土木学会論文集A2(応用力学), Vol. 69, No. 1, 1-15, 2013.

三次元個別要素法による実橋梁の流木閉塞災害事例の解析

香月　智[1]・渋谷　一[2]・大隅　久[3]・石川　信隆[4]

[1]正会員　防衛大学校教授　システム工学群建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20）
E-mail: katsuki@nda.ac.jp
[2]学生会員　防衛大学校理工学研究科後期課程（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20）
E-mail: ed10006@nda.ac.jp
[3]非会員　砂防鋼構造物研究会　日鐵住金建材株式会社（〒135-0042 東京都江東区木場2-17-12）
E-mail: hohsumi@n-kenzai-kaihatsu.jp
[4]フェロー　防衛大学校名誉教授　砂防鋼構造物研究会（〒102-0093 東京都千代田区平河町2-7-5）
E-mail: cgishikawa@m4.dion.ne.jp

平成22年7月16日に広島県庄原市における集中豪雨は，土石流とともに大量の流木を発生させた．このため，同市重行地区では，大量の流木が橋梁に絡まって河道を閉塞し，河川の氾濫被害が生じた．本研究は，この流木の形状特性に関する現地調査を行ったうえで，生起した橋梁閉塞事例に関するシミュレーション解析を行ったものである．すなわち，現地調査により流下した流木の長さ，直径，樹根径を調査し，閉塞シミュレーションのための基礎特性を把握した．そのうえで，樹根部の形状を表現可能な円柱形要素の集合体要素を用いた三次元個別要素法によって，実橋梁の閉塞シミュレーションを行い，その信頼性と閉塞メカニズムに関する知見を示した．

Key Words : *woody debris, DEM, cylindrical element, dam-up, real disaster, bridge, pier*

1. 緒　言

わが国は，戦後の全国的な緑化運動を経て，山地の多くが人工林で覆われている．一方，木材価格の低下，過疎化に伴って森林管理が困難になり，林地荒廃が拡大している．すなわち，林業人口の低下によって間伐材が山林に放置されたり，台風による風倒木も山地斜面に放置されたりしている．これらは豪雨時に流木となり，大量の土砂とともに河川に流出する．流木が土石流中に含まれると，流下の際に河川の狭窄部や橋梁等に詰まることにより，土石流や洪水の氾濫を助長する[1)]．

例えば，2004年7月の福井豪雨[2)]においては，流木による橋梁の被災事例が報告されている．また，2004年7月の新潟豪雨[3)]においても，橋脚に流木が捕捉されて水位が堰上げられたために氾濫し，住宅地が浸水するなど，多くの災害が報告されている．このような流木による被害は古くから報告されており，橋梁に対する被害事例も多い．

このような観点から，足立，大同[4)]は，橋脚周辺における流木の挙動について詳細に検討し，流木の堆積や水位の堰上げについて検討を行っている．

また，流木の挙動や堆積に関する解析的な研究も多くみられる．中川ら[5), 6)]は，平面2次元場において流れ場をオイラー的に解析しつつ，流木の運動をラグランジュ的に追跡することで，流木の流動過程について検討している．ただし，流木同士の接触については考慮されていない．このため，清水ら[7), 8)]は，平面2次元場において，河道内における流木の流動・集積過程について，個別要素法を用いて流木の接触を考慮した表現を試みている．さらに，枝付き形状の流木モデルについても検討を行い，枝の有無により橋脚付近での流木塊の形成過程が異なることを明らかにしている．

これら平面2次元問題とは別に，橋脚を有さない小橋梁における流木の堰止めに関する検討も行われている．後藤ら[9)]や越塚ら[10)]は，MPS法に剛体連結モデルを組み込んだ手法により，鉛直2次元場における橋梁による流木の捕捉過程についてシミュレーションを行っている．そのうえで，これを3次元に拡張し，流水と流木双方の挙動を表現した橋梁の閉塞に関する研究なども行われている[11)]．

このように，流木と流水との連成解析法の精緻化は

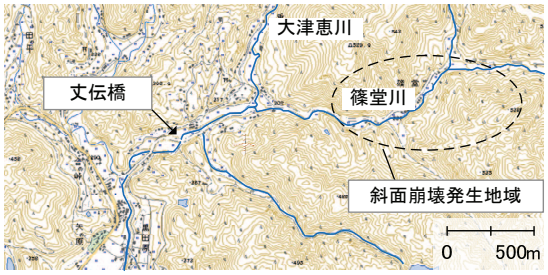


図-1　調査地域（国土地理院発行地形図参照）

進んでいるが，その計算法の実現象との比較を通じた検証などは行われていない．

一方，著者ら[12]は，流木を円柱形要素によってモデル化した個別要素法を用いて，事前実験との比較を通じて流木捕捉工の捕捉シミュレーション解析を試みている．これより，根なし流木の全体的な挙動や流木捕捉率について，実験結果を概ね再現可能であることを示した．また，球連結要素を用いた流木モデルに比して，流木捕捉率という観点からの相違点についても分析・検討した．さらに，著者ら[13]は，円柱形要素からなる集合体要素モデルにより根付き流木を表現することで，根付き流木の挙動を解析することも試みている．

ところで，平成 22 年 7 月 16 日に広島県庄原市に局地的な集中豪雨が襲い，土石流と同時に大規模な流木災害が発生した．この災害は，近年特有の気象条件や，人工林を背後に控える中山間地域に生起している点において，全国的に共通する降雨災害の要因を備えている．また，流木災害事例という観点からは，二つの研究上の貴重な特徴を備えている．その一つは，土石流中の土砂と流木が分離した地域の直下流にあった丈伝橋では閉塞せず，その 10m ほど下流の小橋梁で閉塞していたことにより，氾濫を起こしていたことである．もう一つは，氾濫に伴って溢れ出た流木が水田に大量に残されたため，通常災害では流下してしまって調査が難しい流木が，災害地点で調査できる状態で残されていたことである．

そこで本研究は，今後の流木災害シミュレーションに資する現地調査を行ったうえで，著者らの提案している流木による構造物の間隙閉塞シミュレーション法を用いて，丈伝橋とその下流にある小橋梁に対する閉塞予測解析を行い，個別要素解析法による閉塞予測技術の適用性について検討したものである．

2.　流下した流木の形状特性

広島県庄原市の重行地区において，土石流とともに発生した重行地区の流木氾濫について，災害発生直後

(a)　上流側から撮影

(b)　下流側から撮影

写真-1　橋梁閉塞と流木の堆積状況

の 7 月 24 日に実態調査を行った[14]．ここでは，土石流とともに流出する流木の長さ，直径，および樹根径の特性について分析結果を示す．

(1)　調査の概要

a)　降雨および調査地域の概要

図-1 に，調査した広島県庄原市の川北町重行地区を示す．本調査では篠堂川上流部付近(**図-1** の破線の丸で囲んだ地域)において十数箇所の表層崩壊が視認できた．なお，西ら[15]や海堀ら[16]の報告によると，これらの表層崩壊に伴い発生した土石流は，篠堂川および大津恵川を流下し，丈伝橋付近まで流下している．その際，土石流は周辺の家屋を襲い，破壊させて流下した．ただし，丈伝橋より上流部において河川勾配が緩やかになっているため，土砂が緩勾配部で分離・堆積し，流木のみが丈伝橋に襲来した．この時，**図-1** 中に示す径間が約 10m の丈伝橋では流木が捕捉されていないのに対して，その直下流にある径間が約 5m の小橋梁において多数の流木が捕捉され，流木が溢れ出て，右岸に広がる水田に大量に堆積していた．**写真-1** に，橋梁閉塞と流木の堆積状況を示す．

丈伝橋より上流域においては，**写真-2** に示すように，流木が河岸に堆積した土砂の中に埋没しているため計測調査に適さない．一方，小橋梁の右岸に広がる約

写真-2　土砂に埋没した流木

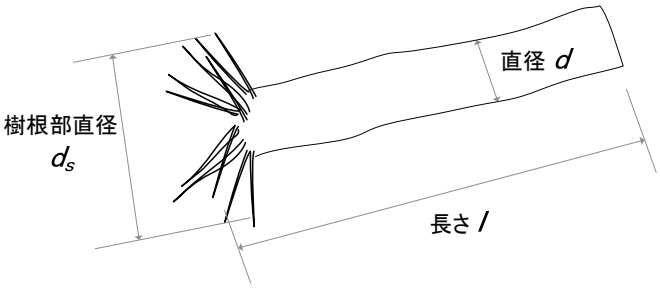


図-2　計測項目の概略図

写真-3　調査地域全景

200m×100m の田畑において，**写真-3** に示すように大量の流木が堆積していた．そこで，この地域に堆積した流木について調査を行った．

b)　計測要領

本調査に当たっては石川らの調査[17]を参考に，**写真-3** に示す水田に堆積した流木のうち，長さ約 2m 以上，直径約 10cm 以上の流木を対象に抽出して，長さ，直径，樹根部の直径の計測を行った．本調査地域には対象となり得る流木が 250 本ほど存在したが，水田の中央部にあって計測が憚られるものもあり，これらを除いて 205 本の流木の計測を行った．**図-2** に，それぞれの計測項目の概略図を示す．

