

論文 地震時列車運転制御における PLUM法情報の活用

森脇 美沙¹・岩田 直泰¹・前原 有²・野辺 亮太郎³・猪口 忠明⁴

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: moriwaki.misa.16@rtri.or.jp (Corresponding Author), iwata.naoyasu.19@rtri.or.jp

²小田急電鉄株式会社 安全・技術部 (〒160-8309 東京都新宿区西新宿 1-8-3)
E-mail: tamotsu.maehara@odakyu-dentetsu.co.jp

³小田急電鉄株式会社 電気部 (前 安全・技術部) (〒160-8309 東京都新宿区西新宿 1-8-3)
E-mail: ryotaro.nobe@odakyu-dentetsu.co.jp

⁴小田急電鉄株式会社 経営戦略部 (前 安全・技術部) (〒160-8309 東京都新宿区西新宿 1-8-3)
E-mail: tadaaki.inokuchi@odakyu-dentetsu.co.jp

現在、日本の鉄道事業者の多くは緊急地震速報を適用した早期地震警報システムを運用している。緊急地震速報は地震時の列車運転制御に対し優れた情報である一方、巨大地震発生時には震源域の広がり適切に反映できず、震度を過小予測する場合がある等の課題を有する。本研究では、巨大地震に対する列車制御の確実性向上を目的として、気象庁が2018年から配信している「PLUM法」による震度予測情報を鉄道に適用するための手法および導入効果に関する検討を行った。その結果、緊急地震速報では警報が発表できない場合でも、PLUM法情報を利用することで少なくとも数秒程度の余裕時間を確保し列車を減速させる効果が期待できることが確認できた。PLUM法と緊急地震速報の併用により、地震時における列車運転制御の確実性を高めることができる。

Key Words: PLUM method, earthquake early warning, train operation control during earthquakes

1. はじめに

地震時に迅速かつ適切な早期地震警報を発報し、列車運転制御を行うことは、鉄道の重要な地震防災対策の一つである。現在、日本国内の多くの鉄道事業者は地震時に列車運転制御を行う際、気象庁が提供する「緊急地震速報」の情報を活用している。小田急電鉄では2006年に鉄道事業者で初めて緊急地震速報を利用した早期地震警報システムを導入し、地震時の列車運転制御を行ってきた¹⁾。同社のシステムはこれまで概ね有効に機能してきたが、巨大地震発生時における技術的課題が明らかになっている。そこで、巨大地震に対する列車運転制御の確実性を向上させることを目的として、気象庁が2018年より配信を開始した、新たな震度予測手法「PLUM法²⁾³⁾」に基づく情報を地震時列車運転制御に適用する手法およびその導入効果について検討を行った^{注1)}。

本論文では、まず、緊急地震速報およびPLUM法について概説する。次に、線状に広がる鉄道に対するPLUM法情報の適用手法に関する検討について述べる。さらに、地震時列車制御に対するPLUM法情報の導入効果の評価について述べる。最後に、PLUM法情報と緊急地震速報の情報を併用する新たな早期地震警報システムの例を紹介する。

2. 緊急地震速報およびPLUM法の概要

緊急地震速報は、地震発生直後に主に震源付近の複数観測点で得られた初期微動(P波)の情報から震源位置とマグニチュードを推定し、各地の主要動(S波)の到達時刻と予測震度の情報を提供するものである。震源と観測点の位置関係によっては、緊急地震速報を受信してから主要動が到達するまでに数秒~数十秒の猶予時間が

生じる場合がある。一方、震源が浅い内陸の地震の震源近傍では、情報の提供が主要動到達までに間に合わない場合もある。また、点震源を仮定しているため、規模の大きな地震では震源域の広がりなどを反映できず、マグニチュードや各地の震度を過小予測する場合がある。実際に、2011年東北地方太平洋沖地震では、震源から遠く離れた関東地方でも強い揺れが観測されたが、緊急地震速報ではそれを予測できず、関東地方に対して警報が適切に発表されなかったという事例が報告されており、技術的課題となっていた。また、小田急電鉄管内においても、緊急地震速報による推定マグニチュードの大きさが過小予測となったために、M-Δ法²⁾に基づき制御判定を行う早期地震警報システムからは適切な運転制御情報が出力されなかったという経緯がある。

