

早期地震警報による余裕時間の検討

(財)鉄道総合技術研究所 正会員 ○岩田 直泰
 (財)鉄道総合技術研究所 正会員 芦谷 公稔
 (財)鉄道総合技術研究所 正会員 佐藤 新二
 (財)鉄道総合技術研究所 是永 将宏

1. はじめに

震源に近い位置で地震を検知し、主要動が到達する前に、震源から離れた位置に情報を送信するシステムの構想は古くから行われている¹⁾。鉄道では、1990年代より新幹線を中心として早期地震検知・警報システムが導入²⁾され、2004年の新潟県中越地震発生時などでは、有効に機能した実績³⁾を持つ。また、2006年8月より気象庁からは緊急地震速報として、早期地震情報の先行的な提供が行われており、その情報は鉄道以外の分野でも広く活用されつつある。地震発生の予知に関する技術レベルは、まだまだ途上の段階であり、地震大国である日本において、今後、早期地震情報の重要性は一段と高まっていくものと考えられる。この早期地震警報システムは、警報が発令されてから大きな揺れが到来するまでの時間差を可能な限り多く設けることに意義がある。本論では、P波警報からS波到来までの時間差(ここでは余裕時間と呼ぶ)に着目し、理論余裕時間と実地震波形による余裕時間の比較検証を行う。

2. 余裕時間の定義

余裕時間は、一般に、震源に近い位置で地震警報を発令し、遠い位置で評価を行った場合に大きくなる。鉄道におけるこの関係は、図-1に示すとおり、海岸検知点(地震発生域近くに設置される地震計、一部JRでは遠方検知点と呼んでいるがここでは海岸検知点とする)と沿線

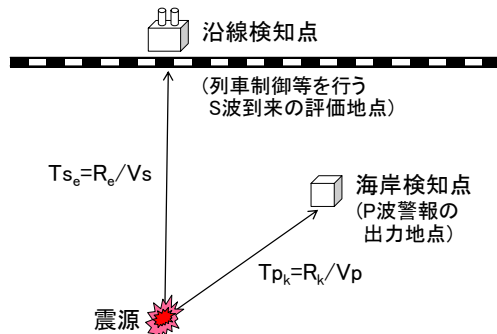


図-1 震源、海岸および沿線検知点の関係

検知点(線路沿線の変電所等に設置される地震計)となり、余裕時間として海岸検知点が震源に近かつ沿線検知点が震源から遠い方が有利となる。

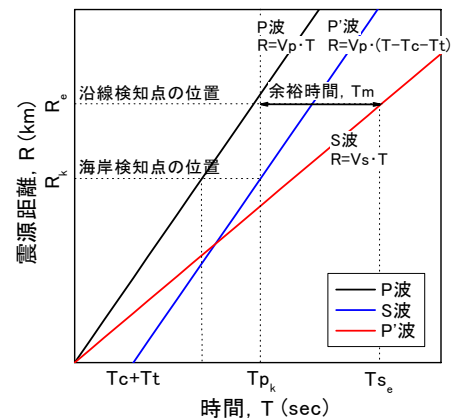


図-2 余裕時間の概念

図-2には、地震のP波とS波の走時による余裕時間の概念を示す。また、余裕時間の定義式を式(1)ならびに式(2)に示す。図-2や式(1)と式(2)からも明らかな通り、余裕時間は、ある海岸検知点にP波が到達し、地震諸元を推定して警報を伝送してから、ある沿線検知点にS波が到達するまでの時間として定義される。

$$T_m = T_{s_e} - (T_{p_k} + T_c + T_t) \quad (1)$$

T_m は余裕時間(秒)、 T_{s_e} は地震発生から沿線検知点にS波が到達するまでの時間(秒)、 T_{p_k} は地震発生から海岸検知点にP波が到達するまでの時間(秒)、 T_c は地震諸元推定に要する時間(秒)、 T_t は警報伝送に要する時間(秒)である。

$$T_m = \frac{R_e}{V_s} - \left(\frac{R_k}{V_p} + T_c + T_t \right) \quad (2)$$

R_e は震源から沿線検知点までの距離(km)、 R_k は震源から海岸検知点までの距離(km)、 V_s はS波速度(km/秒)、 V_p はP波速度(km/秒)である。

$$R_e = \sqrt{D_e^2 + h^2}, \quad R_k = \sqrt{D_k^2 + h^2} \quad (3)$$

D_e は震央から沿線検知点までの距離(km), D_k は震央から海岸検知点までの距離(km), h は震源深さ(km)である. 式(3)を式(2)に代入することにより式(4)が得られる.

