

水理模型実験による水害防備林の 洪水氾濫流木捕捉機能強化の検討

HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT FOR FUNCTIONAL ENHANCEMENT
OF DRIFTWOOD CAPTURE BY FLOOD-RESTRAINING FOREST BELTS

佐藤裕和¹・肱岡勝成²・深田耕太郎³・遠藤雅実⁴

Hirokazu SATO, Katsunari HIJIOKA, Kotaro FUKADA and Masanori ENDO

¹正会員 博 (環) 島根大学助教 生物資源科学部 (〒690-8504 松江市西川津町1060)

²正会員 修 (生資) 元島根大学大学院修士課程 (住所非公開)

³非会員 博 (農) 島根大学助教 生物資源科学部 (〒690-8504 松江市西川津町1060)

⁴学生会員 修 (環) 東京大学大学院博士課程 新領域創成科学研究科 (〒277-8561 柏市柏の葉5-1-5)

Measures for enhanced inundation driftwood trapping by inland flood-restraining forest belts were examined in a hydraulic model experiment. The forest model (scale: 1/100) consisted of rods with a diameter of 3.05 mm set in a 3-cm square lattice form. The model driftwood pieces (length: 1 cm) all passed through the initial model forest. Subsequently, parts representing ropes, nets, boards and piles were installed between the trees in the rearmost row at a height of 2.4 cm to represent the situation of actual flood-fighting measures implemented by residents near rivers. The ropes were 0.33 mm in diameter and were set 3 mm apart, the nets were 0.35 mm in diameter and were set 3 mm apart, the boards were 9 mm in width and were set 3 mm apart, and the piles had a rectangular cross section of 1 × 1.2 mm and were set 4 mm apart. Each of the capture ratios was improved to approximately 56, 50, 7 and 49%. These results show the effectiveness of using simple and practical installations in inland flood-restraining forest belts for enhanced trapping.

Key Words : *inundation drift wood, driftwood capture, flood-restraining forest belts, functional enhancement, flood-fighting*

1. はじめに

豪雨時の流木の堤内地への流入経路には様々あるが、洪水に伴う河道由来の流木は、氾濫が発生した場合には氾濫流とともに堤内地へ侵入・拡散し、水害時の避難行動や復旧作業にとって大きな妨げになることがある。このような問題には、山地の保全、流域や河道内での流木対策に効果が期待されるが、現時点で全ての流木流下を阻止する技術は確立されていない状況にある。また、近年の豪雨・洪水外力の激化により、洪水氾濫に伴う堤内地への流入流木量の増加も否定できない。このため、洪水氾濫に伴う流木対策を、堤内地側でも講じておく必要がある。

この対策のためにわが国では、堤内地に水害防備林(以下、水防林と略記)を設置し、氾濫流を抑制しながら堤体を保護し、流木を含む洪水氾濫由来物質の宅地や田畑などへの流入を軽減させる工夫を施してきた事例が

各地で見られる^{1)~9)}。特に、氾濫流の抑制機能についての重要かつ定量的な情報が、水理模型実験や数値シミュレーションによって提供されてきている^{10)~13)}。

一方、水防林の持つ氾濫物質の捕捉機能についての研究は多くは見られず、流木の捕捉機能については類似の効果を持つ河畔林での検証¹⁴⁾や海岸林での評価^{15)~17)}がある以外に、佐藤ら¹⁸⁾による水理模型実験がなされている程度である。ただし、佐藤ら¹⁸⁾の実験では既存の水防林が有する流木捕捉機能を前提にしており、水防林を新設する以外には、堤内地での洪水氾濫流木効果を大きく高めることは難しい。

そこで、本研究では佐藤ら¹⁸⁾の水理模型実験での検討内容を受けて、水防林の持つ流木捕捉機能を強化させることを目的とし、継続実験を実施した。ここで重視したのは、水防活動で河川沿いの住民が実際に作業できる技術レベルであることである。すなわち、汎用な資材や工法を用いて水防林内の氾濫流と流木の通過を減じられるような対策について検討することとした。

