

早期地震警報のための地震諸元推定とノイズ識別の性能向上

鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

主任研究員 岩田 直泰

1. はじめに

鉄道では、地震発生時に施設や列車の走行安全性が懸念される場合、可能な限り早く列車を停止させる。いち早く列車を停止させるためには、伝播速度の速いP波の情報が有効であり、鉄道では単独観測点のP波初動数秒の情報から地震の位置と規模を推定し、必要に応じて警報を出力するシステムを用いている^{例えば¹⁾}。近年、地震時の安全性向上に資するシステムのさらなる高性能化が望まれている。これを受けて、精度と即時性の改善に向けた早期地震諸元推定アルゴリズム(地震検知および震央距離、震央方位、マグニチュードの推定)の改良を行った。また、諸元推定には微弱なP波初動を用いるため、特に線路沿線に設置された地震計では列車走行に伴う地面の揺れと地震動を識別する必要が生じる。そこで、現行の成分間の振幅比を用いた手法とは別に、周波数情報を用いたアルゴリズムを開発した。

2. 早期地震諸元推定手法の高度化

地震発生時において列車停止信号を出力するための早期地震諸元推定手法では、初めにP波を検知し、次に震央位置(地震計位置からの距離と方位)を求め、更に地震規模(M)を推定する。本研究では、震央が特定の地域に偏らないような195地震(マグニチュード4.5から9.0,震源深さ112km以浅)を選定し、(独)防災科学技術研究所(以下、防災科研)のK-NET²⁾(東北地方太平洋沖地震のみKiK-net²⁾を含む)において震央距離が200km以内である10171波形を用いて各手法の検討を行った。

2.1 地震検知

P波初動の情報に基づき地震諸元推定を行う際、P波の到達を地震計がリアルタイムで自動検知する必要がある。現行手法では、加速度波形の短時間移動平均と倍加した長時間移動平均の交点を到達時刻とする手法(STA/LTA法)を実装しているが、移動平均の計算パラメータを再調整した。さらに、STA/LTA法でP波到達を検知しなかった場合にも比較的強い地震動を取り逃すことがないように規定値超過による地震検知手法(レベルトリガ)を追加した。前記の地震波形データセットを用いた検討の結果、地震検知性能は10%程度向上することを確認した。

2.2 震央距離推定

現行手法ではP波到達から2秒間のデータを関数 $y=Bt \cdot \exp(-At)$ にフィッティングすることにより、P波初動の振幅増加率を表す係数 B を求め震央距離を推定している(B- Δ 法)。一方、フィッティングする関数を単純化して $y=Ct$ とし、推定に用いるP波到達からのデータ長を少なくすることにより精度が向上することが明らかとなっている(C- Δ 法)。図1は目視でP波到達位置を読み取った場合における現行と提案の各手法から求めた係数 B および C と気象庁情報から求めた震央距離の相関係数を示す。各係数と震央距離は負の相関を持つため相関係数は-1に近いほど推定精度が高い。図によると、提案手法は現行よりも推定データ長が短い段階で相関係数が最小とな

り、その値はB- Δ 法よりも小さいことから、C- Δ 法により精度と即時性の両方の向上が認められる。また、推定の開始タイミングに関し、P波到達時刻からのデータを利用して計算する場合とやや振幅が大きくなった時刻から計算した場合を比較した結果、後者の推定精度が高いことが明らかとなったため、これを実現する処理を組み込んだ。更に震央距離の算出において粘性項を含む式の方が推定精度は向上することが確かめられたことから推定式の関数形を変更し、式の係数を再決定した。

