

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

齊藤 栄一*・佐藤 慎司**・柴山 知也**

1. はじめに

海域に大型構造物を設置する場合、その基礎部分の洗掘は構造物の安定性を検討するうえで非常に重要な問題となる。防波堤や護岸などの堤脚部の洗掘については、主に実験などにより、そのメカニズムは解明されつつある(たとえば入江ら¹⁾)。またもう一つ重要な構造物である円柱状構造物についても、小口径円柱に関しては近年研究が盛んであり種々の報告がされている(たとえば柴山ら²⁾)。しかし大口径円柱、特に波動場における大口径円柱周辺の洗掘については、回折波の影響により円柱周辺の波動場が複雑となるために東江・勝井³⁾や増岡ら⁴⁾の研究例しかなく、そのメカニズムはあまり解明されていないのが現状である。大口径円柱に関する諸問題は、最近注目を集めている沖合人工島、もしくは大型橋樑脚の建設に関する問題などと密接に関連しており工学的に非常に重要である。そこで本研究では波動場における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地形変化予測モデルを提案することを目的とした。さらに、提案したモデルの妥当性を検証するために、モデル値と実験値を比較検討した。

2. 実験装置および方法

実験は図-1 に示す様な 9×9m の平面水槽を用いて行なった。一樣水深部に 2m 四方の木枠で囲った洗掘ビットを設けて観測域とし、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うえで、直径 52.2 cm の円柱を設置した。また観測域の周辺に矢倉をたて、その上に観測用レールおよび台車を設置し、台車には連続式砂面計および容量式波高計を取り付けた。そして表-1 に示す実験条件で以下の項目を測定した。

(1) 波高分布

容量式波高計を用いて造波後 0～1 時間後および 4～6 時間後の間の波高分布を測定した。測点間隔は 10 cm とした。測定には約 50 分を要した。

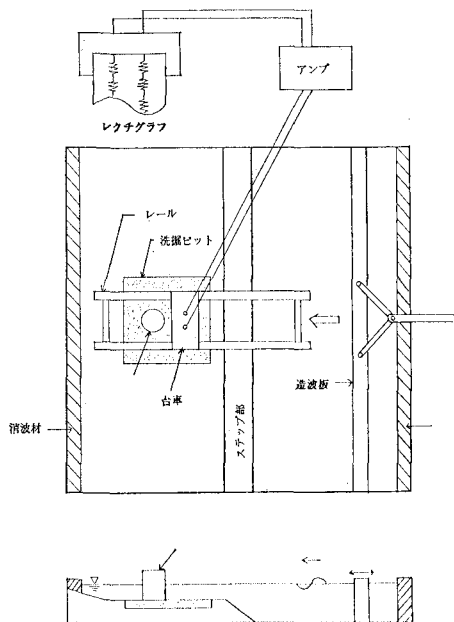


図-1 実験装置概略図

表-1 実験条件

case	1	2	
T (s)	0.94	0.94	T : 入射波周期
H (cm)	6.7	7.9	H : 入射波高
h (cm)	16.5	16.5	h : 水深

(2) 底面地形

連続式砂面計を用いて造波後 1, 2, 4, 6 時間後の底面地形を測定した。測線間隔は円柱近傍では 5 cm とし、その他の領域では 10 cm とした。また円柱に 30°毎に目盛りを付けて、円柱面における洗掘深を読みとった。

(3) 流れの様子

染料の粒子を投入し、染料の移動状況を観察することにより流れの方向、速さを測定した。

(4) 砂の移動機構

円柱周辺に局所的に着色砂を投入し、砂の移動機構、および浮遊状況を測定した。

* 正会員 工修 (株)間組技術研究所

** 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

3. 数値モデル

地形変化予測数値モデルの作成に際して、波・流れ共存場の漂砂量に関する既往の研究を参考にして漂砂量公式を導入した。本来、波浪場、流れの場と地形変化は相互に影響を及ぼしあっているものであるが、本研究では地形変化後も波浪場と流れの場は一定で変化しないとして計算を行なった。したがって本モデルは、円柱周辺の地形変化が水深に比べて小さい比較的初期の段階における砂移動現象を対象としていることになる。

