

39. 橋梁に敷設した水平梁の流木捕捉効果の検討

宮原 邑太^{1*}・堀口 俊行²・堤 大三³

¹学生会員 防衛大学校研究科地球環境工学専攻 (〒239-8686神奈川県横須賀市走水1-10-20)

²正会員 防衛大学校建設環境工学科 (〒239-8686神奈川県横須賀市走水1-10-20)

³正会員 三重大学生物資源学研究科 (〒514-8507三重県津市栗真町屋町1577)

* E-mail: em61040@nda.ac.jp

近年の異常気象により土砂災害の規模が拡大しており、巨礫や土砂とともに大量の流木が含まれる流木混じり土石流が多くみられるようになってきた。そのため、従来建設されてきた不透過型砂防堰堤では捕捉できない流木が、下流に流れていき河川に掛かる小橋梁で捕捉されることで閉塞し氾濫に繋がる事例が見られている。そこで本研究は、流木のみを捕捉して橋梁の閉塞を低減させて土砂等を最下流部まで流下を促す水平梁構造物を提案するものである。さらに、提案した水平梁構造の捕捉率を流木の長さや捕捉工間隔および縦材効果をパラメーターとして検討した。その結果、流木の投入要領、捕捉工間隔、流木の本数によって捕捉率に影響を与えることを示した。

Key Words : woody debris, horizontal rods, trap efficiency

1. 緒言

近年の土砂災害において、土砂とともに大量の流木が河川を流下し、被害を拡大している事例が報告されている¹⁾。石川は、流木災害の特徴を6つに分けている²⁾。その中で、流木によって橋梁を閉塞して住宅地や施設等に被害を与えることや橋梁閉塞によって土石流等がダムアップし、水圧で橋梁が押し流されることが示されている。このことから、流木に対して上流から下流に至るまでの連続的な対策の必要を示している³⁾。写真-1は、令和2年7月豪雨での橋梁閉塞の事例であり、流木による閉塞から土砂氾濫が報告されている。

このような状況を鑑みて、国土交通省は流木対策に関する事務連絡を通して、既存の砂防構造物に流木捕捉機能を付与するように進めてきた³⁾。しかし、近年の流木被害状況から、砂防施設が整備できない小河川の橋梁において閉塞が発生する例や、既設の不透過型砂防堰堤で捕捉しきれなかった流木が下流に至り氾濫を引き起こす例など、流木捕捉対策は十分とは言えない。そのため、小河川の橋梁部において、対象箇所に適切な流木対策が必要である。

ところで、流木混じり土石流における橋梁閉塞の



写真-1 令和2年7月豪雨での橋梁閉塞の事例

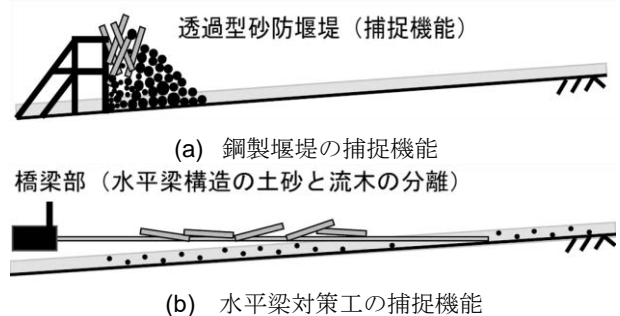


図-1 水平構造モデルの流木捕捉機能

発生および起因する被害は、流木が橋梁を通過できずに留まっていることが多くある。この対策は、流木と土砂が混在して流下する土石流において、効率的に土砂と流木を分離できるような施設を考案で

