

## 東海道新幹線地震防災システムにおける早期地震警報機能の強化

ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社 太田 光

### 1. はじめに

東海道新幹線の地震防災システムは「東海道新幹線早期地震警報システム(TERRA-S=Tokaido shinkansen EaRthquake Rapid Alarm System:テラス)」、「沿線地震計」、「社外地震情報」で構成されている。

「テラス」は東海道新幹線から離れた位置で発生する地震を可能な限り早く検知する目的で、沿線から50km以上離れた位置に東海道新幹線全線をとり巻くように21箇所の遠方地震計を設置している。これらの遠方地震計により、地震のP波(初期微動)を検知し、地震諸元(震央距離、震央方位、マグニチュード)を推定する。推定結果は中継所を介して、沿線の変電所に設置している沿線処理装置に送信され、地震諸元をもとに東海道新幹線への影響を判断し、必要に応じて警報を発信する。変電所では新幹線への送電を停止させることで、S波(主要動)が沿線に到達するまでに列車を減速・停止させる。

「沿線地震計」は東海道新幹線沿線に約10km間隔で全50箇所に設置され、概ね震度4に相当する揺れ(加速度40gal以上)を検知した場合と、P波から予測されるS波の揺れが震度4相当(警報用予測震度<sup>1)</sup>4.0以上)の場合に、一定の範囲に警報を発信する。また、S波による大きな揺れ(加速度160gal以上)を検知した場合には、その沿線地震計から120kmの範囲に警報を発信する。

「社外地震情報」はテラスによる早期警報を補完する目的で、気象庁が発信する緊急地震速報を2008年から活用している。

### 2. 遠方地震計の単独推定手法の改良

遠方地震計の単独推定は従来、P波による地震検知から2秒間を要していた。そこで、岩田ほか(2016)<sup>2)</sup>が提案する手法を参考に、遠方地震計の単独推定手法の改良を行った。具体的には、地震検知手法、震央距離推定手法、震央方位推定手法、マグニチュード推定手法、ノイズ識別手法の改良により、地震諸元推定の精度向上とノイズ誤検知の防止を図った。これらの改良により、地震諸元推定に要する時間を2秒から1秒に短縮できた。また、地震計センサの誤検知防止と二重系化により、システムの信頼性向上を図った。

### 3. 複数の遠方地震計の検測情報を統合的に処理する手法の導入

#### (1)遠方地震計の単独推定による地震警報の課題

遠方地震計の単独推定については、前述した改良手法の導入により、地震推定の早期化と精度向上を図った。一方で、従来の遠方地震計の地震警報による列車の停止範囲は、個々の遠方地震計で単独推定した地震諸元により決定していた。単独推定では、震源から離れるほど、推定誤差が生じやすい傾向があるため、あとから地震を検知した遠方地震計により、必要以上の列車停止を発生させる場合があった。

そこで、溜瀨ほか(2014)<sup>3)</sup>が提案する手法を参考に、複数の遠方地震計が推定した検測情報を、統合的にリアルタイムで処理することで、地震警報の早期性は維持しつつ、地震諸元推定の精度を向上する手法(統合検知点処理)をテラスに導入することとした。

#### (2)統合検知点処理手法の概説

各遠方地震計からの地震検測情報を中継所装置で受信し、その情報の着順から、震源が存在する可能性がある緯度経度の範囲(テリトリー)を推定することができる。次に、推定したテリトリー内の地震発生確率分布と遠方地震計単独の推定地震諸元、観測走時と理論走時の差(走時残差)等を組み合わせ、ベイズ統計的手法を用い

て震源位置を計算する。具体的には震源位置を確率分布として、事前確率と尤度を乗じることで、事後確率を計算する。ここで、事前確率とは過去約 90 年間の震源情報から事前に作成した地震発生確率分布である。尤度とはテリトリー、検出時刻、震央距離、震央方位の各推定結果を組み合わせた確率密度の評価値である。

なお、震央方位では推定結果と 180° 逆向きの方位にも一定割合の尤度を与えている。これは、遠方地震計が 180° 逆向きに推定する事例が低確率ながら存在し、その場合でも、テリトリー等と組み合わせて正しい震央方位を推定させるためである。また、尤度計算は、最尤値探索の効率化(パーティクルフィルタ法)を図り、リアルタイム処理を可能としている。

地震波を検出した遠方地震計が震源に最も近い 1 点のみの段階では、従来の単独推定から得られる地震諸元情報に新たにテリトリーの情報が加えられることで、早期性の維持と推定精度の向上を両立している。

### (3)東海道新幹線早期地震警報システムへの導入

本手法の実用化にあたっては、各遠方地震計からの推定地震諸元情報を、リアルタイムに統合して地震諸元を推定する「統合検知点処理装置」を開発し、中継所機器室内に設置した。統合検知点処理装置は耐障害性能向上のため、冗長構成とした。

従来の、遠方地震計が単独推定した結果を用いる手法と比較して、地震検知から警報発信までの早期性を維持するとともに、理論上の推定精度向上を実環境でも実現するためには、拠点間の情報伝送遅延の更なる低減、拠点毎の伝送遅延差の縮減が課題であった。このため、遠方地震計と中継所間を接続する通信回線を従来のメタル専用線(デジタル回線とアナログ回線が混在)から帯域保証型の光回線に統一化した。

統合検知点処理装置は 2020 年 9 月末より運用を開始した。警報の精度が向上したことで、運用開始以降の 1 年間に発生した 13 地震において、精度向上による効果を確認している。

## 4. 国立研究開発法人防災科学技術研究所(以下、「防災科研」)が運用する海底地震観測網の活用

防災科研が運用する海底地震観測網を新たな社外地震情報として活用することで、海溝型地震検知の早期化を図った。対象は、日本海溝付近の房総半島沖および茨城県沖に設置されている S-net(S1, S2)および南海トラフ地震の想定震源域である熊野灘および四国沖に設置されている DONET である。活用にあたっては、2013 年から技術開発を行い、他鉄道事業者とともに防災科研との調整を重ねてきた。そして、試験配信によるデータ安定性等の検証を経て、実配信に関する相互協力協定を防災科研と締結し、2019 年 4 月に運用を開始した。

海底地震観測網の活用による効果として、2021 年 2 月 13 日に発生した福島県沖地震(M7.3)では、東海道新幹線沿線に S 波が到達する約 1 分前に警報を発信することができた。海底地震観測網を活用することで、海溝型地震をより早期に検知し、警報を発信することが可能となり、東海道新幹線の安全性は向上した。

## 5. おわりに

今回の機能強化では、遠方地震計の単独推定における早期化と精度向上を図った。また、複数の遠方地震計が推定した情報を統合的に処理する「統合検知点処理手法」を導入することで、地震諸元推定の早期性を維持しつつ、精度を向上した。さらに、防災科研が運用する海底地震観測網を活用することで、海溝型地震の早期検知が可能となった。今後も地震防災技術のブラッシュアップを図り、東海道新幹線の安全・安定輸送の確保に努めていく所存である。

### 【参考文献】

- 1)他谷周一,中嶋繁:警報用計測震度及び警報用予測震度の検討,土木学会第 62 回年次学術講演会公演概要集,2007
- 2)岩田直泰,山本俊六,是永将宏,野田俊太:早期地震警報のための地震諸元推定とノイズ識別の機能向上,鉄道総研報告,Vol.29, No.3,2015
- 3)溜瀧功史,山田真澄,StephenWu:緊急地震速報のための同時多発地震を識別する震源推定手法,地震第 2 輯,Vol.67, pp.41-55,2014