

表面波探査を活用した 既設鉄道盛土の耐震診断に関する検討

高木 翔太¹・松丸 貴樹²・佐藤 武斗³・富田 佳孝⁴
濱田 吉貞⁵・塩谷 敦⁶

¹正会員 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38)

E-mail: takagi.shota.05@rtri.or.jp

²正会員 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38)

E-mail: matsumaru.takaki.35@rtri.or.jp

³正会員 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38)

E-mail: sato.taketo.67@rtri.or.jp

⁴正会員 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38)

E-mail: tomida.yoshitaka.90@rtri.or.jp

⁵正会員 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部構造技術室 (〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田 2-4-24)

E-mail: yoshisada-hamada@westjr.co.jp

⁶正会員 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部構造技術室 (〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田 2-4-24)

E-mail: atsushi-enya@westjr.co.jp

既設鉄道盛土の耐震診断で用いる土の強度に関する設計用値（以下設計用値）は、現地の盛土より採取した試料の室内土質試験や密度検層等に基づき設定することを基本としている。現状の設計用値は、軌道から離れた代表点で採取した試料の調査結果に基づき設定され、列車の繰返し荷重に伴う盛土の密実化等既設盛土の不均一性を考慮できない。

本研究では、耐震診断手法の高度化を行うことを目的として、表面波探査により面的に評価したせん断波速度分布を、さらに不飽和状態での強度特性を考慮する設計用値の評価方法について検討した。その結果、表面波探査を用いることで盛土内部の密度分布を推定でき、不飽和土の強度特性を考慮した盛土の耐震性評価を行うことで、従来よりも合理的な耐震診断が可能となることを確認した。

Key Words: railway embankments, seismic diagnosis, shear wave velocity, unsaturated strength

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以降、鉄道分野の各種既設構造物において耐震補強が進められ、既設鉄道盛土においても都市部¹⁾や新幹線²⁾等で積極的に耐震診断や必要箇所の耐震補強が行われている。技術基準としては、鉄道における既設土構造物を対象にして耐震診断の手引き³⁾（以下手引き）が整備され、耐震性評価のための調査・試験方法等についてまとめられている。近年では既設土構造物を対象として、従来から行われている飽和状態での三軸試験結果等を基にした耐震診断に加えて、不飽和

強度特性を考慮した耐震診断手法⁴⁾について提案されている。この提案手法により、従来の飽和強度特性を用いた場合と比べて、耐震補強仕様の軽減が可能であることが示されている。一方で、既設鉄道盛土の盛土材料の調査は現地より採取した試料の室内土質試験や密度検層等により行っているため、盛土が均一であると仮定して、地点毎で評価した強度特性を盛土全体に適用されている。これは、盛土の不均質性や列車の繰返し荷重を受けている盛土上部や軌道近傍などの密実化していると考えられる箇所を考慮できないため、面的な地盤情報の取得と診断への活用が重要となる。

そこで、本研究では耐震診断手法の高度化を行うことを目的として、表面波探査⁵⁾により面的に評価したせん断波速度分布に着目し、表面波探査を利用した土の強度に関する設計用値（以下設計用値）の推定方法の検討を行った。設計用値の推定にあたり、室内土質試験にて、せん断波速度の変動に及ぼす密度、拘束圧、载荷サクシヨンの大きさや履歴の影響について評価を行うとともに、設計用値の推定方法の検証のため、既設鉄道盛土を対象に表面波探査を実施した。さらに、検討した設計用値の推定方法を用いた既設鉄道盛土の耐震診断への活用方法を提案した。その際に、既往の検討で示されていなかった不飽和土を対象とした室内土質試験から得られる不飽和強度特性の活用方法についても示す。

既設鉄道盛土の現地調査イメージを図-1に示す。現在行われている一般的な耐震診断では、試料採取位置の代表点での密度を用いて飽和三軸圧縮試験を実施し、設計用値を推定していた。それに対し、検討した方法では、現地調査から得たせん断波速度より盛土内部の密度分布を求め、その密度から代表点の土質試料を用いて、飽和あるいは不飽和三軸圧縮試験を複数実施し設計用値を推定する。

2. 対象とした盛土の概要

調査の対象としたのは関西地区にある複々線の既設鉄道盛土で、図-2に示すとおり高さ5.6m、法面勾配1:1.5の盛土形状である。盛土材料は図に示す法肩から4.1m、深さ0.15mの位置で砂置換により密度の測定を行うとともに試料を採取し、各種室内土質試験を実施した。三軸圧縮試験等については再構成試料により行っている。盛土材料の物理試験結果を表-1に、粒度分布を図-3に示す。当該盛土材料は細粒分礫質砂（SFG）に分類され、鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物⁶⁾（以下土構造標準）で示される土質区分うち粒度配合の悪い砂礫、砂質土等の土質3となる。最大乾燥密度、最適含水比はそれぞれ1.76g/cm³、16.2%であり、試料採取位置における乾燥密度は1.38g/cm³（ $D_r=79\%$ ）、含水比17.6%であった。

