

4 捨石堤に関する二、三の実験的考察

運輸省海上保安庁灯台部 正員 藤野義男
運輸省運輸技術研究所 正員 工博 井島武士
運輸省海上保安庁灯台部 〇山瀬憲吾

I 緒 論

防波堤及び灯台などの建設に必要な捨石による基礎構造の安定及び防波堤の堤端部の安定について概略の見解を求めるために、二、三の実験を行った。

堤端部に於ける破壊現象を、しからざる場所との比較に於いて考察するために最初に捨石堤の崩壊の機構についての観察を行った。次いで堤端部の前面部と側面部との崩壊の仕方の比較をなして、その各々の面の特徴を見だし、且つ捨石重量計算公式として一般に広く用いられている1938年に発表せられたIRIBARREN公式、並びにHUDSONの改良公式が堤端部についても適用し得るや否やを考察した。

II 無限長捨石堤に関する実験

(i) 実験装置

(1) 水路

この実験に使用せられた水路は長さ45m、巾6m、深さ1.5mで周期1秒より32秒までの波を造り得る。図-1は、実験水路の構造及び模型の配置を示すものである。

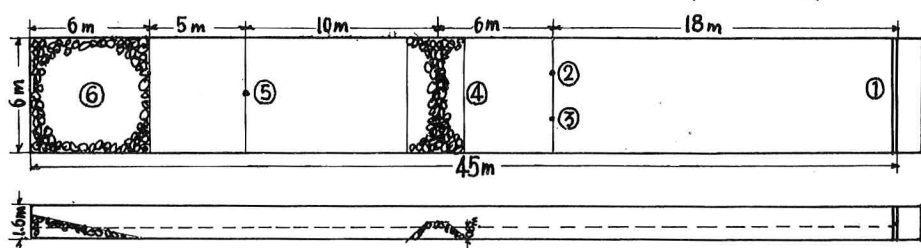


図-1 実験水路説明図

図-1に於いて、記号①は造波板、②及び③は波高計、④は模型捨石堤、⑤は捨石堤後部波高及び水位測定用ポイントゲージ、⑥は波殺し用の捨石斜面（勾配1:6）である。

図-2は、造波装置の方から見た水路内部を示すもので、手前に見えるのは模型防波堤である。造波装置は10HP誘導電動機により駆動され無段変速機を介して、二段変速及び造波板振動を要するギヤボックスを有し、造波板はピストンタイプの運動をなすものである。

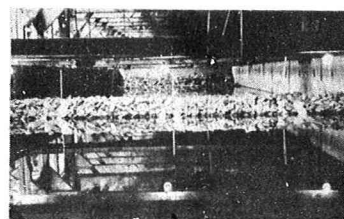


図-2

(2) 波高計

図-3はこの波高計の原理図である。変圧器の非接地側にネオン管を並列に80箇所接続し各々の端子をステップゲージの

それぞれ絶縁導線に結び、この各導線の端はステップゲージ上5mmの縦間隔に並び、約6mm程外側に突起しており、この突起している導線の端が水中に浸漬することにより、これが接地となり、この回路に交流100Vの電圧を印加すれば、この電気的回路を電流が流れネオン管は点灯される。点灯されたネオン管の数により波高を直読する。

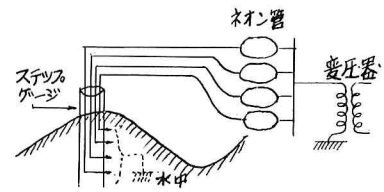


図-3 波高計の原理図

(i) 模型

実験に用いた捨石堤は、造波板から約24 mの距離に図-1のように作り法勾配、天端高、天端巾は表-1の五種類のものを用いた。水路の方向を区別するために、ここでは造波板よりを前、反対側を後と称することにする。

模型捨石堤を構成する石の重量は250gより35Kg程度で、1.0Kg附近の石が最も多い。図4(a)の如く250g, 500g, 1.0Kg, 1.5Kg, 2.0Kg, 2.5~3.0Kg(いずれも重量差±10%以内)の六種類の石を色分けして配置し、同時に各種の重量について実験を行った。図4(b)は波が防波堤を襲った際のものである。

号	前面法勾配	後面法勾配	天端高(cm)	天端巾(cm)
1	1:1.5	1:1.0	87	60
2	1:1.5	1:1.0	90	100
3	1:2.0	1:1.0	87	70
4	1:2.0	1:1.0	90	75
5	1:2.5	1:1.0	90	64