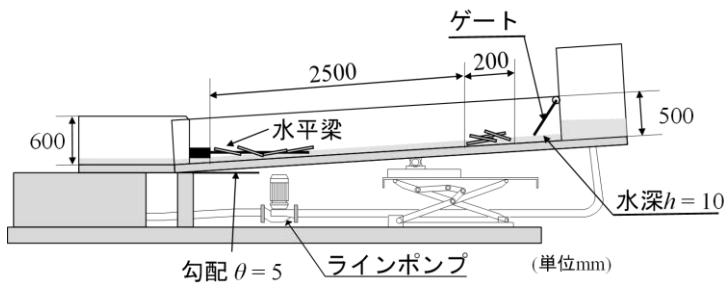


図-2 実験水路

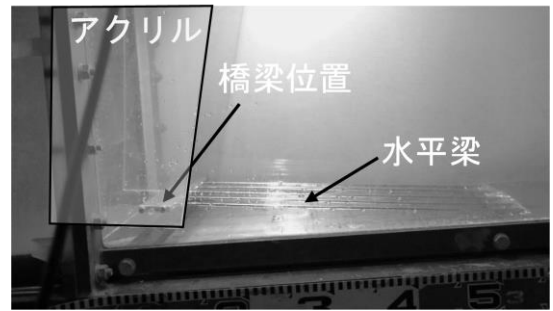


写真-2 水平梁捕捉工

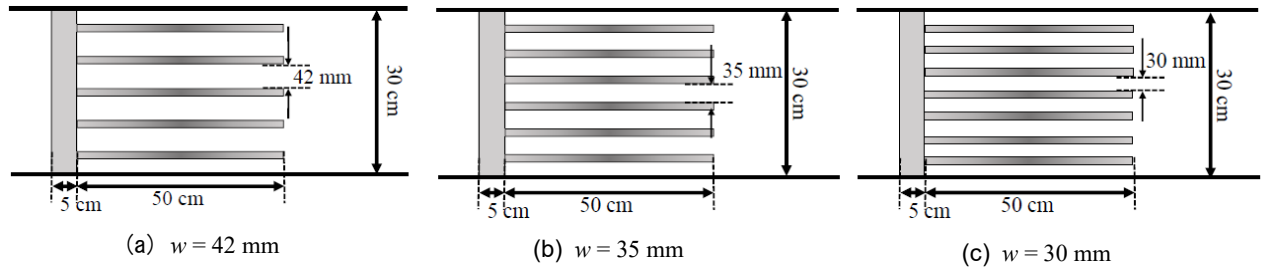


図-3 各々の水平梁捕捉工

できれば、橋梁上流側で流木を漕しとり、残った土砂のみ下流に流下させることができると考えた。例えば、図-1(a)のように土砂と流木を同時に捕捉するよりも、図-1(b)のように土砂と流木を分離して流木だけを捕捉することができる水平梁の方が効率的である⁴⁾。Furukawa et al.⁵⁾は、流木と土砂の混合状態から流木のみを捕捉できることを確認し、様々な流木長に対して捕捉効果を確認した。そこでは、流木の流下条件が捕捉率に与える影響について示した。しかし、実構造物として水平梁を設置するには補剛材もしくは縦材を入れる必要があり、流木の捕捉効果に大きく影響を与えられるため検討する必要がある。

そこで本研究は、水平梁構造に縦材を入れて捕捉工の効果を検討するものである。その際に、3種類の流木モデルを用いて捕捉効果を整理し、現行の流木捕捉工間隔を決定する設計式と比較して、提案モデルとして提案する。

2. 実験の概要

(1) 実験要領

実験水路内に提案した捕捉工を設置し、連続的に水を供給して流木モデルを流下させた。その際、捕捉された流木本数を計測する。さらに、後続流によって流木が捕捉工から抜けることもあるため、流木の再流出が止まるまで十分待ったのち、計測を行った。流木捕捉率 R_t は、

$$R_t = n_t/n \times 100 \quad (1)$$

ここで、 n ：投入した流木本数、 n_t ：捕捉工によって捕捉された流木本数。

捕捉工によって流木の捕捉率は常に一定とならずばらつきが生じる。そのことを考慮して同条件下における実験を10回行い、その平均値を流木捕捉率 R_t とした。

(2) 実験装置

図-2に示す実験水路は、長さ4.3 m、水路幅0.3 m、深さ0.5 mの直線水路である。水路勾配は、 $\theta = 0 - 20^\circ$ の間で調整が可能となっている。本研究では、文献^{4), 5)}を参考に水路勾配は $\theta = 5^\circ$ とした。

写真-2に水平梁捕捉工を示す。水路下流部にこの捕捉工を設置して、捕捉工間隔及び水路に流す流木モデルの形状、本数を変化させることで流木挙動や捕捉率を整理した。捕捉工は、梁部分を直径4.0 mmのアルミ丸棒で、橋梁部分をアルミ板で作成した。橋梁部分から水路面までの高さは10 cmである。また、水平梁捕捉工は、上流端をテープで水路床に固定することで、水流による浮き上がりをなくした。アクリル板と水路はクランプで固定した。

