

近接サイト特性比を用いた鉄道沿線の 地震動分布評価手法

是永 将宏* 津野 靖士*

**Evaluation Method for High-resolution Distribution of Earthquake Ground Motions along Railways,
using “Adjacent Site Characteristic Ratios”**

Masahiro KORENAGA Seiji TSUNO

We propose a method to estimate the distribution of earthquake ground motions along railways with high density and high accuracy. In this method, firstly, the relative site amplification factors between the two adjacent seismic stations (“Adjacent site characteristic ratios”) are obtained using the high-density temporary earthquake observations data. Secondly, we obtain the site amplification factor at the evaluation sites (temporary seismic stations) with respect to the reference site (permanent seismic station) by sequentially multiplying the “Adjacent site characteristic ratios”. The earthquake ground motions at the evaluation points can be estimated by multiplying the site amplification characteristic ratios prepared in advance at each evaluation site by the earthquake records at the reference point.

キーワード：地震動評価, 臨時地震観測, サイト増幅特性, 近接サイト特性比

1. はじめに

鉄道では、地震発生時に停止した列車の運行を安全に再開させることを目的として、鉄道事業者が線路沿線に設置している地震計で観測された地震の揺れの大きさ(地震動指標値)に応じて、徒歩等による点検を実施している。鉄道用の地震計は離散的に設置されており、地震時には地震計で観測された値が周辺の代表値として扱われ、その観測値が基準値を超過した場合には予め定められた各地震計の受け持ち範囲に対して点検が行われる^{1) 2)}。地震計の設置間隔は一般的に新幹線では10～20km程度、在来線では最大で40km程度であることから、地震後の点検のため、運転再開に多大な時間を要する場合がある。一方で受け持ち範囲内の地震動は震源断層の破壊の特性や複雑さ(震源特性)、震源で発生した地震波が伝わる経路(伝播経路特性)、各地点近傍の地盤構造(サイト増幅特性)の影響により一様ではない。受け持ち範囲内の地震動の空間的な変化を高密度かつ高精度に把握することができれば、点検範囲の絞り込みや優先順位の設定などによって効率的な点検を行うことができ、迅速な運転再開や復旧支援に寄与することができる^{3) 4) 5)}。

ある地震に対する地震動の空間変化を高密度、高精度に評価するためには、地点ごとに固有の情報であるサイト増幅特性の空間分布を詳細に把握することが重要である。サイト増幅特性を評価する方法として、微動観測な

* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

どの物理探査を通して地盤モデルを作成して評価する方法などがあるが、本研究では、評価対象地点で観測された地震記録を用いたサイト増幅特性の評価方法を提案した。地震記録を用いるサイト増幅特性評価手法は、地震記録から直接的な評価を行うために高精度なサイト増幅特性の把握が可能である。しかし、従来の手法では、信頼性の高い評価を行うために、事前の地震観測により多くの地震記録を収録する必要があった。そのため、地震観測が長期間にわたることで手間やコストが大きくなるといった問題点があることから、これまで鉄道沿線のサイト増幅特性評価手法としてあまり用いられてこなかった。そこで本研究では、少ない観測地震記録からでも高密度、高精度な信頼性の高いサイト増幅特性の評価が可能となる手法を提案した。さらに、求めた近接サイト特性比と基準点である常設地震検知点の地震記録とを用いた、新たな高精細地震動評価手法を開発した。本報告では、提案した手法について述べるとともに、提案手法による予測結果と実測結果とを比較することで、その効果と適用性について検討を行った結果を示す。

2. 臨時地震観測

まず、本手法の適用に必要な地震観測について述べる。ここでは、九州地方の熊本平野および八代平野を南北に縦断する測線を対象として臨時地震観測を実施し、得られた地震記録を用いて手法の検討と検証を行った事例に