図-2中に柱状図を示すが、支持地盤は表層がN値2程度の緩い粘性土地盤が3m続き、4.5m以深はN値30以上の砂礫地盤が続いている。

3. せん断波速度の評価

2章で示した盛土を対象として、室内土質試験結果および表面波探査により、せん断波速度の測定を実施した。室内土質試験にてせん断波速度を計測する目的は、せん

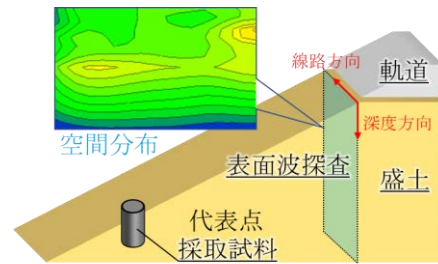


図-1 現地調査イメージ

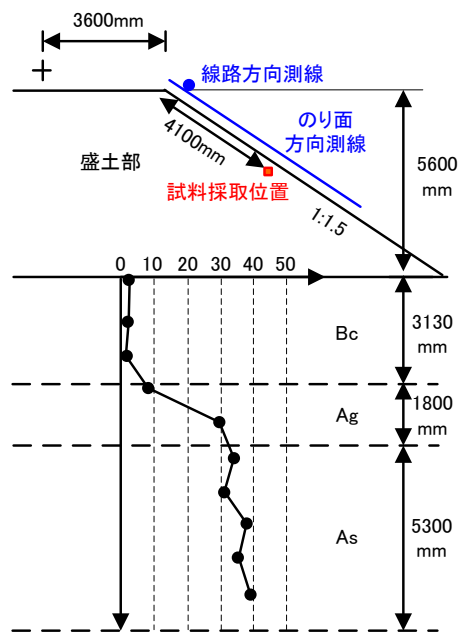


図-2 対象とした既設鉄道盛土断面

表-1 物理試験結果

分類	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	含水比 w (%)	細粒分含有率 F_c (%)
SFG	2.63	1.38	17.6	26.1

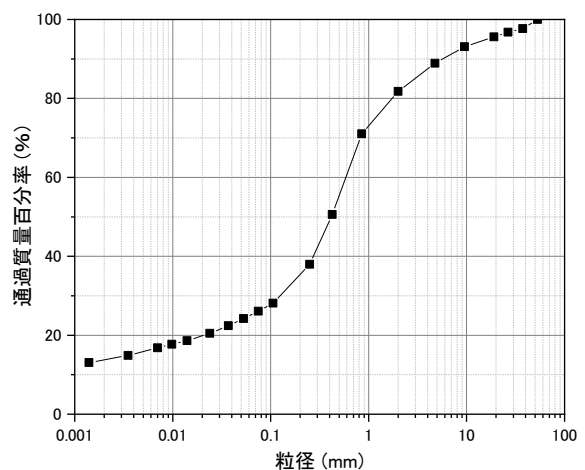


図-3 粒度分布

断波速度に及ぼす影響因子について検討することである。既往の研究においては、盛土材料を対象に締固め密度比や拘束圧等によるせん断波速度の増減への影響が検討されている⁷⁾。実際の盛土は不飽和状態であり飽和度やサクシジョンの大きさがせん断波速度に影響を及ぼすことが考えられる。しかしながら、サクシジョン等の精緻な制御を行い、せん断波速度を計測できる装置そのものが少なく、飽和度やサクシジョンの大きさによるせん断波速度の違いについてはほとんど検討がなされていない。そこで、本研究では不飽和三軸試験装置を改良し、密度や拘束圧に加えて供試体の飽和度やサクシジョンの大きさがせん断波速度に及ぼす影響を検討した。また、室内土質試験結果から得られたせん断波速度をもとに、表面波探査結果を用いて、既設鉄道盛土の密度分布の推定を実施した。

(1) 室内土質試験結果によるせん断波速度計測

a) 試験方法

まず、密度、拘束圧がせん断波速度に及ぼす影響を調べるため、2章で示した盛土から採取した盛土材料より作製した供試体 ($\Phi 50\text{mm}$, $H100\text{mm}$) を用いて、ベンダーエレメント試験 (以下 BE 試験) によりせん断波速度を測定した。試験は JGS0544-2020 に従い、供試体は異なる 3 種類の乾燥密度 ($1.38\text{g/cm}^3 : D_c 79\%$ (現地密度), $1.50\text{g/cm}^3 : D_c 85\%$, $1.58\text{g/cm}^3 : D_c 90\%$) で、現地の採取含水比 $w=17.6\%$ になる条件で作製した。せん断波速度の計測は拘束圧を 25kPa , 50kPa , 75kPa , 100kPa と段階的に変えて実施した。

次に、飽和度およびサクシジョンがせん断波速度に及ぼす影響について検討する方法を示す。試験装置は図4に示す不飽和三軸試験装置を使用し、飽和度およびサクシジョンを変えてせん断波速度を計測した。せん断波速度は新たに不飽和三軸試験装置用に作製したディスクトランスデューサー⁸⁾ (DT) を用いて計測し、図の試験装置のキャップとペダスタルにそれぞれ受信用 DT と発振用 DT を取り付けている。間隙空気圧はセル内に設置している間隙空気圧計により計測した。供試体 ($\Phi 50\text{mm}$, $H100\text{mm}$) は、乾燥密度 1.50g/cm^3 ($D_c 85\%$) となるように自然含水比 $w=13.9\%$ で作製した。