$$Tm = \frac{\sqrt{D_e^2 + h^2}}{Vs} - (\frac{\sqrt{D_k^2 + h^2}}{Vp} + Tc + Tt) \quad (4)$$

3. 理論余裕時間と実地震波形余裕時間の比較

本論では, 2003 年十勝沖地震発生時に, (独)防災科学技術研究所の K-NET⁴⁾で観測された波形を用い, 理論余裕時間の評価が適切であるか否かの検討を行う.

前記の地震発生時には, K-NET の 357 観測点において地震波形が記録されたが, このうち, 100Hz サンプリングにより記録されたのは 340 観測点である(200Hz サンプリングデータは地震諸元推定アルゴリズム⁵⁾の対象外であり, ここでは割愛した). この 340 観測点のデータセットを, 鉄道総研が気象庁と共同で開発した地震諸元推定アルゴリズム⁵⁾に入力したところ, P 波による諸元推定を行った波形(トリガした後, ノイズ判定されなかった波形)は 33 観測点となった. なお, ここでは海岸検知点での標準的なパラメータを用いている. このデータセットの地震動指標等を表-1 に示す.

本章の実波形による余裕時間は, K-NET えりも岬観測点(HKD112)に P 波が到達した時刻に地震諸元推定時間と警報伝送時間を加えた時刻を, その他の各観測点に S 波が到達した時刻から引いたものである. なお, えりも岬観測点(HKD112)のみ, 警報伝送時間が不要のため P 波が到達した時刻に地震諸元推定時間のみを加えた時

表-1 十勝沖地震の解析地震データ一覧

データ名	観測点			地震動指標			検出位置(サンプル数)	
	緯度(deg.)	経度(deg.)	震源距離(km)	3成分PGA(gal)	S1値(kine)	計測震度	P波検出位置	S波検出位置
AOM0070309260450.ud	41.22	141.40	235.8	178.3	16.00	4.9	1119	5293
AOM0090309260450.ud	40.96	141.38	247.1	38.7	4.35	3.6	636	4521
AOM0100309260450.ud	40.87	141.15	268.8	91.0	7.60	4.2	689	5181
AOM0110309260450.ud	40.68	141.37	260.9	83.0	6.43	4.0	934	5741
AOM0120309260450.ud	40.51	141.48	262.7	53.1	4.39	3.6	879	5308
AOM0140309260450.ud	40.43	140.94	305.6	43.1	6.89	3.8	544	5277
AOM0230309260450.ud	40.97	140.44	320.6	46.9	6.14	3.9	299	5072
AOM0270309260450.ud	41.14	140.83	283.9	35.5	2.94	3.5	233	4804
HKD0530309260450.ud	43.78	143.61	229.8	103.9	10.04	4.3	691	3832
HKD0610309260450.ud	44.07	145.00	268.6	99.9	4.53	3.8	642	5264
HKD0680309260450.ud	43.66	145.13	230.1	591.2	84.95	5.9	645	3769
HKD0780309260450.ud	43.15	144.50	161.5	415.5	34.88	5.3	1077	3772
HKD0790309260450.ud	43.30	144.60	179.6	211.7	23.53	4.9	723	3687
HKD0840309260450.ud	43.11	144.13	154.0	403.6	52.80	5.7	931	3305
HKD0860309260450.ud	42.85	143.87	127.5	800.6	136.05	6.3	952	2946
HKD0870309260450.ud	43.15	143.90	158.6	305.1	21.92	4.9	864	3168
HKD0910309260450.ud	42.81	143.66	126.4	455.0	81.21	5.9	1219	3044
HKD0920309260450.ud	42.93	143.45	143.8	672.7	70.07	6.0	1141	2684
HKD0960309260450.ud	42.70	143.14	134.7	227.9	33.12	5.1	1140	3130
HKD0980309260450.ud	42.50	143.28	111.6	430.1	88.41	6.0	1216	2842
HKD1000309260450.ud	42.28	143.32	94.4	988.4	50.63	6.1	1286	2835
HKD1060309260450.ud	42.34	142.37	160.0	191.3	43.11	5.3	807	2201
HKD1090309260450.ud	42.17	142.77	123.9	249.7	36.71	5.3	761	2856
HKD1100309260450.ud	42.13	142.94	110.4	219.6	40.95	5.4	1249	2872
HKD1110309260450.ud	42.01	143.15	91.4	86.1	10.68	4.2	1203	2914
HKD1120309260450.ud	41.93	143.24	82.9	147.0	14.88	4.5	1343	2383
HKD1130309260450.ud	42.13	143.32	85.0	211.4	20.47	4.9	1328	2820
HKD1150309260450.ud	41.90	140.97	261.7	105.3	6.20	4.0	615	4462
HKD1680309260450.ud	41.93	140.37	311.0	29.9	6.77	3.7	537	5125
IWT0010309260450.ud	40.41	141.72	253.2	44.7	1.94	3.2	324	5296
IWT0180309260450.ud	39.69	141.15	341.4	14.9	0.75	2.3	204	5568
IWT0200309260450.ud	39.78	141.33	323.5	42.4	4.48	3.8	463	5500
IWT0240309260450.ud	40.26	141.29	291.6	45.1	2.57	3.3	1093	5923

