

鉄道ネットワークの損失輸送量に着目した 地震対策効果の定量的評価

岩田 直泰* 丹羽 健友** 鈴木 崇正*** 山本 俊六#

Quantitative Evaluation of Earthquake Countermeasure Effects Focusing on Lost Transportation Volume of Railway Networks

Naoyasu IWATA Katsutomo NIWA Takamasa SUZUKI Shunroku YAMAMOTO

To improve railway resilience against an earthquake, we verified and applied a developed support system to evaluate the earthquake countermeasure effects focusing on the lost transportation volume of the railway networks. The system calculates the recovery process of the transportation volume that decreased after an earthquake, by optimization calculation so that the lost transportation volume is minimized. This makes us to quantitatively evaluate the effect of countermeasures. In addition, a different recovery process can be relatively evaluated. In this study, first we evaluate the performance of the system based on past earthquakes. Then comprehensively compare the effects of countermeasure such as structural and operational. And we quantify the achievement of anti-catastrophe performance. The evaluated recovery process of the lost transportation volume with the developed system is useful to implement strategic earthquake countermeasures.

キーワード：レジリエンス，迂回・復旧計画作成支援システム，鉄道ネットワーク，損失輸送量，地震対策

1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震は、現代の日本社会が経験したことのない規模の地震、いわゆる未経験地震であった。広範囲かつ複合的に被災したこの地震の経験により、それ以降、防災対策の考え方に転換が生じた。すなわち、想定内の地震に対してはこれまで通りの耐震性能を持たせると共に、想定を超える未経験地震が発生した場合にも壊滅的な被害を回避しつつ、しなやかな回復力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た¹⁾。

さらに、東北地方太平洋沖地震の経験から、広域に影響が及ぶ地震に対しては、鉄道がネットワークによって構成されている点に着目し、ネットワーク全体の輸送量を確保する対応が重要なことが明らかとなった。

地震に対する鉄道のレジリエンスの向上のためには、構造物の剛性を高める耐震補強等のハード対策や、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る。一方、実施されてきた様々な対策の効果について、鉄道がネットワークにより構成されているという観点からの評価が行われていない。そこで、本研究は地震時における鉄道のレジ

リエンスの向上を目指して、鉄道ネットワークの損失輸送量の最小化に着目することにより地震対策や危機耐性の効果を一元的に評価する手法を提案し、その適用を検討した。加えて、危機耐性の評価にも本手法の適用検討を行った。

2. 評価手法の概要と検証

2.1 迂回・復旧計画作成支援システムの概要

鉄道総合技術研究所は、これまで広範囲にわたって鉄道ネットワークに影響を及ぼす大規模な自然災害が発生した際の、被災区間の最適な復旧戦略や復旧途上の迂回輸送戦略を導出する迂回・復旧計画作成支援システム（以下、支援システム）²⁾を開発してきた。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必要なリソースの最適配分計算や、迂回輸送に係るコストを最小化するような最適迂回輸送戦略の計算が可能である。損失輸送量は、災害発生から復旧までの期間に失われた旅客や貨物の輸送量を意味し、復旧期間中の各日における平常時の輸送量（災害が発生していないと仮定した場合の想定輸送量）と、被災状況下における輸送量の差分の総和と定義する。図1は、損失輸送量の概念を示すものであり、青色で示された領域の面積が損失輸送量となる。なお、本研究ではこの支援システムを地震災害の復旧性評価に適用する。

図2に支援システムの入力と出力の概要を示す。入力には被災区間の具体的な復旧日数（図2の入力①）、また

* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室
** 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室（現 ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社）
*** 信号・情報技術研究部 交通計画研究室
鉄道地震工学研究センター

