

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04428

研究課題名(和文) 交通振動を積極的に利用した微動計測による地下構造探査手法の開拓

研究課題名(英文) Development of subsurface structure exploration method using traffic-induced vibration and microtremors

研究代表者

平井 敬 (Hirai, Takashi)

名古屋大学・減災連携研究センター・助教

研究者番号：00708373

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：表層地盤探査における交通振動の利用可能性について検討を行った。地震波干渉法の理論を応用することで、交通振動を含む常時微動の観測記録から擬似加振記録を作成することが可能であり、これをもとに地下構造のイメージングを行うことができることが明らかになった。振動源としては、鉄道の列車走行振動よりも道路交通振動が擬似加振記録の合成には適していることが分かった。夜間や交通量の少ない状況においても全域通過関数を抽出するなどの工夫により良好な擬似加振記録を作成することができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築物や土木構造物の設計・施工、地震動の地盤応答計算の際に重要となる地下構造の探査手法として、常時微動観測を用いる方法は低コストで汎用性が高いものの、交通振動がノイズとなることが多かった。本研究課題では、地震波干渉法の理論を応用することで、交通振動を積極的に利用することが可能であることを示した。これにより、交通振動が卓越する都市部においても表層地盤構造の把握が容易になり、より安全な建物や土木構造物の設計につながることを期待される。

研究成果の概要(英文)：We evaluate the potential of traffic-induced vibration on the application to exploration of subsurface soil structure. Applying the theory of the seismic interferometry, a pseudo-excitation record can be generated from the ambient noise including the traffic-induced vibration, realizing the imaging of the subsurface structure. To synthesize a pseudo-excitation record, the road traffic-induced vibration is better than the train-induced one. In the silent environment, a pseudo-excitation spectrum is obtained as the all-pass function extracted by the factorization of the Fourier spectrum.

研究分野：地震工学

キーワード：地下構造 交通振動 地震波干渉法

1. 研究開始当初の背景

表層地盤構造は、建築物や土木構造物の設計・施工、地震動の地盤応答計算の際に重要な情報である。これを調査する方法に、ボーリング孔を用いた PS 検層、標準貫入試験、屈折法探査、反射法探査、表面波探査、微動探査などがある。中でも、常時微動を観測する方法は、ボーリング孔も人工震源も不要であるため、低コストで汎用性が高いという特徴があり、広く用いられている。しかしながら、常時微動観測に基づく解析方法の多くは、振動源が遠方に均一に分布しているという仮定のもとに定式化されている。このため、都市部においてありふれた振動源である交通振動は、信号源よりはノイズ源としてとらえられることが多かった。この影響を除去するため、都市部における微動探査は夜間に行われることも多い。しかしながら、交通振動を積極的に信号源として利用することが可能になれば、表層地盤探査の利便性が飛躍的に向上すると考えられる。

2. 研究の目的

本研究課題では、通常はノイズ成分として扱われることの多い交通振動（自動車・鉄道）を積極的に信号源として利用し、表層地盤探査に応用する方法を開拓することを目的とした。都市部において交通振動が非常にありふれた振動源であるにも関わらず、これを信号源として利用する表層地盤探査手法が確立されていないのは、加振力波形を制御することが困難であるという事情によるところが大きい。本研究課題では、地震波干渉法の分析方法を用いてこれを克服し、交通振動を含む常時微動記録から浅層レイリー波探査における擬似加振記録と同様のものを生成するという方法を採用した。

3. 研究の方法

交通振動にも、その源となる交通機関によっていくつかの種類が考えられる。本研究課題では、都市部において一般的にみられる鉄道の列車走行にともなう振動と道路交通振動を取り上げることとした。それぞれについて、線路または道路が地上・高架・地下にある場合が考えられるが、鉄道については地下鉄と高架鉄道、道路は地上にある場合を対象とした。それぞれについて、直線状の測線に沿って等間隔で常時微動計を設置し、交通振動を含む常時微動を数時間にわたって観測した。また、あわせて円形アレイによる微動観測も行った。直線アレイによる微動観測記録から地震波干渉法の手法により擬似加振記録を作成し、表面波多チャンネル解析により位相速度も分散曲線を推定した。円形アレイによる微動観測記録については、SPAC 法と CCA 法により分散曲線を推定し、直線アレイによる観測記録によるものと比較した。

