

斜面上に設置した大口径円柱周辺の地形変化機構

柴山 知也*・ 齊藤 栄一**・ 島多 昭典***

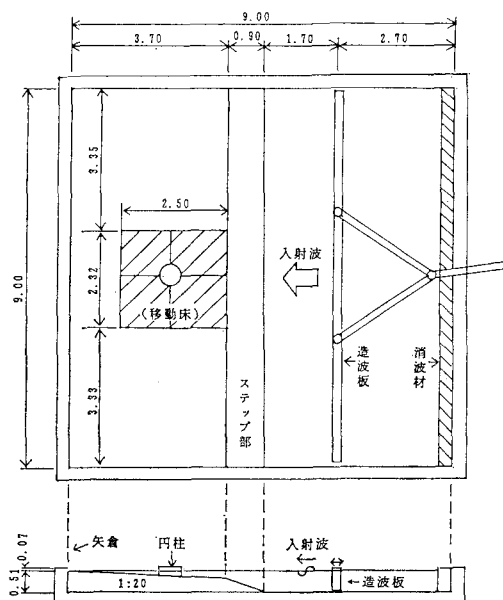
1. 緒 言

近年、大型橋のケーソンや人工島など、様々な大型海洋構造物が沿岸域に建設されている。これらの構造物の周辺では、波や流れの変化によって局所的な洗掘が生じる。構造物周辺の局所洗掘問題は、構造物の安定性を検討する上で非常に重要な問題となる。大型海洋構造物、特に大口径円柱構造物周辺の海底地形変化に関しては、例えば東江・勝井(1985)、増岡ら(1986)、東江ら(1991)によって水理実験を用いた検討がなされている。また数値モデルも数種提案されており、大口径円柱周辺の地形変化予測計算が行われている。齊藤ら(1988)は、大口径円柱周辺の波高分布を MacCamy・Fuchs(1954)の回折波理論より求め、流れを境界層外縁の質量輸送速度と radiation stress の勾配を外力とする流れの和とし、シールズ数を用いたパワーモデルを基本とする漂砂量式で底面地形変化を計算している。また勝井・東江(1990)は、齊藤らのモデルに改良を加え、重合波波浪・流れ共存場に拡張した底面せん断力を用いて計算を行っている。しかし、これらの研究のほとんどは一樣水深条件におけるものである。海底地形変化を考慮する様な水深における現地の海岸は、一般的に海底勾配を有しており、また碎波帯内に構造物を設置する場合もあるので、一樣水深条件の場合とは砂移動の機構が異なると考えられる。そこで本研究では、波動場における一樣海底勾配上の大口径円柱周辺の砂移動現象に着目し、実験と理論の両面から考察することにより数値モデルを提案することを目的とした。さらに、実験値と数値モデルによる計算値を比較・検討し、一樣海底勾配上の大口径円柱周辺の砂移動機構について考察した。

2. 実験装置および方法

実験には、1/20 の一樣勾配床をもつ 9×9 m の平面水槽を使用した。一樣勾配部の中央に直径 52.2 cm の円柱を設置し、規則波を作用させた。実験は、固定床と

洗掘ビットを設けた移動床の両方で行った。固定床実験では、容量式波高計を用いて波高分布を、電磁流速計および超音波式流速計を用いて流速を測定した。測点は 10 cm 間隔の格子上とした。流速は 1 つの測点に対して、波の谷で流速計が空中に露出しないよう、静水面下 8 cm (ケース 1) および 6 cm (ケース 2) の上層と、底面上 1 cm の下層の 2 か所で測定した。水深の浅い領域では下層のみ測定した。また、全体的な流れの方向を把握するために染料を投入し、その移動状況を観察した。移動床実験では、洗掘ビットに中央粒径 0.2 mm、比重 2.65 の粒径のそろった砂を投入した。固定床実験と同一条件の規則波を作用させ、造波開始後 1, 2, 4, 6 時間後の底面地形を、接触式砂面計を用いて計測した。円柱近傍の洗掘量、堆積量は予め記した円柱の目盛りから読みとった。また固定床実験と同様、容量式波高計を用いた波高分布測定も行った。波高分布は、底面地形の変化が波浪場に及ぼす影響についても確かめられ



(unit:m)

図-1 実験装置概要

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 正会員 工修 (株)間組 技術研究所

*** 正会員 北海道開発庁

表-1 実験条件

ケース	1	2	
T (s)	1.02	1.31	
H_0 (cm)	9.1	5.0	T : 入射波周期
h_c (cm)	11.5	12.1	H_0 : 換算沖波波高 h_c : 円柱中心位置での水深

