

# 災害によるネットワーク寸断を考慮した最適な避難経路探索手法の構築

珠玖 隆行<sup>1</sup>

<sup>1</sup>岡山大学学術研究院 環境生命科学学域

本研究では、地震や豪雨などの災害によって寸断された道路ネットワークを対象とした避難経路探索手法を構築するとともに、どのような対策を行えば、頑健な道路ネットワークを構築できるかを岡山市を対象にした数値シミュレーションを通して検討した。より具体的には、地域の防災力として①避難所への非難に要する時間、および②救援物資が全避難所に運搬されるまでの時間に基づいて、地域防災力を定量的に評価するための方法論を構築し、岡山市北区における地震時の建物倒壊による道路ネットワークの閉塞を取り上げ、建物倒壊に対して地域防災力を効率的に向上させるための対策について検討した。

キーワード：災害，道路ネットワーク，経路探索

## 1. はじめに

災害発生時に人的な被害（死者や負傷者）を最小限に抑えるには、避難準備・避難行動に代表されるソフト対策が重要な役割を果たす。2011年の東日本大震災で発生した津波の際に、適切な避難行動により多くの人命が救われた事例や、逆に適切な避難行動をとることができず多くの犠牲者が出てしまった事例が数多く報告されている。

岡山県では、2018年の7月豪雨により、県北西部を中心に、堤防の破堤や床上床下浸水、斜面崩壊など種々の災害が生じ、広い範囲に甚大な被害をもたらした。災害発生後、申請者らは現地調査を行い、被害状況の把握やメカニズムの解明に取り組んだが、それらの調査項目に加えて、市民の方の避難行動に関する聞き取り調査を行った。その結果、「避難勧告や避難指示が出たときには避難ルートは浸水しており、避難できる状況では無かった」「避難所の周辺が浸水しており、避難所に行くことが危険だと思った」など、避難行動を実施するための事前情報が不十分であったことが明らかとなった。

このように、災害発生時には、災害が発生していない状況で想定された避難経路や避難所、および緊急車両の走行ルートが有効に機能せず、命を守るための避難行動がとれない状況を生み出す可能性がある。そのため、災害発生によって時々刻々と変化する環境を考慮した避難所の設定や避難ルートの選定が、人命を守るための避難行動を実践する上で極めて重要であることがわかる。

本研究では、地震や豪雨などの災害によって寸断された道路ネットワークを対象とした避難経路探索手法を構築するとともに、どのような対策を行えば、頑健な道路ネットワークを構築できるかを検討した。より具体的には、地域の防災力として①避難所への非難に要する時間、

および②救援物資が全避難所に運搬されるまでの時間に基づいて、地域防災力を定量的に評価するための方法論を構築し、岡山県における地震時の建物倒壊による道路ネットワークの閉塞を取り上げ、建物倒壊に対して地域防災力を効率的に向上させるための対策について議論する。

## 2. 解析方法

本章では、提案手法の要素技術である最短経路探索、コスト関数、ネットワーク中心性について説明する。

### (1) 最短経路問題

避難経路の探索問題は、グラフ理論における最短経路問題として解釈することができるため、最短経路問題の概略について説明する。最短経路問題（SPP：Shortest Path Problem）とは、重み付きグラフの与えられた2つのノード間を結ぶ経路の中で、重みが最小の経路を求める最適化問題である。重み付きグラフとは、グラフの辺に重み（コスト）が付いているグラフであるが、本研究で対象とする道路ネットワークは、ノードに距離や所要時間のコストが付いているため、重み付きグラフであると解釈できる。

最短経路問題の中でも、特定の1つのノードから他の全ノードとの間の最短経路を対象とする場合を、単一始点最短経路問題（SSSP：Single Source Shortest Path）と呼ぶが、本研究で対象とする問題は、ある建物から避難時間が最小となる避難所までのパスを探索する問題であるため、SSSPを解くためのアルゴリズムを用いる必要がある。SSSPを解くアルゴリズムとしては、ダイクストラ法<sup>1</sup>やベルマン-フォード法<sup>2,3</sup>がよく知られており、こ

れまで多くのアルゴリズムが低案されているが、ほとんどのアルゴリズムはダイクストラ法に基づいており、本研究でもダイクストラ法に着目した。ダイクストラ法による最短経路問題を解くためのアルゴリズムは以下のように書くことができる。

- i. 始点に0を書き込む
- ii. 未確定の地点の中から、最も小さい値を持つ地点を一つ選び、その値を確定させる（ルート記録）。
- iii. iiで確定した地点から直接つながっていて、かつ未確定な地点に対し、かかる時間を計算し、書き込まれている数より小さければ更新する。
- iv. 全ての地点が確定していれば終了、そうでなければiiiに戻る。

