

地下構造推定を目指した地震波干渉法による地下鉄振動の分析

名古屋大学工学部環境土木・建築学科建築学コース
護研究室 平岡奈々

1. 背景と目的

土地の成り立ちや災害リスクを評価するために地下構造を推定することは重要である。そのための地盤探査の手法は地上で加振を行う必要があるものも多い。しかし加振による探査はコストや労力がかかり、周辺への影響も大きく、都市部では困難である。それらの諸問題を解決する手法として、自然地震による地震動観測記録に相互相関処理を施すことで擬似的に加振記録を合成する（以降擬似加振記録と呼ぶ）、地震波干渉法¹⁾が近年注目されている。しかし自然地震による探査は、多数の自然地震の発生を待たねばならず、長い期間を要する。そこで、本研究では、人工震源により簡易に探査を行う方法として、地下鉄を地下震源とした地震波干渉法の可能性を検討する。具体的には、図1に示す地下構造推定フローに対して、名古屋市営地下鉄名城線の走行を振動源とする地表面での加速度記録から擬似加振記録を合成し、位相速度の読み取りを行う。

仲田 (2008)²⁾ は上越新幹線及び京阪電気鉄道鴨東線を振動源として、比較的 S/N 比の大きい地域で同様の検討を行った。そこで本研究では、より車道に近く交通量の多い山手グリーンロード沿いで計測した記録でも、波動伝播を確認できる擬似加振記録が合成できるかどうかも含めて検討を行う。

2. 地震波干渉法の概要

地震波干渉法とは、二つの異なる受振点で観測された地震動波形に相互相関処理を施すことにより、一方の受振点を擬似的な加振点とする他方の受振点でのグリーン関数を合成する手法のことである。Wapenaar and Fokkema (2006)¹⁾ は、相反定理と時間反転不変の原理をもとに以下の地震波干渉法の基本式を導いた。

$$2\text{Re}\{G(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}_B, \omega)\} \approx \frac{2}{\rho c} \oint_{D_1} [G^*(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}, \omega)G(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}, \omega)]d^2x \quad (1)$$

ここで $G(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}, \omega)$ は \mathbf{x} で発生した地震を \mathbf{x}_A で観測した際の地震動、 D_1 は地表面の計測点と地下の震源を含む閉曲面 D の地表面を含まない面を表す。この式は震源 \mathbf{x} に対する点 \mathbf{x}_A およ

び点 \mathbf{x}_B における観測記録の相互相関を、 D 上の震源 \mathbf{x} について積分することによって、観測点の一方を加振点、他方を受振点とする記録を擬似的に合成できることを示している。

3. 地下鉄振動の計測及びデータ処理

図1に計測とデータ処理の流れを示す。名古屋大学東山キャンパス山手グリーンロード沿いで地下鉄名城線名古屋駅-本山駅間の列車走行に起因する地表の加速度を計測した(図4)。図2,3のように、全長245mの測線を3分割し5m間隔に受振点を設けた。また計測は鉛直方向、線路方向、線路直交方向の3成分で、全て200Hzサンプリングである。測線各区間で南行、北行それぞれ約70本の列車走行による地表の加速度を計測した。

次に処理の詳細を述べる。データの切り出しでは、計測記録からS/N比の極端に小さい記録を除外した。これにより、測線の各区間で65本程度の北行の列車走行による地表の加速度記録を擬似加振記録合成に用いることとした。また、2で述べた手法を用いて合成した擬似加振記録Aと別に、スペクトルの因数分解によって全域通過関数を取り出す³⁾ことでより精度の高い擬似加振記録Bの合成を試みた。全域通過関数は、地盤の不均質性や異種波動成分等の不確定な要因が少ないとされている。

4. 擬似加振記録の分析

まず擬似加振記録AとBの比較を行う。図5,6より、Aはノイズや相互相関処理の際にフーリエ振幅の大きな波が生じてしまった影響で精度が低く波動伝播を確認しにくい擬似加振記録となっている一方、Bはそういった不確定な要因が取り除かれており、Aより格段に波動伝播が確認しやすくなっている。よって以降は擬似加振記録Bの結果から分析を行う。

