

江の川下流部における 水害防備林の倒伏に関する一考察

CONSIDERATION ABOUT THE LODGING OF THE FLOOD DEFENSE FORESTS IN THE LOWER REACH OF GOUNOKAWA RIVER

青木 健太郎¹・藤田 正治²
Kentaro AOKI and Masaharu FUJITA

¹正会員 工修 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

²正会員 工博 京都大学教授 防災研究所流域災害研究センター
(〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

Because the lower reach of Gounokawa River has low population and assets, a river improvement security level is lower than the upper reaches. Therefore, it becomes important to utilize the river improvement effect of flood defense forests. On the other hand, the water depth of floods is large, and velocity in the flood defense forests is early, it may lodge and flows out. We evaluated a river improvement effect of the flood defense forests quantitatively and examined an activation method of the flood defense forests. However, we do not consider the risks such as lodging or the outflow of the flood defense forests at the time of the large-scale flood. In this study, the lodging situation of the flood defense forests was evaluated quantitatively using a 2-D shallow-water flow model. In addition, we assumed the lodging situation of the flood defense forests at the time of the large-scale flood and considered difference in flood plain velocity.

Key Words : *flood defense forests, effectiveness to the flood control, lodging of the flood defense forests*

1. 序論

江の川下流部は人口・資産も少なく堤防整備が遅れているため水害防備林が持つ治水効果を評価して保全することが重要である。しかし、近年、水害防備林の繁茂範囲の拡大による河積阻害や立ち枯れした竹が倒伏することによる粗度の増大によって、流下能力が低下するなど、治水上の課題となっている。また、山間狭窄部を流下するため洪水時の水深が大きく、大規模洪水時には水害防備林に大きな流体力が作用し倒伏や流出の可能性がある。そのため、水害防備林が持つ治水効果を考慮して、適切に維持管理し、活用していくためには、水害防備林の倒伏や流出について定量的に評価する必要がある。

江の川下流部において、福岡ら¹⁾は、水害防備林が流れや河床変動に及ぼす影響や水害防備林伐採の影響についてS58.7洪水を対象として評価している。筆者ら²³⁾は、水害防備林の幅による堤内地流速の変化に着目して、水害防備林の治水効果を評価するとともに、水害防備林の

縦断的な形状や切れ目の影響を評価した。このように、水害防備林の治水効果を定量的に評価し活用策を検討する取り組みはなされてきたが、大規模洪水時における水害防備林の倒伏や流出等のリスクまでは考慮していない。また、ヤナギ等の樹木群の倒伏や流出に関する考え方は確立している⁴⁹⁾が、竹林の倒伏に関する研究は少ない状況である。

このような背景から、本研究では江の川下流の水害防備林を対象として、水害防備林の倒伏状況を定量的に評価し、竹の材料特性の知見⁶⁾と併せて大規模洪水時の水害防備林の倒伏可能性について考察する。

2. 竹の材料特性に関する既往研究

現在、日本の多くの竹林は放置竹林となり、森林が荒廃する要因となっている。それを解決するため、竹材を建築構造物に利用するための研究において、竹の基本的な材料特性を把握する実験等が行われている。吉田ら⁹⁾

表-1 竹の曲げ試験結果

試験機関		曲げ応力度 (kN/cm ²)
東京大学		12.2
大分大学		14.4
Washington State Univ.		10.5
Univ. Aachen		7.6
職業大	試験片実験	19.0
	実大実験	6.1

は、横浜市近郊に生育する孟宗竹を用いて、曲げ、圧縮せん断、引張、割裂の試験を行っている。丸のままの試験体を使用した実大実験において、曲げ応力度 σ_b が6.1～7.7kN/cm²という結果を得ている。また、他の試験機関での実験データとも比較している。ただし、表-1に示す結果は試験体を抽出した場所や試験体の形状がそれぞれ異なるため、データにばらつきがある。本研究では、竹の材料特性試験結果からの曲げ応力度 σ_b を倒伏判定の閾値として使用するため妥当性について、S58.7洪水を対象として検討した。

