2018年7月広島県坂町総頭川で発生した 流木を伴った土石流の特性

DEBRIS FLOW WITH DRIFT WOOD IN THE SOZU RIVER, SAKA TOWN, HIROSHIMA PREFECTURE ON JULY 6th, 2018

福岡尚樹¹・橋本晴行² Naoki FUKUOKA and Haruyuki HASHIMOTO

¹正会員 修(工) 西日本技術開発(株) 土木本部水工部(〒810-0004 福岡市中央区渡辺通1-1-1)
²フェロー会員 工博 元九州大学大学院工学研究院教授

This paper describes the characteristics of the debris flow with drift wood which occurred in the Sozu River in Saka Town, Hiroshima Prefecture on July 6th, 2018. Field survey and numerical simulation were made in this research. The field survey shows the amount of sediment and woody debris outflowing from the mountain area and the results are compared with the numerical simulation. One-dimensional simulation model is developed for the debris flow with drift wood. This model considers frontal unsteady flow and the following steady flow. The former is composed of drift wood only and the latter of two-layer flow of sediment-water mixture in the lower part and of wood-sediment-water mixture in the upper part.

The numerical simulation indicates the peak flow discharge $Q=92\text{m}^3/\text{s}$ and peak sediment concentration C=0.2 along the river valley. The volume of sediment runoff is estimated about 59,000m³ and this result agrees with the field survey.

Key Words: Sediment-related disasters, debris flows, woody debris, drift wood, two-layer flow model, one-dimensional simulation, Saka town, Hiroshima Prefecture

1. はじめに

2018年7月5日から8日にかけて西日本の広範囲にわた り記録的な大雨が発生した.広島県では、6日午後から 翌朝にかけて猛烈な雨となり、広島市、坂町、熊野町、 呉市、東広島市などにおいて多数の崩壊・土石流を発生 させた.特に、坂町総頭川では流木を伴った土石流が発 生し、中流の谷出口に存在する2基の橋梁を流木により 閉塞させるとともに、下流では土砂堆積により周辺の住 宅街に大量の土砂を氾濫させた.

著者らは、災害直後より、総頭川流域において河道の 写真撮影および河道に堆積した流木の計測を通じてその 特性、橋梁と流木捕捉との関係などを中心に調べてきた.

今後の対策立案のためには、上流域からの流木を伴った土石流の特性を明らかにする必要がある.

著者らは、従来、流木を伴った土石流の1次元数値シ ミュレーション手法を検討してきた^{1,2,3}.本研究は、現 地調査とともに流木を伴った土石流の数値シミュレー ションを実施し、その特性を考察したものである.なお、 本論文における「土石流」は、急勾配河道において現れ る土砂移動形態⁴である土石流、泥流、掃流状集合流動、 高濃度浮流砂流を総称して使用したものである.

2. 総頭川流域と災害の概要

(1) 総頭川流域の概要

坂町は広島県の南西部に位置し、隣接する広島市およ び呉市と国道31号線やJR呉線により接続されている地域 で(図-1)、町域面積15.67km²のうち約半分が山地で占 められている.坂町を流れる総頭川流域を図-2に示す. 総頭川は流域面積4.2km²、流路延長約3kmの二級河川で ある.また、総頭川とその支川大判川の主流路の縦断図 を図-3に示す.流域図は国土地理院公表の基盤地図デー タ⁵より作成した.総頭川の主流路は河口からO₅地点



図-1 坂町位置図



図-2 総頭川流域図





(図-2)までの区間で,標高110mにおいて支川の大判 川と合流している.合流地点より上流は林地からなる渓 流域,合流地点から下流の標高60mまでの地域は主に農 地として利用され,田畑が広がっている.さらに下流の 地域は,住宅街が広がり,河口付近の国道31号線沿いに は坂町役場が位置する.

坂町の主な地質は花崗岩類であり、流路沿いの林地の 植生は、クヌギ等の落葉広葉樹やクスノキ等の常緑広葉 樹で構成された混交林である.

(2) 災害の概要

総頭川流域に位置する坂観測所およびそれに最も近い 呉市内の天応観測所の降雨記録を図-4,5に示す⁶⁾.坂 観測所では2018年7月5日9時から6日19時までの間に累加 雨量268mmを,6日18時から19時までの間に最大時間雨 量67mm/hを記録した.しかしながら,20時以降は欠測 となった.一方,天応観測所の記録によれば6日20時以 降も降雨が持続しており,最大時間雨量55mm/h(6日19 時~20時),累加雨量388mmであった.

