

二基の大型円筒構造物周辺の局所洗掘の発生領域の予測に関する一検討

Local Scouring area around Two Large Circular Cylinders

岩田好一朗*・宮池克人†・金 昌済**・今井 聡**

Koichiro Iwata・Miyaike Yoshihito・Changje Kim・Akira Imai

This paper aims at investigating, experimentally as well as theoretically, the local scouring area around two large circular cylinders under wave action. The lateral extent of the local scouring area adjacent to two large cylinders is wider than that for one large cylinder which is less than about $0.1L$ (L is the wavelength) from cylinder surface. Maximum scouring depth along cylinders has a strong correlation with d_{50}/L (d_{50} is the median diameter of sand), that is, as d_{50}/L increases, non-dimensional scouring depth ($\Delta h/H_I$; H_I is the incident wave height) increases. Finally, the local scouring area around two large circular cylinders is shown to be well predicted theoretically with the spatial gradient of mass transport velocity based on diffraction theory.

Keywords : local scouring area, two large circular cylinders, spatial gradient of mass transport velocity, diffraction theory

1 はじめに

複数の大口径円筒構造物周辺の局所洗掘の発生領域の予測に関しては、Kim and Iwata(1993)、岩田ら(1993a, 1993b)および金ら(1993)による水理実験および数値解析手法を用いた検討がある程度である。それによると、2円筒、3円筒構造物周辺では、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、また底面流速の空間勾配が増加すれば洗掘、減少すれば堆積となり、円筒まわりでは実験値と計算値の対応が良好であると報告している。本研究は、二基の大型円筒構造物周辺の局所洗掘の発生領域の特性を実験的に考察すると同時に、さらに、その発生箇所をわきだし分布法より求められた境界層内のラグランジュ質量輸送速度を用い、解析的に予測する手法について検討することを目的とする。

2 水理実験

平面造波水槽(長さ28m、幅11mおよび深さ0.8m)を使って移動床実験を行った。水槽の中央部に幅500cm、長さ400cmおよび深さ7cmの洗掘ピットを設置し、移動床による構造物周辺の地形変化の実験を行った。また水槽の両側面に沿って反射波と回折波を防ぐための消波フィルターを付けた。表-1に示すように、底質の中央粒径を $d_{50}=0.015\text{cm}$ と $d_{50}=0.038\text{cm}$ の2種類、静水深を20cmと一定にした。入射波の周期を $T=1.4\text{s}$ 、 2.0s の2種類とし、直径 $D=47.2\text{cm}$ の単円筒および2円筒構造物を対象とした。周期1.4sの場合は、円筒外壁間の間隔を D 、 $2D$ 、 $3D$ および $5D$ (D は構造物の直径)に変化し、また周期2.0sの場合には、円筒間隔を D および $2D$ に変えて実験を行った。なお、入射波高は4~6cmとし、地形変化がほぼ平衡に達するまで造波開始後5200~5400波造波し、構造物周辺の地形変化を詳細に計測した。

表-1 実験条件

静水深 h (cm)	入射角度 α (deg.)	構造物直径 D (cm)	周期 T (sec)	波高 H_I (cm)	底質の中央粒径 d_{50} (cm)	構造物設置間隔 c/D
20	0	47.2	1.4	4.5	0.038	1,2, ∞
				5.7	0.015	1,2,3,5, ∞
			2.0	5.7	0.038	1,2, ∞
					0.015	1,2, ∞

*正会員 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (464-01 名古屋市千種区不老町)

†正会員 中部電力(株) 火力・原子力開発グループ部長

**学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻

3 質量輸送速度の空間勾配

層流境界層内のラグランジェ質量輸送速度 ($\bar{u}_L, \bar{v}_L$) は次式のように与えられる (Carter et al, 1973) .

