

論文の内容の要旨

生物・環境工学専攻
平成 14 年度博士課程 進学
安瀬地 一作
田中 忠次

水路側岸に水没した植生群を有する開水路流れの実用的な 平面二次元解析に関する研究

1. 背景

河川や用水路は古来、洪水流の速やかな流下(治水)や、効率的な送排水(利水)を目的として計画や設計がなされてきた。しかし、近年では、治水・利水機能に加えて、豊かな自然(環境)が求められるようになってきた。そこでは、水路側岸に植生群を繁茂させたり、杭群を配置したりすることなどが行われている。植生群や杭群はその流速逡減効果により、浮遊砂の沈降・堆積を促進し、浮遊砂の堆積は更なる植生群の繁茂を促す。これらの植生群は、多様な動植物の棲息環境となり、親しみやすい水辺環境を提供し、豊かな自然環境を創造する。一方、小河川や農業用水路などの幅の狭い水路では、わずかな植生であっても植生は流れを障害し、安全かつ効率的な水輸送の妨げとなる。環境ばかりを重視しては、治水・利水がなおざりにされ、逆に、治水・利水のみを重視しては環境に対する配慮が欠落する。そこで、環境を重視しつつも治水・利水効果も維持するためには、植生群が流れに対してどのような影響を与えるかを水理学・流体力学的に検討する必要がある。そこで、本研究では水路側岸部に植生群が水没し

た流れを対象に、実用的な平面二次元解析モデルの開発を目指す。

2 用語の定義

ここで、本研究で用いる用語の定義を示す。水路側岸に水没した植生群を有する流れにおいて、流下方向に植生の存在する区間を植生区間、植生の存在しない区間を植生区間外、植生区間は横断方向に植生が存在する植生領域と存在しない主流域とする。さらに、植生域は水深方向に植生層と表面層とに分けられる。

3 既往の研究・目的

水路側岸に植生群が水没している流れは瀬津・鬼塚ら(1998, 1999)によって詳細な実測が行われている。このような流れでは、植生域では断面全幅に植生群が存在する場合と同様に植生層内では指数分布、表面層では対数分布となり、主流域では通常の開水路同様に対数分布となることが示されている。また、横断方向にも流速分布を持ち、植生領域境界付近で変曲点を持つことから、変曲点不安定により、大規模水平渦が発生する。大規模水平渦が発達すると、断面内で表面付近では植生域へ向かい、底面付近では主流域へと向かう二次流が発生することが示されている。以上のように水路側岸に植

生群が水没する流れは、三次元的で複雑な流れとなる。その流れの複雑さから、このような流れに関する解析手法も複雑なものなり、実用的といいがたい。

一次元解析では、得られる情報が少なく複雑な流れを解析するには十分な解析とはいいがたく、三次元解析では計算が複雑になるために実用的といいがたい。そこで本研究では、水路側岸に植生群が水没した流れを対象とし、実用的な平面二次元解析モデルの開発を目的とする。

4 研究の概要

通常、平面二次元解析は流れを水深方向に平均化して扱うため、水深方向に抵抗は乱れの発生源が分布しているような、本研究で対象とするような流れには適用できない。適用するためには水深方向に水没した植生群の抵抗と、その乱れ構造をモデル化する必要がある。そこで、植生抵抗は、植生域での流速分布から水深平均流速を求め、これと Manning 式から植生抵抗を考慮に入れた新たな Manning 粗度係数で表現する。また、乱流構造は、渦動粘性係数モデルを導入して、植生域の Reynolds 応力分布と流速分布から、水深平均渦動粘性係数を導出する。これら二つの新たなモデルを平面二次元解析に組み込むことにより、流れの解析を行う。なお、植生の抵抗および、渦動粘性係数を以上のようにモデル化すると、水路側岸に水没した植生群を有する流れを底面粗度と乱流構造の異なる二つの流れの平行流とみなすことができる。

