

トンネル近接交差部における地下水挙動の解析事例

ANALYSIS OF GROUNDWATER BEHAVIOR AROUND THE CROSSINGS OF ADJACENT TUNNELS

田中 誠*・大西有三**・安田 亨***・高橋健二***

Makoto TANAKA, Yuzo OHNISHI, Toru YASUDA and Kenji TAKAHASHI

Abstract: This study deals with the groundwater problem in excavating a road tunnel near an existing tunnel for water supply which is located beneath the former almost orthogonally. There are many uncertainties such as excavation-disturbed zone and deterioration of lining concrete of the latter, the existence of highly permeable faults, and so on. Therefore, it is important to investigate the flow rate from the tunnel face during excavation and to discuss about the drainage method. The authors have carried out the three-dimensional analysis considering the very complex geometry of tunnels, faults and alternation sediments to evaluate the groundwater behavior. The results are very important for planning countermeasures to keep the supplied water.

Key words: Groundwater, Tunnel, Faults, Groundwater Level, Finite Element Method

1. まえがき

道路延長にトンネル区間の占める割合は、近年着実に増加してきており、この傾向は今後一層鮮明になってくるものと考えられる。道路における山岳トンネルは、地形の制約を受けてますます長大化していくことが予想されるし、山岳地帯のみならず、近年の生活圏の平地から郊外丘陵地への拡大に伴って、生活圏に隣接してのトンネル工事も多くなってきている。これらトンネルの施工とともに、トンネル工事に起因した地下水位低下や渇水の問題も増加の兆しを見せてきている。

地下水は表面流水と異なり水温、水質が一定であり、水資源として極めて利用しやすい資源である。地下水位の高い我が国では、古くより浅い地下水を生活用水、農業用水、さらには産業用水、工業用水として利用するケースが多く、簡単な井戸掘削により良質の水を得ている。トンネル工事により地下水位低下等の影響が生じた場合、これらの地下水利用者に与える被害は図り知れないものがあり、これらには一歩その対応を誤れば大きな社会問題へ発展しかねない要素が潜在している。故に、トンネル工事において、事前に渇水の規模等の影響を検討しておくことは、工事自体の影響予測の中でも重要なことである。

トンネル工事による地下水位低下や渇水は多分に自然現象に支配されるために、これを事前に正確に予測することは至難の業である。最近では、地盤や境界条件の複雑さへの対処のしやすさから、有限要素法によ

キーワード：地下水、トンネル、断層、地下水位、有限要素法

*正会員 京都大学大学院助手 工学研究科土木システム工学専攻

**フェロー Ph. D.・工博 京都大学大学院教授 工学研究科土木システム工学専攻

***正会員 パシフィックコンサルタンツ（株）大阪本社第四技術部トンネル技術課

る数値解析が一般的に用いられてきている^{10,23,24)}。その解析方法としては、地下水の経時的な変動を知るために、非定常浸透流解析の利用が多くなってきている。また、地盤の深さ方向への帯水層の変化や地下水の動きを解明する目的で、2次元平面解析から準3次元、そして3次元解析へと発展している。さらには、自由水面を有する不圧帯水層をも加味した3次元解析も開発され、飽和領域のみを対象としていた研究から不飽和領域をも考慮した解析方法が開発されている。

しかしながら、3次元解析を実施するには、必要となる莫大な記憶容量や演算時間が物理的にも経済的にも制約を受けるのみならず、モデル作成に多大な労力を要することが多い。ゆえに、トンネル工事に伴う湧水量、地表水量、地下水位の時系列を3次元的に捉え、かつ水利用に与えるトンネル工事の影響を判断できる資料を提供しうる解析例は、まだ数少ない。

本研究では、鉛直に近い複数の破碎帯と交わり、既設の導水路トンネルの下方に近接して交差するように計画されている新設の道路トンネルの掘削が、導水路トンネル内の供給水や周辺地盤の地下水に及ぼす影響を、3次元飽和－不飽和非定常浸透流解析手法によって定量的に解析した例を示す。

2. 対象地区

2.1 概説

本研究で対象とした地区は、中生代・古生代の砂岩と粘板岩の互層からなる丘陵地である。対象地区の概形をFig. 1に示す。ここには、山岳道路トンネルが計画されており、計画ルートの上位28mという小さい離隔で導水路トンネルがほぼ直角に交差している。この導水路トンネルは、建設後約30年程度経過しており、常時12,000～13,000m³/hrにのぼる飲料水を供給するライフラインである。加えて、導水路トンネル掘削時の緩み領域の存在や、覆工コンクリートの老朽化状態などの不確実要素が多く認められている。

