

# 中山間地域の特性を反映した 洪水氾濫被害の評価技術の開発

\*椿 涼太

広島大学大学院 工学研究科 社会基盤環境工学専攻



中山間地では、河川が比較的小規模な多数の流路網に分散して流れ、人口や資産の空間密度も相対的に低い状態にあるため、ある程度以上の降雨や流量規模に対しても効果が期待できるような治水施設の設置が後回しになりがちである。道路や鉄道などの交通盛土の果たす氾濫流の導流効果に着目すると、これらの地形効果の及ぼす洪水氾濫被害に与える影響を適切に評価し、あるいは導流効果を積極的に活かして浸水を制御することが防災だけでなく減災という観点からも重要視されるようになってきている。そこで、本研究では、交通盛土のおよぼす効果・影響を分析し、これを踏まえた洪水氾濫被害の評価技術を開発した。

テーマ 洪水氾濫，中山間地，鉄道盛土，盛土流失

## 1. はじめに

中山間地域における洪水災害は、低平地のように水の流れが大河川に集約して流れ、また人口や資産などがある程度の密度を持って配置されているような地域とは異なる特徴を持つ。すなわち、中山間地では、河川が比較的小規模な多数の流路網に分散して流れ、人口や資産の空間密度も低い状態にある。その為、ある程度以上の降雨や流量規模に対しても効果が期待できるような堤防やダムなど等の対策を

実施することは投資効率の点などで困難である。中山間地域において道路や鉄道などの交通盛土の果たす氾濫流の導流効果に着目すると、これらの地形効果の及ぼす洪水氾濫被害に与える影響を適切に評価し、あるいは導流効果を積極的に活かして浸水を制御することが重要となる。また交通機能はソフト対策を実施する上での基盤でもあり、交通盛土の被災リスクを適切に評価し、また交通盛土の水害耐性を確保していくことは、中山間地域の災害に対する耐



a) 2009/8 豪雨による JR 西日本・姫新線



b) 2010/7/15 豪雨による JR 西日本・美祢線

図-1 鉄道盛土の流水による被害状況写真

性や回復力を確保する点でも重要である。

そこで本研究では、中山間地域における交通盛土のおよぼす洪水氾濫に及ぼす影響と、洪水災害時の交通盛土の被災条件について鉄道盛土に着目して分析した。

## 2. 佐用町豪雨災害による氾濫流と鉄道盛土被害に関する調査研究

### 2-1 鉄道被害の概要

2009年8月(平成21年)の8日から11日にかけて、台風9号により中国・関西・四国を始め各地で記録的な降雨が観測された。この降雨により、佐用町周辺を通過する、JR西日本・姫新線および智頭急行で大きな被害がみられた。姫新線では盛土流出(図-1a)を含め78ヶ所、総延長3.8kmに渡る路線被害および駅舎の浸水が発生し、全線再開までには約二か月を要した<sup>1)</sup>。智頭急行においても土砂流入など4ヶ所での路線被害や駅舎への浸水が発生した<sup>2)</sup>。本章では台風9号による鉄道被害が集中した姫新線と併走する佐用川の河道区間(千種川合流地点から上流に約6kmから12km)を対象に氾濫解析を行い鉄道盛土被害と洪水流の関係を検討した。

降雨が集中した佐用町周辺の河道に併走する区間において、鉄道盛土に多数の被害がみられた。具体的には、姫新線では播磨久徳・美作土居駅間の約13kmの区間に被害が集中し、道床流出被害(流水によるバラスト流失)が56個所(総延長2.3km)、斜面崩壊・土砂流入が13個所(延長9.1km)、盛土流出(バラストのみならず、盛土自体が洗掘被害を受ける被害)が9個所(5.6km)確認された。特に佐用川と併走する佐用・上月駅間では河川が増水・氾濫したことで、流水に起因する道床流出、盛土流出が多くみられた。図-2に、本章での解析区間における佐用川河道および姫新線の位置関係および鉄道の被災個所を示す。赤丸横の数字は姫路起点のキロ程を示している。また特に大きな被害を受けた49.2km地点では、高さ2mの盛土が140mにわたり流出するとともに、その前後60m区間でも道床が流出し、図-1に示すように線路が梯子状に浮き上がりねじれた状態

