

海洋構造物周囲の洗掘に関する基礎研究

倉田 克彦*・平井 住夫**

1. ま え が き

石油掘削リグのような海洋構造物周囲の潮流あるいは波浪による洗掘は、構造物の安定性を検討する上で重要な問題である。構造物周囲の洗掘現象は、水の流れと水底面の変化が互いに影響しあう複雑な現象であり、洗掘機構にも現在のところ不明な点が多く、理論的な取扱いが困難であるため、水理模型実験の結果に基いて洗掘現象を解析することが多い。従来の円柱周囲の洗掘に関する研究は、水面上にまで突き出た単独円柱を対象としたものがほとんどあって、円柱を組合せた海洋構造物のように、複数の円柱が比較的狭い間隔で存在する場合の円柱周囲の洗掘現象におよぼす円柱間の相互干渉による効果、あるいは水面上に没している円柱周囲の洗掘現象についての検討例は、石原¹⁾、Tanaka and Yano²⁾ などに見られるだけで数少ない。

そこで、円柱を組合せた海洋構造物周囲の洗掘を解明するための基礎研究として、定常流中に 1) 2本の円柱が流れに直角に置かれた場合（横列円柱）、2) 2本の円柱が流れに平行に置かれた場合（縦列円柱）、および 3) 円柱が水中に没している場合（没水円柱）について、それぞれの円柱周囲の洗掘深と、それにおよぼす隣接円柱の影響ならびに円柱の高さの影響について調べた。

2. 実験施設および実験方法

実験は、大阪市立大学工学部河海工学実験場の幅 4.0 m、深さ 0.8 m、長さ 40 m のモルタル仕上げ開水路を用いて行なった。水路の中央付近に幅 3.5 m、長さ 5.0 m、深さ 1.0 m の砂槽を設け、その中に水路床面上 3 cm の高さになるまで砂を入れ、また砂槽上流端より上流側約 2 m 範囲の水路床面上に 3 cm の厚さで砂を敷いて、砂床をつくった（図-1）。この砂床の下流端より上流側へ 1.0 m～1.5 m の位置に、円柱を次のように設置した。

i) 横列円柱： 図-2 に示すように、外径 $D=8.0$

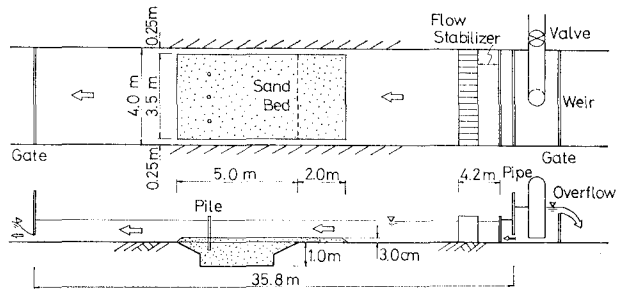
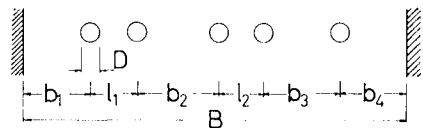


図-1 水路概形

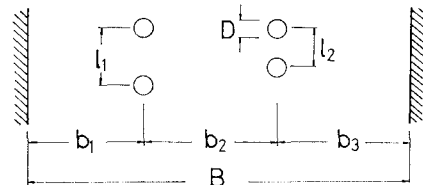
cm の塩化ビニル製の 2 本の円柱を中心間隔 l と円柱の直径 D との比 $l/D=1\sim6$ および ∞ となるように流れの方向と直角に配置した。



B	D	b ₁	l ₁	b ₂	l ₂	b ₃	b ₄
400	8	100	8	100	12	90	90
		100	48	100	0	0	152
		100	16	160	24	0	100
		100	8	160	32	0	100

unit: cm

図-2 横列円柱の配置



B	D	b ₁	b ₂	b ₃	l ₁	l ₂
400	8	100 以上			8	12
					24	16
					48	32

unit: cm

図-3 縦列円柱の配置

* 正 会 員 工 修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科

** 学生会員 大阪市立大学大学院 工学研究科土木工学専攻

ii) 縦列円柱: 横列円柱の場合と同じ2本の円柱を、図-3に示すように、流れの方向と平行に $l/D=1\sim 6$ および ∞ となるように配置した。

iii) 没水円柱: 外径 $D=13$ cm の3本の高さの異なる塩化ビニル製パイプを、図-4に示すように、砂面からの円柱高さ h_{cy} と水深 h との比 $h_{cy}/h=0.0\sim 1.0$ となるようにして、流れの方向と直角に並べた。なお、円柱が水面上十分高く、水面の変動によっても円柱頂部が水をかぶるようなことがない状態を $h_{cy}/h=1.0$ とする。

