

姉山トンネル（所原トンネル）における3Dレーザー計測を用いた急崖岩盤斜面の調査と施工

長井 正¹・緒方 直¹・高村 忠勝²・尾畑 洋²・中出 剛³・石濱 茂崇⁴

¹西日本高速道路（株） 中国支社 松江高速道路事務所 出雲工事区
（〒690-0044 島根県松江市浜乃木8-2-31）

²（株）熊谷組 広島支店 所原トンネル作業所（〒693-0021 島根県出雲市塩冶町423）

³正会員 （株）熊谷組 土木事業本部 土木設計部土工・開削グループ
（〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1）

⁴（株）熊谷組 土木事業本部 土木設計部地質グループ（〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1）

姉山トンネル（所原トンネル）は、出口側坑口の直上の岩盤斜面が急崖を形成しており、トンネル掘削の影響により不安定化することが懸念されていた。このため、対策工として不安定岩塊への締め付け効果を期待したアンカー工と吹き付けのり枠工によるのり面防護工が計画された。

施工にあたっては、伐採により露出した岩盤斜面での追加調査を実施した。追加調査には、3Dレーザー計測を使用して精密な岩盤斜面の形状を把握し、その形状に基づいて事前に計画されたのり面对策工の妥当性の検証を行うこととした。また、3Dレーザー計測により詳細な形状が明らかとなったオーバーハングは、高所岩盤掘削機（800kg級ブレイカ装着機）を用いて掘削除去した。

キーワード：急崖岩盤斜面、3Dレーザー計測、3Dモデル、高所岩盤掘削機

1. はじめに

所原トンネル（開通後の正式名称は姉山トンネル）では、出口側坑口の直上の岩盤斜面が急崖を形成しており、トンネル掘削の影響による緩みの増大と地震時の斜面の不安定化により岩盤斜面が崩落することが懸念されていた。このため、不安定岩塊への締め付け効果を期待したアンカー工と吹き付けのり枠工によるのり面对策工が計画された。

一般的に、深い植生に覆われた岩盤斜面では、斜面の形状が詳細に把握できない状態となっていることがあり、特にオーバーハングとなっている場合には、2次元平面図上に形状を正確に表現することは困難である。このような状況で、岩盤斜面にアンカー工や吹付のり枠工などののり面对策工が計画されると、施工時には「現地合わせ」となってしまうため、設計の妥当性を確認する場合には、より慎重な判断が求められる。

本工事では、のり面对策工が計画されている斜面が深い植生に覆われており、事前に斜面の正確な形状は把握できなかった。

のり面对策工の施工にあたり、周辺の伐採を実施したところ、露出した岩盤斜面が複雑な形状をしており、地質状況の把握や正確な斜面形状の計測を目的とした追加調査を行い、設計の妥当性を確認する必要があると判断された。また、調査にあたっては、工事が進行中であることから迅速な調査が求められ、急崖斜面での調査であることから安全な方法で実施する必要があった。

このような状況から、本工事では、追加調査に3次元（以下、3Dと表記）レーザー計測器を採用して斜面の正確な形状を計測し、地表踏査結果も勘案して、のり面对策工の設計の見直しを行った。

2. 工事概要

所原トンネルが位置している山陰自動車道鳥取益田線は、鳥取市を起点として、鳥取県～島根県の主要都市を通過し、島根県益田市に至る、中国地方の日本海沿岸地域を横断する延長244kmの高速道路である（図-1）。

山陰自動車道の沿線には、中国地方でも代表的な港湾や観光地が多く、様々な地域産業の活性化の取り組みが行われている。本道路は、このような主要都市と港湾あるいは観光地を結び、さらには広域的な高速ネットワークを形成することで京阪神や山陽・四国・九州地方との連携を強化することを目的として山陰地方の産業・経済・文化の発展に大きな役割を果たすものと期待されている。

所原トンネルは、山陰自動車道鳥取益田線のほぼ中間部の斐川IC～出雲IC間（13.6km）における延長820mのトンネルであり、出雲市街地中心部から南南東へ約5.0kmの地点に位置する。

