レジリエンス評価に基づく災害時道路ネットワークの最適啓開戦略

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]・鈴木 雄[6]・海野　遥香[7]

[1]学生非会員 東京理科大学大学院 創域理工学研究科社会基盤工学専攻（〒 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 創域理工学部社会基盤工学科（〒 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 創域理工学部社会基盤工学科（〒 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 創域理工学部社会基盤工学科（〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641）
E-mail: yusuzuki@rs.tus.ac.jp
[7]正会員 茨城大学大学院 理工学研究科 (〒 316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)
E-mail: haruka.uno.uj38@vc.ibaraki.ac.jp

地震や豪雨による道路構造物の被災は，交通ネットワークの機能低下をもたらし，緊急車両の通行や物資・資材の輸送に問題を生じる．そのため，早期に道路機能を回復させるための最適な道路啓開計画の策定が求められるが，実務的な方法論が確立されていない状況にある．本研究では，主要拠点間のレジリエンス評価とネットワーク最適化問題を活用した道路啓開評価モデルを構築する．具体的には，国土交通省で運用される「道路の防災機能評価」の累積脆弱度をネットワーク性能指標として，複数の啓開シナリオの下で全域木を活用したネットワークフロー問題を解くことで最適な道路啓開戦略を求める．首都圏を対象としたケーススタディ分析の結果，複数路線の同時啓開に比べて特定路線の重点的な啓開が有効であることが確認された．本研究の成果は，実務における最適な道路啓開計画の策定に資することが期待される．

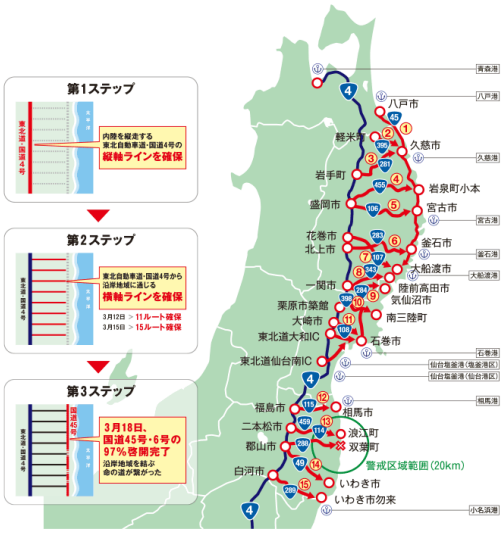
Key Words: *Disaster Prevention Function Assessment, Road Opening, Resilience Assessment, Network Optimization, Universal Tree*

1. はじめに

地震や豪雨，大雪等の災害が発生すると，交通ネットワークは正常に機能することが難しくなり，機能の低下が発生する．それが長時間継続すると，緊急車両の通行や物資，資材の輸送に問題が生じ，安全確保や人命救助に影響を及ぼす事態となる．そこで機能低下を早期に解決すべく，発災後すぐに道路の啓開が行われる．これにより，救命救助や物資輸送に必要な車両をより少ない時間や人員で通すことが可能になり，道路機能低下の影響を最小限に食い止めることが可能になる．

現在，大規模災害時における啓開計画の策定は全国各地で進められている．その契機となったのが，2011 年 3 月の東日本大震災における啓開の成功である．「くしの歯作戦」と呼ばれたこの災害における啓開戦略では，まず内陸の国道 4 号線と東北自動車道を啓開することで縦軸を確保したのち，内陸と沿岸部を結ぶ道路を啓開し，最後に沿岸部の道路を啓開した[1]．これにより，沿岸部への速やかな物資輸送や緊急車両の通行を実現した．この啓開図を**図–1** に示す．この成功を踏まえて，首都圏における「八方向作戦」をはじめとして，北海道，近畿，四国等の国土交通省の各地方整備局や，全国の各都道府県で啓開計画の策定が進められている．策定の上では，より早期に道路機能を回復させるための最適な道路啓開計画とすることで，限られた労力で最大限の成果を上げることが期待されている．

ところが，現在策定が進められている各地の計画では，最適とするための実務的な方法論が確立されていないのが現状である．このため，発災後に行われる啓開が必ずしも効果的に行われるとは言い難い状況にある．例えば，首都圏における「八方向作戦」の場合[2]，首都高速道路や国土交通省各国道事務所の管轄国道をあみだ状に啓開することで，48 時間以内に八方向の各方面について最低 1 ルートを確保することが方法論として示されている．一方で，あみだとなる啓開対象の



図–1 くしの歯作戦の展開[1)]

