

12段長大切土施工における3次元データの活用と のり面の長期安定対策工

齊藤亮祐・小野剛・今泉和俊・早川正城

福島と秋田を結ぶ東北中央自動車道のうち南陽高島～山形上山間は、平成30年度の開通に向けて最終段階を迎えているところである。上山インターチェンジ（IC）工事は「かみのやま温泉IC」の造成を含む約110万 m^3 の切盛土工を行う工事であり、最大12段となる長大切土は新第三紀中新世の凝灰岩類及び泥岩から構成される堂満山において施工された。第三紀の泥岩や凝灰岩は、掘削時に堅硬で安定したのり面であったとしても時間経過とともに急速に風化が進行し、表層崩壊などの変状が発生することが多い。

本稿では、12段長大切土のり面に採用した長期安定対策工の報告と共に、長大切土を伴う大規模な切盛土工事において全自動無人ヘリによる3次元写真測量を活用した事例について報告する。

キーワード：長大切土，流れ盤，表層崩壊，UAV，3次元モデリング，長期安定対策

1. はじめに

第三紀の泥岩や凝灰岩，熱水変質作用を受けた火山碎屑岩類などは，掘削時に堅硬で安定したのり面であったとしても時間経過とともに膨張や風化が急速に進行し，表層崩壊などの変状が中長期的に発生することが懸念される。これらの変状は，掘削に伴う応力解放や，地山に含まれる膨潤性粘土鉱物の吸水による体積膨張により，経時的に地質性状に変化が生じることに起因する。

上山IC工事では新第三紀中新世の凝灰岩類及び泥岩から構成される堂満山（山形県上市市）において切土が計画され，その切土高は84mになることから最大12段の長大切土が設計された。しかしながら，事前地質調査により堂満山には亀裂の発達する緩み領域の存在や12段長大切土が流れ盤での掘削になることが確認されていた。上記のように崩壊性要因を持った地山での切土施工となるため，12段長大切土のり面の長期的な安定対策工を検討するための堂満山長大切土ワーキング（WG）を立ち上げ，適切な対策工法の選定を行った。

また，当工事は長大切土と共にインターチェンジを造成する工事であり，切盛土量の総量は約110万 m^3 になる。大規模な切盛土工事を施工するにあたり，測量および土量算出の効率化および安全性向上を目的として全自動無人ヘリ（UAV）による3次元写真測量技術を活用した出来形管理を試みた。

2. 上山インターチェンジ工事

(1) 工事概要

東北中央自動車道は福島と秋田を結ぶ高速道路であり，移動時間の短縮，一般国道13号の混雑緩和，災害時の救急搬送ルートの確保を主目的に建設が進められている。上山IC工事は建設中の南陽高島～山形上山間24.4kmのうち（図-1），かみのやま温泉ICの造成を含む工事延長3,411m，切盛土工（約110万 m^3 ），のり面工（種吹付工，植生基材吹付工，ブロック積プレキャストL型擁壁工，補強土壁工），用・排



図-1 施工位置図



写真一 12段長大切土2段目掘削状況 (平成29年7月撮影)

水工、橋梁下部・上部工、跨道橋などを施工する工事である (写真一)。

(2) 地質概要

堂満山付近の丘陵地に分布する新第三紀中新世吉野層は、塊状の流紋岩質凝灰角礫岩～青緑色の火山礫凝灰岩 (Ytb1) を主体としており、暗灰色で硬質なシルト岩～淡緑灰色の細粒凝灰岩を含有する泥質岩類 (Ym) を挟在する (図一2)。地層は概ね南北方向の走向で30°程度の西傾を呈し、12段長大切土のり面では流れ盤となる。

凝灰角礫岩および火山礫凝灰岩の新鮮部は非常に堅硬な岩相を、泥質岩類も新鮮部においては固結度が高く、割れ目も少ない堅硬な岩相を呈している。なお、これらの新鮮部においては、当初設計では軟岩と想定されていたが、施工時の岩盤判定により硬岩と判定されるほど新鮮で堅硬な岩相を呈す地山も分布しており、発破掘削を併用した掘削を行った。しかしながら、地表付近では風化変質が進行しており、亀裂が発達するゆるみ領域の存在が既往地質調査および切土のり面において確認された。

