

大型海洋構造物周辺の洗掘深に関する定量評価

勝井秀博*・東江隆夫**

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が、対象の大半は部材の径 D と波長 L の比 D/L が小さいか、あるいは KC 数 $u_b T/D$ が大きい部材で、剝離渦による洗掘が支配的となる場合である。 $D/L > 0.2$ 、 KC 数 < 0.5 の大口径の構造物では渦の影響は小さいが、波浪変形や流れの場が複雑となり、洗掘現象についても十分理解されていない。筆者ら（1985, 1990）は、大口径円柱周辺の洗掘パターンを明らかにし、円柱前面では2次元重複波による洗掘となり、円柱の周縁では波による水粒子速度 u_w が最大のところで堆積し、 u_w の場所的勾配の最も大きいところ（ $|du_w/dx| = \text{MAX}$ ）で洗掘する N' 型洗掘となること、従来のパワーモデルではこの N' 型洗掘を説明できないことなどを示した。しかし、設計に必要となる洗掘深の絶対値や洗掘の進行速度に関する検討は不十分である。また、海底石油掘削リグや海上空港など、大型海洋構造物の平面形状は円柱とは限らない。本研究の目的は、円柱、四角柱、八角柱など、大型構造物の形状の違いによる洗掘特性を、模型実験によって系統的に把握し、洗掘深の定量評価を試みることである。

2. 実験方法

実験方法の詳細は、大口径円柱周辺の洗掘現象に関する筆者らの報告（1985）に詳しいので、ここでは、実験方法の概略と、新たに加えた構造物模型を含め、全体の実験条件をまとめて説明する。

実験は、平面水槽中央のピット（4.4×4.4 m）に層厚 15 cm、粒径 $D_{50} = 0.15 \text{ mm}$ の移動床を設け、直径または1辺の長さ $D = 117 \text{ cm}$ の円柱、四角柱（正方形）、八角柱の構造物模型を約 5 cm 根入れして設置（非没水・貫入型）し、規則波、不規則波を $t = 2 \sim 10 \text{ h}$ 作用させた後、構造物周辺の地形変化を測定して行なった。

水深は $h = 30 \text{ cm}$ 、入射波は $T = 0.8 \sim 2.0 \text{ s}$ 、 $H = 5 \sim 12 \text{ cm}$ 、波の入射角は $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$ とした。また、比較のため、波力を受けにくい没水タイプ、模型を単に砂面に着底させただけのタイプの洗掘特性も調べた。表-1に、実験条件と構造物模型の形状と設置状況をまとめて示す。具体的な実験ケースは、表-2に掲げてある。ただし、以下、実験結果の説明は、特に断わらない限り、非没水・貫入型を対象とする。

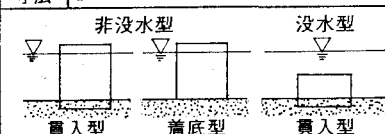
3. 実験結果および考察

3.1 洗掘パターン

写真-1、写真-2に円柱と四角柱周辺の海底地形変化の状況を示す。構造物前方の同心円状の洗掘・堆積パターン、四角柱隅角部の渦による洗掘孔などが特徴的である。図-1～3に、四角柱の $\alpha = 0^\circ$ と 45° および八角柱周辺の洗掘パターンをコンターで示す。円柱周りのコンター（既発表：1985）と比較しながら、構造物の形状による洗掘パターンの違いを簡単にまとめる。

円柱、 $\alpha = 0^\circ$ の四角柱、八角柱では、前面で重複波が発達し、2次元防波堤前面と同様の洗掘（L型、N型）となる。 $\alpha = 45^\circ$ の四角柱前面では、防波堤に波が斜め入射した場合の洗掘パターンに類似する。円柱側方は N' 型洗掘パターンとなるのに対して、四角柱では隅角部の洗掘が顕著で洗掘深も大きい（図-1）。八角柱は円柱と類似の洗掘パターンとなる。構造物周縁の洗

表-1 洗掘実験の条件

砂		$D_{50} = 0.15 \text{ mm}$
水深		$h = 30 \text{ cm}$
波	周期	$T = 0.8, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0 \text{ s}$
	波高 波向	$H = 5, 8, 10, 11, 12 \text{ cm}$ $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$
構造物	形状と寸法	円柱 四角柱 八角柱 $D = 117 \text{ cm}$ $B = 117 \text{ cm}$ $D = 117 \text{ cm}$
	非没水型 没水型	
		

