

笠森トンネルにおける大量出水および 地表陥没の発生原因とその後の対策について

藤本 克郎¹・柳森 豊²・斎藤 庸³・小川 渉⁴・竹内 辰典⁵

¹飛島建設㈱ 首都圏土木支店 圏央道笠森トンネル作業所
(〒297-0121 千葉県長生郡長南町佐坪1131-1)
E-mail:katsuro_fujimoto@tobishima.co.jp

²正会員 飛島建設㈱ 九州支店 豊見城トンネル作業所 (〒901-0242 豊見城市高安413-1大漁マンション201)

³正会員 日本工営㈱ コンサルタント国内事業本部 (〒300-1259 つくば市稲荷原2304)

⁴国土交通省 関東地方整備局 千葉国道事務所 (〒263-0016 千葉市稲毛区天台5-27-1)

⁵国土交通省 関東地方整備局 東京国道事務所 (〒102-8340 東京都千代田区九段南1-2-1九段第3合同庁舎)

笠森トンネルで発生した、大量出水とそれに伴う地表陥没について、周辺の地形地質を再精査した上で、発生原因を推定し、トンネル掘削再開後の再発防止策を検討した。検討した防止策は、施工段階での地下水位をモニタリングしながら、有効性を確認して安全に施工できた。本稿ではその経緯を報告する。

Key Words : a lot of underground water, boring, pilot tunnel, groundwater level measurement

1. はじめに

笠森トンネルは圏央道（首都圏中央連絡自動車道）の千葉県内区間に位置し、房総半島中央部を東西に走る木更津JCT～茂原長南IC間に計画された、全長L=2 420mの道路二車線トンネルである。

トンネル周辺の地質は、地表面から表土層（dt）、万田野層（Mdl1, Mdl2）、笠森層（Ks, Km）の順に堆積しており、万田野層は粗粒な砂層が主体で、笠森層の下部に挟まれる最大厚さ70mの砂礫層とされているが、トンネル掘削範囲には大きな礫の含有は確認されていない。笠森層は無層理で塊状の半固結砂質泥岩からなり、良く締まっているものの固結度は低く、強度的には軟岩程度で不透水～難透水性を呈している。

この万田野層と笠森層の層境界面は、起点側から見て切羽右下へ2～3° 傾斜し、下位にある笠森層の透水性が

小さいため、これらの層境は地下水が帯水している。とくにトンネル中央部付近で凹の形になっており、層境に帯水している地下水はこの地点付近で最も大きくトンネル断面内に出現する。小高い丘陵地を貫く地形となっており、所々に小土かぶりが連続するため、大部分の区間で坑口パターンに準ずる支保で施工している。

トンネル縦断線形から、起点側（長南側）、終点側（市原側）の両坑口付近ではこの層境界面はトンネル天端の上に位置していたが、掘削が進むとともに境界面はトンネル断面へ近づき、中間部付近ではトンネル天端付近に位置するようになっていた。（図-1）

中間部付近のトンネル天端付近に位置する層境界面では、地下水の存在により砂層を不安定化させる状況にあったため、補助工法を駆使しつつ掘削していたが、終点側坑口から811mの切羽で突発的な2～8t/minにも達する大量出水とともに土砂崩壊が生じ、地表面に到達する陥没が

