

道路ネットワーク強靱化のための耐震化戦略: Gibbs cloner and cross-entropy アプローチ

武井 伸生¹・長江 剛志²

¹学生員 東北大学大学院工学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-816)
E-mail: nobuo.takei.t6@dc.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学大学院工学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-814)
E-mail: nagae@m.tohoku.ac.jp

近年の大規模震災では、複数の交通施設が同時に利用不可能となり、それにより甚大な経済損失が発生した。これらの経済損失を軽減するための事前の対策の一つに交通施設の耐震補強が挙げられる。この対策を実施するためには、費用対効果を考慮して、一部の交通施設を重点的に耐震化する戦略を求める必要がある。そこで、本研究では、費用対効果の高い優良な戦略を求めるための方法論を構築することを目的とする。まず、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式化した。次に、その問題を解決するために、多段階乱択アルゴリズムを用いた手法を提案した。最後に、Sioux Falls のネットワークで提案方法の有効性を検証した。

Key Words : *Anti-seismic reinforcement, Multi-level randomized algorithm, Cross-entropy method, Gibbs cloner method, Resiliency*

1. はじめに

近年、東日本大震災(2011年3月)などの大規模震災により、日本の道路ネットワークは多大な被害を受けた。これらの地震はネットワーク上の複数の交通施設(e.g. 橋梁, トンネル)を同時に利用不可能な状態にし、それにより、経路途絶によるトリップ機会損失などの社会的不便が生じた。内閣府の調査によると、東日本大震災では、3,559個の交通施設が被害を受けた。また、2008年の駿河湾地震では、5日間の通行止めで21億円の経済損失が発生した(中央地方整備局道路部, 2008)。日本では、さらなる大規模震災(e.g. 首都直下地震, 東南海地震)が将来高い確率で発生するとされている。中央防災会議によると、首都直下地震が実際に発生した場合の交通遮断による機会損失・時間損失での間接被害は、約1.5兆円である。日本の道路ネットワークを強靱化し、このような不便を軽減する事前の対策として交通施設の耐震化が考えられる。しかし、すべての交通施設に耐震化を行うには莫大な費用が必要となるため、現実的に行うことはできない。そのため、一部の交通施設を重点的に耐震化することで高い費用対効果が得られる優良な戦略を選択する必要がある。

自然災害などの稀少事象に対する道路ネットワークの信頼性に関しては、多数の研究が報告されている。例えば、D'Este and Taylor¹⁾は、事象の生起する確率によらず、生起したときのネットワークへの影響の大きさに起因する脆弱性という概念を定義した。Nicholson and

Du²⁾は損壊確率が高いリンクを「弱い」リンク、損壊した場合の被害が大きいリンクを「重要な」リンク、そのどちらも備えたリンクをクリティカルリンクと定義し、その分析を行った。Jenelius et al.³⁾は、脆弱性の概念を(1)危険な事象が起こる確率と、(2)ある場所で事象が起こったときの影響を表す暴露(exposure)の二つから成り立つと主張し、それらを計測する方法を提案した。これら以外にも、脆弱性に関する研究は数多く存在する。しかし、複数の交通施設が同時に利用できなくなる面的被害を想定して脆弱性を分析している研究は数少ない。Du and Peeta⁴⁾は事前の投資政策決定によってネットワークの残存力を高めるための確率的最適化モデルを開発した。しかし、この研究ではある投資戦略の下でのネットワークのパフォーマンス評価にモンテカルロ法を用いており、リンクの損壊確率が非常に小さい場合、推計誤差が生まれる可能性がある。先行研究であるNagae et al.⁵⁾は、費用対効果を考慮して施設の一部のみを重点的に耐震化するという事前の対策を求める方法論を提案した。しかし、戦略をad-hocに選択しているため、得られた戦略が最適解に近い保証されない。そこで、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。

