

2. 実験方法

2.1 実験設備

実験は図－1に示すような長さ23m，幅0.6m，高さ1.0mのピストン型の吸収式不規則波造波装置が設置されている片面ガラス張りの水平底の二次元造波水路を用いて行なった。造波装置の制御は全ての実験において，造波板による再反射を抑えた吸収式制御として行なった。造波板から7m岸側の地点からモルタルによって1/30の海底勾配の傾斜をつけ，その末端にはビーチ型消波装置を設けている。また造波板背後にはヘチマロンの消波工を用いた。堤体模型は造波板より約14m岸側に設置した。波高形には，容量式波高計を用いている。

2.2 模型ブロックと縮尺比

石やブロックで構成される堤体の安定性に関する模型実験は，適切に操作されるならば，十分に現地の状況を再現できることが知られている。模型の大きさの下限は許容できる縮尺効果（Scale Effects）により，上限は主として実験水槽の規模によって定まる。安定に関する実験では，縮尺比が過小であると，所要の安定重量 W は過大（ K_D 値は過小）となることが知れている。この他に，模型が小さすぎると製作が困難になるし，造波能力に比べて大きすぎると不安定な状況が出現できないことになる。さらに伝達波などについても縮尺効果がある¹⁾。

以上の検討から本実験では，模型ブロックの長さの縮尺を1/20とし，フルード相似律のひずみ

なし模型縮尺を用いた。よって模型の各縮尺は，表－1のようになる。今回模型に使用したブロックは，東興ブロック工業株式会社の製品であるサプレスブロック A－3であり，模型ブロックの所要重量は383gとなる。なお，模型ブロックの比重を2.3に近づけるため，モルタルに鉄粉を混入してある。実際に製作した模型ブロックの諸元を表－2に示す。実際に製作した模型ブロックは

表－2 製作模型ブロックの諸元

	平均値重量	標準偏差	平均単位体積重量
Room-Dry	390.8 g	7.49 g	-----
Surface-Dry	403.8 g	5.22 g	2.394 g/cm ³

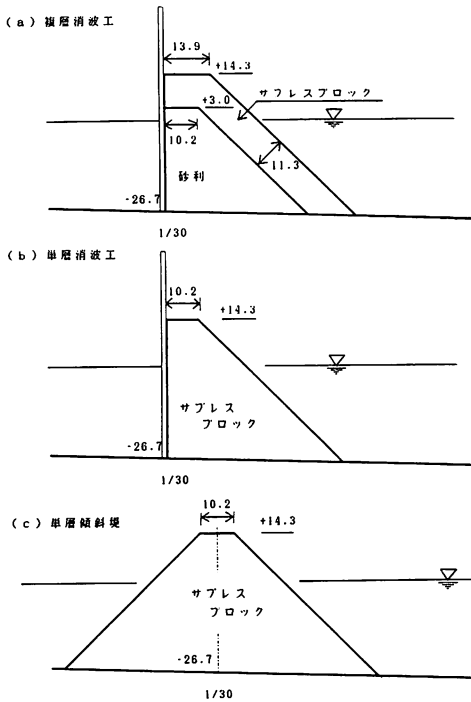
重量及び単位体積重量とも縮尺による計算値よりも大きくなった。

2.3 実験堤体断面

今回実験した堤体断面構造は，図－2に示す（a）複層消波工型，（b）単層消波工型，（c）単層傾斜堤型の3種類である。ブロックの積み方は乱積と層積で，さらに法勾配も1：1，1：1.3，1：1.5の3種類に変化させて行なった。実験のケースは表－3に示す。（a）の場合の内層に用いられている材料は，平均重量は15.13gの砂利を用いた。

表－1 フルード相似律のひずみなし模型縮尺

	ディメンション	縮 尺	$w_r=1, l_r=1/20(>1/50)$
面 積	L^2	l_r^2	1/400
体 積	L^3	l_r^3	1/8,000
時 間	T	$l_r^{1/2}$	1/4.472
速 度	LT^{-1}	$l_r^{1/2}$	1/4.472
力, 重量	MLT^{-2}	$w_r l_r^3$	1/8,000
圧力強度	$ML^{-1}T^{-2}$	$w_r l_r$	1/20
エネルギー	ML^2T^{-2}	$w_r l_r^4$	1/160,000
模型消波ブロック（かつこ内は実物の値 呼び名A-3，公称トン数3 t			
重量(3.061kg)	383 g	(>200g)	
長さ(215cm)	10.3 cm		
高さ(127cm)	6.4 cm		
幅 (145cm)	7.3 cm		



