

地表傾斜データを用いた水理地質構造の推定手法の有効性について

大山 卓也^{1*}・竹内 竜史¹・三枝 博光¹・尾上 博則¹・松本 浩二²

¹独立行政法人 日本原子力研究開発機構（〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64）

²東北大学大学院 環境科学研究科（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20）

*E-mail:ohyama.takuya@jaea.go.jp

筆者らは、地表付近における調査や観測により、ボーリング孔で得られる情報を補完する手法の1つとして、地下空洞の掘削などによる人為的な地下水流動場の変化に伴う地表での傾斜変化を観測し、地下深部の地下水流動に影響を与える水理地質構造を逆解析により推定する手法を開発している。国の深地層の研究施設の一つである瑞浪超深地層研究所用地内に設置した傾斜計を用いて、研究坑道の掘削によって生じる地表の傾斜量を把握し、本研究で開発した解析手法により岩盤の体積変化を推定した。さらに、解析結果と瑞浪超深地層研究所用地内外のボーリング孔で実施してきた長期水圧モニタリング等で取得した水圧変化データに基づき結果を比較検討し、水理地質構造の推定に対する本手法の有効性を評価した。

Key Words : tiltmeter, long-term monitoring, groundwater flow, hydrogeological structure, inverse analysis,

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発では、地下深部における地下水流動場を調査、解析、評価するための体系的な技術を構築することが重要である。また、地下に大規模構造物を建設する場合にも、環境保全の観点から地下水流動場を評価する必要がある。

地下深部における地下水流動場を評価するためには、岩盤の透水性や間隙水圧の分布などを把握し、地下水流動に影響を与える水理地質構造の分布を推定する必要がある。一般的に、地上からの調査の際には、ボーリング孔を用いた調査や観測によってこれらの情報が取得される。しかし、多数のボーリング孔を用いた調査を実施すれば、推定精度の高い結果が得られるものの、深度数100m規模のボーリング孔を用いた調査や観測を数多く行うには多大な時間や費用が必要となる。したがって、ボーリング孔での調査や観測から得られる情報を地表付近における調査や観測で得られる情報によって補完する方法を開発することは、効率的かつ合理的に水理地質構造を把握するうえで有益であると考えられる。

筆者らは、地表付近における調査や観測によってボーリング孔で得られる情報を補完する手法の1つとして、揚水試験や地下空洞の建設など、人為的に発生させた地下水流動場の変化に伴う地表での傾斜の微小な変化から、

地下深部の地下水流動に影響を与える大規模な水理地質構造を推定する手法の開発を実施してきた。

本報告では、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）が進めている超深地層研究所計画¹⁾における研究坑道の建設に伴う湧水や、ボーリング孔での揚水試験などで発生させた地下深部の人為的な地下水流動の変化によって生じる地表の傾斜の微小な変化データを用い、開発した逆解析手法によって地下深部の岩盤の体積の変化を推定した結果を示すとともに、研究坑道周辺のボーリング孔で取得された長期水圧モニタリングデータと本手法を用いた推定結果との比較を行うことにより、水理地質構造の推定に対する本手法の有効性の確認を行った。

2. 超深地層研究所計画

原子力機構では、地層処分研究開発の基盤となる深地層の科学的研究の一環として、岐阜県瑞浪市において、結晶質岩を対象とした超深地層研究所計画を進めており、深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備と深地層における工学技術の基盤の整備を目標として設定している。超深地層研究所計画は、「第1段階：地表からの調査予測研究段階」、「第2段階：研究坑道の掘削に伴う研究段階」、「第3段階：研究坑道を利用した研究

