

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630234

研究課題名(和文)道路ネットワークの耐震化戦略に対する確率的アルゴリズム

研究課題名(英文) A Randomized Algorithm for Anti-Seismic Reinforcement Strategies of A Urban Road Network

研究代表者

長江 剛志 (Nagae, Takeshi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30379482

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大規模震災による道路ネットワークの被災とそれがもたらす社会経済損失の軽減を目的として、橋梁やトンネルなどの道路施設の耐震化戦略 --- どれを耐震化し、どれを現状のままとするか --- をシステマティックに決定するための方法論を開発した。提案手法では、起こり得る被災パターンや耐震化対象とする交通施設の膨大な組み合わせを列挙する代わりに、確率的アルゴリズムを駆使することで、費用対効果に優れた耐震化戦略を実用的な時間内に求められることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study develops a novel methodology for analyzing an efficient anti-seismic reinforcement problem of a urban road network, taking into account the possibilities of simultaneous failure of multiple transportation facilities.

研究分野：交通計画

キーワード：防災計画 交通計画 組み合わせ最適化 確率的アルゴリズム 非凸0-1整数計画問題 cross entropy
法 Gibbs cloner法

1. 研究開始当初の背景

近年、阪神淡路大震災(1995)や東日本大震災(2011)をはじめとする大規模震災により、日本の道路ネットワークは、たびたび、甚大な被害を受けている。こうした地震によって、ネットワーク上の複数の交通施設(e.g. 橋梁, トンネル)が同時に利用不可能な状態となり、経路途絶によるトリップ機会損失等の社会的不便益が発生した。例えば、2011年の東日本大震災では、3,559個の交通施設が損壊し、機会損失・時間損失による甚大な間接被害が生じた[1]。2009年の駿河湾地震では、東名高速道路が5日間通行止めとなり、21億円の経済損失が発生した[2]。このような交通不便益は、将来高い確率で発生するとされている首都直下地震や南海トラフ巨大地震等の大規模震災でも生じるとされている。例えば、首都直下地震において、交通ネットワーク寸断による機会損失・時間損失での間接被害は、約6.2兆円と予想されている[3]。そのため、大規模震災等の災害に対する道路ネットワークの信頼性・強靱性の確保は日本の喫緊の課題である。

2. 研究の目的

本研究では、このような不便益を軽減する方法の一つとして、事前に脆弱な交通施設を補強し、地震時に利用不能となる確率を減少させる「耐震化」に注目する。一般に、ある道路ネットワーク上に存在する全交通施設の耐震性能を一様に向上するためには莫大な費用が必要であり、予算制約を考慮すると実現不可能である。そのため、高い費用対効果を得るために、一部の交通施設のみを重点的に耐震化する「選択と集中」の戦略が必要不可欠である。

本研究では、優良な耐震化戦略を求める道路ネットワーク耐震化問題を定量的に分析する手法を開発することを目的とする。具体的には、Nagae et al. [4]が提案した0-1整数計画問題としての耐震化問題に対して、望ましい解(耐震化戦略)を実用的な時間内に求めるための方法を開発する。

3. 研究の方法

(1) モデル

まず、Nagae et al. [4]で提案されているモデルを概説する。対象とする道路ネットワークの位相

構造は、ノードの集合 N とリンクの集合 \mathcal{A} からなる有向グラフで表現されるとする。道路ネットワークには複数の起終点ペア集合、各起終点毎にOD交通量が存在し、その総和を対象道路ネットワーク全体の通常時交通量とする。対象とするネットワーク上には地震によって損壊する可能性のある脆弱な交通施設が存在する。リンク $a \in \mathcal{A}$ 上の交通施設の集合を \mathcal{B}_a とし、全ての交通施設の集合を $\mathcal{B} := \bigcap_{a \in \mathcal{A}} \mathcal{B}_a$ で表現する。

