

ファジィ理論と遺伝的アルゴリズムを用いた ケーブル張力調整法

金吉正勝¹・古田 均²・田中 洋³

¹正会員 日立造船株式会社 橋梁設計部 (〒559-0034 大阪市住之江区南港北1-7-89)

²正会員 工博 関西大学教授 総合情報学部 (〒569-1095 高槻市霊仙寺町2-2-1)

³正会員 工博 日立造船株式会社 海洋土木設計部 (〒559-0034 大阪市住之江区南港北1-7-89)

斜張橋は、設計・製作・架設等に関わる様々な誤差のために、架設時にケーブルの張力および桁・塔の形状(キャンバー)に誤差が生じる。このため、シムプレート(その板厚は離散量で与えられる)をケーブル定着部に挿入または除去することによりこれらの誤差を除去している。本論文では、ファジィ理論と遺伝的アルゴリズムを応用して、従来の理論では連続量として扱われてきたシム量を、現場技術者に有用な離散量として扱い、ケーブル調整箇所の高減も同時に行うことのできる方法を開発した。そして、パラメトリックな検討および実橋に近い数値計算例により本方法の有効性を示した。

Key Words : cable adjustment, cable-stayed bridge, fuzzy sets, genetic algorithm, shim plate

1. まえがき

斜張橋は、経済性と美観に優れているため、小規模な橋梁から支間長 900 m クラスの長大橋に至るまで広範囲に採用されている構造形式であり、近年数多く建設されている。自定式のみならず部定式といった構造形式の研究¹⁾も進められており、さらに長径間化する可能性も大きい。

ところで、斜張橋は構造的に不静定であるため、ケーブルに適当な張力を加えることによって、構造各部の部材力状態を変化させることができ合理的な設計が可能である。しかし、設計時に最適なケーブル張力を定めたとしても、設計・製作・架設誤差など様々な誤差のため、架設時にケーブル張力および主桁・塔のキャンバーに誤差が生じる。このため、ケーブル定着部にシムプレートを挿入または除去することによってケーブル定着間距離の調整を行っている。すなわち、シムプレートの板厚(シム量)を変更することにより、ケーブル張力を調整することができ、主桁・塔のキャンバーの誤差や断面力誤差を改善することができる。この作業は、シム調整と呼ばれており斜張橋架設の大きな特徴となっている。

最適なシム量決定に関する研究は過去に多くなされてきたが、数理計画法を応用するものが主である。

藤澤²⁾は、ケーブル張力とキャンバーの残留誤差を考慮し、これらを無次元化した自乗和を最小にすることからシム量を求めている。アルゴリズムが比較的容易であることから汎用的に使用されているが、無次元値を調整するための重みの決定に設計者の経験に基づく繰り返し計算が必要となる。古川³⁾らは、多目的計画法(満足化トレードオフ法)を適用して、目的関数にケーブル張力誤差、キャンバー誤差のほか各ケーブルのシム量、シム調整箇所数も考慮してシム量を求めている。しかし、問題の設定により解が得にくい場合がある。筆者ら^{4), 5)}も、ファジィ線形回帰分析を用いた方法、あるいは満足度により設計者の意図するケーブル張力およびキャンバー値などを希望調整値として制約条件に含め、重み決定のプロセスを行うことなく容易にシム量を計算する方法(ファジィシム調整法)を提案している。これらの方法では、希望シム量の範囲をほとんどゼロにすれば、シム調整を行わない箇所を設定でき、シム調整箇所数を規定することができる。しかし、最小シム調整箇所数を見出すアルゴリズムは組み込まれていない。

上記の研究^{2)~5)}いずれにおいても、最適化手法を応用しシム量を連続量として解を得ている。ところが、架設現場では、すべての板厚のシムプレート

表-1 シム量の2進数によるコード化

シム量 (mm)	-60	-40	-20	0	20	40	60	80
シム厚に対応する番号	1	2	3	4	5	6	7	8
2進数表示	000	001	010	011	100	101	110	111

を用意するのは不経済であるため、必要となる板厚を想定し、それより薄い数種類の板厚のシムプレートを作成し、それらを組み合わせることにより対処している。このため、組み合わせが可能なシム量の解のみが意味を持っており、シム量を離散量として扱うのが合理的である。そこで、筆者ら⁶⁾は、離散量を扱うことができる遺伝的アルゴリズム^{7),8)}（以下GAと略す）を用いて、新たな最適シム量の計算法の開発を試みた。しかしながら、この方法は単純GAを基にしているため、計算時間、解の収束性に未だ問題があった。

本研究ではこれらの問題を解決するため、筆者らの一連の研究を統合および発展させ、ファジィ理論とGAを組合せた実用的な新しいケーブル調整法を開発することを試みた。本法はファジィGAシム調整法（略してFGA法）と呼ばれ、以下の特長を有している。

- ① GAを応用することにより実際に使用できるシムプレートの板厚の解が離散量として得られる。
- ② 満足度を考慮したファジィケーブル調整法（略して満足度法）とGAを組み合わせることにより、GAに要する計算時間の短縮および解の収束性の改善、すなわち、全域解あるいは実用的な解に至る可能性を高くすることができる。
- ③ GAの応用により調整箇所数の減少を目的関数に考慮できるため、実用的かつ経済的な解を得ることができる。

