

山岳トンネル掘削における地下水環境影響評価システムの研究

須藤 賢 杉江 茂彦
鈴木 健一郎 鳥井原 誠

Study of Groundwater Environmental-assessment System of Mountain Tunnel Excavation

Ken Sudo Shigehiko Sugie
Kenichiro Suzuki Makoto Torihara

Abstract

In order to assess the effect of a tunnel excavation on groundwater flow and accurately predict seepage to the tunnel, we have developed a ground water assessment system that packages both a water-balance analysis by a tank model and a seepage analysis by FEM. This system can analyze the seepage flow considering the loosened zone around the tunnel induced by the excavation. FEM for analysis of coupled hydraulic-mechanical behavior of soil (GRASP3D) is applied. The change in rock permeability around the tunnel induced by the excavation can be evaluated by permeability tests while decreasing the confining stresses of a large rock block specimen. This report introduces the groundwater assessment system and shows an example of analytical results of a model mountain tunnel excavation.

概要

山岳トンネルを掘削する際の地下水環境への影響を精度よく予測・評価するために、タンクモデルによる水収支解析とFEM浸透流解析とを連携させた地下水環境影響評価システムを構築した。このシステムでは土/水連成FEM解析 (GRASP3D) を援用することにより、トンネル掘削時の空洞周辺地山のゆるみによる透水性の増加を考慮した詳細な解析が可能である。周辺地山のゆるみによる透水性の変化は、大型岩盤ブロック試験体 (0.5m立方体) の応力解放透水試験から求めることができる。本報では、地下水環境影響評価システムの概要と山岳トンネル掘削をモデルケースとして行った試解析事例を紹介する。

1. まえがき

山間部の流域においては、降雨によって沢に水が流れ、地盤中には地下水が形成される。このような流域においてトンネルを掘削すると、トンネルから地下水の湧水が生じる。山岳トンネル掘削時の湧水は工事の施工性に悪影響を与えるばかりでなく、沢水や地下水が生活用水や農業用水等に利用されている流域においては、沢へ流出する帯水層とトンネルが掘削される帯水層とがつながっている場合、Fig. 1に示すように、トンネル内への湧水により、地下水位が低下し、井戸枯れや沢水枯渇等の地下水環境影響問題が生じる恐れがある。

このような問題に対しては、トンネル施工前後の沢水流量予測、周辺地下水流動予測を的確に行い、有効な対策工を実施する必要がある。

そこで、山岳トンネルを掘削する際に生じるトンネル内への湧水の影響による地下水環境影響予測を精度よく行うことを目的に、対象流域における降雨の地表流下・地山浸透に関する水収支とトンネル周辺地山の地下水挙動の関連を考慮することのできる地下水環境影響評価システムの構築を行った。さらに、トンネル周辺の詳細解析技術のツールとして、トンネル掘削時の周辺地山のゆるみによる透水性の増加を考慮することができるよう

土/水連成FEM解析 (GRASP3D)^{1),2)}に機能追加する研究を行い、そのシステムの中に、組み込んだ。

この報告は、1)システムの概要、2)大型亀裂性岩盤ブロック試験体 (0.5m立方体の自然岩体) の応力解放透水試験結果に基づく体積ひずみと透水係数の関係の提案、3)それを土/水連成FEM解析 (GRASP3D)へ機能追加、4)

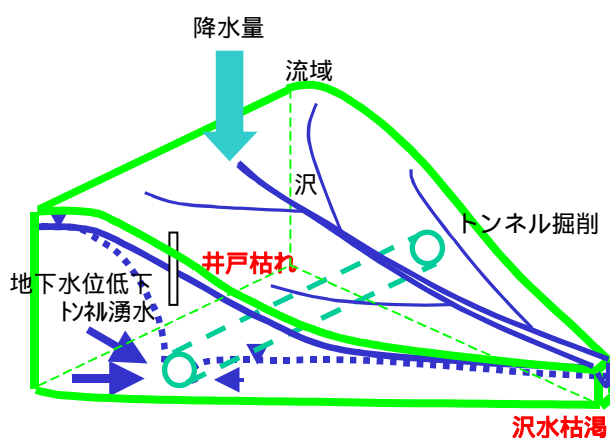


Fig. 1 トンネル掘削による地下水環境影響問題
The Groundwater Environmental Influence Problem by
Tunnel Excavation

