表面波探査を用いた地盤の健全度診断技術に関する研究

広島大学大学院工学研究科	学生会員	○河野	真弓
広島大学大学院工学研究科	学生会員	村上	陽平
広島大学大学院工学研究院	正会員	一井	康二

1. はじめに

水が関与することによって地盤は劣化し、地盤崩壊の危険性が高まる場合がある.そのため、盛土などの土構 造物においては、地盤が健全であるかを定期的に確認し、必要な対処を講じておく必要がある.この目的で実施 される定期的な調査では、低コスト・短期間での調査が求められる.現在、地盤調査法として使用されている表 面波探査は、低コスト、短時間での地盤調査が可能であり、健全度診断技術として有望である.しかし、表面波 探査で把握できるせん断波速度と地盤の劣化状態の関係は明らかになっていない.そこで、本研究では、水の影 響による地盤の劣化とせん断波速度の関係性についてベンダーエレメントを用いた室内実験によって明らかにす ることを目的とする.これにより、将来的には、せん断波速度による地盤の非破壊的健全度診断技術の向上につ なげていく.

2. 実験方法

本研究では、水の影響による地盤の劣化とせん断波速度の関係性について明らかにすることを目的とする.水の影響による地面の劣化要因としては、①水が抜けにくい状態、②細粒分が流出した状態、の2つの状況を考慮する.ここで、水が抜けにくい状態というのは、排水機能の低下により、含水比が上昇する状態のことを指す. また、細粒分が流出した状態というのは、水の流れにより地盤内の細粒分が移動し、地盤の粒度分布が変化する 材料劣化のことを指す.

2.1 含水比の増加による地盤のせん断波速度の変化

本実験では、図-1 に示すように供試体にベンダーエレメントを 設置し、供試体に降雨を与えることで時間経過ごとの含水比の変 化に対するせん断波速度を計測した.時間経過ごとの含水比の変 化は、供試体を乱すことができないため、浸透解析ソフト HYDRUS ¹⁾(以下 HYDRUS)による解析値を使用した.まず、HYDRUS に よる含水比の推定値の妥当性を検討した結果を示す.具体的には、 本実験で使用する土槽に豊浦砂で同様の供試体を作製し、それに 一定時間降雨を行い、降雨終了後のある一定深度の含水比を、電 子レンジ法により測定した.そして、電子レンジ法により得られ た含水比と解析により得られた値との比較を行った.**表-1**に実測 値と解析値の比較を示す.降雨強度の異なる 2 ケースを実施した が、両ケース共に実測値と解析値の値は近い値を示した.この結 果から、HYDRUS による含水比の推定結果はほぼ妥当であるとい える.

まず,図-2に示す土槽に間隙比・初期含水比を管理した供試体 を作成する.図-1に示す位置にベンダーエレメントを設置し,降 雨強度を一定とした雨を3ケース(6.6mm/hr, 13.65mm/hr, 25.13



図-1 ベンダーエレメント設置位置

表-1 実測値と解析値の比較

降雨強度	実測値w (%)	解析值w (%)	誤差 (%)
6.6mm/hr	20.44	19.08	6.65
15.83mm/hr	28.08	30.73	9.44



図-2 実験用土槽の概要

mm/hr) 降らせ、時間経過ごとの地盤の含水比とせん断波速 度を計測した. 試料には豊浦砂を使用した. 表-2, 図-3 に豊 浦砂の物理特性および粒径加積曲線を示す. せん断波速度は ベンダーエレメント試験により測定し,含水比は HYDRUS に よる浸透解析から算出したものを使用した.

図-4に含水比(HYDRUSによる推定値)とせん断波速度の 関係を示す.含水比が上昇するにつれせん断波速度は低下す ることがわかった.また,含水比が14.5~14.8%あたりでは, 微小に含水比が増加しただけでせん断波速度が急激に低下す るという結果が得られた.含水比とせん断波速度の関係は, Case-2とCase-3において,ほぼ同じ値を示している.しかし, Case-1は,他のケースとは異なり,含水比が増加してもせん 断波速度が急激に落ちることなく緩やかに低下する結果とな った.Case-1のみが他のケースとは違う挙動を見せた要因と しては,図-5に示すように,降雨強度が弱い場合は供試体に 加わる水が少量であるため,地盤内の水分布が不均質になり やすいためと考えられる.地盤内の水が少ない箇所では地盤 は固いままであり,せん断波が固い部分を選択的に通ること で平均より大きなせん断波速度が計測されたと考えられる.

2.2 細粒分の流出に伴うせん断波速度の変化

図-6 に示すような底に網を設置した実験用土槽に試料を締 固め、その内部にベンダーエレメントを設置し、細粒分の抜 け出し量とせん断波速度の関係について調べた.土槽の底部 には、供試体内を浸透した水と共に細粒分を受けるための水 槽を設け、定期的に細粒分をろ過により計測した.また、本 実験では、試料を土槽上端より下になるように作製し、図-7 に示すように供試体上部に水をポンプにより汲み上げ、土槽 上端より水がオーバーフローするようにした.水位をオーバ ーフローにより一定に保ち、供試体に一定の水圧を加えて、 細粒分流出を促すことが目的である.試料には中国地方に広 く分布し、破砕性のあるまさ土を使用した.まさ土は風化に も弱く、劣化が進行しやすいという性質を持つ.表-3、図-8 にまさ土の物理特性および粒径加積曲線を示す.