3. 昭和58年7月洪水での倒伏状況の考察

本章では、痕跡水位や水害防備林の洪水後の倒伏状況が分かる資料⁷⁾が存在するS58.7洪水を対象として再現計算モデル（平面二次元流況解析）を構築し、再現計算による水理量より水害防備林に作用する曲げ応力度 σ_f を算出した。水害防備林に作用する曲げ応力度 σ_f と竹の材料特性試験結果からの曲げ応力度 σ_b との比較を行い、S58.7洪水での倒伏状況の考察を行った。

(1) 洪水の概要

S58.7洪水は、島根県西部から広島県北部、山口県北部にかけて局地的な豪雨となり、22日夜から23日朝にかけて島根県西部を中心に時間雨量50mm～90mmの強い雨が断続的に降った。そのため、下流部の川平水位観測所において当時の警戒水位8.4mをはるかに上回る14.35mのピーク水位を観測し、ピーク流量は7,500m³/sに達し、S47.7洪水に次ぐ戦後2番目の規模の洪水となった。本研究の対象区間（20k～30k）では、全ての地区で堤防が未整備であったため、氾濫原と一体となった流れとなり、家屋浸水、氾濫原の浸食・堆積、護岸の崩壊等の被害が発生するとともに、水害防備林の倒伏も発生した。S58.7洪水後の航空写真（S63年撮影）及びS58.7洪水での水害防備林の倒伏状況（S59.3調査）を図-1に示す。

(2) 洪水の再現

a) 水理解析モデル

水害防備林の倒伏や倒伏による氾濫原流速への影響を検討する、平面二次元流況解析モデルを構築した。以下に流れの基礎式を示す。

【運動方程式】

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{uv}{r} = -g \frac{\partial H}{\partial s} - \frac{\tau_s}{\rho h} + 2 \frac{\partial}{\partial s} \left[\varepsilon \frac{\partial u}{\partial s} \right] + \frac{\partial}{\partial n} \left[\varepsilon \frac{\partial u}{\partial n} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} - \frac{u^2}{r} = -g \frac{\partial H}{\partial n} - \frac{\tau_n}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial s} \left[\varepsilon \frac{\partial v}{\partial s} \right] + 2 \frac{\partial}{\partial n} \left[\varepsilon \frac{\partial v}{\partial n} \right] \quad (2)$$



図-1 S58.7洪水後の航空写真及び洪水後の水害防備林状況

【連続式】

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial s} + \frac{\partial(vh)}{\partial n} + \frac{vh}{r} = 0 \quad (3)$$

ここに、 u は s 方向の水深平均流速、 v は n 方向の水深平均流速、 r は流路の曲率半径、 g は重力加速度、 H は水位、 h は水深、 ρ は流体の密度、 t は時間である。

τ_s 、 τ_n は s 、 n 方向の河床せん断応力で、式(4)(5)のように与える。 n は粗度係数であり、低水路、氾濫原、樹木群（式(8)参照）の各粗度係数で与える。

$$\frac{\tau_s}{\rho h} = \frac{gn^2}{h^{4/3}} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

$$\frac{\tau_n}{\rho h} = \frac{gn^2}{h^{4/3}} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

渦動粘性係数 ε は、水深方向に対数則を仮定して、式(6)のように与える。

$$\varepsilon = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (6)$$

ここに、 κ はカルマン定数、 u_* は摩擦速度である。

b) 樹木群モデル

樹木群モデルは、樹木の繁茂特性（直径、密度等）により算出される等価粗度係数とし、式(4)(5)で取り扱う。樹木繁茂特性を表す樹木群透過係数 K は式(7)のように表される。

$$K = (2 \cdot g / a_w / C_d)^{0.5} \quad (7)$$

ここに、 $a_w = N \cdot D_m$ 、抗力係数 $C_d = 1.2$ 、重力加速度 g である。 N は単位面積当たりに繁茂する樹木本数、 D_m は幹の胸高直径である。

