

# 線区情報を活用した地震時運転規制基準値の更新手法

坂井 公俊\* 和田 一範\* 豊岡 亮洋\*

Method for Resetting Operation Regulation Standards Considering Seismic Risk of Railway Facilities

Kimitoshi SAKAI Kazunori WADA Akihiro TOYOOKA

The regulations of seismic intensity to suspend a train operation after earthquakes is determined empirically according to the past disaster. Therefore, it is difficult to reflect the effects of seismic countermeasures, such as seismic reinforcement and additional seismometers, in the regulation standards of train operations. To resume train operations as quickly as possible after an earthquake, this study proposes a method for updating the regulation standards of train operations based on risk analysis. In the proposed method, the seismic risk of each facility is evaluated and used to determine the regulations for suspending a train operation. Using this method, the effect of seismic countermeasures, such as improving the seismic performance of railway facilities and adding seismometers, can be directly reflected to the regulations of train operations.

キーワード：地震時運転規制基準値，耐震補強，地震計の設置，損傷発生リスク

## 1. はじめに

鉄道における地震時の列車運転規制は、地盤上に設置された地震計で観測される値を判断指標として行われている<sup>例えは<sup>1)</sup></sup>。この時の地震動指標としては最大加速度、計測震度、SI値等が採用されているとともに、規制を行う地震動の強さ（以降、運転規制基準値と呼ぶ）も鉄道事業者によって異なる。この運転規制基準値は、過去に発生した地震における施設被害とその箇所での推定される地震動強さの関係を整理した後に、被害発生箇所の地震動強さの下限に基づいて値を定めている事例<sup>1)</sup>があり、基本的にはこの考え方に準じて経験的に設定されていると考えられる。この際、地震計の設置間隔に応じた地震動分布のばらつき、構造物耐力の変動に伴う損傷分布のばらつき等、各種の不確定な要素が存在するが、このような影響も含んだ上で工学的判断により運転規制基準値を設定していることになる。

一方で、近年頻発している大規模地震等の経験をもとに、鉄道構造物や電化柱等の耐震診断、耐震補強や沿線地震計の増設といった各種の地震対策が推進されている。これによって、鉄道の耐震性能が向上するとともに、地震動情報の高密度化による地震動分布の不確定性の低減等が実現されていることは疑いようのない事実である。しかしながら、過去の地震被害の下限値に基づいて運転規制基準値を設定している現状を鑑みると、各種地震対策の効果を運転規制基準値の更新という形で陽に反映させることは困難である。

そこで本検討では、各施設の地震時性能や地震動の特性などの線区情報を個別に考慮した上で、地震による各施設の損傷の可能性を個別に評価し、これに基づいて運転規制を実施する手法を提案<sup>2)</sup>したので、手法の概要と試算の結果を紹介する。

## 2. 地震時運転規制基準値の更新手法の提案

### 2.1 基本的な考え方

本検討では、鉄道施設の耐震補強や地震計の増設といった各種の地震対策に伴う効果を運転規制基準値に反映させる手法を提案する。この際「対策によって向上した耐震性能の変化程度に応じて運転規制基準値を上昇させる」という考え方（図1(a)）を基本とする。一方、現在の運転規制基準値は前章で述べた通り、地震動情報や構造物被害の評価といった不確定、不確実な要素を含んだ上で、経験的、工学的に設定されている。そのため例えば「数値解析によって構造物の損傷は100gal以上で発生することが確認されたので、運転規制基準値を100galに設定する」といった決定論的な判断を行うと、これまで暗に考慮してきた不確定、不確実な要素、安全率等を無視することとなり、従来の運転規制基準値との連続性が失われるとともに、安全性の低下も危惧される。

そこで本検討では「地震対策による性能の向上（耐力、変形性能の向上等）」を、「地震によって損傷が発生する可能性（損傷発生リスク）が低減する」という効果で表現することとし、「地震対策によって低減した損傷発生リスクの差分に応じて運転規制基準値を上昇させる」という方法を構築する。以上の概念により、従来から用いている運転規制基準値の工学的な長所を残した上で、路

\* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

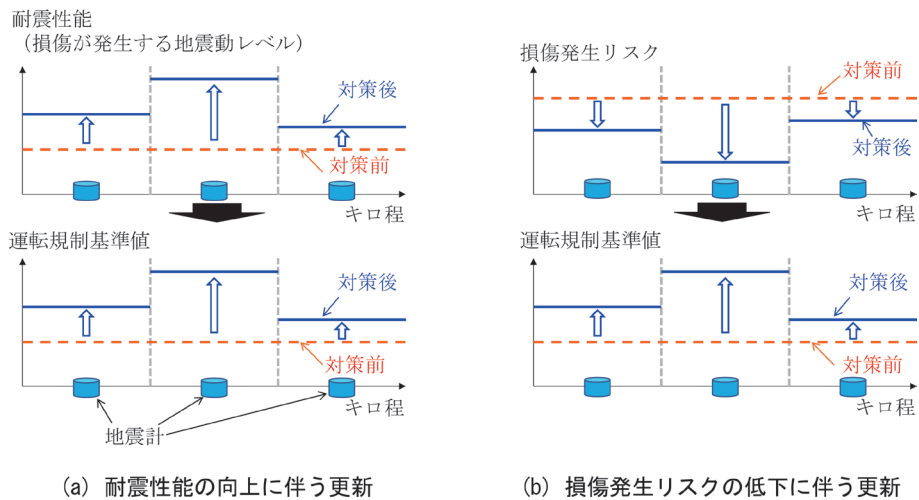


図1 運転規制基準値の更新方法の基本的な考え方

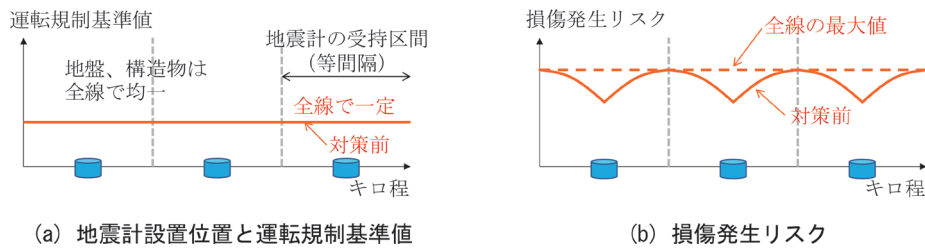


図2 各種対策前の運転規制基準値と各鉄道施設の損傷発生リスク

線の地震時性能の向上分を陽な形で運転規制基準値の見直しに反映することが可能となる(図1(b))。

この考え方に基づくことで「耐震補強や地震計増設といった地震対策の効果を反映させた規制基準値の更新」が可能となる(2.2節)。さらに、対策の実施有無に関わらず「各区間の損傷発生リスクを全区間で均一とすることによる規制基準値の更新」も実現可能となる(2.3節)。

これらの規制基準値の更新は主に地盤上に設置された地震計の指標値に基づいて運転規制を実施する方法である。その一方で、地震毎に地震動の特性(周期特性、継続時間等)は異なるため、ある地点で複数回の地震が発生し、観測された地震動指標値が全て同一(例えば震度5強)であったとしても、構造物への影響という観点では差があると考えられる。そのため地盤上記録の指標値に基づく運転規制ではなく、構造物の損傷有無に基づいて運転規制を行うことで、より合理的な評価が期待される。そこで、「構造物の損傷評価結果を用いた運転規制」に関して2.4節で述べる。

## 2.2 地震対策の効果を考慮した運転規制基準値の更新

地震対策の効果を定量的に評価することで、運転規制基準値を更新する提案手法について説明する。まず現状の運転規制基準値を設定した当初の状況として、図2(a)のように等間隔に地震計が設置され、全線に渡っ

て地盤、構造物が均一であるケースを考える。この時の規制基準値は全ての地震計で同一とする。この路線に対して、構造物の損傷発生リスクを図2(b)のように評価する。損傷発生リスクを算定する際に想定する地震動は、各地震計において運転規制基準値と同一の地震動が観測されるレベルとする。また、損傷発生リスクには、各種の不確定性を考慮する。同一の地盤、構造物が並んでいた場合、不確定性の総量の空間変化は地震計から離隔のみに依存するため、地震計近傍では不確定性は小さく、地震計から遠ざかるにつれ不確定性が大きくなる。この不確定性を考慮することで、図2(b)に示すように地震計の遠方地点ほど損傷発生リスクが大きくなる。ここで得られた損傷発生リスクは「当該地震計において規制基準値の地震動が観測された場合に、各鉄道施設で損傷が発生する確率」であり、これを基本条件とする。

