

離岸堤の先端部周辺における局所洗掘の特性について

平 山 秀 夫*

1. 緒 論

最近、消波ブロックを用いた離岸堤工法が侵食防止対策工法として特に注目されてきているが、この工法はあくまでも経験的工法であって、場合によっては沈下してその機能を十分に発揮できなくなってしまうなど、ブロックを用いた離岸堤工法にはまだかなり多くの問題点が残されているようである。

離岸堤の沈下の要因としては、豊島¹⁾や菅原²⁾が指摘しているように、堤内外の水位差による砂のボーリング現象や戻り流れによる堤直下の砂の移動など、主として底部部周辺の侵食作用が考えられるが、本研究は、特に、堤内外の水位差によって堤先端部に発生する渦などのいわゆる2次流³⁾によってその堤脚部周辺がどのような洗掘現象を呈し、それが堤の沈下にどの程度の影響を及ぼすかを実験的に検討しようとするものである。ここではその第1歩として、離岸堤として最も簡単な平板モデルを用い、砂の移動限界水深で深の実験条件下で、離岸堤先端部付近に発生する渦とそれによる局所洗掘の実態を把握することに努める。特に洗掘過程の可視化や洗掘形状およびモデル堤周辺の水理特性などを詳しく調べ、それらを相互に比較検討しながら、離岸堤先端部周辺における局所洗掘機構の解明の緒を見い出そうとするものである。

2. 実験装置および方法

実験は図-1に示すように、水槽端部に消波工を設置した長さ21m、幅70cm、高さ1mの片面ガラス張り水槽を用い、その中央部に可動床として標準砂(中央粒径 $d_{50}=0.204$ mm、ふるい分け係数 $S_0=1.13$)を約5m区間にわたって厚さ10cmに敷

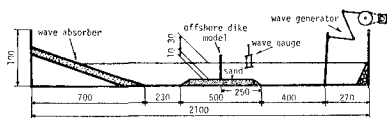


図-1 実験装置 (単位 cm)

きつめた。

実験の方法は、可動床部の中央に厚さ5mmのアクリル製の平板離岸堤モデルを固定し、堤長20, 25, 30, 35cmの4種類の各場合について、種々の波浪条件下における堤端周辺の洗掘状況や水理特性を、経過時間 $t=1, 8, 15$ および30分ごとに調べた。堤周辺の洗掘深の測定は砂面測定装置を用い、同時に抵抗線式波高計で波高分布も調べた。なお、洗掘深の測定は、洗掘形状が等高線法で表示されるように、堤先端部を原点として波の進行方向に x 軸、それに直角方向に y 軸を取り、この両軸方向に約5cm間隔で行った。このようにして得られた、洗掘孔の等高線図と堤周辺の波高分布の時間的変化の代表例を図-2(a)~(d)に示す(図中の○印の大きさは波高に比例しており、数字は入射波高に対する比の値を示し、等高線はcm単位で表示してある)。また、洗掘過程の可視化にはモータードライブ付35mmカメラを用い、堤の岸・沖側の最大水位差の測定には8mm撮影機を使用した。

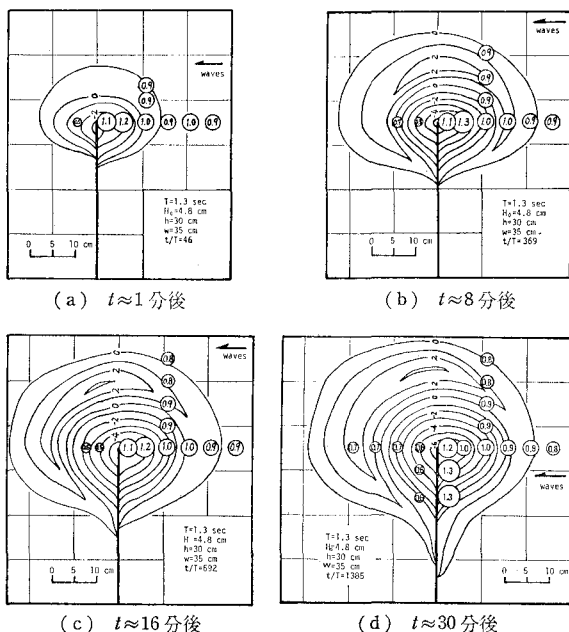


図-2 洗掘孔の等高線による表示と波高分布

* 正会員 工博 大阪府立工業高等専門学校助教授

実験条件は、砂面上水深 h を 30 cm と常に一定として、波浪特性は入射波による底質の移動限界以深になるように、周期 $T=1.0, 1.3, 1.5$ sec の各場合について、沖波波高 $H_0=4.1\sim 6.5$ cm の間で適宜に変化させた。

