

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 —

FLOOD DAMAGE MITIGATION EFFECT OF GROVES IN THE FLOODPLAIN, STUDY ON THE YOSASA RIVER BASIN

舘健一郎¹・末次忠司²・小林裕明³・都丸真人⁴

Kenichiro TACHI, Tadashi SUETSUGI, Hiroaki KOBAYASHI and Mahito TOMARU

¹正会員 工修 国土交通省土木研究所 都市河川研究室 研究員(〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1)

²正会員 工博 国土交通省土木研究所 河川研究室 室長

³正会員 国土交通省土木研究所 企画部企画課 企画係長

⁴正会員 (株)東京建設コンサルタント(元 土木研究所 交流研究員)(〒171-0014 東京都豊島区池袋2-43-1)

For the purpose of minimizing flood damage, measures by river structures are effective and must be strongly promoted. However, preparation for the unexpected flood inundation is also indispensable from the viewpoint of risk management. In this report, as an alternative for ordinary flood control measures, flood damage mitigation by means of groves in the floodplain is proposed. Groves cause drag to the flooding flow and decrease hydraulic force to houses behind them, thus mitigate damage to houses.

To evaluate the effect of groves in the flooding flow, and clarify the durability of trees against being swept away, a study was done for the big flood inundation in the Yosasa river basin in 1998. Field survey, comparison of aerial photos before and after the flood and flood simulation proved the damage mitigation effect of groves and showed the relation between hydraulic parameters and durability of trees.

Key Words : flood control, damage mitigation, groves, hydraulic force, field survey, flood simulation

1. はじめに

治水対策は、通常、設定された超過確率の洪水に対応した計画に基づいて進められているが、同時に、計画規模以上の洪水が発生した場合に想定される事態に対しての備えも必要である。本論文では、急勾配の氾濫原における氾濫流を制御するため、堤内地の樹林を利用することを考える(防災樹林帯)。すなわち、樹林帯が流下する氾濫水に対する抵抗となることで、樹林帯背後の流体力を低減させ、家屋等への被害軽減を目指すものである。樹林帯によるこのような被害軽減効果は、1958年の狩野川台風での洪水氾濫被害の調査結果¹⁾に報告されている。

著者らは模型実験、数値シミュレーションによる検討を行い²⁾、家屋に被害を生じる流体力³⁾との比較から被害軽減効果を示した。しかし、防災樹林帯を現地に適用するためには、氾濫流に対する樹林帯の耐流水力の特性(以後、樹林の耐性とする)を明らかにする必要がある。なぜなら、樹林帯が流失してしまつては効果がないうえ、流木の発生源となることで、かえって下流の被害を大き

くする可能性もあるからである。

洪水流に対して樹木が及ぼす影響については、主に河道内樹林の伐採や植栽計画、河岸防御工としての樹木群利用等の観点から検討が行われており、樹林の耐性については、洪水後の河道内樹木の倒伏に関する調査⁴⁾や、引き倒し試験による樹木の倒伏モーメントの計測⁵⁾などの例がある。洪水流中での樹林の流失機構としては、樹林の根元部分の土砂の侵食、樹木への土石の衝突による損傷、洪水流の流体力による倒伏が考えられる。しかし、氾濫流制御施設としての活用という観点から、堤内地に存在する樹林の耐性について検討された例はない。

そこで、本論文では、平成10年8月末に那珂川水系余笹川で発生した洪水氾濫を対象として、洪水時の堤内地樹林の効果(樹林による家屋被害軽減)及び洪水流に対する樹林の耐性に関して検討した結果を報告する。

2. 調査の概要

一級河川那珂川水系の余笹川は、河床勾配が 1/100

程度の急流河川であり、山地に囲まれた谷底平野を無堤の掘込河道が蛇行して流れている。流路延長は 37.5km、流域面積は 345.5km² である。図-1 に余笹川流域の位置図を示す。平成10年8月末の豪雨では、那珂川・阿武隈川流域を中心に大きな被害が発生したが、特に、余笹川の上流では6日間雨量 1,254mm、最大時間雨量 90mm（8月27日午前2時、那須観測所）という記録的な豪雨に見舞われ、河道の疎通能力を超えた洪水が発生した。図-2 に余笹川の水位と流域内の時間雨量を示す。河道から溢れた氾濫流は谷底平野に広がり、氾濫原の農地や家屋、土木施設等に大きな被害を及ぼした。

