

大口径円柱周辺の洗掘現象

東江 隆夫*・勝井 秀博*

1. はじめに

外洋に大型構造物を設置する場合、洗掘は構造物の安定に関わる重要な問題である。したがって、一般的に構造物周辺に洗掘防止工を施す必要がある。ところが、その設計に際して、回折波の影響が顕著となる程の大型構造物に対しては、明確な設計指針は無く、その都度、実験を行うか、あるいは、防波堤や護岸についての設計指針を準用している状態である¹⁾。また、この問題に関する研究例も防波堤や小口径円柱に比較して少ない。そこで、我々は、大型構造物の洗掘防止工の設計に関する基礎資料を得るために研究を始めた。

今回の研究では、洗掘現象の把握を第1の目的として構造物としては、最も基本的な円柱（没水体、非没水体）を選び、その周辺の砂の移動限界、海底地形変化および円柱周縁の洗掘深を実験的に調べた。

2. 実験方法

(1) 移動限界の測定（移動床実験 A）

実験装置の概要を図-1に示す。水槽は、長さが35.5 m、幅17 m、高さ1.6 mのコンクリート製である。この水槽底面に、移動床Aを設け、その上に模型円柱を設置し、水深30 cmの状態で行った。この移動床は、アルミ板に珪砂5号（ $d_{50}=0.58$ mm）をペンキで貼

り付け、その上に同じ砂を約1 cmの厚さで敷き均したものである。平面水槽で移動限界の測定を行う場合、2次元水槽における実験と異なり、側方からの観察ができない。そこで、ビデオカメラに箱メガネを取り付けた装置を、観測台車上に設置し、ビデオから得られる画像の観察により移動限界の判定をした。箱メガネは $\phi 80$ mm中の塩ビの円筒の底に透明なアクリル板を取り付け、約10 cmの深さに水没させた（波で底板が露出しない程度）。本装置で得られる画像は、水底上約10 cmの範囲で、画面上の砂粒子は、個々に識別できる。また、箱メガネの存在が砂移動へおよぼす影響については、2次元水槽における予備実験で無視できることを確認した。測定点は図-2に示す通りである。入射波は、周期 $T=0.8\sim 2.0$ s、波高 $H=6.0\sim 9.0$ cm、模型円柱として、Model I（直径117 cm、高さ60 cm；非没水体）とModel II（直径117 cm、高さ15 cm；没水体）の2種を用いた。

(2) 地形変化および洗掘深の測定（移動床実験 B）

実験装置の概要を図-1に示す。この実験では、洗掘ビット（ $6.5\times 6.5\times 0.6$ m）の1部に、移動床B（ $4.4\times 4.4\times 0.15$ m）を作成し、その上に円柱模型を設置した。使用砂は、珪砂7号（ $d_{50}=0.15$ mm）である。円柱周縁の洗掘深の測定は造波開始後0、10、30、60、120分に5 cm間隔で25点、連続式砂面計を使用して行った。円柱周

