

# 論文 地震計の設置間隔に応じた 列車運転規制基準値の設定方法に関する研究

鈴木 博人<sup>1</sup>・宮腰 寛之<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター

(〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町 2-479)

E-mail:h-suzuki@jreast.co.jp

<sup>2</sup>正会員 東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター防災研究所 (現在：千葉支社 千葉土木技術センター)

(〒260-0017 千葉県千葉市中央区要町 1-29)

E-mail: hi-miyakoshi@jreast.co.jp

鉄道では、地震時の列車の安全を確保するために、地震計の観測値に基づいて列車運転規制を行っている。東日本旅客鉄道株式会社では、地震計は約 40km の設置間隔を基本に整備されてきたが、近年、首都圏では約 5km から 20km 間隔に短縮された。運転規制基準値は、地震計と地震計の中間で発生する鉄道構造物に被害を発生させるような地震動を地震計で捉えられるように設定されている。この考え方に従うと、地震計の設置間隔を短縮した場合には運転規制基準値を引き上げることができる。本研究では、地震計で地震計の受持ち区間において被害を発生させるような地震動を捕捉できる割合を、従来の地震計の設置間隔の場合と同等にすることで、地震計の設置間隔に応じた運転規制基準値を設定する方法を開発した。この方法は、2019 年から首都圏の主要線区において導入された。

**Key Words:** train operation control, earthquake, seismometer, installation interval, threshold value

## 1. はじめに

世界有数の地震国である日本の鉄道にとって、地震対策は極めて重要である。鉄道では、地震時に列車の安全を確保するために、地震計で一定レベル以上の地震動が観測された場合に運転中止や速度規制といった列車運転規制が行われている<sup>1)</sup>。東日本旅客鉄道株式会社 (以下、JR 東日本とする) では、地震計で観測される最大加速度に基づいて地震時の列車運転規制を行ってきたが、2003 年から地震被害との関連性がより高いスペクトル強度 (Spectrum Intensity, 以下、SI とする) が用いられている<sup>1)</sup>。在来線の地震計は、その設置間隔が約 40km を超えないことを基本に整備されてきたが、近年、首都圏では約 5km から 20km に短縮された。

線状構造物である鉄道では、離散的に配置された観測機器の設置間隔と運転規制基準値との関係についての研究がされてきた。地震については、日本国有鉄道施設局の研究報告書<sup>23)</sup> (以下、国鉄施設局とする) において、鉄道構造物に被害を発生させるような地震の

最大加速度と震央距離との関係を用いて、地震計の設置間隔と運転規制基準値との関係が提案されている。地震動の加速度は、震源から離れるにしたがって減衰する。そのため、地震計と地震計の中間で発生する地震を想定する方法では、鉄道構造物に被害を発生させるような地震を捕捉できるように、地震計の設置間隔が短い (長い) ほど運転規制基準値が高く (低く) なる。一方、鈴木ほか<sup>4)</sup>は大雨に対して、雨量計の受持ち区間で発生する大雨を雨量計で捉えられる割合を一定にするという方法を用いて、雨量計の設置間隔と運転規制基準値との関係を提案した。これは、雨量計と雨量計の間で発生する大雨を念頭に置きつつも、それ以外の全ての大雨を対象にして、雨量計で捉えることのできる大雨の割合を一定にするという方法である。

本研究では、前述の 2 つの方法の考え方をを用いて、地震計の設置間隔を短縮した場合に、地震計による地震動の捕捉性能を損なうことなく引き上げ可能な運転規制基準値の設定方法について検討した。

表-1 地震に対する列車運転規制基準値. SI 値 (kine) .

	落石区間	一般区間	耐震区間
速度規制	3	6	9
運転中止	6	12	18

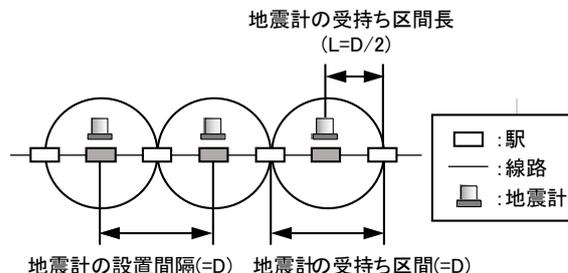


図-1 地震計の設置間隔, 地震計の受持ち区間, および地震計の受持ち区間長の関係

## 2. 列車運転規制方法

### (1) 地震時の列車運転規制

JR 東日本では, 地震時の列車運転規制は地震計で観測される SI 値に基づいて行われている. 在来線の運転規制区間は, 地震時に落石の可能性のある落石区間, 耐震設計指針 (1979 年 9 月) 以降の耐震基準で設計された構造物からなる耐震区間, およびそれ以外の一般区間に区分されている. 運転中止および速度規制基準値は, 表-1 のように運転規制区分ごとに定められている<sup>1)</sup>.

