

多層材料レイアウト最適化手法のロックボルト支保工設計への適用

○ 東北大学工学部 学生員 石井 慶一郎
東北大学大学院 正 員 加藤 準治
東北大学大学院 正 員 京谷 孝史
東北大学大学院 正 員 寺田 賢二郎

1. はじめに

本研究は、地山補強に使用されるロックボルト支保工に対して、有限要素法を用いた構造最適化手法を活用することで、そのロックボルトの最適配置を検討するものである。

ロックボルト支保工は一般に地山深部の強固な地盤に定着され、土圧によって発生する引張力を介して地山全体の崩壊を防ぐものであり、法面の安定やトンネルの代表的な施工法である NATM 工法の地山補強工として古くから知られている。そのロックボルト配置の決定方法については、掘削時に地山の正確なデータが得られないということもあり、地山の大きな特性から経験的に裏付けされた基本配置に頼らざるを得ないのが現状である。

そこで本研究では、多層材料レイアウト最適化という数理的手法を用いて、地山全体の剛性を最大にするロックボルト配置の検討を行った。

2. 最適化問題の設定および解析手順

最適化問題は、一般に目的関数 $f(\hat{s})$ 、制約条件を与える等式制約関数 $h(\hat{s})$ と不等式制約関数 $g(\hat{s})$ で定義づけられる。 $\hat{s}$ は設計変数 s を列に並べたものであり、設計変数ベクトルを意味する。

本研究では、構造全体で使用するロックボルト体積が一定の条件下で地山と支保を含む地山構造物全体の剛性を最大化することを目的とする。なお、本研究では剛性最大化を、予め決められた変位制御点の変位量に対する構造のひずみエネルギー最大化 (具体的には構造解析で得られる荷重-変位曲線下側の面積、または有限要素レベルにおける応力-ひずみ曲線下側の面積を地山構造物全体で積分したものを最大化) するものとして定義した。

以下に本研究における最適化問題を記す。

$$\text{minimize } f(\hat{s}) = - \int_{\Omega} \sigma : \varepsilon \, d\Omega \quad (1)$$

$$\text{subject to } h(\hat{s}) = \int_{\Omega_s} \hat{s}_L \, d\Omega_s - \hat{V} = 0 \quad (2)$$

$$\hat{s}_L \leq \hat{s}_i \leq \hat{s}_U \quad i = 1, \dots, n_s \quad (3)$$

ここで、 σ は Cauchy 応力、 ε は線形ひずみテンソルである。 $\hat{V}$ は予め決められた構造全体のロックボルト体積、 $\hat{s}_L$ と $\hat{s}_U$ は設計変数の下限と上限値、 n_s は設計変数の数を意味する。

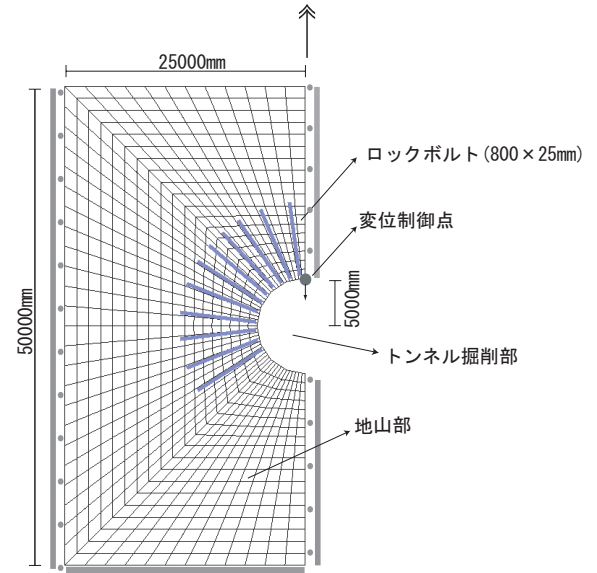


図-1 解析モデル

なお、最適化問題は一般に目的関数を最小化するように設定するため (1) 式では目的関数にマイナスを乗じることで最小化問題に変換している。本研究の最適化アルゴリズムは微分法により行い、数値解析上、安定して最適解を与える、Method of moving asymptotes(MMA)を用いた。

3. 最適化計算例

3.1 解析モデル

本節では、ロックボルトの長さとおさを設計変数として、地山が一様であると仮定した時の、NATM 工法におけるロックボルト配置の最適化を行った。解析モデルは、単一材料からなる地山にロックボルトを図-1のように配置したものであり、有限要素メッシュには4角形8節点要素を使用した。また、ロックボルトは、地山部のメッシュに依存せずにその幾何を表現できる埋め込み要素²⁾と呼ばれる特殊な有限要素を用いた。ただし、ロックボルト表面と地山間のすべりについては簡単のため考慮していない。また、対象性を考慮し片側半分で解析を行った。変位制御点は掘削部の上端にとり、荷重については別途掘削荷重を算出し、その掘削相当荷重を用いた。使用材料はすべて線形材料とし、その材料定数を表-1に記す。最適化前のロックボルト配置については、すべてのロックボルト長が800mm、太さ25mmとなるように設定した。太さの上限については50mm、下限を0mmとした。