このような近接施工においては、次のような事項が問題となる。

- 道路トンネル施工時における、切羽部の集中湧水の有無や、トンネル内の排水規模
- 道路トンネルを安全に施工するための地下水対策工の必要性
- 周辺地下水環境への損傷や周辺住居地域の井戸水の枯渇などに代表される、既設水源に及ぼす湧水影響の検討や保全対策
- 既設の導水路トンネルへの影響

トンネル掘削に際しては、施工時に発生する切羽集中湧水を低減するために水抜き工を行うことが重要な課題である。しかし、本地区における最も重要な課題は、導水路トンネルの多量の通水に影響を与えないで、いかに道路トンネルの近接部を施工するか、ということである。また、事前の地質調査によると、この交差部の地山の透水係数が 10^{-2} cm/sec程度であることが判明し、トンネル切羽の交差部への近接とともに多量の湧水が発生することも想定されている。

2.2 地形、地質

本研究で対象とした地区は、風化浸食の進んだ緩やかな傾斜を持つ山地であり、山裾部には丘陵地や扇状地などが分布する。地質は、粘板岩と砂岩の互層及び崖錐堆積物である。砂岩と粘板岩の互層を北東から南西に縦断する断層破碎帯が数箇所に分布する。地層の走向は北西～東南方向、傾斜は全体的にはやや南傾斜である。道路トンネルは、山裾から山間部に向けて、この互層及び断層破碎帯に掘削される計画である。道路トンネルと交差する導水路トンネルの施工時には、断層破碎等の亀裂密集部からの集中湧水が発生した経緯も記録されている。

2.3 地山の透水性

交差部の透水性は、鉛直ボーリング孔によるルジオン試験結果によれば、亀裂の少ない堅硬部での透水係数は $10^{-5} \sim 10^{-4}$ cm/secであり、トンネルと導水路トンネル交差部近傍の断層破碎帯部での透水係数は $10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm/secである。また、ボーリングコアからみると、破碎部は2~5m毎に認められ、全体として破碎を受けていることが予測された。地下水位は、Fig. 2に示す通り、導水路トンネル内の水面レベルに近いGL-60m程度の位置に認められている。

2.4 道路トンネルの概要

道路トンネルは、東行きと西行きを別々のトンネルとするように計画されている。掘削断面積は、おおよそ約80m²である。施工方式は、上半ショートベンチ方式による機械掘削である。導水路トンネル交差部では、トンネル掘削に先立って水平先進ボーリングを実施し、地山の透水性や湧水量を事前に調査する。

2.5 導水路トンネルの現況

計画されている道路トンネルと交差する導水路トンネルにおいては、覆工の破損によって地山が露出している箇所があり、かなり老朽化している。トンネル直上に位置している沢水の枯渇の状況から考えると、導水路トンネルは周辺地山の地下水を引水していることが想定されている。また、近傍のボーリング孔の水位と導水路トンネルの水位がほぼ等しいことから、地山と導水路トンネル間で地下水の受け渡しが頻繁に行われているものと推定されている。1997年に実施された水収支調査の結果によれば、導水路トンネルに流入、または導水路トンネルから流出する地下水の量は、導水路トンネルの全通水量(12,000~13,000m³/hr)の3~4%に相当している。ここに、マイナスは流入、プラスは流出を意味する。なお、導水路トンネル内の水位は天端より低く、開水路となっている。

3. 地下水解析手法

3.1 地下水解析モデルの構築

従来用いられてきた断面2次元解析では、対象地区の導水路トンネルからの道路トンネルの引水量を評価するためには、モデルの奥行き(道路トンネルの区間距離)を設定しなければならない。実際の地山では、導水路トンネルから道路トンネルに向かう地下水の流れは、奥行方向に一様にはならない。そのため、断面2次元解析モデルの奥行きを正当な根拠をもって正確に設定することは難しく、断面2次元解析による引水量の定量的な評価には問題がある。