続いて、各施設に地震対策を実施した状況に対して、損傷発生リスクを算定する。この地震対策としては、施設の耐震補強(図3(a))や、地震計の増設(図3(b))等が考えられる。施設の耐震補強を実施することで、損傷が発生する地震動レベルが上昇するために、損傷発生リスクが低減する。また地震計を増設すると、地震計の設置間隔が短くなるため、地震計間での不確定性が低減される。この不確定性の低減によって、損傷発生リスクも低減される場合がある。

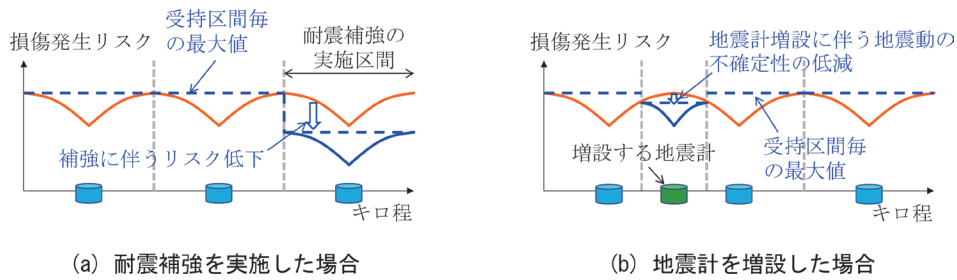


図3 地震対策後の損傷発生リスクの評価

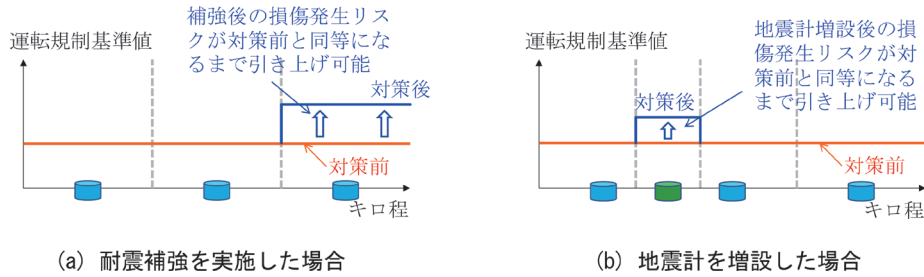


図4 地震対策に伴う運転規制基準値の更新

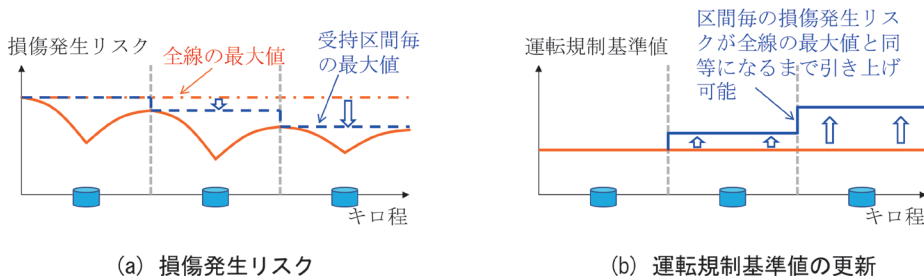


図5 各区間の地震特性の相違を考慮した運転規制基準値の更新

以上を背景に、リスク低減の分だけ運転規制基準値を上昇させる。この上昇量は、各地震計の受け持ち区間毎に、各種対策前の損傷発生リスク（図2（b））を超過しない範囲で設定することができる。そのため、図3で示した各状態に対する基準値の見直しは、それぞれ図4の青線に示したように、対策を実施した箇所付近において実施可能となる。

### 2.3 各区間の地震動、地盤、構造物の特性を考慮した運転規制基準値の更新

路線全体の損傷発生リスクを評価することで、地震計の受け持ち区間毎の損傷発生リスクを横並びで見ることが可能となる。鉄道路線は延長が長く、地域による地震動特性、地盤特性には特徴があるとともに、構造物特性も場所により変化している場合がある。前節では各種特性を全線で同一と仮定したため、損傷発生リスクが単純な形状を示していたが、実際には各地点における構造物の損傷発生リスクは複雑に変化すると考えられる。この地点毎の損傷発生リスクの変化を把握することで、対策の有無によらず、運転規制基準値を見直すことが可能となる。

