

鋼連続桁の断面変化位置決定問題へのGAの適用

A determination of cross-sectional dimension variation position for steel girder using genetic algorithm

保田敬一*, 近田康夫**

Keiichi Yasuda, Yasuo Chikata

*博(工) (株)ニュージェック, 技術開発グループ (〒135-0007 東京都江東区新大橋 1-12-13)

**工博 金沢大学教授, 大学院自然科学研究科環境科学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

One of most effective and traditional ways for the economic design of steel plate girders is to vary their cross-sectional dimensions along their length, in accordance to their bending moment diagram. The design guideline was published in 2000. However, in spite of the existence of practical design rules to determine the number of cross-sections and the cross-section variation points, the final decision still relies on the experience and good sense of the bridge designer. In this paper, we show the outlines of determination system that, by applying genetic algorithms, not only determines the most economic resistance moment and their respective transition points, but also gives an evaluation of the bending moment diagram, without having to perform the conventional structural analysis.

Key Words: Continuous steel plate girders, Cross-section variation point, Design guideline, GA

キーワード: 鋼連続桁橋, 断面変化位置, ガイドライン型設計, GA

1. はじめに

鋼橋における主桁や横桁などの構成部材では、その部位ごとに発生する断面力によって最適な断面を構成し、何カ所もの断面変化位置を設けることにより鋼重の低減を図っている。しかし、断面変化数も多すぎると溶接工数の増加が顕著となり、かえって不経済となる。そこで、日本橋梁建設協会発行のデザインデータブック¹⁾を始めとして、国土交通省、各公団^{2)~4)}・公社⁵⁾⁶⁾等の発注者側の設計基準にも標準的な断面変化位置を求めるためのマニュアルが整備され、記載されている。これを従来型設計とよぶ。ところが、一般に橋梁は単品受注生産物件であり、設計条件、構造において全く同一であるという物件は皆無であるといっても過言ではない。このような条件下では、上記マニュアルが参考にはなっても全くあてはまる構造物は非常に少ないのが現状であった。

具体的には、ある設計者がある橋梁を設計するとする。主桁の断面構成を行う際に、その施主発行の設計基準に準拠し、断面変化位置の初期値を設定する。その後、断面変化位置と補剛材の干渉、現場添設位置との干渉、断面の逆テーパ、最小断面等の理由により、最終的な断面変化位置は当初に計画したものと大きく異なるケースが多々ある。この一連の作業において、設計者はケ

ースパイケースで適切な判断を下し、処理しているのが現状であった。

筆者らは、個々の橋梁が持つ特有の設計条件から最終の断面変化位置を計画当初より推定できれば、骨組構造解析の計算回数、またそれに伴う断面計算の回数削減を図ることができ、設計作業の効率化が可能になると考え、ファジィエキスパートシステムによる断面決定支援システムの構築を行った⁷⁾。

一方、2000年12月以降、ガイドライン型設計⁸⁾⁹⁾が主流となり、これまでの鋼重ミニマムの考え方から(鋼重+工数)ミニマムに移行することでコストを縮減するという考え方になった。この背景には人件費と鋼材費とのバランスがくずれ、工数すなわち人件費が高くなったことにある。このガイドライン型設計の主旨は、輸送制限長を超えない範囲で、ブロック数ミニマムを目指すものである。

このように、従来型設計からガイドライン型設計に移行したとしても、制約条件が変化しただけで、断面変化位置をどうやって決定するかは相変わらず重要な問題である。なぜなら、従来設計でも鋼重ミニマムの設計を行うために設計者の経験と勘により判断と処理を行うという部分が大きかったこと、ブロック数最小というガイドライン型設計でもブロック数が同じであればその

中でも鋼重の最小を目指すべきであること、「鋼重+工数」ミニмумを目指すのであればブロック数を変化させて試算できるツールが必要であること、断面変化位置の初期値と最終の値とがあまりにもかけ離れていては、構造解析の計算回数と断面決定の回数が多くかかってしまい、この回数の削減をしないと設計作業の効率化に結びつかないことなどである。しかし、断面変化位置の決定問題に関する研究は保田らの文献⁷⁾しかなく、構造解析や断面決定の回数を削減することのメリットがあるにも関わらずこれまでほとんど行われてこなかったといつてよい。

本研究では、鋼連続桁橋を対象にして、ブロック数を固定した状態での断面変化位置決定をGAにより算出できることを示す。ブロック数ミニмумという目標はあるが、それがために支点上あるいは支点付近に継手位置がきた場合は、継手位置を移動することを最初に考える。しかし、平均ブロック長と最大輸送可能長とがあまり差がない場合はブロック長をほとんど変化させることができないため、支点付近に継手位置がくることを回避できないということが十分にありうる。その場合はブロック数を増やすという選択になる。このように、ブロック数は固定ではなく、条件によってはブロック数を変えなければならぬケースが発生するため、ブロック数を変化させた様々なケースで試算ができることが望ましい。本論文ではその方法を示す。GAを用いる理由は、ブロック数が増えると総当たり計算の回数も飛躍的に増加するが、GAなら構造解析の初期値を短時間で求めることができるためである。

本研究で目指している鋼連続桁橋の断面変化位置決定支援システムの構築が可能になれば、ブロック数を変化させて鋼重を比較・試算できること、構造解析の計算回数と断面決定の回数の削減をすることで断面変化位置の初期値を早期に求めることが可能になり、設計作業の効率化に結びつくことが期待できる。

