

盛土材料・地盤の不確実性を考慮した盛土の性能評価に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令和5～令和7

担当チーム：土質・振動チーム

研究担当者：石原雅規、東拓生、加藤俊二

【要旨】

激甚化する豪雨災害や、今後想定される南海トラフ地震や首都直下地震等の巨大地震に対して、被害が懸念される道路盛土の性能確保が求められている。道路盛土の性能評価においては、設計時点では把握困難な建設発生土を有効活用した盛土材料の変形・強度特性等や盛土内水位について、施工及び維持管理段階での地盤や盛土材料物性の空間的な不均一さを踏まえた対応方法が課題となっている。本研究では、盛土の性能に大きな影響を及ぼす盛土材料の物性（変形・強度特性など）及び盛土内水位について、主に維持管理段階での情報を活用し、盛土の性能評価のための解析パラメータを高精度に設定する手法を開発・提案した。

キーワード：道路盛土、材料物性、物理探査、室内土質試験、静的自重変形解析

1. はじめに

道路盛土では、切土やトンネル掘削等で発生する土や、ストックヤードで保管された他の工事で発生した土などの建設発生土が材料として使用されることが一般的である。建設発生土は発生場所や発生条件等により物性が異なることが想定されるため、設計段階では物性を把握することが困難であり、施工段階になって初めて把握可能となる。しかし、大量に運び込まれる材料全てについて試験等を行い、物性を正確に把握することは不可能である。さらに施工時の含水比や撒き出し量および転圧方法などによっても締固め状態が不均一となることがある。また、盛土内水位が盛土の性能に大きな影響を及ぼすため、これに対する配慮も必要である。したがって、完成した盛土の性能を、維持管理段階の点検等を通じてできる限り正確に把握し、計画・設計段階に設定した性能に対して不足すると判断される場合は、補強などの対策を行うことが必要となる。

このように、盛土は設計・施工・維持管理の各段階で得られる情報を元に、不確実性を低減しながら性能向上を図ることが必要である。

維持管理段階で盛土の物性を把握するための調査方法として、一般にボーリング調査（標準貫入試験）などを行うことが考えられ、これらの情報からどのように解析モデル化を行うかという課題がある。このため、本研究では平成19年能登半島地震などの過去の地震で被災した盛土のボーリング調査による標準貫入N値と細粒分含有率から、繰返しせん断強度を推定し、こ

れらをモデルに設定し静的自重変形解析を行った。しかし、盛土内のN値や粒度の不均一さの影響で、崩壊有無の判別は概ね可能であるものの、変形量については実被害との乖離が確認される結果となった¹⁾。

また、盛土の性能に大きな影響がある盛土内水位については、ボーリング孔を利用し一定期間水位観測を実施し、解析などに設定する必要があるが、変動する水位からどのように解析モデル化を行うかが課題となる。このため、本研究では機械学習の一手法である再帰型ニューラルネットワークを用いて、一定期間観測した水位を教師データとして盛土内水位の変動予測を行う手法を検討し、予測手法の適用性を確認した²⁾。

前記のボーリング調査などは点の情報であり、不均一で不規則な盛土内部の構造を二次元あるいは三次元的に把握するためには、これらを多点で行わなければならないという課題もある。近年、物理探査技術が地盤の物性等を面的・空間的に把握する方法として期待されている。本研究では、令和6年能登半島地震で被災した盛土に対して、一般的な調査方法および物理探



図-1 対象盛土の令和6年能登半島地震における被災状況

査手法により盛土の物性や水位を想定し、これらを静的自重変形解析に適用し、実被災状況を再現できるか解析を行った。紙面の都合上、本報告書では主としてこの成果について報告するものとする。

2. 現地における物理探査

2.1 調査方法

盛土内部の土の物性の分布を推定することを目的に、S波屈折法探査を行った。S波屈折法探査は、地盤のS波速度(V_s)の分布を面的に求める物理探査技術であり、地表で人為的に発生させた弾性波を設置した受振器で計測する手法である。高周波で波長が短いため分解能に優れるとともに、地中深くまで探査が可能である。

図-1に、探査を行った盛土の令和6年能登半島地震における被災状況を示す。この盛土は、大きな沈下が発生した東側は高さ約20m、沈下・変形が比較的軽微であった西側は高さ約10m、天端幅20mの傾斜地盤上の両盛土であり、谷状の集水地形上に構築されている。令和6年能登半島地震では、のり面やのり尻に流動的な大変形は生じなかったものの、東側の法肩に2.2m程度の大きな沈下が発生し、4車線のうち2車線に損傷が生じた。図中に示したとおり、のり面の3か所で地震後にボーリング調査が行われており、N値は平均的には5.5~6.0程度であった。この盛土に隣接する道路区間は、平成19年の地震で崩壊し、のり尻直下の碎石置換、排水対策、補強盛土、押え盛土などで対策・復旧が行われており、令和6年の地震では被災が軽微であった(図-1右上写真)。

