

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

An Anti-Settlement Measure by Reduction of Subsurface Water Seepage During Construction of a Tunnel

緒方明彦 Akihiko OGATA ((株)熊谷組 土木事業本部 土木設計部)
 中出 剛 Tsuyoshi NAKADE ((株)熊谷組 土木事業本部 土木設計部)
 片山政弘 Masahiro KATAYAMA ((株)熊谷組 土木事業本部 土木設計部)
 尾畑 洋 Hiroshi OBATA ((株)熊谷組 広島支店)

広島市内で施工した山岳トンネル工事において、掘削に伴う地下水位の低下により地表面沈下が発生し、トンネル上部の重要構造物に対する影響が懸念された。このため、対策工法としてトンネル外周に薬液注入による難透水層を形成し、地下水の低下による地表面沈下が許容値以下になるように湧水量を制御する対策工法(制水工法と称する)を採用し、トンネル掘削を無事完了させることが出来た。本論文は、このトンネル工事における沈下のメカニズムについて考察を行うとともに、対策工法として採用した制水工法の考え方と成果、及び、沈下予測手法について述べるものである。

キーワード：山岳トンネル、地表面沈下、マサ土層、浸透流解析、薬液注入 (IGC : H-5)

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詳細に報告されたものは少ない。

今回施工したトンネル工事では直上に重要構造物があり、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から、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。本論文では、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(制水工法)の考え方とその効果等について述べる。

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)
 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

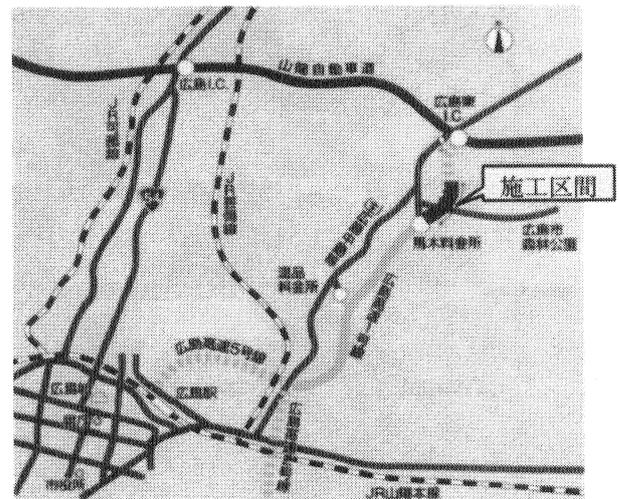


図-1 位置図

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

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。施工にあたってはトンネル掘削によって生ずる地表面沈下が、これらの周辺構造物の許容沈下量 50mm を満足することが求められた。

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 級岩盤に区分できる．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(一般にマサ土と呼称するがここでは，花崗岩マサ及び閃緑岩マサと称する)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．

4. 地表面沈下の状況

トンネル掘削時には切羽の安定性を確保することを目的として，継続的に水抜き先進ボーリングを切羽先端部において実施していたが，花崗岩と閃緑岩との境界付近(図-2)において，地表面沈下が発生した(図-3)．

この沈下は，トンネル掘削の影響を受けていない前方での地表面沈下であることから地下水低下のみの影響によるものと考えられた．ここで得られた地下水低下量と地表面沈下量に関するデータを整理した結果，これらには図-4に示すように非常に高い相関関係があることが判明した．特に閃緑岩マサ区間では以下のような相関関係が得られた．

$$Y=2.4 \cdot X \quad (1)$$

ここでY：地表面沈下量(mm)，

X：地下水位低下量(m)

図-5 に地質境界付近での地表面沈下量を示す．ここに示すように閃緑岩マサ区間で最大 150mm の地表面沈下が発生した．地下水位は，トンネルの下端付近まで低下しており(地下水低下量 30m)，前述の関係式から，地下水低下による地表面沈下量は 72mm 程度と推定され沈下の大部分を占めていると考えられた．

この時点で図-6 に示すような変電所全域にわたる観測井の設置や層別沈下計の設置(E 側線)による観測体制を整えた．また，トンネル掘削では天端の地盤改良が可能なウレタン系での長尺先受けの補助工法を併用しながら掘削を進めたが良好な結果が得られなかった．このため，一旦施工を中断して後述べる対策工法を選定した．

5. 沈下要因分析

今回の地表面沈下の特徴として，地下水位低下とともに即時に地表面沈下が発生した．通常，砂質土の高地下水位地盤では，地下水位の低下とともに有効応力の増加に伴う地表面沈下(即時沈下)が発生することがあり，今回の沈下はこの現象に類似した現象である．しかし，岩の組織を残すマサが，有効応力増加に伴って地表面まで及ぶ沈下が発生させた報告は少なく，更なる沈下要因に対する分析が求められた．

