

## 均質化法を応用したロックボルトの最適設計

東北大学 学生員 平出 壮司  
 東北大学 学生員 谷 宗行  
 東北大学 正会員 京谷 孝史

### 1. はじめに

ロックボルトは岩盤構造物の補強工として古くから用いられてきたが，その定量的評価手法は構築されていない．構造物内においては，場所によって荷重の加わり方や変位の大きさが異なるのであるから，ロックボルトをそれに応じて配置することができれば使用するロックボルト量の低減につながり，経済的な施工が可能になることが期待される．

そこで，本研究では均質化法により岩盤，及びロックボルトを施した岩盤の弾性係数を求め，FEMによりロックボルト工を施した岩盤斜面を評価し，SOR法を用いてロックボルト打設間隔の最適化を行う．本解析では，対象となる岩盤斜面構造物に対しロックボルトの使用量が限られているときの最適なロックボルトの打設間隔とその配置の評価を試みる．

### 2. 最適化問題の設定

本最適化問題では，所与の外力が成す仕事量の最小化を図る．目的関数は式(1)で表される．

$$\min_p \left[ \int_V q_i v_i dV \right] = \min_p [-2F(v_i)] \quad (1)$$

$F$ は系の全ポテンシャルエネルギーであり，

$$F(v_i) = \frac{1}{2} \int_V \frac{\partial v_i}{\partial x_j} E_{ijkl}^H \frac{\partial v_k}{\partial x_l} dV - \int_V q_i v_i dV \quad (2)$$

と表される． $E^H$ は均質化弾性係数であり，設計変数を含む均質化弾性係数である．

制約条件は式(3)で表される．

$$\int_L \frac{1}{p} dl \leq \frac{L}{p_{av}} \quad (3)$$

$L$ ， $p_{av}$ はそれぞれ対象となる構造物のロックボルトを施工する表面の高さ，平均打設間隔である． $L/p_{av}$ はロックボルトの使用本数と考えることができる．つまり，初めに等間隔で打設したことを想定し，この初期状態から最適解析を施すと，打設間隔  $p$  の最適な分布を決定することができる．

### 3. 均質化法の応用

均質化法では，微視的な内部周期構造を有する材料に対して，ユニットセルと呼ばれるその基本単位構造を解析することによって，材料全体の巨視的平均弾性係数が数学的に厳密に与えられる<sup>1)</sup>．

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left( E_{ijkl}(y) - E_{ijpq}(y) \frac{\partial \chi_p^{kl}(y)}{\partial y_q} \right) dY \quad (4)$$

上式の  $E_{ijkl}(y)$  はユニットセル内の弾性係数の分布， $\chi_p^{kl}(y)$  は特性変位関数と呼ばれ，ユニットセルに関する方程式

$$\int_Y E_{ijpq}(y) \frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial x_q} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} dY = \int_Y E_{ijkl}(y) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} dY \quad (5)$$

を解くことによって得られる．

表-1 材料物性値

ヤング率 (MPa)	$3.893 \times 10^4$
一軸圧縮強度 (MPa)	232.5
粘着力 (MPa)	60.52
単位体積重量 (N/m <sup>3</sup> )	$2.681 \times 10^4$
ポアソン比	0.2
内部摩擦角 (deg)	35

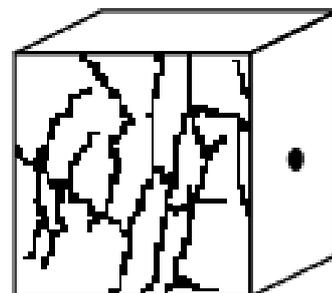


図-1 ユニットセル

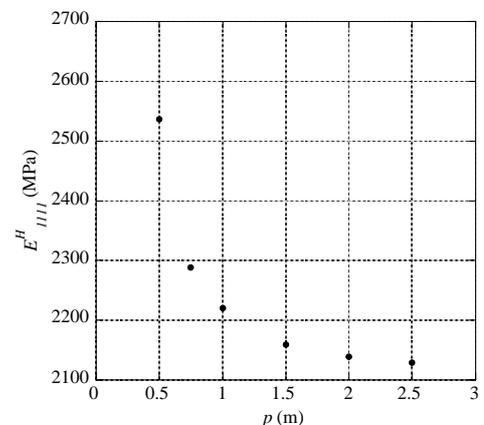


図-2 打設間隔と均質化弾性係数との関係

キーワード：均質化法，有限要素法，ロックボルト，最適設計

980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06 TEL:022-217-7425 FAX:022-217-7423

この均質化法を応用して、分布不連続面を有する岩盤にロックボルトを異なるいくつかの間隔で打設したときの均質化弾性係数を求め、打設間隔  $p$ (m)の関数として表す。

解析対象の岩石は安山岩から成るとし、ロックボルトは異形鉄筋D25を用いることとした。材料物性値<sup>2)</sup>を表-1に、ユニットセルの画像データを図-1に示す。