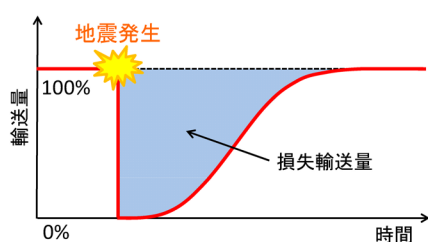


図1 損失輸送量の概念

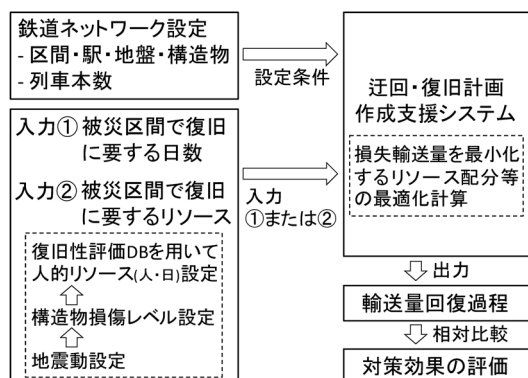


図2 支援システムの入力と出力の概要

は復旧作業等に要する人的リソース（人・日）（図2の入力②）とし、出力は災害により損失した輸送量が最小となるように輸送量の復旧過程を数理計画法にもとづいて算出した結果である。なお、人的リソースを入力する際は、区間およびネットワーク全体に対して投入できる復旧リソース総量の上限を併せて設定する。計算単位は、鉄道ネットワークの各駅を結ぶ区間単位であり、その中に被災箇所を含む区間が対象となる。同じ駅間を結ぶ区間であっても、方向別にそれぞれ異なる区間とする。また、鉄道ネットワーク内の輸送量は発駅と着駅ごとの単位で設定し、1つの発着駅の組み合わせごとに1つの経路を設定できる。

2.2 過去被災地震による支援システムの検証

地震災害に対する支援システムの信頼性を検証する目的から、鉄道ネットワークが広範囲かつ長期間にわたり影響を受けた2011年の東北地方太平洋沖地震（ M_w 9.0）を取り上げ、被災地域における貨物輸送実績データや各被災区間の実際の復旧日を入力データ（図2の入力①）として、支援システムにより貨物輸送量の再現計算を行った。計算の諸条件は以下のとおりである。

- 計算対象地域は関東～東北地方一帯。
- 計算対象期間は2011年3月1日から5月31日。
- 貨物輸送量は1日単位で計算。複数日にまたがって輸送される貨物輸送量はその貨物の発送日に計上。
- 再現計算における1日当たりの貨物輸送量は3月1日から3月11日の実績輸送量の平均値を基準とし震災に伴う全体的な需要の減少等は考慮しない。

- 計算対象地域内を走行する貨物を計算対象とする。発送地あるいは到着地（もしくはその両方）が計算対象地域外にある場合は、計算対象地域内の最初の駅あるいは最後の駅をその貨物の発送地あるいは到着地と見なす。
- 首都圏内の各貨物駅は代表点として1つに集約。

上記の考え方に基づき、計算対象地域内における実績発着輸送量を集計した。その上で、計算負荷軽減のため、輸送量の多い上位10発着ペア分を計算対象とし、この10発着ペアに含まれる貨物駅とその駅間の区間を分析対象のネットワークとした。構成する区間数は上下線を合せて16本、駅数は8であり、計算に用いた路線データには、実際の各駅間の営業キロ等を入力している。

支援システムにより算出した貨物の輸送率（＝日ごとの輸送量／3月1日から11日の平均実績輸送量）の結果を図3に示す。赤線は本システムで計算した東北地方太平洋沖地震後における被災路線の復旧状況に基づく貨物輸送の推定であり、青線は実績である。本震災に伴う輸送率の急減と、被災路線の段階的な復旧に伴う輸送率の回復過程が再現されている。実績輸送率と比較して計算による輸送率は、産業の停滞や救援物資輸送等の需要自体の増減、曜日による需要差、余震発生に伴う輸送量の減少（特に4月7日）、大型連休における需要減等、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るが、全体的な傾向としては被災後の輸送率を再現できている。輸送率の再現に関する検討により、限定的な検証ではあるが支援システムによる輸送率の回復過程に関する計算について一定の信頼性を確認できたと考える。