このような、巨大地震においてマグニチュードや各地の震度を過小予測し適切な情報が発表されない、いわゆる警報の“見逃し”を克服することを目的として、震源推定を介さない震度予測手法である「Propagation of Local Undamped Motion Method (PLUM法)²⁾」が考案された。PLUM法は、“距離 R km 以内で観測された地震波が、工学的基盤^{注3)}で減衰しないで伝播する”と仮定して震度予測を行う手法である。通常、地震波は震源からの距離に応じて減衰しながら伝播するが、十分に短い距離においては地震波の減衰を概ね無視できるものとし、予測地点近傍で観測された揺れのうち最大のものが今後予測地点に到来するとみなしている。これにより、震源推定結果や震源断層の破壊の成長によらず、見逃しなく震度予測情報を発表することが可能となった。ただし、地震波の非減衰を仮定しているため震度を過大予測する傾向があるほか、予測地点から距離 R km の範囲にある観測点まで強い揺れが到来してから警報が発表されることになるため、猶予時間は限定的となる。また、震源近傍の急峻な距離減衰を考慮しないことによる震度の過大予測や、周辺に観測点がないことによる震度の過小予測が発生する場合もある。なお、気象庁はPLUM法の適用距離 R について、予測精度や猶予時間、観測点配置密度などの観点から検討した結果に基づき、R=30kmと定めている²⁾。

気象庁は、2018年よりPLUM法による震度予測手法を緊急地震速報と併用する形で導入し、運用開始した。迅速に情報を発表し猶予時間を確保できる緊急地震速報の長所と、強い揺れを見逃しなく予測できるPLUM法の長所を合わせ持つこととなり、特に巨大地震発生時における震度の予測精度の向上を実現した。したがって、鉄道の早期地震警報システムにおいても同様にPLUM法情報を導入し、緊急地震速報と併用することで、近い将来発生すると考えられている南海トラフ地震のような巨大地震の発生に際し、警報の見逃しの可能性を低減し、沿線

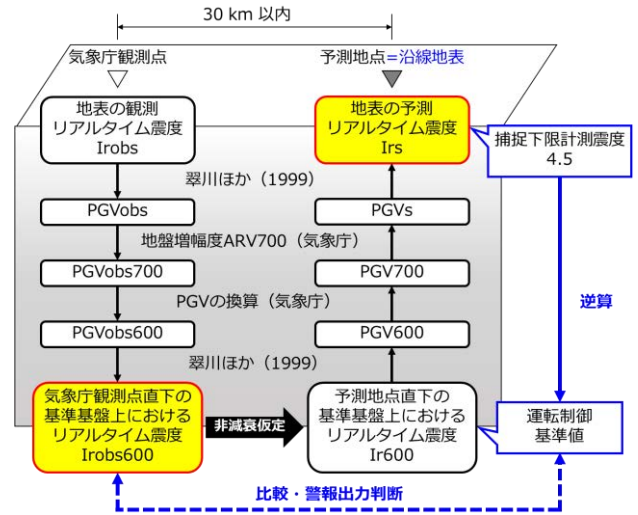


図-1 PLUM法による震度予測手順⁴⁾に基づき作成

の震度を従来よりも高い精度で予測し、より適切な列車の運転制御を行うことが可能になると考えられる。

3. PLUM法情報の適用手法に関する検討

(1) PLUM法による震度予測手順

図-1に示すように、PLUM法による震度予測は、予測地点から30 km以内の範囲にある各気象庁観測点の基準基盤 (S波速度 600 m/s の地盤) 上のリアルタイム震度 Irobs600のうち最大のものが、予測地点の基準基盤上の予測震度 Ir600と同等であるとみなし、予測地点の地盤増幅率を用いて地表の予測震度 Irsに換算するという手順で行われる。具体的な震度予測手順の概要を、気象庁の資料⁴⁾に基づき以下に述べる。