図一 実験堤断面図 (単位cm)

表一 実験ケース

Case NO.	構 造	積み方	法勾配
1	単層消波工	乱 積	1:1
2	"	"	1:1.3
3	"	"	1:1.5
4	複層消波工	二層乱積	1:1
5	"	"	1:1.5
6	"	二層層積	1:1

3. 実験方法

3.1 安定限界の基準¹⁾

石あるいは異形ブロックの安定に関する実験においては、安定・不安定の限界をどのような状態にとるか定めることが大切である。農土試の実験ではブロックの移動状況を(1)少し動く、(2)半脱落、(3)脱落、(4)飛散の4段階に分けており、被害としては(2)以上を対象としている。

Hudson は「表層を構成する個体の総数のうちで脱落する個数の割合が1%以上か、以下か。」をもって被害・無被害の判定基準としている。そして個体の所要重量を、次式で算出することを提案し、これが現在まで用いられている。

$$W = \frac{\gamma_c H^3}{K_D (S_c - 1)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

ここで、 $S_c = \gamma_c / \gamma_w$ 、 γ_w は水の単位体積重量、 K_D は個体および被害率等によって定まる係数である。通常、設計の際に用いられる K_D は、無被害すなわち被害が1%以内の時の値を使用する。また α は斜面が水平となす角度である。

Paul と Baird は傾斜式防波堤の被害を明瞭化させる目的で、波浪による移動が個体の全長よりも短いか長いか2つに分類することが大切だと主張し、前者を“動揺”(Unit Rocking)、後者を“転置”(Unit Displacement)と名付けた。そして、これを基本に被害状況を5段階に分けた。また被害率に代わって防波堤の延長100 ft 当りの被害個数でもって被害の程度を表現すべきであるとしている。

Ouellet は上出の転置以上の移動をしたものだけを被害個数とすることを主張し、また無被害の波高 $H_D = 0$ と被害の各モードにおける波高 H との関係は表一4 のようになるとしている。

本実験では、後記する被害の過程の特性と上記の諸研究を参照して、ブロックの被害状況を、(a)

表一 4 無被害波高 $H_D = 0$ と被害モードにおける波高 H との関係

被害モード	$H / H_D = 0$	被害状況
1	0~0.5	動かない
2	0.5~0.9	動揺のみで転置はない
3	0.9~1.5	いくつかの個体は転置するが表層全体としては安定
4	1.5~1.8	転置するものが多く、時間がたてば表層は破壊する。
5	1.8~	表層がただちに破壊する。

動揺、(b) 転置以上の2段階のいずれかに判定し、各々の個数を数えた。そして被害としては(b)の転置以上を対象とすることとし、被害率はHudsonと同様に全体のブロック個数に対する被害個数の%とした。

3.2 実験波

実験の水深は、沖合いの一樣水深部で、50cmと一定とした。実験波の周期は、安定にかなり影響があることが知られているので、ここでは1/20縮尺を考慮して、 $T=1.3, 1.8, 2.3, 2.8, 3.3$ secの5種類を採用した。

構造物のある場合の、入射波高の決定は、構造物のない水底地形のみの状態で、構造物設置点で測定した波高(すなわちその状態での入射波高)と、沖合一樣水深部の波高との関係を周期をパラメーターとしたグラフにしておいて、構造物があるとときの沖合波高から推定する方法でなされた。入射波高は、10cm程度から、堤体全面水深で丁度碎波するような20cm以上にも達することがあった。

