

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

COMPARISON OF THE BEACH PROFILE CHANGES IN FRONT OF GENTLE-SLOPE
SEA DIKE FOR REGULAR AND IRREGULAR WAVES

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)

Beach profile changes in front of the gentle-slope sea dike and the damage of dike with them were studied experimentally by using the regular and irregular waves. Beach profile changes caused by irregular waves becomes smaller than that by regular waves. It will be considered that the beach profile changes are smoothed in general, because the wave breaking point for irregular waves is different every one wave. In the case of regular waves, although the damage of dike progresses gradually as a time of wave action becomes longer, the damage becomes early with increasing dike slope. On the other, in the case of irregular waves, the damage of dike did not occur within the limits of this experiment.

Key Words : Gentle-slope sea dike, regular waves, irregular waves, beach profile change, damage

1. まえがき

著者らは、緩傾斜堤の設置位置及び勾配が海浜地形の変化や堤前面の最大洗掘深に及ぼす影響について、実験的に検討し報告¹⁾してきた。また、緩傾斜堤の被災過程や被災原因についても、前野ら²⁾、宇多ら³⁾、著者ら⁴⁾及び野口ら⁵⁾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。しかし、不規則波による海浜変形の実験⁶⁾や数値計算の結果⁷⁾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。

そこで本研究は、緩傾斜堤前面の海浜地形の変化や緩傾斜堤の被災状況について規則波及び不規則波を用いて実験的に検討し、波の不規則性の影響を明らかに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

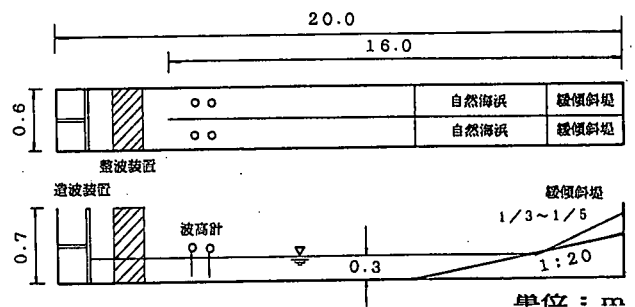


図-1 実験水路概略図

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、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。

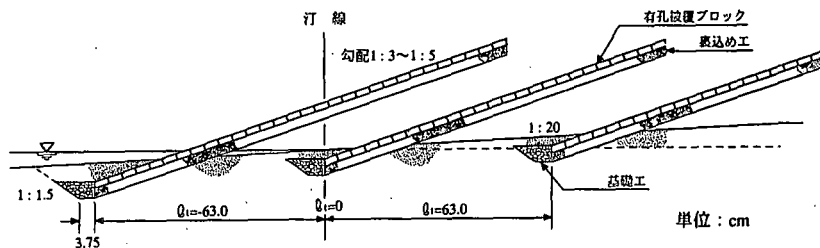


図-2 緩傾斜堤の設置状況図

表-1 実験条件

実験 No.	$T, T_{1/3}$ (sec)	$H, H_{1/3}$ (cm)	緩傾斜堤	ℓ_t (cm) (ℓ_t/L_o)	波浪条件
A-0			無	-	
A-1			1/3	63.0	
A-2			1/4	(0.2)	
A-3			1/5		
A-4	1.34	11.0	1/3	0.0	侵食
A-5			1/4		
A-6			1/5		
A-7			1/3	-63.0	
A-8			1/4	(-0.2)	
A-9			1/5		

一様部水深は $h=0.3\text{m}$ とし有義波周期 $T_{1/3}=1.34\text{s}$, 有義波波高 $H_{1/3}=11.0\text{cm}$, 沖波波形勾配 ($H_{1/3}/L_{1/3}$) ≈ 0.042 で一定とした。規則波の諸元は, 不規則波の有義波と同一にした。この波は, 堀川・砂村等⁸⁾ による汀線の前退 (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.Noda⁹⁾ に従い暴風海岸と正常海岸とに区別すると, 今回の条件は暴風海岸となる。

