

Ⅲ-44 均質化法に基づくロックボルト打設パターンの最適化

東北大学 学生会員 ○平出 壮司
正会員 京谷 孝史

1. はじめに

本研究は均質化法を用いたトポロジー最適化手法¹⁾の考え方にに基づき、打設間隔と打設角度を設計変数とした最適化手法の確立を目的とする。ロックボルトを用いて岩盤構造物を補強する問題に対して3種類の目的関数を設定し、最適なロックボルト打設パターンを求める計算力学的手法を提案する。

2. 均質化法によるロックボルト打設岩盤のモデル化

設計変数（打設間隔 p 、打設角度 θ ）をパラメータとした岩盤の変形強度特性を示す目的関数の作成方法を述べる。

ロックボルトが打設された岩盤の均質化弾性係数は、次式で表される²⁾。

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(E_{ijkl}(y) - E_{ijpq}(y) \frac{\partial \chi_p^{kl}(y)}{\partial y_q} \right) dy \quad (1)$$

また、様々な方向の巨視応力 Σ を載荷してユニットセル内の応力 σ_{ij}^0 が岩石の破壊基準を超えないような巨視応力点を調べて二次曲面近似すると、次式のような岩盤の巨視的破壊基準が得られる²⁾。

$$G(\Sigma) = \{\Sigma - \Sigma_0\}^T [A] \{\Sigma - \Sigma_0\} \quad (2)$$

式(2)における $G(\Sigma)$ は、破壊基準面上では $G = 1$ であり、破壊基準面から遠ざかるにつれて0に近づくもので、ある点の応力状態の破壊状態への接近度を表す破壊危険度と定義する。

ロックボルトを打設した岩盤モデルには、図-1に示すような一つの不連続面を含むユニットセルを用いる。ロックボルトの打設間隔 p および打設角度 θ に対応する複数のユニットセルモデルを準備し、それぞれに対して得られた均質化弾性係数 E^H 、および式(2)における係数行列 $[A]$ の全ての成分の変化を調べ、打設間隔 p 、打設角度 θ を変数とする近似関数を最小二乗法により求める。そうすれば弾性係数マトリクス $[E^H(p, \theta)]$ および破壊危険度を構成する $[A(p, \theta)]$ を打設間隔 p 、打設角度 θ の二変数関数として表現できる。

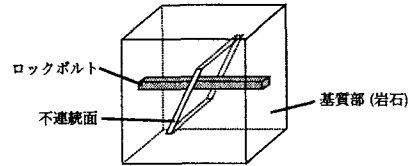


図-1 ユニットセル

3. ロックボルト打設パターンの最適化

(1) グローバルコンプライアンス最小化問題

グローバルコンプライアンスは外力と変位の内積によるスカラー量で定義され、この最小化問題は構造全体の変形を抑えることを意味する。

グローバルコンプライアンス最小化問題はポテンシャルエネルギー最大化問題に置き換えられる(Bendsøe¹⁾)。ポテンシャルエネルギーには均質化弾性係数の関数 $[E^H(p, \theta)]$ が組み込まれ、変形量を最小にする問題³⁾、剛性を最大にする問題として定式化される。制約条件は、ロックボルトの最大使用本数と、設計変数である打設間隔 p 、打設角度 θ に関して現実的な解となるようにそれぞれに上下限の制約を与える。

以上により、問題は次のように定式化できる。

$$\begin{aligned} \text{目的関数: } & \max_{p, \theta} [\Pi(u)] \\ \text{制約条件: } & \int_{\Omega} \frac{1}{p(x)} d\Omega - \frac{\Omega_b}{p_{av}} \leq 0 \\ & p_{\min} \leq p \leq p_{\max} \\ & \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} \end{aligned}$$

この問題におけるラグランジアン $L(p, \theta)$ の停留条件(Kuhn-Tucker 条件)を満たすような解を最適性規準法で求める。

(2) 総破壊危険度最小化問題

破壊危険度関数を用いて、対象構造物全体として破壊する危険性を抑えることを目的とした最適化を行う。破壊危険度を構造物全体で総和したものを総破壊危険度とし、この最小化を目的関数として最適なロックボルト打設間隔および打設角度を算出する。制約条件は前の問題と同じものに設定する。総破壊危険度最小化問題は次のように定式化される。

$$\text{目的関数: } \min_{p, \theta} \left[\int_{\Omega_b} G(p, \theta) d\Omega \right]$$

$$\begin{aligned} \text{制約条件: } & \int_{\Omega} \frac{1}{p(x)} d\Omega - \frac{\Omega_b}{p_{av}} \leq 0 \\ & p_{\min} \leq p \leq p_{\max} \\ & \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} \end{aligned}$$