道路を具体的にどう選ぶかについては，高速道路が最も優先的に選び，次に直轄国道，都道の順で被災状況に応じて決定すると記述されるに留まっている．そのため，現状では発災時に災害対策本部へ各道路の被災状況が正確に伝達されたとしても，速やかにどう啓開を進めるかに関する具体的な指示を行うことが難しくなる．指示が遅くなることで，現場における円滑な啓開が困難になることが懸念される．

そこで本研究では，ネットワーク最適化問題を活用した戦略構築を組み合わせた道路啓開評価モデルの構築を試みる．具体的には，啓開による道路網の復旧戦略について，グラフ構造における「全域木」の構造を考えることによる最適化を行い，それをもとにしたレジリエンス評価を実施する．レジリエンス評価では「道路の防災機能評価」における累積脆弱度を用いることでネットワーク全体を評価対象とし，発災から啓開の完了までの機能喪失量の定量化を実施する．ここで，全域木を構成するまでの戦略構築に関して複数の戦略の比較を実施することで，より最適な啓開の実施における知見を得ることを目的とする．これにより，実務上における最適な道路啓開計画の策定に資す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

災害時における啓開計画の最適化や啓開する道路の優先順位決定に関する研究として，以下のものが挙げられる．坂本ら (2018)[3)] は，複数考えられる道路啓開パターンにおける進出ノードペアに対してアクセシビリティ ACC を求め，その値が最大とするような道路啓開パターンによる復旧対応率と ACC 回復率によるプロットを実施している．一方で，啓開する道路の組み合わせで評価を実施していることから，時間的な道路機能の変化を表現しきれていない点を有している．窪田ら (2021)[4)] は，救援ルートとしての区間選定頻度と復旧日数を考慮した寸断道路の優先順位決定を行い，救援ルート復旧率と延べ復旧日数による評価を実施している．門倉ら (2023)[5)] は，啓開の復旧スケジュールに着目して焼きなまし法を用いた組み合わせ最適化を実施し，戦略的な復旧班割当による拠点へのアクセス回復を表現している．一方で，評価指標としては拠点数を用いており，この指標ではネットワークの接続性を十分に表現しきれていない点を有している．

他方で，道路啓開の評価をレジリエンスの概念に着目して実施したものとして，田中ら (2022)[6)] がある．この研究では，杉浦ら (2021)[7)] が提案したレジリエンス評価の定量化を行ったものである．しかし同論文では，OD ペアを中心の 1 点と外側の 8 点の合計 8 ペアに限定した評価となっており，ネットワークとして啓開を評価できているとは言い難い．また，同論文では啓開評価の定量化に留まっており，戦略の最適化に関する議論も不十分である．

本研究では，グラフ構造で表現される道路ネットワークに着目し，フロー最適化を用いた啓開戦略の構築とそれに基づくレジリエンス評価を実施する．またレジリエンス評価は範囲を拡張させ，ネットワークに含まれる防災拠点や接続点同士の繋がりを評価 OD ペアとして追加する．これらにより，道路啓開戦略の最適化を前提とした道路啓開のレジリエンス評価を実施することで，より効果的な道路啓開戦略の検討に繋げるものである．

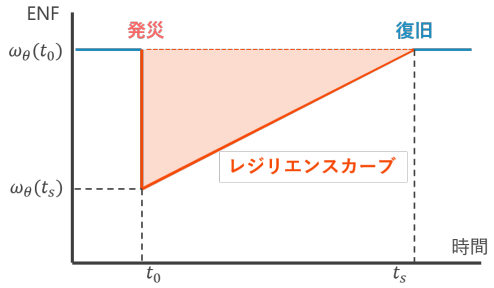
3. 方法論

(1) 本章の概要

本章では，まずレジリエンス評価について説明し，それをもとに啓開と復旧の定義の整理を行う．次に道路をリンク，道路同士の交点をノードとしたグラフ構造のネットワークを構築し，このネットワーク上のリンクを用いた全域木を生成する．その後，生成した木をもとに整理した定義に当てはめ，啓開戦略を決定する方法を説明する．最後に，定めた啓開戦略についてレジリエンスカーブを描き，評価を実施する方法について説明する．

(2) レジリエンス評価とは

レジリエンス評価とは，杉浦ら[7)] により提案された，災害時における交通ネットワークの時系列的な性能評価を示す手法である．この手法を用いることで，縦軸



図–2 道路機能の時間的変化と ENF 指標

に ENF(Effective Network Functionary) 指標，横軸に時間を設定し道路機能の時系列変化を表す曲線を描画することができる．また，発災から復旧に至るまでに喪失した道路機能は，曲線で囲まれた面積として評価することができる．評価図のイメージを**図–2** に示す．図の赤い太線部分が道路機能の変化を示す曲線にあたる部分である．以下では，この曲線をレジリエンスカーブと称する．

