

海岸防砂堤に関する研究

大阪市立大学教授 工学博士 永井 莊七郎

1. 緒 言

昭和 29 年度および 30 年度において、沿岸流および防砂堤に関する研究を行ってきたが、その第 1 報は、第 1 回海岸工学研究発表会（昭和 29 年 11 月 20 日）において、第 2 報は第 11 回年次学術講演会（昭和 30 年 5 月 29 日）において発表した。本文には防砂堤に関する研究結果の総括を記述する。沿岸流に関する研究は現在継続中であるので、次の機会に報告する予定である。

2. 目 的

砂浜が波浪によつて浸食されるのを防ぐために設置する海岸防砂堤について、その最も効果的な防砂堤の長さ、間隔、方向、形状と、波の方向、波の特性との関係を調べるのがこの研究の主な目的である。

3. 実験設備及び実験方法

実験設備及び実験方法はすでに中間報告において紹介したごとく、長さ約 40 m、巾約 14 m の屋外実験場に、長さ約 30 m の直線海岸を造り、その海岸および海底に 3~5 cm の厚さに鉍滓（比重 $\gamma=2.2$ 、平均粒径 $d_m=0.6$ mm）を敷き、海底及び陸岸の勾配を 1/20 および 1/5 にして、汀線に対して 35°~90° の方向から、種々な波高、週期、波形勾配の波を送つて碎波させ、波の方向、波高、波形勾配、汀線から碎波点までの距離などと、防砂堤の長さ、間隔、方向、形状との関係を調べた。波は長さ 7 m、高さ 0.85 m の板の下部をヒンジし、その上部を前後に動かして起した。週期は、1700 回/min のモーターの回転数を変速器と直径 50" のプーレーで 0.5~2.5 sec に落した。この造波装置で起した波は浅海波とはほぼ同一の波形をなすことは本実験場において行つた多数の実験によつて検定されている。

4. 実験の種類

実験に使用した波の種類は、週期 $T=0.69\sim2.83$ sec、沖波の波高 $H_o=1.2\sim5.9$ cm、砕波高 $H_b=3.9\sim8.4$ cm、波長 $L=0.83\sim4.00$ m、沖波の波形勾配 $\delta_o=0.003\sim0.045$ である。波起し板の方向は、汀線に対して、 $\theta_o=35^\circ, 48^\circ, 58^\circ$ および 90° であるが、これらの波のうち、 $\theta_o=35^\circ\sim58^\circ$ のものは 1/20 勾配の海岸で屈折して、砕波点のすこし沖においてはそれぞれ、 $\theta=38^\circ, 53^\circ, 63^\circ$ になつた。表-1 は実験波の種類とその諸性質を示す。

実験に使用した防砂堤の長さは、水中部分が 30 cm、50 cm および 70 cm、陸上部分はいずれも 20 cm で、天端の巾は 2 cm、設置したときの先端の天端は静水面上はば 1~2 cm とし、天端の縦断勾配はほぼ海底勾配に等しくおいた。

防砂堤の配置は 1 本の場合、2~4 本の場合、その間隔を水中部分の長さ（本文において単に防砂堤の長さとして記すときは水中部分の長さを示す）の 2 倍、3 倍、4 倍および 5 倍にした場合について実験した。防砂堤の方向は以上の各場合について、海岸汀線に対して $90^\circ\sim110^\circ$ に変えた。特に方向についてくわしく検討する場合には $90^\circ\sim130^\circ$ に変えて実験した。

海底勾配は多くの場合 1/20 に一様に造つた。特に $\theta=90^\circ$ のときに、陸岸およびそれに続く海底の一部を 1/5 にした場合の実験をも行つた。表-2 は防砂堤の実験の種類を示す。

5. 実験結果

1) 波の性質と堆砂 一般に荒天時の波によつて海岸の砂は沖へ運び去られ、夏、春などの緩かな波によつて再び沖から海岸へ運んで来られることは、すでによく知られていることである。このことより、海岸における砂の堆積および洗掘と波形勾配との間に、何等かの関係があることが考えられるが、この関係について、Johnson¹⁾ および Saville²⁾ は実験結果より次のように述べている。

(a) 最大の漂砂は波形勾配が 0.020~0.030 (Johnson)、あるいは 0.020~0.025 (Saville) のときに起り、そのときの漂砂は汀線付近を上下しながら移動する、汀線漂砂 (beach drifting) が主である。

(b) 波形勾配が 0.020 より小さくなると漂砂は急激に減少する (Saville)。

(c) 波形勾配 0.025 (Johnson)、あるいは 0.03 (Saville) が冬型の波と夏型の波との限界で、これ以上のと

1) J.W. Johnson; Sand Transport by Littoral Currents, Proc. of the Fifth Hydraulics Conf., June. 1952.

2) T. Saville; Model Study of Sand Transport along a Infinitely Long, Straight Beach, Trans. Amer. Geophy. Union, Vol. 31, No. 4, 1950.

