

高波継続来襲による緩傾斜堤の被災に関する不規則波実験

EXPERIMENTAL STUDY ON THE DAMAGE PROCESS OF GENTLE-SLOPE SEA DIKE
ATTACKED BY THE SEVERE IRREGULAR WAVES FOR HOURS TOGETHER

高橋敏彦¹・沼田 淳²・阿部至雄²・相原昭洋³

Toshihiko TAKAHASHI, Atsushi NUMATA, Tetsuo ABE and Akihiro AIHARA

¹正会員 博(工) 東北工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35番1号)

²正会員 工博 東北工業大学教授 工学部土木工学科 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35番1号)

³正会員 東北工業大学助手 工学部土木工学科 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35番1号)

The experiments on the damage of gentle-slope sea dike were conducted by using the irregular waves. The gentle-slope dikes of 1/3, 1/4 and 1/5 slope were constructed at the shoreline and the offshore side. The mutual relationship between the damage of sea dike and the relative maximum scoring (h_{max}/H_0) in front of dike was sufficiently estimated from the result of experiments. In the case of $\ell_s/L_0 = -0.2$, as the value of slope angle increase, the value of h_{max}/H_0 becomes large and damage of dike becomes early. On the other, in the case of $\ell_s/L_0 = 0.0$, as the value of slope angle increase, the value of h_{max}/H_0 becomes small, but the damage of dike did not occurs within the limits of these experiments.

Damage proceeded in the order as follows : (1) vanishing of sands on the slope, (2) damage of foundation works, (3) piping of backfilling stones, (4) subsidence of armor unit. This damage process agreed well with the result of experiments by the regular waves.

Key Words : gentle-slope sea dike, irregular waves, damage, relative maximum scoring

1. まえがき

緩傾斜堤の被災過程や被災原因については、前野ら¹⁾、宇多ら²⁾、著者ら³⁾及び野口ら⁴⁾等の規則波による実験からかなりの知見が得られている。一方、不規則波による海浜変形の実験⁵⁾や数値計算の結果⁶⁾によると、規則波とはかなり異なる結果が報告されている。著者ら⁷⁾は、不規則波と不規則波の有義波に等しい規則波を用いて緩傾斜堤設置による海浜地形や被災について検討を行った。その結果、規則波を作用させた場合被災が徐々に進行するが、不規則波を作用させた場合被災は発生せず、両者には大きな違いが見られた。

そこで本研究では、本実験施設で発生可能な最大有義波を持つ不規則波を継続作用させ、緩傾斜堤の被災過程や堤周辺の砂の移動などを実験的に検討す

ることを目的とした。

2. 実験装置及び実験条件

実験は、長さ20.0m、幅0.6m、深さ0.7mの両面ガラス張り造波水路を2分して片側0.3mとし、両側の水路を使用して行った。水路の一端にはピストン型反射波吸収制御付き造波装置が装備されている。他端には細砂(天然珪砂7号, $d_{50} = 0.15\text{mm}$, 比重=2.60)で1/20勾配の海底地形を作成し、その砂面上に1/3, 1/4, 1/5勾配の3種類の模型堤体を設置した。図-1に、緩傾斜堤の名称及び記号を示す。模型堤体は、「有孔被覆ブロック+透水層」であり、模型縮尺1/40で実験を行った。被覆ブロックの空隙率は15%であり、透水層としての裏込め工は、砂利($d = 2.5 \sim 4.75\text{mm}$)の単層構造で層厚は約20.0mmである。不規則