打設間隔  $p$ (m) と均質化弾性係数  $E^H$  の関係について、例として  $E_{1111}^H$ 成分についてのみ図-2に示す。図-2から、弾性係数の各成分は  $p$  を変数とする2次関数で近似できると考え、2つの2次関数で近似した。この曲線を図-3に示す。これを式(2)の  $E^H$  に組み込んで最適化解析を行う。

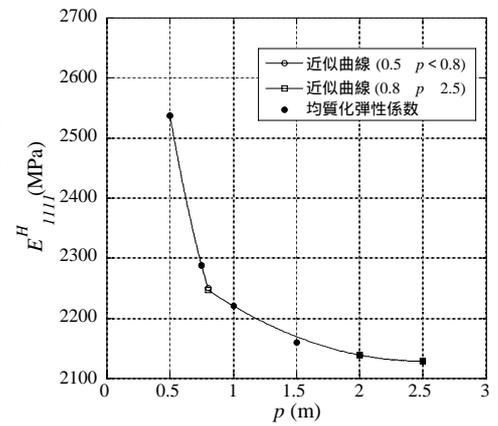


図-3 近似曲線

#### 4. ロックボルトの最適設計

本研究では、3種類の荷重条件においてそれぞれ最適化解析を実行し、結果を比較、検討した。

##### a) 自重のみの場合

外部荷重はなく、岩盤の自重のみによる解析を行う。岩盤の単位体積重量は  $2.681 \times 10^4$  (N/m<sup>3</sup>)であり、鉛直下方向に自重を外力として加え解析した。

##### b) 水平震度を与えた場合

地震を想定した場合であり、水平右向きに水平震度を加える。大きさは自重の0.3倍とした。

##### c) 上部に分布荷重を与えた場合

岩盤斜面の上部に構造物を建設するような場合を想定し、最上部要素のすべてに0.5(MPa)の等分布荷重を加えることとした。

これらを元にロックボルトの打設間隔  $p$  の最適化解析を実行した。ロックボルトは表層側から4層分の要素に対して打設すると仮定し、それ以外の部分は岩盤からなるとしている(平面ひずみ条件)。平均打設間隔  $p_{av}$  は1.5mとした。

結果として、要素ごとのロックボルトの割合を図で表現するためにロックボルトの打設間隔  $p$  が小さいほど濃色で表したものを図-4、図-5、図-6に示す。この図では濃色で示された要素ほど、補強を必要としている。突出部の構造を受け持つ位置や、外力を直接受ける位置にロックボルトの打設間隔が密になることを示している。

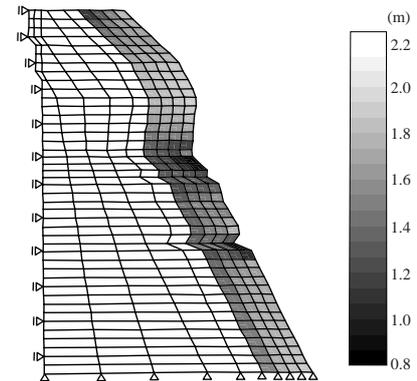


図-4 自重のみの場合

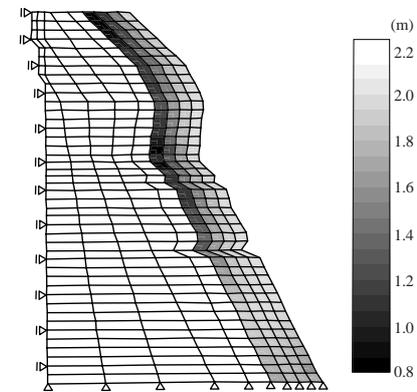


図-5 水平震度を加えた場合

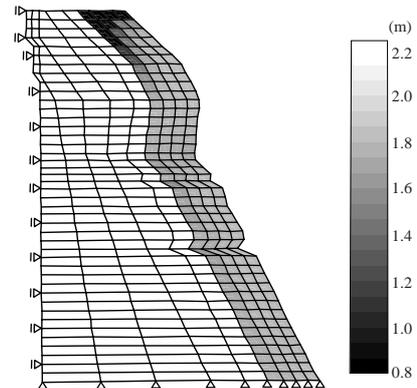


図-6 上部に分布荷重を加えた場合

#### 5. 結論

本研究では、均質化法を応用してロックボルト打設間隔の最適化解析を行った。岩盤構造物の変形量を最小化するという目的に関して、ロックボルトをすべて等間隔で打設するよりもより適した打設間隔が存在することを示した。また、限られたロックボルトの本数でより効果的な打設間隔を解析できることを示した。

#### 参考文献

- 1) 欧陽立珠：均質化法と極限支持力解析を用いた不連続性岩盤安定解析システムの開発，東北大学土木工学専攻修士論文，1998。
- 2) R.D.LAMA, V.S.VUTUKURI (増田秀夫, 田中荘一, 共訳)：岩の力学的性質II，古今書院，1992。