

レジリエンス概念を導入した 災害時の道路啓開評価

田中 敦也¹・柳沼 秀樹²・杉浦 聡志³・力石 真⁴・寺部 慎太郎⁵・海野 遥香⁶・
鈴木 雄⁷

¹学生非会員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: 7622524@ed.tus.ac.jp

²正会員 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: yaginuma@rs.tus.ac.jp

³正会員 北海道大大学院 工学院北方圏環境政策工学専攻 (〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: sugiura@eng.hokudai.ac.jp

⁴正会員 広島大学大学院 先進理工系科学研究科 (〒 739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)

E-mail: chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp

⁵正会員 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: terabe@rs.tus.ac.jp

⁶正会員 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: unoharuka@rs.tus.ac.jp

⁷正会員 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: yusuzuki@rs.tus.ac.jp

災害時に速やかに道路ネットワークを復旧させることは、避難や緊急車両の通行、物資・資材の輸送の観点で重要である。東日本大震災では、早急に最低限の瓦礫処理を行うことで救援・輸送ルートを確認する「道路啓開」の重要性が示され、現在では全国各地で道路啓開計画が立案されている。しかしながら、現状では啓開計画の有効性を定量的に評価する手法は存在していない。本研究では、杉浦らが提案したレジリエンス評価手法を下敷きとして、首都直下地震を想定した道路啓開評価を試みた。具体的には、国土交通省が運用している「道路の防災機能評価手法」における累積脆弱度を性能指標として、複数の啓開戦略による復旧過程を記述した。これにより、実務における啓開計画の検討に資することが期待される。

Key Words: *Transportation Network Resilience, Vulnerability, Disaster Prevention Function Assessment*

1. はじめに

災害時において、道路ネットワークを少しでも早く元通りにすることは非常に重要である。道路を使えるようになることで、ガレキの処分や現地の救急対応、被災者への生活必需品の輸送、応急復旧や復興のための資材搬入が可能になるためである。とりわけ人命救助の観点では、「72時間の壁」と称されるように、被災地への短期間でのルート確保が強く求められている。実際に、2011年3月11日の東日本大震災に対する災害復旧の道路施策では、国土交通省東北地方整備局を主導に行われた「くしの歯作戦」と呼ばれる啓開戦略が強い効果を発揮した。この戦略は、主軸となる東北自動車道と国道4号線、内陸部と沿岸部を結ぶ各道路、沿岸部の各都市同士を結ぶ道路の順に啓開を実施するというものであった。この結果、震災から1週間で全体の97%の道路が利用可能となる効果を上げた。¹⁾このことから、早急に最低限の瓦礫処理を行うことで救援・輸送ルートを確認することの重要性が広く知られ

るようになった。この教訓をもとに、現在は国土交通省の各地方整備局や一部の都道府県、市町村にて啓開のマニュアルが用意され、災害時にはそれに則り道路施策を展開するとしている。²⁾

しかし、道路ネットワークが完全に復旧するまでの間にどのように機能が変化したのかの定量化は、現時点でできていない。そのため、現況では実際に災害時に啓開戦略が適用された場合において、後にそれが適切であったかを判断することができない。また、各都道府県や市町村で啓開戦略が検討されても、それが実用に資するかの判断の裏付けは満足にできていない。

そこで本研究では、交通機能を縦軸、時系列を横軸とした二次元的なレジリエンスによる災害時の交通機能の評価を用いることにより、啓開の評価を実施することを試みる。時間経過による啓開戦略の効果を数値として示すことが可能となることで、視覚的に回復過程を認識することができるようになる。また、回復過程から面積を算出することにより、複数の戦略を定量的に比較することが可能となることが期待される。

