

トンネル岩判定における 遠隔臨場の適用について

山田 信人¹・西尾 彰宣²

^{1,2}株式会社オリエンタルコンサルタンツ・一般社団法人近畿建設協会設計共同体

(〒530-0005 大阪府大阪市北区中之島3-2-18 住友生命中之島ビル13F)

山岳トンネルの施工の際には、トンネル切羽に岩判定技術者が参集して切羽の地山評価を行い、必要に応じて支保パターンの変更を行うトンネル切羽岩判定が実施されている。しかしながら、熟練した岩判定技術者の減少、現場へのアクセスの困難さから、現地に参集することを前提とするトンネル切羽岩判定の実施が困難となってきている。この課題への解決策として、遠隔岩判定システムの仕様検討・システム構築を行い、実大トンネル実験施設および施工中のトンネルを利用した通信実験から、その適用性を実証した。

キーワード トンネル切羽岩判定、遠隔臨場、坑内無線通信、トンネル工事DX

1. はじめに

山岳トンネルの施工においては、切羽の観察や計測を指標としてトンネル切羽岩判定を行い、安全性および経済性が両立した合理的な施工となるよう、必要に応じて支保パターンの変更をおこなっている。トンネル切羽岩判定には、地質を評価する技術、トンネル工学に基づき支保の適正化を判断する両方の技術が必要であり、熟練した技術者の経験が必要となる。一方で、技術と経験を兼ね備えた判定者は近年減少しており、特に切羽状況が複雑な場合等において、適切な判定をすることが難しい場合がある。加えて、山岳トンネルは山間部に位置しており現地への移動に時間を要することから、判定者の拘束時間が長く、地山の急変時等の緊急時診断が困難な場合がある。以上のような事情から、トンネル切羽岩判定の実施効率化が求められている。

トンネル切羽岩判定実施効率化のための施策として、遠隔地からトンネル切羽岩判定を可能とする遠隔臨場システムの仕様を設定し、システムの構築を実施した。当システムを利用することにより、人員不足や作業効率改善のための課題解決が見込まれる。さらに、これまでスケジュール調整等によりトンネル切羽岩判定への参画が難しかった、有識者を含む第三者や、豊富な岩判定実績を持つ発注者側技術者の参加が可能となるという新たな付加価値の創出が見込まれる。

当報告では、実証実験を経て得られた遠隔で岩判定を可能とするシステムについて紹介するとともに、その検討プロセスで得られた、遠隔で岩判定を実施するシステ

ム（以下、遠隔岩判定システム）を構築する際の着目点、課題と対応方法について報告する。

2. トンネル切羽岩判定の概要

近畿地方整備局管内で施工される山岳トンネルでは「トンネル地山等級判定マニュアル（試行案）」¹⁾（以下、判定マニュアル）をもとに統一された評価基準および様式を用いてトンネル切羽岩判定が実施されている。トンネル切羽岩判定のおおまかな実施順序は以下のとおりである。

- ① 設計上の支保パターン変更地点等の、工地上重要な地点の施工日に岩判定を計画する。
- ② 岩判定実施日に判定者が施工現場に参集して切羽を観察し、判定マニュアルに岩種ごとに記載されている切羽評価表に示される9項目の評価区分につき、それぞれ4段階の評点を付ける。
- ③ 岩判定員によってそれぞれの評価項目につけられた評点から、該当切羽の総合評価点を算出する。
- ④ 総合評価点と切羽評価表に示される判定基準および、必要に応じて判定マニュアルに示されるフローチャートや工学的判断を用いて、最終的な支保パターンを決定する。