流木長の測定は，巻尺を用いてその全長を測定した．流木長の計測精度は 5cm 程度である．

直径の測定は，巻尺を直接当てて測定した．計測部分は，根の付いている流木については胸高直径を，根の付いていない折れた流木については，直径の太い方の端部から約 1m 付近の直径を計測した．直径の計測精度は概ね 1cm である．

樹根部直径の測定は，長軸と短軸を測定することが望ましいが，流木同士の絡みあいや埋没等により測定が困難であった．このため，計測可能な方向で巻尺を直接当てて測定した．樹根部直径の計測精度は概ね 10cm である．

(2)　計測結果および考察

a)　計測結果

表-1 に計測結果の概要を示す．表中の樹根部直径の標本数が 116 本とあるのは，全 205 本のうち樹根が付いていた流木が 116 本であり，残りの 89 本は樹幹が折れて根が付いていないことを表している．

計測した流木の特徴は，以下のようになる．

(1)　樹根の付いている流木は，上端部が折れている．
(2)　樹根の付いていない流木は，その幹の両端が折れている．
(3)　いずれの流木も樹冠部は全く残っていない．また，枝や葉についても全く残っていない．

現地調査時の聞き取りによると，間伐等は行われていなかった．よって，枝や葉は枯れ落ちたものではなく，枝葉のあった立木が流下途中ですべて折れてしまったものと考えられる．このことは，文献 18) に述べられている「多少なりとも流送された流木は枝条のほとんどが分離し幹だけとなっている」ことと一致する．

b)　流木長の分布特性

図-3 に，流木長について 1m ごとの頻度分布を示す．なお，**図-3** 中には，対数正規分布曲線による曲線あてはめも示している．崩壊斜面付近における樹高が約 20m 以上であったのに対し，流木長は最大でも 20.3m となっており，また大半の流木長は 10m 以下となっている．これは，前述のように流下途中で流木が折れて

表-1 計測結果

	長　さ	直　径	樹根部直径
標本数	205 本	205 本	116 本
最大値	20.30 m	56 cm	200 cm
平　均	6.1 m	25.1 cm	98.0 cm
標準偏差	3.1 m	8.1 cm	34.7 cm

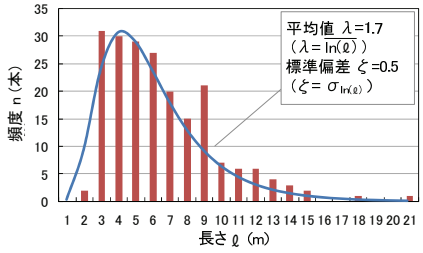


図-3 流木長の頻度分布

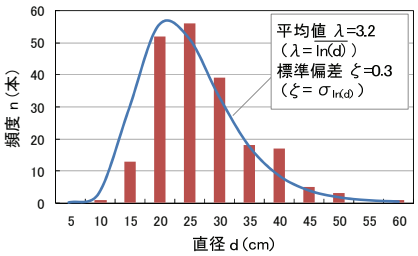


図-4 直径の頻度分布

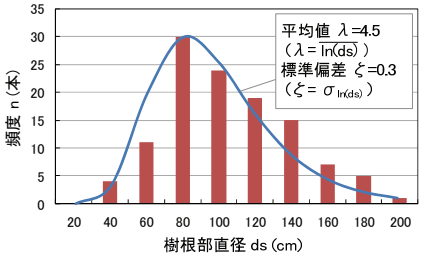


図-5 樹根部直径の頻度分布

いるためである．流木に関する既往の調査と比較すると，菊池ら[19]は，4m 未満の流木が最も多いことを，また清水[20]は，3~5m が最も多く，長くなるに従いその頻度が減少していることを示しているが，**図-3** は，供給元の条件は異なるものの，これらの報告と一致している．これは，日本の植林が盛んであった時期の影響や土石流の性質に起因するものと思われる．

c) 直径の分布特性

図-4 に，流木直径について 5cm ごとの頻度分布を示す．また，対数正規分布曲線による曲線あてはめも示している．清水[20]は，流木直径は10~30cm が最も多く，大きくなるに従い，その頻度が減少するとしているが，**図-4** においても同様の傾向が見受けられる．なお，流木直径の分布についても，対数正規分布でその傾向を表せることがわかる．

参考までに，幹部は樹皮がむけているものの，直径が減少しているようには見受けられない．このことは，崩壊地における立木直径の傾向によって，流木直径の特性がほぼ推定可能であることを示している．

d) 樹根部直径の分布特性

図-5 に，流木の樹根部直径について 20cm ごとの頻度分布を示す．また，対数正規分布曲線によるあてはめ曲線も示す．樹根部直径の分布についても流木長や直径と同様に，概ね対数正規分布でよくその傾向が表すことが可能である．

なお，樹根部直径については流下に伴う折損等による減少が見受けられたので，立木のデータを直接反映できるものではない．

3. 橋梁閉塞現象の解析手法

(1) 解析手法の概要

著者ら[12),13)]は，流木を円柱形要素によってモデル化した個別要素法を用いて，流木捕捉工の捕捉シミュレーション解析を行っている．この際，複数の円柱形要素を任意の形に剛結させ，根付き流木を集合体要素モデルによって表現することで，根付き流木の挙動をシミュレーションすることも試みている．

本研究では，これらの流木捕捉解析手法を応用して，実流木災害に関するシミュレーション解析を試みる．

この流木捕捉解析では，**図-6** のように流木捕捉工を含む河川断面形を与えるとともに，その捕捉工直上流における流量 Q_s，基本流速 U_0，基本水深 h_0，および流木群の状態（位置，長さ，方向等）を与える必要がある．そこで，橋梁直近までの流下解析には，既往研究で確立されている流体計算法の中で，ソフトが公開されている kanako[21]を援用して，**図-7** に示す解析手順で閉塞解析を行った．一次元 kanako は，矩形断面を想定して，上流部で与えられた土石流混じりのハイドログラフ入力を基に，地形条件に応じて，下流点の土石の堆積を含めた数値解析を行うものである．以下に，その概要を記す．

(2) STEP1：河川の断面の設定

図-8 に，丈伝橋付近の平面図および横断断面図を示す．解析ではこれらの図面を参考として，**図-6** に示すように平面要素を配置して，水路の底面と側壁面の形状をモデル化した．参考までに，河床勾配は 1/100 で

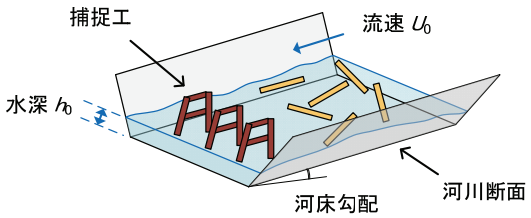


図-6　流木捕捉解析の与条件

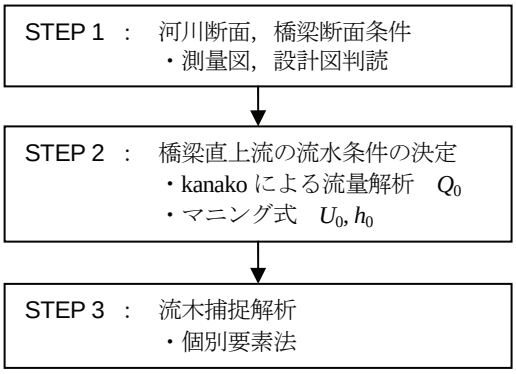
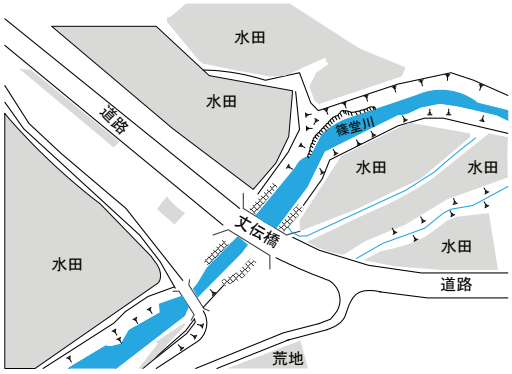
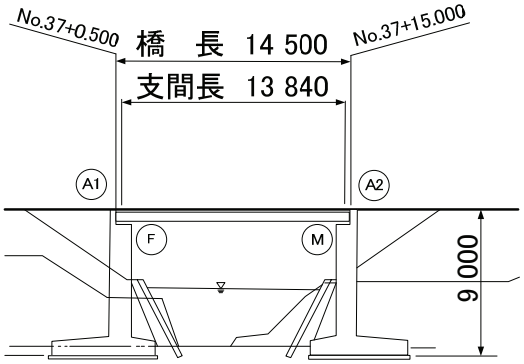


