

# 緩傾斜堤が海浜地形に及ぼす影響に関する研究 —規則的な直角入射波による実験—

高橋敏彦<sup>1</sup>・沼田 淳<sup>2</sup>・首藤伸夫<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 東北工業大学講師 工学部土木工学科 (〒982 仙台市太白区八木山香澄町 35-1)

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

<sup>3</sup>正会員 工博 東北大学教授 工学部災害制御研究センター (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

侵食型、堆積型の波を交互に作用させ、緩傾斜堤の有無による海底地形変化を比較した実験、侵食型の波のみを長時間作用させて、緩傾斜堤設置位置の影響を調べた実験の2種類を行った。緩傾斜堤上に砂が残存する間は、緩傾斜堤の存在が汀線後退に対し有利に働くが、緩傾斜堤の位置によっては、自然海浜にくらべ、海浜の砂が少なくなり、かえって不利となる状況が生じた。堤前面の最大洗掘深、基礎工の被災を、堤設置位置及び波作用時間の関数とする実験の関係を求めた。

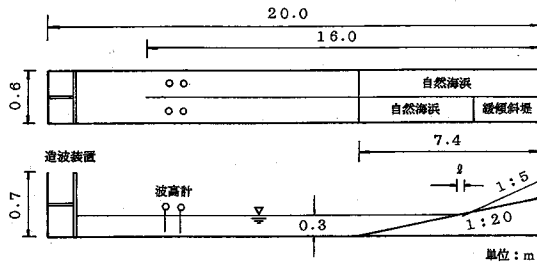
**Key Words** : gentle-slope sea dike, beach profile change, toe-scouring depth

## 1. 序 論

近年、海岸侵食対策の一つとして親水性や景観面も配慮した工法として、緩傾斜堤が築造されている。この緩傾斜堤は、ブロックの孔などによる堤表面の粗度及び捨石層・フィルター層の透水性が大きな特徴<sup>1)</sup>となっている。運輸省より発表された、面的な海岸防護方式の計画・設計マニュアル<sup>2)</sup>には緩傾斜型の堤防・護岸を選定する適合条件として、「特に海岸利用や親水に対する要請が著しく高い場合」の項目がある。また、建設省<sup>3)</sup>より発表された緩傾斜堤の設計手法<sup>4)</sup>のまえがきには、「親水性や景観の面からより良い環境を創出することができる工法として、緩傾斜型堤防・護岸(緩傾斜堤)が各地で採用されるようになった」と述べられている。緩傾斜堤の設計は、当然の事ながら自然条件、背後地の重要度、隣接の海岸保全施設など種々の状況を考慮して決定する事になると考えられるが、運輸省のマニュアルには、緩傾斜堤の防護ゾーンとして後浜部分が示されていることや、建設省の設計手法の中の緩傾斜堤の採用条件の中では、「充分広い前浜があり、…」等と示されていることを考えると、両者とも比較的陸側に設置する方向で考えているのが基本方針と思われる。更に、緩傾斜堤の設置位置について橋本等<sup>5)</sup>は、汀線より岸側に設置する方が望ましい、としている。また宇多等<sup>6)</sup>は、できる限り控え目に造り、緩傾斜堤の法先に砂浜あるいは礫浜を残すように設計することである、と述べている。しかし、宇多等<sup>6)</sup>の緩傾斜堤の安定性に関する全国実態調査による

と、実際には法先が汀線付近あるいは海中にあるものが数多い結果となっている。豊島<sup>7)</sup>は、前浜が狭い場合は法尻を海中に入れて5~6割の緩い勾配の緩傾斜堤にすることを提唱している。ここ数年、緩傾斜堤への波の打ち上げ高さや越波、被災に関連した研究<sup>8)~16)</sup>が数多く行われている。しかし、緩傾斜堤の設置位置についての研究例は数少なく、堤は大方陸側に設置した方が良いという定性的な認識であるが、実際には前述したように法先が汀線付近あるいは、海中にあるものも数多い。これは前浜が狭い等の理由によりやむを得ず設置されたものと思われるが、侵食傾向が強くなっている現況を考えると今後このようなケースが多くなっていくものと思われる。これらの事をふまえ、緩傾斜堤の設置位置の違いによる海浜地形変化の差異を明かにしておくことが、重要であると考えられる。侵食対策として緩傾斜堤を設置した場合の被災として、沿岸漂砂の卓越した海岸では、堤自体被災すると共に下手側の侵食を助長するような沿岸流等による長期的な被災と、台風、低気圧等の波浪による短期的な被災が考えられる。

今回実験設備等の制約上後者を対象に、侵食型の波がどの程度作用した場合に被災が発生するのか、更にその被災過程等を堤の設置位置と関連づけて把握するために実験的検討を行った。本研究では、施工例が比較的多くなると考えられる5割勾配の緩傾斜堤を対象とし、模型縮尺1/40で実験を行った。緩傾斜堤の基礎工及び根入深さは、「緩傾斜堤の設計の手引き」<sup>4)</sup>に準拠して模型堤体を作成した。実験は、「緩傾斜堤の有無が海浜地形に及



図一 実験水路概略図

ばす影響に関する実験」と「緩傾斜堤の設置位置が海浜地形に及ぼす影響に関する実験」とに大別できる。前者の実験は、2分した水路の片側は自然海浜のままとし、他方には緩傾斜堤を設置して同じ条件の波を作用させ、緩傾斜堤の有無による汀線及び海浜地形の変化の違いを検討することを目的としたものであり、後者の実験は、緩傾斜堤の設置位置が、海底地形や堤脚部前面の最大洗掘深及び基礎工に及ぼす影響について検討することを目的としたものである。