図-3に、捕捉工間隔を変化させた3種類の水平梁捕捉工を示す。水平梁の捕捉工間隔は、 $w = 42, 35, 30$ mmの3種類とした。流下方向から長さ50 cmである。

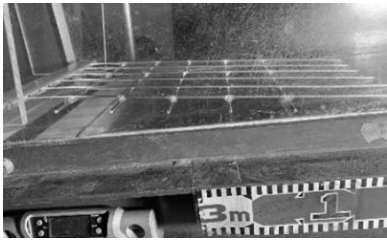


写真-3 縦材付の水平梁捕捉工

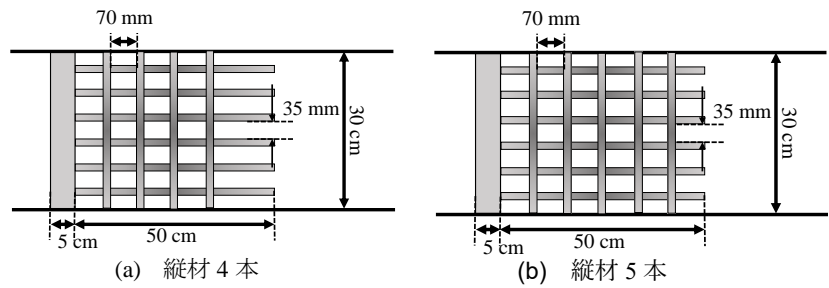


図-4 各々の縦材付の水平梁捕捉工

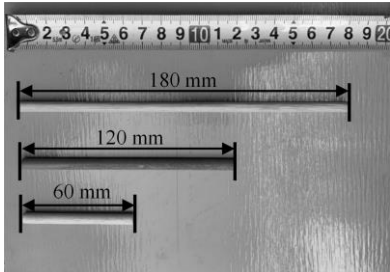
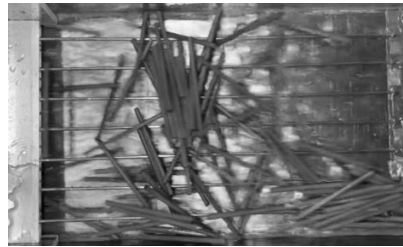


写真-4 流木モデル

表-1 実験ケース

投入方法	縦材	流木長(mm)	投入本数(本)	捕捉工間隔(mm)
投入区間一定法	無し	60	20	30
		120	40	
		180	60	
		180	80	
投入本数一定法	4本	120	100	42
	5本		100	



(a) $t = t_0$

(b) $t = t_0 + 0.1 \text{ s}$

(c) $t = t_0 + 0.2 \text{ s}$

写真-5 流木捕捉過程 (捕捉工間隔 $w = 30 \text{ mm}$, 流木長 $l = 120 \text{ mm}$, 投入区間一定法)

写真-3に、捕捉工間隔 $w = 35 \text{ cm}$ の水平梁捕捉工に縦材を付加した水平梁補足工を示す。図-4のように、縦材の間隔は 7 cm であり、縦材の本数を $0, 4, 5$ 本の 3 種類とした。

(3) 流木モデル

写真-4に、実験で使用する流木モデルを示す。本実験では、流木長の影響を調べるため、長さの異なる 3 種類の流木モデル $l = 60, 120, 180 \text{ mm}$ を作成した。いずれの流木モデルも直径 3 mm である。流木は事前に 24 時間以上、水につけた状態を使用した。なお、比重は乾燥状態で 0.6 、湿潤状態で 0.95 である。

(4) 投入要領

実験水路に設置した水平梁捕捉工の端部から上流側へ $2.5\text{--}2.7 \text{ m}$ の位置に、高さ 50 cm の地点から流木モデルを落下させ、下流側に流下させる。実際に現地での流速と流量を想定して、フルード相似則に従い $1/50$ の縮尺で実験を行う。本実験の流量は、平成 30 年 7 月豪雨 (広島) における土砂洪水を参考に、フルード則に基づき、流量 $Q = 5.6 \text{ L/s}$ に設定し

