

SOLA-SURF 法による潜堤周辺波動場の三次元数値計算

細山田得三* ・ 吉 田 茂** ・ 早 川 典 生***
犬 飼 直 之**** ・ 中 田 芳 貴*****

1. はじめに

前報(細山田ら:1997)において著者等は, SOLA-SURF 法によりナビエ・ストークス (NS) 方程式を積分して, 透過性潜堤前後の波動場流れの数値計算が可能であることを示した. 実際の潜堤にあっては, 潜堤両端近傍で洗掘が観測されるなどの報告(運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所, 1996)があり, 潜堤周辺の三次元流れ構造の解析技術の確立が急務となっている. 粘性流体の三次元数値計算は計算機容量と計算時間が制約条件となり, 海岸工学では従来あまり行われていないようである. しかしながら発達した計算機を利用し, SOLA-SURF 法の優れた特性を生かせば, ワークステーション等により処理が十分可能である. 本報では前報の SOLA-SURF 法を三次元に拡張し, 潜堤周囲の波流れ場についての計算手法を検討するものである.

2. 三次元 SOLA-SURF 法

三次元 SOLA-SURF 法は二次元の場合の自然の延長である(Hirt ら:1975, Bulgarelli ら:1984). 解くべき基礎微分方程式は三次元の NS 方程式および非圧縮性流体の連続式である. 境界条件は粘性流体のそれであり, 固体壁においては流速 3 成分 0 (non-slip 条件)を課し, 自由表面においては運動学的条件として三次元自由水面条件を, 力学的条件として法線方向応力と二方向接線応力 0 を課する.

本研究では水路内に透過性潜堤を設置した場合を解析しているが, 潜堤内部ではダルシー流であると考え, 潜堤内部の流速については次の基礎方程式を解くこととする.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\epsilon \nabla(p + gz) - \frac{\epsilon \nu}{k} \vec{v} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで $\vec{v} = (u, v, w)$ は三次元流速ベクトル, ϵ は空隙率,

k は透水係数, ν は水の動粘性係数, z は鉛直上向き座標である. 式(1), (2)の SOLA-SURF 法への取り込みは, これらが NS 方程式の簡略化した形であるので容易である.

潜堤表面, すなわち潜堤内部と水部との内部境界面では, 流速値と法線方向および接線方向応力の連続性を課した.

以上のように前報に比べて二次元条件を三次元に拡張するのは原理的には容易で, まったく問題がない. 造波条件および岸側端境界条件も前報と同様に与えた.

なお, 本計算法では今のところ碎波現象は取り入れられていない.

3. 計算条件

解析対象は水理実験を再現するように, 幅 60 cm, 長さ 15 m の水槽とし 片端に造波機, 中央に潜堤があるものとした. 潜堤の高さは 37.5 cm, 下底幅 2 m, 上端幅 1 m であり, 平均水深を 55 cm とした. 計算格子は波の進行方向 (x) に $\Delta x = 5$ cm, 鉛直方向 (z) に $\Delta z = 2$ cm, 三次元計算時の横方向 (y) には $\Delta y = 5$ cm と与えた. 波は二次元波であり, 周期 1.2 秒, 波高 13.2 cm とした. 潜堤の形状を図-1 に示す.

4. 二次元透過性潜堤の計算

最初に三次元計算法の妥当性を調べるために, 潜堤を横断方向に一樣に設置した場合(二次元透過性潜堤)について検討した. その結果, 図-2(a)に示すように, 三次元計算では横断方向に著しい水位勾配が観察された.

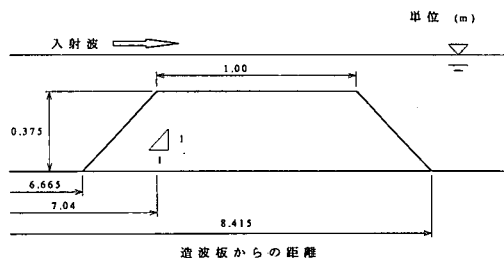
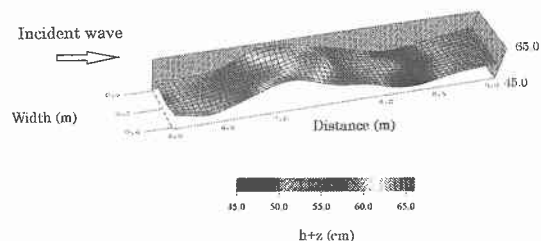
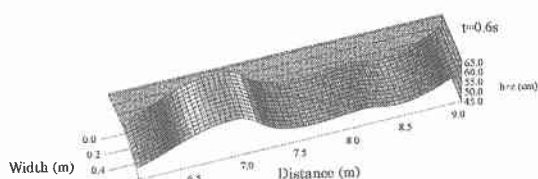


