

GIS を用いたトンネル湧水濁水予測システムの開発

—トンネル掘削による周辺水環境への影響予測を短時間で出力—

文村 賢一・下茂 道人*¹

Keywords : Tunnel Water Inflow, Environmental Impact, Topography, River Flowrate, GIS, DEM

トンネル湧水, 環境影響, 地形, 河川流量, GIS, DEM

1. はじめに

近年、環境保全への関心の高まりとともに、トンネル掘削による周辺環境へ影響が問題とされるケースが増えつつある。中でも、トンネル掘削による湧水は、周辺井戸の枯渇や河川流量の減少などの周辺水環境へ悪影響を及ぼす要因となる場合がある。また、施工者側にとっても、排水処理施設の計画、地山止水対策工の検討などの観点から、トンネルへの湧水量の予測が重要である。

トンネル掘削に伴う湧水量や周辺水環境への影響を予測する場合、従来は数値解析等に代表される手法や後述する高橋の方法に代表される地形解析等による手法を用いてアプローチすることが一般的であるが、多大な労力や専門知識を要する。このため、地下水問題が特に重要視されているトンネル以外では、トンネル掘削に伴う湧水量や周辺環境への影響を定量的に予測評価することは少ないのが現状である。

そこで筆者らは、トンネル掘削に伴う恒常湧水量および周辺地盤で濁水の恐れのある範囲（湧水影響範囲）を簡易に短時間で予測することを目的としたシステムの開発を行った。

2. トンネル湧水簡易計算法^{1), 2)}

トンネル掘削に伴う恒常湧水量や湧水影響範囲の簡易予測手法として、鉄道技術研究所（現財団法人鉄道総合技術研究所）で開発された「高橋の方法」が一般的に用いられてきた。この方法は、「地表面の形は、巨視的にはある程度地下水の流動に関連して形成される」¹⁾ という考えに基づき、地形、トンネルルートおよび濁水比流

量（河川の濁水流量を流域面積で除したもの）から簡便に恒常湧水量と湧水影響範囲を予測することができ、多くのトンネルで用いられている。高橋の方法は以下の仮定を設けている¹⁾。

- (1) トンネルに流出する地下水は自由水面を有する。
- (2) 不透水層は、トンネルの掘削底面付近にあり水平である。
- (3) 左右の地下水面を分離して取り扱うことができる。
- (4) 平衡状態において成立するH-R関係の水平接点において、本来の地下水面は水平面である。
- (5) 地下水面は実用上、地表面の形に一致する。

高橋の方法では、トンネルへの恒常湧水量を次式により評価する。

$$Q = q \times A_t \quad (1)$$

Q : 恒常湧水量 (m³/s)
 q : 濁水比流量 (m³/s/km²)
 A_t : 湧水影響面積 (km²)

すなわち、恒常湧水量は、トンネルへの湧水による周辺地下水の影響面積に、濁水比流量を乗じて計算される。ここで、トンネルへの湧水による周辺地下水の影響面積は以下に述べる手順により求める。

トンネルを開渠として考えると、水理学的計算により、地山の平均的透水性を表す指標K_tとトンネル地下水面との標高差Hから、湧水影響範囲Rは、次式により与えられる¹⁾。

$$R = \sqrt{6K_t H} \quad (2)$$

地下水面形状が地形面と一致すると仮定すれば、Hは平均比高により評価できる。Rは次に述べるように、その河川の集水域の幅により近似的に求めるものとする。

図-1 のように、ある流域内の河川の流路長をL、流域面積をAとすると、平均集水域の幅 R_m は、次式で与

* 1 技術センター土木技術研究所岩盤研究室

えられる¹⁾。

$$2R_m = \frac{A}{L} \quad (3)$$

また、平均比高 H_m は次式で求める (図-2)。

$$H_m = \frac{1}{2}(H_L + H_R) \quad (4)$$

すると、(2)式から対象地山の平均透水性指標 K_t は、次式で計算される。

$$K_t = \frac{R_m^2}{6H_m} \quad (5)$$

ここで求めた透水性指標 K_t を対象流域に適用すると、湧水影響範囲 R は、(2)式により H の関数として与えられる。これを H - R 曲線と呼ぶ。図-3のように H - R 曲線を、トンネル断面に重ねたときの交点座標を求める。トンネルルート沿いの複数の位置で計算された交点座標から湧水影響面積 A_i が求められ、最終的に(1)式により、恒常湧水量が計算される。