以下、FGA法の理論を示し、実橋を模した斜張橋モデルを用いた数値計算により本法の有効性を示す。

2. ファジィGAシム調整法の定式化

本法は、満足度とGAをファジィ制御の考え方をを用いて組み合わせることにより解を得ている。計算過程の概要を表すフローチャートを図-1に示す。以下GAの応用方法とファジィ制御の詳細について述べる。

(1) GAのシム調整法への適用

a) シム量の遺伝子列へのコード化

シム量のコード化ではシム量と遺伝子列を1対1に対応させることが肝要である。本研究では、シム量の組み合わせを2進数でコード化する。例えば、シム量を8種類とすると、それらのコード化は表-1のように定義される。

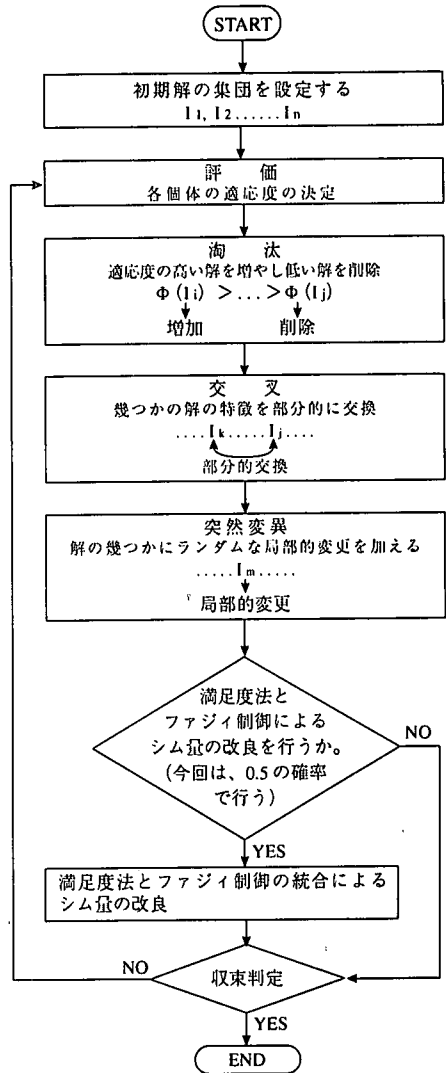


図-1 ファジィGAシム調整法のフローチャート

よって、ケーブル本数が4本で、各ケーブルのシム量の値が(-20mm, 40mm, -40mm, 60mm)とすると、遺伝子列は2進数表示で(010101001110)と表される。

ここでは説明の都合上、シム量の組み合わせから遺伝子列への流れで説明を行ったが、実際の適用においては次のように逆の過程となる。まず遺伝子があり、それが各ケーブルに対応する2進数(3bitづつに遺伝子が区切られる)に分類され、各々10進数に変換されて、各ケーブルのシム量が定まり、シム量の組み合わせが決まることになる。なお、上記のシム量が正の場合は、対応する厚さのシムプレートを挿入、負の場合は、除去することを示す。

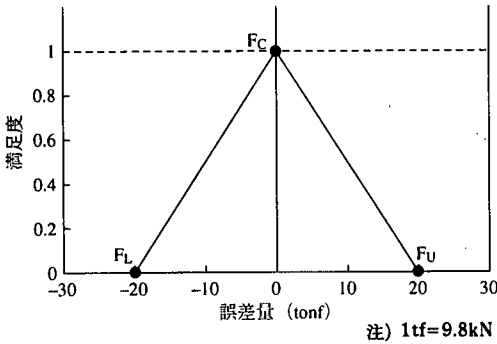


図-2 満足度のメンバシップ関数

b) 定式化と適応度関数の設定

ケーブル張力およびキャンバーの誤差を許容誤差によって無次元化しその値を満足度と定義して、各誤差の照査箇所jの満足度を最大にすることにより適応度関数を定義する。満足度のメンバシップ関数は、許容誤差の上限値 (Fu), 下限値 (Fl), 中心値 (Fc) より図-2 のように定義する。

調整前の誤差をF, シムによる調整量をFs, 調整後の誤差をFoとすると、シム調整法は以下のように定式化される。

$$F_o = F + F_s = F + \sum_{i=1}^N X_i \cdot K_i \quad (1)$$

$$F_L \leq F_o \leq F_U \quad (2)$$

ここに、
 X_i : ケーブルiのシム量
 K_i : 単位シム量による影響値
 N : ケーブル本数
 F_U, F_L : 許容誤差の上限値, 下限値

照査箇所jに着目し、許容誤差の中心値をFcとし、メンバシップ関数として三角形関数を仮定すると、満足度 μ_j は次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} &F_{oj} \leq F_{cj} \text{ の場合} \\ &\mu_j = (F_{oj} - F_{Lj}) / (F_{cj} - F_{Lj}) \\ &F_{oj} > F_{cj} \text{ の場合} \\ &\mu_j = (F_{Uj} - F_{oj}) / (F_{Uj} - F_{cj}) \end{aligned} \right\} (3)$$