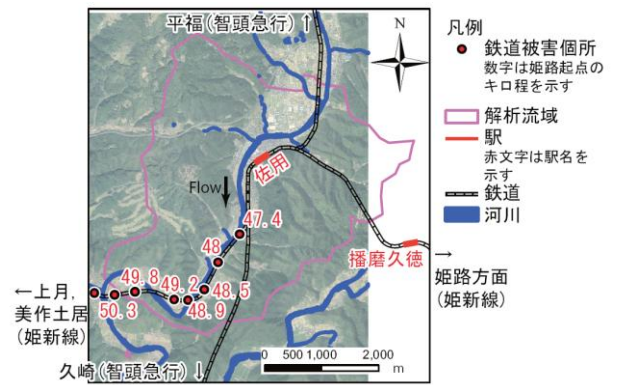


図-2 解析区間での主な鉄道被害個所

となった。

### 2-2 氾濫解析

対象とする流域および河道の表面流について非定常浅水流方程式を用いて評価した<sup>3),4),5)</sup>。また、氾濫流について、河道からの氾濫水(外水)と流域への降雨の流出(内水)の寄与を明らかにすることを目的にスカラーの輸送方程式についても計算を行った。計算格子は、途中に大きな支川の合流がない約15km<sup>2</sup>の部分流域を再現した。河道および谷底平野部については航空レーザー測量による地形データを用い、それ以外の山地については約50m間隔の標高データを用い、河道および鉄道盛土周辺に格子を集中させた格子生成を行った。河道について水面下の標高はレーザー測量では計測できず、そのため大きな誤差が発生している部分については、手動による修正を行った。格子幅は最大40m、最小2.5mとし、格子数は57,980である(図-3)。粗度係数については、河道・平地について0.02、植生域および建物域については0.1、山地については流出解析に合わせ0.3と設定した<sup>6)</sup>。

### 2-3 鉄道盛土の被災機構

まず、鉄道盛土の被災地点の地形条件を検討するために、鉄道盛土の縦断勾配と被災地点の関係を図-4で確認する。同図では、隣接する河川の堤防高も併せて示している。鉄道盛土高および堤防高は、航空レーザー測量データから算定した。同図より、ま