多くの場所で、湾曲する河道を直進するように氾濫流が流下した。大規模な河岸の側方侵食により、低水護岸や農地が流失した。また、大規模な土砂輸送により、礫を含む多量の土砂が耕作地上に堆積した。家屋についても、余笹川流域で全壊68戸、半壊64戸、床上浸水151戸、床下浸水320戸の被害が生じた。

余笹川流域の氾濫原内の多くの家屋が河川上流側に小さな樹林を有しており、余笹川沿いには多くの河畔林がみられる。家屋の河川上流側の樹林は、元々防風林として植えられたといわれているが、洪水氾濫流の勢いを抑える効果も期待されているものと推測される。災害直後の調査でも、樹林により被害が軽減されたと考えられる家屋がみられた。

そこで、余笹川流域の洪水前後の航空写真の比較と現地調査、資料収集により、洪水時の氾濫水の流況、樹林の残存状況、家屋被害状況（流失・残存）を把握した。さらには、数値シミュレーションによる再現計算を行い、樹林が及ぼした効果について定量的な検討を試みた。

3. 航空写真・現地調査による検討

(1) 調査手順

調査は、洪水前（平成8年）及び洪水直後（平成10年9月）に撮影された流域の航空写真をもとにして、余笹川沿川約14kmの区間（東北自動車道橋梁～黒川合流点）での氾濫区域、洪水前後の流路の変化、樹木群、家屋等の構造物の位置・特徴及び洪水前後での変化を整理した。なお、航空写真のみでは不明な点も多いため、災害直後のヘリコプターからのビデオ映像、地形図、現地踏査での確認も参考とした。さらに、3区域の樹林を対象として詳細な現地調査を実施して、樹林の氾濫流への影響、家屋被害軽減への効果等を推定するための基礎データ（洪水痕跡、堆積土砂、樹林の状況等）を取得した。さらに、個々の家屋への被害状況を把握するため、那須町・黒磯市による被害一覧表を収集した。

