

遺伝的アルゴリズムによる大規模既存道路橋の 耐震補強計画支援モデルの構築

MODELING OF STRENGTHENING STRATEGY FOR LARGE SCALE EXISTING
ROAD BRIDGES BY USING GENETIC ALGORITHMS

呉 智深¹・原田隆郎²・横山功一³

Zhishen WU, Takao HARADA and Koichi YOKOYAMA

¹正会員 工博 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科 (〒316-0033 日立市中成沢町 4-12-1)

²正会員 工修 茨城大学助手 工学部都市システム工学科 (〒316-0033 日立市中成沢町 4-12-1)

³正会員 工博 建設省土木研究所 耐震技術研究センター長 (〒305-0805 つくば市大字旭 1 番地)

In this paper, to establish a rational strengthening strategy for large-scale old and weak earthquake-resistant existing structures, a conceptual framework for evaluating the importance factor is developed. Then, based on the importance factor analysis, a general framework of strengthening strategies for large-scale bridge structures is formulated as a constrained, nonlinear optimum problem in which the total strengthening efficacy for a variety of bridges and their different component levels receives maximum within the total budget. The Genetic Algorithms are introduced to solve the optimization problem. Some efforts are made for investigating the performances and adaptabilities of different kinds of Genetic Algorithms. To assess the performance of the estimator, some numerical simulations and a practice investigation on existing road bridges within the area of Ibaraki prefecture are carried out. Finally, a computerized prioritization algorithm to assign a quantified ranking in retrofit and budget distribution is suggested.

Key Words : Genetic Algorithms, strengthening strategies, nonlinear optimization, importance factor

1. はじめに

大地震、特に 1995 年の兵庫県南部地震により、補修や補強の必要な多くの脆弱構造物の存在が浮き彫りにされた。このような構造物に対する効果的な耐震補強計画を策定するためには、地震災害による直接的なリスクと間接的なリスクを考慮した既存構造物の影響度および構造部材的と構造システムの様々な属性評価を行うとともに、その重要度によって補強予算を適切に配分し、合理的な補強対策の優先順位を定めることが必要不可欠となっている。しかし、各自治体が一括管理している数多くの既存道路橋に対して、様々な属性に関する評価上の複雑性、地震防災に関する認識の差異、そして評価対象となる量的な規模を鑑みると、まず統一的にかつ全体的に構造体の重要度分析のカテゴリーを整理することが要求されよう。さらに、ある程度客観的に重要度

分析を行った結果を持って、補強予算を適切に配分することや部材と構造レベルの優先順位を定めることなどの意志決定問題は非常に大規模で複雑な非線形最適化問題となっており、より高度な求解アルゴリズムが必要とされている。

近年、巡回セールスマン問題やナップサック問題に代表されるような組合せ最適化問題において、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms ; 以下 GA とする) を適用した最適解探索手法が提案されている。GA は自然淘汰と生物遺伝の仕組みを基礎とし、生物の持つ環境への適応性をモデル化したものであり、解候補の集団に生物進化の法則を適用して最適解を探索する手法である^{1),2),3)}。通常の組合せ最適化問題に限らず、大規模で複雑な最適化問題への適用が可能でもあり、既存道路橋の補修計画や構造最適設計に対して各種実用的な適用が注目されている^{4),5)}。

本研究では、既存道路橋を対象とした重要度分析

を行うとともに、一定の補強予算のもと、補強すべき橋梁を決定するといった組合せ最適化問題にGAを適用し、耐震補強計画を検討するための意志決定評価モデルを構築した。そして、アルゴリズムの改善、モデルの数値実験により、構築したモデルの性能評価を行うと共に、茨城県の既存道路橋の実データについてのシミュレーションにより、モデルの実用化についても検討した。

ただし、本研究で今現在扱っている問題の対象は、様々な属性を持った道路橋の集合といった空間的なものであり、今後の展開としては構造物の経年劣化を考慮し、一定計画年数の最適化といった時間的な視点をも含んだ統合的なモデルへと展開させていく予定である。

2. 耐震補強計画における既存道路橋の重要度分析

最近の巨大地震の経験を踏まえ、大規模で複雑な既存社会基盤施設に対して、科学的かつ技術的な震災対策計画手法の早期開発、ないしは包括的な耐震補強計画の策定が叫ばれている。しかしながら、このような耐震補強計画に関しては、社会的、経済的に複雑な因子が影響し合っており、既存道路橋の耐震補強計画に限っても、インフラストラクチャーとしての価値や崩壊による社会損失など多数の要因を考慮しなければならない。

佐藤ら⁹⁾は、道路の路線・区間としての重要度と橋の被災時の影響度の2因子を組み合わせ、橋の防災上の重要度を定義しているが、本研究では個々の道路橋の重要性をより相対的に評価するために、図-1に示す4つの重要度構成カテゴリー^{7,8)}を設定した。以下に、各カテゴリーについて詳述する。

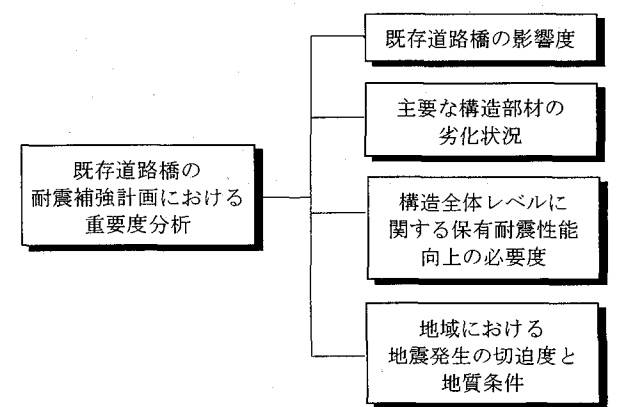


図-1 重要度分析におけるカテゴリー

(1) 既存道路橋の影響度

道路橋は、交通機能の確保に加え、ライフライン

の占用空間として社会・経済活動に極めて重要な役割を果たしている。したがって、地震発生によって道路橋が崩壊し、これらの役割が十分果たせなくなった場合、社会・経済活動に与える影響は非常に大きなものとなる。そこで、本研究ではこのような要因を「既存道路橋の影響度」と定義し、社会・経済活動に与える直接的な影響（内部不経済）と間接的な影響（外部不経済）の両面からコミュニティに対する影響を評価すべきであると考えた（表-1）。

