

大型海洋構造物周辺の波による洗掘特性

勝井秀博*・東江隆夫**

系統的な模型実験により、大型海洋構造物周辺の波による洗掘特性を検討した。構造物の平面形状は円柱、四角柱および八角柱である。根入れのない設置方法や天端が水没した場合の影響も検討した。実験の結果、構造物前面、側面、四角柱隅角部の洗掘パターンを分類した。特に、円柱の側方で、振動流速の場所的勾配と洗掘・堆積のパターンを関係付けた。また、構造物周縁の最大洗掘深と波高の関係を求めた。

Key Words: scour, wave field, offshore structure, model experiment

1. はじめに

海洋構造物周辺の洗掘は古くから研究が盛んである。特に、構造物直径と波長の比 D/L が 0.1 以下の小口径部材からなるジャケットやパイプラインなどでは、多くの研究がなされ、洗掘対策についても実例が豊富である。小口径部材の場合、K. C. 数が大きく、洗掘のメカニズムは構造物回りに生じる渦と深く関係する^{1), 2)}。しかし、北海で実績の多い重力式石油掘削リグや我が国でも構想の盛んな人工島など、構造物が波長と同程度以上の規模になると、回折波による波浪変形が広範囲に及ぶ一方、渦の影響は隅角部などの近傍に留まり、洗掘形態も小口径部材のそれとは異なったものとなる。大口径構造物の回りの波浪変形領域は、図-1 に示すように 3 つに大別できる。第 1 は、構造物前面の重複波領域で、2次元防波堤前面の洗掘に関する知見が適用できる。第 2 の領域は構造物側方で、水粒子速度が加速されたり、回折波や構造物の隅角部における渦の影響を受ける部分である。第 3 は、波の進行方向の裏側の領域で、通常、第 1 や第 2 の領域で洗掘された砂がこの領域に運ばれて堆積する。以下、第 1 と第 2 の領域の海底地形変化に関する最近の研究例を述べる。第 1 の領域; Xie³⁾ は、2次元防波堤前面の重複波による洗掘パターンが、 $(u_{bn} - u_c)/w = 16 \sim 17$ を境にして、浮遊砂が卓越する「細砂型」と掃流砂が卓越する「粗砂型」とに分けられることを見出した。ここに、 u_{bn} は重複波の節の位置における底面水粒子速度の最大振幅、 w は沈降速度を表わす。また、彼は

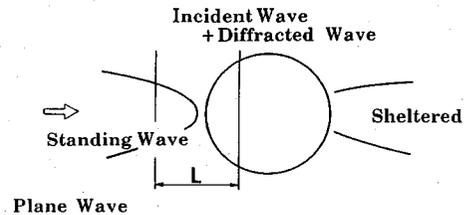


図-1 大型構造物周辺の波浪場の概念図

平衡洗掘深に対する実験式も提案している。同じ問題について、入江ら⁴⁾は砂粒子の移動に関する詳細な実験と観察を行い、 u_b/w およびアーセル数 HL^2/h^3 によって、底質移動のパターンが「L-タイプ」(細砂型)と「N-タイプ」(粗砂型)に区別できることを示した。ここに、 u_b : 進行波の底面水粒子速度の振幅、 H : 波高、 L : 波長、 h : 水深を表わす。しかし、洗掘深の定量評価はなされていない。第 2 の領域; Rance⁵⁾ は、構造物周辺の流速分布のコンターが集中する場所、すなわち、場所的加速度が大きくなる場所で洗掘が起こると報告した。しかし、実験条件は直径と波長の比 D/L が 0.2 程度の場合のみ限定されている。

大型構造物周辺の波による局所洗掘に関しては、このほか筆者らや斉藤らによる実験報告^{6), 7)}があるが、いずれも断片的である。斉藤ら⁷⁾は、円柱周辺の Radiation Stress に起因する平均流と質量輸送流れを考慮した、パワーモデルによる洗掘数値シミュレーションも試みている。しかし、波によって発生する流れの実験的検証は十分でないし、洗掘の計算結果と実験結果の差異も大きい。模型実験の相似則の限界を考慮すると、数値シミュレーションは今後ますます重要となってくる。しかし、数値シミュレーションの精度を向上するためには、まず、基本となる物理現象をきちんと把握しておく必要がある。

以上に鑑み、本研究では、海洋構造物周辺の洗掘特性

本研究の一部は、文献(6), (8), (10) に既発表であるが実験ケースや考察を追加してまとめたものである。

* 正会員 工博 大成建設(株)技術研究所
土木構造・水理研究グループチーフリーダー
(〒245 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

** 正会員 MS 大成建設(株)技術研究所
土木構造・水理研究グループ

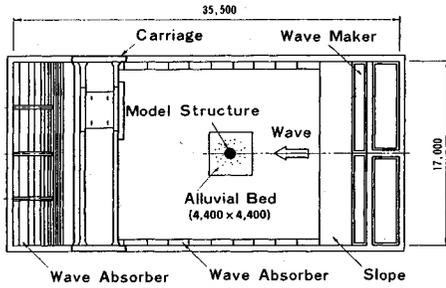


図-2 実験水槽

表-1 実験条件

ケース名	入射波				構型		
	周期 (s)	波高 (cm)	角度 (deg)	時間 (hr)	形状	没水/非没水	貫入/着底
B-C-1	1.0	10	0°	2	円柱	没水	貫入
C-2	1.5	10	0°	10			
C-3	1.5	11	0°	2			
C-4	1.5	10	0°	2			
C-5	2.0	12	0°	2			
C-6	2.0	10	0°	2			
C-7	$T_{1/3}$ 1.0	$H_{1/3}$ 8.0	0°	2			
C-8	$T_{1/3}$ 1.1	$H_{1/3}$ 6.4	0°	10			
B-R-1	0.8	10	0°	4	四角柱	非没水	貫入
R-2	1.0	5	0°	2			
R-3	1.0	8	0°	2			
R-4	1.0	10	0°	2			
R-5	1.0	11	0°	2			
R-6	1.25	10	0°	2			
R-7	1.5	10	0°	2			
R-8	1.75	10	0°	2			
R-9	2.0	10	0°	2			
B-RO-1	1.0	10	45°	2	八角柱	没水	貫入
RO-2	1.5	11	45°	2			
RO-3	1.5	10	45°	2			
B-O-1	1.0	10	0°	2	八角柱	没水	貫入
O-2	1.5	10	0°	2			
B-CS-1	1.0	10	0°	2	円柱	没水	着底
CS-2	1.5	10	0°	2			
B-RS-1	1.0	10	0°	2	四角柱	没水	着底
RSO-1	1.0	10	45°	2			
B-CB-1	1.0	10	0°	2	円柱	非没水	着底
CBS-1	1.0	10	0°	2			

を現象面から理解することを目的として、系統的な模型実験を行い考察を加えた。

2. 実験方法

(1) 実験装置

実験装置の概要を図-2に示す。実験は、長さ35.5m、幅17mの平面水槽の中央のピットに4.4m×4.4m×厚さ15cmの砂床を作成し、この砂床上に塩化ビニール製の円柱と角柱の構造物模型を設置し、水深30cmの状態で行った。表-1に実験条件の概要を掲げる。構造物の形状としては、コンクリート製プラットフォームや海中貯油タンクを想定し、平面形状として円柱(C型)と4角柱(正方形;R型)および8角柱(O型)を選び、また、これらが海底から水面まで吃立しているタイプ(非没水型)と天端が没水しているタイプ(没水型:S型)を組み合わせた。構造物の底部は砂床内に十分貫入させたが、円柱については構造物底面を砂面上に着底させただけの(着底型=B型)タイプも調べた。構造物の規模は、外接円の直径を117cmとし、没水タイプの天端

