

論文 構造物の損傷程度を考慮した 地震時運転規制基準値の設定方法

川西 智浩¹・室野 剛隆²・山田 聖治³・和田 一範⁴

¹正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail: kawanishi.tomohiro.35@rtri.or.jp

²正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail: murono.yoshitaka.51@rtri.or.jp

³正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail: yamada.seiji.17@rtri.or.jp

⁴正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail: wada.kazunori.73@rtri.or.jp

各鉄道事業者では、地震が発生した際に運転規制すべきかどうかを判断するため、地震の揺れの強度を表す指標に対してしきい値（運転規制基準値）が定められていることが多い。しかし、この値は一般的に過去の地震被害に基づいて経験的に定められていることから、構造物の耐震性能や損傷程度を考慮することができない。そこで本研究では、構造物の高さや幅等のパラメータを様々に変化させた構造物群と過去に観測された多数の地震動を用いて構造物の損傷評価を実施することにより、構造物が損傷する際の揺れの指標値（損傷下限値）を塑性率ごとに評価する方法を示し、これに安全率を考慮することで、徐行運転や点検実施等の目的に応じた運転規制基準値を設定する方法を提案する。

Key Words : threshold value, train operation control, earthquake, damage, structure

1. はじめに

各鉄道事業者においては、地震後にどのように運転規制するのが適切かを判断するため、地震の揺れの強度を表す指標に対してしきい値（ここでは、運転規制基準値と呼ぶ）が定められていることが多い^{例え}。運転規制基準値のうち、鉄道構造物の点検を実施するかどうかを判断するしきい値をここでは「点検基準値」と呼ぶこととする。この点検基準値は、列車の運転に支障がある被害が生じている可能性があるかどうかを元に定めるのが適切であり、一般的に過去の被害事例を元に経験的に定められている。具体的には、揺れの推定値が最も小さい被害箇所を抽出し、その箇所における揺れの推定値（損傷下限値）に対してある程度の安全率を見込んで点検基準値が決定されている。しかし、この点検基準値の設定方法を用いる場合、すべての被害地点のうち揺れの指標値が最小となるものを用いて損傷下限値を評価することから、耐震性能が最も低い構造物で損傷下限値が決定し

てしまい、構造物個々の耐震性能を考慮することができないという課題がある。このため、耐震補強することで耐震性能が向上したとしても、その効果を点検基準値の設定に反映させることができない。

そこで本研究では、構造物の耐震性能を考慮した点検基準値の設定方法を開発することを目的とする。まず、高架橋・橋梁の柱・橋脚に対する損傷下限値を数値解析により評価する方法を提案する。提案する手法では、構造物の損傷程度（塑性率）に応じた損傷下限値の設定が可能であることから、塑性率と運転規制区分との関係を明確にすることで、徐行運転や点検実施など、目的に応じた複数段階の損傷下限値を設定することができる。そして、この損傷下限値に安全率を考慮することで、点検実施を行うしきい値（点検基準値）だけでなく、徐行運転等のしきい値も含めた、運転規制に関する複数段階のしきい値（運転規制基準値）を設定する方法を示す。本研究で対象とする損傷下限値、点検基準値、運転規制基準値の関係を図-1に示す。

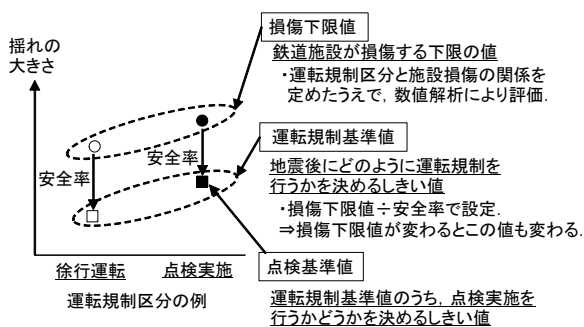


図-1 本研究で用いる各値の関係

2. 地震後における運転規制の考え方

(1) 鉄道構造物の損傷把握や運転規制の方法

鉄道において、地震後にどのように運転規制するのが適切かを判断するためには、地震後に鉄道構造物に被害が生じているのかどうかを短時間で見極める必要がある。その手段として、以下のような方法がある。

a) 構造物自体の揺れを計測する方法

構造物自体に地震計を設置して揺れをリアルタイムに監視することで、構造物に被害が生じているかを把握することができる。ただし、これまで主に高架橋・橋梁の不同変位を把握することを目的として、鉄道構造物に地震計を設置した事例²⁾はあるが、鉄道に限らず土木構造物全体でも、構造物の地震応答の観測事例は少ない³⁾。これは設置費用や電源確保等の課題があるためであり、運転規制に用いるために線状構造物である鉄道構造物の揺れを地震計により直接把握することは現実的ではない。

