

密度法による小規模橋梁の形状最適化に関する基礎的研究

上野 礼慈*・長谷川 明**・高瀬 慎介***

論文要約

インフラ老朽化が社会に大きな課題となっている。橋梁ではすでに、一部の橋梁は老朽化に伴って利用を断念したり、荷重制限あるいは車線規制などの制約を受けながら使用されている。橋梁の維持管理上の問題点から、ボックスカルバートが使用されている事例がある。そこで、小規模橋梁の最適形状を念頭にボックスカルバートの形状の妥当性を最適化により検討する。密度法によって、初期形状による最適形状の比較と、縦横比および拘束数による最適形状の比較を行い、実構造物形状の基本構造の妥当性を検討した。それらの結果から、アーチ、ボックスカルバート、あるいはトラス桁と橋脚の組み合わせなどの基本構造が得られた。

キーワード：形状最適化, 密度法, 小規模橋梁, ボックスカルバート

Fundamental Study on Shape Optimization for small bridges by Density Method

Reiji UWANO*, Akira HASEGAWA** and Shinsuke TAKASE***

ABSTRACT

Aging infrastructure is becoming a major issue for society. Some bridges have already been abandoned due to their age, or are being used with restrictions such as load limits or lane restrictions. In some cases, box culverts have been used due to maintenance problems of bridges. Therefore, the adequacy of the box culvert shape is investigated by optimization, keeping in mind the optimum shape for small bridges. By the density method, the optimum shape was compared by the initial shape, and the optimum shape was compared by the aspect ratio and the number of constraints, and the validity of the basic structure of the actual structure shape was examined. From these results, basic structures such as arches, box culverts, or combinations of truss girders and piers were obtained.

Keywords: *Shape optimization, Density method, Small bridges, Box culvert*

令和3年12月15日

* 工学研究科社会基盤工学専攻博士前期課程・2年

** 八戸工業大学・名誉教授

*** 大学院工学研究科・准教授

1. 緒言

インフラ老朽化が社会的に大きな課題となっている。橋梁を例にとると、すでに一部の橋梁は、老朽化に伴って利用を断念したり、荷重制限あるいは車線規制などの制約を設けながら利用されている現状にある。全国の約72万の橋梁のうち約71%が市町村道りとなっている。市町村の多くは財政が厳しく技術者が少なく、さらに人口減少も厳しいことから、今後、老朽化に伴って利用の制約の課題が加速する恐れが大きく、インフラの現状維持すら懸念される。その場合、当該地域の産業や暮らしのインフラ環境は厳しくなる。このことが、さらに人口減少を加速させる可能性がある。

市町村管理の橋梁を近隣市町村で調査すると、橋長15m未満の小規模橋梁が高い割合を占めている。多くは、橋台に橋桁をのせる橋梁形式(写真1参照)が取られている。橋梁を維持管理をする中で、橋台上部・支承・桁端部が課題として挙げられる。その要因は、複雑な構造、排水処理、部材間応力の伝達、土砂の付着・堆積である。

これに対し、小規模橋梁の一部で、橋台と橋桁が一体化されたボックスカルバートが使用されている事例(写真2参照)がある。維持管理の点から見れば、前述の橋梁形式に比べ、費用や労力の点で軽減されることが期待される。

そこで、本研究では、小規模橋梁の最適形状を念頭にボックスカルバートの形状の妥当性を最適化により検討する。そして小規模橋梁の橋梁形式とボックスカルバート型の比較を行う。



写真1 橋梁形式の事例：三陸沿岸道路



写真2 ボックスカルバート形式の事例：三陸沿岸道路

2. 解析手法

最適化手法は密度法を使用する。この手法は設計領域を有限要素で分割し、部材の総質量の制約条件の下で、構造全体のひずみエネルギーであるコンプライアンスを最小化する設計変数を求める問題となる。これを定式化すると、以下になる。

$$\begin{aligned} & \min C(\rho) \\ & \text{subject to } m(\rho) \leq m(\text{総質量の制約値}), \rho \geq 0 \\ & C: \text{コンプライアンス}, \rho: \text{設計変数} \end{aligned}$$

