複断面開水路における樹林の流水抵抗 に関する相当粗度係数

EQUIVALENT MANNING ROUGHNESS COEFFICIENT IN AN OPEN CHANNEL
OF COMPOUND CROSS SECTION WITH TREE VEGETATION

米谷駿一¹・魚谷拓矢¹・道奥康治²・神田佳一³・入江良幸⁴・柳田昂希⁴
Shunichi KOMETANI, Takuya UOTANI, Kohji MICHIOKU,
Keiichi KANDA, Yoshiyuki IRIE and Kouki YANAGIDA

¹学生会員 学士(工) 神戸大学大学院工学研究科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²フェロー会員 工博 神戸大学大学院工学研究科(同上)

³正会員 工博 明石工業高等専門学校(〒674-8501 明石市魚住町西岡679-3)

⁴明石工業高等専門学校(同上)

The high water level, HWL, for a design flood is the most important parameter in flood control and management. It is a critical issue how to determine Manning roughness coefficient in a vegetated reach, since channelized rivers tend to be densely vegetated in last decades. Although there are several sophisticated hydrodynamic models to analyze flows in vegetated channels, flow resistance due to vegetation is usually formulated in terms of a drag force coefficient which is not always a convenient parameter in flood control management. The HWL is usually determined from a one dimensional non-uniform flow analysis in which Manning roughness coefficient is required in describing channel perimeter's roughness such as vegetation. In this study, an equivalent Manning roughness coefficient, n_v , for a vegetated reach was theoretically estimated by using a two-dimensional two-layer (2D2L) flow model that was developed by the authors. The model's performance was already confirmed by laboratory and field experiments. A functional dependency of n_v on vegetation properties such as discharge, profiles of vegetation, stem diameter, tree height, etc. was investigated. It was found that n_v was kept constant independently of water depth or discharge after the vegetation being submerged.

Key Words : Manning roughness coefficient, vegetated channel, compound cross section

1. 序論

河川敷の樹林消長は土砂収支とともに河川に発生する予測困難な自然現象であり、河川の維持・管理上の課題となっている。砂州の固定化した河川では樹林が過剰に繁茂し、河川の機能障害をもたらしている。特に、砂礫砂州で構成されていた中下流部における樹木繁茂は、疎通機能の低下、流木生産、生態系のレジーム・シフトをもたらす要因となる。

河川法は治水・環境・利水機能の一体的な高度化を目指しているが、第一に計画高水を安全に流下させるような河積の確保が河川整備の前提にある。しかし、現実には整備後に樹林化が進み、計画水準の疎通能力を維持するために樹木伐採を継続しなければならないことが多い。樹林化した河道で計画規模の洪水が発生した場合に水位

をHWL以下に収めるためには、樹林の粗度効果を定量化し縦断面水面形を適切に評価する必要がある。水理解析のために様々なモデルが提案されているが、その多くでは樹木の高さ・幅に応じた流水障害面積と水深平均流速によってあらわされた抗力型の抵抗則が用いられている。しかし、計画高水の流量規模では、河川敷樹木の多くが完全に冠水するため、樹冠上の高速流と樹林内の低速流からなる二層流構造が形成される。この場合、上下層間の鉛直速度せん断にともなう質量・運動量交換が、高水敷ー低水路間の水平速度せん断と同様に、流れの動力学に支配的な役割を果たす。この場合には、多くのモデルでなされているように、樹木の抵抗力を水深平均流速によって表すことは適切ではなく、著者らは二層流構造を考慮した二次元二層流(2D2L)モデルを開発した。2D2Lモデルは捨石水制や捨石堰などの透過性構造物が設置された開水路流¹⁾、実河川の洪水流^{2)~5)}の再現に適用

(a) 樹林化した開水路流の動力学

(b) 相当粗度係数 n_v によって樹木抵抗を表現した開水路流の動力学

図-1 相当粗度係数 n_v の解析イメージ

されてきた。河道の詳細設計段階では、こうした二次元・三次元流解析が有用であるが、治水計画では、樹林を含む河道内の各種粗度要素をマンニングの粗度係数で表現し、計画高水流量に対する一次元不等流解析を実施する。その際、安全側の原則に基づき、樹林による河積の完全阻害や大き目の粗度係数を与えてHWLを推定する傾向にある。しかし、過小・過大の治水事業を避けるためには、合理的・的確な粗度係数の評価が不可欠となる。

