

複数の大口径円筒構造物周囲の局所洗掘に関する研究

Local Scouring around Multiple Large Circular Cylinders

岩田好一朗*・金 昌済**・安部智彦**

Koichiro Iwata・Changje Kim・Tomohiko Abe

This paper aims at investigating experimentally the characteristics and mechanism of the local scouring around multiple large circular cylinders under wave action, in relation to the water particle velocity at bottom around the cylinders, and to the case of one cylinder. The bottom configuration change around multiple circular cylinders has a strong correlation with the spatial variation of water particle velocity at bottom, and, is revealed to differ from that around one cylinder. Finally, the local scouring location around multiple large circular cylinders is shown to be well predicted theoretically by diffraction theory.

Keywords: local scouring, multiple large circular cylinders, spatial variation of water particle velocity, diffraction theory

1 はじめに

大口径円筒構造物周囲(周縁)の洗掘のメカニズムを扱った研究としては、勝井ら[1990,1992]の研究があり、波による水粒子速度が最大のところで堆積し、その水粒子速度の場所的勾配のもっとも大きいところで洗掘する N' -型洗掘を定義して論議した。さらに、斉藤ら[1988]が提案したパワーモデルを改良し、波浪・流れ共存場に拡張した底面せん断力を用いて定量的な評価を行っているくらいである。しかし、これらの研究は単円筒構造物を対象としたものであり、これまで複数の円筒構造物を対象とした研究は皆無といっても過言ではない。

ごく最近、複数の大口径円筒構造物が浅海域に建設され始めたので、複数構造物周囲の局所洗掘現象を明確にすることは工学的に非常に重要な課題である。特に、構造物周囲の局所洗掘は構造物の耐波安定性を論じる上で極めて重要であるが、いまだに不明な点が多い。

したがって、本研究は、複数構造物周囲の局所洗掘現象を、構造物周囲の地形変化に大きな影響を与えと考えられる底面流速と関連づけながら考究し、さらに単円筒構造物の場合と比較しながら実験的に考察すると同時に、その構造物周囲の洗掘および堆積の発生位置をわき出し分布法に基づく回折理論より得られた底面流速の空間勾配を用い、解析的に解明することを目的とする。

2 水理実験

2.1 次元解析

円筒構造物周囲の無次元地形変化量 $\Delta h/H_I$ は一般に、Buckingham の π 定理を用いて整理すると次の無次元物理量に支配されると考えられる。

$$\frac{\Delta h}{H_I} = \phi_1 \left\{ \frac{h}{L}, \alpha, s, \frac{\nu}{H_I \sqrt{gh}}, \frac{D}{L}, \frac{d_{50}}{h}, \frac{e_1}{D}, \frac{e_2}{D}, i, t \sqrt{\frac{g}{h}}, \frac{r}{D}, \theta \right\} \quad (1)$$

ここに、 H_I : 入射波高、 h : 静水深、 g : 重力加速度、 T : 入射波の周期、 α : 入射角度、 s : 底質の水中比重、 ν : 流体の動粘性係数、 d_{50} : 底質の中央粒径、 L : 入射波長、 D : 円筒の直径、 e_1 : 円筒 I と II の構造物間の間隔、 e_2 : 円筒 II と III の間隔、 i : 海底勾配、 t : 波の作用時間、 r : 構造物の半径方向の距離、 θ : 入射波が構造物に最初に当たる点からの構造物周縁の角度である。しかし、本実験では、 $h=20\text{cm}$ 、 $T=1.4\text{s}$ 、 $L=182.5\text{cm}$ 、 $i=0$ 、 $D=47.2\text{cm}$ および $d_{50}=0.38\text{mm}$ で一定としているので、平衡状態での 3 円筒構造物周囲の無次元地形変化量 $\Delta h/H_I$ は次の 6 つの無次元量に大きく支配されるものと考えられる。

$$\frac{\Delta h}{H_I} = \phi_2 \left\{ \frac{H_I}{h}, \frac{e_1}{D}, \frac{e_2}{D}, \alpha, \frac{r}{D}, \theta \right\} \quad (2)$$

ここに、洗掘は $\Delta h/H_I$ が負(-)の場合で、堆積は正(+)の場合である。

*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)