* 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ムリーダー

** 正会員 MS 大成建設(株) 技術研究所土木構造・水理研究グループ副主任研究員

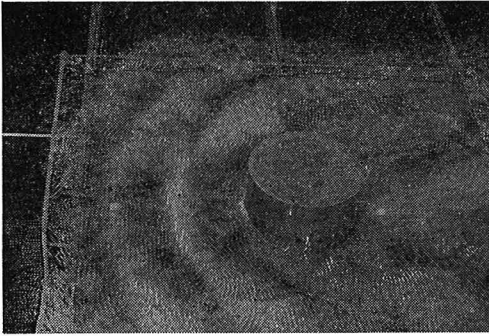


写真-1 円柱周辺の海底地形変化
($T=1.0\text{ s}$, $H=11.0\text{ cm}$, $t=2\text{ h}$; B-C-3)



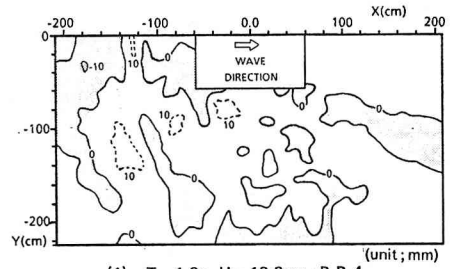
写真-2 四角柱 ($\alpha=45^\circ$) 周辺の海底地形変化
($T=1.0\text{ s}$, $H=11.0\text{ cm}$, $t=2\text{ h}$; B-R-5)

掘・堆積パターンを図-4に模式的に示す。図中、Aは堆積領域、Sは洗掘領域を表わし、波の周期・波高によらず、構造物の形状によって特徴的に定まる。

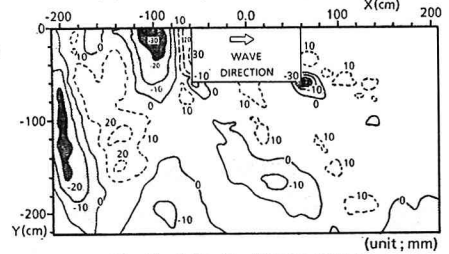
3.2 構造物周縁の洗掘の進行過程

a) 円柱：図-5に、 $T=1.0\text{ s}$ の円柱(B-C-2)を例にとって、10hにわたる構造物周縁の地形変化の模様を示す。図中、 $\theta=0^\circ$ は波に対して構造物前面、 $\theta=180^\circ$ は構造物後面を表わす。図によれば、地形変化は初期から最終段階に至るまで、ほぼ同じパターンで進行している。同じケースについて、円柱周縁上の代表的な計測点における洗掘深の経時変化を、図-6に示した。地形変化は初期の60minまで急速に進み、その後120~180minにかけてゆっくりと平衡に達する。しかし、240minを過ぎるあたりから、領域全体の洗掘が始まる。これは、円柱の上手側の固定床との境界部が深く洗掘され、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することが原因である。

b) 四角柱：四角柱隅角部の洗掘は剝離渦に起因し、N'-型洗掘パターンとなる円柱周縁と洗掘のメカニズムが異なる。隅角部の洗掘深 Z_s の進行度合いは、洗掘後半期(60~120min)は指数関数的で、以下のように表わせる。

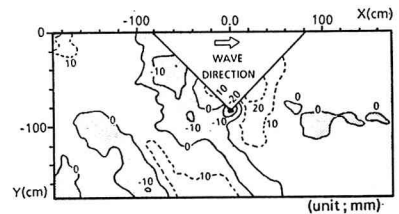


(1) $T=1.0\text{ s}$, $H=10.0\text{ cm}$; B-R-4

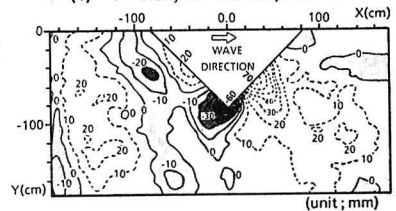


(2) $T=1.5\text{ s}$, $H=10.0\text{ cm}$; B-R-7

図-1 四角柱 ($\alpha=0^\circ$) 周辺の海底地形変化 ($t=2\text{ h}$)



