

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K21692

研究課題名(和文)列車振動を用いた不整形地盤の探査手法の開発

研究課題名(英文)Development of exploration method for irregular structures using train induced vibration

研究代表者

岡本 京祐 (Okamoto, Kyosuke)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・研究員

研究者番号：30748546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、列車振動を用いて地下不整形地盤を探査する手法の基礎検討、開発を行った。地盤中の不整形箇所は大きな地震動を生成しやすく、予めその位置を把握し地震動予測をすることは、都市開発や防災計画にとって不可欠である。そこで、申請者は列車振動により生じる弾性波を用いて不整形地盤を探査する手法の開発を目的とし研究を行った。その結果、列車振動により生じる複雑な入力波形特性から定常部分の波を取り出し、相互相関等の波形処理を加えることで、地下反射面を抽出可能な疑似観測波形を作成することが可能になった。微動探査等を相補的に用いることで、地盤中の不整形箇所発見に貢献することができる。

研究成果の概要(英文)：I conducted a fundamental study and development of exploration method for irregular structures using train induced vibration. Unexpected strong ground motion is likely generated at an irregular structure. Therefore, detecting the location of irregular structures and evaluating the expected strong ground motion are important for urban development as well as disaster prevention plan. To achieve them, I focused on the elastic waves induced by train vibration as an input wave to detect irregular structures. As a result, I revealed that an artificial seismic record can be synthesized from the stationary part of complex train vibration, and a reflector in the subsurface can be recognized using cross-correlation technique for the record. Irregular structures in the subsurface can be detected by our method using microtremor explorations supplementary.

研究分野：応用地球物理学

キーワード：列車振動 不整形地盤 イメージング 振動観測

1. 研究開始当初の背景

地盤中に傾斜や不連続な構造が存在する場所では、表面波や反射波の重ね合わせにより、地震波の増幅的干渉が生じる場合があり、局所的に甚大な被害を生じる危険性がある。例えば、1995年兵庫県南部地震では神戸・阪神地域に震災の帯と呼ばれる木造家屋の被害が集中する地域が出現した。この要因として、六甲山から大阪湾にかけて地下数kmの基盤岩層に不連続が生じており、木造家屋が被害を受けやすい0.5-1Hz程度の地震動が増幅的に干渉した可能性が指摘されている。このような被害を生じる可能性がある箇所を事前に把握し、開発や補強、防災計画を策定することは想定外の被害を減少させることにつながる。そのためには、対象構造物が被害を受けやすい地震動の周期帯を増幅する地盤構造を予め把握しておく必要がある。例えば、高架橋に代表される鉄道構造物は、1-5Hz程度の比較的高周波の地震動の影響を受けやすく、その周期帯に大きく影響を与えると考えられる工学的基盤以浅の構造把握が重要である。しかし、大規模な反射法探査やボーリング調査等は、詳細な地盤構造を把握できる反面、コストや調査可能場所、所用時間など種々の制約があり、重要性が認識されながらも十分に実施されていない。そこで、簡易に観測できる常時微動や人工加振による表面波を用いて、SPAC法やH/Vスペクトル比の解析による探査が精力的に行われてきた。しかし、これら探査手法は観測波が水平成層構造内で生成していることを理論的前提としており、不整形地盤への適用は未だ議論されている。

2. 研究の目的

1の背景を鑑みて、申請者は、地下の不整形箇所を弾性波によって直接イメージングする反射法探査に着目した。前述したように、反射法探査を行うためには、バイプロサイスやダイナマイト等の強力な振源の導入、長大な測線を引くためのコスト・場所・時間等の制約が問題となる。ここで申請者が注目したのが列車振動である。数十トンにもなる車両による加振は、浅層構造調査のために十分な起振力を持つ信号となる。加えて、振源を用意するコストは掛からず、線路に沿った長大な測線での空間連続な観測も可能である。本研究は列車振動を用いて、不整形地盤の探査を行うことを目的とした。

列車振動の反射波を用いる際の問題となるのが列車による入力振動の複雑さである。ある場所の観測波形は、入力波形と地盤中のグリーン関数が畳み込まれた波形である。反射法探査ではこの観測波形からグリーン関数を抽出し、時系列で評価することにより地下のイメージングを行う。しかし、振動源となる車輪自体が移動しており波形がドップ

ラー効果を含んでいることや、複数車輪が振動源となっており発振位置、振源関数が一定しないこと等が要因となり、列車振動による入力は非常に複雑となる。そのため、列車振動そのものを“能動的”に用いた反射法探査は過去行われてこなかった。申請者は過去に波動伝播の理論計算、数値計算及び実データ解析の各手法により、地下不均質による波形変化の解析や、成因ごとによる地震波形の分離を行ってきた。これらを列車振動による複雑な入力波形の解釈への適用を検討する。また、申請者は微動・表面波探査や反射法地震探査による地下イメージングも行ってきた。入力波形の処理からイメージングまで統合的な手法を提案し、列車振動を用いて地盤不整形を直接イメージングする手法の基礎検討、開発を行う。