特集：地震対策技術

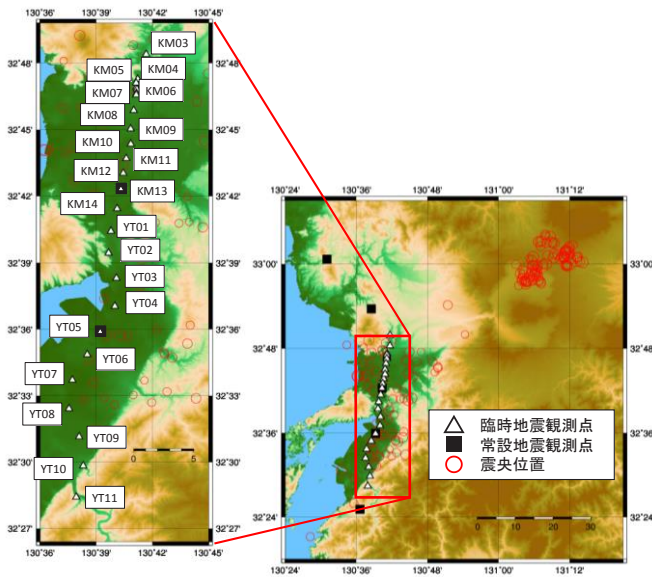


図1 地震観測点と検証に使用した地震

各観測点に設置した地震計の外観を図2に示す。地震計は、加速度センサー（ミットヨ社製：JEP-6A3）とデータの記録装置（白山工業製：LS8800）、バッテリー、GPSアンテナなどから構成される可搬型の機器を使用した。加速度センサーは接着剤などで地表面に固定し、データ記録装置やバッテリーは防水仕様のボックス内に収納した。データはSDカードに記録する方式とし、加速度センサーからの連続データを100Hzサンプリングで収録した。また、電源としてカーバッテリーや単一乾電池を使用した。この可搬型地震計は電源や通信など外部との接続が不要で3～4ヶ月程度の連続観測が可能であり、設置や取り外しも容易であることから、余震観測などの突発的な観測にも機動的に使用することが可能である。

今回の臨時地震観測は2016年熊本地震の発生直後から実施した。検証のために多くのデータを収録することを目的としたため、設置期間は最長で10ヶ月としており、観測点周辺において発生した非常に多くの地震を収録している。このうち本報告の解析には、Mj2.5以上の地震、計176地震を使用した（図3）。解析に使用した地震動の記録は水平2成分合成加速度で最大約70galである。なお、本研究では地震後の点検範囲の絞り込み等による運転再開までの時間短縮を目指すため、点検判断の基準値程度までの地震動を高精度に評価することを目的とする。既往研究により、基盤に入力する地震動が大きくなるとサイト増幅特性が表層地盤の非線形化の影響により変化することが明らかとなっている⁷⁾。ただし、この影響が顕著になるのは100gal以上の場合とされ、この値より低いレベルの揺れを提案手法の適用範囲とする。



図2 臨時地震観測に用いた機器

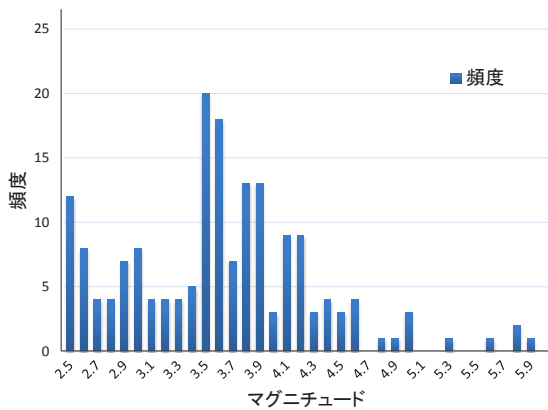


図3 解析に用いた地震

ついて示す。臨時地震観測点の配置と、検証に使用した地震の震央位置を図1に示す⁶⁾。臨時地震観測は、複数回の観測期間に分けて、熊本平野の北端部から八代平野南端部に至る40kmの区間で実施した。同区間内には、約10kmの間隔で2箇所の常設地震検知点が設置されている（図1中黒四角）。臨時地震観測点は300m～3km間隔に配置し、各観測期間において数箇所ずつ、計26箇所を設置した（図1中白三角）。