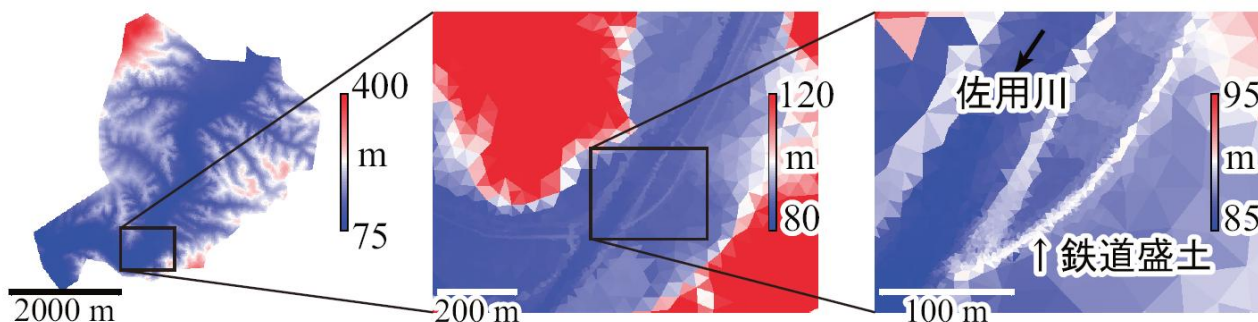


図-3 部分流域の標高と計算格子

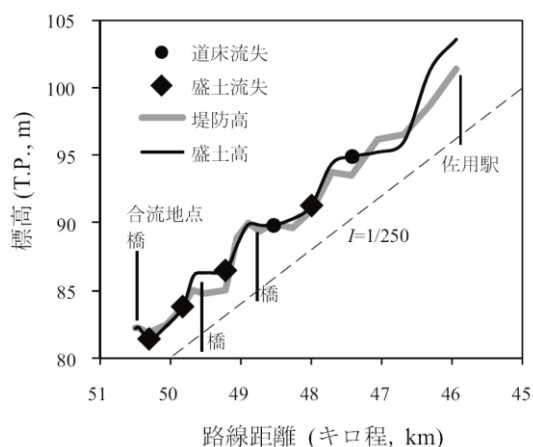


図-4 鉄道盛土の縦断勾配と被災地点

ず、鉄道盛土は、隣接する河川堤防高と同程度の標高に設計されていることが確認できる。次に、盛土表層のバラストが流出する道床流出被害は、鉄道盛土の縦断勾配が小さな地点で発生しているのに対して、より大規模な流出被害である盛土流出は、縦断勾配の急変点で発生していることが確認できる。これは、氾濫水は水平に近い盛土を越流する場合には、幅広い範囲にわたり比較的小さな水深で越流することができるため、単位幅当りの通過流量が小さくなり盛土表層のバラストの一部流下に被害が留まったものと考えられる。一方、盛土が比較的大きな縦断勾配から小勾配や逆勾配に急変する場合には、大勾配の盛土によってせき止められていた氾濫水が、勾配急変点で集中的に越流することとなる。このことが大規模な盛土流出被害の発生につながったものと考えられる。その他に、橋梁への流木閉塞や河岸侵食等による鉄道路線への被害も見られた。

49.2km 地点および 48.9km 地点において大きな盛土被害が見られた。特に 49.2km 地点については、今

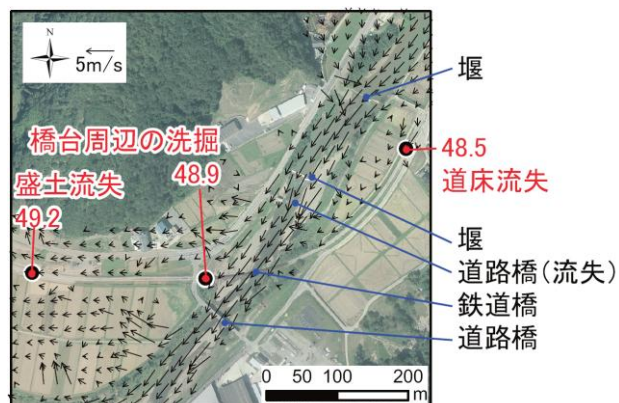


図-5 48.9km地点周辺の流況と地形

回の災害でもっとも大きな被害を受けた個所であり、140m に渡って盛土が完全に流出した区間である。これは、図-5 に示す氾濫解析結果から、48.9km 地点上流右岸で越流した流れが、鉄道盛土に沿って流下するものの北側の山と鉄道盛土による狭窄部において氾濫水の堰上げが発生して、鉄道北側の水位は鉄道盛土高まで上昇したものと考えられる。

### 3. 越流水による鉄道盛土の流失機構に関する開水路実験

実際に被害を受けた事例調査では、鉄道盛土が被害に至った過程を具体的に検証することは困難である。また流失条件についても越流状況を正確に把握・推測することも難しい。そこで本章では、鉄道盛土について特にバラスト部分の流失条件・機構を開水路実験により分析することとした。対象とする鉄道盛土は、中山間地に広く見られる単線非電化区間を想定した<sup>7)</sup> (図-6)。

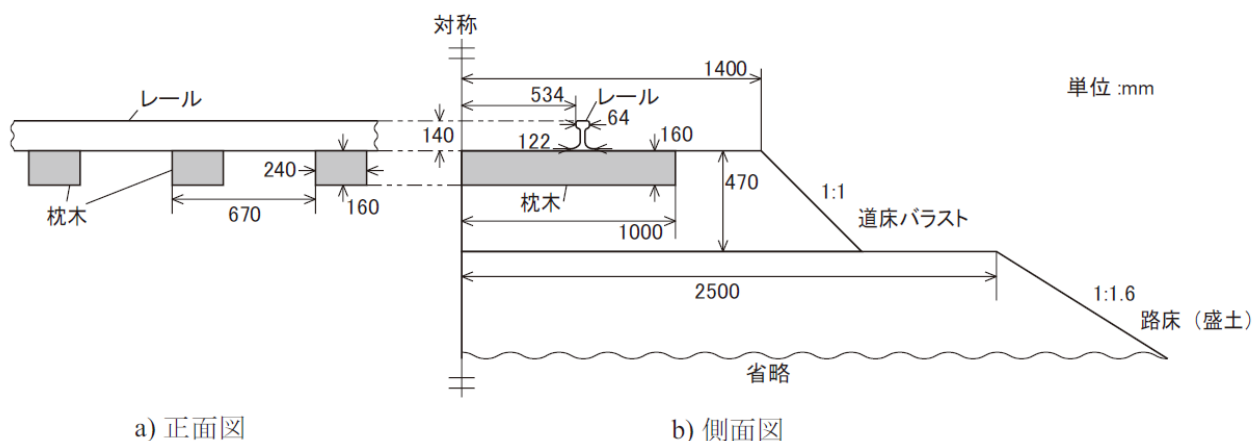


図-6 鉄道盛土の形状

### 3-1 鉄道盛土の破壊形態の分析

越流後の破壊形態として、

1. バラストの流失が起き、流失部分に越流水が集中して堤体を侵食していくもの、
2. バラストを通過・越流した流れが、路床盛土を流れ落ちる際に盛土表面を侵食していくことが主因となる場合、
3. 路床盛土を透過する流れによる浸透破壊が主因となる場合