図-7にトンネル掘削による地表面沈下の影響が少ない切羽手前2.5D(≒25m程度)時のE測線における層別沈

下計の計測結果を，図-8では切羽がE測線に到達した時点での沈下状況を示す．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．

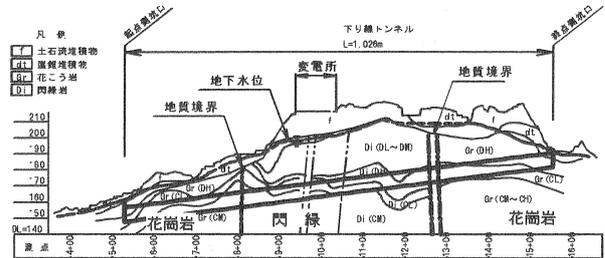


図-2 下り線地質縦断面図

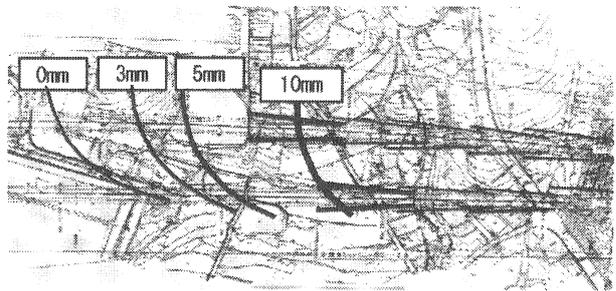


図-3 水抜きボーリング後の地表面沈下コンター

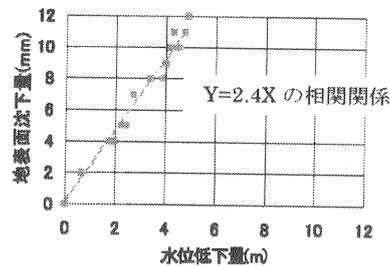


図-4 地下水位低下と地表面沈下の関係

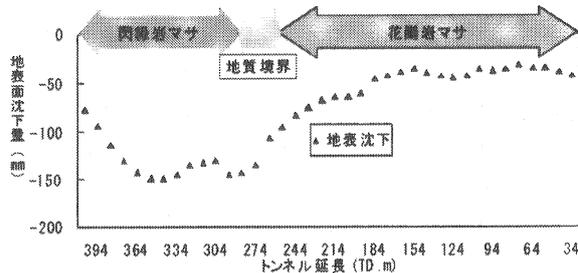


図-5 無体策区間地表面沈

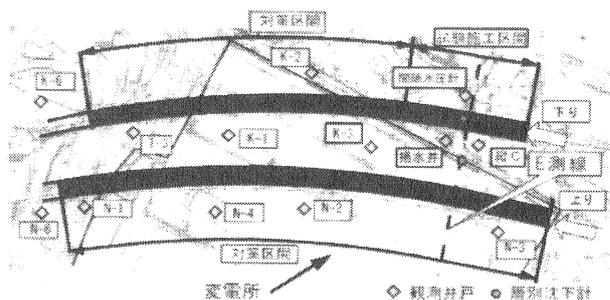


図-6 対策区間と観測井戸設

地層名又は岩級:各層の歪み (全沈下量中の比率)

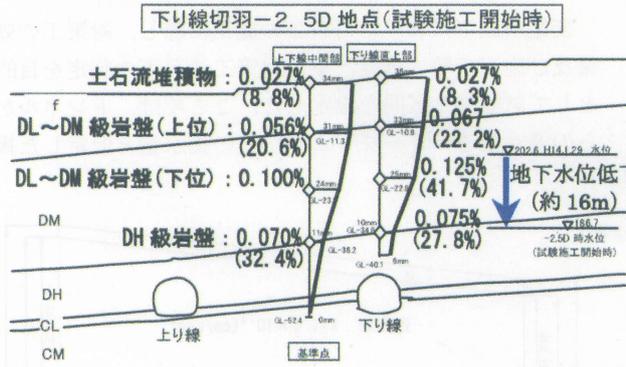


図-7 切羽到達前-2.5D

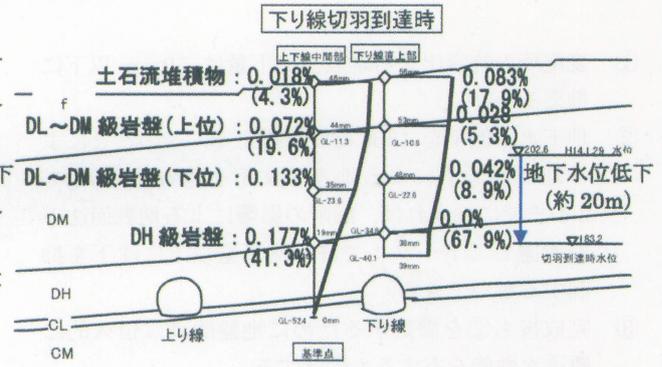


図-8 切羽到達時

図-7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-8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。