具体的なイメージを図5に示す。この箇所では、各種の要因によって終点方の損傷発生リスクが小さい結果が得られていると仮定する（図5（a）の実線）。この損傷発生リスクのうち、地震計受け持ち区間の損傷発生リスク（図5（a）の点線）と全線の最大値（図5（a）の一点鎖線）の差分に対応して、図5（b）のように運転規制基準値を調整可能であるため、当該路線の終点方において運転規制基準値を引き上げることができる。また、この考え方を前節で述べた手法と組み合わせることで、運転規制基準値の更なる合理化が可能である。

### 2.4 地震毎の損傷評価結果に基づく運転規制の実施

前節までの評価は、いずれも地盤上に設置された地震計の観測記録より得られる単一指標（SI値など）を用いた運転規制基準値の設定方法である。鉄道施設の被害を単一の地震動指標で表現する方法は、評価が簡便である一方で、地震動の周期特性や構造物の特性（周期、強度の違い）等を陽な形で考慮することができない。その結果、当該地点の地震動指標と構造物条件を用いた詳細な挙動評価の対応に関する不確実性が大きくなるため、

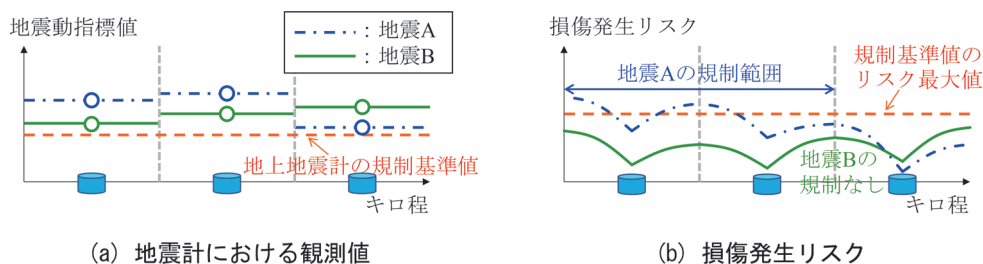


図6 地震毎の損傷発生リスクに基づく運転規制の実施

これを反映した損傷発生リスクも大きな値となる。この不確実性を低減する方法として、地震毎に地震動や構造物の特性を直接考慮して損傷発生リスクを評価することで、さらに運転規制を合理化する手法を提案する。

具体的なイメージを図6に示す。2つの地震A, Bが発生し、図6(a)に示すようにいずれの地震においても対象路線に設置された3つの地震計において、運転規制基準値(図6(a)の点線)を少し上回る記録が観測されたとする。この時、地盤上の地震記録に基づく規制を実施する場合には、両地震ともに全線で運転規制が行われる。

この地表地震計で得られた運転規制基準値は、同一の指標値となる地震に対して、構造物の挙動評価を行った場合の各種ばらつきを含んだものであり、これが図2(b)に示したような各種対策前の損傷発生リスクになる。そのため、個別の地震観測記録、個別の構造物に対して耐震設計で用いられているような評価手法によって損傷評価を行うことで、各種不確実性の低減が可能となり、結果として損傷発生リスクが小さくなる場合が多いと考えられる。

そこで、地震発生直後に各地震に対して個別に損傷発生リスクを評価した場合の結果イメージを図6(b)に示す。地震Aでは、地表地震計により判断を行う際のリスク(図6(b)の点線)を超過する領域が存在した(図6(b)の一点鎖線)。その一方で、地震Bでは全てのエリアでこれを下回る結果が得られたとする(図6(b)の実線)。この場合には、地震Aでは限られた範囲のみで運転規制を行うという判断が可能となるとともに、地震Bでは運転規制が不要となる。そのためいずれのケースにおいても、地表地震計で運転規制を実施する場合と比較して、運転規制の合理化、早期運転再開が実現可能となる。

### 3. 提案手法を用いた地震時運転規制基準値の更新

#### 3.1 対象とする路線の概要

前章で提案を行った地震時運転規制基準値の更新手法を用いた試算を行う。対象とする路線は、図7に示す延長約700kmの仮想路線とする。この路線は主に橋りよ

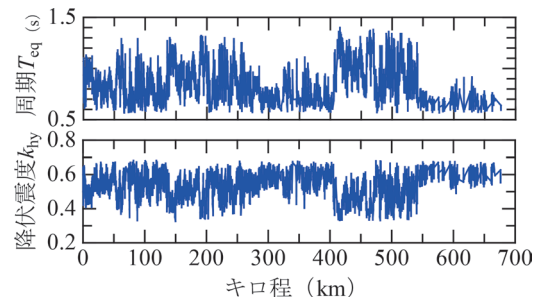


図7 対象路線の情報(土木構造物の振動特性)

