

接続脆弱性分析手法を用いた 災害時の道路ネットワーク評価

定金 乾一郎¹・古市 英士¹

¹一般社団法人 システム科学研究所 調査研究部（〒604-8223京都市京都市中京区新町通四条上ル小結棚町428）

道路ネットワークの防災機能の一評価手法として、拠点間の接続性に着目した接続脆弱性分析手法を提案する。従来手法とは異なり、評価対象事業や災害を予め想定せず、また最短経路ではなく非重複経路を用いて拠点間接続性を分析する手法である。これを奈良県道路ネットワークに適用した結果、道路の途絶により拠点間の接続性が大きく低下するリンク（クリティカルリンク）を抽出することで現状ネットワークの防災機能を評価することができた。

キーワード 道路ネットワーク評価、防災機能、脆弱性、クリティカルリンク

1. はじめに

東日本大震災や2011年紀伊半島大水害以降、道路ネットワーク評価の考え方が少しずつ変化してきている。従来のB/Cによる道路投資の効率性のみで事業を評価する考えに加え、災害時に道路ネットワークが果たす機能も評価することが重要視されるようになってきた。

こうした中、国土交通省では2011年9月に「主要都市・拠点間等の防災機能向上に関する計測マニュアル（暫定案）」ならびに「ネットワーク全体の防災機能向上に関する計測マニュアル（暫定案）」（以下、マニュアルという）を策定し、新規事業採択時評価に適用している。マニュアルでは、評価対象路線が災害により途絶した場合における、代替経路（迂回経路）の所要時間増加率（迂回率）を整備事業路線がある場合とない場合のそれぞれについて算出し、比較することで災害時における道路事業の整備効果を評価している。

しかしながら、マニュアルによる分析方法では、

- ・災害を予め想定した分析方法（想定される様々な災害を一度に考慮できない）
- ・整備路線（道路事業）のwith-withoutを評価（現状評価ができない）
- ・最短経路により評価を行い拠点間の接続性は考慮していない（最短経路以外の経路も実際には存在）

といった点から、道路ネットワーク上の弱点や強化すべき箇所を把握するのに必ずしも適しているとは言えない。

そこで本論文では、これらの問題点を解決するために道路（リンク）が途絶したときの拠点間の接続状況（目的地への到達可能性）から、拠点間の接続性が大きく低下するリンク（クリティカルリンク）を抽出する接続脆

弱性分析手法を提案し、奈良県道路ネットワークへの適用と評価を試みた。

2. 接続脆弱性分析の考え方と特徴

接続脆弱性分析は、リンク交通量や拠点間所要時間に頼らずに、拠点間の接続性をもとに評価する手法であり、ここ数年、土木計画学分野で研究が深められている¹⁾。拠点間の接続性については「非重複経路数（重なることのない経路）」をもって表現し、災害によりネットワーク上のどこかが途絶したときの非重複経路（代替路）の確保状況から道路ネットワークの弱点を特定する。

非重複経路を用いた道路ネットワークの評価方法は以下のとおりである。

- ①ネットワークにおいて拠点間毎の到達可能な非重複経路数を分析。次に、ネットワークを構成するリンク毎に途絶により失われる非重複経路数を算出。
- ②非重複経路数の損失割合の高いリンクまたは途絶により完全に経路を失ってしまうリンクを、クリティカルリンクとして抽出する。

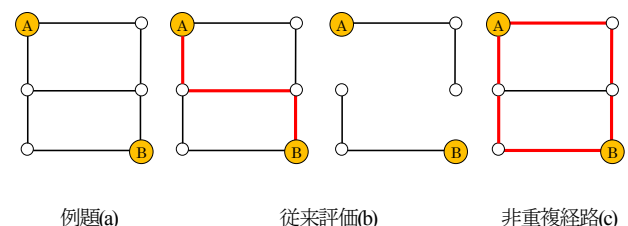


図-1 最短経路（従来手法）と非重複経路の違い

表-2 マニュアルと接続脆弱性分析手法との違い

	マニュアル	接続脆弱性分析手法
経路	最短経路 (速達性)	非重複経路 (接続性)
災害 想定	想定有り(津波浸水, 未 耐震橋梁等)	想定無し
アウト プット	道路事業の整備効果 迂回時間短縮率 (道路整備有り/災害時 の短縮状況)	道路網の弱点個所 当該リンク途絶時の拠点 間経路の損失数(割合) 等 ※