**学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻

**学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻

2.2 実験装置と方法

3次元平面造波水槽(長さ30m, 幅8m および深さ0.6m)を使って固定床および移動床の実験を行った。図-1に示すように, 水槽の一端にはピストン型造波装置が, 他端には1/10勾配を持つ消波斜面が設置されている。

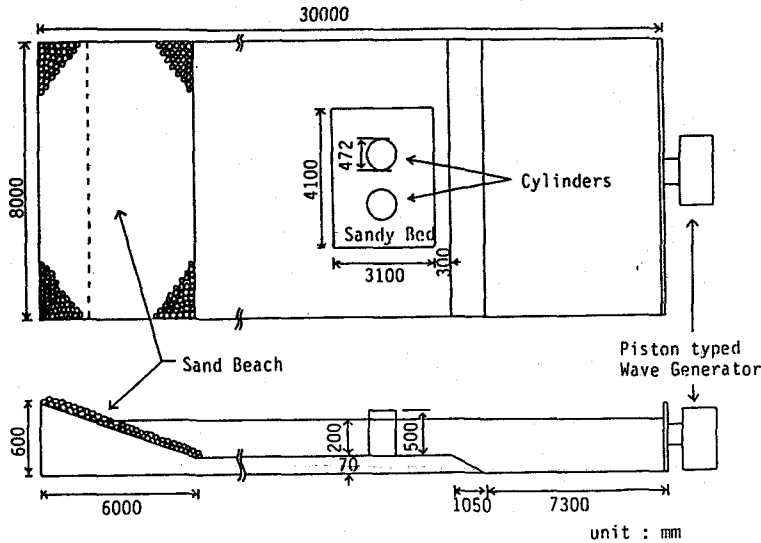


図-1 実験装置

水槽内には先端に勾配1/15の斜面を持つ高さ7cmの水平床を設置し, まず, 2円筒および3円筒構造物を対象とし, 構造物周囲の波高および構造物周囲の洗掘に大きな影響を与える底面流速を各々の円筒に対して, それぞれ円筒表面から1.5cm($r/D=0.53$)離れているところで電気容量式水位計および電磁流速計を用い45°の等間隔で八箇所計測した。2円筒構造物の場合には造波機の位置を固定し, 構造物の向きを変えることにより入射波の入射角度 α を0°および45°の2種類変化させた。また, 円筒外壁間の間隔 e_1 を1Dおよび2Dに変えた。さらに, 3円筒構造物の場合には, 円筒Iと円筒IIの間隔 e_1 は1.1Dとし, 円筒IIと円筒IIIの間隔 e_2 は2Dとした。また, 波の周期 T を1.4s, 静水深 h を20cmと一定にし, 入射波高 H_I は4~5cmとした。なお, 水平床の中央部に410×310cmの範囲で移動床を作成し, 珪砂6号(底質の中央粒径 $d_{50}=0.38\text{mm}$)を厚さ7cmで均して敷設し, 固定床の場合と同様の実験条件で, 2円筒および3円筒構造物を対象とし, 構造物周りの地形変化の実験を行った。構造物周辺の地形変化は造波開始後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, 詳細に計測した。なお, 造波中, 構造物周辺の波高と底面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。比較のため, 単円筒の場合の固定床および移動床の実験も行った。

3 底面流速の数値解析

複数構造物に適用可能な鉛直線わき出し分布法を用い(岩田ら[1993]), 底面流速の振幅 $U_n = \sqrt{U_{br}^2 + U_{\theta\theta}^2}$ (U_{br} は r 方向の底面流速, $U_{\theta\theta}$ は θ 方向の底面流速である)を求め, 底面流速の振幅の空間勾配 ΔV を次のように算定した。なお, 入射波の底面流速は一定なので回折散乱波の底面流速のみを採用することもできる。

$$\Delta V = \frac{\partial U_n}{\partial S} \quad (3)$$

ここに, $S = r\theta\theta$ である。

4 実験結果および考察

全ての実験で, 進行波の底面流速(12.6~14.1cm/sec)は底質の初期移動限界流速(11.7~12.3cm/sec)を超え, 構造物のない予備実験で底質の移動が確認された。また, 本実験条件では, Jonsson[1967]の分類によれば, 構造物周囲は層流または遷移領域に属するので, 層流境界層理論を使っても差し支えないと考えられる。以後, 代表的な局所洗掘地形を取りあげて考察することとする。