本稿はまず、2. で本研究で用いる計算モデルについて説明を行う。次に、3. でモデル中で使用する耐震化戦略の最適化手法と交通不便の期待値推計手法を提案をする。最後に、4. で提案手法の有効性の評価を行う。

2. 道路ネットワーク耐震化問題

本研究では、先行研究⁵⁾で提案されているモデルをもとに簡略化したモデルを使用する。対象道路ネットワークの位相構造を、ノードの集合 N とリンクの集合 \mathcal{A} で表現する有向グラフとして取り扱う。対象道路ネットワークにはいくつかの地震シナリオ $s \in S$ 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。また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 (i.e. 橋梁, トンネル) が存在すると仮定する。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 $\mathcal{B} := \bigcap_{a \in \mathcal{A}} \mathcal{B}_a$ として表現する。

地震発生後の対象道路ネットワークの被害は、複数のリンク損壊によって増加する交通不便益によって定義される。地震発生時の各交通施設の状態は損壊しているか、していないかで表現され、損壊していない交通施設は通常時と同様に使用することができ、損壊した交通施設は完全に修復されるまで使用することができない。そこで、あるリンク a の交通施設集合 \mathcal{B}_a のどれか一つの施設でも損壊した場合、リンク a は通行不可能となる。そのようなリンクの被災状況を表現するため、リンク $a \in \mathcal{A}$ が通行可能なら $y_a = 0$, 通行不可能なら $y_a = 1$ の二つの被災度を用いる。ここで、 $\mathbf{y} := \{y_a : a \in \mathcal{A}\}$ を対象ネットワークの被災パターンとして定義し、その集合を $\Omega_{\mathbf{y}} = \{0, 1\}$ とする。また、被災パターン \mathbf{y} における交通不便益の増加を $\tau(\mathbf{y})$ と定義する。

ここで、地震が起きたときの経済被害を交通施設の耐震補強によって減らすことを考えたい。交通施設 $b \in \mathcal{B}$ の脆弱性を弱い (耐震化されていない) 状態のときは $x_b = 0$, 強い (耐震化されている) 状態のときは $x_b = 1$ と定義し、耐震化戦略 $\mathbf{x} := \{x_b : b \in \mathcal{B}\}$ を表現する。この耐震化戦略の集合を $\Omega_{\mathbf{x}}$ と定義する。

耐震補強を行うことで対象の交通施設の地震強度を高め、リンクの被災確率を減少させる。リンク a の被災確率は、耐震化戦略 \mathbf{x} の下で地震シナリオ s によってリンク a が通行不可能となる確率 $\phi_a(s, \mathbf{x})$ として定義する。被災パターン \mathbf{y} の地震シナリオ s と耐震化戦略 \mathbf{x} の下での条件付生起確率は以下の式で定義する。

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

そこで、耐震化戦略 \mathbf{x} の交通不便益の期待値は以下の式で表現される。

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

耐震補強には耐震化コストが必要であるため、戦略 \mathbf{x}

の下での社会的損失は以下の式で定義される。

$$Z(\mathbf{x}) := \bar{\tau}(\mathbf{x}) + \alpha K(\mathbf{x}) \quad (3)$$

ここで、 $K(\mathbf{x})$ は戦略 \mathbf{x} に必要な耐震化コストであり、 α は金銭タームを一致させるための変換係数である。以上より、耐震化問題は以下の式で定義される。

$$\min_{\mathbf{x} \in \Omega_{\mathbf{x}}} Z(\mathbf{x}) \quad (4)$$

この問題を解くためには以下の二つの問題点が存在する。

- (1) 大規模ネットワークにおいて、被災パターンと耐震化戦略の総数はそれぞれ莫大な数字になり、数え上げによる厳密評価が困難である (e.g. 交通施設数が 50 のとき、被災パターン数は $2^{50} \approx 1.0 \times 10^{15}$)。
- (2) 本研究の耐震化問題は非凸 0-1 整数計画問題であり、大域的最適解を求める多項式オーダーのアルゴリズムが存在しない (NP 困難)。

