

直立壁堤脚部の波による二元的洗掘実験

佐藤 昭二*・田中 則男**・入江 功***

1. 緒 言

防波堤や海岸堤防などの海岸構造物の設計、施工にあたって、堤脚部の洗掘は、まず考慮されねばならぬ重要な要素のひとつである。しかしながら、その現象が複雑であること、荒天時における現地観測が困難であることなどのために、従来これに関する研究はあまりなされていない。この問題に取組んだ研究としては、樫木¹⁾、川崎らによる海岸堤防堤脚部の洗掘に関する実験的研究のほかに、本間・堀川²⁾らの潜堤に関する研究および Russel, R.C. and Sir. C. Inglis³⁾による潮汐を加えた場合の実験があるが、まだ多くの問題が残されている。

著者らはここ数年来、洗掘全般の問題に取り組んできている⁴⁾が、ここでは、まず二次元的造波水路で行なった直立壁脚部の洗掘実験の結果を報告する。本報告は、正常海浜と暴風海浜の平衡海浜をつくり、その種々の位置に直立壁を設けて実験を行ない、洗掘機構に対する両者の相違、洗掘過程および縮尺効果に考察を加えたものである。

2. 実験装置および方法

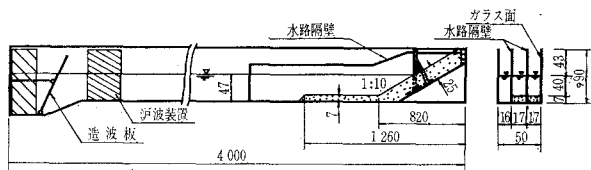
(1) 実験装置

実験には、図-1に示すように、高さ 90 cm、長さ 40 m のフラッター式中型造波水路と、高さ 2.5 m、長さ 100 m のペンデュラム式大型造波水路を用いた。

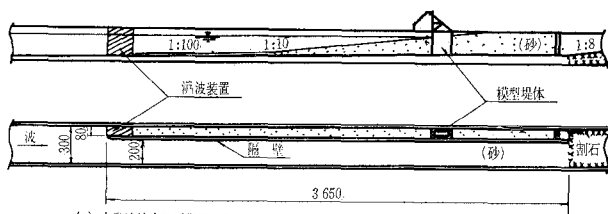
中型造波水路は、片面ガラス張り、他面コンクリート壁の造波水路で、図のように水路の一端に 1/10 勾配の固定床を取りつけ、さらに鋼板隔壁でその幅を 3 つに仕切り、ガラス面側と中央の幅 17 cm のところに、それぞれ粒径の異なる砂を入れて実験を行なった。実験砂は勾配部を 25~30 cm、その前の平坦部を 7 cm の厚さになるように敷きならべ、水深はその平坦部の砂面上 40 cm にした。

大型造波水路では、その一端をコンクリート壁で仕切り、幅 200 cm の部分に割石を置いて消波させ、幅 80

図-1 実験装置



(1) 中型造波水路 (単位cm)



(2) 大型造波水路 (単位cm)

cm の部分を用いた。中型造波水路の場合と同様に、実験砂を水路端から 1/10 勾配で敷き、その前面は 20 cm の厚さで、1/100 勾配になるように敷いた。

(2) 実験方法

実験は、まず上述のように砂を敷いた後に一定の波を 15~20 時間作用させて平衡勾配をつくる。つぎに任意の位置に直立壁を設置し、再び同じ特性の波を作用させ、時々波を止めて、堤脚部の洗掘深、海底勾配等を、水路の中心線に沿ってポイントゲージで測定する。一般に、洗掘は初めが急激に進むので、測定時間間隔を初めは数分とし、次第にその間隔を長くして行き、最後は 1~2 時間とした。このようにして、洗掘形状および深さが、定常状態になるまで波を作用させた。その時間は 1 ケースにつき、大体 6~10 時間であった。