2.1 使用したソフト

ソフトは Isler_2D²⁾を使用し、そのプログラミング言語はFortranが用いられている。Isler_2Dを用いた理由は初期形状の自由度、ソフトの入手・操作の手軽さからである。このソフトは、密度法を使ったもので、要素分割された連続体の各要素のひずみエネルギーを計算し構造全体のひずみエネルギーが最小になるように計算を繰り返す。荷重を支えるために必要な要素の密度は高く、それ以外を低くなるように更新されていく。このソフトの最適化の質量制約(%)とは、最適化の対象の全設計領域の要素数を基準とした時の、初期形状の要素数と最適化後の要素数の比である。この計算では荷重の大きさは最適化の形状には影響はしない。

2.2 Isler_2Dの精度検証

このソフトの最適化の精度を確認するため、単純ばりと片持ちばりの形状最適化を行う。その結果と西脇³⁾の形状・トポロジー最適化の基礎で行われた単純ばりと片持ちばりの最適化の結果を比較する。図1は比較対象の条件を示し、図2は体積の上限値を全設計領域の50%として計算した結果を示している。

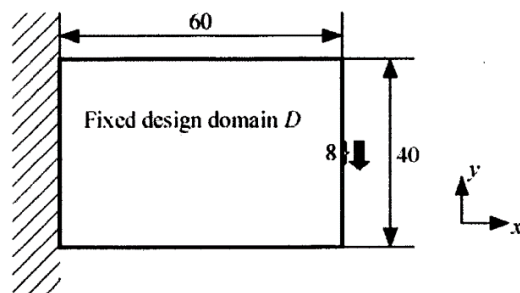


図1 比較対象の条件³⁾

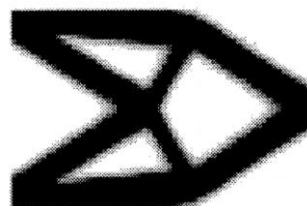


図2 比較対象の最適化後³⁾

Isler_2Dで体積の上限値を比較対象と同様に全設計領域の50%(質量制約50%)で計算した結果を図3に示す。図2と図3を比較すると全体の形状は同じだが内部の部材の本数が異なっている。

そこで質量制約を下げ、40%で行った。その結果を図4に示す。最適化後の形状は上弦材と下弦材に別れ、中央部にトラスが形成される。全体梁長さの中心位置から載荷部に向けて斜めに部材が形成されている。質量制約40%では図2と同様の結果が得られた。

同様に単純梁の最適化を行った結果を図5に示す。従来の研究から得られている単純梁の最適化であるトラスのような結果と同様の形状になった。

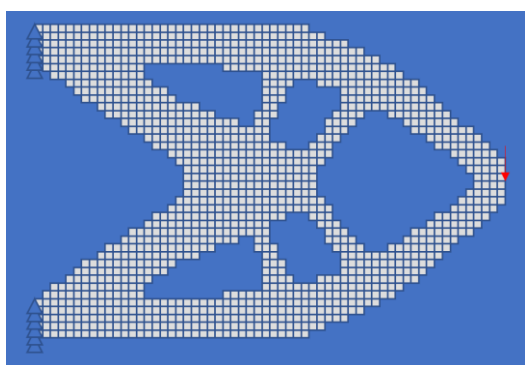


図 3 Isler_2Dの最適化後

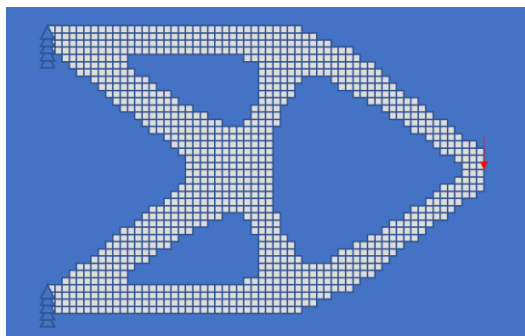


図 4 質量制約40%

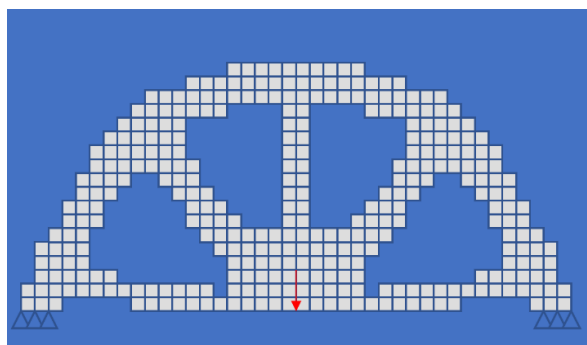


図 5 単純梁の最適化後

3. 最適化

3.1 計算条件

- ・構成要素：正方形の四角形要素
10cm×10cm

- ・材料定数：ヤング率 2060kN/cm²
ポアソン比 0.17

- ・荷重条件：上部に等分布荷重
- ・拘束条件

- ① 等分布荷重載荷部の上部3要素はx方向・y方向の変位を拘束し、非設計対象とする。
- ② 最下部両端の左右それぞれ6要素のx方向・y方向の変位を拘束し、支点とする。

