

円柱まわりの局所洗掘の発達過程に関する実験

小林 智 尚*・小田 健 次**・神 崎 正 美***・橋 本 康 弘****

1. はじめに

今日、様々な海洋・海岸構造物が建設・計画されている。これらの構造物にとって、そのごく周辺部で発生する局所洗掘は構造物の安全性を考える上で重要な要素である。この波動場における局所洗掘については現在、さまざまな研究や現場からの報告が行われている。しかし、これらのほとんどはその実験でのケースあるいは、現地での条件での結果であり、この局所洗掘に対する統一的な検討が行われているとはいえない。

局所洗掘を統一的に取り扱うためには、構造物周辺での流れの構造や洗掘の発生メカニズムを明らかにする必要がある。西沢・沢本 (1989) や土屋ら (1987), Sumer *et al.* (1992) は直立円筒形構造物まわりの流れを局所洗掘形状と関係付けて解析を行っている。また、著者の一人 (小林, 1991) はこの流れを詳細に測定し、この三次元構造を明らかにしている。

これに対して、この局所洗掘の発達過程に関する研究は数少ない。土屋ら (1987) や河田ら (1988) は波流れ共存場において直立円柱まわりに発生する逆円錐状の局所洗掘についてその洗掘深の時間発展を詳細にとらえている。しかし、この研究ではその時間発展を1点でのみ観測しており、局所洗掘全体の発達をとらえるには不十分と考えられる。

そこで本研究ではこの局所洗掘の発達過程について様々なケースについて実験を行い、その特徴を明らかにした。また、最大洗掘深についても定量的解析を行った。

2. 実験条件

実験は図一に示す長さ8m、幅150mm、高さ300mmの波動水槽を用いて行った。この水槽の局所洗掘測定部分は移動床とするために、層厚45mmに砂を敷き詰め、その中央部分に直径 $D=30$ mmの直立円柱を設置している。直立円柱まわりの局所洗掘について、その発生、発達過程を含めて解析を行った。

表一 実験に用いた砂

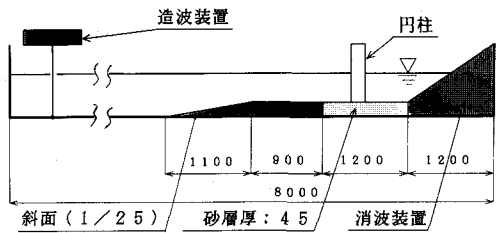
採取地	中央粒径 d_{50} (mm)	比重 s (g/cm ³)
千葉県豊海海岸 (九十九里浜)	0.16	2.56
茨城県大洗海岸	0.17	2.64
千葉県幕張の浜 (人工海浜)	0.20	2.53
沖縄県米須海岸	0.43	2.70

実験には表一に示すように、粒径の異なる4種類の底質砂を用いた。これらの砂はいずれも粒径がほぼ均一になるようにふるい分けを行っている。これらの砂を平らに敷きならし、その中央に直立円柱を設置し、規則波を作用させてその円柱まわりに発生する局所洗掘を観察した。このとき、すべてのケースで水深 h は120mmに保った。そして、入射波の周期 T を1.0秒から3.2秒まで、また波高 H を8.0mmから59.0mmまで変化させてそれぞれのケースで実験を行った。これらの条件は、Keulegan-Carpenter (K.C.) 数ではほぼ4.0から30.0まで約0.5間隔で設定されていることになる。

以上で述べた条件で実験を行い、一定時間ごとに洗掘地形を測定し、その発達過程をとらえた。その際洗掘地形は連続式砂面計を台車に取り付けて測定を行った。

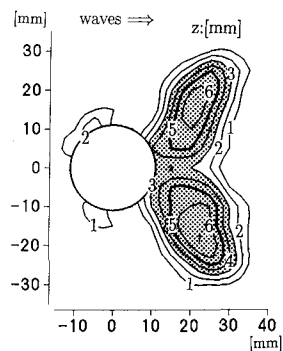
3. 洗掘地形の分類

まず、本研究で観察された局所洗掘の分類を行う。観察された洗掘地形で代表的なものを図二に示す。図中、網掛けされた部分が洗掘された部分を示し、洗掘量を正の数値で表わしている。通常、直立円柱まわりの局所洗掘地形はツノ状洗掘地形と逆円錐形洗掘地形の2種類に

