

岩石の限界ひずみを考慮した 均質化法に基づく岩盤の強度特性評価

小早川博亮^{1*}・京谷 孝史²

¹電力中央研究所 地球工学研究所 地圏科学領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

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: h-koba@criepi.denken.or.jp

均質化法に基づき、亀裂のかみ合わせによる応力状態を反映して岩盤強度を評価する既往の方法に、岩石の限界ひずみを考慮する新たな方法を提案した。既往の岩石試験に基づく岩盤の強度評価に適用するために、既往の原位置試験と室内試験の結果に基づきモデルのパラメータを選定したうえで、簡単なモデルを用いて提案手法の適用性を検証した。その結果、内部構造を反映した強度の評価が可能であること、および強度の拘束圧依存性が評価できることがわかった。提示した方法で岩盤の強度が評価できる可能性がある。

Key Words : rock mass, homogenization method, strength, critical strain

1. はじめに

岩盤の強度特性を評価するためには、亀裂などの影響を考慮した原位置試験が必要である。試験による岩盤の強度特性は岩盤分類との関係で評価されることから、試験結果は当該分類を代表している必要があるものの、それを客観的に評価することは必ずしも容易ではない。数値解析による物性評価方法は、この課題を改善する方策の一つであり、中でも対象とする画像情報と構成材料の力学特性から岩盤物性を評価する均質化法による評価法¹⁾は有力な方法である。

均質化理論に基づく岩盤物性評価においては、岩盤を周期的に繰り返す内部構造を持つ材料と考えたとき、その最小の単位に対しひずみを与えた場合の応力を計算する。これは、言い換えれば、岩盤を代表する要素の応力ひずみ関係を与えていることになる。この方法を用いると、岩盤の変形性は精度良く評価できるものの、強度特性は過小評価されること、強度の拘束圧依存性が評価できないことの2点が指摘されている²⁾。前者の原因としては、岩盤要素の強度を評価する際に、岩盤要素の降伏を「要素内の一点の破壊」をもって定義していることにあることが主と考えられている。また、後者の原因としては、岩盤の割れ目がかみ合うことによる効果が、考慮されていないことが原因として挙げられている。

これに対して、亀裂のかみ合わせを考慮して岩盤の力学特性を評価する方法が提案されている³⁾。この方法は、岩盤の割れ目の変形特性に非線形弾性体の構成則を当てはめ、亀裂のかみ合うことによって接線剛性が増加する現象を表現している。その結果、亀裂を適切にモデル化することにより岩盤要素の強度特性を評価できる可能性があることが示されている。しかしながら、亀裂をどの程度モデル化するかには依存していること、そもそも要素内の一点破壊に基づき降伏関数を定義していることから、計算によって評価された強度と原位置での岩盤の強度との関係を明確に対応させることは必ずしも容易ではない。

桜井³⁾は、従来の岩盤の応力状態による強度評価に対して、原位置で計測できる変位から直接定義できるひずみに対する破壊の閾値として、限界ひずみを定義し、岩盤での破壊ひずみについて種々の検討をしている。

本報告では、均質化法に基づき、亀裂のかみ合わせによる応力状態を反映して岩盤の強度を評価する既往の方法に、新たに岩石の限界ひずみを考慮して原位置岩盤の強度を評価する方法を提案する。この方法を岩盤の物性評価に適用することを最終的な目標として、ここでは簡易なモデルに提案する手法を適用し、限界ひずみによる強度評価について、解析的な検討を行った結果について述べる。

