

表面波探査を用いた既設鉄道盛土の密度分布の推定

鉄道総合技術研究所

正会員 ○高木 翔太 松丸 貴樹

正会員 佐藤 武斗 富田 佳孝

西日本旅客鉄道株式会社

正会員 塩谷 敦 濱田 吉貞

1. はじめに 既設鉄道盛土の耐震診断の際に使用する土の強度に関する土質諸数値は、現地盛土の不攪乱試料や密度検層等に基づく再構成試料を用いた室内土質試験により求めることを基本としている。この方法では、代表点の密度を用いて盛土の密度を均一なものとして扱うこととなり、実際の盛土が有する列車の繰返し荷重等の影響による密度分布の不均一性を考慮することができない。そこで、本研究では盛土内部の面的な密度分布を推定することを目的として、既設鉄道盛土を対象に、表面波探査¹⁾から得られる面的なせん断波速度分布と室内試験で得られる密度が異なるせん断波速度の比較により、実際の盛土の密度分布を推定する方法を検討した。

2. 対象とした盛土の概要 調査対象とした既設鉄道盛土の概要を図1に示す。対象としたのは水平地盤上の単線盛土で、高さ5.9m、のり面勾配1:1.7程度である。のり中腹で採取した現地盛土材は、土粒子密度 $\rho_s=2.60\text{g/cm}^3$ 、細粒分含有率 $F_c=29.4\%$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.608\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=17.4\%$ であり、細粒分礫質砂(SFG)に分類される。

3. 表面波探査の概要および結果 表面波探査は図1に示すとおり、盛土のり肩付近の線路方向で実施し、測線延長は23mでセンサーを1m間隔で24か所設置した。計測は10kgのかけやで盛土表面を打撃し行い、打撃位置は起点のセンサーから5.5m離れた位置より1m間隔で34か所である。

得られたせん断波速度分布を図2に示す。起点方では表層のせん断波速度が大きい傾向にあり、終点方は他よりも比較的小さい結果であった。また、深度6m付近は盛土と支持地盤の境界があると想定されるが、明確なせん断波速度の違いは見られなかった。

4. 室内試験でのせん断波速度計測 室内試験でのせん断波速度は、自然含水比で2つの乾燥密度 $\rho_d=1.34\text{g/cm}^3$ (Case1)、 1.49g/cm^3 (Case2)で作製した供試体に対して、不飽和三軸試験装置に設置したディスクトランスデューサー²⁾(以下、DT)を用いて計測した。せん断波速度の計測は、拘束圧、飽和度およびサクシジョンの影響を検討するため、はじめに排気・排水条件のもと供試体を装置に設置し、通水により見かけ飽和とした後、基底応力 $\sigma_{net}=25\text{kPa}$ で空気を制御することにより排水・吸水を与えることで4つの载荷サクシジョン(5kPa→20kPa→5kPa→2.5kPa)に対して実施した。詳細の試験方法は参考文献³⁾を参照されたい。拘束圧の影響については、 $\sigma_{net}=25\text{kPa}$ 、 $u_a=2.5\text{kPa}$ でのせん断波速度計測終了後に、 $u_a=2.5\text{kPa}$ の条件のもと、 $\sigma_{net}=50\text{kPa}$ →75kPaと段階的に拘束圧を上げて計測した。

せん断波速度の計測結果を図3,4に示す。図3はサクシジョン-せん断波速度関係を示しており、図のa→bとなると飽和度が10~15%程度低下するとともにせん断波速度は5~17m/s増加し、b→dのサクシジョン変化に対して飽和度はほとんど変動せず、せん断波速度は2~13m/sの変動であった。このとき、図3のa→eの段階では、Case1,2ともに