4.1 円筒周囲の底面流速の特性

図-2～図-5 に、円筒表面から 1.5cm ($r/D = 0.53$) 離れている円筒周囲における円筒の接線方向の無次元最大流速 (U_{br}/U_{bl}) および半径方向無次元最大流速 (U_{br}/U_{bl}) の θ に伴う変動特性を示したものであり、太実線および細実線はそれぞれ接線流速と半径方向の流速の計算結果、○および△はそれぞれ接線流速および半径方向の流速の実験値である。なお、下添字 I は入射波を表す。

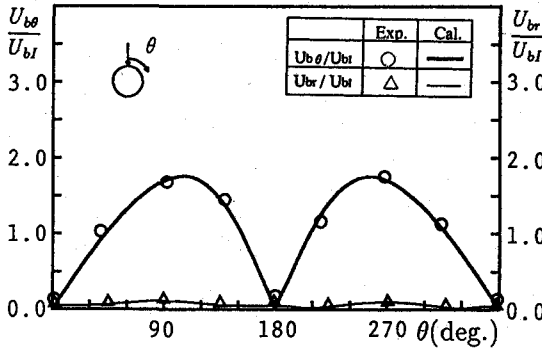


図-2 単円筒周囲の無次元流速の変動特性
($H_I/h = 0.221, d_{50}/D = 0.0008, D/L = 0.259, r/D = 0.53$)

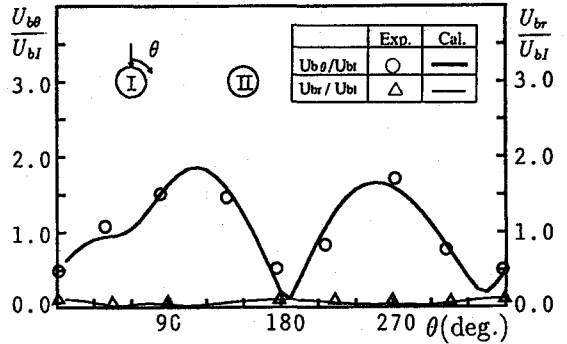


図-3 二円筒周囲の無次元流速の変動特性
($H_I/h = 0.209, \alpha = 0^\circ, e_1/D = 1, r/D = 0.53$)

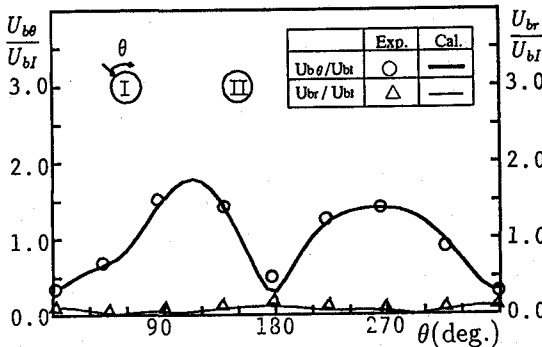


図-4 二円筒周囲の無次元流速の変動特性
($H_I/h = 0.229, \alpha = 45^\circ, e_2/D = 1, r/D = 0.53$)

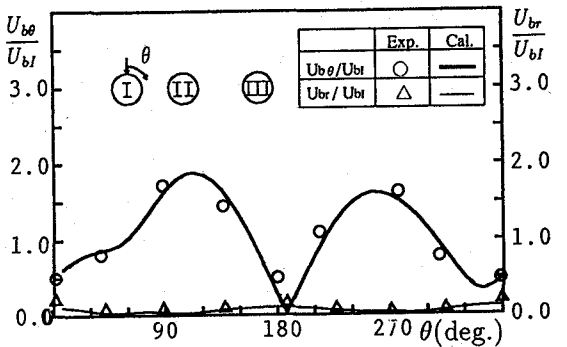


図-5 三円筒周囲の無次元流速の変動特性
($H_I/h = 0.229, \alpha = 0^\circ, e_1/D = 1.12, e_2/D = 2, r/D = 0.53$)