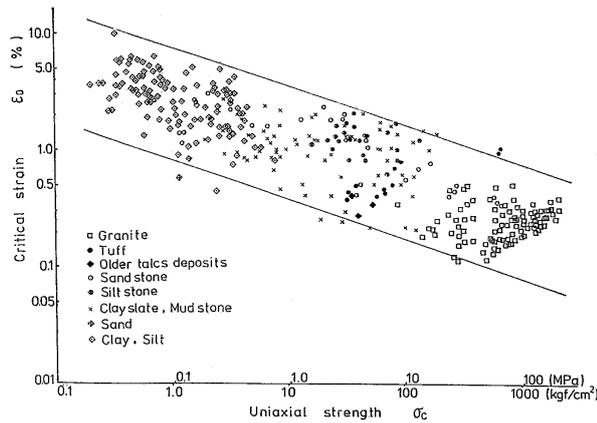


図-1 岩石の限界ひずみと一軸圧縮強さとの関係³⁾

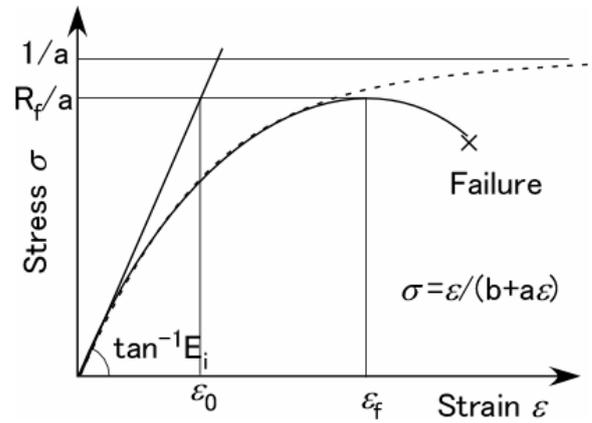


図-2 双曲線による応力ひずみ曲線の近似

2. 解析方法

(1) 岩盤の限界ひずみ

桜井³⁾は一軸圧縮試験によって得られる応力ひずみ関係において、一軸圧縮強さ σ_c と初期弾性係数 E_i から限界ひずみ ε_0 を式(1)で定義し、各種地盤に対して ε_0 をもとめ、一軸圧縮強さとの関係を図-1のように示した。この関係から、一軸圧縮強さの増加とともに ε_0 は減少することがわかる。

$$\varepsilon_0 = \sigma_c / E_i \quad (1)$$

試験によって得られる応力ひずみ関係を図-2に示す双曲線で近似した場合、初期弾性係数と双曲線のパラメータとは(2)式の関係がある。さらに、双曲線のパラメータ a を用いて一軸圧縮強さを式(3)で表されるとした場合、破壊時のひずみ ε_f は限界ひずみ ε_0 と式(4)の関係がある。

$$E_i = 1/b \quad (2)$$

$$\sigma_c = R_f/a \quad (3)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_0}{1-R_f} \quad (4)$$

応力ひずみ関係の非線形性が強い場合には、限界ひずみ ε_0 は、破壊時のひずみ ε_f とは異なるが、破壊までほぼ直線で表される $R_f \ll 1$ の場合には、限界ひずみ ε_0 は近似的に破壊時のひずみ ε_f と等しくなる。

一方、原位置の岩盤についても上記と同様の議論が成立し、原位置の岩盤の量を \ast_s として表すとすると、破壊時のひずみと限界ひずみには、次式で表される関係がある。

$$\varepsilon_{fs} = \frac{\varepsilon_{0s}}{1-R_{fs}} \quad (5)$$

ここで、桜井³⁾は、1)「割れ目が存在すると強度は低下するが、変形係数も同程度低下し、したがってその比として求められる限界ひずみは一定に保たれることになる」、2)「近似的に岩石試験によって得られる R_f を R_{fs} として考えても良いのではないかと著者は考えている」と述べている。つまり、式(4)及び(5)において、近似的に($\varepsilon_0 = \varepsilon_{0s}$, $R_f = R_{fs}$)が成り立つと考えられ、

この場合、岩石、岩盤の区別なく、式(4) (あるいは式(5))が成立することになる。そこで、以下では岩石と岩盤で限界ひずみと破壊ひずみの関係が等しいと考え、限界ひずみを岩盤の強度評価へ適用する方法について考える。

(2) 限界ひずみを破壊の規準とした均質化法による岩盤の強度評価法

岩盤の巨視的強度特性は、均質化解析において、ミクロ境界値問題にマクロひずみ E_{ij} を与えたときの応答としてマクロ応力 Σ_{ij} を求める局所化プロセスを利用して算定することができる。その際に必要なデータは、(1)内部微視構造を表すユニットセルモデル、(2)ユニットセル構成材料の応力ひずみ関係である。内部微視構造を表すユニットセルは、原位置試験を行う試験面サイズのスケッチを基に作成できる。ユニットセルの構成材料の応力ひずみ関係は、岩石および割れ目を含んだ供試体の試験結果によって得られる²⁾。限界ひずみを破壊の規準とし、均質化解析システムによって岩盤の強度を求める手順は以下の通りである。