表-1 模型捨石堤の種類

図4(a)に於いて、①は250g, ②は500g, ③は1.0Kg, ④は1.5Kg, ⑤は2.0Kgの重量の色分けした捨石である。色分けしたこれらの捨石の附近には、やや同じ重量の捨石を置いた。同じ重量の色分けした捨石群の中は約35~40cmで、その間に約55cmの中の正確には重量区分をしない捨石を置いた。捨石は毎回できるだけ同じ方法で防波堤上に置き並べた。しかし無限長防波堤の実験では、色分けした捨石の量が少く且つ周囲の石は、これら捨石と大きさがいく分異なるために堤端部の実験に較べて並べ方は丁寧である。これは捨石間の摩擦係数にかなりの差を生じているようである。使用した捨石はいく分平たい石で、特別に平たい石は除外した。次頁の図-5は模型捨石堤断面図を示す。

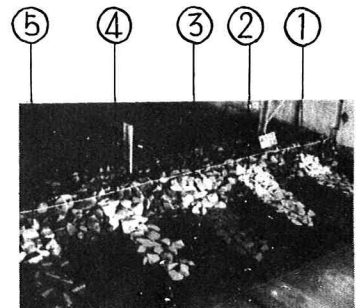


図-4(a)

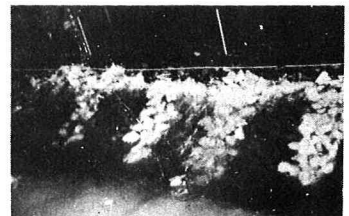


図-4(b)

(ii) 捨石の移動形式

波浪により捨石堤が崩壊する現象を分析するために、最初に個々の捨石の移動について観察を行った。捨石の移動形式から揺動、転動、転落の三種に分け、揺動とは位置の急激なる移動をともしない揺れ動きで裏返しになることが

ない場合、転動は裏返しになるが変位が小さい場合、転落とは位置の急激的移動及び変位の大なる場合とした。

実験は模型捨石堤に波を作用させ波の波高を25cmづつ低い方より高めて捨石の揺動、転動、転落を観察した。ここで示される波高は図-1に示す位置での実際波高である。又この観察区域は静水面上H、同じく静水面下Hの範囲内の部分である。波がある波高になると2~3個の捨石は揺動を始める。この時の波高を揺動の限界波高という。同様に転動、転落の限界波高も定める。図-6は揺動、転動、転落の限界波高と捨石重量との関係グラフである。

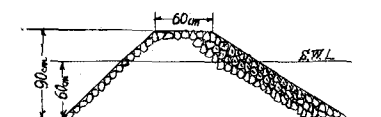


図-5 模型捨石堤断面図

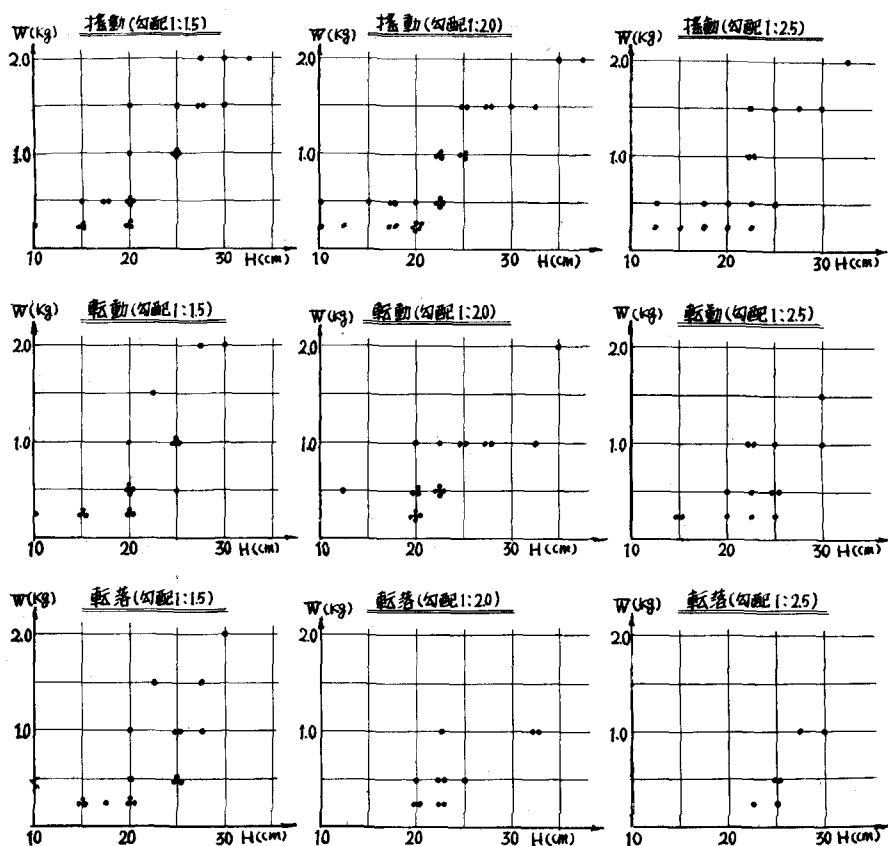


図-6 捨石重量と揺動、転動、転落の限界波高との関係

測定値が相当にばらついているが、これは捨石の置き方により個々の捨石の摩擦係数 μ が相当に異なるためである。揺動、転動、転落の各曲線は各々の捨石重量についての限界波高の平均値(算術平均)を描いた。これらの諸曲線を次頁の図-7、図-8、図-9に示す。

