

GIS を用いたトンネル湧水湧水予測システムの開発

Development of GIS system for Predicting Tunnel Inflow and Dewatered Area

文村 賢一¹⁾・下茂 道人¹⁾

Kenichi FUMIMURA and Michito SHIMO

Recently, an environmental impact on water resources due to tunnel excavation is becoming one of the serious issues associated with tunnel construction. The authors have developed a computer aided system to predict tunnel water inflow as well as the possible dewatered area during and after construction of a tunnel. The developed system uses a conventional approach, so called Takahashi's method. By utilizing GIS, Geographic Information System, the evaluation processes, such as watershed delineation and calculation of influenced area, are conducted semi-automatically. The system does not require professional knowledge on topographic analysis and the tunnels at any location can be analyzed using a built-in DEM (Digital Elevation Model) data covering whole Japan. The reliability of the developed system was confirmed by using an example of a real tunnel shown in the Takahashi's paper.

Key Words: Tunnel Water Inflow, Environmental Impact, Topography, River Flowrate, 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よ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湧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湧水比流量（河川の湧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、これまで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) 正会員 大成建設(株)技術センター土木技術研究所岩盤研究室

- (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 (m^3/s)

q : 湧水比流量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)

A_t : 湧水影響面積 (km^2)

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、湧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、次式で与えられる。

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

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_t 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。

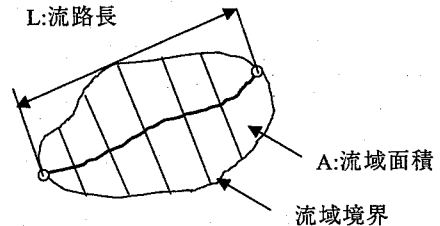


図-1 単位流域（最小流域）²⁾

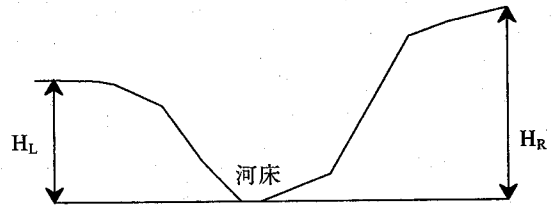


図-2 単位流域断面²⁾

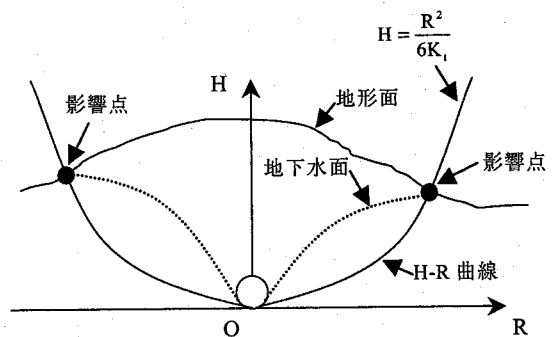


図-3 トンネル湧水影響範囲予測断面²⁾

3. トンネル湧水渇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（地理情報システム）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、渇水比流量の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。