表-1 実験波の種類と特性

沖						波		砕						波						海底 勾配 I
波 高 H_0 cm	水 深 h_0 cm	週 期 T sec	伝播速度 C_0 cm/sec	波 長 L_0 cm	波形勾配 $\theta_0 = H_0/L_0$	訂線より の距離 l cm	波 高 H_b cm	伝播速度 C_b cm/sec	波 長 L_b cm	$\delta_b = H_b/L_0$	$\delta_b' = H_b/L_b$	水 深 h_b cm	h_b/H_b	h_b/H_0						
1. $\theta_0 = 35^\circ$																				
5.8	15.0	0.69	108	74			6.3			0.085		12.5	1.98		1/20					
	15.0	0.79	108	85	0.068		7.0			0.082		11.5	1.64	1.98						
	15.5	0.79	104	82			6.3			0.077		9.0	1.43							
5.2	16.5	0.84	117	98	0.053		7.3			0.075		10.0	1.37	1.92						
	15.5	0.98	111	109		90	5.4			0.050		9.0	1.67							
4.2	19.0	1.01	110	110	0.038	90						12.5		2.98						
4.4	16.5	1.03	118	122	0.036	90	6.8			0.056		8.0	1.18	1.82						
4.1	14.0	1.16	110	128	0.032	80	5.8			0.045		8.5	1.47	2.07						
4.5	13.0	1.46	118	172	0.026	60	5.1			0.030		7.5	1.47	1.67						
5.6	13.0	1.66	111	185	0.030	115	6.2			0.034		8.8	1.42	1.57						
4.1	14.5	1.67	119	198	0.021	108	6.0	113	188	0.030	0.032	7.3	1.22	1.78						
5.5	14.5	1.65	123	203	0.027	108	7.1	106	175	0.035	0.041	7.0	0.99	1.27						
2. $\theta_0 = 48^\circ$																				
4.0	15.0	2.37	116	275	0.015		6.2			0.023		5.0	0.81	1.25	1/20					
	4.1	15.0	2.08	117	243	0.017		5.5		0.023		5.5	1.00	1.34						
	5.3	15.0	1.79	119	212	0.025		5.8		0.027		5.0	0.86	0.94						
	4.2	15.0	1.49	115	172	0.024		6.9		0.040		10.0	1.45	2.38						
4.3		1.15																		
	15.0	1.63	120	195	0.022		7.3			0.037		5.5	0.75	1.28						
3.0	14.3	1.53	101	154	0.019	93	5.2	111	170	0.034	0.031	6.3	1.21	2.10						
3.9	14.3	1.99	113	225	0.017	98	5.6	109	215	0.025	0.026	7.5	1.34	1.92						
2.3	14.3					65	5.4					5.8	1.07	2.52						
2.6	15.0	2.42	108	262	0.010	95	4.9	120	292	0.019	0.017	7.9	1.61	3.02						
1.8	13.8	2.64	123	320	0.006	53	4.4	92	243	0.014	5.018	5.4	1.23	3.00						
1.2	13.8	2.83	135	380	0.003	35	4.2	118	333	0.011	0.013	5.2	1.24	4.33						
3. $\theta_0 = 58^\circ$																				
4.2	13.0	14.5	113	163	0.026	75	5.5			0.034		6.0	1.09	1.43		1/20				
3.3	13.3	15.0	106	159	0.021	65	4.4	98	147	0.028	0.030	6.2	1.41	1.88						
3.8	13.4	1.15	123	141	0.027	130	4.7	100	115	0.033	0.041	8.0	1.70	2.11						
4.2	13.1	1.01	113	114	0.037	140	4.8	109	110	0.042	0.044	8.5	1.77	2.02						
	16.0	0.78	103	83		225	5.4	115	90	0.065	0.065	10.7	1.98							
		0.66					5.9	91	60		0.098	21.0	3.56							
5.5	13.5	1.67	114	190	0.029	125	7.0	102	170	0.037	0.041	7.2	1.03	1.31						
4.9	12.5	2.04	116	236	0.021	95	6.3	95	194	0.027	0.032	7.3	1.16	1.49						
4.9	15.8	1.68	116	195	0.025	75	6.5	101	170	0.033	0.038	7.5	1.15	1.53						
4.8	15.8	1.68	135	225	0.021	90	5.6	109	183	0.025	0.031	8.0	1.43	1.67						
5.6	14.5	1.70	133	226	0.025		6.0	112	190	0.027	0.032	7.8	1.30	1.39						
4. $\theta_0 = 90^\circ$																				
5.6	18.0	1.16	124	144	0.039	105	7.0	124	144	0.049	0.049	8.3	1.19	1.48	1/20					
5.9	18.0	1.16	122	142	0.042	103	6.7	122	142	0.047	0.047	9.0	1.34	1.53						
4.4	17.8	1.47	135	198	0.022	95	6.6	136	200	0.033	0.033	9.6	1.45	2.18						
4.7	19.5	0.84	124	104	0.045	48	6.3			0.061		10.5	1.67	1.34						
6.0	20.3	1.52	127	191	0.031		8.2			0.043		13.0	1.59	1.37						
	20.3	1.15	152	175			8.1			0.046		13.0	1.60							
4.5	20.3	1.03	159	163	0.028		7.3			0.045		10.1	1.38	1.62						
3.8	20.3	1.50	134	200	0.019		8.4			0.042		6.6	0.79	2.21						
5.6	16.0	2.16	118	255	0.022		5.9	117	253	0.023	0.023	11.0	1.86	1.05						
4.3	16.0	2.70	150	400	0.011		5.4	117	316	0.014	0.017	11.0	2.04	1.26						
3.1	16.0	2.36	128	310	0.010		3.9	106	250	0.013	0.016	11.0	2.82	1.26						
2.9	16.0	2.40	144	346	0.008		5.6			0.016		6.8	1.21	1.93						
4.2	16.0	1.70	113	192	0.022	28	5.5			0.029		6.8	1.24	1.31						
4.6	16.0	1.39	126	175	0.026	28	5.3			0.030		6.8	1.28	1.15						
		1.08	112	121			5.6			0.046		9.8	1.21							
	2.0	19.0	2.75	146	403	0.005	85	6.0		0.015		8.3	1.38	4.15						
2.2	19.0	2.40	142	341	0.006	90	6.7	109	262	0.020	0.026	8.3	1.24	3.78	1/20					
2.6	19.0	1.80	138	250	0.010	70	6.8	118	212	0.027	0.032	6.9	1.01	2.66						