3. 臨時地震観測記録を用いた高精細な地震動評価手法

3.1 近接サイト特性比

稠密な臨時地震観測による地震計記録を用いた、高精度で高精度なサイト増幅特性の評価手法について説明する。地表で観測される地震動の周波数特性は一般に、震源特性、地震波の伝播経路特性、各地点近傍のサイト増幅特性の積として式(1)で表現される。また、その概念図を図4に示す。

$$O_{i,j}(f) = S_{i,j}(f) \cdot P_{i,j}(f) \cdot G_j(f) \quad (1)$$

$O_{i,j}(f)$ は地震計で観測される地震動の加速度フーリエ振幅スペクトル、 $S_{i,j}(f)$ は震源特性、 $P_{i,j}(f)$ は伝播経路特性、 $G_j(f)$ はサイト増幅特性を表す。また f は周波数、 i, j はそれぞれ震源、観測点を表す添字である。

地震記録によるサイト増幅特性評価として従来用いられてきた手法に、式(2)のように基準点(常設地震観測点)

と評価点（臨時地震観測点）とで得られた地震動のフーリエスペクトルの比を計算することで、両点のサイト増幅特性比を求めるものがある。

$$\begin{aligned} \frac{G_j(f)}{G_{j+1}(f)} &= \frac{O_{i,j}(f)}{S_{i,j}(f)P_{i,j}(f)} \cdot \frac{S_{i,j+1}(f)P_{i,j+1}(f)}{O_{i,j+1}(f)} \\ &= \frac{O_{i,j}(f)}{O_{i,j+1}(f)} \cdot \frac{S_{i,j+1}(f)}{S_{i,j}(f)} \cdot \frac{P_{i,j+1}(f)}{P_{i,j}(f)} \end{aligned} \quad (2)$$

この手法では、基準点と評価点の距離が大きい場合に2地点間で得られる地震動の記録に対する震源特性と伝播経路特性の差異が大きくなるため ($S_{i,j+1}(f)/S_{i,j}(f) \neq 1$, $P_{i,j+1}(f)/P_{i,j}(f) \neq 1$)、観測されたフーリエスペクトルの比が純粋なサイト増幅特性の比とならず、ばらつきや誤差が生じることが課題として残る。特に震源距離が小さい地震の場合に、その影響が顕著になる。この手法でばらつきを抑えた信頼性の高いサイト増幅特性比を得るためには、多くの地震記録を使用して平均値を求める、または震源特性と伝播経路特性の影響を小さくするために十分に遠地で発生した地震を用いて計算するなどの方法が考えられる。ただし、いずれも必要なデータを得るために長期間にわたって臨時地震観測を実施する必要が生じるため、測定の労力やコストが大きくなる場合がある。そこで本研究では、少ないデータでも効果的に、高精度で信頼性の高いサイト増幅特性の空間分布を評価できる新たな手法を提案する。

ここで、近接する2地点で同時に地震観測を行い、同一の地震*i*に対してそれぞれの地震動 $O_{i,1}(f)$, $O_{i,2}(f)$ が得られた場合を考える。地点間の距離が震源断層の大きさ、震源距離と比較して十分に小さい場合、 $O_{i,1}(f)$, $O_{i,2}(f)$ に対する震源特性と伝播経路特性はほぼ同一であると見なすことができる ($S_{i,2}(f)/S_{i,1}(f) \doteq 1$, $P_{i,2}(f)/P_{i,1}(f) \doteq 1$) ため、2地点間のサイト増幅特性比 $G_{2/1}(f)$ は式(3)により表現される。

$$G_{2/1}(f) = G_2(f) / G_1(f) = O_{i,2}(f) / O_{i,1}(f) \quad (3)$$

すなわち、近接する2地点のフーリエスペクトルの比を計算することで、震源特性と伝播経路特性の影響が除かれた、精度の高い地点間のサイト増幅特性の比を得ることが可能となる。ただし、フーリエスペクトル比を計算する際に幾何減衰の影響を考慮するため、震源距離による補正 ($1/r$: r は震源距離) を行う必要がある。

