

波による円柱まわりの局所洗掘

西 沢 勝*・沢 本 正 樹**

1. ま え が き

海洋構造物周辺における水粒子運動の局所的かく乱によって起こされる局所洗掘は、構造物自体の安全を脅かすものである。局所洗掘の防止という観点からすると、洗掘領域における水粒子の挙動と、それによる海底境界面の動きとの相互作用を系統的に把握するとともに、洗掘領域内での砂の移動量と洗掘領域の規模の時間的変化との関係を確定する必要がある。しかし、その現象は極めて複雑であり、又その特性は極めて多くの要因に支配されているため、洗掘深をいかに予測するかという問題が実験室内規模においてすら確立されていないのが現状である。本研究は、このような現状を踏まえて、まず、どのような局所洗掘形状が存在するかということに主眼を置いて実験を行なった。次に、得られた主要な3つの局所洗掘形状について、水素気泡法により可視化を行い、洗掘機構との関連を追求した。又主要な洗掘形状である、ツノ状洗掘については、流速の平面分布の測定を行ない、可視化結果と対比することを試みた。最後に、K.C. 数を広い範囲(0.9~12.0)で変化させ、後流過パターンと洗掘形状との間の洗掘機構の関係を系統的に調べた。その結果、円柱まわりの局所洗掘形状は、その後流過パターンと密接な関係があることが判明した。又従来、局所洗掘は、大口径円柱・小口径円柱とで別々に論じられるのが一般的であったが、前記の結果を踏まえて、この点についても、K.C. 数で系統的に論ずることが出来るかどうか、その可能性を検討した。

2. 実験装置及び方法

洗掘形状の実験は、図-1に示す様に、長さ1300.0 cm、巾35.6 cm、高さ45.0 cmの手製の水槽を用いて行なった。一端にフラッター型の造波機を取り付け、他端に砂を敷き詰めた。使用した砂は $d_{50}=0.42$ mm、比重 $S=2.60$ の一種類である。砂の敷き方は、水平床では、砂層厚を10.0 cmとし、水路長方向に約6 m程敷

いた。端部は1/5程度の斜面にし、さらに消波ブロックを汀線付近に敷いて、反射率を低下させた。

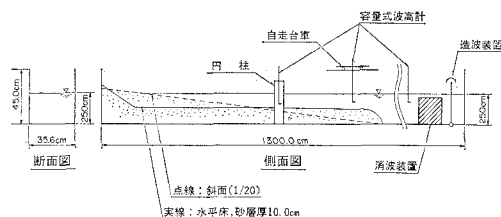


図-1 実験装置

斜面では、勾配を1/20に統一し、全てのケース共シートフロー状で行なうため、斜面を水路長方向にずらせることにより、設置水深を変化させた。水位は水平床、斜面共に25.0 cmに統一した。反射率は自主式台車を用い、Healyの方法により、1ケース4~6回求め、概ね9~15%の値を得た。実験条件は表-1に示す通りで、円柱径、周期共2種類である。

表-1 実験ケース

円柱径	波高 周期	水平床				斜面(1\20)			
		円柱での波高(cm)				円柱での波高(cm)			
		穴(1)	穴(2)	穴(3)	穴(4)	穴(1)	穴(2)	穴(3)	穴(4)
2 cm	1.02s	3.4	5.9	6.9	7.8	4.7	7.0	8.4	7.7
	1.43s	3.1	4.7	6.3	8.2	5.9 注)	3.8 注)	7.2	10.0
8 cm	1.02s	3.3	6.1	6.9	7.8	5.8	8.0	9.4	9.8
	1.43s	2.5	3.9	6.7	7.8	4.7 注)	3.4 注)	7.2	10.6

注) 穴(1)と穴(2)で波高が逆転している部分は設置水深が異なるためである。

可視化は水槽底に、長方形の穴をあけ、そこにアクリル製(高さは砂層厚と同じ10.0 cm)の箱で、水槽内部より覆い、水槽底より写真撮影した。タングステン線は、径0.1 mmのものを、底より6 mmの高さで、水路巾方向に1本ないし、2本張った。

* 正会員 工修 東北大学助手 工学部土木工学科

** 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

ツノ状洗掘の洗掘機構の解明のため、流速の平面分布の測定を行なった。5 mm のプロベラ式流速計を用い、粗度を同じくするため、洗掘形状の実験の時と同じ砂を、ニスで板に張り付け、その上に、1.0 cm メッシュの格子を組み、その格子点で底面より 6.0 mm の位置の流速を測定した。

K.C. 数を求める際の流速は、通常円柱のない場合の流速を用いるが、ここでは、前述の流速の測定結果の考察より、円柱の影響範囲外の流速を用いて差し支えないことが判明したので、以下のような方法をとった。

円柱中心を通る水路巾方向の流速分布は、円柱付近では大きく、円柱から離れるにしたがって少しずつ小さくなる。さらに離れると、それ以上は流速が一定となる領域が存在する。以上のことから、本研究では、上記の流速一定の領域における値を用いて、K.C. 数を算出した。

3. 実験結果及び考察

3.1 .