波動場は MaCamy・Fuchs⁵⁾の回折波理論を用い、次の線形速度ポテンシャル ϕ より計算した。

$$\phi = -\frac{ig}{\omega} A \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \left[\sum_m \varepsilon_m(i)^m \times \left\{ J_m(kr) - \frac{J'_m(kr_0)}{H_m^{(1)}(kr_0)} H_m^{(1)}(kr) \right\} \cos m\theta \right] \quad (1)$$

ここで、座標系は図-2に示す様にとり、 ω は角周波数、 k は波数、 h は水深、 r_0 は円柱半径、 $J_m(kr)$ は第1種 Bessel 関数、 $H_m^{(1)}(kr)$ は第1種 Hankel 関数である。また、 i は虚数単位であり、 ε_m は $m=0$ で1、その他の値で2をとるものとする。

正味の砂移動をひき起こす要因としては波による質量輸送の影響と流れの影響とを考えた。波による質量輸送速度 $U_m = (U_{mr}, U_{m\theta})$ は底面層流境界層理論を用いた Carter et al.⁶⁾の式を円柱座標系 (r, θ) に変換した次式を用いた。

$$\left. \begin{aligned} U_{mr} &= \frac{1}{4\omega} \text{Real} \left\{ F_5 u_r \left(\frac{\partial u_r^*}{\partial r} \right) + F_6 u_\theta \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_r}{\partial \theta} - u_\theta \right)^* \right. \\ &\quad \left. + F_7 \frac{u_r}{r} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_r \right)^* \right\} \\ U_{m\theta} &= \frac{1}{4\omega} \text{Real} \left\{ F_5 \frac{u_\theta}{r} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_r \right)^* + F_6 u_r \left(\frac{\partial u_r^*}{\partial r} \right) \right. \\ &\quad \left. + F_7 u_\theta \left(\frac{\partial u_r^*}{\partial r} \right) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで u_r , u_θ は底面軌道流速複素振幅の各方向成分である。また、 $F_5 = -3+5i$, $F_6 = -1+2i$, $F_7 = -2+3i$

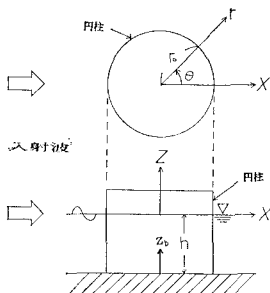


図-2 座標系

であり、*印は複素共役をとることを表わしている。

円柱周辺には複雑な波高分布を有する波浪場がみられるため、radiation stress の勾配を外力とする定常的な流れの場が存在していると考えられる。radiation stress の勾配を外力とする定常流 $U = (U_r, U_\theta)$ は、(3), (4) 式に示す円柱座標系 (r, θ) で書き表わした連続式および運動方程式を連立させ非定常計算法を用いて数値計算により求めた。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \{ r U_r (h + \xi) \} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \{ U_\theta (h + \xi) \} = 0 \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U_r}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} + F_r - M_r + R_r \\ + g \frac{\partial \xi}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial U_\theta}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + F_\theta - M_\theta + R_\theta \\ + \frac{g}{r} \frac{\partial \xi}{\partial \theta} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 ξ は平均水位の上昇量、 t は時間である。また運動方程式 ((4) 式) の各式の左辺第2項および第3項は移流項、第4項は摩擦項、第5項は水平拡散項、第6項は radiation stress の勾配の外力項であり、第4項以降はそれぞれ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} F_r &= \frac{f}{\rho(h+\xi)} U_r \\ F_\theta &= \frac{f}{\rho(h+\xi)} U_\theta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