$$\bar{u}_L = \frac{1}{4\omega} \text{Re} \left\{ F_5 U_0 \frac{\partial U_0^*}{\partial x} + F_6 V_0 \frac{\partial U_0^*}{\partial y} + F_7 U_0 \frac{\partial V_0^*}{\partial y} \right\} \quad (1)$$

$$\bar{v}_L = \frac{1}{4\omega} \text{Re} \left\{ F_5 V_0 \frac{\partial V_0^*}{\partial y} + F_6 U_0 \frac{\partial V_0^*}{\partial x} + F_7 V_0 \frac{\partial U_0^*}{\partial x} \right\} \quad (2)$$

ここに, (x, y) は直交座標, U_0, V_0 はそれぞれわきだし分布法より求められた境界層外縁での x, y 方向の振動流速の振幅, ω は角振動数, Re は実数部, $*$ は共役複素数であり, F_5, F_6 および F_7 は次のように表わされる.

$$F_5 = -8i \exp^{-(1-i)\xi} + 3(1+i) \exp^{-2\xi} - 3 + 5i \quad (3)$$

$$F_6 = -4i \exp^{-(1-i)\xi} + (1+2i) \exp^{-2\xi} - 1 + 2i \quad (4)$$

$$F_7 = -4i \exp^{-(1-i)\xi} + (2+i) \exp^{-2\xi} - 2 + 3i \quad (5)$$

ここに, $i = \sqrt{-1}$, $\xi = z/\delta$, $\delta (= \sqrt{2\nu/\omega})$ は波による層流境界層の厚さを規定する量, z は底面を原点とし上向きを正とした座標, ν 動粘性係数である.

ある基準点 (x_0, y_0) からの質量輸送速度の水平方向に沿っての距離を S とする. また, 合成質量輸送速度 $V = \sqrt{(\bar{u}_L^2 + \bar{v}_L^2)}$ とするとき, 境界層内の質量輸送速度の空間勾配 $\partial V/\partial S$ は次式ようになる.

$$\frac{\partial V}{\partial S} = \frac{1}{V} \left\{ (\bar{u}_L \frac{\partial \bar{u}_L}{\partial x} + \bar{v}_L \frac{\partial \bar{v}_L}{\partial x}) \cos \theta + (\bar{u}_L \frac{\partial \bar{u}_L}{\partial y} + \bar{v}_L \frac{\partial \bar{v}_L}{\partial y}) \sin \theta \right\} \quad (6)$$

ここに, $\theta = \tan^{-1}(\bar{v}_L/\bar{u}_L)$, $x - x_0 = S \cos \theta$, $y - y_0 = S \sin \theta$ である.

本研究では, $\partial V/\partial S > 0$ の場合は洗掘, $\partial V/\partial S < 0$ の場合は堆積とする (岩田ら, 1993b)

4 実験結果および考察

本実験の入射波の Reynolds 数 $U_0 \delta/\nu$ は 152 以下であり, $U_0 \delta/\nu < 160$ を満たすため, 層流境界層理論が適用できると判断される (野田, 1966) .

図-1, 2 は, 円筒の設置間隔 $e/D = 1$ の場合の D/L または $d_{50}/L, h/L$ の差異による円筒構造物周辺の地形変化を示したものである. 地形変化はほぼ対称なので, 全領域の半分のみを図示した. このとき円筒 II は波の方向からみて左側に位置する. 図中の L は波長, 黒い領域は洗掘, 白い領域は堆積を表す. 円筒前面沖側では, 部分重複波の影響で防波堤前面のように, 洗掘と堆積が表れる. また, 円筒まわりでは洗掘, 堆積が交互に表れる. $D/L=0.259$ の場合 (図-1), 円筒間の沖