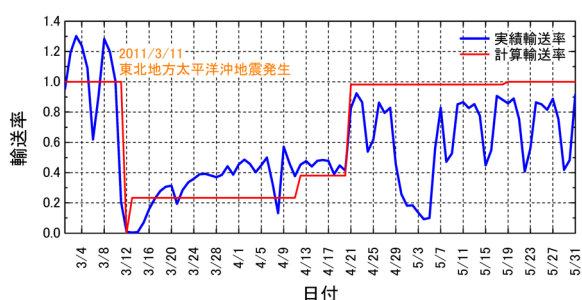


図3 再現計算対象地域内における東北地方太平洋沖地震前後の貨物輸送率の実績および計算

2.3 構造物の復旧性評価データベースの構築と検証

支援システムの入力データの1つは、復旧作業等に要する人的リソース（人・日）である（図2の入力②）。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、地震被害の復旧を扱うためには様々な地震被害の復旧に対する人的リソース等のデータベースを構築し

ておくことが有効である。本研究では、地点毎に発生が予想される地震動の評価や応答値評価から判断される構造物の損傷状態、復旧方法の組合せから、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た³⁾。

地震時における鉄道の輸送機能の復旧性や事業継続性を評価するための手法は各種提案されている。しかし従来の手法は、復旧に要する日数を過去の被災地震における復旧事例に基づいて統計的に決めているものが多いため、地点依存の地震動評価や個別構造物の地震応答解析等の地震被害予測計算をどれだけ精緻に行っても、それらの結果を復旧性の評価に反映することができない。

そこで、被害予測計算により得られる個別構造物の被害過程に応じて、復旧に必要な人的リソースや日数等の情報をきめ細やかに評価できる方法を開発した。復旧性評価データベースを作成するにあたっては、対象とする構造種別・部材を整理し、想定される損傷内容に対して鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計⁴⁾に示される各構造物で想定される損傷レベルの内容と対応した具体的な損傷状態を設定している。なお、いずれの構造種別・部材も、最終的な損傷状態は新設、取替えを必要とする致命的な損傷となっている。またデータベースの構築にあたっての積算については、単価表^{例えは5)}や施工実績に基づいて実施した。

1995年兵庫県南部地震の被災路線を対象に、路線全体の路線延長復旧率(=復旧した路線延長/対象路線延長)を評価した事例を図4に示す。約20kmの延長を有する路線に対して路線延長復旧率を推定し、その結果が概ね被災事例と整合することを確認した。構築した復旧性評価データベースを活用することにより、支援システムへの入力に向けて実態に即した復旧リソース(図2の入力②)を算定できると考える。

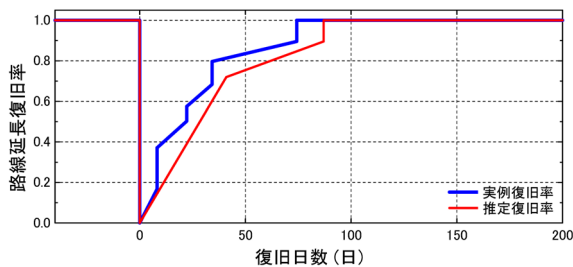


図4 路線の復旧過程に関する事例と推定の比較

3. ネットワークを考慮した対策効果の評価

地震時における鉄道構造物の被災以外でも、列車運転規制を発令して列車の運行が停止となる場合、図1の通り鉄道ネットワークの輸送量は一旦低下し、その後の復旧作業や点検後の運転再開等によりその輸送量が回復し

ていく。本章では、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に代表されるハード対策や早期地震警報に代表されるソフト対策等の実施効果を定量的に評価し、その適用性を検討する。

3.1 評価の手順および条件設定

支援システムによる地震対策効果の評価に向けて、はじめに図2の通り、鉄道ネットワークの設定として路線(区間・駅)、地盤、構造物および列車本数を定める。ここで、構造物の特性は標準的な値を与えている。本研究では、支援システムの利用性の検討に向けて図5に示す仮定の鉄道ネットワークを対象とする。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する。そして、事前にデータベース化した各損傷レベルに対応する復旧日数や復旧人工を用いて各区間で復旧に要する人的リソース(人・日)を求め、支援システムに入力する。次に、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、対策効果を相対的に評価する。

