

構造物の耐震性能を考慮した 地震時点検基準値の設定方法の提案

川西 智浩* 山田 聖治* 室野 剛隆**
和田 一範* 是永 将宏***

Proposal of a Setting Method of a Threshold Value for the Inspection of Structure Considering its Seismic Performance

Tomohiro KAWANISHI Seiji YAMADA Yoshitaka MURONO
Kazunori WADA Masahiro KORENAGA

In order to judge whether railway structures should be checked after the earthquake, a threshold value using a 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, but not considering the seismic performance of the structure. In this paper, we propose a method to estimate the lower limit of earthquake motion, above which limit the structure will be damaged by the earthquake, and show a procedure to set a threshold value for the inspection of the structure considering the lower limit and the safety factor.

キーワード：点検基準値，構造物，耐震性能，損傷下限値，安全率

1. はじめに

鉄道事業者においては、地震後に構造物の点検を実施するかどうかを判断するため、地震の揺れの大きさを表す指標に対してしきい値（ここでは、「点検基準値」と呼ぶ）を定めていることが多い^{例え1)}。この点検基準値は、列車の運転に支障があるような被害が生じている可能性の有無を基に定めるのが適切であり、一般的に過去の被害事例を基に経験的に定められている。具体的には、まず被害箇所における揺れの推定値を個別に算出し、その最小値（損傷下限値）を求める。そして、その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を決定し、その値を路線全体に適用している。しかし、この点検基準値の設定方法を用いる場合、過去の被害箇所のうち耐震性能が最も低い構造物で路線全体の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、耐震補強を実施した場合にも、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提案する。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について示す。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、目的に応じた損傷下限値を設定することができる。また、降伏震度と損傷下限値の関係が明確になることから、損傷下限値の評価に耐震補強の効果を反映させることも可能となる。そして、提案手法により定めた損傷下限値に安全率を考慮することで、点検基準値を設定する方法を示す。

2. 地震後における運転規制の考え方

2.1 運転規制のための鉄道構造物の損傷把握

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3つの方法がある。

(1) 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、構造物に地震計を設置するには費用や電源確保等の課題があり、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多数の地震計を設置して直接把握することは現実的ではない。

(2) 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²⁾ こと

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

** 鉄道地震工学研究センター

*** 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

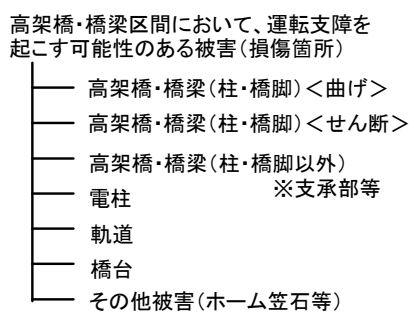


図1 運転支障を起こす可能性のある被害
(高架橋・橋梁区間)

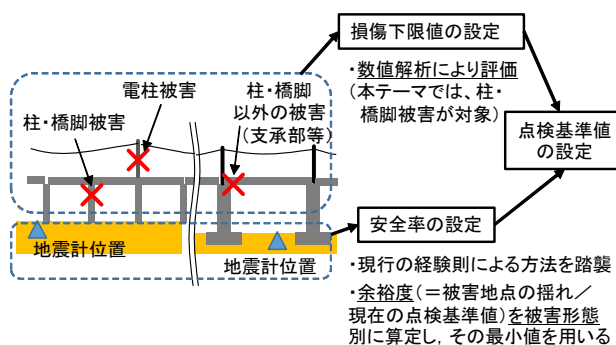


図2 提案する点検基準値の設定方法

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^{3) 4)}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⁵⁾も構築されていることから，今後，構造物情報と文献^{3) 4)}に示されている手法をシステム化し，運転規制に活用することも考えられる。ただし現状では，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。

(3) 地表面の揺れのみにより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点検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討し^{1) 6) 7)}，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⁸⁾，計測震度⁹⁾およびSI値¹⁰⁾などが挙げられる。

2.2 点検基準値設定の現状と課題

前節で述べたように，現在，鉄道事業者では(3)に示した方法により運転規制を行う場合が多いことから，本節ではこの方法により点検基準値を設定する場合の課題について示す。