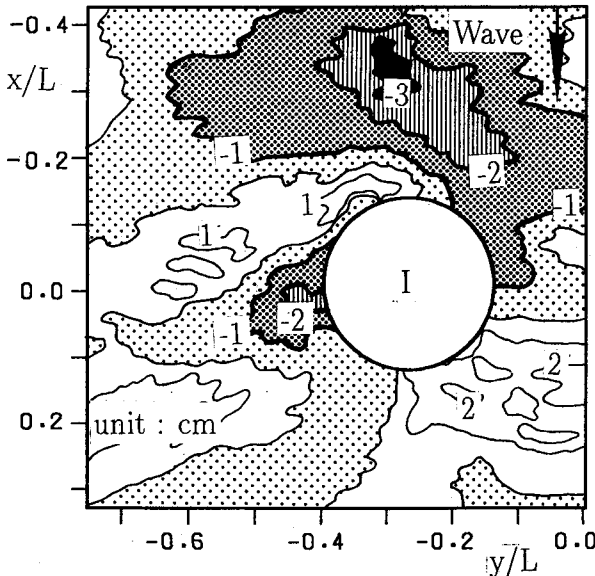


図-1 2円筒周辺の地形変化
($H_I/h=0.285$, $e/D=1$, $h/L=0.11$,
 $D/L=0.259$, $d_{50}/L=0.00008$)

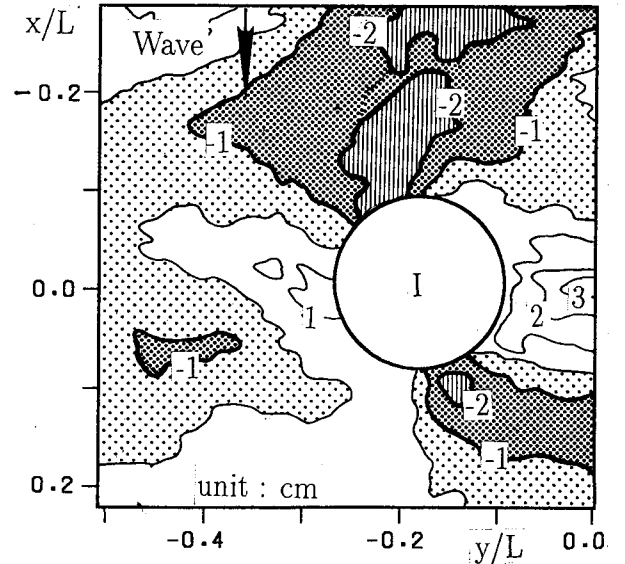


図-2 2円筒周辺の地形変化
($H_I/h=0.285$, $e/D=1$, $h/L=0.07$,
 $D/L=0.174$, $d_{50}/L=0.00006$)

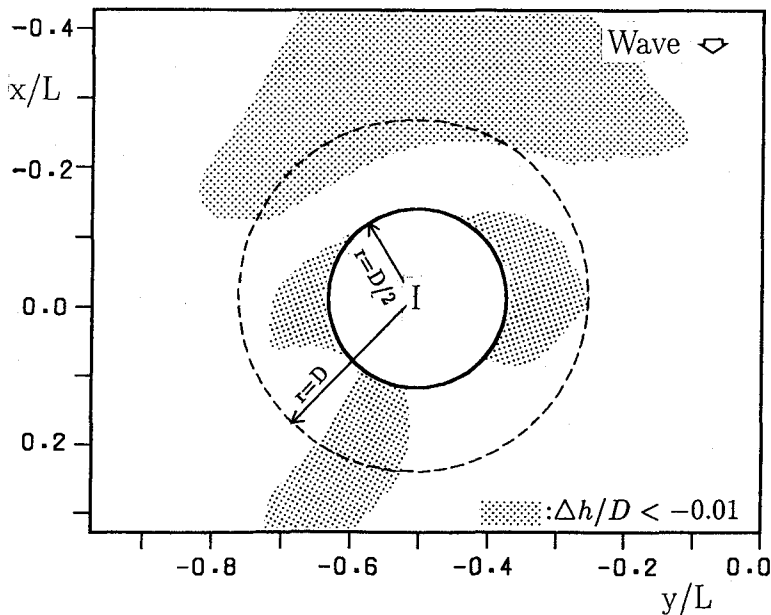


図-3 2円筒周辺の局所洗掘発生領域
($H_I/h=0.285$, $e/D=3$, $h/L=0.11$, $D/L=0.259$, $d_{50}/L=0.00008$)

