

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420505

研究課題名(和文) 地表面形状が表面波の分散曲線に及ぼす影響の評価と補正～地盤脆弱部の適切な把握へ～

研究課題名(英文) The effect of irregular shape of ground surface on surface wave-based geotechnical survey

研究代表者

一井 康二 (Ichii, Koji)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70371771

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、対象となる土構造物の形状に応じて、表面波探査の計測結果を補正することで、地盤内の物性分布を高精度に把握できる手法を提案することを目的とした。

まず、細粒分の抜け出しや含水比の変化により地盤のせん断波速度が変化することを確認でき、さらに、潮汐の影響を受ける護岸(矢板式岸壁)における実測から、表面波探査によって地盤内のせん断波速度の変化を評価できることを確認した。

そして、護岸と盛土を対象に、FEMによる表面波探査のシミュレーションと、実測結果を比較した。その結果、不整形な形状のうち、海底面と地表面の標高差による段差は悪影響を及ぼさないが、盛土の地表面傾斜は悪影響を及ぼすことを確認した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the study is to reveal the applicability of geotechnical survey using surface-wave on the earth-structure with irregular shape. First, the variation of the ground condition due to infiltration of small particle in the ground and variation of water content in the ground is verified by laboratory tests. And the variation of shear wave velocity profile in the ground were successfully measured in the sea-wall under tidal effect.

Then, FEM simulation of surface-wave propagation and field measurements were carried out at a sheet-pile type sea wall and an embankment. The irregular shape of sea wall (The gap of the height between sea side and ground side) have minor effect on the measurement results; however, the irregular shape of embankment apparently affect the measurement results. This is related to the position of measurement line (sensors layout), and the computed results of different measurement lines can be used as possible correction factors.

研究分野：地盤工学

キーワード：表面波探査 せん断波速度 盛土 矢板式岸壁 含水比 FEM解析

1. 研究開始当初の背景

道路盛土や河川堤防のような土構造物は施設延長が長い。これに対し、脆弱部位は、旧地形や建設時に用いた材料のばらつきに依存して、局所的に存在する。したがって、ボーリング調査等の通常の直接的な調査法は、点の情報しか得られないため、局所的な脆弱部位を見逃す危険性が高い。

そこで、面的に地盤内の状況を把握するべく、表面波を利用した手法が着目されている。表面波は分散性を有し、周期に応じて地盤内の各深度の物性が位相速度に反映される。そこで、分散曲線を描くことで、地盤内のせん断波速度分布を把握する手法である。表面波の計測には、人工の打撃による振動や常時微動を、複数の受信機で計測する方法がある。しかし、これは、地盤が水平成層（地表面も水平）となっていることを前提としており、盛土や河川堤防のように、形状が不整形である土構造物にそのまま適用することには、問題がある。

2. 研究の目的

対象となる土構造物の形状に応じて、表面波探査の計測結果を補正することで、地盤内の物性分布を高精度に把握できる手法を提案することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、盛土および護岸（矢板式岸壁）を対象に、数値解析による表面波伝搬のシミュレーションおよび表面波の実測を行い、地盤物性の変化を表面波により把握できることの検証と、形状が不整形であることの影響評価法を検討した。

具体的な研究項目は、以下の5点となる。

(1) 地盤物性の変化とせん断波速度

表面波では、せん断波速度の分布が評価されるため、地盤物性の変化とせん断波速度の変化の対応が整理されている必要がある。

そこで、ベンダーエレメントを用いて、地盤内の水分移動に伴う細粒分抜け出し及び地盤内の含水比変化に応じたせん断波速度の変化を評価した。

(2) せん断波速度分布の変化の実測

地盤のせん断波速度分布の変化が、表面波探査結果において評価できることを、潮汐の影響下にある護岸（矢板式岸壁）を対象とした実測により評価した。

(3) 対象施設の形状が不整形である影響

本研究の対象となる盛土や護岸では、地表面の傾斜（盛土）や、海側で地盤が連続していない（護岸）など、形状が不整形である。このため、理論的に想定されるような表面波

が発生しない可能性があり、その影響の評価を数値解析による表面波伝搬のシミュレーションにより評価した。

(4) 舗装路面の影響の検討

本研究の対象となる盛土や護岸では、一般に表層に高い剛性を有する舗装や路盤が存在する。これは、浅部ほど剛性が低下する一般の地盤の剛性分布の傾向とは逆であるため、表面波探査の計測結果に悪影響を及ぼす可能性がある。そこで、数値解析による表面波伝搬のシミュレーションにより評価した。