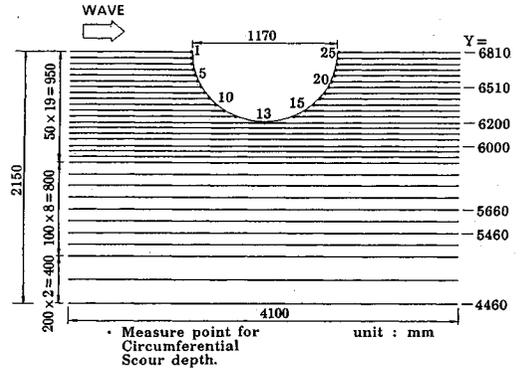


図-3 地形計測の測線と測点

水深を15cmに設定した。砂床は、粒径の均等な細砂として、珪砂7号($D_{50}=0.15\text{ mm}$)を用いた。入射波は、周期 $T=0.8\text{ s}\sim 2.0\text{ s}$ 、波高 $H=5.0\text{ cm}\sim 12.0\text{ cm}$ の規則波とした。したがって、構造物直径 D と波長 L の比は $D/L=0.42\sim 1.22$ となる。波向きは、四角柱の場合、入射波の進行方向と構造物の向きが $\alpha=0$ と 45° の2種類行った。 $\alpha=45^\circ$ の波向きを O で表わす。また、円柱についてのみ、Bretschneider型スペクトルを有する不規則波についても実験した。表-2には、構造物・波長比、K.C.数、移動限界速度、Xieや入江らによる防波堤前面での洗掘指標など、洗掘実験に関係するパラメータをまとめている。

(2) 計測方法

洗掘実験に先立ち、固定床の条件で構造物周辺の波高分布を測定した。 $2L\times 4L$ (L :波長)の計測範囲で、波高の場所的不均一性は $\pm 6\%$ 程度あった。しかし、構造物無しの移動床予備実験により、入射波の不均一性による砂床への影響は無視できるほど小さいことを確認した。

構造物周辺の地形計測は図-3に示すように、波の進行方向に向かって片側半分の $2.2\text{ m}\times 4.4\text{ m}$ の範囲にわたって5~20cm間隔で約40測線について行った。計測は、造波前、造波後1h、2hを標準とし、円柱2ケースについては10h後、四角柱では4h後を加えた(表-1)。地形計測では、電界誘導型の連続式砂面計(正豊工学製)を用いた。砂面計のプロープと砂面との間隔(5~8mm)は底質、水質および水温によって微妙に変化する。そこで、移動床端部の砂面すれすれに直径100mmの塩ビパイプを立て、パイプ上端の高さを定規としてパイプ内側の砂面を均らして基準点を設け、計測前後の基準底面の電圧変化を測定することにより、砂面高のデータを補償した。

構造物側壁沿い(周縁)の地形変化については計測時間間隔を狭め、原則として、造波後10min、30min、1h、2hとし、必要に応じて細かい時間間隔でも計測した。

表—2 洗掘実験におけるパラメーター

$h = 30\text{cm}$ $D = 117\text{cm}$ $D_{50} = 0.15\text{mm}$ $w = 2.0\text{cm/s}$ $u_{*c} = 1.41\text{cm/s}$

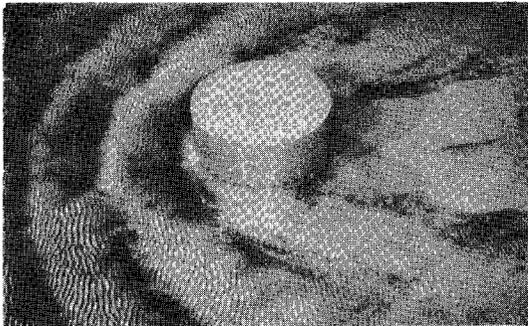
周期 T (s)	波長 L (cm)	波高 H (cm)	D/L	h/L	進行波の底面における水粒子速度・摩擦係数・摩擦速度・K.C.数				限界流速 $u_c^{*3)}$ (cm/s)	防波堤前面の洗掘指標				
					$u_b^{*1)}$ (cm/s)	$f_w^{*2)}$	u_* (cm/s)	$u_b/T/D$		Xie	入江			
											$\frac{u_b - u_c^{*4)}$ W	$\Delta T'$	u_b/W	HL^2/h^3
0.8	96.0	10	1.22	0.31	11.2	0.0219	1.17	0.08	6.9	7.8	粗	5.6	3.4	N
1.0	137.2	5	0.85	0.22	8.5	0.0224	0.90	0.07	7.4	4.8	粗	4.3	3.5	N
		8			13.6	0.0185	1.31	0.12		9.9	粗	6.8	5.6	N
		10			17.0	0.0170	1.57	0.14		13.3	粗	8.5	7.0	N-L
		11			18.7	0.0164	1.69	0.16		15.0	粗	9.4	7.7	L
1.13	163.2	6.4	0.72	0.18	12.4	0.0183	1.19	0.12	7.7	8.6	細	6.2	6.3	L
1.25	186.6	10	0.63	0.16	21.1	0.0146	1.80	0.23	7.4	17.1	細	10.6	12.9	L
1.5	234.0	10	0.50	0.13	23.4	0.0130	1.89	0.30	8.0	19.2	細	11.7	20.3	L
		12			28.1	0.0125	2.22	0.36		8.5	23.9	細	14.0	24.4
1.75	280.2	10	0.42	0.11	24.8	0.0124	1.95	0.37	8.9	20.4	細	12.4	29.1	L
2.0	325.6	10	0.36	0.09	25.7	0.0118	1.97	0.44	9.3	21.1	細	12.8	39.3	L

*1) $u_b = (\pi H/T)/(\sinh kh)$

*2) $\tau_w = \exp[-5.977+5.213(a_b/r)^{-0.18}]$, $r = D_{50}$

*3) $u_c = 2.4s^{*3} D_{50}^{1.43} T^{*1.6}$; Bagnold

*4) $u_{cn} = 2u_b$



写真—1 円柱周辺の海底地形
(円柱: $T=1.0\text{ s}$, $H=11\text{ cm}$, $t=120\text{ min}$; B-C-3)

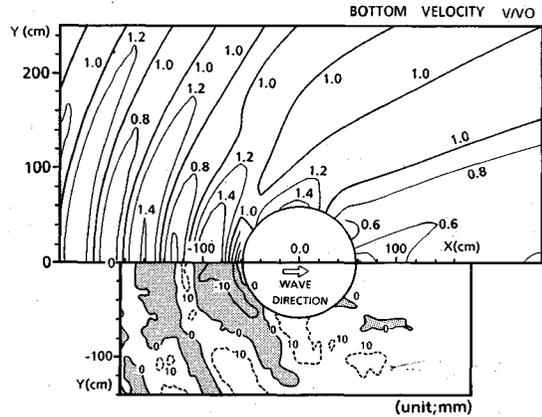
ここでも連続式砂面計を用いたが、プローブ先端の電界が模型の影響を受けないように、模型側面から2 cm離れた位置で計測した。計測点は、図—3の円柱周縁上の黒点で示すように、構造物周縁約5 cm間隔で25~49点とった。

