

LCC を考慮した被災道路ネットワーク復旧計画策定に関する研究

Optimal restoration scheduling for earthquake disaster considering life-cycle cost

古田均*, 中津功一朗**, 築山勲***

Hitoshi Furuta, Koichiro Nakatsu, Isao Tsukiyama

*工博, 関西大学教授, 総合情報学部総合情報学科 (〒569-1137 大阪府高槻市霊仙寺 2-1-1)

**情修, 関西大学大学院博士課程 総合情報学研究科総合情報学専攻 (〒569-1137 大阪府高槻市霊仙寺 2-1-1)

**工修, 関西大学大学院博士課程 総合情報学研究科総合情報学専攻 (〒569-1137 大阪府高槻市霊仙寺 2-1-1)

Japan has been exposed to many natural hazards such as earthquakes. However road networks have not been designed to protect against all such natural hazards. Moreover, even the most modern design specifications can not guarantee the absolute safety due to economic constraints. Therefore, it is necessary to develop a comprehensive disaster prevention program based on the recognition that road networks may be unavoidably damaged when very strong earthquakes occur. In this paper, an attempt is made to discuss the relationships among early restoration, minimization of LCC, and target safety level of road network by using Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA). There are trade-off relations among three objective functions. By introducing the concept of multi-objective optimization into the restoration scheduling for earthquake disasters, it is intended to find several near-optimal restoration scheduling plans. When selecting a practical restoration schedule, it is desirable to compare feasible optimal solutions obtained under various conditions. Several numerical examples are presented to demonstrate the applicability and efficiency of the proposed method.

Key Words: Multi-Objective Genetic Algorithm, Lifecycle Cost, Optimization

キーワード: 多目的遺伝的アルゴリズム, ライフサイクルコスト, 最適化

1. まえがき

日本列島は大規模なプレートの収束域に位置しており, 我々は宿命的に大規模な地震と共存していかなければならない. そのため, 我が国ではさまざまな分野で防災への関心が高まり, 研究が行われている. 地震対策, 地震予測などの研究により, 道路ネットワーク上の橋梁においても考えられるすべての自然災害に対して安全ように設計されているが, すべての橋梁が最新の設計理論で設計されているわけではない. また, 最新の設計理論にしても, 安全性を無限にとることは不可能である. そこで, 本研究では, 今後, 道路ネットワークは何らかの被災を必ず受けることを前提とし, 被災後の復旧計画策定を試みる.

復旧計画策定において, 早期復旧を目的とすると, 復旧班の適正配分および適正な着工順序は相互に強く関連があるので, 別々ではなく同時に解かれる事が望まし

く, それを遺伝的アルゴリズム (GA) を応用することで解決することは杉本らの研究¹⁾により実証されている.

本研究では更に, 適正な工法を同時に解くことにより早期復旧に加えて, 復旧費用とその後の維持管理費用を含めた Life Cycle Cost (LCC) 最小化, ネットワークの安全性最大化を考慮した復旧計画策定を試みる.²⁾

その際, 復旧日数を制約条件として決定してしまう事で, 例えば, 復旧日数を 30 日以内と決定した上で, LCC 費用を最小化し, 復旧班の配分, 着工順序, 工法を最適化することもできる. しかし, 事前に制約条件として, 復旧日数を決定してしまうと, 例えば, あと 1 日復旧に費やすことで, LCC 費用を大幅に下げる解もしくは安全性を大幅に上げる解が存在したとしても, それを発見することはできなくなる. すなわち, このような解を得るには, 復旧日数, LCC 費用, 安全性を少しずつ変化させて解を求める必要がある. しかし, これには多くの労力を必要とするので, 本研究では様々な条件下の実行可能