3. 解析方法

(1) 次元解析

離岸堤先端部における洗掘深 z を支配する要素として、入射波高 H 、周期 T (or 波長 L)、波の作用時間 t 、流体密度 ρ 、粘性係数 μ 、重力加速度 g 、底質の中央粒径 d_{50} 、底質の密度 σ 、初期水深 h および離岸堤間隔の $1/2$ 長 w (=水槽幅 D とモデル堤長 b との差) などが考えられる。したがって、一般的に z は次のような関係式で表示される。

$$z = f_1(H, T, t, \rho, g, \mu, h, w, d_{50}, \sigma) \dots\dots\dots (1)$$

この式から π 定理を用いて次元解析を行い、さらに土砂水理学で用いられる水中における砂れきの特性量 $\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd_{50}}$ を用いることにすれば、洗掘深の無次元量 z/w は次式のように表わされる。

$$z/w = f_1\left(\frac{t}{T}, \frac{h}{H}, \frac{H}{w}, \frac{d_{50}}{H}, \frac{\sigma}{\rho}\right) \dots\dots\dots (2)$$

本実験では、水深 h および底質粒径 d_{50} は常に一定とし、また波高は近似的に約 5 cm 前後であるので、式 (2) 中の各要素のうち h/H と d_{50}/H は $h/H=5.1\sim 7.9$ および $d_{50}/H=0.003\sim 0.005$ であるから、近似的に一定とみなし、かつ Reynolds 数 $(H/T \cdot w/\nu)$ の影響も他の項に比して無視できると仮定すれば、 σ/ρ は一定であることから、式 (2) は次のように簡単化される。

$$z/w = f_2\left(\frac{t}{T}, \frac{H}{w}, \left(\frac{H}{T}\right) \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho}-1\right)gd_{50}}\right) \dots\dots\dots (3)$$

(2) 洗掘孔の諸元と洗掘量

すでに作成された洗掘状態を示した等高線図 (図-2 参照) から洗掘孔の諸元を求めた。すなわち、高さ 0 の等高線の形状の x および y 軸方向の最大径をそれぞれ洗掘孔径 l_x, l_y 、洗掘孔の最大深さを最大洗掘深 $z_{\max}$ とした。また、洗掘孔の傾斜面の平均勾配 (Dz/Dx : $+x$ 軸上の勾配, $Dz/D(-y)$: $-y$ 軸上の勾配) は、等高線間隔がほぼ等しく一定の傾斜面を成していると思われる地点で求め、一方、平均洗掘速度は $z_{\max}/t$ (t : 経過時間) で表わした。

洗掘量は、等高線図からプランニメーターを用いて土量計算を行って求めた。

4. 実験結果および考察

(1) 洗掘過程

波の来襲に伴って堤の岸・沖側で水位差が生じ、これによって堤の両側で交互に渦が発生する。この渦によって底面の底質が巻き上げられ、堤先端部付近を中心にして徐々に洗掘が

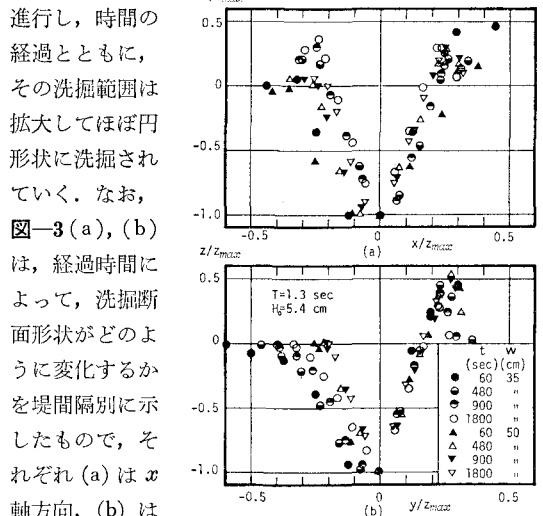


図-3 洗掘断面形状 ((a): x 方向断面, (b): y 方向断面)

