鋼単純ニールセンローゼ橋を対象とした ケーブル調整システムの比較

COMPARISON OF CABLE CONTROL SYSTEMS FOR A STEEL NIELSEN LOHSE BRIDGE

林　裕也 [1)]　中本　啓介 [1)]
Yuya Hayashi　Keisuke Nakamoto

ケーブル系橋梁では，構造物の応力状態がケーブル張力に敏感に影響するため，ケーブル張力，形状を実測し，架設後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張力調整が行われる．本報告では，これまでに提案されている種々の調整量算定手法のうち，遺伝的アルゴリズム(GA)と最小自乗法の調整量算定手法を用いて,実橋を対象とした数値計算を行い，これらの手法の特徴について示す．また，ケーブル張力の調整方法や現場条件を考慮した調整量算定手法の使い分けにより，効率的なケーブル調整量の算定について報告する．

キーワード：遺伝的アルゴリズム，多目的最適化問題，ケーブル張力調整

1．まえがき

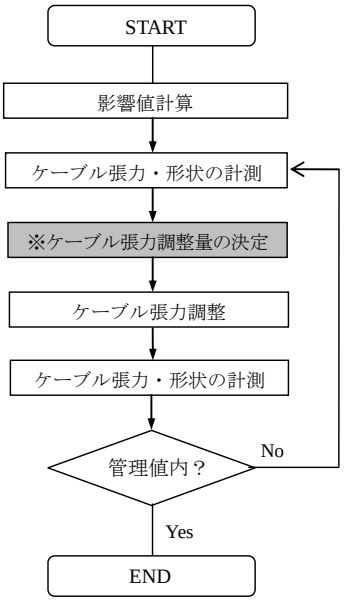
ケーブル系橋梁は，設計の自由度が高い構造であるが，設計時に仮定した構造系を実現するためには，製作，架設において十分な施工精度が要求される.架設現場では，ケーブル張力を計測し，設計時の応力状態を再現することを目的としてケーブル張力調整が行われる．ケーブル張力の調整には，ケーブル定着部にシムプレートを挿入あるいは撤去し，ケーブル長を変化させる方法がある．調整量の決定には高度の架設管理技術と多大な時間を要するため，調整量を迅速かつ合理的に決定することが重要である．調整量は，最小自乗法 [1)]をはじめとして，改良型満足化トレードオフ法 [2)]，遺伝的アルゴリズムを用いた調整量算定手法（以下，GA[3,4)]）等の最適化手法が用いられている．

本論では，種々の調整量算定手法の中から，GA を用いたケーブル調整量決定方法と，最小自乗法による方法について着目し，実橋を対象とした数値計算を行った．さらに，この 2 手法の調整量算定結果を比較し，これらの手法の特徴について示した．

2．調整量算定システム

2.1　調整システムについて

ケーブル張力調整フローを図-1 に示す．張力，形状誤差があらかじめ設定した管理値内に収まるまで，ケーブル張力の調整を行う．ニールセンローゼ橋は高次の不静定構造物であり，張力，形状誤差を管理値内に収めるという制約条件の下でケーブル張力を決定する.架設では，事前に求めた影響値 [4)]を用いて調整量を設定するが，調整ケースが複数存在するため，選定作業が煩雑となる．そのため,調整量は前述の最適化手法を用いて決定する．



※調整量算定手法（最小自乗法，GA 等）により決定

図-1　ケーブル張力調整フロー

1) 技術グループ 技術研究室

2.2　GA を用いた調整量算定システム

2.2.1　GA の概要

GA は，ダーウィンの自然淘汰説を基に生物の進化を模した遺伝的アルゴリズムである．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（パレート最適解）が次世代により多く生き残り，交叉，淘汰および突然変異を繰り返しながら，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．詳細については，文献 3),4)を参照されたい．