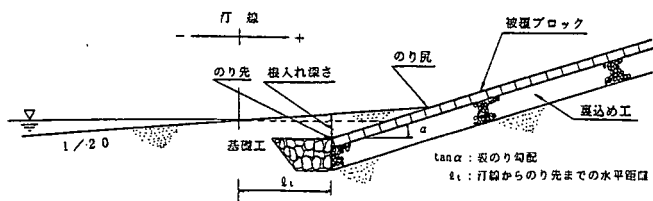


図-1 緩傾斜堤の名称及び記号

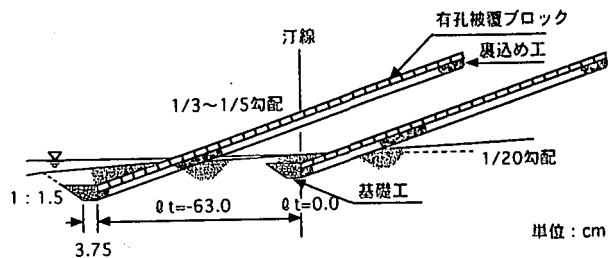


図-2 緩傾斜堤の設置状況

表-1 実験条件

実験 No.	$T_{1/3}$ (sec)	$H_{1/3}$ (cm)	緩傾斜堤	ℓ_t (cm) (ℓ_t / L_o)	波浪条件
A-0	1.34	13.0	無	-	侵食
A-1			1/3	-63.0 (-0.2)	
A-2			1/4		
A-3			1/5		
A-4			1/3	0.0	
A-5			1/4		
A-6			1/5		

波としては、Bretshneider-光易型のスペクトルを有するものとした。

一様部水深は $h = 0.4\text{m}$ とし有義波周期 $T_{1/3}$ (以降 T と記述する) $= 1.34\text{s}$, 有義波波高 $H_{1/3}$ (以降 H と記述する) $= 13.0\text{cm}$, 沖波波形勾配 $(H_{1/3})_0 / (L_o)$ (以降 H_o / L_o と記述する) $= 0.051$ で一定とした。大塚ら⁵⁾は、有義波を用いて堀川・砂村ら⁸⁾の海浜変形パターン分類指標(1)式より、不規則波による海浜地形のパターン分類を行っている。

$$H_o / L_o = C(\tan\beta)^{-0.27}(d/L_o)^{0.67} \quad (1)$$

ここに、 H_o : 沖波波高, L_o : 沖波波長, $\tan\beta$: 初期勾配 d : 底質粒径, C : 定数 である。

それによると、 C 値が $5 < C < 13$ で中間型となり、 5 以下が堆積型、 13 以上が侵食型となっている。前報⁷⁾の波浪条件 ($h = 0.3\text{m}$, $T = 1.34\text{s}$, $H = 11.0\text{cm}$, $H_o / L_o = 0.042$) の場合、 $C \approx 13.6$ で侵食型の下限ぎりぎりの値であったのに対し、今回の波浪条件は $C \approx 16.5$ で完全な侵食型に分類される。表-1に実験条件を示す。入射波、反射波は、合田の入射波分離法⁹⁾で計測した。海底地形は、両水路中央において砂面計により最小1cm~最大30cm間隔で計測すると同時に、緩傾斜堤あるいは汀線付近の状態をスケッチ及び写真に記録した。緩傾斜堤の設置位置は、 ℓ_t (汀線から緩傾斜堤法先までの水平距離で沖側を(-), 陸側を(+)) $/ L_o = -0.2$ (沖側, $\ell_t = -63.0\text{cm}$), 0.0 (汀線地点, $\ell_t = 0.0\text{cm}$) の2種類である。図-2に、緩傾斜堤の設置状況を示す。実験は、連続24.0時間の継続実験である。各実験ケース共、起波後1, 2, 4, 8,

12, 16, 20, 24時間後の海底地形を測定した。ただし、基礎工、被覆ブロックの移動、沈下等の被災時にはその都度記録した。なお、基礎工は捨石基礎工とし、根入れ深さ(初期地形から基礎工上端までの深さ)は、緩傾斜堤の設計の手引¹⁰⁾に概略値として示されている深さの1/40, すなわち、堤法尻が汀線から沖側に位置する場合は5cm, 陸側に位置する場合は2.5cmとした。

