

盛土崩壊箇所への浅部物理探査技術の適用と復旧対策への貢献

稲崎富士・小河原敬徳・木佐貫 寛・尾西恭亮

1. はじめに

巨大地震に対する道路ネットワークや河川堤防などの社会インフラ施設の地震レジリエンス強化にあたっては、これまでの地震の発生リスクの予測および耐震補強や新たな基準類の策定など、発災前に実施されるリスクマネジメント技術の開発に加えて、発災後の被災施設・ネットワークの早期復旧対策への技術的貢献が重視され始めてきている。実際、国土技術政策総合研究所や土木研究所は地震直後からの技術者派遣を通じて緊急復旧対策の策定等を支援してきた。しかし土構造について詳細な現地調査やモニタリング調査に基づくという観点では、インフラ施設の損壊過程の解明や今後の予防と保全に資するような事後調査の領域では貢献事例が多いとは言えなかった。これは、被災箇所では早期復旧によって地震直後の状態が残されていない場合がほとんどであること、現地での詳細調査やモニタリングには特殊な技術と長期にわたる対応が必要とされること、によるものと考えられた。

これに対し筆者らは、地表下50m程度までを対象とする物理探査（浅部物理探査）情報に基づき、さらにボーリングコア試料分析や地質断面解釈を加えて地下空間情報モデルを作成し、それと数値地表モデル（DSM）などの地表空間情報を統合して3次元的地表・地中空間情報モデルを構築して解析する技術の研究と適用を進めてきている¹⁾。今回、2016年4月の熊本地震と6月の集中豪雨が重なったことで盛土の一部が崩壊した高規格道路において道路盛土および周辺地盤の内部物性構造を把握することを目的として浅部物理探査を実施し²⁾、地表空間情報を加えて地表地下空間情報の統合的な解析を行なう機会を得た。その結果、盛土崩壊のメカニズムと影響範囲の把握に有用な空間モデルを提供することができた。本報文では、適用技術の概要および復旧対策への貢献について報告する。

2. 盛土崩壊箇所における浅部物理探査

2.1 浅部物理探査による地下構造の把握

詳細な浅部物理探査を適用した道路盛土崩壊箇所では、盛土脚部に補強土壁が施工されていたこと、また地震後に盛土前縁部に抑止杭が打設されていたことにより崩壊体の移動は限定的であった。しかし軟弱地盤中に施工された地盤改良体も損傷を受けたと推定されたことから、機動性のある浅部物理探査により盛土・地盤の変形構造を詳細に把握するとともに、二次的な崩落を起こさないように慎重に崩落した盛土を除去し、改良体の変形状況を確認したうえで本格復旧工を実施することとなり、盛土崩壊後の状態が暫時保存されるとともに崩落盛土の開削除去が段階的に施工されることになった。

筆者らはこの間に4次にわたって現地調査計測を実施し、また表層地盤試料を採取し、詳細なコア試料分析を実施した。さらに所管事務所からドローン撮影写真データ等の提供を受け、それから詳細なオルソ化画像とDSM（数値地表モデル）を独自に構築した。適用した浅部物理探査手法は2次元電気探査、牽引式電気探査、地中レーダ（GPR）探査、高周波表面波探査、S波速度検層（SVSP）および筆者らが考案したハイブリッド表面波探査である。ハイブリッド表面波探査は従来の能動的表面波探査と受動的表面波探査（微動探査）を同一測線上で連続して実施する方法であり、空間的解像度と探査深度を深くすることを可能とする探査技術である³⁾。道路盛土内部の数m程度以下の不均質構造もS波速度断面構造として把握することができる。牽引式電気探査は通常の2次元電気探査等とは異なり、地面に電極を設置固定せずに装置を牽引移動させながら見かけ比抵抗を測定することができる。

図-1は、盛土崩壊後1週間を経た時点でドローンを用いて撮影された画像データ141枚から、2.5cmグリッドで作成したDSMに物理探査測線を重ねて表示したものである⁴⁾。DSMおよびオルソ化画像の作成にはAgisoft社製PhotoScan Professionalを使用した。同図には、崩壊体前縁部の地盤が円弧状に