3. 実験結果と考察

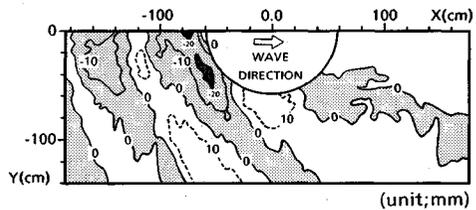
(1) 円柱周辺の洗掘

a) 非没水円柱

非没水円柱周辺の地形変化の様子を写真—1に示す。写真中、黒っぽく見える部分は洗掘の激しい所で、比較的比重の大きい砂粒が残っている。全般に小さな砂礫が底面を覆い、円柱前方で同心円状のスケールの大きな洗掘・堆積パターン、背後では砂が移動していない様子が分かる。海底地形変化のパターンを、コンター図で、図—4~図—8に示す。図中の単位はmm、洗掘を-、堆積を+で表わし、洗掘領域は薄墨を塗っている。図の上半に示すコンターは、回折波理論で計算した底面流速の振幅を、進行波の底面流速振幅で無次元化した値である。図—9に円柱側壁に沿った(円柱周縁の)洗掘パターンを表わす。図中、円の半径方向内側に洗掘深、外側に堆



図—4 海底地形変化と無次元流速分布(計算値)
(円柱: $T=1.0\text{ s}$, $H=10\text{ cm}$, $t=120\text{ min}$; B-C-1)



図—5 海底地形変化
(円柱: $T=1.0\text{ s}$, $H=11\text{ cm}$, $t=120\text{ min}$; B-C-3)

積高を表わす。円柱周縁の洗掘の基本的パターンは、堆積が円柱前面と側面および斜め後方、洗掘が斜め前方と斜め後方となることが分かる。洗掘パターンを模式的に示すと、図—10のように五角形をなす。図—4~図—9や写真—1より、円柱周辺の海底地形変化は、図—1で示した3つの波浪場に対応していることが分かる。すなわち、図—10中、A1は重複波領域、S1, A2, S2, A3は回折波領域(構造物側方)、Xは遮蔽領域となる。以下、重複波領域と回折波領域における海底地形変化について考察する。

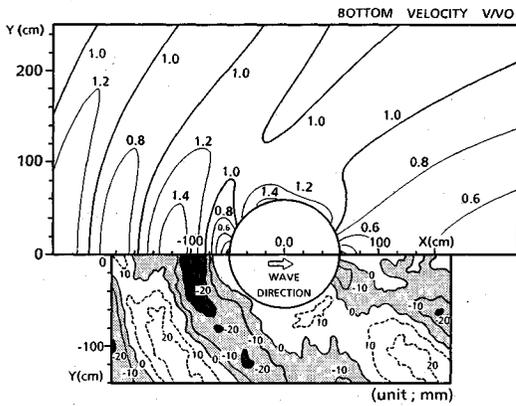


図-6 海底地形変化と無次元流速分布 (計算値)
(円柱: $T=1.5$ s, $H=12$ cm, $t=120$ min; B-C-5)

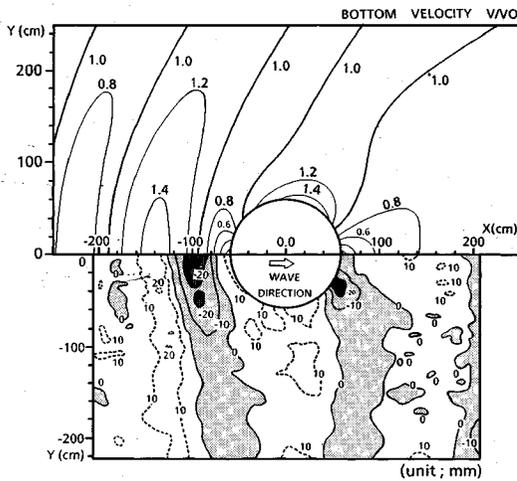


図-7 海底地形変化と無次元流速分布 (計算値)
(円柱: $T=2.0$ s, $H=10$ cm, $t=120$ min; B-C-6)

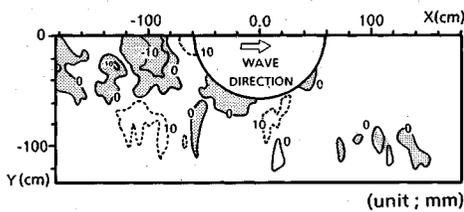


図-8 海底地形変化
(円柱: $T_{1/3}=2.0$ s, $H_{1/3}=8$ cm, $t=120$ min; B-C-7)

(i) 円柱前面の重複波領域

円柱前面では、重複波のコンターに沿うように同心円状の洗掘・堆積を繰り返す。この洗掘・堆積パターンを、防波堤前面のパターンと比較する。図-11に、円柱前面と周縁の洗掘・堆積の位置と底面水粒子速度の関係を示す。図中のコンターは、回折波理論による無次元の底面流速を表す。同図から読み取った、円柱前面の中心線上における、L型とN型の洗掘分類を表-3に示す。また、本実験条件下でのアーセル数 (HL^2/h^3) と波に

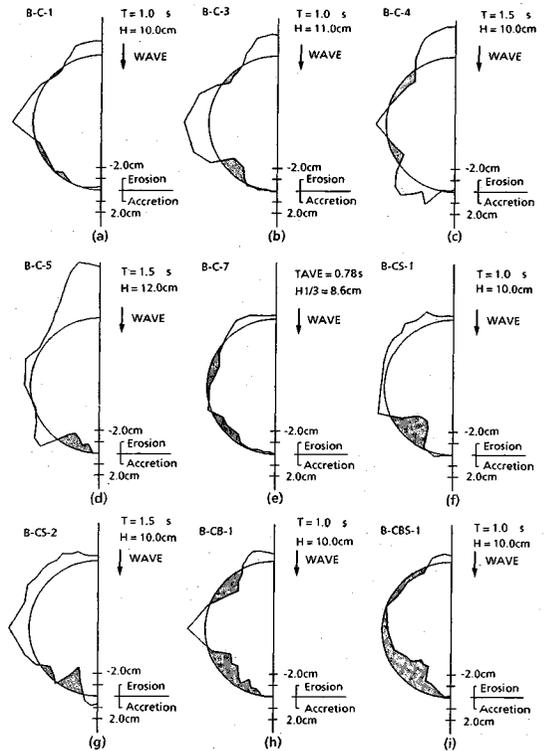


図-9 円柱周縁の洗掘・堆積分布 ($t=120$ min)