次に測線ごとの擬似加振記録の比較を行った。図6,7より、測線北の方が測線南より波動伝播を明瞭に確認できた。測線南側に駅があるため、北行の列車が測線付近を通過するときの速度は北>中>南となる(図8)。これより、波動伝播を擬似加振記録に反映させるには、付近を通過する列車の速度が大きい(加振力のある)範囲で行うとよいことが分かる。

次に、波動の伝播を確認する。図9で示すように、水平成分では伝播の確認が困難だったが、鉛直成分ではおおむね図6,7で示した補助線のように、約320~340m/sの波動伝

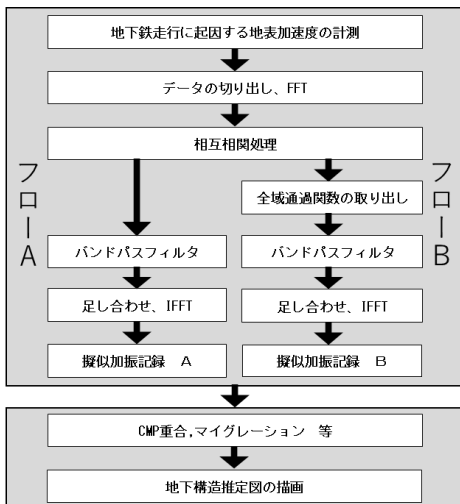


図1 全体フロー



図2 測線位置



図3 計測の様子

播が確認できた。これは付近の PS 検層結果 (赤崎記念研究館前、図 2 星印) の表層 P 波速度 (330 m/s) とおおむね一致している。

5. まとめ

地下構造探査への活用を目指し、地下鉄振動から地震波干渉法によって擬似加振記録を合成した結果、以下のことが分かった。まず擬似加振記録の作成においては、通常的手法では波動伝播がノイズや不確定な成分に埋もれてしまうが、スペクトルの因数分解により全域通過関数を取り出すことで、目視で確認できる程度に精度があがる。これにより、交通量が多く S/N 比の小さい地域でも地下鉄振動による擬似加振記録の合成を行える可能性が示された。また、地下鉄振動は微弱であるため、活用に向けてはある程度速度 (加振力) が必要であると考えられる。伝播の読み取りでは水平方向での波動伝播はあまり確認できなかったが、鉛直方向での波動伝播は確認できた。

今後は、本研究では名城線の名古屋大学-本山駅間での分析しか行っていないため、他の列車振動からも擬似加振記録を合成できるか試みると、より検討の幅が広がる。また、実際の加振記録と擬似加振記録との比較分析を行うことで、擬似加振記録をどの程度活用できるか検討できる。擬似加振記録の精度をさらに上げるには、作成した擬似加振記録から自己相関関数を出すことによる繰り返し成分の除去、狭帯域のバンドパスフィルタによるノイズの除去等が考えられる。理論的な面では、地下鉄振動は一般的な点震源とは異なるため、地下構造を考慮した数値解析により地下鉄の振動特性を評価することができれば、より精度の高い結果につながると期待できる。

参考文献

1. Kees Wapenaar and Jacob Fokkema : Green' s function representations for seismic interferometry, Geophysics, 71, No.4 SI33-SI46, 2006
2. 仲田典弘 : 地震波干渉法による列車振動を震源とし地下可視化の試み, 京都大学工学部特別研究論文, 2008
3. 和泉正哲, 栗田哲, 遠藤良幸, 飛田潤, 半澤徹也 : 表層地盤の地震波動伝播システムにおける伝達関数の因果性と因果伝達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報告集, 第 412 号, pp31-41, 1990

