

大規模災害時における拠点間連結評価のための道路網脆弱性分析方法

岐阜大学 正会員 ○杉浦聡志

1. はじめに

大規模災害時において道路の途絶により陸路による被災地への進入が不可能となれば、救急輸送や物資輸送は困難となる。迅速な緊急対応、復旧・復興のためには支援可能な地域と被災地が連結されることが極めて重要である。被災地と支援する地域の上に1つの経路も存在しなくなるとき（以下、孤立という）のリンク途絶の組み合わせは無数に存在しうる。孤立するリンク途絶の組み合わせのうち、孤立するのに必要な最小のリンク数（以下、最小途絶リンク数という）は、潜在的な道路の脆弱性を表現すると考える。地域間の道路網において脆弱性を評価することは、防災投資や事前の用意のために有用であろう。特に連結性を失わせうるリンクが把握できれば、耐災化や災害発生後の啓開作業の優先順位などに活用できると考えられる。本研究では最小途絶リンク数を評価する方法および、その最小途絶リンク数で孤立するときの途絶リンクの組み合わせを求める方法を構築する。構築した方法を岐阜県の道路ネットワークに適用した結果を示す。

2. 道路網脆弱性評価方法

最小途絶リンク数はグラフ理論の分野で辺連結度として知られている。また、Mengerの定理により辺連結度と辺素な道の最大数は等しいことが証明されている。辺素な道とは、ある起終点を結ぶ複数の経路間でリンクを共有しない経路の集合のことである。辺素な道の概念を道路ネットワークに適用した知見としてKurauchi et al¹⁾がある。本研究ではKurauchi et al¹⁾で提案された手法を援用して辺素な道の最大数を求める以下の問題により辺連結度を評価する。

$$\max_{x,y} y - \varepsilon \sum_{a \in A} x_a \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{out(s)} x_a - y = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{in(t)} x_a - y = 0 \quad (3)$$

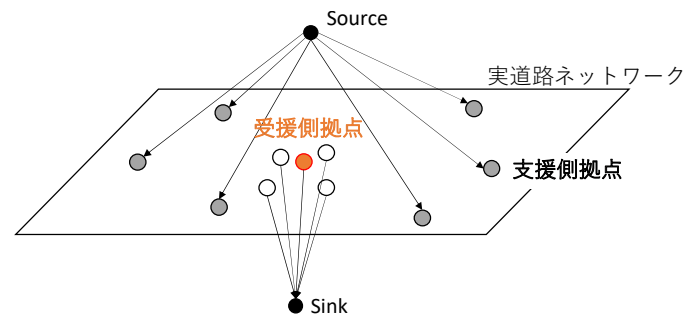


図-1 拠点間のOne to One ネットワーク

$$\sum_{in(n)} x_a - \sum_{out(n)} x_a = 0 \quad \forall n \in N \quad (4)$$

$$x = \{0,1\} \quad y = \{0,1,2 \dots\} \quad (5)$$

ただし、 y は辺素な道の数（未知変数）、 x_a はリンク a が辺素な道に含まれれば1、そうでなければ0をとる未知変数、 $out(k)$ はノード k から流出するリンクの集合、 $in(k)$ はノード k に流入するリンクの集合、 N は道路ネットワークのノード n の集合、 s は起点ノード、 t は終点ノードを示す。

被災地の孤立に係る道路網評価という観点からすれば、どの支援側拠点からでも経路が存在すれば被災地への進入が可能である。そこで、本研究では被災地と支援が可能な地域という2つの地域間の連結性を評価するため、対象とするネットワークに工夫を加える。まず評価対象とする地域の市役所など中心となる施設を受援側拠点とする。つぎに、受援側の地域と同時に被災しないと想定され、支援側の災害時の拠点となりうる施設を複数設定する。また、真の起点を表現するダミーノード（Source）と真の終点を表現するダミーノード（Sink）をネットワークに設ける。Sourceと支援側の施設を1つ以上のリンクで接続し、受援側の施設とSinkも同様に1つ以上のリンクで接続する。これにより、図-1のように受援地域と支援地域間の連結を表現するためのOne to Oneネットワークとして記述される。