3.3 実験手順

実験は、次のような手順で行った。

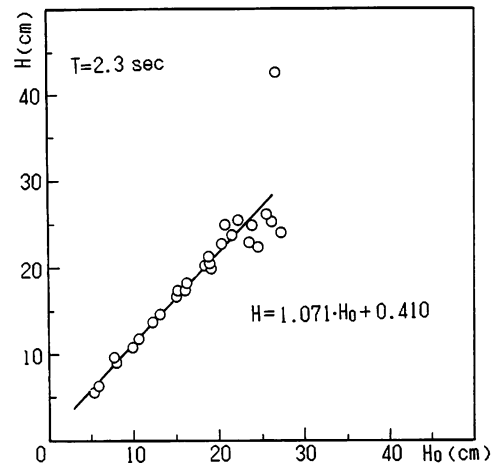
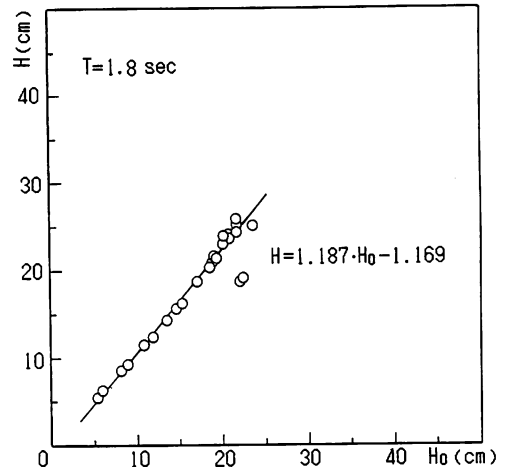
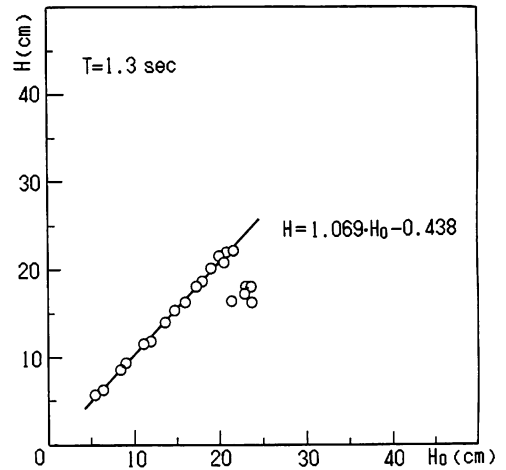
- (1) 実験堤体を斜面に設置する。
- (2) 実験前の写真を撮る。
- (3) 水槽に注水し、波高計のキャリブレーションを行い、所要水深を得る。
- (4) 周期、波高を定め、造波機に信号を送る。
- (5) 波を起こし、同時に沖波の波高を測定する。
- (6) 水槽の水を排水し、移動個数を調べ、実験後の写真を撮る。

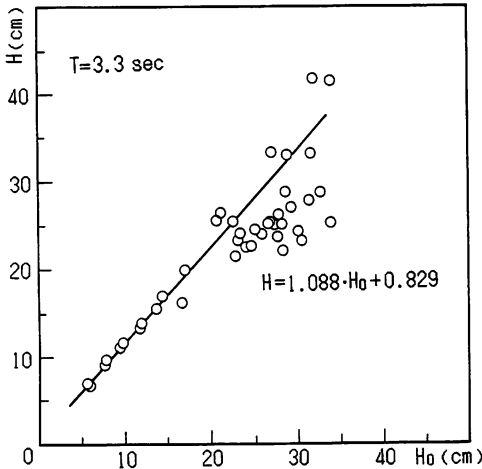
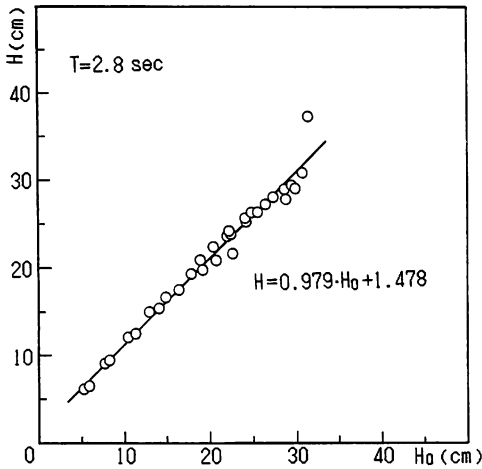
波高、周期、法勾配、積み方、構造物種類を変えて(1)~(6)の操作を繰り返し行なう。また異形ブロックの安定実験においては、弱い波でも長時間作用させるとブロック相互のかみ合わせがよくなり、次に波高を大きくしてもブロックは容易には動かない状態となるので、本実験では各実験ごとにブロックの傾斜部をこわし、再び積み直して実験を行なった。従って本実験の結果は施工の実態と考え合わせると安全側の値を与えるものといえよう。

