

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25709039

研究課題名(和文)地盤震動評価法を革新する新しい物理量NEDの現地計測

研究課題名(英文) Measurement of new physical property NED and innovation of assessment method of ground motion amplification

研究代表者

後藤 浩之(Goto, Hiroyuki)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：70452323

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、近年提唱された地盤震動に関する新しい物理量Normalized energy density (NED)の利用を想定し、NEDの利用にあたって必要な表層のS波インピーダンス(S波速度×密度)を原位置で測定する手法を構築し、実際に現地で計測することを目的とした。地表に設けた円盤を鉛直に加振し、その応答特性を利用することでS波インピーダンスを測定する方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：S-wave impedance is one of the most effective parameters used to study the ground motion amplification of soil deposits on the basis of Normalized energy density (NED), which was newly investigated. New approach to measure the S-wave impedance of the uppermost material in surface ground layers was proposed. First, a circular disk is set on the ground surface, and it is vertically loaded by sinusoidal wave excitation. When the time series of the loading velocity is synchronized with the reaction force, the ratio of the reaction force to the loading velocity is proportional to the S-wave impedance. The proportionality coefficient from numerical experiments is estimated and it is applied in the measurement. The measurement error is estimated to be within 1% for the homogeneous half-space case.

研究分野：地震工学

キーワード：地盤震動 物理探査 地震工学

1. 研究開始当初の背景

地震時の表層地盤の増幅特性を面的に評価することは、地域の地震時脆弱性をあらかじめ把握するためにも重要な課題である。特に、工学的基盤より浅い表層での地震動の増幅は、狭い地域であっても大きく変わる場合があり、例えば 2011 年東北地方太平洋沖地震において大崎市古川地区で見られた被害の地域差のように、実際の被害の違いとして顕在化することもある。

表層地盤の詳細な構造・物性が明らかな場合は、数値計算により評価することができる。一方、それらが明らかでない場合には、微地形区分に基づいた平均 S 波速度のように、経験的な情報によって構造を仮定し、対象地点の増幅特性を評価することが一般的であった。

2. 研究の目的

近年、表層地盤の増幅特性に関する新しい物理量 Normalized Energy Density (NED) が提唱されている。NED は、地盤の材料特性や構成に関わらず基盤から最表層まで一定の値をとる、という性質を持っている。この性質により、地盤内部の詳細な構造を把握せずとも様々な特徴を直接調べることができると考えられた。

そこで本研究では、NED を活用した表層地盤の増幅特性の評価法を確立することを目的に、実験および現地計測によって NED を評価する手法の実現を目指した。

3. 研究の方法

NED は、地盤最表層の S 波インピーダンスによって評価できる。このため、NED の評価は、本質的には地盤最表層の S 波インピーダンスの実測に他ならない。通常、原位置試験による方法では、密度と S 波速度を別に測定し、それらを掛け合わせて求める。本研究では、直接地表面を加振することで S 波インピーダンスを測定する新しい装置を開発する。

半無限均質地盤上で剛円盤を鉛直加振した場合の解析解 (Robertson, 1966) によると、円盤の速度と地盤反力から S 波インピーダンスを推定できる可能性が示唆されている (図 1)。このため、より一般的な条件下で可能な数値解析により検討するとともに、同アイデアを実装した動的平板加振装置を作成し、模型実験により検証を実施した。

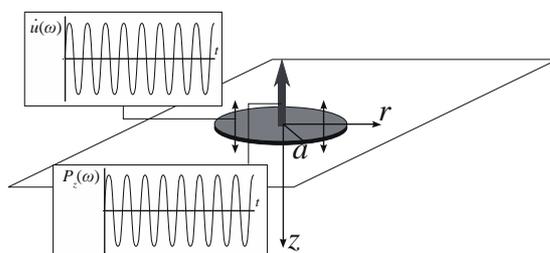


図 1 S 波インピーダンス測定法の原理

4. 研究成果

(1) 数値解析による検証

半無限均質の解析解は、円盤下面に摩擦が働かない条件下で導かれており、現実的ではない。まず、円盤下面の摩擦が十分大きく滑らないものとし、半無限媒質において改めて数値解析を行った。図 2 は、円盤の鉛直振動速度と円盤が地盤から受ける反力のそれぞれについて一例を示したものである。加振周波数によって両者の位相差が異なること、また高周波数ほど位相差が少ないことがわかる。加振周波数を変化させながら、加振速度と地盤反力との位相差、および振幅比を調べたものが図 3 である。ある周波数で位相差がゼロとなること、またその周波数近辺で振幅比が一定値に落ち着くことがわかる。平均応力 (地盤反力 / 円盤面積) と加振速度の振幅比を様々な半無限地盤に対して整理すると、振幅比を S 波インピーダンスで除したものは図 4 に示すようにポアソン比や S 波速度によらずほぼ一定である。