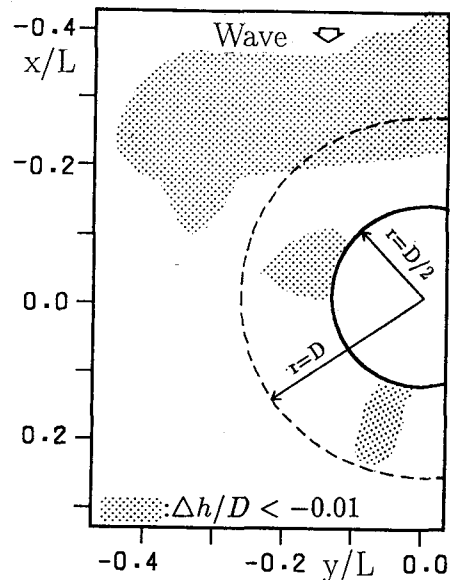


図-4 単円筒周辺の局所洗掘発生領域
($H_I/h=0.285$, $e/D=\infty$, $h/L=0.11$, $D/L=0.259$, $d_{50}/L=0.00008$)

側部分は洗掘され、円筒間の岸側部分は堆積する。一方、 $D/L=0.174$ の場合(図-2)は、円筒間は堆積、円筒間から少し離れた場所から円筒後面までが広く洗掘される。これは、 $D/L=0.259$ の場合は、円筒からの反射がより大きいため、円筒前面に形成された部分重複波の影響を受けて、円筒間までその洗掘領域が広がったと考えられる。しかし、 $D/L=0.174$ の場合は、円筒からの反射が小さいため、部分重複波動場領域での洗掘深も小さく、その洗掘領域も広がらないと推測される。また、この場合、後述するように、底質の移動は掃流と浮遊が共存し、浮遊砂の移動は底面流速に支配され、底面流速の空間変化が大きい(岩田ら, 1993b) 円筒の後面で洗掘されその領域が広がったと推測される。特に、 $D/L=0.259$ の場合(図-1)が $D/L=0.174$ の場合(図-2)より最大洗掘深は大きく、このことは図示していないが、円筒数、設置間隔にはほぼ無関係であった。

一般に、小口径円柱の場合は波長(周期)が長いほど、洗掘深も大きくなることが指摘されている(Sumer et al, 1993)。大口径円筒の場合、Rance(1980)は、単円筒を対象とし、波に流れ($L \approx \infty$)を加えて実験を行い、波のみの場合より洗掘深が大きくなったと報告している。しかし、回折波が効くような範囲($D/L > 0.2$)での地形変化に及ぼす D/L の効果に関する研究はなされていないのが現状である。また、後述するように、複数の大口径円筒構造物周辺の地形変化は D/L , d_{50}/L , h/L , e/D など様々なパラメーターに支配されると考えられる。

図-3, 4 は、それぞれ2円筒および単円筒周辺の洗掘発生領域の範囲を示す。洗掘発生領域の範囲はRance(1980)にならって構造物直径の1%とした。すなわち、洗掘深が構造物直径の1%以上である所を洗掘発生領域と定義して図中に黒い領域で示した。なお、 ∞ は単円筒の場合を表す。円筒前面沖側領域を除き、Ranceが指摘したように、単円筒の場合(図-4)の洗掘発生領域は円筒表面から直径の半分以上以内である。しかし、2円筒の場合(図-3)の洗掘領域は、全ケースにおいて直径の1倍以上達し、複数円筒の場合が洗掘深が大きくて洗掘領域は広いことがわかる。なお、図示しないが、洗掘発生領域の観点からみると、本実験の範囲内では、円筒の設置間隔 e/D が5以下では円筒の増設にともなう他の円筒の影響が無視できないことがわかったことを付記しておきたい。