試験はまず供試体を装置に設置して、通水により見かけ飽和状態としたのち、拘束圧 25kPa の条件のもと、サクシジョンの载荷履歴を $5\text{kPa} \rightarrow 20\text{kPa} \rightarrow 5\text{kPa} \rightarrow 2.5\text{kPa}$ と与えた。せん断波速度は見かけ飽和時から各サクシジョンの载荷過程で計測している。なお、各サクシジョンの载荷過程においては、排気・排水条件のもと間隙水圧 0kPa で所定の間隙空気圧 u_a を与えて、排水量が一定となるまで放置している。

b) 実験結果および考察

拘束圧を変化させてせん断波速度を計測した結果を図

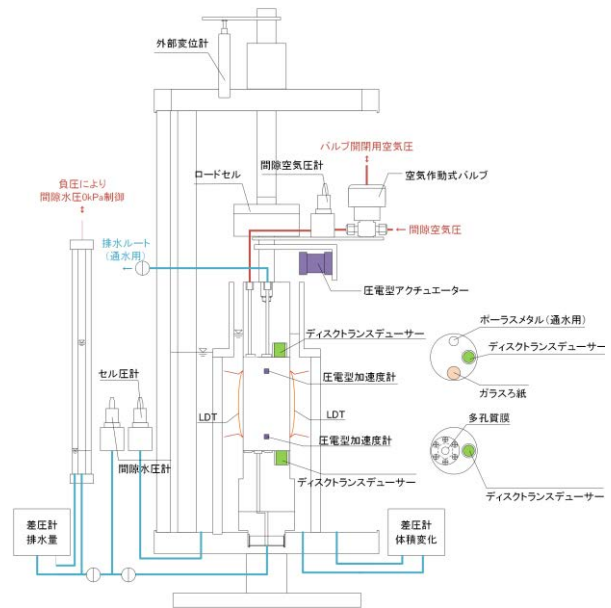


図4 不飽和三軸試験装置 (せん断波速度計測)

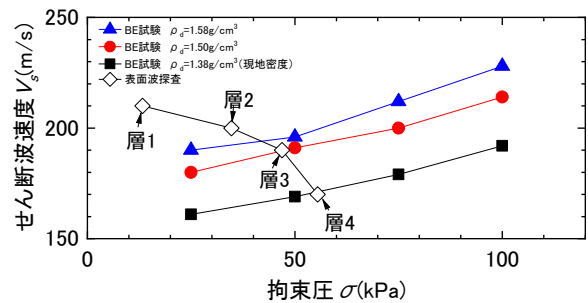


図5 BE 試験および表面波探査から得られたせん断波速度-拘束圧関係

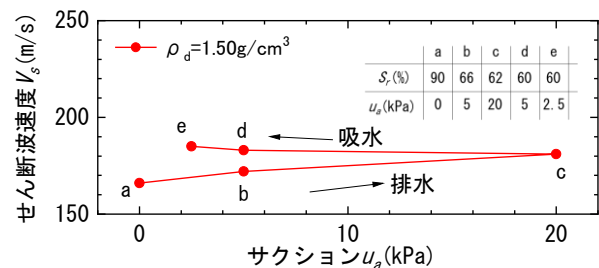


図6 せん断波速度-サクシジョンの変化の関係

5に示す。乾燥密度が $1.38\text{g/cm}^3 \sim 1.58\text{g/cm}^3$ の範囲での変化に対して、せん断波速度は拘束圧に応じて $29 \sim 36\text{m/s}$ の変動であった。一方、拘束圧が $25 \sim 100\text{kPa}$ の変化に対して、せん断波速度は密度に応じて $31 \sim 38\text{m/s}$ の変動をしていた。これは既往の研究⁷⁾で示される傾向と同様であり、密度と拘束圧の増加により、せん断波速度も増加する結果が得られた。

次に、不飽和状態の供試体を対象に、サクシジョンの変化によるせん断波速度の計測結果を図6に示す。このサクシジョンの载荷履歴に伴う飽和度の変化は 90% (見かけ

飽和時) →66% ($u_a=5\text{kPa}$) →62% ($u_a=20\text{kPa}$) →60% ($u_a=5\text{kPa}$) →60% ($u_a=2.5\text{kPa}$) となっていたが、せん断波速度は 19m/s 以内の変動に収まっていた。この結果から前述した密度、拘束圧の変化によるせん断波速度の変動よりも、不飽和状態(飽和度およびサクション)の変化による影響は小さいことが示唆された。これは他の鉄道盛土材料を対象に行った同様の実験⁹⁾においても、同様の傾向が確認されている。このことから、本検討ではせん断波速度の大きさから盛土内の密度を推定する際には、不飽和状態の影響は考慮せず、密度の他にせん断波速度の大きさに支配的な影響を及ぼす拘束圧のみ考慮する。

(2) 表面波探査によるせん断波速度計測

a) 調査方法

表面波探査は盛土の線路方向をのり肩付近で1測線、のり面方向を線路方向の起点終点にて2測線実施した。調査方法は図-7に示すように、受信機を線路方向では1m間隔で24点、のり面方向では0.5m間隔で12点設置し、10kgのかけやを用いて盛土表面を打撃して、発生する弾性波の周波数と伝搬速度を計測する。計測した周波数と伝搬速度から位相速度曲線を求めて、非線形最小二乗法によりS波速度構造を求める。

b) 調査結果

表面波探査から得られたせん断波速度の2次元分布を図-8に示す。線路方向の5~7m位置の表層でバラスト厚の大きい箇所があった影響で、せん断波速度が局所的に増加していると考えられる。その箇所を除くと、全体で160~220m/s程度のせん断波速度分布が計測された。室内試験結果におけるせん断波速度は161m/s~228m/sの範囲で計測されていたことから、両者の値は概ね整合しており、表面波探査から得られたせん断波速度と室内試験結果を比較することにより、盛土内の密度分布の推定が可能であると考えられる。

盛土断面の高さを図-2に示す5.6mとすると、盛土の底面が図-8(a)の水平の点線の位置にあると考えられる。耐震診断では、せん断波速度が小さく、密度が低いと推定される図-8(a)に示す検討断面を抽出し密度の推定を行った。そして、検討断面位置のせん断波速度の分布から、盛土を深度方向に4層に分割した。