事例的な水理条件に限定されるが、本研究では樹林の完全冠水状態における開水路流を2D2Lモデルにより解析し、樹林部の相当粗度係数 n_v を推算する。これにより、洪水痕跡など情報や実績がない区間でも、樹径・樹高・密生度などの樹林特性から n_v が水理学的に評価され、治水管理のための水面形解析が可能となる。さらに、 n_v の解析解を検証し2D2Lモデルの妥当性を確認するために、単純な樹木条件における水理模型実験も実施し、樹林抵抗の説明変数としての n_v の供用性を明らかにする。

2. 2D2Lモデルによる相当粗度係数 n_v の算出方法

(1) 相当粗度係数 n_v の定義

図-1(a)のように樹林が完全に水没した開水路流では、樹冠上層が高速流（流速： U_w ）で、樹林層は低速流（流速： U_v ）である。2D2Lモデル^{1)~5)}では、樹冠上面に沿って内部境界面が設定され、下層から上層への連行流速 W_e を連続式から求める。内部境界面での鉛直せん断力 τ_i は次式で表される。

$$\tau_i = \rho W_e |U_w - U_v| \quad (1)$$

単位水平面積あたりの樹木抵抗力 F_v は、

$$F_v = \frac{1}{2} \rho C_D \lambda_{veg} U_v^2 h_v \quad (2)$$

図-2 n_v の算定手順

により与えられる。ここで、 ρ : 水の密度、 C_D : 抗力係数、 λ_{veg} : 密生度、 h_v : 樹木高さ、である。樹林床の壁面せん断力 τ_0 も林床の粗度係数 n_0 と樹林内の実流速 U_v/p (p : 樹林の間隙率) を用いて評価される。

図-1(a)の樹林を図-1(b)のような相当粗度に置換して、図-1(a)の樹林帯部に介在する全ての力学系を、図-1(b)の浅水流としての樹林帯が受け持つ局所的な壁面せん断力 τ_v で次のように表現した場合に

$$\tau_v = \frac{\rho g n_v^2 U^2}{R^{1/3}} \quad (3)$$

本研究では、 n_v を「相当粗度係数」と称する。

(2) 相当粗度係数 n_v の算定手順（図-2）

本研究では、 n_v を用いて樹林抵抗力を壁面摩擦力に換算することを目的とする。 n_v の定数パラメータとしての可能性を検証するために、検討対象を単純な直線複断面の開水路等流に限定するが、以下に示す n_v の算定手順は、任意地形の河川でも同様である。

① [断面形状、水路床勾配 I 、区間長 L] の複断面開水路において樹木諸元 [樹高 h_v 、樹径 d_v 、樹林帯幅 B_v 、樹木密度 N] を想定する。

②ある流量 Q_0 に対する等流状態は、下流端水位 H_0 に対し

(a) 平面形状

(b) 横断面形状

図-3 解析対象とする複断面開水路と諸元の定義

2D2Lモデルから得られる上流端水位 H_j が、等流の解 $H_1=H_0+I \cdot L$ に一致するまで、 H_0 を繰り返し更新して得られる。2D2Lモデルを介した H_j と H_0 との関数関係を

$$H_j = f(H_0) \quad (4)$$

とおけば、 H_0 の更新値 H はNewton-Raphson法によって次式のように与えられる。

$$H = H_0 - f(H_0) / f'(H_0) \quad (5)$$

③樹林帯部の相当粗度係数 n_v の解を求める。②で得られた H_0 の下で n_v を仮定し、上流端水位 H_j を2D2Lモデルによって求める。その際、樹林帯以外の部分はあらかじめ決定した底面摩擦によるマンニングの粗度係数(表-1)を用いている。 H_j が等流の解 $H_1=H_0+I \cdot L$ に一致するまで、 n_v を繰り返し更新して n_v の収束解が得られる。2D2Lモデルを介した H_j と n_v との関数関係を

$$H_j = f(n_v) \quad (6)$$

とおけば、 n_v の更新値 n はNewton-Raphson法により次式で与えられる。

$$n = n_v - f(n_v) / f'(n_v) \quad (7)$$

④以上の手順で所定の河道・樹木諸元の下で流量 Q_0 に対する等流状態の上下流端水位(H_0 , H_1)と相当粗度係数 n_v の解が得られる。また、水位と河床位から等流水深 h_0 を求めて、「水位－流量」関係(h_0 , Q_0)を得る。ここで、等流水