### (2) 地震計の設置間隔

JR 東日本における在来線の地震計は, その設置間隔が約 40km を超えないことを基本に整備されてきた. さらに, 近年では, 地震計の設置間隔は首都圏では約 20km, 東海道本線, 中央本線, 東北本線, 常磐線, 総武本線・京葉線の主要 5 方面では約 10km, 山手線では約 5km に短縮されてきた.

図-1 は, 地震計の設置間隔, 地震計の受持ち区間, および地震計の受持ち区間長の関係を模式的に示したものである. 地震計の受持ち区間長は, 地震計の地点からその受持ち区間の端部までの距離である. ここで, 地震計は図-1 のように直線の線路に等間隔で設置され, 隣り合う地震計の受持ち区間長が同じと仮定する. このとき, 地震計の受持ち区間長は, 地震計の設置間隔および地震計の受持ち区間の総延長の 1/2 となる. 実際には, 地震計の受持ち区間長は, 地震計の設置間隔の 1/2 の距離にあたる約 20km が基本で, 首都圏では約 10km, 主要 5 方面では約 5km, 山手線では約 2.5km となる.

### (3) 地震時の列車運転規制方法の経緯

地震時の列車運転規制は, 1960 年代までは駅長や保線区長等の体感震度等に基づいており, 地震計の導入とともに最大加速度が採用された. その後, JR 東日本の在来線では最大加速度よりも地震被害との関連性が高い SI 値に基づく方法が 2003 年に導入された.

運転規制基準値については, 体感震度に基づいた震度階を基準にした時代には, 運転中止が震度 5, 速度規制が震度 4 とされていた. 最大加速度の導入にあたって, 運転中止が 80gal, 速度規制が 40gal に定められた. その後, 地震計が 20km 間隔で設置された首都圏の一般

区間では運転中止が 100gal, 速度規制が 60gal, 耐震区間では運転中止が 120gal, 速度規制が 80gal に改められている. なお, JR 東日本で用いていた加速度は鉄道構造物の被害との相関を高くするために, 通過帯域 0.05~5Hz のバンドパスフィルタを適用した加速度である<sup>2)</sup>.

SI 値の導入にあたって, 運転規制基準値は従来の運転規制基準値の設定経緯と既往の鉄道被害の地震動下限値を基に定められた<sup>3)</sup>. 一般区間では, 震度階による運転中止基準であった震度 5 の下限値にあたる計測震度 4.5 に相当するのが 12kine であることと, 12kine は主要な構造物の被害下限値 21.8kine より小さいことから, 運転中止基準値に 12kine が採用された. 速度規制基準値は, 以下に示す理由により計測震度 4.0 に相当する 6kine が採用された. 従来の最大加速度による運転中止基準値 80gal および速度規制基準値 40gal に相当する計測震度は 4.0 および 3.5 であり, これらの差は計測震度で 0.5 である. これから, SI 値による運転中止基準値 12kine に相当する計測震度 4.5kine に対して計測震度で 0.5 小さい計測震度 4.0 に相当する 6kine を速度規制基準値とした. また, 落石も含めた全ての被害の下限値は 6.5 kine であったことから落石区間の運転中止基準値は 6kine, 耐震区間は首都圏の耐震区間の最大加速度の基準値であった 120gal (計測震度 4.8) に相当する 18kine とされた. 速度規制基準値は, 一般区間と同様に SI 値による運転中止基準値に相当する計測震度に対して計測震度で 0.5 小さい値に相当する値とし, 落石区間が 3kine, 耐震区間が 9kine とされた. このように, SI 値による運転規制基準値は, 構造物の耐力が反映されている一方で, 地震計の設置間隔が考慮されていない.

### (4) 地震計の設置間隔と運転規制基準値

国鉄施設局<sup>23)</sup>では, 鉄道構造物に被害を発生させるような地震の最大加速度と震央距離との関係を用いて, 地震計の設置間隔と運転規制基準値との関係を提案した. これによると, 鉄道構造物の近傍で地震が発生した場合に, マグニチュード 6.0 以上の地震で鉄道構造物に被害が発生することが多く, それ以下でも被害を受けた事例がある. したがって, マグニチュード 5.5 から

表-2 捕捉すべき最低加速度と地震計の設置間隔の関係

加速度(gal)	設置間隔(km)
20	60
30	50
40	40
60	20

表-3 SI値と震央距離との関係の解析に用いた地震の諸元

発震日	震源位置等	マグニチュード (Mj)	震源深さ (km)
2011/3/23	福島県浜通り	6.0	7.6
2004/12/14	留萌地方南部	6.1	8.6
2011/3/16	千葉県東方沖	6.1	10.0
2011/3/19	茨城県北部	6.1	5.4
1997/5/13	鹿児島県西部	6.2	8.0
2013/4/17	三宅島近海	6.2	9.4
1997/3/26	鹿児島県西部	6.3	8.0
2004/10/23	新潟県中越地震(余震)	6.3	9.0
2013/2/25	栃木県北部	6.3	2.8
2016/4/15	熊本地震(余震)	6.4	6.7
2011/3/12	長野県・新潟県境付近	6.7	8.4
2014/11/22	長野県北部	6.7	4.6
2005/3/20	福岡県西方沖地震	7.0	9.2
2011/4/11	福島県浜通り	7.0	6.4
2008/6/14	岩手・宮城内陸地震	7.2	7.8
2000/10/6	鳥取県西部地震	7.3	9.0

