

護岸前面海底地形の変化に関する一実験

沼田 淳*・和田 信**

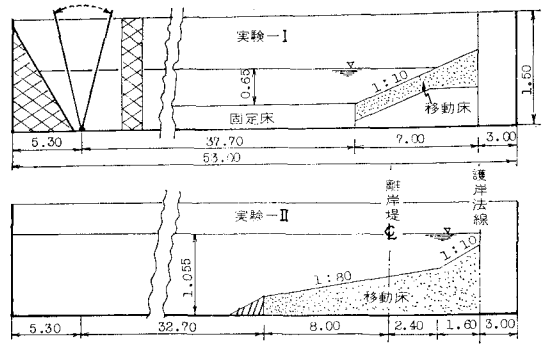
1. 緒 言

海岸護岸の設置に伴って、護岸前面の海底地形が複雑な変化を示すことは良く知られた事実である。したがって、海岸護岸の設計や施工にあたっては、堤脚部の洗掘、さらに護岸前面一帯の海浜形状に関する海岸工学的研究が重要となる。このため、この種の問題に対する内外の研究も数多く、これらの研究によって、重複波領域における直立壁前面の洗掘機構についてはかなりの成果が得られている^{1)~3)}。また、碎波帯内にある護岸の洗掘機構についても、着々その成果が得られているが^{4)~6)}、支配要因が多いため、現地海岸への適用にあたっては、なおかなりの問題があるように思われる。特に、消波ブロックを前面に配置した海岸護岸の場合、個々のブロックの安定性よりも、趾端洗掘によるブロックの沈下・滑動によると思われる災害が多いにもかかわらず、その機構・規模等についての知識が不十分なため、試行錯誤的な対策がとられている現状である。そこで、著者らは、碎波帯に設置されるこの種の構造物の設計資料を得る目的で二、三の実験を行ない、若干の成果を得たのでその結果を報告する。なお、本実験は、一様勾配の砂浜上に直接護岸を設置して実験を開始したもので、平衡勾配に達した自然海浜上に護岸を設置して行なっている従来の実験とは初期条件が異なっているが、このような初期条件の相違が洗掘形式におよぼす影響について興味ある結果が得られた。

2. 実験装置および実験方法

実験は、東北大学工学部土木工学科の風洞付造波水路を用いて行なった。この水槽は、図一1に示すように、長さ53m、幅1m、高さ1.5mの鋼製一部片面ガラス張りであって、水槽の一端には図示のような傾斜部を設け、他端にはフラップ式造波機が設置されている。実験に用いた底質は仙台新港産の海砂（比重2.67、中央粒径 $d_{50}=0.3\sim0.38\text{mm}$ 、陶汰係数 $S_0=1.24$ ）である。

実験は所定の位置に護岸を設置した後、図一1に示すような海底地形を作成し、注水によって海底底質を十分締め固めてから、一定の特性を持つ波を8時間作用させ



図一1 実験水路（単位：m）

表一1 実験条件

	No.	$T(\text{sec})$	$H_0(\text{cm})$	$\frac{d_{50}}{(\text{mm})}$	$\frac{H_0}{L_0}$	$\frac{H_0}{d_{50}}$	$\frac{X}{X_0}$
実験 I	1-0	2.1	11.8	0.3	0.016	392	0
	1-1						0.26
	1-2						0.51
	1-3						0.78
	2-0	1.6	13.5	0.3	0.034	450	0
	2-1						0.24
	2-2						0.47
	2-3						0.74
実験 II	3-1	2.04	9.86	0.38	0.0152	259	0.37
	3-2		13.40		0.0206	353	0.28
	4-1	2.4	19.1	0.38	0.0213	503	0.05
	4-2		29.9		0.0333	787	0.02