各層のせん断波速度と試料採取位置における湿潤密度 1.62g/cm^3 から求めた拘束圧(静止土圧係数を0.5として $\sigma_c=2/3\sigma_v$)を表-2に示し、両者の関係を図-5にプロットした。なお、拘束圧算定上は盛土を湿潤密度 1.62g/cm^3 の全層均一として扱った。図より軌道に近い層1は乾燥密度 1.58g/cm^3 ($D_c 90\%$)の供試体よりもせん断波速度が大きくなる結果となり、列車荷重等により締め固まって密度が増加したと想定される。層2, 3, 4はそれぞれ乾

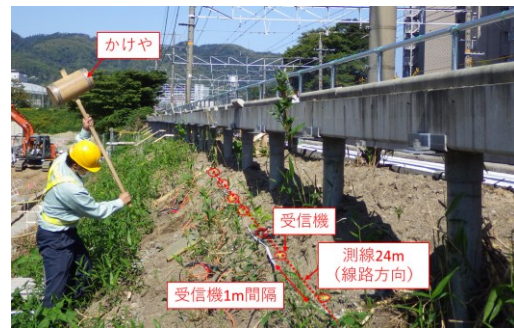


図-7 表面波探査

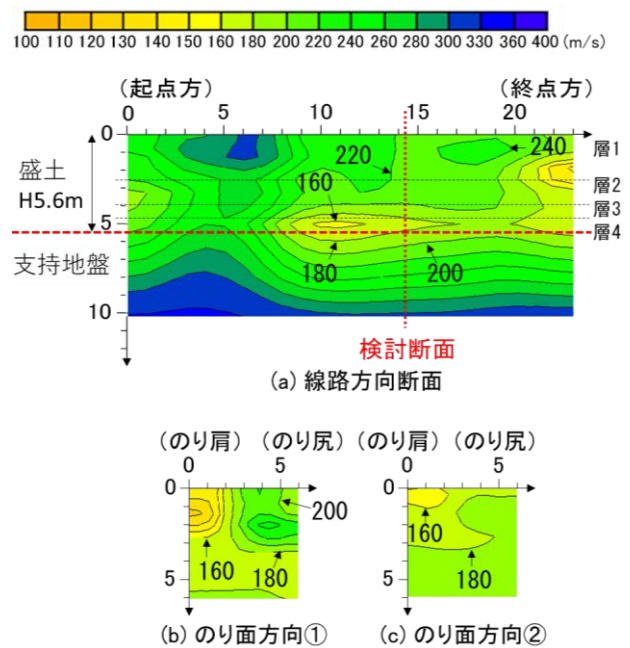


図-8 せん断波速度分布(表面波探査)

表-2 各層のせん断波速度, 拘束圧, 乾燥密度(推定)

層	せん断波速度 V_s (m/s)	拘束圧 σ (kPa)	乾燥密度 ρ_d (推定) (g/cm^3)
1	210	13	1.58
2	200	35	1.58
3	190	47	1.50
4	170	56	1.38

燥密度 1.58g/cm^3 ($D_c 90\%$), 1.50g/cm^3 ($D_c 85\%$), 1.38g/cm^3 ($D_c 79\%$)の結果とおおむね一致する結果であった。層4は現地密度と同程度のせん断波速度となったが、この層は図-2に示す支持地盤との境界付近に位置し、他の箇所に比較してせん断波速度が小さい支持地盤のBc層の特性を取得している可能性が考えられる。しかし、安全側を考慮して、層4の乾燥密度は 1.38g/cm^3 として解析モデルに考慮する。以上を踏まえて、盛土各層の密度を表-2のように設定した。

4. せん断波速度分布の耐震診断への活用

(1) 診断手法の概要

2章で示した既設鉄道盛土を用いて、表面波探査から得られるせん断波速度分布および不飽和強度特性を考慮した耐震診断での活用例を示す。盛土安定に対する応答値の算定や変形に対する耐震診断は、土構造標準に記載される方法に従い、L1地震動に対しては円弧すべり法による安定の照査、L2地震動に対してはニューマーク法による円弧すべり残留変形量と揺すり込み沈下量を加えた残留変形量により照査している。本検討では、手引きで示される耐震診断方法（以下現行法）と今回検討した方法（以下提案法）の比較のため、L1地震動における円弧すべり計算、L2地震動におけるニューマーク法による残留変形量を計算した。

耐震診断について、現行法では代表地点の密度で現地試料による飽和三軸圧縮試験結果から、盛土材料の設計用値の決定をしている。提案法は表面波探査から得られるせん断波速度から盛土内部の密度を室内土質試験結果を用いて推定する。そして、飽和三軸圧縮試験により各密度の設計用値を求め、耐震性評価を実施する。照査結果がNGの場合は、不飽和強度特性を考慮するため浸透計算、不飽和三軸圧縮試験の結果を活用し、粘着力を引き上げ再度耐震性評価を行う。

(2) 飽和状態の設計用値を用いた耐震性評価

a) 飽和三軸圧縮試験

2種類の乾燥密度 1.38g/cm^3 ($D_c79\%$)、 1.58g/cm^3 ($D_c90\%$) の供試体を作製し、飽和三軸圧縮試験を圧密排水条件で実施した。供試体 ($\Phi 50\text{mm}$, $H100\text{mm}$) は自然含水比で4層に分けて締固め、載荷速度 $0.2\%/\text{min}$ で軸ひずみ 15% まで載荷を行った。なお、供試体は装置に設置して通水し飽和させ、 25kPa 、 50kPa 、 75kPa の3つの拘束圧によりせん断を実施している。