繁茂特性を考慮した粗度係数は、水深に応じて式(8)のように表される。

$$\left. \begin{aligned} &h_m = 0 \text{ の場合} \\ &\quad n = \infty \\ &h_m > 0 \text{ かつ } h \leq h_m \text{ の場合} \\ &\quad n = (n_b^2 + h^{4/3} / K^2)^{0.5} \\ &h_m > 0 \text{ かつ } h_m < h \leq h_v \text{ の場合} \\ &\quad n = (h/h_m)^{5/3} \cdot (n_b^2 + h_m^{4/3} / K^2)^{0.5} \\ &h_m > 0 \text{ かつ } h_v < h \text{ の場合} \\ &\quad n = (h/h_m)^{5/3} \cdot (n_b^2 + h_m^{4/3} / K^2)^{0.5} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここに、 h_m は枝下長さ、 h_v は樹高、 n_b は樹木群が繁茂する範囲内での高水敷地表面の粗度係数である。倒伏時は倒伏角に応じた樹高、枝下長さとした。

表-2 解析条件 (S58.7洪水再現計算)

対象流量	昭和58年7月洪水(川平地点: 7,500m ³ /s)
解析対象区間	下流端: 18.0k 上流端: 31.0k 解析区間延長: 13.0km
出発水位	18.0k地点のH-Q式(S58年断面)で設定
粗度係数	低水路: $n=0.035$ (推定粗度係数と一致) 氾濫原: 土地利用を考慮して設定
樹木群	樹木群は等価粗度係数で評価 諸元: 平成23年度調査結果(S58.7洪水時は不明) 平面分布: 航空写真(S63年撮影)より設定
解析地形	河道: 昭和58年測量成果 氾濫原: 平成21年度LPデータ(堤防盛土を除去)
解析メッシュ分割	縦断方向メッシュ: 20m 縦断方向メッシュ: 70分割 (低水路: 30分割、氾濫原: 各20分割)

筆者ら²⁾は、江の川で観測された水害防備林内の流速から得られる粗度係数と樹木の繁茂特性（直径、密度等）より算出される等価粗度係数について比較検証を行った。平成24年7月7日洪水で観測された流速より算出された粗度係数を比較した結果、等価粗度係数の誤差率は10%程度であり樹木群モデルの妥当性を確認している。

c) 再現結果

S58.7洪水後に測量された断面データ等を用いて水理解析モデル構築し、S58.7洪水を再現した。再現に使用した低水路粗度係数は $n=0.035$ であり、河床材料と小規模河床波の形成状況から決まる推定粗度係数と一致した。解析条件を表-2に示す。

本研究の対象区間である20k～30kの痕跡水位を用いて再現性を確認した結果、痕跡水位との平均水位差は0.19mであり、水面形を再現できることを確認した（図-2参照）。痕跡逆算粗度と推定粗度が一致したことで、後述する確率規模別流量の解析で使用する計画粗度適用の妥当性を確認できた。

S58.7洪水での最大流速を図-3に示す。S58.7洪水時の河道は全ての地区で堤防が未整備のため、氾濫原と一体となった流れとなっている。鹿賀地区は水害防備林の規模が小さく、上流側の約1km区間で水害防備林が存在しないため、氾濫原流速が2.0m/sを超えている。川越地区、大貫地区では、上流側の一部で水害防備林が存在しないため、そこから氾濫流が流入し、氾濫原流速が1.5m/sを超えている。田津地区は上流側にある水害防備林の切れ目から氾濫流が流入し、局所的に2.0m/sを超えているが、周辺の地区と比較して氾濫原流速は小さい。田津地区は洪水の流下幅が約600mと広く（周辺の地区は約350～