図-2 に GA の基本フローチャートを示す．GA が注目されている理由として，以下の特徴が挙げられる．

1)GA はシムプレート厚に合わせたケーブル調整量を，1,2,3.2,4.5mm のような離散量として設定が可能である．すなわち組み合わせ最適化問題が解ける．

2)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．

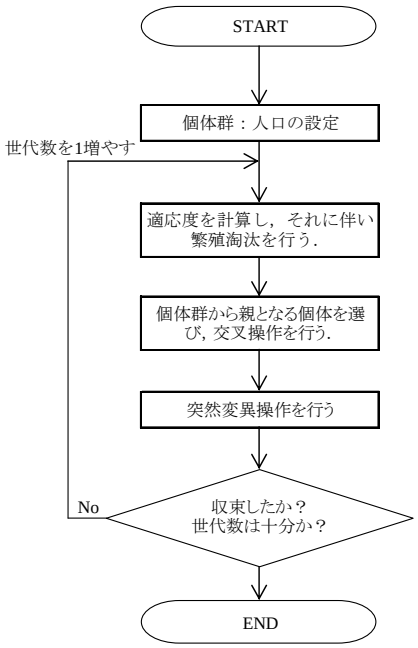


図-2　GA の基本フローチャート

2.2.2　3 目的関数への GA の適用

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重要である．ケーブル調整量の決定の過程で求めたい結果は，バラエティに富んだ解候補であり，同種の組合せを求めるより，**図-3** に示すように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．

ケーブル張力調整については，形状・張力の残留誤差およびケーブル調整本数の 3 つを目的関数として設定することができる．この場合は**図-4** に示すように模式化できる．すなわち，事前に立体骨組解析によって求めた影響値（形状，張力，温度）を用いて，形状，張力および調整本数の組合せで最適解の候補を算定する．

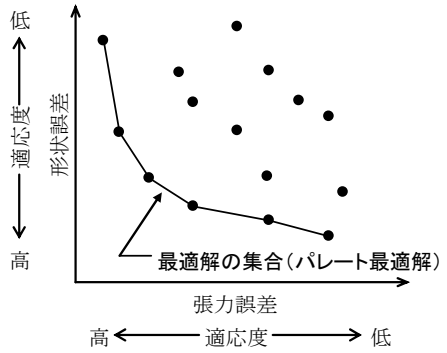


図-3　2 目的関数におけるパレート最適解

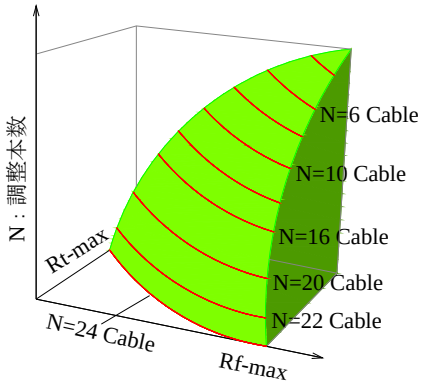


図-4　3 目的関数の個体分布イメージ

2.3　最小自乗法を用いた調整量算定システム

最小自乗法では，張力誤差に着目した調整量を対象とし，張力影響マトリックスを用いて，調整量 ΔS_c を式(1)のように表し，目的関数 f_c を式(2)として，これを最小化する手法により求めた．

$$\Delta S_c = D\{(T + kT_o) + \varepsilon\} \quad \cdots\cdots\cdots (1)$$

$$f_c = \sum(\Delta S_c)^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

ここに，

ΔS_c：調整量　T：張力誤差　T_0：目標張力

D：張力影響マトリックス

k, ε：許容張力誤差に関するパラメータ

計算結果としては，全てのケーブルを調整することでのケーブル調整量が 7.86mm といった連続量で算出される結果となる．現場においては，その日調整が可能なケーブル本数分について調整量の大きなものを選択・調整し，それを数回繰り返し全体の収束を図ることとなる．

3.　数値計算例

以下に，GA および最小自乗法による数値計算例を示す．対象は**図-5** に示す鋼桁架設時の鋼単純ニールセンローゼ橋（橋長 124.5m，使用ケーブル本数 40 本）とする．

3.1　実橋計測による初期誤差量の算出

張力計測および形状計測を行い，調整前の橋体形状およびケーブル張力を算出する．ケーブル張力の計測は，ケーブルの固有振動数を計測し，張力を求める「振動法」により行う[5]．振動法による張力算定状況を**写真-1** に示す．形状計測は 3 次元光波計測システムを用いて計測を行う．**図-6** に計測によって得られた形状誤差と張力誤差を示す．