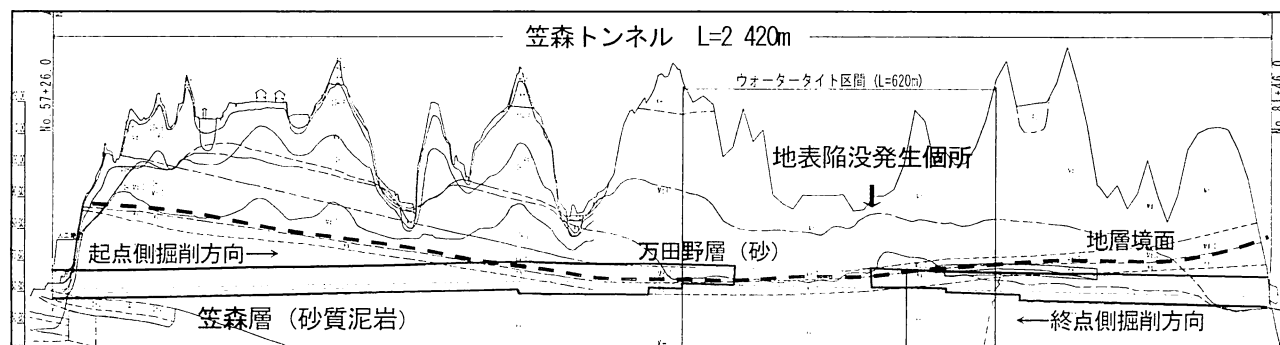


図-1 笠森トンネルの地質縦断図

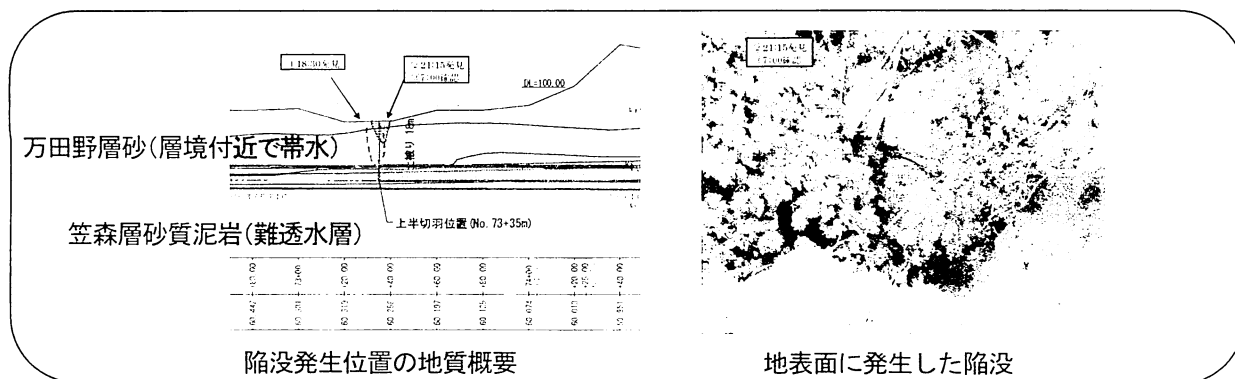


図-2 陥没発生の詳細

二個所で生じた。(図-2)

本稿では、この陥没の発生の原因推定とそれらにもとづく再発防止対策とその施工成果について報告する。

地の二個所で陥没が生じた。

3. 発生原因の調査と原因推定

2. 大量出水および陥没の発生

(1) 掘削補助工法の変更

帯水層である万田野層砂がトンネル天端付近に接近し始めた切羽では、天端付近で施工していた先受け補助工の削孔時に湧水が噴出するなどの不安定化する現象が生じたため(写真-1)、先受け鋼管の打設間隔の短縮や管径の増加などにより先受け剛性を向上させて安定化を図るとともに、切羽前方の地下水位低下を図るトンネル側壁からの水抜きボーリングも実施した。

(2) 地表面陥没の発生

先受け補助工法と水抜きボーリングを併用しつつ掘削を継続し、小土かぶり(土かぶり18m程度)の区間も通過していたが、終点側(市原側)坑口より811mの地点(No.73+35)の切羽右肩部から毎分1tにも達する大量出水(写真-2)が発生し、時間経過とともに清水から濁水に転じて、トンネル断面内に土砂も流入したことにより、切羽右斜め前方の地表面に位置する耕作地および林

(1) 調査内容

地表陥没を引き起こした大量出水の発生原因推定と現地の地形、地質条件の再精査、地表陥没の応急復旧方法の検討のため、陥没発生後設けられた技術検討委員会の指導の下に、調査を実施した。

まず、陥没が発生した場所は、沢地形の上流に開けた圃場として整備された平坦地となっているため、過去の地形改変履歴を確認するため、周辺住民へのヒアリング、航空写真データの調査を行った。(写真-3)