図-7から揺動曲線は法勾配1:15より1:25の間ではほとんど一致し、法勾配の影響がないことを示している。

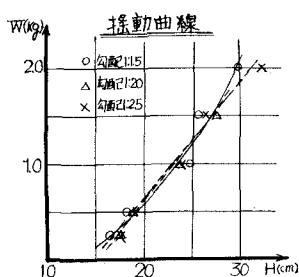


図-7 捨石重量と揺動限界波高との関係

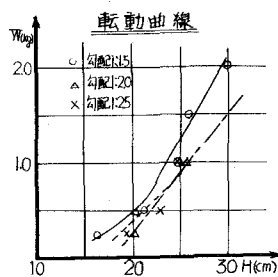


図-8 捨石重量と転動限界波高との関係

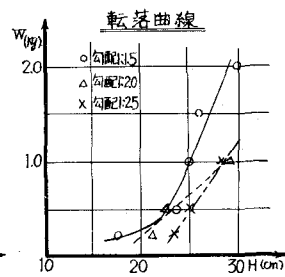


図-9 捨石重量と転落限界波高との関係

図-8及び図-9から転動限界波高に於いて法勾配の影響が現われ、更に転落限界波高には一層強く影響が現われている。捨石堤の崩壊は捨石の揺動、転動ではなくして転落が直接原因である。揺動、転動は単に転落の原因をなしているにすぎない。法勾配の緩かなる斜面では捨石の揺動は起つても、転動更には転落は生じ難い故安定となり、これに反して法勾配の急なものは、揺動は転動、転落に結びつく。図-10はこのことをよく示している。

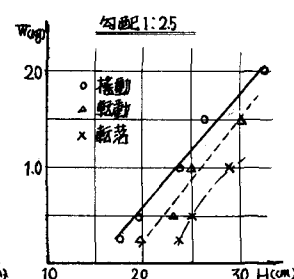
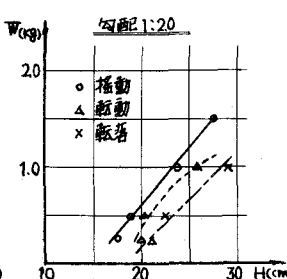
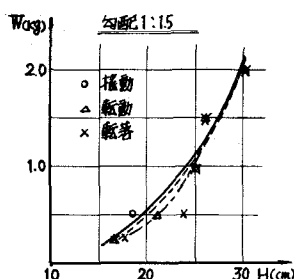


図-10 各勾配に於ける揺動、転動、転落曲線

観察によると揺動、転動、転落の関係は、最初に波が捨石堤上に来て砕け波となり暴砕して堤斜面を流れ上るが、この際特に静水面附近の捨石に衝重を与えて、石と石との接触をゆるめてばらばらにし（揺動、転動）すなわち摩擦係数 μ を小にして流下する際に摩擦係数の低められた石を転動、転落せしめ堤の崩壊へと導いた。

(iii) 捨石堤の移動形式と波形勾配との関係

便宜上%の代りに μ を用いて μ が揺動、転動、転落の限界波高に如何なる影響を与えるかを調べた。

図-11は揺動、転動、転落せしめた限界波高を縦軸にとり μ を横軸にとつてX FPIは250g, O FPIは500g, ● FPIは1Kgの捨石をあらわしたものである。これで見ると μ の変化が、あまり限界波高に影響しないことが分る。わずかに μ が大となるにつれて限界波高が低くなっていく傾向も見られるが、この程度の実験値からは断言できない。