図-2 に岸向き最大流速分布を、図-3 に沖向き最大流速分布を、等流速線図として示す。測定したケースは、写真-1 に示す場合と同じで、円柱径 $D=8$ cm, 周期 $T=1.43$ s, 設置水深 $h=15.0$ cm, 水平床, 円柱での波高 $H=6.7$ cm のツノ状洗掘の場合である。図中には、破線でツノ状洗掘の位置も示した。写真-1 は造波 2 分 30 秒後の洗掘形状を示したものであるが、円柱の岸側にツノ状洗掘が生じ、円柱の側壁には、波の谷によって戻りきれなかった砂が堆積している。図-2 によると、流速分布のコンターの集中する点、即ち剝離点でツノ状洗掘が生じている。これは、Rance(1980) 及び東江・勝井(1985)の所見——これは大口径円柱まわりの局所洗掘について述べたものである——と一致することは興味深く、注目すべき点である。本研究は、円柱径 D と波長 L の比 D/L が 0.06~0.02 程度の範囲にあって、小口径円柱まわりの局所洗掘について述べたものである。このように、大口径、小口径円柱まわりの洗掘が、剝離点付近で一致して生ずる点は、局所洗掘現象も K.C. 数で系統的に論ぜられるのではないかと、という主張の一つの有力な根拠となっている。厳密には、回折理論によって、散乱波が底面流速に与える影響範囲を検討する必要があるものと考えている。この点については、上記、東江・勝井の論文に、MacCamy & Fuchs の理論による底面流速分布を、円柱が無い場合の底面流速との比で示した、指示に富む研究がある。それによると、円柱近傍では、その比が 0.5 程度であるが、円柱から 30~40 cm 離れると、その比は 1.0 となって、散乱の影響は無いことを示している。しかし、円柱近傍での底面流速に与える散乱波の影響が不明であるので、より詳細な理論的検

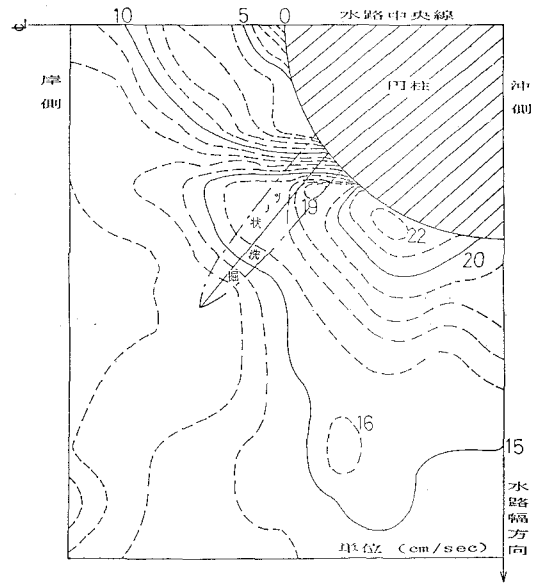


図-2 岸向き最大流速

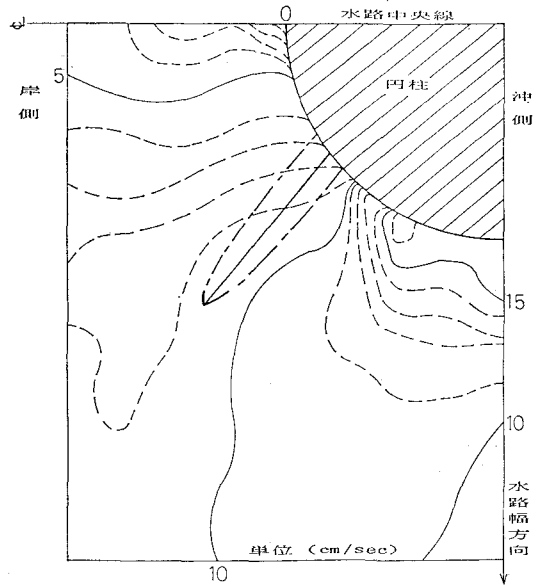


図-3 沖向き最大流速

討が必要である。

図-3 によると、円柱斜め沖向きにも若干の剝離が認められるが、本実験では、ツノ状洗掘は認められなかった。円柱沖側は、全体として滑らかな凹形に掘れる。これは、波の非線形性の影響によるものと考えられる。即ち、図-2、図-3 から判るように、沖向き最大流速は、岸向き最大流速の 75% 程度の流速しかなく、そのため剝離も弱く、ツノ状洗掘が岸沖対称に生じないものと考えられる。

