II-381　防波堤における水平方向の波圧分布のシミュレーション

大林組　技術研究所　正員　津久井啓介

1．はじめに

防波堤を設計する際、当然ながら波圧算定は最も重要である。わが国の場合ほとんどが混成堤であり、転倒モーメントの算定のため揚圧力の算定も非常に重要であるが、今回は主に水平方向の波圧のみを対象とした。

波圧算定の公式としては古くは広井公式、サンフルー公式などがある。マウンド付きの混成堤に関してはミニキン公式や合田公式がある。広井公式は直立壁の前面に波高に比例して一様に波圧が作用するものと考えるもので、その圧力強度は$p = 1.5\, w_0 H$で表わせられる。w_0は海水の単位体積重量（1.03 t/m）、Hは来襲波の波高(m)である。その後発表されたサンフルー公式はトコロイド理論による計算法である。これは台形分布を考え、平均水面での波圧をp_1、水底でp_2、波圧の及ぶ範囲を平均水面より上$H+\delta_0$までとする。ここでp_1、p_2はそれぞれ$(p_2 + w_0 h)((H+\delta_0)/(h+H+d_0))$、$(w_0 H)/(\cosh(2\pi h/L))$であり、$\delta_0 = (\pi H2/L)\cosh(2\pi h/L)$である。

本研究では防波堤にかかる波圧の算定を数値シミュレーションで行い、垂直壁に働く水平方向の波圧の分布の算定などからその可能性を探った。流体は完全流体とし、境界要素法を用いた。また、越波／砕波はしないものとした。この条件では広井／サンフルー公式が適合すると考えられる。

2．境界要素法による波圧算定

図1のような2次元領域を考える。ここで流体を非圧縮の完全流体とすると、速度ポテンシャルの存在が保証され、その支配方程式は

$$\nabla^2\Phi = 0 \qquad \text{in } \Omega \quad (1)$$

なるLaplace方程式になる。なおΦは全速度ポテンシャルである。造波仮想境界及び水底／防波堤の境界条件は、

$$\frac{\partial\Phi}{\partial n} = v\cdot n \qquad \text{on } S_A \quad (2)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial n} = 0 \qquad \text{on } S_B,\ S_{BW} \quad (3)$$

となる。vは仮想境界での運動速度、nは法線ベクトルである。自由表面の条件は、運動学・力学的条件から、

$$\frac{\partial\Phi}{\partial z} - \frac{\partial\eta}{\partial t} - \frac{\partial\Phi}{\partial x}\frac{\partial\eta}{\partial x} = 0 \qquad \text{on } S_F \quad (4)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2}(\nabla\Phi)^2 = 0 \qquad \text{on } S_F \quad (5)$$

となる。ここにηは$z = \eta(x, y)$を満足する自由表面変位である。各時におけるΦとηを時間項でTaylor展開し、高次の項を無視し、それに自由表面条件を代入すると、

$$\eta_{t+\Delta t} = \eta_{t-\Delta t} + 2\Delta t\left\{\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right\}_t \quad (6)$$

$$\Phi_{t+\Delta t} = \Phi_{t-\Delta t} + 2\Delta t\left\{-g\eta + \frac{1}{2}(\nabla\Phi)^2\right\}_t \quad (7)$$

となり、(8)式を計算して(9)式に代入すれば自由表面上のΦが逐次求められる（時間増分法）。以上で各時の流場を各境界条件から境界要素法によって解析できる。全速度ポテンシャルが求っているので、波圧は以下のように求めることができる。

$$p = -\rho\frac{\partial\Phi}{\partial t} - \frac{1}{2}\rho(\nabla\Phi)^2 - \rho g z \quad (8)$$

このシミュレーションの流れを図2に示す。

３．計算結果及び考察

シミュレーションによる結果では、波高に対する最大の圧力強度(p/H)は１００３ kg/m^3であった。広井の式では1.5x1030であるから、１５４５ kg/m^3である。このことから、シミュレーションの方が過小に評価するとも言えるが、もともと広井の公式では安全値を取ってあり、当然の結果とも言える。また今回のシミュレーションでは規則波であり、そのあたりも関係していると思われる。

