

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

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

高橋敏彦¹・沼田 淳²

Toshihiko TAKAHASHI and Atsushi NUMATA

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)

An experiment is conducted to clarify the mechanism of damage of gentle-slope sea dike constructed near the shoreline. Damage proceeds in the order, vanishing of sands on the slope, damage of foundation works, piping of backfilling stones, subsidence of armor units. The gentle-slope sea dike was the most easy to receive damage when it was founded in shoreline. It was considered to be one reason to cut the embedded depth of foundation works in shoreline by half of offshore side. The scouring depth in front of foundation works was the largest when the sea dike was founded in offshore side. Though the precise solution to the effect of slope on scouring depth could not be obtained, the maximum value of it predominated in case of 1/3 slope.

Key Words : Gentle-slope sea dike, armor units, beach profile change, damage, toe-scouring depth

1. まえがき

現在施工されている緩傾斜堤の勾配は、 $1/3 \sim 1/5$ がほとんどであり、その被災の多くは太平洋や日本海に直面する海岸であることが報告¹⁾されている。これは、低気圧、台風等による高波の来襲を直接受けるためと考えられる。しかし、緩傾斜堤へ高波が継続来襲した場合の被災に関する研究は、著者らの前報²⁾を除いてほとんど見あたらない。前報では、緩傾斜堤の法尻と汀線との距離 ℓ_1 (図-1 参照) 及び根入れ深さ d_r を固定して、のり勾配 $\tan \alpha$ を $1/3 \sim 1/6$ と変化させて、高波継続時の緩傾斜堤の被災過程を検討した。しかし、 ℓ_1 を固定した実験条件では、のり勾配が緩いほど基礎工の設置位置が沖側に移動するため、勾配の違いによる緩傾斜堤の被災過程等の違いを明らかにすることができなかった。

本研究では、基礎工と汀線との距離 ℓ_1 を固定して前報同様の実験を行い、緩傾斜堤の勾配と設置位置の違いが、海底地形変化と緩傾斜堤の被災過程にどのような変化をもたらすかを検討することを目的とした。

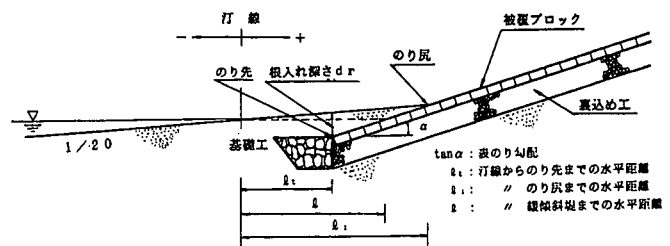


図-1 緩傾斜堤の名称及び記号

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-2に、実験水路概略図を示す。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

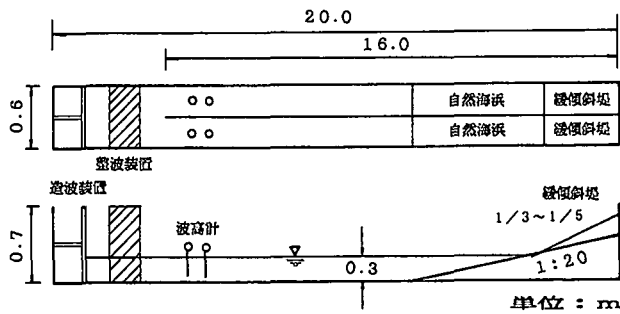


図-2 実験水路概略図

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。

一様部水深は0.3mとし波浪諸元は、周期 $T=1.42\text{sec}$ 、波高 $H=12\text{cm}$ に固定した。沖波波形勾配は $H_o/L_o=0.041$ である。この波は、堀川・砂村等³⁾による汀線の前進(堆積)・後退(侵食)の境界式、

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

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

によって区別すると汀線の後退領域に対応する。また、Iwagaki, Y and H. Noda⁴⁾に従い暴風海浜と正常海浜とに区別すると、今回の条件は暴風海浜となる。表-1に実験条件を示す。ただし、実験No. A-0 (自然

