

トンネル掘削における地下水位低下抑制による 沈下対策工法

吉光 康夫¹・端山 裕章¹・緒方 明彦²
片山 政弘²・尾畑 洋³・中出 剛²

¹ 広島高速道路公社 高速1号線建設事務所 (〒732-0029 広島市東区福田二丁目350番地1吉野ビル)

² 正会員 (株)熊谷組 土木事業本部土木設計部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1)

³ (株)熊谷組 広島支店 (〒730-0051 広島市中区大手町4丁目6番16号)

本工事は、広島市内の大半の電力需要を担う変電所直下を最大土被り45mで2本の道路トンネルを掘削する工事である。設計段階から強風化した花崗岩および閃緑岩（それぞれマサ化）での地下水位低下に伴う地表面発生の可能性が懸念されていたが、施工の進捗に伴い大きな地表面沈下が発生したため、対策として薬液注入による地下水位低下及び地表面抑制対策（以下 制水工法と称す）を実施した。

本稿では、トンネル掘削に伴う地下水位低下によって生じる地表面沈下現象、及びその対策手法と効果について報告するものである。

キーワード：山岳トンネル, 地表面沈下, マサ, 薬液注入

1. はじめに

一般に山岳トンネルでは、対象地盤が軟岩、中硬岩などいわゆる岩盤である場合には、トンネル切羽からの湧水により周辺地山の地下水位が低下しても地表面に沈下が発生するという事例はほとんど報告されていない。一方、近年増加している都市部での山岳工法では、周辺環境の制約から地下水対策と地表面沈下の問題が取り上げられているが、両者の関係については未解明な部分が多い。

トンネル直上に重要構造物を有する本工事でも、当初設計段階より強風化したマサでの地下水位低下に伴う地表面沈下発生の可能性が懸念されていたが、その沈下機構に未解明な部分が多いことで、沈下発生状況に応じて柔軟な対応が可能となる山岳工法により施工が計画された。実施工では進捗に伴い地下水位低下に起因すると推測される大きな沈下が生じたため、沈下挙動について分析するとともに必要な対策工を実施した。

本稿では、トンネル掘削に伴う地下水位低下によって生じる地表面沈下現象について、沈下発生要因とそのメカニズムに関する考察及び対策手法とその効果等について報告する。

2. 工事概要

工事名称：広島高速1号線(安芸府中道路)

道路新設工事(トンネル工区)

発注者：広島高速道路公社

工事場所：広島市東区馬木地先～福田地先

工期：平成12年6月26日～平成18年9月30日(75ヶ月)

施工者：熊谷・前田・鴻治建設工事共同企業体

工事内容：トンネル延長 上り線L=990m

下り線L=1,026m

掘削断面積 82～104m²



図-1 位置図

広島高速1号線(安芸府中道路)は、広島市内中心部の幹線道路網を構成する北東部地域の主要幹線道路と位置付けられており、現在、山陽自動車道広島東ICまでの延伸区間(2.3km)において、鋭意施工が進められている。そのうちの約1kmがトンネル区間となり上下線2本のトンネルを施工中である。

トンネルルート直上には、広島市内の大半の電力需要を担っている変電所をはじめとした重要構造物が位置している。このような周辺環境条件下におけるトンネル掘削において、重要構造物に対する地表面沈下などに関する保全が求められた。

3. 地質概要

地質は図-2(下り線縦断図)に示すように、花崗岩、閃緑岩などの基盤岩の上位に土石流堆積物などの未固結層が分布する。岩質は一般的な岩盤等級に準じ、DL~DM級岩盤、DH級岩盤、CL級岩盤、CM級岩盤に区分した。トンネル切羽や上位に分布する基盤岩は強風化を被ることで、マサ化、一部粘土化(以下 花崗岩マサおよび閃緑岩マサと称す)しており、変電所直下では主に閃緑岩マサが分布する。また、地下水位はトンネル天端25~30m上方の土石流堆積物と基盤岩の境界付近に位置している。

