

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
<b>防災</b>
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 鉄道ネットワークを考慮して 地震の対策効果を明らかにする

東北地方太平洋沖地震の後、壊滅的な被害を回避するとともにしなやかな回復を実現するレジリエンスという概念が広まってきました。地震時における鉄道のレジリエンスを向上させるためには、耐震補強の実施や早期地震警報の導入などの対策が重要であるとともに、鉄道ネットワークの観点からも対策を検討することが重要です。鉄道総研は、大規模な自然災害が発生した際に最適な復旧方法などを提示する迂回・復旧計画作成支援システムを開発しました。ここではそのシステムを適用し、地震対策の効果を一元的に評価する手法について紹介します。



**岩田 直泰**  
Naoyasu Iwata  
鉄道地震工学研究センター  
地震解析研究室長



**丹羽 健友**  
Katsutomo Niwa  
前 鉄道地震工学研究センター  
地震解析研究室  
研究員



**鈴木 崇正**  
Takamasa Suzuki  
信号・情報技術研究部  
交通計画研究室  
副主任研究員



**山本 俊六**  
Shunroku Yamamoto  
鉄道地震工学研究センター長

## はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震はモーメントマグニチュード(☞参照)が9.0という、現代の日本が経験したことの無い規模の地震でした。広い範囲に渡ってさまざまな影響を及ぼしたこの地震の経験により、防災対策の考え方の転換が生じました。すなわち、想定内の地震に対しては従来どおりの耐震性能を保持させるとともに、想定を超える地震が発生した場合にも壊滅的な被害を回避しつつ、しなやかな回復を実現する能力であるレジリエンスを高めることが求められるようになってきました。さらに、東北地方太平洋沖地震の経験から、広い範囲に影響が及ぶ地震に対しては、鉄道がネットワークを構成している点に着目した対応も

重要なことが明らかとなりました。

地震に対する鉄道のレジリエンスの向上には、構造物が性能を保持し続けるようにする耐震補強などのハード対策や、強い揺れが予測や観測された場合に列車を停止させる列車運転規制のようなソフト対策が基本となります。しかし、これまでに実施されてきたさまざまな地震対策の効果について、鉄道がネットワークを構成しているという観点からの評価は行われていません。ここでは、地震時のレジリエンスの向上を目指した地震対策の効果を、鉄道ネットワークの輸送量に着目して一元的に評価する手法について紹介します。

## 評価手法の概要

鉄道総研は、これまで広範囲にわ

### ☞ マグニチュード

地震の規模を示す指標で、いくつかの種類があります。日本では、気象庁マグニチュード  $M_j$  が広く使われていますが、地震の規模が大きい場合はモーメントマグニチュード  $M_w$  が使われることがあります。

### ☞ 最適化計算

与えられた条件の下で、ある関数により算出される値を最大または最小にする解を求める計算。コンピューターを用いて計算を行うことが多く、近年の計算機能力の向上にともない、複雑かつ大規模な問題を扱うことができるようになってきました。