た。流速は、流木モデルが水路を 1.0 m 流下するのに要した時間とし、撮影したビデオから計測した。なお、ビデオの位置は流木捕捉工の位置に置き、流速 $v = 0.93 \text{ m/s}$ であった。また、投入区間一定法と投入本数一定法を採用した^{5),6)}。なお、投入区間一定法では、実験水路に予め 20 cm 区間をとり、高さ 50 cm の位置から流木モデルを落下させた。流木モデルは、下流側に設置して水平梁捕捉工で捕捉される。投入本数一定法では、流下する流木の密度が一定になるように 1 本/s の密度で水路に流下させた。

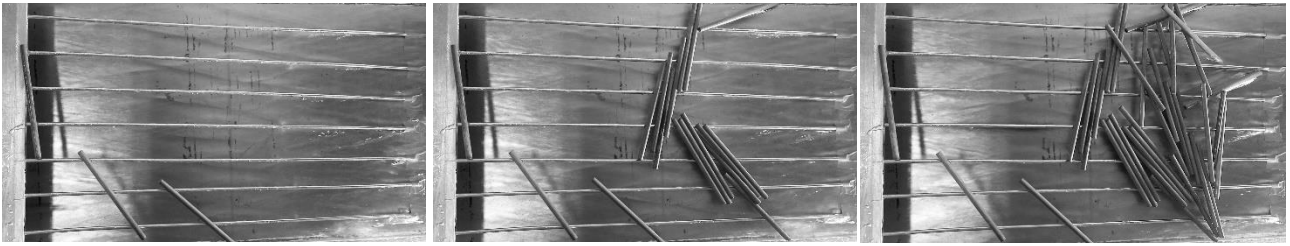
(5) 実験ケース

表-1に、実験ケースを示す。捕捉工間隔および流木形状、本数をそれぞれ変化させ、計 45 通りを各ケース 10 回ずつ実施した。加えて、縦材を付加したケースでは、縦材本数、補足工間隔を変化させ、計 9 通りを実施した。

3. 実験結果

(1) 流木の捕捉過程 (間隔一定と本数一定)

写真-5に、投入間隔一定法における捕捉工間隔 w

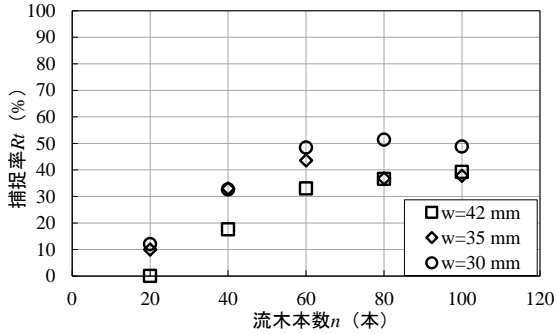


(a) $t = t_0$ s

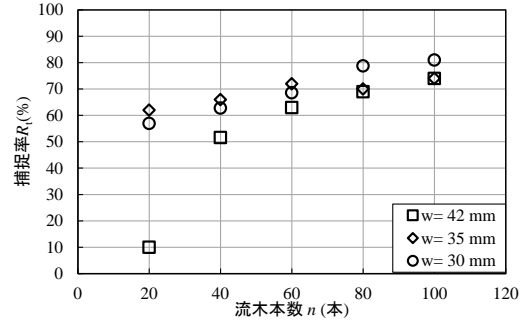
(b) $t = t_0 + 50$ s

(c) $t = t_0 + 100$ s

写真-6 流木捕捉過程 (捕捉工間隔 $w = 30$ mm, 流木長 $l = 120$ mm, 投入間隔一定法)

