

構造解析と応答曲面法によるブラケットの設計最適化

中井 太地*¹ 高宮 義弘*²

Optimization of Bracket Design by Structural Analysis and Response Surface Method

Daichi Nakai and Yoshihiro Takamiya

経済性や省エネルギー化の観点から、軽量かつ高強度な構造は社会から常に要求されている。近年の積層造形技術の普及もあり、形状自由度を活かした様々な構造最適化技術が研究されている。本報告では、ブラケットを対象とした寸法最適化を行った。寸法最適化の方法として複数のパターンで構造解析を行い、その解析結果から近似関数を作成する応答曲面法を用いた。得られた最適寸法で造形し強度試験を行ったところ、構造解析と同等の剛性を持つことを確認できた。

1 はじめに

経済性や省エネルギー化の観点から、軽量かつ高強度な構造は社会から常に要求されている。近年の積層造形技術の普及もあり、形状自由度を活かした様々な構造最適化技術が研究されている。構造最適化の方法としては、寸法最適化、形状最適化、トポロジー最適化の3種類に大別される¹⁾。寸法最適化は、構造的な寸法を設計変数として最適化を行う。形状最適化は、構造物の外形状を設計変数として最適化を行う。形状最適化は、例えば孔の数などを変更することはできない点が次のトポロジー最適化と異なる。トポロジー最適化は材料分布を設計変数として最適化を行い、例えば孔の数が増減可能であるなど、高い自由度を持つ。

本報告では、ブラケットを対象として上記3つのうち最も基礎的とされる寸法最適化を行い、その形状を積層造形して実験による検証を行った事例を紹介する。

2 構造解析による最適化

2-1 解析条件

図1, 2に本報告で設定したブラケットと圧縮治具の寸法をそれぞれ示す。解析対象のブラケットは板厚 X_1 、リブ幅 X_2 、リブ高さ X_3 の3つの設計変数を設定した。式(1)に、これらの設計変数がとりうる寸法の範囲を示す(単位 mm)。

$$2 \leq X_1 \leq 5, \quad 0 \leq X_2 \leq 3, \quad 0 \leq X_3 \leq 10 \quad (1)$$

ただし X_1, X_2, X_3 は連続の値ではなく、0.1 mm毎の離散値のみをとるものとした。なお設計変数がとりうる X_1, X_2, X_3 の組み合わせは97,061パターンである($31^2 \times 101$)。

図3に設定した解析条件の模式図を示す。圧縮治具は試験機の動きを想定してz方向のみに動くものとした。また、ブラケットと圧縮治具の間の接触条件は、静止摩擦係数、動摩擦係数ともに0.02に設定した。

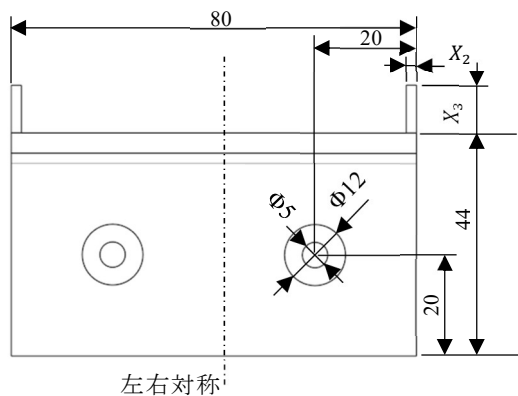


図1 解析対象のブラケット(単位 mm)

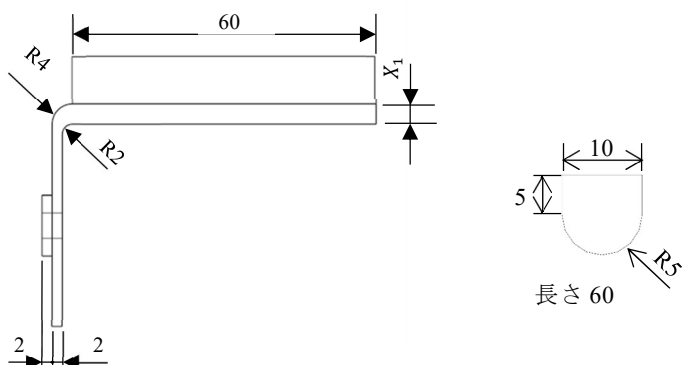


図2 圧縮治具(単位 mm)

