

# 論文 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

坂井 公俊<sup>1</sup>・和田 一範<sup>2</sup>・豊岡 亮洋<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: sakai.kimtiوشي.36@rtri.or.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup> 正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: wada.kazunori.73@rtri.or.jp

<sup>3</sup> 正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: toyooka.akihiro.58@rtri.or.jp

地震時の運転規制基準値は、過去に発生した地震被害発生箇所の地震動強さの下限値に基づいて設定されている。そのため、耐震補強や地震計の増設等の各種地震対策の効果を運転規制基準値に陽な形で反映させることは難しい。そこで本検討では、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を提案した。提案手法では、各施設の地震に伴う損傷発生リスクを定量的に評価し、この損傷発生リスクに基づいて運転規制の判断を行う。これにより、各種施設の耐震性能の向上や地震計設置に伴う情報の高密度化等を運転規制基準値に反映させることが可能となる。提案手法を延長約 700km の仮想路線に適用することで、手法の有効性を確認した。

**Key Words:** railway, train operation control, earthquake, seismic risk of railway facilities

## 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(例えば<sup>1)</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、規制に用いる地震動の強さ(以降、運転規制基準値と呼ぶ)も鉄道事業者によって異なっている。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推定される地震動強さの概ね下限となるような値を定めている事例<sup>2)</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、鉄道の地震時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、上述したような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に鑑みると、このような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入力地震動を個別に考慮した上で、地震による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する。本手法を採用することで、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、結果として地震後の早期運転再開や点検箇所等の合理化が実現される。

## 2. 鉄道の地震リスクに基づく地震時運転規制手法の提案

### (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「地震対策によって向上した性能の差分に応じて運転規制基準値を上昇させる」

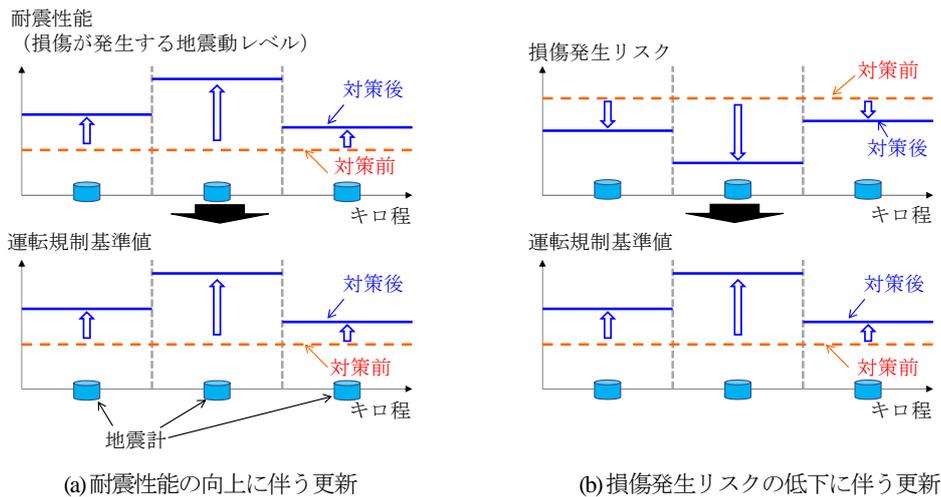


図-1 運転規制基準値の更新方法の基本的な考え方

という考え方を基本とする(図-1(a))。一方、現在の運転規制基準値を設定する際は、1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、工学的に運転規制基準値を設定している。そのため例えば「数値計算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、運転規制値は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と安全性が失われてしまう。そのため、運転規制基準値を更新する際には、こういった不確定、不確実な要素を考慮した上で、現状の運転規制基準値と連続性を持った形での評価を行うことが重要と考える。

そこで本検討では「地震対策による性能の向上(耐力の向上、変形性能の向上等)」を、「地震に伴う損傷発生確率(損傷発生リスク)の低減」によって評価することとし、「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可能となる(図-1(b))。