ここで、地震波干渉法による波形処理の方法について概説する。Wapenaar and Fokkema¹⁾ は、弾性論の相反定理と時間反転不変の原理をもとに、地震波干渉法の基本式を導いた。

$$2\text{Re}[G(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_A, \omega)]S(\omega) = \frac{2}{\rho c} \langle V^*(\mathbf{x}_B, \omega)V(\mathbf{x}_A, \omega) \rangle \quad (1)$$

ここで、 $G(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_A, \omega)$ は点 A のインパルス加振による点 B の地震動速度を表すグリーン関数、 $V(\mathbf{x}, \omega)$ は位置 \mathbf{x} で観測された速度、 $S(\omega)$ はノイズそれぞれのフーリエスペクトルである。この式は、常時微動の存在下で 2 地点の常時微動速度を観測すれば、そのクロススペクトルにより 2 地点間のグリーン関数が与えられることを示している。ただし、式 1 は測線内に振動源が存在しないことを仮定しているので、測線近傍に交通振動源が存在する場合には、厳密には正しくない。しかしながら、測線の外側から到来する微動に対しては近似的に成り立つと考えられるため、都市部での微動探査において利用することが可能である。本研究課題では、式 1 にもとづいて交通振動の微動速度波形からグリーン関数を合成することを試みた。なお、クロススペクトルの推定にあたっては、振動源の特性を除去するため、Vasconcelos and Snieder²⁾ のデコンボリューション型を用いた。

$$R(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_A, \omega) = \frac{V^*(\mathbf{x}_B, \omega)V(\mathbf{x}_A, \omega)}{[V^*(\mathbf{x}_A, \omega)V(\mathbf{x}_A, \omega)] * W(\omega)} \quad (2)$$

この式の分母は、点 A の速度記録のパワースペクトルをバンド幅 0.05 Hz の Parzen ウィンドウで平滑化したものを表している。

4. 研究成果

(1) 地下鉄の列車走行振動についての検討

振動源が地下にある場合として、地下鉄の列車走行振動を計測した。図 1 に計測点の配置を示す。名古屋市営地下鉄名城線の名古屋大学駅～本山駅間の一部区間（愛知県名古屋市千種区）において、線路のほぼ直上となる位置に 5 m 間隔でセンサーを配置した。白山工業株式会社製の微動観測キット JU210 と JU410 を使用し、サンプリング頻度 200 Hz で北・中・南測線に分けて計

測を行った。グリーン関数の合成に用いた列車走行サンプルの数は74である。図2に、地下鉄の列車走行を含む区間と含まない区間それぞれをもとに、北測線の南端を震源とするグリーン関数を合成した結果を示す。いずれの区間を用いた場合でも適切な擬似加振記録が得られている。列車走行を含む区間を用いた結果でははっきりとした波動伝播がみられるが、一方で列車走行を含まない区間を用いた結果の方が各センサー位置での波形の立ち上がりがインパルスに近い形状となっている。これは、加振力の分布が測線の外側にある割合が大きいため、地震波干渉法的前提により忠実な条件となっているためであると考えられる。