6.0 程度以上の地震をもれなく捕捉する必要があるとした。地震動は震源から離れるにしたがって減衰するので、マグニチュード 5.5 から 6.0 程度以上の地震を捕捉できるように、地震計の設置間隔に応じた捕捉すべき最低加速度という考え方を提案した。マグニチュード 5.5 から 6.0 程度で震源の深さが 10km 程度以浅と震源が浅い地震を対象に最大加速度と震央距離との関係を求めて、表-2 に示す捕捉すべき最低加速度と地震計の設置間隔の関係を示した。これは、地震計と地震計の中間地点で発生した鉄道構造物に被害を発生させるような地震を地震計で捉えることができるような加速度である。この関係から、速度規制基準値を捕捉すべき最低加速度である 40gal とし、地震計の設置間隔は 40km とするのが妥当とした。また、運転中止基準値は過去の被害事例を基に、軟弱地盤上の盛土や落石多発箇所などの特別区間が 80gal、その他の一般区間が 100gal が妥当とした。

### 3. 地震計の設置間隔に応じた運転規制基準値

地震時の運転規制基準値は、地震計の設置間隔が従来の約 40km から首都圏では約 5km から 20km に短縮されてきたが、地震計の設置間隔に因らず同一である。

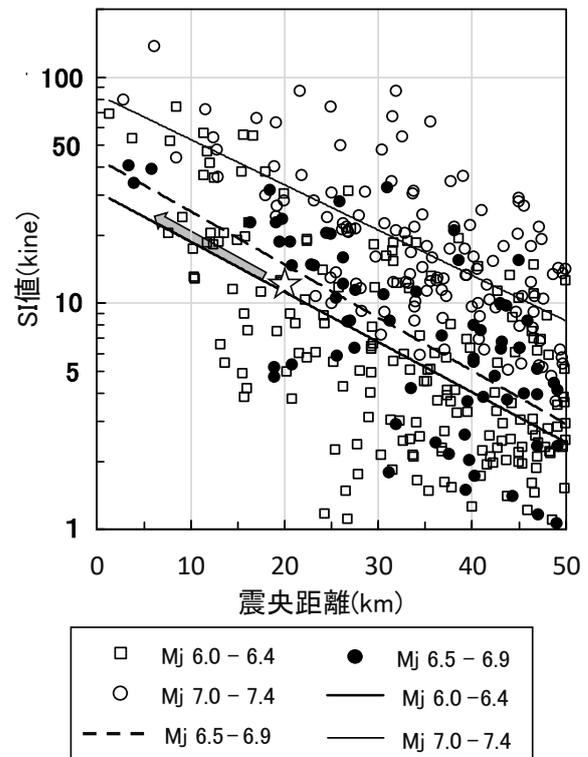


図-2 SI値と震央距離との関係と両者の関係の指数関数による近似式。図中の☆印はSI値 12kineかつ震央距離 20km の場合、矢印はマグニチュード 6.0 から 6.4 の地震から求めた SI 値と震央距離との関係の近似式に☆印から平行な直線。

一方で、国鉄施設局<sup>23)</sup>によると捕捉すべき最低加速度は地震計の設置間隔が短いほど高くなる。この考え方に従うと、地震計の設置間隔を短縮した場合には、運転規制基準値の引き上げが可能と考えられる。そこで、地震計の設置間隔に応じた運転規制基準値の設定方法について、国鉄施設局<sup>23)</sup>と鈴木ほか<sup>4)</sup>の考え方をを用いた 2 つの方法で検討した。なお、首都圏では一部に耐震区間があるものの、その他は一般区間であることから、一般区間の場合を対象に解析を行った。

#### (1) SI 値と震央距離との関係による検討

国鉄施設局<sup>23)</sup>が地震の最大加速度と震央距離との関係を解析したのと同様に、SI 値と震央距離との関係に基づく解析を行った。ここでは、防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET) の地震記録を用いて、1996 年から 2014 年に発生したマグニチュード 6.0 以上かつ震源の深さが 10km 以浅の表-3 に示す 16 地震の記録を用いて分析した。図-2 は、対象にした地震をマグニチュード 6.0 から 0.5 ごとに区分して、SI 値と震央距離との関係を示した散布図である。国鉄施設局<sup>23)</sup>では、地震の最大加速度と震央距離との関係を求めて、捕捉すべき最低加速度と地震計の設置間隔の関係を指数関数で近