波の測定は、中型造波水路では 1 mm ごとの接点がついた階段式波高計を用い、それぞれ増幅器を通して、ペンオシロに記録させた。

洗掘された砂の移動を追跡し、また直立壁によって入射波が影響されたときの海底における底質移動を調べるため、R.I. トレーサーを用いた。アイソトープ砂としては、実験砂の表面に Au-198 を吸着せしめたもの、および Cr-51 のガラス砂を用い、その分布は水路上の台車に取り付けられたシンチレーションプローブで測定した⁵⁾。なお、直立壁前面における波の状況、洗掘状況に関しては、写真撮影による記録も行なった。

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所

** 正会員 運輸省港湾技術研究所

*** 運輸省港湾技術研究所

(3) 実験の範囲

洗掘現象に関係する諸量は非常に多いが、それらのうち、ほぼ一定とみなされる諸量を省略すると、結局つぎの諸量を選び出すことができる。

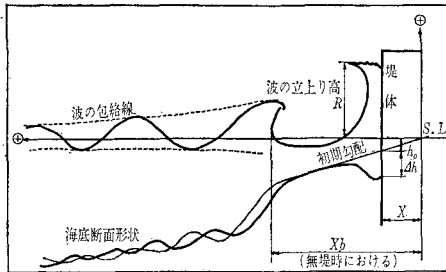
堤体の設置位置 X/X_b 、洗掘深 Δh

沖波波高 H_0 、波の周期 T

波の作用時間 t 、底質の粒径 d

ここに、 X/X_b は図-2 に示すように、汀線から直立堤体までの距離と、無堤時における汀線から砕波点までの距離の比である。

図-2 記号のとり方



したがって、沖波波高に対する相対洗掘深 $\Delta h/H_0$ はつぎのような無次元量にて表わすことができる。

$$\Delta h/H_0 = \phi(X/X_b, H_0/L_0, t/T, d/H_0)$$

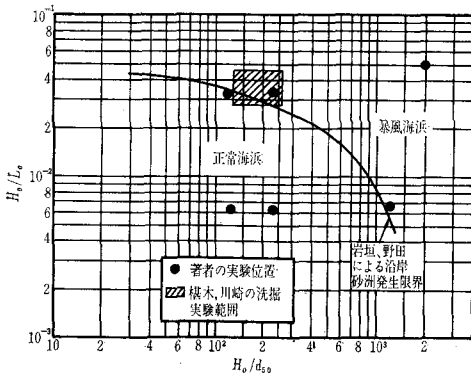
波の特性としては、表-1 に示すように正常海浜として flat な波形勾配 0.0062~0.0065、暴風海浜として、比較的 Steep な波形勾配 0.033~0.051 を用いた。

表-1 実験の種類 (×1/2)

平衡勾配	H_0/L_0	H_0 (cm)	T (sec)	d (mm)	H_0/d	d/H_0	実験装置
正常	0.0062	8.7	3.0	0.69	1.3×10^3	0.0079	中型
"	"	8.7	3.0	0.38	2.3×10^3	0.0044	"
海浜	0.0065	26.0	5.1	0.21	1.2×10^3	0.00081	大型
暴風	0.033	8.7	1.3	0.69	1.3×10^3	0.0079	中型
"	"	8.7	1.3	0.38	2.3×10^3	0.0044	"
海浜	0.051	42.4	2.3	0.21	2.0×10^3	0.00050	大型

この実験範囲を岩垣・野田による模型実験値に対する沿岸砂洲発生限界曲線と比較すると 図-3 のようにな

図-3 実験の範囲



る。この図から、 $L_0/H_0=0.0065$ で $H_0/d=1.2 \times 10^3$ 、 $H_0/L_0=0.033$ で $H_0/d=1.3 \times 10^3$ に対する平衡断面は、限界曲線の近くにあるが、後述するように断面形状からそれらはそれぞれ正常海浜および暴風海浜として整理した。また、同図には、榎木・川崎¹⁾の洗掘実験範囲も示してある。

なお、砕波点を定めることは困難であるが、この実験では波の前縁がほとんど垂直になるところを砕波点とした。

3. 洗掘深の時間的变化および堤体設置位置と洗掘深

前記のような平衡海浜の任意の位置に直立堤を取り付け、長時間波を作用させたわけであるが、堤脚部での洗掘深の時間的变化は、直立壁の設置位置により、いろいろな挙動が見られた。しかし、それらのデータは、洗掘深の時間的变化の観点から、つぎの4つの形式に分類される。