表-2 防砂堤実験の種類

週 期 T(sec)	砕波点ま での距離 i (cm)	防 砂 堤				海底勾配 I	週 期 T(sec)	砕波点ま での距離 i (cm)	防 砂 堤				海底勾配 I
		水中部分 の長さ (cm)	汀線に対 する角度 (α°)	間 隔					水中部分 の長さ (cm)	汀線に対 する角度 (α°)	間 隔		
				cm	倍 数						cm	倍 数	
1. θ ₀ = 35°													
1.5	60	30	90			1/20	1.5	125	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20
1.5	60	30	110			1/20	1.5	50~100	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20
1.5	60	50	90			1/20	1.5	75~100	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20
1.5	60	50	110			1/20	4. θ ₀ = 90°						
1.5	65	30	90	90	3	1/20	1.2	95~115	30	90	90	3	1/20
1.5	65	30	110	90	3	1/20	1.2	95~110	30	90	60	2	1/20
1.5	65	30	110	60	2	1/20	1.2	90~110	30	90	120	4	1/20
1.5	65	30	90	60	2	1/20	1.2	90~110	30	90	150	5	1/20
1.5	70	30	90	120	4	1/20	1.2	90~110					1/20
1.5	70	30	110	120	4	1/20	1.2	90~115	30	90	120	4	1/20 ⁽¹⁾
1.5	70~75	50	90	150	3	1/20	1.2	90~115	50	90	150	3	1/20
1.5	70	50	110	150	3	1/20	1.2	90~105	50	90	200	4	1/20
1.5	65	50	130	150	3	1/20	1.2	88~110	50	110	200	4	1/20
1.5	75	50	110	100	2	1/20	1.2	85~110	50	90	200	4	1/20 ⁽²⁾
1.5	70~100	70	90	225	3	1/20	1.5	90~100	30	90	90	3	1/20
1.5	120	50	90			1/20	1.5	90~100	30	90	120	4	1/20
1.65	115	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20	1.5	85~100	50	90	150	3	1/20
1.65	100~115	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20	1.5	90~105	50	90	200	4	1/20
1.65		30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20	0.85	40~55	30	90	90	3	1/20 → 1/5 ⁽³⁾
1.65		30	110	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20	1.2	15~20	30	90	90	3	1/20 → 1/5
1.65		30	110	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20	0.9~1.0		30	90	60, 120	2, 4	1/20 → 1/5
1.55		30	90	60, 90	2, 3	1/20	1.2~1.5	50~60	30	90	60, 120	2, 4	1/20 → 1/5
1.55		30	110	60, 90	2, 3	1/20	0.9		30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20 → 1/5 ⁽⁴⁾
2. θ ₀ = 48°							1.1	45~50	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20 → 1/5
2.1		30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20	1.1		30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20 → 1/5 ⁽⁴⁾
1.6		30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20	1.5	100~120	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20 → 1/5
1.5	170	30	110	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20	1.5	105~120	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20 → 1/5 ⁽⁴⁾
1.5		30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20	1.15		30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20 → 1/5
1.5		30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20	2.15	35~40	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20 → 1/5
1.5	80~105	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20	2.7	25~30	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20 → 1/5
2.4	95	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20	2.4		30	90	60, 80, 120	2, 3, 4	1/20 → 1/5
2.6	50~55	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20	2.4	20~25	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20 → 1/5
2.6	35	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20	1.7	25~30	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20 → 1/5
3. θ ₀ = 58°							1.4	25~30	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20 → 1/5
1.5	75~85	30	90	90	3	1/20	1.1		30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20 → 1/5
1.5	80~90	30	110	90	3	1/20	2.4	90	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20
1.5	85~95	30	90	60	2	1/20	1.8	70	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20
1.5	78~83	30	110	60	2	1/20	〔註〕(1) 防砂堤先端に捨ブロック置堤40 cm を汀線に平行に取付けた場合						
1.5	75~90	50	90	150	3	1/20	(2) " " 100 cm を " "						
1.5	85~90	50	110	150	3	1/20	(3) 1/20 → 1/5						
1.5	75~80	50	90	100	2	1/20	(4) 汀線および汀線より 20 cm の所にブロックを並べた場合						
1.5	70~85	50	110	100	2	1/20							
1.5	70~80	50	90	150	3	1/20							
1.5	78~83	50	90	100	2	1/20							
1.5	120~135	50	90	150	3	1/20							
1.5	120~130	70	90	100	2	1/20							
1.5	125	30	90	60, 90, 120	2, 3, 4	1/20							
1.5	120~130	50	110	150	3	1/20							
1.5	120~130	70	90	210	3	1/20							

きは漂砂は沿岸流によつて浮遊して移動する。

著者が実験を行った結果は 表-3 に示すごとくで、これを要約すると次のごとくである。

(a) 一般に巻き波で砕波するときは海岸に砂を堆積し、崩れ波で砕波するときは堆積しないか、または洗掘する。同じ巻き波で砕波しても、エネルギーの弱いときは堆積は少なく、強いときほど堆積が多い。また海岸線に対して斜に砕波する場合に、弱い崩れ波のときは、海底の砂は沿岸流によつて海岸に平行に移動するのみで、海岸の砂はあまり洗掘されないが、エネルギーの強い崩れ波のときは、海底および海岸の砂が洗掘され、陸岸が浸食される。海岸線に直角に崩れ波で砕波する場合には、エネルギーの強弱にかかわらず、陸岸が浸食される。

