

斜張橋架設精度管理へのGAの応用

Application of GA to Erection Control for Cable-Stayed Bridge

古田 均・川村幸男・有村英樹・児島哲朗・川岡靖司・田中正明・金吉正勝

Hitoshi FURUTA, Yukio KAWAMURA, Hideki ARIMURA, Tetsuro KOJIMA, Yasushi

KAWAOKA, Masaaki TANAKA, Masakatsu KANEYOSHI

*工博	関西大学教授	総合情報学部	(〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2丁目1の1)
**	大阪市建設局	土木部	(〒530-0001 大阪府大阪市北区梅田1丁目2番2-500号)
+	駒井鉄工(株)	橋梁設計部	(〒555-0041 大阪府大阪市西淀川区中島2丁目5番1号)
++	川田工業(株)	技術部	(〒550-0014 大阪府大阪市西区北堀江1丁目22番19号)
+++	日本橋梁(株)	技術研究所	(〒552-0013 大阪府大阪市港区福崎2丁目1番30号)
++++	(株)栗本鉄工所	鉄構事業部	(〒590-0977 大阪府堺市大浜西町2番地の2)
+++++	日立造船(株)	橋梁設計部	(〒559-0034 大阪府大阪市住之江区南港北1丁目7番89号)

This paper describes the application of GA (Genetic Algorithm) to the shim adjustment in the erection accuracy control for cable-stayed bridge. The least square method, fuzzy regression method, satisficing trade-off method etc. are proposed to determine the optimum shim adjustment and have been adopted to actual cable adjustment. However, some methods have such problems that weighting for various factors is difficult in a job site. Therefore, an attempt is made to present pareto-optimal solutions and apply GA as an optimum shim adjustment method. It is noted that the proposed method can provide us with discrete combination values of shim plates instead of continuous values. Furthermore, it is expected that even inexperienced engineers can easily select an appropriate solution suitable for individual situations without parametric examination of various weighting factors because the method can give a set of solutions (called parato-optimal solution) with different characteristics

key words: genetic algorithm, multi-objective problem, pareto-optimal solution, shim adjustment, ranking & sharing

1. まえがき

斜張橋、ニールセン橋に代表されるケーブル系橋梁はケーブル、塔、アーチ、桁などから構成される高次の不静定構造物である。ケーブル系橋梁は設計の自由度は高い構造であるが、一方で設計時に仮定した構造系を実現するためには、製作、架設において十分な精度が要求される。しかし、実際には製作、架設の各段階で種々の誤差が累積し設計値通りのケーブル張力や形状を確保することが難しい場合がある。

ケーブル系橋梁の中でも特に斜張橋の場合、設計段階で力学的合理性や鋼桁自重の最小化を目指したプレストレスが設定される。このため設計時に想定した張力、形状の再現が不可欠となる。このとき、構造物の応力状態がケーブル張力に敏感に影響するのでケーブル張力、形状を実測し、設計時の応力状態および形状をできるだけ設計値に近づけることを目的にケーブル調整が行われる。

ただし、設計値については鋼重、剛度等の解析モデル化による誤差を含んでいるため、真値ではなく設計値を真と仮定し、目標値として設定される。

シム調整は高度の架設管理技術と多大な時間を要するため、シム調整量をいかにして迅速かつ合理的に決定するかが重要となる。

大阪市では、新たな斜張橋の建設に伴い、より合理的なシム調整方法の開発をするためケーブル架設検討会を設けて、研究を行った。本検討会では最適なシム調整量の決定手法の開発を目的とし、従来の手法に代わる一手法としてAL (Artificial Life: 人工生命) 技術の代表的な手法である遺伝的アルゴリズム (以下GA: Genetic Algorithm) を採用し、シム調整本数別に離散量で表された最適解の集合を提示することを目的に研究を行った。

シム調整量決定手法としては、これまでに1) 最小自乗法¹⁾、2) 改良型満足化トレードオフ法²⁾、3) ファジィ満足度法³⁾などが提案されており、実際の斜張橋のシム調整に採用され成果を挙げている。

これらの方法に共通していることとして、得られる解がすべて連続量であることが挙げられる。つまりシムプレートの板厚として3.539mmや7.265mmなどのような解が与えられる。実際の架設では、シム調整量はあらかじめ

与えられた厚さのプレートの組合せで与えられており、前述の7.265mmのような板厚の組み合わせは存在しない。このため、実際の現場状況を考えるとシム調整量は離散量の組合せとして与えられることが望ましい。

これに対してケーブル架設検討会で採用したGAでは解が連続量ではなく、シム厚の組合わせという離散量で提示される点が他の手法とは決定的に異なる。

また、前述の方法では、重み、希求水準、満足度などのパラメータを変化させながら意図する形状、張力の残留誤差に到達するまで解析を繰り返すことになる。さらに、実際のシム調整作業では架設の条件に適応した解を迅速に求めることが要求される。つまり、形状と張力の残留誤差が互いにトレードオフの関係をしているために、各種パラメータの設定が困難であることや与条件によって解が大きく変化するなど、現場での意思決定者の負担が大きいことが挙げられている。

これに対しGAでは最終結果が最適解の集合解であるパレート最適解で提示されるため、現場の状況に適した多数の解が1度の計算結果の中で示されるので、解の比較、選択も容易になることが期待できる。

本研究では、以上のGAの特性を活かし、これまで目的関数として直接的に扱われていなかったケーブル調整本数を含めた3つの目的関数によるパレート最適解を調整本数別にしかも離散量として提示することにより、張力、および形状の誤差が目標とする範囲内で、かつシム調整を行うケーブル本数が少ない解を合理的に選択することが可能なシステムを構築し、解決定の過程の簡略化、さらなる迅速性を追求することを目的とした。