このシステムを用いて山岳トンネル掘削をモデルケースとして行った試解析事例，を紹介する。

2. トンネル掘削時の地下水環境影響評価システムの概要

2.1 評価システムの構成

地下水環境影響評価システムは、地表流が主な沢水の流量を解析するタンクモデルによる水収支解析とトンネル周辺の地下水挙動を解析するFEMによる浸透流解析で構成されている。Fig. 2には、システムの構成を示す。水収支解析はタンクモデル手法を使用するので、ある降雨量に対する沢水流量、地下水位が出力となり、地下の浸透流を扱うトンネル湧水量の予測は困難である。また、FEM浸透流解析については、地下水解析のため、地下水位分布、トンネル湧水量は予測解析できるが、地表水が主な沢水流量の解析は困難である。そこで、この評価システムは、タンクモデル解析で得られる降雨の地下浸透量を考慮してFEMによる浸透流解析でトンネル湧水量を予測解析し、その予測トンネル湧水量をタンクモデルに入力して、沢水流量を解析する手法である。さらに、トンネル湧水量の詳細解析を行う場合は、トンネル周辺の亀裂性岩盤における亀裂開口緩み領域の透水性変化を考慮できる土/水連成FEM解析 (GRASP3D) が使用可能である。

2.2 評価システムの内容

2.2.1 水収支解析 (タンクモデル) 沢水流出量予測には、河川流量の流出解析法として広く利用されているタンクモデルを用いる。タンクモデルは菅原³⁾によって提案され、いくつかの貯水タンクを鉛直方向に直列に並べた構造となっている。直列貯留型タンクモデルは、Fig. 3に示すように流域における帯水層構造と対応するものと考えられる。タンクの側面には流出を表す流出孔(a)が、底面には地中への浸透を表す浸透孔(b)が設けられており、孔からの流出(浸透)量はタンクの水深に比例するものとして求められる。雨は順次地下に浸透し、各帯水層からそれぞれ流出して沢水(河川)の流量になる。解析に必要なインプットデータは、タンクモデルパラメータ(a: 流出率, b: 浸透率, z: 流出孔高さ, S: タンク内水深)と降水量、蒸発散量、流域面積である。流域面積は沢水の流出量測定位置に対応する流域を地形図から作成し、流域面積を測定する。蒸発散量は、月平均気温からゾーンスウェイト式⁴⁾を用いて算定し、最上段タンクから無降雨日の時に差し引く。降水量は、当該地(対象流域又はそれに近い場所)での観測降水量を用いる。タンクモデルパラメータは、降水量、蒸発散量、流域面積を設定して、試行錯誤にモデルパラメータを設定して解析した結果と測定された実測流量との比較から試行錯誤的に決定する。

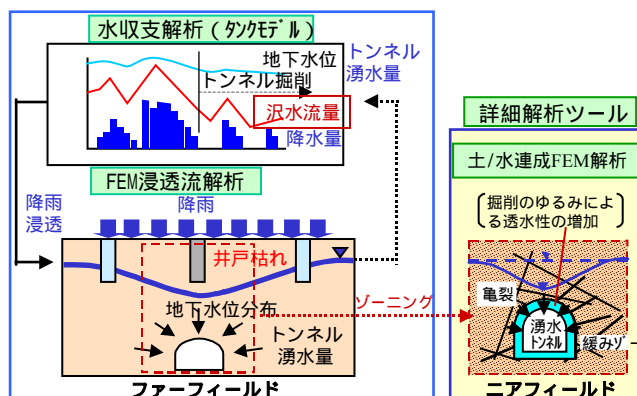


Fig. 2 地下水環境影響評価システムの構成
Composition of a Groundwater Environmental-assessment System