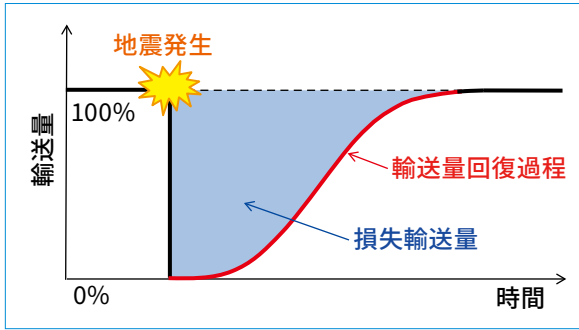


図1 損失輸送量の概念

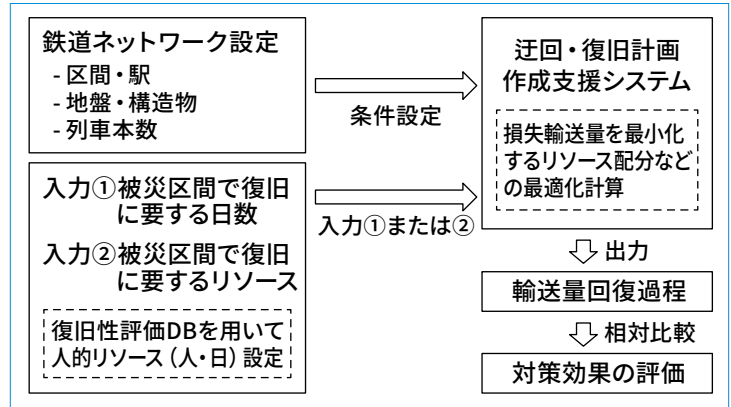


図2 支援システムの入力と出力の概要



図3 支援システムの検証結果

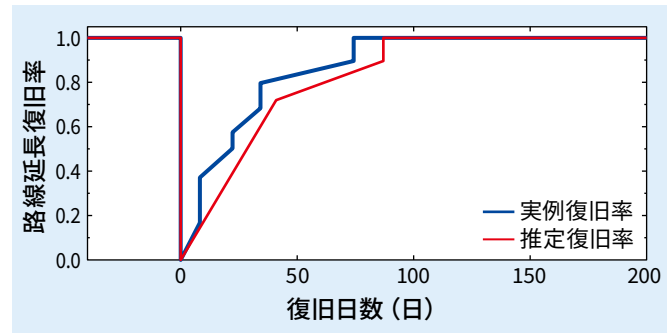


図4 復旧性評価データベースの検証結果

たって鉄道ネットワークに影響を及ぼす大規模災害発生時の、被災区間の最適な復旧方法などを提示する迂回・復旧計画作成支援システム（以下、支援システム）<sup>1)</sup>を開発してきました。このシステムは、被災による損失輸送量を最小化するための復旧にむけた人的リソース（復旧作業に要する述べ人数、単位は人・日）の配分などを最適化計算（※参照）により算出します。損失輸送量は、被災から復旧までの期間に失われた旅客や貨物の輸送量であり、**図1**の青色で示された領域が該当します。

**図2**に支援システムの条件設定や入力と出力の概要を示します。入力は被災区間の具体的な復旧日数、または復旧作業などに要する人的リソースのどちらかとなります。一方、出力は**図1**の赤線で示される輸送量回復過程（被災時に失われた輸送量が通常時の輸送量に戻っていく過程）となります。な

お、人的リソースは、区間およびネットワーク全体に対して投入できるリソースの上限も設定します。

### 支援システムの検証と復旧性評価データベースの構築

まず、支援システムを地震災害へ適用する前段階として、支援システムによる評価の信頼性を検証しました。ここでは、東北地方太平洋沖地震を取り上げ、各被災区間の実際の復旧日を入力として、貨物輸送量の再現計算を行っています。

支援システムにより算出した東北地方太平洋沖地震時の貨物の輸送率を**図3**に示します。赤線は支援システムで計算した貨物輸送の推定輸送率であり、青線は実績輸送率です。この図より、本震発生にともなう輸送率の急減と、被災路線の段階的な復旧にともなう輸送率の回復過程がおおむね再現されていることが確認できます。実績と

比較して推定の輸送率は、曜日による違い、余震発生にともなう輸送量の減少（とくに4月7日）、大型連休における需要減など被災路線の復旧状況によらない変動を考慮しきれていない部分もありますが、全体的な傾向は再現できています。この検証により、支援システムによる輸送率回復過程の計算結果は一定の信頼性を有していることが確認できました。

先に述べたとおり、支援システムの入力の1つは、復旧に要する人的リソース（人・日）です。支援システムが出力する輸送率回復過程の信頼性を高めるためには、入力する人的リソースの精度を高める必要があります。このためには、地震被害の復旧を扱う際、さまざまな地震被害の復旧に要する人的リソースなどの情報の蓄積が役立ちます。鉄道総研は、復旧に必要な人的リソースや日数、費用を事前に評価できる復旧性評価データベースを構築しま

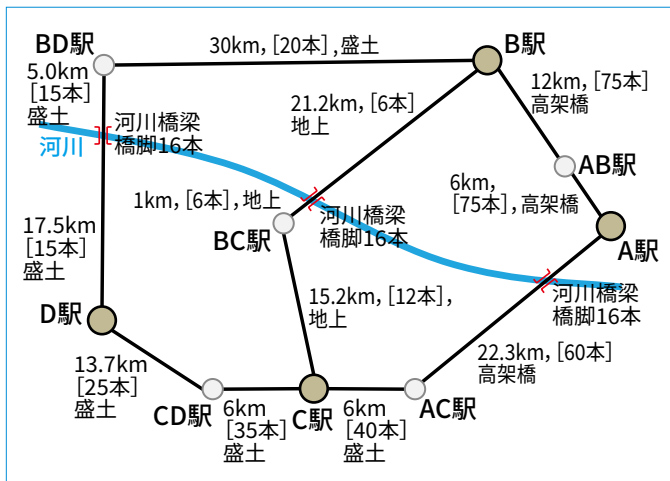


図5 対象の仮想鉄道ネットワーク ([ ]は列車本数)