提案するサイト増幅特性の評価手法では、高密度な臨時地震観測で得られた地震記録のうち、近距離に設置された2つの臨時観測点間で同時に観測された地震記録のスペクトル比を計算し、複数の地震記録に対して平均化したものをその地点間のサイト増幅特性比（近接サイト特性比）とする（図5）。本手法によれば、従来法ではばらつきや誤差が生じやすい震源距離が比較的小さい地

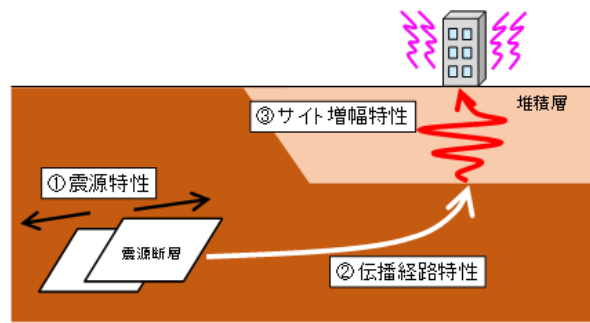


図4 震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性の概念

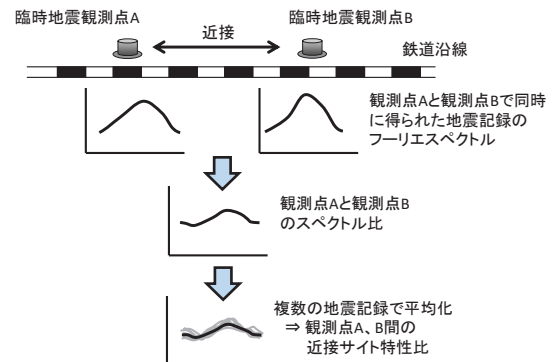


図5 近接サイト特性比の概念図

震や発生場所に偏りのある地震などを利用した場合、少ない地震データのみしか利用できない場合においても、安定的に精度の高いサイト増幅特性を求めることが可能となる。解析に用いる地震の制約が小さいことから、臨時地震観測を実施する期間を短くすることができ、高精度なサイト増幅特性の空間分布の評価が低コストかつ容易に可能となると期待される。

3.2 近接サイト特性比を用いた地震動評価手法

前節で示した臨時地震観測点間の近接サイト特性比を利用した、高精細な地震動の空間分布の評価手法を提案する。手法全体のフローを図6に示す。

まず、数10km間隔で設置された基準点（常設地震観測点）間で高密度な臨時地震観測（数100m～数km程度間隔）を実施し（図6①）、得られた地震記録から各臨時地震観測点間の近接サイト特性比を求める（図6②）。次に、近接サイト特性比を用いて、基準点Rに対する評価点（臨時地震観測点）*i*のサイト増幅特性比 $G_{i/R}(f)$ を式(4)で求める（図6③）。

$$G_{i/R}(f) = G_{i/i+1}(f) * G_{i+1/i+2}(f) * \dots * G_{R-1/R}(f) \quad (4)$$

提案手法では、隣接する各臨時地震観測点間の近接サイト特性比を『数珠つなぎ』することで $G_{i/R}(f)$ を求める（数珠つなぎ法）。近接サイト特性比を用いることにより、従来の基準点と評価点との地震動のフーリエスペクトル