(3) 堂満山長大切土ワーキングの設立と活動概要

上記のとおり第三紀の泥岩や凝灰岩は、掘削時には堅硬で安定したのり面であったとしても、時間経過と共に表層崩壊などの変状が発生することがある。そこで、12段長大切土のり面の長期的な安定対策工を検討するためのWGを切土着手前から立ち上げ、切土の進捗に合わせてWGを随時開催した。なお、WGのメンバーは、発注者、施工者および高速道路総合技術研究所 (NEXCO 総研) 等から構成される。基本的な施工検討のサイクルは図一3に示すとおりであり、WGにおいて現地の地質状況等を確認した後、観測結果等を参照しながら適切な対策工法の選定を行った。

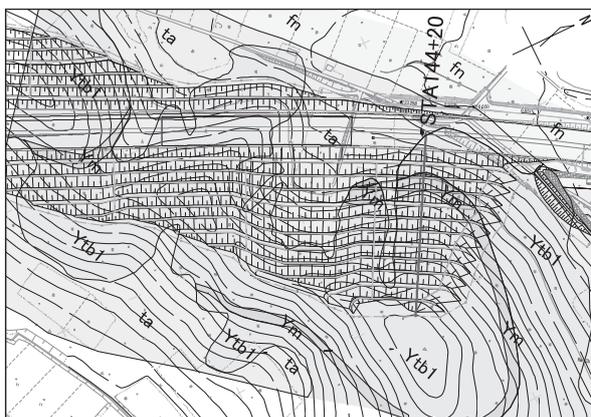


図一3 施工・検討のサイクル

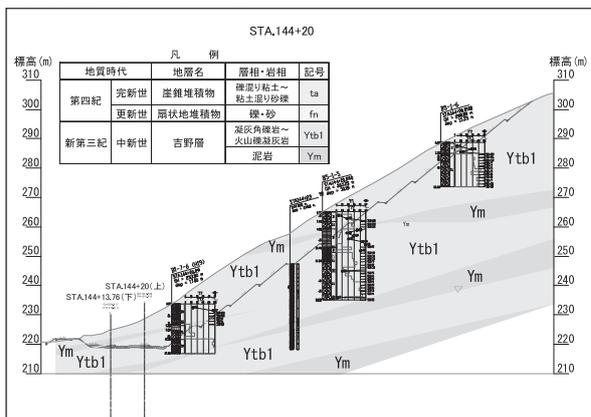
3. 当初設計の概要および安定対策工の見直し

堂満山は凝灰岩類を主体に構成されていたことから、軟岩相当の地山と判定して当初設計が行われた。のり面勾配は、軟岩であれば1:05～1:1.2の勾配を選択できるが、凝灰岩類を主とする地質であり一般的に風化が早く二次的な強度低下が懸念されることから、12段長大切土部においては安全側となる1:1.2の勾配を採用した。また、のり面の安定対策工については、12段長大切土部とそれ以外の箇所とに分け、12段長大切土部については凝灰岩類の風化による表

a) 平面図



b) 横断面図 (STA. 144+20)



図一2 地質平面・横断面

層崩壊等を防止するため、吹付砕工+コンクリート吹付+切土補強土工（ロックボルト工L = 3.0 m）を基本とし、それ以外の箇所については吹付砕+植生工もしくは簡易吹付砕+植生工を採用した（図-4a）。

しかしながら、切土施工に先立ち開催したWGにおいて中長期的な安定対策工について検討した結果、調査ボーリングを追加施工し、そのボーリング孔を利用した地山挙動の動態観測工および地下水位観測孔を設置する見直しを行った（図-4b）。多段式傾斜計による動態観測工は、泥岩層の上位の凝灰岩類が滑り層になりやすいと考え、地質境界および泥岩層上位の凝

灰岩類に重点的に傾斜計を配置し、凝灰岩類の僅かな変位も観測可能な配置とした。地下水位観測では、平常時の地下水位および降雨時や雪解け時の地下水位の変化を把握するため、切土着手前から継続して観測した。