3次元地質モデルは、地山の破碎帯の透水性が大きいことから、Fig. 3に示すように、破碎帯部に透水性の大きい要素を配置することができるようメッシュ分割した。モデルの規模は、116,200節点、107,502要素である。地山の主体となっている砂岩と粘板岩の互層、破碎帯、低地の一部に見られる砂礫層の透水係数は、それぞれルジオン試験で得られた 10^{-5} 、 10^{-2} 、 10^{-4} cm/secを採用した。なお、初期の地下水面は、沢水流量や、ボーリング孔における孔内の水位を参考にして求めた(3.4参照)。

3.2 有限要素法による3次元飽和-不飽和非定常浸透流解析

本研究で対象とした道路トンネルのように、水路や湖沼などの水位下のトンネル施工の場合、トンネル坑内では水抜き・排水を行いながら施工されることが一般的である。トンネル切羽が固定水面(水路、湖沼)などに近接することに比例して坑内湧水量の増加が予測される。さらに、トンネル切羽が固定水面に最も接近する段階では、水路等からトンネルに向かう地下水供給量に応じて、多量の地下水が坑内に流れるため、供給量の多少によっては直上の水面と坑内との間に不飽和域が発生することが予測される。特に、水面から

X: 南向き、Y: 東向き、Z: 鉛直上向き
単位: m

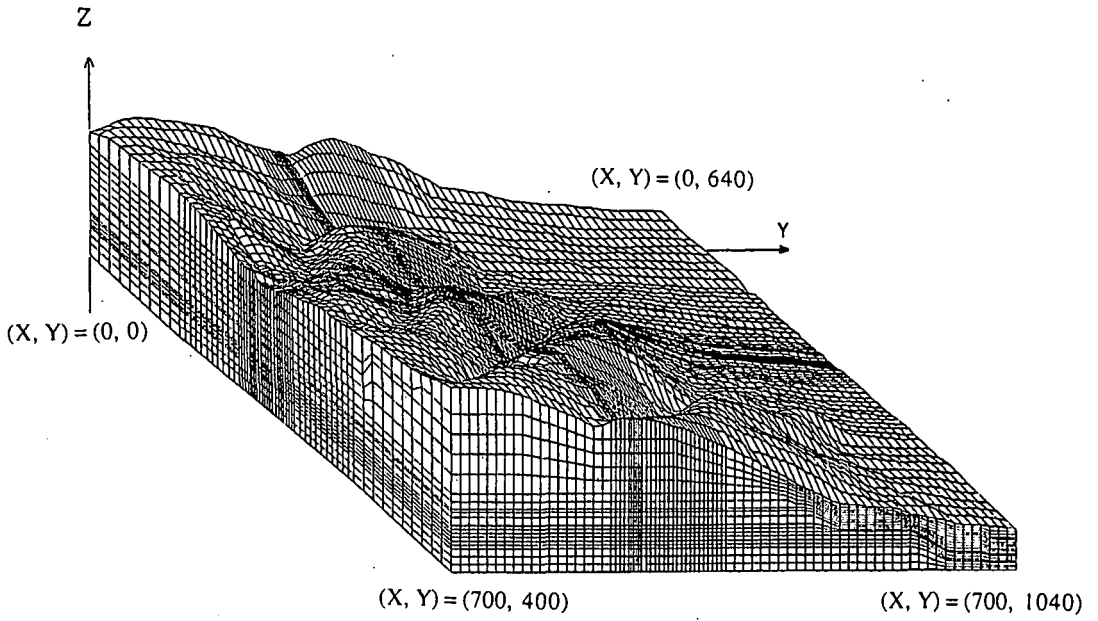


Fig. 1 対象地区の概形

導水路トンネル

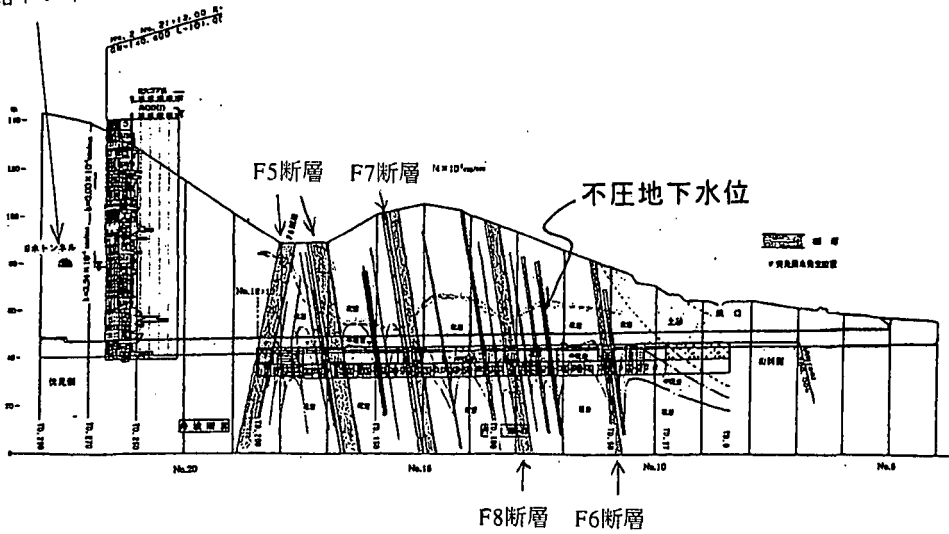
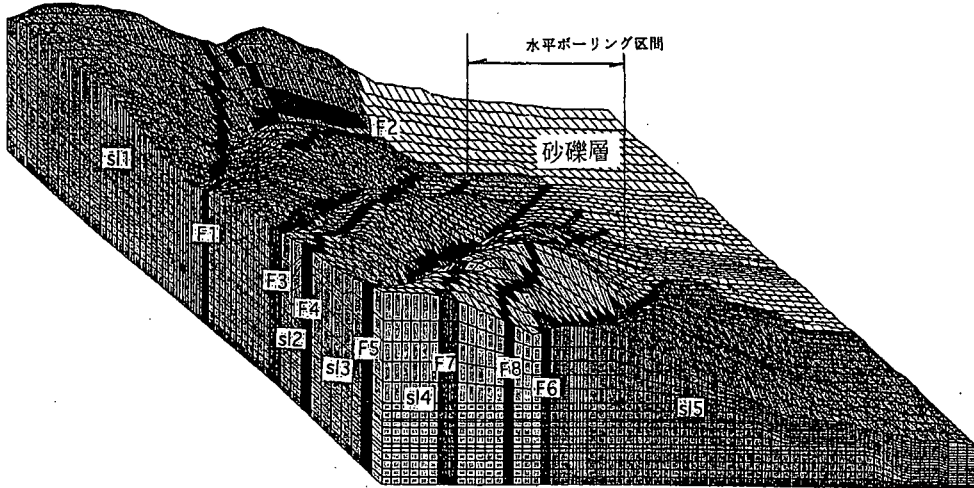
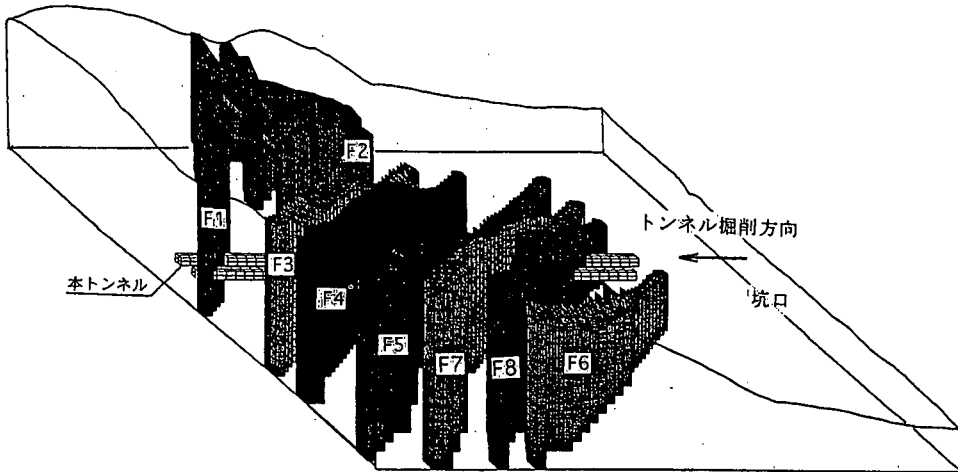