なお、所原トンネル工事の工事概要は、表-1に示す。

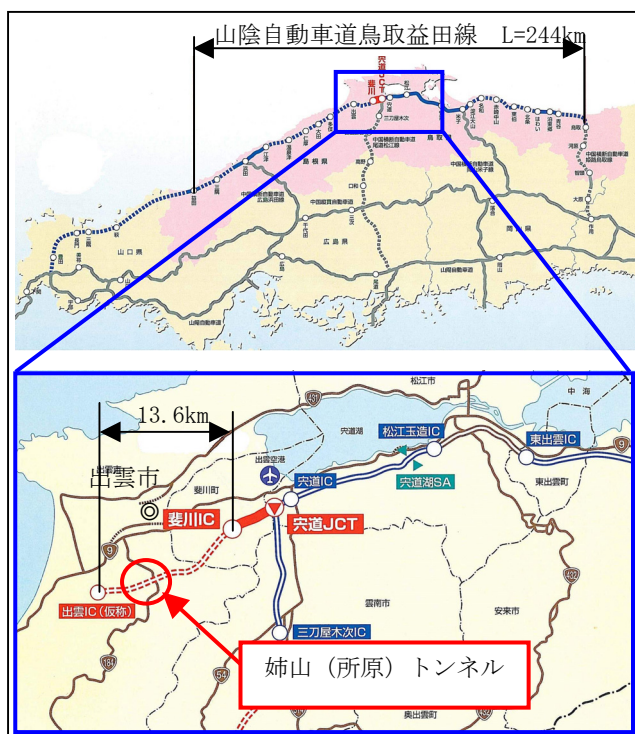


図-1 山陰自動車道工事路線図

表-1 工事概要

工事名	山陰自動車道 所原トンネル工事	
工事場所	自) 島根県出雲市所原町	
	至) 島根県出雲市朝山町	
発注者	西日本高速道路(株) 中国支社	
施工者	熊谷組・松江土建特定建設工事共同企業体	
工期	平成17年12月2日～平成21年3月15日	
トンネル諸元	延長	L=820m
	掘削断面積	76.2～96.1m ²
	内空断面積	61.1～75.4m ²
	掘削方式	機械掘削
	掘削工法	上・下半併進ショートベンチカット工法

3. 地形・地質概要

(1) 地形概要

本トンネル計画地周辺の地域は、東北東－西南西方向に伸びる中国山地中央部の北端に位置しており、本トンネルの周囲は丘陵地形を呈している。

本トンネル線形付近は、神戸川とその支流の穂原川に挟まれた円錐状をした山体であり、山体斜面は全体に急峻となり、所々に急崖がみられる。トンネルは、この山体の中央よりやや南側を東北東－西南西方向に貫く（写真-1）。

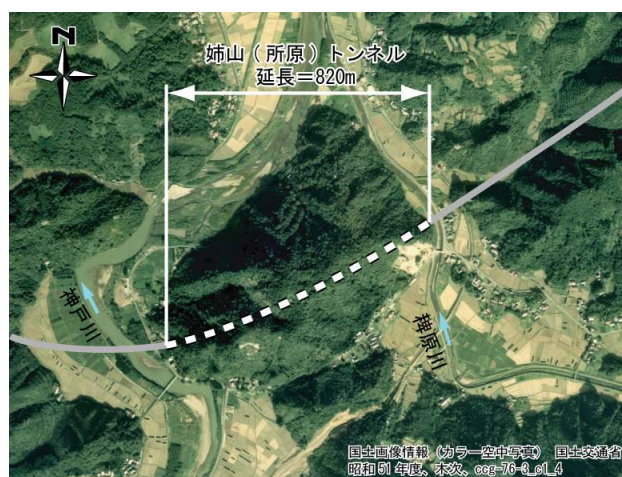


写真-1 工事位置空中写真

(2) 地質概要

当地域周辺を含む中国山地では、中生代白亜紀～新生代古第三紀の火成岩類が主体となっているが、本地域では、それらを覆う新生代新第三紀の火山岩類がみられる。5万分の1地質図幅「木次地域の地質」¹⁾によると（図-2）、本地域には新第三紀中新世の大森層のデイサイト（石英安山岩）溶岩が出現するとされている。

