

# トンネル掘削に伴う流量影響評価への タンクモデル法の適応性の検討

中村河川国道事務所 工務第二課 有田 李呂  
中村河川国道事務所 工務第二課 課長 川田 和徳  
中村河川国道事務所 工務第二課 係長 谷田 雄麻

中村河川国道事務所管内の四万十町から黒潮町に至る道路改築事業区間はトンネルが連続する山岳道路であり、トンネル掘削に起因した表流水の減少や枯渇に伴う利水影響が懸念された。そこで、流出解析手法の1つであるタンクモデル法を用いて、施工前の降雨と河川流量観測データからトンネル掘削に伴う流量への影響評価を行った。タンクモデルの構造は、地山の水理地質構成を反映した直列3段、各タンクの側方と底にそれぞれ1つの流出・浸透孔をもつモデルとした。解析の結果、流量の減少、枯渇を可視化し、工事影響の有無定量的に評価することができた。施工前の水文観測データに基づいたタンクモデルを工事前に構築することにより、施工時における流量影響を簡便に評価することができる。

キーワード トンネル掘削、流量影響評価、タンクモデル、地山の水理地質構成、直列3段

## 1. はじめに

トンネルや大規模切土の施工によって、地下水、地表水の水ミチが変化し、その結果、井戸水の水位低下や沢水の流量が減少あるいは枯渇する恐れがある。これらの水源は、生活用水や農業用水として利用されている場合があることから、水源が枯渇するなどの変化が発生した場合に、工事との因果関係を明らかにする必要がある。また、工事影響に対しては速やかな対応が求められる。

流域に降った雨量を基に沢水の流量を推定する解析手法として流出解析がある。本稿では、トンネル掘削が行われている当事務所の道路改築事業区間において、簡便かつ定量的に流量変化を評価できる流出解析の1つであるタンクモデル法を用いて工事の影響を評価した事例について報告する。

## 2. 対象箇所の概要

当事務所管内の四万十町から黒潮町に至る道路改築事業は全9箇所のトンネル区間がある。このうち、タンクモデル法による流出解析を行った箇所は、解析時に掘削完了した1トンネル、施工中の2トンネル、掘削着手前の3トンネルの計6トンネルに係る利水箇所において実施した。

解析対象箇所の水文データは、箇所により異なるが7年間分から9年間分の工事着手前水文データが取得されている。

## 3. 解析方法

### (1) 解析手法

流出解析は古くから研究が盛んに行われ、現在では条件・用途に応じて様々な手法が提案されている(図1)。本検討では、“施工中のトンネル掘削区間における利水影響の有無を簡便かつ定量的に評価・検証すること”を目的としている。そのため、これまでに蓄積された実測流量データを活用して現状の実測流出量を精度よく推定でき、工事影響の有無を迅速に評価することが可能な流出解析の研究で多くの実績があるタンクモデル法を用いた。

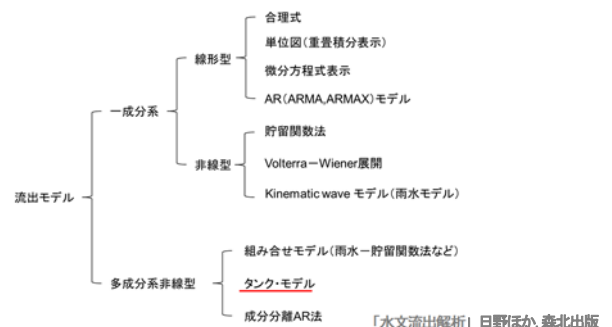


図1 種々の流出モデルの分類

「水文流出解析」日野ほか、森北出版

## (2) 水理地質構造の検討

タンクモデル法では、解析したい箇所の水理地質構造に応じてタンクの構造（直列や並列などの配置や孔の数、高さ）を設定する必要がある。本検討では、現地踏査において、検討箇所の観測点にあたる溪流で確認した地質状況をもとに、地山を構成する地層を3つに区分し、3段の各タンクの側方と底にそれぞれ1つの流出孔（3段×2孔＝計6孔の流出孔）をもつ直列3段のタンク構造を用いた（図2）。