表—3 波の特性と砂の堆積との関係

週 期 $T(\text{sec})$	波形勾配 δ_0	沖波波高 $H_0(\text{cm})$	砕 波 高 $H_b(\text{cm})$	砕 波 の 種 類	堆 積 状 況 そ の 他	海底勾配 I
1. $\theta_0=35^\circ$						
0.69	0.068	5.8	6.0	崩 れ 夜	沿岸流強く、漂砂が汀線に平行に流れ堆積も侵食もしない 低い sand ridge ができる。比較的堆砂する。 小さい ridge ができる。いちじるしくはないが堆積する。 砕波点が遠いため堆積しにくいが少し堆積する。 よく堆積するが ridge はできない。 わずかに堆砂する。	1/20
0.79			7.0	"		
0.79			6.3	"		
0.84			7.3	"		
0.98	0.053	5.2	5.4	"		
1.01				"		
1.03			6.8	"		
1.16			5.8	巻 き 波		
1.22	0.022	3.0	6.8	"		
1.46			5.1	"		
1.50			7.5	"		
1.50			7.5	"		
1.51	$(\delta_0=0.045)$	5.2	6.3	一部崩れ波他は巻き波		
1.65			7.1	巻 き 波		
1.66			6.2	"		
1.67			6.0	"		
2.10	$(\delta_0=0.038)$	3.2	5.5	弱 い 巻 き 波		
2. $\theta_0=48^\circ$						
1.49	0.024	4.2	6.9(5.2~8.9)	巻 き 波	比較的よく堆積する。	1/20
1.53	0.019	3.0	5.2	"	汀線にほぼ平行に低い ridge ができる。堆積する。	
1.63	0.022	4.3	7.3	"	比較的よく堆積する。	
1.79	0.025	5.3	5.8	崩 れ 波	汀線が洗掘される。	
1.99	0.017	3.9	5.6(4.6~6.8)	弱 い 巻 き 波	僅かに堆砂する。	
2.08	0.017	4.1	5.5	弱い崩れ波一部分巻き波	かなり浮遊漂砂あり。汀線には堆積しない。	"
2.37	0.015	4.0	6.2	巻 き 波	余り浮遊漂砂はない。汀線に少し堆積する。	
2.42	0.010	2.6	4.9	弱 い 巻 き 波	ほとんど堆積しない。	
2.60	0.006	2.3	5.4	非常に弱い巻き波	堆砂しない。	
2.64		1.8	4.4	"	"	
2.83		1.2	4.2	"	"	
3. $\theta_0=58^\circ$						
0.66	$(\delta_0=0.065)$	4.2	5.9	崩 れ 波	洗掘される。	1/20
0.78			5.4		堆積しない。	
1.01			4.8	巻き波と崩れ波の中間		
1.15			4.7	不完全な巻き波	ridge ができる。少し堆積する。	
1.22	0.022	3.5	6.0	弱 い 崩 れ 波	堆積なし。汀線がわずかに侵蝕される。	
1.45	0.026	4.2	5.5	巻 き 波		
1.50	0.021	3.3	4.4	完 全 な 巻 き 波	汀線にほぼ平行に ridge ができる。堆積する。	"
1.52	0.018	2.9	5.8		よく堆積する。ridge ができる。	
1.67	0.029	5.5	7.0	巻 き 波	比較的よく堆積する。	
1.68	0.025	4.9	6.5	"	"	
1.68	0.021	4.8	5.6	"	"	
1.70	0.025	5.6	6.0	"	"	
2.05	0.008	2.3	7.0	不 完 全 な 巻 き 波	よく堆積する。小さい溝と ridge ができる。	
2.50	0.008	2.8	4.9	巻 き 波	よく堆積する。	
4. $\theta_0=90^\circ$						
0.84	0.045	4.7	6.3	崩 れ 波	急勾配のため汀線が大きく侵食される。	1/20→1/5
1.03	0.028	4.5	7.3	弱 い 崩 れ 波	洗掘される。	1/20→1/5
1.08			5.6			1/20→1/5
1.15			8.1	崩 全 な 巻 き 波	} 多少堆積する。防砂堤があるとよく堆積する。	1/20→1/5
1.16			7.0			1/20
1.16	0.039	5.6	6.7	"		1/20
1.39	0.026	4.6	5.3	"		1/20→1/5
1.47	0.022	4.4	6.6	"	少し洗掘される。	1/20
1.50	0.019	3.8	8.4	巻 き 波	よく堆積する。	1/20→1/5
1.52	0.031	6.0	8.2	"		1/20→1/5
1.70	0.022	4.2	5.5	完 全 な 巻 き 波	非常によく堆積する。	1/20→1/5
1.80	0.010	2.6	6.8	巻 き 波	比較的よく堆積。	1/20
2.16	0.022	5.6	5.9	"		1/20→1/5
2.36	0.010	3.1	3.9	弱 い 巻 き 波	堆積しない。	1/20→1/5
2.40	0.008	2.9	5.6	"	"	1/20→1/5
2.40	0.006	2.2	6.7	巻 き 波		1/20
2.70	0.011	4.3	5.4	"		1/20→1/5
2.75	0.005	2.0	6.0	"		1/20

(b) 巻き波で碎波するか、崩れ波で碎波するかは、海底勾配、海岸線に対する波の角度などによって異なるが海底勾配をほぼ $1/20$ にして行つた実験では、沖波の波形勾配 $\delta_0 \approx 0.025$ が両碎波の限界であつて、 $\delta > 0.025$ では崩れ波で碎け、 $\delta_0 > 0.025$ では巻き波で碎ける。

(c) 海岸に最もよく砂を堆積させる波形勾配は $\delta_0 \approx 0.015 \sim 0.020$ の間にあるようである。 $\delta_0 < 0.008$ および $\delta_0 > 0.025$ の波では堆積しない。

以上の著者の実験結果と Johnson および Saville の実験結果とを比較すると、

(a) 漂砂が最大のときは汀線漂砂のときであるという点は同意見であるが、そのときの波形勾配は著者の実験値の方が小さい。

(b) 漂砂が急激に減少するのは、著者の実験結果では $\delta_0 \approx 0.01$ であるが、Saville は $\delta_0 = 0.02$ である。

実際に海の波を観測すると、 $\delta_0 = 0.01$ および $\delta_0 = 0.02$ の波は、碎波点では $\delta_0 \approx 0.015$ および $\delta_0 \approx 0.03$ となるが、 $\delta \approx 0.015 \sim 0.03$ くらいの波がむしろ最も多く砂を堆積させるように考えられるから、著者の実験値の方が実際に近いと思われる。

(c) Johnson および Saville などが冬型あるいは暴風型と称している波は、おそらく崩れ波で碎波する波で、夏型の波というのは、巻き波で碎波する波であろうと考えられる。両種の波の限界は、著者と Johnson とはともに $\delta_0 = 0.025$ であるが、Saville は 0.030 である。これも $\delta_0 = 0.025$ の波は碎波するときには $\delta \approx 0.037$ くらいになることを考えると、この程度の値が限界値と考える方が実際に合つていると思われる。

2) 防砂堤の長さ 防砂堤の長さは、防砂堤の計画においてまず第一に定めなければならない問題である。これは海岸の水深、海底勾配、波浪の大きさなどによつて異なるべきであることは誰もが考えるのであるが、これらの間にいかなる関係があるかを一般的に明らかにすることはなかなかむづかしいことである。

防砂堤の長さをきめる最も実際的な方法として、著者は碎波点との関係を求めることを考え、実験によつて両者の関係を調べた。その結果は次のごとくである。

(a) 防砂堤を長くして碎波点に近づけるほどその裏側（波が来る方向の反対側）に多量の砂が堆積する。そのかわり、防砂堤の先端および表側の洗掘はいちじるしくなる。

(b) 防砂堤を非常に短かくして、その先端を碎波点から遠ざけると、先端の洗掘は少なくなるが、堆積も少なくなる。

(c) 防砂堤の先端があまり洗掘されないで、しかも砂がよく堆積するような防砂堤の長さ（水中部分）は、汀線から碎波点までの距離の約 40% の長さである。

(d) 防砂堤の陸上部分の長さは、荒天時に波が基部の陸側に廻りこまないように、陸岸における漂砂移動の上限まで伸すべきである。

以上の結果より、防砂堤の長さを定めるには、その海岸に最も多量に砂を運んでくるような波の碎波点を知ればよい。このような波はすでに記したごとく、沖波の波形勾配 $\delta_0 \approx 0.010 \sim 0.020$ の波であるが、一般に一つの海岸において、巻き波で碎波して海岸へ砂を運んで来るような波の碎波点はほぼ一定しているものであつて、砂の多い海岸では、碎波点に砂州 (sand ridge) ができている場合が多い。