表-1 実験条件

実験 No.	T (sec)	H (cm)	緩傾斜堤	ℓ_t (cm) (ℓ_t/L_o)	ℓ/L_o	波浪条件
A-0			無	-	-	
A-1			1/3			
A-2			1/4	63.0	0.192	
A-3			1/5	(0.2)	0.192	
A-4	1.42	12.0	1/3		0.024	侵食
A-5			1/4	0.0	0.032	
A-6			1/5		0.040	
A-7			1/3		-0.123	
A-8			1/4	-63.0	-0.097	
A-9			1/5	(-0.2)	-0.071	

海浜)は前報²⁾の結果を用いている。表中の波浪条件は、堀川・砂村等の境界式で判別した条件を示している。緩傾斜堤の名称及び記号を図-1に示す。入射波、反射波は、合田の入射波分離法⁵⁾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、 $\ell_t/L_o=-0.2$

(沖側、 $\ell_t=-63.0\text{cm}$)、0 (汀線地点、 $\ell_t=0.0\text{cm}$)、0.2 (陸側、 $\ell_t=63.0\text{cm}$) の3種類である。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、基礎工は前報の蛇籠とは異なり捨石基礎工とし、根入れ深さ d_r (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⁶⁾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

自然海浜の海底地形変化は、前報に掲載してあるので要約して述べる。堀川等⁷⁾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。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、時間の経過とともに汀線が後退してその砂が沖側へ移動し、徐々にbarが発達していく傾向が認められている。

(1) 緩傾斜堤の勾配の違いによる海浜地形変化

図-3(a)~(d)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る。(a),(b)は、3種類の勾配の緩傾斜堤を汀線より陸側($\ell_t/L_o=0.2$)に設置した場合の海底地形を比較したもので(a)は波の作用時間 $t/T \div 10,000$ (約4時間)後、(b)は $t/T \div 61,000$ (約24時間)後の状況である。(a)の時点では、波が緩傾斜堤まで到達していないため、初期汀線近傍で侵食された砂が堤前面に移動し、堆積している様子が伺える。(b)の時点では、汀線後退が徐々に進行したため、堤前面の海底地形変化はかなり大きくなるが、1/5勾配の堤上にはなお砂が堆積している状態が認められる。

