によって変化することから、状況に応じた模型実験結果に基づいて適切に定める必要があるが、その模型実験の標準的手法は定まっていない。これは消波ブロックの安定性に及ぼす波浪条件の影響等の因子がまだ十分に明らかにされていないことのほか、この種の安定性においては変動性が高くそれがどの程度ばらつくものであるかといった実験技術上の問題、さらには許容被害率等の設計思想の問題において多くのあいまいな点が残されていることによる。この最後の設計思想に関しては、筆者らは最終的には消波ブロックの安定性においても耐用期間における期待被害率を推定できるようにし、さらに被害率と機能低下の関係を示明かにして合理的設計法を検討していく必

要があると考えている。

本研究は、以上のような背景にあって、まず消波ブロックの安定性における基本的諸特性について知見を得ることを目的として実施したもので、以下の点について検討したものである。

- ① 規則波の作用と不規則波の作用の相違
- ② 繰り返し実験における被害率の変動性
- ③ 安定性に及ぼす波の諸元の影響
- ④ 消波ブロック全断面被覆と表層2層積みの場合の安定性の違い

これらによって、消波ブロックの安定性に関する実験手法上の留意点を明らかにするとともに、設計上の諸問題についての知見をまとめる。

2. 実験水路および方法

2.1 実験水路

実験は図-1に示しているように、全長163m、幅1.0m、深さ1.5mの半地下式の長水路(津波造波水路)で実施した。造波機は低慣性直流電動機駆動のピストン形式で、入力信号に追従して不規則な波を発生させることができる。

水路床は造波板位置から115mの区間が水平で、それから約13mを勾配3/100の斜面とし、そのあとに1/50斜面の模型床(モルタル仕上げの固定床)を設けた。堤体模型はこの1/50斜面上に設置するが、この部分は片面ガラス張りで、側方からの観察が可能である。また、水路端にはステンレス金くずを中詰めした消波装置を並べてある。

さらに、今回の実験では堤体前方に遮断壁を設け、所定の波が作用した後これを落下させ、造波機停止によって波列の最後部に発生する高波の影響を避けるようにした。

2.2 模型

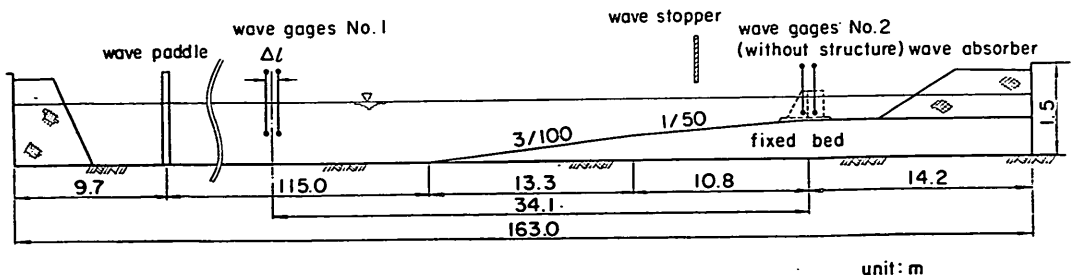


図-1 実験水路

表-1 消波ブロックの諸元

ブロックの種類	重量 (gf)		$\frac{\sigma_w}{W} \times 100$ (%)	単位体積重量 γ_r (gf/cm ³)
	平均重量 W	標準偏差 σ_w		
I	31.8	0.548	1.72	2.25
II	120.0	1.96	1.63	2.34
III	296.0	4.23	1.43	2.32
IV	596.4	9.75	1.63	2.35
V	1224.7	20.03	1.64	2.36

(1) 堤体

堤体は捨石マウンド、消波ブロックおよび直立部からなる。このうち、直立部の模型はステンレス鋼で製作した幅 50cm の函体である。この直立部の高さは 5 cm ごとに鋼枠を積み上げ固定することにより調整可能で、さらに上面にアクリル合成樹脂板を重ねて天端高を調整した。また、1 函当たりの長さは 48cm で、水路幅方向に 2 函並べ、その隙間にはベニア板をはさんで目詰めをした。

(2) 消波ブロック

消波ブロックはペンキで着色したあと重量を計測し、平均重量に対する個々のブロック重量の差が±3%以内に入るものを表層(2層)に限定して実験に用いた。表面乾燥飽水状態で測定したときの平均重量および単位体積重量等を表-1に示す。平均重量(W)は小さいほうから順に31.8, 120.0, 296.0, 596.4, 1224.7gfの5種類で、単位体積重量(γ_r)は2.25~2.36gf/cm³である。

なお、消波ブロックを着色したのは実験において色別に層状に配することによって波の作用による散乱のようすを判別しやすくするためである。

2.3 実験の種類および実験の条件

今回の実験は、表-2に総括しているように、シリーズ I, II, III, IVの四つに大別される。堤体の標準断面を図-2に示しているが、水深(h)は39.7cm、捨石マウンドの厚さは5cm、消波ブロックの法勾配は1:4/3、マウンド法勾配は1:2で全シリーズ一定である。このように、捨石マウンドの厚さを小さくしたのは消波ブロックの法面長をできるだけ長くとり、法先の影響を小さくすることを意図したものである。図中、 B_b は消波ブロック表層2個並びとしたときの天端幅、 b_0 は静水面での被覆層幅、 h_c は静水面上天端高であるが、これらは消波ブロックの重量によって異なる。表-3はこれらの諸元をまとめたものであるが、天端高 h_c は消波ブロックの平均

表-2 実験の種類と実験条件

実験の種類	ブロック重量 (gf)	並べ方	波浪条件	
			波種	$h/L_{1/3}$ (平均値)
シリーズ I	296.0 596.4	全断面 乱積	D波(D1~D12)	0.0856
シリーズ II	296.0	全断面 乱積	D波(D13)	0.0856
シリーズ III	31.8	全断面 乱積	A波(A1, A2)	0.126
	120.0		B波(B1, B2)	0.0892
	296.0		C波(C1, C2)	0.0682
	596.4		RA波	0.122
	1224.7		RB波	0.0879
		RC波	0.0691	
シリーズ IV	31.8	2層 整積	A波(A1, A2)	0.126
	120.0		B波(B1, B2)	0.0892
	296.0		C波(C1, C2)	0.0682
	596.4			

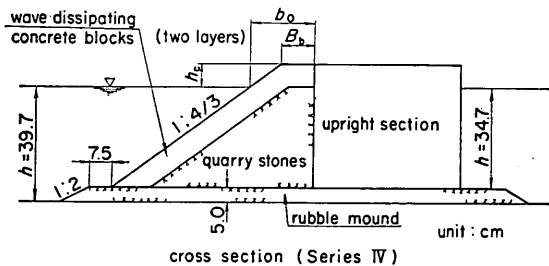
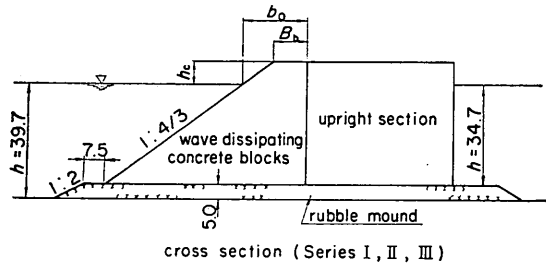


図-2 堤体標準断面

重量に対し Hudson 式により対応有義波高 $(H_{1/3})_W$ を逆算して、次の関係により決定したものである。

$$h_c = 0.6(H_{1/3})_W \dots \dots \dots (1)$$

$$(H_{1/3})_W = \{WK_D(S_r - 1)^3 \cot \alpha / \gamma_r\}^{1/3} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 S_r は流体の単位体積重量に対する消波ブロックの単位体積重量の比、 α は消波ブロックの法面と水

表-3 実験断面の諸元

ブロックの種類	平均重量 W (gf)	模型断面諸元(cm)			摘 要
		h_c	B_b	b_0	
I	31.8	4.0	5.6	10.9	乱積みと整積みの断面諸元は同じである。
II	120.0	6.2	8.7	17.0	
III	296.0	8.3	11.8	22.9	
IV	596.4	10.5	15.2	29.2	
V	1224.7	13.4	18.9	36.8	

平面とのなす角度であり、定数 K_D はこの場合概略値として8.3を用いた。

各シリーズごとの実験内容等は以下のとおりである。

まず、シリーズIの実験は消波ブロックの安定性に係わる被害率の変動性を、実験条件を限定して、やや詳細に調べたものである。対象とした消波ブロックの平均重量は296.0および596.4gfの2種類で、全断面乱積みである。波浪条件については3.で後述するが、同一のスペクトルを目標として作成した12種の波群(D1~D12, 各波群255波)を作用させた。このD波の相対水深 $h/L_{1/3}$ ($L_{1/3}$: 有義波長)は波高レベルにより0.0806~0.0890の間で変化し、平均は0.0856である。また、入射有義波高 $H_{1/3}$ は最終被害率が5%以上となる条件まで順次大きくして実験を行うのを原則とした。

シリーズIIの実験は波の作用時間による被害率の変化を調べたものである。消波ブロックの平均重量は296.0gfの1種で、全断面乱積みである。また、波浪条件もD波(D13)の1種で、作用時間のみを波数に換算して、約250, 500, 750, 1000波の4種類に変化させた。入射有義波高はシリーズIと同じく被害率が5%以上となる条件まで順次大きくした。

シリーズIIIの実験は主として周期による被害率の変化、および不規則波と規則波の違いによる被害率の変化を調べたものである。対象とした消波ブロックの平均重量は31.8, 120.0, 296.0, 596.4, 1224.7gfの5種類で、全断面乱積みである。波浪条件は前出の表-2に示しているように、不規則波はA波($h/L_{1/3}=0.126$), B波($h/L_{1/3}=0.0892$), C波($h/L_{1/3}=0.0682$)の3種についてそれぞれ2波群に分けて合計の波数が約500波となるように連続して作用させた。規則波はRA波($h/L=0.122$, L : 波長)RB波($h/L=0.0879$), RC波($h/L=0.0691$)の3種である。規則波の実験では通常造波板の再反射波の影響を避けるため、有効波数内で一度造

波機運転を止め、所用の波数が得られるまで実験を繰り返す必要があるが、今回の実験ではそれぞれ対応する不規則波と同じ作用時間だけ波を連続作用させた。このときの波の性質については3.で後述する。波高は5種類に変化させ最終被害率が5%以上となるように順次大きくするのを標準とした。ただし、消波ブロックの重量の最も大きい $W=1224.7$ gfについては、水路で生じる最も大きい波高条件でも安定であり、被害率のデータは得られていない。

シリーズIVの実験は消波ブロックの被覆の仕方による被害率の変化を調べたものである。堤体標準断面は前出の図-2に示したように直立部の前面に捨石を中詰めし、表層2層を消波ブロックで整積み被覆したものである。対象とした消波ブロックはシリーズIIIと同じであり、最も重量の大きい $W=1224.7$ gfについてはこの場合も十分安定であったので、被害率のデータが得られていない。また、断面形状の諸元、波浪条件もシリーズIIIと同じであるが、シリーズIVでは規則波による実験は行っていない。

2.4 実験の方法および被害率の定義

実験は、消波ブロックを並べて準備完了したのち、まず波高の小さい波から作用させ、消波ブロックの挙動を目視で観察することによった。不規則波の場合波が定常状態になるまでの初期の波もそのまま作用させたが、規則波に対してはその間フィルター(20枚)を通して減衰させた。波高は順次大きな波を作用させるわけであるけれども、波高条件を変更する際消波ブロックの並べ換えは行わず、被害ブロックの個数はそれまでの被害個数に当該波高条件で新たに発生した個数を加えた累計数とした。

消波ブロックの被害個数は検査域を設定して、その範囲だけで数えることにし、被害の判定はブロックの長さの1/2ないし1倍以上移動したものを被害とするのを基準とした。

被害率 D (%) は次の式で定義する。

$$D = \frac{n}{N} \times 100 \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 N は検査域での消波ブロックの総数、 n は当該波高条件での累積被害個数である。

本実験における検査域は水路幅方向1mのうち中央50cmの範囲とし、さらに水深方向には天端から静水面下2.5 h_c の深さまでとした。このように水深方向に検査域を限定したのは、今回の実験では水深および捨石マウンドの厚さを一定にしているため、消波ブロックの重畳に

表-4 消波ブロックの総数

ブロックの種類	平均重量 $W(gf)$	上層(2層分)		下層		合計	
		乱積み	整積み	乱積み	整積み	乱積み	整積み
I	31.8	198	249	210	—	408	249
II	120.0	124	162	131	—	255	162
III	296.0	90	116	94	—	184	116
IV	596.4	67	84	68	—	135	84
V	1224.7	65	—	69	—	134	—

よって所要ブロック数が著しく異なり、実際の下端まで対象とすると同じ個数のブロックが移動しても被害率が非常に違ったものとなることによる。また、静水面下 $2.5h_c$ までの深さとしたのは、傾斜堤などの被覆材の Hudson 式による重量の被覆深さは静水面下 $1.5H_{1/3}$ とするのが通常であり、これを目安にしたものである。つまり、この場合天端高 h_c を消波ブロックの重量から逆算した有義波高 $(H_{1/3})_W$ の 0.6倍としているため、次式のように $1.5(H_{1/3})_W$ 対応する深さが天端高より与えられる。

$$\text{検査域の下端の深さ} = 1.5(H_{1/3})_W = 2.5h_c \dots (4)$$

表-4はこうして設定した検査域での総数 N を示したものである。全断面乱積みの場合にも上層(表層2層)と下層に分けて示してあるが、表層2層で乱積みと整積みを比較すると、整積みの個数が乱積みの個数より 26~30% 多くなっており、整積みとしたほうがよく締った状態であることが知られる。

なお、この総数 N は被覆部の最下端までに実際に投入したブロック個数に、被覆全断面積に対する検査域の断面積の比を乗じて算出したものである。また、後述する安定実験の結果では、ブロックの被害はほとんどの場合天端面に生じ、多くても静水面付近までで、検査域以外のブロックが被害を生じることはなかった。

3. 実験波の特性

3.1 不規則波の発生および解析法

(1) 不規則波の入力信号

本実験で用いた不規則波の入力信号は Bretschneider・光易型のスペクトルを目標として作成したものであるが、その方法はシリーズ I, II (D波) とシリーズ III, IV (A, B, C波) とで異なる。

シリーズ I, II の入力信号は逆フーリエ変換による方

法により作成した。これは各成分波の複素フーリエ係数から FFT アルゴリズムにより時系列信号を合成する方法である。不規則波実験解析装置 (DS-600) を用いて作成した入力信号を、D/A 変換によりアナログ電圧信号に変換してデータレコーダに収録したのち、造波機に入力した。

シリーズ III, IV の入力信号は次のように作成した。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、データレコーダに記録する。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した。なお、規則波はオシレータにより発生させた。

(2) 波形測定および解析

堤体模型を設置する以前の状態での波高測定は前出の図-1に示したように、堤体設置位置から約 34m 沖側へ離れた水平床上を測定 No. 1、堤体設置位置を測点 No. 2 としてそれぞれ容量式波高計 2 台ずつを用い、合計 4 台により測定した。このうち測点 No. 1 の波高計は、間隔 Δt だけ離して設けたもので、堤体設置後も常置し、入・反射波の分離計算に用いるものである。この設置間隔 Δt は入射波の周期に応じて適当に変化させる。測点 No. 2 は堤体位置での波高を調べるもので、直立部前壁予定位置を中心に測点 No. 1 と同じ間隔だけ離して設置した。

波形解析は不規則波解析装置 (NOVA 4)³⁾ によるオンラインで行った。その内容はゼロアップクロス法による波高の統計処理およびスペクトル解析などのほか、必要に応じて入・反射波の分離による反射率の計算である。これらの解析における 1 チャンネルあたりのデータ数は 4096 個で一定とし、250 波を目標解析波数とするのを標準とした。したがって、シリーズ II の実験のように波数が 500~1000 波の場合には、波列を約 250 波ずつに分けて解析した。

3.2 不規則実験波のスペクトル

発生波のスペクトルを図-3(1)~(4)に示す。これは堤体を設置する以前の状態で、測点 No. 1 の波高計 2 本で得られた各波群 (A~C 波は 2 波群、D 波は 12 波群) のスペクトルを平均し、無次元化して示したものである。ここに、有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ はゼロアップクロス法で求めた値である。図には目標とした Bretschneider・光易型のスペクトルも示してあるが、これと比較すると低周波数側が大きく、高周波数側が周波数が高くなるほど小さくなる傾向を示している。この傾向は有義波周期が短いほど顕著で、有義波周期の長い C 波の場合には高

不規則波に対する消波ブロックの安定性に関する実験的考察

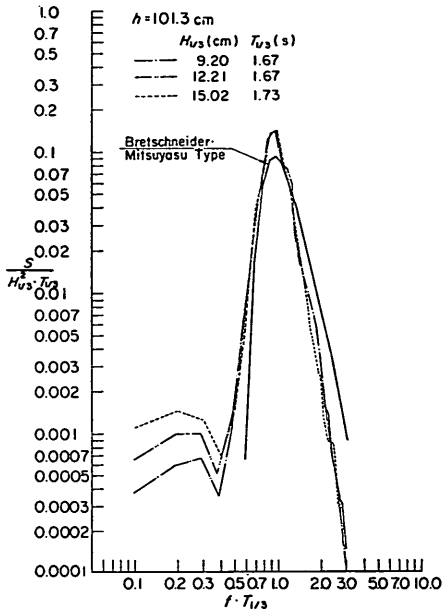


図-3(1) 実験波のスペクトル (A波)

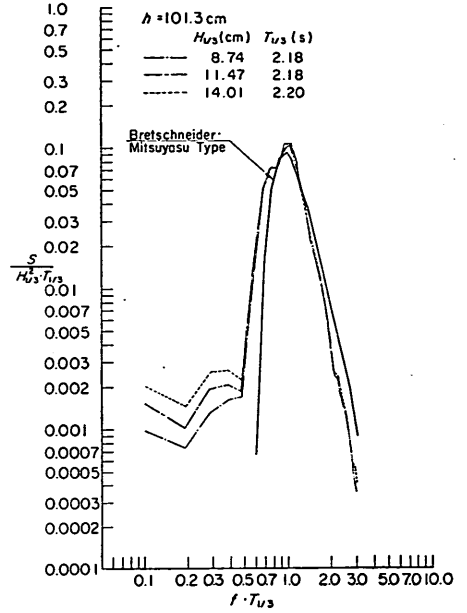


図-3(2) 実験波のスペクトル (B波)