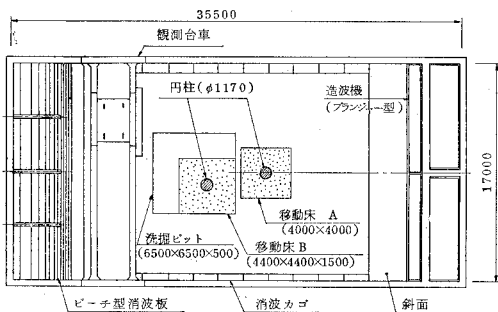


図-1 実験装置

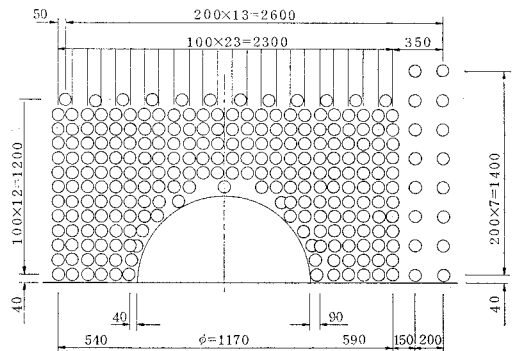


図-2 移動限界測定点

* 正会員 大成建設(株) 技術研究所水理研究室

表-1 実験ケース

(a) 移動床実験 A

CASE	Model	周期 (s)	波高 (cm)	CASE	Model	周期 (s)	波高 (cm)
UM001	I	0.8	8.4	UM101	II	1.0	8.0
UM002	I	1.0	6.0	UM102	II	1.0	9.0
UM003	I	1.0	7.0	UM103	II	1.5	7.0
UM004	I	1.0	8.0	UM104	II	1.5	8.2
UM005	I	1.5	5.0	UM105	II	2.0	7.2
UM006	I	1.5	6.0				
UM007	I	1.5	7.0				
UM008	I	2.0	7.0				
UM009	I	2.0	8.0				

(b) 移動実験 B

CASE	Model	周期(s)	波高(cm)	CASE	Model	周期 (s)	波高 (cm)
MOV01	I	1.0	10.0	MOV07	II	1.0	10.0
MOV02	I	1.0	11.0	MOV08	II	1.5	10.0
MOV03	I	1.5	10.0	MOV09	II	1.0	10.0
MOV04	I	1.5	12.0	* は着底型			
MOV05	I	1.0	10.0				
MOV06	I	$T_{AVE}=1.0$	$H_{1/3}=8.0$				

辺の地形変化は、造波開始後 0, 60, 120 分の時点で $4.4 \times 2.2\text{m}$ の範囲にわたって 5~20 cm 間隔で 40 測線、観測台車上の連続式砂面計を使用して測定した。観測台車の移動、およびデータの収集と処理はミニコンによる計測制御システムを用いて行った。実験条件は、水深 $h=30\text{cm}$ 、入射波の周期 $T=1.0, 1.5\text{s}$ 、波高 $H=10\sim12\text{cm}$ である。円柱模型は、移動床実験 A と同じであるが、設置方法は、砂中に 5 cm 貫入させるタイプと単に砂面に着底させるタイプの 2 通りとした。実験ケースの一覧を表-1 に示す。

3. 実験結果および考察

(1) 移動限界

模型を設置しない状態における砂の移動限界流速を調

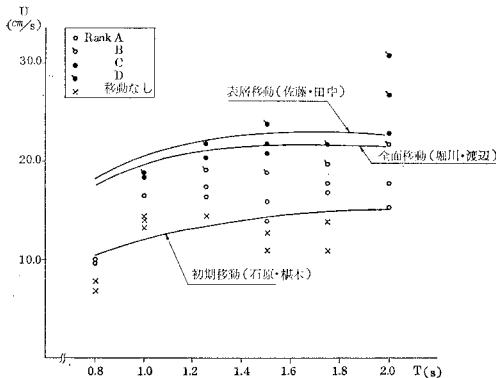
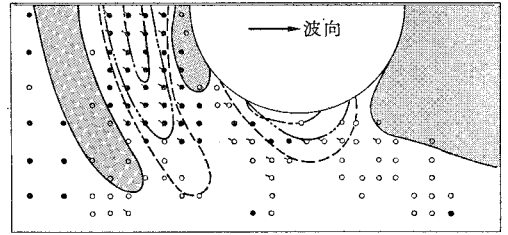
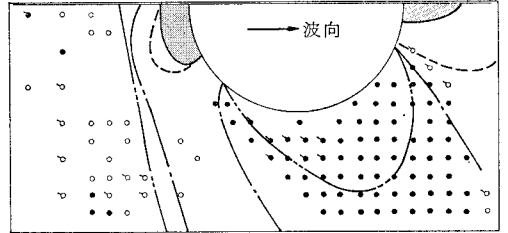


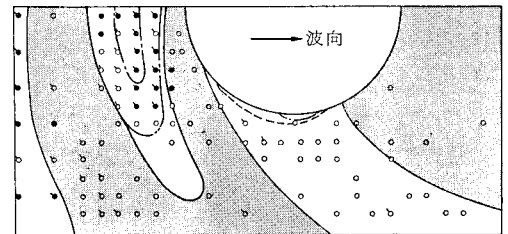
図-3 移動限界 (円柱なし)