(2) 洗掘特性

a) 最大洗掘深

次元解析に基づいた無次元量 $z_{\max}/w$ と t/T の関係を H/w をパラメータにとって示したものが図-4 である。この図から明らかなように、 $z_{\max}/w$ は H/w および t/T の増大とともに増加し、しかもその増加の割合は、 H/w が大きいほど大きいようである。このことは、波高をパラメータにして示した図-5 の $z_{\max}/w$ と t/T の関係からも明らかなように、波高が大きいほど洗掘深の増大率が大きいということになる。

一方、図-6 は堤の沖側と岸側洗掘量の比の値 V_0/V_t

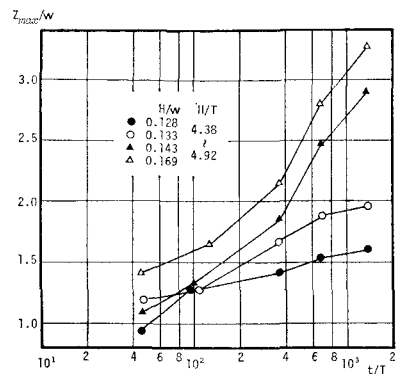


図-4 $z_{\max}/w$ と t/T の関係

と経過時間との関係を堤間隔の $1/2$ の w をパラメータにして示したもので、この図から明かなように、一般的に、離岸堤間隔が狭いときには、 $V_0/V_i < 1$ になる場合が多いようである。

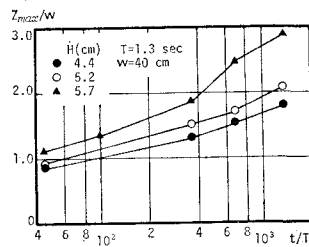


図-5 最大洗掘深の波高による変化

る。このことは、堤間隔が小さいときには、最大洗掘深の位置が岸側に、逆に大きいときには沖側に存在することを意味し、堤間隔が最大洗掘深の発生位置に密接に関係しているように思われる。

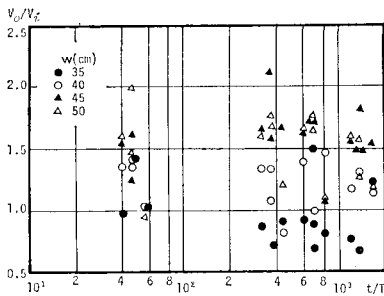


図-6 堤の沖・岸側洗掘量の比と経過時間との関係

b) 平均洗掘速度

図-7 は、平均洗掘速度 z_{max}/t と t/T との関係を周期 T をパラメータにして示したもので、この図から、洗掘速度は波の継続時間によって異なり、洗掘の初期の段階ではかなり洗掘速度が大きいが、時間経過とともに徐々に減少してほぼ一定値 0 に近づいていくことが明らかである。また、洗掘速度は周期によっても異なり、周期が長い場合には短い場合に比べて大きいようである。また、ここでは示していないが、洗掘速度への堤間隔や波高の影響はあまり顕著ではないようである。

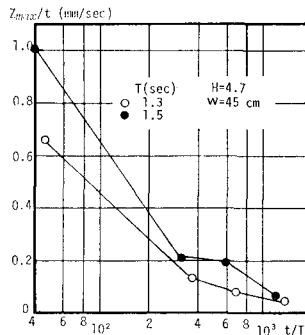
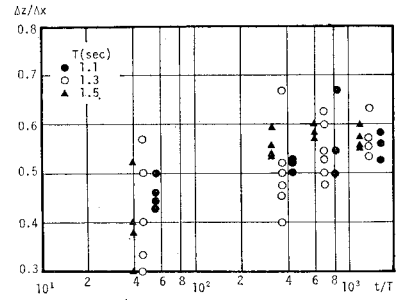


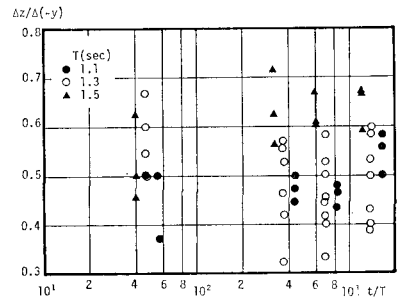
図-7 平均洗掘速度の経過時間による変化

c) 洗掘形状

(i) 洗掘孔の平均斜面勾配: 図-8 (a), (b) は、洗掘孔断面の平均斜面勾配と経過時間との関係を示したもので、(a) は x 方向断面の結果、(b) は堤に沿う y 方向断面の結果である。これらの図から明かなように、