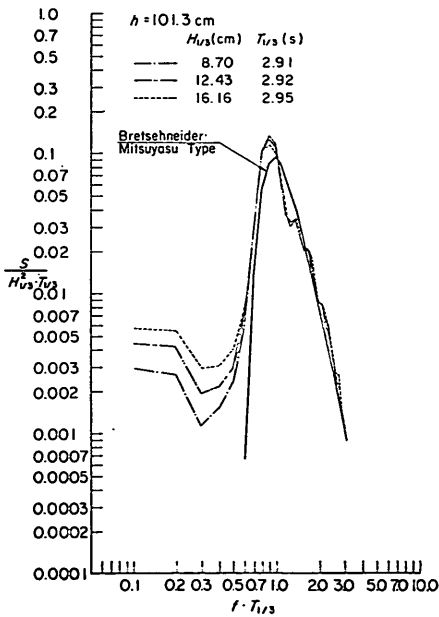


図-3(3) 実験波のスペクトル (C波)

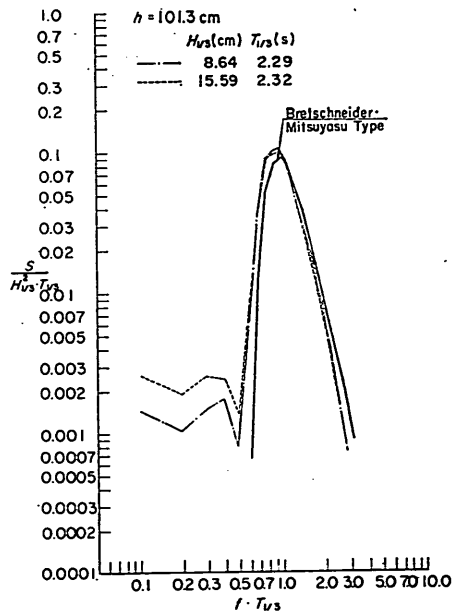


図-3(4) 実験波のスペクトル (D波)

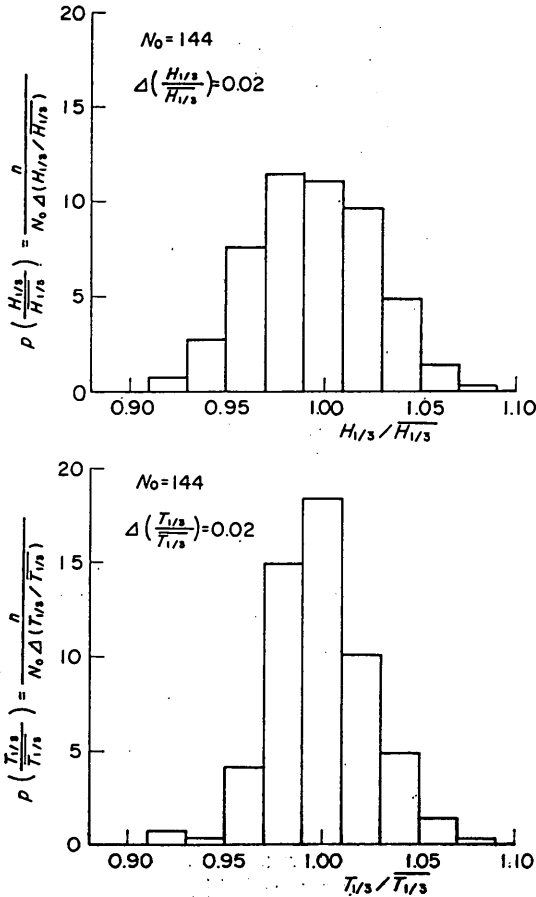


図-4 有義波高および有義波周期の相対度数分布

周波側の減衰は著しくない。これは本実験水路が非常に長く、また粗度が大きいので、高周波成分ほど水路における減衰が大きいことによると考えられる⁴⁾。

3.3 不規則波の変動性

(1) 有義波高および有義波周期の変動性

ある長さの記録に対する有義波高や有義波周期は、波の不規則性に起因する統計的性質のため、変動することが知られている。ここでは、D波(D1~D12)を対象としてこれらがどの程度変動するものであるかを調べておく。

図-4はD1~D12に対し、測点No.2から求めた有義波高と有義波周期の相対度数分布を示したものである。図中 $\bar{H}_{1/3}$ および $\bar{T}_{1/3}$ は各入力基準目盛 e ごとに、12種の波群に対して2点で得られた有義波高および有義波周期の平均値である。波高レベルを決める入力基準電圧は6種

に変化させている。したがって、データ総数 N_0 は $12 \times 2 \times 6 = 144$ 個である。横軸は $\bar{H}_{1/3}$ あるいは $\bar{T}_{1/3}$ で無次元化し、縦軸には相対度数 n/N_0 を分割幅 $\Delta(H_{1/3}/\bar{H}_{1/3})$ あるいは $\Delta(T_{1/3}/\bar{T}_{1/3})$ で割って確率密度のかたちにしてある。これによると、 $H_{1/3}/\bar{H}_{1/3}$ は0.93~1.08、 $T_{1/3}/\bar{T}_{1/3}$ は0.93~1.07の範囲に分布し、標準偏差 σ はそれぞれ0.031および0.021である。

こうした波浪の統計的変動特性に関しては合田が数値実験によって調べている⁵⁾。今回の実験における1波群の平均波数 N_W は251波であるので、これに対する数値実験による標準偏差を図から外そうして読みとると、 $H_{1/3}/\bar{H}_{1/3}$ に対して0.035、 $T_{1/3}/\bar{T}_{1/3}$ に対して0.022程度である。また、数値実験による結果は方向スペクトル波($S_{max}=10$)に対するものであるが、波高がレーリ分布するときの無作為抽出によって求めた $H_{1/3}/\bar{H}_{1/3}$ の標準偏差は0.032となり、今回の実験結果とよく一致していることが知られる。

(2) 最高波高の変動性

最高波高は波群そのものの変動性のほかに、たとえ $H_{1/3}$ が同じであっても、波形記録が違えば H_{max} の値は皆異なるという基本的性質を有している。そのため、不規則波の代表波高の中でも、最高波高は特に変動性が高い。しかも、砕波帯内においては砕波限界波高によって規制されるので、 $H_{1/3}/h$ の値によってもその分布が異なることになる。

表-5 $H_{max}/\bar{H}_{1/3}$ の平均値と標準偏差 (D1~D12, $N_0=24$, $N_W=251 \pm 20$)

$\frac{\bar{H}_{1/3}}{h}$	$H_{max}/\bar{H}_{1/3}$		標準偏差 平均値
	平均値	標準偏差	
0.233	1.686	0.123	0.073
0.335	1.725	0.160	0.093
0.436	1.618	0.138	0.085
0.523	1.453	0.096	0.066
0.581	1.364	0.077	0.056
0.616	1.372	0.090	0.066

図-5(1)、(2)はD波について $\bar{H}_{1/3}/h$ ごとに、 $H_{max}/\bar{H}_{1/3}$ の相対度数分布を示したものである。図中、 $H_{max}/\bar{H}_{1/3}$ の平均値(\bar{x})と平均値±標準偏差($\bar{x} \pm \sigma$)も示してあるが、これらの平均値と標準偏差の値は表-5に示したとおりである。また、図-5(1)中には波高がレーリ分布であ

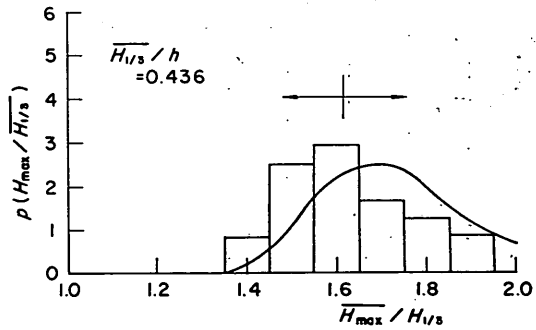
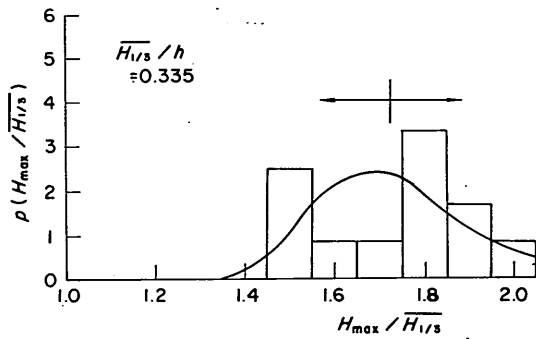
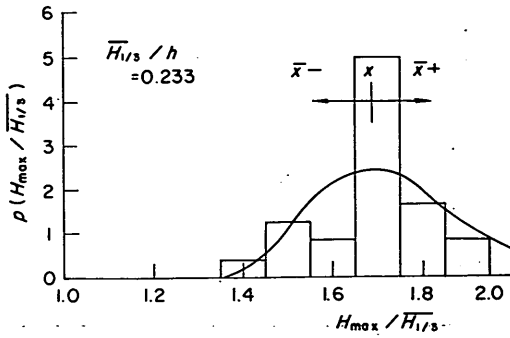


図-5(1) 最高波高の相対度数分布

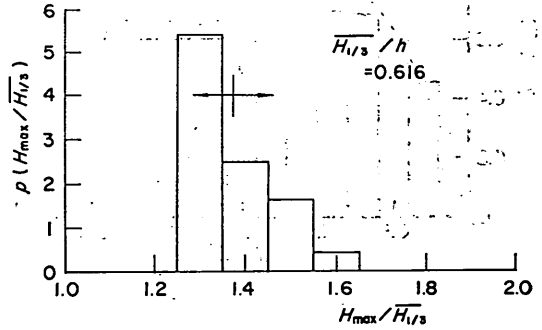
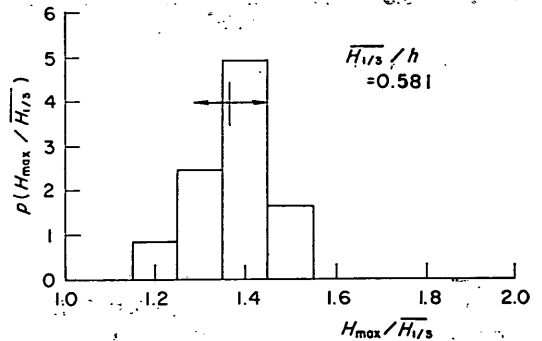
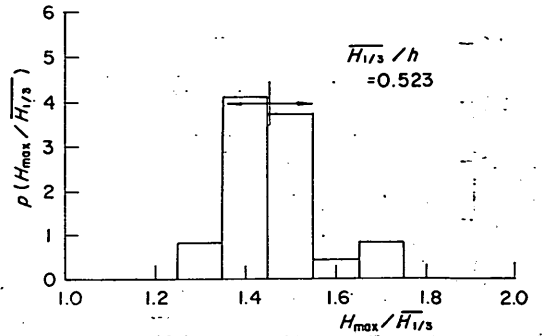


図-5(2) 最高波高の相対度数分布

ときの、波数 $N_W=251$ に対する $H_{max}/H_{1/3}$ の確率密度曲線の理論値⁹⁾を示している。ただし、 $H_{1/3}/h=0.436$ の条件では、砕波の影響を受けるためレーリ分布の仮定を棄却しなければならないが、参考のため示しているにすぎない。これらの結果から、 $H_{max}/H_{1/3}$ の平均値は $H_{1/3}/h=0.233\sim 0.335$ では、 $1.686\sim 1.725$ で大差ないが、 $H_{1/3}/h \geq 0.436$ では、 $H_{1/3}/h$ の値が大きくなるにつれて小さくなり、また変動の幅も小さくなる傾向にあり、砕波の影響を受けていることが明らかである。また、波高がレーリ分布であるときの $H_{max}/H_{1/3}$ の理論による平均値は 1.75 であり、実験値はこれよりやや小

い。なお、 $H_{max}/H_{1/3}$ の確率分布は、 $H_{1/3}/h$ の値が小さい場合でも、理論値と比較して片寄りや凹凸がみられる。これは、データ総数 N_0 が 24 個と少ないことによると考えられる。

3.4 波高分布および代表波諸元の関係

(1) 波高の相対度数分布

不規則波の波高分布は、砕波の影響を受けないところでは、レーリ分布にはほぼ一致することが知られているが、ここでは実験波についてその分布を調べてみる。

図-6(1)~(4)は堤体を設置しない状態で、水深の大きい測点 No. 1 で得られた波高の相対度数分布を例示したも

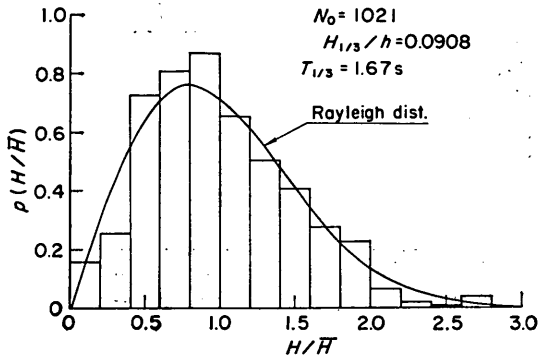


図-6(1) 波高の相対度数分布 (A波)

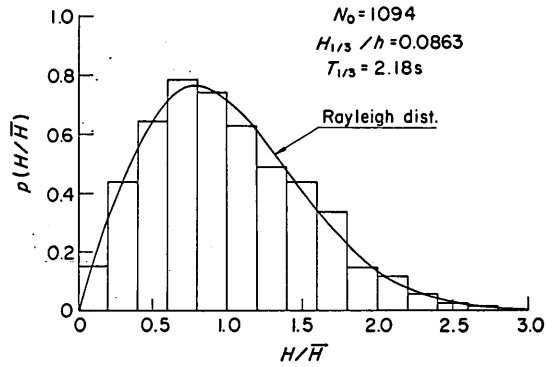


図-6(2) 波高の相対度数分布 (B波)

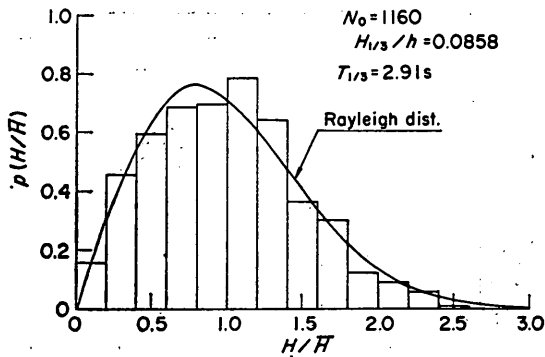


図-6(3) 波高の相対度数分布 (C波)

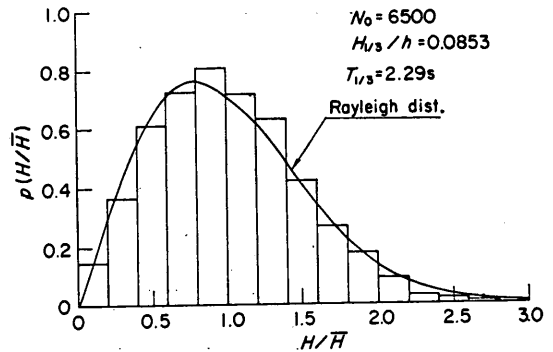


図-6(4) 波高の相対度数分布 (D波)

のである。A, B, C, D波それぞれの各波群の結果をそれぞれの平均波高 \bar{H} で割って無次元化し集計したもので、図中の $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ は各波群の平均値である。図にはレーリ分布の曲線も示してあるが、実験波の分布はこれに近い分布となっていることが確認できる。

(2) 不規則波代表波高間の関係

前項では波高分布について調べたが、ここでは堤体設置位置水深測点 No. 2 の記録に基づき代表波高の関係を調べる。

図-7(1)~(4)はA波 (A1, A2), B波 (B1, B2), C波 (C1, C2), D波 (D1~D12) の有義波高に対する代表波高の関係を示したものである。A, B, C波の最高波高 (H_{max}) については 2 種類の波群に対する測点

No. 2 での 2 点での値すべてを、1/10 最大波高 ($H_{1/10}$), 平均波高 (\bar{H}) については 4 個のデータの平均値のみをプロットしている。D波については、 H_{max} , $H_{1/10}$, \bar{H} ともに各波群 (D1~D12) ごとの 2 点での平均値をプロットしている。図中の曲線はこれらの平均的關係を示したものであるが、A, B, C波の H_{max} に対してはデータの上限に近い値を選んである。これはA, B, C波を用いるシリーズⅢ, IVの実験では 2 種類の波群 (A1, A2等) を各波高レベルごとに連続して作用させるのに対し、D波を用いるシリーズⅠの実験では各波群を別々に作用させるためである。すなわち、A, B, C波については約500波中の最高波高、D波については約250波中の最高波高の平均値を表すよう配慮したものである。

不規則波に対する消波ブロックの安定性に関する実験的考察

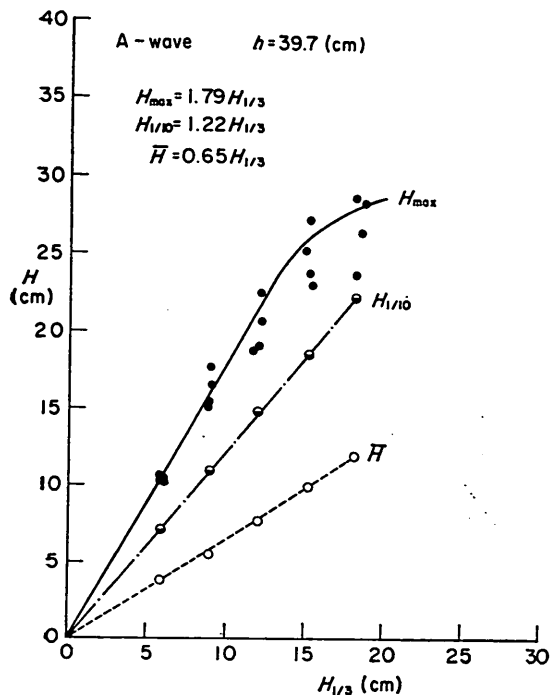


図-7(1) 代表波高間の関係 (A波)

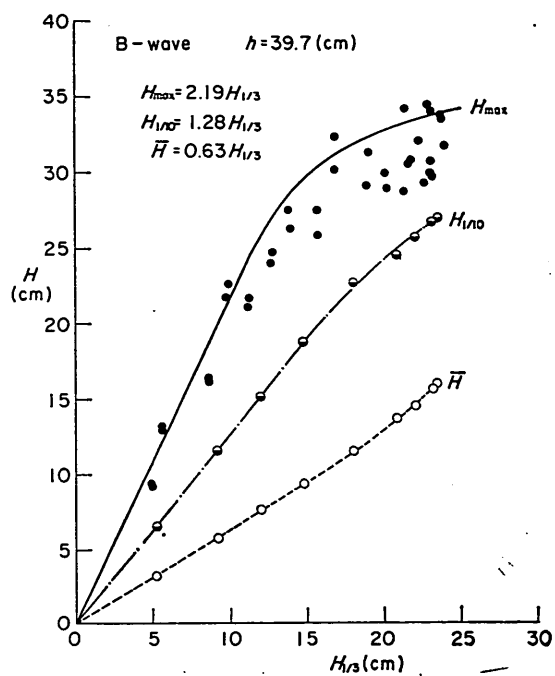


図-7(2) 代表波高間の関係 (B波)