2. 鋼連続桁橋の断面変化位置の決定方法

2.1 従来型設計

平成11年までは適切な断面変化数のもとでの鋼重の最小化を目的に、デザインデータブックや各公団公社などの設計マニュアルに記載されている断面変化位置を初期値として、技術者が経験と勘で断面変化位置を設定していた。しかし、前述の設計マニュアルどおりに断面変化位置が設定されることはほとんどなかったのが現状である。その理由は、変化位置と補剛材との干渉、現場添設位置との干渉、逆テーパー、最小断面などである。図-1にデザインデータブックによるプレートガーダーの標準断面変化位置を載せる¹⁾。

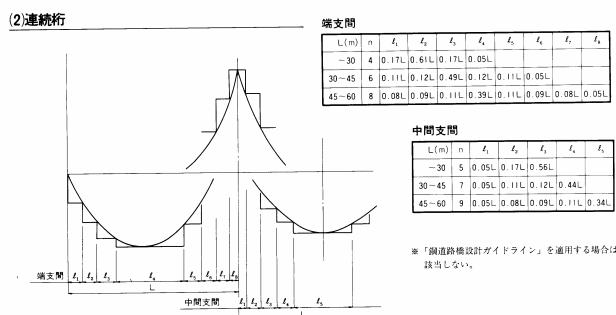


図-1 標準断面変化位置（従来設計）

2.2 ガイドライン型設計

平成12年2月以降、ガイドライン型設計が公表され、連続桁の断面構成における考え方が以下のように示された⁸⁾⁹⁾。

- ・ガイドライン型設計の特徴を最大限に活かすため、輸送制限（ブロック長、ブロック重量）を超えない範囲でブロック数ミニмумを目指す。
 - ・径間部（支間中央）の最大断面力位置での継手はできるだけ避けるべきであるが、ブロック数が減るのであれば径間部の最大断面力位置に継手を設けるのもやぶさかではない。継手部の断面決定による断面の大幅増加よりもブロック数の減少の方が有利となる。
 - ・ガイドライン型設計の主旨は、「鋼重ミニмум」から「（鋼重+工数）ミニмум」に移行することで、コストを減少させることにある。ブロック数を減らすことは、工数算定において部材数と大型材片数を減少させ、工数を大幅に減らすことができる。その効果は、重量増加によるコスト増を上回ることが数十ケースの試算で確認されている。
 - ・現場継手が減るので、小型材片である連結板が減少し、効果度はさほど大きくはないが工数を減少させる。よって、ブロック数ミニмумを目指し、輸送および架設の制限を超えない範囲でブロック長を大きくすることが経済的になる。
 - ・径間部の最大断面力位置に継手を設けることは従来の設計思想からは避けられてきたが、経済性の追求と継手構造の信頼度の向上を勘案して、ブロック数が減ることを条件に上記の考え方を含んでいる、また、鉄道橋ではよく用いられる構造でもある。
 - ・ブロック数の減少と断面増加による重量増の目安としては、全体鋼重比較で約10～15%程度が限界と考える。
- 一方、ガイドライン型設計での現状を以下に示す。
- ・輸送可能部材長をもとにブロック数ミニмумを基本とするが、そうでないケースもある。例えば、①ブロック数ミニмумに従うために支点部に継手がくるようなケース、②ブロック数を1だけ増加することで工数+鋼重が有利になるケース、例えば、ブロック長が輸

送可能部材長には近い場合はブロック長の変動が極端に少なくなるため、ブロック長の選択肢が限られるようなことが想定される。具体的には、桁長51.6m、輸送可能部材長=13m、ブロック数4とすると、平均ブロック長は12.9mとなり、ブロック長は12.9m<L<13.0mの範囲しかとれなくなる。

- ・ブロック数が同じであれば、できるだけ抵抗曲げの合計が少なくなるように計画する。
- ・支点上付近は従来設計と同じようになる。

2.3 最適化の必要性

従来設計であれガイドライン型設計であれ、断面変化位置の設定に何故最適化が必要かという理由は以下のとおりである。

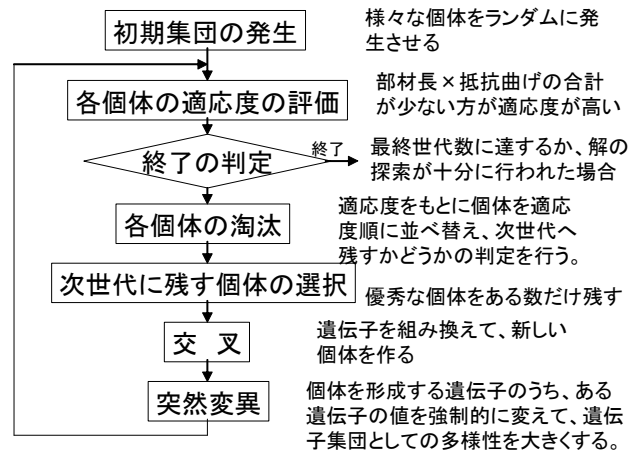
- ・従来設計でも鋼重最小化が達成できたというわけではない。この理由としては、マニュアルの存在、変化位置と補剛材との干渉、現場添設位置との干渉、逆テーパー、最小断面などである。これはガイドライン型設計でも同じことがいえる。
- ・最終的に工費に影響するのはやはり鋼重であり、ブロック数が同じであればその中で鋼重最小を目指すべきである。
- ・「工数+鋼重」ミニマムを目指すのであれば、様々な条件（ブロック数を変化させて鋼重最小化を目指す）で試算できるツールが必要である。
- ・総当たり計算では相当時間がかかるので、初期値を短時間で求められることが実用上必要である。