図-5, 6 に、それぞれ円筒の設置間隔 $e/D=1, 2$ の場合の2円筒周辺の地形変化の実験結果と式(6)を用いた計算結果を示す。図中に、実線は実験結果、破線は計算結果で、ExpSとExpDは各々実験で得られた洗掘と堆積領域を、CalSおよびCalDはそれぞれ計算で求めた洗掘と堆積領域を表す。図-5の場合は、実験結果と計算結果の対応はかなり良好であり、回折理論に基づく境界層内のラグランジュ質量輸送速度を用いて円筒構造物周辺の局所洗掘または堆積の発生領域を予測できる。しかし、図-6の場合は、実験結果と計算結果との対応は決してよくはない。これは、後述するように、底質は掃流のみではなく浮遊でも移動するためと考えられる。

図-7は円筒の設置間隔 $e/D=2$ の場合の円筒前面沖側の地形変化である。図中に、 x' は円筒I表面から沖側への座標、 Δh は地形変化量で、負の値が洗掘、正の値が堆積を表す。複数の大口径円筒構造物の前面領域では防波堤前

面のように N-型洗掘や L-型洗掘(入江ら,1984)が生じる(岩田ら, 1993b). 図中の実線は $H_I/h = 0.291, D/L = 0.174, h/L = 0.074, d_{50}/L = 0.00014$ で, $U_0/w_f = 3.7$, $U_r = 51$ (w_f は底質の沈降速度, $U_r = L^2 H/h^3$) であり, 点線は $H_I/h = 0.291, D/L = 0.174, h/L = 0.074, d_{50}/L = 0.00006$ で, $U_0/w_f = 10.9$, $U_r = 51$ の場合, 一点鎖線は $H_I/h = 0.291, D/L = 0.0259, h/L = 0.11, d_{50}/L = 0.00008$ で, $U_0/w_f = 10.5$, $U_r = 24$ の場合である. 実線と点線は, 部分重複波の腹と節の間領域 ($x'/L = 1/8$) が洗掘され節の領域 ($x'/L = 1/4$) に堆積される N-型洗掘となっているが, 一点鎖線の場合は, $x'/L = 1/8 \sim 3/8$ 領域で洗掘され, $1/2$ 領域に堆積される N-型と L-型の混合型になっている. 一点斜線の場合は, U_0/w_f と U_r との関係が L-型と N-型洗掘とを分ける境界線近傍であるので混合型, また U_r 数が大きい場合にも入江らの結果が適用できるとすると, 実線と点線は N-型洗掘に属するので複数の大口径円筒構造物の前面沖側の地形の場合も L-型, または N-型洗掘に分類できる. また図示していないが, 円筒数, 設置間隔によらずほぼ同様な結果となったことを付記しておく.

図-8 に, 円筒表面から 1.5cm ($r/D = 0.53$; r は円筒中心から半径方向の距離) 離れた位置での円筒の設置間隔にともなう円筒まわりの地形変化を示す. 図中に, θ' は波が構造物に最初当たる点からの円筒まわりの角度でその向きは時計まわりとする. また, 実線は単円筒, 破線は $e/D = 1$, 点線は $e/D = 3$ の場合を表す. 前述したように, $e/D = 1$ の場合の円筒まわりでは洗掘領域は広くて且つ洗掘深は大きい. なお, $e/D = 3$ の場合の最大洗掘深は単円筒の場合とほぼ同程度で, 最大洗掘深の観点からは, 円筒の設置間隔 e/D が 3 程度であれば, 最大洗掘深に対する増設した円筒の影響はなく, 各々の円筒のまわりでの最大洗掘は独立的に生じると言える. しかし, 地形変化の形状は単円筒の場合と異なるので, 円筒を増設することによる影響は無視できないと考えられる. これも図示していないが, $e/D = 5$ の場合の円筒近傍まわりの地形変化の形状も単円筒の場合とは異なり, 地形変化の形状に対する隣接した円筒の影響は, その設置間隔 e/D が 5 以上であると推測されよう.

