掘進機を用いた岩盤掘削を目的とした 圧子押込み試験による花崗岩の力学特性評価

荒木 裕行¹・長谷川 修一²

¹正会員 土木研究所 つくば中央研究所 地質・地盤研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: h-araki55@pwri.go.jp

²正会員 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町2217-20)

E-mail: hasegawa@eng.kagawa-u.ac.jp

管渠築造工事では、非開削かつ比較的短い工期で施工可能であることから推進工法がしばしば採用されている。近年では同工法は硬質岩盤へも適用されるようになったが、岩盤掘削に関する工学的知見は未だ十分ではない。本研究では、推進工法を花崗岩地山に適用した事例を対象に、インタクトロックとしての花崗岩の力学特性と当該花崗岩を構成している造岩鉱物粒子の力学特性を評価し、そこで発生した掘削トラブルとの関連性の検討を行った。造岩鉱物粒子の力学特性評価のため、微小な圧子を試料に直接押込むDSI試験を実施した結果、当該花崗岩を構成する長石は硬度およびヤング率が著しく小さいことがわかった。このような造岩鉱物粒子の力学特性が掘削の難易度に対して影響を及ぼす可能性があり、それを定量的に評価する上でDSI試験は有用である。

Key Words : *micro-indentation, granite, rock-forming minerals, hardness, pipe-jacking method*

1. はじめに

推進工法は、既製の推進管に掘進機を取付け、発進立坑に設置したジャッキにより得た反力を用いて推進管を押込むことで管渠を築造する非開削工法の一つである。地上部の改変および掘削土量を抑えることができることから、上下水道やガス管など比較的小口径の管渠を道路下に敷設する際に多用されており、市街地内における施工では主力工法として評価されている¹⁾。近年では、砂質土・粘性土地山のみならず礫層や岩盤への適用も可能となり^{1), 2)}、同工法の需要はますます拡大するとみられる。しかしながら、岩盤の特性と推進工法の施工性の関連等に関する工学的な検証は未だ十分ではなく、技術的な検証が実施工に委ねられてきた部分が多い³⁾。

シールド工法等で使用する掘進機を用いた岩盤掘削においては、その掘進速度に関して岩石試料の一軸圧縮強さや岩盤の割れ目状態に関する指標等との関連性がこれまで蓄積されており^{4), 5)}、推進工法における事前地質調査でも同様の指標を重視する傾向がある⁶⁾。

一方で、これらの情報だけでは想定できない掘削トラブルが生じることがある。例えば、一軸圧縮強さが110 MPa程度の花崗岩地山において推進工法による掘削を行った場合、通常は岩片状となる掘削残土が細砂化し、

掘削速度が著しく低下した事例が報告されている⁷⁾。当該施工では、超硬チップが母材から突出した形状のローラービットがカッターヘッドに装着されていた。このようなローラービットは、リング状のディスクカッタに比べて小さい押し付け力で掘削可能であることから、推進力の小さい推進工法による岩盤掘削ではしばしば用いられている⁸⁾。当該箇所における掘削速度の低下の原因としては当該花崗岩中の石英や長石類に確認された多数の微細クラックや岩石の硬質化が指摘されているが⁷⁾、同様の事態を通常の事前地質調査結果のみで予想することは難しいと考えられる。

そもそも、推進工法は周辺環境への影響を小さくするよう考慮した上で選択される工法であり¹⁾、さらに掘削断面が小口径である場合を考慮すれば、掘削手法自体を大きく変更することは難しい。したがって、岩石特性と掘削ツールの施工性との関係を把握すること、および施工性に関連する岩石特性を把握することは、推進工法を用いた円滑な施工における大きな課題であると言える。

一方で、岩石特性の評価に当たっては、特に花崗岩の切削性や加工ツールの摩耗を検討するための指標として、岩石の切断面に露出した造岩鉱物の微小硬度試験が実施されることがある。微小硬度試験とは、剛体に近い圧子を試料の平滑な面に垂直に押しつけて永久ひずみ(圧痕)