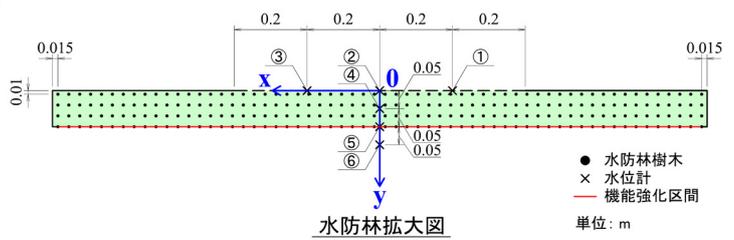
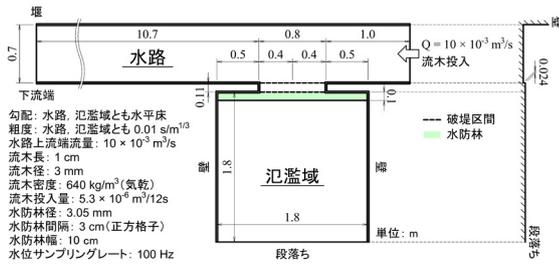


図-1 水理模型の概要

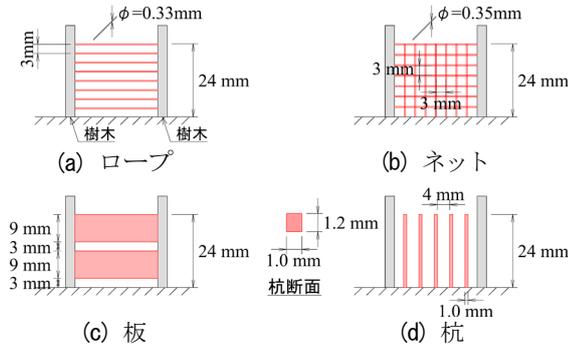


図-2 機能強化方法の概略図

表-1 機能強化方法の諸元

方法	寸法	間隔	材料	透過率 (破堤口方向)
水防林	$\phi : 3.05\text{mm}$	3cm	丸釘 (滑)	89.8%
ロープ	$\phi : 0.33\text{mm}$	3mm	ナイロンテグス	80.7%
ネット	$\phi : 0.35\text{mm}$	3×3mm	ステンレス	71.4%
板	幅: 9mm, 厚さ: 0.8mm	3mm	プラスチック	23.6%
杭	幅: 1mm, 厚さ: 1.2mm	4mm	アルミニウム	73.4%

流木は林内でほとんど捕捉されることなく通過することが分かっているため、ここでは設置間隔3cmより十分短い1cmの流木長とした。流木径は水防林の樹木径と同程度の3mmとした。素材は気乾密度約640kg/m³の南洋材を気乾状態で用いた。流木は、佐藤ら¹⁸⁾の実験を踏襲して12秒間隔で5.3×10⁻⁶m³ (75本) を120秒間 (計750本) , 破堤口上流端の上流1m地点より投入した。その後30秒間流況が定常になるのを待って、林内での捕捉流木数を計測した。これを一連の実験とし、同一条件下で3回ずつ実施した。

2. 実験諸元

(1) 水理模型

本実験では具体的な河川は対象にしているが、幾何縮尺で1/100のスケールを想定し、相似律にはフルード則を用いた。水理模型は長さ12.5m, 幅0.7mの直線開水路に、1.8m四方の滯留域を敷高0.024mで接続させた (図-1) 。両者とも水平床とし、粗度係数は0.01s/m^{1/3}である。水路下流端には水位調整用の可動刃型堰を設け、滯留域の両側は壁面、下流端は段落ちとした。