(5) 測線の設置方向が計測結果に及ぼす影響

対象施設の形状が不整形である場合、表面波探査の計測器の配置（測線の方向）により、結果が異なることが考えられた。そこで、盛土を対象とした数値解析による表面波伝搬のシミュレーションおよび実測により、測線の設置方向が計測結果に及ぼす影響を評価した。

4. 研究成果

以下、研究項目ごとに成果を示す。

(1) 地盤物性の変化とせん断波速度

実験の結果として、Fig. 1 に細かい粒子の抜け出し量とせん断波速度の関係を示す。このように、細かい粒子の抜け出し量が増加すると、せん断波速度は低下する。この要因としては、細かい粒子により拘束されていた大きい粒子が、土中の細かい粒子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。このように、地下水の流動等により細かい粒子が流出した場合、地盤条件にもよるが、15%程度のせん断波速度の低下が生じることがあり、これを検出できれば、地盤の健全度を診断できると考えられる。

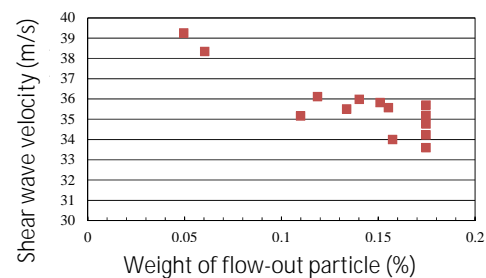


Fig.1 粒子の抜け出しとせん断波速度

Fig.2 には含水比とせん断波速度の関係を示す。このように、含水比の変化により、10～40%程度のせん断波速度の変化が生じることが確認できた。盛土等において排水機能が低下して含水比が増加した部位は脆弱部と判断できることから、この結果に基づくと表面波探査で得られたせん断波速度の分布から、盛土等の脆弱部の検出が可能であることが確認できた。

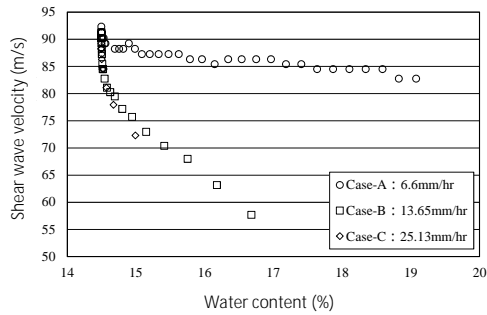


Fig. 2 含水比の変化とせん断波速度

(2)せん断波速度分布の変化の実測

広島市内の護岸（矢板式岸壁）において、潮汐の変化に合わせて表面波探査によるせん断波速度の評価を行った。

この結果、Fig. 3 に示すように、潮汐変化による地下水位変動に整合するように、地盤内のせん断波速度が変化することを確認できた。

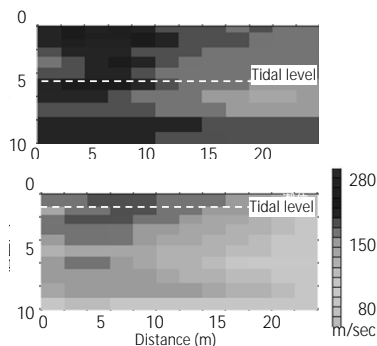


Fig. 3 潮汐に伴うせん断波速度の変化
(上：干潮時、下：満潮時)

(3)対象施設の形状が不整形である影響

広島市内の護岸（矢板式岸壁）を2次元のFEMでFig. 4 に示すようにモデル化し、表面波探査のシミュレーションを行った。解析時に設定した地盤物性に対応するせん断波速度分布が得られることを確認した後、護岸構造を撤去して陸側地盤がそのまま延長するような仮想的なモデルも検討し、海底面と地表面の標高の違いによる段差が表面波探査で計測されるせん断波速度分布に及ぼす影響を評価した。

検討の結果、この事例では、この程度の段差であれば、段差が表面波探査の測線の端部に位置することもあって、計測結果に及ぼす影響は小さいことを確認した。

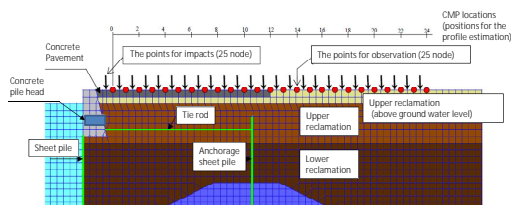


Fig. 4 FEM モデル（解析範囲の一部を表示）

(4)舗装路面の影響の検討

Fig. 4 に示した FEM モデルにおいて、表層の舗装のモデル化の有無による影響を評価した。

Fig. 5 に解析結果の一例として、深さ方向のせん断波速度分布の評価結果を示す。舗装をモデル化した Case-1, case-2, case-5 では、せん断波速度分布を過大に評価することが明らかとなった。この理由としては、一般のアスファルト舗装とは異なり、岸壁エプロン部の舗装はコンクリート舗装であったことが考えられる。

