

豪雨時の小河川の氾濫による 軌道冠水事例の再現シミュレーション

渡邊 諭* 西田 幹嗣*
川尻 俊三* 太田 直之*

Reproducing Simulation of Track Inundation Caused by Overflow of a Small-scale River

Satoshi WATANABE Mototsugu NISHIDA
Syunzo KAWAJIRI Naoyuki OTA

Recently, due to frequent local torrential rainfall events with high intensity, overflow from small-scale rivers and channels, and explosive occurrence of surface flow and inflow of debris from mountain stream have caused disasters beyond imagination, and number of those disasters have been increasing. However, evaluation method of influence of such overflows on railway structures located in mountainous area has not yet been established. In this study, for a basic examination of the evaluation method, the authors selected devastated area including track inundation as a model case, and tried to reproduce situations at the time of suffering by runoff and flood analysis. This paper reports the contents and the results of the reproducing simulation.

キーワード：氾濫，軌道冠水，流出解析，航空写真測量，水害，短時間強雨

1. はじめに

鉄道では、近年頻発している局所的な短時間強雨により、中小河川の氾濫や既設の排水設備からの溢水、沢地形からの表面水や土砂の急激な流入などが生じ、これらを原因とした道床流失、橋りょうの閉塞、盛土の侵食・崩壊など、これまでに見られなかった被災形態の災害が年々増加する傾向を示している。このような河川災害に対しては、これまで、都市域の湛水被害を対象とした氾濫影響評価手法は確立しており、地方自治体を中心としてハザードマップとして利用されている¹⁾。しかしながら、膨大な延長の鉄道が敷設されている山間地・中山間地における氾濫影響評価の実績は少なく、鉄道施設に及ぼす影響を評価する手法は確立されていない。一方、今後の気候の変化から、局所的な短時間強雨の発生件数はこれからも増加すると考えられる。そのため、山間地・中山間地を対象として、鉄道特有の施設を考慮した流出・氾濫モデルを作成し、局所的な短時間強雨が沿線および鉄道施設に及ぼす影響を評価する氾濫影響評価手法を確立する必要がある。

本研究では、その基礎検討として、過去に鉄道沿線で発生した災害事例の中から、軌道冠水を含む被災事例を検討対象として選定し、流出・氾濫解析手法により被災当時の状況の再現シミュレーションを試みた。本論では、

* 防災技術研究部 地盤防災研究室

その再現シミュレーションの内容と再現結果を報告する。

2. 被災事例の概要

2.1 鉄道の被災状況と災害発生時の気象状況

本検討で対象とする被災事例は、山間地の線区で発生した豪雨災害²⁾である。図1は、被災地近傍のアメダス観測点における被災時の降雨量を示したものである。期間の最大時間雨量は82mm/h、連続雨量は347mmに達した。

この降雨により、対象となる線区の駅本体設備の被災をはじめ、踏切等の機械・電気設備の被災が多数発生している。また、軌道冠水による道床流失、氾濫水の越流による盛土の侵食・崩壊、土砂流入等の土砂災害が20件以上発生しており、全線開通まで約2ヵ月を要するほどの被害を受けた。