これによって、「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値の更新」が可能となるとともに、「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値の更新」も実現可能となる。そこで、本章(2)節では上記1点目について整理を行うとともに、(3)節では2点目の方法について述べる。

また、これらの項目は主に地盤上に設置された地震計での観測値に基づいて運転規制を実施する方法であるが、当然のように地震毎に地震動の特性は大きく変化するため、仮に同一の地震動指標(例えば震度6強)となる地震動であったとしても、構造物への影響という観点では差がある。そのため例えば「震度6強の地震動」が同一

の構造物に作用した場合にも、その地震動の周期特性等によって構造物に損傷が発生する場合、発生しない場合が起こりうる。運転規制を実施する場合には、地盤上の地震記録ではなく、構造物の損傷の有無を直接評価することで、より合理的な評価が可能となると考えられる。そこで、「構造物の損傷評価結果を用いた運転規制の方法」に関して(4)節で述べる。

## (2) 地震対策の効果を考慮した運転規制基準値の更新

地震対策に伴う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、各種の不確実性が考慮されていることとする。同一の地盤、構造物が並んでいた場合、不確実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実性は小さく、地震計から遠ざかるにつれ不確実性が大きくなる。そのため想定される地震動の平均値が構造物の耐力よりも小さい場合には、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、この結果を基本条件とする。

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

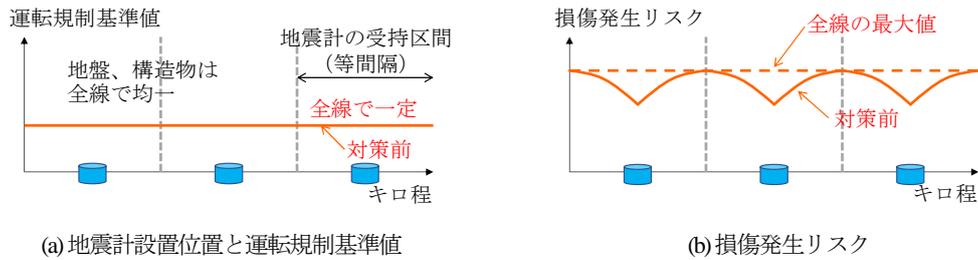


図-2 各種対策前の運転規制基準値と各鉄道施設の損傷発生リスク

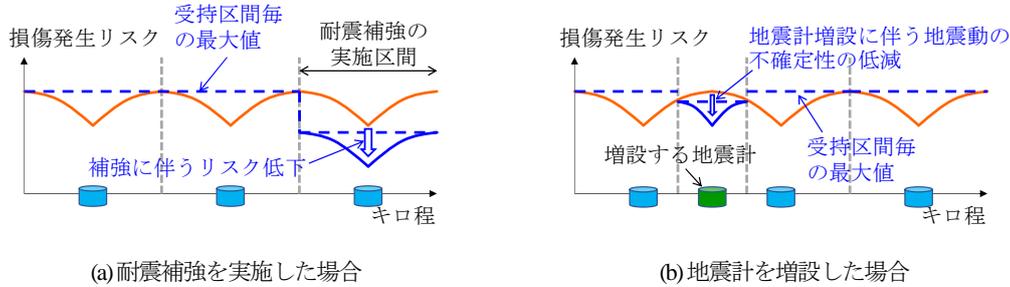


図-3 地震対策後の損傷発生リスクの評価

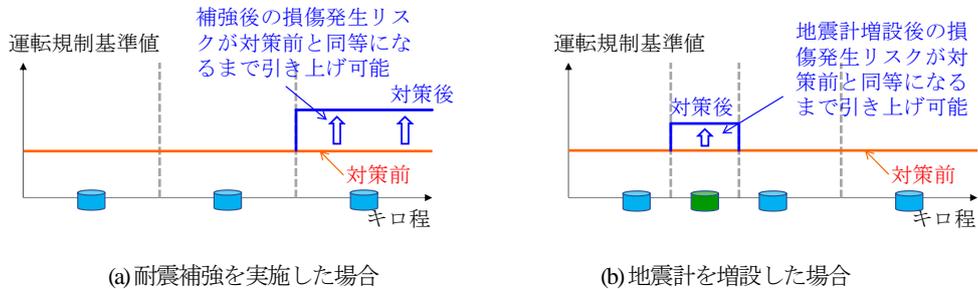


図-4 地震対策に伴う運転規制基準値の見直し

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の変動が低減される。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。