その結果、過去に土砂採取された跡地を埋め戻して圃場整備したとの情報を得たため、これらの事象を踏まえた調査を表-1に示すとおりを実施した。

(2) 調査結果

調査の結果、以下の事象が明らかになった。

- 発生した地表陥没は調査時点で拡大しておらず、孔壁も切り立った状態でほぼ安定している。
- 二個所の地表陥没個所以外にゆるみや空洞は確認されなかった。



写真-1 先受け工削孔時の湧水状況

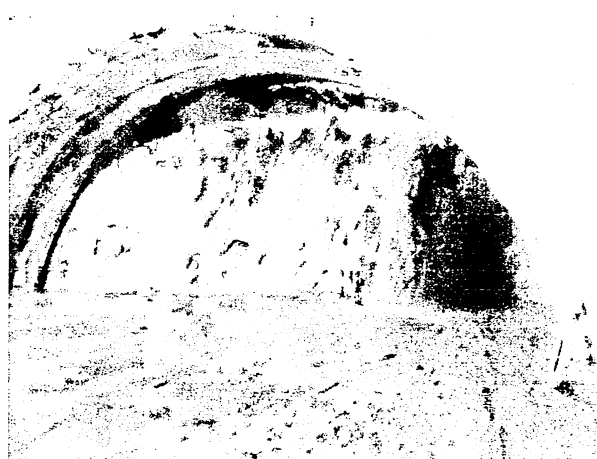


写真-2 大量出水と土砂流入状況

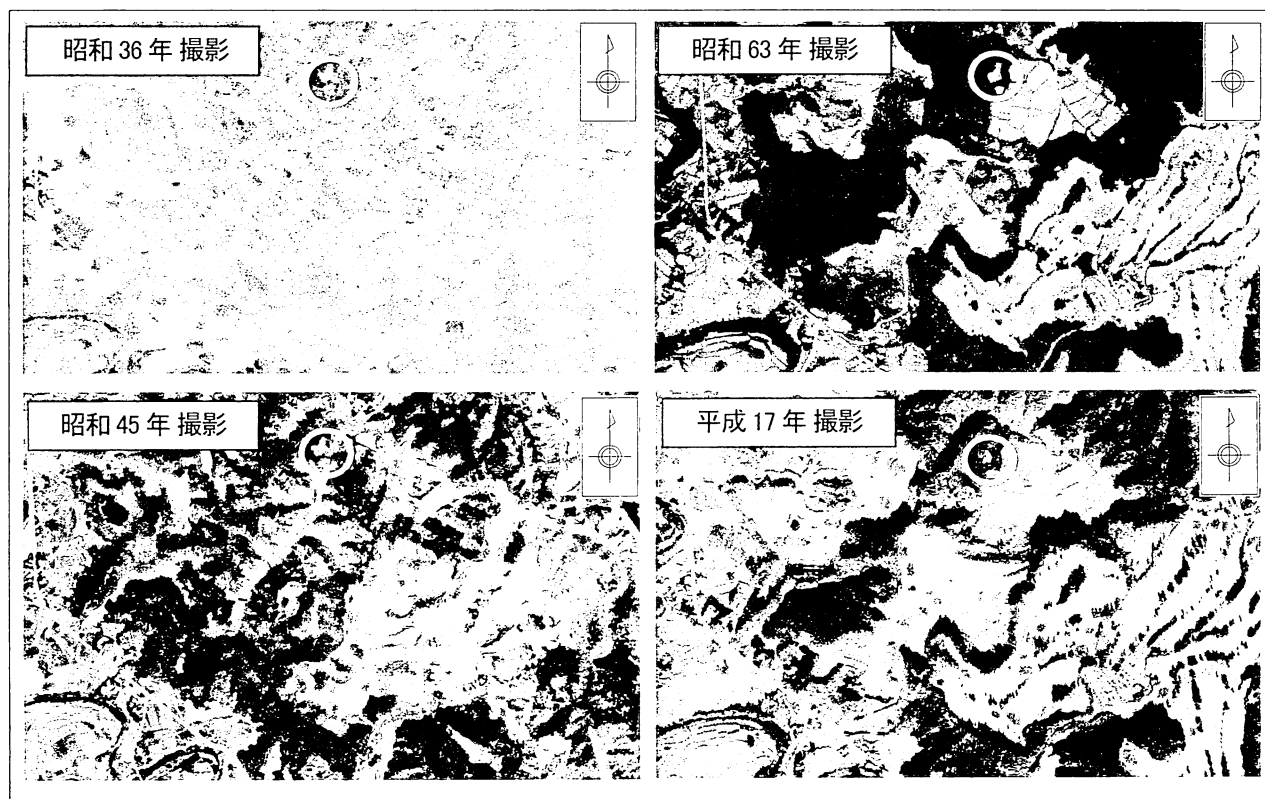


写真-3 地表陥没個所の地形改変履歴をしめす航空写真（写真中の丸印が陥没個所）

表-1 調査内容と目的

No.	調査内容	数量	調査個所	調査目的
1	調査ボーリング（鉛直，斜め）	7本	地表部	地下水状況，陥没規模の把握，陥没個所周辺のゆるみ範囲観測，地山試料採取
2	調査ボーリング（斜め，水平）	4本	トンネル坑内切羽	陥没規模の把握，未掘削区間の状況把握，トンネル周辺のゆるみ範囲把握
3	地下水モニタリング	11個所	新設ボーリング孔，既設観測孔，周辺の利用中の井戸	地下水位変動の把握，水質のチェック，切羽湧水との水収支検証
4	表面波探査	9測線	地表部からトンネル深度まで	トンネル周辺のゆるみ範囲把握，地形改変の影響把握，陥没周辺状況の把握
5	地表面変位計測（3次元計測）	16測点	陥没個所周辺	陥没個所の安定評価 陥没規模の進展状況把握
6	坑内変位挙動観測	3断面 切羽面	切羽面，トンネル内空変位	トンネル構造への影響評価

- トンネル直上部が土砂採取後の埋め戻し地で，陥没発生位置は旧地形の沢部に相当する。