対象道路ネットワークにはいくつかの地震シナリオ $s \in \mathcal{S}$ が存在し、その地震シナリオ s の年生起確率を $\lambda \in [0, 1]$ とする。地震発生後、これらの交通施設が損壊し、その施設が存在するリンクは通行不可能となる。そのとき、各リンクの被災状況を二つの被災度で表現する：リンク $a \in \mathcal{A}$ が通行可能ならば $y_a = 0$ 、通行不可能ならば $y_a = 1$ をとる。これらの集合である被災パターン $\mathbf{y} := \{y_a : a \in \mathcal{A}\}$ により、ネットワークの被災状況を表現する。道路ネットワークの被災による交通不便益を被災パターンの関数 $\tau(\mathbf{y})$ で表す。この交通不便益には、a) 利用できる道路が制限されたことによる所要時間の増加、b) それに伴ってトリップを中止したことによる機会損失、およびc) 経路が途絶したことによるトリップ機会損失などが含まれる。

耐震化戦略は、各施設について「耐震化する」か「現状のままとする」の2値の割り当て $\mathbf{x} := \{x_b : b \in \mathcal{B}\}$ で表す。交通施設 $b \in \mathcal{B}$ が耐震化される場合は $x_b = 1$ 、耐震化されない場合は $x_b = 0$ とする。耐震化戦略 \mathbf{x} の下でシナリオ $s \in \mathcal{S}$ の地震が生じた際にリンク a が被災する確率を $\phi_a(s, \mathbf{x})$ で表す。このとき、当該戦略の下での被災パターン \mathbf{y} の条件付生起確率は以下の式で定義される。

$$p(\mathbf{y}|s, \mathbf{x}) := \prod_{a \in \mathcal{A}} \phi_a(s, \mathbf{x})^{y_a} (1 - \phi_a(s, \mathbf{x}))^{1-y_a} \quad (1)$$

これより、耐震化戦略 \mathbf{x} の下での交通不便益の期待値は以下の式で表現される。

$$\bar{\tau}(\mathbf{x}) := \sum_{s \in \mathcal{S}} \lambda(s) \sum_{\mathbf{y} \in \Omega_{\mathbf{y}}} \tau(\mathbf{y}) p(\mathbf{y}|s, \mathbf{x}) \quad (2)$$

施設 b を耐震化するのに必要な費用を k_b とする。このとき、耐震化戦略 \mathbf{x} に必要な耐震化費用 $K(\mathbf{x})$ は以下の式で定義される。

$$K(\mathbf{x}) = \sum_{b \in \mathcal{B}} x_b k_b \quad (3)$$

最後に、ある戦略 \mathbf{x} の下での社会的損失 $Z(\mathbf{x})$ は式 (2) で求められる期待交通不便益と式 (3) で求められる施設の耐震化費用の和とし、以下の式で定義する。

$$Z(\mathbf{x}) := \bar{\tau}(\mathbf{x}) + \alpha K(\mathbf{x}) \quad (4)$$

ここで、 α は金銭タームを一致させるための変換係数である。本研究における耐震化問題は、この社会的損失を最小とする最適な耐震化戦略 \mathbf{x}^* を探索する問題として、以下のように定式化できる。

$$\min_{\mathbf{x} \in \Omega_{\mathbf{x}}} Z(\mathbf{x}) \quad (\text{P})$$

問題 (P) の厳密解を数え上げによって求めるナイーブな方法は以下のように整理できる：

1. ある耐震化戦略 \mathbf{x} に対する社会的損失 $Z(\mathbf{x})$ を評価する際、期待交通不便益 $\bar{\tau}(\mathbf{x})$ を定義通りに計算する。すなわち、 $\Omega_{\mathbf{y}}$ 内のあらゆる被災パターン \mathbf{y} について交通不便益 $\tau(\mathbf{y})$ を求め、式 (2) に代入する。
2. 上述の手続きを用いて $\Omega_{\mathbf{x}}$ 内の全ての耐震化戦略 \mathbf{x} について社会的損失 $Z(\mathbf{x})$ を計算し、それが最小となるものを最適解 \mathbf{x}^* とする。