表-1 水理・河道条件

流量: Q (m ³ /s)	50~400	
河床勾配:	1/800	
マンニングの粗度係数: n (m ^{1/3} ・s)	低水路	0.028
	高水敷	0.055
	樹林末	0.031
河道形状 (m)	低水路幅	6.0
	低水路水深	1.0
	高水敷幅	6.0
法面勾配	低水護岸	1/2
	堤防法面	1/1

表-2 樹林条件

CASE	樹径 d (m)	樹高 h_v (m)	樹木密度 N (m ⁻²)	密生度 λ_{veg} (m ⁻¹)	樹林帯幅 B_V (m)
1a	0.04	3.0	0.1	0.004	6.0
1b	0.08			0.008	
1c	0.12			0.012	
2a	0.08	2.0		0.008	6.0
2b		3.0			
2c		4.0			
3a	0.12	3.0		0.012	2.0
3b					4.0
3c					6.0
4a	0.1	3.0	0.01	0.001	6.0
4b			0.03	0.003	
4c			0.05	0.005	
4d			0.07	0.007	
4e			0.09	0.009	

深 h_0 は低水路河床と水面との高低差と定義する。

3. 解析事例の開水路諸元と水理条件

(1) 対象とする複断面開水路

加古川の河口距離23.0~24.4km区間の諸元²³⁾を参考に、図-3のような複断面開水路の高水敷上全面に幅 B_v の樹林帯を設定して2D2Lモデルによる等流解析を実施した。低水路水深を $h_m=1.0$ mで一定とし、低水路の満杯流量は約10m³/sである。表-1に水理・河道条件、表-2に樹林条件をそれぞれ示す。ここで、樹木密度 N 、密生度 λ_{veg} は樹径 d 、樹木間隔 ΔS を用いて次式のように定義される。

$$\lambda_{veg} = dh_v / \Delta S^2 h_v = d / \Delta S^2 = d \times N \quad (8)$$

さらに、樹林帯幅 B_v については、高水敷中央から樹林帯左右方向に等しく増減させた。

4. マニングの相当粗度係数 n_v の解析

(1) 流速分布の特性

等流の達成状況を確認するため、図-4にCASE-1bの $Q=150$ m³/sにおける水深平均流速の平面分布の例を示す。等流状態の他、低水路－高水敷間の速度せん断構造などが確認される。

(2) 樹林が「水深-流量」, " h_0 - Q_0 "関係に及ぼす影響

図-5に樹木条件 $[d, h_v, B_v, N]$ に対する (h_0, Q_0, n_v) の関係を示す。各曲線の白丸は、各CASEにおいて樹木が完全に水没・冠水する水深($h_0 = h_v + h_M$)に対応する。この時の流量を Q_M と定義する。いずれの図においても樹木冠水前($h_0 < h_v + h_M$)に比べて、冠水後($h_0 \geq h_v + h_M$)の Q_0 に対する h_0 の増加率が減少する。すなわち、 h_0 とともに河積に占める樹林面積の比率が相対的に減少するために、樹木の疎通能力低減効果が鈍り、 Q_0 に対する h_0 の増加はやや線形的になる。

(a) h_0 vs. Q_0

図-5(a)では $[h_v, B_v, N]$ が一定に設定されている。樹径 d が大きいくほど Q_M は小さく、疎通能力に及ぼす d の影響、間接的には λ_{veg} の影響が反映されている。図-5(b)は、 $[d, B_v, N]$ が同一条件の下での樹高 h_v の影響を示している。樹木冠水前($h_0 < h_v + h_M$)では全CASEが同じ (h_0, Q_0) 関係をたどり、 h_v が小さいCASEから順に樹木が冠水し始める($h_0 \geq h_v + h_M$)。冠水後、 h_v が大きいCASEほど h_0 は大きく疎

通能力は小さいことがあらわされている。図-5(c)では、 $[d, h_v, N]$ が一定の下で樹林帯幅 B_v の疎通能力に及ぼす影響を照査している。 B_v の増加とともに等流水深 h_0 が大きくなり、疎通能力が減少することがわかる。 B_v をより広範に変化させれば、この傾向はより明確に現れる。