- ・その他の条件：質量制約、フィルターWeight

フィルターWeightとは、最適化の計算時に密度が0.1～0.9の範囲にある要素を、密度を0にして要素を削除するか、1にして最適化後も要素として残すかを判断する基準となる値である。

ここで、拘束条件が左右それぞれ6要素のケースと、底部全体を拘束したケースとでは結果に違いは見られなかった。

3.2 計算ケース

(1) 初期形状による比較

まず、初期の形状の違いから最適化後の形状にどのような影響があるかを調査した。初期形状は1辺が4mの正方形である。このうち上部青色の3段は、載荷部分と考え最適化対象から外した。下部の△は拘束点を示している。図6のような正方形のケースと、図7のような箱形のケー

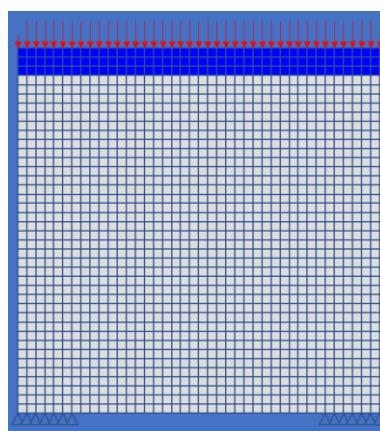


図 6 正方形

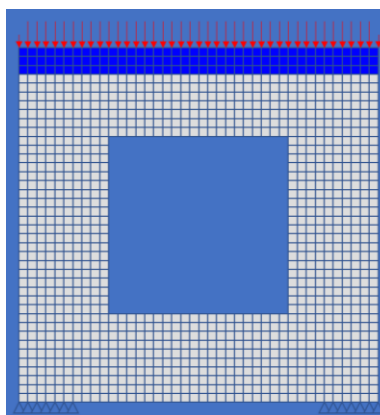


図 7 箱形

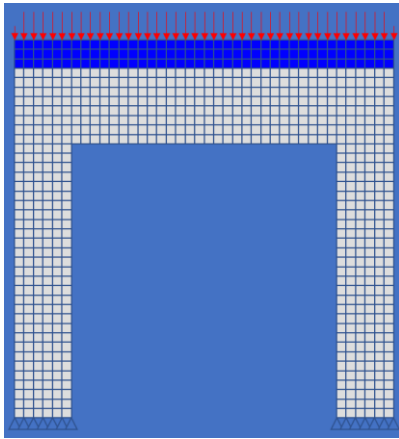


図 8 門形

ス、図8のような門形のケースの3種類をそれぞれ質量制約90%~10%で比較した。これらのケースはどれも全体の大きさは40×40になっている。ボックスカルバートを意識した箱型は初期の内側の大きさはが20×20で中央に配置している。

