

II-27 海岸護岸近傍の海底変形について

旭川土木現業所富良野出張所(正) 大井立也
 北海道大学工学部 (正) 佐伯 浩
 北海道工業大学 (正) 尾崎 晃

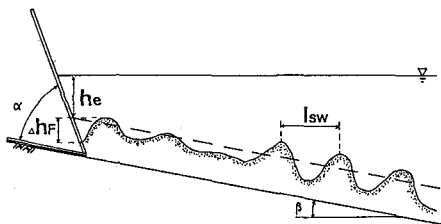
1. 緒 論 我が国は長い海岸線によって囲まれ、人口と富の大部分が海岸に集中している。しかし海岸の利用・開発が進み、人口や産業が海岸に集中してくると、海岸の保全や防護がますます重要となってくる。この海岸線を守るために海岸護岸や海岸堤防が水際線の進退を物理的に阻止するために建設されてきた。この海岸堤防や護岸自体が砂の移動を制御して海岸侵食を防止するような機能を持っているかどうか未だ不明な点が多く、護岸を設置したことによって、かえって前浜の消失が助長され、洗掘や侵食が起こり、大きな海岸災害が発生した例もいくつか報告されている。そこで本研究は任意の位置に建設した護岸に侵食型や堆積型の波がある、いかなる場合に局所洗掘や侵食が起こるか、その関係についてを目的とし、それに合せて移動床における碎波限界や波の変形を測定した。また本研究は汀線近傍における護岸の機能を調べる事が目的であるので碎波点より陸側に構造物を設置した。さて、海岸護岸や堤防の法先の洗掘に関する過去の研究成果をみると、その全てが二次元水槽を用いた実験結果に基づいている。樺木・川崎は直立壁前面の洗掘深を h ととりあげ、関係する要素を用いて無次元量を作り、粘性効果を省略して次式を得た。

$$\Delta h/H_0 = (t/T, H_0/L_0, d/H_0, h_0/H_0) \quad (1)$$

上式において、 H_0 , L_0 , h_0 は沖波の波高、波長、水深を示し、 T は波の周期、 t は起波してから経過時間、 d は砂の粒径である。また、 h_0/H_0 によって洗掘形状のタイプが4つに分けられる事を提案した。これに対して佐藤、田中、入江は樺木、川崎等の結果をもとに実験を行い、洗掘の形式が4つに分類される事と正常海波と暴風海波の洗掘特性を調べ、正常海波では最大洗掘深の最大値は巻き波の落下点付近であり、暴風海波では最大洗掘深を示す形状がW型を示す事を示した。さらに樺木は反射率を洗掘の解明のパラメータの一つとして導入し、反射率を小さくするような条件にしてやれば、ある程度洗掘をある事とできるとし、そのため複合断面を有する海岸堤防についての実験を行い、この断面が洗掘を少なくするための合理的堤防断面であると推定した。細井、荒川は波や底質粒径を変える事により堤防前面の、特に汀線より岸側における砂の移動についての実験を行った。その他、和田、西村、柳井の研究、樺木・高畑の研究とともに野田・岩佐の研究が報告されている。これらの研究は、堤防部の洗掘の形状、洗掘や侵食に影響を及ぼすパラメータの究明が主であるが、本研究は護岸堤防部近傍に堆積が起こるかそれと侵食が起こるかを調べる事と、護岸近傍の波の変形特性を明らかにしたものである。

2. 実験装置と実験の方法 実験は長さ24.0m、幅0.6m、深さ1.0mの両面ガラス張鋼製水路で行われた。図-1に示すように、水槽勾配 β は $\beta = 1/30$ で傾斜板の上に50%通過粒径($d_{50} = 0.033\text{cm}$)の砂を18cm厚に敷きつめてある。護岸の法面勾配 α は任意に変える事ができる。前述したように、初期海底勾配を $1/30$ として、一定の波を10〜13時間作用させて平衡勾配を作る。次に所定の位置に護岸を設置する。その後、波をあて、時々波を止めて海底地形の時間変化を測定する。一般に、洗掘は初期に急激に起こるので、測定間隔を初めは数分間隔とし次第にその間隔を長くして測定を行った。このようにして洗掘形状及び洗掘深が定常状態になるまで波を作用させた。その時間は5〜9時間であった。また、地形変化と同時に波高分布の時間変化を測定し、また1時間おきに反射率の測定も行った。海波変形に関する実験では、波の選抜が重要である。海底の安定形状と波の条件を最初に調べたのは

