

# 樹林帯が設けられた築堤河道からの越水氾濫流量の予測法の開発

## 1. はじめに

河川堤防沿いの樹林帯には魚つき林や沿川地域における自然緑地等の環境機能に加えて、①越流時における堤防の安全性の向上、②破堤部の拡大抑制、③氾濫流量の低減、④流木・土砂堆積の防止、表土流失の低減、といった超過洪水時の減災機能があるといわれている<sup>1)</sup>が、その減災機能について論じた研究や技術資料は極めて少なく、樹林帯の減災機能やその効用は工学的に不明な点が多い。先の改正河川法では、河川管理施設として樹林帯が位置づけられ、その計画、整備および維持管理を行う上での技術的知見が求められている。

中小河川を含む破堤事例に関する調査結果<sup>2)</sup>によれば、堤防背後地を中心として甚大な被害をもたらす破堤の8割は越水に起因し、越水が堤防の機能低下や喪失を招く主因であることがわかっている。

また、実務レベルの氾濫解析において本間公式等の堤外樹林帯の影響が考慮されていない流量式を用いて、堤外樹林帯が存在する河道からの越水氾濫流量を予測すると、そこでの河道水位は既に堤外樹林帯による水位上昇を含んでいるので、過大に評価され、これが真値と見なされる。堤内樹林帯が存在する河道からの越水氾濫流量を評価する場合も同様である。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、(1) 河道計画や洪水防御計画の観点から整備・保全された堤外あるいは堤内樹林帯(竹林あるいは樹木の枝下部)特性を考慮した越水氾濫流量式の開発、(2) 堤外樹林帯の越水氾濫流量の低減効果の検討を行った。

## 2. 堤外樹林帯あるいは堤内樹林帯を考慮した越流流量式

樹木群が設けられた幅が十分に広い水路における1次元漸変流の基礎式は、式(1)と式(2)のようになる。なお、樹木群としては、竹林あるいは樹木の枝下部を対象としている。

$$q = \text{一定} \quad (1) \quad ; \quad I_e = \tau / \rho g H + (V/K)^2 \quad (2)$$

ここに、 $q$ ：単位幅流量、 $I_e$ ：エネルギー勾配(= $-d(H+V^2/2g)/dx$ )、 $\tau$ ：摩擦せん断応力、 $H$ ：任意の断面での水位、 $V$ ：任意の断面での断面平均流速、 $K$ ：透過係数(m/s) (= $1/[NaC_d/(2g)]^{1/2}$ )である。ここで、 $N$ ：単位面積中の樹木の本数(本/m<sup>2</sup>)、 $a$ ：樹木1本当たりの投影面積(= $dH$ )、 $d$ ：樹木1本の直径、 $C_d$ ：樹木1本当たりの抵抗係数、 $\rho$ ：水の密度、 $g$ ：重力加速度である。

円柱群の $C_d$ 値については、樹木密度や河床勾配等によらず、 $C_d=1.20$ 程度の一定値を取ることが知られていることから<sup>3)</sup>、本研究でもこの値を用いることとする。

図-1は、大野川水系乙津川(大分県常行地区)の堤外樹林帯(竹林)を示したものである。大野川水系においては、平成5年9月の出水では大野川・乙津川のいずれも計画高水位を超過し、平成17年9月の出水では乙津川の高田橋水位観測所で計画高水位を0.32m超えている。このため、河道計画(防災)の観点から樹木管理が



図-1 乙津川の堤外樹林帯(竹林)  
(出展：国土交通省大分河川国道事務所)

実施されている。

図-2に示すように、樹林帯が設けられた築堤河道における河道横断方向の越水を考える。堤防天端から測った上層部について、堤外地での水位を $H$ 、樹林帯右端側での水位を完全越流状態では限界水深 $H_c(=q_T^2/g)^{1/3}$ 、もぐり越流状態では堤内地水位を $H_d$ として、式(1)と式(2)を堤外地から樹林帯左端、樹林帯左端から右端、および樹林帯右端から堤防天端上(完全越流)あるいは堤内地(もぐり越流)の各区間に適用し整理すると、各越流状態について式(3)と式(4)が得られる。なお、堤防天端に沿った高さでの内部せん断応力は、樹木群の抵抗力に比して小さいとして無視している。