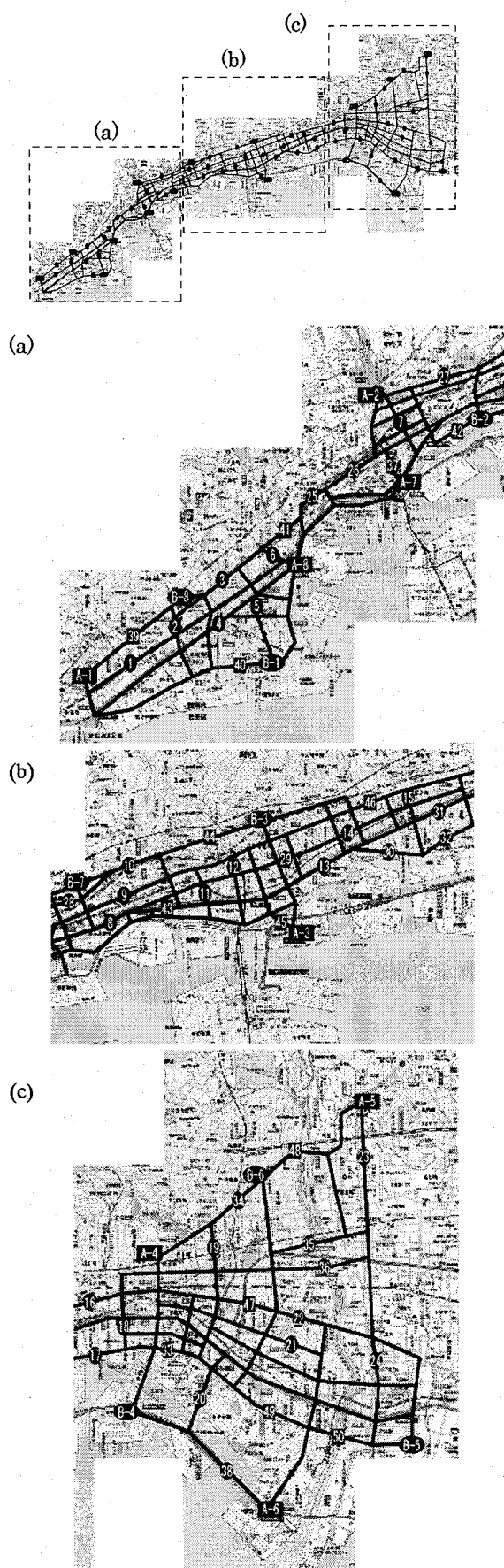


図-1 道路ネットワークモデル

解を列挙し、それらを比較検討するために、復旧計画策定を多目的最適化問題として捉え、多目的遺伝的アルゴリズムを適用し、その有用性について検討する。

2. 道路ネットワーク復旧計画の最適化

2.1 対象道路ネットワークモデル

杉本らの研究¹⁾で、道路ネットワークの復旧を考えた場合、道路上の遮断物を撤去しなければ、道路本体自身の復旧作業が行えない等の条件が被害の時間的階層性として表現された。本研究でモデルとした被災ネットワークも、被害の時間的階層性を含んでいる。また、当然のことながら、時間的に階層関係にない被災モデルも含んでいる。本研究では、1995年阪神淡路大震災で大きな被害を受けた兵庫県神戸市、芦屋市、西宮市の164ノードの道路ネットワークをモデルとして考え、多数の被災を受けた場合を想定する。このモデルでは遮断物撤去作業、道路復旧作業の2種類の作業を考慮している。このとき、数値計算例では、図-1に示すように、38か所(1~38)において道路上に遮断物が倒壊し、50か所(38~50)において道路や橋梁本体に欠陥が発生し復旧作業として、補修作業、補強作業、再建設作業のいずれかが必要であり、遮断物が倒壊した箇所は必ず復旧作業が伴うとしている。遮断物撤去作業、復旧作業の被害量と、その被災が生じているリンクの重要度をそれぞれ表-1、表-2に示す。本研究において、被害量とは0から700まで数値で表し、高いほど、被害度が大きいとしている。また、リンクの重要度とは、被害を受けたリンクが道路ネットワークにおいてどの程度重要であるかを3段階で示し、その数値が高いほど重要度が高いとしている。

本研究では、それぞれの被災内容に対応する班は、8班ずつあると仮定し、図-1にはそれぞれの班の待機場所を遮断物撤去作業班がA-1からA-8、復旧作業班がB-1からB-8で示す。それぞれの班の復旧能力および復旧計画が決定する前に既に着工している既着工工事箇所を表-3~6に示す。ここで、既着工工事がある場合には、その工事箇所の番号を記し、無い場合には0を記している。また、復旧班の能力値とは、各班毎に持っている復旧機材も異なるので、復旧能力には差が出ることを考慮し、本研究では0から35までの数値を定義し、数値が高いほど能力値が高いとした。

復旧率の算定には杉本らの研究¹⁾により提案された方法²⁾を用いる。復旧率を算定することにより、単に復旧日数を短縮するだけでなく、道路ネットワークにおいて重要な被災箇所をできるだけ早く復旧する計画を算定することができる。被災を受けた各道路(リンク)の重要度を $W_i (i=1 \sim n_L)$ とする。ここで、 n_L は被災を受けたリンクの総数である。復旧作業開始から q 日経過後の復旧

率 $R^{(q)}$ は重要度で重みをつけたリンク距離で表すと、式 (1) のように表される。

$$R^{(q)} = \frac{\sum_{i \in J^q} W_i \times l_i}{\sum_{i \in J^0} W_i \times l_i} \quad (1)$$

