H22 年 7 月豪雨による厚狭川中流域の 中山間部での洪水氾濫流の分析

INUNDATION FLOW IN MOUNTAINOUS VILLAGE IN ASA RIVER BASIN
DURING 2010 JULY TORRENTIAL RAINFALL EVENT

椿 涼太¹・朝位孝二²・中村明彦³・戸村健太郎³・河原能久¹・永野博之⁴
Ryota TSUBAKI, Koji ASAI, Akihiko NAKAMURA, Kentaro TOMURA, Yoshihisa KAWAHARA
and Hiroyuki NAGANO

¹ 広島大学大学院 工学研究科 (〒 739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

² 山口大学大学院 理工学研究科 (〒 755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

³ アジア航測株式会社 防災地質部 (〒 215-0004 神奈川県川崎市麻生区万福寺 1-2-2)

⁴ 八千代エンジニアリング株式会社 名古屋支店 (〒 460-0003 名古屋市中区錦 3-10-33 錦 SIS ビル)

In this paper, an inundation flow in the Matsugase district, Sanyo-Onoda City, during the 2010 July torrential rainfall event was analyzed. Topographical data of this area were measured by aerial LiDAR survey. The DEM obtained by the LiDAR survey was verified by field survey data measured by RTK-GPS. A shock-capturing shallow water flow model with a fine calculation grid (two to 5 meters in resolution) was utilized to represent inundation flow in the inundated area. The calculated water depth was compared with the water records. The characteristics of inundation flow, especially the effect of the embankments in the inundated area, and those relation to local damage were discussed. Effects of embankment rise and reduction of energy loss due to a bridge were evaluated.

Key Words: Inundation, Asa River, mountainous village, railway embankment

1. はじめに

中山間地域では、河道に沿って家屋、田畑、道路や鉄道が配置される一方で、河川整備水準が必ずしも十分でない場合が多く、水災害に対して相対的に脆弱といえる。道路や鉄道への被害は、その影響が被災箇所限定されず、その交通網に接続した地域社会全体へ波及する。一方で、このような人口や資産の密度が比較的低い地域に対して、大規模降雨まで対応できる水準までの河川整備を行うことは現実的でなく、氾濫を許容しつつ、氾濫流の特性を踏まえた防災・減災を図ることが現実的である。

本研究では、平成 22 年 7 月に発生した厚狭川中流域の中山間部での洪水氾濫事例を分析する。まず、航空レーザー測量データを用いて、中山間地における洪水氾濫流を、比較的详细な計算格子を用いた氾濫解析により評価する。続いて、本事例での洪水氾濫流の特性を分析し、最後にその特性を踏まえた減災対策の立案を行う。

2. 被害状況概要

(1) 流域特性

図-1 に厚狭川の流域図を示す。厚狭川は標高 534 m

図-1 厚狭川流域

の美祢市於福・大ヶ峠を源流とする流域面積 245 km²、流路延長約 43.9 km の河川であり、山口県が管理する二級河川である¹⁾。ほぼ本川にそって JR 西日本・美祢線が配置されている。本研究で対象とする中流域は、谷底低地と峡谷部分を通る区間であり、河床勾配は 1/240 程度である。

(2) 降雨特性

平成 22 年 7 月の降雨は厚狭川流域の中流域に集中し、10 日から 15 日までの総降水量は、美祢市東厚保で 588

図-2 松ヶ瀬地区の航空写真

mm, 美祿市秋吉台で 584.5 mm, 下関市豊田で 570 mm であり, 最大日降水量, 最大一時間降水量も記録的な値を示した²⁾が, 山崎ら³⁾による検証では最大三時間降水量や日降水量の再現確率は 2.7 年から 27.7 年程度と分析されている。このことから, 先行降雨の影響と 15 日の時空間的な降雨パターンの複合的影響により大きな被害をもたらしたものと考えられる³⁾。

