

二基の大口径円筒構造物周辺の地形変化に関する研究

岩田好一朗*・金 昌 濟**・安 部 智 彦***

1. 緒 言

今後、浅海域の多目的利用開発にともない複数の大口径の円筒構造物が近接して建設されるようになるものと考えられる。したがって、このような複数構造物周りの局所洗掘を含む地形変化の機構を解明することは構造物の耐波設計上極めて重要である。従来、大口径円筒構造物周辺の局所洗掘に関する研究は主に単円筒構造物を対象とし行われてきた（例えば、勝井ら、1990）。

本研究は、今まで、ほとんど論議されていない大口径円筒構造物が二基近接して設置された場合の局所洗掘を含む地形変化の実態とその機構を主に水理実験により明らかにするとともに非碎波の場合の構造物周囲の局所洗掘の発生位置および最大洗掘深の発生位置を湧き出し分布法により解析的に考究しようとするものである。

2. 湧き出し分布法

円筒構造物周辺の底面流速場を湧き出し分布法を用いて数値的に求めるものとする(Isaacson, 1978)。すなわち、任意の点 (x, y, z) における回折散乱波の速度ポテンシャル $\Phi(x, y, z)$ は式(1)で与えられる。

$$\begin{aligned} \Phi_D(x, y, z; t) \\ = \frac{gk \cosh k(h+z)}{4\pi\sigma \cosh(kh)} \\ \times \int_S F(X, Y) G(x, y; X, Y) dS(X, Y) e^{-i\sigma t} \\ \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここに、 g ：重力加速度、 k ：進行波の波数、 h ：静水深、 σ ：角周波数、 (x, y, z) ： Φ_s を求める座標点、 (X, Y) ：湧き出し点の位置、 S ：物体の表面要素、 i ：虚数単位、 t ：時間、 F ：湧き出し強さで後述する物体表面の不透過条件により決定される未知関数である。また、 G はグリーン関数で式(2)で与えられる。

$$G(x, y, X, Y) = i\pi H_0^{(1)}(kr) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $r = \sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2}$ で、 $H_0^{(1)}$ は0次の第1

種ハンケル関数である。物体表面における不透過条件を使うと湧き出し強さ F が決定でき、式(1)より Φ_s が求められる。入射波の速度ポテンシャル Φ_i は既知であるので全速度ポテンシャル $\Phi = \Phi_i + \Phi_s$ がわかり、底面 $z = -h$ での流速は全速度ポテンシャル Φ を空間微分して、 $z = -h$ を用いることにより求められる。なお、本研究で用いた湧き出し分布法による計算結果と実験結果との対応はかなり良好であることが認められた（岩田ら、1993；Kim and Iwata, 1993）。

3. 水 理 実 験

3.1 実験装置と方法

実験は名古屋大学工学部土木工学科の3次元平面造波水槽（長さ30 m×幅10 m×深さ0.6 m）を使って行った。水槽一端にはピストン型造波装置が、他端には1/10勾配の砂による消波斜面が設置されている。水槽内には、先端に勾配1/15の斜面を持つ高さ7 cmの水平床を設置し、その中央部に410×310 cmの範囲で珪砂6号（砂の中央粒径 $d_{50} = 0.038$ cm）を厚さ7 cmで均して移動床を作成し、2円筒を設置した。円筒は直径 $D = 47.2$ cmの亚克力製とし、越波しないように天端高さを静水面上30 cmとした。2円筒の間隔（外壁間隔） e を1 D と2 D の2種類変化させた。発生波は全て規則波であり、周期 T を1.4秒で固定したが、構造物への入射角度 α を0°と45°の2種類、波高 H_1 を4.5 cm（非碎波）と10.9 cm（碎波）の2種類変化させた。なお、 $H_1 = 10.9$ cmの波は円筒（ $\alpha = 45^\circ$ の場合は沖側円筒）で碎波するように造波させた。静水深 h を20 cmで一定とした。

