

早期検知型地震警報システム設置効果の定量評価手法の検討

（財）鉄道総合技術研究所 正会員 他谷 周一
正会員 芦谷 公稔

1. はじめに

鉄道では、沿線にほぼ等間隔で配置された沿線地震計により、地震時警報判断が行われている。これに加えて東海道新幹線をはじめとする一部線区では、沿線から離れた位置に地震検知点を設置し、P波で警報判断を行う早期検知型の地震警報システムが設置されている。このようなシステムでは、沿線に大きな揺れが到達するまでの余裕時間を確保できる一方、P波から震央位置やマグニチュードを推定することから、ある程度の誤差は避けられず、警報が不要な地震でも警報が発信されてしまうようなことも想定される。

警報が必要なときに早期警報が発信され、警報が不要なときには警報を発信しないほど、早期検知型地震警報システムの設置効果が高い、と言えるが、このような尺度からシステムの設置効果を評価するような手法は現在までに開発されていない。

本文は、早期検知型地震警報システムにおける設置効果を定量的に評価する手法を新たに検討し、その内容を報告するものである。

2. 早期検知型地震警報システムによる警報判断

鉄道における過去の被害地震事例からマグニチュード(M)と震央からの距離(Δ)と構造物被害の関係

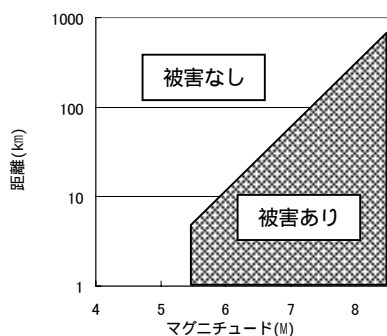


図1. M-Δ図

について示したものとしてM-Δ図¹⁾(図1)がある。ここでは、震央を中心としてMからM-Δ図により求めたΔを半径とする円内を要警報範囲とする。

3. 沿線での警報受信状態

ある位置で地震が発生した場合、沿線における警報の必要性、警報の受信タイミングにより沿線での警報受信状態は表1のように分類される。

警報必要性	警報受信	タイミング	状態
要	有	S波前	早期警報受信(A)
	有	S波後	沿線地震計動作(B)
不要	有	-	空振り(C)
	無	-	正しく見送り(D)

表1. 沿線での警報受信状態分類

早期検知型地震警報システムの設置効果が高い、とは、状態A(早期警報受信)の確率が高く、状態C(空振り)の確率が低いことと言える。

ある検知点iが警報を発信し、沿線のある地点jが状態Aになるためには、地震発生から地点jにS波が到達するまでの時間 T_{sj} 、iにP波が到達するまでの時間 T_{pi} 、iでの演算時間 T_{ci} 、データ伝送時間 T_{ti} の場合、以下の関係が成り立つことが必要条件となる。

$$T_{sj} - (T_{pi} + T_{ci} + T_{ti}) > 0 \quad (1)$$

式(1)を満たす検知点を地点jに対する「早期警報検知点」と呼ぶ。

4. 各状態に至る確率の計算方法

沿線を取り囲むように複数の地震検知点が設置されている場合には、複数の検知点の動作によって沿線での警報受信状態が決定される。

要警報地震時に地点jが状態Aとなるには、早期警報検知点iからjに警報を発信する確率を X_{ij} とすると、

$$P_{Aj} = 1 - (1 - X_{1j})(1 - X_{2j}) \cdots \quad (2)$$

で求めることができる。

また、警報不要地震時にjが状態Cとなるには、ある検知点kからjに警報を発信する確率を Y_{kj} とすると、

$$P_{Cj} = 1 - (1 - Y_{1j})(1 - Y_{2j}) \cdots \quad (3)$$

で求めることができる。

5. 検知点における警報発信率の計算方法

ある検知点からあるに対して警報が発信される確率を求める方法を考える。ここでは、検知点における震央位置及びマグニチュードの推定誤差を考慮する。

図2に概念図を示

した。検知点をi、仮定した震央位置をoとし

た場合、iでは震央距離 L_{oi} 、及び方位角 θ_{oi} (真北を0°とした場合の角度)を推定する。

推定した震央位置をeとし、推定震央距離を L_{ei} 、推定方位角を θ_{ei} とすると、距離の対数誤差 l 、方位の誤

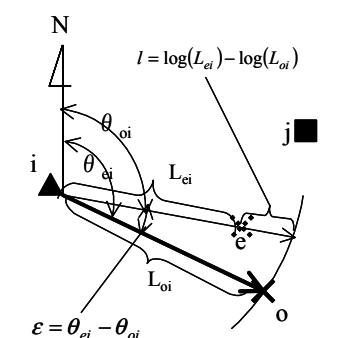


図2. 検知点と震央の位置関係概念図

キーワード：地震計、地震警報、早期検知、設置効果、確率計算

連絡先：〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 TEL 042-573-7273 FAX 042-573-7421