(a) $+x$ 方向断面



(b) $-y$ 方向断面

図-8 洗掘孔の平均斜面勾配と経過時間との関係

断面の位置によって斜面勾配に若干の差異が見られるが、全般的には、図の (b) の離岸堤の遮へい部分では、ほとんどの場合斜面勾配は 30° ($dz/d(-y)=0.6$) より小さく、しかも時間経過による差異もあまり明確ではないが、一方、図の (a) の堤で遮へいされていない部分では、時間経過とともに斜面勾配は徐々に増大し、約 30 分後には砂の水中安息角の 27° に近づく傾向にある。

(ii) 洗掘孔の直径: ここでは示していないが、洗掘孔の x および y 軸方向径 (l_x , l_y) はともに、時間経過とともに増大していく傾向にある (図-3 参照)。しかしながら、図-9 から明かなように、 l_x/l_y の値は、実験値のばらつきがかなり著しいので明言はできないが、全般的には、堤間隔が小さいほど小さく、しかも時間の経過とともに実験値の分散値も小さくなり、結局、 $l_x/l_y \approx 1.0$ のいわゆる円形に近づく傾向にあるようである。さらに図-10 からは、波高が大きいほど l_x/l_y の値は小さ

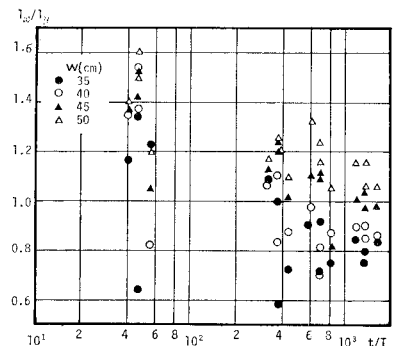
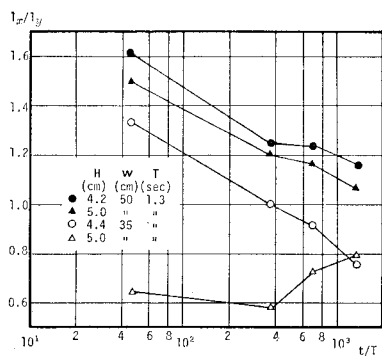


図-9 洗掘孔直径比の経過時間による変化



図—10 洗掘孔直径比の波高による変化

いことが見出される。このことは、すでに図—3 に示した結果からも明らかなように、堤の間隔や波高の違いによって洗掘状況が異なり、特に堤間隔が狭く波高が大きいときには堤に沿う方向の洗掘が顕著となり、堤の安定維持の面ではかなり不利になるものと思われる。したがって、特に堤間隔の決定は堤の沈下対策を考える場合の重要な要素になるものと思われる。

(3) 堤先端部周辺の水利特性

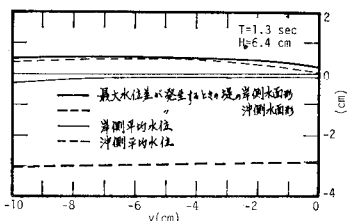
a) 波高分布

図—2 に示したように、洗掘形状の時間的変化を調べると同時に堤周辺の波高分布も調べてきたが、最大洗掘深の発生位置の相違による波高分布特性の明確な差異は見出せなかった。しかしながら、全般的には、最小波高の発生位置は堤から約 3cm 岸側に、最大波高は堤から約 3~8cm 沖側付近に発生する 경우가多く、その分布は周期によっても若干異なるようである。