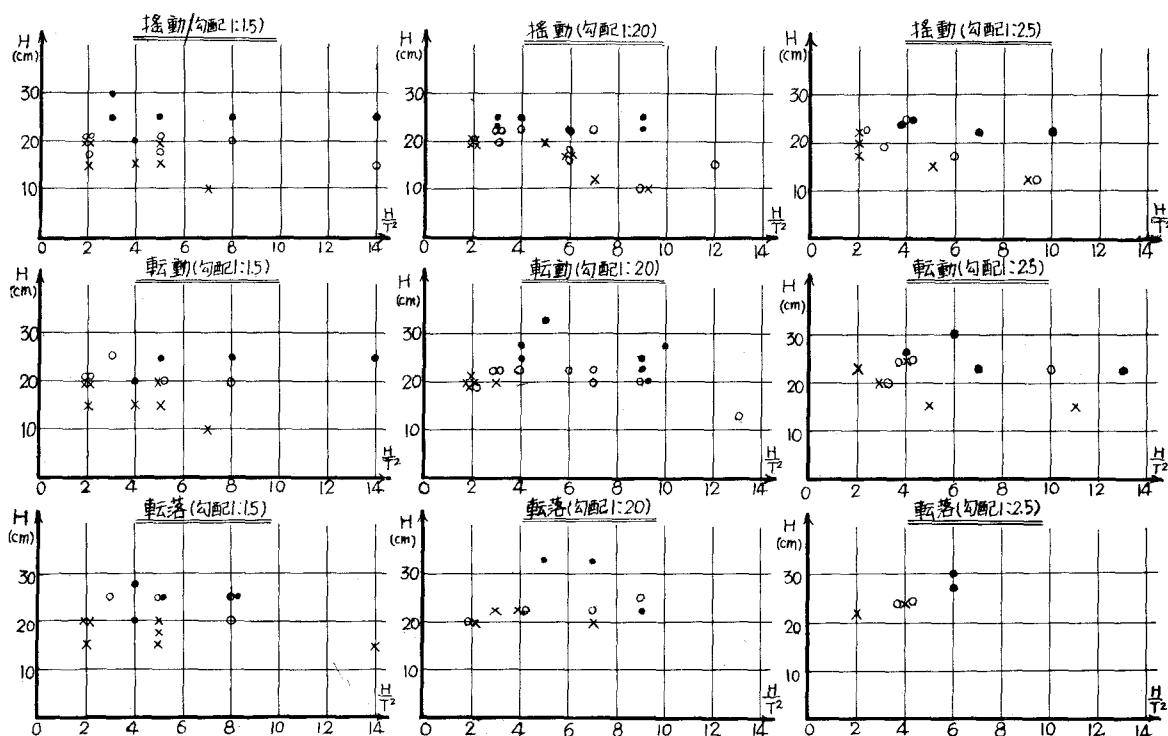


図-11 重量一定なる捨石の揺動，転動，転落の
限界波高に及ぼす β （各重量の捨石）の影響

(IV) 捨石堤の安定限界

捨石堤に、ある波高の波を作用せしめその破壊状況を実体写真撮影により判定し、ほとんど破壊のない状態を安定、破壊がわずかにあるものを準安定、破壊のあるものを不安定とし分類し表-2を得た。

表-2より縦軸に捨石重量をとり、横軸に波高をとって作成したのが次頁の図-12である。

図-12のX印は不安定を、●印は準安定を、○印は安定を示している。図中の実線は安定と準安定との臨界を示す線である。これらの曲線とHUDSONの捨石重量計算公式の法勾配、1:15に対しては $K=0.004$ 法勾配 1:20に対しては $K=0.006$ 法勾配 1:25に対しては $K=0.012$ を用いた曲線と比較したのが、図-13である。

次頁の図-13からHUDSONの捨石重量計算公式がよく実験と適合することが分る。

表-3はHUDSONの公式を用いた実験曲線から求めた係数と、彼の発表したその勾配に於ける係数（ β により変化する）の平均とを比較したものである。実験から求めた係数は小さくでている。

法勾配1:1.5

表2(a)

実験番号	周期 T(sec)	波長 L(cm)	波高 H(cm)	作用時間 (波数)	H_0/L_0	h/L	捨石重量(kg)		
							不安定	準安定	安定
NO.1	1.2	212	22.5	200	0.105	0.29	0.25	0.5	1.0
NO.2	1.7	354	30.0	1060	0.072	0.17	0.5	1.0	2.0
NO.3	2.8	645	27.5	650	0.023	0.095	0.5	1.0	2.0
NO.19	3.1	722	31.0	300	0.019	0.082	0.5	1.0	1.5
NO.20	1.9	410	33.0	300	0.062	0.15	0.5	1.0	1.5
NO.21	1.6	326	27.0	300	0.072	0.18	0.5	1.0	1.5
NO.22	1.3	241	25.0	300	0.099	0.24	0.25	0.5	1.0
NO.23	2.2	490	27.0	300	0.040	0.13	0.5	—	1.0
NO.24	1.0	153.5	12.5	300	0.079	0.43	—	0.25	0.5

法勾配1:20

(b)

