

地震後の点検に向けて 沿線の地震動を正確に推定する

鉄道総研は鉄道路線に沿った地震動と構造物の被害ランクを推定し、地震発生の数分後にそれらの情報を配信する、鉄道地震被害推定情報配信システム (DISER) とよぶシステムを運用しています。このシステムは公的機関からリアルタイムに提供される観測や推定による地震情報を活用しています。鉄道総研はDISERが配信する情報のうち、路線に沿った推定地震動の信頼性向上について検討を行っています。ここでは、より正確な地震動推定に向けた地盤データベースの更新、表層地盤増幅の算出改良、観測値と推定値の組み合わせ、事業者の沿線地震計情報の活用に関する取り組みを紹介します。



岩田 直泰
Naoyasu Iwata
鉄道地震工学研究センター
地震解析研究室長



森脇 美沙
Misa Moriwaki
鉄道地震工学研究センター
地震解析研究室
研究員



田中 浩平
Kohei Tanaka
鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室
副主任研究員



坂井 公俊
Kimitoshi Sakai
鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室
主任研究員



山本 俊六
Shunroku Yamamoto
鉄道地震工学研究センター長

はじめに

鉄道総研は鉄道地震被害推定情報配信システム (DISER) と名付けたシステムを開発し、2019年8月に運用を開始しました¹⁾。このシステムは、路線や構造物の情報を登録した事業者に対して、対象とする路線の沿線地震動や構造物被害ランクの推定情報を地震発生の数分後に配信します。現在、路線や構造物の情報を登録した一部の事業者へDISERのリアルタイム情報を配信しており、地震後の沿線の揺れの把握などにこのリアルタイム情報の導入が進められています。

現行の地震時における列車停止や点検の判断は、基本として事業者が沿線に独自に設置した地震計の観測値に基づいています。地震計は沿線におおむね一定間隔に置かれていることから、隣の地震計との間の揺れは直接把握できません。そこで、地震計にはあらかじめ受け持つ区間が設定されており、その区間内は地震計の観測値と同一の揺れであったとして扱うことにより、点検の実施などが判断されています。しかし、実際は隣の地震計との間の揺れは一律ではなく、地点によりさ

まざまに変化します。DISERのリアルタイム情報の活用により沿線の揺れの分布を連続的に把握できれば、点検を行う区間の判断に役立ててことができます。場合によっては点検の効率化につながり、運転再開までの時間を短縮できる可能性があります。

DISERは、公的地震情報を利用して沿線の揺れを計算により求めるシステムです。計算に基づく情報のため、推定の誤差が含まれます。その誤差を可能な限り低減し、正確な地震動を推定する取り組みは、点検区間の判断の適正化に有益です。さらに、構造物被害ランクを推定する際の構造物への作用地震動の精度を高める結果となり、構造物被害ランク推定の信頼性の向上にもつながります。

