

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

水口 優*・小島 匡人**・小宮山正二***・佐藤 忍****

1. はじめに

海洋構造物周辺の局所洗掘という問題が報告されて久しいが、その定量的予測方法は未だ確立されていない。それは現象が複雑で理論解析が難しいばかりでなく、室内規模での実験が、底質に砂を使う限り、現地との間で相似性を確保する点で問題があるために余り行われていないということによると考えられる。例えば榎木・出口 (1976) のように底質として砂以外の物を使うと底質の性質が異なる事になり、別の問題が生じ得る。底質に砂を使った実験としては Wells and Sorensen (1970) のものがある。共に最大洗掘量にのみ着目しており、洗掘形状すなわち洗掘機構に対する配慮が十分なされているとは言いがたい。

本論文は円柱径が波長に比べて小さいいわゆる小口径の円柱と規則波を用いて、1) 室内実験スケールでの局所洗掘の機構を明らかにし、2) 実験条件を選ぶ事によって現地との相似性を確保でき得る可能性を示し、3) その場合の洗掘現象について定量的な結果を報告するものである。具体的には円柱径、底質砂、および波の条件により洗掘形態、最大洗掘深、最大洗掘深発生位置がどのように変化するかを実験的に調べた。

2. 実験条件および方法

小型平面水槽 (長さ 6 m, 深さ 0.4 m, 幅 2.4 m) および 2 次元水槽 (長さ 30 m, 深さ 0.77 m, 幅 0.8 m) の 2 つの水槽において、条件を円柱径 $D=2.0 \sim 23.5$ cm の 6 種、底質は中央粒径、淘汰係数、比重 (d_{50} , $\sqrt{d_{75}/d_{25}}$, s) = (0.019 cm, 1.67, 2.69), (0.03 cm, 1.20, 2.63) の 2 種、波は周期 $T=0.95 \sim 3.00$ s, 円柱設置位置での波高 $H=1.80 \sim 8.66$ cm, 設置水深 $h=10.0 \sim 25.0$ cm と変えて合計 47 ケースの実験を行った。円柱は直立して常に水面上に出ており、その設置地点は常に浅海領域 ($h/L < 0.15$, L は波長) であった。

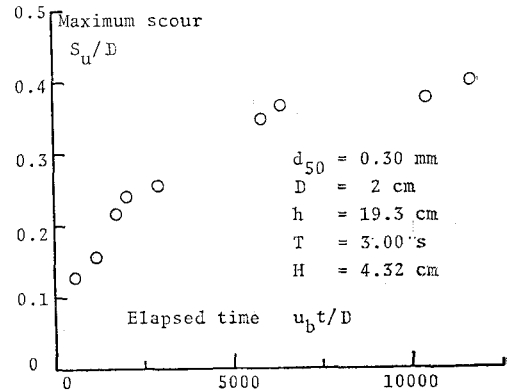


図-1 最大洗掘深の経時変化 図-2 の分類 (IV) に属し写真-4 のケースである。

実験方法は初期地形として水平床を作り円柱を設置した後、砂面計およびポイントゲージで円柱近傍の初期地形の一樣性を確認する。波は目視により地形変化が終了したと思われる時より数分長めに作用させる。洗掘の進行状況についての経時変化を見た例を図-1 に示す。一方向流れにおける洗掘は真の意味の平衡に達する事はないようである [例えば中川 (1974)] が、波動下の場合には円柱近傍を除き正味の流れは殆んどなく、かなり早く平衡形状に達するようである。波を止めた後、洗掘形状をカメラ撮影し、最終地形を砂面計およびポイントゲージで測定、初期地形における円柱近傍の平均値を差し引くことによって最大洗掘深を得た。なお、洗掘とそれに伴う堆積域は局所的であり、その外側では (平均的には) 初期地形のままである。後流域での現象のように左右の対称性の期待できない場合はその洗掘深の大きい方を、その他の場合は両者の平均をとった。また最大洗掘深発生位置は、砂面計のデータまたは目視によって定めた地点をカメラ撮影後読みとる事によって得た。

