

被災道路復旧計画問題の一解法

森本 孝紀 徳丸 正孝 村中 徳明 今西 茂
関西大学工学部電子工学科

被災道路復旧計画問題とは、被害を受けた道路網の交通機能を、効率的に回復させるための復旧計画を求める問題である。従来までの被害モデルは単純化されたものであり、リンク単位で被害を発生させていた。そこで本研究では、現実の被害状況をもとに被害を「通行止め」と「通行規制」の2種類の状態をモデル化する。また、GAのコーディングを改良することで、通行止めとなる被害箇所が多段階復旧を可能としている。さらに、GAの適用方法に関する検討実験を行い、その有効性を示す。

A Solution of Damaged Road Restoration Scheduling Problem

Takanori MORIMOTO Masataka TOKUMARU Noriaki MURANAKA Shigeru IMANISHI
Department of Electronics, Faculty of Engineering, Kansai University

Damaged Road Restoration Scheduling Problem is a problem to request the restoration schedule that recover efficiently for a traffic function of the damaged road network. The damage model until the past was the simplified one, and damage was caused each link. In this research, damage is modeled based on an actual damage situation, two kinds of states, "closed to traffic" and "regulation of traffic", is modeled. Moreover, multistage restoration is enabled by improving the method of coding GA in "closed to traffic". In addition, the examination experiment concerning the method of applying GA is conducted, and the effectiveness is shown.

1. はじめに

災害等によって交通機能が低下した道路網は、効率的な復旧計画が要求される。一般的に復旧計画は、被害箇所の優先順位、および各被害箇所の作業配分方式によって構成されるものである。従来研究では、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いることによって効率的な復旧計画を算出し、その有効性を示している^{1), 2)}。

従来までの道路復旧計画問題では、設定された被害モデルを現実世界と比べて単純化している。従来モデルにおける被害は、1本の道路単位で発生し、その道路は被害が完全に復旧されるまで通行不可能状態となっていた。しかし現実では、1本の道路上に複数の被害が存在する可能性がある。また、片側相互通行などで道路本来の交通容量は確保されないが、道路上に被害が発生していても通行可能となる状態も存在する。

従来研究により算出される復旧計画は、現実的に行われる復旧活動と比べて大きく異なっている。従来研究における復旧計画は、被災リンク単位を基準としたものであり、その被災リンクを完全に復旧が完了するまでが1つの作業単位とされている。しかし、実際の通行止めとされた被害箇所では、一度の作業により完全に復旧することはせずに、復旧作業を2段階に分けて行われることがある。通行止めの被害箇所が通行可能となった時点で、その被害箇所をそのまま復旧することよりも、他の被害箇所を復旧した方が道路網全体の利得を得る場合があるためである。

そこで本研究では、単純化されていた被害モデルの改良を行う。また、改良された被害モデルでは、被害の程度により多段階復旧が行われるため、従来のGAの適用方法ではこの多段階復旧を実現することは困難である。そのため、多段階復旧が可能となるようなGAのコーディングが必要

となる。したがって、本論文では以上に示したGAの適用方法について述べている。さらに、遺伝的アルゴリズムの適用方法に関する検証実験を行う。

2. 被災道路復旧計画問題

2.1. 問題のモデル化

道路復旧計画問題で使用される一般的なネットワークは、主要な都市や交差点を示すノード、および主要道路を示すリンクによって構成されている。

従来の被害モデルは現実の被害状況と比べ単純化されている。従来モデルは被害をリンク単位で発生させている。つまり、各リンクは通行可能状態、もしくは通行不可能状態の2つの状態しか表現されていない。復旧方式は、各リンク単位で復旧作業が行われるため、1本のリンクが完全に復旧するまで次の被災リンクへ作業に移ることができないように設定されていた。

1995年阪神淡路大震災時における兵庫県の被害状況と実際の復旧状況をまとめたものを以下に示す。

- ①復旧作業は発生した被害箇所ごとに行う。
- ②全面通行止めとなっている被害箇所は、まず通行可能状態を目標とした復旧を行い、その後に完全復旧を行う。すなわち、2段階復旧を行う。