※接続性のみを考慮すると、常識的には利用可能性がゼロの非常に長い距離の経路を含んでしまうことから、本検討では時間制約を設けて分析を実施

次に、非重複経路が従来の最短経路による分析方法に比べて優れている点を参考文献²⁾を引用して説明する。

図-1図-1(a)は説明のための簡略化したネットワークで、AB間の移動を考え、図-1(b)左に示した経路を最短経路とする。マニュアルで代替経路を求める場合は、図-1(b)右のように最短経路を全て削除した上で、次の最短経路を探索する。しかし、図-1図-1(b)右には経路が存在しない。一方、リンク重複のない最短の二本経路を求める場合、図-1図-1(c)

に示す二本となる。このため、従来の方法では1本とみなされていたAB間に経路が2本存在する。

このように最短経路による分析手法では拠点間の接続状況を把握することが困難である。これらを含めたマニュアルとの相違点を表-2に示す。

次章以降に、接続脆弱性分析の検討手法の詳細と奈良県道路ネットワークに本分析手法を適用した結果を示す。

3. 接続脆弱性分析手法の概要

(1) 非重複経路数算定モデル概要

接続脆弱性分析では、拠点間の接続性を非重複経路数で表現しようとすることから非重複経路数の算定が必要となる。そこで、非重複経路数を算定するモデルについて以下に説明する。

非重複経路数算定モデルの決定変数は各リンクが非重複経路を構成する集合に含まれるか否かを示す二値変数である x であり、ネットワーク形状が与えられた時、OD ペア間のリンク重複のない経路は次の条件を満たしている必要がある。

1. 出発地 r からの経路構成リンク数および到着地 s への経路構成リンク数は、非重複経路数 n_{rs} に等しい。
2. 出発地 r への流入リンク、および到着地 s からの流出リンクは経路構成リンク集合には含まれない。
3. 途中ノード i ($i \in V, i \neq r, s$) において、流入する経路構成リンク数と流出する経路構成リンク

数は等しい。

上記の条件により、非重複経路数算定モデルは非重複経路数 n_{rs} を最大とする線形最適化問題として、次のように記述できる。

$$\begin{aligned}
 & \max_x n_{rs}, \\
 \text{subject to} \quad & \sum_{x \in \text{Out}(r)} x_a = \sum_{x \in \text{In}(s)} x_a = n_{rs}, \\
 & \sum_{x \in \text{In}(r)} x_a = \sum_{x \in \text{Out}(s)} x_a = 0, \\
 & \sum_{x \in \text{Out}(i)} x_a - \sum_{x \in \text{In}(i)} x_a = 0 \quad \forall i \in I, i \neq r, s, \\
 & x_a = \{0,1\},
 \end{aligned}$$

ここで、

- n_{rs} ODペア rs 間の非重複経路数
 x_a リンク a が非重複経路に含まれるならば 1, そうでなければ 0 とする二値変数
 $\text{In}(i)$ ノード i に流入するリンクの集合
 $\text{Out}(i)$ ノード i から流出するリンクの集合

なお、拠点間の非重複経路を構成するリンクの組合せ（二値変数 x の組合せ）は複数存在する可能性がある。そのような数ある経路集合の中でもっともらしいものとして、総所要時間が最小となる経路を選ぶことが考えられる。総所要時間が最小となる経路集合は以下の最適化問題を解くことで求めることができる。

$$\begin{aligned}
 & \min_x \sum_{a \in A} t_a x_a, \\
 \text{subject to} \quad & \sum_{x \in \text{Out}(r)} x_a = \sum_{x \in \text{In}(s)} x_a = n_{rs}, \\
 & \sum_{x \in \text{In}(r)} x_a = \sum_{x \in \text{Out}(s)} x_a = 0, \\
 & \sum_{x \in \text{Out}(i)} x_a - \sum_{x \in \text{In}(i)} x_a = 0 \quad \forall i \in I, i \neq r, s, \\
 & x_a = \{0,1\},
 \end{aligned}$$

ここで、

- t_a リンク a の所要時間

上記のモデルにより算出される非重複経路には、所要時間が非常に長くなるものが含まれる場合がある。しかしながら、そのような経路は現実的には利用されないと考えられることから、次式のような制約条件を加えることで、あまりに所要時間の長い経路を排除することとする。なお、次式の左辺は平均所要時間であり、右辺の0