るよう、造波開始後 0~2, 5~7 時間後の間に測定した。1 回の測定には約 100 分を要した。実験装置の概要を移動床の場合について図-1に、実験条件を表-1にそれぞれ示す。

3. 数値モデル

本研究で提案する数値モデルは、計算対象領域の波浪と定常流の平面分布を計算し、得られた各地点の水理量から局所的な漂砂量の分布を求め、砂の連続式から各地点の地形変化を求めるものである。モデルは、①波浪場の計算、②定常流場の計算、③底面地形変化の計算の3つのサブモデルより構成し、この3段階に分けて計算を行う。以下に各サブモデルについて説明する。

(1) 波浪場の計算

波浪場の計算には、底面勾配を有する構造物周辺の波浪場を精度良く算定することが可能な、式(1)に示した非定常緩勾配方程式(渡辺ら(1984))を用いた。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \frac{\partial n Q_x}{\partial x} + \frac{1}{n} \frac{\partial n Q_y}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial Q_x}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} + f_D Q_x &= 0 \\ \frac{\partial Q_y}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} + f_D Q_y &= 0 \\ f_D &= 2.5 \tan \beta \sqrt{(g/h)(\hat{Q}/Q_r - 1)} \\ \hat{Q} &= \sqrt{\hat{Q}_x^2 + \hat{Q}_y^2}, \quad Q_r = 0.25 \sqrt{gh^3} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

ここに、 η は水面変動量、 Q_x 、 Q_y は x 、 y 方向の線流量、 c は波速、 n は波速に対する群速度の比、 $\tan \beta$ は底面勾配、 h は水深、 g は重力加速度である。 f_D は碎波減衰項で、その値は合成線流量振幅 $\hat{Q}$ が再生波領域の限界線流量振幅 Q_r よりも小さくなる地点ではゼロとする。

(2) 定常流場の計算

radiation stress の勾配を外力とする定常流を、式(2)に示す水平面内の平均流に関する連続式および運動方程式を連立させ、非定常計算法によって求めた。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U(h+\zeta)}{\partial x} + \frac{\partial V(h+\zeta)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + F_x - M_x + R_x + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + F_y - M_y + R_y + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

ここに、 ζ は平均水位上昇量、 U 、 V は x 、 y 方向の定常流速、 F_x 、 F_y は底面摩擦項、 M_x 、 M_y は拡散項、 R_x 、 R_y は radiation stress 項である。

(3) 底面地形の計算

波浪場および定常流場の計算結果を用い、各メッシュ点における漂砂量を計算した。実験では顕著な定常流が観測され、特に浮遊砂の多かった円柱近傍では、砂の移動方向が定常流の方向にほぼ一致している様であった。そこで漂砂量 Q は柴山ら(1989)にならい式(3)~(5)に示す波・流れ共存場における漂砂量式より算出した。

$$Q = \frac{\Phi w d}{(1-\lambda)} \dots (3)$$

$$\Phi = 0.9 \theta^{1.2} \dots (4)$$

$$\theta = \frac{(\tau_m - \tau_c) u}{\rho (sgd)^{1.5}} \dots (5)$$

ここに、 τ_m は底面せん断応力の最大値、 τ_c は底質移動限界せん断応力、 u は定常流速、 λ は空隙率、 d は底質の粒径、 w は底質の沈降速度、 ρ は水の密度、 s は底質の水中比重である。 τ の計算には Tanaka・Shuto (1981) の摩擦係数を用いている。そして局所底面高を z_b とし、その時間変化率を式(6)で与えた。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\text{div } Q \dots (6)$$

以上のサブモデルを用い円柱周辺の洗掘・堆積を計算した。計算には差分法を採用し、スタッカードメッシュスキームを適用した。また円柱構造物は正方形の格子を用いた多角形で近似した。

4. 実験結果および実験値と計算値の比較

(1) 波浪場

今回の実験条件では、洗掘ビット内で碎波現象が観測された。ケース1では円柱側方から岸側において、ケース2では円柱の岸側 10 cm 位のところで碎波現象が確認された。波高分布の実験値と数値モデルによる計算値の比較を、ケース1について図-2に示す。図-2(a)は固定床上の実験値、(b)は造波後 5~7 時間の間に計測した移動床上の実験値、(c)は非定常緩勾配方程式による計算値である。図-2(a)、(b)はそれぞれ、底面地形変化が起きていない状態での波高分布と、ある程度地形変化が起きた状態での波高分布を示しているが、両者を比較すると、あまり大きな差異はみられない、また、図-2(c)の計算値は若干大きめであるが、2つの実験値を精度良く説明している。以上より今回の実験条件では、地形の変化過程での波浪場の変化量は少なくともほぼ定常とみなせ、その波浪場は非定常緩勾配方程式により精度良く評価できることが分かる。