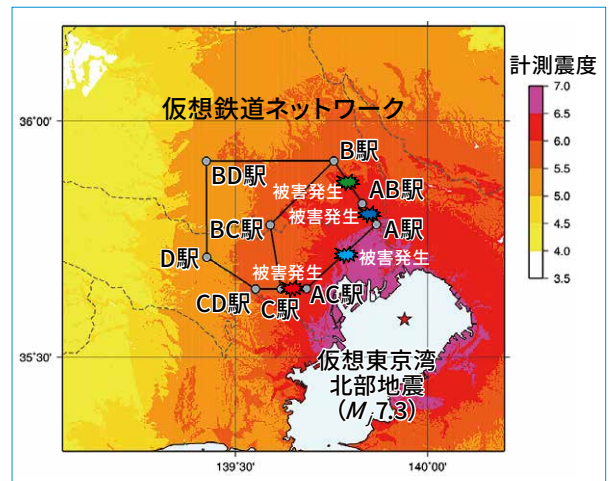


図6 地震動(計測震度)の設定

表1 人的リソースの設定例

区間	人的リソース(人・日)				
	補強なし	A-AB間補強	AB-B間補強	C-AC間補強	AC-A間補強
A-AB間	795	0	795	795	795
AB-B間	393	393	0	393	393
C-AC間	1,200	1,200	1,200	0	1,200
AC-A間	11,065	11,065	11,065	11,065	0
累積損失輸送率	3.50	2.70	3.03	3.30	1.28

復旧に11,065(人・日)を要することを表す

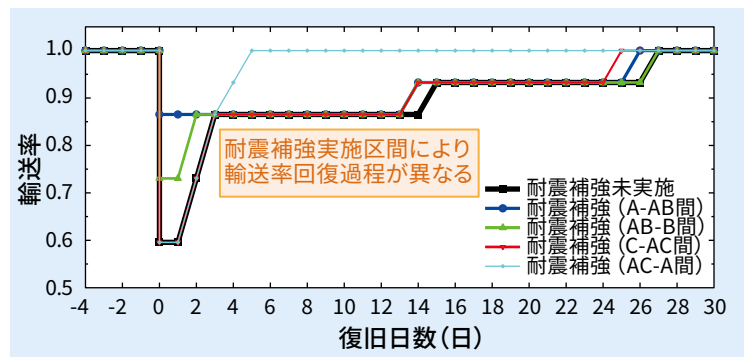


図7 耐震補強実施に対する輸送率回復過程

した<sup>2)</sup>。これにより、構造物ごとの被害に応じて、復旧に要する人的リソースなどを評価できます。

復旧性評価データベースは、対象とする構造物種別や部材を整理し、想定される具体的な損傷状態を設定した上で、各損傷の復旧に要する人的リソースなどを単価表や施工実績に基づき積算して作成しました。

1995年兵庫県南部地震の被災路線を対象に、復旧性評価データベースにより路線延長の復旧率(=復旧した路線延長/対象路線延長)の回復過程を評価した事例を図4に示します。この図より、推定は事例の復旧率とおおむね整合しており、復旧性評価データベースを活用することにより、実態に即した人的リソースを設定できます。

### 鉄道ネットワークを考慮した地震対策効果の評価

ここでは、仮想鉄道ネットワークを対象に、支援システムを用いて耐震補強を実施した際の効果を定量的に評価した事例について述べます。

はじめに、鉄道ネットワークの路線(区間・駅)や構造物、列車本数などの条件を設定します。ここでは、図5に示す仮定の鉄道ネットワークを評価の対象とします。次に、地震動を設定し、それに応じた構造物の損傷レベルを計算します。最後に、前章で述べた復旧性評価データベースを用いて各区間で復旧に要する人的リソースを求め、支援システムに入力します。そして、支援システムでリソース配分の最適化計算を行った後に、輸送率回復過

程を算出します。

ここでの検討では、鉄道ネットワークが関東平野内にあると仮定し、想定首都直下地震の1つである東京湾北部の地震(気象庁マグニチュード7.3)を想定して図6に示す地震動(計測震度)を設定しました。標準的な特性を与えた構造物(高架橋および盛土)の損傷レベルを算出<sup>3)4)</sup>した結果、耐震補強未実施の状況を想定した場合、強い揺れが設定されたB駅からAC駅間の河川橋りょうと高架橋に小被害から大被害、AC駅からC駅間の盛土で小被害が生じると評価されました。