(1) $T=1.0\text{ s}$, $H=10.0\text{ cm}$; B-RO-1



(2) $T=1.5\text{ s}$, $H=10.0\text{ cm}$; B-RO-3

図-2 四角柱 ($\alpha=45^\circ$) 周辺の海底地形変化 ($t=2\text{ h}$)

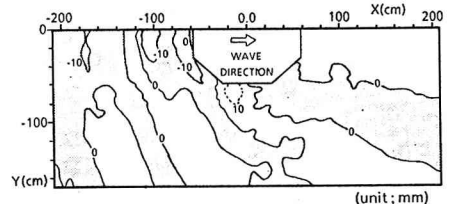


図-3 八角柱周辺の海底地形変化
($T=1.0\text{ s}$, $H=10.0\text{ cm}$, $t=2\text{ h}$; B-O-1)

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

ここで、 Z_s ：時刻 t における洗掘深、 $Z_{s\max}$ ：最大洗掘深、 $t_{\max}$ ：最大洗掘深到達時間。Xie (1981) の防波堤実験では $\beta=0.3\sim0.4$ であるのに対して、 $\alpha=0^\circ$ の場

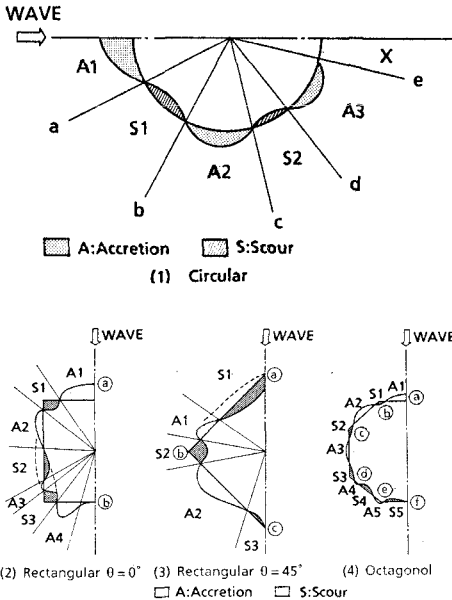


図-4 構造物周縁の洗掘・堆積パターン概念図

合の四角柱の隅角部では、周期によって0.13~0.8と大きく変化した。周期が長いほど洗掘深は大きく、かつ、後半の洗掘の進行速度を表わす β は小さい傾向にある。

3.3 最大洗掘深 $Z_{s\max}$

本実験では、いくつかのケースで平衡洗掘に達しなかった。しかし、図-6からも分かるように、 $t=2\text{h}$ で平衡洗掘の80~100%に達していると判断できるので、 $t=2\text{h}$ 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なう。

a) 一般的特徴：表-2に、構造物前方と周縁の最大洗掘深 $Z_{s\max}$ およびその発生場所を示す。表中、S0は構造物前方、S1, S2, S3は図-4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 $t=2\text{h}$ における洗掘深を表わす。

$Z_{s\max}$ 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、 $Z_{s\max}$ は四角柱周縁のほうが大きい。四角柱の場合、 $t=2\text{h}$ と4hを比べると、周縁の $Z_{s\max}$ 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 $Z_{s\max}$ 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。

b) 防波堤に関する既往の研究：既に述べたように、洗掘深に関する定量的研究は、小口径部材を除いてほとんどない。また、大口径の構造物の局部洗掘深 Z_s を構

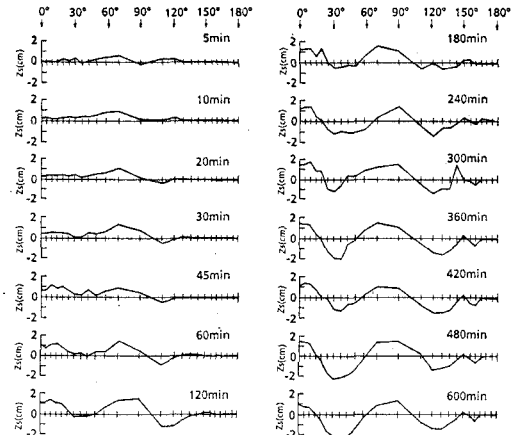


図-5 円柱周縁の洗掘の経時変化(1)
($T=1.0\text{ s}$, $H=10.0\text{ cm}$; B-C-2)