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 上記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。

2.3 提案する点検基準値設定方法の概要

本研究では，前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点検基準値を設定する方法を提案する。

まず，高架橋・橋梁区間において過去に被災した情報から運転支障の影響要因となりうる被害を図1のように抽出し，それらの被害形態を踏まえて，点検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2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

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

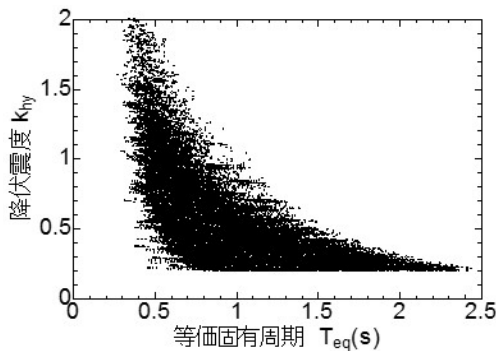


図3 解析対象構造物の T_{eq} - k_{hy} 関係

限值を設定する。

- 過去の被害地点における揺れの指標値を現在の点検基準値で除した値（以下、余裕度と呼ぶ）を被害形態毎に整理し、余裕度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を把握することができる。
- 上記の手順で整理した損傷下限値と安全率を用いて、点検基準値を設定する。

なお本研究では、以後の検討において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。

3. 数値解析による構造物の損傷下限値の設定

3.1 評価方法

ここでは、鋼板巻き立て補強等により柱・橋脚のせん断破壊が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。まず、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地震波の特性を網羅することとした。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

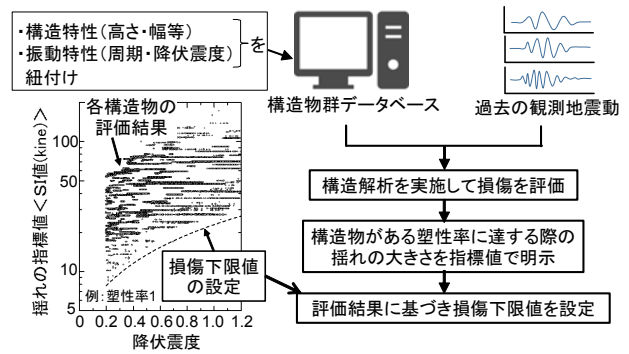


図4 構造物（柱・橋脚）の損傷下限値の設定方法

多数の構造物を作成し、これらの構造物群に対するプ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_{hy} 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。

3.1.1 入力地震動

入力地震動としては、防災科学技術研究所 K-NET¹¹⁾ 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。

3.1.2 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、

- ・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ケースの構造物を用いる。解析対象構造物の等価固有周期 T_{eq} と降伏震度 k_{hy} の関係を図3に示す。

3.1.3 評価手順

図4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²⁾ ため、図3で示した等価固有周期 T_{eq} と降伏震度 k_{hy} を有する弾性の構造物（減衰定数5%）に対し、3.1.1項で示した地震動を入力して1自由度の応答解析

