

貪欲法に基づく道路ネットワークの復旧リンク選定に関する考察

金沢大学 正会員 ○小林俊一 中山晶一郎 山口裕道
同 学生会員 坪川秀太朗, 非会員 Tran Thanh Hai

1. はじめに

広域的な災害では道路ネットワークの複数のリンクが被災し、地域が分断される恐れがある。著者らは木構造を利用した貪欲法にもとづくアルゴリズムによって、ネットワークの分断状況、および復旧リンクのリンク長が最短となる条件を課して復旧リンクを選定する方法を提案した¹⁾。本報では、復旧リンク選定に当たってより現実的な状況に対応するため、復旧に使用できる機材に関する制約条件を検討したので報告する。

2. 貪欲法と最小木計算

(1) Kruskal のアルゴリズム

本論文では無向グラフを対象とする。ネットワークは位置を表すノード、それらを接続するリンクで表現される。各リンクの情報として、リンク番号のほかに始点ノード番号、終点ノード番号およびリンクの重みとしてリンク長を用いる。木構造とはネットワークに属するいくつかのリンクを選択し、閉路（ループ）がない状態で全てのノードについて接続性を確保されている構造のことである。それらの木の中でリンク長合計が最小となるものを最小木という。

Kruskal（クラスカル）のアルゴリズム²⁾は、貪欲法的一种でネットワークの最小木を求めるアルゴリズムである。木構造を構成するリンクのメンバーシップを求める際に、リンク長の短いものから長いものを順に照査し、当該リンクがループを発生しないことが確認できれば最小木メンバーに追加する。このようにして部分木を更新し、最終的に最小木を求める。

またループの判定については部分木集合を導入し、照査するリンクの始点ノードと終点ノードが異なる部分木集合に属している場合にのみ、最小木メンバーに追加した上で部分木集合情報をマージして更新する。部分木集合は到達可能な代表ノードを表す集合で、その元は代表ノードが属する部分木から到達可能な全てのノード番号である。初期値では、到達可能な代表ノードに属する到達可能なノードは自分自身のみであり、元の数はいくつかである。部分木集合情報のマージでは、元の数が多い方の集合にマージする。

(2) 道路ネットワークへの適用

ここでは、通行不可能リンクを含む道路ネットワークへの適用を考える。最初に通行可能なリンクのみに

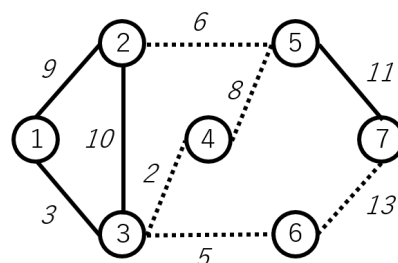


図1 通行不能リンクを含む例題

表1 通行可能リンクに Kruskal 法を適用した結果

ノード番号	部分木集合	元の数
1	3	3
2	3	3
3	3	3
4	4	1
5	7	2
6	6	1
7	7	2

Kruskal のアルゴリズムを適用する。もし道路ネットワークが何らかの形で繋がっておれば、通行可能リンクのうちリンク長合計が最小となる全体木が求められるはずである。一方、ネットワークが分断されている場合は、いくつかの部分木が求められるはずである。この部分木の数、ネットワークが分断された領域の個数と一致する。他にネットワーク分断状況の計算法として、ネットワークのラプラシアン行列の固有値解析によりゼロ固有値の重複個数とチェックする必要方法もあるが、本報告の方法の方が簡単なので計算負荷も小さいメリットがある。

次いで通行可能なリンクで貪欲法による部分木を作ったのち、次に通行不可能なリンクに対して貪欲法によって全体木を作ることも可能である。こうして得られる解は、通行不可能なリンクの中で、全体木を構成するために必要となる修復リンクのリンク長合計が最小となるものである。

上記の計算プロセスは貪欲法を適用するにあたって、ループ生成を照査するリンク群のリストを工夫し、その工学的な意味付けを示したと言える。そこでループ生成を照査するリンク群のリストの作り方に着目し、その工学的な意味についてさらに検討を行った。

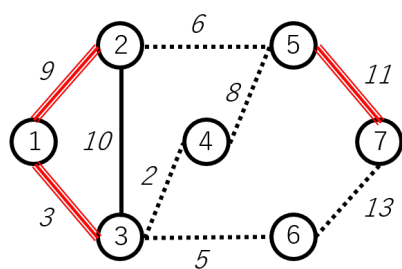


図2 通行可能リンクで構成される部分木

(3) 修復順序に関する検討

通行不可能なリンクを修復するための機材には何らかの制約条件が課せられているのが現実的である。そこで付加情報として修復機材のストック状況をノードごとに定義し、始点あるいは終点ノードにおける修復機材の利用可否情報を含めたリンク群のリストについて検討する。

