名塩道路八幡トンネル
~超近接無導坑めがねトンネルの施工について~

谷口　大樹[1]・木村　圭吾[2]

[1]近畿地方整備局　兵庫国道事務所　工務第一課　（〒650-0042 兵庫県神戸市中央区波止場町3番11号）

[2](株)鴻池組　大阪本店　（〒541-0057 大阪府大阪市中央区北久宝寺町3-6-1）

名塩道路八幡トンネルは用地の制約から上下線の間隔が約1mで近接する超近接めがねトンネルであり，掘削方式には，経済性・工程短縮に有利な先進導坑の無い，無導坑方式を採用した．

本トンネルは市街地にあり，近接するマンション・神社への影響が懸念された．そこで，トンネルの施工に際しては，地山の緩みを抑制するため，FEM解析に基づいた補助工法や瞬結型高強度吹付コンクリートを用いた早期閉合を行うなど様々な工夫を採り入れた．

本論文では，市街地での特殊な断面のトンネル施工において，掘削による緩みを抑制するために採用した様々な対策に加え，工程短縮・品質向上のために採用した工夫について述べる．

キーワード　双設（めがね）トンネル，補助工法，環境対策，早期閉合

1.　はじめに

国道176号は，京都府宮津市から阪神北部地域を経由して大阪市に至る延長約147kmの主要幹線道路である．名塩道路は，このうち西宮市山口町から宝塚市栄町の区間について，現道拡幅を主体として計画された延長10.6kmの道路である．

当該区間の現道は，カーブが多く幅員が狭小な2車線道路に1日当たり約2万台を超える交通量があり，慢性的な交通渋滞が生じている．

さらに，ほとんどの区間に歩道が無いか歩道がある場合も幅員が極めて狭いため，交通安全の確保が求められている．

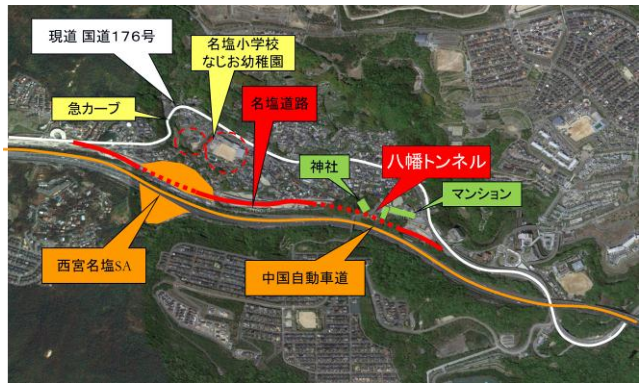


写真-1　八幡トンネル付近の周辺状況

本報告では，国道176号の4車線化改築事業である名塩道路事業の一貫として，西宮市塩瀬町名塩地先において計画された延長L＝242mの山岳トンネルである八幡トンネル工事の施工手法について報告する(**写真-1**)．

2. 名塩道路八幡トンネルの概要

名塩道路八幡トンネルは，中国自動車道及びマンションや神社に挟まれた地理的制約のため，上下線の最小離隔が約１mで近接した「超近接めがねトンネル」の構造を採用した(**図-1**)．

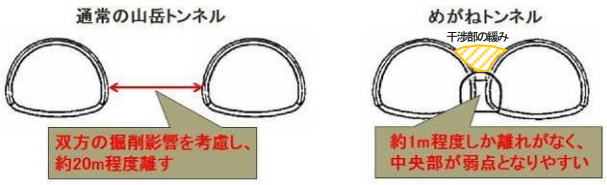


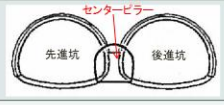
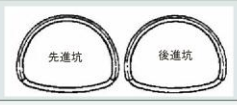
図-1　通常のトンネルとめがねトンネルとの違い

めがねトンネルの施工方法には導坑方式と無導坑方式があるが，本トンネルでは経済性・工程短縮の観点から無導坑方式を採用した．無導坑方式は通常のトンネルと同様に掘削を行うが，採用にあたっては地山変

状を抑制することが要求される(**表-1**).