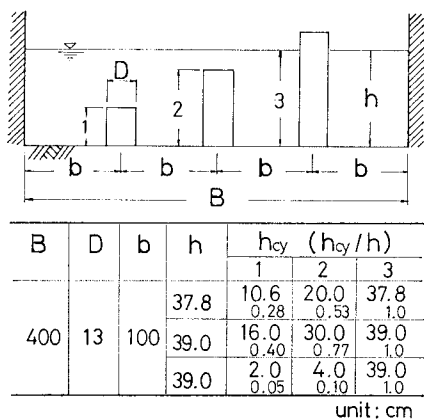


図-4 没水円柱の配置

水路幅 B あるいは円柱の中心間隔 l が円柱直径 D の6倍以上になれば円柱周囲の流れに対する水路側壁や隣接円柱の影響は小さくなり、円柱は無限に広い流れの中に置かれたものとほぼ同じであることが知られている^{3),4)}。この結果を参考にすれば、図-2~4に示すように並べられた円柱に対する隣接の円柱群あるいは側壁の影響はほとんどないと考えられる。

洗掘深は初期砂面からの砂面変動量として求められる。砂面高さは、円柱の前面・左右側面および後面の4か所に貼りつけた2mm目盛の標尺または移動式測定用台車に取付けたポイント・ゲージによって読取った。洗掘の進行は水を流し始めた直後が最も激しく、その後は次第に緩慢になるので、洗掘深(砂面高さ)の測定は水を流し始めた直後は15分~20分間隔で、その後は30分~60分間隔で行なった。洗掘がほとんど進まなくなると判断された時の洗掘深を平衡洗掘深 Z_f として、そこで測定を打ち切り、排水して円柱周囲の洗掘孔の形状を調べた。また、砂面高さの測定とあわせて砂面付近における円柱周囲の流況を糸の動きによって観察した。

実験で用いた砂は中央粒径 $d_{50}=0.27$ mm の海砂で図-5に示すような粒度分布を示した。

円柱より約1.5m上流側の流れに直角な断面において、プロベラ式流速計を用いて測定した流速(流速の鉛直分布)を円柱に作用する流れの流速(流速の鉛直分布)とした。砂の移動限界摩擦速度 u_{*0} を、岩垣によって提

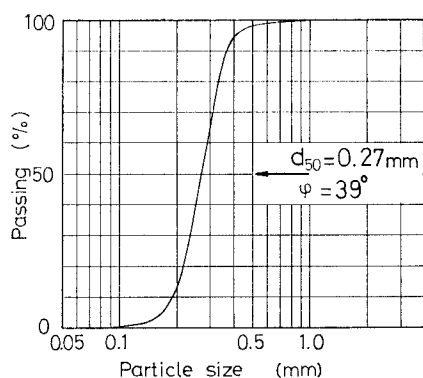


図-5 砂の粒度分布

案された式⁵⁾を用いて求めると、およそ $u_{*0}=1.5$ cm/s となりそれに対応する限界平均流速 $\bar{U}_c$ を Manning 式を用いて求めれば、およそ $\bar{U}_c=28$ cm/s を得た。砂の移動限界流速より速い流速を有する流れによって生じる円柱周囲の平衡洗掘深は流速に無関係であるとされているので⁶⁾、実験では、砂床面全体に砂澱が発生するような流速を有する流れを生じさせ、洗掘深におよぼす流速の変化の影響がないようにした。

3. 実験結果およびその考察

(1) 流れ

円柱に作用する流れの流速分布を対数近似した時の平均流速 $\bar{U}$ 、摩擦速度 u_* および粗度高さ k_s は、 $\bar{U}=31.6$ cm/s~39.1 cm/s, $u_*=2.1$ cm/s~4.2 cm/s, $k_s=0.6$ cm~12.5 cm であって、この流れによって砂床の全面に砂澱が発達していた。流速の鉛直分布の一例を図-6に示す。

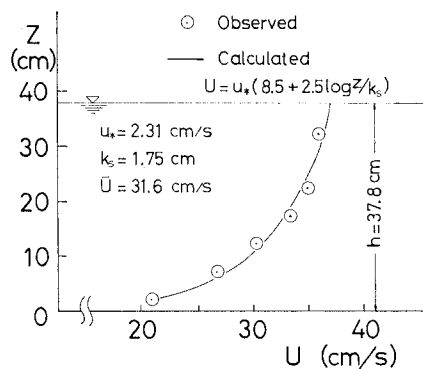


図-6 流速の鉛直方向分布

(2) 横列円柱の洗掘深におよぼす相互干渉

円柱前面あるいは側面の平衡洗掘深 Z_f と円柱が1本の場合、すなわち $l/D=\infty$ のときのそれぞれの位置での平衡洗掘深 $Z_{f\infty}$ との比 $Z_f/Z_{f\infty}$ 、円柱の中心間隔 l と円柱直径 D との比 l/D による変化を図-7に示す。図中の $\odot$, $\triangle$ および $\blacktriangle$ 印は、それぞれ2本の円柱の前面、