## 2. 実験装置及び実験条件

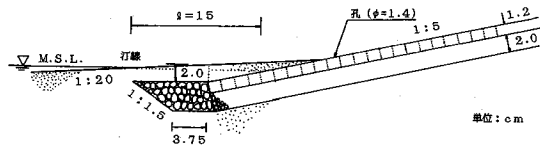
実験は、長さ20.0 m、幅0.6 m、深さ0.7 mの両面ガラス張り造波水路を2分して片側0.3 mとし、両側の水路を使用して行った。水路の一端にはピストン型反射波吸収制御付き造波装置が装備されている。他端には細砂（天然珪砂7号、 $d_{50}=0.15$  mm、比重=2.60）で1/20勾配の海底地形を作成し、その上に1/5勾配の模型堤体を設置した（図一）。模型堤体は、有孔ブロックを模擬した孔径14.0 mmの多孔板（空隙率約22%）の下に粒径5.0 mmのアルミナボールを約20.0 mmの厚さに敷き詰めて作成した。すなわち、粗度及び透水性を有する緩傾斜堤である。入射波、反射波は、合田の入反射分離法<sup>19)</sup>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1 cm～最大80 cm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ビデオカメラで撮影した。

### (1) 緩傾斜堤の有無による海浜地形の変化に関する実験 A

実験は、水深  $h=0.3$  m、周期  $T=1.58$  sec は一定に保ち、波高  $H=2.0$  cm～12.0 cm、沖波波形勾配  $H_0/L_0=0.0054\sim0.0321$  の範囲で行った。表一に実験条件を示す。表中の波浪条件は、堀川等<sup>20)</sup>の境界式から求めた汀線の前進（堆積）、後退（侵食）等の判別結果を示している。また、継続時間の数字は、各波浪条件による波の作用時間であり、( ) 内の数字は波の累加作用時間で

表一 緩傾斜堤の有無に関する実験 A 諸元

実験No	T (sec)	H (cm)	$H_0/L_0$	緩傾斜堤	$l$ (cm)	波浪条件	継続時間(hr)
A-1	1.58	12.0	0.0321	無	-	侵食	4 (4)
		2.0	0.0054			堆積	26 (30)
		12.0	0.0321			侵食	4 (34)
		4.5	0.0121			堆積・侵食	4 (38)
		2.0	0.0054			堆積	8 (46)
		12.0	0.0321			侵食	4 (50)
A-2	1.58	12.0	0.0321	有	15	侵食	4 (4)
		2.0	0.0054			堆積	26 (30)
		12.0	0.0321			侵食	4 (34)
		4.5	0.0121			堆積・侵食	4 (38)
		2.0	0.0054			堆積	8 (46)
		12.0	0.0321			侵食	4 (50)
		7.0	0.0187	堆積・侵食	12 (62)		



図二 実験 A における緩傾斜堤の設置状況

表二 緩傾斜堤の設置位置に関する実験 B 諸元

実験NO.	T (sec)	H (cm)	緩傾斜堤	設置位置	$l$ (cm)	波浪条件	継続時間 (h)	
B-1	1.42	12.0	無	-	-	侵食	24	
B-2								
B-3								
B-4								
B-5								
B-6								
B-7			有	7.5	陸側	7.5	侵食	24
B-8								
B-9								
B-10								
B-11								
B-12								

ある。始めに、侵食型の波を4時間、その後堆積型の波を26時間、以後侵食型、堆積・侵食型（中間領域）、堆積型の波を交互に合計62時間作用させた。図二は、緩傾斜堤の設置状況を示したもので、汀線から静水面と緩傾斜堤法面との交点までの水平距離  $l=15$  cm は一定とした。海底地形は、各波浪条件ごとに起波後、1, 2, 4, 8, 13, 17, 21, 26, 時間後に測定した。

### (2) 緩傾斜堤の設置位置による海浜地形の変化に関する実験 B

実験は、 $h=0.3$  m、 $T=1.42$  sec、 $H=12.0$  cm ( $H_0/L_0=0.041$ ) に固定して行った。表二に実験条件、図三に緩傾斜堤の設置位置及び構造の概略を示す。表及び図の  $l$  は前述の定義と同様であるが、図三のように -60 cm から 60 cm の範囲で変化させた。上記波浪条件を、堀川・砂村等<sup>20)</sup>及び尾崎・曳田<sup>21)</sup>、Sawaragi, T. and I. Deguchi<sup>22)</sup>による汀線の前退・後退のそれぞれの境界式によって区別すると、Sawaragi 等の境界式では、堆

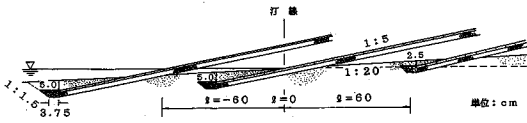


図-3 実験Bにおける緩傾斜堤の設置位置

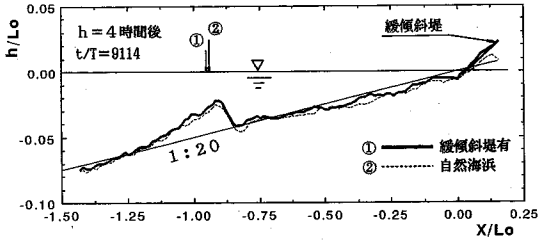


図-4 海底地形(実験A)の比較図 (t/T=9114) 矢印は砕波位置

積型になるが他では汀線の後退(侵食)領域に対応する。ただし、尾崎等の境界式中の砕波波高は、合田<sup>23)</sup>の砕波指標より求めている。尚、榎木<sup>24)</sup>によれば Sawaragi 等の式は、波高の効果が考慮されていない欠点を有していると述べられている。また、Iwagaki, Y. and H. Noda<sup>25)</sup>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-2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。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。なお、基礎工は石詰め蛇籠とし、根入れ深さ(初期地形から基礎工上端までの深さ)は、設計の手引<sup>1)</sup>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5 cm, 陸側に位置する場合は2.5 cmとした。

### 3. 緩傾斜堤の有無による海浜地形への影響に関する実験Aの結果及び考察

緩傾斜堤の有無が、海浜地形に及ぼす影響に関する研究としてブロックを用いて行った前出の橋本ら<sup>5)</sup>, また、不透過滑面で行った出口<sup>26)</sup>, 佐伯・尾崎<sup>27)</sup>等の研究があるが、いずれも洗掘深に着目しているため海浜地形や汀線の変化に関する比較等は詳細には検討されていない。

#### (1) 緩傾斜堤の有無による海浜地形変化の比較

図-4は、侵食型の波を4時間(t/T=9114波)作用させた後の、緩傾斜堤の有無による海浜地形変化の比較図であり、横軸は初期汀線を基準とした無次元水平距離X/L<sub>0</sub>, 縦軸は相対水深h/L<sub>0</sub>で表している。初期地形は、