た。護岸前面の海底形状は造波後5分、15分、30分、1時間、2時間、3時間、5時間ごとに造波機を止め、初期海底地形からの堆積高・洗掘高として測定した。波高分布は最終地形測定後に、地形測定範囲を電気抵抗線式波高計で10cm間隔ごとに測定し、反射率は固定床の一樣水深部を定速走行する台車に据えられた電気抵抗線式波高計の記録を用いた。実験波の特性は表一1に示すようであるが、表中の X および X_0 は、それぞれ初期海底地形の汀線から護岸法線および無堤時の初期海底地形に対する碎波点までの水平距離で、碎波点の位置は合田⁷⁾による新碎波指標より求めたものである。実験Iでは直立護岸とその前面に消波ブロックを配置したいわゆる消波護岸とについて、実験IIでは消波護岸のみの場合と消波護岸の沖合4mの地点に離岸堤を設置した場合とについてそれぞれ表一1に示す実験条件に対する実験を

* 正会員 東北大学助教授 工学部土木工学科
** 正会員 運輸省第四港湾建設局

行なった。なお、No. 1 と 3 および No. 2 と 4 の実験波はそれぞれ正常海浜および暴風海浜に対応する。

3. 実験結果および考察

(1) 実験条件に対する反射率

図-2 は、実験 I において、砕波帯内の種々の位置に護岸を設置したときの波の反射率の変化を横軸に X/X_b 、縦軸に有堤時の反射率 r_f と無堤時の自然海浜の反射率 r_e ($H_0/L_0=0.016$ のとき 8%, $H_0/L_0=0.034$ のとき 6%) との比 r_f/r_e を取り、 H_0/L_0 をパラメーターとして示したものである。 X/X_b が大きくなるにつれ r_f/r_e の値が

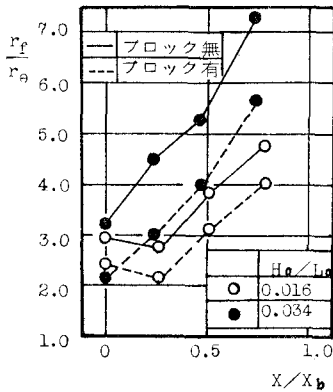


図-2 X/X_b と r_f/r_e の関係

大きくなるが、この傾向は波形勾配の大きい波の方が顕著であることおよび $X/X_b=0$ のとき、 r_f/r_e におよぼす H_0/L_0 の効果は顕著でなくほぼ一定になることなど、野田ら⁸⁾の実験結果と定性的には一致した傾向が認められる。前面にブロックを設置した場合も全く同様の傾向を示すが反射率は減少する。その減少の比率は、波形勾配の大きい波の方が大きくなるようである。なお、実験 II の場合の反射率は図-2 にプロットしなかったが、 $r_f/r_e=2.0\sim3.0$ であった。

(2) 堤脚部の洗掘

前に、No. 1, 3 および No. 2, 4 の実験は、それぞれ正常海浜および暴風海浜に属することを述べたが、無堤時の実験によってそれが立証されている。

図-3 は、実験 I の結果から堤脚部水深の当初水深からの変化量 Δh (+ は堆積, - は洗掘) の時間的変化が護岸の設置位置、ブロックの有無および正常海浜・暴風海浜によってどのように変化するかを調べるため、横軸に波の作用時間 t と波の周期 T との比 t/T を、縦軸に Δh と沖波波高 H_0 との比 $\Delta h/H_0$ をとって図示したものである。

(a) は、 $X/X_b=0$ 、すなわち汀線に堤防を設置した場合である。この場合、砕波形式は Plunging 型を終始保ち、自然海浜に近い砂移動を呈する。したがって正常海浜の

