

高密度レーザ計測データの可視化技術を応用した斜面防災対策への適用事例 —静岡県浜松市天竜区の道路斜面を対象として—

岐阜大学工学部 国際会員 沢田和秀
 浜松市土木部天竜土木整備事務所 千徳嘉親
 株式会社フジヤマ ○大塚啓一 重松克弥 馬場美佳
 中日本航空株式会社 正会員 小野貴稔, 外山康彦, 中村勇貴

1. はじめに

従来の斜面防災事業では、地形図や航空写真から崩壊地等の机上判読を実施し、これら地形図を用いて斜面調査を実施してきた。近年では航空レーザ計測が普及し、浮石・転石や露岩等の「地物」や段差等の微地形を可視化する技術¹⁾も開発され、これらを活用した調査²⁾、対策工の計画・設計を可能とする環境が整いつつある。そこで、静岡県浜松市天竜区の国道152号および主要地方道天竜東栄線沿いの急斜面を対象に高密度レーザ計測を実施し、LPデータから微地形や浮石・転石等を可視化した地図を用いて机上スクリーニング（危険箇所の絞込み）や斜面防災点検・整備計画・施設設計といった、一連の斜面防災事業へ適用を試みたので報告する。

2. 本稿における事例の位置づけ

表-1は、斜面防災事業を、「机上スクリーニング」「斜面防災点検」「整備計画策定」「施設設計」「維持管理」の5つの作業段階に分類し、それぞれの目的、地形図を用いた従来手法の課題、可視化技術を応用した地形解析図に期待する効果、そして活用方法について整理したものである。一連の斜面防災事業のうち、机上スクリーニングから整備計画策定については国道152号の回転翼によるレーザ計測データを、施設設計については県道天竜東栄線のUAVレーザ計測データを使用した。なお、「維持管理」については、本報告では対象外とした。

表-1. 斜面防災事業における従来手法の課題とレーザ計測データ活用の効果

斜面防災事業項目	机上スクリーニング	斜面防災点検	整備計画策定	施設設計	(維持管理)
目的	災害要因を判読するとともに対策施設の有無などを把握し、調査対象区間を抽出する	調査対象区間に対して災害要因を机上判読し、現地調査で特定する	点検結果を用いて被災状況の想定と対策工の計画を行う	整備計画を基に崩壊対策や落石対策の詳細設計及び施工計画を策定する	道路防災点検の継続や施工後の斜面の維持管理への利用に用いる
地形図を用いた従来手法の課題	微地形や浮石・露岩等が再現されない ▶土砂流出や落石・崩壊などの発生源の特定が難しい	微地形や浮石・露岩等が再現されない ▶現地調査で斜面全域を隈なく調査する必要がある	発生源の特定や道路との位置関係の把握が難しい ▶発生源の道路への影響評価が難しい	実測平面図から詳細な発生源の位置や形状が特定できない ▶現地調査による詳細な調査が必要となる	変状の進行等を、微地形程度の場合経年で比較することが出来ない
S-DEM活用に期待する効果	机上調査にて位置精度の高い発生源を含む危険箇所の抽出 ▶明確な根拠資料に基づく調査対象箇所の選定	机上調査にて位置精度の高い災害要因や微地形の抽出 ▶点検計画の策定により効率的かつ安全性の高い調査	点検結果に基づく発生源や微地形および被災区間の推定 ▶複合的な観点から対策区間設定と概略での対策工法選定	発生源と周辺の詳細な状況把握（形状、安定性） ▶設計条件の設定や施工計画 ▶わかりやすい事業説明資料	定期的なレーザ計測による斜面の状況確認 ▶変状の進行や発生源の特定
活用方法	・地形判読図	・微地形判読図 ・現地調査平面図	・災害要因分布図 ・傾斜区分図 ・整備計画根拠資料	・現地調査平面図 ・施工計画検討図 ・施設配置計画平面図	・地形判読図 (前回のデータとの比較)
検証路線	国道152号			県道天竜東栄線	(本稿対象外)

Application for slope disaster prevention measures using visualization technology of high density LiDAR data :
 SAWADA Kazuhide(Gifu University), SENTOKU Yoshinori(Tenryu civil engineering Office Civil engineering
 Department HAMAMATSU city), OTSUKA Keiichi, SHIGEMATSU Katsuya, BABA Mika (Fujiyama Co.,Ltd),
 ONO Atsutoshi, TOYAMA Yasuhiko and NAKAMURA Yuki(Nakanihon Air Service Co.,Ltd)

3. 机上スクリーニング（危険箇所絞り込み）

3.1 調査対象斜面とレーザ計測

国道 152 号における航空レーザ計測は、波形記録方式のレーザスキャナ（LMS-Q680i）を採用し、単コース点密度 11.23 点/m²、計測コース間重複度 55%の計測を実施した。