b) 地表面の揺れと構造物情報を用いて構造物の被害を推定する方法

一般的な鉄道高架橋は比較的単純な構造物であり、その動的挙動が1自由度系で表現できることが多い⁴⁾ことを踏まえ、著者らの一人は構造物位置における地表面の揺れ（最大加速度、最大速度）と構造物情報（周期、降伏震度）の計4つのパラメータを用いて鉄道構造物の被害を予測する方法⁵⁾を提案している。また、地震発生直後に地表面の揺れを推定するシステム⁷⁾も構築されていることから、文献⁵⁾⁶⁾に示されている手法をシステム化することで、地震直後に鉄道構造物の被害を把握し、それに基づき運転規制の判断を行うことも可能である。今後はこのように構造物情報を用いて運転規制を実施することも考えられるが、現状では、運転規制に構造物のパラメータを陽な形で活用することはされていない。

c) 地表面の揺れのみを用いて運転規制を行う方法

鉄道構造物の周辺に設置されている地震計の揺れの指標値と、あらかじめ定めておいた運転規制基準値とを比較する方法であり、鉄道事業者でよく用いられている。この場合の揺れの指標は、一般的に構造物等の被害との

相関性が高い指標値を検出し¹⁾⁸⁾¹⁰⁾、計測機器のコスト¹⁾や利便性を考慮して、鉄道事業者ごとに選定されている。運転規制に用いられている代表的な揺れの指標として、高振動数を遮断するフィルター処理を施した警報用最大加速度¹¹⁾、計測震度¹²⁾およびSI値¹³⁾などが挙げられる。

(2) 運転規制基準値設定の現状と課題

(1)項で述べたように、現在、鉄道事業者ではc)の方法により運転規制を行っていることが多い。この場合、運転規制基準値のうち、特に点検基準値については、列車の運転に支障があるような比較的大きな被害が生じているかどうかを適切に考慮して設定する必要がある。そこで一般的には、過去の地震被害とその被害地点における揺れの指標値との関係を整理し、その整理結果に基づき点検基準値が定められていることが多い。この方法を用いる場合、以下の2つの値を評価する必要がある。

① 被害が生じる揺れの指標値の下限（損傷下限値）

② ①の下限値から点検基準値を設定する際の安全率

まず、①の損傷下限値については、被害地点の揺れの指標値を周辺の地震計の観測値に基づいて推定し、被害地点のなかで揺れの指標値の最小値を抽出することにより評価するのが一般的である。次に、②の安全率については、地震計がある間隔において設置されていることから、地震発生時に地震計位置での観測値よりも大きな地震動が地震計間で発生している可能性などを考慮して、経験的に設定することが多い。

このうち、①の損傷下限値の設定については、以下のような課題がある。

- すべての被害地点のうち揺れの指標値が最小となるものを用いて損傷下限値を決定していることから、構造物個々の耐震性能を考慮して損傷下限値を設定することができない。
- このため、構造物を耐震補強することで耐震性能が向上したとしても、その効果を損傷下限値の設定に反映させることができない。

また、②の安全率については、これまで比較的大規模な地震が発生した場合には適切な運転規制がなされており、従来の経験則に基づく安全率は一定の成果を挙げているといえる。ただし、鉄道は様々な設備から構成されており、構造物の耐震補強を実施して耐震性能が向上したとしても、構造物以外の要素（例えば電柱等）が損傷する可能性があることから、被害形態ごとの損傷下限値に対して適切に安全率を考慮して、最終的な基準値を設定することが望ましい。

(3) 本研究で提案する運転規制基準値設定方法の概要

本研究では、(2)節に示した課題を踏まえて、高架橋・橋梁区間を対象として、構造物の耐震性能や補強効

橋梁・高架橋区間において、運転支障を
起こす可能性のある被害(損傷箇所)

- 高架橋・橋梁(柱・橋脚) < 曲げ >
- 高架橋・橋梁(柱・橋脚) < せん断 >
- 高架橋・橋梁(柱・橋脚以外)
- 電柱 ※ 支承部等
- 軌道
- 橋台
- その他被害(ホーム笠石等)

図-2 運転支障を起こす可能性のある被害の抽出
(橋梁・高架橋区間)

表-1 主なパラメータの概要

パラメータ	範囲等
柱高さ (m)	5~15
断面幅 (m)	0.7~1.1
引張鉄筋比 (%)	0.2~1.5
帯鉄筋比 (%)	0.05~1.25
断面応力(N/mm ²)	0.5~3.0
地盤種別	G3~G5

果を考慮して損傷下限値を設定する方法を示すとともに、さらに安全率を考慮して基準値を設定する方法を提案する。この際、構造物の塑性率に応じた損傷下限値の設定方法を示すことで、塑性率と運転規制区分との関係を明確にすることにより「点検基準値」だけでなく、徐行運転等も含めた、運転規制に関する複数段階の「運転規制基準値」を設定する方法を示す。

まず、高架橋・橋梁区間において運転支障の影響要因となりうる被害を図-2のように抽出した。そして、それらの被害形態を踏まえて、運転規制基準値を以下のようにして設定することとした。設定方法のイメージを図-3に示す。