しかし、この方法を一般ネットワークに適用する場合、それぞれの手続きにおいて、被災パターン集合 $\Omega_{\mathbf{y}}$ および戦略集合 $\Omega_{\mathbf{x}}$ が組み合わせ爆発を起こす。具体的には、それぞれの集合の要素数 $|\Omega_{\mathbf{y}}| = 2^{|\mathcal{A}|}$ 、 $|\Omega_{\mathbf{x}}| = 2^{|\mathcal{B}|}$ がリンク本数 $|\mathcal{A}|$ および施設数 $|\mathcal{B}|$ の増加とともに指数的に増加する。

(2) 乱択アルゴリズムによる組み合わせ爆発の回避

本研究では、組み合わせ爆発の解決手法として、幅広い分野で使用されている乱択アルゴリズムを採用する。まず、任意の戦略 \mathbf{x} の期待交通不便益 $\bar{\tau}(\mathbf{x})$ を簡易なアルゴリズムであるモンテカルロ法を用いて推計することを考える。リンク被災確率集合 $\Phi = \{\phi_a, a \in \mathcal{A}\}$ で表現される確率分布 $f(\cdot; \Phi)$ を用い、適当な数 M 個の標本被災パターン $\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_M$ を生成する。それぞれの被災パターンに対する交通不便益 $\tau(\mathbf{Y}_1), \tau(\mathbf{Y}_2), \dots, \tau(\mathbf{Y}_M)$ を計算し、それらの算術平均を期待交通不便益の推計量とする：

$$\hat{\tau}(\mathbf{x}) := \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \tau(\mathbf{Y}_i) \quad (5)$$

しかし、この方法では、交通不便益 $\tau(\mathbf{y})$ が大きい (例えば、 10^7) が生起確率 $p(\mathbf{y}|\mathbf{x})$ が極めて小さい (例えば、 10^6) パターン \mathbf{y} が十分に生成されず、期待値を過小評価する可能性がある。そこで、 $\tau(\mathbf{y})p(\mathbf{y}|\mathbf{x})$ が大きい被災パターンを効率的に生成することで、高い推計精度と計算効率性を確保することを考える。本研究では、その目的を実現するために、多段階乱択アルゴリズムを用い、興味の対象 ($\tau(\mathbf{y})p(\mathbf{y}|\mathbf{x})$ が大きい被災パターン) のみが生成される理想的なサンプリング確率分布 π^* を推定することを考える。このアルゴリズムでは、まず、以下の二つの段階を交互に繰り返し、十分な数の確率分布列 $\pi^{(1)}, \pi^{(2)}, \dots, \pi^{(M)}$ を生成する。

- フェーズ 1 (標本生成) 確率分布 $\pi^{(k)}$ を与件として、 M 個の標本被災パターンを生成する。
- フェーズ 2 (確率更新) 標本のうち貢献度の高い上位 ρM (e.g. $\rho = 0.1$) 個の被災パターンがより高い確率で生成されるように次の確率分布 $\pi^{(k+1)}$ を決定する。

そして、この過程で生成された標本被災パターンを用いて、期待交通不便益を計算する。

この期待交通不便益 $\hat{\tau}$ の推計方法をサブモジュールとし、優良な耐震化戦略を効率よく求める最適手法を考える。ある道路ネットワークの耐震化問題 (P) の最適戦略を \mathbf{x}^* とし、以下のような単純な方法により、最適戦略を求めるとする：あるパラメータ \mathbf{u} で表現された分布 $f(\cdot; \mathbf{u})$ (e.g. 一様分布) を用い、標本戦略 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N$ を生成する。この生成された標本戦略を元に最適戦略の推定量を $\hat{\mathbf{x}}^* = \arg \min_{i=1, \dots, N} Z(\mathbf{X}_i)$ とする。しかし、この方法で最適解を精度よく推定するためには膨大な数の標本戦略が必要である。そこで、期待値推計手法と同様に多段階乱択アルゴリズムを用いることで、優良な戦略を効率的に求める最適手法を開発する。確率分布列を生成する基本的な構造は期待値推計手法と同じである。

4. 研究成果

提案した計算手法を Sioux Falls ネットワーク図 1 に適用し、その有効性を検証する。本章では、簡単化のため、道路ネットワーク被災による交通不便益として経路途絶による機会損失のみを計上することとした。そして、その計量方法としては、利用可能なリンクのみで構成されるネットワーク