3. 実験結果及び考察

(1) 自然海浜の海浜地形

図-3(a), (b)は、自然海浜に $t = 4, 8, 12$ 及び $12, 16, 24$ 時間、波を継続作用させた後の海底地形を比較した

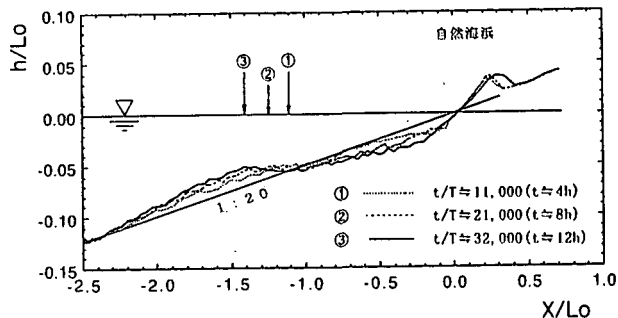


図-3(a) 自然海浜配の海浜地形変動の比較
($t = 4, 8, 12\text{h}$, 矢印は最多碎波地点)

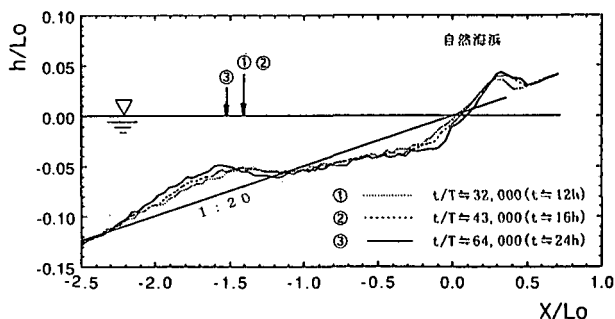


図-3(b) 自然海浜配の海浜地形変動の比較
($t = 12, 16, 24\text{h}$, 矢印は最多碎波地点)

ものである。図中の矢印は、波作用時間に対応する最多砕波点を示している。堀川等¹¹⁾は、初期汀線の前進・後退を基準にして、海浜変形を3つのタイプに分類しているが、自然海浜の実験結果は、「タイプI：汀線が後退し、沖において砂が堆積するタイプ」に分類される。本実験の場合汀線後退はごく僅かであるが、比較的大きい規模のバームが形成されている。また、bar及び最多砕波点も時間の経過とともに、沖側へ移動する傾向が認められる。

(2) 緩傾斜堤の勾配の違いによる海浜地形変化

図-4(a)~(c)は、勾配1/20の自然海浜上に1/3~1/5勾配の緩傾斜堤を設置し、前述の波を作用させた後の海底地形変化を示した一例であり、比較のため自然海浜の地形変化も実線で併記した。(a)は、堤設置位置 $\ell_s/L_o=0.0$ (汀線)における $t/T=64,000$ (約24時間) 後の海底地形変化を比較したものである。

(a)では、1/3, 1/5勾配の堤上にはまだ幾分砂が残っているが、各勾配ともほぼ同位置 ($X/L_o=-1.6$ 付近)に同規模のbarが生じている。初期汀線付近の地形は、堤設置の影響で、自然海浜の場合と幾分異なるが、その沖側はほぼ同様の海浜地形を示している。

(b), (c)は、堤設置位置 $\ell_s/L_o=-0.2$ (沖側)における $t/T=32,000$ (約12時間) 後、及び $t/T=64,000$ (約24時間) 後の海底地形変化をそれぞれ比較したものである。図-4(b)の時点では、のり先付近に勾配の違いによる海浜地形の差が幾分認められること及び1/3勾配のbarが、他勾配より幾分大きい傾向を示している以外は、全体的に各勾配ともほぼ同じ海浜地形を示している。また、堤前面では自然海浜の地形より幾分深く掘れているのが認められる。(c)においては、各勾配とも(b)より更に海浜地形の変動が大きくなっているが、各勾配に対する海浜地形変動の様子やbarの発生位置、大きさ等はほぼ同じである。自然海浜の地形変動は、堤を設置した場合よりのり先付近の深掘れとbarの規模が幾分小さくなっており、全体的に変動が小さくなっている。