は許容可能な旅行時間を表す。

$$\frac{1}{n_{rs}} \sum_{a \in A} t_a x_a \leq \theta$$

(2) 分析指標

非重複経路を算出し、その経路情報を用いて様々な分析が可能であるが、ここでは拠点間の非重複経路を分析し、各リンクが途絶した場合に失われる非重複経路の割合や失われる非重複経路の重要度から、途絶による影響度をリンク毎に評価する。クリティカルリンクは以下の方法により抽出する。

a) リンク重要度指標 LCI の算出

クリティカルリンクを求めるためには、各リンクを 1 本ずつ途絶 ($x_a = 0$) とする制約条件を加えてモデルを再計算し、その結果得られる n_{rs} を用いて以下の リンク重要度指標 LCI (link criticality index) を計算する³⁾。

LCI はリンクごとに算出され、0.0～1.0 の範囲の値を取る指標である。この値が大きいリンクは途絶時に非重複経路数の減少する OD ペアが多いことを意味し、クリティカルであるといえる。

$$LCI_a = 1 - \frac{\sum_{rs} \text{リンク a 途絶後の } n_{rs}}{\sum_{rs} \text{リンク a 途絶前の } n_{rs}}$$

図-3 に示したとおりリンク a が途絶しても、全 OD ペア間において代替経路が存在し、非重複経路数が変化しない場合、LCI は 0.0 となる。一方、途絶によって全 OD ペア間の接続性が断たれる（非重複経路数が 0 本となる）場合は、LCI は 1.0 となる。

b) 途絶による接続性低下 OD 数の算出

LCI は評価対象とする全 OD 間の非重複経路数により算出される指標であるため、リンクの途絶が個別の OD 間に与える影響を評価することはできない。

例えば、あるリンクの途絶により全 OD 間の非重複経路数が 6⇒4 に変化した場合の LCI 指標は 0.33 であるのに対し、5⇒4 の場合の LCI 指標は 0.20 となり、LCI 指標のもとでは前者の方が重要度の高いリンクであると判断される。しかしながら、失われた経路一つひとつの価値をみた場合、図-4 のようなケースが想定される。

この場合、右側の方が LCI 値は小さいものの、リンクが途絶することにより非重複経路を失ってしまう OD ペア (case1) や、非重複経路が残る 1 本となってしまう、次なる途絶によって経路を失ってしまう OD ペア (case2) が存在する。

このように、OD 間の接続性を大幅に低下させるリンクを評価するために、LCI 指標の計算過程により算出された非重複経路を分析し、リンク途絶により非重複経路が 0 本または 1 本となる OD ペアの数（接続性低下 OD

数) を指標としてクリティカルリンクを評価する。

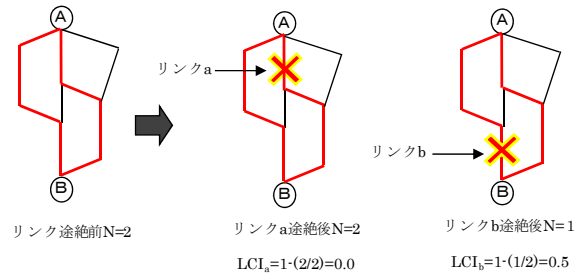


図-3 リンク重要度指標 LCI の計算例

<6⇒4に変化した場合> <5⇒4に変化した場合>

LCI=0.33

LCI=0.20



A市⇔拠点X: 3⇒2本
B町⇔拠点X: 3⇒2本

case1

C市⇔拠点Y: 4⇒4本
D村⇔拠点Y: ~~1⇒0本~~

case2

E町⇔拠点Z: 3⇒3本
F村⇔拠点Z: ~~2⇒1本~~

図-4 LCIに係る非重複経路の内訳

4. 奈良県ネットワークにおける計算例

(1) 計算条件の設定

a) ネットワークの設定

クリティカルリンクの計算においては、各リンクの途絶ごとに最適化問題を計算する必要があることから、計算ネットワークのリンク数の増加に比例して計算負荷が高くなる。計算負荷軽減のため、以下の条件により計算ネットワークを設定した。

- 基本的に奈良県内の県道以上のネットワークを対象とするが、主要地方道以下の1車線道路については、幅員が狭く、災害時において各種要因により途絶する可能性が高いと考えられるため対象外とする。
- 接続脆弱性の評価においては、ODペア間の経路数を評価していることから、分岐のない同一経路上のリンクはそのいずれが途絶しても接続性が断たれるため、1本のリンクと仮定しても計算上同一の結果が得られる。そのため、そのような分岐のない同一経路上のリンクは1本に集約する。

