

Ⅲ－20

破壊力学に基づく岩盤のマルチスケール強度特性評価

東北大学 学生員 ○鈴木 孝夫
東北大学 正会員 京谷 孝史

1. はじめに

不連続面を多数含む不連続性岩盤の力学特性は、その不連続面による複雑な構造に支配されている。西岡¹⁾は、寺田・京谷²⁾らによって提案されたマルチスケール応力変形解析法に基づき、周期微視構造となる亀裂の開・閉合および摩擦挙動を直接的に取り扱う解析手法を開発し、さらに亀裂性岩盤の巨視的破壊基準の提案を行った。しかしながら、応力によって定義される西岡の破壊基準は、有限要素メッシュを細分化すると亀裂先端の応力集中を追いかけることとなり、岩盤の持ちうる強度を過小評価してしまうことが問題点として挙げられていた。そこで本研究では、破壊力学に基づき、メッシュの大きさに左右されない亀裂性岩盤の強度評価法を提案する。

2. 応力拡大係数による亀裂先端応力場評価

応力拡大係数は、亀裂先端の応力場を決定するパラメータである。二次元問題において亀裂の変形は図-1のように2つのモードに分類できる。亀裂先端の応力場は、図-1に示した変形の組み合わせであり、それぞれのモードの応力拡大係数を用いて次式のように表すことができる。

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^I(\theta) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{II}(\theta) \quad (1)$$

ここに、 K_I および K_{II} はそれぞれのモードにおける応力拡大係数、 $f_{ij}^I(\theta)$ および $f_{ij}^{II}(\theta)$ は、亀裂先端との角度によって決まる係数マトリックスである。式(1)から明らかなように、亀裂先端の応力は特異となる。

ここでは、応力拡大係数を用いることで、有限要素分割に依存しない亀裂先端応力場を表現可能なことを示す。解析対象として、図-2に示す亀裂を含んだ構造を考える。亀裂先端には特異点処理を施すことで応力の特異性の表現を試みた。解析対象に亀裂を広げるひずみとせん断ひずみを同時に作用させたときの結果を、図-3および図-4に示す。図-3は亀裂領域を10要素に分割したもの、図-4は同じく30要素に分割したもので、それぞれ特異点処理の有無による違いを示す。図には有限要素解析の結果として得られたせん断応力と、応力拡大係数より得られたせん断応力を示した。図より、特異点処理を施した方が明らかに亀裂先端の応力場を正しく評価していることがわかる。さらに、表-1に2つの応力の誤差を示す。いずれの要素分割においても、特異点処理を施した方が誤差の値は小さいことがわかる。また、標準偏差は特異点処理のあるものの方が小さい。このことは、亀裂先端に特異点処理を施すことにより、要素分割数に依存せずに亀裂先端の応力場を評価できたことに他ならない。

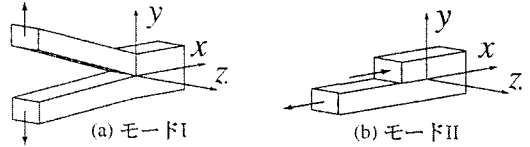


図-1 亀裂先端の変形モード

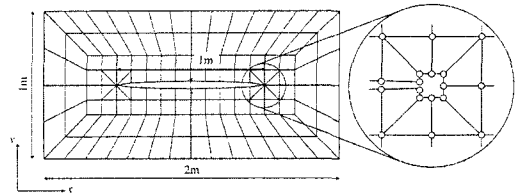


図-2 ユニットセルと亀裂先端の特異点処理

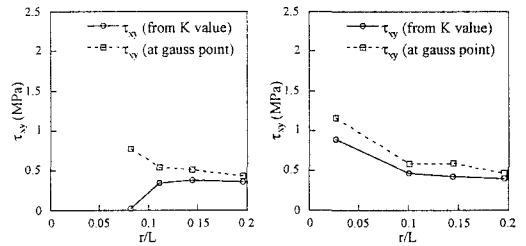


図-3 亀裂先端応力場（10要素分割）
(a) 処理なし (b) 処理あり

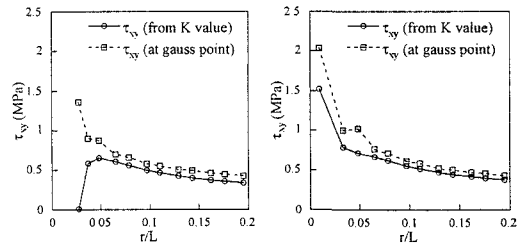


図-4 亀裂先端応力場（30要素分割）
(a) 処理なし (b) 処理あり

表-1 亀裂先端応力場の誤差

	処理なし	処理あり
10要素	127.62%	29.80%
20要素	96.48%	28.01%
30要素	88.63%	27.93%
標準偏差	20.62	1.06

