

海岸護岸堤脚部の洗掘に関する実験的研究

佐伯 浩*・佐藤 俊哉**・小野 敏行***・浜中建一郎****

1. ま え が き

沿岸部に都市が発達し、鉄道・道路等の交通施設も臨海部に建設されている我が国では、海岸保全の重要性が認識されてはいるが、海岸護岸の破損例や護岸を設置したため前浜の消失を助長した例が多数報告されている。また最近では海岸の面的防御の必要性が説かれてはいるが、地形上あるいは海岸線に家屋や交通施設が隣接している我が国では護岸に頼らねばならない海岸が非常に多い。また、護岸被災の原因では、護岸脚部の洗掘・侵食によるものが実に全体の 40% 以上に達している事が報告されている。実際の護岸の被害例では、単調な海岸線であっても、被害箇所は比較的等間隔に近く、海浜流等の影響も受けていて三次元実験も必要と思われるが、今までの護岸近傍の洗掘に関する実験が急勾配に対して行われたものが多いので本研究では水底勾配、1/10、1/30、1/50 と広範囲の実験を行ない、護岸堤脚部の洗掘深と護岸設置位置・設置水深・護岸法勾配・初期水底勾配それに波の反射率の関係を明らかにしたものである。

2. 実験装置と実験方法

(1) 実験装置と実験方法

実験は長さ 24 m、幅 0.6 m、深さ 1.0 m の両面ガラス張り鋼製水路で行なわれた。初期水底勾配 S は 1/10、1/30、1/50 で用いた砂は 50% 通過粒径 d_{50} が 0.033 cm である。護岸の法面勾配 α は任意に変化できるが、主に 90° と 33.7° で、 $S=1/30$ に対しては 63.4° で実験が行われた。砂層の厚さは 18~40 cm である。実験の手順は、他の研究者と同様に、まず初期海底勾配を造り、所定の波を 10~18 時間作用させて平衡海底断面を造る。次に所定の位置に護岸を設置する。その後、また決められた波をあてて護岸近傍の洗掘量と波の反射率を測定する。実験開始直後は比較的急激に護岸堤脚部近傍で洗掘や堆積が起こるので、数分間隔で測定し、1 時間経過後

は 1 時間毎に測定する。そして洗掘深さ、洗掘形状が定常状態になるまで 5~12 時間波を作用させた。

(2) 実験に用いる波の選択

本実験では、まず海岸の平衡断面を造った後、目的とする実験を行なう。波の選択に当っては過去に行なわれた研究成果を基に決定された。J. W. Johnson は沖波波形勾配によって、Bar 型と Step 一の平衡断面形状に分けられる事を明らかにしたが、岩垣・野田は、沖波波形勾配のみでなく、沖波波高と粒径 d_{50} の比 H_0/d_{50} の二つのパラメータで Bar 型と Step 型に分けられる事を明らかにした。その後、緩勾配での長時間の実験が行なわれてから、それ以前の平衡断面形状と若干異ってきた。堀川・砂村等は二次実験の結果をもとに汀線近傍の平衡断面形状に関して次式を得た。

$$\frac{H_0}{L_0} = C \cdot (\tan \beta)^{-0.27} \cdot \left(\frac{d}{L_0}\right)^{0.67} \dots\dots\dots (1)$$

ここで (H_0/L_0) は沖波波形勾配、 $\tan \beta$ は海底勾配、 d は粒径、 L_0 は沖波波長で、 $C \geq 10$ ならば汀線は後退し侵食となり、 $C \leq 3$ ならば汀線は前進し堆積型となり、それぞれ Type I、Type III とする。また $3 \leq C \leq 10$ では一般的に汀線は前進するが、さらに波を作用すると、Swash bar を形成しつつ汀線が後退するような場合で Type II とする。また、尾崎・曳田は緩勾配での実験と堀川・砂村、Rector, Saville 等の結果を再整理して次の分類を示した。

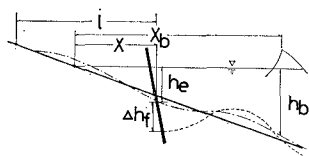
表—1

S	H_0/L_0	T (s)	H_0 (cm)	堀川 砂村	岩垣 野田	尾崎 曳田
1/10	0.100	0.8	10.0	Type I	Bar	Erosion
	0.005	2.8	6.0	Type III	Step	Accretion
	0.030	1.6	12.0	Type II	Bar	Erosion
1/30	0.040	0.97	5.88	Type II	Bar	Accretion
	0.067	1.31	18.03	Type I	Bar	Erosion
	0.005	2.80	6.00	Type III	Step	Accretion
	0.030	1.71	13.40	Type I	Bar	Accretion
1/50	0.040	0.97	5.88	Type I	Bar	Accretion
	0.010	2.00	6.18	Type III	Step	Accretion
	0.088	1.10	16.60	Type II	Bar	Erosion

* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 電源開発(株) 原子力部
*** 北海道大学技官 工学部土木工学科
**** 正会員 工修 北海道大学助手 工学部

$$\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{0.97} \cdot \sqrt{gH_b} \cdot d_{50}^{-1.8} \cdot \tan \beta = D \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 H_b は砕波波高である。 $D > 64$ では汀線が後退し沖に堆積が起こり、これを Type I とする。また $D < 64$ では汀線が前進するが、沖に堆積が起る場合を Type II、沖に堆積がない場合を Type III とした。以上の結果を参考にして、表—1 に示すような 10 種類の波浪条件で実験を行った。なお護岸の設置位置については、平衡状態になった時の汀線と砕波点を基準にした。本研究で用いる記号を図—1 に示す。 l は波の邇上地点から護岸設置点までの距離、 h_e は護岸設置点の堤脚水深、 Δh_f は護岸設置後に洗掘した量で+は洗掘量、-は堆積量を示す。



図—1

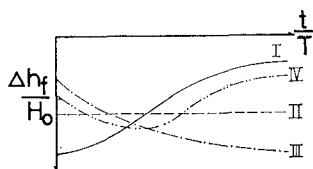
3. 実験結果

(1) 平衡断面形状

護岸の設置以前に初期海底勾配を造り、表—1 に示す波を一定時間作用させて平衡地形を造る。実験の結果は各研究者の示した平衡形状の分類と良い一致を示した。また、最終的には護岸脚部の洗掘が問題となるが、ほとんどの実験ケースで汀線方向に地形は一樣であったが、波長の短い波においては、造波水路の両面で差が見られたが、このような場合は平均値を用いた。

(2) 護岸堤脚部の洗掘の時間変化

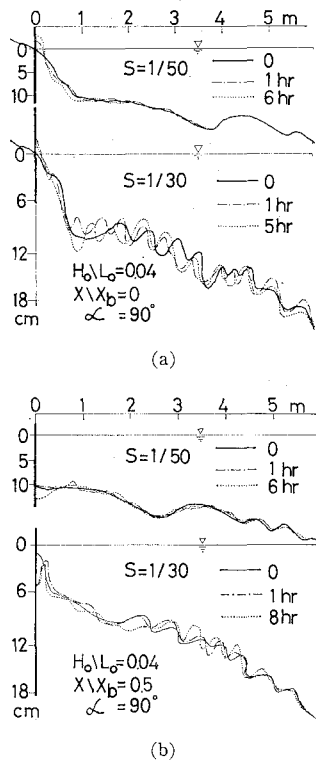
榎木・川崎は $S=1/10$ の場合の護岸堤脚部の洗掘の時間変化を調べているが、それによると、無次元洗掘量 $\Delta h_f/H_0$ の時間変化は 図—2 に示すように 4 つの Type を示す事を明らかにしている。佐藤・田中・入江も同様の結論を得ている。本研究においては、 $S=1/10$ の場合には榎木等の結果と同様に 4 つの Type が発生したが、 $S=1/30$ になると、堆積が起るか Type III が多く、まれに Type II の洗掘状況を示した。また $S=1/50$ の場合には、1 ケース以外は全て Type III で、波の作用時間の経過とともに徐々に洗掘されていった。また 1 ケースのみ



図—2

Type I に近い変形形態が見られた。この事は、護岸堤脚部の洗掘現象が初期海底勾配 S に強く影響される事を示している。

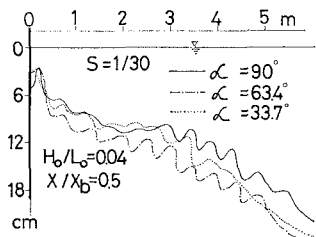
(3) 護岸近傍の洗掘の概況



図—3

図—3 に沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.040$ 、周期 0.97 秒の場合の $S=1/30$ と $1/50$ の海底変形の結果を示す。図 a, b とも護岸の法面角 α が 90° の直立の場合で、両海底勾配の場合とも護岸の設置位置が汀線 ($X/X_b=0$) の場合には、堤脚部に堆積が起り、汀線と砕波点の中間 ($X/X_b=0.5$) に設置した場合には両方とも堤脚部で洗掘が起る。しかし $S=1/50$ の場合の方が洗掘量は少ない。この事は他の条件の場合でも同様で、水底勾配が緩い程洗掘量は少ない。