以上をもとに、氾濫流に対する樹林帯の耐性、樹林帯が氾濫流に及ぼした影響、樹林帯の氾濫流制御効果（背後の家屋被害軽減）について検討した。

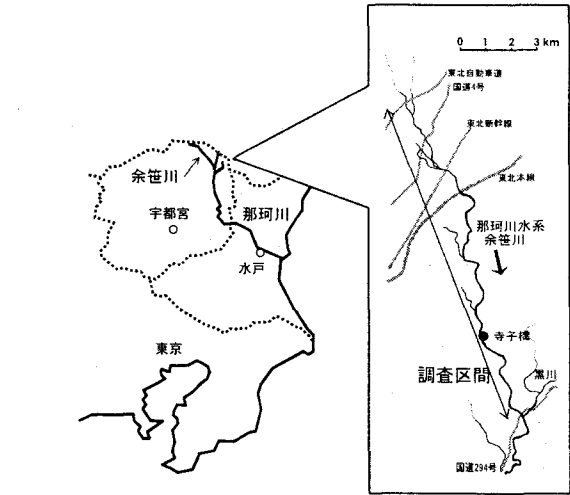


図-1 余笹川の位置と調査区域

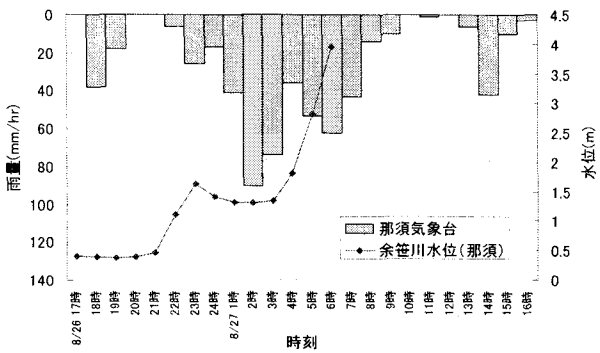


図-2 余笹川(那須地点)水位と雨量(那須観測所)
※余笹川流域の氾濫被害発生は8/27早朝

(2) 樹林周辺における氾濫水の流れ

航空写真でみられる堤内地の氾濫流の痕跡、さらには現地踏査結果をもとに、氾濫水の流れ方から氾濫域を「浸水区域」及び「流水区域」の2種類に分類した。ここでの「流水区域」は洪水流が激しく流下し、洪水後の地表面が土砂で覆われたり、表土が流失したりしている区域である。ただし、調査区間全般にわたって、土砂の堆積と侵食のどちらが卓越していたかを把握するのは困難であった。「浸水区域」は、氾濫流がより穏やかに流下し、洪水による土砂移動が少ない区域である。

洪水前後の航空写真の比較及び現地調査から把握した流域の状況の一例（下川橋の下流）を示したのが図-3である。図には、洪水前後の比較から、樹林（洪水後残存、流失）、家屋（洪水後に残存、流失）、流路（洪水前、洪水後）、氾濫区域が示されている。

図-3の区間では、元々の河道は図の右下付近で2本に分かれており、下流側で左に大きく湾曲していたが、洪水時には外岸側に大きく広がり、洪水後には水田上に新たな河道を形成した。また、洪水が流下した水田上には、礫や砂が堆積していた。

図の上流側には、洪水前には広い樹林が存在していたが、下流側の一部を楕円形に残して流失している。この樹林の右半分については、洪水後に河道と化しており、

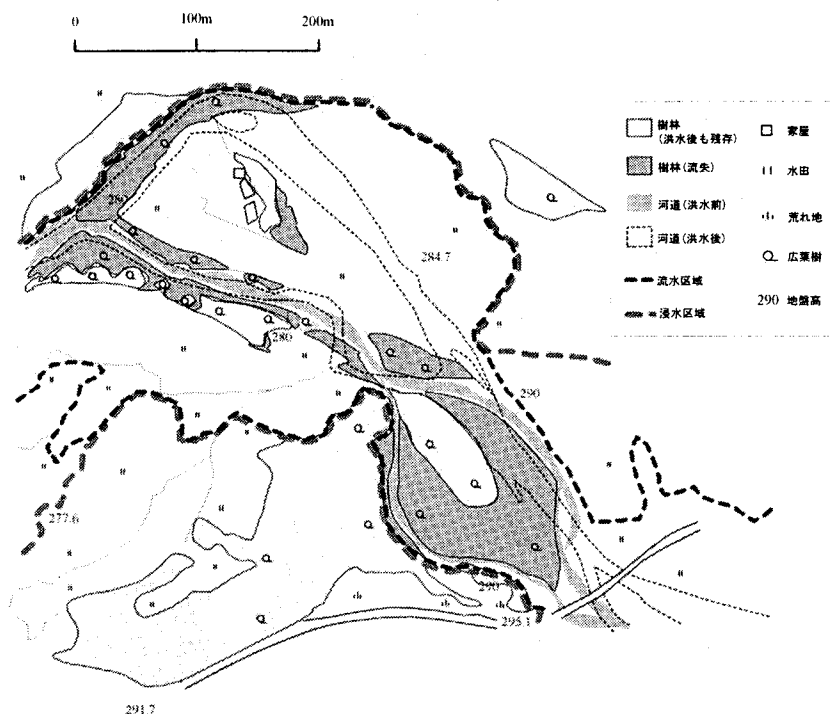


図-3 余笹川流域の洪水前後の変化（下川橋下流）

主に側方からの侵食を受けて流失したものと考えられる。

図の左上には、洪水後も残存した家屋（床上1m浸水の被害）がある。この家屋は、上流側に樹林（杉、竹）を有していた。樹林のうち下流側（家屋に近い側）は洪水後も残存していたが、これらは樹木の生育密度が密あるいは径の大きな樹林である。一方、残存した樹林の前面に存在した樹林は流失しており、密度が疎であった（住民へのヒアリングより）ことが流失原因と考えられる。洪水痕跡は、残存樹林の途中で1.7m程度であるが、この残存樹林の存在による流体力の低減により、家屋の流失が防止されたものと推定される。