段階」の3段階に区分して進める計画である。第1段階における野外調査は、2005年3月に終了し、現在は、研究坑道の掘削を進めている。

(1) 地形・地質の概要

a) 地形概要

瑞浪超深地層研究所用地（以下、研究所用地）が位置する岐阜県の東濃地域は、北西部に美濃飛騨山地、南東部に三河山が分布し、その間に丘陵地が広がる北東－南西方向の軸をもった船底状の地形概観を示す。北部の山地には、木曽川が流れ、先行性の河川として深い谷を刻んでいる。南東部の山地と丘陵地との境界は屏風山（標高794.1m）で、その付近は北東－南西方向に走る屏風山断層により崖錐堆積物を伴う急峻な崖となり明瞭に隔てられているが、南西部に向かうにしたがい不明瞭になる。丘陵地の中央部には、北東から南西に向かって土岐川が流れ、その本流および支流の沿岸には段丘が発達して台地を形成し、河川周辺の低地には沖積層が分布する。この地形と地質の間には明瞭な対応関係があり、中生代の基盤岩類の分布域は山地となり、一方、新第三系・第四系の分布域は丘陵地をなし、鮮新統の瀬戸層群（土岐砂礫層）が土岐面と呼ばれる丘陵地の頂面を形成している²⁾。

b) 地質概要

東濃地域の地質は、白亜紀後期の花崗岩（土岐花崗岩）からなる基盤を、新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が不整合で覆い、さらにその上位に固結度の低い新第三紀鮮新世の砂礫層（瀬戸層群）が不整合で覆っている³⁾（図-1）。瑞浪層群は、下位より、泥岩・砂岩・礫岩からなり亜炭を挟む土岐夾炭累層、泥岩・砂岩・凝灰岩を主体とする本郷累層、凝灰質の泥岩・砂岩を主体とする明世累層、シルト岩・砂岩を主体とする生俵累層の

4累層に区分される。瑞浪超深地層研究所の研究坑道は主として、この地域の基盤をなす土岐花崗岩中に建設される（図-2）。研究所用地近傍には、花崗岩および瑞浪層群を切る月吉断層や山田断層帯が分布している。このうち月吉断層は、ほぼ東西走向で70～80度の南傾斜の逆断層である。

(2) モニタリングレイアウト

図-3に研究所用地の地形図、第1段階の調査研究において推定された断層およびモニタリング孔の配置を示す。地表傾斜データは、04ME02～04ME05号孔の4箇所に設置した傾斜計によって測定されている。計測に用いた傾斜計はPinnacle Technologies社製のナノラジアン（ 10^{-9} radian）オーダーの分解能を持つ高精度傾斜計であり、地表から10m程度のボーリングを掘削してその中に設置されている。長期水圧モニタリング装置は、主に堆積岩を対象として掘削された浅層ボーリング孔のMSB-1号孔、MSB-3号孔、深層ボーリングであるMIZ-1号孔、超深地層研究所計画より広い範囲を対象とした広域地下水流動研究⁴⁾で掘削されたボーリング孔のDH-2号孔（深度500m）、DH-15号孔（深度1000m）などに設置され、孔内に多段パッカーを設置して複数の観測区間を設けている。