図1 計測点配置

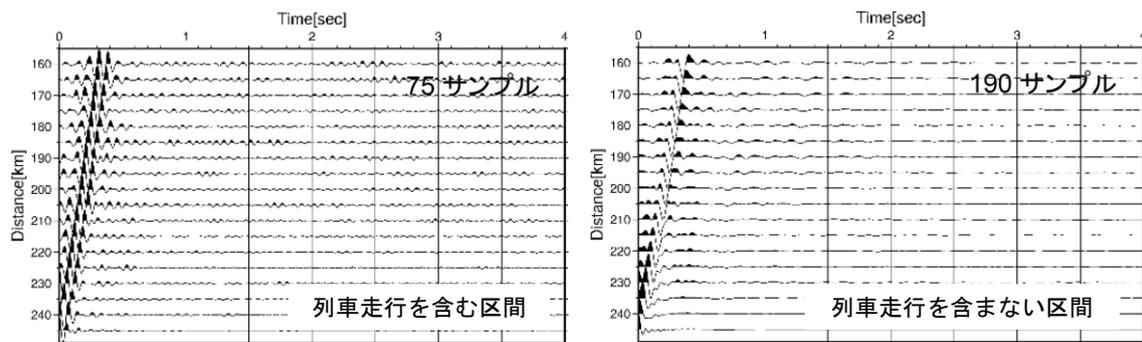


図2 グリーン関数合成結果

(2) 高架上の新幹線の列車走行振動についての検討

振動源がほとんど地表に近い位置にある場合として、新幹線の高架橋に沿う測線での振動計測を実施した。図3に計測点の配置図を示す。名古屋市南区の明治小学校の敷地において、5 m 間隔で21点のセンサーを配置した。使用した機材、サンプリング頻度は前節と同じである。グリーン関数の合成に用いた列車走行サンプルの数は324である。図4に測線中央を震源とするグリーン関数の合成結果を示す。新幹線の列車走行に起因する振動は地下鉄のそれと比較してS/N比が高いが、必ずしもそれがグリーン関数のS/N比の大小につながってはいない。これは、加振力の振動数特性に偏りがあることに原因があると考えられる。

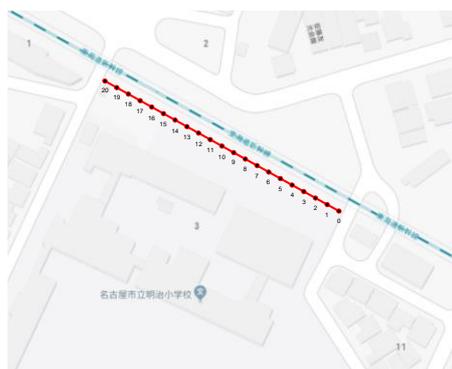


図3 計測点配置

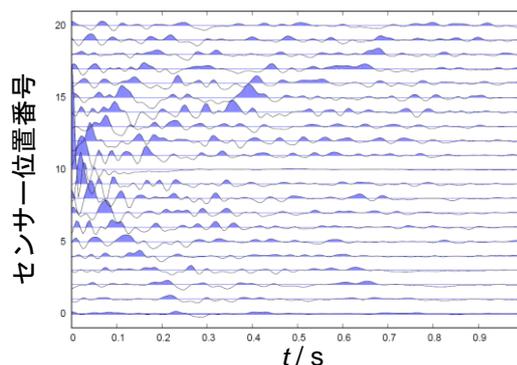


図4 グリーン関数合成結果

(3) 日中の道路交通振動についての検討

比較的強い道路交通振動について適用性を検討するために、名古屋市港区にある名古屋競馬場と土古公園の間を南北に延びる産業道路に沿って微動観測を実施した。図5に計測点の配置を示す。センサーにはジオメトリクス社のATOMを用い、全長210 mの区間に5 m 間隔で43点を設置して日中に計18時間の微動観測を行った。同時に、土古公園において白山工業製加速度微動計JU210を使用して微動アレイ観測を行った。



図5 センサー配置

図 6 に、例として測線中央の地点を震源とする擬似加振記録を示す。地下鉄や新幹線の列車走行振動を利用した場合と比較して明瞭な波群がみられ、210 m/s 程度の速さで伝播している。次に、得られた擬似加振記録を用いて表面波多チャンネル解析³⁾を適用した。図 7 に、測線ほぼ中央の 102.5 m 地点を中心位置 (CMP) とする擬似加振記録の組み合わせに対して推定された分散曲線を示す。同時に行った微動アレイ観測により得られた分散曲線を重ねて示した。表面波多チャンネル解析による分散曲線は微動アレイ観測によるものとよく一致しており、地震波干渉法に基づくレイリー波の分散性の検出は妥当であると考えられる。図 8 に、測線上の各 CMP について同様の処理を行った結果の分散曲線を断面状に並べて示す。表面波多チャンネル解析では CMP ごとに一次元構造を仮定しているが、対象地域は干拓地であり、図 8 でも平行成層構造に近いイメージが得られている。