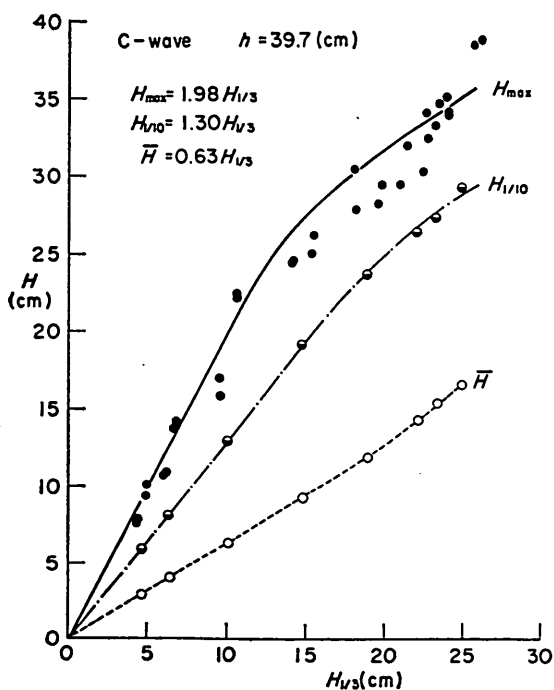


図-7(3) 代表波高間の関係 (C波)

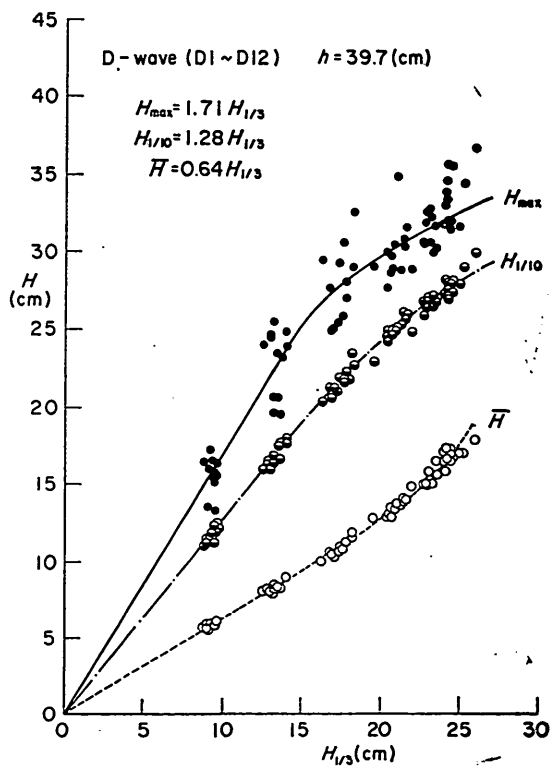


図-7(4) 代表波高間の関係 (D波)

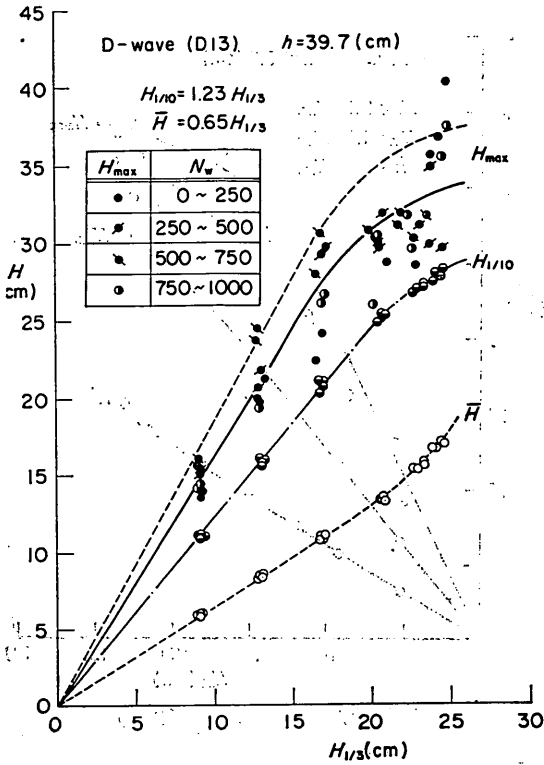


図-8 代表波高間の関係 (D13)

各実験波ともに、有義波高が大きくなるにつれて碎波の影響による変化が認められる。すなわち、 H_{max} や $H_{1/10}$ は増大傾向が鈍化し、 \bar{H} は逆に大きくなる傾向を示している。この傾向は合田の碎波変形理論⁷⁾による傾向と一致する⁸⁾。また、非碎波条件の場合の代表波高間の関係はレーリ分布から、 $H_{1/10}/H_{1/3}=1.27$ 、 $\bar{H}/H_{1/3}=0.625$ と推定されるが、実験による関係はそれぞれ1.22~1.30、0.63~0.65でこれにはほぼ一致している。 $H_{max}/H_{1/3}$ の値はD波については既に述べたとおりであるが、A、B、C波については波数500に対して平均値が1.84と推定されるのに対し、実験値(図中の曲線における直線部での関係)では1.79~2.19で、B、C波についてはやや大きく、A波についてはやや小さい値となっている。

一方、図-8はシリーズIIの実験に用いた波D13の代表波高間の関係を示したものである。この場合1000波の記録を取り、それを250波づつに分けて解析しているが、 H_{max} については0~250波、250~500波、500~750波、750~1000波の間の2点での値すべてを、 $H_{1/10}$ 、 \bar{H} については、0~250波、0~500波、0~750波、0~1000波での値の2点での平均値をプロットしてある。したがっ

表-6 代表周期間の関係と標準偏差 (不規則波)

波種	No	$T_{max}/T_{1/3}$		$T_{1/10}/T_{1/3}$		$\bar{T}/T_{1/3}$	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
A波 (A1, A2)	20	1.04	0.090	1.02	0.018	0.928	0.017
B波 (B1, B2)	36	1.15	0.131	1.04	0.037	0.868	0.022
C波 (C1, C2)	32	1.11	0.144	1.07	0.052	0.814	0.021
D波 (D1~D12)	144	1.11	0.177	1.04	0.043	0.860	0.018

て、 H_{max} の上限に近い値は、1000波中の最高波高、平均的關係は250波のときの最高波高の平均値を表す。250~1000波に対する非碎波条件での $H_{max}/H_{1/3}$ の理論値は1.75~1.93の範囲であるのに対して、実験値は1.54~1.86と小さい。 $H_{1/10}$ や \bar{H} は波数によってそれほど変化がなく、 $H_{1/3}$ に対する比の値も理論値に近い。

(3) 代表波周期の関係

表-6は代表周期間の関係をまとめて示したものである。各波種に対して2測点での測定値の全データに対する平均値と標準偏差を求めたもので、したがって T_{max} は約250波中の最高波の周期に対応する。これによると、有義波周期に対する最高波の周期の比 $T_{max}/T_{1/3}$ は1.04~1.15、1/10最大波の周期の比 $T_{1/10}/T_{1/3}$ は1.02~1.07、平均周期の比 $\bar{T}/T_{1/3}$ は0.814~0.928で、波種によって代表周期の値は若干変化している。

3.5 実験有義波諸元の決定

(1) 再反射波の影響

不規則波実験においては波を長時間続けて作用させるため、造波板からの再反射波の影響が問題となる。そのため、堤体設置後の安定実験時に沖側測点No.1の波高計2本で波形を記録し、入・反射波の分離計算を行って堤体側に進行する波の波高を求め、堤体設置以前の状態での同じ測点の波高との関係を調べてみた。

図-9はその結果を示したもので、横軸に堤体設置以前の状態での測点No.1の有義波高(通過有義波高)、縦軸は堤体設置後の状態での分離入射有義波高である。これによると、波高が小さく、周期が長いほど分離入射有義波高が通過有義波高より若干大きくなっており、波高が大になるにつれて両者は一致する傾向が認められる。しかし、両者の違いは10%以内であり、当実験の場合再反射波の影響はそれほど大きくない。そのため、今回の実験では特に再反射波の影響による実験波諸元の補正は行わず、通過波諸元をそのまま実験波諸元として用いる。

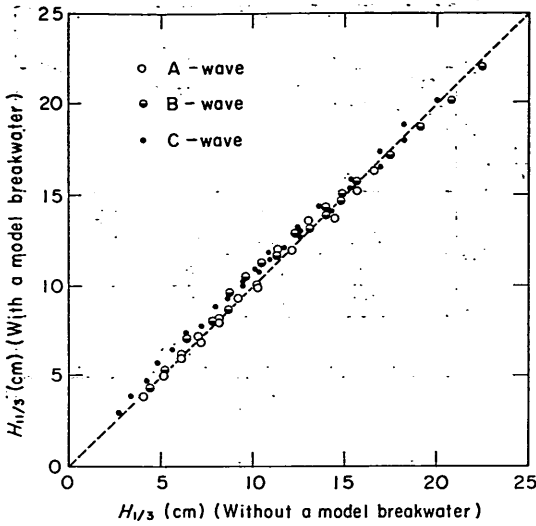


図-9 通過有義波高と分離入射有義波高の関係

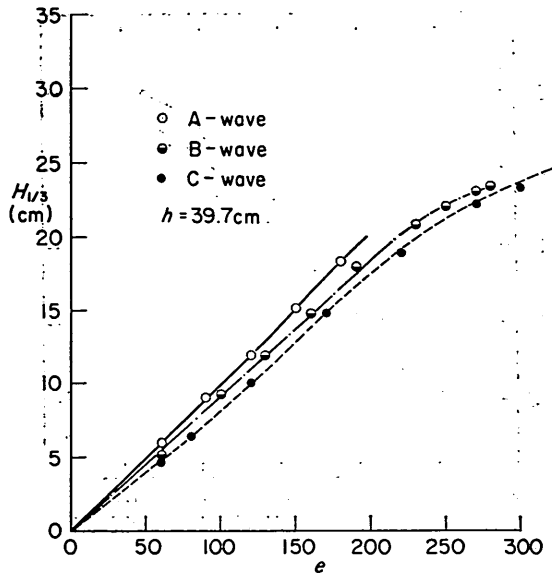


図-11 入力基準目盛波高と有義波高の関係 (A, B, C波)

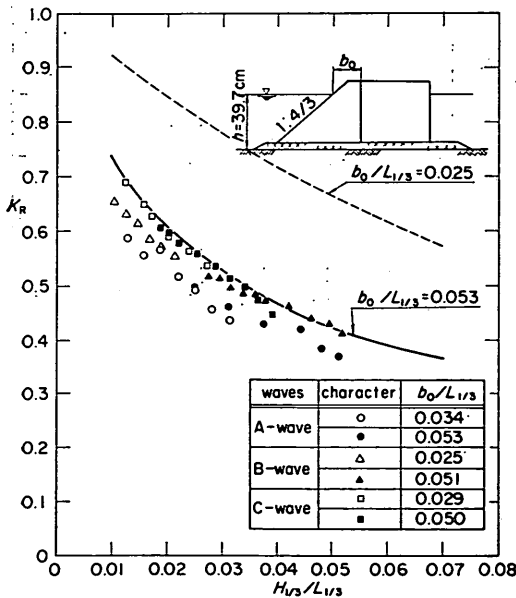


図-10 消波ブロック被覆堤の反射率

これは、前述したように当実験に用いた水路が非常に長くて、かつ粗度が大きいため、側壁の摩擦抵抗等による減衰が大きいこと、および対象とした構造の反射率が0.35~0.70と低反射構造物であることによると考えられる⁴⁾。

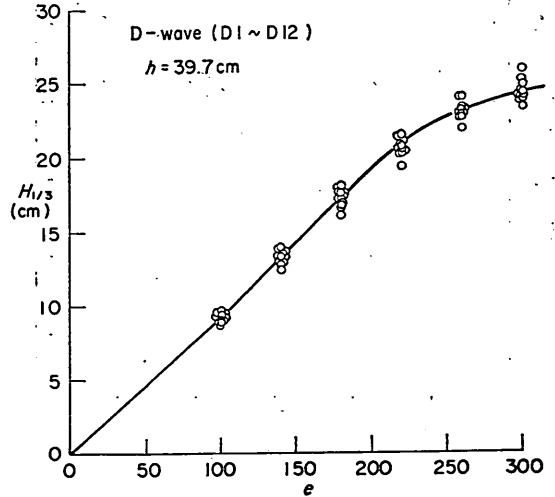


図-12 入力基準目盛と有義波高の関係 (D波)

なお、図-10は今回の実験による反射率 K_R を入射波の波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ に対しプロットしたものである。図中、先に報告した消波ブロック被覆堤の反射率の算定式¹⁾による計算曲線も $b_0/L_{1/3}$ の上限値(0.053)、下限値(0.025)に対して示してあるが、特に $b_0/L_{1/3}=0.025$ の曲線は実験値より0.3程度大きくまったく合っていない。

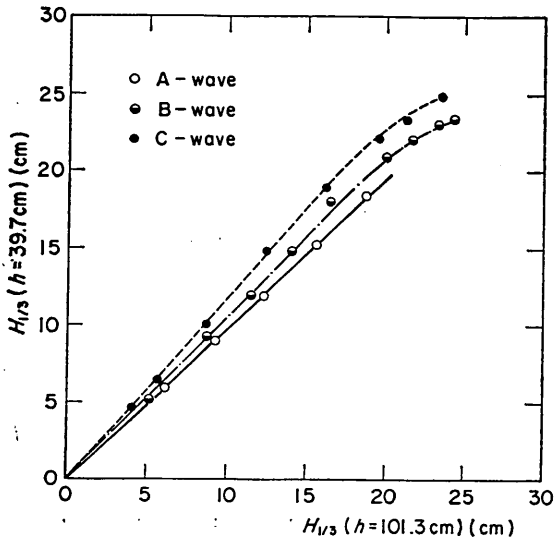


図-13 沖側波高と堤体位置通過波高の相関 (A, B, C波)

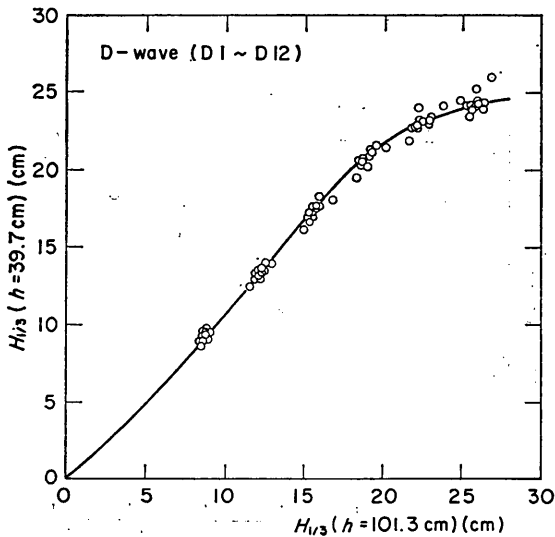


図-14 沖側波高と堤体位置通過波高の相関 (D波)

これは反射率の算定式に明らかに適用限界のあることを意味しており、先に示した反射率の算定式は $b_0/L_{1/3}$ が 0.06程度以上のときのみ適用可能であると考えなければならない。また、 $b_0/L_{1/3}=0.053$ の計算値を実験値と比較しても計算値のほうがやや高い反射率となっている。これも適用範囲からはずれるほか、今回の実験では模型前方34.1m地点で反射率を測定しており、次項で述べる

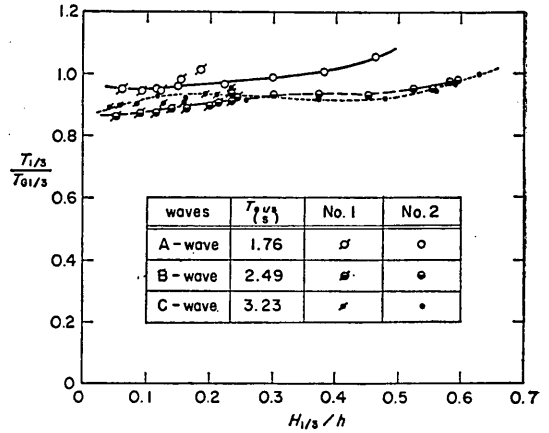


図-15 有義波高と有義波周期の関係 (A, B, C波)

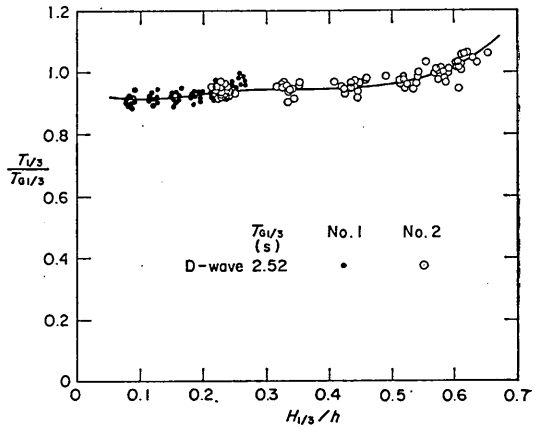


図-16 有義波高と有義波周期の関係 (D波)

ようにその間における波の減衰により反射率がやや低目の値となっていることも一因と考えられる。

(2) 有義波高

図-11はA, B, C波について、図-12はD波について入力基準目盛 e と有義波高 $H_{1/3}$ の関係を示したものであり、実験波の入射有義波高の値はこの図の曲線の関係から推定する。これらはいずれも測点 No. 2 ($h=39.7$ cm) での2点での平均有義波高をプロットしたものであるが、 $H_{1/3}$ が20 cmを超える付近から碎波の影響を受けて増大傾向が鈍化していくことが知られる。また、図-13, 14は沖側測点 ($h=101.3$ cm) での有義波高 $H_{1/3}$ と堤体位置測点 ($h=39.7$ cm) での有義波高 $H_{1/3}$ の相関を示したものであるが、両者の直線部の比の値(0.98~1.18)

