

地震後の早期運転再開に資する 鉄道路線上の詳細な地震動推定

岩田 直泰* 津野 靖士* 山本 俊六*

Estimation of Earthquake Ground Motions along a Railway for Early Resumption of Regular Train Operation after Earthquakes

Naoyasu IWATA Seiji TSUNO Shunroku YAMAMOTO

For early resumption of regular train operation after occurrence of earthquakes, it is important to precisely and rapidly estimate earthquake ground motions. In this study, we tried to evaluate high-dense seismic motions along a model railway. At first, we estimated S-wave velocity structures by geophysical explorations at seismic stations. Secondly, we performed microtremors observations along this railway and calculated H/V spectral ratios. Then, we estimated the continuous linear S-wave velocity structures by applying the peak frequencies of H/V spectral ratios while referring to the subsurface profiles at the seismic stations. Finally, the high-dense seismic motions were estimated by the multiple reflection theory using the S-wave velocity structures. As a result, the estimations were in good agreement with the observations, thus the estimation validity of this method was confirmed.

キーワード：地震時運転規制，早期運転再開，地下構造，地震動，宮崎リニア実験線

1. はじめに

地震発生の際に路線上の揺れが大きく、鉄道施設や走行列車の安全性が懸念される場合には、鉄道事業者は可能な限り早く列車を停止させることとしている^{1) 2)}。その後、事前に定められたルールに従った徒歩巡回等により軌道や鉄道構造物の安全性が確認されれば、列車の運転が再開される。この安全確認は目視で軌道や構造物などの変状有無を確認することから多大な時間を要する場合があります、運転再開までのダウンタイムの短縮を図るには的確かつ効率的に安全確認を行う必要がある。そのためには対象路線沿線の地盤震動特性を詳細に把握し、地震発生時に一定間隔に配置されている地震計設置地点以外の地震動を素早く正確に推定することが重要となる。

本研究では、宮崎県中部沿岸部に位置する全長約7kmの宮崎リニア実験線³⁾をモデル路線に選び、路線に沿ったS波速度構造および地震動の推定を試みた。推定手順としては、まず物理探査手法である表面波探査とアレイ微動探査を用いて地震計設置地点2箇所のS波速度構造を求めた。次に、宮崎リニア実験線に沿って密な間隔で微動を測定してH/Vスペクトル比¹⁾を算出し、物理探査手法により求めた地震計設置地点2箇所の地下構造情報を参照しつつ、線状に連続してS波速度構造を推定した。最後に、設置地震計の観測波形から基盤入力

地震動を算出し、S波速度構造と1次元重複反射理論を用いて各単点微動測定地点における地震動を推定した。

2. 宮崎リニア実験線における地震観測の概要

本研究のモデル路線に選定した宮崎リニア実験線と、そこへ導入した地震計の位置を図1に示す。図に示す通り、宮崎リニア実験線は日向灘の海岸に沿ったほぼ直線の路線であり、構造物は全線がコンクリート高架橋となっている³⁾。地震計は中間地点（以下、サイトA）と南端地点（以下、サイトB）の2地点に設置した⁴⁾。サイトAとBの離隔距離は約4kmである。地震観測に用

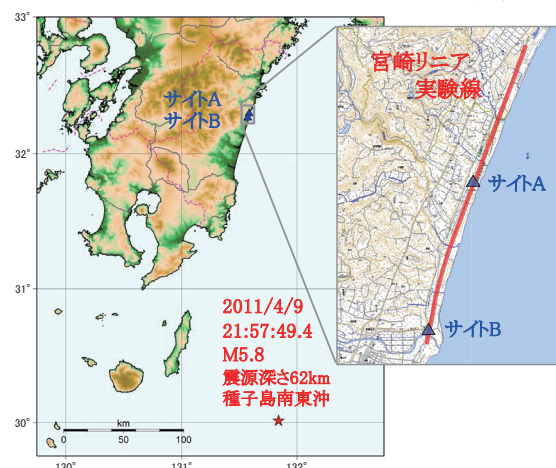


図1 宮崎リニア実験線と設置地震計の位置

* 防災技術研究部 地震防災研究室

特集：防災技術

いた機器は、データロガー、バッテリーおよび加速度センサーから構成され、水平成分の観測は橋軸方向と橋軸直角方向とした。地震観測の期間は2011年1月から2012年12月までの約2年間であり、100Hzサンプリングでデータを連続的に記録した。