表-1に実験条件を示す。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。入射波, 反射波は, 合田の入反射波分離法¹⁰⁾ 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 (緩傾斜堤のり先と汀線との距離) $/L_o$ (ℓ_t/L_o) $\approx$ 以降規則波と不規則波の比較では ℓ_t/L_o と示す} ≈ -0.2 (沖側, $\ell_t=-63.0\text{cm}$), 0.0 (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。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¹¹⁾ 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) 自然海岸の海岸地形変化の比較

図-3(a), (b)は, 自然海岸(1/20勾配)に t/T ($t/T = (T_{1/3}/T)$, 以降規則波と不規則波の比較では t/T と示す) $\approx 32,000, 64,000$ (約12, 24時間) 波の規則波と不規則波を作用させた後の海岸地形を示したものであり, 図中の矢印は規則波の碎波点を示している。堀川等¹²⁾ は, 初期汀線の前退・後退を基準にして, 海岸変形を3つのタイプに分類している。規則波の場合は, 「タイプI: 汀線が後退し, 沖において砂が堆積す

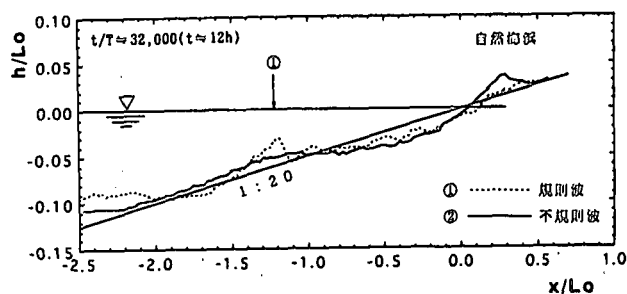


図-3(a) 自然海岸配の海岸地形変動の比較

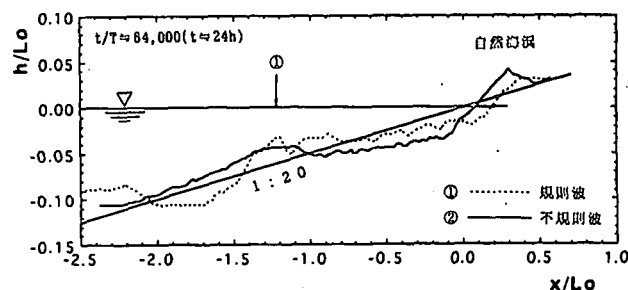


図-3(b) 自然海岸配の海岸地形変動の比較

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る。不規則波の場合もタイプⅠに分類されるが、汀線後退はごく僅かであり規則波に比べてバームが大きく形成されている。また、初期汀線付近より規則波の碎波点付近までは、不規則波の方の侵食量が多いが、碎波点以深部の変化は逆に小さくなっている。

(2) 緩傾斜堤設置位置の違いによる海浜地形変化の比較

a) 陸側 ($\ell_t/L_o=0.2$) に設置した場合の海浜地形変化の比較

図-4(a),(b)は、緩傾斜堤を陸側に設置し、規則波と不規則波を作用させた場合の海浜地形変化の比較を示したもので、図中の不規則波の矢印は碎波点の最岸点と最沖点を表している。(a),(b)は、1/4勾配で $t/T \approx 11,000$ (約4時間) 後及び1/5勾配で $t/T \approx 64,000$ (約24時間) 後の海浜地形である。(a)の時点では両者とも堤上に砂が堆積しているが、初期汀線付近 ($X/L_o \approx 0$) より陸側では不規則波を作用させた場合の方が堆積量が多くなっている。初期汀線より沖側では、規則波を作用させた場合の方が幾分海浜地形変化が大きくなっている。(b)の時点では両者とも(a)より海浜地形の変動が大きくなり、初期汀線付近 ($X/L_o \approx 0$) より陸側では規則波、それより規則波の碎波点付近 ($X/L_o \approx -1.2$) までの範囲では不規則波