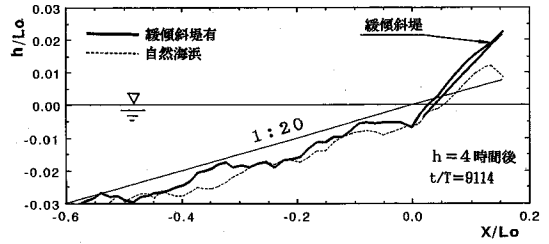


図-5 汀線付近(実験A)の比較図 (t/T=9114)

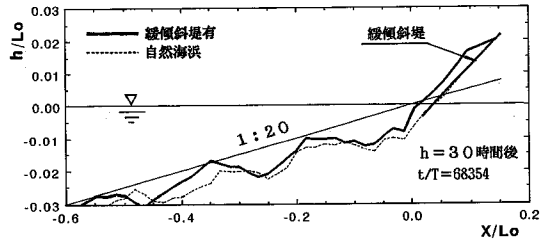


図-6 汀線付近(実験A)の比較図 (t/T=68354)

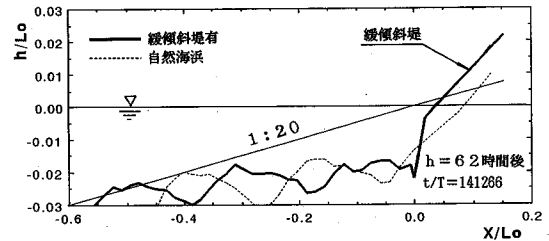


図-7 汀線付近(実験A)の比較図 (t/T=141266)

1/20勾配であり、矢印は砕波地点を示している。この図で見える限りbarの発生位置やその規模は、緩傾斜堤の有無に関係なくほぼ類似しているが、barより陸側のsand waveは、緩傾斜堤有りの方にはっきりと現れている。

図-5は、図-4の汀線付近を拡大したものである。自然海浜及び緩傾斜堤設置海浜とも初期地形に比べて、ほとんどの領域で侵食され、前者の汀線は、後者の堤設置位置よりさらに陸側(X/L<sub>0</sub>≒0.05)まで後退している。一方後者(緩傾斜堤設置海浜)の場合、初期汀線地点では、前者(自然海浜)とほぼ同じ位洗掘されているが、その砂は緩傾斜堤上に堆積しており、沖側の地形変化も前者よりは少ない傾向にある。

図-6は、図-5に引き続き堆積型の波を26時間、累計30時間(t/T=68354)作用させた直後の汀線付近の海浜地形の拡大比較図である。緩傾斜堤の有無にかかわらず、図-5に比べて両者の汀線は前進し、陸上部ある

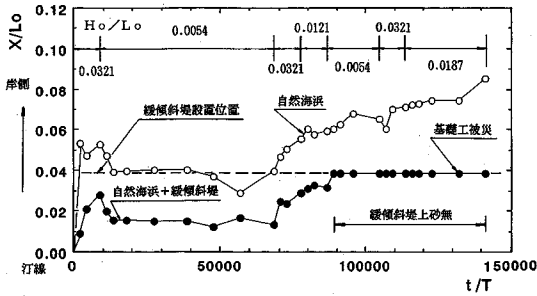


図-8 緩傾斜堤の有無による汀線位置の比較 (実験A)

いは堤上に砂が堆積している。このケースでは、入射波高が2 cmであり非砕波となっている。図-7は、さらに侵食、中間領域、堆積型の波を交互に小計32時間、累計62時間 ( $t/T=141266$ ) 作用させた直後の汀線付近の海浜地形である。緩傾斜堤上の砂は皆無となり、堤前面の深掘れが顕著になるが、自然海浜の方は、汀線が緩傾斜堤設置位置よりかなり後退する結果となった。なお、図-4~7では部分重複波の影響と思われる sand wave が表われている。波浪条件は、自然海浜、緩傾斜堤設置海浜とも  $H_0/L_0=0.0054\sim 0.0321$  であり、反射率はそれぞれ  $Kr=0.34\sim 0.04$ ,  $0.37\sim 0.08$  となっている。

## (2) 緩傾斜堤の有無による汀線位置の変化の比較

図-8は、自然海浜及び緩傾斜堤設置海浜の汀線位置の比較図である。横軸は、波の作用継続時間の無次元量  $t/T$  で、縦軸は汀線位置  $X/L_0$  である。図中の上部には、 $t/T$  に対応して作用させた海象条件  $H_0/L_0$  を示している。図中の点線は、緩傾斜堤の設置位置を表している。

最初、侵食型の波 ( $H_0/L_0=0.0321$ ) を作用させると、自然海浜では一気に  $X/L_0=0.05$  まで後退し、その後は波作用終期 ( $t/T=10,000$ ) までほぼ定常状態になるのに対し、緩傾斜堤設置海浜では、汀線の後退は徐々に進み波作用終期までの後退量は、 $X/L_0=0.03$  である。引き続き、堆積型の波 ( $H_0/L_0=0.0054$ ) を作用すると両海浜ともほぼ同じスピードで汀線は前進するが、自然海浜の場合  $X/L_0=0.03\sim 0.04$ 、緩傾斜堤設置海浜の場合  $X/L_0=0.01\sim 0.015$  で定常状態を保っている。さらに、侵食 ( $H_0/L_0=0.0321$ )、中間 ( $H_0/L_0=0.0121$ ,  $0.0187$ )、堆積型 ( $H_0/L_0=0.0054$ ) の波を交互に作用し続けると、自然海浜の場合はほぼ継続的に汀線の後退が進行するが、緩傾斜堤設置海浜では、堤上の砂が無くなるまで汀線が後退し、その後は深掘れが進行して基礎工が被災する結果となる。緩傾斜堤上に砂が無くなるまでの汀線の後退量は、平均的に見て緩傾斜堤設置海浜の方が自然海浜より4~6割程度少なくなっている。