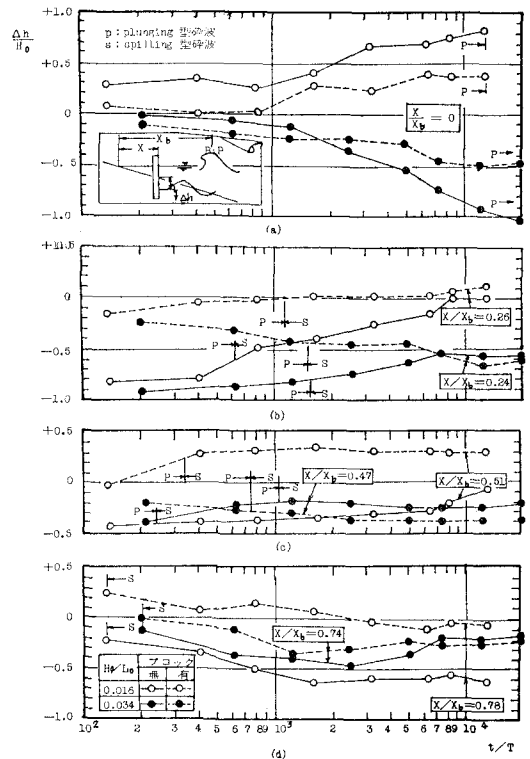


図-3 堤脚部洗掘深の時間的変化

場合は堤防前面に砂が徐々に堆積し、洗掘は起こらないが、暴風海浜では逆に洗掘が進行する。佐藤ら⁹⁾および樫木ら⁴⁾の実験では、汀線に護岸を設置した場合、当初から堆積あるいは洗掘が徐々に進行する形式はない。この相違は前述した初期条件の相違によるものと考えられる。平衡勾配に達した断面は、その波によってもはや変化しないという定常の状態にあり、浸食・堆積に関して最も安定な断面である。したがって、平衡勾配の汀線付近に堤防を設けても砕波状況におよぼす影響は少なく、堤防の設置によって戻り流れが卓越し堤脚部が洗掘されることが考えられる。一方、一様勾配の海浜の場合、堤防の位置が砕波に与える効果が少なければ少ないほど、海浜は無堤時の最も安定である平衡勾配に近づくように砂が移動し、この結果、正常海浜であれば堆積現象が、暴風海浜であれば洗掘現象が継続するものと思われる。なお、消波護岸の場合、直立護岸に比べ堆積および洗掘量とも半減している点が注目される。

(b), (c) は、 $X/X_b=0.25\sim0.50$ の位置に護岸を設置した場合である。直立護岸の場合、正常海浜、暴風海浜ともに造波直後の波により急激に掘られた後徐々に埋め戻されている。正常海浜の場合を比較すると、(b) の埋め戻し量が極端に大きくなっている。これは、(b) の場合 t/T が約 10^3 程度まで Plunging 型砕波を持続するが、この期間中に正常海浜としての堆積作用が著しいのに対し、

(c) では造波直後から Spilling 型碎波に移行し、正常海浜としての堆積作用がほとんどなかったためと考えられる。つまり、後者では護岸設置による戻り流れの減少に起因する埋め戻しのみが生じたのに対し、前者ではこれに正常海浜としての堆積作用が加味されたためであろう。このことは、両者とも Spilling 型碎波となった $t/T \approx 10^3$ 以降の海底地形がほとんど同様な変化を示していることから推察されよう。一方、暴風海浜の場合、 $t/T \approx 10^3$ 程度まで Plunging 型碎波が続くが、暴風海浜の欠漬性が埋め戻し作用と平衡するためか正常海浜に比べ、埋め戻し量が少なく、この場合の洗掘形式は佐藤らの実験結果とほぼ一致している。なお、この位置に消波護岸を設置すると、直立護岸のときに見られたような造波直後の急激な洗掘はなく、正常海浜では徐々に堆積が暴風海浜では徐々に洗掘が進行し、汀線に護岸を設置した場合とほぼ同じような傾向を示す。特に暴風海浜の場合、ブロックを設置すると直立護岸に見られた埋め戻し現象が全くなくなる点が注目される。

(d) は、 $X/X_0 = 0.7 \sim 0.8$ 、すなわち碎波点が堤防直前にある場合の実験である。この場合は碎波が完全でなく部分重複波の影響で徐々に洗掘が進行しているが、暴風海浜の場合若干埋め戻しが生じている。この原因は明らかでないが、碎波点の移動に伴う砂移動によるものではないかと考えられる。この場合の洗掘形式も佐藤らの実験結果とほぼ一致している。

(3) ブロック下部の洗掘

前節では、護岸の設置位置を変化させて行なった実験 I の結果について考察したが、本節では汀線付近に消波護岸を設置した場合の実験 II の結果から、主として離岸堤の有無によるブロック下部の洗掘に着目して考察した。図-4 は離岸堤がない場合のブロック下部の最大洗