まず、予測地点から距離 30 km 以内の範囲に存在する気象庁観測点の地表におけるリアルタイム震度 Irobs を、翠川ほか (1999)⁵⁾による最大速度と計測震度の換算式を用いて、最大速度 PGVobsに換算する。

$$PGVobs = 10^{\frac{Irobs - 2.68}{1.72}} \quad (1)$$

次に、求めた最大速度 PGVobs をその地点の地盤増幅率 ARVobs700 で除すことで、S波速度 700 m/s の工学的基盤上での最大速度 PGVobs700を算出する。

$$PGVobs700 = \frac{PGVobs}{ARVobs700} \quad (2)$$

さらに、次式により S波速度 600 m/s の基準基盤上での最大速度 PGVobs600を求める。

$$PGVobs600 = \frac{PGVobs700}{0.90} \quad (3)$$

これを、換算式を再び用いて、基準基盤上のリアルタイム震度 Irobs600に換算する。

$$Irobs600 = 2.68 + 1.72 \log_{10}(PGVobs600) \quad (4)$$

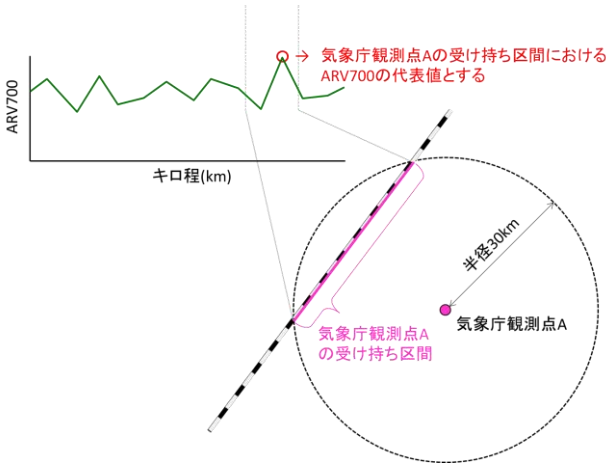


図-2 受け持ち区間と地盤増幅度の代表値の決定方法

以上の手順で、予測地点から 30 km 以内の範囲に存在する i 点の気象庁観測点について基準基盤上のリアルタイム震度を求め、それらの最大値を予測地点の基準基盤上の予測震度 I_{r600} とする。

$$I_{r600} = \max\{I_{robs600}_i\} \quad (5)$$

これを、式(1)と同様にして基準基盤上の予測最大速度 PGV_{600} に換算する。

$$PGV_{600} = 10^{\frac{I_{r600} - 2.68}{1.72}} \quad (6)$$

さらに、次式により工学的基盤上の予測最大震度 PGV_{700} を求める。

$$PGV_{700} = 0.90PGV_{600} \quad (7)$$

これに、予測地点の地盤増幅度 ARV_{700} を乗ずることで、地表の予測最大速度 $PGVs$ を算出する。

$$PGVs = ARV_{700} \cdot PGV_{700} \quad (8)$$

さらに、式(4)と同様に、換算式を用いて予測地点の地表における予測震度 I_{rs} に換算する。

$$I_{rs} = 2.68 + 1.72 \log_{10}(PGVs) \quad (9)$$

なお、PLUM 法情報は、各気象庁観測点の基準基盤上のリアルタイム震度が記載された「リアルタイム震度電文」として配信される。そこで、まず沿線地表で捕捉したい計測震度の下限値を定め、沿線の地盤増幅度を用いて基準基盤上の計測震度に換算したものを運転制御情報の出力基準値（以下、「運転制御基準値」という）とし、電文中のリアルタイム震度値が運転制御基準値を超過するか否かにより制御判断を行う方法を検討した。なお、本論文では沿線地表での捕捉下限計測震度を 4.5 に設定した。これは、小田急電鉄を始め多くの鉄道事業者が地震時列車運転制御の判定方法として採用している M-Δ 法において、制御判定基準値が計測震度 4.5 に相当し⁶⁾、鉄道構造物に被害が生じ始める可能性のある揺れの大きさであることに基づいている。

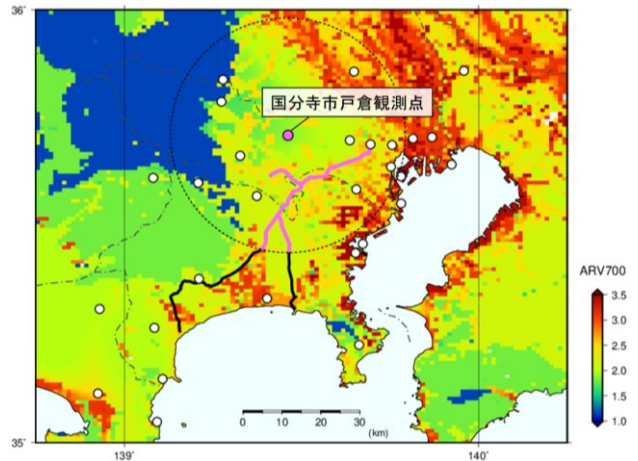


図-3 国分寺市戸倉観測点の位置と受け持ち区間 (○は小田急電鉄の沿線から 30km 圏内の気象庁観測点)