Near Surface Geophysical Exploration at an Embankment Failure Site and its Contributions to the Understanding Failure Process and Planning of Countermeasure Works

隆起していること、補強土壁と抑止杭が一体として変形しつつ盛土の大変形を抑制していること、補強土壁背面の盛土が大きく陥没していること、が鮮明に表現されている。設計図書類等との比較から、陥没は最大で4.2m、水平方向の変位は最大3.2m程度と推定することができた。一方前縁部の地盤は最大で1.8m盤ぶくれした。この崩落体の内外に探査測線を設定して浅部物理探査を実施したが、図-1にはそのうち主な探査測線11測線とSVSPを測定したCPT2孔を示してある。このほかに天端路面上で高周波表面波探査を5測線、GPR探査を250測線以上で実施し、舗装盛土内部の崩落に関連した変形構造の把握を試みた。

図-2は、天端路面に設定したC1測線のハイブリッド表面波探査解析断面である²⁾。盛土最下部と地盤改良された原地盤のS波速度は140m/s程度と低く、換算N値では3-4程度と見積もられた。崩落箇所を挟むボックスカルバート(B/C)の近傍ではS波速度が盛土上部まで低くなっており、盛土体の一部が剛性の高いB/C周辺で緩んでいることが捉えられている。この不均質構造が施工時の盛土転圧のばらつきに起因するものか、地震に起因するものかは特定することができないものの、両B/C間にある盛土体の側面せん断抵抗が相対的に小さかったことが推定された。

図-3は、天端路面に横断方向に設置した長さ約10mの測線（中図DSM上に測線位置を表示）下の盛土舗装の内部構造を高周波表面波探査(上)およびGPR探査(下)断面である⁵⁾。この区間で作成した高精細DSMには、滑落崖後背部路面上に、約3cmの落差を伴う2条の東落ちの亀裂が鮮明に捉えられていた。この亀裂直下および反対側車線下では路床部のS波速度が相対的に低くなっており、後背亀裂が下方に進展し、路床盛土が緩んでいると解釈した。一方反対側車線下の低速度層は、通常では盛土崩落による余効変動によるものとは考えにくい。しかし路面上での稠密GPR探査では、舗装体下面からの反射波が大きい（路床と分離している）領域が滑落崖後背部に舌状に広がっており、一部は反対側車線にまで進展していることがわかった。同図でもGPR断面の同じ測線区間において深さ0.6m付近の反射面のつながりが乱れていることが示されている。GPR断面からはほかにも、アスコン層厚が測線左端側帯部で当初設計どおり薄くなっていること、上

層路盤層が測線距離1m付近（水色矢印）で薄層化すること、表面亀裂がほぼ鉛直下方に少なくとも深さ1m程度まで進展していること、を読み取ることが可能である。

図-4は、崩落部主軸沿いに設定したT1測線沿いに実施した2次元電気探査による比抵抗トモグラフィ断面である⁶⁾。この断面には盛土崩落前後の地表面の変位ベクトルと、盛土開削により露頭した地盤改良体と松杭頭部の原位置からの変位ベクトルが重ね書きされている。なお原位置は設計図書および