を生じさせ、押し込みに要した荷重と試料表面に生じた圧痕の寸法や深さから塑性変形に対する抵抗値として硬度を求める押し込み硬度試験⁹⁾のうち、ごく微小な圧子および荷重を用いて実施されるものをいう¹⁰⁾。例えば、圧痕寸法を測定する微小硬度試験の一つである微小ビッカース硬度試験を行った事例^{11),12)}では、花崗岩を構成する主要鉱物である石英、長石、黒雲母の微小ビッカース硬度および各々の含有率と、岩石の切削率や研磨特性と掘削ツールの磨耗性能との関係が検討され、岩石加工を行う上でこれらが有用な指標となることが明らかになっている。また、微小硬度試験の一つであり、表面からの圧子の押し込み量を測定する押し込み硬度試験を実施した事例¹³⁾では、対象とするスケールによって試験結果に違いが生じることが示された。これは、穿孔器具の磨耗のように微小領域で生じる現象を評価する際には、同様の微小領域において岩石の硬度を測定すべきであることを示唆している。

これまでの押し込み硬度試験を用いた材料評価事例では、圧子寸法から求めた微小硬度値を用いることが主であったが、近年、圧子押し込み時の荷重および試料表面からの押し込み量を連続的に測定する Depth Sensing Indentation (DSI 試験) が実施されるようになってきている。後述するが、DSI 試験は微小領域における詳細な力学的性質が評価可能であり、金属や薄膜の材料評価試験として多用されるようになってきている¹⁴⁾。しかしながら、DSI 試験を岩石評価に適用した事例は、現在のところほとんど見受けられない。

以上を踏まえ、本研究では推進工法を用いて花崗岩地山を掘削した事例を対象とし、そこで発生した掘削トラブルについて検討を行った。当該の花崗岩および他産地の花崗岩試料を用いてインタクトロックとしての岩石の力学特性（以下、岩石レベルの力学特性）を評価するのみならず、それらの花崗岩を構成する造岩鉱物粒子を対象に DSI 試験を行って造岩鉱物粒子としての力学特性（以下、造岩鉱物レベルの力学特性）についても評価検討し、より詳細な岩石の力学特性の評価を実施した。

2. 掘削トラブルの概要

琵琶湖南部に位置する滋賀県信楽町において、推進工法を用いた下水道管の築造が施工された。施工場所は山麓の切土部に位置する国道下 GL. -5.3 m~GL. -6.3 m 付近で、白亜紀花崗岩類である信楽花崗岩と田上花崗岩の境界近くである。信楽花崗岩はしばしばアルカリ長石の粗粒結晶を含み、斑状組織をなす粗粒黒雲母花崗岩あるいは粗粒含角閃石黒雲母花崗岩として知られている¹⁵⁾。

調査ボーリングで採取された信楽花崗岩には巨視的な

亀裂が非常に少なく、GL. -0.9 m~GL. -4.3 m においてはボーリングコアが 3 m 以上にわたって連続していることから、当初は健全な花崗岩と判断された(図-1)。しかし、ボーリングコアを用いて実施した一軸圧縮試験では一軸圧縮強さが 82.5 MPa であり、花崗岩としてはやや小さい値を示すことが明らかとなった。以上より、当該地山はやや風化を受けた花崗岩地山として判断され、掘削にあたっては一軸圧縮強さ 200 MPa 以上の硬岩であっても掘削可能な硬質岩盤掘削用カッターヘッドが採用された。カッターヘッドには、シールド工法と比べて推進工法の推進力が小さい点を考慮し、比較的小さな押し付け力で掘削可能⁸⁾な超硬チップ埋め込み型のローラービットが装着された。また、掘削ずりの搬出は泥水還流方式で行われた。

ローラービットを用いた岩盤掘削においては、母材から突出した超硬チップ部分を切羽に押付けながら回転させることで岩盤を圧砕あるいは割裂・せん断破壊させるため、扁平な形状の岩片が掘削ずりとして発生する。また、掘進機後方には掘削ずりを粒径 30 mm 程度にまで破碎するクラッシャーが装着されている。そのため、一般的な花崗岩の掘削では、図-2 i) に示すような掘削ずりが排出される。しかしながら、図-1 に示した調査ボーリングの実施箇所から掘削起点方向に 10 m 程度離れた箇所では図-2 ii) に示すような粉末状 ($D_{50}=0.55$ mm) の掘削ずりが発生し、推進力を制御しても一般的な掘削速度を得ることができない事態となった。例えば、一般的な花崗岩での掘進速度は 5~10 mm/min 程度であるが、当該箇所では 1 mm/min 以下にまで低下した。粉末状の掘削ずりの発生と掘削速度の低下は、少なくとも約 200 m 以上にわたって続いた。