3. GA によるモデル化

3.1 最適化のアルゴリズム

最適化の指標は経済性（単目的）とし、鋼重の最小化を目指した。具体的には、ブロック長×抵抗曲げモーメントの総和が最小となる継手位置を検索した。目的関数を式(1)に、制約条件は以下に示すとおりである。この目的関数の意味は、ガイドライン型設計の目指す（鋼重+工数）最小のうち鋼重最小を意図している。鋼重に最も影響を与えるのは、主桁の断面構成である。主桁の断面を決定するのは、発生曲げモーメントから計算される部材断面構成による抵抗曲げモーメントであり、この抵抗曲げモーメントにブロック長と鋼材の単位体積重量を乗じたものがブロック鋼重となる。このブロック重量の総和が橋全体の主桁重量になる。鋼材の単位体積重量は共通なので、主桁の重量は抵抗曲げモーメントとブロック長の積の総和、すなわち、式(1)で表現されると仮定した。

なお、ガイドライン型設計では（鋼重+工数）ミニマムを目指していることから、工数も目的関数に含めるべ



図ー2 GAのアルゴリズム

きであるが、同じブロック数（大型材片数が同じ）という条件下では工数に影響の大きい大型材片数が同じであれば、小型材片数の変動は微少であると判断した。

【目的関数】

$$f = \sum_{i=1}^n (Li \times Mi) \rightarrow \min \quad (1)$$

【制約条件】

$$0 < Li \leq Lmax$$

$$\sum Li = BL$$

$$BWi \leq BWmax$$

ここで、

Li ：ブロック長

Mi ：部材の最大抵抗曲げモーメント

n ：ブロック数

$Lmax$ ：輸送可能部材長

BL ：桁長

BWi ：ブロック重量

$BWmax$ ：輸送可能ブロック重量

ブロック長の合計は橋長になることと、各ブロック重量は輸送可能ブロック重量以下とすることである。なお、一般的に、ブロック重量が輸送制限に該当するのは箱桁の場合がほとんどで、鉸桁で輸送重量が問題になることはほとんどないと考えられる。

3.2 GAのアルゴリズム

GAによるアルゴリズムは図ー2に示すとおりである。

3.3 コーディング

通常は2進数でコーディングするので、以下の2つの方法を検討した。

①ブロック長

$$10.3m + 11.4m + 13.8m + 9.2m \dots$$

$$\rightarrow 103 + 114 + 138 + 92 \dots (10cm \text{ 単位})$$

$$\rightarrow 01100111 + 01110010 + 10001010 + 01011100 \dots (2$$

進数)

この方法だと交叉した時にブロック長合計が桁長にならないというデメリットがある。

②継手位置 (累計)

1 0. 3m+2 1. 7m+3 5. 5m+4 4. 7m・・・
→1 0 3+2 1 7+3 5 5+4 4 7・・・(10 cm 単位)

継手位置の線列 (実数) を各個体の記号列にする方法で、2進数にはしていない。交叉するときは任意の継手位置を交換するという方法をとることでブロック長合計は変化しない。

よって、継手位置を線列とする方法を採用した。

実際は、従来設計の場合には10 cmピッチで断面変化位置を設定するのではなく、横桁 (格間) あるいは垂直補剛材の位置によってほぼ離散的に決定されていた。しかし、ガイドライン型設計では補剛材間隔が5mなどの場合もあるため、従来設計より継手位置の自由度は高くなっている。

(1) 初期集団の発生方法

初期集団の発生方法は、無作為に乱数を発生させ、人口数になるように遺伝子を発生させる方法が考えられる。この方法では、輸送可能部材長を超えた場合はやり直しになるので、試算したところ、50個の初期集団を発生させるのに要した時間は300万回 (約200秒) の試行が必要であった。このように少し時間がかかることが欠点である。この方法を具体的に示すと、6つのブロックの場合、接手位置は5になるので、乱数を5個発生させ、小さい順に並べ替えた各乱数に桁長を乗じて接手位置を決定する。例えば、桁長が70mで乱数が0.25, 0.311, 0.453, 0.749, 0.82の場合、接手位置は、17.5m, 21.77m, 31.71m, 52.43m, 57.4mとなる。各ブロック長は、17.5m, 4.27m, 9.94m, 20.72m, 4.97m, 12.6mとなる。この場合、17.5mと20.72mの2つの部材が輸送可能部材長である14.0mを超えているので、やり直しとなる。

(2) 交叉の方法

任意の継手位置を交換する方法を用いた。具体的には、線列 A,B で任意に選択した接手位置同士を交換している。例えば、線列 A: 10.3m+21.7m+35.5m+44.7m+55.0m, 線列 B: 11.2m+22.6m+33.8m+43.9m+55.0m で交叉する場合、確率により求めた交叉位置が3番目と選択された場合、線列 A の35.5mと線列 B の33.8mとを交換する。その結果、線列 A: 10.3m+21.7m+33.8m+44.7m+55.0m, 線列 B: 11.2m+22.6m+35.5m+43.9m+55.0m となる。線列の最後の数字は桁長になるので、この数字は選択されない。交叉した結果、ブロック長が輸送可能部材長の制限を超えた場合はペナルティ関数で対処する。