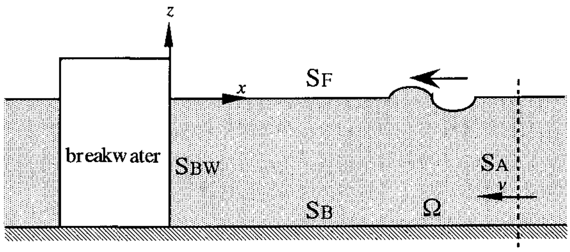

図１．計算領域

合田らはサンフルー式の第４次近似解を求め、実験値と比較して良好な結果を得ている。このときと同じ条件で数値シミュレーションを行い、サンフルーの理論値と比較した。水深７０ｃｍ、周期２．９１秒、波高３４ｃｍのときの波峰時圧力を求めた。結果を図３に示す。

この結果を見てみると、波圧はほぼサンフルーの理論値通りの値を示している。やや全体的に直線的（圧力一定）な結果になっているが、傾向はほぼ同じと考えられる。ただ平均水面位置での圧力が最高値を示さず、１０cmほど上部で最大値を示している。

直線的である理由は、造波境界であるSAで波を発生させるとき、上下一定の速度で動かすピストン式造波を行っているためだと思われる。これは平均水面より上を見たとき、平均水面以下より直線的でなく傾向が出ている。

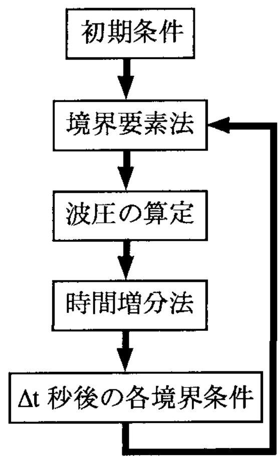

図２．シミュレーション

４．まとめ

このシミュレーターが完成すれば、重複波のシミュレーションはもちろん、非線形成分を含む２成分波、不規則波を受けたときの逐次の波圧変化などを解析することができる。特に多成分の場合、波と防波堤、もしくは波自身の相互作用によって思わぬ力が生じることが十分考察される。

シミュレーションには境界要素法を用いているので、砕波・越波を計算できない。しかしながら砕波圧は波の持つ運動量が衝撃力に変換されたものであると解釈すれば、境界要素法にて波を計算し、砕波限界を越えたときそこで砕波すると仮定してそのときの波のエネルギーから砕波衝撃圧を求めてシミュレートすることはできるであろう。しかしどちらにしろ越波をシミュレートすることは難しい。

将来的にはMarker & CellやVOF法を利用して砕波・越波までを計算できるようにしていく。

また今回は揚圧力については考察しなかったが、これについても今後の課題である。

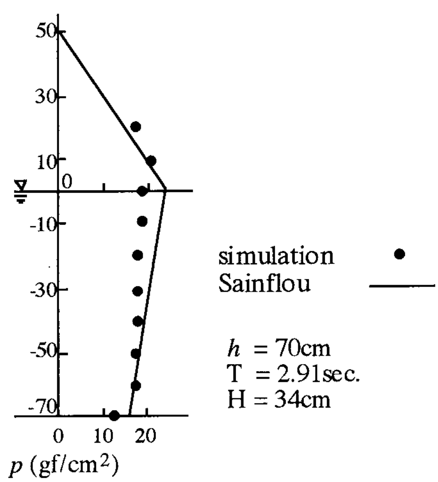

図３．波圧分布

<<参考文献>>

１）合田良實「防波堤の設計波圧に関する研究」港湾技研報告第12巻第3号、1973
２）合田良實「港湾構造物の耐波設計（増補改訂版）」鹿島出版会、1990
３）堀川清司「海岸工学（新編）」東京大学出版会、1991
４）津久井啓介、増田光一「数値波動水槽及び画像処理に関する研究」建築学会大会梗概集、pp.873-874, 1988