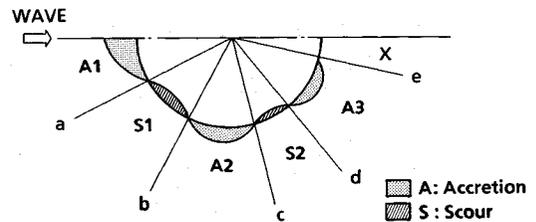


図-10 非没水円柱周縁の洗掘・堆積パターン

よる水粒子速度・沈降速度比 u_b/w と洗掘・堆積パターンの関係を入江ら⁹⁾ にならって図-12に示す。表と図より、 $T=1.0\sim 1.5$ s (B-C-1~B-C-5) ではL型洗掘となり、入江らが示した防波堤前面の洗掘タイプと一致する。したがって、円柱の直径と波長の比が $D/L > 0.5$ では、円柱前面の洗掘現象は2次元的であると言ってよい。しかし、 $T=2.0$ s (B-C-6; $D/L=0.36$) ではN型洗掘となり、従来の定性的傾向からはずれずる。これは、アーセル数 ($HL^2/h^3=39.3$) が入江らの実験条件外であることのみならず、周期が長くなり、波が円柱側方に回り込みやすくなった結果であると考えられる。

(ii) 円柱側方の回折波領域

円柱の沖側を $\theta=0^\circ$ 、岸側を $\theta=180^\circ$ のように円柱側方の位置 θ を定義する。図-4~図-8、図-11において、円柱側方の地形変化と流速分布を比べると、円柱側方の $\theta=90^\circ$ 付近では波による振動流速が最大となる領域で

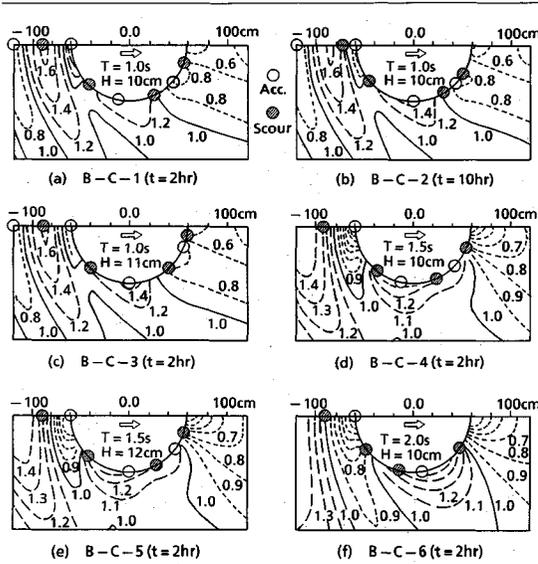


図-11 非没水円柱周縁の洗掘・堆積位置と底面流速分布 (u_b/w_0) の関係

表-3 非没水円柱周辺の洗掘タイプ

ケース名	周期 T (s)	波高 H (cm)	洗掘タイプ	
			前面	周縁
B-C-1	1.0	10	L	N'
C-2	1.0	10	L	N'
C-3	1.0	11	L	N'
C-4	1.5	10	L	N'
C-5	1.5	12	L	N'
C-6	2.0	10	N	N'

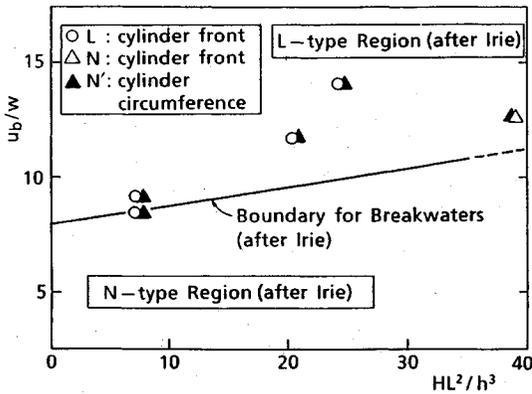


図-12 非没水円柱前面および周縁の洗掘タイプ

あるにもかかわらず堆積し、その前後の、流速が比較的小さい領域で洗掘が起きている。図-11を詳しく見ると、円柱周縁では、特に、 $\theta = 20 \sim 120^\circ$ にかけて、「波による水粒子速度が最大となる場所で堆積し、流速の変化率の大きい場所で洗掘する」パターンとなっている。そこで、円柱周縁におけるこのような洗掘・堆積パターンを、入江ら⁴⁾の「N-型洗掘」の定義を拡張して、「N'-型洗掘」と呼ぶことにする(図-13)。しかし、N'-型洗掘は、底面剪断力が大きい程漂砂量も大きくなるとす

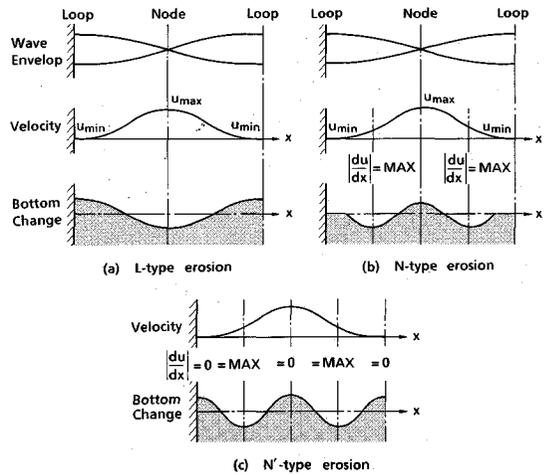


図-13 円柱前面および側面の洗掘タイプ模擬図

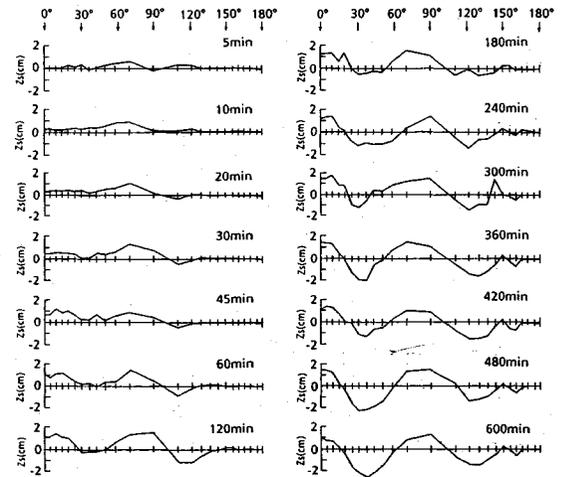


図-14 円柱周縁の洗掘・堆積の経過 (円柱: $T=1.0$ s, $H=10$ cm; B-C-2)

る従来のパワーモデルによるシミュレーションでは十分に再現できない⁸⁾。N'-型洗掘の要因としては、波粒子速度の変化率のほか、円柱周辺に発生する定常流れ⁹⁾、波による振動流速と底面剪断力との位相差¹⁰⁾、円柱周縁での渦なども挙げられる。しかし、Rance⁵⁾も述べたように、大口径円柱の場合渦の影響は小さいと考えられる。

(iii) 地形変化の発達

図-14にケースB-C-2を例にとりて、波作用10hにわたる円柱周縁の地形変化の様態を示す。図より、初期から最終段階に至るまで、細かな時間変動を無視すれば、ほぼ同じパターンで地形変化が進行していることが分かる。この間、波浪場はおおむね定常で、地形変化の影響は特に認められなかった。同じケースについて、円柱周縁上の代表的な計測点(1, 5, 8, 11, 13, 16, 19; 図-3参照)における洗掘深の経時変化を、図-15