水路上流端からは10×10⁻³m³/sの流量 (実スケール1,000 m³/s相当) を定常で与え、破堤口から滯留域へ滯留流が流入する条件とした。破堤口の考え方は、堤防間幅から回帰した土木研究所の式¹⁹⁾より実験では幅0.8mとし、堤高0.05mの堤防が越流とともに破堤するとした水位を水路下流端の堰で調整した。計測水理量は、破堤口沿い (図-1右図のx軸) と滯留域中心線 (図-1右図のy軸) の計6点の水位 (超音波水位計, KENEK社製) , 実験前後の滯留流量 (直接法による) である。

水防林模型は、構造令²⁰⁾での推奨樹林密度1本/10m² (胸高直径0.3m以上) から、直径3.05mmの丸釘を中心間隔3cmの正方格子で滯留域の破堤口前面に設置した。樹林帯制度の適用河川では水防林幅を20m程度と考える場合が見られるが、ここでは後述する流木捕捉機能強化にとって厳しい条件となる幅10mを考え、実験では0.1mとした。

(2) 流木

佐藤ら¹⁸⁾の先行実験により、水防林設置間隔より短い

(3) 機能強化方法

既存の水防林で流木捕捉効果を高めるには、林内の滯留流と流木の通過を減じることが基本となる。ここでは、河川沿線の住民による水防活動で実施可能な技術として、樹木間へのロープ張線、ネット架設、平板張り、角杭打ち (以下、ロープ、ネット、板、杭と略記) を選んだ。それぞれの高さは、実作業が極端に高所にならないよう2.4m (実験では2.4cm) にそろえた。図-2と表-1に概略図と諸元をそれぞれ示す。表-1中の透過率とは、水防林の破堤口方向の全投影面積に対する、樹木幅や各種機能強化による遮蔽部分を除いた投影面積の比である。設置箇所は、実際の破堤時には水防林の前面であるほど水防林樹木が倒壊する可能性が高いため、最後列 (図-1右図のy=0.1m) とした。