似している。一方、その後の研究で、このような関係を表す地震動強さの距離減衰式において、震源に非常に近くなると地震動の振幅が飽和することが知られている<sup>7)</sup>。しかし、現在までに震央距離が小さい場合が考慮された SI 値の距離減衰式は確立されていない。また、図-2 では震央距離が小さい場合のデータは多くはなく、両者の関係はバラツキが大きいものの、図-2 では SI 値が震央距離が小さくなるにつれて国鉄施設局<sup>29)</sup>と同様に大きくなっている。そこで、本研究では両者の関係を国鉄施設局<sup>29)</sup>と同様に指数関数で近似することで、地震計の設置間隔を短縮した場合の運転規制基準値を見積もることとした。図-2 には、両者の関係を最小二乗法を用いて指数関数で近似した場合を実線または点線で示した。なお、SI 値は震央距離が同一の場合にはマグニチュードが大きいほど大きくなる。

地震計の設置間隔は、地震計が図-1 に示すように直線の線路に等間隔で設置され、隣り合う地震計の受持ち区間長が同じとすると、地震計の受持ち区間長の2倍、つまり図-2 における震央距離の2倍に相当する。図-2 を用いて、一般区間における運転中止基準値である 12kine かつ地震計の設置間隔 40km、つまり震央距離 20km に相当する震央距離を短縮した場合の SI 値と震央距離の組合せを見積もった。図-2 には、SI 値 12kine かつ震央距離 20km の場合を☆印で示した。また、マグニチュード 6.0 から 6.4 の地震から求めた SI 値と震央距離との関係の近似式に☆印から平行な直線を矢印で示した。その結果、地震計の設置間隔が 40km (震央距離が 20km) の場合の 12kine に相当するのは、地震計の設置間隔が 20km (同 10km) の場合が 20kine 程度、10km (同 5km) の場合が 25kine 程度、5km (同 2.5km) の場合が 30kine 程度である。

これから、国鉄施設局<sup>29)</sup>が示した捕捉すべき最低加速度と地震計の設置間隔との関係と同様の考え方をすると、地震計の設置間隔が 40km から約 20km に短縮された首都圏では 20kine 程度、約 10km に短縮された主要5方面では 25kine 程度、約 5km に短縮された山手線では 30kine 程度に引き上げできることになる。ただし、地震計の設置間隔を約 10km 以下に短縮した場合には、この値は主要な構造物の被害下限値 21.8kine 以上となる。これから、この方法により引き上げられる運転中止基準値は過大と考えられる。これには、SI 値と震央距離との関係において震源に非常に近くなると地震動の振幅が飽和することが考慮されていないことが影響している可能性がある。

## (2) 地震動の捕捉率による検討

鈴木ほか<sup>4)</sup>が雨量計の設置間隔と運転規制基準値との関係を解析した考え方を地震計の場合に適用して解析

を行った。地震時の列車運転規制では、地震計で運転中止基準値以上の地震動を観測した場合に、その地震計の受持ち区間に運転中止が発令されて、その区間の列車運行が停止される。したがって、鉄道構造物に被害を及ぼす地震動が生起したときに、列車運行が停止されるには、その区間を受け持つ地震計の観測値が運転中止基準値以上でなければならない。つまり、地震計の地点からその受持ち区間の端部までの任意の地点における地震動が主要な構造物の被害下限値 21.8kine 以上の場合に、地震計の観測値が運転中止基準値 12kine 以上であれば運転中止が発令されて、列車運行が停止されることになる。このような場合を地震を捕捉できたと考えることにし、この割合を地震動の捕捉率とする。

地震動の捕捉率の解析には、鈴木ほか<sup>4)</sup>と同様に葛葉ほか<sup>8)</sup>が提案したある地点で大雨が生起したときに他の地点でも同時に大雨が生起している条件付確率 (大雨の同時生起率) の考え方を利用する。地震計の受持ち区間のある地点  $i$  において主要な構造物の被害下限値 21.8 kine 以上の地震動が観測されたときに、地震計の地点  $j$  において基準値  $X$  以上の地震動が観測される条件付き確率は、地点  $i$  と地点  $j$  において観測される SI 値をそれぞれ  $SI_i$  と  $SI_j$ 、地点  $i$  における基準値を主要な構造物の被害下限値 21.8 kine、地点  $j$  における基準値を  $X$ 、2 地点間の距離を  $l$  とすると、 $N$  を括弧内の条件を満たす回数としたときに、次式で表現される。

$$P(X, l)_{i,j} = \frac{N(SI_i \geq 21.8 \cap SI_j \geq X)}{N(SI_i \geq 21.8)} \quad (1)$$

ここで、基準値  $X$  を 12kine とすると運転中止の場合、6kine とすると速度規制の場合となる。地震計は図-1 のように直線の線路に等間隔で設置され、隣り合う地震計の受持ち区間長が同じと仮定する。このような場合の地震動の捕捉率は、地震計の受持ち区間長を  $L$  とすると、式(1)の距離平均値として次式で表される。

$$C(X, L) = \frac{\int_0^L P(X, l) dl}{L} \quad (2)$$

地震動の捕捉率は、運転中止基準値が同じ場合には地震計の受持ち区間長を短縮すると高くなり、地震計の受持ち区間長が同じ場合には運転中止基準値を引き上げると低くなると考えられる。したがって、ある運転中止基準値と地震計の受持ち区間長から、地震計の受持ち区間長を短縮すると同時に運転中止基準値を引き上げた場合に、地震動の捕捉率が同一になるこれらの組合せが存在するはずである。そこで、以下では地震計の受持ち区間長を短縮すると同時に運転中止基準値を引き上げた場合に、地震動の捕捉率が同一になる