(3) 突然変異の発生方法

ビット列でコーディングした場合、一般的な突然変異

方法は任意のビットを反転させる方法がよく用いられる。本研究では累計の接手位置で線列を構成しているため、任意のビット反転という手法は使えない。ある線列において任意に選んだ接手位置を変えるということは、ブロック長の輸送制限に該当する可能性もあり、その場合は解候補ではなくなるため、線列の再設定が必要となる。したがって、本研究ではエリート保存方式で残した解以外を20%の確率で初期設定し直す、すなわち、初期集団を再構成するという方法をとった。この方法は本来の突然変異とはいえないかも知れないが、膨大な解空間を効率よく探索するという目的は同じである。

3.4 適応度の計算

適応度を計算する上での留意点は以下のとおりである。

(1) 適用度の計算

目的関数 ($\sum Li \cdot Mi$) の最小化を目指す。

本来は工数も関係するが、同じブロック数の条件下では工数の変化は微小で無視できると仮定した。ただし、ブロック数が変化した場合、例えば、ブロック数5, 6, 7の場合を比較するのであれば、当然工数は関係してくるので、鋼重以外にもブロック数ごとの加工工数を目的関数に付加するという点は今後の課題となる。

(2) 継手部材の重量

継手の重量は継手位置の断面力に依存するが、ブロック数が同じの場合、継手の重量はほぼ変化しないと仮定した。

(3) 制約条件を満たさなかった個体

ペナルティを与えることで対処した。ブロック長が輸送可能部材長を超えた場合は、ブロック長×抵抗曲げの合計値に 10^6 を加えた。

(4) 断面力は固定とする

適用度とは関係ないが、継手位置、すなわち、断面変化位置を変えると格子計算を行うための入力値である主桁の剛度配分が変化するので、発生断面力は変わってくるが、これは無視した。本来、剛度の仮定、格子計算、断面決定、剛度修正という一連の流れの中で設計は行われるが、これまでの経験から、支間長などのスケルトンと荷重条件、横断面形状が決定すれば、部分的に主桁の剛度を若干修正しても設計最終段階の断面力図にはあまり影響がないことによる⁷⁾。

断面力は、本来格子計算より算出するが、本研究の目的である断面変化位置の初期値を求めることからすると、予備設計時の断面力あるいは詳細設計前に行う桁配置・桁高検討用の断面力を用いるのがよい。本研究の検証例では、予備設計時の断面力や事前検討用の断面力が入手できなかったため、最終剛度での格子計算結果での断面力を用いた。

表－1 GAのパラメータ

項目	パラメータの値、手法
個体数	50
世代数	100
突然変異確率	20%
選択手法	エリート保存方式（適合度上位12%）
交叉手法	1点交叉
交叉率	適合度の上位60%の中から任意に選択
終了条件	世代数＝世代交代数

3.5 GAのパラメータ

用いたGAのパラメータを表－1に示す。表－1の各パラメータのうち、個体数、世代数、突然変異確率は試行錯誤により定めた。交叉手法や終了条件は代表的なものを用いた。個体数は、ブロック数の大小に応じて変化させるのが適当と考えられるが、初期集団発生の計算時間がかかることもあり、何ケースかで比較し、50を選定した。世代数は100としているが、途中段階での中止も可能である。選択手法は、よい解が途中で淘汰させることを防ぐためにエリート保存方式とした。適合度上位12%というのは、個体の適合度上位12%を保存するという意味である。この数字も何ケースかの試算により決定した。交叉率は一般的に100%としている例が多く、本研究でも100%を用いている。しかし、より適合度の高い個体（上位60%）から親を選択する方法を採用している。これにより、より最適な解が出力されるケースが多かったため、この方法を採用した。交叉は1点交叉であるが、3.3でも述べたように、ビット列の場合の1点交叉ではなく、累計接手位置の交換を意味する。突然変異確率は、問題によって異なり、ケースバイケースで値が異なる。20%というのは、3.3でも記述しているが、エリート保存方式で残した解以外を20%の確率で初期設定し直すという意味である。本来の突然変異の意味とは異なるのは、コーディング方法として累計の接手位置で線列を構成していることにも原因があるが、試行錯誤の結果、この方法がより多様な解が出力されるケースが多かったため、この方法、この値を採用した。