3.2 レーザデータの可視化

図-1 は斜面防災点検調査を目的に、浮石や転石、落石の発生源となる露岩の形状、現場での自己位置の参考となる倒木などの地物や微地形を「オリジナルデータ」から可視化した S-DEM 解析図³⁾（以下、S-DEM とする）である。一方、図-2 は、公共測量作業規程の準則に定められている成果品の一つであるグリッドデータを用いて作成した、一般的な地形起伏図である。グリッドデータとは格子状の標高データのことであり、50cm 間隔のデータを使用した。この二つの平面図を比較すると、S-DEM では転石や倒木、露岩等の地物として判読される陰影や、道路沿いの段差地形、その上方の平坦地等の微地形として判読される陰影が確認できるが、地形起伏図ではそれらが不明瞭な陰影として表現されていることがわかる。また、S-DEM は可視化される地物・地形情報が多いため、道路から目標地点までのアクセスルートの検討にも利用できる。

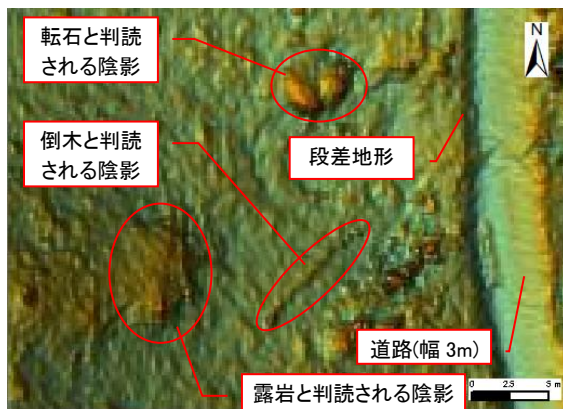


図-1. S-DEM 解析図

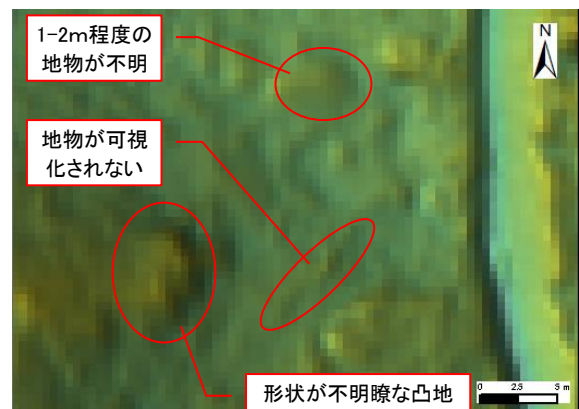


図-2. 地形起伏図

3.3 机上スクリーニング

調査対象区間の絞り込みとして、取得したレーザデータを用いて災害要因となる地形判読を実施した。従来の判読では空中写真が多く用いられてきたが、本調査では微地形の判読が可能である S-DEM（LP コンター図併用）により判読を行うことで、より詳細な災害要因を確認した。図では明瞭な遷急線を黒、やや明瞭な遷急線をピンク、ガリを青で示している。これらは災害要因として特徴的なものであり、これらの要因が顕著に現れている箇所を対象に現地調査を行った。現地調査では、路線内の落石対策施設等の整備状況も把握した。判読した災害要因の中から、災害要因で道路への影響の可能性があり、かつ対策施設の規模が十分でない箇所を、今回の調査対象箇所として抽出した。

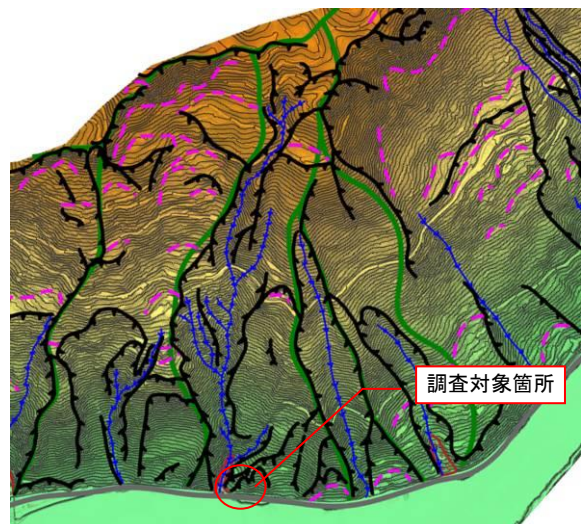


図-3. 災害要因判読図

4. 斜面点検調査

4.1 机上調査

机上スクリーニングにて抽出した斜面を対象に、縮尺 1/500 の S-DEM 解析図を用いて、さらに詳細な災害要因の机上判読を実施した。当該斜面は延長約 50m で、3 つの崩壊跡が確認できる。机上調査では浮石や転石、露岩の候補地となる凸地形を表現している陰影のうち主なものを図-4 に示した。