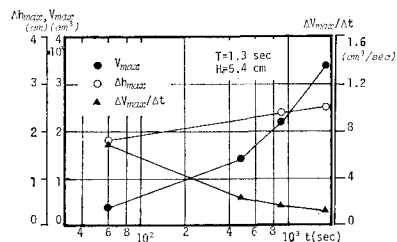
b) 水位差

前述のように、波の来襲とともに波の半周期ごとに堤の岸・沖側で水位差が生じ、これによって堤の岸・沖側に交互に渦（カルマン渦）が発生する。

図—11 は、このような水位差が生じる堤の岸側および沖側の平均水位と岸・沖側水位差が最大になった状態での岸・沖側水面形状の相互関係を示したもので、この図から明らかなように、ただ最大水位差になるときの岸側水面形と沖側平均水位の水平分布形状が類似していることを除けば、これらの間にはあまり明確な関係は見出せないようである。一方、図—12 は最大洗掘量（ V_{max} ）、



図—11 水位差が最大になるときの水面形と平均水位の関係



図—12 最大洗掘量、最大水位差および時間平均洗掘量の関係

堤先端部の最大水位差（ Δh_{max} ）および時間平均洗掘量（ $\Delta V_{max}/\Delta t$ ）の間の関係を示したもので、この図から、最大水位差と最大洗掘量は時間経過とともに増大するが、一方、時間平均洗掘量は平均洗掘速度と同様に、逆に減少する傾向にあることがわかる。

このように、岸・沖側に発生する水位差の程度が発生する渦の規模を決定づけ、これが底面の洗掘に直接的に影響を及ぼすものと思われる。

5. 結 論

以上、波によるモデル堤先端部周辺における局所洗掘の実態を実験的に検討してきたが、その結果を要約すれば次のようである。

(1) モデル堤周辺の水面では、波の来襲に伴って岸・沖側で水位差が発生し、これによって堤の沖側と岸側に反対方向の回転をもつ周期的な渦（カルマン渦）が交互に発生し、これが局所洗掘の主因を成すことが洗掘状況の可視化によって明確になった。

(2) 最大洗掘深の発生位置は、堤間隔の大小によって若干相違し、一般的に、堤間隔が大きいときは沖側に、逆に小さいときは岸側に発生する 경우가多い。一方、堆積場所は、最大洗掘深が沖側に発生する場合には岸側に、逆に岸側の場合には沖側に見られることが多いようである。また、最大洗掘深は、他の実験条件が同じであれば、入射波高および離岸堤の岸・沖間に発生する最大水位差が大きいほど大きいようである。

(3) 時間平均洗掘速度は、一般的に入射波の周期によって異なり、周期の長い場合には、短い場合に比べて平均洗掘速度が大きいようである。また洗掘速度は波の継続時間によっても異なり、洗掘の初期の段階ではかなり大きい、時間経過とともに逆に徐々に減少し、約 30 分後にはほぼ一定値 0 に近づく傾向にある。

(4) 洗掘断面形状の平均斜面勾配は、離岸堤遮へい部分とそれ以外の部分とでは若干相違し、前者の領域ではほとんど斜面勾配は 30° より小さく、しかも時間経過による差異もあまり明確ではないが、一方、後者の領域では、時間経過とともに斜面勾配は増大し、約 30 分後には、ほぼ 27° （砂の水中安息角）になるようである。

(5) 洗掘孔の直径は、水槽方向の大きさ (l_x) およびそれに直角方向の大きさ (l_y) とともに時間経過とともにほぼ増大するが、一方、 l_x/l_y の値は、一般的に堤間隔が小さくかつ波高が大きくなるほど小さくなり、しかも時間経過とともにほぼ 1.0 の値に近づく傾向にある。

最後に、本研究を実施するにあたり、終始、暖かい御指導を賜った京都大学工学部岩垣雄一教授および実験や解析に協力を惜しなかった金野文男・西原民男の両君（当時大阪府立工業高等専門学校学生）に心から感謝の意を表するとともに、本研究は文部省科学研究費自然災

害特別研究 (1) (代表者：岩垣雄一教授) による研究の一部であることを付記し謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 豊島 修・坂本忠彦：離岸堤の沈下について，第 19 回海講論文集，pp. 71~75, 1972.
- 2) 菅原輝男・長野 章・樋口統三：透過式離岸堤の沈下と海浜変形，第 23 回海講論文集，pp. 229~233, 1976.
- 3) 齊藤 隆・浦 勝・柴田幸信：円柱周囲の洗掘について，山口大学工学部研究報告，第 20 巻，第 1 号，pp.83~90, 1969.
- 4) 鈴木幸一：橋脚周辺の局所河床変動に関する研究，京都大学工学博士学位論文，pp. 33~63, 1977.