写真-1　振動法による張力算定状況

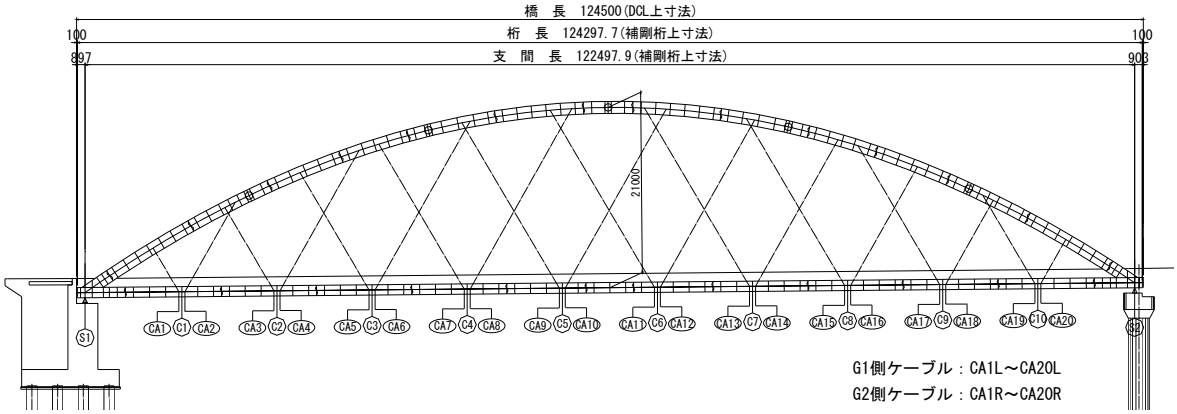


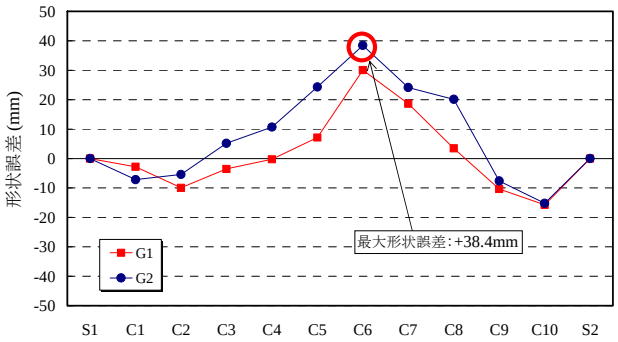
図-5　解析対象モデル

3.2　数値計算例

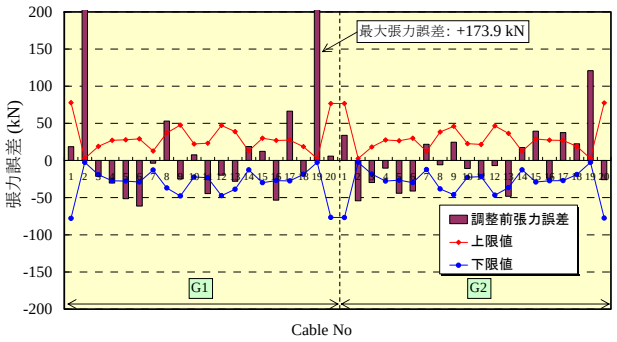
計測された橋体形状，ケーブル張力をもとに，GA と最小自乗法を用いて，調整量について比較を行う．計算条件は，調整量はいずれのケースについても張力誤差が設計値の±15%（管理値）に収まるものを対象とする．所要日数比較のため，1 日あたりの調整本数の上限は，現場条件を考慮し 10 本を条件とする．

ここで示す GA の計算例では，調整本数を最小にする調整量を計算した．以下に GA の実行条件を示す．調整量テーブルは，シムプレートの組合せを考慮し，調整量が離散量として表されるように 1mm 間隔とする．