ここではDISERが配信している地震情報のうち、路線に沿った地表の地震動に焦点をあて、より正確な推定に向けた取り組みを紹介します。

地盤データベースの更新

DISERは公的地震情報を利用して、まず500m四方の領域ごとの面的地震動を推定します。この面的情報から対

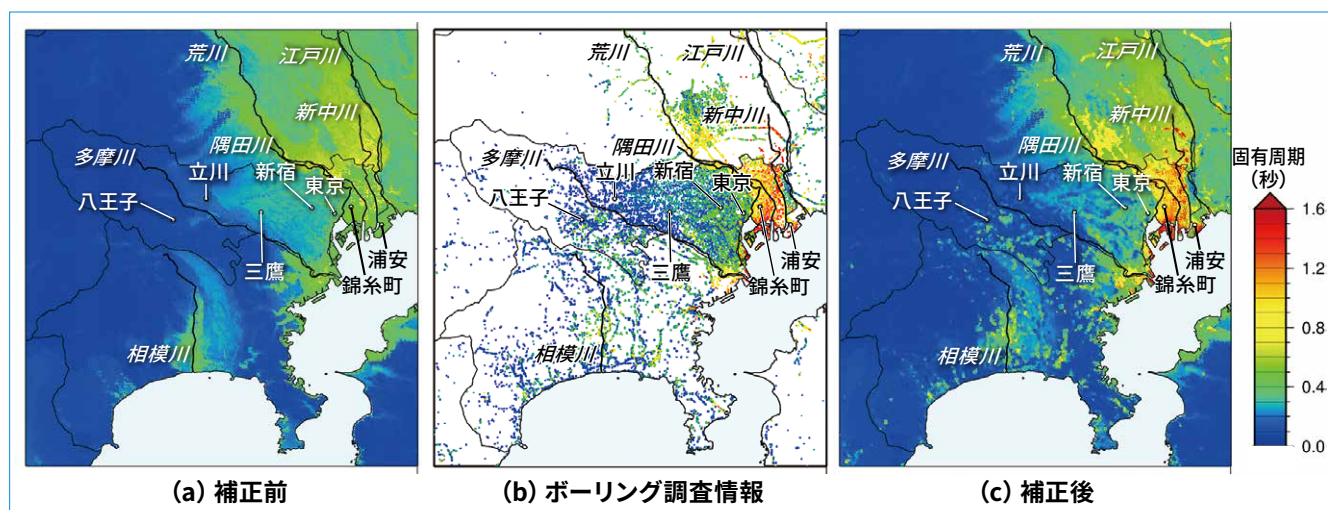


図1 地盤データベース補正の例

象路線の地震動を抽出し、事業者が利用しやすい路線沿いの情報に変えて提供しています。地盤の揺れやすさは、地表面付近の地盤の特性によって変化するため、地盤の揺れやすさを正確に評価したうえで地震動を計算する必要があります。運用中のDISERは、地盤の情報として、地形などに基づいて独自に整備した面的な地盤データベースを用いています¹⁾。

近年、多数のボーリング調査(☞参照)による地盤情報が公的機関から公開されています。そこで、このボーリング調査情報を活用して、面的な地盤データベースの更新を行いました²⁾。図1(a)は従来の地盤データベース(固有周期、☞参照)であり、(b)にボーリング調査による情報を示しています。(a)に対して(b)による補正を加えた情報が(c)となります。(c)によるとボーリング調査に基づく詳細な地盤情

報が反映されており、地盤データベースの更新は推定地震動の信頼性を高めることにつながります。

表層地盤増幅の算出改良

断層の破壊により生じた地震動は地中を伝わり地表に到達します。地震動はその地点の表層近くの地盤の影響を強く受けます。一般的に、表層地盤により地震の揺れが大きくなる現象(ここでは表層地盤増幅とよびます)が知られており、その評価は地表の地震動を推定するうえで重要な要素です。表層地盤はおもに砂の粒などから構成されています。強い揺れが地中から伝わると、粒が揺れを地表に伝えきれなくなる現象が発生します。これは、表層地盤の非線形化とよばれており、とくに強い揺れを推定する際には、この非線形化を考慮して表層地盤増幅を算出する必要があります¹⁾。

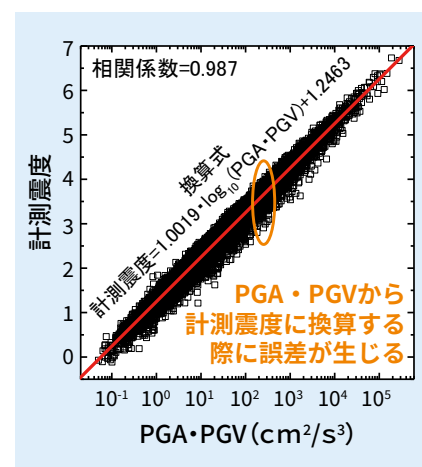


図2 地震波形から算出した指標の関係

ところで、地震時の運転規制には、地震動波形から計算される地震動指標とよばれる数値を用いますが、運転規制に使われる指標の代表的なものとして、気象庁が定義する計測震度があります。運用中のDISERでは計測震度を、地表面の最大加速度(PGA)と最大速度(PGV)の2つの指標から算定しています。これは、PGAとPGVには非線形化した表層地盤増幅を算出する方法が確立されているためと、図2のとおりこれらの積が計測震度と対応関係をもつためです。しかし、両者の関係にはばらつきがあり、統計的関係に基づく計測震度の算出結果には換算による誤差が含まれることとなります。