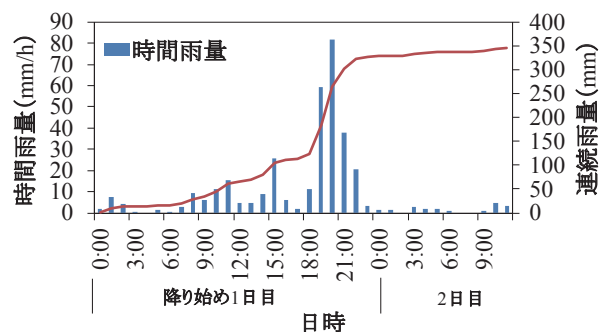


図1 被災時の降雨の状況

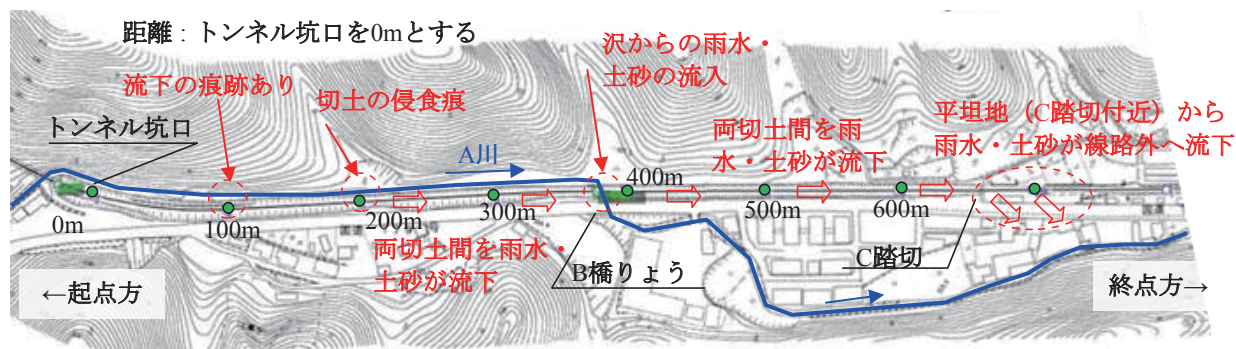


図2 被災状況の概略



図3 両切土区間とA川の概況（終点方より望む）



図4 両切土区間を流下する雨水（被災直後）



図5 線路外へ流下する雨水（被災直後）

推定される被災状況は以下のとおりである。大雨により増水したA川に対し、2つの沢から大量の雨水と土砂が同河川に流入した。その結果、坑口から100mおよび200m付近でA川が氾濫し、雨水が線路側に流入した。なお、100m付近の切土斜面には草本の倒れこみなどの氾濫水が流下した痕跡が、200m付近では切土のり面の侵食が確認されている。また、B橋りょう付近の沢からも同様に雨水と土砂が流入し、同橋りょう付近からも大量の水が線路に流入した。これらの線路へ流入した雨水は下り勾配の軌道に沿って終点方に流下し（図4）、坑口から約660mに位置するC踏切付近よりやや終点方の平坦地形を呈する路盤を侵食し、さらに線路外側の道路へ流下した（図5）。

2.2 再現シミュレーション対象エリアと被災状況

上述の被災事象が発生した線区のうち、山間地において線路と小河川が隣接する延長約800mの区間で発生した土砂流入および軌道冠水事例を対象として、流出・氾濫解析による再現シミュレーションを実施した。

図2に、当該個所の線路平面図と被災状況の概略を示す。当該箇所は、トンネル坑口付近から約600mの区間が両切土区間であり（図3）、その終点方の一部は平坦な地盤となった後、高さ1～2m程度の盛土区間へと続く。線路勾配は終点方に向かって下り勾配である。また、切土区間における線路の左側には最大流路幅3m程度の小河川であるA川が線路と平行に走っており、トンネルから380m付近にあるボックスカルバート形式の橋りょう（以下、B橋りょう）で線路下部を横断している。

これらの氾濫現象を厳密に再現するためには、土砂発生を考慮する必要があるが、土砂発生を精緻に再現可能な解析手法は確立されていない。そこで本検討では、数値地形上を流れる雨水のみを考慮した流出・氾濫解析を行う。

3. 解析に用いる数値標高モデルの作成

3.1 数値標高モデル取得手法の選定

線路冠水を再現するための流出・氾濫シミュレーションを実施するにあたり、解析の土台となる数値標高モデルを作成する必要がある。現在では、国土地理院により50mメッシュの数値標高モデルが日本全国で整備されて

おり、大河川の氾濫シミュレーションなどではこれらのデータを用いることが多い。一方、鉄道沿線を対象としたマイクロなスケールにおいて氾濫現象を再現するためには、盛土、切土および周辺の構造条件が再現できるスケールの地形データが必要となる。最近では、航空レーザー測量のようにメッシュサイズ 1m 以下の詳細な数値標高モデルが取得できるようになってきているが、膨大な線路延長に対して航空レーザー測量を実施することは、経済性、実効性の観点から困難である。そこで本研究では、比較的簡易な手法で詳細な数値標高モデルを取得することを主眼に置き、線路沿線に沿って撮影された航空写真を用いた航空写真測量により数値標高モデルを作成することとした。数値標高モデルを作成する範囲は、2.2 節で述べた区間を含む約 1km² の範囲とし（図 6）、現地の地形状況を考慮して数値標高モデルのメッシュサイズは 1m とした。