表- 1 材料データ

	地山	ロックボルト
ヤング係数 (kN/mm ²)	50	100
ポアソン比	0.25	0.2

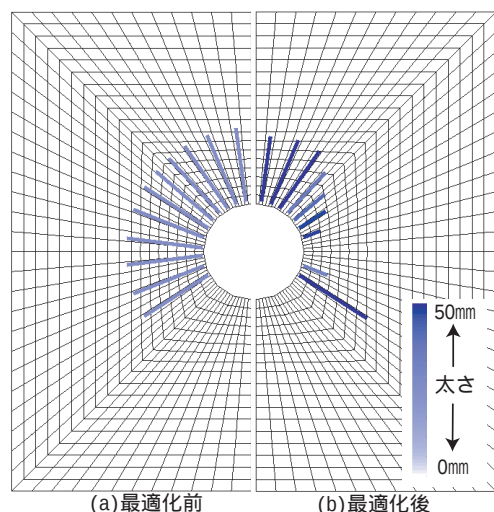


図- 2 ロックボルト配置:(a) 最適化前,(b) 最適化後

3.2 解析結果

図-2, 図-3 は最適化前と後のロックボルト配置 (長さ, 太さ) およびロックボルトの応力を示す. 図-2, 図-3 より最適化を行う前の応力の絶対値が小さいロックボルトは力学的な効果が小さいと判断され, 最適化後には短く, 細くなっているのが分かる. 最適化後に長さ, もしくは太さが 0 となったロックボルトは力学的な役割を果たさず, 無くなったと判断できる.

一方, 応力の絶対値が大きいロックボルトは, 長く, 太くなっているのが分かる. ロックボルト配置が変化したことにより, 目的関数は図-4(a) のように収束して, ひずみエネルギーが最大化されたことから, 図-4(b) の傾きである剛性が大きくなっている.

4. 結論

最適化の結果, 本解析の目的である地山構造全体の剛性最大化を行うことができた. しかし, あまり大きな剛性の増加は見られなかった. これは, 当該解析モデルが線形材料を想定し, またロックボルトの量も地山に比べて少ないことが要因である. しかし, 地山の材料非線形性を考慮した最適化問題においては, 顕著な変化が見られるものと期待できる.

また, 今回の解析の結果, 圧縮領域のロックボルトが引張領域のそれと同等の評価をされていることが分かる. しかし, ロックボルトはそもそも引張力を介して効果を発揮するものであるため, 引張応力のみを考慮した目的関数の定式化を行うことで, より力学的に理にかなったロックボルト配置を決定できると思われる. 今後の課題としては, ロックボルトの長軸方向の引張応力のみを考慮できる手法を確立することにある.

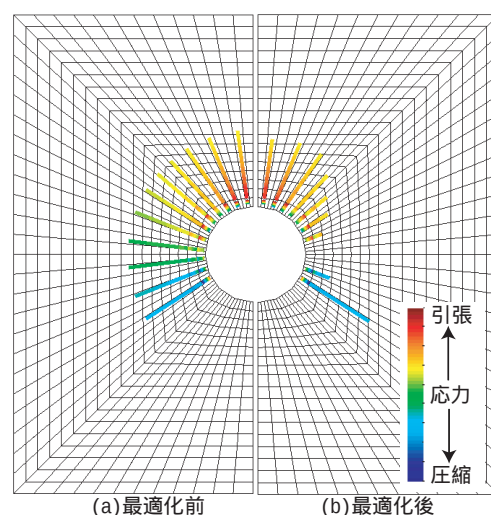


図- 3 ロックボルト応力の変化:(a) 最適化前,(b) 最適化後

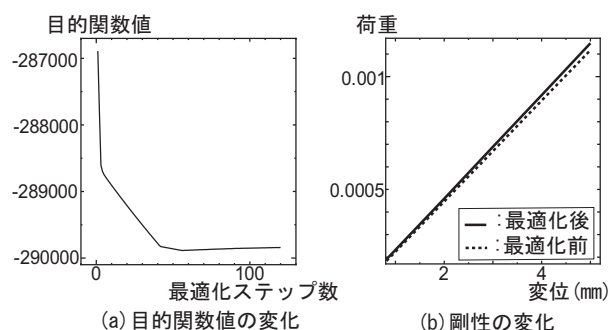


図- 4 目的関数値の変化と剛性の変化

参考文献

- 1) Kato J.: *Material optimization for fiber reinforced composites applying a damage formulation*, Ph.D. dissertation, Institute of Structural Mechanics, University of Stuttgart, Germany, (<http://www.ibb.uni-stuttgart.de/publications/index.html>), 2010.
- 2) Balakrishnan, S., Murray, D.W.: Finite element prediction of reinforced concrete behavior, *Structural Engineering Report*, No. 138, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 1986.