上で複数 OD の最大流問題を解き、各起終点について、平常時の交通需要と被災ネットワーク上で到達できた台数との差 (i.e. トリップできない利用者数) に適当な単価 (1 日あたり 2.4 万円) を乗じて総和をとることとした。なお、起終点 (OD) 交通需要についてはサイトのデータをそのまま用い、各リンクのパフォーマンス関数については、交通容量以外のパラメータ (自由走行時間、係数、乗数) はサイトのデータそのものを、交通容量はサイト・データの 2 倍を用いた。これは、交通配分として最大流モデルを利用する場合、交通容量に関してサイトのデータをそのまま利用すると、全てのリンクが通行可能であるとしても目的地に到達できない利用者が生じるためである。地震シナリオは一つしかないと仮定し、その年あたりの生起確率は $\lambda(s) = 1.0 \times 10^{-3}$ とする。各交通施設の耐震化費用は一律 $K_b = 200 \times 10^3 (b \in \mathcal{B})$ と設定する。なお、本研究の数値計算は Intel Core i5@2.50 GHz プロセッサと 8GB メモリを備えた計算機上で行なった。プログラム言語には Python を用い、最大流問題の計算には Gurobi パッケージを利用した。

以下では、まず、(1)で、期待交通不便益の推計手法の計算効率性と計算精度を検証する。次に、(2)で、GC-CE 法の計算効率性と最適性を検証する。最後に、(3)で、交通施設 38 個の耐震化問題に GC-CE 法を適用し、その有効性を考察する。

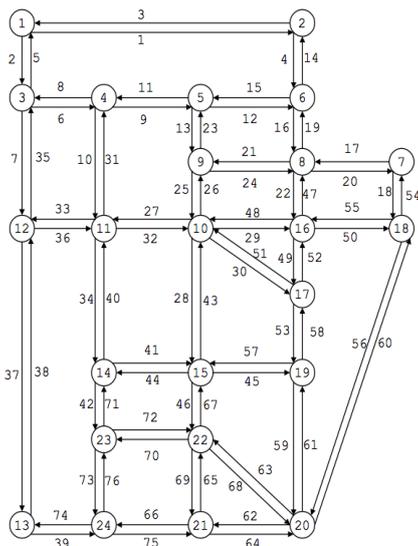


図 1 計算に用いる道路ネットワーク

(1) 交通不便益の期待値推計

前章で提案した交通不便益の期待値推計手法の計算効率性と精度を評価する。数え上げによる期待値の厳密評価値と比較を行うため、ネットワーク上に 20 個の交通施設が存在すると想定する。このネットワークで、5 個の耐震化戦略 (a,b,c,d,e) を恣意的に選択し、それぞれの期待交通不便益を 20 回ずつ CE 法で推計を行う。CE 法の各ステージで生成する標本被災パターン数は $M = 3,000$ とする。CE 法の精度を評価するため、各試行で得られた推計値 $\hat{\tau}$ の誤差率 ϵ を式 (6) で定義する。

$$\epsilon = \left| \frac{\hat{\tau} - E^*}{E^*} \right| \times 100 \quad (6)$$

ここで、 E^* は任意の戦略の厳密期待値である。

各戦略において計算した誤差率の最大値 ϵ_{max} 、中央値 ϵ_{med} 、平均値 $\bar{\epsilon}$ と計算に用いた平均標本パターン数 $\bar{T} \times M$ を表 1 に示す。戦略 a, b, c では、平均誤差率は 2% 以内に収まり、最大誤差率でも 4% 以内に収まった。戦略 d, e においては、平均誤差率はわずか 1% 以内に収まり、最悪値でも 2% 以内に収まった。これらの全体での平均誤差率は 1.18% となり、非常に高精度の推計を行えていることがいえる。また、今回の試行で生成した標本数の平均は 12,600 であった。この数字は総被災パターン数 $2^{20} = 1,048,576$ に対し、わずか 1% の値であり、非常に効率的な推計が行えていると考えられる。