当該掘進機においては、掘削時に切羽と直接接触しているのはローラービット部分のみであり、カッターヘッドと切羽の間には十分な隙間が存在している。そのため、切羽で生じた岩片が掘進機のローラービット以外の箇所と切羽との間で細かく破碎された可能性は低いと推定される。また、前述のように掘進機に備わっているクラッシャーは粒径 30 mm 程度にまで破碎する能力しかないため、クラッシャーによって掘削ずりが粉末状になったことは考えにくく、掘削ずりはクラッシャー通過以前に既に粉末状であったと考えられる。以上の状況から、当該箇所では切羽面において粉末状の掘削ずりが発生したと推察された。

さらに、切羽面には超硬チップ部分が貫入した軌跡が確認されたことから、一般的な岩盤掘削のように超硬チップの接触箇所から岩石が剥離破碎するような状態³⁾となっていなかったと推定された。

また、切羽の外周および前面を掘削するローラービットであるゲージカッターが破損していたことが確認され

図-1 信楽花崗岩ボーリングコア

図-2 掘削ずりの比較 (i): 通常の掘削ずり, ii): トラブル発生時の掘削ずり)

図-3 ゲージカッターの磨耗状況模式図

た。通常は応力の集中する超硬チップ部分に磨耗や損傷が生じやすいが、破損したゲージカッターの超硬チップ部分はほとんど磨耗していないにもかかわらず、超硬チップを支える母材部分が著しく磨耗していた(図-3)。なお、切羽前面部を掘削するローラービットであるフェイスローラーに関しても同様の磨耗状況を呈していたが、破損に至るほどの顕著な磨耗ではなかった。

以上の確認事項から、掘進速度の低下は、超硬チップの接触箇所から岩石が剥離破碎するような通常の掘削状態ではなかった可能性があることと、ゲージカッターが破損したことが直接的な原因と考えられた。

前述の通り、本事例と同様なローラービットを装着して花崗岩を掘削した既往事例⁷⁾では、掘削ずりの細砂化および掘削速度の低下が確認された区間において、岩石が硬質化したこと、造岩鉱物粒子に微細クラックが多数存在したことが確認された。そして、岩石が硬質であったためチップの貫入が円滑に行われなかったのと同時に、微細クラックの存在によって岩片状に割裂・せん断破壊に至る以前に岩石が粉碎されたことが一因であった可能性が指摘された。一方で、本研究で対象とする信楽花崗岩の場合は一軸圧縮強さが比較的小さいといった相違点がある。信楽花崗岩の一軸圧縮強さ以上の岩盤を掘削した事例もあるカッターヘッドを装着しており、さらに信楽花崗岩の一軸圧縮強さが比較的小さいため、当初は円滑に掘削可能と予想されていたにもかかわらず、なぜ円滑な掘削が行えなかったのか、また、なぜゲージカッターが破損に至ったのかは不明であった。

3 岩石レベルにおける花崗岩の特徴

(1) 対象とする花崗岩試料および比較試料の概要

本研究では、掘削トラブルが生じた信楽花崗岩のほか、比較試料として愛知県豊田市産の伊奈川花崗岩および鹿児島県屋久島産の屋久島花崗岩を用いた。

伊奈川花崗岩は愛知県三河地方に分布する粗粒花崗岩であり¹⁶⁾、信楽花崗岩の事例と同様の推進工法で岩盤掘削が行われた。カッターヘッドにはローラービットが装着され、掘進機も同様のものが使用された。事前地質調査において、ボーリングコアの一軸圧縮強さは113.6 MPaと信楽花崗岩よりも大きかったが、大きなトラブルは認められていない。

一方、屋久島花崗岩については推進工法の実施事例データは取得できていないが、信楽花崗岩と同じようにカリ長石の比較的大きな結晶を含む粗粒花崗岩であり¹⁷⁾、岩石の特徴の観点から比較を行う目的で研究対象とした。

信楽花崗岩は図-1に示したボーリングコアを使用し、GL-1.60~1.70 m, GL-3.00~3.15 m, GL-3.60~3.75 m, GL-4.85~4.95 m 付近よりサンプリングした。また、伊奈川・屋久島花崗岩については、岩塊をコアリングして用いた。なお、伊奈川花崗岩および屋久島花崗岩の岩塊は掘削工事に伴って採取されたものである。また、本研究で使用した花崗岩試料から得られた物性値は、試料採取地点近傍の岩石の特徴を示す値であり、各花崗岩の代表値を示すわけではない。