- ・適切な解析モデルを用いて数値解析を実施することで、損傷下限値を設定する。本研究ではこのうち、高架橋・橋梁の柱・橋脚を検討対象とし、構造物の損傷程度を考慮できるよう、塑性率に応じて損傷下限値を設定する。
- ・過去の被害地点における揺れの指標値を現在の運転規制基準値で除した値（以下、余裕度と呼ぶ）を被害形態毎に整理し、その最小値を安全率とする。被害形態毎に余裕度を整理することで、安全率の決定ケースとなる被害形態が把握できる。
- ・上記の手順で整理した損傷下限値と安全率を用いて、運転規制基準値を設定する。

なお本研究では、揺れの大きさを示す指標値としてSI値を用いているが、本研究で提案する手法は、他の指標（例えば計測震度）に対しても適用可能である。

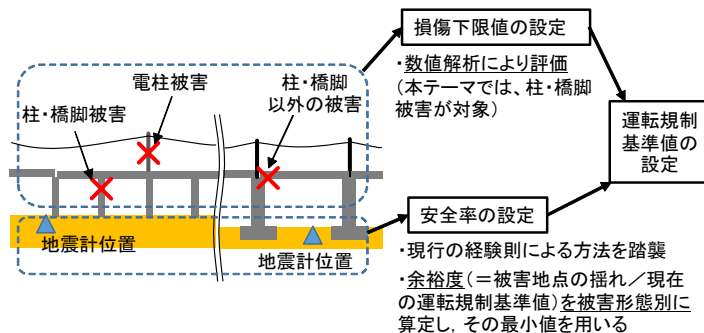


図-3 提案する運転規制基準値の設定方法

3. 数値解析に基づく構造物の損傷下限値の設定

(1) 評価方法

ここでは、鋼板巻き立て補強等により柱・橋脚のせん断破壊は防止できていることを前提とし、柱・橋脚の曲げ破壊を対象とした損傷下限値の評価方法を示す。

構造物の柱・橋脚に関する損傷下限値を数値解析により評価するためには、様々な地震動および構造物を想定し、構造物の損傷評価を実施することが望ましい。このうち、地震動については、過去に多数の地震動が観測されており、それらの地震動を入力することで様々な波の特性を網羅することができる。一方、構造物については、構造物の高さや幅等のパラメータを網羅的に変化させて多数の構造物を作成し、これらの構造物群に対するブッシュオーバー解析により等価固有周期 T_{eq} と降伏震度 k_y を求め、1自由度系にモデル化することとした。そして、上記の地震動を入力して構造物群モデルの応答解析を多数実施し、それに基づき構造物の損傷下限値を評価する。

a) 入力地震動

入力地震動としては、防災科学技術研究所K-NET¹⁴⁾における観測記録を用いた。具体的には、1996年5月～2011年7月の間に発生した地震の観測記録のうち、三分成分合成加速度で50gal以上を計測した記録の水平成分（NS、EW方向）の計16992記録を対象とした。

b) 構造物条件

本研究では、1層3径間のラーメン高架橋（杭基礎）を対象とし、上記構造物の諸元として複数のパラメータを網羅的に変化させた構造物群を用いる。構造物群の主なパラメータとその範囲を表-1に示す。ケース数として、柱高さ8ケース、柱の断面幅5ケース、上部工重量を想定しての柱断面における鉛直応力5ケース、鉄筋比として引張り鉄筋比4ケース、帯鉄筋比5ケース、単線と複線の構造物を使い分けるために線路直角方向の柱間隔を2ケース設定している。さらに、地盤種別と杭径のパターンを計80ケース設定し、以上で構造物ケース総数は640000ケースとなる。このうち、

