

奈良県道路網の防災機能評価 ～接続脆弱性分析手法の実務的展開～

定金 乾一郎¹・古市 英士²・倉内 文孝³・渡邊 泰伴⁴

¹正会員 一般社団法人 システム科学研究所 (〒604-8223 京都府京都市中京区新町通四条上ル小結棚町428)
E-mail:sadakane@issr-kyoto.or.jp

²正会員 一般社団法人 システム科学研究所 (〒604-8223 京都府京都市中京区新町通四条上ル小結棚町428)
E-mail:fuuchi@issr-kyoto.or.jp

³正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)
E-mail:kurauchi@gifu-u.ac.jp

⁴非会員 国土交通省 近畿地方整備局 奈良国道事務所 計画課 (〒630-8115 奈良県奈良市大宮町3-5-11)
E-mail:watanabe-tjk@kkr.mlit.go.jp

東日本大震災以降、実務においては道路ネットワークの防災機能を評価することへのニーズが高まっている。本研究では、防災機能の一評価手法である、拠点間の接続性に着目した接続脆弱性分析手法を実務の道路ネットワークに適用することで、実務への展開可能性や課題把握について検討を行うことを目的に実施するものである。その結果、前提条件の設定方法、拠点ノードの設定方法、実務ニーズに応じた評価指標等の課題が明らかになった。また、接続脆弱性分析手法の今後の実務的展開にあたっての有効性と課題を確認できた。

Key Words : connectivity, vulnerability, distinct paths, practical business

1. はじめに

東日本大震災以降、道路ネットワーク評価の考え方がB/Cによる道路投資の効率性による事業評価から、災害時に道路ネットワークが果たす機能も加味した評価へと変化してきている。

これを受け、国土交通省では道路事業の防災機能を評価するためのマニュアル^{1) 2)}を策定し、新規事業採択への適用を行っている。しかしながら、このマニュアルで示されている評価手法は事業評価を行うことが前提であり、分析対象道路網は主要地方道以上と粗い。

これに対して、地方道路を管理する行政機関においては、県道レベルの現況道路ネットワークを対象とした防災機能上の問題点の発掘や機能強化すべき個所の対策とその優先順位の検討に結び付くような分析ニーズが高い。

そこで、現状道路ネットワークの防災機能を評価する一手法として、倉内ら^{3) 4) 5)}は拠点間の接続性に着目した評価手法として接続脆弱性分析手法を開発してきた。この手法は拠点間の非重複経路数を分析する手法である。各リンクの途絶による拠点間の非重複経路数の変化状況をもとに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）の抽出が可能となることから、先に示した地方行政のニーズに応えうる手法である。

そこで本研究では、奈良県の県道以上の道路ネットワークを対象に、接続脆弱性分析手法の適用を試みることで、実務における手法の展開可能性の検証と分析する上での課題把握を目的とする。

2. 接続脆弱性分析手法の概要

接続脆弱性分析は、ODペア間に重複のない経路（非重複経路）を数え上げることで、拠点間の接続性を評価する手法である。非重複経路を数え上げるアルゴリズムが瀬戸ら³⁾により開発されており、本研究ではそれを用いて奈良県道路網の分析を行う。以下に非重複経路数算定モデルの概要を説明する。

(1) 非重複経路数算定モデル概要

非重複経路算定モデルは、各リンクを、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 で表し、それを決定変数として、ODペア間の非重複経路数 n_{rs} を最大とする線形最適化問題として記述される。なお、拠点間の非重複経路を構成するリンクの組合せ（二値変数の組合せ）は複数存在する可能性があるため、そのような数ある経路集合の中でもっとももらしいものとして、総所要時間を最小とする経路を線形最適化問

題を解くことで一意に求める。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が、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が可能である。なお、 t_a はリンク a の所要時間を表し、 x_a はリンク a が非重複経路に含まれるか否かを表す二値変数である。次式の左辺は平均所要時間であり、右辺の θ 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

本研究では、奈良県道路網において、途絶により拠点間の接続性を大きく低下させるリンク（クリティカルリンク）を特定することを目的とし、各リンクが途絶した場合に拠点間の接続性に与える影響の大きさを表す指標として、瀬戸ら³⁾により提案されているリンク重要度指標 LCI (link criticality index) を用いる。これは、リンクの途絶による非重複経路数の減少率を全 OD ペア間で足し合わせたものであり、リンク毎に算出される。LCI は、途絶により非重複経路数が減少する OD ペア数が多いほど大きく、また、途絶前の OD ペア間の非重複経路数が少ないリンクが途絶した場合の方が大きくなる。