- (1) マクロひずみ E_{ij} の6次元空間において、 E_{ij} の第3主ひずみ ε_3 (最大圧縮ひずみ) が岩石の限界ひずみ ε_0 (岩盤の限界ひずみと等しい) と等しくなるようなマクロひずみ E を、 N 個準備する。
- (2) マクロひずみ E_{ij} を与えたときの応答としてマクロ応力 Σ_{ij} を求める。このマクロ応力 Σ_{ij} は岩盤の限界

ひずみに対応する応力である。

- (3) 得られたマクロ応力を6次元空間における超曲面として適当な関数で近似すれば、得られた方程式 $F(\Sigma)=0$ がマクロ強度の破壊規準を与える。これには2次曲面

$$F(\{\Sigma\}) = \{\Sigma\}^T [A] \{\Sigma\} + \{\Sigma\}^T \{b\} - 1 = 0 \quad (6)$$

を用いるのが簡便で都合が良い。ここに、今は二次元平面ひずみ解析を行うので、 $[A]$ は(3×3)対象行列、 $\{b\}$ は3次元ベクトルである。詳細は京谷¹⁾を参考にされたい。

(3) パラメータの決定方法

a) 亀裂のかみ合せを考慮した弱層モデル

弱層モデル²⁾は、亀裂とその周辺の基質部を含んだ薄い部分を連続体弱層に置き換えて、亀裂がかみ合うことによる剛性の上昇を表現できるものである。具体的には、亀裂を含めた割線弾性係数 E^* を、亀裂の閉合の程度と関係する弱層の体積弾性ひずみ $e_v^* = \Delta V/V$ の関数として次式で表現するものである。

$$E^*(e_v^*) = E_0 + E_\alpha \times \left(1 - \exp(-\beta [e_v^*]^n)\right)$$

$$[e_v^*] = \frac{1}{2} (|e_v^*| - e_v^*) = \begin{cases} 0 & (e_v^* > 0) \\ e_v^* & (e_v^* \leq 0) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 E_0, E_α, β, n は弱層モデルのパラメータであり、 E_0 は $e_v^* = 0$ のときの初期割線弾性係数、 E_α は $e_v^* \rightarrow \infty$

において漸近する最大割線弾性係数に関するパラメータであり、 β, n は割線弾性係数の変化する様子を支配するパラメータである。

b) パラメータの決定手順

弱層モデルのパラメータは、割れ目を含まない岩石コアの圧縮試験と、同一岩種・岩級からなる原位置の岩盤を対象に行われた平板載荷試験結果と試験面の画像情報に基づき決定した。以下にパラメータの決定の手順と、決定したパラメータについて述べる。

まず、岩石コアの一軸圧縮試験によって得られた応力ひずみ ($\sigma_m - \epsilon_m$) 関係を用意する。次に、平板載荷試験によって得られた荷重強さ (σ) - 変位 (δ) 関係の初期載荷部分の関係を用いて、応力 (σ) - ひずみ (ϵ) 関係を次式に基づき算定する。

$$\sigma = \frac{\Delta P}{\pi a^2}, \epsilon = \frac{2\Delta\delta}{\pi a^2(1-\nu^2)} \quad (8)$$

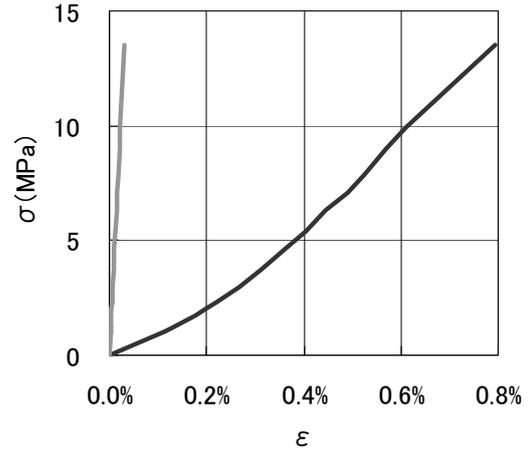


図-3 岩石および岩盤の応力ひずみ関係

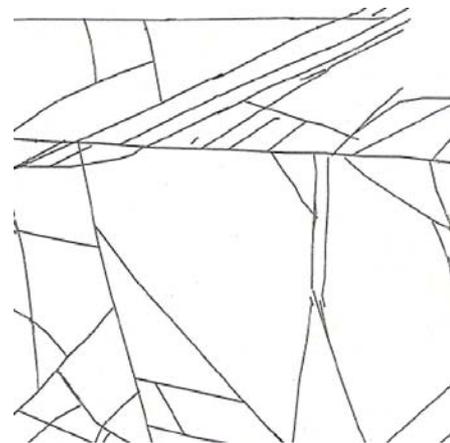


図-4 載荷面の亀裂状況 (縦60cm×横60cm)