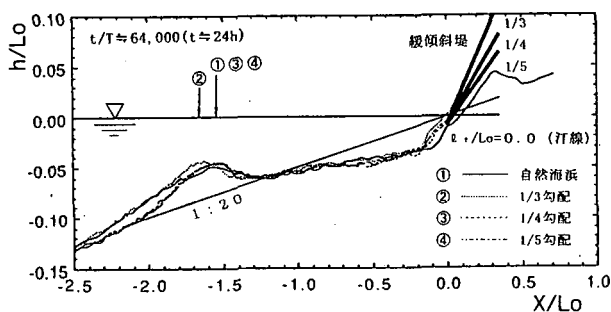


図-4(a) 勾配の違いによる海浜地形変動の比較
(堤設置位置 $\ell_s/L_o=0.0$, $t=24h$)

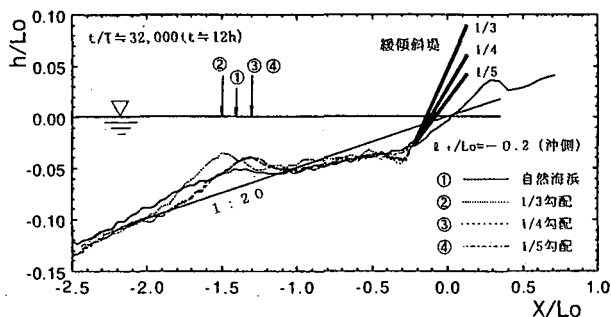


図-4(b) 勾配の違いによる海浜地形変動の比較
(堤設置位置 $\ell_s/L_o=-0.2$, $t=12h$)

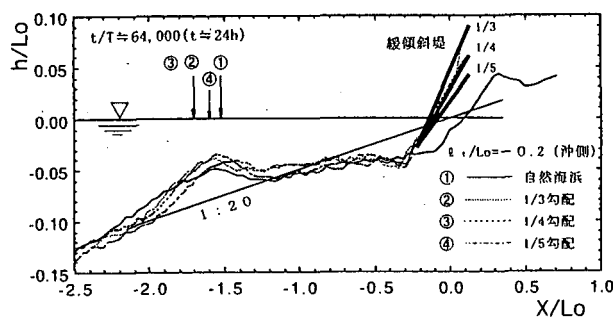


図-4(c) 勾配の違いによる海浜地形変動の比較
(堤設置位置 $\ell_s/L_o=-0.2$, $t=24h$)

緩傾斜堤を設置した場合は、のり先付近で勾配の違いによる海浜変動に幾分違いが認められるものの、それより沖側においては、勾配の違いによる海浜地形の変化にはそれ程の違いは認められない。

(3) 緩傾斜堤設置位置の違いによる海浜地形変化

図-5(a)~(c)は、緩傾斜堤設置位置の違いによる海浜地形の変動を比較したもので、(a)は1/5勾配で $t/T=21,000$ (約8時間) 後、(b)は1/4勾配で $t/T=43,000$ (約16時間) 後、(c)は1/3勾配で $t/T=64,000$ (約24時間) 後の海浜地形である。緩傾斜堤の設置

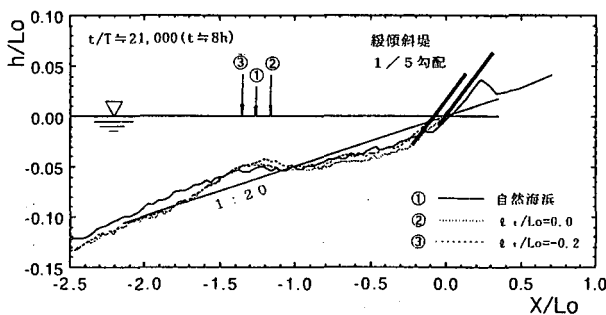


図-5(a) 堤設置位置の違いによる海浜地形変動の比較
(1/5勾配, $t=8h$)