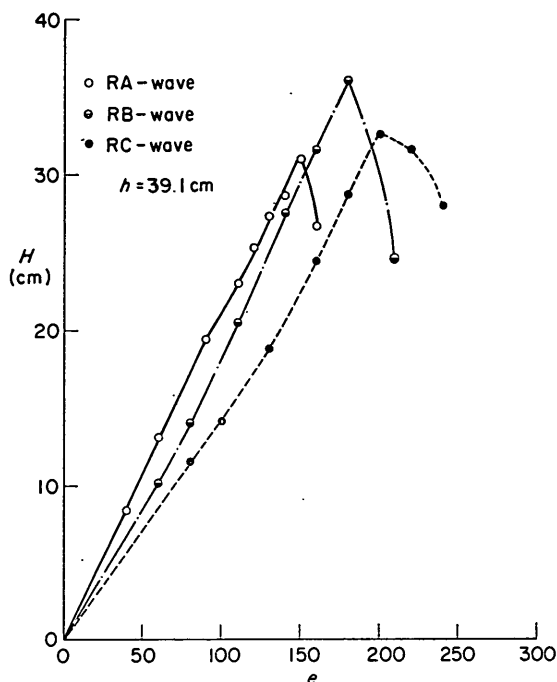


図-17 入力基準目盛と波高の関係 (RA, RB, RC 波)

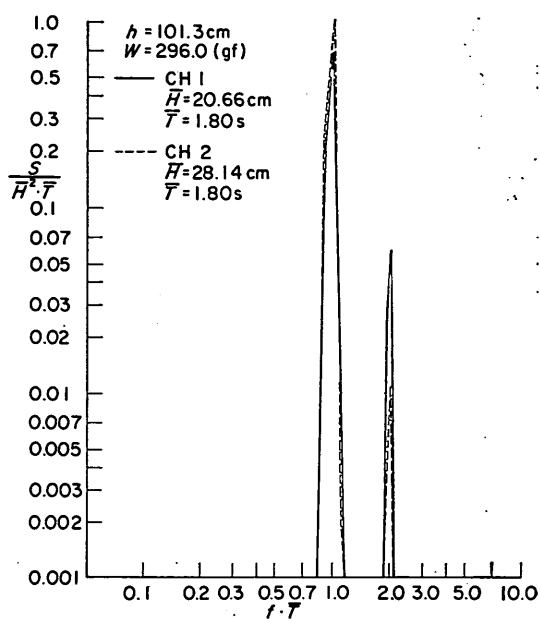


図-18(1) 規則波のスペクトル (RA 波)

は浅水度係数から算出される値 (1.03~1.24) よりやや小さく、沖側測点と岸側測点での間の波の減衰が影響しているようである。

(3) 有義波周期

同じ波形の入力信号を用いても、波高レベルを表す入力基準目盛 e によって発生波の周期が若干変化する。図-15はA~C波、図-16はD波について有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ の関係を適当に無次元化して示したもので、有義波高が大きくなると周期がやや長くなる傾向が認められる。周期の無次元化に用いた $T_{G1/3}$ は入力信号の有義波周期である。深水波の場合には発生波の有義波周期はこの値に一致する ($T_{1/3} = T_{G1/3}$) はずであるが、実際には浅水波であるため小さくなっている。これは浅水波の条件においては造波特性が周期の関数であり、周期が長いほど効率が低いなどの影響による。

なお、これらの図の測定範囲における測点 No. 2 の有義波周期の平均値はA波1.75 s、B波2.37 s、C波3.04 s、D波2.46 sであり、今後は有義波周期を代表させて言う場合にはこれを用いる。

3.6 規則実験波の特性

(1) 通過波

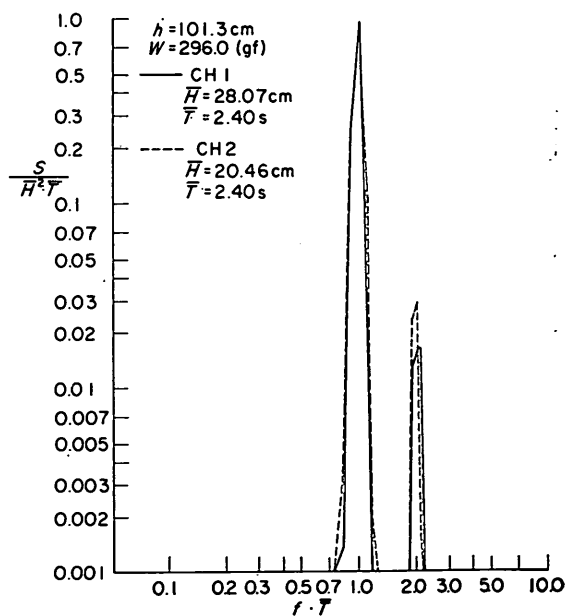


図-18(2) 規則波のスペクトル (RB 波)

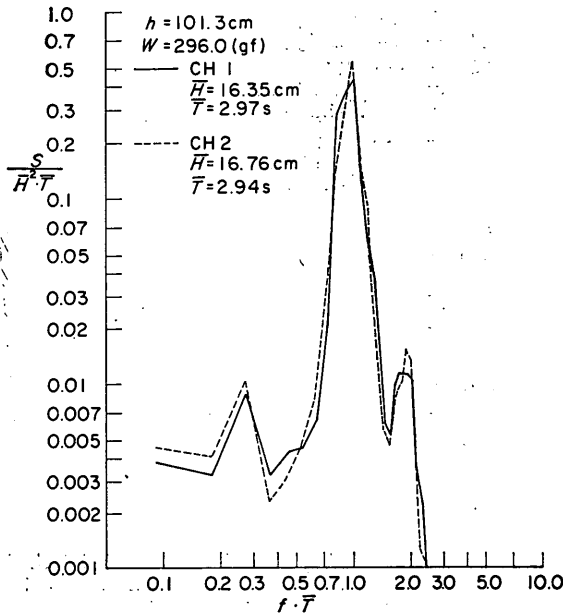


図-18(3) 規則波のスペクトル (RC波)

堤体を設置する以前の状態での規則波は一定の波高と周期を有した規則的な波である。

図-17は入力基準目盛 e (規則波の場合は造波板の偏心に一致する) と堤体設置予定地点 ($h=39.7\text{cm}$) での通過波高の関係を示したものである。周期はRA波が1.80

s, RB波が2.40s, RC波が3.00sである。いずれも砕波後の波の条件まで検定してあるが、実験では砕波限界の波までしか採用していない。なお、合田の砕波指標による砕波限界波高はRA波27.8cm, RB波28.8cm, RC波29.8cmで、今回の測定値よりやや小さい。

(2) 堤体設置後の規則実験波のスペクトル

堤体設置後においては、今回の実験では前述したように長時間 (有効波約 500 波) 波を連続して作用させているため、造波板からの再反射波の影響によって波形が乱れる。そのため、堤体を設置した状態で測点 No. 1 で得られた波形記録に基づき、スペクトルや波高の変動特性等を調べておく。ただし、この場合、水路内に部分重複波が形成されるため、最も極端な条件でも腹と節の両方の記録が得られるように、波高計間隔は $L/4$ としている。

図-18(1), (2), (3) は各周期条件ごとのほぼ定常状態に達したあとのスペクトルを無次元化して示したものである。図中、CH1は測点 No. 1 での沖側、CH2は同岸側を示し、 \bar{H} , \bar{T} はゼロアップクロス法で求めた波高、周期の平均値である。これから、いずれも $f\bar{T}=1.0$ および 2.0 のところで鋭いピークを有するスペクトルであることが知られるが、周期が長くなるにつれてこれらのピーク周波数を中心とするスペクトル幅が広がり、RC波にいたってはあたかも不規則波のようなスペクトルを有することが認められる。これは周期が長いほど水路における波の減衰が小さく、造波板の再反射波の影響が大となって波形が乱れることによると考えられる。

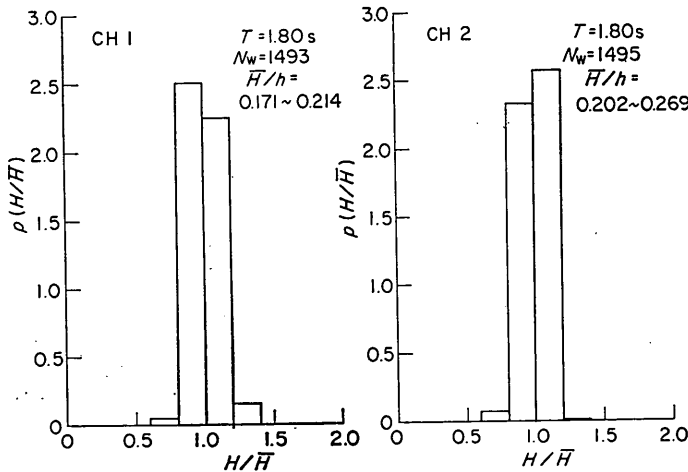


図-19(1) 波高の相対度数分布 (RA波)

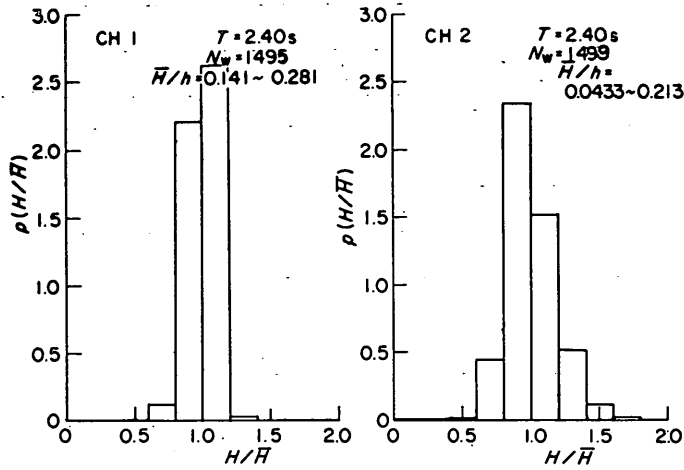


図-19(2) 波高の相対度数分布 (RB 波)

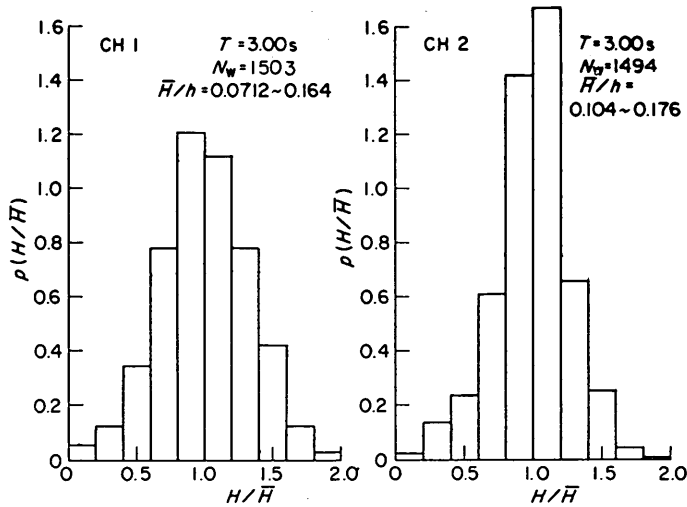


図-19(3) 波高の相対度数分布 (RC 波)

(3) 波高の相対度数分布

図-19(1), (2), (3)は, RA, RB, RC 波について堤体設置後の沖側点 No.1 ($h=101.0\text{cm}$)での波形記録から, 波高計ごとに波高の相対度数分布を示したものである。波高計間隔が $L/4$ で規則波であるため, 2点間の平均波高は相当程度異なっているけれども, 無次元化した分布の形はほぼ同じ傾向にあり, いずれも $H/\bar{H}=1.0$ を中心に左右対称の分布形状を示している。また, 周期が長くなるほどその分布幅が広がっており, RA 波では H

$/\bar{H}$ が $0.6\sim 1.4$ であるのに対し, RC 波では $0\sim 2.0$ まで分布している。

(4) 規則波の代表波諸元の関係

(2), (3)でみたように, 堤体設置後の定常状態における波形は規則波であっても変動する。そのため, 不規則波の場合と同様に最高波, $1/10$ 最大波, 有義波, 平均波を定義し, これらの代表波諸元間の関係を調べてみる。

表-7は平均波高を基準とした代表波高間の比をまとめて示したものである。これは沖側測点 No.1での測定値

表-7 代表波高間の関係と標準偏差（規則波）

波種	No	CH1						CH2					
		H_{max}/\bar{H}		$H_{1/10}/\bar{H}$		$H_{1/3}/\bar{H}$		H_{max}/\bar{H}		$H_{1/10}/\bar{H}$		$H_{1/3}/\bar{H}$	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
RA波	36	1.21	0.083	1.14	0.067	1.09	0.040	1.13	0.068	1.09	0.042	1.06	0.027
RB波	42	1.18	0.117	1.11	0.069	1.06	0.033	1.56	0.324	1.33	0.124	1.20	0.068
RC波	34	1.74	0.264	1.49	0.180	1.30	0.117	1.45	0.227	1.29	0.136	1.18	0.091

表-8 代表周期間の関係と標準偏差（規則波）

波種	No	CH1						CH2					
		T_{max}/\bar{T}		$T_{1/10}/\bar{T}$		$T_{1/3}/\bar{T}$		T_{max}/\bar{T}		$T_{1/10}/\bar{T}$		$T_{1/3}/\bar{T}$	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
RA波	36	1.00	0.009	1.00	0.003	1.00	0.002	1.00	0.006	1.00	0.002	1.00	0
RB波	42	1.00	0.007	1.00	0	1.00	0	1.01	0.013	1.01	0.009	1.01	0.009
RC波	34	1.02	0.034	1.02	0.030	1.02	0.036	1.03	0.033	1.02	0.020	1.02	0.014

から、波高計別に求めた平均値と標準偏差である。部分重複波に対し、波高計間隔を $L/4$ としているため、波高計の位置によって波高比の値が大きく違っていることが知られる。一般に、波高の絶対値が大きい条件ほど波高比の値はやや小さくなる傾向にある。逆に言えば、部分重複波の節に近い場合には波高比はやや大きくなる。また、代表波高比の値は波種によっても変化し、周期が長くなるほど大きくなっており（CH1とCH2の平均）、前述した波高の相対度数分布の広がりに対応している。

一方、表-8は代表周期比を同様に示したものである。周期比は波高比ほどには変化しないけれども、周期が長くなるにつれて平均値、標準偏差ともに大きくなる傾向にあり、前述のスペクトルの広がり傾向に対応している。

(5) データ整理に用いる規則波の諸元

以上のように、今回の実験の場合規則波であっても変動するが、規則波による安定実験のデータ整理に際しては堤体設置以前の状態で測点 No. 2 で測定した周期と波高の値をそのまま適用することにする。このうち、周期については、変動はそれほど大きくないけれども、波高は特に周期の長い条件において著しく変動することに留意しておく必要がある。

なお、堤体設置後の沖側測点においては波高計間隔を $L/4$ として測定しているため、その平均値は部分重複波

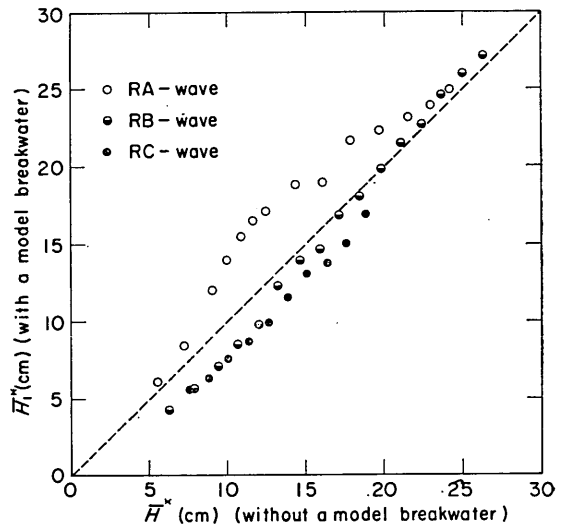


図-20 通過波高と入射波高の関係

における入射波高に近い値と考えることができる。そのため、これの平均値と堤体設置以前の状態での同地点での通過波高を比較してみたのが図-20である。これによると必ずしもきれいな対応を示していないが、波高が大

きい条件では両者がかなり一致する傾向が認められる。これは碎波によって堤体からの反射率が小さくなることによるものと考えられる。しかし、ここで求める堤体設置後の入射波高はあくまでも概略値であり、厳密な議論に供するものではない。

4. 実験結果および考察

4.1 不規則波と規則波の違い

(1) 不規則波による実験結果

以下、実験結果を示し考察するが、記述の順序は実験のシリーズの順にはとられず、まずシリーズⅢの結果に基づき不規則波と規則波による安定性の違いから述べる。

シリーズⅢにおける不規則波による実験は、消波ブロックの重量ごとに3種の波(A波、B波、C波)を用いて実施したもので、それぞれの波種について2波群づつ用意し、同一波高レベルでこれを連続して作用させた後に、被害個数を調べる方法によっている。したがって、その同一波高レベルでの有効継続時間はA波 $528 \times 2 = 1056$ s、B波 $699 \times 2 = 1398$ s、C波 $912 \times 2 = 1824$ sであり、波数に換算するとA波 $1056 \div (1.75 \times 0.928) \approx 65$ 波、B波 $1398 \div (2.37 \times 0.868) \approx 680$ 波、C波 $1824 \div (3.04 \times 0.814) \approx 740$ 波となる。

図-21(1)~(3)は波種別に波高と被害率の関係をプロットしたものであり、図中の曲線は実験データの傾向を適当に表している。これによると、被害曲線はブロック重量が小さいほど急な立ち上がりを示し、わずかな波高増大で被害が急激に大きくなる傾向にあることが知られる。ただし、特に図-21(2)の $W=296.0$ gf の条件において

は、1ランク上の $W=596.4$ gf の被害曲線と交差しており、その他の波種の場合においても被害曲線がやや緩やかな傾向にあるように認められる。この理由はよくわからないが、初期の並べ方においてやや被害を受けにくい状態であったのかもしれない。

(2) 規則波による実験結果

規則波実験における波の条件は不規則波の有義波周期にはほぼ対応した周期を有する3種(RA波、RB波、RC波)でそれぞれ対応する不規則波と同じ作用時間だけ連続作用させている。そのため、3.6で述べたように規則波実験といえども、特に周期の長い条件において、波が非常に乱れているけれども、ここでは波高条件としては

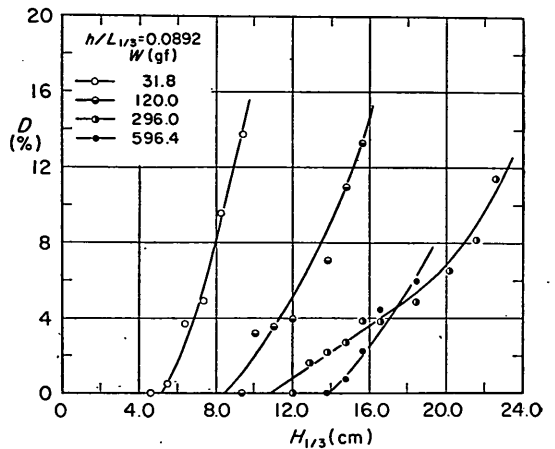


図-21(2) 有義波高と被害率の関係 (B-wave)