(3) 被害の概要

厚狭川流域下流に位置する山陽小野田市では, 洪水氾濫により床上・床下浸水合わせて 820 棟に達した¹⁾。

路線が厚狭川に沿って配置された美祿線は, 複数の鉄道橋の流失や各所での盛土やバラストの流失がみられ 7 月 15 日から不通となった。鉄道再開のための予算の一部を山口県が措置して, 翌年の平成 23 年 9 月に全線での運転が再開された。

図-2 に随光川合流点の直下流に位置する松ヶ瀬地区の航空写真を示す。同地区は, 厚狭川流域の中流部の下流側に位置する。河道は屈曲しており内岸側に位置する低地は農地などに利用されている。また, 国道 316 号線や美祿線が河道に平行して配置されている。この地区では河川からの氾濫により低地が冠水し, 美祿線の盛土の大規模な流失が見られた。この地区では橋梁の流失は見られなかったが, 流木等による通水断面の減少が確認された。

3. 松ヶ瀬地区周辺の地形情報の検証

平成 24 年 2 月に当該地域を対象に, 1 m² に 1 点の計測密度で航空レーザー測量を実施した。計測されたデータに基づき, 計測値をグリッドに補間した DSM (Digital Surface Model) と, フィルタリング処理により地盤高を抽出し, これを内挿した DEM (Digital Elevation Model) の 2 種類のデータが整備された。

出水前に実施された横断測量結果と, 出水後の実施した航空レーザー測量により得られたデータを比較す

図-3 GPS 計測地点の配置図

ると, 一部の斜面形状に相違がみられたものの, 基本的に両者はよく一致していた。斜面形状の相違については主に計測時期の違いに起因し, 越流部を除き, 出水時から航空レーザー測量実施時までには河道改修等は実施されていないことから, 数値モデルにおいて基本的に航空レーザー測量データに基づき標高分布を与えることとした。水面下については航空レーザー測量で取得できないため, 横断測量結果と比較して, 航空レーザー測量の標高が平坦で, かつ 20 cm 程度以上過大評価されている点は, 水面反射を捉えていると判断し, 横断測量データの値を最終的な標高値とした。

松ヶ瀬地区の上流側の越流地点には護岸および若干の築堤が見られる。これらの標高は越流流量に大きな影響を与えるが, 航空レーザー測量時には洪水越流地点の護岸の補修工事が行われていた。越流地点の護岸の形状把握, 堤防および鉄道の計測精度の検証, 痕跡水位の実測のため, 平成 25 年 6 月 13 日に RTK-GPS 測量を実施した。図-3 に計測地点の配置を示す。

越流地点の堤防天端標高の GPS 計測値と航空レーザー測量により作成された同地点での DEM および DSM 標高を図-4 に比較する。航空レーザー測量の値は, GPS 計測値と比較すると若干過大評価傾向があることが確認できる。植生被覆のある場合には, DSM 標高は実際の地面より高い値となる傾向があるが, ここでは, 一点を除くと DSM 標高と DEM 標高はほぼ同じである。堤防は草で覆われており, また定期的に刈り取りが行われることから, 比較的密度の高い草体で覆われる。そのため地表面までレーザー信号が到達しづらく, 結果として, 平均すると DEM 標高は GPS 標高に比べて 0.13 m ほど過大評価したと考えられる。

図-5 には鉄道盛土越流地点付近での, GPS により計測したレール上面の標高と DEM, DSM 標高を比較する。GPS 標高と比較して DSM 標高は 0.11 m の過小評価, DEM 標高は 0.18 m の過小評価となっている。レー

図-4 越流地点の堤防天端の GPS, DEM, DSM 標高の比較

図-5 鉄道レール上面の GPS 標高と、その位置での DEM, DSM 標高の比較

ルの高さ (レール上面と枕木上面の高さの差) は 0.14 m から 0.16 m 程度である⁴⁾。DEM 標高は枕木高さに相当する高さを捉えているものと考えられ、DEM 標高を 0.18 m 嵩上げしたものがレール上面高さに相当すると判断できる。