ENF 指標とは，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であり，グラフ構造の交通ネットワーク G，ネットワークの OD ペア $w \in W$ の交通需要 $d_w \in D$ で決定する指標である．ネットワーク G はグラフ構造であり，道路を表す「リンク」の集合 A と，リンク同士を結びつける「ノード」の集合 N によって構成されるため，$G(N, A)$ と表現される．

これらに加えて ENF 指標は，災害時におけるリンク A の性能低下の組み合わせを表す「シナリオ」$s \in S$，災害時のリンクやノードを修復する順序によって決定する「戦略」$k(r)$ によって時間経過で変化する．災害が発生すると，まずリンクやノードに破損が発生し，それらの通行ができなくなる．これらについて啓開や復旧作業が行われると，不通だった箇所について暫定的な開通を経て，平時と同様の通行が可能になる．この際，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 は時間により変化する．よって ENF 指標も時間で変化し，ENF 指標は発災時間を t_0，リンクの状態が完全に復旧した時刻を t_s として，$t|t_0 \leq t \leq t_s$ において時間 t の関数として表すことができる．さらに，これらの変数はシナリオ s や戦略 $k(r)$ の違いによっても ENF 指標は変化する．シナリオ s が異なると啓開するノードやリンクが変化し，それに応じるようにして交通需要が変化するためである．また同じシナリオ s が選ばれた場合においても，戦略 $k(r)$ の違いにより時間 t における啓開されたリンクの組み合わせが変化する．それにより，ENF 指標も戦略の違いで異なる値をとる．

以上より，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 $f_\theta(\,)$ とすると，ENF 指標を定量評価した値は以下の式 (1) で表される．ENF 指標を時系列的にプロットすることで，一連の啓開についてネットワークの状態変化を表現し，**図–2** の太線で示した曲線を得ることができる．

$$\omega_\theta\left(s,t,k(r)\right) = f_\theta\left(G\left(N\left(s,t,k(r)\right),A\right),D\left(s,t,k(r)\right)\right) \tag{1}$$

ここで，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，**図–2** の三角形上辺の赤細点線部に対応する．そのため，災害発生による変化量は $\omega_\theta(s) - \omega_\theta(0)$ で表すことができる．これと式 (1) を用いて時間 $t \mid t_0 \leq t \leq t_s$ で積分することで，ある災害において実行される戦略 $k(r)$ 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 (2) で表され，**図–2** における薄い赤色で塗られている箇所に対応する．

$$\zeta_s^\theta = \int_{t_0}^{t_s} \omega_\theta\left(0,t,k(r)\right) - \omega_\theta\left(s,t,k(r)\right)dt \tag{2}$$

(3) ENF 指標と累積脆弱度

本研究では ENF 指標の具体的な数値として，国土交通省の「道路の防災機能評価」で用いられている「累積脆弱度」を用いる[8)9)10)]．これにより，主要拠点間の OD ペアの発災から復旧までの所要時間の変化を含む指標により，啓開をネットワーク全体で評価することができる．

累積脆弱度は，対象とするシナリオ s において，OD ペアの平時の所要時間と災害時の各時間 $t|t_0 \leq t \leq t_s$ における OD 間所要時間を用いて算出することができる無次元量である．累積脆弱度は以下の式 (3) で表される．

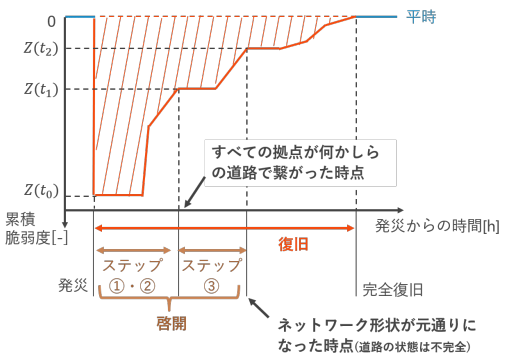
$$Z(s,t) = \sum_w z_w\left(s,t,k(r)\right) \tag{3}$$

ここで，$z_w\left(s,t,k(r)\right)$ は発災から復旧までの時間 t における，ある OD ペア $w \in W$ の脆弱度である．脆弱度は，平時の OD 間所要時間 S_w^o と災害時の所要時間 $S_w^h\left(s,t,k(r)\right)$ から算出し，以下の式 (4) で表される．

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

脆弱度は，0 以上 1 以下の値を取る無次元量である．そのため，累積脆弱度は上記の定義式より，0 を最小値，OD ペア数を最大値とする指標となる．各 OD ペア間所要時間は，道路ネットワークの各リンクにリンク状態に応じた所要時間をリンクコストとして与えた上で，各 OD ペアについて Dijkstra 法による最短路探索を行うことで算出する．