図-1に判定マニュアルから引用した9項目4段階の評価区分表を示す。評価区分(A)～(I)の9項目についてそれぞれ4段階の評点を行い、切羽評価を行う。遠隔で岩

判定を実施する際にも、これら9項目を精度よく判定できるシステムの構築が求められる。

図-1 切羽岩判定評価区分表

評価区分 (掘削地点の地山の状態と挙動)					
(A) 切羽の状態	1. 安定	2. 鏡面から岩塊が抜け落ちる	3. 鏡面の押し出しを生じる	4. 鏡面は自立せず崩れ、あるいは流出	5. その他
(B) 素断面の状態	1. 自立(巻掛不要)	2. 時間がたつと緩み崩れ落ちる(後巻掛)	3. 自立困難掘削後早期に支保する(先巻掛)	4. 掘削に先行して山を空けておく必要がある	5. その他
(C) 圧縮強度	1. $\sigma \geq 100\text{Mpa}$ ハンマー打撃はね返る	2. $100\text{Mpa} > \sigma \geq 20\text{Mpa}$ ハンマー打撃で砕ける	3. $20\text{Mpa} > \sigma \geq 5\text{Mpa}$ 軽い打撃で砕ける	4. $5\text{Mpa} \geq \sigma$ ハンマー刃先食いこむ	5. その他
(D) 風化変質	1. なし・健全	2. 岩面に沿って変色、強度やや低下	3. 全体的に変色、強度相当に低下	4. 土砂状、粘土状、破砕、当初より未固結	5. その他
(E) 割れ目の頻度	1. 間隔 $d \geq 1\text{m}$ 割れ目なし	2. $1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	3. $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	4. $5\text{cm} \geq d$ 破砕当初より未固結	5. その他
(F) 割れ目の状態	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土を挟む、当初より未固結	5. その他
(G) 割れ目の形態	1. ランダム方形	2. 柱状	3. 層状、片状、板状	4. 土砂状、層片状、当初より未固結	5. その他
(H) 湧水	1. なし・渉水程度	2. 滴水程度	3. 集中湧水	4. 全面湧水	5. その他
(I) 水による劣化	1. なし	2. 緩みを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊、流出	5. その他

3. 遠隔岩判定の課題抽出と仕様検討

(1) 遠隔岩判定仕様策定のための課題抽出

遠隔岩判定システムを用いて岩判定を実施する際においても、遠隔で判定を行う判定員が現地で行う判定員と同程度かそれ以上の岩判定を行える環境を確保する必要があります。このような環境が構築できなければ、遠隔岩判定システムの利用により切羽岩判定の品質低下を招くことになり、結果としてトンネル工事の安全性および経済性確保を妨げることとなる。そこで、仕様の策定に先立ち、遠隔岩判定を実現するための課題を抽出した。以下に抽出した課題を示す。

課題1：切羽観察を行うために必要な画質の選定

切羽岩判定の9項目の評価項目の中には、風化変質、割れ目の頻度、状態、湧水の有無といった、切羽を細かく観察することにより初めて判断できる要素も含まれている。低画質の画像では、これらの要素を十分に判断できない可能性がある。どの程度の高画質であれば十分に切羽観察が可能であるかの指標が必要である。

課題2：切羽と遠隔地のリアルタイム双方向通信

切羽から遠隔地まで一方的に情報を発信するだけでは、遠隔地の岩判定員が十分に観察したいポイントを観察できず、岩判定の精度が低下する恐れがある。そのため、遠隔地の切羽判定員が自らの手でカメラを操作し、自由自在に切羽を観察することができる環境構築が必要である。また、9項目の判定項目のうち、圧縮強度については岩片のハンマー打撃音が参考されるため、音声のリアルタイム通信も必要である。

課題3：通信困難エリアである坑内での無線通信実現

トンネル切羽を撮影した映像は、ネットワーク通信を経由して遠隔地まで送信する必要がある。トンネル坑内の有線通信環境は施工現場により様々で、坑内に通信設備が設置されていない施工現場や、通信設備が設置され

ていても、高画質映像を送信することができる通信容量が確保されていない施工現場も存在する。現場環境に左右されず安定した通信環境を確保するためには、設置が簡易で、かつ高容量の無線通信設備が適していると判断した。無線通信設備には、トンネル坑内には、通常、セントル、防音壁、防水工台車、重機等の、無線通信を阻害する機器設備が多数配置されていることから、これらの存在にかかわらず安定した無線通信を実施できることが求められる。また、図-2に示すように、トンネルは坑壁に囲まれた閉鎖空間であることから、坑壁に反射した電波の乱反射に起因する干渉問題が発生し、データ遅延や中継の途絶が懸念される。選定する無線通信設備は、電波の乱反射の影響を受けにくい通信設備であることが求められる。