図 - 1



J.W. Johnsonであった。彼は入射波の沖波波形勾配 H_0/L_0 により 海浜横断面形が二つのパターンに分けられる事を報告した。 $H_0/L_0 > 0.025 \sim 0.030$ において bar型海浜(沿岸砂州が発生する暴風海浜)が発生し, $H_0/L_0 < 0.025 \sim 0.030$ においては Step型海浜(沿岸砂州が発生せず, 前浜付近に堆積が発生する正常海浜)が表れるとした。その後 Rector は大型模型実験を行ない, 海浜変形は沖波波形勾配と粒径はかりでなく 波高と波長の絶対値にも影響される事を示した。また P.H. Kemp は次元解析の結果から, 平衡海浜形状には砂波波高 H_b , 砂波点から最終進上までの距離 L , 砂粒子の沈降速度 w も影響する事を示した。さらに岩垣・野田は暴風海浜と正常海浜の境界には Johnson の示した沖波波形勾配のみでなく, 沖波波高と d_{50} の比 H_0/d_{50} の二つのパラメーターで二つの海浜を分類した。その後 Nayak は底質の比重と沖波波高の比が重要である事を示した。しかし最近になって 移勾配での実験, 長時間の実験が行なわれ始めて, 以前の平衡形状の考え方が若干 異ってきた。堀川・砂村は次式を提案している。

$$\frac{H_0}{L_0} = C \cdot (\tan \beta)^{-0.27} \cdot (d/L_0)^{0.67} \quad (2)$$

ここで $C \geq 10$ では汀線が後退し (Type I), $3 \leq C \leq 10$ では汀線が後退あるいは前進し (Type II), $C \leq 3$ では汀線が前進する事 (Type III) を示した。また尾崎・史田は移勾配の実験結果と堀川・砂村, Rector, Saville の結果を再整理して次の分類を示した。

$$\left. \begin{aligned} (H_0/L_0)^{0.96} \cdot \sqrt{g H_b} \cdot d_{50}^{-1.8} \cdot \tan \beta &> 64 && \text{汀線後退, 沖に堆積発生 (I 型)} \\ (H_0/L_0)^{0.96} \cdot \sqrt{g H_b} \cdot d_{50}^{-1.8} \cdot \tan \beta &< 64 && \text{汀線前進} \begin{cases} \text{沖に堆積発生 (II 型)} \\ \text{沖に堆積なし (III 型)} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

以上の結果を参考にし, 堀川・砂村の汀線変化, 尾崎・史田の汀線変化とそれに岩垣・野田の正常海浜と暴風海浜の境界の3つを参考にして, 表-1 に示す4つの種類の波を選んだ。また, 過去の研究成果から護岸の傾斜角も沈没に影響を与える事が判っているので傾斜角 α を直立 ($\alpha = 90^\circ$), 急勾配 ($\alpha = 63.4^\circ$), 緩勾配 (33.7°) の3つとした。また護岸を設置する位置は汀線, 汀線と進上高の中間点, 汀線と砂波点の中間点の3つとした。また最初の二つの波の実験から $\alpha = 63.4^\circ$ のやめ代りに護岸設置位置で汀線と砂波点の間の汀線より $1/4$ のところに実験を追加した。