(2) 縦横比・変位拘束による比較

次に、初期形状の縦横比の違いと変位拘束の位置から最適化後の形状にどのような影響があるかを調査した。

表 1 調査したケース：初期形状と拘束数

		縦横比		
		1 : 1	1 : 2	1 : 3
変位拘束	2か所	図-9	図-10	図-12
	3か所		図-11	図-13
	4か所			図-14

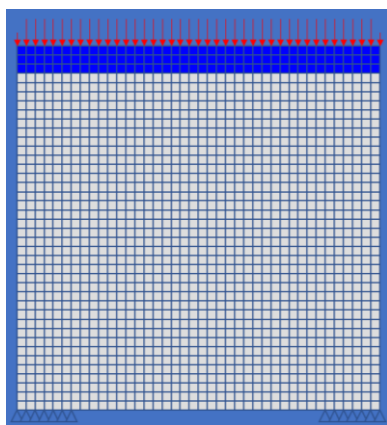


図 9 縦横比1 : 1

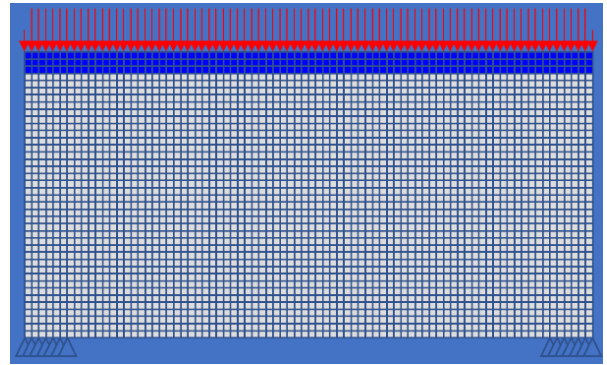


図 10 縦横比1 : 2

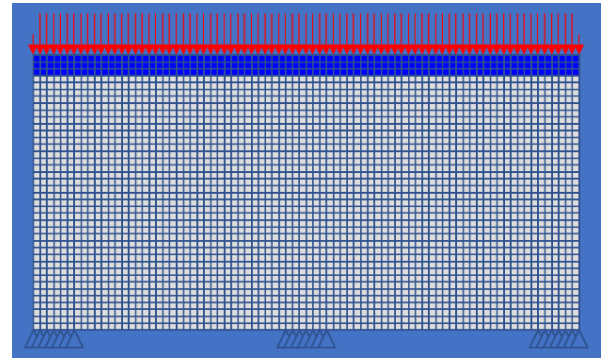


図 11 縦横比1 : 2、変位拘束3か所

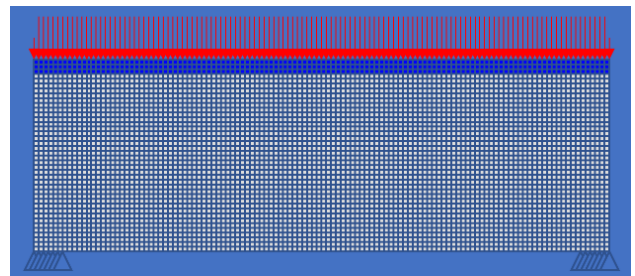


図 12 縦横比1 : 3、変位拘束2か所

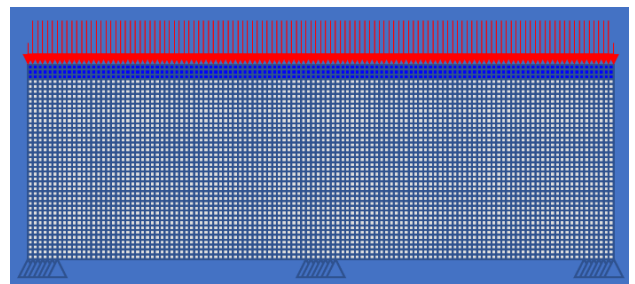


図 13 縦横比1 : 3、変位拘束3か所

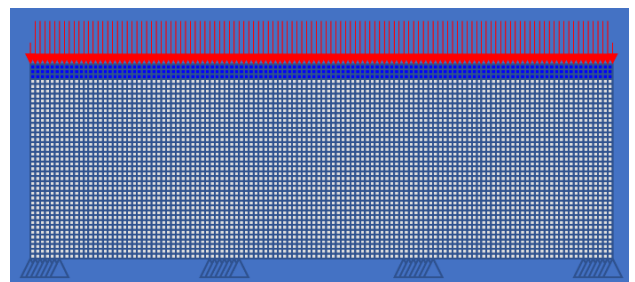


図 14 縦横比1 : 3、変位拘束4か所

3.3 計算結果と考察

(1) 初期形状による比較

初期形状の違いによる最適化後の形状で特徴が分かりやすいケースの、質量制約60%、30%、10%を抜粋する。図16と図17では正方形で最適化された配置が設計領域に入っていない分を補うように上部設計領域に引っ張り材として現れている。その後質量制約30%では図18の正方形はアーチのようになり、同様に図19の箱形も引っ張り材がなくなり正方形と似た形状になった。図20の門形はほか2つのケースよりも橋脚部が細く、引っ張り材も配置されている。