本システムは、Windows2000 または XP の OS 環境下で動作する。GIS ソフトとして、Arcview8.2 を用いた。

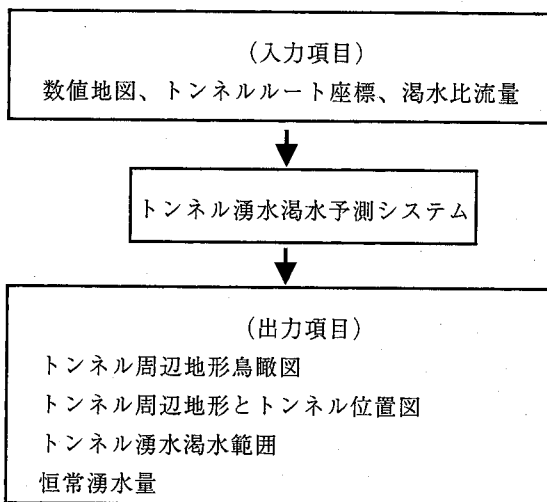


図-4 入力項目と出力項目

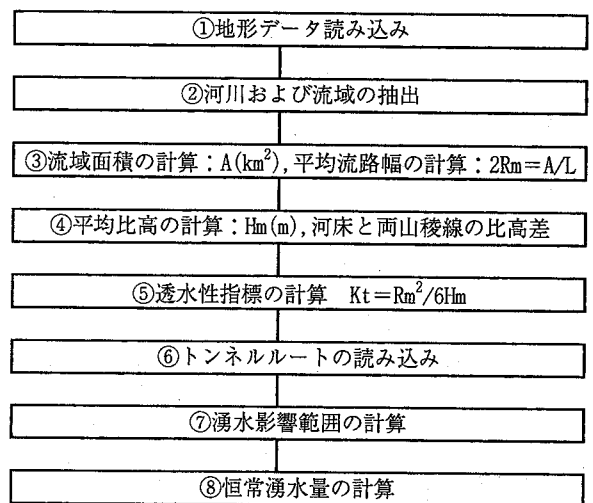


図-5 解析フロー

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。

(1)H-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河川および流域の抽出³⁾

作成された地形面に対して、以下の手順で、河川および流域を抽出する（図-7）。

(a)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、河川および流域が正しく抽出されない。このため地形面を平滑化し、小規模のくぼ地を埋める。

(b) 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セルの内、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。

(c) 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。

(d) 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。

(e) 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で抽出した流域について、その流域内に含まれるセルの数から流域面積を計算する。また、河川の上流の2端点を選択することにより流路長を計算する。流域面積と流路長から(3)式を用いて平均流路幅を計算する。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。得られた結果を画面上に一覧表示する(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)。各断面の平均比高の平均値から流域の平均比高を計算し、画面上に一覧表示する。

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曲線を画面上に表示する(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 トンネルルートの読み込み

