

潜堤周辺の底泥の局所洗掘に関する実験的検討

鶴谷 広一*・吉永 宙司**・佐々木 豊喜***

1. ま え が き

シルテーションとは、港湾などにおいて波や流れによって粘土やシルトなどの微細な底質が巻き上げられ、航路や泊地に堆積することで、開発途上国、特に東南アジアや中南米といった河川からの流出土砂量の多い港湾では、長い間この問題に悩まされ続けてきた。これらの地域の港湾では、いまだに航路維持のためにかなりの費用をかけて浚渫が行われており、年間数百万 m^3 の維持浚渫を行っている港も少なくない。このために財政的な負担も大きくなり、港湾の管理や発展に支障をきたしている。

一方、わが国ではこの種の問題を抱えた港湾が少なく、水理学的にも複雑な現象が対象であるために、これまで十分な研究がなされていなかった。しかし、熊本港の建設をきっかけとして、シルテーションに関する研究が盛んに行われるようになってきた。九州の有明海にある熊本港は、わが国では稀な東南アジアや中南米の港湾と類似した自然条件下、つまり、底質が微細な粘土やシルトから成る遠浅の干潟海岸にあり、しかも潮汐差が大きい場所にある。このため、シルテーションによる航路や泊地の埋没対策として、これまでに現地データの取得や埋没量予測モデルの構築などが行われてきた。また、シルテーションで問題となる底泥の挙動を把握するために、最近、各種の室内実験も行われている。このような研究成果にもとづくわが国の技術援助に対して、開発途上国からの期待は非常に大きくなっている。

航路などの埋没対策の一例として、航路の両側に潜堤を設置し、海底付近を移動する底泥が航路に堆積する量を減少させるという方法が具体的に考えられている。潜堤は、防波堤より建設費が安く、埋没軽減効果もかなり期待できるといわれている。しかし、潜堤などの構造物周辺の底泥の挙動については、ほとんど解明されていない。特に、潜堤自体の安定性が問題になるほどの局所洗掘が起こるのか、あるいは潜堤付近での極端な堆積によ

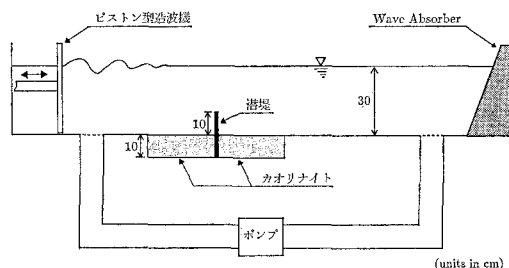
り、潜堤としての効果が小さくなることはないのか、など疑問点は多い。

本研究の目的は、潜堤を設置したことによる周辺への影響を把握することにある。実際の海域において、波と流れは同時に作用することが多く、波と流れの進行方向は常に一定ではない。これらのことを考慮して、波とその進行方向に対して同方向および逆方向の流れをかけて、潜堤周辺に敷き詰めた底泥の巻き上げ実験を行い、潜堤周辺の底泥の局所洗掘に関する検討を行った。

2. 実験方法

実験は、図一1に示すような長さ10 m、幅40 cm、高さ50 cmの二次元造波水路を用いて行った。波は水路左にあるピストン型造波装置により、流れは水路下部の回流装置によって起こされる。水路中央部には潜堤を設置し、その前後1.5 mを底泥床とした。底泥は幅40 cm、厚さ10 cmにわたって、淡水を用いて含水比165～175%に調整したカオリナイトを敷き詰めた。底泥床の中央部には、水底からの高さ10 cm、幅40 cm、厚さ1 cmのアクリル製の潜堤の模型を設置した。実験時の水深は30 cmの一定とした。波と流れの作用時間は8～10時間とした。

実験ケースは、表一1に示すように、波と流れの進行方向が同じ順流のケース、波と流れの進行方向が逆の逆流のケースをそれぞれ2ケース、合計4ケースである。これらの他に、ケース1と同じストロークで造波した波のみ（ケース5）、および流れのみ（ケース6）の2ケースの実験も行っている。ケース5の波高は約2.2 cm



