

直下地震を対象とした地震早期検知に関する基礎的検討

鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

研究員 宮腰 寛之

1. はじめに

鉄道分野では、地震発生時に可能な限り早く列車の運転を制御して事故のリスクを低減するために早期地震警報を利用しており、その手法は大きく二つに分けられる。一つは、鉄道沿線の地震計が設定値以上の地震動を検知したタイミングで地震計周辺の決められた範囲に対して警報出力する手法¹⁾であり、いわゆる「オンサイト地震警報」である。地震計の設定値は、高振動数成分を遮断する鉄道分野独自のフィルタ処理²⁾を施した加速度(以下、JR警報用加速度)による水平加速度 40cm/s^2 が国鉄時代から採用されている¹⁾。もう一つの手法は、S波より先に到着するP波の初動部分を利用してマグニチュードと震央距離を推定し、既往地震の鉄道構造物の被害とマグニチュード、震央距離の関係(M-Δ図)に基づいて早期に警報を出力する「P波警報」³⁾である。P波警報は1992年に東海道新幹線で実用化されたユレダス(UrEDAS)で初めて導入され、P波の初動部分の数秒間の卓越周期からマグニチュードを推定し、推定マグニチュードとP波の初動部分の最大振幅から震央距離もしくは震源距離を求め、M-Δ図に基づいて警報出力していた。2004年度以降に導入された新しい早期地震警報システムでは、P波の初動部分の振幅のエンベロープ形状と震央距離の統計的な関係から震央距離を推定⁴⁾し、推定震央距離とP波の初動部分の最大振幅からマグニチュードを求め、M-Δ図に基づいて警報出力している⁵⁾。P波警報はマグニチュードに応じて警報出力範囲を変化させることが可能であり、大地震時に震源から遠く離れた地点に対しても即時に警報出力できるというメリットがある。

一方、鉄道沿線の直下で発生する大地震に対しては、現行のP波警報のように推定地震諸元に基づいて間接的にS波を予測する手法よりも、P波から直接的にS波を予測する手法の方が、より確実に警報出力できる可能性がある。さらに、地中深くに設置された地震計を利用することで、現行の地表に設置された地震計より早く地震動を検知し、警報出力を早めることが可能と考えられる。本研究では、地中地震計のP波しきい値超過による警報出力手法を提案し、その有効性を評価する。

2. 使用したデータ

(独)防災科学技術研究所が運用している基盤強震観測網KiK-netの地中と地表の地震記録を使用した。首都直下地震を想定して関東平野内の観測点を対象とし、そのうち地中地震計が地震基盤に設置されている図1の12観測点⁶⁾の記録を使用した。そして、図2に示す関東平野内およびその周辺を震源とする215地震の1212記録を使用した。使用した地震のマグニチュードは4.5~7.0の範囲にあり、7割以上が5.0以下である。また、使用した地震記録の震源距離のヒストグラムを図3に示す。震源距離は40~120km以上の記録が多い。

全地震記録に対してP波の到着時刻は鉛直成分、S波の到着時刻は水平成分を用いて、それぞれ目視で読み取った。P波の最大加速度はP波到着からS波到着までの時間における鉛直成分の絶対値の最大値、S波の最大加速度はS波到着後の水平2成分のベクトル和の最大値とした。