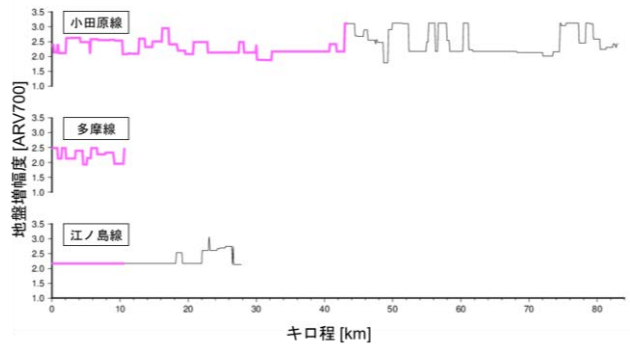


図-4 国分寺市戸倉観測点の受け持ち区間の地盤増幅度（着色部）

(2) 運転制御基準値の設定に関する考え方

鉄道は予測地点が線状に広く展開しているため、運転制御基準値を設定する際には、地盤増幅度の値が路線に沿って変化することを考慮しなければならない。また、鉄道では線区の一部にでも安全が疑われる箇所が存在する場合は、その箇所を含む区間で運転制御を行う必要がある。そこで、図-2に示すように、気象庁観測点から 30 km 以内の範囲に含まれる路線の区間を「受け持ち区間」とし、そこから抽出した沿線の地盤増幅度の最大値を、その受け持ち区間の地盤増幅度の代表値とした。したがって、運転制御基準値は気象庁観測点ごとに設定され、それぞれの受け持ち区間における地盤増幅度の代表値によって異なる値となる。

(3) 運転制御基準値の算出手順

ここで、運転制御基準値の具体的な算出方法の概要を、気象庁の国分寺市戸倉観測点を例として以下に示す。

- ① 沿線地表での捕捉下限計測震度 4.5 を地表最大速度 $PGVs$ に変換すると、11.4 cm/s となる。

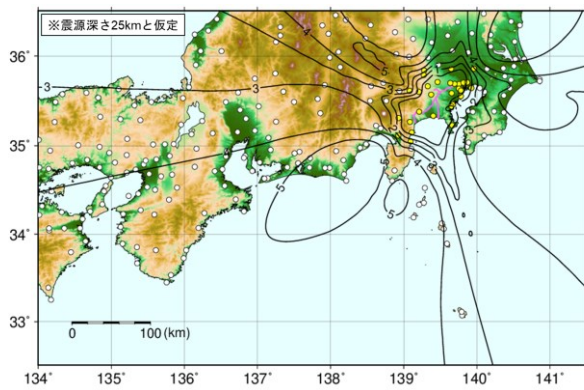


図-5 任意地点での地震に対する沿線の最短余裕時間コンター
(○は気象庁観測点, 黄色は沿線 30km 圏内のもの)

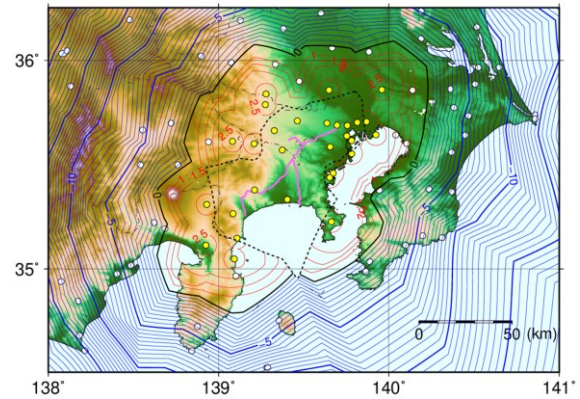


図-6 任意地点での地震に対する沿線の PLUM 法と
緊急地震速報の最短余裕時間差分コンター
(○は気象庁観測点, 黄色は沿線 30km 圏内のもの)

- ② 図-3および図-4に示すように, 当該観測点の受け持ち区間における地盤増幅度 ARV700 を抽出しその最大値を求めると, 2.7 である.
- ③ ①で求めた地表最大速度 PGVs を, ②で求めた地盤増幅度 ARV700 の最大値で除すと, S波速度 700 m/s の基盤上での最大速度 PGV700 は 4.2 cm/s となる.
- ④ ③で求めた S 波速度 700 m/s の基盤上での最大速度 PGV700 を S 波速度 600 m/s の基準基盤上での最大速度 PGV600 に換算すると, 4.7 cm/s となる.
- ⑤ ④で求めた基準基盤上での最大速度 PGV600 を基準基盤上での計測震度に換算すると 3.8 となり, これを当該観測点の運転制御基準値とする.