ここで μ_j は満足度を表すメンバシップ関数のメンバシップ値を表す。

したがって適応度関数は Mim-Max の考え方をを用いると、次のように定式化される。

$$O(\{I\}) = \min_{i=1}^M (\mu_i) \Rightarrow \text{MAX} \quad (4)$$

ここに、 $\{I\} = \{I_1, I_2, I_3, \dots, I_N\}$: シム量の組合わせ, N : ケーブル本数, M : 誤差の照査箇所の数

本研究では、この式(4)にシム調整箇所数を最小にするための項を付け加え、適応度関数を次のように定義する。

適応度関数

$$O(\{I\}) = \min_{i=1}^M (\mu_i) + \alpha \cdot \{N_a - N_0\} + \beta \mu_i \Rightarrow \text{MAX} \quad (5)$$

ここに、 N_a は調整を行わないケーブル本数。ただし、定数 α はシム調整の満足度とシム調整箇所の影響をバランスする重みを表わし、通常0.0 ~ 1.0の値であり、調整箇所数の減少を望む場合は、1.0以上の値となる。また、 N_0 は設計者が望む調整を行わないケーブルの最低数である。ここで、 β はペナルティ項であり、式(3)の満足度が負の場合(すなわち、誤差量が許容誤差の範囲外にある場合)、負の値(-100程度)をとる。

c) 淘汰の方法

各個体の適応度は、式(5)で示した適応度関数によって決定される。本研究では、適応度の低い個体を削除して、適応度の高い個体を複製する。淘汰を行う個体数は、(集団サイズ×淘汰率)により決定する。本研究では、淘汰率を0.5とした。

d) 交叉の方法

交叉法としては、通常よく用いられる一点交叉法を用いている。交叉率としては、0.6をとっている。

e) 突然変異の方法

突然変異は遺伝子の一部を強制的に変換させる行為である。2進数でコード化された遺伝子列の場合は0を1あるいは1を0に変換させる。突然変異を行う個体はランダムに決定され、変換される遺伝子もランダムに決定される。また、突然変異率としては0.1をとっている。なお、上記における淘汰率、交叉率、突然変異率の値は、過去の研究⁷⁾によった。

f) 収束判定条件

集団サイズは常に「第0世代集団」のサイズと等しくするため、ここではまず個体を適応度の高い順に並び替え、集団サイズを「第0世代集団」のサイズと等しくする。その後、適応度の上位80%が等しくなったときに解が収束したとみなしアルゴリズムを打ち切る。または、最も適応度の高い個体の適応度関数が、数世代(入力値)に渡って変化しない場合も計算を打ち切る。もし、収束条件を満たしていない場合は、もう1世代アルゴリズムを続けることになる。ただし、最大繰返し世代数に到達した場合は強制的に計算は打ち切られる。以上の手順に従

って、繰り返し計算により最適解を求める。

(2) 満足度法とGAの統合

(1) で示したGAによる操作を適用すれば、理論的には解が求まるはずであるが、本問題のようによく似た解が数多く存在する場合には、単純GAでは常に最適解が得られる保証はなく、また、求まる場合においても収束性に問題が生じることが多い。すなわち、多大な計算時間が必要となる。そこで、ここでは、これらの問題を改善するために満足度法とGAの統合をファジィ制御の考え方を利用して試みる。

a) ファジィ制御の概要

前件部が2変数、後件部が1変数の場合、ファジィ制御は以下のように定式化される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{IF } X \text{ is } A_1 \text{ and } Y \text{ is } B_1 \text{ THEN } Z \text{ is } C_1 \\ \vdots \\ \text{IF } X \text{ is } A_m \text{ and } Y \text{ is } B_m \text{ THEN } Z \text{ is } C_m \end{array} \right\} (6)$$

これに簡略化ファジィ制御の考え方をを用いると、

$$\begin{array}{l} \text{ルール } R_1: \text{IF } X \text{ is } A_{11} \text{ and } Y \text{ is } A_{12} \text{ THEN } Z \text{ is } b_1 \\ \text{ルール } R_2: \text{IF } X \text{ is } A_{21} \text{ and } Y \text{ is } A_{22} \text{ THEN } Z \text{ is } b_2 \\ \vdots \\ \text{ルール } R_m: \text{IF } X \text{ is } A_{m1} \text{ and } Y \text{ is } A_{m2} \text{ THEN } Z \text{ is } b_m \end{array} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、m はルールの総数。

計算手順は以下ようになる。

①各ルールの適合度 W_i を求める。

$$W_i = \min \{ \mu_{A_{i1}}(x), \mu_{A_{i2}}(x) \} \quad (8)$$

ここに $\mu_{A_{ij}}(x)$ はルールに含まれるファジィ集合 A_{ij} を規定するメンバシップ関数である。

②推論結果 (Z) を算出する。

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^m W_i b_i}{\sum_{i=1}^m W_i} \quad (9)$$

