

トンネル掘削に伴う周辺河川流量への影響再現解析の試み

熊本 創*¹・藤田 クラウディア*¹

Keywords : coupled surface and subsurface water flow modeling, mountain tunnel, groundwater inflow, river flow rate

地表水・地下水連成解析, 山岳トンネル, トンネル湧水, 河川流量

1. はじめに

山岳トンネルの施工時に大量の湧水が発生すると、施工性の低下など工事に悪影響を及ぼすだけでなく、井戸枯れや河川流量の減少など周辺水文環境に影響を及ぼすことがある。これら周辺環境への影響を定量的に予測することは、施工時の対策工の計画や環境影響に対するリスク管理を行う上で重要と考えられる。著者らは、トンネル施工に伴う周辺水文環境への影響を予測可能な地表水・地下水連成解析コード (HydroGeoSphere¹⁾: 以後、HGS と呼ぶ) の導入を進めている。今回、同コードの適用性確認を目的に、施工時に大量湧水が発生した既往のトンネル工事事例での坑内湧水量や、河川流量の観測結果の再現解析を試みた。その結果、HGS により、トンネル掘削に伴う坑内湧水量や周辺河川流量の変化を定量的に評価できることが示された。本稿では、再現解析の結果と考察について報告する。

$$\frac{\partial h_o}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(d_o K_{Ox} \frac{\partial h_o}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(d_o K_{Oy} \frac{\partial h_o}{\partial y} \right) + d_o \Gamma_o \pm Q_o = 0 \quad (2)$$

ここに、 x, y, z は位置座標[L], K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} は透水係数テンソルの x, y, z 方向の主成分[LT⁻¹], k_r は相対浸透率[-]であり、飽和度 S_w [-] の関数で表される。 h_G は地下水の全水頭[L], Q は地下水における単位体積当たりのシンク/ソース流量[L³L⁻³T⁻¹], S_s は比貯留係数[L⁻¹], ϕ は空隙率[-]である。式(1)中の Γ_{ex} は、地下水と他のドメイン (地表水や井戸など) との交換流量 (単位体積当たりの流量) [L³L⁻³T⁻¹] を表しており、地表水との交換流量は、 $ex = 0$ とした Γ_o で表現される。式(2)中の h_o は地表水の水面高さ[L]であり、地表面の z 座標 z_o [L] と地表水の水深 d_o [L] の和で表される (すなわち、 $h_o = z_o + d_o$)。 Q_o は地表水における単位体積当たりのシンク/ソース流量[L³L⁻³T⁻¹] である。 K_{Ox}, K_{Oy} はそれぞれ x 方向と y 方向の surface conductance [L T⁻¹] と呼ばれる係数で、以下のように表される。

2. HydroGeoSphere の概要

HGS は、カナダ Waterloo 大学で開発された地表水・地下水連成解析コードである。地下水流れは式(1)に示す三次元飽和・不飽和浸透流、地表水流れは式(2)の二次元 St.Venant 方程式の拡散波近似式で表現され、これらを完全陰的に連成して解くことができる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} k_r \frac{\partial h_G}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} k_r \frac{\partial h_G}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} k_r \frac{\partial h_G}{\partial z} \right) \pm Q + \Sigma \Gamma_{ex} = S_w S_s \frac{\partial h_G}{\partial t} + \phi \frac{\partial S_w}{\partial t} \quad (1)$$

$$K_{Ox} = \frac{d_o^{2/3}}{n_x} \frac{1}{[\partial h_o / \partial s]^{1/2}} \quad (3)$$

$$K_{Oy} = \frac{d_o^{2/3}}{n_y} \frac{1}{[\partial h_o / \partial s]^{1/2}} \quad (4)$$

ここに、 n_x, n_y は x 方向および y 方向におけるマニングの粗度係数[L^{-1/3} T], s は最大傾斜方向の距離[L]を表す。

また、HGS では、地下水と地表水の交換項は次式として取り扱われる。

$$d_o \Gamma_o = \frac{k_r K_{zz}}{l_{exch}} (h_G - h_o) \quad (5)$$

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

ここに、 l_{exch} はカップリング長[L]と呼ばれ、地表水と地下水の連成の強さに関するパラメータである。カップリング長が小さいほど強い連成（地表水と地下水の交換流量が多い）となり、大きいほど弱い連成を表現することができる。カップリング長の理論値や実測値の取得は困難であるが、慣例的にHGSではデフォルト値である0.1mが用いられている。本稿においても、このデフォルト値を用いた。

HGSの空間離散化はコントロールボリューム型の有限要素法、有限差分法を選択可能であり、細かな地形の起伏などに応じた柔軟な非構造メッシュモデルの取扱いが可能である。これまで多くの解析実績を有するが、トンネル施工に伴う地表水への影響評価事例は著者の知る限りでは存在しない。

