

波・流れの共存場における局所洗掘

——砂れんの発生しない場合——

河田 恵 昭*・ 朝 堀 泰 明**・ 土 屋 義 人***

1. 結 言

浅海域を対象とした波と流れの共存場における円柱周辺の局所洗掘に関する研究では、最近、理論的な取り扱いの試みとして円柱背後に形成されるカルマン渦が支配的な役割を果たすとしてモデル化した土屋ら¹⁾のものとや写像関数を用いて解析した柴山ら²⁾のものが挙げられる。しかし、円柱周辺のカルマン渦の特性については、これまで流れのみを対象とした研究が多く、波と流れの共存場では、ほとんどその特性が明らかにされていない。

そこで、水理実験によって、円柱周辺の局所洗掘の過程を明らかにしようとする試みがいくつか行われているが³⁾、現地と実験との縮尺効果の問題があって、必ずしも実験結果をそのまま現地へ適用することは困難となっている。その最大の原因として、動的洗掘の領域では底面に砂れんが発生することが挙げられる。実験水槽で発生する砂れんは、波長が円柱径より一般に長く、波高が5~10 mm程度と、洗掘深に匹敵することが多いので、洗掘に及ぼす砂れんの影響は大きい。一方、現地海岸では、構造物の円柱径は砂れんの波長より大きく、砂れんの波高に比べて洗掘深がかなり大きいのが普通で、実験の場合と違い砂れんの影響はほとんど無視できよう。

本研究では、底質として中央粒径が0.85 mm、密度1.81 gr/cm³の軽量骨材を用いることにより、砂れんの発生を伴わない、波と流れの共存場における円柱周辺の局所洗掘に関する実験を行い、従来の砂れんのある場合の実験結果と比較検討する。さらに、円柱周辺の局所洗掘では、カルマン渦の巻き上げが支配的であることから、これを制御すれば、洗掘の軽減に結びつく可能性がある。そこで、1つの試みとして、円柱周辺から吸水して、境界層の発達を抑制すれば、カルマン渦の渦径や流下速度がどの程度変化するかを調べ、それに起因して洗掘深が軽減できることを定量的に確認する。

2. 局所洗掘実験

波と流れの共存場における円柱周辺の局所洗掘に関する水理実験は、昨年と同様の装置を用いて行った。実験条件としては、水深は10 cmとし、波の周期は1 sと1.4 sの2種類であり、波高は3~5 cmで段階的に変化させた。順流と逆流の流速は0~13.4 cm/sの間でやはり段階的に変えて行った。円柱の直径は1.6 cmおよび2 cmの2種類である。円柱周辺の洗掘深は直径0.5 mmのプラスチック製光ファイバーケーブルを利用して計測した。

一方、縦渦の制御は、長さ12 m、幅40 cm、高さ30 cm、路床勾配1/500の透明アクリル製直線水路で行った。流量は2.7 l/sであり、水深は7.06 cmで一定とした。したがって、平均流速は9.56 cm/s、Froude数は0.115である。実験は、水路中央に直径7.62 cmの塩ビパイプを垂直に設置して、その後方にできる渦を観察し、また、可視化してVTRと写真機で撮影した。円柱には水面以下に直径3 mmの小孔を縦一列、等間隔に10個あけ、円柱内より小型水中ポンプで吸水して境界層の特性を変化させて、縦渦を制御することを試みた。円柱内からの吸水流量は、0から41.80 cm³/sの間で段階的に変化させた。また小孔列の位置 θ は図-1に定義する角度であって、5種類変えて実験を行った。円柱のReynolds数が 7.28×10^3 と大きかったので、可視化の方法はハロゲンランプによってカルマン渦による水面の微妙な凹凸を照射し、その影を水路底面に投影しこれを撮影することにした。