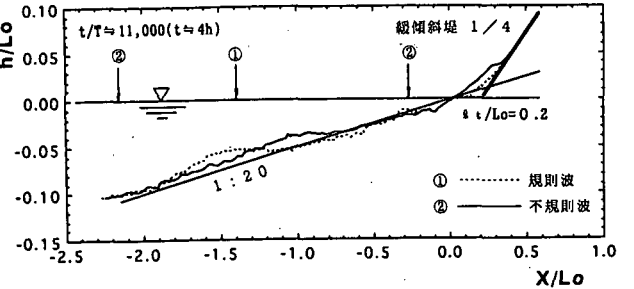


図-4(a) 堤設置位置の違いによる海浜地形変動の比較
陸側 ($\ell_t/L_o=0.2$, 1/4勾配)

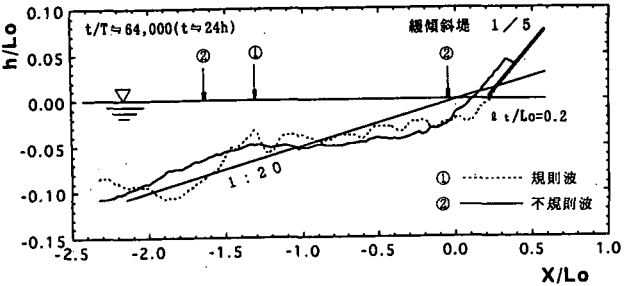


図-4(b) 堤設置位置の違いによる海浜地形変動の比較
陸側 ($\ell_t/L_o=0.2$, 1/5勾配)

による侵食量の方が大きい。このような傾向は他の勾配でも認められた。

b) 汀線 ($\ell_t/L_o=0.0$) に設置した場合の海浜地形変化の比較

図-5(a),(b)は、緩傾斜堤を汀線に設置し、規則波と不規則波を作用させた場合の海浜地形変化の比較を示したものである。(a),(b)は、1/4勾配で $t/T \approx 11,000$ (約4時間) 後及び1/3勾配で $t/T \approx 64,000$ (約24時間) 後の海浜地形である。(a)の時点では両者とも堤上に砂が堆積しているが、不規則波を作用させた場合の方が堆積量は多くなっている。海浜地形変化は、規則波を作用させた場合の方が大きくなっている。(b)の時点では $X/L_o \approx -0.2$ より陸側では規則波、それより規則波の碎波点付近 ($X/L_o \approx -1.1$) までの範囲では不規則波による侵食量の方が大きい。このような傾向は、陸側に設置した場合と同様他の勾配でも認められた。

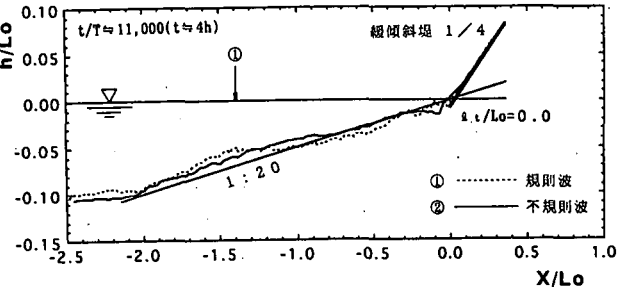


図-5(a) 堤設置位置の違いによる海浜地形変動の比較
汀線 ($\ell_t/L_o=0.0$, 1/4勾配)