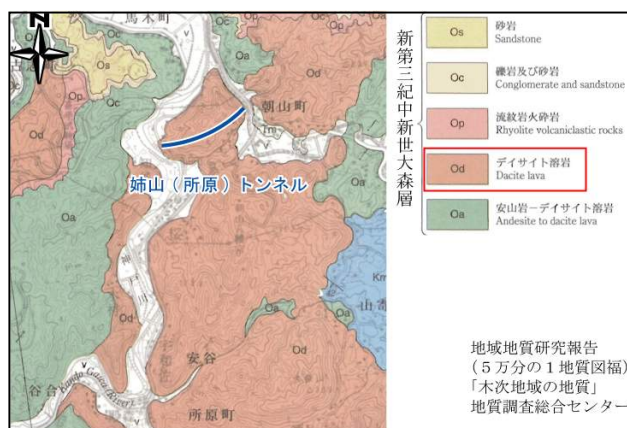


図-2 所原トンネル周辺の地質図

本トンネル周辺でみられる石英安山岩溶岩は、全体に多孔質で発泡跡が認められる塊状岩盤（中硬岩）である。新鮮部は暗灰～灰色を呈しており、風化が進むと褐灰～灰白色となる。

当該斜面周辺の石英安山岩には、写真-2のように開口亀裂が発達しブロック状に浮石となるものが多くみられる。この成因は、溶岩質の石英安山岩の初生的な不連続面（冷却節理など）が応力解放に伴い、開口したものと推測される。



写真-2 石英安山岩露頭写真

4. のり面对策工の概要と追加調査の経緯

所原トンネルの出口側（東側）坑口直上の斜面では、事前の地質調査により、トンネル掘削の影響による緩みの増大と地震時の斜面の不安定化により岩盤斜面が崩落することが懸念されていた。

既往設計時には、ボーリングコアやボアホールカメラ調査等の結果をもとに図-3に示すような岩盤内の緩み域が推定され（以下、「推定緩み範囲」とする）、アンカー工と吹き付けのり砕工によるのり面对策工が計画された。

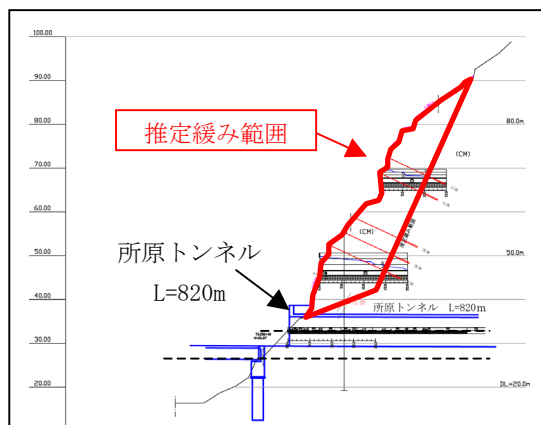


図-3 東側坑口斜面の推定緩み範囲（縦断面図）

なお、既往設計時には、東側坑口部が急崖であることや深い植生に覆われていたことから、当該斜面の正確な形状が把握されていなかった。よって、当初の対策工は、限られた情報に基づいて計画せざるを得ない状況であった。

一方、施工時に伐採により露出した岩盤斜面（写真-3）を確認したところ、当該斜面は様々な方向の亀裂が組み合わさった複雑な形状を呈しており、斜面の上部にはオーバーハング状を呈している箇所が認められた。このような状況から、追加調査を実施して、亀裂の方向性などの地質状況や斜面形状を詳細に把握し、事前に計画されたのり面防護工の妥当性の検証を行うこととなった。

なお、恒久的な安定性を考えた場合には、オーバーハング部は極力除去することが望ましいことから、のり面形状の変更も含めた対策工を検討することとなった。



写真-3 東側坑口斜面の全景

5. 調査方法および調査結果

(1) 調査方法

今回実施した追加調査では、専門技術者による地表踏査を実施するとともに、3Dレーザー計測による現況測量を実施した。

3Dレーザー計測器は、レーザー光により遠隔から非接触で対象物の3次元座標を求められる機器であり、当該地のような急崖部でも安全かつ迅速に計測データを取得することができる。

今回は、中長距離計測が可能な機器（Optech ILRIS-3D、対象斜面の対岸の道路より計測した（写真-4））。表-2に3Dレーザー計測器の仕様を示す。



写真-4 3Dレーザー計測状況

表-2 3Dレーザー計測器の仕様

項 目	内 容
測定距離	3～800m
スキャニング角	垂直・水平 $\pm 20^{\circ}$ ($40^{\circ} \times 40^{\circ}$)
データサンプルレート	2000ポイント/秒
測定精度	$\pm 3\text{mm}$ (計測距離100m時)
レーザー強度	Class 1