本研究の検討は、図5の仮想鉄道ネットワークが関東平野内にあると仮定して地盤条件(表層地盤による地震動の増幅特性)を設定した。次に、地震動は想定首都直下地震の1つである東京湾北部地震(M_j 7.3)を想定して算出した。地震動は地盤特性を考慮し、気象庁緊急地震速報の震度予測式⁶⁾によって求めた。算出された地震動(計測震度)の面的分布は図6に示す通りであり、AC駅からA駅間では計測震度6.5以上となっている。構造物の損傷レベルについて、高架橋は文献7,8の手法、

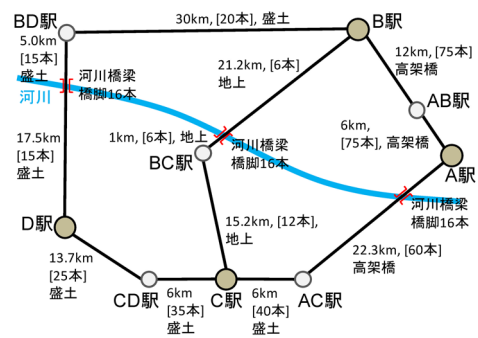


図5 対象の仮想鉄道ネットワーク([]は列車本数)

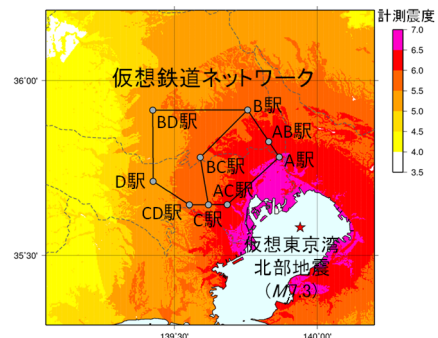


図6 地震動(計測震度)の設定

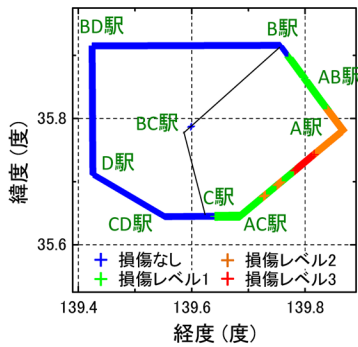


図7 構造物被害（損傷レベル）の設定

盛土は文献9の手法に基づき算出した。高架橋の損傷は応答塑性率により4段階、盛土の損傷は沈下量により3段階にランク分けした。その結果、構造物の損傷レベルは、図7の通り強い揺れが設定されたB駅からAC駅間の河川橋梁と高架橋で損傷レベル1から3、AC駅からC駅間の盛土で損傷レベル1となった。なお、ここでは耐震補強をしていない状況の被害を想定している。

本章の解釈では、ネットワークの各駅を結ぶ区間ごとに復旧リソース（図2の入力②）を設定して、各地震対策に対する輸送率の回復過程を算出する。対策効果の評価は、輸送率回復過程を相対的に比較することにより行うものとする。

3.2 耐震補強実施（ハード対策）評価への適用

ここでは、区間ごとの耐震補強の実施効果の評価する。仮想地震において、耐震補強未実施の場合には図7の通り、主に区間B駅からAC駅間で被害が生じる。本研究では、耐震補強を実施した場合には被害が生じないと仮定し耐震補強の効果を評価する。すなわち、耐震補強未実施の場合は被災区間において復旧リソースを入力するが、耐震補強を実施した場合はその区間の復旧リソースの入力値を0とする。想定した被害に対し、2.3節の復旧性評価データベースを用いて、復旧に要するリソース（人・日）を算出する。支援システムにより耐震補強を未実施の場合や、区間ごとに耐震補強を実施した場合の輸送率回復過程を求め、その値を比較することにより耐震補強の実施の効果を定量的に把握することができる。