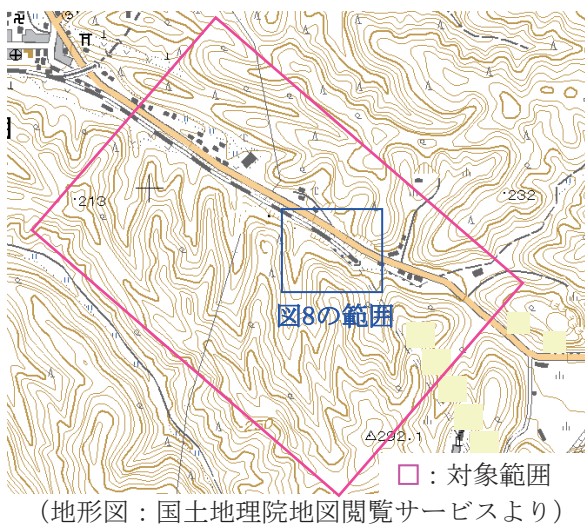
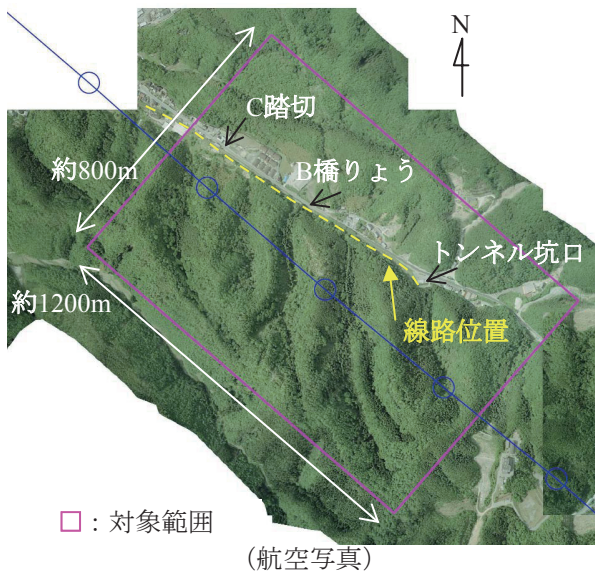


図 6 数値標高モデル作成の対象範囲

3.2 航空写真測量による数値標高モデル作成手法

3.2.1 航空写真測量の概要

航空写真測量とは、複数の位置から撮影された航空写真から共線条件の原理により対象物の三次元座標を算出しデジタル数値図化を行うものであり、航空写真撮影位置の三次元情報、焦点距離、航空機のロール角、ピッチ角、ヨー角等のデータを基に任意の地上対象物の座標を求める手法である。このとき、数値図化された各標高点の座標位置はランダムな点の集合であるが、この座標点から任意の格子点状の座標に数値変換することで、数値標高モデルを作成する。

3.2.2 現地調査による地形情報の補完

航空写真測量だけでは、樹木や建造物等により遮蔽された空間の座標を得ることができない。そこで、遮蔽点となる点については、地上部に任意の基準点を置き、トータルステーションにより遮蔽部の座標位置を計測し、上述の数値標高モデルを補完した。図 7 に数値標高モデル作成のイメージ図を示す。また、図 8 に航空写真測量により作成した数値標高モデルの一部を示す。