ここで、 l_i はリンク i の距離、 J^q は被災を受けたリンク番号の集合、 J^0 は q 日までに開通したリンク番号の集合を表している。

表-1 遮断物撤去作業のデータ

工事箇所	被害量	被害度	重要度	工事箇所	被害量	被害度	重要度
1	566	1.70	1	20	314	0.94	1
2	242	0.73	2	21	223	0.67	1
3	635	1.91	3	22	521	1.56	3
4	312	0.94	3	23	162	0.49	3
5	654	1.96	1	24	555	1.67	3
6	511	1.53	1	25	544	1.63	2
7	211	0.63	1	26	454	1.36	2
8	461	1.38	3	27	444	1.33	2
9	656	1.97	3	28	316	0.95	2
10	341	1.02	3	29	443	1.33	1
11	665	2.00	1	30	421	1.26	2
12	422	1.27	1	31	551	1.65	3
13	521	1.56	3	32	166	0.50	1
14	314	0.94	1	33	513	1.54	1
15	322	0.97	3	34	531	1.59	3
16	236	0.71	3	35	245	0.74	1
17	246	0.74	1	36	424	1.27	1
18	666	2.00	2	37	337	1.01	3
19	624	1.87	1	38	564	1.69	2

表-3 倒壊物撤去作業班の能力値と既着工工事

復旧班	1	2	3	4	5	6	7	8
能力値	15	30	12	17	18	23	25	35
既着工工事	0	0	0	37	0	36	0	35

表-4 補修作業班の能力値と既着工工事

復旧班	1	2	3	4	5	6	7	8
能力値	10	20	25	14	17	30	23	27
既着工工事	42	46	48	0	0	49	0	0

表-5 補強作業班の能力値と既着工工事

復旧班	1	2	3	4	5	6	7	8
能力値	10	22	25	21	17	25	23	27
既着工工事	41	44	0	0	0	0	0	40

表-2 復旧作業のデータ

工事箇所	被害量	被害度	重要度	工事箇所	被害量	被害度	重要度
1	153	0.47	1	26	146	0.45	2
2	313	0.96	2	27	366	1.12	2
3	526	1.61	3	28	611	1.87	2
4	464	1.42	3	29	145	0.44	1
5	133	0.41	1	30	425	1.30	2
6	415	1.27	1	31	413	1.26	3
7	355	1.09	1	32	231	0.71	1
8	531	1.62	3	33	245	0.75	1
9	246	0.75	3	34	353	1.08	3
10	623	1.91	3	35	361	1.10	1
11	445	1.36	1	36	131	0.40	1
12	154	0.47	1	37	255	0.78	3
13	613	1.87	3	38	564	1.72	2
14	444	1.36	1	39	631	1.93	1
15	366	1.12	3	40	322	0.98	3
16	615	1.88	3	41	464	1.42	3
17	641	1.96	1	42	114	0.35	1
18	151	0.46	2	43	415	1.27	1
19	254	0.78	1	44	700	2.14	1
20	654	2.00	1	45	511	1.56	3
21	561	1.72	1	46	211	0.65	3
22	125	0.38	3	47	344	1.05	3
23	345	1.06	3	48	407	1.24	3
24	212	0.65	3	49	512	1.57	2
25	536	1.64	2	50	423	1.29	2

表-6 再建設作業班の能力値と既着工工事

復旧班	1	2	3	4	5	6	7	8
能力値	17	18	23	23	15	31	24	28
既着工工事	45	0	0	0	47	43	0	0

2.2 復旧日数の計算

復旧日数の計算においても、被害規模、復旧班の能力値、移動時間、労働時間を考慮した杉本らの研究¹⁾で提案された方法を用いる。以下にその方法を示す。各復旧工事を完了するのに要する復旧日数 d は式(2)によって求められる。

$$d = h / t_1 \quad (2)$$

ここで、 h は復旧工事を完了するのに必要な復旧時間であり、その復旧時間は、被災の規模と担当する復旧班の能力値により求める。また、被害規模は小、中、大の3種類と定義した。小規模被害（被害量が200未満と定

