

(56) 空隙を含む岩石材料の力学的挙動のモデル化について

東海大学海洋学部
琉球大学工学部
豊田工業高等専門学校
大成建設

正会員
正会員
正会員
正会員

アイダン・オメル
○ 渡嘉敷直彦
赤木知之
伊藤文雄

MODELLING OF MECHANICAL BEHAVIOUR OF POROUS ROCKS

Ömer AYDAN Tokai University
N. Tokashiki Ryukyu University
T. Akagi Toyota National Technical College
F. Ito Taisei Co.

Abstract

In this article, a model for a medium having inclusions in pores and distributed in a periodic pattern is proposed, using the micro-structure concept. Then, the model is compared with finite element models and other existing models. Finally, the validity of the model is checked by applying it to laboratory and in-situ tests on rock masses and its applicability is discussed. The applications indicates that averaging techniques are applicable to the estimation of elastic properties of the medium in terms of those of constituents but they overestimate the strength properties.

1. 序論

岩盤構造物の安定性を評価する上で多孔質岩盤の変形および強度特性が重要である。多孔質岩盤の力学的モデル化に関しては、以下のような因子を考えなければならない。

- 1-) 母岩の力学的挙動、
- 2-) 岩盤の空隙に存在する介在物の力学的挙動とその幾何学的形状

本論文では、これらの因子を考慮しマイクロ構造¹⁾という概念に基づいて、空隙を有する岩石材料の力学的挙動のモデル化について新しい評価法を提案するとともに、提案した評価法を他の評価法と比較・検討をし、その妥当性を数値解析および実験結果によって確かめる。

2. 理論

本モデルを誘導する上で、以下の仮定を導入する。

- a-) 空隙に存在する介在物は周期的に分布する。
- b-) 空隙に存在する介在物とそれを囲む媒体の構成則が与えられている。
- c-) 代表的な要素において、応力場とひずみ場は線形的に重ね合わせることができる。

モデルを誘導する上で、最初に一次元的な場合を考え、根本的な概念を説明し、次に、多次元問題に拡張する。

2.1 一次元の場合

図-1に示すような周期性を持つ物体を考える。同図より代表的な要素を図-2に示すように選ぶことができる。一次元的の問題の場合(力の作用している方向のみに変形する状態)一様なひずみ状態において、図-3に示すように、力学的にa-) 平行モデル、b-) 直列モデルと二つのモデルにわけて考えることができる。

a-) 平行モデル

各パートにおいて、応力は一様に分布するという仮定に基づいて、力の釣合により以下の式が得られる。

$$\sigma_{11} = \alpha \sigma_{11}^I + (1 - \alpha) \sigma_{11}^{II} \quad (1)$$

ここに $\alpha = L_d/L_2$ である。パートIのひずみ ϵ_{11}^I は母岩のひずみと介在物のひずみの和として、与えられる。

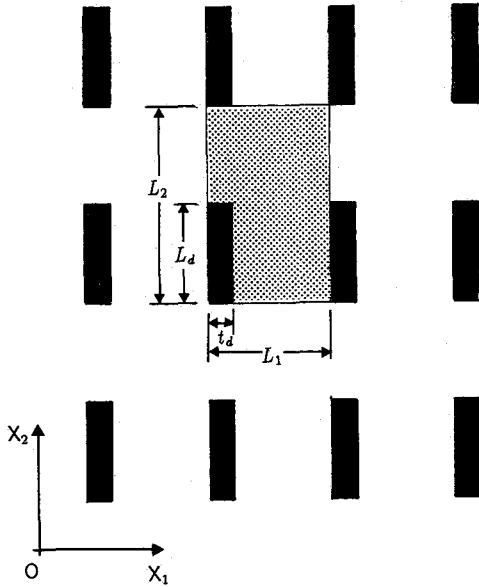


図-1

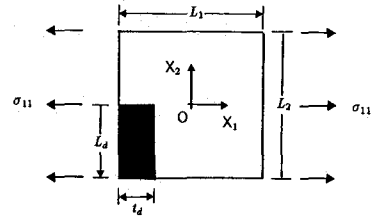


図-2

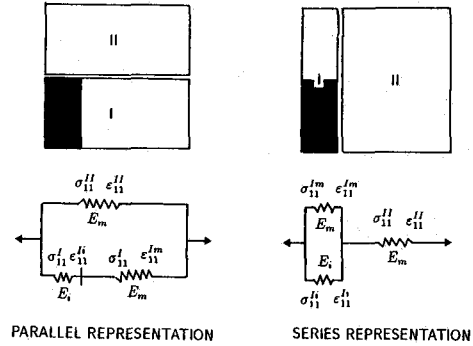


図-3

$$\epsilon_{11}^I = \lambda \epsilon_{11}^{Ii} + (1 - \lambda) \epsilon_{11}^{Im} \quad (2)$$

