

第IV部門

脆弱性の概念による道路網接続性評価方法の提案

京都大学工学部 学生員 ○瀬戸裕美子

京都大学工学研究科 正会員 倉内 文孝

京都大学経営管理研究部 正会員 宇野 伸宏

1. はじめに

高度に成熟した現代社会において、想定外の事象が発生したとしても深刻な遅延が生じないような信頼性の高いネットワークの構築が非常に重要である。本研究では、事象発生確率と事象の深刻度の積により評価する従来の信頼性評価手法では、事象発生確率の推定精度に結果が大きく依存することを受け、最悪ケースを想定しその事象の深刻度のみに着目した道路ネットワーク評価手法を提案する。また、道路機能に影響を及ぼすイベントが生じた際にも主な発着地間がつながっていることがまず重要であると考え、交通需要に依存せずネットワーク形状からのみの評価を考える。簡単な仮想ネットワークにおける例題計算を通してその動作を検証した結果を報告する。

2. 接続性評価の方法

(1) N-Edge-Connected Network

事象発生確率を考慮せずそのインパクトのみを評価するために、N-edge-connected network¹⁾の概念を援用する。N-edge-connected network とは、全ての OD ペアについて、非重複経路が最低 N 本存在するようなネットワークを意味し、最大 N-1 本のリンクが途絶したとしても全ての OD ペアの連結性が保たれるネットワークを表す。つまり、最も都合の悪い N-1 本のリンクが途絶したとしても OD 間の接続性が確保されるという評価となり、最悪ケースを想定する脆弱性解析 (Vulnerability Analysis) と整合する評価手法を構成できる。ただし、道路ネットワークにおいてはあまりに長大な迂回路は非現実的であるため、経路本数算定の際には経路のサービス上限も設定することも考える。

(2) 変数および記号の定義

V	: ノード集合
E	: 有向リンクの集合
rs	: 任意の OD ペア ($r \neq s, rs \in V$)
n_{rs}	: rs 間のリンク重複のない経路本数
E_{rs}	: rs 間のリンク重複のない経路セットを構成するリンク集合 ($E_{rs} \subset E$)
x_a	: リンク $a(a \in E)$ が $a \in E_{rs}$ ならば 1, $a \notin E_{rs}$ ならば 0 の 0-1 変数
$\text{in}(i)$	: ノード i への流入リンク集合
$\text{out}(i)$	: ノード i からの流出リンク集合
c_a	: リンク a の所要時間

 $\tilde{c}_{rs}$: OD ペア間の最短経路所要時間 α : 許容可能な経路所要時間の上限を表す定数

(3) 非重複経路数算出モデル

非重複経路数算出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 $\mathbf{x}$ である。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。

これらの条件の元に、非重複経路数 n_{rs} を最大とする問題として非重複経路数算出モデルは次のように記述できる。

Max n_{rs}

subject to

$$\sum_a c_a x_a^* \leq \alpha \tilde{c}_{rs} n_{rs}$$

$$\mathbf{x}^* = \arg \min_x \sum_a c_a x_a$$

subject to

$$\sum_{a \in \text{out}(r)} x_a = n_{rs}, \sum_{a \in \text{out}(s)} x_a = 0$$

$$\sum_{a \in \text{in}(s)} x_a = n_{rs}, \sum_{a \in \text{in}(r)} x_a = 0$$

$$\sum_{a \in \text{in}(i)} x_a - \sum_{a \in \text{out}(i)} x_a = 0 \quad i \in V, i \neq r, s$$

1 番目の制約条件は、「全経路の所要時間の平均値が、最短経路所要時間の α 倍まで」に規定するものである。2 番目の制約条件は、複数ある最大の n_{rs} を実現する構成リンク集合の中で最適なものを求めるための問題であり、この問題の目的関数値が 1 番目の制約条件の左辺となっている。この問題は、簡単な線形整数計画問題で記述可能である。

(4) 評価の方法

非重複経路算定モデルを適用した結果、非重複経路数が

比較的少ない OD ペアが脆弱といえるし、また全 OD ペアの非重複経路数の累積分布をみることで異なるネットワークの接続性能を比較することも可能である。さらに、その途絶がネットワークの接続性に深刻な影響を及ぼすリンク、すなわちクリティカルリンクを特定することもできる。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上記のモデルを再計算し、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。この値が大きければ、途絶時に非重複経路数が減少する OD ペアが多いという意味でクリティカルといえる。

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

3. 例題ネットワークへの適用

提案したモデルを図 1 の例題ネットワークに適用する。リンク中央にはそれぞれの所要時間を示している。対角線上のノードをセントロイドとし、OD を設定する。サービス上限を表す定数 α を変えて計算すると、各 OD ペア間の経路数は図 2 に示す通りとなった。 $\alpha=1$ の時は、当然全ての OD ペア間には最短経路のみが許容される。 $\alpha=2$ の時、非重複経路数は増加するが、OD ペア 7-9 と 9-13 には依然として確保される経路が 1 本のみである。これらのペア間の最短経路所要時間は他の OD ペア間に比べて極めて小さく、それに対する次善経路が確保されにくいためである。さらに、許容可能な所要時間に上限がない時、ここで示したネットワークでは端点の 4 つのセントロイドを含む OD ペアが脆弱という結果となった。