表-1 既存道路橋の影響度に関する評価項目

災害による外部不経済	(I1)車両交通量、(I2)大型車交通量、(I3)歩行者数、(I4)迂回路の有無、(I5)混雑度、(I6)路線種、(I7)接続先、(I8)路線の方向、(I9)火災延焼危険度、(I10)沿道特性、(I11)橋下特性、(I12)占用物件
災害による内部不経済	(I13)建設費用、(I14)補強期間、(I15)耐震補強の難易度

a) 災害による外部不経済

外部不経済に関する評価項目では、利用頻度の高い橋梁ほど被災後の影響が大きいと考えられることから、交通量に関係する要因、(I1)車両交通量、(I2)大型車両交通量、(I3)歩行者数、(I5)混雑度から橋梁の重要性を評価した。さらに、被災時の避難経路、被災後の救援活動を行うために必要不可欠なものとして、(I4)迂回路の有無、(I6)路線種、(I7)接続先、(I8)路線の方向、(I11)橋下特性を、被災時に最優先的に考えなければならない人命については、(I9)火災延焼危険度、(I10)沿道特性、(I12)占用物件を項目として考慮することとした。

b) 災害による内部不経済

内部不経済に関する評価項目では、規模の大きい橋梁ほど崩壊による損失も大きくなることから、橋梁の(I13)建設費用を評価項目とすると共に、補強工事にかかる(I14)補強期間も評価項目として考慮した。また、既存道路橋に対して実際に耐震補強工事を行う場合は、その位置的要因および周辺環境の影響が工事の実施可能性並びに作業性に影響を及ぼすと考えられることから、(I15)耐震補強の難易度も評価項目として考慮した。

なお、内部不経済としての補強費用については、その大小を評価することが構造物の補強優先順位を考慮する上では必要ないと考えられるため、後述する耐震補強計画の策定において、予算制約に関する評価指標の一つとして利用することとした。

(2) 主要な構造部材の劣化状況

既存道路橋の維持管理や耐震補強計画の策定において第一に考えなければならないことは、必要な補

強予算を十分に与え、経年劣化している各主要部材を補強し、構造物の基本的な耐荷性能を維持していくことである。したがって、橋梁を構成する各主要部材の劣化状況を評価することは、重要度分析のカテゴリーの一つとして定義できよう。この部材劣化状況に関する情報は、一般に「橋梁点検台帳」や「橋梁震災点検表」より得られるが、本研究においては以下の9項目についての劣化状況を評価項目として定義した(表-2)。

下部構造の変状については、(D1)基礎の異常な変形、(D2)躯体の異常を取り上げた。また、支承部の変状については、(D3)支承本体の損傷、(D4)アンカーボルトの抜け出し・損傷、(D5)沓座コンクリートの損傷、(D6)上下部構造間の異常な変異を、落橋防止装置については、(D7)可動支承における移動制限装置、(D8)桁橋から下部構造頂部縁端までの桁の長さ又は基礎防止装置を取り上げた。さらに、(D9)桁等の変形についても考慮した。

表-2 主要な構造部材の劣化状況に関する評価項目

下部構造の変状	(D1)基礎の異常な変形、(D2)躯体の異常
支承部の変状	(D3)支承本体の損傷、(D4)アンカーボルトの抜け出し・損傷、(D5)沓座コンクリートの損傷、(D6)上下部構造間の異常な変異
落橋防止装置	(D7)可動支承における移動制限装置、(D8)桁橋から下部構造頂部縁端までの桁の長さ又は基礎防止装置
(D9)桁等の変形	

(3) 構造全体レベルに関する保有耐震性能向上の必要性

構造物の劣化・損傷の診断は定期点検等により行われているが、耐震補強計画によって補強対象橋梁を選択する際には、各種構造部材におけるひび割れや剥離、腐食、異常な変形等の劣化・損傷以外に、地震防災上、本来構造システムの持ち合わせている耐震性能を考慮しなければならない。特に、耐震設計理論や技術の進歩、地震防災に関する意識の高まりにより、耐震的に欠陥を持つ古い橋梁の補強には「構造部材的」な手法ではなく、「構造システムの」な手法・評価が必要であることが強調されてきている。

そこで、本研究では(T1)耐震設計基準、(T2)補修・補強履歴、(T3)設計年、(T4)ダメージを受けている橋脚の状態、(T5)橋台形式、(T6)斜角、(T7)落橋型破壊発生の有無、(T8)せん断と曲げ耐力の比による橋梁脆弱度の8項目を取り上げて評価項目とした。

(T1)、(T2)の2項目は、保有耐震性能に関する耐

震診断において非常に有用な情報であり、(T3)から(T8)の6項目は耐震補強設計により評価される保有耐震性である。Caltrans⁹⁾の補強計画においては、耐震補強設計により評価される保有耐震性能を用いている。これらの評価項目を活用し、構造システムの潜在的な脆性破壊性状を診断することが、今後ますます要求されると思われる。