図一1 水路の説明図

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室長

** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

*** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

表-1 実験条件

ケース	平均流速 (cm/s)	含水比 (%)	作用時間 (hr)
1 (逆流)	26.8	171.6	10
2 (順流)	26.8	171.1	10
3 (逆流)	14.5	172.3	8
4 (順流)	14.5	166.2	8

3. 実験結果および考察

図-2 (a)~(d) は、それぞれケース 1~4 の実験後の底泥表面の地形、水平方向の流速 u の分布 (流速のスケールは図中表示してある)、波高 H の分布、底面せん断応力 τ_b の分布を示したものである。なお、○印は表-1 に示される平均流速を用いて計算した τ_b の値であり、△印はそれぞれの地点の流速分布のうち、潜堤背後の反流域の流速を無視して求めた平均流速を用いて計算した τ_b の値である。いずれの図も○印と△印の τ_b はほぼ等しい値となっている。縦軸は水底の位置を 0 とし、横軸は潜堤の位置を 0 とし、順流、逆流のケースともに波の進行方向を正の向きとして設定している。また、ケース 5 の波のみ、あるいはケース 6 の流れのみのケースは、どちらも底泥の巻き上げはほとんどなかった。波のみあるいは流れのみと、波と流れの共存場の直接の比較はむずかしいが、波と流れが作用する場合には、波あるいは流れ単独の場合よりも底泥は巻き上げおよび移動しやすくなっているものと考えられる。

図-2(a) より、流れの進行方向に対して潜堤背後の $x = -70 \sim -20$ cm において、波高が急激に増大している。この部分から底泥が巻き上がり始め、10 時間後には最大約 4 cm の深さに洗掘された。これは、潜堤背後の波高が流れの影響で増大すると、その地点における τ_b も大きくなり、巻き上げに関する限界せん断応力 τ_c を越えるためである。巻き上げに関する式は、次式で示される。

$$E = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_c} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 E : 巻き上げ率 ($\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 M : 底質の種類や含水比によって決まる定数 ($\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) である。流れの進行方向に対して潜堤前面では、ほとんど巻き上げ

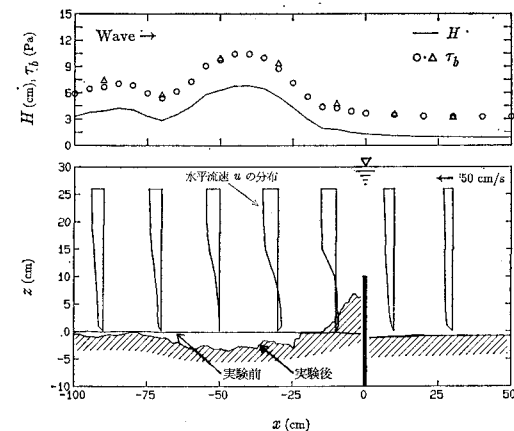


図-2(a) 底泥の地形変化と流速、波高、底面せん断応力分布 (ケース 1)

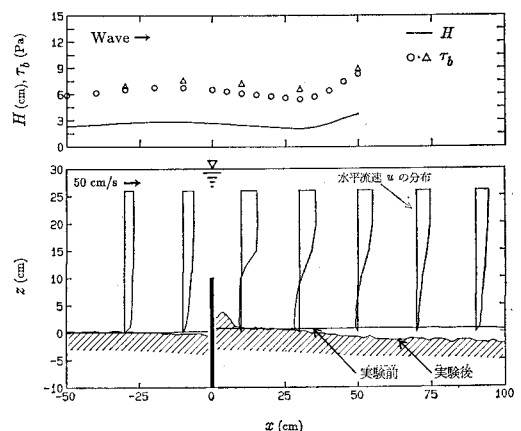


図-2(b) 底泥の地形変化と流速、波高、底面せん断応力分布 (ケース 2)