3. 実験結果と考察

(1) 海岸護岸近傍の海浜変形

構造物を設置しない状態での初期海浜勾配 $\tan \beta = 1/30$ の海浜変形の一例を示す。これは表-1 に示されている C 波の場合であるが, 実験結果は堀川・砂村のものと3つの Type II であり, 尾崎・史田の示した Accretion の場合であり, 岩垣・野田の示した Step 型 (正常海浜) となり, 表-1 に示されている平衡形状の分類がよく合っている事を示している。海岸護岸を設置した場合の護岸前面の海浜変形の実測の例を図-3 ~ 図-9 に示す。これは全て沖波波形勾配が $H_0/L_0 = 0.005$ の場合である。これらの護岸設置時 ($t = 0$ hr) の海浜形状は図-2 の $t = 12$ hrs の状態である。 h_e は護岸の基脚水深であり, X は図-2 の構造物を置かない状態の $t = 12$ hrs 時の汀線から護岸までの距離で,

表 - 1

Wave	H_0 / L_0	T (sec)	H_0 (cm)	Horikawa Sunamura	Ozaki Hikita	Iwagaki Noda
A	0.040	0.97	5.88	Type II	Accretion	Bar Type
B	0.067	1.31	18.03	Type I	Erosion	Bar Type
C	0.005	2.80	6.00	Type III	Accretion	Step Type
D	0.030	1.71	13.40	Type II	Accretion	Bar Type

図 - 2

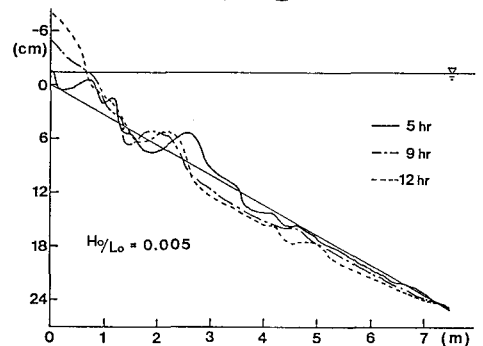
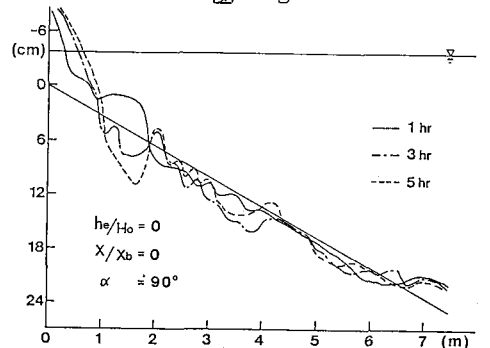


図 - 3



X_b は河線と砂
波点間の距離
で X/X_b は護岸
が砂波帯内の
どの位置にあ
るかを示して
いる。図-3.