表-4 地震動の捕捉率の解析に用いた地震計数

JR東日本	気象庁	防災科学技術研究所	国土技術政策研究所	港湾空港技術研究所	東京ガス
332	672	1,742	718	136	4,113

表-5 地震動の捕捉率の解析に用いた地震

発生年月日	震源位置（地震名）	深さ（km）	マグニチュード（Mj）
2000/10/06	鳥取県西部地震	9.0	7.3
2001/03/24	芸予地震	46.0	6.7
2003/05/26	三陸南地震	72.0	7.1
2003/07/26	宮城県北部地震	11.9	6.4
2003/09/26	十勝沖地震	45.1	8.0
2003/09/26	十勝沖地震（余震）	21.4	7.1
2004/10/23	新潟県中越地震	13.1	6.8
2004/10/23	新潟県中越地震（余震）	9.0	6.3
2004/10/23	新潟県中越地震（余震）	14.2	6.5
2004/10/27	新潟県中越地震（余震）	11.6	6.1
2004/11/29	根室半島南東沖	48.2	7.1
2004/12/14	留萌地方南部	8.6	6.1
2005/02/16	茨城県南部	46.1	5.3
2005/03/20	福岡県西方沖地震	9.2	7.0
2005/07/23	千葉県北西部	73.1	6.0
2005/08/16	宮城県沖	42.0	7.2
2007/03/25	能登半島地震	10.7	6.9
2007/07/16	新潟県中越沖地震	16.8	6.8
2008/06/14	岩手・宮城内陸地震	7.8	7.2
2008/07/24	岩手県沿岸北部地震	108.1	6.8
2009/08/11	駿河湾	23.3	6.5
2011/03/11	東北地方太平洋沖地震	23.7	9.0
2011/03/12	長野県北部地震	8.4	6.7
2011/03/15	静岡県東部	14.3	6.4
2011/04/07	宮城県沖	65.9	7.1
2011/04/11	福島県浜通り	6.4	7.0
2011/04/12	千葉県東方沖	15.1	6.4
2012/03/10	茨城県北部	6.5	5.4
2012/03/14	千葉県東方沖	15.1	6.1
2013/02/25	栃木県北部	2.8	6.3
2013/09/20	福島県浜通り	16.7	5.9
2014/11/22	長野神城断層地震	4.6	6.7

これらの組合せについて解析する。

地震動の捕捉率を求めるにあたって、JR 東日本、気象庁、国立研究開発法人防災科学技術研究所、国土交通省国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人港湾空港技術研究所、東京ガス株式会社による地震計の観測値を用いた。解析に用いた地震計数を表-4 に示す。このような複数の機関における地震計の観測値を組合せて用いることで地震動の捕捉率を統計的に算出した。また、この解析に用いる地震は、国立研究開発法人防災科学技術研究所の K-NET の地震計が観測を開始した 1996 年から 2014 年までに発生したものとし、そのうち日本全国で 21.8kine 以上を観測した表-5 に示す 32 地震を用いた。図-3 には、2 地点のいずれかの地震計において、21.8kine 以上の地震動が観測された地震計の組合せ延べ数を 2 地点間の距離 1km 区間ごとに示した。例え

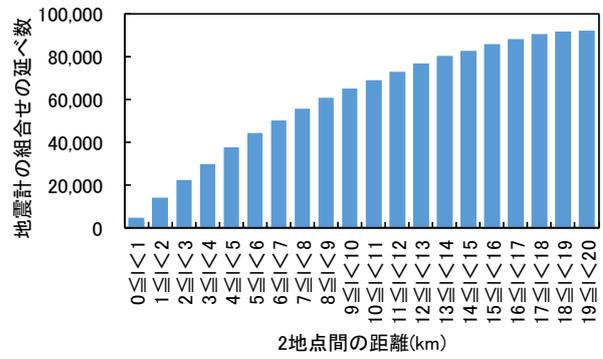


図-3 2地点のいずれかの地震計において、21.8kine以上の地震動が観測された地震計の組合せ延べ数で、2地点間の距離 1km ごとの数。

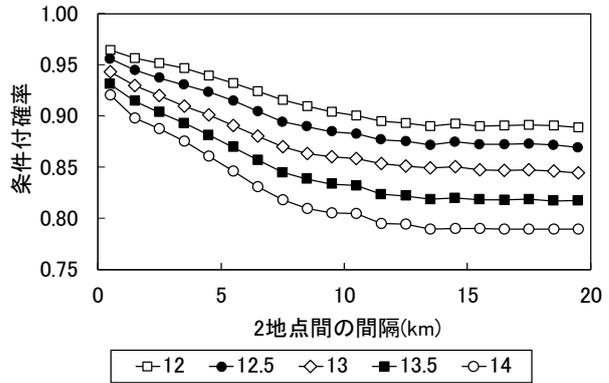


図-4 基準値 X を一般区間の運転中止基準値である 12kine から 14kine まで 0.5kine ずつ引き上げた場合について、各 1km の範囲における条件付確率と 2 地点間の距離との関係