(4) 地域による地震発生の切迫度と地質条件

先の兵庫県南部地震の被害を見ても分かるとおり、例え橋梁設計における耐震設計基準の整備が進んだとしても、設計強度を越える大規模な地震が発生しないとは言い切れない。また、同程度の耐震性能を保有した橋梁であっても、地域差によってその被害に差がでてくる。つまり、橋梁の耐震補強計画を考える上で、地域における地震発生の切迫度は考慮しなければならない要因の一つである。

そこで本研究では「地域における地震発生の切迫度と地質条件」として、(S1)地盤条件、(S2)最大基盤加速度、(S3)継続時間による偶発危険度に及ぼす因子および(S4)断層活動による因子を評価項目に取り入れた。

兵庫県南部地震では、表層地盤の増幅特性や阪神地域の基盤地形の不整形性が大きいことが示唆されるとともに、一般に地盤が軟弱なほど、相対的に被害は大きくなるといわれる。このことから地盤条件の考慮は不可欠である。また、最大基盤加速度については、地震動加速度が大きいほど相対的に被害度は高くなること、継続時間については、地震による被害度が継続時間に比例して高くなることから評価項目として取り上げた。

3. 耐震補強計画策定問題の組合せ最適化問題としての定式化

国や地方自治体等は、過去数回にわたって全国的な道路橋の震災点検を実施し、その結果に基づき、防災業務計画や地域防災計画として、既存橋梁・構造物への耐震対策計画を行っている。しかし、都市の複雑性や広範性を考慮するためには、橋梁を単独にみた画一的な計画論でなく、特定エリアを包括し、防災に係る予算を総合的に活用できるような耐震対策計画でなくてはならない。

そこで本研究では、耐震補強計画の策定問題を組合せ最適化問題として定義し、前述の既存道路橋の重要度分析の結果を踏まえ、目的関数および制約条件を定式化した。

(1) 目的関数の設定

目的関数としては、先に述べた重要度分析の結果を利用して、これを補強効果値として数値化することによって、計画対象となる橋梁群を相対評価することとした。重要度分析の結果から補強効果値を数値化する方法については、一般的には定量化のための各種理論を適用することによって対応することが望ましいと考えられるが、本研究では各評価項目ごとに点数化の基準を定め、それらを積み上げる方法を採用した。以下に、具体的に補強効果値の点数化方法について述べる。

まず、重要度分析における各カテゴリーの評価項目についてそれぞれ点数化した。例えば、既存道路橋の影響度における「(I11)橋下特性」については、橋下特性が「構造物」の場合は3点、「道路・鉄道」の場合は2点、「河川」の場合は1点のように点数化した。ここで、各項目ごとの点数は橋梁点検台帳等の文献などから経験的に決定した。また、構造全体レベルに関する保有耐震性能の向上における「(T8)せん断と曲げ耐力の比による橋梁脆弱度」については、保有耐震性能「Ⅰ(劣)」が3点、「Ⅱ(中)」が2点、「Ⅲ(良)」が1点のように耐震補強によって現状の保有耐震性能が向上する程度を点数化した。さらに、主要な構造部材の劣化状況については、保有耐震性能と同様に、各評価項目(D1~D9)の劣化状況「Ⅰ(劣)」を5点、「Ⅴ(良)」を1点とする5段階評価で補強後の効果を点数化した。なお、地域による地震発生切迫度と地質条件については、既存道路橋の影響度と同様に、評価項目ごとの点数化の分類をそのまま適用することとした。

次に、各評価項目の点数を4つのカテゴリーごとに合計して各カテゴリーの点数を計算した。つまり、ここで計算される4つのカテゴリーの点数は、耐震補強および通常補強を行った橋梁ないしは部材のものであり、既存橋梁に対する耐震補強などの対策を施した場合の補強効果が目的関数の中に表現されている。

以上より、目的関数は式(1)に示すように計画対象となる橋梁群において耐震補強および通常補強を必要とする橋梁の重要度から換算された補強効果値を総和し、これを最大にするような定式化とした。

$$F = \sum_{i=1}^n (I_i \times T_i \times S_i \times \sum_{j=1}^{m_i} D_{ij}) \rightarrow \text{maximize} \quad (1)$$

ここで、 I_i : 橋梁 i の影響度、 T_i : 橋梁 i の保有耐震性能に関する補強効果値、 S_i : 橋梁 i の地域にお

ける地震発生切迫度と地質条件、 D_{ij} : 橋梁 i 部材 j の重要な構造部材の劣化状況に関する補強効果値であり、これらは対策が施された場合は計算された点数を値として持ち、対策が施されなかった場合は0である。また、 n : 計画対象橋梁数、 m_i : 橋梁 i の部材数である。

(2) 制約条件の設定

制約条件としては補強予算に関する制約条件 G_1 、保有耐震性能の限界値 T_L に対する制約条件 G_2 、部材劣化状況の限界値 D_L に対する制約条件 G_3 の3つの制約条件を設定した。

補強予算に関する制約条件は、式(2a)に示すように、補強を必要とする各部材の総費用と橋梁全体(構造システム)の耐震性に要する費用の総和が、補強予算を超えないようにしたものである。また、保有耐震性能の限界値 T_L に対する制約条件は、式(2b)に示すように、重要度分析において評価された各橋梁の保有耐震性能が、設定された限界値(保有耐震性能の最低レベル)を下回らないようにするといったものである。さらに、部材劣化状況の限界値 D_L に対する制約条件は、式(2c)に示すように、重要度分析において評価された各部材の保有耐震性能が、設定された限界値(部材劣化状況の最低レベル)を下回らないようにするといったものである。

$$G_1 = C - \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^{m_i} c_{ij}^D + c_i^T) \geq 0 \quad (2a)$$

$$G_2 = T_i - T_L \geq 0 \quad (2b)$$

$$G_3 = D_{ij} - D_L \geq 0 \quad (2c)$$

ここで、 C : 補強予算、 c_{ij}^D : 橋梁 i 部材 j における補強費用、 c_i^T : 橋梁 i (構造システム) の耐震性向上に要する補強費用である。

