II-289 保存則系差分法を用いた漸縮水路における交差波を含む流況の計算

㈱日水コン 正 員○潮田智道
岐阜大学 正 員 河村三郎

1. はじめに 近年、山地丘陵部の保全・利用が積極的に進められるようになり、親水機能や景観性、生態系に配慮した、各種の水理構造物が提案されるようになってきた。中でも、これまで、水理学的に、不適当であるとして採用されなかった堰形状や側岸形状が見直されるようになってきたばかりではなく、天然の河床・側岸形状を尊重することも、水系管理を考える上で重要な要素と成りつつある。さらに、景観性の創出という観点からすれば、水面形状が複雑な流況を積極的に創出することにより、流れの変化を楽しむことが必要となる。そのためには、交差波発生による水面形状のパターンを把握することにより、要求される水面擾乱を自由自在に生じさせるためのノウハウの確立が必要となる。従って、いかなる条件のもとであれば、人工的に交差波を発生させることができ、それらの複合された水面模様がいかに形成されるのかを知ることは重要である。ここではその第一歩として制御の対象となる交差波の発生が予想されるケースとして、漸縮水路の形状としては、最も簡単な場合を利用し、水路漸縮部による交差波を伴う水面形を保存則系差分法[1)]を活用して流況を再現し、その支配法則の確立のための手掛かりを得る手法としての有効性を検討する。

2. 水路の概要 図－1に示すように、流入端0.30m、流出端0.15mの右岸に直線の側岸を、左岸に漸縮する側岸を有する水路を使用する。この水路の特色は、曲率半径R＝1.700mを有する一定曲率の円弧側岸を0・500mのところで滑らかに接続し、1.000mの所で直線水路に接続しているのが特色である 一方の側岸を直線状の側岸とする水路は、その側岸を対象軸とする左右対称の水路の片側を表しているものと解釈することが可能となる場合がある。それは、カルマン渦のような、非対称現象が生じない場合に限定されるが、高速流を対象とする場合、非対称現象が生じないと予想されるため、水路片側のみを計算対象領域として限定することにより、計算時間の節約を図ることが出来る。もとより、本計算では、高速流を対象としているため、拡散の効果は、著しくないと考え、計算の効率性を優先して、拡散項を無視することにする。

3. 支配方程式 保存則形の連続式及び運動方程式は、

$$U_t + E_x + F_y = C \tag{1}$$

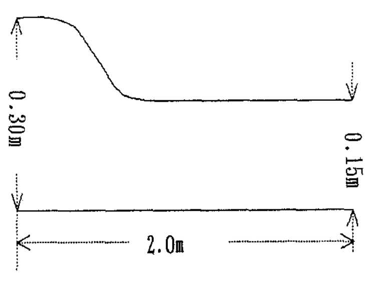
を採用する。ただし、

$$U=\begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix}, E=\begin{bmatrix} q_x \\ uq_x+p \\ uq_y \end{bmatrix}, F=\begin{bmatrix} q_y \\ vq_x \\ vq_y+p \end{bmatrix} \quad C=\begin{bmatrix} 0 \\ gh(i_{0x}-I_{fx}) \\ gh(i_{0y}-I_{fy}) \end{bmatrix} \tag{2}$$

そして、仮定①②を考慮する。従って、

$$p=\frac{1}{2}gh^2 \quad , \quad I_{fx}=\frac{n^2u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} \quad , \quad I_{fy}=\frac{n^2v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} \tag{3}$$

n: Manningの粗度係数。



図－1 漸縮水路

仮定：①流線の湾曲の影響を考慮せず、静水圧分布を仮定する。②底面剪断力は等流状態の乱流粗面水路において成立するManningの平均流速公式により考慮する。

4. 座標変換 実際の地形は不規則で湾曲部などを含んでいる。そこで、境界形状の不規則性のため格子点が境界に載らない場合、座標軸が境界に密着したもの（body-fitting coordinate） となるような一般曲線座標への座標変換(ミャッピング)を使用することによって対応する。例えば、中心軸に対して左右対称な水路の場合、拡散の影響が無視できるような高速流を対象とするならば、対称性により水路片側のみの計算を行うだけで十分であると考えることができる。そこで、ミャッピングの写像関数を

$$\xi = x、\eta = y / g(x) \quad (4)$$

とする。ここで、$g(x)$は、xにおける中心線から上側の境界までの距離である。この変換を行う場合、物理平面には、非直交格子が形成され、側岸形状の漸縮率が大きい場合、部分的に格子形状の変化が著しくなる場合がある。この場合、ξ_x、ξ_y、η_x、η_yは、