実測では、表面波探査により評価したせん断波速度分布とスウェーデン式サウンディング試験結果から推定したせん断波速度分布がFig. 6 に示すようにおおむね一致しており、解析結果ほどの舗装の影響は認められない。この理由は、解析ではコンクリート舗装が地盤に密着するようにモデル化しているのに対し、実際にはコンクリート床板下面に微小な空隙等が存在するなど、実際の舗装路面の状況が想定される状況と異なっている部分も多いためではないかと推察している。

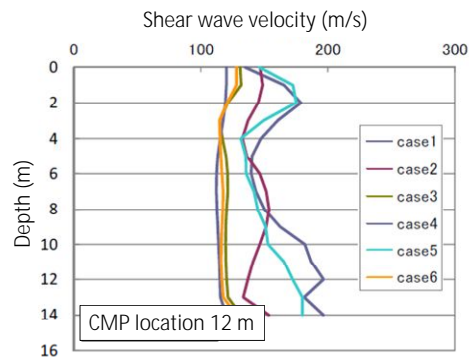


Fig. 5 せん断波速度分布の解析結果の例
(舗装をモデル化したケースでは過大評価)

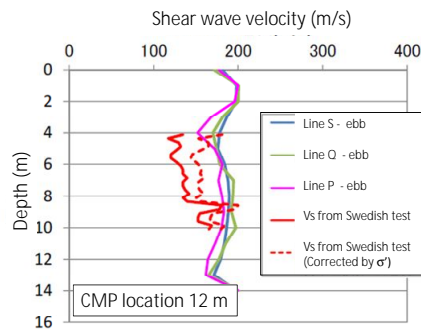


Fig. 6 原位置のサウンディング試験の結果と表面波探査の実測のそれぞれから求めたせん断波速度分布の比較

(5)測線の設置方向が計測結果に及ぼす影響

実際の盛土での表面波探査では、維持管理用の通路の位置に応じて、盛土に並行した測線が設置できるとは限らない。そこで、Fig. 7 に示すように盛土に並行な測線と盛土に直交する測線での結果を比較した。測線と計測断面の重なりを Fig. 8 に示す。そして、測

線の設置方向の影響を、測線の交点位置の計測結果により評価した。評価結果を Fig. 9 に示す。ここで Margin(乖離率)とは、直交方向の測線での計測値を並行方向の測線での計測値の平均で除したものである。深度にもよるが、最大で 50% 近く、せん断波速度を過大評価していることがわかる。同様の傾向は、数値解析結果でも確認された。この解析結果を用いることで、測線の方向が異なった場合の解析結果の解釈や補正が可能となる。



Fig.7 盛土直交・盛土並行の2測線

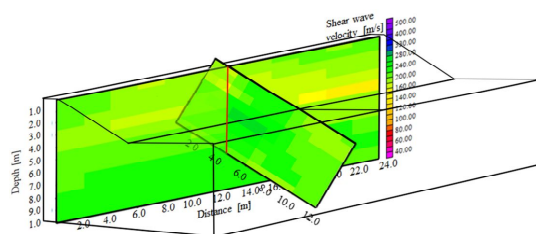


Fig.8 2測線の計測結果の重ね合わせ

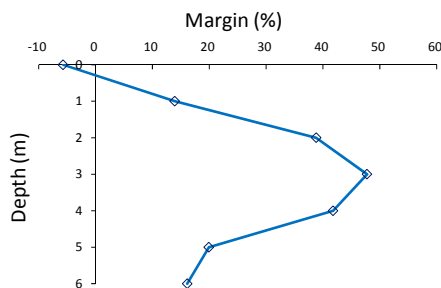


Fig.9 測線の変化による計測結果のずれ (計測結果に用いるべき補正係数の案)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10 件)

1. 一井康二, 河野真弓, 擁壁や盛土の健全度診断への地盤震動計測 適用性と課題, 物理探査, Vol.68, No.2, pp.101-118, 2015 (査読有)
2. Naoki Orai, Koji Ichii, Shiho Ishii, A trial of simple and easy health monitoring for power poles by using ' ipod ', Science China Technological Sciences, Volume 58, Issue 4, pp 712-719, 2015 (査読有)
3. 秦吉弥, 常田賢一, 一井康二, 北口峻輝,

林訓裕, 排水補強パイプの打設に伴うせん断剛性の増加効果を考慮した高速道路盛土の耐震性の評価, 地盤と建設, Vol.33, No.1, pp.19-26, 2015 (査読有)