2. 既往研究のレビューと本研究の位置づけ

災害時の機能低下をレジリエンスの形で定式化する研究は、過去に複数の研究が存在する。林 (2016)³⁾ は、レジリエンスの向上を機能被害と復旧時間で表すことができる三角形の面積を小さくすることとしている。また、ハザード (理学)、曝露量 (都市計画)、脆弱性 (土木建築構造) の 3 変数で表される「被害」に加え、人間活動と時間の計 5 種類の変数で定義される関数であるとした。このうち、被害を表す 3 変数は「予防力」、残り 2 変数を「回復力」として定義し、特に後者に着目することで、社会現象として災害を捉える式として表そうとした。塩崎ら (2015)⁴⁾ は、システムの安定性を「頑健性」と「回復力」で表し、特に後者について、回復可能な水準を回復にかかる時間と回復速度によって表現している。ここで、回復速度は被災から回復可能な水準に至るまでの直線の傾きとして表現している。一方で杉浦ら (2021)⁵⁾ は、特に機能について交通ネットワークを対象とし、災害時のレジリエンスの回復過程の表現を試みている。また、施策による機能損失の軽減についての表現を実施している。

しかしながら、いずれの場合についても、縦軸となる機能についての具体的な指標は示されていない。そのため、具体的な計算を実施し、定量的に評価することが困難であるのが現状である。本研究では、縦軸に脆弱度と呼ばれる定量的に算出可能な指標を用いて、災害時における啓開による交通ネットワークの回復過程の記述を具体的な数値として出力する点において新規性を有している。

3. 災害時の道路啓開に関するレジリエンス評価手法

(1) 手法の概要

本研究では、杉浦ら (2021)⁵⁾ の研究を下敷きとし、交通ネットワークにおけるレジリエンス概念の定量化を実施する。そのため、まずは同論文に則り、レジリエンスを定量的に表すのに必要な要素を改めて整理する。

交通ネットワークにおけるリンクの集合を A 、ノードの集合を N 、ネットワークを $G(N, A)$ とする。そして、このネットワーク G に OD ペア $w \in W$ が存在し、その交通量を $d_w \in D$ で表す。また、あるハザードによる交通ネットワークへの異常発生を、各リンクの性能低下の組み合わせとして $s \in S$ で表す。このとき、交通需要は日常から大きく乖離することが考えられることから、シナリオに依存する値であると仮定して $D(s)$ と置くことができる。ここで、すべてのリンクについて機能の低下が生じないシナリオ、つまり平時を表す

シナリオは $s = 0$ として表すことができる。

さて、ネットワークの供給能力や需要を考慮した道路システムの状態を表す指標を総称し、Effective Network Functionality (以下、ENF) と呼ぶ。サフィックスを θ とする、ある 1 つの ENF 指標を計測する関数を $f_\theta(\cdot)$ とすると、ENF 指標を定量的に評価した値は以下のように表される。

$$\omega_\theta(s) = f_\theta(G(N(s), A(s)), D(s)) \quad (1)$$

このとき、ネットワークが平時から変化しないシナリオは $s=0$ の場合として表すことができることから、災害発生による変化量は $\omega_\theta(s) - \omega_\theta(0)$ で表される。

また、ネットワークに含まれるリンク集合 A とノード集合 N 、交通需要 D は時間により刻々と変化する。そのため、これらの値は発災時間を t_0 、リンクの状態が完全に復旧した時刻を t_s として、 $t_0 \leq t \leq t_s$ において時間 t の関数として表すことができる。さらに、これらの値は災害時の交通ネットワークを復旧させる戦略 $k \in K$ にも依存する。この戦略 k は、復旧に用いるリソース r により $k(r)$ と表すことができ、リンク集合 A とノード集合 N 、交通需要 D は $k(r)$ の関数であるとする。これらをもとに、式 (1) を時間 t と戦略 $k(r)$ で拡張した式を以下に示す (式 (2))。この結果を各時間についてプロットし線で結ぶと、**図-1** の黒線で表される。

$$\omega_\theta(s, t, k(r)) = f_\theta(G(N(s, t, k(r)), A(s, t, k(r))), D(s, t, k(r))) \quad (2)$$

さらに、式 (2) について時間 $t_0 \leq t \leq t_s$ で積分すると、災害による ENF の機能低下量の時系列に関する積分量 $\zeta_{s, k(r)}^\theta$ を算出することができる。これにより、ある災害による発災から復旧に至るまでの機能低下量を定量的な値として表現することができる。この積分量は式 (3) で表され、**図-1** における灰色で塗られている箇所に対応する。

$$\zeta_{s, k(r)}^\theta = \int_{t_0}^{t_s} \omega_\theta(0, t, k(r)) - \omega_\theta(s, t, k(r)) dt \quad (3)$$

