

東京大学工学部

蔡 明

東京大学工学部 正会員 ○ 堀井秀之

A Constitutive Modeling of Highly Jointed Rock Masses

Ming CAI, University of Tokyo
Hideyuki Horii, University of Tokyo

Abstract

The mechanical behaviors of jointed rock masses are strongly affected by the property and geometry of the joints. A constitutive model is proposed in this paper which represents the effect of density, orientation and connectivity of joints as well as the property of the joint itself. The stress-strain relations of the jointed rock mass are formulated by taking the volume average of stress and strain inside a representative volume element where the evaluation of the relative displacement across the joints is required. The mechanical behaviors of joints are represented by an elasto-plastic constitutive law that is based on the classical theory of plasticity. The relative displacement across the joints is calculated from the joint stiffness and the stress concentration tensor which gives a relationship between overall stress and the traction acting on the joint. The stress concentration tensor depends on the ratio of the joint stiffness to the system stiffness which is the stiffness of the surroundings affected by the behavior of other joints and the joint connectivity. To evaluate the stress concentration tensor, a simple method is developed. The interaction effect between joints is properly considered in the model by using a homogenization method proposed in this study. The effect of joint connectivity, which results in the reduction of the system stiffness, is treated in the model with connection coefficient. Some simple examples are solved by the proposed constitutive model, and the critical state that the shear displacement on the joint reaches the peak shear displacement can be captured in the calculation. The results are in agreement with the experimental data showing the characteristic features of the behaviors of jointed rock masses. The proposed constitutive model for jointed rock masses is implemented into a Finite Element Analysis Program (FEAP) with a three-dimensional isoparametric element for the numerical solution of some engineering problems. The program is used to analyze a plate-loading test problem and the results of the three-dimensional finite element analysis are compared with the test data.

1. はじめに

岩盤は内部に多数存在するジョイントによって特徴づけられる。岩盤の力学的挙動はジョイントの特性だけでなく、その密度、方向分布、連結性等に大きく依存する。一般に、代表的寸法の岩盤に含まれるジョイントの数は膨大であり、その幾何形状・空間位置は統計的にしか与えられないため、ジョイントを個別に取り扱うジョイント要素法や個別要素法は、岩盤の要素試験等のシミュレーションのような問題には有効であろうが、岩盤の力学的挙動の一般的な解析手法として適していない。一般的に岩盤の工学的問題では、対象構造物の寸法がジョイントのそれに比べて大きく、ジョイントの数は膨大である。このような問題に対しては、岩盤を連続体として取り扱う連続体理論が必要である。その場合、ジョイントを有する岩盤の構成方程式が必要となるが、ジョイントの力学特性、密度、方向分布、連結性を反映した構成方程式は存在しない。本研究の目的は、様々なジョイントの分布状態にある岩盤に対する構成方程式のモデル化を計り、岩盤に対する連続体理論と解析手法を構築することにある。

2. ジョイントを有する岩盤の構成方程式モデル

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、代表要素内の応力とひずみを平均することにより求められる。代表要素内にジョイント（変位の不連続面）がある場合、その関係は次式で与えられる¹⁾。

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

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 番目のジョイントの表面、 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わしている。従って、応力増分とひずみ増分の関係を求めるためには、ジョイント面での相対変位（せん断すべりと開口変位）を評価する事が必要となる。全てのジョイントの幾何形状、空間位置を与えてジョイント面での相対変位を求めることは不可能に等しく、大胆なモデル化を行うことが必要である。

基質部分の岩石の非線形性はジョイントの効果に比べれば無視できるため、本研究では基質部分の岩石は線形弾性体と仮定する。ジョイント自身の力学挙動に関しては多くの研究があり、ジョイントの力学的挙動は古典的塑性論に基づく弾塑性構成方程式により表わすことができることが知られている。本研究では、過去の研究に基づき、一つの弾塑性構成方程式を採用した²⁾。これにより、ジョイントに作用する平均応力増分と、ジョイント面での相対変位の増分の関係が陽な形で与えられる。

