

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 地震時の運転規制基準値を 鉄道線区情報を活用して設定する

近年、構造物の耐震診断や耐震補強、沿線地震計の増設などが積極的に行われており、鉄道の地震に対する性能は飛躍的に向上しています。このような地震対策の効果を、運転規制を行う地震動レベルに反映させる手法を開発しました。提案手法を仮想路線に適用することで、従来よりも運転規制の実施回数や実施範囲の合理化が可能となることを確認しました。この方法を用いることで、これまでの運転規制で担保していた鉄道の安全性を損なうことなく、運転規制の実施範囲を合理化できるため、鉄道のさらなる安定輸送が可能となります。

## はじめに

地震発生後の車両の運転規制は、沿線に設置された地震計の観測記録をもとに判断されています。具体的には、地震計で得られた地震動指標（最大加速度、震度階、SI値（※参照）など）が事前に設定した値を上回った場合に、運転を中止し、徒歩巡回などの点検を実施します。この判断のしきい値（以降、運転規制基準値）は、過去に発生した地震被害のおおむね下限となるような値を経験的に設定することで、鉄道の安全性を担保しています。

一方で、1995年の兵庫県南部地震や2011年の東北地方太平洋沖地震などの経験を踏まえ、既設構造物の耐震診断や耐震補強が積極的に推進されています。また、耐震設計基準の改訂<sup>1)</sup>にともない、新設構造物にはあらかじめ高い耐震性能が要求されています。このように、大規模地震を対象とした鉄道の性能は近年飛躍的に向上しています。

こうした中で、2018年6月に発生した大阪府北部地震などでは、甚大な被害は発生しなかったものの、地震発生から鉄道の運行再開までに時間を要



坂井 公俊  
Kimitoshi Sakai  
鉄道地震工学研究センター  
地震応答制御研究室  
主任研究員



和田 一範  
Kazunori Wada  
鉄道地震工学研究センター  
地震応答制御研究室  
副主任研究員



豊岡 亮洋  
Akihiro Toyooka  
鉄道地震工学研究センター  
地震応答制御研究室長

### ※ 最大加速度

加速度は、単位時間当たりの速度の変化率を表す指標（単位：m/s<sup>2</sup>）で、地震中の加速度の最大値のこと。地震動の加速度を表す場合には、Gal（ガル）（1Gal=0.01m/s<sup>2</sup>）で表現されることがありますが、これはガリレオ・ガリレイ（Galileo Galilei）にちなんでいます。

### ※ 震度階

震度0から7まで10段階に分けられた揺れの大きさを表す指標（震度5、6は弱強の2段階）で、日本では地震後に気象庁から発表されます。従来は測候所職員の体感や周囲の被災状況から決められていましたが、平成8年より地震波形を用いて自動算出されています。

### ※ SI値

一般的な建物にどの程度の被害が発生するかを数値化した指標（単位：kine（カイン、cm/s））。地震波形を用いて、周期0.1秒から2.5秒の構造物の速度応答を算定し、その平均値で表現します。

した点が注目されました。地震時の鉄道には安全性とともに、早期運転再開、安定輸送という観点も重要となります。このような観点から、耐震補強などの対策効果を評価することで、運転規制基準値が上昇し、鉄道の安定輸送が向上する可能性があると考えられます。

そこで今回、路線の情報を活用することで運転規制基準値を見直す方法を新たに提案したので、手法の概要と、提案法を用いた試算結果の紹介を行います。

### 現在の地震時運転規制の概要

地震計で得られた記録に基づく運転規制判断のイメージを図1に示します。新幹線などの路線には、ある一定間隔ごとに地震計が設置されており、それぞれ設定された受け持ち区間ではこの地震計で運転規制基準値を超える記録が観測された場合に一律の規制を行います。

図1の例では、3箇所設置された地震計のうち右側2つが事前に設定した運転規制基準値を上回っています。そのため、右側2/3の領域(図1の緑線の範囲)で運転規制が必要だと判定されます。