ここに $\lambda = t_d/L_1$ である。両パートにおいて、ひずみ場は一樣であるとする。すなわち、 $\epsilon_{11}^I = \epsilon_{11}^{II}$ である。構成則として、各孔質は Hooke の法則に従うものとする、応力とひずみの関係式は以下のように書くことができる。

$$\epsilon_{11}^{II} = \frac{\sigma_{11}^{II}}{E_m}, \quad \epsilon_{11}^{Im} = \frac{\sigma_{11}^I}{E_m}, \quad \epsilon_{11}^{Ii} = \frac{\sigma_{11}^I}{E_i} \quad (3)$$

ここに E_m と E_i は母岩と介在物の弾性係数である。式(2)と式(3)より、以下の式が得られる。

$$\epsilon_{11}^I = \left[\frac{(1 - \lambda)}{E_m} + \frac{\lambda}{E_i} \right] \sigma_{11}^I \quad (4)$$

したがって、物体の等価な弾性係数は式(1),(2)および(4)より、以下のように得られる。

$$E_{11} = (1 - \alpha) E_m + \alpha \left[\frac{E_m E_i}{(1 - \lambda) E_i + \lambda E_m} \right] \quad (5)$$

b) 直列モデル

パート I において、応力は一樣に分布するという仮定にの基づいて、力の釣合により以下の式が得られる。

$$\sigma_{11}^I = \alpha \sigma_{11}^{Ii} + (1 - \alpha) \sigma_{11}^{Im} \quad (6)$$

ひずみ ϵ_{11} はパート I とパート II のひずみの和として、

$$\epsilon_{11} = \lambda \epsilon_{11}^I + (1 - \lambda) \epsilon_{11}^{II} \quad (7)$$

と与えることができる。なお、各孔質において、応力とひずみの関係式は Hooke の法則に従うものとする、以下のように書くことができる。

$$\epsilon_{11}^{Im} = \frac{\sigma_{11}^{Im}}{E_m}, \quad \epsilon_{11}^{Ii} = \frac{\sigma_{11}^{Ii}}{E_i}, \quad \epsilon_{11}^{II} = \frac{\sigma_{11}}{E_m} \quad (8)$$

したがって、物体の等価な弾性係数が式(6),(7)および(8)より、以下のように得られる。

$$\frac{1}{E_{11}} = \frac{(1-\lambda)}{E_m} + \frac{\lambda}{(1-\alpha)E_m + \alpha E_i} \quad (9)$$

両モデルは $\alpha = 1$ あるいは $\lambda = 1$ の時は、同形になる。

2.2 多次元の場合

前節で導入したパラメータ α と λ は多次元問題において、テンソル量に置き換えなければならない。テンソル α は応力テンソルに作用するオペレータである。一方、テンソル λ はひずみテンソルに作用するオペレータである。 λ と α は以下のように与えられる(図-4)。

$$\alpha = \sum_{i=1}^3 \alpha_i (n_i \otimes n_i) \quad \lambda = \sum_{i=1}^3 \lambda_i (n_i \otimes n_i) \quad (10)$$

ここに

$$\alpha_1 = \frac{l_2}{L_2} \cdot \frac{l_3}{L_3}, \quad \alpha_2 = \frac{l_1}{L_1} \cdot \frac{l_3}{L_3}, \quad \alpha_3 = \frac{l_1}{L_1} \cdot \frac{l_2}{L_2}, \quad \lambda_1 = \frac{l_1}{L_1}, \quad \lambda_2 = \frac{l_2}{L_2}, \quad \lambda_3 = \frac{l_3}{L_3}$$