3. 結果と考察

(1) 水理量

図-3, 図-4に破堤口および滯留域の水位の時間変化と実験終了時の空間変化を、図-5に滯留流量をそれぞれ示す。水位は滯留域底面を基準とし、3秒のメディアン

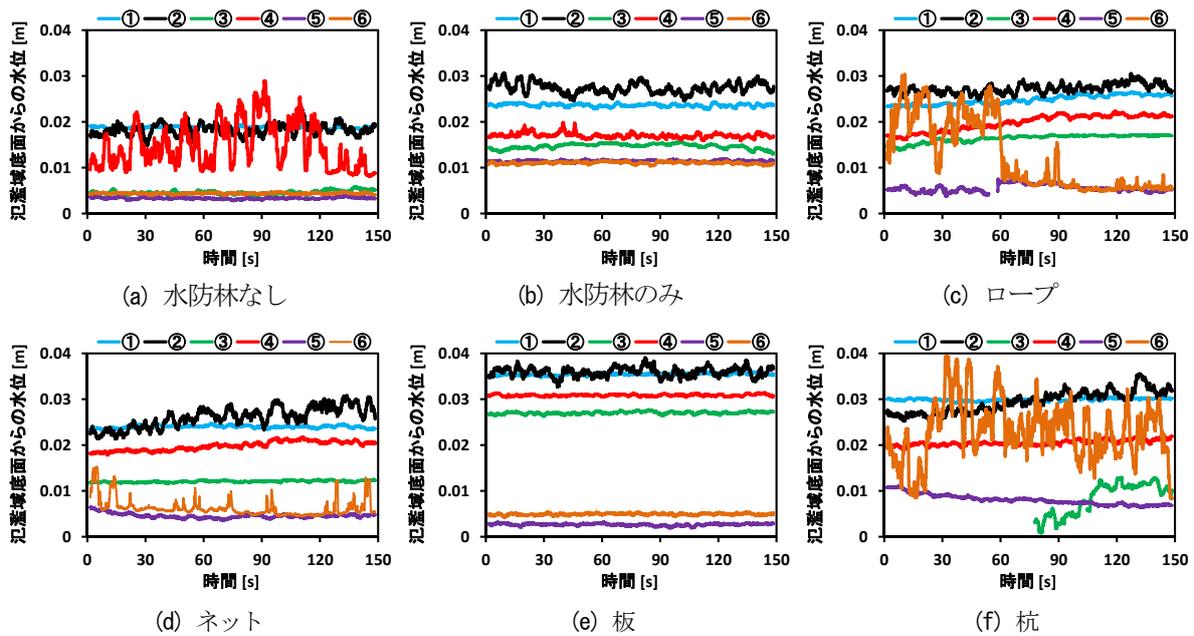


図-3 破堤口および氾濫域水位の時間変化

(3実験の平均, 3秒メディアンフィルター処理後に負値を除去, 水位計位置①-⑥は図-1右図参照)

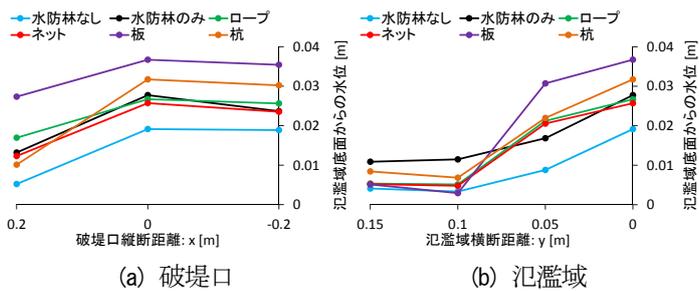


図-4 破堤口および氾濫域水位の空間変化

(実験終了時, 3実験の平均, 3秒メディアンフィルター処理後に負値を除去, 横軸の x , y 位置は図-1右図参照)

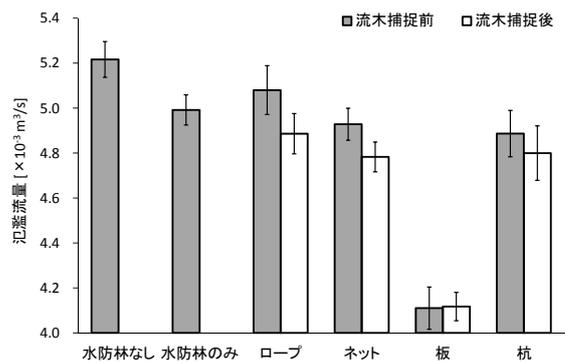


図-5 氾濫流量 (3実験の平均)

フィルターによりノイズ処理を行い, 負値は除去した.

水位の時間変化は, ロープや杭のケースにおいて, 水防林外側の水位において振動が激しくなっている (図-3(c), (f)) が, 流木の通過や捕捉によって各地点で水位が極端に変動している様子はない. 他方, 時空間変化の双方において, 板の破堤口および水防林内の水位が他の強化法に比べて高くなっており, また氾濫流量も少なくなっていることが分かる. これは, 板による遮蔽率が高くなり, 氾濫流に対しては堤防のような役割を果たしていることによるものと考えられる. すなわち, 水位が高い状態で氾濫流と流木が板を大きくオーバーフローする傾向にあり, このことは目視でも確認された. 流木捕捉と氾濫流量の関係については後に詳述する.

(2) 流木捕捉

図-6に氾濫域への流木流入率 (水路に投入した流木が氾濫域へ流入した比率) を, 図-7に水防林内での流木捕

捉率 (水防林内で捕捉された流木の比率) をそれぞれ示す. 図-7には, 氾濫流木数に対する捕捉率と, 水路へ投入した全流木数に対する捕捉率を併記している. また, 図-8に捕捉された流木の水防林内での空間分布を示す.

a) 対策なし (透過率: 89.8%)

水防林のみで機能強化対策を施さなかった場合, 本実験で用いた流木長に対する林内での捕捉は見られなかった. 流木の樹木への衝突も視認されたが, ここで想定した流木長が水防林樹木の設置間隔の1/3程度であり, いずれも瞬間的な流下の阻害にとどまった.

b) ロープ (透過率: 80.7%)

氾濫域への流木流入率は, 対策なし (水防林のみ) の場合に比べ減少し約39%で, 水防林内での捕捉は, 水防林のみの場合には見られなかったのが, 流入流木量の約56%を捕捉した. また, 林内で捕捉された流木の空間分布は, 破堤口沿いを中心に下流側まで及んでいる. 図-9(a)に捕捉の様子を示す.