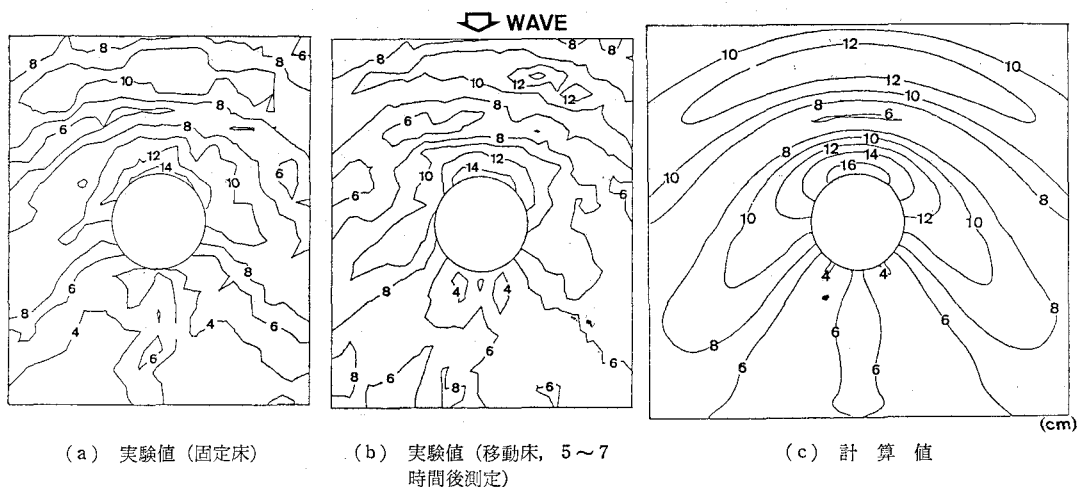


図-2 波高分布の実験値と計算値の比較 (ケース 1, 図の上方より波が入射)

(2) 定常流場

ケース 1 の定常流ベクトルの実験値を 図-3(a) に、計算値を 図-3(b) に比較して示す。実験では、流速は 1 つの測点に対して上層と下層の 2 カ所で測定しているので、図-3(a) には上層と下層の両方の実験値を示してある。図より実験における定常流速は全体として冲向きになった。特に、碎波現象が顕著であった円柱の岸側では、強い冲向きの定常流が発生している。これに対して、計算値にはその様な傾向が見受けられず、円柱の斜め後方岸側領域などにおいては岸向きの流速となった。これは、実験値に碎波帯内の戻り流れの影響が顕著にあらわれていたためと考えられる。上層の流速測定点は、計測機のセンサーが空中に露出しないよう波の谷よりも下方に設定したために、それよりも上方における定

常流速は測定不可能であった。したがって、岸向きの定常流速は実験値にはあらわれにくかったと言える。これに対して radiation stress 分布の勾配を外力とする計算値は、流速が断面で様な値を持つ 2 次元的な流れとして求められたものであり、戻り流れの影響は加味されていない。

次に、実験値の定常流ベクトルが全体として右から左に向かっているのが分かる。これは、円柱背後の碎波現象により沿岸流が発生していることを示している。円柱背後では碎波によるエネルギー減衰が顕著で、沿岸流が発生し易い状況であった様である。これら顕著な戻り流れおよび沿岸流の存在は、染料による目視観察でも確認している。