5 基礎方程式

基礎方程式は二次元浅水流方程式を用いる。(5-1)は連続式、(5-2)、(5-3)式はそれぞれ流下方向(x 方向)、横断方向(y 方向)の運動量式である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0 \quad (5-1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = & -g \frac{\partial h}{\partial x} + gi_0 \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu_t \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) \right] - F_x \end{aligned}$$

・・・(5-2)

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = & -g \frac{\partial h}{\partial y} + gi_0 \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\nu_t \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] - F_y \end{aligned}$$

・・・(5-3)

ここに、 h :水深、 x :流下方向距離、 y :横断方向距離、 t :時間、 U : x 方向水深平均流速、 V : y 方向水深平均流速、 g :重力加速度、 i_0 :水路勾配、 F_x : x 方向底面せん断力、 F_y : y 方向底面せん断力、 ν_t :渦動粘性係数である。

(5-2)、(5-3)式において、左辺は慣性項、右辺第一項は圧力項、第二項は重力項、第三、四項は粘性応力と Reynolds 応力項、第五項は通常、壁面せん断力であり、局所摩擦抵抗係数 C_f を用いて次のように表現される。

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{C_f}{h} u \sqrt{u^2 + v^2} \\ F_y &= \frac{C_f}{h} v \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned}$$

また、 C_f と Manning 粗度係数との関係から、 C_f は、

$$C_f = gn^2 / h^{1/3}$$

となる。ここで、植生域では次章で示す、植生の抵抗を考慮に入れた新たな Manning 粗度係数を用いる。渦動粘性係数 ν_t にも同様に、植生域では次章で示す、新たな水深平均渦動粘性係数を用いる。数値解析法には、金子ら(1975)と同様の ADI(Alternating Direction Implicit)法を用いる。

6 新たな Manning 粗度係数 渦動粘性係数

まず、植生抵抗は池田(1999)と同様の流速分布から水深平均流速を求め、求められた水深平均流速と Manning 式から植生抵抗を考慮に入れた Manning 粗度係数を定式化する。

植生層、表面層で流速分布はそれぞれ次のようになる。

植生層 ($0 \leq z \leq k$)

$$u(z) = \frac{u_*}{\alpha \kappa k} \exp \alpha(z-k) \quad (6-1)$$

表面層 ($k < z \leq h$)

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{k} \right) + \frac{u_*}{\alpha \kappa k} \quad (6-2)$$

ここで, z :水深方向距離, u_* :植生層境界摩擦速度, κ :カルマン定数=0.4, k :植生高さ, $\alpha = (\lambda C_D / 4 \kappa^2 k^2)^{1/3}$, λ :植生の存在密度, C_D :抵抗係数=1.0 である. これから水深平均流速を求めると次のようになる.

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \left[\frac{1}{\alpha^2 k h} \{1 - \exp(-\alpha k)\} + \ln \left(\frac{h}{k} \right) - \frac{h-k}{h} \left(1 - \frac{1}{\alpha \kappa} \right) \right] \quad (6-3)$$

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (6-4)$$

U :断面平均流速, n :粗度係数, R :径深, I :エネルギー勾配. (6-3)式と Manning 式(6-4)式から植生の抵抗を考慮に入れた新たな Manning 粗度係数が(6-5)式のように求まる.

$$X \equiv \frac{u_*}{\kappa} \left[\frac{1}{\alpha^2 k h} \{1 - \exp(-\alpha k)\} + \ln \left(\frac{h}{k} \right) - \frac{h-k}{h} \left(1 - \frac{1}{\alpha \kappa} \right) \right] \\ n_v = \frac{R^{2/3} I_e^{1/2}}{X} \quad (6-5)$$

渦動粘性係数は, Reynolds 応力分布と流速分布からモデル化する. Reynolds 応力分布は植生層内では, 指数分布, 表面層では三角形分布となることが知られており, それぞれ次のように表すことができる. 植生層 ($-k \leq z \leq 0$)

$$\rho \bar{u}' w' \equiv \tau_{xz} = \rho u_*^2 \exp(\alpha' z) \quad (6-6)$$

表面層 ($0 < z \leq h'$)

$$\rho \bar{u}' w' \equiv \tau_{xz} = \rho u_*^2 \left(1 - \frac{z}{h'} \right) \quad (6-7)$$