碎波しない場合は造波開始後2時間以上、地形変化がほぼ平衡状態に達するまで造波し、碎波する場合は、造波開始1～2時間後、それぞれ地形変化を詳細に計測した。なお、造波中、構造物周辺の波高と流速をそれぞれ電気容量式水位計と電磁流速計で計測した。また、別途、移動床実験と同様の実験条件で円筒周囲の底面摩擦力を、各々の円筒に対して、円筒表面から1.5 cm（ $r/D = 0.53$ ）と6.5 cm（ $r/D = 0.56$ ）離れた位置でShear meter（三計エンジニアリング製S-10 W）を用いて45°の等間隔で八箇所計測した。さらに、比較のため単円筒の場

* 正 会 員 工 博 名古屋大学教授 工学部土木工学科
 ** 学生会員 工 修 名古屋大学大学院 土木工学専攻
 *** 学生会員 名古屋大学大学院 土木工学専攻

合の移動床実験も行った。

3.2 解析方法

湧き出し分布法により底面流速 V の空間勾配 $\Delta V = \partial V / \partial S$ ($S = r\theta$, θ は入射波が構造物に最初当たった点からの構造物周囲の角度) を求めた。

また、質量輸送速度 U_m を求めるには非線形理論を展開する必要があるが、本論では、質量輸送速度は convective inertia term $V(\partial V / \partial S)$ に密接に関連するものとし (Carter ら, 1973), 質量輸送速度の空間勾配 ΔU_m を次のように仮定した。

$$\Delta U_m = -\frac{\partial}{\partial S} \left(V \frac{\partial V}{\partial S} \right) \quad (3)$$

本実験の範囲内では、底面は層流境界層となるため底面せん断力 τ_θ と τ_r を層流境界層理論に基づいて次のように算定した。

$$\tau_\theta = \sqrt{2} \rho \nu \beta V_\theta \quad (4)$$

$$\tau_r = \sqrt{2} \rho \nu \beta V_r \quad (5)$$

ここに、 ρ : 流体の密度, ν : 流体の動粘性係数, $\beta = \sqrt{q/2\nu}$, σ : 角周波数, V_θ : θ 方向の底面流速, V_r : r 方向の底面流速である。

4. 実験結果および考察

4.1 地形変化の特性

底質の移動は水粒子の底面流速場に支配されるものと考えられるので、円筒周辺の底面流速場と関連づけて論議する。構造物の設置されていない状態の予備実験で、非碎波の進行波の底面流速 (13.3 cm/sec) は底質の初期移動限界流速 (12.0 cm/sec) を超え、底質の移動が確認された。

図-1 は $H_1/h=0.209$, $\alpha=0^\circ$, $e/D=1$ の場合の2円筒周辺の地形変化の平面図である。同図より、円筒の前面領域 (Aより前面) は、部分重複波の影響により洗掘領域

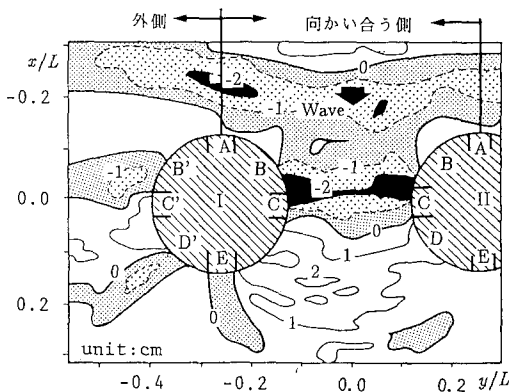


図-1 二円筒周辺の地形変化
($H_1/h=0.209$, $\alpha=0^\circ$, $e/D=1$)

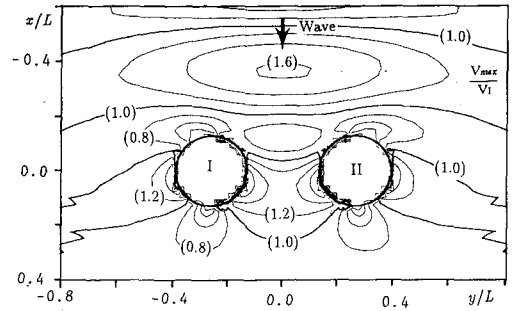


図-2 二円筒周辺の等最大流速線図
($H_1/h=0.209$, $\alpha=0^\circ$, $e/D=1$)

