

堤体背面に整備された樹林帯が 越水特性に及ぼす影響

EFFECTS OF FLUVIAL WOODS ZONE ARRANGED ON GENTLY SLOPED
BACK FACE OF LEVEE UPON OVERFLOW CHARACTERISTICS

秋山 壽一郎¹・重枝 未玲²・松田 健介³・大庭 康平³
Juichiro AKIYAMA, Mirei SHIGE-EDA, Kensuke MATSUDA, and Kouhei OHBA

¹フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 工学研究院建設社会工学研究系
(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²正会員 博士(工学) 九州工業大学大学院准教授 工学研究院建設社会工学研究系(同上)

³学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻(同上)

In this study, the effects of the fluvial wood zone in landside upon overflow characteristics of flood flows are investigated experimentally, theoretically and numerically. The wood zone arranged on gently sloped back face of levee is considered. It is found that river water level is heading-upped by the woods zone, so that overflow characteristics in the vicinity of the crown of the levee may be changed from complete to locally submerged outflows, depending on characteristics of the wood zone, levees and flood flows. It may cause such a problem that river water level and overflow discharge are unable to be related. A discharge formula, that includes both effects of characteristics of the wood zone and levees, is developed for this purpose, and is validated through experimental and numerical investigations.

Key Words : *fluvial woods zone, overflow discharge formula, gently sloped back face of levee*

1. はじめに

降雨外力の増大などの自然的状況と財政逼迫などの社会情勢の変化を受け、治水政策のパラダイムシフトが起こっている。すなわち、“洪水氾濫の防止を基本とする防災から被害最小化を基本とする減災への転換”¹⁾と、“できるだけダムにたよらない治水政策への転換”²⁾である。これらの答申でも指摘され、2011年の7月新潟・福島豪雨災害、9月台風12号豪雨災害で顕在化してきた「整備目標を上回る洪水に対する対策や備え」が、今後よりいっそう重要になってこよう。

整備目標を上回る洪水に対する対策として、堤防対策がある。堤防対策には、高規格堤防などの堤防そのものの対策と、堤防機能を維持増進する対策がある。本研究は、盛土した堤体背面に樹林帯を設けた堤防対策を取り扱ったものである。

さて、樹林帯には、越水時の堤防の安全性の向上や破堤部の拡大抑制といった堤防対策としての機能に加え、破堤時の氾濫流量の低減や流木・土砂堆積の防止などの減災機能があると言われている。また、樹林帯は、自然

生態系の保全や沿川地域の自然緑地などの環境機能も具備していることから、社会的コンセンサスが得られやすい堤防対策である。例えば、大分県大野川では、大津留地区の左岸側水衝部に延長1.23kmにわたって、樹林帯が整備されている。

しかしながら、樹林帯の調査・既往の知見を河川伝統工法として取りまとめた資料³⁾は数多いものの、その機能を工学的に論じた研究・技術資料は極めて少ない。著者の知る限り、樹林帯の破堤氾濫流の流体力低減効果などを検討した秋山らの研究^{4),5),6)}、樹林帯の破堤プロセスに対する影響を検討した鷺見らの研究⁷⁾、樹林帯幅と洗掘量の関係や樹林帯による氾濫流量低減効果について検討を加えた坂野・藤田の研究⁸⁾、堤外樹林帯が設けられた築堤河道からの越水流量の推定法を提案した秋山らの研究⁹⁾などがある程度で、その機能や効用には不明点が多い。樹林帯の整備・保全法についても、水防林、造園における植栽、植生生態学に関する知見などをまとめた手引き¹⁰⁾はあるものの、そこに明記されているように、その設計・整備・管理の基準は未だ確立されていない。

本研究は、先述した堤防対策のうちの「堤防そのものの対策」と「樹林帯」の両対策に関するものである。す

なわち、中小河川を含む破堤の原因の7~8割は越水に起因することから¹¹⁾、堤体背面を盛土して緩傾斜にするるとともに、そこに樹林帯を設けることで、堤体補強と越流水の減勢効果・耐侵食性を高め、越水破堤の耐力を増強した堤防¹⁰⁾(以下「本堤防」という)を対象として、そこでの樹林帯整備計画の検討手段を提示するとともに、その有用性を実証したものである。

2. 解析の方法の概要

樹林帯整備に当たっては、越水や越水破堤が前提となることから、その計画段階において越流流量あるいは越流水深を想定する必要がある。そのため的手段として、簡便に越流流量あるいは越流水深を想定できる「樹林帯・堤体形状・堤内地盤高を考慮した越流流量式」(以下「本流量式」という)と、平面的な樹林帯整備のあり方の検討や整備計画の手段としての「PSA-FUF-2DF model」(以下「本モデル」という)の概要を以下に示す。