さて, 前述したように, 小口径円柱の場合とは違って大口径の場合は, 本実験の範囲では D/L が大きい方が洗掘領域は広くて, さらに, 洗掘深は大きくなった. つぎに, 円筒周辺の地形変化を大きく支配する要素であると考えられる底質の無次元大きさ (d_{50}/L) の効果を取り上げ検討する. 図-9 は円筒まわりの $r/D = 0.53$ 位置での d_{50}/L の差異にともなう最大洗掘深の変化を示したものである. 本実験の範囲内では, d_{50}/L が大きくなるにともない, 最大洗掘深も大きくなることがわかる. これは, L が小さくなるほどまたは d_{50} が大きくなるほど, 最大洗掘深は大きくなることに対応する. すなわち, 回折波が強くて底質は掃流

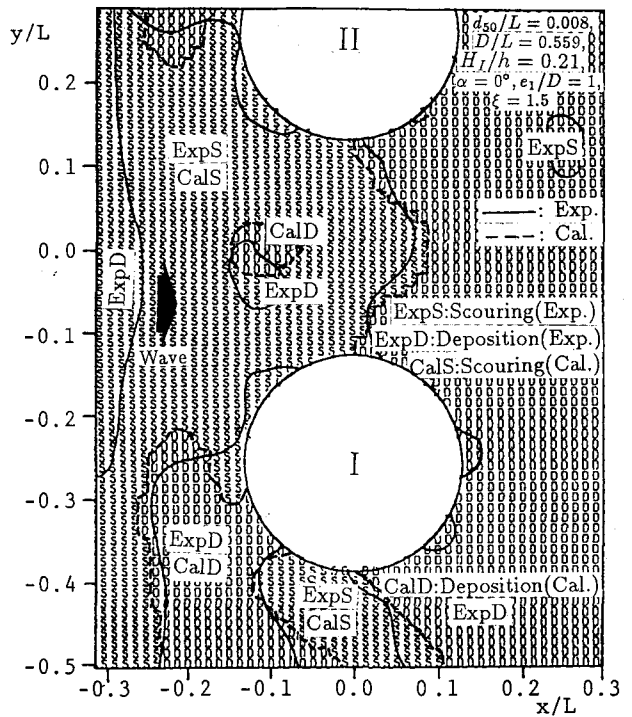


図-5 2 円筒周辺の地形変化の実験値と計算値の比較
($H_I/h = 0.225, e/D = 1, h/L = 0.11,$
 $D/L = 0.259, d_{50}/L = 0.00021$)

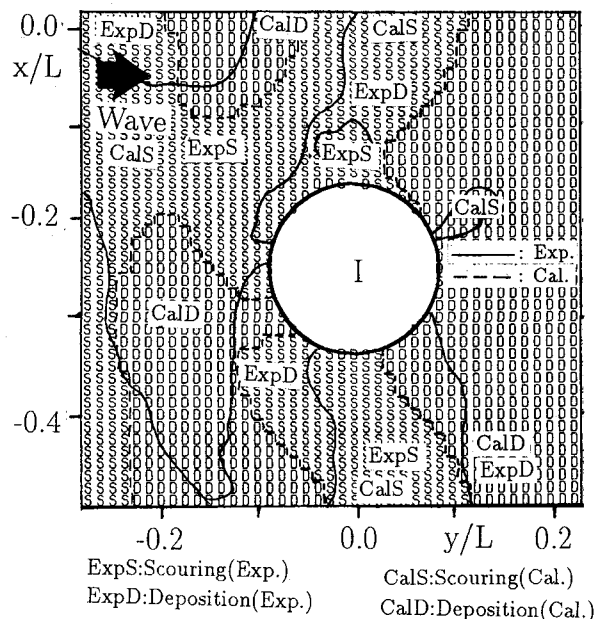
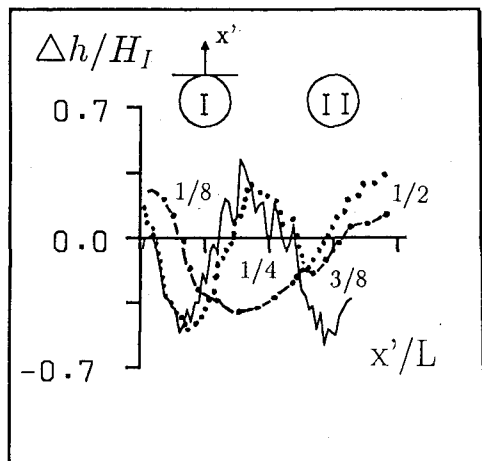


