

(66) ガイドライン型設計のための鋼連続桁 断面変化位置決定に関する一考察

保田 敬一¹・近田 康夫²

¹正会員 株式会社ニュージェック 道路グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

E-mail : yasudakc@newjcc.co.jp

²正会員 金沢大学教授 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail : chikata@staff.kanazawa-u.ac.jp

鋼橋の設計がガイドライン型設計に移行して長い期間が経過したが、詳細設計で発注者と協議・確認・承認を得るための資料作成は技術者の経験に依存している。(材料費+製作費) ミニマムとなる解は多数あり、協議や承認をスムーズに運ぶためにも代替案の選定と説明、比較を適切に行う必要がある。本論では、部材数毎に(材料費+製作費) ミニマムとなる代替案を GA により検索するツールを提案する。国土交通省タイプと旧日本道路公団タイプの鋼連続桁橋を対象に、材料費と製作費の合計を最小にする複数の代替案を抽出・評価する。

Key Words: continuous steel plate girders, cross-section variation point, design guideline, GA

1. はじめに

鋼橋の設計においては、従来の鋼重ミニマムの考え方から、「ガイドライン型設計」と呼ばれる 1 部材 1 断面、連結板の一体化などの構造の簡略化により工場製作の省力化を推進することで材料費+製作費のコスト削減を目的とした設計法¹⁾に移行して約 20 年が経過した。この間、ガイドライン型設計についての様々な知見の蓄積があったが、発注者に対して詳細設計の内容の確認や承認を得るための作業は設計担当技術者の経験に依存しており、作業自体はあまり変化がない。すなわち、断面変化位置を決定するための比較検討資料を作成するために、部材数を変えてシミュレーションでき、代替案を効率的に抽出するためのツールが少ないがために、技術者の経験に依存していることである。

本論では、詳細設計段階での協議用資料を作成するために GA を用いて代替案を効率的に探索する方法を提案する。詳細設計での協議用として、断面力ピーク位置に継手がくる場合や、左右非対称の案の優劣を発注者に提示して、スムーズに協議することにより協議の回数を減らすことが可能となる。国土交通省タイプと旧日本道路公団タイプの鋼連続桁橋を対象に、材料費と製作費の合計を最小にする複数の代替案を抽出・評価する。GA により短時間で実用的な解が得られることが特徴である。

2. 継手位置の決定方法

断面変化位置の決定フローを図-1 に示す。図-1 におけるブロック数毎の鋼重・工費算出での最小鋼重による継手位置算出が最も時間がかかる。解が無数に存在するためである。本研究ではこの計算時間のかかる部分に GA を適用し、計算時間の短縮を目指した。継手位置が決まれば鋼重、大型・小型材片数、加工工数などが算出でき、鋼重+工数による工費は計算できる。

3. GA によるモデル化

(1) 最適化指標

最適化の指標は経済性(単目的)とし、工場製作原価の最小化を目指した。ここで、工場製作原価とは鋼橋積算基準(建設省都市局, 建設省道路局, 2003.3.)より、直接工事費のうち材料費と製作費の合計として定義した。直接工事費に含まれる工場塗装費は材料としての鋼重に単位重量あたりの塗装面積と塗装単価を乗じて算出しており、鋼重の増減に比例しているため、本論文では考慮しないものとした。あと、工場製作原価に含まれる間接工事費(間接労務費, 工場管理費)は、直接工事費に比例するため、これも本論文では考慮しないものとした。

目的関数を式(1)に示す。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）による製作費最小を目指している。このうち、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重量となる。同じブロック数の場合、継手位置を変化させても大型部材重量や大型材片数は変化しないが、小型部材重量や小型材片数が変化するので、製作費が異なってくるためである。

a) 目的関数

目的関数を式(1)に示す。

$$f = (c_M + c_P) \rightarrow \min \quad (1)$$

ここに、 c_M ：材料費（鋼材重量×鋼材単価）， c_P ：製作費である。

b) 制約条件

制約条件を式(2)～(4)に示す。

$$0 < Li \leq L_{max} \quad (2)$$

$$\sum Li = BL \quad (3)$$

$$BWi \leq BW_{max} \quad (4)$$

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、 L_{max} ：輸送可能部材長、 BL ：桁長、 BWi ：ブロック重量、 BW_{max} ：輸送可能ブロック重量である。