以上の事実に基づき、以下のような測定法を提案した (Goto et al., 2015)。

Step.1: 剛性の高い円盤で地表を鉛直加振し、円盤の速度と地盤反力とを測定する。

Step.2: 速度と地盤反力との位相差がゼロとなる周波数を特定する。

Step.3: その周波数での平均応力 (地盤反力 / 円盤面積) と速度の振幅比を求め、これを係数 (2.2788) で除し、S 波インピーダンスを推定する。

提案法を数値解析による半無限地盤のデータセットに適用したところ、誤差 1% 以内と高い推定性能を示すことがわかった。

同様の数値解析を、水平な表層と半無限の基盤とからなる 2 層系、およびより実際の地盤に近いと考えられる 1 次元ランダム媒質に対して実施した。2 層系の結果 (図 5) によると、大局的には円盤半径が小さいほど表層の S 波インピーダンスが、半径が大きいほど基盤の S 波インピーダンスが求まるが、表層厚と円盤半径が一致する場合に、表層の値より小さな値が求まることが明らかとなった。この傾向は、様々な円盤半径、様々な表層厚で表れるため、実地盤においても過小評価する可能性のあることに留意が必要である。

また 1 次元ランダム媒質では、表層に与えた S 波インピーダンスの揺らぎの範囲に推定値が求まることが確認された (図 6)。ランダム媒質を生成する乱数を変えて同様に数値実験を繰り返したが、同様な結果が得られたことから、理想的な条件下ではここでの提案手法が有効であることが確認された。