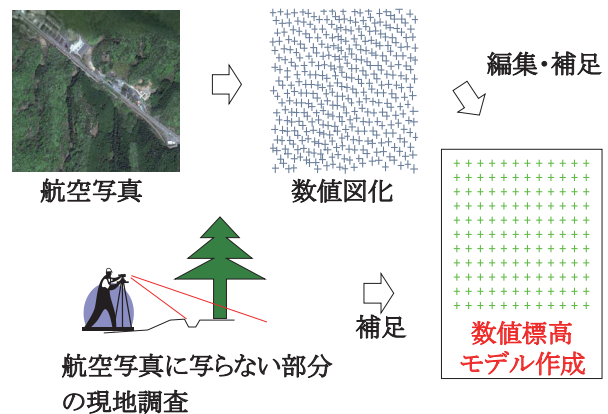


図 7 数値標高モデル作成のイメージ図

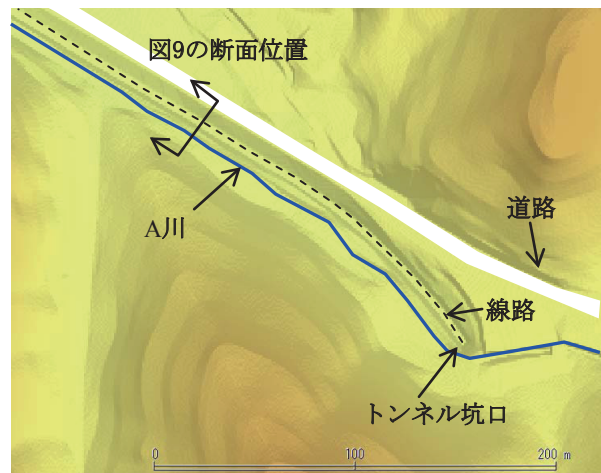


図 8 作成した数値標高モデルの一部
(トンネル坑口付近)

特集：防災技術

3.2.3 流出シミュレーションへの適用

A川からの氾濫現象を再現するためには河川の断面データが必要となる。ここでは、現地調査により、河川縦断方向に代表的な河川横断面を計測し、各断面間は線形補完することで連続的な河川モデルを再現した。図9は、航空写真測量により得られた数値標高モデル上に、上述の河川断面を重ね合わせたものの一例である。図には、比較のため、現地調査により得られた断面概略図を示す。なお、航空写真が入手できなかった上述の領域（約1km²）の範囲外の数値標高については、国土地理院による50mメッシュサイズの数値標高モデルを用いている。

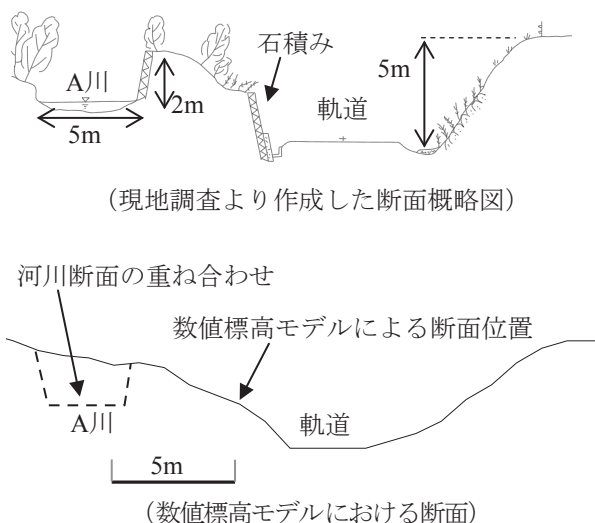


図9 断面の一例（トンネル坑口より150m付近）

4. 被災事例再現のための流出・氾濫シミュレーション

4.1 流出・氾濫シミュレーション手法の概要

3章で述べたA川の河川モデルを有する数値標高モデルを流れの土台として用い、外力として被災時の降雨を入力する。流出解析では、地形解析により落水線を自動生成し、この落水線網に沿った雨水の流れを分布型流出モデル（Kinematic wave法）により数値的に算出することで雨水の移動を表現している。分布型流出モデルのメリットとして、雨水の流れを力学的に追跡できる点が挙げられる。また、地形条件を解析に取り入れることや、降雨の空間的な分布を考慮した解析が可能となる。

本検討では、分布型流出モデルの一つとして、地盤を三層構造にモデル化した手法³⁾を用いている。このモデルでは、地盤を図10に示すような毛管移動水の流れの場である毛管空隙部（不飽和層）と、重力水が発生する大空隙部（飽和層）および地表層の三層に分割することで、流出モデルにおける各層の流量と水深を(1)式として整理している。これらの関係式と、(2)式の流れの連続式とを組み合わせて雨水の流れを再現する。