入力した復旧リソースを表1、輸送率回復過程の計算結果を図8に示す。表1には図8に示す計算結果から算

表1 ハード対策評価におけるリソースの設定例

駅名1	駅名2	復旧リソース(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	795	0	795	795	795
AB	B	392.5	392.5	0	392.5	392.5
C	AC	1200	1200	1200	0	1200
AC	A	11065	11065	11065	11065	0
累積損失輸送率		3.50	2.70	3.03	3.30	1.28

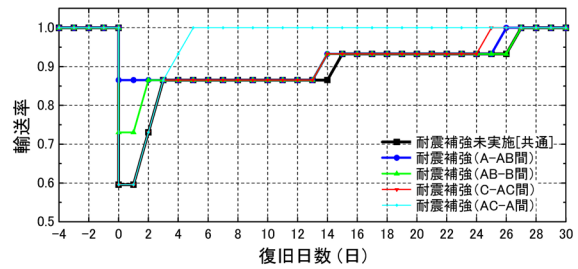


図8 耐震補強実施に対する輸送率回復過程

出される累積損失輸送率を併せて記す。ここで、累積損失輸送率は、災害発生から復旧までの損失輸送率(=1-輸送率)の積分値として定義する。表1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。すなわち、鉄道ネットワークにおける累積損失輸送率の最小化の観点から、耐震補強の実施においてAC駅からA駅間の補強は最も効果が高いと言える。本節の適用性検討の結果、耐震補強実施（ハード対策）の効果を支援システムにより定量的に把握できると考える。

3.3 早期地震警報導入（ソフト対策）評価への適用

次に、早期地震警報^{例えば10)}の導入により列車が早期に停止し脱線を防止できたと仮定して、早期地震警報導入の効果を評価する。地震動の設定は、AC駅からA駅間が最も強い地震動が作用することから、ここでは当該の区間において走行車両の脱線が生じたとする条件を与える。構造物被害の条件は3.2節と同一とする。脱線が生じない場合、その脱線車両に対する対応が不要となるため、より早く復旧工事に取り掛かることができる。この脱線車両対応をリソースで与えることにより、早期地震警報導入の有無（脱線の有無）に対する輸送率回復過程を求めた。算出された輸送率回復過程を図9に示す。なお、脱線した車両に対する対応リソース（1000人・日とした）の正確な設定値については議論があるものの、支援システムの利用性を検討する目的から、ここでは入力リソースは所与のものとして扱う。図9によると、早期地震警報の導入により遅延なく直ちに復旧作業を開始できるため地震発生から2日目までの輸送率の回復が早く、累積損失輸送率は3.50から3.23に約8%低減している。本節の適用性検討の結果、早期地震警報導入（ソ

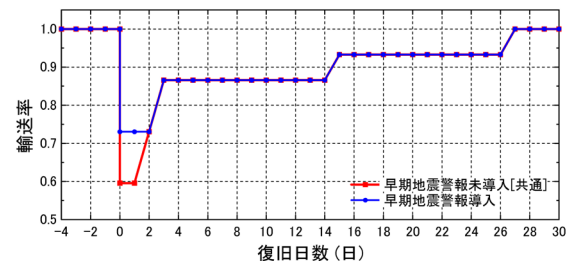


図9 早期地震警報導入に対する輸送率回復過程

フト対策)の効果を支援システムにより定量的に評価できることが示された。

3.4 被災後の復旧人員配分(復旧戦略)評価への適用

本節では復旧戦略として、被災構造物の復旧作業に要するリソースを戦略的に配分することによる効果を定量的に評価する。ここで扱う構造物被害の条件も3.2節と同一とする。本研究における復旧戦略は、ネットワーク全体および各区間に配分できるリソースの上限を設定することにより検討する。各区間のリソースの上限について、各区間とも一律配分とした場合(各区間500人・日)と、被害が大きく列車本数も多いAC駅からA駅間に集中的に配分した場合(AC駅からA駅間1000人・日、その他250人・日)を比較する。なお、全体のリソース上限を1000人・日としている。図10の輸送率回復過程を見ると、地震発生後3日目までは一律配分の方が回復は早い。一方、14日目以降は戦略的配分の方が回復は早くなる。累積損失輸送率は、一律配分(4.18)より戦略的配分(3.91)の方が小さくなる。これより、復旧に対するリソースの配分を判断する際の定量的情報を得ることができる。被害後の復旧工事の計画策定にあたり、支援システムにより列車本数や旅客数の多い重要路線に復旧リソースを集中投入する効果等を定量的に評価できると考える。