図-4では深度別における変形係数と代表的な地質・岩級の層(深度)区分を示した。この結果では、

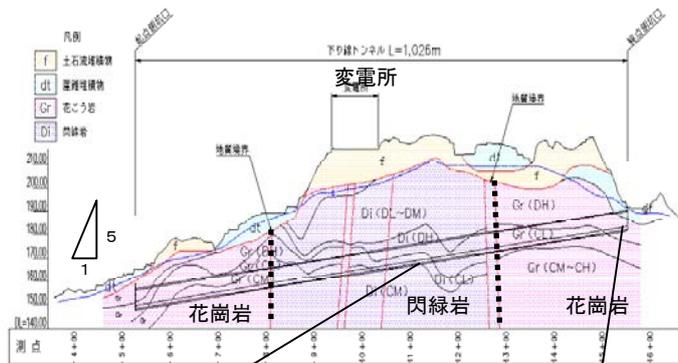


図-2 地質縦断図

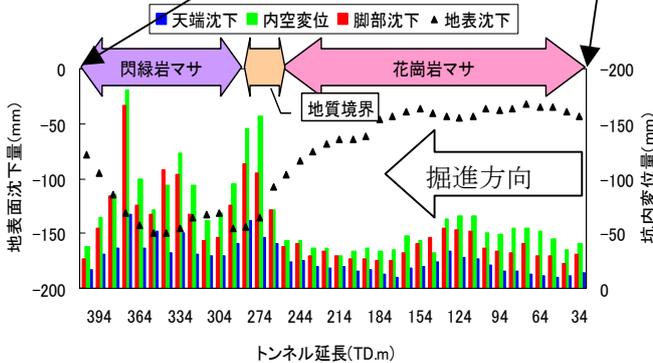


図-3 地質別地表面沈下および坑内A計測結果

DL~DM級岩盤では概ね数十MPaの値を示すことで土砂地山程度の低い変形係数となり、DH級岩盤では数百MPaの値を示すことで軟岩程度の変形係数となる。なお、花崗岩マサと閃緑岩マサでの変形係数の差異は小さい。

図-5では閃緑岩マサと花崗岩マサでの深度別における間隙率を示した。この結果では、閃緑岩、花崗岩マサともに深度の増加とともに間隙率の減少傾向が認められる。また、閃緑岩マサと花崗岩マサの比較では、相対的に閃緑岩マサの間隙率が大きく、その値は、一般的なマサと比較しても大きい40~50%程度を示す。

4. 地表面沈下状況

本トンネルでは、図-3に示すように、閃緑岩マサ区間にて、100mmを超えるような大きな地表面沈下が発生した。これは、図-6に示すように、切羽の安定性を目的とした水抜き先進ボーリング(先端部は約60m前方)に伴い、切羽前方から地表面が沈下したことの確認をはじめ、図-7に示すように地下水位低下量と地表面沈下量に高い相関にて関連性があることが判明した。