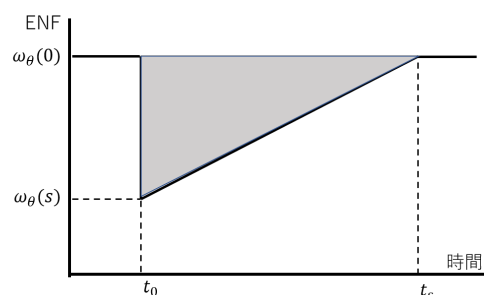


図-1 道路機能の低下および復旧の時間推移

(2) 脆弱度と ENF 指標

本研究では ENF 指標の具体的な数値として、検討するネットワーク内に存在する各 OD ペアの累積脆弱度を用いる。脆弱度とは、国土交通省における「道路の防災機能評価手法」において定義された、ある OD ペアの平時の期待所要時間と災害時の期待所要時間から算出される無次元量である。⁶⁾⁷⁾⁸⁾ 脆弱度は 0 以上 1 以下の値を取り、この値が 0 に近づくほど、その OD ペアを平時と同じ所要時間で通行できることを表す。逆に脆弱度が 1 に近づくほど、その OD ペアを通行するのに普段よりも所要時間が多くかかることを表す。そして脆弱度の値が 1 の場合は、その OD ペアが寸断されていることを表す。ENF 指標として用いる累積脆弱度は、上記で得られた各 OD ペアごとの脆弱度を、ネットワーク内における全 OD ペアについて足し合わせるにより算出する。

以下では、あるシナリオ s 、ある時間 t の復旧戦略 $k(r)$ における、ネットワーク内のある OD ペア w の脆弱度 $z_w(s, t, k(r))$ の算出方法を述べる。まず、その OD の平時の期待所要時間 S_w^o を算出する。次に、災害時のシナリオ s の復旧戦略 $k(r)$ による、時間 $t | t_0 \leq t \leq t_s$ における OD ペア w の期待所要時間 $S_w^h(s, t, k(r))$ を算出する。そして、算出した平時と災害時の期待所要時間の値を用いることにより、以下の式 (4) によって各 OD ペアの脆弱度を算出することができる。

$$z_w(s, t, k(r)) = 1 - \frac{S_w^o}{S_w^h(s, t, k(r))} \quad (4)$$

ENF 指標となる累積脆弱度は、式 (4) を各 OD について足し合わせたものとなる。あるシナリオ s のある時間 t における、復旧戦略 $k(r)$ による累積脆弱度 $Z(s, t, k(r))$ を表す式を以下に示す。

$$Z(s, t, k(r)) = \sum_w z_w(s, t, k(r)) \quad (5)$$

これにより、ある時間 t の復旧戦略 $k(r)$ における累積脆弱度として、ENF 指標を具体的な計算できる形で定義することができる。

累積脆弱度は、各 OD ペアの脆弱度の値を介して、ネットワーク G とそれに含まれるノード集合 N 、リンク集合 A の情報が含まれる。さらに、リンク集合 A の状態を通じて、交通需要 D の情報が含まれる。これらに加え、シナリオ s や復旧戦略 $k(r)$ の情報も含まれることから、累積脆弱度は上記で示した ENF 指標の要件を満たしており、有用であるといえる。また数値としての累積脆弱度の解釈は、以下の通りである。各 OD ペアについて算出される脆弱度は 0 以上 1 以下の数値で表されることから、それを各 OD について足し合わせた累積脆弱度は必ず 0 以上の値を取る。そして値が 0 に近いほど、平時に対する機能低下が小さいことを表す。面積として災害による発災から完全に復旧するまでの

機能低下量を評価する際には、面積の値が小さいほど、災害における機能低下量が小さいことになる。このことは、直感的に災害による機能低下量の認識や、複数戦略による機能低下量の大小関係の比較が可能であることを表している。