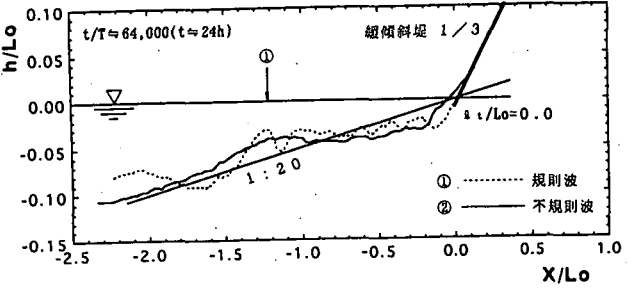


図-5(b) 堤設置位置の違いによる海浜地形変動の比較
汀線 ($\ell_t/L_o=0.0$, 1/3勾配)

c) 沖側 ($\ell_t/L_o=-0.2$) に設置した場合の海浜地形変化の比較

図-6(a),(b)は、緩傾斜堤を沖側に設置し、規則波と不規則波を作用させた場合の海浜地形変化の比較を示したものである。(a),(b)は、1/4勾配で $t/T \approx 43,000$ (約16時間) 後及び1/3勾配で $t/T \approx 64,000$ (約24時間) 後の海浜地形である。(a)の時点では両者とも堤前面が侵食されており、規則波を作用させた場合の方が海浜地形の変動が大きく、堤前面の深

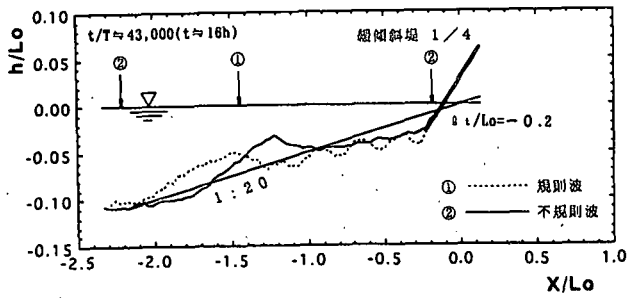


図-6(a) 堤設置位置の違いによる海浜地形変動の比較
沖側 ($\lambda t/Lo = -0.2$, 1/4勾配)

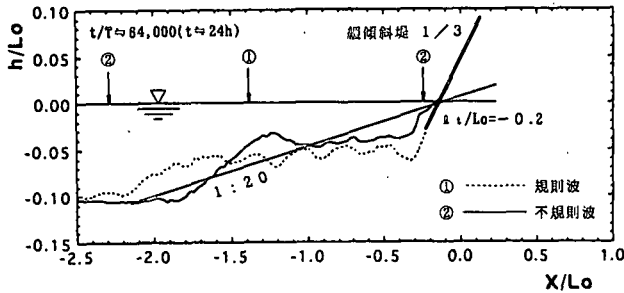


図-6(b) 堤設置位置の違いによる海浜地形変動の比較
沖側 ($\lambda t/Lo = -0.2$, 1/3勾配)

掘れも認められる。(b)の時点では(a)の傾向が更に進み、規則波を作用させた場合は堤前面の深掘れが顕著に認められる。堤前面から $X/Lo \approx -1.0$ 付近までは、規則波を作用させた場合の方が侵食量が多い。

(3) 堤前面の最大洗掘深の比較

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(a),(b)は、陸側 ($\lambda t/Lo = 0.2$) 及び沖側 ($\lambda t/Lo = -0.2$) に1/4,1/3勾配の緩傾斜堤を設置した場合の例で h_{max} を沖波波高 H_o $\{=(H_{1/2})_o$ 、以降規則波と不規則波の比較では h_{max}/H_o と示す}で無次元化した値を経時的に示したものである。

図-7(a)では、規則波を作用させた場合徐々に洗掘深が大きくなり $t/T \approx 64,000$ では $h_{max}/H_o \approx 0.5$ の値を示している。一方、不規則波を作用させた場合は、起波後から $t/T \approx 54,000$ まで徐々に砂が堆積しそれ以降幾分洗掘されているが、 $t/T \approx 64,000$ でも $h_{max}/H_o \approx -0.25$ の値となっている。図-7(b)では、規則波及び不規則波とも徐々に洗掘深が大きくなる傾向が認められ、 $t/T \approx 64,000$ で規則波及び不規則波の h_{max}/H_o の値はそれぞれ約1.2及び0.6となっている。