この運転規制基準値を見直す時には「運転規制基準値を設定した当初と比較して、鉄道の地震時性能が向上した分だけ運転規制基準値を上昇させる」という考え方を提案しました。イメージを図2に示しますが、以降では、この図に従って説明を行います。

しかしながら、従来の運転規制基準値はさまざまな経験に基づいて設定されているため、上述した力学的な性能の向上と直接連動して評価することは難しいという側面があります。

### 地震リスクに基づく運転規制基準値の更新方法の提案

そこで今回、「運転規制基準値を設

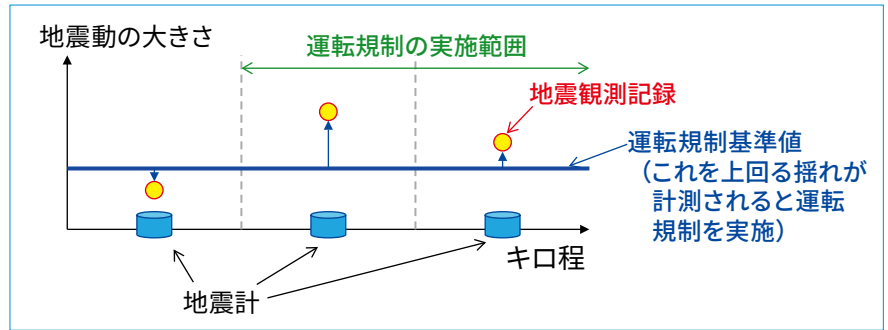


図1 運転規制の実施イメージ

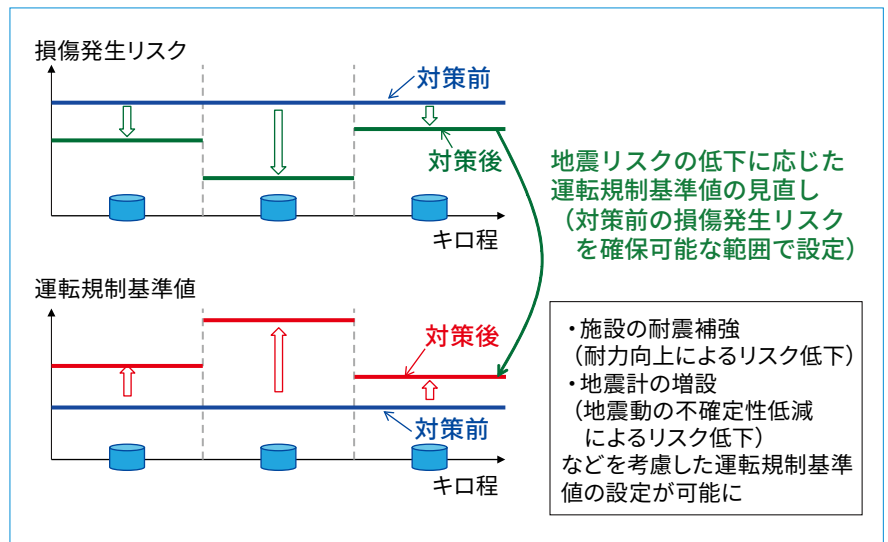


図2 地震リスクに基づく運転規制基準値の更新

定した当初と比較して、地震対策によって低減した損傷発生リスクの大きさに応じて運転規制基準値を上昇させる」という考え方を提案しました。イメージを図2に示しますが、以降では、この図に従って説明を行います。

まず、運転規制基準値(図2下段の青線)を設定した時点における、鉄道の地震ともなう損傷発生リスクを評価します(上段の青線)。ここで言う損傷発生リスクとは、「沿線地震計で運転規制基準値が観測される地震が発生した場合に、列車運行に支障のある事象が発生する確率」であり、一般的にはこれは非常に小さい値であると考