図-9に既存の土質試験結果及び追加調査から、花崗岩と閃緑岩の間隙率を深度で整理した。この図から、花崗岩部分に比べ閃緑岩部分の間隙率が非常に大きく、深度が浅いほどより間隙率の大きいことが分かる。

また、写真-1には大きな沈下傾向を示したDM級岩盤の鏡下観察結果を示し、写真-2に予め有効応力追加分を載荷した試料の鏡下観察結果を示す。写真-1ではDM級岩盤の試料中に染料を浸透させることで試料内の間隙を確認した。図-9に示すように閃緑岩で間隙率の大きいことが確認されていたが、鏡下でもその傾向が把握された。また、写真-2では、試料を予め圧密させたことで大きな間隙が閉塞し染料の浸透はわずかであった。この結果は、地下水低下に伴い有効応力が増加すると地表面が沈下すると考えた前述の示唆を支持するものと考えられる。

地下水が低下することで砂質地盤の即時沈下に近い挙動を示すと考えられることから、対策工法は、地下水を低下させない工法を基本として考えた。しかし、完全な止水対策と本体の耐水構造を前提とした対策では、大幅な工事費の増加、工期の延長が必要となる。このため、経済性と施工性を考慮し、下記の要求性能を満足することを前提としてトンネル外周部に薬液注入による難透水層を形成し、地下水低下の制御を図る対策工法(制水工

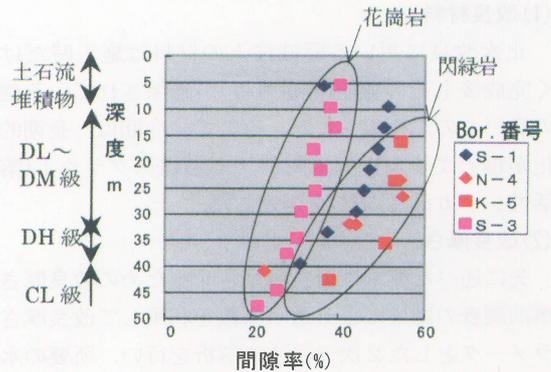


図-9 深度と間隙率

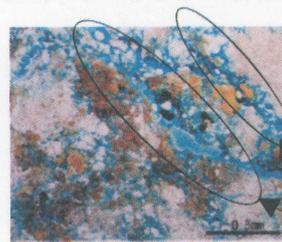


写真-1 DM級岩盤

A: 岩盤の緩みで開口したDM級は過去からの地下水位季節変動(有効応力増加)の影響を被らない深度のため、開口割れ目は開いたままである。
染料

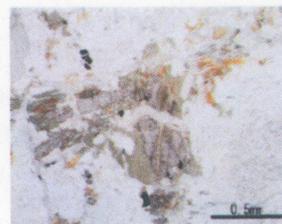


写真-2 DM級岩盤(圧密後)

B: 工事着手に伴い地下水が低下し(有効応力増加)DM級の開口割れ目が閉塞する。このため大きな変形(沈下傾向)を示した。

6. 対策工法(制水工法)

6.1 対策工法の考え方

これまで述べたように、主にDM、DH級岩盤が、地

法)を選定した。この工法に要求された機能は以下の通りであった。

- ① 変電所の許容出来る地表面沈下量は、50mm 以下に抑える。
- ② 地下水の低下を 13m 程度に抑える。このことにより地下水低下による地表面沈下を 32mm(13m×2.4)までに抑えれば、掘削の影響による地表面沈下を考慮してトータルで許容沈下量以下に沈下を抑制する事ができる。
- ③ 完成後も②を満足するために地盤改良は恒久的に難透水性を有するものとする。
- ④ トンネル周辺には難透水性層を構築するが、基本的には排水型のトンネルと考え二次覆工は耐水構造としない。
- ⑤ 施工はトンネル内部から行き掘削のサイクルに組み込めるものとする。

6.2 改良仕様の検討

この制水工法を選定する上での課題は、下記の2点であった。

- ① 改良材料の選定
- ② 改良体の大きさ(厚さ)

(1) 改良材料

止水改良に用いる薬液注入の材料は施工時だけでなく完成後もその機能(難透水性)が確保されている信頼性の高いものが要求された。そこで、今回は、長期的な劣化が極めて少ない薬液材料である恒久グラウト(溶液型活性シリカ系注入材)を選定した。