そこで、本研究では図1に示す新たな被害モデルを定義する。この被害モデルでは従来と異なり、1本のリンク上において被害が複数箇所存在する。さらに、「通行止め」、「通行規制」となる被害箇所の2種類の被害を設定する。以上の被害の設定により、現実的な被害状況をモデル化することができる。さらに実際の復旧作業を考慮し「通行止め」の被害箇所においては2段階復旧を行うこととする。これは、第1段階では通行規制状態、第2段階では完全復旧を目標とする復旧方式である。

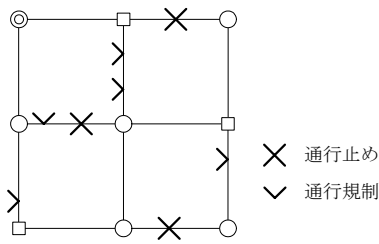


図1 被災ネットワークモデル

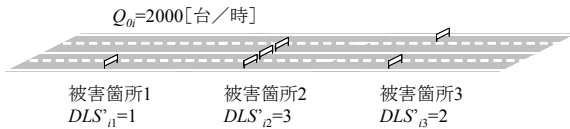


図2 被害状況の一例

2.2. 問題の定量化

2.2.1. ネットワーク機能の評価

ネットワークを評価することは、道路網全体の機能がどの程度回復しているのかを数値で示すことである。以下に、被災道路復旧計画問題で一般的に使用される、ネットワークの評価方法を示す。

- 1 被害状況から、各リンクの交通容量を算出する。
- 2 各リンクの交通容量に基づいて、OD 交通量をネットワークに配分する。
- 3 配分された交通量から、アクセシビリティ指標を求める³⁾。
- 4 アクセシビリティ指標から復旧率を求める¹⁾。

本研究では、リンク上に被害が存在しても通行可能状態となる場合がある。そのため、各リンクの交通容量は被害状況に応じて変化しなければならない。しかし、现阶段ではその依存関係は解明されていない。したがって、単純化した交通容量算出方法によって各リンクの交通容量を求める。

リンクの交通容量は(1)式によって算出される。ここで、 Q'_{0i} はリンク i の現在の交通容量 [台/hour]、 Q_{0i} はリンク i の交通容量 [台/hour]、 LS'_i はリンク i の現在確保可能な車線数、 LS_i はリンク i の車線数、 DLS'_{ij} はリンク i 上の被害箇所 j における被害車線数を示す。

$$Q'_{0i} = \frac{LS'_i}{LS_i} Q_{0i} \quad (1)$$

ただし、 $LS'_i = LS_i - \max(DLS'_{ij})$

つまり、リンクの交通容量は、被害が最も大きい箇所に依存する。例えば、図2の被災リンクにおける交通容量は、 $Q'_0 = 500$ [台/時]となる。

2.2.2. 復旧戦略の評価

道路ネットワークの最適復旧問題における代表的な目的関数として累積非復旧度がある。これは図3のように、横軸を復旧作業日数、縦軸を復旧率とした復旧曲線の上部の

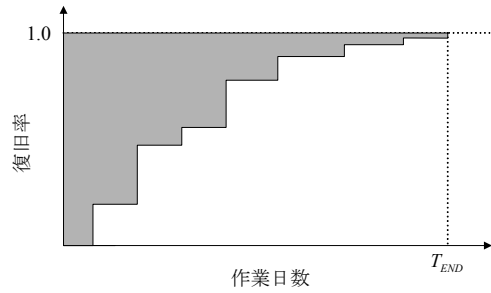


図3 累積非復旧度

面積を表している。よって、累積非復旧度 TR は (2) 式で表される。本研究における道路網復旧問題は、(2) 式で示される累積非復旧度を最小にするような復旧計画を求めることである。

$$TR = \int_0^{T_{END}} [1.0 - RR(t)] dt \quad (2)$$

3. 遺伝的アルゴリズムの適用

3.1. コーディング

被災道路網復旧計画問題とは、被害箇所の復旧優先順位、および作業配分量を考慮した効率的な復旧計画を求める問題である。したがって、この問題を遺伝的アルゴリズムに適用するには、復旧優先度と作業配分量の2つの異なる要素を組み込んだコーディングが必要である。