以上より設定した奈良県道路ネットワークのノード数は774、リンク数は1,228（双方向2,456）となった。



図-5 広域防災活動拠点位置



図-6 非重複経路の例

b) 評価対象ODの 設定

奈良県内の39市町村について、市町村役場所在地と最寄りの広域防災活動拠点間の接続性を評価した。広域防災活動拠点は図-5の4施設である。

c) 所要時間制約の設定

本論文では、3.(1)で述べた理由から非重複経路の平均所要時間が拠点間の最短経路所要時間の2倍以下という制約条件を便宜的に設けることとした。

$$\frac{1}{n_{rs}} \sum_{a \in A} t_a x_a \leq 2 \bar{t}_{rs}$$

ここで、 $\bar{t}_{rs}$ はノードrs間の最短経路所要時間を表す。

(2) 計算結果

a) 非重複経路の例

算定した非重複経路の例を図-6に示す。図-6に示す経路は、東部防災活動拠点の消防学校と御杖村及び南部防災活動拠点の吉野川浄化センターと下北山村の非重複経路である。

b) LCIの算出結果

LCIの算出結果（図-7）より、奈良県道路ネットワークにおいて、以下の特徴が見られた。

- ・奈良県南部の国道168号、国道169号、国道309号においてLCIが高くなっており、広域防災活動拠点への接続性について重要なリンクであると言える。
- ・国道309号上に位置する市町村については、吉野川浄化センターへの非重複経路は、迂回路の所要時間が大きくなるため所要時間制約を満たさず1本であり、途絶すると非重複経路が0本になってしまうことから、LCIは1.0となっている。
- ・野迫川村及び黒滝村については接続リンク数が1本であり、そのリンクが途絶した場合非重複経路数は0となることから、LCIは1.0となっている。
- ・拠点到接続するリンクは、非重複経路に含まれている場合が多く、途絶した場合に代替経路の確保が困難であることから、LCIが高くなっている。
- ・拠点到接続するリンク以外でLCIが高くなっているものとしては、国道25号、国道165号、国道166号等が挙げられる。これらは奈良県の東西を結ぶ路線であり、非重複経路に選ばれている。これらの路線については大きな迂回を要さない代替路が少ないため、リンクが途絶した場合には非重複経路が減少し、拠点間の接続性が下がると考えられる。

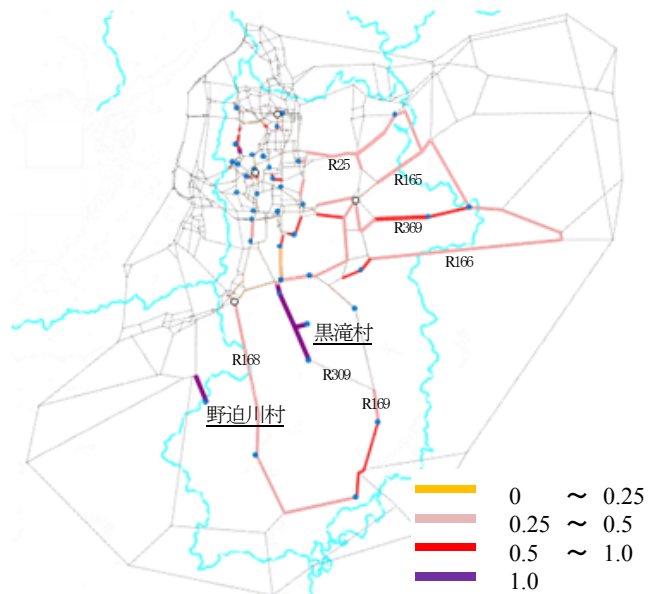


図-7 LCI算出結果

LCIの算出結果をみると、LCIが大きくなっているリンクは中心部から離れた南部地域及び東部地域に多く見られる。これらの地域は、ネットワークが粗くなっていることから、所要時間制約を満たす非重複経路数が少なく、リンクが途絶することによって、代替経路が確保できない状態となっていることを表している。

次節に非重複経路数が減少しているODペアの内訳として接続性低下OD数を見ることでリンクの途絶による影響を受ける市町村を把握する。

c) 途絶による接続性低下OD数

接続性低下OD数を算出した結果、以下のような特徴が見られた。

- ・ 南部地域に非重複経路が 1 本→0 本になるリンクが見られ、特に国道 309 号については、3 拠点の接続性が断たれるリンクが見られる。
- ・ 非重複経路が 2 本→1 本になるリンクは、南部地域及び東部地域に多く見られる。