*1 機械電子研究所

*2 (公財)福岡県産業・科学技術振興財団

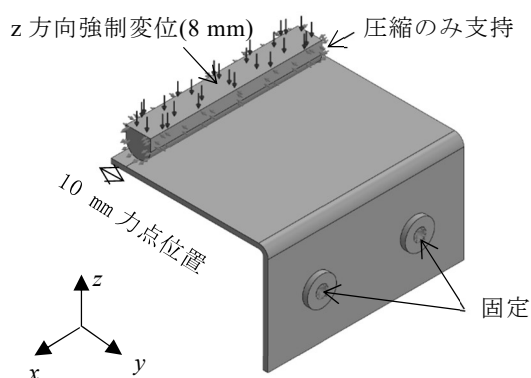


図3 解析条件の模式図

表1に設定したブラケットの材料の物性値を示す。この物性値は、積層造形で一般的に使用される材料であるポリ乳酸(PLA)樹脂を想定して設定した。また圧縮治具はブラケットより十分に硬い材料を想定して、剛体とした。

表1 ブラケットの物性値(解析).

ヤング率 E_a	3,700 MPa
ポアソン比 ν_a	0.33
質量密度 ρ	1,270 kg/m ³

設定した最適化条件を式(2)に示す。

$$\begin{aligned} &\text{minimize } M \\ &\text{subject to } P_z \geq 25, \text{ when } |U_z| = 8 \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 M はブラケットの質量(g)、 P_z は圧縮治具の z 方向の反力(N)、 U_z は圧縮治具の z 方向の変位(mm)である。

式(2)の制約条件は圧縮治具に z 方向の8 mmの強制変位を加えた際に z 方向の反力が25 N以上であることを要求する。換言すると、圧縮治具に25 Nの荷重を加えた時の z 方向の変位が8 mm以内となる制約条件で、ブラケットの質量が最小となる設計変数 X_1 、 X_2 、 X_3 を探索する最適化問題となる。

2-2 応答局面法による最適寸法の探索

先述の通り X_1 、 X_2 、 X_3 の組み合わせは97,061パターンに達し、すべてのパターンの解析を行うのは現実的ではない。そこで、本研究では応答局面法を用いて最適寸法を探索した。

応答局面法は数10から数100パターン程度の解析を行い、解析結果から近似関数を作成する。この近似関数より未解析の結果を予測し、最適な寸法の組み合わせを推薦する手法である²⁾。今回の最適化問題の場合、質量を予測する近似関数 $\widehat{M}(X_1, X_2, X_3)$ と反力を予測する近似関数 $\widehat{P}_z(X_1, X_2, X_3)$ の2種が必要である。

図4に応答局面法による最適化のフロー図を示す。Ansys Mechanical 2022R2を用いて、構造解析及び応答局面法による最適化を行った。図4の(1)では実験計画法として、最適空間充填設計を用いた。最適重点計画は設計パラメータを設計空間全体にわたって均等に分布できることに特徴がある³⁾。また(3)に用いたニューラルネットでは隠れ層を6ノードに設定した。

図5に応答曲面 $\widehat{P}_z$ の例を示す。図5は X_3 の寸法を5 mmに固定して、 X_1 、 X_2 の値を変化させたときの反力を示している。 P_z は X_1 、 X_2 に対して非線形の関係であることが分かる。

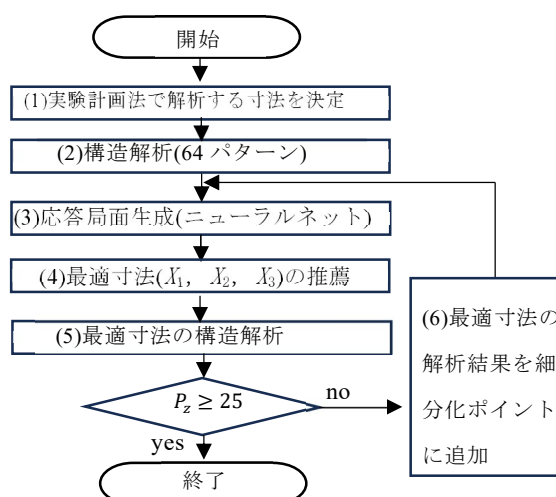


図4 最適化のフロー図

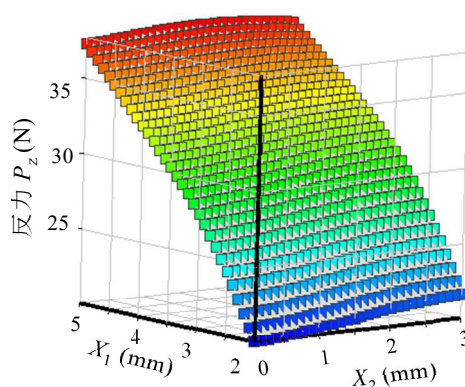


図5 応答曲面 $\widehat{P}_z$ の例($X_3=5$ mm)