3. 既往トンネル事例の再現解析

3.1 既往事例（蓑武トンネル）の概要

再現解析は、既往の大量湧水事例である蓑武トンネル²⁾を対象に実施した。蓑武トンネルは、兵庫県北部に位置する道路トンネルであり、施工時に約8 m³/minの突発湧水と天端崩落が発生している。その後も湧水量は増加し、トンネル掘削完了時には約32 m³/minに達したと記録されている。また、大量湧水による周辺水環境への影響を把握するため、施工途中から多数の地点で河川流量などの水文調査が行われており、文献³⁾にまとめられている。本検討では、これら既往の文献に記録された情報を参考に、トンネル掘削時の坑内湧水量や河川流量の観測値について、HGSによる再現解析を試みた。

3.2 解析メッシュの作成

図-1に解析対象領域の平面図を示す。対象領域はトンネルおよび複数の河川流量観測点を含む約29 km²の範囲とし、モデル境界は地形解析により抽出した尾根線とした。HGSでは、解析メッシュとして四面体要素などで離散化した非構造メッシュの取り扱いが可能であるが、地表水と地下水を連成した解析を行う場合は、平面メッシュを深さ方向に押し出して構築したレイヤードメッシュの使用を推奨している。本検討ではレイヤードメッシュを採用した。

図-2にレイヤードメッシュの基本となる平面メッシュを示す。メッシュサイズは、トンネル位置をトンネル直径に合わせて13mとしたほか、河川近傍については、高次谷の細かな地形表現が可能となるよう周囲よりもメッシュサイズを細かく設定した。平面メッシュ



図-1 解析領域
Fig.1 Modelling area

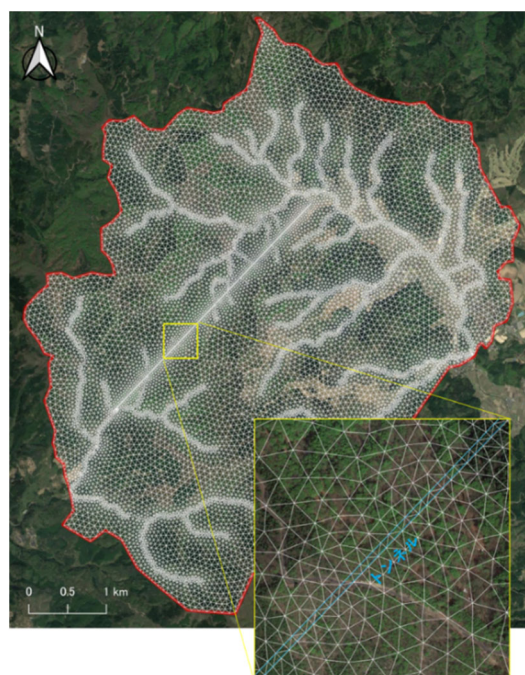


図-2 平面メッシュ
Fig.2 Plane mesh

の節点数と要素数はそれぞれ14,947と29,502である。

図-3に平面メッシュを深さ方向に押し出して作成した三次元レイヤードメッシュの鳥観図を示す。深さ方向の分割は21層とし、節点数、要素数はそれぞれ328,834、619,542となった。

当該地域には主に新第三紀中新世の堆積岩類が分布しているが、トンネル施工時の大量湧水はいずれも断層部で発生しており、その他の区間では顕著な湧水増加は見られない。また、本件は、文献^{2), 3)}に記載の限られた情報に基づいているため、詳細な地質構造は

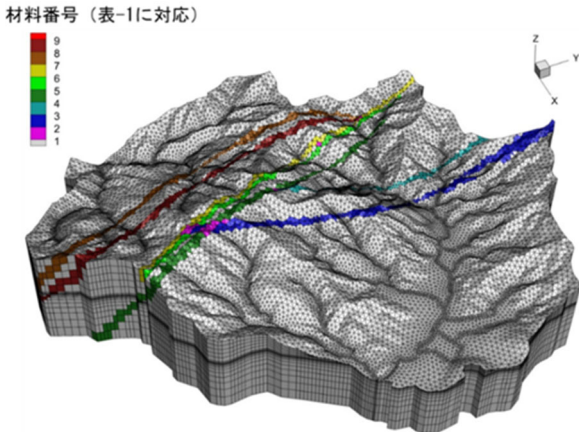


図-3 三次元レイヤードメッシュ
Fig.3 3D layered mesh

モデル化しておらず、湧水の増加に寄与すると推定された 7 つの断層以外は同一の物性を有する岩盤としてモデル化した。また、表層付近の伏流水の影響を考慮するために地表面下 10cm (全 21 層のうち地表面から 1 つ目の層) を表土層としてモデル化した。