続いて、LCI を計算した結果を表 1 に示す。 α の値が小さな時には LCI の値が大きく、途絶の影響度が比較的大きい。また、 α によってクリティカルリンクが変わっているが、これは想定する状況に応じて重要とされるリンクが変わることを示唆する結果となっている。

4. おわりに

本稿では、脆弱性の概念を援用した道路ネットワーク接続性評価手法を提案した。提案した評価手法は、許容可能な経路所要時間に上限を用いることで現実的な評価が可能であり、簡単な線形最適化問題で記述できるため大規模ネットワークにも適用可能といえる。例題ネットワークに適用して提案したモデルの動作を確認したが、今後はこのモデルを用いて、実際に即した道路ネットワークの接続性評価を行う予定である。

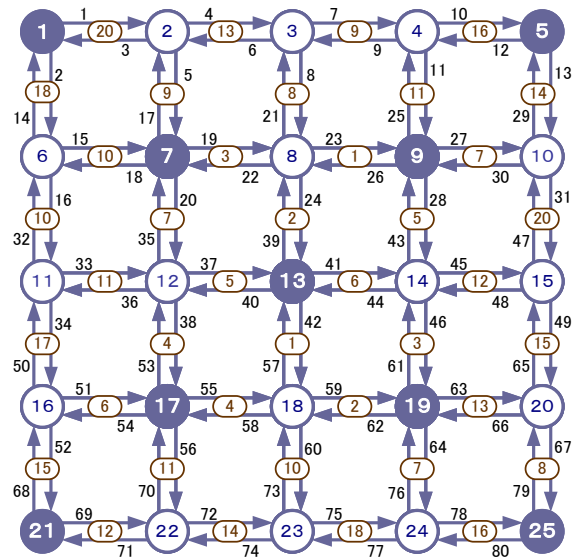


図 1 例題ネットワーク

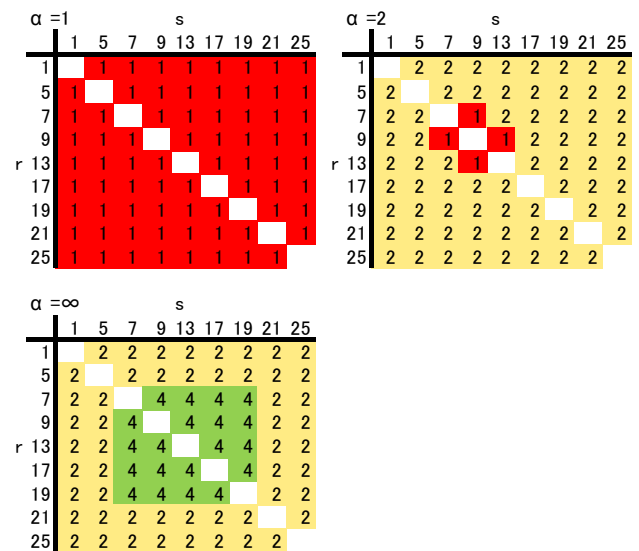


図 2 OD ペア間の非重複経路数 ($\alpha=1,2,\infty$)

表 1 LCI 計算結果 ($\alpha=1,2,\infty$)

$\alpha=1$			$\alpha=2$			$\alpha=\infty$		
順位	LinkNo.	LCI	順位	LinkNo.	LCI	順位	LinkNo.	LCI
1	24	0.278	1	1	0.056	1	1	0.056
1	39	0.278	1	2	0.056	1	2	0.056
1	42	0.278	1	3	0.056	1	3	0.056
1	57	0.278	1	10	0.056	1	10	0.056
5	19	0.194	1	12	0.056	1	12	0.056
5	22	0.194	1	13	0.056	1	13	0.056
5	23	0.194	1	14	0.056	1	14	0.056
5	26	0.194	1	29	0.056	1	29	0.056
5	55	0.194	1	52	0.056	1	52	0.056
5	58	0.194	1	67	0.056	1	67	0.056
5	59	0.194	1	68	0.056	1	68	0.056
5	62	0.194	1	69	0.056	1	69	0.056
13	2	0.111	1	71	0.056	1	71	0.056
13	13	0.111	1	78	0.056	1	78	0.056
13	14	0.111	1	79	0.056	1	79	0.056
13	15	0.111	1	80	0.056	1	80	0.056

参考文献

- 1) Grötschel, M., Design of survivable networks. Handbook in Operations Research and Management Science, 7, pp.617-672, 1995