

ネットワーク信頼性解析に基づく 道路網の地震防災戦略について

能島 暢呂¹

¹正会員 博士(工学) 広島工業大学講師 工学部建設工学科 (〒731-51 広島市佐伯区三宅 2-1-1)

地震時の道路機能の信頼性向上を図る場合、道路網全体を一様に強化することは不合理であり、被災規模に応じた道路機能の目標水準の達成を目指した計画的な施設強化が重要となる。本研究は、リンクの構造的信頼度を与件とし、ノード間の交通容量を評価指標とする道路ネットワークの信頼性解析と重要度分析を行い、目標水準を効率よく達成する地震防災戦略について考察したものである。状態列挙法と分散低減法に基づくモンテカルロ・シミュレーションの組み合わせによりサンプルされた全ての被災パターンに対して、Ford-Fulkerson のアルゴリズムにより最大フローを求め、目標とする機能水準の充足・非充足と、リンクの破壊・非破壊の関係から算出されるリンク重要度により、施設強化の優先順位に関する考察を行った。

Key Words : road network, earthquake disaster, traffic capacity, network reliability analysis, maximum flow analysis, importance factor, retrofit prioritization

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た。道路機能の地震時信頼性の向上を図り、被災時に円滑な交通機能を確保することは地震防災上の重要課題であるが、限られた時間的・経済的資源のもとでは、膨大な道路施設を一様に強化することは不可能であり、戦略的な施設改善方策を検討することが重要となる。

道路ネットワーク機能の評価指標は、可到達性、所要時間、最短距離、処理交通量など様々なものがあり、被災状況下での交通機能を詳細に評価するためには、交通生成・発生・集中・配分などの交通工学的な分析が不可欠である。しかし、道路交通の地震災害時の挙動については、OD 交通の質的・量的変化や交通手段・経路の変化など不確定要因が多く、現象として未解明の問題が残されている。このため、フローを物理現象として記述可能な水道や電気よりも被害予測が困難であり、機能評価を行うには細部にわたる状況設定を行なわざるを得なくなることから、評価結果と具体的な地震防災対策を関連付けた議論が難しくなる。

一方、機能信頼性は構造信頼性の上に成り立つものであるから、道路施設の被災状態ならびに保持しうるサービス水準を確率的に予測しておくことは、効果的な施設改善計画を検討するために、十分意義深いものと考えられる。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、道路ネットワー

クの最大フローを評価指標とした確率論的な信頼性解析手法を提案し、簡単なモデル分析を通じて、リンク信頼度と被災道路ネットワークの機能水準との関係について考察する。さらに、各リンクに対して求められる確率重要度に基づき、想定される被災規模と道路ネットワークに要求される機能水準に応じて、施設改善の優先順位を決定する戦略的な地震防災対策の考え方について検討する。

本研究のフローチャートを図 1 に示す。以下、2. においては図 1 の太枠の部分について手法を概説し、3. では数値計算例を示して結果の考察を行う。

2. 最大フローに基づく道路機能の信頼性評価

(1) 最大フローの算出

最大フローは、リンク容量が与えられたネットワークにおいて、特定の 2 点間を通過しうるフローの最大値であり、ネットワーク機能の評価基準として最も基本的な概念の一つである¹⁾。道路交通網における最大フローは、ネットワークとして処理しうる交通容量に対応し、地震時に損傷を受けた道路ネットワークが、施設として保持しているサービス水準としての解釈が可能である。不明な点の多い震災時の交通需要や OD パターンの問題に立ち入る必要がないことから、被災道路網の機能性能を評価する指標として使用された実績も多い²⁾⁻⁴⁾。本研究では、後述の(2)(3)の方法でサンプリングされたネットワークの被災状態に対して、最大フロー最小カットの定理