ば、同じ地震計の組合せで 21.8kine 以上が 3 回の地震で観測されている場合は、地震計の組合せ延べ数に 3 回計上する。なお、2 地点間の距離が 20km 以内では、地震計の組合せ延べ数は、2 地点間の距離の増加とともに多くなる。

図-3 に示した 21.8kine 以上の地震動が観測された地震計の組合せの地震動データを用いて、式(1)に示す条件付確率を求めた。この条件付確率は、2 地点間の距離が 20km までの地震計の組合せの地震動データについて、2 地点間の距離を 1km 区間ごとに区分して、その区間に含まれる全ての 2 地点の組合せの地震動データから算出した。図-4 には、運転中止の場合について、基準値 X を一般区間の運転中止基準値である 12kine から 14kine まで 0.5kine ずつ引き上げた場合について、2 地点間の距離が 20km 以下における各 1km の区間における条件付確率を示した。図-4 によると、条件付確率は、2 地点間の距離の拡大とともに単調に減少し、その減少量は 2 地点間の距離の拡大とともに小さくなる傾向にある。また、基準値 X が大きいほど、2 地点間の距離が同じ場合には小さくなる。

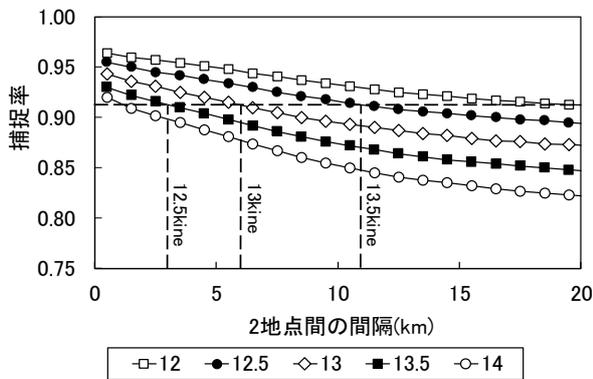


図-5 基準値  $X$  を一般区間の運転中止基準値である 12kine から 14kine まで 0.5kine ずつ引き上げた場合について、各 1km の範囲における地震動の捕捉率と 2 地点間の距離との関係。点線は、基準値が 12kine かつ 2 地点間の距離が 20km の場合の地震動の捕捉率と、基準値が 12.5, 13, 13.5kine の場合にその捕捉率と同一になる 2 地点間の距離。

表-6 基準値  $X$  が 12kine かつ 2 地点間の距離  $L$  が 20km の場合または地震計の設置間隔が 40km の場合と地震の捕捉率が同一となる基準値  $X$  と地震計の設置間隔との組合せ

2地点間の距離(km) (地震計の受持ち区間長)	20	11	6	3	1
地震計の設置間隔(km)	40	22	12	6	2
SI値(kine)	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0

地震動の捕捉率は、式(2)に示すように式(1)の条件付確率の距離平均値として求めることができる。図-5 には、基準値  $X$  を 12kine から 14kine まで 0.5kine ずつ引き上げた場合の地震動の捕捉率を示した。地震動の捕捉率と 2 地点間の距離との関係は、図-4 に示した条件付確率と 2 地点間の距離との関係と同様の傾向にある。

図-5 に示した地震動の捕捉率と 2 地点間の距離との関係を用いると、2 地点間の距離を短縮した場合に、地震動の捕捉率が同一となる基準値  $X$  を求めることができる。つまり、地震計の受持ち区間長を短縮した場合に、地震動の捕捉率が同一となる運転中止基準値を求めることができる。図-5 によると、基準値  $X$  が 12kine かつ 2 地点間の距離  $L$  が 20km の場合と地震動の捕捉率が同一となる基準値  $X$  と 2 地点間の距離  $L$  との組合せは表-6 のとおりである。また、地震計は図-1 のように直線の線路に等間隔で設置され、隣り合う地震計の受持ち区間長が同じとすると、地震計の設置間隔は前述の 2 地点間の距離の 2 倍となる。基準値  $X$  が 12kine かつ地震計の設置間隔が 40km の場合と地震動の捕捉率が同一となる基準値  $X$  と地震計の設置間隔との組合せも表-6 に示した。

