

## 位相最適化を利用した軽量鋼桁の設計と効果的な設計条件の検討

東京大学 学生会員 石原優一 正会員 長山智則 蘇迪

### 1. はじめに

鋼橋の設計において、上部工を軽量化する重要性は高い。軽量化による材料費低減に加え、下部工に作用する地震荷重と鉛直荷重を低減可能になるなど、軽量化には様々な利点がある。上部工には主桁以外にも床版、二次部材、舗装などの重量が作用するが、鋼床版、軽量PC床版等を利用した構造では主桁の軽量化の影響も大きいといえる。また、構造の最適化設計において、位相最適化<sup>1)</sup>という手法がある。この手法では大きな計算コストがかかることに加え、最適化の結果、空隙を多く有する構造が得られやすいことから施工面で困難が生じ、これまで実橋梁への応用は仮設橋<sup>2)</sup>や補修設計<sup>3)</sup>などを対象に限定的に行われたに過ぎない。一方で、近年では最適化技術の進歩やそれを扱うことのできる汎用ソフトウェアの展開により、実橋梁に対しても応用の可能性が広がっている。

そこで本研究では、活荷重の作用する上道路橋を想定して、位相最適化手法を用いて鋼桁の形状を決定し、それに基づいて主桁部材の配置や断面寸法を工学的に決定することで軽量鋼桁を設計すること、設計領域の高さを変えた最適化桁の設計を繰り返し、最も軽量の構造を明らかにして従来構造と比較検討することを目的とした。

### 2. 二次元領域での位相最適化

二次元領域において設計領域を設定し位相最適化を行う。位相最適化とは、設計領域や荷重条件・境界条件などを前提条件として設定した後、領域に対して材料密度を示す特性関数を置くことで構造設計問題を材料分布問題へと変換し、目的関数および制約条件を与えて最適化計算を解くことで材料密度分布を決定する手法である。この手法を用いて、2次元領域において橋梁を想定した条件下で最適解探索を行った。なお、位相最適化においては通常はひずみエネルギー最小化を目的関数、体積率を制約条件とした最適化が行われる。応力・変形制約下における鋼重軽減問題に適用するため、本研究ではまず、これらの目的関数、制約条件を採用したうえで、鋼材の許容応力度を材料特性の降伏応力に設定し、最大たわみを制約条件に加えた。この最適化を制約条件の体積率を漸減させて繰り返すことで、応力とたわみの制約を考慮して、体積低減を図ることとした。なお、位相最適化には構造最適化ソフトウェア TOSCA を使用した。



図1 2次元領域での最適化結果



図2 スムーズ化した最適化結果



図3 設計領域高さ 1.5m 2.5m 5m での最適化結果



図4 最適化結果に基づく構造設計

鋼道路橋としての利用を想定し、支間長は30m、密度等の材料特性値は鋼材と同一とした。荷重条件は道路橋示方書(H24)に沿って設定し、等分布荷重P2は全域に、等分布荷重P1は橋長にわたり軸方向に移動させながら複数の載荷パターンを考慮した。一般的

キーワード 位相最適化, 橋梁設計

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学橋梁研究室 TEL 03-5841-6097

な桁高の I 桁と比較するため、設計領域高さは 1.5m とした。最適化結果を図 1 に示す。ただし、ここでは材料密度の大小に関わらず最適化後に残った全ての要素が表示されている。これに対し、材料密度が 0.3 以下の要素を取り除き、スムーズ化したものを図 2 に示す。トラス構造の中央部のトラス部材を取り除いた構造が確認できる。

次に、桁高を変化させた場合に最適化結果がどのように変化するか確認するため、設計領域の高さを変更し位相最適化を行った。ここでは 30m の支間長に対して一般的な桁高と考えられる 1.5m、アーチ橋において一般的なライズ比に対応する 5m、それら 2 つの中間の 2.5m の 3 つの場合について最適化結果を比較した (図 3)。桁高を高くするに従いトラスに近い構造からアーチに近い構造に変化する様子が確認できる。

### 3. 最適化結果に基づく軽量鋼桁の構造設計

前項で得た出力結果は 2 次元での構造を考えたものであり、断面形状は考慮されていない。得られた構造に対して工学的解釈を適用して断面形状を設定する。この際、断面形状は板厚 1mm で直線状の鋼管形状とし、断面半径を位相最適化により得られた各部材の厚さを参考に設定した。この時、断面半径は上弦材・下弦材において 20cm から 40cm、斜材においては 6cm から 10cm 程度となった。なお、位相最適化結果には材料密度が低く広範囲に分布する領域が見られ、この領域にも力の伝達機構が必要と考えられるものの、スムーズ化により材料が削除された。そのため工学的解釈を踏まえてトラス構造の斜材に置き換えた。このように部材と断面形状を設定したものが図 4 である。この構造に対して、有限要素解析ソフト Abaqus を用いて応力試験を実施し、許容応力度 140N/mm<sup>2</sup>、鉛直方向最大変位量を支間長の 1/500 である 6cm を設計要求とし、これらの要求を満たし、かつ、道路橋示方書 (H24) に従って座屈も生じないように各部材の断面半径を調整した。その結果、桁の重量は 2 桁合わせて 11.36ton となった。

### 4. 従来の構造との比較及び効果的な設計条件の検討

前項で作成した最適化桁と同様の設計要求に耐える I 桁およびトラス桁を作成し、これらと最適化桁について重量比較を行った。その結果は表 1 の通りとなり、I 桁とトラス桁の両方に対して軽量化できていることが確認できる。また、設計領域の高さ 2.5m、5m のケースにおいても、位相最適化結果に対して構造設計を実施し、その重量を算出した (表 2)。この結果から、1.5m、2.5m、5m の 3 つの桁高の中では 2.5m の際に最も効果的な軽量化設計が可能になることがわかった。

表 1 I 桁およびトラス桁との重量比

	I 桁	トラス桁	最適化桁
重量[ton]	14.9	12.17	11.36
軽量化率	24.80%	6.70%	-

表 2 異なる桁高での最適化桁の重量比較

	1.5m	2.5m	5m
重量[ton]	11.36	8.9	11.59

### 5. 結論

2 次元領域における位相最適化により得られた結果を工学的に判断し薄肉の鋼管部材からなる最適化桁を設計した。位相最適化は、ひずみエネルギー最小化と体積率制約条件を考慮したものであるが、制約条件にたわみ上限値を加え、材料特性として降伏応力を考慮することで、応力・変形制約下における鋼重軽減問題に適用した。設計した断面の桁構造を活荷重・死荷重下での応力、最大変位量に対して Abaqus を用いて照査した。作成した構造が従来の鋼桁構造に対して重量の面で優位性があることを示し、位相最適化を用いた鋼桁設計の有用性を示した。

### 参考文献

- 1) 加藤準治 他 (2013) 『マルチスケルトポロジ最適化手法と解析的感度導出法の提案』日本計算工学会論文集, Paper No.20130022
- 2) 有尾一郎 他 (2010) 最適化構造概念に基づく新しい応急仮設橋のプロトタイプ技術開発』構造工学論文集 Vol.56A
- 3) B.Briseghella et al. (2013) *Application of Topological Optimization to Bridge Design, Journal of Bridge Engineering*, pp. 790-800