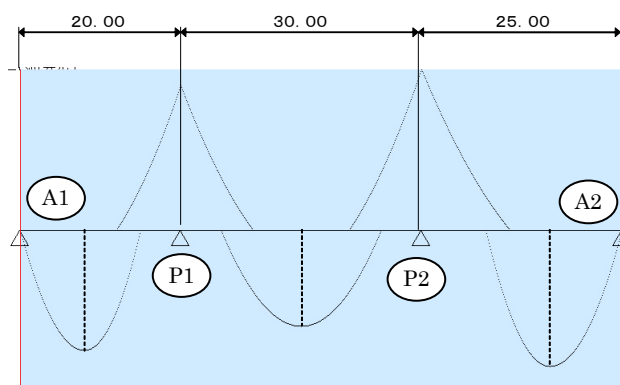
4. 検証

4.1 検証例1

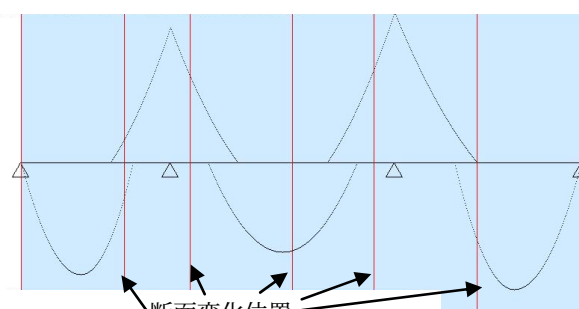
検証の対象にしたのは、3径間連続桁である。断面力図を図－3に示す。桁長＝20＋30＋25＝75mで、輸送可能部材長を14mと仮定すると、 $75/14=5.36$ となり、ブロック数は切り上げて6部材となる。よって、以降の計算はブロック数6部材固定で実行した。

(1) 厳密解を求めない理由

厳密解（総当たり）を算出するには時間がかかる。例えば、この例のように、3径間連続桁（20＋30＋25



図－3 検証例1（断面力図）



図－4 50世代での断面変化位置

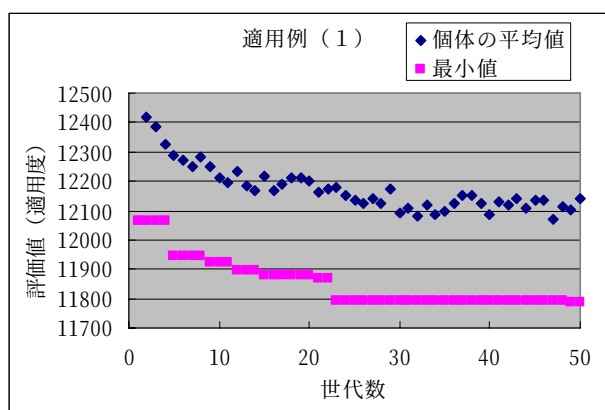
5m＝7.5m）、最大輸送部材長＝14m、6部材としても、10cm単位で継手位置を検索すると、最小ブロック長は $7.5m - 5 \times 1.4m = 5m$ となる。よって、ブロック長は5mから14mの範囲をとることになる。したがって、ブロック長は最大で $90 \times 90 \times 90 \times 90 \times 90 \times 90$ 通りの組み合わせ（ブロック長×最大曲げの総和の計算）を計算しなければならない。また、筆者のPC（Pentium M プロセッサ、1.20GHz）で総当たりの試算をしたところ、24時間の計算結果で、照査ケースの数は1417,000、進捗率は0.0016、全てが完了するのには約620日必要との結果が得られた。総当たり数だけを算出するだけでも約13日、総当たり数の概算は 3.7×10^8 通りであり、この結果から、現実的に厳密解を求められないと思われる。

(2) 最適解の探索結果と適合度

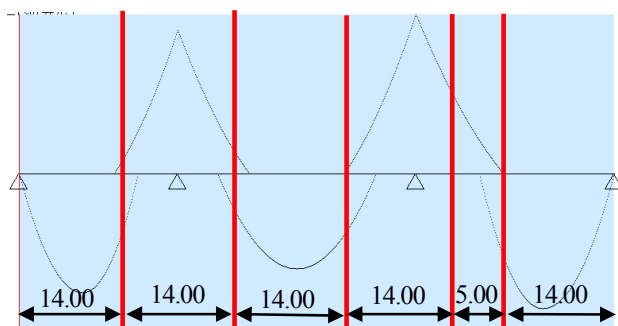
第50世代まで探索した結果を図－4に示す。また、評価値（適合度）の変化として、個体の平均値と個体の最小値推移を図－5に示す。最小値（準最適解）は23世代以降、平均値も30世代以降は安定しているようである。

(3) 考察

6ブロックの場合、曲げモーメントのピークが5カ所（第1径間正曲げ、第2径間正曲げ、第3径間正曲げ、P1支点上負曲げ、P2支点上負曲げ）あり、この5カ所を5ブロックに対応させるとすると、残りの1ブロックは曲げモーメントが小さくなる交番部に配置した方



図－5 適合度変化（個体の平均と最小値）の推移



図－6 6ブロックでの断面変化位置の例

が全体の抵抗曲げモーメントは小さく押さえることができる。この考え方に従い、交番部を径間長の長い第3径間にもっていき、交番部のブロック長を最小ブロック長の5mとすると、残りの5ブロックは全て最大輸送部材長の14mとなるという極端な例が図－6である。したがって、この図－6に示すブロック割りは最適解に近い値であると考えることができる。図－4では交番部の位置が4番目のブロックになっている。

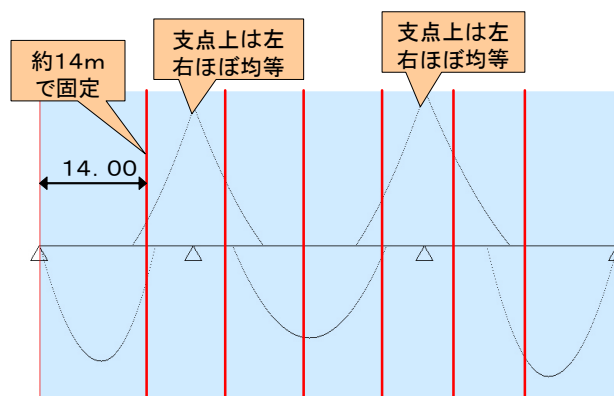
この図－6ではP1支点上、P2支点上の左右不均等はほとんど発生していない。GAによる探索解と図－6の結果を抵抗曲げモーメントの総和で比較したのが表－2である。抵抗曲げモーメントの合計でもGAによる探索結果の方が優れている結果となる。GAではうまく抵抗曲げモーメント合計値の最小を探索しているといえる。さらに、図－6のブロック割りでは、交番部ブロックと隣接するブロックの断面力の差が大きいことと、隣接するブロックのブロック長の差が大きいことから、実務の設計者は図－6のブロック割りは選択しないと思われる。