しかしながら，名塩道路八幡トンネルは、全線にわたって小土被りであり，かつめがね構造となる特殊条件下でのトンネル施工である上に，マンション・神社の重要構造物が近接しているため，この地山変状を抑制することが最大の課題であった.

表-1 導坑方式・無導坑方式の比較

	導坑方式	無導坑方式
概要図		
特徴	・本坑掘削前に導坑を掘削し、中間部の補強(センターピラー)を実施	・通常のトンネルと同様に掘削する。 ・補助工法や早期断面閉合により、地山変状を抑制⇒【前提条件】
施工順序	①中央導坑(掘削→支保工→ｾﾝﾀｰﾋﾟﾗｰ) ②先進坑(掘削→支保工→ｲﾝﾊﾞｰﾄ→覆工) ③後進坑(掘削→支保工→ｲﾝﾊﾞｰﾄ→覆工)	①先進坑(掘削→支保工→ｲﾝﾊﾞｰﾄ) ②後進坑(掘削→支保工→ｲﾝﾊﾞｰﾄ) ※覆工は地山変位が収まってから施工
工期	△：導坑があるため長期 (概算工期：掘削～覆工：1.5)	○：短期 (概算工期：掘削～覆工：1.0)
安定性	○：中間地山・脚部の事前補強が可能なため、地山の変状(沈下等)に強い △：導坑掘削により地山を緩ます場合あり	○：補助工法により切羽の安定は確保可能 ○：早期閉合で地山の変状を最小限とする △：地耐力不足の場合、とも下がりが懸念
経済性	△：割高（概算工費：1.05）	○：経済的（概算工費：1.0）

3. トンネル施工における課題

（1）干渉部の緩みについて

地山変状において特に問題になるのが上下線の干渉部の緩みである．緩みの程度は，地質状況，施工手順，補助工法の有無等に左右されるが，特に干渉部に関しては，緩みを許せば，先進坑，後進坑の緩みが重なり合い，トンネル2本分の大きな緩み領域の拡大につながりかねない.

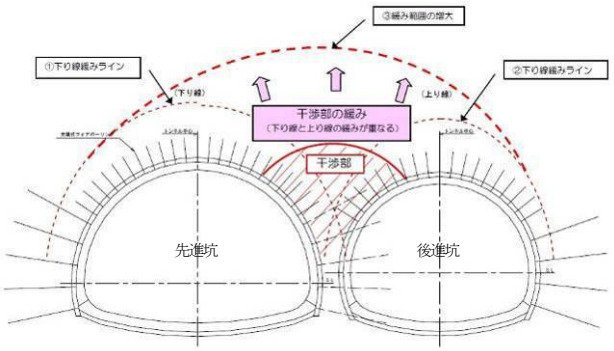


図-2 めがねトンネル緩みのメカニズム

（2）硬質な地盤について

掘削機械は，早期閉合において適用事例が多いことから，当初ツインヘッダを採用したが，神戸層群の礫岩層には硬質な玉石が多く存在し，ビットの消耗が激しく，掘削が不可能となったため，大型ブレーカ（1.3t級）に変更した．その後全断面にさらに硬質な岩盤が出現し，大型ブレーカ（1.3t級）による掘削でも進捗が思うように進まないため，工程短縮を図ることが課題となった.

