

東海道新幹線早期地震警報システムにおける統合検知点処理手法の導入

東海旅客鉄道株式会社 正会員 ○児玉 聡
東海旅客鉄道株式会社 西山 裕之
東海旅客鉄道株式会社 松岡 亮介

1. はじめに

東海道新幹線早期地震警報システム(以下、テラス)は、新幹線沿線から離れた位置に設置した遠方地震計にて地震発生を早期に検知し、沿線が強く揺れるより前に警報を出力することにより、列車を減速・停止させ、地震時の列車安全性を向上するシステムである。遠方地震計は沿線から約 50 km 以上離れた位置に計 21 か所設置している(図 1)。テラスの機能としては、まず遠方地震計にて地震の P 波を検知し、C-Δ 法²⁾等により初動 1 秒間以降の観測データをもとに震央位置やマグニチュード等の地震諸元を推定する。推定結果は中継所を介して沿線の各変電所に設置している沿線処理装置と呼ばれる装置に送信される。沿線処理装置では、受信した地震諸元をもとに警報の可否を判断し、必要に応じて警報出力する(図 2)。

今回、複数の遠方地震計が推定した地震動の情報を統合的に処理することで、早期性を維持しつつ、地震諸元推定の精度を向上する手法(統合検知点処理)をテラスに導入したので、その手法、効果の事前検証、実装方式について報告する。

2. 複数の遠方地震計の情報による地震諸元推定手法の検討

遠方地震計が単独で処理する地震諸元推定手法(単独検知点処理)については、C-Δ 法²⁾等の導入により、推定時間の早期化及び精度向上が図られてきている。今回、主として震源推定に関する更なる精度向上を実現するため、溜瀧ら(2014)³⁾が提案する手法を参考に、複数の遠方地震計から得られる検測情報等を組み合わせて統合的に処理した推定地震諸元情報を用いる手法を検討した。まず、各遠方地震計からの地震波の検測情報を受信したときに、その順番を基に震源が存在する可能性がある緯度経度の範囲を震源テリトリとした。次に、震源テリトリ内の過去約 90 年間の気象庁一元化震源データを基に作成した東海道新幹線周辺の地震発生確率分布データ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)等を組み合わせて震源位置を計算するベイズ推定手法を検討した。具体的には震源位置を確率分布とし、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、事前確率は、地震発生確率分布データ、尤度は、①震源テリトリ、②検測時刻、③震央距離、④震央方位の各推定結果を組み合わせたものである。④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° 逆向きに推定した場合でも、震源テリトリ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、グリッド計算を近似してベイズ推定を行うパーティクルフィルタ法を用い、リアルタイム処理を可能としている。さらにノイズ判別処理は、遠方地震計単体で地震をノイズと判定した場合でも、複数の遠方地震計の検測情報から地震と再判定することで性能を改善した。なお、地震波を検知した遠方地震計が震源に最も近い 1 点のみの段階では、従来の単独検知点処理から得られる推定地震諸元情報に震源テリトリ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。



図 1 地震計配置箇所

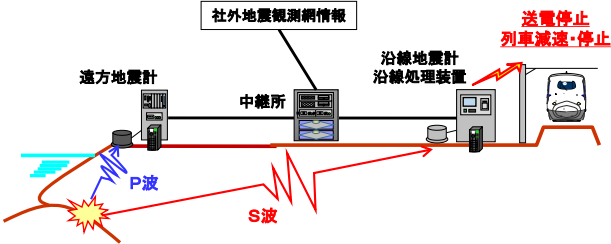


図 2 早期地震警報システム機能概要

キーワード 地震, 地震計, 鉄道, 早期警報

連絡先 〒100-0005 東京都千代田区丸の内一丁目 9 番 1 号丸の内中央ビル 5F 東海旅客鉄道株式会社

3. シミュレーションによる導入効果の検証

2007 年から 2014 年までの間に東海道新幹線において警報出力があった 37 地震のデータを用いて、震源推定を行った。その結果、震央距離が近い地震については、緯度経度ともに 0.1 度程度の推定精度であることを確認した。また、遠方地震計単独の推定地震諸元情報を用いる場合と比較して、警報の精度向上が図られていることが判った。また、従来の手法では遠地の大地震で沿線の揺れが小さくとどまるような地震では誤差が大きくなる場合があったが、本手法では同様の地震に対して推定誤差が縮小することを確認した(図 3)。