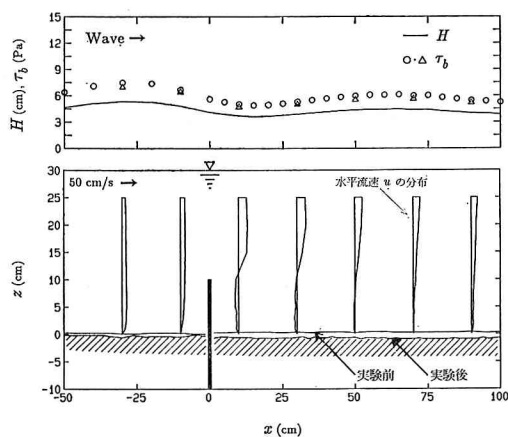


図-2(c) 底泥の地形変化と流速，波高，底面せん断応力分布（ケース 3）

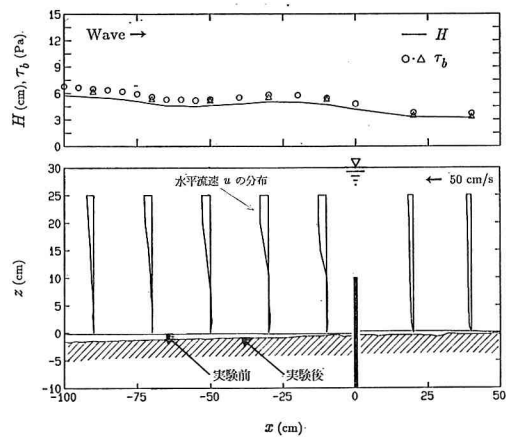


図-2(d) 底泥の地形変化と流速，波高，底面せん断応力分布（ケース 4）

はなく，また潜堤背後が局所的に巻き上がっていることから， τ_e の値は約 6 Pa と考えられる．鶴谷ら（1990）の 図-16 に示されている含水比と回転粘度計で求められる降伏値の関係から，含水比が 170% のときの降伏値を求めると，5~6 Pa が得られ，今回の局所的に大規模な洗掘が生じている場合の限界せん断応力 τ_e とほぼ等しい値となっている．

また，波高が最大となる $x = -40$ cm において， τ_b の値は約 10 Pa， E の値は $3.7 \times 10^{-5} (\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1})$ と算定され，上式から M の値を計算すると， $5.6 \times 10^{-5} (\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1})$ となる．この値は，Van Leussen・Dronkers（1988）が示している M の値の範囲 $1 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-4} (\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1})$ に入っている．

写真-1 は，ケース 1 で底泥の巻き上がる瞬間を撮ったもので，底泥表面が破壊して，そこからかなり大きな塊として巻き上がっているのがわかる．写真-2 は，やはりケース 1 の潜堤付近で底泥の状況を撮ったもので，潜堤は写真右端である．潜堤背後には粒状の底泥塊が堆積し，その下には，潜堤側に向かって円弧状の筋が確認

できる．潜堤背後に堆積している底泥塊は，主として $x = -20$ cm より下流側で巻き上げられて潜堤付近に運ばれたものと考えられる．これは流れの場に潜堤などの構造物が設置された場合，潜堤の高さの約 10 倍下流側すなわち潜堤背後 1 m 程度までは反流域となり（鶴谷ら，1987），巻き上げられた底泥が反流によって潜堤側に運ばれるためである．このとき堆積する底泥塊は，粒径の粗いもので，これは反流によって運ばれる底泥のうち，重いものが潜堤付近に堆積し，軽いものはほとんど流れによって，遠方に運び去られてしまうためである．

写真-3，4 は，ケース 1 で写真撮影のために実験後に濁った水を水道水と入れ換えて撮ったものである．写真-3 は潜堤付近の底泥の堆積と洗掘の様子を示している．潜堤付近には，粒の大きい底泥塊が堆積しているのが確認できる．また，洗掘された場所には水路と平行な方向に筋が見られるが，これは反流域内のかかなり大きな乱れによって底泥が巻き上げられたために生じたものである．写真-4 は，流れの進行方向に対して潜堤背後 1 m 以降の底泥の洗掘の様子を示している．反流域内の