3. 単点微動測定および各種物理探査の概要

3.1 モデル路線に沿った単点微動測定

軌道や構造物のみならず駅舎や変電所などを含めた鉄道施設は主に線状に連続していることから、地震時における路線上の地震動を推定するために線状に連続した地下構造を把握しておくことが望ましい。しかし、実際の路線上の地盤情報は、建設時に必要に応じて実施された標準貫入試験の結果のみの場合が多い。

本研究では、宮崎リニア実験線に沿ったS波速度構造を把握するため、密な間隔で単点微動測定を実施した。測定間隔は約100mとし、全87地点にて微動データを取得した。センサーは固有周期2秒の速度計を用い、データ収録の際はサンプリング周波数を100Hzとし、カットオフ周波数25Hzのローパスフィルター処理を施している。1地点の測定では、60秒間の測定を5回程度実施した。

次に、得られた単点微動測定データからデータ不良の5地点を除いた計82地点のH/Vスペクトル比を求めた。H/Vスペクトル比は中心周波数の20%幅の算術平均による平滑化処理を施したフーリエスペクトルの水平動と鉛直動の比として算出している。ここでは、橋軸方向および橋軸直角方向に対してH/Vスペクトル比を別々に求め、それらを対数平均してその地点のH/Vスペクトル比としている。

図2には宮崎リニア実験線のキロ程に対する各H/Vスペクトル比のコンター図を示す。図中にはH/Vスペクトル比が卓越している部分を○で示している。この路線の全長は約7kmであり、短い区間にも関わらずH/Vスペクトル比の卓越周波数に大きな差異がみられる。キロ程が3.158kmのサイトAでは約2Hzが卓越しており、6.708kmのサイトBでは約0.7Hzが卓越していることから、各サイトの地下構造が大きく異なっていることが示唆される。

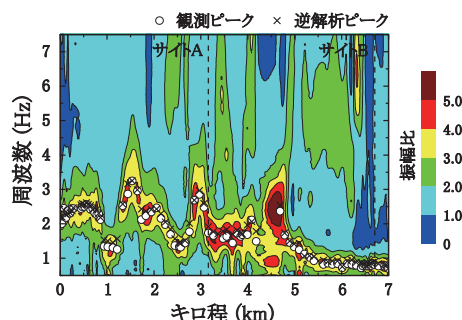


図2 H/V スペクトル比のコンター図

3.2 表面波探査およびアレイ微動探査

地震計が設置されているサイトAとBにおいて、主に浅層部のS波速度構造を推定するために表面波探査^(例えば5)を実施した。測定には単点微動測定と同じく固有周期2秒の速度計8台により、100Hzサンプリングにてデータを記録した。センサーは1台目から2台目の離隔距離を1mとし、それ以降は設置間隔を1mずつ増やし、最遠点となる8台目が打撃点から38mとなるように設置した。打撃はかけやを用いた人力によるものとし、最遠点でのS/N比が確保されていることを確認しながらデータを記録した。

また、より深部のS波速度構造を把握するためにアレイ微動探査^(例えば6)を行った。測定には表面波探査と同一の速度計を用い、100Hzサンプリングにて微動データを記録した。測定は30分程度行い、自動車の通過等に伴うノイズの少ない時間帯を切り出してSPAC法^{7) 8)}による解析を行った。センサーの配置は正三角形の頂点とその中心点とし、サイトAでは正三角形の1辺が10m, 20m, 40m, 80m, サイトBでは20m, 30m, 40m, 50m, 70m, 90mのアレイ観測を実施した。なお、測定箇所の条件により中心位置にセンサーを設置できない場合もあった。