本研究で対象とした各花崗岩試料の断面を図-4に示すとともに、目視観察の結果を以下に述べる。

信楽花崗岩は、乳白色の長石類と灰褐色の石英が大部分を占め、黒雲母などの有色鉱物の含有は少ない。長石

図-4 花崗岩試料の断面

および石英は、約5~10 mmの粒径で斑状に分布している。

伊奈川花崗岩は、信楽花崗岩と同様に比較的粒径の大きい長石および石英を有しているが、信楽花崗岩と比較して黒雲母の含有量が多い。5~10 mm程度の石英および長石の間を、1~3 mm程度の長石および黒雲母が埋める組織をなす。

屋久島花崗岩は、およそ10 mmから30 mm以上にも達するカリ長石の結晶が部分的に存在するが、それ以外の部分は伊奈川花崗岩と比較的類似しており、石英、長石類、黒雲母が1~3 mm程度の粒径で分布する。

(2) 試験項目および試験条件

岩石の基本的な性質について、ノギス法による密度試験¹⁸⁾、パルス透過法による超音波速度試験¹⁹⁾、点載荷試験²⁰⁾を実施した。供試体は、直径および高さが約50 mmの円柱状供試体とし、信楽・伊奈川・屋久島花崗岩それぞれ8試料ずつ、計24試料を各試験に用いた。供試体の含水状態については、密度・超音波速度試験は乾燥状態および飽和状態それぞれにおいて、点載荷試験は自然乾燥状態で試験を行った。なお、乾燥状態とは110度で24時間以上炉乾燥した状態、飽和状態とは室内で72時間以上水浸した状態とした。

また、花崗岩中の造岩鉱物の種類と量比および風化変質による粘土鉱物の生成の有無を確認するためX線回折分析を実施した。円柱状供試体作製時に生じた岩石片を分析試料とし、調整法は粉末法とした。X線のターゲットはCu、管電圧は35.0 V、管電流は30.0 mA、走査速度は2.00°/minである。

(3) 試験結果と考察

X線回折の分析結果を図-5に示す。X線回折によると

いずれの試料も主に石英、長石類および黒雲母で構成されている。信楽花崗岩は黒雲母が少なく、長石類としてはカリ長石および斜長石がともに含まれている。伊奈川花崗岩は信楽花崗岩と比べると黒雲母が多く、長石は斜長石が主体であるほか、微量の角閃石を含んでいる。屋久島花崗岩は伊奈川花崗岩と類似しているが、長石はカリ長石と斜長石の両方が含まれている。いずれの花崗岩についても、風化変質によるとみられる緑泥石が微量ながら確認された。

次に、密度試験、超音波速度試験、点載荷強度試験の結果を表-1に示す。密度に関して比較すると、比較的比重の大きい黒雲母や角閃石といった有色鉱物が少ない信楽花崗岩は、最も小さい値を示した。また、信楽花崗岩は吸水率⁷⁾が最大かつ超音波速度が最小である。これらの結果から同花崗岩は比較的間隙量が多く、それほど緻密な構造ではないと推定される。

点載荷試験に関しては、事前調査で明らかとなった一軸圧縮強さと同様に信楽花崗岩の点載荷強さ I_s は小さい。また、全供試体の超音波速度と I_s の関係を図-6に示すが、両者には正の相関関係が見られるほか、信楽花崗岩は屋久島花崗岩に見られるような供試体毎の結果のばらつきも小さい(図-6)。信楽花崗岩の試験後の供試体の一部を図-7に示すが、載荷コーンの貫入や載荷部分の粉碎もほとんどない状態で割裂に至っており、信楽花崗岩は割裂しやすい性質を有するといえる。つまり、割裂破壊のみを誘発するような掘削機構であるならば、円滑な掘削を行うことが出来る可能性がある。

しかしながら、実際の信楽花崗岩の掘削においては、掘削速度が著しく低下するという全く逆の結果となった。ローラービットが回転することによって複雑な破壊モードを呈するものと考えられたため、割裂破壊以外の因子が特異な掘削トラブルを招いた可能性があるが、以上のような岩石レベルにおける試験結果だけでは掘削トラブルの原因を明らかにすることは難しい。

4. 鉱物レベルにおける力学特性評価方法

(1) 造岩鉱物の力学特性評価手法

信楽花崗岩の掘削トラブルでは、ゲージカッターのチップではなく母材部分に顕著な摩耗を受けたことが、掘削速度の低下に大きく影響を与えた可能性がある。岩石の加工に用いられるツールの摩耗は、ツールと岩石が接触するごく小さな領域で生じる現象であり、これまでも岩石中に含まれる造岩鉱物の微小硬度を用いて加工の難易を評価する試みが行われている^{11), 12)}。本研究では、岩石レベルにおける岩石試験では明確にならなかった掘削トラブルの原因を明らかにするため、花崗岩を構成す