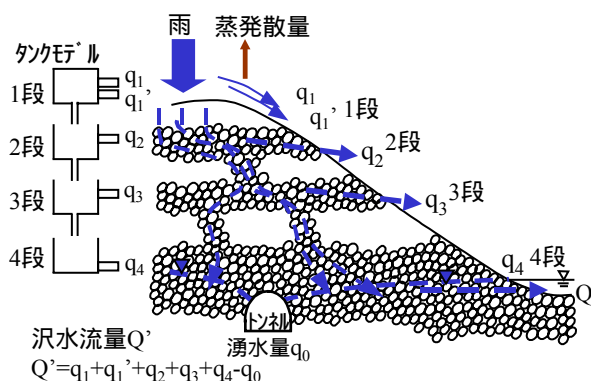


Fig. 3 タンクモデルの流域の帯水層構造への対応模式図
Outline Figure to the Aquifer Structure of the Valley of a Tank Model

トンネル湧水の影響を受ける沢水流量の予測は、地下水が沢へ流出する帯水層とトンネルへ湧水する帯水層とが繋がっている場合、掘削前の実測沢水流量を同定したタンクモデルで掘削時期について予測計算した沢水流量から、FEM浸透流解析により求めたトンネル湧水量を差し引いた流量として計算を行う。

2.2.2 FEM浸透流解析 FEM浸透流解析を行う解析プログラムは、有限要素法による総合地盤解析システム SIGNAS (System for Integrated Geotechnical Numerical Analysis Ver.3)⁵⁾ を使用した。この解析は、トンネルの湧水量とトンネル周辺地下水位の解析を行うものである。解析に必要な入力パラメータは、透水係数(比透水係数)、貯留係数(水分特性曲線)、地下水位、降雨条件等である。解析モデル作成については、解析領域、解析深度(不透水層)、地盤構成、トンネル構造等の設定を行う。

2.2.3 土/水連成FEM解析 (GRASP3D) 土/水連成FEM解析には解析プログラム GRASP3D^{1), 2)} (Grasp

Real Action of Subsoils and Pore-water) を用いた。本解析法はBiot (ビオ) の多次元圧密理論にもとづくものである。土/水連成FEM解析は従来別々に行われていた地盤の応力変形解析と地下水の浸透流解析とを、同時に連立させて、逐次時間ステップ毎に解いていくところに特徴がある。また、詳細については次の3章に述べるが、掘削にともなう地山のゆるみによる透水性 (透水係数) の変化を逐次施工過程を追いながら計算条件に考慮することができる。

3. 土/水連成FEM解析 (GRASP3D) への掘削ゆるみの透水性変化を考慮する機能追加

弾性変形内での応力解放に伴う亀裂性岩盤の亀裂の開閉による透水係数変化を把握することを目的に、原位置より採取した大型岩盤ブロック試験体を使用して、等方三主応力下における応力解放過程での3方向 (上下, 左右, 前後方向) の透水試験を行なった。さらに、その応力解放過程での体積ひずみ変化量と透水性変化量に対しての結果と初期透水特性との組み合わせで応力解放に伴う透水特性を提案し、それを透水係数の変化機能としてGRASP3D に組み込んだ結果について以下に述べる。

