



写真-1 トンネル位置地上状況

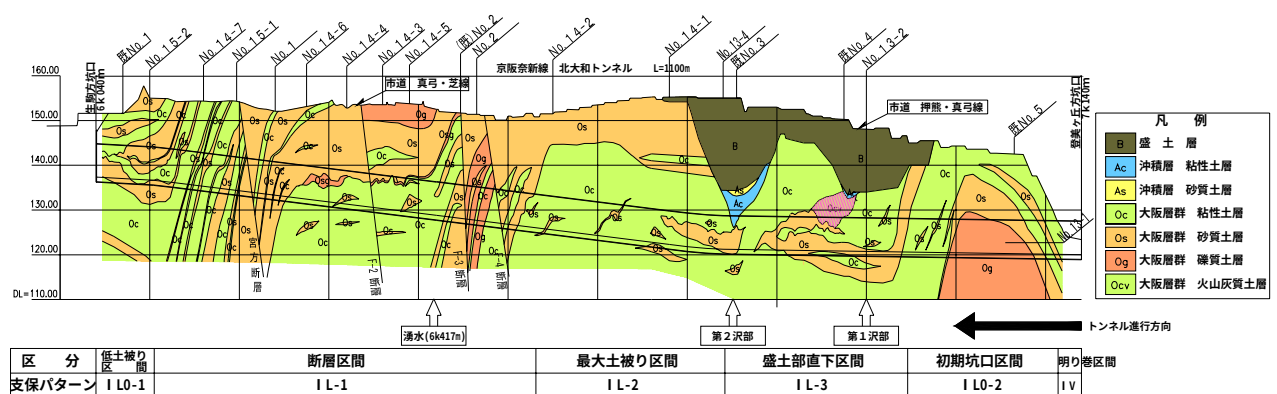


図-2 地質縦断図（実績情報）および支保パターン

2. 工事概要

工事名称：北大和トンネル建設工事（6k040m～7k140m 間）

発 注 者：奈良生駒高速鉄道株式会社
（施工管理：近畿日本鉄道株式会社）

施工場所：奈良県生駒市上町、同北大和地内

工 期：平成 13 年 2 月 16 日
～平成 17 年 3 月 25 日

工事内容：トンネル延長 1,100m（NATM 区間 1,074 m＋明り巻区間 26m）

掘削断面積 69～76 m²

補助工法併用上半先進ショートベンチカット工法、機械掘削・タイヤ方式

って開発が進んでおり、北大和住宅地と呼ばれるニュータウンに位置する。

図-2 に掘削実績および追加地質調査による地質縦断図を示す。トンネルの地質は、新生代第三期鮮新世～第四期更新世の大阪層群に属する大八丁累層と宮方累層で構成されている。大八丁累層と宮方累層の境界には宮方断層と呼ばれる東落ちの逆断層が存在し、他にも 3 本の断層が検出されている。また、宅地造成工事により旧沢地形部に施工された盛土区間があり、旧沢地形底部には沖積層が確認されている。これら盛土部直下区間と断層区間の掘削における地表面沈下抑制および切羽安定対策が課題であった。

(2) 周辺環境

北大和トンネルの周辺環境としては、以下の項目を挙げることができる。

①直上住宅地は、非常に閑静な第 1 種低層住居専用地域である。

②直上をライフラインの埋設された市道、街路が複数横断、あるいは並走する。

したがって、トンネル工事に起因する地表面沈下に

3. 地形・地質概要および周辺環境

(1) 地形・地質概要

北大和トンネルは、京阪奈丘陵と呼ばれる標高差 50m 程度の丘陵地にあり、周辺は近年の宅地造成によ

よる住居およびライフラインの損傷、騒音・振動による住環境の悪化を極力抑制することが非常に重要であった。

4. 周辺環境対策

(1) 騒音対策

騒音については、トンネルに使用する機械・設備および作業形態別に、近接家屋における騒音予測を行い、さらに合成発生音による騒音レベルをシミュレーションした結果を基に、表-1 に示す騒音対策を計画した。

表-1 騒音対策

種 別	機種・作業	騒 音 対 策
設備面	コントラファン	サイレントコントラファンの使用
	バックチャージラント	建屋に防音バネを使用
	スリ出用ダンプ	エンジンルーム前面に防音装置を装備
作業形態	ずり仮置場	バックホ運転は昼間のみ
	掘削用機械	機械が坑内 20m 以深に入るまでは昼間作業