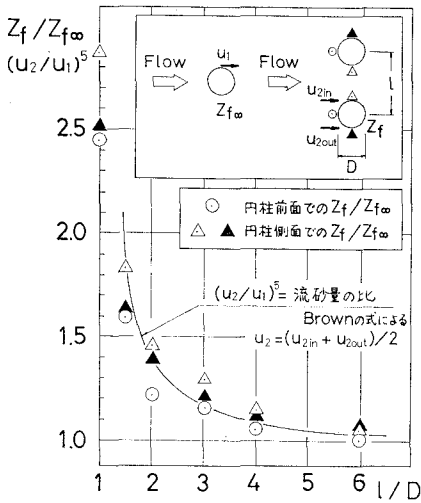


図-7 横列円柱の平衡洗掘深の円柱間隔による変化

内側側面ならびに外側側面における平衡洗掘深の平均値に対する $Z_f/Z_{f\infty}$ の値である。

$l/D=6$ の場合には円柱相互の影響はなく、それぞれの円柱周囲の流況、洗掘深および洗掘孔の形状は単独円柱の場合のそれらと同じであった。 $2 < l/D < 6$ の範囲では、円柱の相互干渉の影響が現われ、 l/D が小さくなるほど、すなわち2本の円柱が近づくほど洗掘深は単独円柱の場合と比べて大きくなって、とりわけ円柱側面においては $l/D \leq 2$ の時、単独円柱の場合より 50%~150% 近くも洗掘深が増加している。また円柱前面(○印)よりも側面(△, ▲印)の方が、さらに側面でも外側(▲印)よりも内側(△印)の方がより強く相互干渉の影響を受けて洗掘深が大きくなっていることがわかる。円柱前面の淀み点(線)から円柱周囲にかけて馬蹄形渦が形成されるが、前面での洗掘深は単独円柱の場合の洗掘深の1.2倍程度であって、相互干渉の影響は比較的小さいことがわかる。

図-7 中の実線は、2本の円柱周囲の流れの速度をポテンシャル流理論から求め⁷⁾、円柱の内側と外側側面における流速の平均値 u_2 の、単独円柱の側面での流速 u_1 ($=2u_0$; u_0 : 一様流の速度) に対する比 u_2/u_1 (円柱が2本の場合の流速の増加率) を5乗した値の l/D による変化を表わしたものである。Brownによれば、洗掘量は流速の5乗に比例しており⁸⁾、図中の実線はそれぞれの流速 u_2 および u_1 による洗掘量の比を表わしているとも言える。 $1.5 \leq l/D \leq 6$ の範囲では、円柱側面における平衡洗掘深と流速の5乗比の円柱中心間隔による変化はよく一致している。これは円柱が近接することによって生じた流速の増加、すなわち掃流力の増大が側面における洗掘深の増加をもたらしていることを示している。また、前面の洗掘深も側面の場合と同様の変化を示して

おり、円柱周囲の洗掘深に対しては、側面における掃流力の増大の影響が強いことを示している。

$l/D < 1.5$ の範囲では、2本の円柱が1つの径の大きな柱体ようになって、それを取囲むような流れとなる。このため、2本の円柱を取囲むような規模の大きな馬蹄形渦が形成されるようになり、それによる洗掘が支配的となるようである。

(3) 縦列円柱の洗掘深におよぼす相互干渉

各円柱の前面と側面における平衡洗掘深 Z_f の円柱の中心間隔 l による変化を図-8に示す。○および△印は上流側の円柱(前円柱と称す)の前面および側面での $Z_f/Z_{f\infty}$ を、●および▲印は下流側の円柱(後円柱と称す)の前面および側面での $Z_f/Z_{f\infty}$ を表わす。