以上より, 国分寺市戸倉観測点における基準基盤上でのリアルタイム震度が 3.8 に達すると, 沿線に対して警報が出力され, 列車制御が行われることとなる.

4. PLUM 法情報の導入効果の評価

早期地震警報システムの目的は, 必要に応じて地震発生直後に可能な限り迅速に走行中の列車を減速・停止させることである. したがって, 気象庁からの電文を受信した後, 早期地震警報システムが運転制御情報を出力してから沿線に S 波が到達するまでの時間である「余裕時間」がどの程度確保できるかを把握することは重要である. そこで, 小田急電鉄の路線に対し, 緊急地震速報の震源情報では運転制御情報が出力されず, PLUM 法の情報のみによって運転制御情報が出力される場合の余裕時間を算出することによって, PLUM 法情報の導入効果の評価を行った.

(1) 余裕時間の算出方法

本論文では, 地震観測点に S 波が到達するのと同時に

運転制御基準値を超過すると仮定した場合, 運転制御情報が出力されてから沿線に S 波が到達するまでの時間を, PLUM 法情報により確保可能な余裕時間 TLS と定義し, 次式のように表す⁷⁾.

$$TLS = \frac{\Delta_E}{V_s} - \left(\frac{\Delta_A}{V_s} + TTS \right) \quad (10)$$

ここで, Δ_E は震源から沿線までの距離, Δ_A は震源から地震観測点までの距離である. また, V_s は S 波速度であり, ここでは気象庁の速度構造モデル JMA2001⁸⁾ を使用している. また, TTS は伝送時間で, システムのネットワーク性能に依存するものであり, ここでは 1.0 秒と設定した. なお, 小田急電鉄では, 沿線 30 km 以内の気象庁観測点のうち 1 点でも運転制御基準値を超過した場合, 運転制御情報を出力し全線に対して列車制御を行う.

(2) 任意地点での地震に対する沿線の最短余裕時間

まず, 仮想的なグリッド上の任意の緯度・経度を震央とする地震に対する小田急電鉄沿線の最短余裕時間を算出した. なお, 本節の検討では震源深さを 25 km と仮定している. 図-5 に示すように, 沿線のごく近傍で発生する場合を除き, PLUM 法情報によって最短でも数秒の余裕時間を確保可能になる事がわかる. ただし, 太平洋の沖合に震央が位置する場合, 島嶼部以外には地震観測点がないため, 最短余裕時間が短くなる傾向にある. また, 図-6 に, PLUM 法により確保可能な余裕時間と, 緊急地震速報によって確保可能な余裕時間の差分について検討した結果を示す. PLUM 法での最短余裕時間と緊急地震速報での最短余裕時間が等しくなる黒色の等値線を境界として, 青色の等値線で示す外側の領域で地震が発生した場合は緊急地震速報による警報の方が早く出力される可能性が高いのに対し, 赤色の等値線で示す内側の領域で地震が発生した場合は PLUM 法による警報の方が早く出力される可能性が高いことを意味している. したがって, PLUM 法は近地地震に対する警報出力の迅速性にも

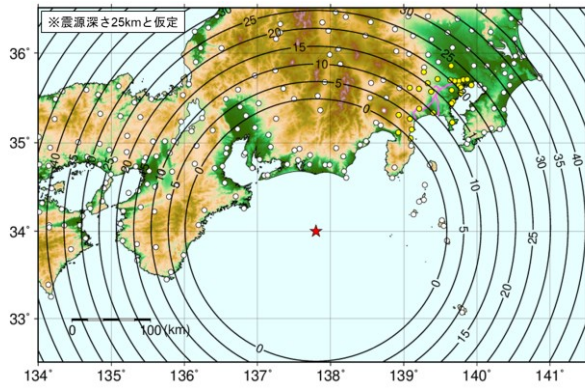


図-7 安政東海地震における余裕時間コンター
(○は気象庁観測点, 黄色は沿線 30km 圏内のもの)