(2) 振動対策

振動の伝播は地質・地層構成により異なり、固体

伝播音は家屋構造および家屋内の位置により異なるため、各家屋の振動影響をシミュレーションすることは不可能に近い。したがって、平均的な土被り、地質における地表での振動レベルを予測し、対策を立て、計測により管理していくこととした。

- ①鏡吹付コンクリートは、ツインヘッダーで切削する。
- ②設計で上半仮インバート吹付が計上されているが、実施工においては、計測管理を行いつつながら、実施しないことを基本とする。
- ③待避所掘削等、やむを得ず大型油圧ブレイカーを使用する際は、必ず昼間作業とする。

(3) 地表面沈下対策

北大和トンネルの設計支保パターンは、図-3、表-2 に示す通りで、この支保構成および補助工法を基本に施工条件を整理した上で地表面沈下抑制工法の検討を行った。

北大和トンネルの地形・地質条件下では、地表面沈下は避けられないものの、周辺環境条件を考慮すると、その値を最小限に抑制することが非常に重要であり、地元住民からの強い要望であった。

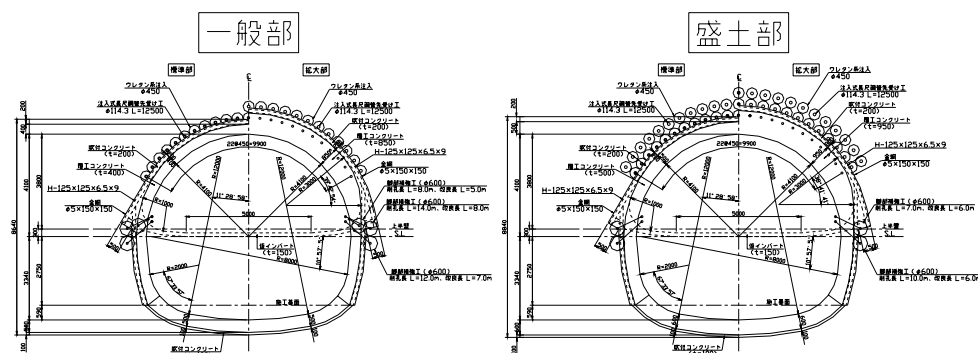


図-3 計標準支保パターン図

表-2 設計支保工・補助工法一覧表

工 種	一般部	盛土部	土被り最大部
吹付 コンクリート	アーチ・インバート	20 cm・10 cm	
	上半仮インバート	15 cm	
ロックボルト	――	――	L=3m×8本 P=1.2
鋼製支保工	H-125 (ウイングリブ付)		H-125
注入式フォアローリング	――	――	L=3m×18本 P=0.6
注入式長尺鋼管先受工 (AGF-OFP工)	打設長 12.5m, シフト長 9m 打設間隔 45 cm・120° 鋼管 φ114.3 mm (23本) 注入材 シリカレジン	打設長 12.5m, シフト長 6m 打設間隔 45 cm・120° 鋼管 φ114.3 mm (23本) 注入材 シリカレジン	――
脚部補強工 (AGF-OFP工)	打設 8・12・14m, シフト長 9m 鋼管 φ114.3 mm (6本) 注入材 シリカレジン	打設長 7・10m, シフト長 6m 鋼管 φ114.3 mm (4本) 注入材 シリカレジン	――

表-3 地表面沈下抑制工法（支保構造・補助工法）の変更・追加

沈下抑制システム	支保構造・補助工法	設 計	変更・追加
先行沈下抑制	AGF 工・脚部補強工削孔方式	水削孔	気泡二重管削孔
	長尺鏡ボルト工	———	断層帯水区間に導入
トンネル安定性向上	鋼製支保工	H-125	H-150
	プレロードシェル工	———	地上条件・沈下状況に応じて導入
	上半仮インバート工	計上	原則的に施工しない
	下半掘削先行補強工	———	盛土部直下区間に導入
	地下水位低下工法	———	断層帯水区間に導入
後続沈下抑制	早期全断面閉合	———	導 入
その他	追加地質調査	———	導 入

地表面沈下の原因には種々のものがあり、これらが複合して発生するのが一般的である。すなわち、沈下を抑制するためには事前に原因別の十分な対策工を講ずるとともに、掘削に際しては監視を強化し、最適な対策工へと適宜変更することが必要である。