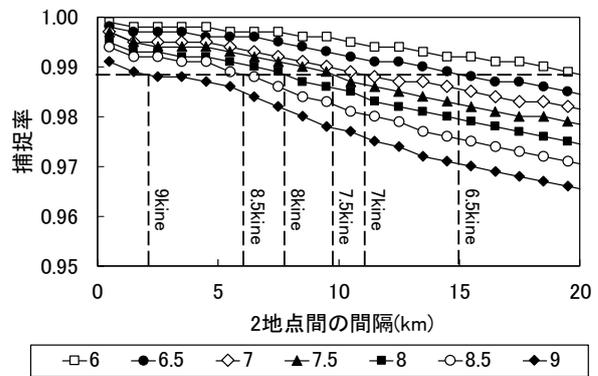


図-6 基準値  $X$  を一般区間の速度規制基準値である 6kine から 9kine まで 0.5kine ずつ引き上げた場合について、各 1km の範囲における地震動の捕捉率と 2 地点間の距離との関係。点線は、基準値が 6kine かつ 2 地点間の距離が 20km の場合の地震動の捕捉率と、基準値が 6.5, 7, 7.5, 8, 8.5, 9kine の場合にその捕捉率と同一になるの 2 地点間の距離。

表-7 基準値  $X$  が 6kine かつ 2 地点間の距離  $L$  が 20km の場合または地震計の設置間隔が 40km の場合と地震の捕捉率が同一となる基準値  $X$  と地震計の設置間隔との組合せ

2地点間の距離(km) (地震計の受持ち区間長)	20	15	11	10	7	6	2
地震計の設置間隔(km)	40	30	22	20	16	12	4
SI値(kine)	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0

速度規制の場合について、図-6 には、基準値  $X$  を一般区間の速度規制基準値である 6kine から 9kine まで 0.5kine ずつ引き上げた場合について、地震動の捕捉率と 2 地点間の距離との関係を図-5 に示した運転中止の場合と同様の方法で求めて示した。基準値  $X$  が 6kine かつ 2 地点間の距離  $L$  が 20km の場合と地震動の捕捉率が同一となる基準値  $X$  と 2 地点間の距離  $L$  との組合せは表-7 のとおりである。また、表-6 と同様に基準値  $X$  が 6kine かつ地震計の設置間隔が 40km の場合と地震動の捕捉率が同一となる基準値  $X$  と地震計の設置間隔との組合せも表-7 に示した。

#### 4. 列車運転規制基準値

JR 東日本における在来線の地震計の設置間隔は、約 40km を標準に、首都圏では約 20km、主要 5 方面では約 10km、山手線では約 5km に短縮されてきた。

地震計の設置間隔を短縮した場合に引き上げられる運転中止基準値は、SI 値と震央距離との関係による方法では、地震計の設置間隔が 40km から約 20km に短縮された首都圏では 20kine 程度、約 10km に短縮された主要 5 方面では 25kine 程度、約 5km に短縮された山手線

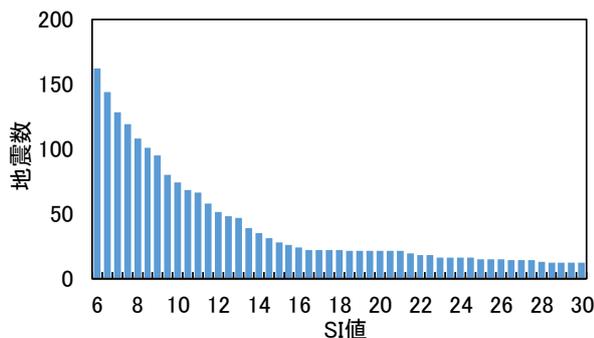


図-7 2003年から2016年までにJR東日本の地震計で観測された各SI値以上の地震の頻度

では 30kine 程度に引き上げられることになる。一方で、地震動の捕捉率を一定にする方法では、地震計の設置間隔が40kmから約20kmに短縮すると12.5kine程度、約10kmに短縮すると13kine程度、約5kmに短縮すると13.5kine程度と、SI値と震央距離との関係による方法に比べて引き上げられる値は小さくなる。

次に、運転規制基準値を引き上げた場合に、その基準値を超過する地震の頻度を調べた。図-7には、2003年から2016年までにJR東日本の地震計で観測された各SI値以上の地震の頻度を示した。図-7によると、運転中止基準値を12kineから12.5kineに引き上げると運転中止となる地震の回数が6%、13kineにすると8%、13.5kineにすると24%、20kineにすると59%、25kineにすると71%、30kineにすると76%低下すると想定される。速度規制基準値を6kineから6.5kineに引き上げると速度規制または運転中止が発令される地震の回数が11%、7.5kineにすると27%、8.5kineにすると38%低下すると想定される。