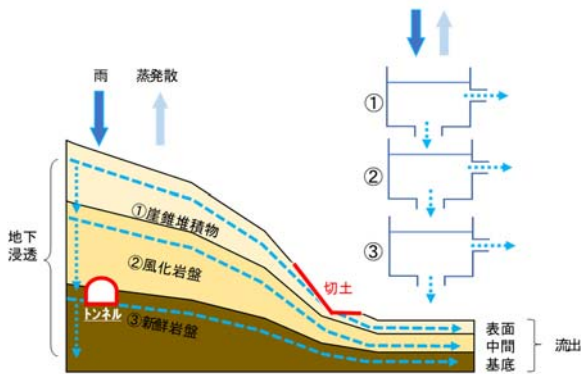


図2 タンクモデルの概念図

## (3) タンクモデル法

タンクモデル法は、水理地質構造を流出層毎の貯水タンクを繋げた構造に見立て、それぞれのタンクに流出と浸透を表現するための孔を設けることで、それを經由して流れ出る計算流量（モデル流量）を求める手法である。降雨が集水域へ浸透し、各流出層から流出する様子を表現する。図2のように、検討箇所の水理地質構造を反映したうえで解析を行うため、比較的イメージがつかみやすい手法である。

計算流量の算出は、タンクからの流出係数(a)、浸透係数(b)、流出孔高さ(h)、初期水位(S)の4つのパラメータをタンク3段分の計12個設定する必要がある。これらのパラメータは物理的根拠を明確に持たない値であるため、タンクモデル法でのパラメータ決定の際の課題とされている。そこで、本検討では、以下に詳述するExcelのソルバー機能を活用してパラメータの最適解を求めることとした。

## (4) ソルバー機能

ソルバー機能とは、計算結果となる目的の値(A)を先に指定し、その結果を得るために制約条件をいくつか設け、変数となる値(B)を変化させることで最適値(B')を導く機能である。ただし、最適解は一つとは限らず、設定するパラメータの値によっては何通りもの解が得られるため、今回の検証では、水理地質構造上整合的と考えられる下記の条件1)~3)を反映した値となるように解析を行った。

条件1) 上位のタンクほど流出・浸透係数が大きい

(崖壁・風化岩においては、新鮮岩ほど水の貯留能力がないため、流出・浸透が卓越している)

条件2) 流出・浸透係数の値は1を超えない

(貯留量以上の排水や逆流はない)

条件3) 枯渇のみられる箇所は伏流していると解釈し、

最下段タンクの浸透係数を大きく設定する

(上のタンクほど雨を反映し、下のタンクほど残留した流量を反映するため、溜水や枯渇している状態の流量は、計算上3段目の浸透係数が大きく関わる)

## (5) 解析手順

解析手順は以下のとおりである（図3）。

手順① 入力データとして、実測流量（水文データ）、降雨量（気象庁の公開データ）、蒸発散量（気象庁公開の気温データを用いて計算）、流域面積（地理院地図から算出）を収集、準備する。

手順② タンク3段分の流出孔係数(a)、浸透孔係数(b)、流出孔高さ(h)、初期水位(S)の12個のパラメータの初期値を適当に手入力する。

手順③ ソルバー機能を用いて手順②で入力したパラメータの初期値からモデル流量を算出する。このとき、モデル作成期間内の実測流量とモデル流量との差が最小になるような計算パラメータが求まる制約条件を設定する。

手順④ 計算結果（グラフ）を確認し、その際、実測流量とモデル流量との平均絶対誤差が50%以上であれば、再度手順②に戻り、パラメータを修正する。50%未満であれば計算終了とした。なお、手順②~④を繰り返しても計算が収束しない（実測流量とモデル流量との差が50%以上）箇所については、高水時を除いた場合の相関係数が0.7以上であれば計算終了とした。