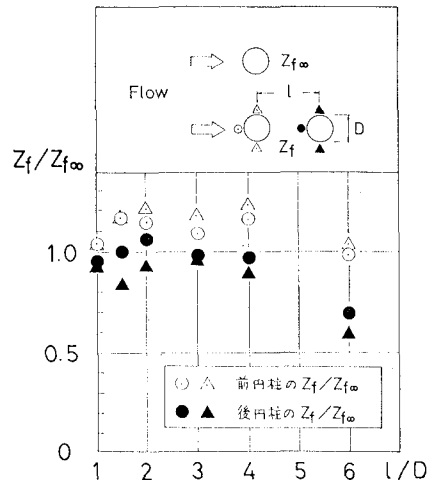


図-8 縦列円柱の平衡洗掘深の円柱間隔による変化

$1.5 \leq l/D \leq 4$ の範囲において、前円柱の平衡洗掘深が単独円柱の場合と比較して 10%~20% 増加している。石原⁹⁾は、水深 5.2 cm、流速 37.9 cm/s (砂の移動限界流速相当)、円柱直径 15 cm の条件で行なった実験の結果より、前円柱の平衡洗掘深は単独円柱の場合と変わらないとしており、本実験の結果とは異なっている。石原の実験は水深が浅くて流速が大きき、そのため Froude 数も大きく、また鉛直方向の流速分布が本実験の場合と異なっていると考えられるが、それらがどの程度洗掘深に影響をおよぼすかは検討していない。

$l/D=6$ の場合、後円柱は前円柱背後の砂の堆積域に位置するようになり、平衡洗掘深は単独円柱の場合の6割程度になる。 $l/D \leq 4$ の範囲では、後円柱は前円柱の洗掘孔内に位置し、平衡洗掘深は単独円柱の場合よりやや小さくなる。

後円柱が無い時の、前円柱背後の洗掘孔の形状が、後円柱が置かれている付近の初期砂面の形状と仮に考えて後円柱周囲の洗掘深 Z_f の円柱間隔による変化を示したものが図-9である。前円柱の後流域中に置かれた後円

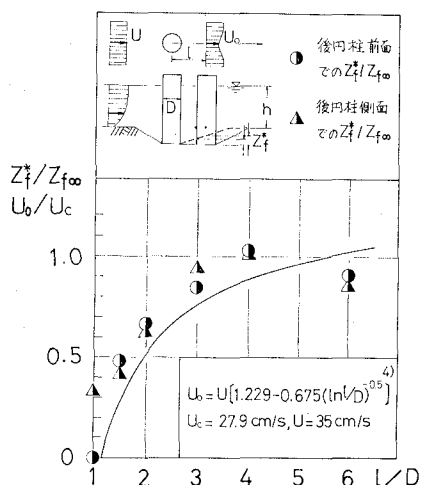


図-9 前円柱による砂面形状を基準とした後円柱の平衡洗掘深と後流流速との関係

柱には、上昇流および渦が存在する流速の遅い複雑な流れが作用すると考えられる。円柱背後の後流中の流速分布については、永井・倉田⁴⁾が実験的に調べており、その結果を用いて、後流中心線上の平均流速 U_0 と砂の移動限界流速 U_c の比 U_0/U_c の円柱からの距離による変化を示すと図中の実線のようになる。 $U_0/U_c \leq 1$ となる $1 \leq l/D \leq 5$ の範囲においては、洗掘深 $Z_f^*/Z_{f\infty}$ と流速 U_0/U_c の前円柱からの距離による変化は、互によく一致した傾向を示しており、洗掘深 Z_f^* は流速 U_0 にほぼ比例して変化していると言える。この結果は、砂の移動限界流速よりも遅い流れにおける円柱周囲の平衡洗掘深の流速による変化⁹⁾と同じである。

(4) 没水円柱の洗掘深におよぼす高さの影響

没水円柱の前面および側面での平衡洗掘深の円柱高さによる変化を図-10に示す。図中に $\circ$ および $\triangle$ 印で

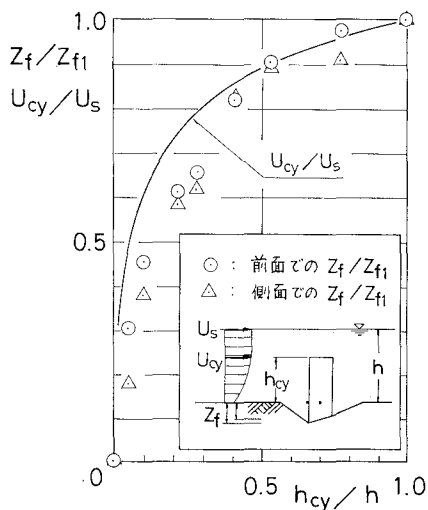


図-10 平衡洗掘深の円柱高さによる変化

示した前面および側面での洗掘深の円柱高さによる変化の様子にほとんど差がないことから、円柱高さの洗掘深への影響が前面と側面と同じ程度およんでおり、円柱高さが異なる場合にも洗掘孔の形状がほぼ相似であると言える。