えられます。

次に、各種の地震対策を実施した効果を見込んで、現在の損傷発生リスクを評価します(上段の緑線)。地震対策を行った路線では、この影響によって鉄道の損傷発生リスクが低下します。

そして、このリスク低下分だけ、運転規制基準値を見直すことが可能であると考えます。この時の運転規制基準値の引き上げ範囲は、対策前の損傷発生リスクが確保される範囲で設定します。このような対応を行うことで、これまでの地震時運転規制が担保している安全性を維持した中で、安定輸送の向上が可能となります。

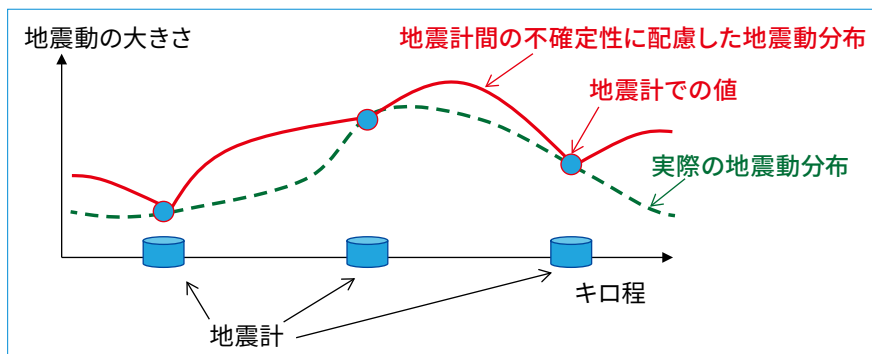


図3 地震計に基づいた地震動分布の推定 (対策前)

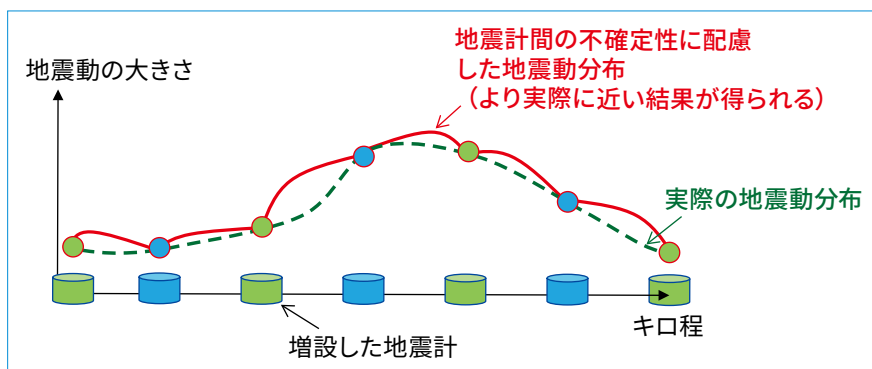


図4 地震計に基づいた地震動分布の推定 (地震計増設後)

### 地震計の増設効果を考慮した 運転規制基準値の更新方法

このような地震リスクに基づく評価を行うことで、地震計の増設効果も同様に運転規制基準値に反映させることができます。具体的には図3に示すように、離散的に設置された地震計では、その間の地震動情報を直接知ることはできないため、線状の揺れを把握するためには、この不確定性にも配慮を行う必要があります。そのため、実際の地震動の分布(図中の緑線)に対して多少の余裕を考慮(図中の赤線)する必要があります。この部分も含んだ上で運転規制基準値が設定されていると考えることができます。

これに対して、例えば図4に示すように、従来の地震計の間に1つずつ増設することで、実際の地震動分布により近い情報が取得できるため、これまで考慮していた余裕代を低減した評価

が可能となり、結果として損傷発生リスクの低減が実現できます。その結果、地震計の増設効果も運転規制基準値の見直しに反映できます。

### 仮想路線に対する提案手法の適用

提案手法を用いた試算を行うことで、運転規制基準値を実際に更新可能であることを確認します。対象は延長約700kmの仮想路線であり、土木構造物はおもに橋りょう・高架橋によって構成されています。橋りょう・高架橋の支承部は鋼棒ストッパー、鋼角ストッパーが採用され、電化柱はPC柱が約50m間隔で設置されています。また、沿線地震計は約20km間隔で地表位置に設置されています。