両図より、緩傾斜堤を沖側へ設置するほど規則波による堤前面の深掘れは大きくなるが、不規則波の場合は沖側に設置したケースでも顕著な深掘れは発

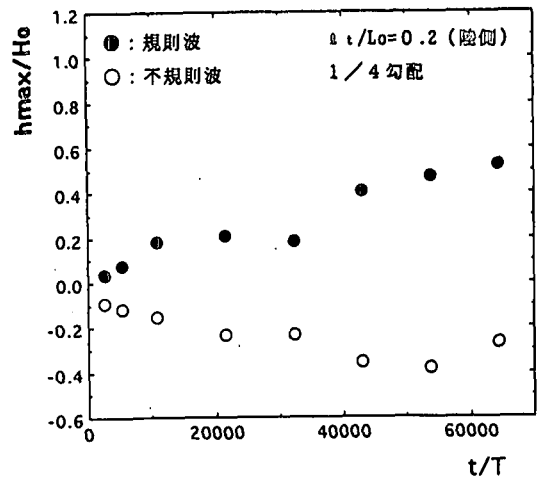


図-7(a) h_{max}/H_o と t/T の経時変化の比較
陸側 ($\lambda t/Lo = 0.2$, 1/4勾配)

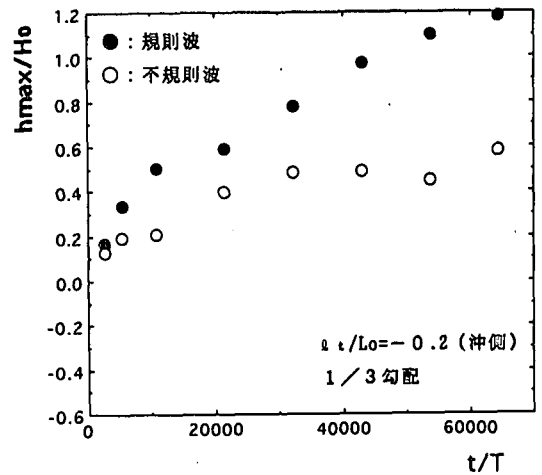


図-7(b) h_{max}/H_o と t/T の経時変化の比較
沖側 ($\lambda t/Lo = -0.2$, 1/3勾配)

生しない。一般に、堤前面の洗掘は重複波の作用、戻り流れの作用等に起因すると考えられており、今回の規則波は侵食型の一定の入射波が作用するのに対し、不規則波の入射波の約2/3以上は規則波の入射波よりも小さい波が作用するために、上記の作用の影響が小さくなったためと考えられる。

(4) 緩傾斜堤上の砂の移動及び堤の被災状況の比較

図-8(a),(b),(c)は、緩傾斜堤上の単位幅当たりの砂量の経時変化を示したもので、各々陸側 ($\lambda t/Lo = 0.2$)、汀線 ($\lambda t/Lo = 0.0$) 及び沖側 ($\lambda t/Lo = -0.2$) に1/5,1/4及び1/5勾配の緩傾斜堤を設置した場合の例を示している。図中の直線は初期砂量を、点線の0は堤上に砂が全くなくなった状態を表す。図-8(a),(b)のケースでは、不規則波を作用させた場合起波直後から徐々に堤上に砂が堆積して、 $t/T \approx$

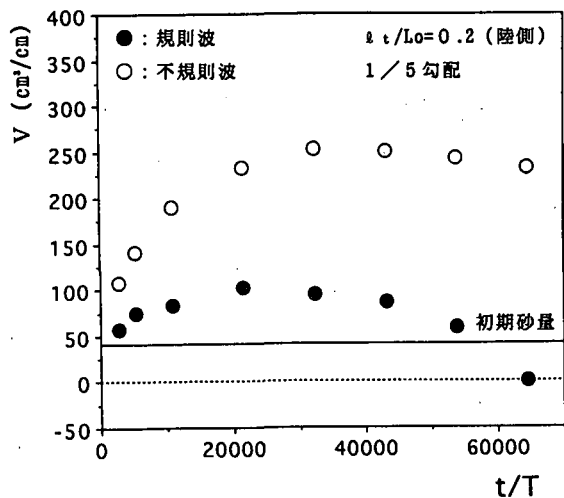


図-8(a) 緩傾斜堤上の砂の変動比較
陸側 ($\ell t/Lo=0.2$, 1/5勾配)