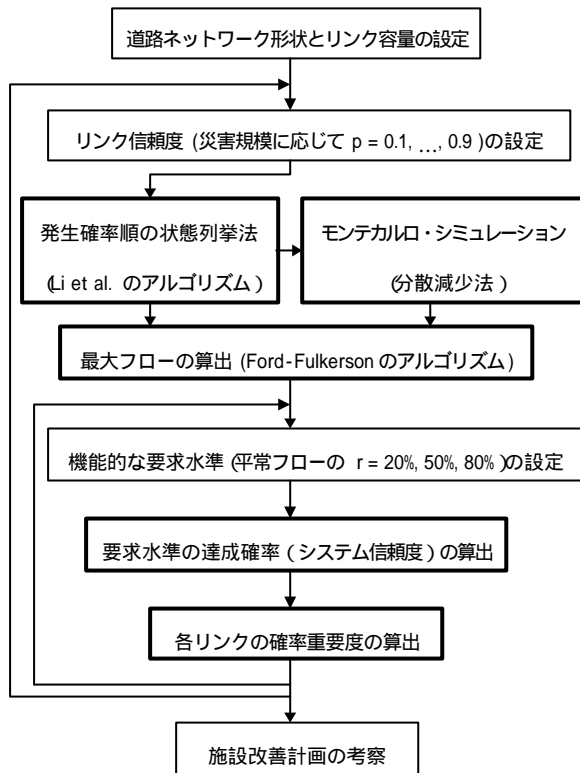


図1 本研究のフローチャート

に基づく Ford-Fulkerson のアルゴリズム¹⁾を適用し、最大フローを求める。

(2) 発生確率順の状態列挙法

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 $S^k = \{x_1^k, \dots, x_n^k\}$ 、その発生確率を $Q(S^k)$ 、その場合のシステム評価関数を $G(S^k)$ とする。Li et al.^{5),6)} 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值 G_U, G_L を得るアルゴリズムを提案した。

$$G_U = \sum_{k=1}^m Q(S^k) G(S^k) + \left\{ 1 - \sum_{k=1}^m Q(S^k) \right\} G_b \quad (1)$$

$$G_L = \sum_{k=1}^m Q(S^k) G(S^k) + \left\{ 1 - \sum_{k=1}^m Q(S^k) \right\} G_w \quad (2)$$

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)の状態を仮定した場合のシステム評価関数の値である。この方法は朝倉⁷⁾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あいまいさが高い

(0.5 に近い値をとる)場合、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。

(3) 分散減少法によるモンテカルロ・シミュレーション

本研究では状態列挙法が有効でなくなるような現実規模の問題に対処するため、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、式(1)(2)の上下限值とシミュレーション結果をあわせ、システム評価関数の期待値を次式により推定する。

$$G(m, N) = \sum_{k=1}^m Q(S^k) G(S^k) + \left\{ 1 - \sum_{k=1}^m Q(S^k) \right\} \sum_{j=1}^N G(S^j) / N \quad (3)$$

ここに N はシミュレーションの試行回数、 $G(S^j)$ は j 番目の試行における状態 S^j に対して求められたシステム評価関数の値を表す。

(4) 要求水準の達成確率の算出

式(3)において、状態 S に対する最大フロー $F_{\max}(S)$ をシステム評価関数 $G(S)$ として用いた場合には、期待最大フローが求められる。また、平常時の最大フロー F_0 に対する機能水準を係数 r で表し、「最大フロー $F_{\max}(S)$ が基準値 rF_0 を充足するか否か」により定められる二値変数

$$B(S) = \begin{cases} 0 & (F_{\max}(S) < rF_0) \\ 1 & (F_{\max}(S) \geq rF_0) \end{cases} \quad (4)$$

をシステム評価関数 $G(S)$ として用いた場合には、要求水準 r の達成確率としてのシステム信頼度が求められる。システム信頼度の真値が P_0 であるとき、直接的モンテカルロ法によるシステム信頼度の推定値の分散が $P_0(1-P_0)/N$ となるのに対し、上限値 P_U と下限値 P_L が既知の場合に分散減少法を適用すると、分散は $(P_U - P_0)(P_0 - P_L)/N$ に低減される。

(5) 各リンクの確率重要度の算定

システム信頼度は、特定のリンク i が非破壊のもとでの条件付信頼度 $P(1_i, p)$ と、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

$$I_i^B = \frac{\partial P}{\partial p_i} = P(1_i, p) - P(0_i, p) \quad (5)$$

に相当し⁸⁾、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。

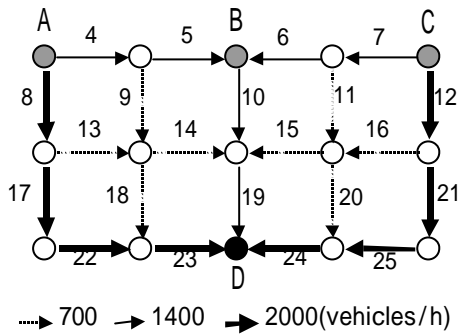


図2 解析対象とした仮想的な道路ネットワーク
(リンク上の番号はリンク No.を表す)