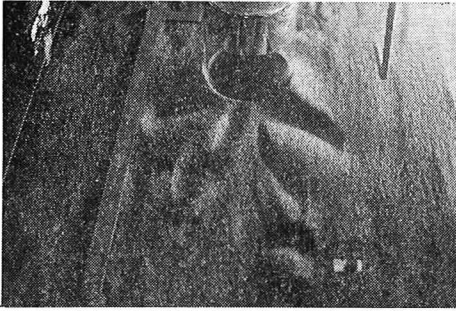


写真-1 ツノ状洗掘 写真下：岸側 K. C.=2.7

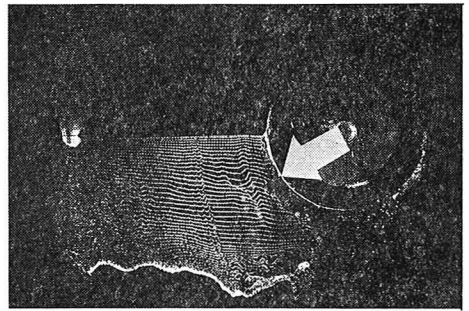


写真-1' ツノ状洗掘の剝離 写真下：岸側

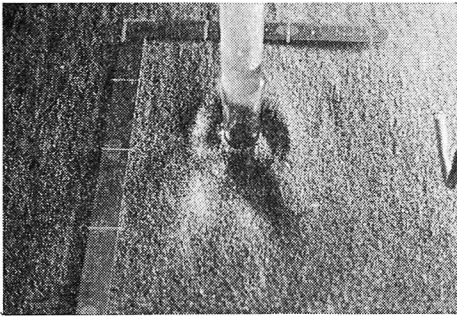


写真-2 混合形状 写真下：岸側 K. C.=6.9

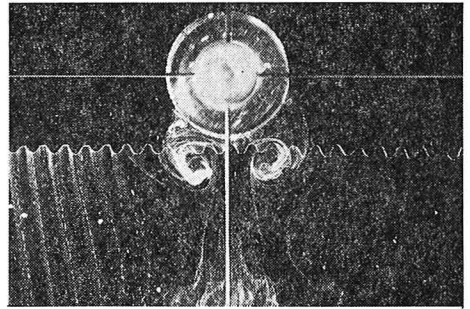


写真-2' 対称渦 写真下：岸側

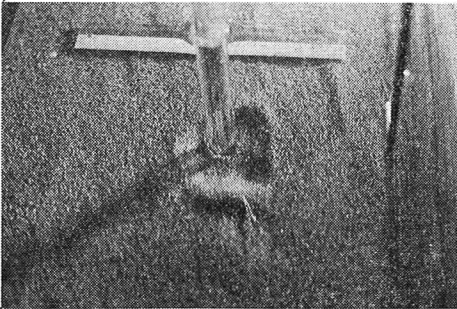


写真-3 逆円錐洗掘 写真下：岸側 K. C.=7.7

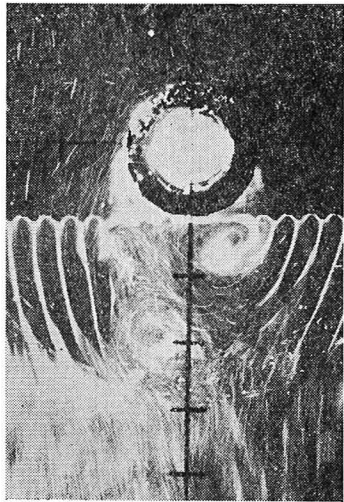


写真-3' 非対称渦 写真下：岸側

3.2 洗掘形状と可視化

写真-1, 2, 3 に3つの主要な洗掘形状を, K.C. 数の小さい順に示す. その右に, 各々の場合の可視化結果を写真-1', 2', 3' として示す. 実験条件は, 写真-1: ツノ状洗掘, 円柱径 $D=8$ cm, 周期 $T=1.43$ sec, 波高 $H=6.7$ cm, 設置水深 $h=15$ cm. 写真-2: ツノ状洗掘と逆円錐形洗掘の混合形状, $D=2$ cm, $T=1.02$ sec, $H=8.4$ cm, $h=10$ cm, 写真-3: 逆円錐形洗掘, $D=2$ cm, $T=1.02$ sec, $H=6.9$ cm, $h=15$ cm である. 以下に, 各洗掘形状とそれ等の可視化結果についての考察を述べる.