飽和三軸圧縮試験より得られた軸差応力 - 軸ひずみ関係を図-9に、内部摩擦角 ϕ と粘着力 c を表-3に示す。 1.50g/cm^3 ($D_c85\%$) での設計用値は 1.38g/cm^3 ($D_c79\%$) と 1.58g/cm^3 ($D_c90\%$) の結果から線形補間により求めた。図-9の軸差応力 - 軸ひずみ関係はピーク強度が見られず、硬化挙動を示していた。表-3をみると密度の上昇とともに ϕ 、 c も増加する結果となっており、また細粒含有率 F_c が 26.3% であることから、一定の粘着力を有していたと考えられる。

b) 計算条件

飽和強度特性を用いた円弧すべり法およびニューマーク法に関して解析モデルを図-10に示す。現行法は盛土を単一層、提案法は表面波探査から得られた図-8(a)の成層地盤とする。現行法では試料採取位置での密度試験よ

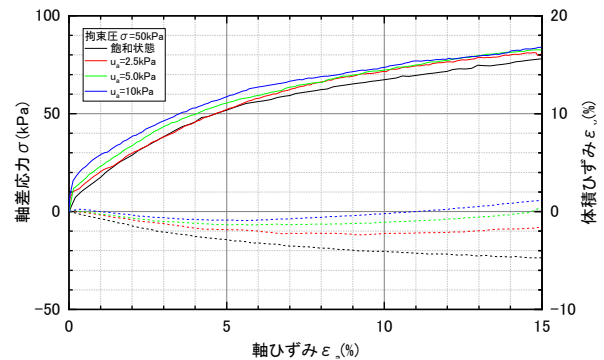


図-9 軸差応力 - 軸ひずみ関係 (拘束圧 $\sigma 50\text{kPa}$)

表-3 飽和三軸圧縮試験結果

湿潤密度 ρ_t (g/cm^3)	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	内部摩擦角 ϕ (deg)	粘着力 c (kN/m^2)
1.62	1.38	19.7	9.75
1.77	1.50	24.0 ^{※1}	11.43 ^{※1}
1.86	1.58	27.0	12.56

※1 線形補間により推定

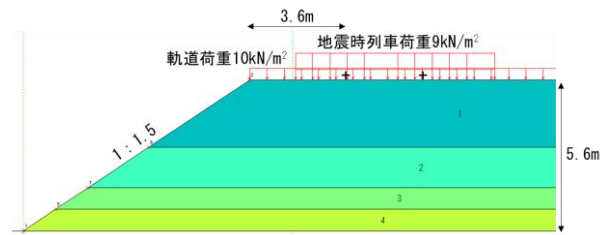


図-10 解析モデル (提案法飽和)

り評価された乾燥密度 1.38g/cm^3 (現地密度) を用い、提案法では表面波探査により推定した表-2で示されている各層の乾燥密度を用いた。計算で用いる湿潤密度は、現行法と提案法ともに試料採取位置における含水比 $w=17.6\%$ より算出した。現行法と提案法ともに内部摩擦角 ϕ 、粘着力 c は使用する密度ごとに表-3に示される値を使用する。

上載荷重は土構造標準に従い、軌道荷重 10kN/m^2 、地震時列車荷重 9kN/m^2 与えた。L1地震動での設計水平震度 $k_h=0.2$ とした。ニューマーク法の計算においては鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計¹⁰⁾ (以下耐震標準) に記載の支持地盤の地盤種別に応じた加速度波形を用いている。地盤種別は各層の N 値と層厚から固有周期を 0.336 と算出し、この固有周期から G3地盤とした。そして、G3地盤における土構造物の設計用加速度波形を耐震標準より参照し、図-11の波形を用いて計算した。

c) 耐震性評価結果

現行法と提案法の耐震診断結果の一覧を表-4に示す。円弧すべり検討結果を見ると、L1地震動の照査値は現

行法 1.176, 提案法 1.055 と盛土内部の密度を考慮することで、現行法よりも提案法の照査値が減った。しかし、提案法により盛土内部の密度を考慮したとしても照査値が 1.0 以下とならなかった。当該盛土においては、過去に 2018 年大阪北部地震など L1 地震動相当の地震を受けていると考えられるが、安定を保っており計算結果と異なる。本検討は飽和状態の設計用値を用いているが、盛土内の密度分布を考慮したとしても照査結果が 1.0 を超えて安定を満足しなかった。この結果は、既設盛土の強度評価が難しく、現状の耐震性評価の課題であることを示唆する。

(3) 不飽和状態の設計用値を用いた耐震性評価

a) 不飽和三軸圧縮試験

2 種類の乾燥密度 1.38g/cm^3 ($D_c79\%$)、 1.58g/cm^3 ($D_c90\%$) の供試体を用いて、不飽和三軸圧縮試験を実施した。供試体 ($\Phi 50\text{mm}$, $H100\text{mm}$) 作製方法は飽和三軸圧縮試験と同様であり、供試体を設置してセル圧 20kPa で通水により見かけ飽和状態とした。そして、サクシジョンの載荷履歴を与えて排水、吸水を行った。なお、拘束圧は 25, 50, 70kPa で排水過程は共通して $u_c=20\text{kPa}$ を載荷し、吸水過程は $u_c=2.5, 5, 10\text{kPa}$ まで除荷した。その後、排気・排水条件のもと、載荷速度 $0.2\%/min$ で軸ひずみ 15% までせん断を行った。