(3) 道路啓開による復旧過程

以下では、回復過程にて実施される啓開の際の道路ネットワークにおけるリンクの扱いについて述べる。本研究では、リンクには不通、応急復旧、平常の 3 段階の状態があるとして扱う。そして、時間経過による啓開の実施により、各リンクごとに状態が変化するものとして計算を実施する。平時と災害時のみならず、応急復旧の状態も検討に含めるのは、大規模災害時には不通の状態から段階を踏まず平時に戻るとは考えにくく、その状態を表現する必要があると考えたためである。

具体的な状態遷移は以下の通りである。あるネットワークで災害が発生すると、被害が想定されるエリア内のリンクが使えなくなる (不通)。この状態から、時間経過による啓開の進行より、最低限の資材や人員が移動できる状態でリンクが再開通する (応急復旧)。さらに応急復旧の状態から一定時間を経て、リンクは支障なく利用できる平時の状態に復旧する (平常)。

本研究では、この状態毎に各リンクにおける移動速度 v を決定する。移動速度は、各リンク長に対して除することにより、各リンクの所要時間算出に用いる。この結果をもとに、各 OD ペアについてダイクストラ法を用いた最短経路探索を実施することで、OD ペアの所要時間を算出し、脆弱度と累積脆弱度を算出する。条件と速度を整理した表を掲載する (表-1)。

啓開の進行については、以下の通りである。本研究では各 OD ペアについて、被害の小さい方から大きい方へと進行するものとして計算を実施する。そして、啓開が終了したリンクから順に、応急復旧の状態を経由して平時のリンク状態へ回復する。ここでは簡略化のため、リンクの種類にかかわらず、すべてのリンクについて同じ速度で啓開が進行するものと仮定して計算を実施する。

表-1 リンク状態と移動速度

リンク状態	移動速度
不通	0
平時	法定速度 (リンクごとに設定)
応急復旧	法定速度の半分 (リンクごとに設定)

4. 首都直下地震を想定したケーススタディ分析

(1) エリア選定の背景

内閣府によると、首都直下地震では一都三県を中心に、地震の揺れによる家屋の倒壊と市街地火災により、約 610,000 棟の家屋が倒壊・焼失、最大約 23,000 人の死者が出ることが想定されている。⁹⁾ 経済的被害も甚大で、直接被害で約 47 兆円、生産やサービス低下の被害が約 48 兆円に及ぶことが想定されている。この被害の外周部は東京外環自動車道に沿うように広がっており、その内側で家屋の倒壊や火災による甚大な被害の発生が予想されている。本研究では、この災害からの復旧における啓開戦略による発災から完全復旧に至るまでの交通ネットワークの機能の回復過程の記述を試みる。さらに、複数の啓開戦略を用いて回復過程の記述を実施し、それらの定量化した結果を比較する。これにより、啓開に関する知見を得ることを目標とする。

(2) 道路ネットワークの設定

用いるネットワークは、赤太線で示される東京外環自動車道、黒点線で示される一般道の環状部(大泉～高井戸～用賀～羽田)、ならびにこれらの環状道路の内側にある、緑線で示される首都高速道路各線で構成されるネットワークである(図-2)。ただし、中心と外周部とを結ぶ道路とそれに関連するリンクを有するネットワークに限定している。そのため、東京高速道路(汐留～西銀座～京橋)、首都高速八重洲線(西銀座～神田橋)、及び盲腸線となる首都高速道路の路線のリンクは検討のネットワークに含めない。計算対象とする OD ペアについては、東京駅の最寄りとなる宝町出入口ならびに京橋出入口を起点 O、検討するネットワーク外縁部に位置している 8 箇所のジャンクション・インターチェンジを終点 D とした、計 8 ペアを対象として計算を実施する(表-2)。

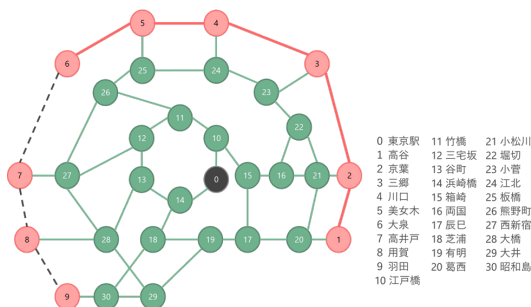


図-2 啓開戦略の設定

表-2 計算対象の OD ペア

OD ペア番号	起点	終点
A	東京(宝町/京橋)	羽田出入口
B	東京(宝町/京橋)	用賀出入口
C	東京(宝町/京橋)	高井戸出入口
D	東京(宝町/京橋)	大泉 JCT
E	東京(宝町/京橋)	川口 JCT
F	東京(宝町/京橋)	三郷 JCT
G	東京(宝町/京橋)	京葉 JCT
H	東京(宝町/京橋)	高谷 JCT