- I 急激に掘れた後、埋まる。
- II 急激に掘れた後、そのままの状態が続く。
- III 急激に掘れた後、徐々に掘れる。
- IV 初めから徐々に掘れる。

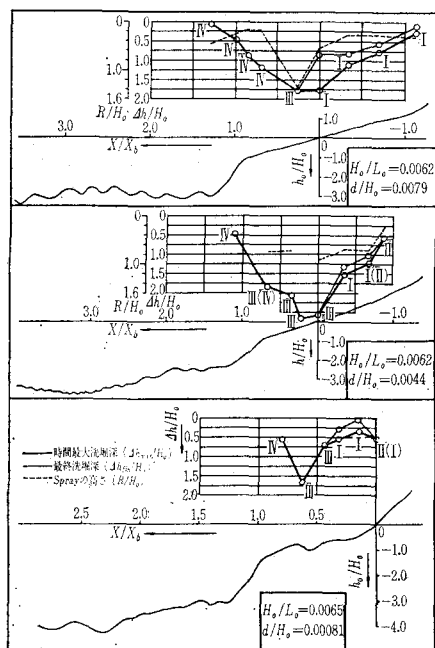
正常海浜、あるいは暴風海浜において、これらの洗掘形式が表われる位置はそれぞれ定まっているが、両者の間では、様子がかなり違っている。

図-4 は、正常海浜のいろいろな位置に、堤体を設置したときの時間最大洗掘深 $\Delta h_{\max}/H_0$ 、最終洗掘深 $\Delta h_{\text{fin}}/H_0$ 、飛沫の立上り高 R/H_0 を $d/H_0=0.0079$ 、 $d/H_0=0.0044$ 、 $d/H_0=0.00081$ なる3つの断面について示したものである。図で細線は最終洗掘深、実線は時間最大洗掘深であり、その差が埋戻し量に相当する。折れ線に沿って付してある記号は、その位置に堤体を設置したとき、上記のどの洗掘形状が見られたかを示したもので、2重の記号をもつものはその判定が困難なことを示すものである。たとえば、III(II)とあるのは、II型の性質を多分にもつIII型ということを示す。また、飛沫の立上り高は、時間的に最大洗掘深を示した頃のものである。

この図から、正常海浜における洗掘の一般的特性として、つぎのことがいえる。

- (1) 最大洗掘深は、砕波点より少し岸側、すなわち巻き波の落下点付近で起こる。
- (2) 時間最大洗掘深の断面方向の分布は、この最大値を中心にV字型をなす。
- (3) 洗掘の時間的变化は、最大洗掘深を示すところ、およびその近傍ではIII型、それより岸側で主としてI型であり、沖側ではすべてIV型である。II型は一般にI型の陸側で起こる。

図—4 正常海浜のいろいろな位置に堤体を設置したときの時間最大洗掘深、最終洗掘深、飛沫の立上り高



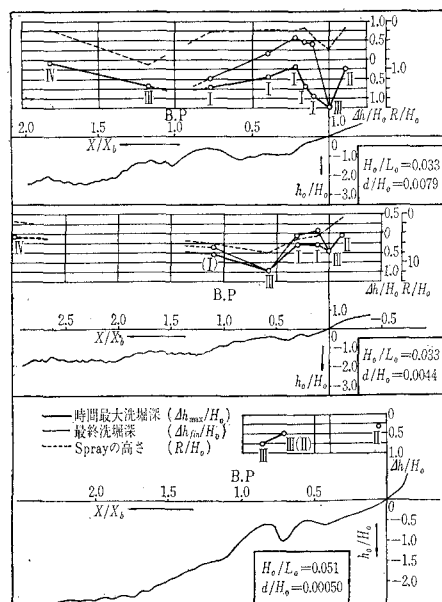
同様に、暴風海浜の場合を $d/H_0 = 0.0079$, $d/H_0 = 0.0044$, $d/H_0 = 0.00050$ なる3つの断面について示したのが、図—5である。正常海浜の場合と同様に、細線で示した最終洗掘深と、実線で示した時間最大洗掘深との差が埋戻し量に相当する。また、飛沫の立上り高も、最大洗掘深を示した頃におけるものである。