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、湧水影響範囲を求める(図-3参照)。

湧水影響範囲を、地形面、トンネルルートと共に画面上に重ねて表示する。

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。結果を画面上に一覧表示する(図-13)。

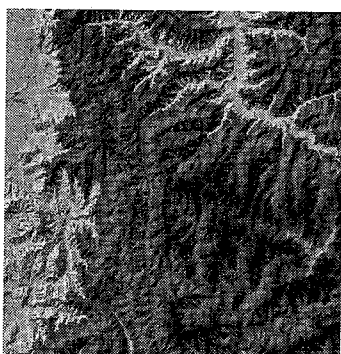


図-6 地形データの読み込み

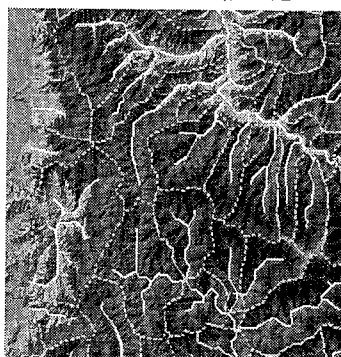


図-7 河川及び流域の抽出

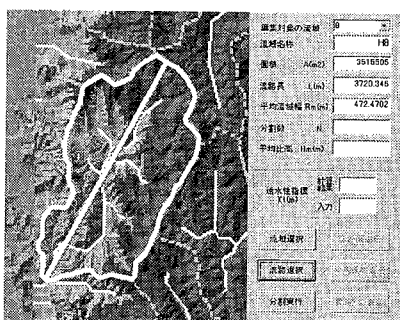


図-8 流域面積、平均流路幅の計算

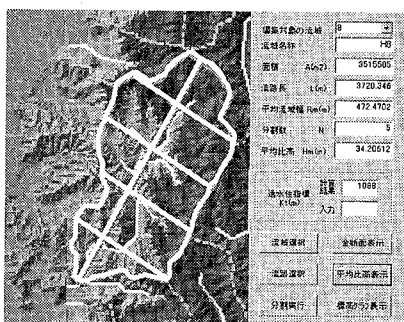


図-9 平均比高の計算

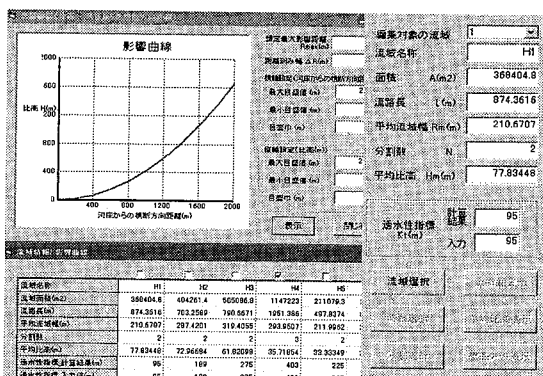


図-10 透水性指標 (H-R曲線) の計算

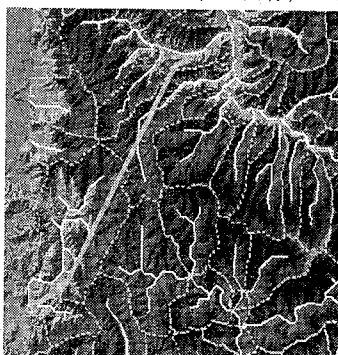


図-11 トンネルルートを読み込み

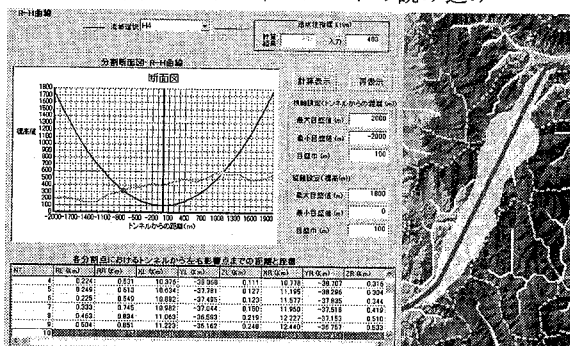


図-12 湧水影響範囲の計算

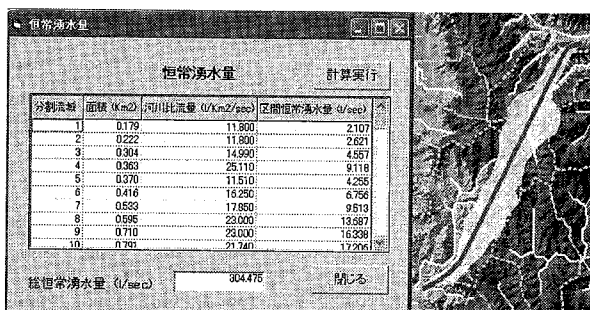


図-13 恒常湧水量の計算

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。そこで、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。

4. 1 トンネル湧水影響範囲

図-14 に本システムによる湧水影響範囲と高橋による湧水影響範囲（破線）を示す。この図から、湧水影響範囲については、両者ともほぼ一致する結果が得られた。

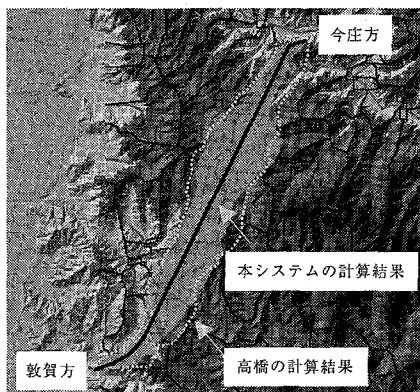


図-14 湧水影響範囲の計算結果

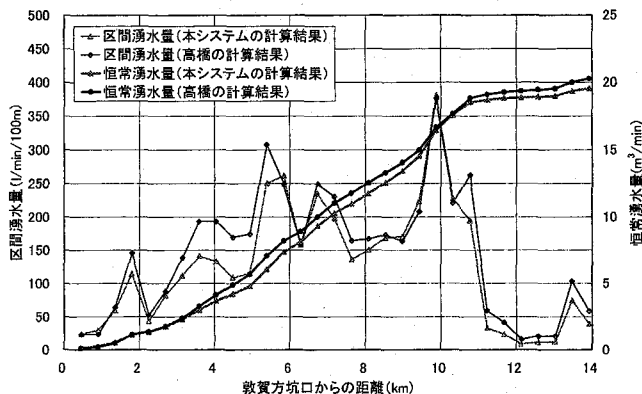


図-15 トンネルに沿った恒常湧水量計算結果

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、高橋の計算結果、本システムの計算結果を示す。本システムの計算結果は、観測値や、高橋の計算結果と整合的であることが分かる。

図-15 は、敦賀方坑口からの距離 (km) と恒常湧水量 (m^3/min)、区間湧水量 ($\text{m}^3/\text{min}/100\text{m}$) の関係について、本システムの計算結果と高橋の計算結果を示している。本システムの計算結果は、高橋の計算結果によく整合している。

表-1 恒常湧水量計算結果

観測値	16.8 m^3/min
高橋の計算結果	20.3 m^3/min
本システムの計算結果	18.3 m^3/min

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、コンピュータを用いて流域抽出、比高計算、湧水影響範囲、恒常湧水量までを、客観的かつ半自動的に計算できる。

(2)本システムの計算結果と観測値、高橋の計算結果を比較した結果、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出来るようになった。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 Spatial Analyst ユーザーズ・ガイド