4. サイトAとサイトBのS波速度構造の推定

表面波探査およびアレイ微動探査により得られたレイリー波の位相速度を合わせることで、サイトAとBでのレイリー波の分散特性を抽出する。図3(a)と(b)にはサイトAとBで観測された位相速度を示しており、図中の□は表面波探査、○はアレイ微動探査から得られた位相速度を表す。図3(a)に示すサイトAではおおよそ2Hzから15Hz、図3(b)に示すサイトBではおおよそ1Hzから20Hzの広帯域なレイリー波の分散曲線が連続的に得られた。

このレイリー波の分散曲線から、遺伝的アルゴリズムを用いた逆解析によりS波速度構造を推定した⁹⁾。図3(a)および(b)には、表面波探査およびアレイ微動探査により算出した位相速度と併せ、逆解析から求めた地下構造を用いて算出したレイリー波の理論分散曲線(赤実線)を示す。これらの図から、観測と理論のレイリー波の分散特性はよく一致していることが分かる。

また、図4(a)および(b)に表面波探査のセンサー配置にて行った単点微動測定による観測H/Vスペクトル比(緑実線)と推定地下構造を用いたレイリー波の理論H/Vスペクトル比(赤実線)を示す。図中の灰色の細実線は個別の観測H/Vスペクトル比を表し、緑実線はそれらの対数平均を表す。図4(a)のサイトAは2Hz前後が卓越しており、図4(b)のサイトBは0.7Hz前後が卓越している。

観測(緑実線)と理論(赤実線)の関係をみると、図4(a)のサイトAでは実測H/Vスペクトル比の2Hz前後のピークは、理論H/Vスペクトル比がトラフとなっている部

分にあたる。図4 (b) のサイト B では特に高周波数側の卓越周波数にずれが生じている。この理由として、表面波探査およびアレイ微動探査で得られた地下構造は観測領域の平均的な構造を表し、局所的な特性を反映する H/V スペクトル比とは必ずしも一致しないためと考えられる。より局所的な S 波速度構造を求めることを目的として、分散曲線の一致度を大きく損なわず H/V スペクトル比のピークの周波数位置が改善するように地下構造を修正することとした。ここでは順解析により S 波速度構造