北大和トンネルにおける地表面沈下抑制工法について検討した結果、①先行沈下抑制、②トンネル安定性向上、③後続沈下抑制を沈下抑制システムとして位置付け、基本となる設計上の対策工に加え、表-3 に示す追加対策工を提案し、採用あるいは協議対象とした。

これらの検討結果を基に、試験施工区間を設け、NATM 工法の安全性を実証するとともに、地表面沈下抑制工法の効果を把握した上で本格的な掘削施工に着手した。

掘削工において最も問題になると考えられていた盛土部直下区間および断層区間の施工に際しては、表-3 に示す地表面沈下抑制工法を状況に応じ組み合わせることで、経済性も確保しながら無事に通過することができた。

また、試験施工においては、地表面沈下抑制工法の効果確認だけでなく、騒音・振動対策についても効果確認を行い、それらの結果を地元自治会に提示し、トンネル工法の安全性および工事の周辺環境への影響の低さを理解していただいた上で工事協定書を締結し、本掘削に着手した。

5. 盛土部直下区間の掘削工

(1) 事前検討

図-1 に示すように、トンネル区間には盛土部（掘削進行順に第 1 沢部・第 2 沢部）があり、旧沢地形底部に分布する沖積粘性土層、比較的高い地下水位等が把握されており、地下水位低下に起因し大きな地表面沈下が発生することが当初から懸念されてい

た。そこで、事前に追加地質調査を実施し、その結果盛土層が粘性土層により遮水されていることが把握できたため、薬液注入や防水型構造等の対策工法を採用せずに、地下水変動をモニタリングしながら図-2、表-2 に示す当初設計の支保パターンで当該区間の掘削に入った。

(2) 第 1 沢部の施工

まず、第 1 沢部において盛土層厚の増大に伴い地表面沈下も増大する現象に遭遇した。早急に後続変位抑制を主とする対策を実施するとともに、さらに盛土層厚の大きな第 2 沢部に備え先行変位抑制工法の検討を行い、先行支保工補強パターンの施工を実施した。

a) 計測結果

当該区間の計測結果を要約すると以下のようなる。

- ①盛土層厚の増大に比例して沈下量が増大した。
- ②盛土層厚の大きい区間の先行沈下量が 10 mm を超えており、上半掘削時沈下量の 40～50% となった。
- ③盛土層厚の大きい区間では、切羽到達前 1～2D で先行沈下が始まっている。
- ④内空変位・天端沈下量は、上半掘削時で 10 mm 以下と小さなものであった。

b) 上半掘削完了区間の対策工

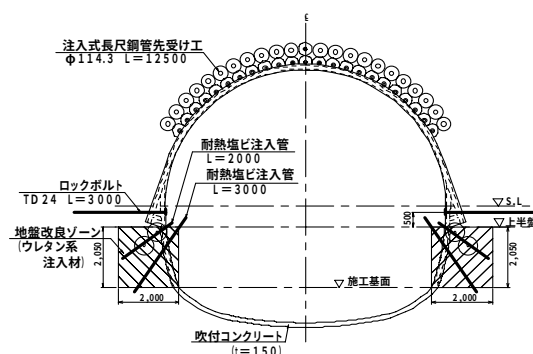


図-4 下半掘削先行補強工（その 1）

既施工区間の後続変位抑制を目的として、早期全断面閉合を実施することとしたが、トンネル内空の変位量が小さいにもかかわらず、大きな地表面沈下が発生していることから、掘削による応力解放が地山より変形性の高い盛土層に影響していることが考えられたため、下半掘削およびインバート掘削の際の周辺地山への影響をできるだけ抑える必要があった。そこで、下半掘削前に図-4に示す下半掘削先行補強工を実施した。

表-4 盛土部直下区間の補強パターン

工 法	IL-3 補強①パターン	IL-3 補強②パターン
AGF 工	鋼管：L=12.5m@400 mm 28 本 注入：注入圧管理(目安注入量 160kg/本) シフト長：6m	鋼管：L=15.5m@400 mm 30 本 注入：注入圧管理(目安注入量 200kg/本) シフト長：6m
脚部補強工	注入：注入圧管理(目安注入量 25kg/m)	注入：注入圧管理(目安注入量 30kg/m)
プレート・シェル工	必ず導入	必ず導入(底版部注入袋拡大)
鋼製支保工	H-150	H-150(ウイング・リブ 底版拡大型に変更)
鏡ボルト工	——	切羽・地表面沈下状況に応じて導入