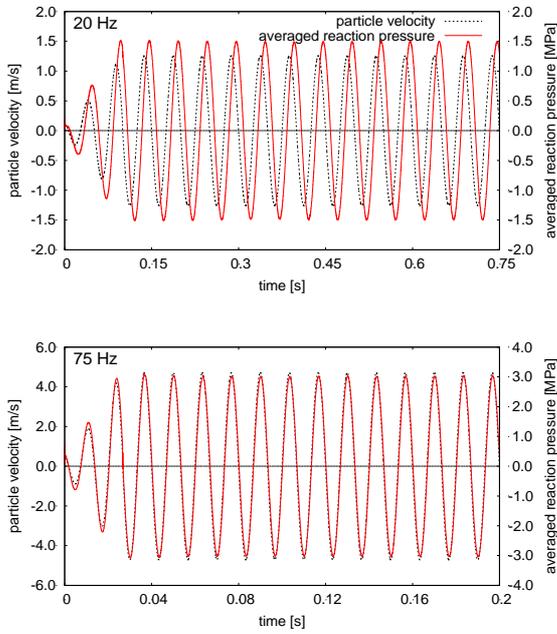


図2 円盤加振速度と地盤反力の一例

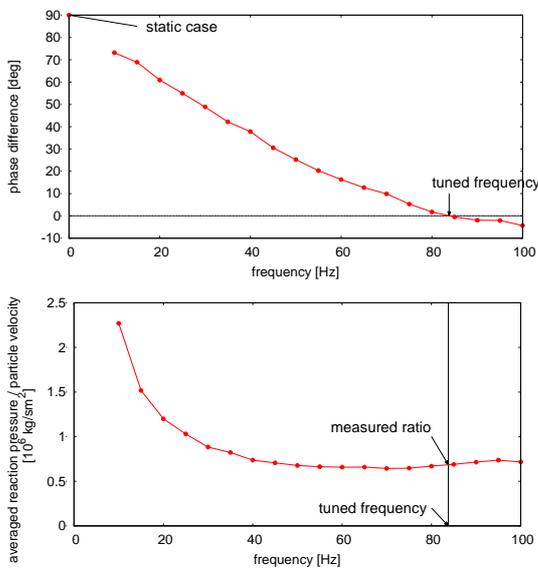


図3 加振周波数による位相差と振幅比の変化

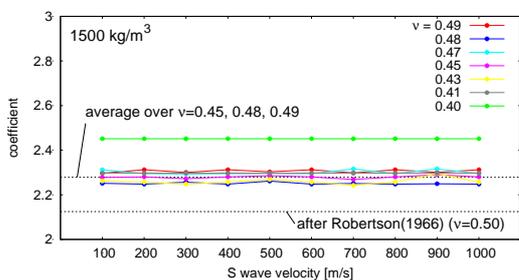


図4 平均応力をS波インピーダンスで除した値のポアソン比・S波速度による変化

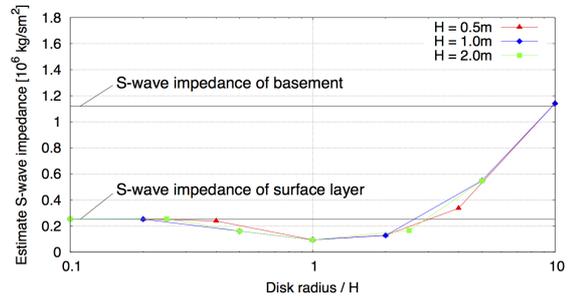


図5 表層と基盤とからなる2層系におけるS波インピーダンスの推定結果

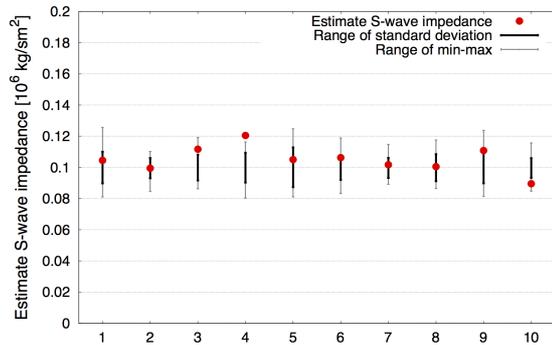


図6 1次元ランダム媒質(10モデル)におけるS波インピーダンスの推定結果

(2) 模型実験による検証

数値解析により提案されたS波インピーダンス測定法を検証するため、図7に示すような模型実験を行った。土槽に砂を敷き詰め、水位を調節しながら飽和地盤と不飽和地盤を摸した模型地盤を用意する。この時、加振によって液状化が生じないように、十分な締め固めを行った。実験に先立ち、板叩き法により測定されたS波の直達波・屈折波から表層地盤のS波速度を、模型地盤に要した砂の重量と水分量から表層地盤の湿潤密度をそれぞれ求め、これを正解値とする。提案手法に従って、円盤を地表に置き、加振器で鉛直加振した際の円盤の運動を加速度センサーで、地盤反力をロードセルで記録した。

提案手法と同様に加振速度と地盤反力との位相差を求めたところ、位相差がゼロとなる周波数が必ずしも求まらないことが明らかとなった。この原因の全てを解明できた訳ではないが、高周波数側でエイリアシングが生じている可能性も考えられるため、安定して位相差が減少する傾向の見られる位相差40-50度の周波数に着目し、その2.4-3.6倍の周波数区間で位相差がゼロになると予測する。また、予測周波数区間において振幅比の平均を求めることによって、図8に示すようにS波インピーダンスを推定することとした。

以上の方法を実験結果に適用したものが図9である。横軸に示す正解値に対し、全般的に30%ほど過小評価である。先の提案手法の通り位相差ゼロを基準として求めていたならば、S波インピーダンスが求まらないため、ここにプロットできない。従って改良法による改善は確かに見られたが、より精度の高い測定法の開発が今後も必要である。