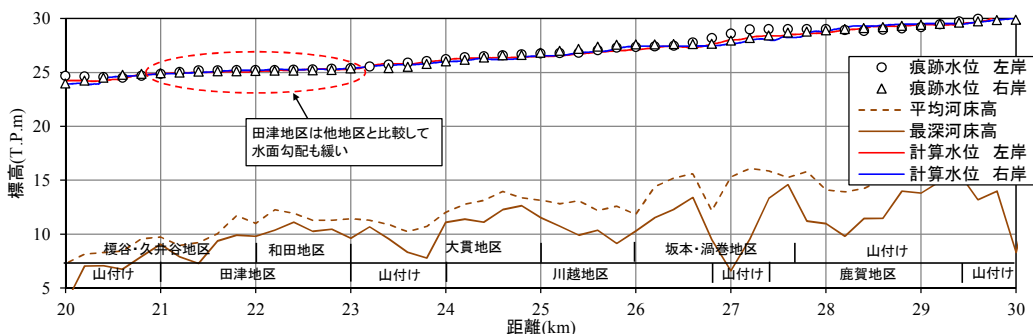


図-2 痕跡水位再現結果縦断図 (S58.7洪水)

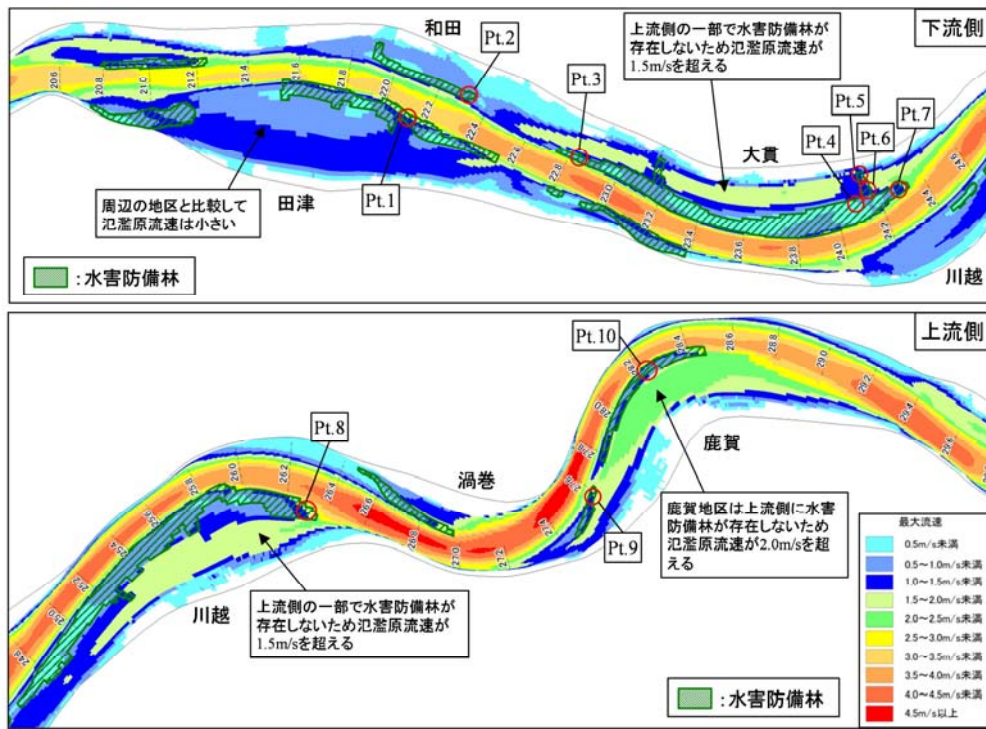


図-3 S58.7洪水再現計算における最大流速平面図

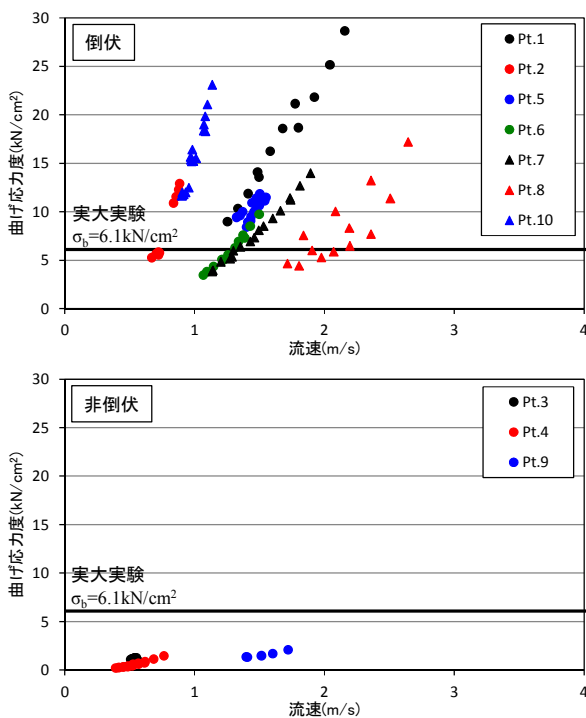


図-4 水害防備林に作用する曲げ応力度 (S58.7洪水)

400m), 水面勾配も緩いため, 氾濫原流速に違いが生じたと考えられる。

(3) 水害防備林の倒伏状況

水害防備林に作用する曲げ応力度と竹の材料特性試験結果からの最大曲げ応力度との比較を行い, S58.7洪水での倒伏状況の考察を行った。水害防備林に作用する曲げ応力度 σ_f は式(9)のように与える。

表-3 平均水量より算出した曲げ応力度

Pt.	位置	倒伏状況	直径 (cm)	平均水量		曲げ 応力度 (kN/cm ²)
				流速 (m/s)	水深 (m)	
1	左岸22.1k	倒伏	12	1.66	13.04	16.9
2	右岸22.4k	倒伏	6	0.78	9.55	8.0
3	右岸22.8k	非倒伏	6	0.54	4.81	1.0
4	右岸24.0k	非倒伏	6	0.54	3.53	0.5
5	右岸24.1k	倒伏	6	1.45	5.80	10.2
6	右岸24.1k	倒伏	6	1.28	5.02	5.9
7	右岸24.3k	倒伏	6	1.48	4.92	7.6
8	左岸26.4k	倒伏	9	2.13	5.22	7.9
9	左岸27.6k	非倒伏	12	1.53	4.31	1.6
10	左岸28.2k	倒伏	6	1.00	15.54	15.5