(1) 樹林帯と堤体形状を考慮した越流流量式¹²⁾の概要

図-1は、河道横断方向の水面形の一例であり、同一流量を与えたときに、樹林帯がある一定以上の流水抵抗を發揮した場合(赤の実線)と樹林帯がない完全越流状態(緑色の実線)を併せて示している。これからわかるように、堤防裏面に樹林帯を設けると、そこを流下する越流水の水位が全体的に上昇する。それだけではなく、樹林帯がある一定以上の流水抵抗を發揮した場合には、越流水が堰上げられ、そのために堤防天端にあった支配断面が消失し、堤外地水位が上昇する場合がある。

図-1のように樹林帯がある一定以上の流水抵抗を發揮しても、越流流量が増減するわけではないが、樹林帯によって上昇した堤外地水位を用いて本間の完全越流公式を適用すると、過大に越流流量を評価することになる。

また、このように堤防高より堤内地水位が低くなった状況では、本間のもぐり越流公式は適用できなくなる。すなわち、樹林帯がある一定以上の流水抵抗を發揮した場合には、本間公式等の既存の流量式では堤外地水位あるいは堤外・堤内地水位と越流流量の関係を把握できない。

以上を踏まえて、以下に示す本流量式を提案する。

図-2は、図-1の流況を模式的に示したものである。単位幅当たりの越流流量 q_T は、式(1)で与えられる¹²⁾。式(1)は、樹林帯特性(透過係数 K_T 、幅 L)と平均地盤高 Z^* を考慮して、任意の基準面から測った堤外地水位 h および堤内地水位 h_d の関係を表している。ここで、樹林帯特性と堤内地盤高に関する流量補正係数 C_T は、式(2)で表される。なお、式(1)は堤内地水位が堤防天端高より高いもぐり越流状態に対しても適用可能である。ただし、堤内地水位が堤防天端高より低くなる状況(図-1)も含めた流量式となっているので、本間公式とは水位の取り方が異なっている。

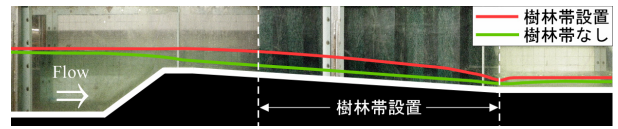


図-1 流況の一例(配列 I, L /法面長=0.8)

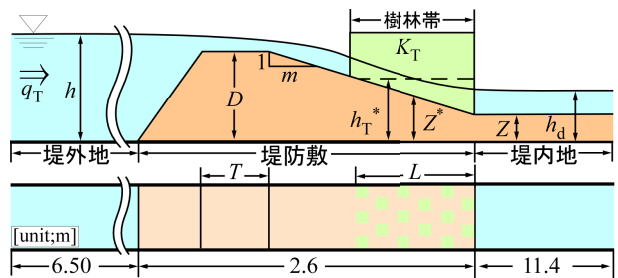


図-2 樹林帯の設置条件と重要な諸量

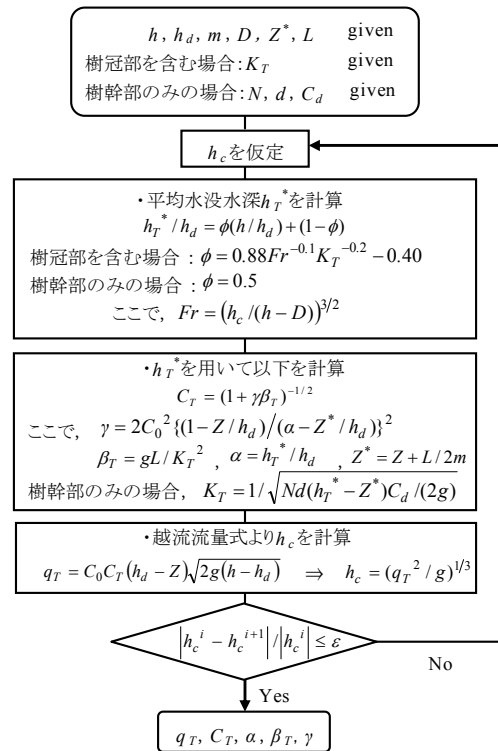


図-3 計算手順

$$q_T = C_0 C_T (h_d - Z) \sqrt{2g(h - h_d)} \quad (1)$$

$$C_T = (1 + \gamma \beta_T)^{-1/2} \quad (2)$$

ここで、 C_0 : 樹林帯が設けられていない状態での堤防の流量係数、 $\gamma = 2C_0^2 [(1-Z/h_d)/(\alpha-Z^*/h_d)]^2$ 、 $\beta_T (=gL/K_T^2)$: 樹林帯パラメータ、 $\alpha (=h_T^*/h_d)$: 樹林帯区間における平均的な水位 h_T^* と h_d との比、 K_T : h_T^* に基づく透過係数、 g : 重力加速度である。