2. 遺伝的アルゴリズム

GAとは、ダーウィンの自然淘汰説を基に生物の進化を模した、適用範囲の非常に広い学習的アルゴリズムである^{4), 5)}。すなわち、世代を構成している個体の集合（個体群）の中で環境への適応度の高い個体が次世代により多く生き残り、また交叉および突然変異を起こしながら、次の世代を形成していく過程を模した最適化手法である。

GAが注目されている理由としては以下のものが挙げられる⁶⁾。

- 1) GAは離散量（離散変数）が扱える。すなわち、組合せ最適化問題が解ける。
- 2) 感度解析が1度で良い。
- 3) 目的関数が陽に表現されていなくても良い。
- 4) 基本概念が受け入れやすく、手順、アルゴリズムが簡単である。

土木分野の計画、施工、管理に関わる諸問題を考えると、本質的には離散変数問題や組み合わせ最適化問題が大部分である^{7), 8)}。前述のように本論文で取り扱っているシム調整問題もその一つである。

以下にGAの基本的な流れを示す。

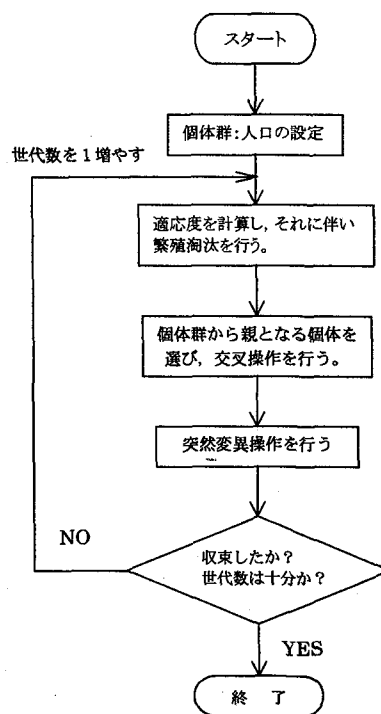


図-1 GA基本フロー

3. GAの多目的最適化への応用

3.1 パレート最適解

(1) パレート最適解

一般に多目的最適化問題(multiobjective optimization problem:MOP)は一般的に下記のように定義される。

$$\text{目的関数: } F(x)=(F_1(x), \dots, F_n(x)) \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\text{制約条件: } x \in X \subset R^n$$

上記のように最適化問題は、解候補の集合、制約条件、目的関数の三つから定義される。一方、GAの基本的要素は、遺伝子列(または線列)と適応度関数の二つである。最適化問題をGAにモデル化する時、解候補は遺伝子列に、目的関数は適応度関数に直接的に対応づけられる。

制約条件は、遺伝子列に組み込まれたり、ペナルティ関数として適応度関数に組み込まれたりする。最適化問題とGAの関係を模式的に表すと図-2のようになる。

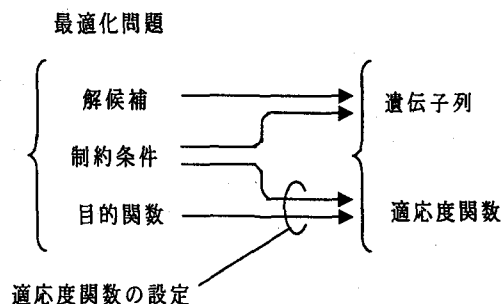


図-2 GAとの対応

しかしながら、多目的最適化問題では、一般にすべて

の目的関数を同時に最小にすることはできない。これは各目的関数がトレードオフの関係になっているため、目的関数間での協調を図って各目的関数をできるだけ小さくする必要がある⁹⁾。

したがって、多目的最適化問題ではある目的をそれ以上改善するには他を犠牲にしなければならないという、ぎりぎりの状態で解を求めることになる。このようなぎりぎりの状態はパレート (Pareto) 最適状態とよばれ、その状態を実現する解をパレート最適解という¹⁰⁾。多目的最適化問題のパレート最適解は、もとの問題を何らかの工夫により単一目的の問題に変換するという、いわゆるスカラー化手法により求められる。したがって多目的最適化問題をスカラー化した問題に対して適応度関数を導入して、GAを適用することによりパレート最適解を求めることが可能である。

0, 1の文字列でコード化された個体を、ランダムに複数個発生させることにより個体群を形成させ、適応度に基づく個体の再生と交叉、突然変異による個体群の進化の結果、得られた適応度最大の個体を近似パレート最適解とする。

複数の個体の発生により多点探索を行うというGAの特徴を考慮すれば、多目的最適化問題のスカラー化によりパレート最適解をただひとつ求めるだけでなく、パレート最適解の集合を求めることが可能である。

(2) 2目的のパレート最適解の例

部品コスト、事故回数を例にしてパレート最適解を表現すると図-3のようになる。

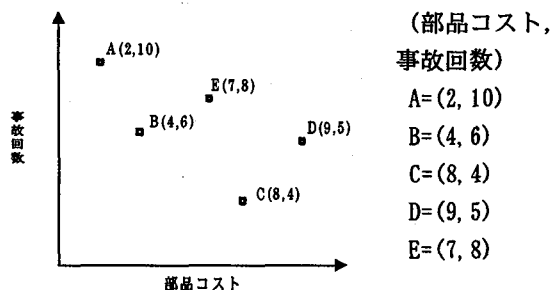


図-3 2目的関数のパレート最適解

本例では、点A, B, Cがパレート最適解 (非優越) 集合になる。

(理由) 点A, B, Cは、各々他のいかなる点によっても優越されない。たとえば、点B(4, 6)は他の任意の点 (x, y) に対して

$$x < 4 \text{ AND } y < 6$$

を同時に満足する (x, y) は存在しないためである。

ここで点D, Eは、他の点によって優越されている。

$$C \leq D \quad (8 < 9 \text{ AND } 4 < 5)$$

$$B \leq E \quad (4 < 7 \text{ AND } 6 < 8)$$

3. 2 多目的最適化への応用

(1) ランキングとシェアリング

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、次世代に残していくことがキーポイントになる。この点に関してこれまでに以下の方法が提案されている。