図-7　橋梁閉塞解析の手順

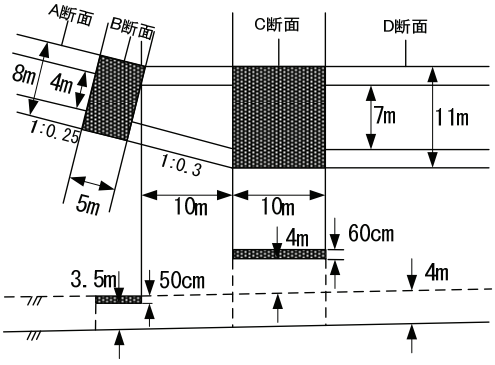


(a)　丈伝橋付近の見取り図

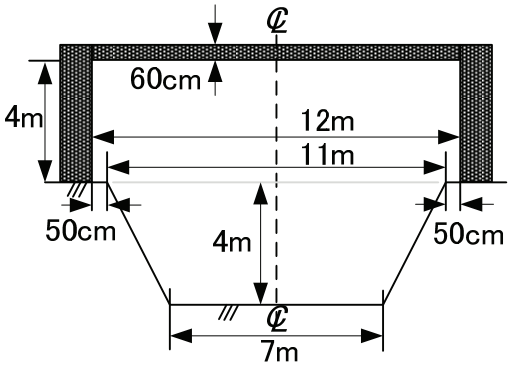


(b)　丈伝橋の横断断面図

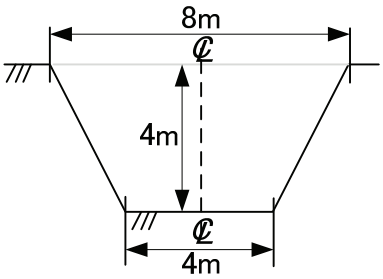
図-8　丈伝橋付近の図面



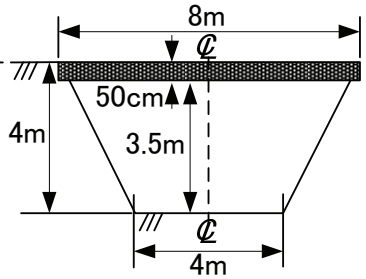
(a)　平面図および縦断断面図



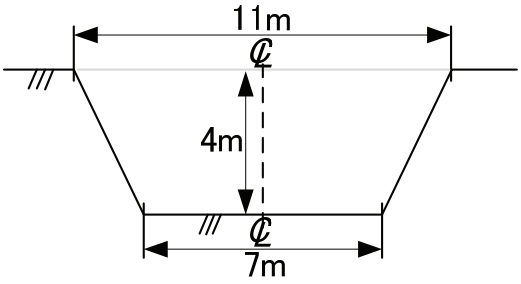
(d)　横断断面図（C 断面）



(b)　横断断面図（A 断面）



(c)　横断断面図（B 断面）



(e)　横断断面図（D 断面）

図-9　解析上の丈伝橋付近の水路図

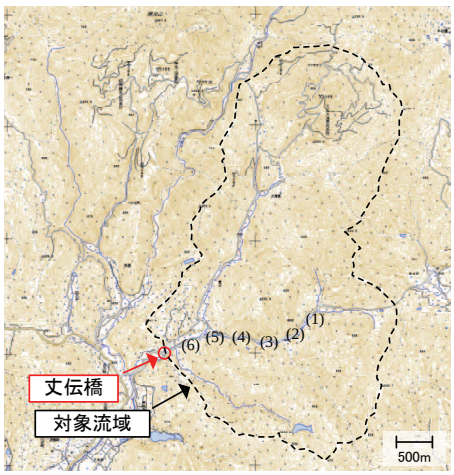


図-10　流域面積の算定

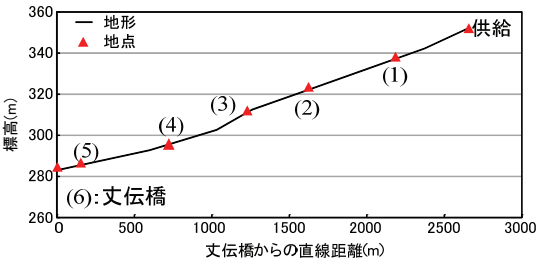


図-11　丈伝橋までの縦断断面図

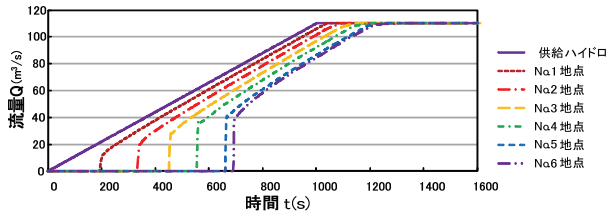


図-12　ハイドログラフ

である.

(3)　STEP2：橋梁直上流の流水条件の決定

a)　雨量データを用いた流域流量

降雨時に河川を流下する対象流量 Q_p は次式より求めた[22].

$$Q_p = \frac{1}{3.6} P_e A_R \tag{1}$$

ここで, Q_p : 対象流量(m^3/s), P_e : 有効降雨強度(mm/h), A_R : 流域面積(km^2).

また有効降雨強度 P_e は，次式より求めた[22].

$$P_e = \left(\frac{P_{24}}{24}\right)^{1.21} \left(\frac{24 K_{f1}^2}{\frac{K_{p1}}{60} A^{0.22}} \right)^{0.606} \tag{2}$$

ここで，P_{24} : 24 時間雨量(mm)，K_{f1} : ピーク流出係数，K_{p1} : 係数(K_{p1}=120).

なお，式(2)におけるピーク流出係数 K_{f1} は，文献 23)の中の山地河川用の値と用いた．K_{f1} = 0.80 とした.

流域面積 A_R は，**図-10** に括弧で示す丈伝橋付近を起点に，丈伝橋付近に流入する篠堂川および大津恵川に流れ込む対象流域を尾根伝いに設定し，100m メッシュに分割して算定した. その流域面積は A_R = 13.22 km^2 である.

24 時間雨量は，文献 24)の雨量データにより，前日 7 月 15 日の 259mm，当日 7 月 16 日の 125mm を平均して，192mm を用いた.

よって，式(1)に基づく対象流量は Q_p = 110.8 m^3/s となった.

b)　丈伝橋の流量

前述の対象流量 Q_p を基に, 砂防分野において公開されている土石流シミュレータ「kanako」[21]を用いて，丈伝橋付近の流量を求める.

ここで，ハイドログラフ予測を行うのは，後述する流木群を押し流す流量を決定することにある．なお，解析では流量の時間変化は考慮していないため，最大流量の概算値が得られれば良い.