これは、後件部の定数 b_i を適合度 W_i で加重平均したものである。

b) 満足度法

満足度法では、前項の式(1)～式(4)を用いて目的関数 (GAでは目的関数を適応度関数としている) を以下のように定義する。この場合、シム調整量を表わす変数 x は連続量である。

$$\mu_D(x) = \max \{ \min \{ \mu_1(x), \dots, \mu_m(x) \} \} \quad (10)$$

この問題は、線形計画問題に帰着することができ、

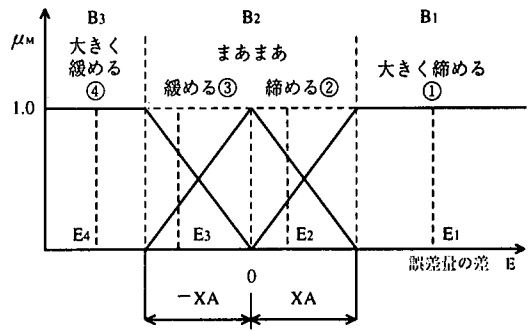


図-3 メンバシップ関数

非常に容易に解を求めることができる。詳細は参考文献5)を参照されたい。

c) 満足度法とGAとの統合方法

ここでは、誤差量の差に着目しルールを作成する。計算を簡略化するため、ルールは以下の3つに限定した。ただし、ここで規定する誤差量の差とは、満足度法の誤差量 (設計値と同法の解の差) とGAの誤差量 (設計値と同法の解の差) の差をいう。具体的には後の数値計算例で説明する。

なお、ここで、満足法の役割は収束の方向性を付与してGAの収束を早めるが、GA自身の解はあくまでも適応度関数によって決まることを付記する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{ルール } R_1: \text{IF } E = A_1 \text{ THEN } B_1 \\ \text{ルール } R_2: \text{IF } E = A_2 \text{ THEN } B_2 \\ \text{ルール } R_3: \text{IF } E = A_3 \text{ THEN } B_3 \end{array} \right\} (11)$$

ここに、誤差量の差 (E)

A_1 : 誤差量の差が大きい (負)

A_2 : まあまあの誤差

A_3 : 誤差量の差が大きい (正)

調整量の係数 (B)

B_1 : 大きく引き縮める

B_2 : まあまあ縮める, 又は, 緩める

B_3 : 大きく緩める

これらの考え方を図に表現すると図-3となる。

ここに、XA : 許容誤差量の差とすると、

$$\left. \begin{array}{l} \textcircled{1}: W_1 = 1 \\ \textcircled{2}: W_2 = E_2 / XA, \quad W_3 = 1 - W_2 \\ \textcircled{3}: W_3 = E_3 / XA, \quad W_2 = 1 - W_3 \\ \textcircled{4}: W_4 = 1 \end{array} \right\} (12)$$

よって、例えば図-3における誤差量の差 E_1 ~

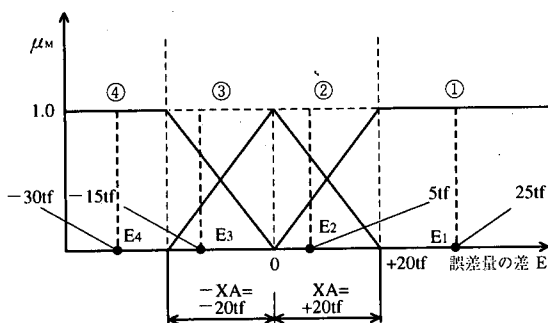


図-4 メンバシップ関数

E_4 の場合は以下の推論となる。

$$\left. \begin{aligned} E_1 : Z &= W_1 \times B_1 \\ E_2 : Z &= (W_1 \times B_1 + (1.0 - W_2) \times B_2) \\ &\quad / (W_1 + W_2) \\ E_3 : Z &= (W_3 \times B_3 + (1.0 - W_2) \times B_2) \\ &\quad / (W_2 + W_3) \\ E_4 : Z &= W_4 \times B_3 \end{aligned} \right\} (13)$$

これよりシム量 (S_j) の算出は次の式による。

$$S_j = (E_i / C_{ik}) \times Z \quad (14)$$

ここに、 i は照査項目、 j は張力調整の対象とするケーブル番号とする。ただし、影響値 (C_{ik}) に選択において、照査項目 i に対する最も大きな影響値 (C_{ik}) を持つケーブル番号 (k) の値を採用する。通常、 $k = j$ となる。

$$\text{平均シム量 } S_j = \sum_{i=1}^k S_j / D \quad (15)$$

S_j は整数ではないので、想定したシムプレートによる組み合わせが可能なシム量の中から、 S_j に最も近い整数のシム量を採用する。D は照査項目の数である。

(3) 数値計算例

以上の方法に具体的な数値をあてはめて計算例を示す。ただし、ここでは本論文のテーマである満足度法とGAの統合方法に関する例を示す。

部材変位や断面力の設計値と計測値の差を最小にするために行った満足度法の解におけるケーブル i のケーブル張力の誤差量が $10tf$ (98.0kN)、GAの解における同ケーブルの誤差量が $15tf$ (147.0kN) とする。ただし、誤差量とは設計値と満足度法、あるいは、GAの解との差で定義される。よって、誤差量の差を E_i とすると、 $E_i = 15tf - 10tf = 5tf$ (49.0kN) となる。また、満足度法で解を求めるに

