

樹林帯による破堤氾濫流の減勢効果に関する研究

1. 研究の背景

堤防に沿った樹林帯や水防林(以下「樹林帯」という)は、環境機能と治水機能を兼備した優れた河川管理施設である。しかし、その機能と効用については、工学的に必ずしもよくわかっているわけではない。本研究は、以上のような背景を踏まえ、破堤氾濫流に対する樹林帯の減勢効果について検討を加えたものである。

2. 実験の概要

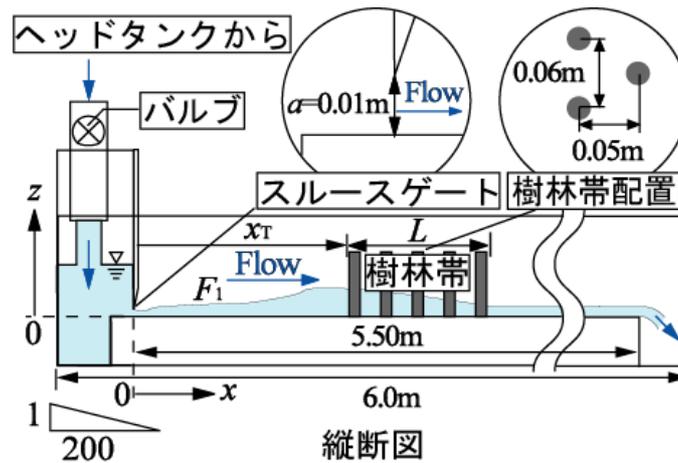


図-1 実験装置

表-1 CASE B 実験条件

実験装置は、両面アクリル製の水槽(長さ 6.0m、幅 0.50m、高さ 0.50m、勾配 $I=1/200$)内に河床(長さ 5.50m、粗度係数 $n=0.01$)と水門(開き $a=0.01\text{m}$)を設け、河床に模型樹林帯(直径 $d=0.018\text{m}$ 、幅 $L=0.25 \sim 1.50\text{m}$ 、本数 $N=320$ 本/ m^2)を千鳥状に配置したものである。破堤氾濫流を想定し、幅広い Froude 数 $F_1(=q/(gh_1^3)^{1/2})$ で水門から流出するようにした。水門からの流出水は、射流状態で流下した後、下流端で段落し、量水枘で流量計測できるようになっている。ここで、 q =単位幅流量(m^2/s)、 $h_1 = C_c \cdot a$ 、 C_c =収縮係数である。なお、水路勾配は、限界勾配に近い急勾配である。

実験は、水門位置での流れの状態と樹林帯特性との関係(CASE A)と樹林帯による減勢効果(CASE B)について検討した。CASE A では、樹林帯特性 $\Psi(=LNd)$ を $\Psi=1.4, 2.9, 4.3$ および 5.8 、Froude 数 F_1 と樹林帯設置位置 x_T/L を様々に変化させ、水門から流出水が射流状態で流出する限界条件を求めた。CASE B では、 $\Psi=1.4$ と 2.9 の各場合について、 $x_T/L=0.40, 0.80$ および 1.20 とし、 F_1 を「強いもぐり流出」から「水位上昇区間が L の範囲内となるような自由流出」となるように変化させ、水面形を把握した。実験装置と CASE B の実験条件をそれぞれ図-1 と表-1 に示す。

CASE	x_T/L	F_1	領域
1-x1-F1	0.4	2.3	A
1-x1-F2		2.5	A
1-x1-F3		4.0	B
1-x1-F4		4.3	C
1-x1-F5		4.8	D
1-x2-F1	1.4	2.6	A
1-x2-F2		3.2	A
1-x2-F3		4.2	B
1-x2-F4		4.7	C
1-x2-F5		5.4	D
1-x3-F1	1.2	3.1	A
1-x3-F2		3.2	A
1-x3-F3		4.2	B
1-x3-F4		4.8	C
1-x3-F5		5.4	D
2-x1-F1	0.4	3.1	A
2-x1-F2		4.2	A
2-x1-F3		6.0	B
2-x1-F4		7.3	C
2-x1-F5		8.0	D
2-x2-F1	2.9	3.1	A
2-x2-F2		4.5	A
2-x2-F3		6.5	B
2-x2-F4		8.4	C
2-x2-F5		10.0	D
2-x3-F1	1.2	3.5	A
2-x3-F2		4.2	A
2-x3-F3		7.3	B
2-x3-F4		9.2	C
2-x3-F5		10.6	D