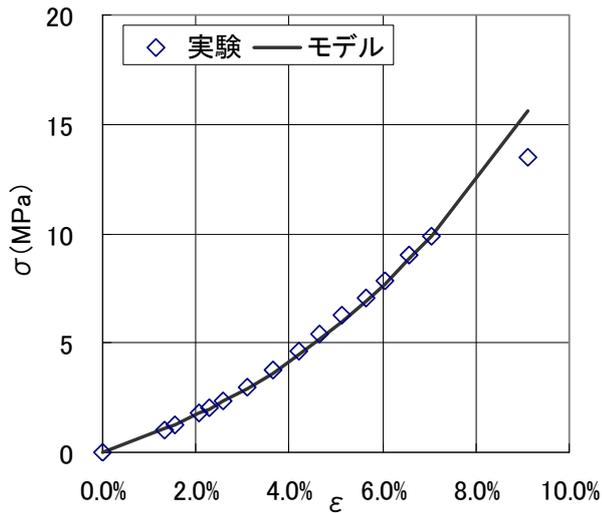
ここに、 P は荷重、 a は載荷板の半径、 ν は岩盤のポアソン比を表す。今、一次元圧縮の状態を考え、岩石の実質部と亀裂の面積割合をそれぞれ L_m, L_j とする。岩盤の変位 U は実質部の変位 U_m と亀裂の変位 U_j の和として与えられると考えると、弱層のひずみは次式で与えられる。

$$\epsilon_j = \frac{1}{L_j} \epsilon - \frac{L_m}{L_j} \epsilon_m \quad (9)$$

岩石と亀裂の面積割合は、亀裂の厚さをどの程度にするかによって異なる。つまり、算定される弱層の応力ひずみ関係は、亀裂の厚さによって異なることを示している。したがって、この面積割合算定に用いた亀裂の厚さは、岩盤の強度評価に用いる幾何情報における、亀裂の厚さと整合させる必要がある。

c) 算定したパラメータ

パラメータの算定に用いた岩石(三軸試験)と岩盤(平板載荷試験(PLT))の応力ひずみ関係を図-3に



弱層モデルのパラメータ: $E_0=75(\text{Mpa})$,
 $E_a=48225(\text{Mpa})$, $n=1.47$, $b=6.84 \times 10^{-2}$

図-5 弱層の応力ひずみ関係

示す。また、PLTの載荷面の亀裂の状況を図-4に示す。対象とした岩盤はC_M級の花崗岩であり、PLTの応力ひずみ関係の算定においては、岩盤のポアソン比は0.2と仮定した。

図に示す亀裂は、厚さ4mmでモデル化しており、面積割合は、亀裂部8.4%、実質部91.6%である。この面積割合を用いて、式(9)に基づいて算定した応力ひずみ関係を図-5に示す。図には実験から求めた応力ひずみ関係を式(7)の弱層モデルで近似したものを併せて示す。図より、モデルは実験により求めた応力ひずみ関係を良く表現できていることがわかる。

3. 解析結果

(1) 解析条件

解析に用いた岩石の変形特性は、円柱供試体による一軸圧縮試験の結果を用いた。また、弱層モデルのパラメータは、前章で述べた値を用いた。用いた入力物性値を表-1に示す。

解析に用いたメッシュを図-6に示す。図中、黒色で示した箇所は弱層を表し、白色の箇所は実質部を表す。ここでは、限界ひずみによる破壊規準を用いた場合、どの程度岩盤強度の評価に適用できるかを確認するために、簡易なモデルを用いている。

数値試験に用いるマクロひずみは、その第1主ひずみの値は限界ひずみと等しく、方向は図-6に示すメッシュの平面内になるように設定した。均一な材料の場合には、紙面垂直方向のひずみを限界ひずみのポアソン比分だけ与えることによって一軸圧縮条件と考えるこ