図-2に盛土の形状と受振器の配置を示す。盛土両側に受振器を100個設置し、約2m間隔で水平方向に板叩きにより起振することで探査を行った。

また、これとは別にP波屈折法探査も実施し、P波速度(V_p)の測定も行った。 V_p は、これまでの研究から土の飽和度が100%に近づくと約1,500m/sまで急激に高くなることが確認されている。これを利用して、当該盛土の地下水位線の推定も行った。

2.2 調査結果

図-3に探査の結果得られた V_s の分布を示す。変形が発生した東側のり面の直下では、 V_s の分布がのり面

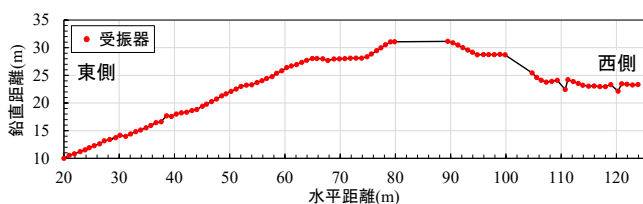


図-2 S波屈折法探査の受振器の配置

に平行に一樣に分布しておらず、複雑な分布となっている。また、盛土天端直下において、 V_s の高い領域が天端付近まで分布している。盛土施工前の元地形を確認したところ、調査位置は谷埋めの主要な沢筋に対して山側にも尾根・谷の地形の変化があり、おおむね2車線分の幅で尾根の緩いせり出しがあり、調査位置付近で主要の沢筋に対して尾根側面が急こう配化している箇所、おそらく元地形の地山と盛土との境界により生じた物性の微妙な違いで生じた変化ではないかと推察される。一方、この変化は天端中央付近のN値には明確には表れていなかった。これはおそらく、地盤への打撃貫入による破壊試験である標準貫入試験と、非破壊で微小ひずみ領域の物性を測定する弾性波探査の違いが関係していると推察される。

また、P波屈折法探査による V_p の分布を図-4に示す。ここでは、現場のボーリング孔での観測水位を正とし、図中に破線で示している、観測水位の位置と同じ V_p の等値線を水位線と考えることとした。

3. 採取土の室内土質試験

弾性波探査と並行して、当該盛土ののり尻付近から盛土材料の採取を行い、室内土質試験を行った。

図-5に粒径加積曲線、締固め曲線、繰返しせん断強度試験結果、バンダーエレメント試験結果を示す。

土は、礫分が8.2%、細粒分含有率 F_c が71.2%の礫まじり砂質細粒土であり、締固め曲線によると最大乾燥密度1.279 g/cm³、最適含水比35.0%で、採取した土の自然含水比は48%程度であった。

最適含水比で締固め度(D_c)85%、90%、95%の供試体を作成し、有効拘束圧を98 kN/m²として行った繰返しせん断強度試験による繰返し回数—繰返しせん断応力比の関係によると、繰返しせん断強度比(R_L)は、 D_c =85%で0.205、 D_c =90%で0.215、 D_c =95%で0.244で

