

詳細地形データを用いた地盤災害への対応

岐阜大学 国際会員 ○沢田和秀

中部大学 正会員 浅野憲雄

1. はじめに

平成 13 年度から施行開始された土砂災害防止法は、「土砂災害から国民の生命及び身体を保護するため、土砂災害が発生するおそれがある土地の区域を明らかにし、・・・・・著しい土砂災害が発生するおそれがある土地の区域において一定の開発行為を制限し、・・・・・対策の推進を図り、もって公共の福祉の確保に資することを目的とする。」となっており、国民の安全を確保することについては非常に有効だが、一定の開発行為を制限することについては、土地の区域の価値に大きく影響する事案である。本報文では、このような法施行に対し、詳細地形情報がどのように利用されるべきかを考える。

2. 詳細地形図の重要性

基礎調査には、施行規則の中で、縮尺 1/2,500 以上の地形図を砂防基盤図として使用することが明記されており、施行以来この地図のあり方についていくつかの議論もなされている¹⁾。概ね 5 年ごとに調査を実施するとされるこの法律の下では、砂防基盤図は、新鮮な 3 次元デジタル情報であり、しかも詳細であるべきである。例えば図-1 および図-2 は、岐阜県内の同区域を基礎調査マニュアルに基づいて調査した結果である。それぞれの左図は砂防基盤図、右図は航空レーザ計測データを用いた調査結果である。保全対象の一般家屋には特別警戒区域（レッドゾーン）は含まれないものの、警戒区域（イエローゾーン）とも大きく範囲が異なることが分かる。指定区域内に一般家屋を含む土地があれば、資産価値に大きく影響する。航空レーザ計測には、利点欠点が存在する²⁾が、その原理から、写真測量から得られた地形とは比較にならない精度が確保されていることは明確であるため、詳細なデジタルデータを使用すべきである。またデジタルデータは、更新のしやすさ、データ解析のしやすさなど、デジタル 3 次元情報でしか成し得ない利用方法がある。さらに、3 次元ビューワを用いれば、これまでと異なる視点からの視覚情報を得ることができる。



図-1 砂防基礎調査による（特別）警戒区域設定例（その 1）

3. 土砂災害防止法における地形図の位置づけ

岐阜県の西濃地域では、平成 24 年 9 月 17 日～19 日に渡って続いた台風 16 号による大雨に起因して、18

日午後、大垣市上石津町において土石流が発生した。同地域は、平成 20 年度に砂防基礎調査が実施されており、そのときに基礎調査によって指定されたレッドゾーンおよびイエローゾーンの範囲と、今回発生した土石流の範囲とを比較することが可能となったため、これを紹介する。