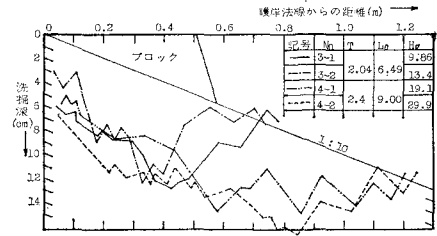


図-5 護岸ブロック下部の最終洗掘形状

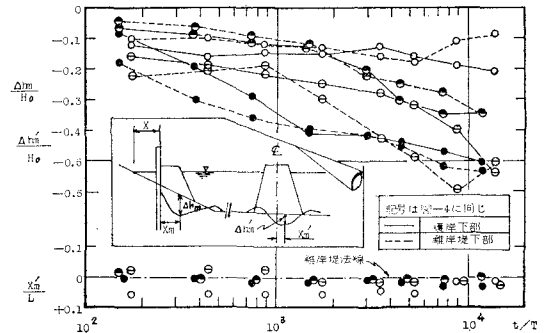


図-6 護岸ブロック下部の最大洗掘深と離岸堤下部の最大洗掘深およびその位置の時間的变化

掘深 Δh_m および最大洗掘を生じた位置の護岸法線からの距離 X_m を H_0 および L_0 で無次元化したものの時間的变化を示したものである。これによると、最大洗掘深 Δh_m は、正常海浜・暴風海浜ともに一般的には時間の経過とともに徐々に増大する傾向を示している。一方 X_m はかなり大きい変動を示す場合も見受けられるが、一般には、時間の経過とともに若干岸に移動するかほとんど不変であるといえることができよう。しかし、その位置 X_m/L_0 の値は離岸堤のない場合 0.04~0.08 程度である。なお、ブロック下部の洗掘を受ける範囲は、図-5 に見られるように沖波波長が大きいほど大きくなる傾向を示しているが、その距離は護岸法線から約 $L_0/8$ 程度の範囲である。

図-6 は、離岸堤がある場合の実験結果を図-4 と同様な方法で図示したもので、離岸堤下部の最大洗掘深およびその位置の時間的な変化も併記した。離岸堤を設置すると、離岸堤のない場合に比べ初期洗掘は非常に小さく、離岸堤の効果が明瞭であるが、離岸堤下部が洗掘を受け離岸堤が沈下して消波機能が減少するにしたがって護岸ブロック下部の洗掘が進行し、最大洗掘深は、特に暴風海浜の場合、離岸堤なしの場合と比べほとんどその差が認められなくなる。