図-6 2 円筒周辺の地形変化の実験値と計算値の比較
($H_I/h = 0.285, e/D = 2, h/L = 0.07,$
 $D/L = 0.174, d_{50}/L = 0.00006$)

運動するとき、最大洗掘深は大きくなる。底質の粒径が
大きければ底質の沈降速度も大きくなり、Engelund(1965)
の掃流砂と浮遊砂との分類($u^*/w_f < 1.0$: 掃流砂が卓越,
 $1.0 < u^*/w_f < 1.7$: 掃流砂と浮遊砂が共存, $1.7 < u^*/w_f$
: 掃流砂が卓越; u^* は摩擦速度)によると、底質の沈降速度
 w_f が大きくなるほど掃流砂になりがちで、 $d_{50}/L=0.00014$,
 0.00021 の場合、 u^*/w_f はおおよそ 0.38 で掃流砂が卓越,
 $d_{50}/L=0.00006$, 0.00008 の場合、 u^*/w_f はおおよそ 1.15 で
掃流砂と浮遊砂が共存する範囲に属する。したがって、本
実験のように、砕波しない入射波と円筒構造物による回折
波と反射波の三者で形成される重畳波動場では、底質の浮
遊による地形変化への寄与は小さいので、掃流運動のみの
場合が、掃流と浮遊が共存または浮遊運動の場合より最大
洗掘深は大きくなったと推測される。なお、いずれも、2
円筒まわりの最大洗掘深が単円筒の場合より大きくなり、
増設した円筒の影響が大きいことがわかる。



—: $h/L=0.07, D/L=0.174, d_{50}/L=0.00006$
: $h/L=0.07, D/L=0.174, d_{50}/L=0.00014$
 — · —: $h/L=0.11, D/L=0.259, d_{50}/L=0.00008$
 図-7 2円筒前面沖側領域の地形変化
 ($H_I/h=0.285, e/D=2$)

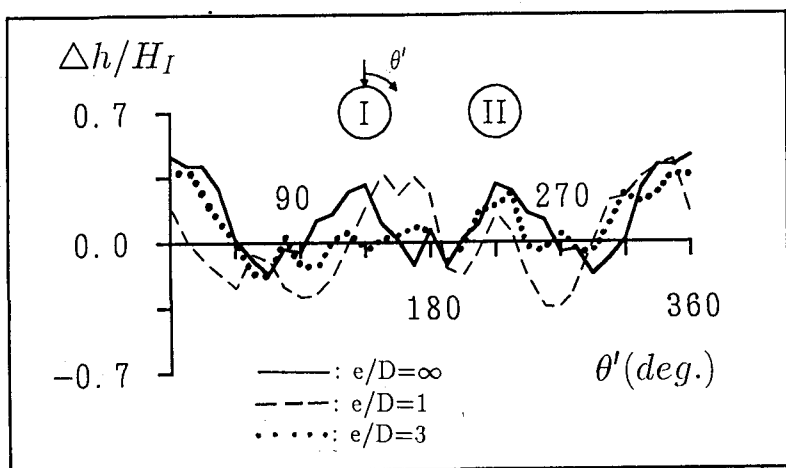


図-8 円筒まわりの地形変化
 ($H_I/h=0.285, h/L=0.11, d/L=0.259, d_{50}/L=0.00008, r/D=0.53$)