3) 防砂堤の方向 わが国においては、海岸防砂堤の多くは汀線に直角に突出しているようであるが、最も有効な防砂堤の方向は、海岸に襲来する波の角度によつて異なるべきであると考えられる。

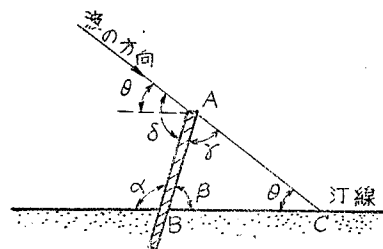
海岸線に斜に進んで来た沖波は、海岸に近づくとき屈折して次第に海岸線に平行にならうとする。しかし沖波の入射角が相当大きい場合には、沖波は屈折によつて海岸線に平行になる前に斜のままで碎波する。この場合に碎波によつて輸送された水量は、海岸線に平行に流れて沿岸流を生じ、この沿岸流によつて浮遊した漂砂が運ばれる。また巻き波で碎波する場合には、碎波後の波によつて汀線漂砂を生ずる。このような海岸においては、波が海岸線にほぼ直角にくる海岸に比して、防砂堤の効果は顕著である。

図-1 防砂堤の方向

(1) 角 δ の値：入射波と防砂堤とのなす角 δ (図-1) の値によつて、砂防堤付近の洗掘および堆積の状況が異なる。まづ $\delta = 90^\circ$ の場合には、防砂堤の先端および表側がはなはだしく洗掘されるとともに、防砂堤に当る波力が大きいので、防砂堤の構造上および維持上不利である。

$\delta < 90^\circ$ の場合には、防砂堤表側の砂が沖へ運び去られるので、表側が洗掘されて不利である。

したがつて $\delta > 90^\circ$ でなければならないが、 δ があまり大きいと



侵入波が防砂堤に沿って、基部の方へ流れるので、防砂堤の表側および基部付近が洗掘される。実験の結果によると、最も良好な δ の値は

$$\delta \approx 100^\circ \sim 110^\circ \dots \dots \dots (1)$$

であつて、 $\delta > 120^\circ$ であつてはならない。

(2) 角 α の値：防砂堤が汀線となす角 α は、侵入波の方向 θ が定まれば (1) 式の条件より自ら定まる。すなわち表-4 のごとくである。

しかしながら、 α は δ と θ のみによつては定められない。それは、 α があまり大きくなると、防砂堤の陰の部分に波が廻り込みにくくなり、したがつてその部分に砂が堆積しにくくなるからである。防砂堤によつて最も多く砂が堆積することを期待できる部分は、この陰の $\triangle ABC$ 部分であるから、 α を大にして、この部分の堆積を減ずることは、防砂堤の方向として最も不利である。

防砂堤の陰の部分に最大の堆積を生ずるのは、陰の部分の面積 $\triangle ABC$ が最大のときであると考えられる。いまその面積を F 、防砂堤の長さ $AB=L$ とすると、

$$F = \frac{1}{2} AB \cdot BC \sin \theta = \frac{1}{2} L^2 \frac{\sin \beta \cdot \sin(\theta + \beta)}{\sin \theta}$$

F を最大ならしめる β の値は

$$\frac{dF}{d\beta} = 0 \quad \therefore \beta = \frac{\pi - \theta}{2} \dots \dots \dots (2)$$

となる。(2) 式より β および α を求めると表-5 のごとくである。

図-2 防砂堤1本の場合の堆積および洗掘状況

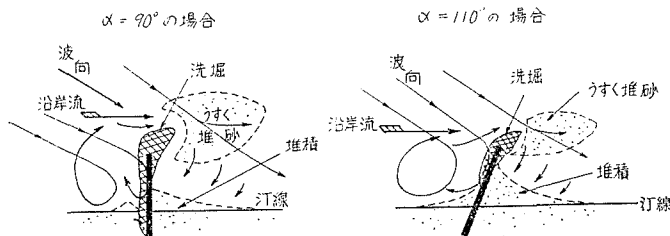


表-5 β および α の値

θ	β	α
30°	75°	105°
40°	70°	110°
50°	65°	115°
60°	60°	120°

表-5 によると、(2) 式の条件を満足する α の値は、 $\theta = 30^\circ \sim 60^\circ$ のときには $\alpha = 105^\circ \sim 120^\circ$ であることとなるがこの値が最も適当であるかどうかを実験によつて確かめてみた。すなわち $\theta_0 = 35^\circ, 48^\circ, 58^\circ, 90^\circ$ 、したがつて碎波点の少し沖では $\theta = 38^\circ, 53^\circ, 63^\circ, 90^\circ$ の方向から波を起し、防砂堤の長さ $L = 30 \text{ cm}, 50 \text{ cm}$ 、その方向を $\alpha = 90^\circ \sim 130^\circ$ に変えて種々の実験を行つた。

(a) $\theta = 35^\circ$ および 55° の場合：この場合における防砂堤付近の堆積および洗掘状況は図-2 のごとくである。

図-2 により明らかなごとく、 $\alpha = 90^\circ$ の場合には、防砂堤にあたつた波が防砂堤に沿つて基部に向つて走るので、基部が洗掘されるとともに、先端付近もいちじるしく洗掘される。また防砂堤の裏側にもエネルギーの強い波が入るので、あまり堆積しない。これに反し $\alpha = 110^\circ$ の場合には、防砂堤の基部に向う流れが比較的弱いので基部の洗掘はなく、むしろ基部からの戻り流れと寄せ波とが衝突して、基部付近に堆積を生ずる。また砂堤の裏側には適当にエネルギーの弱い波が廻り込んでよく堆積する。しかし防砂堤の先端は相当に洗掘される。これは1本の防砂堤のときにはまぬかれがたい現象である。

$\alpha \geq 120^\circ$ のときには、波が防砂堤の裏側へ廻り込みにくいので堆積しにくい。このことは $\theta \geq 60^\circ$ の場合でも同様である。

以上の実験結果は、 $\theta = 35^\circ \sim 55^\circ$ の場合には (1) 式および (2) 式を満足する場合にはよく堆積し、いずれか一方の条件を満足しない場合には堆積が減少することを物語っている。したがつて波が海岸汀線に対して $\theta = 35^\circ \sim 55^\circ$ の角度で進んでくる海岸においては、防砂堤の方向は $\alpha = 105^\circ \sim 115^\circ$ 、平均 $\alpha_m = 110^\circ$ のときが最もよく堆積することが考えられる。