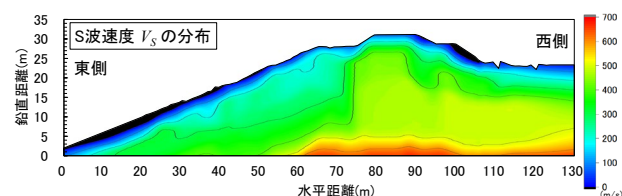


図-3 S波屈折法探査によるS波速度の分布

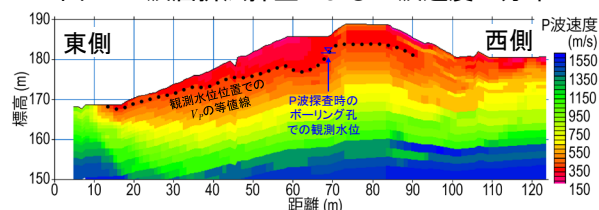


図-4 P波屈折法探査によるP波速度の分布

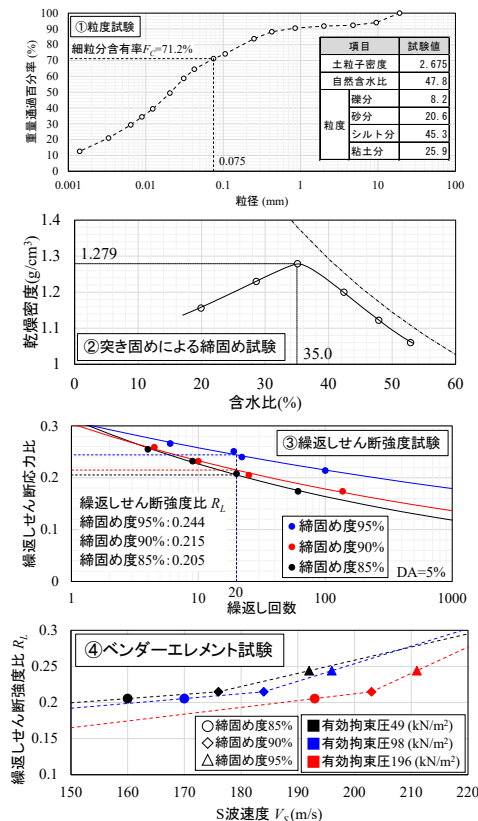


図-5 現地から採取した土の物性

あった。図-1 のとおり、対象盛土の平均 N 値は 5.5～6.0 であり、 $F_c=71.2\%$ を考慮して道路橋示方書の液状化判定法に基づき R_L を算出すると、 F_c による粒度補正の影響により、 $R_L = 1.59 \sim 2.35$ という非常に大きな値となり、強度を著しく過大に評価することとなる。

ベンダーエレメント試験は、三軸試験の供試体上下に弾性波の受・発振器を設置し、弾性波の伝播速度を直接計測する試験方法である。最適含水比で D_c を 85%、90%、95% で作成した供試体の有効拘束圧を 49 kN/m²、98 kN/m²、196 kN/m² として計測した V_s と前記の R_L の関係によると、 R_L が高く、有効拘束圧が大きくなるほど V_s が大きい傾向がある。

4. 静的自重変形解析

4.1 解析方法

対象盛土の地震時の変形量を求めるため、静的自重変形解析を行った。静的自重変形解析は、地盤や土構造物の地震に対する解析において、地震動による過剰間隙水圧の上昇に伴う土の強度低下を、土・地盤モデルの弾性係数を低減することで表現し、自重により発生する変形を静的に求める手法である。本研究では、砂質地盤の液状化による地盤の変形を対象とした 2 次元 FEM 変形解析手法である「ALID」を用いた。

「ALID」は、弾性係数を Jambu 式により拘束圧依存性を考慮して各要素に設定するとともに、不飽和領域については土の降伏条件に Mohr-Coulomb の破壊基準を、塑性ポテンシャル関数に Drucker-Prager の式を適用した弾・完全塑性モデル「改良 MC/DP モデル」により弾塑性挙動を表現が可能である。一方、盛土内水位以深の飽和領域については、各要素に R_L を設定し、所定の地震外力（地震時せん断応力比 L ）との関係から液状化に対する抵抗率 $F_L (=R_L/L)$ を計算し、 F_L に応じて土の地震時の弾性係数の低下を設定して静的解析を行い、自重による変形を計算するものである³⁾。本計算は参考文献 4) に示されている方法を基本として実施したので、計算方法の詳細はこれを参照されたい。

本計算では、 V_s に基づく弾性係数から Jambu 式を回帰し、できるだけ V_s 分布に忠実にモデルに適用するとともに、繰返しせん断強度試験及びベンダーエレメント試験により得られた V_s と R_L の関係を利用し、有効拘束圧を考慮しつつ R_L の分布を算出しモデルに適用した。図-6 に V_s 分布から推定した R_L の分布を示す。大きな変形が発生した東側のり面下は R_L が複雑に分布しているとともに、天端直下には R_L が著しく高い領域が天端付近の深さまで迫っており、図-3 に示した V_s 分布の特徴の影響を強く受けている。この結果を解析モデルにできる限り忠実に設定した。また外力 (F_L の分母) である地震動強度については、近隣の K-Net 大町観測点で計測された最大加速度 1,000 cm/s² がモデル内に均一に作用するものとして解析を行った。

また、盛土内水位の設定については、地震被災時は、直前の積雪・融雪により水位が高かったことが推定されているが、地震被災時の水位は計測されていない。この盛土は土の F_c が高いことから、保水特性が高く、かつ透水性が低いことが推察され、現状の水位に対して大きな水位変動がないものと考え、図-4 に示す V_p 測定時の推定水位を解析モデルに設定することとした。