表 1 各戦略における推計期待値の誤差率と平均サンプル数

x	E^*	$\bar{\epsilon}(\%)$	$\epsilon_{max}(\%)$	$\epsilon_{med}(\%)$	$\bar{T} \times M$
a	7,121	1.57	3.58	1.36	14,100
b	18,136	1.72	3.69	1.47	14,700
c	42,059	1.60	3.82	1.53	14,700
d	78,353	0.75	1.96	0.74	10,500
e	111,962	0.27	0.55	0.25	9,000

(2) 最適戦略の探索

施設数 20 個の道路ネットワークに GC-CE 法を適用し、その計算効率性と最適性を検証する。各ステージで生成する標本戦略数は $N = 200$ 、生成された戦略の期待交通不便益を CE 法で求めるときに各ステージで生成する標本被災パターン数は $M = 3,000$ とする。

各ステージ毎で生成された戦略の目的関数値の最大値, 95% タイル値, 中央値, 5% タイル値, 最小値の推移を図 2 に示す. この結果から, ステージ回数が増える毎に生成される戦略の目的関数値が全体的に小さくなっていき, 6 回目のステージで大域的最適解に収束したことがわかる. また, 最大値と最小値の差はステージ回数が増えても, 小さくならないことが図から読み取れる. GC 法で非常に範囲の広い探索を行いながら, 多数の優良な戦略を生成していると考えられる. しかしながら, 生成した総標本戦略数は 1,200 であり, この数字は, このネットワークの総耐震化戦略数 $2^{20} = 1,048,576$ のわずか 0.1% 程度である. このことから, 多数の優良戦略を生成しながら, 効率的な計算でもあることがわかる. なお, この最適化計算を 20 回行ったところ, 全ての試行で大域的最適戦略が求められた. これらの結果から, このネットワークでは, GC-CE 法は高い最適性と効率性を備える有効な方法であると考えられる.

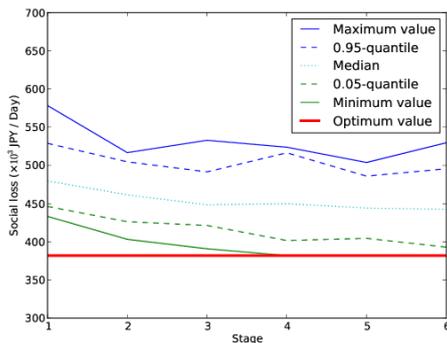


図 2 各ステージにおける目的関数値の最大値, 95% タイル値, 中央値, 5% タイル値, 最小値の推移

(3) より施設数が多い問題への適用

最後に, GC-CE 法をより規模の大きいネットワークに適用し, その有効性を検証する. Sioux Falls ネットワークの全ての上下線に脆弱な交通施設が存在すると想定する. そのため, 交通施設数は 38 となり, 耐震化戦略数と被災パターン数は共に $2^{38} = 2.7 \times 10^{11}$ であり, 数え上げによる厳密評価が(本研究の数値計算で使用している PC では)困難である. 交通需要や耐震化費用などの計算に必要な条件は前節と同じ数値を使用する. 各ステージで生成される標本戦略数は $N = 100$, 生成された戦略の期待交通不便益を求めるとき

に各ステージで生成する標本被災パターン数は $M = 3,000$ とし, 計算を行う.

計算の結果, 最適戦略は標本戦略数 1,400, ステージ数 14 で求められた. この最適戦略の社会的損失を CE 法で 10 回計算した結果, その平均値は 1,072(万円/日)となった. 現時点(全ての交通施設に耐震化が行われていない状態)での期待社会的損失の推計値 1,243(万円/日)と比較を行うと次の計算が成り立つ.

不便益の減少額(万円/日):

$$1,243 \Rightarrow 752 = 491 \quad (7)$$

耐震化費用(万円/日):

$$0 \Rightarrow 320 = 320 \quad (8)$$

投資対効果(%):

$$(7)/(8) \times 100 = 153 \quad (9)$$

この結果から, 適当な費用で期待損失額を大幅に減少させている, 投資対効果の高い戦略であると考えられる. なお, 計算で生成した戦略数は 1,400 であり, これは総戦略数 $2^{38} = \text{約 } 2,000 \text{ 億個}$ と比較して極めて少ない数であり, 非常に効率よく最適戦略が推定されていることがわかる.