その結果,坂町には6日17時35分に土砂災害警戒情報が,19時40分には大雨特別警報が発表された⁷⁾.そのため,坂町は17時40分に避難勧告を,19時40分に避難指示を発令した⁸⁾.

坂町では坂地区の総頭川流域,小屋浦地区の天地川流 域において甚大な被害が発生した.総頭川流域では,谷 出口付近にある刈津土井橋,旗橋が大量の流木捕捉によ り閉塞状態となった(写真-1).一方,下流の住宅街で は堆積土砂に起因した河床上昇による土砂氾濫被害が顕 著であった(写真-2).この流域では氾濫による浸水被 害130件を含む家屋被害826件,人的被害(死者)1名が 発生した. レーザー航空測量によると、総頭川流域では崩壊・侵 食によって流出した土砂量12.6万m³、下流住宅街に氾濫 した土砂量4.2万m³(いずれも「かさ」表示)と評価さ れている⁹.また、流出土砂のうち河道内と側道に堆積 した土砂量は2.4万m³と言われている。

総頭川とその支川大判川では、斜面崩壊に起因する流 木を伴った土石流が発生し、下流域に大量の土砂と流木 を流出させたものと考えられる.

3. 流木に関する現地調査

(1) 調査の概要

著者らは、災害直後の7月21,22日、および9月23,24 日、10月21日に総頭川流域の現地調査を実施し、河道の 写真撮影とともに、河道に残留する倒木や流出した流木 のスケールについて調べた.その結果、流木の特性、橋 梁と流木捕捉との関係などを明らかにした.

(2) 流木の生産・流出・氾濫

総頭川上流の側岸に位置する林道50m(図-2のA地 点)を対象に、立木の数密度を調べた.立木の数密度は 0.60本/m²であった.しかしながら、樹高の計測は不可 能であったため、侵食された河岸に残存する倒木N=20 本を抽出し、その長さLと直径Dを計測した.計測結果 をもとに倒木長のヒストグラム(図-6)を求めた.その 結果、倒木の平均長さL=9.70m、平均直径D=13.4cmで あった.

また、国土地理院の航空写真(正射画像)から、崩 壊・侵食箇所の面積を判読した結果、0.101km²であった ことから、そこに繁茂していた立木の本数は約60,000本 と評価した.この立木が崩壊や侵食により全て流木化し たものと仮定すると、総頭川流域で生産された流木の総 量は「かさ」表示で約4.1万(実積で0.83万)m³と評価 された.

さらに、中流域および下流域に流出・氾濫した流木の 堆積状況についても調査を行った.その結果、流木の堆 積状況を、①個別に単独で堆積した流木、②群を形成し て堆積した流木の2パターンに大別した^{10,11)}.後者はさ らにa)橋梁の上流側に捕捉・堆積した流木と、b)側岸 の電柱やガードレールなどに捕捉・堆積した流木とに分 けた.中流域(図-2のB地点)で氾濫し、個別に堆積し た流木をN=20本抽出し、そのスケールを調べた.計測 結果の一例を図-6に示す.個別に単独で堆積した流木の 平均長さL=2.34m、平均直径D=15.3cmであった.これと 倒木の平均長さを比較すると、中流域に個別に堆積した 流木は、流下の過程でその長さを倒木の約1/4まで減少 させたことが分かる.一方、2017年九州北部豪雨災害の 白木谷川では流木は流下過程において、上流に残留した 倒木の約1/3まで長さを減少させていた³.



写真-1 中流河道の橋梁に捕捉された流木群 (下流から上流方向を2018年7月22日撮影)



写真-2 下流河道における土砂堆積(2018年7月21日撮影)