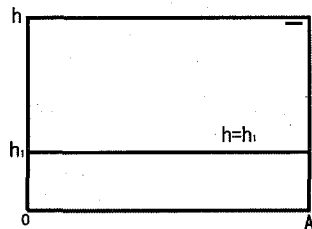
義)は, 復旧班の能力差が出ず, 一定の時間 h_t (本研究においては 4 時間と定義) で完了する被害と定義され, 式(3a)で示す. 次に中規模被害 (被害量が 200 以上 500 未満と定義) は, 復旧班の能力差が出るが, すべての復旧班が対処できる程度の被害と定義され, 式(3b)によって求められる. ここで, 式(3b)の D は被害量, A は復旧班の能力 (1 時間に処理できる被害量) を示す. 最後に大規模被害 (被害量が 500 以上と定義) は, 大型重機等が要求される被害であり, ある基準値以上の能力がないと対処できない被害と定義され, 式(3c)によって求められる. ここで, 式(3c)の A_c は大規模被害を担当できる最低能力 (本研究では 13/時間と定義) を示している.

$$h = h_t \quad (3a)$$

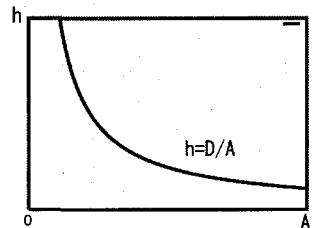
$$h = D/A \quad (3b)$$

$$h = \infty (A < A_c) \quad \text{あるいは} \quad (3c)$$

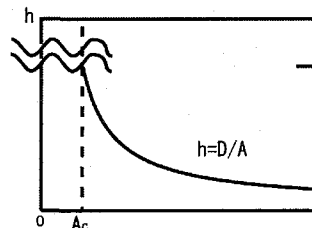
$$h = D/A (A \geq A_c)$$



(a) 小規模被害



(b) 中規模被害



(c) 大規模被害

図-2 被害規模と復旧能力の関係

この時, 被害規模毎の復旧必要時間と復旧班能力値との関係は図-2 で表される. ここで, t_1 は復旧班の 1 日の復旧工事のための作業時間であり, 式(4)により求められる.

$$t_1 = t_0 - 2t_m - h_c \quad (4)$$

ここで, t_0 は移動時間も含めた復旧班の一日にできる労働時間 (本研究では, 12 時間と定義), t_m は移動に要する時間で, 復旧班の常駐場所から被災場所までの最短距離を L (km), 復旧班の移動速度を v (km/h, 本研究では 10km/h と定義)とし, 式(5)で表される. h_c は準備等の時間であり, 各工事毎に必ず必要な時間 (本研究では, 2 時間と定義) である.

$$t_m = L/v \quad (5)$$

3. 多目的最適化による復旧計画策定

3.1 多目的最適化問題

多目的最適化問題とは, 複数の評価項目が存在する場合に, これらを任意の重み付けなどを用いて一つにまとめることのできない問題の事である. つまり, 複数の目的関数を同時に最小化するという完全最適解が, 目的関数が相競合するために存在しない問題のことである. そのために, 多目的最適化問題では, 完全最適解の代わりに消極的な解として, ある目的関数の値を改善するためには, 少なくとも他の一つの目的関数の値を改悪せざるを得ないような解が定義され, それをパレート最適解としている. パレート最適解は, 他よりも劣っていない解という意味で非劣解 (non-inferior solution) とも呼ばれている. つまり, 多目的最適化問題ではパレート最適解を得ることが目的となる.

3.2 多目的遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (以下 GA: Genetic Algorithm) とは広大な解空間を持つような問題に有効とされ, 生物の進化プロセスに着想を得た多点探索に基づくアルゴリズムである. 問題の解候補を個体として, GA 空間に写像し, 基本的な構成としての淘汰・交叉・突然変異などの遺伝的操作 (オペレータ) を行いながら, 環境に適合するように進化していく. 進化して生き残った個体の適合度は徐々に高くなっていくことになる. 適合度を最適化問題の目的関数と考えると, 目的関数の値が進化と共に徐々に大きくなっていくことでよりよい個体, よりよい解候補を生み出すことが可能となる. 多目的遺伝的アルゴリズム (以下 MOGA: Multi-Objective GA) とは個体群を用いて探索をすすめる GA の特徴に注目し, 個体評価における多目的性を直接的に取り扱うアルゴリズムである. すなわち, それぞれの目的関数に対してある程度良い値をとる個体を同時に持ちながら探索を進めることができ,

パレート最適解を直接求めることができる。図-3にMOGAのアルゴリズムを示す。GAを多目的最適化問題に適用する場合、パレート最適解を適切に評価・選択し、次世代に残すことが重要であり、本研究では玉置ら³⁾が提案する以下の二つの方法を組み合わせた方法を用いる。