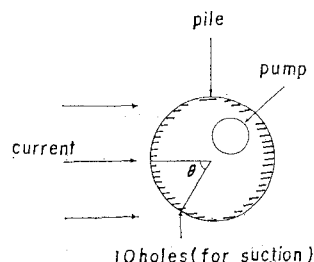


図-1 ポンプによる吸水位置

* 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

** 学生員 京都大学大学院 工学研究科

*** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

3. 砂れんの発生しない場合の局所洗掘特性

3.1 洗掘深の経時変化

まず、時間の経過に伴う洗掘深の変化について、VTRで解析した結果の数例を図-2(a)~(c)に示す。これから明らかに、時間の経過にともない洗掘深がステップ状に大きくなっている。この原因の一つは、洗掘深の変化が0.5 mm単位で計測されるのに対し、底質粒径が0.85 mmと大きいためであろう。また円柱周辺の局所洗掘は円周上で一様に発生しているのではなく、カルマン渦の移動に伴って発生しているので、連続的ではないことが挙げられよう。ここで示した実験結果は、すべて動的洗掘領域に属するものであり、つぎにそれぞれのケースを検討してみよう。(a)を見ると、流速が13.4 cm/sの条件で、初期の洗掘深の増加が比較的小さいのに対し、 10^3 秒程度経過後、急に洗掘が進み最大値に近づくことがわかる。この変化は波高・水深比 H/h が大きくなるとさらに大きくなることも見いだされた。一方、円柱直径が2 cmに大きくなると、 H/h が比較的小さい場合には(a)と同様の洗掘過程を示すが、大きくなると傾向が変わる。すなわち、(b)に示すように、約10秒で洗掘深は最大に達し、その後は増大・減少を繰り返しながら、最終的に若干減少し、定常状態になるようである。しかしこれも付加した流速が減少すると(a)に示すような結果となる。このように、付加流速が大きくなって、洗掘孔が埋め戻されるということは、波と流

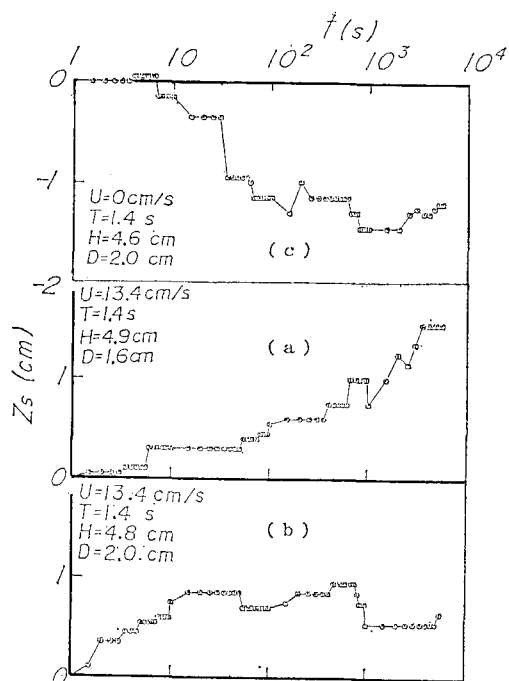


図-2 洗掘深の経時変化例

れの場合における馬蹄渦とカルマン渦によって洗掘孔から運ばれる漂砂量より洗掘孔に流入する漂砂量が多いということに対応しよう。さて(c)のケースは波のみによる円柱の沖側の洗掘の時間的変化を示したものである。この場合、沖側に底質が堆積し、岸側の円柱から少し離れた場所で広く浅い洗掘孔が認められた。これは順流の流速を8.4 cm/sとした場合にも見られた現象である。後述するように、砂れんの発生しない場合にも、波のみではほとんど洗掘されなかった。

3.2 最終洗掘深の特性

図-3は無次元波高 H/h と無次元洗掘深 Z/D との関係を示し、付加した流速はいずれも13.4 cm/sである。白丸と黒丸は周期がそれぞれ1.4 sと1 sに対応しており、いずれも砂れんは発生せず H/h が約0.35以下では静的洗掘であった。これから、この領域では、波高の増大とともに洗掘深も増大していることがわかる。ついで、動的洗掘の領域においても波高の増大とともに洗掘深が増大するが、無次元波高が約0.42を超えると逆に洗掘深が急減していくようである。この図から、無次元洗掘深に及ぼす周期の相違の影響はほとんど認められない。