刻を, 同観測点に S 波が到達した時刻から引いたものとしている. なお, 理論余裕時間の計算に用いたパラメータを以下に示す.

$$Vp = 6.0(\text{km/秒}), \quad Vs = 3.5 (\text{km/秒})$$
$$h = 42(\text{km}), \quad Tc = 2.0(\text{秒}), \quad Tt = 1.0(\text{秒})$$

理論と実地震波形の余裕時間の比較検証結果を図-3 に示す. データ数が少ないものの, 両値はほぼ同一であり, 理論値と実地震波形の余裕時間の値は整合性が高いことが認められる.

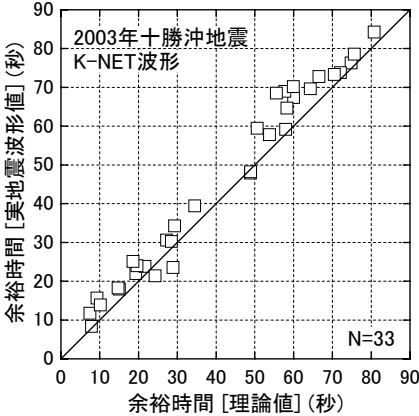


図-3 余裕時間の比較検証

本論で行った検証は, 設定したP波速度やS波速度のパラメータの検証に他ならないが, 本手法による理論余裕時間はある程度の信頼性を有することが確かめられたと言える. なお, 図-3の各プロットは若干の誤差を生じているが, これは, 地震波伝播経路の速度構造のバラツキや, 手動検測の読み取り誤差などの影響と考えられる.

5. まとめ

本論では, 近年, 注目を集めている早期地震警報の導入効果を定量的に評価するための指標のひとつである余裕時間について検討を行った. この結果, 理論余裕時間と実地震波形により算出される余裕時間の整合性は高く, S 波・P 波速度等のパラメータ設定等も適切であることが確かめられた.

参考文献

1) 伯野元彦・高橋博, 10秒前大地震警報システム, 自然, pp.74-79, 1992.9
2) 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, 1996.1
3) 仁杉巖監修, 巨大地震と高速鉄道 新潟県中越地震をふりかえって, 山海堂, 2006.11
4) 独立行政法人 防災科学技術研究所HP, 強震ネットワーク K-NET, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
5) 東田進也・他, P波エンベロープ形状を用いた早期地震諸元推定法, 地震2, 56, 351-361, 2004.3