

複合材料構造体の最適設計による省エネルギー型工作機械の開発

東大工 ○内田悠斗, 柏原翔一, 木崎通, 光石衛 ©杉田直彦

要旨

近年工作機械の省エネルギー化が要求されており, そのためには構造体の静剛性, 動剛性, 熱剛性の向上が必要となる. そこで, 本研究では異方性材料で低熱膨張且つ高剛性である CFRP と, 高振動減衰性であるレジンコンクリートを組み合わせた最適設計をすることで, 特性向上を目指す. 最適設計によりコラム全体モデルについて, 従来鋳鉄モデルと比較して, 静特性, 熱特性, 動特性が 7~50%向上することを確認した.

1. 研究背景

工作機械には高精度加工のために高剛性, 低熱膨張率が, 高速加工を可能にするために, 高減衰性がそれぞれ要求される. また, 工作機械は消費電力が大きく環境への負荷が大きいため, 消費電力を抑えた工作機械の開発が求められる. 図 1 に従来機の, 図 2 に目標とする消費電力をそれぞれ示す. 消費電力の削減は, 移動体の軽量化に加え, 運転準備や加工時間の短縮によっても達成される. そのためには, 固定体が従来機より高剛性, 高減衰性, 低熱膨張率であることが必要となる. そこで, 本研究では, 複合材料の利用, 形状の最適化を検討し, 静的, 熱的, 動的特性の向上を目指す.

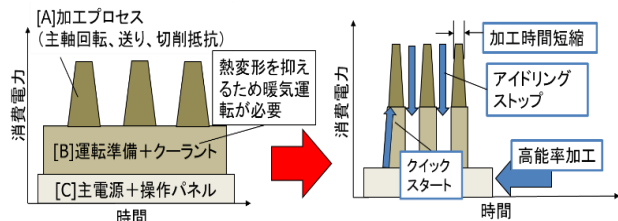


図 1 従来の消費電力

図 2 目標とする消費電力

2. 研究目的

形状を最適化した研究として, 予め位置の決定されている補強用リブについてトポロジー最適化を適用することにより体積一定のもと, コンプライアンスを 21%減少させたものがある[1]. ただ, 薄肉のリブにトポロジー最適化を適用しているが, 構造体全体に対してトポロジー最適化を適用しているわけではない. そこで, 本研究では, 省エネルギー化を目指した高剛性, 高減衰性, 熱的安定性を両立させる同時 5 軸マシニングセンタ固定体全体の構造最適化を研究目的とし, これらの実現のためにトポロジー最適化による形状の最適化に加え, 材料の最適化, CFRP の繊維配向の最適化を行う.

3. 材料の検討

表 1 に各種材料の物性値を示す. 従来, ある程度剛性の高い鋳鉄, 鋼が用いられてきたが, これらの材料は減衰性, 熱的安定性が低い. そこで高剛性, 低熱膨張率の CFRP の適用を検討する. しかし, CFRP は繊維材料で, 繊維が切れると剛性が落ちるため, 複雑な設計には向いていない. そこで, 複雑な形状成形が可能で, かつ高減衰性のレジンコンクリートも用いる.

表 1 材料特性

	鋳鉄	鋼	レジンコンクリート	CFRP
ヤング率 [GPa]	100	210	33	450
対数減衰 $[10^{-3}]$	1~3	0.5	20	23
線膨張係数 $[10^{-6}/K]$	12	11	12	-1.3 ~ 0.4

4. 複合材料最適化手法の提案

構造の最適化手法は寸法最適化, 形状最適化, トポロジー最適化と 3 つに大別される. 本研究は中でも最も自由度が高く, 大きな性能向上が見込めるトポロジー最適化を主に用いる. しかし, トポロジー最適化によって導かれる形状は複雑なため, CFRP には向いていない. そこで, 外殻を CFRP を用いて作成し, 内部構造のレジンコンクリートを静剛性, 動剛性を維持しつつ, 熱変形を最小化するようにトポロジー最適化する.

5. コラムの設計

5.1. 複合材料を用いた角柱ユニットの解析

複合材料を用いた場合の特性の変化を調べるために静解析, 熱解析, 動解析をした. 図 3 に解析モデルを示す. CFRP の繊維配向は Z 方向($\theta = 0^\circ$)とした. 静解析は下面を完全固定とし, 上面に Z 方向 1000N の圧縮荷重をかけたときの上面の Z 方向変位を評価した. 熱解析は構造体全体が 6°C に温度上昇した時の上面の Z 方向変位を評価した. 動解析では拘束条件なしで, 1 次固有振動数を評価した. 図 4 に解析結果を示す. CFRP にレジンコンクリートを詰めると(1)鋼に比べて, 圧縮変位はほぼ変化なく, 1 次固有振動数は上昇した. しかし, 何も詰めていない(2)CFRP に比べて熱変位は大きくなってしまった. これは充填物(レジンコンクリート)の線膨張係数が大きいことによる. そこで他の特性を落とさずに, 熱変位を抑えるレジンコンクリートの詰め方を検討する.