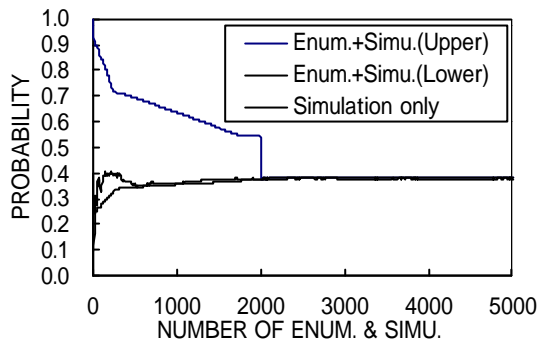


図3 状態列挙法と分散減少法によるモンテカルル口法および直接的モンテカルル口法によるシステム信頼度 ($p=0.9, r=80\%$)

3. 数値計算例

(1) 解析対象モデルと前提条件

解析対象とした道路ネットワークを、図2に示す15ノード22リンクの有向グラフでモデル化した。ノードDは被災都市で、図中に記された2000、1400、700(台/時間)の交通容量を持つ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。A、B、CからDへの平常時最大フローは、最小カットを構成するリンク(19, 23, 24)に規定され $F_0 = 5400$ (台/時間)である。被災時の要求水準としては高・中・低の3段階 ($r = 80, 50, 20\%$) を考え、被災時最大フローがそれぞれ $rF_0 = 4320, 2700, 1080$ (台/時間)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する。リンク信頼度は簡単のため全リンクで一律とし、被災規模によって $p=0.1 \sim 0.9$ のように変化させた。状態列挙数は $m=2000$ 、シミュレーション試行回数は $N=8000$ 回とした。

(2) 解析結果と考察

図3にシステム信頼度推定の過程($p=0.9, r=80\%$)を途

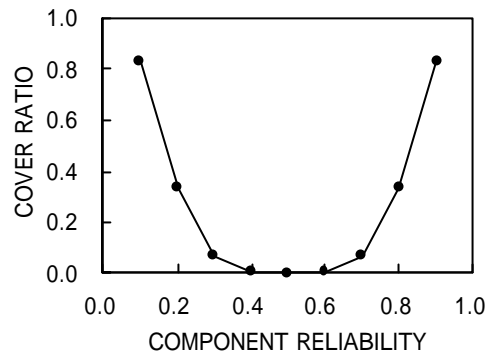


図4 2000回の状態列挙でカバーされる状態空間の割合

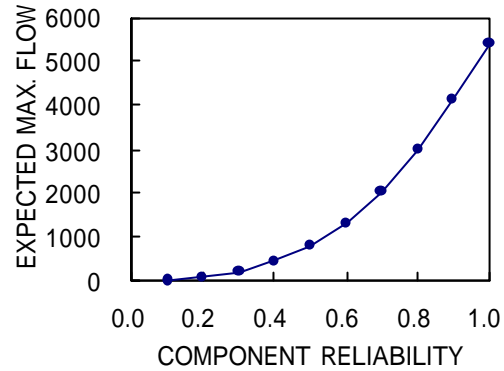


図5 リンク信頼度と期待最大フロー

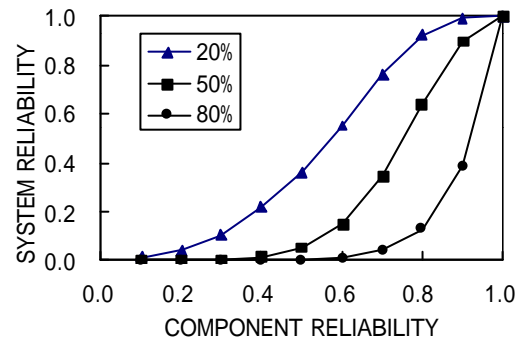


図6 リンク信頼度と要求水準のペアに対応するシステム信頼度

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を図4に示す。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、22リンクの小規模なシステムでも、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5はリンク信頼度と期待最大フローの関係を示し、図6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 $r=20\%$ のように低い場合には、システム信頼度は比較的高い水準を保つことができるが、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7と図8は、リンク信頼度が低く($p=0.3$)、要求水準