この図から、暴風海浜における洗掘の一般的傾向として、つぎのことがいえる。

- (1) 時間最大洗掘深を示す曲線は、一般に W 字形をなし、2つの極大値をもつ。一つは、第一砕波点(図—5では、B.P.と記してある)より少し岸側で、他は最終砕波点の少し岸側、すなわちそれぞれ砕波の落下点付近にある。
- (2) 洗掘深の時間的変化の分類では、極大値を示す位置付近ではⅢ型であり、その中間ではⅠ型、最終砕波点付近のⅢ型を示す位置の岸側ではⅡ型である。

以上のように、時間最大洗掘深の断面方向の分布が、正常海浜では極大値を一つもつV字形、暴風海浜では極大値を2つもつW字形であることが、両者におけるいちじるしい相違である。これは本実験範囲では前者が1回砕波、後者は2回砕波であったためであろう。砕波点の少し岸側では、砕波後、速度のいちじるしく増大した水粒子が作用するため、洗掘深はそこで極大値を示す。したがって、1回砕波の正常海浜では、砕波点の少し岸側に1つの最大値が見られるが、暴風海浜では、2回砕波のため、第1砕波点、および最終砕波点の少し岸側

図—5 暴風海浜のいろいろな位置に堤体を設置したときの時間最大洗掘深、最終洗掘深、飛沫の立上り高



に、2つの極大値が見られたのであろう。このことは、図—4、図—5において、時間最大洗掘深の大きいところでは、波の飛沫の立上り高が大きいことから、うかがえる。

また、最大洗掘深は正常海浜においては、沖波波高の2倍に近いが、暴風海浜では、沖波波高と、ほぼ同じくらいである。これは正常海浜の場合、1回砕波により、波のエネルギーが1度に流れのエネルギーに変換されているためと思われる。

岩垣・野田による沿岸砂洲の発生限界を示す図—3によれば、 $d/H_0 = 0.00081$ で $H_0/L_0 = 0.0065$ 、および $d/H_0 = 0.0079$ で $H_0/L_0 = 0.033$ の平衡断面は、それぞれ暴風海浜、正常海浜であるはずであった。

図—4において、前者、すなわち、 $d/H_0 = 0.00081$ の場合の海底断面を正常海浜の他の2つの断面とくらべると、あたかも、ステップが非常に発達しているように見えるが、ステップ上面の形状から見るとむしろ沿岸砂洲が発生しているようにも取れる。また、時間最大洗掘深の分布は、正常海浜では汀線より少し沖側に1つの極大値を有するのが一般的と思われるが、 $d/H_0 = 0.00081$ の場合は、かなり沖のいわゆる沿岸砂洲付近で極大をなし、汀線付近にいま1つの極大値を示すさざしが見られる。すなわち、時間最大洗掘深の分布が暴風海浜におけるW字形に近くなっている。

また、後者すなわち、 $d/H_0 = 0.0079$, $H_0/L_0 = 0.033$ の場合の平衡海浜は、図—5より明らかに沿岸砂洲が発生しており、暴風海浜に入れるべきであるが、同時にステップもかなり発達している。暴風海浜では、時間最大

洗掘深は、沿岸砂洲付近と汀線付近で二つの極大値をなす W 字型の分布をなすわけであるが、この場合、そのような分布をなしているとはいえ、汀線付近で非常に大きな極大値をなしており、正常海滨としての特性も現われているようである。

以上のように、入射波の特性が一定であっても、海滨を構成している砂の粒径が異なると海滨の性質も異なってくるわけであるが、それはまた、洗掘現象にも著しく影響するようである。