部分木上の修復機材の移動は、全く自由にかつ所要時間ゼロで移動できると仮定する。すなわち部分木上のいずれかのノードに機材ストックがあれば、部分木上のあらゆるノードで修復機材が利用可能であると考え。また大胆な仮定ではあるが、差し当たって通行不可能リンクの修復にかかる期間を無視でき、修復に取り掛かった順で修復が終了すると考える。

さて、貪欲法を適用するにあたって以下の条件を適用する。ある通行不可能なリンクを修復に当たって、当該リンクの始点か終点ノードのいずれかに修復機材が到達しえない場合には、修復活動が不可能であると考え。また、ある通行不可能リンクが修復すれば、そのリンクの始点及び終点ノードでも修復機材が利用可能であると考え、リンク群のリストを動的にアップデートする。

図-1 に示す幾つかのリンクが通行不能である状態を考える。図中の丸の中の数字はノード番号、リンク横の数字はリンク距離を表し、破線部分が通行不能リンクである。貪欲法に基づく Kruskal のアルゴリズムを通行可能リンクのみについて適用すると、表-1 の結果を得る。部分木集合は 3, 4, 6, 7 の 4 種類なので、4 つの部分木に分断される。これを図示すると図-2 となる。赤色 3 重線のリンクは得られた部分木に所属するリンクである。

つぎに修復機材がノード 6 にストックされている場合を考えよう。通行不可能リンクに対し、リンク長の昇順かつ始終点ノードでの機材利用可否を考慮して貪欲法を適用すれば、まず (3, 6) のリンクを修復、次に (3, 4) のリンクを修復、次に (2, 5) のリンクを修復するという結果が得られる。機材が単一であるので、修復が完了するたびにリンク群リストのデータが

アップデートされる。

これに対して、修復機材がノード 6, 7 にストックされる場合を考えよう。この場合も、修復されるリンクは同じであるが、修復される順序については一考の余地がある。修復に取り掛かった順で修復が終了すると思えば、第 1 段階としては、ノード 6 の機材はリンク (3, 6)、またリンク 7 の機材はリンク (2, 5) の修復に取り掛かる。つぎに第 2 段階として、ノード 6, 7 いずれかあるいは両方の機材でリンク (3, 4) の修復に取り掛かる。この場合、機材は複数であるが、修復が完了するタイミングは同じであるので、やはり修復が完了するたびにリンク群リストのデータがアップデートされる。

より一般的な状況として、1 つのリンク修復は単一の機材で担当するが、修復に要する時間が距離（重み）に比例すると仮定しよう。この仮定の下で複数機材が復旧に当たる場合には、時間域に対して逐次的にリンク群リストのデータを動的にアップデートする必要がある。2 つの機材を初期配置ノード番号にしたがって、機材 6 あるいは 7 と呼ぶことにする。まず時刻 $t = 0$ でリンク (6, 3) および (5, 2) の修復を開始。 $t = 5$ で機材 6 がリンク (6, 3) の修復が終わり、引き続いてリンク (3, 4) の修復を開始。 $t = 6$ で機材 7 がリンク (5, 2) の修復が終えるが、全体木を構成するために必要となる通行不可能リンクがないため、この機材 7 の仕事は終了。 $t = 7$ で機材 6 がリンク (3, 4) の修復を終え、全体木が確保できる。

3. おわりに

本報告では、災害時の緊急復旧等を念頭に、ともかく全体がつながるために必要となる復旧戦略について、木構造の特徴を活かした数理的な手法について議論した。現段階では、かなり割り切った仮定をおき、貪欲法の適用性について検討した。一方で、修復機材については、複数での修復作業による作業短縮、初期配属ノードからの移動可能範囲の制限など、現実にはさまざまな制約条件が存在すると思われる。今後は、それらの制約条件を整理して切り分け、木構造に立脚した復旧戦略計算の特徴について調査を行う予定である。

謝辞：本研究の一部は国土交通省新道路技術会議において採択され、国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究により実施したものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) T.T. Hai, ほか：ネットワーク上に構成する木構造を利用した道路網の緊急復旧ルート選定に関する一考察，第 58 回土木計画学研究発表会，2018.11，CD-ROM.
- 2) Kruskal, J.B.: On the Shortest Spanning Subtree of a Graph and the Traveling Salesman Problem, Proc. of the AMS, Vol. 7, No. 1, pp. 48-50.