図-11 に，解析対象地点である丈伝橋を流下方向距離の原点(0m)とした縦断断面図を示す．**図-12** には，供給ハイドログラフと，「kanako」による各地点における流量と時間の関係を示す．これより，下流に下がるにつれて時間遅れを生じた急激な立ち上がりを示すハイドログラフへ変化することがわかる．しかし，最大流量は Q_p と同じ 110 m^3/s に収束している．これは，供給ハイドログラフに流量の低減する領域を設定していないためである．しかし，最大流量に関する判断は可能であるので，丈伝橋の流木閉塞シミュレーションに用いる流量 Q_s は 110 m^3/s とした．また，多少の増減を行って，その感度を分析することとした.

c)　流速・水深の算定

流速・水深の算定では，マニング式と連続の式および水路断面形状を連立することにより求めた.

$$Q_s = A_s U_0 \tag{3}$$

$$U_0 = \frac{1}{n} I^{(1/2)} R^{(2/3)} \tag{4}$$

$$R = \frac{A_s}{S} \tag{5}$$

$$A_s = \frac{1}{2}\left(B_{top} + B_{base}\right) h_0 \tag{6}$$

$$S = B_{base} + \frac{2h_0}{\sin\left(\mathrm{atan}(2)\right)} \tag{7}$$

図-13 根付き流木モデル

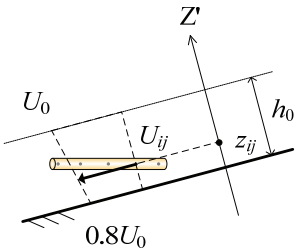


図-14 流下時の流速分布モデル

$$B_{top} = B_{base} + h_0 \tag{8}$$

ここで，Q_s：流量(m^3/s)，A_s：流れの断面積(m^2)，U_0：基本流速(m/s)，n：マニングの粗度係数(s/m$^{1/3}$)，I：水路勾配，R：径深(m)，S：潤辺(m)，B_{top}：水面位置での河幅(m), B_{base}:底面位置での河幅(m), h_0:基本水深(m).

式(3)から(8)を連立すると，水深に関する方程式が得られる．

$$I^{(3/2)}\left(\sin\left(\text{atan}(2)\right)\right)^2\left(2B_{base}+h_0\right)^5 {h_0}^5 - 32n^3Q^3\left(B_{base}\sin\left(\text{atan}(2)\right)+2h_0\right)^2 = 0 \tag{9}$$

式(9)は，基本水深 h_0 に関する高次の多項式となり，簡易に解を得られない．そこで，径深 R および断面積 A_s を基本水深 h_0 に関する 1 次式に近似する．まず径深 R は単項式とするため，本解析で対象とする底面位置での川幅 B_{base} が 4～7m の範囲において, 切片 0 で直線近似すると，次式が得られる．

$$R = 0.5728h_0 \tag{10}$$

また，断面積 A_s は，同じく本解析で対象とする底面位置での川幅 B_{base} が 4～7m の範囲において，式(6)より得られる真の断面積との差が最小になるよう，次式で近似する．

$$A_s = \left(B_{base}+1.5\right)h_0 \tag{11}$$

そのうえで，式(3), (4), (10), (11)を連立すると，水深および流速に関して次式が得られる．

$$h_0 = \sqrt[5]{\frac{n^3Q^3}{0.5728^2\left(B_{base}+1.5\right)^3 I^{(3/2)}}} \tag{12}$$

$$U_0 = \frac{1}{n}I^{(1/2)}\left(0.5728h_0\right)^{(2/3)} \tag{13}$$

式(12), (13)を用いて，**図-9** に示した水路の断面変化に対応した基本流速 U_0 と基本水深 h_0 を算定する．

(4) STEP3：流木による橋梁閉塞シミュレーション

a) 個別要素法解析の概要

本研究では，文献 12), 13)の手法を用いている．個別要素法では，各要素の接触状態を判定したうえで，接触要素間に仮想の要素間ばねを設定して，接触力を算定する．そして，個々の要素ごとに運動方程式を解くことで変位を求め，要素の運動を追跡する．本研究では，根付き流木を，**図-13** に示すように樹幹部を表す 1 個の円柱形要素と，樹根部を表す 8 個の円柱形要素を剛結した集合体要素を用いてモデル化した．なお，根なし流木については，1 個の等径円柱形要素によりモデル化した．解析では，流木同士または流木と橋梁，流木と水路壁・底面の接触を表現することにより，流木が絡まって閉塞する現象を解析できる．個々の要素の運動解析要領については，文献 13)に示しているので省略する．

b) 流速分布モデル

個々の要素には，自重，浮力および流木とその周辺の流水との速度差によって生ずる流体力を作用させる．本手法では計算負担を軽減するため，以下のように流木群周辺の流れを簡略にモデル化した流速を，各要素に与えるものとした[12), 13)]．以下に，橋梁閉塞シミュレーションに用いた手法の概要を述べる．

c) 流下時の流速分布モデル

図-14 に示すように，流下方向の鉛直方向(Z'軸方向)の分布に対し，基本流速ベクトル $\mathbf{U}_0$ と基本水深 h_0 を与えたとき，水面上の流速を $\mathbf{U}_0$ で，水路床上の流速をその 8 割の速度となるよう，水深に応じて線形的に低下させるものとした．そのうえで，各円柱形要素(i)の積分点(j)の高さ z_{ij} に応じて，積分点における流速ベクトル $\mathbf{U}_{ij}$ を求めた．

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{ij} = 0.2\dfrac{z_{ij}}{h_0}\mathbf{U}_0 + 0.8\mathbf{U}_0 & (0 \le z_{ij} \le h_0) \\ \mathbf{U}_{ij} = 0 & (z_{ij} > h_0) \end{cases} \tag{14}$$

なお，水深方向の流速分布については，対数分布が一般的であるが，個別要素法の有する他の要因，モデル化との精度バランスと計算の容易性を考慮して，文献 12)において，その適用性を検討されたものである．

d) 流木捕捉に伴う水深の算定

本解析では，堆積流木間隙の流水の透過断面積を，対象橋梁から 4m(平均流木長)上流内に存在する流木

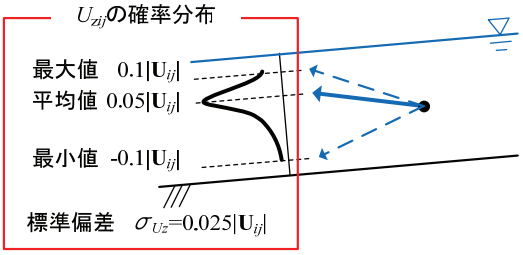


図-15 流速の乱れ成分

表-2 解析基本値

項目			値
流水条件	粗度係数 n		0.04 $m^{1/3}/s$
	抗力係数 C_D		1.0
流木要素	要素数		500
	平均流木長 l_{mean}		6.1 m
	平均直径 d_{mean}		25.1 cm
	密度 ρ		950 kg/m^3
要素間ばね	ばね定数	法線方向 K_n	1.0×10^7 N/m
		接線方向 K_s	1.5×10^6 N/m
	減衰定数 h		0.2
	粘着力 c		0 N
	摩擦角 tanφ		0.404
計算条件	時間刻み Δt		2.0×10^{-5} s

の流下方向への投影面積の総和に応じて減少させる．そのうえで，投影面積の総和が流路断面積 A_s の 2.5 倍となった時に，最大水位 H に達し，維持されるものとした．これは，文献 12)に示した実験結果の観察と解析における水流モデルを準用したものである．一方，流木の投影面積が $0.2A_s$ 以下においても水位は保たれるものとした．すなわち，流木捕捉による水深 $\hat{h}$ は，次式により算定する．

$$\begin{cases} \hat{h}=h_0 & \left(\Sigma A_{di}/A_s<0.2\right) \\ \hat{h}=\dfrac{H-h_0}{2.3}\left(\dfrac{\sum A_{di}}{A_s}-0.2\right)+h_0 & \left(0.2\le\Sigma A_{di}/A_s\le2.5\right) \\ \hat{h}=H & \left(2.5<\Sigma A_{di}/A_s\right) \end{cases} \quad (15)$$

e) 流速の乱れ成分ベクトル

文献 12)の研究成果を適用して，水深方向に対し，ランダムな乱れ成分ベクトルを与える．すなわち，流速 $\mathbf{U}_{ij}$ のうち z 軸方向(流下方向に直交する水深方向ベクトル)成分 U_{zij} を，**図-15** に示すように正規分布に従う確率変数とした．すなわち，その最大値は|$\mathbf{U}_{ij}$|の 1 割(0.1|$\mathbf{U}_{ij}$|)，また最小値も負値の 1 割(-0.1|$\mathbf{U}_{ij}$|)としたうえで，平均値が 0.05|$\mathbf{U}_{ij}$|で標準偏差が 0.025|$\mathbf{U}_{ij}$|とする，正規確率分布に従う乱数を用いて与えることとした[12]．なお, この方向ベクトルは, 流下方向と直交するため, 流下方向への流量は保存されている．

4. 橋梁閉塞事例のシミュレーション

(1) 解析条件

a) 流下本数

発生流木量は，文献 22)を参考に，次式によって求めた．

$$V_{wy}=\frac{B_d L_{dy13}}{100}\sum V_{wy2} \quad (16)$$

$$V_{wy2}=\pi H_w R_w^2\frac{K_d}{4} \quad (17)$$

ここで，V_{wy}：発生流木量(m^3)，B_d：土石流発生時に浸食が予想される平均渓床幅(m)，L_{dy13}：発生流木量を算出する地点から流域の最遠点までの流路にそって測った距離(m)，V_{wy2}：単木材積(m^3)，ΣV_{wy2}：サンプリング調査 $100m^2$ あたりの樹木材積($m^3/100m^2$)，H_w：樹高(m)，R_w：胸高直径(m)，K_d：胸高係数．