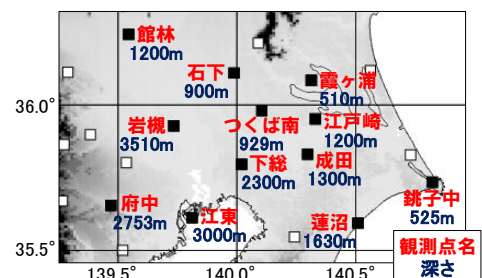


図1 使用したKiK-net観測点

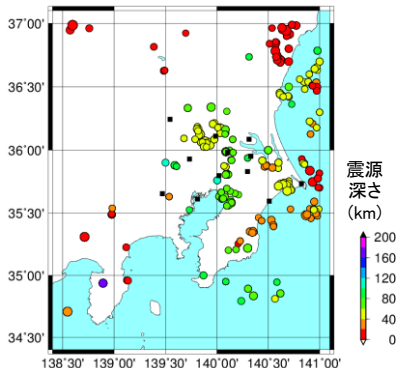


図2 使用した地震

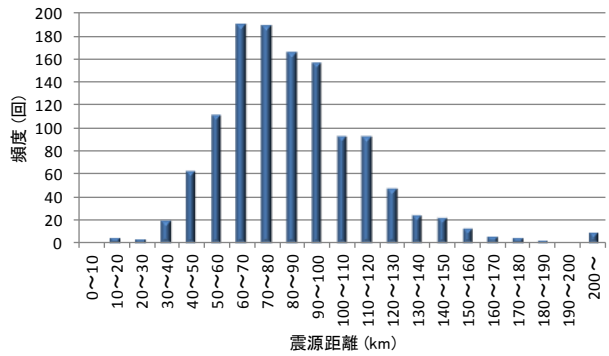


図3 震源距離のヒストグラム

3. 地中P波のしきい値設定と警報精度

地中P波と地表S波の最大加速度の関係の例を図4に示す。最大加速度の係数に直線 $\log y = \log x + b$ をフィッティングすることで、地中P波による地表S波の予測式を求めた。ここで b は地中P波の最大加速度に対する地表S波の最大加速度の倍率を表す。 b は地中P波と地中S波の関係が受ける震源の放射特性の影響および伝播経路における減衰の影響と、地中S波と地表S波の関係が受ける観測点の地下速度構造による地震動増幅の影響の和で表される⁷⁾。各観測点の b を図5に示す。 b は0.9~1.5の範囲にあり、観測点による違いが大きい。本手法における地中地震計のしきい値は、図4に示すように、地表S波の設定値に対応する地中P波の最大加速度値とするが、しきい値設定は観測点ごとに行うことが望ましい。

次に、各観測点の地中P波と地表S波の最大加速度の相関係数を図6に示す。相関係数は概ね0.7~0.9の範囲にあり、平均で約0.83であることから、早期地震警報として十分な精度であると考えられる。

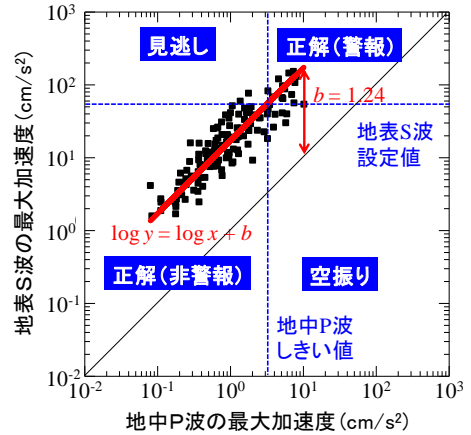


図4 地中P波と地表S波の最大加速度の関係の例 (KiK-net 石下観測点)

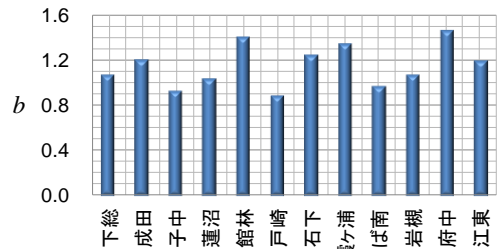


図5 各観測点の倍率 b

4. 地中P波による警報精度と地震計からの距離の関係

地中地震計から離れた地点では、地中地震動に含まれる震源特性や伝播経路特性の影響が、地中地震計の観測記録に含まれるそれら特性と異なることが想定される。そのため、警報出力した地中地震計から離れた地点ほど、警報精度が低くなることが予想される。そこで、地中P波による早期地震警報の精度が地震計を中心に半径何 km まで保たれるかを確認した。各地震において震源から最も近い地中地震計を参照点とし、参照点の最大加速度 A_{ref} とその他の地中地震計の最大加速度 A_{obs} の比 A_{obs}/A_{ref} を求めた。 A_{obs}/A_{ref} と参照点から水平距離 d/r_{ref} (参照点の震源距離 r_{ref} で正規化) の関係を図7に示す。参照点から距離が大きくな