- ①それぞれの目的関数について独立に選択を行う方法。
- ②解の優越性に基づいて選択を行う方法。

方法①としては個体群を目的関数の種類に等しい部分個体群に分割し、各目的関数値に応じて独立に個体を選択してそれぞれの部分個体群を生成するという方法がある。なお交叉および突然変異は、生成された部分個体群をすべて合せて1つの個体群としたものに対して適用される。この方法ではパレート最適解の一つの目的関数に対して極端に良い解が得られることが多く、妥協解が得られにくいという問題点が指摘されている。

方法②にはランキング選択によるものがある。優越関係に基づくランキングの方法とは現在の個体群の中で支配されていない全ての個体を求めて、これらを同一視してランク1とする。次にこれらのランク1の個体を取り除いた個体群の中から支配されていないすべての個体を求めてランク2とする。このような操作を個体群の中の全ての個体がランク付けされるまで続け、ランクに応じた選択確率に基づいて再生を行う手法である。

優越関係に基づいて定められるランクを利用して選択を行う方法 (ランキング選択) であるランキングは要約すると以下に示す方法で行われる¹¹⁾。

0° ランク $r=1$ とする。

1° 個体群の中からパレート最適個体を求め、これらのランクを r とする。

2° 得られたパレート最適個体を個体群の中から除き、 $r=r+1$ とする。

すべての個体のランクが決定されるまで、1° および2°の手続きを繰り返す。いずれのランキング法を用いた場合でも、すべての個体に対してその優越関係を調べる必要があるので計算量が多くなるという問題点がある。

ただし、GAがランダム探索と際だって異なる特徴は多点並列探索を行う点である。したがって、単に最適解を探すということのみにとらわれず、様々な局所解を探索することにも応用可能である。

図-4にランキングによるパレート最適解算出のフローを、図-5に解析結果の模式図を示す。

ただし目的関数 f_1 と f_2 は次のように定義する。

i 番目の個体の目的関数1を $f_1(i)$ (横軸)

i 番目の個体の目的関数2を $f_2(i)$ (縦軸) とする

ランキング法に多岐性の関数の最適化を図るために、シェアリング (sharing) の手法が1987年にGoldbergとRichardsonによって導入された¹²⁾。シェアリングの概念は、多くの点が集中している部分での関数値には比較的小さ

な重みを、そうでない疎な部分には相対的に大きい重みをかけることにより、関数値の分布の均一化を図る操作である。

多目的最適化の場合、解(個体)がある所に集中するよりも、解の候補が分散した集合(パレート最適解集合)として得られるのが望ましい。パレート最適解集合が得られると、意思決定者はその中からトレードオフを考えることにより唯一解を用いる。以下にシェアリングの手法を2目的の場合¹¹⁾を例にとって説明する。

図-5のように f_1 軸を基準に適切なクラス分けを行い、各クラスに含まれる個体群の個数を $n(i)$ とする。次に各クラスに含まれる個体群がもつ適応度関数より各クラスに含まれる個体の適応値を、そのクラスの個数を正規化した値($=num(i)$)で割ったものを次式で求められる分割適応度関数($shared_fitness$) とする。

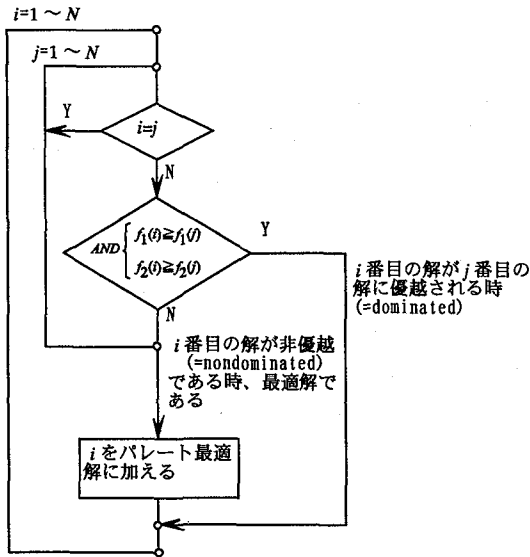


図-4 パレート最適解算出のフロー

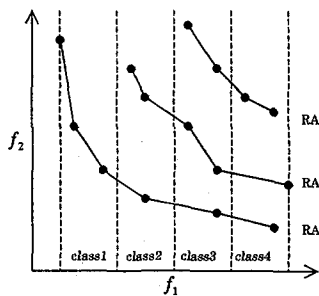


図-5 2目的の場合のランキング

$$fit(i) = \frac{1}{RANK(i)} \quad (2)$$

$$shared_fit(i) = \frac{fit(i)}{num(i)} \quad (3)$$

ここに $num(i)$ は $n(i)$ を正規化したものである。

$$num(i) = \frac{n(i)}{\sum_{i=1}^N n(i)} \quad (4)$$

ここに

N : i 番目のクラスに含まれる個体数

$n(i)$: i 番目のクラスに含まれる個体数

$num(i)$: 各クラスに含まれる個数を正規化した値

(2) 3目的関数への応用

3目的関数の場合、個体の分布は3次元的になるが、個体のばらつきの程度を、適応度関数に関係づけるためには、2目的関数の場合と同様に1つの評価値で表現する必要がある。しかし、2軸の分布を1つの値で評価することはできない。そこで互いに独立した3軸に関してのばらつきを1つの値で表現するために、図-6のように3軸のうちの一つの軸に着目してクラス分けを行い、クラス毎の個数を計算する。