$$\sigma_f = \frac{M}{W} \quad (9)$$

ここに, M は外力モーメント⁸⁾で, 水理解析から得られた水深, 流速を用いて式(10)のように与える。また, W は断面係数で, 竹の直径等から式(11)のように与える。

$$M = \frac{1}{2} \rho C_D S u^2 L \quad (10)$$

ここに, ρ は水の密度, C_D は樹木の抗力係数, S は抗力の作用面積, u は流速, L は破壊の中心から抗力中心までの長さである。

$$W = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D} \quad (11)$$

ここに, D は竹の直径, d は竹の厚みである。S58.7洪水時に存在した水害防備林の直径や高さは調査されていないため不明である。そのため, 現在の水害防備林の直径や高さ(平成23年度調査結果)を使用した。また, 竹の厚みは参考文献⁹⁾より直径の10%で設定した。

水害防備林の倒伏・非倒伏箇所(図-1参照)でのメッシュ毎の水量より算出した曲げ応力度を図-3, 平均水量より算出した曲げ応力度を表-3に示す。S58.7洪水

時に水害防備林が倒伏した箇所では、水害防備林に作用する曲げ応力度 σ_f が竹の曲げ応力度 σ_b の実大実験結果 6.1kN/cm^2 を概ね上回っている。また、非倒伏の箇所では、水害防備林に作用する曲げ応力度 σ_f が竹の曲げ応力度 σ_b の実大実験結果 6.1kN/cm^2 以下となっている。このことから、水害防備林の倒伏判定において、竹の曲げ応力度 σ_b の実大実験結果 6.1kN/cm^2 を一つの指標（閾値）として用いることができることを確認した。

