

# 建設 3D プリントに向けた連続なマイクロ構造を求める最適設計手法の開発

名古屋大学 学生会員 ○松井 聖圭  
 名古屋大学 正会員 干場 大也  
 名古屋大学 正会員 加藤 準治

## 1. はじめに

近年、構造物の軽量化・高寿命化を期待して、非鉄筋コンクリートの利用が広がっている。一方、建設 3D プリント技術の発展により、コンクリートや金属、FRP といった材料で、複雑な形状を造形可能になりつつある。そこで、本研究では次世代の構造材料として、コンクリートの補強材に形状を最適設計し、積層造形した CFRP を使用することを考える。これが実現すれば、非鉄筋コンクリートの利点に加え、自動造形による省人化、さらに最適設計による力学的性能の向上が期待できる。

周期的なユニットセルにおける補強材形状の最適化は、マルチスケルトポロジ最適化手法 [1] によって可能となる。しかし、複数のマイクロ構造を想定した場合、異なるマイクロ構造の境界面の連続性が問題となる。そこで本研究では、連続なマイクロ構造を求める新しい最適設計手法を開発、提案する。

## 2. マクロ剛性最大化を目的としたマイクロ構造のトポロジー最適化問題

マイクロ周期構造の最適な材料配置によりマクロ構造の剛性を最大化するため、本研究では以下のように最適化問題を設定した。

$$\text{minimize } f(\mathbf{s}) = - \int_{\Omega} \boldsymbol{\Sigma} : \mathbf{E} \, d\Omega \quad (1)$$

$$\text{subject to } h(\mathbf{s}) = \int_Y s_i \, dY - \hat{V} = 0 \quad (2)$$

$$0 \leq s_i \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{s}$  はマイクロ構造の形状を与える設計変数ベクトル（要素内密度）であり、 $\boldsymbol{\Sigma}$  および  $\mathbf{E}$  はマクロ領域  $\Omega$  に分布するマクロ応力およびマクロひずみである。また、 $\hat{V}$  はマイクロ領域  $Y$  内における使用材料体積の制約値である。目的関数  $f(\mathbf{s})$  はマクロ構造のコンプライアンス最小化を意味し、制約関数  $h(\mathbf{s})$  はマイクロ構造の材料体積制約を意味する。

マクロ応力  $\boldsymbol{\Sigma}$  は分離型マルチスケール解析手法を

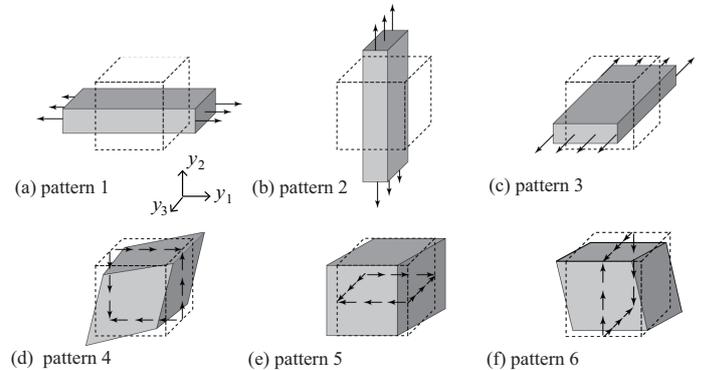
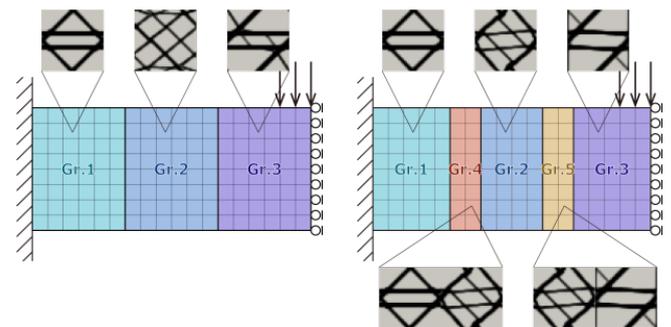


図-1 数値材料試験で与えるユニットセルの変形パターン



(a) 接合面グループ無し (b) 接合面グループ有り

図-2 2次元問題における接合面グループの概念

用いて次式で計算する。

$$\boldsymbol{\Sigma} = \mathbb{C}^H : \mathbf{E} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbb{C}^H$  は均質化剛性テンソルであり、マイクロ構造を持つユニットセルに図-1 に示すそれぞれの変形パターンを与えた計算結果から求められる（数値材料試験）。

## 3. 分離型マルチスケール解析手法に基づく接合面ユニットセル導入の提案

前節で設定したマルチスケルトポロジ最適化問題において、マクロ構造領域を複数のグループに分割してそれぞれ別のマイクロ構造を設定すると、異なるマイクロ構造の間に不連続な接合面を生じるといった問題が