(3) 樹林の耐性

調査区間内の多くの樹林は杉や竹で構成されていた。

洪水前に「流水区域」に存在した樹林の多くが、氾濫流により流され、洪水後にはなくなっていた。しかし、氾濫流の流下方向や横断方向にある程度の広がりを持った樹林の一部は洪水後も残存した。この理由は、長い樹林区間を流下するにつれ、樹木の抵抗によって流れの勢いが減少していったことによるものと考えられる。

現地踏査の結果、流失した樹木は根の付近の土砂が洗掘されることにより流失したように見受けられた。特に、洪水時に河道が大きく広がった場所に隣接する樹林については、側方への侵食により、樹木を支持する土塊もろとも流失している場合が多かった。また、樹林内部の流失樹木の分布については、樹木が疎に分布している場所に流れが集中して高速流が流れた痕跡があり、その部分については樹木の根元周辺が洗掘されて流失している現象がみられた。

また、氾濫流の流下方向にある程度の延長をもった樹

林の場合の堆積土砂をみると、上流側に粒径の大きな礫が堆積しており、下流側ほど粒径の小さな土砂が堆積していた。樹林内を流下するに従い、樹木の抵抗で流速が失われていったことを示すものと考えられる。

水深及び流速が増加して樹木に加わる流体力が大きくなった場合には、根元部分を軸にして樹木が倒伏することが考えられる。しかし、このような形態の樹木流失については、現地調査では明確に判断できなかった。

「浸水区域」については、洪水前に存在した樹林の全てが洪水後も残存していた。このことから、洪水後に地表面の様相を変化させるような土砂の移動が生じないような流れでは、樹林の流失は生じていないものと考えられる。

また、洪水が激しく流下した「流水区域」内には、樹林の広がりがさほど大きくないにも関わらず洪水後に残存したものもみられたが、このような樹林の地盤高は周辺よりも高くなっており、それにより流水の影響を逃れたといえる。

以上より、氾濫流により流失しないためには、樹林が流れの激しさに応じた十分な平面的広がりをもち、樹林内での流速を抑制するため十分な密度を有する必要がある。また、盛土することも樹林の破壊を防ぐ重要な要素である。

(4) 樹林による家屋防御効果

樹林による家屋被害の軽減効果を検討するために、家屋の上流における樹林の有無と家屋被害の関係について整理した。流水区域、浸水区域それぞれに位置する全家屋について、洪水前の家屋上流側における樹林の有無（樹林の最下流端を起点として、樹林の流下方向幅の3

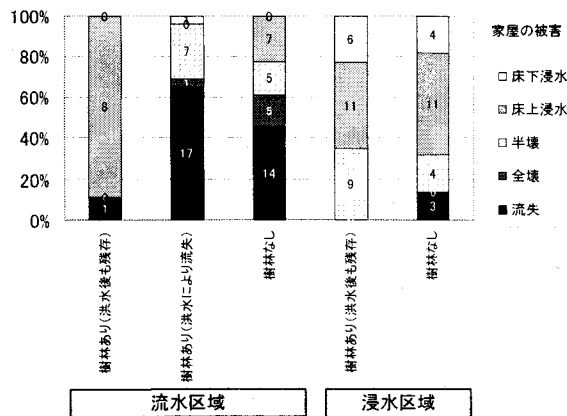


図-4 家屋上流の樹林の有無と家屋被害(14kmの調査区間内)

倍の距離以内に含まれる家屋を“前面に樹林がある家屋”と定義)と家屋の被害程度との関係を整理したのが図-4である。

図-4より、氾濫流が激しく流れた「流水区域」では、“樹林なし”の場合に40%以上の家屋が流失している。“樹林あり”で洪水後も樹林が残存している場合には流失家屋は少ないが、洪水により樹林が流されてしまった場合には樹林とともに家屋が流失し、大きな被害となっている。このことから、樹林による家屋の流失被害防止の効果が生じるのは、少なくとも樹林そのものが流されないような流れの範囲である必要があるといえる。