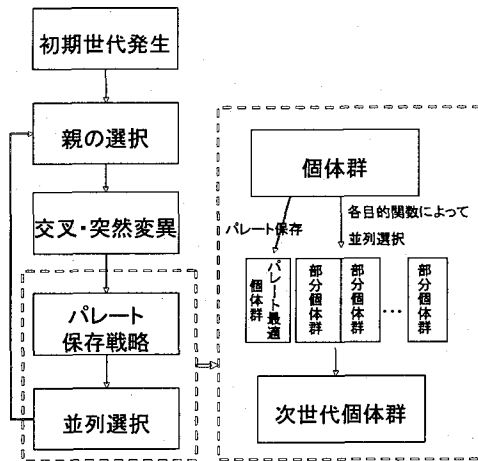


図-3 MOGAのアルゴリズム

(1) 並列選択

選択の際に、次世代の個体群を目的関数に等しい数の部分個体群に分割し、それぞれに対して、単一の目的関数値で選択して、それぞれの部分個体群を形成していく。並列化効率が高くなるという利点はあるが、パレート解集合すべてが求められるのではなく、一つの目的関数の値が極端に良い解に集中するという欠点も見受けられる。しかし、良好な解の要素としては、それぞれの目的関数の最適値が求められていることが要求されるので、この選択法を組み合わせることは有効である。

(2) パレート保存戦略

現個体群中におけるパレート最適性を有する個体を保存し、残りの個体群を目的関数の数で均等に配分し、各目的関数を基準に選択を行う。ただし、次世代の数より、パレート最適性を有する個体が多い場合は、パレート最適個体群の中のみで、並列選択を行う。パレート保存戦略によって妥協解を強制的に次世代に残すとともに、並列選択により各目的関数値のさらなる改善を図っている。

3.2 復旧計画策定における多目的最適化

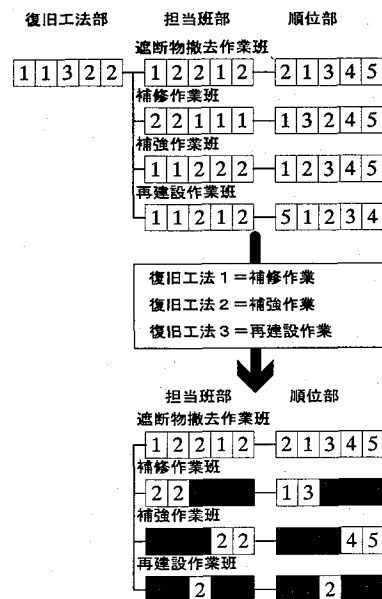
復旧計画を策定する場合、早急に策定するのはもちろんとして、今後2度と同じ被害をもたらさないような安全性と今後の経済性を考慮し、計画を決定することが望まれる。本研究では、管理者の意思決定に必要な解を得る問題を多目的問題として捉えることで、システムを構

築する。最適な復旧計画を策定するためには、復旧予算などを条件としてあらかじめ決定し、その範囲内で安全性を高め、復旧日数を最小化することが考えられるが、復旧予算などの条件を少し緩めることでどの程度安全性が上がるか等の検討をする際に多大な労力を要することになる。そこで、本研究では計画を最適化するために安全性、LCC、復旧日数を目的関数と定義する。すなわち、安全性を最大に、LCCを最小に、復旧日数を最短にすることを目的とし、多目的最適化問題として、解の探索を行う。ここで、各目的関数にはトレードオフ関係が存在する。例えば、LCCを最小化することが、ここでは、復旧工法を安価でおさめるということになり、十分な補強を行わないとなり、安全性を低減させることにつながる。また、安全性を最大化することは、補強などの付加工事を行うために、復旧の完了日数を増加させることにつながってしまう。多目的最適化を行った復旧計画は、各目的関数値を改善するには他の目的関数値を低下させてしまう限界点の解、すなわち複数のパレート解を求めることになる。

4. システムの構築と適用

4.1 GAの構成

遺伝子型：GTYPE



表現型：PTYPE

復旧工事	班	担当工事の順序
遮断物撤去作業班	1班	2→4
補修作業班	2班	3→5
補強作業班	2班	1→3
再建設作業班	2班	4→5
再建設作業班	2班	2

図-4 遺伝子列の構成と計画の生成

本システムでは、遺伝子を図-4に示すように構成する。各個体が持つ遺伝子列を被災箇所への復旧工法部と各作業

毎の担当班部、順序部に分ける。復旧工法部と担当班部は各被災箇所の復旧工法、それを担当する班の番号を示している。遮断物撤去作業においては、必要な箇所においては必ず行われるものとして、その際、復旧作業として、補修、補強、再建設の作業のいずれかは必ず行われるものとする。また、順序部と担当班部は同じ長さをとるが、順序部においては被災箇所の番号をコーディングし、作業の順番を左から順に行うようにしている。このようにコーディングすることで、被災箇所の復旧工法と、復旧作業の班の配分、これらのスケジュールが同時に決定される。順序列の交叉において、スケジューリング問題に用いられる交叉方法³⁾を用いる。以上が本研究で対象としている被災モデルのためのGAの理論的な説明である。