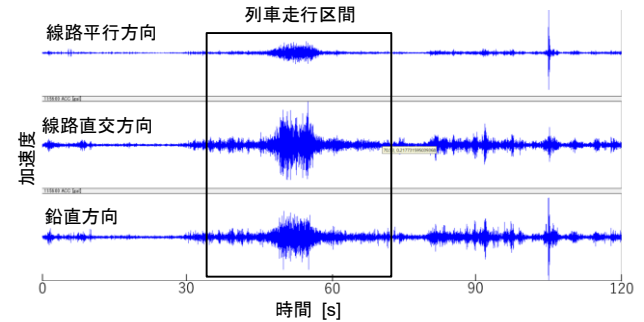


図 4 列車走行区間の切り出し

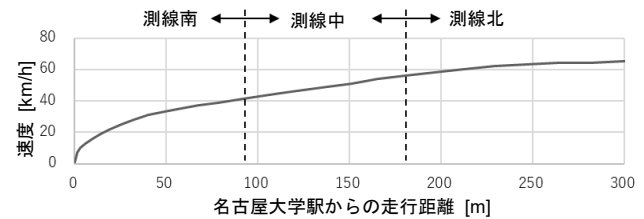


図 8 名古屋大学駅→本山駅の列車走行距離と速度の関係

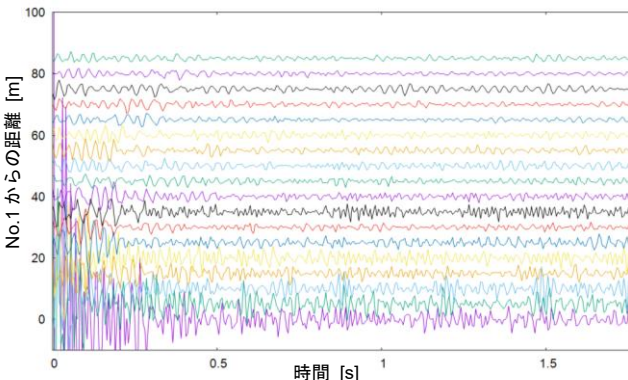


図 5 擬似加振記録 A (測線北 No.01 加振 鉛直方向) (受振点 (5m 間隔) 毎の擬似加振記録を並べたもの)

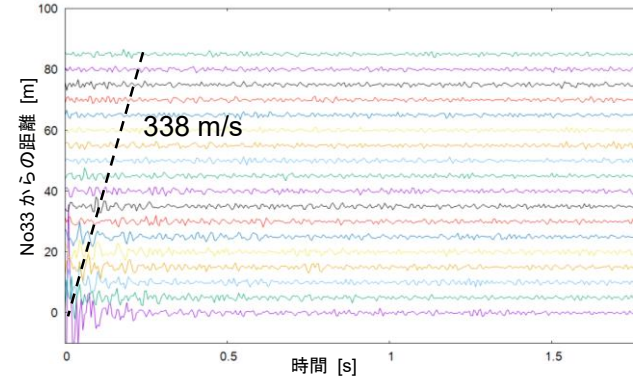


図 7 擬似加振記録 B (測線南 No.33 加振 鉛直方向)

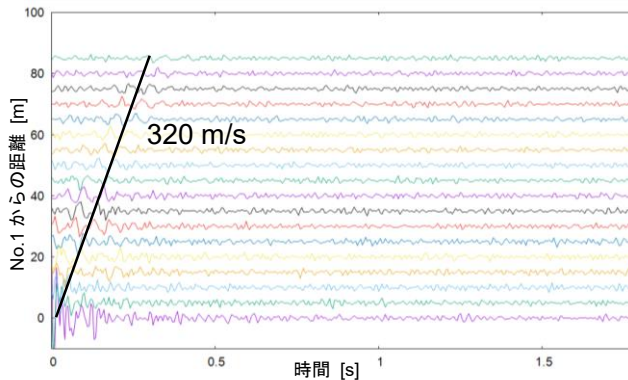


図 6 擬似加振記録 B (測線北 No.01 加振 鉛直方向)

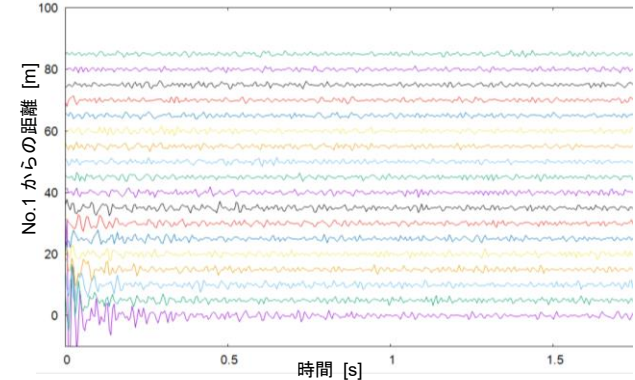


図 9 擬似加振記録 B (測線北 No.01 加振 水平方向)