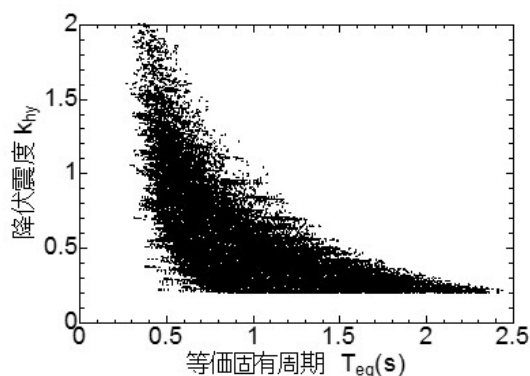


図-4 解析対象構造物の T_{eq} - k_y 関係

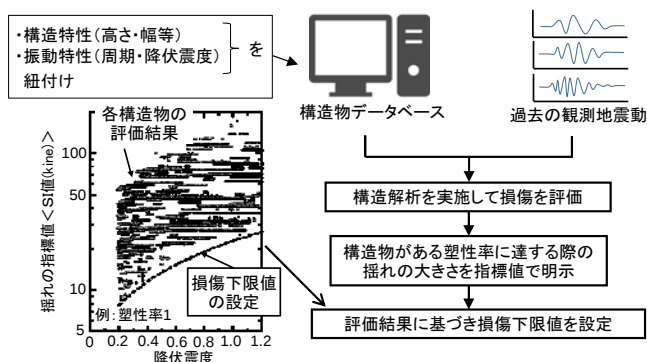


図-5 構造物（柱・橋脚）の損傷下限値の設定方法

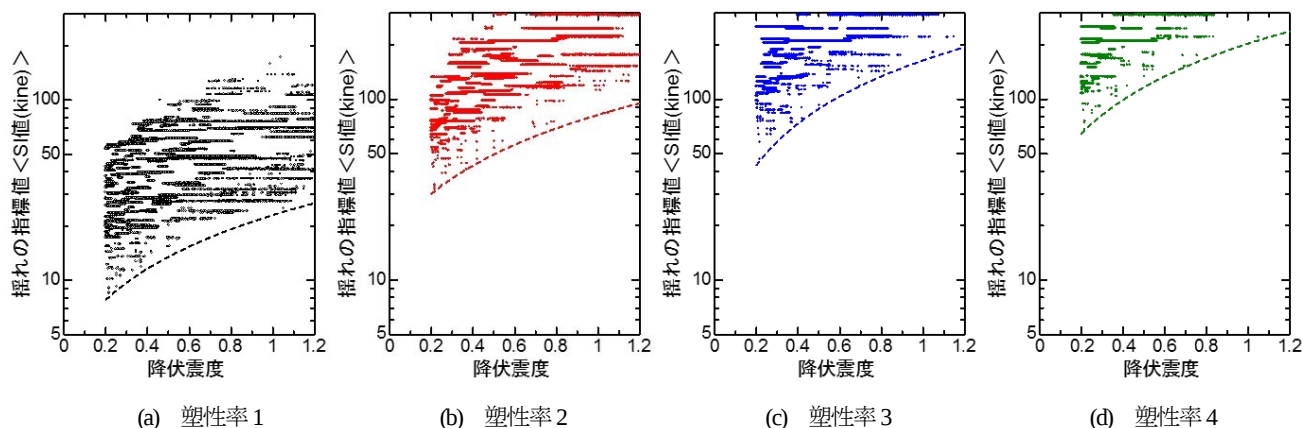


図-6 塑性率ごとの損傷下限値の評価結果

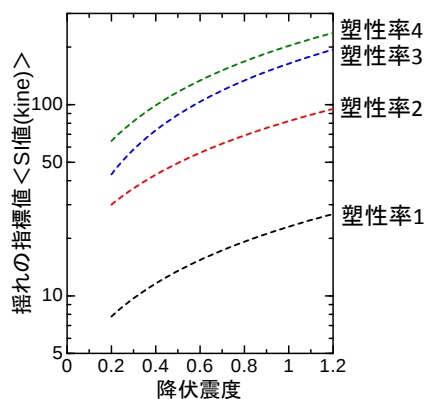


図-7 構造物の損傷評価に基づく損傷下限値の評価結果

- ・プッシュオーバー解析結果が適切でない構造物
- ・等価固有周期が10(s)以上、降伏震度が2.0以上あるいは0.2未満の構造物

など、応答解析の検討対象として適切でない構造物を除外した計435610ケースとする。解析対象構造物の等価固有周期 T_{eq} と降伏震度 k_y の関係を図-4に示す。

c) 評価手順

図-5に数値解析に基づく構造物（柱・橋脚）の損傷下限値の設定方法を示す。一般的な高架橋は比較的単純な構造物であり、その動的挙動が1自由度系で表現できることが多い⁴⁾ことから、図-4で示した等価固有周期 T_{eq} と降伏震度 k_y を有する弾性の構造物（減衰定数5%）に対

し、a)で示した地震動を入力して1自由度の応答解析を実施する。そして、構造物がある塑性率に達する際の揺れの指標値を評価し、その評価結果に基づき構造物の曲げ損傷を対象とした場合の損傷下限値を設定する。

(2) 評価結果

構造物が塑性率1～4に達する際のSI値と構造物の降伏震度 k_y との関係を図-6に示す。各図より、構造物の降伏震度が大きくなるにつれて、ある塑性率に達する際のSI値が向上することがわかる。図-6には、損傷評価結果に基づき、各塑性率に達するSI値の下限を $y=ax+b$ の形でフィッティングさせて設定した損傷下限値をあわせて示している。また、塑性率1～4に対して設定した損傷下限値をとりまとめた結果を図-7に示す。このように提案手法では、構造物がある塑性率に達する揺れの指標値を整理していることから、構造物の塑性率ごとに損傷下限値が設定可能である。

