

最大フローを指標とする道路ネットワークの地震時信頼性解析手法

広島工業大学工学部 正会員 能島 暢呂

1. はじめに 阪神・淡路大震災における緊急対応や復旧・復興活動は、道路交通の機能マヒによる大きな制約を受け、被災時に円滑な道路交通を確保することが急務であることが明らかとなった。道路網機能の評価指標は、連結性、到達時間、最短距離、処理交通量など様々なものがあり、それらを基準とした信頼性解析には、被災状態が確定後の事後評価と、被災状態が未確定の事前の確率的評価がある。本研究では、地震被災時の道路網の基本的な性能規範として交通容量が適切と考え、ネットワークの最大フローを指標とした確率論的な信頼性解析手法を提案する。モデル分析を通じて、要素信頼度と被災道路網の機能水準との関係について考察し、効果的な施設改善計画に関する基礎的な検討を行う。

2. 状態列挙法とモンテカルロ法の組み合わせによる信頼性評価手法

(1) Li ら^{1),2)}による状態列挙法 道路網をリンク数 n のネットワークとしてモデル化して、リンク i の状態を破壊($x_i = 0$)と非破壊($x_i = 1$)の二値変数で表し、その期待値を要素信頼度(非破壊確率) p_i とする。道路網全体としてのシステムの状態をベクトル $S_k = \{x_1^k, \dots, x_n^k\}$ 、その出現確率を $P(S_k) = \prod_{i=1}^n p_i^{x_i^k} (1 - p_i)^{1-x_i^k}$ 、その場合のシステム評価関数(本研究では最大フロー)を $G(S_k)$ とする。Li ら^{1),2)}は、総数 2^n にのぼる状態空間の中から発生確率の高い順に状態ベクトルを列挙し、第 m 項($m < n$)までの部分的な状態列挙でシステム評価関数の上下限値を得るアルゴリズムを提案した。

$$G_U(m) = \sum_{k=1}^m P(S_k)G(S_k) + \left\{1 - \sum_{k=1}^m P(S_k)\right\} \cdot G_b, \quad G_L(m) = \sum_{k=1}^m P(S_k)G(S_k) + \left\{1 - \sum_{k=1}^m P(S_k)\right\} \cdot G_w \quad (1)$$

ここで G_b と G_w は未列挙の状態空間においてそれぞれ最良(全要素非破壊)・最悪(全要素破壊)を想定した場合の $G(S_k)$ の値である。この方法は朝倉ら³⁾により道路網の最短距離信頼性の評価に適用され、リンク数が多い場合やリンク信頼度の値によっては厳密値への収束が極めて遅く、実用に適さなくなることが指摘された。

(2) 分散減少法によるモンテカルロ法 本研究では状態列挙法が有効でない場合に対処するため、未列挙の状態空間から限定的にサンプルをとるモンテカルロ・シミュレーションを補足的に適用する方法を提案する。分散減少法に基づいて、Li らの下限値とシミュレーション結果をあわせ、システム評価関数を次式により推定する。

$$G(m, N) = \sum_{k=1}^m P(S_k)G(S_k) + \left\{1 - \sum_{k=1}^m P(S_k)\right\} \cdot \sum_{j=1}^N G(j)/N \quad (2)$$

ここに N はシミュレーションの試行回数、 $G(j)$ は j 番目の試行におけるシステム評価関数の値を表す。

(3) リンク重要度の推定 システム信頼度は、特定のリンク i の破壊のもとでの条件付信頼度 $P(1_i, p)$ と、非破壊のもとでの条件付信頼度 $P(0_i, p)$ に分離して求めることが可能である。両者の差は Birnbaum の確率重要度 $I^B = \partial P / \partial p_i$ に相当し⁴⁾、リンク i の信頼性の改善によるシステム信頼性の改善効果を知るための感度指標として用いることができる。

3. 解析対象モデルと前提条件 本研究で解析対象とした仮想ネットワークは、図1に示す15ノード22リンクの有向グラフである。ノードDは被災都市で、図中に記された交通容量(台/時間)のリンクを介して救援拠点A、B、Cから救援を受ける。被災時の通行可能確率はリンク信頼度 p で表され、被災したリンクの交通容量は0とする。救援拠点A、B、Cから被災都市Dに至る最大フローは平常時5400であるが、地震被災下における最大フローが、所与の要求水準(5400に対するフロー充足率 $r\%$ で表す)を満たした場合にシステム機能が充足されるものとし、その確率を要求水準 $r\%$ に対するシステム信頼度と定義する。最大フローの算出には、Ford-Fulkerson のアルゴリズムを用いる⁵⁾。

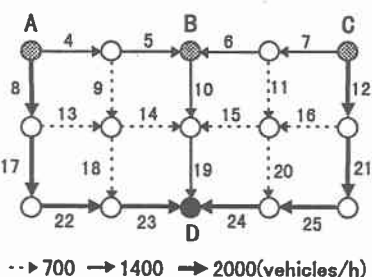


図1 解析対象とした道路ネットワーク

4. 解析結果と考察 リンク信頼度を全リンクで一律とし、状態列挙数 $m = 2000$ 、シミュレーション試行回数 $N = 8000$ 回とした場合の結果を示す。図2にシステム信頼度推定の過程($p = 0.9, r = 80\%$)を途中まで示した。2000回の状態列挙