写真-1 底泥の巻き上がる瞬間（ケース 1）

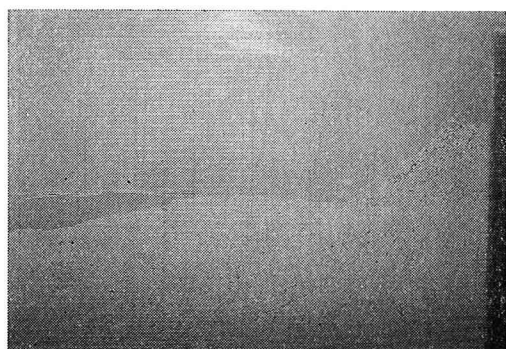


写真-2 潜堤付近の底泥の状況（ケース 1）

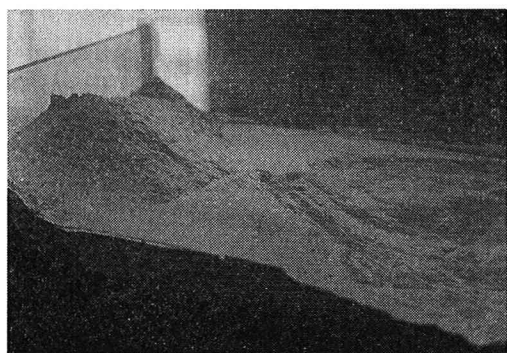
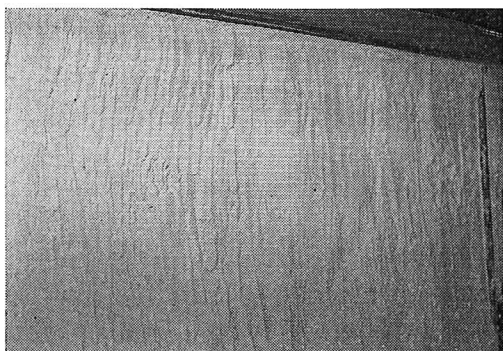

 写真-3 $x=0\sim-50$ cm の底泥の状況 (ケース 1・実験後)

 写真-4 $x=-100$ cm 付近の底泥の状況 (ケース 1・実験後)


写真-5 潜堤付近の底泥の状況 (ケース 2)

洗掘と違って、水路と垂直すなわち横断方向に筋ができており、これはおもに波の働きで底泥が巻き上げられたためである。

図-2(b) はケース 2 の実験結果であるが、このケースはケース 1 のような波高のピークはないものの、 $x=40$ cm あたりから流れの影響を受けて波高がやや増大し、 τ_b の値が 6 Pa を越える地点では、やはり巻き上げが起こっている。これは、ケース 1 のような局所的な洗掘ではなく、広い範囲のほぼ一様な洗掘である。流れの進行方向に対して潜堤前面は、潜堤付近でわずかに巻き上がっているが、ほとんど地形の変化は見られない。

写真-5 は、このケース 2 で潜堤付近の底泥を撮ったもので、潜堤は左端にある。ケース 1 は、巻き上げられた底泥塊が潜堤付近に堆積しているのがはっきりわかったが、ケース 2 では、底泥が盛り上がっているだけでほとんど堆積していないことがわかる。これは、ケース 1 と比べて底泥が極端に巻き上がるほど τ_b が大きくなったが、底泥の波動運動が潜堤背後のかなり広い範囲で起こり、潜堤の近くでは、底泥の水平方向の波動運動が抑制されたために、上方に盛り上がったものである。さらにケース 1 と比較して、局所的な波高の増大がないために、巻き上がる底泥の粒径が小さく、この底泥は逆流によって潜堤付近まで運ばれるが、堆積せずに流れによ

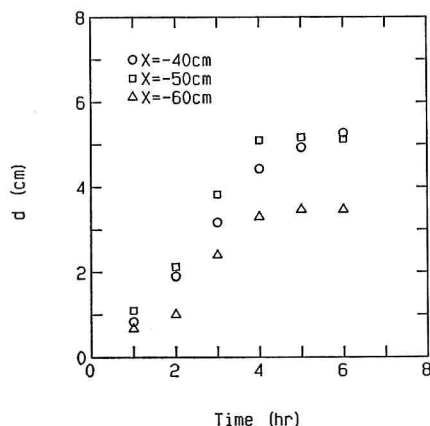


図-3 洗掘深の時間変化

って後方に運び去られている。

図-2(c), (d) では、どちらのケースも平均して波高が大きいために、量は少ないものの全域にわたって底泥が巻き上がり、洗掘が起こっている。また、潜堤付近の堆積はほとんどみられず、これは流速分布からもわかるように逆流が弱く、巻き上げられた底泥の底面付近の移動が少ないためであると考えられる。また、これまでのケースと同様に、 τ_b が 6 Pa を越えると巻き上げの量が多くなっている。ケース 3 では、流れの影響によって $x=-30\sim-20$ cm でやや波高が大きくなっているが、局所的な洗掘はみられず、波が進行していくにしたがって波高減衰によ、巻き上げ量は減少している。ケース 4 では、流れの影響によって潜堤の背後でやや波高が大きくなるため、巻き上げ量も多くなっている。