各構造の地震リスク評価手法については省略しますが、それぞれ鉄道総研において開発した地震時挙動評価

手法<sup>2)3)</sup>に基づいて算定しています。

以上の条件に基づいて、対策前の路線の損傷発生リスクを評価しました。この時に想定する地震動の大きさは、全線の地震計位置で運転規制基準値(今回はSI値12kineと定義)と同一の値が観測されたと考えました。これは、図1の全3か所の地震計で青線と同一の揺れが観測されたと仮定することに相当します。

損傷発生リスクの評価結果を図5に示しますが、各位置の地盤条件や構造物条件が複雑に変化しているため、損傷発生リスクは地点ごとに異なり、例えば損傷発生リスクがもっとも高いキロ程350km付近とキロ程440km付近(図中青丸で囲った地域)を比較すると、後者は6割程度ひかんのリスクとなっています。また全体を俯瞰すると、この路線では電化柱の損傷発生リスクが相対的に大きく、地震リスクの低減という観点では、電化柱の対策が重要であることが確認できます。

### 耐震補強による運転規制基準値の更新

対象路線の電化柱をすべて鋼管柱に交換した条件で損傷発生リスクを評価しました。この損傷発生リスクを、対策前の損傷発生リスクとの比率で示した結果(これをリスク変化率と定義)を図6に示します。この結果から、電化柱を鋼管に取り換えることで耐力が上昇し、結果として電化柱の損傷発生リスクが大幅に低減したことがわかります。そして、路線全体の損傷発生リスク(図6の黒線)は対策前と比較して低減しており、例えばキロ程580km付近では対策前と比較して40%程度にまでリスクが小さくなっていることが確認できます。その一方で、キロ程400~500km周辺では対策前の路線において電化柱以外の損傷発生リスク

が大きかったために、電化柱を対策したとしても全体の損傷発生リスクが変化しない(リスク変化率=1)こともわかります。そのため、路線の損傷発生リスクを効率的に下げるためには、各地点で弱点となる部位を効率的に抽出し、対策を施すことが重要であるといえます。

続いて、この損傷発生リスクの低減を用いて、運転規制基準値の更新を行いました。今回の評価では、損傷発生リスクを対策前と同一となるように運転規制基準値を調整しました。得られた結果を図7に示します。

この結果をみると、リスク低減の程度によって運転規制基準値が上昇されていることが確認できます。とくに、損傷発生リスクが40%程度に下がったキロ程580km付近では、運転規制基準値が16kine程度になっており、従来よりも30%以上運転規制基準値を上昇可能であることがわかります。その一方で、損傷発生リスクが変化しなかった450km付近では当然のように運転規制基準値も変化していません。

また、今回は省略しますが、これ以外にも橋りょう・高架橋の対策や支承部の対策などを組み合わせることで、損傷発生リスクがさらに低減することも確認しています。さらに、地震計を増設することでも運転規制基準値を上昇可能であり、複数の対策を効率的に組み合わせた評価も実現可能です。

## おわりに

今回紹介した手法によって、これまでの地震時運転規制で担保していた鉄道の安全性を低下させることなく、運転規制基準値を見直すことが可能となるため、地震後の早期運転再開、鉄道のさらなる安定輸送が実現されます。