なお，サンプリング調査 $100m^2$ あたりの樹木材積 ΣV_{wy2} は，次式により与えられる．

$$\sum V_{wy2}=n_{100}V_{wy2} \quad (18)$$

ここで，n_{100}：サンプリング調査 $100m^2$ あたりの樹木本数(本/$100m^2$)であり，既往の調査結果から 4～8 本/100 m^2 と推定した．

よって，発生流木本数 n_w は次式によって求めた．

$$n_w=\frac{V_{wy}}{V_{wy2}}=\frac{B_d L_{dy13}}{100}n_{100} \quad (19)$$

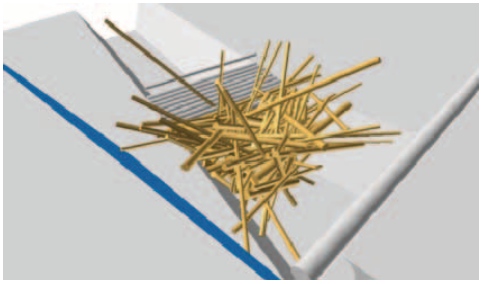
ここで, B_d=10m, L_{dy13}=1000m, n_{100}=5 本/$100m^2$ とした．

b) 計算条件

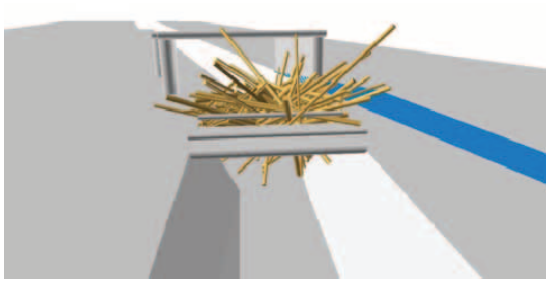
前述の手法や既往研究 [12), 13)]に基づいて使用した解析基本値を，**表-2** に示す．流木モデルの長さは，第 2 章で述べた現地調査の結果に基づき，最大値 20.3m，最小値 2.0m，平均値 6.1m，標準偏差 3.1m の対数正規分布に従う乱数を用いて設定した．流木の直径と樹根部直径についても同様に設定した．流木の樹根の有無についても，現地調査に基づき，57% の割合でランダムに決定した．

法線方向ばね定数 K_n は，次式により算定した．

$$K_n=\frac{48E_w I_{mean}}{l_{min}^3} \quad (20)$$



(a) 上流側より



(b) 下流側より

図-16 解析の橋梁閉塞結果（流量 132 m^3/s，流下密度 2.8 本/s）

$$I_{mean} = \frac{1}{64}\pi d_{mean}^4 \tag{21}$$

ここで，I_{mean}：流木の断面 2 次モーメント，l_{min}：流木の最小長さ，d_{mean}：流木の平均直径，E_w：流木の弾性係数であり，流木の弾性係数 E_w は鋼製砂防構造物設計便覧 [25]における杉の弾性係数を参考に，E_w=7.35×10^9 N/m^2 を用いた．

接線方向ばね定数 K_s は，法線方向ばね定数 K_n を基に次式で求めた [12]．

$$\frac{K_s}{K_n} = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \tag{22}$$

ここで，ν：ポアソン比(杉材では ν=0.4[26])である．

その他のパラメータについても，文献 12), 13)に基づき設定した．

(2) 解析ケース

前述のように，入力条件の決定においては不確定なパラメータがあることを考慮して，解析ケースは，流速・水深の感度解析を鑑みて，流量 Q_p = 110 m^3/s と，Q_p = 110 m^3/s を基準に，それぞれ 2 割増減させた Q_p = 88 と 132 m^3/s の 3 ケースについて解析を行った．流下密度については，次のように決定した．**図-3** で考察したように流木は立木状態から折損して数本に分かれているため，式(19)の発生本数の 3～4 倍になるが，仮に 10%程度(200 本)が 1 分間程度に流木塊の先頭部に集中して来襲したことを想定した．そのうえで，文献 12)では，平均流木長がオーバーラップし始めるくらいの密度が 1 つの指標となったことに鑑みて，2.8 本/s を基準として，5.6 本/s，1.4 本/s，0.7 本/s の 4 ケースについて検討した．すなわち，流量との組み合わせによって総計 12 ケースについて解析した．また流木の初期配列の影響についても検討するため，同一ケースにつき各 5 回ずつ，乱数を用いて初期配列の異なる解析を行った．

具体的には，丈伝橋より上流 10m 地点から上流に向って，流下密度に応じた長さをとり，各流体の位置と姿勢を乱数を用いて，均等になるように発生させ，水のない状態の河川に重力落下させて配置した．解析はこの状態に全面に流水を与えて流木を浮遊流下させた．

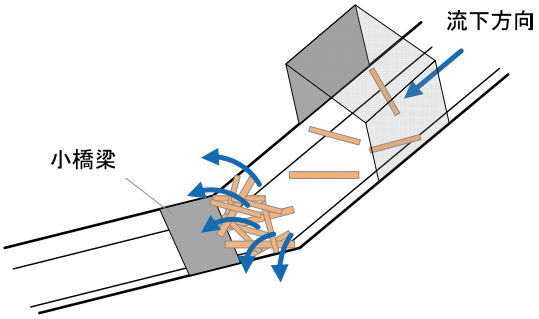


図-17 河道閉塞に伴う流水の氾濫イメージ

5. 橋梁閉塞シミュレーションの解析結果

(1) 根なし流木モデルによる橋梁閉塞解析

a) 橋梁の閉塞状況

比較対象とするため，流木を全て根なし流木として橋梁閉塞シミュレーションを行った．この場合，基本流量 110 m^3/s では流下密度 5.6 本/s の場合しか閉塞しない．そこで流量を増やして，流量 132 m^3/s，流下密度 2.8 本/s とした場合のケースにおける解析結果を，**写真-1** の視点に合わせて**図-16** に示す．

写真-1 によると，流木が小橋梁の上流側の河道を閉塞するとともに，橋梁上に覆いかぶさるように堆積している．また，小橋梁より上流側へ遡って堆積している流木は見受けられない．

しかし，**図-16** に示す解析結果では，小橋梁上流側の河道を閉塞するとともに，後続の流木が上流側に向かって堆積している．

これは，実河川における流木の河道閉塞・堆積過程は，**図-17** に示すように，まず流木が橋梁に絡まることにより河道が閉塞された後，閉塞地点からあふれ出る複雑な流れによって流木が氾濫し，下流域に流れ出ているのに対し，本解析では流水の方向が河川方向に

表-3　根なし流木モデルによる閉塞シミュレーション結果

		流下密度			
		0.7 本/s	1.4 本/s	2.8 本/s	5.6 本/s
流量	88 m^3/s	×	×	×	×
	110 m^3/s	×	×	×	●
	132 m^3/s	×	×	●	●

●：橋梁閉塞，×：全流木通過（非閉塞）

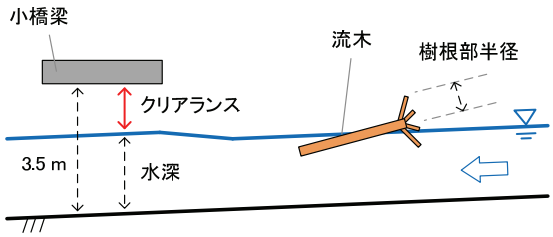


図-18　橋梁下端のクリアランス

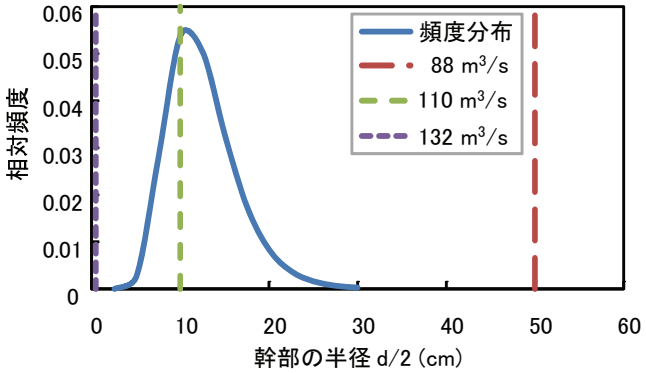


図-19　流木半径の頻度分布とクリアランスの比較

限られているためである．

b)　橋梁閉塞に及ぼす流量や流下密度の影響

表-3 に，各ケースの橋梁閉塞結果を示す．まず，流量 88 m^3/s ではいずれの流下密度においても閉塞が生じていない．一方，流量 110 m^3/s では流下密度 5.6 本/s，流量 132 m^3/s では流下密度 2.8 本/s と 5.6 本/s でのみ橋梁閉塞が生じている．