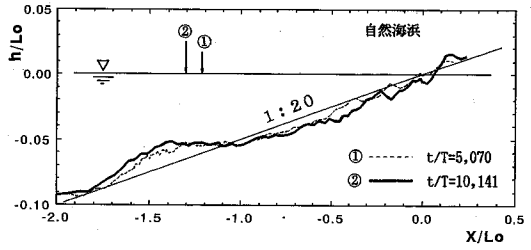


図-9 (a) 自然海浜の海底地形 (実験B) ( $t/T=5070, 10141$ ) 矢印は砕波位置

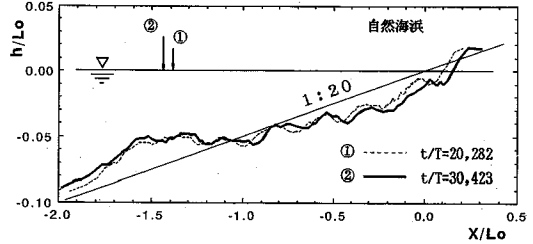


図-9 (b) 自然海浜の海底地形 (実験B) ( $t/T=20282, 30423$ ) 矢印は砕波位置

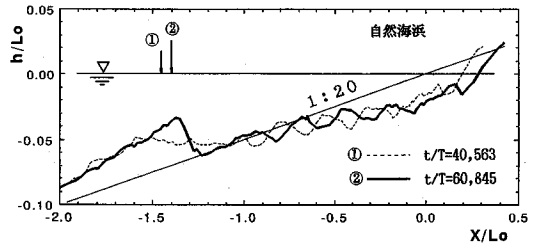


図-9 (c) 自然海浜の海底地形 (実験B) ( $t/T=40563, 60845$ ) 矢印は砕波位置

## 4. 緩傾斜堤の設置位置に関する実験Bの結果及び考察

### (1) 自然海浜の海浜地形変化

図-9 (a), (b), (c) は、それぞれ自然海浜に  $t=2, 4; 8, 12; 16, 24$  時間 ( $t/T=5070, 10140; 20282, 30423; 40563, 60845$ ) 波を作用させた後の海浜地形を示したものである。細実線は1/20勾配の初期地形である。堀川等<sup>28)</sup>は、海浜変形を3つのタイプに分類しているが、今回の実験結果は、「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。

### (2) 緩傾斜堤設置位置の違いによる海浜地形変化

図-10 (a), (b), (c) 及び図-11 (a), (b), (c) は、それぞれ緩傾斜堤を陸側  $l=45$  cm の所に設置した

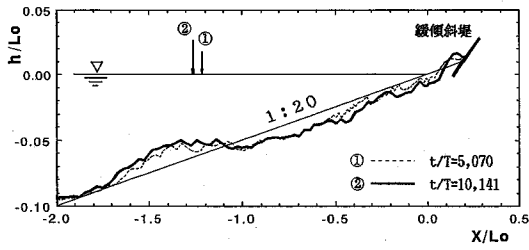


図-10 (a) 緩傾斜堤設置 ( $l=45.0$  cm) の海底地形 (実験 B) ( $t/T=5070, 10141$ ) 矢印は砕波位置

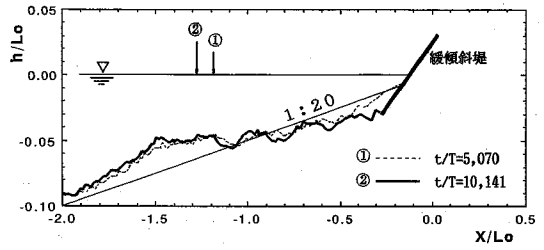


図-11 (a) 緩傾斜堤設置 ( $l=-39.8$  cm) の海底地形 (実験 B) ( $t/T=5070, 10141$ ) 矢印は砕波位置

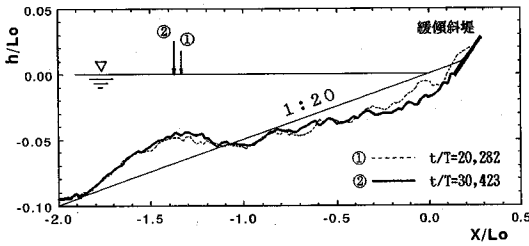


図-10 (b) 緩傾斜堤設置 ( $l=45.0$  cm) の海底地形 (実験 B) ( $t/T=20282, 30423$ ) 矢印は砕波位置

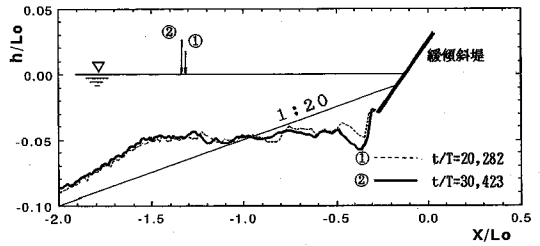


図-11 (b) 緩傾斜堤設置 ( $l=-39.8$  cm) の海底地形 (実験 B) ( $t/T=20282, 30423$ ) 矢印は砕波位置

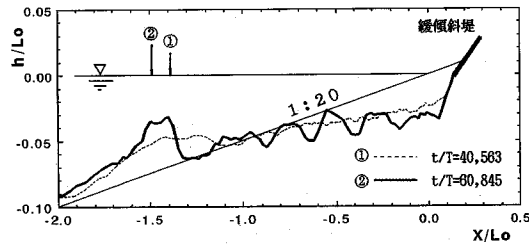


図-10 (c) 緩傾斜堤設置 ( $l=45.0$  cm) の海底地形 (実験 B) ( $t/T=40563, 60845$ ) 矢印は砕波位置

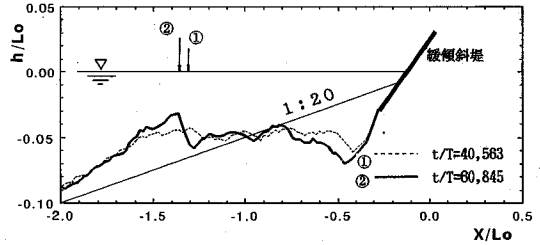


図-11 (c) 緩傾斜堤設置 ( $l=-39.8$  cm) の海底地形 (実験 B) ( $t/T=40563, 60845$ ) 矢印は砕波位置

場合 (実験 No. B-11) と沖側  $l=-39.8$  cm の所に設置した場合 (実験 No. B-3) の海浜地形の経時変化を示した一例である。前者の場合、起波後  $t/T=20282$  までは前浜の砂が打ち上げられた形で堤上に堆積しているが、前浜が狭くなるにつれて堤上の砂も沖に運ばれて消滅し、堤前面が深く掘られていく傾向が認められる。一方、後者の場合はもともと前浜が存在しないためか、堤上に砂が堆積するという現象は見られず、砂は  $t/T=10141$  では完全に消滅し、その後は前者よりも早く堤前面の深掘れが進行した。