4. 実験結果

4.1 構造物設置点波高と沖波波高の関係

構造物設置点の波高と沖合一樣水深部の波高との関係を各周期ごとに図-3に示す。図-3より





図一 3 模型設置点の波高 H と沖合一様水深部の波高 H_0 との関係

波が砕波するまでの波高は両位置における波高の相関は非常によい結果が得られている。各周期とも同じ様な関係を示しているが、各周期ごとに関係を1次式で表わし、図中に記入してある。砕波付近から模型設置点での波高は非常にばらつき、砕波が起これと考えられる沖合いの波高も各周期によって異なり、その後の変動も周期によって異なる。

4. 2 各堤体における被害状況

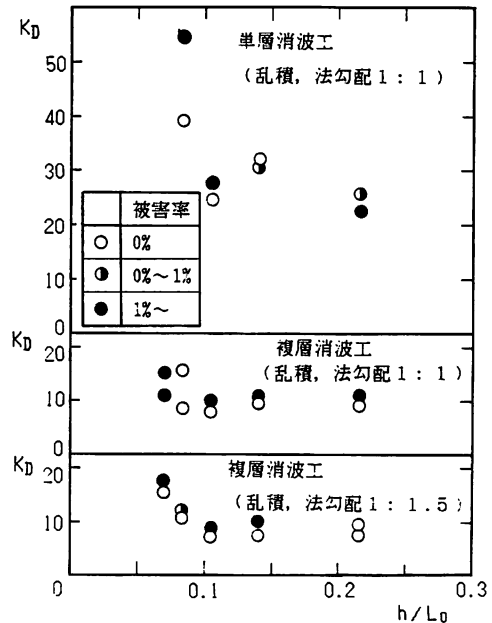
実験結果を表一5に示す。単層傾斜堤の法勾配1:1の状態では、ブロックの安定性がよく、各周期において造波可能な範囲まで波高を大きくし

砕波状態まで実験を行なったが、すべての実験において“動揺”の状態のブロックはあったが、“転置”の状態は見られず、すべて無被害であった。

堤体を消波工形式にし消波ブロックのみの単層消波で実験を行なうと、法勾配1:1では被害状況を再現することができた。法勾配を1:1.3, 1.5と緩くすると砕波状態で被害状況を再現することができた。堤体の層を2層にし、中詰めに砂利を用いた複層消波工については、ほぼ各周期、法勾配1:1, 1.3において被害状況を砕波状態の前の波高で見ることができた。また複層消波工の層積の状態の実験においては、単層傾斜堤と同様に被害状況を見ることができず無被害であった。