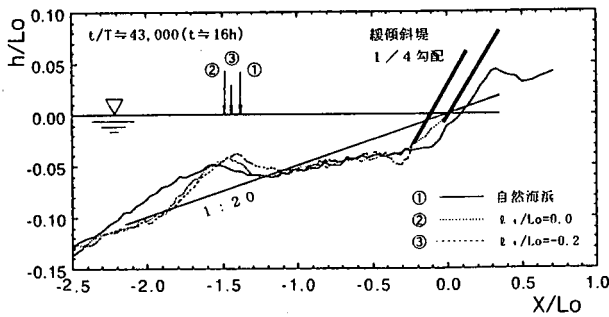


図-5(b) 堤設置位置の違いによる海浜地形変動の比較
(1/4勾配, $t \approx 16h$)

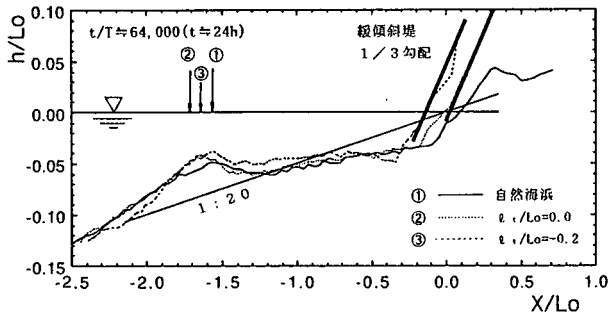


図-5(c) 堤設置位置の違いによる海浜地形変動の比較
(1/3勾配, $t \approx 24h$)

位置は沖側から $l_t/Lo = -0.2, 0$ であり, 比較のため自然海浜の地形変化も実線で併記した。

(a)の波作用8時間後の海底地形をみると, 堤をいずれに設置したケースでも幾分堤前面の洗掘が認められるが, 両ケースとも堤上に砂が残っており, 海底地形変化はそれほど大きくない。堤を設置した場合及び自然海浜とも沖合 ($X/Lo = -1.3$ 程度) にbarが発達しつつある。また, 自然海浜のバームの成長が顕著である。(b)の16時間後の海底地形をみると, (a)よりも海浜地形は大きく変動しているが, 汀線に堤を設置したケースでは堤上に砂が残っている。一方, 沖側に設置したケースでは堤上に砂が全く無く, 堤前面が自然海浜より深く掘れているのが認められる。いずれのケースでもbarの位置は(a)よりも沖側に移動し, 大きく発達している。(c)の24時間後の海底地形は, (b)の場合より幾分変動が大きくなるが, 汀線に設置した堤上にはまだ砂が残っている。一方, 沖側に設置した堤の裏込め工が吸い出され, 被覆ブロックが沈下しているのが認められた。また, いずれのケースでもbarはほぼ同じ位置 ($X/Lo = -1.6$ 程度) で発達している。

緩傾斜堤の勾配に関係なく堤を沖側に設置するほど, 堤前面の深掘れが大きくなる傾向が認められる

が, それ以外の海底地形変化にはそれほどの差が認められなかった。

(4) 緩傾斜堤上の砂の移動及び堤の被災状況

図-6(a), (b), (c)は, 1/3, 1/4, 1/5勾配の緩傾斜堤上の単位幅当たりの砂量の変化を経時的に示したものである。図中の●印は $l_t/Lo = 0$ (汀線), ○印は $l_t/Lo = -0.2$ (沖側) に緩傾斜堤を設置したケースである。図中の実線は, 各設置位置における緩傾斜堤上の初期砂量を, $V=0$ の点線は, 堤上に砂が全く無くなった状態を表す。

図-6より $l_t/Lo = 0$ (汀線) に設置したケースでは, 各勾配とも起波後から $t/T \approx 21,000$ までは緩傾斜堤上に砂が堆積していく傾向が認められるが, それ以降は侵食が進み $t/T \approx 64,000$ でほぼ初期砂量まで戻って