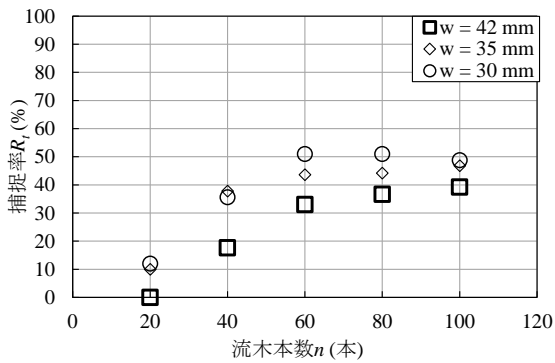


(a) 流木長 $l = 120$ mm

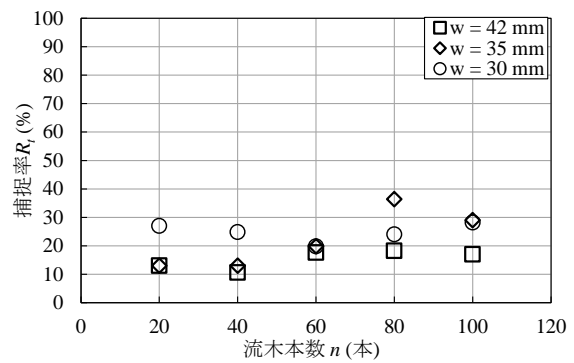


(b) 流木長 $l = 180$ mm

図-5 捕捉率～流木本数の関係



(a) 投入区間一定



(b) 投入本数一定

図-6 投入要領における影響

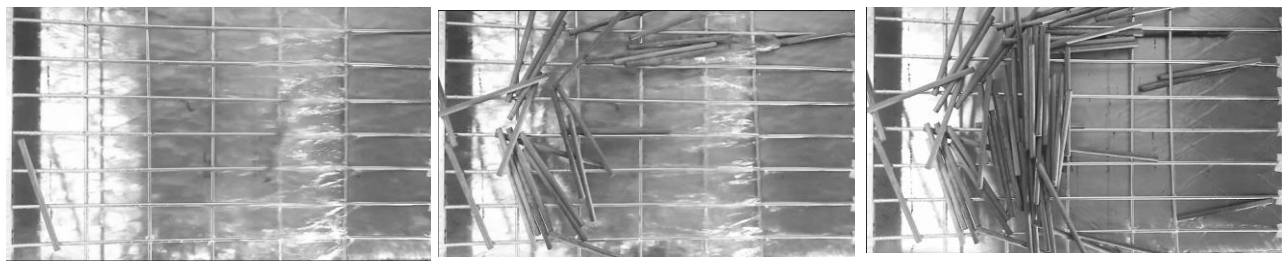
$w = 30$ mm, 幹モデル本数 $n = 100$ 本, 流木長 $l = 120$ mmの実験結果を示す. 写真-4は, 上流側から流れてきた流木が一気に捕捉工に到達し, 捕捉されている. 一方で, 流下したときに流木の流れる姿勢が流下方向に対して平行の時は捕捉されずに, そのまま流下している. また, 集団で流下してきたものから遅れた流木は, 流れてきた流木の姿勢によって捕捉されずに流下している. よって, この水平梁捕捉工は, 橋梁閉塞の要因となりえる大量の流木のみを捕捉して, 流下できる流木はそのまま流下していることが分かる.

写真-6は, 投入間隔一定法の捕捉工間隔 $w = 30$ mm, 流木長 $l = 120$ mmである. 徐々に流木が流れていき捕捉されている. また, 流木の個々の傾きが流下方向に対して垂直に近ければ捕捉され, 水平になると流下している. また, 先行の流木が捕捉される

と後続の流木が捕捉されやすくなっている.

(2) 流木長と流木本数の影響

図-5に, 捕捉工間隔 $w = 30, 35, 42$ mmにおける流木長の影響を示す. 流木モデル毎に分けて捕捉率と流下本数の関係を整理した. 流木長が長くなるにつれて捕捉率が大きくなる. 流木が長くなることで捕捉工にぶつかり流木同士が絡みやすくなることが示唆される. また, 流木長が 60 mmでは捕捉されることが分かった. 次に, 流木本数における影響を見ると, 捕捉工間隔が広いとき, 流木本数が少ないほど大きく影響を受ける. これは流し方にも影響を受けるが, 一気に流れてくる流木が捕捉工や後続流によって通過できなくなっているためである. 流木が群で来ると流木同士で絡み合うことで捕捉されている. このことから流下本数における影響が捕捉効果



(a) $t = t_0$ s (b) $t = t_0 + 50$ s (c) $t = t_0 + 100$ s

写真-7 流木捕捉過程 (縦材 5 本 流木長 $l = 120$ mm, 投入間隔一定法)



(a) $t = t_0$ s (b) $t = t_0 + 50$ s (c) $t = t_0 + 100$ s

写真-8 流木捕捉過程 (縦材 4 本 流木長 $l = 120$ mm, 投入間隔一定法)

を上げていることが分かる。しかし、捕捉量が多くなりすぎると流下を促す機構が失われる可能性もあるため、流木の捕捉について土砂と流木の流下の効率性について今後検討が必要である。