また、透過係数 K_T は、柱状物体群として取り扱える竹林や樹木樹幹部については、樹木特性とその水没水深がわかれば、式(3)より計算できる⁹⁾。ちなみに、樹木群の透過係数は、大野川水系乙津川のメダケ林で 5.5m/s ¹³⁾程度の大きさを有している。

$$K_T = 1 / \sqrt{NaC_d / (2g)} \quad (3)$$

ここで、 N ：単位体積当たりの樹木の本数、 a ：樹木1本当たりの投影面積(= dh_T)、 d ：樹木1本の直径、 h_T ：樹木の水没水深、 C_d ：樹木1本当たりの抵抗係数である。なお、柱状物体群では、樹木密度や河床勾配等によらず、 $C_d \doteq 1.20$ の一定値を取ることが知られている⁹⁾。

一方、樹冠部を有する樹木群については、樹木特性(樹種、樹木密度など)に対応した K_T を与える必要がある。しかし、河道内樹木群に関しては、密な樹木群で $K_T=10$ 、疎な樹木群では $35 \sim 60 \text{m/s}^{14)}$ などの知見が得られているものの、樹林帯の K_T 値についてはほとんどわかっていない。

式(1)は堤内地に樹林帯を設けた状況を想定した流量式であるが、堤防裏法に樹林帯を設けた場合の流量式に容易に拡張できる。いま、法勾配 m 割の堤防の裏法尻から天端に向かって樹林帯を設ける場合を考えると、裏法尻から測って天端方向の距離を η として、任意断面における堤防高は $Z+\eta/m$ となる。したがって、樹林帯設置区間での平均地盤高 Z^* は、 $Z^*=Z+L/2m$ のようになる。

q_T の予測に当たっては、① a は、不明な水位 h_T^* と関係したパラメータであり、後述するように、この a は Fr と K_T の関数となっていること、② C_T に h_T^* が含まれていること、③ 樹冠部を有する樹木群では、 K_T と L は与えられるので、 β_T は既知量であること。一方、竹林等の柱状樹木群では、 K_T に h_T^* が含まれているので、 β_T も不明であること、などを勘案した解法とする必要がある。

図-3は、以上を踏まえて、通常の流量式と同様に水位(h, h_d)から越流流量 q_T を算定するための計算手順を示したものである。したがって、与条件を水位(h, h_d)、樹林帯特性(K_T, L)、および堤防・地盤高特性(Z, m)としている。越流流量 q_T と水位(h, h_d)などの関係は、例えばExcelのゴールシークを用いれば、ほぼ瞬時に求めることができる。なお、 α の与え方と C_0 値については、後述する模型実験より定められる。

(2) PSA-FUF-2DF model¹⁵⁾の概要

PSA-FUF-2DF modelは、計算領域を複数のサブ領域に分割し、サブ領域間の接続条件を与えることで、解析データを領域内で閉じさせ、複数のCPUで本解析法の並列計算を行い、計算速度あるいは計算精度の向上を図ったものである。

本解析法の基礎方程式である2次元浅水方程式の連続の式と運動方程式は、次に示す通りである。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + S = 0 \quad (4)$$

$$U = (h, uh, vh)^T; E = (uh, u^2h + 1/2gh^2, uvh)^T; \\ F = (vh, uvh, v^2h + 1/2gh^2)^T; \\ S = (q_r, -gh(S_{ox} - S_{fx}) + F_x, -gh(S_{oy} - S_{fy}) + F_y)^T$$

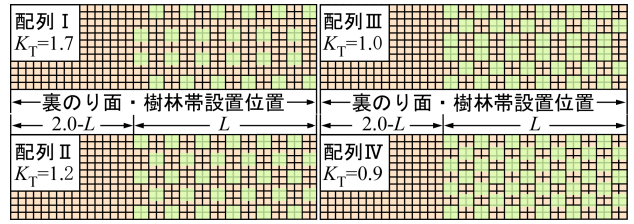


図-4 模型樹林帯の配列

表-1 実験条件

CASE		$K_T(\text{m/s})$ (実スケール換算)	$L/\text{法面長}$	Fr	
N				0.20~0.60	
T	配列 I	$a \sim d$	$\frac{1}{2}$	1.7(5.4)	
	配列 II	$a \sim d$	$\frac{1}{2}$	1.2(3.9)	
	配列 III	$a \sim d$	$\frac{1}{2}$	1.0(3.2)	
	配列 IV	$a \sim d$	$\frac{1}{2}$	0.9(2.9)	
				0.7~1.0	0.58~0.62 0.47~0.61 0.55~0.58 0.33~0.49 0.56~0.61 0.23~0.36 0.59~0.63 0.20~0.33

