

限界ひずみ仮説に基づく岩盤の強度評価法

電力中央研究所 正会員 ○ 小早川博亮
 東北大学 正会員 ○ 京谷孝史

1. はじめに

岩盤上の重要構造物の構築において、岩盤の強度評価は重要である。このため、通常は原位置での岩盤試験によって強度を評価する。しかしながら、原位置試験の供試体寸法は有限であり、供試体寸法に反映できない不連続面や材料の不均一さを含んでいる場合、その強度評価は必ずしも容易ではない。これに対して、数値解析による岩盤の強度評価法が開発されている^{1),2),3)}。これらのうち、限界ひずみ仮説⁴⁾に基づく岩盤の強度評価法は、岩石の破壊時のひずみと関係した限界ひずみを規準として岩盤の降伏を規定する方法であり、岩盤の強度評価法として有力であると考えられた。しかしながら、限界ひずみ仮説に基づく岩盤の強度評価法は原位置試験の結果を必ずしも精度よく説明できるわけではないことがわかってきた³⁾。

限界ひずみは ε_0 は、図1⁴⁾に示すように同種同岩級の岩石に対する値であっても、幅をもって分布する特性であることから、岩石の試験に基づいて正確に限界ひずみを評価するよりも、原位置での岩盤の強度特性を説明することができて、かつその岩石の限界ひずみとして適切な値に設定できることが重要と考える。

そこで、本報では、限界ひずみ仮説を応用した均質化理論に基づく岩盤の強度評価法³⁾を用いて、原位置試験の結果をキャリブレーションする方法を提案する。提案手法を実際の花崗岩に対して適用することで、そのキャリブレーション方法を検証する。

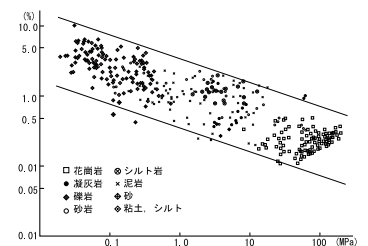


図-1 ε_0 と一軸圧縮強さの関係

2. 原位置試験結果のキャリブレーション方法

数値解析による岩盤の物性評価手法と原位置岩盤試験を組み合わせることにより岩盤物性評価を高度化する手法の枠組みが示されている⁵⁾。ここでは、このような岩盤物性評価の高度化手法の枠組みを踏襲し、限界ひずみ仮説を応用した均質化理論に基づく岩盤の強度評価法と、原位置試験を組み合わせたあらたな岩盤物性評価手法（キャリブレーション法）を構築する。

図2に、原位置試験と限界ひずみ仮説を応用した均質化理論に基づく岩盤の強度評価法を組み合わせることで原位置岩盤の強度を予測するためのキャリブレーション法の概念図を示す。その手順は、①岩石の一軸圧縮強さに対する限界ひずみの分布範囲から、設定する限界ひずみを決める。次に、②設定した限界ひずみに基づき、均質化法による岩盤の強度評価を行い、巨視的破壊規準を求める。そして、③得られた巨視的破壊規準を基に、極限荷重解析などの手法により岩盤せん断試験のシミュレーションを行い、得られた極限荷重と原位置試験の試験結果を比較し、適切な限界ひずみを設定する。