図-6 実験用土槽の概要

表-2 豊浦砂の物理特性

土粒子密度 ρ _。	g/cm ³	2.634
最大密度 ρ _{dmax}	g/cm ³	1.655
最小密度 ρ _{dmin}	g/cm ³	1.345
最適含水比 wopt	%	14.25
最大間隙比	-	0.972
最小間隙比	-	0.602



図-3 豊浦砂の粒径加積曲線



図-4 含水比(推定値)とせん断波速度の関係



図-5 地盤内の水分状態の例



図-7 実験の様子

図-9 に示すように、細粒分の抜け出し量が増加すると、せん 断波速度も低下するという結果が得られた.この要因としては、 細粒分により拘束されていた大きい粒子が、土中の細粒分が抜 けることで動きやすい状態となった可能性があげられる.これ により地盤のせん断剛性が低下するためせん断波速度も低下し た可能性があると考えられる.



3. 表面波探査による地盤の健全度診断手法のイメージ

ベンダーエレメントによる室内実験から,水が関与したこ とで劣化した地盤では,せん断波速度は低下するということ がわかった.このことから,せん断波速度の変化に着目する ことで地盤の健全度を診断できる可能性があることがわかる. 以下に表面波探査を用いた地盤の健全度診断手法の例を示す.

図-10に示すように、まず、盛土等の構造物を新たに作った 場合、表面波探査によりせん断波速度を初期状態として計測 をする.既存の盛土等に適用する場合も、最初に計測したデ ータを初期状態とする.その後、毎月、毎年、あるいは大雨 が長期にわたり続いた後など、定期的にせん断波速度の計測 を行う.これにより初期状態と比べせん断波速度に変化が見 られたかを確認する.せん断波速度の低下が見られた箇所は、 水による何らかの影響により劣化している可能性が高い箇所 と推測できる.この手法の大きな利点としては、広範囲の調 査範囲から、地盤の劣化の疑いがある地点を簡便に抽出する ことができる点である.この手法により低コスト、短期間 での調査が可能になると考えられる.

4. せん断波速度の変化による擁壁の固有振動数の変化

2.1 の実験結果から得られたせん断波速度と含水比の関係を用いて、実スケールの盛土擁壁をモデル化した動的 FEM 解析を実施した.本解析では、図-11 に示す3ケース において解析を行い、締固めが十分である初期状態から、

表-3 まさ土の物理特性

土粒子密度 ps	g/cm ³	2.670
最大密度 pdmax	g/cm ³	1.517
最少密度 pdmin	g/cm ³	1.194
細粒分	%	13.00
最適含水比 wopt	%	12.50
透水係数 K	cm/sec	3.088×10^{-3}



図-9 抜け出し量とせん断波速度の関係



図-10 地盤の健全度診断手法のイメージ



含水比が上昇し、せん断波速度が低下した状態における 擁壁の固有振動数の変化について検討した.本研究では、 解析プログラム FLIP (Ver.7.1.3)²⁾を使用した.

図-12 に解析対象断面の土層区分及び応答加速度の参 照節点の位置を示す.ここでは、単純化のため、盛土・ 擁壁は全て線形弾性体と仮定した.擁壁の解析定数及び 盛土の解析定数は、擁壁の設計事例集³⁾に記載されてい るもの、及び実験で使用したまさ土の物性値を用いた. 表-4 に各ケースにおける解析パラメータを示す.各ケー スにおける盛土のせん断剛性およびヤング率は実験で得 られたせん断波速度と含水比の関係から算出した.解析 では、様々な周波数を均一に含むホワイトノイズを基盤 に与え、擁壁の上端下端の応答加速度からそれぞれのフ ーリエスペクトルを求める.そして、上端と下端のフー リエスペクトルの比を伝達関数と定義し、そのピーク周 波数を擁壁の固有振動数とした.

図-13に、固有振動数と含水比の関係を示す.降雨に より含水比が上昇すると、擁壁の固有振動数は低下する という結果が得られた.固有振動数の変化量は10%と 27%であり、常時微動計測による予測が可能なレベルで ある.よって、表面波探査よりも簡便に行える常時微動 による固有振動数の計測によっても、健全度診断は可能 であると思われる.



図-12 解析断面モデルのメッシュ

表-4 盛土部解析パラメータ

	せん断波速度	含水比	せん断剛性	ヤング率
	V _s [m/s]	w[%]	G[kPa]	E[kPa]
Case-1	90.2	14.6	1.10E+05	2.94E+05
Case-2	57.7	15.4	4.55E+04	1.21E+05
Case-3	82.8	16.9	9.49E+04	2.52E+05



5. まとめ

本研究では、水の影響による地盤の劣化とせん断波速度の関係性について①水が抜けにくい状態、②細粒分が 流出した状態について考慮し、ベンダーエレメントによる室内実験により調べた.その結果、含水比の上昇およ び細粒分率の低下によりせん断波速度は低下することがわかった.よって、水の影響による地盤の劣化によって せん断波速度は変化するということがわかった.これらから、表面波探査によるせん断波速度計測により地盤が 劣化しているかどうかを確認できる可能性があることがわかった.さらに、動的 FEM 解析の結果、降雨による含 水比の上昇によって、擁壁の固有振動数は小さくなることがわかった.固有振動数の変化量は常時微動計測によ る予測が可能なレベルであるため、表面波探査より簡便な常時微動計測による擁壁盛土の健全度診断が可能であ ると考えられる.

謝辞

本研究は,科学研究費補助金若手研究(B)課題番号 22760358 の補助を受けて行われた.ここに記して謝意を 示します.

参考文献

- 1) PC-PROGRESS : http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx
- 2) FLIP 研究会ホームページ: http://www.meisosha.co.jp/flip/index.html
- 3) 村上有誠: 擁壁の設計と施工計画, pp.126, 平成14年.