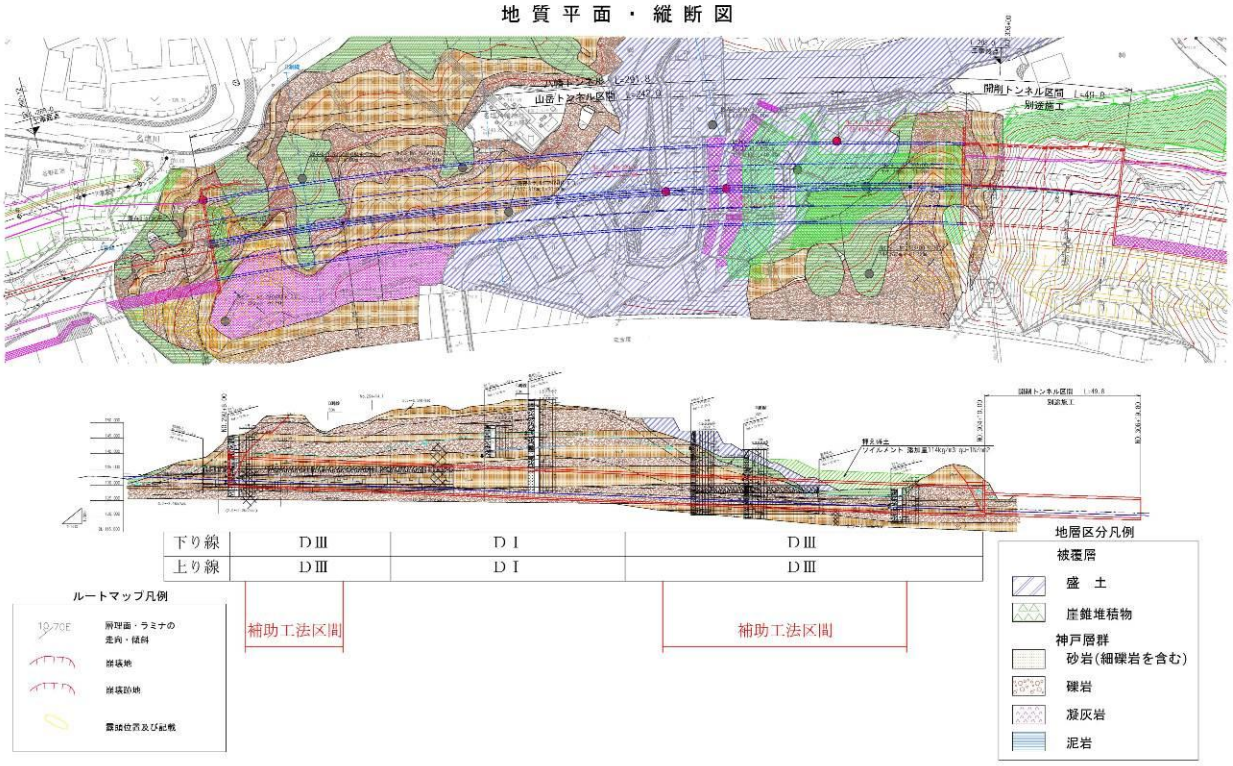


図-3 トンネル地質状況及び補助工法導入箇所

4. 施工における課題の解決方法

（1）干渉部の緩みについて

緩み対策においては，主に補助工法と早期閉合を取り入れた施工を実施した．

a) 補助工法について

補助工法を実施した箇所及びその種類については，**図-3** の通りである．

検討手法としては，主にFEM解析を用いて実施した．神社・マンション等の重要構造物が近接している区間では既往設計にてFEM解析を実施し，補助工法を決定していた．しかし，起点側坑口部のNo.293+7.0 断面においては図-4に示すように下り線側の土被りが小さく地山およびトンネル支保構造の安定性に関して不安があったため，追加のFEM解析を実施して補助工法の採用を検討した．

トンネルの安定性に対する評価基準として，解析結果による壁面変位と，限界ひずみより求められる基準変位との対比から切羽の安定性を評価した．トンネル切羽の安定性は，櫻井ら[1)]の提案する『直接ひずみ制御法』を用いて評価した．