域と堆積領域が交互に現れる領域、円筒の後面領域 (Eより後面) は円筒の遮蔽領域で堆積となる領域になっており、単円筒の場合と同様の結果 (藤井ら, 1990; Kim and Iwata, 1993) となっている。湧き出し分布法で計算した円筒周辺の底面流速を示した図-2 とつぎ合わせると、流速の増加する斜め前方領域 [外側 (B'): $V_{\max}/V_1 = 0.2 \rightarrow 1.4$, 向かい合う側 (B): $V_{\max}/V_1 = 0.2 \rightarrow 1.6$] ($V_{\max}$ は底面流速, V_1 は入射波の底面流速である) および流速の減少する斜め後方領域 [外側 (D'): $V_{\max}/V_1 = 1.4 \rightarrow 0.2$, 向かい合う側 (D): $V_{\max}/V_1 = 1.6 \rightarrow 0.2$] は洗掘領域となる。一方、円筒の前面領域 (A) から二つの円筒の向かい合う側の側方領域 (C) までの全領域は洗掘領域となる。これは後述するように、底面流速線が密集する (図-2 参照)。すなわち底面流速の空間変化が激しくなったため、洗掘領域となったと推測される。

碎波する場合の地形変化の一例を図-3 に示す。碎波する場合、全体的には円筒前面領域 (A) では部分重複波の影響がある程度規則的に現れ、本論のように円筒設置部で碎波する場合は、部分重複波の影響は相当大きいと考えられる。向かい合う側の側方領域 (C) から斜め後方領域 (D) と外側の斜め前方領域 (B') から側方領域 (C') を

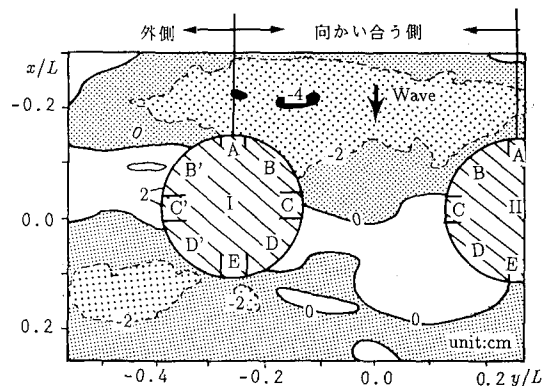


図-3 二円筒周辺の地形変化 (碎波)
($H_1/h=0.544$, $\alpha=0^\circ$, $e/D=1$)

除き、全体的に洗掘となっている。非碎波の場合には(図-1参照)。外側の斜め前方領域(B')は流速が増加する領域なので洗掘領域となるが、碎波する場合(図-3)には堆積領域となっている。これは円筒前面領域(A)で洗掘された砂が浮遊し運ばれ堆積し、その場所での洗掘量を上回ったと考えられる。また、向かい合う側では流速が速くなるからもっと後方領域まで底質は移動するが、 $e/D=1$ の場合は前方領域で激しく洗掘された砂が狭い円筒間を移動し通過する割合が少なく、そのため遠くへ行かず近い後方領域で堆積したものと考えられる。なお、図示していないが、 $e/D=2$ の場合には円筒間隔がより広がるので、 $e/D=1$ の場合の場合より、より後方領域で堆積する。

4.2 局所洗掘

a) 円筒前面領域

円筒前面領域は防波堤前面領域のように、回折波と入射波により構成される部分重複波によって2次元的な洗掘パターンを表す(藤井ら, 1990)。この領域での洗掘の特性は、入射波による底面での最大流速 u_b と底質の沈降速度 w_f の比 u_b/w_f によって支配される(入江ら, 1984)。すなわち、 $u_b/w_f < 10$ の場合は腹と節の中間で洗掘され節の位置で堆積するN型洗掘となり、 $u_b/w_f < 10$

