

リユース部材を利用した構造最適化による鋼トラス橋設計方法に関する基礎的研究

東京大学 学生会員 ○高橋 大吾

東京大学 正会員 蘇 迪

1. 背景と目的

近年日本において河川橋梁の集中豪雨や津波による被害が頻発傾向にあることが問題となっている。また、2050 年カーボンニュートラルに向けた循環型社会の形成には資源価値の保全と廃棄物発生の最小化が必要とされており、リサイクルでは溶融の工程で二酸化炭素排出や工数が生じることから、さらに高いレベルでの資源循環であるリユースについて着目した。

最近の代表的な事例として道路鋼トラス橋を再利用した白山市の金名橋¹⁾では主構造を変更し、部材を選択的に組み合わせて利用できるというトラス橋の特徴を大きく活かし、設計条件に柔軟に対応した自由な設計を行っているが、リユース部材のトラスの組み合わせに関する方法論は特に確立されていない。本研究ではこのような背景を踏まえ新造部材の併用を考慮した以下の研究目的を設定した。

①橋桁流失の被害を受けた鋼トラス橋や架替鋼トラス橋について調査を行い、実情を整理する。

②位相最適化・節点位置最適化・断面寸法最適化を用いて、リユース部材と新造部材を組み合わせた鋼トラス橋の構造最適化設計手法を提案する。

③鋼トラス橋設計のケーススタディを行い、鋼重、二酸化炭素排出量と工事費の観点から評価する。

2. 鋼トラス橋とリユース部材ストックの現状

リユース部材のストックとなり得る橋桁流失と架替撤去に関して過去 20 年間の鋼トラス橋について調査を行った。調査方法としては、インターネット検索と自治体の発表資料、報告論文、新聞記事、土木学会サイトから情報を入手できた橋梁を対象としてリストを作成し、発生年や管理者、被害経間などを調査した。日本橋梁建設協会の鋼道路橋計画の手引き²⁾によって概算した鋼重と件数を同協会の橋梁年鑑データベース³⁾から入手した新規架設と比較して表 1 にまとめた。

十分なストックがあるとは言えない状況であるが、鋼トラス橋の撤去ペースは件数・鋼重ともに新規架設

を上回っているとともに、他橋種と比較すると鋼トラス橋は極めて少ない架橋件数であった。

表 1 最近 20 年間のリユース部材ストック発生状況
(新規架設は最近 10 年間)

	件数	鋼重
被災による撤去	0.8 件/年	119t/年
架替による撤去	2.7 件/年	866t/年
新規架設	1.9 件/年	571t/年

3. 研究手法と設計フレームワーク

トラス構造の構造最適化には断面寸法最適化・節点位置最適化・位相最適化の 3 つに分類され、Rasmussen⁴⁾はグランドストラクチャ法と呼ばれる位相最適化問題を、離散変数に断面候補を含む混合整数線形計画問題として定式化し、大域的に解く方法を示している。この方法をもとに Brütting⁵⁾は、すべてリユース部材の組み合わせからなるトラス構造の設計方法を提案しており、新規製作したトラス構造物と比較して CO₂ 排出量の減少を示している。本研究では Brütting⁵⁾のフレームワークをもとに図 1 のような設計フレームワークを使用した。

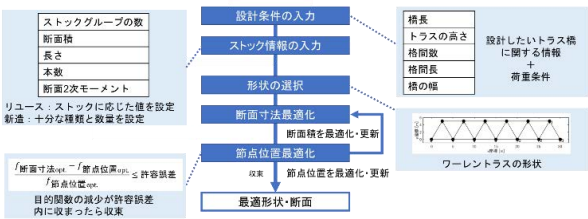


図 1 設計フレームワーク

初期形状から断面寸法最適化と節点位置最適化を繰り返して行い収束するまで断面積と節点位置を更新するというものである。

目的関数には総鋼重や二酸化炭素排出量などの指標を設定し、断面寸法最適化では各線要素にストックの中のどの部材を割り当てるかを表現した割り当て行列と部材伸び量・節点変位が変数となり分枝限定法によって大域的に解かれる。節点位置最適化では断面積は固定値のまま節点移動量が変数となり、内点法によって局所的に解かれる。

キーワード 構造最適化, 鋼トラス橋, リユース部材, 再利用, CO₂ 排出量
連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 本郷キャンパス 工学部 1 号館

文献を参照してヤードでのストック買い取り時点から架設現場の輸送時点までに生じる二酸化炭素排出量原単位と工事費単価を設定して計上した。

4. ケーススタディ

ケーススタディでは図2の橋長32mの4格間単純鋼ワーレントラスの初期形状を用いた。まずストック状況による影響を比較するため表2のようなそれぞれ独立な制約を設けた(a)~(c)の異なるリユース部材ストックによる実行結果を表3に示す。