抵抗曲げモーメントの総和を低くするには、断面力の大きい支点上のブロック長を短くすることが有効であると思われる。この方針からすると、図－4の方が図－6よりも支点上のブロック長が短い分だけ優れているといえる。

このように、50世代での適用度最小値となる図－4

表－2 抵抗曲げモーメント合計の比較

部材番号	GAによる探索解			図-6		
	部材長:L(m)	Mmax	L×M	部材長:L(m)	Mmax	L×M
1	13.825	150	2,074	14.000	150	2,100
2	8.868	180	1,596	14.000	180	2,520
3	13.674	120	1,641	14.000	120	1,680
4	10.844	114	1,236	14.000	200	2,800
5	13.823	200	2,765	5.000	100	500
6	13.966	170	2,374	14.000	170	2,380
Σ	75.000		11,686	75.000		11,980



図－7 検証例1での推奨断面変化位置

のブロック割り以外にも、適用度が小さくなる準最適解あるいは準々最適解なども画面に表示し、支点上の左右不均等の状態とも合わせて総合的に判断することも設計技術者にとっては有用であるといえる。支点上の左右不均等がどこまで許容できるかは技術者の判断であり、実際に最適解に近い数例を画面に表示させて確認できるようなシステムがあれば望ましいといえよう。

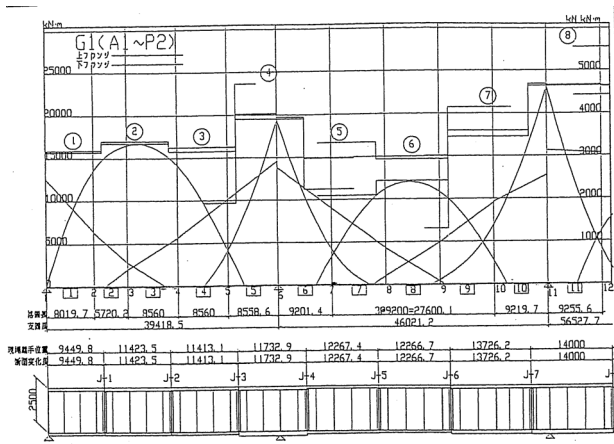
ブロック数を6部材で固定するという条件では、この結果はやむを得ない。実設計では、図－7のように7部材にして、支点上付近をほぼ左右均等になるようにして、第2径間正曲げ部を2ブロック、第3径間正曲げ部を2ブロックにするのが妥当と思われる。

結論としては、6部材と7部材との（鋼重＋工数）比較を行い、決定するのが良いと考えられる。ただし、本研究では工数の比較は行っていない。

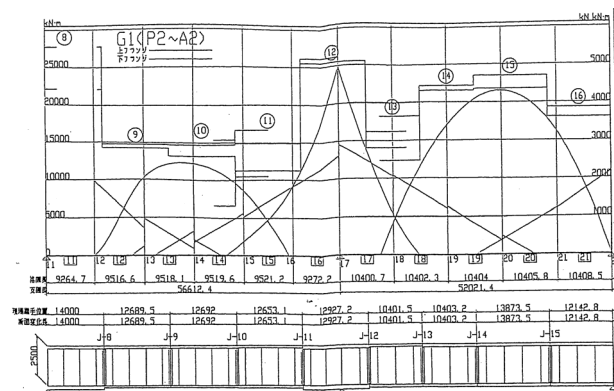
4.2 検証例2

(1) 最適解の探索

検証例2で対象とした橋梁は、4径間連続鋼板桁である。橋長：195.000m、桁長：194.720m、支間長（CL上）：39.400m+46.000m+56.500m+51.900mで、A1～P2間が2主桁、P2～A2間が4主桁である。総幅員は、10.250m（A1上）、19.158m（A2上）である。図－8、図－9にG1の断面力図を示す。なお、輸送可能部材長は14.00mである。



図－8 断面力図 (G1) その1



図－9 断面力図 (G1) その2

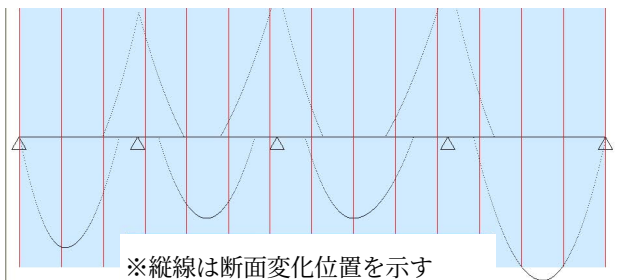
図－8および図－9において、○数字は部材番号，□数字は格間番号を表す。上下フランジの区分は応力図では実線・点線で示されているが，本論文では論旨の展開上厳密に示すことはあまり意味がないと考え，あえて区分を明瞭に示さないことをご了承願いたい。