(凡例) Q: 石英, K: カリ長石, P: 斜長石, B: 黒雲母, Ch: 緑泥石, A: 角閃石

図-5 花崗岩のX線チャート

図-6 超音波速度と点荷荷強さの関係

図-7 点荷試験後の信楽花崗岩供試体 (一部)

表-1 岩石レベルにおける花崗岩の各種物性値

	密度試験			超音波速度試験				点载荷試験
	乾燥密度 ρ_d [g/cm ³]	飽和密度 ρ_{sat} [g/cm ³]	吸水率 [%]	乾燥状態		飽和状態		点载荷強さ I_s [MPa]
				V_p	V_s	V_p	V_s	
				[km/sec]	[km/sec]	[km/sec]	[km/sec]	
信楽花崗岩	2.58	2.59	0.43	3.06	1.89	3.51	1.94	4.49
伊奈川花崗岩	2.67	2.68	0.33	4.74	2.23	5.17	2.28	6.33
屋久島花崗岩	2.64	2.64	0.25	3.64	1.93	4.39	1.98	6.07

る造岩鉱物に着目し、鉱物レベルにおける力学特性の定量的評価を行うこととした。

実験の実施に当たっては、ごく微小な領域でも測定可能であることや、測定位置を精度よく調節して鉱物粒子を特定できることなどの条件を満足する手法である必要がある。本研究では、そのような手法の一つとして押し込み硬度試験を実施した。

押し込み硬度試験は、ダイヤモンドなどの剛体に近い圧子を試料に押し込んで、変形特性を評価するものであり、圧子の寸法や形状、試験荷重、圧子を押し込む際の制御方式の違いなどから幾つかの種類が存在する¹⁰⁾。微小な圧子および試験荷重を用いてごく微小な領域を対象とする

押し込み試験は微小硬度試験と呼ばれ、その一つである微小ビッカース硬度試験などは既往事例^{11), 12)}でも用いられている。通常の微小硬度試験では圧子の押し込みによって形成された圧痕の寸法を計測することで微小硬度を求めると、圧子押し込み時の押し込み荷重と試料表面からの押し込み量を連続的に取得することで試料の力学特性をより詳細に評価することが可能なDSI試験が、セラミックス²¹⁾や薄膜材料²²⁾などの評価に使用されるようになっている。本研究ではこのDSI試験を用いることで、花崗岩を構成する造岩鉱物の力学特性を評価することとした。

図-5からもわかる通り、対象とする花崗岩は主に石英、カリ長石、斜長石、黒雲母から構成されている。特に、

石英および長石類は対象としている花崗岩の主要な構成鉱物であり、これらの鉱物粒子の力学的性質が個々の岩石の性質に対して何らかの影響を及ぼしている可能性が高い。そこで、本研究では対象花崗岩に含有されている石英および長石類を対象とし、既往事例^{11)~13)}にならって岩石の切断・研磨面に露出している鉱物粒子の力学特性をDSI試験により評価することとした。実際には花崗岩中には長石類としてカリ長石および斜長石が含まれているが、目視で両長石を判断することが難しいため、区別は行わないものとする。なお、岩石内の鉱物粒子は、既存クラックや粒子境界の結合状態が個々に異なっている。このことを考慮すれば、本試験で得られる結果は鉱物自体の特性のみならず、これらの条件も受けた複合的な因子に基づく結果であるといえる。

また、花崗岩試料を用いた試験とは別に、石英および長石類の単体鉱物試料を用いた試験を実施した。DSI試験を岩石評価に適用した事例は未だ少ない上、使用する圧子形状や荷重条件、解析手法が異なる場合には、結果の直接的な比較が困難である。そこで、花崗岩に含有されている代表的な鉱物である石英、カリ長石、斜長石の単体鉱物試料を用いて花崗岩試料と同一の条件で試験を行い、微小圧子の押込み時の特性を評価するとともに花崗岩試料との相対比較を行う際の基礎資料とした。