しかし、そのジョイントの構成方程式により直ちにジョイントにおける相対変位が求まるわけではない。それは、ジョイントに作用する応力が全体の平均応力とは異なり、その大きさが、ジョイントの剛性とそのジョイントを包含している系（岩盤）の剛性との比によって定まるためである。ジョイントに作用する応力と岩盤の平均応力との関係が求まれば、ジョイントにおける相対変位、さらに岩盤の平均ひずみが求まり、岩盤の構成方程式が完結する。従って、ジョイントに作用する応力を算定することが課題となるが、ジョイントの剛性はそのジョイントを包含している系の剛性に比べて高い程、ジョイントが受け持つ応力は大きくなる。ジョイントを包含している系の剛性は、他のジョイントの挙動や、ジョイントの連結状態に依存しているため、それらを考慮して系の剛性を算定する方法が必要である。

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、ジョイント応力集中テンソル $[F_{ij}]_k$ を次式のように導入した。

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

ここで、 $\Delta \bar{\sigma}_{ij}$ は代表要素の平均応力増分を、 $\Delta \bar{\sigma}_{ij}^J$ はジョイントに作用する平均応力増分を表わす。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、方向分布等に依存するが、これが定まれば岩盤の構成方程式が得られる。

ジョイント応力集中テンソルを算定するため、次の簡単な手法を提案する。図1に示すように、ある一つのジョイントに着目し、そのジョイントを包含する系を等価な均一材料に置き換え、問題(a)をジョイントを含まない均一な物体(b)、ジョイントをくり抜いた物体(c)、およびくり抜かれたジョ

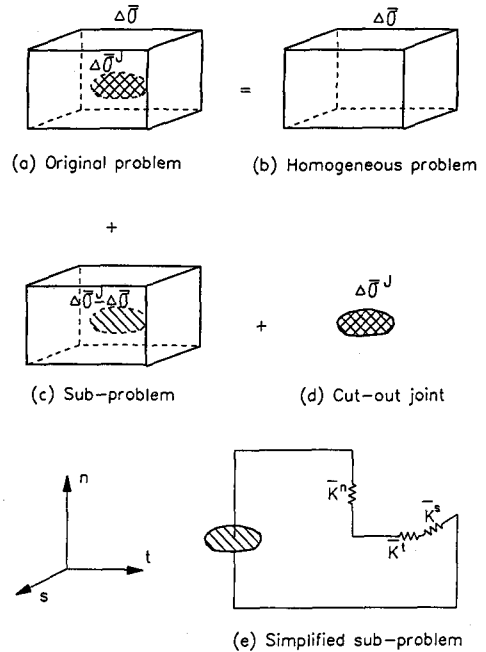


Figure 1 Decomposition and simplification of the closed joint problem

イント (c) に分離する。系の剛性という概念を導入し、問題(c)におけるスリットの相対変位とスリットに作用する応力との関係を定める。それは、図 1 (e) に示すように、(c) の系をジョイント垂直方向のバネと接線方向の 2 つのバネに置き換えることと等価である。次元解析に基づき、ジョイントによる系の剛性の変化、ジョイントの連結性、等価材料の異方性等を考慮できるよう、次の形の系の剛性を導入する。

$$\bar{K}^n = \frac{\bar{E}}{\lambda^n L^J} \quad \bar{K}^s = \frac{\bar{G}^s}{\lambda^s L^J} \quad \bar{K}^t = \frac{\bar{G}^t}{\lambda^t L^J} \quad (3)$$

ここで $\bar{E}$ はジョイント垂直方向の等価接線ヤング係数、 $\bar{G}^s$ 、 $\bar{G}^t$ はそれぞれ $n-s$ 、 $n-t$ 面内のせん断変形に対する等価接線せん断定数を表わしている。 L^J はジョイントの特性寸法で、 λ^n 、 λ^s 、 λ^t はジョイントの連結性を表わすパラメータであり、 β^n 、 β^s 、 β^t は系の異方性に対する修正係数である。