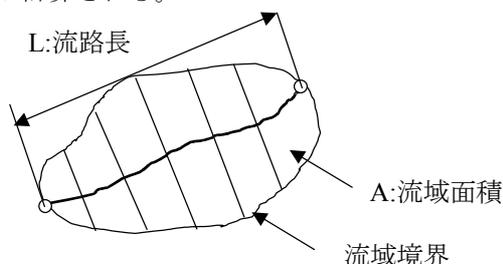


図-1 単位流域 (最小流域)
Unit Catchment Area (Minimum Catchment Area)

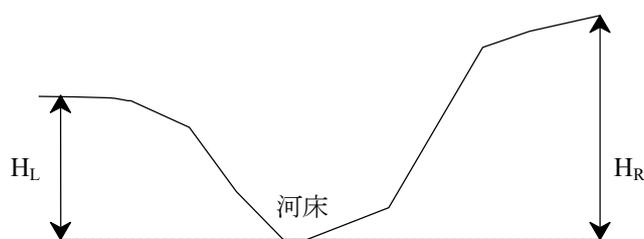


図-2 単位流域断面
Section of Unit Catchment Area

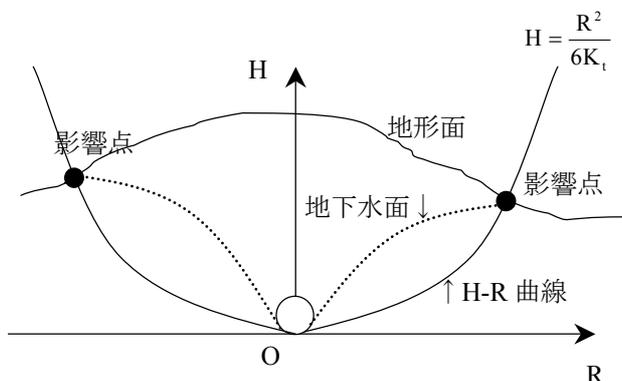


図-3 トンネル湧水影響範囲予測断面
Prediction of Influenced Area due to Tunnel Inflow

3. トンネル湧水濁水簡易予測システム

3.1 システムの概要

高橋の方法は計算自体は比較的単純であるが、流域 (分水嶺に囲まれた領域) の抽出をはじめとする地形解析作業には、地形学的知識と労力が必要である。また、解析者の主観によって、得られる解析結果にばらつきが生じる。

そこで、流域の抽出をはじめとする煩雑な作業を、GIS (地図情報システム) の地形解析機能を有効に活用することで、作業を半自動化し、迅速かつ客観的な評価を行うシステムを開発した。

本システムの入力項目を図-4に示す。数値地図、トンネルルート座標、濁水比流量の3つを入力すると、恒常湧水量、湧水影響範囲が計算される。

なお、本システムの動作環境として、基本OS : Windows2000またはXP、ならびにGISソフト : Arcview8.2 がインストールされているパーソナルコンピュータが必要である。