(a) Model I $T=1.0\text{s}$, $H=8.0\text{cm}$

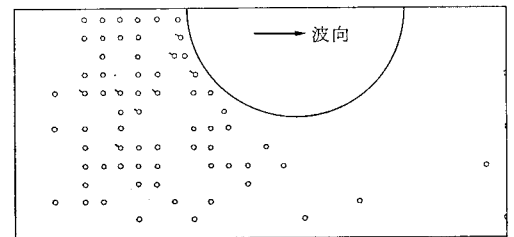


(b) Model I $T=2.0\text{s}$, $H=8.0\text{cm}$

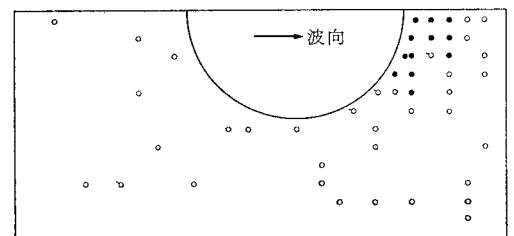


(c) Model I $T=1.0\text{s}$, $H=7.0\text{cm}$

図-4 移動限界平面分布 (Model I)



(a) Model II $T=1.0\text{s}$, $H=8.0\text{cm}$



(b) Model II $T=2.0\text{s}$, $H=7.2\text{cm}$

図-5 移動限界平面分布 (Model II)

べ、移動状況のランク付けをするために予備実験を行った。流速は、電磁流速計を底面上 3 cm の高さに設置して測定を行った。その結果を図-3 に示す。図の縦軸は底面流速、横軸は入射波の周期を表す。図中の曲線は、従来の移動限界水深の公式と微小振幅波理論から底面流速を逆算して得られたものである。また移動状況は、以下の 5 つのランクに分けてそれぞれの記号で示した。

- Rank A: 表層が一体となって激しく動く
- Rank B: 表層が一体となって動く……全面移動
- Rank C: 砂粒子が数々動く
- Rank D: 砂粒子が 1 ~ 2 個動く……初期移動
- × : 移動しない

実験値は若干バラツキはあるものの従来の公式で示される曲線と大差ない結果が得られた。したがって、箱メガネとテレビカメラによる間接的な観察の精度と、箱メガネ使用による底面への影響、移動床厚が 1 cm と薄いことによる移動限界への影響などについては、大きな問題は無いと考えられる。

図-4 は、Model I を設置した場合の移動限界の平面分布を、図-3 と同様の記号で示したものである（ただし、移動しない場合は無印とした）。図中の曲線は、MacCamy & Fuchs の理論²⁾ から求めた底面流速値に対して、移動限界の流速を次の方法で算出して得られたものである。

- 実線 (——) 初期移動の公式 (石原・樫木)
- 破線 (----) 初期移動の実験値 (○ 図-3)
- 1 点鎖線(一・一) 全面移動の公式 (堀川・渡辺)
- 2 点鎖線(一・一・一) 全面移動の実験値 (● 図-3)

図によれば、移動無の領域（図中薄墨部）と全面移動の範囲については、実験値と移動公式は主旨一致している。しかしながら、従来の移動公式では説明できない領域も存在し、この理由として以下の 3 つの要因が考えられた。

- (a) 従来公式を 3 次元的な移動限界に適用したこと。
- (b) 初期移動の判定の難しさ。
- (c) 波の非線型性。

(a) に関しては、以下のことが考えられる。移動限界を厳密に論じる場合、底面の粗滑、境界層が乱流であるか層流であるかということが、重要な要因である。このことは、2 次元的には堀川・渡辺によって統一的に整理されている³⁾。しかしながら、その中でも境界層の状態の判定には、まだ問題を残している。さらに、円柱周辺の底面における水粒子は、場所によっては平面的に橢円軌道を描く。したがって、境界層の発達状態は 2 次元水槽におけるそれと異なることが推測される。今後、3 次元的な波動場における境界層について詳しく検討する必要がある。(b)、(c) に関しては、初期移動の判定が観察者