SI値と震央距離との関係から求めた運転中止基準値を採用すると、運転中止の頻度が大幅に低減する一方で、地震計の設置間隔を約10km以下に短縮した場合には運転中止基準値が主要な構造物の被害下限値以上になる。この方法により引き上げられる運転中止基準値は過大と考えられ、これには震源に非常に近くなると地震動の振幅が飽和することが考慮されていないことが影響している可能性がある。一方で、地震動の捕捉率を一定にすることで求めた運転中止基準値を採用すると、SI値と震央距離との関係から求めた場合に比べて、引き上げられる運転中止基準値が低く、運転中止の頻度の低減は小さいものの、運転中止の頻度を低減する一定の効果がある。これから、地震計の設置間隔を短縮した場合に、地震計による地震動の捕捉性能を損なうことなく引き上げ可能な運転規制基準値として、地震動の捕捉率を一定にすることで求めた値を採用することにした。

地震動の捕捉率を一定にすることで求めた運転中止

表-8 地震計の設置間隔が40kmのときの運転中止基準値12kineおよび速度規制基準値6kineに相当する地震計の設置間隔と運転中止および速度規制基準値

地震計の設置間隔 (km)	運転中止基準値 (kine)	速度規制基準値 (kine)
40	12.0	6.0
20	12.5	7.5
10	13.0	8.5
5	13.5	8.5

および速度規制基準値は、表-6および表-7から、地震計の設置間隔が約20kmの首都圏、約10kmの主要5方面、約5kmの山手線において表-8のようになる。

## 5. まとめ

本研究では、地震計の設置間隔を短縮した場合に、地震計による地震動の捕捉性能を損なうことなく引き上げ可能な運転規制基準値について検討した。地震計の受持ち区間で発生する地震動を地震計で捉えられる割合を一定にする方法を提案し、運転中止基準値および速度規制基準値と地震計の設置間隔との組合せを示した。運転中止基準値は、地震計の設置間隔を40kmから20, 10, 5kmに短縮した場合には12kineからそれぞれ12.5, 13, 13.5kineに引き上げることができる。また、速度規制基準値は、地震計の設置間隔を同様に短縮した場合には6kineからそれぞれ7.5, 8.5, 8.5kineに引き上げることができる。

この方法による地震に対する運転規制基準値の引き上げにあたって、山手線と主要5方面の路線について、線路沿線の地盤を調べて、地震計の受持ち区間における地盤が概ね一定になるように受け持ち区間の見直しや、地震計の設置地点の見直しと増設を行った。その上で、2019年3月に地震計の設置間隔に応じた運転規制基準値への見直しを実施した。

謝辞：本研究では、気象庁、国立研究開発法人防災科学技術研究所、国土交通省国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人港湾空港技術研究所、東京ガス株式会社、およびJR東日本による地震計の観測値を利用しました。それぞれの機関において観測とデータの保存・整理に従事された方々に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 堀込順一：JR東日本における地震対策と運転規制概要、新線路、Vol.60, pp.59-61, 2006.
- 2) 飯島哲之助：『防災管理システムの研究』の中間報告か

- ら 第2分科会, 鉄道土木, Vol.16, pp.366-368, 1974.
- 3) 鎌田拓司: 防災管理システムの研究報告書(1)―昭和 49 年度より―, 鉄道線路, Vol.23, pp.413-416, 1975.
  - 4) 鈴木博人, 中北英一, 高橋日出男: 鉄道における雨量計の設置間隔と列車運転規制基準値の設定方法に関する考察, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.56, pp.L409-L414, 2012.
  - 5) 美藤恭久, 中村豊, 富田健司: 東海道・山陽新幹線における地震時ダウンタイム短縮化対策, 鉄道技術研究報告, Vol.1294, pp.1-38, 1985.
  - 6) 島村誠, 鈴木博人: 地震観測にもとづく列車運転規制基準の検討, 日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.11, pp.2289-2292, 2002.
  - 7) 翠川三郎: 地震動強さの距離減衰式, 地震, Vol.61, pp. S471-S477.
  - 8) 葛葉泰久, 友杉邦雄, 岸井徳雄: 降水量の空間相関構造, 水工学論文集, Vol.46, pp.127-132, 2002.

(Received April 2, 2021)  
(Accepted June 4, 2021)

## METHOD FOR DETERMINING TRAIN OPERATION CONTROL CRITERIA ACCORDING TO SEISMOMETER INSTALLATION INTERVAL

Hiroto SUZUKI and Hiroyuki MIYAKOSHI

Train operation is regulated based on the observed values of seismometer in order to ensure the safety of train operation in the event of an earthquake. East Japan Railway Company has maintained seismometers based on the installation interval of about 40 km, but in recent years, this interval has been shortened to about 5 km to 20 km in the Tokyo metropolitan area. The train operation control criteria are set so that the seismometer can capture the seismic ground motion that causes damage to the railway structure that occurs between the seismometer and the seismometer. According to this idea, if the seismometer installation interval is shortened, the train operation control criteria can be increased. In this study, we have developed a method for determining the train operation control criteria according to the seismometer installation interval. The seismic motion capture rate is defined as the ratio of seismic ground motion that causes damage to the railway structure in the charge section of the seismometer that is captured by the seismometer. In this method, this capture rate is made equivalent to the case where the installation interval of the conventional seismometer is 40 km. This method was put to practical use in 2019 in major lines in the Tokyo metropolitan area.