各要素で算定した F_L に基づき、安田・稲垣の方法⁵⁾ 及び豊田らの方法⁶⁾ で弾性係数の低下率を算出して、弾性係数を設定し、自重による変形を計算した。

4.2 解析結果

図-7 に解析による変形図を示す。前述の地震後の

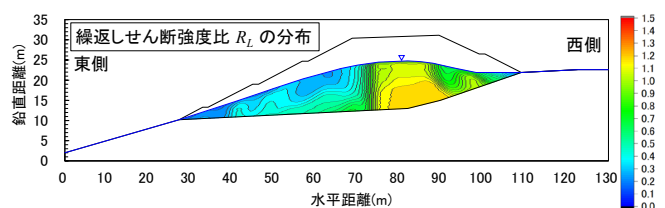


図-6 S 波速度から推定した繰返しせん断強度比の分布

ボーリング調査による平均的な N 値 (5.5~6.0 程度) と、粒度試験による細粒分含有率 ($F_c=71.2\%$) から算出した R_L (1.59~2.36) を設定すると、 F_L が盛土全域で 1.2 を上回り、剛性低下が発生せず、図には示していないが、自重による変形が発生しない計算結果となった。仮に $F_c=50\%$ とした場合、 $R_L=0.3$ 程度となる。実際の設計で一般的に行われている手法に基づき、 $R_L=0.3$ を盛土内に一様に設定して解析を行った結果が図-7 上図であり、下図は V_s 分布から推定した R_L 分布をできる限り忠実にモデル化した解析結果である。

上下図ともに、東側の法肩沈下量は図-1 に示す実被害における法肩沈下量に近い 2m 強となるが、 $R_L=0.3$ を盛土内に一様に設定した上図では、天端中央付近の沈下量が最も大きく、東西両側ののり面がはらみ出す変形となっており、図-1 に示した被害状況と異なる結果となった。一方、 V_s 分布から推定した R_L 分布によりモデル化した下図は、天端の直下に V_s が高く推定 R_L が高い領域が存在する影響で、盛土天端や西側の法肩の沈下やのり面のはらみ出しなどは小さく、東側の法肩に 2.3m 程度の沈下及びのり面のはらみ出しが発生するなど、図-1 の被害状況に近い結果となった。

以上の結果から、盛土内の土の強度の分布を面的に把握し、これをできる限り忠実に解析モデルに設定することで、地震時の変形量の計算精度が向上することが示唆された。ただし、この解析は初の試みであり、①地震時の水位を把握・設定できていない、②地震により盛土内部の構造が乱された状態の V_s に基づいて R_L を推定している可能性がある、③土の物性が面的に把握・設定できていない、④ベンダーエレメント試験の V_s の範囲外の R_L の推定は外挿に基づいている、などの問題点もあることから、今後検討事例を増やし、手法の高度化が必要と考えられる。

5. まとめと今後の方針

盛土の性能に大きな影響を及ぼす盛土材料物性及び盛土内水位について、施工・維持管理の段階での情報

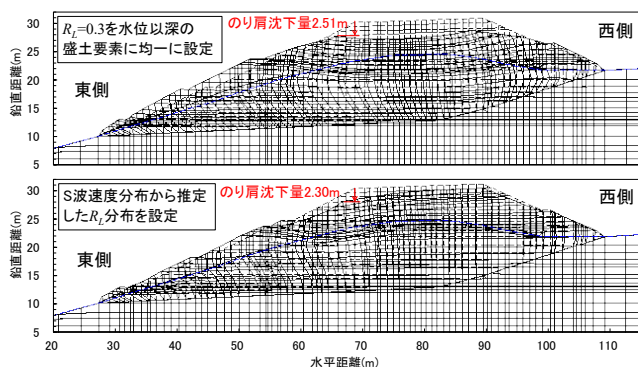


図-7 静的自重変形解析による変形図

を活用し解析パラメータとして設定する手法の開発・提案を行った。

- 1) 平成 19 年能登半島地震等で被災した盛土の標準貫入試験による N 値と細粒分含有率から繰返しせん断強度を推定し、静的自重変形解析を行ったが、 N 値や粒度が不均一であり、崩壊有無の判別は概ねできたものの、実測値との乖離が確認された¹⁾。
- 2) 機械学習 (ディープラーニング) の一手法である再帰型ニューラルネットワークを用いて、一定期間観測した水位を教師データとして盛土内水位の変動予測を行う手法を検討し、その適用性を確認した²⁾。
- 3) 令和 6 年能登半島地震で大きな変形が生じた盛土において、S 波屈折法探査により S 波速度を面的に把握し、現地から採取した土の室内土質試験により土の強度等を把握し、これらを元に静的自重変形解析を行い、実被害の変形を概ね表現できた。