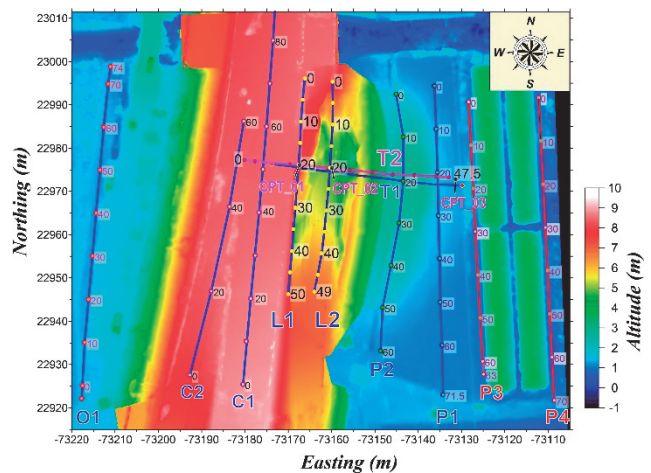


図-1 道路盛土崩壊箇所DSMと物理探査測線展開区(文献4)に加筆

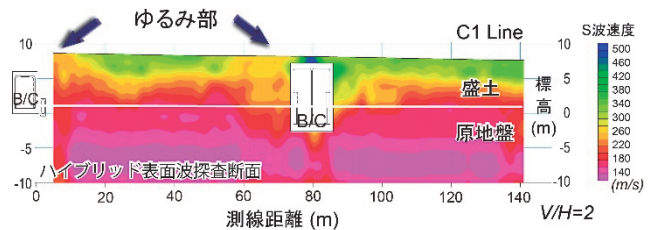


図-2 天端路面縦断C1測線沿い盛土内部のS波速度構造(文献2)に加筆

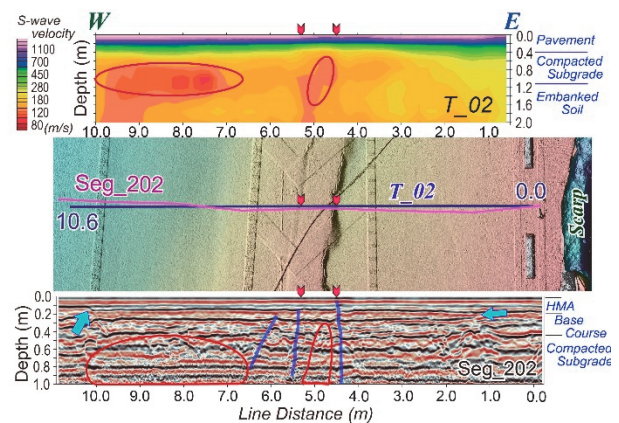


図-3 盛土崩壊箇所後背部天端道路のDSM(中)と高周波表面波探査(上)およびGPR探査(下)で捉えた盛土舗装内変形構造(文献5)に加筆

崩落前の空中写真等から推定した。同図に示すように、道路盛土上部は斜め右下方に5.1m程度滑動した。一方補強土壁上面はほぼ水平方向に4.5m程度移動している。一方松杭は元位置から斜め右上方に移動した。最大の抜け上がり高さは1.6mに達している。また同図に示した比抵抗構造からは、高比抵抗を示す盛土、低角の衝上すべりを伴って盤ぶくれした前縁地盤を明瞭に識別することができる。また淡水成の蓮池層上部層と海成の有明粘土層とは比抵抗が異なる層として識別されている。同図には、これらの地表変位および開削によって確認された地盤改良体等の地中変位を説明する崩壊すべり線を合わせて示している。改良体の一部は開削面以深に潜頭しており、探り調査によって概略深度が推定された。なお今回の調査では、開削面以深の改良体の折損状況を把握するための計測は実施していないが、上述の地表地中変位は一部の改良体が折損したと想定しないと説明できない。また盛土の変形が初期陥没と後生的すべりの2回の活動によって形成されたというモデルを想定している。

2.2 地表地下空間情報の統合化解析

筆者らが現地において実施した浅部物理探査の結果断面を地下空間情報の主要情報として取り込み、また開削・復旧段階において数次にわたって撮影された空中写真データから地表空間情報を構築した。これらを3次元空間情報表示システム（Golden Software社製Voxler）に取り込み、3次元空間モデルを作成した。さらに改良体312本と抑止松杭147本の傾斜方位角と頭部標高データから各々の3次元地中構造をモデル化して統合した。3次元モデルの構築により、任意の断面や平面で崩落部の地表地中構造を表示解釈することができ、盛土崩落部の内部がどのような構造をしているかを解釈することが容易になるとともに、それがどのように形成されたかをより合理的に推定することが可能になった。なお構築した3次元モデルでは、改良体は傾斜変位しているが、途中で折損してはいないと仮定している。

