

発災からの経過時間に依存した道路ネットワークの移動時間の評価 その1

(株)篠塚研究所 正会員 ○中村孝明, 非会員 川上洋介, 正会員 静間俊郎
 東京都市大学 フェロー会員 吉川弘道

1. はじめに

東日本大震災では、事業停止の原因としてライフラインやインフラ施設などの外部要因を挙げる企業が多い。これに備えるには、代替の生産拠点の整備や物流拠点の再編など、大掛かりな対策が必要になるが、その判断には発災時にライフラインやインフラ施設の機能はどの程度低下し、復旧には何日かかるのか、などの情報が必要である。そこで本研究は道路ネットワークを取り上げ、想定地震が発生した際に目的地まで行けるのか否か、迂回による遅延時間は、道路機能は何日程度で復旧するのか、などの予測情報を企業に発信するための情報プラットフォームの整備を目標とする。本報では要素技術となる発災からの経過時間に依存した道路ネットワーク OD 間の移動時間を効率的に評価する方法を整備する。

道路ネットワークの信頼性評価に関する研究は、主に交通工学の分野で進められ、例えば文献 1)~3)などがある。また、災害時の迂回を含めた移動時間に関する研究は、例えば文献 4)~6)などがある。これら研究ではネットワーク状システムの連結信頼度や移動時間の信頼性評価を、如何に効率的に計算するかが主な課題となっている。本報では電子回路設計などで使われる BDD (Binary Decision Diagram)^{7),8)}を適用し、OD 間の移動時間の確率分布を効率的に計算する。またこの確率分布は発災からの経過時間に依存する確率過程を考える。

2. 道路ネットワークの移動時間の評価方法

地震による通行途絶は、盛切土斜面の崩落、橋梁やトンネル被害、さらに道路閉塞の要因となる周辺施設の被害など、様々な被害要因が考えられる。これにより道路機能の復旧期間は多様なものとなる。さらに各要因の被害モード(軽微、中破、倒壊など)によっても復旧期間は異なる。そこで、道路網をノード・リンクでモデル化した際、任意のリンクを通過するのに要する時間は、被害要因、被害モードに応じて図-1 左のような確率分布を持つと考える。ここに、 t は平常時のリンク通過時間、 $t_1, t_2, \dots$ は被災による長期

通行止め期間である。 p_s はリンクの無被害確率であり、この排反事象の確率は地震動の条件付き道路施設被害、あるいは周辺施設被害の発生確率である。

本論では災害復旧は同時復旧の原則に従うものとする。ただし、復旧を同時に行えない物理的な状況もあり、この点については今後の検討課題とする。同時復旧を前提とすると、多点被災であっても復旧工事の工程等に関わりなく、各リンクに想定される復旧期間 $t_1, t_2, \dots$ を過ぎれば、そのリンクは健全な状態に戻ると仮定することができる。つまり発災から $t_1, t_2, \dots$ を経過した時点でリンクの通過時間の

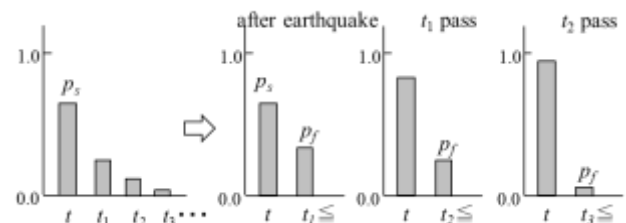


図-1 リンクの通過時間の確率関数

確率分布は、図-1 右のように動的に変化する。これによりリンクの通過時間の確率関数は時間切片に対し有被害と無被害の2値となる。図中の p_f は有被害確率である。

リンクの通過時間の確率関数の動的変化と共に、システム上の OD 間の移動時間の確率関数も動的に変化する。その平均値を経過時間に対し結んだ曲線を移動時間経過曲線と呼ぶこととし、これを図-2 に例示する。縦軸は OD 間の移動時間であり、平常時を 1.0 として基準化している。横軸は発災からの経過時間である。図には経過時間に依

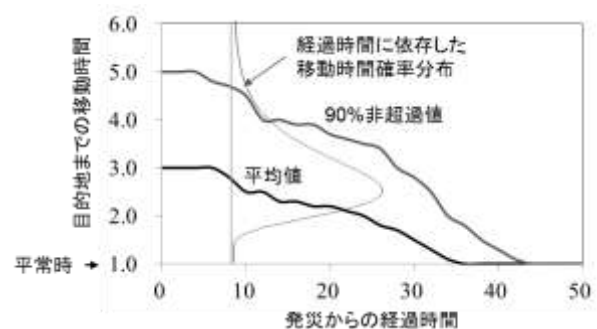


図-2 OD間の移動時間経過曲線

Key words : 道路被災, ネットワーク, 信頼性評価, BDD, 移動時間経過曲線

連絡先: 東京都新宿区西新宿 4 丁目 5-1 幸伸ビル 3F TEL : 03-5351-3781 FAX : 03-5351-3783

存した移動時間の確率分布と 90%非超過の曲線も併記している。この図から目的地までの所要時間は、発災当初は平常時の3倍程度掛かるが、経過時の間とともに復旧が進み30日程度で、通常に戻る、などが分かる。

3. 経過時間に依存した移動時間確率分布の計算方法

OD間の移動経路はシステムの最小パスセットとして得られる。最小パスセットを構成するリンクの部分集合を M_i ($i=1\sim n$)と置き、これを経路と呼ぶ。また健全時の各経路の移動時間を、短い順に $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ とする。なお、各リンクの移動は両方向とする。