### (3) 自然海浜及び緩傾斜堤設置位置の違いによる海浜地形変化の比較

図-12 (a), (b) は、自然海浜 (実験 No. B-1) と緩傾斜堤を  $l=-60$  cm (実験 No. B-2),  $l=0$  cm (実験 No. B-6) 及び、 $l=60$  cm (実験 No. B-12) の位置に設置した場合の海浜地形の変化を比較したもので、(a) は

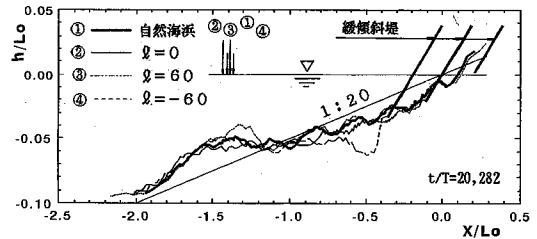


図-12 (a) 自然海浜及び堤の設置位置の違いによる海底地形 (実験 B) ( $t/T=20282$ ) 矢印は砕波位置

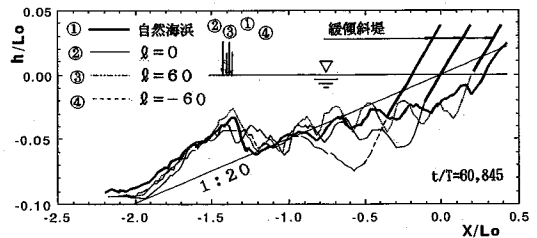


図-12 (b) 自然海浜及び堤の設置位置の違いによる海底地形 (実験 B) ( $t/T=60845$ ) 矢印は砕波位置

表—3 緩傾斜堤上の砂の移動（実験B）

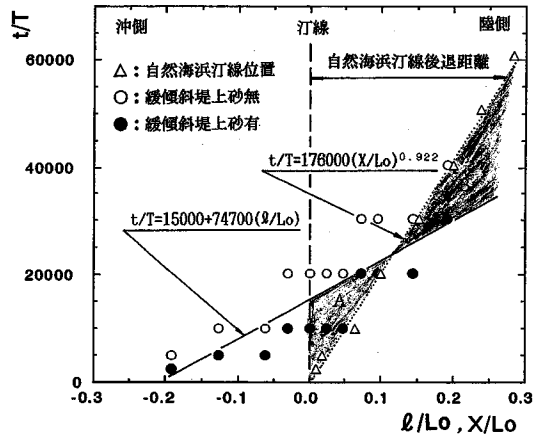
t/T	s/L <sub>0</sub>										
	-0.191	-0.127	-0.082	-0.031	0.0	0.024	0.048	0.072	0.095	0.143	0.191
2535	侵食	侵食	侵食	侵食	侵食	侵食	侵食	侵食	侵食	堆積	不変
5070	無	侵食	侵食	不変	侵食	侵食	侵食	堆積	不変	堆積	堆積
10141	無	無	無	侵食	侵食	堆積	堆積	堆積	堆積	堆積	堆積
20282	無	無	無	無	無	無	無	侵食	不変	侵食	堆積
30423	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	侵食
40563	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
50704	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
60845	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無

起波 8 時間 ( $t/T=20282$ ) 後, (b) は, 24 時間 ( $t/T=60845$ ) 後の海浜地形変化の比較図である。起波後 8 時間 ( $t/T=20282$ ) までは, 自然海浜の地形変化と緩傾斜堤を汀線から陸側に設置した場合の地形変化はほぼ類似しているが, 緩傾斜堤を沖側に設置した場合は, この時点で基礎工前面に深掘れが発生している。起波後 24 時間 ( $t/T=60845$ ) では, 緩傾斜堤の設置位置に関係なく基礎工前面で深掘れが発生し, その規模は沖側ほど大きくなる傾向が認められる。また, 自然海浜の汀線後退量は, 最も陸側へ設置した堤位置より更に後退している。これは緩傾斜堤を設置した場合, 有孔ブロックを模擬した多孔板が, その位置で汀線の後退を防ぐ形となるためである。

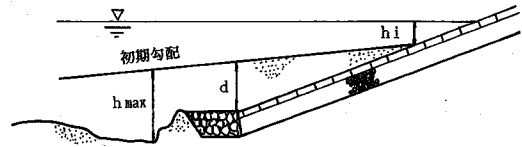
(4) 緩傾斜堤上の砂の移動

表—3 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 5 mm 以内なら不変,  $\pm 5$  mm 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, 基礎工をも含めた堤防の上に砂が全く無くなった場合である。表中の波形線以下が, 堤上の砂が全く無くなった場合である。当然の事ながら, 緩傾斜堤を陸側に設置すればする程砂の無くなり方が遅い結果となる。このことから, 緩傾斜堤の設置位置を検討する場合, 侵食型の波の作用時間も考慮すべき重要な要素の一つと考えられる。

図—13 は, 表—3 の結果から, 波の作用時間ごとの緩傾斜堤上の砂の有無を, 自然海浜の汀線後退量の時間的变化と比較して示したものである。図中の実線は, 堤設置位置の無次元量  $l/L_0$  と堤上に砂が無くなるまでの波作用時間の無次元量  $t/T$  との関係を示したもので, それぞれ式 (1), (2) で表わしたものである。