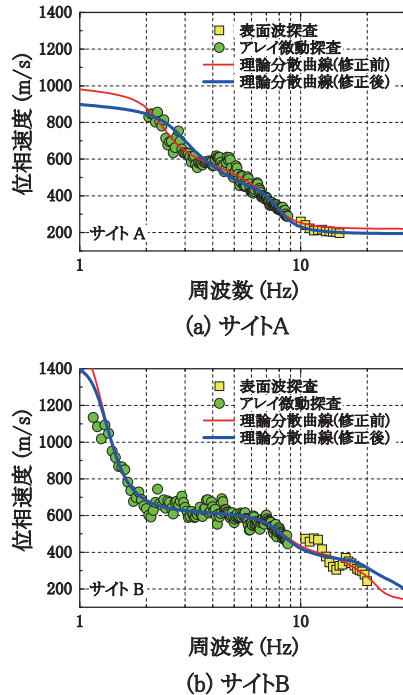


図3 観測位相速度および理論分散曲線

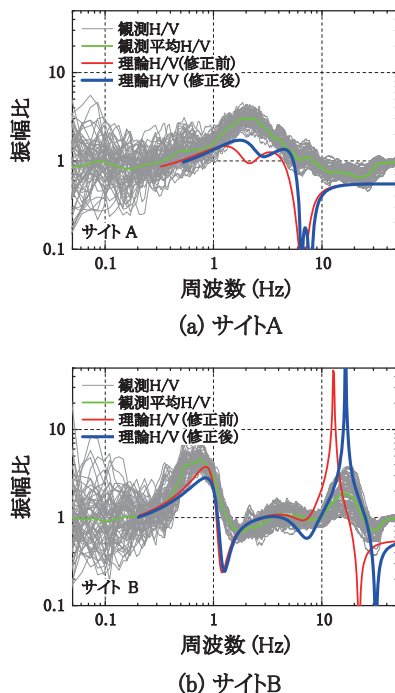


図4 観測および理論 H/V スペクトル比

を変更し、その結果を反映して探索範囲を狭く設定した上で、再度、遺伝的アルゴリズムを用いた逆解析を行った。

図3 (a), 4 (a) および 5 (a) にサイト A の修正前後の位相速度、H/V スペクトル比および推定 S 波速度構造を示す。図3 (a) に示す位相速度（青実線）を見ると 10Hz 以上の実測と理論の一致度が改善されており、図4 (a) の H/V スペクトル比（青実線）ではピークの周波数の実測と理論の一致度が修正前より高まっている。また、図3 (b), 4 (b) および 5 (b) にサイト B の修正前後の位相速度、H/V スペクトル比および推定 S 波速度構造を示す。図3 (b) に示す位相速度（青実線）を見ると 15Hz 以上の帯域で修正による違いがみられ、図4 (b) の H/V スペクトル比（青実線）では 15Hz 前後のピークの一致度が改善している。なお、理論分散曲線や理論 H/V スペクトルの算出に用いる P 波速度や密度は、経験式¹⁰⁾を用いて推定した S 波速度から算出している。

推定した地下構造は観測されたレイリー波の分散特性と H/V スペクトル比のピーク周波数の両方を良好に再現できており、H/V スペクトル比に基づく地下構造の修正により推定結果の信頼性はより高められたと考える。

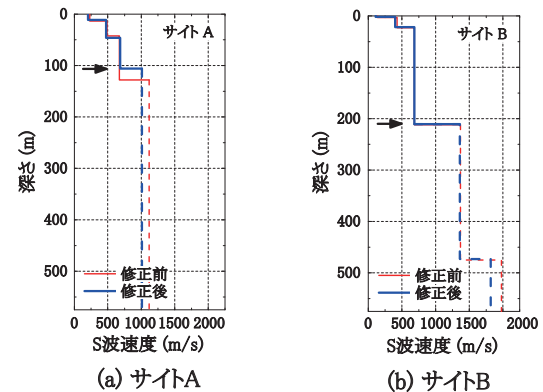


図5 推定 S 波速度構造

5. 推定した S 波速度構造の検証

サイト A と B において推定された S 波速度が 700m/s 程度以浅の地下構造を検証することを目的として、各サイトの入力地震動の比較を行う。ここでは、各サイトの地表面で観測された波形と 4 章で推定した地下構造を用いて基盤入力地震動を算出し比較する。

検討対象とした地震は 2011 年 4 月 9 日 21 時 57 分に発生した種子島南東沖の地震 (M5.8) である。この地震は、宮崎リニア実験線における約 2 年間の地震観測で波形が記録されたマグニチュードが最も大きな地震である。サイト A および B と当該地震の震央との位置関係を図1に示す。図に示す通り、ほぼ南北に延びる宮崎リニア実験線の橋軸方向は上記地震の放射方向、橋軸直角方向は放射直角方向に概ね一致しているが、ここでは、電子地図を用いて各サイトの橋軸方向に対する北からの角度

特集：防災技術

を求め、波形を回転させることにより放射方向と放射直角方向の波形を算出した。各サイトは約4km離れているが、震源までの距離に比べると十分に小さいことから各サイトの基盤に入力する地震動はほぼ同一であると推測される。