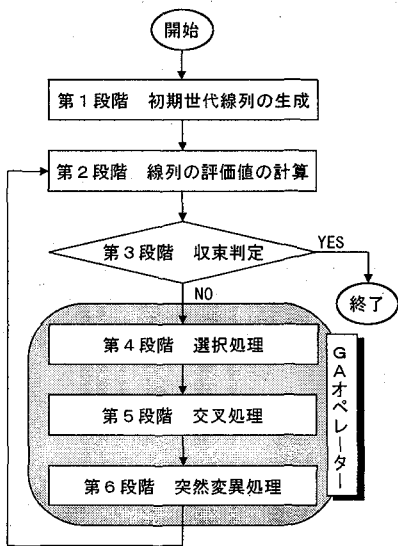
4. GAによる既存道路橋の耐震補強計画のための評価モデル

既存道路橋の耐震補強計画を策定するために、本研究では3.で定式化した最適化問題を、GAの最適解探索能力を用いて解くための評価モデルを構築した。特に、前述の既存道路橋の重要度分析との関連性から、橋梁の各部材に対する補強と構造システム全体に対する耐震補強について検討するために、前者については部材単位の部材劣化状況から評価し、後者については橋梁単位で評価される保有耐震性能を利用した。

以下に、本研究で対象とした耐震補強計画の策定問題へのGA適用の概要やGA導入における各種パラメータの検討結果について論述し、本研究における評価モデルを提案する。

（１）評価モデルの遺伝子フォーマット

GAの基本的な処理フローを図－１に示す。GAの処理プロセスでは、まず問題領域における求めたい解の表現形式をGAの遺伝子列にコーディングすることが必要となる。このコーディングされた遺伝子列を個体と呼ぶ。GAの処理過程では1世代中でL個の個体が生成され、収束判定基準を満たした時点で、世代中の最大適応度個体が最適解として抽出される。収束判定基準が満たされない場合は、遺伝的オペレータによって各種遺伝子操作（選択、交叉、突然変異）が行われ、次世代の個体L個を生成する。GAから得られる解はコード化されているので、これを問題領域にデコード化して最適解とする。



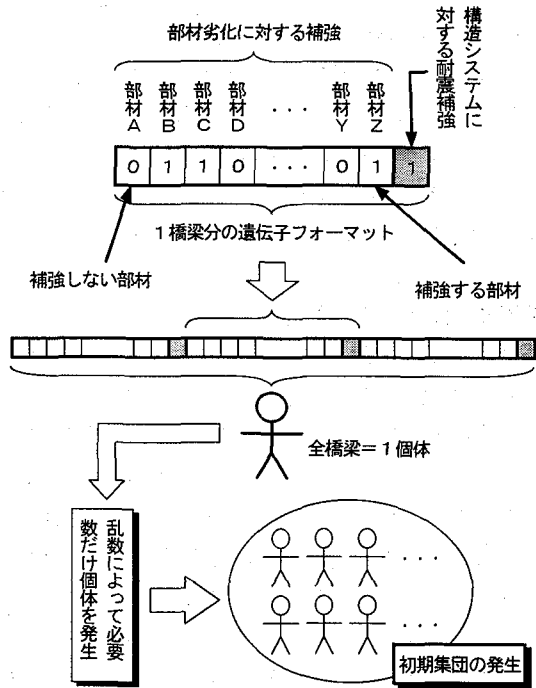
図－１ GAの処理フロー

このようなGAの処理プロセスにおいて、問題領域の解の表現形式をGAの遺伝子列にコーディングすることは非常に重要な手続きである。さらに、このコーディング手法には一般性はなく、対象とする問題の特性を生かしたコーディングが必要となる^{1),2),3)}。本研究では、既存橋梁の補修計画について既に近田ら⁴⁾によって適用されてきた方法を応用して、解の表現形式のコーディングを行った。

つまり、提案する評価モデルにおいては、通常の補強を評価する部材単位の遺伝子と橋梁全体の構造システムを評価する遺伝子を設定し、1橋梁について（部材数+1）回の補強判定が伴うものとした。そして、これらはそれぞれに「補強する⇒1」「補

強しない⇒0」の各遺伝子がすべての橋梁分コード化されることとした（図－２）。つまり、これが1個体となる。

なお、本評価モデルでは、選択された遺伝子をデコード化する際、対応する評価レベルは必ず最大評価レベルまで補強されることとし、各補強に要する費用は評価を1段階高める度に単位コストが加算されるものと設定した。



図－２ 評価モデルの遺伝子フォーマット

（２）評価値の算出

評価モデルにおける個体の評価値を算出するために、式(1)の目的関数と式(2)の制約条件を組み合わせる評価関数Φを定義した。ここで、制約条件を含む最適化問題をGAに導入する方法としては、制約条件式をペナルティ項として表現する方法がある^{1),2),3),10)}。よって、本研究でも制約条件を含む問題をペナルティ関数を用いて無制約の問題に変換し、式(3)のように定式化した。

$$\Phi = \begin{cases} F & (G_1 \geq 0 \text{ and } G_2 \geq 0 \text{ and } G_3 \geq 0) \\ F - \alpha G_1 - \beta G_2 - \gamma G_3 & (G_1 < 0, G_2 < 0, G_3 < 0) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、α、β、γはペナルティ係数であり、右辺第1項の目的関数に対する第2、3、4項のペナルティ項の効き具合を調整するためのパラメータである。制約条件の各項がそれぞれ満たされないとき、目的