により異なること、波の有限振幅性が底面流速に影響をおよぼすことも考えられるが、図-3 に示した予備実験の結果から、それらが、主要因になるとは考えにくい。

図-5 は、Model II（没水体）を設置した場合の移動限界を調べたものである。今回の実験条件では、全てのケースにおいて、円柱上で碎波した。周期が短い場合 ($T=1.0$ s) では、移動する範囲は前面のみに限られており、周期が長くなると ($T=2.0$ s)、円柱の直後で激しい動きを示している。周期が長い場合には、碎波による影響で、本来の遮蔽領域において砂粒子の移動が見られた。

(2) 海底地形変化

写真-1 は、Model I を設置した場合で、周期 $T=1.0$ s、波高 $H=10$ cm の波を、120 分間作用させたときの海底地形を正面から見たものである。図-6 は、代表的な海底地形変化の等高線を描いたものである。特に、図-6(d)では、波高分布（理論値）をあわせて示した。写真-1 および図-6 (a)~(d) より Model I の場合の全体的な地形変化の特徴がわかる。すなわち、円柱前面では、同心円状に洗掘、堆積を繰り返し、側方は堆積し、後方は遮蔽領域で砂の移動そのものが見られない（砂連の発生もない）。次に条件の違いによる地形変化の違いを見る。図-6 (a), (b) は波の作用時間が 60 分と 120 分の場合である。60 分での傾向を保ちながら、洗掘堆積とも次第に発達している様子がわかる。図-6 (b), (d) は波高が 1 cm 異なる。両者の地形変化の傾向は同じであるが、わずかの波高の違いで地形変化が大きく促進されている。図-6 (b), (c) は、周期が異なる。前面の地形変化および斜め後方の洗掘の位置が若干異なる。以上の地形変化に関して考察を加える。円柱前面では、図-6 (d) からわかる様に、部分重複波を形成している。この領域では、防波堤前面での砂の移動に関する入江等⁴⁾や Xie⁵⁾ の研究結果が参考になる。入江等は、砂の移動形態に L-タイプと N-タイプが存在すること、また、その境界条件を示している。今回の条件では、全て L-タイ

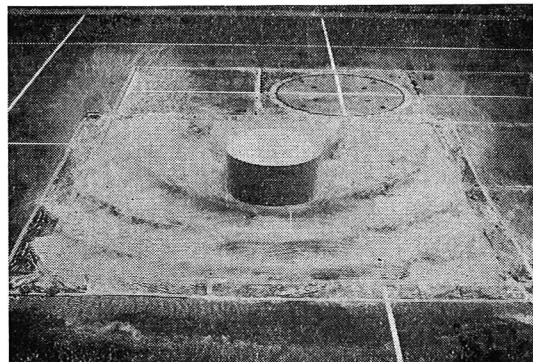
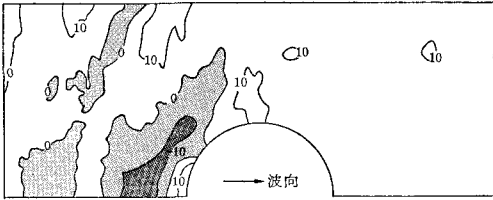
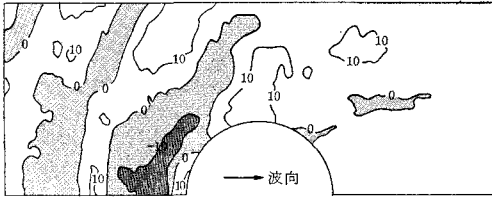
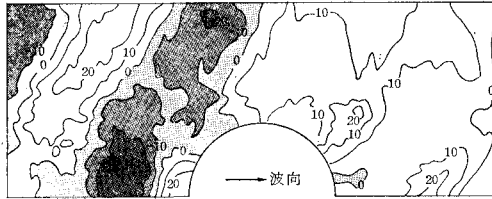
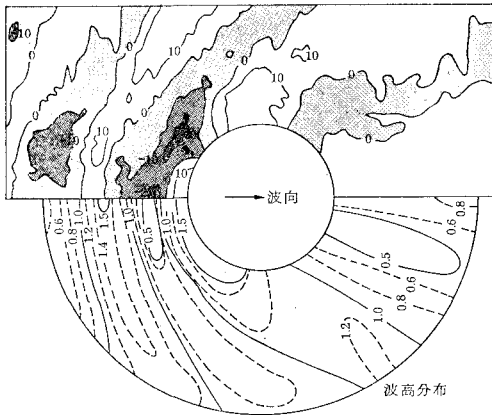
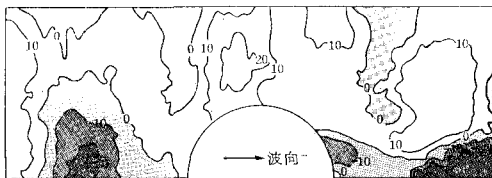
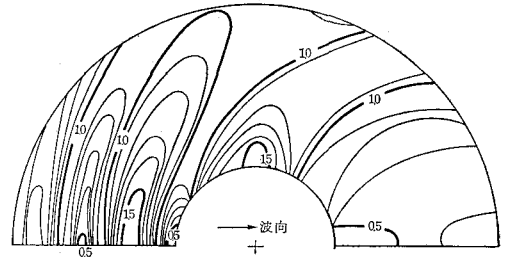
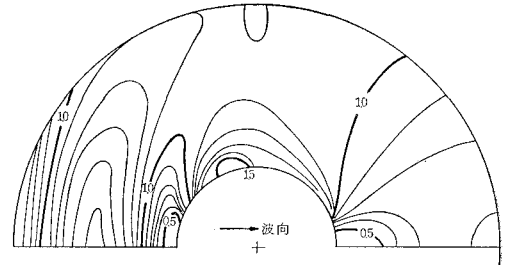


