

II-405

収れん水路を有する斜面堤の越波量計算

清水建設(株)技術開発センター 正員 萩原運弘

1. はじめに

近年、水質の浄化やエネルギー獲得のために積極的に越波による流れを利用しようとするのが注目されている。岸から沖に向けてV字型に開口する収れん水路を有する斜面堤は、遡上波の波高を増幅させ、より多くの越波量を獲得できる構造形状として期待される。これまでの越波量に関する数多くの研究は主として実験的なアプローチにより行われてきたが、最近、収れん水路のない二次元の一樣斜面に対しては数値モデルも提案されている(Kobayashi et al. (1989), 山本(1991), 萩原(1993))。本研究は、三次元な収れん水路を有する斜面堤に対して越波量算定モデルを構築し、数値計算によって越波特性を調べたものである。

2. 特性曲線法を用いた計算モデル

図-1に示されるように、斜面傾斜角 θ 、天端高 h_e 、収れん水路入口幅 B_i 、出口幅 B の斜面堤を対象とし、斜面方向に x' 軸、斜面の法線方向に y' 軸、斜面に直角上向きに z 軸をとる。二次元非線形長波方程式において、水底から水面まで積分し、各変数を沖側端の静水深 h_0 で無次元化すると、運動方程式および連続式は次のように無次元表示される。

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} + h \frac{\partial h}{\partial x} + h + f|u|u = 0 \quad \dots (1)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} + h \frac{\partial h}{\partial y} + f|v|v = 0 \quad \dots (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad \dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} h &= h' \cos \theta / h_0, \quad t = t' \sin \theta \sqrt{g/h_0}, \\ x &= x' \sin \theta / h_0, \quad y = y' \cos \theta / h_0, \\ u &= u' / \sqrt{gh_0}, \quad v = v' / \sqrt{gh_0}, \\ f &= f' / 2 \tan \theta \end{aligned} \right\} \quad \dots (4)$$

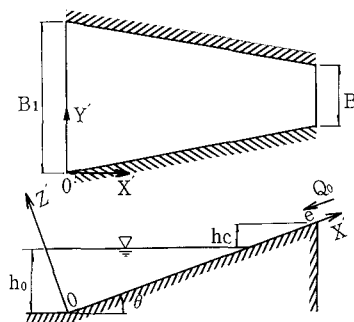


図-1 座標系

ここに、 t' : 時間、 h' : 水面からの水深、 u' : 水深方向に平均した x' 軸方向の流速、 v' : 水深方向に平均した y' 軸方向の流速、 θ : 斜面の傾斜角、 g : 重力の加速度、 f' : 底面摩擦係数である。従来、特性曲線法による差分式の誘導にあたっては研究者によって様々な方法が議論されている(Lai(1976), Matsoukis(1989))。式(1)~式(3)は次のように特性曲線表示される。すなわち、陪特性曲線式(5)、(6)の上で、特性方程式(7)が成立する。

$$\frac{dx}{dt} = u + c \cdot \cos \phi \quad \dots (5), \quad \frac{dy}{dt} = v + c \cdot \sin \phi \quad \dots (6)$$

$$\frac{1}{c} \cdot \frac{dh}{dt} + \cos \phi \frac{du}{dt} + \sin \phi \frac{dv}{dt} + c \cdot Fr + \cos \phi + Fx + Fy = 0 \quad \dots (7)$$

ここに、 $c = \sqrt{h}$, $Fr = \sin^2 \phi (\partial u / \partial x) - \sin \phi \cos \phi (\partial u / \partial y + \partial v / \partial x) + \cos^2 \phi (\partial v / \partial y)$, $Fx = f|u|u \cos \phi / h$, $Fy = f|v|v \sin \phi / h$ である。また、 ϕ は図-2に示されるように、反時計回りにとられる Parametric Angleである。流線は式(8)で表され、また連続式は式(9)のようになる。

$$\frac{dx}{dt} = u, \quad \frac{dy}{dt} = v \quad \dots (8), \quad \frac{dh}{dt} = -h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad \dots (9)$$