従来までの被災道路復旧計画問題では、コーディングは被災リンク番号が並べられた形とされていた。被害がリンク単位で発生するモデルであったためである。しかし、本研究では発生した各被害箇所に対して復旧を行うために、遺伝子は被害箇所番号となる。さらに、通止めとなる被害箇所に対しては2段階復旧を取り入れているため、通行止めとなる復旧箇所番号は重複させている。作業配分量は、各被害箇所に対応した配分量を付加させている。

図4にコーディング方法を示す。 I_k は k 番目に着手する被害箇所番号、 P_k は被害箇所番号 I_k へ派遣する作業配分量を表している。なお、 M は総復旧作業数である。総復旧作業数とは、すべての被害箇所を完全復旧するまでに必要な作業数であり、被害箇所数とは等しくない。つまり、通行止めとなる被害箇所の作業数を2、片側相互通行となる被害箇所の作業数を1として、それらの総和が総復旧作業数となる。

図6は図5の被災ネットワークにおけるコーディングの一例である。この場合、被害箇所2、5番は2段階復旧が行われるため、その番号の遺伝子が重複している。この遺伝子列は、まず被害箇所2番に30名派遣し、次に、被害箇所5番に40名派遣することを意味している。

次に、コード化された遺伝子列を復旧計画へ変換するデコードの方法について説明する。遺伝子の順番に作業人員数が確保できるかチェックを行い、確保が可能であれば人員をその被害箇所に派遣する。派遣が完了したら、次の被

被害箇所番号	I_1	I_2	I_3	I_M
復旧能力配分量	P_1	P_2	P_3	P_M

図4 コーディング

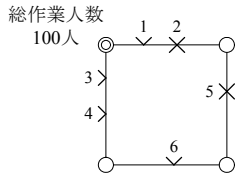


図5 仮想被災ネットワーク

被害箇所番号	2	5	4	1	5	2	3	6
復旧能力配分量	30	40	20	50	40	50	10	30

図6 コーディングの一例

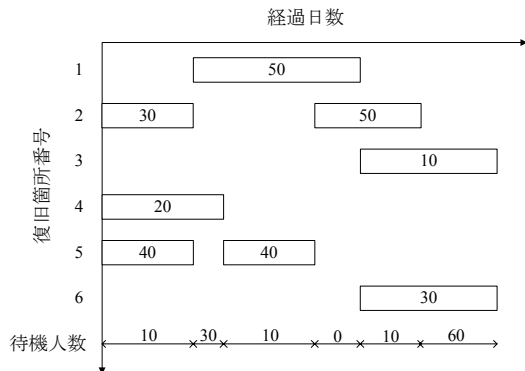


図7 復旧計画

員をその被害箇所に派遣する。派遣が完了したら、次の被害箇所について同様にチェックを行い、すべての被害の復旧が終了した時点で、デコード処理は完了となる。以上の処理を、被害箇所がすべて復旧するまで続ける。図6の遺伝子列をデコードすることによって得られた復旧スケジュールを図7に示す。

3.2. 選択

選択処理には、トーナメント選択を用いる。さらに、世代交代により解を劣化させないために、エリート保存戦略も併用する。

3.3. 交叉

本研究では、遺伝子に被災箇所番号を対応させているため、通常の交叉を用いると、必要以上の被害箇所番号が発生する場合や、ある被害箇所番号が消えてしまう可能性がある。そこで順序問題に対応した、一様順位交叉を用いる。なお、重複している被害箇所番号は、先に現れる被害箇所番号と後に出現する被害箇所番号を区別して扱う。

