

非重複経路本数とアクセシビリティ指標に基づく岐阜県道路ネットワークの接続脆弱性評価

岐阜大学 学生会員 ○原田剛志 岐阜大学 正会員 倉内文孝

1. はじめに

災害発生後には、道路途絶により目的地に到達できない状況が起こりうる。そのため、最低限の機能として到着できるかどうか、すなわちノード間の接続性を評価する必要がある。また、一部のリンク途絶により複数の OD ペアに悪影響が生じうる。これらの背景を踏まえ、本研究では接続性の観点から発着地間の到達の可能性を評価し、脆弱性の観点から、道路網がもつ潜在的な弱点箇所を特定する評価方法論の構築を目指す。

2. 接続性評価と接続脆弱性

2.1. 接続性評価方法

本研究では、OD ペア間の接続について、強さと質の2つの視点で評価する。接続が強いとは、多くの経路が存在し、少数のリンク途絶が生じて経路が残り、到達の可能性が大きいことを意味する。また、接続の質が高いとは、比較的短い所要時間で到達できる、あるいは到達後に得られる機会が大きいことを意味する。

a) 接続の強さの評価

接続の強さは、OD ペア間の非重複経路数を用いて評価する。リンク重複のない経路が n 本存在すれば、 $n-1$ 本の途絶が起きたとしても接続性が確保される。非重複経路の数え上げについては、Kurauchi ら¹⁾により提案された非重複経路の数え上げ法を活用する。

$\max n_{ij}$

Subject to

$$\sum_a c_a x_a^* \leq n_{ij} \alpha$$

$$x^* = \arg \min_x \sum_a c_a x_a$$

Subject to

$$\sum_{a \in \text{out}(i)} x_a = n_{ij}, \sum_{a \in \text{out}(j)} x_a = 0,$$

$$\sum_{a \in \text{in}(i)} x_a = 0, \sum_{a \in \text{in}(j)} x_a = n_{ij},$$

$$\sum_{a \in \text{in}(k)} x_a - \sum_{a \in \text{out}(k)} x_a = 0, k \in V, k \neq i, j$$

$$x_a \in \{0, 1\}$$

ただし、 n_{ij} : OD ペア (i, j) 間の非重複経路数、 c_a : リンク a の所要時間、 α : 非重複経路の平均所要時間に関する閾値、 x_a : リンク a が非重複経路構成リンクであれば1、そうでなければ0をとる変数(未知変数)、 V : 全ノードの集合、 $\text{in}(k), \text{out}(k)$: それぞれノード k の流入、流出リンクの集合。

α の設定によって、非重複経路の平均所要時間に上限値が与えられるため、対象事象の緊急度を考慮できる。

b) 接続の質の評価

接続の質については、到達のしやすさと到達後に得られる機会について重みづけできるアクセシビリティ指標(式1)を導入し、与件の接続経路本数 n の場合におけるアクセシビリティを算出することとした。

$$A_{in} = \sum_j D_j / (1 - e^{\beta c_{ijn} - \theta}) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 A_{in} : 非重複経路 n 本確保されているときのノード i の人が享受できる機会の大きさ、 D_j : ノード j で供給可能なサービス、 β, θ : パラメータ、 c_{ijn} : 非重複経路が n 本確保されている場合の ij 間の非重複経路の平均所要時間(接続の強さを求める際に得られた結果)。

2.2. ノードの接続脆弱性

上記で説明した接続性評価手法を用いて、接続脆弱性評価を行う。具体的には、ネットワーク上のリンクを途絶させた際のアクセシビリティを再計算し、以下に述べる指標を用いてノードの脆弱性²⁾を評価する。

a) 接続強度 (NC)

$$NC_{ia}(\alpha) = \sum_j n_{ija}(\alpha) \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 $NC_{ia}(\alpha)$: ノード i について、リンク a 途絶時に所要時間 α 分を閾値とした場合の接続強度、 $n_{ija}(\alpha)$: リンク a 途絶時に α 分以内に到達可能な ij 間の非重複経路本数(接続の強さを求める際の目的関数)。

b) アクセシビリティ減少率 (RA)

$$RA_{ia} = (AI_{i0} - AI_{ia}) / AI_{i0} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 RA_{ia} : リンク a 途絶時のノード i のアクセシビリティ減少率、 AI_{ia} : リンク a 途絶時のアクセシビリティ ($a=0$ なら平常時)。

2.3. クリティカルリンクの特定

ノード脆弱性に大きな影響を及ぼすリンクをクリティカルリンク²⁾とし、接続強度から見た重要性和、アクセシビリティから見た重要性で評価する。

a) 接続強度減少指標 (NCI)

$$NCI_a(\alpha) = \sum_i (NC_{i0}(\alpha) - NC_{ia}(\alpha)) / \sum_i NC_{i0}(\alpha) \dots \dots (4)$$

ただし、 $NCI_a(\alpha)$: リンク a 途絶時に所要時間 α 分を閾値とした場合のリンク a がネットワーク上のノードの接続強度に及ぼす影響。

b) アクセシビリティ低下指標 (RAI)

$$RAI_a = \sum_i (AI_{i0} - AI_{ia}) / \sum_i AI_{i0} \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 RAI_a : リンク a の途絶がネットワーク上の評価対象ノードの全体のアクセシビリティに及ぼす影響。