写真-1 円柱 (Model I) 周辺の海底地形変化

(a) Model I $T=1.0$ s, $H=10$ cm, $t=60$ min(b) Model I $T=1.0$ s, $H=10$ cm, $t=120$ min(c) Model I $T=1.5$ s, $H=10$ cm, $t=120$ min(d) Model I $T=1.0$ s, $H=11$ cm, $t=120$ min(e) Model II $T=1.5$ s, $H=10$ cm, $t=120$ min

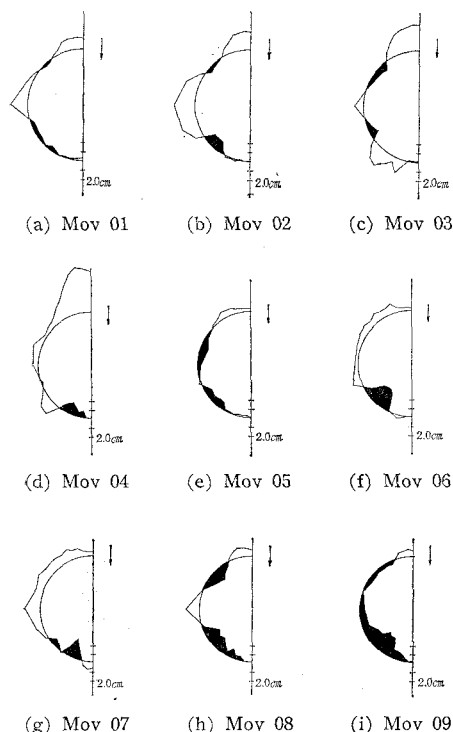
図—6 円柱周辺の海底地形変化 (単位 mm)

(a) $T=1.0$ s, $h=30$ cm, $D=117$ cm(b) $T=1.5$ s, $h=30$ cm, $D=117$ cm

図—7 円柱周辺の最大底面流速分布 (回折理論)

ブに属している。したがって、重複波の腹で堆積、節で洗掘を起こすことになる。実験結果は、そのことを良く反映している。周期の違いによる前面の地形の違いは、重複波の腹あるいは節の位置の違いによるもので、同様の現象であると考えられる。図—7に MacCamy & Fuchs の理論による底面流速の分布を模型が無い場合の底面最大流速との比で示した。図—6と7を見比べると、円柱側方は流速が増大する領域であり、堆積領域となっていること、また、比較的流速の遅い円柱斜め後方に洗掘域が発生することがわかり興味深い。Rance⁶⁾は、流速分布のコンターが集中する点、すなわち、場所的加速度が大である点で洗掘が起こること、また、円柱径 D と波長 L の比 D/L が 0.1 程度になると渦の影響は無いことを示した。今回の実験でも流速コンターの集中点(円柱斜め前方と斜め後方)で洗掘が発生している。場所的に流速場が激しく変化する点では、一旦動いた砂は、元の場所と異なる流速場の支配を受けるため厳密には元の位置には戻れない。このメカニズムに関しては今後詳細な検討を行う予定である。なお、渦に関しては、染料を流した観察では、その発生はほとんど認められなかった。