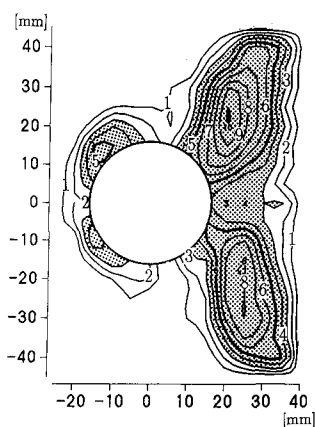


図一 実験水槽 (単位: mm)

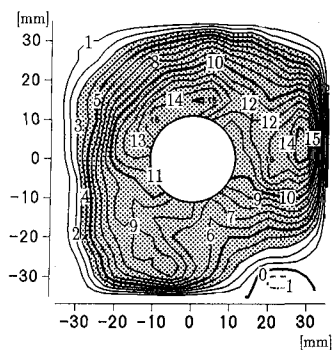
* 東京理科大学助手 理工学部土木工学科
** 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻
*** 首都高速道路公団
**** 西武鉄道(株)



(a) ツノ状洗掘地形



(b) 遷移地形



(c) 逆円錐形洗掘地形

図-2 代表的な局所洗掘地形

分類されるが、本実験ではこの2つの洗掘地形が明確に分類できなかったため、これらの間の洗掘地形として遷移地形をも考慮した。

これらの局所洗掘地形をK.C.数で分類した結果を図-3に示す。この図から、K.C.数を増加させるにしたが

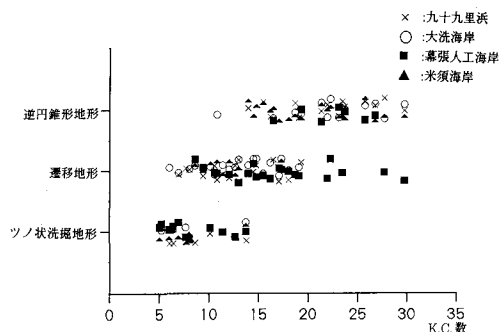


図-3 K.C.数と局所洗掘地形との関係

って、局所洗掘地形はK.C.数が約8でツノ状地形から遷移地形へ、さらに約18で遷移地形から逆円錐地形へと変化しているのが分かる。そして、これらの洗掘地形が変化するK.C.数は底質の種類によらずほぼ一定である。

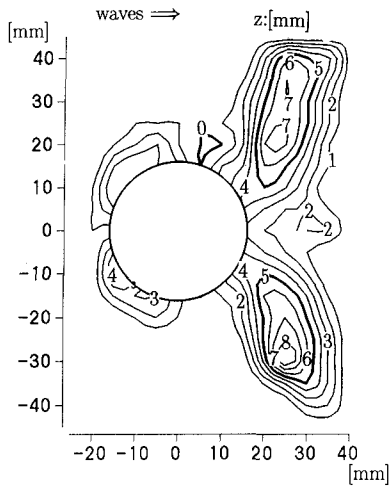
この洗掘地形に関しては、西沢ら(1989)によればK.C.数が約7.4から7.7でツノ状洗掘地形と逆円錐形洗掘地形とに分類されると報告されているが、本研究の結果もほぼこれらに従うものである。また、目視による円柱まわりの流れの可視化実験の結果、西沢らの報告と同様にツノ状洗掘地形上には円柱からの剥離渦が、また逆円錐形洗掘地形上には円柱前面に馬蹄形渦が、さらに遷移地形上ではこの2つの渦が共に確認された。

したがって、局所洗掘地形すなわち最大洗掘深発生位置はK.C.数によって表現される直立円柱まわりの流れのみによって規定され、底質の種類には影響しないことが分かる。この事は、次に述べる局所洗掘の発達過程についてもあてはまる。

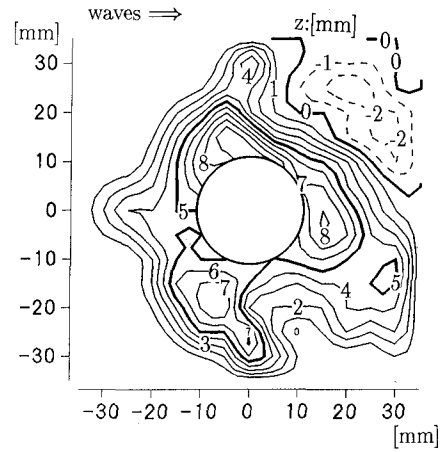
4. 局所洗掘の発達過程

つぎに局所洗掘の発達過程について解析を行った。実験で観測された局所洗掘地形の変化の一部を図-4および図-5に示す。図中の数値は洗掘を正の値で示している。これらの図は洗掘形状がそれぞれ遷移地形と逆円錐形局所洗掘地形の場合に対応しており、入射波の条件は $H=24\text{ mm}$, $T=2.4\text{ s}$ および $H=52\text{ mm}$, $T=3.0\text{ s}$ である。したがって、K.C.数はそれぞれ11.02, 29.74となっている。ここでは入射波を200波作用させるごとに直立円柱まわりの局所洗掘地形を測定している。これらの図からこの洗掘形状は局所洗掘形状によらず、洗掘初期からほぼ相似形を保っていることが分かる。この様子は、他の実験ケースにおいても観察されている。