この系の剛性が定まれば、容易にジョイント応力集中テンソルを決定することができる。系の剛性を定めるためには、ジョイントの挙動により系の剛性が変化する効果を評価しなくてはならない。そのような方法としては、Self-Consistent 法がよく知られているが、Self-Consistent 法を用いた場合、未知の系の剛性を決定するため Consistency 条件式を解かねばならず、計算が煩雑な上、効果を過剰に評価してしまう傾向が報告されている。本研究では、ジョイントにより低減した系の剛性を算定する新しい手法を提案する。まず、系がジョイントを含まない基質材料として各ジョイントのジョイント応力集中テンソルを計算し、その結果から岩盤の平均的接線コンプライアンステンソルを求める。次に、各ジョイントが、既に求めた平均的接線コンプライアンスを持った等価材料中にあるものとして同様の計算を行い、最終的な岩盤の平均的接線コンプライアンステンソルが得られる。

3. 構成方程式モデルの結果

本構成方程式モデルの結果の例として、一方向に配向した一ジョイント系を含む岩盤の応力ひずみ曲線を図 2 に示す。予測される非線形挙動は実験事実と定性的に一致している。モデルにより、ジョイントのせん断相対変位が限界値に達する限界荷重も予測される。ジョイントの相互干渉の影響、すなわち、各ジョイントを包含する系の剛性が他

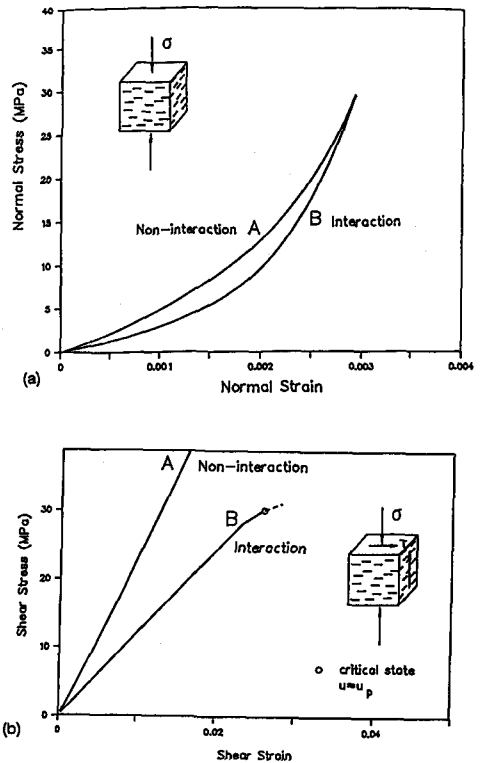


Figure 2 Stress-strain relations of jointed rock masses with one set of unidirectionally distributed joints. (a) Normal stress-normal strain relations; (b) Shear stress-shear strain relations

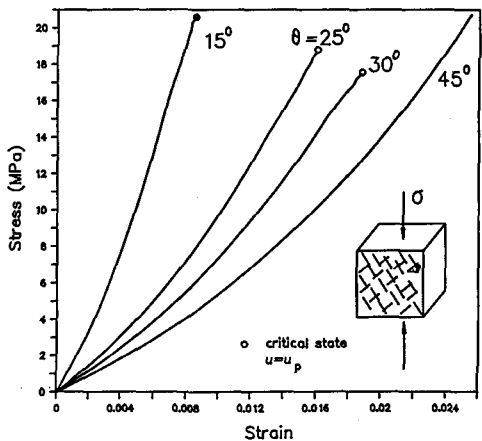


Figure 3 Uniaxial stress-strain relations of jointed rock masses with different joint inclination angle

のジョイントによって低減し、そのジョイントの変形が大きくなり、岩盤の剛性が低下する傾向が、特にせん断変形において示されている。図3は直交する2つのジョイント系を含む岩盤の一軸圧縮下の応力ひずみ曲線であるが、圧縮軸に対してジョイントの方向が変化する場合の挙動の変化が、本モデルによって再現されることを示している。