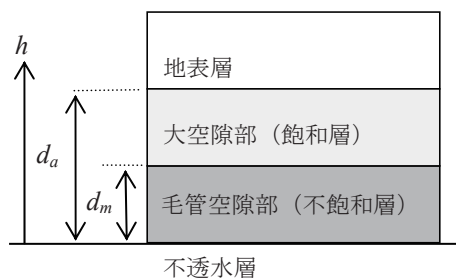


図10 地盤の三層モデルの概念図³⁾

$$q(h) = \begin{cases} v_m d_m \left(\frac{h}{d_m}\right)^\beta, & 0 \leq h < d_m \\ v_m d_m + v_a (h - d_m), & d_m \leq h < d_a \\ v_m d_m + v_a (h - d_m) + \sqrt{i/n} (h - d_a)^m, & d_a \leq h \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (2)$$

ここで、 d_m ：不飽和層の層厚、 d_a ：飽和層の層厚、 v_m ：不飽和層の平均流速、 v_a ：飽和層の平均流速、 i ：斜面勾配、 n ：地表層の粗度係数、 m ：定数、 q ：単位幅流量、 x ：斜面上端からの距離、 r ：雨量、 β ：飽和層と不飽和層との透水係数比、 h ：水深である。このモデルの解析パラメータは、 d_m 、 d_a 、 n 、飽和層における透水係数 $k_a (=v_a/i)$ 、 β の5変量となる。

上述の手法で算出された雨水はA川に流れ込み、一次元不定流として下流方に流下する。このとき、各河川の横断位置において流下させることのできる限界流量を超えた場合に氾濫が発生する。氾濫した雨水は二次元不定流解析によって地表面を流下する⁴⁾。これら一連の解析を実施することで、降雨時の河川の氾濫ならびに氾濫水の挙動を再現することができる。

4.2 解析条件

本検討では、前節で述べた三層モデルのパラメータを変化させた3ケースについて流出・氾濫解析を実施した。実施した解析条件を表1に示す。外力は、災害発生時の降り始めからの雨量として、レーダーアメダス解析雨量（空間分解能1km）による降雨量をA川流域に面的に与えている。

解析ケースIでは、既往の降雨流出解析事例のパラメータを採用した。これは、今回外力として用いた降雨により同時期に氾濫被害が発生したA川の下流域において実測されたハイトグラフおよびハイドログラフに対し、ピーク流量ならびに流量の増加傾向がフィッティングするよう各パラメータを逆算して求めたものである。解析ケースIでは、不飽和層の層厚 d_m を0としているのが特徴である。解析ケースIIは、ケースIで対象としたA川下流域における氾濫事象とほぼ同規模の氾濫が発生した平成16年福井豪雨における足羽川流域に

対し、同様の手法により算出されたパラメータ⁵⁾を用いたものである。

解析ケース III については、三層モデルにおける飽和層・不飽和層を無くして降雨は全て地表層を流下することとし、地表層の粗度係数のみケース I と同様の値としている。いわゆるゲリラ豪雨と呼ばれるような短時間集中豪雨が植生に覆われた斜面中に降った場合には、降雨量の大半は地盤に浸透することなく流出することも考えられる。そこで、地盤への浸透を無視する設定とすることで、他の解析ケースよりも短期間で大量の雨水が地表を流下することを期待したものである。また、このような設定により、鉄道施設への影響評価として最も安全側の評価となることを考慮した。

氾濫水の挙動を追跡する二次元不定流計算における氾濫粗度については、岩佐らの係数⁶⁾を参考に、いずれの解析ケースにおいても山林を想定した 0.06 を与えた。

表 1 解析条件一覧

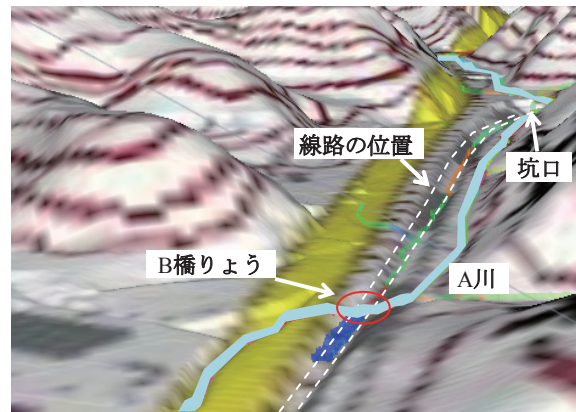
パラメータ	解析ケース		
	I	II	III
n ($m^{-1/3}s$)	0.3	0.4	0.3
k_a (m/s)	0.015	0.01	—
d_a (m)	0.4	0.26	—
d_m (m)	0	016	—
β	—	4	—
外力	被災時降雨 (図 1 参照)		
氾濫粗度 ($m^{-1/3}s$)	0.06		
流域面積 (km^2)	1.27		
解析地形	1m × 1m		