3Dレーザー計測により得られたデータは、図-4に示すフローにて処理を行った。

なお、当該斜面の計測点数は約100万点であり、計測期間は2日間である。

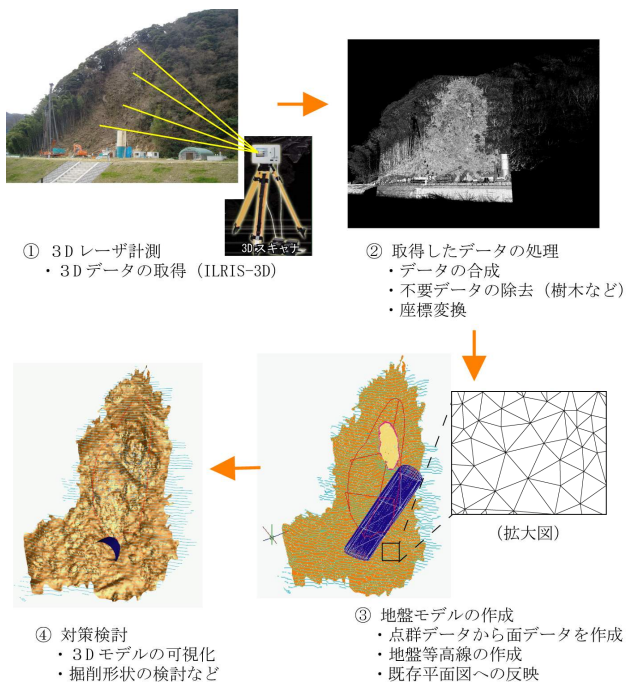


図-4 3Dレーザー計測のデータ処理フロー

(2) 調査結果

3Dレーザー計測により得られたデータを用い、当該斜面の詳細な平面図の作成 (図-5) および3Dモデルの作成を行った (図-6)。

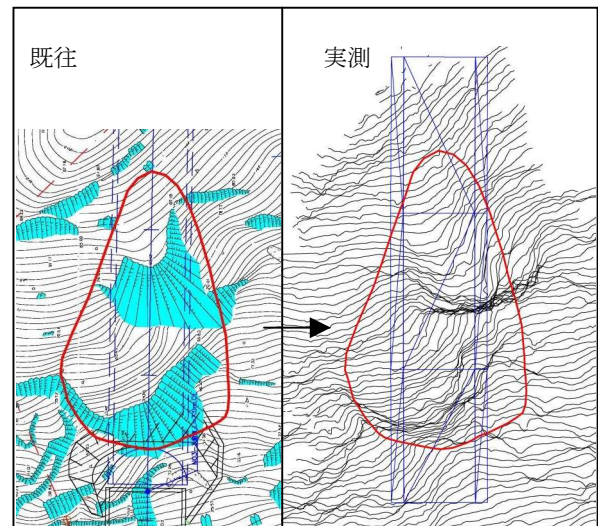


図-5 東側坑口の既往平面図 (左) と実測平面図 (右)