図-7にクラス分けを含めた3目的関数のランキングとシェアリングのフローを示す。

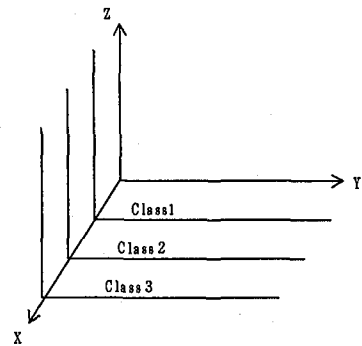


図-6 3目的関数のクラス分け

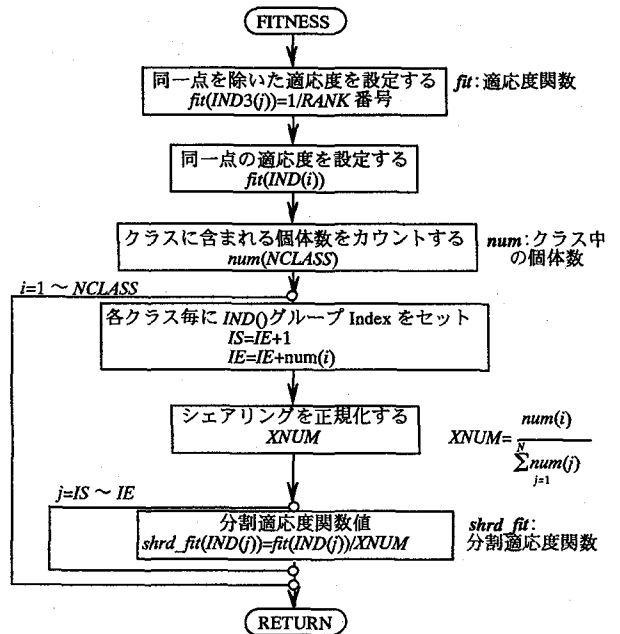


図-7 3目的関数のランキング&シェアリングのフロー

4. 数値計算例

4.1 解析モデル

解析モデルとしては現在大阪市建設局で工事中の3径間連続鋼床版箱桁の斜張橋を対象とする(図-8)。

解析モデル概要

橋 長: 340.800m
支 間: 24.000+65.000+248.850m
主 塔: 逆Y型1本タワー、塔高80m
主 桁: 鋼床版箱桁(4室)
ケーブル: ファン型2面 6段ケーブル(全24本)

4.2 解析条件

- 1) 調整対象ケーブル: CA1L~CA12L, CA1R~CA12R
計24本
- 2) 調整シムテーブル: -63mmから64mm, 1mm間隔
128種類(7bit)
- 3) 誤差の検討対象: 形状誤差: Rf_{ii} (主桁キャンパー38点, 塔頂1点)
張力誤差: Rt_{ii} (全24本)
- 4) 初期誤差: 形状の最大誤差: $Rf\text{-max}=115.8\text{mm}$,
張力の最大誤差: $Rt\text{-max}=48.6\text{tf}$
- 5) 最大繰返し世代数: 100世代
- 6) 人口サイズ: 800個体
- 7) その他条件:
交叉方法: 1点交叉, 交叉確率: 0.5,
突然変異確率: 0.05

図-9に初期誤差の分布図を示す。

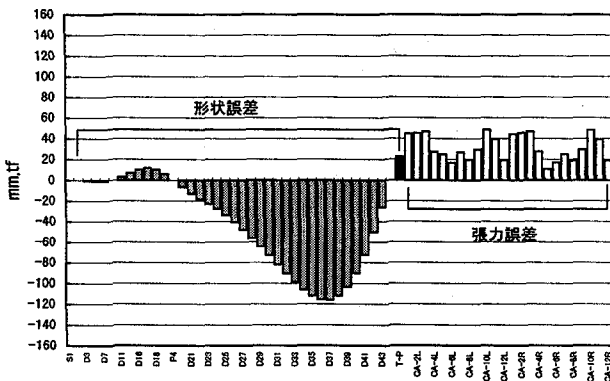


図-9 形状、張力の初期誤差

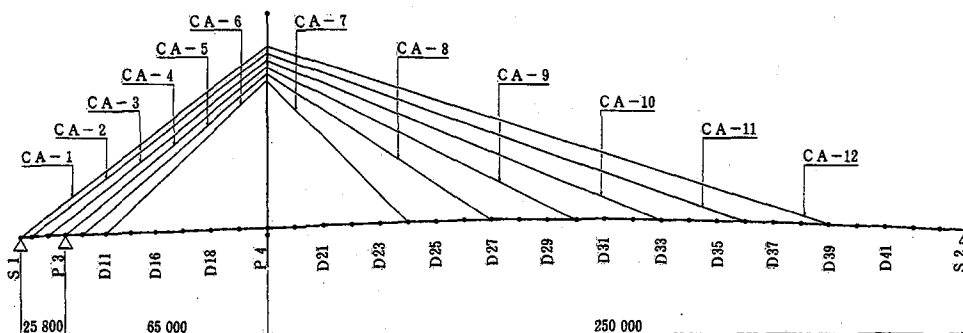


図-8 解析モデル図

シムプレートの組み合わせのコード化で一番重要なのは、シムプレートの組み合わせと遺伝子列が1対1に対応することである。本検討では1本のケーブルに対して用意したシムプレートの種類を128種類としており、実際の計算過程では、7bitずつに区切られた遺伝子列とシムプレートが対応し、各ケーブルのシムプレートの決定後、シムプレートの組み合わせが決定する。

人口サイズは単一目的問題の場合、設計変数(ケーブル本数: 24本)の約10倍(240個体)程度を目安とすることが多いが、本検討において、ランキングを行いパレート最適解を求める場合、試算の段階でそれ以上の個体をエントリしないと適切な解を得るには不十分であることが解ったため、解析時間を考慮して人口サイズを800個体とした。また、突然変異確率は0.01~0.05を目安とし、最良戦列の人口サイズに占める割合と同値である0.05とした。