ここに、 U ：保存量ベクトル、 E, F ： x, y 方向の流束ベクトル、 S ：発生項・消滅項ベクトル、 h ：水深、 u, v ： x, y 方向の流速、 g ：重力加速度、 q_T ：単位面積当たりの流入流量、 S_{ox}, S_{oy} ： x, y 方向の河床勾配、 S_{fx}, S_{fy} ： x, y 方向の摩擦勾配、 F_x, F_y ：計算メッシュ内に樹木群などの物体群が含まれる場合に付加される x, y 方向の流体力項である。摩擦勾配は、Manningの公式、流体力項は抵抗係数 C_d を用いた式で計算される。時間積分にはEulerの陽解法、空間積分には流束差分法を用いている。

3. 実験と実験結果

(1) 実験の条件と方法

実験装置は、図-2に示したように、河道横断面を考へ、水路(長さ20.5m、幅0.60m、粗度係数 $n=0.01$ 、勾配 $I=0$)中に堤防(表法勾配2割、裏法勾配 $m=20$ 割、堤防高 $D=0.20\text{m}$ 、堤防天端幅 $T=0.2\text{m}$)を設置し、堤防裏法尻を始点として天端にかけて幅 L の模型樹林帯を設けたものである。堤防裏法勾配は、模型スケールを1/10として、法面長が2mの20割とした。この設定は、一般に樹林帯整備区間が20mであることと、模型実験における樹林帯パラメータ β_T の設定範囲を広く取るためである。当然のことながら、本流量式と本モデルは、これより急な裏法勾配であっても適用可能である。

模型樹林帯には、樹冠部を有する模型樹木群としてよく用いられる⁸⁾、プラスチックが糸状に絡み合った柱状多孔体(透過係数 K_T 、密度 λ (=実質体積/空間体積)=0.047)を配列 I ~ IVのように配列したものをを用いた(図-4)。

実験は、CASE K、CASE NおよびCASE Tを行った。CASE Kでは、各配列の柱状多孔体を水平に設置した開水路実験を別途実施し、配列された柱状多孔体群を一つの多孔体と見なして、空間平均された透過係数 K_T を $K_T = (q/h_T^*)/I_c^{1/2}$ より算定した。

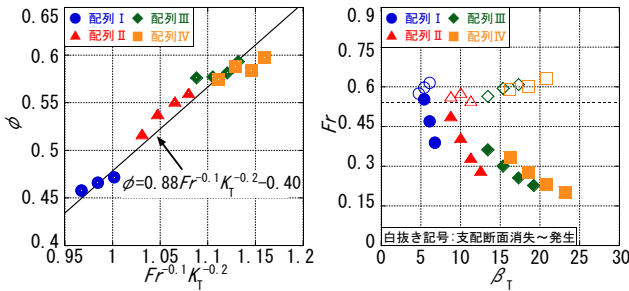


図-5 ϕ の関係

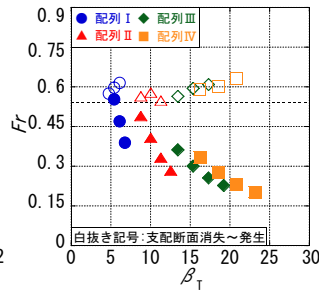


図-6 β_T と Fr との関係

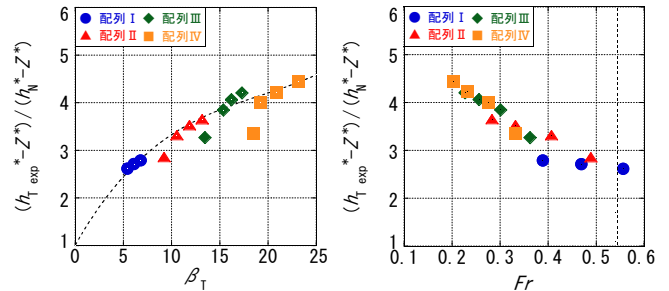


図-7 β_T , Fr と $(h_T^* - Z^*) / (h_N^* - Z^*)$ との関係

CASE Nでは、堤防設置・樹林帯無設置の条件で、水路下流側に刃形堰(高さ s)を設け、 $s/D=1.0\sim 1.2$ の範囲で変化させ、堤防天端から裏法にかけての流況がCASE Tと同様な越流状態となるよう設定し、 q_T と (h, h_d) の関係を求めた。こうして得られた (h, h_d) と式(1)で $C_T=1.0$ と $Z=D$ とした関係式より、流量係数 C_0 を求めた。