実験番号	周期 T(sec)	波長 L(cm)	波高 H(cm)	作用時間 (波数)	H_0/L_0	h/L	捨石重量(kg)		
							不安定	準安定	安定
NO.4	1.0	153.5	20.0	200	0.018	0.35	—	0.25	0.5
NO.5	1.4	270	24.0	200	0.085	0.22	0.25	0.5	1.0
NO.6	1.6	326	27.0	200	0.072	0.18	0.25	0.5	1.0
NO.8	2.0	436	35.0	200	0.053	0.13	0.5	1.0	1.5
NO.14	1.0	153.5	15.0	300	0.100	0.40	—	—	0.25
NO.15	1.3	241	25.5	300	0.101	0.24	0.25	0.5	1.0
NO.16	1.7	354	27.5	300	0.071	0.18	0.25	0.5	1.0
NO.17	1.8	383	27.5	300	0.059	0.16	0.5	—	1.0
NO.18	2.1	463	32.5	300	0.049	0.13	0.5	1.0	1.5

法勾配1:25

(c)

実験番号	周期 T(sec)	波長 L(cm)	波高 H(cm)	作用時間 (波数)	H_0/L_0	h/L	捨石重量(kg)		
							不安定	準安定	安定
NO.9	1.2	212	15.0	600	0.075	0.3	—	—	0.25
NO.10	1.4	270	25.0	300	0.089	0.22	0.5	0.25	1.0
NO.11	1.7	354	27.5	300	0.071	0.18	0.25	0.5	1.0
NO.12	1.8	383	30.0	300	0.064	0.16	0.25	0.5	1.0
NO.13	2.1	463	32.5	300	0.050	0.13	0.5	1.0	1.5

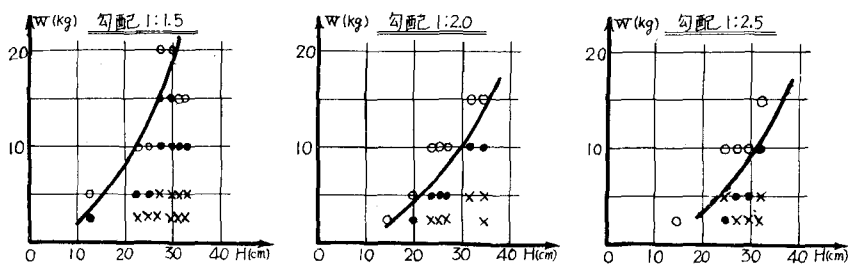


図-12 安定限界曲線

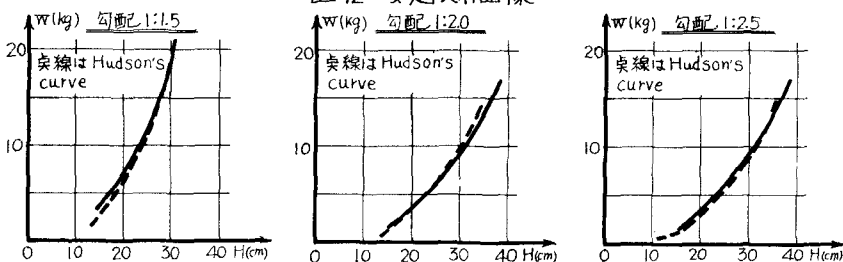


図-13 安定限界曲線とHUDSONの曲線との比較

図-Aは波を作用させる以前の実体写真で、これに波高27.5cm, $\%0.023$ の波を650波作用させた後の実体写真が図-A'である。これらの破壊の程度を準安定として処理した。

又図-Bは前と同様波を作用させる以前の実体写真で、これに波高30cm, $\%0.072$ の波を1060波作用させた後の実体写真が図-B'である。この程度の破壊を堤の不安定として処理した。

これらの写真を実体視することにより、破壊の状況を具体的にみることができる。

表-3

法 勾 配	1:1.5	1:2.0	1:2.5
実験曲線より	0.004	0.006	0.012
HUDSONの与えた、その勾配に於ける係数の平均	0.008	0.017	0.028

図-A

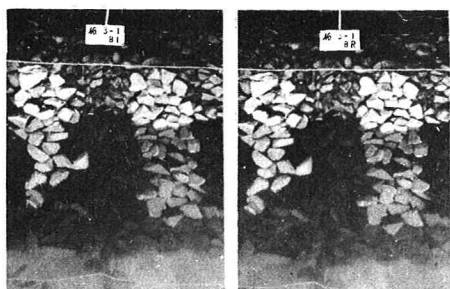
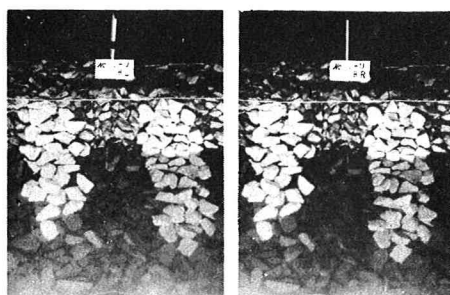