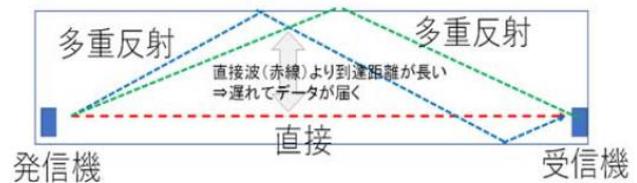


図-2 電波の乱反射に起因する通信障害発生イメージ

課題4：坑口から遠隔地までの通信実現

課題1から課題3までを解決することにより、切羽から坑口までの双方向高画質ネットワーク通信は可能となる。さらに坑口から遠隔地までの通信を確保することにより、遠隔地からの岩判定が実現する。

(2) 遠隔岩判定仕様策定のための課題解決

抽出した4項目の課題につき、以下に示すように課題解決を行い、遠隔岩判定の機器仕様を策定した。

課題1の解決：複数画質の切羽画像を観察した画質選定

どの程度の高画質であれば遠隔地からも切羽を効率よく観察できるかを判断するために、あらかじめカメラにより撮影した切羽画像を画像処理により複数の画質に変換し、それぞれを詳細に観察することにより、どの程度の画質であれば効率よく切羽観察を行えるかを確認した。

確認には、4K画質で撮影した切羽画像および、同画像に画像処理を施し、フルHD画質、HD画質とした計3枚の切羽画像それぞれについて、近畿地方整備局道路工事課および近畿技術事務所の協力を得て比較し、切羽観察に必要な画質の比較検討を行った。図-3に比較検討状況を示す。検討の結果、4K画質がもっとも画像による切羽判定に有効であるが、輝度の変化が大きくなる切羽周辺では、画質に加えて最低被写体照度の影響が大きくなるため、0.05lux程度の最低被写体照度を持つ撮影機材を確保すれば、フルHDでも画質は安定し、肉眼による切羽観察と同程度の観察が可能であることが判明した。そのため、4K画質のリアルタイム映像送信は必要

な通信容量が膨大となることを考慮し、フルHD画質を基本仕様として検討を進めることとした。



図-3 複数画質による切羽画像検討状況

課題2の解決：PTZカメラ、ウェアラブルカメラの利用

スマートフォンやタブレットを利用したweb会議システムでは、遠隔地の判定員が直接カメラを操作することができないため、判定者は任意に確認したい場所を確認できず、十分な切羽観察が実施できない。そのため、切羽と遠隔地の双方向通信が可能であり、遠隔地の判定員がカメラ操作を行える切羽映像撮影媒体として、PAN：水平操作、TILT：垂直操作、ZOOM：拡大縮小機能を有したPTZカメラを採用した。PTZカメラの選定の際には、課題1で明らかになった必要画質の映像送信が可能である点、0.05luxの低被写体照度に対応している点、切羽を詳細に観察するため光学ズーム機能を備えている点の3点すべてを満たす機器として、表-1に示す機器を採用した。

表-1 遠隔岩判定に採用したwebカメラ

分類	PTZカメラ
カメラ名	VB-R13 (CANON)
写真	
重量、寸法	約 1990g、φ199×199mm
防塵防水仕様	—
画素数	210万画素 (フルHD)
ズーム倍率	30倍光学ズーム
パン角度	360° エンドレス旋回
チルト角度	180°
最低被写体照度	・デイモード (カラー) : 0.05lux ・ナイトモード (白黒) : 0.002lux
マイク	マイクなし
電源	PoE 給電対応

また、切羽付近の判定員と遠隔地の判定員が相互にコミュニケーションを取り、ハンマー打撃音のような現地の音を遠隔地に的確に伝えるため、切羽付近の判定員がウェアラブルカメラを着用することを基本仕様とした。ウェアラブルカメラは、手振れ補正機能および水平維持機能が搭載され、映像酔いを解消する機能が搭載されてい

る点を考慮して表-2に示す機器を選定した。また、坑内騒音に配慮し、マイクには骨伝導通話機能を有する機器を選定した。

表-2 遠隔岩判定に採用したウェアラブルカメラ

分類	ウェアラブルカメラ
カメラ名	CX-WE100 (ザクティ)
写真	
重量、寸法	約 140g、37×69×92 (mm)
防塵防水仕様	IP65
画素数	フルHD
ズーム倍率	2~4倍
パン角度	180° 広角レンズ
最低被写体照度	0.75lux
マイク	マイク搭載

