

掘削トラブルが生じた花崗岩の構成鉱物に見られた 押し込み変形特性曲線の特徴

東京大学大学院工学系研究科 学生会員 ○荒木 裕行
 香川大学工学部 正会員 長谷川修一

1. はじめに

掘進機を用いた岩盤の全断面掘削における掘削効率は、圧縮強度、岩石試料の硬度、研磨性鉱物粒子の含有量、岩盤中の割れ目及び層理などの影響を受ける¹⁾。掘進速度の推定にあたっては、岩石試料の一軸圧縮強度を主たる指標と位置付けた手法が多い²⁾。ローラービットを装着した場合、岩石の掘削はチップから受けた集中荷重によるチップ周辺岩石の剥離・破壊が繰り返されることで進められるが、これには岩石中に存在する数 μm 程度の微細クラックの進展が重要となる³⁾。つまり、岩石・岩盤レベルの影響のみならず、既存微細クラックの有無およびその性状など、ミクロな視点に立った岩石評価も場合によっては必要であるといえる。

一般的に、良好な地山を掘進機により掘削した場合、扁平な岩石片の掘削ずりが発生する。しかしながら、信楽花崗岩を対象とした施工においては、細粒状の掘削ずりが発生し、掘進速度が著しく低下した。当該花崗岩の調査ボーリングコアは、一軸圧縮強度が 82.5MPa であり、コアの連続性も良好でRQDはほぼ100%であったことから、岩石・岩盤レベルでの地山評価では掘進機の適用に比較的適した岩盤といえ、トラブルの原因は不明であった。

本研究では、金属やセラミックスなどの薄膜材料の評価試験として多用されているマイクロインデンテーション試験を用いることで、構成鉱物レベルにおいて花崗岩の力学的性質を検討した。本稿では特に、極端な掘削障害が発生した信楽花崗岩と、概ね通常通りの掘削が行われた豊田花崗岩を対象とし、両花崗岩の主要構成鉱物である長石と石英の押し込み変形特性曲線($P-h$ 曲線)の特徴について述べる。

2. 試験方法

試験は、最大荷重 P_{max} に達するまで一定割合で荷重を増加させることで微小なダイヤモンド製バーコピッチ(三角錐)圧子を測定対象に押し込み、 P_{max} に達した状

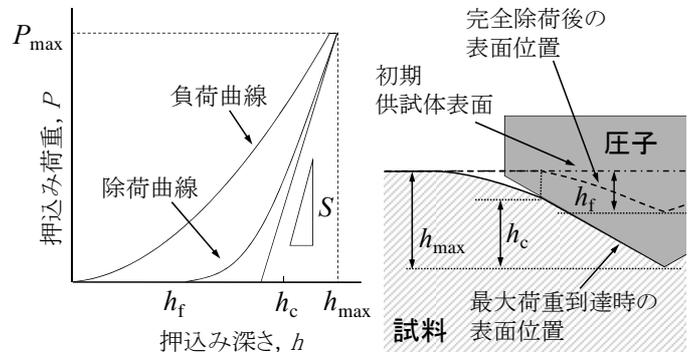


図-1 押し込み変形特性曲線 ($P-h$ 曲線) の概要と
圧子押し込みによる試料表面の変形模式図

態で一定時間荷重を保持し、 P_{max} から一定割合で除荷する、といった手順を1サイクルとする。 P_{max} は $980.67[\text{mN}]$ 、負荷・除荷時間は $10.00[\text{sec}]$ 、荷重保持時間は $2.00[\text{sec}]$ とし、初期供試体表面からの押し込み深さを $0.02[\text{sec}]$ 毎に計測することで $P-h$ 曲線を取得する(図-1)。

試験にて得られた除荷曲線は試料の弾性回復を示しており、除荷初期における接線勾配である接触剛性 $S (=dP/dh)$ を用いれば、試料とダイヤモンド製圧子の複合弾性係数 E_r は次式のように表される^{4)~6)}。

$$E_r = (1/\beta) \cdot (\sqrt{\pi}/2) \cdot (1/\sqrt{A_p}) / (1/S - C_f) \quad (1)$$

