

II-213

貯水池における表面波伝播シミュレーション

開発土木研究所河川研究室 正会員 村上 泰啓
北海道開発局河川管理課 正会員 中村 興一
開発土木研究所河川研究室 正会員 清水 康行

1. はじめに

ダム貯水池、湖沼、湾等の閉鎖性水域において、土砂崩壊などによって大規模波が発生し、周辺構造物に悪影響を及ぼしたり、さきわめて希にダム堤体から越波した水が下流へ被害を及ぼす場合がある。また、ゲート操作、風波などの影響でセイシュが発生し、適正な流水管理の支障になるといった問題もあり、閉鎖性水域における波の特性を推定するための簡易な数値シミュレーション手法の開発が必要となっている。こうしたシミュレーション手法の開発により、土砂崩壊による波の伝播や、風波によって発生するセイシュの予測が可能となり、閉鎖性水域における波の特性の把握が容易に行える。筆者らは、波動追跡シミュレーション手法を開発中であり、本報告では矩形ポンドにおける造波実験結果と2次元浅水流モデルによる数値計算の比較を行い手法の適用限界について考察した。

2. 造波実験

静水面に衝撃を与えて発生した波の特性を把握するため、 $5\text{m} \times 10\text{m}$ 水深 50cm のポンドを製作した。ポンド水面直上からブロック（重量 10kg , $39\text{cm} \times 19\text{cm} \times 15\text{cm}$ ）、を落下させて発生させた波の進行を捉えるため、容量式波高計による波高観測を実施した。図-1は波高計により得られた地点毎の波高の時間変化である。測点間を移動していく波頂の時間変化から、第1波の波速が約 $2(\text{m/s})$ 、 $1/2$ 波長が約 $2(\text{m})$ であり、水深波長比 (h/L) で分類される浅水波の領域であることが把握される。次に波の周波数分布特性を見るためFFTによるスペクトル解析を行ない、図-2に示した。縦軸が複素フーリエ係数の絶対値、横軸が振動数 ($1/\text{周期}$) を表わしている。データ個数は801個、サンプリング時間は0.1秒である。図によればポンドに発生した波の周波数で卓越しているのは1秒前後の領域である。また、グラフ左側に8.5, 4.5, 3.0秒といった比較的長周期のピークが見られる。周波数領域と波速の関係から、発生している波は深水波から長波にまで及んでいる。

3. 数値計算

浅水波では流速の水深方向変化が無視できないため、2次元浅水流方程式では浅水波を再現できない可能性が強い。しかし、ここでは手法の適用限界を評価するため、St.Venant型の2次元浅水流方程式を採用した。仮に周期が0.5秒までの波を再現しようとす

