

波・流れ共存場での小口径円柱周辺の局所洗掘機構

柴山 知也*・先灘 正成**・塚本 幸雄**

1. はじめに

構造物周辺の局所洗掘問題については、従来から主に一方向流のもとで研究が行なわれており（たとえば吉川¹⁾）、主として馬蹄形渦の作用により、直立円柱周辺の洗掘が引き起こされることが分かっている。一方、波による洗掘の研究は Wells and Sorensen²⁾、樫木、出口³⁾の最大洗掘深を対象とした研究、水口ら⁴⁾の実験室規模での洗掘機構の研究など、近年ようやく定量的な取り扱いが行なわれるようになってきた。しかしながら波流れ共存場の下で構造物周辺の流速場をモデル化し、局所漂砂量則と合わせ用いることによって、洗掘を定量的に予測しようとする研究は実用的な観点からはいまだに成功していないようである。本研究の目的は、最近注目されつつある、波流れ共存場における直立小口径円柱周辺の局所洗掘現象について、主に円柱周辺に発生する馬蹄形渦や剝離渦などの渦の運動に注目して、水理実験および数値モデルを用いて検討することである。ここで直立円柱は沿岸部に建設される橋脚あるいはプラットホームの脚部を想定している。本研究では流況の可視化に基づいて渦の運動をモデル化し、さらに局所漂砂量則と合わせ用いて洗掘現象のモデルを作成し、その妥当性を検討した。さらに杭工法、シート工法などの洗掘防止工法の効果についてもそれぞれの渦の作用と関連付けて実験的に検討した。

2. 実験方法及び結果

実験には環流装置付き小型二次元造波水路（長さ 11 m, 幅 0.2 m, 深さ 0.3 m）を用い、種々の波の条件（波高 0~6 cm, 周期 1~1.5 s）とそれに重なる種々の一方向流（波の進行方向を正とし、正方向と逆方向にそれぞれ 0~16 cm/s）の下で洗掘現象を観測した。水深は 20 cm とした。アルミ粉末を投入し、スリット光源を用いて 35 mm カメラおよびビデオテレビで任意の断面を撮影し、主に馬蹄形渦と剝離渦の挙動に注目しつつ直立円柱周辺の流速場を観察した。また最終洗掘形状をポイン

トゲージを用いて計測した。移動床の場合、底質には中央粒径 0.7 mm の砂を用いた。これはより細かい砂で実験すると、底面全域にわたって砂漣が形成される場合が多く、現地スケールとの相似性が期待できないためである。いずれの実験ケースにおいても実験開始後 30 分ほどで洗掘形状はほぼ定常状態（最終地形）に達した。

図-1 に a) 流れによる最終洗掘形状、b) 波による最終洗掘形状、および c) それらの条件の波、流れが重なり合った場合の最終洗掘形状の比較の例を等高線図で示す。図で H は波高、 T は周期、 V は定常流速（+が波の進行方向と一致する方向）を示す。等高線図はほぼ上下対称となるため、下半分のみを記入してある。図に示すように波流れ共存場では、著しく広い範囲に洗掘領域が拡大される場合があることがわかる。これは主として浮遊砂を多数取り込んだ剝離渦の運動が、主流部流速の時間変化の作用により、広範囲に及ぶためである。特に砂の堆積域は、剝離渦が取り込んだ浮遊砂を沈降させる場所によって決定される。この剝離渦の運動が、主流部の流速の時間変化に伴い複雑になる点が、流れによる洗掘に比べて、波による洗掘あるいは波流れ共存場の洗掘を特徴付けるものといえる。