1）人口サイズ：800 個体
2）繰り返し実行回数：5 回
3）最大繰り返し世代数：100 世代
4）交叉方法：1 点交叉，交叉確率 0.6，突然変異確率：0.05



a）　形状誤差



b）　張力誤差

図-6　初期誤差量（形状，張力）

5）調整量テーブル：-50mm から+50mm，1mm 間隔

比較に用いる最小自乗法は，ケーブル張力と調整量に着目した調整量を計算する．

3.3　計算結果

表-1 に最小自乗法および GA による調整量算定結果を，**図-7** に調整後の G2 桁の形状誤差分布を示す．最小自乗法では，調整量が連続量で求められる．シムプレートの組合せ可能な調整量となるように修正計算を行った結果，**図-8** に示すように張力の管理値を超過するケーブルが 40 本中 13 本あった．そのため，再度の修正計算を行い，全てのケーブルが管理値内となるように収める必要があった．**図-9** に GA によって算出した調整量候補と張力誤差分布の履歴を示す．

GA では，合計 27 本のケーブルを調整したが，調整量の決定にあたり，第 1 回目と 2 回目の調整量は，1 日の調整本数の上限値（10 本）内にある調整量候補の内，最も張力誤差が小さくなる解を選択した．3 回目の調整量については，張力誤差が管理値に収まる候補の内，形状誤差および調整本数が最小となる解を選択した．

以下では，最大形状誤差，最大調整量，調整本数および所要日数に着目して，最小自乗法と GA の比較を行う．

(1) 最大形状誤差

表-1，**図-7** より，最小自乗法では，最大形状誤差が+38.0mm となる．GA では，最大形状誤差が+34.3mm となる．計算例では調整本数に着目した調整事例のみを紹介しているが，形状誤差に着目した調整ケースを解として選択すれば，さらなる形状の改善が可能である．

(2) 最大調整量

最小自乗法では，前述の式(1),(2)により，張力誤差が所定の管理値内に収まる範囲で，調整量を最小となるように収束計算を行っている．最小自乗法の調整量は -12.6mm のように全て連続量で算出され，シムプレート厚にあわせた調整量を再計算する必要があった．GA では，求められた調整量は全て離散量で表されている．

(3) 調整本数および所要日数

表-1 より，最小自乗法ではケーブル全数（40 本）を調整するため，調整に必要な日数は 4 日となるが，GA では 27 本の調整で済み，作業日数を 1 日減らすことができる．

以上の結果を踏まえ，GA および最小自乗法の着目パラメータや，特徴について比較した結果を**表-2** に示す．GA では調整量が離散量で表されること，形状や調整本数に着目した調整量が求められることから，調整方法がシムプレート式の場合や，現場条件に合わせた調整量を求めたい場合に有効であるといえる．一方，最小自乗法は，調整量が連続量で表されるため，ナット回転式の場合は再計算は不要である．さらに，最大調整量を小さくできることや，目標の張力誤差に収まる調整量を簡易に求められることから，有効な手法であるといえる．これより，両手法ともに長所，短所を持ち合わせているため，必要に

表-1　各手法による調整量算定結果

	最大形状誤差（mm）	最大調整量（mm）	調整本数（本）	所要日数（日）
初期計測値	+38.4	-	-	-
(1) 最小自乗法	+38.0	-12.6	40	4
(2) GA	+34.3	+27.0	27	3
(2) - (1)	-3.7	14.4	-13	-1

