周期的な内部補強構造を考慮した非鉄筋コンクリートの均質化および最適設計法

名古屋大学　学生会員　○松井　聖圭
東北大学　正会員　鎌田　浩基
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まっている．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最適な形状に積層造形した 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．

周期的なミクロ構造における補強材形状の最適化は，マルチスケールトポロジー最適化手法（Katoら，2014）によって可能となる．しかし，複数のミクロ構造を想定した場合，異なるミクロ構造の境界面の連続性が問題となる．先行研究では，境界面の連続性を幾何的に制約する手法や，後処理として境界面に新たなユニットセルを内挿する手法が提案されているが，境界面の力学的挙動を考慮していない．そこで本研究では，力学的に連続な境界面を持つミクロ構造を求める新しい最適設計法を提案する．加えて，非線形問題に適した特殊な均質化手法の導入について検討する．

２．均質化法に基づく分離型マルチスケール解析手法

本研究では，ミクロ境界値問題とマクロ境界値問題を別々に解く分離型マルチスケール解析手法を用いる．これは周期的なミクロ構造を持つ非均質体を等価な均質体に置き換えて解析するものであり，均質体の材料剛性（均質化剛性 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{H}}$）を数値材料試験により計算する．

数値材料試験では，まず，ユニットセルを供試体として各方向の単位ひずみ $\boldsymbol{E}$ を与える．次に，ミクロ境界値問題を解くことで単位ひずみを与えた際のミクロ応力を求め，積分操作によりマクロ応力 $\boldsymbol{\Sigma}$ を計算する．そして，以下に示すマクロ構成則から均質化剛性 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{H}}$ を計算する．

$$\boldsymbol{\Sigma} = \boldsymbol{C}^{\mathrm{H}} : \boldsymbol{E} \tag{1}$$

３．マクロ剛性最大化を目的としたミクロ構造のトポロジー最適化問題

周期的なミクロ構造における最適な材料配置によって，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．

ここで，設計変数ベクトル $\boldsymbol{s}$ は各ミクロ要素に設定された材料密度であり，これによりユニットセルの材料配置を定める．目的関数 $f(\boldsymbol{s})$は，マクロ領域 Ω に分布するマクロ外力 $\boldsymbol{F}$ およびマクロ変位 $\boldsymbol{d}$ の内積で計算されるひずみエネルギーである．制約関数 $g(\boldsymbol{s})$は，ミクロ領域 $\boldsymbol{Y}$ における材料体積制約であり，V は所与の材料体積の制約値である．

$$\text{minimize} \quad f(\boldsymbol{s}) = \frac{1}{2}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{d} \tag{2}$$

$$\text{subject to} \quad g(\boldsymbol{s}) = \int_{Y} s_i \mathrm{d}Y - V \leqq 0 \tag{3}$$

$$0 \leqq s_i \leqq 1 \qquad i = 1,2,\ldots,N \tag{4}$$

キーワード　トポロジー最適化，均質化法，数値材料試験
連絡先　〒464-8603　愛知県名古屋市不老町　工学研究科土木工学専攻加藤研究室　ＴＥＬ052-789-3732

© Japan Society of Civil Engineers

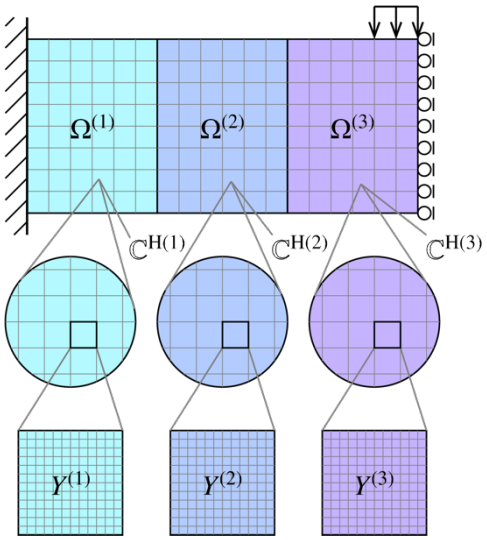

図1　従来手法における領域分割

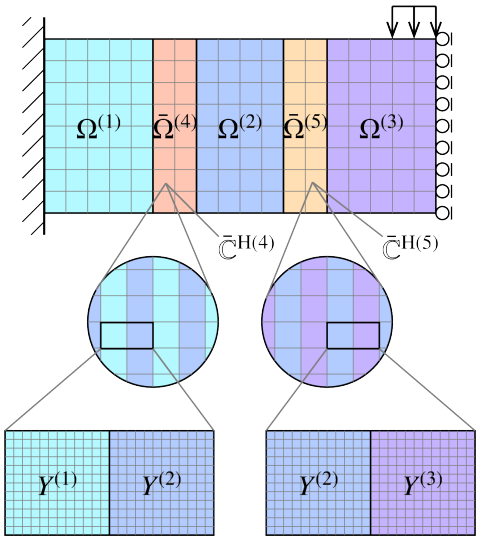

図2　提案手法における領域分割

4. 境界面の剛性を反映した接続領域の導入

前節で設定したマルチスケールトポロジー最適化問題において，図1のようにマクロ構造を複数の領域に分割し，それぞれ別のミクロ構造を設定すると，異なるミクロ構造間に不連続な境界面を生じるという問題がある．これは，均質化法によりミクロ構造由来の力学性能は均質化剛性$\boldsymbol{C}^{\mathrm{H}}$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，連続なミクロ構造を求めるため，図2のように境界面付近に新たに接続領域と呼ばれる領域を導入する．また，接続領域のミクロ構造には，隣接する領域のユニットセルを繋げた長方形または直方体のユニットセルを設定する．これにより，仮に従来の領域のミクロ構造が不連続だった場合，それらを繋いだ接続領域のミ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$\boldsymbol{C}^{\mathrm{H}}$が低下することになる．このように，ミクロ構造の連続性を考慮した境界面の剛性を接続領域に反映させることで，不連続な境界面を抑制した最適化結果が期待できる．

一方，領域分割数の増加に伴って計算コストが大幅に増加するという課題がある．例えば，3次元問題において各軸方向にそれぞれ2分割して8個の領域を設定した場合，新たに19個の接続領域が導入され，計27個ものユニットセルに数値材料試験を行うことになる．そのため，非線形材料を対象にした最適化問題に，提案手法をそのまま適用することは計算コストの点から現実的でないと考えられる．そこで，計算コストの低減を目的に，高速フーリエ変換（FFT）に基づく均質化手法（MoulinceとSuquet, 1998）の最適化問題への応用についても合わせて検討する．

5. まとめ

本研究において，力学的に連続なミクロ構造を求めるトポロジー最適設計法を提案した．また，提案手法を非線形材料を対象にした最適化問題に適用するため，FFTに基づく均質化手法の導入について検討した．

参考文献

・J. Kato, D. Yachi, K. Terada, T. Kyoya: Topology optimization of micro-structure for composites applying a decoupling multi-scale analysis, Struct. Multidiscip. Optim., 49(4), pp.595-608, 2014.

・H. Moulinec, P. Suquet: A numerical method for computing the overall response of nonlinear composites with complex microstructure, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 157, pp.64-94, 1998.

© Japan Society of Civil Engineers