不飽和三軸圧縮試験より得られた軸差応力 - 軸ひずみ関係を図-9 に示す。軸ひずみ 15% 時の残留応力は、飽和度の低下により増加する結果となった。また、飽和三軸試験で得られた内部摩擦角を不飽和三軸試験結果にも適用して求めた粘着力 - サクシジョンの関係を図-12 に示す。飽和度とサクシジョンの変化に伴う拘束圧の増加により見かけの粘着力が増加していると考えられる。

b) 浸透流解析

現行法では盛土を飽和状態とした設計用値を用いているが、既設盛土内には一定の領域が不飽和状態を保つことが確認されている⁴⁾。そのため、地震時においても不飽和強度特性を用いてよいと考える。そこで、盛土に降雨と地震が同時に作用する条件で耐震診断を行うことを前提に、盛土が降雨を受けた状態の不飽和領域を求めるために浸透流解析を実施した。

まず、浸透流解析で必要となる水分特性曲線を得るために保水性試験および透水試験を実施した。保水性試験は加圧法により、透水試験は変水位法により 2 種類の乾燥密度 1.38g/cm^3 ($D_c79\%$)、 1.58g/cm^3 ($D_c90\%$) を用いて行った。保水性試験から得られた水分特性曲線を図-13 に示す。図より密度の変化に伴う水分特性曲線の変化が大きい傾向が見られた。浸透流解析で用いる水分特性曲線モデルは、保水性試験結果をもとに VG モデル¹¹⁾から求めている (図-13)。透水試験から得た透水係数は乾

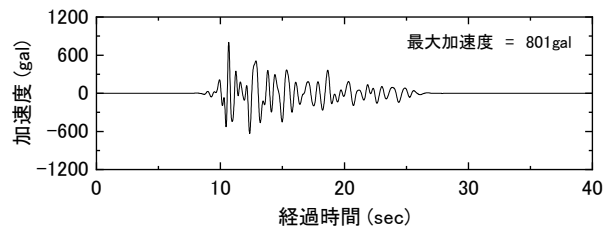


図-11 設計用加速度波形 (G3)

表4 円弧すべり照査結果

	強度特性	L1	L2 地震動 (ニューマーク法)	
		地震動 円弧すべり照査値	残留変形量 (m)	降伏震度
現行法	飽和	1.176	0.89	0.200
	不飽和	1.135	0.76	0.220
提案法	飽和	1.055	0.56	0.260
	不飽和	1.036	0.47	0.277

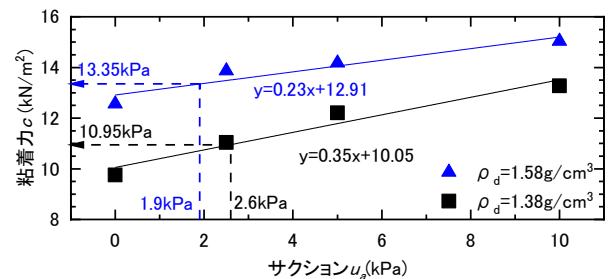


図-12 粘着力 - サクシジョンの関係

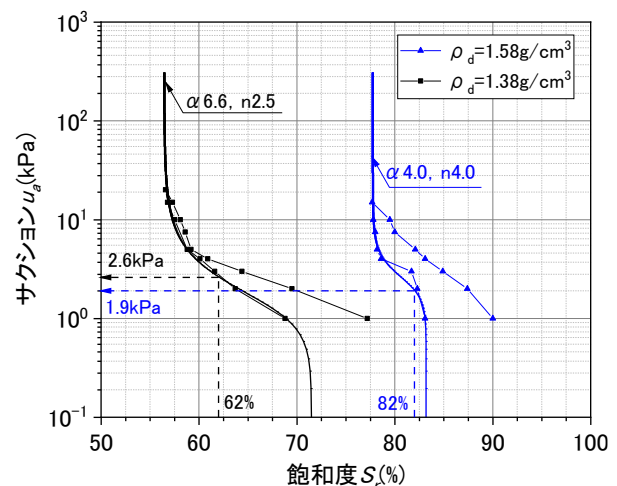


図-13 水分特性曲線

燥密度 1.38g/cm^3 ($D_c79\%$) と 1.58g/cm^3 ($D_c90\%$) に対して、それぞれ $3.16 \times 10^{-6}\text{m/s}$ 、 $5.91 \times 10^{-8}\text{m/s}$ であった。

浸透流解析は保水性試験、透水試験から得られた結果を用いて、図-14 に示す断面で乾燥密度を変えて 2 ケー

ス実施した。盛土形状は既設鉄道盛土で一般的な高さ6m、のり勾配1:1.3とし、基礎地盤は透水性地盤（透水係数 $1.00 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ）としている。また、2種類の乾燥密度 1.38g/cm^3 ($D_c79\%$)、 1.58g/cm^3 ($D_c90\%$)を用いてそれぞれ単一層とした。透水係数は前述した乾燥密度ごとの透水試験結果を使用した。