Fig. 2 地下水位

地山の3D地質区分



トンネルルートと破碎帯分布



砂岩・粘板岩互層(s11～s15) : $k = 10^{-5}$ cm/sec

断層・破碎帯(F1～F8) : $k = 10^{-2}$ cm/sec

砂礫層 : $k = 10^{-4}$ cm/sec

Fig. 3 3次元地質モデル

岩盤部を介して地下水が引水される場合、水面との接近度合や経過時間に応じて、飽和領域と不飽和領域の複雑な発生過程が予測される。

このような地下水挙動を3次元的に評価するためには、飽和領域と不飽和領域を一括して扱える解析手法が不可欠である。このため、本研究では、赤井ら⁹⁾によって誘導された飽和-不飽和領域内の浸透の支配方程式を用い、これを有限要素法によって離散化し、地層構造や断層を考慮した要素分割を行い、導水路トンネルは、内壁の遮水性を無視して、覆工部分を表現する低透水性の要素は使用せず、壁面を圧力0の水頭固定境界とすること、道路トンネルは施工ステップに応じて切羽や壁面に相当する節点に圧力0の水頭固定条件を与えていくことでモデル化した。このことは、トンネル切羽や壁面の覆工が地山の地下水の壁面からの浸出になんら影響せず、またトンネル掘削によって周辺地山の透水性は変化しないと考えていることを意味する。

なお、有限要素離散化した支配方程式の解法には、計算速度の点から、SSOR-PCG法⁹⁾を採用した。

3.3 支配方程式

ここに示す支配方程式の誘導は、赤井らによる誘導を再整理したものである。

水の密度が時間的、空間的に不変であると仮定すると、連続式

$$-v_{i,j} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

及び飽和-不飽和領域におけるDarcy流れの式（運動方程式）

$$v_i = -K_r(\psi) K_{ij} h_{,j} \quad (2)$$

$$h = \psi + x_3 \quad (3)$$

より、次式を得る。

$$\{K_r(\psi) K_{ij} h_{,j}\}_{,i} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4)$$

ここに、 v_i は流速の x_i 成分、 θ は体積含水率、 $K_r(\psi)$ は比透水係数（ある体積含水率における地盤の透水係数の飽和状態における透水係数に対する比で、直接には体積含水率によって決まるが、ここでは毛管ポテンシャルの関数として与える）、 K_{ij} は飽和透水係数テンソル、 h は全水頭、 ψ は圧力水頭（不飽和状態では毛管ポテンシャル）である。

地盤の間隙率を n 、飽和度を S_w とすると、

$$\theta = n S_w \quad (5)$$

であるから、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (n S_w) = \frac{d}{d\psi} (n S_w) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left\{ S_w \frac{dn}{d\psi} + n \frac{dS_w}{d\psi} \right\} \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (6)$$

となる。不飽和領域においては圧力水頭変化による間隙率の変化が生じないものと仮定すると、式(6)及び式(3)を式(4)に代入して次式を得る。

$$\{K_r(\psi) K_{ij} (\psi + x_3)_{,j}\}_{,i} = \{\alpha S_w + c(\psi)\} \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (7)$$

ここに、 $S_w = dn / d\psi$ は比貯留係数、 $c(\psi) = d\theta / d\psi$ は比水分容量であり、 α は、飽和領域($\psi \geq 0$)においては1、不飽和領域($\psi < 0$)においては0となる係数である。式(7)が飽和-不飽和領域内の浸透の支配方程式である。

なお、 K_r は直接には θ の関数であるが、ここでは定式化を簡単にするため ψ の関数として取り扱う。不飽和領域($\psi < 0$)においては、 θ と ψ とは水分特性曲線によって1対1に対応付けられ、飽和領域($\psi \geq 0$)においては ψ の値に関わらず常に $\theta = n$ である。当然ながら、飽和領域($\psi \geq 0$)においては $K_r = 1$ である。一般には、水分特性曲線は浸透過程と排水過程では異なった経路を通る、すなわちヒステリシスを示すが、本研究では、簡単のため水分特性曲線は浸透過程と排水過程で同一の経路を通るとした。

以上の詳細は、文献⁹⁾を参照されたい。

3.4 地山の物性

地山の物性は次の通りである。透水係数は、砂岩と粘板岩の互層部は 10^{-5} cm/sec、断層破碎部(F1～F8)は 10^{-2} cm/secとした。また、孔内載荷試験の結果によれば、各層とも変形係数は 10^{-3} kgf/cm²程度であり、これをもとに比貯留係数を 10^{-6} と設定した。