関数にペナルティ項が加えられることによって制約条件があるのと同様な効果がもたらされる。

なお、この評価関数によって算出される個体の評価値は、補強を行うべきと判断された橋梁および部材に関する値であり、予算等の各種制約によって補強できなかった箇所については計上されない。

(3) 遺伝的オペレータの検討

本研究では、選択処理、交叉処理、突然変異処理といったGAにおける各種遺伝子操作（遺伝的オペレータ）に関する幾つかの数値実験を行い、その検討結果を踏まえて評価モデルを構築した。以下に、それぞれの検討結果について述べる。なお、数値実験についてはGAの初期世代線列の生成において、ランダムな十数パターンの線列群を発生させ、それらの統計的な結果に基づいてGA評価モデルのパラメータを決定した。

a) 選択処理に関する検討

選択処理においては、エリート保存方式とランク方式とを比較検討することとした。一般に、エリート保存方式は単独で使用すると個体の多様性が保てないという欠点があるため、高い適応度の個体をバランスよくコピーできるランク方式と組み合わせる方法が提案されている^{1),2),3),10)}。本研究でもこの考え方を採用すべく、「エリート保存方式」と「エリート保存方式とランク方式の併用」の2つの方法を比較することによって、選択処理のアルゴリズムを検討した。図-3に2つの方法を比較した複数の数値実験の結果の一例を示す。「エリート保存方式とランク方式の併用」の方が収束世代数と適応度の最大値ともに向上していることが分かる。これより、本評価モデルでは「エリート保存方式とランク方式」を併用したアルゴリズムを採用する。

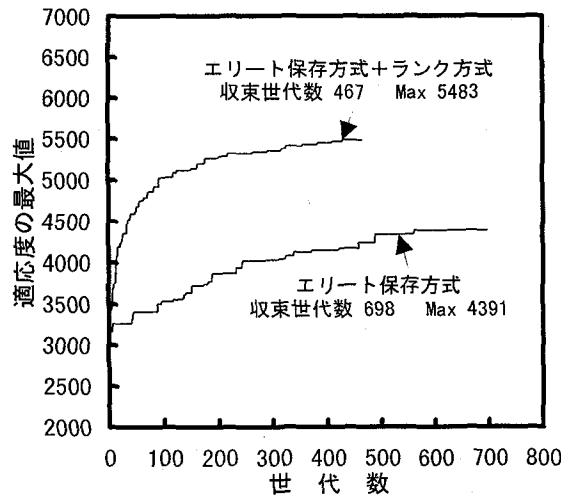


図-3 選択処理の違いによる適応度の収束性及び最適解の比較の一例

b) 交叉処理に関する検討

交叉処理については、1点交叉と2点交叉を比較検討した。しかしながら、これらのアルゴリズムの違いに差異は見られなかったため、本評価モデルにおいては最も単純な1点交叉処理を交叉処理のアルゴリズムとして用いることとした。

c) 突然変位処理に関する検討

突然変異においては、一般に突然変異率が高いと収束が早まり局所解に陥りやすく、逆に低いと適応度の高い解は得られるものの信頼性が低くなるということが分かっている^{1),2),3)}。本研究では、この関係を数値実験により確認すると共に、このことを考慮して、個体群中の最大適応度の広がり具合によって突然変異率が変化するようなアルゴリズムを採用すべく検討した。具体的には、式(4)に示すようなLogistic曲線を用いて突然変異率を設定した。つまり、世代中の最良個体の分布率によって突然変異率 P_m が変化していく(図-4)。

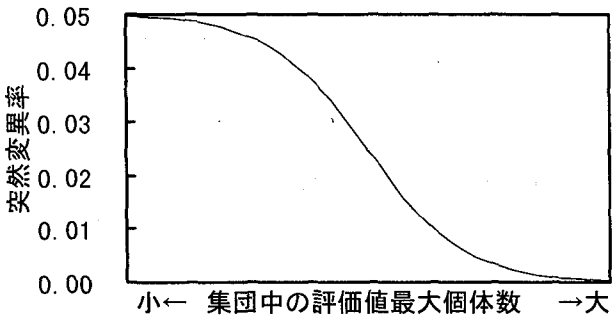


図-4 集団中の評価値最大個体数と突然変異率の変化のLogistic曲線による表現

$$P_m = \frac{0.05}{1 + 0.001e^{0.1x}} \quad (4)$$

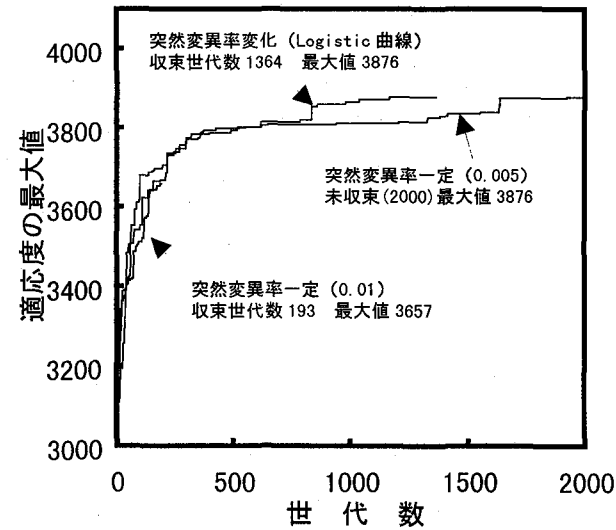
ここで、 x : 世代中の最良個体の分布率(%)であり、係数 0.05, 0.001, 0.1 は数値実験により経験的に求めた。