ここで，累積脆弱度を ENF 指標として用いることが可能である理由は以下の通りである．累積脆弱度を算出するための所要時間は，リンクとノードから構成さ



図–3 累積脆弱度とレジリエンスカーブ，啓開と復旧の位置づけ

れるグラフ構造の道路ネットワークを用いている．これに加えて，災害時の所要時間にはリンクの状態や需要に応じて変化することが含まれているほか，啓開戦略やシナリオによって啓開対象に選ばれるリンクが変化することが含まれている．例えば，ある OD で考えられるすべての経路で不通のリンクを含む場合，その OD の所要時間を∞とすることができる．また，啓開した際に平時と比較して車線が少なくなるために交通需要が集中し，所要時間が増加することを計算に含めることが可能である．さらに，啓開の戦略やシナリオによって選ばれるリンクが変化すると Dijkstra 法で求まる最短路も変化し，結果として所要時間も変化する．これに加えて，主要拠点間すべての OD ペアの脆弱度を累積脆弱度として足し合わせていることから，ネットワーク全体として評価することが可能である．結果として，累積脆弱度はレジリエンス評価における ENF 指標のひとつとして用いるのに適しているといえる．

累積脆弱度をレジリエンス評価に落とし込むと，機能が低下するリンクが多いほど各 OD ペアの所要時間は増加し，累積脆弱度は増加する．そのため縦軸は下向きを正として図示することで，**図–2** と整合性をとる．

(4) 啓開と復旧の位置づけ

1 章に示したくしの歯作戦の経過を考慮し,「啓開」と「復旧」を以下のように整理する．まず啓開について，対象とするネットワークのすべてのノードが接続されるようにリンクを開通させたのち，すべてのリンクが開通するまでの 2 段階を啓開と定義する．前者のすべてのノードを結びつける段階では，結びつけるための最小数のリンクが啓開される段階を表す．例えば，くしの歯作戦においては内陸部を啓開したのちに沿岸部までの道路をつなぎ合わせた状態までの段階を表す．後者は前者の段階で用いなかったリンクを含めて，ネットワークのすべてのリンクの啓開が終了する段階である．ここで，啓開が終了した状態では，ネットワークに含まれる各リンクが平時の状態と必ずしも一致しない点に留意が必要である．これに対し復旧は，発災からすべてのリンクが平時の状態に戻った状態になるまでの段階と定義する．これを表す図を**図–3** に示す．

(5) 全域木の生成

上記における，対象のネットワークに含まれるすべてのノードを繋ぎ合わせる状態を，グラフ理論における「全域木」の構造と捉えることができる．全域木とは，無向グラフのネットワークにおけるすべてのノードを繋ぐ木構造のことである．木の構造をとるため，始終点が一致するパスである閉路は存在しない．道路ネットワークのリンクを上下線一組で啓開し，それらのリンクコストが等しいと仮定すると，このネットワーク上の道路リンクは無向グラフと扱うことが可能である．そのため道路網を無向グラフとみなし，それをもとにした全域木を構築することができる．全域木に用いられる枝集合 E に含まれるリンク e の本数 $|E|$ は，ネットワークのノード集合 N の個数を $|N|$ 個として，$|E| = |N| - 1$ で表現される．このとき，$E \subseteq A$ であることから，この本数は必ず平時のネットワークのリンクの本数以下になる．

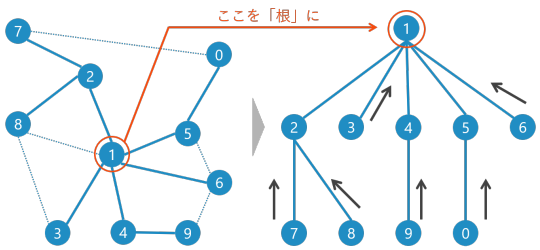
本研究では考えられる全域木のうち，全域木に用いるリンク長の合計が最小となる全域木を構成することで戦略の最適化に結びつける．全域木は，木に用いる枝を変更することで複数の候補が考えられる．そのため，リンクコスト c_e が最小になるような全域木である「費用最小全域木」を考え，適切なリンクコストを与えることで唯一つに定めることができる．ここではリンクコストとしてリンク長を与え，総リンク長の最小全域木が完成するまでの総啓開距離を最小とする．これにより，より少ない距離で啓開を行い，その中における戦略を検討できる．

ノード N の部分集合を M，両端点が M に含まれる枝の集合を E(S) とする．最小全域木問題の定式化として閉路除去で定式化すると，以下の式 (5) で表される[11]．

$$
\begin{aligned}
min \quad & \sum_{e \in E} c_e x_e && (5)\\
s.t. \quad & \sum_{e \in E} x_e = |N| - 1 \\
& \sum_{e \in E(M)} x_e \leq |M| - 1 \qquad \forall\, M \subset N \\
& x_e \in 0, 1 \qquad \forall\, e \in E
\end{aligned}
$$