3. 樹林帯による減勢効果

3-1. 流れの状態と領域

図-2は、樹林帯が存在する状況での破堤氾濫流の流況を模式的に示したものである。図-3は、流況の一例(CASE Ψ 2-x2)を示したもので、図中の赤線は限界水深 $h_c(=(q^2/g)^{1/3})$ である。このように樹林帯特性 Ψ が同じでも、流況は F_1 と x_T/L によって異なった流況を呈する。

図-4は、水門位置での流れの状態に関する限界条件を F_1 と x_T/L との関係として Ψ 別に示したものである。実線で示した限界条件より右側の領域であれば、水門位置において射流状態で自由流出する。なお、図中のプロットは、CASE Bの実験条件を示したものである。同図より次のことがわかる。(1) Ψ が小さい方が、自由流出となりやすい。(2) ある Ψ に対して、 x_T/L が小さいと、自由流出となる F_1 は大きくなる。(3) したがって、定性的には Ψ が大きく、 x_T/L が小さくなるように樹林帯を設置した方が、もぐり越流となり、幅広い F_1 に対して堤防裏法尻付近での落ち堀(局所洗堀)の形成が抑制される。

図-5と図-6は、それぞれCASE Bより得られた無次元水面形 h/h_c を Ψ 1=1.4 と Ψ 2=2.9 の場合について x_T/L ごとに示したものである。 F_1 の増加に伴い、次のような4領域が発生することがわかる。(1) 領域A:水門位置でもぐり跳水、樹林帯上流側全域で水位上昇が起こる、(2) 領域B:水門位置で自由流出となり、樹林帯上流側で自由跳水が起こり、水位上昇区間が短くなる、(3) 領域C:水位上昇区間が樹林帯幅にほぼ収まり、水位が低下する、(4) 領域D:樹林帯最前列で流水の飛散が発生し、水位上昇区間が樹林帯区間よりも短くなり、水位はさらに低下する。また、次のことがわかる。(1) 全領域で樹林帯下流側の水深は等流水深 $h_0(=(n^2q^2/l)^{3/10})$ となる。(2) 領域Aでは、跳水後に樹林帯による堰上げのため若干の水位上昇が起こる。(3) 全体的な傾向としては、領域A、次いで領域Bで、与えられた F_1 に対して水位上昇区間が最も長くかつ水位が高くなる。また、最大水位は、 x_T/L と F_1 にほぼ無関係に Ψ 1で $h/h_c=2.1$ 程度、 Ψ 2で $h/h_c=2.5$ 程度であり、 Ψ にほぼ規定される。

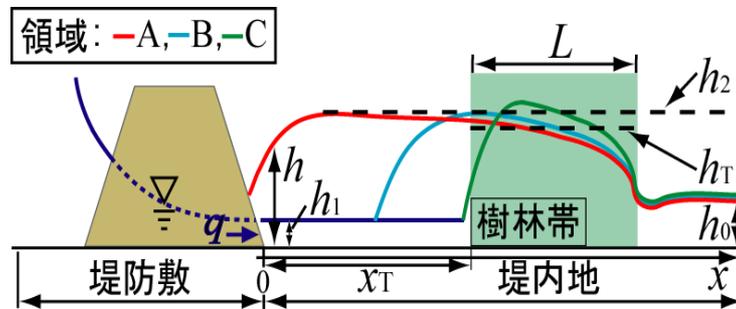


図-2 流れの定義と重要な諸量

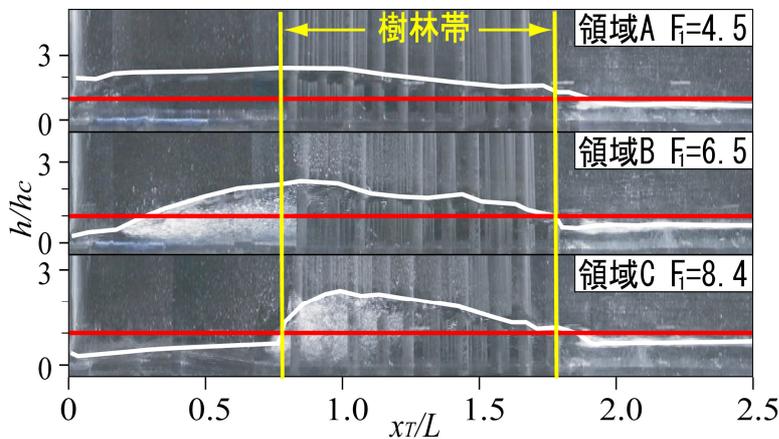


図-3 流況の一例(CASE 2-x2)