全体的には、半径方向の流速は、複数基になると変わるものの、接線方向の流速に比べて小さい。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。円筒が一基の場合は、 $\theta = 0^\circ$ に対して対称な流速分布となるが、円筒が複数基設置されると、 $\theta = 0^\circ$ に対する対称性はなくなる。この場合、円筒間の向かい合う側は縮流効果により、接線流速が大きくなるが構造物の間隔がもっとも狭くなる位置より波の透過側にずれた $\theta = 120^\circ$ 前後の方の接線流速が大きくなる。これは円筒による回折波の特性に左右されるためである。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流速は精度よく予測できる。ところが、底面流速と局所洗掘(図-2と図-6、図-3と図-7および図-5と図-8(a))との対応は、単円筒を対象とした勝井ら[1990]による N' -型に似ているものの、同パターンとはいえない。これについては後述する。

4.2 円筒周囲の局所洗掘の特性

上述したように、過去の研究によれば、円筒周囲では流速の空間勾配が局所洗掘に大きく関わっているのが指摘されてきたが、その実態はまだ解明されていない。そこで、本研究では、わき出し分布法に基づく回折理論より得られた、回折散乱波の空間勾配を用い、円筒周囲の局所洗掘現象を考察する。勝井ら[1990]は円筒前面を除き半径方向の砂の出入りは小さいので接線方向流速のみで論議したが、半径方向の流速は小さいけれども局所洗掘には寄与することが考えられるので、本研究では半径方向の流速も採用することとする。

図-6～図-8 に、円筒表面から 1.5cm ($r/D = 0.53$) 離れている位置の単円筒、2 円筒および 3 円筒周囲の θ にともなう無次元地形変化量 $\Delta h/H_I$ と回折散乱波の流速の空間勾配 ΔV の関係を示す。図中に、太実線は無次元地形変化量 $\Delta h/H_I$ であり、細実線は回折散乱波の流速の空間勾配 ΔV を表す。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、比較のため、単円筒を対象とした勝井ら[1990]の実験結果 ($H_I/h = 0.33, d_{50}/D = 0.001, D/L = 0.853, 2r/D = 1.14$) を図-9 に示す。

まず、単円筒の場合(図-6)の円筒周囲の地形変化量 $\Delta h/H_I$ は $\theta=0^\circ$ に対して対称となったため、その半分のみを示したが、円筒が複数基(図-7、図-8)になると、 $\theta=0^\circ$ に対する対称性はなくなるので円筒の全周囲の地形変化量を示した。構造物の数、設置間隔および入射波の波高、角度によって円筒周囲の地形変化はそれぞれ複雑な様子を表す。すなわち、円筒の数が多いほど円筒周囲の地形変化は複雑となる。

単円筒の場合(図-6、図-9)、本研究での実験結果(図-6)は斜め前方から側方($\theta \cong 45^\circ \sim 105^\circ$)までが洗掘領域となり $\theta \cong 65^\circ$ で $\Delta h_{max}/H_I \cong -0.65$ となる。一方、勝井らの実験結果(図-9)では円筒の斜め前方($\theta \cong 33^\circ$)で若干の洗掘と斜め後方($\theta \cong 105^\circ \sim 135^\circ$)で大きな洗掘が生じ、 $\Delta h_{max}/H_I \cong -0.11$ である。著者らと勝井らとの結果の差異は D/L と d_{50}/D 、つまり回折波の特性の差異に起因するものと考えられる。なお、直角入射の円筒Iの場合($H_I/h=0.209$, $\alpha=0^\circ$ and $e_1/D=1$)、無次元最大洗掘深は $\Delta h_{max}/H_I \cong -0.7$ となり、他の場合より大きい。これは、流速の空間勾配が大きいため洗掘深も大きくなったと考えられる。

底面流速の空間勾配 ΔV と地形変化の対応は、図-6～図-9に示すように、 ΔV が増加する領域では洗掘、 ΔV が減少する領域では堆積となっていることが認められる。なお、 ΔV が増加する領域における $\Delta V \cong 0$ では最大洗掘、 ΔV が減少する領域における $\Delta V \cong 0$ では最大堆積となっている。