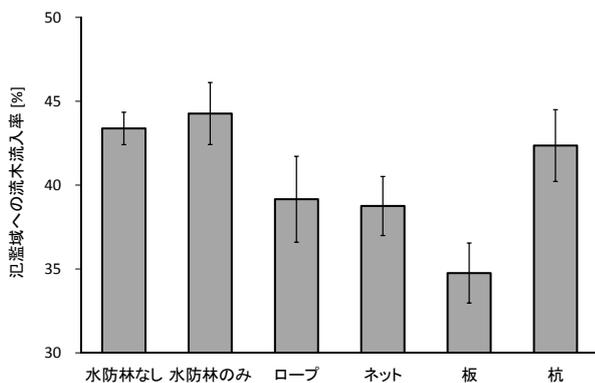


図-6 氾濫域への流木流入率 (3実験の平均)

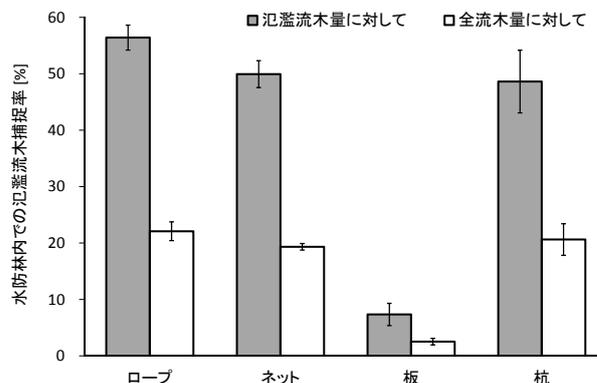


図-7 水防林での氾濫流木捕捉率 (3実験の平均)

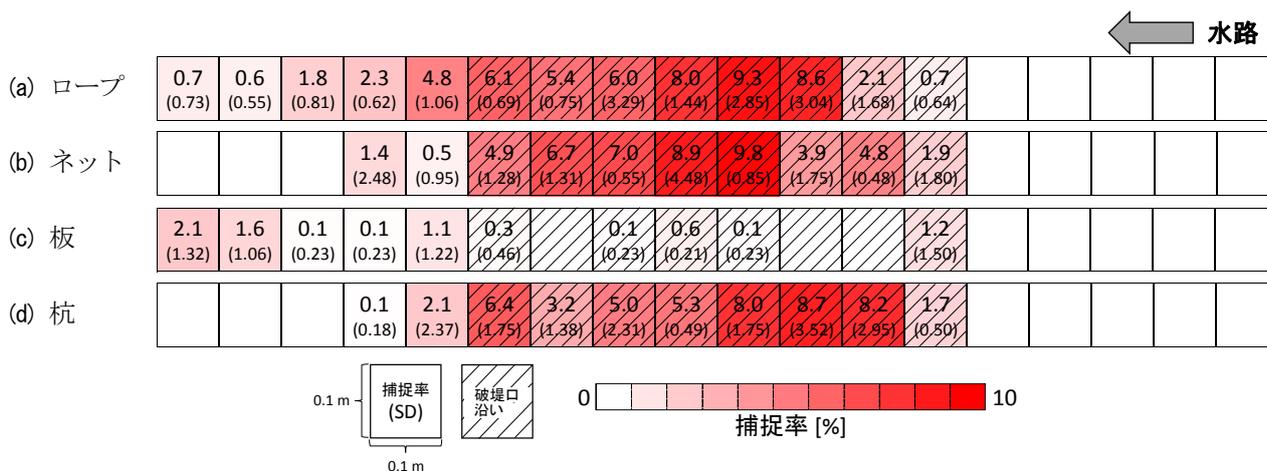


図-8 捕捉流木の水防林内での空間分布 (3実験の平均)

c) ネット (透過率 : 71.4%)