(3)第2沢部の施工

a)先行支保工の強化

第1沢部における施工の経緯ならびに計測結果を踏まえ、盛土層厚の大きな第2沢部においてはより大きな地表面沈下発生が予想されるため、さらに先行支保工を強化したパターン(IL-3 補強②)を採用した。

b)地表面沈下増大への対応

表-5 第2沢部上半掘削完了区間の対策工

工 法	仕 様	採用理由
上半仮インバート工	t = 150 mm	沈下が継続し、収束傾向を示さなかった。わずかな内空変位が盛土層に影響していると考え、早急な仮閉合が必要であった。
下半掘削先行補強工	図-5 の仕様	内空変位を極力抑制するとともに、応力解放の影響遮断を狙った。

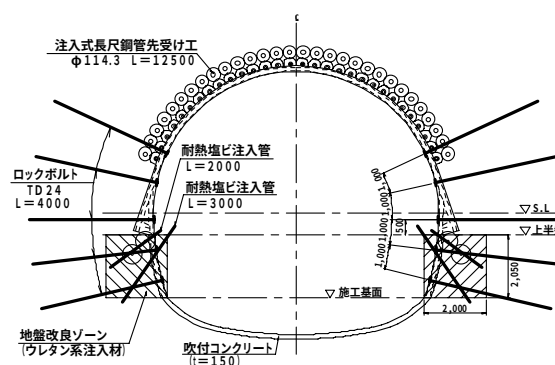


図-5 下半掘削先行補強工（その2）

c)未掘削区間への対策工

計測結果に示すようにトンネル内空の変位は小さいにもかかわらず先行沈下比率が高く、結果的に地表面沈下の増大を招いていることから、切羽前方の先受工が地山と共下がりしている現象を想定した。そこで、共下がり現象を先受工強化で抑制しようと考え、表-4に示す先行支保工補強パターン(IL-3 補強①)を導入した。これは、次に遭遇する第2沢部の試験施工としての位置付けでもあった。

第2沢部に入った当初は、先行支保工強化型の支保パターンが効果を発揮し、地表面沈下量は10 mm程度以下と安定していた。しかし、盛土層厚が増大するに従い次第に地表面沈下も増大し、盛土層厚最大部では40 mmを超える地表面沈下量を観測した。その対策として、第1沢部で実施した対策工法を基に表-5の対策工を実施した。

c)計測結果

第2沢部における地表面沈下の傾向は、第1沢部とほぼ同様であった。地表面沈下範囲も影響範囲として通常設定される $45^\circ + \phi/2$ よりもやや広い 45° にまで広がった。また、先行沈下比率も大きく、先行沈下抑制を目的として導入したAGF工の増強は、盛土層厚最大部においては期待通りの効果を得るに至らなかった。

(4)盛土部直下区間の地表面沈下増大メカニズムと施工の反省

まず、事前検討時に予測した通り、地下水位低下が見られなかったことから、その影響はないと考えられる。

計測結果からの想定であるが、今回の予想を超える地表面沈下が発生したメカニズムとしては、自立性の劣る盛土層が地山に作用し、グランドアーチが形成できず、AGF鋼管とともに沈下する共下がり現象と切羽鏡面への微小な押し出し現象が発生する。掘削の際に周辺から押し出された土砂を余分に取り除くことにより、さらに共下がりを進行させる。この繰り返しにより沈下が継続し、大きな沈下量となったと考えられる。また、比較的小さな内空変位が変形性の大きな盛土層に影響したことも考えられる。

この地表面沈下対策として、今回のようなケース

では、切羽鏡面への押し出しを抑制し、先行沈下量を抑制する機能の高い長尺鏡ボルトが有効だったのではないかと考えられる。長尺鏡ボルトは一つの有効手段として補強メニューに上げていたが、切羽鏡面の目に見える挙動が観測されなかったので導入に至らなかった。今後は、鏡面挙動を容易に計測できる手段の開発が必要であると考ええる。

上半掘削完了区間において採用した下半掘削先行補強工は、上半支保工沈下防止と下半掘削時の地山への影響遮断の効果が非常に高く、坑口部や断層破碎帯等地山条件の悪い箇所に有効であると考ええる。

また、早期全断面閉合はトンネルを早期に安定させる効果はもちろん、路盤の悪化防止の効果も十分期待できる。さらに厳しい条件下では、早期全断面閉合を1シフト毎に繰り返す方法も採用すべき手段の一つであると考ええる。