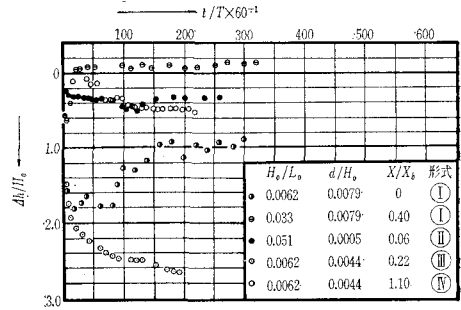
4. 洗掘機構

前節において、洗掘の時間的変化には 4 つの型があることを述べたが、ここではそれらの分類にもとづいて、実験例をあげながらその機構を考察する。

図-6 は、4 つの洗掘形式の代表的な例についての海底断面の変化を示したもので、図中細線は、まだ波を作用させないときの状態、点線はある時間波を作用させたときの状態、実線は長時間波を作用させ、定常状態になったときの状態を示す。また、I、IV 型洗掘の例では、R.I. トレーサーを用いたが、それらの結果および波を長時間作用させて、定常状態になったときの各点における波の山および谷の高さを示す線（波の包絡線）もこの図に示してある。

図-7 は、これらの場合の堤脚部における洗掘深の時

図-7 図-6 の例における洗掘深の時間的変化



間的変化をプロットしたものである。

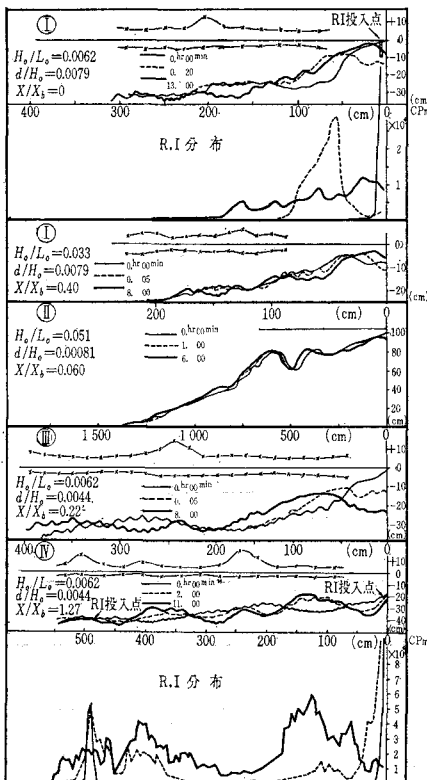
まず、I 型洗掘の例のうち、正常海滨 ($d/H_0=0.0079$, $H_0/L_0=0.0062$) の前浜 ($X/X_b=0$) に堤体を設置した場合をみてみよう。この場合は堤脚部で洗掘された砂の移動を調べるため、堤脚部の砂の一部を R.I. トレーサーと置きかえた。波作用後 20 分で、堤脚部は急激に洗掘されているが、R.I. トレーサー分布図からわかるように、洗掘された砂は、堤体の影響によって生じた不完全重複波の腹より沖へは運ばれず、大部分はステップののり面に堆積している。しかし、波作用後 13 時間では、図の実線が示すように、20 分後に大きく掘れていた洗掘孔の大部分が埋戻され、同時に堤体からすぐ沖の重複波の腹より少し岸側の海底が大きく欠壊している。土量のバランスから見て、この欠壊した砂は岸向きに移動し、ステップののり面に堆積されたことがわかる。

このように正常海滨の前浜に堤体を設置したときは、ある程度洗掘された後、常に埋戻しが見られるが、その原因はつぎのように考えられる。この領域に堤体を設置すると、碎波後の波が堤体前でいったん立ち上がり、つぎに孤立波の形で沖向へ反射されるため、無堤時にくらべて反射波の質量輸送も含めた全体としての戻り流れは増大するが、それが水表面近くに集中した形となるので結果として底に沿う戻り流れが減少する。これは、底質が岸向きに移動することを意味し、それが堤脚部の埋戻しに寄与するものと思われる。また、埋戻しに寄与する今一つの原因は、後の IV 型洗掘のところで述べるように、重複波の腹の位置を境にして、その少し沖側、および岸側の底質はそれぞれすぐ隣の沖側および岸側の節の位置へ運ばれるという作用である。上の場合に、不完全重複波の腹より少し岸側が欠壊し、ステップののり面に堆積したのは、この作用が強かったことによるであろう。

つぎに、図-6 の I 型洗掘の例で、暴風海滨 ($d/H_0=0.0079$, $H_0/L_0=0.033$) のトラフ ($X/X_b=0.40$) に堤体が設置された場合をみてみよう。

