

重合メッシュ法を用いた形状最適化による疲労設計

東京大学
東京大学 正会員
法政大学
JFE エンジニアリング
JFE 技研

山東 篤
○鈴木 克幸
大坪 英臣
川畑 篤敬
栗原 康行

1. はじめに

船舶・海洋構造物や鋼製橋梁などの溶接構造物では、繰り返し荷重の作用により溶接部などで疲労損傷が発生することがある。疲労強度の向上は構造物の安全性を高めるとともに、長寿命化およびレス・メンテナンス化に大きく貢献するものと考えられる。このため、疲労強度を改善するための対策として、溶接止端部の形状を溶接部あるいは疲労損傷が発生すると予想される部位に作用する応力が低減されるように工夫する方法が考えられる。従来の疲労対策は「比較強度」の考え方に基づいて経験的に決められることが多い。それに対して最適化技術を用いた疲労対策法の確立によりあらゆる条件下での疲労対策を理論的、客観的に行うことができる。

本稿では溶接継手を含む局部構造に着目して局部形状を疲労強度の観点から最適化し、耐疲労性能に優れた形状を導出する手法の構築を図る。また、同問題に効果的な重合メッシュ法を用いた形状最適化について示す。

2. 重合メッシュ法

重合メッシュ法はグローバルメッシュ、ローカルメッシュと呼ばれる2種類のメッシュを重合して解析する手法である。グローバルメッシュはモデルの全体形状を評価し、ローカルメッシュはグローバルメッシュの領域内の任意の位置に配置することができる。重合メッシュ法により定式化された釣り合い方程式は次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}^G & \mathbf{K}^{GL} \\ \mathbf{K}^{LG} & \mathbf{K}^L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}^G \\ \mathbf{u}^L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}^G \\ \mathbf{f}^L \end{Bmatrix} \quad (1)$$

添字 G, L はグローバルメッシュ、ローカルメッシュに対応する変数であることを表す。 $\mathbf{K}^G, \mathbf{K}^L$ は対応するメッシュの剛性マトリックスであり、 \mathbf{K}^{GL} は両メッシュの連成を表す項である。

3. ローカルメッシュによる形状評価

既往の研究¹⁾により、ローカルメッシュはモデルの局部形状を評価することが可能であることが報告されている。例えば、穴あき板は図1のようなメッシュを重合することによりモデリングすることができる。このとき、グローバルメッシュに穴は必要なく、ローカルメッシュでのみ穴をモデリングすればよい。

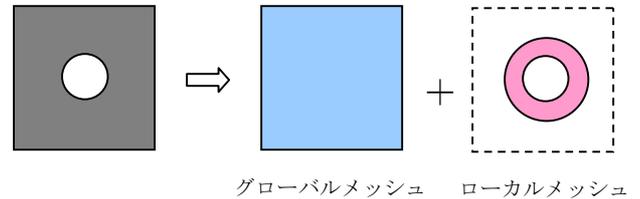


図1 穴あき板のモデリング

モデルの全体形状と局所形状を別のメッシュでモデリングすることで、メッシュ分割が容易となり、さらに規則的なメッシュを用いることができる。また、穴の位置を変更する際にはグローバルメッシュを一切変更することなく、ローカルメッシュを重合する位置のみを変更すればよい。

4. 重合メッシュ法による形状最適化

重合メッシュ法は形状最適化手法のベシスベクトル法と非常に相性がよい。ベシスベクトル法では最適形状を誘導する際の基底となるベシスベクトルを用いて最適形状を導く。設計領域の任意形状 M を初期形状 M_0 とベシスベクトル M_i 、パラメータ α_i ($i=1 \sim n$) を用いて次式のように表す。

$$M = M_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i (M_i - M_0) \quad (2)$$

α_i は定義したベシスベクトルの形状を基準とした倍率であり、設計領域の形状を表現する設計変数となる。同手法を重合メッシュ法によって拡張する。ローカルメッシュの形状をベシスベクトル法によって制御し、最適形状をローカルメッシュによって表現することにより、重合メッシュ法の柔軟性とベシスベクトル法の安定性を持った形状最適化手法となる。さらに、重合メッシュ法は高精度なズーム解析が可能な手法として提案されたものであり、ズーム解析が必要な問題に対しても効果的である。

本手法による設計領域の形状評価を(2)式と同様に定式化を行うと次式のようになる。

$$\begin{aligned} M_G &= M_{G0} \\ M_L &= M_{L0} + \sum_{i=1}^n \alpha_i (M_{Li} - M_{L0}) \end{aligned} \quad (3)$$

より詳細な内容については文献²⁾を参照されたい。

key word 疲労強度, 溶接構造物, 形状最適化, 重合メッシュ法

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL: 03-5841-6553 FAX: 03-3815-8360