切土掘削途中のWGにおいてのり面の亀裂発達状況を確認したところ、調査ボーリングによって想定したゆるみ領域以外においても広範囲に亀裂が発達している事が確認された。特に上り線（12段長大切土）側は流れ盤であり、開口亀裂も確認されたことから、図-4bのように切土補強土工の施工範囲を増やし、植生工を全てコンクリート吹付工に変更した。また、切土頭部裸地部への雨水浸入を遮断することを目的として、コンクリートシールを追加した。なお、変更となったこれらの対策工についても、その後の動態観測等で効果の確認を行いながら施工を進めた。

4. 水抜きボーリング工の再検討

のり面の安定性を確保するためには、地盤中の地下水を地山内から速やかに排出させることが効果的である。

図-4bに示す地下水位観測孔D、Eにおいて観測した地下水位および気象庁上山中山観測所で記録された降水量を図-5に示す。水抜きボーリング工を施工する2段目切土施工前（平成29年7月）までの地下水位の変化は、観測孔DにおいてはEL. 238 m（GL. -19.5 m）付近に恒常的な地下水位面が位置し、最長2ヶ月間程度EL. 220 m ~ 225 m 付近まで地下水位が低下する結果を示した。これらの変化には、降水量との相関は見られないが、20 mm/day 程度の降水のうちにEL. 238 m 付近まで地下水位が上昇する傾向が見