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。

### (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

地震対策前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同時に、構造物特性も場所により変化している場合がある。上記(2)では全線の各種特性を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も可能となる。

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、この考え方を上記(2)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も可能である。

### (4) 地震毎の損傷評価結果に基づく運転規制の実施

上記(2)、(3)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、これを反映した損傷発生リスクも大きな値となる。この

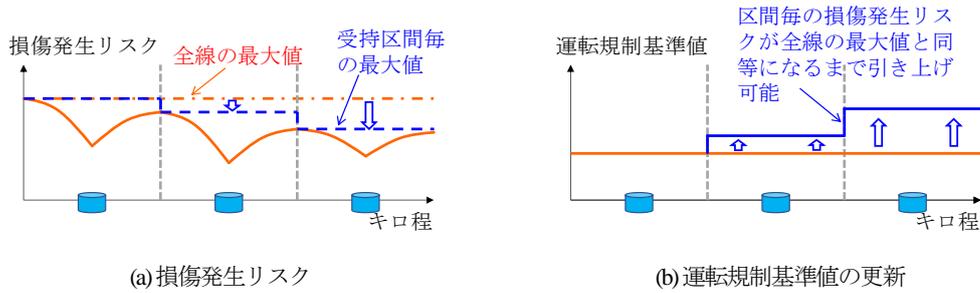


図-5 各区間の地震特性の相違を考慮した運転規制基準値の見直し

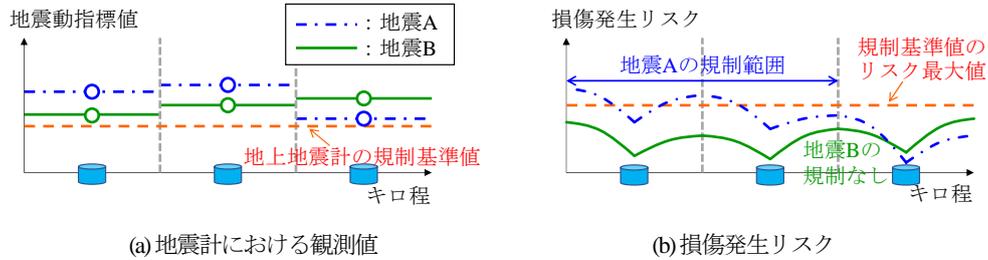


図-6 地震毎の損傷発生リスクに基づく運転規制の実施

不確実性を低減する方法として、地震毎に構造物の特性を直接考慮した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。そのため、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、その指標値を有する地震動に対する損傷発生リスクの最大値であると捉えることができ、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である。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詳細な評価手法によって挙動評価を行った場合には、この損傷発生リスクよりも小さな結果が得られる場合が多いと考えられる。

そこで地震A、Bそれぞれに対して個別に損傷発生リスクを評価したことを想定した概念図を図-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値の更新

#### (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値の設定方法を用いた地震時運転規制値の見直しに関する試算を行う。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ょう・高架橋で構成されており、各構造物の等価固有周期、降伏震度は、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>2)</sup>を用いて設定している。この橋りょう・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>3)</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>3)</sup>を用いて評価する。また、各地震計の受け持

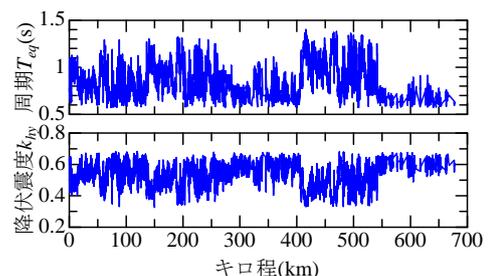


図-7 対象路線の情報(土木構造物の振動特性)