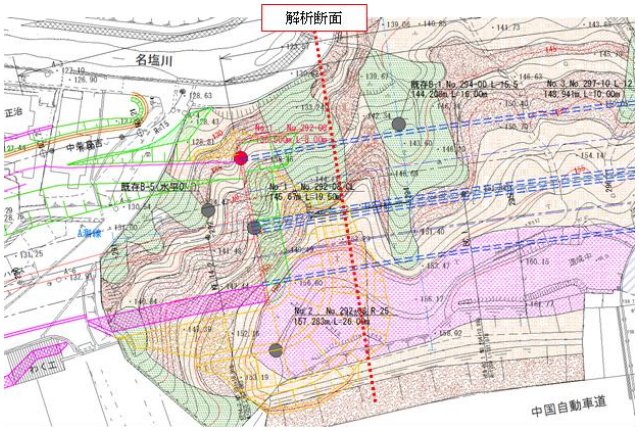


図-4 起点側坑口部解析位置平面図

追加のFEM解析を行った結果，**図-5**に示すとおり当初設計の補助工法を行わない無対策のケースでは，トンネル掘削により干渉部には大きな緩み領域を生じ，下り線側では地表部に達する緩み領域も生じる．FEM は連続体を対象に微小変形を扱う解析手法であり，無対策ケースのように非線形領域がトンネルと地表部や両トンネル間でつながった場合の大変形については追随していない懸念もあり，地山の緩みの進展によりトンネル施工に危険を及ぼす可能性がある．

このため，トンネルを連続体として扱えるよう対策工を行う必要がある．対策工としては，多段式長尺鋼管フォアパイリングによる緩み抑制対策が効果的と判断した．

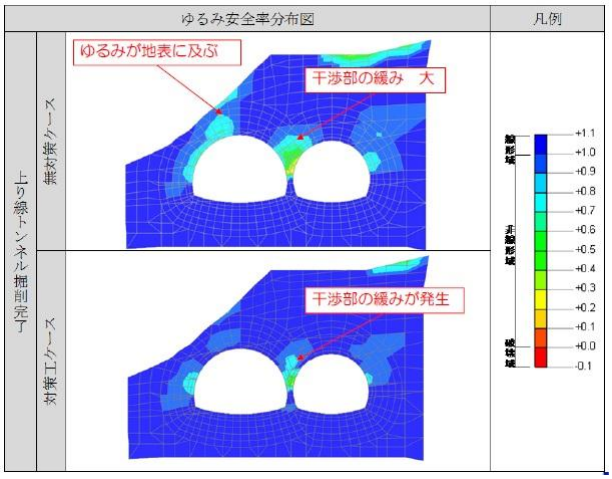


図-5 起点側坑口部におけるFEM解析事例

また，トンネル干渉部の緩みを許すと緩み領域が助長され，最終的には緩みが拡大し崩落の懸念があるため，トンネル干渉部に注入式フォアポーリングによる干渉部補強を実施した(**図-6**)．

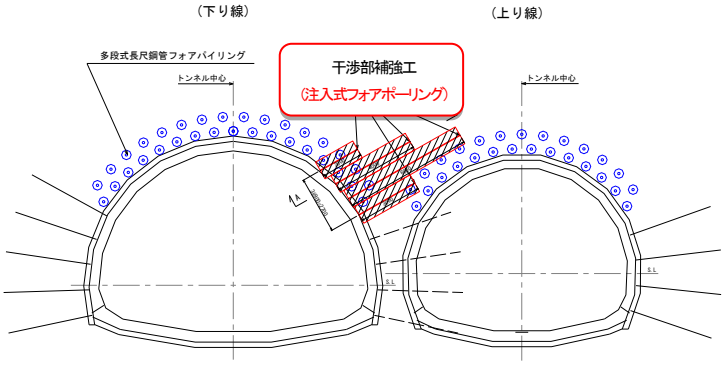


図-6 起点側坑口部において採用した補助工法

補助工法が必要な範囲の決定には，起点側坑口部の水平ボーリングデータを用いた．その結果，坑口より延長36.5mまでの区間は強風化した地山で脆く，部分的に粘土が挟在していた．36.5m以降の区間は，部分的に割れ目が発達，粘土を挟むものの全体的には地山は良好でコアは棒状を呈していた．

前述の解析結果によれば，補助工法を採用しないケースでは地表面にまで緩み範囲が及ぶことが想定されていること，当該箇所（36.5m地点:No.294+4.5）の下り線のセンターの土被りが8.463m（0.6D）であり，肩部の最小土被りは7.611m（0.54D）となるため，緩みの影響で地山の安定性が損なわれる可能性が高いと考えられたため，坑口部延長36.5m（No.294+4.5）までを目安に補助工法の採用が必要であると判断した．