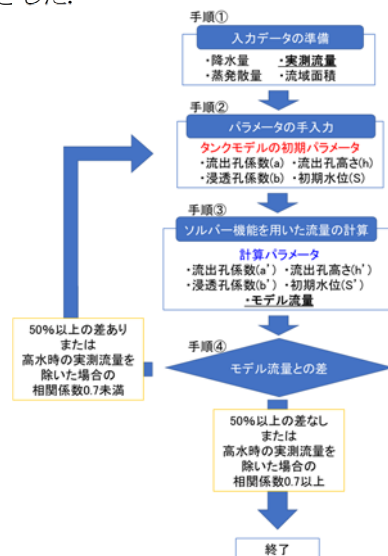


図3 解析手順

## 4. 解析結果事例

本発表では、トンネル掘削による減水・渇水が確認された「Aトンネル 水田-4」と「Bトンネル 沢2-3」の2箇所の解析結果と工事影響評価の事例を示す。それぞれの箇所は Aトンネル（解析時に掘削完了）とBトンネル（施工中）の施工に伴い工事影響が発現したと評価した事例である。以下にそれぞれの解析結果を述べる。

### (1) Aトンネル(解析時に掘削完了)のAトンネル 水田-4

#### (a) 水源とトンネル掘削の関係

沢水を水源とするAトンネル 水田-4は、その集水域の大部分がAトンネルの渇水影響範囲と重複している（図4）。渇水影響範囲とは、工事前に流水のあった場所でトンネル掘削が進行し、沢水がトンネル側に引き込まれることにより、流量が減衰・枯渇する恐れがあると想定される範囲のことである。Aトンネルは、R2.6月より施工が開始し、R3.3月に貫通した。

#### (b) 流出解析結果

解析の結果、図5の青破線枠で示す解析パラメータ決定の際に採用した工事前の実測流量の観測期間（モデル作成期間）において、実測流量とモデル流量が概ね整合的な値であり、計算パラメータの設定が適切であることが分かる。また、洪水の影響等による大幅な流量上昇を観測した時期においては、モデル流量から乖離する結果となった。図5の赤実線枠で示すトンネル掘削開始以降の期間（検証期間）では、実測流量の多くがモデル流量より少ない流量となった。

次に、掘削開始以降の検証期間における実測流量とモデル流量の詳細を図6に示す。掘削開始（R2.6月）～掘削完了（R3.3月）までの期間は、①の12月と2月の渇水期に流量の枯渇が見られた。他の観測月では、実測流量とモデル流量は概ね同様の値を示した。工事前の渇水期において流量の枯渇は無く、少雨の影響だけでなくトンネル掘削の影響による渇水と判断される。掘削完了（R3.3月）以降～R3.8月の期間では、実測流量がモデル流量の約1/10の少ない流量（②）がみられ、工事前のR2.4月と6月の実測流量と比較しても明らかに低下していることを示す。この期間においてもトンネル掘削により、水源の減水が発生したと判断される。R3.9月以降の③の期間では、例年よりも降雨が少なく、これに連動してモデル流量は低下したが、実測流量はすべて枯渇という結果であった。この期間においてもトンネル掘削による影響を明らかに受けていると判断される。

### (c) 流量影響評価

Aトンネル 水田-4では、トンネル掘削中に流量の枯渇が確認され、トンネル掘削後のR3.4月と6月にもモデル流量より実測流量が少ない減水が確認された。また、R3.9月以降においても流量の枯渇が確認された。そのため、トンネル掘削によりAトンネル 水田-4の水源が減水・枯渇したと判断される。