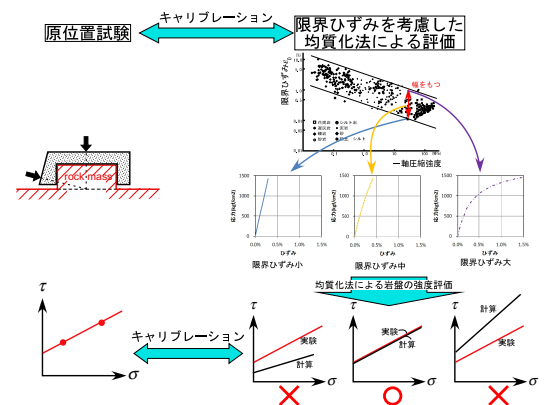


図-2 限界ひずみを考慮した均質化解析と原位置試験結果のキャリブレーション方法の概念図

3. 巨視的破壊規準の拘束圧依存性の検討

(1) 計算条件

ここでは限界ひずみの設定によって巨視的破壊規準の拘束圧依存性がどの程度変化するかを把握し、適切な範囲のものが得られるかどうかを確認する。

対象とした岩盤は C_M 級の花崗岩であり、用いた幾何情報は原位置岩盤せん断試験の試験面のスケッチである。入力物性については、実質部の弾性係数は48,300MPa、ポアソン比は0.245、粘着力は22.6MPa、せん断抵抗角は 55.3° である。破壊ひずみ ε_f と限界ひずみ ε_0 には $\varepsilon_f = \varepsilon_0 / (1 - R_f)$ の関係があり、また、限界ひずみは一軸圧縮強さ σ_c と初期弾性係数 E_i から、 $\varepsilon_0 = \sigma_c / E_i$ で求められる。 E_i と σ_c は破壊時のひずみに比べればばらつきは少ないと考えられるので、これらの値は実験に基づいて設定することとする。

	$\varepsilon_f(\%)$	R_f
case1	0.294	0
case2	0.368	0.2
case3	0.420	0.3
case4	0.756	0.61

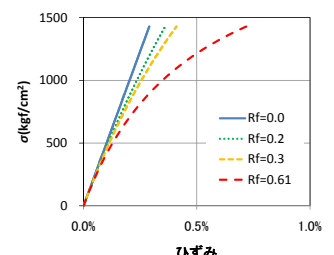


図-3 設定した応力ひずみ関係図

キーワード：岩盤，強度，均質化法，限界ひずみ

〒270-1194 我孫子市我孫子 1646 E-mail:h-koba@criepi.denken.or.jp

この場合、限界ひずみは一定値として与えられるので、ここでは限界ひずみに関連して、破壊時のひずみをパラメータとし、表1のように与えた。表1で与えられる応力ひずみ関係を図3に示す。

マクロ応力は、対象とする岩盤の幾何情報と入力物性、与えるマクロひずみに応じて算定されるので、応力の第一不変量 J_1 と偏差応力の第二不変量 $\sqrt{J_2}$ の関係は直線にはならず、異方性を反映して、一般に幅（バラツキ）をもった分布となる。ここでは破壊時のひずみの変化による強度の拘束圧依存性の変化を把握することが目的であるため、計算で、与えるマクロひずみは、異方性の影響を排除するために、軸ひずみの比 E_{11}/E_{22} が等しくなるように算定した。

(2) 計算結果

計算によって得られたマクロ応力から、 J_1 及び $\sqrt{J_2}$ を求めて図4に示す。図より、破壊時のひずみが大きくなるに従って、 $\sqrt{J_2}$ が大きくなると共に、各々の破壊時のひずみ毎のプロットであらわされる $J_1 \sim \sqrt{J_2}$ 分布の勾配 α も大きくなっていることがわかる。この勾配はまさに拘束圧依存性に関連したものであることから、破壊時のひずみの増加に応じて強度の拘束圧依存性が評価できていることを示している。

図4の分布を R_f 毎に直線近似して得られる Drucker-Prager 破壊規準の定数 α, K から、Mohr-Coulomb 破壊規準の c, ϕ を R_f 毎に求めて図5に示す。 R_f の増加とともに、 c, ϕ は増加しており、設定した R_f の範囲では、 ϕ は最大で50度程度まで増加していることがわかる。以上より、岩石試験に基づく R_f の範囲により、当該岩盤では c で1-2.5MPa、 ϕ で20~50°の範囲で変化することがわかる。

4. 極限荷重解析

(1) 計算条件

極限荷重解析に用いる有限要素分割を図6に示す。極限荷重解析は、図6(1)で鉛直荷重に対する応力分布を求め、その応力を初期応力として図6(2)のモデルに与え、せん断荷重に対する極限荷重を求める手順で行った。