完全越流状態( $H_d/H < 2/3$ ) :

$$H - H_c = (q_T / H_T)^2 (L / K_T^2) + (1/2g)(q_T / H_c)^2 \quad (3)$$

もぐり越流状態( $H_d/H \geq 2/3$ ) :

$$H - H_d = (q_T / H_T)^2 (L / K_T^2) + (k/2g)(q_T / H_d)^2 \quad (4)$$

ここに、 $q_T$  : 樹林帯が設けられた築堤河道での単位幅当たりの越流量、 $H_T$  : 樹林帯区間での樹木の代表水没水深、 $L$  : 樹林帯幅、 $K_T$  : 樹林帯区間の透過係数( $=1/[NdH_T C_d/(2g)]^{1/2}$ )、 $k$  : もぐり越流状態における堤体の形状損失係数である。

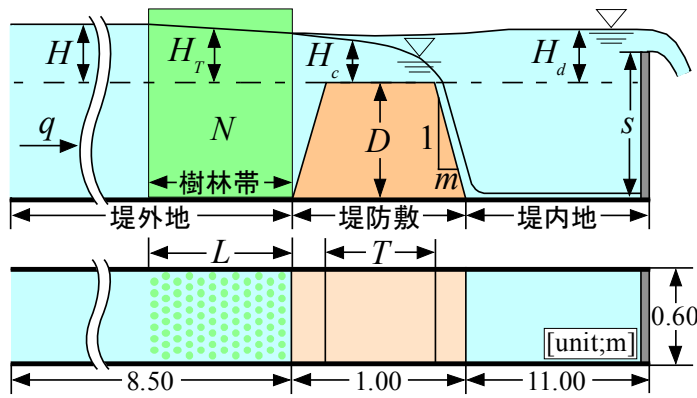


図-2 樹林帯の設置条件と重要な諸量(堤外樹林帯)

式(3)と式(4)において、樹林帯区間での樹木の代表水没水深 $H_T$ は不明な水位である。このため、越流量 $q_T$ を予測するには $H_T$ を既知あるいは推定できる水位と関連づける必要がある。

いま樹林帯区間での水位低下量を $\Delta H$ とすれば、樹林帯左端と右端での水位はそれぞれ $H$ と $H - \Delta H$ となるので、 $H_T$ は式(5)のように近似的に表される。ここで、 $\phi$  : 樹林帯区間での水面形(水没水深)に関する補正係数であり、 $\phi=1$ で直線分布となる。一方、 $\Delta H$ は式(2)から式(6)のように評価できる。

$$H_T = \phi(H - \Delta H/2) \quad (5) \quad ; \quad \Delta H = (V_T^2 / K^2)L \quad (6)$$

式(5)と式(6)より、各越流状態の代表水没水深 $H_T$ が式(7)と式(8)のように得られる。ここで、 $H$ と $H_d$ は既知水位、 $H_c$ は推定可能な水位である。

完全越流状態( $H_d/H < 2/3$ ) :

$$H_T / H_c = 0.5 \left\{ \phi(H / H_c) + \sqrt{\phi^2 (H / H_c)^2 - 2\phi\beta_c} \right\} \quad (7)$$

もぐり越流状態( $H_d/H \geq 2/3$ ) :

$$H_T / H_d = 0.5 \left\{ \phi(H / H_d) + \sqrt{\phi^2 (H / H_d)^2 - 2\phi\beta_c (H_c / H_d)^2} \right\} \quad (8)$$

ここに、 $\beta_c = gL / K_c^2$ 、 $K_c = 1/[NdH_c C_d/(2g)]^{1/2}$ 。

完全越流状態では式(3)と式(7), もぐり越流状態では式(4)と式(8)を連立して解けば, 若干の解法上の工夫が必要ではあるが,  $q_T$ を予測できる. しかしそのように取り扱えば, 式型が複雑になり, 解析的に $q_T$ を得ることができない. また, 越水に樹林帯が及ぼす影響や効果も明確になってこない.