また、 f は次式で表示される摩擦係数である。

$$f = \frac{2}{\pi} \rho C_f u_b \quad (6)$$

ここで、 C_f は底面摩擦係数、 u_b は底面における波の流速振幅、 ρ は流体の密度である。

$$\left. \begin{aligned} M_r &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon r \frac{\partial U_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\varepsilon \frac{\partial^2 U_r}{\partial \theta^2} \right) \\ M_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon r \frac{\partial U_\theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\varepsilon \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial \theta^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで、 ε は拡散係数であり本研究では $\varepsilon=100$ とした。

$$\left. \begin{aligned} R_r &= \frac{1}{\rho(h+\xi)} \left(\frac{\partial S_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial S_{r\theta}}{\partial \theta} \right) \\ R_\theta &= \frac{1}{\rho(h+\xi)} \left(\frac{\partial S_{\theta r}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial S_{\theta\theta}}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここで、 S_{rr} , $S_{\theta\theta}$, $S_{r\theta}$, $S_{\theta r}$ は radiation stress の各成分である。

次に底質の動きやすさを表わすパラメータとしてシーلز数を導入する。シーلز数 ϕ_m は次式の様に表わされる。

$$\phi_m = \frac{1}{2} \frac{f \omega u_b^2}{sgd} \quad (9)$$

ここで, f_w は Jonsson⁷⁾ の波による摩擦係数, s は底質の水中比重, d は底質粒径である. 円柱周辺の底面近傍では, 水粒子は一般に平面的に楕円軌道を運動しているため, その底面摩擦応力の算定法については未知の部分が多い. さらに波・流れ共存場における底面摩擦応力の評価には流れの影響も考慮しなければならないが, 上述の様な複雑な三次元境界層に対して流れの影響を評価することは現段階では困難である. そこで本研究では, 底面摩擦応力の算定には波動流速のみを考えることにし, (9) 式の u_b に波動流速の絶対値の最大値を代入することによりシールズ数が評価できるものと考えた.

以上の様にして計算される質量輸送速度 U_m , 定常流 U , シールズ数 ϕ_m を基にして漂砂量 Q を (10), (11) 式の様に与えた. ここで同式には, 渡辺ら⁸⁾ にならない底勾配の影響を考慮する項も導入した. また U_m は底面に発達する境界層に対して計算される質量輸送流れであり, U は radiation stress の勾配を起因力として全水深に対して計算される定常流れである. したがってそれぞれの計算値が砂の輸送量に与える影響は異なると考えられるため, その重みを表わす係数 α を導入した.

$$Q = q - \varepsilon_s |q| \frac{\partial z_b}{\partial S} \dots\dots\dots (10)$$

$$q = A(\phi_m - \phi_c)(U_m + \alpha U) d \frac{1}{1 - \lambda_v} \dots\dots\dots (11)$$

ここで, S は底勾配の方向ベクトル, ϕ_c は限界シールズ数, A, ε_s は正の無次元係数, λ_v は底質の空隙率である. また, z_b は局所底面高であり, その時間変化率は (12) 式で与えられる.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\text{div}[Q] \dots\dots\dots (12)$$

数値計算に際しては, 図-3 に示す様な計算格子を用

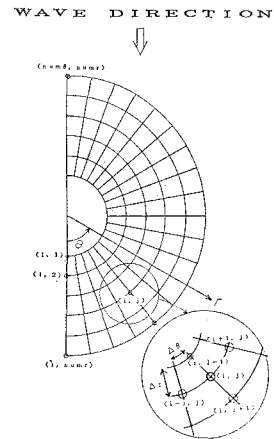


図-3 計算格子

いて (12) 式を差分法で解いた. 差分法としては中心差分を採用した.