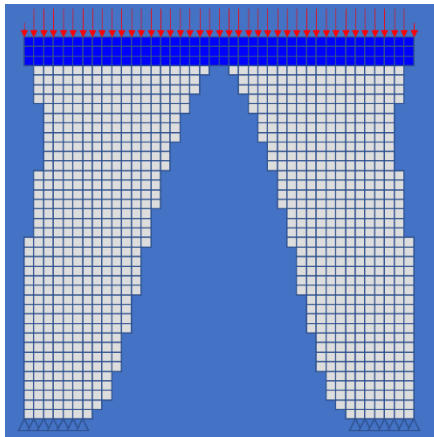


図 15 正方形の質量制約60%

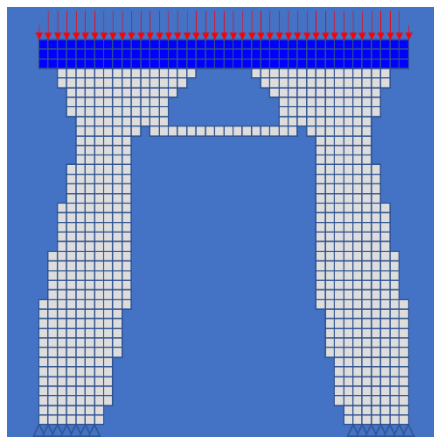


図 16 箱形の質量制約60%

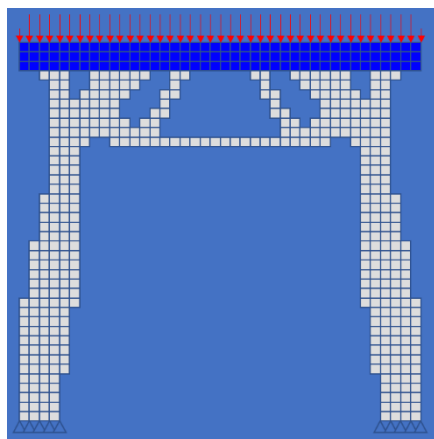


図 17 門形の質量制約60%

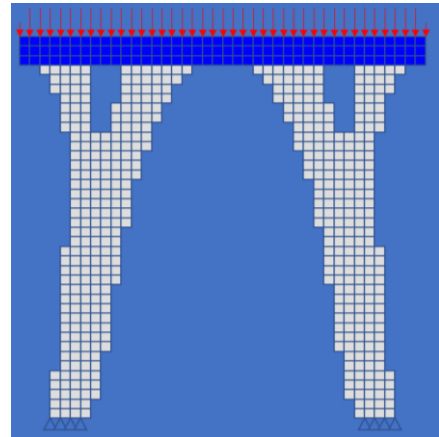


図 18 正方形の質量制約30%

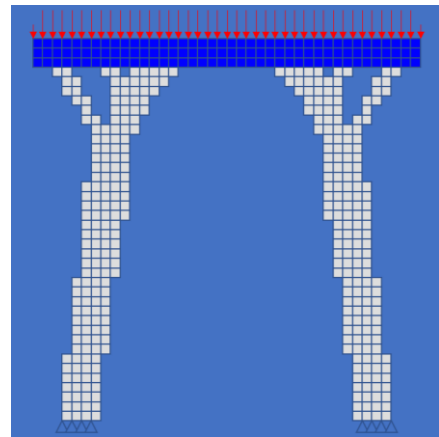


図 19 箱形の質量制約30%

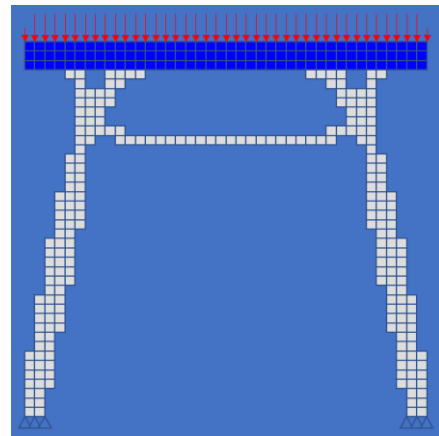


図 20 門形の質量制約30%

最も最適化後の要素数が少ない質量制約10%の図21の正方形はさらに橋脚部が細くなり、Y字の形状になった。図22の箱形も正方形同様に橋脚部が細くなったが、Y字を形成するための要素が正方形よりも足りなかったため1本の棒材として配置されている。図23の門形は引っ張り材がなくなり橋脚部も細くなっている。それぞれのケースで最適化後の要素数が違うのは、質量制約のもとである初期形状の要素数が違うためである。