4.5はいずれ
も護岸法面傾
斜角が $\alpha=90^\circ$

で直立の場合

であるが、図-

3は河床部、

図-4は陸上側、

図-5は河線と

砂波点の中間

点に護岸を設

置した場合で

あるが、無次

元堤脚水深

h_e/H_0 が大き

くなり、無次元

護岸設置位置

X/X_b が大き

くなるにつれ

て、堤脚部の

洗掘が起り易

い事をして

いる。 h_e/H_0

と X/X_b が

(-)の符号の時

は、陸上部に護

岸が造られた事

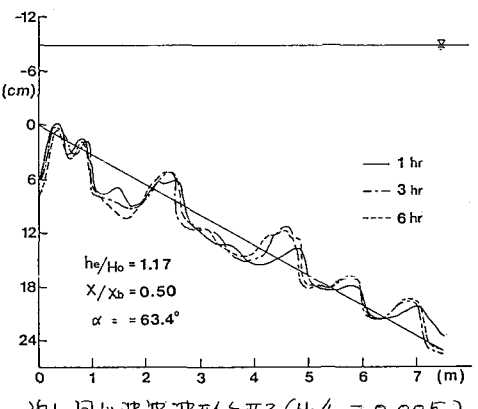
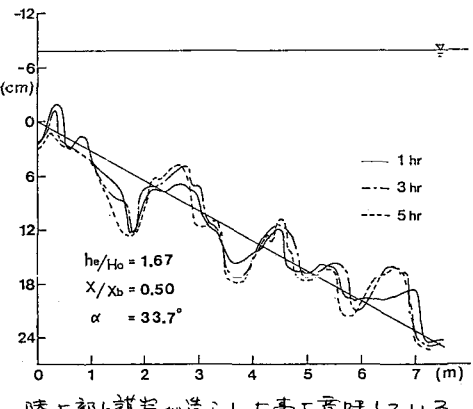
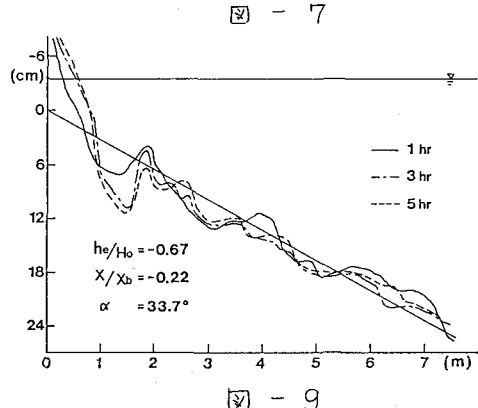
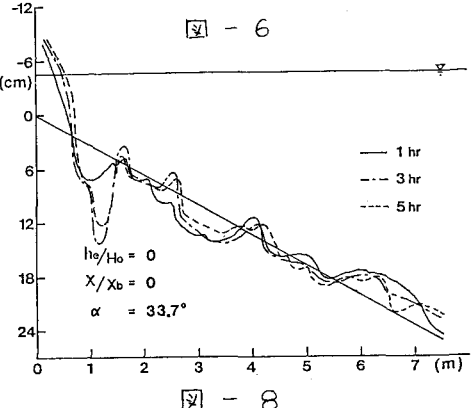
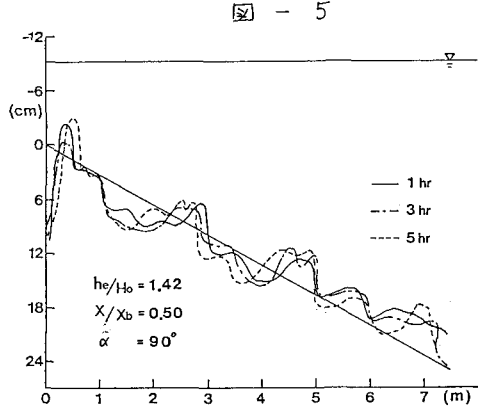
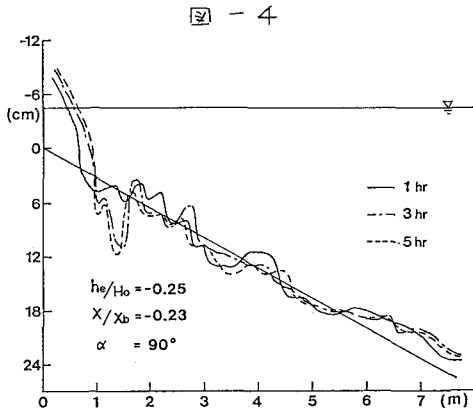
を意味している。

次に同じ波浪形

状($H_0/L_0 = 0.005$)