う・高架橋で構成されており、各構造物の挙動は耐震設計で用いられる等価1自由度モデルによって評価可能であるものとする。この時に必要となる等価固有周期 $T_{eq}$ 、降伏震度 $k_{hy}$ は、予め多様な諸元を有する構造物に対して計算されたデータベース<sup>3)</sup>を用いて設定している。この橋りよ・高架橋の支承部は鋼棒ストッパー、鋼角ストッパーが使用され、電化柱は12-40-N9Bが全線で使用されていると仮定した。また、沿線の地震計は0km, 20km, 40km...と20km間隔で設置されていると仮定し、運転規制はSI値が12kineを超過した場合に実施する<sup>1)</sup>こととした。

この鉄道路線に対して損傷発生リスクを評価する。この時の入力地震動は、全ての地震計位置のSI値が12kineとなるように調整した地震観測記録(近年観測された代表的な7波形)を用いることとし、地震計設置箇所間の地震動の変動は、距離に基づく地震動の振幅の変化を距離減衰式<sup>4)</sup>を用いて評価する。また、各地震計の受け持ち区間における損傷発生リスクは、複数の地震動を用いて得られたそれぞれの損傷発生リスクのうち、受け持ち区間における最大値を採用することとした。

各構造物の挙動評価、損傷発生リスクの評価は、既往の成果<sup>5) 6) 7)</sup>に基づいて実施することとし、高架橋く体の損傷は、応答塑性率 $\mu=1$ を限界値として設定するとともに、支承部、電化柱はそれぞれ限界耐力を加速度応答に換算して設定している。この時、本来であれば各施設の耐力、周期等の不確実性を考慮した損傷発生リスクの評価を行う必要がある<sup>8)</sup>が、今回はこの影響は無視して構造物等の情報は確定的に与えられるものと仮定した。

以上の条件に基づいて、高架橋く体、支承、電化柱の

損傷発生リスクの評価を行った結果を図8に示す。この図では全区間における損傷発生リスクの最大値を1に正規化した指標（リスク比率）で表示している。この結果を見ると、この路線では多くの区間で電化柱の損傷発生リスクが最大値を示している。そのため今回の設定条件下において、当該路線における運転規制の観点からは電化柱の損傷がボトルネックになっていることが分かる。また損傷発生リスクの最大値は区間によって大きく変動しており、場所によっては最もリスクの高い区間と比較して0.6倍程度になっていることが分かる。これは各区間の地盤特性、構造物特性の違いによるものである。

### 3.2 地震対策の効果を検討した運転規制基準値の更新

本節ではいくつかの地震対策シナリオを設定し、この対策効果を考慮した規制基準値の更新に関する試算を行う。具体的にはシナリオとして、a) 電化柱への地震対策、b) 全施設への地震対策、c) 地震計の増設を設定し、それぞれの評価を実施する。

ここで、対策に伴う各施設の耐震性能の上昇は、本来であれば個別構造毎に評価する必要があるが、今回は以下のように一律に設定した。まず電化柱については、鋼管柱への交換を行うこととした。高架橋の耐震性能は、せん断補強によって損傷レベル2以上に至る震度が30%上昇すると仮定し、支承については限界震度が20%上昇すると仮定した。また、地震計の増設に関しては、従来の20km間隔の中間地点に地震計を増設し、地震計設置間隔を10kmとした。

これらの対策を実施することによる、損傷発生リスクの変化を対策方法別に算定する。この時、対策前の損傷発生リスクで正規化し、これを「リスク変化率」と定義することで、損傷発生リスクの増減を定量的に表示する。

#### a) 電化柱に地震対策を実施した場合

対策前の状態（図8）で相対的に損傷発生リスクが高かった電化柱に対策を施した条件において、リスク変化率を算出した結果を図9に示す。これらの結果より、電化柱の損傷発生リスクはほぼゼロに低下し、地震対策を実施することで、全体的に損傷発生リスクが低減していることが分かる。しかしながら、対策前において電化柱以外の損傷発生リスクが相対的に大きくなっていった400km～550km付近では、対策後においても路線としてのリスク変化率は1のままとなっている。