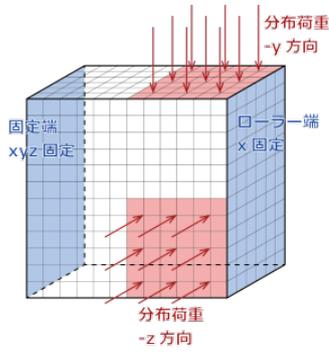
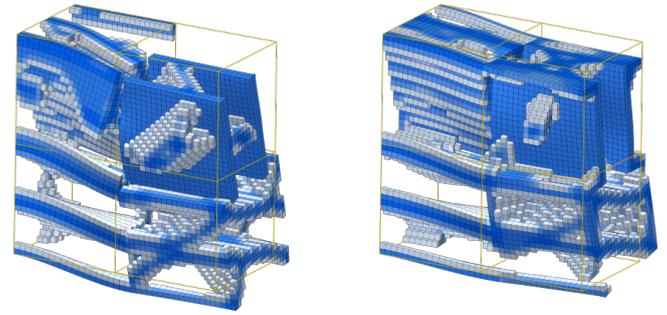
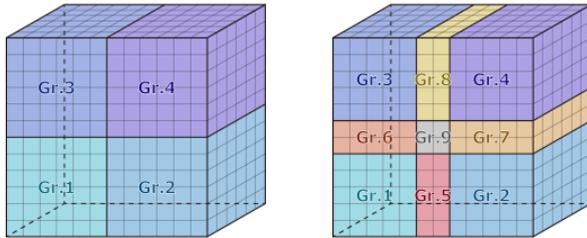


図-3 最適化計算の境界条件



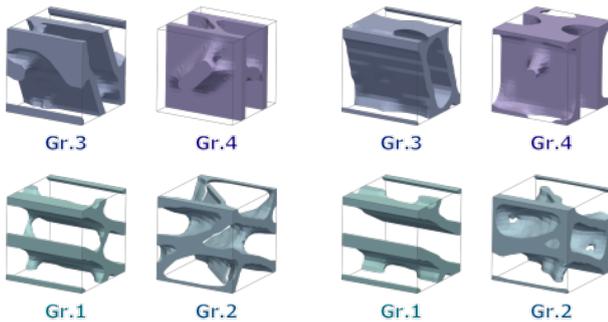
(a) 接合面グループ無し (b) 接合面グループ有り

図-6 構造解析結果



(a) 接合面グループ無し (b) 接合面グループ有り

図-4 マクロ構造領域のグループ分割



(a) 接合面グループ無し (b) 接合面グループ有り

図-5 最適化結果

ある。これは、均質化法によりマイクロ構造由来の力学性能は均質体の剛性に置き換えられ、マクロ境界値問題において連続とみなされるためである。

そこで本研究では、連続なマイクロ構造を求めるために、図-2のように従来のグループの界面付近に新たに接合面グループを設定する。また、接合面グループの均質化剛性  $C^H$  の計算には隣接するマイクロ構造を繋げた直方体のユニットセルを用いるものとする。これにより、仮に従来のグループのマイクロ構造が不連続だった場合、それらを繋いだ接合面グループのマイクロ構造も不連続になり、数値材料試験から計算される均質化剛性  $C^H$  が低下することになる。このように、マイクロ構造同士の連続性を考慮した本来の剛性をマクロ構造

解析に反映させることで、不連続な接合面を抑制した最適化結果が期待できる。

#### 4. 最適化数値計算例

直方体構造物に対する最適化数値計算例を紹介する。ここでは、連続性を考慮しない通常的手法と、連続性を考慮して接合面グループを導入した本手法の2つの場合を比較する。図-3は解析の際の境界条件であり、2箇所に分布荷重を作用させた。また、図-4は2つの場合のグループ分割を示している。

最適計算の結果、図-5に示すマイクロ構造が得られた。さらに、得られた4つのマイクロ構造を並べて最適計算の際と同様に荷重を作用させて構造解析を行った。構造解析の結果、図-6に示す変形図が得られ、本手法を用いた連続なマイクロ構造のほうが境界面における変形が小さくなっていることが分かる。

#### 5. 結論

本研究において、連続なマイクロ構造を求めるトポロジー最適設計手法を提案した。そして、接合面グループの有無による2つの場合の最適計算結果について構造解析を行い、提案手法がマイクロ構造の連続化に効果があることを確かめた。

#### 参考文献

- [1] Daishun YACHI, Junji KATO, Shinsuke TAKASE, Kenjiro TERADA, Takashi KYOYA : Analytical sensitivity analysis for decoupling multi-scale topology optimization of composites, *Transactions of JSCES*, 2013, 20130022, 2013.