透過率はロープの場合に比べて10%程度減少しているが、氾濫域への流木流入率はロープの場合と同程度の約39%となった。氾濫流木の捕捉率は約50%となり、ロープの場合よりも捕捉率をやや下げている。捕捉流木の林内での空間分布は、破堤口沿いによく集中している。図-9(b)に捕捉の様子を示す。

d) 板 (透過率 : 23.6%)

透過率が他の方法に比べて大幅に減少し、氾濫域への流木流入率は約35%となり、他の強化法に比べて最も流入を抑制したが、透過率の減少幅ほど流入流木量を抑制しなかった。また、捕捉率も最低の約7%となったが、これは先述のとおり、板による氾濫流の遮蔽と氾濫水位が高まったことによる。捕捉流木の林内での空間分布は、特に破堤口前面に集中せず、破堤口より下流側にかけて比較的均等に広がった。図-9(c)に捕捉の様子を示す。

e) 杭 (透過率 : 73.4%)

透過率はネットの場合と同程度であるが、氾濫域への流木流入は4つの強化法の中で最大の約42%であった。氾濫流木に対する捕捉率は約49%で、ネットの場合とほぼ同じとなった。捕捉流木の林内での空間分布は、ネットの場合と同様に破堤口沿いに集中した。図-9(d)に捕

捉の様子を示す。

(3) 流木捕捉に伴う氾濫流量の変化

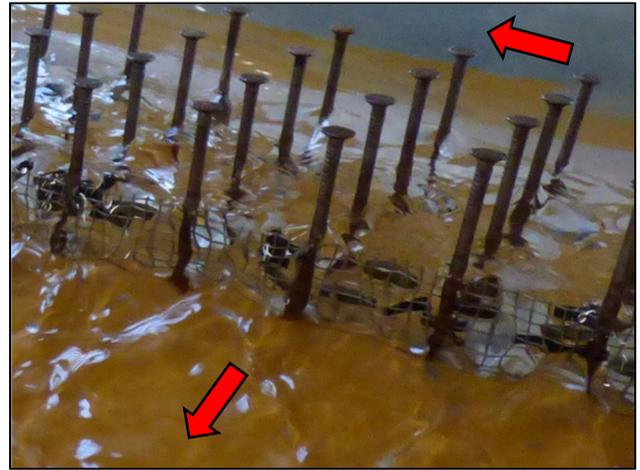
本実験では水路流量を定常で与えたが、図-6より水防林での流木捕捉の少なかった板以外で、氾濫流量の実験前後での減少が確認できる (有意確率はロープ : $p \approx 3 \times 10^{-5}$, ネット : $p \approx 2 \times 10^{-4}$, 杭 : $p \approx 0.02$)。つまり、流木の捕捉により堤内地への氾濫流量も抑制されるという副次的な効果が発現したことになる。なお、水防林を設置するだけでも氾濫流量を減少させている ($p \approx 3 \times 10^{-8}$)。ロープの場合、流木流入前には水防林のみの場合よりも氾濫流量が増加しているが、流木の捕捉により最終的には水防林のみよりも氾濫流量が減少した ($p \approx 0.003$)。

4. 機能強化に伴う水防林樹木の力学的負担

流木捕捉の機能を強化し、捕捉流木が多くなった場合、流水の阻害も大きくなるため、それを支える水防林樹木へ掛かる水圧が大きくなり、過度な捕捉になれば樹木が折れたり倒壊する可能性が生じる。そこで、本稿で提案としたような機能強化を行う場合には、あらかじめ