CASE Tでは、水路下流端で自由段落り流れとし、柱状多孔体の配列を配列I～IV、多孔体幅 L と裏法面長の比 $L/\text{法面長}$ を4通りに、さらに各 $L/\text{法面長}$ に対して Fr を2通りに変化させ、堤防天端で支配断面が消失する場合と配列、 $L/\text{法面長}$ および Fr との関係、堤防天端で支配断面が消失した場合とそうでない場合(完全越流)の水面形を調べた。ここで、 Fr は堤外地水位 h に基づく天端基準のFroude数 $(=q_T/(g(h-D)^3)^{1/2})$ である。堤防天端で支配断面が発生するときの Fr は、理論的には $Fr=(2/3)^2=0.54$ であるので、 $Fr=0.6$ は堤防天端上でほぼ限界流となる場合に対応している。

いずれのCASEについても、堤防天端上では中央と両端の3点、樹林帯内では0.1mあるいは0.2m間隔、その他の断面では1.00m間隔でポイントゲージを用いて水深を測定した。流量 Q は、電磁流量計と量水柵の両方で算定した。なお、両流量の相対誤差は $\pm 0.5\%$ 以内であった。CASE NとCASE Tの実験条件を表-1に示す。

(2) 実験結果

CASE KとCASE Nより、各配列の透過係数 m/s がそれぞれ配列I ($K_T=1.7$)、II(1.2)、III(1.0)およびIV(0.9)のように、流量係数 C_0 が $C_0 \approx 1.06$ のように得られた。

$\alpha(=h_T^*/h_d)$ の関係は、次のように決定した。まず h_T^* が h と h_d の重み付き平均で表せると仮定し、 α を式(5)のように置き、次にCASE Tの実験結果を用いて、 ϕ の関係を求めた(図-5)。これからわかるように、 ϕ は Fr と K_T の関係として式(6)のように表せる。ここで、 $\phi(=0\sim 1)$ は水位に関する重みである。なお、 h_T^* は本実験から得られた樹林帯区間の水位を積分し、これを L で除して求めた。

$$\alpha = \phi(h/h_d) + (1-\phi) \quad (5)$$

$$\phi = 0.88Fr^{-0.1}K_T^{-0.2} - 0.40 \quad (6)$$

なお、実スケールに換算した各配列の透過係数は、Froudeの相似則($K_p=K_m \times (L_p/L_m)^{1/2}$)より、配列I～IVの順

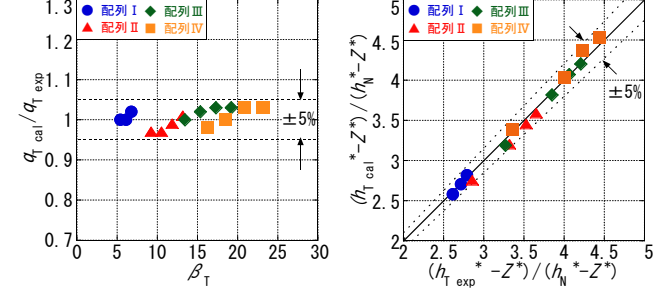


図-8 β_T と $q_{T \text{ cal}} / q_{T \text{ exp}}$ の関係

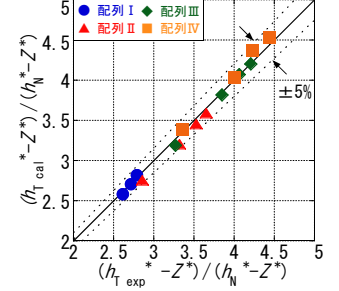


図-9 $h_{T \text{ cal}}^*$ と $h_{T \text{ exp}}^*$ の比較

にそれぞれ5.4, 3.9, 3.2, 2.9m/sとなる。ここで、添え字 m と p は、模型と実スケールをそれぞれ示している。この実スケール換算の配列Iの透過係数の値は、先述した乙津川メダケ林に相当する。流木や流出ゴミが樹林帯に捕捉されると、さらに透過係数が小さくなるので、堤防越水時には図-1のような状況が十分起り得る。

4. 結果と考察

(1) もぐり越流への遷移条件と越水流量

図-6は、 β_T と $Fr(=q_T/(g(h-D)^3)^{1/2})$ との関係を示したものである。図中の塗りつぶしと白抜き記号は、堤防天端で支配断面が消失した場合と、支配断面消失～発生となった場合をそれぞれ示している。先述したように、理論的には堤防天端で支配断面が発生するのは $Fr=0.54$ のときである。実験では、樹林帯によって水表面が動揺するため、支配断面の特定が困難なために若干の差異が生じているが、それに近い値となっている。同図中の支配断面が消失する境界の $\beta_T(=gL/K_T^2)$ の値から、そのような状態となる各配列の $L/\text{法面長}$ の値を決定することができる。例えば配列Iでは、 $\beta_T \approx 5.4$ 、つまり $L/\text{法面長} \approx 0.8$ で支配断面が消失する。