の場合には節の位置で洗掘され腹の位置で堆積するL型となる。本研究で対象とした底面での最大流速と底質の沈降速度の比 $u_b/w_f = 2.44 \sim 2.75$ であるからN型の範囲に属する。

入射角度 $\alpha = 0^\circ$ の場合の円筒前面領域での地形変化を図-4(a)と(b)に示す。(a)は非碎波の場合の地形変化、(b)は碎波する場合の地形変化を表す。それぞれ円筒 I の前面領域での地形変化であり、円筒表面から沖方向に x の正軸をとっている。非碎波の場合(図-4(a))は、全てがほぼN型洗掘となっている。 $e/D=1$ の場合の洗掘深は他のケースより大きい、これは、円筒間の設置間隔が狭いため波の反射率が大きくなったためと考えられる。

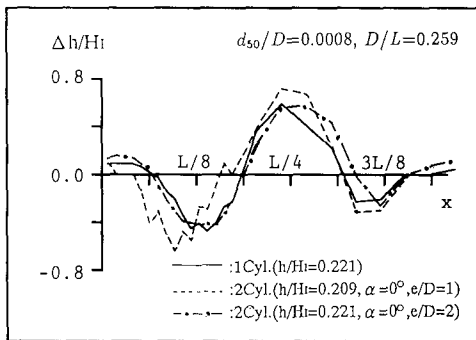
碎波する全ての場合(図-4(b))の無次元洗掘深 $\Delta h/H_I$ は3ケースともほぼ同程度であり、円筒表面から $3L/16$ までは洗掘となっているが、単円筒の場合は非碎波の場合の地形とよく似ていることがわかる。これは、円筒が増えるにつれて碎波の規模が大きくなるため、単円筒より2円筒の方の洗掘領域が広がったと推測される。

b) 円筒周囲

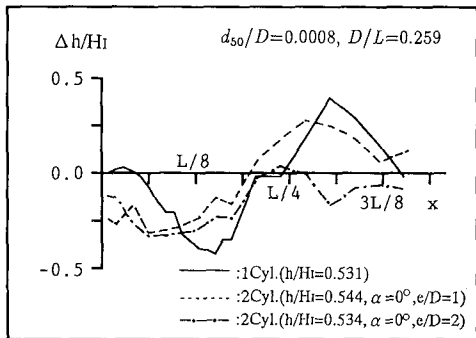
本実験の条件下では、Jonsson(1966)の分類によれば、構造物周囲は層流または遷移領域となるので、砂移動の初期の段階では層流境界層理論を使っても差し支えないと考えられる。

図-5は、円筒表面から 1.5 cm ($r/D=0.53$) および 6.5 cm ($r/D=0.64$) 離れている円筒周囲における円筒の接線方向無次元最大せん断力 ($\tau_{\theta}/\rho g H_I$) に伴う変動特性を示した一例であり、細実線および太実線はそれぞれ $r/D=0.53$ および $r/D=0.64$ の位置の接線せん断力の計算結果、 $\circ$ と $\triangle$ はそれぞれ $r/D=0.53$ と $r/D=0.64$ の位置の接線せん断力の実験値である。

半径方向のせん断力は、接線方向のせん断力に比べて小さい。これは構造物のごく近傍では、構造物表面の不透過条件により、半径方向の水粒子の運動は非常に小さ



(a) 非碎波



(b) 碎波

図-4 円筒前面領域の地形変化

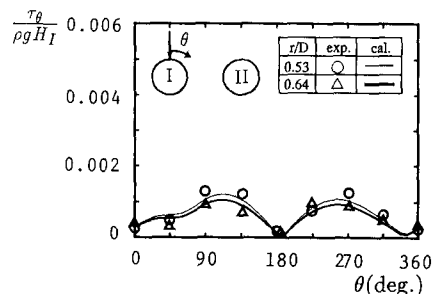


図-5 接線方向の無次元せん断力の変動特性
($H_I=0.209$, $\alpha=0^\circ$, $e/D=1$)