実験値下層の図で、破線○印で示した円柱左斜め後方

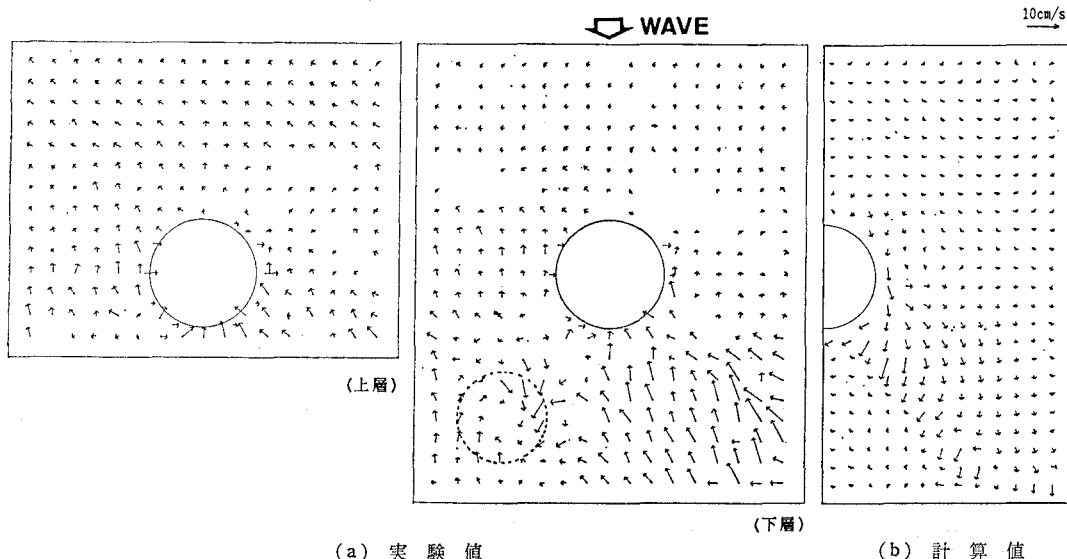


図-3 定常流分布の実験値と計算値の比較 (ケース 1, 図の上方より波が入射)

岸側の領域に、定常流ベクトルのセルが存在する。これは、この付近で何らかの渦が発生していたことを示すものである。後述する底面地形変化の実験結果によれば、この付近で地形は大きく洗掘された。著者らはこの渦を、発生した場所から考え、定常流に起因するカルマン渦と推測する。しかし今回は、測定装置の限界からその微細構造までを確認するまでには至らなかった。

(2) 底面地形

実験における砂漣の様子をケース1について写真-1に示す。写真は造波開始後7時間のものである。実験では、造波開始後間もなく移動床全体の砂が巻き上がり、約1分後には全面に砂漣が形成された。砂漣の形状に関しては、その後、波の作用時間による変化はほとんどなかった。写真中、移動床内数カ所でうろこ状の3次元砂漣が形成されており、円柱周辺では重合波浪場が形成され、底面水粒子が円に近い橢円軌道を描いていたことを示している。3次元砂漣の形成位置は斉藤(1988)の水平床実験の場合とほぼ同じであった。

次に図-4には、底面地形変動量の実験値と数値モデルによる計算値の比較を示す。図中洗掘域は斜線で示し

である。また、今回の実験条件に対しては、平衡地形に達する時間がほぼ5~6時間であったので、造波開始後6時間後の実験値と計算値を示してある。円柱の近傍においては計算値は実験値を良く説明しているといえる。しかし円柱より若干離れた周辺域では、実験値は円柱岸側で、計算値は円柱沖側で洗掘される結果となっている。また、実験値の洗掘・堆積のパターンが若干の左右非対称となっており、計算値の精度には問題があるといえる。その原因について以下より検討を加える。

流速の実験結果は、波の谷よりも水深が深い領域では戻り流れが卓越しており、また顕著な沿岸流も観測されたことから、計算結果とは異なる傾向となった。実験では、碎波帯および円柱の近傍で浮遊砂量が多く砂の移動方向は戻り流れ、沿岸流の影響を受けているようであった。よって、底面地形は、戻り流れの作用で全体的に岸側で洗掘され沖側に堆積し、沿岸流の作用で左右非対称になったものと考えられる。沼野ら(1989)は、碎波帯内においては底面付近に undertow が存在し、それが砂の移動に大きな影響を及ぼすことを数値モデルを用いて指摘している。本実験の結果はこの指摘に合致するものである。

次に、円柱の斜め後方岸側で発生した定常流に起因する渦の影響が考えられる。図-4(a)より、底面地形は図-3(a)(下層)の渦の発生域で大きく洗掘されており、定常流の影響下では、渦の効果を考える必要があることを示している。本数値モデルには渦の効果は全く考慮されていない。Shibayama・Win(1992)は、このような碎波帯内定常流下の渦の作用による洗掘について、数値モデルを用いて指摘しており、今後検討が必要である。