以上の結果を踏まえ、航空レーザー測量データを用いて微地形を考慮した氾濫解析を実施する際の注意点を考察する。氾濫解析を行う場合の標高値は、地表の高さを表す DEM を用いる。植生や家屋の影響については、一般的に粗度係数や抗力モデルにより評価できる。家屋の形状を格子形状として与える場合には、別途建物のラスターデータを用意するか、レーザー計測結果より構造物外形を算定することができる⁵⁾。本研究では、解析地域の植生や家屋の密度が小さく、洪水氾濫流への影響は限定的であるため、植生や家屋の効果は簡易的な粗度係数による評価を行うこととした。

氾濫流の挙動に非常に大きな影響を及ぼす線状盛土地形について、DEM 標高をそのまま用いると盛土高さを過大評価し、また鉄道盛土の高さについては DEM 値は実際のレール上面より過小評価する傾向が認められた。これらの差は、レーザー測定の精度の範囲であるが、少なくとも本研究の分析範囲において、ばらつきというよりは明確なトレンドとして確認された。また氾濫水深の予測はサブメートルオーダーの精度が要求されることから、これらの標高は補正することが望ましい。従って、次章以降の氾濫解析において標高分布は DEM 値を用いて設定することとし、河川堤防については 0.13 m 引き下げ、鉄道盛土については 0.18 m の嵩上

げを行う事とした。越流地点付近の鉄道橋による洪水流のせき上げ効果についてはドビッソン (D'Aubuisson) 式により考慮した⁶⁾。ただし、流木等による閉塞量に関する定量的情報が入手できなかったため、橋梁による排除面積のみを対象にせき上げ効果を評価した。

4. 松ヶ瀬地区の堤内地の盛土流失機構の分析

(1) 氾濫解析の計算条件

分析対象の河道区間が約 2 km と短く、河床勾配も 1/240 程度と比較的急峻であることから、ピーク流況条件での定常状態を再現することとした。山口県により算定された通過流量の分析結果に基づき、厚狭川からの流入量は 811 m³/s、随光川からの流入量は 110 m³/s と設定した。非構造格子を用いた 2 次元不定流モデルに一定流入流量を与えた。計算格子は盛土部分は 2 m、それ以外の部分は 5 m の辺長の三角形格子を生成した。粗度係数について河道・地面を 0.03、植生を 0.1、建物を 0.1 とした。河道の粗度係数は山口県による既往計画等の際に利用された値と同一である。下流端水位は山口県による洪水再現計算の水位分布をもとに設定した。

(2) 水位の再現性

痕跡水位が確認された 2 地点 (図-3 を参照) での水位と、氾濫計算により算定された水位を比較する。氾濫計算の流入出条件は定常で与えたが、氾濫域や水際で渦などに起因する変動がみられ、完全な定常状態にはならなかった。そのため、再現性評価に用いる水位は 1 分おきの 20 分間の平均値と最大値の二通りを算出した。痕跡水位 1 は同地点にある工場の内壁に残った水位痕であり、実測値は 25.98 m であるのに対し、計算水位は平均 25.79 m、最大 25.90 m であった。痕跡水位 2 については実測値は 25.81 m、計算結果は平均 25.61 m、最大 25.67 m であった。計算結果の水位は平均値で約 19 cm、最大値で 11 cm 程度、水位を過小評価している。中山間地域では比較的地形起伏が大きく、氾濫水の水面勾配も大きいため、氾濫水位を精度良く評価することが比較的困難である (例えば 2009 年の佐用川氾濫の解析では 20 地点での氾濫解析水位と水位痕跡との差は平均で 28 cm 程度であった⁶⁾)。このことから、本研究で評価された水位の精度は十分とは言えないが、現状の技術水準としては妥当な範囲と考えることができる。

(3) 氾濫流況

氾濫解析により再現した洪水氾濫流況を図-6 に示す。図-6a に示す白色破線は美祢線を、灰色実線は国道 316 号線を示している。図-6b に示す標高分布より河道は基本的に掘り込み型であり、一部沿線に配置された道路が微高地として堤防の役割を果たしていることが確認できる。図-6c に示す水位分布から、河道左岸側の低平地に河道内の水位と同程度の氾濫水が流れており、氾濫水が河道に併走して流れるいわゆる流下型の形態⁷⁾