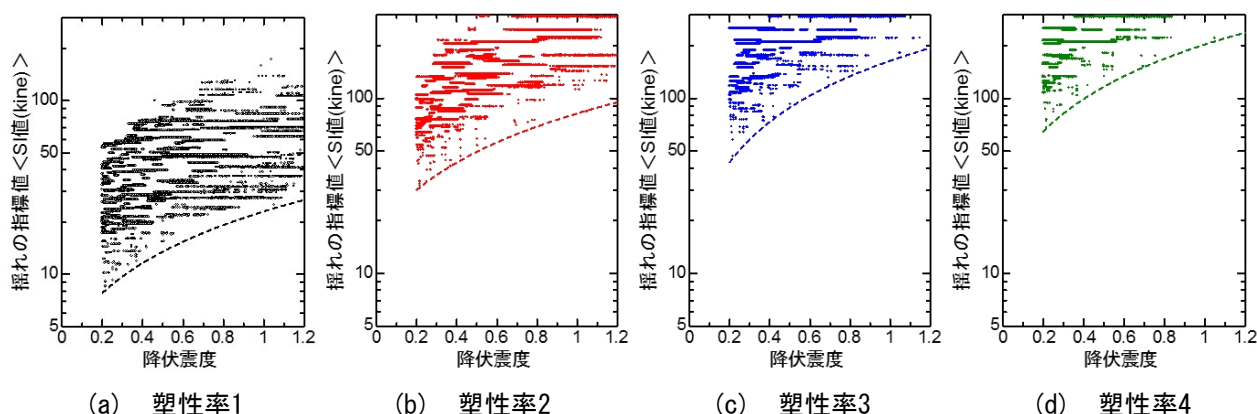


図5 塑性率ごとの損傷下限値の評価結果

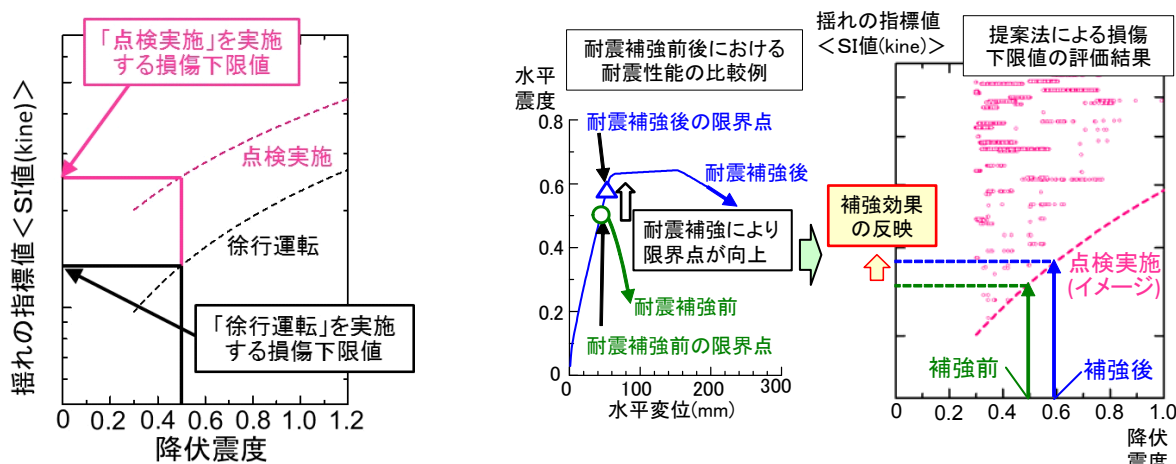


図6 目的に応じた損傷下限値の設定のイメージ図 (図中の下限値はイメージ)

(a) 耐震補強による限界点向上 (b) 損傷下限値の設定

図7 損傷下限値設定における耐震補強効果の反映

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。

3.2 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_{ny} との関係を図 5 に示す。図 5(a)～(d) 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。また、これらの図には、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。このように提案手法では、構造物の塑性率ごとに損傷下限値が設定可能である。

3.3 構造物の損傷下限値の活用方法

3.3.1 目的に応じた損傷下限値の設定

図 5 では塑性率ごとの損傷下限値の評価結果を示していることから、構造物の塑性率と目的（「徐行運転」、

「点検実施」などの運転規制区分）との対応を明確にすることで、図 6 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することができる。

3.3.2 セン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について、耐震補強前後の耐震性能を比較した例を図 7(a) に示す。耐震補強前は、構造物の変位の増大に伴いせん断破壊が発生する。せん断破壊が発生するとその後耐力が急激に低下し、構造物の安全性が確保できなくなることから、耐震補強前についてはせん断破壊の発生点が運転支障を生ずるかどうかの限界点であると考えられる。一方、耐震補強後はせん断破壊が発生しなくなり、構造物の耐力が増大することにより、運転支障を生ずるかどうかの限界点も曲げ損傷が発生する点まで向上する。

図 5 に示したように、提案手法では降伏震度が大きくなるにつれて柱・橋脚の損傷下限値が向上するという特性を評価することができる。したがって、図 7(b) に示すように、目的に応じて構造物の降伏震度と柱・橋脚の

損傷下限値の関係を評価しておき、耐震補強後の降伏震度をその評価結果にプロットすることで、耐震補強後の柱・橋脚の損傷下限値を設定することができる。また、降伏震度と柱・橋脚の損傷下限値の関係が示されていることから、耐震補強前に比べて損傷下限値が向上することもわかる。このように、提案手法を用いることで、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。