図-1 潜堤模式図

* 正会員 工博 長岡技術科学大学環境・建設系 助教授
** 正会員 工修 長岡工業高等専門学校環境都市工学科 助教授
*** 正会員 Ph.D. 長岡技術科学大学環境・建設系 教授
**** 正会員 工修 長岡技術科学大学環境・建設系 助手
***** 正会員 工修 中電技術コンサルタント(株)



(a) non-slip



(b) slipあり

図-2 二次元潜堤の計算結果の比較

水理実験結果ではこのような現象は見られなかったもので、これはこのレイノルズ数では non-slip の境界条件が強く拘束しすぎているためと思われる。そこで三次元計算において、側壁での境界条件を slip ありとした。その結果は図-2(b)に示すように、二次元計算結果と近い結果を得た。以上の結果から本報の三次元計算においては、側壁での境界条件を slip あり（流速勾配0）とした。

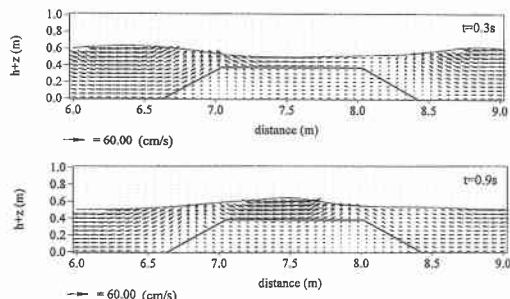
図-3はこの条件における二次元計算と三次元計算による流速ベクトル図を示す。全体的に両者は良い一致を示しているが、細かく観察すると、三次元計算では潜堤沖側で流速値が大きめである。その他の流れの状況はよく一致しているといえる。

5. 三次元計算結果

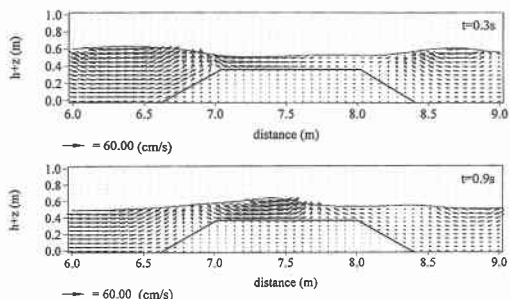
5.1 実験水槽規模の計算

三次元計算の潜堤設置条件として、二次元計算時の潜堤を実験水槽（幅 60 cm）中の波進行方向左側半分だけに設置した場合を想定した。他の計算条件は3. 計算条件の項に記した条件と同一である。ここでは潜堤が不透過性と透過性の2ケースの場合についての計算結果を比較する。図-4～6は不透過性潜堤と透過性潜堤周りの水表面変動と流速ベクトル図を示す。流速ベクトル図は潜堤天端上下の典型的な平面において表示した。

図-4の水表面変動を見ると、入射波は潜堤沖側法面に接近すると水位が低くなるのがわかる。波の峰が潜堤上に達すると波形勾配は急になり、潜堤上の波に対して潜堤のない部分（側方区間）の波は位相が遅れる様子を示している。そしてこれらの傾向は不透過性潜堤の方がより著しく現れている。



(a) 二次元計算結果



(b) 三次元計算結果

図-3 二次元計算結果と三次元計算結果の比較

図-5, 6は平面流速ベクトル図の比較である。図-5は潜堤天端より 2.5 cm 上の面であり、図-6は潜堤天端より 17.5 cm 下の面である。時刻 $t=0$ は図-4と同様であり、波の谷が潜堤沖側の法肩部に到着した時刻をとっている。

図-5を見ると流速ベクトルは潜堤上から水が側方区間に回り込む様子を示しており、図-4に見られる潜堤上と側方部上の水面波の位相差と関連しているものと思われる。不透過性と透過性潜堤の違いとしては当然ながら不透過性の方が潜堤上と側方部上との違いが著しく現れている。図-6は潜堤中央部平面であるので、流れは側方部から潜堤を周りこんで広がっていく様子が見てとれる。図-6(b)は透過式潜堤内部にも相当な流れがあり、これが潜堤端部での流速ベクトルの回り込みを少なくしているのがわかる。

5.2 領域を拡張した計算

前節迄の計算は実験室内の造波水槽内のシミュレーションを想定しており、実海域への応用にまでは至っていない。そこで本手法でワークステーションにより計算できる例として、領域を拡張して計算したので報告する。

本計算では計算領域を 30 m × 30 m の平面水槽とし、潜堤は水槽中央の片側に高さ 80 cm、天端幅 3 m、両法勾配 1:1 にし、波峰方向幅 15 m のものを水槽の片側に寄せて設置したと想定した。静水時水深は 1 m とし、入射