図-6 計算領域と計算結果（水位 (c) の色の薄い部分は冠水していない部分を示す。標高 (b) と水位 (c) はそれぞれが見やすいようにカラーレンジを変えて示している。）

図-7 氾濫域の水位分布 (左) と鉄道盛土流失部を通る流線に沿った全水頭、ピエゾ水頭、標高の分布 (右)

であることがわかる。氾濫域の水位分布は、鉄道盛土および道路盛土により区画されて、段階的に水位が低下しながら河道に氾濫水が戻っていることが確認できる。図-6d に示した流速分布および図-6e に示したフルード数分布より、洪水氾濫流は河道を集中して流れており、河道の一部で局所的に 1 前後の高いフルード数が発生していることが確認できる。

氾濫域では上流の左岸側の斜面と鉄道に囲まれた低平地を川に平行して氾濫水が流下している。それ以外の氾濫域は、基本的に流速が小さく停滞しているが、盛土の越流部分で局所的な高速流が発生しており、盛土の上流側は氾濫水のせき上げが生じている。また鉄道盛土の流失区間の下流側はフルード数が高く、限界流・射流が発生している。

図-7 に、鉄道盛土流失部分の周囲の水位分布と、越流する流れの流線に沿った全水頭、ピエゾ水頭、標高

の分布を示す。左側に示した水位分布中の白実線は鉄道盛土を越流した流れの流線であり、その流線に沿った水理量を右側のグラフに示している。図-7 右のグラフ中に a で示した起伏は道路盛土であり、天端に対して上流は 0.3m 程度の標高差 (越流水深) が生じている。同グラフ中の b の起伏は鉄道盛土であり、越流後に約 1 m の大きな水位差が生じているが越流水深は 0.12m ほどで、直前の道路盛土越流部分に比べると小さい。道路盛土の上流部分に貯留された氾濫水は延長 30 m 程度の道路盛土区間を越流するが、その下流部の鉄道盛土で貯留された氾濫水は、鉄道盛土の 120 m 程度の区間を分散して越流している。鉄道盛土の越流幅が相対的に大きいため、鉄道盛土の越流水深は上流の道路盛土の越流水深より小さくなっている。

氾濫流は河岸や堤内地の盛土の周囲に比べ低いところを集中して通過する。また盛土が水平に近ければ広

図-8 河岸・道路・鉄道の標高縦断分布

い範囲を分散して越流する。従って、河岸や盛土の縦断分布から、洪水氾濫が起きた際の氾濫流の挙動をある程度事前に予測できる可能性がある。そこで、本事例での河岸や盛土の縦断分布を図-8に示し、標高の縦断分布と氾濫流との関係を分析する。横軸の距離標の位置は図-2の河道内の数字と対応している。鉄道盛土の流失部分は9.7KP付近であり、軌道高は平坦になっている。流失部分の上流側の9.8KPから10.0KPの間も、軌道高は流失部分と同程度であるが、この部分の軌道自体に大きな被害はなかった。これは、9.8KPから10.0KPの間は、右岸の道路は左岸につながる道路橋の取り付け部の盛土であり、軌道高より右岸の道路高の方が高く、氾濫域と河道が道路盛土により分割されたため、鉄道盛土は浸水するが強い越流は生じなかったためである。9.5KPより下流側では右岸は山付き部になっており、浸水は起きていない。

5. 考察

(1) 堤内地の盛土の越流と被害

図-7の右側に示した氾濫水の水位分布より、b地点の鉄道盛土部分より、上流側のa地点の道路盛土地点は水位差が大きく単位幅辺りの越流流量は相対的にかなり大きい。ところが、道路盛土は一部の破損はみられたものの残存した一方で、鉄道は120mほどの区間でバラストや通信線の流失があり、その内の80m程度の区間では鉄道盛土の流失が確認された。その原因として、道路盛土と鉄道盛土の越流に対する耐久性の違いが考えられる。すなわち、鉄道盛土においては天端がバラストに覆われており、そのバラストは越流により流失しやすいのに対し⁴⁾、道路盛土は天端がアスファルト舗装されており、越流に対する耐久性があるためである。その他の要因として、道路盛土の越流部下流は湛水しており水位が道路天端と同程度であったため、盛土下流法面の侵食や越流後の落堀形成が抑制されたと考えられる。一方、鉄道盛土は越流後の落差が大きく高速流が発生して下流側法面の侵食やバラスト流失