(3) 検討するケース

本研究では啓開戦略の効果の定量化に加え、これを利用して複数の啓開戦略の比較検討を実施する。ここでは、以下の3つの観点について、全7ケースで比較検討を実施する。今回比較検討を行う項目を表-3に示す。

a) 啓開の分散と集中(ケース番号 1, 2, 3, 4)

計算対象とするネットワークについては8つの OD ペアがあり、それに対応するようにして8方向の啓開を実施する。この際に、啓開を1方向に集中して啓開する戦略(ケース1)と、複数方向について同時に実施する戦略とを比較する。後者についても、2方向、4方向、8方向のそれぞれについてケース2、ケース3、ケース4として同時に啓開する戦略を比較する。ここで、方向の数を問わずネットワーク全体の単位時間あたりの啓開できる距離は一定であるとする。具体的には、各リンク啓開速度は(啓開対象の全リンク総延長)/(72時間)で表される。ここで、分母を72時間としたのは、ネットワーク内のすべてのリンクを72時間以内に啓開する方針に基づき設定したものである。そして、この距離を啓開する方向で除することで、1方向あたりの単位時間あたりの啓開する距離(km/h)を算出し、計算に用いる。

b) 啓開の順序の選び方(ケース番号 1, 5)

本研究では、以下の方針に基づいた啓開戦略を基本として、啓開の実施と評価を実施する。まず、ODペアのうち未開通のリンクを、上記で示した方面数だけ選んで啓開を実施する。次に、残っている啓開候補の OD ペアについて、脆弱度が高い値を示している OD ペアを対象に啓開を実施する。これを繰り返すうちに、対象とする8ペアすべての啓開開始・終了をもって選定を終了する。

表-3 検討するケース

ケース	方向数	順序	応急復旧時間
1	1 方向	基本	24 時間
2	2 方向	基本	24 時間
3	4 方向	基本	24 時間
4	8 方向	基本	24 時間
5	1 方向	震災	24 時間
6	1 方向	基本	12 時間
7	1 方向	基本	36 時間

一方で、東日本大震災の際の首都高速道路の復旧順序をもとにした啓開戦略についても、ケース 5 として計算を実施する。この啓開戦略は、表-2 における OD ペアの番号 A から H の順、つまり図-2 における左下のルートから時計回りで 1 方面ずつ啓開を進めるものである。ここで、東日本大震災が発災した 2011 年から 2022 年現在に至るまでの間に新たに高速道路リンクが開通していることから、ネットワークが完全に同一のものではないことに注意が必要である。そして、上記で示した基本となる啓開戦略(ケース 1)との比較検討を実施する。

c) 応急復旧状態の継続時間(ケース番号 1, 6, 7)

各リンクは、先述したように啓開後はすぐには平時の状態に復旧せず、一定時間の応急復旧状態を挟んでから平時に回復するとしている。この応急復旧状態がどのくらいの時間で継続するのについても、本検討では比較の題材とする。

具体的には、啓開完了から 24 時間後に平時に復旧する状態(ケース 1)を基準とし、12 時間後と 36 時間後に平時に戻る状態の 2 つをそれぞれケース 6, ケース 7 として計 3 状態を比較する。

(4) 分析結果の整理方法

分析結果は、横軸に時間(時間:h)、縦軸に ENF 指標となる 8 つの OD ペアの累積脆弱度(-)で表す。ここで、時間による ENF 指標の変化は 1 時間刻みとし、発災から完全に復旧するまでの機能低下量を表す面積は 1 時間と機能の値で求まる矩形の連続量に近似して計算を実施する。また、横軸と縦軸の単位から、この面積は (h) で表される。