3. 例題ネットワークにおける試算

提案した指標を用い、岐阜県道路ネットワークの接続性および接続脆弱性の評価を試みる。本稿では、災害直後に重傷患者を大規模病院へ搬送する場合を想定し、主要ノードと医療施設の間に非重複経路を2本確保する場合のアクセシビリティ試算結果を報告する。

3.1. 計算対象ネットワークと入力データ

ノード数 1780、リンク数 4768 の岐阜県ネットワークを用いる。「災害拠点病院」「救命救急センター」としてデータベース³⁾に登録されている9つの医療施設を取り上げ、8つの主要ノードから表1に示した医療施設へのアクセシビリティを評価する。医療機会について、式(1)の D_j は病床数で表現することとし、2010年10月の値を使用した。同一ノードに施設がある大垣、高山では、病床数をそのまま用いる。

アクセシビリティ指標のパラメータは、カーラーの救命曲線を参考にする。所要時間が30分である場合にアクセシビリティが平常時の0.5として計算されるパラメータ、 $\beta=0.17$ 、 $\theta=5.3$ を用いた。

3.2. 計算結果の考察

平常時のアクセシビリティを表2に示す。郡上と下呂が平常時から医療機会が少ない結果となった。表3より、これらのノードが脆弱であることがわかり、平常時にアクセシビリティの相対的に低い場所が脆弱と判定されていることがわかる。一方で、恵那、山県など、平常時に高いアクセシビリティを有するにもかかわらず、特定のリンク途絶によって大幅に低下してしまう可能性もある。クリティカルリンクについてみると、上位3つのリンクは岐阜市周辺に存在した(図1)。迂回を余儀なくされ、アクセシビリティが大きく減少したためである。特に、3291、3293の国道256号は、山県市と岐阜市中心を結ぶ重要路線であり、平常時の重要路線が災害発生時にも重要といえる。平常時のアクセシビリティを高めるような施策を行うことで、脆弱性を低下させる可能性が示されたといえる。一方で興味深いのが、表3に示したノード脆弱性を高めるリンクが、表4の式(5)で示されるクリティカルリンク判定指標では抽出されなかったことである。これは、式(5)では、すべての出発ノードでの総和をとっていることから、より多くの出発ノードへ影響を及ぼすリンクが相対的に重要と判定されるためと考えられる。

表1 医療施設名³⁾と病床数

ID	施設名	床数	ID	施設名	床数
1	大垣市民病院	888	6	岐阜県総合医療 C	590
2	高山赤十字病院	506	7	岐阜大附属病院	606
3	中濃厚生病院	383	8	中津川市民病院	360
4	木沢記念病院	452	9	県立多治見病院	627
5	岐阜赤十字病院	300			

表2 平常時のアクセシビリティ計算結果

病院→	1	2	3	4	5	6	7	8	9
岐阜	272	0	117	21	297	566	485	0	0
大垣	888	0	2	0	86	87	10	0	0
高山	0	506	0	0	0	0	0	0	0
恵那	0	0	0	2	0	0	0	261	51
可児	0	0	65	384	1	7	0	0	443
山県	2	0	170	24	121	100	485	0	0
郡上	0	0	19	2	0	2	0	0	0
下呂	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表3 脆弱ノード判定結果 (NCI 計算結果)

都市	NCI	途絶リンク	都市	NCI	途絶リンク
下呂	1.00	2708	可児	0.33	4706
郡上	0.99	816	岐阜	0.12	1027
恵那	0.59	4480	大垣	0.04	3498
山県	0.46	3296	高山	0.00	-

表4 クリティカルリンク判定結果 (RAI 計算結果)

リンク	変化量	RAI	リンク	変化量	RAI
3293	411.9	0.08	3291	338.6	0.06
3236	373.5	0.07	4705	337.3	0.06

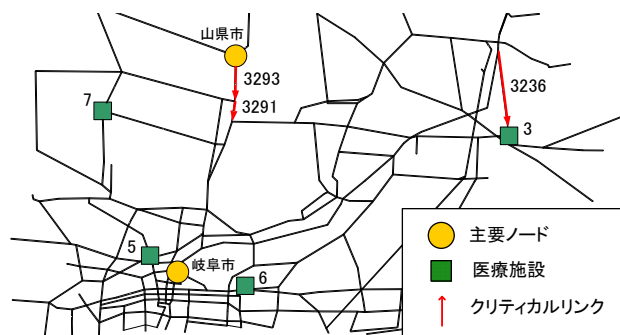


図1 岐阜市周辺における計算結果

4. おわりに

本稿では、接続性評価手法および脆弱性概念を用いた脆弱性ノードとクリティカルリンクの特定法を提案した。また、岐阜県道路ネットワークを対象に医療機会を評価した結果を報告した。今後は、非重複経路数を変化させた場合などパラメータの感度分析を行うとともに、複数の移動目的への対応等を行う。

参考文献

- 1) Kurauchi, F., Uno, N., Sumalee, A. and Seto, Y. "Network Evaluation Based on Connectivity Vulnerability", Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee, 637-649, 2009.
- 2) Taylor, M., Sekhar, S. and D'Este, G. : "Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks", Network and Spatial Economics, Vol.6, No.3-4, pp.267-291, 2006.
- 3) 独立行政法人地震防災フロンティア研究所:「災害拠点病院等データベース Web 版」, 2010.1月更新