S58.7洪水での結果を踏まえ、流水による外力モーメントより求めた曲げ応力度を算定することで水害防備林の倒伏の可能性を評価することができた。

4. 現況河道での水害防備林倒伏の可能性

本章では、現況河道において確率規模別（1/30～1/200）の平面二次元流況解析を実施し、堤防未整備地区である田津地区を対象として水害防備林の倒伏状況を確認した。また、水害防備林の倒伏による氾濫原流速への影響を評価した。

(1) 解析条件

現況河道モデルの解析地形は、最新の平成22年度定期横断測量成果を使用し、解析区間はS58.7洪水再現モデルと同じとしたが、解析メッシュは水害防備林での水理量をより詳細に把握するため細分割した。外力は、確率規模別の流量（表-4）を設定した。解析条件を表-5に示す。

表-4 確率規模別流量

確率規模	流量(m^3/s)	
	江津地点	検討区間
1/30	8,300	7,800
1/50	9,300	8,700
1/100	10,700	10,000
1/200	12,500	11,800

表-5 解析条件（確率規模別流量）

解析対象区間	下流端：18.0k 上流端：31.0k 解析区間延長：13.0km
出発水位	18.0k地点のH-Q式（H22年断面）で設定
粗度係数	整備計画で設定されている計画粗度係数 低水路：逆算粗度係数＋推定粗度係数 氾濫原：土地利用を考慮して設定
樹木群	樹木群は等価粗度係数で評価 諸元：平成23年度調査結果 平面分布：航空写真・植生図より設定
解析地形	河道：平成22年度定期横断測量成果 氾濫原：平成21年度LPデータ
解析メッシュ分割	縦断方向メッシュ：10m 縦断方向メッシュ：120分割（3～6m） （低水路：40分割、氾濫原：各40分割）

(2) 解析結果

S58.7洪水での倒伏状況の検討結果を踏まえて、倒伏

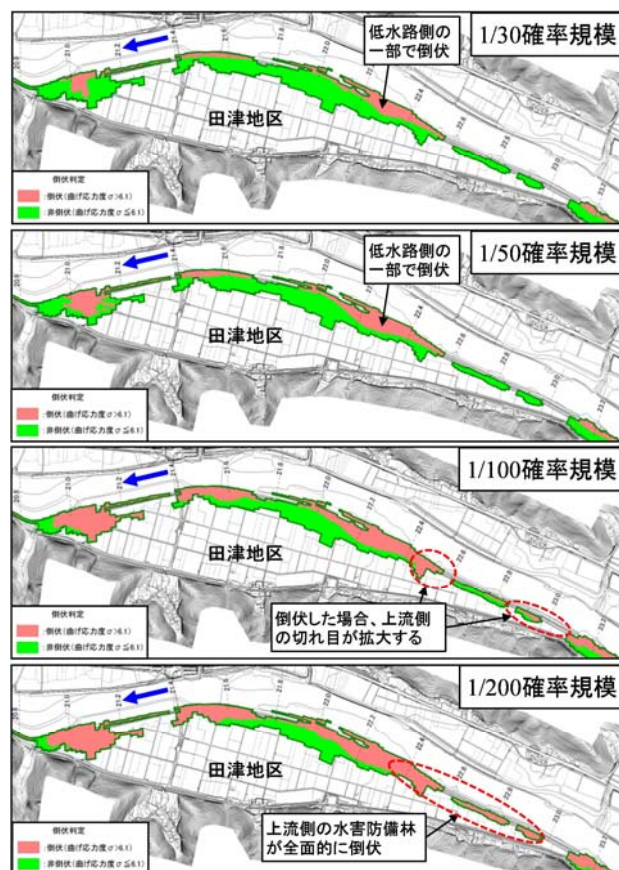


図-5 水害防備林の倒伏状況平面図

表-6 水害防備林の倒伏面積

確率規模	面積(ha)		比率	
	倒伏	非倒伏	倒伏	非倒伏
1/30	4.02	9.94	28.8%	71.2%
1/50	5.52	8.45	39.5%	60.5%
1/100	8.35	5.62	59.8%	40.2%
1/200	10.09	3.87	72.3%	27.7%