6. 断層区間の掘削工

(1)突発的な湧水との遭遇

当初より断層区間においては、多量の湧水により切羽が不安定になり、最悪の場合地表面までおよぶ崩落の発生が懸念されており、盛土部直下区間に次いで施工の難渋が予想されていたので先行水平ボーリングにより前方探査を実施していたが、懸念された湧水の存在は把握できなかった。しかし、当該区間に入って約120m進行した6k417m地点から施工したAGF工の鋼管から最大200リットル/分の湧水量を観測した。



写真-2 湧水状況 (6k417m)

探りボーリングの結果、トンネル天端付近上部に豊富な地下水を賦存している砂礫層が存在していることが明らかになったため、一旦切羽を停止し、地上からの追加地質調査により周辺の地質状況および地下水状況の詳細なデータを収集し、地下水対策工法、掘削補助工法を検討した。

(2)地下水位低下工法

追加地質調査の水質分析結果により、周辺水文物件への影響が小さいこと、地下水位低下による地表面沈下量が小さいこと等が予測できたため、地下水

対策として地下水位低下工法に絞って検討を行った。

ディープウェル工法等も可能な地上条件ではあったが、地上が閑静な住宅地であり、電力供給や排水処理が容易でないことから、坑内からの水抜きボーリング工の試験施工を行い、地下水位低下効果を確認することとした。試験施工の結果、地下水位低下効果が確認でき、追加地質調査で把握できた地質情報を基に帯水層を狙うことが可能であることから、地下水位低下工法として水抜きボーリング工を導入した。

(3)掘削工法

図-1からも分かるように、当該区間は天端付近に帯水砂礫層を抱えている区間が長いため、地下水位低下工法を併用しても若干の地下水位は残る。そこで、表-6に示すように、地山を傷める可能性のある補足注入が不要な天端安定対策工法を主とした補助工法を導入したIL-1③パターンを採用し、掘削を進めた。

- ①地山損傷を最小限に抑えることを目的に、AGF工をL=12.5m×30本に増やすとともに、鋼管ピッチを400mmと狭めることで補足注入を不要とする。
- ②先行孔15本については、改良強度の高いセメント系注入材を使用し、改良ゾーンの核とする。後行孔15本についてはゲルタイムを早めたシリカレジンを使用して改良ゾーンの止水性を高める。
- ③透水性の高い砂礫層の場合、グラウンドアーチが形成されにくいことから緩み領域が拡大する可能性がある。したがって、トンネルの安定性確保および後続変位抑制を目的としてプレロードシェル工を実施する。
- ④緊急用の切羽安定対策工法として、注入式鏡ボルト工を準備し、状況変化に即時対応できる体制をとる。

特に、市道真弓・芝線横断部は、複雑な地層構成でかつ断層の存在が予測されているため、切羽安定が難しく、また直上に重要なライフラインを埋設した幹線道路があるため地表面沈下抑制も必要不可欠である。したがって、表-6に示すように、切羽鏡面安定対策および切羽方向への押し出し防止を目的として長尺鏡ボルト工を採用したIL-1④パターンで掘削し、無事通過した。

(4)計測結果

地表面沈下は、概ね5~10mm程度と比較的小さな数値となった。特に、長尺鏡ボルトを施工した市道真弓・芝線横断部における地表面沈下は5mm程度以下となり、切羽前方を拘束することで先行変位を抑制し、その結果全変位量を抑えることができたものと考えられる。また、地下水位低下の影響もほとんど見受けられなかった。さらに、内空変位・天端沈下も15mm以下と比較的小さな値で収束したことから、トンネルの安定性が確保できたものと判断された。

表-6 断層区間支保パターン

区 分	設計支保パターン	I L-1③パターン	I L-1④パターン
AGF 工	L=12.5m@450 mm 23 本 SRF 注入 シフト長：9m	L=12.5m@400 mm 30 本 セメント系+SRF 注入 シフト長：9m	L=12.5m@450 mm 23 本 セメント系+SRF 注入 シフト長：9m
脚部補強工	φ600 mm L=5.0・7.0・8.0m	φ600 mm L=5.0・7.0・8.0m	φ600 mm L=5.0・7.0・8.0m
鏡面補強工	——	鏡ボルト L=4.0m (必要に応じ)	長尺鏡ボルト (FIT 工法) L=12.5m
プレート・シェル工	——	必ず導入	必ず導入