a-) 平行モデル

各パートにおいて、応力は一様に分布するという仮定に基づいて、力の釣合により以下のように得られる。

$$\sigma = \alpha \sigma^I + (I - \alpha) \sigma^{II} \quad (11)$$

パートIのひずみ ϵ^I は母岩のひずみと介在物のひずみの和として与えられる。

$$\epsilon^I = \lambda \epsilon^{Ii} + (I - \lambda) \epsilon^{Im} \quad (12)$$

両パートにおいて、ひずみ場は一様であるとする。すなわち、 $\epsilon^I = \epsilon^{II}$ である。構成則として、各孔質はHookeの法則に従うとすると応力とひずみの関係式は以下のように書くことができる。

$$\sigma^{II} = E_m \epsilon^{II} \quad \epsilon^{Im} = C_m \sigma^I, \quad \epsilon^{Ii} = C_i \sigma^I \quad (13)$$

ここに E_m と C_i は母岩の弾性テンソルとは介在物の弾性コンプライアンスのテンソルである。式(12)と(13)より、以下の式が得られる。

$$\epsilon^I = [(I - \lambda)C_m + \lambda C_i] \sigma^I \quad (14)$$

したがって、物体の等価弾性テンソルは式(11),(12)および(14)より、以下のように得られる。

$$E^* = (I - \alpha)E_m + \alpha [(I - \lambda)C_m + \lambda C_i]^{-1} \quad (15)$$

b-) 直列モデル

パートIにおいて、応力は一様に分布するという仮定に基づいて、力の釣合により以下のように得られる。

$$\sigma^I = \alpha \sigma^{Ii} + (I - \alpha) \sigma^{Im} \quad (16)$$

ひずみ ϵ はパートIとパートIIのひずみの和として、

$$\epsilon = \lambda \epsilon^I + (I - \lambda) \epsilon^{II} \quad (17)$$

と与えられる。

なお、各孔質において、応力とひずみの関係式はHookeの法則に従うとすれば、以下のように書くことができる。

$$\sigma^{Im} = E_m \epsilon^{Im}, \quad \sigma^{Ii} = E_i \epsilon^{Ii}, \quad \epsilon^{II} = C_m \sigma^{II} \quad (18)$$

したがって、物体の等価弾性コンプライアンスのテンソルは式(16),(17)および(18)より、以下のように得られる。

$$C^* = (I - \lambda)C_m + \lambda [(I - \alpha)E_m + \alpha E_i]^{-1} \quad (19)$$

以上に述べた理論は亀裂性岩盤の評価にも使うことができる。

3. 適用と考察

提案した評価法の妥当性を検討するために、有限要素法による数値実験を行った。平面ひずみ状態において一軸圧縮およびせん断数値実験を行った。図-5に数値実験で使われた物体の幾何学形状と境界条件を示す。解析においては、幾つかの弾性係数比 $\xi = E_i/E_m$ にたいして、パラメータ λ を一定にしなが、パラメータ α を変

