

【研究ノート】

浅層レイリー波探査と地震波干渉法による浅部地盤の

グリーン関数の比較・検討

居樹幸太郎¹，平井敬²，高橋広人³，護雅史⁴，鈴木晴彦⁵

¹ 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科，大学院生

² 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科，准教授 博士（工学）

³ 名城大学理工学部建築学科，准教授 博士（工学）

⁴ 名古屋大学災害対策室，教授 博士（工学）

⁵ 応用地質株式会社，博士（工学）

浅層レイリー波探査と常時微動に地震波干渉法を応用する手法は、いずれも表層の波動伝播速度を検出し、表面波の分散曲線および地下構造の推定に利用することができる手法である。それぞれ独立して発展してきた2手法間の整合性を比較・検討するため、同一測線上において観測・実験を行った。常時微動観測においてはセンサー間隔を4 m、2 m、1 mの3種類として観測を行い、浅層レイリー波探査においてはセンサー間隔を1 mとして起振ごとにセンサー列と起振位置を1 mずつずらして実験を行った。常時微動観測記録および浅層レイリー波探査による起振記録の双方から、表面波の波動伝播速度が得られた。目測の範囲ではあるが、主要な波群の伝播速度がほぼ整合性のある結果となった。今後は表面波多チャンネル解析で分散曲線を算出し、地下構造を推定する段階も含めて両手法を比較していく。

キーワード：表面波探査，人工起振，地下構造，波動伝播，常時微動

1. はじめに

地震防災や建築耐震を考えるには、地下構造を知ることが重要である。たとえば、掘削調査が挙げられる。掘削調査は正確な地盤情報を得ることが可能であるが、掘削する手間と費用が懸念となる。

掘削を伴わない調査においては、人工起振する方法と受動的な微動記録の処理で工夫する方法がある。前者には林ら(2001)¹⁾に代表される浅層レイリー波探査があり、後者の方法のひとつは高橋ら(2022)²⁾のような微動記録に地震波干渉法を応用して擬似起振記録を得る方法がある。浅層レイリー波

探査の理論は確立されており広く用いられている一方、微動記録から擬似起振記録を得る方法は未だ試行段階であり、浅層レイリー波探査と比較した例はない。そのため、これら 2 手法の間の整合性は不明瞭のままとなっている。

本研究では、それらと比較・検証することを目的とし、同一の測線で両手法を適用した。本稿ではその結果について報告する。

2. 観測・実験

浅層レイリー波探査とは地面を人工的に加振して波形データを取得し、波動伝播速度から地下構造を推定する手法である。これは地盤調査における非破壊検査のひとつとして広く活用されている。地震波干渉法とは地震動の波形記録を重合し、観測点間のグリーン関数を推定する方法である。この地震波干渉法を常時微動記録に適用する手法は、高橋ら(2022)²⁾によって開拓された新しい手法である。

観測は、名古屋市東部の東山丘陵を切り盛りして造成した、名古屋大学東山キャンパス（名古屋市千種区）の敷地内（図 1）で行った。なお、測線付近では過去に P-S 検層が実施（図 1 中の☆印）されている。2024 年 8 月 19 日に常時微動観測を、20 日に浅層レイリー波探査を行った。天気は 19 日が晴で 20 日が雨のち晴であったが、観測時間中に降水はなかった。

常時微動観測は、固有振動数 2 Hz のジオフォンと、応用地質株式会社製の McSEIS-AT(1ch)と同(3ch)を使用し、Long 測線（-80～80 m の地点に 4 m 間隔）、Middle 測線（-40～40 m の地点に 2 m 間隔）、Short 測線（-20～20 m の地点に 1 m 間隔）の 3 測線で行った。Long 測線は 2 時間、Middle 測線と Short 測線は 1 時間 30 分観測した。ただし、McSEIS-AT(3ch)は上下成分のみを使用した。また、Long 測線観測中に、測線東端付近のマンホールで作業が行われていたほか、-72 m 地点直下に湧水パイプが設置されていた。

浅層レイリー波探査は、米国 Geospace Technologies 社および中国 Sunfull 社製の固有振動数 4.5 Hz のジオフォン 24 個を応用地質株式会社製のデータロガー McSEISE-SW に接続した。これを 1 m 間隔で配置し、西端を-40 m 地点から開始して、起振一回ごとにセンサー列を 1 m ずつ東向きに移動し、東端が 40 m 位置になるまで行った。東端が 40 m 地点に達した後は起振位置のみ 1 m ずつずらして起振した。