☞ ボーリング調査

地盤に細い穴を掘り地盤の状況や地層の境界の深さなどを調べる地盤調査法の1つです。一般的に、N値とよばれる強度を計測します。N値により設計に用いる地盤の支持力や土質定数が算定できます。

☞ 固有周期

地震動は「揺れの大きさ」と「揺れの繰り返し間隔」に分けて考えることができます。ものにはそのものが揺れやすい繰り返し間隔があり、固有周期とよべます。

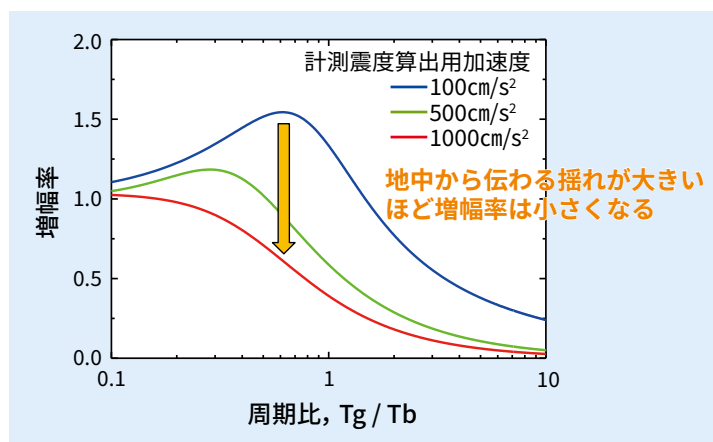


図3 計測震度の表層地盤増幅特性の例

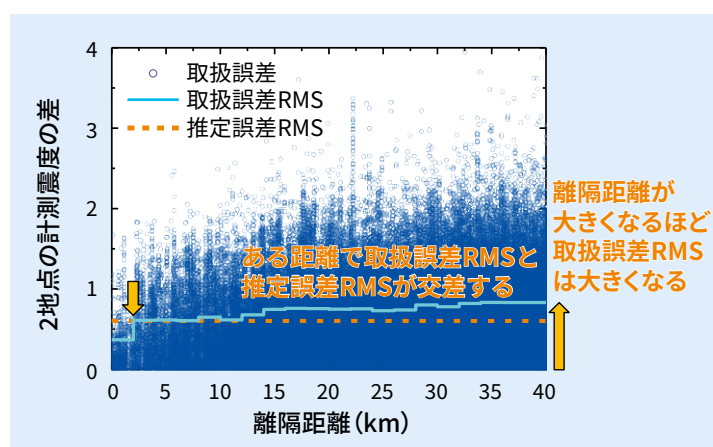


図4 取扱誤差と推定誤差の比較

そこで、計測震度に対して表層地盤増幅の算出法を、多様な地盤条件、多数の地震動波形を用いた地盤応答解析により新たに定めました³⁾。図3に計測震度を算出する際の表層地盤増幅特性の例を示します。この図は、横軸に地中から伝わる揺れの固有周期 (T_b) と表層地盤の固有周期 (T_g) の比を取り、縦軸に表層地盤増幅の程度を示しています。地中から伝わる揺れが大きいほど、非線形化により増幅率は小さくなることが確認できます。ここで新たに定めた表層地盤増幅により、推定地震動の信頼性を高めることができます。

観測値と推定値の組み合わせ

公的地震情報に基づくDISERの推定地震動には、計算手法や地盤情報の

ばらつきなどに起因する推定誤差が含まれます。地震計近傍の地点においては、計算による推定値を用いるよりも近傍の地震計の揺れと同一とみなした方が誤差は小さくなることが考えられます。そこで、より正確な地震動の推定に向けて、観測値と推定値を組み合わせる方法を開発しました。

この検討にあたり、ある地点の揺れを、近傍の地震計の観測値と同一とした場合の誤差（ここでは取扱誤差とよびます）と、DISERによる推定値を用いた場合の誤差（ここでは推定誤差とよびます）を比較しました。