3.5 解析手順と境界条件

450日間にわたる地下水の挙動を解析するためには、降雨の影響を考慮しなければならない。原位置での降雨量の詳細な記録が存在しないことから、降雨強度は当該地域のおおよその年間降雨量(1,500mmとした)を1年(31,536,000秒)で除したものとし、タンクモデルを用いた簡単な水文学的検討により、降雨浸透率(降雨のうち地盤に浸透する量の割合)を0.17とした。降雨強度と降雨浸透率の積を地表面からの流入量とし、モデルの地表面の各節点に流量境界条件を与え、要素の表面積に応じて配分された流入量を指定した。ただし、地下水面が地表面上にある場合(地表面の節点の節点圧力水頭が0または正となる場合)は、その節点の条件を圧力0の水頭固定境界として収束計算を行った。計算収束時に圧力0の水頭固定境界条件が与えられていた節点の流出量は、沢水流量に相当すると考えられる。

既設トンネルである導水路トンネルが対象地区をほぼ南北に貫き、道路トンネルが東の低地から西の山岳部へと掘削される計画であるため、道路トンネル掘削時の地下水の流れは、広域的には南と北から道路トンネルに向かうことが予想される。

道路トンネルが掘削されると、その地下水に対する影響がトンネルから南と北へ向かって伝わっていき、ついにはモデルの南と北の境界に到達する。このため、南と北の境界の取り扱いには注意を要する。

まず、対象地区内に点在する井戸において観測された地下水位をもとに水位のコンター図を描き、これをもとにモデルの東西南北の周囲における水位を求め、この水位固定境界として定常解析を行う。この解析結果と先のコンター図とを比較して最大の差が1cm以内であることを確認した上で、東西南北の周囲の境界上の節点流量を求める。東の境界を水位固定としたまま、西、南、北の境界を流量固定として定常解析を行う。この結果が先の解析結果とほぼ等しいことを確認し、トンネルを掘削しない状態で10日間程度の非定常解析を行って、地下水位に変動が生じないことを確認する。このことは、道路トンネルがモデルの南と北の境界を越えて横断方向に地下水を引き込まないということであり、地下水涵養量を低く見積もることになる。

これ以後、モデルに、導水路トンネルを瞬時に、先進ボーリングと道路トンネルを段階的に、それぞれ掘削していく。先進ボーリングの掘削は、掘削予定線上の節点に圧力0の水頭固定条件を与えることによって表現する。実際の道路トンネル施工の速度が月進40m程度であると想定し、1か月に1度、道路トンネルに相当する要素を40mにわたって除去し、切羽と側壁を水圧0の水頭固定境界に変更することによって掘削を表現する。このことは、先にも述べたように、トンネル切羽や壁面の覆工が地山の地下水の壁面からの浸出になんら影響しないと考えていることを意味する。なお、道路トンネルは、東行き、西行きとも、高さ10m、幅10mの矩形断面であり、導水路トンネルは、高さ3m、幅3mの矩形断面である。また、道路トンネルの東行きと西行きの切羽は同時に進行するものとする。

以上の境界条件処理をTable 1に示す。

このモデルの妥当性は、沢水流量(基底流量)とボーリング孔水位から検証している。すなわち、地山の物性や降雨強度、降雨浸透率といったパラメータが現実のものと大きく食い違っていれば、沢水流量やボーリング孔水位の実測値と解析値も異なるはずであり、実測値と解析値がよく一致していれば、パラメータがほぼ妥当であると判断できる。

Table 1 非定常解析における境界条件処理

時刻 (H)	事項	備考
0	初期定常状態の解析	東・西・南・北とも水位固定境界
0	初期定常状態の解析	東は水位固定、西・南・北は流量固定
0	非定常解析開始	
0~10	条件不変	水位が変動しないことを確認
10	導水路トンネル全長掘削	
30	先遣車・リング 40m 延長掘削	
60	先遣車・リング 70m 延長掘削	
90	先遣車・リング 40m 延長掘削	
120	先遣車・リング 30m 延長掘削	
150	道路トンネル 40m 掘削	
180	道路トンネル 40m 掘削	
210	道路トンネル 40m 掘削	
240	道路トンネル 40m 掘削	
270	道路トンネル 40m 掘削	
300	道路トンネル 40m 掘削	
330	道路トンネル 40m 掘削	
360	道路トンネル 40m 掘削	
390	道路トンネル 40m 掘削	
420	道路トンネル 40m 掘削	
450	解析終了	