ジョイントの連結性の影響を表わすパラメータ λ^n , λ^s , λ^t は、実験結果をフィットするように選ばざるを得ない。図4は、そのパラメータを選び、熱疲労により人工的にジョイントをいれた花崗岩の圧縮試験結果をフィットさせた結果である。ある拘束圧に対する実験結果よりパラメータを決定すれば、その値を用いて、それ以外の拘束圧に対する挙動を予測することができる。予測結果は実験結果と良好な一致を示しており、モデルの妥当性を示していると考えられる。用いたパラメータの値はかなり大きいが、そのことは、ジョイントの連結により岩盤の剛性が低下する影響が重要であることを意味している。

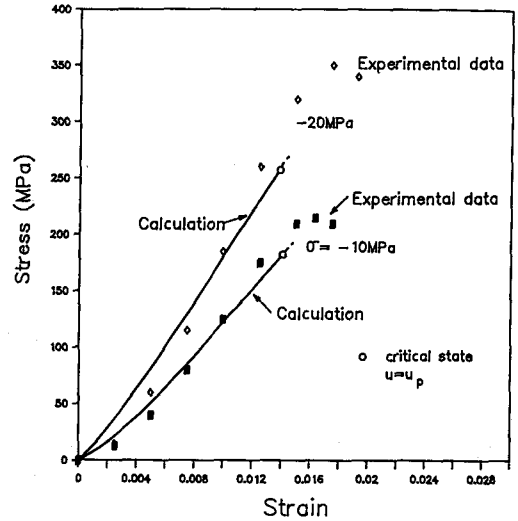


Figure 4 Experimental data and predicted results of stress-strain relations of cracked solids - Identification of the connection coefficient

4. 平板載荷試験の有限要素解析

開発された構成方程式モデルを有限要素解析プログラムに組み込み、任意のジョイント分布を有する岩盤構造物の、任意の荷重履歴に対する3次元解析を可能とした。解析例として平板載荷試験を取り上げ、解析結果を載荷板下方のジョイントの情報とひずみ分布の計測結果のある川治ダムにおける試験結果³⁾と比較した。図5は有限要素解析に用いたメッシュ分割を表わしている。図6は荷重と載荷点変位の関係を示しており、図7は載荷板直下鉛直方向のひずみ増分(単位荷重増分当り)の分布を示している。本モデルでは、実験で常に観測されるヒステリシスが予測されない。これは、採用したジョイントの構成方程式において、直応力と法線方向相対変位の関係が、非線形ではあるが、非弾性ではないことに起因する。このヒステリシスは岩盤挙動の大きな特徴であり、それを予測できるようモデルを改良することは今後の課題であるが、まずそのヒステリシスの発生メカニズムを明らかにする事が重要である。図7にも示されているように、変形は表面近傍に集中する。これは、表面近傍に緩みが生じたことによると考えられるが、そのことは、表面近傍の潜在的ジョイントが開口したことを意味している。すなわち、ジョイントの密度は均一ではなく、解放される応力に依存している。ジョイントの密度まで予測し、岩盤挙動の解析をするためには、ジョイント発生の基準をモデルに組み込む必要があるが、これは今後の研究の方向の一つである。