図6にサイトAとBの地表にて観測された加速度波形を示す。また、図7には各サイトにおける放射直角方向の地表加速度波形のフーリエスペクトルを示す。0.4Hz

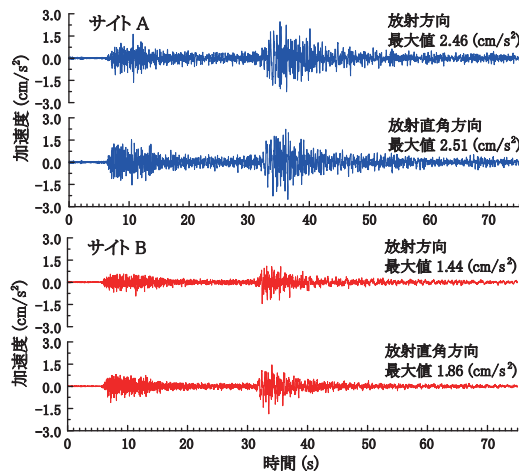


図6 地表加速度波形（上段：サイトA，下段：サイトB）

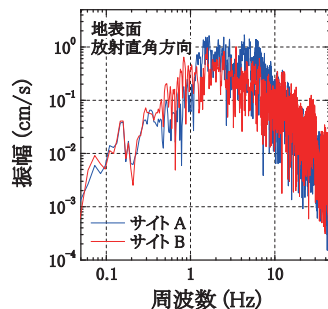


図7 地表加速度フーリエスペクトル

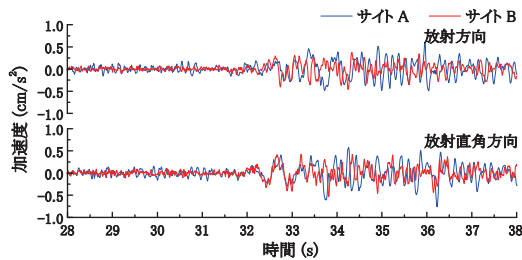


図8 基盤加速度波形

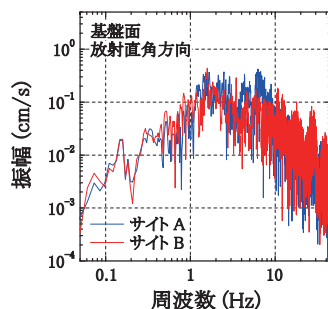


図9 基盤加速度フーリエスペクトル

から1Hzの帯域ではサイトBの振幅はサイトAよりも大きい。一方、1Hzから5Hzの帯域では逆にサイトAの振幅はサイトBよりも大きい。

次に、サイトAとBの基盤入力加速度波形を4章で推定した各サイトの地下構造と1次元重複反射理論を用いて算出した⁶⁾。Q値は周波数依存を与えず推定S波速度(cm/s)を15で除した値とした。算出した基盤入力加速度波形を図8に示す。なお、波形を算出した基盤面は、サイトAは3層(S波速度685m/s)と4層(1009m/s)の境界面(図5(a)の矢印の位置)とし、サイトBも3層(S波速度684m/s)と4層(1361m/s)の境界面(図5(b)の矢印の位置)とした。各サイトの基盤入力地震動を算出した境界面は深さが100m程度異なるが、ほぼ同一のコントラスト比を持つことからこの境界面を選択している。図8では、算出した基盤面における入力加速度波形の28秒から38秒の部分拡大しており、サイトAとBの波形を比較する目的から到達時間の遅れを補正している。具体的には、震源に近いサイトBの時間に0.6秒を加えている。この図を見ると、S波が到達したと考えられる32秒以降において両サイトの基盤入力加速度波形は振幅や位相がよく一致している。特にSH波が卓越する放射直角方向で一致度が高く、S波到達の直後は特に良好である。

図9には、各サイトにおける放射直角方向の基盤入力加速度波形のフーリエスペクトルを示す。図7に示した地表に比べ、0.4Hzから1Hzおよび1Hzから5Hzの帯域で一致度が高まっている。

S波速度が700m/s程度と1000m/s程度の層境界よりも浅い地盤の影響を取り除いて両サイト基盤入力地震動を求めた結果、地表観測地震動よりも一致度が高まることから、S波速度が700m/s程度以浅における推定地下構造は地震動推定などを行うための信頼性を有していると判断した。

6. モデル路線に沿ったS波速度構造と地震動の推定

6.1 モデル路線に沿ったS波速度構造の推定

宮崎リニア実験線に沿ったS波速度構造をH/Vスペクトル比の卓越部の情報に基づき推定する¹¹⁾。図2にはS波速度構造の推定に用いる各単点微動測定地点のH/Vスペクトル比の卓越部分を○で示している。