3.3 解析条件

3.3.1 地下水および地表水の水利物性値

上記でモデル化した各地質構造に与える透水係数などの水利物性は、文献に参考となる情報がないため、別途実施した地下水流動解析から、坑内湧水量の変化をある程度再現可能な透水係数をあらかじめ求めて表-1 のように設定した。相対浸透率などの不飽和物性についても不明であるため、今回は最も単純な線形モデルを仮定した。地表流については、河川部とそれ以外のメッシュを区分して、文献値^{4) 5)}を参考に、それぞれ異なるマンニングの粗度係数を設定した (表-2)。

3.3.2 初期条件および境界条件

解析の初期条件は、地下水位を地表面に沿って設定し、地下岩盤中が完全飽和となるよう設定した。

境界条件は表-3 の通りとした。地表面に与える降水量は、文献³⁾を参考に有効降雨量 2,123 mm/年とし、解析実施期間を通して一定降雨量を与える条件とした。再現解析は、まず掘削前の初期状態を模擬した定常解析を実施し、その後、トンネル掘削工程を模擬した逐次掘削解析を実施した。逐次掘削解析では、掘削工程に合わせて、トンネル掘削箇所該当する節点を圧力水頭ゼロの浸出点境界に変更した。

3.4 解析結果と考察

3.4.1 トンネル湧水量

図-4 にトンネル坑口湧水量の解析結果と観測値との比較を示す。図より、トンネルが断層に到達した際の急激な湧水増加 (たとえば 250 日付近の日高坑口の湧

表-1 地下水パラメータ

Table 1 Parameter values for subsurface flow

地質区分	材料番号	透水係数 (m/s)	比貯留係数 (1/m)	空隙率 (-)
岩盤	1	2×10^{-7}	1×10^{-5}	0.3
断層交差部	2	1×10^{-5}		
断層(H1)	3	4×10^{-6}		
断層(H2)	4	6×10^{-6}		
断層(H3)	5	1×10^{-5}		
断層(H4)	6	1×10^{-5}		
断層(H5)	7	1×10^{-5}		
断層(M1)	8	3×10^{-5}		
断層(M2)	9	1×10^{-5}		
表土	10	1×10^{-5}		

表-2 地表水パラメータ

Table 2 Parameter values for surface flow

区分	粗度係数 ($m^{-1/3}s$)
河川部	0.01
河川以外	0.2

表-3 境界条件

Table 3 Boundary conditions

境界面	地表水	地下水
上面	降雨境界	-
下面	-	不透水境界
側面	水深固定の流出境界	不透水境界

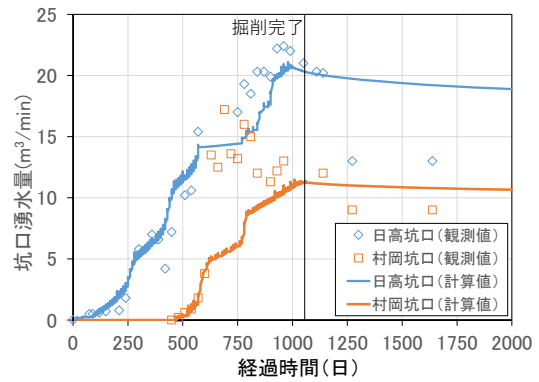


図-4 坑口湧水量の比較

Fig.4 Comparison of groundwater inflow rate

水量の急激な増加) など、施工中の湧水量変化は概ね再現できていることが分かる。一方で、掘削完了後の観測値に見られる長期的な湧水量の減少傾向については、解析結果が観測値に比べて過大となった。掘削完了後に湧水量が減少する要因としては、トンネル内に大量の地下水が流入することによる周辺地下水位の低下や、トンネル壁面付近の岩盤や覆工背面の裏面排水材の目詰まり等が考えられる。解析結果と観測値の乖離の原因を特定するためには、観測井などによる地下水位の観測データが有効と考えられるが、今回参照した文献には地下水位の情報含まれておらず、原因の

