

II-PS10

数値波動水槽の開発とその応用

清水建設(株)(正) 大山 巧・東京工業大学(正) 灘岡和夫

1. はじめに

著者ら^{1),2)}は先に、非線形不規則波をも取り扱える開境界処理法として、数値消波フィルターを提案するとともに、解析領域内に設定した造波ソースとの組み合わせにより、無反射造波システムを開発した。本報告では、境界要素法による非線形波動解析法にこれらを有機的に組み込んだ、いわゆる「数値波動水槽」のモデルとその特長について述べ、さらにこのモデルの応用として、潜堤による波の分裂現象について検討する。

2. 数値波動水槽のモデル

(1) 任意の非線形波を対象とした開境界処理: 図-1に示すような2次元水路内の非線形波動場をポテンシャル理論に基づいて考える。図中、 S_V は水路内に設定した任意形状物体の表面を表している。水路の両側には、スポンジ層と Sommerfeld 境界で構成された数値消波フィルター¹⁾を置き、水路内に造波ソースを鉛直に配置する(S_S)。スポンジ層は、流速に比例した減衰(μ は比例係数)を与えることにより、波をエネルギー的に吸収するもので、非線形領域まで含めた広い周期帯域の波に対して有効である。ここではさらに、流体抵抗に伴うスポンジ層前面からの反射を抑えるために、図に示されるように、 μ をスポンジ層内で線形に分布させている。また、スポンジ層背後の境界 S_2, S_4 では位相速度を $\sqrt{gh}$ とした Sommerfeld 放射条件を与えることにより、入射波に含まれる長周期成分を領域外に透過させている。これらスポンジ層と Sommerfeld 境界の組み合わせにより、非線形不規則波をも効率よく消波・吸収することができる。一方、造波ソース S_S では、発生する波に対応した強さのわき出しを与える³⁾。この場合、図-1に示されるように、同じ波が両側に進行することになるが、ソース背後(図-1では左側)に消波フィルターを配置しておけば、一方向に進行する波のみが発生できることになる。ソース上では流速を規定しているわけではないので、解析領域からの反射波はソースで再反射することなく、背後の消波フィルターにより吸収される。(2) 境界要素法による定式化: 速度ポテンシャル ϕ に関する基礎方程式は、領域内にわき出しが存在する関係で、ポアソン方程式として表される。そこで、スポンジ層を含めた流体領域を対象にグリーン公式に基づく境界積分方程式を立て、自由表面での力学的条件以外の境界条件を代入する。この際スポンジ層背後の境界 S_2, S_4 では、流速と圧力の連続性を考慮して Sommerfeld 放射条件と接続する。また、自由表面での力学的条件については、重みつき残差法に基づいた積分方程式を立てる。これらの積分方程式を線形要素を用いて空間的に離散化し、重み付き残差式については重み関数の任意性を考慮すると、最終的に各境界面でのポテンシャル ϕ 、自由表面での水面変動量 η およびこれらの時間偏微分値を未知数とする連立方程式を得る。これらを静水状態を初期条件として各時間ステップで解くことにより、流体運動の時間発展が計算できる。(3) 実験水槽との機能比較: 本数値波動水槽では砕波や渦ありの流れを取り扱うことはできないが、その反面、実験水槽に比べて以下の特長を有している。1) 実験水槽の消波装置に比べて、数値波動水槽内の開境界処理法の方が高い消波効率を得ることができ、長時間のシミュレーションが可能になる。2) 閉鎖領域内で行わざるを得ない実験水槽に対して、数値波動水槽では波の進行に伴う質量輸送速度成分も領域外に透過させることができる。3) 造波ソースからの再反射の影響はほとんどなく、実験水槽では効率が悪くなる不規則波の無反射造波をも行うことができる。これらのことから、数値波動水槽は実験水槽に比べて、より実海域の波動場に近い状況を再現できるものと言えよう。

3. 潜堤による波の分裂現象の解析

(1) 波の分裂と周期特性の変化: 潜堤や砂州などの水深急変部における波の分裂現象は、沿岸域の波浪場や海浜流場に大きな影響を及ぼすが、この現象を直接取り扱うことができる解析法が存在しなかったため、理論的にはほとんど検討されていない。ここではまず、数値波動水槽を用いて、長方形断面の潜堤に規則波が連続して入射する際の波の分裂と周期特性の変化を計算する。図-2は、 $D/h = 4.0$, $h_S/h = 0.3$ (D : 堤体幅, h_S : 堤体上の水深)の潜堤に $H_0/h = 0.1$, $\sigma^2 h/g = 0.8$ (H_0, σ : 入射波の波高と角振動数)の規則波が入射す