とおける. なお, 原点は植生層境界にとってある. ここで τ_{xz} : z 面に働く x 方向の Reynolds 応力, $u' = u - U$ で, u : x 方向瞬間流速, U : x 方向時間平均流速, $w' = w - W$ で, w : z 方向瞬間流速, W : z 方向時間平均流速, u_* :植生

層境界での摩擦速度, $h' = h - k$, α' :Reynolds 応力分布係数である.

また, Reynolds 応力は渦動粘性係数と流速 $u(z)$ を用いて,

$$\tau_{xz} = \nu_t \frac{du(z)}{dx} \quad (6-8)$$

上式に(6-1), (6-2)式を代入して整理すると, それぞれ渦動粘性係数分布が, 植生層 ($-k \leq z \leq 0$)

$$\nu_t(z) = u_* \kappa k \exp[(\alpha' - \alpha)z] \quad (6-9)$$

表面層 ($0 < z \leq h'$)

$$\nu_t(z) = u_* \kappa (z+k)(1-z/h') \quad (6-10)$$

となる. これを水深平均すると, 植生の影響を考慮した新たな水深平均渦動粘性係数が次のように求まる.

$$\bar{\nu}_t = \frac{k \nu_{t1} + h' \nu_{t2}}{h' + k} \\ = \frac{u_* \kappa}{h' + k} \left[\left(\frac{h'}{6} + \frac{1}{2} k \right) h' + k \left(\frac{1}{\alpha' - \alpha} \right) \{1 - \exp(-k(\alpha' - \alpha))\} \right] \quad \dots (6-11)$$

と求まる. また, Reynolds 応力分布係数は混合距離の仮定から $\alpha' = 2\alpha$ となる.

7 計算条件・境界条件

初期条件は植生域, 主流域に分けて考えた運動量方程式を等流条件の下, 流れ場を計算したものを与えた. 下流端の水深は実測値から強制水位を, 上流端は流量境界である. 側壁は植生域では slip 条件を, 主流域では non-slip 条件で, ダルシーワイズバッハの式を変形したものをを用いた.

表 1 に計算条件を示す. これらの条件で水深, 流速が一定値に収束するまで計算を行い, 収束した状態を定常状態とした.

表 1

計算領域		計算格子		時間ステップ t
x 方向	y 方向	x	y	
800cm	30cm	5cm	2cm	0.005sec

8.実験方法・実験条件

実験は全長 16m, 幅 30cm の可変勾配水路で行った. 模擬植生群は 4mm ピッチのパンチング板を厚さ 5cm の発泡スチロールに貼り付け, パンチング板の穴に, 直径 2mm のアルミの棒を差し込むことで作成した. これを水路に設置

し模擬植生群とした。検査区間は 8m で、模擬植生群は検査区間流入後 1m の地点から下流までの 7m 区間の左岸側 15cm の領域に設置した。測定項目は水深及び流速分布である。水深はポイントゲージを用い水路中央部で植生入り口付近は 50cm 間隔、その他は 1m 間隔で測定した。流速分布は電磁流速計を用い、植生区間入り口から 1m 流下地点から流下方向に 1m 間隔、横断方向には 2.5cm 間隔。水深方向には 2cm 間隔で測定した。各地点の流速は 0.1 秒間隔で 30 秒間測定し、平均したものをを用いた。実験は水

深、流量、植生密度、水路勾配を変えたもので 10 パターン行ったが、ここでは、次の表 2 の 1 パターンのみの水面形及び、検査区間入り口から 5m、6m、7m 流下後の地点の横断方向流速分布のみを示す。