図-5は開削・復旧対策工施工時に露出した地盤改良体と抑止松杭の頭部の絶対変位量を平面投影した図である。盛土崩壊の主軸部で絶対変位量が大きくなっており両翼側で変位が収束していること、地盤改良体と松杭とが異なった変位をしていることがわかる。図-6は、開削調査時の地表DSMと地盤改良体・松杭の傾動変位を考慮して作成した地表地中情

報統合3次元モデルである。図中青色で示した改良体は、開削面より下位に潜頭し、探り調査等で確認・推定したものであるが、途中での折損は考慮していない。3次元モデルを構成する面や改良体等は空間的に定義されているので任意の断面やボックスで切り取り表示することができる。従来すべり解析

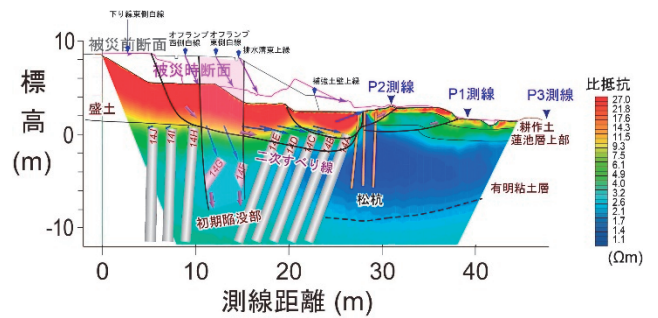


図-4 崩壊箇所主軸部の比抵抗横断面と地表・地中構造物の推定変形構造（文献6）を改変

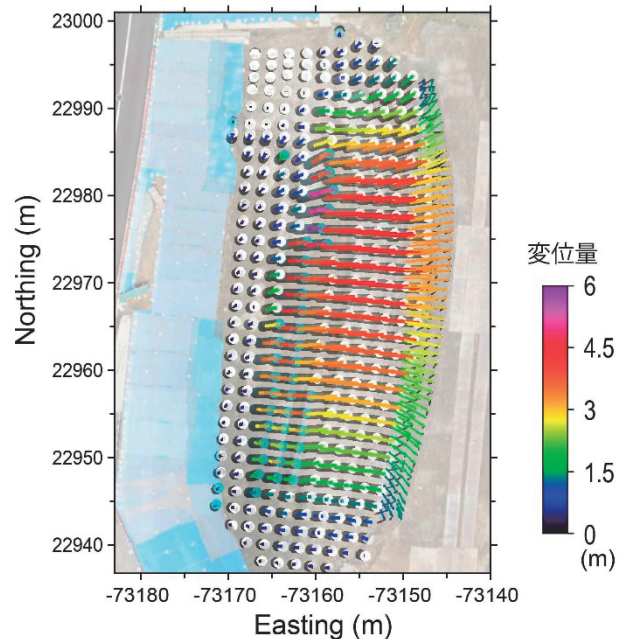


図-5 地盤改良体頭部の推定絶対変位量の空間分布

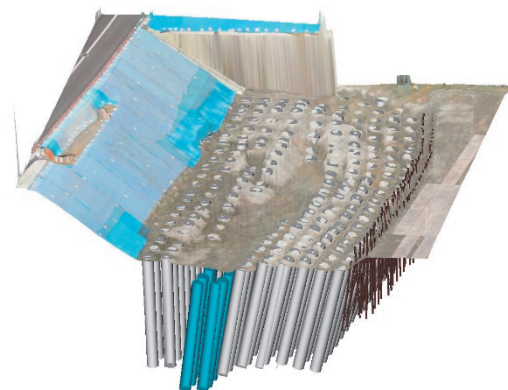


図-6 開削・復旧対策時の地表DSMと地盤改良体・松杭の傾動変位を考慮して作成した地表地中情報統合3次元変形モデルを統合した地表・地中空間情報3D表示例

等は特定の断面でしか実施されていなかったが、このように3次元モデルを構築することで、すべり主軸面を正確に定義することが可能になり、またすべり面やブロック境界面などを抽出・解釈することも容易になった。

