

トポロジー最適化理論で導かれた仮設ブラケット形状の力学的考察の試み

瀧上工業 正会員 ○松村 寿男, 中村 将章
 ヒノデホールディングス 正会員 北田 幸夫, 長崎 怜
 名古屋大学大学院 正会員 加藤 準治

1. 目的

近年、トポロジー最適化(数理的な最適化理論に基づいたコンピュータ上での構造物の最適化形状の導出)および3Dプリンティング技術の急速な進歩により、鋼構造部材の複雑な形状の実現が可能となってきた。ソフトを使用することで、与えられた条件をもとにコンピュータが自動で最適な形状を導出することが可能だが、その形状に対する力学的な評価を設計者が行う必要がある。筆者らは、これらを活用した橋梁用落橋防止ブラケットの新たな開発を試みている¹⁾。

本稿では、橋梁の保全工事で施工時の仮設支材として適用を想定している仮設ブラケットを対象として、トポロジー最適化²⁾により導かれた形状(以下、最適化形状)に対する力学的考察を試みる。

2. 仮設ブラケットの適用箇所および現行形状

本研究で対象とする仮設ブラケットは、工事期間中の車線数減少を避けるために、図-1 のとおり上下線の間には架設する増設桁を施工中に一時的に仮受けする支材の一部である。現行形状の仮設ブラケットは、鋼板 SM490Y を溶接で組み立てた、図-2 に示す L 型形状である。

3. 仮設ブラケットの最適化形状の導出

仮設ブラケットの最適化形状の導出は、トポロジー最適化解析ソフト「HiramekiWorks(くいんと社製)」を使用した。最適化条件は、剛性は現行形状と同等以上、応力は設計荷重にて弾性領域とした。L型の鉛直部(背面)のボルト位置を固定とし、水平部先端のボルト位置に設計荷重 144kN を与えた。トポロジー最適化理論による解析の結果、図-3 に示すような約 20%軽量化された形状が導かれた。形状から分かるように、力の伝達性状に基づき、強度上重要な部分は肉厚が大きく、力を負担しない部分では材料が削ぎ落とされ、空洞を有している。

4. 最適化形状のフレーム構造による計算モデルの仮定

最適化形状について力学的に考察を試みる。図-4 のように最適化形状の計算モデルをフレーム構造と仮定し、簡易設計が可能な構造とした。側面図からフレーム構造の長さおよび角度を測り図化すると、主要部の部材 ADB と斜材 CD と剛に結合していると仮定した。なお、フレーム下弦材 CD の角度は、 $\angle DBC \cong \angle DCB$ である。詳細は省略するが 2次元はり要素によるフレームの簡易計算で求めた各部材に発生する軸力は、鉛直載荷荷重 P を用いて図-4 のように表すことができる。

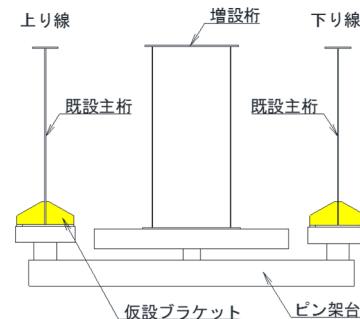


図-1 仮設ブラケット適用箇所

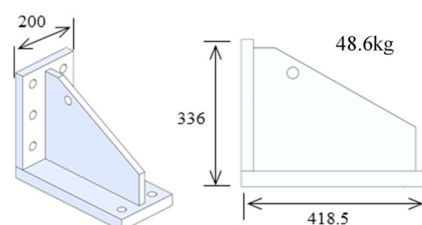


図-2 仮設ブラケット(現行形状)

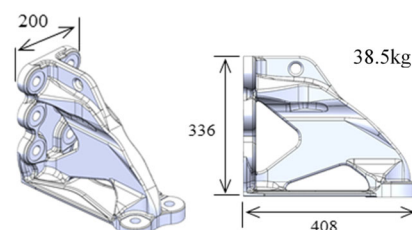


図-3 仮設ブラケット(最適化形状)

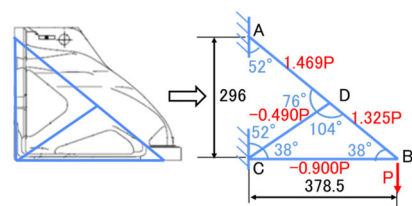


図-4 計算モデル(フレーム構造)

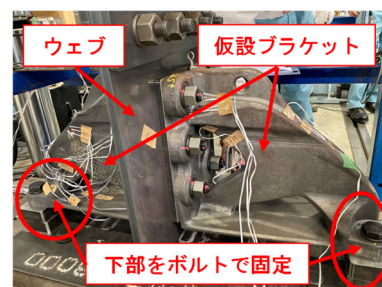


写真-1 試験体の設置状況

5. 実験と仮定したフレーム計算の考察

最適化形状を 3D プリンティング技術により製作し荷重載荷試験を実施した。試験詳細は別報で報告するが、試験体は三次元砂型積層造形機により製作した砂型（鋳型）に熱で溶かした金属を流し込むことで製造した。材質は FCD600（球状黒鉛鋳鉄）（ヤング率：E=170GPa, 0.2%耐力： $\sigma_{0.2\%}=360\text{ N/mm}^2$ ）とした。試験状況を写真-1 に示す。ウェブの両側に仮設ブラケットを設置し、下部をボルトで固定してウェブを鉛直方向へ引っ張ることで荷重を与えた。