(2) 改良厚さ

先に述べた要求性能を満足させるための改良厚さを、事前調査の結果による透水係数を利用して改良厚さをパラメータとした2次元浸透流解析を行い、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。ここで、改良部の透水性能は一般的に低減出来るとされる原地盤の1/10とした(図-10)。

この結果、改良体厚さを2m とすれば所定の水位低下量を許容範囲内と出来る結果となりこの厚さを施工時の改良厚さとした。(表-1)

6.3 施工方法

工程短縮を考慮した場合、薬液注入を施工サイクルに組み込むことが有効であることに加え、現有機械の改良で対応可能な施工方法が最も効率的で経済性も高いことから、実施工では図-11, 12 に示すように外周部の注入長7m/シフトとし、掘削に用いるジャンボを利用する手順とした。また、各シフトにおいて前方からの湧水を抑えることを目的として、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、更に対策工法可否の判定を目的として試験施工区間を設定した。ここでは、トンネルからの湧水量をディープウェルからの揚水量と仮定した揚

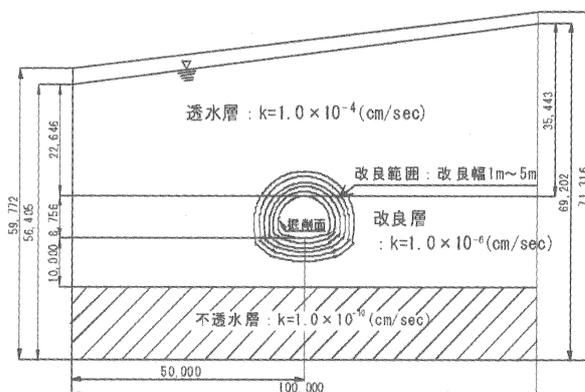


図-10 改良範囲検討モデル

表-1 計算結果

| ケース | 改良透水係数 (cm/sec) | 改良層厚 (m) | 水位低下量 (m) |
|-----|------------------------|----------|-----------|
| 1 | 1.0 × 10 ⁻⁵ | 1.0 | 17.6 |
| 2 | | 2.0 | 13.0 |
| 3 | | 3.0 | 10.5 |
| 4 | | 4.0 | 9.0 |
| 5 | | 5.0 | 8.0 |

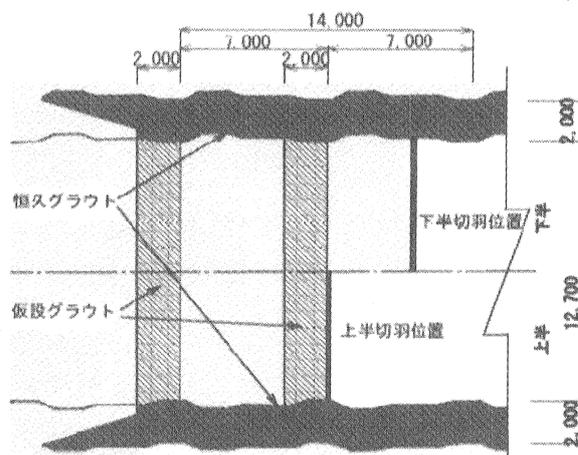


図-11 改良ステップ平面図

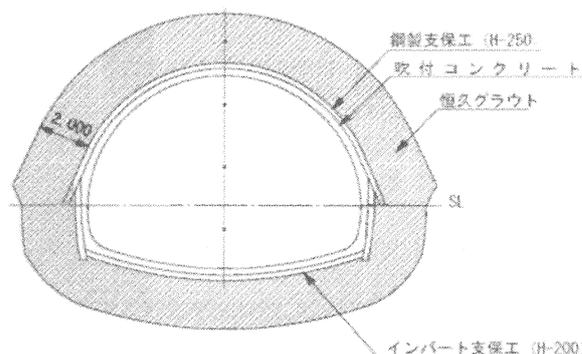


図-12 改良ステップ断面

水試験と見立て、非定常解析により、水理定数の同定を行った。また、2次元浸透流解析を行うことで改良体の透水係数を同定し、目標とした改良部の難透水性が確保されているかのチェックを行った。

また、上下線での制水工法施工完了時については、2次元浸透流解析により上下線掘削完了後の最終的な水位低下量を算出し、目標とする地下水位低下量を満足するか否かのチェックを行った上で変電所直下での施工を行うこととした。

7.1 理論解析による水理定数の同定

(1) 現地盤の水理定数

閃緑岩区間全体を帯水層と仮定して、試験施工区間におけるトンネル内湧水量と各観測井の地下水位低下量から、図-13のようにトンネルを揚水井戸に見立てた揚水試験としてタイスの式を用いて水理定数(透水係数、貯留係数)を同定した。得られた透水係数は $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{cm/sec}$ のバラツキがあるが、これは、帯水層厚の違いと岩盤性状の違いなどによる差と考えられる。以後の解析においては、安全側の値である $1 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ を使用するものとする。