これらの問題の解決手法として本研究では重点サンプリングの一つである多段階乱択アルゴリズムを用いる。

3. 提案手法

(1) 最適戦略の探索手法

本研究では、最適耐震化戦略の探索手法として多段階乱択アルゴリズムの一つである Gibbs cloner (GC) 法⁶⁾を用いる。GC 法は NP 困難な組み合わせ最適化問題や稀少事象の推計問題に広く適用可能な手法である。この手法は重点サンプリング密度と標本の生成に MCMC を用いるという特徴を有し、これらの問題を解く。手続きは以下ようになる。

まず、実際の耐震化問題の代わりに任意の確率分布 $f(\cdot)$ から生成される標本の目的関数値がある実数値 m 以下となる確率 $l(m)$ を推定する問題を考える。

$$l(m) = \mathbb{E}_f[I_{\{Z(\mathbf{X}) \leq m\}}] \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{X} は分布 $f(\cdot)$ の元で生成される標本、 $Z(\mathbf{X})$ は標本の目的関数値である。この問題に対して、最良の推定量をもたらす確率密度は次の式で与えられる。

$$g^*(\mathbf{x}) = \frac{I_{\{Z(\mathbf{x}) \leq m\}} f(\mathbf{x})}{l(m)} \quad (6)$$

ここで、 $I_{\{Z(\mathbf{x}) \leq m\}}$ は $Z(\mathbf{x}) \leq m$ のとき 1, そうでなければ 0 をとる指示関数、 $f(\cdot)$ は任意の分布である。この最適な確率密度 $g^*(\cdot)$ を用いると、最良な推定量 $\hat{l}^* = \frac{f(\mathbf{x})}{g^*(\mathbf{x})}$ はただ 1 つの標本を生成することで推定でき、 g^* の下で最適戦略が確率 1 で生成される。しかし式 (6) に今推定したい l が含まれているため、このままでは確率密度 $g^*(\cdot)$ を生成することができない。この問題を解決するため、GC 法では適当な実数値 (レベル) の列 $\{m^{(t)}, t \leq -1\}$ とステージ $(t-1)$ での最適確率密度の

列 $\{g^*(x, m^{(t-1)}), t \leq 0\}$ を逐次生成する．ここで，

$$g^*(x, m^{(t-1)}) = \frac{f(x)I_{\{Z(x) \leq m^{(t-1)}\}}}{l(m^{(t-1)})} \quad (7)$$

はステージ $(t-1)$ で $\{Z(x) \leq m^{(t-1)}\}$ となる標本を分散 0 で生成する確率密度である．まず， $g^*(x, m^{(t-1)})$ から N 個の標本を生成する．次に $g^*(x, m^{(t-1)})$ の下で $\{Z(x) \leq m^{(t)}\}$ となる標本が十分に生成される $m^{(t)}$ を推定する．これを $(m^{(t)}, g^*(x, m^{(t)}))$ が (m^*, g^*) に収束するまで繰り返す．本研究における最適化手法の具体的なステップアルゴリズムは以下ようになる．

- Step1 繰り返しカウンタを $t = 1$ とする．確率密度 $f(\cdot)$ から標本 X_1, \dots, X_N を生成する．目的関数値 $Z(X)$ から標本を小さい順に並べて，下から ρN 番目 (e.g. $\rho = 0.1$) の値を $\hat{m}^{(0)}$ を推定する．その値を下にエリート標本集合 $\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_{N_0}$ を抽出する．
- Step2 標本集合 $\{\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_{N^{(t)}}\}$ の中で冗長な標本を取り除いた集合 $\{\hat{X}_1, \dots, \hat{X}_{N^{(t)}}\}$ を生成する．
- Step3 cloning parameter $\eta^{(t-1)}$ を以下の式から決定し， $\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_{N^{(t-1)}}$ をそれぞれ $\eta^{(t-1)}$ 個複製し， $\mathcal{X}_{cl} = \{(\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_1), \dots, (\tilde{X}_{N^{(t-1)}}, \dots, \tilde{X}_{N^{(t-1)}})\}$ を生成する．この \mathcal{X}_{cl} の各標本から b の長さで MCMC を適用し，新たな標本集合 $\{X_1, \dots, X_N\}$ を生成する．
- Step4 $\hat{m}^{(t)}$ を推定し，エリート標本 $\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_{N^{(t)}} \sim g^*(x, \hat{m}^{(t)})$ を決定する．
- Step5 収束条件を満たしたら終了とし，そうでなければ $t = t + 1$ として，Step2 に戻る．

