

亀裂の開閉摩擦を考慮したマルチスケール解析による岩盤の変形強度特性評価

鉄道総合技術研究所 正会員 ○西岡 英俊
 東北大学大学院工学研究科 正会員 京谷 孝史

1. はじめに

亀裂性岩盤の力学特性は、亀裂による複雑な構造に支配されている。無数の亀裂が存在する亀裂性岩盤に対して均質化理論に基づき2段階スケールからアプローチする「マルチスケール応力変形解析法」が提案されている¹⁾。本研究では、亀裂性岩盤および亀裂を有する石膏供試体に対して均質化理論に基づき周期微視構造となる亀裂の初期開口、閉合および摩擦挙動を直接取り扱うマルチスケール解析を行い、変形および強度特性を評価する。

2. 評価解析手法の概要

評価手法の概要を図-1に示す。大別して3段階からなり、(a)変形特性をマルチスケール応力変形解析により評価し、(b)強度特性をユニットセルに対する数値試験から巨視的破壊基準を求め、(c)それを2次凸曲面に近似して極限支持力解析により構造全体の強度特性を評価するものである。

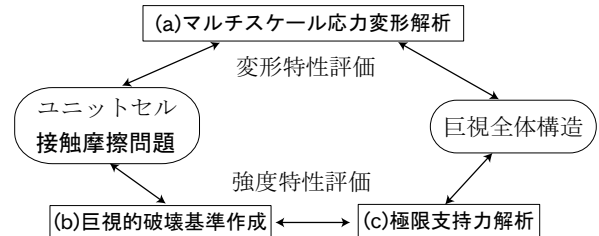


図-1 評価手法の概要

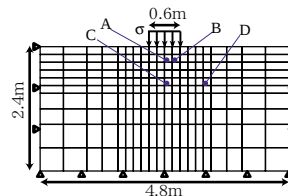


図-2 巨視構造モデル

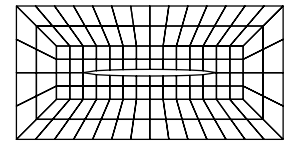


図-3 亀裂ユニットセル

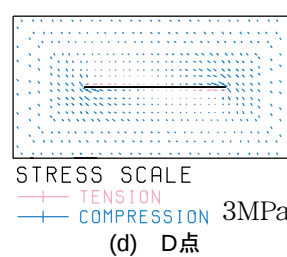
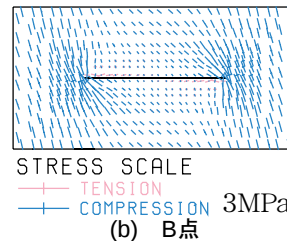
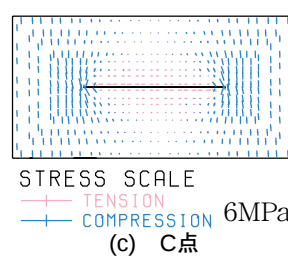
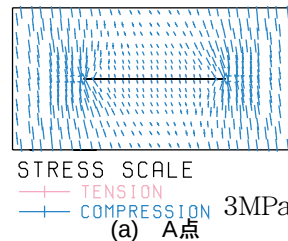


図-4 微視応力分布

3. マルチスケール解析例

(1) 平板載荷試験

実岩盤の変形特性を知る目的で広く行われている原位置平板載荷試験の解析を行う。亀裂が1方向に周期的に分布する岩盤をモデル化し、その亀裂配向角度 θ を水平から反時計回りに $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ として解析した。亀裂面での摩擦係数は0.6、平面ひずみ条件とし、基質部岩石は花崗岩の値を用いた。巨視構造モデルを図-2に、ユニットセルを図-3に示す。図-4に $\theta=0^\circ$ 、 $\sigma=3.5\text{MPa}$ の場合の図-2中のA～D点における微視応力分布を示す。場所によって微視応力分布形状が大きく異なることがわかる。また載荷応力 σ と載荷中心点の沈下量 u_y を図-5に示す。亀裂の閉合に伴う見かけの剛性上昇を表現できていることがわかる。