もう一方の浸水区域は氾濫流がより穏やかに流れた区域であるが、“樹林あり”で洪水により樹林が流失した例はなく、樹林がある場合の流失家屋はない。

以上から、樹林自体が流失に耐えうる洪水流の範囲では、樹林が背後の家屋の防御効果を発揮するものと考えられる。

4. 氾濫シミュレーションによる検討

(1) 検討手法

氾濫流に対する樹林の効果、樹林の耐性、家屋被害軽減の効果をより定量的に推定するためには、まず、洪水時の氾濫流の状況をより正確に推定する必要がある。そこで、余笹川流域の一部区間を対象に一般座標系を用いた二次元不定流モデル⁶⁾による氾濫再現計算を行い、樹林による流れの変化、樹林や家屋に加わる水理的作用を精査する。

計算対象エリアは氾濫原に家屋、樹林等が存在する寺子橋周辺(縦断方向に約1km区間)とした。最小サイズ1~2mの一般座標系でメッシュ化することで、地盤高の変化、家屋、樹林、道路の位置等、地形や地物を忠実に表現できるようにした。メッシュ化には、河道平面図並びに洪水後の横断測量結果等を用いた。

モデルの中では、家屋については氾濫流は不透過であるとして地盤高が無限大と設定した。樹林については、次の式で示される透過係数 $K(\text{m/s})$ を用いて抗力を表現

した。

$$K = 1 / \sqrt{a_w C_d / 2g} \quad (1)$$

a_w は単位体積の水中の樹木の総投影面積、 C_d は抗力係数、 g は重力の加速度である。透過係数 K は樹木抵抗の大きさの指標で、大きいほど流れやすいことを示す。寺子橋周辺の現地調査の結果では、近傍の樹林(主に杉)の幹径は10cm~20cm、密度は0.8~1本/ m^2 であり、高さ1.5m程度から太さ5cm程度の枝が出ている形状をしていた。しかし、場所による樹林形状の違いは不明なため、今回の条件設定では枝の影響は無視して樹木を円柱とみなした。抗力係数 C_d を1.0(円柱)、幹径を15cm、密度1本/ m^2 としたときの透過係数 K である11.5m/sを、各樹林メッシュに一律に与えた。また、底面には土地利用に応じた底面粗度係数(河道:0.035、樹林:0.100、水田:0.050、道路:0.047)を与えた。

本検討の対象区間における洪水時の実測流量データは存在しないが、痕跡水位や流出計算による様々な推定値が存在する。今回の計算では、いくつかの流量を与えて再現計算を行い、現地調査で把握された痕跡水位と計算結果が最も良く合致する流量(1,256 m^3/s)を上流端流量として採用した。

下流端水位は、対象区間の下流端における浸水実績と地盤高の関係から推定して設定した(TP241.8m)。

メッシュサイズが1~2mと非常に小さいため、計算時間間隔は0.005秒とした。上流端流量及び下流端水位を一定値で与え、流況がほぼ一定となる2時間にわたって計算を行った。すなわち、本検討では、ピーク値のみを対象とした再現計算を行っている。

(2) 再現計算の結果

洪水前に存在した樹林帯位置を条件として再現計算を行った結果が図-5(流速ベクトル図)である。

図-5より、周辺よりも低く掘り込まれている河道部分の流速が早くなっている。また、家屋密集地区において流速が低下している様子がみられる。図中の河道右岸側及び左岸側にある樹林には、河道部分から乗り上げた氾濫流が流入しているが、樹林内を流下するにつれて流速が低減している様子が分かる。

図-6は、図-5で示された区域内の上流右岸側に位置する樹林部分を拡大した図(流速ベクトル図)である。

また、図-7は同じ範囲において、洪水後にも残存した樹林の位置を条件として計算した結果である。洪水前に存在した樹林のうち、上流側並びに河道に近い側、流れが河道に落ち込む下流側の部分が流失している。流失した部分は湾曲している河道の内岸側に位置しており、河道から乗り上げた流れが高速で樹林に流れ込む場所に一致している。この流れにより、樹林の周縁部から徐々に洗掘が進み、樹林が流失したものと考えられる。洪水前の樹林の状態を条件とした結果では、河道に近い樹林内の