(2) 交通不便益の期待値推計手法

交通不便益の期待値推計手法として，本研究では cross-entropy(CE) 法⁷⁾ を用いる．CE 法も GC 法と同じく多段階乱択アルゴリズムの一つである．二つの手法の特徴の主な相違点は，生成する確率密度の性質の違いである．GC 法は非パラメトリックな確率密度列を生成し，最適な確率密度 g^* を求めるのに対し，CE 法はパラメトリックな確率密度列 $\{f(x, v^{(t)}), t = 1, \dots, T\}$ を生成することで最適な確率密度に限りなく近い分布を求めることである．基本的な確率密度列の生成方法は以下の二つのステップの繰り返しである．

初期準備 小さな数 ρ (e.g. $\rho = 0.1$) と適当な確率集合 v の初期値を与える．

- Step1(Adaptive updating of $\gamma^{(t)}$) サンプルング確率 $q(\cdot; v^{(t-1)})$ から N 個の標本 $\mathcal{Y}^{(t)} := Y_1^{(t)}, \dots, Y_N^{(t)}$ を生成し，目的関数値 $S(Y_n^{(t)})$ を計算し， $S_{(1)} \leq \dots \leq S_{(N)}$ と小さい順に並び替える．そして上位 ρN 番目の値として $\hat{\gamma}^{(t)}$ を推定する．

- Step2(Adaptive updating of $v^{(t)}$) クロスエントロピー最小化問題を解くことで，標本のうち上位 ρN 個のパターンがより高い確率で生成されるサンプリング確率集合 $v^{(t)}$ を決定する．

本研究では，サンプリング確率集合をリンクの損壊確率集合，目的関数値を期待値への重要度の高さ $S(Y) := \tau(Y)p(Y)$ とし，その値の高い標本被災パターンが多く生成される確率密度を求める．具体的なアルゴリズムは以下ようになる．

- Step1 :繰り返しカウンタを $t = 1$ とする．初期損壊確率集合 $v^{(0)}$ ， ρ ， N を適当に決定する．
- Step2 : $q(\cdot, v^{(t-1)})$ から N 個の標本被災パターン $\mathcal{Y}^{(t)}$ を生成する．目的関数 $S(Y)$ を計算し，上位 ρN 番目の値として $\gamma^{(t)}$ を決定する．
- Step3 :以下の式から損壊確率集合の更新をする．

$$v_a^{(t)} = \frac{\sum_{n=1}^N I_{\{S(Y_n) \geq \gamma^{(t)}\}} W(Y_n^{(t)}; p, q) Y_{n,a}}{\sum_{n=1}^N I_{\{S(Y_n) \geq \gamma^{(t)}\}} W(Y_n^{(t)}; p, q)} \quad (8)$$

ここで，

$$W(Y_n^{(t)}; p, q) = \frac{p(Y_n^{(t)})}{q(Y_n^{(t)}; v)} \quad (9)$$

は元々の損壊確率集合 p とサンプリング確率集合 q の尤度である．

- Step4 : t 回目の交通不便益の平均を以下の式から算出する．

$$\hat{\tau}^{(t)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tau(Y_n^{(t)}) W(Y_n^{(t)}; p, q) \quad (10)$$