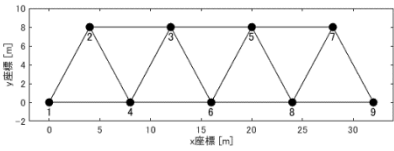


図2 ワーレントラスの初期形状

表2 各ストック状況における最適化結果

ストック	制約
(a)	断面候補不足(50, 100, 200 m ²)
(b)	長さ不足(各 5 m)
(c)	本数不足(各 2 本)

表3 各ストック状況における最適化結果

ストック(a)					
鋼重最小化			CO ₂ 最小化		
鋼重: 7081kg	CO ₂ : 6885kgCO _{2eq}	工事費: 907740 円	鋼重: 9988kg	CO ₂ : 4621kgCO _{2eq}	工事費: 2411800 円
ストック(b)					
鋼重最小化			CO ₂ 最小化		
鋼重: 6988kg	CO ₂ : 6798kgCO _{2eq}	工事費: 895850 円	鋼重: 7310kg	CO ₂ : 7097kgCO _{2eq}	工事費: 937060 円
ストック(c)					
鋼重最小化			CO ₂ 最小化		
鋼重: 7081kg	CO ₂ : 6885kgCO _{2eq}	工事費: 907740 円	鋼重: 6968kg	CO ₂ : 3960kgCO _{2eq}	工事費: 1384500 円

ストック(a)と(c)を使用した場合には、CO₂ 排出量最小化を目的関数に設定するとリユース部材が利用されることがわかる。しかし断面候補が乏しいケースでは必要以上に太い部材を割り当てられたことにより鋼重が増加する結果となり、また本数不足のケースでは新造部材を併用した解が得られた。長さの乏しいケースでは座屈制約の影響を受け、短いリユース部材を利用するような形状は得られなかったと考えられる。次に、構造的な観点から鋼重を低下させることで下部工への

負担を軽減したい一方、CO₂ 排出量の低減を行いたいという 2 目的のバランス関係を可視化するために式(1)のような目的関数を設定して、重み係数を変化させて得られた結果の重み係数ごとの各指標の内訳を図3に示す。ストックには表4に示す条件を設定した。

$$\min (w \times \text{全体鋼重} + (1 - w) \times \text{新造部材鋼重}) \tag{1}$$

表4 設定したリユースストック

断面候補	50, 100, 200 m ²
長さ	10 m
本数	各 2 本

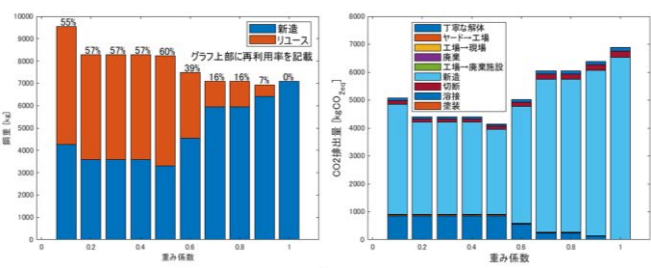


図3 重み係数ごとの指標の内訳

重み係数の増加に伴い再利用率の低下傾向が見られ、離散的な再利用率をもつ解が5つほど得られた(約58, 39, 16, 7, 0%)。再利用率の高い解では解体量の増加の影響は受けず、新造部材量の減少によって低CO₂ 排出量となる。設計者はこれらの複数解から適切なバランスを選択することができる。

5. 結論

架橋数が少なくストック量が僅少であることが明らかとなったが、鋼トラス橋の撤去に関する調査では新設量を撤去量が上回りリユース部材ストックは利用可能である。

また、新造部材を併用したリユース部材の鋼トラス橋設計フレームワークを提案し、ストックの多寡による影響や、再利用率の異なる複数の最適解を得て鋼重とCO₂ 排出量のトレードオフ関係を定量的に評価した。

6. 参考文献

1) 梶川康男, 鋼トラス橋の解体部材を移設再利用する自転車専用歩道橋について, 土木学会第57回年次学術講演会, I-665, 2002. 2) 日本橋梁建設協会, 鋼道路橋計画の手引き, 2008. 3) 日本橋梁建設協会, 橋梁年鑑データベース. 4) M.H. Rasmussen, M. Stolpe, Global optimization of discrete truss topology design problems using a parallel cut-and-branch method, Computers and Structures, Vol.86, pp.1527-1538, 2008. 5) J. Brütting, J. Desruelle, G. Senatore, C. Fivet, Design of Truss Structures Through Reuse, Structures, Vol.18, pp.128-137, 2019.