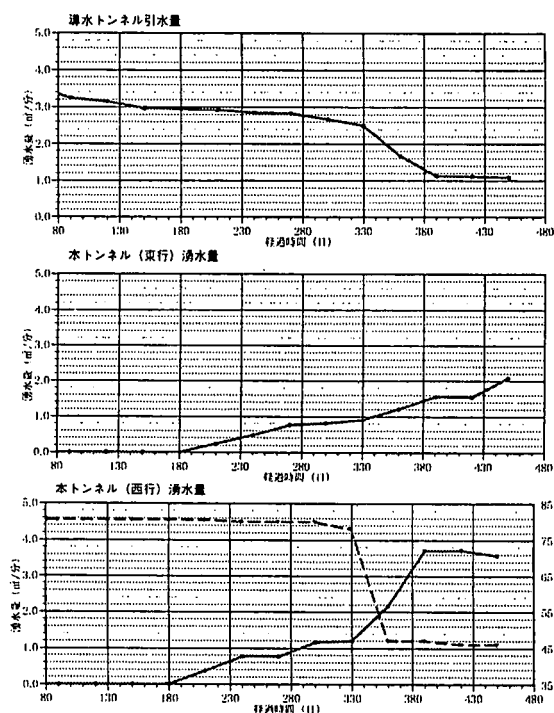


Fig. 4 導水路トンネルから引水される量と、道路トンネルの湧水量の経時変化

4. 解析結果

導水路トンネルから引水される量と、道路トンネルの湧水量の経時変化をFig. 4に示す。ここに、F5、F4およびF3通過時は、それぞれ計算開始後270日、330日および390日に相当する。

道路トンネルの東行き、西行きとも、F5断層通過時に650～720l/min程度の湧水量が発生する。一方、導水路トンネルから引水される量は253l/min程度である。このことから、道路トンネルが掘削される以前は、地下水が導水路トンネルに流入していたことが想定される。F4、F3断層通過時には、トンネル湧水量の増加とともに、道路トンネルが導水路トンネルから1.0m³/min程度を引水することが予測される。これは、導水路トンネル通水量（12,000～13,000m³/hr）の0.7%程度に相当する。この割合は小さなものであり、道路トンネル施工時に、トンネル交差部に特に止水対策を施さなくてもよいと判断することができる。

また、代表的な時間ステップにおける水圧分布と全水頭分布をFig. 5に示す。道路トンネルの掘削の進行に伴って、地下水面が低下している状況や、導水路トンネル付近の水圧分布が変化している状況が図から理解できる。

5. 結語

本研究は、山岳施工方式の道路トンネルにおいて、ほぼ直角に交差する導水路トンネルとの近接施工区間における地下水問題を扱った。解析モデルでは、地下水涵養量を低く見積もり、道路トンネル、導水路トンネルとも覆工の遮水性を考慮しないという安全側の仮定のもとに3次元飽和－不飽和非定常浸透流解析を行って、止水対策を施すことなく道路トンネル掘削が可能であるという予測結果を得た。

今回は、事前調査及び計測結果を用いて、モデルの同定計算を行う過程は報告できなかった。今後は、調査ボーリングや施工中のデータを参考にしながら、モデルの精度を向上させる必要がある。

参考文献

- 1) 大西有三・田中 誠・安田 亨・高橋健二・山田耕嗣：トンネル掘削の周辺地盤地下水に及ぼす影響の評価、第31回地盤工学研究発表会講演概要集、pp. 2137～2138, 1996.7.
- 2) 大西有三・田中 誠・安田 亨・高橋健二：トンネル掘削の周辺地盤地下水に及ぼす影響の評価（その2）、第32回地盤工学研究発表会講演概要集、pp. 1997～1998, 1997.7.
- 3) 大西有三・大津宏康・田中 誠・安田 亨・高橋健二：トンネル掘削の周辺地盤地下水に及ぼす影響の評価（その3）、第33回地盤工学研究発表会講演概要集、pp. 1805～1806, 1998.7.
- 4) 大西有三・大津宏康・田中 誠・安田 亨・高橋健二：トンネル掘削の周辺地盤地下水に及ぼす影響の評価（その4）、第34回地盤工学研究発表会講演概要集、pp. 1319～1320, 1999.7.
- 5) 赤井浩一・大西有三・西垣 誠：有限要素法による飽和－不飽和浸透流の解析、土木学会論文報告集第264号、pp. 87-96, 1977.
- 6) 西垣 誠・中屋眞司・河野伊一郎：前処理付き共役勾配(SSOR-PCG)法を用いた飽和－不飽和多孔質媒体中の三次元浸透解析法、土木学会論文集第448号/III-19, pp. 101-110, 1992.