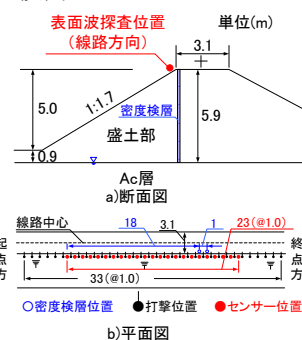


図1 対象とした盛土の概略図

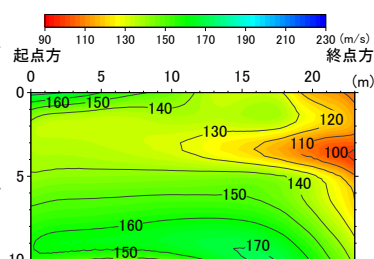


図2 せん断波速度分布

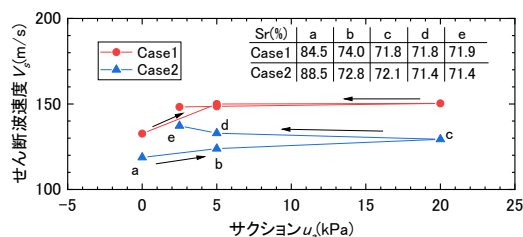


図3 サクシジョン-せん断波速度関係

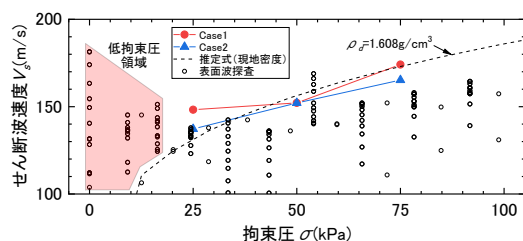


図4 拘束圧-せん断波速度関係

キーワード 表面波探査, せん断波速度, 盛土

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7261

密度変化が小さいことを確認している。密度の変化がせん断波速度に及ぼす影響としては、供試体作製時の密度が小さい Case1 のせん断波速度が 11~26m/s 程度 Case2 よりも大きくなった。この結果は、見かけ飽和過程での圧密により、見かけ飽和後の乾燥密度 ρ_d が Case1 では $1.34 \text{ g/cm}^3 \rightarrow 1.60 \text{ g/cm}^3$ 、Case2 では $1.49 \text{ g/cm}^3 \rightarrow 1.59 \text{ g/cm}^3$ と両ケースで差が小さくなった影響や供試体の端面の影響も含んだ形で計測が実施できる DT は、端面の含水量の違いでせん断波速度が変動すると考えられ、十分には確認できていないが Case1 では Case2 よりも端面の含水量が少ないため、せん断波速度が大きくなったと推測される。次に、図 4 は拘束圧-せん断波速度関係を示しており、拘束圧 25kPa~75kPa の変動に対してせん断波速度は 26~28m/s の変動であった。以上のことから、飽和度・サクシジョンの大きさよりも拘束圧がせん断波速度に及ぼす影響が大きいことが示唆された。この傾向は既往文献³⁾と同様であり、拘束圧を考慮して異なる密度で実施した室内試験のせん断波速度と現地のせん断波速度を比較することで盛土の密度分布の推定を行うこととした。

5. 密度分布の推定 密度分布の推定にはせん断波速度と密度の関係に関する室内試験結果を用いるが、実施可能な試験数に限りがあるため、推定式の利用を検討した。推定式は Shibuya ら⁴⁾に示される関係式から式(1)を用いた。

$$V_s = \sqrt{A \cdot \sqrt{e^\beta \sigma_c^{0.5} / \rho_t}} \quad (1)$$

ここに、 A 、 β ：定数、 e ：間隙比、 σ_c ：有効拘束圧、 ρ_t ：湿潤密度(g/cm^3)、 V_s ：せん断波速度である。湿潤密度 ρ_t は 4 章の結果から飽和度、サクシジョンの影響は小さいことが示唆されたため、乾燥密度として扱い、式の定数 A 、 β は実験値からフィッティングして $A=2699$ 、 $\beta=-1.5$ とした。推定したせん断波速度と実験値の関係を図 5 に示す。推定値は実験値に対して $\pm 10\text{m/s}$ 程度の範囲で概ね整合しており、推定式により異なる密度でのせん断波速度を求めることが可能と考えられる。図 4 に表面波探査から得られた現地の拘束圧-せん断波速度関係を白丸のプロットで示す。拘束圧 σ_c は現地で計測した 3 か所の湿潤密度 ρ_t の平均値 1.67g/cm^3 を用いて鉛直応力 σ_v を図 2 のデータプロット位置で算出し、 $\sigma_c=2/3\sigma_v$ より求めた。図 4 にはのり面中腹で計測した現地の乾燥密度を用いた推定式のプロットを示す。式は拘束圧の二重根号に比例するため、低拘束圧領域では適切にせん断波速度を推定できず、せん断波速度から密度を推定する際には、過大評価する課題がある。そのため、密度の推定では、現地で計測した乾燥密度 $\rho_d=1.608\text{g/cm}^3$ を上限と設定した。

求めた乾燥密度分布を図 6 に示す。なお、6m 以深は支持地盤があると考えられるため参考値として示す。表層付近の低拘束圧領域は上限の密度となり、終点付近で緩い密度が推定された。起点から 18m、19m の地点で実施した密度検層の結果と提案手法を用いて推定した密度の深度分布の比較を図 7 に示す。提案手法の結果は、18m の地点で深度方向に 0.5m ごとに密度を求め、各層の密度は 3 点（例えば 1~2m では 1.0m、1.5m、2.0m）の平均値とした。比較の結果、表層付近の低拘束圧領域の評価においては課題があるものの、3m 付近が緩く、深部では密になる傾向は得られており、一定の精度で密度を推定することが可能であることを確認した。

6. まとめ 既設鉄道盛土を対象として表面波探査から得られるせん断波速度分布を利用して密度分布を推定した。その結果、表層付近の密度の推定において課題があるものの、一定の精度で盛土内部の密度分布を推定できることを確認した。今後は推定した密度分布を活用した耐震診断手法について検討していきたいと考えている。

謝辞 ディスクトランスデューサーを用いたせん断波速度計測の方法について東京大学の桑野玲子教授に詳細な情報を提供いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献 1) 川尻ら：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. 2) Laxmi Prasad Suwal : 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. 3) 高木ら：不飽和三軸試験を用いたサクシジョ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，pp.21-4-2-06~21-4-2-07, 2022. 4) Shibuya al. : Estimate of elastic shear modulus in holocene soil deposit, Soil and foundations, Vol.36, No.4, pp.45-55, 1996.

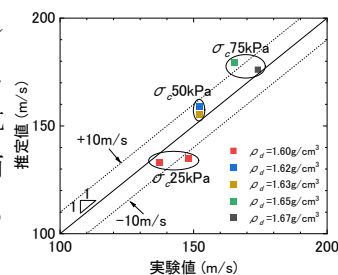


図 5 せん断波速度の推定値-実験値の比較

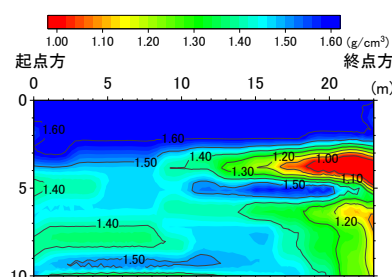


図 6 推定した乾燥密度分布

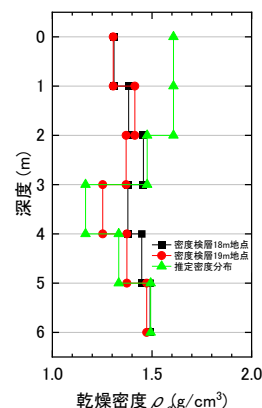


図 7 密度検層との比較