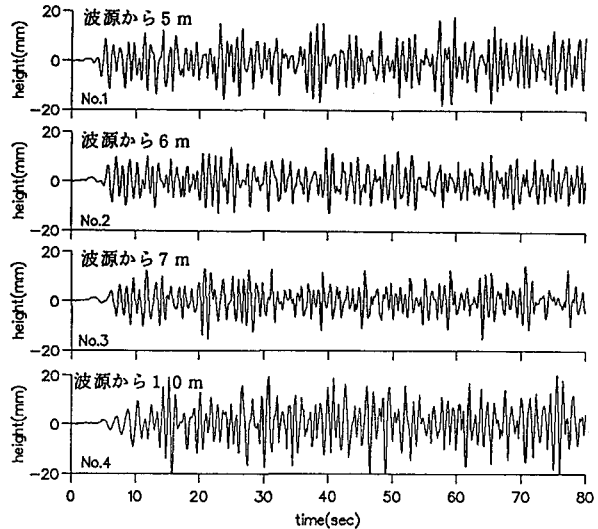


図-1 波高の時間変化

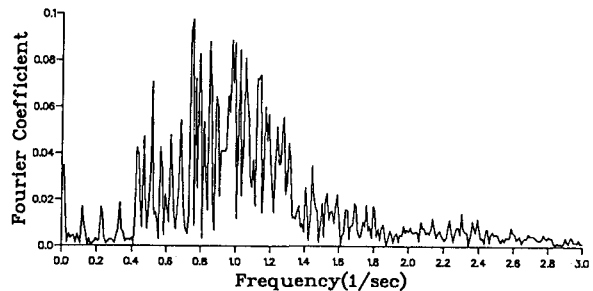


図-2 周波数分布特性（実測値）

連続の式

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

x 方向運動方程式

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = E_x \quad (2)$$

y 方向運動方程式

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial y} = E_y \quad (3)$$

ここで、

$$H = h(x, y, t), U = u(x, y, t)h(x, y, t), V = v(x, y, t)h(x, y, t), G = uvh = UV/h$$

$$F = u^2 h + \frac{1}{2} g h^2 = \frac{U^2}{h} + \frac{1}{2} g h^2, S = v^2 h + \frac{1}{2} g h^2 = \frac{V^2}{h} + \frac{1}{2} g h^2$$

$$E_x = gH(S_{ox} - S_{fx}) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \epsilon \frac{\partial(uh)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \epsilon \frac{\partial(uh)}{\partial y} \right\},$$

$$E_y = gH(S_{oy} - S_{fy}) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \epsilon \frac{\partial(vh)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \epsilon \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right\}$$

$$S_{fx} = \frac{n^2 U \sqrt{(U^2 + V^2)}}{H^{10/3}}, S_{fy} = \frac{n^2 V \sqrt{(U^2 + V^2)}}{H^{10/3}}, S_{ox} = -\frac{\partial z}{\partial x}, S_{oy} = -\frac{\partial z}{\partial y}$$

h ; 水深、 u ; x 方向の水深平均流速、 v ; y 方向の水深平均流速、 g ; 重力加速度、 S_{ox} ; x 方向の水路勾配、 S_{oy} ; y 方向の水路勾配、 S_{fx} ; x 方向の底面摩擦勾配、 S_{fy} ; y 方向の底面摩擦勾配、 ϵ ; 乱流粘性係数、 n ; マニングの粗度係数。

ると、波速を $2(m/s)$ として波長が $1(m)$ 程度の波までを再現する必要がある。計算メッシュは計算の安定性を考慮して再現する最小波長の 10 分の 1 の 10 cm とした。連続式、運動方程式を (1) ~ (3) 式に示す。

差分法には MacCormack 差分スキーム [1] を採用した。MacCormack 差分スキームは、時間依存差分法の一つで時間・空間方向に二次の精度を持っている。MacCormack 法は格子点上の値だけでスキームを記述できるメリットがあり、近年跳水を含むような河川の河床変動計算や、段波などの計算に多く用いられている。初期条件として、すべての格子点に水深 50 cm を与え、ブロック重量に相当する水柱をブロック投下箇所を与えた。壁面の条件として、もう 1 メッシュ外郭に仮想格子点を考え、壁面の水位は仮想格子点と壁面の 1 つ手前の格子点で求めるようにした。このとき、仮想格子点には入射してくる波の u, v に対し鏡面の条件で流速を与えた。

4. 計算結果

図-3は波動の伝播を時間を追ってプロットしたものである。水面に衝撃が加えられた時の波の伝播の傾向は定性的に表現されている。図-4は実験ポンドの測点 No.4 に対応する計算ポイントでの水位の時間変化のうち、最初の 2.0 秒間を実測値と併せてプロットしたものである。実測値の第 1 波の立ち上がり点は計算値において良く適合しているが、傾向としては波長、波高などが異なっており、現象をうまく再現していない。また、実測値は 1.5 秒前後で大きく重複した波が出ているが計算値では第 1 波付近が最も大きく、時間の経過とともに波高が低減している。図-5は測点 4 に相当する点の計算結果の周波数分布特性を実測値と併せてプロットしてある。比較的長周期の部分では適合性が高いが、実測値で卓越している 1 秒付近の周波数の適合性が良くない。