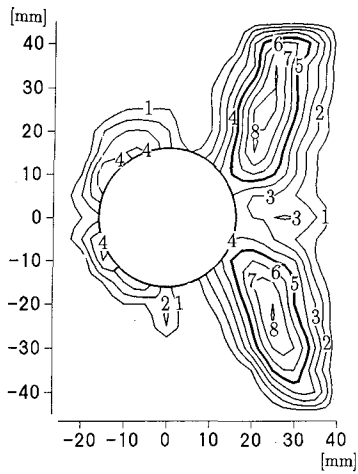
これらの図から最大洗掘深の発生位置の時間変動およびその最大洗掘深の時間変化を図-6および図-7に書き改める。図-6より、局所洗掘地形はその洗掘形状を相似形に保っているばかりではなく、最大洗掘深発生位置



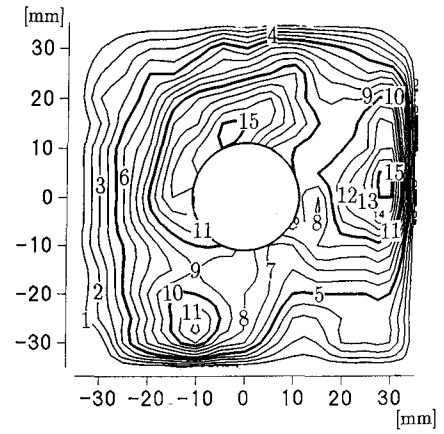
(a) 200 波作用時



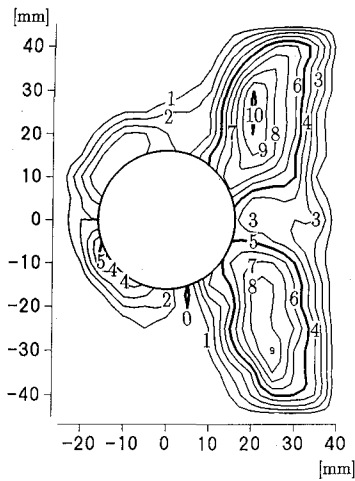
(a) 200 波作用時



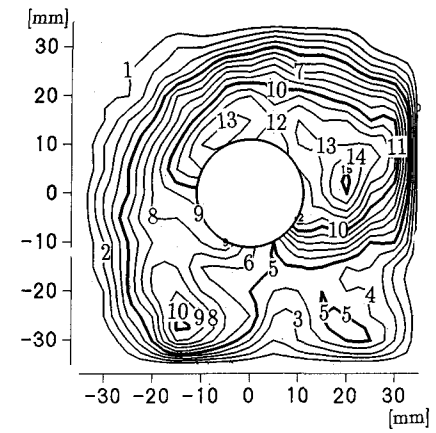
(b) 600 波作用時



(b) 600 波作用時



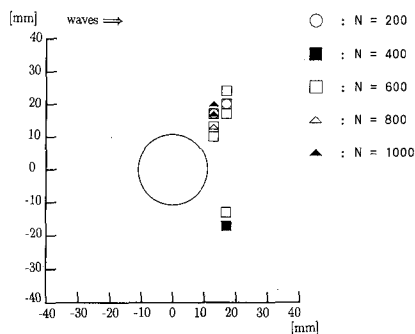
(c) 1000 波作用時



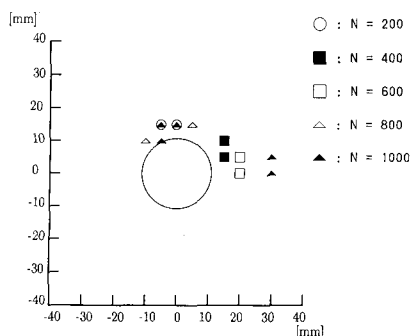
(c) 1000 波作用時

図-4 局所洗掘地形の時間変化 (K. C. 数=11.02)

図-5 局所洗掘地形の時間変化 (K. C. 数=29.74)