(3) 偏差ひずみエネルギー最小化問題

岩盤の破壊規準をひずみで表すものとして、限界ひずみが提案されている³⁾。その際、岩盤構造に生じる最大せん断ひずみの分布を求め、破壊時のせん断ひずみと比較するということが行われている。せん断ひずみ分布は、偏差ひずみエネルギーを用いて評価することができる。偏差ひずみを ε' としたとき、偏差ひずみエネルギーを式で表すと次のようになる。

$$U_s = \frac{1}{2} \varepsilon'_{ij} E_{ijkl} (p, \theta) \varepsilon'_{kl}$$

問題は次のように定式化される。

$$\begin{aligned} \text{目的関数: } & \min_{p, \theta} \left[\int_{\Omega_b} U_s(p, \theta) d\Omega \right] \\ \text{制約条件: } & \int_{\Omega} \frac{1}{p(x)} d\Omega - \frac{\Omega_b}{p_{av}} \leq 0 \\ & p_{\min} \leq p \leq p_{\max} \\ & \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} \end{aligned}$$

(4) 解析結果

例として(1)による解析結果を示す。解析対象のトンネルにおける不連続面状況と初期応力、および解析結果を図-2~7に示す。図は左側に打設間隔 p の分布、右側に解析結果を考慮した打設パターンを示している。図から、最適なロックボルトの配置は、初期応力の大きな方向にロックボルトが集まり、分布不連続面に対するロックボルトの打設角度は垂直な方向に近づく。

4. おわりに

本研究は、岩盤とロックボルトの力学的相互作用を定量的に評価し、均質化法を用いたロックボルト打設パターンの最適化解析手法を提案した。この結果、岩盤内に存在する不連続面群や初期応力分布を考慮した合理的なロックボルトの打設間隔および打設角度を得ることができた。

参考文献

- 1) M.P.Bendsøe, N.Kikuchi: Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.71, 197-224, 1988.
- 2) 京谷孝史, 欧陽立珠, 寺田賢二郎: 岩石の力学特性と不連続面画像情報による岩盤の変形強度特性評価, 土木学会論文集, 第631号/III-48, pp.131-150, 1999.
- 3) 桜井春輔: トンネル工事における変位計測結果の評価法, 土木学会論文報告集, 第317号, pp.93-100, 1982.

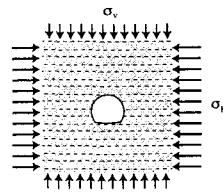


図-2 不連続面群の分布状況(水平方向)と初期応力

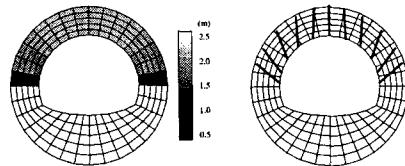


図-3 図-2の断面に対するグローバルコンプライアンス最小化問題による最適打設パターン

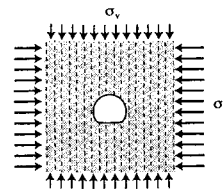


図-4 不連続面群の分布状況(鉛直方向)と初期応力

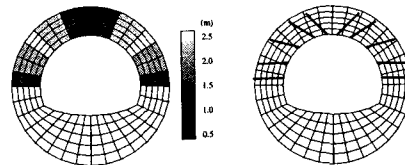


図-5 図-4の断面に対するグローバルコンプライアンス最小化問題による最適打設パターン

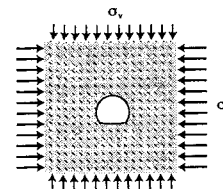


図-6 不連続面群の分布状況(45°方向)と初期応力

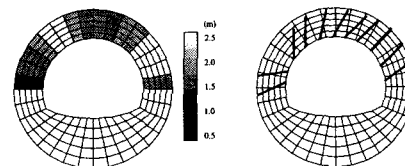


図-7 図-6の断面に対するグローバルコンプライアンス最小化問題による最適打設パターン