(5) 啓開による機能回復過程の定量化と考察

ケース 1 について、啓開による機能の発災から完全に復旧するまでの時間経過による変化をグラフ化したものを、図-3 に示す。

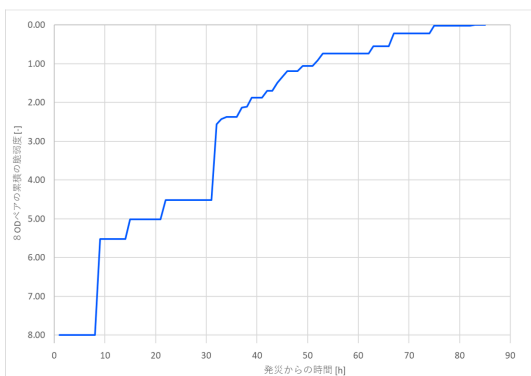


図-3 ケース 1 (1 方向啓開, 基本, 応急復旧状態 24 時間)

累積脆弱度は 8 つの OD ペアを対象としているため、最大値は 8, 最小値は 0 である。図-3 の縦軸には ENF 指標とした累積脆弱度(-)が下向きに正として、横軸には時間(h)として出力されている。そのため、時間経過で累積脆弱度の値が小さくなると、プロットはグラフ右上に移動する。そして約 80 時間後には、平時の状態に完全に回復していることがわかる。

グラフを見ると、すべての時間において一様に機能が回復しておらず、時間によって回復量に幅があることがわかる。例えば、発災から 10 時間後と 30 時間後には機能が大きく改善している一方で、30 時間からは回復量が鈍化していることがわかる。これは、OD ペアが全く通行できない状態から仮復旧ながら通行できる状態に至るまでと比べ、仮復旧から平時に戻るまでの間の各 OD ペアの脆弱度の値の変化が小さいことに起因すると考えられる。

また、グラフよりも左上にあたる面積が、発災から完全復旧までの機能損失量に相当する。この面積を計算すると 224.5 時間となり、1OD ペアあたりに換算すると約 30 時間の機能損失が発生していることになる。

(6) ケース別の分析結果の比較と考察

以下では、比較した各観点についての考察を実施する。まず、各ケースにおける、発災から完全に回復するまでの日数(日)と面積(h)の結果を表-4 に整理する。

a) 啓開の集中と分散による結果

4 つのケースによる比較図を図-4 に示す。

表-4 計算結果のアウトプット

ケース	完全回復までの時間	面積
1	83	224.5
2	77	222.9
3	75	270.5
4	85	398.3
5	83	299.2
6	71	171.1
7	95	277.0

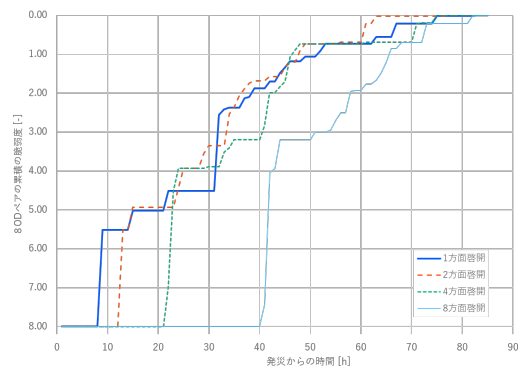


図-4 啓開の集中と分散による比較(ケース 1, 2, 3, 4)

1 方向に集中して啓開を実施するケース 1 と、2 方向を同時に啓開するケース 2 がほぼ同じ面積の値で、最も発災から完全復旧までの機能損失が小さくなった。次に 4 方向を同時に啓開するケース 3 が大きく、8 方向を同時に啓開するケース 4 が最も発災から完全復旧までの機能損失が大きくなった。この結果は、発災から同時に啓開する方面が増えれば増えるほどグラフ上で面積が大きくなり、機能損失が増加することを意味する。このことから、啓開は方面を限定して啓開を進める方が、機能損失が小さくなり効果的であることがわかった。この要因として、OD ペアが未開通の場合とそうでない場合、たとえ応急処置状態の場合でも大幅に脆弱度の改善があることで、1 ペアでも早く応急処置状態で開通させることが望ましい状態となっているためと推察した。