波作用後 5 分で、堤脚部は最大洗掘深に達しており、同時に沿岸砂洲付近を構成していた砂が岸方向へ移動している。定常状態に達した 8 時間後では、上の岸方向への砂の移動が堤脚部へおよんでおり、顕著な埋戻しが行

図-6 4 つの洗掘形式の代表的な例



なわれている。これは、つぎのように考えられる。暴風海浜では、砕波後2次的に発生した波がトラフ内を進行し、前浜を遡上して、底にそう戻り流れを生ぜしめるが、体をトラフ内に設置した場合、それを直接沖向きに反射することになり、その結果無堤時と比較して底にそう戻り流れが減少する。沿岸砂洲付近を構成していた砂が岸方向へ移動したのは、この原因によるものであろう。

図-4、図-5で、正常海浜の前浜、あるいは暴風海浜のトラフに堤体を設置したとき、埋戻しの著しいI型洗掘が見られたが、これは以上のような機構によるものと思われる。

堤体設置位置が、さらに岸へ移ると堤による波の反射率が著しく小さくなるため、上記のような埋戻し効果をもたらすまでに至らず、堤脚部は初期の洗掘を維持するにとどまる。図-6のII型洗掘の例におけるがごとく、沖の海底断面には、ほとんど変化がない。また、I、II型洗掘が見られるこれらの領域では、砕波後の奔流のごとき流れが作用するため、堤脚部では水平軸をもつ局所的な渦が発生し、図-6の例からもわかるように洗掘孔の形状は逆直角三角形をしている。

III型洗掘の領域に入ると、堤体が砕波の落下点近くにあるため、段波としての作用を強くうけ、つぎに述べるIV型洗掘の重複波による洗掘機構が多分にてくる。

図-6には、III型の例として、正常海浜 ($d/H_0=0.0044$, $H_0/L_0=0.0062$) の砕波点の少し岸側 ($X/X_b=0.22$) に堤体を設置した場合を示してある。

この領域では、洗掘の初期においては砕波後の波が、奔流に近い状態で堤脚部に作用するため、急激に洗掘され、5分後の断面からわかるように、洗掘孔はI、II型の場合と類似した形をしている。しかし、ある程度洗掘が進むと、堤脚部の水深も深くなり、堤体前で波は完全に砕けなくなるので、つぎのIV型の重複波による洗掘に近くなり、堤脚部では徐々に洗掘が進む。同時に洗掘孔の形状も初期とは異なった凹曲面形をなすようになる。

図-4、図-5で、III型の場合洗掘深が他の場合にくらべて大きかったのは、ここがI型とIV型との遷移領域であるため、奔流による洗掘と重複波による洗掘の2つの洗掘機構をあわせ持ったためと思われる。

IV型洗掘は、堤体がさらに沖へ出て、波を完全に反射するようになったときに見られる。図-6の例には、正常海浜 ($d/H_0=0.0044$, $H_0/L_0=0.0062$) の沖浜領域 ($X/X_b=1.27$) に堤体を設置した場合を示してある。この場合には、重複波の下における底質移動を調べるため、図のように堤体前と堤体から二つ目の重複波の腹より少し岸側の底質に、R.I. トレーサーを投入した。

波作用後の R.I. トレーサー分布から、重複波の腹之境にして、その少し沖側および岸側の底質がそれぞれすぐ沖側および岸側の節の位置へ徐々に運ばれるようすが

明瞭にわかる。堤体位置は、重複波の腹の位置に相当するため、そのすぐ沖側の底質が徐々に沖の節の位置へ運ばれる結果それが堤脚部へおよび堤脚部の洗掘として現われたものである。このためIV型洗掘の場合の洗掘孔の形状は、図の11時間後の断面図に見られるようなV字形となる。

このように、III型より沖側では一般にIV型が現われるわけであるが、図-5の $d/H_0=0.0044$ の場合にみられるように、場合によってはI型洗掘が現われることがある。