そのような理由から, 本研究では式(3)と式(7)あるいは式(4)と式(8)を分離して取り扱う. すなわち, 式(3)と式(7)では $H_T/H_c=\alpha_1$ , 式(4)と式(8)では $H_T/H_d=\alpha_2$ と置き, 式(3)と式(4)から各越流状態の越流流量式を導く一方,  $\alpha_1$ と $\alpha_2$ はそれぞれ式(7)と式(8)で与えることとする.

$H_T$ をこのように置くことで, 式(3)と式(4)から堤外樹林帯を考慮した各越流状態の越流流量式がそれぞれ式(9)と式(10)のように得られ, しかも本間の越流公式と同型となる. また, 堤外樹林帯が越流流量に及ぼす影響は, 各越流流量式の流量補正係数 $C_T$ として評価され, その意味が明確になる.

完全越流状態( $H_d/H < 2/3$ ):

$$q_T = C_T C_0 H_d \sqrt{2gH} \quad (9)$$

ここに,  $C_T=(1+\gamma\beta_T)^{-3/2}$ ,  $\gamma=2/(3\alpha_1^2)$ ,  $\alpha_1(=H_T/H_c)=0.5[\varphi(H/H_c)+\{\varphi^2(H/H_c)^2-2\varphi\beta_c\}^{1/2}]$ .

もぐり越流状態( $H_d/H \geq 2/3$ ):

$$q_T = C_T C_0 H_d \sqrt{2g(H-H_d)} \quad (10)$$

ここに,  $C_T=(1+\gamma\beta_T)^{-1/2}$ ,  $\gamma=2(C_0/\alpha_2)^2$ ,  $\alpha_2(=H_T/H_d)=\alpha_1(H_c/H_d)$ .

ここで,  $C_0$ : 堤外樹林帯が設けられていない河道での流量係数,  $C_T$ : 堤外樹林帯に関する流量補正係数,  $\beta_T$ : 樹林帯に関する無次元パラメータ( $=gL/K_T^2$ )(以下「樹林帯パラメータ」という)である. 各越流状態での $C_0$ は,  $\beta_T=0$ のときに, 式(9)と式(10)が本間公式と一致することから定められる.

### 3. 実験の概要

実験装置は, 正面越流を対象として, 水平水路を横断するように堤防(法勾配 $m=2$ 割, 堤防高 $D=0.20$ m, 堤防天端幅 $T=0.20$ m)と円柱模型樹林帯(直径 $d=0.006$ m)を樹林帯幅 $L$ (m)にわたって千鳥状に $N$ (本/ $m^2$ )を設置したものである(図-2). 実験は, 樹林帯無し(CASE N), 堤外樹林帯有り(CASE T-O)および堤内樹林帯有り(CASE T-I)の3パターンについて, 模型樹林帯特性( $N, L$ )を変化させ, 完全あるいは潜り越流状態を実施した(表-1). 水深 $h$ はポイントゲージで測定し, 流量 $Q$ は電磁流量計と量水柵の両方で算定し, その平均値とした(相対誤差:  $\pm 0.5\%$ 以内).

表-1 実験条件

CASE		越流形態	$q$ ( $m^2/s$ )	$L$ (m)	$N$ (本/ $m^2$ )	$s/D$		
N	1	O	0.024			1.1		
	2	S						
T	O	O			1.5, 3.0 4.5, 6.0	400	1.1	
						600		
						800		
						1000		
	I	S				1.5, 3.0 4.5, 6.0		400
								600
								800
								1000

### 4. 結果と考察

図-3は、実験値に基づき、 $C_T$ と $(1+\gamma\beta_T)$ との関係を調べたものである。これより、次のことがわかる。(1)  $LN$ が同じ値であれば、 $H_T$ もほぼ同じ値を取り、樹林帯特性は $\gamma\beta_T$ で評価できる。(2)  $H_T$ を適切に評価できれば、 $C_T$ が定まり、式(9)と式(10)から $q_T$ を予測できる。