2.3 震央方位推定

現行手法ではP波初動からの1.1秒のデータ長を用いて主成分分析法により震央方位を推定している(固定ウィンドウ法)。図2に推定に用いるデータ長を変化させた時の推定値と気象庁情報に基づく震央方位の相関係数を示す。ここで、相関係数は1に近いほど推定精度は高い。図によると0.5秒前後で相関係数が最も大きくなっており、推定に用いるデータ長を短くすることで精度は向上することが分かる。更に、データ長を固定することなく、変位波形が半波長となるデータ長を用いた方が精度は向上することが明らかとなっている(可変ウィンドウ法)。半波長の検出には、P波到達からある程度時間が経過した後において変位波形がゼロ線と交差(ゼロクロス)するまでのデータ長としている。図2には可変ウィンドウ法の相関係数(0.84)を併せて示しており、現行の1.1秒のデータ長を用いた固定ウィンドウ法の相関係数(0.78)よりも高いことから精度の向上が確認できる。

2.4 マグニチュード推定

地震の規模を表すマグニチュードの推定は、前記した推定震央距離と観測振幅から統計回帰式を用いて求める。現行手法では振幅は変位波形を用いているが、統計的には加速度の方が変位よりもP波到達から短い時間で最大値が出現する傾向にあり、加速度に基づくマグニチュード(加速度 M)を用いることでその推定の即時性向上が期待される。ただし、加速度 M は変位に基づくマグニチュード(変位 M)に比べて推定誤差が大きい。精度と即時性はトレードオフの関係を示すが、高速で走行する新幹線を対象として地震時の安全性を確保するためには情報の早さを重視することの効果は高いと考える。一方、変位 M は精度が高く、大きな地震の際に値が飽和しない傾向を示す。以上よりマグニチュードの推定には、加速度 M および変位 M の論理和(OR)制御を用いる手法を提案する。加えて、現行手法のマグニチュード算出式は粘性項を含んでいないが、その項を含めることにより精度向上が認められたことから関数形を変更し、式の係数を再決定した。加速度 M と変位 M のOR制御とする提案手法によるマグニチュードの推定誤差RMSは、震央距離推定の改善ならびに粘性項を含む式の導入により現行手法に対し18.1%低減する。

3. ノイズ識別手法の高度化

鉄道沿線に設置された地震計において地震動と識別すべき振動は交通振動や工事振動等があるが、この中で列車走行に伴う振動の影響が最も大きいと考えられる。これより、本研究では地震動との識別の対象を列車振動とする。列車振動のデータは、新幹線沿線に設置された複数の地震計(65地点)の記録波形データ(10002波形)とした。列車振動の性質は、線路からの離隔や地盤条件

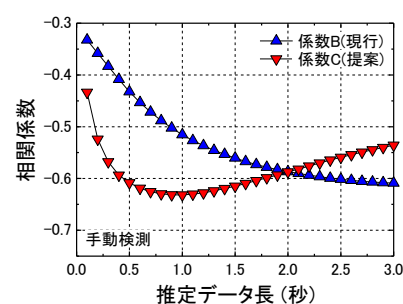


図1 手法比較(震央距離)

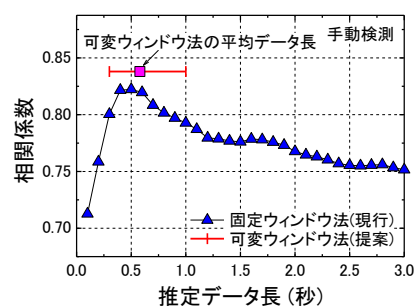


図2 手法比較(震央方位)

により異なることが予想されるが、本研究では地震動と列車振動を識別する指標の平均的な傾向を確認する目的から、データが記録された場所の違いを考慮せずに扱う。

3.1 地震動と列車振動の特性の違い

地震動の初動はP波であり一般に上下動が卓越することから、現行の地震計では地震動とそれ以外の雑振動の識別に平滑化を行った上下動と水平動の振幅比の最大値($VHmax$)を主な指標として用いている。前記の列車振動のデータセットに対して $VHmax$ を求め、地震動と列車振動を比較した結果、地震動は上下動が卓越し $VHmax$ が1程度以上となるケースが多いのに比べ、列車振動は1程度以下のデータが多いことが確認された。現行手法はこの指標の閾値を適切に設定することにより地震動と列車振動の識別を行っている。線路沿線で観測される列車振動は多くの場合、高周波成分が卓越することが報告されている。一方、地震動は相対的に列車振動より低周波成分が卓越することが予想される。これより周波数特性の情報を用いることで、地震動と列車振動を適切に識別できる可能性が示唆される。