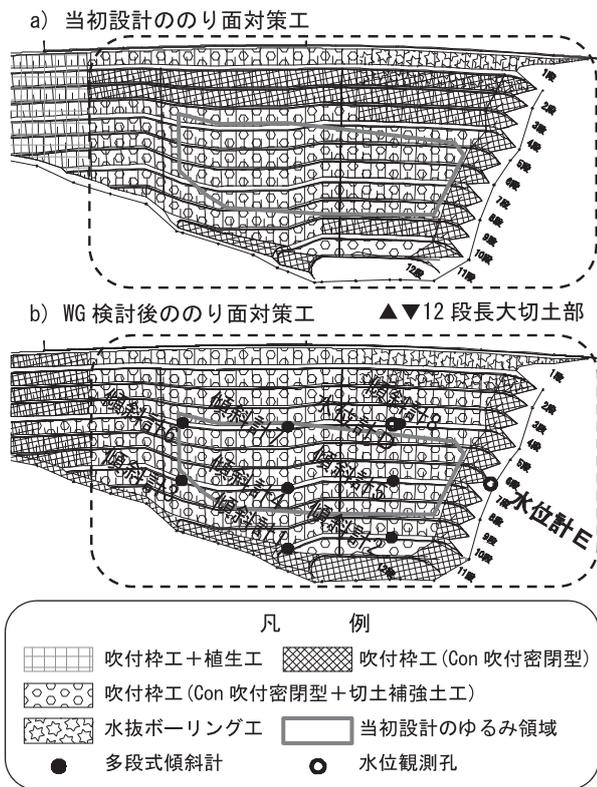


図-4 安定対策工の検討結果

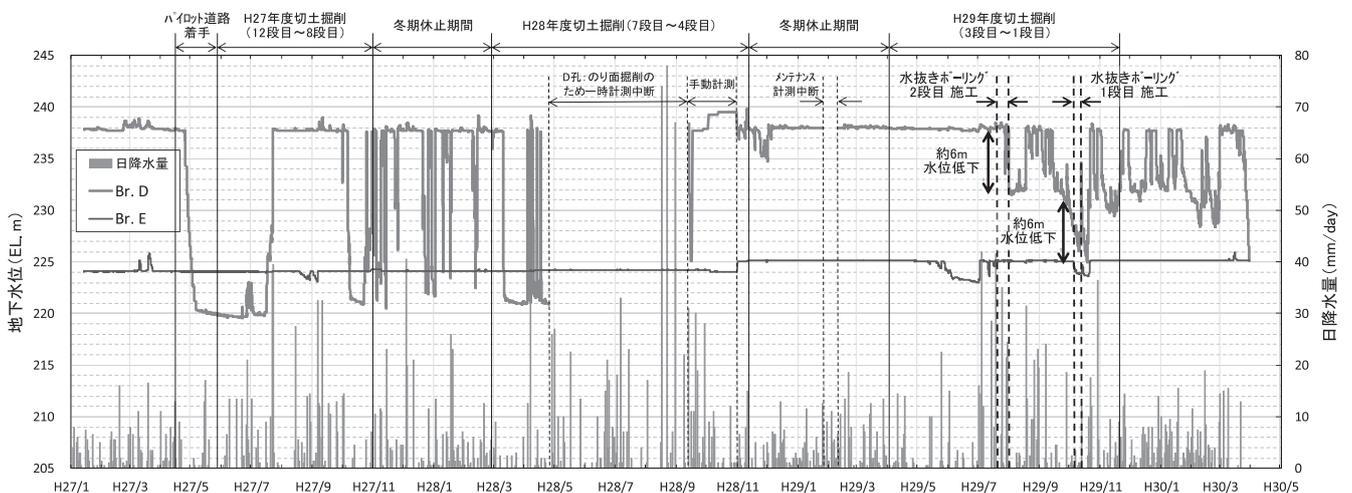


図-5 地下水位観測結果および降水量

られた。一方、切土範囲の端部付近に位置する観測孔 E の地下水位変化は、EL. 224 m (GL. -35 m) 付近に恒常的な地下水位面が位置し、降水量との相関は見られない。

3 段目までの切土のり面における地下水湧水状況を観察すると、ある一定の標高以下の亀裂から網目状に地下水が流れ出るのはなく、多くの湧水地点において凝灰角礫岩に挟まれる泥岩層上位の亀裂より流れ出る様子が観察された。これは、泥岩層が遮水層となり、かつ、地山中の限られた水みちを地下水が流れていると推定した。

既往地質調査により、上り線 1 段目ののり面より地下水湧出が想定されていたため、当初設計において水抜きボーリング工が計画されていた (図-4, 6)。しかしながら、上述の地下水位観測結果、3 段目までの地下水湧水状況および亀裂が発達した地山状況から、地山から地下水を効率良く排出させるためには水抜き工の施工範囲・位置の再検討が必要であると判断した。

水抜きボーリング工の再検討にあたり、ボーリングコアや切土のり面で観察された地質分布、地層の走向・傾斜および地下水位観測孔で観測された地下水位面の標高などから、堂満山の地質構造および 2 層の地下水位面の 3 次元モデルを推定した (図-7, 視点は 12 段長大切土の北方上空, 地形データは非表示)。なお、モデリングにあたって、泥岩層 (Ym1, Ym2) は調査ボーリングで観察された深度および切土面で観察された位置、走向・傾斜より推定し、地下水位面は観測孔 D, E で記録された深度において泥岩層 (Ym1)

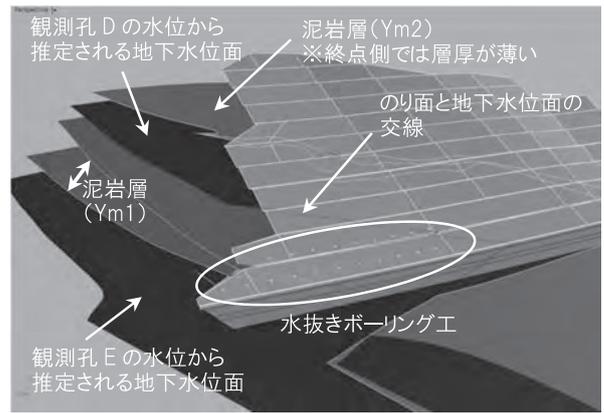


図-7 堂満山の地質構造および地下水分布の 3 次元モデル

の平均的な走向・傾斜と並行とした。この 3 次元モデルを用いた再検討の結果、ボーリング長の延長 (当初設計より 12 m 延長し、32 m とした) および 1 段目起点側 (南側) に 3 本の追加施工が地下水排出に効果的であると判断した。