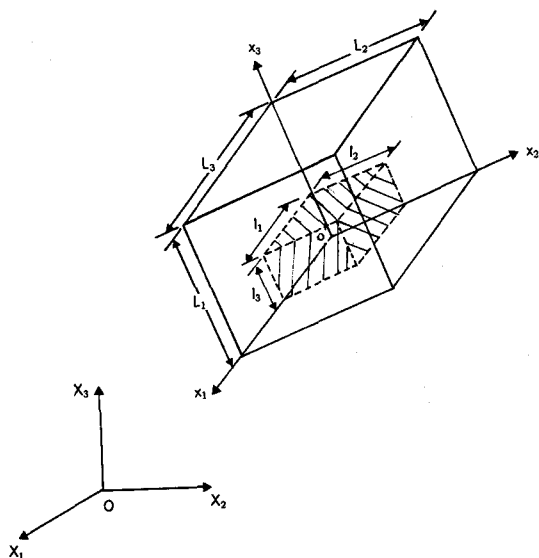


図-4

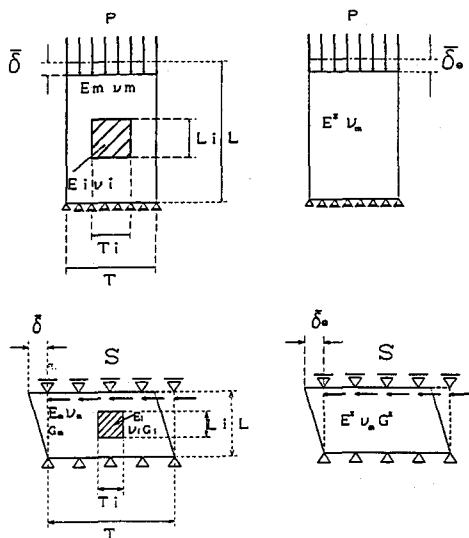


図-5

化させた。計算結果を図-6に示す。図からわかるように、有限要素法によって得られる数値実験結果は提案した両モデルによって得られる理論曲線の間に入っている。

次に、空隙の形状が物体の等価な弾性係数に与える影響を検討する。球形状と円筒形状の空隙の場合に対する計算結果を図-7に示す。図からわかるように球形状の空隙の影響は円筒形状の空隙のものに比べ少なめであるが、それほど差異がない。しかし、両モデルの結果はそれぞれに近い。同図に Mixture 理論によって得られる曲線も示す。Mixture 理論による曲線は、両モデルによって得られる曲線に比べ、過大評価になっている。

Litewka と Sawczuk²⁾はアルミニウムの板状の供試体の方眼および千鳥のパターンでスリットを設け、一軸引張実験を行い、この実験でスリットの長軸の角度を変化させた。実験結果を両モデルによる等価弾性係数と一軸引張強度の結果と合わせて図-8に示す。図からわかるように、実験結果と平行モデルによって計算された理論曲線とはほぼ一致している。直列モデルの方が実験結果より、かなり過大な評価になっている。同図に Mixture 理論によって得られる曲線も描いてある。体積比という概念に基づく Mixture 理論は方向性を持つ空隙を有する物体には適しないことが判る。

伊東ら³⁾は円盤および球形状の塑性ゴム材料を含有するモルタルの一軸圧縮実験を行っている。球形状の場合の実験結果と予測結果を図-9に示す。図よりわかるように、弾性係数は両モデルによって得られる曲線の間に入っている。しかし、実験結果は平行モデルの方に近い。一軸圧縮強度に関しては、両モデルによって予測される値の方が実験結果より過大評価になっている。これは平均化理論の弱点と考えられる。この例においても Mixture 理論方はまた過大評価になっている。

桜井ら⁴⁾は、2種類の混合材に対する圧縮実験を行った。1-) CASE 1:マトリクスが硬くて、介在物が柔らかい場合、2-) CASE 2:マトリクスが柔らかくて、介在物が硬い場合。図-10に予測結果と実験結果を示す。混合体の等価弾性係数と圧縮強度は硬材の弾性係数と圧縮強度で正規化されている。図中の実験結果は桜井らの報告されている実験結果の平均値である。この例に関して、実験結果と予測結果の間に良い一致をみることが図より簡単にわかる。

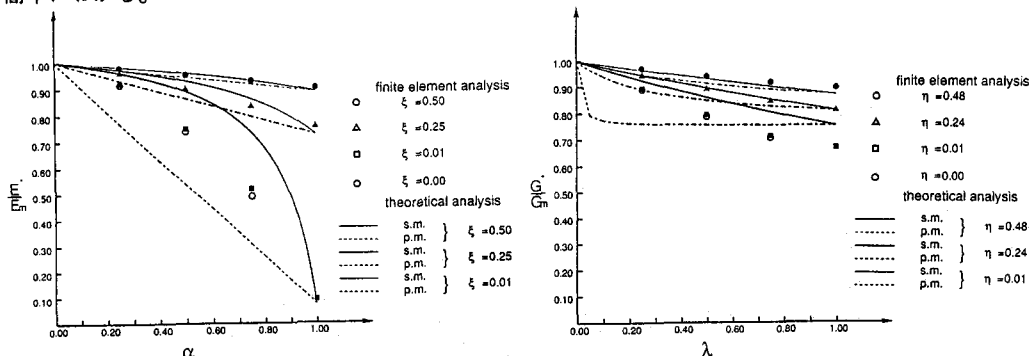


図-6

4. 結論

本論文で、マイクロ構造という概念に基づいて、空隙を有する岩石材料の力学的挙動のモデル化について新しい評価法を提案し、提案した評価法を他の評価法と比較・検討し、その妥当性を数値解析および実験結果によって確かめた。

参考文献

- 1-) Jones, R.M.: Mechanics of composite materials. McGraw-Hill Book Company.
- 2-) Litewka, A. and A. Sawczuk 1984: Experimental evaluation of the overall anisotropic response on continuous damage in *Mechanics of Material Behaviour (D.C. Drucker Anniversary Volume)*, Elsevier, pp. 239-252.
- 3-) 伊東孝・赤木知之・河村誠一 1990: 岩質材料の不連続部含有量とクリープ特性について. 第22回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.301-305.
- 4-) 桜井春輔・川嶋幾夫・小池信司 1991: 不均質岩質材料の限界ひずみに関する実験的研究. 第12回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp.97-102.