3. 実験結果と考察

3.1 洗掘形状について

洗掘形状は図-2 に示す様に縦軸に u_b/u_{b0} , 横軸に

* 正会員 工博 中央大学助教授 理工学部土木工学科

** 中央大学大学院生 理工学研究科土木工学専攻

*** 中央大学学生 理工学部土木工学科 (現中里建設)

**** 中央大学学生 理工学部土木工学科 (現大木建設)

D/L をとる事により5つに分類された。ここで u_b は底面最大流速で実測の波高 H 、周期 T (30 波平均) よりストークス波5次近似またはクノイド波3次近似を用いて算出し [磯部 (1978)], u_{bc} は次式で与えられる佐藤・田中の表層移動限界波高を同様にして流速に換算したものである。

$$\frac{H_0}{L_0} = 0.565 \left(\frac{d_{50}}{L_0} \right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h}{L} \cdot \frac{H_0}{H} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに H_0 , L_0 は沖波の波高と波長である。局所洗掘は明らかに前後非対称であり、波峰下流速が支配的なためその流速 u_b の精度のよい値が必要である。

(I) は砂漣が全面で発生する場合、(II) は円柱の後流域で発生した砂漣が伝播していく場合である。

(I), (II) は実験室スケールでは発生する砂漣のスケールと局所洗掘が同程度のものとなり、砂漣発生の相似律と局所洗掘のそれが絡むために

現地スケールとの相似性が期待できない。(III) は洗掘が円柱側面および背後に生じるケースで、円柱による縮流と後流渦による洗掘が支配的な場合である。(IV) は洗掘形状が一方向流れの場合と同様に円柱前面で逆円錐状をなし、円柱前面に発生する馬蹄渦によると考えられる洗掘が支配的な場合である。(V) は洗掘が生じないケースである。

図-2 において(I)と(II)の境界である砂漣の全面的発生限界は $u_b \geq 1.27u_{bc}$ であり、(II)と(III)および(IV)の境界である後流域における発生限界は $u_b \geq 0.95u_{bc}$ である。共に妥当な値と判断される。さて(III),(IV)のケースはそれぞれのメカニズムを考える事により境界値およびそれぞれの領域内での現象の現地との相似性が期待できる場合である。ただし図-2中の境界線は実験ケースが十分多いとはいえずやや不確定である。(IV)と(V)の境界はいわゆる洗掘限界になるわけである。 D/L が小さい時は $u_b/u_{bc} \approx 0.5$ であり、ポテンシャル理論によれば円柱側線での流速が接近流速の2倍になるという縮流効果に対応している。 D/L が大きい場合は回折現象が影響して縮流効果がおちる事になり、限界線は $u_b/u_{bc} = 1$ に近づく。(III)と(IV)の境界についてはまず逆円錐状洗掘は馬蹄渦によるものと考えた上で、馬蹄渦の発生条件として波動運動中の最大流速付近の持続時間と円柱