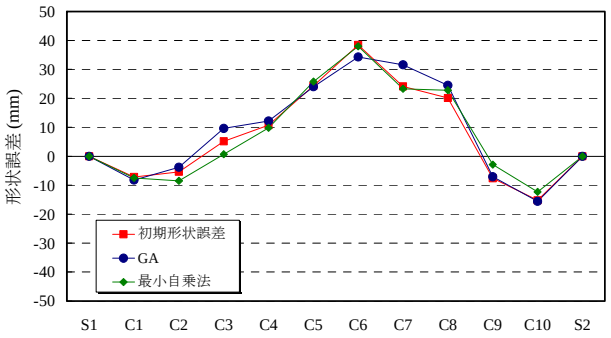


図-7　調整後の形状誤差（G2 桁）

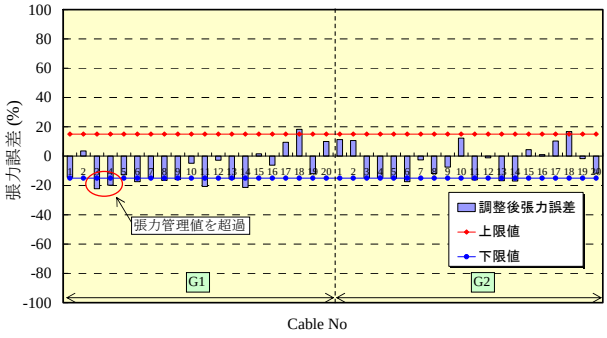


図-8　最小自乗法による張力誤差分布（修正前）

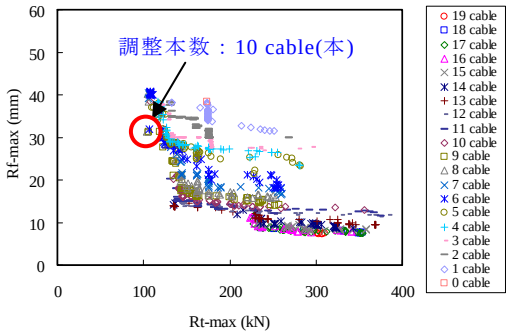


図-9(a)　GA による調整量候補(第 1 回調整時)