でカバーされた状態空間の割合は図3に示すようであり、状態列挙法が有効なのはリンク信頼度が極端に高いか低い場合に限られ、シミュレーションとの組み合わせは必須であるといえる。図4はリンク信頼度と期待最大フローの関係を示し、図5は要求水準 $r = 20\%, 50\%, 80\%$ に対するシステム信頼度を表す。リンク信頼度の低下とともに期待最大フローとシステム信頼度は急速に低下する。要求水準が $r = 20\%$ のように低い段階では、システム信頼度は比較的高いが、このような少量の交通容量を緊急時に活かすには、重要交通を優先させる厳重な交通規制が必要となろう。図6はリンク信頼度が低く ($p = 0.3$)、要求水準も低い ($r = 20\%$) ケースについて、重要度 I^B の大きなリンクの順に $P(1_i, p)$ と $P(0_i, p)$ を図示したものである。中容量の2本のリンク(10, 19)の重要度が高く評価されたのは、この2本だけで救援拠点Bと被災地Dを容量1400で連結でき、被災地Dの孤立防止に効果的であるためと解釈できる。図7はリンク信頼度と要求水準の種々のペアに対して、重要度が高く評価されたリンクを数本図示したものである。高信頼度 ($p = 0.9$)・高要求水準 ($r = 80\%$) のケースでは、冗長性の乏しい外郭の大容量リンクの重要度が高く評価され、幹線網強化の必要性を示唆している一方、冗長性に富む中央付近のリンクは単独リンクとしての重要度は低い。中信頼度・中要求水準のケース ($p = 0.6, r = 50\%$) では、前二者の中間的な結果が得られている。また高信頼度・低要求水準 ($p = 0.9, r = 20\%$) のケースは、平常時の最小カット・最大フロー5400を規定する3本のリンク(19, 23, 24)の重要度が高くなっている。

5. おわりに 以上のように、リンク信頼度と被災後のシステムへの要求水準によって、リンク信頼度改善の優先順位が大きく異なることが明らかとなった。特に大規模地震災害を想定する場合には、システム全体の機能に期待する性能の目標を明確に設定し、その実現に向けてリンク信頼度の合理的な改善戦略の検討が重要である。本研究の手法はこの種の議論に有効であるが、2つの信頼度の差で定義される重要度は分散が大きくなるため、解析精度のいっそうの向上が望まれる。なお本研究を行うにあたり、文部省科学研究費補助金重点領域研究「都市直下地震(計画研究B-3)」ならびに文部省私立大学ハイテク・リサーチ・センター整備事業による補助を得たことを付記する。

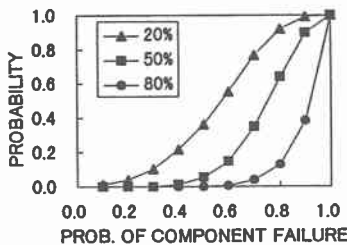


図5 リンク信頼度と要求水準のペアに対応するシステム信頼度

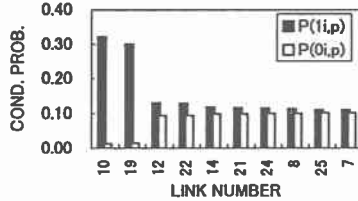


図6 リンクの非破壊・破壊を条件とする条件付信頼度 ($p = 0.3, r = 20\%$)

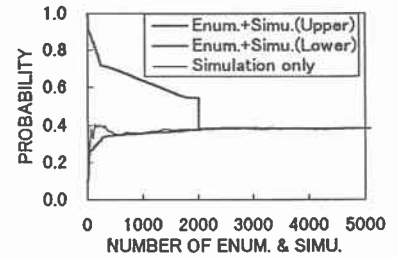


図2 状態列挙とモンテカルロ法によるシステム信頼度 ($p = 0.9, r = 80\%$)

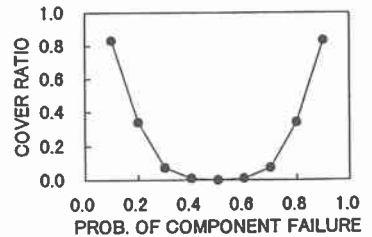


図3 2000回の状態列挙でカバーされる状態空間の割合

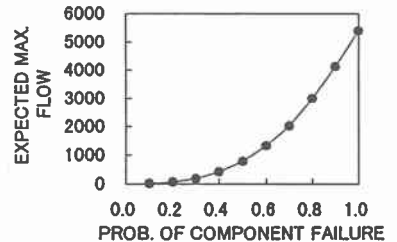


図4 リンク信頼度と期待最大フロー

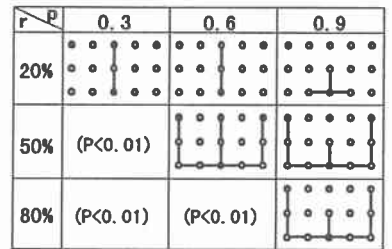


図7 リンク信頼度と要求水準のペアに対応する重要リンク

参考文献 1) Li, V. O. K. and Silvester, J. A.: Performance Analysis of Networks with Unreliable Components, *IEEE Transaction on Communications*, Vol.COM-32, No.10, pp.1105-1110, 1984. 2) Lam, Y. F. and Li, V. O. K.: An Improved Algorithm for Performance Analysis of Networks with Unreliable Components, *IEEE Transaction on Communications*, Vol.COM-34, No.5, pp.496-497, 1986. 3) 朝倉康夫・柏谷増男・藤原健一郎: 交通ネットワークにおける迂回の限度を考慮したODペア間信頼度の指標, 土木学会論文集, No.555/VI-34, 1997.1, pp.41-49. 4) Henley, E. J. and Kumamoto, H.: Reliability Engineering and Risk Assessment, Ch.10 Importance, Prentice Hall Inc., 1981, pp.418-435. 5) Buckley, F. and Harary, F.: Distance in Graphs. Addison-Wesley Publishing Company, 1990.