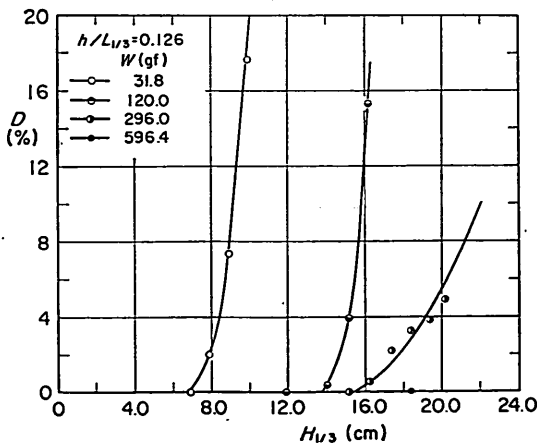


図-21(1) 有義波高と被害率の関係 (A-wave)

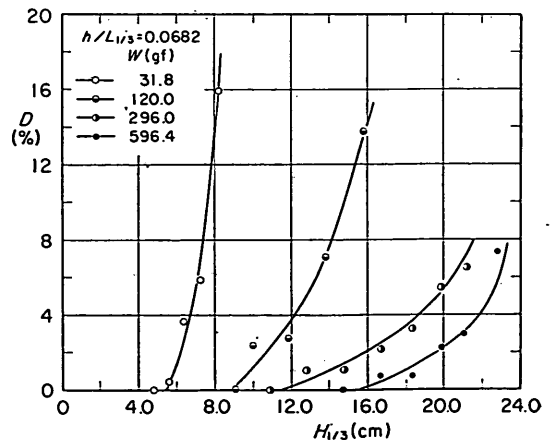


図-21(3) 有義波高と被害率の関係 (C-wave)

すべて堤体設置以前の状態で測定した通過波高を用いる。

図-22(1)~(3)は規則波実験による波高と被害率の関係を示したものである。不規則波の場合と同様に被害曲線を示してあるが、ブロック重量が大になるにつれて被害曲線が緩やかになる傾向が認められる。

(3) 不規則波と規則波の比較

前出の波高と被害率の関係から、 $D=0, 1, 3, 5, 7, 10\%$ のときの波高を読み取り、それぞれの被害率に対する有義波高($H_{1/3}$)と規則波波高(H_{reg})の関係をプロットしたのが図-23である。 $H_{reg}/H_{1/3}$ の値は条件によってはほぼ1.0~2.0の範囲にばらつくけれども、被害率が大になるにつれてそのばらつきの範囲はやや狭くなる傾向にある。

全データについて H_{reg} と $H_{1/3}$ の比の平均値と標準偏差を求めると次のようになる。

$$H_{reg}/H_{1/3} = 1.5 \pm 0.37 \dots \dots \dots (5)$$

この $H_{reg}/H_{1/3}$ の平均値は不規則波の1/40最大波高と有義波高の比にはほぼ等しく、規則波による波高は平均的

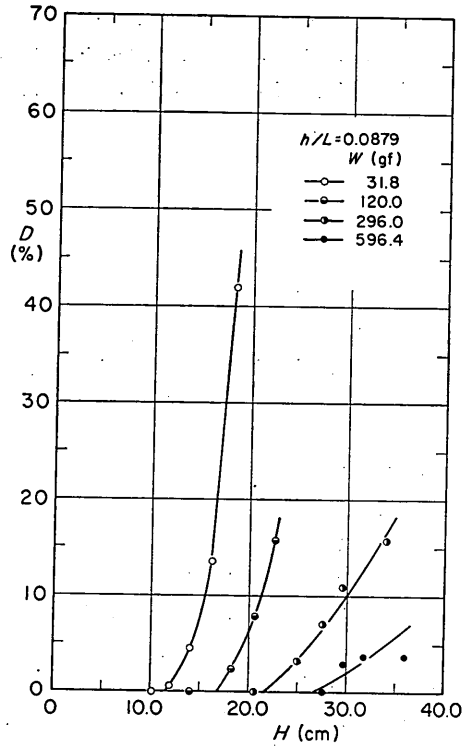


図-22(2) 波高と被害率の関係 (RB-wave)

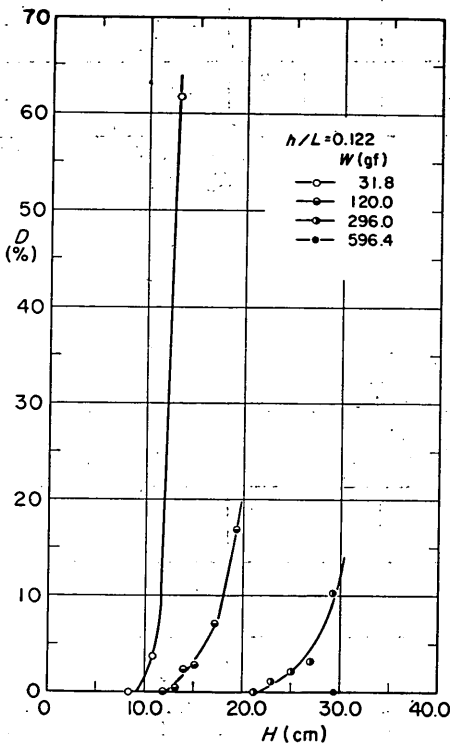


図-22(1) 波高と被害率の関係 (RA-wave)

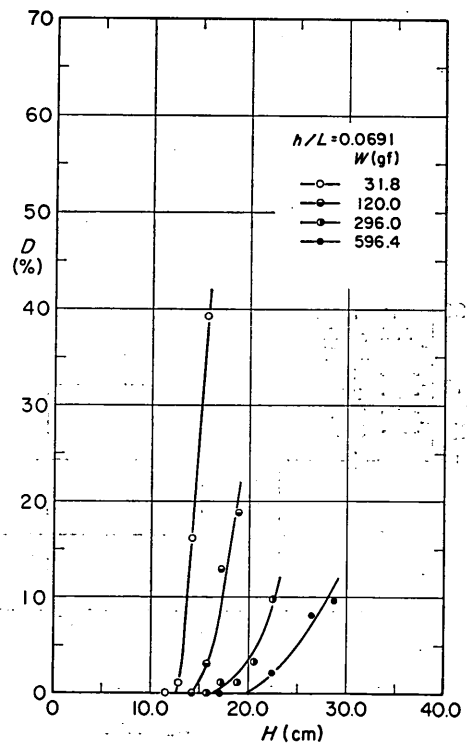


図-22(3) 波高と被害率の関係 (RC-wave)

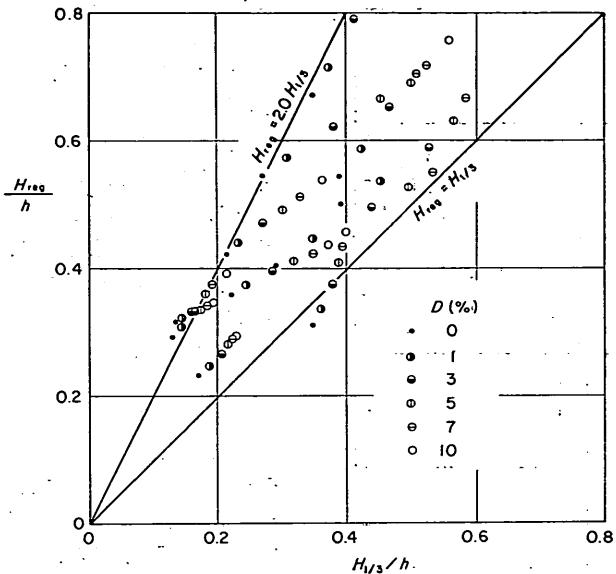


図-23 不規則波実験と規則波実験の比較（有義波高基準）

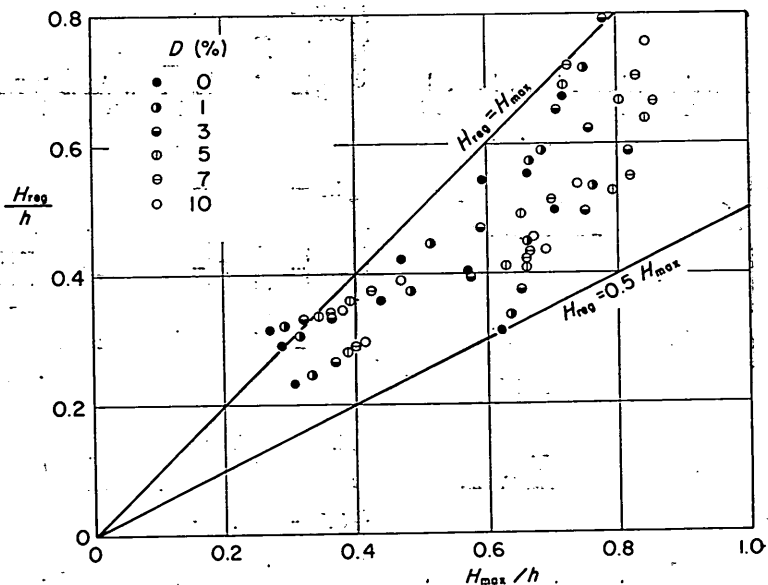


図-24 不規則波実験と規則波実験の比較（最高波高基準）

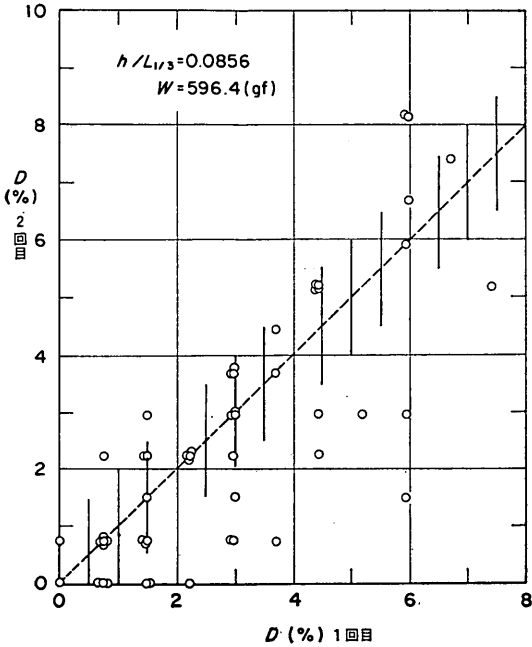


図-25 被害率の相関

には不規則波の $H_{1/40}$ に対応することが知られる。この平均値は傾斜堤被覆材の安定性について調べた范・渡辺・堀川⁹⁾による1.4の値よりやや大きいにすぎないが、今回の結果では変動が著しいという特徴がある。これは今回の実験ではブロックの重量を広範囲に変化させていることによると考えられる。

一方、図-24は同じ被害率を与える不規則波の最高波高と規則波の波高とを比較したものである。これによると、 H_{reg}/H_{max} の値はほぼ0.5~1.0の範囲に分布し、被害率が大きくなるほど分布幅がやや狭くなる傾向にある。

H_{reg} と H_{max} の比の平均値±標準偏差は

$$H_{reg}/H_{max} = 0.80 \pm 0.14 \dots\dots\dots (6)$$

となり、規則波の波高を不規則波群中の最高波高と考えると、規則波のほうが厳し過ぎる結果となる。これは規則波ではほぼ一定の波が継続して作用するわけであるから当然の結果であるといえる。

なお、今回の不規則実験波の H_{max} と $H_{1/3}$ の比の平均値と標準偏差は

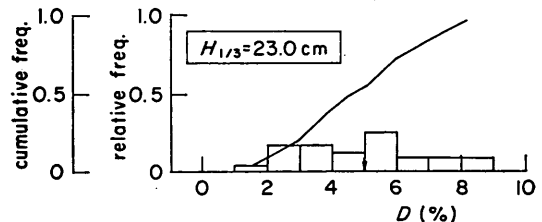
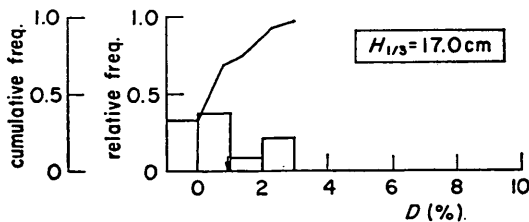
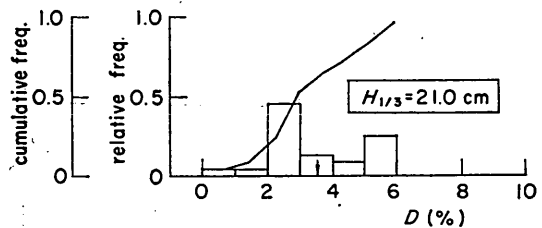
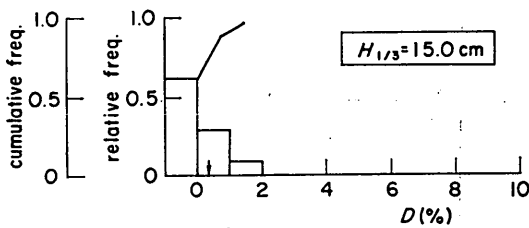
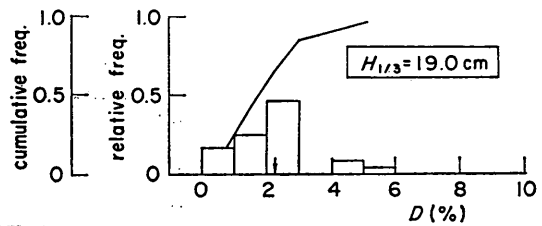
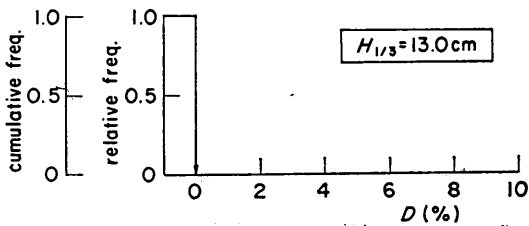


図-26(1) 繰り返し実験による被害率の相対度数分布 (W=596.4 gf)

図-26(2) 繰り返し実験による被害率の相対度数分布 (W=596.4 gf)

$$H_{max}/H_{1/3}=1.87\pm 0.23 \dots\dots\dots(7)$$

であり、式(5)と式(6)の平均的關係はこれによって説明できる。つまり、式(7)の比を式(5)に代入すれば式(6)の關係になることが確認される。

4.2 被害率の変動性

(1) 同一条件での繰り返し実験による被害率の相関

シリーズ I の実験では、D1~D12の12波群の波を用いて繰り返し実験を行ったが、そこにはこれらの波群の違いによる影響と、ブロックの積み方等初期条件による影響の両方が含まれる。そのため、まず同一の波群が作用したときの変動がどの程度になるか、 $W=596.4\text{gf}$ の場合についてD1~D12の波群の作用を2回繰り返し実験を行って調べてみた。つまり、D1波群について初期状態から波高レベルを順次大きくして累積被害率を求め、これをD1からD12波群まで繰り返し、さらに同じ実験を2回繰り返し合計 $12\times 2=24$ 回の繰り返し実験を行ったものである。いずれも同一波高レベルでの連続した波の有効作用時間は540sで、波数に換算すると540

$\div(2.46\times 0.860)=255$ 波である。しかし、実際には波が定常状態になるまでの時間も直接作用させているので、実際の総波数は290波程度となる。

図-25は横軸に1回目の実験による被害率、縦軸に2回目の実験による被害率をとって、同一波浪条件による結果をプロットしたものである。これによると、同一波浪条件であっても1回目と2回目の結果は大きく変動し1回目の被害率2.2%であったものが2回目には0というような例もある。傾向的には2回目の被害率がやや小さい傾向にあるけれども、図中影線を付けた範囲は両者の被害率の差が被害率の絶対値で±1%の範囲であり、この場合被害を生じた全データの約70%がこの範囲に入っている。つまり、1回測定して被害率がたとえば2%のとき、もう1回同一条件で実験を行ったとき被害率が1~3%程度に変動する可能性は約70%の確率であるということを表している。

(2) 被害率の度数分布

図-26は(1)の実験結果を1回目、2回目あわせて波高レベルごとに被害率の度数分布の形に書き換えたもので

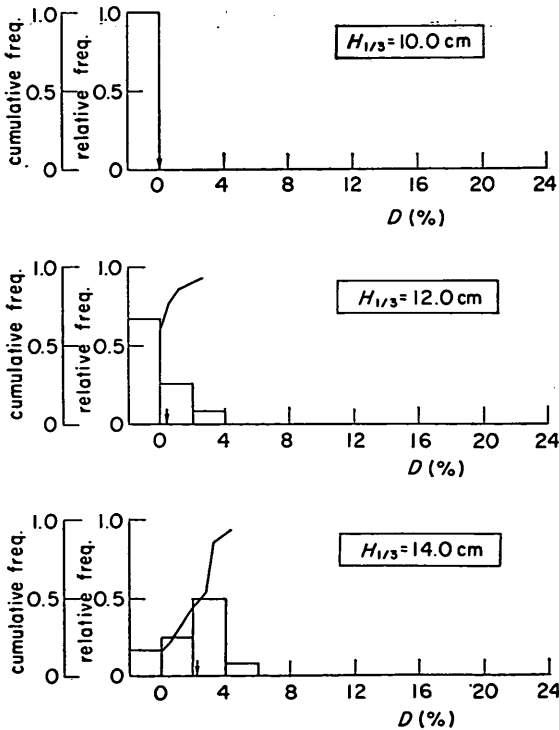


図-27(1) 繰り返し実験による被害率の相対度数分布 ($W=296.0\text{gf}$)

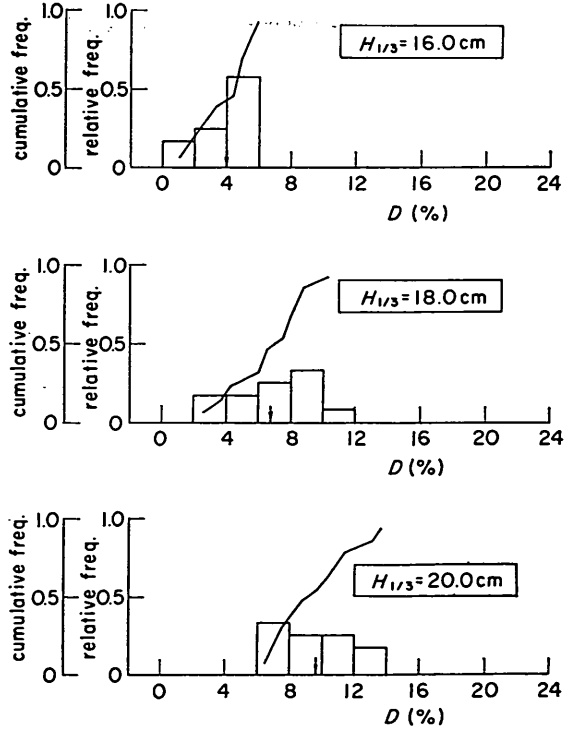


図-27(2) 繰り返し実験による被害率の相対度数分布 ($W=296.0\text{gf}$)