ここで、旅行者は移動時間が最も短い経路を選択すること、旅行者は経路に関する被災情報を把握していることなどを前提とする。求める確率事象は短い順に選ばれる経路選択であり、確率変数は経路の移動時間である。そして、リンクの通行止め期間の最小値を超える時間を要する選択経路は目的地まで行き着く行ことができない事象とみなし、これらを同一事象としてまとめる。

まず、旅行者は最も短い時間の経路を選択することから、経路 M_1 を選択する。この場合、経路 M_1 が健全でなければならない。次に、経路 M_1 が損傷により利用できない場合は、経路 M_2 を選択することになる。これは経路 M_1 が損傷かつ経路 M_2 が健全である状態である。これをブール代数の論理式を使い表すと以下ようになる。

$$M_2 \cdot \overline{M_1} = (M_1 \oplus M_2) \cdot \overline{M_1} \quad (2)$$

ここに、 $\cdot$ はブール積、 $\oplus$ ブール和である。 $\overline{M}$ は余事象である。次に、経路 M_3 を選択するには経路 M_1 が損傷かつ経路 M_2 が損傷かつ経路 M_3 が健全である状態である。経路 M_3 を選択する論理式は以下となる。

$$M_3 \cdot \overline{M_1} \cdot \overline{M_2} = (M_1 \oplus M_2 \oplus M_3) \cdot \overline{M_1} \cdot \overline{M_2} \quad (3)$$

(2), (3)式の関係を一般化すると、経路 m を選択するのは、以下の論理式となる。

$$(M_1 \oplus \dots \oplus M_m) \cdot \overline{M_1} \oplus \dots \oplus \overline{M_{m-1}} \quad (4)$$

つまり、経路 m の選択確率は $M_1 \sim M_m$ の和事象確率から、 $M_1 \sim M_{m-1}$ の和事象の余事象確率を差し引けばよい。これより以下の確率計算を順次行えば、全ての経路の選択確率が求められることになる。

$$\begin{aligned} M_1 &\rightarrow M_1 \oplus M_2 \rightarrow M_1 \oplus M_2 \oplus M_3 \\ &\rightarrow \dots \rightarrow M_1 \oplus \dots \oplus M_m \rightarrow \dots \end{aligned} \quad (5)$$

4. BDDの適用と計算フロー

BDD^{7),8)}は論理関数を効率良く表現するデータ構造の一種であり、複雑で大規模なネットワーク構成のシステムに有効である。そこで、 $M_1 \sim M_m$ の和事象確率を求めるのに

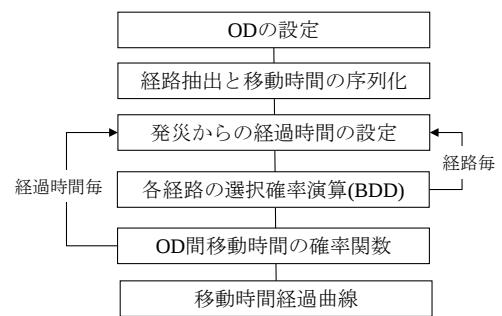


図-3 移動時間経過曲線の計算フロー

BDDを適用する。(5)式にて示されるように、順次新たな経路を加える場合、BDDはより効率的である。図-3に移動時間経過曲線の計算フローを示す。

図より、ODを設定後、経路(最小パスセット)を計算し、健全時のOD間移動時間の短い順に列記する。リンクの通過時間の確率変数(図-1)を所与とし、発災からの経過時間を設定する。BDDを使い短い順に選択される経路(移動時間)毎にその確率を求め、移動時間の確率分布を得る。経過時間を更新し、リンクの損傷確率を変え、同じ計算を繰り返す。経過時間毎の移動時間の確率分布の平均値等を求め、移動時間経過曲線を得る。

その2では、本提案を具体的に計算する。

参考文献

- 1) 中山昌一朗, 高山純一: 交通需要と経路選択の確率変動を考慮した確率的交通ネットワーク均衡モデル, 土木学会論文集 D, Vol.62, No.4, pp.537-547, 2006.11
- 2) 内田賢悦: 交通容量の確率的変動が道路ネットワークの移動時間に与える影響に関する研究, 土木学会論文集 D, Vol.66, No.4, pp.431-441, 2010.10
- 3) 飯田恭敬, 若林拓史, 福島博: 道路網信頼性の近似解析方法の比較研究, 土木学会論文集, No.407 / IV-11, pp.107-116, 1989.7
- 4) 能島暢呂: 要素破壊の相関性を考慮したネットワーク最大フロー評価のシミュレーション, 土木学会論文集 A1, Vol.65, No.1, pp.776-788, 2009
- 5) Chang, S.E. and Nojima, N.: Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective, Transportation Research, Vol.35A, pp.475-494, 2001.
- 6) 内田賢悦, 加賀谷誠一, 高橋尚人, 萩原亨: 交通行動の中止を考慮した災害時における交通ネットワークモデルに関する研究, 土木学会論文集, No.779 / IV-66, pp.1-10, 2005.1.
- 7) Randal E. Bryant: Graph-Based Algorithms for Boolean Function Manipulation. IEEE Transactions on Computers, Vol. C-35, No. 8, pp.677-691, August. 1986.
- 8) Karl S. Brace, Richard L. Rudell and Randal E. Bryant: Efficient Implementation of a BDD Package, In Proceedings of the 27th ACM/IEEE Design Automation Conference, pp.40-45, 1990