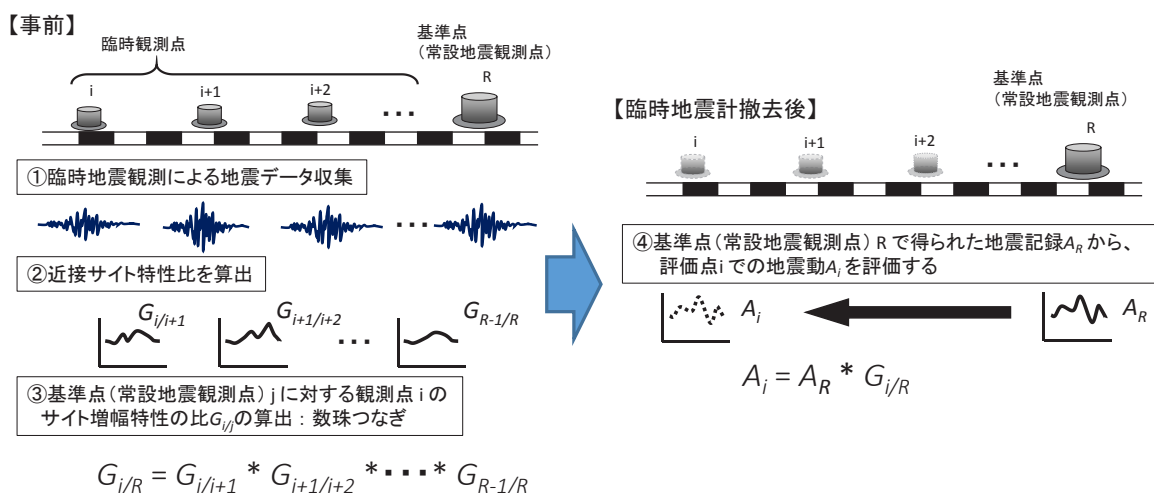


図6 提案した高精細な地震動分布評価手法の手順

の比を直接計算する手法と比べて、震源特性と伝播経路特性の影響の小さい高精度なサイト増幅特性比をより効果的に求めることができると考える。

上記の数珠つなぎ法を用いて、基準点間の各評価点における高密度なサイト増幅特性比の空間分布をあらかじめ用意しておく。臨時地震計撤去後に地震が発生した際には、評価点 E (臨時地震観測点を設置していた箇所) でのサイト増幅特性比 $G_{E/R}(f)$ に、基準点 R で記録した地震記録 $A_R(f)$ を式(5)のように掛け合わせることで、評価点 E での地震動 $A_E(f)$ を評価することが可能となる(図6④)。

$$A_E(f) = A_R(f) * G_{E/R}(f) \quad (5)$$

なお、地震動 $A_E(f)$ を求める際にも、基準点 R および評価点 E の震源距離による補正を行うこととする。

3.3 地震動評価手法の精度検証

提案した地震動評価手法による地震動評価結果の精度を検証するために、2章で示した臨時地震観測記録と式(5)を用いて、提案手法から算出したスペクトルと実記録との比較を行った。

まず、図7に示した常設地震観測点 (KM13) を基準点、その周辺に設置した臨時地震観測点 (KM06 ~ KM12) を評価点とし、記録された地震データから、提案手法を用いて基準点に対する評価点のサイト増幅特性比を求めた。さらに、すべての観測点で観測された地震記録 (2016年4月16日 9:48 Mj5.4) を用いて各評価点の地震動評価を行い、実際に記録された地震動記録との比較を行った。この結果を図8に示す。の黒線が臨時地震観測により得られた観測結果、赤線が提案手法により算出した評価結果である。各評価点における算出結果と実測値の結果は、若干のばらつきはあるものの、1Hz ~ 5Hz 付近のピークなどの特徴がよく一致しており、提案手法により周波数領域

において高い精度で地震動評価を行えることが示された。

これまででは常設地震観測点の地震動記録のみを利用して、一律に点検が実施されているが、本手法により高密度に地震動特性の空間的な変化を把握することが可能となることから、点検範囲の絞り込みなどの効率化により早期の運転再開につながることを期待される。

3.4 地震動指標値評価への適用

3.2節で提案した地震動評価手法では、地震動のスペクトルを出力としている。地震動のスペクトルは、構造物の被害推定や被害発生箇所の抽出を行うために非常に有用な情報である。一方で、地震後の運転再開判断には、現在は、警報用最大加速度⁸⁾ や計測震度、SI 値などの地震動の大きさを示すスカラー値 (地震動指標値) が用いられている。そこで、ここまでに提案した近接サイト特性比を用いた鉄道沿線の高精細な地震動評価手法について、地震動指標値による評価への適用を行った。