図-4(a)および(b)は、周期を1.4 sとし、円柱径を1.6 cmあるいは付加した流速を12.1 cm/sと遅くした場合の結果であり、軽量骨材の実験結果は半黒丸で示してある。まず、円柱径を小さくすると明らかに無次元洗掘深はかなり大きくなることがわかる。これは、平均粒径0.110 mmの砂を用いた実験結果では見られなかった現象である。その原因として、今回の軽量骨材の方が結果的に重くなっており、しかも、円柱が太くなると洗掘径が大きくなって、カルマン渦による単位面積当たり底面から巻き上げる漂砂が少なくなるからであろう。付

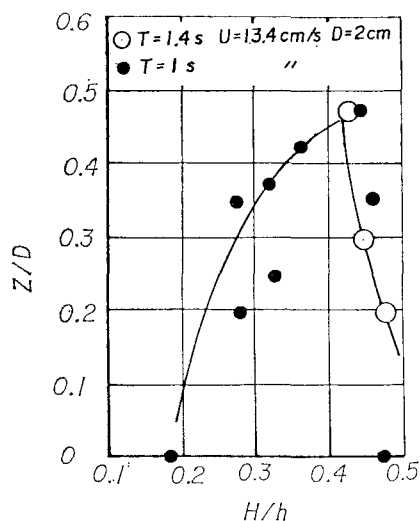


図-3 無次元洗掘深と波高・水深比との関係

加した流速の減少によって洗掘深が大きくなるのは、洗掘孔に上流から流入する漂砂が少なくなつて、埋め戻しがそれほど大きくないことによる。

こうした実験結果を踏まえて、波と流れの共存場における局所洗掘過程をまとめると、つぎのようになる。すなわち、波と流れの共存場において、円柱前面および側面の底質を円柱背面にまで水平に移動させるのは馬蹄渦による。しかし、この掃流運動が行われるのは円柱付近を波の峰が通過するときである。そしてつぎに水面が下がり、波の峰が近づくと円柱後方にカルマン渦が発生し、それによって、馬蹄渦によって掃流運動してきた底質が巻き上げられるわけである。つぎの波が接近し円柱付近を波の峰が通過するときに、巻き上げられた底質は下流方向へ流れによって運ばれ、円柱から少し離れたところに堆積する。それに対し、波のみの作用による洗掘では、馬蹄渦によって円柱背面にまで運ばれた底質が、カルマン渦により巻き上げられるまでは、前述した波と流れの共存場における過程と同様であった。しかし、運ばれてきた底質ばかりでなく、円柱背面近くの底質もカルマン渦によって巻き上げられ、それが再び円柱前面に押し戻されることが起こる。その結果、前述したように、円柱前面付近に底質が堆積し、円柱背面付近は浅く広く洗掘された。

4. 洗掘に及ぼす砂れんの影響

図-4(a)および(b)には、砂を用いた錦織⁴⁾の実験結果も示してあり、図中の黒丸はその時発生した砂れんの波高を超音波測深器で読み取ったものである。図-3の結果と合わせて考えると、まず H/h が増加し、洗掘深が最大になった後、砂れんのない場合●には洗掘深が急激に0になるのに対し、砂れんがある場合には円柱程度洗掘された状態で留まり、さらに H/h を大きくすれば碎波するようになる。この原因としては、つぎの2つが考えられる。

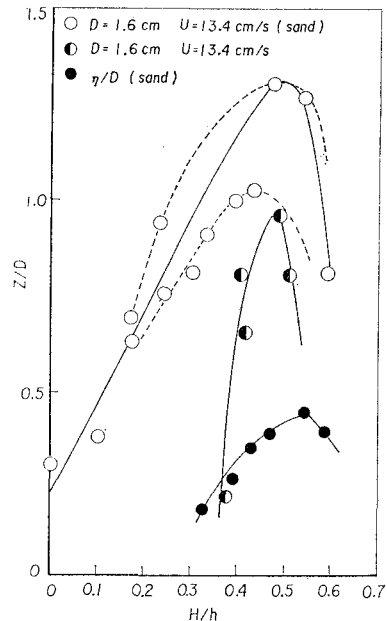
1) 砂れんがあれば、形状抵抗を受けて流体のエネルギーがロスするので摩擦抵抗による漂砂量が plane bed の場合に比べて少なくなる。したがって、 H/h が大きくなっても、洗掘孔の埋め戻しのために流入する漂砂量は少ない。