(6) 全域木啓開戦略の構築

本研究では，上記で生成した距離最小全域木をもとに啓開の始終点が決定され，これに基づいた啓開戦略



図–4 全域木から根付き木の生成と方面の定義

を構築する．

具体的な手法は以下の通りである．まず，上記で構築した全域木を根付き木に等トポロジー変形を行う．等トポロジー変形であるため，全域木のノードとリンクの接続関係を変更せずに，新たに根とするノードを指定し，根付きの木に変形する．根付き木は，根の深さが最小となるように根をとることで，唯一つに定める．

そして，木における各枝の端点を啓開の始点，根を啓開の終点として啓開を行うことを考える．ここで，各枝の端点から根までのパスを方面と定義する．本研究では啓開作業のリソースを一定と仮定した上で，発災からすべての方面について啓開が終了するまでを評価する．**図–4** はそれを模式的に表したものであり，黒い矢印の方向に 6 方面から啓開が進むことを表す．

啓開戦略 k(r) は様々考えられるが，本研究では生成した根付き木をもとに条件を指定し，条件内で唯一つに絞り込むことを考える．条件としては例えば，方面へのリソースの集中と分散による比較や，根からの方面の遠近による啓開順序の違いによる結果の比較が挙げられる．

(7) 全域木啓開後の戦略

全域木の生成が完了すると，全域木に含まれなかったリンクが未啓開の状態で残っている．これらのリンクに対しては，平時に OD ペアの経路として利用される回数を各リンクについて数え上げ，利用回数が多い順で啓開を行う．これにより，全域木の状態で最短路で啓開されていない OD ペアに対し，最短路になるように啓開が行われやすくなることを表現する．

(8) レジリエンスカーブの描画と面積評価

戦略においては，啓開が完了する前のリンクを通行不可，啓開が完了したリンクを平時と同じ所要時間で通行できると設定する．この際，啓開が完了してから一定時間のリンク間所要時間を平時よりも大きく設定することにより，リンクの状態が不完全であると表現することも可能である．その上で対象とする OD ペアに対して，各時間について上記の脆弱度の定義式 (4) から，発災からの経過時間ごとに各ペアの脆弱度を算出する．脆弱度の結果から各時間の累積脆弱度を求め，レジリエンスカーブを図示する．そして，レジリエンスカーブで囲まれた面積を災害による機能低下量として評価する．



図–5 構築した道路ネットワーク

4. 首都圏道路網の啓開を想定したケーススタディ分析

(1) 本章の概要

本研究では，首都圏の道路啓開を対象として最適な啓開戦略を構築し，その評価を行う．その上で，得られた結果をもとに考察を実施する．考察のため，方面に由来する 4 つの戦略でレジリエンスカーブを描き，面積やカーブの形状や時間経過による変化に着目する．

(2) ケーススタディの背景と道路ネットワークの設定

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[12]．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．

このような背景から本研究では，東京外環自動車道で囲まれた範囲の首都高速道路と一部の一般道をリンク，ジャンクションをノードとして基本となるネットワークを構築する．その上で，このネットワークのノードに防災機能評価で用いられる 4 種類の拠点ノードを付加し，最終的な計算に用いるネットワークを構築する．これ以降では，基本ネットワークに含まれるリンクを

表–1 計算対象の OD ペア

拠点種類	役割	サブノード数
広域拠点	災害時における意思決定・実行の中心機関	8
交通拠点	他の地方から対象地域に支援を輸送する際における交通上の経由地	2
地域拠点	総合的または特定の防災機能に中心的な役割を果たす拠点	111
被災拠点	災害時において大きな被害を受けると想定される市町村役場	35
合計		156

メインリンク，同ネットワークに含まれるノードをメインノードと称する．またメインノードに付加するノードをサブノード，サブノードとメインノードを結ぶリンクをサブリンクと称する．

a)　基本ネットワークの設定

基本となるネットワークについては，道路構造による分岐の可否を考慮し，最終的に 50 本のメインリンク・35 のメインノードを用いる．このネットワークの図を**図–5** に示す．

b)　サブノード・サブリンクの設定

基本ネットワークに付加するサブノードは，**表–1** に整理した 4 種類の拠点ノード計 156 ノードである．サブノードは，サブリンクを用いて直線距離で最も至近となるメインノード 1 つに結びつける．そのため，サブリンクの本数はサブノード数と同じ 156 本となる．サブリンクの距離の数値は，Google Map 上で最寄りのメインノードからの直線距離を計測した値を用いる．各メインノードに付加するサブリンクの本数を整理したものを**表–2** に示す．