(2) ブロックせん断試験

ここではブロックせん断試験に対する強度評価結果を示す。(1)と同様のモデル(図-2,3)で垂直応力 σ を0,1,2,3MPaとし、極限支持力解析により得られたせん断応力 τ と σ の関係を図-6に示す。拘束圧依存性が表現できており亀裂配向角度 $\theta=0^\circ$ で粘着力 $c=3.6\text{MPa}$ 、内部摩擦角 $\phi=14^\circ$ が得られ $\theta=45^\circ$ では $c=4.2\text{MPa}$ 、 $\phi=26^\circ$ が得られた。岩石コア($c=20.6\text{MPa}$ 、 $\phi=60^\circ$)に比べ亀裂の存在による強度低下が評価され、また亀裂の配向角度による強度の異方性も表れている。

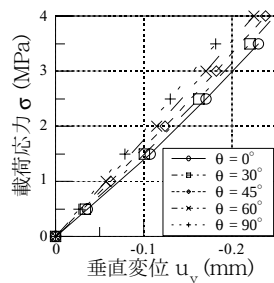


図-5 載荷応力-変位関係

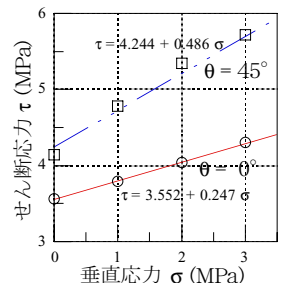


図-6 ブロックせん断試験解析結果

キーワード：亀裂性岩盤、均質化理論、マルチスケール解析、接触摩擦問題

連絡先：仙台市青葉区荒巻字青葉06 東北大学大学院土木工学専攻材料力学研究室 Tel.022-217-7425 Fax.022-217-7423

(3) 石膏一面せん断試験の強度特性評価

亀裂の配向角度がせん断強度に及ぼす影響を調べるために、一方向に長さ10mm、厚さ0.1mmで亀裂を作成した石膏供試体の一面せん断試験が行われている。この一面せん断試験を解析し実験結果との比較を通して考察を行う。

a) 巨視的破壊基準形状の検討

亀裂表面での摩擦係数を $\mu=0.6$ とした場合の巨視的破壊基準形状を図-7に示す。その形状は $\Sigma_x = \Sigma_y$ の二次元等方圧軸に関して非対称になり、亀裂が閉合する Σ_y の圧縮側で強度低下が表れる。また巨視せん断応力 Σ_{xy} 方向に対しては、健全材料に比べ大幅に強度低下が生じている。

b) マルチスケール解析による微視応力分布

マルチスケール解析を行い、 $P_n=7.35\text{kN}$ 、 $P_t=14.7\text{kN}$ での亀裂配向角度 θ とせん断面中央点での応力を調べた。表-1に θ と全体座標系での巨視応力 $\Sigma_x, \Sigma_y, \Sigma_{xy}$ 、主応力軸の方向 θ_1 および亀裂に沿った座標系の巨視応力 $\Sigma_{x'}, \Sigma_{y'}, \Sigma_{x'y'}$ を示す。 θ_1 は 55° 前後になり、亀裂方向が一致($\theta \approx 55^\circ$)あるいは直交($\theta \approx -35^\circ$)する方向に近いほど $\Sigma_{x'y'}$ が0に近づくことがわかる。

c) 実験結果の考察

(1),(2)から図-8中に示す $P_n=7.35\text{kN}$ での一面せん断試験の実験結果を考察する。亀裂配向角度 θ が主応力軸 θ_1 と異なる場合は、亀裂にせん断応力 $\Sigma_{x'y'}$ が主応力軸 θ_1 と異なる場合は、亀裂にせん断応力 $\Sigma_{x'y'}$ が作用するために強度が低い。またせん断応力 $\Sigma_{x'y'}$ が0に近づく方向の中、 θ が θ_1 と一致する方向($\theta \approx 55^\circ$)に近い場合は亀裂を閉合させる Σ_y 圧縮が主となる方向となり、大きな強度上昇は生じない。一方、 θ が θ_1 と直交する方向($\theta \approx -35^\circ$)付近では、亀裂と平行方向の Σ_x 圧縮が主となることから、大きな強度上昇が生じる。

d) 極限支持力解析による強度評価

c)で得た巨視的破壊基準(図-7)を2次凸曲面で近似し(図-9)、極限支持力解析により得られた強度評価を図-8中に示す。さらに比較のため、亀裂を連続体弱層モデルで評価した場合の強度評価²⁾も同時に示す。本解析手法が連続体弱層モデルでは低く評価していた流れ目側($\theta > 0^\circ$)においても実験結果に近い評価を得られることがわかる。