b) 啓開順序による結果の比較

ケース 1 とケース 5 の比較図を図-5 に示す。

施策の観点からは、ケース 1 とケース 5 ともに 1 方向に集中して啓開を実施している点で同じである。ところが、2 つの施策は実際のネットワークにおける啓開の順序が異なる。この結果、発災から完全に復旧するまでの機能低下量を表す面積の値は、ケース 1 の 224.5 時間に対しケース 5 では 299.2 時間と、2 つのケースで 70 時間以上も差が生じた。このことから、似たような戦略をとった場合でも啓開順序が異なると、最終的な面積の値が異なることがわかった。この要因としては、ケース 1 の方がケース 5 に比べ早期に累積脆弱度の値が大きく下がっていることが要因に挙げられる。具体的には、ケース 5 では発災から 20 時間後に大きく低下しているのに対し、ケース 1 では 10 時間後に大きく低下している。これを踏まえ、発災から 10 時間後から 20 時間後までの 10 時間の面積の増分を比較すると、ケース 1 では面積が 52.2 時間増加しているのに対し、ケース 5 では 71.5 時間も面積が増加している。

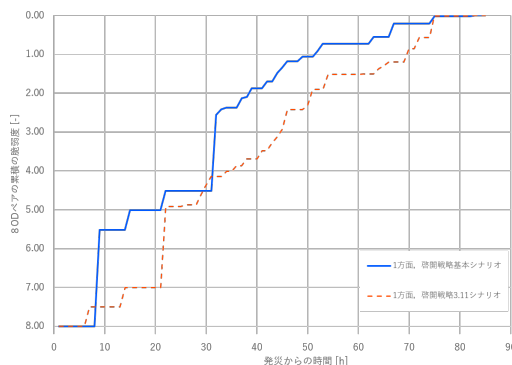


図-5 啓開順序による比較(ケース 1, 5)

c) 応急復旧時間の継続時間による結果の比較

ケース 1 とケース 6, ケース 7 の比較図を図-6 に示す。

ケース 1, ケース 6, ケース 7 ともに、方向数と順序は同じで、応急復旧の状態が継続する時間のみが異なる。そのため、8 つある OD ペアのうち、最初の OD が開通して応急復旧時間が経過するまでは同じ経過をたどる。その後は、応急復旧の状態の継続時間が短ければ短いほど、機能の回復はより早くなり、完全復旧に要する時間も短くなっている。その結果として、機能低下量を表す発災から完全に復旧するまでの面積の値も小さくなると推察される。

5. おわりに

本研究では、啓開戦略の定量化を実例も含めて実施し、啓開戦略をレジリエンスの形で定量化することは十分に可能であることを示した。特に、同じ状況下からの機能の回復過程が戦略により大きく異なる点は、啓開の戦略を最適化することで災害による機能損失の面積を最小化することで被害の最小化に務めることができるポテンシャルを有しており、特筆すべきものであろう。

一方で、本研究における限界点としては、以下の点が挙げられる。まず、交通量による所要時間の増加反映の根拠が不十分であることが挙げられる。本研究では平時の半分の所要時間になると仮定して設定しているが、実際には移動の自粛による交通量減少により所要時間の増加量が小さくなる可能性がある。逆に、啓開したばかりのリンクに交通が集中し、所要時間が逆に大幅に増大してしまうことも考えられる。これを検討するためには、移動速度の算出において、リンク状態によるリンクのキャパシティならびに予想される通過交通量からの移動速度、所要時間の算出が必要になるように考えられる。また、啓開直後の各リンクにおける応急復旧の状態がどのくらい持続するのかについて

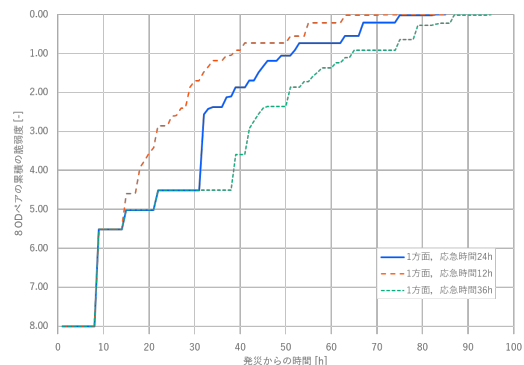


図-6 応急復旧時間の継続時間による比較(ケース 1, 6, 7)