覆工材料となり得ると考える。

7. 高品質二次覆工への取組み

(1) 充填の確実性向上を目指したスパン割り

当トンネルは、全線に渡り拡幅型 AGF 工を導入しており、最大拡幅断面において空洞を残さずコンクリートを確実に充填するため、セメント長を AGF 工 1 シフト長 9m に合致させるスパン割り変更を行った。

これにより、拡幅型 AGF 断面において最拡幅部にセメント装備のエア抜管をセットすることができるため、コンクリート充填の信頼性が一段と向上した。

(2) 膨張コンクリートによるひび割れ抑制の現場試験

膨張コンクリートのトンネル二次覆工への適用事例は極めて少なく、日本道路公団長崎自動車道路長崎トンネルにおける報告があるのみである。これは、ひび割れ抑制効果の信頼性と経済性の問題が背景にあるためと思われる。

しかしながら、今後トンネルの維持管理への取組みが本格化する中、ひび割れを抑制することで剥落等の危険度を低減し、その結果ライフサイクルコスト縮減に寄与するものと考え、今回実際の覆工コンクリートに膨張コンクリートを使用し、現場計測・効果確認を行った。

なお、当現場実験は、平成 15 年度土木学会年次学術講演会¹⁾にて発表された。

膨張コンクリート現場実験で確認された事項は、以下の通りである。

- ① プレーンコンクリートでは、温度収縮、乾燥収縮の影響で、材齢 3～8 日に引張応力が増加し、引張強度の 45～90%（ひび割れ発生限界点）の範囲に入るため、ひび割れ発生の可能性が高くなる。
- ② 膨張コンクリートでは、材齢初期にケミカルプレストレスによる圧縮応力（約 1N/mm^2 ）が導入されるため、ひび割れ発生の可能性が大きく低減される。

ほぼ同一条件下で施工したプレーンコンクリートのスパンにはひび割れが確認されているが、膨張コンクリートのスパンについてはひび割れが発生していないことが確認できており、繊維補強コンクリートに比べても経済的であることから、今後、有効な

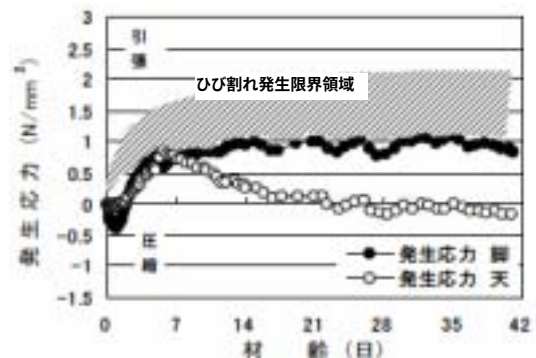


図-6 プレーンコンクリートの発生応力

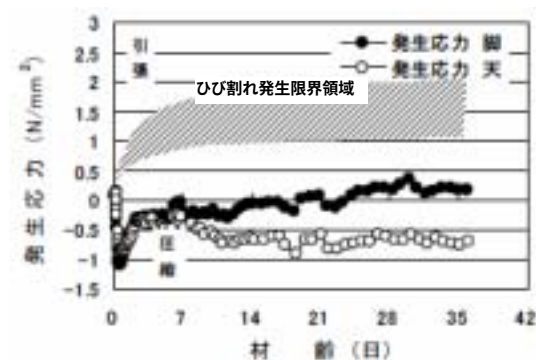


図-7 膨張コンクリートの発生応力

8. おわりに

北大和トンネルは、工事中のみならず開業後の列車走行の周辺環境への影響に対する住民の関心が高く、周辺環境保全に配慮した施工はもちろんのこと、地元協議、体験会・実験会の公開、現場見学会、工事情報・環境測定情報の開示等、地元住民との対話を積極的に進め、説明責任も果たせたものと自負している。

また、ライフサイクルコストを考慮したトンネル構築も今後取り組んでいかなければならない課題であり、そういった意味でも当工事の事例が今後同種の工事の参考となれば幸いである。

なお、多くの課題に対し、京阪奈新線トンネル技術委員会（委員長：足立紀尚氏）において適切なご指導をいただき、無事工事を完了することができた。全ての関係者の方々に対し、この紙面をお借りして謝意を表します。

参考文献

1) 佐竹紳也，御園憲治，村上正一，畑 浩二，木梨秀雄：二次覆工コンクリートにおける膨張材のひび割れ低減効果に関する現場実験，平成 15 年度土木学会年次学術講演会，2003