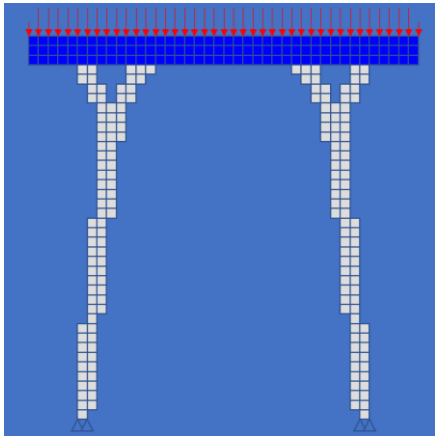


図 21 正方形の質量制約10%

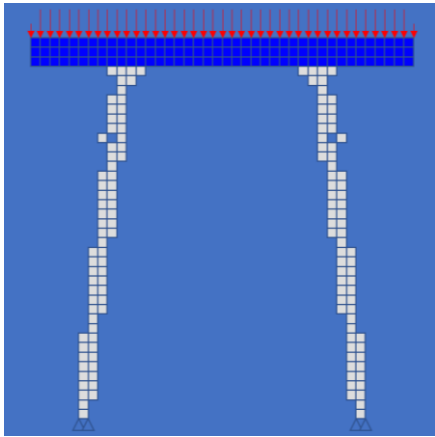


図 22 箱形の質量制約10%

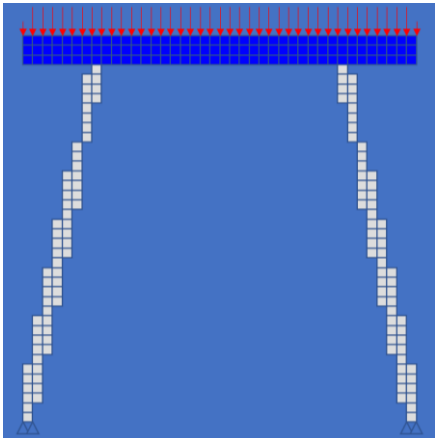


図 23 門形の質量制約10%

表 2 最適化結果

		縦横比		
		1 : 1	1 : 2	1 : 3
変位拘束	2か所	図-24	図-25	図-27
	3か所		図-26	図-28
	4か所			図-29

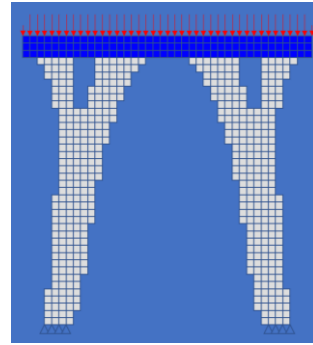


図 24 縦横比1 : 1

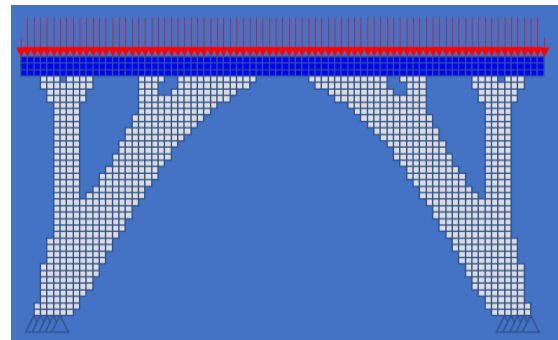


図 25 縦横比1 : 2

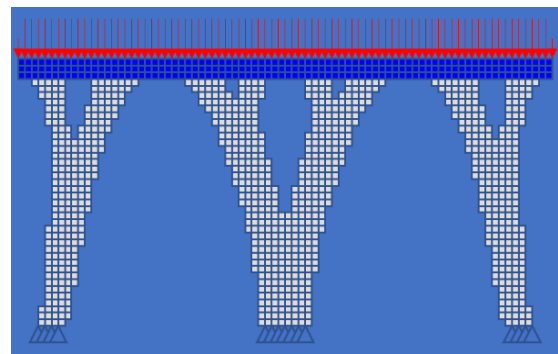


図 26 縦横比1 : 2、変位拘束3か所

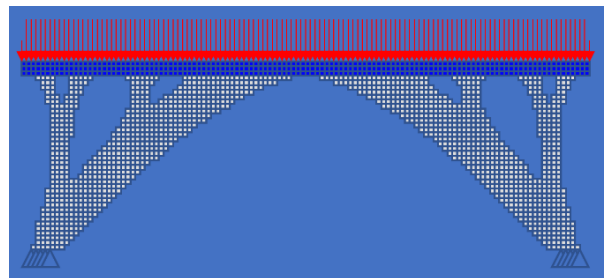


図 27 縦横比1 : 3

(2) 縦横比・変位拘束による比較

図24と図25と図27の縦横比1 : 1、1 : 2、1 : 3を比較すると横幅が変化しているだけで最適化後の要素の配置は変化がなかった。そのほかの変位拘束の数を変化させて最適化を行ったケースもそれぞれ変位拘束をした部分に橋脚が現れることが共通していて、それ以外に変化は見られなかった。

