

マルチスケール解析による非均質岩盤の力学特性評価

加藤 準治^{1*}・寺田 賢二郎¹・京谷 孝史²

¹東北大学 災害科学国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

²東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

*E-mail: jkato@civil.tohoku.ac.jp

本研究では、ミクロスケールにおける岩石の塑性挙動および引張・圧縮強度特性を考慮して、非均質岩盤に対するマルチスケール解析を行い、そのマクロ強度特性評価を行うことを目的とする。具体的には、泥岩を母相に砂岩が傾斜して堆積している互層岩盤を対象として、そのミクロ構造に対する数値材料試験によりマクロ強度包絡線を算定し、上部構造物の影響を考慮した非均質岩盤の異方的なマクロ強度特性評価および局所化解析によるミクロ構造の破壊状況の把握を行う。構成則は、弾塑性構成則および弾塑性・損傷構成則を採用し、圧密応力に依存した材料パラメータを算定することで、深さ方向や上部構造物周辺の圧密応力によって異なる岩盤の強度評価を可能とした。

Key Words : rock mass, anisotropic strength, elasto-plasticity, damage, multiscale analysis

1. はじめに

本研究は、津波荷重を受ける海洋構造物を敷設した互層岩盤を対象にそのマルチスケール解析を行うものである。ここでは、ミクロスケールにおける岩石の塑性挙動および引張・圧縮強度特性を考慮して、非均質岩盤に対するマルチスケール解析を行い、そのマクロ強度特性評価を行うことを目的とする。具体的には、泥岩を母相に砂岩が傾斜して堆積している互層岩盤を対象として、そのミクロ構造に対する数値材料試験によりマクロ強度包絡線を算定し、上部構造物の影響を考慮した非均質岩盤の異方的なマクロ強度特性評価および局所化解析によるそのマクロ強度に対応したミクロ構造の破壊状況の把握を行うものである。本研究では、実例として計算コストを大幅に低減できる分離型マルチスケール解析手法¹⁾を用いて数値解析を実施した。

2. 弾塑性構成則、等方性弾塑性・損傷構成則

本研究で解析対象とする、泥岩、砂岩に対して等方性弾塑性構成則を仮定する。また、マクロ材料挙動としては異方性弾塑性構成則をマクロ構成則に仮定し、数値材料試験からその材料パラメータを同定する。また、引

張・圧縮強度特性の評価を目的として等方性・弾塑性損傷構成則を導入する。

(1) 等方性弾塑性構成則

等方性弾塑性構成則には一般的なMises型の等方性弾塑性構成則を採用する。ひずみ加算分解、弾性構成則、降伏関数、流れ則、相当塑性ひずみ、内部硬化則、負荷・除荷条件は、それぞれ次式で与えられる。

$$\sigma = \mathbb{C}_0^e : \varepsilon^e \quad (1)$$

$$f(\sigma, \alpha) = \|\mathbf{s}\| - \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_y(\alpha) = 0 \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\gamma}_p \mathbf{N} \quad (3)$$

$$\alpha = \bar{\varepsilon}^p = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3}} \|\dot{\varepsilon}^p\| dt \quad (4)$$

$$\dot{\alpha} = \dot{\bar{\varepsilon}}^p = \sqrt{\frac{2}{3}} \|\dot{\varepsilon}^p\| \quad (5)$$

$$f(\sigma, \alpha) \leq 0 \quad \dot{\gamma}_p \geq 0 \quad \dot{\gamma}_p f(\sigma, \alpha) = 0 \quad (6)$$

ここで、 \mathbb{C}_0^e は、弾性係数テンソル、 \mathbf{e}^e は弾性ひずみの偏差成分、 \mathbf{s} は偏差応力である。 \mathbf{N} は流れベクトルであり、偏差応力を成分とする単位ベクトル、 $\dot{\gamma}_p$ は塑性乗数である。なお、硬化関数としては σ_{y0} 、 H 、 R_0 、 β をパラメータとする次のVoce硬化則を採用する。

$$\sigma_y(\alpha) = \sigma_{y0} + H\alpha + R_0(1 - \exp(-\beta\alpha)) \quad (7)$$