目的関数は、以下のように定義する。

(1) 復旧日数と復旧率 (RD)

杉本らの研究¹⁾で定義された復旧日数と復旧率による目的関数を用いる。以下、復旧率と復旧日数による目的関数値をRD値とする。復旧率と復旧日数の関係は図-5のようになる。そこで、本研究では、図-5にあらわされる部分、つまり、非復旧面積を最小化することを目的とする。道路ネットワークの機能の回復を視野に入れた場合、復旧日数を短縮することも重要であるが、重要なリンク（道路）をより早く復旧することも重要なことである。そのため、目的関数に復旧日数と復旧率を組み合わせることができるこの方法を用いることにした。

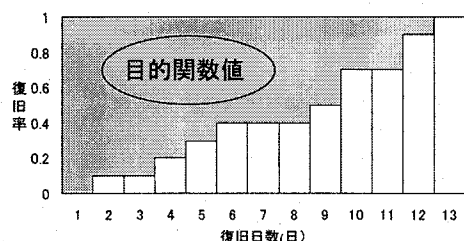


図-5 復旧率と復旧日数による目的関数RD

(2) ライフサイクルコスト (LCC)

橋梁・高速道路の計画において、初期建設費だけでなく維持管理・更新コストを評価することによって、公共事業の効率化・合理化を目指す必要がある。つまり、復旧に関しても、従来のような元の状態に戻すといった考えよりも、今後を考慮した復旧方法を検討する必要がある。つまり、長期的に経済面を考慮した上で復旧計画を策定する必要がある。そこで、本研究では、橋梁や高速道路においては、復旧工法として、補修、補強、再建設の3種類を定義し、それぞれのその後の維持管理費用

(MC : Maintenance Cost) を以下のように定義する。被災後の復旧費用 (RC : Restoring Cost) については、被害度により異なることも考慮し、本研究においては、基本費用 C_b を設定し、被害度 D_{degree} に応じて式(6)によって求める。その際、復旧工法に伴う基本費用を表-7のように定義する。

$$RC = C_b \times D_{degree} \quad (6)$$

表-7 復旧工法に伴う基本費用と安全性

復旧工法	復旧 (万円)	維持管理 (万円)	安全性
補修	700	3500	0.6
補強	1200	2000	0.8
再建設	5000	1500	0.9

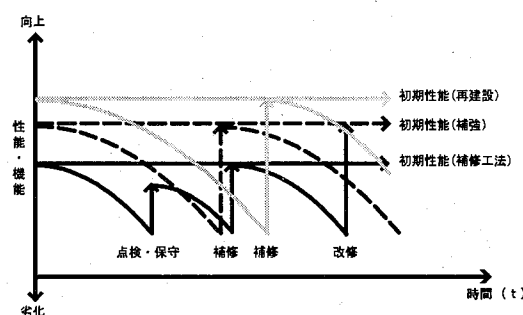


図-6 復旧工法に基づく機能性能と維持管理

また、復旧後の維持管理費用 MC についても、復旧工法により、基本性能が異なることを考慮している。図-6に基本性能と復旧工法の関係を示す。

表-7からもわかるように、維持管理費用 MC は復旧工法により異なる。本研究では、 MC は被災地域毎の劣化率 D_r と表-7に示した復旧工法毎の維持管理の基本費用 M_b により式(7)により求める。ここで、本研究における維持管理費用は以後50年を対象としている。

$$MC = M_b \times D_r \quad (7)$$

なお、本研究において補修、補強、再建設といった復旧費用とその後の維持管理費用を合わせたものをライフサイクルコスト LCC としてその最小化を目指す。 LCC の定義を式(8)に表す。

$$LCC = \sum_{i \in \mathcal{P}} (RC_i + MC_i) \quad (8)$$

i は被災を受けたリンクの番号である。 $\mathcal{P}$ は被災を受けたリンクの集合である。

(3) 安全性 (SL)