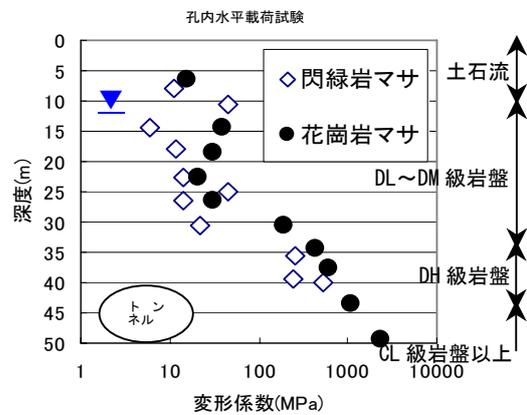


図-4 深度別変形係数

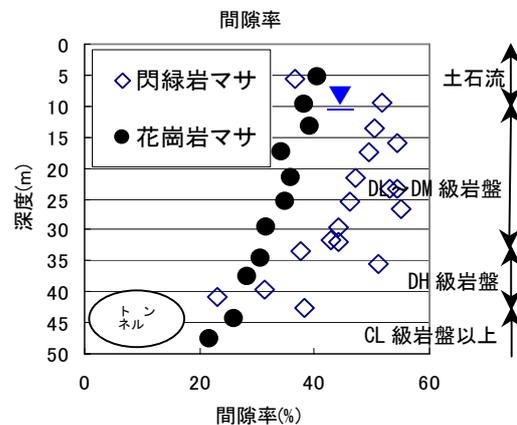


図-5 深度別間隙率

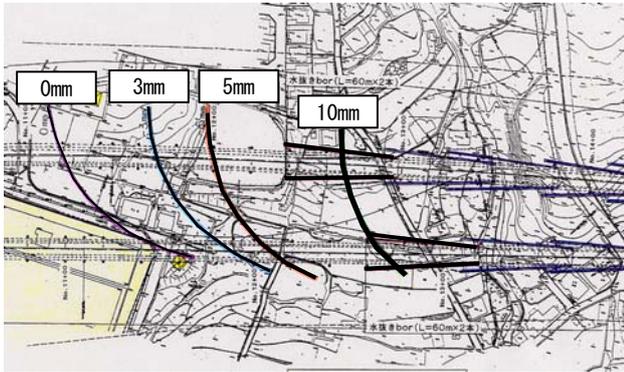


図-6 水抜きボーリング後の地表面沈下コンター

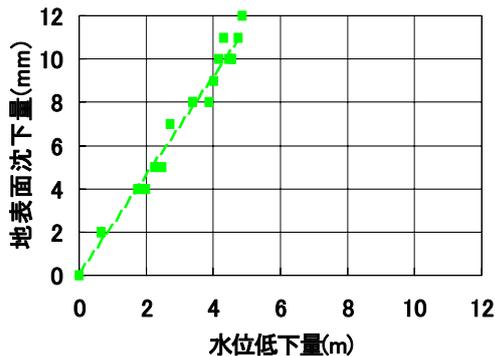


図-7 地下水水位低下と地表面沈下の関係

5. 地表面沈下要因分析

一般に、砂質土の高地下水水位地盤では、地下水水位の低下とともに有効応力の増加に伴う地表面（即時）沈下が発生することが知られている。しかし、岩の組織を残すマサガ、有効応力増加に伴う地表面（即時）沈下を発生させた報告は少ない。そこで、図-8に示すように、下り線の変電所手前で設定した試験施工区間にて、閃緑岩マサガ区間での地盤挙動を把握するためトンネル横断方向に層別沈下計と間隙

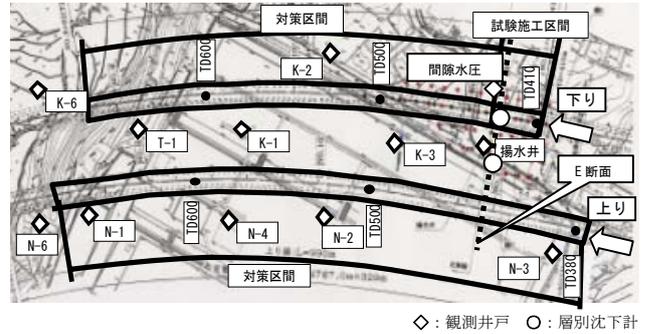


図-8 対策区間と観測井戸設置位置

水圧計を設置した計測断面（E測線）を設けた。

図-9ではトンネル掘削による地表面沈下の影響が少なく、主に地下水水位低下によって地表面沈下が発生すると考えることが一般に可能な、切羽手前2.5D（ $\approx 25m$ 程度）時の沈下状況を示し、図-10では切羽がE測線に到達した時点での沈下状況を示している。また、図中では各地質・岩級別に設置した層別沈下計による各層毎の沈下量より算出した（約10数mの層厚に対する）歪み量と地表面沈下量に対する各層の沈下比率を併記した。

図-9において、トンネル掘削の影響が少ない上下線中間部の層別沈下計、間隙水圧計の結果からは、トンネルが到達する前に地下水が約16m低下し、その地下水水位低下に応じて地下水面以下に分布するDL～DM級岩盤（下位）が0.1%と最も多く歪み、次いでDH級岩盤が0.07%と大きな歪値を示す。なお、これら地層の沈下量は全体沈下量の約70%を占める。

一方、図-10に示すように、切羽到達時にはトンネル掘削に伴う地山の緩みが周辺に影響を及ぼすことで、地下水低下に伴う地表面沈下に加え、更にトンネル直上の地盤の沈下が地表面までほぼ一様に波及する。また、上下線中間部でも相対的に大きな歪みが発生する箇所はトンネルに近いDH級岩盤に移行する。この結果は、トンネルが到達する前では、地