(c),(d)は、緩傾斜堤を汀線($\ell_t/L_o=0$)に設置した場合の海底地形変化を比較したもので、(c)は $t/T \div$

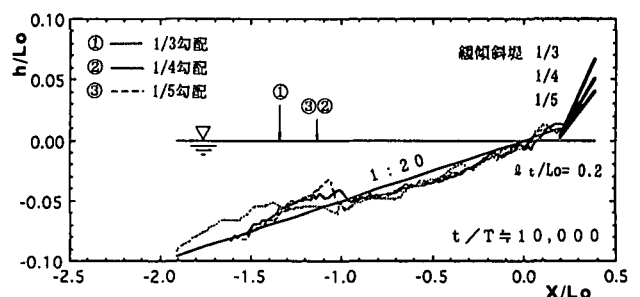


図-3(a) 勾配の違いによる海浜地形変動の比較
矢印は碎波地点

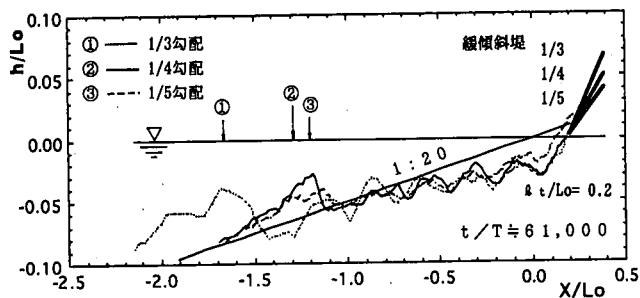


図-3(b) 勾配の違いによる海浜地形変動の比較
矢印は砕波地点

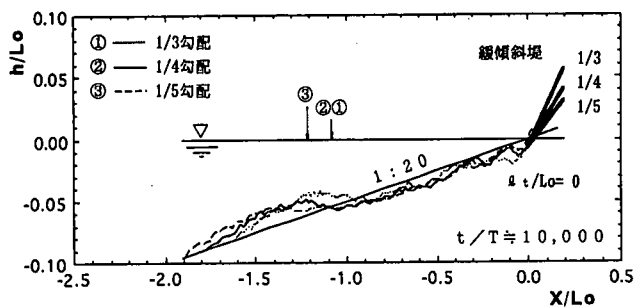


図-3(c) 勾配の違いによる海浜地形変動の比較
矢印は砕波地点

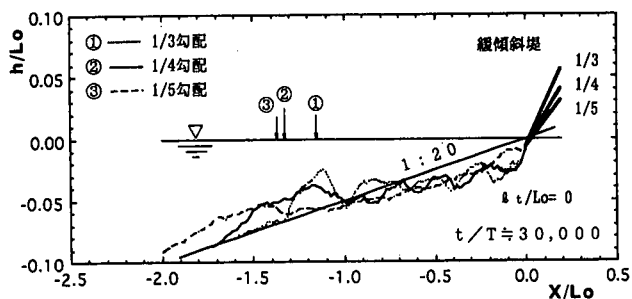


図-3(d) 勾配の違いによる海浜地形変動の比較
矢印は砕波地点

10,000(約4時間)後、(d)は $t/T \div 30,000$ (約12時間)後の状況である。(c)の時点では堤前面の砂が幾分掘られているが、1/3勾配の場合のみ堤上の砂が完全に消失してしまっている。(d)の時点では、堤前面の洗掘がさらに進行しているが、堤の勾配が急なほどその洗掘深が大きくそれに伴って沖合のbarの発達も大きくなっている。barの発生位置はいずれの場合も $X/Lo \div -1.0 \sim -1.5$ 付近であるが(b)の1/3勾配のケースのみ $X/Lo \div -1.5$ より沖側に発生している。なお、 $t/T \div 61,000$ (約24時間)後に堤上に砂が残っていたのは(b)に示した1/5勾配のケースのみである。

以上の実験結果から緩傾斜堤の勾配が急なほど堤上の砂の消失が早く、堤前面の深掘れや海底地形の変化も大きくなる傾向が確認された。

(2) 緩傾斜堤設置位置の違いによる海浜地形変化

図-4(a)~(d)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),(b)は1/3勾配で $t/T \div 10,000$ (約4時間)後及び $t/T \div 61,000$ (約24時間)後、(c)は1/4勾配で $t/T \div 20,000$ (約8時間)後、(d)は1/5勾配で $t/T \div 61,000$ (約24時間)後の海浜地形である。

緩傾斜堤の設置位置は沖側から $l_t/Lo = -0.2, 0, 0.2$ 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4時間後の海底地形をみると、汀線及び沖側に設置したケースでは堤前面の洗掘が徐々に進行している傾向が認められるが、陸側に設置したケースでは堤上にまだ砂が残っており、堤前面の地形変化もそれほど大きくない。しかし、(b)の24時間後の海底地形をみると、堤設置位置に関係なくsand waveが顕著になり海浜地形も大きく変動している。また堤前面の深掘れは、堤を沖側に設置するほど大きくなる傾向が認められる。(c)の8時間後の海底地形をみると(a)より地形変動は大きくなっているものの、堤を陸側に設置したケースでは(a)の場合と同様堤上にまだ砂が残っている。(d)の24時間後の海底地形は、(b)の場合と同様sand waveが顕著になり海底地形も大きく変動している。堤前面の深掘れは、堤を沖側に設置するほど大きくなるが1/5勾配の緩傾斜堤を陸側に設置したケースだけは、この時点