ここで、 β は圧子形状定数(三角錐圧子では 1.034)⁷⁾、 A_p は接触深さ h_c における接触投影面積、 C_f は試験装置のコンプライアンス C_f ⁶⁾である。 A_p は、圧子の幾何学形状および補正長さ Δh_c ⁶⁾を考慮すると、

$$A_p = 3\sqrt{3} \tan^2 65^\circ (h_c + \Delta h_c)^2 \quad (2)$$

で表わされる。なお、 E_r はダイヤモンド製圧子と試料のポアソン比 ν 及び縦弾性係数 E (添え字 i 及び s は圧子及び試料を表す)を用いて、

$$1/E_r = (1 - \nu_i^2)/E_i + (1 - \nu_s^2)/E_s \quad (3)$$

で表わされる。また、硬度 H_{IT} は次式で定義される⁴⁾。

$$H_{IT} = P_{\text{max}}/A_p \quad (4)$$

3. 試験結果と考察

信楽花崗岩の長石は、他と比較して硬度及び弾性係数が著しく小さいことが明らかとなった(図-2)。両値を減少させる原因としては、押し込み深さの増大および

キーワード 掘進機, 花崗岩, 造岩鉱物, マイクロインデンテーション, 硬度

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 古関研究室 TEL 03-5452-6421

接触剛性の減少が考えられるが、当該長石は特に押し込み深さの増大が著しい(図-3)。

同長石については、 $P-h$ 曲線の負荷過程において、荷重の増分が微小であるにもかかわらず h が不連続的に急増する箇所が認められた(図-4)。負荷曲線を数値微分し、負荷曲線の傾きの逆数である dh/dP の変化を検討したところ、概ね 200[mN]以下の荷重領域において、各々1ないしは2箇所程度のピークが確認できた(図-5)。なお、同様の現象は、豊田花崗岩の長石にはほとんど認められない(図-6、図-7)。負荷曲線における h の不連続的な増加現象は、セラミックスコーティング膜を対象に同様の試験を実施した事例では亀裂の生成や剥離などに伴って生じるとされており⁸⁾、同一の試料であればほぼ一定の荷重以上で生じることが明らかになっている⁹⁾。しかしながら、信楽花崗岩の長石においては、概ね一定荷重以下の負荷初期段階で発生している。そのため、試験によって新たに亀裂が生成されたのではなく、既存の微小クラック等の影響によって、負荷初期における変形能が増大した可能性が考えられる。

4. まとめ

掘削トラブルが生じた信楽花崗岩の長石は、通常の掘削が行われた花崗岩試料と比較して硬度・弾性係数に著しい低下がみられた。当該長石の $P-h$ 曲線には、概ね一定荷重以下で押し込み量の不連続的な増加が認められ、これに伴う押し込み深さの増大が硬度・複合弾性係数低下の原因であるといえる。負荷初期における変形能の増大は、比較試料ではほとんど認められず、信楽花崗岩は構成鉱物レベルにおいて特徴的な力学的性質を有していると言える。

参考論文

1) 大島洋志：土地地質学, pp.81-86, 2000. 2) 大久保誠介：トンネル掘進機の適用性とエキスパートシステム, 資源・素材学会誌, Vol.106, No.6, pp.341-346, 1990. 3) 関根英樹, 斎藤敏明：コアボーリングビットによる岩石の掘削の微視的過程のシミュレーション, 日本機械学会論文集 A, Vol.56, No.528, pp.1721-1729, 1990. 4) Oliver W.C. and Pharr G.M. : An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, *J. Mater. Res.*, Vol.7, No.6, pp.1564-1583, 1992. 5) Sneddon I.N. : The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile, *Int. J. Eng. Sci.*, Vol.3, No.1, pp.47-57, 1965. 6) Sawa T. and Tanaka K. : Simplified method for analyzing nanoindentation data and evaluating performance of nanoindentation instruments, *J. Mater. Res.*, Vol.16, No.11, pp.3084-3096, 2001. 7) Oliver W.C. and Pharr G.M. : Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements *J. Mater. Res.*, Vol.19, No.1, pp.3-20, 2004. 8) Ma L.W. et al. : Deformation mechanisms operating during nanoindentation of TiN coatings on steel substrates, *Sur. Coat. Tech.*, Vol.192, No.1, pp.11-18, 2005. 9) 菅沼幹裕ほか：ナノインデンテーション法に