図-1は、ダイクストラ法で対象とするグラフの例を示している。グラフは、ノード（節点or頂点）の集合とエッジ（枝or辺）の集合で構成される構造である。図-1の○がノードであり、ノード間をつなぐ線がエッジに対応している。エッジには重みを与えられており、この重みがノード間の距離や所要時間に対応している。ノードをV、エッジをEとおくと、グラフは次式で定義される。

本研究においても上記の基本的なダイクストラ法のアルゴリズムを用いて道路ネットワークの解析および最短経路探索に用いた。ただし、各ノードの重みの定義や、コスト関数の定義は、災害時の避難経路探索問題に特化したものを提案し、本研究で用いる。

## (2) コスト関数

本研究では住民の避難所への避難及び救援物資の輸送に着目し、次式のコスト関数により地域防災力を評価する。

$$C = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} T1_i + \frac{1}{n_{b1}n_{b2}} \sum_{j=1}^{n_{b1}} \sum_{k=1}^{n_{b2}} T2_{jk} + \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} T3_i \quad (1)$$

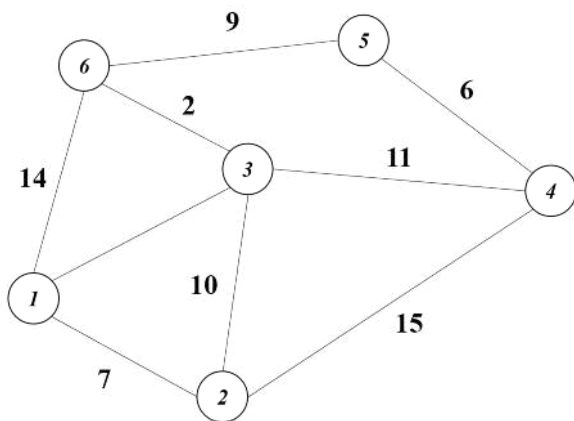


図-1 ダイクストラ法で対象とするグラフの例

ここで、 $T1$ は最も近い避難所への避難時間、 $T2$ は一次拠点から二次拠点への救援物資輸送時間、 $T3$ は二次拠点から避難所への救援物資輸送時間、 $n_p$ は避難者数、 $n_{b1}$ は一次拠点の数、 $n_{b2}$ は二次拠点の数、 $n_s$ は避難所の数である。このコスト関数Cが小さいほど防災力が高い道路閉塞によって、避難経路および救援物資輸送経路が存在しなければ、 $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$ にペナルティ定数として $\gamma$ を与える。式(1)はどのような災害事象にも適用可能であり、例えば、洪水・浸水、斜面崩壊や液状化によるネットワークの寸断などもモデル化することが可能である。

本稿では提案手法の一つの応用例として、地震時の建物倒壊による道路閉塞に着目し、その解析結果を示す。地震による建物倒壊のモデル化には少なくとも以下の不確定要素が含まれるため、ここではMonte Carlo Simulationによって式(1)を確率的に評価した。

- 1) 建物の倒壊確率
- 2) 建物の倒壊方向
- 3) 木造orRC造
- 4) 建物の建築年
- 5) 建物の高さ

解析においては、建物倒壊が発生した場合の瓦礫流出量は建物の高さに等しく、また、道路幅の半分以上に瓦礫が流出すれば道路閉塞が発生するものと仮定している。なお、MCSを効率的に実行するため、OpenMPによる並列計算を行った。建物倒壊による道路ネットワークの寸断を回避するための対策として、種々のものを考えることができるが、ここでは道路に面する建物を耐震補強することにより、防災力を向上させる（式(1)を最小化すること）を考える。本研究では、耐震補強する建物をBetweenness Centrality (BC) <sup>4)</sup>に基づいて効率的に選定する方法を新たに提案する。BCとは、ネットワークにおける各頂点の重要性を解析するための一つの指標であり、応用例として、カーナビの経路探索の効率化を目的に利用されている。BCの計算にはダイクストラ法を用い、BCのスコアが高いノードと接続されている道路に面する建物の耐震化を行うことで、効率的に防災力を向上させることができるかどうかを検討した。

## (3) ネットワークにおける中心性

(1)で示したダイクストラ法により、ある地点から避難時間が最も短くなる避難所までのルートを探査することは可能であり、最短経路の情報を地域住民に提示することで、命を守る避難行動に貢献できると考えられる。一方で、どのような対策をすれば、避難がよりスムーズに進むのか、どのような投資をすれば、被害を軽減できるのか、などの、具体的な対策を議論するためには、避難経路の提示だけでは不十分である。工学的には、ネットワークの中でどの点がブレイクポイントになっている

