互層岩盤の変形・強度特性評価のための分離型マルチスケール解析手法の開発

1. はじめに

互層岩盤上の構造物の安全性評価には互層岩盤の変形・ 強度特性が重要となる.しかし互層岩盤は複雑な微視的構 造を有するため,数値解析による岩盤構造物の変形・損傷挙 動の予測は難しく,計算コストも高い.そこで本研究では, 分離型マルチスケール解析により計算コストを抑えた上で 岩盤の変形強度特性を評価する手法を提案する.

2. ミクロ材料構成則

2.1 等方性弹塑性構成則

弾性域は Hooke の弾性構成則 $\sigma = \mathbb{D}^e : \varepsilon^e$ に従うものと する. 降伏基準には Drucker–Prager モデルを採用し,降伏 関数は粘着力 c およびパラメータ $\eta \ge \xi$ を用いて

$$\Phi(\sigma, c) \equiv \sqrt{J_2(s(\sigma))} + \eta p(\sigma) - \xi c = 0$$
(1)

とする.ここに、 J_2 は偏差応力 *s* の第 2 不変量、*p* は静水 圧応力である.塑性流れポテンシャルはパラメータ $\bar{\eta}$ を用 いて $\Psi(\sigma, c) \equiv \sqrt{J_2(s(\sigma))} + \bar{\eta}p(\sigma)$ と定義する.また塑性 乗数 $\dot{\gamma}$ と降伏関数 ϕ により、以下の弾塑性モデルの負荷/除 荷条件が成立する.

$$\Phi \le 0, \quad \dot{\gamma} \ge 0, \quad \dot{\gamma} \Phi = 0 \tag{2}$$

2.2 損傷構成則

応力--ひずみ関係はスカラーの損傷変数 D を用いて次式のように表される.

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D) \mathbb{D}^{\mathrm{e}} : \boldsymbol{\varepsilon}$$
 (3)

この D は車谷ら¹⁾ の破壊力学に基づく等方性損傷モデルを 実質応力空間に拡張した変数であり、発展則はパラメータ α^d 、 β を用いて

$$D\left(\eta^{d}\right) = 1 - \frac{\eta_{0}^{d}}{\eta^{d}} \left(1 - \alpha^{d} + \alpha^{d} \exp\left(-\beta\left(\eta^{d} - \eta_{0}^{d}\right)\right)\right)$$
(4)

である.損傷開始の条件には以下の二曲面モデルの損傷関 数を採用する.

$$\phi_1\left(\boldsymbol{\sigma}^{\text{eff}}\right) = \frac{f_t}{\tau_f} \sqrt{J_2\left(\boldsymbol{s}\right)} - \eta^d\left(\boldsymbol{\sigma}^{\text{eff}}\right) = 0$$
 (5)

$$\phi_2\left(\boldsymbol{\sigma}^{\text{eff}}\right) = I_1(\boldsymbol{\sigma}^{\text{eff}}) - \eta^d\left(\boldsymbol{\sigma}^{\text{eff}}\right) = 0$$
(6)

ここに、 σ^{eff} は実質応力である.

○東北大学大学院工学研究科	学生会員	山中耀介
東北大学大学院工学研究科	学生会員	鈴木峻
鹿島建設株式会社	正会員	大川真里奈
東北大学災害科学国際研究所	正会員	森口周二
東北大学災害科学国際研究所	正会員	寺田賢二郎



3. 数值材料試験

図-1 に示す構造のユニットセルに第2章で示した等方性 弾塑性・損傷構成則を適用して数値材料試験を行った.これ により得られたマクロ応力-ひずみ応答曲線を示す図-2よ り,各方向で変形・損傷挙動が異なることが確認できる.こ のような変形・強度特性を再現可能なマクロ材料に適用す る直交異方性弾塑性・損傷構成則を次章で説明する.

4. マクロ材料構成則

4.1 直交異方性弹塑性構成則

応力–ひずみ関係は直交異方性の弾性テンソル \mathbb{C}^e を用いて, $\tilde{\sigma} = \mathbb{C}^e$: $\tilde{\varepsilon}^e$ となる.降伏基準には次の Hoffman モデルを採用する.

$$\tilde{\Phi}(\tilde{\sigma},\tilde{\alpha}) = \tilde{\sigma}: \boldsymbol{M}: \tilde{\sigma} + \boldsymbol{q}: \tilde{\sigma} - \tilde{\sigma}_{\mathrm{Y}}^{2}(\tilde{\alpha}) = 0$$
(7)

ここに *M* と *q* はそれぞれ 4 階と 2 階のテンソルであり,材 料の各種降伏応力により与えられる.塑性ポテンシャルは 降伏関数と同じ式を用いて, $\tilde{\Psi}(\tilde{\sigma}, \tilde{a}) \equiv \tilde{\Phi}(\tilde{\sigma}, \tilde{a})$ とする.ま た,負荷/除荷に関して式 (2)と同様の負荷/除荷条件が成立 する.