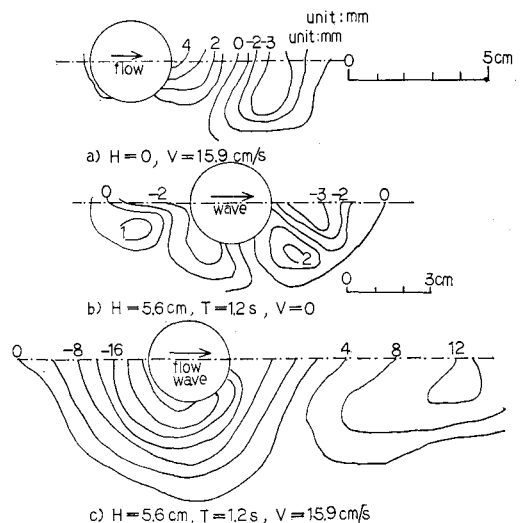


図-1 最終洗掘形状の比較 H : 波高, T : 周期, V : 流速

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 学生会員 東京大学大学院工学系研究科

実験結果より、一方向流の場合と同様に、縮流による馬蹄形渦と流線のはく離による後流渦が、局所洗掘に支配的な影響を及ぼすことが分かった。洗掘形状はこれらの渦の挙動によって決定される。まず円柱周りは一方向流の場合と同様に、馬蹄形渦の作用によりほぼ円柱側面にそって侵食される。馬蹄形渦に取り込まれ、浮遊した砂は、剝離渦の作用によって円柱周辺部に運ばれ、渦が崩壊するとともにその場に沈降することとなる。即ち洗掘形状はこれらの渦の運動によって変化する。そこで固定床の下でアルミ粉を用いて流速場を可視化し、これらの渦に注目して渦の移動、渦径の大きさなどを可視化実験によって求めた。剝離渦の可視化に当たっては、剝離渦が三次元構造を持つために、底面よりの高さによって渦内の流速、渦径などが大きく変化することが考えられる。そこでスリット光源の高さをいろいろに変化させて写真を撮影した。その結果、高さ方向に諸量の若干の分布が見られたため、底面付近を観測するために、スリットの位置を底面から 1 cm に固定して撮影を行なった。なお撮影に当たっては、水面での光の屈折により像が歪みを生じるため、防水ハウジングを作製し、波の場を大きく変化させないように注意しつつカメラのレンズの先端を水中に挿入した。

3. 数値モデルによる検討

可視化実験の結果に基づき、以下に述べる単純化した仮定を与えて、流速場のモデルを作成した。まず後流渦についての仮定を述べる。剝離点位置は円柱表面に沿って圧力勾配が 0 になる点で与えることを試みた。しかし現実には計算結果において、渦度流速が大きくなる位

相付近では波の進行方向と直角方向付近に剝離点が集中するために、剝離点はこの点であたえた。循環の大きさは Sarpkaya⁵⁾ に習って渦度流速の時間積分で与えた。さらに渦の構造をランキン渦と仮定し、コアの半径 r は可視化実験から読みとった実験結果をも参照して 図-2 に示すような結果から時間の 1/2 乗に比例する関数

$$r = 11.2\sqrt{vt} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ν : 水の動粘性係数, t : 渦放出後の時間

で与えた。次に渦の移流については主流と渦の鏡像(円柱表面を鏡面とする)の影響を考えた。また渦の放出高さについては実験結果より 5 mm と定めた。

次に馬蹄形渦についての仮定を述べる。まず渦の強さについて Shen⁶⁾ のモデルを準定常の仮定のもとに適用して、各瞬間における回転流れの外縁流速 u_1 を非攪乱部の表面流速から以下のように求めた。