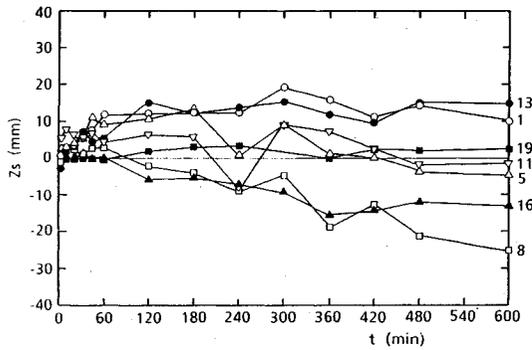


図-15 非没水円柱周縁の洗掘経時変化
(円柱: $T=1.0$ s, $H=10$ cm, $t=0\sim 600$ min; B-C-2)

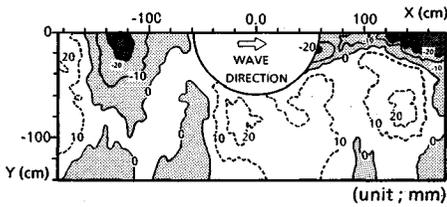


図-16 海底地形変化 (没水円柱: $T=1.5$ s, $H=10$ cm, $t=120$ min; B-CS-1)

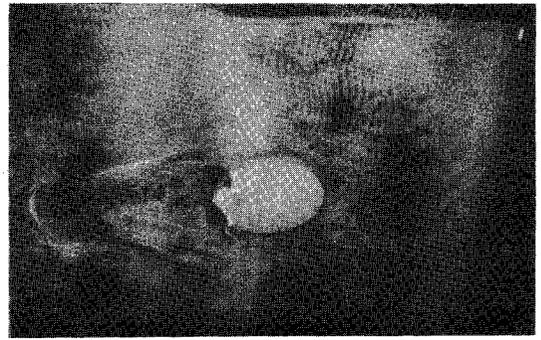


写真-2 没水円柱の天端での砕波状況

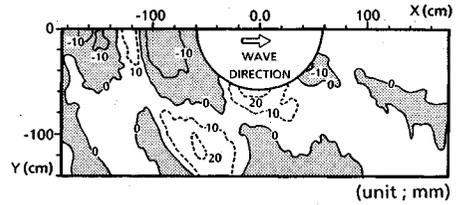


図-17 海底地形変化 (円柱-着底型: $T=1.0$ s, $H=10$ cm, $t=120$ min; B-CB-1)

に示した。地形変化は初期の 60 min まで急速に進み、その後 120~180 min にかけてゆっくりと平衡に達する。しかし、240 min を過ぎるあたりから、全体的に洗掘が進行し始める。これは、円柱の上手側の移動床と固定床との境界における洗掘が発達して、円柱の上手側からの砂供給量が、実験開始直後に比べて減少したことが原因である。

Xie³⁾によれば、防波堤前面で平衡洗掘深に到達する波数 N_{max} は、 $N_{max} = 6,500 \sim 7,500$ ($H/L > 0.02$)、 $= 6,500 \sim 10,000$ ($H/L < 0.02$) である。3次元実験と2次元防波堤実験の時間スケールが等しいと仮定すると、本実験の $T=1.0$ s の場合は 2h ほぼ平衡となるが、 $T=2.0$ s の場合平衡に達していない可能性もある。したがって、本実験の平衡洗掘深の精度には多少問題が残る。しかし、全般に、地形変化は $t=1$ h から 2h にかけて最も急激であり、 $t=2$ h 以降の変化は鈍くなる。したがって、ここでは $t=2$ h における洗掘深を用いて、各構造物間の洗掘傾向を比較する。

a) 波や構造形式による洗掘パターンの比較

(i) 没水と非没水の違い

没水円柱周辺の海底地形変化を図-16 に示す。円柱の天端が没水すると、波の回折・重合の度合いは小さくなり、海底地形の変化も小さくなる。しかし写真-2 に示すように、円柱天端上で砕波が発生し、円柱後方の砕波のブランジング点で激しい洗掘が発生した。特に、 $T=1.5$ s の場合、円柱後方の洗掘深は 40~50 mm (Z_s/H

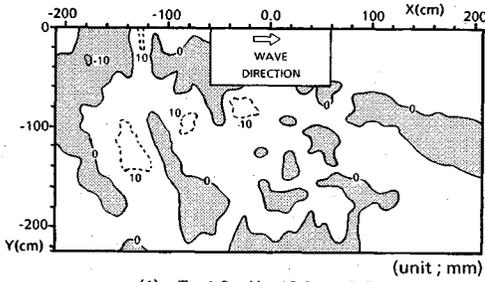
$= 0.4 \sim 0.5$) に達した。しかし、円柱の周縁まで洗掘が及ぶことは無かった。円柱周縁の洗掘については、図-9の (a) と (f)、(c) と (g) を比較する。非没水円柱では、円柱前面 A1 (図-10 参照) と側方 A2 で堆積する傾向があるのに、没水円柱では、斜め後方 (非没水円柱の A3 相当領域) のみで洗掘し、その他の領域は堆積傾向にある。

(ii) 貫入と非貫入 (着底) の違い

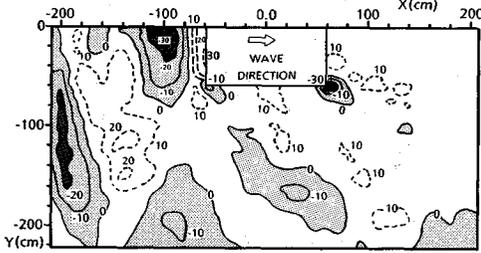
円柱の底部が砂中に貫入せず、砂上に着底しただけの場合 (Sit-On-Bottom) の海底地形変化を図-17 に表わす。図-4 と比べても分かるように、非貫入型は貫入型の海底地形変化と大差ない。ただし、円柱周縁の洗掘範囲はより大きく発達する。円柱周縁については、図-9の (a) と (h)、(f) と (i) を比較する。非没水円柱の非貫入型は、円柱底面と接する表層の砂粒子の拘束が緩いため、洗掘は円柱底面下にまで及び、洗掘領域は貫入型の場合より広がった。没水円柱の非貫入型では、洗掘領域が円柱前面を除く全ての領域に及んだ。没水の場合、天端上の砕波によって発生した円柱後方の強い流れが、円柱周りの岸向き流れを誘発して、周縁の洗掘を助長したものと考えられる。構造物周りの流れについては、今後詳細な計測が必要である。

(iii) 不規則波と規則波の違い

図-8 は、不規則波による円柱周辺の洗掘パターンの 1 例である。不規則波では重複波は十分に発達しないので、円柱前面における洗掘・堆積のパターンは規則波の場合ほど明確でない。また、円柱側方の洗掘もあまり発