こ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_L に比例すると考えられる($q \propto U_L$)。この質量輸送速度 U_L は波の非線形性により生じる量であるが、この U_L は本計算手法(線形理論)で求めた流速 U_n に比例すると仮定すると、底質の輸送量の空間勾配 $\partial q/\partial S$ は質量輸送速度 U_L の空間勾配 $\partial U_L/\partial S$ に比例するので、次式が成立する。

$$\frac{\partial q}{\partial S} \propto \frac{\partial U_L}{\partial S} \propto \frac{\partial U_n}{\partial S} (\equiv \Delta U) \quad (4)$$

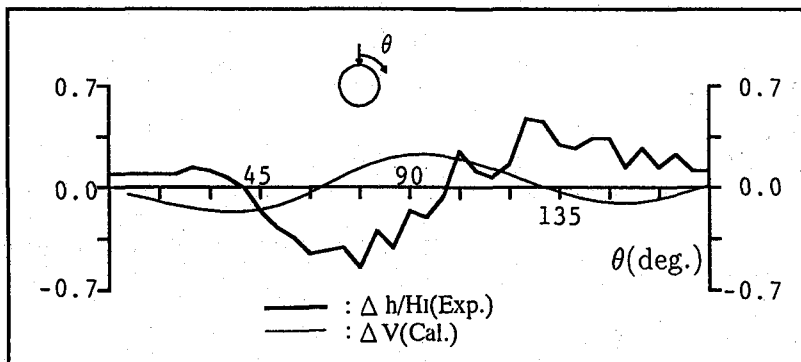


図-6 単円筒周囲の地形変化
($H_I/h=0.221$, $d_{50}/D=0.0008$, $D/L=0.259$, $r/D=0.53$)

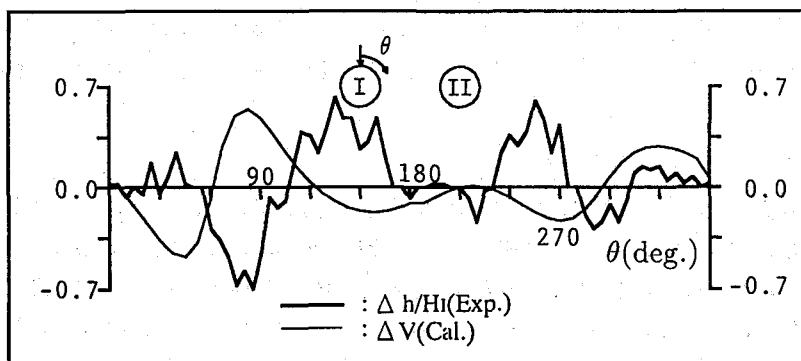


図-7 二円筒周囲の地形変化
($H_I/h=0.209$, $\alpha=0^\circ$, $e_1/D=1$, $r/D=0.53$)

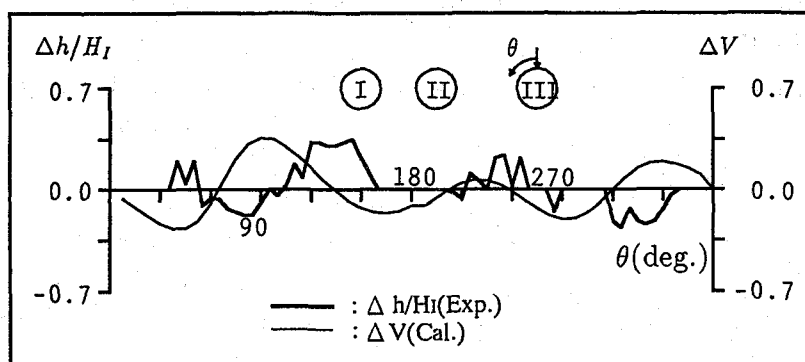
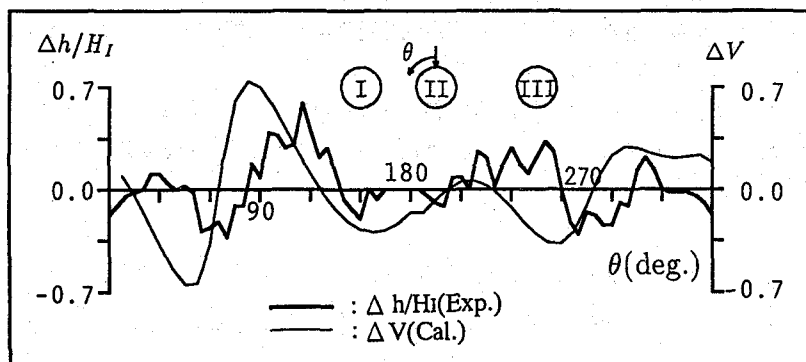
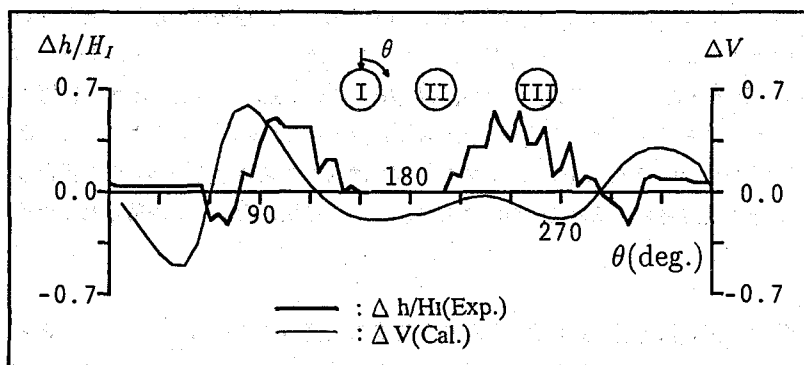