- 旧地形の沢部を反映した地下水供給があると想定される。
- 陥没発生切羽近傍に流砂を起こしやすい砂が分布していた。
- 今後掘削するトンネルルートは旧地形の沢部の合流点付近を横断する。

これらのように，トンネル施工前には予期できなかった事象が複合していたことが判明した。

これらの現地での調査により得られた結果のほかにも，降水量の調査も実施したところ，2010年6-8月は少雨傾

向であったが，一転して9-10月には平年値を上回る雨量が観測され，陥没が発生した10月19日には地下水位が6m程度（前年比の1.5倍）上昇していたことも判明した。

(3) 原因の推定¹⁾

得られた調査結果を総合的に判断すると，以下のような通常では予見しにくい要因が重なったと考えられた。

- ① 秋（9月～10月）の降雨で地下水位が6m程度（前年同時期比1.5倍）上昇していた。
- ② 地表面の水田の下に旧地形の沢部を反映した水みちが存在し，旧地形の集水域から継続的に地下水が供給されていた。

- ③ 土採り場跡の埋め土（ゆるみやすい盛土）がトンネル上部に堆積していた。
 - ④ トンネル直上部付近（万田野層）に自立困難と判定される砂（均等係数5未満）が部分的に存在していた。
- これらの状況下で、トンネル切羽が地下の水みちに接近して大量出水を招き、砂の限界動水勾配を上回ったことにより流砂現象の発生も相まって、地表面にまで到達する陥没が発生したものと推定された。（図-3）

4. 対策工法の検討

調査結果から、地表陥没が発生した個所と同様の条件下での掘削となる区間は、L=185m（No.71+50～No.73+35）も継続することから、今後トンネル掘削の再開にあたり、再発防止のための対策工の検討が不可欠となった。

