

地盤最表層の S 波インピーダンス測定手法の開発 S-wave impedance measurement of uppermost material in ground surface layers

○後藤浩之・田中伸明・澤田純男・稲谷栄巳

○Hiroyuki GOTO, Nobuaki TANAKA, Sumio SAWADA, Hideki INATANI

S-wave impedance is one of the most effective parameters used to study seismic wave propagation, e.g., the value for the uppermost material of the ground surface layer controls the magnitude of site amplification. We propose a new approach to measure the S-wave impedance of the uppermost material in ground surface layers. First, a circular disk is set on the ground surface and it is vertically loaded by sinusoidal wave excitation. When the time series of loading velocity is synchronized to the reaction force, the ratio of the reaction force to the loading velocity is proportional to the S-wave impedance. We then estimate the proportionality coefficient from the numerical experiments and check its accuracy. We also discuss the applicability of this new approach and its limitations based on numerical experiments for inhomogeneous media: a two-layered medium and 1-D random medium. The proposed approach is effective for both cases if we select the appropriate circular disk size.

1. はじめに

表層地盤の揺れやすさを評価する上で、表層の S 波インピーダンスは重要な物理パラメータの 1 つである。最表層の S 波インピーダンスは、Normalized Energy Density (Goto et al., 2011) の保存則を介して地盤の平均的な増幅特性と対応するため、原位置でこれを測定することができれば、対象地点の増幅特性を評価する際の有用な情報となる (例えば、平井・澤田, 2012; 新垣他, 2015)。

これまで S 波インピーダンスを求めるためには、個別に測定あるいは推定された密度と S 波速度が用いられてきた。本研究では、より正確に最表層の S 波インピーダンスを求めることを目指し、地表に設けた剛円盤を調和振動で加振する方法を提案する。

2. 提案手法

地表に剛円盤を設置し、上下方向に調和振動により加振する。この時、加振速度および地盤から受ける反力を測定する [Fig.1]。加振周波数を変えながら、加振速度と反力との位相差がゼロとなる周波数を探し、この周波数におけるそれぞれの振値を記録する。反力振幅を円盤面積で除した平均応力と加振速度振幅の比をとり、さらに係数 I_0 で除すと、媒質の S 波インピーダンスが求められる。

この手法は、Robertson (1966) の解において位相差がゼロとなる周波数が存在すること、およびそ

の周波数における振幅比が媒質の S 波インピーダンスに比例すること、に基づいて構成しされたものである。ただし、Robertson (1966) の解は、円盤下面に摩擦が働かないなど現実的ではない仮定によるものであるため、半無限均質媒質において改めて数値実験により妥当性を確認したところ、係数 I_0 に 2.2788 を用いれば、設定した媒質の S 波インピーダンスを誤差 1% 以内で求められることが確認された。

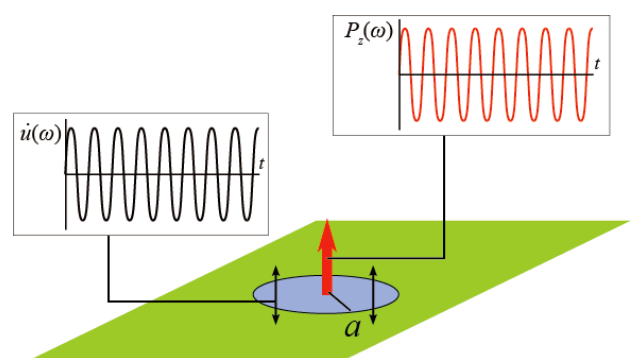


Fig.1 Schematic figure of a rigid circular disk vertically loaded by sinusoidal wave excitation.

3. 数値実験

半無限均質媒質以外での提案手法の適用性を確認するため、均質な表層と基盤とからなる 2 層系地盤、および深さ方向にのみ変動をもつ 1 次元ラ

ランダム媒質を対象に数値実験を行った。いずれも、2次元軸対称円筒座標系における有限要素法を用いている

(1) 2層系地盤

表層厚を変化させた複数の2層系地盤について提案手法を適用した。半無限均質地盤であれば、円盤半径によらず媒質のS波インピーダンスが求められるが、2層系地盤では円盤半径によって求められるS波インピーダンスが異なる。円盤半径が表層厚に比べて20%以下であれば、提案手法により求められる値が表層のS波インピーダンスにほぼ一致する [Fig.2].