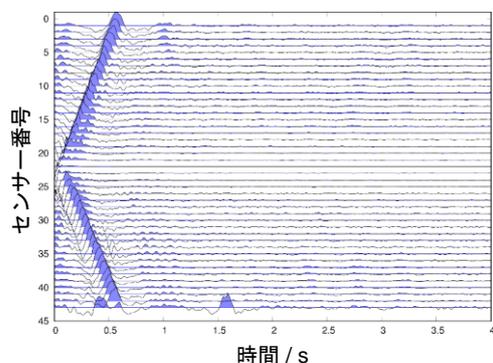


図 6 擬似加振記録

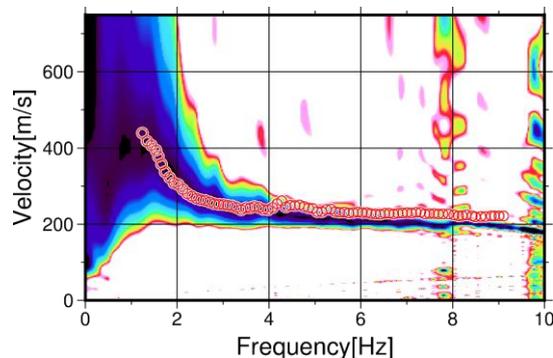


図 7 分散曲線

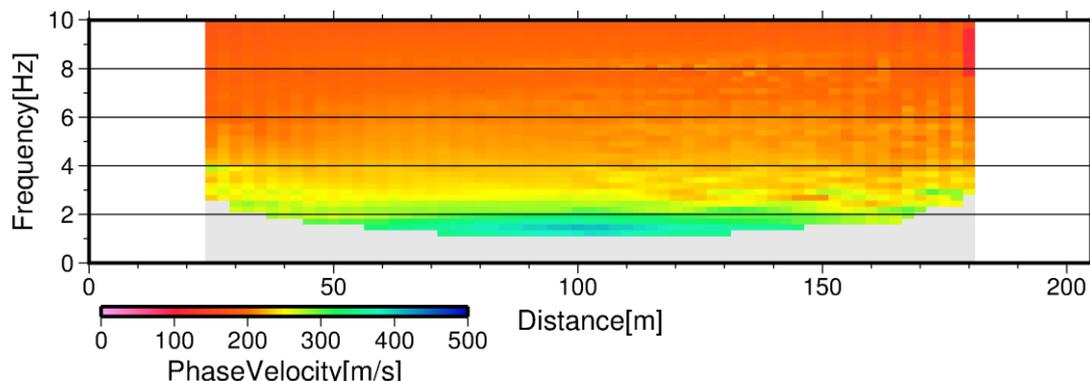


図 8 位相速度断面のイメージ

(4) 夜間の道路交通振動についての検討

交通量の少ない地域での適用性について検討するため、名古屋大学東山キャンパス内の夜間の常時微動観測を行った。図 9 に計測地点の配置を示す。センサーはジオメトリクス社製の上下成分 2 Hz 速度計 Atom を用い、全長 189 m の区間に 4.5 m 間隔で 43 か所を設置した。なお、図中×印の位置では水道管付け替え工事が行われていた。また、測線南の附属高校グラウンドにて微動アレイ観測を行った。



図 9 計測地点の配置図

図 10 に擬似加振記録の合成結果を示す。左側のグラフでは、測線方向に伝播する波群にノイズが混入し明瞭なグリーン関数とは言い難い。そこで、フーリエスペクトルの因数分解⁴⁾により抽出した全域通過関数を右側に示した。こちらはより明瞭に測線方向に伝播する波群が確認できる。図 11 に、測線中央位置を CMP とするグリーン関数の組合せに対して推定された位相速度を示す。微動アレイ観測による位相速度とよく対応する結果が得られた。図 12 に、測線上の各 CMP について同様の処理を行った結果の位相速度を断面上に並べて示す。測線における微地形はため池の堰堤に該当するが、おおむね平行成層構造と思われるイメージが推定できた。