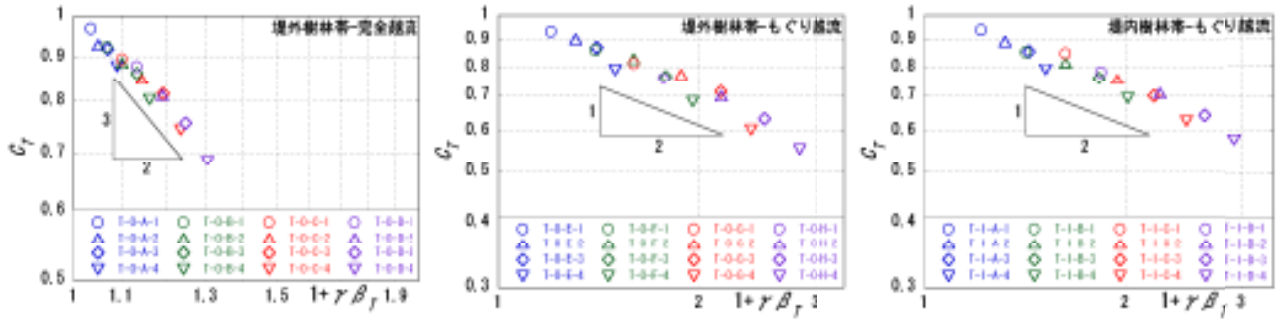


図-3 実験結果に基づく $C_T$ の理論解の検証

ただし、得られた越流流量式(式(9), 式(10))は、 $\alpha$ を介して、 $C_T$ に既知水位( $H$ ,  $H_d$ )と未知水位 $H_c$ が含まれているので、これを勘案した上で、既知水位( $H$ ,  $H_d$ )から適切に $H_T$ を評価し、 $q_T$ を予測できる解法とする必要がある。図-4は、これを踏まえた解法計算である。