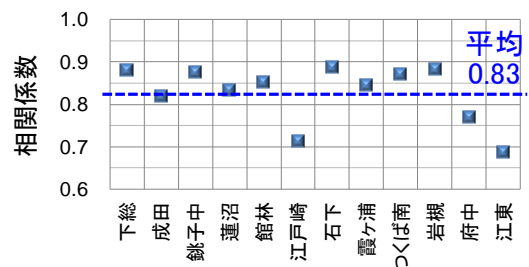


図6 最大加速度の相関係数

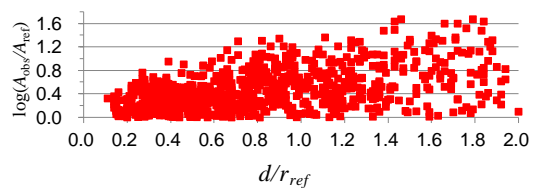


図7 A_{obs}/A_{ref} と d/r_{ref} の関係

ると $A_{\text{obs}}/A_{\text{ref}}$ のバラツキが大きくなっているのがわかる。これは、参照点とその他の地震計で地震動が受ける距離減衰の影響が異なるためと考えられる。 d/r_{ref} について 0.1 刻みの区間ごとに計算した最大加速度比 $A_{\text{obs}}/A_{\text{ref}}$ の標準偏差を図 8 に示す。図 8 より、 d/r_{ref} が 0.5~0.6 を超えると標準偏差が大きくなるのがわかる。震源距離 40km 以上のデータが多いことは図 3 で示したが、この値を参照して d/r_{ref} を水平距離に換算すると 20~24km までは距離減衰の影響の違いが小さいと言える。したがって、地中地震計近傍のごく浅い場所で発生した地震を除き、地中地震計から半径 20~24km 離れた地点でも警報精度が保たれることが期待できる。これより、現在の KiK-net 観測点の配置でも関東平野全域で十分な警報精度を確保できると考えられる。

5. 現行手法との比較

地表 P 波の初動部分から推定した地震諸元に基づいて警報出力する現行の P 波警報（以下、現行手法）と、地中 P 波から直接的に S 波を予測する本研究の手法（以下、本手法）について、警報精度と余裕時間の比較を行った。

現行手法の地震諸元推定は、P 波検知に成功した地震記録の P 波到着後 1 秒のデータで行い、解析に使用する各パラメータの値は新幹線の沿線地震計で標準的に用いられているものとした。また、現行の早期地震警報システムと同じように、地震諸元推定を行った地震計自身が M-Δ法の警報出力範囲に含まれた場合に警報出力することとした。これは、JR 警報用加速度が 80cm/s^2 を超過して警報出力することと概ね対応している⁸⁾。なお、P 波検知に失敗した地震記録は警報出力しないものとして取り扱った。

本手法は、地中地震計の加速度の鉛直成分が地中 P 波しきい値を超過した時点で警報出力するため、P 波検知を必要としない。しかし、P 波よりも S 波の加速度の鉛直成分が大きい場合、S 波を P 波と誤認識して警報出力する可能性がある。そこで、図 9 に示すように、P 波到着後一定時間経過後は警報出力しないようにタイムウィンドウ (TW) を設定し、TW = 1, 3, 5 (s) の各ケースについて扱う。はじめに、現行のオンサイト地震警報のしきい値の JR 警報用加速度 40cm/s^2 に相当するフィルタ未処理の加速度 54cm/s^2 を地表 S 波の設定値としたケース（以下、ケース 1）において本手法における TW の設定による警報判定結果の変化を確認する。そして、現行手法の M-Δ法に基づいた警報出

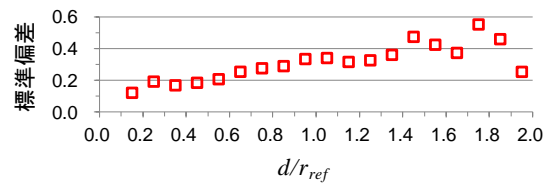


図 8 $A_{\text{obs}}/A_{\text{ref}}$ の標準偏差と d/r_{ref} の関係

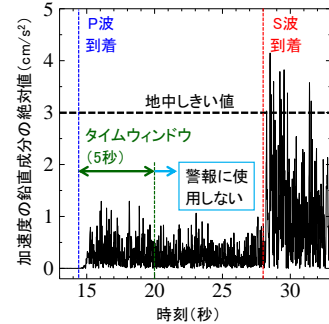


図 9 タイムウィンドウの設定 (5 秒)

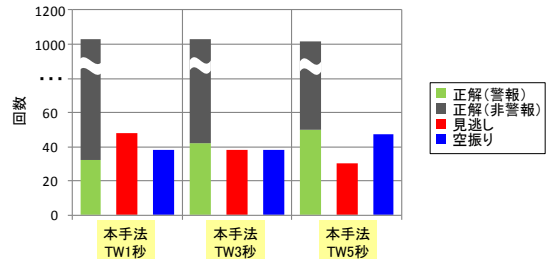
表 1 警報判定結果の分類

	警報出力※	警報未出力
地表S波設定値超過	正解(警報)	見逃し
地表S波設定値未超過	空振り	正解(非警報)

※警報出力条件

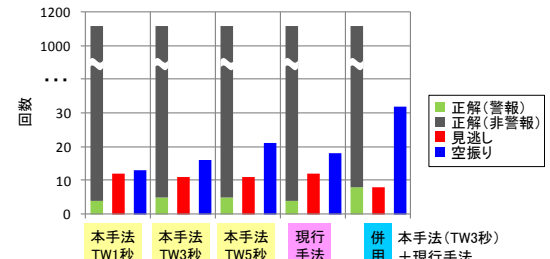
- 現行手法 地震諸元推定を行った地震計自身がM-Δ法の警報出力範囲に含まれる
- 本手法 地中地震計の加速度の鉛直成分が地中P波しきい値を超過する