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

LCI は、各リンクを 1 本ずつ途絶 ($x_a = 0$) 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} を用いて計算できる。リンクが途絶しても、全ての 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 となる。

3. 奈良県道路網への適用と実務上の課題

(1) 分析の前提条件

a) ネットワークの設定

計算ネットワークは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。なお、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した。



図-1 広域防災活動拠点位置

LCI の計算においては、各リンクの途絶ごとに再度非重複経路を求め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。接続脆弱性分析においては、拠点間の経路を分析対象とすることから、同一経路上の分岐のない区間は複数のリンクとして計算しても、1 本のリンクとして計算しても、同様の結果が得られる。そのため、計算負荷軽減のために分岐のない同一経路上のリンクは 1 本に集約したネットワークで計算する。

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。

b) 評価対象 OD の設定

本研究では、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する。広域防災活動拠点は図-1 の 4 施設である。拠点位置は道路ネットワーク上の、最寄りの分岐リンク数が最も多いノードに設定する。最寄りに分岐するノードが無い場合は、リンクの途中にノードを追加し、そこに設定する。非重複経路算定モデルにおいて、非重複経路数の最大値は、評価対象の OD に接続するリンク数のいずれか少ない方となる。本研究では、拠点を近傍のノードに設定しているが、実際には拠点は交差点上に位置するわけではなく、広域的に評価する場合等には、拠点近傍まで到達できれば十分であると考えられることから、拠点周辺のネットワークを集約し、接続するリンク数を増やして選択され得る経路集合を検討する等、設定方法に工夫の余地がある。

表-2、表-3 に本研究で設定した広域防災活動拠点及び市町村の接続リンク数を示す。

表-2 広域防災活動拠点

	エリア	拠点施設名	接続 リンク数
1	北部	県営競輪場	4
2	中部	第2浄化センター	2
3	東部	消防学校	3
4	南部	吉野川浄化センター	4

表-3 市町村

	エリア	名称	接続 リンク数		エリア	名称	接続 リンク数
1	北部	奈良市	4	21	東部	曾爾村	2
2	中部	大和高田市	4	22	東部	御杖村	3
3	北部	大和郡山市	3	23	中部	高取町	2
4	北部	天理市	4	24	中部	明日香村	2
5	中部	橿原市	3	25	中部	上牧町	3
6	東部	桜井市	3	26	中部	王寺町	4
7	南部	五條市	4	27	中部	広陵町	4
8	中部	御所市	3	28	中部	河合町	2
9	北部	生駒市	3	29	南部	吉野町	2
10	中部	香芝市	4	30	南部	大淀町	3
11	中部	葛城市	4	31	南部	下市町	2
12	東部	宇陀市	3	32	南部	黒滝村	1
13	東部	山添村	3	33	南部	天川村	2
14	中部	平群町	2	34	南部	野迫川村	1
15	中部	三郷町	2	35	南部	十津川村	2
16	中部	斑鳩町	2	36	南部	下北山村	2
17	中部	安堵町	3	37	南部	上北山村	2
18	中部	川西町	3	38	南部	川上村	2
19	中部	三宅町	2	39	南部	東吉野村	2
20	中部	田原本町	3				

c) 所要時間制約の設定

本研究では、2.(1)で述べた所要時間制約について、制約がない場合 ($\alpha = \infty$) と、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倍以下の場合 ($\alpha = 2$) について計算する。

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

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) 分析結果

a) 非重複経路の算出結果

各市町村と広域防災活動拠点間の非重複経路数を表-4に示す。五條市と宇陀市については、市町村役場の位置と広域防災活動拠点の位置が近接しているため、計算対象外としている。

$\alpha = \infty$ の場合、黒滝村及び野迫川村の非重複経路が1本となっている。ネットワークの設定上、市町村役場に接続するリンクが1本のみであるためであるが、途絶により接続が断たれる危険性が高い。

$\alpha = 2$ の場合について、非重複経路数が $\alpha = \infty$ の場合より減少する市町村について表に色付けしている。所要時間制約を設けることで、奈良市、大淀町においては非重複経路が2本に減少し、斑鳩町、下市町、天川村、十