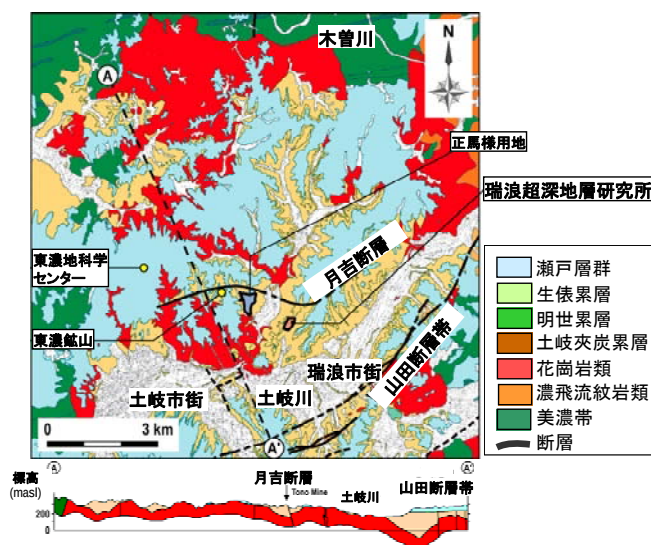


図-1 岐阜県東濃地域の地表地質 文献3)に追記

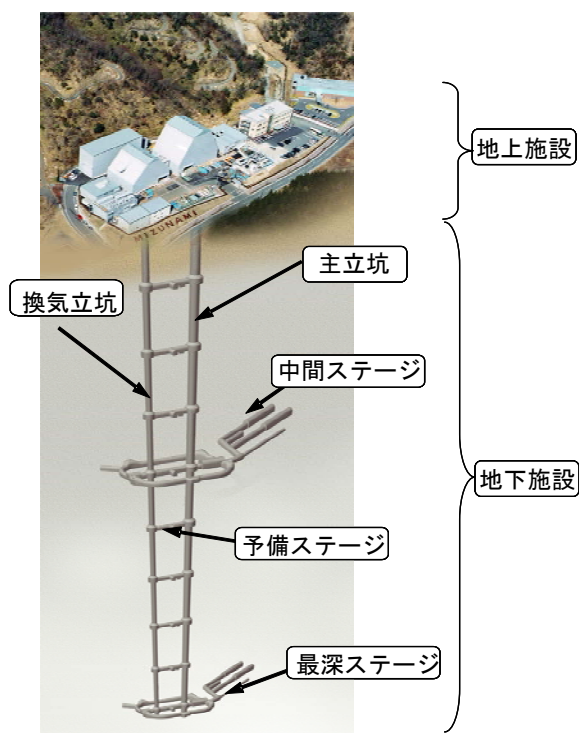


図-2 研究坑道のレイアウト（イメージ）

3. 地下水流動解析

第1段階の調査研究で実施された水理地質構造モデルの構築結果から、図-3中の推定断層Aは、断層に沿う方向には高透水性、断層面に直交する方向には低透水性の透水異方性を有し、推定断層Bは低透水性を有していると解釈されている⁹⁾。図-4に第1段階において解釈された断層の分布とその水理特性を示す。

水頭変化に対する断層の透水性の影響を把握することを目的として、地下水流動解析を実施した。モデル化・解析の領域は図-4に示すように研究所用地を中心とした2km四方とし、深度方向は地下水の流動系境界深度を考慮して深度2kmとした。解析の対象とした断層は、図-4に示す第1段階の調査研究で解釈された断層に、第2段階