ここで，流量設定がシミュレーション結果に及ぼす影響について，図-18 に示す橋梁下端のクリアランス(すなわち，水面から橋梁下部までの高さ)と流木半径の分布との関係をもとに考察する．橋梁下端の水路床からの高さは 3.5m である．これに対し，流量 88，110 および 132 m^3/s の小橋梁付近における水深は，それぞれ 3.0，3.4，3.8 m である．したがって，これらに対応するクリアランスはそれぞれ 50，10，0 cm となる．図-19 に，流木半径の頻度分布と橋梁下端のクリアランスを比較して示す．これより，まず流量 88 m^3/s ではクリアランスが 50 cm に対し，流木半径は 23 cm 以下であり，橋梁に接触しないために閉塞しなかったことがわかる．次に，流量 110 m^3/s ではクリアランスが 10 cm であり，約半数の流木が橋梁に接触する状態となる．このため，流木が橋梁下面に衝突し，回転する遅滞時間が生ずる．すなわち，流量 132 m^3/s とするとクリアランスがないため，全ての流木が橋梁に接触する状態となる．そのうえで，流下密度が 2.8 本/s を超えると，根なし流木であっても橋梁に衝突して回転運動している間に次の流木が近づいて絡まり，橋梁を閉塞する．

(2)　根付き流木モデルによる橋梁閉塞解析

a)　橋梁の閉塞状況

図-20 に，流量 110 m^3/s，流下密度 2.8 本/s のケースにおける解析結果の橋梁閉塞過程について，上流側から観察した状況を 5 秒間隔で示す．なお，図中の t_0 秒とは，最初に流木が橋梁に絡まり始める時間である．

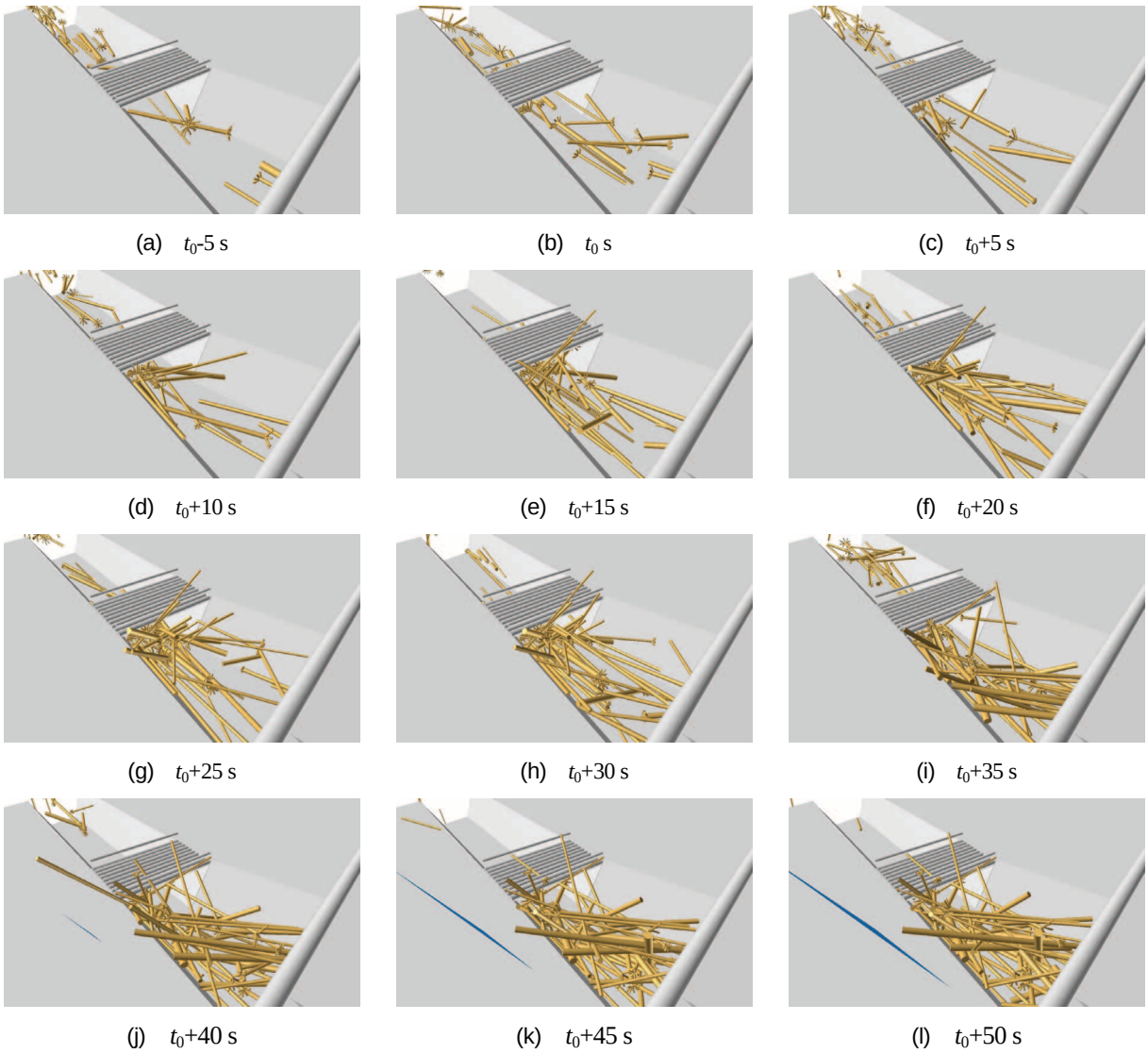
これより，図-20(b)において小橋梁の上流左岸側を起点に流木が堆積し始め((b)～(g))，流木の絡み合いが一旦は解けかかるものの((g)～(i))，後続の流木により再び絡まりあうことで河道が閉塞されている様子がわかる((i)～(l))．

b)　橋梁閉塞後の状況の比較

図-21 に，流量 110 m^3/s，流下密度 2.8 本/s のケースのシミュレーション結果を示す．流木は，小橋梁の上流側の河道を閉塞するとともに，後続の流木が上流側に向かって堆積している．このように，河道閉塞後の堆積形状は異なるが，上流部にある径間の広い丈伝橋では閉塞せず，下流部の小橋梁で閉塞する事象について，予測できている．

c)　流量や流下密度が橋梁閉塞に与える影響

表-4 には，各ケース 5 回分の解析結果のうち，橋梁閉塞を生じた回数を示す．流量 110 および 132 m^3/s で



(a) t_0-5 s　(b) t_0 s　(c) t_0+5 s

(d) t_0+10 s　(e) t_0+15 s　(f) t_0+20 s

(g) t_0+25 s　(h) t_0+30 s　(i) t_0+35 s

(j) t_0+40 s　(k) t_0+45 s　(l) t_0+50 s

図-20　解析の橋梁閉塞過程(流量 110 m^3/s，流下密度 2.8 本/s)

(a) 上流側より　(b) 下流側より

図-21　解析の橋梁閉塞結果(流量 110 m^3/s，流下密度 2.8 本/s)

は 5 回全ての解析で橋梁閉塞が生じている．一方，流量 88 m^3/s では 5 回中 1 回しか閉塞が生じていない．なお，今回の解析範囲では流下密度の影響は見受けられない．

小橋梁が閉塞される場合は，**図-22** に示すように，まず流木の樹根部が橋梁下面に接触して水深方向に回転し，側壁や川底と接触する．このように，鉛直方向に捕捉された流木を起点として，次々と流木が絡まり

表-4　根付き流木の閉塞シミュレーションによる閉塞回数（5 回中）

		流下密度			
		0.7 本/s	1.4 本/s	2.8 本/s	5.6 本/s
流量	88 m^3/s	1 回	1 回	1 回	1 回
	110 m^3/s	5 回	5 回	5 回	5 回
	132 m^3/s	5 回	5 回	5 回	5 回