ただし、円盤半径に応じて求められるS波インピーダンスが単調に増加するのではなく、表層厚と一致する場合に極小値を持つ。このため、実際には様々な半径を持つ円盤で測定をして、過小評価でないことを確認する必要がある。

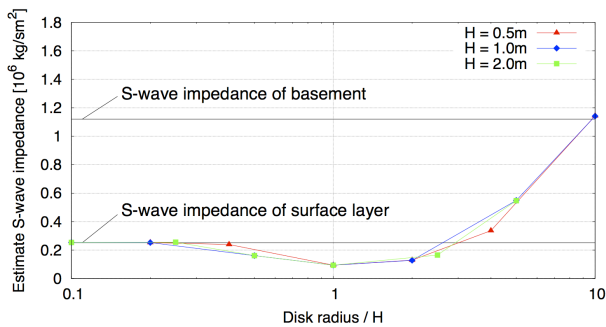


Fig.2 Estimated S-wave impedance for two-layered medium plotted with a normalized disk radius.

(2) 1次元ランダム媒質

表層を構成する実際の媒質は均質ではなく、概ね深さ方向に変動している。そこで、深さ方向の不均質性を持つ表層地盤に対して提案手法を適用し、その妥当性を確認した。不均質性を持つ地盤は、深さ方向にのみ速度および密度の揺らぎを持つ von-Karman 型の1次元ランダム媒質によりモデル化する。平均モデルは、防災科学技術研究所 K-NET 古川 (MYG006) において求められている深さ 20m までの速度、密度値を参考に表層2層と基盤とからなる3層系地盤で与えた。

ランダムに生成した 10 サンプルモデル [Fig.3] それぞれに対して半径 20cm の円盤を用いた提案手法を適用し、最表層のS波インピーダンスを求めた。Fig.4 はそれぞれのサンプルに対して求めら

れたS波インピーダンスと、最表層のS波インピーダンス値のばらつきの範囲とを比較したものである。いずれのケースにおいても、求められたS波インピーダンスは値のばらつきの範囲に概ね収まっており、提案手法の妥当性が伺える。

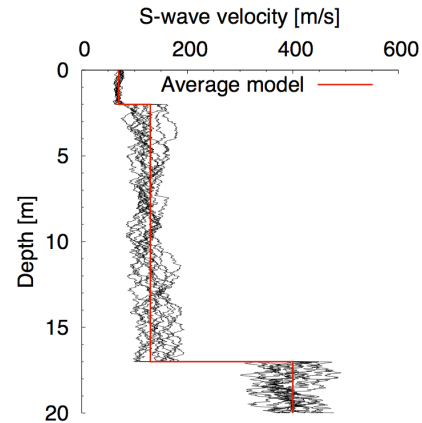


Fig.3 Random models for S-wave velocity ($\varepsilon^2 = 0.1$).

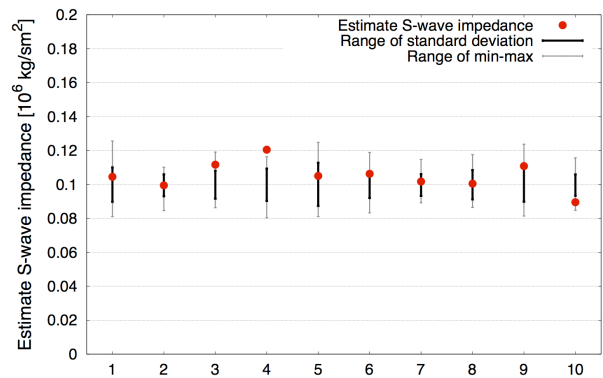


Fig.4 Estimated S-wave impedances for each of 10 sample models.

参考文献

- Goto, H., Sawada, S., Hirai, T. (2011): Conserved quantity of elastic waves in multi-layered media: 2D SH case -normalized energy density-, Wave Motion, 48, 7, 603-613.
- Robertson, I. (1966): Forced vertical vibration of a rigid circular disc in a semi-infinite elastic solid, Proc. Camb. Phil. Soc., 62, 3, 547-553.
- 新垣芳一, 澤田純男, 後藤浩之 (2015): 応答スペクトルの増幅率に寄与する地盤震動パラメータの検討, 平成 26 年度防災研究所研究発表講演会.
- 平井俊之, 澤田純男 (2012): 地震動のエネルギー指標に基づく地震動予測結果の妥当性評価, 日本地震工学会論文集, 12, 1, 31-42.