図-A'

図-B

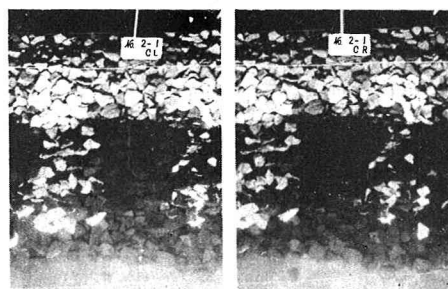
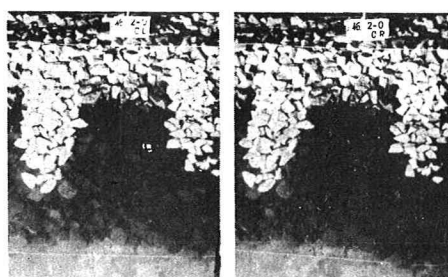


図-B'

Ⅲ 捨石堤端に関する実験

(i) 実験装置

(1) 水路-----Ⅱ-(i)-(A)に同じ。

(2) 波高計-----Ⅱ-(i)-(B)に同じ。

(ii) 模 型

模型堤端部は造波板より、約24mの距離に次頁の図-4のように作り法勾配、天端高、天端巾は次頁の表-4の二種類のものを用いた。表-4の番号2を用いた実験は番号1での実験資料を整理する際の参考として行なったものである。

表-4 模型堤端部の種類

番号	前面法勾配	後面法勾配	側面法勾配	天端高(cm)	天端巾(cm)
1	1:2.0	1:2.0	1:2.0	90	90
2	1:2.0	1:2.0	1:1.5	90	90

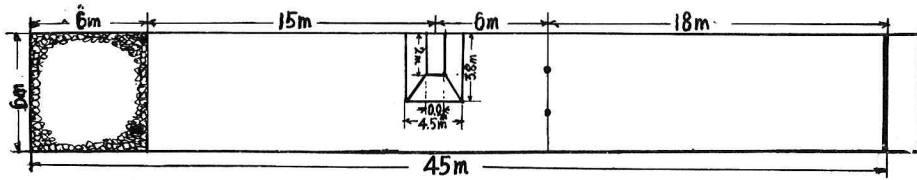


図14 実験水路説明図

模型堤端部を構成する石の重量は250gより35kg程度で、1kg附近の捨石が最も多い。これに図15に示す如く、2~3層の厚さに500gの捨石を帯状にまいた。捨石は無雑作に毎回できるだけ同じ方法で置いた。

(ii) 堤端部破壊現象の特徴

堤端部破壊現象の定性的な概念を得ることを目的として行ったが、期限が限られていたので、実験には勾配1:2の一種類に限定し500gの捨石を用いた。

実験は図15に示される模型堤端部に、表-5の波を作用させ破壊状態を実体写真撮影して破壊の程度及び特徴を調べた。調査の便宜上、堤端の各部を図16の如く区分する。

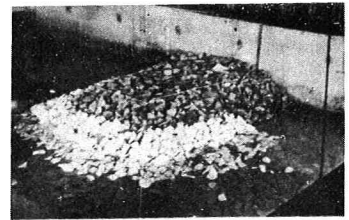


図15(a) 模型堤端部



図15(b) 模型堤端部

実験番号	周期	波長	波高	H_0/λ	h/λ
NO. 1	2.1	463	17	0.025	0.128
NO. 10	1.6	326	17	0.036	0.184
NO. 4	1.8	383	23	0.048	0.157
NO. 12	1.8	383	24	0.050	0.157
NO. 3	1.8	383	24	0.050	0.157
NO. 5	1.7	354	25	0.057	0.169
NO. 4	1.6	326	26	0.070	0.184
NO. 1	1.6	326	26	0.070	0.184
NO. 2	1.6	326	28	0.075	0.184
NO. 5	1.6	326	28	0.075	0.184
NO. 3	1.6	326	29	0.075	0.184
NO. 6	1.6	326	29	0.078	0.184