か、どの点に対して対策を講じれば、避難時間や救援物資の配送時間を短縮でき、地域の防災力を向上させることにつながるか、の情報も必要不可欠となる。

本研究では、ネットワークの中のどの点が重要か？を定量的に評価する指標として、中心性 (centrality) に着目する。中心性とは、グラフ理論やネットワーク分析において、グラフの中の最も重要な点を意味するが、いくつかの定義がある。代表的なものを以下に示す。

**I. 次数中心性 (Degree centrality)** : 次数中心性とは、より多くのエッジ (=他ノードとの関係性) を持つノードを高く評価する指標である。

**II. 近接中心性 (Closeness centrality)** : 近接中心性とは、あるノードから他のノードへの最短経路長の合計の逆数を取ったものであり、ある要件を満たすグラフの最短経路長の「合計」に着目したものと捉えることができる。

**III. 媒介中心性 (Betweenness centrality, Freeman 1977)** : 媒介中心性とは、着目している点以外の2点を結ぶ最短経路のうち、その点を通るものの割合であり、道路ネットワークにおいては、ある地点から目的地に到達するために、歩行者・車がよく通過する点と考えることができる。避難時間や救援物資配送時間の短縮を目的とする対策を講じるために、本研究においてこの媒介中心性を用いる。

媒介中心性は、辺が  $E$ 、頂点が  $V$  のグラフ  $G := (V, E)$  に対して、以下の手順により計算できる。

- 1) 頂点  $s$  と  $t$  のペア  $(s, t)$  に対し、最短のパスを求める
  - 2) それぞれのペア  $(s, t)$  に対し、最短パスのフラクションを求める
  - 3) 全てのペア  $(s, t)$  に対するフラクションの総和をとる
- より簡単には、次式で定義することができる。

$$C_B(v) = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}} \quad (2)$$

ここに、 $C_B$  は媒介中心性、 $\sigma_{st}$  はノード  $s$  からノード  $t$  までの最短経路の合計を意味する。図-2 はあるグラフに対する媒介中心性の例を示している。図中のノードの色が媒介中心性の程度を表し、赤色が低い、青色が高いノードを表している。

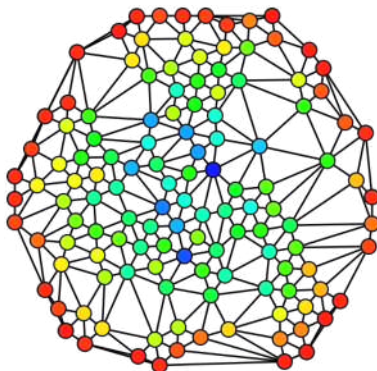


図-2 媒介中心性の例<sup>9)</sup>

### 3. 適用例

本研究で提案した防災力評価モデル、およびBCに基づいた建物の耐震化の有効性を検証するため、岡山市北区を対象に建物倒壊シミュレーションおよび道路ネットワークの解析を行った (図-3)。北区全域に同一震度の地震が発生し、各建物から一人が非難するという条件のもとで計算した。なお、被災者は自宅から最も近い避難所に徒歩で移動し、救援物資は車で輸送されるものとする。ここでは比較のため、表-1に示す4つのケースについて検討を行った。なお、耐震化する建物数は岡山市の予算に基づき決定し、全ての建物にかかる耐震工事費用は簡単のため一律とした。