くなり、鉛直方向あるいは接線方向の水粒子運動が卓越するためである。すなわち、式(4)と(5)よりわかるように、底面せん断力は底面流速に比例するので、底面流速の大小によって変わるが、この場合、回折散乱波により接線せん断力が大きくなる位置は構造物の間隔がもっとも狭くなる位置 $\theta=90^\circ$ より透過側にずれた $\theta=120^\circ$ 前後となる。なお、実験値と計算値の対応は良好であり、線形計算に基づく本計算手法で底面せん断力は精度よく予測できると考えてよい。

図-5と図-6を比較してみれば、底面せん断力が大きい $\theta=120^\circ$ および 260° 付近は堆積領域となっている。このことより底面せん断力の大小によって平衡状態での局所洗掘の評価はできないことが認められる。

図-6～図-8に、円筒表面から1.5 cm ($r/D=0.53$) 離れた位置における2円筒周囲の θ にとりなう無次元

地形変化量 $\Delta h/H_I$ と底面流速の空間勾配 $\Delta V = \partial V / \partial S$ および ΔU_m の関係を示す。図中の太い実線は $\Delta h/H_I$ 、細実線は ΔU_m 、破線は ΔV の値を示す。ここに、地形変化量 $\Delta h/H_I$ の負の値(-)は洗掘、正の値(+)は堆積を表す。なお、単円筒の場合(岩田ら, 1993; Kim・Iwata, 1993) の円筒周囲の地形は $\theta=0^\circ$ に対してほぼ対称となったが、図-6～図-8に示したように2円筒の場合は $\theta=0^\circ$ に対する対称性はなくなる。

まず、全体的に、円筒周囲の全体地形については、底面流速の空間勾配が存在する領域(底面流速が増加または減少)では洗掘となったが、円筒表面周囲では、底面流速の空間勾配 ΔV が増加する領域では洗掘となり、この領域の $\Delta V \approx 0$ 付近で極大洗掘が生じることが一般的に認められる。逆に、底面流速の空間勾配が減少する領域では堆積となり、この領域の $\Delta V \approx 0$ 付近で極大堆積となるのが一般的な傾向として認められる。また、 ΔU_m が正(+)の場合は洗掘、 ΔU_m が負(-)の場合は堆積であることが認められる。これらの理由としては、次のことが挙げられる。底質の輸送量 q は質量輸送速度 U_m に比例する($q \propto U_m$)。底質の輸送量の空間勾配 $\partial q / \partial S$ は質量輸送速度 U_m の空間勾配 $\partial U_m / \partial S$ に比例するので、式(3)を利用すると次式が成立する。

$$\frac{\partial q}{\partial S} \propto \frac{\partial U_m}{\partial S} \propto \frac{\partial}{\partial S} \left(V \frac{\partial V}{\partial S} \right) (= \Delta U_m) \quad \cdots \cdots (6)$$

式(6)の質量輸送速度の空間勾配 ΔU_m を書き直すと次式のようになる。

$$\Delta U_m = \frac{\partial}{\partial S} \left(V \frac{\partial V}{\partial S} \right) = \left(\frac{\partial V}{\partial S} \right)^2 + V \frac{\partial^2 V}{\partial S^2} \quad \cdots (7)$$

式(7)の右辺第一項は、図-9に示すように、第2項に比べて小さいので無視すれば、式(8)をうる。

$$\Delta U_m \approx V \frac{\partial^2 V}{\partial S^2} \quad \cdots \cdots (8)$$

V の空間勾配 $\partial V / \partial S$ が増加する領域での $\partial^2 V / \partial S^2 > 0$ となり式(8)の ΔU_m は正(+)である。逆に、 $\partial V / \partial S$ が減少する領域では $\partial^2 V / \partial S^2 < 0$ となるので ΔU_m は負(-)となる。すなわち、式(8)によれば、 $V \partial^2 V / \partial S^2 > 0$ の場合は、 $\partial q / \partial S > 0$ に対応するので、距離 S の増加にとりない