図 1 観測・実験実施場所と測線

3. 結果

Long 測線での微動観測記録に地震波干渉法を適用して得られた擬似グリーン関数のうち、測線座標 -80 m を起振位置としたものを図 2 に、測線座標 0 m を起振位置としたものを図 3 に示す。また、Short 測線で得られた擬似グリーン関数のうち、測線座標 0 m を起振位置としたものを図 4 に示す。なお、得られたグリーン関数には $0.2\text{--}40\text{ Hz}$ のバンドパスフィルターを施した。そして浅層レイリー波探査においてセンサー列西端を測線座標 0 m とし、測線座標 -0.5 m 位置を起振したときの波形記録を図 5 に示す。時間軸は収録開始時刻を起点としている。図 4 の測線座標 $0\text{--}24\text{ m}$ と図 5 の全体は同じ地点に微動計を設置して観測したものとみなすことができる。いずれにおいても、起振位置からの波動伝播が見られた。

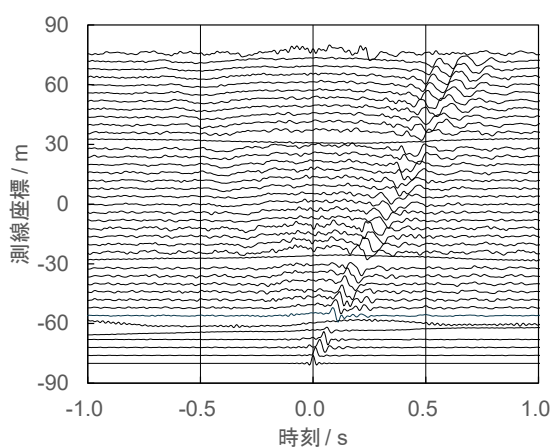


図 2 Long 測線における -80 m 地点を起振源とした各観測点のグリーン関数

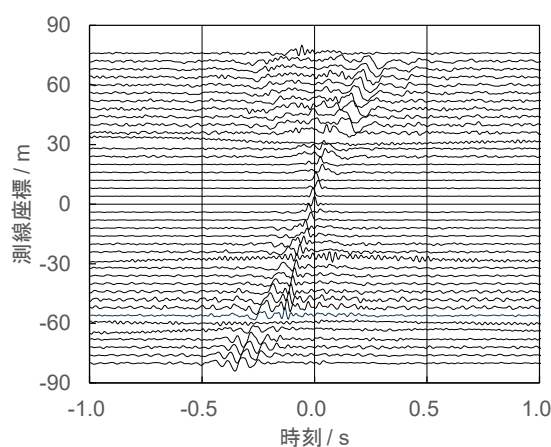


図 3 Long 測線における 0 m 地点を起振源とした各観測点のグリーン関数

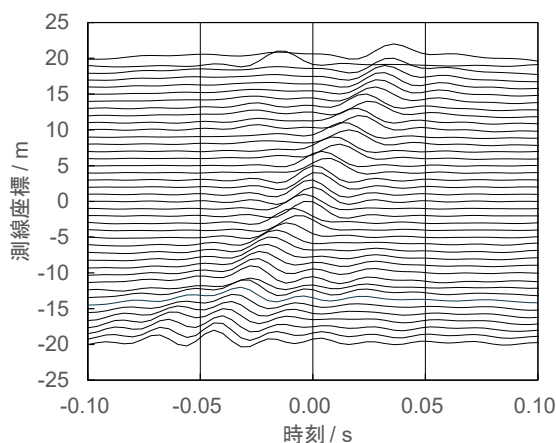


図 4 Short 測線における 0 m 地点を起振源とした各観測点のグリーン関数

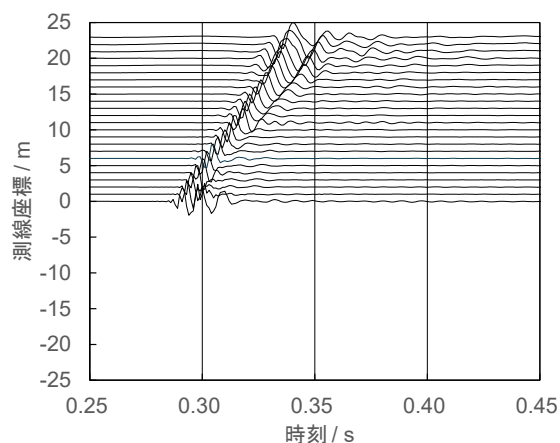


図 5 浅層レイリー波探査における 0 m 地点を起振源とした各観測点の波形

4. 考察

図 2-4 から、微動記録に基づく擬似起振記録の結果は伝播速度がおよそ 500 m/s、図 5 から、実際の起振の結果はおよそ 460 m/s となっていることが読み取れ、おおむね整合している。そして図 4 と図 5 においては、測線座標 7-16 部分付近を境に波動伝播速度が異なって伝播しているように見える。これは、地下構造がこの付近を境に東西で異なっていることを示唆している。ただしいずれも目測であるため、正確に調査するためには表面波多チャンネル解析で分散曲線を見る必要がある。

また、地震波干渉法を用いた際は、時間軸の負側にも値を持つ偶関数の形でグリーン関数が得られるとされている。しかし図 2-4 においては、測線負方向への波動伝播がほとんど見られない結果となった。今回の測線西側（測線座標負の側）には幹線道路（名古屋市道八事線）があり、観測中も交通量が多かった。そのため常時微動の波形において西から東に向かう波動伝播が卓越していたのに対して、東から西へ向かう波動伝播が相対的に弱かったことが原因である。

5. まとめ

本研究では、常時微動に地震波干渉法を応用する手法と浅層レイリー波探査の比較をするため、同一測線で両手法を実施した。その結果、両手法の結果を目測によって推定すると、それぞれの伝播速度が整合しているように見えたほか、どちらも同様の地点で波動伝播速度が異なっている様子を確認することができた。この結果は適切に地下構造を反映していると考えられる。今後は表面波多チャンネル解析で分散曲線を算出し、グリーン関数の分布から地下構造を推定する段階も含めて両手法を比較していく。

謝辞

本研究の成果は、公益財団法人木下記念事業団の令和 6 年度学術研究活動助成事業による研究（研究代表者：平井敬，研究課題名：浅層レイリー波探査とリニアアレイ微動観測を組み合わせた新たな地下構造推定法の構築）の一部である。また、名城大学の岩永正徳氏，関竣介氏，兵庫県立大学の白井和音氏には常時微動観測および浅層レイリー波探査の観測・実験において協力を得た。それぞれ感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 高橋広人，平井敬，護雅史：2次元 S 波速度構造推定における地震波干渉法の常時微動記録への適用性，日本建築学会構造系論文集，87 巻，798 号，pp.690-700，2022，DOI: https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijs/87/798/87_690/_article/-char/ja/