表-1 検討ケース

Case 1	耐震化なし
Case 2	避難所周辺の建物を耐震化
Case 3	BCに基づいて建物を耐震化
Case 4	全ての建物を耐震化

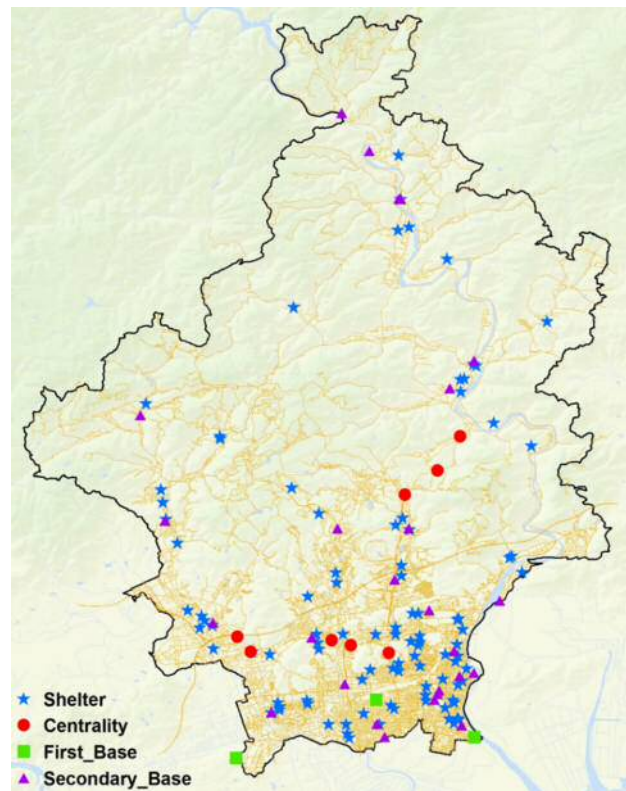


図-3 解析対象の道路ネットワーク

## 4. 結果

計算結果の一例として、各ケースのコスト関数Cの平均値 (Cave) を表-2にまとめ、そのヒストグラムを図2に示す。左上がCase 1, 右上がCase 2, 左下がCase 3, 右下がCase 4に対応している。本結果は、 $W_s$  (歩行速度) = 125m/min, SI (震度) = 7.0,  $\alpha = \beta = 0.2$ ,  $\gamma = 120$ の条件で計算した結果である。ここでは5,000回のMCSを実施したが、5000回の繰り返しで安定的で信頼性の高い結果が得られることを確認している。

図-4から明らかのように、各ケースで左右対象の単峰性の分布が得られた。この分布から、コスト関数を平均値で議論することが合理的であることがわかる。各ケースの比較である表2に着目すると、当然、建物の耐震化を行うことでCaveが減少していることが確認できる。

表-2 コスト関数の平均値

Result	Case			
	1	2	3	4
$C_{ave}$ (sec)	1531	1508	1482	1120
$E$ (sec/piece)		0.032	0.67	0.013

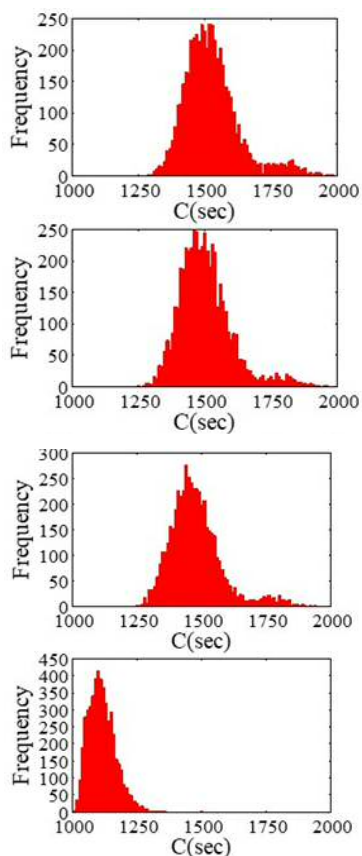


図-4 コスト関数のヒストグラム

Case2とCase3の値を比較すると、避難所の周りの建物の耐震化を行う (Case 2) よりも、本研究で提案するBCに基づく耐震化 (Case 3) の方がCaveを26秒減少させることができる。耐震補強の効率を表す建物1棟毎のCave減少率Eに関しては、約2倍の差が確認できた。全ての建物の耐震化を行えば (Case 4), 大幅にCaveは減少するが、効率を表すEはCase 3の約2%であることから、費用対効果が著しく低い。以上の結果から、本研究で提案する方法により、防災力を定量的に評価できること、また、BCに基づく建物耐震化に関する意思決定が有効であることがわかる。

## 5. まとめ

本研究では、大規模地震によって発生する建物倒壊による道路閉塞を対象に、防災力評価手法を構築するとともに、BCに基づいた耐震化すべき建物の選定方法を提案した。さらに、提案した方法を岡山市北区における地震時の建物倒壊シミュレーションに適用し、その有効性について検討した。数値シミュレーションにより、提案手法の有効性を示すことができたが、提案手法の実用化に向けては解決すべき課題も多い。今後は、計算に必要な経験的なパラメータ、例えば道路閉塞の条件設定などの設定方法を確立するとともに、津波や液状化といった他の自然災害も考慮したモデルを構築することが求められる。

謝辞：本研究は、一般社団法人中国建設弘済会による技術開発支援事業の助成を受けたものです。

### 参考文献

- 1) Dijkstra, E.W.: A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, pp. 269-271, 1959.
- 2) Bellman, R: On a Routing Problem, *Quarterly of Applied Mathematics*, 16(1), pp. 87-90, 1958.
- 3) Ford, L.R and Fulkerson, D.R.: *Flows in Networks*, Princeton University Press, 1962.
- 4) Freeman, L. C.: A set of measures of centrality based upon betweenness, *Sociometry*, Vol.40, No.1, pp.35-41, 1977
- 5) Wikipedia : Centrality , <https://en.wikipedia.org/wiki/Centrality>, 2021年4月20日閲覧。