応答曲面法による最適化の結果、 x_1 、 x_2 、 x_3 の値はそれぞれ 2.5、0.4、7.8 mm となった。得られた形状としては、 x_2 の値が小さくリブが薄いこと、また x_3 の値は大きくリブが高いことに特徴がある。

図 6 に得られた最適寸法における解析結果を示す。図 3 に示すように y 方向の手前側より 10 mm 奥に圧縮治具を配置しているため、図 6 の y 方向の手前側では 8 mm 以上の変位がある。また、この時の反力 P_z は 25.08 N であった。



図 6 最適寸法での解析結果

3 実験による検証

2 章で得られた最適寸法の有効性を検証することを目的として、強度試験を行った。

3-1 ブラケットの造形

熱溶解積層方式の積層造形装置 PRUSA i3 MK3 (Prusa Research) を用いてブラケットを造形した。造形したブラケットの例を図 7 に示す。積層造形装置の充填率を 100 % に設定し、材料内部に空洞が発生しないようにした。造形に用いた材料は PLA 樹脂とした。

表 2 にひずみゲージを用いて実測した物性を示す。表 2 の値は 3 回の引張試験による平均値である。表 1 に示した解析に用いたヤング率と比較して実験に用いた PLA のヤング率は低く、柔らかい材料であったことがわかる。

ブラケットは前章で得られた最適寸法の他に、比較対象として追加で 8 パターンを造形した。表 3 に造形した寸法を示す。

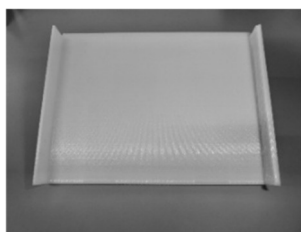


図 7 造形したブラケットの例

表 2 PLA の物性値(実験)

ヤング率 E_e	2,851 MPa
ポアソン比 ν_e	0.336

表 3 造形 CAD 寸法

	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (mm)
最適寸法	2.5	0.4	7.8
Sample 1	2.3	0.5	2
Sample 2	2.3	0.5	8
Sample 3	2.3	1	2
Sample 4	2.3	1	8
Sample 5	2.6	0.5	2
Sample 6	2.6	0.5	8
Sample 7	2.6	1	2
Sample 8	2.6	1	8

3-2 実験方法

3Dプリンタにより造形したブラケットは精密万能試験機 AG-100kNX (株式会社島津製作所) を用いて強度試験を行った。図 8 にブラケットの強度試験の写真を示す。ブラケットは十分に大きなアルミフレームにネジで固定した。圧縮治具には図 2 で示す寸法のものを用いた。図 3 に示すように、圧縮治具とブラケットが接する位置から試験を開始し、圧縮治具を下方方向に移動させた。圧縮治具の試験速度は 3 mm/min とし、圧縮治具に加わる荷重が 25 N になった時の圧縮治具の変位 U_z を測定した。



図 8 ブラケットの強度試験

3-3 実験結果

図 9 に実測したブラケット質量と強度試験の変位の関係を示す。ブラケットの質量が大きくなるほど、荷重 25 N を加えたときの変位 $|U_z|$ が小さくなることがわかる。また全てのブラケットでも閾値に設定した変位

8 mmより大きな値を示した。これは表1と2で示すように解析と実験で材料物性に差があるためと考えられる。

材料物性の差を考慮するために、実験の変位 $|U_z|$ にヤング率の比(E_e/E_a)を乗じた補正変位と実測質量の関係を図10に示す。最適寸法における補正変位は制約条件である8 mmとほぼ同じ値である。図11に25 Nの力を加えたときの解析変位と補正変位の関係を示す。解析の変位のほうが補正変位よりも多少大きい傾向にあるが、概ね一致している。