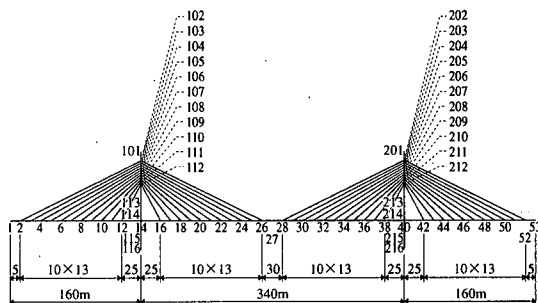


図-5 斜張橋モデルの寸法と格点番号

際して入力した許容誤差の上限値 (F_u) および下限値 (F_l) を各々 $20tf$ (196.0kN)、 $-20tf$ を用いて、許容誤差量の差 (XA) も $20tf$ とする。この場合、ファジィ制御で用いるメンバシップ関数は図-4となる。

$$\begin{aligned} \textcircled{2} : W_2 &= E_2 / XA = 5 / 20 = 0.25, \\ W_3 &= 1 - W_2 = 0.75 \end{aligned}$$

式(13)を適用するに際し、調整量の係数である B_1, B_2, B_3 を各々 $0.7, 0.3, 0.7$ と与える。これは1近傍の任意の値でよく、例えば、 $0.9, 0.2, 0.9$ などとしてもよい。よって図-4における E_2 は、次の推論より求まる。

$$\begin{aligned} E_2 : Z &= (0.25 \times 0.7 + (1.0 - 0.75) \times 0.3) \\ &\quad / (0.25 + 0.75) = 0.25 \end{aligned}$$

③誤差量の差が E_1, E_3, E_4 にある場合は上記と同様にして計算する。図-4における E_3 は、以下の結果となる。

$$\begin{aligned} W_3 &= (-15) / (-20) = 0.75, W_2 = 1 - W_3 = 0.25 \\ E_3 : Z &= (0.75 \times 0.7 + (1.0 - 0.25) \times 0.3) \\ &\quad / (0.25 + 0.75) = 0.75 \end{aligned}$$

$$\textcircled{1} W_1 = 1.0 (E_1 = 25tf \text{ の場合}), \\ E_1 : Z = W_1 \times B_1 = 1.0 \times 0.7 = 0.7$$

$$\textcircled{4} W_4 = 1.0 (E_4 = -30tf \text{ の場合}), \\ E_4 : Z = W_4 \times B_3 = 1.0 \times 0.7 = 0.7$$

3. FGA法の数値計算例と考察

FGA法の有効性を示すため、実橋に即した鋼斜張橋として中規模の平面骨組モデルで数値計算例を示す。モデルの主要寸法、格点番号および部材番号を、図-5 および図-6 に示す。断面諸量および死荷重強度は、過去の実施例を参考に表-2のように仮定した。主桁の断面性能は、橋軸方向に変化させ、ケーブルは4種類の断面を使用した。なお、FGA法で使用したシム量の組み合わせは、ケース1では表

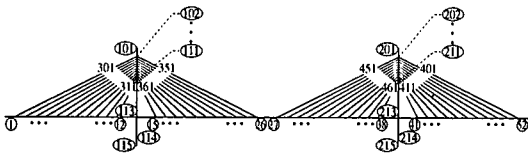


図-6 斜張橋モデルの部材番号

表-2 断面諸量および死荷重強度

	(a)断面諸量			(b)死荷重強度	
	Λ (m ²)	I (m ⁴)	E (tf/m ²)		W (tf/m)
桁	0.55 ~0.65	0.6~0.7	2.1×10^7	桁, 舗装地	7.0
塔	1.0~1.2	0.75~1.4	〃	塔	5.0
ケーブル	0.0059 ~0.011	—	2.0×10^7	ケーブル	0.05~0.10

注) 1tf = 9.8kN

表-3 ケーブル長さに与えたランダムな誤差

ケーブル部材番号	長さ誤差 (mm)	ケーブル部材番号	長さ誤差 (mm)
301	-20	401	5
302	60	402	-40
303	40	403	40
304	-15	404	-10
305	-20	405	60
306	10	406	-80
307	-60	407	15
308	-5	408	-15
309	-60	409	-20
310	40	410	10
311	-40	411	20
351	5	451	-5
352	-80	452	-80
353	-10	453	-20
354	15	454	-40
355	40	455	5
356	-20	456	-60
357	-15	457	20
358	-60	458	-10
359	10	459	20
360	-20	460	15
361	-5	461	-40

表-4 桁の重量誤差

部材番号	重量誤差(tf/m)
1~13 (側径間)	-0.100
14~39 (中央径間)	-0.200
40~52 (側径間)	-0.100

注) 1tf = 9.8kN

-1と同じ8種類 (-60 mmから+80 mmまでを 20 mmピッチ), ケース2では16種類 (-70 mmから+80 mmまでを 10 mmピッチ)とした. なお, 満足度法における F_u , F_L は各々 20tf(196.0kN), -20tfとし, X_A も 20tfとした.

(1) 照査ケース

シム調整が必要になるケースを計算機上で作り出すため, 次の誤差系を作成した.

ケース1……ケーブル長さランダムな誤差を与える. (表-3)

ケース2……ケース1に桁の重量誤差(表-4)が重なった場合.

ケース1ではケーブル長に対し製作時に誤差があったと仮定しているが, ケーブル長に起因する誤差はシム量で修正が可能であり, ケーブル誤差長と絶対値が等しく符号が反対の値がシム量として計算される. そのため, プログラムの照査を行うのに有効であると考えられる. ケース2では, 桁の重量誤差として自重が軽くなったための張力誤差が加わると仮定している. この重量誤差が生じると, ケーブル張力は小さくなるためシム量は正值となり, シムプレートを挿入することになる. しかし, ケース2は, ケース1と複合して生じるケースとなるため複雑な誤差系となり, シム量の解も無限に存在する系となる. これらの中から局所解に陥らず全域解を見つげることが重要となる.