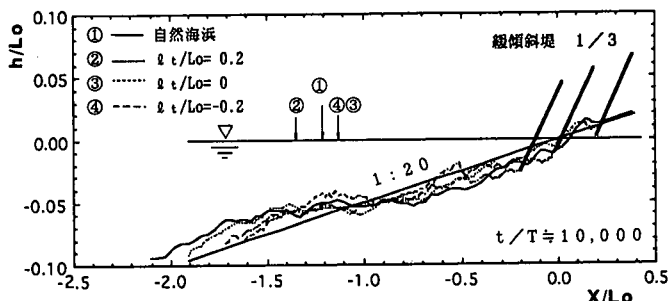


図-4(a) 堤設置位置の違いによる海浜地形変動の比較
矢印は砕波地点

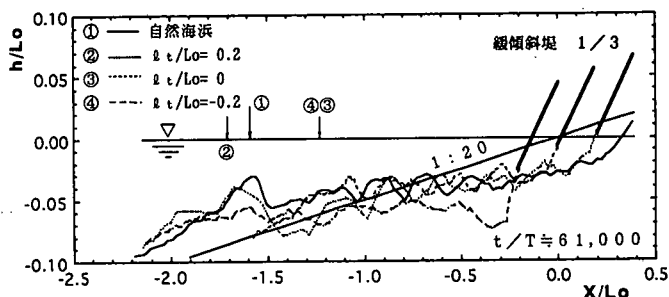


図-4(b) 堤設置位置の違いによる海浜地形変動の比較
矢印は砕波地点

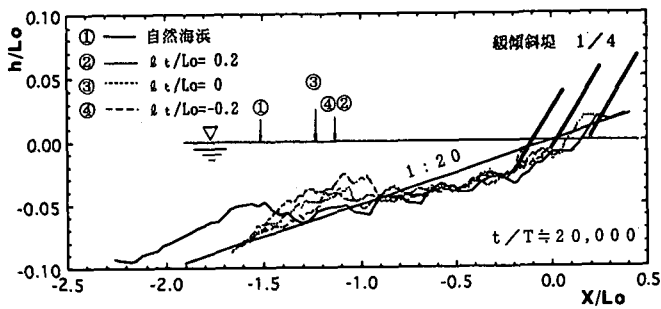


図-4(c) 堤設置位置の違いによる海浜地形変動の比較
矢印は砕波地点

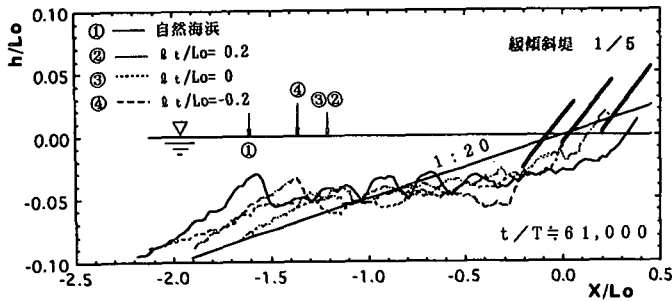


図-4(d) 堤設置位置の違いによる海浜地形変動の比較
矢印は砕波地点

でも堤上に砂が残っており堤前面の地形変化も自然海浜の場合より小さくなっている。この1/5勾配のケースを除けば、汀線及び陸側に設置した他の5ケースにおける堤前面の深掘れは自然海浜の地形変化と同程度であり、沖側に設置した3ケースにおける深掘れは自然海浜の地形変化より大きくなっている。

以上の実験結果から、緩傾斜堤の勾配に関係なく堤を沖側に設置するほど、海浜地形の変動及び堤前面の深掘れが大きくなる傾向が確認された。

(3) 緩傾斜堤上の砂の移動及び堤の被災状況

表-2は、緩傾斜堤上の砂の移動を前計測時と比較して堆積しているか、侵食しているか、不変であるかを表示したものである。緩傾斜堤上の砂の形状を前計測時と比較し、最大鉛直変位が5mm以内なら不変、±5mm以上変化している場合には、そのいずれか大きい方で代表し、+値なら堆積、-値なら侵食と分類した。無は、基礎工を含む堤上に砂が全く無くなった場合である。

表-3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、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。