(3) 橋梁に捕捉された流木群の特性

総頭川流域では、谷出口付近の橋梁2箇所において、 大量の流木が橋梁に捕捉され群を形成し、河道を完全に 閉塞していた(写真-1).橋梁に捕捉された流木群から N=20本の流木を抽出し、そのスケールを計測した(図-7). 橋梁に捕捉された流木の平均長さL=3.77m, 最頻値 Lmode ≒2m, 平均直径D=21.1cmであった. 一方, 橋梁の 桁下クリアランスは2.7mであった.従って,捕捉流木群 はクリアランスに対して1.4倍の長さを有していたこと になる. 流木群を構成する個々の流木の55%が桁下クリ アランスを超える長さをもっていたことから、これらの 流木が、橋梁に先行的に捕捉され、このことが後続の比 較的短い流木をも捕捉したと推定される. 実際, 群に含 まれる流木長の最頻値Lmode≒2mであったことから、桁 下クリアランスより短い流木も多数橋梁に捕捉されてい た. ピア(橋脚)のない橋梁に関する実験によると¹²⁾ 流木が橋桁に捕捉される確率と流木本数および流木長と の間には正の相関関係がある. したがって, 橋梁による 流木捕捉の原因は、桁下クリアランスより長い流木が多 く存在したこと、多数の流木が橋桁に一気に流入したこ と、および水位が橋桁にかかる程度の高さであったこと などが考えられる.

(4) 橋梁による流木捕捉と土砂堆積の特性

総頭川における流木捕捉と土砂堆積との関係について 調べた.流木が谷出口付近の2基の橋梁に捕捉され,河 道閉塞が発生した.その流木堆積高は約4~7mであった

(写真 - 1). そのため、下流への流木流出は少なく、 個別に堆積する流木が散見される程度であった. これに 対し、住宅街が存在する下流河道では土砂堆積による河 床上昇のため、周辺に広範囲に2~3m程度の高さで土砂 氾濫が発生していた(写真 - 2). この付近の河床勾配 は上流に対して極めて緩く1.7/100であった(図 - 3). この河床勾配の減少が顕著な土砂堆積を引き起こしたと 推測される.

一方,2017年九州北部豪雨災害の朝倉市白木谷川などにおいても、下流の住宅街に著しい土砂氾濫が発生した. 下流に流出した流木が橋梁に捕捉されるとともに、その 背後に顕著な土砂堆積が発生した.これは橋梁による流 木捕捉が河道閉塞を引き起こし、土砂堆積や土砂氾濫を 引きおこしたと考えられている³.

坂町総頭川の土砂氾濫は下流河道における勾配減少に 起因しているのに対して,朝倉市白木谷川の土砂氾濫は 下流河道における流木による河道閉塞が原因であった.

4. 流木を伴った土石流の流動シミュレーション

総頭川流域の土石流は源頭部の土砂崩壊に起因したものと推測される.従って,流木を伴った崩壊起源の土石流の1次元流動シミュレーションを行った.解析モデルは,Nagano et al.¹⁾に基づき,土砂・水混相流(土石流)である本体部主流層と流木・土砂・水混相流である本体部表層の2層構造モデルとした.その結果,流木は主流層の上を本体部より早く流下し,先端部に集積することとなる(図-9).

(1) 土石流流動モデル(本体部主流層)の基礎式

本体部主流層のモデルは、河床の侵食・堆積と側岸侵 食の評価が可能な高岡¹³, Takaoka et al.¹⁴のモデルをも とに構築されたものである.流路断面は長方形で近似し、 側岸は直立を保ったまま水平方向に侵食され、侵食土砂 は側方流入として即座に流れに取り込まれるとした.ま た、河床は流砂濃度と平衡流砂濃度の大小関係により侵 食または堆積するものとした.基礎式は、運動方程式、 全相と固相の連続式、河床と両岸の変動式の5個であり、 未知数は流量、水深、土砂濃度、河床高、河道幅の5個 である.それらは紙面の都合上割愛するが、詳細は永 野・福岡・橋本らの研究³³を参照されたい.

(2) 流木流動モデル(本体部表層)の基礎式

本体部表層の流木流動モデルでは、Nagano et al.¹⁾のモデルを基に基礎式を構築した.すなわち

流木相(表層部)の連続式:



図-9 流木を伴った土石流の流動モデル

$$\frac{\partial V_d}{\partial t} + \frac{\partial Q_d}{\partial x} = n_0 i_s \frac{\pi}{4} d_d^2 l_d \tag{1}$$

ここに、 V_d :河道単位長さ当たりの流木の実質体積、 Q_d :流木流量、 n_0 :側岸斜面における単位面積当たりの 樹木数(数密度)、 d_d :樹木の直径、 l_d :樹木の長さ.