3. 研究の方法

鉄道総研が所有している日野土木実験所内では線路に近接して自由に観測測線を配置することが可能である。当該場所で列車振動の収録を行う。その収録記録を用いて、反射波を用いた地下構造イメージング手法の検討を行う。

列車による入力振動の特性は、振動源となる車輪自体が移動しており発振位置、時刻等が一定しないこと等が要因となり、複雑となる。一方、通常反射法探査ではバイプロサイスやダイナマイト発破等の1)「発振時刻・位置」、2)「入力波形」を制御できる震源を用いる。1)発振時刻・位置は反射波走時から反射面位置を推定するために不可欠な情報である。また、2)入力波形に地下構造(グリーン関数)が畳み込まれた波形が観測波形であり、そこから地下構造を抽出するためには入力波形が既知であることが重要である。平成28年度は複雑な生列車振動波形から、入力発振時刻・位置の特定、特徴的な入力波形の分離を行う。列車振動波形は、車両質量による重力が車輪を通してレールに圧力を加えることで空間的に定常に生じる振動の他に、線路継ぎ目・軌道変位箇所が生じる大振幅な非定常波群で構成される。この非定常波を生成する箇所近傍で観測した波形から、非定常部分を分離して入力波形とする。列車の車軸(左右の車輪)数は既知情報であり、且つ何れの車軸からも類似した波形が入力されると考えれば、車軸数を既知情報として与えたセンサランス処理等により列車振動の非定常部分を入力波形として取り出すことが可能である。その入力波形を別観測点での記録と相互相関を取ることで、対象とした非定常波発生箇所から1列車が入力する明瞭なシグナルを確認できる。

反射法探査では、反射波のS/N比を向上させるために地下の共通反射点で反射した記録を重合するので、様々なオフセット距離での発振が不可欠である。しかし、列車振動を

用いる場合、線路上のみしか振源の移動ができず、特に線路直交方向の測線に対して重合処理が不可能である。そこで、任意の観測点ペアの一方を振源、他方を観測点とした波形を合成できる地震波干渉法を適用する。本来、地震波干渉法は入力の情報未知のノイズ等に対しても可能な処理で、(イ)の処理を必ずしも施さなくて良い。しかし、未知入力への地震波干渉法の適用条件として、入力がお互いに無相関な必要がある。列車振動のように、各々のレール継目や軌道変位にて生じるイベント群が無相関ではない場合、ある特定のイベントを取り出す(イ)の処理を行った後に干渉処理をする必要がある。(ウ)の処理により得られた、各観測点ペア間の発振・受振記録を一般の反射法探査のフローに従い処理する。本処理には米国コロラド鉱山大学が開発した Seismic Un*x を用いる。

4. 研究成果

列車振動を用いた反射法地震動探査を行うための基礎検討として、(1)列車振動の収録、(2)入力波形の特性解析、(3)反射法のための地震波干渉法処理の適用を行った。

(1) 列車振動の収録

実際の鉄道線区に隣接した実験場にて線路方向と平行、および直角に 24 の地震観測装置を並べて列車振動の収録を行った(1成分、図1)。



図1 側線の設置状況

収録の際には、定常的な振動源となり得る線路継ぎ目近傍(6観測点)と、その垂直方向(18観測点)に観測装置を配置した。観測された列車本数は、編成数や走行速度、走行方向などが異なる全55本であった。

(2) 入力波形の特性解析

最も継ぎ目に近い観測点で得られた波形に対して特性解析を適用した。列車振動は連続移動する車輪がレールを圧縮することにより生じる非定常的な部分と、レール継ぎ目のような不連続な部分を車輪が通過する度に生じる定常的な部分が混在している。反射

法地震探査を行うためには振源の特性(波形や発振位置等)が既知であることが望ましい。そこで、ある観測点での波形内に含まれる継ぎ目由来の波形部分は、通過した車輪数と何らかの関係性を持つことを利用して、継ぎ目で生じる定常的な振動波形を抽出する作業を行った。継ぎ目部分で生じる波形部分を取り出すことで、波形情報、発振位置を特定し、反射法地震探査のための発振ソースと見なすこととした。具体的な方法としては、まず、任意の時間遅れを与えながら波形の自己相関関数を算出する。その自己相関係数において一定閾値を超えた数が通過した車輪数と一致する条件を探すことで、継ぎ目部分を車輪が通過したことによる定常振動波形部分を特定した。