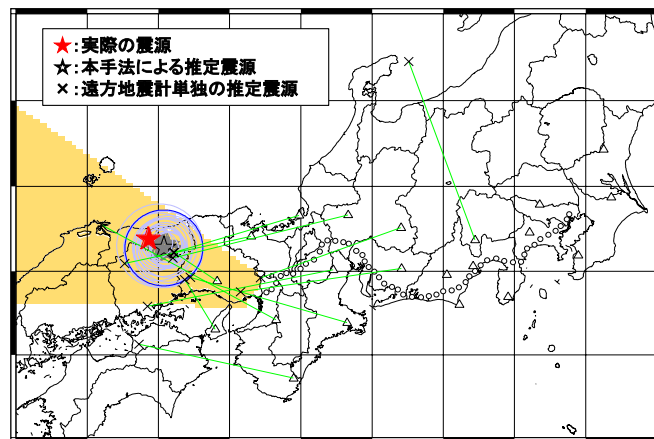


図 3 シミュレーション事例

4. 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等の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することとした。統合検知点処理装置は耐障害性能向上のため、冗長構成としている(図 4)。

従来の遠方地震計が単独で推定した地震諸元を用いる手法と比較して、地震検知～警報出力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(デジタル回線拠点とアナログ回線拠点が混在)から帯域保証型の光回線に統一化した。

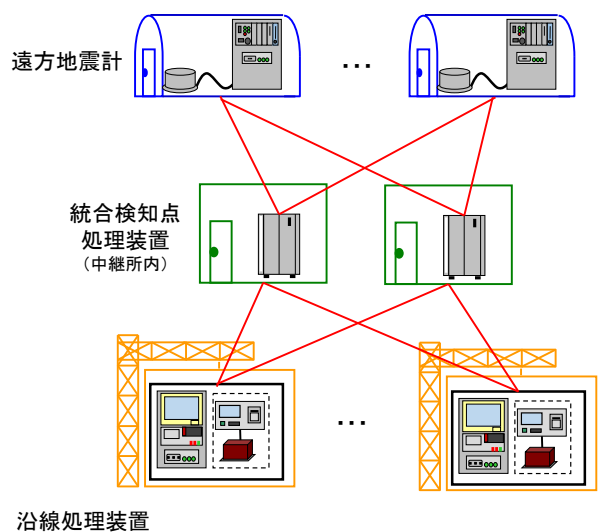


図 4 システム構成図 — 光回線

また、統合検知点処理装置上でリアルタイムに震源推定を行うためには、検測情報を得る前に予め震源テリトリを計算しておく必要がある。運用中に通信障害等が発生して遠方地震計からの情報送信が途絶えた場合、震源テリトリの再計算が必要となるが、再計算処理には時間を要するため、震源推定処理が滞り、警報の早期性を損ねる可能性がある。そこで、過去の障害発生事例を基に、一定数の遠方地震計で障害が発生した場合の震源テリトリを予め計算して処理装置内部に結果を格納しておくことで、再計算処理を不要とし、早期性毀損のリスクを低減している。万が一、設定数を超える遠方地震計で障害が発生した場合は、一時的に遠方地震計単独の推定地震諸元情報を警報出力に利用可能とする処理を加え、不測の事態に備えた対応をとっている。

統合検知点処理装置は 2020 年 9 月末より運用を開始し、2021 年 1 月までに発生した 5 地震において、精度向上による効果を確認している。

5. まとめ

複数の遠方地震計が推定した地震動の情報を統合的に処理することで、地震諸元情報推定の早期性を維持しつつ、精度を向上する手法を導入した。本手法を用いた「統合検知点処理装置」は 2020 年 9 月末より運用を開始している。今後も地震防災技術を更に磨き上げ、東海道新幹線をはじめとする当社の鉄道の安全・安定輸送の確保に努めていく。なお、本手法の開発・導入にあたっては、ジェイアール東海コンサルタンツ(株)、ジェイアール東海情報システム(株)、三菱スペース・ソフトウェア(株)、(株)ANET、NTT 西日本(株)の各社に多大なる協力を頂いた。記して感謝申し上げる。

1) 他谷周一:東海道新幹線の地震防災システム,土木施工 2014.10 vol.55 2) 岩田直泰・他: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 2015 3) 溜渕功史・他: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 2014 vol.67