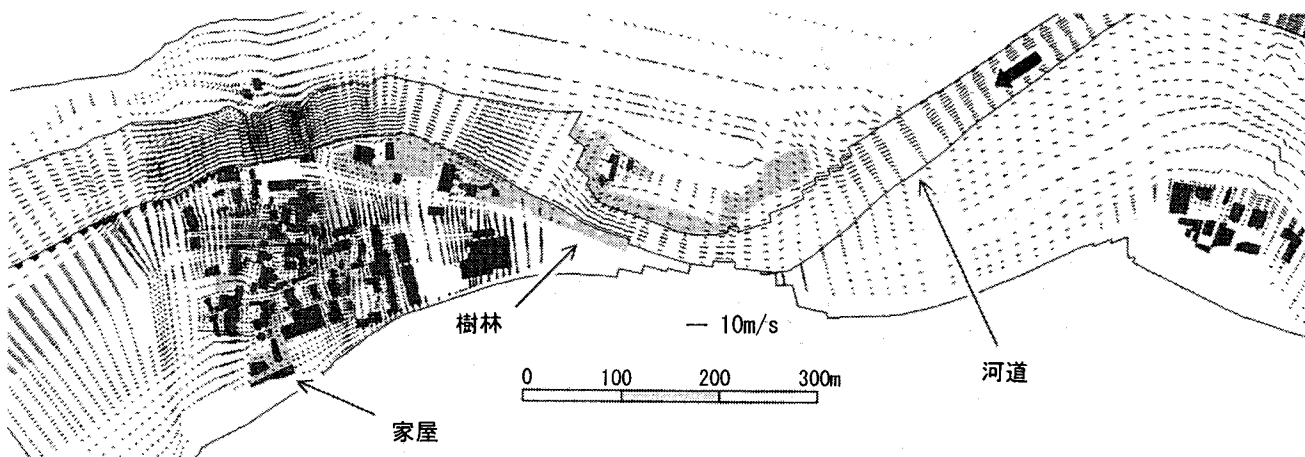


図-5 寺子橋周辺における氾濫再現計算で得られた流速ベクトル（樹林・河道の位置は洪水前の条件）

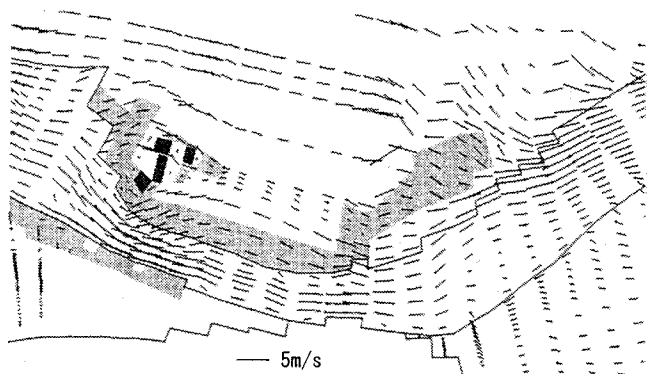


図-6 樹林周辺の流速ベクトル図（樹林位置は洪水前の条件）

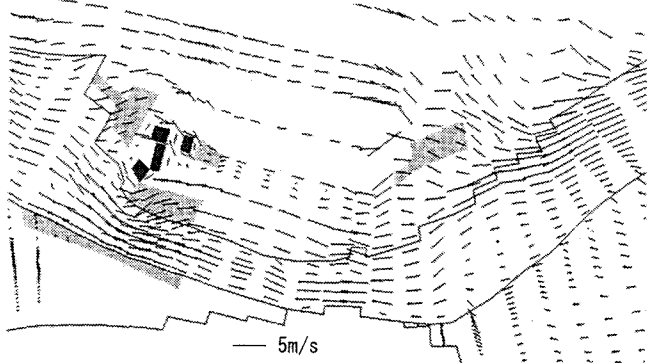


図-7 樹林周辺の流速ベクトル図（樹林位置は洪水後の条件）

流速は概ね2m/s以下となっているが、洪水後には樹林が流失し、同じ位置の流速が2～4m/sの高速流となっている。また、残存した樹林の内部でも、洪水前の条件に比べて流速の低減が小さくなっている。