図-2において、 $t + \Delta t$ 時刻の点Pの未知量 u 、 v および h を得るためには、 $\phi = 0, \pi/2, \pi$ および $3\pi/2$ での陪特性曲線と特性方程式さらに流線と連続式に対して、計算済みの t 時刻における内挿点①～⑤から点Pに至る定積分を実施すればよい。計算では、水面から上の斜面にも微小な水深を確保するため岸側端から単位時間、単位幅あたり仮想流量 Q_0 を与えるものとし、初期条件は仮想流量 Q_0 を流したときの不等流計算により求めた水深および流速とした。沖側境界では、次式的水深を与えた。

$$h = 1 + \xi_i(t) + \xi_r(t) \cdots (10)$$

ここに、 ξ_i 、 ξ_r は沖側端での無次元化された入射波、反射波の時間波形である。一方、岸側境界では次のように考えた。越

波が常流状態の場合には $h_{e,i} = h_{e,i-1}$ と与え、 u_e 、 v_e を $\phi = \pi$ を除いた3本の陪特性曲線を用いて計算する。ここに、 $h_{e,i-1}$ は境界端の一つ内側の格子点での水深である。また、越波が射流状態にあるときには4本の陪特性曲線が存在するので特別の処理は行わない。越波がない場合は流速を $u_e = -Q_0/h_e$ とする。一方、側方は閉境界であるので $v = 0$ とした。越波量 Q は、流量フラックス $u_e h_e$ の時間変動より計算する。

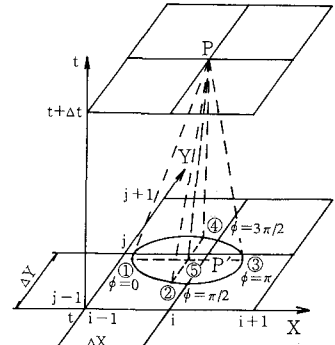


図-2 差分スキーム

3. 計算結果

図-3は越波量に及ぼす取れん効果の影響を調べるために、 $h_0/L = 0.046$ 、 $h_c/h_0 = 0.65$ 、 $\theta = 20.5^\circ$ 、 $f' = 0.006$ の一定条件に対して越波量の増加割合 Q/Q_1 と取れん比 B/B_1 の関係を、天端高波高比 h_c/H をパラメータとして示したものである。ここに、 Q_1 は取れん水路のない場合の越波量である。天端高波高比 h_c/H が小さく越波しやすい場合には取れん効果はあまり期待できないが、波高が小さく越波しにくい h_c/H が大きい場合には、 $B/B_1 = 0.5$ 程度の取れん水路を設置することによって、より多くの越波量獲得が期待できる。図-4は越波量に及ぼす斜面の傾斜角の影響を調べるために、 $h_0/L = 0.046$ 、 $h_c/H = 1.3$ 、 $f' = 0.006$ の場合について越波量 $Q_\theta = Q/\cos\theta \sin\theta$ と傾斜角 θ の関係を、取れん比 B/B_1 をパラメータとして示した。いずれの B/B_1 に対しても $\theta = 25^\circ$ 程度で越波量は最大となる。

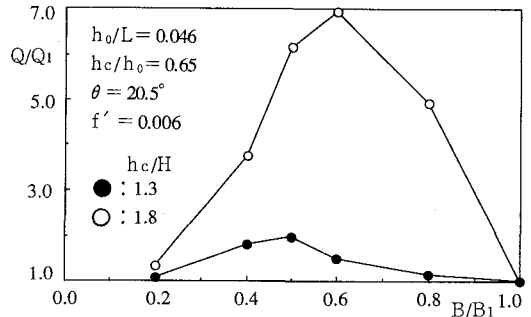


図-3 越波量に及ぼす取れん効果の影響

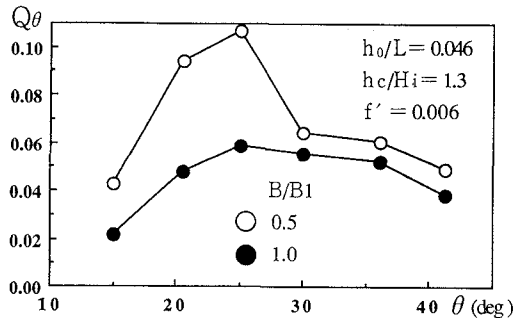


図-4 越波量に及ぼす傾斜角の影響

4. おわりに

有限振幅長波理論を特性曲線法により数値的に解く一次元流れの越波量計算を、三次元構造形状である取れん水路を有する斜面堤に対する二次元平面流れに拡張した。一次元流れの場合と異なり、二次元平面流れでは特性曲線理論が極めて複雑になるが、基礎式的特性曲線による表示は比較的容易に導かれる。また様々な差分法が可能であるので、これらについては今後検討する必要がある。

参考文献：Kobayashi et al. (1989), ASCE., 山本ら (1991), 海工論文集, 萩原 (1993), 海工論文集, Lai (1976), Proc. Int. Symp. Unsteady Flow Open Channel., Matsoukis (1992), ASCE.