表 2

単位幅 流量 (l/s)	下流端 水深 (cm)	植生 高さ (cm)	存在 密度 (1/cm)	水路 勾配
8.21	14.1	10	0.0172	0

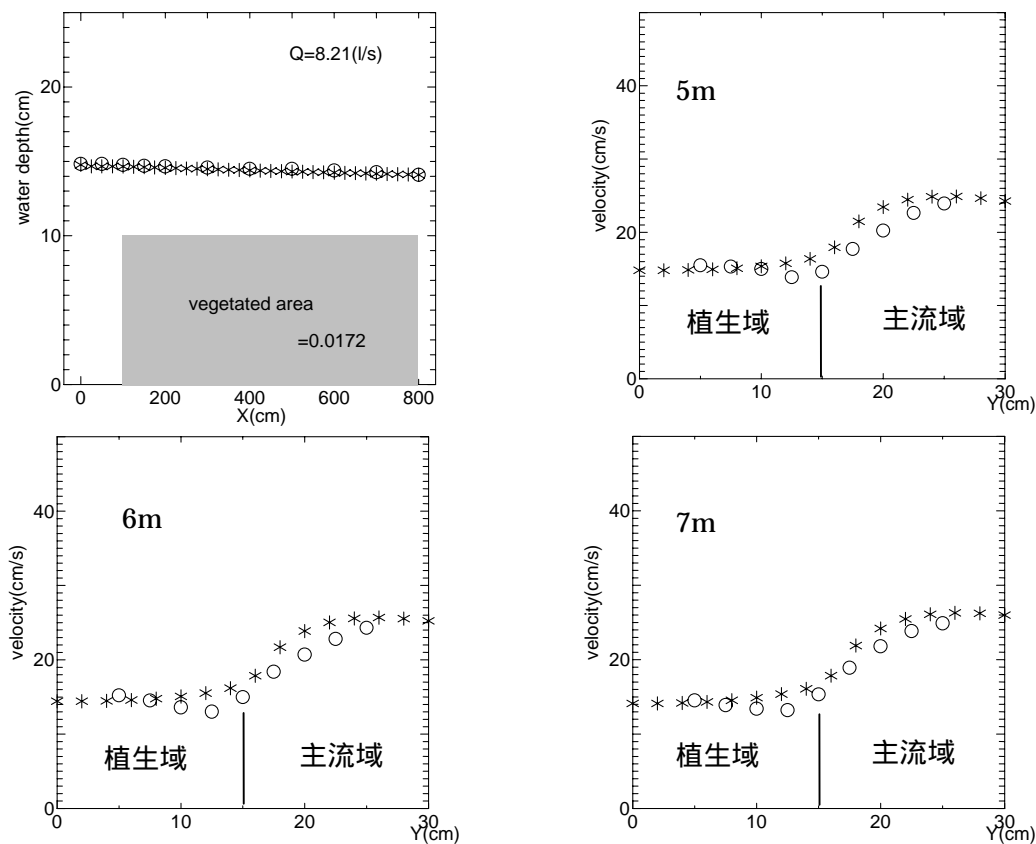


図 1 水面形解析結果と実験結果

9 解析結果

図 1 に水面形と流速分布の実測値と解析結果を示す。○が実測値、*が本モデルの解析結果である。本モデルは良好に実測値を再現できている。水面形のグラフは、横軸は流下距離、縦軸が水深である。流速分布のグラフは、横軸が横断距離、縦軸が主流流速である。同様に図の○が実測値、*が本モデルの解析結果、○が中矢らのモデルの結果である。植生域、主流域境界部付近で実測流速分布は最小値となるが、本

モデルはそれを再現できていない。これは流れの三次元性によるものだと考えられるが、この影響を考慮するためには、詳細な乱流構造の把握が必要となる。本研究ではこのような乱流構造の測定は行っていないため、これは今後の課題とされる。それ以外の部分では本モデルは実測値を良好に再現できおり水路側岸に水没した植生群を有する流れに対して、有効な解析手法であるといえる。