まず，最小ブロック数の場合，桁長：39.4185+46.0212+56.6124+52.0214=194.0735m であるので，ブロック数=桁長/輸送可能部材長=194.0735m/14.00m=13.86→14部材となる。平均ブロック長は桁長/ブロック数=194.0735m/14=13.862m となり，これだと，ほとんどブロック長は変化させることができない。したがって，ブロック長の変化は固定状態となり，支点上に継手が来ても移動できないという問題が生じる。

ブロック数を14で固定して，GAで解を検索した結果が図－10である。全てのブロック長が13.55mから13.99mの間にあり，世代数が経過してもほとんど変化がない。

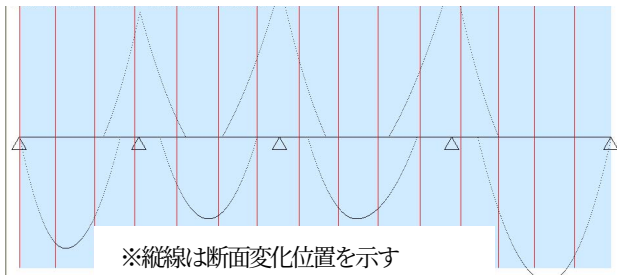
次に，ブロック数を1増やし，15ブロックでGAによる探索を50世代まで行った(図－11参照)。平均ブロック長は桁長/ブロック数=194.0735m/15=12.938m となり，ブロック長は11.80m～13.81m間で変化している。

探索結果からの考察は以下のようになる。



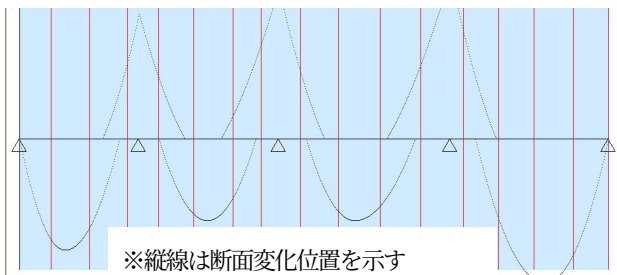
※縦線は断面変化位置を示す

図－10 ブロック数14での断面変化位置(40世代)



※縦線は断面変化位置を示す

図－11 ブロック数15での断面変化位置 (50世代)



※縦線は断面変化位置を示す

図－12 ブロック数16での断面変化位置 (50世代)

- ・ブロック数がひとつ多いので，ΣMLはブロック数14よりも改善されている。14部材ではΣML=35126なのが，15部材ではΣML=33088と減少している。
- ・第1中間支点上および第3中間支点上では部材の左右不均等が発生している。
- ・支点上の左右均等ルールを特に設けなくても，GAで自動的に左右均等になるような解（これがΣMLが最も小さくなる可能性が高い）を探索してくれると期待したが，うまくいかない。

実際の設計では，支点上に継手位置が来ないように，支点上はほぼ左右均等になるような条件を満足するようにブロック数を調整し，最終的に16部材で設計している。

最後に，ブロック数をさらに1増やし，16ブロックで50世代までGAによる探索を行った(図－12参照)。

(2) 実設計例との比較

図－8および図－9の実設計とGAによる探索結果との比較を行った結果を表－3に示す。なお，表中の最大曲げモーメントの値は，そのブロック長における最も大きい曲げモーメントの値である。この値は，実際の断面力図から再計算したもので，断面決定後の設計値では

表－3 抵抗曲げモーメントの合計比較（実設計とGA）

部材番号	実設計			GA（50世代）		
	部材長	最大曲げ※	L×M	部材長	最大曲げ※	L×M
1	9,450	146.6	1,385,370	10,358	153.7	1,592,025
2	11,423	170.0	1,941,910	12,804	170.0	2,176,680
3	11,413	151.9	1,733,635	12,540	135.0	1,692,900
4	11,732	190.0	2,229,080	10,083	189.9	1,914,762
5	12,267	118.3	1,451,186	11,754	115.7	1,359,938
6	12,267	125.0	1,533,375	12,847	125.0	1,605,875
7	13,726	181.0	2,484,406	9,214	142.9	1,316,681
8	14,000	230.0	3,220,000	13,040	230.0	2,999,200
9	12,689	124.0	1,573,436	12,448	111.2	1,384,218
10	12,692	125.0	1,586,500	13,757	125.0	1,719,625
11	12,653	138.4	1,751,175	13,344	111.8	1,491,859
12	12,927	250.0	3,231,750	13,987	250.0	3,496,750
13	10,402	144.7	1,505,169	11,751	164.6	1,934,215
14	10,403	208.9	2,173,187	11,570	214.3	2,479,451
15	13,874	220.0	3,052,280	13,038	220.0	2,868,360
16	12,143	181.6	2,205,169	11,537	176.0	2,030,512
Σ	194,061		33,057,628	194,072		32,063,049