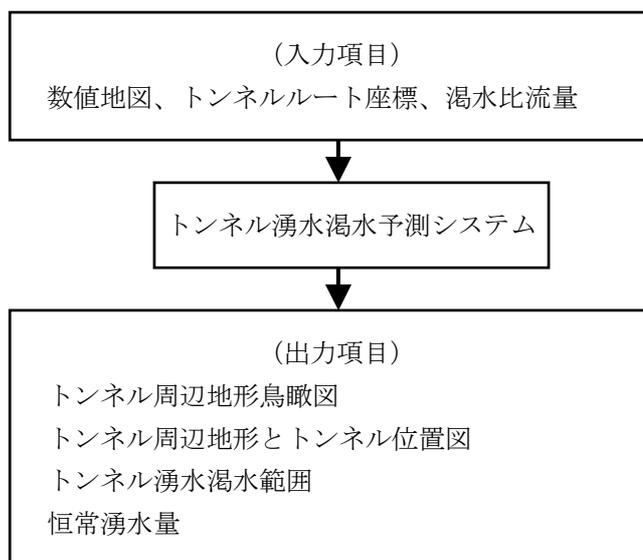


図-4 入力項目と出力項目
Input and Output Data

3.2 システムの操作手順

本システムの操作手順は、 H - R 曲線を求める部分とそれを基に恒常湧水量および湧水影響範囲を求める部分の大きく2つに分かれる。図-5に、システムの解析フローを示す。以下、このフローに従って具体的な操作手順を説明する。

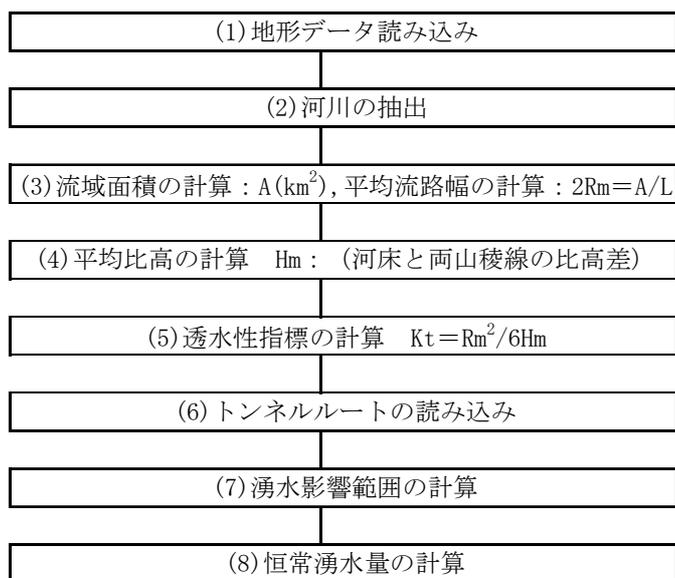


図-5 解析フロー

Flow Diagram of Analysis

①H-R 曲線の作成

(1) 地形データの読み込み

解析対象とする数値地図 (DEM : Digital Elevation Model) を読み込み、解析領域の地形面モデルを作成する (図-6)。本報では、国土地理院発行の50mメッシュ標高データを使用した。

(2) 河川の抽出³⁾

作成された地形面に対して、以下の手順で、河川要素を抽出する (図-7)。

(i) くぼ地の解消

上記(1)で作成された地形面は、ごく小規模なくぼ地 (周辺の地形面より低く、かつ小規模な領域) を含む場合がある。このような地点は、そこに流れこんだ水がどこにも流れなくなる。小規模なくぼ地が解析領域内に数多く存在すると、水系の抽出を行う際に正しい流域が得られない。このため地形面を平滑化し、小規模のくぼ地を埋める。

(ii) 水流方向の計算

地形面をユーザーが指定する大きさのセルに分割する。個々のセルに対して、周辺の8セルのうち、各方向の標高差を計算し、最大の標高差が生じる方向を水流方向とする。

(iii) 水系網の計算

個々のセルに対して、上流のすべてのセルから流れ込む水流の合計値を計算する。ほとんどのセルは、この合計値は小さな値となるが、支流がいくつも集まった本流に属するセルは、非常に大きな値となる。

(iv) 最小流域に分割

透水性指標の計算を行うために、解析領域を最小流域に分割する。最小流域の大きさは、ユーザーが与える水流の最大合計値と同じ水流合計値を持つセルを流出点とし、そのセルの上流すべてのセルを流域として抽出する。