(4) Sand Wave 発生状況および規模

堤防前面一帯は、部分重複波の影響を受けて特徴ある変化を示す。観察によると造波後間もなく部分重複

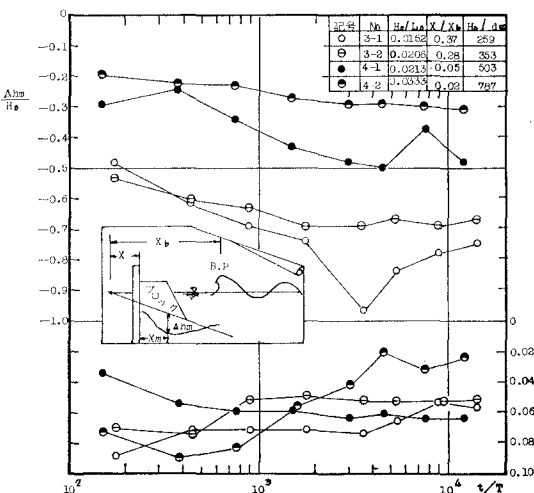


図-4 護岸ブロック部の最大洗掘深およびその位置の時間的变化

おける質量輸送速度の相対的速度差が大きくなり、より顕著な Sand Wave が生ずると思われるが、観測によると反射率の増大に伴って必ずしも Sand Wave の波高が大きくなり、その発達には限界があるものと推察される。さらに $U_{0i}(1+r)$ ($U_{0i}=\pi H_i/T \sinh kh$) が大きくなると乱流域に入り、層流におけるほど輸送速度の相対的速度差による掃流力の差が現われないものと思われる。また波動などの外力と砂の安息角などを考慮した平衡条件から Sand Wave の波形勾配にも限界が存在することが想像される。このような観点から底面最大速度を反射率の効果を含めて表現し、砂の抵抗力を用いて無次元化した $N=U_{0i}(1+r)/\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd_{50}}$ を横軸にとり、Sand Wave の波形勾配 H_s/L_s との相関をとったのが図-11である。No. 1, 2 および 3 の実験値はそれぞれ初期海底勾配 1/10 および 1/80 の所でのもので、前者の場合の最大包絡線を点線で示したが、この場合には $N=5.5$ 付近で、また $H_s/L_s=0.06$ あたりに発達の限界点があるように思われる。しかし、後者の場合 H_s/L_s が 0.08 以上になることもあり、Sand Wave の発達限界には、海底勾配の影響が大きいようにも思われるが、実験ケースが少いためはっきりしたことはいえない。

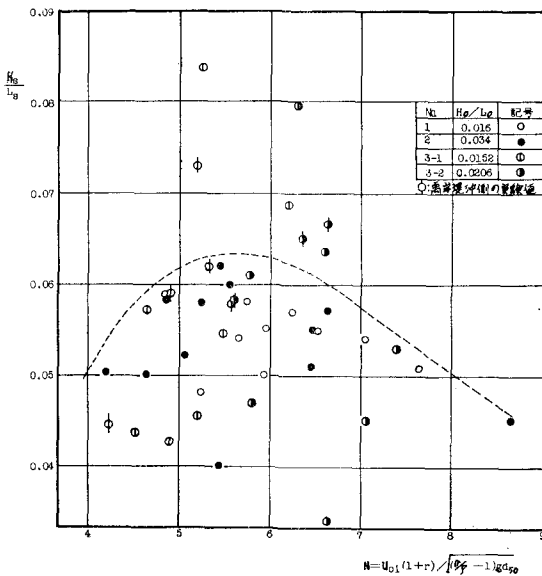


図-11 Sand Wave の波形勾配

なお、No. 4 の砕波帯内に発生した Sand Wave については N の算定があいまいとなるため同図にはプロットしなかった。この場合の波形勾配は 0.04~0.09 と広い範囲に分布するが、No. 3 の実験すなわち砕波帯より沖側の実験値に比べ一般に波形勾配が大きくなるようである。

5. 結 言

以上、実験範囲が狭く、一般的な結論を得るまでには至らなかったが、護岸脚部洗掘に対する履歴効果、消波護岸および離岸堤による脚部の洗掘防止効果、Sand Wave の発生規模などについて、定性的に若干興味ある結果を示すことができた。

最後に、終始ご指導いただいた東北大学岩崎教授に深謝致します。また、実験に多大の協力を得た東北大学職員 佐藤弘、当時学生の新谷寛両君にも感謝の意を表します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費「波浪災害に関する総合的研究」(代表者: 岩垣雄一教授) の援助を受けた。

参 考 文 献

- 1) 榎木 亨: 海岸堤防基部の洗掘機構に関する研究, 第 14 回海岸工学講演会講演集, pp. 329~335 (1967)
- 2) 野田英明: 波動境界層における質量輸送と海底の洗掘, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 59~66 (1970)
- 3) Herbich, J. B. and Ko, S. C.: Scour of Sand Beaches in Front of Seawalls, Proc. 11 th Conf. on Coastal Eng., pp.622~643 (1968)
- 4) 榎木 亨・川崎芳一: 海岸堤防脚部の洗掘について, 京大防災研究所年報, 第 4 号, pp. 198~209 (1961)
- 5) 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的洗掘実験, 第 13 回海岸工学講演会講演集, pp. 156~161 (1966)
- 6) 榎木 亨・高畑市三: 海岸堤防堤脚部の局所洗掘機構について, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 371~376 (1971)
- 7) 合田良実: 砕波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 第180号, pp. 39~49 (1970)
- 8) 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)