次に護岸の法勾配による護岸近傍の洗掘状況を示した



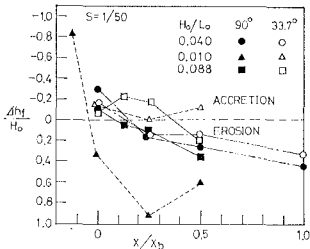
図—4

ものが図-4である。同一の波浪条件で、同一の設置位置であれば法勾配 α が緩い程、洗掘量は小さくなる。この傾向は $S=1/50$ の場合も同様であるが、 $S=1/10$ の樁木等の結果では法勾配が緩い方が逆に洗掘量が大きくなる傾向があり、海岸護岸の法勾配が洗掘に及ぼす効果は初期水底勾配によってかなり差がある事を示している。

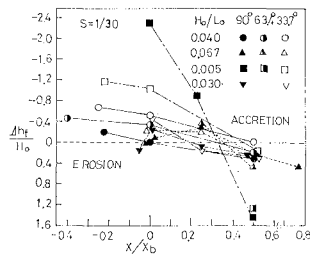
(4) 護岸の設置位置及び護岸法勾配と洗掘量の関係

護岸の堤脚水深あるいは護岸の設置位置と洗掘量の間には強い相関がある事は良く知られている。初期水底勾配 $S=1/10, 1/30, 1/50$ に対する無次元洗掘量 $\Delta h_f/H_0$ と護岸の設置位置 X/X_0 及び護岸法勾配 α の関係を図-5に示す。どの海底勾配の場合も、護岸の設置位置が碎波点($X/X_0=1$)に近づくにつれて無次元洗掘量は大きくなる傾向が見られる。また一般に、護岸の法勾配が小さい程、洗掘量は少なくなっている。また、初期水底勾配が $S=1/30, 1/50$ の場合には $X/X_0<0.25$ の範囲に護岸が設置されると、護岸堤脚部は堆積傾向が強くなるが、 $S=1/10$ の場合には、陸岸に護岸を設置しない限り堆積は起らない。また、堀川・砂村の分類のType IIIで、岩

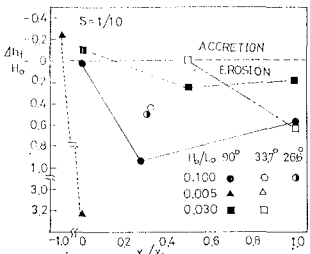
垣・野田の Step Type の条件の波では、護岸の設置位置の影響を非常に強く受ける事が明らかとなったがその理由は明確ではない。次に、 $S=1/50$ の場合の無次元堤脚水深(h_e/h_0)と洗掘量の関係を示したものが図-6である。堤脚水深が大きい程、洗掘量はふえる。一般に(h_e/h_0)が大きくなる事は、(X/X_0)が大きくなる事を意味しているので、当然の事ながら図-5の傾向と非常に良い一致を示している。次に、護岸法勾配 α が 90° と 33.7° の場合の無次元堤脚水深と洗掘量の関係を示したものが図-7である。図からも明らかなように、護岸法勾配 α が小さい方が洗掘量が少ないし、また、同一の法勾配であれば、初期水底勾配が急な程、一般的に洗掘量が多い。また、護岸法面角が 33.7° の場合には、 $X/X_0<0.2$ の範囲では堆積が起こる事も示している。



(a)



(b)



(c)

図-5

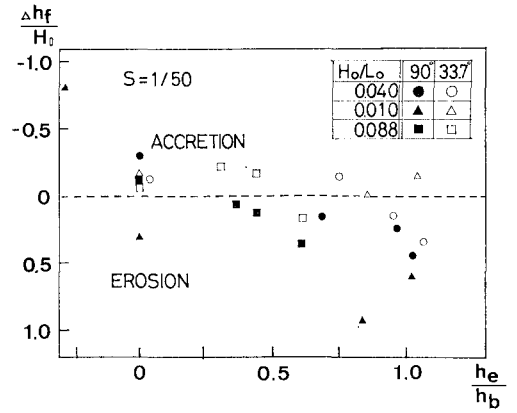
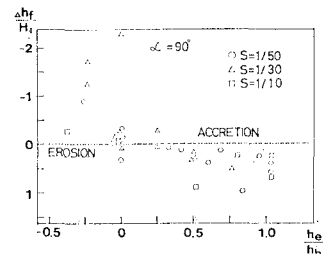
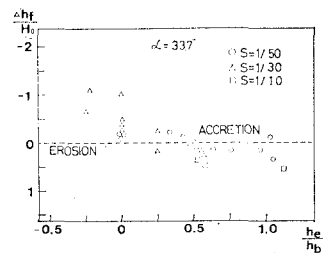