優れていると言える。ただし、図-6中の黒色の破線より内側はいわゆる“ブラインドゾーン”であり、この領域で地震が発生した際にはいずれの警報も出力される前に沿線へS波が到達する。

(3) 過去の南海トラフ地震に基づく沿線の余裕時間

小田急電鉄の沿線では、南海トラフ地震を始めとした地震災害リスクが懸念されている。そこで、過去に発生した南海トラフ地震の事例に基づき、PLUM 法情報の活用による余裕時間を算出した。なお、震源情報は文献9)に基づいており、昭和東南海地震（震源深さ 40 km）および昭和南海地震（震源深さ 24 km）以外は震源深さの情報が不明であるため、本節の検討では 25 km と仮定した。図-7 に 1854 年安政東海地震（M8.4）の余裕時間コンターを例として示す。表-1 に示すように、南海トラフ地震に対して小田急電鉄の沿線では、震源に最も近い気象庁の三島市東本町観測点へ最初に S 波が到達して警報が出力されることが期待され、小田原駅付近での余裕時間は約 5 秒である。一方、震源から遠い新宿駅付近では約 20 秒の余裕時間が確保できる見込みがあり、この付近を走行する列車は、強い揺れが到達するまでの 20 秒の間に列車速度の大幅な低減が期待できる。したがって、沿線から遠方で巨大地震が発生した場合、緊急地震速報の震源情報のみでは警報の見逃しが生じる可能性があったが、PLUM 法情報をあわせて活用することでより確実に列車制御を行うことができ、さらに余裕時間を 5~20 秒確保可能になる。

5. おわりに

本論文で述べた PLUM 法情報の鉄道への適用に関する検討および導入効果の評価を受け、小田急電鉄は緊急地震速報の震源情報に加えて PLUM 法の震度予測情報を早期地震警報システムに導入し、2021 年 9 月 23 日初電より運用を開始した。図-8 に示すのは、本システムの動作

表-1 過去の南海トラフ地震の事例に基づく PLUM 法情報により確保可能な各駅の余裕時間

駅名	地震名						平均
	明応	宝永	安政東海	安政南海	昭和東南海	昭和南海	
新宿	20.73	20.33	20.82	20.08	20.23	20.39	20.43
相模大野	14.17	13.66	14.19	13.43	13.56	13.74	13.79
片瀬江ノ島	10.50	11.16	10.82	11.29	11.28	11.00	11.01
伊勢原	9.85	9.60	9.90	9.47	9.55	9.62	9.67
小田原	4.95	4.91	5.01	4.86	4.89	4.90	4.92

(単位は秒)



図-8 PLUM 法情報を活用した小田急電鉄の早期地震警報システムの画面例

画面例であり、予測される震度とその揺れが到達するまでの予想時間を表示している。

PLUM 法情報を、緊急地震速報の震源情報と併せて適用することで、沿線の近地地震に対する警報出力の迅速性や、遠方での巨大地震発生時における列車制御の確実性の向上が可能となる。また、PLUM 法情報の早期地震警報システムへの導入により、地震時における列車の安全性が高まると考える。

NOTES

- 注1) 緊急地震速報に関連する近年の技術的改善として、IPF 法¹⁰⁾の導入も挙げられる。IPF 法は、ほぼ同時に発生した複数の地震が 1 つの地震として処理されてしまい、正しい震源位置や規模が求められないという課題に対する改善手法であり、気象庁により 2016 年から運用されている。なお、緊急地震速報の電文の仕様に変更は生じないため、従前より緊急地震速報の震源情報を活用している事業者は、特に技術的検討やシステム改修等を行わずとも震源決定・同一地震判定の精度の向上効果が反映された震源情報を自動的に受信し、列車制御を行うことが可能である。
- 注2) 過去の被害地震のマグニチュード M と、その地震における鉄道の被害箇所までの震央距離 Δ に関するデ

ータに基づく経験式 $\log_{10} \Delta = 0.51M - 1.5$ により運転制御範囲を決定し早期地震警報の出力判断を行う方法を、M- Δ 法という⁶⁾。

注3) 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)¹¹⁾では、工学的基盤はS波速度400 m/sの地盤とされているが、本論文では気象庁の定義に則りS波速度700 m/sの地盤を工学的基盤としている。