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>4)</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、周期等の不確定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>7)</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。

## (2) 地震対策の効果を考慮した運転規制基準値の評価

本節では地震対策の効果を考慮した規制基準値の評価例を示す。具体的には下記に示す4つの対策に対する評価結果をそれぞれa)-d)に示す。

- ・電化柱に地震対策を実施した場合
- ・電化柱と高架橋く体に地震対策を実施した場合
- ・全ての施設で地震対策を実施した場合
- ・上記とは別に地震計を増設した場合

### a) 電化柱に地震対策を実施した場合

前節で構築した路線に対して、各種地震対策の実施を想定するとともに、これに伴う運転規制基準値の見直しを実施する。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で設定した。まず、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。電化柱については、鋼管柱への交換を行うこととした。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。

これら各対策を実施することによる、損傷発生リスクの変化を個別に算定した。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評価した。

ここではまず、相対的に損傷発生リスクの高い電化柱に対策を実施したことを想定した場合の図-8からのリスク変化率を図-9に示す。これらの結果より、電化柱の損傷発生リスクが大幅に低下しており、基本的には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

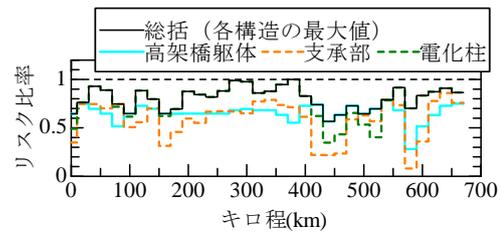


図-8 現状の損傷発生リスクの評価結果

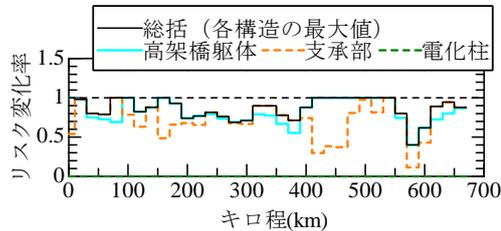


図-9 地震対策に伴う損傷発生リスクの変化  
(対策箇所：電化柱)

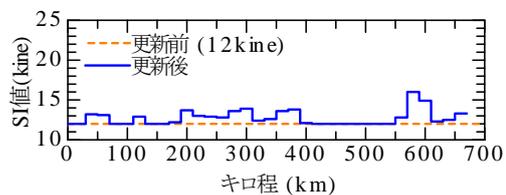


図-10 運転規制基準値の評価結果（対策箇所：電化柱）

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な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。

続いて提案手法を用いて、電化柱の地震対策を実施した場合の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。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、例えばキロ程450km付近のような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では、電化柱の対策を実施し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。

これと同様の整理は、高架橋く体や支承の補強を実施した結果にも行えるため、最終的には各箇所でも最適な対策を選定することも可能である。このように、提案手法を用いることで、耐震補強の効果を運転規制基準値の更新に陽な形で反映できるとともに、対策箇所の違いによる効果の大小も定量的に評価可能である。

### b) 電化柱と高架橋く体に地震対策を実施した場合

上記a)の電化柱の地震対策を全線に渡って実施した後に、高架橋く体への地震対策を実施した場合の損傷発生リスクの変化を評価した。得られた結果を図-11に示す。

この結果を見ると、400~450km付近で大きくリスクが低減していることが分かる。その一方で、70~80km付近では高架橋の応答震度が大きくなる結果として、支承の損傷発生リスクが多少大きくなっている。

次に、この地震対策を実施した場合を想定し、運転規制基準値の評価を行った。得られた結果を図-12 に示すが、先ほど述べた 400~450km 付近では規制基準値が大幅に上昇する一方で、70~80km 付近では規制基準値が多少小さくなっている。そのため、耐震補強を実施する際には、このような観点も含めた上で適切な箇所に適切なレベルの対策を実施することが望ましいと言える。