これは、無堤時においてもある程度の波の反射があるため、沖浜においてすでに上記のような不完全重複波の下における底質移動機構による海底の凹凸が生じているためである。堤体を設置したとき、堤体よりすぐ沖の腹の位置の水深が付近にくらべてある程度浅い場合、その腹より少し岸側から節の位置へ運ばれる砂の量も多くなるため、その影響が堤脚部へおよび埋戻しが行なわれる。したがって、III型の沖側にI型が現われたとしても洗掘機構としては、IV型と異なるものではない。

以上の4つの洗掘形式の例からも知れるように、堤体を設置したとき、海底地形は堤脚部にごく近いところだけが変化するのではなく、相当沖までその影響をうけ、また、沖における海底地形の変化は、堤脚部における洗掘に密接な関係がある。

5. 最大洗掘深について

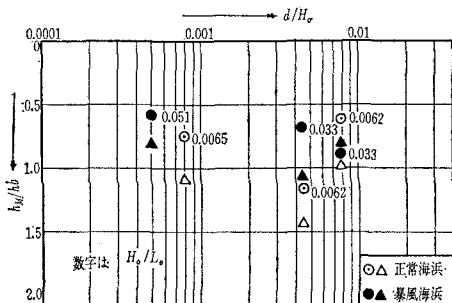
3.で述べたように、沖波波高に対する相対最大洗掘深 h_M/H_0 は、沖波の波形勾配に大きく関係し、それが小さいほど、相対最大洗掘深は大きかった。

そこで、砕波水深 h_b に対する相対最大洗掘深 h_M/h_b についてみてみよう。

図-8は、 H_M/h_b に対して粒径と波高との比 d/H_0 をプロットしたもので、図中△印は、著者らの実験における砕波水深を用いたものである。しかし、砕波水深は一般に正確には定めがたいので、砕波指標より求めた砕波水深を用いたものも、図中○印で示してある。

これによると、 h_M/h_b は、 h_M/H_0 の場合ほどの波形勾配の影響はなく、著者らの実験における砕波水深を用

図-8 最大洗掘深と底質粒径との関係



いた場合 (図中△印), h_M/h_b は, d/H_0 にあまり関係せず, $h_M/h_b=1$ を中心に分散しているが, 砕波指標による h_b を用いた場合は, h_M/h_b は, d/H_0 が小さくなるにつれ, 減少する傾向を示し, この実験の範囲では, h_M/h_b の値は 0.5~1.0 の範囲にある。

6. 結 語

以上, 平衡海浜に直立堤を設置したとき, 堤脚部での洗掘は, 洗掘深の時間的変化の観点から, 4 つに分類できることを示し, それらの洗掘機構に考察を加えてきた。

しかし, この実験は, 二次元的なものであり, また, 入射波としては規則波を用いたものであるので, 現地のように堤に沿う流れがある場合や, 入射波が不規則波である場合とは, 現象も相当異なるはずである。このように, 現地での洗掘を考えるには, この実験は, まだ多くの問題を残しているが, 波による洗掘機構を考える上に, ある程度の指針を与えることはできたものと思う。

最後に, 本実験や, 資料の整理に多大の協力を得た同

研究室, 平原, 杉山, 浅川の各技官に感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 樫木 亨・川崎芳一: 海岸堤防堤脚部の洗掘について, 京大防災研究所年報第 4 号, 昭 35.
- 2) Masashi Honma, Kiyoshi Horikawa: A study of Submerged Break-Waters, Coastal Engineering in Japan, Vol. 4, 1961.
- 3) Russel, R.C. and Sir, C. Inglis: The Influence of Vertical wall on a Beach in front of it, Proc. of Minesota International Hydraulics Convention, 1953.
- 4) 佐藤昭二・田中則男・入江 功: 海岸構造物の堤脚部洗掘に関する研究 (第 1 報) 直立壁堤脚部の波による二次元的洗掘実験, 港湾技術研究所報告, 第 5 巻 10 号, 昭和 41.6.
- 5) 佐藤昭二・田中則男・入江 功: 放射性同位元素の漂砂模型実験への利用について, 港湾技術資料 No. 13, 昭和 39.8.
- 6) 岩垣雄一・野田英明: Laboratory Study of Scale Effects in two Dimensional Beach Process, Proc. of 8th Conf. on Coastal Eng. 1963.