$$u_1 = Du_0/4\pi r_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

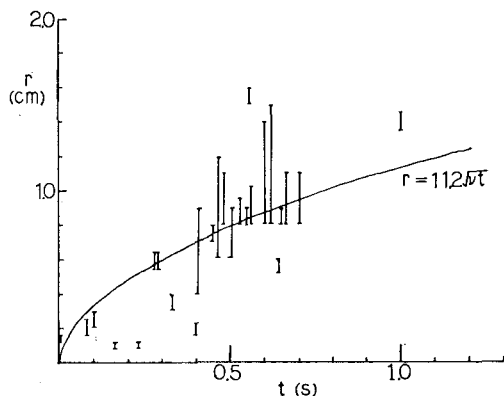


図-2 渦のコア径の時間変化の実験値とモデルに用いた関数

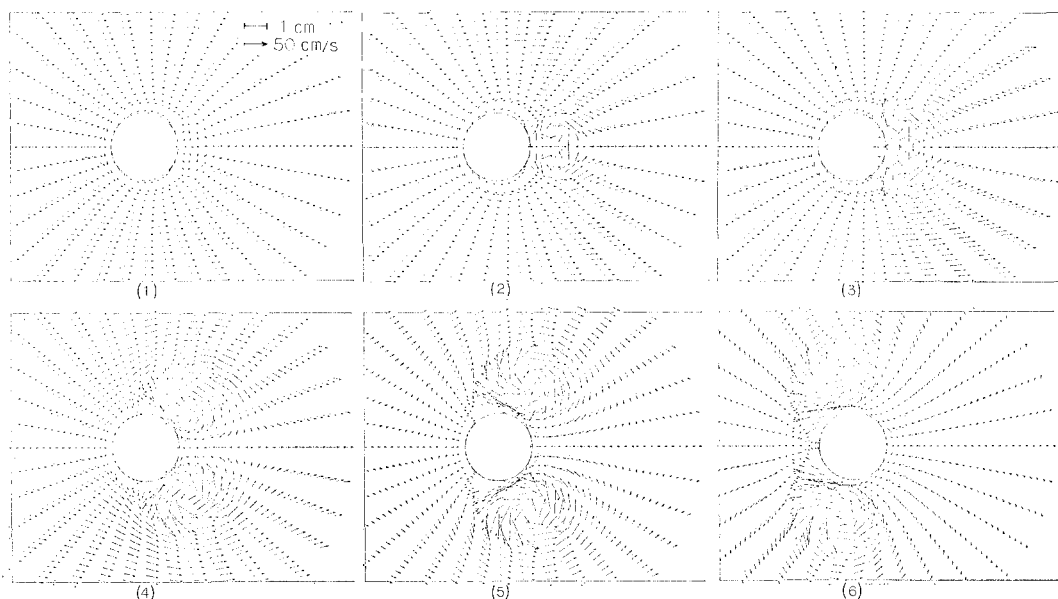


図-3 円柱周辺底面流速場の位相変化 (2 π /10 位相ごとの流速ベクトル図)

ただし u_1 : 各瞬間の回転流れの外縁流速, D : 円柱径, u_0 : 非攪乱部の各瞬間の表面流速, r_0 : 渦の半径である. また, 宇民⁷⁾によれば馬蹄形渦の半径 r_0 は

$$r_0 = 0.2D \dots \dots \dots (3)$$

で与えられる.

上記二つの渦の流速場とポテンシャル成分による流速場を足し合わせることで, 円柱周辺の底面流速場を計算した. 図-3 に計算した底面流速場の主要な位相分の例を位相 $2\pi/10$ 毎のベクトル図で示す. 図に示した例は波高 5.7 cm, 周期 1.2 s, 定常流速 +10.3 cm のものである. 馬蹄形渦の強さの時間変化, 剝離渦の一周期間の運動による底面流速の時間変化を図より読み取ることができる. 以上のモデルによって計算した流速場は, 可視化実験の結果と, 馬蹄形渦の効果と剝離渦の効果をも含めて, 定性的にはよく一致していた.

次に上記モデルによって求めた各位相ごとの底面流速場に, 準定常の仮定のもとに Brown⁸⁾ 型の局所掃流漂砂量式を適用し, 底質の連続条件から砂面高さの変化を求めることを試みた. 移動量式は以下で表わされる.

$$\Phi(t) = 40 \times \Psi^3(t) \dots \dots \dots (4)$$

ただし, Φ : 無次元漂砂量, Ψ : シールズ数

$$\Phi(t) = \frac{q(t)}{wd}, \quad \Psi(t) = \frac{f_w u_b^3(t)}{2sdg}$$

q : 瞬間体積漂砂量, w : 砂粒子沈降速度

d : 粒径, s : 砂粒子水中比重, f_w : 摩擦係数

である. ただし f_w は計算の便宜のために, 例示する計算結果を求める場合には 0.01 に設定した. 上記の漂砂量式によって, 各瞬間における流速ベクトル方向の漂砂量を求め, それを極座標の各成分に分配した.

図-4 に砂面高さ時間変化の, 数値計算と実験結果の比較を示す. 数値計算結果は, 現段階では勾配の効果が入っておらず, 最終地形に達する事はない. そこでここでは数値計算結果は一周期後の結果を示してある. 実験結果は最終地形であるから直接の定量的比較はできないが, 定性的に侵食域と堆積域の領域を比較すると, 後流部では定性的に侵食域と堆積域の位置が一致している. 即ち後流渦の効果は本モデルに良く取り込まれているといえる. 一方, 円柱前面での洗掘はモデルでは再現されていない. これは現実の現象では馬蹄形渦に取り込まれた浮遊砂の効果が顕著なため, 式 (4) で与えた掃流砂公式では砂の運動が表現不能であることを示している. 馬蹄形渦に取り込まれた浮遊砂に関しては更に良く検討する必要があるといえる.