4. 構造物の損傷下限値の活用方法

本章では、3章で示した方法により評価した塑性率ごとの損傷下限値の活用方法について示す。

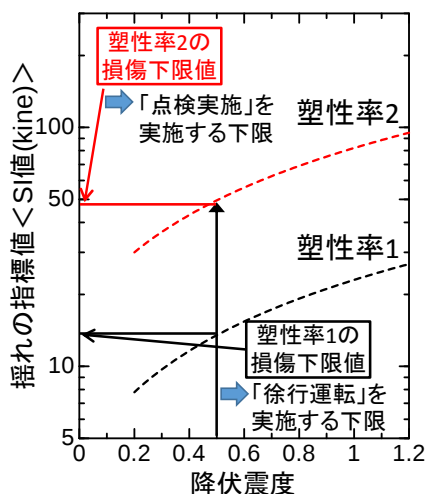
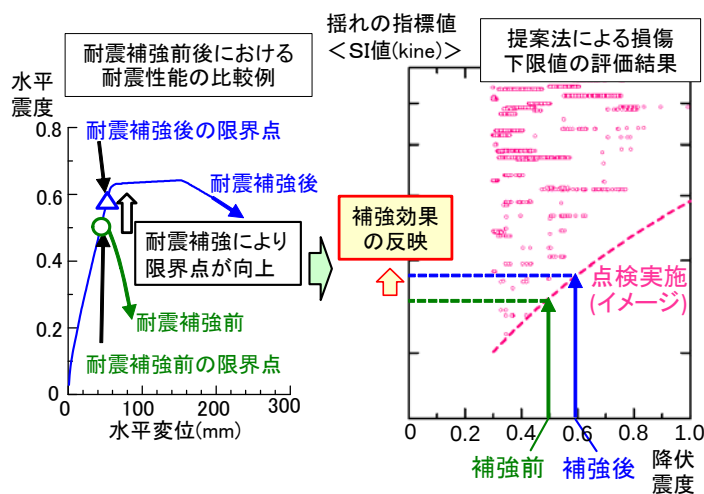


図-8 目的に応じた損傷下限値の設定



(a) せん断補強による限界点向上 (b) 損傷下限値の設定

図-9 損傷下限値設定における耐震補強効果の反映

柱高さ7-8m・柱幅0.7-0.8mの構造物のみ抽出した場合

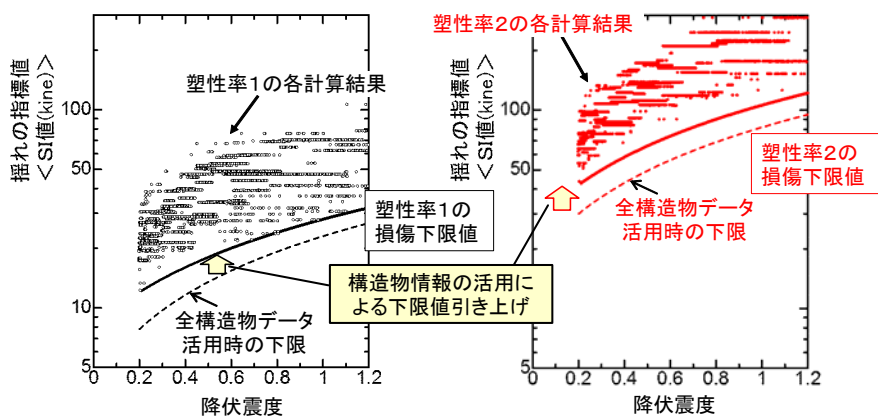


図-10 構造物情報の活用による損傷下限値の引き上げ

(1) 目的に応じた損傷下限値の設定

図-7に示した塑性率ごとの損傷下限値の評価結果を用いることで、目的にあわせて複数段階の損傷下限値を設定できる。例えば、構造物の塑性率が1の場合、曲げひび割れを許容するものの、鉛直荷重は十分保持できることから、塑性率1の損傷下限値を「徐行運転」を実施する下限と設定し、一方、構造物の塑性率が2の場合、曲げ損傷が進行した状態であることから点検が必要であると考え、塑性率2の損傷下限値を「点検実施」を実施する下限と設定する。このように塑性率と目的（運転規制区分）の対応を明確にすることで、図-8に示すように、ある構造物の降伏震度から、目的に応じた損傷下限値を設定できる。

(2) せん断補強による耐震補強効果の反映

せん断破壊形態の構造物を鋼板巻き等により耐震補強した場合、運転規制を実施するかどうかの限界点を、耐

震補強前はせん断破壊の発生点、耐震補強後は曲げ降伏点とすると、構造物の耐震補強によりせん断破壊が発生しなくなるため、図-9(a)に示すようにこの限界点が向上する。3章で示した方法では、構造物の降伏震度とある塑性率に達する揺れの指標値の関係を整理していることから、図-9(b)に示すように、損傷下限値の評価結果を補強後の降伏震度に適用することにより、損傷下限値の設定に耐震補強の効果を反映させることが可能となる。