JR警報用加速度 40cm/s^2 超過したケースは80回



(a) ケース 1 (地表 S 波しきい値が JR 警報用加速度 40cm/s^2 相当)

JR警報用加速度 80cm/s^2 超過したケースは16回



(b) ケース 2 (地表 S 波しきい値が JR 警報用加速度 80cm/s^2 相当)

図 10 本手法と現行手法の警報判定結果

表 2 本手法と現行手法の余裕時間の比較

地震発生日時	マグニチュード	震源深さ (km)	観測点名	震源距離 (km)	余裕時間 (秒)		
					本手法	現行手法	差
2011/3/16 12:52	6.1	10	銚子中	16.6	2.25	1.84	+0.41
2011/4/16 11:19	5.9	79	霞ヶ浦	89.8	11.58	10.58	+1.00
2012/3/14 21:05	6.1	15	銚子中	17.6	1.36	0.00	+1.36

力と対応する JR 警報用加速度 80cm/s^2 相当のフィルタ未処理の加速度 114cm/s^2 を地表 S 波設定値としたケース (以下, ケース 2) において現行手法と本手法の警報判定結果を比較する。

全地震記録に対して本手法と現行手法を適用し, 警報判定結果を表 1 のように分類した。はじめに, ケース 1 の警報判定結果を図 10(a)に示す。タイムウィンドウを長くするほど正解が増えて見逃しが減るが, 空振りが増えるというトレードオフの関係になっている。本手法と現行手法が共に警報出力した 6 回のうち, 現行手法の M- Δ 図がマグニチュード 5.5 以上の地震に対して警報出力するように設定されていることを考慮して, マグニチュード 5.5 以上である 3 回の地震について余裕時間を比較した結果を表 2 に示す。表 2 より, 本手法の方が若干ではあるが余裕時間が長いことがわかる。この結果は, 現行手法は警報出力までに P 波到着後最短でも 1 秒かかるのに対して, 本手法は P 波到着後 1 秒未満でもしきい値超過時に警報出力可能であることや, 地中地震計が地表地震計よりも若干早く地震動を検知可能であることによる。一方, ケース 2 の警報判定結果は図 10(b)に示すとおりである。JR 警報用加速度が 80cm/s^2 を超えるようなデータ数が少ないこともあり, 本手法と現行手法が共に警報出力したのは 1 回のみであった。本手法ではタイムウィンドウを設定しているため警報出力できなかったが, 現行手法で警報出力したケースが 2 回存在した。逆に, 現行手法で P 波検知に失敗したが本手法で警報出力したケースが 2 回存在した。限られたデータ数であるが, この結果は, 現行手法と本手法を併用することで空振りが若干増えるものの, 見逃しを減らしてより確実に警報出力できる可能性を示している。

6. まとめ

本研究では, 地中地震計の P 波しきい値超過による警報出力手法を提案した。地中 P 波と地表 S 波の関係を最大振幅で評価し, 早期地震警報として利用可能な精度で, 地中 P 波から地表 S 波を予測できることを示した。また, 地中地震計による警報の有効範囲は約 20~24km であり, 現在の地中地震計の配置でも関東平野全域において警報精度が保たれることを明らかにした。そして, 本手法と現行手法を併用することで, 空振りが増えるものの, より早く確実な警報出力が可能であることを示した。

謝辞

防災科学技術研究所の基盤強震観測網 KiK-net の地震記録を使用しました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 中村豊：国鉄における地震警報システム, 鉄道技術, Vol.42, No.10, pp.371-376, 1985.
- 2) 美藤ほか：東海道・山陽新幹線のための地震時ダウンタイム短縮化対策, 鉄道技術研究報告, No.1294, pp.1-38, 1985.
- 3) 中村豊：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) Odaka *et al.*, “A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record,” *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.93, pp.526-532, 2003.
- 5) 岩橋ほか：早期地震警報システムの実用化, 鉄道総研報告, Vol.18, No.9, pp.23-28, 2004.
- 6) 林ほか：関東平野の地下に分布する先新第三系基盤岩類, 地質学雑誌, Vol.112, No.1, pp.2-13, 2006.
- 7) 宮腰ほか：地中地震記録を利用した地表地震動の即時予測手法, 鉄道総研報告, Vol.27, No.11, pp.7-13, 2013.
- 8) 中村ほか：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.