崩壊地①は、高さ 5m 程度の崩壊跡地であり、崩壊地下部には転石と思われる凸地形 1 が確認できる。また、左側部には露岩と思われる凸地形 2 が表現されている。

崩壊地②では、左側部に凸地形 3 が表現されており、比較的大きいため露岩と思われる。また崩壊地内には凸地形 4 及び凸地形 5 が表現されており、2m 以下という小さい規模であるため、転石の可能性が高い陰影である。

崩壊地③の崩壊地頭部には、凸地形 7 として 3 つの陰影が表現されている。また、崩壊地内には、輪郭が明瞭な凸地形 8 が表現されているが、その左側には輪郭が不明瞭な凸地形 9 が表現されている。このような不明瞭な凸地形は密な下層植生群の疑いがある。また、崩壊地下方に崩土が堆積している陰影がないことも特徴的である。

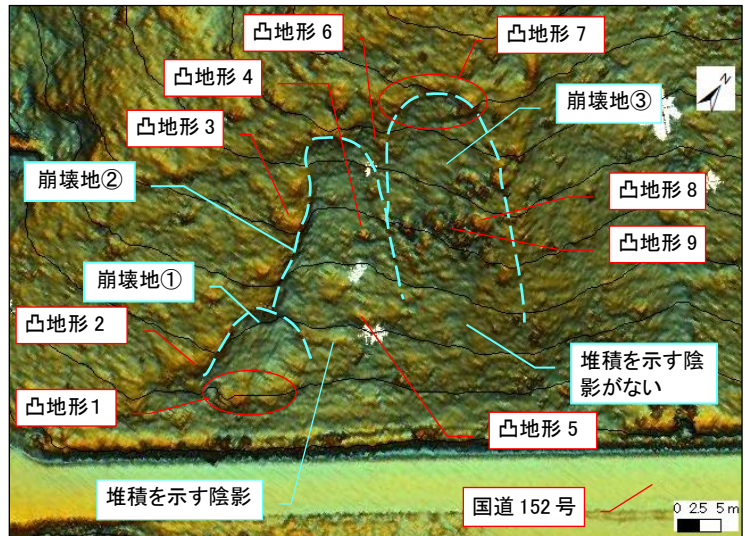


図-4. 机上調査結果

4.2 現地調査

図-5 は、当該斜面で実施した現地調査結果を図-4 に反映させたものである。紙面の都合上、主なものを表-2 に整理する。机上調査で確認した凸地形を示す陰影は、現地では浮石等であることを確認したが、浮石等ではなくシダ等の下層植生群や直径の大きな樹木、もしくは樹木とその周辺の地形とが一体となった微地形であることも確認した。従って、机上調査は浮石・転石や露岩等の候補地の抽出であり、現地調査によって特定する必要がある。