- Step5 :収束条件を満たしたら終了とし，式 (11) で期待値，式 (12) で目的関数値 $Z(x)$ を推計する．このとき $T = t$ とする．そうでなければ $t = t + 1$ として，Step2 に戻る．

$$\hat{\tau} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \hat{\tau}^{(t)} \quad (11)$$

$$\hat{Z}(x) = \hat{\tau} + K(x) \quad (12)$$

(3) GC 法と CE 法の組み合わせ

本研究では，以上で述べた最適化手法と期待値推計手法を組み合わせた手法で道路ネットワーク耐震化問題を解く．具体的には GC 法のアルゴリズム中で生成する戦略の目的関数値 $Z(x)$ に厳密値ではなく，CE 法で求められる $\hat{Z}(x)$ を用いる．この方法を本研究では，GC-CE 法と呼ぶ．

4. 数値例

(1) テストネットワーク

前節で述べた提案手法を Sioux Falls のネットワークに適用し、提案手法の有効性を検証する。ネットワークの交通需要はテストネットワークの元の値をそのまま用い、リンクの交通容量は元の値の 2 倍を用いる。このネットワークには 20 個の交通施設が存在すると仮定し、その配置を図-1 に示す。地震シナリオは一つしかないとして、その年あたりの生起確率は $\lambda(s) = 1.0 \times 10^{-3}$ とする。交通不便益 $\tau(y)$ は経路途絶による経済損失とし、通行不能台数に対応したものと考える。通行不能台数一台当たりの交通不便益を 2.4(万円/日)とした。また、各交通施設の耐震化費用は一律 $K_b = 200 \times 10^3 (b \in \mathcal{B})$ 、変換係数は簡単のため $\alpha = 1.0$ と設定した。

△ : Transportation facility

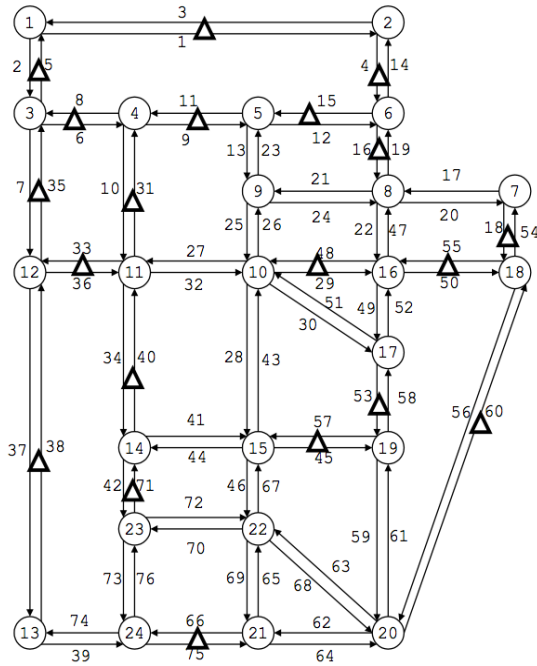


図-1 交通施設の配置

(2) 交通不便益の期待値推計

期待値推計がよく用いられている Monte-Carlo 法に対する CE 法の優位性は先行研究⁸⁾で明らかにしたため、今回は中規模ネットワークでの CE 法の精度と効率性を検証する。恣意的に選んだ耐震化戦略 (a,b,c,d,e) に対し、20 回ずつ推計を行った。CE 法の各イタレーションでの標本被災パターン数は $M = 2000$ とした。各試行

で得られた推計値 $\hat{\tau}$ の誤差率 ϵ を式 (13) で定義した。

$$\epsilon = \left| \frac{\hat{\tau} - E^*}{E^*} \right| \times 100 \quad (13)$$

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} 、最小値 ϵ_{min} 、平均値 $\bar{\epsilon}$ と計算に用いた平均サンプルパターン数 $\bar{T} \times M$ を表-1 に示す。どの戦略でも、平均誤差率が 2% 以下に収まったことがわかる。また、全試行の最悪値は誤差率 5% 以内の値である。これらから、戦略によって多少の差はあるものの、全体として期待値の大きさによらず、安定して高精度の推計を実現していると考えられる。なお、平均サンプル被災パターン数は 13,200 個であった。この数字はこのネットワークの総被災パターン数 $2^{20} = 1,048,576$ に対し、約 1.2% であり、非常に少ない標本数で推計できたことを示している。以上から、提案した期待値推計手法はこのネットワークに対し、高効率かつ高精度な方法であると考えられる。

