

CS1-21〔I〕

境界要素法解析による岩盤の構成式モデルの妥当性の検証

東京大学 学生員 ○久保田 啓二郎
 東京大学 正員 堀井 秀之

1 はじめに

岩盤の力学的挙動は内部に多数存在するジョイントに特徴づけられているが、個々のジョイントの情報を取り扱うことは不可能に近く、統計的にしか扱うことができない。そのため岩盤の工学的問題を解析するためには連続体理論が必要となる。Cai はジョイントを有する岩盤の構成方程式モデル^[1]を提案しており、それは不連続面(ジョイント)の特性・密度・方向・連結性を反映したものである。

ジョイントを有する岩盤の応力-ひずみ関係は、ジョイントにおける相対変位が求められれば、それを積分して求められる。ジョイントに作用する応力は全体の平均応力とは異なるが、その大きさはジョイントの剛性と、ジョイントを含む系の剛性の比によって定まる。ジョイントにおける応力が決まれば、古典的弾塑性構成則によりジョイントにおける相対変位が得られ、全体の平均ひずみが得られる。ジョイントに作用する応力を求めるためには、ジョイント同士の相互作用の評価が必要となり、他のジョイントによりジョイントを包含する系の剛性が低下する影響を考慮したジョイントの相対変位を算出しなければならない。また実際の岩盤においてはジョイントが連結していることが多く、連結の特質を考慮したモデルが必要となる。

Cai^[1]はジョイントの力学的特性・密度・方向分布を考慮し、さらに連結性に対するパラメーターを導入することにより、ジョイントの連結性をも評価できる岩盤の構成方程式モデルを構築している。本論文では境界要素法によるシミュレーションの結果とモデルの結果とを比較することによりこのモデル化の妥当性を示し、連結性のパラメーターの値と実際のジョイントの連結率との関係を明らかにする。

2 Cai のモデル

ジョイントを有する岩盤の応力増分-ひずみ増分の関係は次式で与えられる。

$$\Delta \bar{\epsilon}_{ij} = C_{ijkl}^R \Delta \bar{\sigma}_{kl} + \frac{1}{2V} \sum_k \int_{S_k^J} (\Delta [u_i] n_j + \Delta [u_j] n_i) dS \quad (1)$$

ここで C_{ijkl}^R は基質部分のコンプライアンステンソル・ S_k^J は k 番目ジョイントの表面・ n_i はその単位法線ベクトル・ $\Delta [u_i]$ はジョイント面での相対変位の増分を表している。

しかしジョイントに作用する応力は全体の平均応力とは異なり、その大きさはジョイントの剛性と、そのジョイントを包含している岩盤の剛性との比に依存する。岩盤の平均応力とジョイントに作用する平均応力の関係を規定するために、Cai のモデル^[1]では応力集中テンソルを導入して次式のように表した。

$$\{\Delta \sigma_{ij}^J\}_k = [F_{ij}]_k \{\Delta \bar{\sigma}_{ij}\} \quad (2)$$

ここで $\Delta \sigma_{ij}^J$ はジョイントに作用する平均応力増分を、 $\Delta \bar{\sigma}_{ij}$ は代表要素の平均応力増分を表す。このジョイント応力集中テンソルは、他のジョイントの特性・密度・方向分布等に依存している。