(2) 計算結果

解析によって得られた荷重係数から $\tau - \sigma$ 関係を求め、図7に示す。 R_f の増加に従って強度の拘束圧依存性が大きくなっていることがわかる。これは図5に示したように各々の要素の入力特性において、 R_f の増加に伴って ϕ が大きくなっている結果を反映しているものと考えられる。しかしながら、 R_f の増加によって c は大きくなっているものの、 ϕ は $R_f = 0.3$ と 0.4 の場合ではほとんど変わらず、頭打ちの傾向が認められる。これは、要素の入力特性のうち、 ϕ が大きくなっても、ブロックせん断試験の極限荷重解析によって評価される拘束圧依存性の表現には上限がある可能性を示している。今回設定した限界ひずみに関するパラメータのうち、 R_f の拘束圧依存性を表す k は一定値として設定しているため、これを変化させることにより改善される可能性はある。

以上のことから、破壊ひずみの分布を考慮することにより、得られる岩盤の巨視的破壊規準の強度は増加することがわかった。したがって、破壊ひずみの分布をパラメータとして原位置試験の結果とキャリブレーションすることは可能と考えられる。

5. まとめ

限界ひずみ仮説を応用した均質化理論に基づく岩盤の評価法を用いて、原位置試験の結果をキャリブレーションする方法を提案し、実際の花崗岩に対して適用することで提案法を検証した。

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, pp. 131-150, 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) 小早川博亮, 京谷孝史: 限界ひずみ仮説を応用したマルチスケール解析による不連続性岩盤の強度評価. 計算工学講演会論文集, Vol. 14, 2009.
- 4) 櫻井春輔: 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, No. 327, pp. 93-100, 1982.
- 5) 岡田哲実, 谷和夫, 金谷守, 大津仁史: 原位置岩盤試験法の開発と不均質岩盤への適用性の検証. 土と基礎, Vol. 54, No. 4 pp. 22-24, 2006.

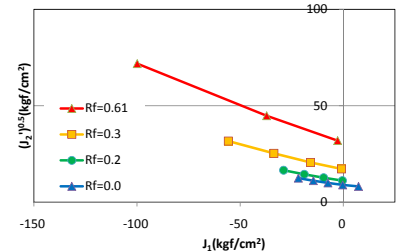


図-4 マクロ応力の $J_1 - \sqrt{J_2}$ 関係図

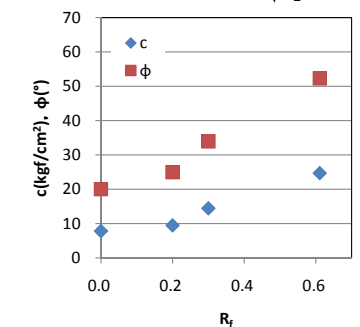


図-5 c, ϕ と R_f の関係

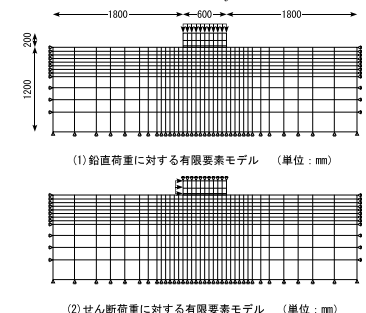


図-6 ブロックせん断試験の有限要素モデル

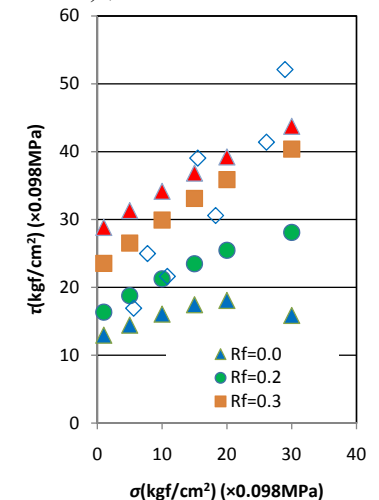


図-7 巨視的破壊規準を用いた極限荷重解析の結果