(2) 改良体の透水係数について

試験施工中の地下水位変動量について、改良体の透水係数をパラメータとして2次元浸透流解析を行った結果を図-14に示す。

改良範囲の透水係数を現地盤の1/30とした場合に解析による地下水位低下量は3.5mとなり、試験施工期間におけるE測線近傍の縦C、揚水井(図-6)における地下水位低下量とほぼ一致した。この結果から、改良範囲については目標とした難透水性を確保していることが確認出来た。

7.2 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。この結果、最終的な地下水位低下量は最大で13m程度と推定され、設定した改良仕様により目標の地下水位低下量に制御できると評価された(図-15)。

なお、坑内浸出流量は 1.0l/min/m 程度と予測したが、実測値とほぼ一致した。

8. 対策工法の効果

8.1 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、制水工法の未対策時と対策時の観測結果を図-16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。一方対策時では、地下水の季節変動が大きい切羽近接に伴う影響を明確に評価することはできないものの、対策時の場合は、地下水位の急激な低下はみられず、地下水位自体も高水位を保っていることが分かる。

8.2 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-17に示す。ここで、地下水位低下量は対策工法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す

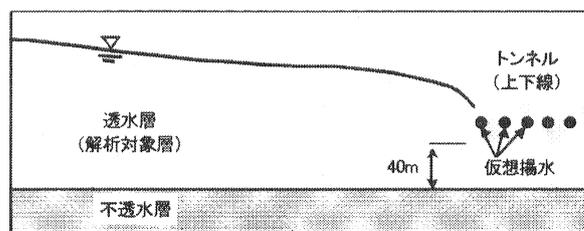
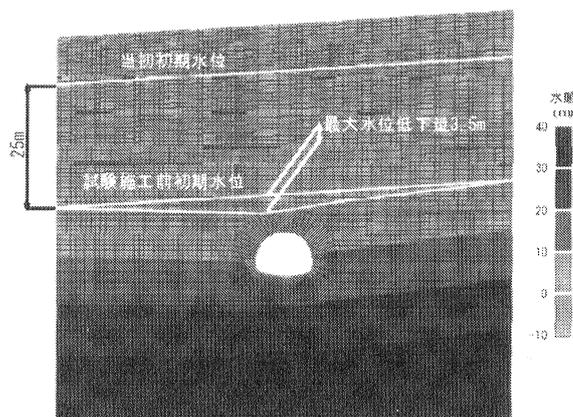
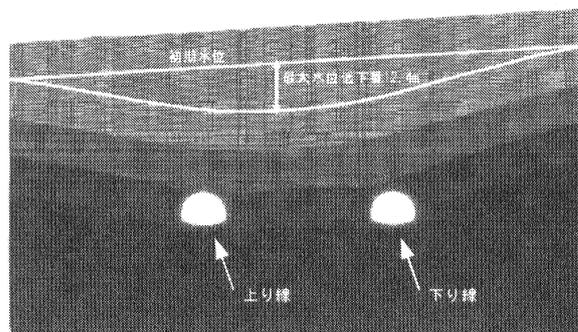