4. まとめ

本研究では亀裂性岩盤の開閉摩擦挙動を取り扱うマルチスケール解析を行った。その結果、亀裂性岩盤特有の力学特性が評価できることが示され、解析手法が不連続性岩盤に対する力学的モデルとして、岩盤構造物の設計や岩盤斜面の安定性評価として有用な手法になりうると考えられる。

参考文献

- 1) 寺田賢二郎, 京谷孝史: 無数の亀裂を有する物体のマルチスケール応力変形解析法, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp. 23-34, 1999.
- 2) 京谷孝史, 寺田賢二郎, 欧陽立珠: 岩石の力学特性と不連続面画像情報による岩盤の変形強度特性評価, 土木学会論文集, No.631/III-48 pp. 131-150, 1999.

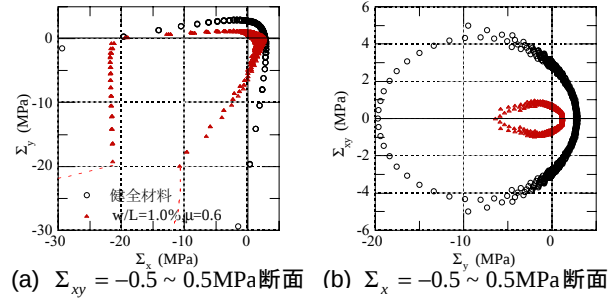


図-7 巨視的破壊基準曲面形状

表-1 マルチスケール解析による巨視応力

θ ($^\circ$)	Σ_x (MPa)	Σ_y (MPa)	Σ_{xy} (MPa)	θ_1 ($^\circ$)	$\Sigma_{x'}$ (MPa)	$\Sigma_{y'}$ (MPa)	$\Sigma_{x'y'}$ (MPa)
90.0	-1.044	-2.704	2.350	54.7	-1.044	-2.704	2.350
67.5	-0.440	-2.427	2.110	57.6	0.761	-3.628	0.789
45.0	-0.488	-2.229	1.914	57.2	0.556	-3.272	-0.871
22.5	-0.810	-2.409	1.979	56.0	-0.776	-2.444	-1.965
0.0	-1.111	-3.123	2.325	56.7	-3.123	-1.111	-2.325
-22.5	-1.396	-3.634	2.671	56.4	-5.195	0.165	-1.097
-45.0	-1.692	-3.421	2.755	53.7	-5.312	0.199	0.864
-67.5	-1.687	-3.012	2.585	52.2	-3.709	-0.990	2.296
-90.0	-1.044	-2.704	2.350	54.7	-1.044	-2.704	2.350

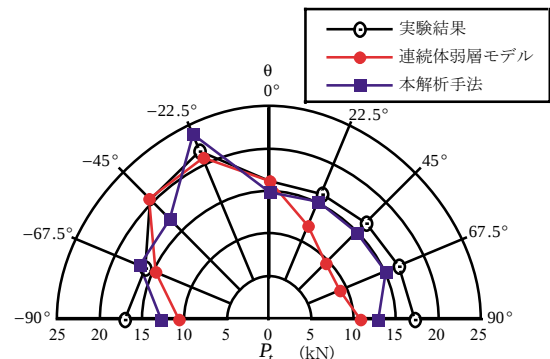


図-8 亀裂配向角度とせん断強度の関係

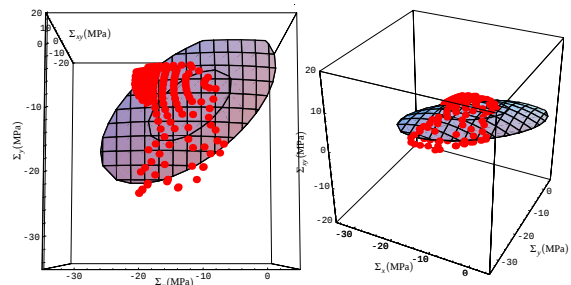


図-9 巨視的破壊基準の2次曲面近似