3.2 周波数特性を考慮した識別指標の提案

周波数特性の簡易評価法として、単位時間に振幅値がゼロを交差する回数(Zc)をカウントして周波数特性を把握する手法(ゼロクロス法)が知られている。また、P波初動の近似的な卓越周期(Tc)を推定する手法として速度と加速度の平均の比に基づく手法(近似卓越周期法)が提案されている。加えて、本研究では新たに漸化式フィルタを用いて高周波および低周波の帯域を通過させる処理を行い、それらの絶対値振幅の移動平均の比を指標(Rud)とする手法(周波数帯域比法)を提案

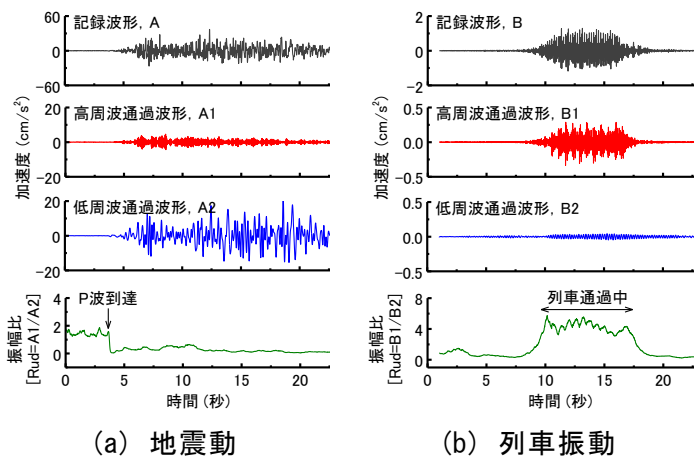


図3 Rud時系列の例

する。図3(a)(b)に、地震動と列車振動の Rud の時系列の例を示す。(a)の地震動では、P波到達の前後において Rud の値が変わりP波到達後はその前より指標値が低下する。一方、(b)の列車振動では、列車通過時において Rud の値が変化し通過中はその前より指標値が上昇する。

3.3 識別手法の検証と提案

前記した3つの手法において地震動と列車振動を識別する閾値を定め、その効果を考察した。なお、各指標に対して閾値を定め識別を行う場合、両者の完全な分離は難しく地震動をノイズとして識別するケースが発生する。本研究では、各指標において列車振動と識別する割合が全列車振動データ数の90%になるよう閾値を定めた。単独指標による地震動の識別結果は $VHmax$ が最も高く Rud , Tc , Zc の順となった。次に、指標を組み合わせることで識別性能の向上を試みたところ、 $VHmax$

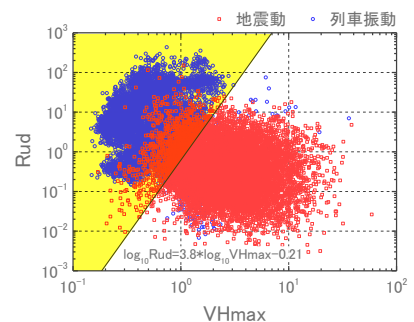


図4 識別状況

と Rud を含む組み合わせの識別率が高いことが分かった。これら2つの指標の組み合わせ方法を検討した結果、論理和(OR)よりも対数の1次式($\log_{10} Rud \geq a * \log_{10} VHmax + b$)を用いた方が統計的に良好な識別結果となった。図4に $VHmax$ と Rud に関する地震動と列車振動の散布図と、1次式