a) ツノ状洗掘の場合 (写真-1, 1')

この場合の K.C. 数 (UT/D) は, 2.7 で, 流れは剝

離するが, 渦の形成は認められない. 写真-1' に剝離点を矢印で示した. 剝離点付近では, 水粒子は激しく乱れ, 砂を動き易くし, さらに少し遅れて, 波の冲向き流れが加わるため, 剝離点付近でツノ状洗掘が生ずる. 剝離の規模が小さいにもかかわらず, ツノ状洗掘が大きく出来る理由は, 波の冲向き流れが大きく影響しているものと考えている. 即ち, 剝離直後の波の冲向き流れによって, 砂が冲向きに方向転換して運ばれるためと考え

る。目視によると、砂の動きは、砂れんの動きと類似している。斜め岸向きに出来る理由としては、可視化では確認出来なかったが、円柱岸側に生ずる後流域の縁に沿って出来るものと考えている。プロベラ式流速計の記録によると、後流域の縁では、かなりの流速のランダム変動が認められ、砂が動き易くなっていると考えられるからである。

大口径円柱、小口径円柱共、剝離点で洗掘が生ずることは、3.1で述べた通りであるが、K.C. 数で系統的に論ずる場合のもう一つの問題点は、表-2 に示す様に、本研究では、0.9 以下の K.C. 数について実験を行なっていないことである。前記、東江・勝井の大口径円柱における研究の K.C. 数の範囲も、筆者の試算では、概ね 0.5~1.0 の範囲にある。したがって、今後の課題として、K.C. 数が 0.9 以下の実験を行い、大口径円柱の洗掘形状と比較検討する必要があると考える。

岩垣ら(1982)は、波動場における円柱周辺の後流渦パターンの既往の研究を整理しているが、それによると、表-2 に示すように、本ケースは、V-1 の渦パターンに属する。

b) ツノ状洗掘と逆円錐形洗掘の混合形状の場合(写真-2, 2')

この場合の K.C. 数は 6.9 で円柱まわりに、対称渦が生じる。この対称渦の岸沖方向への移動に伴って、円柱まわりの砂がはじき飛ばされて、逆円錐形洗掘が生じ、さらに剝離と後流域に対称渦が移動した直後の波の沖向き流れによって、ツノ状洗掘が生じる。本ケースは、表-2 に示すように、ツノ状洗掘と逆円錐形洗掘の遷移過程であって、対称渦がその働きの原動力となっているわけである。一般に、物理現象というものは、ある状態からある異なった状態に移り変る場合には、必ず遷移状態が存在する、という観点から考えると、本ケースは至極妥当な結果が得られたと云える。本ケースは、岩垣らの分類によると、V-2 の渦パターンに属する。

c) 逆円錐形洗掘の場合(写真-3, 3')

K.C. 数は 7.7 で円柱まわりに非対称渦が生じる。この非対称渦の岸沖方向への移動に伴って、円柱まわりの砂がはじき飛ばされて、逆円錐形洗掘が生じる。後流域に発生する渦が非対称であるため、ツノ状洗掘は生じない。前述の岩垣らの分類によると、本ケースは V-3 の渦パターンに属する。

波動場においては、河川構造物周辺の局所洗掘の場合に認められるような、馬蹄形渦の存在は認められないことが、西沢ら(1987)によって報告されており、同じ逆円錐形洗掘であっても、そのメカニズムは全く異なる。上述のように、波動場における円柱まわりの局所洗掘に支配的なものは、集中渦であるが、なぜ一様流の場合のよう

に馬蹄形渦が認められないかという問題は重要である。即ち、馬蹄形渦の発生条件とも云うべき問題である。

Baker(1979) は、流れが層流の場合の層流馬蹄形渦の発生について興味深い実験的研究を行なっているが、参考までに、彼の研究によって試算してみる。境界層排除厚さ δ^* を波動境界層では 0.2 cm ぐらいに仮定すると、 UD/ν (ν : 動粘性係数 = 0.01 cm²/s) は約 3000~4000 になる。 $D/\delta^* = 10$ ぐらいとなり、6 渦糸領域内となる。いずれにせよ、渦糸は発生する領域に属しており、馬蹄形渦は存在することになる。それでは、波の場合にも馬蹄形渦は存在しているが、ただ可視化では確認出来ない程に弱いものであるということであろうか。それでは、確認出来る程に強い馬蹄形渦、局所洗掘の立場からすると、洗掘に支配的となる馬蹄形渦の発生条件は? ということに問題は移る。直観的には、ある一定以上の流速のもとに、周期 T が問題になると考えられる。即ち、一方向への流れの持続時間が問題になると考えられる。いずれにせよ、この問題は理論的、実験的に詳しく検討すべき課題であると考えている。