H/Vスペクトル比を用いてS波速度構造を連続的に推定する際は、4章で推定したサイトAとBのS波速度構造の情報を参照する。これは、H/Vスペクトル比はS波速度と層厚のトレードオフが強い¹²⁾ため、H/Vスペクトル比のみからでは地下構造の決定に不確かさを残すことによる。

推定に用いる観測H/Vスペクトル比は、卓越周波数の0.5倍から2.0倍の帯域を用いた。まず、北端の始点

から終点方へ向かいサイト A の推定地下構造の層厚と S 波速度に $\pm 10\%$ 幅の拘束を設けて、遺伝的アルゴリズムを用いた逆解析により S 波速度構造の推定を連続的に行った。本研究では、H/V スペクトル比の卓越部前後の狭い帯域を用いて地下構造を推定するため、逆解析時の拘束条件は探索範囲を狭く設定し、層厚ならびに S 波速度とも参照地下構造モデルの $\pm 10\%$ 幅としている。次に、南端の終点から始点方へ向かいサイト B の推定地下構造に基づき、サイト A と同じ拘束条件を設定した。なお、サイト B の推定地下構造は第 1 層として S 波速度が 109m/s の薄い層を有する 5 層モデルとしているが、この層はサイト B のごく表層に局所的に存在していると考えられ、連続的に S 波速度を推定する際の参照モデルとしては第 2 層に第 1 層の層厚を加えた 4 層モデルとした。

サイト A と B の地下構造モデルに基づき、両端から逆方向へ向けて観測 H/V スペクトル比とレイリー波の理論 H/V スペクトル比の一致度を確かめつつ連続的に S 波速度構造を推定し、それらの一致度が最も良好となるよう順次地下構造を決定した。その結果、サイト A モデル区間（サイト A のモデルを参照し地下構造を推定した区間）とサイト B モデル区間（サイト B のモデルを参照し地下構造を推定した区間）の境界は 5.100km 前後となった。なお、この位置は図 2 の○で示した H/V スペクトル比の観測ピークが 1Hz を下回る位置に概ね対応している。

サイト A モデル区間のキロ程が 0.934 ~ 1.217km, 2.446 ~ 2.662km, 3.158 ~ 5.097km (4.691km 地点を除く) では上記の拘束条件を用いると逆解析により実測の H/V スペクトル比のピークを再現できなかった。そのため、自由度を高めて 3 層目の層厚および 4 層目の S 波速度の拘束条件を $\pm 100\%$ 幅まで拡大して再度逆解析を行った。本研究では H/V スペクトル比のピーク周波数に注目し地下構造を求めている。よって、ピーク周波数を合わせることで推定地下構造の信頼性向上につながると考え、初期の条件で一致度が低い地点のみ拘束条件の自由度を高めている。

図 10 にサイト A モデル区間の観測 H/V スペクトル比と逆解析時のレイリー波理論 H/V スペクトル比の例として、キロ程 2.662km 地点における比較を示す。この例は上記の拘束条件の自由度を高めたケースであり、条件を緩和したことにより観測と理論の H/V スペクトル比のピーク周波数の一致が改善されている。この例では、自由度変更の結果として、変更前と比較し 3 層目の層厚が 62% 大きくなり、4 層目の S 波速度が 22% 速くなった。

図 2 には、H/V スペクトル比におけるピーク周波数の実測値（観測ピーク）と理論値（逆解析ピーク）を重ねて示す。ここで、理論値は上記の逆解析により求められた地下構造を用いてレイリー波の理論 H/V スペクトル比を算出することにより得られた値である。この図によると、逆解析により求められた推定地下構造の理論 H/V

V スペクトル比のピーク周波数は観測値よりもわずかに大きな値となっている地点もあるがよく一致している。これよりモデル路線全線に渡り、地下構造推定に向けたピーク周波数の再現は概ね良好であることが確認される。