5. 結 論

本研究では、一様海底勾配上に設置された大口径円柱周辺の底面地形変化に関し、水理実験と波・流れ場に着

目した数値モデルより検討し以下の結論を得た。

(1) 一様海底勾配上に設置された大口径円柱周辺の波浪場は、非定常緩勾配方程式を用いることで精度良く評価できる。

(2) 碎波帯内に設置された大口径円柱周辺の定常流場は、波の谷よりも水深が深い領域では、戻り流れが顕著で、底面の砂移動に大きな影響を及ぼしている。

(3) 碎波帯内に設置された大口径円柱周辺では、碎波

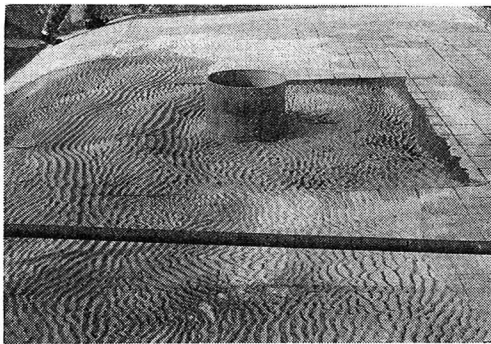


写真-1 円柱周辺の砂漣の様子 (ケース1, 向かって左が沖側)

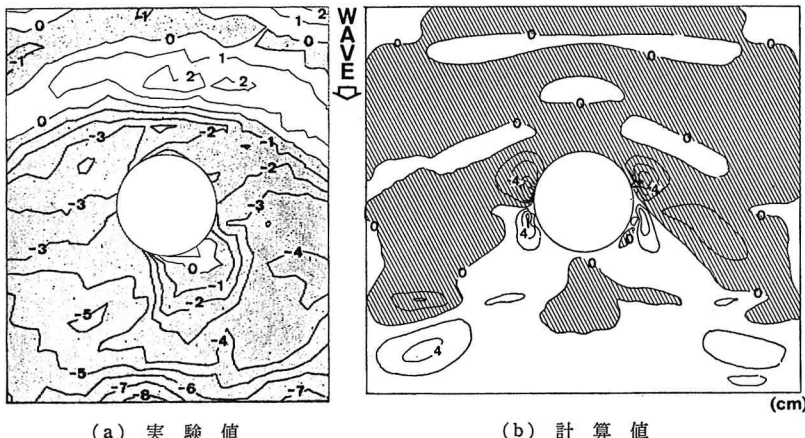


図-4 底面地形変動量の実験値と計算値の比較 (ケース1, 図の上方より波が入射)
(斜線部分は洗掘域)

現象により沿岸流が発生する場合があります, 底面の砂移動に大きな影響を及ぼす。

(4) 沿岸流が顕著になると, 円柱斜め岸側後方で定常流に起因する渦が発生する場合があります, その周辺では底面地形は洗掘される。

(5) 大口径円柱周辺の洗掘・堆積などの底面地形変化は円柱の近傍に関しては, 本数値モデルを用いることで評価できるが, その周辺域の予測に関しては若干の問題がある。この理由として, 戻り流れ, 沿岸流などの定常流の影響下での渦の存在などが考えられる。今後は, 円柱周辺の流れおよび渦のより微細な構造を把握し, 各効果を数値モデルの中に組み入れていく必要がある。

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 (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, 横浜国立大学修士論文, 97 p.
- 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.
- 柴山知也・浅田英幸・天明敏行・佐藤慎司 (1989): 波と流れが任意角度で斜交する場合での漂砂量, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 304-308.
- 東江隆夫・勝井秀博 (1985): 大口径円柱の洗掘現象, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 425-429.
- 東江隆夫・勝井秀博・灘岡和夫 (1991): 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.
- 沼野祐二・佐藤慎司・柴山知也 (1989): 海浜変形シミュレーションにおける浮遊砂の移流過程と undertow の効果, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 394-398.
- 増岡宏昭・城 一真・佐藤慎司 (1986): 波による円柱状構造物周辺の局所洗掘, 第41回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第2部, pp. 569-570.
- 渡辺 晃・丸山康樹 (1984): 屈折・回折・碎波減衰を含む波浪場の数値解析法, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 103-107.
- MacCamy, R. C. and R. A. Fuchs (1954): Wave forces on piles, A diffraction theory, Tech. Memo., No. 69, B.E.B.
- Shibayama, T. and A. Win (1992): A Numerical model for local scour around a cylinder due to waves and currents, Proc. of the 41st Annual Conf., 2, JSCE.
- Tanaka, H. and N. Shuro (1981): Friction coefficient of a wave-current coexistent system, Coastal Eng. in Japan, Vol. 24, pp. 105-128.