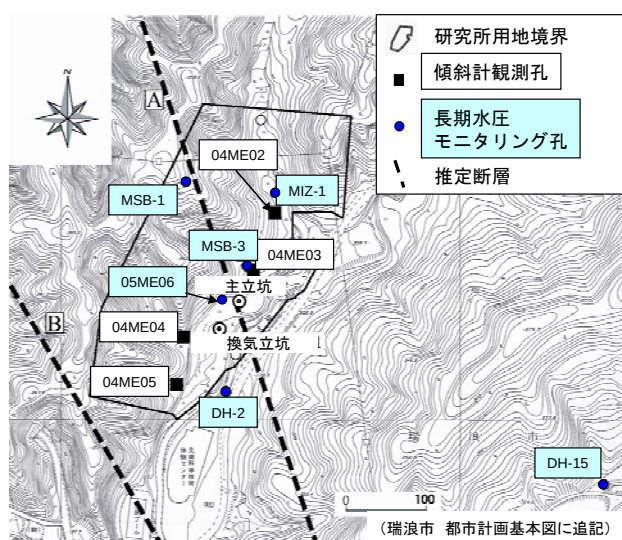


図-3 研究所用地とモニタリング孔配置図

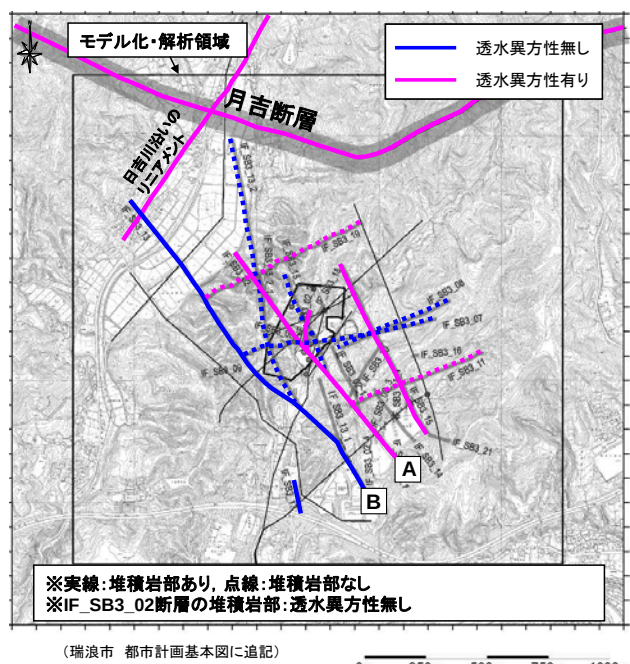


図-4 第1段階において解釈された断層の分布および水理特性

の調査の一環として研究坑道の孔底から実施されたパイロットボーリング調査⁹⁾で新たに把握された断層を追加した。また、パイロットボーリング調査結果から、断層Aを含む一部の断層は位置、形状が変更された。地層区分は、透水性のコントラストの観点から堆積岩を4層に、花崗岩は割れ目の分布密度の観点から3層に分けた。各断層と地層には、第1段階の調査研究で実施された水理試験によって把握された透水(量)係数を設定し、新たに追加した断層にはパイロットボーリング調査で把握された透水(量)係数を設定した。

深度200m(標高-20m)までの研究坑道の掘削を定常解析で模擬し、境界条件は、上部境界条件を一定涵養量、側方境界条件を固定水頭境界、下部境界条件を不透水境界とし、研究坑道の壁面は自由浸出面とした。

水理地質構造のモデル化と地下水流動解析には、原子力機構が開発した、断層等が混在している複雑な水理地質構造を有する岩盤中の地下水流動場を効率的にモデル化・解析するシステムであるGEOMASS (GEOLOGICAL MODELLING ANALYSIS AND SIMULATION SOFTWARE) システム⁷⁾を用いた。

解析結果を図-5に示す。図-5は標高20mの水頭分布である。この図から水頭の低下は断層A、Bに挟まれた範囲で大きく生じており、これらの断層が研究坑道掘削に伴う水圧変化に与える影響が大きいことが分かる。

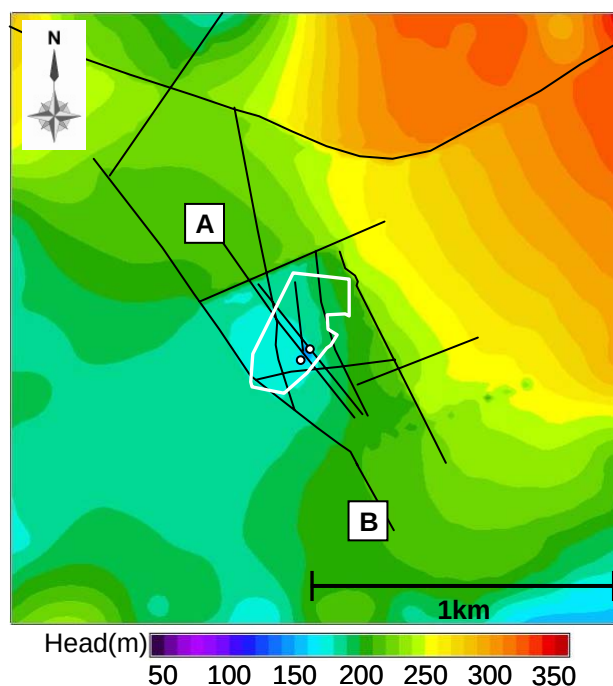


図-5 地下水流動解析結果(全水頭分布)

4. 地表傾斜データを用いた逆解析

第2段階の調査研究である研究坑道の掘削は2005年2月から開始しており、研究坑道の掘削に伴う坑道内への湧水は、排水処理プラントにて処理し、研究所近傍の河川へ放流していた。しかし、主立坑の掘削深度が約170mに到達した際、排水中のふっ素とほう素の濃度が排水基準内であったが、環境基準を超過していたため、2005年10月27日に研究坑道の掘削と排水を停止した。このため、研究坑道内の水位は上昇し、一時的には立坑の深度約50mまで冠水した。ふっ素とほう素を除去する設備を排水処理プラントに付加し、2006年2月20日から連続的な排水を再開している。