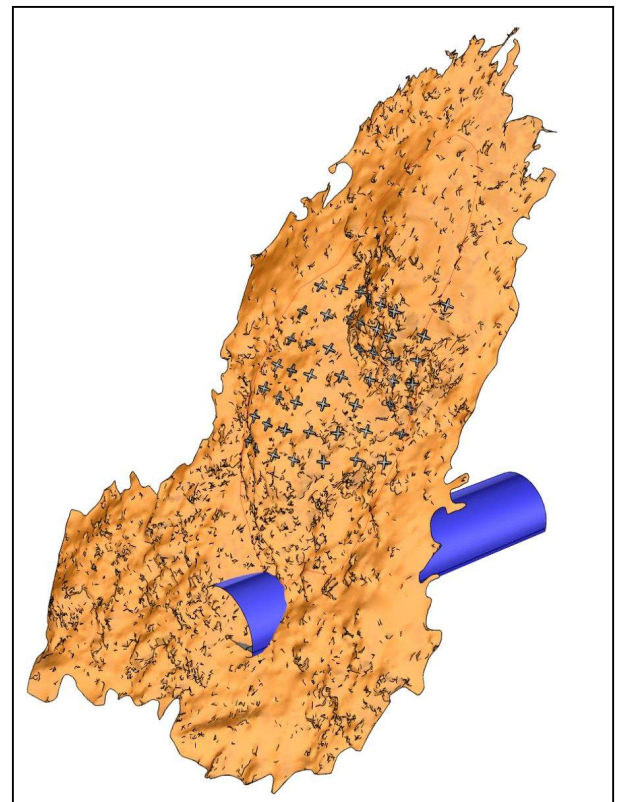


図-6 東側坑口斜面の3Dモデル

作成した平面図や3Dモデルでは、既往平面図に比べ斜面上部でオーバーハングしている形状を明瞭に確認することができる。

確認されたオーバーハング部は、3Dレーザー計測の結果から凸型の斜面形状が明らかとなり、全般に不安定な形状である。また、地表踏査の結果からは、一部の亀裂が開口していることが確認され、将来的に岩盤崩落が発生する恐れがあると判断された (図-7)。

よって、当該斜面では、恒久的な安定性を確保す

るために、オーバーハング部は掘削除去することとなった。

また、オーバーハング部の掘削に伴い、斜面形状が変更となるため、アンカー工についても設計の見直しを実施する必要が生じた。

設計の見直しにあたっては、作成した平面図や3Dモデルを基に、オーバーハング部の除去に伴う当該斜面の安定性について安定解析（簡便法）を行い、アンカー工の設計の見直しを行った。

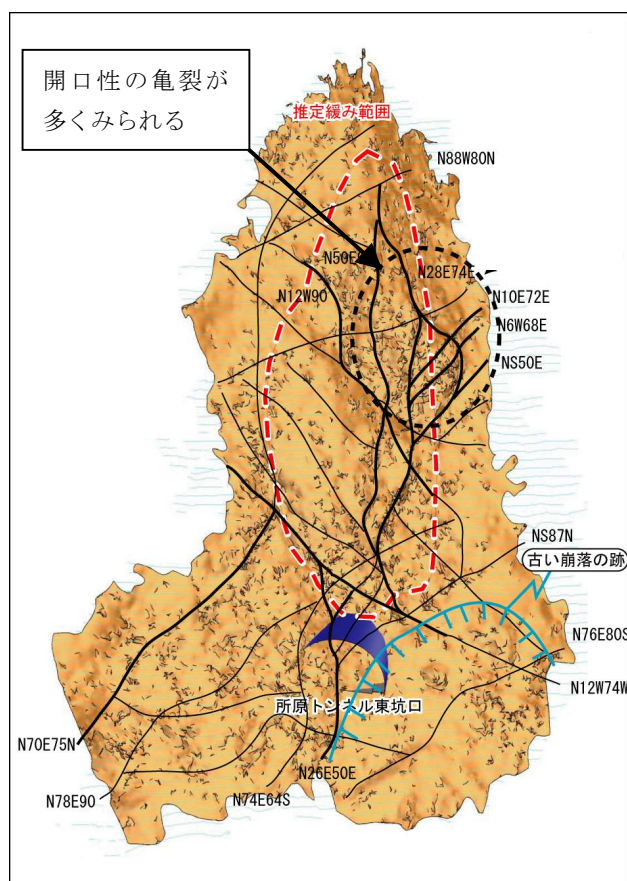


図-7 東側坑口斜面の地表踏査結果

6. のり面対策工の設計見直しと施工

(1) オーバーハング部掘削

オーバーハング部の掘削形状を検討するにあたり、3Dモデルにより把握された形状や地質状況を勘案し、4種類の掘削範囲案を作成した（図-8、表-3）。

比較検討にあたっては、除去する岩塊量は大きなものの、恒久対策としての機能を最優先に考え、掘削除去範囲としては、斜面の平均的な勾配に近く、最も安定性が高いと評価されたⅢ案を採用した（図-9）。