(v) 河川の抽出
個々のセルに対して、水流の合計値が別途ユーザーが設定した値以上の値のセルを河川として抽出する。

(3) 流域面積、平均流路幅の計算

上記(2)で抽出した流域面積は、その流域内に含まれるセルの数から計算される。また、河川の上下流の2端点を選択することにより流路長が計算される。流域面積と流路長から(3)式を用いて平均流路幅を求める。以上の操作をトンネルルート沿いの複数の流域について行う。得られた結果は画面上に一覧表で表示される (図-8)。

(4) 平均比高の計算

上記(3)で得られた流域を流路の横断方向にユーザーが指定する数に等分割する。分割した各断面について、河床から左岸、右岸の山稜線との標高差を取得し、その平均値である平均比高を(4)式を用いて求める (図-9)。

各断面ごとの平均比高の平均値から流域の平均比高が自動的に計算され、画面上に一覧表が表示される。

(5) 透水性指標の計算

平均比高、平均流路幅から(5)式を用いて流域の代表的な透水性指標を求める。計算結果とともにH-R曲線が画面上に表示される (図-10)。

②トンネル湧水湧水予測解析

上記①で求めた H-R 曲線から恒常湧水量を計算する。

(6) トンネルルートを読み込み

トンネル座標 (X,Y,Z) が記入されたテキストファイルを読み込み、画面上にトンネルルートを表示する (図-11)。

(7) 湧水影響範囲の計算

トンネルをユーザーが指定する複数断面に等分割する。分割した断面において、H-R 曲線と地形断面を重ねて描画し、地表面と H-R 曲線の交点 (影響点) を求める (図-12)。各断面における影響点をつなげることにより湧水湧水影響範囲を求める (図-3 参照)。

湧水湧水影響範囲は、地形面、トンネルルートと共に画面上に重ねて表示される。

(8) 恒常湧水量の計算

既往の調査結果等に基づき、湧水比流量を入力し、(7)で求めた湧水影響範囲を用いて、(1)式から恒常湧水量を自動的に計算する。結果が画面上に一覧表で示される (図-13)。

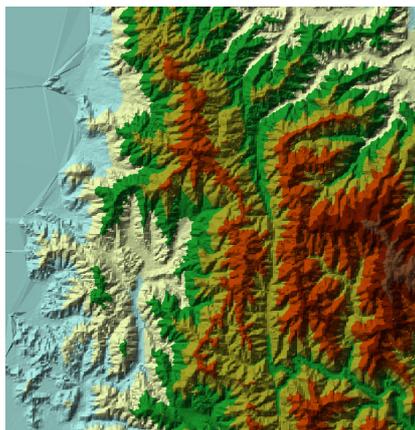


図-6 地形データの読み込み
Digital Elevation Model Data

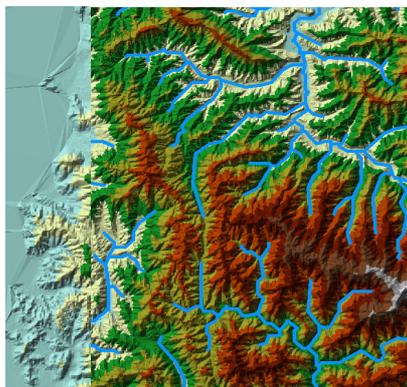


図-7 河川の抽出

Stream Definition



図-8 流域面積、平均流路幅の計算

Calculation of Area of Catchment and Average Stream Width

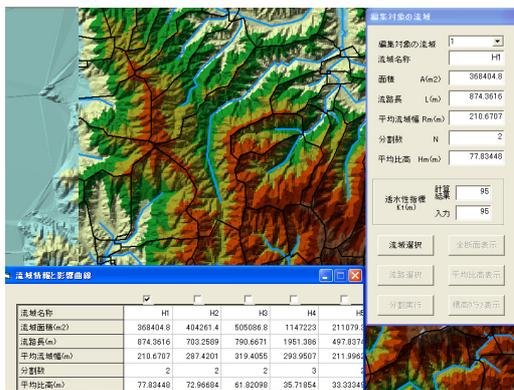


図-9 平均比高の計算

Calculation of Average Ratio of Ridge Height and Width



図-10 透水性指標 (H-R曲線) の計算

Calculation of Permeability Index (H-R Curve)