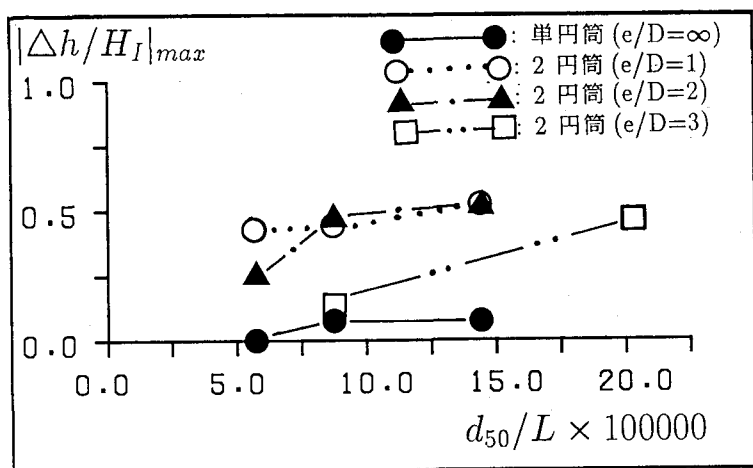


図-9 円筒まわりの最大洗掘深と d_{50}/L との関係
 ($H_I/h = 0.285, r/D = 0.53$)

5 結論

以上、本論では、複数の円筒構造物周辺の局所洗掘の発生領域の特性を単円筒の場合と比較しながら、さらに、層流境界層内のラグランジュ質量輸送速度の空間勾配と関連づけながら論議した。以上を要約して整理すると次のようである。

- 1) 底質が掃流運動する場合は、複数の大口径円筒構造物周辺の局所洗掘および堆積の発生箇所は境界層内のラグランジュ質量輸送速度の空間勾配を使って理論的に予測できることが明らかになった。
- 2) 2 円筒の場合の洗掘発生箇所は円筒の設置間隔によらず円筒直径の一倍以上に達するが、単円筒の場合の洗掘発生領域は円筒直径の半分以上以内である。
- 3) 複数の大口径円筒構造物の前面沖側領域は防波堤の前面領域のように、L-型とN-型洗掘とで分類できる
- 4) 円筒の設置間隔 $e/D=3$ 程度であれば、円筒の増設にともなう円筒構造物近傍まわりの最大洗掘深に対する影響は小さい。
- 5) 円筒近傍まわりの最大洗掘深は、円筒数、円筒の設置間隔によらず、 d_{50}/L が大きくなるほど ($d_{50}/L < 0.00021$) 大きくなる。

参考文献

- 1) 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2次元的海底洗掘-底質の移動機構に着目した研究-, 港研報告, 第23巻第1号, 3, pp.3-52. 1984.
- 2) 岩田好一朗, 金昌済, 安部智彦: 複数の大口径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, 1993a
- 3) 岩田好一朗・金昌済・安部智彦: 二基の大口径円筒構造物周辺の地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 526-530, 1993b.
- 4) 金昌済, 岩田好一朗, 安部智彦: 大口径の3円筒構造物周辺の局所洗掘に関する一考察, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集, pp. 936-937, 1993.
- 5) 野田英明: 波による海底砂の初期移動について, 第13回海岸工学講演会講演集, pp. 135-141, 1966.
- 6) Carter, T. G., P. L. F. Liu and C. C. Mei: Mass transport by waves and offshore sand bedforms, J. of Waterways, Harbours and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol. 99, pp. 165-184. 1973.
- 7) Engelund, F.: Turbulent energy and suspended load, Coastal Engg. Lab., Tech. Univ. of Denmark, Rep. No. 10, 1965.
- 8) Kim C. J. and K. Iwata: Local Scouring around Two Large Circular Cylinders, Proc., 25th Int. Assoc. for Hydraulic Research, Vol.3, pp. 159-166, 1993.8.
- 9) Rance, P. J.: The potential for scour around large objects, Scour prevention techniques around offshore structure, The Society for Underwater Technology, pp. 41-51, 1980.
- 10) Sumer, B. M., N. Christiansen, and J. Fredsøe: Influence of cross section on wave scour around piles, J. of Waterways, Harbours and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol. 99, pp. 477-495. 1993.