4. 議 論

表-2 に、前記岩垣らの分類に従って、波動場における円柱周辺の後流渦パターンと局所洗掘形状の関係を整理して示した。

洗掘形状は、K.C. 数によって分類出来、K.C. 数が大きくなるにつれ、ツノ状洗掘→ツノ状洗掘と逆円錐形洗掘の混合形状→逆円錐形洗掘へと変化してゆく。そして、これら洗掘形状が発生するための原動力となっているものは、前記各々に対応して、剝離と波の沖向き流れ→対称渦→非対称渦である。本研究は、洗掘形状がどんな後流渦パターンと対応しているかという点に主眼を置いた研究であるので、表-2 中の K.C. 数の範囲は、決して後流渦パターンの範囲を規制するものではなく、表-1 に示した実験ケースの K.C. 数の値で整理したものである。したがって、正確な渦パターンに対応する K.C. 数については、前記岩垣らの文献を参照されたい。

表-2 波動場における円柱周辺の後流渦パターンと局所洗掘形状の関係

渦パターン	摘 要	K. C. 数 (UT/D)	局所洗掘形状
V-1	集中渦の発生なし	$0.9 < K. C. < 3.2$	ツノ状洗掘
V-2	1 対の対称渦	$5.3 < K. C. < 7.4$	ツノ状洗掘と逆円錐形洗掘の混合形状
V-3	1 対の非対称渦	$7.7 < K. C. < 12.0$	逆円錐形洗掘

なお、水口ら(1985)は、洗掘形状を 5 つに分類しているが、西沢ら(1986)の研究でも、彼等の分類中、(I), (II),

(V)の現象は認められた。しかし、あまり細かく分類すると、いたずらに整理を複雑にする可能性があるため、主要な3つの洗掘形状について整理した。又本研究は、一種類の砂($d_{50}=0.42\text{ mm}$)についての研究であるため、今後は、砂の粒径を種々変えた研究が必要である。

5. 結 語

以上、波動場における円柱周辺の後流渦パターンと局所洗掘形状の関係を検討し、その特性を説明することを試みた。

主要な結論は次のとおりである。

(1) 波動場における円柱まわりの局所洗掘は、その後流渦パターンと密接な関係があり、本実験範囲においては、K.C. 数によって系統的に論ぜられる。しかし、大口径円柱の局所洗掘にまで拡張するためには、散乱波の影響範囲を検討し、洗掘形状の比較を行う必要がある。

(2) 大口径円柱まわりの局所洗掘と小口径円柱まわりの局所洗掘のツノ状洗掘とで「剝離点付近で洗掘が生ずる」という一致点が認められた。

(3) 波動場における逆円錐形洗掘は、集中渦(1対の非対称渦)によって生じ、一様流におけるそれと異なり、馬蹄形渦によるものでないことが明らかとなった。

最後に、本研究の推進に際し、実験にご協力下さった、唐木毅君、飯島元君(大成道路)および南誠信君(東北大学大学院)に感謝します。

参 考 文 献

- 岩垣雄一・浅野敏之・永井文博(1982): 波と流れの共存場に置かれた円柱に作用する流体力, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 433~437.
- 東江隆夫・勝井秀博(1985): 大口径円柱周辺の洗掘現象, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 425~429.
- 水口 優・小島匡人・小宮山正二・佐藤 忍(1985): 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.
- 西沢 勝・唐木 毅・沢本正樹(1986): 波による円柱まわりの局所洗掘, 東北地域災害科学研究報告第22巻, pp. 29~34.
- 西沢 勝・飯島 元・沢本正樹(1987): 波による円柱まわりの流れの可視化と局所洗掘, 第42回年講, pp. 624~625.
- Baker, C. J. (1979): The laminar horseshoe Vortex, J. Fluid Mech., pp. 347~367.
- Rance, P. J. (1980): The Potential for scour around large object, Scour Prevention Techniques around offshore structures, The Society for underwater Technology, pp. 41~53.
- Nishizawa, M., M. Sawamoto (1988): Local Scour around a Vertical Cylinder under the Wave Action, 6th CONGRESS OF APD-IAHR, pp. 121~128.