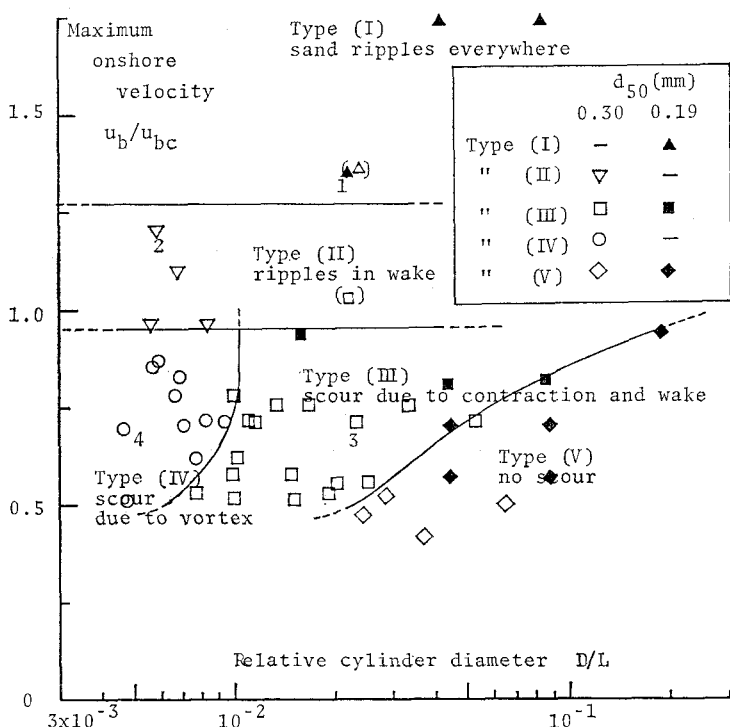


図-2 洗掘形状の分類、図中の数字1~4は写真番号に対応する。
() 内の点は樫木・出口 (1976) のものである。

径の比を考えパラメータとして D/L をとった。すなわち一方向流れ的な要素の強い場合程、馬蹄渦が発生しやすいと考えたわけであるが、その点については更なる検討を要する。なお後流渦の特性を支配すると考えられる K.C. 数 ($=u_b \cdot T/D$) を横軸にとって分類する事も試みたが、データのまとまりは図-2 に比べて悪かった。

写真-1~4 はそれぞれ図-2 の分類の (I)~(IV) に属するケースの最終洗掘形状である。図-2 中に写真のケースに対応する数字が示してある。写真-1 は砂漣の形状が円柱によってわずかに乱されている程度である。写真-2 は後流域で砂漣が発生しているものの D/L が小さいために逆円錐形状も発達している。写真-3 は後流渦による洗掘がよく発達している。写真-4 は、前面にきれいな逆円錐形状が見られる。波の入射方向は写真-1 のみ上方から他は左方からである。

3.2 最大洗掘深発生位置について

工学的に見て局所洗掘の重要なパラメータは最大洗掘深とその発生位置であろう。最大洗掘深発生位置を波の入射方向を $\theta = \pi$ とする極座標系 (r, θ) で表し、 θ と D/L の関係をプロットしたのが図-3 である。データは非常にばらついているが D/L の大きい(III)のケースにおいては、 $\theta = \pi/6 \sim \pi/2$ に発生し、 D/L の小さい(IV)のケースでは $\theta = \pi/2 \sim \pi$ に存在する。(III)と(IV)の境



写真-1 全域に砂漣が発生する場合 (I)

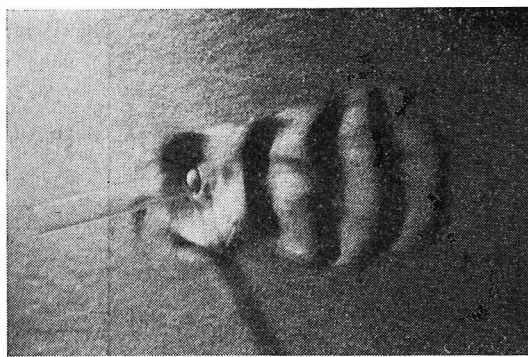
 $d_{50}=0.19 \text{ mm}, D=5 \text{ cm}, h=10 \text{ cm}, T=2.12 \text{ s}, H=5.21 \text{ cm}$


写真-2 後流域に砂漣の発生する場合 (II)

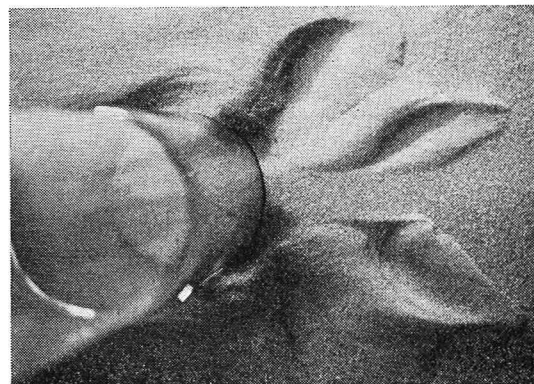
 $d_{50}=0.30 \text{ mm}, D=2 \text{ cm}, h=25 \text{ cm}, T=2.15 \text{ s}, H=8.66 \text{ cm}$