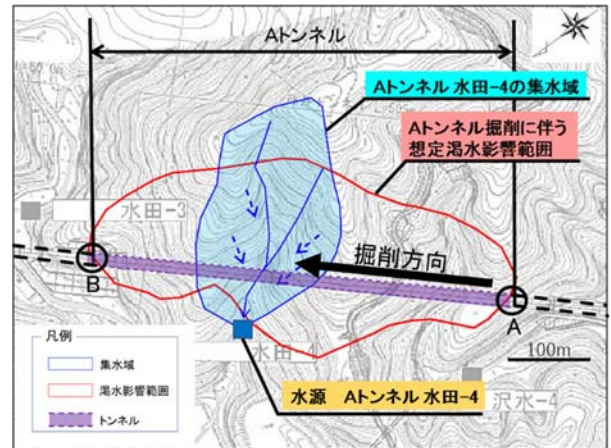


図4 Aトンネルと流量影響評価対象

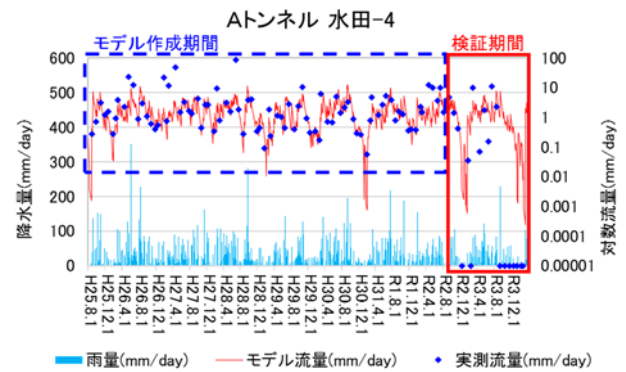


図5 Aトンネル 水田-4の実測流量と解析結果のグラフ

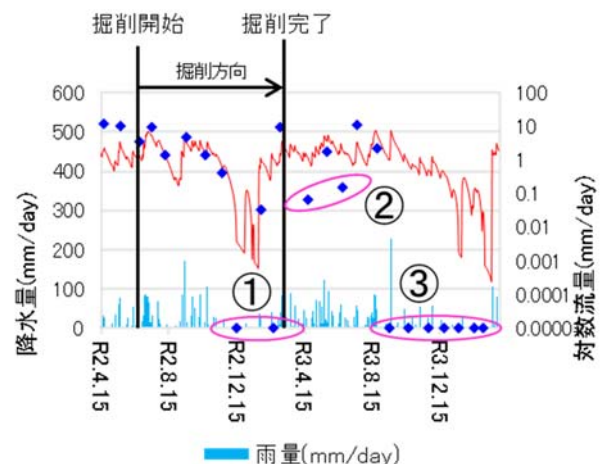


図6 Aトンネル掘削期間における流量影響評価図

## (2) Bトンネル(施工中)のBトンネル 沢2-3

### (a)水源とトンネル掘削の関係

沢水を水源とするBトンネル 沢2-3は、集水域の大部分がBトンネルの湧水影響範囲と重複している(図7)。Bトンネルは、R3.9月より施工が開始し、現在もトンネル掘削が進行中である。

### (b)流出解析結果

工事前の実測流量の観測期間(モデル作成期間)は、実測流量とモデル流量が概ね整合的であり、計算パラメータの設定が適切であると判断されること、洪水の影響等による大幅な流量上昇を観測した時期においては、モデル流量から乖離すること、さらにトンネル掘削開始以降の期間(検証期間)では実測流量はモデル流量より少ない流量であり、Aトンネル 水田-4と同様傾向の結果が得られた(図8)。

掘削開始以前の約3年間(H31.12月～)および検証期間の実測流量とモデル流量の詳細を図9に示す。掘削開始(R3.8月)以前の工事前の期間では、湧水期に流量の枯渇または減水が観測されており(④)、Bトンネル 沢2-3は工事の影響に関わらず少雨の影響を強く受ける水源であると判断される。掘削開始(R3.8月)～集水域到達(R4.2月)までの期間は、実測流量とモデル流量に明瞭な差はみられない。集水域到達以降は、例年よりも降雨が少なく、3月以降のモデル流量は上昇傾向を示しているのに対し、実測流量は枯渇(⑤)という結果でモデル流量より大きく乖離した結果であった。