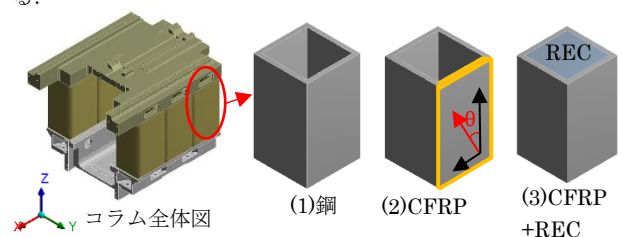


図 3 解析モデル

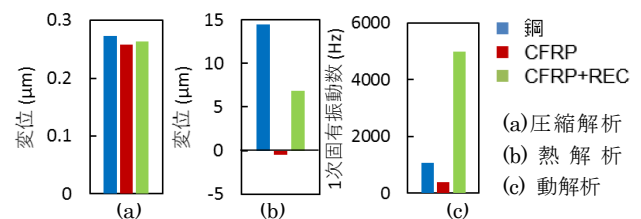


図 4 解析結果

5.2. 角柱ユニットのトポロジー最適化

図 3(3)のモデルに対して, 重量 50%削減のもと, 熱変形を最小化するようにトポロジー最適化した結果, 図 5(a)のようになった. ただ, 一般にレジンコンクリートに空洞構造を作ることは困難な

ため、図 5(b)のように 3D プリントで作った構造をレジコンクリートに埋め込むことで空洞構造を実現した(図 5(c)). これらのモデルに対して 5.1 節と同様の解析を実施し、最適化前のモデルと比較した結果を図.6 に示す. 作成可能モデルは最適化前と比べて、圧縮変位、1 次固有振動数はほとんど変わらずに、熱変位を 69% 減少させることができた.

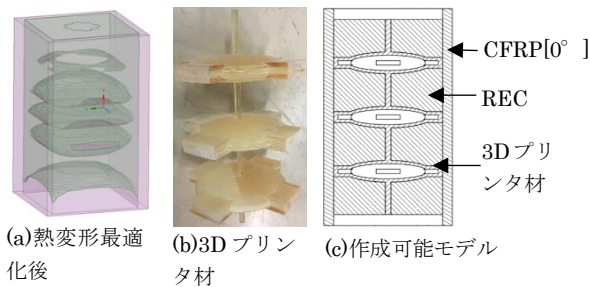


図 5 トポロジー最適化形状と作成可能モデル

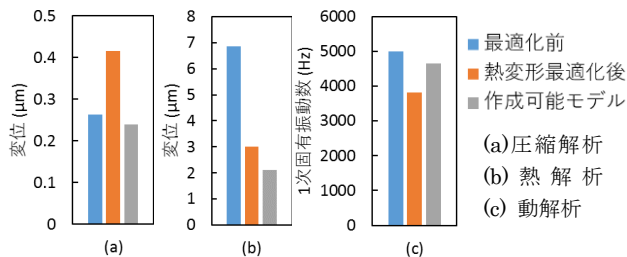


図 6 熱変形最適化後、作成可能モデルの特性

5.3. コラム全体モデルでの解析

角柱モデル単体で CFRP の繊維配向を最適化した結果、 $[0^\circ]$ 配向の特性が総合的に良いことが分かった. そこで、図 7(2)を提案モデルとして解析し、図 7(1)の従来モデルと比較した結果を図.8 に示す. 静解析として、X,Y,Z 方向に主軸先端部に 1000 N のリモート荷重をかけて X 軸スライダ締結部の荷重方向最大変位を評価した. 熱解析ではベッド締結部 8 箇所固定とし、温度を 6°C 上昇させた時の X 軸スライダ締結部の Z 方向最大変位を評価した. 動解析では拘束なしで、固有振動数を評価した. 解析結果を図 8 に示す. X 方向変位は 45%, Y 方向変位は 35%, Z 方向変位は 10%, 熱変位は 50%それぞれ減少し、1 次固有振動数は 7%増加した.