また，補助工法の注入剤として当初はセメント系注入剤を使用する設計であったが，ウレタン系注入剤のシリカレジンへ変更した．変更した理由としては，**表-**

2の通りである．また，沢部地形であり，湧水の発生が予想されていたことも，湧水の影響を受けにくいシリカレジンへ変更した理由である．

表-2　セメント系材料とシリカレジンの比較

注入材料	セメント系注入材		ウレタン系注入材（シリカレジン）
	超微粒子セメント＋急硬性混和材	プレミックスモルタル	シリカレジン
硬化時間	30～300秒（ゲル化）（少しずつ粘性が高まり流動性がなくなる．）○	60～120分（ゲル化）△	45～120秒（硬化反応終了時間）（急激に発泡し，地山の内部応力を高め，岩片間の結合力を高める．）◎
材料強度	1日→10kgf/cm2 注入後養生が必要となり、掘削サイクルにロス生じる △	1日→10kgf/cm2 注入後養生が必要となり、掘削サイクルにロス生じる △	発泡後→30～40kgf/cm2 早期強度が得られるため，注入後すぐに掘削が可能 ◎
総合評価			◎(採用)

b）早期閉合について

本工事では，切羽から7m手前でインバートを含めた支保工と吹付コンクリートによる閉合を行い，地山の安定を図った(図-7)．

また、先行トンネルの補助工法採用区間では，吹付コンクリートに瞬結型高強度吹付コンクリート(Σショット工法：KT-130070-A)を活用した．瞬結型高強度吹付コンクリートは，高強度混和剤と急結剤を添加することで，吹き付け後10分で2～3N/mm²程度(標準の高強度吹付コンクリートの3時間強度相当)の強度が得られ，28日強度も36 N/mm²を十分満足する配合とした．

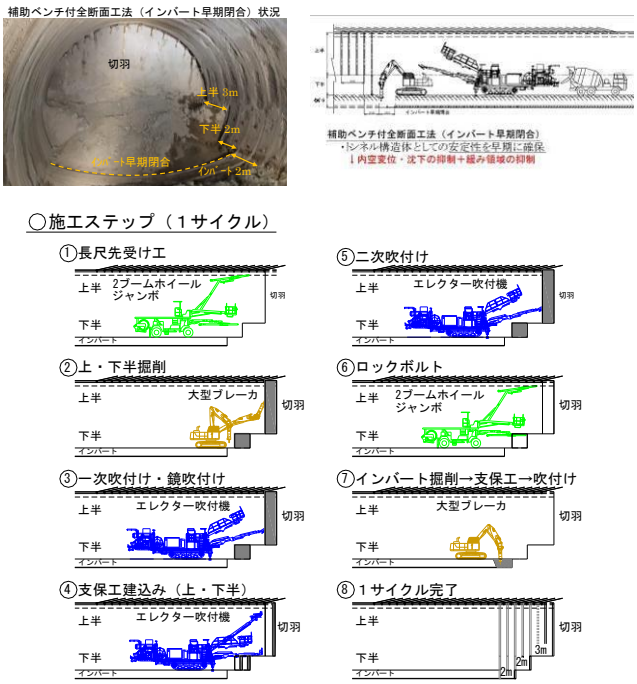


図-7　早期閉合説明図

c）その他の対策について

前述の対策以外にも，前方地山の緩みの抑制及びインバート施工時の安全性の向上によるトンネル相互の影響の低減を目的として，鏡安定対策(鏡ボルト・鏡吹付けコンクリート)を実施した．

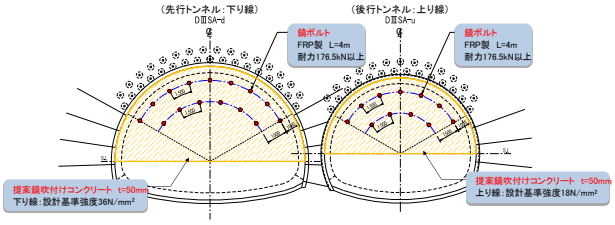


図-8 鏡安定対策実施図

また，上半脚部の沈下抑制と中間側壁部の改良効果によるゆるみ抑制によるトンネル相互の影響低減を目的として，先行トンネル施工時における中間側壁部補強対策(レッグパイル)を実施した(図-9)．