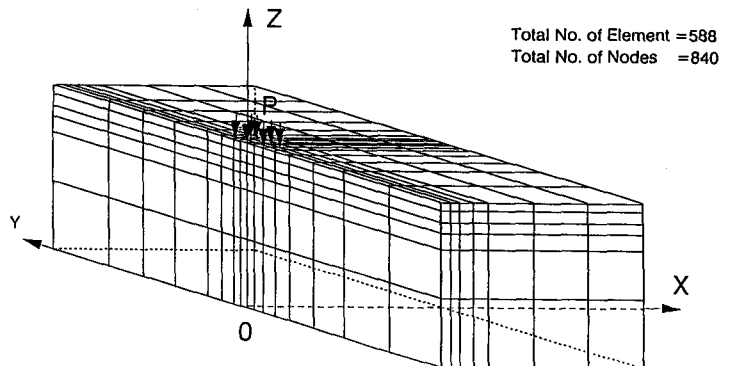


Figure 5 Finite element mesh used in the calculation

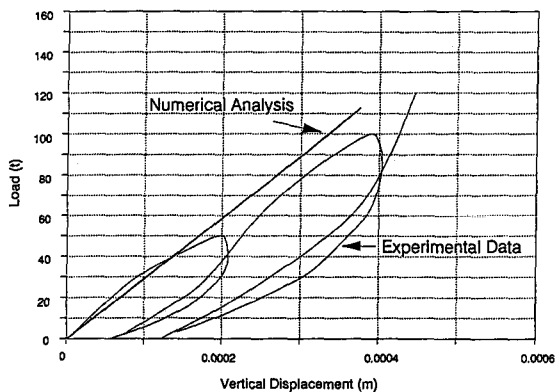


Figure 6 Load-Vertical displacement relation at the plate center

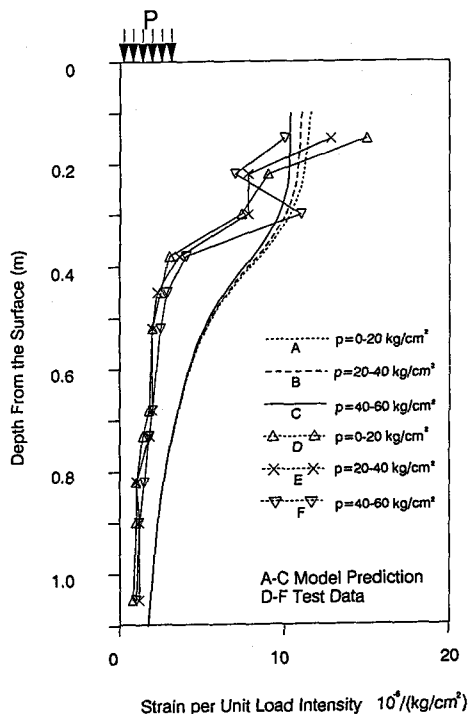


Figure 7 Variation of axis strain (per unit load intensity) along the depth-nonuniform joint distribution

5. おわりに

本研究で開発した解析プログラムにより、ジョイントの情報を反映した解析が可能となるが、その応用の可能性の一つは、新しい岩盤の物性パラメータの抽出と対応する試験方法の開発である。本解析法を用いれば、緩んだ岩盤に変形試験を実施することにより緩まない岩盤の特性を推定することが可能となる。スカラー量である変形係数一つだけで岩盤物性を表わしているのが現状であるが、新しい岩盤物性を表わすパラメータを見つけ出すことが次の目標となる。例えば、変形特性の三主軸とその3方向の変形係数といったようなパラメータが考えられる。岩盤の変形特性をうまく表現出来るパラメータが見いだせれば、試験結果のばらつきは、はるかに小さくなることと期待される。その新しいパラメータを求める試験方法としては、例えば、平板載荷試験と2方向のせん断試験を組み合わせた方法などが考えられる。どのようなパラメータを選ぶべきか、どのような試験方法によってそのパラメータが測定できるかを検討する上で、本研究で開発した岩盤の有限要素解析プログラムは有効な手段を与えよう。

[参考文献]

- 1) Horii, H. and Nemat-Nasser, S., "Overall moduli of solids with microcracks: load-induced anisotropy", J. Mech. Phys. Solids, Vol. 31, No. 2, pp. 155-171, 1983.
- 2) Barton, N.R. and Bandis, S.C., "Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice", Proc. Int. Conf. on Rock Joint, Loen, Norway, 4-6 June, pp. 603-610, 1990.
- 3) 飯田隆一、柴田功、西岡正、斉藤孝三：岩盤変形試験と内部ひずみ分布特性、第11回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、