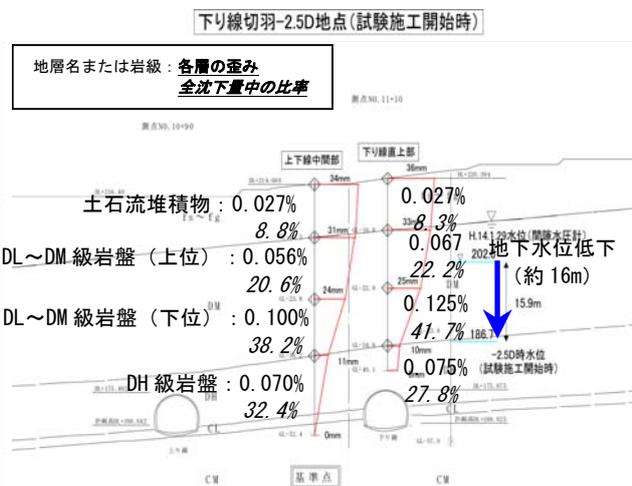


図-9 切羽到達前-2.5D

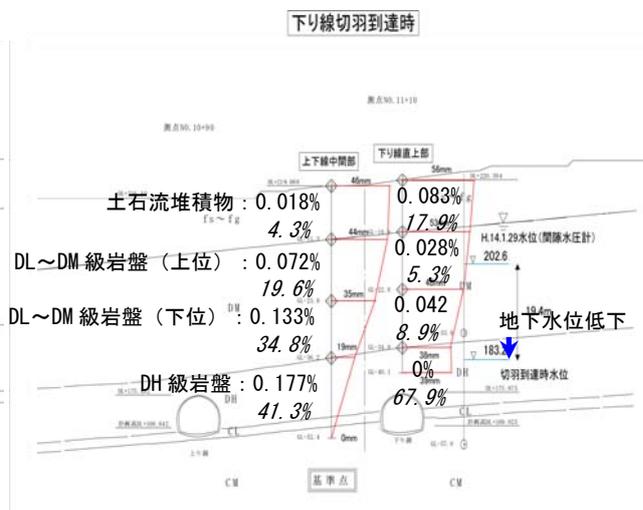


図-10 切羽到達時

下水の低下に応じて、有効応力が増加し、DL～DM級岩盤（下位）やDH級岩盤に圧縮（圧密）が生じることで、地表面が沈下することを示唆している。この原因は、有効応力の増加に伴い、特に間隙率が著しく大きいことを確認したDM級岩盤においては、その間隙が閉塞したものと考え、DH級岩盤については、いわゆる弾性的な沈下が発生したものと考える。

6. 対策工の検討

(1) 対策工の選定

対策工として制水効果・経済性等を総合的に評価し、薬液注入による制水工法を採用した。これは、トンネル外周部に難透水ゾーンを形成し、坑内湧水は許容するものの所要の量に抑制することで地下水位低下の制御を図る工法である。

(2) 改良仕様の検討

無対策の場合、掘削に伴う地下水位低下量は35m程度と予測された。これに対し、事前の挙動分析から地表面沈下量を目標値内とするためには、地下水位低下量を13m以下とすることが目安とされた。そこで、改良厚さをパラメータとした二次元浸透流解析により、所要の水位低下量を満足するための改良範囲を算定した。検討モデルを図-11に示す。ここ