3.1 大型岩盤ブロック試験体による応力解放透水試験⁶⁾

3.1.1 応力解放透水試験方法 岩盤ブロック試験体は、Photo 1に示す栃木県安蘇郡葛生町産の中～古生代に生成された層状黒色石灰岩の自然岩盤ブロック (約0.5m立方) である。亀裂の平均開口幅は0.8mm, 標準偏差は1.7mmである。応力解放透水試験は、当社のPhoto 2に示す岩盤多機能試験装置を用いて、三主応力制御の透水試験を行った。ブロック試験体の側面は、Photo 1に示すように一面に9箇所の透水窓が設けられたゴムスリーブで覆われている。試験は、Fig. 4に示すブロック試験体の6面に設置された載荷板に拘束荷重を等方載荷し、試験体の上下 (Z) 方向, 南北 (Y) 方向, 東西 (X) 方向の3方向についての透水試験を順次行い、その後、等方載荷荷重を解除して、同様に3方向の透水試験を行った。等方載荷荷重は、800kN (応力3.2MPa) を初期として、400kN, 200kN, 100kN, 50kNと降圧して、最後に1200kN, 50kNと供試体6面に載荷した。透水圧は給水側20kPa, 排水側10kPaとした。測定項目は、給水側と排水側の水圧, 透水量, 載荷段階中での供試体間隙水の給水・排水量および側方・鉛直変位である。透水試験後、ゴムスリーブの影響を除くブロック試験体の体積ひずみを求めるために、ゴムスリーブを外したブロック試験体の三主応力制御試験を透水試験と同じ等方載荷荷重について行った。

3.1.2 透水係数の変化則の提案 Fig. 5は、透水係数と体積ひずみの関係を示す。なお、横軸の体積ひずみは、等方載荷荷重800kNの体積ひずみを初期ひずみとし、各



Photo 1 大型岩盤ブロック試験体 (0.5m立方体)
A Large Rock Block Specimen



Photo 2 岩盤多機能試験装置
Multipurpose Testing Machine for Rock Masses

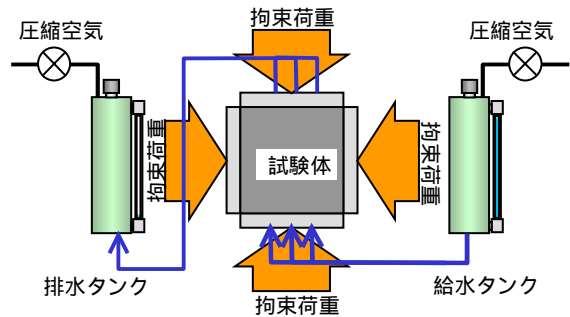


Fig. 4 応力解放透水試験方法概要図

A Stress Release Permeability Test Method
Outline Figure

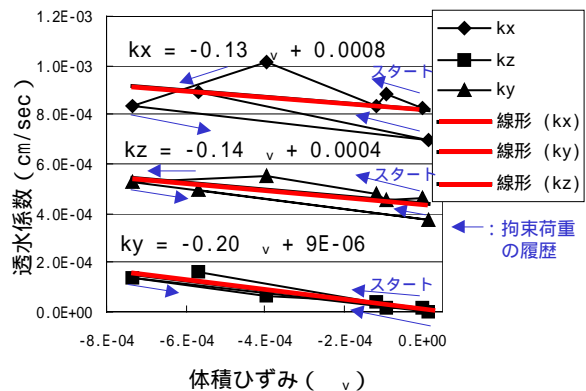


Fig. 5 透水係数と体積ひずみの関係

The Relation of Permeability Coefficient and
Volume Distortion

等方載荷荷重のひずみの差で表したものである。図中、線形近似した直線と近似式を併記した。各方向の透水係数は体積ひずみとほぼ同じ傾きの直線関係にある。拘束状態での初期透水性の異方性は等方応力解放後もこの比率を維持している。透水係数と体積ひずみの直線勾配は、各透水方向の直線勾配を平均すると、概ね0.2である。この結果から、応力解放過程における透水性の変化率 i は、 $i = 0.2$ と評価した。

3.2 GRASP3Dプログラムへ透水係数変化則の組み込み

亀裂性岩盤地山の变形(ひずみ)・応力と地下水挙動を載荷・時間ステップ毎に計算するにあたり、前述の透水係数の変化則(体積ひずみ～透水係数関係)にしたがって透水係数が載荷・時間ステップ毎に更新されるように、地盤/地下水連成解析プログラムGRASP3DにFig. 6に示す機能を加えた。ここで透水係数の変化勾配は3方向(X,Y,Z)にそれぞれ任意に与えられるように機能を加えた。