を用いた識別領域を示す。この場合、地震動の識別率は 89.8% となり高い識別性能が確認される。

4. 実地震を用いた総合的な検証

本研究で得られた知見を反映させる形で、早期地震諸元推定ならびにノイズ識別の手法を記した「早期警報用地震計における地震諸元推定アルゴリズム仕様書」を改訂した。

この仕様書に記したアルゴリズムおよびパラメータを実地震で記録された波形(防災科研の K-NET²⁾)に適用してシミュレーションを行った。ここでは、2007 年 3 月 25 日に発生した能登半島沖地震(M6.9)を対象とする。気象庁が発表した震央位置(☆印)と現行および提案手法による推定震央位置(×印)を図 5 の(a)(b)に示す。評価対象は震央距離が 200km 以内の観測点としており、諸元推定を行った観測点を▲印で示している。地震を検知した観測点数は現行手法が 66, 提案手法が 76 となり、提案手法の方が地震検知性能は高い。震央位置の推定結果を見ると、提案手法では現行に比べ気象庁発表の震央周辺に×印が集まっており、より正確な推定が行われていることが確認される。また、マグニチュードに関して推定誤差 RMS を算出したところ現行手法は 0.97, 提案手法は 0.72 であり、提案手法の方が高精度となる結果を得た。加えて、警報出力時間を比べたところ提案手法の最速警報時刻は現行よりも 1 秒短縮されており、即時性の向上も確認できた。

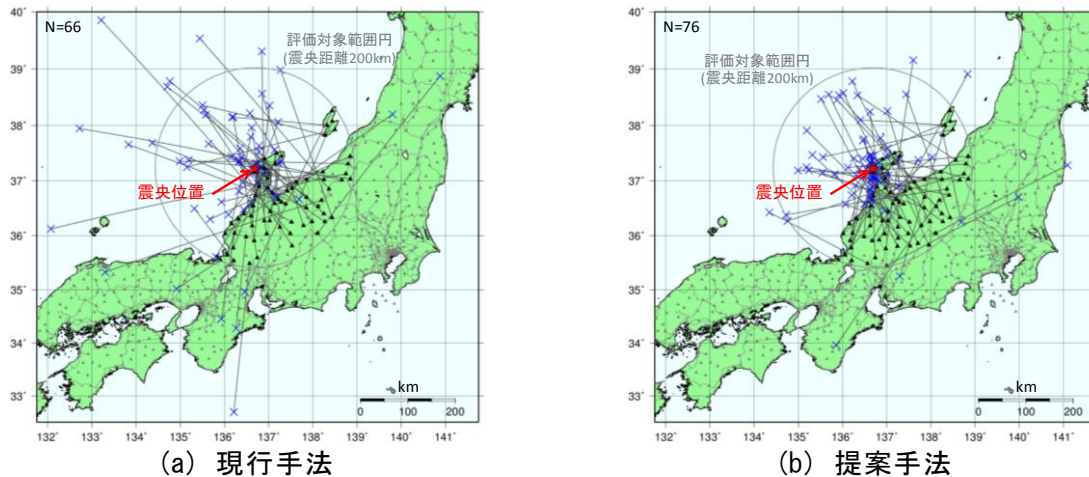


図 5 震央位置推定の比較 (2007年3月25日 9時42分 能登半島沖地震 M6.9)

5. まとめ

警報アルゴリズムの高度化による早期地震防災システムの性能向上に関する検討として、単独観測点による早期地震諸元推定ならびにノイズ識別のアルゴリズムの改良について述べた。この改良アルゴリズムを実装した試作版の早期警報用地震計を開発し、現在、稼働試験を行っている。ここで述べた最新の知見を反映させた手法を導入することにより、地震時の安全性の向上が期待される。なお、本研究では防災科研の K-NET および KiK-net の地震波形データ²⁾を使用した。

参考文献

- 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) Okada, Y., Kasahara K., Hori S., Obara K., Sekiguchi S., Fujiwara H., and Yamamoto A. : Recent progress of seismic observation networks in Japan - Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net - , Earth Planets Space, 56, pp. 15-28, 2004