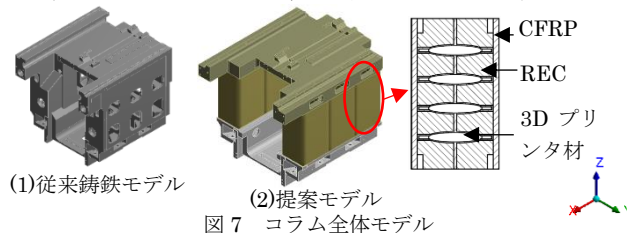


図 7 コラム全体モデル

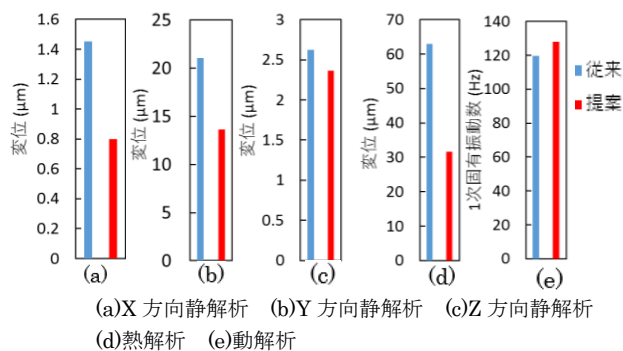


図 8 提案モデルの特性

6. 解析妥当性評価のための実験

図 9 に示すモデルでハンマリング試験を実施した. 剛性の低い紐でつるし、ハンマーで加振して加速度応答を測定した. 実験結

果を図 10 に、解析と比較を図 11 にそれぞれ示す. (3)(4)のようにレジコンクリートを詰めたモデルは(1)鋼に比べて 1 次固有振動数が約 7 倍高いことが分かる. また、鋼に比べ、CFRP やレジコンクリートを適用した場合の減衰性の高さが伺える. さらに、(3)(4)を見ると、レジコンクリートを空洞にしても 1 次固有振動数の減少量は 10%程度に抑えられることが分かった. さらに、それぞれ解析と実測の誤差は 10%以内に収まることが分かった.

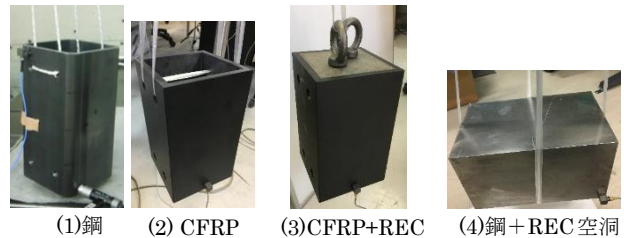


図 9 実験の様子

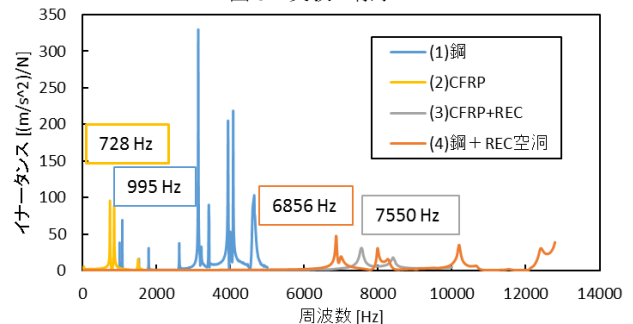


図 10 加速度応答

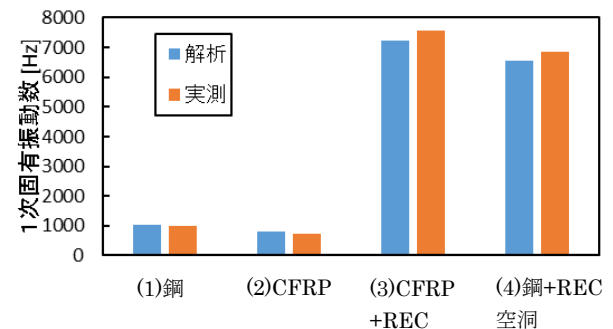


図 11 解析と実測の比較

7. まとめと今後の展望

複合材料の特徴を踏まえた、最適化手法を適用して、コラム全体モデルについて、従来鋳鉄モデルと比較して X 方向変位は 45%, Y 方向変位は 35%, Z 方向変位は 10%, 熱変位は 50%それぞれ減少し、1 次固有振動数は 7%増加したことを確認した. 本研究ではコラムを角柱ユニットに分けて設計したが、全体モデルでの拘束条件、荷重条件を考慮して角柱ユニット単体の条件を決定したわけではない. 今後、その部分を検討し、設計に組み込むことで全体モデルでのさらなる特性の向上が見込める.

参考文献

[1] 劉陽, 下田昌利, "薄板構造における補強リブの自由境界形状の最適設計手法." 日本機械学会論文集 A 編 79.801 (2013): 644-656.