図-5(d)は、 $[d, h_v, B_v]$ が一定で樹木密度 N が変化した場合の (h_0, Q_0) 関係を示す。 N が疎通能力に及ぼす影響は顕著に見られる。

図-4 水深平均流速の平面分布

(a) 樹径 d による変化

(b) 樹高 h_v による変化

(c) 樹林帯幅 B_v による変化

(d) 樹木密度 N による変化

図-5 樹木条件による水深の変化

図-6 樹林帯領域の相当粗度係数

(b) n_v vs. Q_0

各パラメータ変化に応じた (n_v, Q_0) の関係に着目すると、いずれのCASEにおいても樹林抵抗に応じて、相当粗度係数が、 $n_v = 0.03 \sim 0.07 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ の範囲で変化している ($n_v = n_0 = 0.03 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$: 林床の粗度係数)。これより、高水敷樹林帯に対して慣例的に用いられるマンニングの粗度係数の範囲 ($0.03 \sim 0.20 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$) と概ね対応した相当粗度係数 n_v が得られていることが確認される。

樹木が冠水前の ($h_0 < h_v + h_M$, または, $Q_0 < Q_M$) においては、 n_v が Q_0 とともに単調増加しているが、冠水後 ($h_0 \geq h_v + h_M$, または, $Q_0 \geq Q_M$) は、(h_0, Q_0) に関係なく n_v がほぼ一定値をとることが特徴として見出される。このことは通常の壁面粗度要素と同様に、 n_v が樹木条件 $[d, h_v, B_v, N]$ だけに依存する定数パラメータとして取り扱い可能であることを示唆している。特に、高水計画の流量規模を対象とする場合には樹林が冠水している状態がほとんどであり、このような n_v 特性はHWLの評価作業における利点となる。

図-5(a)~(d)の下図に示す (n_v, Q_0) を見れば、樹木抵抗に関するパラメータの内 $[B_v]$ の変化による n_v の顕著な変化は確認されなかったが、その他の $[d, h_v, N]$ のいずれが増加しても n_v が増加する傾向が示されている。今回の解析条件は限定されており、しかも高水敷の粗度係数を大きく設定 ($n = 0.055$) したため、 B_v の減少が n_v に及ぼす影響が小さく表れたと考えられる。

(3) n_v におよぼす $[d, h_v, B_v, N]$ の影響

n_v を Q_0 と $[d, h_v, B_v, N]$ の平面上に表記すれば図-6(a)~(d) のようになる。特に、冠水後の流量規模に着目すれば、 n_v が樹木諸量 $[d, h_v, N]$ とともに増加する傾向が図-5よりも明確に確認される。なお、図-6(c)を見ると、本解析条件の範囲では、 B_v にもなう n_v の変化はほとんど見られない。以上のように、治水上重要となるような樹木が冠水する規模の流量を対象として、より広範な樹林条件の下で2D2Lモデル解析を実施すれば、 $n_v = \text{Func.}[d, h_v, B_v, N]$ の関係を定量的に見出すことが可能となる。その結果、たとえ洪水痕跡情報がない区間においても n_v を水理学的に評価することができ、治水管理に必要な水面形を解析することができる。

5. 水理実験による本解析の検証

(1) 実験の概要

2D2Lの等流解析から得られる相当粗度係数 n_v の妥当性を検証するために水理模型実験を実施した。幅 $B = 1.0 \text{ m}$ 、区間長 $L = 8.0 \text{ m}$ の単断面開水路の水路床勾配を $I = 1/1,000$ に固定し、表-3のような二つのCASEの諸元で樹木模型 (木製円柱) を水路床全面 ($B_v = 1.0 \text{ m}$) に設置した。流量は $Q_0 = 1.87 \sim 27.15 \text{ l/s}$ の範囲で変化させ、等流条件を達成した後、樹木部以外の潤辺粗度と等流水深・河

床勾配などから、樹木部の相当粗度係数 n_v を逆算した。本実験は模型樹木の相当粗度係数 n_v の算定を目的としているため、図-3のような複断面開水路で実施する必要はなく単断面開水路を使用した。