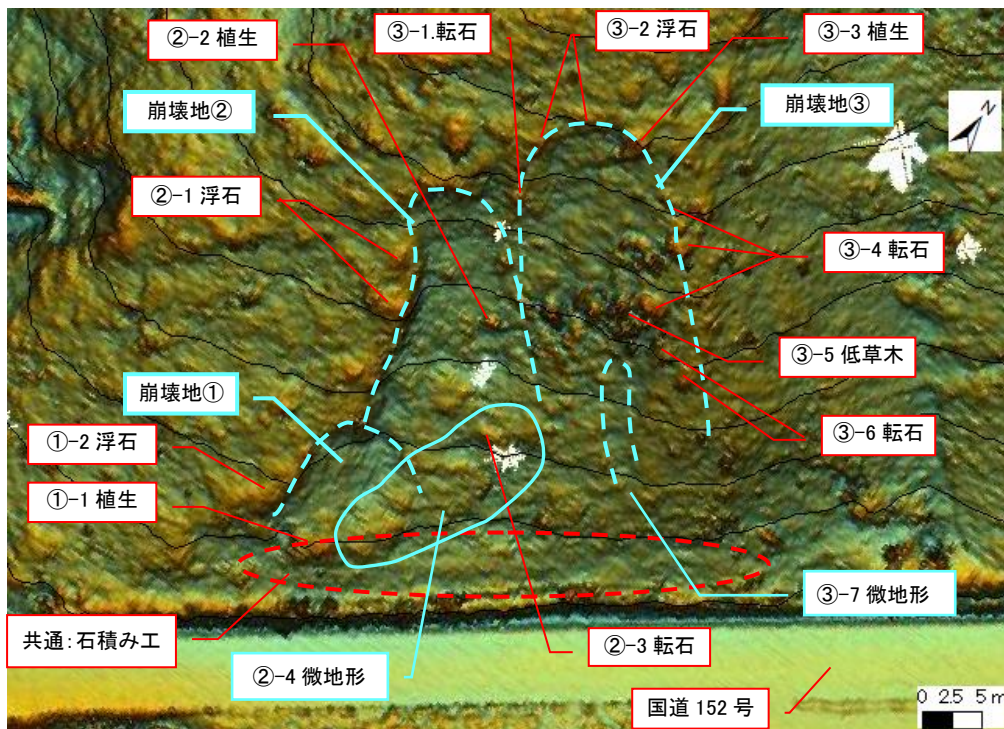









図-5. 現地調査結果

表-2. 調査結果抜粋

コメント	写 真	コメント	写 真
<p>①-1 植生</p> <p>シダ等の密な下層植生が生い茂っており、これらが一体となった凸地形として可視化されていた。</p>		<p>②-2 植生</p> <p>転石と思われた凸地形は、根本部分の直径が 30 cm と 20 cm のスギが一体化した地物であった。</p>	
<p>②-3 転石</p> <p>崩壊地②内において、高さ 1.8m 程度の転石を複数確認した。</p>		<p>②-4 微地形</p> <p>崩土や礫が堆積している状況を確認した。</p>	
<p>③-5 低草木</p> <p>低草木の下にはφ60 cm 程度の転石が分布していた。転石は可視化されていない。</p>		<p>共通：石積み工</p> <p>既設の防護柵背面には、練石積みが整備されており、S-DEM からは、一定勾配の斜面として確認できる。机上段階では判読できない。</p>	
<p>③-2 浮石</p> <p>崩壊跡地形の頭部に不安定な浮石を確認した。拡大した浮石は H0.8 × W1.8 × D1.5m であった。</p>			

4.3 斜面防災点検調査におけるレーザ計測データ活用の有効性

S-DEM に表現された浮石等と想定される陰影は、現地では浮石や転石であった。また机上調査で調査対象が絞りこめているので、調査漏れや調査ルートは迷うことなく効率的に調査をすることができた。対策施設の範囲など、現地で得られた情報も S-DEM 解析図上に精度よくプロットすることができた。

課題としては、現地で確認した陰影は浮石や転石外にも下層植生群や、ある程度の直径の単木もしくは複数の樹木でもあり、必ずしもすべてが災害要因ではなかった。また、高密度であっても、1m未満の転石等の抽出には限界があった。その原因として、上層植生の繁茂によるレーザデータの減衰や、地盤面付近の下層植生や枯れ枝等の地物がノイズとなり明瞭な陰影として表現されきれていない、ということが考えられる。

以上のことから、S-DEM では道路から尾根までの広域な範囲において災害要因を概観し、そこから斜面調査が必要な箇所を絞り込んでいくことに有効である。図-6 は図-5 斜面の傾斜区分図である。この傾斜区分図等を作成することで、土砂や落石等の堆積する可能性のある範囲の参考図として利用することができる。また、抽出された斜面に対し、現地調査前の机上調査の段階でさらなる災害要因や微地形・地物を判読し、計画立案用図面、現地調査用図面として利することにより、正確性・効率性・安全性がより確保された現地調査とそのとりまとめに有効である。

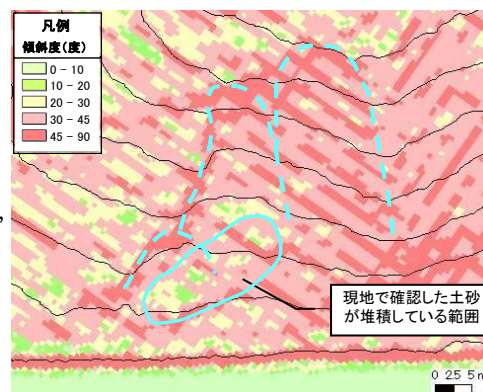


図-6. 傾斜区分図(図-5 と同一斜面)

5. 整備計画策定

5.1 災害の推定

表-2, 図-5 に示した, 机上調査及び現地調査で確認した転石・浮石, 斜面崩壊の発生源及び斜面状況から, 今後懸念される災害について推定して図-7 に示した。

崩壊地①は, 小規模な崩壊の発生が懸念される。道路面から崩壊地頭部までの斜面高は 10m ほど, 斜面勾配は 30° 未満と規模は小さく, 現状も崩土が斜面内に堆積している。道路と斜面の間に緩斜面があり, そこで落石等は停止するものと考えられるため, 道路への影響があるような被害は少ないものと想定される。