図 11 に H/V スペクトル比を用いて推定した宮崎リニア実験線に沿った S 波速度構造を示す。図中の (A1) 184 ~ 219 はサイト A モデル区間の 1 層目かつ推定 S 波速度が 184 から 219m/s であることを表す。その他、(A2) 428 ~ 459 や (B1) 361 ~ 377 など同様の表現である。なお、サイト A モデル区間の層境界は+で表示し、サイト B モデル区間の層境界は×で表示している。

連続的に S 波速度構造を推定した結果、両区間の境界位置において始点方のサイト A モデル区間の第 1 層および第 2 層、終点方のサイト B モデル区間の第 1 層は不連続な速度分布となった。一方、サイト A モデル区間の第 3 層とサイト B モデル区間の第 2 層は、S 波速度は 640 から 750m/s と類似しており、ほぼ同じ S 波速度を持つ連続した層であると推測される。なお、サイト A モデル区間で第 3 層の層厚が所々大きくなっている地点がみられるが、これは先に述べた逆解析時の拘束条件を変更した区間である。

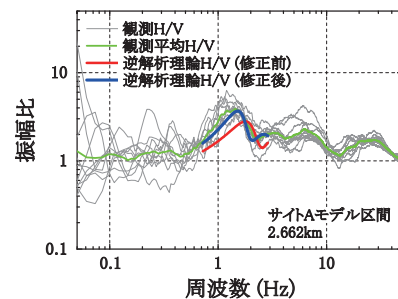


図 10 観測および逆解析理論 H/V スペクトル比の例

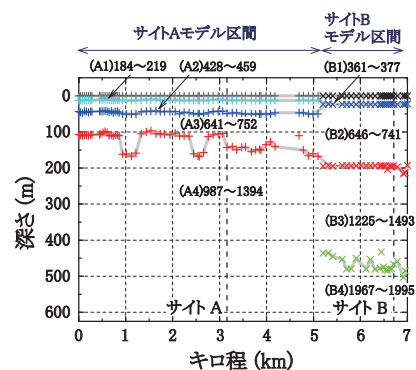


図 11 モデル路線に沿った S 波速度構造

6.2 モデル路線に沿った地震動の推定

ここでは、6 章 1 節で推定した S 波速度構造を用い、宮崎リニア実験線に沿った高密度な地震動推定を行う。推定の手順は以下の通りである。はじめに、S 波速度構造を推定した単点微動測定地点において、推定 S 波速度構造と 1 次元重複反射理論により基盤面から地表面への伝達関数を算出する。次に、5 章で算出した基盤入力地

特集：防災技術

震動は宮崎リニア実験線全線で同一であるとし、算出済みの伝達関数を用いて地表面の波形を算出する。そして、算出された地表面波形から地震動指標を計算する。なお、本研究での基盤入力地震動はサイト B にて求めたものを用いることとし、算出する地震動指標は水平 2 成分合成加速度とした。最後に、モデル路線に沿って算出した地震動のうちサイト A の観測と推定地震動を比較することにより精度検証を行った。検討に用いた地震動は、5 章の検討と同じく 2011 年 4 月 9 日 21 時 57 分の種子島南東沖の地震 (M5.8) とした。

図 12 には、宮崎リニア実験線のキロ程と推定した水平 2 成分合成の地表面最大加速度の関係を示す。この検討では、サイト B が参照点であり、サイト A は検証点という位置付けとなる。サイト A を見ると設置地震計により実測された値と 6 章 1 節で求めた S 波速度構造モデルに基づく推定の値はよく一致している。検証点は 1 点のみであるものの地震動推定の結果は良好であった。本研究の手法を用いて対象路線に沿った S 波速度構造を把握しておくことにより、詳細な地震動推定が可能であると考えられ、鉄道施設のような線状構造物への入力地震動や構造物の被害推定などに活用できると考えられる。