図-5に複数の数値実験結果の一例を示す。突然変異率を一定とした場合(突然変異率の高い場合と低い場合の2タイプ)と突然変異率を式(5)にしたがって変化させた場合とを比較した。この結果より、突然変異率を変化させる方法では、より高い適応度がかかり早く見つかり、最適解の探索機能と共に解の信頼性および収束性も向上していることがわかる。

以上のような遺伝的オペレータの検討により、局所解到達への回避、収束性の問題が解消できた。

また、問題領域とGAのモデル空間との関連性から、補強の必要がない部材等を表現している遺伝子

が「補強する⇒1」と選択された場合には、強制的な遺伝子操作により「補強しない⇒0」に変換し、意味のない補強を行わないこととした。なお、このような遺伝子操作については、不要な設計変数を排除するといった改良法が提案・確認されている¹¹⁾。本研究では改良前の遺伝子操作を採用したが、現在、この改良法を反映させたモデルに改良中である。



図－5 突然変位処理の違いによる適応度の収束性及び最適解の比較の一例

5. 評価モデルの数値シミュレーション
および検証

茨城県の特定期間（国道 6 号線および国道 51 号線に架けられている）の既設道路橋 78 橋のデータを用いて、構築した評価モデルの信頼性について検討を行うと共に、計画対象エリアをマクロ的に評価することによって、モデルの実用性についての検討も行った。

まず、今回のシミュレーションで用いた重要度分析に基づく補強効果値の点数化基準について、各カテゴリごとに表－3～5に示す。なお、今回のシミュレーションでは重要度分析を行う十分な基礎データが得られなかったため、各カテゴリの評価項目については一部のデータしか利用できなかった。また、今回のシミュレーションにおける対象道路橋すべてが比較的狭いエリアに存在することから、地域による地震発生の切迫度についてはすべて同値（ $S_1=1$ ）として扱った。

また、式(2)で設定した制約条件において、補強費用に関する運用条件、部材劣化状況や保有耐震性能の限界値に関する運用条件は次のように設定した。まず、補強予算についてはモデルを運用する際の橋

梁数およびそれらの補強費用の必要度によって変化させ、概ね橋梁の 7 割が選ばれるような予算額を設定した。例えば、以下で述べる「モデルの信頼性について」のシミュレーションでは、対象とする橋梁数が 10 橋分であり、これらの橋梁のすべてを補強

表－3 既存道路橋の影響度における
評価項目の点数化の基準

評価項目		点数化の基準	
I1	車両交通量 (台/12h)	10,001 以上	3
		3,001～10,000	2
		3,000 以下	1
I2	大型車両交通量 (台/12h)	5,001 以上	3
		1,001～5,000	2
		1,000 以下	1
I4	迂回路の有無	無し	3
		有り	1
I5	混雑度	渋滞有り	3
		渋滞無し	1
I6	路線種別	一桁国道	3
		二桁国道	2
		その他	1
I10	沿道特性	市街地	3
		平野部	2
		山間部	1
I11	橋下特性	構造物	3
		道路・鉄道	2
		河川	1

表－4 部材劣化状況における評価項目の
点数化の基準

評価項目		点数化基準	
D1	基礎の異常な変形	すべての評価項目において、5段階評価する。	
D2	躯体の異常		
D3	支承本体の損傷		
D4	アンカーボルトの 抜け出し・損傷		
D5	沓座コンクリートの 損傷		
D6	上下部構造間の異常な 変異	I (劣)	5
		II	4
		III	3
D7	可動支承における 移動制限装置	IV	2
		V (良)	1
D8	桁橋から下部構造 頂部縁端までの桁の長さ又は基礎防 止装置		
D9	桁等の変形		

表－5 保有耐震性能における評価項目の
点数化の基準

評価項目		点数化基準	
T8	せん断と曲げ耐力 の比による 橋梁脆弱度	I (劣)	3
		II (中)	2
		III (良)	1

表－7 数値シミュレーションにおける既存道路橋の重要度分析結果およびデータ

橋梁	橋長 (m)	幅員 (m)	I	T	S	部材劣化状況 D								
						D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
1	365.0	8.7	30	Ⅲ	1	V	I	I	I	Ⅱ	I	Ⅳ	Ⅱ	Ⅲ
2	261.2	9.7	29	Ⅲ	1	Ⅲ	Ⅲ	I	V	Ⅲ	Ⅱ	V	Ⅲ	V
3	214.3	12.0	28	Ⅲ	1	Ⅱ	Ⅲ	V	I	V	I	Ⅳ	Ⅳ	Ⅱ
4	144.0	8.7	27	Ⅲ	1	Ⅳ	V	Ⅲ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅳ	V	V	Ⅳ
5	123.0	10.4	26	I	1	Ⅱ	Ⅳ	I	V	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
6	93.0	9.0	25	I	1	I	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	V	V	I	Ⅳ	I
7	70.0	8.1	24	Ⅱ	1	V	Ⅳ	I	I	I	I	Ⅲ	V	Ⅲ
8	57.2	8.8	23	Ⅱ	1	Ⅱ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	V	Ⅲ	V
9	55.0	10.0	22	Ⅲ	1	Ⅲ	Ⅲ	V	V	V	V	V	Ⅳ	Ⅱ
10	43.8	10.5	21	I	1	Ⅳ	V	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅳ	V	Ⅱ

表－6 シミュレーション条件

項 目	条 件
個 体 数	100 個体
選 択 個 体 数	60 個体 (40 個体は淘汰される)
交 叉 個 体 数	40 個体 (交叉率: 100%)
突 然 変 異 率	式(5)の Logistic 曲線で規定
収 束 判 定 条 件	$\frac{\text{最大値}-\text{最小値}}{\text{最大値}} \leq 0.05$