図—13 緩傾斜堤設置位置及び自然海浜汀線後退位置と波の作用継続時間（実験B）



図—14 緩傾斜堤の最大洗掘深さの概略と定義

$$t/T = 15000 + 74700(l/L_0), \quad -0.19 < l/L_0 < 0.19 \quad (1)$$

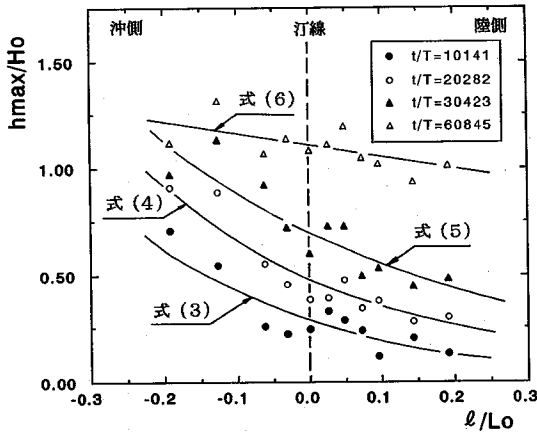
$$t/T = 176000(X/L_0)^{0.92}, \quad 0 < X/L_0 < 0.29 \quad (2)$$

両曲線に挟まれる領域 A すなわち緩傾斜堤の設置位置が,  $0 < l/L_0 < 0.125$  の範囲では堤上の砂が完全に消滅するまでの波の作用時間の方が, 自然海浜の汀線がその位置まで後退するまでの波の作用時間より長くなる。

一方, 堤設置位置が  $l/L_0 > 0.125$  の領域 B では, 逆に堤上の砂が完全に消滅するまでの波の作用時間の方が短くなる。このように  $l/L_0 = 0.125$  を境として逆転現象が起こるのは, 侵食性の波が長時間 (本実験では約 2 万波) 継続すると堤上の砂が減少して, 自然海浜に比べ反射率が大きくなり戻り流れを助長して砂の消滅を促進する結果となるためと考えられる。したがって, 長時間の波の作用に対して傾斜堤が破壊されずに抵抗しうるかどうかが, 波がおさまる段階で砂が戻ってくるか否かが, 傾斜堤の良否を決めることになると考えられる。

(5) 緩傾斜堤設置位置と基礎工前面最大洗掘深

緩傾斜堤上 (基礎工上含む) の砂が徐々に侵食され, 砂が無くなると次の段階として基礎工前面の砂が掘れてくる。一般に波による洗掘は, 重複波の作用, 碎波によって生ずる水塊の作用, 遡上した波の戻り流れの作用等に起因すると言われている。今回の実験では, かなり沖合いで碎波が生じているため碎波の影響は小さく, 基礎工前面の洗掘は, 主として重複波と戻り流れの



図一15  $l/L_0$  と  $h_{max}/H_0$  の関係 (実験B)

作用によるものと考えられる。図一14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。海岸堤防前面における洗掘については、たとえば樫木<sup>29)</sup>、佐藤ら<sup>30)</sup>、細井<sup>31)</sup>、野田ら<sup>32)</sup>、沼田ら<sup>33)</sup>、服部ら<sup>34)</sup>による多くの研究があるが、大部分は鉛直堤あるいは鉛直堤に近いもので実験を行っている。粗度及び透水性を有する緩傾斜堤の設置位置と、洗掘深の関係の詳細に検討している研究例はほとんど見あたらない。前述の設計の手引き<sup>4)</sup>の中に最大洗掘深を求める式が掲載されているが、この式は、根入れ深さを決めるためのもので、上述の基礎工前面の洗掘深とは定義が異なっている。図一15は、緩傾斜堤の設置位置 ( $l/L_0$ ) と堤前面最大洗掘深さの無次元値 ( $h_{max}/H_0$ ) の関係を  $t/T$  をパラメータとして図示したものである。図中の曲線は、パラメータ  $t/T$  毎の回帰曲線で、それぞれ式(3)~(6)で表される。

$$h_{max}/H_0 = 0.28 \times 10^{(-1.7 \cdot l/L_0)}, \quad t/T = 10141 \quad (3)$$

$$h_{max}/H_0 = 0.48 \times 10^{(-1.4 \cdot l/L_0)}, \quad t/T = 20282 \quad (4)$$

$$h_{max}/H_0 = 0.70 \times 10^{(-1.1 \cdot l/L_0)}, \quad t/T = 30423 \quad (5)$$

$$h_{max}/H_0 = 1.10 \times 10^{(-0.23 \cdot l/L_0)}, \quad t/T = 60845 \quad (6)$$

図中の曲線群を一括定式化すると次のようになる。

$$h_{max}/H_0 = a \times 10^{(b \cdot l/L_0)} \quad (7)$$

$$a = 0.154 + 1.59 \times 10^{-5} (t/T) \quad (8)$$

$$b = -2.00 + 2.94 \times 10^{-5} (t/T) \quad (9)$$

ただし、 $-0.19 < l/L_0 < 0.19$ 、 $10000 < t/T < 60000$

当然ではあるが、波の作用時間が長いほど、また緩傾斜堤を沖側へ設置するほど、最大洗掘深が大きくなるが、作用時間が極端に長くなると(本実験の場合  $t/T = 60845$  程度)設置位置による最大洗掘深の違いは小さく

表一4 基礎工被災と波の作用継続時間(実験B)

$t/T$	$l/L_0$										
	-0.191	-0.127	-0.062	-0.031	0.0	0.024	0.046	0.072	0.095	0.143	0.191
2535	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
5070	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
10141	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
20282	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
30423	A	無	無	無	無	B	A	無	無	無	無
40693	B	B	無	無	無	B	B	B	A	無	無
50704	B	B	A	A	無	B	B	B	B	A	B
60845	B	B	A	A	無	B	B	B	B	B	B

無:被害無し, A:基礎工が初期設置位置より少しでも動いたり傾いたりした状態  
B:基礎工の移動・傾きなどにより、堤中詰め材が吸い出される状態

なるようである。出口<sup>26)</sup>は、砕波帯内の4地点で4種類の法勾配を持つ護岸について洗掘深の実験を行っているが、最大洗掘深は、 $H_0/L_0 = 0.05$ の場合、 $hi/L_0 = 0.015$  ( $hi$  = 堤設置水深)、 $H_0/L_0 = 0.03$ の場合、 $hi/L_0 = 0.025 \sim 0.035$ で発生するとの結果を得ている。本実験条件の場合  $H_0/L_0 = 0.042$ のみであり、出口の実験と比較して  $hi/L_0$ の値が小さい範囲での実験であったためか、図一15で示してあるように最も沖側へ設置した場合 ( $l/L_0 = -0.191$ ,  $hi/L_0 = 0.0127$ )に洗掘深が最大となっている。ただし、前述したように波の作用時間がある程度長くなると、設置位置による差は小さくなる傾向が見られる。佐伯・尾崎<sup>27)</sup>は、陸側を含む砕波帯内の4地点で3種類の法勾配を持つ護岸について実験を行っているが、本実験と同様、堤を沖側へ設置するほど洗掘深が大きくなる結果を示している。