作用降雨は先行降雨28800時間与えたのち短期降雨24時間与えている。作用降雨の算出は対象とする既設鉄道盛土に最も近いアメダスの枚方の過去のデータから平均年降水量、最大日降水量、最大時間降水量を参照した。先行降雨は定常状態の盛土を再現するために与えており、平均年降水量1412mmとして、2日晴れ、1日降雨の条件（図-15a）とした。短期降雨は定常状態の盛土に短期間雨が作用した際の状態を再現するために与えており、最大日降水量183.5mm、最大時間降水量68mmを用いて、図-15b)に示す降雨とした。なお、短期降雨は盛土内部へ浸透しやすい作用時間の後半に降水量が増加する後方集中型モデルとした。浸透流解析より得られた乾燥密度 1.38g/cm^3 での飽和度分布を図-16に示す。盛土表層付近は $S_r \geq 62\%$ と飽和状態に近く、内部は $S_r < 62\%$ と降雨による飽和度の上昇は小さかった。これは乾燥密度 1.58g/cm^3 においても同様の結果であった。この結果から盛土内部に不飽和強度特性を考慮することとした。

c) 計算条件

不飽和強度特性を用いた円弧すべりおよびニューマーク法に関して解析モデルを図-17に示す。盛土形状、湿潤密度、内部摩擦角、上載荷重は現行法、提案法ともに飽和状態と同様とし、不飽和強度特性を見込むため粘着力を浸透流解析で得られた盛土の飽和度に応じて設定した。盛土の飽和領域、不飽和領域の境界は浸透流解析の乾燥密度 1.38g/cm^3 ($D_c79\%$)で得られた図-16の値を用いて、天端から1.5m、のり先から2.5mの範囲が飽和状態の表層、その表層より内部を不飽和領域とした。

粘着力の設定について、まず浸透流解析より得られた飽和度分布より乾燥密度 1.38g/cm^3 ($D_c79\%$)、 1.58g/cm^3 ($D_c90\%$)の不飽和領域の飽和度はそれぞれ62%、82%と求めた。そして、この飽和度に対応するサクシオンは図-13より2.6kPa、1.9kPaであることから、図-12の粘着力-サクシオンの関係式を用いて、粘着力を 10.95kN/m^2 、 13.35kN/m^2 と設定した。乾燥密度 1.50g/cm^3 ($D_c85\%$)の粘着力は 1.38g/cm^3 ($D_c79\%$)と 1.58g/cm^3 ($D_c90\%$)の結果から線形補間により 12.39kN/m^2 と求めた。

d) 耐震性評価結果

不飽和強度特性を考慮した現行法と提案法の耐震診断結果の一覧を表4に、現行法と提案法によるL1地震動の円弧すべり形状を図-18に示す。飽和状態での耐震性評価結果と同様に盛土内部の密度を考慮することで、L1地震動の照査値は現行法1.135、提案法1.036と減る結

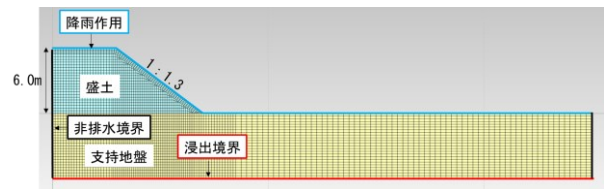


図-14 浸透流解析モデル

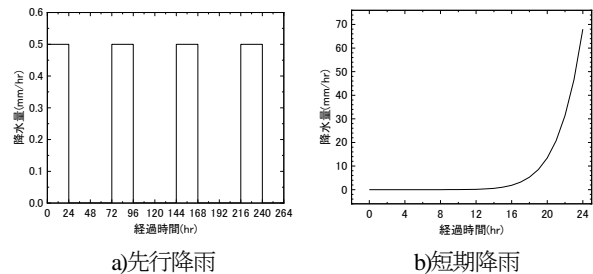


図-15 作用降雨

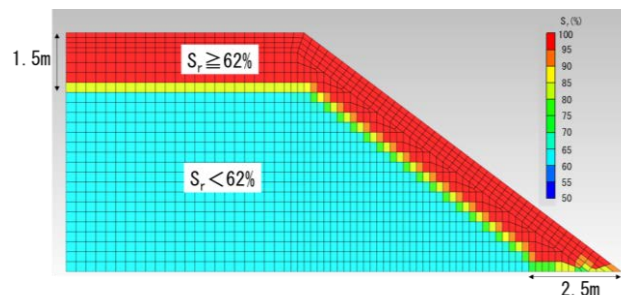


図-16 飽和度分布 (乾燥密度 1.38g/cm^3)

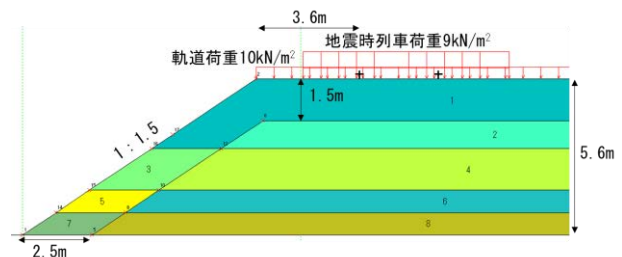


図-17 解析モデル (提案法不飽和)

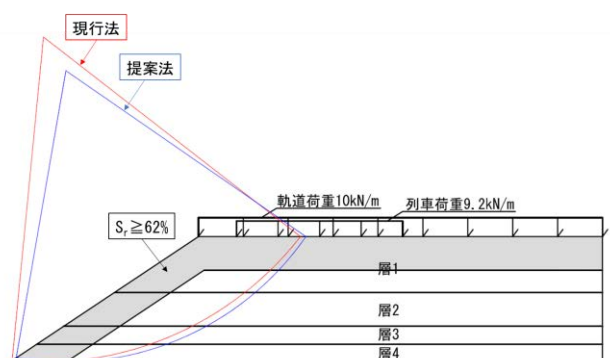


図-18 不飽和状態における円弧すべり計算結果 (L1地震動)