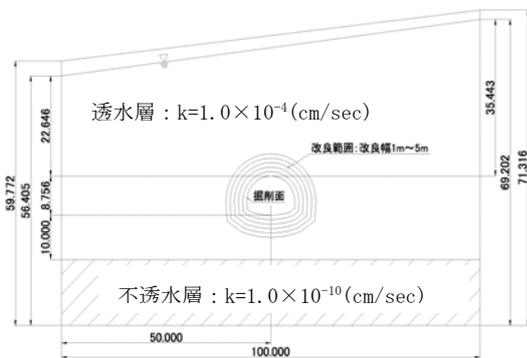


図-11 改良範囲検討モデル

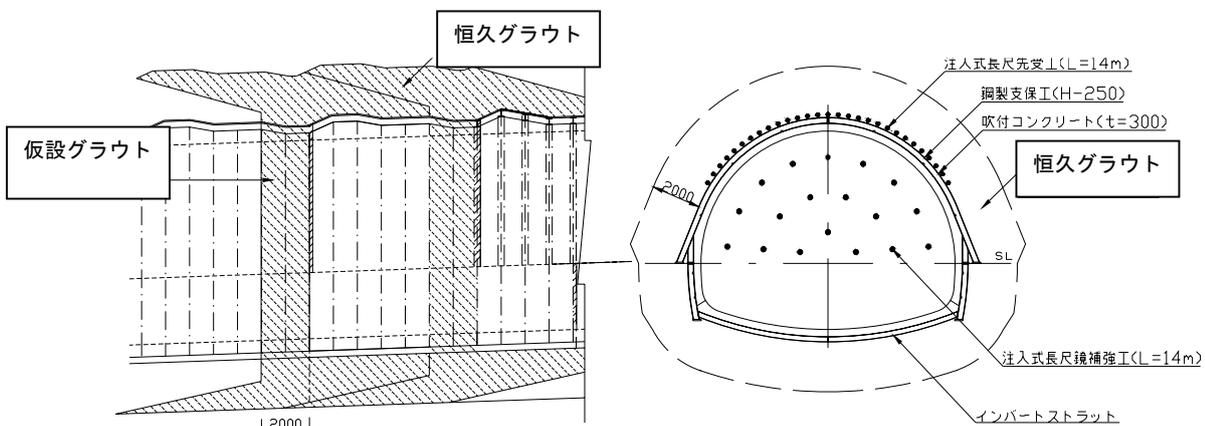


図-12 対策工施工パターン図

で、改良部の透水性については既往の実績から原地盤の1/10とした。解析の結果から、所要の制水効果を得られる改良範囲としてトンネル外周2mを設定した。なお、トンネル周囲の改良部には恒久的な効果が求められるため、注入材には長期的な劣化が極めて少ない溶液型活性シリカ系注入材を用いることとした。また、施工は図-12に示すように7m/シフトとし、各シフトにおいて切羽鏡面にも溶液型水ガラス系注入材による仮設グラウトを実施した。

7. 試験施工

変電所直下における対策工の施工に際し、対策工の効果及び施工手順の確認を目的とした試験施工を実施した。

(1) 透水特性の確認

試験施工区間におけるトンネル内湧水量と地下水位低下量から、トンネルを揚水井戸に見立て、タイスの式を用いた逆解析により透水係数を同定した。5つの観測井戸における逆解析で得られた透水係数は 10^{-3} cm \sim 10^{-4} cm/secであり、当初設定値が概ね妥当であることが確認された。

(2) 改良効果の検証

試験施工区間における地下水位低下量から、二次元浸透流解析により改良部の透水性能について検証した。試験施工開始前の観測井戸水位を初期水位とし、改良部の透水性能をパラメータとして地下水位低下量をフィッティングした結果、改良部の透水係数は原地盤の1/30程度と推定された。

(3) 地下水位低下量の予測

試験施工を通じて得られた上記の知見をもとに、トンネル上下線掘削に伴う最終的な地下水位低下量を予測した（図-13）。この結果、最終的な地下水

位低下量は12.4mと推定され、設定した改良仕様により所定の地下水位低下量に制御できると評価された。なお、坑内への湧水量は1 $\frac{1}{2}$ l/min/m程度と推定された。

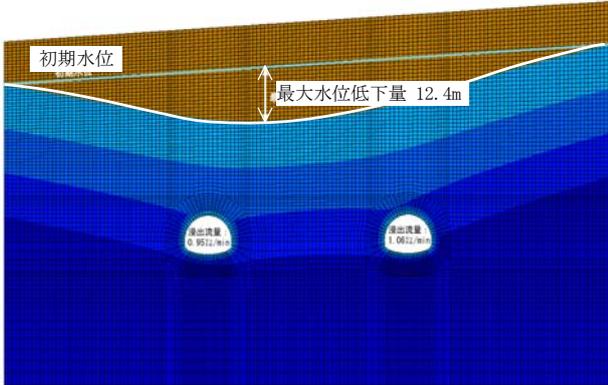


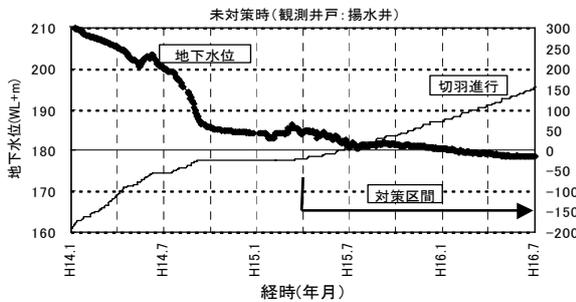
図-13 予測解析結果

8. 施工結果

対策区間の施工にあたっては、変電所区域内及び周辺の地下水位や地表面沈下量、坑内湧水量等の計測による動態観測を行いながら施工を進めた。

(1) 切羽進行に伴う地下水位挙動

切羽進行に伴う地下水位挙動について、未対策時と対策時の観測結果を図-14に示す。未対策時の場合は切羽距離が50mまで近づいた時点から急激な地下水位低下が生じている。これに対し、地下水の季節変動が大きい