解析時間については試算段階で行った人口サイズ4000の場合で460秒、人口サイズ800の場合で30秒程度である。

実際には、解析モデルや設定した誤差量にも影響を受けるため、各種パラメータの設定には事前のシム量決定のシミュレーションが不可欠である。

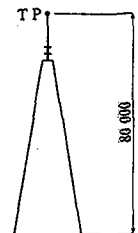
4.3 2目的計算例

(1) 計算例(その1)

形状および張力の残留誤差を対象とした2目的問題の計算例を示す。適応度関数については、構造系全体の応力バランスを考えた誤差の配分などが考えられるが、本研究では各個体の持つ張力と形状の残留誤差のうち、張力と形状の最大誤差の絶対値($Rt\text{-max}$, $Rf\text{-max}$)に着目し、式(2)~(4)を用いてランキングとシェアリングを行った。

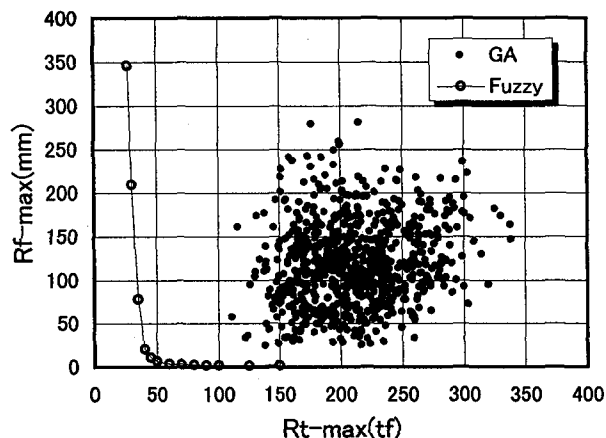
図-10に各世代における個体の $Rt\text{-max}/Rf\text{-max}$ 分布図を示す。ここには比較解としてファジィ満足度法³⁾の解も示している。

結果より40世代である程度解が収束し、100世代においても解は改善されていない。本計算例では最終世代においても、パレート最適解の収束性がファジィ満足度法に比して悪い結果となっており、精度の低い解、つまり

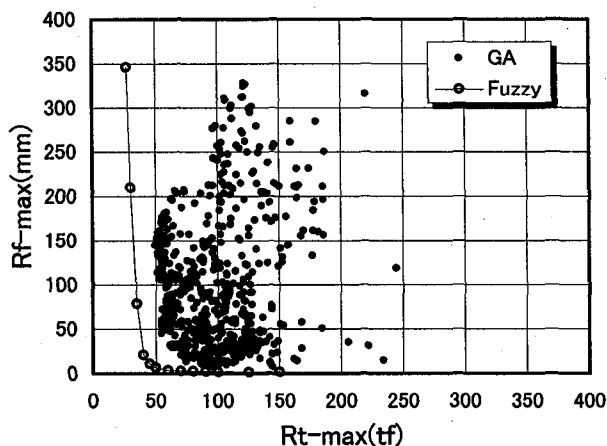


Ri-max, Rf-maxが改善されていない解しか得られていない。このため最大繰り返し世代数を多くしたり、淘汰、繁殖の条件を変更して解析したが、同程度の結果しか得ることはできなかった。

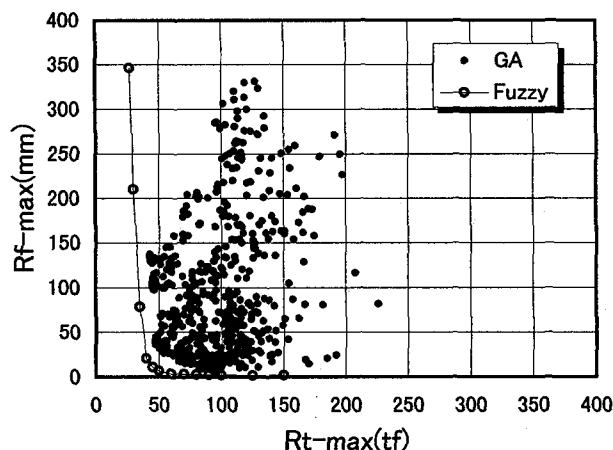
解析条件を変更しても解が改善されない原因としては、世代交代の早い段階で初期収束が発生していることが挙げられる。つまり、収束に問題があるパレート最適解どうしの交叉のみが行われ、解が改善されず、収束が頭打ちとなっていると考えられる。



(a)初期世代



(b)40世代

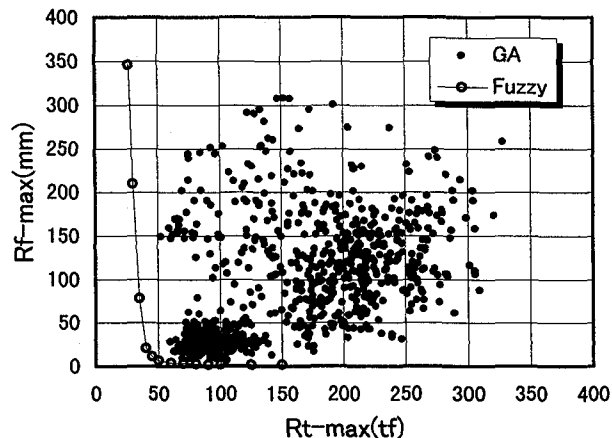


(c)100世代

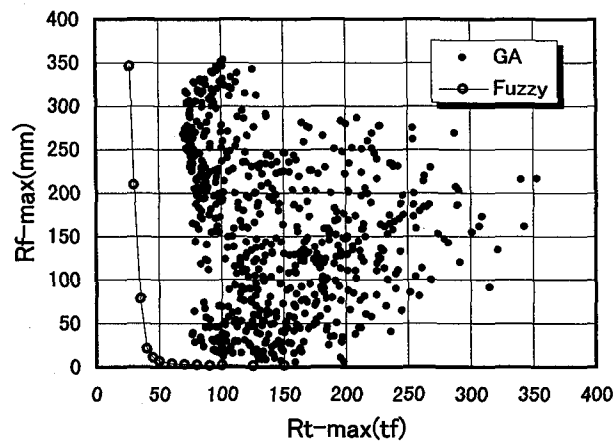
図-10 2目的問題解析結果

(2)計算例(その2)