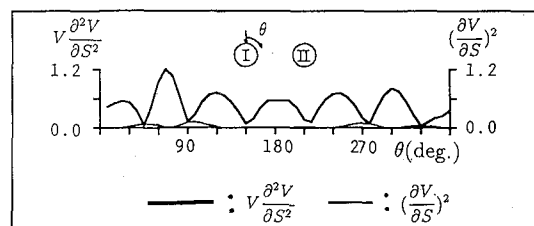


図-9 $V \partial^2 V / \partial S^2$ と $(\partial V / \partial S)^2$ の関係
($H_I/h=0.221$, $\alpha=0^\circ$, $e/D=2$, $r/D=0.53$)

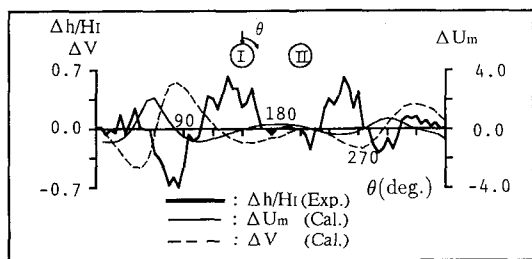


図-6 二円筒周囲の地形変化
($H_I/h=0.209$, $\alpha=0^\circ$, $e/D=1$, $r/D=0.53$)

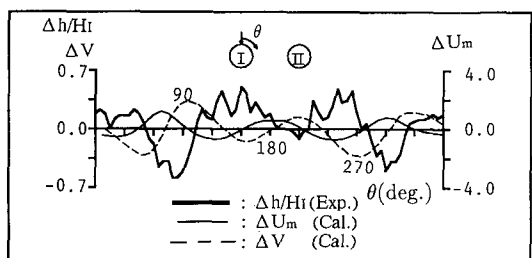


図-7 二円筒周囲の地形変化
($H_I/h=0.221$, $\alpha=0^\circ$, $e/D=2$, $r/D=0.53$)

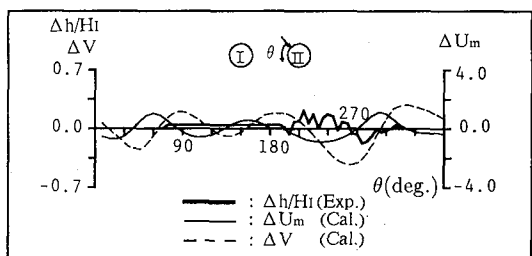
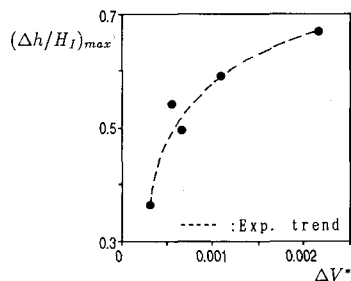


図-8 二円筒周囲の地形変化
($H_I/h=0.235$, $\alpha=45^\circ$, $e/D=1$, $r/D=0.53$)

図-10 最大洗掘深と ΔV^* との関係

底質の移動量が増加するため $V\partial^2 V/\partial S^2 > 0$ の領域での底面は洗掘傾向 ($\Delta h/H_1 < 0$) になる。逆に、 $V\partial^2 V/\partial S^2 < 0$ の場合は、 $\partial q/\partial S < 0$ に対応するので、底質の輸送量 q は距離 S とともに減少するため、 $V\partial^2 V/\partial S^2 < 0$ の領域での底面は堆積状態になると考えられる。なお、全体的に、円筒の斜めの方前領域では、 ΔU_m が正となってから少しずれて洗掘は始まる。これは円筒前面の部分重複波動場領域と円筒周囲の重合波動場領域の境界において部分重複波動場領域の底質の移動量が重合波動場領域の底質の移動量より大きいため、部分重複波動場領域の底質が流されて斜め前方領域に溜まって堆積されたためと推測される。