### c) 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-13 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-14 に示すが、全線において規制基準値の大幅な上昇を実現できる。

### d) 地震計の増設

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う。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。

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-15 に、運転規制基準値の更新結果を図-16 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。

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も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。

### (3) 地点毎の各種特性を含めた運転規制基準値の評価

ここでは、2章(3)で提案を行った対策前の損傷発生リスクの差異を考慮した運転規制基準値の見直しを行う。まず各種対策前の損傷発生リスクは図-8 に示した通りであるが、例えばキロ程 370km 付近において損傷発生リスクが最大値を示している。その一方で、キロ程 450km 付

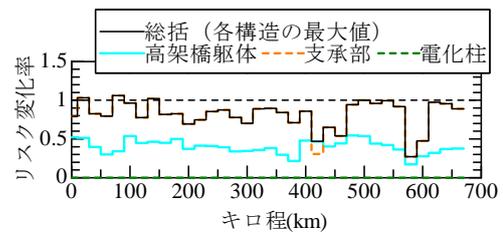


図-11 損傷発生リスクの変化（電柱、柱く体の対策）

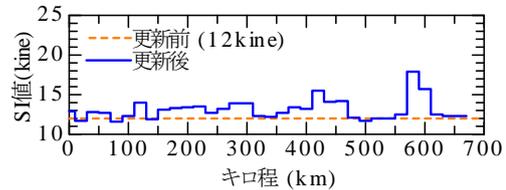


図-12 運転規制基準値の評価結果（電柱、柱く体の対策）

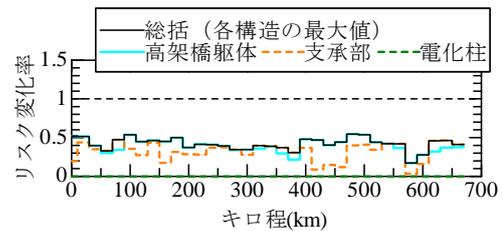


図-13 対策に伴う損傷発生リスクの変化（全施設に対策）

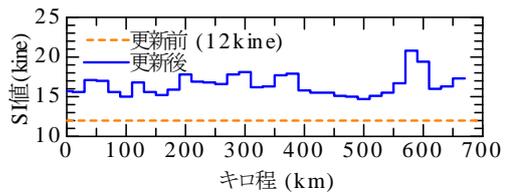


図-14 運転規制基準値の評価結果（全施設に対策）

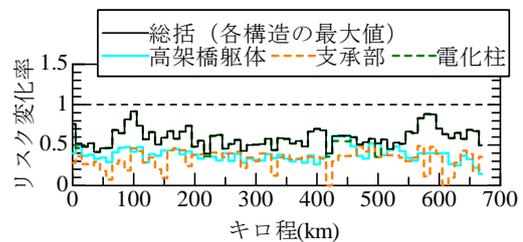


図-15 地震計を増設した場合の損傷発生リスクの変化

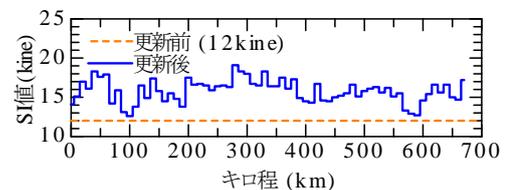


図-16 地震計を増設した場合の運転規制基準値の評価

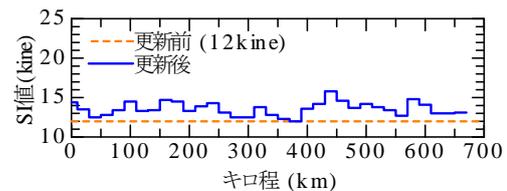


図-17 各地点の特性を考慮した運転規制基準値の評価

近や 580km 付近等では相対的に損傷発生リスクが低くなっている。そのため、370km 付近の損傷発生リスクを有