耐震補強未実施の場合は、構造物の被災区間において被害に応じた人的リソースを先に述べた復旧性評価データベースに基づき設定します。一方、耐

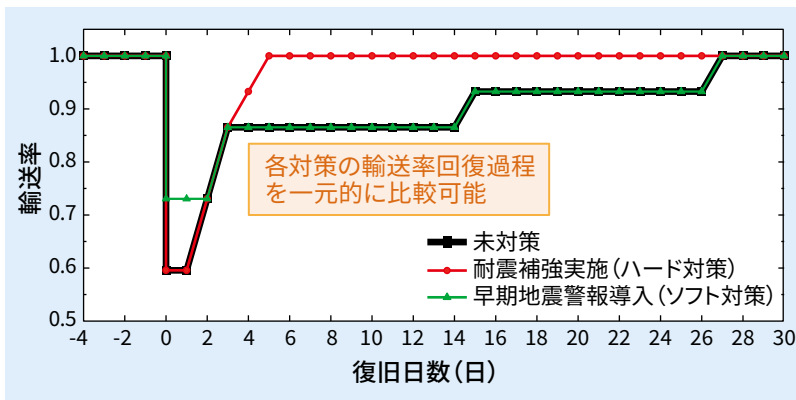


図8 各地震対策における輸送率回復の一元的評価

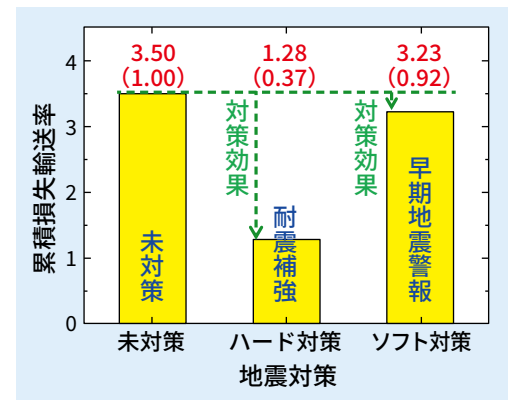


図9 各地震対策の累積損失輸送率の比較 (括弧は未対策を基準とする累積損失輸送率比)

震補強を実施した場合は被害が生じないとして復旧に要するリソースを0に設定します。そして、支援システムを用いて輸送率回復過程を求め、それらを比較することにより、耐震補強の実施の効果を相対的に評価します。ここで入力した人的リソースを表1、輸送率回復過程の計算結果を図7に示します。

累積損失輸送率という指標を、災害発生から復旧までの損失輸送率の総和として定義します。表1および図7より、AC駅からA駅間を補強した場合に累積損失輸送率が最小になることがわかりました。これより、鉄道ネットワークの累積損失輸送率をもっとも小さくするという観点において、耐震補強の実施はAC駅からA駅間をもっとも効果が高いといえます。この際、鉄道ネットワークの輸送量回復過程を定量的に示した上で評価可能な点が支援システム適用の特徴です。

### 地震対策効果の比較

前章において、ハード対策の代表例である耐震補強実施に関する輸送率回復過程の算出例を示しました。設定する人的リソースやその上限の値を適切に設定することにより、早期地震警報導入に代表されるソフト対策や、被災

後の復旧人員配分などの復旧戦略といった地震対策にも、支援システムを用いた地震対策効果の評価は適用できます。これらは、鉄道ネットワークの損失輸送量を最小化する同一の基準によって算出され、各対策の輸送率回復過程は一つの図にあわせて表記できます。さらに累積損失輸送率といった同一の指標で評価が可能となります。ハード対策、ソフト対策の一元的な評価の例として、図8に輸送率回復過程、図9に累積損失輸送率の比較を示します。また、図9には未対策を基準とする累積損失輸送率比をあわせて示します。図9によると、累積損失輸送率は、耐震補強の実施により未対策に対して63%低減し、早期地震警報導入により未対策に対して8%低減していることがわかり、異なる対策の効果を定量的に比較できます。

従来の地震対策効果の評価は、ハードやソフトなどの対策ごとに行われてきました。しかし、支援システムは、鉄道ネットワークの損失輸送量を評価基準として一元的に評価できるという特徴を有しています。

### おわりに

地震時における鉄道のレジリエンス性能を向上させるためには、対策の効

果を鉄道ネットワークの観点からも評価することが重要です。

ここでは、鉄道ネットワークにおける損失輸送量の最小化を評価基準とし、リソースの最適配分を計算するシステムを用いて地震対策効果の一元的な評価を行いました。ここで適用した支援システムの輸送率回復過程の計算結果は、事前対策の投資計画や事後復旧工事の計画策定の定量的評価や比較検討に活用でき、戦略的な対策実施の判断を支援できると考えます。RRR

### 文献

- 1) 奥田大樹, 鈴木崇正, 深澤紀子, 尾崎尚也: 大規模災害発生後の鉄道輸送の復旧戦略決定支援手法の基礎検討, 鉄道総研報告, Vol.34, No.2, pp.5-10, 2020
- 2) 神澤拓, 田中浩平, 西村隆義, 西村明彦: 復旧性評価データベースを活用した鉄道構造物の復旧性評価法の提案, 第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.73-80, 2019
- 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, Vol.66, No.3, pp.535-546, 2010
- 4) 坂井公俊, 室野剛隆, 京野光男: 鉄道盛土の地震被害簡易推定手法の提案, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.3, pp.542-552, 2012