(2) シム量の計算結果とその考察

ここでは, シム量を連続量として扱って計算している従来の方法として, 著者らの開発した満足度法⁵⁾を用い, FGA法との比較を行い検討する.

ケース1の解を表-5に示す. 満足度法では, シム量のいかなる組み合わせも可能としているため, 予想通りケーブル長さの誤差を打ち消す解を算出している. これに対し, FGA法で調整箇所を考慮しない場合, これは評価関数式(4)の場合にあたるが, ケーブル張力の最大残差誤差を $-14.5tf(-142.1kN)$ に押さえ, しかも, 張力調整不要ケーブルを9本となる解を算出している. さらに, 調整箇所を考慮した解(評価関数式(5)による)では, 最大残差誤差が $-16.8tf(-164.6kN)$ とわずかに増加するが, 張力調整不要ケーブル数が13本となり約5割増加している. ケーブル張力調整において張力調整箇所を減らすことは, 架設費用および安全性の観点から極めて大切なことから, 本例では精度の上からは満足度法の方が優れているものの, 現実的にはFGA法で張力調整箇所を減らす解を採用するのが妥当と考えられる.

表-5 ケース1の計算結果

注) シム量の単位(mm),1tf=9.8kN

満足度法				FGA法 (調整箇所数考慮せず)					FGA法 (調整箇所数考慮)					
ケーブル No.	シム量	残差誤差 (tf)	ケーブル No.	シム量	残差誤差 (tf)	ケーブル No.	シム量	残差誤差 (tf)	ケーブル No.	シム量	残差誤差 (tf)	ケーブル No.	シム量	残差誤差 (tf)
301	20.00	0.0003	401	-5.00	0.0001	301	20.00	0.6508	401	-20.00	-14.5204	301	0.00	-16.7826
302	-60.00	0.0003	402	40.00	-0.0003	302	-60.00	-0.3159	402	40.00	2.6712	302	-60.00	5.7287
303	-40.00	0.0003	403	-40.00	-0.0003	303	-40.00	-1.2747	403	-40.00	0.8942	303	-40.00	2.8556
304	15.00	0.0000	404	10.00	-0.0003	304	20.00	5.3738	404	20.00	14.5229	304	20.00	8.0174
305	20.00	0.0003	405	-60.00	-0.0003	305	20.00	-2.2147	405	-60.00	-1.3941	305	20.00	-1.1357
306	-10.00	-0.0003	406	80.00	-0.0003	306	0.00	12.4738	406	80.00	-2.1754	306	0.00	12.7775
307	60.00	0.0003	407	-15.00	-0.0003	307	60.00	-1.7753	407	-20.00	-11.5429	307	60.00	-1.9844
308	5.00	-0.0003	408	15.00	0.0003	308	0.00	-10.5895	408	20.00	4.9726	308	0.00	-11.0305
309	60.00	-0.0003	409	20.00	0.0003	309	60.00	-0.3040	409	20.00	-5.0310	309	60.00	-0.5991
310	-40.00	-0.0003	410	-10.00	0.0003	310	-40.00	-0.3297	410	0.00	14.3773	310	-40.00	-0.3519
311	40.00	0.0002	411	-20.00	0.0003	311	40.00	-0.8059	411	-20.00	-6.1730	311	40.00	-0.3493
351	-5.00	0.0003	451	5.00	-0.0003	351	0.00	8.7255	451	0.00	-7.0496	351	0.00	-1.9607
352	80.00	0.0003	452	80.00	-0.0003	352	80.00	2.8757	452	80.00	-0.4635	352	80.00	-8.4487
353	10.00	0.0003	453	20.00	-0.0003	353	0.00	-10.7400	453	20.00	-0.1609	353	20.00	5.5254
354	-15.00	0.0003	454	40.00	-0.0003	354	-20.00	-4.4877	454	40.00	0.1964	354	0.00	14.2723
355	-40.00	0.0002	455	-5.00	0.0002	355	-40.00	2.2070	455	0.00	7.2829	355	-40.00	-6.4239
356	20.00	0.0003	456	60.00	0.0003	356	20.00	1.9973	456	60.00	1.7392	356	20.00	-6.0856
357	15.00	-0.0003	457	-20.00	0.0003	357	20.00	10.5903	457	-20.00	3.3609	357	20.00	2.6190
358	60.00	-0.0003	458	10.00	0.0003	358	60.00	3.1164	458	0.00	-14.0347	358	60.00	-5.3151
359	-10.00	-0.0003	459	-20.00	-0.0003	359	-20.00	-13.4136	459	-20.00	5.1866	359	0.00	13.9765
360	20.00	-0.0003	460	-15.00	-0.0003	360	20.00	5.0207	460	-20.00	-4.5986	360	20.00	-1.6417
361	5.00	-0.0003	461	40.00	-0.0003	361	0.00	-7.2934	461	40.00	5.3898	361	0.00	-12.0138