4. 3 相対水深による影響

Hudson式に使われている K_D 値を相対水深 h/L_0 で整理したものを図一4に示す。本実験においては、 K_D 値はほぼ一定の値を示しているが、



図一 4 消波工の K_D 値と相対水深 h/L_0 の関係

長周期の波においては K_D 値は大きくなり、安定性がよくなる傾向を示す。また単層消波工は複層消波工に比べ相対水深による K_D 値の変化が大きい。

藤本ら²⁾は2層乱積み消波工で実験を行ない、テトラポットでは相対水深が大きくなると K_D 値は小さくなり、六脚ブロックでは相対水深によ

表一五 実験による被害状況

実験Case NO. 1 , 単層消波工, 乱積, 法勾配 = 1 : 1							
周 期 T sec	入力波高 H'	沖波波高 H _o	模型位置 波高 H	ブロック 数 N	動揺	転置	KD
1.3	20	20.7	21.7	193	4	2	22.4
	21	21.6	22.7	191	3	1	25.6
1.8	20	21.2	24.0	193	0	1	30.3
	21	21.5	24.4	194	7	0	31.8
2.3	18	20.4	22.3	193	5	0	24.3
	19	21.4	23.3	190	4	2	27.7
2.8	20	26.1	26.1	195	2	0	38.9
	22	28.7	28.7	191	9	2	51.8
3.3	19	25.1	砕波	195	6	1	
	20	27.4	砕波	191	7	0	
実験Case NO. 2 , 単層消波工, 乱積, 法勾配 = 1 : 1. 3							
2.3	20	22.2	砕波	217	3	1	
	22	24.9	砕波	226	4	1	
実験Case NO. 3 , 単層消波工, 乱積, 法勾配 = 1 : 1. 5							
2.3	20	23.4	砕波	238	2	0	
	22	24.7	砕波	238	16	1	
実験Case NO. 4 , 複層消波工, 乱積, 法勾配 = 1 : 1							
1.3	13	15.3	15.9	97	2	0	8.8
	14	16.3	17.0	96	11	6	10.8
1.8	13	14.8	16.4	89	7	0	9.7
	14	15.3	17.0	92	6	2	10.3
2.3	12	13.9	15.3	92	8	0	7.8
	13	15.2	16.7	91	17	2	10.2
2.8	13	14.6	15.8	100	3	0	8.6
	14	18.0	19.1	95	7	0	15.3
3.3	12	14.9	17.0	97	7	2	10.8
	13	16.6	18.9	97	8	1	14.8
実験Case NO. 4 , 複層消波工, 乱積, 法勾配 = 1 : 1. 5							
1.3	15	16.7	17.4	120	5	0	7.7
	16	17.9	18.7	121	6	0	9.5
1.8	14	15.4	17.1	122	2	0	7.3
	15	17.0	19.0	118	27	4	10.0
2.3	14	15.5	17.0	125	9	0	7.2
	15	16.6	18.2	112	25	3	8.8
2.8	14	18.2	19.3	125	0	0	10.5
	15	19.0	20.1	118	17	1	11.9
3.3	15	19.4	21.9	119	15	0	15.3
	16	20.2	22.8	117	7	2	17.3

て K_D 値は変化しないという結果を得ている。また郭ら³⁾は Dolos の一層整積みの実験結果より相対水深が大きくなるにともなって K_D 値は大きくなり、安定性はよくなる。しかし、同じ相対水深においては、周期の長い波に対してブロックは比較的安定であるとしている。この様に周期による影響は、ブロックの種類はもとより、積み方等によってもその影響は異なってくる。

4. 4 安定係数と Surf Similarity Parameter の関係

一般に勾配が緩やかなほど安定性はよくなる。本実験においてもその傾向を見ることができる。安定度を式(2)で定義される Stability Number N_S で表わし、式(3)で定義される Surf Similarity Parameter ξ で整理したものを図-5 に示す。

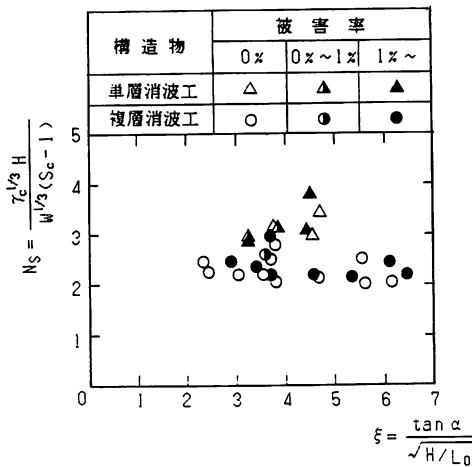


図-5 消波工(乱積)の N_S 値と Surf Similarity Parameter ξ の関係

$$N_S = \frac{\gamma_c^{1/3} H}{W^{1/3} (S_c - 1)} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}} \quad (3)$$

ここで、 N_S 値と K_D 値の関係式は式(1)より式(4)の関係にある。

$$N_S = (K_D \cdot \cot \alpha)^{1/3} \quad (4)$$

石積傾斜堤では $\xi \approx 3$ で N_S 値が最も小さくなると言われている。本実験においては、単層消波工では ξ の値が大きくなると N_S 値が大きくなる傾向が伺われる。また複層消波工では ξ の値によらずほぼ一定の N_S 値を示している。