(b) $\theta \geq 60^\circ$ の場合: $\theta = 60^\circ \sim 90^\circ$ の場合には, $\delta = 100^\circ \sim 110^\circ$, $\alpha < 120^\circ$ の両条件を同時に満足することはできない。 $\alpha = 90^\circ \sim 110^\circ$ にとれば $\delta > 120^\circ$ となる。しかし $\alpha > 120^\circ$ にはとれないのであるから, $\alpha = 90^\circ \sim 110^\circ$ のうちでどの角度のときが悪い影響が少ないかを実験によつて検討するよりほかに方法がない。

以上のことより $\theta \geq 60^\circ$ の場合には, $\theta < 60^\circ$ の場合に比して防砂堤による堆積はむづかしいことが考えられるが, 実験および実際の海においても, このことは事実である。

実験は, $\theta = 60^\circ$ および 90° の方向からの種々の波について, 防砂堤の方向 $\alpha = 90^\circ$ および 110° , 長さ $L = 30$ cm および 50 cm に変えて行つた。そのうちの $\theta = 90^\circ$ のときの堆積状況を示すと 図-3 のごとくである。 $\theta = 60^\circ$ のときもほぼこれと同じである。

一般に波が $\theta = 60^\circ \sim 90^\circ$ の角度で進んでく
る場合には, 波は防砂堤に沿つて基部に向つ
て流れるので, 基部が洗掘されやすく, また
戻り流れのために寄せ波が阻止されて, 碎波
点から運んで来た砂を汀線まで運ぶことがむ
づかしくなるので, 汀線付近には堆積しにく
い。

しかし $\alpha = 90^\circ$ のときと $\alpha = 110^\circ$ のときを
比較すると, $\alpha = 110^\circ$ のときの方が防砂堤に

沿つて走る波のエネルギーが強いので, 防砂堤の基部および表側(角 α の側)ならびにその汀線の洗掘がはなはだしい。また裏側(角 β の側)にはあまり堆積しない。したがつて $\alpha = 90^\circ$ のときの方が一般によく堆積する。 $\alpha = 90^\circ$ と $\alpha = 110^\circ$ との堆積の差は防砂堤が 2 本以上のときにさらに大きくなる。

4) 防砂堤の間隔 2 本以上の防砂堤を配置すると, いずれの場合でも, 1 本の場合に比して防砂堤の効果はいちじるしく増大する。

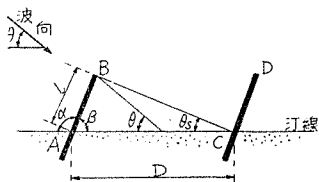
一般に防砂堤間に砂が堆積するためには, 碎波後の波が海底の砂を持つて, 適当なエネルギーをで防砂堤間に侵入し, そこでエネルギー減少して持つて来た砂を洗掘させ, 水だけが戻り流れあるいは反射波となつて外へ出てゆくことが必要である。間隔が広過ぎると, エネルギーの大きすぎる波が侵入するので, せつかく持つて来た砂を洗掘させないで再び沖へ持ち去るとともに, さらに汀線付近の砂をも沖へ運び去る。反対にあまりに間隔が狭いと, 波が防砂堤間に十分に侵入しえないので, 砂も堆積しない。したがつて一定の波のエネルギー, 波の方向, 防砂堤の長さに対して, 砂を堆積するに最も適した防砂堤の間隔があるはずである。実験によつてこれらの関係を検討してみた。

(1) $\theta = 35^\circ \sim 55^\circ$ の場合: $\alpha = 90^\circ$ お
よび 110° の場合における碎波後の水分
子の運動経路および堆積状況は一般に
図-4 に示すごとくである。図-4 には
洗掘状況は示さなかつたが, いずれの場
合でも, 防砂堤の先端は初めは洗掘され
るが堆積が進むにつれて, 次第に埋まつ

てゆく。特に下流側(沿岸流に対して)の防砂堤の先端は大部分埋る場合が多い。これに反し上流側の防砂堤の先端はなかなか埋らない。

図-2 と 4 を比較すると, 上流端の防砂堤の表側の堆積状況は, $\alpha = 90^\circ$ および 110° の場合ともよく似ているが, 裏側すなわち防砂堤間の堆積は異なっている。図-4 には 2 本目の防砂堤の効果が明瞭に現われている。この場合にも $\alpha = 110^\circ$ のときがよく堆積することはすでに述べたとおりである。

図-5 防砂堤の間隔



防砂堤間の堆積状況を観察すると, 砂が堆積する角 θ_s は波が進んで来る角 θ に対して一般に,

$$\theta_s \approx 0.4 \theta \dots \dots \dots (3)$$

である。したがつて最もよく堆積するためには, 上流側の防砂堤の先端 B から角 θ_s の方向に引いた直線 BC と汀線との交点 C に次の防砂堤が配置されればよい。

この場合には, 防砂堤 AB と CD との間隔 D は

$$D = l \cos \beta + l \sin \beta \cdot \cot \theta_s \dots \dots \dots (4)$$

図-3 $\theta = 90^\circ$ のときの堆積および洗掘状況

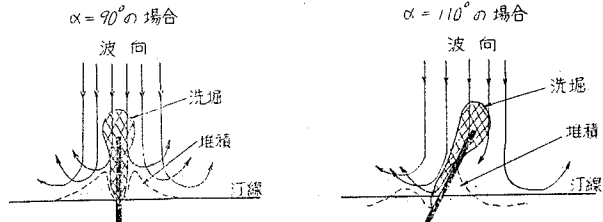
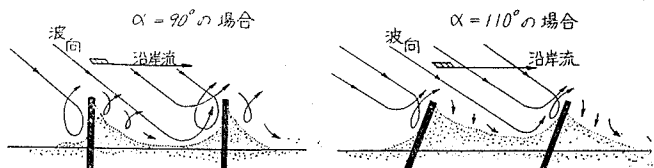


図-4 防砂堤間の堆積状況 ($\theta = 35^\circ \sim 55^\circ$)