差 ε は、

$$l = \log(L_{ei}) - \log(L_{oi}) \quad (4)$$

$$\varepsilon = \theta_{ei} - \theta_{oi} \quad (5)$$

と表わされる。震央位置を e と推定する確率 $p_e(l, \varepsilon)$ を求めることは、距離の対数誤差が l 、方位の誤差が ε となる確率を求めることと同義である。

l および ε の確率密度関数を $f_l(x)$ 、 $f_\varepsilon(y)$ とすれば、微小な値 $\Delta l, \Delta \varepsilon$ を用いることで、 $p_e(l, \varepsilon)$ は

$$p_e(l, \varepsilon) = \int_{l-\Delta l}^{l+\Delta l} f_l(x) dx \cdot \int_{\varepsilon-\Delta \varepsilon}^{\varepsilon+\Delta \varepsilon} f_\varepsilon(y) dy \quad (6)$$

により求めることができる。 $\Delta l, \Delta \varepsilon$ が限りなく 0 に近い場合、

$$p_e(l, \varepsilon) = f_l(l) \cdot f_\varepsilon(\varepsilon) \cdot \Delta l \Delta \varepsilon \quad (7)$$

と表わせる。

続いて、震央位置を e と推定した場合に地点 j に対して警報を発信する確率 p_m の求め方を考える。推定 M を M_e 、 e から j までの距離を L_{ej} とし、 $M - \Delta$ 図における Δ について $\Delta \geq L_{ej}$ となるような最小の M を $M_{\min}$ とすると、 $M_e \geq M_{\min}$ の場合に警報が発信される。

$M_{\min}$ は、 $M - \Delta$ 関係式¹⁾から

$$M_{\min} = \frac{\log(L_{ej}) + 3.2}{0.71} \quad (8)$$

で求めることができる。

したがって、 M_e の確率密度関数を $f_m(m)$ とすれば、 p_m は

$$p_m = \int_{M_{\min}}^{+\infty} f_m(m) dm \quad (9)$$

により求めることができる。 $M_{\min}$ は推定震央位置により一意に決まることから l, ε の関数なので、 p_m も l, ε の関数となる。ここでは、

$$p_m = Q(l, \varepsilon) \quad (10)$$

と置く。

よって、震央位置を e と推定し、かつ警報が発信される確率 $p_a(l, \varepsilon)$ は、

$$p_a(l, \varepsilon) = f_l(l) \cdot f_\varepsilon(\varepsilon) \cdot Q(l, \varepsilon) \cdot \Delta l \Delta \varepsilon \quad (11)$$

である

検知点 i からの警報発信率 X_{ij} は、発生しうるあらゆる l, ε について p_a を求め、その総和を取ることで求めることができる。すなわち、

$$X_{ij} = \iint f_l(l) \cdot f_\varepsilon(\varepsilon) \cdot Q(l, \varepsilon) dl d\varepsilon \quad (12)$$

により求めることができる。

(12)の結果を各検知点で計算し、(2)または(3)に代入することで状態 A の確率、状態 C の確率を計算できる。

6. 全体的な評価方法

あらゆる位置であらゆるマグニチュードの地震が起こることを想定した場合の状態 A または C への遷移率は次のようにして求める。

等間隔で配置した仮想震央の 1 つ 1 つに対してあるマグニチュード m_i を想定し、3. ~ 5. で述べた方法により、状態 A ~ D それぞれの確率を計算する。その計算結果について地域別の地震発生頻度で加重平均する。その結果を $p_X(m_i)$ ($X = A, C$) とすると、異なる N 個設定して計算した場合、 M 発生頻度関数 (グーテンベルクリヒター式) を $Gr(m)$ とすれば、状態 A ~ D の確率の全体的な評価値 P_X は、

$$P_X = \sum_{i=1}^N p_X(m_i) \cdot Gr(m_i)$$

により求めることができる。

7. シミュレーション計算の実施

東海道新幹線における早期検知型地震警報システムをモデルにシミュレーション計算を実施した。震央位置及びマグニチュードの推定誤差は既往の文献¹⁾を参考にした。結果を図 3 に示す。

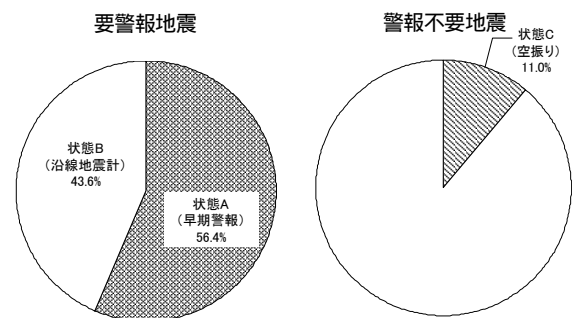


図 3. シミュレーション結果例

これまで、検知点での推定マグニチュード等の誤差分布から間接的に地震警報システムの導入効果を予測していたが、今回提案した確率計算を用いることでより直感的に導入効果を把握できるようになった。

8. おわりに

今回検討した手法は、新規に早期地震検知システムを設置する際に、検知点の効果的な配置を事前に検討する場合や、複数検知点での連携機能等を評価する場合などに活用できると考えている。

【参考文献】1. 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(1996.1)