2) 砂れんが発生すると、漂砂は砂れんの背面上で発生して漂砂雲となって頂部から上部へ放出される。波と流れの共存場では、流速の比較的大きい部分にこの漂砂雲が運ばれるので、これが必ずしも洗掘孔に落ちるとは限らない。

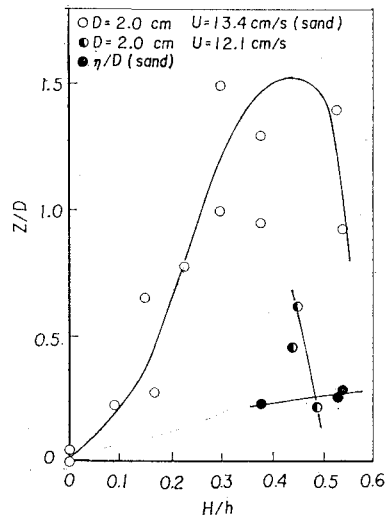
これらの事実は図-3と図-4(b)のケースの比較によっても明らかにされる。これらの図から円柱径 2 cm の場合、順流の流速の小さい場合 (12.1 cm/s) が大きな

場合 (13.4 cm/s) より明らかに洗掘深が大きくなっている。これらの実験値はすべて漂砂のある状態に対応したものであるが、付加した流速の小さい方が当然漂砂量が少ないといえる。すなわち、埋め戻しの量が少なくなるわけで、それだけ洗掘深が深くなっているわけである。

つぎに、漂砂が発生し、砂れんが発生する場合の影響を考えてみよう。図-4(a)で示すように、 H/h が小さく漂砂の発生しない領域では H/h が大きくなると洗掘深は単調に深くなることがわかる。しかし、漂砂の発生する領域に入ると急に実験値のばらつきが目立つようになる。当初、これは実験誤差と考えていたが、 H/h に



(a) $D=1.6$ cm



(b) $D=2$ cm

図-4 無次元洗掘深と波高・水深比との関係

よる砂れんの無次元高の変化は非常にスムーズであることが見いだされた。そこで、洗掘深の実験値の上・下限値を示す点線を図中に描いたところ、つぎのような興味あることがわかった。すなわち、上・下限値の差がほとんど砂れんの無次元波高に等しいことである。これは、上限値は洗掘孔の中心に砂れんの谷線が、下限値はその峰線がやって来たときの洗掘深であると考えられ、最終洗掘形状の写真からも確かめられた。ここで設定した実験条件では、通常、砂れんの波長が円柱径よりも大きく、しかも洗掘孔内はすり鉢状になっているので、砂れんの影響は直接的には入っていないと考えられてきたが、この結果は明らかにそれが無視できないことを示している。

図-5 は $H/h=0.45$, $u=13.4$ cm/s の場合の洗掘深の最大値を図-4 などから求め、これと砂れんの無次元波高の関係を示したものである。この図から、円柱径の増加とともに砂れんの無次元波高は単調に減少するが、無次元洗掘深は極大値をもつことがわかる。砂れんの無次元波高が単調に減少するのは、円柱径の相違にかかわらず砂れんの波高がほぼ一定であるということにはほかならない。また、同じ外力条件であるから漂砂量も同じと言える。このような条件で無次元洗掘深に円柱径の相違の影響があらわれるのは、やはり円柱の背後に形成されるカルマン渦の特性が円柱径に強く影響されていると考えるのが妥当であろう。たとえば、円柱背後のカルマン渦の循環がほぼ一定であるとすれば、円柱径が大きくなると当然洗掘孔直径も大きくなるので、この洗掘孔を移動するカルマン渦によってなされる単位面積当りの仕事(それは結局砂を巻き上げるのに使われる)は減少し、そのため無次元洗掘深は減少すると推察される。

5. 吸水による縦渦の制御と洗掘軽減の試み

波と流れの共存場においては、円柱周辺の局所洗掘ではカルマン渦が支配的な役割を果たすことが分かってきた。そこで、この渦を制御することによって、局所洗掘を軽減する方法を検討することにした。