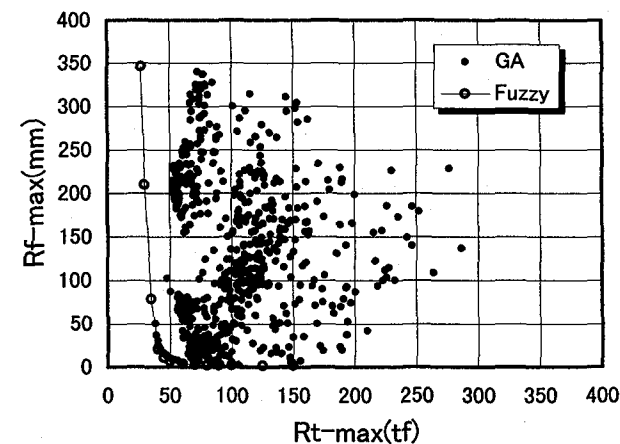
解精度の向上を計る方法として人口サイズの増加が挙げられる。試算の段階で人口サイズを20000~50000個としたが解精度の向上は計ることはできなかった。これは本例では 24^{128} 個の組み合わせがあり、試算のように人口サイズを数十倍程度と設定しても無限に近い解候補の中からごく一部しか候補として採用されていないことに起因すると思われる。そこで初期世代の分布の形態に着目し、収束解の改善を試みた。