本研究で達成した盛土の強度や水位の面的、空間的な把握技術は、既設盛土の性能評価、追加対策の要否やその必要規模の把握などにも活用可能であることから、精度向上など継続して研究を進めるとともに、研究成果の紹介等により、社会実装・普及に努める。

参考文献

- 1) 佐々木直也, 東拓生, 佐々木哲也, 加藤俊二: 谷埋め高盛土の地震時の変形に関する被災事例を対象とした解析手法の検討, 第 77 回土木学会年次学術講演会, III-90, 2022 年 9 月
- 2) 佐々木直也, 東拓生, 佐々木哲也, 加藤俊二: 再帰型ニューラルネットワークによる谷埋め盛土の盛土内水位予測手法の検討, 第 78 回土木学会年次学術講演会, CS14-17, 2023 年 9 月
- 3) (株)地盤ソフト工房: ALID/Win 地盤土の構成則 (第 3 版), 2016 年 5 月
- 4) 東拓生, 加藤俊二, 佐々木哲也: 谷埋め高盛土の地震時変形挙動に関する解析手法の検討, 土木技術資料, 第 62 巻 12 号, pp16-19, 2020 年 12 月
- 5) 安田進, 稲垣太浩, 長尾和之, 山田真一, 石川敬祐: 液状化を含む繰返し軟化時における種々の土の変形特性, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp525-526, 2005 年 7 月
- 6) 豊田耕一, 杉田秀樹, 石原雅規: 河川堤防の地震被害事例に基づく液状化地盤の剛性に関する検討, 第 4 回日本地震工学会大会-2005 梗概集, pp226-227, 2005 年 11 月

A STUDY ON THE PERFORMANCE EVALUATION OF EMBANKMENTS CONSIDERING UNCERTAINTIES IN EMBANKMENT MATERIALS AND SUBGRADE CONDITIONS

Research Period: FY2023-2025

Research Team: Soil Mechanics and Dynamics Research Team,

Geology and Geotechnical Engineering Research Group

Author: ISHIHARA Masanori

AZUMA Takuo

KATO Shunji

Abstract: This research aims to improve the performance of embankments by developing and proposing a method for setting embankment material properties and embankment water level as analytical parameters, utilizing information obtained during the construction and maintenance phases, thereby improving the reliability of embankment performance evaluation throughout the construction and maintenance phases.

Static self-weight deformation analysis was performed on structures damaged by past earthquakes. While the constants showed considerable variation, and the presence or absence of collapse could be generally determined, discrepancies with measured values were observed.

A method for predicting fluctuations in the water level within the embankment using a recurrent neural network based on water level data observed on-site was investigated, and the applicability of the prediction method was confirmed.

In the embankment that experienced significant deformation during the 2024 Noto Peninsula Earthquake, S-wave velocity was measured using seismic exploration, and the physical properties of the soil were determined through laboratory soil testing of soil samples collected on-site. Based on this, static self-weight deformation analysis was performed, and the deformation of the actual damage was generally represented.

Keywords: Road embankments, Material properties, Seismic wave exploration, Laboratory soil testing, Static self-weight deformation analysis

論文リスト

● 学術誌等による成果普及

査読無し論文・国内（計 1 本）

- c-1) 東拓生、佐々木哲也、加藤俊二、佐々木直也：谷埋め高盛土の地震時崩壊事例と耐震性照査手法、土木技術資料、第 65 号第 9 巻、pp16-19、2023.9

学会発表等その他（計 4 本）

- e-1) 東拓生、佐々木哲也、加藤俊二、佐々木直也：谷埋め高盛土の地震時変状に及ぼす盛土幅の影響、第 16 回日本地震工学シンポジウム、Day1-G419-23、2023.11
- e-2) 佐々木哲也、東拓生、加藤俊二、佐々木直也：谷埋め高盛土の地震時変状の評価手法の検討、第 16 回日本地震工学シンポジウム、Day1-G415-01、2023.11
- e-3) 東拓生、佐々木哲也、加藤俊二：谷埋め道路盛土の地震時変状の評価法及び対策手法、第 35 回日本道路会議、4032、2023.11
- e-4) 東拓生、佐々木哲也、加藤俊二：細粒分を多く含む土を用いた谷埋め高盛土の地震時変状に関する解析、第 59 回地盤工学研究発表会、23-11-4-04、2024.7