図-7は、CASE Tより得られた樹林帯区間の平均水深 $(h_{T \text{ exp}}^* - Z^*)$ と樹林帯無し(完全越流)の状況での樹林帯区間の平均水深 $(h_N^* - Z^*)$ との比 $(h_{T \text{ exp}}^* - Z^*) / (h_N^* - Z^*)$ と、 β_T あるいは Fr との関係を示したものである。

このように、堤防裏法に樹林帯を設けることで、そこでの水深が全体的に上昇する。当然のことながら、その上昇率は β_T が大きいかほど大きくなる。例えば配列Iの樹林帯を設けると、樹林帯設置区間での水深は樹林帯

を設けない場合の2.5倍以上となり、平均流速は完全越流状態に比べて1/4以下になる。なお、各配列の最も小さい β_T では、 $(h_{T \text{ exp}}^* - Z^*) / (h_N^* - Z^*)$ が小さくなっているが、これは、先述した支配断面消失～発生の状態となっているからである。このことは Fr についても同様である。

図-8は、図-3の計算手順で得られた予測値 $q_{T \text{ cal}}$ と実験値 $q_{T \text{ exp}}$ を、図-9は同様に $(h_{T \text{ cal}}^* - Z^*)$ と $(h_{T \text{ exp}}^* - Z^*)$ を比較したものである。これから明らかなように、本流量式は、樹林帯特性(K_T, L)および堤防・地盤高特性(Z, m)を考慮して、水位(h, h_d)と越流流量 q_T との関係を的確に評価できる。このように、本流量式を用いることで、樹林帯の計画段階において、越流流量あるいは越流水深を把握できる。また、樹林帯区間における堤防裏法の平均水深($h_T^* - Z^*$)も知ることができるので、裏法面の耐侵食性に関する検討にも役立つ。

以上から明らかなように、本流量式は樹林帯の整備計画のための手段として有用である。また、堤内地水位が堤防天端を越えた冠水状態(もぐり越流状態)において、樹林帯特性を考慮して氾濫流量を評価できる手段はいまのところ存在しないので、そのような箇所を含む氾濫解析に用いる流量式として用いることもできる。

(2) PSA-FUF-2DF modelを用いた検討

本モデルを用いて、河道に沿った樹林帯整備について検討する。本検討の解析条件は、図-10に示したように、河道(長さ $X=10\text{m}$ 、幅 $B=8\text{m}$ 、粗度係数 $n=0.03$ 、勾配 $I=1/5000$)に沿って設けられた堤防(表法勾配2割、裏法勾配20割、堤防高 $D=0.2\text{m}$ 、堤防天端幅 $T=0.2\text{m}$)の裏法に堤防裏法尻を始点として天端にかけて樹林帯を設けたものである。なお、縮尺スケールは1/10としている。また、本検討では、先述した河道横断方向の実験(CASE T)結果の検証も目的の一つであるので、越流水の流出角度 $\theta=0^\circ$ 、つまり正面越流に近くなるように解析条件を設定した。本結果では、最大で $\theta \approx 16^\circ$ であったので、 $q_{T \text{ num}}/q_c$ は $\cos 16^\circ (\approx 0.96)$ で最大で4%程度の誤差を有している。

樹林帯としては、① 樹林帯A：配列I ($L=1.8\text{m}$ 、 $K_T=1.7\text{m/s}$)を設けた場合、② 樹林帯B：その他の条件は樹林帯Aと同じで、樹林帯の一部の区間(長さ $M=B/4$)を $K_T=9.0\text{m/s}$ (実スケール換算約 29m/s のブナ林)とした場合、③ 樹林帯C：同区間の透過係数を配列IIIの $K_T=1.0\text{m/s}$ (流出ゴミが捕捉された状態を想定)とした場合、および④ 樹林帯N：樹林帯を設けない場合(通常完全越流状態)とした。

解析の境界条件は、境界1では流量 Q 、境界2と3では水位 h を与えた。なお、境界4は壁面となっている。解析に用いた計算メッシュは、河道部では 0.15m 、堤防では 0.03m 、氾濫原部では 0.1m を基準にした三角形メッシュで、その総数は37755である。