同図には浅部物理探査断面は表示されていないが、構築した3次元モデルには、解析処理したすべての物理探査断面に加えてボーリング柱状図データも含まれており、それらとの対比も可能である。

3. まとめ

地震および豪雨が重なったことで道路盛土の一部区間が崩壊した箇所において詳細な物理探査を適用し、地表変状等の空間情報を加えて地表地中の3次元空間情報モデルを構築・解析し、盛土崩壊のメカニズムと影響範囲の把握に有用な情報を提供することができた。今回の調査結果で明らかになったことと、今後の検討課題は以下のとおりである。

- 1) 現地調査および 3 次元空間情報モデリングによって、崩壊が基礎地盤深部まで影響を与えていることを空間的に把握することができた。
- 2) モデル化にあたっては柱状改良体を連続体として扱った。個々の改良体のモデル化には折損状況の確認のための詳細で大規模な調査解析の適用が必要とされる。
- 3) UAV 空中写真画像および地上撮影稠密画像データの解析によって、盛土崩壊部の 3 次元モデルを時空間的に追跡することができた。施工時・維持管理時の地上撮影画像データも盛土変状の発生と進行過程の追跡や崩壊のメカニズム解明に有用な空間情報の一つとなるので、体系的な管理保存が望まれる。
- 4) 本報文で紹介した現地調査解析・空間情報解析はすべて土木研究所職員が実施したものである。また、現地探査後 2 週間程度で解析結果を取り

まとめて関係機関に報告している。災害時の機動的な調査と原因究明、復旧支援に向けてさらに計測解析処理技術の向上を進めるつもりである。

謝 辞

本報文で紹介した盛土崩壊部での調査には佐賀県有明海沿岸道路整備事務所の関係者に便宜を図っていただくとともに関連生データの提供を受けました。また現地探査計測へ協力いただきました。記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 稲崎富士、青池邦夫：稠密物理探査技術による浅部地盤構造の把握と3次元可視化技術、土木技術資料、第59巻、第2号、pp.14～19、2017
- 2) 木佐貫寛、小河原敬徳、尾西恭亮、稲崎富士：道路盛土崩壊地における詳細浅層物理探査、第52回地盤工学研究発表会発表講演集、pp.163～164、DVD-ROM、2017
- 3) 稲崎富士、木佐貫寛：活線道路におけるハイブリッド表面波探査、物理探査学会第133回学術講演会講演論文集、pp.109～112、2015
- 4) Ogahara, T., Kisanuki, H., Onishi, K., and Inazaki, T.: Making of a detailed DSM of a partially collapsed road embankment and correlation with 3D GPR data, *JpGU-AGU Joint Meeting 2017, HTT19-P02*, 2017
- 5) Inazaki, T., Kisanuki, H., Hayashi, K., and Imamura, S.: High-frequency Surface Wave Measurements for the Investigation of Pavement Structure, *Proceedings of the 23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics - Near Surface Geoscience 2017*, 5.p DOI: 10.3997/2214-4609.201702066, 2017
- 6) Kisanuki, H., Ogahara, T., Onishi, K., and Inazaki, T.: Near surface geophysical survey at a collapsed site of a highway embankment caused by a heavy rainfall, *Proceedings of the 30th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP2017)*, 248-254. DOI: 10.4133/SAGEEP.30-020, 2017

稲崎富士



土木研究所地質・地盤研究グループ 特任研究員
Tomio INAZAKI

小河原敬徳



土木研究所地質・地盤研究グループ 非常勤職員
Takanori OGAHARA

木佐貫 寛



土木研究所地質・地盤研究グループ 交流研究員
Hiroshi KISANUKI

尾西恭亮



土木研究所地質・地盤研究グループ 主任研究員、博士(工学)
Dr. Kyosuke ONISHI