の場合で、護岸

法面の傾斜角が $\alpha=33.7^\circ$ の場合を示したものが図-6, 7, 8である。このように護岸の法面



たの符号の時、陸上部に護岸が造られた事を意味している。次に同じ波浪形状($H_0/L_0 = 0.005$)の場合で、護岸法面の傾斜角が $\alpha=33.7^\circ$ の場合を示したものが図-6, 7, 8である。このように護岸の法面配がゆるい場合でも堤脚水深が大きくなると堤脚部の洗掘が起り易い傾向がみられるが、 $\alpha=90^\circ$ の場合に較べると、洗掘量は非常に小さい事が判る。特に図-5, 8, 9を比較すると、これは同じ設置位置($X/X_b=0.50$)であり、ほぼ同一の堤脚水深($h_e/H_0=1.17\sim1.67$)であるが、護岸法面角が大きくなる程洗掘深(堤脚部)は大きい。この事実は、表-2のA, B, Dの波についてと同様な傾向がみられる。以上の結果から X/X_b が大きい程、 h_e/H_0 が大きい程、さらに護岸法面角 α が大きい程、護岸堤脚部が洗掘し易い事が判る。全2の実験結果を表-2に示す。まず無次元洗掘量 $\Delta h_f/H_0$ と護岸設置位置 X/X_b の関係を示したものが図-10である。 $\Delta h_f/H_0$ がマイナスの時は堆積を示し、プラスの時は洗掘を示す。図から明らかなように設置位置 X/X_b が沖側になるにつれて洗掘量が多くなり、逆に陸側に設置される程、堤脚部の堆積が顕著になってくる。また同一の護

岸法面角の場合には、沖波波形勾配 H_0/L_0 が小さい程、

堤脚部で堆積が起り易い事が明かとなったが、これは、

Johnson や岩垣・野田の結果と一致している。以上の

結果から、護岸の設置に当っては条件のゆるぎを限り、護

岸法面勾配をゆるくし、かつ設置位置をできるだけ陸

側にずらすようにした方が護岸そのものの安全にとってよい

事を示している。次に護岸前面の反射率 K と洗掘

・堆積深 $\Delta h_F/H_0$ の関係を示した結果が図-11

である。この反射率 K を求めるに当っては便宜的に

Healy の方法を用いている。図からも明らかなように

反射率 K が $K \geq 0.22$ の範囲では、護岸堤脚部で

洗掘が起り、また $K < 0.22$ の範囲では、一般に堆

積が起る事を示している。図-10, 11 からみて護岸

設置位置 X/X_b が大きくなると、当然堤脚水深 h_e

も大きくなり、護岸前面の波も進行波から部分重複

波へと移り、当然反射率 K も大きくなっていく。それ

と同時に堤脚部の洗掘深も大きくなる事を示している。また、この時護岸法面角がゆるくなると、その反射率 K

も低減できるため、洗掘量も減らす事ができる。次に、護岸前面の洗掘に関する実験結果をまとめたものを図

-12 に示す。これは護岸を置かない場合の波の迎上点から護岸設置位置までの距離を表わし、迎上高を R とする時

では $l = R \cos \beta + X$ で計算できる。 R は迎上に関する実験結果から求めている。同図より、反射率 K

が大きい程、また $(H_0/L_0) \cdot (l/d_{50}) \cdot \sin \alpha$ が大きい程、堤脚部の洗掘が起り易い事を示している。こ

の l/d_{50} は、 $(H_0/L_0) \cdot l$ 、 $\sin \alpha$ が大きくなる程、洗掘量が多くなるという上述した結果に基づいて

求めたものである。また粒径は大きい程、当然の事ながら洗掘しにくい事が岩垣・野田の結果で示

されているから分母に入れている。さて図中に破線付きの矢印が入っているが、この (a) は表-2 の Run 3 の結

果であるが、この場合堤脚部の洗掘が起るが、堤脚部に異形

ブロックを乱積したところ反射率 K が最初 $K = 0.32$ であつた

のがブロック投入後は $K = 0.16$ と減少したため、堤脚部には

ほとんど洗掘した形跡はみられなかった。また同図に於ける (b)