a) CASE Tの検証

図-11は、図-10の任意の横断面における樹林帯Aと樹林帯Nの河道横断方向の水面形と、CASE Tの実験結果

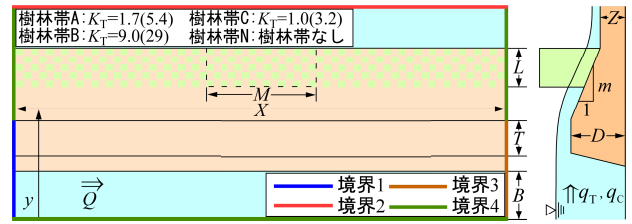


図-10 解析条件

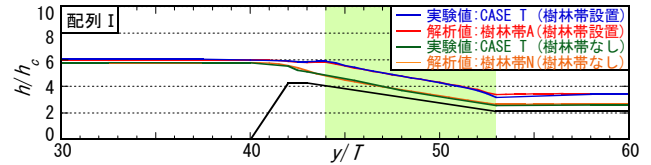


図-11 横断水面形の実験結果と解析結果の比較

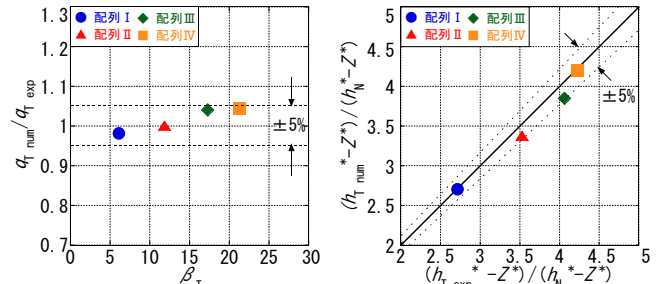


図-12 β_T と $q_{T \text{ num}}/q_{T \text{ exp}}$ の関係

図-13 $h_{T \text{ num}}^*$ と $h_{T \text{ exp}}^*$ の比較

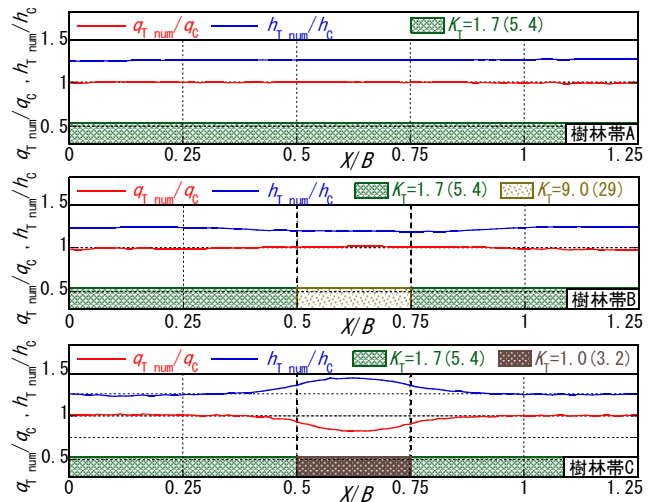


図-14 $q_{T \text{ num}}/q_c$ と $h_{T \text{ num}}/h_c$ の縦断分布

を比較したものである。計算結果は全体的な水面形を良好に再現している。樹林帯Aの堤防裏法尻下流でやや差異が認められるが、これはそこで樹林帯がなくなるために、流れの加速・縮流が起り、平面2次元モデルでは再現できない流れとなっているためである。また、図-12と図-13は、それぞれ先述した図-8と図-9に対応した検証である。ここでは L /法面長 $=0.9$ の場合を示している。本流量式の妥当性がこれからも確認できる。

b) 各樹林帯の比較

図-14は、堤防天端中央での越流水深 $h_{T \text{ num}}$ と単位幅越流流量 $q_{T \text{ num}}$ をそれぞれ限界水深 $h_c (= (q_c^2/g)^{1/3})$ と限界流量 q_c で無次元化して、樹林帯A~C別にそれらの縦断分布を示したものである。また、表-2は、天端基準の堤外地水

深 h_{num}/h_c を2通りに変化させたときの樹林帯A-Cの $q_{T num}/q_c$ と $h_{T num}/h_c$ の値を区間別に示したものである。

これからわかるように、① h_{num}/h_c が大きくなると、樹林帯の堰上げ効果が顕著になり、 $q_{T num}/q_c$ と $h_{T num}/h_c$ の変化も大きくなる。② 樹林帯Aでは、樹林帯Nと比して、越流流量は変わらないが、図-1で見たように、樹林帯の堰上げ効果のために越流水深が増加する。③ 樹林帯Bについては、ブナ林を想定した区間では越流水深は減少するが、 h_{num}/h_c が大きくなると越流流量は増加する。当該区間で越流流量が増加するのは、樹林帯Aと同様の理由から、当該区間の上下流で越流水深が増加するので、この増加した水位に相当する越流流量がブナ林区間で発生するからである。これに対応して、当該区間では越流水深が低下する。④ 樹林帯Cでは、樹林帯Bと逆傾向となり、小さな透過係数の区間において越流流量は減少し、越流水深は増加する。

このように、 h_{num}/h_c が大きくなると、透過性が大きな樹林帯区間や未整備区間での越流流量は限界流量より大きくなる。また、流出ゴミが捕捉された状態等の透過性が小さな区間では越流流量は減少するが、越流水深は逆に増加する。以上のように、河道縦断方向の樹林帯の粗密等によって、越流流量や越流水深の増減が変化するので、その整備に当っては注意が必要である。