復旧後の道路ネットワークの安全性を考慮すると、リンクの交通量、橋梁や高速道路であれば、橋梁下の状況

による安全性を最大化することは重要である。本研究においては、上記したような状況を考慮し、表-2 に示したリンクの重要度 I と表-7 に示した各復旧工法による安全性 (SL : Safety level) により、ネットワーク全体の安全性を式(9)により求め、その最小化を目的とする。ここで、本研究では再建設作業を行った際、最新の設計理論にしても、安全性を無限にとることは不可能であると考え、安全性を 0.9 とした。また、本研究では、復旧作業計画の安全性に対する影響を検証するために、重要度を 3 段階で表した。

$$SL = \sum_{i \in I} (I_i \times S_i) \quad (9)$$

4.2 GA の実行と結果

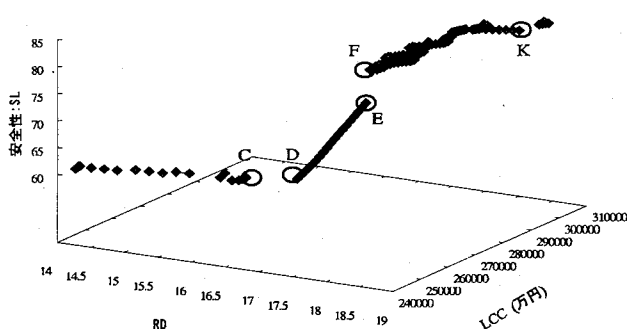


図-7 パレート解の分布

GA のパラメータは、個体数 200、交叉率 0.6、突然変異率 0.05、世代数 5000 とした。図-7 は MOGA によって得られたパレート解の分布である。また、表-8 は各解候補の評価値を示す。解候補 C と解候補 D を比較したとき、安全性の評価においてはほとんど変わらない。しかし、C から D で SL 値が少しだけ上がることで、他の目的関数、 RD 値、 LCC の評価が大幅に悪くなっている。また、E と F を比較した場合、復旧日数に関して、少しだけ評価値が下がっている。そのとき、 LCC の評価は少しだけ上がり、つまり、 LCC は減少し、さらに、 SL においては、大幅な向上が見られる。図-8~10 は 3 種類の目的関数のうち、2 つの目的関数を取り上げてグラフ化したものである。図-8,9 を見ると、 RD 値が少し上がることで、 LCC を大幅に最小化することができ、 SL の値も大幅も高めることができる事が分かる。図-9,10 を見ても、 SL 値が変わらないのに対し、 RD 値、 LCC を大幅に減少させる解が存在していることが分かる。

ここで、パレート解の一例として、解候補 K における遮断物撤去作業と 3 種類の復旧作業の日程を図-11~14 に示す。黒く塗りつぶされている部分は、何も分担していない待ち時間である。図-11~14 は被災箇所 3, 4, 15, 16 のような重要度の高いリンクにおいて、 SL 値を高めることができる補強作業、再建設作業の割合が補修

作業に比べて大きくなっている。その結果として、表-8 からわかるように RD 値に関しては他の解に比べると大幅に大きな値となっている、つまり、時間を要する復旧計画となっているが、 SL 値に関しては、高い数値を示している。

このように、復旧計画を多目的最適化ととらえることにより様々な状況下の計画案との比較が容易にでき、意思決定者の支援につながるといえる。

表-8 解候補

	RD	LCC	SL
A	14.234	241343	61.224
B	15.069	242300	62.123
C	16.309	254316	63.496
D	17.421	260416	63.756
E	17.565	265016	74.116
F	17.576	264866	80.001
G	17.546	284956	80.023
H	17.779	289676	80.229
I	17.898	292191	82.054
J	18.325	291942	82.234
K	18.649	301471	82.268
L	18.623	303837	82.302