図-13 揚水試験モデル



- ・ 解析における最大水位低下量：3.5m
- ・ 試験区間開始～試験区間完了の縦C・揚水井の水位低下量
縦C：3.5m、揚水井：3.7m

図-14 浸透流解析結果（改良効果検証）



- ・ 最大水位低下量：12.4m
- ・ 浸出流量（下り線）：1.06 l/min
- ・ 浸出流量（上り線）：0.95 l/min

図-15 予測解析結果

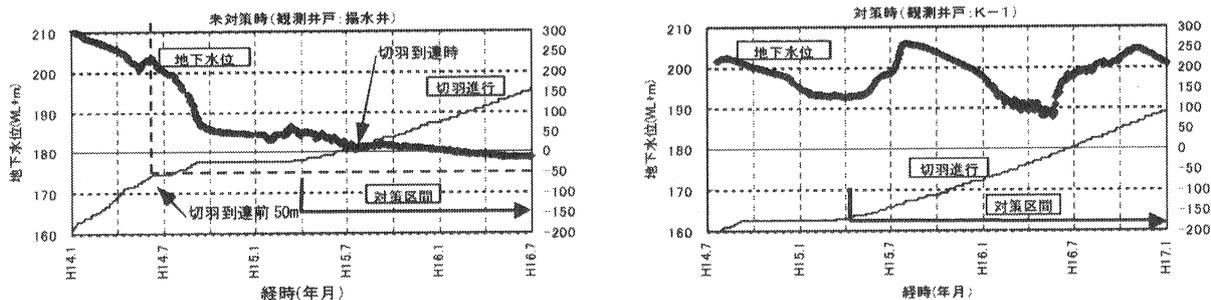


図-16 切羽進行と地下水位挙動

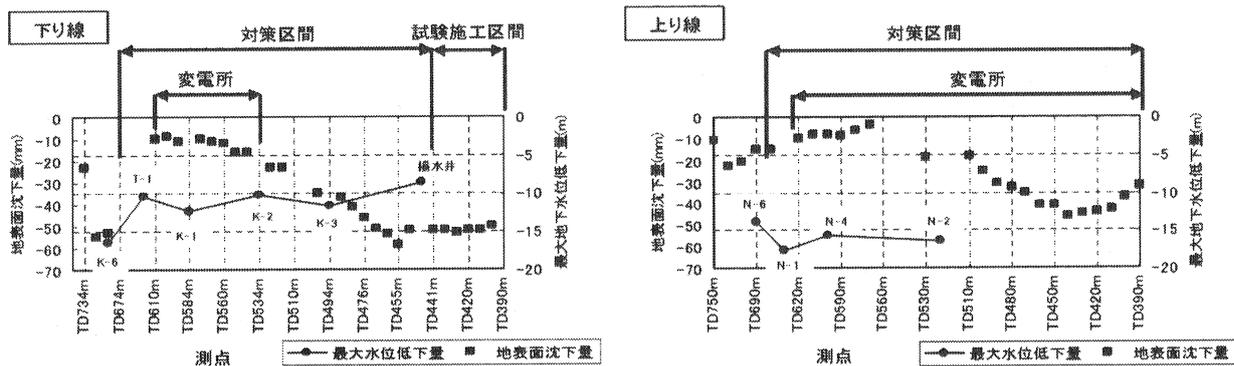


図-17 地下水位低下量と地表面沈下量

しており、変電所区間における目標値(50mm)を満足した。

9. 沈下挙動に対する考察

制水工法で施工を進めたところ、地下水位低下及び地表面沈下に改善傾向が見られた。しかし、その沈下傾向は場所毎に異なる傾向が見られた。そこで、DM級岩盤の試料に対して一般の土に適用する圧密試験を実施し、その沈下の不均一性に考察を加えることを試みた。

図-18に圧密試験結果を示す。ここで、試料の採取深度における現状の有効応力を比較したところ、一部の試料で通常の地盤で言うところの過圧密領域にあることが分かった。この結果を基に、現状の地下水位が20m低下した場合の沈下量を計算した結果、一部の試料では有効応力増加が過圧密状態内の荷重変動であったため沈下量は小さな値となり、他ではe-logp曲線に沿った大きな値となった。

このことから、いくつかの箇所では、現在の荷重状態より大きな荷重が過去に載荷されていた可能性が考えられる。そこで、改めて周辺の長期地下水計測結果を調査したところ、変電所近傍では地下水位が、毎年間で約5m以上の季節変動している事が判明した。このことは、図-16のK-1のグラフにも年間の水位変動が10m以上あることに表れている。従って、場所によっては、地下水位変動による有効応力の変化(圧縮)をすでに受けており、そのような箇所では、地下水位の低下量が小さい場合

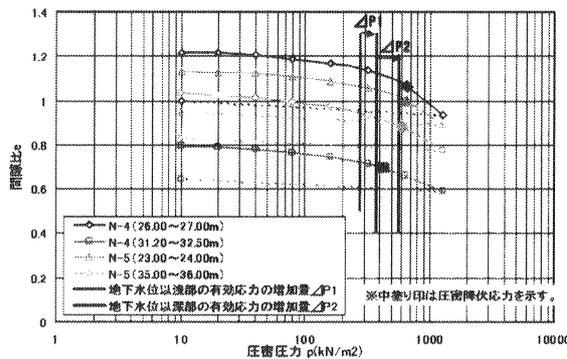


図-18 圧密試験結果

(DM級岩盤の下位まで水位低下が発生しない場合は予想より小さな地表面沈下しか発生しないことを示唆していた。

地下水位低下量と地表面沈下量の関係をみると、当初の無体策区間で地下水位の低下量が大きかった箇所における相関関係($y=2.4x$)に対し、地下水位の低下量が小さい対策工法区間では $y=1.2x$ と地下水位低下による地表面沈下への影響が小さくなっており、前述した有効応力の変化を受ける地盤の応力履歴による沈下特性の違いを表していると考えられる。

10. 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、工事終了後の長期的な水位変動と沈下挙動を予測する事