なお、樹林の有無による家屋に加わる流体力の違いと家屋の被害の関係には明確な傾向を見いだすことができなかった。家屋の構造や家屋の基礎の洗掘、流下物等も影響していることが原因と考えられる。

(3) 樹林の耐性の検討

樹林の流失と流れの関係について考察する。図-8は氾濫域内の全ての樹林メッシュを対象として、洪水後の樹林の残存・流失の違いと水深及び流速の関係を示してい

る。図中▲印は、流失樹林のうち地盤高が低い河道沿いの樹林（水深4m程度）で、側方侵食の影響を大きく受けていると判断したものである。また、図-9には摩擦速度 u_* 、樹木の根元への外力モーメント M と、樹林メッシュの流失率の関係を示している。摩擦速度は、氾濫計算で得られた底面せん断力から算定した。根元への外力モーメントは、計算で得られたメッシュ平均水深・流速より求めた抗力を用い、抗力の作用中心を水深の1/2として算定した⁵⁾。

図-8及び図-9より、摩擦速度、外力モーメントが大きくなるにつれ樹林の流失率が高くなっており、樹林の流失とそれらの値には有意な関係があることが分かる。側方侵食の影響を受けたと考えられる樹林は、他の樹林よりも流失率が高い。なお、図-9(右)の外力モーメントと流失率の関係図において $M=50$ (kgm)や $M=90$ (kgm)付近の流失率が低くなっているのはサンプル数の少なさに起因するものと考えられる。

摩擦速度については $u_*=0.30$ (m/s)程度の外力が加わった場合ほぼ半数の樹林が流失している。岩垣の式⁷⁾によれば、 $u_*=0.30$ (m/s)は粒径110mm程度の限界摩擦速度である。余笹川流域の他の河畔林内での土質調査の結果では、最大粒径で100mm程度、20mmで約50%をカバーしていた。この結果から考えると、地盤の粒径から推定される限界摩擦速度よりも大きな摩擦速度に対しても、洗掘・樹木流失が生じなかった樹林が存在したと考えられる。

また、外力モーメントについては、 $M=50$ (kgm)程度でほぼ半数が流失している。この値は、倒伏限界モーメントの下限式⁵⁾より求めた値である562.5kgm（幹の径15cm）よりも相当小さい。

ただし、上記の結果には、現地の実際の倒伏限界モーメントが不明なこと、枝や葉、閉塞物等の影響を考慮していないことも影響していると考えられる。計算で設定したよりも大きな抵抗が樹林内で生じていたとしたら、実際の摩擦速度は計算値より小さく、外力モーメントは計算値よりも大きかったことになる。

現地調査からは、根元の洗掘が流失機構として支配的

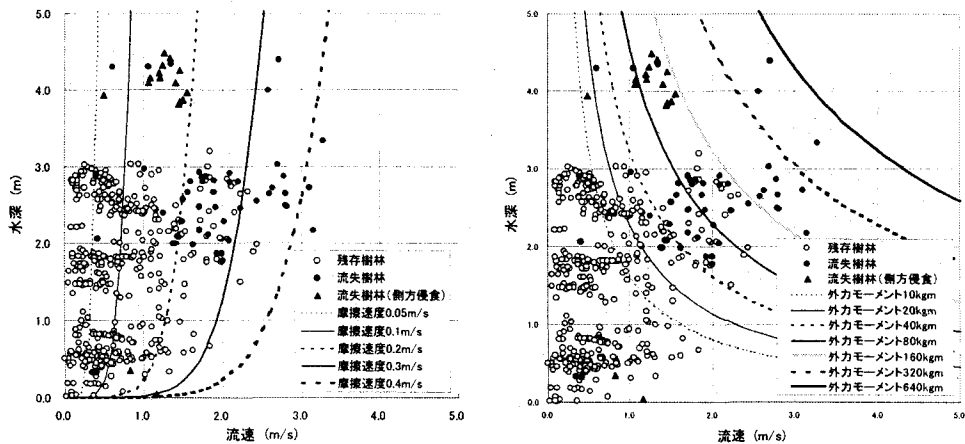


図-8 樹林（メッシュ毎）の洪水後の残存・流失と水深・流速の関係
(左図には等摩擦速度線、右図には等外力モーメント線が示されている)