表-6 ケース2の計算結果

注) シム量の単位(mm),1tf=9.8kN

満足度法				FGA法 (調整箇所数考慮なし)					FGA法 (調整箇所数考慮)					
ケーブル No.	シム量	残差誤差 (tf)	ケーブル No.	シム量	残差誤差 (tf)	ケーブル No.	シム量	残差誤差 (tf)	ケーブル No.	シム量	残差誤差 (tf)	ケーブル No.	シム量	残差誤差 (tf)
301	20.59	-8.4846	401	-5.74	-8.4846	301	20.00	-9.7922	401	-10.00	-10.2935	301	10.00	-7.4111
302	-60.77	-8.4846	402	37.91	-8.4846	302	-60.00	-8.4744	402	40.00	-2.8719	302	-70.00	-4.3367
303	-42.16	-8.4846	403	-43.47	-8.4846	303	-40.00	-7.0297	403	-50.00	-15.6926	303	-60.00	-15.0299
304	12.57	-8.4846	404	6.27	-8.4846	304	10.00	-14.6093	404	10.00	-2.1233	304	0.00	-6.8914
305	16.81	-8.4846	405	-64.47	-8.4846	305	20.00	-6.7687	405	-70.00	-16.2751	305	0.00	-12.5008
306	-11.42	-8.4846	406	77.33	-8.4846	306	-10.00	-9.6652	406	80.00	-6.4375	306	-30.00	-16.1961
307	61.31	-8.4846	407	-14.90	-8.4846	307	70.00	2.2193	407	10.00	-3.8441	307	50.00	-6.7454
308	10.56	-6.8269	408	19.40	-6.8358	308	10.00	-11.7727	408	20.00	-11.1280	308	0.00	-6.2778
309	76.71	8.4846	409	35.63	8.4846	309	80.00	11.8192	409	40.00	10.3214	309	70.00	12.5004
310	-22.61	8.4846	410	6.43	8.4846	310	-20.00	12.8627	410	10.00	8.7295	310	-30.00	7.5956
311	55.60	8.4846	411	-5.16	8.4846	311	50.00	-4.6485	411	0.00	13.9560	311	50.00	6.0027
351	-8.97	2.1731	451	2.36	2.1684	351	-10.00	-2.1369	451	10.00	5.6442	351	0.00	-3.3773
352	66.82	-8.4846	452	68.14	-8.4846	352	70.00	-8.2613	452	70.00	-11.8014	352	80.00	-7.1732
353	-4.70	-8.4846	453	6.61	-8.4846	353	0.00	-6.9756	453	10.00	-9.0350	353	10.00	-3.0805
354	-30.94	-8.4846	454	25.36	-8.4846	354	-30.00	-13.2642	454	30.00	-6.4396	354	-20.00	-5.6168
355	-58.50	-8.4846	455	-22.22	-8.4846	355	-50.00	-3.0771	455	-20.00	-9.2430	355	-50.00	-6.6314
356	0.72	-8.4846	456	41.96	-8.4846	356	10.00	-1.0979	456	40.00	-14.8100	356	0.00	-17.1164
357	-4.49	-8.0917	457	-38.26	-8.0631	357	0.00	-6.7202	457	-30.00	2.7490	357	0.00	-6.3046
358	48.96	8.4846	458	0.12	8.4846	358	50.00	5.2321	458	0.00	6.1450	358	50.00	6.4855
359	-29.64	-6.5510	459	-38.58	-6.5885	359	-30.00	-10.2333	459	-40.00	-9.5069	359	-30.00	9.2589
360	0.58	-8.4846	460	-33.47	-8.4846	360	0.00	-11.8429	460	-30.00	-0.1583	360	0.00	-11.4766
361	-11.23	-8.4846	461	24.53	-8.4846	361	-10.00	-7.0109	461	20.00	-16.7002	361	-10.00	-7.7593

ケース2の解を表-6に示す。満足度法ではシム量がケーブルによってバラバラであり、シム量が1ミリに達しない箇所を張力調整不要ケーブルと見なすと3本である。張力調整箇所数を考慮しないFGA法では、最大残差誤差が-16.7tf(-163.7kN)で張力調整不要ケーブルが5本である。これに対し、張力調整箇所数を考慮したFGA法では、最大残差誤差が-19.1tf(-187.2kN)で張力調整不要ケーブルが9本である。張力調整箇所を減らせば当然のことながらケーブル張力の残差誤差は増加するが、本例のケースでは残差誤差に大きな差がないため、工学的な観点からはFGA法(張力調整箇所数を考慮)の結果を適用するのが妥当と考えられる。

張力調整箇所を減らすのに、満足度法を用いることができる。例えば、ケース2で示したシム量が小さなケーブルのシム量を強制的にゼロとして再計算すればよい。FGA法で得られた張力調整不要ケーブル5本のケース(表-6)と比較するため、表-6の満足度法において絶対値の小さいシム量を、強制的に5箇所ゼロとし計算して得たのが、表-7における満足度法(FGA法模擬)の解である。ただし、シム量は10mm単位でまるめて計算した。この解の最大残差誤差が-18.1tf(-177.4kN)であることから、最大残差誤差が-16.7tf(-163.7kN)であるFGA法の方がより良い解を算出していることが分かる。