まとめると，メインとサブのすべてのリンク数の合計は 206 本，同ノード数の合計は 191 ノードとなる．

各リンクの移動速度について，平時における各メインリンクの移動速度は，そのリンクの法定速度を用いる．一方で，サブリンクの移動速度は，一般道の移動速度の与え方に則り一律で 30km/h とする．

(3)　距離最小全域木と根付き木の構築

このネットワークに対して距離最小全域木を求め，そのうちメインリンクについて図示したものを**図–6** に示す．

距離最小全域木に用いられるリンクの本数は，メインリンクとサブリンクを合わせて 190 リンクとなる．また，距離最小全域木に含まれるメインリンクの総延長は 172.2km となる．

構築した最小全域木について，3 章にて示した方法論に基づき根付き木に等トポロジー変形を行う．この際，◯で示すメインノードが根に指定されて根付き木が生成される．本ケーススタディにおける根付き木を表したものを**図–7** に示す．この根付き木では枝分かれが 10 あることから，本ケーススタディでは 10 方面の啓開に関する評価を実施する．

表–2 計算対象の OD ペア

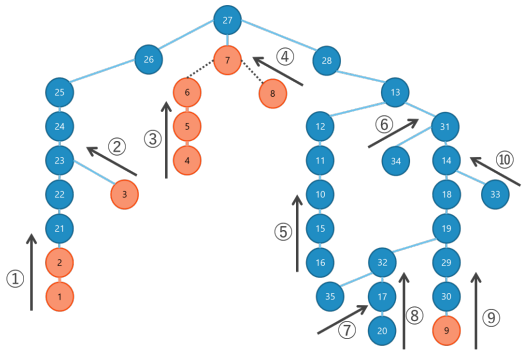
メインノード番号	メインノード名	サブリンク本数
1	高谷 JCT	1
2	京葉 JCT	6
3	三郷 JCT	8
4	川口 JCT	6
5	美女木 JCT	11
6	大泉 JCT・出入口	7
7	高井戸出入口	5
8	用賀出入口	4
9	羽田出入口	3
10	江戸橋 JCT	4
11	竹橋 JCT	9
12	三宅坂 JCT	3
13	谷町 JCT	1
14	浜崎橋 JCT	1
15	箱崎 JCT	2
16	両国 JCT	3
17	辰巳 JCT	2
18	芝浦 JCT	1
19	有明 JCT	3
20	葛西 JCT	4
21	小松川 JCT	3
22	堀切 JCT	4
23	小菅 JCT	5
24	江北 JCT	5
25	板橋 JCT	10
26	熊野町 JCT	4
27	西新宿 JCT	14
28	大橋 JCT	5
29	大井 JCT	1
30	昭和島 JCT	5
31	一ノ橋 JCT	4
32	有明 JCT	0
33	入谷出入口	5
34	戸越出入口	6
35	晴海出入口	1



図–6 生成された距離最小全域木

(4)　検討する戦略

このケーススタディでは，発災時にすべてのメインリンクが不通になるシナリオを仮定する．そしてメインリンクに対して啓開が行われ，最終的にすべてのメ



図–7 生成された根付き木と方面の関係

表–3 検討する戦略

番号	啓開する方面数	方面の選び方	具体的な順番
1	1 方面	近い順	④→⑥→③→⑩→②→⑤→⑦→①→⑧→⑨
2	2 方面	近い順	④⑥→③→⑩→②→⑤→⑦→①→⑧→⑨
3	10 方面	近い順	①～⑩
4	1 方面	遠い順	⑨→⑧→①→⑦→⑤→②→⑩→③→⑥→④

インリンクが復旧するまでの戦略 k(r) を与え，レジリエンス評価を実施する．戦略 k(r) は根付き木に基づき以下の条件のもと，以下の計 4 つの戦略を考える．今回比較検討を行う項目を**表–3** に示す．

a)　啓開リソースの分散と集中

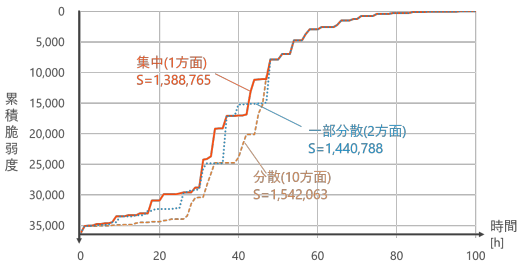
本研究では啓開リソースの総量を,「全域木に含まれるすべてのリンクを 48 時間以内に啓開する量」と仮定する．48 時間の数値は,「八方向作戦」の計画の記述に合わせて設定したものであり，救命救助における 72 時間の壁の意識のもとに設定されたものである．このリソースを 1 つの方面に集中させて啓開を実施するか，複数の方面に分散させて啓開を実施するかの比較を実施する．