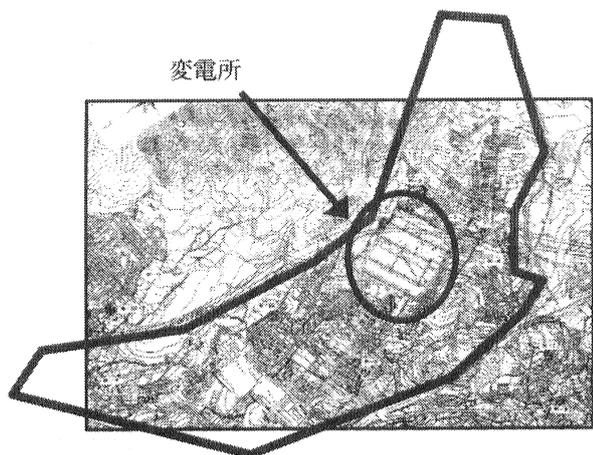


図-19 浸透・沈下解析モデル範囲

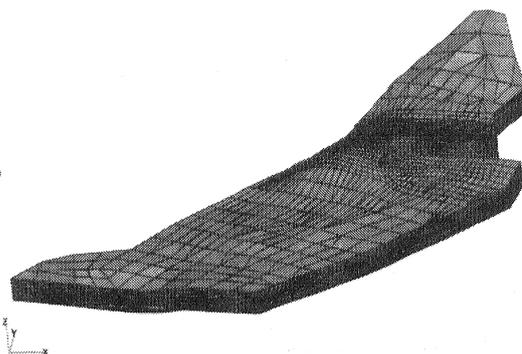
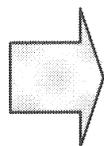


図-20 解析モデル

が求められた。

そこで、予測解析手法として地下水浸透に基づき広域の地下水位変動と地盤沈下を3次元的に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)を用いた予測解析を行うこととした。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。

10.1 解析範囲

解析範囲は、解析対象の変電所及びトンネルを含んだ範囲とし、境界は以下のように設定した(図-19)。

- ① 左右の境界は谷部分とした。
- ② 下流側(下側)の境界は、小河川を境界とした。
- ③ 上流側(上側)については、解析対象から十分離れており左右の谷が接近している部分を境界とした。

10.2 初期条件及び考え方

下記の条件を地下水、沈下それぞれの解析の初期条件とした。

(1) 地下水解析

透水係数 原地盤 5.0×10^{-5} cm/sec

改良区間 原地盤の1/10

比貯留係数 1.0×10^{-4}

間隙率 0.3

降雨条件 過去3年間の降雨量のデータを使用する。

浸透係数 全域30%

水位設定：トンネル掘削開始前の状態を、降雨を考慮した定常解析(予備解析)により水位状態の初期設定を行った。

解析開始時：解析開始時点は、試験施工開始時点。

掘削進行状態：実施工の進行状態をモデル化した

(2) 沈下解析

- ・ 地下水解析の結果を基に、各時間における水位低下による有効応力増加分を地盤の増加応力と考え、圧密曲線(e-logP曲線)を利用し、圧密降伏応力 P_c 、圧縮指数 C_c を用いて沈下量を算定する解析とする。

- ・ 地下水の低下面より上部の地盤にも残留水が存在してこれが排水されるまで沈下が進行する。(飽和状態→不飽和状態→通常状態)。これにより長期間に及び沈下が進行する解析となる。

10.3 条件設定の変更と結果

10.2の初期条件で解析を行った結果と実測値を比較し精度向上のために以下のような条件設定の変更を行った。

(1) 地下水解析

解析開始時点(試験施工開始時点)においては、それ以前のトンネル掘削による水位低下分を考慮していないため、予測値と実測値の水位に乖離が見られた。このため、予めこれを考慮して求めた水位分布を初期条件とすることで、解析開始時点における境界水位の精度を向上させた。

また、飽和状態から不飽和状態への遷移時における有効応力の変化を細かく設定していた点を見直し、水位低下により生じた浮力減少分を即時発生するように変更した。この結果、地下水位の季節変動を多少表現できるようになった。

(2) 沈下解析

当初の予測解析では沈下算定において過去の最大履歴荷重を考慮していないため、掘削等の施工イベントに関わらず季節変動の地下水位低下によって沈下が生じる挙動がみられた。このため、最大履歴荷重を超える増加有効応力のみを沈下算定において反映させるとともに、解析開始時期の見直しにより試験施工以前の影響を考慮することで、実測値の挙動に合う結果が得られた。

また、実測値では水位変動の収束に合わせて沈下も収束するのに対し、当初の予測解析では沈下が長期発生し続け、収束するのに非常に時間が長くなっていたが、上記(1)で前述した水位低下分の浮力減少分を即時に考慮することで、実測値の収束状況と同様の傾向になった。