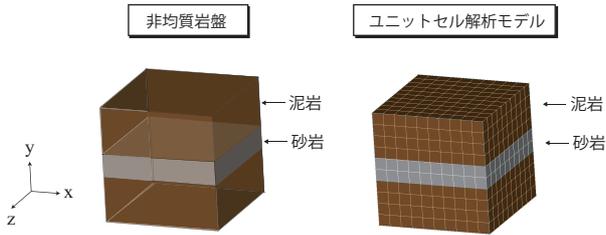


図-1 数値材料試験のユニットセル

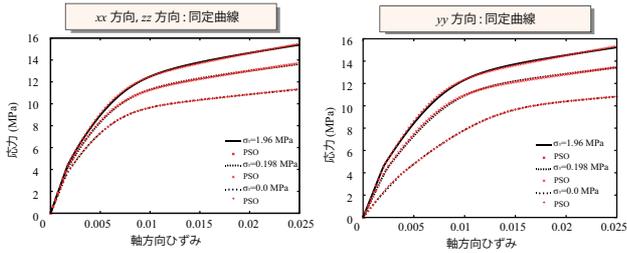


図-2 PSOによるパラメータ同定結果

(2) 異方性弾塑性構成則

マクロ構成則には、式 (1)の C_0^e に直交異方性を導入する。また、Hill応力 σ_{pHill} を以下のように定義する

$$\sigma_{pHill} = \sqrt{\sigma : M_p : \sigma} \quad (8)$$

式中の M_p は、Hillテンソルと呼ばれる各軸の初期降伏応力の比を成分とする4階のテンソルであり、参照降伏応力には各方向の初期降伏応力の最小値を採用した。異方性弾塑性構成則では、降伏関数の代わりに塑性異方性ポテンシャル ϕ_p を用いて塑性流れ則を以下のように定義する。

$$\phi_p(\sigma, \alpha_{Hill}) = \frac{1}{2}(\sigma_{pHill})^2 - \frac{1}{2}(\sigma_y(\alpha_{Hill}))^2 \quad (9)$$

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\gamma}_p \frac{\partial \phi_p}{\partial \sigma} = \dot{\gamma}_p M_p : \sigma \quad (10)$$

また、相当塑性ひずみ速度を $\sigma_{pHill} \dot{\epsilon}^p = \sigma : \dot{\epsilon}^p$ を満たすようなひずみ速度 $\dot{\epsilon}^p$ とし、蓄積塑性ひずみはその時間積分量と定義すると、硬化則は、

$$\dot{\alpha}_{Hill} = \dot{\epsilon}^p = \frac{\sigma : \dot{\epsilon}^p}{\sigma_{pHill}} = \dot{\gamma}_p \sigma_{pHill} \quad (11)$$

となる。これらに次式の負荷・除荷条件が加わり、Hillの弾塑性モデルが完備される。

$$\dot{\gamma}_p \geq 0, \quad \phi_p \leq 0, \quad \dot{\gamma}_p \phi_p = 0 \quad (12)$$