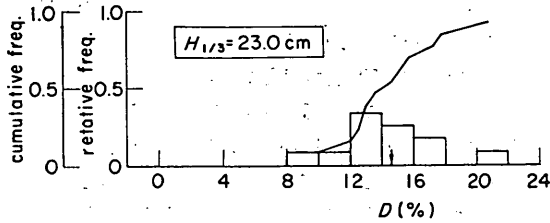


図-27(3) 繰り返し実験による被害率の相対度数分布 (W=296.0gf)

被害率は広く分布するようになり、 $H_{1/3}=23.0\text{cm}$ の条件ではすべての試行において被害が生じている。また、図中累積度数を折れ線で示してあるが、一般に中央値は被害率の平均値と異なっていることが知られる。

一方、図-27は $W=296.0\text{gf}$ の場合の同様な結果を示したものである。ただし、この条件では同一波群での繰り返し実験を行っておらず、各波高レベルごとのデータ数 N_0 は12である。この場合も $H_{1/3}=10.0\text{cm}$ ではすべての試行で被害率は0であるが、波高が大きくなるにつれて被害が分布するようになり、 $H_{1/3}=18.0\text{cm}$ ではすべての場合被害が生じている。

被害率の分布形状は被害率の小さい条件では集中度が高く、平均値も最頻値と一致する傾向にあるが、被害が大きくなるにつれて集中度が低下し、広く分布する変化を示している。また、被害率の大きいときの平均値は最頻値よりもやや大きくなる傾向にあり、分布形が被害率

ある。図中、横軸に下向きの矢印で示してある値は被害率の平均値を表す。この場合、分割幅を被害率1%にとっており、度数を数えるとき下限値を含めていない。波高の最も小さい $H_{1/3}=13.0\text{cm}$ の場合すべてのデータが被害率0である。波高がこれより大きくなるにつれて、

表-9 シリーズIの結果 (W=596.4(gf))

$H_{1/3}$ (cm)	波群番号												平均値	標準偏差	標準偏差 平均値		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					
13.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—
15.0	0	0	0.74	0	0.74	1.48	0	0	0.74	0.74	0	1.43	0.49	0.54	1.10	—	
17.0	1.48	0.74	0.74	0	0.74	1.48	2.22	0	2.96	0.74	0	2.22	1.11	0.93	0.84	—	
19.0	1.48	1.48	1.48	2.96	2.96	4.44	2.96	1.48	4.44	1.48	0.74	2.22	2.34	1.16	0.50	—	
21.0	2.22	2.96	3.70	2.96	5.93	4.44	4.44	2.96	5.19	2.96	5.93	2.22	3.83	1.28	0.33	—	
23.0	2.96	4.44	5.93	3.70	5.93	5.93	5.93	4.44	6.67	3.70	7.41	2.96	5.00	1.43	0.29	—	

上段 1回目
下段 2回目

表-10 シリーズIの結果 (W=296.0(gf))

$H_{1/3}$	波群番号												平均値	標準偏差	標準偏差 平均値	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
10.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—
12.0	0	0	1.09	0	0.54	0	0.54	0	0	0	0	2.72	0.41	0.77	1.89	—
14.0	0	0.54	3.26	2.17	2.72	3.26	3.26	0	1.63	4.35	1.63	3.26	2.17	1.37	0.63	—
16.0	2.17	1.63	5.98	5.98	4.89	4.89	4.89	1.09	3.26	5.98	3.26	4.35	4.03	1.65	0.41	—
18.0	6.52	3.80	8.70	7.61	8.70	8.15	6.52	2.72	5.98	10.33	4.35	8.15	6.79	2.17	0.32	—
20.0	7.51	6.52	9.78	8.70	10.33	10.87	8.70	7.61	11.41	13.59	7.61	13.04	9.65	2.16	0.22	—
23.0	9.78	12.50	13.04	13.04	13.59	14.67	15.76	11.96	17.39	17.93	15.22	20.65	14.63	2.85	0.20	—

の大きい方へ伸びる傾向が認められる。

(3) 被害率と変動係数の関係

表-9, 10は各波高レベルごとに各波群による被害率および平均値と標準偏差をまとめて示したものである。 $W=596.4\text{gf}$ の条件については2回繰り返して実験を行っているので、表-9の上段に1回目の値、下段に2回目の値を区別して示してある。波高が大きくなるにつれて、平均値、標準偏差ともに大きくなる傾向が認められる。しかし、同表の最右欄に変動係数(=標準偏差/平均値)の値を示してあるが、この値は被害が大きくなるにつれて減少していく傾向にある。この傾向は先に報告した混成堤マウンド被覆材の被害率の変動係数においても同様である⁹⁾。こうした被害率の変動性と不規則波の有義波高の変動性を比較すると、有義波高の変動係数なわち有義波高の平均値に対する標準偏差の比は0.03程度であるので、被害率の変動性が著しく高いことが知られる。これは不規則波群の変動性に起因するというより

も、同一波群による繰り返しによる変動に認められるように、消波ブロックの安定性における本質的な変動性によるところが大であると推定される。

さて、被害率の変動係数は被害率の増大とともに減少する傾向が認められたが、次にこの関係の定式化を試みる。

図-28は両対数紙上に被害率と変動係数の関係をプロットしたものである。重量による傾向的相違がやや認められるけれども、両者にはほぼ直線関係が認められるので、平均的關係を表す式として次式が得られる。

$$\text{変動係数}\left(\frac{\sigma_D}{\bar{D}}\right) = 0.89 \bar{D}^{-0.57} \dots\dots\dots(8)$$

図中の直線はこの関係を示したものである。これによると平均被害率1%のときの変動係数は約0.9, 5%のときの変動係数は約0.4である。ただし、これは今回の実験条件と被害率の定義に対して得られたものであり、条件や定義が異なれば違った関係となる可能性が十分あることに留意する必要がある。

(4) 有義波高と被害率の関係

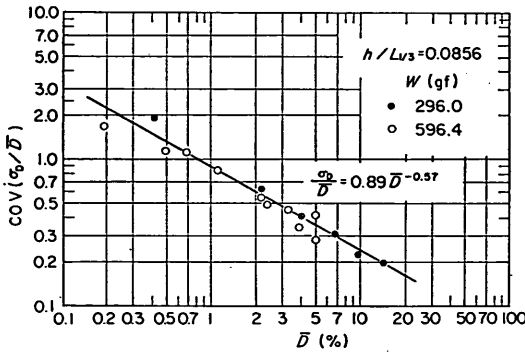


図-28 被害率と変動係数の関係

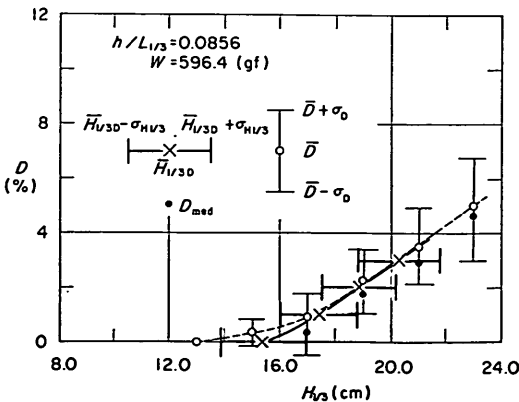


図-29 有義波高と被害率の関係 (W=596.4gf)

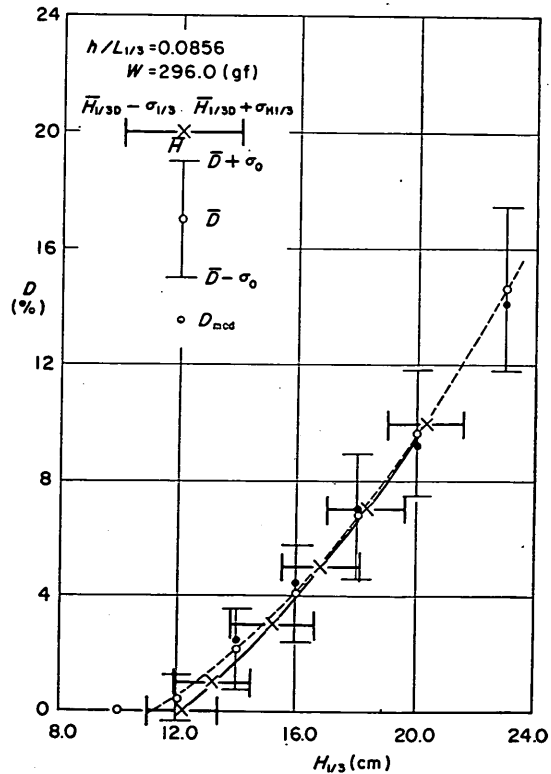


図-30 有義波高と被害率の関係 (W=296.0gf)

図-29, 30は $W=596.4\text{gf}$ および 296.0gf の条件での波高と被害率の関係を示したもので、それぞれ次の3種類の関係を示してある。

- ① 有義波高と被害率の平均値±標準偏差 ($\bar{D} \pm \sigma_D$) の関係
- ② 有義波高と被害率の中央値 ($D_{med.}$) の関係
- ③ 被害率と有義波高の平均値±標準偏差 ($\bar{H}_{1/3D} \pm \sigma_{H_{1/3}}$) の関係

このうち、①の被害率の平均値は前出の表-9, 10の値 ($W=596.4\text{gf}$ については1回目と2回目を合わせたときの値)、標準偏差は式(8)による計算値である。また、②は前出の図-26, 27に示した累積相対度数が0.5となる被害率を読み取って示したものである。さらに、③は各試行ごとの波高と被害率の曲線から、図-29の $W=596.4\text{gf}$ の条件については $D=0, 1, 2, 3\%$ のときの波高を読み取り、図-30の $W=296.0\text{gf}$ の条件については $D=0, 1, 3, 5, 7, 10\%$ のときの波高の値を読み取って、その平均値と標準偏差の範囲を示したものである。

この3種いずれの関係においても有義波高の増大とともに被害率が大きくなる傾向を示すが、特に被害率の小さい条件において差が生じる。これは被害率の平均値は各試行のうち1回でも被害が生じれば0とならないことによる。また、被害率の標準偏差は $\bar{D}=0\%$ で0となるが、 $D=0\%$ の安定限界有義波高の標準偏差は被害率の大きい条件での値と同程度であることが知られる。

(5) 安定限界波高の分布と変動係数

前項で代表的被害率に対する有義波高の平均値と標準偏差について述べたが、図-31はそのうち $D=0\%$ に対する安定限界有義波高の相対度数分布を示したものである。ただし、 $W=596.4\text{gf}$ および 296.0gf に対する $H_{1/3D=0}/H_{1/3D=0}$ の値を集計して確率密度分布のかたちで示してある。ここに、 $H_{1/3D=0}$ は $D=0\%$ のときの安定限界有義波高、 $\bar{H}_{1/3D=0}$ は各ブロック重量ごとのその平均値を表している。 $H_{1/3D=0}/\bar{H}_{1/3D=0}$ の値は0.75~1.25の範囲に分布し、最頻値は平均値よりやや小さい0.85~0.95のクラスに生じていることが認められる。

図中の曲線は次式で与えられる対数正規分布をあてはめてみたものである。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] \quad (9)$$

ここに、 $\lambda = E(\ln X)$ 、 $\zeta = \sqrt{\text{Var}(\ln X)}$ はそれぞれ $\ln X$ の平均値と標準偏差であり、この分布特性を表すパラメータである¹⁰⁾。これらのパラメータの値は次のように近似式で与えてある。

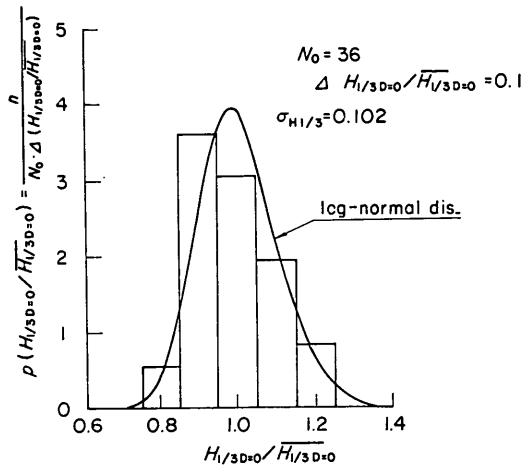


図-31 安定限界有義波高の相対度数分布

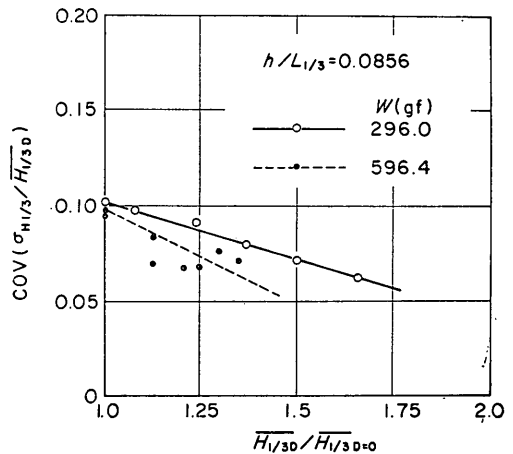


図-32 有義波高と変動係数の関係

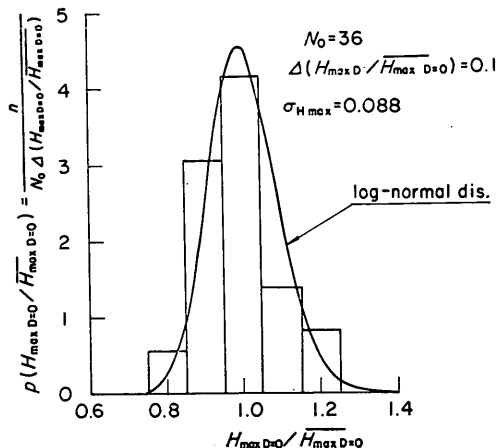


図-33 安定限界最高波高の相対度数分布

$$\zeta \doteq \sigma_{H_{1/3}} / H_{1/3D=0} = 0.10$$

$$\lambda \doteq \ln(H_{1/3D=0} / \bar{H}_{1/3D=0})_{med} = \ln 0.995 = -0.0052$$

ここに、 $\sigma_{H_{1/3}}$ は安定限界有義波高の標準偏差、 $(H_{1/3D=0} / \bar{H}_{1/3D=0})_{med}$ は中央値である。

以上、 $D=0\%$ の安定限界有義波高の分布を示したが、任意レベルの被害率に対する有義波高 $H_{1/3D}$ の値も分布し、ここには示していないけれども、被害レベルが大になるにつれてやや正規分布に近づく傾向を示す。図-32はそうした分布における変動係数の値を、横軸に $\bar{H}_{1/3D} / H_{1/3D=0}$ をとってプロットしたものである。この場合、 $H_{1/3D} / H_{1/3D=0} = 1.0$ すなわち安定限界有義波高の変動係数は消波ブロックの重量にかかわらず約0.10ではほぼ一致し、 $\bar{H}_{1/3D} / H_{1/3D=0}$ の値が大になるにつれて低下していく傾向は示しているものの、その低下傾向は $W=596.4\text{gf}$ の条件のほうがやや大きい結果となっている。

一方、図-33は不規則波の最高波高と被害率の関係(図は示していない)から $D=0\%$ の安定限界最高波高 $H_{maxD=0}$ を読み取って、その平均値 $\bar{H}_{maxD=0}$ で規準化したときの相対度数分布である。これによると $H_{maxD=0} / \bar{H}_{maxD=0}$ の値は0.75~1.25の範囲に分布するけれども、変動係数は0.088で先の有義波高基準の場合よりも若干小さく、集中度がやや高くなることが知られる。図中の曲線は式(9)と同じ対数正規分布をあてはめてみたものであるが、この場合のパラメータは次の値を用いている。

$$\zeta \doteq \sigma_{H_{max}} / H_{maxD=0} = 0.088$$

$$\lambda \doteq \ln(H_{maxD=0} / \bar{H}_{maxD=0})_{med} = -0.00039$$

また、図-34は任意の被害率に対する最高波高 H_{maxD} の変動係数を $\bar{H}_{maxD} / H_{maxD=0}$ に対してプロットしたものである。 $H_{maxD} / H_{maxD=0} = 1.0$ すなわち $D=0\%$ のときの変動係数は前述したように0.088であるが、 $\bar{H}_{maxD} / H_{maxD=0}$ の値が大きくなるにつれて $W=596.4\text{gf}$ の条件のほうがやや大きく低下する結果となっている。

(6) K_D 値の分布と変動係数

ある被害レベルに対する有義波高が変動するという事は Hudson 式における K_D 値が変動するということの意味している。そのため、次式によって K_D 値を逆算し、その分布を調べてみる。

$$K_D = \frac{I_r}{W(S_r - 1)^3 \cot \alpha} H_{1/3}^3 \dots \dots \dots (10)$$

図-35は $D=0\%$ のときの安定限界有義波高に対する K_D の値 ($K_{D=0}$) の相対度数分布を、各ブロックごとの平均値 ($\bar{K}_{D=0}$) で割って規準化して、確率密度分布のかたちで示したものである。この場合、 $K_{D=0} / \bar{K}_{D=0}$ の値は0.5~2.0の範囲に分布し、前出の図-31の安定限界

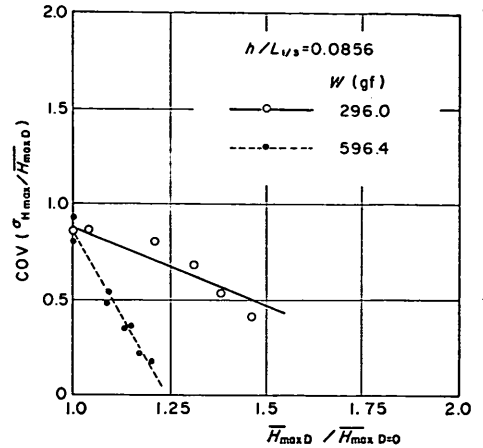


図-34 最高波高と変動係数の関係

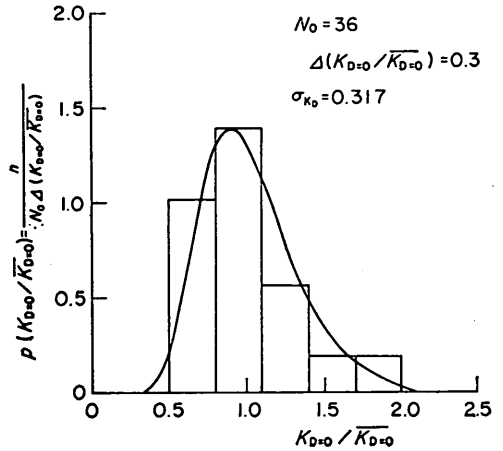


図-35 安定限界 K_D 値の相対度数分布 (有義波高基準)