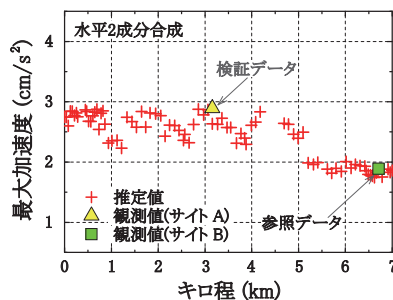


図 12 モデル路線に沿った地震動推定

7. おわりに

本研究ではモデル路線に沿って S 波速度構造を推定し、その情報に基づき高密度に地震動を推定することを試みた。本研究における地震動推定の手順を図 13 に示す。

観測と推定の地震動比較による精度検証の結果、評価

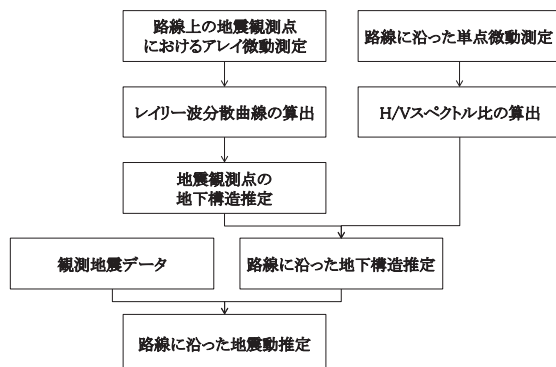


図 13 路線に沿った地震動推定の手順

箇所は 1 点のみではあるものの検証点で観測された地震動と良く一致し、宮崎リニア実験線沿線の地震動分布を詳細に把握することができた。

本研究の手順を用い、対象路線に沿った S 波速度構造を推定しデータベース化しておくことで、地震発生時において、鉄道施設のような線状構造物への入力地震動や構造物の被害推定などを即時的かつ詳細に実施することが可能となる。これらの推定結果は、列車の運転再開判断の支援情報などに活用できると考えられる。

なお、本研究は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

文 献

- 1) 中村豊：研究展望 総合地震防災システムの研究，土木学会論文集，No.531/I-34，pp.1-33，1996
- 2) 芦谷公稔，佐藤新二，岩田直泰，是永将宏，中村洋光：鉄道の地震警報システムにおける緊急地震速報の活用，物理探査，Vol.60，No.5，pp.387-397，2007
- 3) 財団法人 鉄道総合技術研究所：超電導磁気浮上式鉄道 宮崎リニア実験線記録誌，交通新聞社，1998
- 4) 岩田直泰，山本俊六，是永将宏，野田俊太，伊藤賀章：公的地震情報を活用した早期運転再開支援システムの試作，鉄道総研報告，Vol.26，No.9，pp.17-22，2012
- 5) 芦谷公稔，吉岡修，横山秀史：周波数 - 波数スペクトルの逆解析による複数モードの位相速度推定と鉄道振動への応用，物理探査，Vol.52，No.3，pp.214-226，1999
- 6) 津野靖士，工藤一嘉：微動を用いた空間自己相関法による S 波速度構造の実務利用への評価，日本建築学会構造系論文，No.596，pp.17-24，2005
- 7) Aki, K. : Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol.35, pp.415-456, 1957.
- 8) Okada, H. : The Microtremor Survey Method, *Geophysical monograph series*, No. 12, Society of exploration geophysicists, 2003.
- 9) 山中浩明，石田寛：遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析，日本建築学会構造系論文集，No.468，pp.9-17，1995
- 10) Ludwig, W. J., Nafe, J. E. and Drake, C. L. : Seismic refraction, *The sea*, Vol.4, edited by A. E. Maxwell, Wiley-Interscience, New York, pp.53-84, 1970.
- 11) 津野靖士，地元孝輔，山中浩明：東北地方太平洋沖地震の余震観測記録と微動観測記録の解析から推定された茨城県中部に於ける S 波速度構造 - 東茨城台地に注目して - ，物理探査，Vol.64，No.6，pp.401-412，2011
- 12) Scherbaum, F., Hinzen, K.-G. and Ohrnberger, M. : Determination of shallow shear wave velocity profiles in the Cologne, Germany area using ambient vibrations, *Geophys. J. Int.*, Vol.152, pp.597-612, 2003.