図-3 は、ケース 1 と同じ波と流れを含水比 164.1% のカオリナイトにかけた場合の、時間経過と洗掘深の関係を示したものである。測定は、 $x=-40, -50, -60$ cm で行い、水路の中央断面上と水路幅方向に左右 10 cm ずつ離れた 2 断面上、合計 3 断面上の平均値をとった。図より、巻き上げは 4 時間ぐらいではほぼ終り、その後はほとんど洗掘されていない。これは、洗掘によって

地形がかなり変化するために、波や流れの作用する条件も変わり、 τ_b の値が小さくなるのと、洗掘に時間がかかって下部底泥はかなり構造を回復して強度が大きくなっているためである。また、洗掘深がケース1の値に比べて大きいのは、中央よりも側壁の近くで、洗掘深が大きかったためである。

4. 結 論

本研究では、以下に示す結論が得られた。

(1) 波のみまたは流れのみ場で、底泥の巻き上げが起こらない場合でも、波と流れの共存場では、これらの相互作用によって波高が増大し、底面せん断応力が限界せん断応力を越えると、底泥は巻き上げを始める。

(2) 流れの作用による波の変形が大きくなるような、流れの影響が強い場合には、局所的な洗掘が起こりやすい。特に逆流の場合、潜堤周辺の底泥は流れの進行方向に対して潜堤背後で底泥が破壊して洗掘が生じやすくなり、いったん破壊して洗掘し始めると粒径の比較的大きな粗い泥の固まりが移動を始め、潜堤付近まで運ばれて堆積する。この場合には、潜堤周辺では洗掘が起こらず、潜堤自体の安定性には問題が少ない。ただし、巻き上がった底泥が潜堤の直背後に堆積すると、潜堤の有効高さが減少することにもなるので十分な注意が必要である。

(3) 流れによる波の変形がそれほど大きくない流速の小さい場合には、底泥表面に働くせん断応力が巻き上げに関する限界せん断応力を越えていれば、潜堤前面、

背後ともほぼ一様に巻き上がる。ただし、逆流が小さいために巻き上がった底泥塊は潜堤の方へは運ばれず、潜堤周辺に顕著な堆積は起こらない。また潜堤周辺で小さな洗掘が起こるので、潜堤の安定性を考える上では長期的な洗掘の傾向を知る必要がある。

(4) 実際の海域にあてはめて考えると、ケース1、2とケース3、4の波高と平均流速の値を比較して、後者の方がより現実的であると考えられる。つまり、潜堤周辺の底泥の堆積はほとんどなく、潜堤周辺の底泥が洗掘されることが考えられる。今回の実験から、水深3mの場所に高さ1mの潜堤を設置した場合、約一日で潜堤周辺の底泥が10~20cm洗掘されることになるが、底質移動の相似則についていえば現地 conditions を正しく模型に再現しているわけではなく、今後さらに詳しい検討を加える必要がある。

参 考 文 献

- 田中 仁・首藤伸夫(1980): 波・流れ共存時の底面摩擦に関する実験, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 163-167.
- 鶴谷広一・江口秀二・佐々木豊喜(1990): 流れおよび波による底泥の巻き上げ限界, 港湾技研資料, No. 674, 13 p.
- 鶴谷広一・松延嘉國・惟住智昭・柳嶋慎一(1987): 湧昇流を発生させるための水中設置構造物背後の流れと乱れ特性, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第2号, pp. 127-169.
- Van Leussen, W. and J. Dronkers (1988): Physical Processes in Estuaries: An Introduction, in Dronkers, J. and W. van Leussen (Eds), Physical processes in estuaries, Springer-Verlag, pp. 1-18.