4. 洗掘防止工法の検討

以上の洗掘機構の考察に対応して, 洗掘防止工法についても検討した. ここでは杭工法と多束マットによ

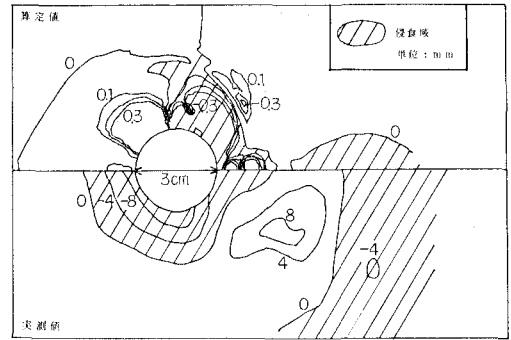


図-4 侵食, 堆積域分布の実測値と計算値の比較の例

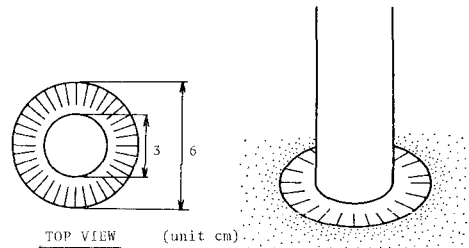


図-5 多束マットの構造

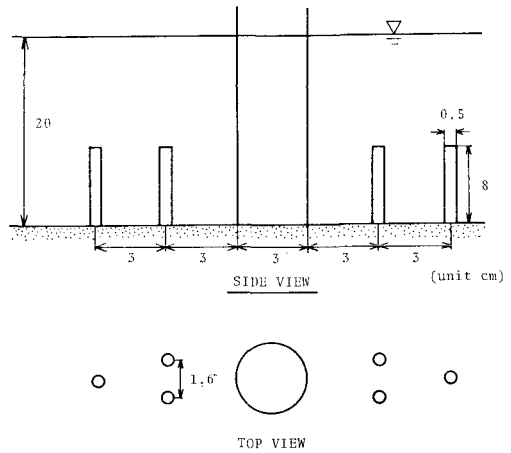


図-6 杭の配置図

る工法 (佐伯⁹⁾) をとりあげる. 円柱周辺に杭を打つ工法は後流渦内の流速場を乱すために主として後流渦による洗掘や砂の運搬の防止に効果があり, また境界層を制御することにより馬蹄形渦を弱める効果も若干は存在すると考えられる. 一方, 脚部周辺をシートで覆う工法は, 直接に馬蹄形渦の作用を受ける侵食部分を保護する為に, 馬蹄形渦による洗掘に効果があると考えられる. そこでそれぞれの最大洗掘深軽減率を実験的に求めた. 実験に用いた多束マットは直径 3 cm の円柱のまわりに直径 6 cm, 厚さ 0.5 mm の生ゴムラバーを用いて作成したものであり, 32 まいのマットに分割してある. 図-5 に多束マットの構造を示す. また, 杭は後流渦の

表—1 洗掘防止工による最大洗掘の軽減率

H (cm)	0	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
V (cm/s)	16	0	10	16	-10	-16
杭工法 (%)	74	39	8	11	12	25
シート工法 (%)	8	80	2	52	29	44

最も発達する地点に相当する部分に設置した。図—6に杭の配置図をしめす。このような工法を実施した場合と実施しない場合について最終地形における最大洗掘深さの比較を行ない、その効果を確かめた。表—1に波流れが同一の方向の場合におけるそれぞれの防止工法の最大洗掘深さの軽減率を百分率で示す(100%は洗掘が全く起こらなくなることを示し、0%は軽減効果がないことを示す。)洗掘において後流渦の作用が支配的な場合には杭工法が効果的であり、馬蹄形渦の作用が支配的な場合には多束マット工法が効果的であることが表—1に示した結果、および実験による現象の観察結果から裏付けられた。

5. 結 論

波流れ共存場の鉛直円柱周辺の局所洗掘現象を実験及びモデルを用いて検討し、以下の結論を得た。

(1) 円柱周辺の底面流速場は後流渦、馬蹄形渦をそれぞれモデル化し、ポテンシャル成分に重ねることにより、算定できる。

(2) 流速場のモデルに局所掃流漂砂量則を適用し、砂

面高変化を求めると、馬蹄形渦内の浮遊砂の効果が支配的な領域以外では侵食、堆積の領域が一致する。

(3) 後流渦による洗掘に対しては杭工法が有効であり馬蹄形渦による洗掘に対しては多束マット工法が有効であることが、波流れ共存場の局所洗掘現象についても確かめられた。

参 考 文 献

- 1) 例えば、吉川秀夫：流砂の水理学，丸善，pp. 313～341，1985。
- 2) Wells, D. R. and R. M. Sorensen: Scour around a circular cylinder due to wave action, Proc. 12th Coastal Eng. Conf., pp. 1263～1279, 1970.
- 3) 樺木 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回土木学会関西支部年次学術講演会概要集，II-76，1976。
- 4) 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回海岸工学講演会論文集，pp. 430～434，1985。
- 5) Sarpkaya, T.: An analytical study of separated flow about circular cylinders, Jour. of Basic Eng., Trans. of ASME, Vol. 90, pp. 510～518, 1968.
- 6) Shen, H. W.: Scour near piers, River Sedimentation, 2, Chapter 23, WRP, 25, 1971.
- 7) 宇民 正：円柱橋脚前方における局所流の研究，土木学会論文報告集，No. 247, pp. 61～69, 1976.
- 8) Brown, C. B.: Sediment transport, in Engineering Hydraulics, edited by H. Rouse, John Wiley and Sons Inc., N.Y., 1039 p., 1950.
- 9) 佐伯康二・北川 信・山県 守・今井貫爾・利穂吉彦・小池 司：強潮流下における大規模構造物周りの局所洗掘現象に関する実験的研究，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 435～439，1985。