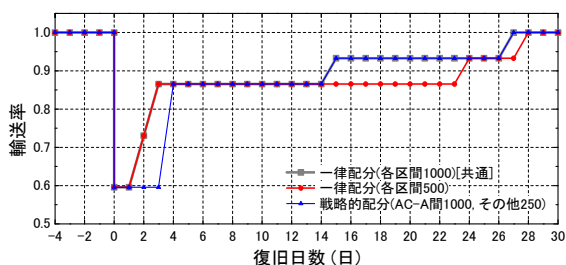


図10 復旧人員配分に対する輸送率回復過程

3.5 各地震対策の一元的な評価

3.2節から3.4節において、ハード対策(耐震補強実施)、ソフト対策(早期地震警報導入)、復旧戦略(被災後の復旧人員配分)の輸送率回復過程を定量的に示した。これらは、投入する人的リソースやその上限の値を設定することにより、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している。よって、各対策の輸送率回復過程は一つの図に併せて表記することが可能であると共に、累積損失輸送率といった同一の指標で相対的な評価が可能となる。ハード対策、ソフト対策、復旧戦略の一元的な評価結果として、図11に輸送率回復過程、図12に累積損失輸送率を示す。また、図12には未対策を基準とする累積損失輸送率比を併せて示す。なお、ここで扱う未対策のリソース上限の値は各区間1000人・日であり、復旧戦略は各区間500人・

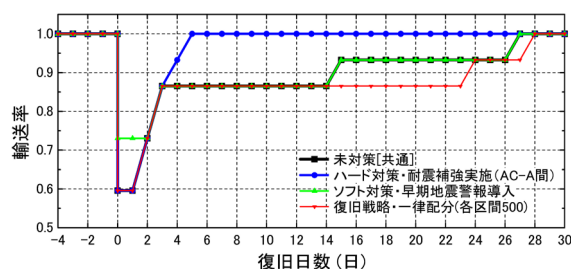


図11 各地震対策における輸送率回復の一元的評価

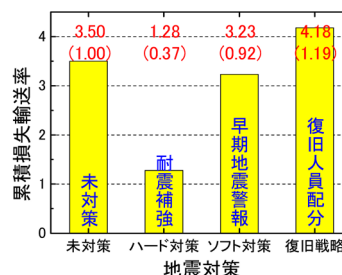


図12 各地震対策の累積損失輸送率

(括弧は未対策を基準とする累積損失輸送率比)

日としていることから、本節の復旧戦略は復旧リソースが不足している状況(リソース不足)を想定している。図12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63%低減し、早期地震警報の導入により8%低減する。これより、本研究で設定した条件においては輸送率の損失に対して耐震補強の効果が大きいことが確認できる。一方、リソース不足により復旧作業に十分なリソースが投入できない場合は損失輸送率が19%大きくなっていることが分かる。

従来の地震対策効果の評価は、ハード対策、ソフト対策、復旧戦略の対策ごとに別々に行われてきた。しかし、本研究で適用した支援システムを用いることにより、ネットワークを対象として一元的な評価が可能となり、事前対策の投資計画や事後復旧の計画策定の意思決定支援に使用できる可能性がある。