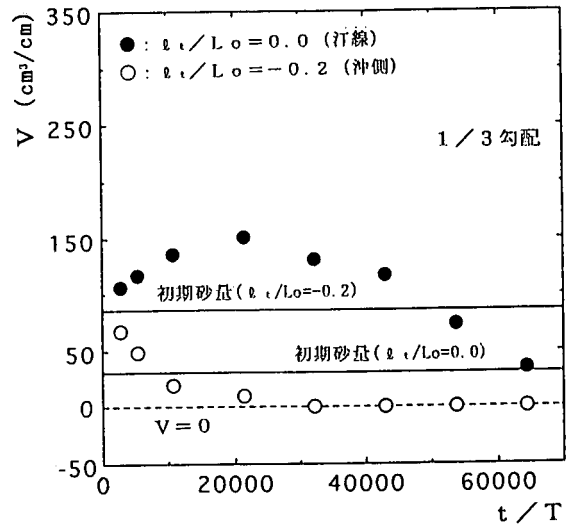


図-6(a) 緩傾斜堤上の砂の変動比較 (1/3勾配)

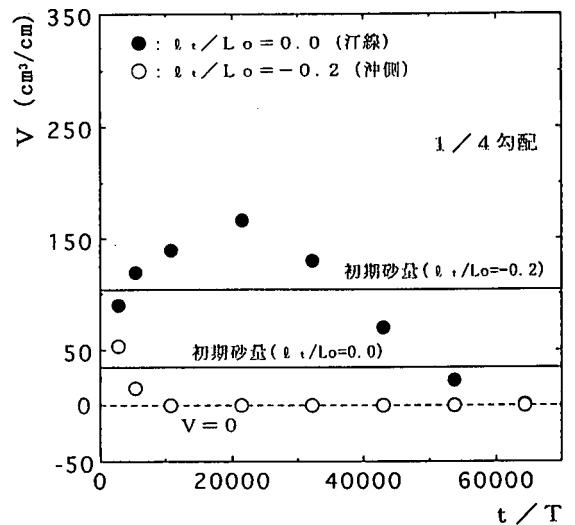


図-6(b) 緩傾斜堤上の砂の変動比較 (1/4勾配)

表-2 緩傾斜堤の被災と波の作用継続時間

t / T	1 / 3		1 / 4		1 / 5	
	ℓ_t / L_o		ℓ_t / L_o		ℓ_t / L_o	
	-0.2	0	-0.2	0	-0.2	0
3,000	無	無	無	無	無	無
5,000	無	無	無	無	無	無
11,000	A	無	無	無	無	無
21,000	A	無	A	無	無	無
32,000	B	無	A	無	A	無
43,000	D	無	B	無	A	無
54,000	C	無	B	無	B	A
64,000	C	無	B	A	B	A

無：被災無し A：基礎工が削られ始め
 B：基礎工約1/2消失
 C：被覆ブロックの沈下、ずれ等
 D：基礎工ほぼ全壊

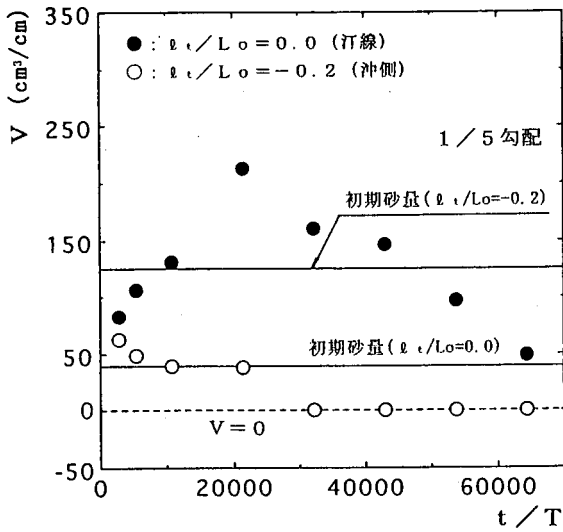


図-6(c) 緩傾斜堤上の砂の変動比較 (1/5勾配)

いく傾向が認められた。これは、起波後堤前面の砂が岸側へ移動して堤上に堆積した後、堤前面の侵食により、波が緩傾斜堤により強く作用するようになり、堤上の砂が徐々に侵食されたためである。一方、 $\ell_t / L_o = -0.2$ (沖側) のケースでは起波直後から堤上の砂の侵食が始まり、いずれの勾配も $t/T \approx 10,000 \sim 30,000$ で緩傾斜堤上に砂が全く無くなる結果となっている。この侵食された砂は、図-4(b), (c) に示されている様に基礎工前面に移動するのではなく、更に沖の方へ移動しbarの発達に寄与しているものと思われる。