対策工は、これまでの施工でも水抜きボーリングを実施していたことから、表-2にしめすとおり、トンネル切羽前方の地下水位をより確実な方法で低下させることが基本となる。

地下水対策工の中から、天端の安定と地下水対策に有効とされ、かつ実績の多い「水抜きボーリング」、「ディープウエルまたはウエルポイント」、「水抜き坑」、「止水注入工」を比較検討対象とした。

- 比較検討の結果、本トンネルの地質的な特徴である地下水の遮水層がトンネル断面内天端付近に位置することを考慮すると、
- ・ 止水工法による対策は、対象区間が長く、工期、工費ともに現実的でない。
（注入効果の確実性も問題になる）
 - ・ トンネル坑外からの地下水位低下工法では、多数の深井戸を施工する必要がある。
（地表面の利用状況から対応が厳しい）
 - ・ トンネル本坑内からの水抜きでは、水抜きボーリングの打設角度と位置に制約を受ける。
（効率的に水抜き効果が得にくい）

- ことなどから判断して、
- ① トンネル坑内からの直接的な水抜きが可能である。
 - ② 施工範囲の地下水位を事前に地層境界付近まで低下させることが可能である。
 - ③ トンネル直上を含む直近での水抜きが可能である。
 - ④ トンネル掘削により周辺地山（とくに万田野層砂）にゆるみを生じさせない。

といった条件を満足でき、水抜き効果の検証を行いながら施工できる「水抜き導坑からの水抜きボーリング工法」を採用した。

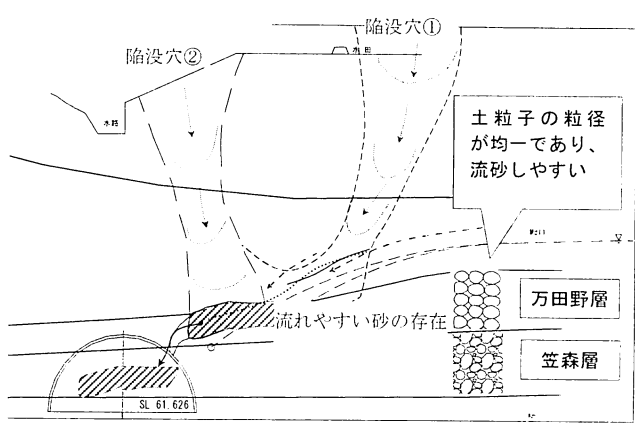


図-3 陥没発生メカニズム推定図

表-2 対策工の基本方針

発生原因	考えられるリスク	対策工の基本方針	対策工の候補
① 異常降雨による地下水位の上昇	・ 流砂によりゆるみ範囲が拡大して崩落が発生する。 ・ 流砂によりトンネルへの水みちが拡がり大出水に至る。	・ トンネル切羽前方の地下水位をより確実な方法で積極的に低下させる。 ・ トンネル天端のアーチゾーンを確実に地山改良し、流砂を生じさせない。	地下水位低下工法（水抜きボーリングの強化、ディープウエル等）
② 旧地形を反映した地下の水みちの存在			
③ 土採り場跡の埋め土			
④ 万田野層に存在する自立困難な砂層	・ 先受け工の隙間から砂が抜け落ち、崩落が発生する。	・ 先受け鋼管の間からの抜け落ちや崩落による切羽の不安定化を防ぐ、より確実な先受け工の施工。	拡幅型 AGF を継続施工

5. 水抜き導坑からの水抜きボーリングの施工

(1) 水抜き導坑の施工

水抜き導坑は、特別な補助工法なしでも掘削できるように、比較的自立性のよい笠森層中に掘削する。

トンネル掘削により導坑の上部に分布する難透水性の遮水ゾーンをゆるめることのないように、層境までのかぶりを1m以上確保でき、かつ、本坑断面への切上げ時の障害にならない位置を考慮して、下半盤に導坑底盤を合わせた位置にした。