4. 村上雄亮, 一井康二, 河野真弓, 土の引張強度に及ぼす含水比の影響, 地盤工学会中国支部論文報告集, 地盤と建設, Vol.32, pp.157-162, 2014. (査読有)

5. Koji Ichii, Keisuke Kitade, Mayumi Kawano, Ikuo Taguchi, Surface Wave-Based Health Monitoring Method for a Sheet Pile Quay Wall, International Journal of Structural Stability and Dynamics Volume 14, Issue 05, 1440009 (18 pages) DOI: 10.1142/S0219455414400094, 2014. (査読有)

6. Yoshiya Hata, Atsushi Nozu, Koji Ichii, Variation of earthquake ground motions within a very small distance, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 66, November 2014, Pages 429-442, doi:10.1016/j.soildyn.2014.08.006, 2014. (査読有)

7. 北出 圭介, 一井 康二, 河野 真弓, 栗原大, 田口 依久夫, 港湾構造物の健全度診断のための表面波探査の適用性の検討, 地盤工学ジャーナル, Vol. 9, No. 4, p. 495-510, 2014. (査読有)

8. 北出 圭介, 一井 康二, 高町 茉莉, 松野隆志, 井合 進, 飛田 哲男, 不同沈下する粘性土地盤上の砂質地盤の N 値の変化に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, p. I_751-I_760, 2014. (査読有)

9. 秦吉弥, 魚谷真基, 常田賢一, 一井康二, 北口峻輝, 林訓裕, 排水補強パイプの打設に伴う盛土内におけるせん断剛性の増加効果, 地盤工学会誌, Vol. 62, No.7, pp.16-19, 2014 (査読有)

10. 秦吉弥, 一井康二, 野津厚, 酒井久和, 高盛土の残留変形に影響を及ぼす入力地震動の周波数帯域に関する基礎的検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.4, pp.747-759, 2014 (査読有)

[学会発表](計 8 件)

1. 藤木昂, 秦吉弥, 村田晶, 湊文博, 常田賢一, 古川愛子, 一井康二, 長野県白馬村神城地区における高密度常時微動計測, Kansai Geo-Symposium 2015, 2015年11月20日, 大阪市立大学 学術情報総合センター
2. Hata, Y., Ichii, K., Nozu, A., Maruama, Y. and Sakai, H., Comparison of monitored and estimated microtremor H/V spectra after the large-scale earthquakes at a ground disaster site in Fusa District, Abiko City, Japan, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Christchurch, New Zealand, 2015年11月1~5日, Air Force Museum

3. 藤木昂, 秦吉弥, 村田晶, 湊文博, 常田賢一, 古川愛子, 一井康二, 吉川登代子, 高密度常時微動計測に基づく長野県白馬村神城地区におけるサイト増幅特性の評価, 第35回地震工学研究発表会, 2015年10月6日~7日, 東京大学生産技術研究所

4. Hata, Y., Ichii, K. and Nozu, A., Practical assessment on seismic damage to an airport runway based on 2-D and 3-D non-linear FEM analyses with special reference to crack occurrence, 4th International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster mitigation and Rehabilitation, Kyoto, Japan, 2014年9月16~18日, Uji Obaku Plaza, Kyoto University

5. Mayumi Kawano, Keisuke Kitade, Yusuke Murakami, Mari Takamachi, Tatsuhiko Ito, Koji Ichii, Ground health monitoring of a slope of constructed fill using the surface wave method, 4th International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster mitigation and Rehabilitation, Kyoto, Japan, 2014年9月16~18日, Uji Obaku Plaza, Kyoto University

6. Naoki Orai, Koji Ichii, A study on seismic resistance evaluation methods for embankments with the consideration of the effect of rainfall, 4th International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster mitigation and Rehabilitation, Kyoto, Japan, 2014年9月16~18日, Uji Obaku Plaza, Kyoto University

7. Hata, Y., Ichii, K., Maruyama, Y. and Sakai, H., Continuous observation of microtremor at a geodisaster site before and after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, Turkey, 2014年8月24~29日, The Istanbul Convention & Exhibition Centre

8. 秦吉弥, 駒井尚子, 常田賢一, 一井康二, 常時微動H/Vスペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に基づく強震波形の評価~2001年芸予地震によって被災した宅地造成地を例として~, 第52回日本地すべり学会研究発表会, 2013年8月28日~9月1日, 島根県民会館

6. 研究組織

(1) 研究代表者

一井 康二 (Koji Ichii)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：70371771

(2) 研究分担者

秦 吉弥 (Yoshiya Hata)