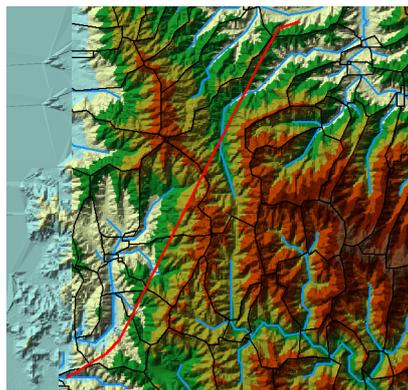


図-11 トンネルルートを読み込み

Tunnel Route Definition

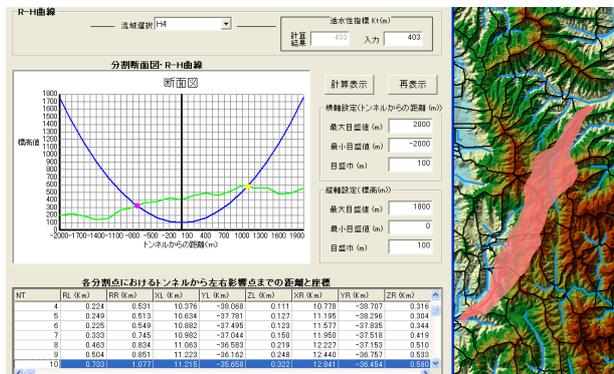


図-12 湧水影響範囲の計算

Automated Detection of Influenced Area

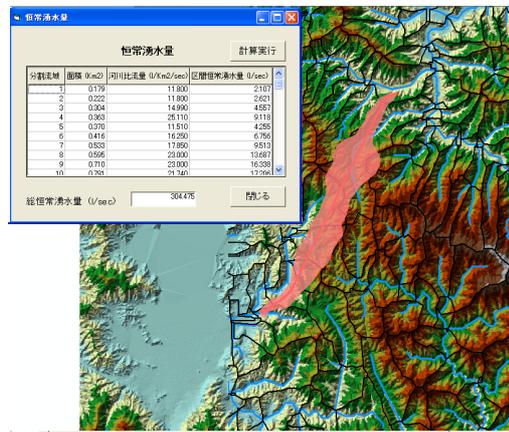


図-13 恒常湧水量の計算

Calculation of Inflow Rate

4. システムの検証

高橋¹⁾は、北陸トンネルを対象とした湧水量予測を行い、観測値と比較した結果を報告している。

本システムの検証を目的として、同トンネルに対して、上記論文に示された結果との比較を行った。

北陸トンネルは、福井県敦賀市谷口より、南条郡今庄町下新道に至る、延長 13.83km の鉄道複線トンネルである。地質は、ほぼ中央 2km に花崗岩類が分布する他は、チャート、粘板岩、砂岩の互層からなる。地形は、河川本流沿いに側方浸食による比較的広い涵養地とともにその中に蛇行帯を有し、支流または、支谷が発達している。

4.1 トンネル湧水影響範囲

図-14 にトンネル周辺地形と本システムによる湧水影響範囲（朱色部分）、高橋による湧水影響範囲（黄破線）を示す。この図から、本システムによる湧水影響範囲は、高橋による湧水影響範囲とほぼ同様な計算結果が得られた。