なお、本解析条件は大変形かつ接触条件を圧縮のみ支持としたため、非線形である。そこで実際にヤング率を2章で解析に用いた E_a から実験で求めた E_e に変更して解析してみたところ、 U_z はほぼ(E_a/E_e)倍になった。すなわち今回の場合は、ヤング率を E_a から E_e に変更した際の非線形性の影響は小さく、実験の変位 $|U_z|$ に(E_e/E_a)を乗じて補正を行うことは解析的にも概ね妥当と考えられる。

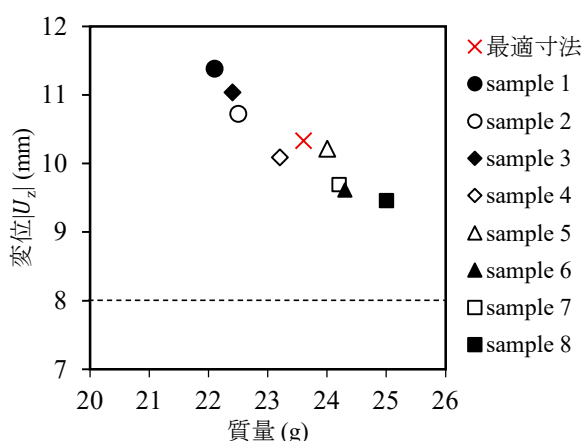


図9 実測質量と強度試験の変位の関係

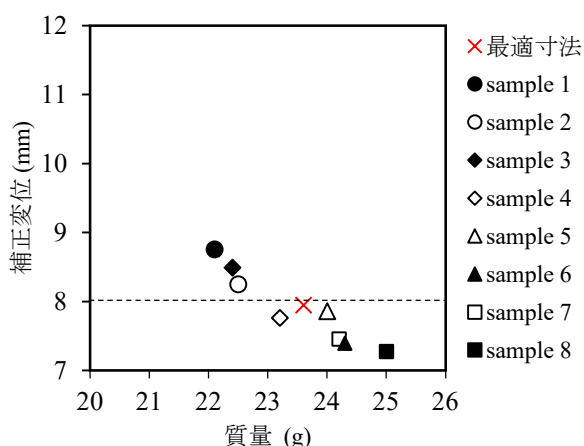


図10 実測質量と補正変位の関係

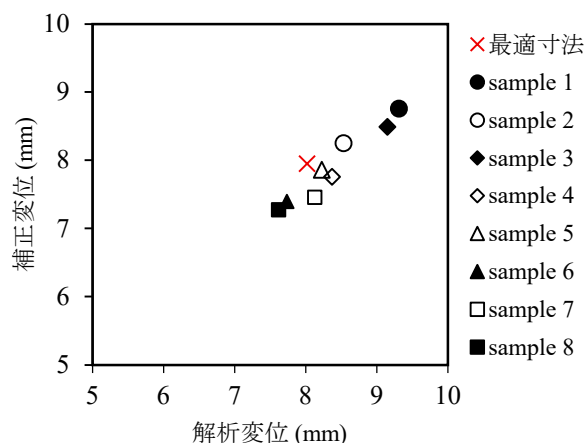


図11 解析変位と補正変位の関係

4 まとめ

ブラケットを対象に応答曲面法を用いた寸法最適化の検討を行った。最適化の結果、リブが薄く高い形状が得られた。解析で得られた最適化形状を積層造形装置で造形して、強度試験を行ったところ、解析で想定されるよりも柔らかいブラケットとなり、解析に設定した制約条件を満たすことができなかった。そこで、解析と試験に使用した材料のヤング率が異なっていたことから、実験結果を補正したところ、制約条件をほぼ満たす結果を得ることができた。

5 謝辞

本研究は九州地方知事会・政策連合「工業系公設試験研究機関の連携」の一環である「九州連携CAE研究会⁴⁾」(デジタル情報を活用した生産工程の高度化に関する研究[R4-R6])における共通課題として実施したものである。助言いただいた研究会のメンバーに、お礼申し上げます。

6 参考文献

- 1) 西脇 眞二, 泉井 一浩, 菊池 昇: トポロジー最適化, pp. 1-24, 丸善出版 (2012)
- 2) 倉本 紘彰: 福岡県工業技術センター研究報告, No. 29, pp. 37-40 (2019)
- 3) ANSYS, Inc.: DesignXplorer ユーザーガイド 2022 R2, p. 79 (2022)
- 4) 泉川 達哉, 田中 徹, 入江 直樹, 土村 将範: 設計工学, Vol. 60, pp. 244-250 (2025)