4. 構造物の危機耐性の評価への適用

未経験地震による想定を超えた被害に備えるために、構造物の危機耐性を考慮することが提案¹¹⁾されている。鉄道総研は、構造物の危機耐性の性能評価法を提案¹²⁾しており、具体的には危機耐性 R を、鉄道において起きてはならない事態の影響度 C_i と、起きてはならない事態に対する構造物の回避能力 P_i の積により式(1)で算定している。

$$R = \sum_{i=1}^m C_i \cdot P_i(r_j) \quad (1)$$

構造物の回避能力 P_i は、危機耐性を表現する性能指

標の達成度 r_j に関して示される。鉄道総研は、性能指標として図 13 の 6 つの性能指標の達成度を提案しており、この中には復旧性（ネットワーク） r_6 が含まれる。本研究はネットワークの損失輸送率に着目した支援システムの出力結果である輸送率回復過程に基づき、累積損失輸送率を用いて式(2)により r_6 を 0 から 1 の範囲で算定する。

$$r_6 = 1 - \frac{\text{対象区間損傷時の累積損失輸送率}}{\text{ネットワーク全区間損傷時の累積損失輸送率}} \quad (2)$$

本章では、3章で設定した鉄道ネットワークや構造物被害条件を対象として r_6 の評価に支援システムを適用した例を示す。全区間および各区間の被害復旧までの輸送率回復過程を図 14 に示す。なお、 r_6 は累積損失輸送率が少ないほど 1 に近づき、多いほど 0 に近づく指標である。検討の結果、この値が最も小さくなっている区間は C 駅から AC 駅間となった。よって、対象構造物のネットワークを考慮した復旧性を向上させるためには、C 駅から AC 駅間の構造物に対して対策を行うのが最も効果が高いことが分かる。支援システムを用いた r_6 の算出により、鉄道構造物の危機耐性の定量評価の信頼性を高めることができると考える。

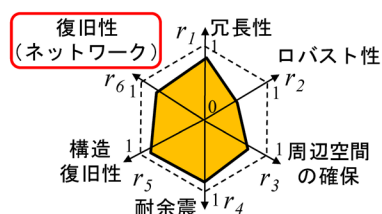


図 13 危機耐性の性能指標の達成度 r_j

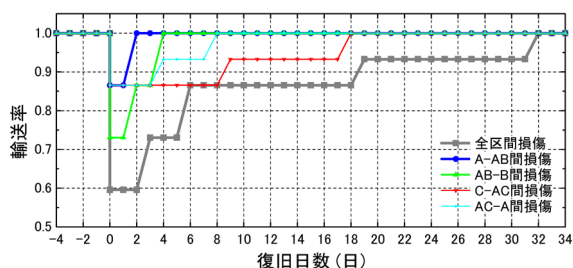


図 14 r_6 評価に対する輸送率回復過程

5. おわりに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の後、構造物等について壊滅的な被害を回避すると共にしなやかな回復力を実現する「レジリエンス」という概念が広まってきた。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、限られた資源の中でハード対策（例えば耐震補強実施）、ソフト対策（例えば早期地震警報導入）、復旧戦略（例えば復旧人員配分）のバランスを取

ることが重要である共に、鉄道ネットワーク全体の輸送量の確保も重要となる。

本研究では、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適用性を確認した。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、地震時における鉄道のレジリエンスの向上に向けて戦略的な対策実施を支援できると考える。

文献

- 1) 山本俊六：鉄道の地震レジリエンスを高める研究開発，RRR, Vol.77, No.2, 2020
- 2) 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，第34巻，第2号，pp.5-10, 2020
- 3) 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
- 4) 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) 神奈川県土木整備局：平成30年度土木工事資材等単価表平成30年4月（設定），2018
- 6) 気象庁資料：緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料，<https://www.data.jma.go.jp/svd/cew/data/nc/katsuyou/reference.pdf>（参照2020年10月1日）
- 7) 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
- 8) 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），pp.I_32-I_39, 2015
- 9) 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
- 10) 芦谷公稔，佐藤新二，岩田直泰，是永将宏，中村洋光：鉄道の地震警報システムにおける緊急地震速報の活用，物理探査，第60巻，第5号，pp.387-397, 2007
- 11) 室野剛隆：巨大地震に備えるー鉄道の耐震設計と危機耐性ー，土木学会誌，Vol.100, No.7, pp.24-27, 2015
- 12) 室野剛隆，田中浩平，齊藤正人，坂井公俊，豊岡亮洋：鉄道構造物の耐震設計における危機耐性の定量評価法の提案，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.75, No.3, pp.336-349, 2019