写真-3 縮流域および後流域が洗掘される場合 (III)

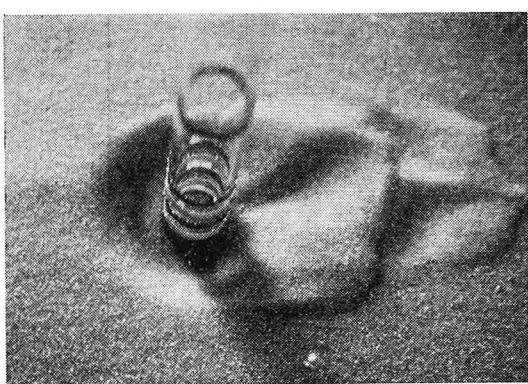
 $d_{50}=0.30 \text{ mm}, D=10 \text{ cm}, h=19.3 \text{ cm}, T=3.00 \text{ s}, H=4.23 \text{ cm}$


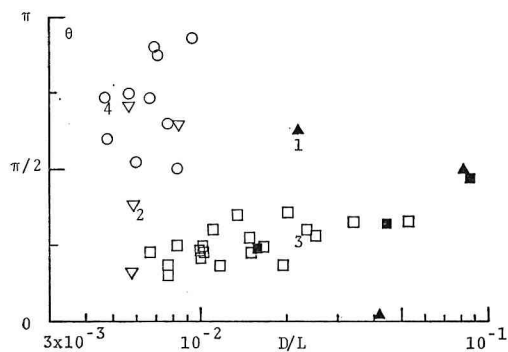
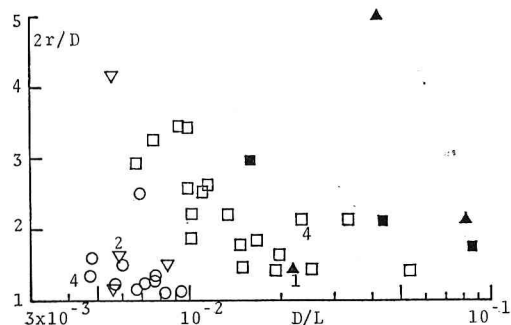
写真-4 逆円錐型洗掘形状の発生する場合 (IV)

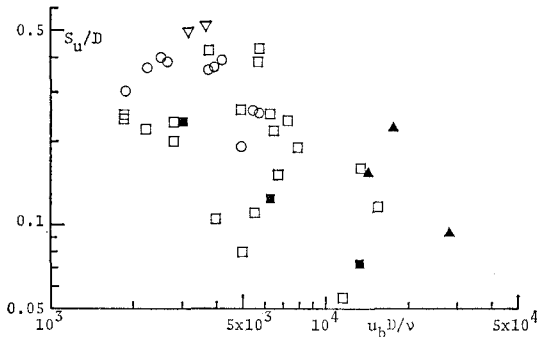
 $d_{50}=0.30 \text{ mm}, D=2 \text{ cm}, h=19.3 \text{ cm}, T=3.00 \text{ s}, H=4.32 \text{ cm}$

界域に属するケースではほぼ洗掘深の等しいものが円柱前面と後面に発生する場合についてはどちらもプロットしている。(IV)のケースにおいては逆円錐状の洗掘深の θ 方向の違いが少ないために、 $\theta=\pi/2\sim\pi$ でのばらつきは考えられる。一方(III)においては、後流渦パターンを分類するK.C.数をパラメータに θ が決定されることが予想されるが、実際にはそういった関係は見られなかつ

た。

また最大洗掘地点の円柱中心からの動径距離 r については図-4に示すように、(IV)に属して逆円錐状洗掘の見られるケースにおいては $2r/D\approx 1$ と円柱のすぐわきで最大洗掘が生じているのに対し(III)に属する場合はちがなりながらも D/L の小さい時は $2r/D=3\sim 4$ 、 D/L が増加するに従って減少しながら $2r/D\approx 2$ に近づいていく傾向が見られる。