(2) DSI 試験の概要

a) 試験条件と手法

DSI試験では、試料表面から圧子を押込み、負荷開始から除荷完了まで連続的に測定することで、押込み荷重-深さ曲線を取得する。試験は、i) CCDカメラを用いて測定対象鉱物を定め、ii) 設定した最大荷重 P_{max} に達するまで一定割合で荷重を増加させて圧子を押込み、iii) P_{max} に達した状態で一定時間を保持し、iv) P_{max} から一定割合で除荷する、一連の手順を1サイクルとして実施した。本研究では、手順ii)およびiii)における P_{max} を980.7 mN、手順ii), iv)における負荷・除荷時間は10.00 sec、手順iii)における荷重保持時間を2.00 secとした。使用した圧子は、中心軸と各側面のなす角が 65° の三角錐圧子（バーコピッチ圧子）であり、圧子の押込みは電磁力による荷重制御で行い、押込み量は静電容量変位計で測定した。変形特性曲線の解釈およびそれを用いた物性値の算出については、後述する既往の手法に従うものとした。

b) 供試体と測定位置の概要

石英および長石類の単体鉱物試料として、人工石英、カリ長石である微斜長石、斜長石である灰曹長石の単体鉱物試料を準備した。それぞれの寸法は、試験面の各辺が30 mm程度、厚さが10 mm程度である。DSI試験にて用いる供試体は、供試体表面の微小変形を測定対象とすることから試験面が平滑であることが重要となるため、

試験面は#3000の研磨剤による表面仕上げを行った。なお、人工石英は水熱合成による人工試料、微斜長石および灰曹長石は天然試料である。測定に当たっては、既存クラックや不純物を避け、各々10点の試験を行った。

信楽花崗岩については、前述のボーリングコア(図-1)のGL-1.60 m, GL-1.70 m, GL-3.73 m, GL-4.95 m付近を用いて、直径50 mm、厚さ15 mm程度の供試体を作製した。その他の花崗岩については、岩塊をコアリングした円柱状試料を基に、信楽花崗岩と同様の寸法の供試体を作製した。各供試体の切断面を#60~#3000の研磨剤を用いて順に研磨し、これを試験面とした。測定対象とする石英および長石粒子は、各々に十数粒子を選定し、1粒子につき2点から3点程度の押込み試験を実施することで各々30程度のデータを得ることとした。なお、測定位置は、既存クラックおよび粒子境界の近くを避けるよう調整した。測定を行った鉱物粒子についてはマーキングを行い、同一粒子の過剰な重複試験は避けるものとした。

なお、本論では単体鉱物試料の結果について、花崗岩試料の結果との混同を防ぐため、人工石英をQt、微斜長石をMc、灰曹長石をOlgとして記すこととする。

(3) 各種物性値の算出

本試験を実施した場合に得られる典型的な変形特性曲線と試料断面模式図を図-8に示す。なお、図-8 i)における(a), (c), (d)は、図-8 ii)中の各押込み状態と対応している。

変形特性曲線からは、最大押込み深さ h_{max} 、完全除荷

図-8 i)変形特性曲線の概要と ii)圧子の押込みによる試料表面の変形の模式断面図(既往研究²³⁾を基に加筆)

時の押込み深さ h_p 、そして除荷初期における接線勾配である接触剛性 $S (=dP/dh)$ が得られる。除荷曲線は試料の弾性回復を表しており、弾性体における理論解²⁴⁾に基づいて接触剛性 S を示すと次式で示される^{23), 25)}。

$$S = \beta \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A_p} \quad (1)$$

A_p は圧子と試料との接触投影面積、 β は圧子形状定数でありバーコビッチ圧子の場合 1.034²⁵⁾ である。複合ヤング率である E_r は、試料のヤング率 E_s およびポアソン比 ν_s 、ダイヤモンド製圧子のヤング率 E_i およびポアソン比 ν_i から得られる圧子と試料との等価なヤング率であり、次式にて示される。

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu_s^2)}{E_s} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \quad (2)$$

本研究では、ダイヤモンド圧子の E_i は 1141 GPa、 ν_i は 0.07²⁶⁾ を用いるが、本試験で試料のポアソン比 ν_s を直接求めることはできない。そのため、次式で示される通り、ポアソン比を含めた E' を試料の複合ヤング率として求めることとする。

$$E' = \frac{E}{(1-\nu^2)} \quad (3)$$

なお、式(1)で与えられる S の逆数は、弾性変形時における試料のコンプライアンス C_s である。しかし、実際に測定された除荷曲線の初期 30 % を直線近似することで求めた S の逆数は、試料のコンプライアンス C_s と試験装置のコンプライアンス C_f の和である複合コンプライアンス C である²⁷⁾。この点を考慮して、式(1)を変形すると E_r は次式にて算定される。