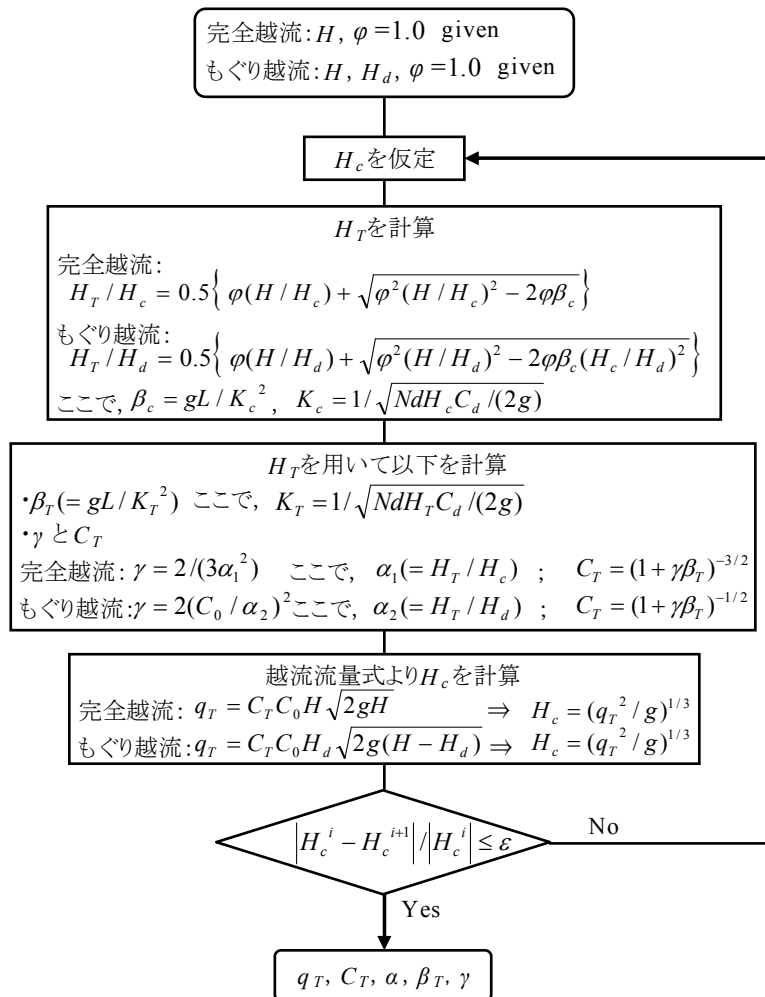


図-4 計算手順

図-5は、式(7)と式(8)の水面形に関する補正係数 $\varphi$ の同定と予測精度の検証を併せて行ったものである。実験から得られた $\varphi$ 値(全48ケース)が、 $\varphi=0.99\sim 1.02$ であることを踏まえ、 $\varphi$ 値を $\varphi=0.9$ ,  $1.0$ および $1.1$ に変化させ、堤外樹林帯および堤内樹林帯の各越流状態の予測値 $q_{T\text{CAL}}$ /実験値 $q_{T\text{EXP}}$ と $\beta_T$ との関係について調べた。これより、次のことが確認できる。(1)  $\beta_T$ の値にかかわらず、 $\varphi=1.0$ としてよい。(2) 堤外および堤内樹林帯のいずれの越流状態についても、樹林帯特性と既知水位が与えられれば、越流流量をほぼ正確に予測できる。

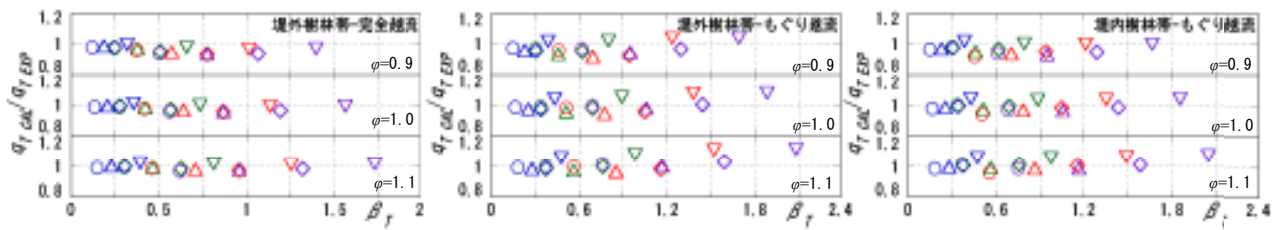


図-5  $q_T$  の予測値と実験値との比較

図-6は、式(7)と式(8)において $C_T=1.0$ とした場合、すなわち堤外樹林帯が無設置の場合の越水氾濫流量 $q_0$ に対する $q_T$ の相対誤差 $((q_T-q_0)/q_0)$ の計算結果と実験結果を比較したものである。ここで、 $q_0$ を比較対象としているのは、(1) 堤外樹林帯が存在する河道からの越流流量には、堤外樹林帯による越流流量低減効果が既に含まれているので、その低減率を評価できないこと、(2) 現行の実務レベルでの氾濫解析では、堤外樹林帯が設置された河道からの越水氾濫流量を本間公式等の流量式で評価し、これを真値と見なしていることによる。そこでここでは、 $(q_0-q_T)/q_0$ を堤外樹林帯による越水氾濫流量の低減率と定義する。これより、いずれの越流状態においても堤外樹林帯は顕著な越水氾濫流量の低減機能を有していることや、その評価も可能であることが確認できる。

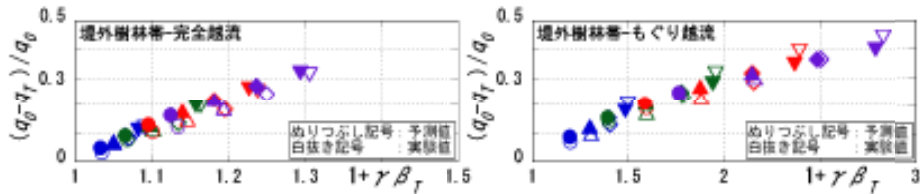


図-6 堤外樹林帯による越水氾濫流量の低減率

## 5. まとめ

本研究から次のような知見が得られた。(1) 堤外あるいは堤内樹林帯が設置された河道からの越水氾濫流量を予測する手法を開発し、実験結果との比較検討よりその妥当性を検証した。(2) 堤外樹林帯が顕著な越水氾濫流量の低減機能を有することと、その低減率の評価が可能であることを明らかにした。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 建設省土木研究所河川研究室：越水堤防調査最終報告書，土研資料第2074号，1984.
- 3) 福岡捷二，藤田光一：洪水流に及ぼす河道内樹木群の水利的影響，土木研究所報告，180-3，1990.