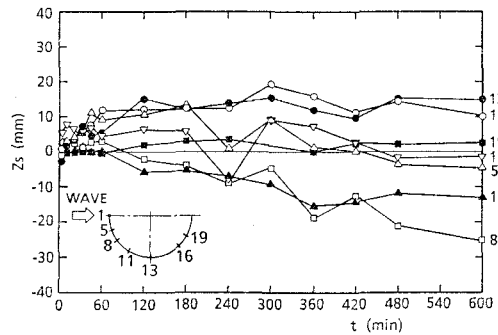


図-6 円柱周縁の洗掘の経時変化(2) (B-C-2)

造物の代表径 D で無次元化することは適当でない。ここで、比較のため、大型構造物の極限である、防波堤を取り上げる。

Xie (1981)は、防波堤前面の重複波による平衡洗掘深 $Z_{s\max}$ と相対水深 h/L を関係付け、細砂に対して次のような実験式を示した。

$$Z_{s\max}/H=0.4 \cdot (\sinh kh)^{-1.85} \quad (2)$$

$$(u_{bn}-u_c)/w > 16.5 \quad (3)$$

ただし、 H : 波高、 u_{bn} : 節における底面の流速振幅、 u_c : 砂の移動限界流速、 $k=2\pi h/L$ 。

微小振幅進行波の底面水粒子の軌道振幅 a_b を用いて、式(2)を変形すると

$$Z_{s\max}/a_b=0.8 \cdot (\sinh kh)^{-0.85} \quad (4)$$

$h/L=0.1\sim 0.3$ の範囲では、 $(\sinh kh)^{-0.85}$ の変化は鈍く、0.66~1.15程度であるので、防波堤前面の $Z_{s\max}$ は a_b と同程度以下、あるいは、完全重複波の軌道振幅の最大値 $a_b' (=2a_b)$ の1/2程度以下と考えてよい。

c) 防波堤と構造物周りの洗掘の比較：図-7(1)、(2)に、 $t=2\text{h}$ における円柱、四角柱の前方と周縁の最大洗掘深 $Z_{s\max}$ を波高 H で無次元化したものと、

表-2 構造物前方と周辺の最大洗掘深 Z_{smax}

D=117cm, $D_{50}=0.15\text{mm}$
 $W=2.0\text{cm/s}$ +; 堆積

ケース名	模型	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
						S0	S1*	S2*	S3*	
B-C-1	円柱		1.0	10	0.22	13	(2h) (10h)	(2h) (10h)*3		
C-2			◇	◇	◇	4	5	11	14	
C-3			◇	11	◇	22	26	5		
C-4			◇	◇	◇	23	5	11		
C-5			1.5	10	0.13	25	8	7		
C-6			◇	12	◇	28	+	13		
C-7			2.0	10	0.09	28	+	25		
C-8			$T_{1/3} 1.0$ $T_{1/3} 1.1$	$H_{1/3} 8.0$ $H_{1/3} 9.4$	0.22 0.18	15 4	+	7 2		
B-R-1	四角柱 $\alpha=0^\circ$	非没水	0.8	10	0.31	(2h) (4h)	(2h) (4h)	(2h) (4h)	(2h) (4h)	
R-2			1.0	5	0.22	10	11	9	15	11 14
R-3			◇	◇	◇	3	3	1	1	+
R-4			◇	8	◇	9	11	6	8	9 7
R-5			◇	10	◇	7	19	21	27	29
R-6			◇	11	◇	14	24	24	17	24
R-7			1.25	10	0.16	44	46	25	31	47 49
R-8			1.5	◇	0.13	35	51	59	+	63 76
R-9			1.75	◇	0.11	76	85	16	22	54 欠
B-R0-1	四角柱 $\alpha=45^\circ$		1.0	10	0.22	22	14	21		3
R0-2			◇	11	◇	26	26	29		3
R0-3	八角柱		1.5	10	0.13	29	+	82		20
B-0-1			1.0	10	0.22	20	11	6		+
0-2	円柱 (箱底)	非没水 没水	1.5	◇	0.13	35	+	7		11
B-CB-1			1.0	10	0.22		14	+		15
CBS-1	円柱	没水	◇	◇	◇		4	だらだら		23
B-CS-1			1.0	10	0.22			S2より後側		
CS-2	四角柱 $\alpha=45^\circ$		1.5	◇	0.13	5	25	23		
B-RS-1			◇	◇	◇	+	10	21		23
RSO-1			◇	◇	◇	+	10	17		S2に吸収
			◇	◇	◇	+	10	17		