(4) まとめ

本研究では, 道路ネットワーク耐震化問題を定量的に分析し, 優良な耐震化戦略を求める手法を開発した. 具体的には, cross-entropy 法を用いて任意の戦略の効果を求める手法と Gibbs cloner 法を用いて最適な戦略を求める手法を開発し, それらを組み合わせた GC-CE 法を提案し, それを簡略化された実道路ネットワークに適用した. その結果, GC-CE 法で非常に効率的に費用対効果の高い戦略が求められることがわかった. 最後に, その提案手法で得られた戦略は, 従来の手法で得られる戦略よりも期待社会的損失がより小さい優良な戦略であり, GC-CE 法の高い有効性が示された.

提案手法の実用化に必要な事項は下記のように整理される. まず, 厳密な分析を行うためには, 各地域に潜在する地震の生起確率, それにおけるネットワーク上の各交通施設の脆弱性, 平常時の交通需要等のデータの整理が必要不可欠である. これらのデータが得られることで, 耐震化問題のより精緻な評価が可能になると考えられる. 次に, 耐震化候補となる交通施設の選別の必要性について議論する必要がある. 例えば, 細街路等

の平常時の交通需要が少なく、分析前に重要性が極めて低いと判断できるリンクを分析対象から除外することで被災パターン数および戦略数をあらかじめ減らし、計算リスクの削減が行える。最後に、本研究の提案手法である GC-CE 法は並列計算との親和性が高く、その先端の研究成果を活用することでより効率的な計算が可能となることが予想される。こうした並列化・高速化によって提案手法を実用的な規模のネットワークに適用可能か否かの検証が必要であると思われる。

参考文献

- [1] 内閣府：従来の被害想定と東日本大震災の被害, 2011.
- [2] 中部地方整備局道路部：駿河湾の地震に伴う東名通行止めにより生じた影響～社会的な影響に関する調査結果の概要～, 2009.
- [3] 池内幸司, 伊藤夏生：首都直下地震の被害想定と対策, 地学雑誌, Vol. 116, No. 3/4, pp. 490-503, 2007.
- [4] Nagae, T., Fujihara, T. and Asakura, Y.: Anti-seismic reinforcement strategy for an urban road network, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 46, No. 5, pp. 813-827, 2012.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 6 件)

1. 武井伸生, 長江剛志：道路ネットワーク強化のための耐震化戦略: Gibbs cloner and cross-entropy アプローチ, 第 52 回土木計画学研究発表会, 秋田大学 (秋田県秋田市), 2015.11.22.
2. Nagae, T. and Takei, N.: Anti-seismic reinforcement strategy for an urban road network: a cross-entropy approach, the 6th International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR), USB-memory (17 pages), Nara, Japan, 2015.8.2.
3. 武井伸生・長江剛志：乱択アルゴリズムによる道路ネットワーク耐震化問題の解

法, 第 29 回人口知能学会全国大会, CD-ROM, 公立ほこだて未来大学 (北海道函館市), 2015.5.30.

4. Takei, N. and Nagae, T.: Estimating Expected Social Losses from Wide-Area Damage on An Urban Road Network for An Anti-Seismic Reinforcement Problem: A Cross-Entropy Approach, the 19th Hong Kong Society of Transportation Studies International Conference, Kowloon, Hong Kong, USB-memory, 2014.12.15.
5. 武井伸生, 長江剛志：道路ネットワーク耐震化戦略のための便益推計手法：クロスエントロピー法, 第 50 回土木計画学研究発表会, 鳥取大学 (鳥取県鳥取市), CD-ROM, 2014.11.3.
6. 武井伸生・長江剛志：道路ネットワーク耐震化の便益推計手法の比較, 第 9 回防災計画研究発表会, 東北大学 (宮城県仙台市), 2014.9.21.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

特に無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長江 剛志 (NAGAE, Takeshi)
東北大学・工学研究科・准教授
研究者番号：3 0 3 7 9 4 8 2

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し