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	$E^*(x)$	$\bar{\epsilon} (\%)$	$\epsilon_{max} (\%)$	$\epsilon_{min} (\%)$	$\bar{T} \times M$
a	7,121	1.88	4.62	0.55	15,000
b	18,136	1.35	3.81	0.18	15,000
c	42,059	1.55	4.80	0.06	15,000
d	78,353	0.89	2.17	0.27	12,000
e	111,962	0.43	1.12	0.012	9,000

(3) 最適戦略の探索

次に、このネットワークにおける提案した GC-CE 法の有効性を検証する。最初のステージでの標本戦略数は $N = 200$ 、生成された戦略の期待交通不便益を求めるときの各ステージでの標本被災パターン数は $M = 3000$ で計算を行う。

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。これは、非パラメトリックな確率密度を用いているという GC 法の特徴により、一つの戦略に収束するのではなく、幅広い戦略を生成しているからであると考えられる。なお、生成した総標本戦略数は 1,200 であった。これは、このテスト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。また、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た有効な方法であると考えられる。

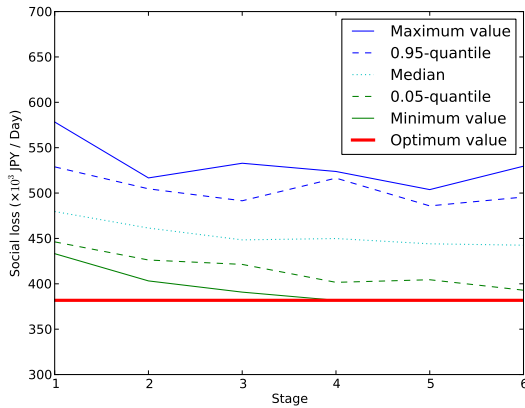


図-2 各ステージにおける目的関数値の最大値，95% タイル値，中央値，5% タイル値，最小値の推移

(4) 実規模ネットワークへの適用

最後に、GC-CE 法を実規模ネットワークに適用する。前節で用いた Sioux-Falls のネットワークを再び使用し、交通施設が各リンクの一つずつ、総計 38 個存在すると仮定する。交通需要や耐震化コストなどの条件は前節と同じ数値を使用する。この問題に対し、最初のステージでの標本戦略数は $N = 100$ 、生成された戦略の期待交通不便益を求めるときの各ステージでの標本被災パターン数は $M = 3000$ で計算を行う。

計算の結果、最適戦略はサンプル数 1,400、ステージ数 14 で求められた。得られた最適耐震化戦略を図-3 に示す。この最適戦略の社会的損失を CE 法で 10 回計算した結果、その平均値が 1,077(万円/日) となった。これは、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が 1,243(万円/日) であることから、損失額を大幅に減少させている戦略であると言える。また、総耐震化費用 320(万円/日) に対し、期待交通不便益の減少額は 486(万円/日) であり、非常に費用対効果の高い戦略であることがわかる。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生成されていることがわかる。この結果についてはさらなる考察を行いたいと考えているが、GC-CE 法で実規模ネットワークでも効率的に優れた戦略を求められると考えられる。