導坑断面は小断面NATMの機械施工が可能な最小断面として設定した。（図-4）

掘削は小断面NATMに適用可能な自由断面掘削機（カッターローダ：CL9E-1）を使用し、小断面トンネルの標準支保パターンに準じる形で施工したが、本坑断面への拡幅が予定されているため、ロックボルト施工を省略し、天端の笠森層かぶり厚さを確認するためにフォアボーリングを打設した。（写真-4）

(2) 水抜きボーリングの施工

水抜きボーリングは、施工延長（20～30m）と小断面トンネル内での水抜き管継ぎ足し作業の安全性を考慮して、導坑からのドリルジャンボによる小口径鋼管削孔に

より施工した。

水抜き鋼管の径から算出される排水量と前述の調査ボーリングを水位観測井として把握したトンネル前方の地下水位を勘案して、水抜きボーリングはトンネル延長5mごとの断面で、3本／断面の頻度で施工した。（写真-5）

水抜きボーリングの終了と同時にボーリング口元での水圧、水位観測井の水位を測定し、水抜き効果を検証している。地下水位は水抜きボーリング施工と同時に低下し始め、ボーリング施工完了時には、トンネル周辺の観測井の水位は、ほぼ地層境界面付近までに低下できた。

（図-5）

6. 本坑の施工

地層境界面付近までの地下水位低下を確認したのちに本坑断面への切上げ掘削を開始した。切上げ掘削で水抜き導坑からの水抜きボーリングは、いったん切断され、その機能を果たせなくなることから、本坑掘削においても側壁部からの水抜きボーリングを継続して施工し、地下水排水を受け替えることにした。

地下水は本坑切羽ではしみだし程度の湧水で土砂流出が生じることもなく、本坑天端部のゆるみ拡大を防止するために密な間隔で打設した鋼管先受け工の効果もあり、安定した掘削を実現できた。（写真-6）

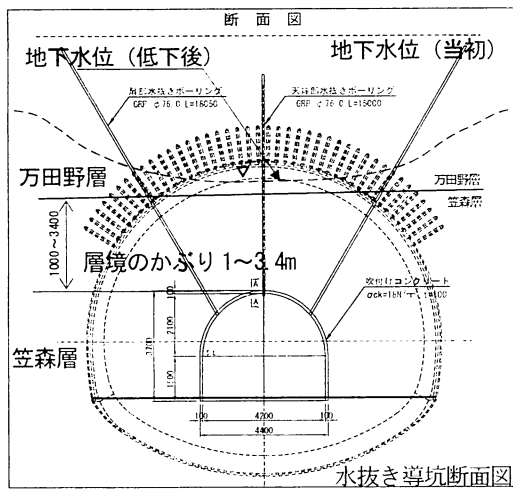
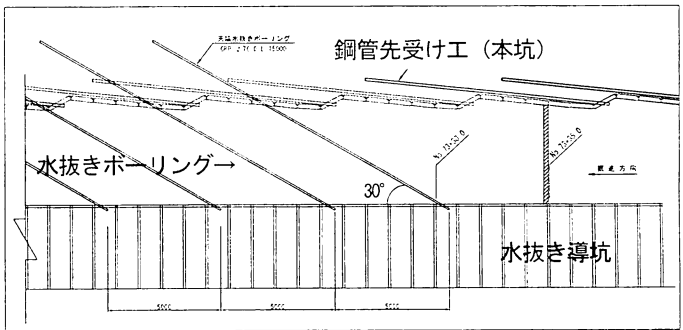