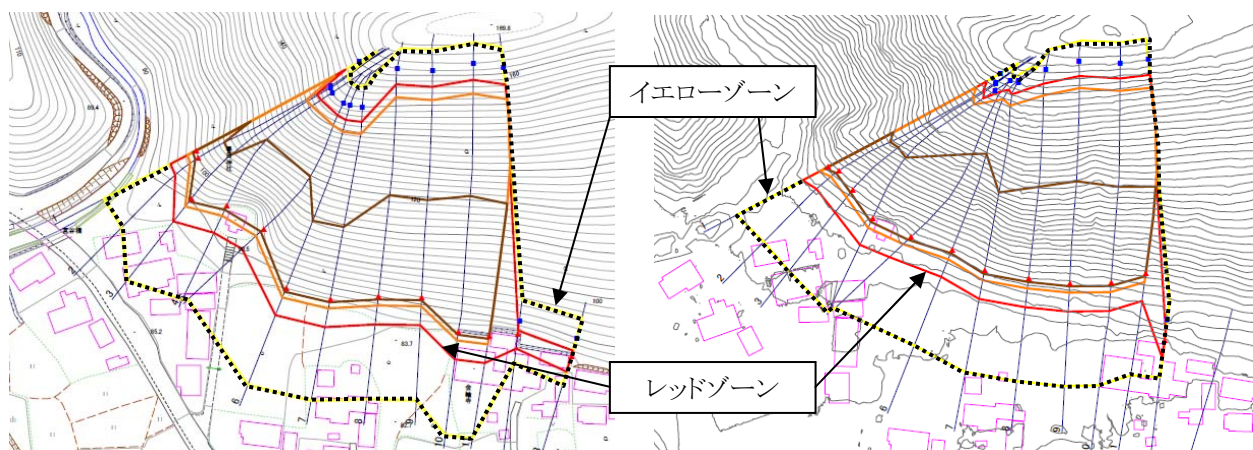


図-2 砂防基礎調査による（特別）警戒区域設定例（その 2）

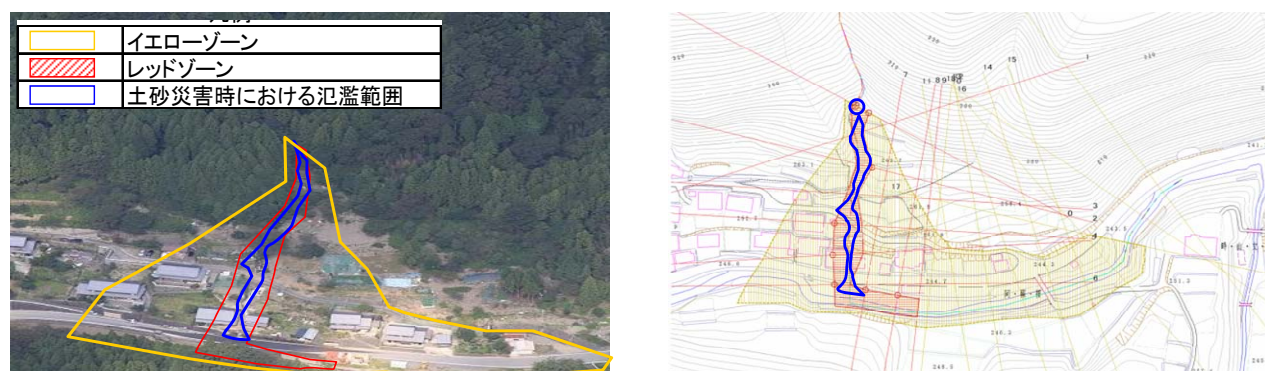


図-3 基礎調査による予測範囲と実際の土石流氾濫範囲（上ノ谷）

図-3 および図-4 に、基礎調査によるレッドゾーンおよびイエローゾーンの算出範囲と実際の土石流氾濫範囲（青線）を重ね合わせて表示した。各図で、左図は斜め上空からの航空写真にゾーンを重ね合わせたもの、右図は砂防基盤図を用いた調査票に実際の土石流氾濫範囲を重ねたもので、青線が氾濫範囲である。岐阜県砂防課は、図-3 に示す土石流について、状況調査結果として以下のように報告している。【土石流は、地形勾配が急峻であることから、大半が堆積せず、現況流路に沿って流下している。土砂の氾濫開始始点は、谷の出口で放棄された耕作地と溪岸の高低差ないところとなっている。土石流の流下方向は、現況の谷に沿って流下している。】また、基礎調査の結果と比較して、以下のようにまとめている。【地形勾配が急峻であることから、広範囲な堆砂は見られず、溪岸部に少量の堆積が見られる。市道から県道までの区間は、急勾配の三面張り水路となっているため、土砂は堆積せずに牧田川まで一気に流下している。したがって、流下した土石流の流出範囲は、基礎調査におけるレッドゾーンと一致していると言える。氾濫開始地点について、土砂災害時では、谷の出口より土砂の氾濫痕跡が確認できることから、妥当と言える。流下方向についても、土砂災害では、現況の谷に沿って流下していることから、妥当と言える。】以上のように、条件がそろえば、砂防基盤図を用いた基礎調査の結果と実際の土石流の流下領域が合致することがわかった。

同日の報告に、岐阜県砂防課は、図-4 に示す別箇所の土石流について、災害状況調査により、以下のようまとめている。【今回の土砂流出による施設の倒壊被災は、流出規模に比して少ない印象を受ける。これは、上流の砂防堰堤（H10 災関緊急砂防）の設置により、巨礫（D95～D70 クラス）が保全区域まで流下せず、