表-7 満足度法による調整箇所数考慮の計算結果

注) シム量の単位(mm), 1tf=9.8kN

満足度法で調整箇所数考慮 (FGA模擬)					
ケーブル No.	シム量	残差誤差 (tf)	ケーブル No.	シム量	残差誤差 (tf)
301	20.00	-9.6927	401	-10.00	-13.8399
302	-60.00	-8.0168	402	40.00	-6.9704
303	-40.00	-6.1477	403	-40.00	-6.2495
304	10.00	-13.1496	404	10.00	-6.7072
305	20.00	-5.0895	405	-60.00	-6.5686
306	-10.00	-7.4888	406	80.00	-9.2608
307	60.00	-12.2629	407	-10.00	-5.4536
308	10.00	-10.4060	408	20.00	-10.9368
309	80.00	11.2199	409	40.00	12.3775
310	-20.00	9.7907	410	10.00	13.1860
311	60.00	15.0324	411	-10.00	-4.6695

351	-10.00	1.0458	451	<u>0.00</u>	-2.0142
352	70.00	-3.8733	452	70.00	-7.6060
353	-10.00	-15.4198	453	10.00	-5.6624
354	-30.00	-6.8242	454	30.00	-3.3737
355	-60.00	-10.5520	455	-20.00	-6.8013
356	<u>0.00</u>	-10.0722	456	40.00	-12.0907
357	<u>0.00</u>	-1.5734	457	-40.00	-11.0555
358	50.00	9.3080	458	<u>0.00</u>	8.7452
359	-30.00	-7.9042	459	-40.00	-8.2936
360	<u>0.00</u>	-9.9754	460	-30.00	-0.1505
361	-10.00	-5.0993	461	20.00	<u>-18.1287</u>

ところで、計算時間については、ケース1の満足度法は20秒、FGA法(調整箇所数考慮せず)が184秒、FGA法(調整箇所数考慮)が207秒であった。いずれの方法でも現場で苦痛を感じない短時間で処理が可能である。なお、計算機は、ノート型EWS:S-4/Leia(富士通)を使用した。

4. 結論

本論文では、離散量を取り扱うことができ、組合わせ最適化問題に有効なGAを用い、さらに収束の加速化を図るためファジィ制御を援用して斜張橋のケーブル張力調整に対し新たな方法を提案した。シム量の解が離散量で得られるため、現場技術者に有用で実用的な方法と思われる。本研究で得られた結論は以下のようにまとめられる。

1) 実設計で対象になる斜張橋モデルへ適用し設計者の満足度を満たすシム量を離散的な解として算出できた。

2) その解は、シム量が離散的に得られるばかりでなく、張力調整箇所も最小にしておき、工費の上から経済的な解となっている。そのため、実用性においても従来方法より優れていると考えられる。

3) GAのもつ欠点の一つとして演算時間の長さが挙げられるが、現在のコンピュータの発達が目覚ましく本文の計算例ではEWSを用いたが、パソコンを用いても建設現場で対応可能である。

本論文で取扱ったシム調整問題のように局所解が多数存在すると考えられる問題に対して、局所解に陥らず全域解への探索を続ける一つの方法を提案できたと考えるが、さらに効率的な方法論を開発することが、今後の課題として残されている。

参考文献

- 1) 大塚久哲, 吉田 武, 太田俊昭, 今井富士夫: 主桁支持方法の異なる長大斜張橋の力学特性比較, 構造工学論文集Vol.31A, pp.351-360, 1985.3.
- 2) 藤澤伸光: 斜張橋架設時のシム量決定法, 橋梁と基礎, 第18巻, 第9/10号, 1984年4/10月.
- 3) 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/1-6, pp.495-502, 1986年10月.
- 4) 古田 均, 亀井正博, 金吉正勝, 田中 洋: ファジィ理論を用いた斜張橋ケーブルの最適プレストレス力決定法, 土木学会論文集, No.540/IV-31, pp.105-112, 1996.6.
- 5) 金吉正勝, 田中 洋, 古田 均: 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, No.598/I-44, pp.381-390, 1998.7.
- 6) 梶田幸秀, 渡邊英一, 古田 均, 金吉正勝: 遺伝的アルゴリズムを用いた斜張橋ケーブル調整法の改良, 第49回土木学会年次学術講演会講演概要集, I-409, pp.816-817, 1994年9月.
- 7) 鹿沓麗, 杉本博之, 山本洋敬: 遺伝的アルゴリズムの応用に関する基礎的研究, 第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.181-186, 1991.11.
- 8) 北野宏明編: 遺伝子アルゴリズム, 産業図書, 1993.6.

(1999.3.8 受付)

CABLE TENSION ADJUSTMENT BASED UPON FUZZY THEORY AND GENETIC ALGORITHM

Masakatsu KANEYOSHI, Hitoshi FURUTA and Hiroshi TANAKA

In the construction of cable-stayed bridges, it is important to adjust the cable tension to the design values. In practice, the adjustment is performed by adding or removing shim plates. In this paper, an attempt is made to apply Fuzzy Logic (FL) and Genetic Algorithm (GA) in order to obtain a practical combination of shim plates. GA is useful for solving the combinatorial problems, because it can deal with discrete design variables and indifferential functions. FL is employed to improve the convergency and to reduce the computation time. Introducing GA, it is possible to obtain the minimal number of cables requiring the adjustment as well as the practical combinations of shim plates. A numerical example is presented to demonstrate the efficiency and applicability of the method developed here.