(3) 等方性弾塑性損傷構成則

多次元問題における等方性の損傷モデルは、損傷変数

を導入し、以下の式で表す。

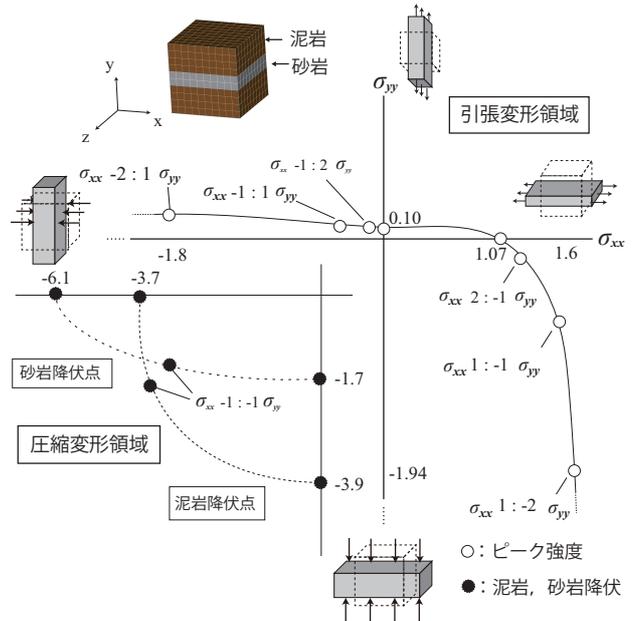


図-3 強度包絡線

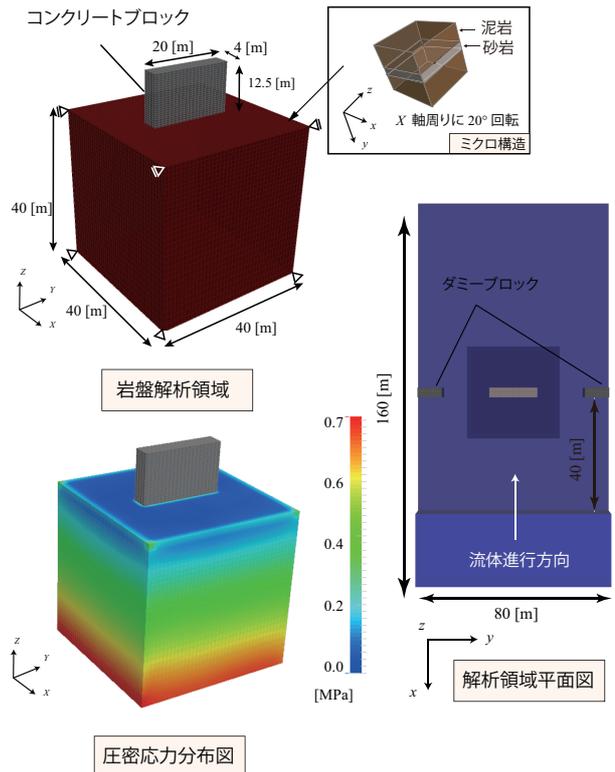


図-4 マクロ解析境界条件と圧密応力の分布図

$$\sigma = (1 - D) C_0 : \epsilon^e \quad (13)$$

ここで、 D は損傷変数であり、損傷がなければ $D = 0$ 、損傷が進展し、完全に破壊されている状態であれば $D = 1$ を示す、 $0 \leq D \leq 1$ を値域とする変数である。損傷判定には de Vree らによって提案された、引張 - 圧縮間の強度比を導入した修正 von-Mises モデルにおける等

価ひずみを採用する。また、引張強度 f_t を用いて損傷開始ひずみを以下の式で定義する。

$$\kappa_0 = \frac{f_t}{E} \quad (14)$$

これらの損傷パラメータと、変形履歴における最大の等価ひずみを $\kappa \geq 0$ と置くことで、負荷・除荷、損傷の判定を行う。なお、損傷変数 D は以下の式で定義する。

$$D(\kappa) = \left[1 - \left\{ 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp\left(-\frac{E\kappa_0 h_e}{G_f}(\kappa - \varepsilon_0)\right) \right\} \right] \quad (15)$$

ここで、 h_e は要素長さ、 G_f は単位面積当たりのは界面を形成するのに必要なエネルギーである。

3. 数値材料試験

図-1に示す泥岩と砂岩から構成される非均質岩盤のユニットセルに対して数値材料試験を行った。ここで、ユニットセルにおける体積比は泥岩 8 : 砂岩 2 と設定し、圧密応力を0.0 MPaから1.96 MPaの間で、0.196 MPa刻みで設定し、10 ケース試験を行った。また、この数値材料試験を行う前段階として、泥岩、砂岩それぞれに対する三軸圧縮CU 試験の結果から式(7)に示されるVoce 硬化則の各パラメータと弾性定数を圧密応力ごとに同定し、数値材料試験の入力データとしている。

図-1に示すユニットセルに、等方性弾塑性構成則を用いて単軸圧縮とせん断変形をひずみ量が2.5% になるまで負荷する。数値材料試験の結果であるマクロ応力とマクロひずみの関係から、対応する等価均質体のマクロ異方性弾塑性パラメータを同定する。