- 2) 林宏一，鈴木晴彦，斎藤秀樹：人工振源を用いた表面波探査の開発とその土木地質調査への適用，応用地質技術年報，No.21，pp.9-39，2001

Note:

Comparison of Green's Functions in Shallow Soil by Rayleigh Wave Survey and Seismic Interferometry

Kotaro Sueki¹, Takashi Hirai², Hirohito Takahashi³, Masafumi Mori⁴, Haruhiko Suzuki⁵

¹ Graduate School of Disaster Resilience and Governance, University of Hyogo, Graduate Student

² Graduate School of Disaster Resilience and Governance, University of Hyogo, Associate Professor, Dr. Eng.

³ Faculty of Science and Technology, Meijo University, Associate Professor, Dr. Eng.

⁴ Disaster Management Office, Nagoya University, Professor, Dr. Eng.

⁵ OYO Corporation, Dr. Eng.

Abstract

The Rayleigh wave survey and the seismic interferometry based on microtremors are used to detect surface wave velocities and to estimate surface wave dispersion curves and subsurface structure. These methods have been developed independently of each other. In the paper, the two methods are applied to the same site to investigate the consistency of them. In the microtremor observation, the sensor spacing was set to 4 m, 2 m, and 1 m. In the Rayleigh wave survey, the sensor spacing was set to 1 m. In the Rayleigh wave survey, the sensor line and excitation position were shifted by 1 m for each excitation. The surface wave velocities were obtained from both methods. Within the range of visual measurements, the surface wave velocities of the main wave groups were almost consistent. In the future study, we will calculate dispersion curves by multi-channel analysis of surface waves obtained by both methods, including the stage of estimating subsurface structure.

Keywords: Surface wave survey, Artificial excitation, Subsurface structure, Wave propagation, Microtremor