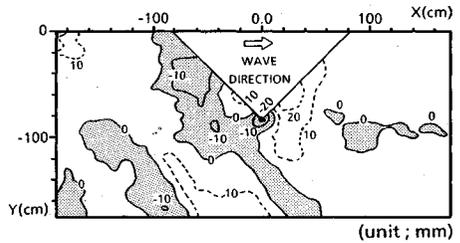


(1) $T = 1.0s, H = 10.0cm, B-R-4$

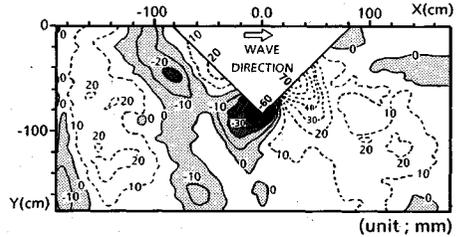


(2) $T = 1.5s, H = 10.0cm, B-R-7$

図-18 海底地形変化 (四角柱, $\alpha=0^\circ, t=120 \text{ min}$)



(1) $T = 1.0s, H = 10.0cm, B-RO-1$



(2) $T = 1.5s, H = 10.0cm, B-RO-3$

図-19 海底地形変化 (四角柱, $\alpha=45^\circ, t=120 \text{ min}$)

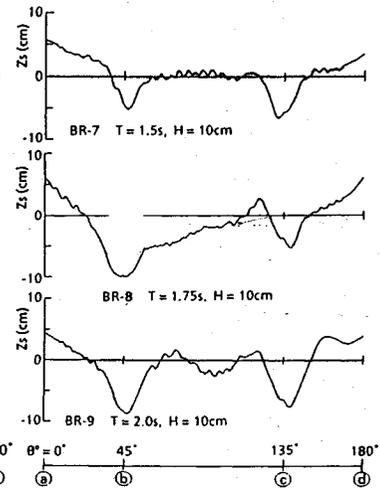
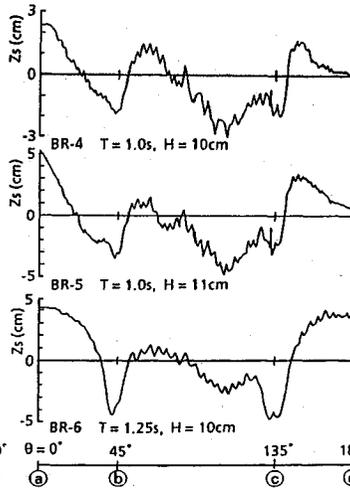
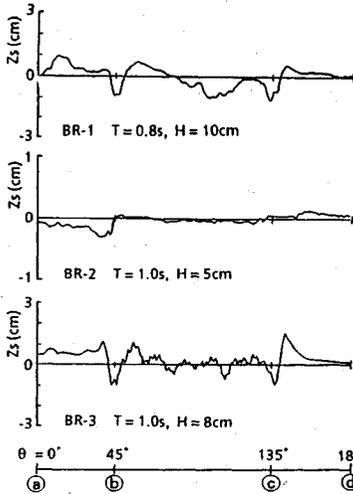


図-20 四角柱周縁の洗掘・堆積分布 ($\alpha=0^\circ, t=120 \text{ min}$)

達しない。円柱周縁の洗掘・堆積パターンは、図-19の (a) と (e) を比較する。不規則波の波高が小さいので定量比較は出来ないが、洗掘・堆積のパターンは両者で大差なく、おおむね五角形をなしている。

(2) 四角柱・八角柱周辺の洗掘

a) 非没水四角柱

非没水四角柱周辺の海底地形変化のパターンの例を、円柱の場合と同様に示す。図-18は波の入射角度 $\alpha=0^\circ$ (正面入射)、図-19は $\alpha=45^\circ$ (対角線入射) の場合である。周縁の洗掘深分布については、図-20、図-21に示す。非没水四角柱周辺の地形変化の特徴を以下に述べる。

(i) $\alpha=0^\circ$

図-18より、四角柱前方における重複波による洗掘・堆積パターンは、円柱の場合と同様である。側方における堆積の傾向、斜め後方の洗掘の傾向も円柱の場合と同様であるが、隅角部の洗掘が特徴的である。隅角部では、洗掘孔のすぐ近傍に洗掘孔から運ばれたと思われる砂がスポット的に堆積する。したがって、四角柱の側方では、円柱で生じたN'-タイプと隅角部の洗掘が合成したパターンとなっている。図-20、図-21を参考にして、四角柱周縁の洗掘パターンの概念図を、図-22(a)に示した。図中、破線はケースによって、洗掘・堆積が入れ替わることを示す。

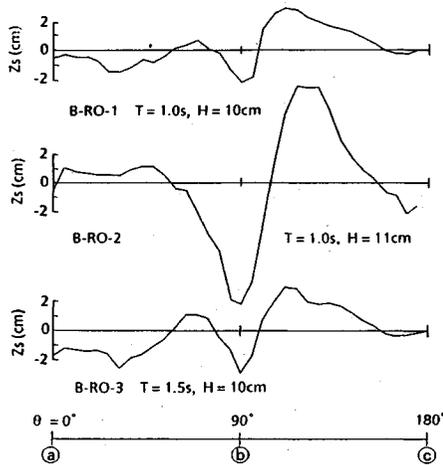
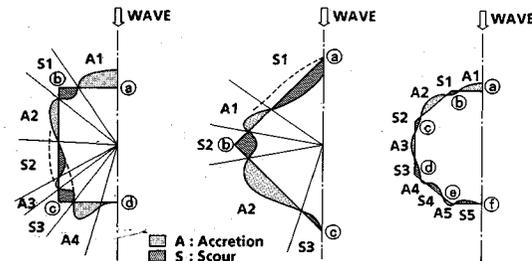


図-21 四角柱周縁の洗掘・堆積分布 ($\alpha=45^\circ$, $t=120$ min)



(a) Rectangular $\theta=0^\circ$ (b) Rectangular $\theta=45^\circ$ (c) Octagonal

図-22 非没水四角柱・八角柱周縁の洗掘・堆積パターン

(ii) $\alpha=45^\circ$

図-19より、この場合も、四角柱前方の洗掘パターンが、斜めにおかれた四角柱前面の重複波の影響を受けていることは明らかである。しかし、重複波のパターンが複雑なため、構造物前面の稜線に沿って洗掘・堆積が繰り返されている。防波堤に波が斜め入射したときの洗掘・堆積パターンと類似の現象である(栗山ら¹¹⁾)。一方、側方の隅角部の洗掘は顕著で、洗掘深も大きい。斜めにおかれた四角柱の洗掘パターンの大きな特徴である。 $\alpha=0^\circ$ の場合と同様に、洗掘孔のすぐ近傍にスポット的な砂堆が存在する。周縁の洗掘パターンの概念図を、図-22 (b)に示す。

b) 隅角部の洗掘の進行状況

表-4に、 $\alpha=0^\circ$ の場合の隅角部の洗掘の進行状況をまとめた。表中 β は、防波堤前面の洗掘進行速度に対するXie³⁾の実験式における指数である。

$$Z_s/Z_{smax} = (t/t_{max})^\beta \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 Z_s :時刻 t における洗掘深、 Z_{smax} : $0 \leq t \leq t_{max}$ における隅角部(岸側・沖側)での最大洗掘深、Xieの実験では防波堤前面の平衡洗掘深の最大値、 t_{max} :本実験では4h、Xieの実験では平衡到達時間を表わす。本

表-4 四角柱隅角部の洗掘進行状況 ($\alpha=0^\circ$, $t=0\sim 4$ h)