図-3 最大洗掘位置角度 θ と相対円柱径 D/L 図-4 最大洗掘位置の動径距離 $2r/D$ と D/L

図—5 最大洗掘深 S_u/D と円柱レイノルズ数 $u_b D/\nu$

3.3 最大洗掘深 S_u について

一方向の流れの清水時洗掘においては、底質特性によって若干の差があるものの最大洗掘深は殆んど円柱レイノルズ数 ($Re = u \cdot D/\nu$, u は接近流速, ν は動粘性係数) で決定される [中川 (1974)]. 本実験でも円柱レイノルズ数と無次元最大洗掘深 S_u/D の関係を調べたところ、図—5 のようになり (IV) に属するケースは (III) との境界に近い ($S_u/D < 0.3$) 3 点を除き、わずかながらの上昇傾向のある同一曲線に乗っているようにも見られる。他の分類に属する場合は無相関となっている。

波動による洗掘においては K.C. 数によって洗掘深が支配されるという報告があり [榎木・出口 (1967)], 本実験の結果についてもその様に整理してみたところ図—6 を得た。(IV) に属するケースは図—5 でも見たように先の 3 点を除くと K.C. 数によらずほぼ一定値 0.4 となる。他のケースはほぼ線型の関係を示し、例えば Type (III) のケースに対しては次のような実験式を与える。

$$\frac{S_u}{D} = 0.061 + 0.017 \left(\frac{u_b \cdot T}{D} \right) \dots (2)$$

この結果は、K.C. 数の大きい時は S_u には D が殆んど関係しない事を示している。(IV) 以外のケースは K.C. 数によって支配される後流の影響を強く受けた洗掘であり実験に用いた底質に余り差が無い事を考えると当然の結果である。

ついで底質の性質を考慮した場合の整理方法として底面流速と限界流速の比を横軸に、底面流速が限界流速を越える時間の長さに着目し、洗掘深を波長 L で無次元化してプロ

ットしたのが図—7 である。(I) から (IV) のどのケースにおいても u_b/u_{bc} の増加に伴い S_u/L が増加する傾向を示している。図中では Type (III) および Type (IV) に対し次式で示されるような実験曲線をあてはめてみた。

Type (III):

$$\frac{S_u}{L} = 0.0049 \left(\frac{u_b}{u_{bc}} \right)^{1.3} \dots (3)$$

Type (IV):

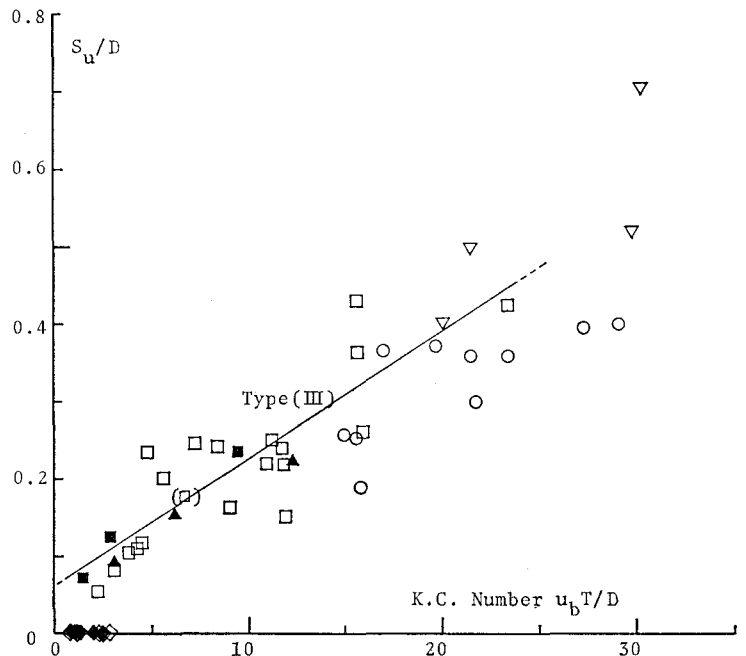
$$\frac{S_u}{L} = 0.0034 \left(\frac{u_b}{u_{bc}} \right)^{1.4} \dots (4)$$