(2) 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ろということは、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突然変異確率で設定した個数だけ初期設定し直す、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。さらに、より多様な解空間を探索するために、以下の方法も併用した。ランダムに選択した解を対象にして、接手位置ごとに輸送可能部材長とその残りに分けるとこで2つの子ができる。例えば、ブロック長が10.00+12.40ならば、14.00+8.40および14.00+8.40に分割する。この場合、輸送可能部材長に最も近い位置に継ぎ手をセットする。

もう1点、接手位置を離散位置として初期設定してい

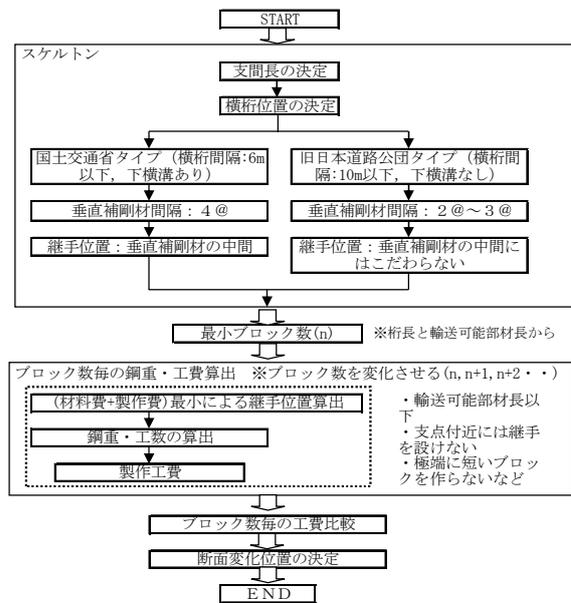


図-1 断面変化位置決定フロー

表-1 GAのパラメータ

項目	パラメータの値、手法
個体数	160
世代数	60
突然変異確率	20%
選択手法	エリート保存方式（適合度上位20%）
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

るので、線列は接手位置の並びになっていることを利用し、ランダムに選択した解を対象に、任意の1継手位置づつおよび2継手位置づつ前後にずらした解を新規に作成する方法も併用した。例えば、例えば、線列が5+9+14+18+23ならば、5+11+14+18+23という解を発生させる。この解の発生確率は突然変異確率に従った。

(3) 継手部分の孔引き照査

設定した継手位置に正曲げピーク位置が近い場合は、継手の孔引き照査で母材フランジ断面 UP が想定される。母材の断面を UP させないためには予め応力余裕量を少し多めに見込んでおくことで断面 UP を回避することが可能となる。そのため、鋸桁で 20KN/mm² の応力余裕を確保するようにした。このため、設定した継手位置に正曲げピーク位置が近い場合は前述の応力余裕を確保するために一律でフランジ断面 UP をするようにした。なお、支点部はその近傍に継手位置がくる場合目的関数にペナルティを与えるようにしている。

(4) GAパラメータ

用いたGAのパラメータを表-1に示す。

4. 適用例 1 (国土交通省タイプ)

国土交通省タイプの継手位置が垂直補剛材の中間にくるケースとして、文献²⁾に記載の 3 径間連続非合成鈹桁を対象とした。支間割り、 $37.000\text{m}+55.000\text{m}+37.000\text{m}$ で桁長は 129.000m である。全幅員は 9.925m 、主桁本数は 4 本、床版支間長は 2.650m である。輸送可能部材長は 13.00m 、ブロック数は 11 である。なお、この橋は左右対称である。地方整備局の設計要領により、モーメントピーク位置に継手は設けないように設定している。

(1) GA による最適解の探索結果

まず、最小ブロック数を求める。桁長 129.000m を輸送可能部材長の 13.00m で割ると、 9.923 となるので、最小ブロック数は 10 となる。この場合、平均ブロック長は $129.00\text{m} \div 10 = 12.900\text{m}$ となり、ほとんどブロック長は変化させることができない。垂直補剛材の中間に継手を設けても、全てのブロックでブロック長が輸送可能部材長以下になるにはできない。したがって、ブロック数が 10 では不可能ということになる。

次にブロック数を 11 にすると、平均ブロック長は 11.727m となるので、これなら垂直補剛材の中間に継手を設けることができる。以降、ブロック数を 12, 13, 14, 15 と 1 ずつ増加させ、GA による解探索を行った。工場製作費 (材料費 + 製作費) の比較を図-2 に示す。

このように、目的関数を構成する材料費と製作費とはトレードオフの関係になるが、本研究ではブロック数ごとに最適解を算出するという方法を採用しており、ブロック数を変えた場合の最小工場製作費を求めることまでは行っていない。