本研究では、このパラメータ同定手法として、粒子群最適化法（以下、PSOに略）を使用しており、同定対象としたマクロ異方性弾塑性構成則の材料パラメータは弾性定数、ポアソン比、各方向の降伏応力、硬化係数である。ここで、弾性定数とポアソン比に関しては線形均質解析から同定することが出来るのでPSOの同定対象から外している。このとき、圧密応力を0.0 MPa、0.98 MPa、1.96 MPa としたときの x 方向、 y 方向のマクロ応力-マクロひずみ曲線とこれらに対してPSOを行った結果を数値材料試験の結果（図-2）とあわせて図-3に示す。図中の数値材料試験の結果とPSOの同定曲線には良い一致が見られるため、ここで得られたパラメータをマクロ異方性弾塑性構成則に用いることとする。また、実際の構造物における圧密応力は無限に考えられるため、本研究で仮定した0.0 MPaから1.96 MPaの間で補間ができるよう、同定したパラメータに圧密応力を変数とする近似曲線を導入する。本研究では、次の2次関数形式を仮定する。

$$val = a\sigma_3^2 + b\sigma_3 + c \quad (16)$$

ここで、 σ_3 は圧密応力である。マクロ解析を行う際に、事前に圧密応力を算定しておくことで、この圧密応力に依存したパラメータを利用することができる。マクロ強度特性評価のため、等方性弾塑性・損傷構成則を用いて軸方向引張変形を図-1のユニットセルに与える。

また、図-3はユニットセルに与える引張変形により得られるマクロ応力の最大値（ピーク強度）と、 x 軸方向、 y 軸方向に対して同時に負荷をかけた時のピーク強度を結んだマクロ強度包絡線を示している。図中には圧縮変形においてミクロ構造内の泥岩、砂岩の塑性変形が始まる応力状態もプロットしている。このピーク強度と降伏点はユニットセル内の泥岩、砂岩の配置に依存したものであるが、このようなマクロ強度包絡線を事前に算定しておくことで、マクロ解析で得られるマクロ応力の分布図から、破壊箇所の判定を行うことが容易になる。次章の解析例では、このマクロ強度包絡線を用いたマクロ強度特性の評価と局所化解析を用いたミクロ構造の強度特性の評価を行う。

4. 海洋構造物に対する流体-構造連成解析

津波荷重を受ける海洋構造物を敷設した互層岩盤を対象にマルチスケール解析を行う。ここでの構造解析には動的陰解法を採用し、流体力には、自由表面流れとしてNavier-Stokesの運動方程式と連続の式をFEMとVOF法を用いて近似する。流体力の解析領域と構造解析モデルを図-4に示す。ここでは、防波堤のようなコンクリートブロックに流体力が作用する場合を考える。流体-構造の連成解析における境界条件としては、コンクリートブロックから40 m 離れた地点に静水圧から12 m の波柱をたて、自由落下させることによって波を発生させて、流体解析を行った。

図-5に、波がコンクリートブロックに到達する前の時刻と、節点変位ベクトルのノルム値である変位量が最大になった時刻の解析結果を示す。また図中には、変位量が最大値を取ったときの引張変形が卓越する領域の X 、 Z 軸方向のマクロ垂直応力を拡大した様子を示している。

ここで、図-3に示したマクロ強度包絡線を用いて考察を行うと、図中の X 軸方向応力、 Z 軸方向マクロ垂直応力が共に正の値をとり、前者が1.0 MPaを超えている点A周りの領域では、軸方向応力値が第一象限にあるマクロ強度包絡線の外側にある。すなわち、この領域では、泥岩・砂岩両者に損傷が生じている可能性が示唆される。次に、点B周りの領域では、 Z 軸方向マクロ垂直応力が0.1 MPa前後であるため、 X 軸方向マクロ垂直応力の大小