特定には至らなかった。

3.4.2 河川流量

図-5 に河川流量の解析結果と観測値の比較を示す。文献 3)では、トンネル周辺 4 km 程度のエリアを 21 の小流域に分割し、各小流域の最下流点で河川流量観測を行っている。観測結果は、小流域毎の比流量分布図として文献中に示されている。本検討では、このうち 20 の小流域について、文献中の比流量から計算した河川流量の推定値と解析結果を比較した。なお、解析値は掘削前後の定常状態の値を採用した。図-5 より掘削前後で河川流量の解析結果は減少し、掘削後は観測値を大きく下回った。流量観測は、大量湧水と天端崩落が発生した時期から施工完了 2 年後までの長期に渡っており、文献 3)に記載の比流量がいつの時点の値かは定かではない。これに対して解析結果は掘削後定常状態の値であり、そのため実測値よりも河川流量が少なくなった可能性がある。また、図-6 には、観測流域における比流量の比較を示す。解析結果では、掘削の影響を受けて、トンネルルートに沿って比流量の低い流域が見られるが、観測値はトンネル直上においても 1,500~2,000 mm/年の比流量を維持した流域が見られる。この要因としては、解析モデルの浅層地質構造や降水量分布などが実際を十分に反映していないことが考えられる。今回のモデルは坑内湧水の増加に寄与する断層のみを考慮しており、断層を通じて地表水をトンネルに直接引き込むようなモデルとなっている。実際には、表土層や風化岩等、断層による地表水とトンネルとの水の導通を遮るような構造が存在していた可能性が考えられる。

4. まとめ

本稿では、著者らが導入を進めている地表水・地下水連成解析コード (HydroGeoSphere) について、トンネル掘削に伴う水文環境影響評価への適用性の確認を目的とした既往事例の再現解析を行った。その結果、観測値の再現性について課題は残すものの、トンネル施工時の坑内湧水量の変化や、それに伴う河川流量の変化を定量的に評価できる見通しが得られた。今後は、実績を重ねつつモデル化・解析ノウハウを蓄積していく予定である。

参考文献

- 1) Aquanty Inc. : HGS Theory Manual, 2015.
- 2) 樋上尚子, 森川武浩, 西本和生, 實松茂幸 : 予期せぬ異

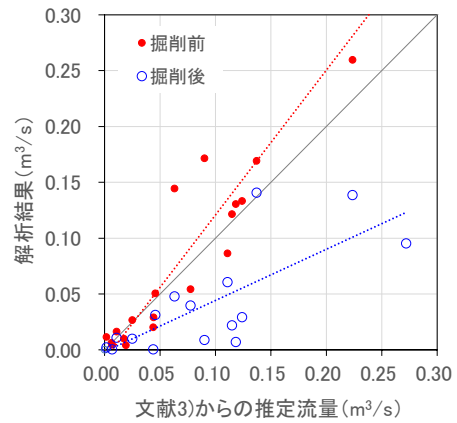
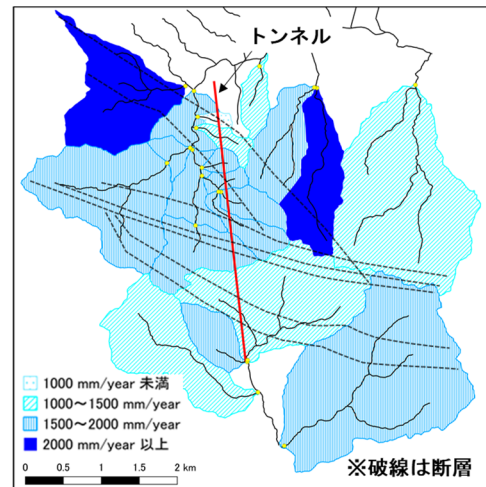
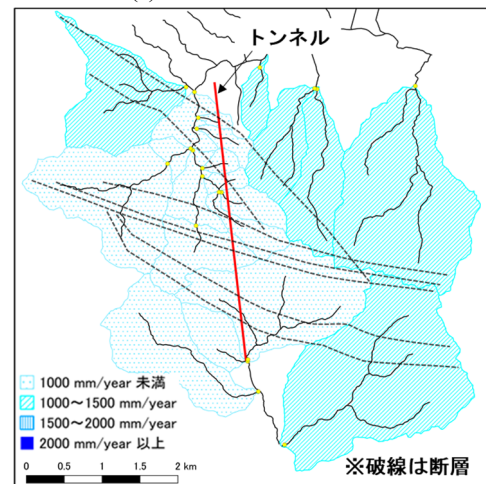


図-5 河川流量の比較

Fig.5 Comparison of river flow rate



(a) 観測値 (文献 3))



(b) 解析結果 (掘削後定常状態)

図-6 河川流量の比較

Fig.6 Comparison of specific discharge

常湧水に挑む 国道482号 蕨武トンネル日高工区, トンネルと地下, 第33巻, 1号, pp.17-28, 2002.

- 3) 後藤大輔, 井伊博行, 平田健正, 吉国孝成, 大塚康範, 金川正敏 : 環境同位体と流量測定によるトンネル湧水の起源推定, 環境工学研究論文集, 41巻, pp.662-674, 2004.
- 4) 土木学会編 : 水理公式集, 2018.
- 5) 国土交通省 水管理・国土保全局ほか : 河川砂防技術基準調査編および参考となる資料 平成 24 年 6 月版, 2013.