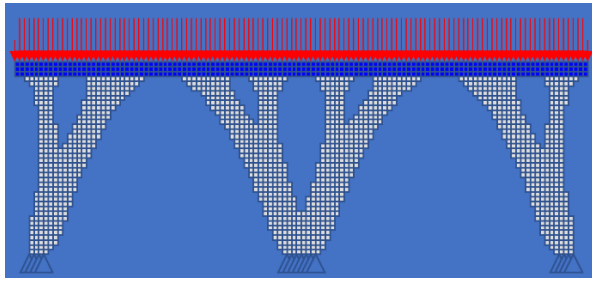


図 28 縦横比1：3、変位拘束3か所

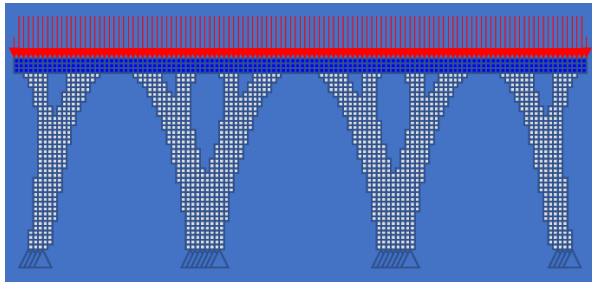


図 29 縦横比1：3、変位拘束4か所

4. 実構造物への適用

本計算で設定された荷重条件、拘束条件、および材料条件は、実構造物を念頭に置いて設定したものであるが、下記のような課題がある。

- (1) 荷重条件では、荷重を受け止める要素を考慮し、初期形状の上部を固定して、最適化の対象には含めていない。この対応は、実構造物を橋梁形式ではなく、一体化構造としたときでも同様な対応が選択されると推測している。一方、盛土部との接合において、両端側面に水平荷重を考慮する必要がある。
- (2) 拘束条件では、拘束部の反力を受け止めるために底版が設置される。底版を含めた最適化のために、底部全面に拘束条件を設けた計算を行ったが、前述の結果と大きな相違はみられなかった。
- (3) 材料条件では、均一の材料として計算しているが、実構造物では、複合材料や複合構造を取り入れている。今後、要素ごとの材料条件の付与について検討が必要である。

4. 結言

本研究は、小規模橋梁における橋梁形式とボックスカルバート形式を、密度法による形状最適化を行って検討したものである。その結果、次のような結論を得た。

- (1) 最適化形状の多くは、ほぼ鉛直に設置される複数の支柱を持つアーチ形状を示した。
- (2) 架設地形の縦横比や支点個数によって形状は異なるものの、アーチ形状であること、ほぼ鉛直な支柱が設けられることは共通であった。

- (3) 計算条件によっては、上部がトラスを形成する梁と両端の支柱で支持された形状を示すことがあった。これは、形状最適化過程の一部で、橋台とトラス桁の組み合わせを最適形状として探索したものと推測している。

上記の結論は、本計算で設定された荷重条件、拘束条件、および材料条件によって得られたものであって、これらの条件が異なれば、自ずから異なる形状が最適形状として得られるものと推測されるが、今後の実構造物への適用の際の形状検討に、有効な知見を提供すると考えている。

謝辞

本研究は、2020年から始まった寒冷地小規模橋梁研究会の研究活動の一環で行われたものです。本研究成果に対し貴重な助言をいただきました会員各位に誠意を表します。また、成果の一部は、公益財団法人青森県建設技術センターからの研究助成を受けたものです。ここに記して、感謝を示します。

参考文献

- 1) 国土交通省：老朽化対策の取り組み
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf>
2021年5月確認
- 2) 藤井大地著（2008）、建築デザインと最適構造、丸善
- 3) 西脇眞二：平成の構造最適化を振り返る～形状最適化・トポロジー最適化の発展～、精密工学会誌、Vol.86、No.1、PP.4-7、2020.7