円柱高さと水深との比 h_{cy}/h が 0.5 以上の場合の平衡洗掘深は、 $h_{cy}/h=1.0$ の場合と比べて 10% 程度減少するにすぎないが、 $h_{cy}/h < 0.5$ になれば、洗掘深に対する円柱高さの影響が顕著に現われ、円柱高さが低くなるにつれて平衡洗掘深は急激に小さくなり、 $h_{cy}/h=0.0$ 、すなわち円柱が砂中に埋め込まれ、円柱頂面と初期砂面とが一致する場合には円柱周囲において、洗掘は生じなかった。

没水円柱に作用する流れの鉛直方向の速度分布を対数近似すると、図-10 中の実線のようになる。流速の鉛直方向の変化の様子は洗掘深の円柱高さによる変化の様子とよく一致しており、洗掘深は円柱頂面の高さにおける流速と密接な関係があることがわかる。円柱周囲に発生し洗掘現象に関係する馬蹄形渦の強さは円柱頂面での流速に比例すると言われている⁹⁾ので、没水円柱周囲に発生する馬蹄形渦の強さが、没水円柱周囲の平衡洗掘深を決定する支配的な要因であると言ってよいであろう。

4. 結 論

以上述べてきたことを要約すれば、次のようになる。

(1) 2本の円柱を流れの方向と直角に並べた場合、中心間隔と円柱直径の比 l/D が 6 以上になると相互干渉はなく、円柱周囲の洗掘深は単独円柱の場合と同じであるが、 $1.5 \leq l/D \leq 6$ の範囲では、円柱が近接することによって生じる円柱側面での流速の増大が、洗掘深の増加の支配的な要因であり、 $l/D \leq 1.5$ の場合には、2本の円柱を取囲むような馬蹄形渦が形成され、 $l/D > 1.5$ の場合とは流況も洗掘の支配的要因も異なる。

(2) 2本の円柱を流れの方向と平行に並べた場合、後円柱周囲の洗掘深は、後円柱に作用する流れの速度の変化と、前円柱の存在により生じる後円柱付近の砂面形状の変化の2つの影響を受ける。前円柱の後流流速が砂の移動限界流速 U_c より速い場合、後円柱周囲の洗掘深に対する流速の変化による影響はほとんどなく、前円柱によって生じた砂面形状の変化の影響のみを受け、 U_0 が U_c より遅い範囲に後円柱がある場合、後円柱周囲の実際の洗掘深 Z_f^* は後流流速にほぼ比例して変化する。

(3) 円柱が水中に没している場合、円柱周囲の洗掘深は、円柱高さが水深の半分以下になれば急激に減少し、しかもその影響は前面および側面にほぼ同じ程度および、円柱の高さが異なる場合にも洗掘形状に相似性があると思われる。流速の鉛直方向の変化と洗掘深の円柱高さによる変化とはよく一致しており、洗掘深は円柱頂面

の高さにおける流速によってほぼ定められ、洗掘深を決定する支配的な要因は馬蹄形渦だと言える。

付 記

この実験を行なうにあたりご協力いただいた日立造船(株)技術研究所の巻幡敏秋・山口栄三の両氏および当時大阪市立大学工学部学生高野仁君(現京都市役所勤務)に対し、感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 石原藤次郎: 橋脚による河床洗掘に関する実験的研究, 土木学会誌, Vol. 24, No. 1, pp. 23~55, 1938, 1.
- 2) Tanaka, S. and M. Yano: Local Scour Around a Circular Cylinder, Proc. of 12th Congress of IAHR, pp. 193~201, 1967, 9.
- 3) 永井莊七郎: 改訂水理学, コロナ社, pp. 294~295, 1972.
- 4) 永井莊七郎・倉田克彦: 開水路流れの中の円柱の相互干渉, 土木学会論文報告集, No. 196, pp. 57~64, 1971, 12.
- 5) 土木学会編: 水理公式集, 201 p., 1971,
- 6) Shen, H. W., V. R. Shneider and S. Karaki: Local scour around bridge piers, Proc. of ASCE, Vol. 95, HY6, pp. 1919~1938, 1969.
- 7) 今井 功: 流体力学(前編), 裳華房, 215 p., 1973.
- 8) 例えば, 河村三郎: 流送土砂の推算, 1977 年度水工学に関する夏期研修会講義集, A-7, 土木学会水理委員会.
- 9) Roper, A. T., V. R. Schneider and H. W. Shen: Analytical Approach to Local Scour, Proc. of 12th Congress of IAHR, pp. 151~161, 1967, 9.