まず、取扱誤差を把握するため、公的機関の観測値⁴⁾を用いて、2地点の地震計の計測震度の差とそれらの離隔距離の関係を整理しました⁵⁾。図4の

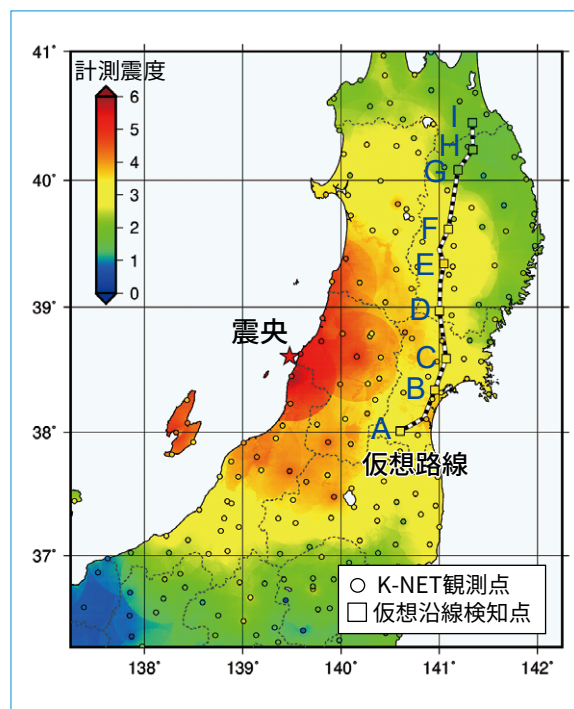


図5 面的地震動の推定例（提案手法）

青色丸印は2地点の計測震度の差を示していますが、これは取扱誤差に相当します。離隔距離2km間隔ごとの取扱誤差の平均的な値（ここでは取扱誤差RMSとよびます）は、図4に水色実線で示すとおり、離隔距離が大きくなるほど大きくなる傾向がみられます。一方、DISERによる推定誤差の平均的な値（ここでは推定誤差RMSとよびます）は0.57程度となることがわかっており¹⁾、図4の^{だいたい}橙色破線で示しています。

図4より、離隔距離2kmよりも小さい範囲では、取扱誤差RMSは推定誤差RMSよりも小さくなることがわかります。すなわち、地震計から2km未満の範囲は、DISERの推定値に代えて、沿線の地震計の観測値をそのまま用いることで、DISERの推定地震動の信頼性を高めることにつながります。ここで述べた観測値と推定値を組み合わせる手法は、今後、DISERへの導入を目指しています。