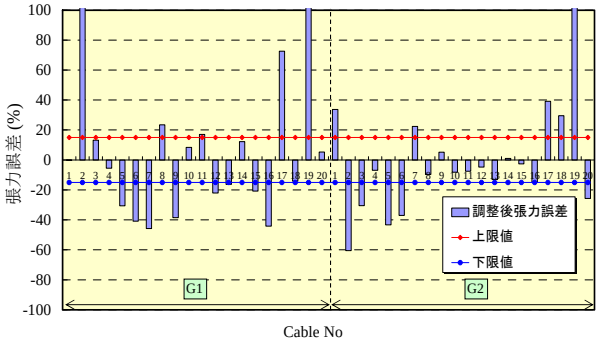


図-9(b)　張力誤差分布（第 1 回調整後）

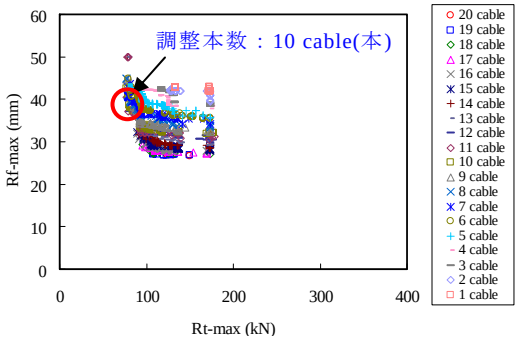


図-9(c)　GA による調整量候補（第 2 回調整時）

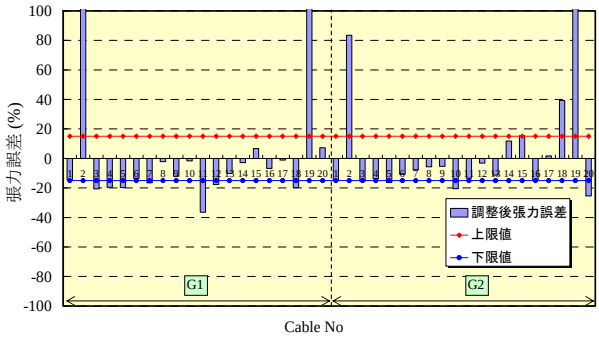


図-9(d)　張力誤差分布（第 2 回調整後）

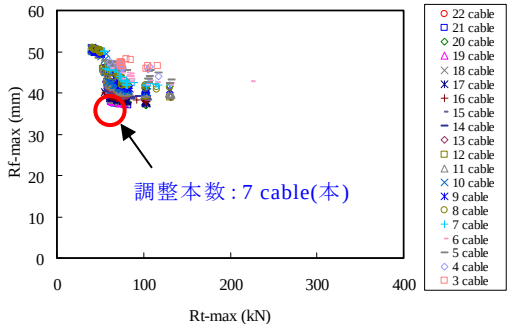


図-9(e)　GA による調整量候補（第 3 回調整時）

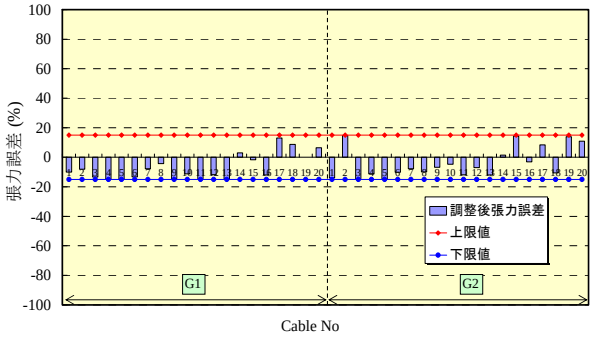


図-9(f)　張力誤差分布（第 3 回調整後）

表-2　GA と最小自乗法の比較

比較項目	GA	最小自乗法
着目パラメータ	形状，張力，調整本数（3種類） 【3目的問題として処理】	形状，張力（2種類） 【それぞれが独立した変数として処理】
解の収束方法	形状，張力，調整本数に着目した調整候補をそれぞれ作成し，設計者が任意で調整量を選定できる．	調整量を目的関数として，誤差が管理値に収まる範囲で，自乗和が最小となるように調整量を算定．
解の個数	複数	1種類のみ
調整本数	任意	全量のみ
調整量	離散量 （シムプレートの組合せが可能）	連続量 （シムプレートの組合せが不可能）
特徴	・調整量が離散量で表され，形状，張力，調整本数に着目した調整量が求められるため，現場の状況に応じた調整量が算出できる． ・解の候補が複数存在するため，設計者の自由度が大きい．	・ナット回転法のような連続量を設定できる調整法の場合であれば，数日でケーブル全数を調整することで，計測は1回で完了できる．

応じて使い分けを行うことが望まれる．なお，実際の現場では，解析によって得られた形状・張力の影響値と実橋の出来形誤差による影響値の差などを考慮した調整が必要となる．

4. まとめ

本論では，ケーブル張力調整量算定手法の中から，GA および最小自乗法に着目し，実橋を対象とした数値計算による比較を行った．これより得られた両手法の特徴について以下に示す．

1)GA では複数の調整量候補が算定されるため，形状誤差，張力誤差に加えて，調整本数に着目した調整量を選択することが可能である．さらに，調整量はシムプレートの組合せに合わせて，離散量として設定可能である．

2)ケーブル張力調整方法が，シムプレート式の場合は計算された離散量に合わせて，かつその日の調整本数に合わせて最適な調整量を選択し，ケーブル調整後にその張力の確認を行いながら，順次調整量を策定できる．つまり，現場の作業状況とリンクした調整数値の算出が可能である．

3)最小自乗法では，ケーブル全数を調整対象とする調整量が連続量として算定される．つまり，ケーブル調整方法が，ナット回転法のような場合，かつケーブル本数があまりにも多いような場合を除いて，ケーブルを全て調整する場合，最初の計測と調整量算出後，数日のケーブル調整，そして最終のケーブル確認だけで調整が完了することが可能であり，調整作業は簡便である．

4) ケーブル張力の調整方法（シムプレート式，ナット回転式）や現場条件に合わせて，調整量算定手法の使い分けを行うことで，効率的にケーブル調整量の算定を行うことができる．

参考文献

1)久保 元生，奥原 光，浜村 正信，竹中 裕文：神崎川橋梁の設計と施工，春本技報 No.1，pp.42-54，1990

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，pp.495-502，1986

3)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

4)たとえば，有村 英樹，高瀬和男：遺伝的アルゴリズム法を用いたケーブル張力調整システムの開発，駒井技報 Vol.18，pp30-42，1999

5)頭井 洋，新家 徹，濱崎義弘：振動法によるケーブル張力実用算定式の補正，土木学会論文集，No.525/I-33，pp351-354，1995