図—6(e)は、Model II を設置した場合の海底地形変化を示したものである。前述した様に、砕波による影響で、円柱後方の離れた地点で、かなり激しく洗掘が発生している。また、図示はしていないが、周期 1.0 s の波の場合、円柱の背後では砂の移動が見られなかった。



図—8 円柱周縁の洗掘深

Model II では、円柱周辺の全体的な海底地形変化には明瞭な傾向は見い出せなかったが、それは、Model II が没水体であるため、波の変形の程度が小さかったためと思われる。

(3) 円柱周縁の洗掘深

図—8 は、移動床実験 B の全ケースにおける円柱周縁の洗掘深を示したものである。円の内側が洗掘、外側が堆積でその量は、円周からの距離で表わしている。(2) の海底地形変化で述べた様に、Model I では、前面で堆積(重複波の腹)、斜め前後方で洗掘、側方で堆積している。それらの量は、入射波の周期が長い程、また波高が高い程大きくなっているが、Model I, $T=1.5$ s, $H=12$ cm (Case Mov 04) の場合には、前面での堆積が激しいために、結果的には、斜め前方では洗掘が堆積に追いつかない状態が生じた。設置方式の違いに関しては、最大洗掘深は、貫入型と着底型に差異は認められなかったが、洗掘範囲は、着底型が広範囲で円柱底板下におよんだ(図—8(h), (i))。図—8(e) は不規則波に対するものであるが、実験ケースが少なく、洗掘深と地形変化に顕著な傾向は認められなかった。

4. 結 論

回折波の影響が顕著となる大口径円柱周辺の洗掘現象を把握するために、2 種類の実験を行い、以下の結論を得た。

(a) 砂の移動限界について

- (1) 没水していない直立円柱 (Model I) の場合、重複波の卓越する前面と、波を遮蔽する後方では、従来の移動限界の公式と回折波理論の組合せで移動範囲を説明できる。
- (2) しかしながら、その他の領域では、移動限界公式の適用には問題がある。その理由の 1 つとして、境界層の発達の状態が、2 次元の場合と異なることが考えられる。
- (3) 没水円柱 (Model II) の場合、碎波の影響により、後方が激しく移動する場合がある。

(b) 海底地形変化と洗掘深について

- (1) Model I の場合、洗掘は斜め前方と後方で発生し、前面と側方で堆積する。
- (2) 特に、前面の地形変化は、重複波が生じる防波堤前面での地形変化と同じ現象である。
- (3) また、底面の水粒子速度の平面分布との比較により、洗掘は、流速が場所的に急激に変化している点で発生する。
- (4) Model II の場合、碎波の影響で円柱後方で激しく洗掘される。
- (5) 設置方式の違いでは、着底型が、円柱底面まで洗掘範囲が広がる。

最後に、本研究を遂行するにあたり、大成サービス㈱の杉山勝治氏、野口隆光氏、そして安西真樹君には、その実験において多大な協力を得た。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本海洋開発産業協会：構造物の耐波浪性に関する調査報告書(Ⅲ)，pp. 188~233, 1984.
- 2) MacCamy, R. C. and R. A. Fuchs: Wave forces on piles, A Diffraction theory, Tech. Memo., No. 69, B.E.B. 1954.
- 3) 堀川清司・渡辺 晃：波による砂動に関する一考察，第 13 回海岸工学講演会講演集，pp. 126~134, 1966.
- 4) 入江 功・近藤隆道・赤石正廣・寺崎賢次：重複波による防波堤前面での海底洗掘，第 31 回海岸工学講演会論文集，pp. 350~354, 1984.
- 5) Xie Shi-Leng: Scouring patterns in front of vertical break water sand their influence on the stability of foundations of the break waters, Technishe Hogedelft, 61 p., September, 1981.
- 6) P. J. Rance: The potential for scour around large Objects, Scour Prevention Techniques around Off-shore Structures, The Society for Underwater Technology, pp. 41~51, 1980.