この立坑の冠水から再排水を大規模な水理試験としてとらえ、それ以前の2005年4月21日から同年9月30日までを「期間1」、排水を停止し立坑冠水が始まる2005年10月28日から同年12月10日までを「期間2」、再び排水が始まる2006年2月20日から同年3月31日までを「期間3」と設定し、それぞれの期間で取得された地表傾斜データを用いた逆解析を行い、岩盤の体積変化を推定した。

(1) 地表傾斜データ

図-6に地表傾斜の計測結果の一例を示す。図-6から、04ME03号孔では、期間1は立坑に向かう傾斜方向で、期間2は期間1の経路を遡って初期状態に戻る傾斜方向であり、期間3は期間1とほぼ同じ挙動を示していることがわかる。

(2) 逆解析および逆解析結果と地下水流動解析結果の比較

揚水試験や地下空洞の建設などに伴う人為的な影響によって、岩盤内の地下水流動場が変化することにより、岩盤の体積ひずみが発生して地表面の傾斜を変化させる。

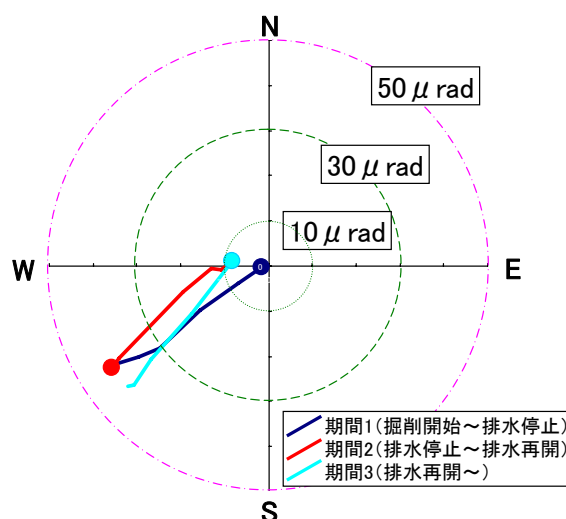


図-6 地表傾斜計測結果 (04ME03号孔)

したがって、岩盤に生じる体積ひずみと地表傾斜量の理論的な関係が明確になっていけば、傾斜計を用いた地表の傾斜量を逆解析することにより地下水流動場を評価できる。本研究で用いた手法は、Vascoらによって提案された逆解析手法⁹⁾の問題点を改良した手法^{9,10)}である。

解析に用いたモデルは、主立坑中心をモデルの中心とし、期間1の立坑の到達深度（深度80～160m）が堆積岩中であることから、堆積岩を主な検討対象とし、鉛直方向に160m、水平方向は主立坑とDH-15号孔の距離（500m）の2倍の1000mとした直方体とした。本解析モデルは従来の研究⁹⁾と同様に、地表面の凹凸や地質の不均質性を考慮しない半無限等方均一多孔質弾性体としている¹¹⁾（図-7）。

図-8に上記の期間1～3で計測された地表傾斜データを用いた逆解析によって体積変化を推定した結果^{10,11)}を示す。図中の破線が体積減少領域を、実線が体積増加領域を等高線で示しており、標高20mの断面を示している。

図-8(a)は期間1（2005年4月21日～9月30日：掘削中）の解析結果であり、図-8(b)は期間2（2005年10月28日～12月10日：排水停止～立坑冠水）、図-8(c)は期間3（2006年2月20日～3月31日：排水再開～）の解析結果を示す。

図-8(a)から期間1では、体積減少領域が立坑付近に集中していることが分かる。また、図-8(a)と図-8(b)を比較すると、地下水の体積増加領域と体積減少領域が逆転している。図-8(a)と図-8(c)を比較すると、体積減少領域が異なることが分かる。この理由については、より詳細な検討が必要であるものの、いずれの期間の解析においても、体積変化の中心が第1段階調査で透水異方性もしくは低透水性を有すると推定されていた断層A、Bの間に位置しており、体積変化も、ほぼ断層に挟まれた範囲で発生していることが分かる。このことから、本研究で開発した逆解析手法による解析結果は、第1段階の調査研究および第2段階の調査研究で得られた情報の一部を