4. 山岳トンネル試解析事例

Fig. 1のトンネル掘削模式図に示すように、流域の沢を横断する山岳トンネルを掘削した場合の解析事例について述べる。解析は、トンネル湧水量の解析、トンネル掘削後の沢水流量の予測およびトンネル湧水量詳細解析として掘削ゆみの影響を考慮した土/水連成FEM解析(GRASP3D)について以下に紹介する。

4.1 トンネル湧水量 3次元解析

FEM浸透流解析は、飽和・不飽和3次元浸透流解析を行った。トンネル湧水量が沢水流量に与える影響を調べるため、沢水流域内のトンネル湧水量を解析する目的で、解析領域はタンクモデルの解析領域とほぼ同じ面積0.08 km²(約200m×380m)の尾根筋に囲まれる沢水流域とした。トンネルは、沢筋の約50m下部を縦断する。地下水水位は降雨浸透の影響を考慮して、境界条件とした上流側と下流側の地形表面に存在すると仮定した。Fig. 7に3次元FEM浸透流解析の結果を示す。沢流域に位置するトンネルからの湧水量Qは、 $Q = 173\text{m}^3/\text{day}$ が得られた。トンネル周辺地下水水位分布解析結果については、Fig. 7に示すトンネル周辺地下水水位分布断面図から、トンネル湧水によって地下水水位が低下する分布が分かり、この低下部分に井戸が存在すると、井戸枯れの恐れがある。

4.2 トンネル湧水量を考慮した沢水流量試解析

トンネル湧水の影響を受ける沢水流量の予測方法は、直列貯留型4段タンクモデルを使用して、前述の2.2.1項で述べたように、トンネル掘削前の実測沢水流量の再現モデルに、予測時期の降雨量と蒸発散量およびトンネル予測湧水量をインプットして、計算を行う。前節の4.1

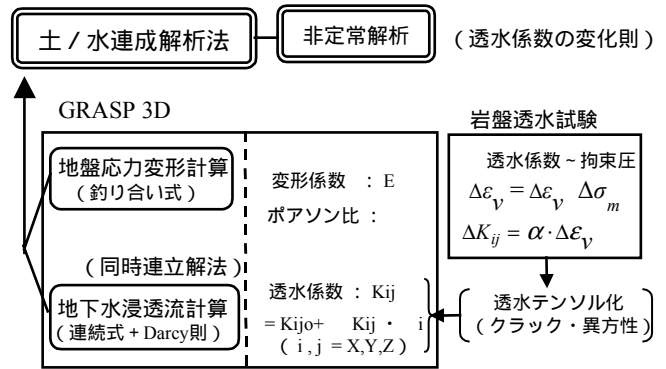


Fig. 6 GRASP3Dへの透水係数変化則の組み込み
Inclusion of the Coefficient of Permeability Change Rule to Analysis Soft GRASP3D