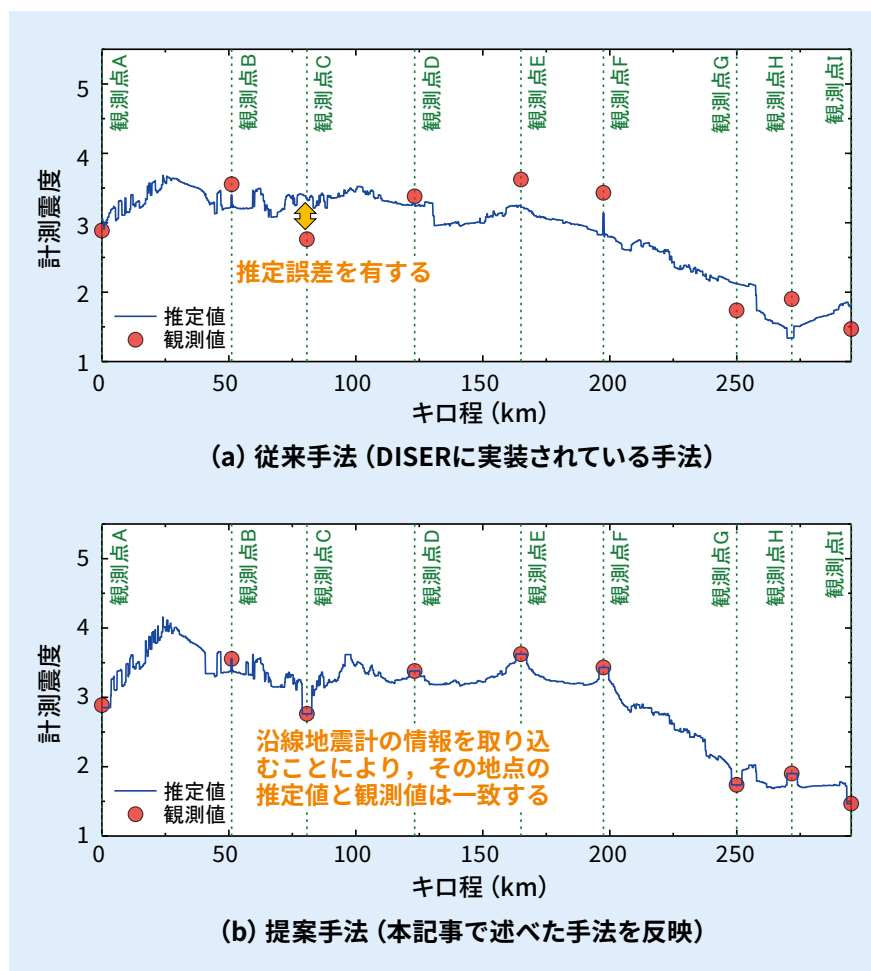


図6 沿線地震動の推定例 (観測点AからIは図5の地点に対応)

事業者の沿線地震計情報の活用

稼働中のDISERは、公的地震情報をを用いて地震動を推定しています。よって、地震計が対象の路線に近く、さらにその地震計の数が多い方が、その路線に対する推定の信頼性は高くなります。現在のシステムは、事業者が沿線に設置している地震計の情報を推定に用いていませんが、上記の理由から事業者の沿線地震計の観測値を計算に取り入れることは有効です。

図5に推定した面的地震動の例(2019年6月18日、山形県沖の地震、マグニチュード6.7、震源深さ14km、最大震度6強)を示します。図中の路線は、鉄道総研が定めた仮想路線です。この路線は、地震動の推定に用いた観測点とは別の観測点⁴⁾を通過するよう

に設定しており、それらは沿線の地震計を模擬しています。この仮想路線沿いの推定計測震度を図6に示します。ここで、(a)は従来手法、(b)は提案手法による結果です。(a)はDISERに実装されている手法の結果であり、観測値(赤色丸印)と推定値(青色実線)

が一致しない場合がみられ、推定誤差を有しています。(b)の提案手法は、ここで述べる「事業者の沿線地震計情報の活用」に加えて、先に述べた「地盤データベースの更新」、「表層地盤増幅の算出改良」、「観測値と推定値の組み合わせ」を適用した結果を示しています。(b)は沿線地震計の観測値を計算に取り込んでいることから、地震観測点において推定値は観測値と一致し、その周辺にも観測値の影響が反映された結果となっています。この結果から、事業者の沿線地震計情報の活用の有効性が確認できます。

おわりに

ここでは、地震後の点検の効率化などを目的として、路線に沿った推定地震動の信頼性を高める取り組みを紹介しました。ここで述べた手法を、DISERに組み込むことにより、リアルタイムに提供する地震動情報の信頼性を高めることが期待されます。これからも信頼性の高い地震動や構造物被害ランクの情報配信を目指し、事業者の意見を取り込みながら、基礎的な検討やシステムの改修を進めていきます。

なお、本記事に関する検討の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。**[RRR]**

文献

- 1) 岩田直泰, 坂井公俊, 山本俊六, 室野剛隆, 青井真: 鉄道地震被害推定情報配信システム(DISER)を利用して素早く運転を再開する, RRR, Vol.77, No.2, pp.12-15, 2020
- 2) 田中浩平, 坂井公俊: 離散的な土質情報を活用した面的な地盤固有周期の推定精度向上, 鉄道総研報告, Vol.31, No.7, pp.17-22, 2017
- 3) 杉浦翔太, 野上雄太, 丹羽健友, 田中浩平, 坂井公俊: 表層地盤の強度と入力地震動最大値を考慮した各種地震動指標の地震増幅率の高度化, 第40回地震工学研究発表会講演論文集, 2020
- 4) 防災科学技術研究所: NIED K-NET, KiK-net, doi:10.17598/NIED.0004
- 5) 森脇美沙, 岩田直泰, 山本俊六: 近接観測点情報を用いた地震時列車運転規制に対する空間補間推定地震動の適用性評価, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会, CS10-73, 2020