する鉄道において現状の運転規制基準値が設定されていると捉え、その他区間の損傷発生リスクの変化程度に応じて、対策前の運転規制基準値の更新も可能である。

この考え方に基づいて、各箇所での運転規制基準値を評価した結果を図-17に示すが、上述したキロ程450km付近、580km付近等、損傷発生リスクの低い地域において運転規制基準値が上昇している。つまり、この評価手法に基づいた場合には、前節で評価を行ったような地震対策を実施しない場合、対策の効果を期待しない場合にも、運転規制基準値の見直しが可能であることが分かる。

さらに、この手法に基づく場合にも、前節と同様に各地震対策の効果を考慮した規制基準値の評価が可能である。これを考慮した試算として、電化柱のみの地震対策を全線に実施した場合、地震計の増設を全線に実施した場合の損傷発生リスクの変化を図-18に、これに基づく運転規制基準値の見直し結果を図-19に示す。これらの結果を見ると、全体的な傾向は前節で示した各対策を実施した場合のリスク低減、規制値上昇の傾向と同一である。その一方で、対策前の地震リスクの差異も加味しているため、規制基準値のさらなる上昇を実現している。

このように、各区間の特性の差異を含んだ評価を実施することで、従来と同一の安全性を保持した中で、運転規制基準値のさらなる合理化や、ダウンタイムの短縮が実現可能となる。

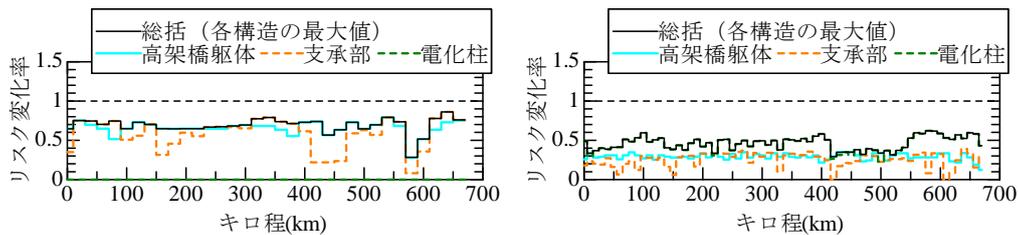
#### (4) 地震毎の損傷評価結果に基づく運転規制の実施

本節では、地震発生後の面的な地震動情報を用いた損傷発生リスクの個別評価によって、運転規制を判断する手法の試算を行う。上記(2)、(3)の検討はいずれも地盤上の地震計での観測値に基づいて規制を実施することを前提としており、設定した地震動指標での運転規制基準

値(今回はSI値=12kine)となる地震動波形を複数用いて損傷発生リスクを評価するとともに、この最大値を抽出して整理している。これに対して本節では地震A(短周期が卓越)、地震B(周期0.8秒が卓越)という2つの地震が発生し、さらに全ての地震計においてSI値=16kineが観測されたと考え、その時の損傷発生リスクの評価を行うとともに、運転規制の実施エリアの評価を行う。

この時の損傷発生リスクの評価手法は全て(1)~(3)節において実施した際の手法と同様である。その一方で、上記(1)~(3)節では複数波形を用いて損傷発生リスクを算出し、この最大値を使用していたのに対して、ここではそれぞれ1波形のみを用いて損傷発生リスクを評価した。最終的に得られた損傷発生リスクの評価結果をまとめて図-20に示す。これらの図の縦軸は、図-8と同様にリスク比率で表示しており、これが1を上回った場合に運転規制を実施する必要があると判断される。