課題3の解決：指向性のある無線通信技術の採用

通信難所であるトンネル坑内での無線通信を実現するためには、坑壁による電波の乱反射による通信障害を解消し、かつ、通信を阻害する重機、セントル等の坑内設備の隙間で通信が可能となるよう、指向性の高い無線通信機器を採用した。表-3に選定した二種の無線通信機器を示す。機器の選定の際には課題1により明らかになった、安定してフルHD以上の映像送信が可能な通信容量 (25Mbps以上) を持つ通信機器を採用した。

表-3 遠隔岩判定に採用した無線通信機器

	指向性	
	LED通信	ミリ波通信
写真		
取扱会社	(株) 三技協	サンテレホン(株)
防塵防水仕様	IP67	IP67
通信速度	最大 750Mbps	1.3Gbps
通信距離	300m 中継器使用で延長可能	1km 中継器使用で延長可能

課題4の解決：4G回線を用いた坑口からの通信

施工現場によっては必ずしも坑口までネットワーク環境が整えられているとは限らない。また、施工業者により整備されたネットワーク環境を用いて双方向通信を実施するためには、ルータに進入用のポートを開くことが必要となるため、施工現場にセキュリティリスクが発生することになる。そのため、坑口からの通信環境も遠隔岩判定の実施のために独自構築することが好ましい。そのため、遠隔岩判定機器について、4G通信を用いて坑口から遠隔地まで通信可能な通信設備を構築した。

(3) 遠隔岩判定仕様策定

遠隔岩判定実施のための課題解決を実施した結果をもとに、遠隔岩判定の仕様を策定した。

図-4に遠隔岩判定通信模式図を示す。切羽付近にはPIZカメラが設置され、遠隔地の判定員はネットワークを介してカメラ操作を行い、自由自在にカメラを操作可能である。また、切羽付近の判定員はウェアラブルカメラおよび骨伝導マイクを装着し、web会議システムを通じて遠隔地の判定員とコミュニケーションを取り、指示に応じてハンマー打撃音等を送信する。映像および音声等のデータは坑内に設置した無線通信を通して坑口まで送信され、坑口からは4G通信を通して遠隔地まで送信される。

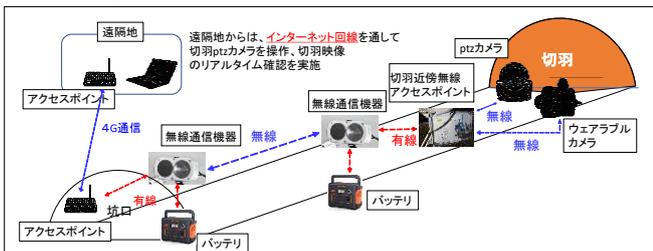


図-4 遠隔岩判定通信模式図

4. 遠隔岩判定システム実証実験

仕様策定した遠隔岩判定のシステムが現場に適用可能かどうかを判断するために、トンネル状実験施設および、2件の施工中の実トンネルを利用して通信試行を実施した。

(1) 実大トンネルを用いた通信実験

遠隔岩判定システム試行の第一段階として、選定した無線通信機器がトンネル内においても坑壁の電波乱反射の影響を受けずに通信可能かどうかを判断するために、国土技術総合政策研究所が所有する実大トンネル実験施設（茨城県つくば市）において無線通信機器の試行を行った。図-5に実大トンネルの概要を示す。

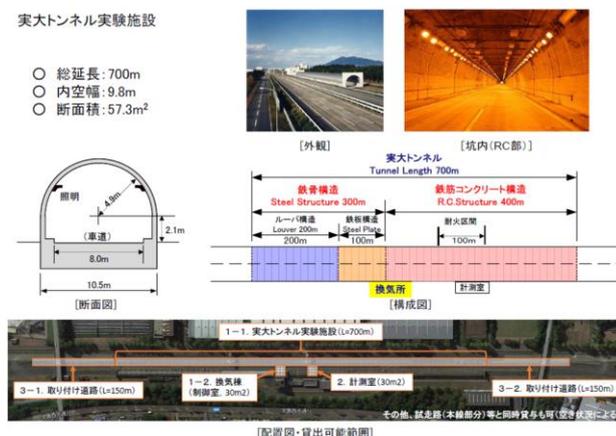


図-5 実大トンネル概要

実大トンネルは延長700mの直線状のトンネル型実験施設であり、トンネル坑内にはセントルや防水工台車、重機などの設備は設置されていない。そのため、当実験は、以下のテーマで実施した。