*1) 図-4における洗掘位置 *2) 波作用時間, () 内の注記以外は2h

相対水深 h/L との関係を示す。但し、円柱では $t=10\text{h}$ 、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、実験の範囲では最大 $Z_{smax}/H=1.0$ 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 $1\sim 1.5$ 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。

3.4 円柱周りの洗掘シミュレーション

前報 (1990) では、斉藤ら (1985) の地形変化シミュレーション法において、底面剪断力の評価法を改良し、円柱前方の洗掘計算の精度が向上することを示した。しかし、N'-型洗掘パターンを説明することができなかった。

本研究では、パワーモデルに基づく漂砂量を次のように表現した。

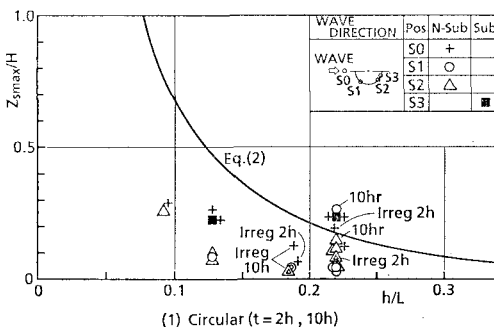
$$q(t) = AD_{50} \varepsilon_k \{ \Psi(t) | -\Psi_{cr} \} (U_w(t) + \gamma + U_o) / (1 - \lambda) \quad (5)$$

$$\bar{q} = (1/T) \int_0^T q(t) dt \quad (6)$$

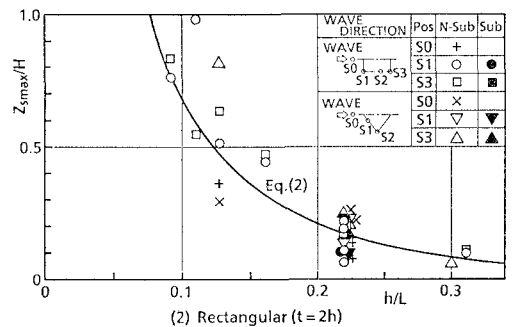
ここで、 $q(t)$ 、 $\bar{q}$ ：時刻 t における局所漂砂量および 1 留期平均の漂砂量 (cm^2/s)、

A ：無次元係数 ($=1.2$)、 D_{50} ：砂の粒径 (0.015cm)、 λ ：砂の空隙率 ($=0.4$)、 $\Psi(t)$ 、 Ψ_{cr} ：時刻 t における無次元剪断力および限界シールズ数 ($=0.085$)、 $U_w(t)$ 、 U_o ：時刻 t における底面の軌道流速および定常流速、 γ ： $U_w(t)$ と $\Psi(t)$ の位相差、 ε_k は $\Psi(t)$ と Ψ_{cr} の大小関係で 0.1 の値を取るオペレーターである。

γ を説明する。元来、水平床での振動流速と底面剪断力の間の位相差は $\pi/4$ 以下であるが、Sato (1987) によれば、砂澱の存在化では、流速の最大時と浮遊砂質量の最大時とは $\pi/2$ 以上の位相差がある。そこで、浮遊砂と掃流砂を併せ、砂の巻き上がりに関連する $\Psi(t)$ と



(1) Circular ($t=2\text{h}, 10\text{h}$)



(2) Rectangular ($t=2\text{h}$)