表-2 緩傾斜堤上の砂の移動

t/T	1/3			1/4			1/5		
	-0.2	0	0.2	-0.2	0	0.2	-0.2	0	0.2
3000	侵食	侵食	侵食	不変	侵食	不変	不変	不変	侵食
5000	不変	侵食	不変	侵食	侵食	堆積	侵食	堆積	侵食
10000	侵食	無	堆積	侵食	不変	堆積	不変	堆積	侵食
20000	無	無	侵食	侵食	無	堆積	不変	堆積	堆積
30000	無	無	侵食	不変	無	不変	無	侵食	堆積
41000	無	無	無	侵食	無	堆積	無	不変	侵食
51000	無	無	無	無	無	無	無	無	侵食
61000	無	無	無	無	無	無	無	無	侵食

表-3 緩傾斜堤の被災と波の作用継続時間

t/T	1/3			1/4			1/5		
	-0.2	0	0.2	-0.2	0	0.2	-0.2	0	0.2
5000	無	A	無	無	無	無	無	無	無
10000	無	A	無	無	A	無	無	無	無
20000	無	B	無	無	A	無	A	A	無
23000	A	B	無	A	A	無	A	A	無
41000	B	C, D	A	A	B	無	A	A	無
46000	B	D	B	A	C	A	A	A	無
51000	C	D	C	A	D	A	B	B	無
61000	D	D	D	B	D	A	B	D	A

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

図-5には、表-2,3及び緩傾斜堤の被災記録をもとに、緩傾斜堤の被災過程と実験条件との関係を図示している。緩傾斜堤の被災過程は、ほとんどのケースで高波浪が継続来襲すると、始めに基礎工上の砂が侵食され、基礎工が削られ始める(○印)、その直後あるいは数時間の高波が継続すると堤上に全く砂が無くなり(●印)、さらに高波が数時間継続すると基礎工の約1/2(■印)が消失し、さらに数時間高波が来襲すると裏込め工の砂利が吸い出されて被覆ブロックが沈下、移動等の被災(▲印)が起こりその後基礎工がほぼ全壊(□印)して崩壊するというパターンである。

この図から認められる特徴的な現象は、
①被覆ブロックが被災し基礎工がほぼ全壊したのは、 $l_t/Lo = -0.2$ の1/3勾配、 $l_t/Lo = 0$ の全てのケース、 $l_t/Lo = 0.2$ の1/3勾配の5ケースである。被災時間等も考慮すると勾配が急なほど被災しやすい傾向を示している。

②緩傾斜堤を汀線に設置した場合、その沖側及び陸側に設置した場合に比べ、全ての勾配で被災までの時間が早く被覆ブロックが被災し基礎工がほぼ全壊した。これは汀線における基礎工の根入れ深さを、沖側の1/2と急減したことによると考えられる。