崩壊地②は, 道路面から崩壊地頭部まで斜面高は 30m ほどあり, 不安定な転石・浮石が分布している。そのため, 今後も斜面崩壊の進行や落石の危険性は残っているが, 斜面中腹に部分的な緩斜面があり, 中腹より下方に転石や崩土が堆積していることから, 強いエネルギーを持ったまま道路まで到達する可能性は低いものと考えられる。土砂の崩壊が進行した場合には, 既設の落石防護柵背面にまで堆積土砂が到達する危険性は考えられるが, 現時点で落石防護柵に堆積はしていない。

崩壊地③は, 斜面高が約 40m で勾配が 40° ある急峻な崩壊地形である。崩壊地頭部から道路面まで急勾配が続き, 崩土の堆積による緩斜面等は見られない。崩壊地は集水地形となっており, 流水の侵食によるものとみられる微地形も確認された。斜面内の上部や崩壊地上部, 側部には不安定な転石・浮石が多く分布している。今後, 大雨による表流水増加等で斜面崩壊や落石が生じた場合, 斜面内に堆積することなく, 斜面下方まで到達することが懸念される。その際に, 落石や土砂は集水地形とガリ地形に沿った方向に移動していくものと想定される。

以上のことから, 崩壊地①, ②においては「堆積土砂の崩落」, 崩壊地③では「落石・土砂の流下」への対策を講じる必要がある。

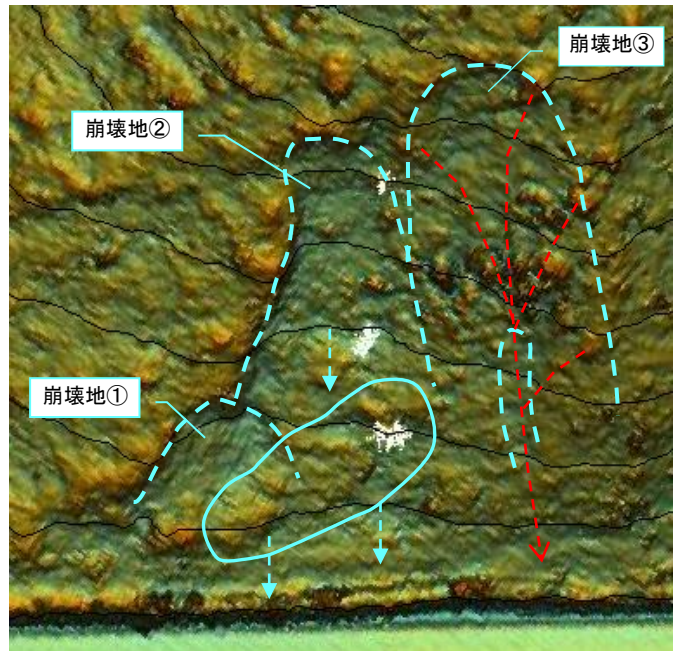


図-7. 対策工の概略検討

5.2 整備計画におけるレーザ計測データ活用の有効性

有効性として, 机上調査にて把握できる斜面方向や集水地形, 起伏といった地形状況と, 机上・現地調査で確認した発生源の情報を組み合わせて評価することで, 落石被害が懸念される範囲や土砂流出の危険性が高い箇所を推定しやすくなる。また, そういった被災要因とその推定影響範囲から, 必要な対策工種や対策範囲が概略で検討可能となる。S-DEM 上に対策工の配置計画も可能となるため, 概算数量算出や概算工事費算定に対する, 明確な根拠資料の作成が可能である。

岩盤の節理の発達状況や転石・浮石の安定度判定といった, 設計条件となる事項については, 机上調査だけでは判断できないことが確認できたため, 現地調査は必須である。

6. UAV レーザ計測データを用いた施設設計 (詳細設計)

急峻な斜面において UAV レーザ計測データを活用して詳細設計を実施した事例を報告する。調査対象は, 浜松市天竜区二俣町鹿島地内の県道天竜東栄線の自然斜面である。ここで UAV レーザ計測 (Riegle VUX1-mini) により点密度 100~200 点/m² の計測を実施した。対象箇所は, 既存の LP データがなく, 小範

囲の設計であることと、設計に使うことからより高密度のデータを取得したいという観点より UAV によるレーザ計測データを適用した。S-DEM を作成して現地調査を実施し、転石や浮石等の分布状況を正確に把握したうえで、落石対策工詳細設計を実施した。

図-8、図-9 に示すとおり、本設計の対象は延長約 60m の範囲である。斜面下部には高さ約 15m のモルタル吹付工が施工されており、その上部に自然斜面が残っている。