判定の閾値を竹の曲げ応力度 σ_b の実大実験結果 6.1kN/cm^2 とした。

確率規模1/30及び1/50では、水害防備林に作用する流体力が小さいため、低水路側の一部を除いて水害防備林は倒伏しないと予測される。水害防備林の非倒伏範囲が縦断的に連続するため、水害防備林が持つ流速低減効果を期待することができる。

確率規模1/100では、上流側の水害防備林の切れ目が倒伏により拡大する可能性がある。江の川下流部の水害防備林の課題として、上流側の切れ目から氾濫流が流入することによって、氾濫原流速が局所的に増大する³⁾。そのため、上流側の水害防備林の切れ目が倒伏により拡大した場合、氾濫流がさらに流入し、氾濫原流速が増大する可能性がある。

確率規模1/200では、上流側の水害防備林が全面的に倒伏する可能性がある。また、田津地区の水害防備林の約3/4が倒伏するため、水害防備林の流速低減効果が大きく損なわれる可能性がある。

大規模洪水時（1/100及び1/200）では、水害防備林の

半分以上が倒伏するため、堤防や護岸の整備と合わせて活用していく必要がある。

(3) 倒伏による氾濫原流速への影響

確率規模が1/200の場合、田津地区の水害防備林の約3/4が倒伏し、水害防備林の流速低減効果が大きく損なわれる可能性があることがわかった。そのため、超過洪水である1/200の外力を対象として、水害防備林が倒伏しないCase1、倒伏角を45°としたCase2、倒伏角を10°としたCase3、完全に倒伏したCase4について氾濫原流速への影響を確認した。倒伏による氾濫原流速への影響を図-6に示す。

Case2では、倒伏後の抗力の作用長がCase1と比較して大きく変わらないため、氾濫原流速に大きな違いは見られない。Case3では、倒伏後の抗力の作用長が小さくなるため、氾濫原流速が一部増大する。水害防備林は倒伏しても流出しない限り、氾濫原流速への影響は限定的である。

Case4では、倒伏範囲において水害防備林の流速低減効果がなくなるため、氾濫原流速が増大する。水害防備林が完全に倒伏・流出した場合、氾濫原流速への影響が大きいため、水害防備林の流出についても考慮していく必要がある。

5. 結論と今後の課題

本研究では、S58.7洪水を対象として水害防備林の倒伏検討を行うとともに、現況河道において確率規模別流量での倒伏可能性の検討を行った。以下に得られた主な結論及び課題を示す。

- 1) S58.7洪水での倒伏検討結果より、水害防備林の倒伏判定の閾値として、竹の曲げ応力度 σ_b の実大実験結果6.1kN/cm²を用いることの妥当性を確認できた。また、流水による外力モーメントより求めた曲げ応力度を算定することで水害防備林の倒伏の可能性を評価することができた。
- 2) 計画規模(1/100)を超える洪水において、竹の曲げ応力度($\sigma_b=6.1\text{kN/cm}^2$)を超過する範囲が多く存在し、水害防備林が倒伏する可能性が高いことがわかった。また、水害防備林の倒伏による氾濫原流速への影響を確認することができた。
- 3) 江の川下流部での水害防備林の倒伏状況の検討を行ったが、S58.7洪水での検討であるため、今後発生する洪水での調査が必要である。また、他河川での事例を収集・解析することで水害防備林の倒伏に関する知見を蓄積する必要がある。