(a)初期世代

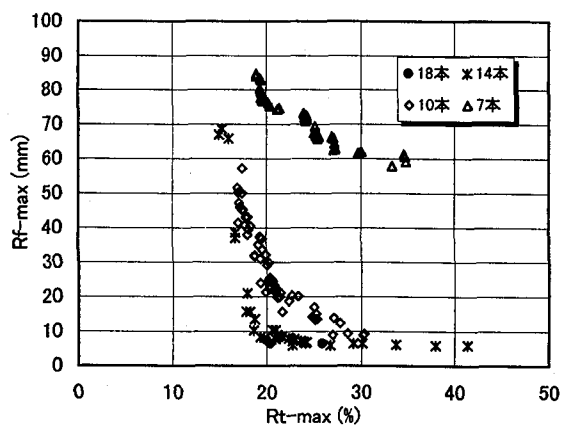


(b)40世代

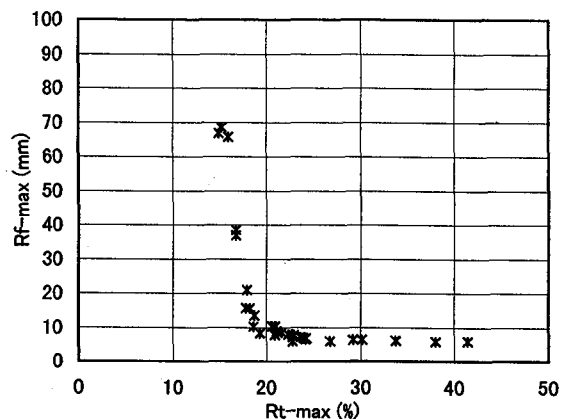


(c)100世代

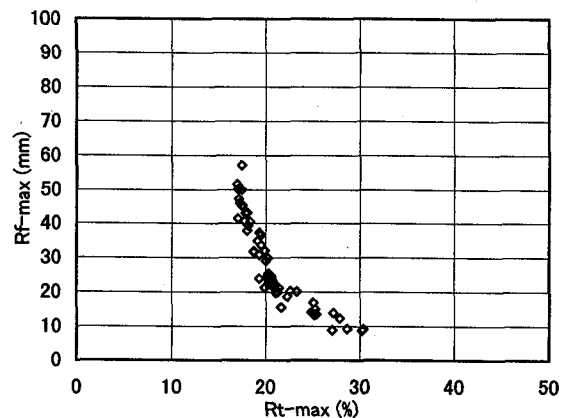
図-11 初期世代を改善した場合の解析結果



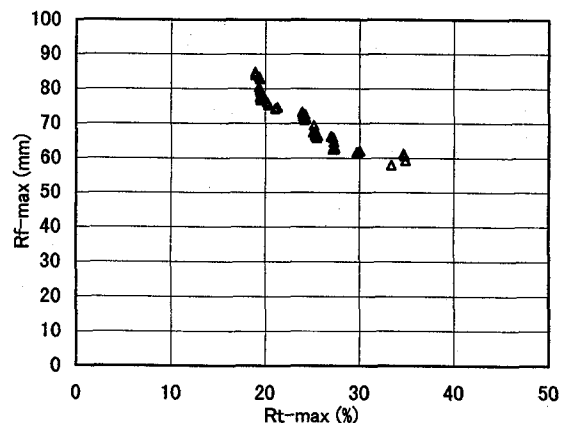
(a)調整本数別Rf-max/Rt-max分布図



(b)調整本数14本

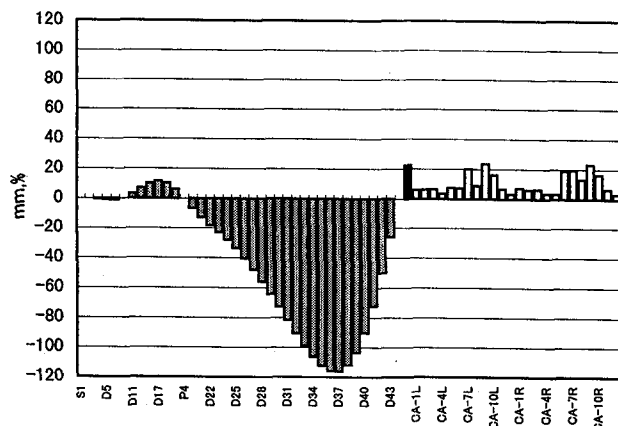


(c)調整本数10本

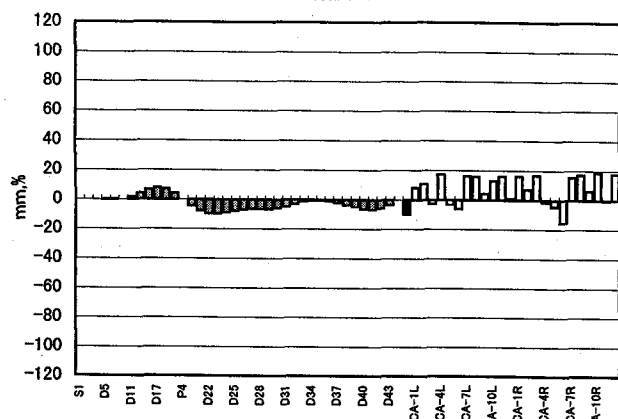


(d)調整本数7本

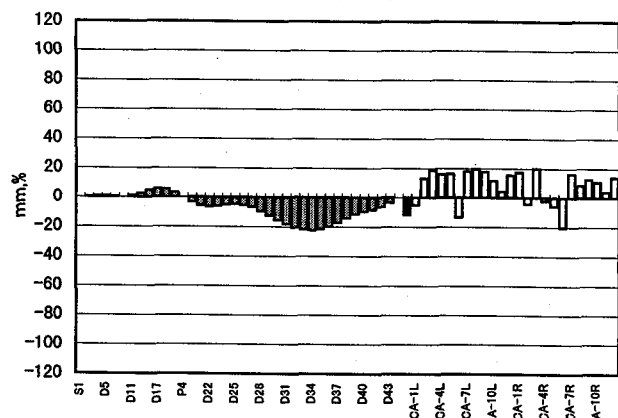
図-13 調整ケーブル本数別Rf-max/Rt-max図



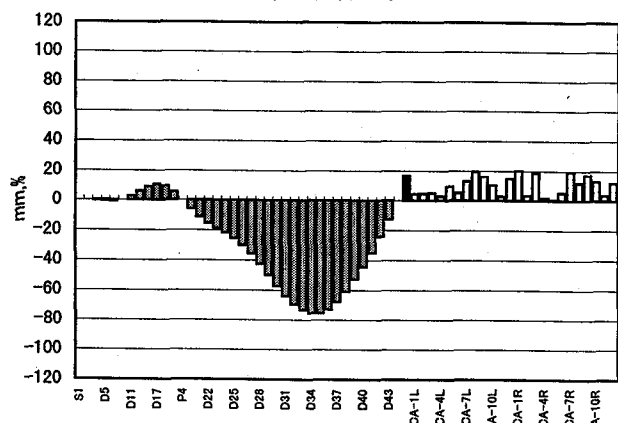
(a)初期誤差



(b)調整本数14本



(c)調整本数10本



(d)調整本数7本

図-14 調整ケーブル本数別誤差分布図

まず初期誤差，調整シム量，調整後誤差を影響値マトリックスを介して次式のように考える。

$$Ax + b_0 = b_1 \quad (5)$$

ここで

A ：影響値マトリックス， x ：調整シム量

b_0 ：初期誤差， b_1 ：調整後誤差

次に制約条件として $x_{\min} < x_i < x_{\max}$ を与え，これを満足し b_1 が最小となるような x を求める。このとき，調整本数には制限を加えず，連続量で x を求めこれをmm単位で丸める操作をした。さらにこの x を中心に，正規分布により発生させた個体を候補として必要数だけ採用する。

本例では全人口数800個体のうち，400個体を上記の手法により発生させ，その他条件は4.2と同じとした。計算結果を図-11に示す。

結果から解るように各個体は初期世代においても最終解付近で分布しており，最終世代のパレート最適解の収束は改善されている。

4.4 3目的計算例

次に3目的関数の計算例を示す。2目的に付加する目的関数としてシム調整本数を採用するため，形状と張力の残留誤差および調整本数の少ない個体ほど適応度が上がることになる。この場合の形状および張力の残留誤差とシム調整本数の関係を模式的に図-12に示す。

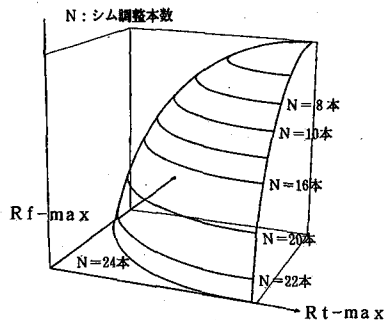


図-12 形状，張力の残留誤差およびシム調整本数

他手法ではシム量が1,2mmなどのように小さいケーブルについては強制的にゼロにするなどの操作を行い調整本数の低減を図っていたが，本手法では調整本数別に解が提示されるため，架設現場の状況に合わせた適切な解の選択が可能となる。実際には調整本数ができるだけ少なく，かつ残留誤差が管理値を満足する解を選択することになる。

通常，シム調整問題では残留誤差の許容値として，形状については支間や塔高をパラメータとして70mm，60mmなどのように定められ，また，張力については設計張力の10%などのように設定される。前述までの計算例では形状，張力とも許容値をパラメータとして考慮していない。張力については各ケーブルとも設計張力が異なり，残留誤差を設計張力に対する割合で管理することを考慮すると，無次元化を図り，これをもって適応度を計算す