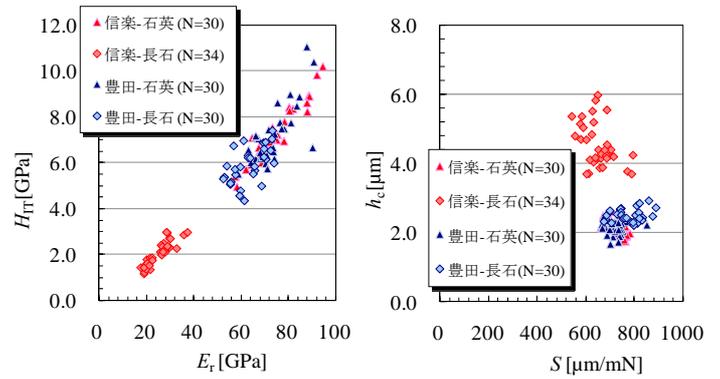


図-2 複合弾性係数と硬度

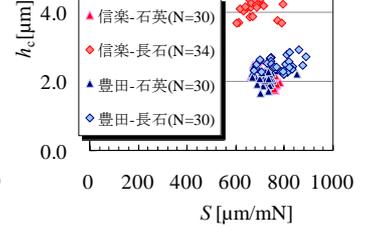


図-3 接触剛性と接触深さ

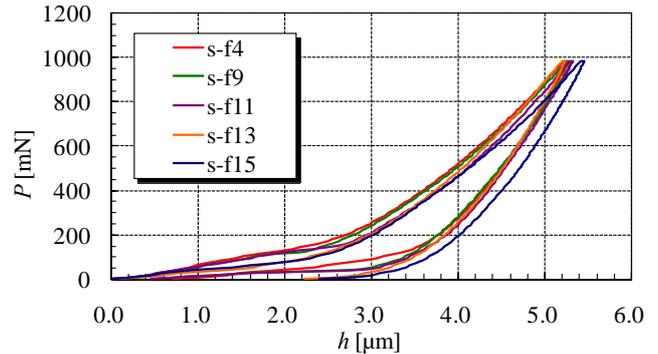


図-4 信楽花崗岩含有長石の $P-h$ 曲線

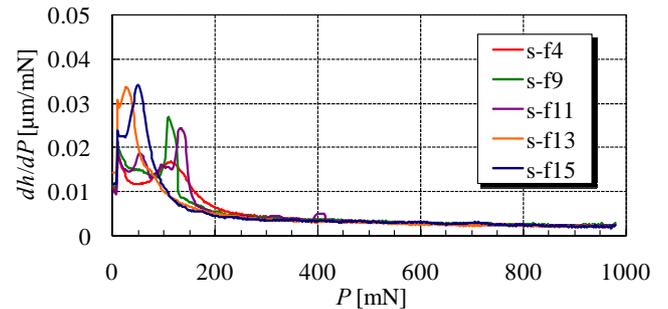


図-5 信楽花崗岩含有長石の負荷曲線における dh/dP

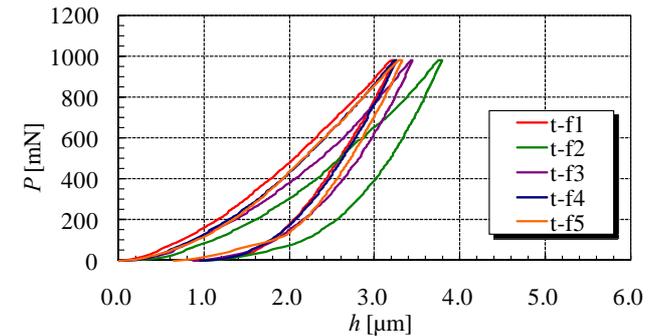


図-6 豊田花崗岩含有長石の $P-h$ 曲線

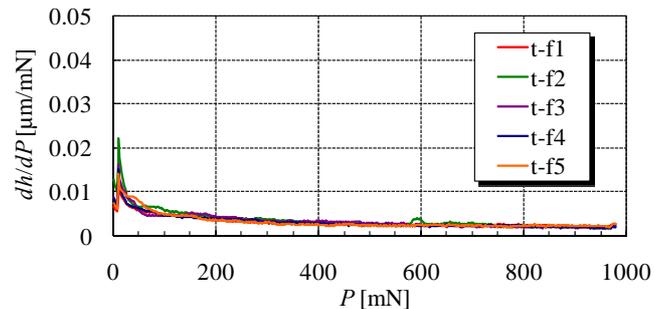


図-7 豊田花崗岩含有長石の負荷曲線における dh/dP

よるセラミックスコーティング膜の評価, 愛知県産業技術研究所研究報告, Vol.6, pp10-13, 2007.