まず、地点間のサイト増幅特性比から地震動指標値の補正を行うための係数 (サイト補正係数) を求める。ここでは、臨時地震観測で得られた地震記録を用いて、係数を求める方法を示す。

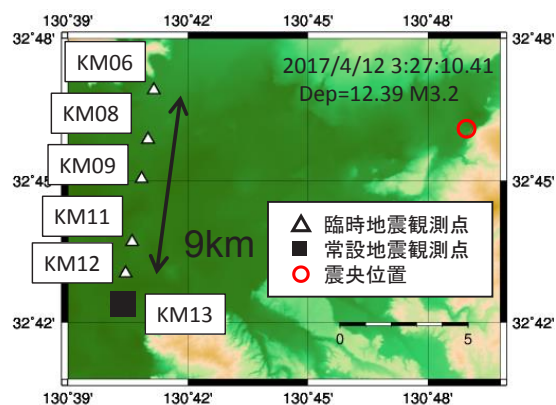


図7 検証に用いた観測点と地震

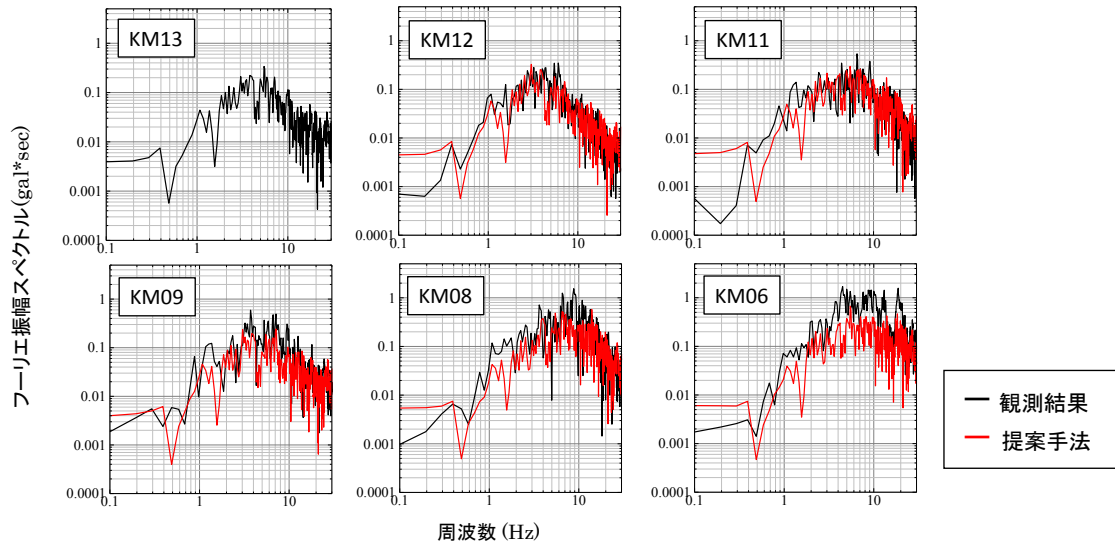


図8 観測記録と本手法による地震動評価結果との比較

近接する2つの臨時地震観測点間で同時に得られた地震の記録から、フーリエ振幅スペクトルの観測点間の比の平均値と地震動指標値の比を算出し、両者の関係式を求める。ここで、観測点間のスペクトル比の平均値は、地震動指標値の比との相関が最もよくなる1～5Hzの周波数帯域のデータを抜き出して算出することとした。さらに、この関係式を換算式とし、近接サイト特性比の数値つなぎにより求めたサイト増幅特性比(式(4))から、基準点に対する評価点の、各地震動指標値のサイト補正係数を求めた。このサイト補正係数と、基準点(常設地震観測点)で観測された地震記録(地震動指標値)とを掛けあわせることで、各評価点の地震動指標値を評価することが可能となる。

上記の地震動指標値評価手法を実地震データに適用して、その精度を確認した。求めた評価結果と、評価点で実測された値との比較の例を図9に示す。区間の全ての評価点において計測震度の推定誤差が概ね0.5以下となっており、評価区間内全体の揺れの傾向が正しく示されている。同様に複数の地震に対して地震動指標値の評価を行った結果、その誤差RMSは計測震度で約0.5～0.6となり、本手法で十分な推定精度で地震動指標値を評価することが可能であることが明らかとなった。