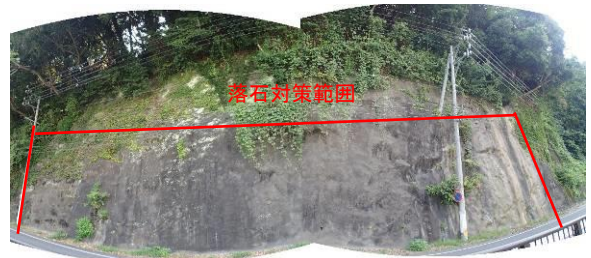


図-8. 施設設計対象範囲

6.1 詳細調査

S-DEM を用いた机上調査と現地調査を実施し、対策の対象となる転石・浮石・岩塊の状況把握を行った。

机上調査では、S-DEM で表現される陰影の (i) 濃淡、(ii) 形状から、落石発生源を抽出した。

現地調査では、机上調査で抽出した発生源および現地でも新たに確認した転石に対して、落石対策工の詳細設計に必要な設計条件として、(iii) 規模の確認、(iv) 周辺地形 (斜面勾配)、(v) 安定度判定⁴⁾ を確認した。

落石の分布状況を図-10 に示し、現地調査で確認した諸条件を表-3 に示す。

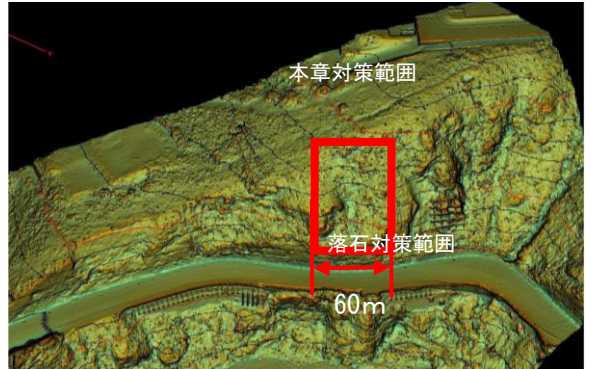


図-9. 本章対象範囲

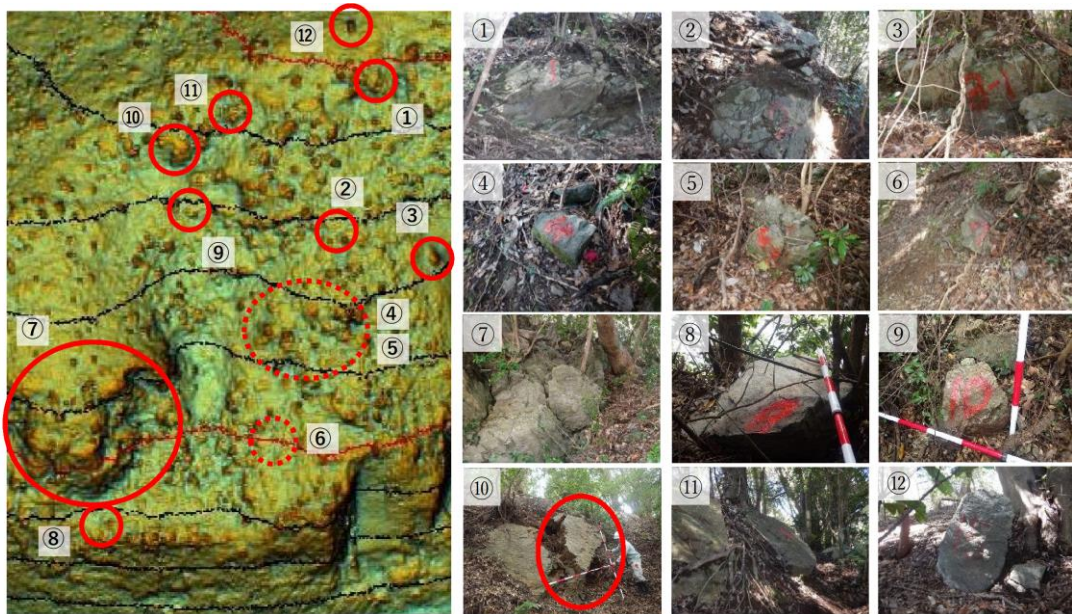


図-10. 落石発生源分布図

表-3. 調査確認諸元

	(i)濃淡	(ii)形状(机上)	(iii)規模(現地) (m)	(iv)周辺地形 (斜面勾配)	(v)安定度判定
①	中程度	円形で比較的大さい	3.0×1.5×1.0	76°	1 または 2
②	淡	判別不可能	2.0×1.5×1.0	45°	1 または 2
③	濃	円形で比較的大さい	2.5×2.0×2.0	60°	1 または 2
④	中程度が複数	円形で小さい	0.4×0.2×0.2	45°	1 または 2
⑤	中程度が複数	円形で小さい	0.8×0.6×0.3	41°	1 または 2
⑥	淡	判別不可能	0.6×0.3×0.3	42°	1 または 2
⑦	濃	急崖が連なる	0.9×1.0×0.7	85°	1 または 2
⑧	中程度	円形で小さい	1.0×0.6×1.0	90°	1