図-6



(a)

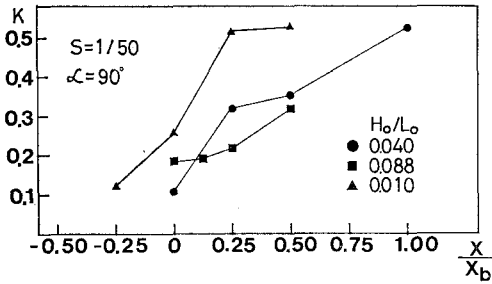


(b)

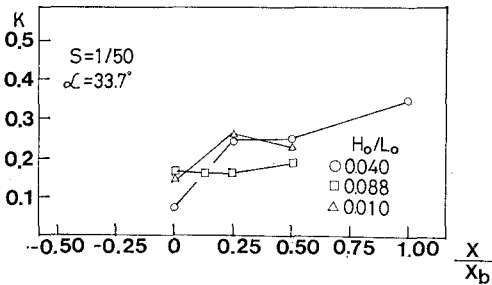
図-7

(5) 洗掘量と反射率の関係

護岸による反射率と護岸堤脚部の洗掘には強い相関がある事は榎木等の研究でも明らかにされている。護岸を設置しない平衡断面での砕波点より2波長沖側で, Healy の方法で求めた反射率 K と護岸設置位置 X/X_b の関係を示したものが 図-8 である。 X/X_b が大きくなる程



(a)



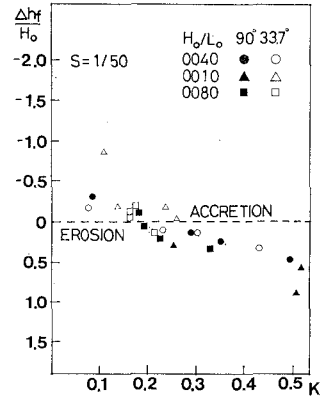
(b)

図-8

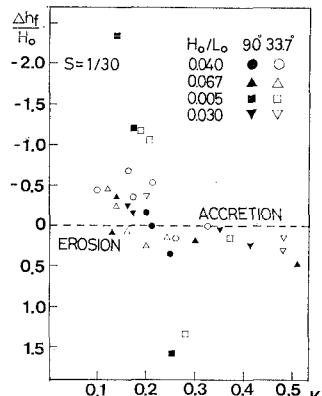
一般には堤脚水深 h_e が大きくなるため、当然の事ながら反射率は大きくなる。また、同一の沖波波形勾配・設置位置であれば、護岸法勾配 α が小さい程、反射率 K は小さくなる。これは、 $S=1/30$ の場合も同じ結果である。次に反射率と洗掘量の関係を調べたものが 図-9 である。全ての初期勾配 S に対して、反射率 K が大きくなる程、無次元洗掘量 $\Delta h_f/H_0$ が大きくなる。また、 $S=1/30, 1/50$ の比較的緩勾配の場合には、反射率 K が、 $K<0.2$ の範囲では堆積傾向が強い事を示している。また、 $S=1/10$ の急勾配の場合には、反射率と洗掘量の間には明確な相関は見い出せない。 $S=1/10$ のような急勾配の場合には、榎木等が指摘しているように、反射率より、もどり流れの流速が洗掘に影響を与えているものと思われる。

(6) 洗掘・堆積の判定条件

以上結果から判断すると、護岸堤脚部の洗掘量は沖波波形勾配 (H_0/L_0) が大きい程、大きい傾向を示す、護岸の法勾配 α が大きい程、洗掘量が大きくなる。また、底質粒径については、粒径 d_{50} が小さい程、動き易い事から洗掘量も大きくなる事が想像できる。また、護岸の設



(a)



(b)