$$E_r = \frac{1}{\beta} \frac{\sqrt{\pi}}{2(C - C_f) \sqrt{A_p}} \quad (4)$$

また、バーコビッチ圧子の中心軸と側面のなす角が α_B (本論では 65°) のとき、接触深さ h_c を用いれば、その幾何学形状より A_p は、

$$A_p = 3\sqrt{3}(\tan^2 \alpha_B) \cdot (h_c + \Delta h_c)^2 \quad (5)$$

である。ただし、 h_c は圧子と試料が接触した深さである接触深さ、 Δh_c は補正長さである²⁷⁾。 h_c は、 $h_{\max}$ と圧子押込み時の表面変位 h_s (図-8) および除荷曲線から得られた S を用いて、次のとおり求められる。

$$h_c = h_{\max} - h_s = h_{\max} - \varepsilon \frac{P_{\max}}{S} \quad (6)$$

ここで、 ε は圧子形状により決定される補正係数であり、バーコビッチ圧子の場合 0.75 を用いる²⁴⁾。

そして、硬度 H_{IT} は $P_{\max}$ を A_p で除した値であり、次式にて求められる。

表-2 単体鉱物試料の Δh_c および C_f ²⁸⁾

	$\Delta h_{\max}$ [μm]	C_f [nm/mN]
Qt	0.255	0.390
Mc	0.143	0.240
Olg	0.160	0.229

$$H_{IT} = \frac{P_{\max}}{A_p} \quad (7)$$

さらに、試料の弾性回復率 η_{IT} は、圧子押込みに要した総仕事量 W_{total} (図-8 i)の(a)(b)(c)(e)部分の面積) に対する弾性変形仕事量 $W_{\text{elast.}}$ (図-8 i)の(c)(d)(e)部分の面積) の割合として次式で求められる。なお、完全弾性試料ならば、 η_{IT} は 100% となる

$$\eta_{IT} = W_{\text{elast.}} / W_{\text{total}} \times 100 \quad (8)$$

C_f および Δh_c については、本論文で用いた試験装置を用い、単体鉱物試料 Qt, Mc および Olg を対象に $P_{\max}$ を複数変更した DSI 試験を実施することで求めた値²⁸⁾を用いた (表-2)。

5. 造岩鉱物の力学特性を踏まえた岩石の評価

(1) DSI 試験結果

a) 単体鉱物試料

造岩鉱物試料の変形特性曲線を図-9 に、得られた各物性値の平均値を表-3 に示す。なお、図-9 に示した変形特性曲線は、各々 10 データの平均をとったものである。

3 種類の鉱物ともに、 η_{IT} が 60 % 前後の弾塑性挙動をとるが (表-3)、石英 (Qt) より長石類 (Mc, Olg) の方が $h_{\max}$ はやや大きい。Mc と Olg については変形特性曲線の概形がよく似ており、圧子の押込みに対してほぼ同じ挙動を示す。

H_{IT} および E' は、長石類より人工石英の方が大きく、また Mc と Olg で比較すれば概ね同程度である。表-3 には各天然鉱物の E' について文献値も併せて示したが、本結果と比較すると特に石英に関してよく一致している。長石については、文献値より本研究で得られた値の方が若干小さいが、両鉱物試料は天然材料であり、その物性値は人工材料よりもばらつきが大きいことを考慮すれば、許容できる範囲内の差であるといえる。

以上のように、花崗岩の主要構成鉱物である石英および長石は、数 μm 程度の押込みに対しては弾塑性挙動を示し、除荷時の弾性挙動から得られる E' は既往値とも比較しても概ね一致することが明らかとなった。この結果は、鉱物試料の力学特性を DSI 試験によって測定するこ

図-9 単体鉱物試料の平均変形特性曲線

表-3 単体鉱物試料の各物性値(平均値)と文献値²⁶⁾

	$h_{\max}$ [μm]	H_{IT} [GPa]	E' [GPa]		η_{IT} [%]
			実験値	文献値 [†]	
Qt	3.00	7.45	95.8	95.3 - 97.1	63.3
Mc	3.38	6.95	61.1	79.2	66.1
Olg	3.34	6.41	67.2	80.8	58.8