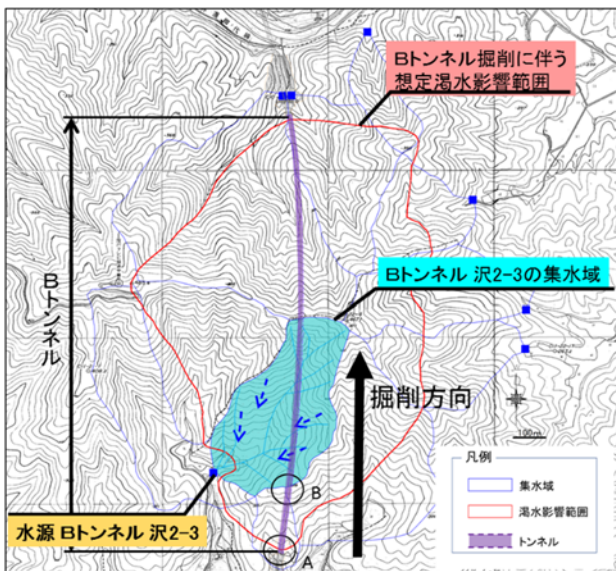


図7 Bトンネルと流量影響評価対象

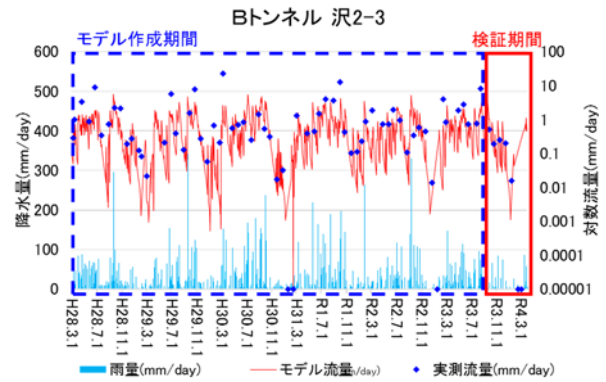


図8 Bトンネル 沢2-3の実測流量と解析結果のグラフ

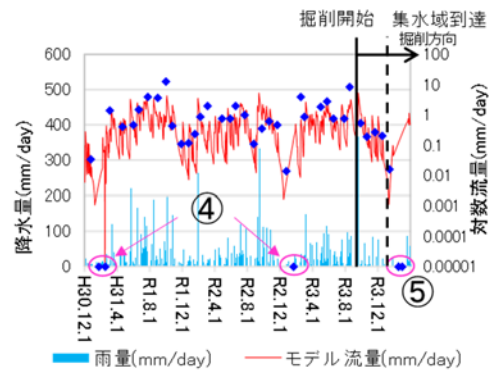


図9 Bトンネル掘削期間における流量影響評価図

### (c)流量影響評価

Bトンネル 沢2-3では、トンネルの切羽が集水域に到達した後の観測月において流量の枯渇が確認された。当該月は湧水期であり、工事前の湧水期(④)との明らかな流量変動の差異は見られないが、例年3月の実測流量が豊富であるのに対し、掘削開始のR3.9月以降において3月観測流量で初めて枯渇を確認した。そのため、今後Bトンネル 沢2-3の水源は減水・枯渇となる可能性がある判断される。

## 5. おわりに

Aトンネルの掘削に係るAトンネル 水田-4の水源において、実測流量とモデル流量との差が明瞭であり、工事影響の発現を定量的に評価した。タンクモデル法を用いた流出解析は、当該区間と同様の水理地質特性をもつ集水域に対し、トンネル掘削による流量影響の評価手法として適応性があるといえる。採用する水文データの量と質、水理地質的な情報を忠実に解析に取り込めば、一定の精度をもった工事影響評価が可能となる有効な手法である。今後、本検討で構築した各トンネルのタンクモデルのパラメータを基に定期的に流出解析、影響評価を行い、水源の減水、枯渇に伴う対応を迅速に行うことに繋げていきたい。