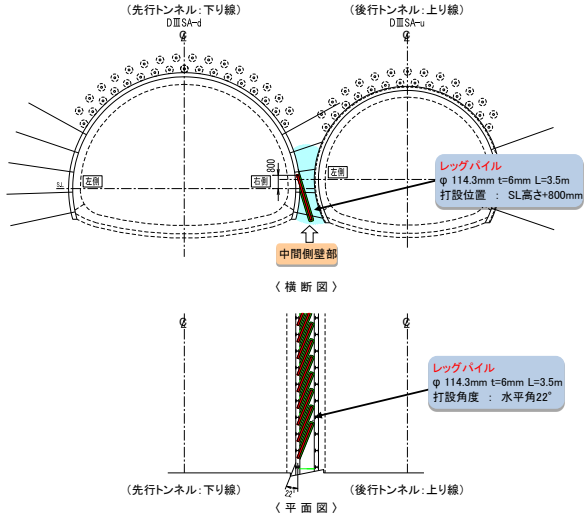


図-9　レッグパイル施工概要図

さらに，地山の緩みの低減及び，地表面沈下の抑制によるトンネル相互の影響の低減を目的とし，プレロードシェル工法を用いて鋼製支保工による早期の支保効果の発現を図った．

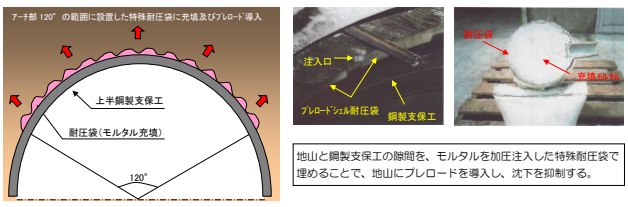


図-10　プレロードシェル工法説明図

以上のように様々な対策を用い，緩み（変位）を極力抑制した施工を行った．

（2）硬質な地盤について

機械掘削が進行するにつれ，トンネル深部では岩盤が硬くなり，掘削の進行が目標通り図れない恐れがあったため，大型ブレーカ（3t級）に加え非火薬岩盤破砕剤（ガンサイザー（時間制限有））を採用した．ガンサイザーとは，薬剤の熱分解時に発生する水蒸気圧により岩盤を破砕できる非火薬の岩盤破砕技術である．特長としては，岩盤を瞬時に破砕する性能を有するとともに，発破工法と比較し，破砕時の振動，騒音が小さくできることが挙げられる．

また，さらに工期短縮を図るため，下記に示すユニット鉄筋の採用や，施工時期の見直しに伴いFRPフォームを型枠材料とした覆工コンクリートの施工を行った（下記a），b）参照）．

a）ユニット鉄筋の採用

本トンネルの施工に関しては，配筋作業の機械化，合理化，作業改善を行い，鉄筋組み立て作業における工期短縮を図る目的で，二次覆工（インバート本体工）にユニット鉄筋を採用した（**写真-2**）．ユニット鉄筋には他にも**表-3**の様なメリットがある．

表-3　ユニット鉄筋特徴

	概要	詳細
①	高品質な製品で配筋制度が向上する	品質管理が行き届いた工場の自動溶接金網機で製造するため，高品質な製品の安定供給が可能
②	作業性が向上する	専用装置により鉄筋ユニットを把持し，所定の位置に設置（結束）する作業だけなので，苦渋作業がなく安全性が向上する
③	太径鉄筋も製作が可能	鉄筋径D29mmまでのユニット化が可能（当現場は最大径D22mm）
④	現場検査の簡素化を実現できる	ユニットごとの配筋ピッチは確実に確保できるため，継手部や端部の現場組み鉄筋の確認を行う（配筋検査の簡素化）