表－8 10 橋のシミュレーション結果

橋梁	T	部材劣化状況 D								
		D 1	D 2	D 3	D 4	D 5	D 6	D 7	D 8	D 9
1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0
2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
3	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1
4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
6	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1
7	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
8	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1

する場合に要する費用が 22,000 万円程度であったことから、その約 7 割に当たる 15,000 万円を予算として与えた。なお、このときの耐震補強による工費単価 c_i^T を 300 万円、通常補強による工費単価 c_{ij}^D を 100 万円と設定した。耐震補強に要する費用と通常補強に要する費用とを区別し計上することで、地震荷重に対する保有耐震性能を保持するための補強と、環境荷重や疲労荷重のような通常荷重下における部材劣化の補強のそれぞれの影響を定量的に考慮することができる。また、保有耐震性能の限界値 T_L を「I」に、構造劣化状況の限界値 D_L を「Ⅱ」にそれぞれ設定し、モデルを運用した。

さらに、評価モデルを運用する際に必要となる G A の運用条件を表－6 に示す。

(1) モデルの信頼性に関する検証

構築したモデルの信頼性について検討するために、茨城県の特設エリアの既存道路橋 78 のうち意図的に選んだ 10 橋について、シミュレーションを行った。

既存道路橋の影響度については基礎データをもとに点数化した結果、構造全体レベルに関する保有耐震性能向上の必要度 T、主要な構造部材の劣化状況 D については基礎データそのものを表－7 に示す。

シミュレーションの結果を表－8 に示す。保有耐震性能および構造劣化状況の欄が「1」となっている部分が「要補強」と判断されている部材等である。このシミュレーションにおける G A の収束世代数は 62、適応度の最大評価値は 9857 であり、収束性および最適解への到達度とも有効であると考えられる。

補強選定箇所についてみると、式(3)の評価関数におけるペナルティ項の効果によって、保有耐震性能評価が「I」の橋梁は耐震補強を、また構造劣化状況が「I」及び「Ⅱ」の部材は通常補強をすべきと正しく判定されている。さらに、既存構造物の重要度評価が高く保有耐震性能評価が低い橋梁ほど多くの補強箇所が選定されていることが確認できた。

(2) モデルの実用性に関する検証

次に、茨城県の特設エリアにおける既設道路橋 78 橋について耐震補強計画のシミュレーションを行い、計画対象エリアをマクロ的に評価することによって、モデルの実用性についての検討を行った。

ここで、G A による評価モデルだけでは橋梁の相対評価、つまりどの橋梁を優先的に補強すればよいかという優先順位の導出ができないことから、本研究では以下のような方法で、78 橋の既存道路橋に対して補強対策優先順位を付することとした。なお、本優先順位導出方法は、G A 評価モデルの実用性を

検討するための一例であり、今後このような優先順位導出に関するリーズナブルな方法の開発と、その妥当性の検討について行う予定である。

表－9に例示するように、評価モデルからの最適解によって補強すべきと判断された各橋梁の各遺伝子の数を算出すると共に、そのときの橋梁全体の補強費用および補強効果を定量化している各橋梁ごとの評価値も計算し、これらをすべてかけ合わせたもの、つまりそれらの積の大きい順に優先順位を付した。例えば、表－9に例示する橋梁1では補強費用は最大となっているが、「補強要と判断した遺伝子数(A)」と「補強効果(C)」を掛け合わせることで、補強費用としては2番目の橋梁5と順位が逆転することになる。

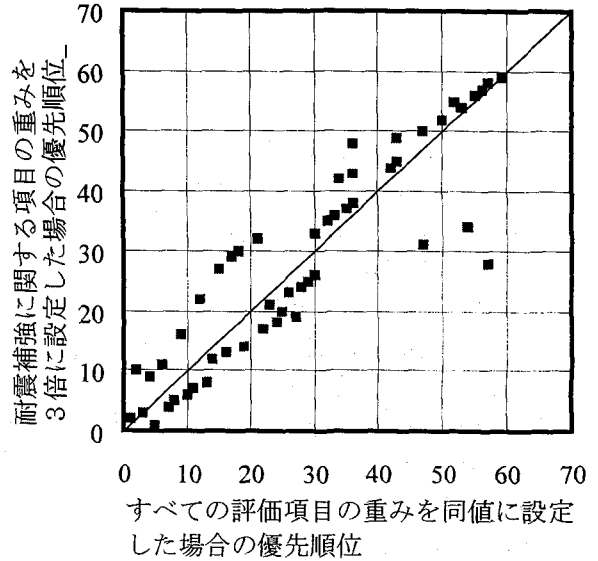
表－9 優先順位導出方法の一例

橋梁	補強要と判断した遺伝子数(A)	補強費用(万円)(B)	補強効果値(C)	(A)×(B)×(C)	優先順位
1	7	256	20	35,840	2
2	3	124	14	5,208	5
3	5	180	23	20,700	3
4	1	130	10	1,300	7
5	6	230	27	37,260	1
6	3	150	9	4,620	6
7	4	140	11	6,160	4

今回のシミュレーションでは、対象とした78橋の既存道路橋に対してGAの評価モデルを運用し、先述の優先順位導出方法を利用して以下の2つの考え方で順位を導出した。そして、耐震補強計画における保有耐震性能の影響評価を行うと共に、マクロ的な耐震補強計画策定に対するモデルの実用性について検討した。

優先順位を導出する際の2つの考え方として、①各評価項目に掛かる重みを同値（すべての評価項目を同等1とした）に設定した場合、②構造全体レベルに関する保有耐震性能として用いた「(T8)せん断と曲げ耐力の比による橋梁脆弱度」の評価項目のみに関する重みを3倍に設定した場合を考え、その結果を比較した。