REFERENCES

- 1) 芦谷公稔, 佐藤新二, 岩田直泰, 是永将宏, 中村洋光: 鉄道の地震警報システムにおける緊急地震速報の活用, 物理探査, Vol. 60, No. 5, pp. 387-397, 2007. [Ashiya, K., Sato, S., Iwata, N., Korenaga, M. and Nakamura, H.: Application of earthquake early warning information to earthquake alarm systems in railways, BUTSURI-TANSA, Vol. 60, No. 5, pp. 387-397, 2007.]
- 2) 気象庁: 緊急地震速報評価・改善検討会 技術部会(第7回)資料, 2017.
- 3) Kodera, Y., Yamada, Y., Hirano, K., Tamaribuchi, K., Adachi, S., Hayashimoto, N., Morimoto, M., Nakamura, M. and Hoshihara, M.: The Propagation of Local Undamped Motion (PLUM) Method: A Simple and Robust Seismic Wavefield Estimation Approach for Earthquake Early Warning, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 108, No. 2, pp. 983-1003, doi: 10.1785/0120170085, 2018.
- 4) 気象庁地震火山部: 緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料, 2020.
- 5) 翠川三郎, 藤本一雄, 村松郁栄: 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, Vol. 1, pp. 51-56, 1999. [Midorikawa, S., Fujimoto, K. and Muramatsu I.: Correlation of New J.M.A. Instrumental Seismic Intensity with Former J.M.A. Seismic Intensity and Ground Motion Parameters, *Journal of social safety science*, Vol. 1, pp. 51-56, 1999.]
- 6) 中村洋光, 岩田直泰, 芦谷公稔: 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. [Nakamura, H., Iwata, N. and Ashiya, K.: Statistical Relationships between Earthquake Disaster and Seismic Parameters Used for Train Operation Control after Earthquake, *RTRI Report*, Vol. 19, No. 10, pp. 11-16, 2005.]
- 7) Iwata, N., Yamamoto, S. and Ashiya K.: Quantitative Evaluation of Damage Mitigation on Running Trains by Earthquake Early Warning, presented at the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, September 24-28, 2012.
- 8) 上野寛, 畠山信一, 明田川保, 舟崎淳, 浜田信生: 気象庁の震源決定方法の改善—浅部速度構造と重み関数の改良—, 験震時報, Vol. 65, pp. 123-134, 2002. [Ueno, H., Hatakeyama, S., Aketagawa, T., Funasaki, J. and Hamada, N.: Improvement of hypocenter determination procedures in the Japan Meteorological Agency, *Journal of Seismology, Volcanology and related Engineering*, Vol. 65, pp. 123-134, 2002.]
- 9) 宇佐美龍夫, 石井寿, 今村隆正, 武村雅之, 松浦律子: 日本被害地震総覧 599-2012, 東京大学出版会, 2013.
- 10) 溜渕功史, 山田真澄, Stephen Wu: 緊急地震速報のための同時多発震源を識別する震源推定手法, 地震第2輯, Vol. 67, pp. 41-55, 2014. [Tamaribuchi, K., Yamada M., Wu, S.: A New Approach to Identify Multiple Concurrent Events for Improvement of Earthquake Early Warning, *Zisin; Journal of the Seismological Society of Japan, 2nd ser.*, Vol. 67, pp. 41-55, 2014.]
- 11) 国土交通省監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説—耐震設計, 丸善出版, 2012.

(Received April 1, 2022)

(Accepted June 3, 2022)

TRAIN OPERATION CONTROL DURING EARTHQUAKES USING INFORMATION OF PLUM METHOD

Misa MORIWAKI, Naoyasu IWATA,
Tamotsu MAEHARA, Ryotaro NOBE and Tadaaki INOKUCHI

Many Japanese railway companies have introduced and operate earthquake alarm systems using the earthquake early warning (EEW) information. While the EEW information is excellent for the train operation control during earthquakes, it has problems such as underestimating the ground motion during huge earthquake because it does not take into account the spread of the source area. In this study, we investigated the method and effectiveness of applying the PLUM method information, which has been distributed by the Japan Meteorological Agency since 2018, to railways in order to certainly control trains during huge earthquakes. As a result, it is confirmed that the PLUM method information can be expected to be effectiveness in providing the lead time at least a few seconds to slow down running-trains even when the EEW information cannot be issued. It can be more certainly for the train operation control to use the information both of the PLUM method and EEW.