波は周期 2 s、波高 16 cm で与えた。SOLA-SURF の計算にあつては、水平方向のセル長 30 cm、鉛直方向は 6 cm、時間ステップは 0.005 s で 30 秒間計算した。図-7 はこの計算による水面変動を示したものである。図から波が潜堤上に達すると波高低減を起こしていることがわかる。また潜堤周辺では屈折ならびに回折を起こしているらしいことも見てとれる。

6. 結 論

本研究では前報に引き続いて構造物の周りの波流れ場

の数値計算手法を検討した。特に本報では三次元数値解析に焦点をあて、実海域での計算をめざして努力を重ねてきた。本報で得られた結論をまとめると以下のようである。

(1) SOLA-SURF 法による三次元波動場の流れ構造の計算手法を定式化した。

(2) 実験水槽規模の計算条件の範囲では、側壁の境界条件として、非粘性型の slip 条件とした方が水理実験結果を良く再現することができた。この理由は本計算のレイノルズ数の条件下では、側壁付近に薄い境界層が発達しているためであると考えられるが、この点の解決は将来の問題である。

(3) 潜堤が水路横断方向に半分だけ設置されている場合に潜堤が不透過性と透過性の場合について、三次元計算を行い三次元的特性を調べた。その結果、潜堤上と潜堤の無い側方区間との間における波（水面変動）特性

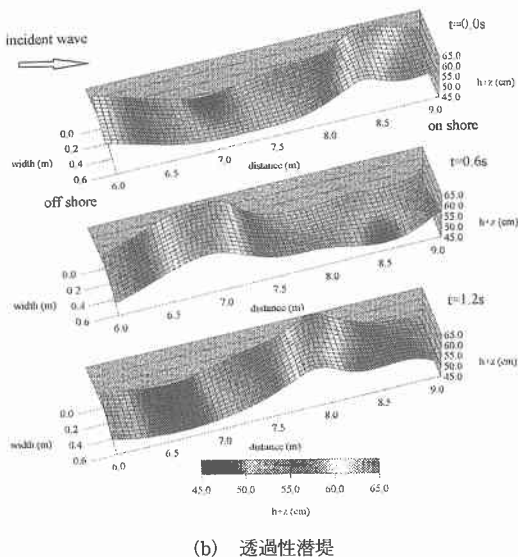
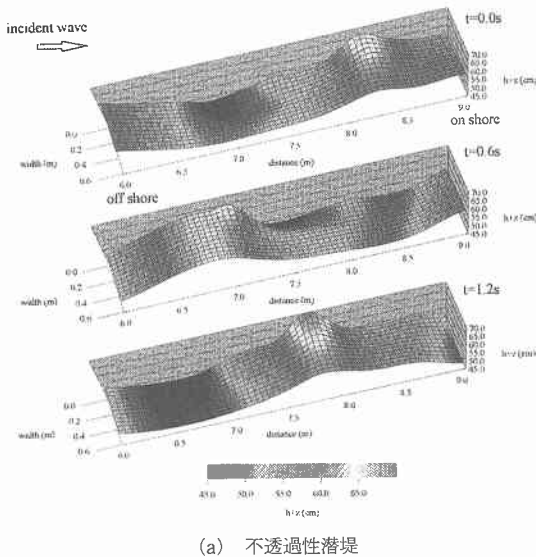


図-4 三次元計算結果：水表面変動
(潜堤位置：Y0-30 cl, X6.7-8.4 m)