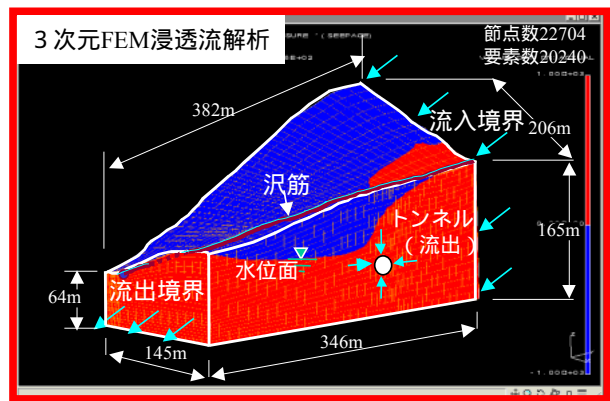


Fig. 7 3次元FEM浸透流解析
3-dimensional FEM Groundwater Seepage Flow Analysis

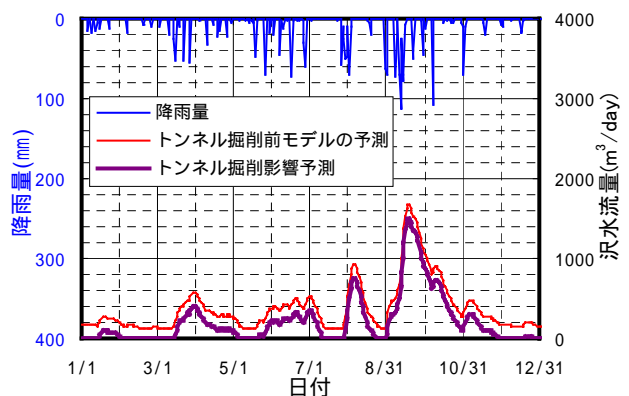


Fig. 8 トンネル湧水量を考慮した沢水流量解析
The Amount Analysis of the Valley Streams in Consideration of the Amount of Water which Flows into a Tunnel

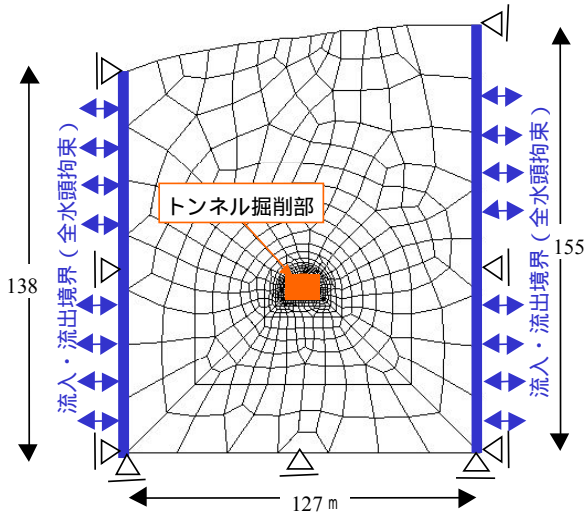


Fig. 9 トンネル周辺地山の解析モデル
The Analysis Model of the Tunnel Circumference Stratum

のトンネル湧水量 3次元解析で求めたトンネル湧水を考慮した沢水流量予測結果をFig. 8に示す。図中、トンネル掘削前のタンクモデルで予測した沢水流量（細線）と今回構築したシステムで予測解析した結果（太線）を示す。Fig. 8に示すように、細線はトンネルがない場合の沢水流量で、沢とトンネル位置の帯水層が繋がっている場合、トンネル湧水が生じることにより太線に示すように沢水流量が減少する。また、沢水枯渇は降雨量の極端に少ない時期にトンネル湧水の影響を受けて生じる恐れがあることが分かる。

4.3 トンネル湧水量詳細解析（土/水連成FEM解析 GRASP3D）

4.3.1 解析モデルの作成 用いた有限要素メッシュと境界条件をFig. 9に示す。トンネル掘削部のサイズは幅10m、高さ8mである。ここで、モデル化領域の初期水頭値と水理境界条件の値は、前項4.1の3次元浸透流解析の結果を用いた。

掘削過程の模擬はFig. 10に示す上半掘削と下半掘削の2段階施工とした。掘削過程の模擬は掘削される地山要素を削除（地山剛性の消失と地山応力の解放）することで表現した。また掘削によって新たに生じる空洞面については、大気圧に触れることから水圧値が零（ゼロ）になるように空洞面上の節点の全水頭を拘束した。空洞面から湧水が生じる状況はこの水理境界条件の設定によって模擬した。

地山の物性値はL級岩盤⁷⁾を想定しFig. 11の値を用いた。ここで地山の破壊判定にはDrucker-Pragerの基準を用い、破壊要素の変形係数(E)は初期値の1/100に低減させた。掘削による地山の透水係数(鉛直方向 K_v 、水平方向 K_h)の変化率は既に3.1.2項で述べた透水係数～体積ひずみ関係から求めた値を用いた。土/水連成FEM解析