設計荷重時（ブラケット一体あたり 144.7kN）の発生ひずみをもとに第 4 章で仮定したトラス計算と比較する。L 型の水平部に生じる軸力に着目すると、設計荷重時の発生ひずみは水平部の上面で $\epsilon_1=-349\mu$ 、下面で $\epsilon_2=-420\mu$ から、上面には $\sigma_1=59.3\text{N/mm}^2$ 、下面には $\sigma_2=71.4\text{N/mm}^2$ の圧縮応力が作用している。上下面ともに圧縮応力が作用しており、応力差が少ないことから、水平部は圧縮の軸力部材と言える。圧縮応力をもとに水平部に生じる軸力を算出する。水平部の E-E 断面の形状を A,B の 2 つの領域に分割した。領域 A に上面の応力、領域 B に下面の応力が作用する仮定で計算すると、E-E 断面に作用する軸力は 142.6kN となる。すなわち、実験結果より、水平部に作用する軸力 P_{BC} は設計荷重 P を用いて $P_{BC}=0.990P$ と表される。第 4 章でフレーム構造と仮定し計算した場合は $P_{BC}=0.90P$ であり、簡易計算とは概ね近い値と考察できる。

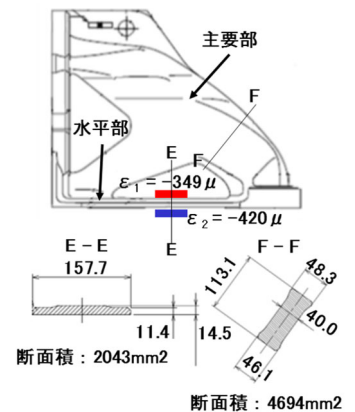


図-5 ひずみ計測位置と断面

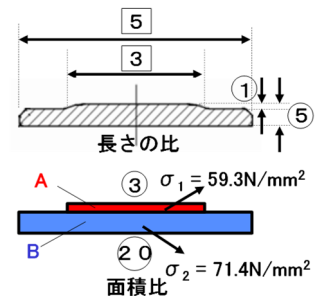


図-6 E-E 断面の領域設定

6. FEM 解析と仮定したフレーム計算の考察

最適化形状の FEM 解析を実施した。鋳鉄のバイリニア型の非線形材料特性を図-7 に示す。境界条件は鉛直部のボルト部を固定とし、水平部先端のボルト部に強制変位を与えることで載荷した。図-8 に最大主応力のコンター図、図-9 に FEM 解析の荷重-変位関係を示す。

強制変位を作用した水平部先端と鉛直部の上段のボルト部を力が伝達するように、フレームの主要構造の軸力部材（以下、主要部）に大きな応力が生じており、斜材には第 4 章の簡易計算と同様に圧縮応力が生じている。トポロジー最適化により、不要な部分は削ぎ落とされているが、斜材と主要部は形状を保持する剛な結合部材として機能していると考察する。すなわち、主要部と斜材の曲げが本機構の重要な機能を果たしていると考えられる。次に、主要部の最小断面である F-F 断面に着目して降伏時の載荷荷重を計算する。

FCD600 材料の 0.2%耐力は 360MPa であることから、断面積を乗ずると降伏時に主要部に作用する軸力は $P_{DB}=1689.8\text{ kN}$ となる。図-4 のフレーム計算より $P_{DB}=1.325P$ なので、載荷荷重は $P=1275.3\text{ kN}$ となる。図-9 に示す FEM 解析の荷重-変位関係より最適化形状の降伏荷重は約 1,000kN であり、フレーム構造の簡易計算は FEM 解析結果とおおむね近い値であることが分かる。

謝辞：本研究は国土交通省の建設技術研究開発助成制度 JPJ000094 の助成（研究代表者：日之出水道機器株式会社 野村和孝）の研究助成金を用いて実施した。ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1)土木学会：トポロジー最適化手法を用いた非溶接橋梁用ブラケットの開発,CS11-05,土木学会全国大会,2022
- 2)西野崇行,加藤準治,京谷孝史,日本計算工学会論文集, Paper No.20190004, 2019

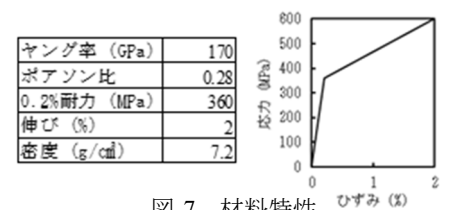


図-7 材料特性

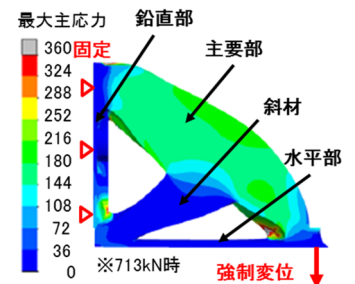


図-8 最大主応力のコンター図

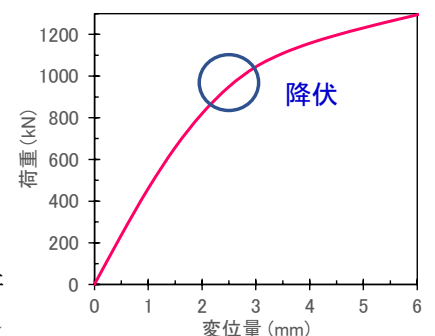


図-9 荷重-変位関係