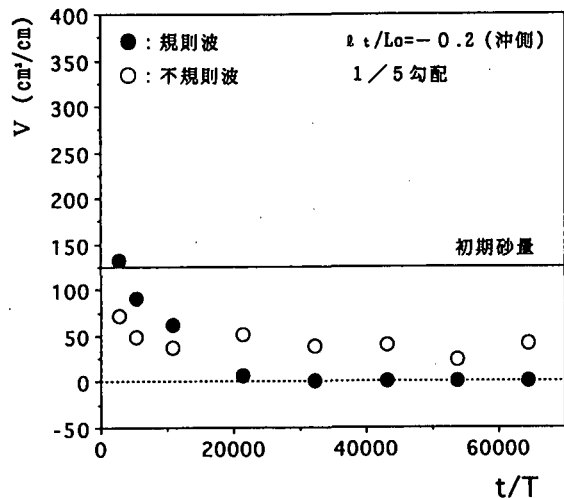


図-8(c) 緩傾斜堤上の砂の変動比較
汀線 ($\ell t/Lo=-0.2$, 1/5勾配)

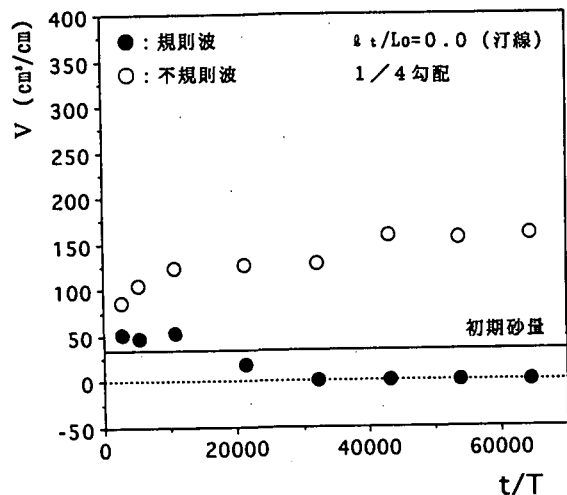


図-8(b) 緩傾斜堤上の砂の変動比較
沖側 ($\ell t/Lo=0.0$, 1/4勾配)

表-2 緩傾斜堤の被災と波の作用継続時間
(規則波)

t/T	1/3			1/4			1/5		
	$\ell t/Lo$			$\ell t/Lo$			$\ell t/Lo$		
	-0.2	0	0.2	-0.2	0	0.2	-0.2	0	0.2
3,000	無	無	無	無	無	無	無	無	無
5,000	A	無	無	無	無	無	無	無	無
11,000	A	A	無	無	A	無	無	A	無
21,000	A	A	無	A	A	無	A	A	無
32,000	A	A	無	A	A	無	A	A	無
43,000	A	B	無	A	A	無	A	B	無
54,000	B	C,D	無	B	B	無	B	B	無
64,000	C,D	C,D	無	B	C,D	A	B	B	A

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

表-3 緩傾斜堤の被災と波の作用継続時間
(不規則波)

t/T	1/3			1/4			1/5		
	$\ell t/Lo$			$\ell t/Lo$			$\ell t/Lo$		
	-0.2	0	0.2	-0.2	0	0.2	-0.2	0	0.2
3,000	無	無	無	無	無	無	無	無	無
5,000	無	無	無	無	無	無	無	無	無
11,000	無	無	無	無	無	無	無	無	無
21,000	無	無	無	無	無	無	無	無	無
32,000	無	無	無	無	無	無	無	無	無
43,000	無	無	無	無	無	無	無	無	無
54,000	無	無	無	無	無	無	無	無	無
64,000	無	無	無	A	無	無	A	無	無