表-2は、緩傾斜堤及び基礎工の被災状況を被害無し(無)、基礎工が削られ始めた状態(A)、基礎工約1/2消失した状態(B)、被覆ブロックの沈下、ずれ動く等の状態(C)、基礎工がほぼ全壊した状態(D)に分類し、堤の勾配、設置位置別に緩傾斜堤の被災状況を波の作用時間を追って一覧にしたものである。被災がほとんど発生しなかった前報の不規則波の結果⁷⁾とは、2章で記述したように波浪条件が異なるので一概に比較出来ないが、侵食型の波を継続作用させた今回の実験では、 $\ell_t / L_o = -0.2$ (沖側) の位置に堤を設置した場合、堤の勾配が急なほど被災しやすい傾向が認められた。一方、堤を汀線に設置した時は、上記とは逆の傾向が認められるが、致命的な被災には至っていない。前者は、堤勾配が急なほど反射波が大きくなるためと考えられるが、後者については、砕波後の波によって岸方向に移動した砂の堤上への堆積状況の違いに起因すると考えられるが、さらなる検討が必要である。

$\ell_t / L_o = -0.2$ (沖側) に緩傾斜堤を設置した場合の被災過程は、始めに緩傾斜堤上の砂が無くなるか、基礎工崩れ始め(A)のいずれかが早く起こり両方起こった後、基礎工1/2が消失(B)する。その後、1/3勾

配のみであるが基礎工がほぼ全壊(D)し、被覆ブロックに被災(C)が生じるパターンである。この被災パターンは、規則波実験¹²⁾とほぼ同じである。

(5) 堤前面の最大洗掘深

本節では、堤前面の最大洗掘深 h_{max} を初期地形からの変動値として定義し検討した。ただし、堆積は負、侵食は正とした。

図-7は、堤設置位置及び勾配別に最大洗掘深の経時変化を示したものである。 $\ell_t / L_o = 0$ (汀線) では、起波後から $t/T \approx 30,000$ までは勾配によって侵食・堆積の傾向が逆になる場合があるが、その後は、徐々に洗掘が進み、 $t/T \approx 64,000$ では各勾配とも相対最大洗掘深 $h_{max}/H_o \approx 0.2$ 程度の値となっている。一方、 $\ell_t / L_o = -0.2$ (沖側) の場合は、勾配が急なほど侵食量が大きくなっているが、1/3, 1/4勾配では $t/T \approx 50,000$

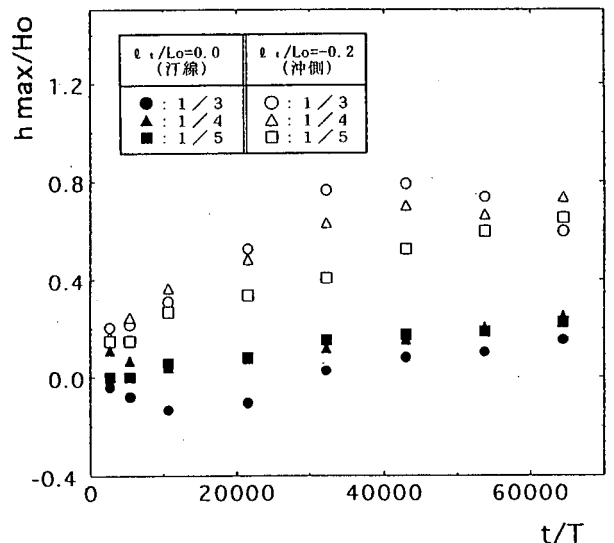


図-7 h_{max}/H_o と t/T の関係

00で侵食から堆積に転じており、 $t/T=64,000$ では各勾配とも $h_{max}/H_0=0.7$ 程度の値となっている。波の継続時間に関係なく $\ell_t/L_0=0$ (汀線)では、堤の勾配が急になるほど最大洗掘深が小さくなり $\ell_t/L_0=-0.2$ (沖側)では、この傾向が逆転するという結果は前節の被災状況と同じであり、堤前面の最大洗掘深と堤の被災とは密接に関連するものと考えられる。