5. 疲労強度最大化問題の定式化

構造物の疲労強度は母材部、ガス切断部、溶接部などで異なり、その他荷重条件や継手形式等でも大きく異なる。従って、構造物の各部位ごとに疲労強度の優劣に見合った重みを考慮した目的関数を設定する。

$$\min. [\max. (c_1\sigma_1, c_2\sigma_2, \dots, c_N\sigma_N)] \quad (4)$$

ここで、 σ_i は参照部の主応力であり、 c_i は各部に対応する重み係数である。文献3)では溶接部に対して1.5の重みを設定しているが、重み係数の適切な設定は現在までの研究や実験から多くの場合について可能であると思われる。(4)式は最大値の候補が変更される点において不連続な関数となり、必ずその点において局所解となる。よって、(4)式と同義で、かつ連続な目的関数となるように定式化する。

$$\text{objective function} \quad \min. \beta \quad (5)$$

$$\text{subject to} \quad c_i\sigma_i \leq \beta \quad (6)$$

上式は(4)式と完全に同義であり、かつ連続な関数である。この式変換は minmax 問題を解く際に一般的に用いられている。

6. 例題

図2に示す鋼床版の部分において、疲労強度を最大化するようなスカラップの形状を導く。このモデルは全体形状に対して最適化を行う領域が非常に局所的であり、FEMによるモデリングは難しい。重合メッシュ法は高精度なズーム解析が可能な手法であるため、このような問題に対して自然なズームを行いながら、局所形状を最適化することができる。

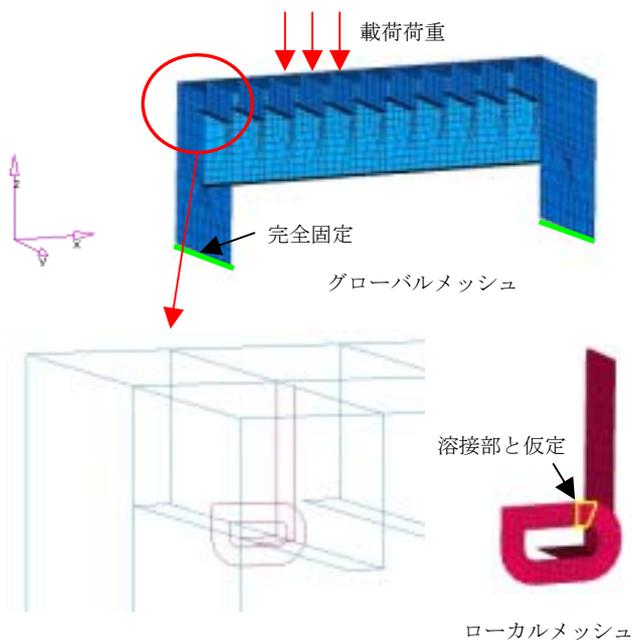


図2 例題

初期形状の主応力分布を図3に示す。応力が集中する箇所が2つあるが、重みを考慮すると溶接部と仮定した要素が第一に最小化の対象となることが分かる。

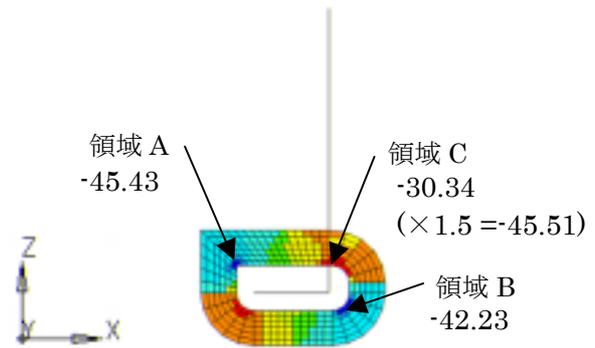


図3 初期形状におけるスカラップ周りの主応力分布
最適形状は図4のようになった。

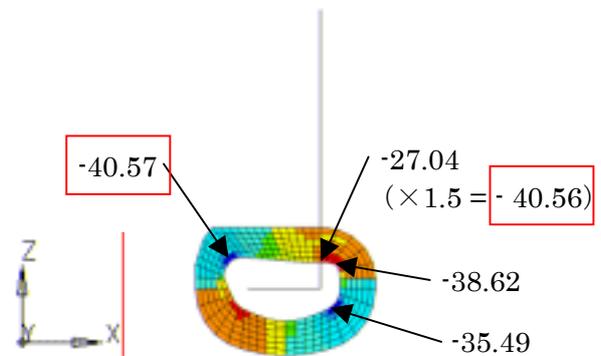


図4 最適形状と主応力分布

スカラップの形状は溶接部である領域Cに応力が集中しないように、溶接部以外に応力が流れるように変形した。また、領域Aに丸みを持たせ応力を分散している。

7. まとめ

本稿では疲労強度の最大化を目的関数とした形状最適化を提案した。また、従来の形状最適化手法では困難なズーム問題や、柔軟な形状変更が可能な重合メッシュ法を用いたベシスベクトル法が効果的であることを示した。

【参考文献】

- 1) メッシュ法による穴あき板の解析に関する一考察, 中住昭吾, 鈴木克幸, 藤井大地, 大坪英臣, 日本計算工学会論文集, 2001.5
- 2) 重合メッシュ法を用いた形状最適化 山東篤, 鈴木克幸, 大坪英臣, 計算工学講演会論文集 Vol.8, pp.315~318, 2003.5
- 3) 溶接継手を含む局部構造の疲労強度の最適化, 伊藤久, 中村哲也, 土木学会, 平成13年度全国大会第56回年次学術講演会, 2001