図-10

Accretion

Erosion

$\Delta h_F/H_0$

X/X_b

0.040 90° 63.4° 33.7°

0.067 90° 63.4° 33.7°

0.005 90° 63.4° 33.7°

0.030 90° 63.4° 33.7°

表 - 2

Run No.	H_0 / L_0	T (sec)	α	Δh_F (cm)	X / X_b	l (cm)	H_b (cm)	K
1	0.040	0.97	90	0	0	20.0	7.3	0.21
2				-1.0	-0.23	11.3	6.4	0.20
3				+1.9	+0.50	40.5	-	0.25
4				-2.0	0	22.2	5.8	0.17
5				-2.5	-0.40	12.5	6.6	0.10
6				+1.0	+0.50	44.3	5.6	0.25
7				-3.0	0	20.1	5.8	0.16
8				-4.0	-0.25	9.8	6.2	0.16
9				0	+0.50	53.3	6.6	0.32
10	0.067	1.31	90	+0.8	0	32.5	33.0	0.13
11				-6.0	+0.25	141.0	24.0	0.14
12				+4.0	+0.50	258.0	25.6	0.30
13				+9.0	+0.78	420.0	-	0.51
14				+0.7	0	31.3	25.0	0.16
15				-7.9	+0.25	160.0	29.0	0.12
16				+7.5	+0.50	280.0	31.0	0.24
17				-4.3	0	35.8	25.0	0.14
18				-4.0	+0.25	145.0	30.0	0.10
19				+4.0	+0.50	275.0	31.0	0.20
20	0.005	2.80	90	-14.0	0	50.3	14.6	0.14
21				-7.3	-0.23	26.2	14.4	0.17
22				+9.5	+0.50	175.0	25.0	0.25
23				+8.0	+0.50	175.0	12.0	0.28
24				-6.5	0	51.1	14.6	0.22
25				-7.0	-0.22	24.3	13.8	0.19
26				+1.0	+0.50	170.0	10.8	0.37
27				-3.5	0	40.1	17.5	0.16
28				+2.1	-0.05	21.2	18.5	0.17
29	0.030	1.71	90	+1.0	+0.25	220.0	20.7	0.35
30				+3.5	+0.50	430.0	33.7	0.41
31				-5.0	0	40.4	18.2	0.20
32				+2.0	+0.25	245.0	23.0	0.48
33				+4.0	+0.50	410.0	-	0.48