(3) 構造物条件の絞込みによる損傷下限値の引き上げ

図-7に示した塑性率ごとの損傷下限値は、図-4に示したすべての構造物を対象として構造物の損傷を評価した結果に基づき設定されている。一方、ある路線の高架橋・橋梁を対象とする場合、標準設計を採用していた等の理由により、例えば構造物の高さや幅が一定の範囲内に収まっているなど、構造物のパラメータが表-1に示した範囲よりもさらに限定される場合もあると考えられる。一例として、柱高さ7～8m、柱幅0.7～0.8mの構造物の

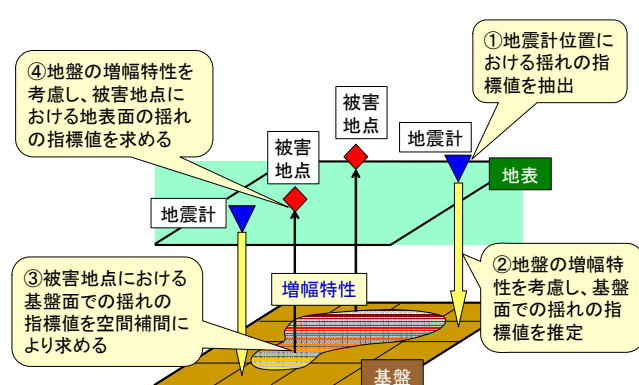


図-11 被害発生地点における揺れの指標値の推定

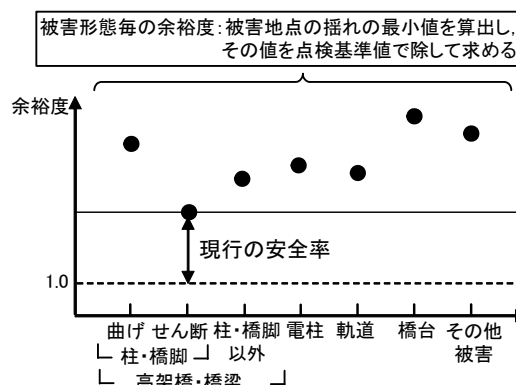


図-12 被害形態毎の安全率の整理（イメージ）

みを抽出して構造物の損傷評価を行い、その評価結果に基づき損傷下限値を設定した結果を図-10に示す。このように、構造物情報を活用して損傷評価に用いる構造物データを絞り込むことにより、損傷下限値を引き上げることも可能となる。

(4) 柱・橋脚以外の損傷への対応

本研究で示した損傷下限値の設定方法は、高架橋・橋梁における柱・橋脚の損傷を対象としている。したがって、運転規制基準値を設定するためには、柱・橋脚以外の損傷に関して、別途損傷下限値を把握する必要がある。現状では、柱・橋脚以外における損傷下限値は、過去の被害地点における揺れを周辺の地震計の観測値に基づき推定する方法^{例）15}が考えられる。損傷下限値の推定手順を図-11に示す。

- ① 地震計位置における揺れの指標値を抽出する。
- ② 地盤の増幅特性を考慮して、地震計位置における基盤面での揺れの指標値を推定する。
- ③ 被害地点における基盤面での揺れの指標値を空間補間により求める。
- ④ 地震被害が発生した地点における地表面位置での揺れの指標値を、地盤の増幅特性を考慮して算出する。

この手法では、多くの地震の被害を収集することとともに、いかに揺れの指標値を精度良く推定できるかがポイントになる。特に②や④では地盤特性を考慮して基盤面や地表面の揺れの指標値を精度良く推定する必要がある。その方法として、例えば地盤の非線形性を考慮して加速度や速度の増幅特性を評価している野上らの式¹⁰を用いて被害地点における加速度・速度を算出し、それらの値からSI値などの指標値を換算式により求める方法⁷が考えられる。

また、各被害形態を表現可能な解析モデルを用いて損傷評価を行うことにより、柱・橋脚以外の損傷に関しても物理的根拠に基づいて損傷下限値を評価することがで

きると考えられる。この評価手法について今後の課題である。

5. 安全率の設定

3章および4章の方法で設定した損傷下限値から運転規制基準値を定めるためには、安全率を設定する必要がある。ここでは、過去の被害地点における揺れの指標値を運転規制基準値で除した値（余裕度）に基づき、現行の運転規制基準値が有している安全率を求めることとし、その前提で安全率を設定する際の留意点を示す。

まず、安全率算定の際には、あらかじめ被害の程度と運転規制区分との関係を明確にしておく必要がある。一般的に過去の被害が整理されているのは、運転支障が生じて点検が必要となるような比較的大規模の被害であることが多いため、それらの被害における揺れの指標値と点検実施の基準値（点検基準値）を用いて余裕度を算定するのがよい。

また、2章で述べたように、例えば構造物をせん断補強することで柱・橋脚の損傷下限値が引き上げられた場合でも、電柱等その他の損傷が起これにくくなるわけではない点にも注意する必要がある。