- ① トンネル坑内においても無線通信機器で通信を行うことが可能かどうかを確認する。
- ② 無線通信を行った場合の通信容量を数値化する。
- ③ 機器設置に必要な時間を計測する。

図-6に通信実施状況を示す。電波乱反射の影響を観察するため、通信機器は極力坑壁に近付いた地点に設置して実施した。



図-6 無線通信試験実施状況

通信試験の結果から、以下のような結論が得られた。

- ① 選定した通信機器はともにトンネル坑内で通信を行うことが可能であった。また、テスト用に接続したHD画質のPIZカメラでスムーズな映像送信が可能であった。また、通信確認にあわせて実施した、プラスチックおよび人を障害物と見立てた通信遮断試験では、両者ともに通信が遮断されないか、通信遮断後に数秒程度で通信復帰が可能であった。
- ② 通信速度は両者ともに85Mbps以上を記録し、フルHD映像のみならず4K映像を送信可能な通信容量であった。
- ③ 機器の組み立てに要する時間は両者ともに1分程度であり、実際の現場で実施される岩判定でも運用可能な短時間での準備が可能であった。

以上の実験結果から、無線通信機器に関してはトンネル坑内においても基本的に通信可能であることを確認した。一方で、当実験では以下が課題として残った。

課題) 当実験施設には重機やセントル等の通信の障害となると考えられる設備が存在していない。実トンネルでの試行により、これら設備があっても通信可能かどうかを判断する必要がある。

(2) 実トンネルを用いた通信実験(江住第二トンネル)

実大トンネルにおいて実施した通信実験で残った課題の確認を行うため、施工中のトンネルを利用して遠隔岩判定通信実験を行った。

通信試験には、実験当時すさみ串本道路において株式会社安藤・間により施工中であった江住第二トンネルを利用した。図-7にトンネル平面図および機器配置図を示す。

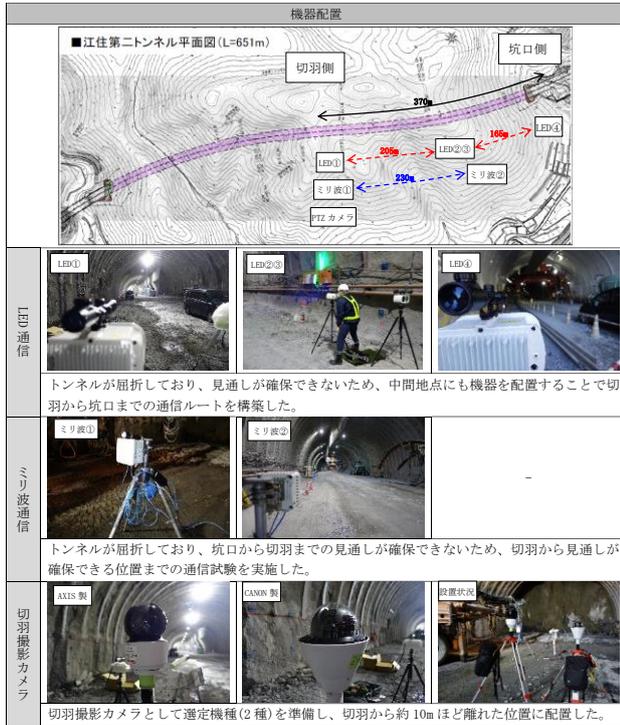


図-7 江住第二トンネル平面図および機器配置図

当トンネルは実験当時の延長が370mであり、距離呈30.0m付近に防水工台車、距離呈200m付近に防音扉が配置されている。当環境を利用し、以下3通りの実験を行った。

- ① 防水工台車の人用出入口を通した通信可否実験
- ② 防音扉の扉を非常に狭い感覚となるまで閉めた状態での通信可否実験
- ③ 選定したPTZカメラを用いた切羽から坑口までの映像送信実験

実験の結果は以下の通りであった。

- ① 図-8に実験対象とした防水工台車の写真を示す。防水工台車の人用出入口を通した通信実験の結果、防水工台車を通して良好な通信を確保し、スムーズにwebカメラを操作可能であることを確認した。