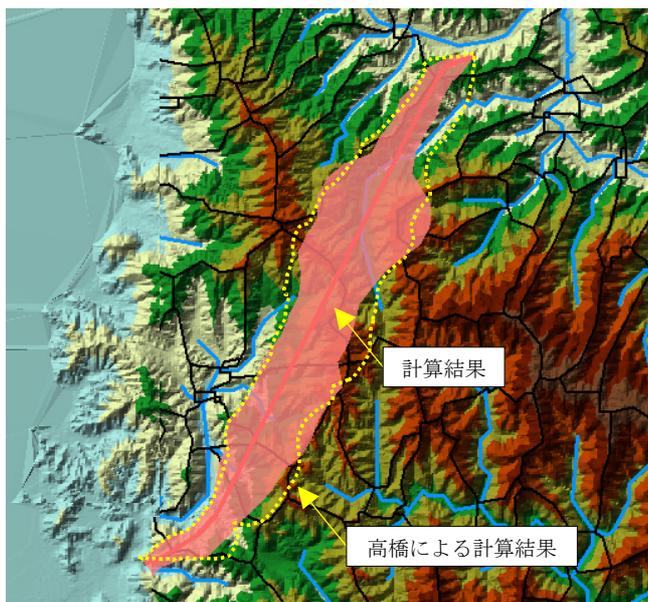


図-14 湧水影響範囲の計算結果
Predicted Influenced Area due to Tunnel Inflow

4.2 恒常湧水量

トンネル掘削に伴う恒常湧水量について、表-1 に、観測値、高橋による予測値、本システムによる予測値を示す。本システムを用いた計算結果は、観測結果や、高橋らの計算結果と整合的あることが分かる。

図-15 は、敦賀方坑口からの距離 (km) と恒常湧水量 (m³/min)、区間湧水量 (m³/min/100m) の関係について、本システムによる計算結果と高橋による計算結果を示し

ている。本システムによる計算結果は、高橋の計算結果によく整合している。

以上から、本システムにより信頼性の高い予測結果が得られることが示された。

表-1 恒常湧水量計算結果

Steady State Water Inflow Rate	
観測値	16.8 m ³ /min
高橋による予測値	20.3 m ³ /min
本システムを用いた予測値	18.3 m ³ /min

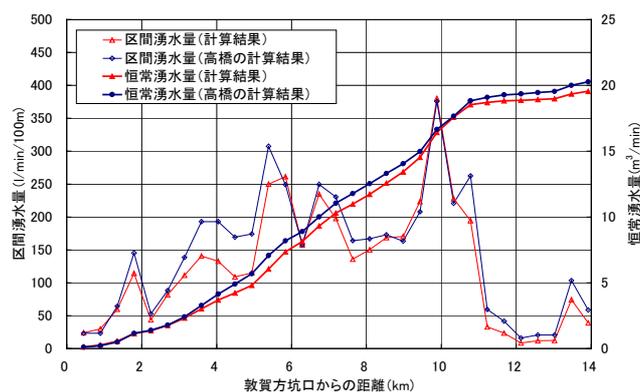


図-15 トンネルに沿った恒常湧水量計算結果
Profile of Steady State Water Inflow Rate along a Tunnel

5. おわりに

本システムの開発により、得られた結論を以下にまとめる

(1)本システムは、数値地図を基に GIS を有効に活用することにより、流域抽出、比高計算、湧水影響範囲、恒常湧水量までを、コンピュータが客観的かつ半自動的に計算できる。

(2)本システムによる予測値と観測値、高橋による予測値を比較した結果、整合的であることを確認した。本システムによって、迅速にトンネル湧水予測や湧水範囲予測を行うことができるようになった。今回の成果を基に、今後多くのトンネル現場へ適用し、環境影響の事前予測などに活用していきたい。

参考文献

- 1)高橋彦治：トンネル湧水に関する応用地質学的考察、鉄道技術研究報告、No279、1962。
- 2)大島洋志・西森紳一：トンネル工事を対象とした水文調査法の研究、鉄道技術研究報告、No1108、1979。
- 3)ESRI 社：ArcGIS spacial Analyst ユーザーズ・ガイド