図－6に結果を示す。グラフの縦軸は保有耐震性能として用いた「(T8)せん断と曲げ耐力の比による橋梁脆弱度」の評価項目のみに関する重みを3倍に設定した場合の優先順位であり、横軸は各評価項目に掛かる重みを同値に設定した場合の優先順位である。ここで、図－6における対称軸から右下にプロットされた橋梁は、補強耐震計画を考慮したことで優先順位が上がり、逆に左上の橋梁は優先順位が



図－6 設定した重みの違いによる優先順位の比較

下がったことを表している。
耐震補強計画における重みを増したことで、下位の順位ながら大きく優先順位が上がった橋梁が見られるとともに、優先順位上位の橋梁に対しては耐震補強計画を考慮することの効果が大いことが推察できる。このように、本モデルでは茨城県のような特定エリアについて、既存橋梁の耐震補強計画に関するマクロ的な計画方針を見い出すことができる。

6. おわりに

本研究では、既存道路橋を対象に重要度分析を行うとともに、その分析結果に基づく耐震補強計画を検討するための評価モデルを構築した。本研究における結論は以下のとおりである。

- 1) 既存道路橋を対象とした重要度分析について、大きな4カテゴリーを定義し、各カテゴリーにおける評価項目を検討した。その際、既存道路橋の影響度について検討すると共に、橋梁の構造システムの耐震補強と主要構造部材の劣化に対する補強のそれぞれについて独立に評価することで、耐震補強計画のための重要度分析が可能となった。
- 2) 耐震補強計画をモデル化するに当たって、当該問題を最適化問題として定式化し、その求解アルゴリズムとしてGAを適用した。そして、このGAによる評価モデルの各種パラメータの検討を行った結果、選択処理については「エリート保存方式とランク方式」を併用した方がよいこと、交差処理については交差手法の違いに差異はなかったこと、また突然

変異処理については、突然変異率のパフォーマンスにおいて Logistic 曲線を用いた手法を用いることにより解の信頼性および収束性が向上したことが分かった。

- 3) 茨城県の既存道路橋の実データから適当に選択した 10 橋について、評価モデルの数値シミュレーションを行った結果、耐震補強計画案としての最適解が十分に正当性を持っていること（モデルの収束性および最適解への到達度）、保有耐震性能向上の必要度や主要な構造部材の劣化状況などの限界値に対する制約条件の効果が確認できたことなど、モデルの信頼性の高さを確認できた。
- 4) 茨城県の既存道路橋の実データ 78 橋について、モデルの実用性に関する数値シミュレーションを行った。橋梁ごとの重要度や補強費用などを考慮した優先順位の導出方法を利用して、耐震補強に関する重要度の評価項目の影響評価を行った結果、優先順位との関係から特定エリアのマクロ的な耐震補強計画の方針について検討することが可能となった。

本論文は、近年高い議論となっている大規模都市システムの耐震補強計画および防災計画の合理化を目指した理論的な研究の第一稿である。

現在、構築したモデルにおいて、目的関数における評価値の算出のための重要度分析の結果を定量評価する方法を見直しているところであり、併せて各評価項目の点数の相関関係についても今後考慮していきたいと考えている。さらに、管理主体である官庁等の耐震・防災施策の一助として、構造物の経年劣化を考慮し、一定計画年数の最適化といった時間的な視点をも含んだ統合的なモデルへと展開させていく予定である。

最後に、本研究でのシミュレーションおよび検証のために、建設省関東地方建設局常陸工事事務所から橋梁点検台帳など各種データを提供いただいた。また、各種数値計算については、奥野直敬君（平成 8 年 3 月卒業）および佐藤文裕君（平成 9 年 3 月卒業）にご協力いただいた。ここに、厚く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 坂和正敏，田中雅博：ソフトコンピューティングシリーズ 1 遺伝的アルゴリズム，朝倉書店，1995。
- 2) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム，産業図書，1993。
- 3) Goldberg, D. E. : Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesely Publishing Company, 1989.
- 4) 近田康夫，橋謙二，城戸隆良，小堀為雄：GA による既存橋梁の補修計画支援の試み，土木学会論文集，No.513/I-31, pp.151~159, 1995。
- 5) 杉本博之，鹿汁麗，山本洋敬：離散的構造最適設計のための GA の信頼性向上に関する研究，土木学会論文集，No.471/I-24, pp.67~76, 1993。
- 6) 佐藤次郎，篠崎之雄，佐伯光昭，磯山龍二：大都市における既存道路橋の地震防災上の重要度の評価手法，土木学会論文集，No.513/I-31, pp.213~223, 1995。
- 7) 呉智深，原田隆郎，佐藤文裕，岩松幸雄：遺伝的アルゴリズムによる道路橋の耐震補強計画のモデル化に関する研究，計算工学講演会論文集，Vol.2, pp.673~676, 1997。
- 8) Wu, Z. S., Harada, T. and Sato, F. : Genetic Algorithms-based reinforcement strategies for large scale deteriorating road bridges, 7th ICCCB, Vol.2, pp.1521-1526, 1997。
- 9) 1994 年 1 月 17 日ノースリッジ地震による道路橋被害に関する耐震諮問委員会報告書「挑戦はつづく」，応用地質株式会社，1995。
- 10) 構造工学委員会 AL（人工生命）技術の構造システム最適化への応用に関する研究小委員会：新しい構造システム最適化手法—人工生命技術の応用—，土木学会論文集，No.543/I-36, pp.1~18, 1996。
- 11) 杉本博之（討議者），近田康夫（回答者）：“GA による既存橋梁の補修計画支援の試み”への討議・回答，土木学会論文集，No.543/I-36, pp.281~283, 1996。

（1997 年 9 月 26 日受付）