表-5

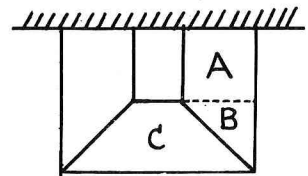


図16

観察によれば

- (1) A部の破壊現象は、無限長防波堤の場合と同じ栈橋である。
- (2) B部は堤体天端が連続的に低くなる部分で、ここでは砕け波となり越波の形でC部

に流下する。B部のみについていえば、A部に於ける越波の場合と相似と考えられる。

(3) C部では、B部の斜面で波は前傾して碎波の形となり、波峯が水塊の形でB部を越えてC部斜面に落下する。この落下点は、波長によつて移動するが、同一形式の波では一定しここに顕著な洗堀が起る。落下した水は、更に斜面に沿う水平に近い流れとなつて斜面を流掃する。したがつてこの部分の主要な破壊は、この洗堀とそれにつづく流れによるものである。図-17に実体写真でこれを示している。

図-17(a)は、波の作用する以前の状態で、これに $H=28\text{cm}$ の波を100波作用させたものが図-17(b)である。

図-17(b)の写真を実体視すれば明らかであるが、写真中央の黒い部分は、洗堀により捨石が移動したもので、移動した石は左下方に集められている。

各種波高に対するC部の洗堀程度を比較したものが表-6であり、表中の一印は洗堀（破壊）なし、○印は洗堀（破壊）の形跡あり、◎印はやや洗堀（破壊）されており、⊙印は相当に洗堀（破壊）されている。又×印は大きく洗堀（破壊）されていることを示している。

破壊程度の項は、全体的なC部の破壊程度を示したものである。これによると洗堀程度と破壊程度とが、ほとんど相伴なっており、多くの場合この形式で破壊が進行するが、まれには洗堀による破壊は著しくなく全面的な流掃による破壊が起ることもある。

図-17(a)

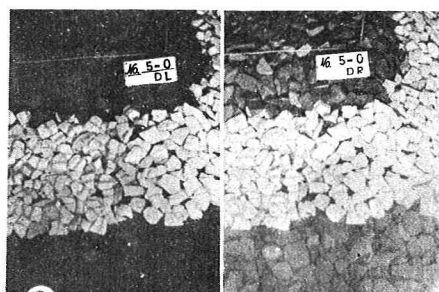
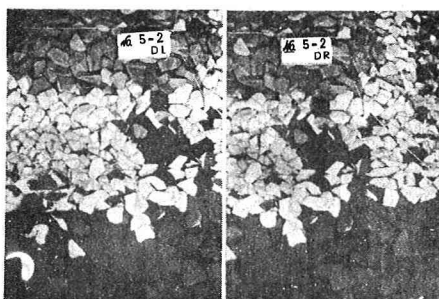


図-17(b)



実験番号	N0.1	N0.10	N0.4	N0.12	N0.3	N0.5	N0.4	N0.1	N0.2	N0.5	N0.3	N0.6
波高 H_0	17	17	23	24	24	25	26	26	28	28	29	29
	0.025	0.036	0.048	0.050	0.050	0.059	0.070	0.070	0.075	0.075	0.075	0.078
洗堀程度	○	○	◎	—	—	◎	×	×	○	×	◎	×
破壊程度	○	○	○	◎	◎	◎	×	×	◎	×	◎	×

表-6 C部の洗堀並びに破壊程度

(iii) 堤端の安定限界

模型堤端部にある波高の波を作用せしめ、その破壊状況を実体写真撮影により判定し、ほとんど破壊のない状態を安定、破壊がわずかにあるものを準安定、破壊のあるものを不安定として、ABC部について分類し次頁の表-7を得た。

表-7に於いて、○印は安定、●印は準安定、×印は不安定を表わす。

実験 番号	周期 T(sec)	波長 L(cm)	波高 H(cm)	作用時間 (波数)	H_0/L_0	h/L	安定限界		
							A部	B部	C部
N0.10	1.6	326	17	1500	0.036	0.184	○	○	○
N0. 1	2.1	463	20	1200	0.060	0.128	●	●	○
N0. 4	1.8	383	23	300	0.048	0.157	●	○	○
N0.12	1.8	383	24	1500	0.050	0.157	●	○	●
N0. 3	1.8	383	24	300	0.050	0.157	●	●	●
N0. 5	1.7	354	25	300	0.057	0.169	●	○	●
N0. 4	1.6	326	26	1500	0.070	0.184	×	×	×
N0. 1	1.6	326	26	1500	0.070	0.184	×	×	×
N0. 2	1.6	326	28	1500	0.075	0.184	×	×	×
N0. 3	1.6	326	28	1500	0.075	0.184	×	×	×
N0. 5	1.6	326	29	1500	0.075	0.184	×	×	×
N0. 6	1.6	326	29	1500	0.078	0.184	×	×	×

表-7

一般に破壊程度は、A部が最大で、次いでC部、B部の順である。表-7から次のことがいえる。

(1) A部の安定と準安定の限界は、ほぼ波高19cmのところである。IRIBARRENの改良公式で $K=0.017$ を用いて捨石重量を求めると、660gとなりこれは実験に使用した捨石の約三割増の値である。又波高19cm、石の重量500gとして改良公式で K の値を求めると約0.013となる。