この結果、洗掘深は円柱径によらない事になるが (III) の場合は図—6 で見たように近似的には確かにそうであり、(IV) の場合は実験における D/L の範囲が小さいため決定的なことは言えない。なお、洗掘深を円柱径 D で無次元化してプロットする事も試みたが、データは一定の傾向を示さなかった。

4. ま と め

室内実験スケールでの波動運動による小口径円柱まわりの局所洗掘現象について以下の様な結論が得られた。

1) 洗掘の発生は波峰下での底面流速と限界流速の比 u_b/u_{bc} と円柱径と波長の比 D/L によって決まる、2) 洗掘形状も u_b/u_{bc} と D/L によって、砂漕が全域に発達する場合の洗掘 (I)、後流域に砂漕が発生する場合の洗掘 (II)、縮流域および後流域での洗掘が支配的な場合 (III)、馬蹄渦によると考えられる逆円錐状の洗掘形状を呈する場合 (IV) の 4 つに分類される。その中で (I) と

図—6 最大洗掘深 S_u/D と K.C. 数 $u_b T/D$

(Ⅱ)は室内実験のスケールでは発生する砂澱と洗掘が同程度となってしまう。(Ⅲ)と(Ⅳ)の場合については、3) 最大洗掘深の位置はばらつきがあるものの(Ⅳ)では円柱近傍前面にあり、(Ⅲ)では円柱後部の離れた所に移動する事、4) 最大洗掘深は(Ⅲ)、(Ⅳ)を通じて波長 L で無次元化する事によりそれぞれで無次元底面最大流速による事がわかった。

現地スケールの現象においては図-2の(Ⅰ)、(Ⅱ)においても砂澱の影響が無視できて、(Ⅲ)と(Ⅳ)の

境界も上にのびるものと考えられる。その時の最大洗掘位置はともかく、洗掘深が本実験結果、例えば(3)、(4)式の延長上にくるか否かは今後の研究を待たざるを得ない。

参 考 文 献

1) 磯部雅彦・西村仁嗣・堀川清司：保存波の擾動解の波高による表示，第33回土木学会年次学術講演会概要集Ⅱ-394，1978。

2) 佐藤昭二・田中則男：水平床における波による砂移動について，第9回海岸工学講演会論文集，pp. 95~100，1962。
 3) 榎木 亨・出口一郎：波動による円柱周辺の局所洗掘に関する実験，第31回土木学会年次学術講演会論文集Ⅱ-76，1976。
 4) 中川博次：水理構造物による局所洗掘，1974年度水工学に関する夏期研修会講義集，A-1-1~A-1-15，1974。
 5) Wells, D. R. and R. M. Sorensen: Scour around a circular cylinder due to wave motion, Proc. 12th Coastal Eng. Conf., pp. 1263~1279, 1970.

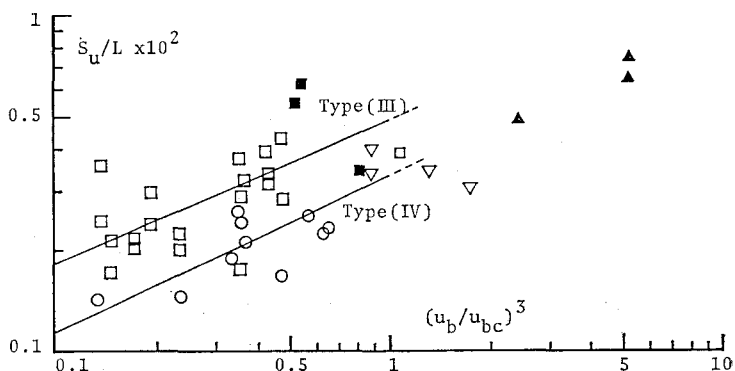


図-7 最大洗掘深 S_u/L と底面最大流速 u_b/u_{bc}