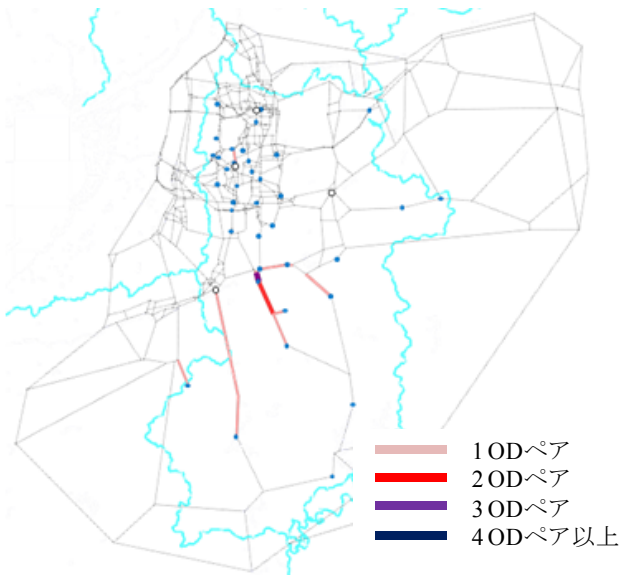


図-8 接続性低下OD数 (1本→0本)

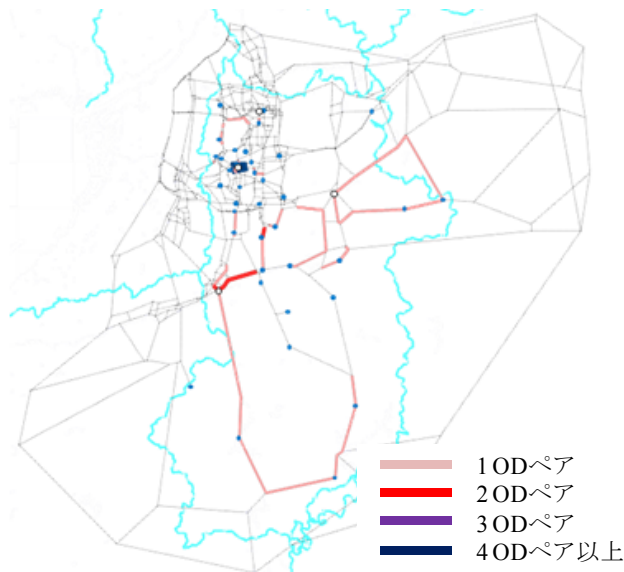


図-9 接続性低下OD数 (2本→1本)

5. 結論

(1) まとめ

本論文では、拠点間の非重複経路に着目した接続脆弱性分析手法を用いてクリティカルリンクを抽出することで、奈良県の道路ネットワークの現状防災機能を評価することができた。

その結果、奈良県道路ネットワークにおいては、ネットワークが粗い南部地域及び東部地域のリンクが、各市町村から広域防災活動拠点間の接続性において重要度が高いことが示された。今回の分析条件によると、国道309号は複数の拠点間の経路となっていることから、重要なリンクであると言える。

(2) 今後の課題

本論文では、所要時間制約を、非重複経路の平均所要時間が最短経路所要時間の2倍以内として相対的な時間設定を行っているが、実際には防災計画に基づいた許容可能な所要時間（〇時間以内に到達など）を設定することが望まれており、その対応が必要である。

また、道路事業等のネットワーク整備による脆弱性の変化を捉えることにより事業の便益評価に活用することも期待される。これに関しては、現在、非重複経路が確保されることによる災害発生時の不安感の軽減効果等を便益換算することによって、費用便益分析の枠組みにより評価する手法が提案されている²⁾。

さらに、分析技術の援用により、施設配置の最適化についても検討が可能である。例えば、災害対策センターは、全てのノードとの接続性が確保されている必要があり、ある接続性（全ノード間の非重複経路数が2本以上等）を確保した状況下において総旅行時間が最小となるノードに配置する等の応用が可能である³⁾。

このように、接続性を配慮する必要がある計画評価において、本分析手法の応用が期待される。

謝辞： 岐阜大学工学部社会基盤工学科の倉内教授には分析手法について丁寧にご指導頂き、また国土交通省近畿地方整備局奈良国道事務所様には貴重な分析の機会を与えて頂きました。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 倉内文孝・宇野伸宏・夏皓清・葉光毅：台湾道路ネットワークにおける接続脆弱性解析とその活用，土木計画学研究・講演集，Vol.42，CD-ROM，2010
- 2) 原田剛志・倉内文孝・高木朗義：接続性確保に着目した道路ネットワーク防災機能の便益評価，土木計画学研究・講演集，Vol.47，CD-ROM，2013
- 3) 瀬戸裕美子・倉内文孝・宇野伸宏：脆弱性の概念を用いた道路網接続性評価に関する研究，土木計画学研究・講演集，Vol.37，CD-ROM，2008