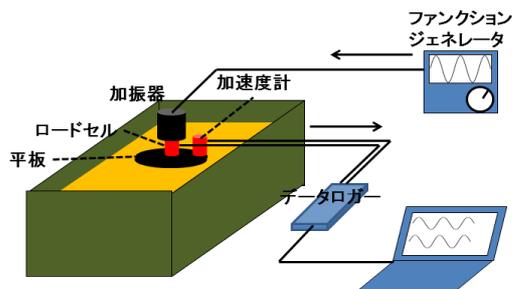


図7 1次元ランダム媒質(10モデル)におけるS波インピーダンスの推定結果

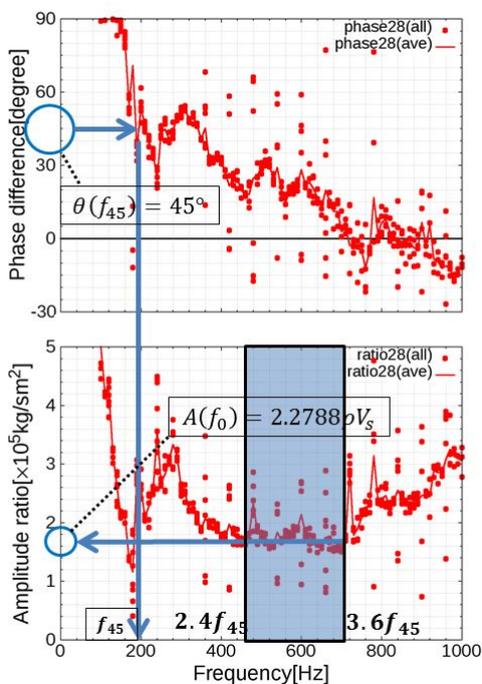


図8 模型実験に基づくS波インピーダンスの推定法

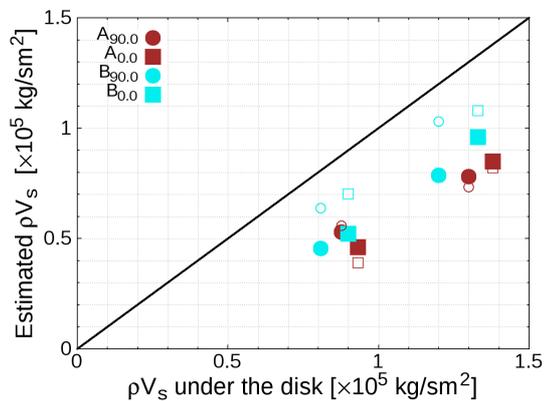


図9 模型実験に基づくS波インピーダンスの測定値と正解値の比較

参考文献

Robertson, I.A.: Forced vertical vibration of a rigid circular disc in a semi-infinite elastic solid, *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 62(3), 547-553, 1966
 Goto, H., Tanaka, N., Sawada, S., and Inatani, H.: S-wave impedance measurements of the uppermost material in surface ground layers: vertical load excitation on a circular disk, *Soils and Foundations*, 55(5), 1282-1292, 2015.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計8件)

Hiroyuki Goto, Yuichi Kawamura, Sumio Sawada and Takashi Akazawa, Direct estimation of near-surface damping based on normalized energy density, *Geophys. J. Int.*, Vol.194, No.1, pp.488-498, 2013.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggt104>

後藤浩之, 地盤伝達関数のクロスタームに関する基本的な性質, *土木学会論文集 A2*, Vol.69, No.2, pp.1_435-446, 2013.
http://doi.org/10.2208/jscejam.69.1_435

後藤浩之, 2層系地盤伝達関数による級数展開の離散表現, *土木学会論文集 A2*, Vol.70, No.2, pp.1_531-1_541, 2014.
http://doi.org/10.2208/jscejam.70.1_531

Hiroyuki Goto, Nobuaki Tanaka, Sumio Sawada, and Hideki Inatani: S-wave impedance measurements of the uppermost material in surface ground layers: vertical load excitation on a circular disk, *Soils and Foundations*, Vol.55, No.5, pp.1282-1292, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.026>

Yoshiya Hata, Hiroyuki Goto, and Masayuki Yoshimi: Preliminary analysis of strong ground motions in the heavily damaged zone in Mashiki town, Kumamoto, Japan, during the main shock of the 2016 Kumamoto earthquake (Mw7.0) observed by a dense seismic array, *Seismological Research Letters*, Vol.87, No.5, pp.1044-1049, 2016.
DOI:10.1785/0220160107

Hiroyuki Goto, Hitoshi Mitsunaga, Masayuki Inatani, Kahori Iiyama, Koji Hada, Takaaki Ikeda, Toshiyasu Takaya, Sayaka Kimura, Ryohei Akiyama, Sumio Sawada, and Hitoshi Morikawa: Shallow subsurface structure estimated from dense aftershock records and microtremor observation in Furukawa district, Miyagi, Japan, *Exploration Geophysics*, Vol.48, No.1, pp.16-27, 2017.
<https://doi.org/10.1071/EG16113>

Hiroyuki Goto, Yoshiya Hata, Masayuki Yoshimi, and Nozomu Yoshida: Nonlinear site response at KiK-net KMMH16 (Mashiki) and heavily damaged sites during the 2016 Kumamoto Earthquake (Mw7.1), Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, in printing.