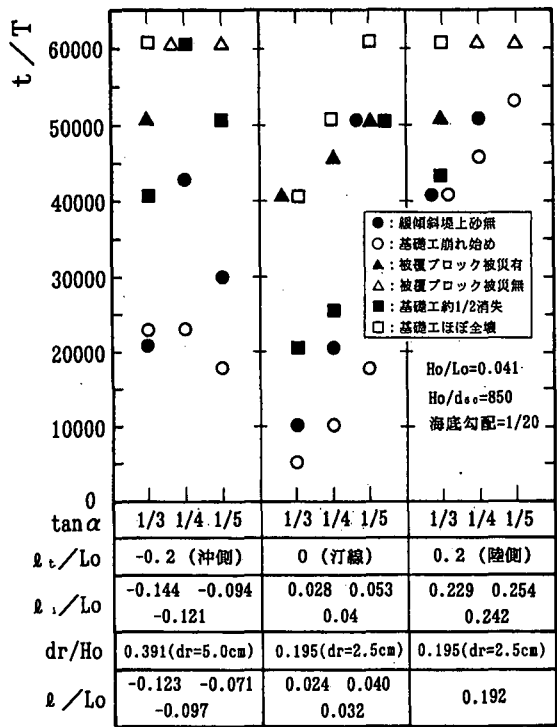


図-5 緩傾斜堤の被災と実験条件との関係

以上のことから侵食型の高波浪が長時間作用するような海岸に緩傾斜堤を設置する場合は、出来るだけ勾配を緩くし、根入れ深さについてもより慎重な配慮が必要と考えられる。

(4) 基礎工前面の最大洗掘深

前述したように本実験の範囲 ($-0.2 \leq \ell_t / L_o \leq 0.2$) では、緩傾斜堤被覆ブロックの被災は、基礎工上及びその前面の砂が侵食されると基礎工が徐々に崩壊し、裏込工が吸い出されて被覆ブロックの沈下移動等の被災が起こり、基礎工の全壊深掘れへと進行すると考えられるので、本節では、法面勾配や高波の作用時間が基礎工前面の最大洗掘深に及ぼす影響について検討してみる。

図-6は、基礎工前面の洗掘状況を模式的に示したもので、各測定時における初期地形からの洗掘深さの最大値を基礎工前面の最大洗掘深 h_{max} と定義した。一般に、護岸前面の洗掘は、重複波の作用、砕波によって生ずる水塊の作用、戻り流れの作用等に起因すると考えられる。今回の実験では、かなり沖合い ($X/L_o \approx -1.1 \sim -1.7$) で砕波しており、砕波の影響は比較的小さいと思われる。次に反射率につ

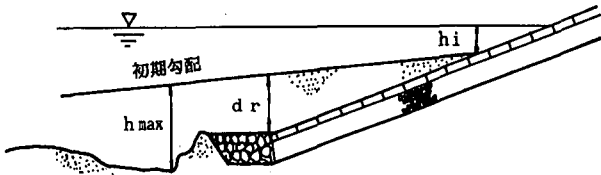


図-6 基礎工前面の最大洗掘深さの説明図

いてみると、実験初期の段階では堤設置位置が沖側の場合 $K_r = 7 \sim 14\%$ 、汀線の場合 $K_r = 4 \sim 9\%$ 、陸側の場合 $K_r = 3 \sim 5\%$ と比較的小さい。実験終了時にはそれぞれ $K_r = 14 \sim 19\%$ 、 $11 \sim 15\%$ 、 $11 \sim 24\%$ であり、いずれの設置位置でも1/3勾配のときの反射率が最も大きくなっている。一方、堤前面の深掘れや海底地形変動が最も大きくなるのが、堤設置位置に関係なく1/3勾配の場合であることと併せ考えると、本実験における基礎工前面の洗掘は、重複波及び戻り流れの作用に起因するのではないかと推察される。

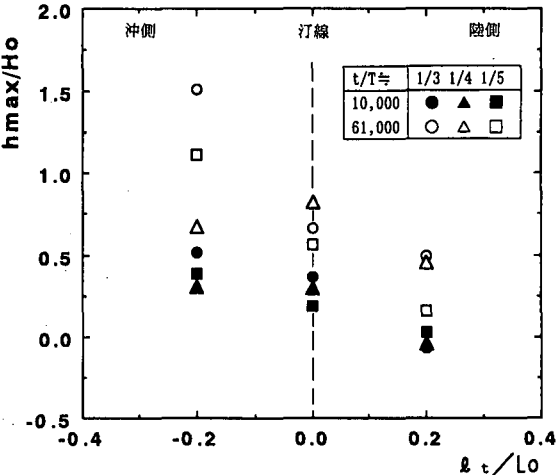


図-7(a) ℓ_t / L_o と h_{max} / H_o の関係
($t/T \approx 10,000, 61,000$)

図-7(a)は、緩傾斜堤の勾配及び設置位置によって最大洗掘深にどの程度の違いが生ずるかを調べた一例である。同図には、 $t/T \approx 10,000$ (約4時間) 後と $t/T \approx 61,000$ (約24時間) 後の値のみをプロットしたが、 h_{max} / H_o の経時変化をみると $t/T \approx 20,000$ (約8時間) 後までは勾配による差は極めて小さい。 $t/T \approx 41,000$ (約16時間) 後以降になると勾配による差が大きくなるが、特に沖側に設置した場合顕著に表れる。ただし、勾配が急なほど h_{max} / H_o の値が大きくなるという傾向は明瞭ではないが、1/3勾配のときその値が最も大きくなるケースが一番多い。一方、設置位置による h_{max} / H_o の値の違いは明瞭で、緩傾斜堤を沖側に設置するほどその値が大きくなる傾向が認