図-7 構造物周辺の最大洗掘深 Z_{smax}

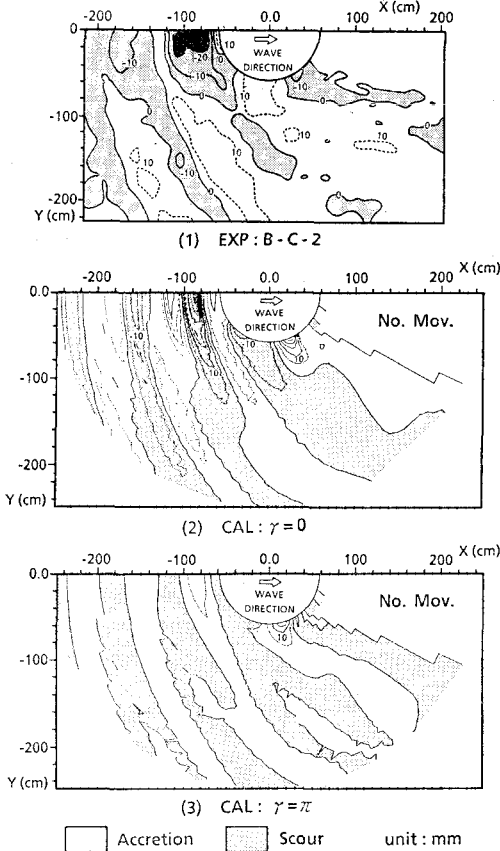


図-8 円柱周辺の海底地形変化の計算値と実験値の比較
($T=1.0$ s, $H=10.0$ cm, $t=2$ h; B-C-2)

輸送を担う $U_w(t)$ の間に位相差 γ を導入することにした。 γ の値によって漂砂の向きを調整できることから、 γ は渡辺ら (1984) の方向関数に関係するパラメータとも解釈できる。

$T=1.0$ s の計算結果を例として 図-8 に示す。図中 (1) は実験値、(2) は位相差 γ を考慮しない場合、(3) は $\gamma=\pi$ とした場合である。 γ の影響は一見して顕著ではないが、良く見ると、洗掘・堆積の位置が微妙にずれている。図-9 に円柱周縁の地形変化の実験値と計算値の比較を示す。 $\gamma=\pi$, $3\pi/4$ とすることにより、

計算値は実験値 (円柱周縁の N'-型洗掘パターン) に接近した。しかし、 γ の導入は、円柱周縁の洗掘計算には効果的であるが、円柱から離れた場所では、必ずしも有効でなく、場所や周期による使い分けが必要である。

4. 結 論

模型実験により、円柱、四角形、八角形の平面形状を有する大型構造物周辺の洗掘パターンを把握した。また、構造物前面、周縁、隅角部の洗掘深および洗掘の進行速度を、2次元防波堤の Xie の実験式を用いて定量的に評価した。円柱周辺の洗掘シミュレーションでは、波粒子速度と底面剪断力との位相差 γ を考慮することにより、周縁の計算精度が向上した。以上より砂地盤に関する限り、1~1.5倍の精度の範囲で、概略値ながら、大型構造物周辺の洗掘深の定量的評価が可能となった。

今後、隅角部の洗掘と剝離渦を関係付けるパラメータを検討すると共に、位相差 γ の物理的意義を明らかにする必要がある。

謝辞：本研究を進めるに当たり、東京大学工学部土木工学科の渡辺晃教授には、貴重なご助言を頂いた。また、横浜国立大学工学部建設学科の佐藤慎司助教授には、数値シミュレーションのご指導を頂いた。ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 勝井秀博・東江隆夫 (1990): 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. 379-383.
- 斉藤栄一・佐藤慎司・柴山知也 (1988): 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.
- 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.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.
- Sato, S. (1987): Oscillatory boundary layer flow and sand movement over ripples, Doctoral Dissertation submitted to University of Tokyo, 135 p.
- Xie, S. L. (1981): Scouring patterns in front of the breakwaters, Coastal Eng. Group, Dep. of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, 61 p.

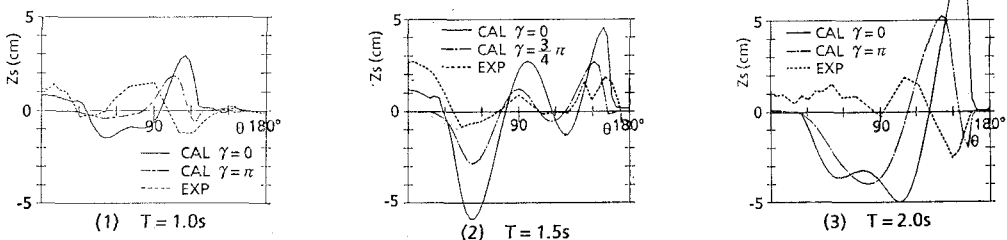


図-9 円柱周縁の洗掘計算と実験値の比較