しかしながら、図-8に示す $H_1/h=0.235$ 、 $\alpha=45^\circ$ 、 $e/D=1$ の場合の岸側円筒 (円筒II) の $\theta=0^\circ\sim 180^\circ$ の付近は ΔU_m が比較的変動しているが、地形変化はほとんど生じていない。この点について、今後の検討の余地は残されているが、洗掘現象は必ずしも底面流速または質量輸送速度の空間勾配で支配されない場合もあると推測される。

次に最大洗掘深について触れておこう。底面流速の空間勾配の変化率 ΔV^* と無次元最大洗掘深 $(\Delta h/H_1)_{\max}$ の関係を示したものが図-10である。図中の ΔV^* は次式のように算定した。

$$\Delta V^* = -\frac{\partial}{\partial \theta} \{ \Delta V_{\min} - \text{連続する } \Delta V_{\max} \} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\Delta V_{\min}$ と $\Delta V_{\max}$ は連続する ΔV の最小値と最大値である。図-10に示されているように、 ΔV^* が大きくなるほど最大洗掘深 $(\Delta h/H_1)_{\max}$ は大きくなり、円筒表面周囲の局所洗掘深は ΔV^* と強い相関関係があることがわかる。

5. 結 論

本研究によって得られた主要な結論を以下に要約する。

(1) 二基の大口徑円筒構造物周囲の全体地形と局所地形の変化は碎波の有無、構造物の設置間隔および波の入射角度によって著しく変化する。

(2) 非碎波の場合の全体地形は、底面流速の変化がある領域で洗掘が生じ、円筒の向かい合う側の洗掘深は円筒の外側より大きくなる。

(3) 碎波する場合の全体地形は、入射角度および設置間隔によらず、円筒側方から沖側への前半部は全般的に激しく洗掘され、岸側への後半部は堆積になる。

(4) 円筒前面の局所地形は、非碎波の場合はN型洗掘となるが、碎波の場合には構造物前面から節のところまで洗掘となる。一方、無次元最大洗掘深は、非碎波の場合は設置間隔によって異なるが、碎波の場合には設置間隔に関係なくほぼ同じである。また、単円筒の場合の無次元洗掘深は、本実験の範囲内では、碎波、非碎波に関係なくほぼ同程度となる。

(5) 非碎波の場合の円筒周囲の局所地形は、底面流速の空間勾配の極小から極大までの領域は洗掘、極大から極小までの領域は堆積、 $\Delta V \approx 0$ 近傍では最大洗掘 (極小から極大の間) または最大堆積になる。また、質量輸送速度の空間勾配が正の場合は洗掘、負の場合は堆積となり、円筒周囲の局所洗掘の発生位置と最大洗掘深の発生位置はわきだし分布法による底面流速を使って精度良く予測できる。なお、円筒周囲の最大洗掘深は底面流速の空間勾配の変化率と強い相関関係にある。

参 考 文 献

- 岩田好一郎・金 昌済・安部智彦 (1993): 複数の大口徑円筒構造物周囲の局所洗掘に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 9, pp. 135-140.
- 岩田好一郎・水谷法美・金 昌済・真 田武 (1993): 3円筒大型構造物による波の変形と作用波力, 海洋開発論文集, Vol. 9, pp. 205-210.
- 入江 功・灘岡和夫・近藤隆道・寺崎賢次 (1984): 重複波による防波堤前面での2次元的海底洗掘-底質の移動機構に着目した研究一, 港研報告, 第23巻第1号, 3, pp. 3-52.
- 勝井秀博・東江隆夫 (1990): 大口徑円柱周囲の底質の移動限界と洗掘, 海岸論文集, 第37巻, pp. 379-383.
- Carter, T. G., P. L. F. Liu and C. C. Mei (1973): Mass transport by waves and offshore sand bedforms, J. of waterways, Harbours and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol. 99, pp. 165-184.
- Isaacson, M. Q. (1978): Vertical cylinders of arbitrary section in waves, J. of Waterways, Harbours and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol. 104, pp. 309-322.
- Jonsson, I. G. (1966): Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th ICCE, pp. 127-148.
- Kim C., K. Iwata (1993): Local scouring around two large circular cylinders in wave field, Proc. XXV IAHR, Tokyo. (in press)