(a) ロープ



(b) ネット



(c) 板



(d) 杭

図-9 水防林内での流木捕捉例

樹木の力学的な安定性を検討しておく必要がある。

ここでは、樹木へかかる最も負担の大きい場合を想定して、樹木間で完全に流水が阻害されて静水状態となった全水圧が、両側の樹木で支えられている状況を外力条件とする。すなわち、個々の樹木はキャンチレバーとなり、全水圧に対する曲げモーメントとせん断力を負担する状態となる。

各種幾何条件は実スケールで水深2.4m、樹木間距離3m、樹木径0.3mとした。水深については、越流水深を考量するとさらに大きな値となるが、機能強化の方法によって越流水深が異なるため、ここではベンチマークとして本実験で想定した機能強化条件に等しい高さとした（図-2参照）。このとき、樹木間の全水圧は約84.7kNである。水防林の両端部を除けば、一本の樹木にはこの半分の力が両側より作用するため、結局この大きさの力が樹木一本あたりの負担する外力であり、キャンチレバーの支点反力もこれと等しい。鉛直方向の圧力は三角形分布となっているため、地盤から2.4÷3=0.8mの高さで作用点となり、根元で最大曲げモーメントと最大せん断力が働き、それぞれ約67.8kN・m、約84.7kNとなる。円柱の場

合の最大曲げ応力 σ_{max} と最大せん断応力 τ_{max} は、それぞれ以下のように求められる。

$$\sigma_{max} = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (1)$$

$$\tau_{max} = \frac{16Q}{3\pi d^2} \quad (2)$$

ここに、 π :円周率、 d :直径、 M :曲げモーメント、 Q :せん断力である。

これより、 $\sigma_{max} \approx 25.6\text{N/mm}^2$ 、 $\tau_{max} \approx 1.6\text{N/mm}^2$ となる。樹木の強度にも様々あるが、建築基準法施行令（平成27年改正）²¹⁾によれば、例えば実際の水防林でも多く見られるスギでは、無等級材の曲げ強度とせん断強度はそれぞれ22.2N/mm²、1.8N/mm²とされている。ただし、生育状況にある実際の樹木は、製材と異なり含水率が高く、この基準よりも低い強度と考えられるため、流木捕捉を水防林で積極的に行う場合には、根元付近を中心として、背後への支木、巻立て、樹木間のロープやワイヤによる連結など、樹木に何らかの補強を施しておくことが無難である。また、樹木の強度が十分であっても地盤強度が十分でない場合には、樹木が倒壊する可能性があ

る。この場合には樹木前面の地盤に土のうなどを置いて押え盛土をし、倒壊に対しての予防策を講じることが必要となる。

5. おわりに

本稿では水防林の持つ洪水氾濫流木の捕捉機能について、住民が水防活動で実施できるような簡易な技術や工法によって強化することを試み、水理模型実験を行った。その方法は、水防林樹木間へのロープ張線、ネット架設、平板張り、角杭打ちとした。また、流木捕捉量の増加に伴う水防林樹木に作用する外力と樹木強度との関係についても概算し、実務上の留意点についても言及した。以下、本研究で得られた知見を列記する。

- ・ 水防林のみでは見られなかった流木捕捉率を、効果の高低はあるが上記の方法によって向上させた。
- ・ 氾濫流木に対する捕捉率はロープでは約56%、ネットでは約50%、板では約7%、杭では約49%であった。
- ・ 板の場合には透過率が小さいが、氾濫流に対して堤防のような役割を果たし、水防林内での水位が高まり、氾濫流とともに流木が板を大きくオーバーフローしてしまい、捕捉率が低下した。
- ・ いずれの方法でも、透過率の減少あるいは、流木捕捉に伴い、氾濫流量を抑制するという副次的な効果が見られた。
- ・ 板の場合には、多量の流木捕捉は見込まれないが、氾濫流量と流入流木量を抑制する効果が最も期待できる。
- ・ 流木捕捉に伴って増加する水圧による水防林樹木や地盤への負担は、樹種や直径、地盤強度によっては過大になりうるため、水防活動の一環で何らかの補強をしておくことが安全である。