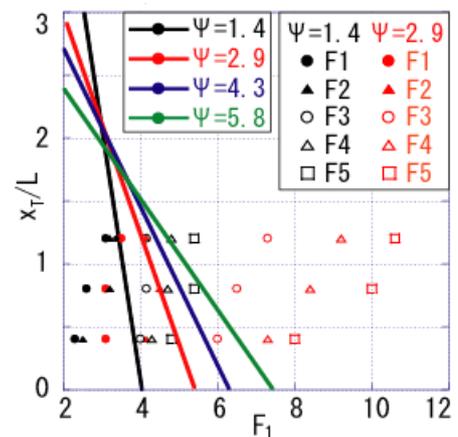


図-4 限界条件

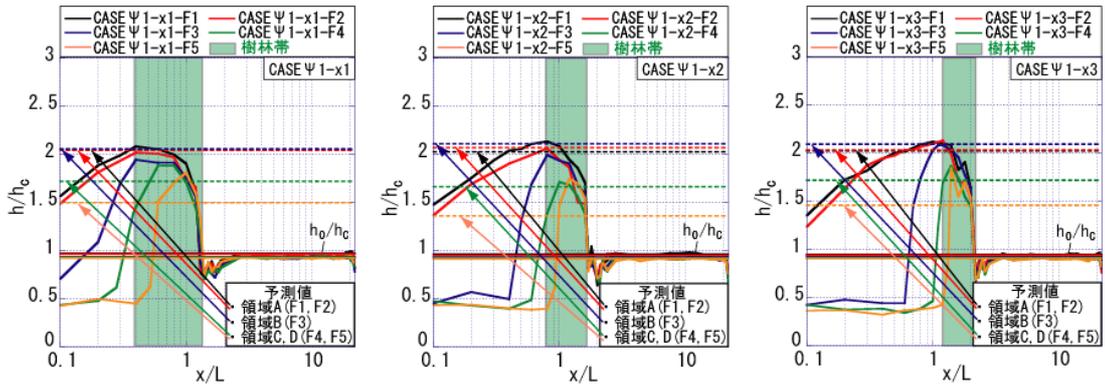


図-5 無次元水面形(CASE 1)

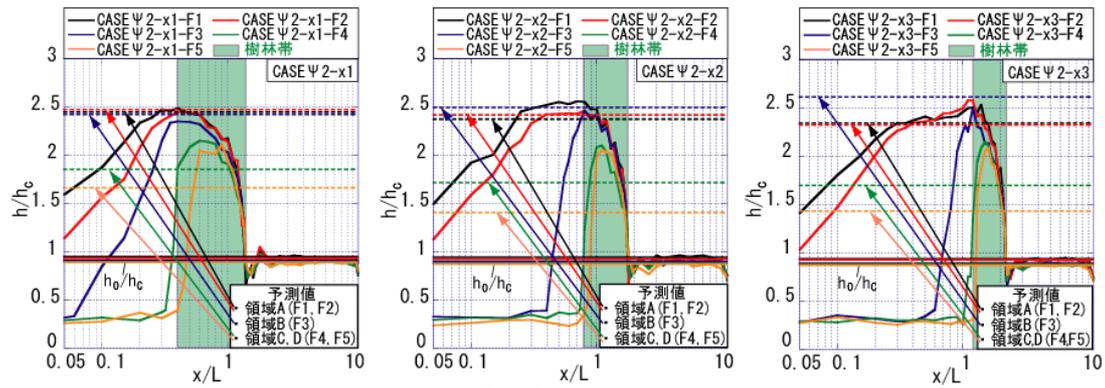


図-6 無次元水面形(CASE 2)

3-2. 樹林帯による水位上昇の予測と領域区分

樹林帯による水位上昇を予測する式は、以下に示すとおりである。

$$(h_2/h)^3 - [1 + 2F_1^2(h_1/h)^2] (h_2/h) + 2(h_1/h)F_1^2(h_1/h)^2 = 0 \quad (1)$$