図-8 防水工台車

- ② 防音扉の扉間隔が50cmとなるまで扉を閉めて通信実験を行った結果、50cm程度の隙間であっても良好な通信環境を確保することが可能であることを確認した。



図-9 防音扉を用いた実験状況

- ③ 選定したPTZカメラを用いて、切羽から坑口まで無線通信で接続し、坑口付近に設置したPCで切羽を観察した結果、当無線通信機器を用いて、坑内設備がある状況でもフルHD映像のスムーズな通信が可能であることを確認した。図-10にPTZカメラによる切羽撮影状況を示す。



図-10 PTZカメラによる切羽撮影状況

当実験により、坑内設備が存在する実トンネルにおいても、切羽から坑口までの無線通信による遠隔岩判定が実施できることを確認した。一方で、当実験からは以下が課題として残った。

課題) 当実験では通信は切羽から坑口までにとどまり、

坑口から遠隔地までの4G通信を含めた遠隔岩判定の実施可否は未確認である。

(3) 実トンネルを用いた通信実験(高富トンネル)

江住第二トンネルにおいて実施した通信実験で残った課題の確認を行うため、株式会社大林組により、すさみ串本道路において施工中である高富トンネルを利用した通信実験を実施した。当実験は近畿地方整備局の協力を得て、高富トンネルから近畿地方整備局本局および近畿技術事務所の両者まで、4G通信を利用した遠隔地からPTZカメラを操作する遠隔岩判定実験を行った。高富トンネルは試験当時の延長が170m程度の直線状トンネルで、実験当時、防水工台車などの坑内設備は存在していない。

図-11に実験状況写真を示す。当実験では遠隔地から4G回線および坑内無線通信を通して双方向通信により切羽付近に設置したPTZカメラを操作し、坑内状況を観察することに成功した。



図-11 高富トンネル遠隔通信試行実験状況

5. まとめと今後の課題

当検討では、今後のトンネル切羽岩判定の作業効率化を目的として、遠隔地からトンネル切羽までを無線通信で接続する遠隔切羽岩判定の仕様検討、遠隔岩判定システム構築、遠隔岩判定システムの実証実験を実施した。検討当初には仕様検討を行い、以下のような結論を得た。

- ① 遠隔地からの映像配信を通して切羽岩判定を実施するためには、0.05lux以上の低被写体照度対応、かつ、フルHD以上の画質が必要である。

- ② 双方向通信による遠隔地からのカメラ操作が必要である。
- ③ 坑内は通信難所であることから、安定した高通信容量の無線通信実施のためには、坑内環境に対応可能な無線通信機器を選定する必要がある。
- ④ 坑口から遠隔地までの通信を確保するためには、4G通信環境を準備する必要がある。

以上の課題を解決するための仕様検討・機器選定を実施したうえで遠隔岩判定システムを構築し、実大トンネル、2件の実トンネルでの試行を通して、切羽から遠隔地まで双方向通信を行い、PTZカメラを操作して切羽観察を行うことに成功した。

今後は、当検討で作成した遠隔岩判定システムをより汎用性に利用可能なものとするため、クラウドを利用した切羽画像のリアルタイム保存、ネットワークセキュリティの確保等の仕様検討を行うとともに、通信技術の発展にあわせて、5G環境の利用等、機器の高精度化を継続して実施する予定である。

謝辞：当検討の実施に際しては、近畿技術事務所 榎本総括技術情報管理官（当時）、高祖技術情報管理官（当時）、近畿地方整備局道路工事課 浦本課長補佐に、切羽観察を行うために必要な画質の選定に際し、ご協力、ご指導、助言をいただいた。現場実験の実施にあたっては、江住第二トンネルにつき株式会社安藤・間に、高富トンネルにつき株式会社大林組に快くご協力いただいた。株式会社演算工房、株式会社三技協、サンテレホン株式会社、凸版印刷株式会社各位には実験実施にご協力いただいた。近畿地方整備局道路工事課 浦本課長補佐、近畿技術事務所 吉田技術情報管理官には、実験実施の際の遠隔地からのPTZカメラ操作確認につきご協力いただいた。関係各位にこの場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 近畿地方整備局道路工事課：「トンネル地山等級判定マニュアル（試行案）（平成18年9月試行案の改訂版）」、2016