ケース名	入射波		洗掘の進行度合い	隅角部 ㊦ ㊧*) 洗掘深の比較	洗掘の進行速度 β *)	
	T(s)	H(cm)			㊦	㊧
B-R-1	0.8	10	1hで平衡	㊦、㊧ 同等	0.6	1.17
R-2	1.0	5	10minで平衡	㊦のみ、㊧なし	1.0	-
R-3	*	8	㊦では漸増、 ㊧では1hで平衡	㊦大	-	-
R-4	*	10	10minで初期洗掘終了、 その後漸増	初期㊦大、後期㊧大	0.5	0.8
R-5	*	11	4hでも漸増	初期㊦大、後期同等	0.6	0.2
R-6	1.25	10	10minで初期洗掘終了、 その後漸増	同上	0.4	0.6
R-7	1.5	*	2hでも漸増	㊦ ㊧ 同等	0.20	0.20
R-8	1.75	*	㊦:漸増、 ㊧:10min開打後減少	㊦大	0.14	0.14
R-9	2.0	*	1hで平衡	初期㊦大、後期同等	0.13	0.13

*1) 図-22参照 ㊦:沖側隅角部(前面)、㊧:岸側隅角部(後面)

*2) $Z_s/Z_{smax} = (t/t_{max})^\beta$

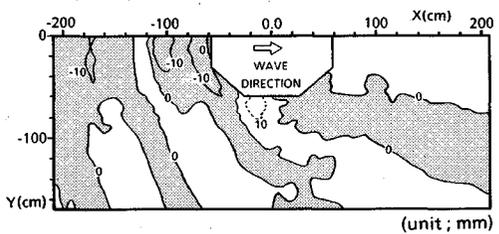


図-23 海底地形変化

(八角柱: $T=1.0$ s, $H=10$ cm, $t=120$ min; B-0-1)

実験では、洗掘の進行は一定でなく、洗掘のごく初期 ($t=1\sim 2$ min)の間急速に洗掘が進行したあと、比較的安定した速度で洗掘が進んで ($t=2\sim 60$ min) ほぼ平衡状態に達し、その後は進行が停止するか、あるいは進行してもその速度は非常に緩慢となる。ここでは、洗掘進行速度としては、中間の時間領域 ($t=2\sim 60$ min) を対象とした。Xieの防波堤前面では $\beta=0.3\sim 0.4$ であるのに対して、四角柱の隅角部では $\beta=0.13\sim 0.8$ と、波の周期によって大きく変化した。周期が長くなるにしたがって洗掘深は大きくなるが、洗掘の進行速度を表わす β は小さくなる傾向にある。

c) 構造形式による洗掘パターンの比較

四角柱が没水すると、円柱の場合と同様、構造物周辺の洗掘は小さくなるが、天端での碎波による構造物後方の洗掘が生じる。ただし、 $\alpha=45^\circ$ では後方の洗掘は比較的穏やかであった。非没水八角柱周辺の洗掘パターン例を図-23と図-22 (c)に示す。八角柱周辺の地形変化は円柱のそれとほぼ同等であるので、八角柱程度の多角形は円柱でモデル化できることを確認できた。

(3) 構造物周縁の最大洗掘深

3. (2)で述べたように、本実験では平衡洗掘状態を得るに至らなかった。そこで、海底地形の変化が鈍くな

表-5 構造物周縁の最大洗掘深 Z_{smax}

ケース名	横型 形状	設置方法	入射波			最大洗掘深 Z_{smax} (mm)							
			周期 T(s)	波高 H(cm)	h/L	前方			周縁				
						S 0	S 1 ^(*)	S 2 ^(*)	S 3 ^(*)	S 1 ^(*)	S 2 ^(*)	S 3 ^(*)	
B-C-1	円柱		1.0	10	0.22	13	4	5					
C-2			•	•	•	22	2	26	11	14			
C-3			•	•	•	11	•	23	5	11			
C-4			1.5	10	0.13	25	8	7					
C-5			•	•	•	12	•	28	•	13			
C-6			2.0	10	0.09	28	+	25					
C-7			$T_{1/3} 1.0$	$H_{1/3} 8.0$	0.22	15	+	7					
C-8			$T_{1/3} 1.1$	$H_{1/3} 6.4$	0.18	4	+	2					
B-R-1	四角柱 $\alpha=0^\circ$	非没水	0.8	10	0.31	10	11	9	15	11	14		
R-2			1.0	5	0.22	3	3	1	1	+	+		
R-3			•	•	•	9	11	6	8	9	7		
R-4			•	•	•	7	19	21	27	29	17	17	
R-5			•	•	•	11	+	14	24	24	17	24	22
R-6			1.25	10	0.16	44	46	25	31	47	49		
R-7			1.5	•	0.13	35	51	59	+	63	76		
R-8			1.75	•	0.11	98	次	19	次	54	次		
R-9			2.0	•	0.09	76	85	16	22	83	76		
B-RO-1	四角柱 $\alpha=45^\circ$		1.0	10	0.22	22	14	21		3			
RO-2			•	•	•	26	26	29		3			
RO-3			1.5	10	0.13	29	+	82		20			
B-O-1	八角柱		1.0	10	0.22	20	11		6	+			
O-2			1.5	•	0.13	35	+	7		11			
B-CB-1	円柱 (着底)	非没水	1.0	10	0.22		14		+	15			
CB-1	円柱 (着底)	没水	•	•	•		4		だらだら	23			
B-CS-1	円柱		1.0	10	0.22	5				S2より積算	23		
CS-2			1.5	•	0.13	25				22			
B-RS-1	四角柱 $\alpha=45^\circ$	没水	1.0	10	0.22	+	10		21		23		
RSO-1			•	•	•	+	10		17		S2に吸収		

*1) 図-10, 22における洗掘位置 *2) 波作用時間, () 内の注記以外は2h *3) +: 堆積

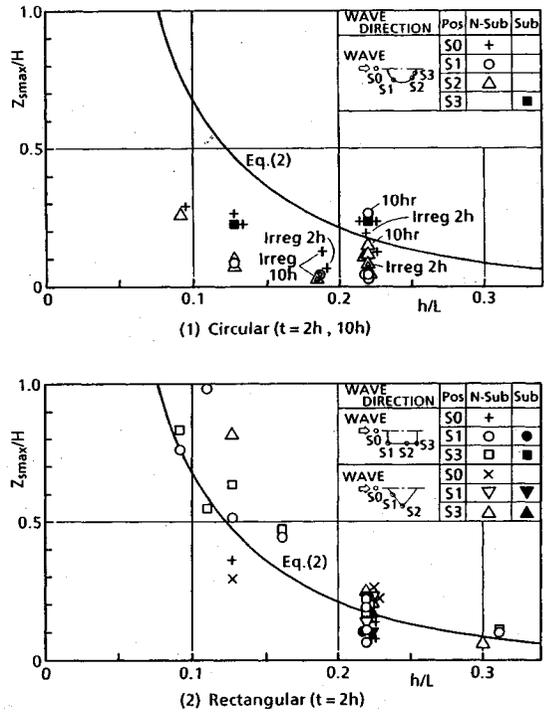


図-24 構造物周縁の最大洗掘深と相対水深の関係

る $t=2h$ での構造物周縁の最大洗掘深を用いて、構造物の種類、波向きなどが洗掘に及ぼす影響の比較を行う。

表-5に構造物周縁の最大洗掘深とその発生場所を示す。表中S0は構造物前方、S1, S2, S3は、図-10, 図-22に示した構造物周縁の洗掘発生領域、(2h), (4h), (10h)などは波の作用時間を表わし、時間の()の注記のないものは全て $t=2h$ における洗掘深を表わす。表より次のことが分かる。 Z_{smax} は、円柱の場合、周縁部(N型洗掘)より前方(重複波型洗掘)のほうが大きい、四角柱の場合、周縁部(隅角部)の方が遙かに大きくなる。また、四角柱と円柱を比べると、 Z_{smax} は四角柱周縁のほうが大きい。四角柱の場合、 $t=2h$ と4hを比べると、周縁の Z_{smax} の発生位置は一定していないが絶対値は大差なく、洗掘が平衡に達していることを示している。さらに、没水型であるにもかかわらず、周縁の Z_{smax} は非没水型より小さいとは言えず、円柱の場合、非没水型の約2倍、四角柱の場合、非没水型と同程度である。