ることがより現実的である。

そこで形状の最大誤差 ($Rf\text{-max}$ ，単位:mm) と張力誤差を設計張力で除した値 ($Rt\text{-max}$ ，単位:%) で適応度を評価した。4.3の条件で3目的解析を行った結果を調整ケーブル本数別に図-13に示す。

本解析では24本から7本までのパレート最適解を得ることができているが，図-13(a)では比較のため，18，14，10，7本の解候補のみを表示することとした。

本研究でGAを採用した目的の1つとして，唯一つの解だけでなく，パラエティに富んだ多様性のある解を提示することが挙げられる。本プログラムでは，乱数の変更により，収束解にも変化が生じる。そこで，収束が頭打ちとなる100世代で解析を打ち切り，計算時間を考慮し，10回分の解析結果から，最終的なランキングを行うことで，より多様性のある結果が得られるようにした。

図-13に調整本数別のパレート最適解の分布を，図-14に調整ケーブル本数別の誤差分布図を示す。図-13より，調整本数が18本から7本の範囲では，パレート最適解集合のうち，14本調整の場合と10本の場合とを比較すると調整本数が異なるものの，同様な効果が得られることが解る。一方，7本調整する場合では10本調整する場合と比較して形状では約3.5倍の最大誤差が生じている。このように3目的解析を行うことで調整ケーブル本数により張力や形状に差が現れる限界が判断可能と考えられる。すなわち，何本のケーブルを調整することで合理的かつ効果的に結果を得ることができるかの判断が容易になると考えられる。

5. 結論とあとがき

本研究では斜張橋のシム調整問題に，離散量を取り扱うことができ，組合せ最適化問題に有効なGAを適用した。さらにGAに多目的最適化手法を導入し，形状，張力，シム調整本数を同時に最適化することで，シム調整本数別にパレート最適解を効率的に，かつ精度良く提示することのできるシステムを構築した。GAの適用においてはシムプレート厚の遺伝子列へのコード化はもちろんのこと，これまで直接扱われていなかった調整ケーブル本数を目的関数に加えた3目的関数に対応した適応度関数の設定，初期世代の発生方法に検討を加えた。本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) GAは基本的な概念，定式化，アルゴリズムが明快でありプログラム化も簡単であるため，種々の設計，施工問題への適用が可能である。さらに他の手法で容易に得ることができない離散量を扱うことができるため斜張橋に代表されるケーブル系橋梁におけるシム調整問題には有効である。本研究で対象とした斜張橋のシム調整問題においても，十分実用に適する解を短時間で得ることができる。

(2) 従来2目的関数の場合に採用されてきたランキング

とシェアリングの手法を用い、調整ケーブル本数を目的関数に加えた3目的関数問題に拡張し、形状、張力の残留誤差および調整ケーブル本数にパレート最適解を提示することを可能とした。これにより、調整ケーブル本数別にパレート最適解を提示できるため工学的な根拠の上で合理的かつ効果的な判断ができ、意志決定者の解の選定がスムーズに行えるシステムを構築した。

(3) 初期個体群の分布形態に着目し、最終解に近い個体群を混在させることにより、それまで頭打ちとなっていたパレート最適解の収束精度を向上させることを可能とした。その際、人口サイズのみ適切に設定すれば、淘汰、交叉、突然変異等のパラメータ、あるいは方法についてはそれほど注意を払うことなく精度の良い解を与えることができる。

(4) 従来の方法では意思決定の際、重み、希求水準といった与条件を変えたトライアル計算が必要であったが、本手法では条件変更した再度の解析が必要でなく、一度の解析結果より状況に適した解を選択すれば良いことになる。迅速性が要求される架設精度管理に関して、調整ケーブル本数別にパレート最適解を提示できるGAを適用することは、非常に有効である。

謝辞：本研究を行うにあたり、北海学園大学工学部土木工学科 杉本博之教授に貴重なソフトの提供と懇切なご指導を頂いた。ここに記して謝意を表すものである。また、本研究を遂行するにあたり多くの助言や資料を頂いた大阪市建設局土木部橋梁課の方々、および常吉連絡橋架設JV高瀬和男氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤澤伸光：斜張橋架設時のシム量決定方法、橋梁と基礎、第18巻、第9/10号、1984。

- 2) 古川浩平・井上幸一・中山弘隆・石堂一成：多目的計画法を用いた斜張橋の架設時精度管理システムに関する研究、土木学会論文集、第374号/I-6、pp495-502、1986-10。
- 3) 金吉正勝・古田 均・田中 洋：設計者の満足度を考慮したファジィケーブル張力調整法、土木学会論文集、第598号/I-44、pp381-390、1998-7。
- 4) J.H.Holland：Genetic Algorithms and the Optimal Allocations of Trials, SIMAJ.Comp., (2), pp88-105, 1973。
- 5) 北野宏明編：遺伝的アルゴリズム、産業図書、1993-6。
- 6) 古田 均・杉本博之：遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用、森北出版、1997-9。
- 7) 古田 均・杉本博之・井下泰具・横田哲也・廣瀬彰則・中谷武弘：中長期事業計画問題へのGAの応用、土木学会構造工学論文集、vol. 44A、pp497-502、1998-3。
- 8) 中村秀明・宮本文穂・河村 圭：遺伝的アルゴリズムによる既存橋梁の最適維持管理計画の策定、第5回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集、pp49-54、1997-12。
- 9) 坂和正敏・田中雅博：遺伝的アルゴリズム、朝倉書店、1995-9。
- 10) 土木学会：構造システムの最適化、土木学会、1989-9。
- 11) 玉置 久・喜多 一・岩本貴司：遺伝的アルゴリズム-V-GAの拡張、システム/制御/情報、システム制御情報学会、Vol. 40, No. 2, pp. 69-76, 1996-2。
- 12) D.E.Goldberg and J.Richardson: Genetic Algorithms with Sharing for Multimodal Function Optimization, in Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, 1987。

(1998年9月18日受付)