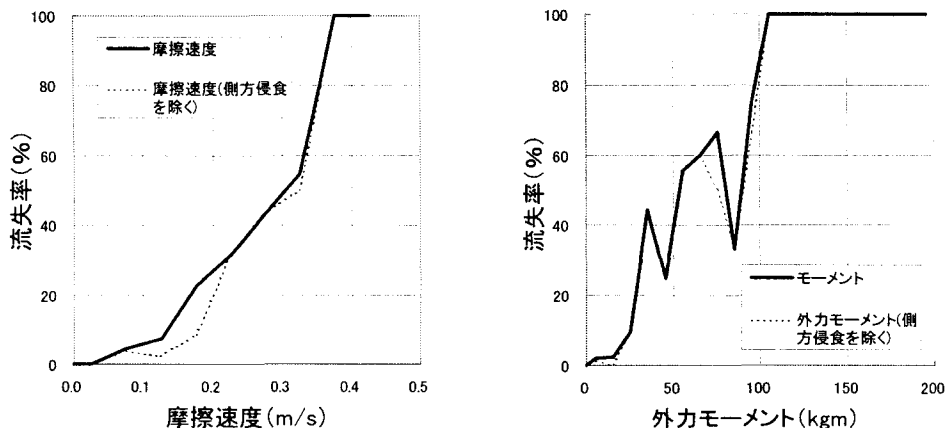


図-9 樹林（メッシュ毎）の流失率と摩擦速度 u_* （左図），外力モーメント M （右図）の関係

であったと推定された。しかし、図-8（左図）をみる限りでは、部分的（水深1m程度、流速1.5m程度）に摩擦速度が大きいにも関わらず流失していない樹林も存在しており、摩擦速度のみで評価できない可能性もある。樹林の流失限界については、より詳細な現地データにもとづく判断が必要であろう。

5. おわりに

平成10年8月末の豪雨による那珂川水系余笹川流域を対象として、防災樹林帯の効果に関する検討を行った。余笹川流域の氾濫原の樹林帯の洪水前後の変化の比較より、地表面の状態を著しく改変するような激しい氾濫流が流れた場所においては、多くの樹林が流失していた。現地調査では流水による洗掘が樹木の流失の主因と考えられるが、流体力による倒伏との関係も含め、より詳細なデータに基づく分析が必要である。

被害家屋と家屋上流の樹林の有無の関係より、樹林自体が流失に耐える範囲の洪水流に対しては、氾濫流による被害軽減効果が発揮されたものと考えられる。

貸与していただいた。また、黒磯那須消防組合消防本部には災害後のビデオ等を貸与していただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 栗林沢一：狩野川流域における集落の立地と災害の形態，地理学評論，33. 3，pp. 70-77，1960.
- 2) 末次忠司・館健一郎・小林裕明：防災樹林帯の氾濫流制御効果，土木研究所資料，第3538号，1998. 2.
- 3) 佐藤智，今村文彦，首藤伸夫：洪水氾濫の数値計算および家屋被害について—8610号台風による吉田川の場合—，第33回水理講演会論文集，pp. 331-336，1989. 2.
- 4) 北川明・島谷幸宏・小栗幸雄：洪水による樹木の倒伏，土木技術資料，30-7，pp. 9-14，1988. 7.
- 5) 建設省河川局治水課：河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案)，1993. 2.
- 6) 福岡捷二・川島幹雄・横山洋・水口雅教：密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究，土木学会論文集，No. 600/Ⅱ-44，pp. 23-36，1998. 8.
- 7) 土木学会：水理公式集[平成11年版]，pp. 158-159，1999. 11.

謝辞：栃木県大田原土木事務所には航空写真や洪水痕跡調査結果等を、栃木県土木部河川課には河道平面図等を

(2000. 10. 2受付)