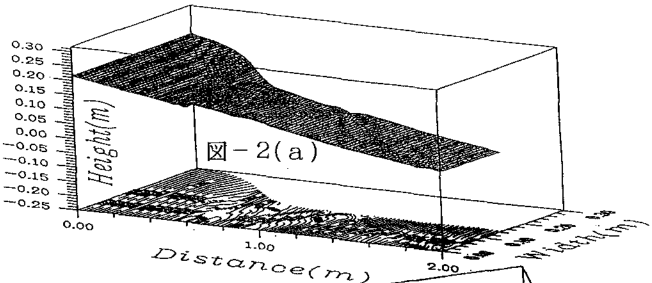
$$\xi_x = 1 \quad , \xi_y = 0 \ ,$$
$$\eta_x = -y g'(x) / g(x)^2 \ , \quad (5)$$
$$\eta_y = 1 / g(x)$$

となる。支配方程式(1)と等価な、変数ξ、η を独立変数とする計算平面に関する支配方程式は、

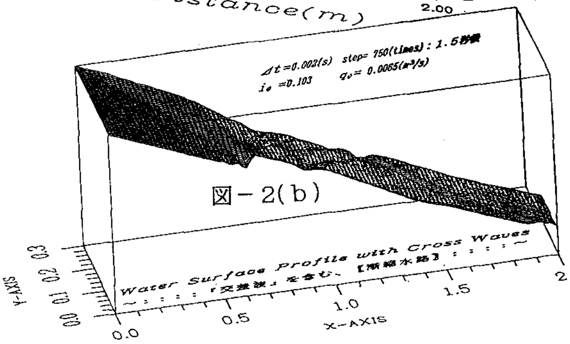
$$\hat{q}_t + \hat{F}_\xi + \hat{G}_\eta = 0 \qquad (6)$$

となる。上式はt、ξ、ηに関する保存則形の支配方程式である　ただし、

$$\hat{q} = \frac{q}{J}, \quad \hat{F} = \frac{\xi_x F + \xi_y G}{J}, \quad \hat{G} = \frac{\eta_x F + \eta_y G}{J}, \quad \hat{S} = \frac{S}{J} \quad (7)$$



図－２(ａ)



図－２(ｂ)

５．計算結果　式(6)に保存則系差分法の一つであるMacCormack法を適用した計算結果の水面形を、俯瞰図で表す。中心線においては、側岸の漸縮による中心線方向への流速成分の発生によるものと考えられる水位の上昇及び水面形の急峻化が生じている。このことから側岸における形状の変化のみの影響による衝撃波の発生を捉えることが出来ることが明らかとなった。図－２(ａ)及び図－２(ｂ)は、本計算の俯角を変えた俯瞰図を示している。図より、側岸の影響による水位上昇は、側岸から水路中央部に至るにつれて、水面勾配の急峻化が顕著になっていることが確認される。従って、次のことが理解できる。側岸の漸縮の影響により、水路中央へ向かう流速成分が発生し、そして、その流速成分が中央線に到達すると反射を生じ、側岸方向へ向かう流れを生ずる。そして、その流れが再び反射を起こし、そしてこれが繰り返されている。

６．おわりに　交差波の数値計算については、若干の研究例[2),3)]があるが、本研究で用いる方法は、一般曲線座標に対する浅水流方程式をMacCormack法により差分化し時間進行法により解析したものである。計算結果より、本手法は、一定の計算ケースに対しては、解析しうることがわかった。しかしながら、安定性及び、精度の検討に対しては、依然、未解明のままである。従って、今後、精度、安定性の向上を図る必要があると考えられる。また、一般曲線座標における浅水流に対する解析は、多くの研究者によってなされており、段落ちの影響による跳水を含むケースの計算も行われている。しかしながら、本研究は、勾配が一定で、側岸の漸縮のみの影響により、一次元解析法では十分対応できないケース、すなわち、跳水の一種である交差波の発生するケースについて、時間進行法により解析を行っている点に特色がある。本研究では、交差波の水理学的特性の解明に使用可能な解析法として、浅水流方程式を保存則系差分法で解析する方法が有望であることを明らかにしたが、その物理的特性やエネルギー減殺効果などを明らかにするには至っていない。今後、これらを解明することにより、防災及び景観性の創出に役立つものと思われる。

参考文献:1)日本機会学会編:流れの数値ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ,pp.117-118,ｺﾛﾅ社,1988.
2)Oscar F.Jimenez, and M.Hanif Chandhry : Computation of Supercritical Free-Surface Flows; ASCE Vol.114,No.4,(Apr.1986).
3)岩佐義朗,細田尚:漸縮水路の高速流に関する数値解析;京都大学防災研究所年報,第32号,B-2(1989)