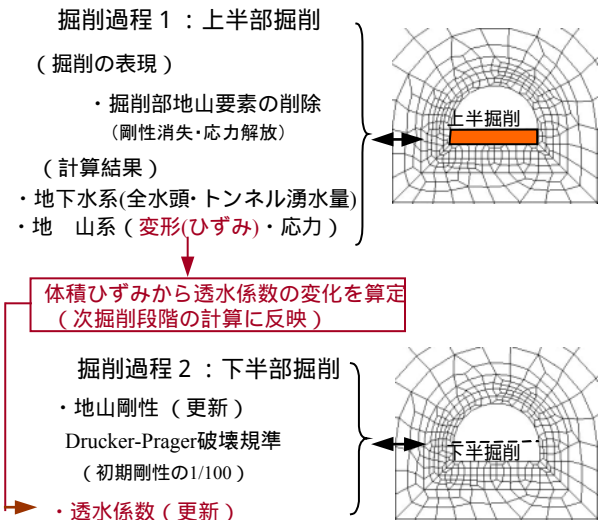


Fig. 10 トンネル掘削過程の計算フロー
The Calculation Flow of Tunnel Excavation Process

岩盤物性 (L級岩盤想定)	
(応力・変形定数)	
$E=1000 \text{ MPa}$	} (破壊判定) Drucker-Prager の破壊基準
$\nu=0.3$	
$C=0.87 \text{ MPa}$ (粘着力)	
(地山の初期応力)	
$\sigma_{vi} = (\sigma_v - 1) \cdot Z$	$t = 2.5 \text{ t/m}^3$
$\sigma_{hi} = K_0 \cdot \sigma_v$	$K_0 = 0.5$
(透水係数)	
掘削前	
$K_v = K_h = 1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$	
掘削後	
$K_v, K_h = K_v, K_h(\sigma_v, \sigma_h, \nu)$	
$K_i = \dots \nu +$ 【透水性変化率: i 0.2】	

Fig. 11 解析に用いた力学および浸透の定数値
The Constant Value of Dynamics and Permeability Used for Analysis

GRASP3Dにこのような透水係数の変化則の機能を加えることにより、掘削過程を模擬しながら、トンネル周辺地山の応力変化（体積ひずみ発生仕方）に応じた透水性の変化を考慮することが可能となった。

4.3.2 解析結果 トンネル周辺の透水係数の分布をFig.14に示す。図中、透水係数の値が初期値の4倍以上に増した領域が区別されるように示した。トンネル底盤および側壁の透水係数の増加が著しく、特に底部の中央付近の地山では初期値の20倍程度の値が得られた。これから、湧水の卓越場所を検討づけることができる。

周辺の地山からトンネル空洞部に回り込む水の流れを示す流速ベクトルをFig.15に示す。透水係数を初期値で一定とした場合と比較して差が明確であるのはトンネル

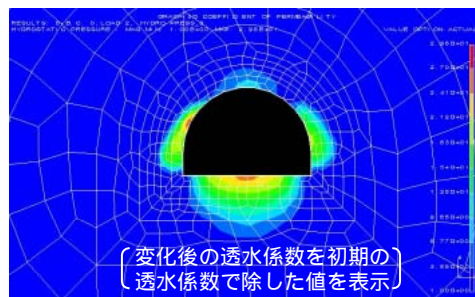


Fig. 14 トンネル周辺の透水性係数分布
The Permeability Coefficient Distribution
Around a Tunnel

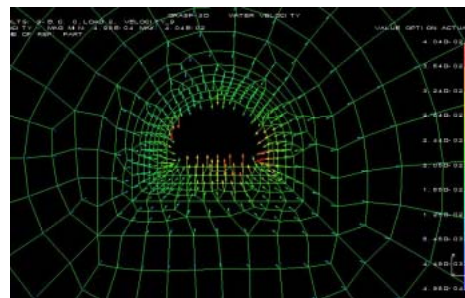


Fig. 15 トンネル周辺の流速ベクトル
The Flow Velocity Vector Around a Tunnel

底盤の中央付近に限られている。トンネル底盤の中央付近の流速は、透水性係数を初期値で一定とした場合のそれに比べて1.5倍程度であった。透水性係数分布で示した同場所での透水性係数の差（20倍）に比べて流速となって表れる差は以外と小さい。またトンネル内への全体湧水量については、透水性係数一定の場合の2%程度しか差が生じず、地下水面の形状にも有意な差が生じなかった。これは、掘削ゆるみの影響はトンネル近傍だけで、それ以外は透水性係数の初期値と変わらないことから、湧水量は初期の透水性係数から求められる値と大きく変化しない結果になったものと考えられる。