最小途絶リンク数を実現する途絶リンクの組み合わせは「最小カット集合」として知られている。最小カット集合の導出は以下の手順で可能である。この

手順で最小カット集合が導出可能であることを示すためには、数学的証明が必要となるが、紙面の制約上ここでは割愛する。

Step1 : 評価対象のリンクをすべて接続したネットワークで辺素な道, 辺連結度の値 N を導出する。

Step2 : Step1 で $x_a = 1$ となったリンクを用いて, 経路探索により経路を特定する。経路は N 回探索し, 各回で使用されたリンクは以降では除去する。経路探索方法の方法は問わない。

Step3 : Step1 で $x_a = 1$ となったリンク全てについて, 1 つずつ除去したネットワークを用意し, それぞれ辺連結度を算出し, 辺連結度が $N-1$ となるリンク (ボトルネックという) を特定する。

Step4 : Step2 で特定した経路上に存在するボトルネックを各経路からそれぞれ 1 つずつ選択したリンクの組み合わせが最小カット集合となる。

Step2 で特定した経路上にはボトルネックが複数存在することも生じる。そのため, 最小カット集合は複数の組み合わせが存在しうる。Step4 で経路に複数のボトルネックが存在するとき, いずれか 1 つを選択するかによる組み合わせを生成すれば, すべての最小カット集合を列挙することが可能である。

3. 岐阜県道路ネットワークへの適用

構築した道路網連結性評価方法を岐阜県周辺の道路ネットワークに適用する。まず, 郡上市役所を支援側の拠点, 支援側の拠点到岐阜県内の 9 市役所を設定した図-2 に示した道路ネットワークを対象とする。郡上市役所から街路等で経路が無数に想定できるノードを 5 つ選定し, 各 2 つずつダミーリンクを Sink と接続した。リンク数はダミーリンクを含めて 4796, ノード数は Source と Sink を含めて 1782 である。試算の結果, 辺連結度は 5 であり, 最小カット集合は図-3 に示す黄色破線の通りであった。ボトルネックの多くは郡上市役所周辺に集中した。すなわち, 山間地に位置する郡上市役所は市街地への進入路が限定的であり, 連結の弱点となっていることがわかる。一方で, 図-3 で 2 と表示したボトルネックだけは市街地への進入路ではない。このボトルネックより郡上市街地側には 2 つの路線が供用されているものの, 当該地点で 1 つのリンクのみとなるため, ボトルネックとなっている。したがって, 大規模災害時にはこのリンクが孤立の原因となることも考えられる



図-2 岐阜県周辺の対象ネットワーク

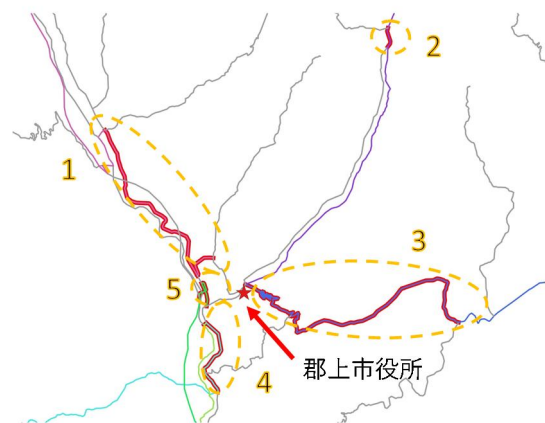


図-3 ボトルネックの位置図

ため, 市街地近辺ではないが, 管理者は注意を払う必要があるだろう。このように本研究の提案手法で道路網の連結性を評価し, 連結性を失わせうるリンクを特定することができる。他のネットワークでも試算しているが, 結果については紙面の制約のため発表時に報告する。

4. おわりに

本研究は大規模災害時における拠点間連結性を評価するための方法について構築した。構築した方法を岐阜県周辺の道路ネットワークに適用し, 計算可能であること, 連結性としての辺連結度と最小カット集合を導出可能であることを示した。今後は他の道路網表羽化方法との比較により提案手法の特性の把握, および街路などを含む大規模ネットワークでの適用性の確認が必要である。

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, pp.637-679, 2009.