再検討した水抜きボーリング施工後の地下水位変化を図-5 に併せて示す。2 段目の水抜きボーリング施工後、観測孔 D の地下水位が約 6 m 低下した。また、1 段目の水抜き工施工後には、更に 6 m 程度水位が低下した (図-5)。その後も、降水により一時的に水位が上昇するが、比較的短時間で水位が低下する様子が観測されている。現在の排水状況は、晴れの日が続いた場合には限られた排水管から排水が確認されるのみであるが、降雨後には全ての排水管から排水が確認される (写真-2)。水抜き工の施工範囲・位置の再検討によって効率良く排水が行われていると考えられる。

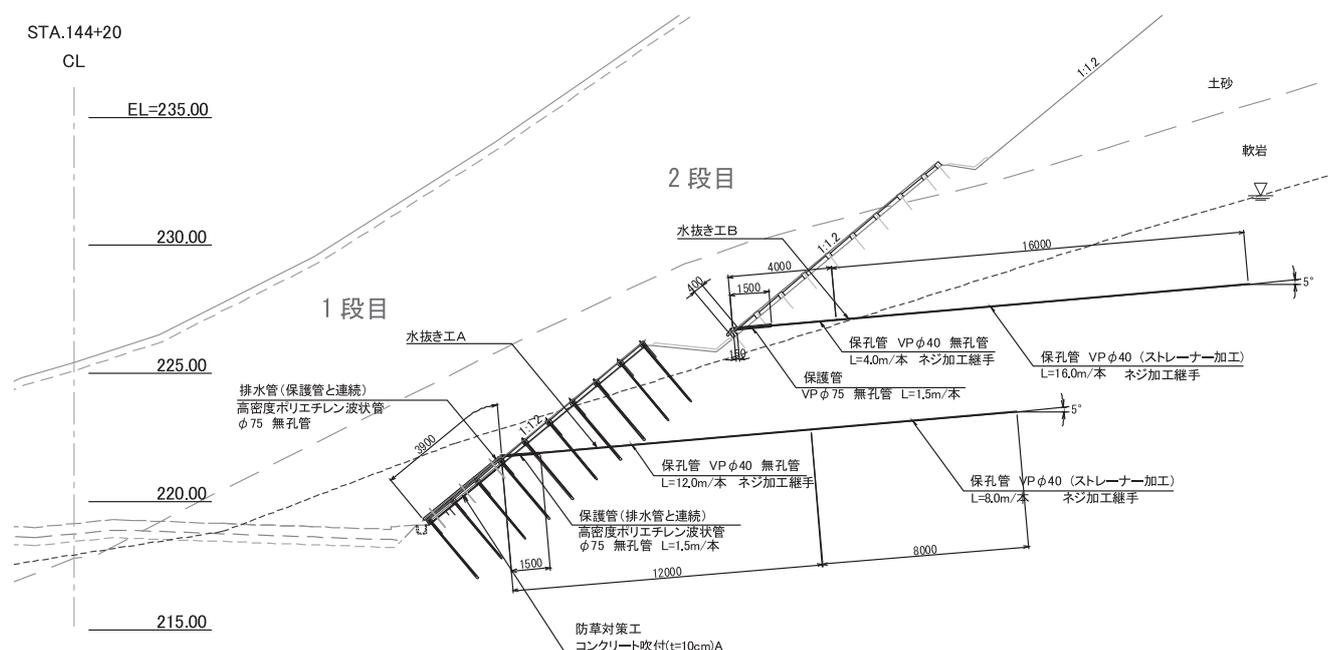


図-6 当初設計における想定地下水位と水抜きボーリング工の位置関係 (STA.144+20)



写真一 晴天時の排水状況



写真三 UAV 写真測量に用いた基準点 (GCP)

5. UAV による 3 次元測量を活用した出来形管理

当工事では、長大切土を伴うインターチェンジ造成工事特有の大規模な切盛土工事を施工するにあたり、測量および土量算出の効率化および測量作業における安全性の向上を目的として、UAV による 3 次元写真測量技術を用いた出来形管理を試行した (図一 8)。なお、UAV 写真測量は、工事着手前測量、施工途中段階での出来形測量、工事完了時測量に補助的に採用し、それぞれの段階で土量を算出した。