しかしながら、岩盤内に設けられるエネルギー備蓄施設や原子力廃棄物の処分施設等は、立坑や複数のトンネル空洞が縦横に連結する構造となることが想定されるため、ゆるみ域も連続性を持つ危険性がある。例えば、全水頭の高い領域と立坑部およびトンネル部とでゆるみ域がつながる可能性もある。このような場合においては、ゆるみ域の透水性が計算結果に大きく影響を与えるものと考えられ、本研究で構築した詳細解析法による予測計算により高い予測精度が期待できる。

5. おわりに

山岳トンネルを掘削する際の地下水環境への影響を精度よく予測・評価するために、タンクモデルによる水収支解析とFEM浸透流解析とを連携させた地下水環境影響評価システムを構築し、そのシステムの概要と山岳トンネル掘削の試解析事例を紹介した。

以下に、得られた成果を示す。

- 1) この評価システムにより、沢とトンネルの帯水層がつながっている場合、トンネルからの湧水影響を考慮した沢水流量予測試解析を行った結果、沢水枯渇は降雨量の極端に少ない時期にトンネル湧水の影響を受けて生じる恐れがあることが分かる。
- 2) トンネルゆるみの影響について、岩盤多機能試験装置により大型亀裂性岩盤ブロックの応力解放透水試験を行い、X、Y、Z方向の透水性係数を求めた。各方向の透水性係数は、応力解放による体積ひずみの増加に伴い、

直線的に、ほぼ同じ勾配で変化することが明らかとなった。

- 3) 土/水連成FEM解析法（GRASP3D）に応力解放透水試験で得られた透水性係数の変化則の機能を加えることにより、掘削過程を模擬しながら、トンネル周辺地山の応力変化（体積ひずみ発生の方）に応じた透水性の変化を考慮することが可能となった。
- 4) 機能追加した土/水連成FEM解析（GRASP3D）を使用して、掘削過程を追跡する試解析を行った結果、トンネル底盤の中央付近の地山で透水性係数の増加が著しいことが明らかになった。しかし、今回の単設トンネルを扱った均質地盤でのトンネル内への湧水量については、トンネル近傍の透水性係数の変化は、地山全体の地下水流れの中にあって大きな効果が生じないことが分かった。

今後、これまでの研究成果を踏まえて、さらに解析事例等を増やし、実績データ等の蓄積をしていく必要がある。

参考文献

- 1) Ohta, H., Iizuka, A., Omote, Y. and Sugie, S.: 3-D analysis of soil/water coupling problems using elasto-viscoplastic constitutive relationships, Proc. 7th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Vol.2, pp.1191~1196, (1991)
- 2) 杉江・飯塚・太田：三次元土/水連成FEM解析における種々の離散化と計算精度・効率、構造工学シンポジウム論文集、第18巻、pp.33~38、(1993)
- 3) 菅原正巳：流出解析法、共立出版、253p、1973
- 4) 改訂地下水ハンドブック：建設産業調査会、pp.45~47、(1998)
- 5) ユーザーマニュアル浸透解析：有限要素法による総合地盤解析システム SIGNAS (System for Integrated Geotechnical Numerical Analysis) (Ver.3)、(1986)
- 6) 須藤・鈴木・杉江・上野：亀裂性岩盤の等方応力解放に伴う透水性について 第58回土木学会年次学術講演会、pp.799~800、(2003)
- 7) 桜井・清水・福原・岡本：地下石油備蓄空洞の情報化施工における逆解析の適用、土と基礎、Vol.46、No.6、pp.5~8、(1998)