(a) K. C. 数=11.02



(b) K. C. 数=29.74

図-6 最大洗掘深発生位置の時間変動

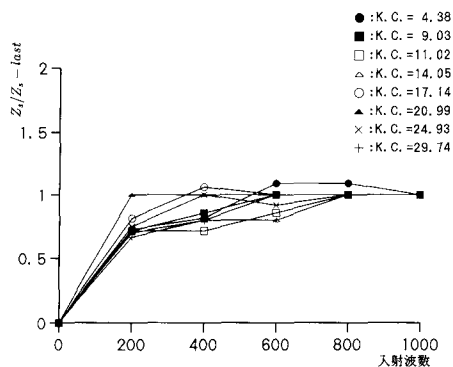


図-7 最大洗掘深の時間変化

もほぼ一定していることが分かる。これは、最終洗掘形状が円柱からの剥離渦や馬蹄形渦などの組織渦によって特徴付けられている直立円柱まわりの流れによって規定されているのと同様に、その発達各段階においても洗掘形状はこの流れに支配されていると考えられる。すなわち、底面では剥離渦や馬蹄形渦などによって特定の位置のみが常に強く洗掘されており、その周辺部では強く洗掘された部分に向かって底質の砂が滑落しているためであると考えられる。そしてこの特徴は底質の種類には無関係である。

以上の結果から、直立円柱まわりの流れは洗掘地形の

発達程度にかかわらず、ほぼ一定の様相を呈しているものと考えられる。ただし図-6(b)の場合、円柱背後の最大洗掘深発生位置は洗掘とともに移動している。これは著者の一人(小林, 1991)が局所洗掘の発達した底面上の流れを測定して示したように、洗掘地形が発達するにしたがって、この複雑な洗掘地形の影響を受けて直立円柱まわりの流れも複雑な3次元構造を有するようになるようになったためと考えられる。しかし、この点についてはまだ不明な点が数多く残されている。したがってK. C. 数の範囲や入射波の非線形性、洗掘地形の発達程度などを含めて今後再検討する必要がある。

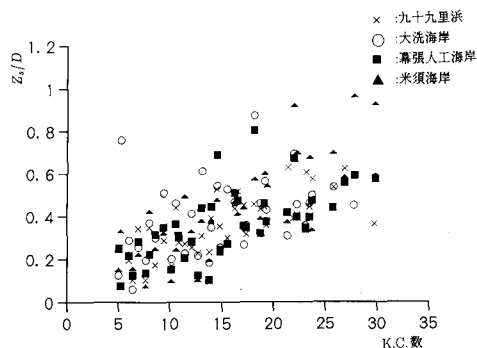
図-7では洗掘深 z_s を最終洗掘深 z_{s-last} で無次元化した洗掘深の時間変化の様子を示している。この図からは、初期に局所洗掘が早く進み、その後次第に発達速度をゆるめながら最大洗掘深がほぼ一定値に漸近していく様子が読み取れる。これは河川中の橋脚まわりの局所洗掘(中川, 1974)と同様に、局所洗掘に砂の供給がない場合の局所洗掘の発達過程の特徴を示している。Sumer *et al.* (1992)は波動場において砂漣が発生している場合について検討しており、同様の結果を得ている。

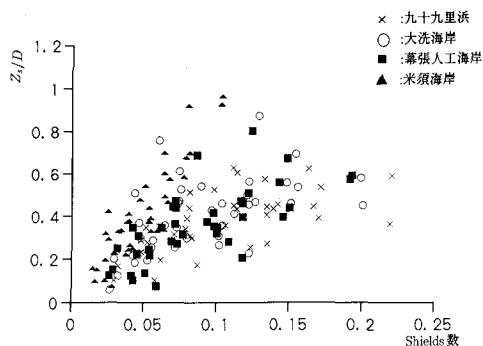
5. 局所洗掘の最終洗掘深

最後に最終洗掘深について検討を行った。最終洗掘深はK. C. 数や波形勾配、Ursell 数と言った入射波の諸条件や Shields 数や粒度分布、水中安息角などの底質の条件など、さまざまなパラメータの関数として表される。今回はこれらのパラメータのうち、K. C. 数と Shields 数について注目し、これらの無次元パラメータと最終洗掘深との関係について検討を行った。

図-8と図-9にはそれぞれK. C. 数と z_s/D 、Shields 数と z_s/D との関係を表している。ここで z_s と D はそれぞれ最終洗掘深と円柱直径を表している。

図-8では底質の種類によらず測定結果は同じ傾向を示しており、K. C. 数が増加するにしたがって z_s/D の値も増加しているのがわかる。さらにK. C. 数が十分大き

