

高水数と堤防法面における植生の耐侵食効果

金沢大学工学部 正 員 辻本哲郎
金沢大学工学部 ○ 大迫裕美

1. まえがき

近年の河川整備は、治水、利水、環境機能のいずれも損なわないことを目的に進められつつある。こうした動きの中、高水数と堤防法面を植生で覆うことによってどれほどの耐侵食効果があるかを検討することは、環境機能と治水機能を両立させる上で意義のあることと思われる。本研究では、高水数、堤防法面などを含む複雑な断面形状を取り扱い、植生条件、水理条件を変えた様々な流れについての疑似等流3次元解析に基づいて植生による耐侵食効果を評価し、「植生堤防」を設計する上での指針を検討したい。

2. 植生を伴う流れの計算

高水数、堤防法面上に植生を伴う複断面水路での流れを再現するにあたり、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた数値計算を行った。植生の効果は、 $k-\epsilon$ 乱流モデルの支配方程式に形状抵抗項を付加することにより取り入れられる。一般に、数値解析をする上では有次元で取り扱う方が物理量の変化を観察するのには都合が良い。しかし、今回の数値解析では重要視される物理量の多くが次元を持っており、支配方程式が多数となる。よってここでは、速度スケールを断面平均流速 U_m 、長さスケールを水深 h で無次元化して計算を行うこととし、結果を有次元に戻すことにより物理的具體性を持たせて評価する方法をとった。無次元化された支配方程式を一般形保存式の形でまとめたものを表1に示す。

計算するにあたって断面の設定が必要となるが、高水数と堤防法面を含む断面形状は複雑なものとなる。よって図1に示すように高水数と堤防法面を切り離して別個の断面として想定し、簡略化を図った。

3. 植生による高水数、堤防法面の耐侵食能の評価

まず、計算結果より水深 h と流量 Q の関係を求めると図4の上段のようになる。 $h-Q$ 図の求め方は以下の通りである。

- (1) 計算結果より得られた無次元圧力勾配 dP^*/dX^* を次式のように変換する。

$$\frac{dP^*}{dX^*} = \frac{h}{\rho U_m^2} \frac{dP}{dX} = \frac{h}{\rho U_m^2} \rho g I_e = \frac{g h I_e}{U_m^2} = \left(\frac{u_*^*}{U_m} \right)^2$$

- (2) $\frac{dP^*}{dX^*} = \frac{g h I_e}{U_m^2}$ に I_e を与えることにより U_m を求め、断面積をかけて流量 Q を得る。

- (3) 水深 h を変えて数値計算を行い、上述の方法でそれぞれの水深に対応する流量を求める。

次に、計算結果から得られたレイノルズ応力分布の底面への外挿値で無次元掃流力 $\tau_*^* = \rho u_*^{*2}$ を見積り、流量との関係を示したのが図4の下段である。下段の図の縦軸は掃流力を表すが、同時にその掃流力を限界掃流力とする砂粒の粒径を併示した。耐侵食能の横断方向評価点は、最も侵食の危険性があると考えられる高水数、堤防法面のエッジ部分を選んだ。図2に計算断面寸法と耐侵食能の横断方向評価

表1 $k-\epsilon$ モデルの無次元化された支配方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho U^*) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\rho U^* - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y^*} \right) + \frac{\partial}{\partial z^*} \left(\rho W^* - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z^*} \right) = S_p \\ & \phi \quad \Gamma \quad S_p \\ U-eq \quad U^* \quad v_i^* + \frac{1}{R_e} \quad & - \frac{dP^*}{dx^*} - \frac{2}{3} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^{*2}} - F_x^* + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(v_i^* \frac{\partial v_i^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(v_i^* \frac{\partial W^*}{\partial x^*} \right) \\ V-eq \quad V^* \quad v_i^* + \frac{1}{R_e} \quad & - \frac{\partial P^*}{\partial y^*} - F_y^* + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(v_i^* \frac{\partial v_i^*}{\partial y^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(v_i^* \frac{\partial W^*}{\partial y^*} \right) \\ W-eq \quad W^* \quad v_i^* + \frac{1}{R_e} \quad & - \frac{\partial P^*}{\partial z^*} - F_z^* + \frac{\partial}{\partial z^*} \left(v_i^* \frac{\partial v_i^*}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial z^*} \left(v_i^* \frac{\partial W^*}{\partial z^*} \right) \\ k-eq \quad k^* \quad \frac{v_i^*}{\sigma_k} + \frac{1}{R_e} \quad & P_k^* - \epsilon^* + C_{k1} (U^* F_x^* + V^* F_y^* + W^* F_z^*) \\ \epsilon-eq \quad \epsilon^* \quad \frac{v_i^*}{\sigma_\epsilon} + \frac{1}{R_e} \quad & \frac{\epsilon^*}{k^*} \left[C_{\epsilon 1} P_k^* + C_{\epsilon 2} (U^* F_x^* + V^* F_y^* + W^* F_z^*) \right] - C_{\epsilon 3} \epsilon^* \\ P_k^* = v_i^* \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial U^*}{\partial x^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial V^*}{\partial y^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial W^*}{\partial z^*} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial U^*}{\partial y^*} + \frac{\partial V^*}{\partial x^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial U^*}{\partial z^*} + \frac{\partial W^*}{\partial x^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial V^*}{\partial z^*} + \frac{\partial W^*}{\partial y^*} \right)^2 \right\} \\ v_i^* = C_\mu \frac{k^{*2}}{\epsilon^*} : Re = \frac{U_m h}{\nu} : x^* = x/h : y^* = y/h : z^* = z/h : P^* = P/\rho U_m^2 \\ U^* = U/U_m : V^* = V/U_m : W^* = W/U_m : k^* = k/U_m^2 : \epsilon^* = \epsilon h/U_m^3 \\ F_x^* = -\frac{1}{2} C_D \frac{h}{l_0} \Omega^* \sin \theta \sin \phi : F_y^* = -\frac{1}{2} C_D \frac{h}{l_0} \Omega^* \sin \theta \cos \phi : F_z^* = -\frac{1}{2} C_D \frac{h}{l_0} \Omega^* \cos \theta \sin \phi \\ \Omega^* = (U \sin \theta \sin \phi - V \sin \theta \cos \phi - W \cos \theta \sin \phi) \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \end{aligned}$$