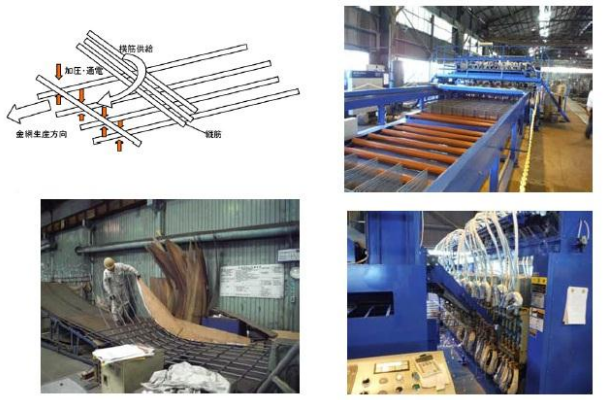


写真-2　ユニット鉄筋（工場製作時）の写真

b）FRPフォーム[*1]を型枠材料とした覆工コンクリートの施工

本トンネルでは，当初設計においては覆工コンクリートの型枠材料として鋼製を使用する予定であったが，FRPフォームに変更した．FRPフォームを採用した主な理由は，工事着手時期の見直しにより，硬質な地盤による掘削の遅れから，覆工コンクリートの施工時期が冬期となったためである．FRPフォームの特徴として構成材料と比較して熱伝導率が低いため，型枠内のコンクリートが外気温の影響を受けにくく，初期のコンクリート養生において有利となる．

また，離型性に優れ，自動ケレン装置が不要となることによる工期短縮，透過性を有する型枠なのでコンクリートの打設状況が確認できる等のメリットもある．

5.　地山変状の測定結果について

地山変状を把握するため，天端沈下・内空変位・地表面沈下等の測定（計測A）を行うとともに，坑内・ロックボルト軸力・支保工応力・吹付コンクリートの応力の測定（計測B）を行った．

計測Bでは他に，神社・マンション付近の沈下測定を自動計測システムにより実施した（**図-11・図-12**）．

その理由としては，前述のとおり本トンネルは重要構造物に近接しており，それらへの影響を連続かつリアルタイムに監視する必要があったためである．

最終的に，内空変位の変位速度が１mm／週以下となったことを2回程度確認できたら変位が収束したと判断し，測定を終了こととした．測定終了後，防水工及び覆工コンクリート工へ着手した．