の3通りが考えられる。被災後に、その盛土流失がいずれの被災形態により引き起こされたかを断定することは困難となる。姫新線や東日本沿岸域などの被災事例にこだわらず、より一般的に捉えようと、盛土材料、盛土表面の被覆状況、降雨パターン、周辺の地形と関係などに依存するものと考えられる。一方で、盛土流失には至らないバラスト流失事例が多く見られることから、鉄道盛土流失において、バラスト流失が先行して発生すると予想される。そこで破壊形態1（バラスト流失）について分析することとした。

### 3-2 バラストの透水・破壊実験

鉄道盛土の通過流量と上流部の水位の関係と、流失が起きる限界流量を算定するために、図-7に示す、実際に供用された後に回収された廃バラストを用いて実験を行った。バラストは、使用するにつれバラストの角の摩耗や、粒子の分割が起きて、粒径がやや小さく、また粒子の形状が丸く変化する。実験に



図-7 実験で用いたバラスト  
(目盛の数字は10cm単位)

用いたバラストは、粒径が20~80mm程度、間隙率 $\varepsilon$ は0.49、比重 $\rho$ は2.55g/cm<sup>3</sup>であった。本実験ではバラスト交換後に時間がたった鉄道バラスト部の特性を調査することとなる。

図-7に示した廃バラストを用いて、幅0.3mの開水路に高さ0.25mの堤体を設置して、透水特性および破壊限界を調査する。図-8に、堤体形状と、水深・距離の計測点を示す。水路床には1/100程度の勾配をつけ、またバラスト部の下流1mで水を自由落下させており、バラスト部の下流では射流となっている。通過流量毎の堤体のり面での水深 $h_{in}$ ,  $h_{out}$ 、流入部から流出部までの距離 $l$ 、流入・流出部の間隙 Froude 数  $Fr = \frac{U}{\varepsilon\sqrt{gh}}$ 、流出部の動水勾配  $i_{out}$  の関係を調査したところ、 $q = 0.0069\text{m}^2/\text{s}$  程度を越えると、のり面での礫の部分的な流失が起き、また  $q = 0.0144\text{m}^2/\text{s}$  以上では、流入水深  $h_{in}$  が、堤体の天端の高さ0.25m

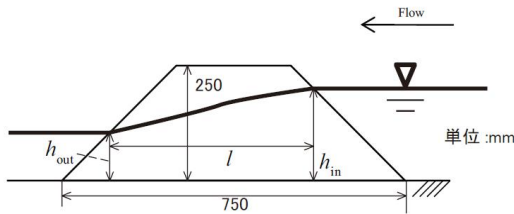
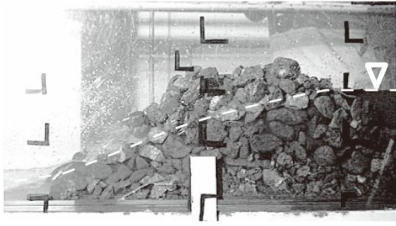


図-8 バラスト堤体の透過実験装置

と同程度となるとともに、のり面の大規模な崩壊が起きることが判明した。実験を行った条件においては、崩壊後も堤体の一部は水面上に出た。バラスト内部の浸透流の水面形は、低下背水曲線となり、水面形は下流部の水深により規定される。よって、本実験で得た、バラスト堤体の崩壊限界流量  $q = 0.014 \text{ m}^2/\text{s}$  は、バラスト堤体の大きさとは関係なく適用できる目安となる。

#### 4. おわりに

本研究では、中山間地域における洪水氾濫被害の評価技術における交通盛土のおよぼす影響の重要性に着目して、洪水災害時の鉄道盛土の被災状況と流失条件について現地調査と開水路実験により分析を行った。