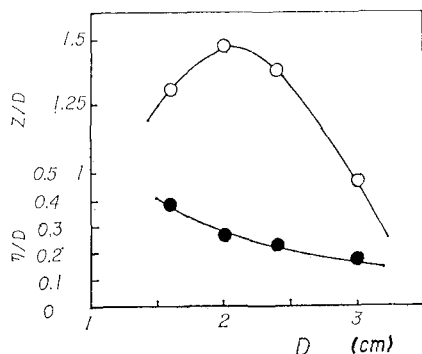


図-5 円柱径による無次元洗掘深と砂れんの波高の変化

友近⁵⁾によれば、カルマン渦列が V の速度で流下しているとき、円柱の抗力 D_0 は、次式で表される。

$$D_0 = \rho \Gamma b (U - 2V) / (a + \rho \Gamma^2 / (2\pi a)) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Γ : 渦の循環、 a および b : それぞれカルマン渦の流下方向および水路横断方向の間隔で、 $b/a=0.2806$ である。これから、円柱の抗力を減少させるには、カルマン渦の循環を小さくするか、その流下速度を大きくすればよいことがわかる。

図-6 は無次元吸水量をパラメータとして、吸水位置と渦の無次元流下速度の関係を示したものである。これから無次元流速 V/U が最大となるのは $\theta=90^\circ$ のときの 1.45 であって、ついでやはり 90° の 1.30 である。前者の方が流量は少ないが、 $\theta=90^\circ$ のときは、今回の実験範囲内では V/U の値は他のケースに比べて大きく、吸水すればかならず離脱する渦の流下速度が増加するという結果が得られた。したがって、流れに対して横断方向の位置から吸水すれば、 V/U の値が大きくなると結論できる。

このように、渦の流下速度が大きくなった場合、それ以外の渦の特性が変化しないのかどうかについて、つぎに検討してみたのが図-7である。この図において d/D は渦の無次元直径を表しており、 $\theta=90^\circ$ の場合がいずれの無次元吸水量についても他の角度に比べて小さくなっているのがわかる。すなわち、 $\theta=90^\circ$ で吸水すれば、渦の直径が小さくなり、流下速度が速くなるといえる。渦直径の変化が循環の値にどの様に反映されるかわからないが、少なくとも直径が小さくなれば、循環そのものも減少すると推定される。この点に関して、従来の成果を適用して若干の考察を加えてみよう。

図-8 は Reynolds 数が 1200 の場合の渦度流束 K_1 , K_2 および K_3 の時間的変化を示したものである⁶⁾。この図で、 $\theta=90^\circ$ の部分で吸水すれば、渦度の供給量が減少して渦度流束 K_1 が小さくなり、結局円周からの剝離せん断層 (S_1 の部分から下流に伸びている部分) が屈曲するといわれている。確かに本実験においてもカルマ

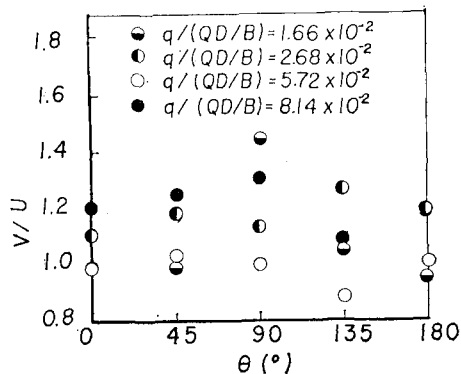


図-6 カルマン渦の流下速度と吸水位置の関係

ンの渦列が横断方向に変動する現象が観察されたが、これに対応しているのであろう。つまり、 K_1 と K_2 の回転方向が逆であるため、渦度の局所的集中に基づく遠心力不安定が吸水によってより安定するが、 K_1 が小さくなるためせん断層の屈曲が現れると考えられる。要約すると、吸水によって渦度 K_1 が減少し、その減少によって渦の直径が小さくなって、かつせん断層の屈曲のため剥離しやすくなった結果、今回の実験のように渦の流下速度が大きくなったと推定される。

これらの結果から、円柱の抗力を小さくするには流れに対して円柱の側面の位置 ($\theta=90^\circ$) で吸水すれば効果が上がるといえる。そして、渦度が減少することが期待されるので、カルマン渦による砂粒の巻き上げ量も減少し、洗掘深が軽減できることが期待できる。ただし、今回の結果はあくまでも水理実験における Reynolds 数が 7,000 程度の場合の結果であることに留意する必要がある。