ここで、 h ：縮流部での全水深、 h_1 ：縮流部の水深($=C_c \cdot a$)、 h_2 ：跳水後の水深

$$h_2/h_1 = (\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)/2 \quad (2)$$

ここで、 h_1 ：縮流部の水深($=C_c \cdot a$)、 h_2 ：跳水後の水深

$$[(h_T/h_1)^2(1-\lambda)^2] [1 - (h_0/h_1)] (h_0/h_1) [1 + (h_0/h_1)] - 2F_1^2 \} - 2(h_0/h_1)(L/h_1) [n^2 gh_T^{-1/3} + (g/K_T^2)] F_1^2 = 0 \quad (3)$$

ここで、 $K_T (=Ndh_T C_d / 2g)^{1/2}$ ：樹林帯区間平均の透過係数、 λ ：樹林帯密度、 C_d ：樹木1本あたりの抵抗係数

(1)領域 A のもぐり跳水後と領域 B の自由跳水後の水深 h_2 は、それぞれ式(1)と式(2)で与えられる。ただし、領域 B では樹林帯による堰上げのため、自由跳水下流側～樹林帯上流端の区間で若干の水位上昇が起こる。(2)領域 C と D における樹林帯設置区間での平均水深 h_T は、式(3)で与えられる。式(3)は樹林帯による流積減少、動圧による抵抗力、樹林帯下流での等流水深 h_0 等を考慮し、樹林帯区間に運動量保存則を適用して得られたものである。なお、樹林帯区間での造波抵抗や樹林帯前面での水位差による抵抗を考慮する必要があるが、いずれも局所的な抵抗でその評価が理論的に困難なため、ここでは考えていない。なお、領域 A の h_2 あるいは領域 C と D の h_T は、式(1)あるいは式(3)を Newton・Raphson 法で解き求めた。また、式(1)中の h には実験値を、式(3)の h_1 には縮流部から樹林帯上流端までの水面形計算から得られた水深を用いた。領域 B の h_2 は式(2)より求めた。

領域 A、B および C における実験値と予測値は、図-5 と図-6 中に示したとおりである。これより次のことが確認できる。(1)領域 A と B では、跳水後の水深 h_2 がほぼ予測されている。(2)領域 C と D では、樹林帯区間の平均的な水深 h_T の予測値と実験値の誤差は±4%程度であった。誤差の要因は、先述した造波抵抗や水位差による抵抗と考えられる。

図-7 は，実験結果に基づき，縮流部で定義された比力 $M(=h^2/2+q^2/gh)$ と，樹林帯の抗力 D_T を単位体積重量 ρg で除した $R(=L(q/h_T)^2 \cdot [K_T(1-\lambda)]^2)$ との比 M/R と x_T/L との関係性を求めたものである．これより次のことがわかる．(1) M/R と x_T/L によって，もぐり跳水，自由跳水および樹林帯区間での強制跳水・飛散の3領域に区分できる．(2) 樹林帯による氾濫流の減勢効果が高いと期待される領域 A は，想定氾濫流量 q に対して，樹林帯の特性 ψ と設置位置 x_T/L で特定できる．また，そのときの最大水深は，式(1)から推定できる．

4. おわりに

本研究では，堤内樹林帯設置時の破堤氾濫を想定し，流れの状態と樹林帯特性との関係と樹林帯の減勢効果について実験的に検討し，さらに予測値との比較を行った．本研究により，流況と領域の関係，水深の予測法等，破堤氾濫流に対する樹林帯の減勢効果を評価検討する上で必要となる工学的な知見と技術が得られた．

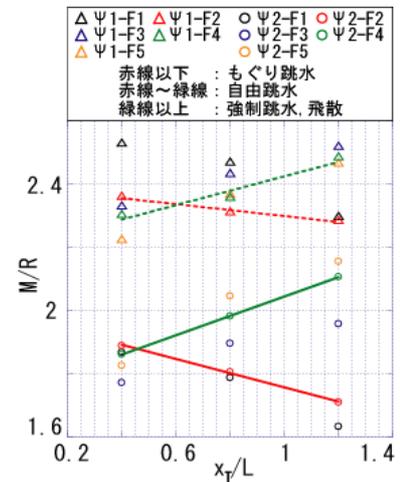


図-7 領域区分