さらに、この定常波形部分と線路と垂直方向に配置された各観測点で得られた波形との間で、相互相関処理を行うことで、各観測点における定常波部分の抽出を行った(図2)。

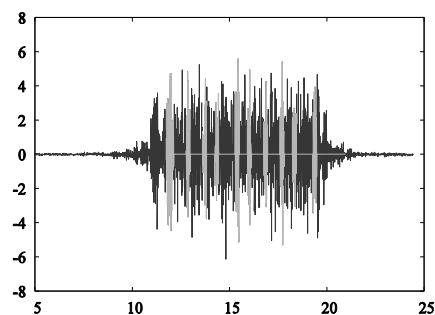


図2 観測された波形(黒線)と取り出された定常部分(灰色)の例

(3) 反射法のための地震波干渉法処理の適用

(2)の自己相関処理により抽出された各観測点での定常波形部分に対し、任意のペア

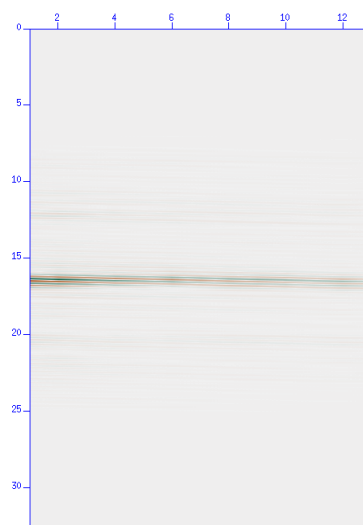


図3 仮想的に合成した反射波記録の一例

観測点間で相互相関処理を行った(地震波干渉法処理)。これにより、ペア観測点のうち一方を発振点、他方を観測点とした仮想的な波動場を合成した。

以上のようにして合成した任意のペア観測点間のショット記録を、オフセット記録ごとに並び替え、反射法地震探査に利用するデータセット(疑似観測記録)の作成を行った。並び替えた疑似観測記録から、直達波の後続部分に反射波が存在することが見て取れた(図3)。このことより、地下の何らかの反射面からのシグナルを捉えている可能性が高いことが明らかとなった。

(4) Seismic Uni*xを用いた処理

本シグナルを詳細に解析するために、Seismic Uni*xを用いて、反射法探査のプロセッシングを行った。まずプロセッシングの第一段階として、55本列車が通過した際に得られたそれぞれの観測波形を足し合わせることでS/N比を向上させることを行った(スタッキング処理)。しかしながら、本プロセッシングの際に、スタッキング処理を行っても十分にS/N比が上がらないことが判明した。その後、得られた疑似観測記録の詳細評価を行ったところ、個々の観測波形において不整形形状のイメージングが可能となるのに十分なS/N比を保持していないことが分かった。本原因を追究したところ、サンプリング数の不足や、受振器と地面とのカップリングが影響している可能性があることが分かった。後者の原因としては、線路とその近傍にはバラストと言われる小石状の物質が撒かれており、その地点に設置した受振器からは十分な信号が得られていなかった可能性が考えられる。設置の際にはできる限りバラストを取り除き受振器を設置したものの、十分な対策となっていなかった可能性がある(図4)。



図4 バラスト下に設置された受振点

(5) 雑微動部分まで用いた地下不整形部分のイメージング

(4)で反射面を抽出するのに十分なS/N比が得られなかったことが分かった。しかしながら、得られた列車振動の雑微動成分を用

いて微動探査処理を適用することで、地下の不整形境界面を抽出できることが分かった。このことにより、微動探査により得られる不整形部分の境界面イメージを補助的な情報として、受振器配置の決定、反射法イメージング処理の際の参考情報とすることができる。

(6) まとめ

申請者は、地下の不整形箇所を弾性波によって直接イメージングする反射法探査に着目した。その際の震源としては列車振動を用いることとした。

上述の手法の実現のために、(1)列車振動の収録、(2)入力波形の特性解析、(3)反射法のための地震波干渉法処理の適用、(4)Seismic Uni*xを用いた処理を行った。その結果、列車振動を用いた一連の処理を行うことで、地下境界面からの反射波を確認することが可能であることが分かった。しかしながら、収録された観測波形のS/N比を向上させることが困難だという問題が判明し、明瞭な境界面のイメージングまでを行うことは難しいことも明らかとなった。そのため、追加作業として(5)雑微動部分まで用いた地下不整形部分のイメージングの検討を行った。その結果、(5)の手法を用いることで、補助的な不整形構造のイメージングを得られることが分かった。当該情報を補助情報として、列車振動を用いた反射法地震探査の実施を行うと、より効率的、効果的に地下構造のイメージングが可能になることが期待される。

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 1件)

① Okamoto, K., Tsuno, S., Numerical Studies of Effects of Dipping Structures on Horizontal/Vertical Spectral Ratios, *Pure and Applied Geophysics*, in-press, 2018.

[学会発表] (計 2件)

① Okamoto, K., Tsuno, S., Korenaga, M., Application of microtremor explorations to an irregular ground “Case study in the middle coast of Miyazaki prefecture”, 5th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion

② 岡本京祐, 津野靖士, 2011年東北地方太平洋地震において関東地方で観測された周期2-3秒の大速度応答に寄与した破壊位置推定, 物理探査学会 第135回(平成28年度秋季)学術講演会

[図書] (計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0件）

○取得状況（計 0件）

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 京祐 (OKAMOTO, Kyosuke)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エ
ネルギー・環境領域・研究員

研究者番号：30748546