b)　啓開の順序の選び方

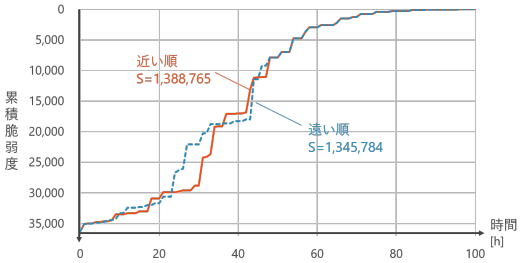
上記に加えて，方面 (パス) の長短，根からの深さによる啓開順序の選び方の違いについての比較も実施する．これにより，根付き木のパスを選ぶ順序を一意に決定しつつ，その中の戦略の違いによる結果の比較を実施することが可能になる．

(5)　レジリエンス評価の実施

本ケーススタディにおいて累積脆弱度の計算対象とする OD ペアは，ネットワーク内のすべての拠点ペアとする．つまり，全ノードと選んだノード以外のすべてのノードの積で表され，191 ノード× (191-1)=36,290 ペアとなる．そのため，このレジリエンス評価における縦軸の最大値は 36,290，最小値は 0 である．



図–8 啓開の集中と分散による比較



図–9 啓開順序による比較

(6)　ケース別の分析結果の比較と考察

本項では，上記の戦略別の評価結果を示し，その結果に基づいた考察を実施する．

a)　啓開の集中と分散による結果

啓開の集中と分散について，3 つの戦略によって比較した際の各戦略のレジリエンスカーブの結果を**図–8** に示す．

結果を見ると，啓開のリソースを特定の方面に集中させるほど，カーブがよりなだらかに回復し，面積の値が小さくなることがわかる．これは，時間経過によるペアの繋がりについて，方面数が少ないほど短時間でより多くの拠点ペアが繋がっているためと考えられる．啓開のリソースを分散させると，まず方面ごとの小さい木構造のネットワークが複数生成され，啓開終盤になってそれらが 1 つに結びつく．一方で方面数を減らし啓開のリソースを集中させた場合は，一つの方面に含まれるノードリンクがまず啓開され，それにほかの方面に含まれるノードリンクが次々と結びつくことになる．結果として，後者のほうがより多くのノードリンクの OD を開通させやすくなり，それが評価結果にも現れていると考えられる．

b)　啓開順序による結果の比較

啓開の根からの長短で啓開順序を変化させた場合の比較図を**図–9** に示す．

結果を見ると，根から遠いパスから啓開する戦略の場合で，より面積が小さくなることが現れている．レ

ジリエンスカーブに着目すると，啓開開始から 20 時間〜40 時間の区間でカーブに大きな開きがあることが伺える．短いパスから啓開すると，序盤は次々にノードリンクが結びつくものの，後半はパスが長くなり結びつきに時間を要するようになる．一方で長いパスから啓開すると，序盤に接続される拠点ペアは少なくなるが，後半は啓開するパスが短くなり次々と結びつくようになる．より多くのノードが結びつくのと比例して結びつく OD ペアも増え，結果として累積脆弱度を小さくすることに繋がっていると考えられる．

c) 考察

上記の戦略別比較から，面積を小さくするための簡単な考察を実施する．レジリエンス評価において面積を小さくするためには，より短時間で累積脆弱度を小さくする必要がある．累積脆弱度を小さくするためには，その定義から各 OD ペアの所要時間を平時の所要時間に近づければよい．

各 OD ペアの所要時間を小さくするためには，複数のアプローチがある．一つとして，より多くの拠点同士が接続されることが挙げられる．これにより，複数の OD ペアの所要時間を短くすることが可能になり，累積脆弱度の値を小さくすることができる．これを実現するためには，拠点同士が近接しているネットワークの集中的な啓開や，多くの平時の OD ペアが通るリンクを重視した啓開が求められる．もう一つとして，啓開を速やかに行うことも挙げられる．より短時間で早く外縁部から中心部まで繋げることや，距離最小全域木に啓開することでより少ないリソースや所要時間で啓開を行うことに繋げられると考えられる．

5. おわりに

本研究では，啓開評価の定量化から一歩進め，全域木の考え方に基づく道路啓開戦略の最適化を組み合わせたレジリエンス評価を実施した．それを実現するための啓開戦略として，最小全域木の形にリンクを復旧させることで，啓開リソースを最小とする場合における戦略に最適化して戦略を検討することができた．さらに根付き木に変形させ，啓開戦略を方面で定めることで啓開手順をグラフ構造から定めることも可能になった．ここで用いた方面の定義を利用し，少ない方面への啓開リソースの集中による啓開の有用性を示すことができた．