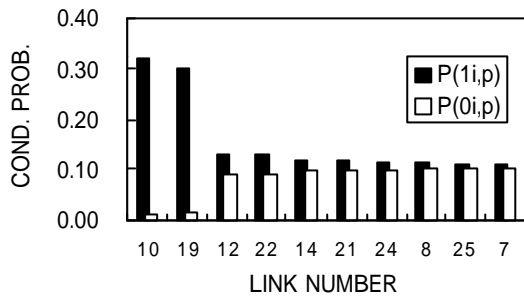


図7 リンクの非破壊・破壊を条件とする
条件付信頼度 ($p=0.3, r=20\%$)

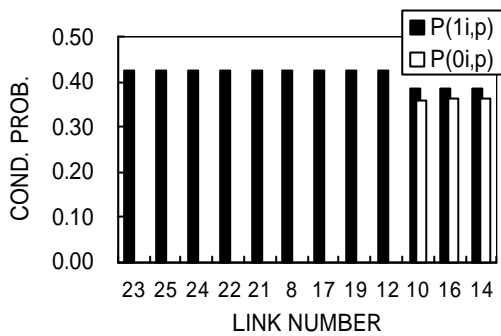


図8 リンクの非破壊・破壊を条件とする
条件付信頼度 ($p=0.9, r=80\%$)

も低い ($r=20\%$) ケースと、リンク信頼度が高く ($p=0.9$)、要求水準も高い ($r=80\%$) ケースについて、確率重要度 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。また図9はリンク信頼度と要求水準の種々のペアに対して、高い重要度を示したリンク位置を数本図示したものである。図7において、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(台/時間)で連結でき、被災地Dの孤立防止に効果的であるためである。また図8においては、冗長性の乏しい外郭の大容量リンクと被災地Dに直結するリンク19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、平常時の最大フローを規定する3本のリンク(19, 23, 24)の重要度が高くなっており、ボトルネック発生を回避することが重要であることを示している。低信頼度・高要求水準のケースはシステム信頼度が0.01を下回ることから、重要リンクを表示していない。実現性が低い要求水準であるために、被害許容を強いられる領域であるといえる。

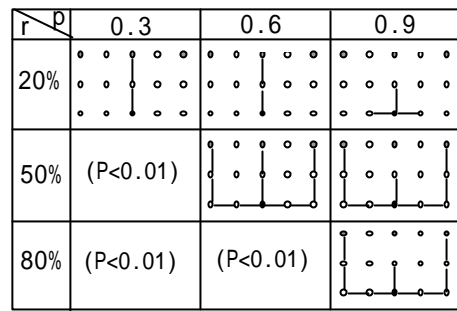


図9 リンク信頼度 (p) と要求水準 (r) のペア
に対応する重要リンク

4. おわりに

数値計算例を通じて、リンク信頼度と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を示した。小規模災害には可能な限り平常時機能を維持し、大規模災害時には最低限の緊急ニーズを充足できるような道路交通システムが地震防災上重要である。システム全体に期待される機能性能の目標を明確に設定し、その実現のための戦略的な施設改善策が検討されるべきであろう。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の推定値は分散が大きくなる傾向があるため、解析精度のいっそうの向上が望まれる。

謝辞：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。

参考文献

- 1) Dolan, A. and Aldous, J. : *Network and Algorithms, An Introductory Approach*, John Wiley & Sons, 1993.
- 2) Fennes, S.J. and Law, K.H. : Expected Flow in a Transportation Network, *Proc. of 2nd U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, pp.673-682, 1979.
- 3) 榎谷有三：震災時における道路網の機能性能の評価法，*交通工学*，Vol.19, No.5, pp.3-17, 1984.
- 4) Basoz, N and Kiremidjian, A. S. : Lifeline Network Analysis for Bridge Retrofit Prioritization, *Proc. of 2nd China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering*, Xi'an, China, pp.239-246, 1994.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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, pp.41-49, 1997.
- 8) Henley, E. J. and Kumamoto, H. : *Reliability Engineering and Risk Assessment*, Prentice Hall Inc., pp.418-435, 1981.