4. 提案手法の適用条件に関する検討

提案手法の適切な実施に向けて、近接サイト特性比の算出に用いるデータ数や臨時地震観測における観測点の間隔と、近接サイト特性比の精度との関係を検証し、本手法の適用条件についての確認を行った。

4.1 臨時地震観測点間隔と近接サイト特性比の精度

臨時地震観測点間の距離が近接サイト特性比の算出結果に与える影響について検証する。まず、地下構造の変

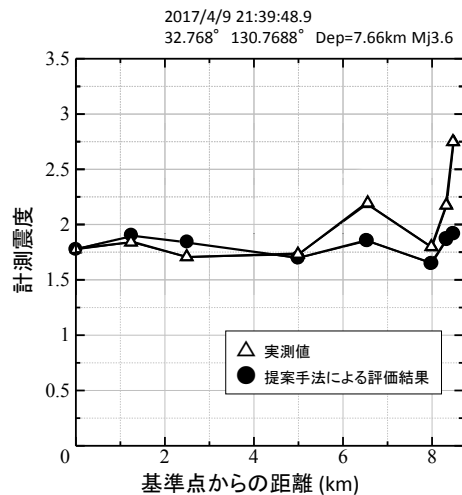


図9 地震動指標値の評価結果と実測値との比較

化が比較的小さいと考えられる平野中央部の臨時地震観測点について、観測点間の距離を変更しながらそれぞれ近接サイト特性比を求め、各距離におけるばらつき(標準偏差)を比較した。ここで近接サイト特性比の算出には、各臨時地震観測点で収録されたすべての地震記録を使用している。図10に観測点間隔と近接サイト特性比の標準偏差との関係を示す。図10より、臨時地震観測点の間隔が大きくなるほど、標準偏差の値が大きくなる傾向が見られる。これは、近接サイト特性比を算出する際に、観測点間隔が大きい方が震源特性や伝播経路特性の違いによる影響を受けやすく、純粋な近接サイト特性比とならない場合があるためと考えられる。

手法の最終的な利用方法を考える場合、臨時地震観測点の間隔を極力小さくした方が、より詳細に地震動の空間分布の把握ができ、地震後の点検箇所の効率的な絞り込みや点検範囲の縮小を行うことが可能となることから、運転再開までの時間短縮に与える効果は大きくなる。また、図10の結果より、推定精度の観点からも臨時地震

特集：地震対策技術

観測点間の間隔を小さくする方がよく、特に距離が5km以下であれば、標準偏差の値は0.2～0.3程度となり、安定的に近接サイト特性比が求められることがわかる。一方で臨時地震観測にかかる労力やコストを考えた場合には、観測点間隔を大きくして臨時観測点の数を減らす方が有利である。平野中央部などの地下構造の変化が小さいと考えられる箇所については、上記の5kmを上限の目安として臨時地震観測を実施することで、より効率的にサイト増幅特性の空間分布の把握が可能となると考える。また、地下構造の変化が大きいと考えられる平野端部については地盤条件の変化に対応して臨時観測点間の距離を短くすることで、サイト増幅特性の把握が可能となると考える。

4.2 近接サイト特性比算出に使用するデータ数と精度

次に、近接サイト特性比の算出に使用するデータ数と精度との関係について確認を行う。各臨時地震観測点で収録されている地震記録からランダムに5個、10個、15個、20個の記録を抽出し、それぞれ近接サイト特性比を算出する。これを5回ずつ行い、それぞれのデータ数ごとに正解からの誤差のRMSを求めた。ここで正解は、臨時観測点間で同時に観測されたすべての地震記録（約50個）を使用して算出した近接サイト特性比とした。結果を図11に示す。算出に使用するデータ数を多くした方が、誤差のRMSは小さく、安定的に正しい近接サイト特性比が