図 - 11

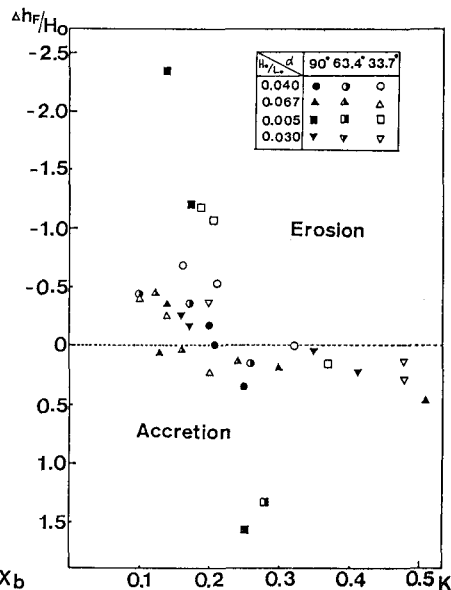


図 - 12

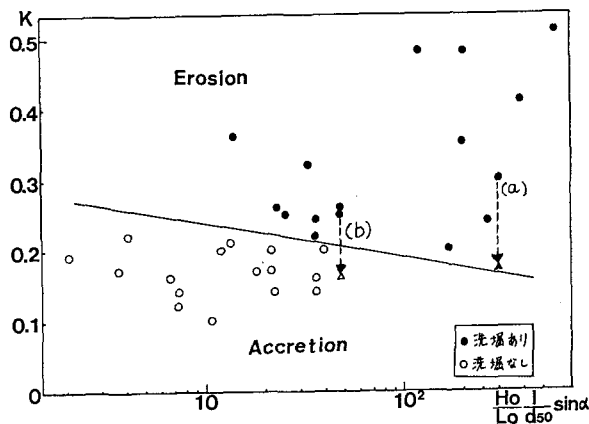


図 - 13

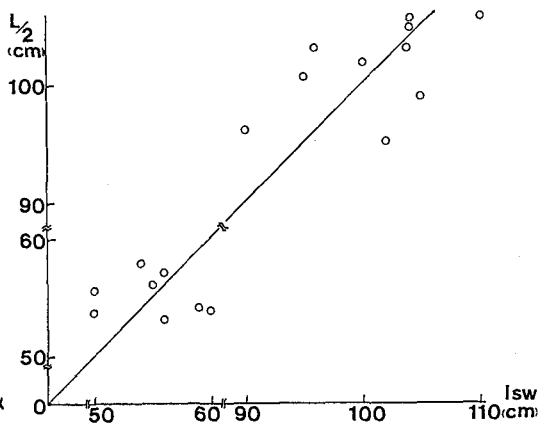


図 - 14

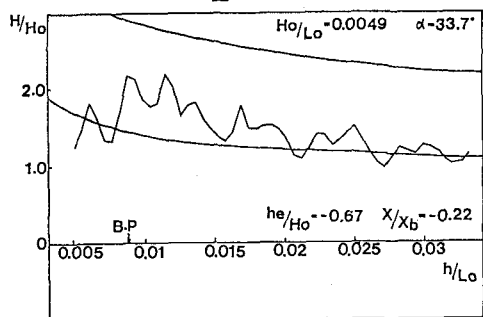


図 - 15

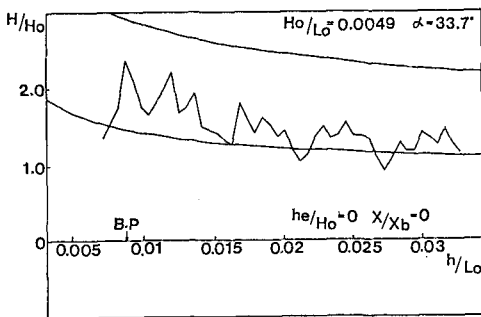


図 - 16

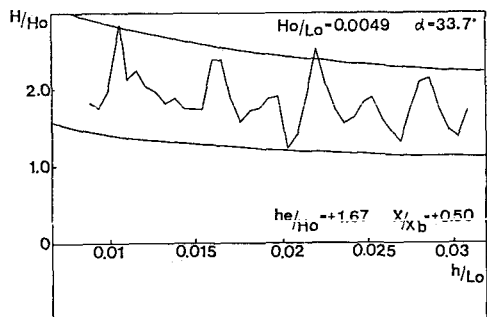
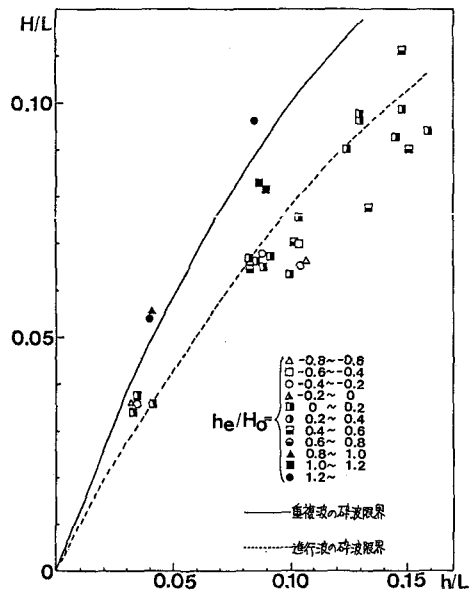


図 - 17



は、置形ブロック設置前は反射率が $K=0.25$ で、堤脚部がかかり洗掘したガブロック投入後は $K=0.17$ まで下がり、そのために堤脚部に堆積が起った事を示している。この図-12は、護岸前面が堆積するか洗掘されるかの判定をするための図であるが、し、ひを小さくしたり、護岸前面に置形ブロック等を投入する事により、反射率を低下させる事により、元来は堤脚部が洗掘するような条件の場合でも逆に堆積させる事も可能となる事が明らかとなった。また、この実験を通して、護岸前面の海底変形は激しく、洗掘・堆積は短時間内に急激に起こる事も明らかとなったので、実際の海岸堤防や護岸の設計に当っては、平均水面（設計潮位）を適切に設定する事が非常に重要となる。一般に潮位は港内