## (6) 基礎工被災と波の作用継続時間

表一4は、基礎工(蛇籠使用)の被災状況を被害無し(無)、基礎工が初期設置位置より少しでも動いたり傾いたりした状態(A)、基礎工の移動・傾きなどにより、堤中詰め材が吸い出される状態(B)に分類し、設置地点ごとの基礎工の状態を波の作用時間を追って一覧にしたものである。被災の過程は、前節で述べたような過程で、堤上の砂が無くなった後、基礎工前面の洗掘が進行し、最後に基礎工が傾いて中詰め材が吸い出されるというパターンである。

図一16は基礎工被害発生を、 $d/H_0$ をパラメータとして  $l/L_0$ と  $t/T$ の関係を図示したものである。本実験の場合、根入れ深さは、緩傾斜堤の設計の手引<sup>4)</sup>を参考にし、法尻が海中にある場合  $d = 5.0$  cm ( $d/H_0 = 0.388$ )、陸上にある場合  $d = 2.5$  cm ( $d/H_0 = 0.194$ )とした。図中の直線は、基礎工被害の有無を示す境界線で次式で表される。

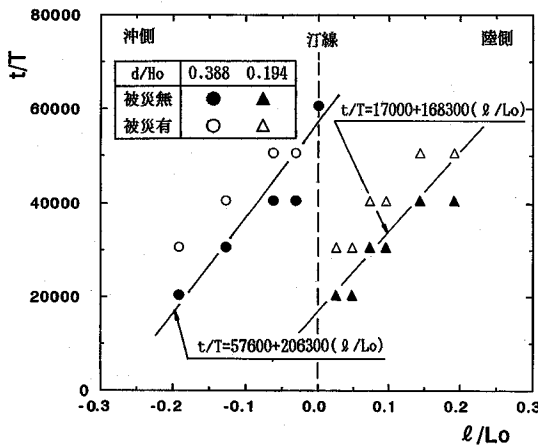


図-16  $t/T$  と  $l/L_0$  の関係 (実験 B)

$$t/T = 57600 + 206300(l/L_0) \quad (10)$$

$$-0.19 < l/L_0 \leq 0 \quad (\text{法尻が海中})$$

$$t/T = 17000 + 168300(l/L_0) \quad (11)$$

$$0.02 < l/L_0 < 0.19 \quad (\text{法尻が陸上})$$

本実験によると、式 (10) と (11) は、汀線 ( $l/L_0 = 0$ ) で不連続変化し、しかも緩傾斜堤を陸側 ( $l/L_0 > 0$ ) に設置した方が短い波の作用時間で基礎工が被害を受ける結果となった。これは、汀線で基礎工の根入れ深さを一気に半減したためである。この点については、今後の検討課題である。

## 5. 結 論

自然海浜と緩傾斜堤設置海浜の両者に、侵食型、堆積型等の波を交互に作用させ、海底地形変化を比較した実験 A の主要な結論を要約すると (A-1)~(A-2) の通りである。また、自然海浜と緩傾斜堤の設置位置を種々変えた堤設置海浜に、侵食型の波を長時間作用させた場合の海底地形等を比較検討した実験 B の主要な結論を要約すると (B-1)~(B-5) の通りである。

(A-1) 自然海浜の汀線は、侵食型の波を作用させると一気に後退するが、緩傾斜堤設置海浜の汀線後退は比較的緩慢である。引き続き堆積型の波で、両者の汀線はほぼ同じスピードで前進するが、再び侵食・中間・堆積型の波を交互に作用させると両者とも時間の経過と共に徐々に後退していく、このとき緩傾斜堤上の砂は徐々に消滅して、堤が完全に露出し、堤前面が掘られて被災にいたる (図-8)。

(A-2) 緩傾斜堤上に砂がある間は、緩傾斜堤は自然海浜に比べ汀線後退に対して有効に働き、汀線後退量は自然海浜の 4~6 割程度に低減できる。

(B-1) 自然海浜の無次元汀線後退距離  $X/L_0$  は、 $t/T$

と関連付けられる。

(B-2) 緩傾斜堤上の砂が無くなるまでの波の無次元作用時間  $t/T$  は、緩傾斜堤設置位置  $l/L_0$  と関連付けられる。

(B-3) 侵食型の波を長時間作用させた場合、護岸設置位置が  $0 < l/L_0 < 0.125$  の範囲 (図-13 の領域 A) では、緩傾斜堤上の砂が無くなるまでの波の作用時間は、自然海浜の汀線がその堤位置まで後退するまでの波の作用時間より長くなるが、 $l/L_0 > 0.125$  の領域 (図-13 の領域 B) では、逆となって堤前面の洗掘が先行するようになる。

(B-4) 堤前面の無次元最大洗掘深  $h_{\max}/H_0$  は、 $l/L_0$  と  $t/T$  と関連付けられる。波の作用時間が短い場合の  $h_{\max}/H_0$  の値は、緩傾斜堤を沖側へ設置すればするほど又、波の作用時間が長ければ長いほど大きくなるが、波の作用時間がある程度長くなると (本実験の場合  $t/T = 60,000$  以上) 設置位置による差は小さくなる。

(B-5) 基礎工が被災するまでの波の継続時間は、緩傾斜堤を汀線より沖側に設置した場合と岸側に設置した場合に分けて、それぞれ堤の設置位置に関連付けられる。ただし、汀線を境として不連続に変化する結果となる (図-16) が、これは汀線で基礎工の根入れ深さを一気に半減したためと考えられる。この点については、今後の検討課題である。