4. 5 模型の縮尺効果について

安定に関する実験では縮尺比が過小であると、所要の安定重量 W は過大 (K_D 値は過小) となることが知られている。島田ら⁴⁾は式(5)で定義されるレイノルズ数 R_e の増加とともに Stability Number N_S の値も増加し、 R_e 数がほぼ 4×10^5 以上になると N_S 値の増加傾向はにぶり、一定値に近づくとしている。

$$R_e = \frac{\sqrt{gH} \cdot l_a}{\nu} \quad (5)$$

ここで、 g : 重力加速度、 H : 入射波高、 ν : 水の動粘性係数、 $l_a = (W \cdot \gamma_c)^{1/3}$ 、 γ_c : ブロックの単位体積重量である。本実験における R_e 数の範囲は $5.2 \times 10^4 < R_e < 7.1 \times 10^4$ であり、縮尺効果により実際よりも小さい K_D 値と考えられる。CERC は捨石堤について、また島田らは消波ブロックの模型実験より、小規模実験における Stability Number N_S を現地に適用する際の模型縮尺の影響を調べている。これらの実験結果を紹介すると図-6 のようである。縮尺効果を考慮

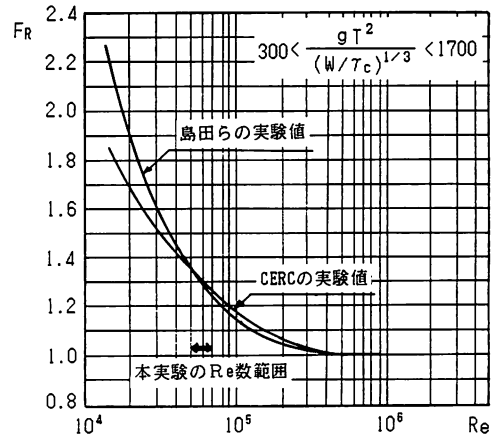


図-6 模型縮尺の影響がない範囲の Stability Number に対する補正係数 F_R (島田ら(1986)より)

して実験結果を設計に反映するには、模型縮尺の影響を補正する係数 F_R を次式のように定義している。

$$F_R = \frac{N'_S}{N_S} \quad (6)$$

ここで、 N_S : 模型での Stability Number、 N'_S : 実物での Stability Number である。本実験では $230 < gT^2 (W/\gamma_c)^{1/3} < 585$ と実験条件が異なるが、図に本実験を適用すると $F_R \approx 1.25 \sim 1.35$ となる。

5 あとがき

本実験よりサプレスブロックの複層消波工における K_D 値及びスタビリティナンバー N_S は、最も最小な値をとると $K_D \doteq 8$, $N_S \doteq 2$ となる。消波工を単層にすると K_D 値及びスタビリティナンバー N_S は大きくなる。また堤体を傾斜堤にすると安定性はさらによくなる。乱積みと整積みでは整積みの方が安定性は非常によい。

この種の実験は、実験値のばらつきが大きいのが普通で、何回か同じ実験を繰り返して K_D 値を決める必要があり、またブロックの比重等が大きく影響することから、充分安定性を見込んで K_D の値を使用する心要がある。

なお、本研究を行なうにあたり、室蘭工業大学近藤俊郎教授に御指導、御助言を頂いた。また東興ブロック工業(株)及び(株)道建資材工業から資料等の御協力を得、本校土木工学科17期生の新宮照暁、高橋正樹、徳田勝浩、鳥井洋介、門間義之君らに実験に関して多大な御協力を得た。最後にこれら

の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 近藤俊郎, 谷野賢二, 浅間良則, 佐藤隆一, 佐藤文雄, 中嶋基之: ジュゴン堤の安定性と消波特性に関する実験, 室蘭工業大学土木工学科河海研究室, 1977.
- 2) 藤本稔美, 阿部宣行, 長谷川寛: 消波ブロックの水利特性に関する実験的研究, 電力中央研究所報告, 1982.
- 3) 郭 金棟, 蘇 棋福: 消波ブロック安定係数について, 海岸工学講演会論文集, 第26回, 1979.
- 4) 島田真行, 藤本稔美, 斎藤昭三, 榊山勉, 平口博丸: 消波ブロックの安定性に関する模型縮尺効果について, 海岸工学講演会論文集, 第33回, 1986.

(平成元年12月1日受理)