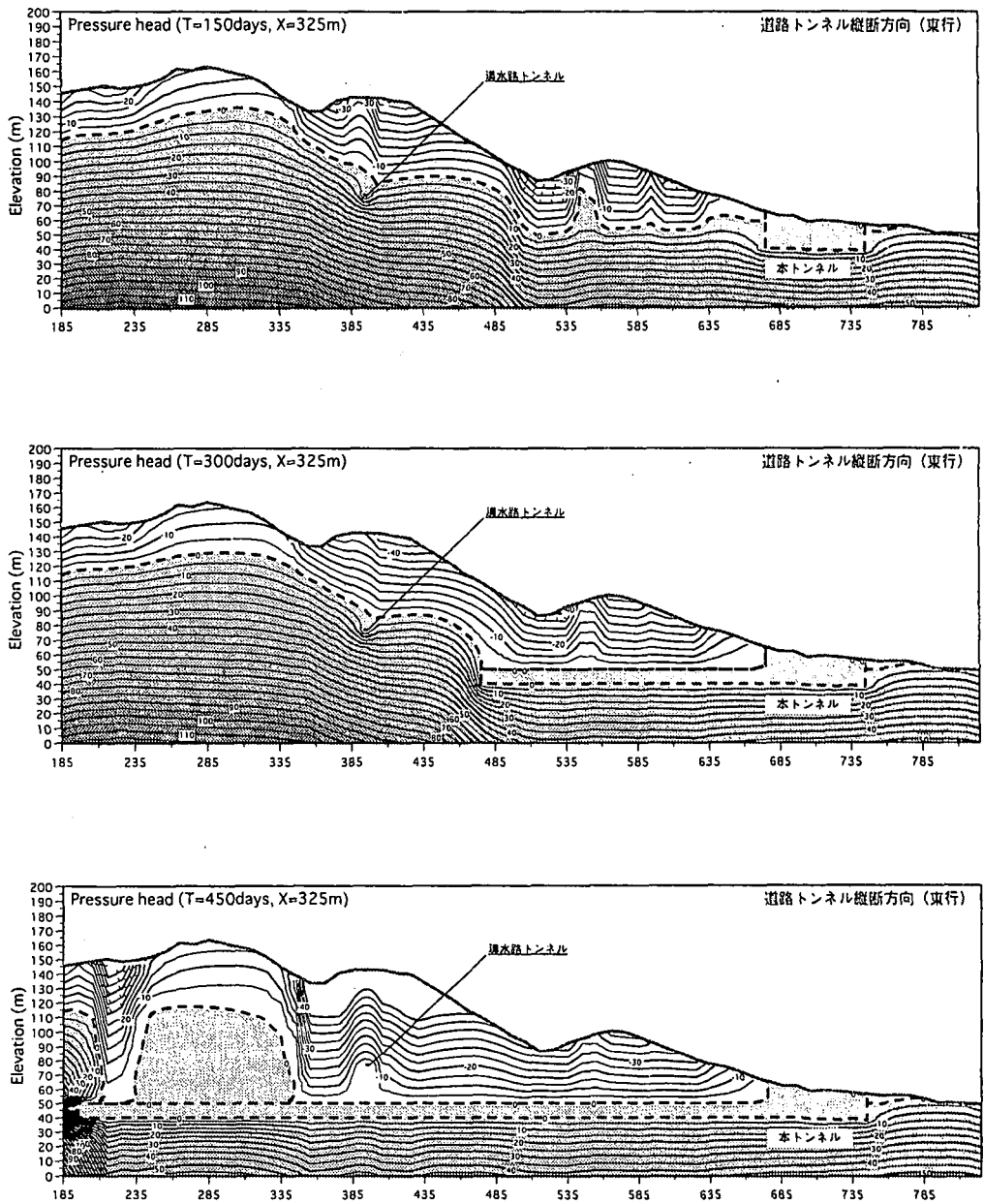


Fig. 5 水圧分布