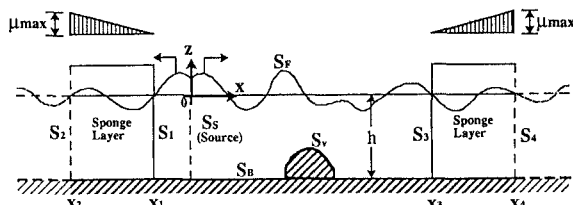


図-1 数値波動水槽における座標系と記号の定義

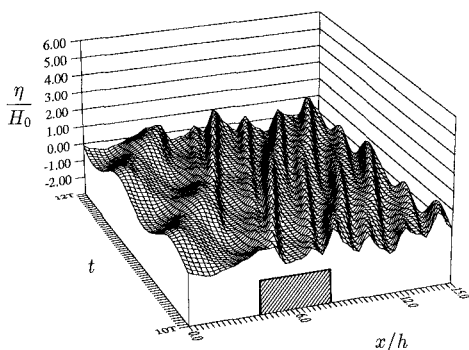


図-2 定常波動状態での時空間波形

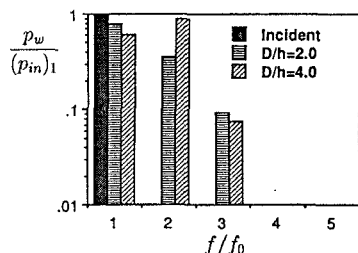
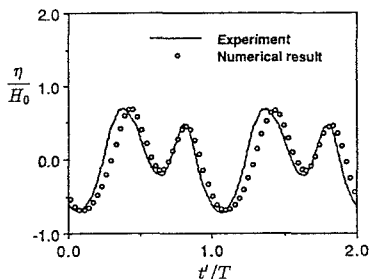
 $(D/h = 4.0, h_S/h = 0.3, H_0/h = 0.1, \sigma^2 h/g = 0.8)$


図-3 透過波のパワースペクトル

 $(h_S/h = 0.3, H_0/h = 0.1, \sigma^2 h/g = 0.8)$

図-4 透過波形に関する比較 ($\sigma^2 h/g = 0.97$)

る場合、定常波動状態が得られてからの(波を発生してから10周期後の)時空間波形を示したものである。波が潜堤上を通過する際には顕著な波峰分裂が起こり、高周波数成分の波が新たに発生することが明確に認められる。潜堤通過後の波は、複数の成分波の波速の相違により非保存波として伝播している。 $D/h = 2.0, 4.0$ の条件で、潜堤から約1波長背後の点で得られた時間波形をスペクトル解析した結果を図-3に示す。図中、横軸は透過波に含まれる各成分波の振動数 f を入射波の基本周波数 $f_0 (= \sigma/2\pi)$ で除した無次元周波数であり、縦軸は各成分波のパワースペクトルを入射波の基本周波数のパワースペクトルで除した無次元値である。入射波のパワースペクトルは、潜堤が存在しない状態での解析結果から求めたものであるが、非線形性の影響はほとんどない。これに対して、潜堤を透過する波に含まれる高周波数成分は有意な大きさのエネルギーを持ち、特に $D/h = 4.0$ の倍周波数のパワースペクトルは、基本周波数成分を大きく上回り、 $D/h = 2.0$ の場合に比べて2倍以上もの値を示している。従って、潜堤による波の変形を考える際、従来はあまり重要視されていなかった堤体幅は、透過波の周期特性を支配する重要なパラメータであると言える。(2) 模型実験との比較: 解析結果を検証するために、幅0.4m、長さ17mの水槽を用いて模型実験を行った。水深 h は25cmで一定とし、 $D/h = 4.0, h_S/h = 0.3$ の潜堤模型に、 $H_0 = 2.5$ cmで周期の異なる規則波を入射させた。透過側での時間波形に関する比較の一例を図-4に示す。実験波形、解析波形ともに、高周波数成分波の混在による波峰の分裂現象が明確に現れており、両者の一致は非常に良好である。従って、本解析モデルから得られる結果は十分に妥当であり、潜堤による周期特性の著しい変化は、実際の物理現象として起こることが確かめられた。

4. おわりに

任意の非線形波を対象とした波動解析法として、無反射造波機能を有した数値波動水槽について述べ、潜堤による波の分裂現象の解析に応用した。本数値波動水槽は、ポテンシャル流れの仮定のもとでは、実験水槽に比べてより実海域に近い状況を再現することができ、またこれまで理論的に取り扱うことができなかった非線形波動場の問題に応用できることを明らかにした。

1) 大山 巧・灘岡和夫; 海岸工学論文集, 第37巻, pp.16-20, 1990. 2) 大山 巧・灘岡和夫; 土木学会論文集, 第429号, 1991.

3) Brorsen, M. and Larsen, J.; Coastal Eng., Vol.11, pp.93-113, 1987.