図-8 K. C. 数と z_s/D との関係

図-9 Shields 数と z_s/D との関係

くなると流れは定常流に近づくので、 z_s/D は河川での橋脚まわりの局所洗掘現象と同様に、ある一定値になると想像できる。したがって K. C. 数が大きくなるにしたがって z_s/D の値は増加してある一定値に漸近するものと考えられる。Sumer *et al.* (1992) も底面全面に砂漣が発達した場合について同様の検討を行っている。その中で彼らは K. C. 数のより広い領域に対して実験を行い本研究と同様の結果を得ている。

この結果を局所洗掘形状の結果と組み合わせて検討すると、ツノ状洗掘や逆円錐形洗掘などの局所洗掘形状は z_s/D の値そのものにはさほど影響を与えていないと考えられる。ただし K. C. 数によって局所洗掘形状は変化するため最終洗掘深発生位置も明らかに異なり、その洗掘に寄与する流体中の組織渦も異なることから、局所洗掘形状を無視し K. C. 数のみで z_s/D の議論を進めることに疑問が残る。これは洗掘形状によりグラフの傾きなどが異なっているにも関わらず、各々の測定データのばらつきのためそれらを確認できなかったためと考えられる。

図-9 でも図-8 に比べてさほど明確ではないが、同様な傾向、つまり Shields 数が増加するにしたがって z_s/D の値も増加する傾向がみられる。またこの図からは、個々の底質では測定結果がある程度まとまった傾向を示しているが底質ごとにこれらの傾きが異なっているのがわかる。本研究では実験条件として直立円柱直径と水深を一定としている。そのため K. C. 数と Shields 数とを全く無相関に変化させて実験を行うことは困難である。したがって、それぞれの底質で明確な傾向を示しているのはむしろ図-8 において K. C. 数と z_s/D とが明確な関係を示しているためであると想像できる。よってこのグラフの結果は図-8 と組み合わせることにより、本研究の条件では z_s/D の値は底質の種類にさほど影響されないことを示している。

このように局所洗掘現象が底質の運動によって起こる

現象にも関わらず、その最終洗掘深を表す無次元パラメータ z_s/D は流れの様相を表す K. C. 数と強い関係があり、底質の種類にはあまり左右されていない。この点についても底面全面に砂漣が発達した場合について Sumer *et al.* (1992) も同様の結論を得ている。

6. おわりに

本研究では波動場における直立円柱まわり局所洗掘について、4 種類の底質砂を用いた室内実験を通してその洗掘の発達過程と最終洗掘深について検討を行った。このとき、底面は円柱近傍をのぞいて砂漣は発生しない状態であり、また K. C. 数は約 4.0 から 30.0 の範囲であった。実験では局所洗掘の発達段階や最終状態においてその局所洗掘地形を測定し解析を行った。

その結果、まず発達過程においては洗掘初期から洗掘地形が相似形を保ち、さらに最大洗掘深発生位置もほぼ一定していることが明らかになった。この特徴は洗掘地形の種類に関わらず観察された。これは、特に洗掘されやすい点が円柱からの剝離渦や馬蹄形渦などの流れの様相によって決まってしまうためと考えられる。またこの時、最大洗掘深は時間と共に増加するものの、その進行速度は徐々に低下し、長時間波を作用していると最大洗掘深はほぼ一定となった。

次に、最終洗掘深 z_s と円柱直径 D との比 z_s/D といくつかの無次元パラメータとの関係について検討を行った結果、 z_s/D と K. C. 数には強い相関が見いだされた。これに対し、本実験では最終洗掘深と底質の種類とのあいだにはあまり関係が見られなかった。

最後に、本研究に対し愛知県庁の嶋田達昌氏には東京理科大学在学中、実験や解析に協力いただいた。また本研究は文部省科学研究費(平成4年度奨励(A)04750504、小林智尚)の補助を受けた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 西沢 勝・沢本正樹 (1989): 波による円柱まわりの局所洗掘, 第 36 回海岸工学論文集, pp. 414-418.
- 土屋義人・河田恵昭・錦織 慎 (1987): 波・流れ共存場における局所洗掘, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 402-406.
- 河田恵昭・朝堀泰明・土屋義人 (1988): 波・流れ共存場における局所洗掘一砂れんの発生しない場合一, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 397-401.
- 小林智尚 (1991): 局所洗掘底面上の直立円柱まわりの流れに関する実験的研究, 第 38 回海岸工学論文集, pp. 446-450.
- 中川博次 (1974): 水理構造物による局所洗掘, 水工学における夏期研究会講義集, pp. A-1-1-A1-15.
- Sumer, B. M., J. Fredsoe and N. Christiansen (1992): Scour around vertical pile in waves, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 117, No. 1, pp. 15-31.