このジョイントの応力集中テンソルを決定するために、ジョイントの連結性を考慮した次式で与えられる系の剛性を導入している。

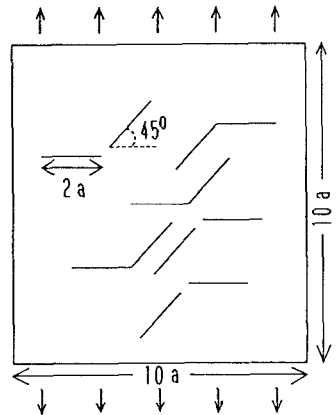


図1. 検証に用いた岩盤

$$\bar{K} = \frac{\bar{E}}{\lambda L^J} \tag{3}$$

ここで λ はジョイントの連結性を表すパラメーター・ L^J はジョイントの長さである。

3 検証の方法

Cai のモデルでは3次元問題を扱っているが、本研究においては2次元問題を考えた。また Cai のモデルは応力とひずみの増分に関する増分方程式により非線形問題を扱っている。しかし増分の1ステップに注目すると、常に適当な接線剛性を用いて線形計算をしているので、本研究では線形問題を考えることによりモデル化の妥当性を検証する。検証の方法として境界要素法を用いてジョイントを多数有する問題のシミュレーションを行い、その結果をモデルの予測値と比較する。図1に示すように、代表要素として10a 四方の岩盤材料を用いて検証を行った。材料に有するジョイントの位置はランダムとし、そのジョイント自身は法線方向とせん断方向にバネを用いて結合した。ジョイントの密度を順次上げていき、岩盤の剛性がいかに低下するかを調べ、シミュレーション結果(解析結果)とモデルの結果(予測値)とを比較することにより検証を行う。

4 検証の結果および結論

ジョイントが全く連結していない場合の結果を図2に示した。ここで k はバネ剛性・ θ はジョイント方向の角度・ \bar{E}/E はジョイントを有する岩盤とジョイントを有していない岩盤の剛性の比である。解析結果と予測値とはほぼ近い値を示しており、構成方程式モデルの妥当性を示唆している。ジョイントが連結しているときの結果を図3および図4に示した。図3のグラフは、ジョイントの連結性を表すパラメーター λ を変化したときのモデルの結果をプロットしたものである。シミュレーションにおいて連結率 ρ (ρ = 連結しているジョイント数/全ジョイント数) を変えたときの剛性に対応する点を図3にプロットした。これより得られるジョイントの連結率 ρ と連結性を表すパラメーター λ との関係を表したものが図4である。図4より連結率が低いときには特に、パラメーターは連結率とはほぼ線形関係にあり、荷重条件やジョイントの方向には大きく依存しないことが示された。このことは、Cai のモデルにおける連結性を表すパラメーターが物理的意味を持つジョイントの連結率と一対一に対応していることを示している。

参考文献

[1] Ming Cai and Hideyuki Horii., A Constitutive Model of Highly Jointed Masses, Mechanics of Materials (1992); in print

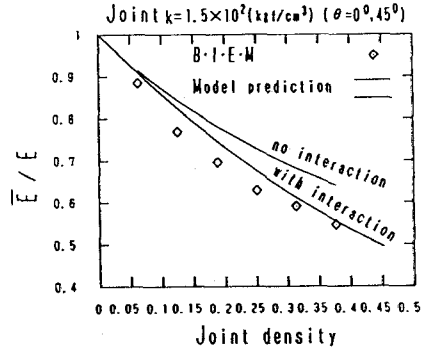


図2. 連結していない場合の結果

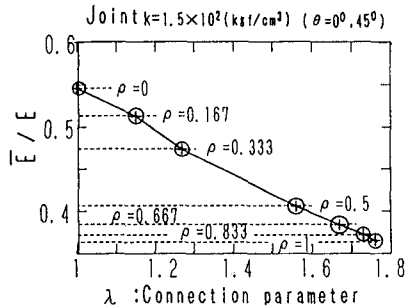


図3. λ をモデルへ代入した結果

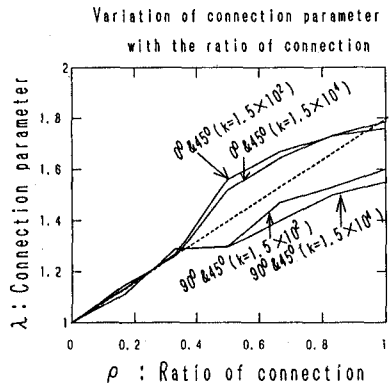


図4. ρ と λ の関係