(3) 投入要領の影響

図-6は、投入要領の影響を見るために捕捉工間隔 $w = 30, 35, 42$ mm の捕捉率を示す。投入区間一定の捕捉率は、 $R_t = 40\%$ 程度である。一方、投入本数一定法は、明らかに捕捉率が下がっている。また、流木本数 $n = 40-80$ の範囲での捕捉率を比較すると約半分に落ちる。さらに、流下本数 $n = 80$ と流下本数 $n = 100$ を比較すると、 $w = 35, 42$ mm の捕捉率が低下している。これは、捕捉工に留まっていた流木が後続から流下してくる流木の衝突が下流に押し出されることが原因である。捕捉率が 20% から 10% に低下している。従って、投入本数一定法は捕捉された流木が後続の流木によって流下してしまうことが生起する結果となった。流木の流下形態においては、投入本数一定法のような流れ（各個運搬）が多くあることから、流下の形態によって捕捉工間隔の大きさを検討する必要がある。

(4) 縦材の影響

写真-7, 8 に縦材付の水平梁捕捉工の流木捕捉過程を示す。縦材が入ることで多くの流木が捕捉されていることが分かる。また、流木長が 60 mm の場合は、捕捉されずに流下する。このことから縦材間隔

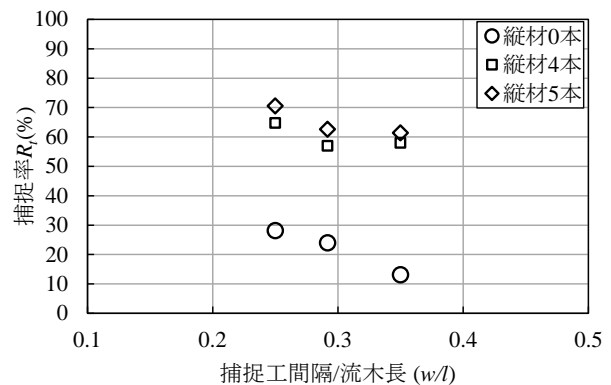


図-7 縦材有無によるの捕捉率への影響

は流木長の半分以下にすると捕捉されることが示唆される。

図-7に、縦材時の捕捉工の捕捉率および流木長と補足工間隔の比の関係を示す。縦材がない場合、捕捉工間隔が狭くなるほど捕捉率が大きくなることがわかる。一方、縦材が4, 5本の場合には捕捉工間隔が変化しても捕捉率に大きな変化がなく $R_t = 60\%$ ほどで一定の値を示す。縦材無しと有りの捕捉率を比較すると、縦材有の方がいずれの捕捉工間隔においても約2倍ほど大きいことがわかる。このことより、捕捉率に影響を与えるのは縦材の本数ではなく、縦材の有無であることが分かる。

(5) 捕捉率推定法の提案

石川ら⁹⁾は、不透過型砂防堰堤に設置される流木止スクリーンの捕捉性能について検討している。その結果に基づき、捕捉率 P_c を評価するための式を提案している。

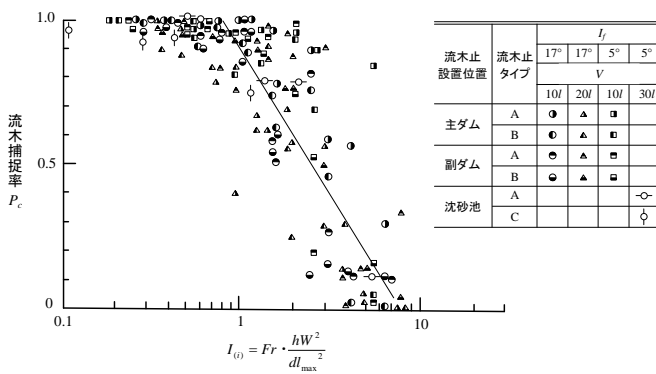


図-8 水山らの実験結果 7)

$$\begin{cases} P_c \approx 1.0 & (I_{(i)} \leq 0.8) \\ P_c = \log(8/I_{(i)}) & (0.8 \leq I_{(i)} \leq 8) \\ P_c \approx 0.0 & (I_{(i)} \geq 8) \end{cases} \quad (2)$$