められた。

図-7(b)は、1/3勾配の緩傾斜堤に対する最大洗掘深の経時変化を例として示したものである。 $\ell_t/L_0=0.2$ において、初期段階の h_{max}/H_0 の値がマイナス値になっているのは前述したように、波が緩傾斜堤まで到達しておらず堤前面に砂が堆積しているためである。図中の直線及び曲線は、パラメーター t/T ごとの回帰直線及び曲線であるが、今回の実験データのみでは h_{max}/H_0 の値を、 ℓ_t/L_0 及び t/T の関数として表示することは困難であるように思われる。

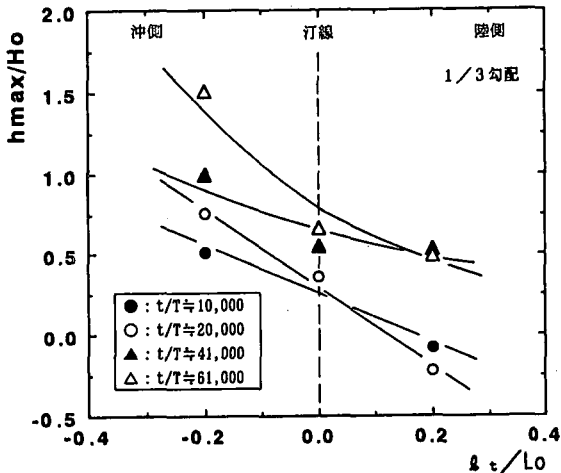


図-7(b) ℓ_t/L_0 と h_{max}/H_0 の関係 (1/3勾配)

図-7(a),(b)より、緩傾斜堤を沖側へ設置するほど、また波の作用時間が長いほど徐々に最大洗掘深が大きくなる傾向が認められる。

4. あとがき

緩傾斜堤を設置した海岸に、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り、時間スケールの問題など、さらに検討すべき課題もあるが、本実験の結果を要約すると以下ようになる。

(1) 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基礎工上の砂が侵食され、基礎工が崩れ始める(○印)。②引き続く高波で堤上の砂が全く無くなる(●印)。③基礎工の約1/2が消失(■印)。④裏込め工の砂利が吸い出されて被覆ブロックが沈下、移動等の被災(▲印)。⑤基礎工が

ほぼ全壊する(□印)。(図-5参照)

(2) 被覆ブロックが被災し基礎工がほぼ全壊したのは、 $\ell_t/L_0=-0.2$ の1/3勾配、 $\ell_t/L_0=0$ の全てのケース、 $\ell_t/L_0=0.2$ の1/3勾配の5ケースである。被災時間等も考慮すると勾配が急なほど被災しやすい傾向を示している。

(3) 緩傾斜堤ののり先が汀線位置にある場合、他の2ケースに比べ被災までの時間が早く、すべての勾配で被覆ブロックが被災し、基礎工がほぼ全壊した。従って、汀線付近に設置する場合、基礎工の根入れ深さについては、慎重な検討が必要である。

(4) 最大洗掘深(h_{max})は、幾分バラツキはあるものの堤を沖側に設置するほど、また波の作用時間が長いほど大きくなる傾向が認められた。

(5) 勾配が急なほど h_{max}/H_0 の値が大きくなるという傾向は明瞭ではないが、1/3勾配のときその値が最も大きくなるケースが一番多い。

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高橋庄史君、稲崎 淳君、杉沢満仁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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Iwagaki, Y. and H. Noda: Laboratory study of scale effects in two-dimensional beach processes, *Proc. 8th Conf. on Coastal Eng.*, pp. 194-210, 1962.
- 5) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 運輸省港湾技術研究所港湾技研資料, No. 248, pp. 24., 1976.
- 6) 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.
- 7) 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.