(2) A部の準安定と不安定との限界波高は25cmで、IRIBARRENの改良公式で $K=0.017$ をとって計算すれば1500gとなり、これは実験に使用した捨石重量の三倍である。

(3) A部では波高が高くなるにつれ、安定、準安定、不安定の順で現われている。

(4) B部の安定と準安定の限界は、ほぼ波高24cmのところである。HEDARの越波の公式より捨石重量を求めると610gとなり、実験に使用した捨石の約二割増しの値である。

(5) B部の準安定と不安定との限界波高は25cmで、HEDARの越波の公式より求めれば、685gとなる。

(6) B部では、波高により安定と準安定とが明瞭に現われない。しかし不安定にする波高は26cmのところに明確に現われている。

(7) C部の準安定と安定との限界波高は23cmで、IRIBARREN改良公式で $K=0.0157$ の場合の K' (0.02)を用いて計算した場合には1370gとなり、又HEDARの越波の公式から計算すれば、540gとなる。これは実験に使用した捨石重量(500g)にほぼ一致する。

(8) 準安定と不安定との限界波高はA部と同じである。

以上よりA部の実験値は、IRIBARRENの改良公式を用いた計算値に、B・C部については、HEDARの越波の公式を用いた計算値にほぼ一致する。但しA部の安定と準安定との限界波高19cmはII(4)の安定限界曲線(図12)に較べて低くでている。これは主として、石の並べ方によつたのではないかと考えられる。

Ⅳ 結 論

観察によつて、捨石堤並びにその堤端各部の崩壊様相を調べた。又破壊程度より安定限界波高を仮定し、この波高と捨石重量との関係を IRIBARREN の改良公式、HEDAR の公式と比較して若干の考察を行つた。その結果を要約すれば、次の如くなる。

- (1) 個々の捨石の移動形式より、揺動、転動、転落に分け捨石堤の崩壊様相を考へれば
 - (i) 揺動限界波高は、法勾配に影響されない。(法勾配 1:15 より 1:25 の間)
 - (ii) 転動、転落限界波高は、法勾配に影響され、勾配が急になると次第に低い値となる。法勾配 1:15 では揺動、転動、転落限界波高は、ほとんど一致している。
 - (iii) 揺動、転動、転落の限界波高に比し、あまり影響しないらしい。
 - (2) 破壊状態を安定、準安定、不安定に分けて考え、安定と準安定との臨界を示す線を安定限界曲線と称すると、この曲線は IRIBARREN の改良公式にその傾向がよく合い、且つ係数 K を求めると 0.004 (勾配 1:15), 0.006 (勾配 1:20), 0.012 (勾配 1:25) となつた。
 - (3) 堤端部を A B C の区域に分けて考えると
 - (i) A 部の破壊現象は、無限長捨石堤の場合と同じ様相で IRIBARREN 改良公式が適用できる。
 - (ii) B 部の破壊現象は、A 部に於ける越波の場合と考へられる。HEDAR の越波の公式で計算した値と実験値は、ほぼ一致する。
 - (iii) C 部の破壊現象は、A B 部とは異なつた破壊様相で洗堀と碎波後の斜面に沿う流掃作用である。前者は後者に比し一般に破壊作用はいちぢるしい。波高に対する捨石重量は、HEDAR の越波の公式より求めた値にほぼ一致する。但し、実験資料が不足であるため全面的に HEDAR の越波の公式を適用できるかどうかは分らない。
- 著者らの実験は、概略的な見解を求めるために行つたものであるが、次の二項について不満足であつた。
- (1) 捨石堤斜面による波の反射率が不明であつたため、捨石堤前面に於ける実際波高をもつて資料を整理した。このため波高については、反射波の影響について考慮をはらう必要がある。
 - (2) 無限長捨石堤に関する実験で、重量区分をした捨石の数が少なかつた。このために両側の重量区分をしない捨石の影響が、いく分入つたと思われる。とくに 250g, 500g の捨石の両側は、これらの石より大きな石が置かれていたので、安定限界波高としては、いく分高くでたと思われる。

この実験には、運輸技術研究所の高橋技官、中村技官の援助を得た。ここに記して、謝意を表わす。

参考文献

1. 港湾技術要報, NO.9 (才18回国際航路会談特集) 1954年 7月
2. P.A.Hedar: Design of Rock-fill Breakwater, Minnesota International Hydraulics Convention, Sept. 1953.
3. 水理公式集: 才四編, 土木学会, 昭和32年 8月