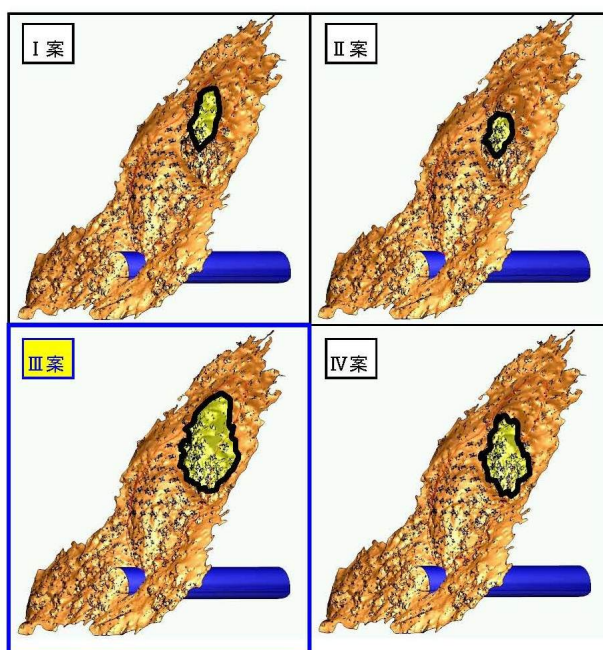


図-8 オーバーハング部掘削除去案（太線が除去部）

表-3 オーバーハング部掘削除去案の比較表

案	除去対象	除去勾配	除去量
I	オーバーハング部の一部	平均斜面勾配 (60°)	160m ³
II	オーバーハング部の一部	すべり面勾配 (70°)	80m ³
III	オーバーハング部全体	平均斜面勾配 (60°)	810m ³
IV	オーバーハング部全体	すべり面勾配 (70°)	350m ³

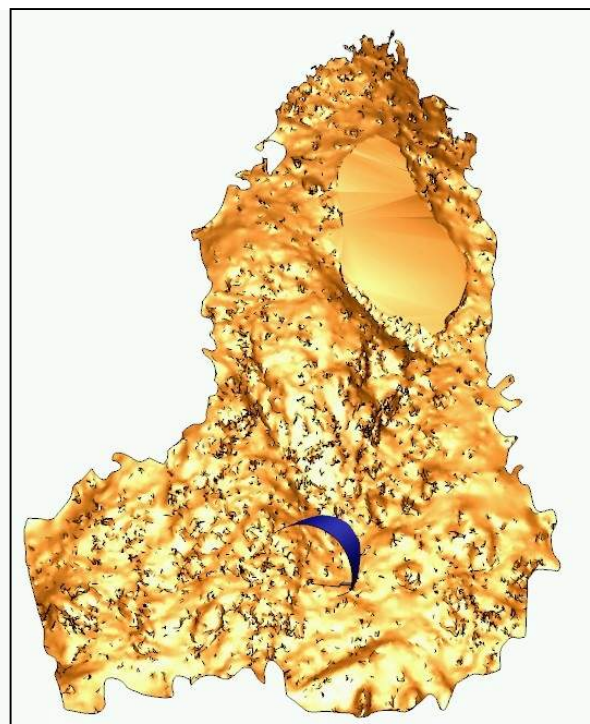


図-9 オーバーハング部を除去した3Dモデル

オーバーハング部の掘削除去では、800kg級ブレイカを装着した専用機械（高所岩盤掘削機）を採用した。高所岩盤掘削機は、斜面上方の樹木をアンカーとしてワイヤーで固定し、ラジコンによる遠隔操作にてウィンチを使って前後左右移動しながらオーバーハング部の岩盤掘削を行うものである（写真-5）。除去岩塊は、斜面前方に土堤と大型土のうによって設けたポケット部分に落下させ、飛散防止に配慮した。



写真-5 高所岩盤掘削機掘削状況

(2) アンカー工

図-10に既往設計時のアンカーと実施したアンカーの比較を示す。

既往設計では、推定緩み範囲において斜面長さが最大となるトンネル中心を通る断面を用いて安定解析を行い、必要抑止力は1726.4kN/mであった。

実施設計では、得られた3Dモデルを基に、オーバーハング部の掘削除去に伴う検討断面の再検討を行い、必要抑止力が最大となる断面として、トンネル中心から2m離れた断面を選定した。また、既往設計断面での逆解析により設定されていた地盤定数についても、新たな検討断面を基に見直しを行った。