求められており、可能な限り多くの地震記録を用いて算出することが望ましい。しかし、データ数が10個以上であればその誤差のRMSは小さく、この程度のデータ数であれば安定的に近接サイト特性比の算出が可能であると考えられる。10個程度のデータを収録するためにかかる臨時地震観測の期間は、例えば本研究において2016年熊本地震発生から1年後に実施した臨時地震観測においては、Mj3.5の比較的規模の大きな地震に限っても約4ヶ月間であった。観測点周辺での地震の発生状況に依存するものの、比較的短い期間の臨時地震観測によって、精度の高いサイト増幅特性の評価が可能であると言える。

5. まとめ

高密度の臨時地震観測記録を用い、近距離に設置された地震計間で得られた観測地震記録から、地点間サイト増幅特性差（近接サイト特性比）を求める手法を提案した。また、求めた近接サイト特性比と常設地震検知点の地震記録とを用いた、新たな高精細地震動評価手法を提案した。提案手法を実地震に適用した結果、短期間に観測された少ないデータで、高精度かつ高密度な地震動評価を行えることが確認された。本手法を対象となる鉄道沿線に適用することにより、地震時の線路点検の効率化や早期運転再開につながることを期待される。

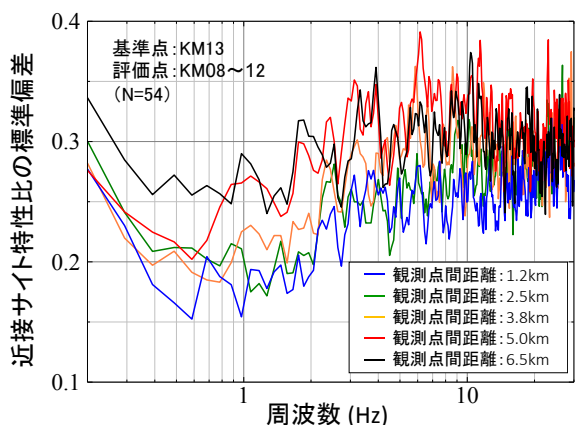


図10 観測点間隔と近接サイト特性比の標準偏差

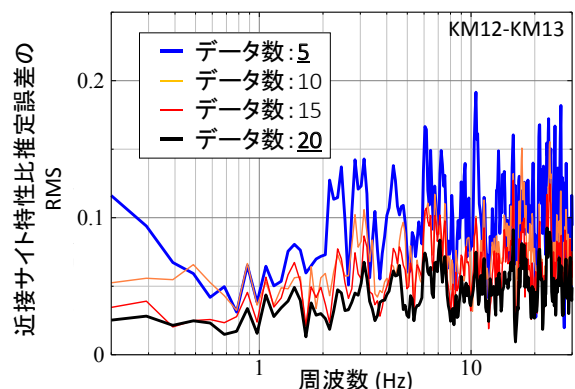


図11 データ数と近接サイト特性比推定誤差のRMS

文献

- 1) 鈴木博人, 島村誠: 地震時運転規制方法の研究, JR EAST Technical Review, No.3, pp.53-60, 2003
- 2) 堀込順一: JR 東日本における地震対策と運転規制概要, 新線路, Vol.60, No.1, pp.59-61, 2006
- 3) 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
- 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) 山本俊六, 岩田直泰, 坂井公俊, 岡本京祐: 鉄道用地震情報公開システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.30, No.5, pp.41-46, 2016
- 6) Tsuno S, Korenaga M, Okamoto K, Yamanaka H, Chimoto K, Matsushima T: Local site effects in Kumamoto City revealed by the 2016 Kumamoto earthquake, Earth Planets Space, 69:37, 2017.
- 7) 坂井公俊, 室野剛隆, 桐生郷史: 地表位置の距離減衰式から工学的基盤位置の地震動を推定する簡易手法, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.57A, pp. 332-339, 2011
- 8) 中村洋光, 岩田直泰, 芦谷公稔: 地震時運転規制に用いる指標と鉄道被害の統計的な関係, 鉄道総研報告, Vol.19, No.10, pp.11-16, 2005