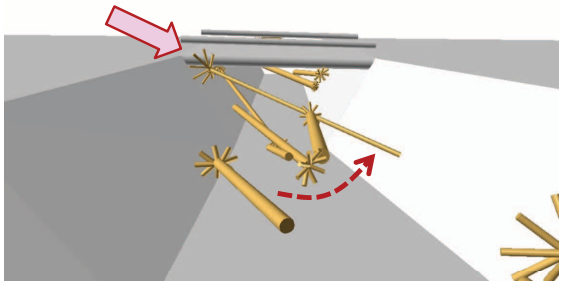


図-22　橋梁閉塞の起点となる流木

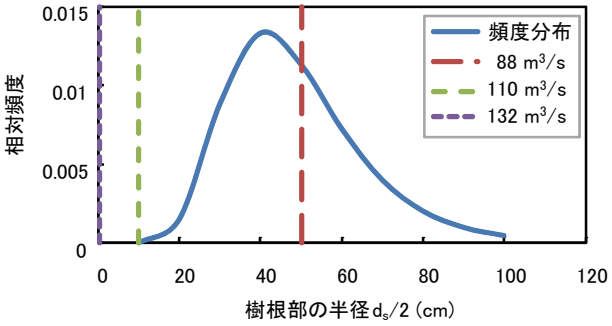


図-23　樹根部半径の頻度分布と橋梁下端のクリアランスの比較

流木の堆積が促進されることがわかる．流量 110，132 m^3/s では，根付き流木が小橋梁の下端に接することにより，上述の流木による閉塞過程が開始されている．一方，流量 88 m^3/s においても，流木のうちの一部は橋梁の下端に根が接していることもある．しかし，ほとんどの場合，後続の流木が絡まる前に流下するため，流木は堆積することなく全て流下している．

樹根部の半径の影響を見るために，頻度分布と橋梁下端のクリアランスに対する超過確率について考察する．**図-23** には，頻度分布と流量ごとのクリアランスを示している．これより，流量 110 m^3/s ではクリアランスが 10cm となり，全ての根付き流木が橋梁と接触することがわかる．また流量 132 m^3/s ではクリアランスが全く無くなり，根の有無にかかわらず全ての流木が橋梁と接触する．これは，根なし流木で考察したことと一致する．一方，流量 88 m^3/s ではクリアランスが 50cm あり，根付き流木のうちの半分未満しか接触の可能性がない．このため，流木の初期配列，すなわち流下順序の影響は，流量 88 m^3/s のケースに表れることがわかる．

そこで，試みに樹根部半径の最大値，最小値，平均値，標準偏差について，それぞれ調査結果の半分とする確率分布に基づく樹根モデルを用いてシミュレーションを行い，樹根部半径の大きさの影響について検討した．**図-24** に，小さい半径の樹根部の頻度分布と，橋梁下端のクリアランスを比較して示す．また，**表-5** に，各ケースの橋梁閉塞結果を示す．まず，流量 88 m^3/s では，いずれの流下密度においても閉塞が生じていない．一方，流量 110 m^3/s と 132 m^3/s では，流下密度が高い場合に橋梁閉塞が生じている．

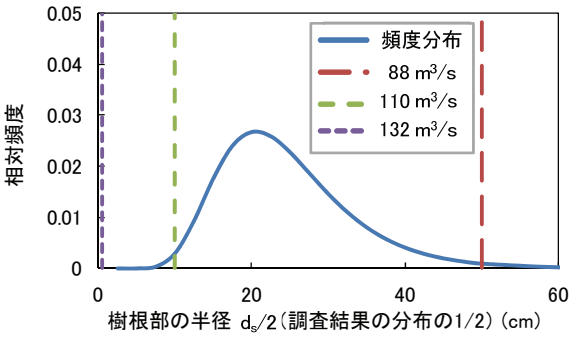


図-24　調査結果の半分の分布で与えた樹根部半径と橋梁下端のクリアランスの比較

6.　流木捕捉工を設置した場合の捕捉シミュレーション

(1)　捕捉工間隔の設定

現行の設計法によると，捕捉工柱部材の間隔 W は，次式を用いて設計することと定められている [27]．

$$W \le \frac{1}{2} l_{\max} \tag{23}$$

ここで，$l_{\max}$：最大流木長．

よって，最大流木長が 20m とすると，捕捉工の間隔は 10m 程度となるが，現地の河床幅 7m には適切でない．そこで，文献 28) で著者らが提案した流木捕捉率の予測式を用いて設定を試みる．

表-5　小半径樹根部による閉塞シミュレーション

		流下密度			
		0.7 本/s	1.4 本/s	2.8 本/s	5.6 本/s
流量	88 m^3/s	×	×	×	×
	110 m^3/s	×	×	●	●
	132 m^3/s	×	●	●	●

●：橋梁閉塞，×：全流木通過(非閉塞)

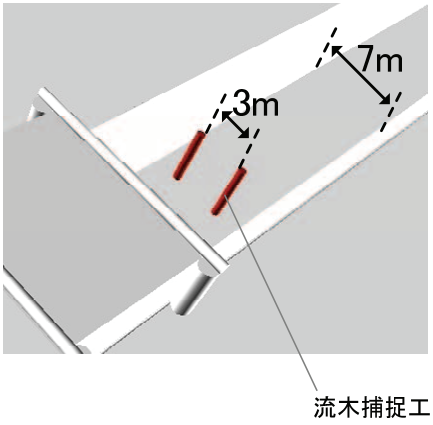


図-25　流木捕捉工の設置状況

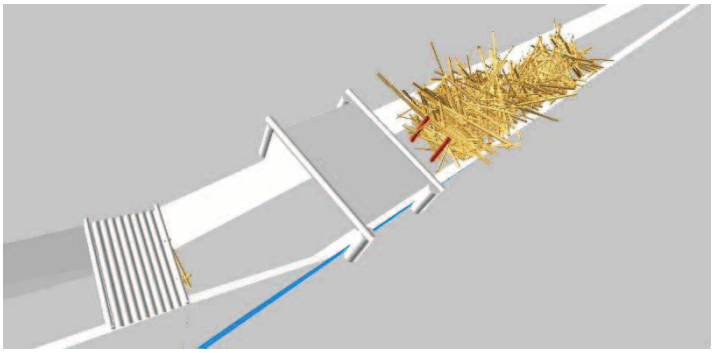


図-26　流木捕捉工を設置した解析結果
(流量 110m^3/s，流下密度 2.8 本/s)

$$\begin{cases} P_c \approx 1.0 & (I_{(n)} \le 0.8) \\ P_c = \log(8/I_{(n)}) & (0.8 \le I_{(n)} \le 8) \\ P_c \approx 0.0 & (I_{(n)} \ge 8) \end{cases} \tag{24}$$

$$I_{(n)} = Fr \frac{h_0 W_o^{\,2}}{d_s l_{mean}^{\,2}} \tag{25}$$

ここで，P_c：流木捕捉率，$I_{(n)}$：捕捉率支配指標，Fr：フルード数，W_o：捕捉工柱部材の外側間隔，d_s：流木の樹根部直径，l_{mean}：平均流木長.

そこで，目標捕捉率を 85%として，捕捉工間隔を求めると，以下のようになる.

$$W = \sqrt{\frac{8}{10^{(P_c)}} \frac{1}{Fr} \frac{d_s}{h_0} l_{mean}^{\,2}} - 2D = 2.9\mathrm{m} \tag{26}$$

ここで，D：捕捉工柱部材の直径.

よって，柱部材の間隔を $W = 3$m として，**図-25** に示すように流木捕捉工を設置した場合の解析を行った．本来の流木捕捉工は，下流部の橋梁の流木災害を抑制するため，土石流区間より下流で，なるべく上流部に設置されるものであるが，ここでは，流木捕捉性能と効果を，前述解析と比較し易くするため，丈伝橋の直上流部に設置した.

(2)　流木捕捉工の捕捉シミュレーション

図-26 に，丈伝橋の上流 10m の位置に流木捕捉工を 3m 間隔で設置した場合の捕捉解析結果を示す．流下させた全 500 本の流木のうち 462 本(92.4%)が捕捉されている．また，小橋梁での閉塞は生じていない.