4. モデルによる計算値と実験値との比較

(1) 波動場

図-4 に各点の波高を入射波高で除した波高比の分布図を示す. (a) は実験において 0~1 時間後の間に測定されたもの, (b) は 4~6 時間後の間に測定されたものであり, (c) は回折波理論による計算値である. まず図-4 (a) と図-4 (b) とを比較すると, 観測時間の経過とともに大きな差異はみられない. すなわち, 時々刻々と変化する底面地形に対して波動場には大きな変化がみられないことになり, 数値モデルで前提とした仮定がほぼ満たされていることになる. 次に実験値と計算値については, 円柱後方で若干の不一致を呈するもののその他の全体的なパターンはほぼ一致しているといえる.

(2) 流れの場

円柱周辺の流れの場は非常に複雑であり染料によって定量的に観測するのは困難であった. しかし定性的には図-5 (a) に示す様な流れが明確に認められた. 同図において, 二重線で示した矢印は流れの方向を, 実線で示した矢印は底面における水粒子の運動の軌跡を表わしている. 計算により求めた質量輸送速度分布図を図-5 (b) に, 定常流分布図を図-5 (c) に示す. 図によれば計算値は定常流の方が大きく計算されており, その分布は観測値と良く

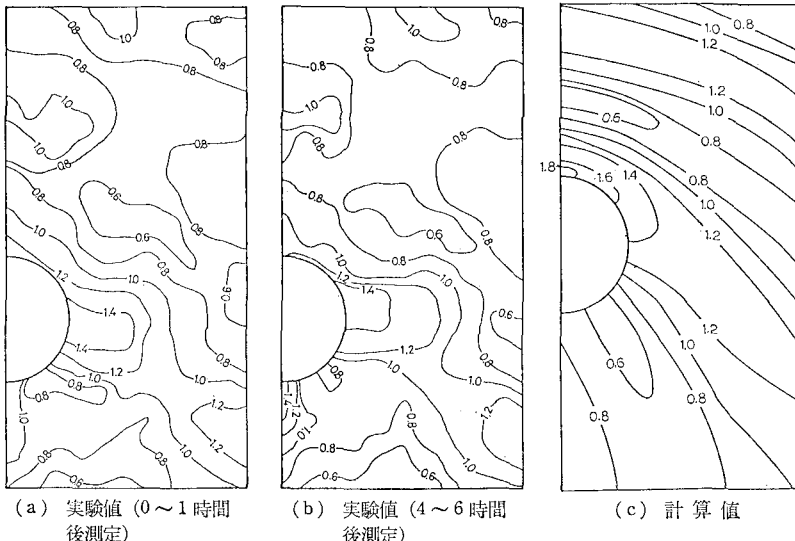


図-4 波高比分布図 (Case 1, 上方より波が入射する)

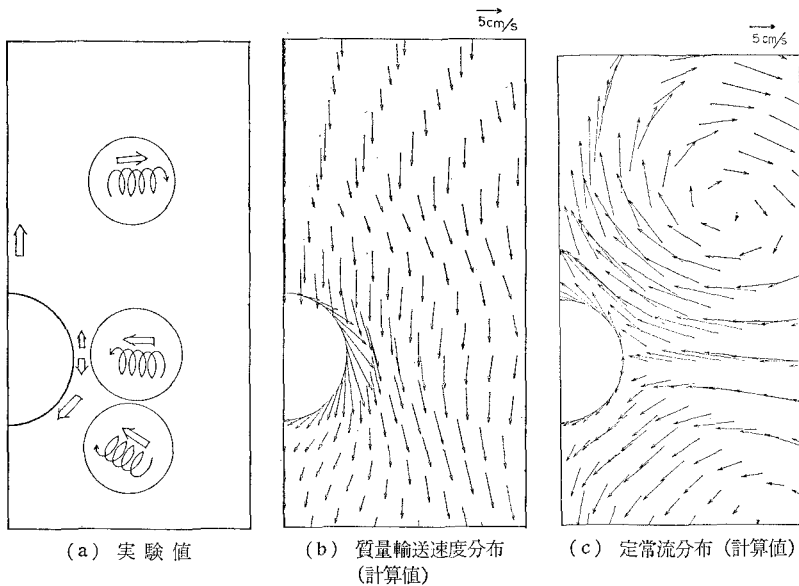


図-5 流れの分布図 (Case 2, 上方より波が入射する)