流木(実質体積)量V_dと河道単位面積当たりの流木本 数n_dとの関係は次のようになる.

$$V_d = Bn_d \frac{\pi}{4} d_d^2 l_d \tag{2}$$

流木速度をvaとすれば、流木流量Qaおよび流木本数フ ラックスNaは次のようになる.

$$Q_d = V_d v_d \tag{3}$$

 $N_d = Bn_d v_d$ (4) 流木の流速 v_d は土石流の平均流速vに関連付けて

$$v_d = a_s v$$

とした. 流木の流速を主流層の表面流速で近似すると, 係数a,は,表面流速と平均流速との比を意味しており, 大略a, = 1.25となる. ここに,急勾配河道において現れ る土砂移動形態(土石流,泥流,掃流状集合流動,高濃 度浮流砂流)に対して提案された流速分布式⁴を用いた.

(3) 流木流動モデル(先端部)の基礎式

先端部に集積した流木の実質体積をVFとすると、連続の式は

$$\frac{\partial V_F}{\partial t} = (v_d - v) V_d = \frac{a_s - 1}{a_s} Q_d \tag{6}$$

ここに、 $v_d=a_sv$, $a_s=1.25$, $Q_d=v_dV_d$ である. また、右辺各量 (v, v_d , V_d , Q_d) は本体部先端における値である. さらに先端部 (流木相)の代表厚さを H_F , 先端部 (流木相)の代表長さを L_F とすると

 $V_F = Bk_F H_F L_F \lambda_d$ (7) とおける.ここに、 k_F =形状係数、 λ_d =流木相の実積率

(流木濃度) である. 但し, $H_F \ge h >> h_d$ である.

実験によると条件次第で先端部が図-9のように盛り上 がる場合もある¹⁵⁾. 危険側としてこの盛り上がりを考慮 し、その形状を半円形で近似すると、式(7)において $H_F = L_F$, $k_F = \pi/2$ となる.

(4) 上流端の境界条件

上流端における崩壊現象を,静止した土量 V_s が崩壊 により一瞬のうちに流量Q,流砂濃度 C_0 の土石流に変換 されT秒間継続するものとしてモデル化した^{2,14}.

(5) 計算条件

a)計算河道

計算対象河道は流域面積の大きい大判川の源頭部O。から河口までの区間とした.初期河床高は図-5の等高線 データを用いた.また,初期流路幅は航空写真をもとに 設定した.本シミュレーションでは,渓流区間で側岸と 河床の侵食を許容するが,下流の氾濫区間では河床や側 岸の侵食は許容しない条件で計算した.

b) 降雨・崩壊条件

計算対象の時間は、7月6日17時00分から20時00分までの3時間とした.降雨条件は、坂および天応観測所における7月6日17時00分から20時00分までの各時間雨量とし

(図-1), 流出率f = 0.9として合理式より算定した流量 を上流端に与えた.

崩壊の発生は19時00分からT = 60秒間と継続し、崩壊 土量 $V_s = 2,000$ m³、崩壊面積=2,000m²、崩壊時土砂濃度 $C_0 = 0.4$ と仮定した.

d)その他の計算条件

(5)

流速係数は、流況に基づき渓流区間で8、氾濫区間で 10とした. 流砂の粒径は現地調査よりd = 0.005mと仮定 した. 流木条件は、3章の調査より $n_0 = 0.60$ 本/m²、 $d_d = 0.13$ m、 $l_d = 9.7$ mとした.

(6) 計算結果と考察

図-10,11に流量,流路床変動高の1時間ごとの計算結 果を示す.図-10で,x=2600m地点は,大判川と総頭川 との合流地点であるため,流量が流下方向に急増してい る.ピーク流量は,写真-1に示す橋梁地点で約89m³/s (x = 2200m),下流端で約80m³/s (x = 0m)となった.合理式 より清水のピーク流量を算定すれば,それぞれ,約 16m³/s,約70m³/sであることから,本災害における土石 流のピーク流量は,清水時の1.1~5.6倍と推定される.

流砂濃度の縦断変化を見ると、ピーク値は橋梁地点で 0.21(x = 2200m)となった.流砂濃度は流下方向に減少し、 渓流区間($x = 2400 \sim 4000$ m)では0.10 ~ 0.25 、橋梁より下 流の区間($x = 0 \sim 2200$ m)では0.04 ~ 0.14 であった.流路床 は、上流の $x = 2250 \sim 3050$ m、3650 ~ 4000 mの区間で縦侵 食が著しく、下流の $x = 0 \sim 1300$ mでは堆積が著しい(図 -11).堆積高の計算結果は、現地調査結果とよく一致 している.