本実験は、2 次元水槽内の限られた実験条件の下で行われたものであり、現地での沿岸流による漂砂の影響、規則波を用いた事による不規則波との違い、初期勾配  $1/20$  から実験を開始している点等また、地形変化の時間スケール、底質の粒径等による相似則等の問題もあり、今回の実験結果を現地に適用するには更に検討すべき点が多々残っているが、砂浜海岸における緩傾斜堤設置の有無による海浜地形変化の違いや、緩傾斜堤設置位置による海浜地形変化の違いを考える上で、参考になるような二、三の知見を得ることが出来たものと考えられる。

最後に、本実験およびデータ整理には、当時東北工業大学学生 大川一則、鈴木一広、高橋正之、中川学の各君に協力していただいた。また、本論文の公表にあたり、小川記念基金の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 豊島 修: 緩傾斜のり面被覆工法, 海岸, No. 24, pp. 133-144, 1984.
- 2) 運輸省港湾局監修: 面的な海岸防護方式の計画・設計マニュアル, 日本港湾協会, p. 209, 1990.
- 3) 青木東雄, 芦田義則, 森吉尚, 宇多高明, 小俣篤: 緩傾斜堤の設計手法について, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 658-662, 1989.



- 4) 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.
- 5) 橋本宏，田中茂信，筒井保博：緩傾斜堤の局所洗掘と岸沖漂砂への影響，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 249~253, 1983.
- 6) 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.
- 7) 豊島 修：緩傾斜護岸工法，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 447-451, 1987.
- 8) 高橋敏彦，首藤伸夫，沼田 淳：緩傾斜堤の水理特性に関する実験的研究，海岸工学論文集，第37巻，pp. 509-513, 1990.
- 9) 高橋敏彦，首藤伸夫，沼田 淳：緩傾斜堤への波の打ち上げ高の一推定法，海岸工学論文集，第38巻，pp. 501-505, 1991.
- 10) 高橋敏彦，沼田 淳，首藤伸夫：緩傾斜堤への波の打ち上げ速度及び戻り流れに関する実験的研究，海岸工学論文集，第40巻，pp. 711-715, 1993.
- 11) 井上雅夫，島田広昭，坂本佳弘：親水性護岸の越波防止機能，海岸工学論文集，第40巻，pp. 701-705, 1993.
- 12) 井上雅夫，島田広昭，円間弘起：緩傾斜護岸の越波特性に及ぼす風の影響，海岸工学論文集，第39巻，pp. 586-590, 1992.
- 13) 井上雅夫，島田広昭，円間弘起：透水性を有する緩傾斜護岸の越波特性，海岸工学論文集，第38巻，pp. 541-545, 1991.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) Burger, A. M. et al. : Verification and practical use block revetment design method, *Proc. 22th Conf. on Coastal Eng.*, pp.1431-1445, 1990.
- 17) Sparboom, U. and Debus, W. : Wave-induced uplift characteristics on concrete block slope revetments, *Proc. 23th Conf. on Coastal Eng.*, pp.1573-1586, 1992.
- 18) De waal, J. P. and Van der Meer, J. W. : Wave runup and overtopping on coastal structures, *Proc. 23th Conf. on Coastal Eng.*, pp.1758-1771, 1992.
- 19) 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，No.248, pp. 24, 1976.
- 20) 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.
- 21) 尾崎 晃，曳田信一：波による二次元汀線変化の相似に関する実験的研究（続），第24回海岸工学講演会論文集，pp.167-169, 1977.
- 22) Sawaragi, T. and I. Deguchi : On-offshore sediment transport rate in the surf zone, *Proc. 17th Conf. on Coastal Eng.*, pp.1194-1214, 1980.
- 23) 合田良実：砕波指標の整理について，土木学会論文報告集，No.180, pp.39-49, 1970.
- 24) 榎木 亨：移動床模型実験の相似率，1984年度（第20回）水工学に関する夏期研修会講義集，Bコース，B-5-1~B-5-13, 1984.
- 25) 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.
- 26) 出口一郎：緩傾斜堤，pp.56-74，文部省科学研究費自然災害特別研究成果，「研究代表者 尾崎晃：砂浜決潰の防止工法とその適用性に関する研究」，No. A-59-1, 1984.
- 27) 佐伯 浩，尾崎 晃：護岸と海浜地形変化との関係についての実験的研究，pp.24-38，文部省科学研究費自然災害特別研究成果，「研究代表者 尾崎晃：砂浜決潰の防止工法とその適用性に関する研究」，No. A-59-1, 1984.
- 28) 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.
- 29) 榎木 亨，川崎芳一：海岸堤防堤脚部の洗掘，京大防災研究所年報，第4号，pp.198-209,1960.
- 30) 佐藤昭二，田中則男，入江 功：直立壁堤脚部の波による二次元洗掘実験，第13回海岸工学講演会論文集，pp.156-161, 1966.
- 31) 細井正延：堤防設置による海浜変形について，第14回海岸工学講演会論文集，pp.325-328, 1967.
- 32) 野田英明，岩佐敏博：海岸堤防堤脚部の洗掘に関する研究，第19回海岸工学講演会論文集，pp.53-57, 1972.
- 33) 沼田 淳，和田 明：護岸前面海底地形の変化に関する一実験，第20回海岸工学講演会論文集，pp.495-499, 1973.
- 34) 服部昌太郎，川又良一：海岸堤防による二次元海浜の地形変化，第23回海岸工学講演会論文集，pp.234-239, 1976.

(1994.11.24 受付)

# EFFECTS OF A GENTLE-SLOPE SEA DIKE ON BOTTOM TOPOGRAPHY -HYDRAULIC EXPERIMENTS WITH NORMALLY INCIDENT MONOCHROMATIC WAVES-

Toshihiko TAKAHASHI, Atsushi NUMATA and Nobuo SHUTO

Two series of experiments are carried out. The first is the sea bottom change with and without a gentle-slope sea dike, after eroding and accreting waves are alternately applied. The second compares effects of the location of the dike, when a train of eroding waves is applied for many hours. The dike effectively works to stop the shoreline retreat, as long as beach sands are on the dike. Depending on the location of the dike, the dike works worse than a natural beach to reduce beach sands. The maximum scouring depth and the damage condition of foundation works are expressed as functions of the location of dike and the duration of waves.