RRR

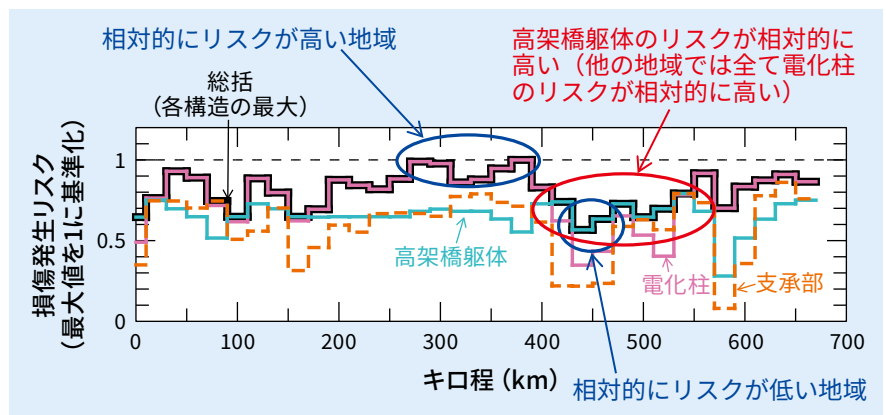


図5 損傷発生リスクの評価結果(対策前, 最大値を1に正規化)

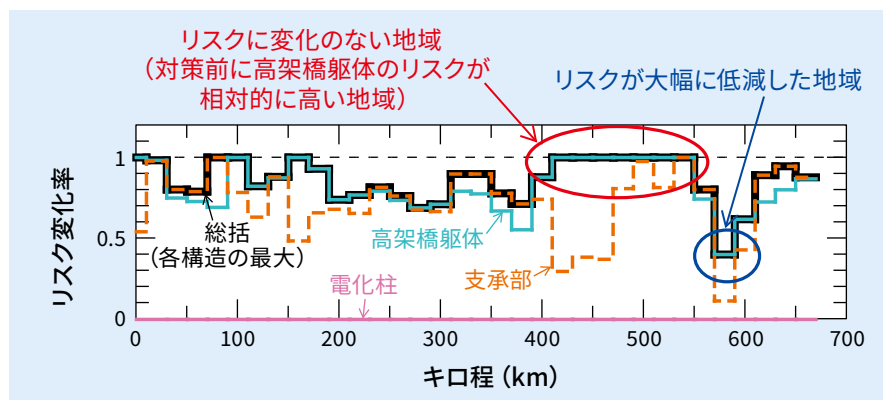


図6 対策後の損傷発生リスク変化率の評価結果(全線の電化柱対策を実施した場合)

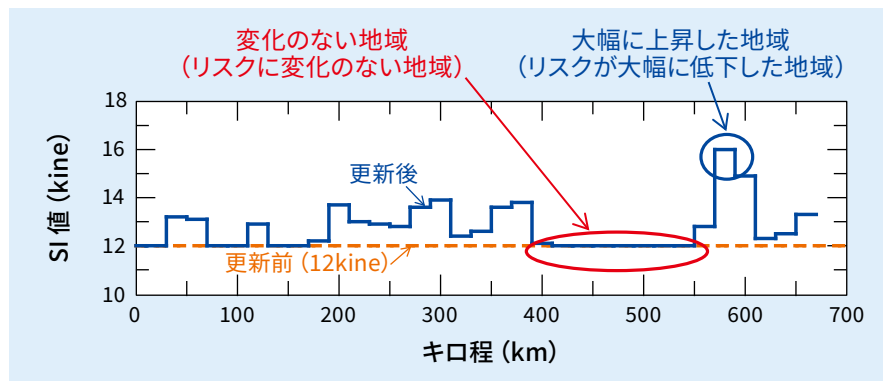


図7 運転規制基準値の更新結果(全線の電化柱対策を実施した場合)

## 文献

- 1) 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
- 2) 坂井公俊, 松本星斗：鉄道橋梁・高架橋を対象とした地震被害発生確率の即時推定手法の提案, 土木学会論文集, Vol.77, No.4, 2021
- 3) 田中駿, 坂井公俊, 田中浩平, 原田智：土木構造物上の電車線柱の地震応答値即時推定手法の提案, 土木学会鉄道工学論文集, Vol.22, 2018