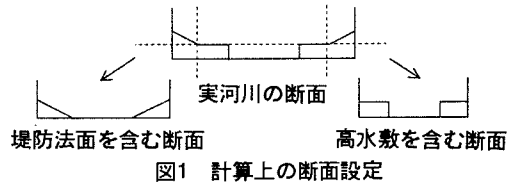


図1 計算上の断面設定

点を示す。限界掃流力については、高水敷の底面が平坦であるのに対し、堤防法面は横断勾配を有するので、高水敷については岩垣式¹⁾を適用し、堤防法面については横断勾配を θ とした次式 $u_{*c\theta}^2 = K(\theta)u_{*c}^2$ を用いて評価した。ここで、 $u_{*c\theta}^2$ は横断勾配が θ の砂面上の無次元限界掃流力、 u_{*c}^2 は平坦河床の場合の無次元限界掃流力、 $K(\theta)$ は横断勾配 θ 、流れの方向と水路方向との角度 γ 、揚力抗力比 $k_L = D/L$ の3つの要素に影響を受ける係数である。ここでは簡単のため $\gamma = 0$ 、 $k_L = 0$ とした。図3に中川ら²⁾による $K(\theta)$ の計算結果を示す。今回は、高水敷と堤防法面のそれぞれの場合について、植生高さ VH 、植生密度 λ 、エネルギー勾配 I_e の3つの条件による比較を行った。この図から、例えば高水敷において植生高さ2cm、植生密度 0.05cm^{-2} 、エネルギー勾配 0.002 のとき、約 $13000\text{cm}^3/\text{s}$ の流量では 0.05mm 程度の砂まで移動しないというようなことが評価できる。また、系統的な評価として、植生高さが高いほど、植生密度が大きいほど、そしてエネルギー勾配が小さいほど掃流力が低減し、耐侵食効果が期待できる。

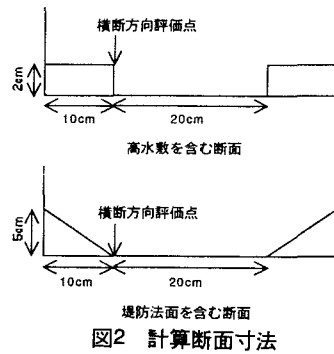


図2 計算断面寸法

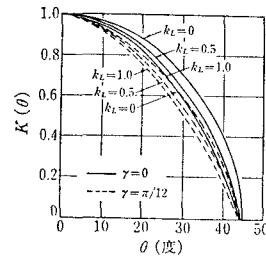
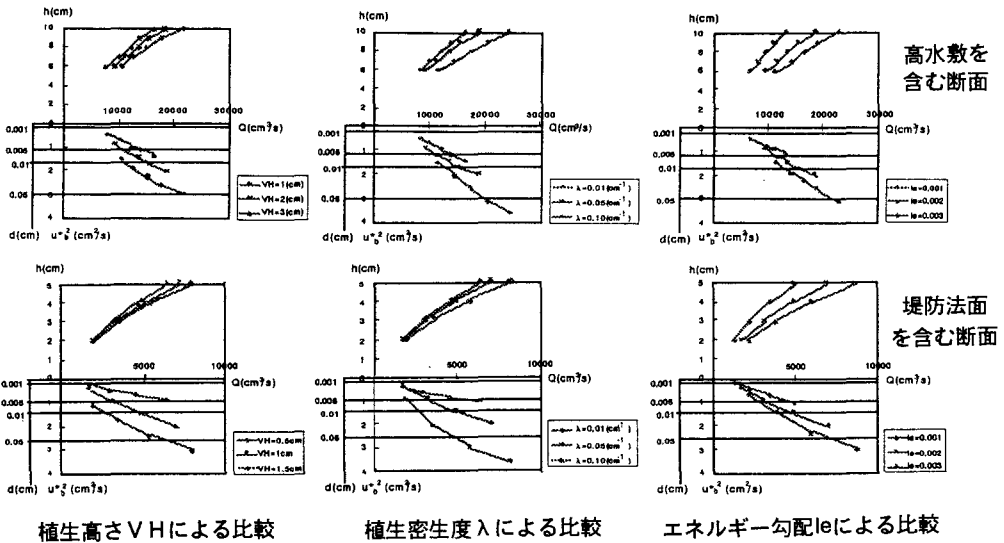
図3 中川らによる $K(\theta)$ の計算値

図4 h-Q図と流量による掃流力の変化

4.あとがき $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いた数値計算により、植生に覆われた高水敷、堤防法面がどのような状況でどの程度の耐侵食効果を有するかを評価できる見通しが立った。今回の数値計算では、断面設定において高水敷と堤防法面を別個に取り扱ったが、今後は、より実河川に近い断面設定で数値計算ができるよう進めていく予定である。また、いくつかの候補植物種ごとの引き抜き抵抗の評価、季節的な強度の変化なども検討し、さらに詳細かつ合理的な評価法を確立したい。

参考文献：1) 岩垣：限界掃流力に関する流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，pp.1～21，1956
2) 中川，辻本：移動床流れの水理，技報堂出版，p230～236，1986