本モデルは、以上のような検討に止まらず、河道幅の変化等の河道特性や河道内樹木群状態等も踏まえて、平面的な樹林帯整備のあり方の検討が可能であることから、樹林帯整備計画の手段として有用であると考えられる。

5. まとめ

以下に本研究の結論を示す。

(1) 樹林帯の整備計画において必要となる越流流量や越流水深を検討する手段として、簡便に越流流量あるいは越流水深を想定できる「樹林帯・堤体形状・堤内地盤高を考慮した越流流量式」を提案し、実験結果に基づきその妥当性を実証した。

(2) 「PSA-FUF-2DF model」が樹林帯・堤体形状・堤内地盤高を考慮して、越流流量と堤防裏法部を含む河道横断方向の水面形を良好に再現できることを示した。併せて、本流量式の妥当性も実証した。また、本モデルの有用性の実証例として、堤外地・堤防・樹林帯・堤内地よりなる河川区域を対象として、河道縦断方向の樹林帯特性の違いが越流特性に及ぼす影響について検討を加えた。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金 基盤研究B(課題名：豪雨災害時の浸水減災シミュレータの開発と樹林帯の減災効果に関する研究、課題番号：21360237、研究代表者：秋山壽一郎)の助成と、本学学部4年生岡村賢治君、松田圭司君の協力を得て実施したものである。

表-2 各樹林帯の $q_{T num}/q_c$ と $h_{T num}/h_c$

樹林帯設置状況	堤外地水深 h_{num}/h_c	区間別の $q_{T num}/q_c$ 、 $h_{T num}/h_c$		
		X/B=0~0.5	X/B=0.5~0.75	X/B=0.75~1.25
樹林帯A	1.61	0.99, 1.25		
	1.74	0.96, 1.55		
樹林帯B	1.61	0.99, 1.24	1.01, 1.19	0.99, 1.23
	1.74	0.96, 1.47	1.12, 1.25	0.96, 1.46
樹林帯C	1.61	1.00, 1.24	0.83, 1.42	1.00, 1.24
	1.74	0.97, 1.57	0.78, 1.65	0.93, 1.58

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会河川分科会，豪雨災害対策総合政策委員会：総合的な豪雨災害対策の推進について(提言)，<http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/05/050419/01.pdf>.
- 2) 今後の治水対策のあり方に関する有識者会議：今後の治水対策のあり方について(中間とりまとめ)，国土交通省河川局，2010.
- 3) 例えば，建設省土木研究所河川部：水害防備林調査，土研資料第2479号，1987.
- 4) 例えば，秋山 壽一郎：樹林帯の氾濫抑制機能，自然災害科学，25-3，pp.268-276，2006.
- 5) 例えば，重枝未玲，秋山 壽一郎：数値シミュレーションに基づく堤防に沿った樹林帯の治水機能の検討，土木学会論文集，No.740/II-64，pp.19-30，2003.
- 6) 秋山 壽一郎，重枝未玲，有働貴行，山尾匡人：水防林が氾濫の流況に及ぼす影響と減勢効果，水工学論文集，第55巻，pp.907-912，2011.
- 7) 鷲見哲也，岸本雅彦，辻本哲郎：越流による破堤進行に及ぼす堤内地条件の影響，河川技術論文集，第10巻，pp.215-220，2004.
- 8) 坂野章，藤田光一：堤防沿いの樹木群が破堤箇所の流れと河床変動に与える影響に関する実験，土木学会第51回年次学術講演会，II-319，pp.638-639，1996.
- 9) 秋山 壽一郎，重枝未玲，木付拓磨，利岡正士：樹林帯の減災機能に関する研究 -堤外樹林帯による越水氾濫流量の低減効果-，水工学論文集，第54巻，pp.859-864，2010.
- 10) 国土交通省河川局治水課監修：堤防に沿った樹林帯の手引き，山海堂，2001.
- 11) 例えば，末次忠司：河川の減災マニュアル，山海堂，2004.
- 12) 秋山 壽一郎，重枝未玲，松田健介，山尾匡人，大庭康平：樹林帯と堤内地盤高が越水氾濫流量に及ぼす影響，河川技術論文集，第17巻，pp.347-352，2011.
- 13) 国土交通省九州地方整備局大分河川国道事務所，大野川河道技術資料，2002.
- 14) 福岡捷二，岡部博一，飯島直己：樹木が密生する常呂川の洪水期間中の流れと河床変動の一体解析法を用いた計画河道断面と樹木管理方法の提案，<http://www.ric.or.jp/profile/works/kiyou/h230223.8.pdf>.
- 15) 重枝未玲，秋山 壽一郎，小園裕司，上川謙：遠賀川流域の分布型流出解析と平面2次元洪水追跡，水工学論文集，第54巻，pp.517-522，2010.

(2011. 9. 30受付)