表-1 入力物性値

弾性係数	48300(MPa)
ポアソン比	0.245
限界ひずみ	0.30(%)

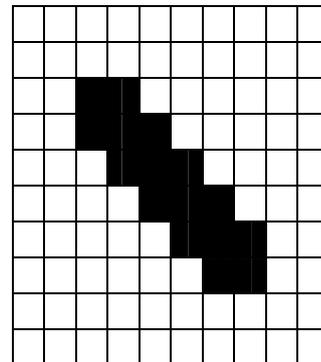
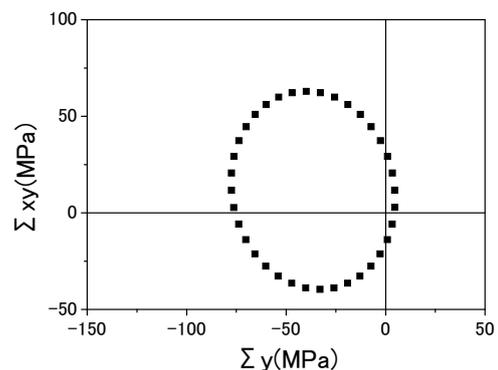


図-6 解析メッシュ図

とができる。今回の場合は対象の材料は複合材料であることから、厳密には一軸圧縮条件とは異なるが、紙面垂直方向ひずみは限界ひずみに岩石のポアソン比を掛け合わせたものを与え、一軸圧縮に近い条件とした。

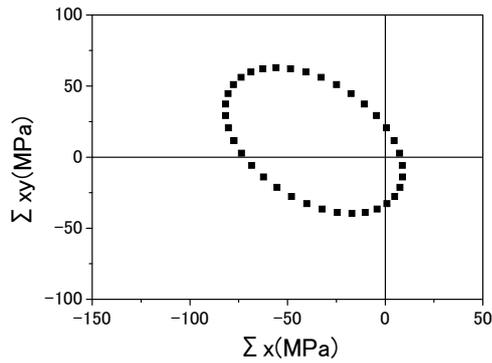
(2) 解析結果

解析によって得られたマクロ応力の分布を、 Σ_x , Σ_y , Σ_{xy} 平面に示したものをそれぞれ図-7に示す。図より、限界ひずみに対応する応力は各平面において楕円で表され、長軸方向が $\Sigma_y - \Sigma_{xy}$ 平面と $\Sigma_x - \Sigma_{xy}$ 平面では異なるものを示している。長軸の傾きは軸方向応力の増加に伴いせん断応力が増加する方向を示しており、これは拘束圧依存性を表していると考えられる。また、長軸の傾きの大きさが各平面で異なるのは、弱層の分布に対する载荷方向との関係を反映しており、内部構造を反映したものと考えられる。

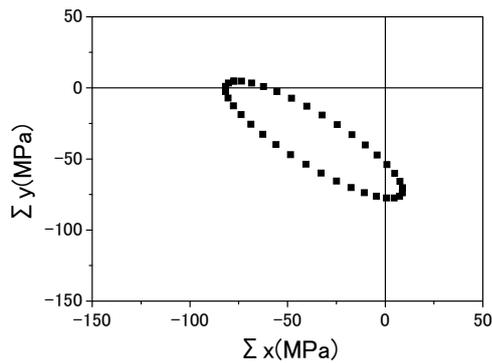


(a) $\Sigma_y - \Sigma_{xy}$ 平面

図-7 限界ひずみに対応したマクロ応力の2次元表示 (引張りを正として表示)



(b) $\Sigma_x - \Sigma_{xy}$ 平面



(c) $\Sigma_x - \Sigma_y$ 平面

図-7 限界ひずみに対応したマクロ応力の2次元表示 (引張りを正として表示)

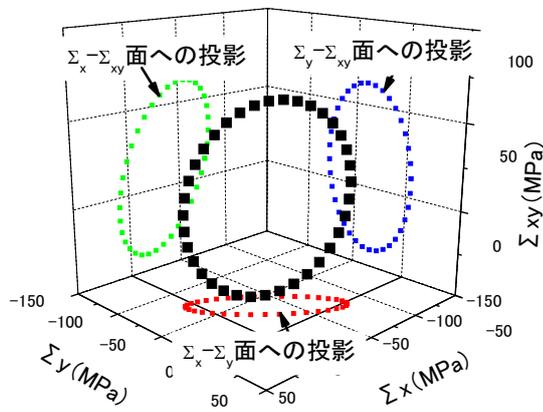


図-8 限界ひずみに対応したマクロ応力の3次元表示 (引張りを正として表示)