(2) 実設計例との比較

文献²⁾に記載の 3 径間連続桁の断面構成 (以下、元設計と略す) を GA による同じブロック数 11 での探索結果と比較するために、元設計をもとに、最大曲げモーメントを GA で用いた断面力算出式で再計算した。これで、同じ条件で比較できることになる。最も総コストが低くなるのは $n=11$, $n=12$ のケースであり、その差は 0.0031% とわずかである。

元設計と GA による解 ($n=11$) とを比較すると、目的関数である工場製作費は GA による解の方が小さくなっている。大型ブロック数が同じの場合、継手位置が異なるとブロック長 \times 最大曲げモーメントが若干異なり、これが材料費に反映する。また、小型材片重量も継ぎ手部の断面が若干異なるので、この点も影響がある。大型材片数や小型材片数はブロック数が同じであれば差はない。この例は、実設計での断面変化位置が必ずしも工場製作費ミニマムになっていないことを示唆している。スケル

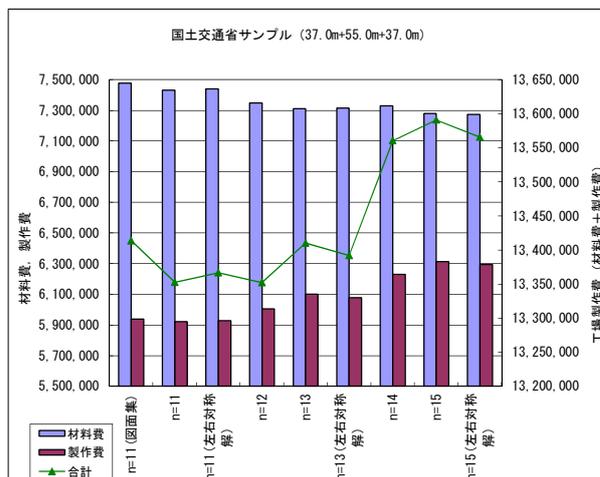


図-2 工場製作費の比較 (国土交通省タイプ)

トンが左右対称であるのでブロック割りも左右対称にするという従来の考え方ではガイドライン型設計の主旨にはあてこなし。元設計と同じ左右対称解でブロック数 11 の場合でも GA による解は元設計での工場製作費より小さい解を探索している。工場製作費の比率は大きくはないが、コスト削減が叫ばれている昨今、更なる工場製作費の低減に向けた試みとして、GA による解探索の有効性があると考えられる。ブロック数 $n=11$ および $n=13$ での GA による最適解は左右非対称になっていることも特徴である。準最適解の中には左右対称の解も存在するが、適応度は大きくなっている。従来設計では、スケルトンが左右対称の場合、継手の位置も左右対称に設定する。しかし、継手数を変えずに工場製作費 (材料費 + 製作費) の最小を考えた場合、必ずしも左右対称の解が最適であるとは限らないことがわかる。

技術者は一般的にスケルトンが対称であればブロック割りも左右対称にする場合が多いと思われるが、ブロック数を変えずに工場製作費の安くなるケースがまだ存在することも留意する必要があるといえる。最終的には隣接する断面力 (板厚) の差、ブロック長のバランスなどから技術者が判断することになるが、左右非対称でも工場製作費が安くなるのであればそれはガイドライン型設計の主旨に合致するので、その採用も検討すべきであると考えられる。

5. 適用例 2 (旧日本道路公団タイプ)

旧日本道路公団タイプとして、実際の設計例である 3 径間連続非合成鈹桁 (2 主桁) を対象とした。支間割り、 $33.60\text{m}+46.50\text{m}+32.80\text{m}$ で、桁長は 112.90m である。全幅員は 10.200m 、主桁本数は 2 本、床版支間長は 5.550m である。輸送可能部材長は 13.00m 、ブロック数

は輸送可能部材長と桁長の関係（ $112.90\text{m} \div 13.00\text{m}=8.685$ ）から、9～13で検討した。本節でも、適用例1での結果より、横桁は製作費に含めず、1主桁のみを対象としてGAによる工場製作費最小を検討した。