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

40,000から $t/T=64,000$ までの間に幾分侵食あるいは一定値を示すのに対し、規則波の場合は起波直後より幾分堤上に砂が堆積するものの、その後徐々に侵食され堤上にほとんど砂が無くなる状態となっている。

図-8(c)の沖側では、規則波、不規則波とも起波直後より堤上の砂が侵食され始め、徐々に侵食が進み $t/T=20,000$ 以降の規則波では堤上に砂が無くなり、不規則波では幾分堤上に砂が残っている状態となっている。

表-2及び3は、規則波及び不規則波を作用させた場合の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の規則波の場合は、波の作用時間が長くなるにつれて緩傾斜堤の被災が徐々に進行するが、勾配が急なほどその速度は速い。また設置位置について

は、汀線、沖側の順に被災が早くなっている。一方、表-3の不規則波の場合はほとんどのケースで堤上に砂が残っているため、本実験の範囲内ではほとんど被災は発生せず、規則波の場合と大きな違いが見られた。

4. あとがき

不規則波の有義波に等しい規則波を用いて行った海浜地形変化を、同一条件で行った不規則波による海浜地形変化と比較検討した。その結果不規則波の場合、一波ごとに碎波点の位置や反射率が異なるため全体的に平均化されて、規則波の場合に比べ海底地形変化は小さくなることが分かった。本実験で得られた結論は、要約すると次のようである。

(1) 堤を設置しない初期勾配1/20の自然海浜の場合、規則波の方が汀線後退量は大きい。また、初期汀線付近より規則波の碎波点付近までは、不規則波の方の侵食量が多いが、碎波点以深部の変化は逆に少ない。

(2) 緩傾斜堤を設置した場合、規則波の方は波の作用時間が長くなるにつれて緩傾斜堤の被災が徐々に進行するが、勾配が急なほどその速度は速くなる。一方、不規則波の場合本実験の範囲内ではほとんど被災は発生せず、規則波の場合と大きな違いが見られた。

(3) 緩傾斜堤を陸側 ($\ell_t/L_o=0.2$) 及び汀線 ($\ell_t/L_o=0$) に設置したケースの場合は、堤上及び堤ののり先より0.2 L_o 沖合までは規則波、それより規則波の碎波点付近($X/L_o \approx -1.2$)までは不規則波を作用させた場合の方が侵食が多くなっている。一方、沖側 ($\ell_t/L_o=-0.2$) に堤を設置した場合は、規則波の方が堤前面の深掘れが顕著であり、またそれより $X/L_o \approx -1.0$ 付近まで侵食が大きくなる傾向を示した。

(4) 緩傾斜堤を沖側へ設置するほど、規則波による堤前面の深掘れは大きくなるが、不規則波の場合は設置位置に関係なく顕著な深掘れは発生しない。

(5) 全ケースとも不規則波の方が堤上への砂の堆積量が多くなる。

謝辞: 本実験およびデータ整理には、当時東北工業大学工学部学生戸牧篤也君、菅野 厚君、大山貴仁君、

福士長徳君、三浦一志君に協力していただいた。また、本研究に対して文部省科学研究費(基盤研究C(2))の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 高橋敏彦・沼田 淳・首藤伸夫: 緩傾斜堤が海浜地形に及ぼす影響に関する研究—規則的な直角入斜波による実験—, 土木学会論文集, No. 545/II-36, pp. 79-88, 1996.
- 2) 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.
- 3) 宇多高明・柳澤 修: 緩傾斜堤の被災機構と安定化のための方策, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 656-660, 1991.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 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) Iwagaki, Y. and H. Noda: Laboratory study of scale effects in two-dimensionnal beach processes, *Proc. 8th Conf. on Coastal Eng.*, pp. 194-210, 1962.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.