▲ : Facility without reinforcement
◆ : Reinforced facility

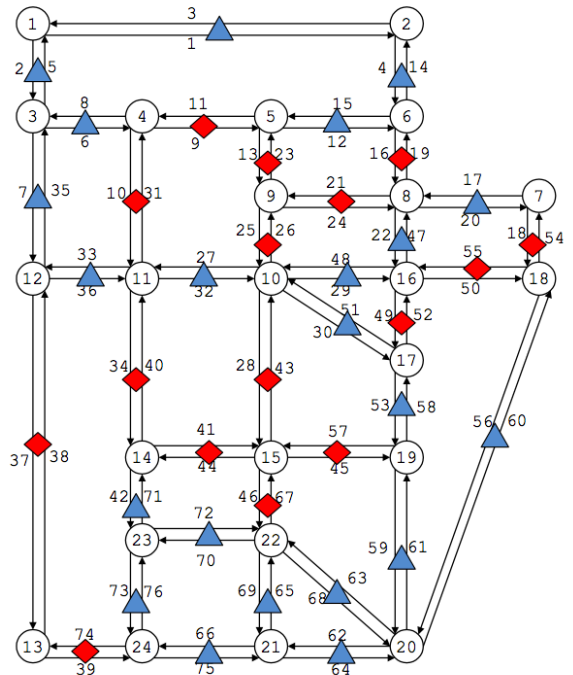


図-3 推計された最適戦略

5. おわりに

まず、本研究における道路ネットワーク耐震化問題を定式化した。次に、耐震化戦略の最適化手法として Gibbs cloner 法、交通不便益の期待値推計手法として cross-entropy 法を用いたアルゴリズムを説明し、それらを組み合わせた GC-CE 法を提案した。その提案手法を中規模ネットワークに適用し、CE 法の高い効率性と精度、GC-CE 法の有効性を明らかにした。最後に、実規模ネットワークに適用し、この手法の有効性を示した。

参考文献

- 1) D'Este, G. and Taylor, M. A.: Network vulnerability: an approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks, in *Network Reliability of Transport. Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR)*, 2003.
- 2) Nicholson, A. and Du, Z. P.: Degradable transportation systems: An integrated equilibrium model, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 31, No. 3 PART B, pp. 209-223, 1997.
- 3) Jenelius, E., Petersen, T. and Mattsson, L.-G.: Importance and exposure in road network vulnerability analysis, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 40, No. 7, pp. 537-560, 2006.
- 4) Du, L. and Peeta, S.: A Stochastic Optimization Model to Reduce Expected Post-Disaster Response Time Through Pre-Disaster Investment Decisions, *Networks and Spatial Economics*, Vol. 14, No. 2, pp. 271-295, 2014.
- 5) Nagae, T., Fujihara, T. and Asakura, Y.: Anti-seismic rein-

- forcement strategy for an urban road network, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 46, No. 5, pp. 813–827, 2012.
- 6) Rubinstein, R.: The Gibbs Cloner for Combinatorial Optimization, Counting and Sampling, *Methodology and Computing in Applied Probability*, Vol. 11, No. 4, pp. 491–549, 2008.
 - 7) Rubinstein, R. Y. and Kroese, D. P.: *The Cross-Entropy Method: A Unified Approach to Combinatorial Optimization, Monte-Carlo Simulation and Machine Learning*, Springer Science & Business Media, 2004.
 - 8) 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, 2014.

(平成 27 年 7 月 27 日 受付)

Anti-Seismic Reinforcement Strategies for An Resilient Urban Road Network: A Gibbs Cloner and A Cross-entropy Approach

Nobuo Takei and Takeshi Nagae

In this study, we develop an quantitative method for analysing the anti-seismic reinforcement (ASR) problem of urban road network against large-scale earthquakes. Since the Great Hanshin-Awaji earthquake (1995), Japanese road networks have experienced severe damage from large-scale earthquakes. In each earthquake, the road network in the affected area was partly severed since multiple transportation facilities were simultaneously disabled, which caused huge social losses. Such social impact from large-scale earthquakes could be reduced by an ASR of transportation facilities. However, it is not feasible to reinforce all transportation facilities because it costs a lot. We thus need to find the optimum ASR strategy among many alternatives, taking into account the cost-effect balance. This study develop an optimization method with a Gibbs cloner method to find better ASR strategies and an estimation method of the expected social losses with a cross-entropy approach.