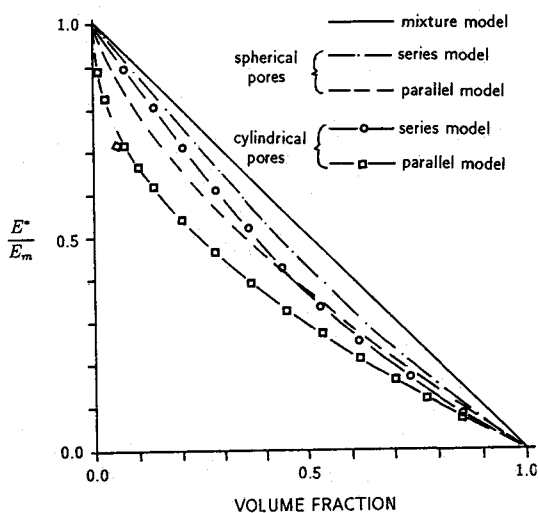


図-7

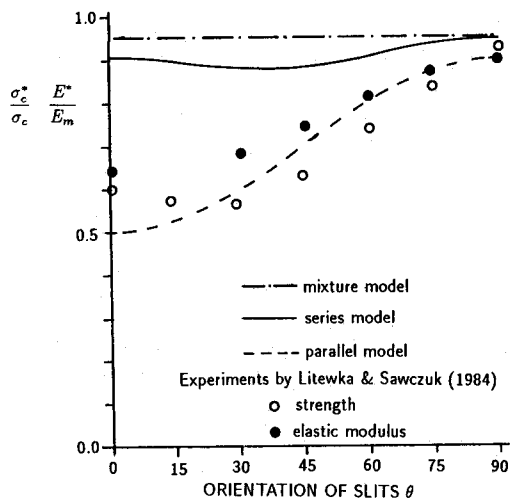


図-8

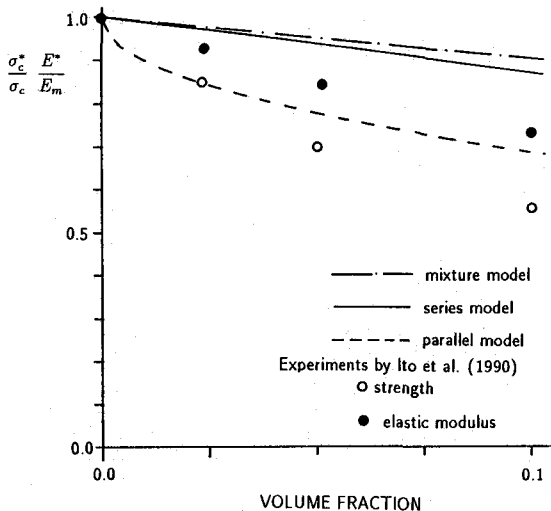


図-9

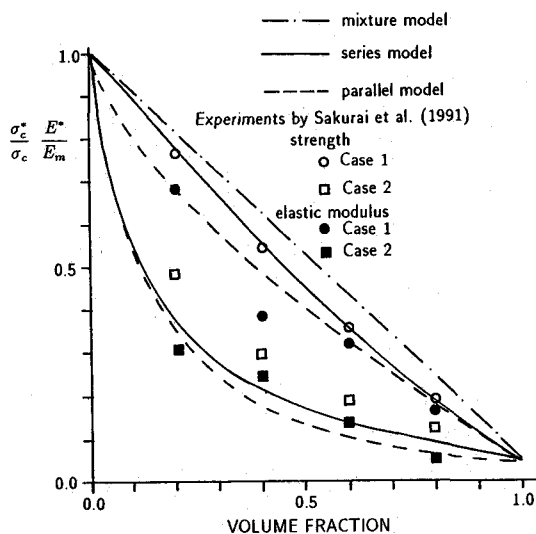


図-10