5. おわりに

ここでは 2 次元浅水方程式を用い、MacCormack 法による差分法を用いた水面波の発生と伝播のシミュレーションを試みた。計算で表現可能な波は計算時間やメッシュのサイズに依存し、非常に細かい周期の波まで再現しようとする計算時間が数秒に増大し実用的ではない。このため実測データによる波の周波数解析を行い、再現しようとする最小の周期の波を決定し、その波長から計算メッシュを決定した。計算条件として実験で投下したブロック相当重量の水柱を与えた。計算結果の周波数特性を比較すると、数秒オーダーの長周期成分が実測と良く適合しており、周期の短い成分については適合度が低い。同一箇所の波高を実測値と計算値で比較すると、観測結果とは伝播特性が明らかに異なっており、2 次元浅水流モデルでは限界があることが理解された。今後は、水深方向の縦横断方向流速変化を考慮可能な 3 次元モデルについて検討を加える予定である。

6. 参考文献 [1] 日本機械学会編：流れ数値シミュレーション、コロナ社、1988

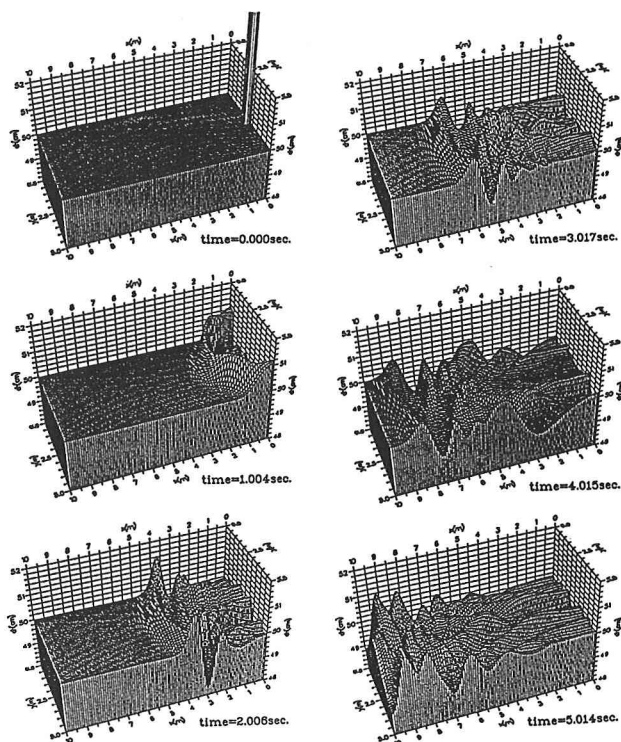


図-3 波高伝播計算結果

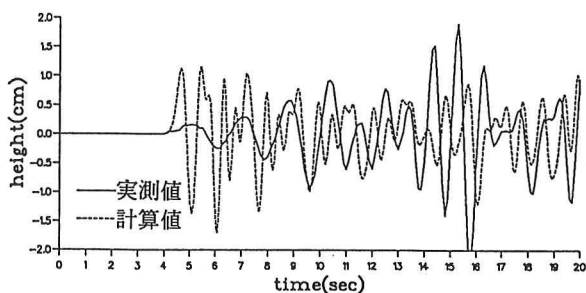


図-4 波高時間変化の比較

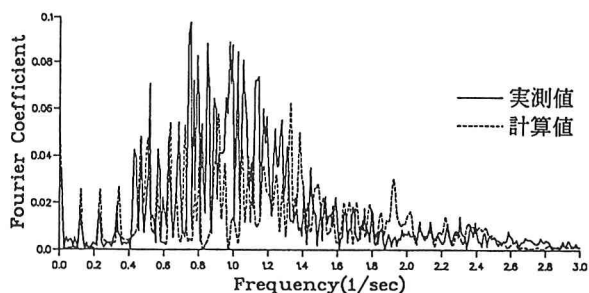


図-5 周波数分布の比較