以上より、ロープ、ネット、杭がほぼ同様の流木捕捉効果を発揮するため、現場ごとの設置のしやすさから工法を選択すればよい。ただし、流木捕捉に伴う水防林樹木への力学的負担の増加を緩和することまで配慮すると、水圧に対する反力を負担できる杭が最も合理的であるものと考えられる。また、氾濫流量の軽減に重きを置き、流木捕捉効果を二義的な期待とする河川では板が最も有効となる。

謝辞：本研究に先駆けて実施した荒川水防林の現地調査では、国土交通省東北地方整備局福島河川国道事務所吾妻山系砂防出張所の栗田外美所長、水林自然林管理事務所の國原よし子氏から、多大な援助を賜った。また、島根大学の学生諸君には、快く実験に協力をしていただいた。諸氏に心より謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 小出博編著：日本の水害-天災か人災か-，東洋経済新聞社，288pp.，1954.
- 2) 上田弘一郎：水害防備林，産業図書，174pp.，1955.
- 3) 伊吹正紀：砂防特論，森北出版，209pp.，1955.
- 4) 岸原信義，武蔵哲夫：扇状地河川の治水と水害防備林-阿武隈川水系荒川の水害防備林-，林業技術，No. 479，pp. 7-12，1982.
- 5) 宮村忠：水害 治水と水防の知恵，中公新書，221pp.，1985.
- 6) 建設省土木研究所：水害防備林調査，土木研究所資料，No. 2479，205pp.，1987.
- 7) 松浦茂樹，山本晃一，浜口達男，本間久枝：水害防備林の変遷についての一研究，日本土木史研究発表会論文集，第8号，pp. 193-204，1988.
- 8) 大熊孝：水害防備林の再興に関する一考察，土木史研究，第17号，pp. 135-143，1997.
- 9) 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，243pp.，2001.
- 10) 末次忠司，館健一郎，小林裕明：防災樹林帯による氾濫流制御に関する研究，水工学論文集，第42巻，pp. 805-810，1998.
- 11) 館健一郎，末次忠司，小林裕明，都丸真人：洪水氾濫時の防災樹林帯の効果に関する検討-余笹川流域を対象として-，水工学論文集，第45巻，pp. 913-918，2001.
- 12) 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.
- 13) 秋山壽一郎，重枝未玲，大庭康平，山尾匡人，岩本浩明：破堤氾濫流に対する水防林の減災効果の検討，水工学論文集，Vol. 68，No. 4，pp. I_1027-I_1032，2012.
- 14) 山田健四，長坂有，佐藤創，対馬俊之，阿部友幸：2003年台風10号災害における厚別川流域河畔林の被害状況と流木発生・捕捉量の定量化，砂防学会誌，Vol. 59，No. 1，pp. 13-20，2006.
- 15) 首藤伸夫：防潮林の津波に対する効果と限界，海岸工学講演会論文集，第32巻，pp. 465-469，1985.
- 16) 今村文彦，柳澤英明：海岸植生帯の津波防災への機能-減災か被害拡大か，自然災害科学，Vol. 25，No. 3，pp. 263-297，2006.
- 17) Tanaka, N., Sasaki, Y., Mowjood, M. I. M., Jinadasa, K. B. S. N. and Homchuen, S.: Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: experience of the recent Indian Ocean tsunami, *Landscape and Ecological Engineering*, Volume 3, Issue 1, pp. 33-45, 2007.
- 18) 佐藤裕和，肱岡勝成，深田耕太郎，遠藤雅実：堤内に設置された水害防備林の洪水氾濫流木捕捉に関する水理模型実験，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol. 74，No. 4，pp. I_1213-I_1218，2018.
- 19) 土木学会水理委員編：水理公式集[平成11年版]，pp. 129-130，1999.
- 20) 国土技術研究センター編：改定 解説・河川管理施設等構造令，技報堂，423pp.，2000.
- 21) 国土交通省：建築基準法施行令，平成27年改正 告示第910号，2015.

(2018. 4. 3受付)