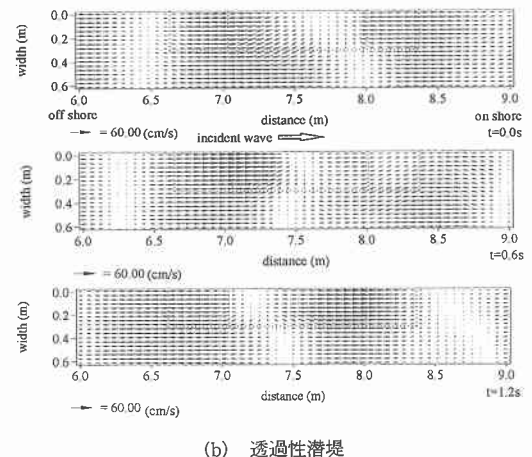
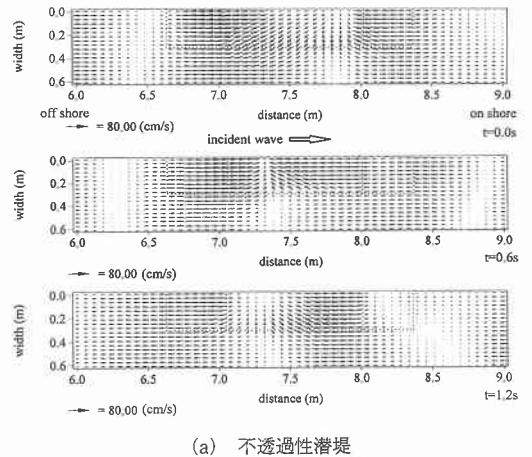
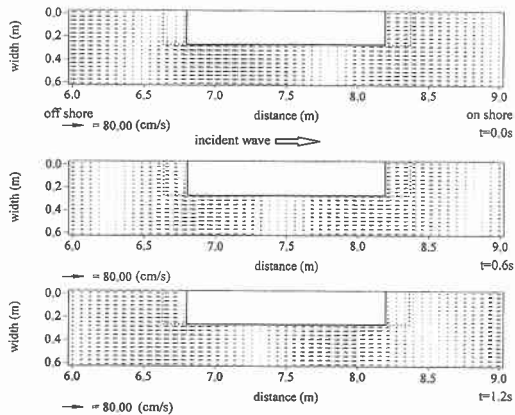
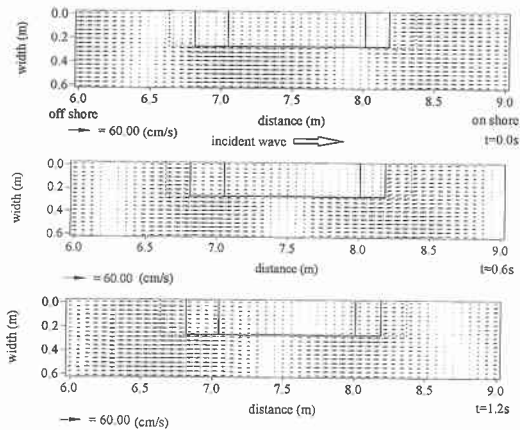


図-5 三次元計算結果：流速ベクトル平面分布
(潜堤天端上 2.5 cm 面)



(a) 不透性潜堤



(b) 透過性潜堤

図-6 三次元計算結果：流速ベクトル平面分布
(潜堤天端下 17.5 cm 面)

の相異，流速分布の偏りや周り込みなどの特徴を明らかにすることができた。

(4) 計算領域を $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ まで拡張し，その中の半分部分に潜堤を想定して三次元計算を行った。波の波高が潜堤上で低減すると共に，潜堤周辺では屈折又は回折のような変形特性が観察できることを示した。本計算は実海域規模での計算の可能性を目指したものであり，さらに大型高速の計算機を使用することにより，本法は

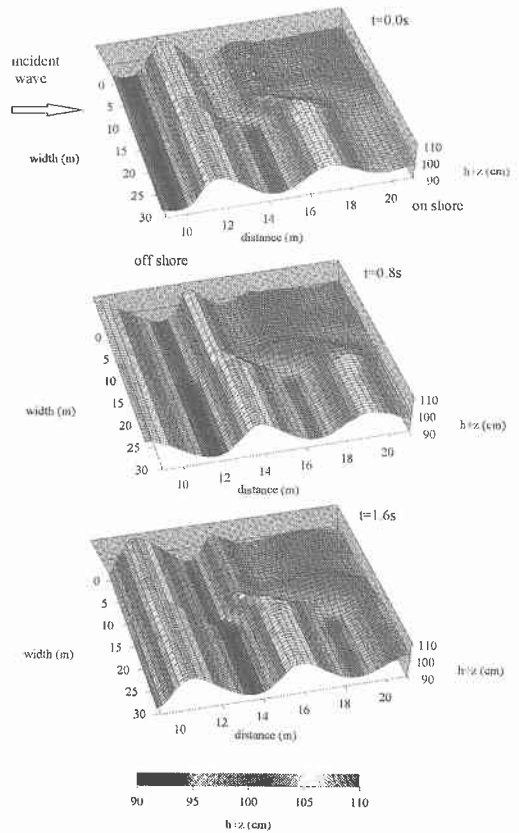


図-7 拡張した領域での計算例

十分に実海域規模の計算へ適用可能であることを示したものである。

参考文献

- 細山田得三・吉田 茂・早川典生・辻本剛三 (1997): SOLA-SUR 法による潜堤周辺波動場の数値計算, 海岸工学論文集, 44 巻, pp. 86-90.
- 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所・(財)沿岸開発技術研究センター (1996): 新潟西海岸養浜工等技術検討調査調査委託参考資料.
- Hirt, C. W., Nichols, B. D., Romero, N. C. (1975): SOLA-A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flow, Los Alamos Scientific Laboratory, LA-5852, pp. 1-50.
- Bulgarelli, U., Casulli, V., Greenspan, D. (1984): Pressure Methods for the Numerical Solution of Free surface Fluid Flows, Pineridge Press Swansea, U. K., 322 p.