で測定された。海岸の場合には波浪によるWave Set up 等の影響も強く受けるので平均水位の設定には充分注意せねばならない。また護岸を設置した場合の海浜変形の形状をみると、部分重複波の節に Sand Wave の山が形成された。重複波においては、波の腹の位置では上下方向のみの水粒の運動、節の位置では水平方向のみの水粒の運動を行なう。と主張、腹の位置に Sand Wave の山ができるはずであるが、野田の重複波境界層内の変量輸送速度の理論計算によると、腹から節へ向う流れが卓越する事が明らかにされているので、その理論によると本実験の結果にもよくあてはまる。護岸の設置位置 $X/X_b \geq 0.25$ の場合の波の波長 L と Sand Wave の波長 l_{sw} の関係を図 14 の結果の一例が図-13 である。図から明らかなように、 l_{sw} と L は良い一致を示している。この事実は、 $X/X_b \geq 0.25$ の範囲に護岸を設置すると前面の波は部分重複波になる事を示している。

(2) 護岸近傍の波の変形

図-14, 15, 16 は沖波波形勾配 $H_0/L_0 = 0.005$, 護岸法面勾配 $\alpha = 33.7^\circ$ の場合の波高の変化を示したものである。 h_e は堤脚水深であり、 h_e/H_0 がプラスは陸上部に護岸がある事を示している。図中の下側の実線は線形波動理論に基づく波高変化の理論曲線であり、上側の実線はそれを2倍したもので、線形重複波理論による腹部波高の包絡線である。図-14, 15 に示されている護岸設置位置が訂正とにより陸側の場合には、砂浜近傍を除いては線形波動の波高変化にほぼ一致している。砂浜近傍については理論より大きい値を示しているが、これは固定床による一様斜面上の波の変形に非常に近いが、図-16 に示す $X/X_b = 0.50$ の場合には、堤脚水深も $h_e/H_0 = 1.67$ と大きいため、波は重複波に近い状態となり、線形重複波の理論波高に近い値を示している。また、この時には護岸前面では大きな洗掘が起っている。つまり波が重複波に近くなると護岸前面の洗掘量は大きくなる。次に図-17 に本実験から得られた砂浜限界を示す。図中の実線は重複波理論の砂浜限界であり、破線は進行波の理論砂浜限界である。同図より明らかなように、 $h_e/H_0 > 0.4 \sim 0.6$ の範囲では砂浜限界は重複波の場合に近くなり、このような場合には、反射率も大きく、また護岸前面の洗掘も激しくなる。

あとがき

本研究の実験に当り、北大工学部の小野敏行氏に多大の助力を得たし、データの整理等に当り北大工学部学生、渡尾暢宏、押川定生の両君のお世話になった。記し深甚なる謝意を表する。

参考文献

1. 水理公式集, 土木学会編
2. Iwagaki, Y. and H. Noda: Laboratory study of scale effects in two dimensional beach process, proc. 8th Conf. on Coastal Eng., 1963
3. Reichter, R.L.: Laboratory study of equilibrium profile of beaches, BEB Tech. Memo No. 41, 1954.
4. 樺本亨, 川崎芳一: 海岸堤防堤脚部の洗掘について, 京大防災研年報 4号, 1960
5. 佐藤昭三, 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, 1966
6. 樺本亨: 海岸堤防基部の洗掘機構に関する研究(と1), 第14回海岸工学講演会論文集, 1967
7. 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, 1972
8. 野田英明, 川嶋康宏: 浅海重複波による変量輸送, 第15回海岸工学講演会論文集, 1968
9. 佐伯浩: 海岸構造物近傍の波の変形, 第17回水工学に関する夏期研修会講義集 2号, 1981
10. 尾崎 豊: 砂浜災害防止工法とその適用性に関する研究(と1) 自然災害特別研究成果報告, 1983