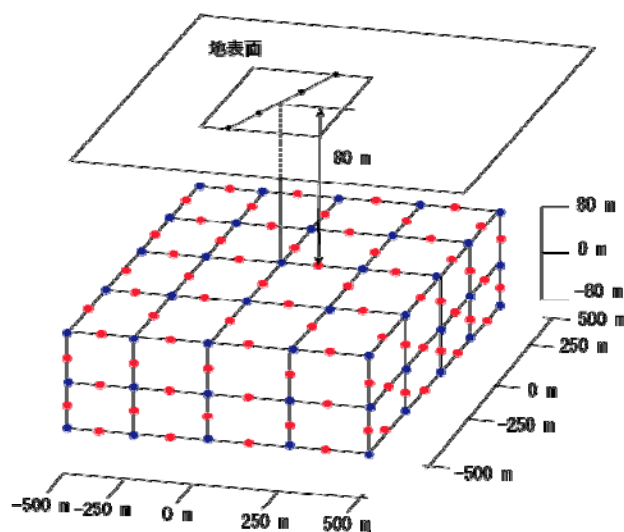


図-7 半無限等方均一多孔質弾性体モデル¹¹⁾

反映させた3章に示す地下水流動解析の結果と整合的であることが示された。

5. 長期水圧モニタリングデータによる水理地質構造の推定と逆解析結果の比較

本報告で対象としている堆積岩部における長期水圧モニタリングは、浅層ボーリング孔であるMSB-1号孔、MSB-3号孔の2孔で実施されており、他のボーリング孔における観測区間は、瑞浪超深地層研究所の研究対象である結晶質岩の花崗岩部に設けられている。MSB-1号孔は、パイロットボーリング調査の結果などから位置が変更された断層Aの東側に位置する。また、MSB-3号孔は斜孔であり、浅部の観測区間は断層Aの東側に位置し、深部の観測区間は断層Aの西側に位置している。

上記2孔において、4章で設定した期間1～3で観測された長期水圧モニタリングデータを図-9に示す。図-9中No.4からNo.7が断層Aの西側に位置している観測区間である。このモニタリング孔で得られた全水頭の実測値と第3章で示した地下水流動解析の結果の比較から、浅部において概ね実測値を再現できている結果が得られてい

る⁵⁾。また、図-9から、期間1に着目した場合、断層Aの東側の観測点である(a)では水位低下量は約10mであるのに対し、断層Aの西側の観測点である(b)の深部の水位低下量は約40m～60mと非常に大きく、この傾向は期間2、3のいずれについても同様であり、このことから断層Aが断層に直交する方向に対して低透水性を有していることが推定できる。

以上のことから、地下水流動解析結果と整合的である本研究で開発した逆解析による水理地質構造の推定手法は概ね妥当であるといえる。

一方、断層Bについては、その西側にモニタリング孔がないため、長期水圧モニタリングデータのみからでは断層Bが低透水性を有していることの直接的な証拠を見つけることはできない。長期水圧モニタリングデータから地下水流動場に影響を与える水理地質構造を把握するには、対象とする領域により多くの長期水圧モニタリング孔を配置し、広範囲かつ多数の長期水圧モニタリングデータを取得する必要がある。しかしながら、多数のボーリング孔を掘削することは、費用や調査にかけられる時間の面から現実的とは言えない。また、十分多くの長期水圧モニタリング孔を配置できない場合には、長期水