(1) 検討ケース

旧日本道路公団タイプの場合、垂直補剛材間隔が広く、継手位置は垂直補剛材の間にはこだわらないため、解の自由度が高い。旧日本道路公団タイプの継手位置の計画手順は、まず垂直補剛材の中間にセットして、うまくいかない場合は、継手位置をすこしずらすという作業を行う。ここで、技術者の判断が入る。そして、全体のバランスを考慮しつつ、うまくいけば完了となる。部材数11の設計例では継手位置が垂直補剛材の中間にきており、また、モーメントピーク位置を中心にしてブロックはほぼ左右対称になっている。これでも（鋼重+工数）ミニмумになるかというところではない。垂直補剛材の中間に継手をセットする方法と、そうでない方法との比較が必要になると考え、表-2に示すケースを検討した。case-1とcase-2は垂直補剛材の中間はこだわらずに継手をセットする方法で、case-3とcase-4は垂直補剛材の中間に継手をセットする方法である。case-2は継手位置が決まった後で、格点位置を再度セットする方法である。いずれのケースもGAにより目的関数が最小となる解を求めた。なお、支点到隣接するパネルに継手が来る場合は、目的関数にペナルティを加えている。実際の設計では、case-4のように、中間支点上ブロックなどを左右対称にするためや、ブロック数を減らすために1つの格間のみ割り数を変えることは設計ではよく行われている。

(2) GAによる最適解の探索結果

case-1からcase-4まで、GAにより工場製作費最小となる解を探索した。ここではcase-1の工場製作費を図-3に示す。実際の設計例（n=11）での結果も併記する。

適用例1と同じように、大型材片重量はブロック数が増加すると減少する。大型材片数は1ブロック増加するごとに3つつ増加する。小型材片重量はブロック数は増加するごとに増加の傾向を示す。小型材片数もブロック数の増加に伴い増加する。大型T継手溶接延長はブロック数が増加しても変化しない。結果、材料費はブロック数が増加すると減少するが、製作費はブロック数が増加すると増えるため、材料費+製作費は下に凸の関係になり、最小となる点が求める解となる。この例では、材料費の減少分より製作費の増加分の方が影響が大きく、最小ブロック数n=9のケースでは正曲げピーク位置が継手位置と重複する箇所が複数あり、母材の断面UPの影響により工場製作費は最小にはならなかった。母材断面UPの影響を受けたのはn=12のケースも同様である。適

表-2 検討ケース

case-1	格間割(3@)はそのまま、格間の中間ならどこでも継手をセットしてもよい。すなわち、格点および支点付近以外(左右50cm)ならどこでも継手をセット可能。継手位置は5cmピッチ。
case-2	格間割は無視して、支点付近以外(支点から左右50cm)ならどこでも継手をセットしてもよい。継手位置は5cmピッチ。
case-3	垂直補剛材の中間に継手をセットする。ただし、格間数を3@~7@に変化させる。後で、継手がない格間は3@に修正する。
case-4	垂直補剛材の中間に継手をセットする。ただし、1つの格間のみ格間数を3@から4@にする。

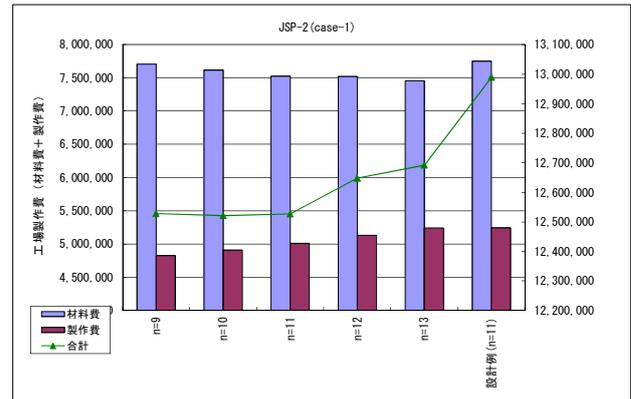


図-3 case-1での工場製作費 (旧日本道路公団タイプ)

用例2の場合、n=10のケースが工場製作費最小となったが、n=11との工費差はごくわずかである(0.45%)。スケルトンがほぼ左右対称の場合は偶数のブロック割にすることはほとんどないが、材料費+製作費最小という観点からGAで解を探索すると合致する解があるということである。

6. おわりに

本研究では、ガイドライン型設計の主旨を反映すべく、鋼連続桁の断面変化位置を決定する方法を示した。ガイドライン型設計の主旨は、鋼重+工数による工費ミニмумを目指すものであり、必ずしもブロック数最小が工費ミニмумになるとは限らない。継手位置は、支間割りや垂直補剛材位置などのスケルトンと輸送可能部材長との関係から決まるのもので、ブロック数を複数ケース比較しないと鋼重+工数による工費ミニмумは決定できない。詳細設計における協議や承認に活用できるツールとしてGAは有効であることが示された。

参考文献

- 1) 建設省：鋼道路橋設計ガイドライン（案），1995。
- 2) (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。