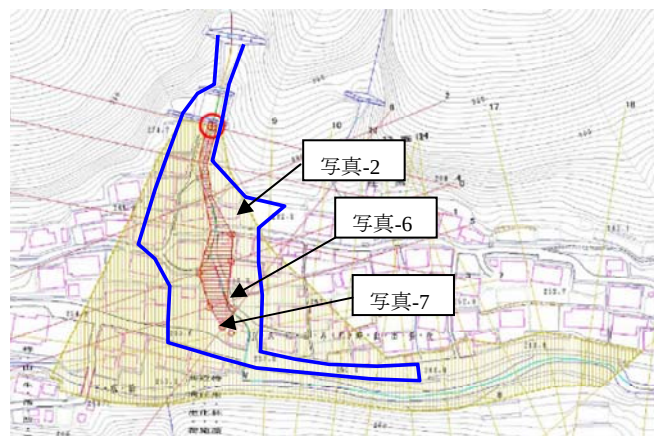
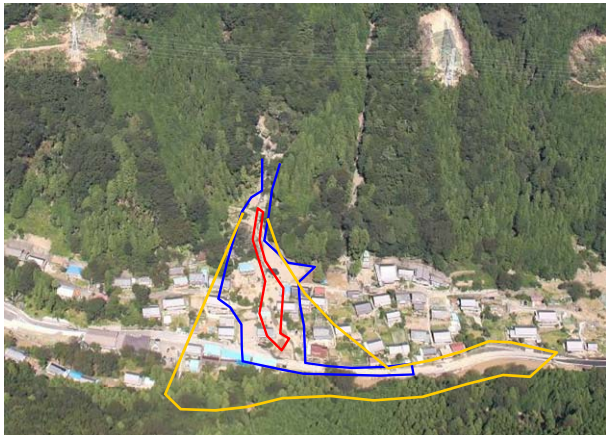


図-4 基礎調査による予測範囲と実際の土石流氾濫範囲（滝根谷）

砂防堰堤堆砂域で捕捉または停止したためと考えられる。無施設であったら、巨礫が直接家屋に衝突する可能性が高いため、被害は拡大していたと推定できる。したがって、保全区域（下流域）へ流出した礫は、比較的小粒径（ $\phi 5 \sim 20$ cm程度）であったと考えられるため、基礎調査のイエローゾーンに近い氾濫エリアとなったと推定できる。】写真-1 は氾濫開始点直下の写真であるが、確かに流出土砂の粒径は小さい。流出土砂の中間位置（写真-2）および最下流部付近（写真-3）についても、土砂の粒径は大きくないことがわかる。



写真-1 氾濫開始点直下



写真-2 中間域



写真-3 下流域



写真-4 家屋による流路の規制



写真-5 レッドゾーン内の礫

また、基礎調査結果と比較して、以下のように検証している。【イエローゾーンと今回の土砂氾濫範囲を重ね合わせると、氾濫基準点からの広がり(30°)および氾濫端部の挙動は、イエローゾーンと概ね一致する。下流域で裾が広がっていない点は、両側に家屋が建ち並び流出進路が規制されたと考えられる(写真-4)。したがって、土砂が流出(氾濫)する範囲は、概ねイエローゾーン範囲内と考えて差し支えないことが検証された。イエローゾーンは地形条件(地形勾配2°)のみから決定されるため、家屋等の構造物による規制は一切考慮さ

れていない。左岸側でイエローゾーンから逸脱している氾濫範囲があるが、これは流出した土砂が家屋に衝突し、方向が変化したと考えられる。レッドゾーンと現地を比較すると、レッドゾーンが土石流エネルギーの高い範囲を示す設定のとおり、レッドゾーン内に比較的巨礫が堆積していることが確認できる(写真-5)。

当該流域のレッドゾーンにかかる家屋は、3戸(木造)で、基準点に最も近い家屋が倒壊している(写真-2 参照)。基礎調査によって得られた外力計算と照合すると、倒壊家屋(写真-2)は $73.9\text{kN/m}^2(h=1.0\text{m})$ 、未倒壊家屋は、写真-6: $18.5\text{kN/m}^2(h=0.4\text{m})$ ・写真-7: $17.9\text{kN/m}^2(h=0.4\text{m})$ となり、家屋に作用した力に大きな差異があることが確認できる。したがって、基礎調査の解析結果は、実際の被災状況を的確に表現できていると考えられる。(図-4 右参照)】



写真-6 未倒壊家屋



写真-7 未倒壊家屋

ここで示した砂防基盤図は、航空レーザ計測データを砂防基礎調査における解析システムに適用するため、1/2,500 レベルに変換している。レーザ計測によって得られた最大の詳細さを用いれば、1/1,000 レベルの地形図を表現できるため、ここで示した土石流予測より、さらに精度の良い氾濫区域を想定できると考えられる。さらに、地形図だけでなく家屋や樹木を表現できる DSM (Digital Surface Model) を用いれば、微地形だけでなく構造物によって規制される土砂流の挙動をより詳細に予測できると考えられる。詳細な地形図を利用した土石流等の数値解析による予測は、砂防基礎調査に用いられるような簡易的な数値解析手法ではなく、CFD(Computational Fluid Dynamics) に基づく手法³⁾や SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法⁴⁾⁵⁾、DEM (Distinct Element Method)⁶⁾⁷⁾など、物理現象を直接的に表現できる解析方法を用いることが望ましい。