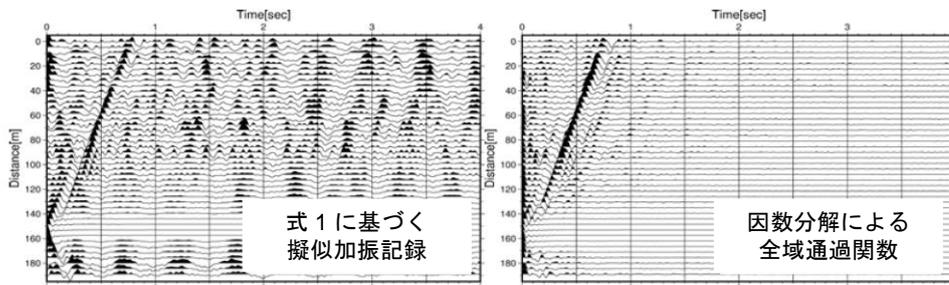


図10 グリーン関数合成結果

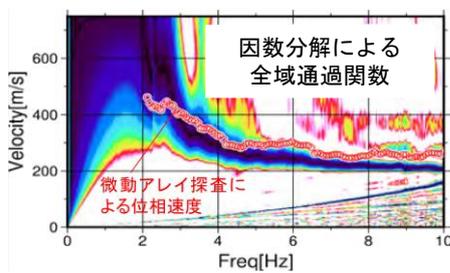


図11 分散曲線

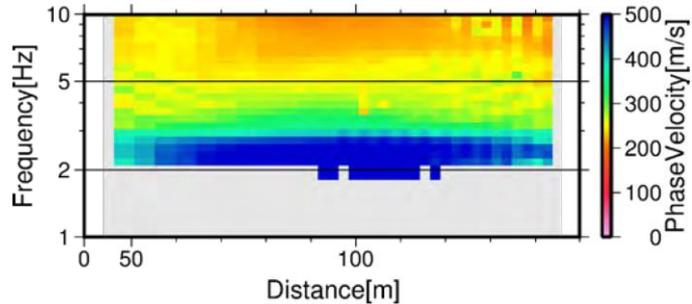


図12 測線上における位相速度の分布

(5) まとめ

以上の検討結果より、本研究課題において下記の諸点が明らかになった。

1. 地震波干渉法の手法を応用することで、交通振動を含む常時微動の観測記録から浅層レイリー波探査によるものと同様の擬似加振記録を作成することが可能であり、これをもとに地下構造のイメージングを行うことができる。
2. 交通振動源としては、新幹線よりも地下鉄のような普通鉄道が、鉄道の列車走行振動よりも道路交通振動が、それぞれ擬似加振記録の合成には適している。これは、この順に加振力の振動数特性が広帯域化するため、インパルス的な形状の擬似加振記録を合成するにあたり好都合であるためと考えられる。
3. 日中の道路交通振動を利用することにより明瞭な擬似加振記録を得ることができるが、夜間や交通量の少ない状況においても全域通過関数を抽出するなどの工夫により良好な擬似加振記録を作成することができる。

<引用文献>

- 1) Wapenaar, K. and Fokkema, J., Green's function representations for seismic interferometry, *Geophysics*, 71, pp.SI33-SI46 (2006)
- 2) Vasconcelos, I. and Snieder, R., Interferometry by deconvolution, Part 1 – Theory for acoustic waves and numerical examples, *Geophysics*, 73, pp.S115-S128 (2008)
- 3) Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J., Multi-channel analysis of surface waves, *Geophysics*, 64, pp.800-808 (1999)
- 4) 和泉正哲, 栗田哲, 遠藤良幸, 飛田潤, 半澤徹也: 表層地盤の地震波伝播システムにおける伝達関数の因果性と因果伝播関数の構成要素に関する基礎的研究, *日本建築学会構造系論文集*, 412, pp.31-41 (1990)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 水間健太, 平井敬, 福和伸夫
2. 発表標題 グリーン関数の相反性を活用した有限差分法による常時微動シミュレーション
3. 学会等名 日本建築学会2018年度大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋広人, 平井敬, 護雅史
2. 発表標題 地下構造推定を目的とした地震波干渉法による地下鉄振動の分析
3. 学会等名 日本建築学会2018年度大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水間健太, 平井敬, 福和伸夫
2. 発表標題 有限差分法を用いた常時微動シミュレーションによるH/Vスペクトルと分散曲線
3. 学会等名 日本建築学会2019年度大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平井敬, 高橋広人, 護雅史
2. 発表標題 交通振動を利用した地震波干渉法による地下構造探査の試み その1 列車走行振動の利用に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会2019年度大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋広人, 平井敬, 護雅史
2. 発表標題 交通振動を利用した地震波干渉法による地下構造探査の試み その2 自動車走行振動の利用に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会2019年度大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平井敬, 高橋広人, 護雅史, 鈴木晴彦
2. 発表標題 道路交通振動を利用した地震波干渉法による地下構造探査の試み
3. 学会等名 日本建築学会2020年度大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	高橋 広人 (高橋広人) (Takahashi Hirohito) (00650821)	名城大学・理工学部・准教授 (33919)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------