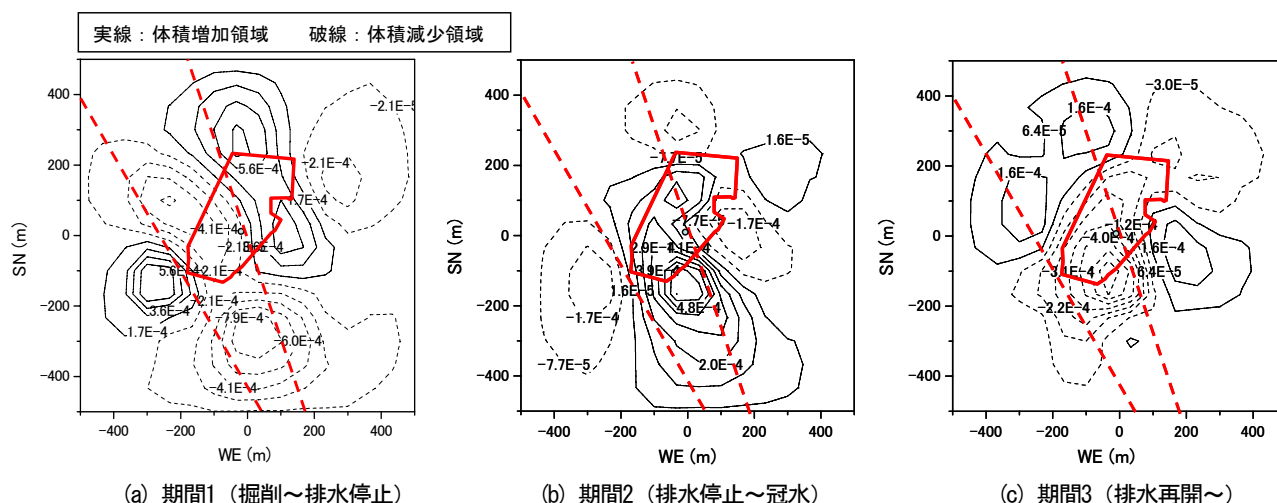


図-8 地表傾斜データを用いた逆解析結果

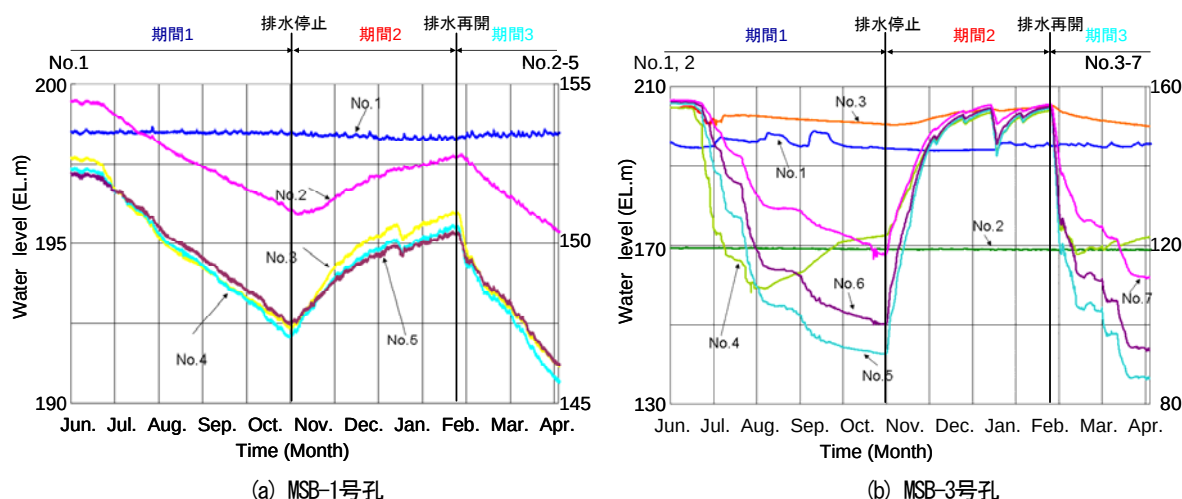


図-9 モニタリングデータ

圧モニタリングデータのみからでは地下水流動に影響を与える重要な水理地質構造が把握されず、地下水流動解析に用いるモデルにも反映されない可能性も考えられる。

ゆえに、限られたデータ数の長期水圧モニタリングデータから解釈した結果に、地表で簡便にデータを取得することのできる本手法による推定結果を加えることで、長期水圧モニタリングデータを補完し、地下水流動に影響を与える水理地質構造を把握できる可能性がある。また、長期水圧モニタリングデータを用いて、水理地質構造をモデル化する際に、本手法による水理地質構造の推定結果を考慮することで、水理地質構造モデルの妥当性をチェックすることにも使える可能性がある。