4. あとがき

緩傾斜堤を設置した海岸に、不規則波の高波が継続して来襲した場合の海浜地形の変化と緩傾斜堤の被災過程等を把握するための実験を行った。ごく限られた条件のもとでの実験であるが、本実験の結果を要約すると以下のようになる。

(1) 緩傾斜堤の被災は、 $\ell_t/L_0=-0.2$ (沖側)で発生したが、勾配が急なほど被災が早く起こった。一方、 $\ell_t/L_0=0$ (汀線)に設置した場合は、ほとんど被災は発生しなかった。

(2) 緩傾斜堤の被災は、勾配に関係なくほぼ次の順序で起きる。①堤上の砂が全く無くなり、基礎工が崩れ始める(A)。②基礎工の約1/2が消失(B)。③基礎工がほぼ全壊する(D)。④裏込め工の砂利が、のり先より吸い出されて被覆ブロックが沈下、移動(C)。となっており、規則波実験とほぼ同順序で起きる。

(3) 堤前面の相対最大洗掘深 h_{max}/H_0 と堤の被災とは密接に関連し、 $\ell_t/L_0=-0.2$ (沖側)では堤の勾配が大きくなるほど h_{max}/H_0 が大きくなり、被災も早く発生する。一方、 $\ell_t/L_0=0$ (汀線)の場合は、上記の逆となる。また、 $t/T=64,000$ になると h_{max}/H_0 の値は堤勾配に関係なく、前者では0.7、後者では0.2に漸近する傾向を示す。

(4) 緩傾斜堤上の砂量は、 $\ell_t/L_0=0$ (汀線)に堤を設置した場合は、起波後堤前面で侵食された砂が一旦堤上に移動し堆積するが、その後その砂は徐々に侵食されほぼ初期状態に戻るか堤上に砂が無くなるかのいずれかである。 $\ell_t/L_0=-0.2$ (沖側)に設置した場合は、徐々に侵食され $t/T=10,000\sim 30,000$ 程度で堤上の砂は無くなり堤はむき出しとなる。

謝辞:本実験およびデータ整理には、当時東北工業大

学学部学生森 祐矢君、山中知明君、初瀬 豊君に協力していただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 前野賀彦・山本方人・遠藤泰司: 緩傾斜護岸裏込め砂の吸い出し機構, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 499-503, 1990.
- 2) 宇多高明・小菅 晋・柳澤 修: 緩傾斜堤の安定性に関する全国実態調査, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 651-655, 1991.
- 3) 高橋敏彦・沼田 淳・高橋庄史: 高波来襲時の緩傾斜堤の被災に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 841-845, 1996.
- 4) 野口賢二・田中茂信・鳥居兼一・佐藤慎司: 大型模型実験による緩傾斜ブロック堤の被災機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 756-760, 2000.
- 5) 例えば大塚行則・三村信男・渡辺 晃: 不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 321-325, 1984.
- 6) 例えば窪 泰浩・小竹康夫・横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃: 非定常緩勾配不規則波動方程式を用いた波浪場・海浜流場・海浜地形変化の予測モデル, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 201-205, 1992.
- 7) 高橋敏彦・沼田 淳: 規則波と不規則波による緩傾斜堤前面の海浜地形変化の比較, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 451-456, 2001.
- 8) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋: 波による二次元汀線変化に関する一考察, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 329-334, 1975.
- 9) 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, 運輸省港湾技術研究所港湾技研資料, No. 248, pp. 24., 1976.
- 10) 建設省河川局海岸課監修: 緩傾斜堤の設計の手引き, 全国海岸協会, 48p., 1989.
- 11) 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三: 波による海浜変形に関する一考察, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 357-363, 1973.
- 12) 高橋敏彦・沼田 淳: 高波継続来襲による緩傾斜堤の被災に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第16巻, pp. 209-214, 2000.