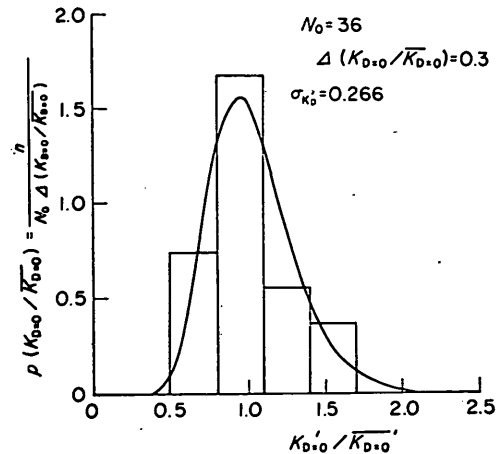


図-36 安定限界 K_D 値の相対度数分布 (最高波高基準)

有義波高の分布より広がる。これは K_D 値が式(10)のように $H_{1/3}$ の3乗に比例することによる。図中、曲線は式(10)の関数形に対し式(9)の分布から $K_{D=0}/\bar{K}_{D=0}$ の確率分布を推定したもので、ほぼ妥当な分布を与えていることが知られる。また、式(10)の関係により、 K_D 値の変動係数は有義波高の変動係数の約3倍となるので、安定限界における値は0.3程度となっている。

以上は有義波高を代表波高としたときの K_D 値であるが、Hudson 式における波高は不規則波の任意の代表波高を適用しえる。ただし、この場合の K_D 値は代表波高によって異なり、最高波高に対応する K_D 値を K_D' と表記し、次式によって定義する。

$$K_D' = \frac{\gamma r}{W(S_r - 1)^3 \cot \alpha} H_{\max}^3 \dots \dots \dots (11)$$

図-36は $D = 0\%$ に対する K_D' の値 ($K_{D=0}'$) をその平均値 ($\bar{K}_{D=0}'$) で規準化して相対度数分布を示したものである。 $K_{D=0}'/\bar{K}_{D=0}'$ の値は0.5~1.7の範囲に分布し、変動係数も0.266で K_D の場合よりも変動幅がやや小さくなる。図中の曲線は式(11)の関数形に対し、前出の図-33の曲線から推定した K_D' の確率密度曲線である。

4.3 波の諸元の影響

(1) 周期条件別の被害率と K_D 値の関係

消波ブロック等の斜面被覆材の安定性に及ぼす波の諸元の影響については、これまでもさまざまな議論が行われている。たとえば、Bruun・Günbak⁽¹⁾ は斜面勾配

上での共振現象によるところが大であり、斜面上の碎波状態をよく区分する次の無次元パラメータ (surf similarity parameter)⁽¹²⁾ が重要な要素であることを指摘した。

$$\xi = \tan \alpha / \sqrt{H/L_0} \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 L_0 は深水波の波長である。

これについては、榎木ほか⁽¹³⁾ が実際に傾斜堤被覆石について安定実験を行って、 $\xi = 2 \sim 3$ のとき著しく不安定となることを示している。しかし、今回の実験結果について同様な整理をしてみたが、消波ブロック被覆堤の消波ブロックの安定性については、式(12)のパラメータで単純に表されるものでないことが判明した。そこで、本節においては、まずシリーズⅢの実験結果に基づき、相対水深と相対波高による安定性の相違について検討する。

シリーズⅢによる波高と被害率の関係については既に図-21、22に示した。図-37(1)、(2)、(3)はこのうち不規則波実験結果について K_D 値を求め、被害率に対しプロットしたものである。図中、曲線は実験値の平均的關係を表したものであり、適当な被害率に対して前出の式(8)から推定した標準偏差の範囲も示してある。消波ブロックの重量によってばらつきがあり、標準偏差の範囲からはずれるものもあるけれども、60~80%のデータはその範囲内にあり、こうしたばらつきの一部は本質的特性であるといえる。

また、3種の周期条件の結果を図-38にまとめて示して

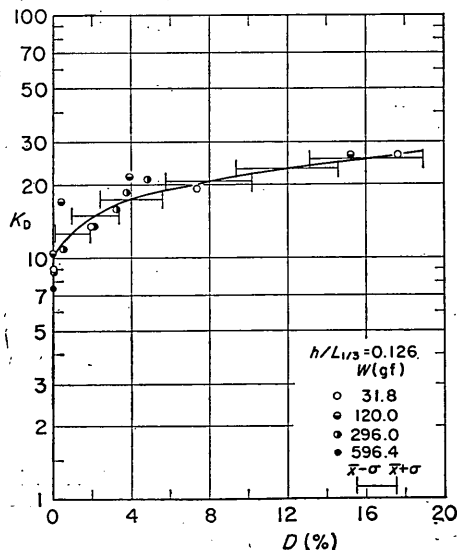


図-37(1) 被害率と K_D 値の関係 (A-wave)

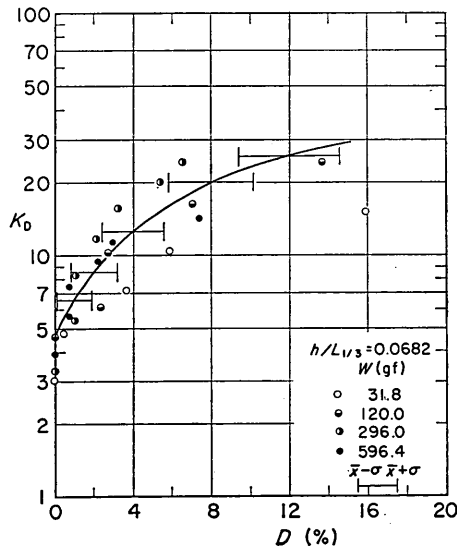


図-37(2) 被害率と K_D 値の関係 (B-wave)

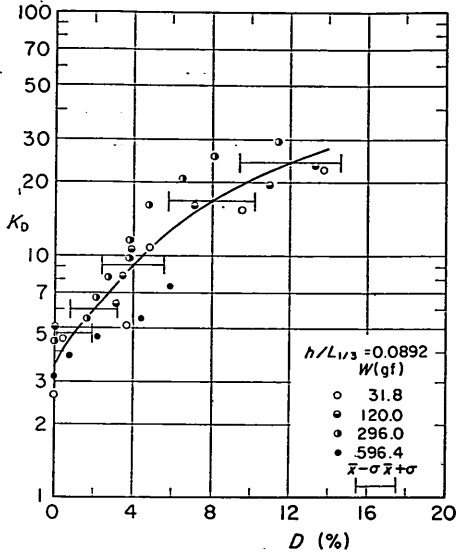


図-37(3) 被害率と K_D 値の関係 (C-wave)

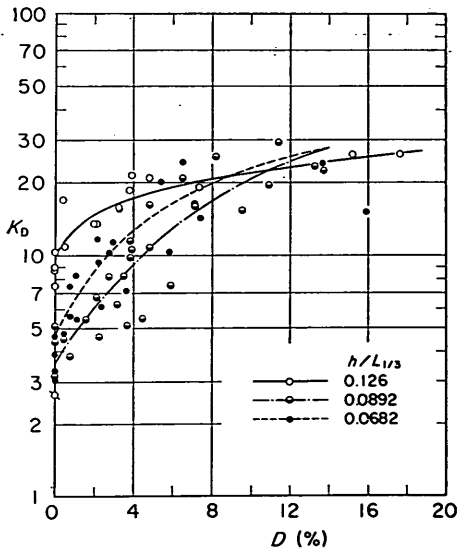


図-38 被害率と K_D 値の関係 (A, B, C-wave)

いるけれども、これによって被害率と K_D 値との関係は周期条件により変化することが明らかである。すなわち、周期の短い $h/L_{1/3}=0.126$ の条件では初期被害の領域では K_D 値が最も高いが、被害率の大きい領域では他の周期条件よりもむしろやや小さくなっている。これに対し、周期が中間の $h/L_{1/3}=0.0892$ の条件は初期被害の

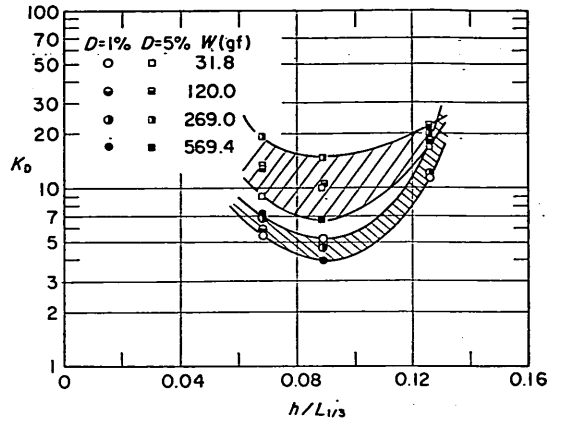


図-39 $h/L_{1/3}$ と K_D 値の関係

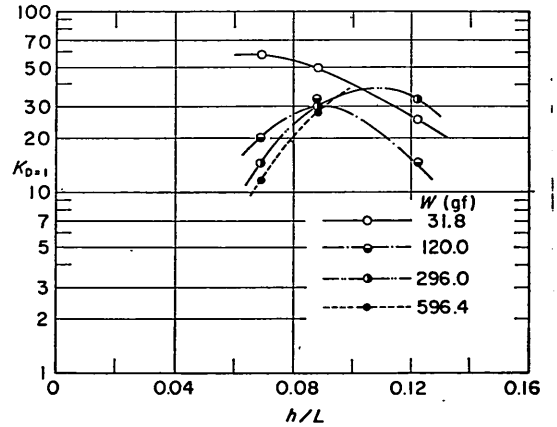


図-40 h/L と K_D 値の関係

領域においては3種の中で最も小さい K_D 値を示すけれども、被害が大きくなるにつれて急激に増大している。周期の最も長い $h/L_{1/3}=0.0682$ の条件はこれらの中間的な変化である。

(2) 相対水深と K_D 値の関係

図-39は消波ブロックの重量別の $D=1\%$ および 5% に相当する K_D 値 ($K_{D=1}$ および $K_{D=5}$) を求め、それを相対水深 $h/L_{1/3}$ に対してプロットしたものである。消波ブロックの重量や被害率によってやや違いが認められるけれども、いずれも $h/L_{1/3}$ と K_D 値との関係においては極小値を持つ変化を示し、特に安定限界状態に近い場合周期の長いほど安定性が悪いとは言えないようである。

なお、本実験の結果からは $K_{D=1}=4\sim 19$, $K_{D=5}=6\sim$

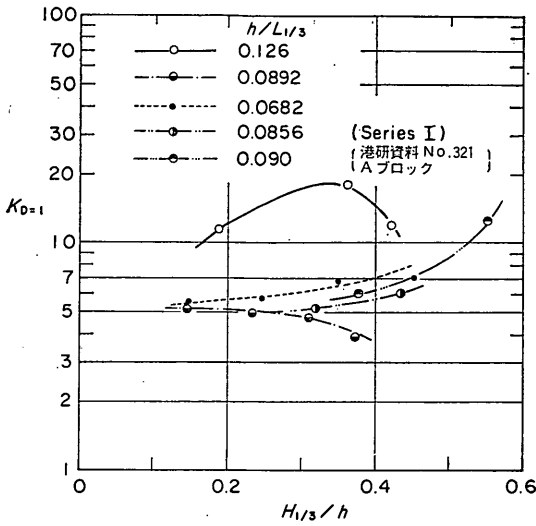


図-41 $H_{1/3}/h$ と $K_{D=1}$ 値の関係

20程度の値となっている。以下、主として被害率1%の $K_{D=1}$ 値について波浪諸元の影響を論じるけれども、これは安定限界に近い状態を代表させたもので、設計において $K_{D=1}$ の値を用いることを推奨するものではない。

図-40 は規則波実験による $K_{D=1}$ の値を相対水深 h/L に対して示したものであるが、この結果ではブロック重量による違いがやや大きく、中には不規則波の場合とは逆に極大値を有する変化を示すものも認められている。 $K_{D=1}$ の値は10~60で、不規則波の $K_{D=5}$ の値よりも大きく、また同種のブロックに対する既往の値¹⁴⁾より大きい結果となっている。これは被害の判定基準等の違いによるものと考えられる。

以上のように、消波ブロックの安定性に及ぼす周期の影響は規則波と不規則波によって非常に異なり、また消波ブロックの重量によっても変化するようであり、複雑であることが知られる。

(3) 相対有義波高と $K_{D=1}$ との関係

前項でふれた消波ブロックの重量による変化は、重量が大になるほど被害率が1%となる波高が大となるので、波高による変化に置き換えることができる。

図-41 は不規則波実験結果について横軸に相対有義波高 $H_{1/3}/h$ をとって、 $K_{D=1}$ の値をプロットしたものである。図中には、シリーズIの実験による平均値および既往の同種のブロックに対する結果¹⁵⁾も合わせて示してある。曲線はそれぞれ同一周期条件でのデータの傾向を表したものである。中には $H_{1/3}/h$ が大きくなるにつれて

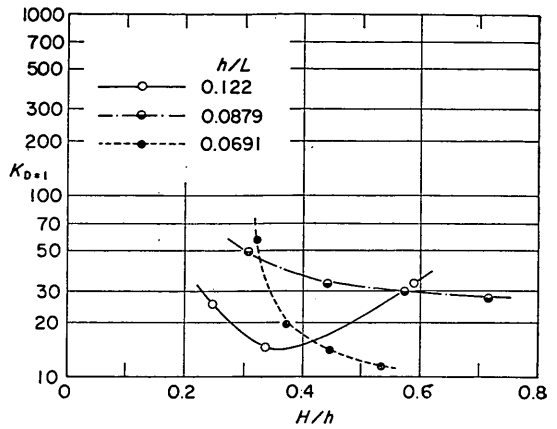


図-42 H/h と $K_{D=1}$ 値の関係

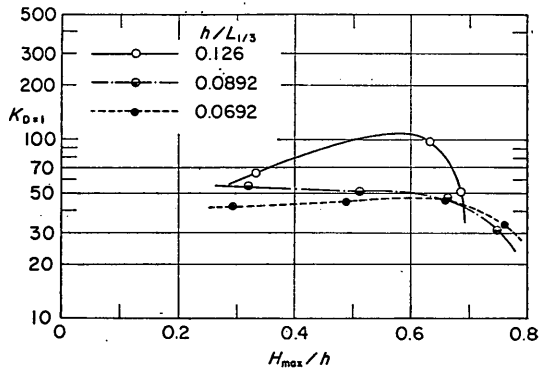


図-43 H_{max}/h と $K_{D=1}$ 値の関係

$K_{D=1}$ の値が低下しているものもあるけれども、 $h/L_{1/3} = 0.0682, 0.0856, 0.090$ の条件では明らかに増大傾向を示している。これは $H_{1/3}/h$ が大きくなるにつれて碎波の影響を受け、 H_{max} と $H_{1/3}$ の比が小さくなることによる影響と推測される¹⁵⁾。

一方、図-42 は規則波実験による同様な結果を示したものである。この場合、 $h/L = 0.122$ のデータを除き、不規則波のときとは逆に H/L が大きくなるにつれて $K_{D=1}$ の値が小さくなる傾向にある。これは規則波の場合には、波高がほぼ同じで碎波に近いほど強い波の作用を連続して受けることによると推測される。

以上の結果から、データはばらついているものの、規則波実験では碎波に近いほど安定性が悪いのに対し、不規則波実験では有義波高が同じであれば水深が浅くて碎波による制限が強くなるほど安定性が良くなる傾向にあるといえる。ただし、これはあくまでも不規則波の代表

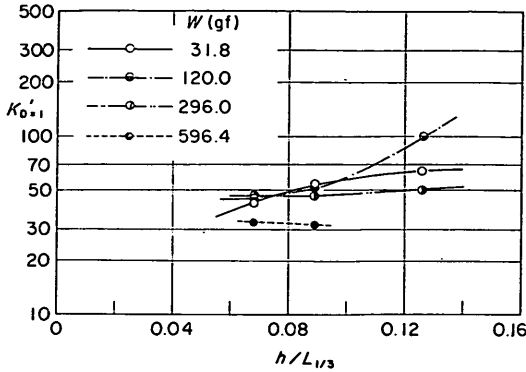


図-44 $h/L_{1/3}$ と $K'_{D=1}$ 値の関係

波高として有義波高を用いたときであって、代表波高として最高波高を用いると結果は異なる。たとえば、図-43は代表波高として H_{max} を用いて、前出の式(1)によって被害率1%に相当する値($K'_{D=1}$)を求め H_{max}/h に対してプロットしたものである。これによると、 H_{max}/h が大となって碎波による制限を受けるようになると、 $K'_{D=1}$ の値は明らかに小さくなる傾向を示している。しかしながら、その傾向は規則波実験ほどではなく、また値も全般に大きい。これは不規則波中の最高波高の波は1波であるのに対して、規則波ではそれが連続して作用すること、および3.6で述べたように規則波実験に対して通過波高を用いているが、実際には再反射の影響により波高が変動していることの影響によると考えられる。

なお、 H_{max} を用いたときの $K'_{D=1}$ の値を $h/L_{1/3}$ に対してプロットしてみたのが図-44である。これによると前出の図-41に示した有義波高基準の K_D 値の傾向とは異なり、 $K'_{D=1}$ の値は $h/L_{1/3}$ によってほとんど変化しないか、増大の傾向にあることが知られる。

(4) 波の継続時間の影響

安定性に及ぼす波の諸元でもう一つ重要な要素は波の継続時間であり、これをどの程度長くすればよいということが常に問題となる。特に、不規則波における最高波高は波群によって異なり、その期待値は波数とともに大きくなる。したがって、不規則波の場合には継続時間によって単に作用波数が増えるばかりでなく、最高波高が異なる影響も含まれる。そのため、不規則波の継続時間の影響を調べるには、同一継続時間についても多数の波群を用意し、これを用いて種々の継続時間に対し実験を行う必要があるが、ここでは一つの波群を用いた継続時間による被害率の変化の例(シリーズII)について述べる。