4. 詳細地形を用いた落石対策工の検討

乗鞍スカイライン(主要地方道乗鞍公園線)は、岐阜県高山市から乗鞍岳畳平を繋ぐ延長約 14km の山岳観光道路で、冬期は積雪のため閉鎖されているが、開通期間には、マイカー規制が行われているものの、年間 30 万人弱が訪れる観光地である。岐阜県では、県管理道路における災害に至る要因の早期発見と点検データの蓄積を目的とし、既設点検箇所に対して定期点検(履歴調査)により変状の進行状況を把握するとともに、防災点検のデータ管理を適正かつ容易に行えるシステムの整備を目的として、既存の岐阜県道路防災点検管理システムの機能拡張等と同システムの運用・保守を行っている。つまり、防災点検のデータ管理を GIS によって行い、その機能拡張のために常に保守を継続している。その中で、乗鞍スカイラインにおける落石発生の多い箇所について、対策工法選定のために落石シミュレーションを行った。対象の箇所は、図-5 中心付近のヘアピンカーブが連続する斜面で、標高は約 2,500m である。写真-8 および写真-9 で示すように、多数の転石・浮き石が存在し発生源となっている。通常、落石対策工の設計には、日本道路協会の落石対策便覧が用いられ、総検査対象数約 130 を計算したところ、最大の落石エネルギーは約 20,000kJ になった。

しかし、そのように突出したエネルギーを持つ落石は少なく、図-6 のように 5,000kJ のエネルギーに対応できる防護工を作れば、90%以上の落石に対応できることがわかった。ここで、写真-8 および写真-9 を見て

も分かるように、対象箇所は高標高な上に、地形、地質条件が特殊（傾斜の緩い岩塊層やハイマツで覆われている）であり、落石対策便覧で用いる簡便式によって得られる落石エネルギーと異なる可能性があるため、別途数値シミュレーションによってエネルギーを算出することとした。そこで、質点系3次元シミュレーションによる解析を実施し、防護工の設置区間および落石エネルギーを検討した。岐阜県は、県域統合型GIS8)を一般公開しており、その基本地図として2mメッシュごとの標高値をもつデジタルデータ（DEM



図-5 落石シミュレーションによる検討箇所

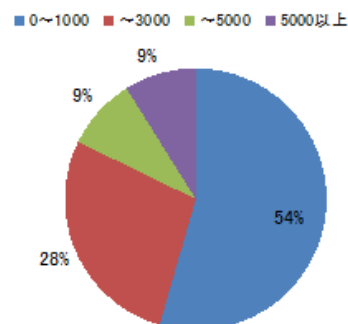


図-6 落石エネルギー分布（単位 kJ）

：Digital Elevation Map）を全県域保有している。これを用いることにより、詳細な3次元地形図を利用したシミュレーションを実施できる。質点系3次元シミュレーションのためのパラメータの決定には、次の事例を基に設定した。平成22年6月22日の道路パトロールにより確認された不安定岩塊のうち、特に不安定な状態の3個の岩塊が除去され、そのうちの1個が道路まで落下し、落石防護柵と路面に損傷を与え、道路脇に停止した。その状況が土木事務所によりビデオに記録されていたため、その再現解析を実施し、パラメータフィッティングを試みた結果、最も近い結果から選出した。図-7に、パラメータフィッティングのための落石シミュレーションによる検討結果の例を示した。図のように、詳細に表現された微地形上を質点モデルの落石挙動が表現できる。現地に則した落石の反発・すべり・転がりに関する解析パラメータが得られたあと、具体的には、写真-8、写真-9に示したように、個々の岩塊に番号を付け、それぞれの岩塊から岩径の異なる落石が発生したときの落下経路と到達地点を数値解析によって予測した。



写真-8 多数の転石・浮き石



写真-9 多数の転石・浮き石

一例として、種々の岩径の転石が斜面上に設定された解析モデルの外観を図-8に示した。このように、現地調査で判明した落下する危険性のある岩塊について、シミュレーションを行い、道路上に落下する場所・落石の経路・大きさから、防護工の設置場所と大きさおよび必要とするエネルギー吸収能を決定し、設計用のデータとする。図-9は、ある程度まとまった岩塊が存在する箇所からの落石を想定したケースを同時に表示