図-4 水抜き導坑の施工断面図および縦断面図



水抜き導坑縦断面図



写真-4 水抜き導坑掘削状況



写真-5 水抜きボーリング排水状況

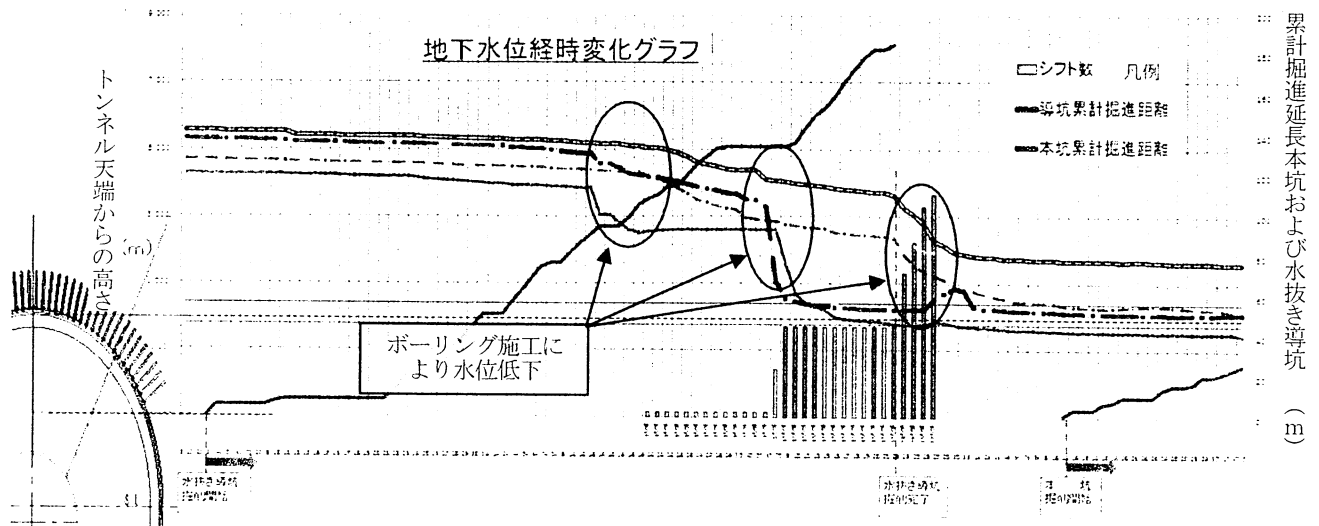


図-5 水抜き導坑からの水抜きボーリングによる地下水位低下状況

7. おわりに

現場で発生した大量出水に対して、地形、地質条件を再精査し、現地形に潜んでいるリスクを整理して対策を検討した。検討結果を施工中の地下水モニタリングにより確認しつつ無事に施工ができた。

地下水位により地山の安定性が低下するトンネルでは事前の水位低下や地山補強が重要になる。切羽前方の地下水状況を適切に把握して、先見性を持って合理的な施工法を選定することの大切さを今回の地表陥没で身をもって体験することになった。

今後は、施工中に低下させた地下水位を完成段階でウォータータイト構造に復水させる必要があり、更なる地下水位観測が必要になると思われる。

都市部における山岳トンネル工事のさらなる情報化施工へ向けて、本事例が今後の参考になれば幸甚である。

謝辞：突如発生した出水とそれに伴う陥没の発生に対して、愚直に原因を追及して有効な対策を立案し、安全に大きな事故もなく施工できたことは技術者として大いなる喜びである。これもひとえに笠森トンネル技術検討委員会（委員長：大島洋志首都大学東京客員教授）の委員



写真-6 本坑施工状況（目立った切羽湧水なし）

をはじめとする関係各位の方々のご指導、ご助言のお陰であり、本紙面をお借りして深く感謝する次第です。

参考文献

- 1) 日経コンストラクション編集部「■事故に学ぶ [圏央道笠森トンネル工事に伴う地表の陥没]」日経コンストラクション 2011/03/14 号

COUNTERMEASURE AGAINST A LOT OF GROUNDWATER AND GROUND CAVED IN KASAMORI TUNNEL

Katsurou FUJIMOTO, Yutaka YANAGIMORI, Mamoru SAITOU,
Wataru OGAWA and Tatsunori TAKEUCHI

In this report, the construction of Kasamori tunnel is described. During its construction, inundation and surface subsidence have occurred in the tunnel. Detailed investigation on the geophysical aspects of the ground was carried out again and the cause of occurrence was predicted based on the outcome of investigation. The suitability of countermeasure was examined to prevent similar problems after resuming the tunnel excavation work. The examined countermeasure enabled monitoring of water level to ensure effective and safe construction process.