UAV 写真測量の手順は次のとおりである。①飛行経路の現地安全確認、② UAV 用基準点 (Ground Control Point : GCP) の設置 (写真一 3、今回は 60 cm * 60 cm の GCP を使用)、③使用機器の始業前点検 (写真一 4)、④ PC / タブレット PC で作成した飛行経路を UAV に転送、⑤設定された経路を飛行しながら航空写真を連続撮影 (1 フライトあたり約 2 万 m² 撮影、約 15 分)。その後、撮影した航空写真を専用システムを用いて解析することにより高密度の点群データを算出し、最終的に 3 次元 CAD データとして作図した。



写真四 測量に用いた UAV

土量の算出は、予め 3 次元 CAD 化した設計図面と、UAV 写真測量にて得られた 3 次元 CAD データを比較して算出した。なお、航空写真の撮影と点群データの座標算出は、基本的には従来の有人航空機を利用した航空写真測量の技術を応用している。飛行経路の設定では、UAV 進行方向に 80%、横方向に 60% のラップ範囲を設け、隙間なく航空写真を撮影した。座標算出では、視差効果を用いた単純な三角測量で高さを算出しており、少しずつずらして撮影した画像内から特徴量検出により同一ポイントを見つけ、三角形を複数形成することにより高精度な座標算出を行っている。

工事着手前の測量および土量算出における、直接横断測量と UAV 写真測量との比較結果を表一 1 に示す。直接横断測量断面は 100 測線となり、表に示す通り UAV 写真測量では、所要日数、延人員数ともに大幅削減が可能となった。また、算出した土量を比較した結果、差異は 1.6% であった。

工事着手前の横断測量では、急傾斜地や湿地帯での作業が必要となるが、UAV 写真測量では、基準点設置以外の作業は上空からとなり、現地での直接作業を軽減できるため、作業性、安全性が向上する。また、施工途中段階では出来形測量に伴う重機稼働制限 (規



図一 8 工事着手前の UAV による 3 次元写真測量結果

表一 直接横断測量と UAV 写真測量との比較

項目	単位	直接横断測量	UAV 写真測量
所要日数	日	45	6
延人員数	人	210	18
切土量	m ³	1,077,158	1,060,223
差異	m ³	16,935	
	%	1.6	

制)が削減できた。UAV 写真測量は降雨、強風等の条件下では作業できないといった問題点はあるが、広域かつ複雑な地形での測量において非常に有効な手法であり、かつ、土量算出の迅速化、省力化を図ることができると考えられる。

6. おわりに

本格的な切土掘削開始から積雪時の中断を挟み、約2年半の工期で当該箇所の切土工事は完了した。WGにおいて選定した安定対策工を施工したことにより、多段式傾斜計による動態観測では現在までに地山の顕著な変位は観測されていない。また、UAV 写真測量では測量作業における直接作業の軽減、安全性の向上、測量作業中の重機稼働制限の削減、土量算出の迅速化、省力化を図ることができた。

今後施工される類似工事においては、安心・安全・円滑に管理していける構造となるよう維持管理上の観

点にも考慮した対策工となるよう検討する必要もある。その際には、今回の検討過程が参考となれば幸いである。

J C M A

[筆者紹介]



齊藤 亮祐 (さいとう りょうすけ)
 (株)奥村組
 旧：東北支店 土木部第2部 上山インター事務所
 工事主任
 現：東日本支社 リニューアル技術部
 金田橋耐震事務所
 所長



小野 剛 (おの たけし)
 (株)奥村組
 旧：東北支店 土木部第2部 上山インター事務所
 所長
 現：東日本支社 東北支店 土木第1部
 部長



今泉 和俊 (いまいずみ かずとし)
 (株)奥村組
 技術研究所 土木研究グループ
 主任研究員



早川 正城 (はやかわ まさき)
 東日本高速道路(株)
 旧：東北支社 山形工事事務所 上山工事区
 工事長
 現：北海道支社 道路管制センター 交通技術課
 課長