佐用町豪雨被害について流出解析および平面二次元氾濫解析を実施して鉄道盛土に被害がみられた地域の氾濫流況を評価するとともに、被害実態と氾濫流況との関連を分析した。その結果、氾濫域の地形条件および氾濫流況の関連性が改めて確認され、地形条件と盛土縦断勾配の関連性などにより鉄道盛土の流失リスクの高い個所が予測できる可能性が示唆された。一方で、平面二次元解析による氾濫流況の再現性に限界があることから定量的な鉄道盛土流失リスクの予測の難しさも明らかとなった。そのため、本研究で行ったような氾濫域の地形条件および、そこを流れる大規模出水の流れ構造の把握や、地形条件と盛土縦断勾配の関連性などの検討を組み合わせ

ることが、実用的な盛土被害の予測と制御に役立つものと考えられる。

鉄道盛土の流失条件についてより定量的に評価するために、特にバラスト部分の流失条件・機構を開水路実験により分析した。その結果、バラストが流失する越流流量が特定された。また鉄道盛土の土堤部分の浸透破壊および表面侵食耐性についても既存資料に基づいて検討がなされ、鉄道盛土流失がバラスト流失をきっかけとして開始され、バラスト流失により越流水が流失部分に集中して流れることにより、土堤部分を含めた大規模な流失に至ることが示唆された。このことから本研究で同定されたバラスト流失に至る越流流量条件は、鉄道盛土の流失リスク評価を行う上で重要な指標となること考えられる。

盛土流出による大規模被害を少なくするためには、盛土自体の耐久性を高めることが有効であり、また盛土への越流が予見される区間での盛土縦断勾配の調整などにより越流の分散化によって鉄道流失リスクの低減することが可能となる。鉄道盛土は軌道・バラスト等からなる比較的均質な設計をもっているため、越流流量算定等の被災流況の評価に利用できる可能性もある。今後は、越流に耐性を持つ鉄道や道路盛土の構造の検討と、交通盛土の流失リスクが小さく、また洪水氾濫の制御による被害低減効果をより発揮するような交通盛土の平面配置や縦断形状の設計方法についても検討を進めていく予定である。本研究の成果を活かし、中山間地域での降雨災害による被害を確実に低減し、中山間地域の住まい方を含めた中国地方における安全で安心できる社会のあり方の提言と、これを支える社会基盤技術開発を推進していきたい。

**謝辞：** 広島大学工学部・河原能久教授、有尾一郎博士との討議に深謝いたします。現地調査、開水路実験について山田雄也氏、上田康弘氏、吉田浩紀氏をはじめとする広島大学工学部水工学研究室学生諸氏の協力を得ました。佐用町被害調査について、河川整備基金「2009年8月佐用町豪雨災害に関する調査研究」(代表：藤田一郎)において討議や情報交換を行いました。以上、ここに記して深謝いたします。

本報告の一部は、土木学会水工学講演会<sup>8)</sup>および土木学会河川技術論文集<sup>9)</sup>において発表した。

#### 参考文献

- 1) 金子幸弘: 平成 21 年度台風 9 号災害による姫新線播磨徳久・美作土居間土砂災害. 日本鉄道施設協会誌, Vol.6, pp.450-451, 2010.
- 2) 智頭急行株式会社: 智頭急行安全報告書 (2009 年度版), 智頭急行株式会社, 2010.
- 3) 国土交通省河川局治水課: 浸水想定区域図作成マニュアル, 国土交通省, 2005.
- 4) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 野口正人: 低平地河川流域での豪雨による都市氾濫解析. 土木学会論文集, Vol.761=II-67, pp.57-68, Apr.2004.
- 5) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 津崎周平, 重岡広美: 急流中小都市河川が貫流する密集市街地での浸水・排水プロセスのシミュレーション. 水工学論文集, Vol.51, pp.511-516, 2007.
- 6) 佐山敬洋, 小林健一郎, 寶馨: 佐用町河川災害を対象とした降雨流出解析. 平成 21 年台風 9 号による河川災害調査報告書, pp.28-36, 2010.
- 7) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 丸善, 2007.
- 8) 椿 涼太, 河原能久, 佐山敬洋, 藤田一郎: 豪雨災害時の氾濫流による鉄道盛土の被災機構, 土木学会水工学論文集, 第 55 巻, pp.919-924, 2011.3.
- 9) 椿 涼太, 河原能久, 上田康弘: 越水による鉄道盛土の流失機構に関する実験的研究, 土木学会河川技術論文集, Vol.17, pp.449-454, 2011.7.