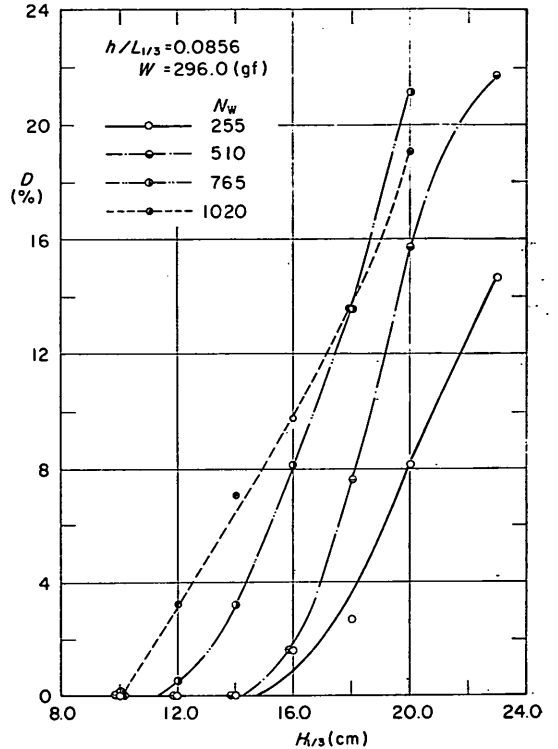


図-45 有義波高と被害率の関係

この実験で用いた波群はD13波であり有効継続時間を540 s, 1080 s, 1620 s, 2160 s, 波数に換算して255波, 510波, 765波, 1020波と変化させ繰り返し実験を行った。ただし、継続時間が違っても同一波群の一部を用いているため、たとえば510波に相当する継続時間の前半分は255波に相当する継続時間の波と全く同一である。対象とした消波ブロックは $W=296.0$ gf の1種で、各作用波数ともに波高レベルは6種類程度に変化させるが、同一条件での繰り返し実験は行っていない。

図-45は各波数 (N_w) のシリーズ別に、有義波高と被害率の実験結果を示したものであり、曲線はデータの傾向を適当に表したものである。これによると被害率の大きい条件で若干逆転しているデータもあるけれども、全体には継続時間が長いほど被害率が大である傾向が認められる。また、初期被害 ($D \approx 0$) の発生する波高条件も継続時間によって10~15cmの範囲で変化し、継続時間が長いほど小さくなる傾向を示しており、安定実験において波の継続時間が非常に重要な因子であることが知られる。

しかし、この違いの中には前述したように最高波高の

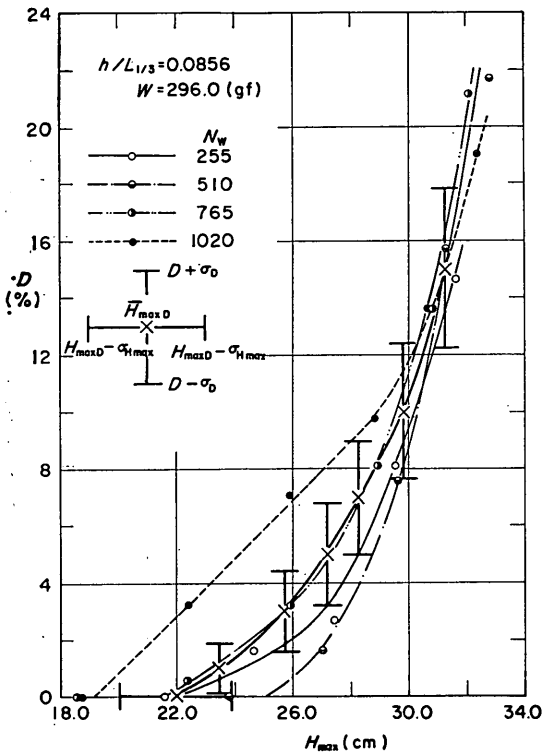


図-46 最高波高と被害率の関係

現れ方の影響が含まれている。そこで、図-45の関係を横軸に各波列の最高波高をとってプロットし直してみたのが図-46である。これによると被害曲線は $N_w=1020$ のデータを除いて図-45の結果よりよくまとまり、必ずしも波数の多いシリーズの被害率が高いとは限らない結果となっている。しかしながら、被害率が10%以下の $N_w=1020$ の条件は明らかに大きな被害率となっており、図中これを含めた H_{max} と D の平均的關係および被害率の標準偏差の範囲を示してあるが、その範囲をも上回っている。また、 $D=0\%$ の安定限界状態に対する H_{max} の平均値と先の4.2(5)で述べた安定限界最高波高の変動係数の値から推定した標準偏差の範囲を示してあるけれどもこれからはずれている。

以上の結果から、波の継続時間の影響は最高波高の現れ方によるところが大であるといえるけれども、そればかりでなく波数の増大による被害率の増大も無視し得ないものと考えられる。

4.4 乱積みと整積みの違い

(1) 波高と被害率の関係 (シリーズIVの結果)

シリーズIVの実験は直立部前面に捨石部を設け、その

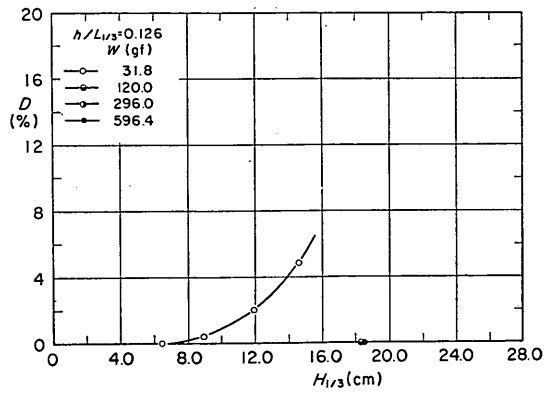


図-47(1) 有義波高と被害率の関係(整積み, A-wave)

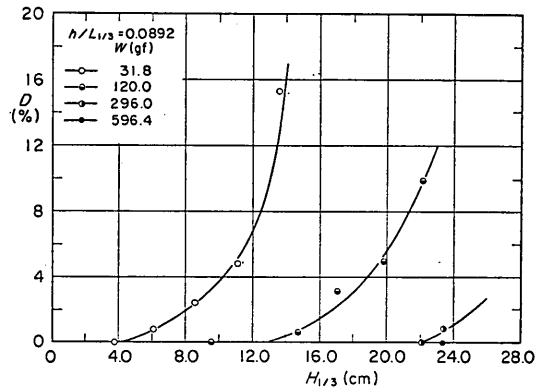


図-47(2) 有義波高と被害率の関係(整積み, B-wave)

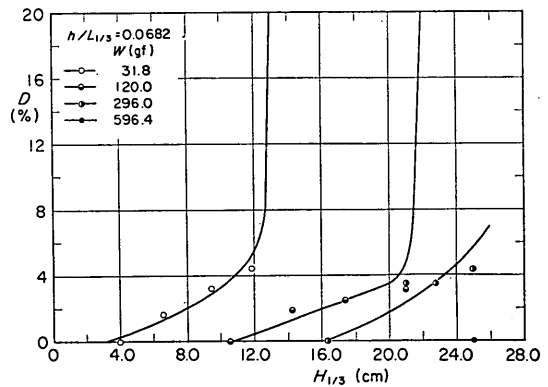


図-47(3) 有義波高と被害率の関係(整積み, C-wave)

表層のみを消波ブロック2層整積みで被覆した断面で、波はシリーズIIIの不規則波実験と同じ、A波、B波、C波の3種である。しかし、同一波高レベルでの波の有効

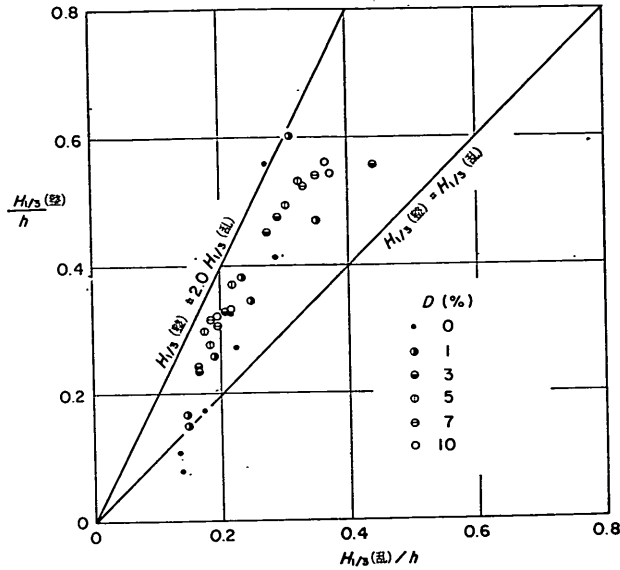


図-48 乱積み実験と整積み実験の比較

継続時間はA波860 s, B波1060 s, C波1240 sであり、波数に換算するとそれぞれ530波, 515波, 501波で、シリーズⅢの68~82%である。

図-47(1)~(3)は各波種別に波高と被害率の関係を示したものである。ここに、被害率は検査領域における表層2層の総数に対する移動個数の比をパーセント表示したもので、図中の実線はその実験値に基づく被害曲線を表す。これらをシリーズⅢの結果と比較すると、同じ被害ブロック数のとき、シリーズⅣのほうが被害率が大きくなるにもかかわらず、被害曲線は被害率が比較的小さい条件において非常に緩やかな立ち上がりを示すことが認められる。しかし、図には示していないけれども、図-47(3)の条件 ($h/L_{1/3}=0.0682$) では $W=31.8\text{gf}$ で $H_{1/3}=15.4\text{cm}$ の波を作用させたときの被害率は66.3%, $W=120.0\text{gf}$ で $H_{1/3}=25.0\text{cm}$ の波を作用させたときの被害率は93.2%にもなり、ある限界を超えると被害が急激に大きくなる危険性があるようである。

(2) 全断面乱積みとの比較

シリーズⅢとⅣにおける有義波高と被害率の関係から、 $D=0, 1, 3, 5, 7, 10\%$ のときの有義波高を読み取って、乱積みと整積みを比較したのが図-48である。これによると、2例ほど整積みの場合の波高が小さいけれども、他は $H_{1/3}(\text{整})/H_{1/3}(\text{乱})$ が1.0~2.0の範囲にはば入っており、全データについての平均値±標準偏差は

次式のようにになる。

$$H_{1/3}(\text{整})/H_{1/3}(\text{乱})=1.46\pm 0.29 \dots\dots\dots(13)$$

また、同様に $H_{\text{max}}(\text{整})/H_{\text{max}}(\text{乱})$ の平均値±標準偏差の値を求めると次のようになる。

$$H_{\text{max}}(\text{整})/H_{\text{max}}(\text{乱})=1.31\pm 0.25 \dots\dots\dots(14)$$

以上の結果から、シリーズⅢとⅣでは波高が異なり、同じ波数としたとき整積みの場合の波高が小さくなって係数値が若干小さくなる可能性はあるものの、整積みとして消波ブロックのかみ合わせをよくすることによって、安定性が相当程度改善されることは明らかである。これはまた、実験における消波ブロックの設置の仕方が結果に大きく影響することを意味している。

5. むすび

本研究による主要な結果をまとめると以下のとおりである。

- ① 規則波の作用と不規則波の作用の比較では、平均的には規則波の波高を有義波高の1.5倍あるいは最高波高の0.8倍と考えれば不規則波の作用とほぼ同じ被害率となる。しかし、これらの換算係数は波の周期や波高、および被害率によって著しく変化する。したがって、消波ブロック等の安定実験におい

ては、より現実に近い不規則波を用いて行うのがよい。

- ② 消波ブロックの被害の程度は繰り返し実験によって著しく変動し、被害率、安定限界波高、 K_D 値などは確率変数と考える必要がある。これは不規則波そのものが確率変量であることにもよるが、そのほか消波ブロックの安定性自体が本来非常に変動性の高いものであることによる。今回の実験の結果では被害率の変動係数は平均被害率1%のとき約0.9、5%のとき約0.4であった。また、安定限界有義波高の変動係数は約0.1、安定限界に対応する K_D 値の変動係数は約0.3であった。したがって、実験によって安定性を検討するとき、こうした変動性を考慮することが必要である。
- ③ 不規則波に対する安定性は有義波諸元ばかりでなく、最高波高の現れ方、および継続時間が影響するので留意する必要がある。
- ④ 不規則波の代表波として有義波諸元を用いたときの K_D 値は相対水深($h/L_{1/3}$)、および相対波高($H_{1/3}/h$)によって変化する。水深および有義波高を一定としたとき、周期の長いほうが不安定となりやすく、また有義波周期および波高を一定としたとき、碎波によって最高波高が制限を受ける浅い水深より、碎波の生じない深い水深のほうが被害の危険性が高い。
- ⑤ 消波ブロックを整積みとし、かみ合せをよくすることによって安定性が非常に改善される。これは実験においては初期の並べ方(積み方)が安定性に非常に影響することを意味するもので、模型での投入方法に充分注意する必要がある。

本報告における実験は昭和56年度から59年度にかけて設計に係わる技術的諸問題の一つとして実施したものである。その間初期の段階における実験計画および準備に関して当時の設計基準部設計基準研究室柳生忠彦元室長、柴田綱三元室員の協力を得た。また、昭和56~57年度の実験は当時水工部防波堤研究室室員 村永 努技官(現第四港湾建設局下関調査設計事務所)が主として担当したものである。ここに記して関係各位に深謝の意を表する次第である。

(1985年3月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 谷本勝利・高橋重雄・明瀬一行：防波堤直立部に働く不規則波力に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第23巻 第3号，1984，pp. 47~99

- 2) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1979，pp. 2-118~2-121
- 3) 富田英治：不規則波実験制御解析システムについて，港湾技研資料，No. 452，1983，34p.
- 4) 谷本勝利・富田英治・村永 努：水路における不規則波の再反射波の影響について，港湾技研資料，No. 467，1983，23p.
- 5) Goda, Y.: Numerical experiments on statistical variability of ocean waves, *Rept. Port and Harbour Res. Inst.*, Vol. 16, No. 2, 1977, pp. 3~26
- 6) たとえば，合田良実：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，1977，pp. 170~172
- 7) 合田良実：浅海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. 179~184
- 8) 范 期錦・渡辺 晃・堀川清司：不規則波に対する消波ブロック傾斜堤の安定性に関する実験的研究，第30回海岸工学講演会論文集，1983，pp. 352~356
- 9) 谷本勝利・柳生忠彦・村永 努・柴田綱三・合田良実：不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究，港湾技術研究所報告，第21巻 第3号，1982，pp. 3~42
- 10) たとえば，伊藤 学・亀田弘行：土木・建築のための確率・統計の基礎，丸善，1977，412p. (原典，A. H.-S. Ang and W. H. Tang: Probability concepts in engineering planning and design, Vol. 1)
- 11) Brunn, P. and Günbak, A. R.: New design principles for rubble mound structures, *Proc. 15th Coastal Engg. Conf.*, ASCE, 1976, pp. 2424~2473
- 12) Battjes, J. A.: Surf similarity, *Proc. 14th Coastal Engg. Conf.*, ASCE, 1974, pp. 466~480
- 13) 榎木 享・柳 青魯・大西明德：捨石防波堤斜面上の共振現象による破壊機構，第29回海岸工学講演会論文集，1982，pp. 428~432
- 14) Coastal Engineering Research Center, US Army Corps of Engineers: Shore protection manual, Govt. Print Office, Vol. II, 1973, pp. 7-167~7-201
- 15) 谷本勝利・大里陸男・高岡征二郎・内田豊彦・池田辰男：不規則波による消波ブロック被覆堤の安定実験，第26回海岸工学講演会論文集，1979，pp. 343~346

主要記号一覧表

B_0	: 消波ブロックの天端幅
b_0	: 静水面での被覆層幅
D	: 被害率
\bar{D}	: 被害率の平均値
H	: 波高の一般表示
H_{\max}	: 最高波高
$H_{1/10}$: 1/10最大波高
$H_{1/3}$: 有義波高
\bar{H}	: 平均波高

不規則波に対する消波ブロックの安定性に関する実験的考察

$H_{1/3}^*$: 沖側測点での有義波高	S_r : 流体の単位体積重量に対する消波ブロックの単位体積重量の比
$\bar{H}_{1/3}$: 各種の波群の有義波高の平均値 (個々の波群の値と区別を要するときのみ使用)	T : 波の周期の一般表示
$(H_{1/3})_W$: 消波ブロック重量に対して Hudosn 式により逆算される有義波高	T_{\max} : 最高波の周期
$H_{\max D=0}$: 被害率 0% に対する最高波高	$T_{1/10}$: 1/10最大波の周期
$\bar{H}_{\max D=0}$: 被害率 0% に対する平均最高波高	$T_{1/3}$: 有義波周期
$\bar{H}_{\max D}$: 任意の被害率に対する平均最高波高	\bar{T} : 平均波の周期
$H_{1/3 D=0}$: 被害率 0% に対する有義波高	$\bar{T}_{1/3}$: 各種の波群の $T_{1/3}$ の平均値 (個々の波群の値と区別を要するときのみ使用)
$\bar{H}_{1/3 D=0}$: 被害率 0% に対する平均有義波高	$T_{G1/3}$: 入力信号の見掛け上の有義波周期
$\bar{H}_{1/3 D}$: 任意の被害率に対する平均有義波高	W : 消波ブロックの平均重量
h : 水深 (一般には堤体設置位置での水深)	\bar{x} : 変動量の平均値の一般表示
h' : 直立部の基面水深	α : 消波ブロックの法面と水平面のなす角
h_c : 直立部および消波ブロックの静水面上天端高	γ_r : 消波ブロックの単位体積重量
K_D : Hudosn 式に有義波高を代入したときの K_D 値	Δ : 各クラスの分割幅
K_D' : Hudosn 式に最高波高を代入したときの K_D 値	ζ : 確率変数を対数にしたときの標準偏差 ($\sqrt{\text{Var}(\ln X)}$)
K_R : 反射率	λ : 確率変数を対数にしたときの平均値 ($E(\ln X)$)
L : 波長の一般表示	ξ : surf similarity parameter ($\tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$)
$L_{1/3}$: 有義波波長	σ : 標準偏差の一般表示
L_0 : 深水波の波長	σ_D : 任意の波高に対する被害率の標準偏差
N : 検査域での消波ブロックの総数	$\sigma_{H\max}$: 任意の被害率に対する最高波高の標準偏差
N_0 : データの総度数	$\sigma_{H1/3}$: 任意の被害率に対する有義波高の標準偏差
N_w : 波の総数	σ_w : 消波ブロック重量に対する標準偏差
S : スペクトル密度	