本研究では、以上の点を踏まえて、次に示す手順にて現行の運転規制基準値が有している安全率を求めることとする。

- ① 図-11に示した方法により、運転支障が生ずるような被害が発生した地点における揺れの指標値を推定する。
- ② ①で推定した被害地点における揺れの指標値を、図-2のように抽出した被害形態ごとに分離し、被害形態ごとの損傷下限値を求める。
- ③ ②で整理した損傷下限値を現行の運転規制基準値で除することにより、被害形態毎の余裕度を求める。この場合の運転規制基準値として、本研究で

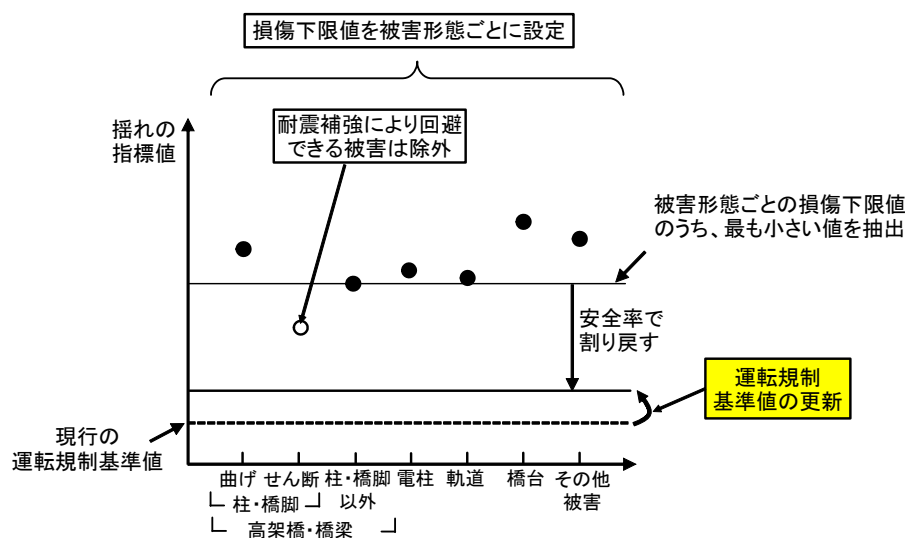


図-13 柱・橋脚の損傷下限値を引き上げた場合の運転規制基準値の更新方法

は点検基準値を用いる。

被害形態毎の余裕度、およびその値に基づく安全率の整理イメージを図-12に示す。つまり被害形態毎の余裕度が図-12のようになった場合、高架橋・橋梁がせん断破壊する場合の余裕度が、現行の運転規制基準値が有している安全率となる。

6. 運転規制基準値の設定方法

過去の地震被害に対して、被害形態ごとに現行の運転規制基準値が有する安全率は5章で示した方法により整理できる。図-12の場合、柱・橋脚がせん断破壊する場合の余裕度が現行の安全率となるが、せん断破壊形態の高架橋・橋梁を耐震補強した場合には、柱・橋脚のせん断破壊は発生しなくなり、損傷下限値が向上する。また、柱・橋脚の曲げ破壊を対象とする場合、図-7に示した柱・橋脚の損傷下限値の評価結果を用いることで、構造物の降伏震度が比較的高い路線では、柱・橋脚の損傷下限値を引き上げることができる。

一方、運転規制基準値に関する安全率は2章でも述べたように、地震計間でより大きな地震動が発生している可能性などを考慮して設定されている。本研究ではこの点を考慮し、柱・橋脚の損傷下限値を引き上げた後でもこの安全率の値を保持することを前提とする。

以上を踏まえて、柱・橋脚の損傷下限値を引き上げた後に運転規制基準値を更新する手順を以下に示す。また、その更新方法のイメージを図-13に示す。

- ① 点検実施や徐行運転など、基準値を定める目的（運転規制区分）を設定する。
- ② 5章で示した方法により、現行の運転規制基準値における余裕度を被害形態ごとに求め、その最小

値を求める。この最小値が、運転規制基準値の設定において考慮する安全率となる。

- ③ 耐震補強により回避できる被害形態以外に対して、目的に応じた損傷下限値を評価する。このとき、柱・橋脚の曲げ破壊に関する損傷下限値は、3章に示した方法により設定することができる。
- ④ ③で評価した被害形態ごとの損傷下限値のうち、最小の値を抽出する。
- ⑤ ④で抽出した最小値を、②で設定した安全率で除することにより、運転規制基準値を更新する。

以上の方法により、安全率を維持したまま運転規制基準値を更新することが可能になる。

図-13からもわかるように、構造物の柱・橋脚の損傷下限値が引き上げられたとしても、運転規制基準値は耐震性能が向上した分だけ引き上げられるわけではなく、他の被害形態にも着目すべきであることに注意が必要である。また、4章(4)節で述べたように、他の被害形態の損傷下限値を物理的根拠に基づいて設定する方法については、今後の課題である。