また、式(2)中の $I_{(i)}$ は、次式で与えられ捕捉率との関係は図-8 で表される。

$$I_{(i)} = Fr \frac{hw^2}{dl^2} \quad (3)$$

ここで、 $I_{(i)}$: 捕捉率支配指標、 Fr : フルード数、 V : 流速、 h : 水深、 w : 捕捉工間隔 d : 流木直径。

図-8 より、本推定式は水山らの実験結果を良好に評価できていることがわかる 7)。なお、実験条件では、 $Fr=2.85$ 、 $d=8\text{mm}$ 、 $h=9\text{mm}$ で行われた $W/l_{\max}=1/2$ 条件下の捕捉率支配指標 $I_{(i)}$ が 0.8 となる。指針 8) に示されている捕捉工間隔比 1/2 以下は、この実験結果において捕捉率が $P_c = 1.0$ となることに対応している。

上記の指針 8) に従うと本実験においては、図-9 のように整理することができ、式(3)を用いてにおいて捕捉工間隔を 2 倍として評価すると実験結果を良好に評価できる。このことから、流下を促す捕捉工間隔にするには $P_c = 0.5$ 程度となるように設定することで橋梁の閉塞を低減できる可能性がある。しかし、定量的な評価をするには実験データが少ないため今後検討していく必要がある。

4. 結 言

本研究では、水平梁捕捉工に対して流木長、流木本数、流木の流し方によって捕捉率に与える影響について検討したものである。得られた成果をまとめると以下ようになる。

1) 流木が長くなると流木と捕捉工が接触することで絡みやすくなり、捕捉率が大きくなる。

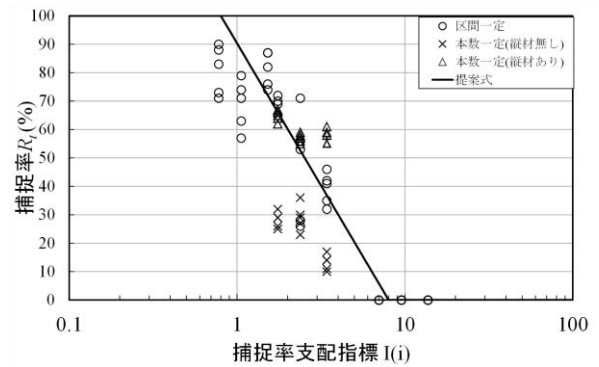


図-9 捕捉率～捕捉率支配指標

2) 捕捉工間隔が狭くなるほど捕捉率は高くなる。ただし、捕捉量が大きくなりすぎると流下を促す機構が失われる可能性もある。

3) 縦材を付加した場合、縦材無の場合に比べて捕捉率が大きくなる。

参考文献

- 1) 石川芳治, 池田暁彦, 柏原佳明, 牛山素行, 林真一郎, 森田耕司, 飛岡啓之, 小野寺智久, 宮田直樹, 西尾陽介, 小川洋, 鈴木崇, 岩佐直人, 青木規, 池田武穂: 2013 年 10 月 16 日台風 26 号による伊豆大島土砂災害, 砂防学会誌, Vol.66, No. 5, pp. 61-72, 2014.
- 2) 石川芳治: 最近の土砂災害の特徴と対策, 第 9 回土砂災害シンポジウム論文集, pp. 61-66, 2018.
- 3) 国土交通省砂防部: 事務連絡, 平成 29 年 7 月九州北部豪雨を踏まえた今後の砂防事業における流木対策, 2017.
- 4) 武藤弘典, 堤大三, 古川真由子, 内田太郎, 鈴木拓郎, 堀口俊行: 新たな流木捕捉工の開発のための急勾配水路実験による実験的研究, 砂防学会誌, Vol. 73, No. 6, pp.19-26, 2021.
- 5) M.Furukawa, D. Tsutumi, M. Hironori, T.Uchida, T. Suzuki, T. Horiguchi: Flume Experiments Evaluating the Efficacy of a Large Wood Trap Featuring Horizontal Rods, Water 2021, Vol.13, pp.1837-1852, 2021.
- 6) 石川芳治, 水山高久, 福澤誠: 砂防ダムおよび流木スクリーンによる流木捕捉効果, 土木技術資料, Vol.31, No.9, pp.41-47, 1989.
- 7) 水山高久, 石川芳治, 矢島重美: 透過型砂防ダムによる流木捕捉効果, 土木技術資料, Vol.30, No.11, pp.47-52, 1988
- 8) 国土交通省砂防部, 国土交通省国土技術政策総合研究所: 土石流・流木対策設計技術指針及び同解説, 2016