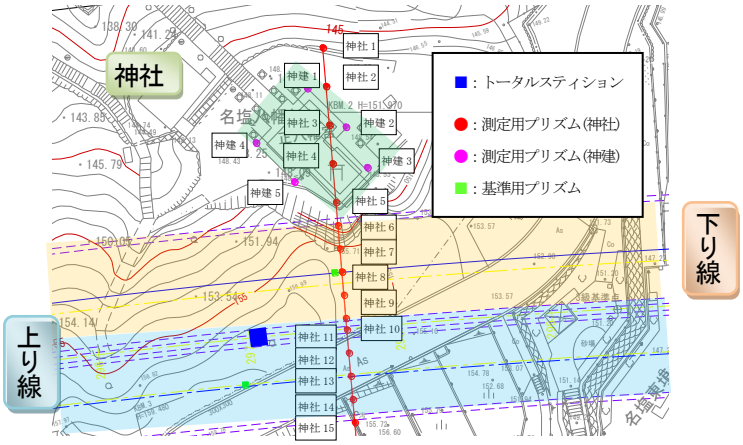


図-11 神社付近測定箇所

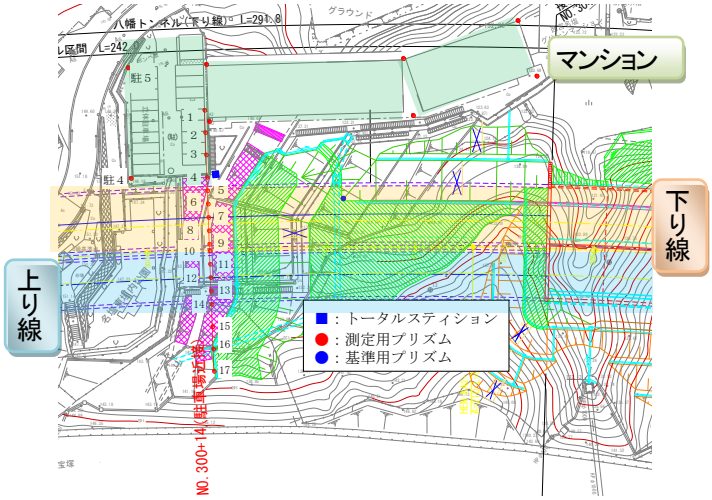


図-12　マンション付近測定箇所

写真-3　エキセントリックリッパによる施工状況

6.　環境に対する配慮について

本トンネルは市街地での施工となり，マンション・神社も近接しているため，周辺の環境（騒音・粉塵等）にも配慮した施工を行った.

（1）騒音に対して

前述した通り地盤が硬質であったことから非火薬岩盤破砕剤（ガンサイザー（時間制限有））を使用したが，使用に際し，坑口を防音ハウスで覆っていたものの騒音・振動・低周波音の発生が懸念された.

そこで，施工に先立ち試験破砕を実施し，トンネル坑口付近と，近接する民家付近において，騒音・振動・低周波音を測定した.

測定した結果，特定建設作業(騒音)における規制値である85dBを下回り，低周波音についても発破騒音の昼間の管理提言値である130dBを下回った．また、振動レベルに関しても規制値である75dBよりも小さかった.

（2）粉塵に対して

終点側坑口（No.304+10～No.305+13付近）の切土の施工に際し，近接するマンションに対する騒音のため「大型ブレーカ」が使用できなかった.

よって，トンネル掘削に使用する「ツインヘッダ」により掘削を進めたが，予想以上に多くの粉塵が発生した.

その対応策として，「エキセントリックリッパ」を採用した(**写真-3**)．エキセントリックリッパーの特徴は，第一に，掘削の機構が掘り起し方式で，本工事のように硬質の玉石混じりの地山では掘削騒音（振動）が小さく，住宅地域での使用が可能であること，第二に，法面整形において掘削箇所をピンポイントで傾斜に沿った掘削ができること，第三に，切削方式のツインヘッダに比べて，粉じん発生量が少ないことである.

7. おわりに

名塩道路八幡トンネルは，全線にわたって低土被りかつめがね構造となる特殊条件下でのトンネル施工であり，市街地で重要構造物が近接していたため，施工に際して通常のトンネル施工よりも地山変状に対して慎重に施工する必要があった.

その中で，通常のトンネル施工では行わない計測Bを取り入れ，トンネル構造及び周辺の挙動をリアルタイムに計測し，情報化施工を実施した.

また，既往設計においても，標準支保パターン（DⅢ，DⅠ）を出発点としてFEM解析等によってトンネル構造を決定するという，通常のトンネル設計手法とは異なる方法が取られた.

以上述べたとおり，様々な工夫を採り入れた事により，特殊な条件下である名塩道路八幡トンネル工事は無事終了することができた．ここで得られた知見が今後同様のトンネル施工へフィードバックされ，技術発展に寄与することが望まれる.

謝辞

最後に，本工事にあたり国土技術政策総合研究所真下道路構造物研究部長には非常に貴重な助言をいただいた．また本論文作成にあたりご協力いただいた関係者の皆様に感謝を申し上げる.

参考文献

1) 櫻井春輔ら：都市トンネルの実際，鹿島出版会，1998.3
2) ジェオフロンテ研究会：注入式長尺先受け工法（ＡＧＦ工法）技術資料（五訂版），2006.12
3) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，2009.2
4) 瀬崎満弘，渡辺正，藤倉裕介，源石佳弘：ＦＲＰ型枠を用いた覆工コンクリートの温度特性，トンネルと地下，第 42 巻 9 号，pp55-62，2011.9
5) 田中孝，谷口大樹 ：名塩道路八幡トンネルにおける無導坑方式の設計について，平成 26 年度近畿地方整備局研究発表会，施工・安全管理部門：No.02，2014.9