が促進されたものと考えられる。

図-8に示す鉄道盛土の標高分布(軌道高)より、鉄道盛土流失区間の高さがほぼ水平な区間でバラスト流失が起きたことがわかる。鉄道盛土が天端から浸食されていくと、その浸食部分を集中して氾濫水が流れるようになる。一方、本事例では比較的広い範囲での流失が見られたことから、越流流れにより天端ではなく鉄道盛土下流側の法面侵食が進んだことが広い範囲での鉄道盛土の流失につながったものと考えられる。

(2) 氾濫流による被害の低減策

当該地区において、このような氾濫流に起因する被害が発生した地形要因としては、谷底平野部の上流端である10.3KP付近の右岸の標高が低く、ここから越流・氾濫が起きたことがあげられる。この位置は、氾濫域の中では比較的標高が高いため、一旦越流した氾濫水は地形勾配により流下していくこととなる。よって上流部分の護岸・堤防を補強して、上流からの越流・氾濫を抑制することが氾濫流を弱めることにつながる。このような部分的な堤防の嵩上げは、全体的な浸水が起ることを防ぐわけではないが、氾濫流速を抑制する効果が期待できる。

図-9に、現状地形と氾濫域上流の越流部分を2m嵩上げた場合の氾濫流況を比較する。図-9の上半分は水位分布を、下半分はLine Integral Convolution (LIC) 法により可視化した⁹⁾流況を示す。パターンの方向は流向を示し、色の違いは単位幅流量に対応している。水位分布の比較より、越流部分の嵩上げを行う事により氾濫域の水位が低下していることが確認できる。流況を確認すると、現状地形ケースの図中にA地点で示した位置から越流した洪水流が氾濫域を流下しており、その一部はC地点を通り逆流しながらB地点で河道に戻っている。B地点では河道の流れが上流部で越流しCを逆流した流れとともに河道に再び合流している。2m嵩上げたケースでは、A地点からの越流は続いているが、現状地形のケースに比べると氾濫流は弱くなっており、またB地点での複雑な流れも解消されている。表-1に、図-9a上に示した断面の Q_1 (河道断面)、 Q_2 (道路盛土と鉄道盛土の間)、 Q_3 (鉄道盛土と後背山地の間)の各部分の通過流量を比較する。現状地形ケースでは Q_3 地点を流下した $46 \text{ m}^3/\text{s}$ の内 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ は Q_2 地点から河道に戻っており、氾濫域の下流へ流入する流量は $Q_2 + Q_3$ の $36 \text{ m}^3/\text{s}$ である。これは河道を流れる流量に対しては4%程度である。1m嵩上げたケースでは、氾濫域を流下する流量は $28 \text{ m}^3/\text{s}$ と半減しており、2m嵩上げたケースではさらに減り $2 \text{ m}^3/\text{s}$ と評価されている。このように上流越流地点の嵩上げは、松ヶ瀬地区の氾濫流量を抑制する効果が大きく、氾濫流に起因する下流の被害を抑制する効果が高い。氾濫域への流入流量は、越流地点に形成された支配断面により規定されるため、氾濫域の内部の盛土や下流側の河川への還流部分の盛土の嵩上げや築堤は、氾濫域への流入流量の制御につ

図-9 氾濫域上流の越流部分の堤防嵩上げの検討（上段：水位分布，下段：LIC法による流況可視化）

表-1 各断面の通過流量の比較

ケース名	Q_1	Q_2	Q_3	
現状地形	893	-10	46	
越流部嵩上げ+1m	914	-9	37	
越流部嵩上げ+2m	931	-6	8	
現状地形（橋梁なし）	919	-3	12	単位 m^3/s