節変動が大きい

(2) 地下水位低下量と地表面沈下量

トンネル掘削終了後の地下水位低下量と地表面沈下量を図-15に示す。ここで、地下水位低下量は対策工施工開始後に生じた最大値を抽出したものである。対策区間における最大地下水位低下量は10~15m程度となり、事前の予測結果とほぼ一致している。地表面沈下量は未対策区間の影響により対策区間初期において比較的大きな沈下が生じているが、対策区間の進行に伴い低減傾向を示しており、変電所区間における目標値(50mm)を満足した。

9. 浸透・沈下解析による挙動予測

施工の進捗により観測データが蓄積されるのに伴い、施工中の地下水挙動管理を行うために、事前の予測解析(2次元定常浸透流解析)に対して下記のよう

- ・ 施工中、施工完了後の経時的な挙動予測
- ・ 地下水位と連動した沈下量の予測
- ・ 対策工端部位置を設定するための3次元的効果の評価
- ・ 地下水位季節変動(最大15m)の反映

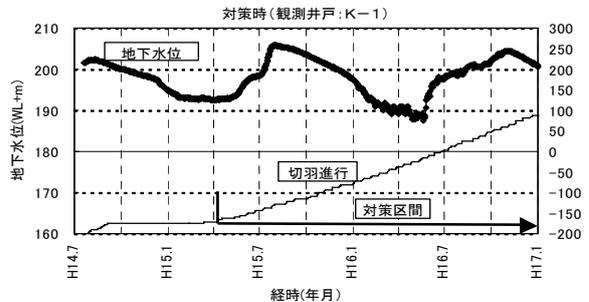


図-14 切羽進行と地下水位挙動

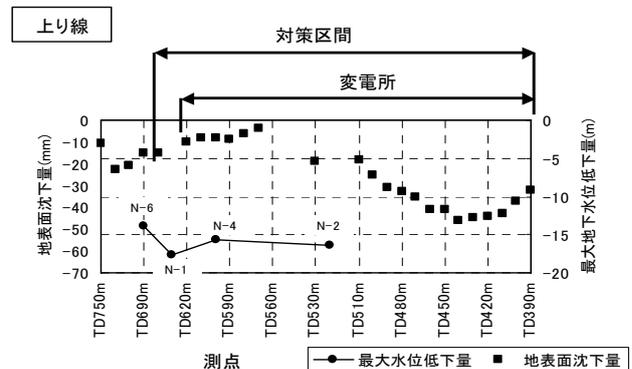
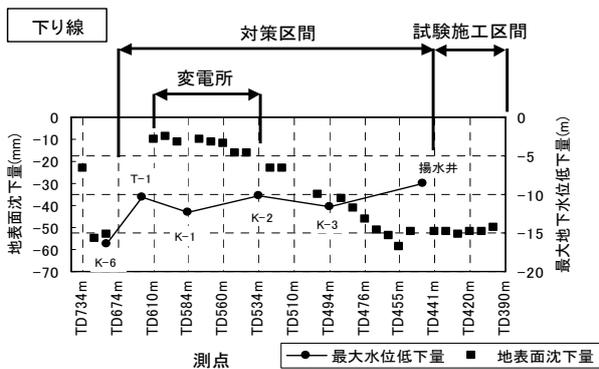


図-15 地下水位低下量と地表面沈下量

このため、予測解析手法として地下水浸透に基づき広域の3次元的地盤沈下を予測できる解析手法¹⁾(UNSAF-3D-C、本稿では「浸透・沈下解析」という)を用い、予測解析の高度化を図ることとした。

本手法は、地下水浸透流解析から得られる間隙水圧の変化を有効応力の増分に置き換えて沈下量を算定する手法である。

ここで、水理特性は事前解析と同様とし、施工前2年分の地下水位とのフィッティングにより境界条件を設定した。また、圧密に関するパラメータとしては、対象となる地盤の採取試料における圧密試験で得られた e - $\log p$ 曲線を用いた。