3.3.3 柱・橋脚以外の損傷への対応

鉄道構造物全体に対する点検基準値を設定するためには、柱・橋脚以外の損傷に関しても損傷下限値を把握する必要がある。現状では、この値は過去の被害地点における揺れの推定結果から評価する方法^{例えば¹²⁾}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方法も考えられるが、この評価手法については今後の課題である。

4. 安全率の設定

3章の方法で設定した損傷下限値から点検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点検基準値で除した値（余裕度）に基づき、現行の点検基準値が有している安全率を求めることとする。その手順を以下に示す。

- ① 運転支障を伴う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1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点検基準値で除した値（余裕度）を被害形態毎に求める。
- ④ 被害形態毎の余裕度のうち最も小さい値を、現行の点検基準値における安全率とする。

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8に示す。図8の場合、高架橋・橋梁がせん断破壊する場合の余裕度が、現行の点検基準値における安全率となる。

5. 点検基準値の設定方法

過去の地震被害に対して、現行の点検基準値における被害形態ごとの安全率は4章で示した方法により整理できる。図8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5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

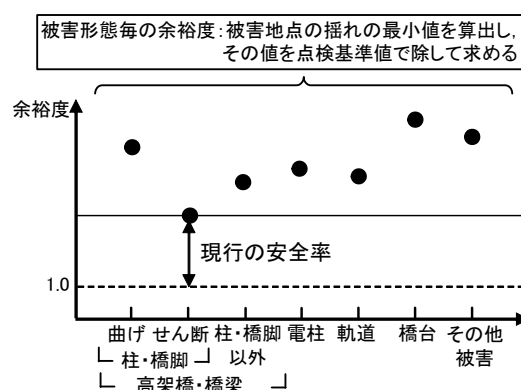


図8 安全率の整理方法（イメージ）

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、点検基準値に関する安全率は2章で述べたように、地震計の間の地点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点検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9に示す。

- ① 4章で示した方法により、現行の点検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、点検基準値の設定において考慮する安全率となる。
- ② 耐震補強により回避できる被害形態以外に対して、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。
- ③ ②で評価した被害形態ごとの損傷下限値のうち、

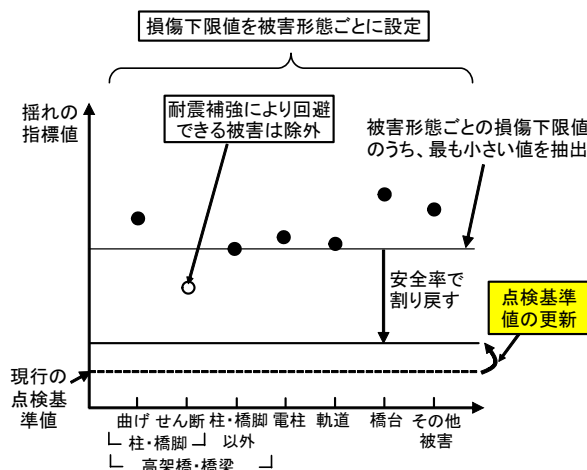


図9 柱・橋脚の損傷下限値を引き上げた場合の点検基準値の更新方法（イメージ）

特集：地震対策技術

最小の値を抽出する。

- ④ ③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、点検基準値を更新する。

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

図9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、点検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。

6. まとめ

本研究では、被害が発生する場合の地震の揺れの大きさ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点検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、目的に応じた損傷下限値の設定や、構造物の耐震補強効果を考慮した損傷下限値の引き上げが可能になった。
- ・点検基準値を定める際の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、安全率の評価結果を踏まえて、点検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点検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点検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いた。

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) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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, pp.41-46, 2016
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 気象庁告示第 4 号, 1996
- 10) Housner, G.W.: Spectrum Intensity of Strong Motion Earthquakes, Proc. of 1952 Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures, Earthquake Engineering Re-search Institute, pp.72-88, 1952.
- 11) 防災科学技術研究所 全国強震観測網, <http://www.kyoshinbosai.go.jp/kyoshin/> (参照日: 2018 年 6 月 7 日)
- 12) 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