果となった。さらに、不飽和強度特性を考慮することで現行法と提案法ともに L1 地震動の不飽和状態の照査値が飽和状態と比べて 0.041 (現行法), 0.019 (提案法) 減る結果となった。この結果から一定の粘着力を有する盛土材料であったため、見かけの粘着力増加に伴う照査値の減少分としては小さいが、不飽和強度特性を活用する有効性を確認した。また、図-18 の円弧すべり形状を見ると、現行法に比べて提案法の円弧形状が深くなっているのが確認できる。これは、提案法において層 4 が他の層と比べて内部摩擦角 ϕ と粘着力 c が低いいため、層 4 を長く通る円弧形状となったためと考えられる。

次に表 4 の L2 地震動における結果を見ると、現行法の不飽和状態に比べて提案法は算定される残留変位量が 0.29m 減少する結果となった。降伏震度を比較すると、提案法では 0.057 現行法よりも大きくなり、耐震性が向上している結果が得られた。

既設鉄道盛土に対して不飽和強度特性を考慮した耐震性評価を行い、提案法でも L1 地震動の照査値が 1.0 を超える結果となったが、現行法に比べると照査値が 1.0 に近づく結果が得られた。以上のことから、表面波探査により盛土内の密度分布を推定し、さらに不飽和強度特性を活用し、対象盛土の状況をより詳細に考慮することで盛土耐震診断をより合理的に行うことができる可能性があることを確認した。

5. まとめ

既設鉄道盛土の耐震診断において使用する土の強度について、現行法では地点毎の地盤調査結果を用いて飽和三軸圧縮試験結果から得られた値を使用していた。そこで、提案法では面的な地盤情報の取得が可能な表面波探査から得られるせん断波速度と不飽和強度特性を考慮した既設鉄道盛土の耐震性評価手法の検討を実施した。本研究で得られた結果を以下に示す。

(1) 室内土質試験にてせん断波速度の変動に及ぼす影響評価のため、密度、拘束圧、飽和度およびサクシオンに着目した試験を実施した。その結果、せん断波速度の変動に対しては飽和度およびサクシオンよりも密度、拘束圧の影響が大きいことを確認した。

(2) 既設鉄道盛土を対象に実施した室内土質試験より、拘束圧とせん断波速度の関係を整理した。得られた関係図を用いて、表面波探査から得られるせん断波速度分布から盛土内の密度分布を推定できる可能性があることを確認した。

(3) 既設鉄道盛土を対象に、表面波探査の利用と不飽和強度特性を考慮した耐震性評価を実施した。表面波探査から得られるせん断波速度分布と不飽和強度特性を考慮することにより、現行法よりも現地盛土の状態に近い条件で耐震性評価できる可能性を確認した。

REFERENCES

- 1) 油谷彬博, 中村宏, 浜崎直行, 前田剛志, 桐生郷史: 御茶ノ水~水道橋間における土構造物耐震補強, 基礎工, Vol.45, No.12, pp.42-46, 2017.
- 2) 大木基裕, 関雅樹: 土構造物の耐震性診断と対策 6. 東海道新幹線における土構造物の耐震性診断と対策, 地盤工学会誌, Vol.59, No.8, pp.80-87, 2011.
- 3) (公財) 鉄道総合技術研究所鉄道技術推進センター: 鉄道土構造物の耐震診断の手引き (詳細診断編), 2016.
- 4) 佐藤武斗, 松丸貴樹, 中島進, 小湊祐輝, 山田孝弘, 藤原雅仁: 不飽和土の強度特性を考慮した既設盛土の耐震診断法, 鉄道総研報告, pp. 23-28, 2017.
- 5) 川尻峻三, 山口貴之, 橋本聖, 田中悠暉, 中村大, 山下聡: 盛土内の性状把握に対する表面波探査の適用性, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.1, pp61-74, 2018.
- 6) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 2007.
- 7) 竹園紘樹, 三浦みなみ, 高橋正和, 澁谷啓, 川尻峻三: 締固め度及び含水比が土のせん断弾性波速度に与える影響, 地盤工学北海道支部技術報告集, pp.117-122, 2012.
- 8) Laxmi Prasad Suwal and Reiko Kuwano: Disk shaped piezo-ceramic transducer for P and S wave measurement in a laboratory soil specimen, Soils and Foundations, Vol.53, No.4, pp510-524, 2013.
- 9) 高木翔太, 松丸貴樹, 佐藤武斗, 富田佳孝, 杉山健太: 不飽和三軸試験を用いたサクシオンの影響を考慮したせん断波速度の測定, 第 57 回地盤工学研究発表会, 21-4-2-06, 2022.
- 10) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 2012.
- 11) Van Genuchten, M. Th.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol44, pp892-898, 1980

STUDY ON SEISMIC DIAGNOSIS OF EXISTING RAILWAY EMBANKMENTS USING THE SURFACE WAVE METHOD

Shota TAKAGI, Takaki MATSUMARU, Taketo SATO, Yoshitaka TOMIDA,
Yoshisada HAMADA and Atsushi ENYA

The design values for soil strength used in the seismic diagnosis of existing railway embankments are determined based on laboratory soil tests of samples taken from them and density logging. The conventional design values cannot take into consideration the variability of the existing embankments such as the denseness caused by the cyclic loading of the train, and it is due to the sampling location that is away from the railway track. In this study, to advance the seismic diagnosis method, the design values considered the unsaturated strength of the materials and the shear wave velocity distribution obtained by the surface wave method were evaluated. As a result, it is possible to estimate the density distribution in the existing embankment by the surface wave method. In addition, the design value resistance improves considering the unsaturated strength characteristics of the embankment materials. It is possible to make a more rational seismic diagnosis.