⑨	中程度	円形 非常に小さい	0.4×0.4×0.4	41°	1 または 2
⑩	濃	特異な形状	1.4×1.6×0.6	70°	1 または 2
⑪	濃	角形	1.0×1.4×0.4	43°	1 または 2
⑫	中程度	円形で小さい	3.0×1.5×1.0	76°	5

6.2 詳細設計での運用

S-DEMにより可視化された周辺地形と、現地調査で確認した条件に基づき、対策工法を選定した。

(1) 落石防護工の選定

S-DEMからも確認できるように、斜面内には明瞭な集水地形を成している箇所がある。現地調査においても当該箇所に留意して調査を実施したところ、実際に集水地形となっている。また、S-DEMからは転石の特定が困難で、集水地形上部に確認できる⑨の転石以外にも、φ0.1m程度の微小な落石発生源となる不安定な転石が、集水地形内に多数確認できる。小規模かつ複数の落石が道路に到達するのを防ぐ必要があるため、待受式の落石防護工（待受け式防護網や防護柵）を選定した。

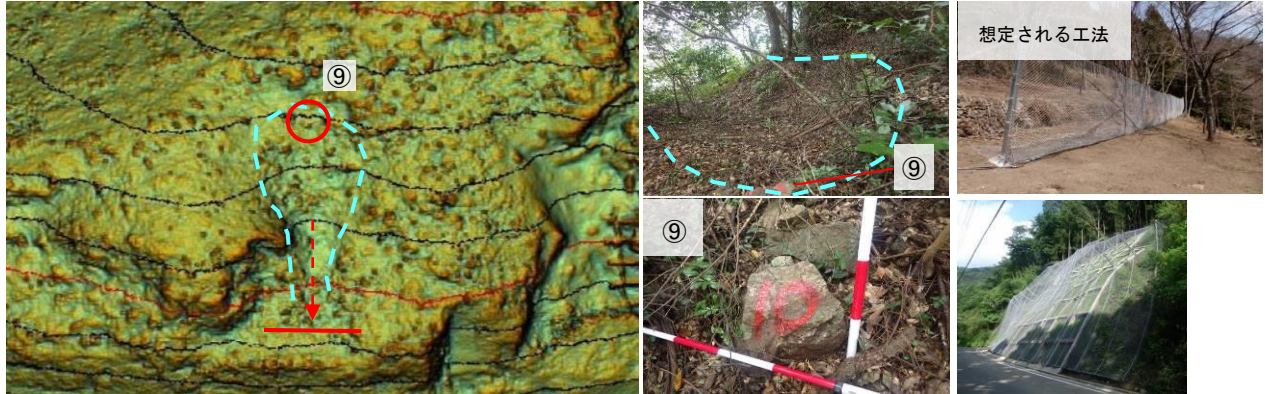


図-11. 落石防護工

(2) 落石予防工の選定

S-DEMから斜面内に非常に広大な岩塊が確認できる(⑦)。また陰影が濃いことから急崖となっており、危険性の高いことが想定できる。現地調査では、S-DEMでは確認できない節理が非常に発達した岩塊であることが確認できた。この岩塊に対してはS-DEMからも、広域であるが、岩塊として一連の対象として対策できるため、現位置で固定し、落下することを防ぐワイヤーロープ伏せ工を選定した。

また、⑩については、S-DEMからも何らかの微地形として明瞭に確認できる。現地調査では、非常に不安定な転石であることが確認できた。斜面の上部に位置しているため、ワイヤーロープ掛け工による対策工を選定した。