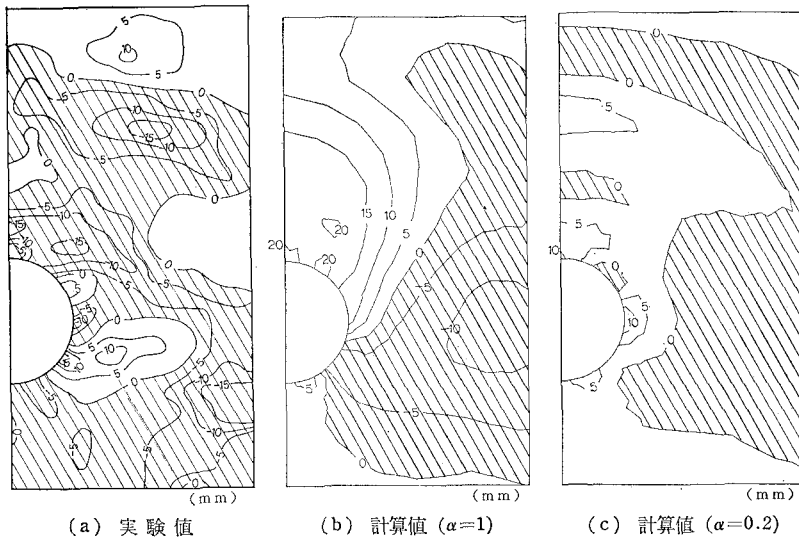


図-6 底面地形変化 (Case 2, 4時間後, 上方より波が入射する)

一致しているといえる。

(3) 底面地形

実験において、波の作用時間が長くなるにつれて、底面に局所的に勾配がつき底質が移動しにくくなり、底面地形が平衡地形に向かうといった現象が観測された。平衡時間は一定ではなく実験条件により多少のばらつきがみられた。また円柱近傍に関しては早い時間に平衡地形に達し、その後徐々に周辺部に広がっていく傾向があった。図-6 に実験値と数値モデルによる計算値の比較を示す。同図中に示された実験条件に対しては平衡時間がほぼ4時間であったので、数値モデル値を求める際の条件も4時間後に設定した。また(10)・(11)式における

無次元係数 A は 0.07 に、 ε_s は 0.03 に、限界シールズ数 ϕ_c は 0.06 に設定した。図-6 (a) は実験値、(b) は(11)式中の係数 α を 1 としたものである。(c) は α を 0.2 としたものである。前述のとおり質量輸送 U_m は底面近傍に発達する境界層に対して計算される量であるのに対し、定常流 U は全水深一様として計算される。しかし実際には、定常流は全水深に一様ではなく底面近傍では計算値よりずっと小さくなっているため、砂の輸送量に与える影響は、定常流によるものよりも質量輸送によるものの方が大きいと考えられる。そこで $\alpha=0.2$ とし、 $\alpha=1$ の場合と、実験値との適合性を比較した。図中の斜線部は洗掘域を表わしている。

図-4 より、係数 α を 1 とした (b) 図では定常流の影響が過大評価されているため、実験値 (a) とかなり異なる地形変化となっているが、 α を 0.2 とした (c) 図では、全体的なパターンに関しては実験値と良好に一致している。しかし円柱直前の領域など細部の領域に関しては、まだ問題を残している。その原因について以下に検討を加える。