$\alpha=110^\circ$ が最もよいのであるから、 $\beta=80^\circ$

$$\therefore D=0.174 l+0.985 l \cdot \cot \theta_s \dots\dots\dots (5)$$

$\alpha=35^\circ \sim 55^\circ$ の場合には、 $\theta_s=0.4 \theta=14^\circ \sim 22^\circ$ であるから

$$D \doteq l \cdot \cot \theta_s \dots\dots\dots (6)$$

とおいてよい。 $\cot \theta_s=4.0 \sim 2.5$ 、平均 $\cot \theta_s=3.2$ であるから

$$D \doteq 3 l \dots\dots\dots (7)$$

となる。

防砂堤の長さ $l=30 \text{ cm}$ 、 50 cm および 70 cm について、間隔を $3l$ 、 $4l$ 、 $5l$ に変化して実験したところ、 $D=3l$ のときが最もよく堆積した。 $D=3l$ の

次によく堆積したのは $D=2l$ のときであった。 $D=4l$ のときは、防砂堤間に波が入りすぎて堆積は減少した。 $D=2l$ 、 $3l$ および $4l$ の場合の堆積状況を示すと一般に図-6 のごとくである。

(2) $\theta=60^\circ \sim 90^\circ$ の場合：この場合には $\theta=35^\circ \sim 55^\circ$ の場合とは多少異なる。すな

わち波が海岸線にはほぼ直角に進んでくる場合には、碎波による沿岸流はほとんど生じないので、防砂堤付近における水の運動状態が非常に違ってくる。海岸線にはほぼ直角に進んで来た波は、海岸にあたつてのち、底部に沖方向への戻り流れを生じ、この戻り流れは寄せ波が防砂堤間に侵入することを阻止するように働く。このため $\theta=60^\circ \sim 90^\circ$ の場合には一般に堆積しにくい。この傾向は寄せ波の方向と戻り流れの方向とが一致するほどいじむしい。それゆえ、寄せ波と戻り流れの方向がなるべく一致しないように防砂堤を配置する必要がある。

実験の結果によると、防砂堤の間隔が長さの2倍のときは、戻り流れの方向と寄せ波の方向とがほとんど一致するので、防砂堤間の汀線付近の水位上昇がいじむしくなり、戻り流れが強くなる。このため寄せ波が碎波点から持ってきた砂は防砂堤の先端付近で沈澱し、汀線付近には堆積しにくい。

間隔が長さの3倍のときは、戻り流れの方向が寄せ波の方向と多少ずれてくるので、戻り流れと寄せ波とがぶつかって複雑な流れを生ずる。このためかえって砂が堆積する。初めはこの堆積は不規則であるが、時間が経つにつれて、汀線付近にカスプのごときものを生じ、戻り流れが両側から集まるようになり、その部分は多少洗掘されが他の部分の汀線付近に堆積を生ずる。

間隔が長さの4倍になると、汀線にカスプのごとき円弧を画いて、戻り流れが2~3箇所集中する傾向が強くなり、戻り流れが集まる部分以外の汀線付近に堆積を生ずる。

間隔が長さの5倍のときも、3~4倍のときと同様の傾向はあるが、防砂堤間に侵入する波のエネルギーが大き過ぎるので、汀線がかえって洗掘される。

以上の関係を図示すると図-7 のようで、一般に、防砂堤の間隔が長さの4倍のときが最もよく堆積し、ついで3倍のときが堆積が多く、2倍のときが最も堆積しにくい。

また図-8,9 および10は、波の週期 $T=1.2 \text{ sec}$ 、 $\theta=90^\circ$ の波において、防砂堤の間隔を長さの2倍、3倍および4倍にしたときの堆積状況を示す。

5) 特殊防砂堤について

(1) 潜堤：すでに述べたごとく、波が海岸線にはほぼ直角に進んで来る場合には一般に防砂堤間に砂が堆積しにくい、特に波形勾配 $\delta_0=0.02$ 前後の波でも波長および波高が大きく、したがつ

図-6 $\theta=35^\circ \sim 55^\circ$ 、 $\alpha=110^\circ$ の場合の防砂堤間の堆積状況

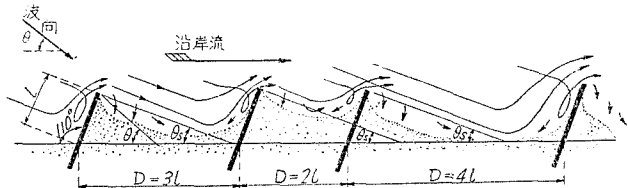


図-7 $\theta=60^\circ \sim 90^\circ$ 、 $\alpha=90^\circ$ の場合、防砂堤間の堆積状況

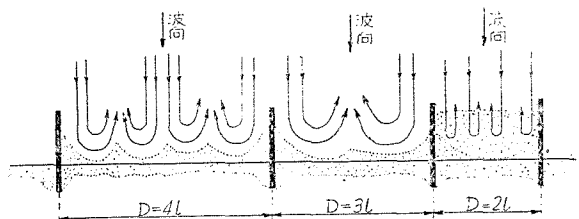


図-8 波の方向は汀線に直角、防砂堤の間隔が長さの2倍の場合



図-9 波の方向は汀線に直角、防砂堤の間隔が長さの3倍の場合

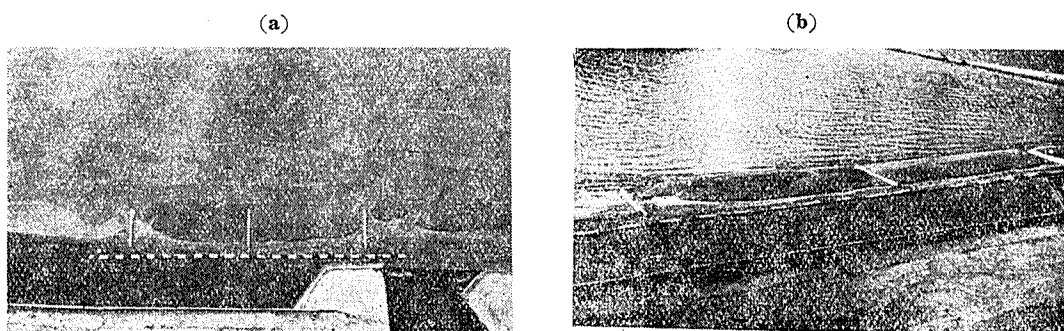
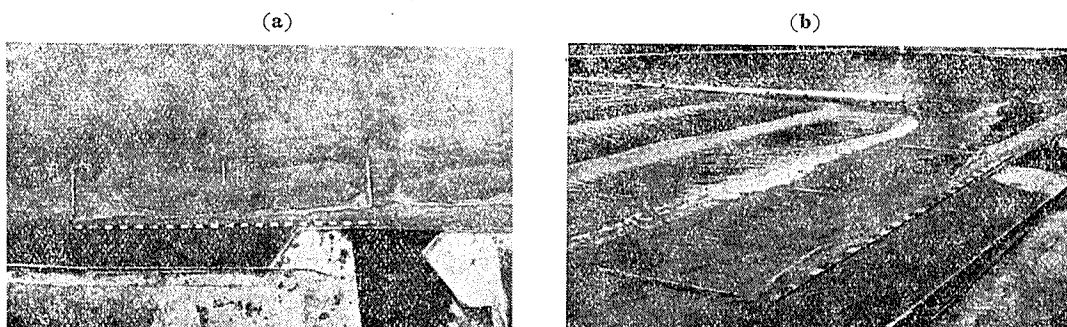