続いてこのリスク変化率から運転規制基準値の更新を行った。得られた結果を図10に示すが、例えばキロ程580km付近のように、図9で地震リスクが大きく低減している箇所において、運転規制基準値を大幅に引き上げ可能であることが分かる。その一方で、元の状態において電化柱以外の損傷発生リスクが最大となる場所（例えばキロ程450km付近）では、電化柱の対策を実施し

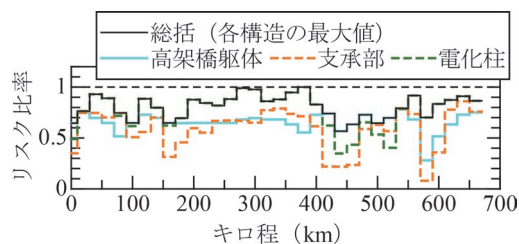


図8 現状の損傷発生リスクの評価結果

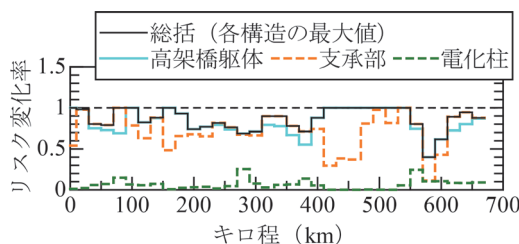


図9 地震対策に伴う損傷発生リスクの変化  
(対策箇所：電化柱)

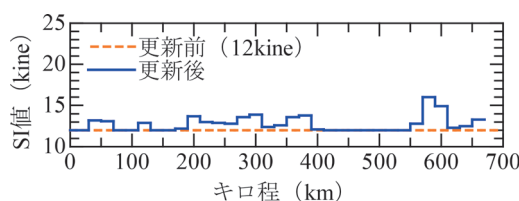


図10 運転規制基準値の評価結果（対策箇所：電化柱）

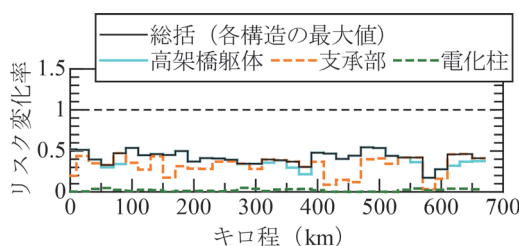


図11 地震対策に伴う損傷発生リスクの変化  
(全施設に対策)

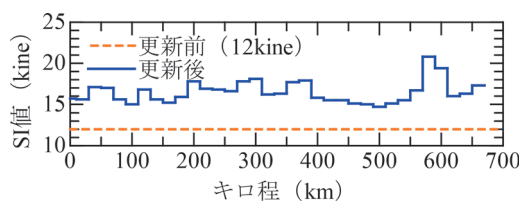


図12 運転規制基準値の評価結果（全施設に対策）

た場合にも当該箇所のリスクは低減せず、運転規制基準値も変化しない。

#### b) 全施設に地震対策を実施した場合

続いて、高架橋く体、支承部、電化柱の全てに地震対策を実施した状況を想定し、損傷発生リスクの評価を行った。得られた結果を図11に示すが、全線に渡って

損傷発生リスクを大幅に低減できていることが分かる。この状態において提案手法に基づいて運転規制基準値の更新を行った結果を図12に示す。これを見ると、損傷発生リスクの大幅な低減に伴って、全線における規制基準値の大幅な上昇が実現可能であることが分かる。

c) 地震計の増設

地震計を増設することで地震計間の地震動分布の不確実性が低減され、結果として損傷発生リスクの低減が期待される。そこで、地震計の増設に伴う損傷発生リスクの変化、運転規制基準値の更新に関する評価を行った。なおこの時には、上記b)の地震対策は実施していない状態(上記a)の状態)を基準としてリスク変化率等の評価を行っている。

地震計の設置間隔を20km間隔から10km間隔とした条件下で、損傷発生リスクの変化率を評価した結果を図13に、運転規制基準値の更新結果を図14に示す。今回の事例では、地震計を増設することで、大幅なリスク低減、規制基準値の上昇が実現されている。