も疑問が残る。本研究では 24 時間を基準として 12 時間と 36 時間の場合とで比較検討を実施した。しかし実際には、リンクごとに復旧時間がまちまちであることが予想される。

今後の展望としては、特定の道路ネットワークの状態における啓開の最適化が可能になると考えられる。具体的には、啓開手順について機械学習を実施することで、レジリエンス評価でアウトプットされた、機能損失量である面積の値を最小にする啓開方策の検討が可能になると考えられる。啓開戦略の最適化により、発災後の啓開実施を最適化することができるほか、災害を想定した啓開計画の検討の段階においてもより最適とされる啓開戦略の提案を、具体的な機能低下量の数値とともに示すことが可能になると期待される。

参考文献

- 1) 国土交通省 東北地方整備局: 震災伝承館 啓開「くしの歯」作戦, <https://infra-archi311.jp/s-kushinoha.html> (2022.9.24 閲覧).
- 2) 国土交通省: 道路: 道路啓開計画, <https://www.mlit.go.jp/road/bosai/measure/index4.html> (2022.9.24 閲覧).
- 3) 林春男: 災害レジリエンスと防災科学技術, 京都大学防災研究所年報第 59 号, pp.34-36, 2016. [Haruo.H.: Science and Technology for Disaster Resilience, Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.59A, 2016.]
- 4) 塩崎由人, 加藤孝明, 菅田寛: 自然災害に対する都市システムのレジリエンスに関する概念整理, 土木学会論文集 D3, Vol.71, No.3, pp.127-140, 2015. [Yuto.S., Takaaki.K., Hiroshi.S.: The Concepts of Urban System Resilience to Natural Disasters, Transaction of the Japan Society of Civil Engineers, Vo.71, No.3, pp.127-140, 2015.]
- 5) 杉浦聡志, 力石真, 柳沼秀樹 (2021): 災害時交通のレジリエンス評価に向けた研究展望, 土木計画学研究・講演集, Vol. 64 (CD-ROM).
- 6) 新道路技術会議: 道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート No.25-1, <https://www.mlit.go.jp/road/tech/jigo/h25/pdf/report25-1.pdf>, 2016.
- 7) 国土交通省 道路局 都市局: 道路の防災機能の評価手法 (案), <https://www.mlit.go.jp/road/ir/irhyouka/pdf/hyouka.pdf>, 2016.
- 8) 国土交通省: 道路の防災機能評価手法 (暫定案) の改定について, <https://www.mlit.go.jp/common/001114203.pdf>, 2015.
- 9) 内閣府 防災情報のページ: 特集 首都直下地震の被害想定と対策について (最終報告), <https://www.bousai.go.jp/kohou/kouhoubousai/h25/74/special01.html> (2022.9.24 閲覧).

(2022. 9. 30 受付)

Evaluation of Road Reopening in Disasters by Introducing the Concept of Resilience

Atsuya TANAKA, Hideki YAGINUMA, Satoshi SUGIURA, Makoto CHIKARAISHI, Shintaro TERABE, Haruka UNO, and Yu SUZUKI

Prompt restoration of road networks in the event of a disaster is important in terms of evacuation, emergency vehicle traffic, and transportation of goods and materials. The Great East Japan Earthquake demonstrated the importance of "road reopening" to secure relief and transportation routes by promptly disposing of debris at a minimum, and road reopening plans for disaster relief are currently being developed throughout Japan. However, there is currently no method to quantitatively evaluate the effectiveness of road reopening plans. In this study, we attempted to evaluate road reopening under the assumption of an earthquake directly under the Tokyo metropolitan area, based on the resilience evaluation method proposed by Sugiura et al. Specifically, we used the cumulative fragility of roads as a performance index in the "Evaluation Method for Road Disaster Prevention Functions" of the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), and described the recovery process using multiple road-reopening strategies. The results are expected to contribute to the study of road reopening plans in practice.