課題点としては，以下の点が挙げられる．まず，本研究では啓開部隊やその基地には着目しておらず，部隊の動きやリソースを十分に考慮しきれていないと考えられる．また，本研究ではネットワークのすべてのリンクの不通からの啓開を前提としているが，現実には発災後ネットワークの一部のリンクのみが途絶される．そのため，全域木に用いられるリンクには，普段通り機能しているリンクと災害時に啓開するリンクに分ける必要があり，その上で必要なリンクを選び最適化することが求められる．さらに，本研究では戦略の最適化は行っているが，レジリエンス評価による面積の最適化は行っていない．すべての戦略を計算し最適な戦略を計算することも可能であるが，組み合わせ爆発という点で計算負荷の課題が残る．

今後の展望としては，最適化戦略と道路網に関する考察が挙げられる．背景としたくしの歯作戦が行われた東北地方と今回ケーススタディに選んだ首都圏では道路網の疎密が大きく異なる．また，全域木にした際に根に向かって啓開するか，根から啓開するかの違いも生じる．これらの違いにより啓開戦略とそれによる結果の違いが生じると考えられることから，啓開戦略の最適化と道路網の関係についても考察する余地があると考えられる．

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-archive311.jp/s-kushinoha.html (2023.9.25 閲覧).
2) 首都直下地震道路啓開計画検討協議会：首都直下地震道路啓開計画（第 4 版），$https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000862573.pdf$
3) 坂本淳，西内裕晶: 大規模災害からの復旧対応力を考慮した道路啓開モデルの提案，公益社団法人日本都市計画学会都市計画論文集，Vol.53 No.3，pp.859-866，2018．[Jun S., Hiroaki N. :Proposal of a Decision Method for Road Recovery Considering Recovery Capacity after a Large-Scale Disaster, Journal of the City Planning Institute of Japan, Vol.53 No.3, 2018.]
4) 窪田晃英，坂本淳，永田臨：救援ルートとしての区間選定頻度と復旧日数を考慮した道路啓開計画の検討ー高知県道路啓開計画を対象としたケーススタディ，交通工学論文集，第 7 巻第 4 号（特集号 B），pp.B_10-B_16，2021．[Koe K.，Jun.S.，Nozomi N.：Proposal a road recorvery method Considering the Number of Selection for Emergency Route and Restoration Date:A Case Study of Road Recovery Plan in Kochi Prefecture，Journal of Traffic Engineering，Vol.7 No.4，2021．]
5) 門倉尚紀，畠山満則，梶谷義雄，高橋亨輔 (2023)：タイムラインを考慮した大規模災害時の道路復旧優先順位付けに関する一考察，土木計画学研究発表会・講演集，Vol.67(CD-ROM).
6) 田中敦也，柳沼秀樹，杉浦聡志，力石真，海野遥香，鈴木雄 (2022)：レジリエンス概念を導入した災害時の道路啓開評価，土木計画学研究発表会・講演集，Vol.66(CD-ROM).
7) 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, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 64 (CD-ROM).
8) 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.
9) 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/ir-hyouka/pdf/hyouka.pdf,
2016.
10) 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.
11) 久保幹雄：Python による実務で役立つ最適化問題 100+, pp.64-65, 2022.
12) 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),
$https://www.bousai.go.jp/kohou/kouhoubousai/h25/74/special_01.html$(2023.9.25 閲覧).

(2023. 10. 13 受付)

OPTIMAL REVEALING STRATEGY FOR ROAD NETWORKS IN DISASTERS BASED ON RESILIENCE ASSESSMENT

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

Damage to road structures caused by earthquakes and torrential rains can impair the functioning of transportation networks, causing problems for the passage of emergency vehicles and the transport of goods and materials. Therefore, an optimal road reopening plan is required to restore road functions as soon as possible, but a practical methodology has not yet been established. In this study, an evaluation model for road reopening is developed based on resilience assessment between major centers and network optimization problems. Specifically, we use the cumulative vulnerability of the ”Road Disaster Prevention Function Assessment” operated by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism as a network performance index, and solve a network flow problem utilizing a global tree under multiple revelation scenarios to obtain an optimal road revelation strategy. The results of a case study analysis in the Tokyo metropolitan area confirmed that it is effective to proceed with road reopening starting with shorter routes and to focus on specific routes rather than reopening multiple routes at the same time. The results of this study are expected to contribute to the formulation of optimal road reopening plans in practice.