3.4. 突然変異

本研究では、被害箇所番号の順列とそれに対応した作業配分量という2種類の異なる要素を個体に組み込んでいる。

Parent 1	5	2	6	1	3	1	5	4
	50	30	60	30	40	20	40	60
Parent 2	3	1	1	4	5	2	5	6
	30	40	10	80	50	40	70	20
Mask	0	1	0	1	0	0	1	1
Child 1	3	2	1	1	5	6	5	4
	30	30	10	30	50	20	40	60
Child 2	5	1	2	4	3	1	5	6
	50	40	30	80	40	20	70	20

図8 一様順序交叉

2	5	6	1	3	1	2
50	30	60	30	40	20	40

→

2	5	6	1	3	1	2
50	30	60	30	70	20	40

図9 復旧優先度に関する突然変異

2	5	6	1	3	1	2
50	30	60	30	40	20	40

→

2	6	1	3	5	1	2
50	60	30	40	30	20	40

図10 作業配分量に関する突然変異

そのため、順序に関する変異のみでは、作業配分量の値が早期で収束してしまう可能性がある。そこで突然変異には、「被害箇所番号の変異」と「作業配分量の変異」の2種類を用いる。以下に、2つの突然変異について述べる。なお、本研究では、突然変異が実行されると判断されたとき、それぞれの変異が行われる確率をともに50%としている。

a. 被害箇所番号の変異 (図9)

任意の2地点間の遺伝子をランダムに並び替えるスクランブル方式を採用する。この際、被害箇所番号とそれに対応した作業配分量をブロック化して並び替えを行う。

b. 作業配分量の変異 (図10)

任意の遺伝子の一つを選び、その遺伝子の値を変更する。

4. 実験と考察

本研究における復旧計画は、被害箇所の優先順位および、作業配分量によって構成されている。そのため、遺伝的アルゴリズムによって得られた復旧計画において、作業配分量が効率よく配分されているかを検討する必要がある。そこで、GAによって得られた復旧計画に対して、作業配分量のみを対象に最適化を行うことで、3章で述べた遺伝的アルゴリズムの適用方法の妥当性を示す。実験の概要を以下に示す。