10.4 予測解析結果

予測解析結果と実測値を比較した結果の一例として、

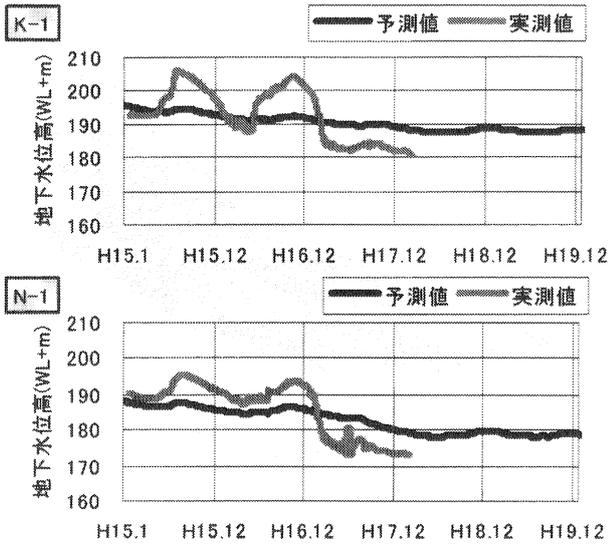


図-21 地下水位変動量予測結果

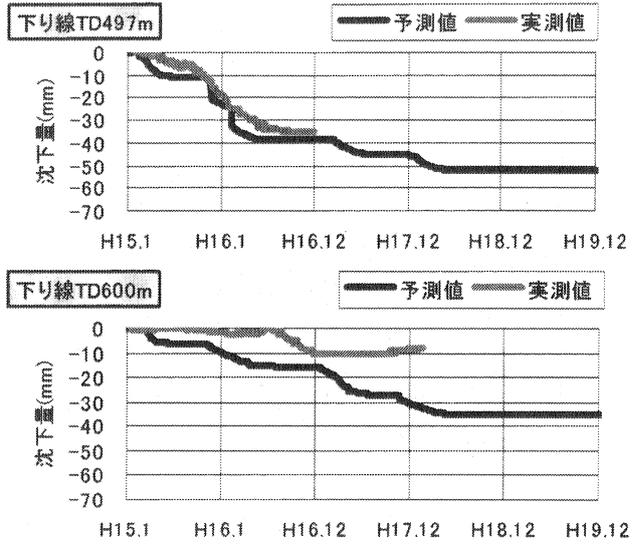


図-22 沈下予測解析結果

地下水位と地表面沈下量の経時変化図をそれぞれ図-21～22に示す。地下水位については、大きな季節変動は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、施工が更に進行した位置(TD600m)では実測値が小さい値を示した。

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、場所毎に異なる地盤条件(下記に示す)等が異なることに起因していると考えられた。

- ・ 沈下対象層の層厚の違い
- ・ 過去の水位変動履歴による沈下特性の違い、
- ・ 水理定数の差異

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る。

以上の長期予測解析結果も地表面沈下量が50mmを超えるような沈下が発生することはなく、実測値は予測解析結果の値より小さな沈下量で推移していることから、長期的に予測外に大きな沈下が発生する可能性は低いと考えられた。

11. まとめ

本工事は、トンネル掘削(山岳工法)に伴う地下水位低下による地表面沈下が発生するトンネルにおいて、従来の止水工法(完全止水型改良+トンネルの耐水構造)によるのではなく、制水工法(地表面沈下を許容沈下量以下に制御出来る範囲の地盤改良+排水構造のトンネル)を施工し、地表面沈下量も許容値以内に抑えることが出来た。

また、地表面沈下量、地下水位変動の予測手段として、

浸透・沈下解析を適用して十分な精度での予測解析が出来た。

この工法は、これまでの完全な止水を行う工法と比較して経済性に優れ、掘削サイクルに組み込んでの施工が可能であることから局所的な地下水・沈下対策として有効な手段であると考えられる。

適用にあたっての本工法の課題は、制御すべき地下水位の低下量を決定し改良厚さを算定するために、地表面沈下量と地下水位低下の関係、地盤の情報(水理定数、地盤性状など)を出来る限り正確に把握する必要があることである。また、長期にわたる地下水位データや沈下に関する情報なども必要であり、これらの情報を出来るだけ収集し分析することで、工事におけるリスクを低減する必要があることである。施工にあたっては解析と計測を両輪とした情報化施工を行うことが前提であり、施工への迅速なフィードバック体制を整えることも重要である。

謝辞

最後に施工にあたりご指導をいただいた安芸府中トンネル技術委員会の方々、広島高速道路公社の皆様、ご協力頂いた中国電力(株)の皆様、並びに工事関係者の方々には心から御礼申し上げます。

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, III-2, pp. 1-12, 2005.

(2006年11月30日 受付)