Carstens¹²⁾が述べたように、大口径の構造物の局所洗掘深 Z_s を構造物の代表径 D で無次元化することは適当でない。Xie⁹⁾によれば、防波堤前面の重複波による平衡洗掘深 Z_{smax} と相対水深 h/L の関係は次式のような

$$Z_{smax}/H = 0.4 \cdot (\sinh kh)^{-1.35} \dots \dots \dots (2)$$

$(u_b - u_c)/w > 16 \sim 17$
ただし、 $k = 2\pi h/L$ 。進行波の底面水粒子の軌道振幅は $a_b = 0.5 H (\sinh kh)^{-1}$ であるから上式は、

$$Z_{smax}/a_b = 0.8 \cdot (\sinh kh)^{-0.35} \dots \dots \dots (3)$$

$h/L = 0.1 \sim 0.3$ の範囲では、 $(\sinh kh)^{-0.35}$ の変化は鈍く、0.66~1.15程度であるので、防波堤前面の Z_{smax} は a_b と同程度以下、あるいは、防波堤前面で発生する軌道振幅の最大値の1/2程度以下と考えてよい。本節では式(2)にならい、洗掘深を波高と関係付けて考察する。図-24(1), (2)は、 $t=2h$ における円柱と四角柱周縁の最大洗掘深 Z_s を波高 H で無次元化したものと、相対水深 h/L との関係を示したものである。但し、円柱では $t=10h$ 、不規則波(Irreg)の結果も加えている。図中、+○△などの記号は、洗掘領域S0, S1, S2, S3による違い、白抜きの記号は、非没水の場合、黒く塗り潰した記号は没水の場合を表わす。曲線は式(2)を表わす。

まず、円柱、四角柱共に構造物前方の洗掘深は、周期が短い(h/L 大きい)と防波堤前面と同程度であるが、周期が長くなると防波堤の場合の1/2程度にしかならない。次に、円柱周縁の洗掘深は四角柱の場合より小さく、実験条件の範囲で最大 $Z_{smax}/H = 0.25$ 程度である。また、円柱では h/L が大きいと Z_{smax}/H が小さくなるが、式(2)で示されるような明瞭な関係は得られない。四角柱では洗掘深は大きくなり、実験の範囲では、

Z_{smax}/H の最大値は約1.0となった。洗掘深と相対水深の関係は、式(2)と定性的に一致したが、定量的には、円柱の Z_{smax} は式(2)の約1/2、四角柱の隅角部では逆に1~1.5倍大きい。同じ四角柱でも、波向きが $\alpha=45^\circ$ の場合のS2の洗掘深は、 $\alpha=0^\circ$ の場合の約1.3倍となった。

4. 結 論

大口径海洋構造物の洗掘特性を明らかにするため、構造物の形状、設置方法、波の条件などを系統的に変化させた模型実験を行った。その結果、大口径構造物の前面では2次元防波堤前面の洗掘パターンと類似のパターンとなること、構造物の側方、特に円柱周縁では波による振動流速が $|du/dx|=0$ となる位置で堆積、 $|du/dx|=MAX$ となる位置で洗掘が発生することが明らかとなった。円柱周縁の洗掘パターンは、防波堤前面での洗掘の基本メカニズムにならって、「N'-タイプ」と名付けた。没水構造物は波力の影響は小さいが、天端上の碎波によって構造物後方の洗掘が誘発されること、根入れがなく着底しただけの構造物では、洗掘を助長することも分かった。最大洗掘深は、本実験の範囲で、円柱で波高の1/4倍、角柱の隅角部で波高程度となった。

今後、円柱周辺の流れと砂粒子の移動形態を詳細に調べてN'-タイプの洗掘のメカニズムを明らかにする予定である。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、東京大学工学部渡辺晃教授に有益なご助言を頂いた。ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 西沢勝・南誠信・沢本正樹：波動場における円柱の後流

渦パターンと局所洗掘との関係、土木学会第43回年次学術講演会概要集Ⅱ，pp.758~759，1988。

- 2) 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。
- 3) Xie, S.L. : Scouring patterns in front of vertical breakwaters and their influences on the stability of the foundations of the breakwaters, Coastal Eng. Group, Dep. of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, 61 pp., 1981.
- 4) 入江功・灘岡和夫・近藤隆道・寺崎賢次：重複波による防波堤前面での二次元的海底洗掘—底質の移動機構に着目した研究—，港湾技術研究所報告，第23巻，第1号，3，pp.3~52，1984。
- 5) Rance, P.J. : The potential for scour around large objects, One-day seminar of scour prevention techniques around offshore structures, Society for Underwater Technology, London, pp.41~53, 1980.
- 6) 東江隆夫・勝井秀博：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.425~429，1985。
- 7) 斎藤栄一・佐藤慎司・柴山知也：波動場における大口径円柱周辺の局所洗掘に関する研究，第35回海岸工学講演会論文集，pp.392~396，1988。
- 8) 勝井秀博・東江隆夫：大口径円柱周辺の底質の移動限界と洗掘，海岸工学論文集第37巻，pp.379~382，1990。
- 9) 東江隆夫・勝井秀博・灘岡和夫：大口径円柱周辺の砂の移動機構に関する研究，海岸工学論文集第38巻，pp.451~455，1991。
- 10) 勝井秀博・東江隆夫：大型海洋構造物周辺の洗掘深に関する定量評価，海岸工学論文集第39巻，1992。
- 11) 栗山善昭・浅倉弘敏・藤田誠・入江功：斜め入射重複波による直立堤前面の海底洗掘，第34回海岸工学講演会論文集，pp.411~415，1987。
- 12) Carstens, T. : Seabed scour by current near platform, Proc. of 3rd International Conf. of Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, pp.131~145, 1975.

(1992.12.3 受付)

SCOURING AROUND A LARGE SCALE OFFSHORE STRUCTURE

Hidehiro KATSUI and Takao TOUE

Wave induced scouring around a large-scale offshore structure is investigated by a series of model experiments. Scour patterns are compared and classified for various shapes and types of structures, and with those in front of breakwaters. The influence of the structure's being submerged and the foundation's being not embedded also examined. Scour and accretion at the side of a cylinder is related to the gradient of the velocity amplitude caused by waves. The relationship between maximum scour depths and the incident wave height are obtained.