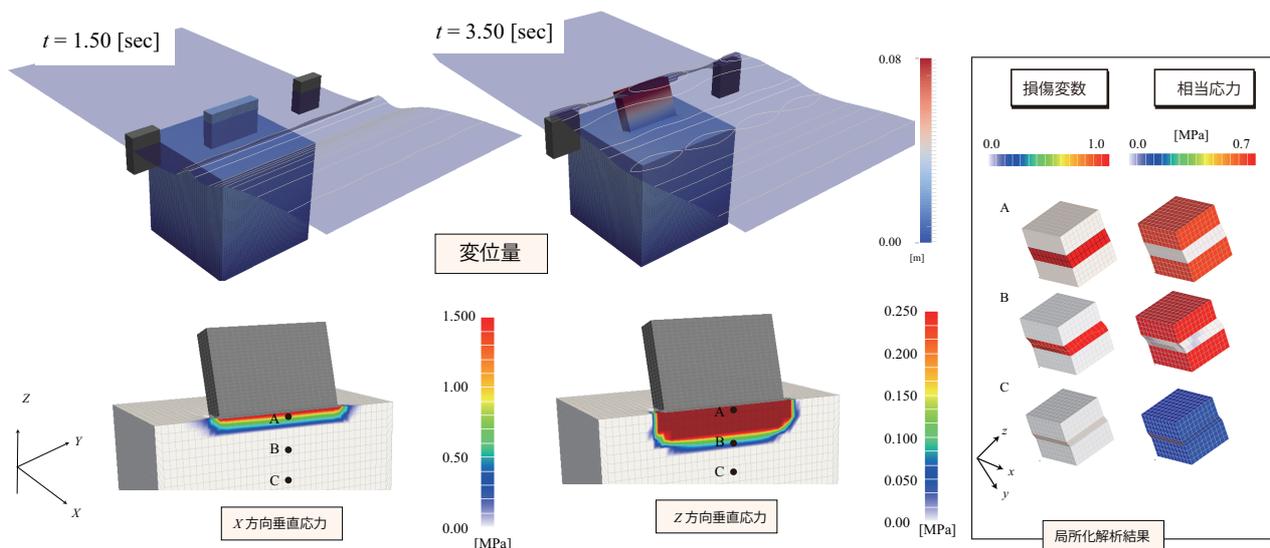


図-5 マクロ解析境界条件と圧密応力の分布図

によっては砂岩に損傷が生じている可能性があり、点C 周りの領域では泥岩・砂岩ともに損傷が生じないと考えられる。

以上の考察の検証として、点A から点C について局所化解析を行う。これらの点のマクロひずみ履歴を入力データとして、図-1中のマイクロ構造解析モデルに対して局所化解析を行った結果を図-5 (右)に示す。この図からわかる通り、点A, B では砂岩に損傷が発生していることがわかる。先に、マクロ応力のX, Z軸方向成分の分布図からは点A において泥岩も破壊する可能性が示唆されたが、比較的、引張強度の低い砂岩に先に損傷が発生したため、泥岩に損傷が発生しなかったものと推察される。この点を除けば、マクロ強度包絡線を用いた考察と局所化解析の結果は概ね一致している。

5. まとめ

本研究は、津波荷重を受ける海洋構造物を敷設した互層岩盤を対象にマルチスケール解析を行った。ここでは、泥岩と砂岩から構成される非均質岩盤に対して、マイクロスケールにおける岩石の塑性挙動、圧縮・引張強度特性を考慮してマルチスケール解析を行うことで、異方的なマクロ強度特性の評価を行った。

参考文献

- 1) Terada, K., Kato, J., Hirayama, N., Inugai, T., Yamamoto, K., A method of two-scale analysis with micro-macro decoupling scheme: application to hyperelastic composite materials, *Comput. Mech.*, 52 (5), pp 1199-1219, 2013.
- 2) Terada, K., Kikuchi, N., A class of general algorithms for multi-scale analyses of heterogeneous media, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190 (40-41), pp. 5427-5464, 2001

MULTI-SCALE CHARACTERIZATION OF TENSILE AND COMPRESSIVE STRENGTHS OF HETEROGENEOUS ROCK MASS

Junji KATO, Kenjiro TERADA and Takashi KYOYA

The macroscopically anisotropic strengths of rock masses with local heterogeneities are assessed by means of the method of micro-macro decoupling analyses in consideration of yield and tensile/compressive strengths of rocks at micro-scale. To evaluate the macroscopic strength characteristics, a series of numerical material testing analyses, which is based on the mathematical homogenization theory, is conducted on a layered structure of mudstone and sandstone, each of which exhibits consolidation-pressure dependent plastic deformations as well as tension-cut-off-type damage behavior. Numerical examples are presented to demonstrate the performance of this method.