(2) 本解析と水理実験との比較

表-3の樹木条件に対して2D2Lモデル解析を実施し、等流水深 h_0 と相当粗度係数 n_v を求めた。前述のように、2D2Lモデルは実河川・模型開水路のいずれにも適用実績があり、任意断面形の開水路に適用可能である。図-7は (h_0, Q_0) 関係を、図-8は (n_v, Q_0) 関係をそれぞれ示す。図中の実線は、それぞれのCASEに対する2D2Lモデルの数値解を示している。 n_v の実験値に見られるやや不規則な傾向や解析値との偏差に関しては、水深・流量計測や等流達成度に起因する誤差が関与していると考えられる。しかしながら、樹木冠水前後における疎通能力の変化や密生度 λ_{veg} が (n_v, Q_0) 関係や相当粗度係数 n_v に及ぼす影響など、実験値の傾向を本解析結果は概ね再現している。以上のことから、2D2Lモデル解析に基づく前節までの議論が妥当であることが実験的にも検証された。

6. 結論

国内外で樹林化が進行する河川の状況を鑑みると、樹木植生が河川の疎通能力に及ぼす影響を的確に評価し、治水計画に反映できるような樹木抵抗則を確立することが急がれる。治水計画に供することを目指して、樹木の流水抵抗をあらわす壁面粗度パラメータとしてのマニング相当粗度係数 n_v を二次元二層流（2D2L）モデルに基づいて水理学的に評価した。その結果、

- 樹木が水没し完全に冠水した水理条件下では、流量・水位に関係なく粗度係数を一定として取り扱うことができる。
- 樹木が冠水した場合には、 n_v が樹木諸元〔樹高 h_v 、樹径 d_v 、樹林幅： B_v 、樹木密度 N 〕だけに依存する。などの重要な知見を得ることができた。さらに、実験により実現現象でもこの傾向を確認することができた。

今後、 n_v がマニングの粗度係数と同様に、粗度要素条件によって一意的に決定される定数か否かを確認する必要がある。広範な樹木条件に2D2Lモデルを適用し $n_v = \text{Func.}[d, h_v, B_v, N]$ の関数関係を確立すること、実河川を含むより一般的な河道地形、樹林分布、水理条件に対して n_v を求め、本研究結果の普遍性を検証することが課題と考えている。

謝辞：本研究に際しては、国土交通省姫路河川国道事務所関係各位のご協力を頂いた。また、平成23-25年(2013)度科学研究費基盤研究(B)（代表：道奥康治、課題番号：23360212）の助成の下で実施された。以上、記して

表-3 実験条件

CASE	樹径 d (cm)	樹高 h_v (cm)	樹木間隔 ΔS (cm)	樹木密度 N (本/cm ²)	密生度 λ_{veg} (cm ⁻¹)
1	0.6	6.0	21.9	0.00208	0.00125
2			10.95	0.00834	0.005

図-7 (h_0, Q_0) に関する本解析と水理実験との比較

図-8 (n_v, Q_0) に関する本解析と水理実験との比較

謝意を表する。

参考文献：

- 1) 道奥康治・南條雅志・石垣泰輔・前野詩朗：捨石水制が冠水した開水路流の二次元二層流モデル，土木学会論文集，No.782/II-70，pp.31-50，2005.
- 2) 道奥康治・宮本仁志・神田佳一・大地洋平・阿賀一穂・盛岡淳二・魚谷拓矢・吉田一光・吉村敏：樹林化した河道の流況観測と樹林内外の流況・樹木抗力の解析，河川技術論文集，第16巻，pp.437-442，2010.
- 3) 道奥康治・宮本仁志・神田佳一・大地洋平：樹林が繁茂した加古川中流部における出水時流況と樹林損壊に関する調査・解析，土木学会論文集B1（水工学），第55巻，pp.S_1087-S_1092，2011.
- 4) K. Michioku, et al.: Hydrodynamics and hydromorphology of river structures constructed by natural materials, Proc. 6th Intl. Conf. Water Resources and Environment Research, Water & Environment Dynamics, 2013.
- 5) M. Taniguchi, K. Aga, K. Michioku and K. Kanda: Hydrodynamic influence of vegetated floodplain morphology on drag force moment acting on trees, Proc. 35th IAHR World Congress, 2013.
- 6) 水理委員会編：水理公式集，pp.89，1990.

(2013.9.30受付)