図-9

置位置 X/X_b が大きくなると当然の事ながら洗掘量はふえる。しかし、後で述べるように汀線的位置 $X/X_b=0$ の場合、他の量の効果が現われなくなるので、護岸の設置位置については、平衡断面時の波の遇上位置から護岸設置位置までの距離 l で考えると、 l が大きい程、洗掘量はふえる。よって $(H_0/L_0) \cdot l \cdot 1/d_{50} \cdot \sin \alpha$ の積である次式は、大きい程、洗掘が起こり易い事になる。

$$\frac{H_0}{L_0} \cdot \frac{l}{d_{50}} \cdot \sin \alpha = E \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、当然の当ながら反射率 K も、増加とともに洗掘量がふえる事になる。よって、 K と $(H_0/L_0) \cdot (l/d_{50}) \cdot \sin \alpha$ によって護岸堤脚部が洗掘するか、堆積するかを調べたものが 図-10 である。図中の $\circ \cdot \square \cdot \triangle$ は洗掘しないかあるいは堆積する場合で $\bullet \cdot \blacksquare \cdot \blacktriangle$ は洗掘を示している。図中には約 70 ケースの実験結果を示したものであるが、図中の破線により、かなり明確に護岸堤脚部が洗掘するか、堆積するかを判定する事ができる。また、破線より上側に離れるに従い洗掘量が大きくなり、また下側に離れる程、堆積量も大きくなる傾向がある。

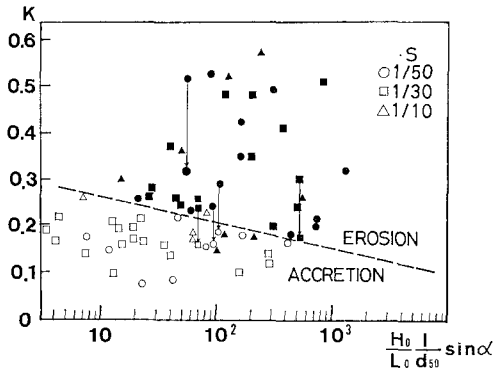


図-10

また、この遡上高から護岸までの距離 l については Saville の遡上高の実験結果を用いても良い。図-9 の妥当性の検証として、護岸前面に異形ブロックを設置して反射率を低下させる事により、洗掘から堆積へ転ずるかどうかの実験を行った。用いたブロックはテトラポッドで、3個並びの $1:1.5$ 勾配とし、天端高さは沖波波高 H_0 とほぼ同一の高さにした。実験は、 $S=1/50$ の場合は $X/X_0=0.25$ で $\alpha=90^\circ$ 、 $S=1/30$ の場合は $X/X_0=0.50$ で $\alpha=90^\circ$ で行った。図中の矢印でその変化を示しているが、反射率 K が小さくなり、洗掘から堆積に転じているものもあれば、堆積はしていないが、洗掘量が非常に減少したものもあり、図-10 を利用する事により護岸前面が洗掘するか堆積するかを判定する事が可能となった。また、護岸前面を異形ブロックで被覆する事は洗掘防止に効果がある事が明らかとなったが、長時間の実験では、ブロックの沈下も起こり、その効果も半減した事から、ブロックの沈下防止対策も必要である。

4. 結 語

本研究は比較的緩勾配の $S=1/30, 1/50$ を中心に海岸

護岸の洗掘についての実験を行ったが、今まで数多く実験されている $S=1/10$ 程度の急勾配での洗掘機構とその結果においてかなりの差が見られた。特に護岸法面勾配については逆の結果が得られた。また一般的には護岸設置位置が沖側になる程、また、設置水深が深い程洗掘し易い事が明らかになったが、特定の波では(堀川・砂村の Type III で岩垣・野田の Step Type)、特に設置位置に強く依存する事が明らかとなった。また、堤脚部の洗掘、堆積の判定のグラフを作製したが、今後は、現地でのデータとの照合も必要であろう。

参 考 文 献

- 1) 土木学会編：水理公式集，1974.
- 2) Iwagaki, Y. and H. Noda: Laboratory study of scale effects in two dimensional beach process, Proc. 8th Conf. on Coastal Eng.
- 3) 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.
- 4) 堀川清司，砂村継夫，近藤浩右：波による二次先海浜変形に関する実験的研究，第21回海岸工学講演会論文集，pp. 193~199, 1974.
- 5) 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, 1974.
- 6) 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.
- 7) 榎木 亨，川崎芳一：海岸堤防脚部の洗掘について，京大防災研年報，第4号，pp. 1~12, 1961.
- 8) 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，第13回海岸工学講演集，pp. 156~161, 1966.
- 9) 榎木 亨：海岸堤防基部の洗掘機構に関する研究(その1)，第14回海岸工学講演集，pp. 329~335, 1967.
- 10) 佐伯 浩，大井立也，尾崎 晃：海岸護岸近傍の海底変動について，土木学会北海道支部論文報告集，第40号，pp. 261~266, 1984.
- 11) 佐伯 浩，尾崎 晃：護岸と海浜地形との関係についての実験的研究，文部省科学研究成果-砂浜欠損防止工法とその適用性に関する研究- 代表者 尾崎 晃，pp. 24~38, 1984.