まず漂砂量公式に問題があることが考えられる。前述のとおり本研究で用いた漂砂量公式では定常流、質量輸送とシールズ数を評価する必要がある。数値モデルでは流れの評価はうまく行っているものの、シールズ数の評価には若干の問題を残している。(9) 式よりシールズ数 ϕ_m を決定する重要なパラメータとして底面における水粒子速度の振幅 u_b がある。しかし円柱周辺の波動場は非常に複雑であり、図-5 (a) にも示したとおり底面における水粒子の軌跡は、円、楕円、もしくは直線と多種多様で 2 次元的である。そこに一次的に評価されたシールズ数の式 ((9) 式)、および限界シールズ数 ϕ_c を適用するには限界があると思われる。さらに漂砂量公

式に波の非対称性による net の漂砂量を考慮していないことも問題の一つと考えられる。

数値モデルによる地形変化の計算値は特に円柱前面において実験値と一致していない。その理由は、円柱前面に形成される非線形性の強い重複波の影響を考慮することにより解釈することができる。大口径円柱は曲率が小さいので、前面においては防波堤の場合と同じように考えることができ、入江らりによる防波堤前面での重複波の下における底質の移動機構の研究結果を参考にすることができる。入江らによれば、重複波の下での底質の移動機構には、net の移動方向が節から腹へ向かう L タイプと、腹から節へ向かう N タイプの 2 種類がある。これは流速波形の歪み、すなわち波の有限振幅性および砂漣近傍に形成される渦の作用が原因である。特に波の有限振幅性に関しては、図中に示した実験条件では有限振幅性が非常に大きく、実験中も至る所で碎波寸前の波が観測された。これに対して本研究の数値モデルでは、線形理論を用いているために計算された波動場には波の有限振幅性が全く考慮されていない。以上より数値モデルは円柱前面で実験値と一致しなかったと考えられる。

5. 結 論

本研究では、大口径円柱周辺の波浪流速場に着眼して地形変化予測モデルを提案した。そして以下の結論を得た。

(1) 円柱周辺の波動場は MaCamy・Fuchs⁵⁾ の回折波理論により評価できる。

(2) 回折波理論、および Canter et al.⁶⁾ の底面境界層理論を用いることにより円柱周辺の質量輸送速度の場を評価することができる。また、回折波理論から計算される波動場を用いて radiation stress を評価することにより、円柱周辺に発達する流れの場を計算することができ

る。しかし流れ自体が複雑で流れの大きさを測定することが難しいので、実験により定量的な検証をすることは困難であった。

(3) 提案した地形変化予測モデルにおいて、地形変化の全体的なパターンに関しては計算値と実験値は良く一致しているといえるが、円柱前面など細部の領域に関してはまだ問題を残している。今後は、波動場、流速場が複雑な場合における漂砂の運動機構について詳しく検討し、波の有限振幅性をおよび砂漣近傍の渦の作用を考慮するなど、漂砂量公式の改良を行なう必要がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、東京大学磯部雅彦助教授、新潟大学泉宮尊司助手、東亜建設工業の大中晋氏、佐藤典之氏より貴重な御助言をいただいた。ここに記して厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 入江 功・近藤隆道・赤石正廣・寺崎賢次：重複波による防波堤前面での海底洗掘——底質の移動機構に着目した研究，第 31 回海岸工学講演会論文集，pp. 350～354，1984。
- 2) 柴山知也・先灘正成・塚本幸雄：波・流れ共存場での小口円柱周辺の局所洗掘機構，第 34 回海岸工学講演会論文集，pp. 407～410，1987。
- 3) 東江隆夫・勝井秀博：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. 425～429，1985。
- 4) 増岡宏昭・城 一真・佐藤慎司：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概要集 第 2 部，pp. 569～570，1986。
- 5) MaCamy, R. C. and R. A. Fuchs: Wave forces on piles (A diffraction theory), Tech. Memo., No. 69, B.E.B., 1954.
- 6) Carter, T. G., P. L. F. Liu and C. C. Mei: Mass transport by waves and offshore sand bedforms, J. WW, ASCE, No. 99, pp. 165～184, 1973.
- 7) Jonsson, I. G.: Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th ICCE, pp. 127～148, 1966.
- 8) 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・柳山 勉：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. 103～107，1984。