3. 巨視的破壊基準の定義

微視構造を含む材料の巨視空間上のある1点での破壊開始の基準を次のように定義する。

[定義]：材料内部の点 x の近傍にあるユニットセル内部の亀裂先端において、亀裂先端の応力拡大係数がいずれかのモードの破壊じん性値を越えたとき、構造体の点 x において巨視的な破壊が始まる。

この定義のもとで、所望の巨視的破壊基準に達する巨視応力 Σ_{kl} がマルチスケール応力変形解析²⁾により数値的に求めることができ、さらに二次凸曲面で近似することで極限支持力解析³⁾により巨視構造の強度評価が可能になる。

4. マルチスケール解析例

マルチスケール解析例として、図-5に示すような石膏モルタルの一面せん断試験をシミュレーションを行う。ユニットセルは図-2と同様の形状のものをを用い、寸法は10mm×20mm、亀裂長さを10mmとした。なお、石膏モルタルの破壊じん性値は、既に実験で得られている他材料のものから引張強度の相関により推定した。

(1) 巨視的破壊基準面

3.で定義した破壊時巨視応力点を図-6に示す。ユニットセル内の亀裂には長さに対して1.0%の開口幅を与えることで、実験を忠実に再現した。図-6.(a)は三次元応力空間中のプロット、(b)および(c)は任意の範囲の断面内に存在する点の投影である。(b)より、 $\Sigma_y < 0$ 領域においてもせん断強度が上昇していないことから、亀裂は閉合していないことがわかる。

(2) 極限支持力解析

(1)で得られた破壊時巨視応力点を二次凸曲面近似し、極限支持力解析³⁾を行った結果を図-7に示す。図-5中に示した側方拘束荷重は $P_n = 7.35\text{kN}$ とした。せん断破壊荷重 P_t の大きさに差はあるものの、実験結果と同様にいわゆる差し目と呼ばれる $\theta = -22.5^\circ$ 方向に強度が強くなることが定性的に表現できている。この値の差は、破壊じん性値の決定や各モードの破壊じん性値の相関関係による。

5. おわりに

以上の成果から、本研究で提案する破壊力学によるアプローチは、従来法¹⁾で問題とされていた要素分割数の細分化による亀裂先端における応力集中を回避するものであるといえる。さらに、極限支持力解析によって破壊強度の異方性を表現しうるものであることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 西岡英俊：分布不連続面の開閉および摩擦を考慮した岩盤のマルチスケール解析手法の開発、東北大学修士学位論文、2001。
- 2) 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。
- 3) 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。

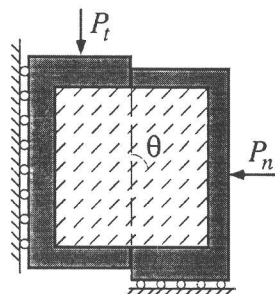
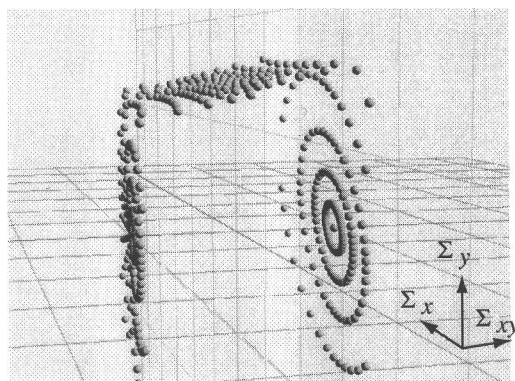
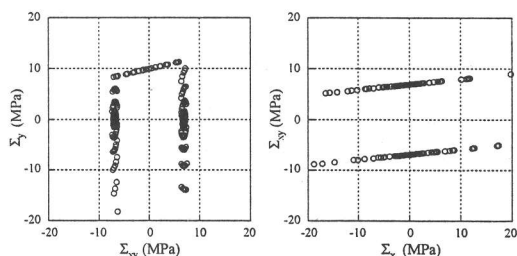


図-5 石膏モルタル一面せん断試験



(a) 三次元巨視応力空間



(b) $\Sigma_x = -5 \sim 5\text{MPa}$ 断面 (c) $\Sigma_y = 0 \sim 5\text{MPa}$ 断面

図-6 巨視的破壊基準

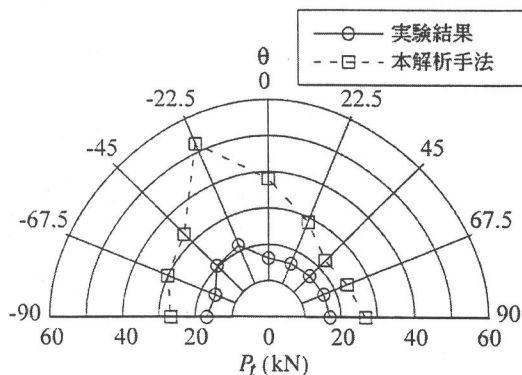


図-7 極限支持力解析結果