また地域によって対策効果に差が見られるが、これは今回設定した構造物等の条件が図7のように複雑に変動しているためである。具体的には、例えば地震計が設置されている地点の近傍で弱点となる構造物が存在する場合には、地震計の増設に伴うリスク低減効果が小さくなり、結果として運転規制基準値がそれほど上昇しないことになる。これに対して、地震計の設置箇所遠方で弱点となる構造物が存在する場合には、この箇所での地震動の不確実性が小さくなることで、損傷発生リスクが大幅に低減される。

また紙面の都合上省略するが、2.3節、2.4節で提案を行った各区間の地震動、地盤、構造物の特性の考慮や、地震毎の損傷評価によって、運転規制が更に合理化されるという点も試算により別途確認済<sup>2)</sup>である。

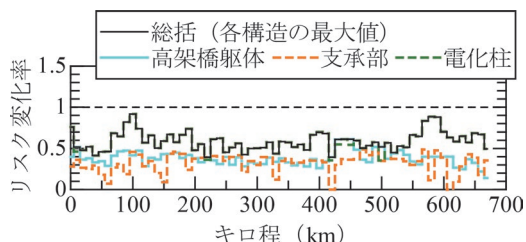


図13 地震計を増設した場合の損傷発生リスクの変化

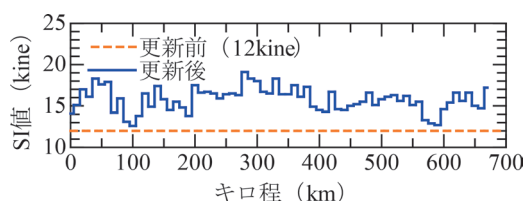


図14 地震計を増設した場合の運転規制基準値の評価

このように、今回提案した手法を用いることで、各種地震対策の効果を損傷発生リスクの低減という形で定量的に評価可能である。この手法により、土木構造物の耐震対策に限らず、他施設の耐震対策や、地震計の増設効果等の対策であっても、同一の指標によって評価することができる。さらに、この損傷発生リスクの低減を運転規制基準値の更新に直接反映することが可能であることが確認された。

4. まとめ

本検討では、地震発生後の早期運転再開を実現させるための運転規制基準値の設定方法の提案を行った。具体的には、各施設の地震時性能や入力される地震動などの線区情報を個別に考慮した上で、地震による損傷発生の可能性を個別に評価し、これに基づいて運転規制を実施する手法を提案し、手法の有効性を確認した。

今回提案した手法を用いることで、各施設の耐震性能の向上や地震計設置に伴う地震動情報の高密度化の効果を運転規制に直接関連付けることが可能となり、結果として点検箇所合理化が実現される。さらに、提案法によって運転規制の実施回数、実施範囲の合理化程度の定量評価や、経済的な効果の評価が可能となるため、運転規制の効率化という観点からの耐震診断、耐震補強、地震計増設等の実施効果の評価も可能となる。

なお今回の試算では、想定する被害箇所を限定したが、実際の鉄道の地震被害箇所は多岐に渡る。そのため提案手法を実路線に適用する際には、様々な被害を網羅した評価が必要である。これには、これまでの各種成果を活用可能であるとともに、各施設の地震被害予測手法の高度化に引き続き取り組むことが重要である。

謝辞

本検討では、損傷発生リスク評価において防災科学技術研究所のK-NETの観測記録を使用させていただきました。ここに記して謝意を示します。

文献

- 1) 鈴木博人, 島村誠: 地震時運転規制方法の研究, JR EAST Technical Review, No.3, pp.53-60, 2003
- 2) 坂井公俊, 和田一範, 豊岡亮洋: 鉄道施設の損傷発生リスクを考慮した地震時運転規制基準値の設定手法, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.25, pp.17-24, 2021
- 3) 小野寺周, 和田一範, 坂井公俊, 室野剛隆: インベントリー法による橋りょう・高架橋の被害推定法, 鉄道総研報告, Vol.33, No.12, pp.29-34, 2019

- 4) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, Vol.523, pp.63-70, 1990
- 5) (公財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 2012
- 6) 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, pp.I\_373-I\_383, 2021
- 7) 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, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.22, pp.201-205, 2018
- 8) 和田一範, 坂井公俊: 構造物特性の不確実性を考慮した地震時非線形応答の確率分布の推定精度向上に向けた検討, 土木学会論文集, Vol.77, No.4, pp.I\_47-I\_60, 2021