表-4 非重複経路数

市町村	接続リンク数	非重複経路数	
		$\alpha = \infty$	$\alpha = 2$
1 奈良市	4	4	2
2 大和高田市	4	2	2
3 大和郡山市	3	3	3
4 天理市	4	4	4
5 橿原市	3	2	2
6 桜井市	3	3	3
7 五條市	4	—	—
8 御所市	3	2	2
9 生駒市	3	3	3
10 香芝市	4	2	2
11 葛城市	4	2	2
12 宇陀市	3	—	—
13 山添村	3	3	3
14 平群町	2	2	2
15 三郷町	2	2	2
16 斑鳩町	2	2	1
17 安堵町	3	2	2
18 川西町	3	2	2
19 三宅町	2	2	2
20 田原本町	3	2	2
21 曾爾村	2	2	2
22 御杖村	3	3	3
23 高取町	2	2	2
24 明日香村	2	2	2
25 上牧町	3	2	2
26 王寺町	4	2	2
27 広陵町	4	2	2
28 河合町	2	2	2
29 吉野町	2	2	2
30 大淀町	3	3	2
31 下市町	2	2	1
32 黒滝村	1	1	1
33 天川村	2	2	1
34 野迫川村	1	1	1
35 十津川村	2	2	1
36 下北山村	2	2	2
37 上北山村	2	2	2
38 川上村	2	2	1
39 東吉野村	2	2	2

津川村、川上村の5市町村においては1本となっている。

b) LCIの算出結果

LCIの算出結果を図-5、図-6に示す。奈良県道路ネットワークにおいて、次の特徴が見られた。

- 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となり、LCIは1.0となる。
- 奈良県南部の国道168号、国道169号、国道309号においてLCIが高くなっている。
- なお、拠点に接続するリンクは、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。
- $\alpha = \infty$ の場合は、拠点に接続するリンク以外は、長大な迂回経路も許容することから、代替経路を確保することができるため、LCIは高くない。

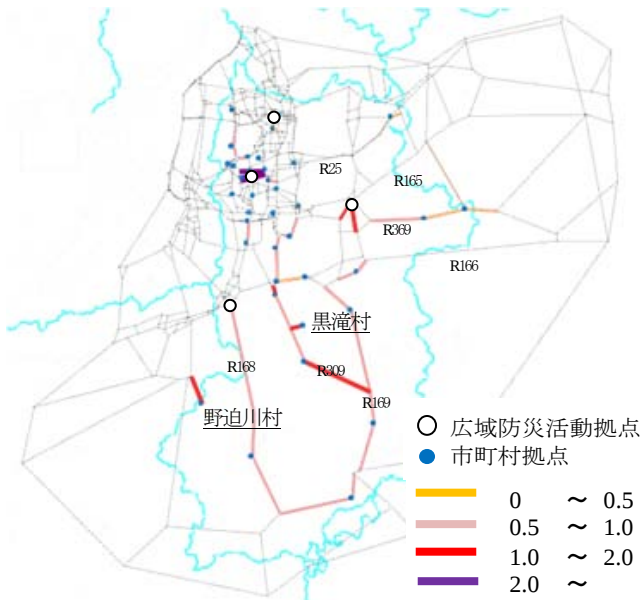


図-5 LCI算出結果($\alpha = \infty$)

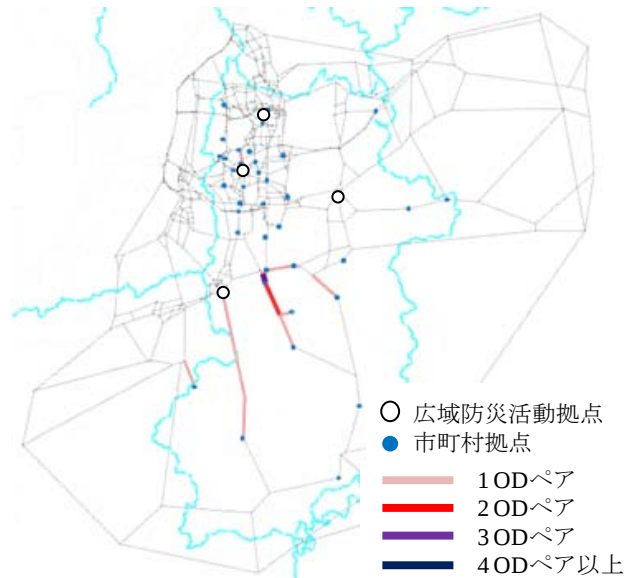


図-7 接続性低下OD数 ($\alpha = 2$)