4.3 解析結果

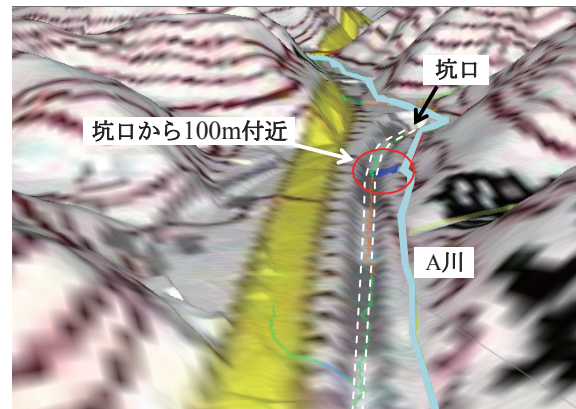
4.3.1 氾濫現象の再現性

図 11 は、再現シミュレーション結果から得られたケース I の代表的な氾濫事象を示したものである。その結果、(1) B 橋りょう付近からの氾濫、(2) 坑口から 100m 付近における A 川からの氾濫、(3) 同様に坑口から 200m 付近における A 川から氾濫、(4) 線路を流下した氾濫水が平坦地の C 踏切付近から線路外に拡散、の順で発生している。また、いずれの解析ケースでも発生事象の時系列的な順序は同様の結果となった。

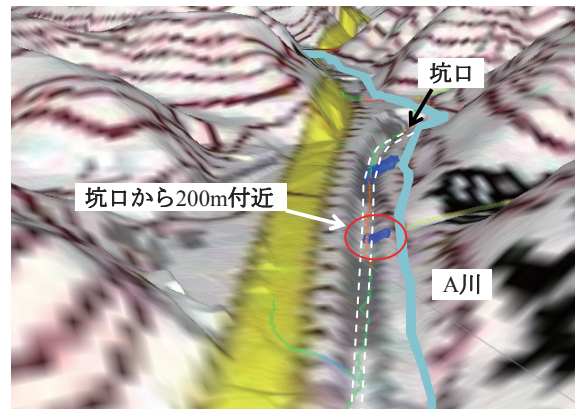
また、これらの氾濫現象は 2.2 節で述べた被災当時の推定状況と矛盾はなく、坑口から 100m 付近および 200m 付近からの氾濫の状況および C 踏切付近における線路外への流下状況も、その後の現地調査や図 4、図 5 に示したような被災後の痕跡と比較するとほぼ一致する結果となった。ただし、実現象において (1) から (4) の事象がどのような順序で発生したかは厳密には不明である。



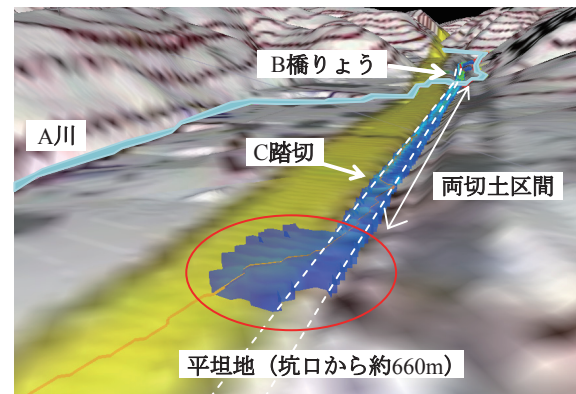
(1) B橋りょう付近からの氾濫



(2) 坑口から100m付近におけるA川からの氾濫



(3) 坑口から200m付近におけるA川からの氾濫



(4) 線路を流下した氾濫水が平坦地のC踏切付近から線路外に拡散

図 11 代表的な氾濫事象 (解析ケース I)

特集：防災技術

再現シミュレーションにより得られた期間中の最大水深は、B 橋りょう付近より坑口側の両切土区間で最大 1.5m、平坦地に位置する C 踏切付近で最大 0.5m 程度となり、被災後の浸水痕跡等と比較しても乖離は小さいものと考えられる。