なお、推定緩み範囲の上部の岩塊を除去したことから、必要抑止力は大幅に低減し、既往設計の約20%の275.0kN/mとなった（表-4）。

表-4 必要抑止力の比較（既往設計および実施）

	設計アンカー力	打設数量 (本)	必要抑止力
当初設計	1056.7	49	1726.4
実施	235.7	30	275.0

※地震時

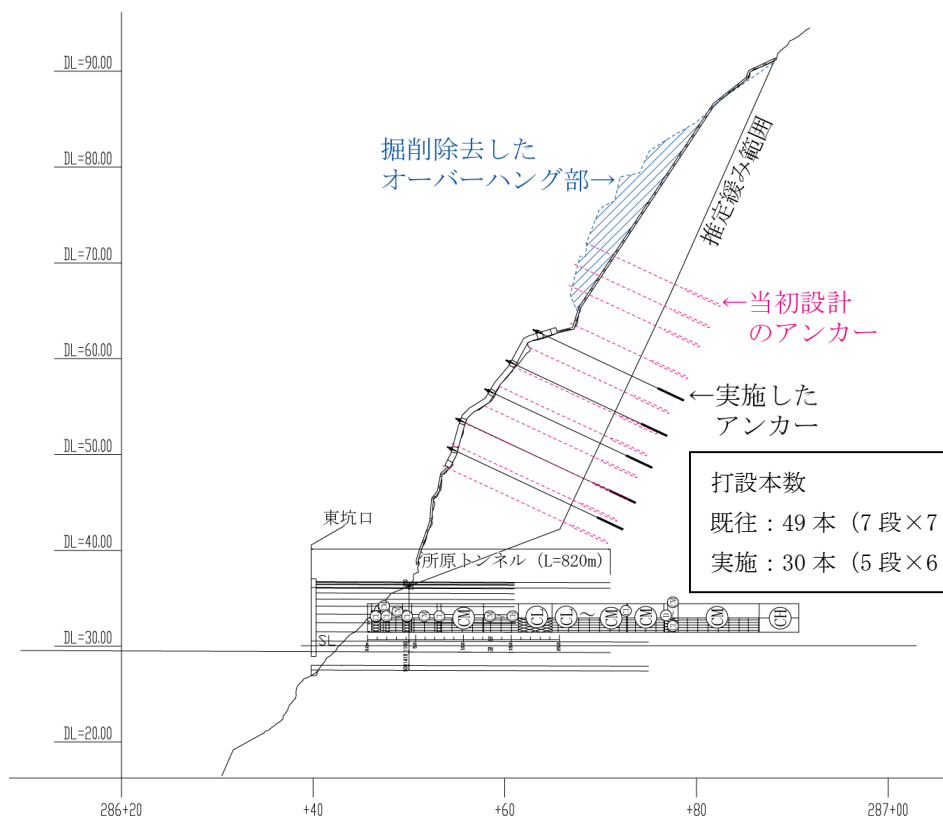


図-10 アンカー工の比較（既往設計と実施）

アンカーの配置にあたっては、開口亀裂や潜在亀裂を数多く有する当該斜面の特性を考慮し、過大なアンカー力による局部的な破壊を避けるため、設計アンカー力を300kN程度に抑えた。また、開口亀裂や潜在亀裂を面的に抑えて、岩塊の抜け落ちや亀裂の進行を抑制するために、アンカーの配置間隔は通常の最大間隔（5m）より密な間隔（2～3m）とした。

また、受圧板に関しては、既往設計で計画された独立受圧板型に対して、実施設計では面的な抑止効果が期待できる吹付のり砕工（幅 400mm×高さ 400mm）を採用した。

アンカー工の施工では、斜面が開口亀裂を有する岩盤状況であることから、削孔時に岩盤内へのセメントミルク充填（無圧）を実施し（写真-6）、可能

な範囲における亀裂の閉塞を図った。

7. トンネル掘削時の対応

本工事では、アンカーの最上段および最下段に荷重計を設置し、アンカー荷重の常時観測を行った（写真-7）。図-11は、トンネルセンター近傍の最下段のアンカーに設置した荷重計の測定結果である。トンネルが当該斜面直下を通過しても、アンカー荷重計に荷重変動がみられず、安定した状態であった。