後藤浩之, 秦吉弥, 吉見雅行: 益城町市街地の地盤増幅特性と 2016 年熊本地震における被害集中域との関係, *岩波科学*, Vol. 87, No.2, pp.186-191, 2017.

[学会発表](計16件)

後藤浩之: 非減衰 2 層系地盤伝達関数列による多層系地盤伝達関数の級数展開, 平成 25 年度土木学会全国大会, 2013/9/3-5, 日本大学生産工学部 (千葉県習志野市).

後藤浩之: 非減衰 2 層系地盤伝達関数列による多層系地盤伝達関数の級数展開, 日本地震学会 2013 年秋季大会, 2013/10/7-9, 神奈川県民ホール (横浜市).

後藤浩之: 地盤伝達関数展開を利用した地盤増幅特性の分解法について, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014/4/28-5/2, パシフィコ横浜 (横浜市).

後藤浩之: 2 層系地盤伝達関数による級数展開を用いた地盤増幅特性の重ね合わせ表現, 平成 26 年土木学会全国大会, 2014/9/10-12, 大阪大学 (大阪府豊中市).

後藤浩之, 田中伸明, 澤田純男, 稲谷栄巳: 最表層地盤の S 波インピーダンス測定法の開発(3): 1 次元ランダム媒質における検証, 日本地震学会 2014 年秋期大会, 2014/11/24-26, 朱鷺メッセ (新潟市).

後藤浩之, 田中伸明, 澤田純男, 稲谷栄巳: 円盤加振による地盤最表層の S 波インピーダンス測定手法の開発, 平成 27 年土木学会全国大会, 2015/9/16-18, 岡山大学 (岡山市).

後藤浩之, 稲谷昌之, 羽田浩二, 澤田純男, 盛川仁: 大崎市古川地区の浅層地盤構造をターゲットとした超高密度常時微動観測, 日本自然災害学会平成 27 年度年次講演会, 2015/9/24-25, 山口大学 (山口市).

Sayaka Kimura, Hiroyuki Goto, Hitoshi Morikawa, and Sumio Sawada: Identification of incident and site-to-site factors for ground motion coherence based on very dense seismic array observations, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 2015/11/1-4, クライストチャーチ (ニュージーランド).

後藤浩之, 満永仁志, 稲谷昌之, 飯山かほり, 盛川仁: 高密余震観測と常時微動測定に基づいた大崎市古川地区の浅層地盤構造のモデル化, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016/5/22-26, 幕張メッセ国際会議場 (千葉市).

Hiroyuki Goto, Sayaka Kimura, Hitoshi Morikawa, and Sumio Sawada: Effect of subsurface irregularity on ground motion coherence, 5th IASPEI/IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 2016/8/15-17, 台北 (台湾).

江口拓生, 後藤浩之, 川方裕則, 土井一生, 高橋直樹, 澤田純男: 動的平板載荷実験に基づく地盤最表層の S 波インピーダンス測定法の開発, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016/9/7-9, 東北大学 (仙台市).

後藤浩之: 近年の地震観測とその工学的活用例, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016/9/13-15, 岡山大学 (岡山市).

後藤浩之, 澤田純男, 新垣芳一: 正規化エネルギー密度 NED に基づいた地盤震動特性評価, 第 35 回日本自然災害学会学術講演会, 2016/9/20-21, 静岡大学 (静岡市).

後藤浩之, 秦吉弥, 吉見雅行, 吉田望: KiK-net 益城サイトの非線形地盤応答特性,

日本地震学会 2016 年秋季大会 2016/10/5-7 ,
名古屋国際会議場 (名古屋市).

後藤浩之, 秦吉弥, 吉見雅行, 吉田望 :
KiK-net 益城サイトの非線形地盤応答特性,
第 36 回地震工学研究発表会 2016/10/17-18 ,
金沢歌劇座 (金沢市).

Hiroyuki Goto, Nobuaki Tanaka, Sumio
Sawada, and Hideki Inatani: S-wave
impedance measurements of the uppermost
material in surface ground layers, 16th
World Conference on Earthquake
Engineering, No.636, 2017/1/9-13, サンチ
アゴ (チリ).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称 : S 波インピーダンス測定方法および測
定装置

発明者 : 後藤浩之

権利者 : 後藤浩之・勝島製作所

種類 : 特開

番号 : 2014-095616

出願年月日 : 2012 年 11 月 9 日

国内外の別 : 国内

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 浩之 (GOTO, Hiroyuki)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号 : 7 0 4 5 2 3 2 3