4.3.2 氾濫規模と各氾濫事象の発生時刻

表 2 に、各解析ケースの氾濫規模の比較として期間中の A 川への流入・流出量を示す。表から、単位時間当たりの流出量の最大値に若干の差があるものの、総流出量および流入量については地盤への浸透を考慮しないケース III を含むいずれのケースでもほぼ同様の結果となった。また、表 3 には、前項で述べた各氾濫事象の発生時刻を比較したものを示す。表から、地盤への浸透を考慮しないケース III については他のケースよりも早く発生しており、パラメータ設定時の想定と合致する結果となっている。しかしながら、その差最大 1～2 分程度とわずかであり、再現シミュレーションとしてはいずれの解析ケースでもほぼ同時刻に各氾濫事象が発生していると言ってよい。

なお、今回の災害事象では、C 踏切において器具箱の浸水により信号が途絶した時刻、すなわち故障検知時刻が 20 時 19 分と記録されている。踏切付近からの線路外への拡散は再現シミュレーションによれば 20 時 11 分ごろから発生している。再現シミュレーション結果と最

大 8 分の誤差があるものの、踏切故障検知時刻と再現シミュレーションにおける氾濫事象の発生時刻は、ほぼ一致する結果となった。

以上のことから、今回設定した解析条件では、地盤への浸透を全く考慮しない解析条件においても、再現シミュレーションにより実際の氾濫現象を概略的ではあるものの再現していることが分かった。

5. 結論

山間地における軌道冠水事例を対象に、航空写真測量により数値標高モデルを作成するとともに、分布型流出モデルおよび二次元不定流計算を適用した流出・氾濫解析による再現シミュレーションを行った。その結果、今回の被災対象事例では、地盤への浸透の有無によらず、氾濫の発生規模ならびに代表的な氾濫事象の発生時刻はほぼ一致する結果となった。また、実際の踏切故障検知時刻との比較からも、概略的ではあるが実際の氾濫現象を再現していることが確認できた。このことから、小河川流域において局所的な短時間強雨による氾濫現象を再現する場合には、表層流のみを考慮した流出・氾濫解析で再現可能であることが示唆される。

本検討で対象とした河川の氾濫現象は、一般的な大河川の氾濫現象と比較して非常に小さい地形スケールを対象とした解析である。そのため、今回設定した「地盤への浸透を考慮しない」という解析条件が、どの程度の規模の氾濫現象にまで適用可能かどうかは不明である。今後は、その適用性についての知見を得るため、氾濫事象の再現解析事例を蓄積していく予定である。また、伏び、線路側溝および横断開渠など、線路特有の排水構造が数値標高モデル上で再現できていないため、合わせて検討が必要である。

文 献

- 1) 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，2005
- 2) 気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- 3) 立川康人，永谷言，寶馨：飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発，水工学論文集，第 48 巻，pp.7-12，2004
- 4) 岩佐義明，井上和也，水鳥雅文：数値水理学，丸善，1995
- 5) 立川康人，田窪遼一，佐山敬洋，寶馨：平成 16 年福井豪雨における洪水流量の推定と中小河川流域の治水計画に関する考察，京都大学防災研究所年報，第 48 号 B，p.1-13，2005
- 6) 岩佐義明：氾濫水の水利の数値解析法，京都大学防災研究所年報，第 23 号 B-2，p.7，1980

表 2 A 川への流出・流入量の比較

各流量	解析ケース		
	I	II	III
流入量の最大値 (m ³ /s)	23.0	23.0	23.0
総流入量 (m ³)	386390	386449	387134
流出量の最大値 (m ³ /s)	2.1	1.9	2.1
総流出量 (m ³)	1410	1410	1565

表 3 代表的な氾濫事象の発生時刻

氾濫事象	発生時刻		
	ケース I	ケース II	ケース III
(1) B 橋りょう付近からの氾濫	19:28	19:30	19:28
(2) 坑口より 100m 付近からの氾濫	19:50	19:52	19:48
(3) 坑口より 200m 付近からの氾濫	20:02	20:03	20:02
(4) 平坦地付近での氾濫水の拡散	20:11	20:11	20:12
踏切故障の検知時刻	20:19		

※いずれも降り始め 1 日目の時刻