ながらない。むしろ、これらの盛土や築堤部の上流側に氾濫水が湛水することから、盛土等を嵩上げすることは、上流側の浸水深を大きくする効果があり、実施すべきではない。特に氾濫域内の鉄道などの盛土を高くすることは、十分な排水経路が確保されている場合を除き、むしろ盛土前後の水位差を大きくし盛土の流失リスクを増大させることになる。

越流部の周辺に架かる鉄道橋のせき上げ効果を評価しない条件での通過流量の解析結果を表-1の最下段に示している。せき上げを考慮した現状地形の結果と比較して、氾濫流量が減少している。当該地区への氾濫流による被害を軽減させる上で、鉄道橋梁をせき上げを防ぐ形へ改修することも効果的である。

6. おわりに

平成22年7月に発生した梅雨前線による降雨で生じた山口県美祿市松ヶ瀬地区の洪水氾濫と鉄道盛土流失の被害状況を分析した。航空レーザー測量により得ら

れた1 mメッシュの微地形データと現地計測結果を比較したところ、小規模の堤防や鉄道盛土では標高のバイアスが確認された。これらの結果を踏まえ、松ヶ瀬地区の氾濫水の流れを再現した。その結果、松ヶ瀬地区上流右岸側から越流した流れが、河道や河道に併走する道路・鉄道に沿って流下して、道路盛土や鉄道盛土によってせき止められた氾濫水がそれぞれの盛土を越流して河道に戻ったことが確認された。鉄道盛土の越流は120 m程度の区間を分散して越流し、越流後の落差が大きいことも影響して法面侵食に起因した大規模な盛土流失が起きたものと推察された。このような氾濫流に起因する交通網などへの被害を軽減させるためには、氾濫域の上流部分から越流を抑制することが有効であり、その施策としては越流部の部分的嵩上げ、および橋梁改修による洪水流のせき上げ量の低減が有効と考えられる。氾濫域の面積が限定されているため、これらの施策を実施したとしても下流への洪水伝搬速度や流量への影響は極めて限定的である。

謝辞：河道や水文データなどの情報を山口県土木建設部河川課よりご提供いただきました。航空レーザー測量の実施につきまして、アジア航測株式会社・阪口和之氏にご協力をいただきました。水位痕跡について、菊永工業株式会社および阿部氏にご協力いただきました。本研究の一部は、中国建設弘済会より助成を受けて行われました。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 永野博之, 羽田野袈裟義, 銭谷淳, 朝位孝二, 赤松良久: 2010年7月の豪雨による厚狭川流域で発生した水害の特性について, 第66回年次学術講演会講演概要集, pp. 335-336, 2011.
- 2) 山口県: 災害記録～平成22年7月15日大雨災害～, 山口県総務部防災危機管理課, 2010.
- 3) 山崎俊成, 山本晴彦, 立石欣也, 原田陽子, 高山成, 吉越恒, 岩谷潔: 2010年7月15日に山口県において発生した豪雨の特徴と水災害の概要, 自然災害科学, Vol. 3, No. 29, pp. 413-425, 2010.
- 4) 上田康弘, 椿涼太, 河原能久, 吉田浩紀: 鉄道盛土の越水による上部構造の流失機構・条件の解明, 河川技術論文集, Vol. 18, pp. 375-380, 2012.
- 5) 椿涼太, 藤田一郎, 岡部健士: 航空レーザー測量を用いた高解像度非構造格子の自動生成と氾濫解析, 土木学会論文集, Vol. 810/II-74, pp. 91-102, 2006.
- 6) T. Tsubaki, Y. Kawahara, T. Sayama, and I. Fujita: Analysis of geomorphic and hydraulic conditions causing railway embankment breach due to inundation flow, *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, Vol. 30, No. 1, pp. 87-99, 2012.
- 7) 国土交通省: 中小河川浸水想定区域図作成の手引き, 河川局治水課, 2005.

(2013.9.30 受付)