1. 通常の遺伝的アルゴリズムを用いて、最適化を行う (GA1)。
2. GA1によって得られた解に対して、作業配分量のみを対象として最適化を行う (GA2)。

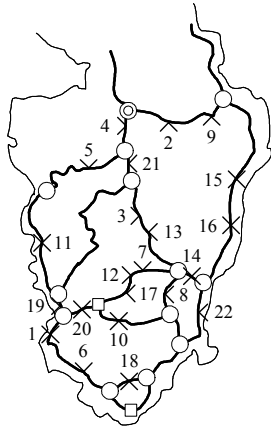


図 11 伊豆半島被災ネットワークモデル

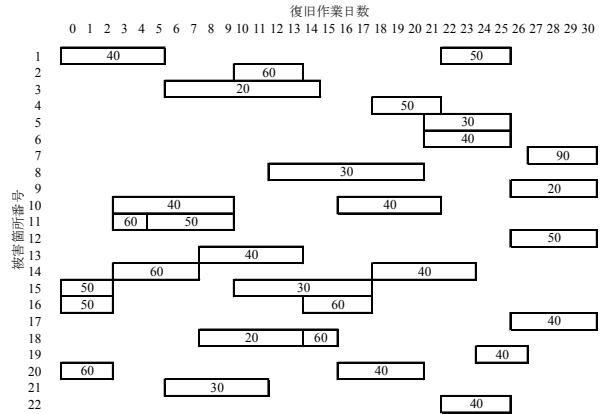


図 13 伊豆半島被災ネットワークモデル

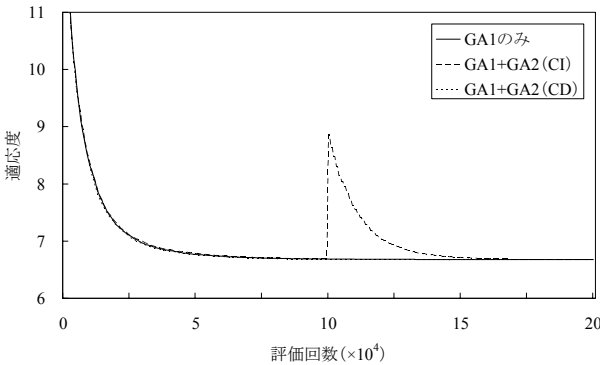


図 12 解の進化状況

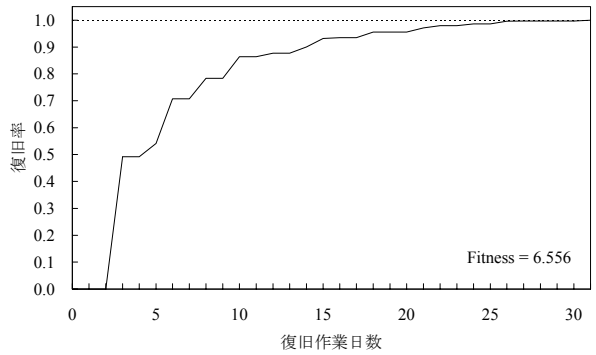


図 14 復旧率の回復過程

表 1 解の改善値

評価	GA1のみ	GA1+GA2(CI)	GA1+GA2(CD)
10×10 ⁴ 回目	6.687	6.691	6.678
20×10 ⁴ 回目	6.677	6.679	6.669

GA1 のパラメータは個体数 500, 世代数 200, 突然変異率 30%である. 次に GA2 の遺伝操作について説明する. まず, 初期集団は以下に示す 2 通りの方法で生成する.

- 初期個体集団をすべてランダムに生成する. すなわち, GA1 の解に依存しない (CI ; Create Independent).
- GA1 で得られた最良の 1 個体のみを引き継いで, 他の初期個体はランダムに生成する. つまり, GA1 の解に依存する (CD ; Create Depend).

選択は GA1 と同様に, トーナメント選択とエリート保存を使用する. 交叉には一様交叉を採用し, 突然変異にはランダムの遺伝子を任意の値に変更する方式を使用する. GA2 のパラメータは試行錯誤の結果, CI を使用したときは個体数 1000, 世代数 100, 突然変異率 20%を使用し, CD を使用したときに個体数 1000, 世代数 100, 突然変異率 10%を使用した. この条件による解の収束状況, および解の改善値をそれぞれ図 12, 表 1 に示す.

表 1 より, すべてにおいて改善値が 0.01 程度であることがわかる. また, 図 12 より, 解の収束状況は確認する限り, ほぼ同一の値に収束していることがわかる. 以上より, GA2

による効果はほとんどみられないと考えられる. したがって, 今回示した GA 適用方法は妥当なものであると考えられる.

なお参考のため, この実験により最良の解が得られた個体による復旧スケジュール, および復旧率の過程をそれぞれ図 13, 図 14 に示している.

5. おわりに

本論文では, 改良された被災道路網モデルにおける遺伝的アルゴリズムの適用について提案した. また, GA の適用方法に関する検証実験を行い, その妥当性を示した. 今後は, 緊急物資輸送ルート設置の導入など, より現実的な被害道路網モデルの設定が課題として挙げられる.

参考文献

- 佐藤忠信, 一井康二, “遺伝的アルゴリズムを用いたライフライン網の最適復旧過程に関する研究”, 土木学会論文集, No.537 / I -35, pp.245-256, 1996.
- 杉本博之, 田村亨, 有村幹治, 斎藤和夫, “復旧班の協力を考慮した被災ネットワーク復旧モデルの開発”, 土木学会論文集, No.625 / IV-44, pp.135-158, 1999.
- 榎谷有三, 田村亨, 斎藤和夫, “道路網を対象とした時間距離行列の視野化”, 土木計画学研究, No.12, pp.567-574, 1995.