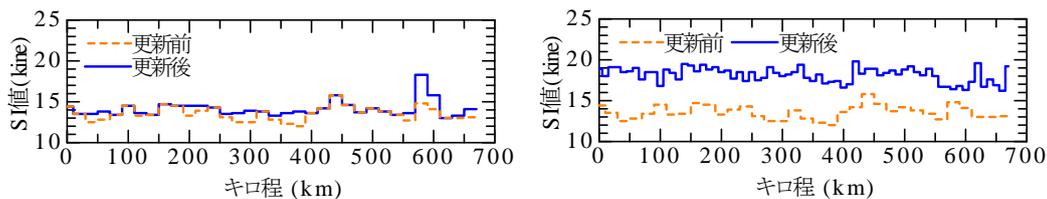
そこで、運転規制を実施する範囲を図-20に黒塗で示しているが、ここでの評価はいずれも全ての地震計位置でSI値=16kineが観測されたという条件であり、地表地震計に基づく評価を実施した場合には、全線で運転規制が実施される条件であるにも関わらず、いずれの地震においてもリスク比率が1を下回る区間、すなわち運転規制が不要な区間が存在することがわかる。また、短周期成分が卓越する地震Aでは運転規制を実施する範囲が300km付近の狭い範囲に限定されており、地震毎に損傷発生リスクを即時的に評価(例えば<sup>8)</sup>)し、これに基づき運転規制を実施することで、地震毎のばらつきを排除した評価が可能となるため、点検範囲の合理化が実現される。



(a) 電化柱の地震対策のみを実施した場合

(b) 地震計の増設のみを実施した場合

図-18 損傷発生リスクの変化 (各地点の特性を考慮した場合)



(a) 電化柱の地震対策のみを実施した場合

(b) 地震計の増設のみを実施した場合

図-19 運転規制基準値の評価 (各地点の特性を考慮した場合)

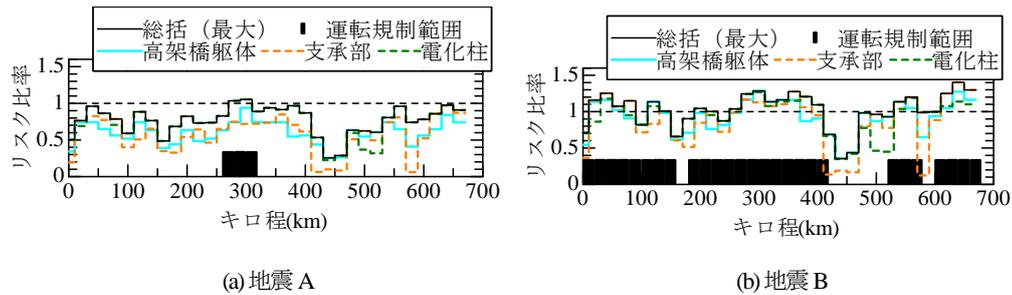


図-20 地震毎の損傷発生リスク評価, 点検範囲の評価結果

#### 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の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も可能であり、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。

なお今回提案した手法によって従来の判断基準と連続性を保った評価が可能となるが、これとは別の視点で、鉄道の健全度を高精度かつ適切に評価し、これに基づいた運転規制を実施する方法も考えられる。これについては、鉄道構造物の被害推定手法の高度化も含めて今後さらに検討を行う必要がある。

謝辞：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。

#### 参考文献

- 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) 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.
- 3) 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.
- 4) (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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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, 2021
- 8) 岩田直泰, 坂井公俊, 山本俊六, 室野剛隆, 青井真：鉄道地震被害推定情報配信システム (DISER) を利用して素早く運転を再開する, RRR, Vol.77, No.2, pp.12-15, 2020

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

## METHOD FOR SETTING OPERATION CONTROL VALUES CONSIDERING SEISMIC RISK OF RAILWAY FACILITIES

Kimitoshi SAKAI, Kazunori WADA and Akihiro TOYOOKA

The limit value 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 limit value of train operation control. In order to resume train operation as quick as possible after the earthquake, this study proposed a method for updating the limit value of train operation control on the basis of a risk analysis. In the proposed method, the seismic risk of each facility is evaluated and used to determine the limit value 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 regulation of train operation. The proposed method was applied to a 700 km railroad and the effectiveness of the method was confirmed.