6. 結論

本研究では、開発した逆解析手法を用いて、実際の現場で取得された地表傾斜データから地下深部岩盤中の地下水流動場の変化を逆解析で推定した。その結果と第1段階の調査研究結果に第2段階のパイロットボーリング調査で新たに取得された情報を加えて実施した地下水流動解析の結果との比較を行った。その結果、地表傾斜データの逆解析結果は第1段階の調査研究で得られた結果と概ね整合的となった。さらに、逆解析結果と長期水圧モニタリングデータを基にした地下水変動の推定結果との比較では、長期水圧モニタリングデータからでは把握しきれない断層の影響が逆解析の結果から把握できた。したがって、地下水流動に与える影響が大きく、長期水圧モニタリングデータのみでは表現しきれない水理地質構造は、地表傾斜データを基にした解析結果と組み合わせることで把握できる可能性が示された。

以上のことから、本手法は、水理地質構造を推定する際に有効な補完方法となり得る。今後は、対象をより深度の深い花崗岩とし、実際に研究坑道を掘削しながら進める第2段階の調査研究と組合せながら、本手法の有効性を確認していく。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：超深地層研究所 地層科学研究基本計画，核燃料サイクル開発機構技術資料，JNC TN7410 2001-018，2002.
- 2) 貝塚 爽平，木曾 敏行，町田 貞，太田 陽子，吉川 虎雄：木曾川・矢作川流域の地形発達，地理評，37，pp.89-102，1964.
- 3) 糸魚川淳二：瑞浪地域の地質，瑞浪市化石博物館専報，No.1，pp.1-50，1980..
- 4) 動力炉・核燃料開発事業団：広域地下水流動研究基本計画，核燃料サイクル開発機構技術資料，PNC TN7020 98-001，1997.
- 5) 尾上 博則，三枝 博光，大山 卓也，遠藤 令誕：繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理地質構造のモデル化・地下水流動解析（ステップ 4），日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2007-34，2007.
- 6) 日本原子力研究開発機構：地層処分技術に関する知識基盤の構築 ―平成 18 年度―，日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 年度報告書，pp.26-27，2007.
- 7) 稲葉 薫，三枝 博光，M.J. White，P. Robinson：地下水流動の予測解析統合システム（GEOMASS システム）の概要と東濃地域への適用事例，地下水学会誌，第 44 巻第 2 号，pp.105-123，2002.
- 8) D, W, Vasco., K, Karasaki. and L, Myer. :Inversion of surface tilt caused by fluid migration, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124, pp.29-37, 1998.
- 9) 中谷 勝哉，松木 浩二，新井 孝志，大村 一夫，竹内 真司，荒井 靖，堀本 誠記：傾斜計を用いた地下水流動評価法の開発とモデル化，*Journal of MMIJ*, Vol.123 No.1, pp.17-25, 2007.
- 10) 中谷 勝哉，松木 浩二，新井 孝志，大村 一夫，竹内 真司，荒井 靖，堀本 誠記：傾斜データの逆解析による立坑掘削に伴う地下水流動の評価，*Journal of MMIJ*, Vol.123 No.1, pp.26-32, 2007.
- 11) 成川 達也，松木 浩二，新井 孝志，大村 一夫，竹内 竜史，荒井 靖，竹内 真司：傾斜データを用いた不均一な地下水流動の評価，*Journal of MMIJ*, 2007.

APPLICABILITY OF THE METHOD TO ESTIMATE HYDROGEOLOGICAL STRUCTURES USING A TILT DATA

Takuya OHYAMA, Ryuji TAKEUCHI, Hiromitsu SAEGUSA, Hironori ONOE and Koji MATSUKI

Authors have been developed the technique for estimating hydrogeological structures, which influence the deep groundwater flow, by an inverse analysis using tilt change by an artificial impact of the underground facility construction. It is possible to complement the data from borehole investigations by using the technique based on the data obtained from surface area. This paper describes the results of evaluation for the applicability of the technique by comparing with the long-term hydraulic monitoring data.