図-10 波の方向は汀線に直角、防砂堤の間隔が長さの4倍の場合



てエネルギーの大きい波が、相当長時間にわたって押し寄せる海岸においては、強い引き波および戻り流れによって海岸の砂が沖へ運び去られるので、防砂堤間の汀線付近が浸食されやすい。このため、せつかくたまつた砂を荒天時にすつかり沖へ運び去ってしまう場合が多い。このような海岸においては、防砂堤の先端に防砂堤に直角に（汀線に平行に）低い潜堤を造る場合がある³⁾⁴⁾⁵⁾。このような潜堤の効果を実験によつて検討したところ、次のごとくであつた。

(a) 潜堤によつて沖から来る波のエネルギーを減殺するとともに、砂が海岸から引き波あるいは戻り流れによつて沖の方へ運び去られようとするのを阻止する。

(b) 潜堤の高さは干満の差によつても異なるが、大体において、先端にて平均水面くらいとするのがよい。あまり高くすると、潜堤の前面で砕波するので、波のエネルギーを減殺する効果は強いが、潜堤の前面あるいは後面がはなはだしく洗掘されて、潜堤が破壊されるおそれがある。反対にあまり低過ぎても満潮時に効果が少ないが、ほぼ平均水面くらいの高さにして、天端の巾を広くして、波のエネルギーを適当に減殺するようにするのがよい。

(c) 潜堤はなるべく連続堤にした方がよい。縦堤の中間で切つてT字形にすると、切つた部分に海岸よりの戻り流れが集中し、その部分に深掘れを生ずる。

(d) 潜堤の構造は巾の広い透過工とした方がよい。

すでに第1報でも紹介したごとく、新潟港ではT字形の防砂堤および連続潜堤の間を縦堤で適当に区切つた防砂堤によつて、海岸の浸食を防いでいる。またここでも潜堤は透過工がよいといつている³⁾⁴⁾。

また米国ミシガン湖畔のシカゴでも、海岸より 90 m~150 m、水深 6 m のところに、天端巾 3.5 m、法 1:1.5 の梯形断面の捨石潜堤を造り、両端を縦堤で陸岸に連絡した結果、潜堤と陸岸との間によく堆積したと報告している⁵⁾。

図-11 および 12 は、波の方向がともに海岸線に直角で、波の週期 $T=1.2$ sec、防砂堤の間隔は長さの4倍の場合に、潜堤の長さが間隔のそれぞれ $1/3$ および $1/2$ のときの堆積状況を示す。図-11 より図-12 の場合の方がよく堆積していることがわかる。潜堤は捨モルタルブロックの堤である。

(2) 中間突起堤： 潜堤に類似した方法として、直角防堤の中間に、海岸に平行（すなわち防砂堤に直角）に短

3) 黒田静夫：「新潟港における海岸防護工事」，第18回国際航路会議，港湾技術要報，No. 9，1954.8。

4) 竹内良夫：「新潟港海岸欠損と防災工事」，港湾技術要報 No. 10，1954.12。

5) R. Minikin. Coast Protection, The Dock and Harbour Auth. 1948~1949.

図-11 $\theta=90^\circ$, $T=1.2 \text{ sec}$, $D=4 \text{ l}$ で、潜堤の長さが $\frac{1}{2}D$ の場合

(a)

(b)

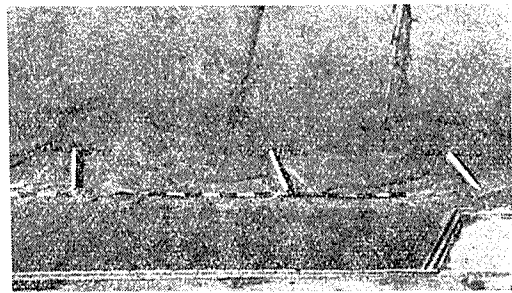
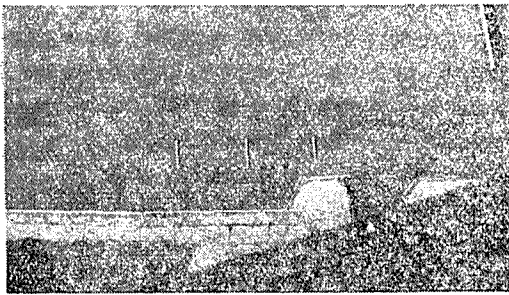


図-12 $\theta=90^\circ$, $T=1.2 \text{ sec}$, $D=4 \text{ l}$ で、潜堤の長さが $\frac{1}{3}D$ の場合

(a)

(b)



い突起堤を突出することは、いたずらに防砂堤間の水面を混乱させるのみで堆積の効果は少ない。

(3) 防砂堤間の護岸： 波が海岸線に直角にくる場合には、汀線が浸食されやすいので、これを防ぐために海岸に透過性および不透透性の護岸を造つて実験してみたが、潮位が低くて波が護岸を越さないときは、波が護岸につきあつてその前面を洗掘し、潮位が高くて波が護岸上を越して陸岸に押し上るときは、引き波が護岸上を溢流するとき、あるいは護岸の間を流過するとき、護岸の前後面を洗掘するのでよくない。護岸によつて海岸の浸食を防ぐには、いかなる場合にも波が越さない、高い、頑丈な海岸護岸を造るべきである。

付記 この研究は昭和 29 年度および 30 年度、文部省総合研究「海岸工学の基礎的研究」の一部である。

またこの実験には当研究室の助手久保弘一工学士、山本 宏君、藤原義一君等の援助を得た。ここに記して謝意を表わす。