カルマン渦の制御による洗掘軽減効果を確認するために、吸水および非吸水の場合の円柱周辺の無次元最終洗掘深と波高・水深比の関係を示したものが図-9 である。実験では直径 2 cm のパイプに直径 5 mm の穴を開け内部に漂砂を吸い込まないように内側にステンレス製網を貼り付けてあり、吸水は円柱の底部に接続したチューブを通して行った。穴の位置は、前述した制御実験の結

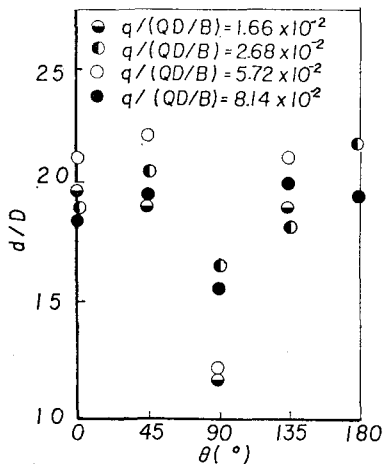


図-7 カルマン渦径と吸水位置の関係

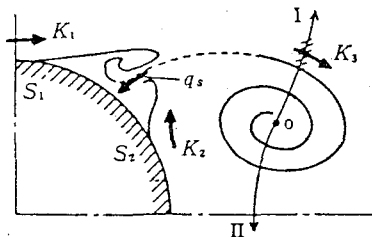


図-8 渦度流束のモデル⁶⁾

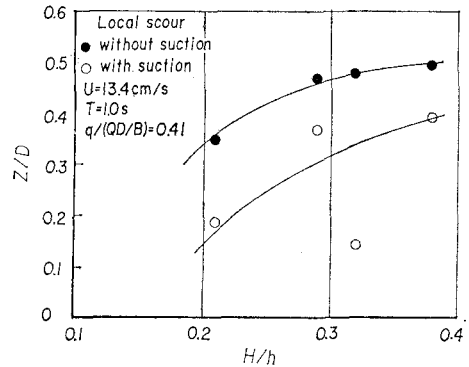


図-9 吸水による洗掘制御例

果を参照して、真横から吸水した。この図から明らかに、吸水すれば最終洗掘深が小さくなり、極端な場合にはほとんど洗掘が進まない場合もあり、洗掘の制御が可能であることがわかった。

6. 結 語

軽量骨材を用いて、砂れんが発生しない条件で、波・流れの共存場における円柱周辺の局所洗掘実験を行い、つぎのような結果を得た。

1) 砂れんがない場合、漂砂が活発に移動する領域で波高・水深比の増加とともに洗掘深が最大となり、その後急激に埋め戻されるのに対し、砂れんのある場合には、砂れんの形状抵抗や砂れんの背面上で漂砂雲となることから、洗掘孔に流入する漂砂が少なく、洗掘深は零にならない。

2) 砂れんのある場合の洗掘深のばらつきは、主に、砂れんの谷あるいは峰と洗掘孔の位置関係に起因している。

3) 円柱の側面から吸水すれば、カルマン渦の直径が小さくなり、その結果洗掘深が小さくなることが見いだされ、この方法を応用すれば洗掘制御できることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 柴山知也・先灘正成・塚本幸雄：波・流れ共存場での小口径円柱周辺の局所洗掘機構，第34回海岸工学講演論文集，pp.407～411，1987。
- 2) 土屋義人・河田恵昭・綿織 慎：波・流れの共存場の局所洗掘，第34回海岸工学講演論文集，pp.402～406，1987。
- 3) 水口 優・小島匡人・小宮山正二・佐藤 忍：波動による小口径円柱まわりの局所洗掘に関する実験的研究，第32回海岸工学講演論文集，pp.430～434，1985。
- 4) Nishikori, M.: Local scour around cylindrical piles due to waves and currents, Master thesis, Div. of Civil Eng., Graduate School of Eng., Kyoto Univ., 1987。
- 5) 友近 晋：流体力学，森北出版，p.208，1940。
- 6) 松井辰弥：渦の生成・崩壊，境界層，丸善，pp.333～367，1986。