図-8には、図-7で示した応力を、三次元の座標にプロットしたものを示す。図より、限界ひずみに対応した応力状態は、3次元空間に分布した楕円として表示されていることがわかる。さらに、その楕円の軸は等方状態でなく、楕円の軸が傾いた状態で表示されており、これは岩盤の亀裂の分布を反映したものである。

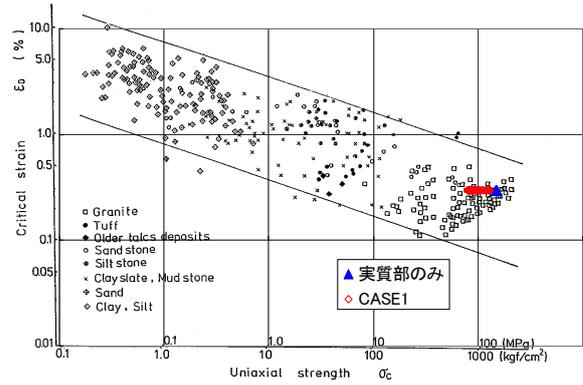


図-9 限界ひずみと一軸圧縮強さとの関係

4. 考察

解析によって得られたマクロ応力から軸差強度を求め、既往の一軸圧縮強さと限界ひずみの関係³⁾にプロットしたものを図-9に示す。図には、図-6のメッシュがすべて実質部の場合のプロットもあわせて示している。図より、弱層を含む岩盤の軸差強度はすべて岩石の場合よりも低下していることがわかる。さらに、軸差強度の低下の幅は80MPa~120MPaであることがわかり、これは数値試験に供したマクロひずみの方向に対応したものである。つまり、数値試験に供したマクロひずみの方向に応じて、弱層による強度低下の程度が異なっていることを示している。

さらに、今回の計算で求めた軸差強度は、拘束圧が生じている状態での軸差強度であり、一軸強度よりも大きく算定されていると考えられる。これを考慮して、既往の限界ひずみと一軸圧縮強さの関係と今回のプロットとの関係を見ると、既往の分布に対して右上の位置、つまり ϵ_c 、 σ_c ともに大きい領域にプロットされており、上記のことと整合していると考えられる。

5. まとめ

限界ひずみを岩盤の破壊規準として考え、それを均質化法による岩盤の強度評価に組み込む方法を提示した。さらに、岩石の力学試験と原位置での平板载荷試験から弱層モデルのパラメータを決定する方法を提示し、原位置試験の結果を用いてパラメータを算定した。

提示した岩盤の強度評価方法の適用性を、簡易なモデルで検証した結果、提示した方法で岩盤の強度が評価できる可能性があることがわかった。今後は、三軸状態に対応する限界ひずみに基づいて数値試験の方法を検討したうえで、実岩盤での強度評価を行い、当該方法の適用性について検討する予定である。

参考文献

- 1) 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, pp131-150, 1999.
- 2) 小早川博亮, 京谷孝史: 亀裂に対する連続体弱層モデルを用いた均質化法による岩盤の強度特性評価, 土木学会論文集 C, vol.63, No.2, pp.428-440, 2007.
- 3) 桜井俊輔: トンネル工事における変位計測結果の評価法, 土木学会論文集, No317, pp.93-100, 1982.

ROCK MASS STRENGTH EVALUATION CONSIDERING WITH A CRITICAL STRAIN OF ROCK BY A HOMOGENIZATION METHOD

Hiroaki KOBAYAKAWA and Takashi KYOYA

In this paper, we present a discontinuous rock mass strength evaluation method considering a critical strain of rock. This method incorporating a weak layer model that describes the mechanical behavior of cracks is based on a mathematical homogenization theory. Parameters of the weak layer model were determined by the In-site plate load test of discontinuous rock mass and the unconfined compression test of intact rock. We verified this method by using a simple model with a crack. As a result, it has been understood that the strength influenced by geometrical features rock mass was able to evaluate, and the strength dependency of confining pressure expressible too.