また、アンカー荷重測定と並行して光波測距儀によるのり面変位を観測したが、アンカー荷重測定と同様にトンネル通過に伴う変位は認められなかった。



写真-6 セメントミルク充填状況



写真-7 アンカー荷重計およびプリズムの設置状況

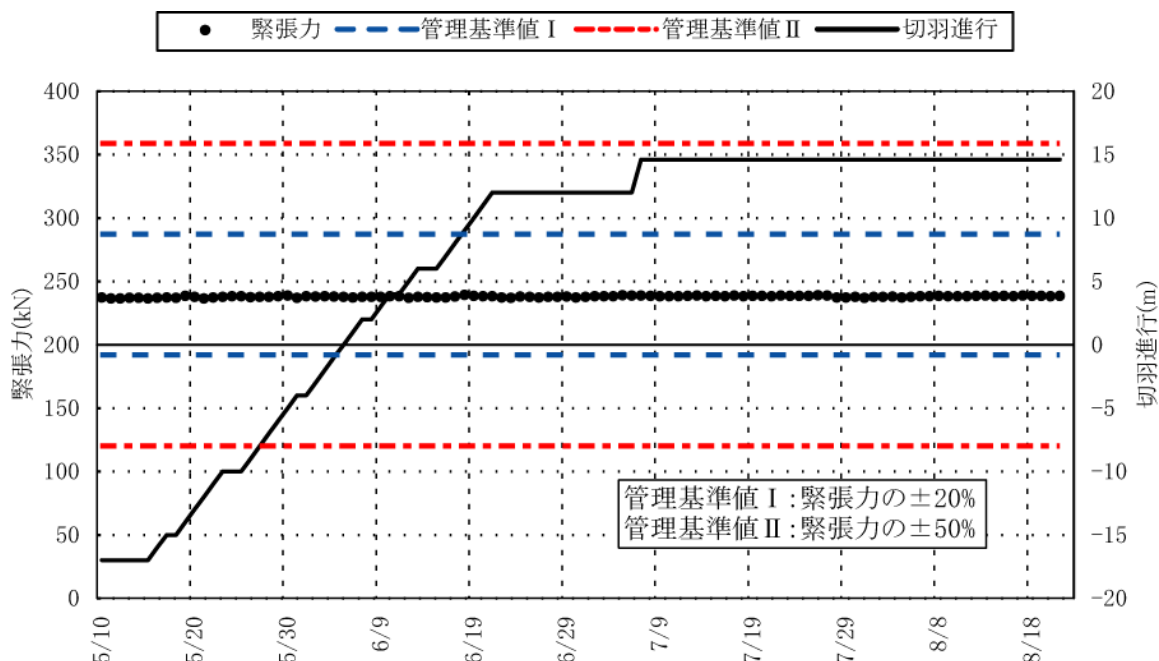


図-11 アンカー荷重計測経時間変化グラフ

8. まとめ

本工事では、不安定岩塊を有するトンネル坑口部の斜面对策において、追加調査として3Dレーザー計測を利用して詳細な斜面形状を取得した。

この計測結果から作成した平面図や3Dモデルを基に、斜面形状やアンカー工の設計を見直し、岩塊除去やアンカー工の適正な配置など、当該斜面の現場状況に則したより恒久的に安定性の高いのり面对策工を設計した。

施工にあたっては、掘削工法やアンカー打設方法にも工夫を加え、対象斜面を特に変状させることなく、坑口部のトンネル施工を終えることができた（写真-8）。



写真-8 のり面对策工全景

本工事で採用した3Dレーザー計測は、当地のような急峻な岩盤斜面において、詳細な斜面形状のデータを比較的短時間で得ることができるため、のり面对策工の設計や施工計画を立案する上で有用なツールであると考えられる。

しかしながら、現状の3Dレーザー計測では、データの処理やモデルの作成に専用のソフトと専門の技術者による作業が必要である。

今後は、汎用のソフトでデータ処理が可能となり、かつ現在の汎用CADの2次元図面のように、一般的な

土木技術者でも扱えるようになれば、3Dレーザー計測は、普遍的に使用されるツールとなると考えられる。

9. おわりに

所原トンネルの東側坑口のり面对策工は、「西日本高速道路株式会社松江高速道路事務所管内のり面对策検討委員会」において検討が重ねられてきた。

本論は、同委員会において示された意見や指摘をもとに実施した調査や施工について報告したものであり、同委員会の委員長を務められた佐々木康広島大学名誉教授を始めとした各委員の方々にこの場を借りて厚く御礼を申し上げる。

なお、所原トンネル工事は、平成21年3月15日に竣工し、平成22年3月に開通する山陰自動車道・斐川IC～出雲IC間の「姉山トンネル」として供用される予定である（図-12）。



図-12 姉山（所原）トンネル完成予想図

参考文献

- 1) 松浦浩久・鹿野和彦・石塚吉浩・高木哲一：木次地方の地質，地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），産総研地質調査総合センター，p. 72，2005.