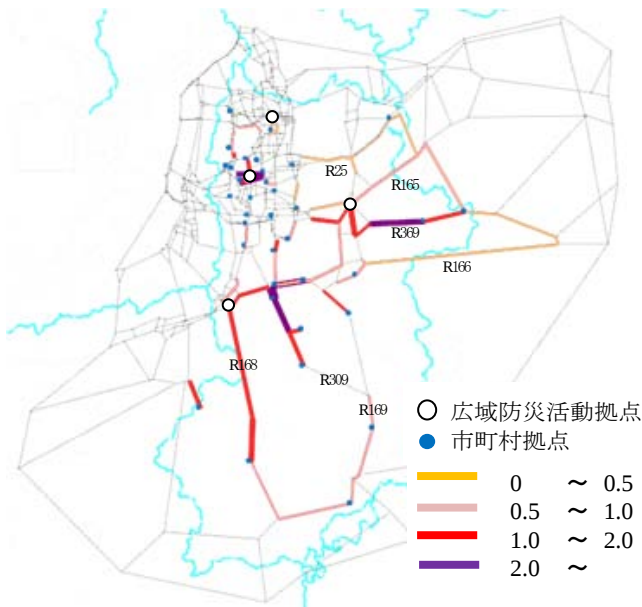


図-6 LCI算出結果($\alpha = 2$)

- $\alpha = 2$ の場合において、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本となっており、その経路上のリンクが途絶することで、非重複経路が減少するため、LCIが高くなっている。
- $\alpha = 2$ の場合において、拠点に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。これらは代替路が大きな迂回を要するため、リンクが途絶した場合には非重複経路が減少し、拠点間の接続性が低下すると考えられる。

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。

c) 途絶による接続性低下OD数

平常時に非重複経路が1本のみであるODについて、リンクが途絶した場合に代替となる非重複経路が確保できない場合、そのOD間は接続が断たれてしまう。そのようなリンクは拠点間の接続性において特に重要であると考えられ、実務上そのようなリンクの特定が求められている。

上記のLCIは、評価対象の全てのOD間の非重複経路数の減少率を足し合わせた指標であるため、各リンクの相対的な重要度を評価することは可能であるが、途絶によりOD間の接続が断たれるリンクを特定することは出来ない。そこで、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本となるODペアの数（接続性低下OD数）を、クリティカルリンクを抽出するための指標として算出した。

なお、所要時間制約が無い場合、拠点に接続するリンク以外のリンクが途絶しても、所要時間が長大となっても代替路が確保されるため、OD間の接続は断たれない。そのため、所要時間制約がある場合について、接続性低下OD数を算出し、拠点間の接続上問題のあるリンクを特定する。算出結果は図-7のようになり、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。

- ・ 国道 369 号については LCI は高くなっているものの、接続性低下 OD 数は 0 であるため、南部地域の道路の方が脆弱であると言える。

(3) 実務上の問題点

奈良県道路ネットワークの接続脆弱性分析を通して、下記の実務上における問題点が明らかとなった。

a) LCI の限界

本研究で用いた LCI 指標では、リンク間の相対的な重要度を評価することが可能である。一方、実務上では、途絶により OD 間の接続が断たれてしまうようなリンクの評価も重要であり、LCI ではそのようなリンクを評価することはできないため、本研究で提案した接続性低下 OD 数のような指標による評価が必要である。

b) 所要時間制約の必要性

緊急輸送物資、医療搬送などは限られた時間内での搬送が求められるため、実務上は所要時間制約を設けた接続性評価が重要である。また、所要時間制約を設けない場合は、長大な迂回となっても代替路が確保できるため、OD 間の接続性は低下せず、クリティカルリンクの特定が困難となることから、所要時間制約の設定が重要であると言える。

c) 拠点設定及びノードの集約化

非重複経路算定モデルにおいて、非重複経路数は拠点に接続するリンク数に依存することから、拠点の設定次第で分析結果が変化する。広域的に評価する場合等には、拠点近傍まで到達できれば十分であると考えられることから、拠点周辺のネットワークを集約する等、設定方法について検討が必要である。

4. 結論

(1) まとめ

本研究では、拠点間の非重複経路に着目した接続脆弱性分析手法を奈良県道路ネットワークに適用し、クリティカルリンクを抽出することで、現状防災機能を評価することができた。リンク毎に拠点間接続性に与える影響を把握することができ、本分析手法の有効性を確認できた。また、本分析手法の実務的展開にあたっての課題を確認することができた。

(2) 今後の課題

本研究で明らかとなった実務上の課題について、今後の実務への適用を通して検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局、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）、2011.9
- 2) 国土交通省道路局、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）、2011.9
- 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
- 4) 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
- 5) 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

(*****) 受付