図-8 三円筒周囲の地形変化
 $(H_I/h=0.229, \alpha=0^\circ, e_1/D=1.12 \text{ and } e_2/D=2, r/D=0.53)$

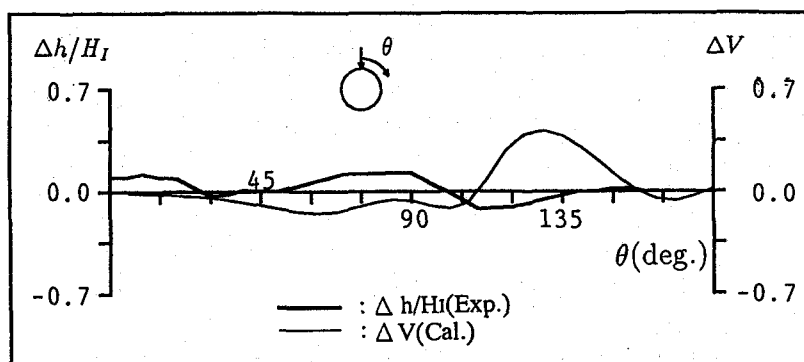


図-9 勝井らの実験結果²⁾
 $(H_I/h=0.333, d_{50}/D=0.0001, D/L=0.854, r/D=0.57)$

式(4)によれば、 $\partial U_n / \partial S > 0$ の場合は、 $\partial q / \partial S > 0$ に対応するので、距離 S の増加にともない底質の移動量が増加するため $\Delta V > 0$ の領域での底面は洗掘傾向($\Delta h / H_I < 0$)になる。逆に、 $\partial U_n / \partial S < 0$ 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、 $\partial U_n / \partial S < 0$ 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、円筒の斜め前方領域では、 ΔV が極小から少し増加してから洗掘は始まる。これは円筒前面の部分重複波動場領域と円筒周辺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。

5 結論

以上、本論では、複数の円筒構造物周囲の局所洗掘の特性を単円筒の場合と比較しながら、さらに、回折散乱波の底面流速および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) 回折理論により円筒構造物周囲の局所洗掘の発生位置は予測できる。

(2) 大口径円筒構造物が複数基設置された場合の局所洗掘現象は単円筒構造物のそれとは異なる。すなわち、構造物の数、設置間隔及び入射波の波高、角度によって異なる。

(3) 流速の空間勾配の増加する領域では局所洗掘、減少する領域では堆積が起きる。

(4) 流速の空間勾配 $\Delta V \cong 0$ の領域あたりで最大局所洗掘(流速の空間勾配の増加する領域)または最大堆積(流速の空間勾配の減少する領域)が生じる。

参考文献

- 1) 岩田好一朗・水谷法美・金昌済・真田武：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. 9，1993。
- 2) 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，第37回海岸工学論文集，pp. 379-383，1990。
- 3) 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，第39回海岸工学論文集，pp. 491-495，1992。
- 4) 斉藤栄一・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。
- 5) Jonsson, I. G. : Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th ICCE, pp. 127-148, 1967。