予測解析結果と実測値を比較した結果の一例として、地下水位と地表面沈下量の経時変化図をそれぞれ図-16~19に示す。地下水位については、大きな季節変動を再現できていないものの、最低地下水位を概ね捉えることができている。一方、地表面沈下は、対策初期の位置(TD497m)では実測値が予測値とほぼ一致するものの、施工がさらに進行した位置(TD600m)では実測値が小さい値を示し、また、施工途中に収束する傾向がみられる。このような地表面沈下の予測との違いの要因は、場所毎に以下の地盤条件が異なることに因ると考える。①沈下対象となるDL級~DM級岩盤の厚さ②変形係数の三次元的なバ

ラツキ③過去に受けた地下水変動に伴う間隙閉塞の有無。このような地盤条件を精度良く把握することで予測精度も向上すると考えられ、今後詳細なデータ分析により検討を行う予定である。

9. まとめ

閃緑岩マサで地下水低下に伴う大きな地表面沈下を確認した。この大きな地表面沈下の原因は、地下水位低下に伴う有効応力増加による(地下水面以下の)閃緑岩マサの間隙の閉塞と弾性沈下によるものとする。

また、トンネル掘削に伴う地下水位低下対策として薬液注入による制水工法を採用し、実施工において良好な結果を得ることができた。今後山岳トンネル工事においても周辺環境配慮の観点から同様な状況下での施工が増加するものと思われるが、合理的な施工方法の一つとして本工法の適用性を確認できたと考える。

参考文献

- 1) 西垣誠・今井紀和・小松満・長井いづみ：圧縮に伴う比貯留係数の変化を考慮した地下水浸透に基づく地盤沈下解析手法，土木学会論文集NO.799，2005.9

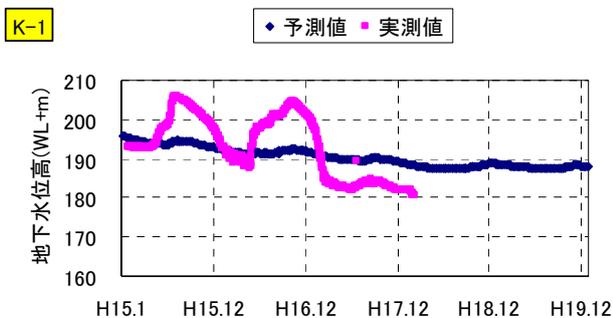


図-16 地下水位経時変化図 (K-1)

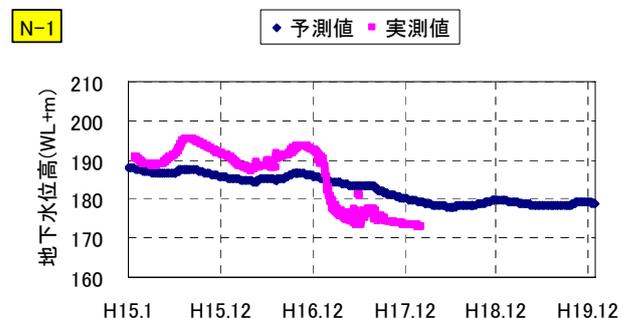


図-17 地下水位経時変化図 (N-1)

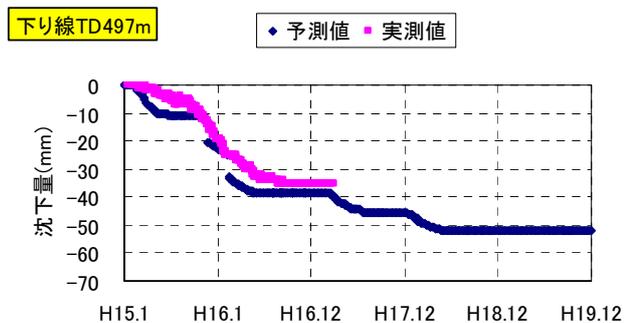


図-18 地表面変化図 (下り線 TD497m)

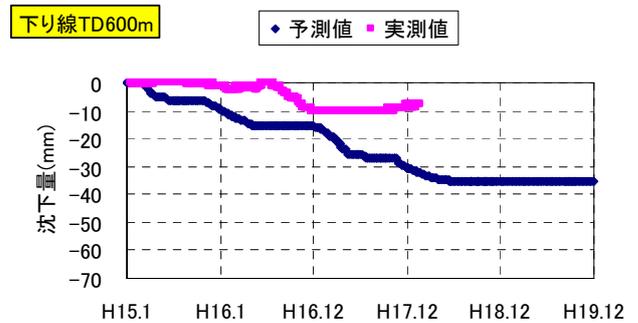


図-19 地表面変化図 (下り線 TD600m)