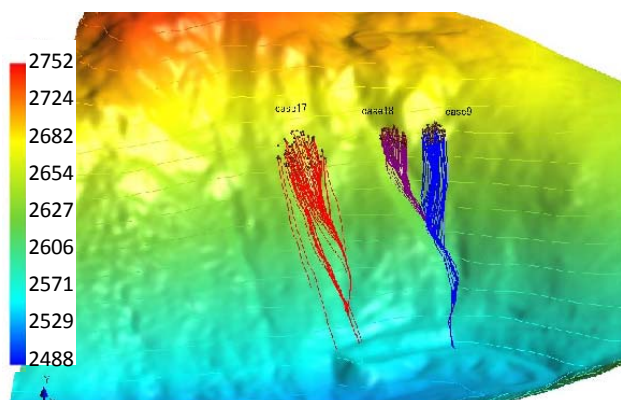


図-7 落石シミュレーションによる検討結果例

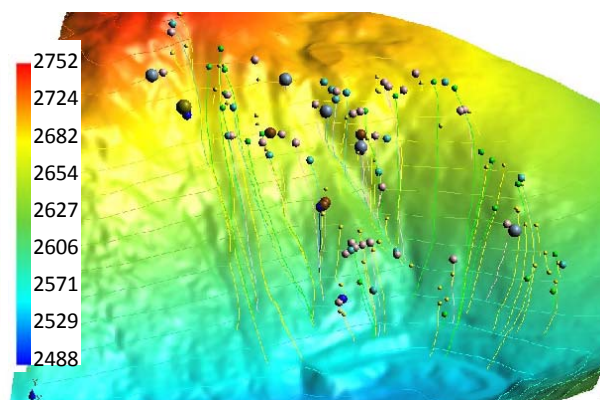


図-8 現地調査結果から設定された落石モデル

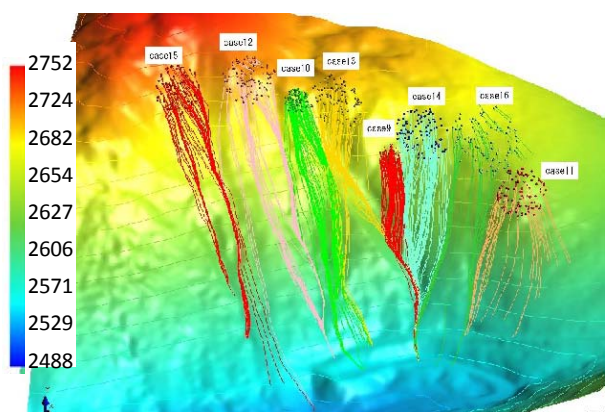


図-9 岩塊群からの落石経路

した結果である。この結果から、落石対策便覧によって設定された 5,000kJ の耐力は安全率を見込んだ上での設定とすることができ、防護工の設置場所および形状を確定することができた。シミュレーションの結果から、適正な箇所に適正な防護工を設置することが提案できた。これは、詳細な現地調査を行ったことと、その調査結果を活かすことのできる詳細地形図を使った数値シミュレーションによって検討できた成果である。

4. おわりに

航空レーザ計測は、10 年ほど前から全国的に実施されているが、平面図や横断図といった従来通りの使われ方をしただけで、その後活用されてないことが多い。3 次元データとして使用することによって、適切な社会基盤の整備に大いに役立てられるよう、活用が望まれる。

最後に、本稿は、岐阜県県土整備部のデータ提供によって充実することができた。誌面を借りて感謝の意を申し上げます。

参考文献

- 1) 例えば、吉川知弘、川下茂樹、田中比月、小川紀一郎、佐野寿聰、土砂災害防止法における砂防基盤図の重要性と精度について、APA、Vol.82、No.9、pp.54 – 62、2002.
- 2) 講座：わかって使うレーザ計測、地盤工学会誌、Vol.59、No.10～No.12、2011.、Vol.60、No.1～No.3、2012.
- 3) Moriguchi, S., Yashima, A., Sawada, K., Uzuoka, R. and Ito, M., Numerical simulation of flow failure of geomaterials based on fluid dynamics, Soils and Foundations, Vol.45, No.2, pp.155-165, 2005.
- 4) Lucy, L.B., A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, Astron. J., Vol. 82, pp. 1023-1024, 1977.
- 5) 沢田和秀, 野々山栄人, 八嶋厚, 森口周二, 斜面崩壊土砂の挙動予測解析への SPH 法の適用, 混相流, 22 巻 4 号, pp.339-347, 2008.
- 6) Cudall, P.A. and Strack, O.D.L., A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 7) 内田吉彦, 伯野元彦, 粒状体シミュレーションによる岩屑流・土石流の解析 東京大学地震研究所, 第 65 号, p.321-411, 1990.
- 8) 県域統合型 GIS ぎふ URL : <http://www.gis.pref.gifu.jp/>