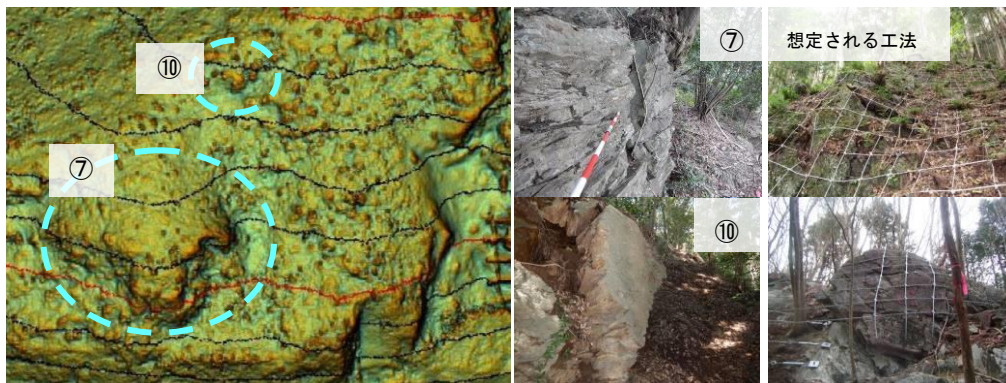


図-12. 落石予防工

6.3 詳細設計における UAV レーザ計測データ活用の有効性

詳細調査では、机上の段階から微地形や落石発生源を事前に把握することができた。一辺が1.0mの大きな石や、それよりも小さい石でも斜面に微地形が少ない場合には明瞭に確認ができた。また、UAVによるレーザ計測は、実機によるレーザ計測よりも密に照射できるため、急崖地のようにレーザが照射されにくく地

形取得が難しい箇所や集水地形等の微地形も、形状が概ね把握できるほどに可視化された。また、現地調査の基盤図として利用することで、斜面防災点検での現地調査と同様に安全かつ効率的な調査を実施することができた。対策工の選定においては、落石が懸念される転石・浮石等の分布や、周辺の地形状況が可視化されるため、被災範囲の想定や対策工の配置計画、落石予防工・落石防護工といった複数工法を適切に組み合わせる提案が可能となる。

その他の効果として、測量作業が危険な急峻な斜面においても平面図や横断図の作図が可能である。また、地形の起伏が三次元で可視化されるため、仮設モノレールのルート選定のような現地の地形に依存する仮設計画が、平面図よりも容易かつ適切に検討することができる。

施設設計における課題として、詳細調査では設計条件を決定するために岩の節理の発達状況、安定度判定、及び落石が懸念される石の規模等の諸元を確認する必要がある。これらは S-DEM から読み取ることができ来ないため、現地でそれぞれ確認する必要がある。

以上のことから、施設設計における UAV レーザ計測データの活用は、机上調査での斜面全域の把握や発生源の抽出、地形条件と発生源の状況を複合的に考慮した対策工選定では有効であり、それらを示す根拠資料として可視化技術は大いに活用できる。しかし、設計諸元の抽出や、各発生源への配置、数量算出などの詳細な事項については机上では確認できないため、個別に確認する調査は省くことができない。

7. おわりに

高密度レーザ計測データから微地形や地物を斜面勾配に応じて平面図や立体的な鳥観図に可視化することによって、従来は机上調査の段階で把握できなかった浮石や転石、露岩といった災害要因を確認するとともに、現地調査にあたっては、危険な箇所を回避し効率的な調査を実施することができた。更に対策工の検討においては、安全性の確保や工法の種類・規模の精度が向上するなど、レーザ計測データの有効性が確認できた。

しかし、机上段階で把握した災害要因は、現地においては下層植生や直径の大きな樹木、周辺の微地形と一体となった地形など、すべてが災害要因ではないこと、また、密な下層植生や急勾配、もしくは複雑な地形等によって、災害要因を可視化しきれない場所もあることが確認できた。さらに、レーザ計測データは地形や地物の「形状」のみを表現するため、露岩の節理の発達や下部の洗堀の状況など、個別の災害要因の危険度の把握は困難であることも確認できた。従って、複数の災害要因から構成される斜面全体の危険度を評価するためには、机上調査に加え現地調査を実施する必要がある。

これらのことから、斜面内に存在するすべての浮石・転石や露岩等の災害要因を可視化し、机上調査のみから斜面の危険度を判断するべきではないが、従来手法よりも正確性・効率性・安全性がはるかに高いスクリーニング、机上調査や現地調査、施設整備計画や詳細設計などの斜面防災対策が可能になると考える。

参考文献

- 1) 公益財団法人日本測量調査技術協会 (2013) : 航空レーザ測量による災害対策事例集, p31-45.
- 2) 増田 仁・田近真悟・沢田和秀・小野貴稔 (2014) : 転石調査のための高密度レーザ計測による斜面の可視化, 第 23 回調査・設計・施工技術報告会.
- 3) 千田良道・高野正範 : 転石・岩盤斜面調査を目的とした航空レーザ測量の課題改善, 日本写真測量学会学術講演会発表論文集, p85-88, 平成 25 年度.
- 4) 社団法人日本道路協会 (平成 29 年 12 月) : 落石対策便覧, p59.