参考文献

- 1) 福岡捷二，五十嵐崇博，高橋宏尚：江の川水防林の特性と治水効果，水工学論文集，第39巻，pp.501-506，1995。

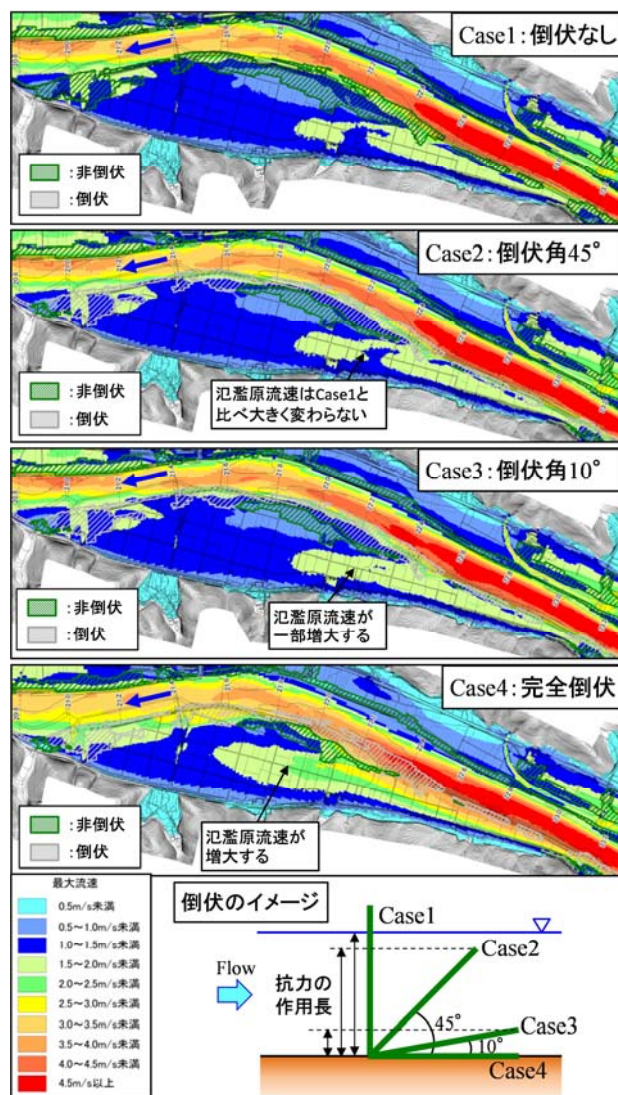


図-6 田津地区の最大流速平面図 (1/200)

- 2) 青木健太郎，中井喜美男，松尾至哲：江の川下流部における水害防備林が持つ治水効果を活用した維持管理方策，河川技術論文集，第21巻，pp.313-318，2015。
- 3) 青木健太郎，藤田正治，稲若孝治，松尾至哲：江の川下流部における水害防備林の課題及び改善策：土木学会論文集B1(水工学)，Vol.72，No.4，pp. I_1099- I_1104，2016。
- 4) 渡邊康玄，市川嘉輝，井出康郎：洪水時における河道内樹木の倒伏限界：水工学論文集，第40巻，pp.169-174，1996。
- 5) 田中規夫，八木澤順治，福岡捷二：樹木の洪水破壊指標と流出指標を考慮した砂礫州上樹林地の動態評価手法の提案：土木学会論文集B Vol.66 No.4，pp.359-370，2010.11。
- 6) 吉田競人，飯塚真次：横浜市近郊に生育する孟宗竹の材料特性：職業能力開発総合大学校東京校 紀要 第23号，pp.115-124，2008。
- 7) 建設省中国地方整備局浜田工事事務所，アジア航測株式会社：江の川洪水流量図化業務解析報告書，1984。
- 8) (財)リバーフロント整備センター編：河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案)，山海堂，1994。

(2016.4.4受付)