7. まとめ

本研究では、被害が発生する場合の地震の揺れの強度を表す指標値の下限（損傷下限値）の評価方法を提案するとともに、被害形態毎の損傷下限値に安全率を考慮することで運転規制基準値を設定する方法を示した。得られた成果を以下に示す。

- ・高架橋・橋梁の柱・橋脚に関する損傷下限値を物理的根拠に基づいて評価するため、数値解析に基づき設定する方法を示した。提案手法を用いることで、構造物の耐震補強を実施した場合にその補強

効果を見込むことができ、柱・橋脚の損傷下限値を引き上げることが可能になった。

- ・提案した損傷下限値の評価手法では、構造物がある塑性率に達する揺れの指標値を整理していることから、構造物の塑性率ごとに損傷下限値が設定可能であり、例えば「徐行運転」や「点検実施」の基準値など、目的に応じて柔軟に損傷下限値が設定できるようになった。
- ・安全率の設定方法を整理するとともに、提案した損傷下限値の評価手法と、被害形態ごとの安全率の評価結果を踏まえて、目的に応じて運転規制基準値を設定する方法を示した。これにより、柱・橋脚の損傷下限値が引き上げられた場合、安全率を維持したまま運転規制基準値を更新することが可能になった。

なお本研究では、高架橋・橋梁における柱・橋脚のみを損傷下限値の評価対象としたが、今後は、柱・橋脚以外の損傷についても数値解析に基づき評価する方法を検討し、それに基づいて線区情報を活用した運転規制基準値を設定する手法を提案したいと考えている。

謝辞：本研究では、防災科学技術研究所K-NETのデータ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) 坂井公俊，本山紘希，室野剛隆，盛川仁，荒木正之，松田滋夫，浦口尚貴：高架橋の地震時不同変位計測のための高密度地震観測システムの構築，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.72，No.1，pp.107-118, 2016.
- 3) 矢部正明，塚本英子：構造物の地震応答の観測に関する調査，第 20 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.297-304, 2017.
- 4) 室野剛隆，佐藤勉：構造物の損傷過程を考慮した非線形応答スペクトル法の適用，土木学会地震工学論文集，第 29 巻，pp.520-528, 2007.
- 5) 室野剛隆，野上雄太，宮本岳史：簡易な指標を用いた構造物および走行車両の地震被害予測法の提案，土木学会論文集 A, Vol.66, No.3, pp.535-546, 2010.
- 6) 坂井公俊，室野剛隆：地震動の最大加速度と最大速度を用いた土木構造物の地震被害推定ノモグラムの改良，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.71, No.4（地震工学論文集第 34 巻），I_32-I_39, 2015.
- 7) 山本俊六，岩田直泰，坂井公俊，岡本京祐：鉄道用地震情報公開システムの開発，鉄道総研報告，Vol.30, No.5, 2016.
- 8) 国土交通省気象庁・総務省消防庁：震度に関する検討会 報告書，2009.3.
- 9) 他谷周一，翠川三郎：構造種別を考慮した鉄道構造物の地震被害関数の検討，日本地震工学会論文集，Vol.14, No.1, pp.71-84, 2014.
- 10) 他谷周一，翠川三郎：鉄道高架橋区間の地震被害関数の検討，日本地震工学会論文集，Vol.15, No.4, pp.1-15, 2015.
- 11) 美藤 恭久，中村 豊，富田 健司：東海道・山陽新幹線のための地震時ダウンタイム短縮化対策，鉄道技術研究報告，No.1294, pp.1-38, 1985.
- 12) 気象庁告示第 4 号，1996.
- 13) Housner, G.W. : Spectrum Intensity of Strong Motion Earthquakes, Proc. of 1952 Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures, Earthquake Engineering Research Institute, pp.72-88, 1952.
- 14) 防災科学技術研究所 全国強震観測網，<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 15) 丸山喜久，山崎文雄，用害比呂之，土屋良之：新潟県中越地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係，土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, pp.208-216, 2008.
- 16) 野上雄太，坂井公俊，室野剛隆，盛川仁：表層地盤と入力波の周期特性を考慮した表層地盤での地震増幅率の評価，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.68, No.1, pp.191-201, 2012.

(2018.4.6 受付)

ESTABLISHMENT OF THRESHOLD VALUE FOR TRAIN OPERATION CONTROL CONSIDERING THE DAMAGE OF STRUCTURE

Tomohiro KAWANISHI, Yoshitaka MURONO, Seiji YAMADA and Kazunori WADA

In order to judge whether railway structures should be checked after the earthquake, the threshold value by the parameter expressing the level of earthquake motion is often established. This value is generally determined based on the damage of the railway facilities by the past earthquake. Therefore, the seismic performance of the structures can't be taking into account when the threshold value is determined. In this paper, we propose the method to measure the lower limit of earthquake motion when the structure is damaged by the earthquake and show the procedure to set the threshold value for the train operation control considering the lower limit and the safety factor.