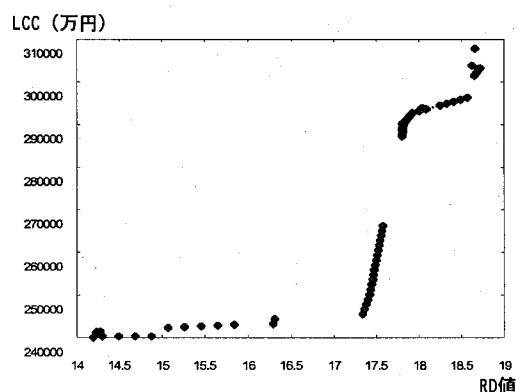


図-8 LCC と RD におけるパレート解の分布

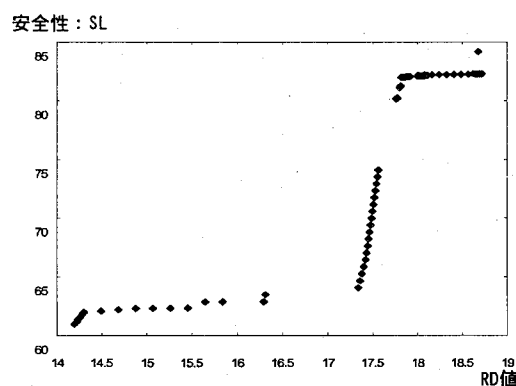


図-9 SL と RD におけるパレート解の分布

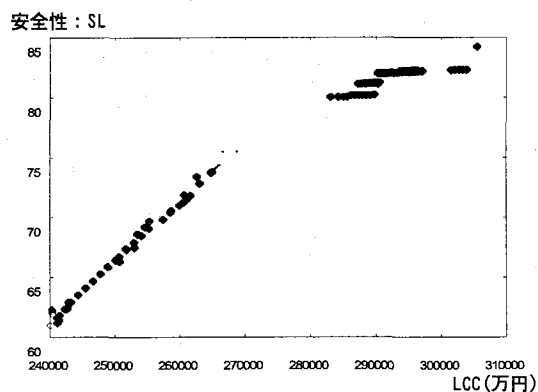


図-10 SLとLCCにおけるパレート解の分布

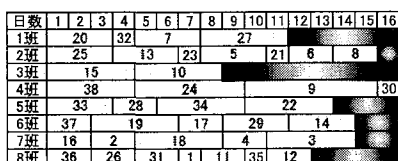


図-11 遮断物撤去作業班の日程



図-12 道路補修作業班の日程

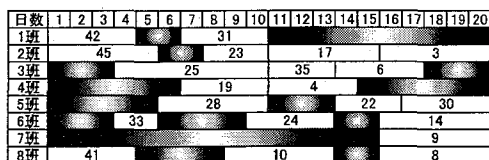


図-13 道路補強作業班の日程

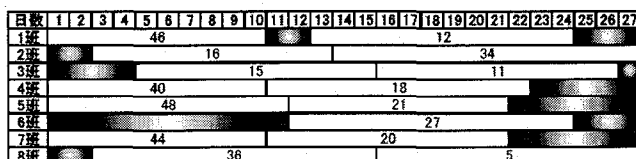


図-14 道路再建作業班の日程

5. おわりに

本研究では、復旧計画を策定する場合、早急に策定するのはもちろんとして、復旧後の道路ネットワークの安全性と今後の経済性を考慮し、計画を決定することを提案した。つまり、復旧計画策定の際、道路ネットワークの安全性と、その際、経済的な面で前提条件となる復旧費用とその後の維持管理費用を含めた Life Cycle Cost (LCC) を考慮することを提案した。

1. 復旧班の適正配分および適正な着工順序だけでなく、適正な工法も同時に解くことが遺伝的アルゴリズムを用いることで可能とした。
2. 本研究では、よりよい復旧計画を得るために、復旧計画の最適化を行うための前提条件となりうる復旧日数、ライフサイクルコスト、安全性を目的関数と捉え直し、復旧計画策定を多目的最適化問題と定義

し、多目的遺伝的アルゴリズムを適用した。

3. 更に多目的最適化によって得られた優劣のつけられないパレート最適解を複数求め、それらを列挙し、パレート関係を視覚化し、様々な状況下の計画案の比較を行うことで、より簡単に意思決定基準を示すことができ、意思決定支援システムとしての位置づけを提案できた。
4. 今後、総合的な防災システムを考えた場合に、被災に備えた事前の準備や震災直後といった状況下での復旧計画策定における探索時間の問題についても、検討を加える予定である。
5. また、被災ネットワークは復旧プロセス内におけるリンクの重要度の変化や2次災害などによる動的環境下にある。実用性を考えた場合には、静的環境下における探索結果では、環境の変化に対応し難い。今後、動的な環境下に対応した復旧プロセスの構築についての検討していく予定である。

謝辞

本研究の遂行に、私立大学学術研究高度化推進事業(学術フロンティア事業)「合意形成のための認知的・数理的情報処理システムの構築」の援助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 杉本博之, 片桐章憲, 田村亨, 鹿汗鹿: GA によるライフライン系被災ネットワークの復旧プロセス支援に関する研究, 構造工学論文集 Vol.43A, pp517-524, 1997.
- 2) Hitoshi Furuta, Koichiro Nakatsu & Dan M Frangopol: Optimal restoration scheduling for earthquake disaster using life-cycle cost, Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructures System, pp47-54, 2005
- 3) 森正勝, 玉置久, 荒木光彦: 多目的最適化問題に対する遺伝的アルゴリズムの一構成法, システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集 Vol.38th, pp341-342, 1994
- 4) Goldberg, D. E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley Publishing Company, Inc.
- 5) Furuta, H., Kameda, T., Nakahara, K., Takahashi, K and Frangopol, D M. (2006), Optimal Bridge Maintenance Planning using Improved Multi-Objective Genetic Algorithm, *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis. (in press)

(2005年9月10日受付)