Key Words: 均質化法,マルチスケール解析,直交異方性弾塑性,損傷モデル,差分進化

〒980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 災害科学国際研究所 4F S403-S404, TEL 022-752-2132, FAX 022-752-2133





4.2 直交異方性損傷構成則

直交異方性損傷構成則において応力--ひずみ関係と損傷変 数 *D*の発展則は次式のように表される.

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}} = \left(1 - \tilde{D}\right) \mathbb{C}^{\mathrm{e}} : \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\mathrm{e}} \tag{8}$$

$$\tilde{D}\left(\tilde{\eta}^{d}\right) = 1 - \frac{\tilde{\eta}_{0}^{d}}{\tilde{\eta}^{d}} \left(1 - \tilde{\alpha}^{d} + \tilde{\alpha}^{d} \exp\left(-\tilde{\beta}\left(\tilde{\eta}^{d} - \tilde{\eta}_{0}^{d}\right)\right)\right)$$
(9)

損傷開始の条件として損傷関数は次式のように定義する.

$$\tilde{\boldsymbol{\Phi}}^{\mathrm{d}} = \tilde{\boldsymbol{\sigma}}^{\mathrm{eff}} : \boldsymbol{M}^{\mathrm{d}} : \tilde{\boldsymbol{\sigma}}^{\mathrm{eff}} + \boldsymbol{q}^{\mathrm{d}} : \tilde{\boldsymbol{\sigma}}^{\mathrm{eff}} - \left(\tilde{\boldsymbol{\eta}}^{\mathrm{d}}\right)^{2} = 0 \qquad (10)$$

ここに、 $\tilde{\sigma}^{\text{eff}}$ は実質応力であり、 $M^{d} \geq q^{d}$ はそれぞれ $M \geq q$ に用いる引張・圧縮・せん断降伏応力を引張・圧縮・せん 断強度に変換して与えられる.

5. パラメータ同定

第4章で説明したマクロ材料構成則によって図-2に示す 複雑な力学特性を表現するために,各方向の弾性係数や引 張強度などの32のマクロ材料パラメータを同定する.パラ メータ同定は第3章の数値材料試験の結果を用いて行う. 初めに21個の弾塑性パラメータを差分進化により同定した 後,11個の損傷パラメータを数値材料試験のピーク応力か ら取得する.得られた結果の一例としてxx方向圧縮試験と その同定曲線を図-3に示す.

6. マクロ構造解析

第4章のマクロ材料構成則に第5章で同定したパラメー タを適用し、マクロ構造解析を行う.マクロ構造として地 震外力を受ける地中のトンネルを想定し、モデル全体が xy方向にせん断変形するように強制変位を与える.互層傾斜 角 0°, 20°, -20°のケースで解析を行い、得られた損傷開 始直後の損傷変数の分布図を図-4に示す.いずれの場合で も損傷はトンネルの隅角部に発生しており、これは応力集 中の影響が大きいためであると考えられる.損傷部分につ いて、損傷開始直前に発生した水平応力 σ_{xx} と垂直応力 σ_{yy} を $\sigma_{xx}-\sigma_{yy}$ 平面にプロットし、損傷曲面との比較を図-5 に 示す.図よりいずれの互層傾斜角においても σ_{xx} および σ_{yy}



図-6 xy せん断ひずみの分布図

は損傷曲面の内側に収まっており,損傷はせん断応力 τ_{xy} に より発生していると考えられる.また,図-5と同じ変形状 態におけるせん断ひずみ γ_{xy} の分布を示す図-6から,互層 傾斜角によってひずみ分布が変化していることが分かる. 以上より,提案したマクロ構成則によれば,分離型マルチス ケール解析において岩盤のミクロな非均質性を反映したマ クロな変形・強度特性の異方性を適切に表現可能であると いえる.

7. 結論

互層岩盤の複雑な微視的構造に起因する異方性および引 張・圧縮依存性の複雑な変形・強度特性を,数値材料試験を 経て算出し,Hoffman モデルの直交異方性弾塑性・損傷構成 則に適用することで,マクロ構造解析を行うミクロ・マクロ 解析手法を構築した.そして,数値解析により,本手法が変 形状態や損傷状態を予測可能であることを例示した.

参考文献

1) 車谷麻緒,寺田賢二郎,加藤準治,京谷孝史,樫山和夫 共著: コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化と その性能評価,日本計算工学会論文集,2013巻,p.20130015, 2013.