ない。すなわち、図－8および図－9に記されている断面構成ではなく、実設計とGAとでは同じ条件となっている。

図－8および図－9は実設計における断面変化位置の初期値ではなく、最終の値である。本研究の目的はあくまで「初期値を求める」ものであり、そのために、GAを用いて問題適用性を確認している。「断面変化位置の初期値」の優劣評価は、「最終的な断面変化位置」を決定するまでの修正回数の多少でなされるべきものであって、表－3に示されるような「 $\sum(M \times L_i)$ の大小」でなされるものではないと考えられるが、実際の設計例では断面変化位置の初期値は保存しないことが多く、修正回数による検証はできない可能性が高いと思われる。しかし、実際の設計現場では初期値からの修正回数が2回、3回となるケースもよく聞く話であり、この回数を低減することは設計の効率化のためにも必要と考えられる。さらに、ブロック数が同じという条件であれば最終的な断面変化位置での鋼重は最小重量を目指すべきであるのに、実際の設計ではそうはなっていない事例も見受けられる。

表－3でいいたいことは、図－8および図－9での最終的な断面変化位置におけるブロック長と設計曲げモーメントの積の総和よりもGAによる探索結果の方が鋼重が小さくなるという結果であり、これは実設計での断面変化位置が必ずしも最適解ではない可能性があることを示している。

(3) 考察

ブロック数 16 という同じ条件で比較した結果、実設計よりGAの探索結果の方が Σ （ブロック長×抵抗曲げ）の値が小さくなった。この結果より、

- ①支点上は両者ともほぼ左右均等の状態になっている。
- ②GA のチューニングを行うことで、更なる最適解が存在する可能性がある。

③実設計では格間と補剛材との関係から、継手位置が離散的に決定される。ガイドライン型設計では従来設計のように補剛材間隔が狭くなく、数m以上の場合もあり継手位置の自由度は高いが、GA による解がそのまま使えずに修正される可能性もある。

④最小ブロック数 14 では加工工数は最小となるが、おそらく（鋼重＋工数）が高くなると予想される。また、ブロック長が輸送可能部材長に近いこともあり、ブロック長をほとんど変化させることができないことから、支点上でのブロック左右不均等が発生する。ブロック数 15 でも同様のことがいえる。

5. 結論

本研究では、鋼連続桁橋の断面変化位置（継手位置）の決定問題を、GA を用いて解いた。実設計例とGA による探索結果を比較し、GA が実設計例より優れているという結果を得た。

ブロック長は一元的に桁長と輸送可能部材長との関係から決まるのではなく、支付近の継手位置など、複数のブロック数（最小ブロック数、最小ブロック数＋1、最小ブロック数＋2など）から比較して決定する必要がある。そのための探索ツールとしてGAは適用可能であり、実設計での比較検討では有用なツールとなりうると思う。

実設計では、支点上を中心にしてブロックが概ね左右均等になるように断面変化位置を設定していることが多い。また、発生断面力の大きい支点上はブロック長を短くすることが鋼重低減につながることも事実である。しかし、支点上ブロックの左右均等を優先するあまり、鋼重＋工数のコストが高くなるようではガイドライン型設計の主旨に反する。文献8)、9)に示されている標準図でも中間支点上は左右不均等になっている。支点上のブロック長を短くできるかどうかは輸送可能部材長、支点の位置、ブロック数、桁長の関係から決まるものであり、支点上のブロック長が長くなっても最終的に鋼重＋工数ミニマムを実現できればよいと考える。また、支点上のブロックを左右均等にすべきとの記述は文献8)、9)にもないことから、最低限、施工上継手が設けられることや支付近にできるだけ継手がこないなどの配慮ができればよいと考えることができる。

この断面変化位置決定問題は総当たり数が膨大であり、GA で解くのが妥当と考えられる。GA で支点上左右均等になる解が適用度が高いと設定することは可能であるが、そのルールのために最適解が探索できないことやその解が鋼重＋工数で不利になることも考えられるため、ルールとして追加するなら支点上何m以内に接手位置がこないという程度に抑える対処が望ましいと考えられる。一般的に支点上負曲げ部のブロック長を短

くすることは鋼重低減につながると考えられるが、このルールが最優先というわけではなく、あくまで鋼重+工数のコストで比較して決定すべきであるとする。

今後の課題は以下のとおりである。

- ・厳密解（総当たり）との比較を行う必要がある。
- ・GAのパラメータの検証
- ・GAコーディングでグレイ・コード採用の検討
- ・径間数が増えたとした場合の検証（8径間、10径間など）をしなければならない。
- ・工数の算定は同じブロック数では工数に影響のある大型材片数が同じであるので、それほど差がないと考えられるが、ブロック数を変えて比較する場合、大型材変数が異なってくるので、鋼重と工数の両者を目的関数に組み込む必要がある。
- ・実設計では格間と補剛材との関係から、継手位置が離散的に決定されるが、GAによる解がそのまま使えない場合もあり、修正が必要となる。

参考文献

- 1) (社)日本橋梁建設協会：デザインデータブック，1988.5.
- 2) 日本道路公団：設計要領第2集，1990.7.
- 3) 阪神高速道路公団：設計基準第2部，1990.6.
- 4) 首都高速道路公団：鋼構造物設計基準，1992.4.
- 5) 名古屋高速道路公社：鋼構造物設計基準，1987.4.
- 6) 福岡北九州高速道路公社：設計基準第2部，1992.4.
- 7) 保田敬一，沼田 克，額谷啓司，一ノ瀬伯子，永谷政和：鋼橋の断面決定支援システムの構築，第3回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.135-140，1993.12.
- 8) (社)日本橋梁建設協会：ガイドライン型設計適用上の考え方と標準図集，2000.2.
- 9) (社)日本橋梁建設協会：ガイドライン型設計適用上の考え方と標準図集 Q&A，2000.2.

(2006年9月11日受付)