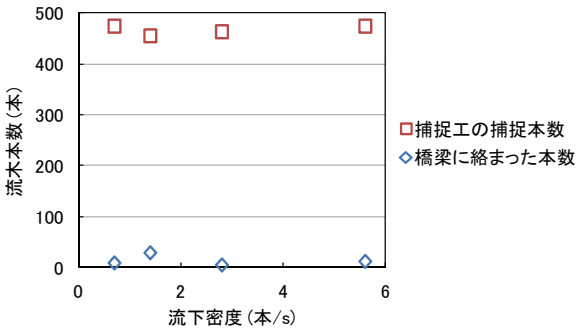


図-27　流木捕捉本数～流下密度関係

図-27 には，流木の流下密度を変化させたシミュレーションを行ったうえで，流木捕捉工の捕捉本数および橋梁に絡まった流木本数と，流下密度の関係を示す．これより，捕捉工の捕捉本数に対する流下密度の影響は見受けられない．また，捕捉されずに流下した流木が小橋梁に絡まる場合もあるが，河道を閉塞することはない．すなわち，流木捕捉工が効果的であることを示している.

7.　結　言

本研究は，円柱形要素を用いた個別要素法による流

木捕捉過程の解析法を流木実災害に適用して，その適用性を検討したものである．本研究の成果をまとめると以下のようになる．

(1) 橋梁形状を反映した流木捕捉に関する解析を行うための必要入力情報を，実地形情報や雨量データを基に算定する方法を提案した．

(2) 前述の入力情報を基に橋梁閉塞解析を行うと，流量や流木の密度などの変動に対してさほど鋭敏になることはなく，上流部での丈伝橋では閉塞せず，下流部の小橋梁では閉塞する事象を予測できた．

(3) この検討においては，橋梁閉塞に及ぼす流木の流下密度の感度は小さかった．よって，任意の形状を有する橋梁下部の流木閉塞に関する予測シミュレーションは，上流山地や河川の概略情報を基に実行可能である．

(4) 橋桁高さと水面高によって作られるクリアランスと，樹根部半径の確率分布との関係が，閉塞過程のきっかけと流木の絡まりの条件に支配され，流木による閉塞の主因子となる．

(5) 前述のことは，流木が水深方向に回転し，側壁か川底に接触するメカニズムが閉塞する関係であることを示している．これは，橋脚の間隔のみならず，橋梁下面と川底との間隔についても配慮する必要があることを示唆している．

(6) 流木捕捉工を設置した場合の解析によると，橋梁上流部での流木捕捉工の設置が有効であるものと思われる．

(7) 本研究の手法では，流木が河道内において閉塞状態に至ることは判定できるが，閉塞後に溢れ出して河道外に流出する過程を推測できない．これは流水を河道内における与条件としてモデル化しているためである．流木要素の運動を流体解析と連成して解析する手法[5)~11), 29)]を参考として改良が必要である．

(8) 実際に災害が生ずることは望ましいことではないが，今後も災害事例のシミュレーションを行い，入力データや解析パラメータの信頼性および感度について検討を行い，シミュレーション技術の向上を図る必要がある．

参考文献

1) 水山高久，石川芳治，福澤誠：流木の運動・堆積機構と対策工に関する研究，土木研究所報告，Vol.183，No.3，pp.71-156，1991.3.
2) 土木学会：平成 16 年度 7 月北陸豪雨災害調査報告書，pp.206-220，2005.5.
3) 防災科学技術研究所：主要災害調査 40 号，pp.33-75，2006.3.
4) 足立昭平，大同淳之：流木に関する実験的研究，京都大学防災研究所年報，Vol.1，pp.41-49，1957.12.
5) 中川一，高橋保，池口正晃：洪水氾濫に伴う流木群の拡散に関する研究，水工学論文集，Vol.37，pp.379-384，1993.2.
6) 中川一，井上和也，池口正晃，坪野考樹：流木群の流動と堰止めに関する研究，水工学論文集，Vol.38，pp.543-550，1994.2.
7) 清水義彦，長田健吾，高梨智子：個別要素法を用いた流木群の流動と集積に関する平面 2 次元数値解析，水工学論文集，Vol.50，pp.787-792，2006.2.
8) 清水義彦，長田健吾：流木形状を考慮した個別要素法による橋脚周辺の流木集積過程に関する数値実験，水工学論文集，Vol.51，pp.829-834，2007.2.
9) 後藤仁志，酒井哲郎，林稔：粒子法による流木群の堰止め過程の Lagrange 解析，水工学論文集，Vol.45，pp.919-924，2001.2.
10) Koshizuka, S., Nobe, A. and Oka, Y.: Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol.26, pp.751-769, 1998.4.
11) 後藤仁志，五十里洋行，酒井哲郎，奥謙介：山地橋梁の流木閉塞過程の 3 次元シミュレーション，水工学論文集，Vol.51，pp.835-840，2007.2.
12) 渋谷一，香月智，大隅久，石川信隆：円柱モデル個別要素法による捕捉工の流木捕捉解析，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.67，No.1，pp.113-132，2011.10.
13) 渋谷一，堀口俊行，香月智，大隅久，石川信隆：円柱形集合体要素を用いた個別要素法による根付き流木の捕捉シミュレーション，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.67，No.2（応用力学論文集 Vol.14），pp.I_323-I_334，2011.8.
14) 渋谷一，香月智，大隅久，國領ひろし：平成 22 年 7 月 16 日に広島県庄原市で発生した豪雨災害における流木実態調査，砂防学会誌，Vol.64，No.1，pp.34-39，2011.5.
15) 西真佐人，林真一郎，山越隆雄，清水武志：2010 年 7 月 16 日の梅雨前線豪雨により広島県庄原市で発生した土砂災害，土木技術資料，Vol.52，No.9，pp.6-7，2010.9.
16) 海堀正博，杉原成満，中井真司，荒木義則，山越隆雄，林真一郎，山下祐一：2010 年 7 月 16 日に発生した広島県庄原市の土砂災害の緊急調査報告，砂防学会誌，Vol.63，No.4，pp.30-37，2010.9.
17) 石川芳治，水山高久，鈴木浩之：崩壊・土石流に伴う流木の実態と調査法，土木技術資料，Vol.31，No.1，pp.23-29，1989.1.
18) 森田和博，山内隆弘，水野幸雄，山田謹吾，中村明，平山拓哉：岐阜県の土石流災害における流木について，平成 14 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.36-37，2002.
19) 菊池耕太，石川芳治，白木克繁：三宅島金曽沢における降雨による流木の流下・堆積特性，砂防学会誌，Vol.60，No.3，pp.38-43，2007.9.
20) 清水収：山地流域における流木天然ダムの形成・破壊と流木の流出過程，砂防学会誌，Vol.62，No.3，pp.3-13，2009.9.
21) 中谷加奈，里深好文，水山高久：GUI を実装した土石流一次元シミュレータ開発，砂防学会誌，Vol.61，No.2，pp.41-16，2008.7.
22) 国土交通省砂防部，国土交通省国土技術政策総合研究所：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）及び同解説，社団法人　全国治水砂防協会，2007.11.

23) 財団法人　砂防・地すべり技術センター：土石流・流木対策の技術指針に関する講習会　テキスト，p.80，2007.12.
24) 広島県庁：広島県防災 Web，http://www.bousai.pref.hiroshima.jp/hdis/main.jsp?link=1&menu=27
25) 鋼製砂防構造物委員会：鋼製砂防構造物設計便覧　平成21年版，砂防・地すべり技術センター，pp.64-65，2009.9.
26) 森林総合研究所：改訂4版　木材工業ハンドブック，丸善，pp.134-135，2004.3.
27) 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，社団法人　全国治水砂防協会，2007.11.
28) 渋谷一，香月智，大隅久，石川信隆：根付き流木モデルによる流木捕捉工の捕捉効果に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1087-1094，2011.3.
29) 牧野統師，牛島省，古川教正，禰津家久：流木の流速と集積に関するT型個体モデルによる3次元数値計算，水工学論文集，Vol.52A，pp.991-996，2008.2.

(2012. 4. 25 受付)

SIMULATION OF REAL BRIDGE DISASTER DAMMING UP WITH WOODY DEBRIS USING 3-D DEM

Satoshi KATSUKI, Hajime SHIBUYA, Hisashi OHSUMI and Nobutaka ISHIKAWA

A heavy rain fall hit Shobara city, Hiroshima on 16th July 2010. A large amount of woody debris caused a flooding disaster by damming up a bridge and spreading out to rice field and so on. This paper presents an inquiry on the shape properties of the woody debris left on the rice field. And simulations of the damming up process of woody debris occurred on the real bridge by using 3 dimensional Distinct Element Method based on assembled cylinder elements. The simulation points out the twisting mechanism of woody debris occurred at the space between slab of the bridge and the flood surface in damming up process. Validity of the simulation at real site is discussed.