図-12~13に崩壊発生前後の流木流量,水深の縦断分布 を60秒ごとに示す.流木流量のピークは,2.1m³/s程度で, 崩壊発生から約180秒で橋梁地点(x = 2200m)に到達した. 土石流は,ピーク水深2.0m程度で渓流区間(x = 2400~ 4000m)を流下し,崩壊発生から180秒後に橋梁地点(x = 2200m)に到達し,そのときのピーク水深1.6m程度であっ た(図-14).これに対し,先端部流木群の高さ H_{F} =3.6m程 度あり,桁下クリアランス2.7mを超えたため,橋梁に流 木が捕捉されたと推定される.

河口(x = 0m)と谷出口(x = 2400m)における流出土砂量 はそれぞれ、「かさ」表示で約3.3万m³、約5.9万m³と評 価された.これらの差分をとると、下流河道に堆積した 土砂量は「かさ」表示で約2.6万m³と見積もられ、現地 河道内と側道に堆積した土砂量2.4万m³と概ね一致した.

5. おわりに

以上,2018年7月西日本豪雨により発生した坂町総頭 川流域における流木を伴った土石流について,災害直後 より流木の現地調査を実施するとともに1次元流動シ ミュレーションを行った.

谷出口付近での橋梁による流木捕捉は下流への流木流 出を防ぎ下流の住宅街における被害を軽減化したが、過 剰な土砂流出と河床勾配の減少により下流河道において 著しい土砂堆積が発生し、周辺に土砂氾濫を発生させた.

参考文献

- H. Nagano, H. Hashimoto and T. Miyoshi : One-dimensional model of landslide-induced debris flow with woody debris, Proceedings of the 35th IAHR World Congress, CD-ROM, 2013.
- 2) 福岡尚樹,橋本晴行,高岡広樹:2014 年8月20日広島市安佐 南区八木地区で発生した土石流災害について,自然災害科学, 34巻,特別号, pp.111-119,2015.
- 永野博之,福岡尚樹,橋本晴行:2017年九州北部豪雨により 発生した朝倉市白木谷川流域の流木・土砂・水混相流の流出 規模に関する研究,河川技術論文集,24巻,pp.487-492, 2018.
- 4) 橋本晴行:土砂の移動現象とそのメカニズム,ながれ29, pp.193-202,2010.
- 5) https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php (2017年7月20日閲覧). 国土地理院:地理院地図(電子国土 Web),http://maps.gsi.go.jp/(2017年8月2日閲覧).
- 6) 国土交通省【川の防災情報】: http://www.river.go.jp.
- 7)広島地方気象台:平成30年7月3日から8日にかけての台風第7 号と梅雨前線による大雨について(広島県の気象速報),平 成30年7月8日.
- 8) 坂町: 広報 さか 8月号, No.744, 2018.
- 9) 広島県砂防課:土砂洪水流に対する対策について,平成 30 年7月豪雨災害を踏まえた今後の水害・土砂災害対策のあ り方検討会第2回砂防部会(資料4), p.2, 2018.
- 10) Rusyda, M.I., Hashimoto, H., Ikematsu, S. & Sakada, K.: Characteristics of woody debris deposition during the Yabe River Flood in Yame City, Japan: Northern Kyushu Flood Disaster in July, 2012, Proc. of the 12th Int. Symp. on River Sedimentation, pp.1989-1996, 2013.
- 11) 楠窪正和,赤野久志,ムハマド イスラミ ルシダ,池松伸 也,永野博之,橋本晴行:2013年7月島根県津和野名賀川流 域で発生した流木氾濫に関する調査,第7回土砂災害に関す るシンポジウム論文集,pp.103-108,2014.
- 12)橋本晴行,池松伸也,喜多貢菜,船田昂志,西田悠人,ム ハマドファリドマリカル:ピアのない橋梁による洪水時の 流木捕捉と水位上昇に関する実験的研究,第9回土砂災害に 関するシンポジウム論文集,pp.97-102,2018.
- 13) 高岡広樹:高濃度流れによる河道侵食と土砂流出に関する 研究,九州大学博士論文,2006.
- 14) H. Takaoka, H. Hashimoto and M. Hikida : Simulation of landslide-induced debris flow-The Atsumari debris flow disaster in Minamata City, Japan, Debris-Flow Hazards Mitigation, 2007.
- 15) 福岡尚樹,山本泰己,永野博之,池松伸也,橋本晴行:流 木を伴った土石流の先端部の抵抗則に関する実験的研究,第 66回H29砂防学会研究発表会概要集,pp.94-95,2017.

(2019.4.2受付)