[†]Voigt平均およびReuss平均の算術平均値から算出。

との妥当性を支持するものである。また、ごく微小な圧子の押し込みに対してはカリ長石も斜長石もほぼ等しい力学特性を示すという結果は、花崗岩試料に対してDSI試験を実施する際に両者の区別を厳密に行う必要性が低いことを示唆するものであるといえる。

b) 花崗岩試料

各花崗岩中の石英および長石の物性値の関係を図-10および図-11に、各物性値の平均値を表-4に示す。図-10および図-11においては、単体鉱物試料のQt, Mc, Olgの平均値も併せて示す。なお、各花崗岩中の長石はカリ長石と斜長石の区別を行っておらず、また、5.(1)a)で述べたようにカリ長石も斜長石もほぼ等しい力学特性を示すことから、長石の物性値の評価にあたってはMcの C_f および Δh_c (表-2)を代表して使用した。

まず、全体的に花崗岩試料の試験結果はデータのばらつきが大きい。これは、測定を行った鉱物粒子の寸法や不純物の有無、隣接する鉱物粒子との境界状態などが影響したものと考えられる。表面に露出した鉱物粒子に圧子を押し込むという試験の特性上、圧子を押し込む過程で複数の鉱物を貫く懸念があるが、図に示すとおり本試験で圧子を押し込むのは最大でも7μm程度とごく微小であり、载荷曲線の顕著な乱れもないため、圧子が複数の鉱物に接触した可能性は低いと考えられる。

次に、伊奈川花崗岩および屋久島花崗岩に着目すると、石英および長石の各物性値はばらつくものの、その分布領域は概ね重複していることがわかる(図-10, 図-11)。 H_{IT} および E' の平均値で比較すれば、両花崗岩の石英はQtよりもやや小さい値を取り、両花崗岩中の長石に関してはMcやOlgと比べてほぼ同等の値を示している(表-3, 表-4)。そもそも石英は剛性が長石のそれよりも大きく、鉱物粒子の粒径や粒子境界の状態による影響が顕著に現れるため、両花崗岩の石英の E' はQtよりも全体的に小さい値となったと考えられる。一方、 η_{IT} の平均値に関しては、石英、長石ともに造岩鉱物試料の結果と概ね

近い値を示し、それぞれの鉱物自体の力学特性はほぼ同じであるといえる。

一方で、信楽花崗岩については、石英は伊奈川・屋久島花崗岩の石英と同程度の H_{IT} 、 E' および η_{IT} を示す。しかしながら、長石の H_{IT} および E' は著しく小さい(図-10, 図-11)。平均値で比較すると、信楽花崗岩の長石の $h_{\max}$ は5.69μmと他の長石の2倍近く、 H_{IT} および E' は他の長石の2分の1以下である(表-4)。 η_{IT} もやや小さい傾向にあり、若干塑性変形しやすいといえる。なお、信楽花崗岩の長石に関しては、DSI試験実施後に代表的な鉱物粒子を対象に鉱物の確認を行った。図-10および図-11には、確認対象とした鉱物粒子の結果を信楽-長石iとして示しているが、いずれの鉱物粒子もカリ長石もしくは斜長石であった。そのため、鉱物の種類の違いではなく、粒子内のクラックや粒子境界の物理的な状態がDSI試験結果に大きく影響を与えた可能性が高い。

以上の結果から、伊奈川花崗岩や屋久島花崗岩などの場合、岩石を構成している石英および長石粒子は比較的近い力学特性を示すことが明らかとなった。一方で掘削トラブル発生箇所における信楽花崗岩は、石英は標準的な値を示すにもかかわらず、長石の各種物性値が著しく小さく、主要構成鉱物である石英と長石の力学特性のコントラストが顕著な特徴を有する岩石であることも示された。

(2) 掘削トラブル発生箇所における信楽花崗岩の総合評価

本研究で明らかになった信楽花崗岩の特徴を列挙すると、以下の通りとなる。

- ・掘削に当たって採取された信楽花崗岩のボーリングコアは、地表面下5m程度の箇所にもかかわらず巨視的な亀裂が少なかった。
- ・比較的粒径の大きい石英と長石類で構成されている粗粒花崗岩であり、黒雲母の含有量は比較的少ない。

図-10 石英と長石の H_{IT} と E' 図-11 石英と長石の H_{IT} と η_{IT}

表-4 花崗岩内の造岩鉱物の各物性値 (平均値)

	対象鉱物	測定数	$h_{max}[\mu m]$	$H_{IT}[GPa]$	$E' [GPa]$	$\eta_{IT}[\%]$
信楽花崗岩	石英	30	3.16	7.23	79.9	65.8
	長石	34	5.69	2.09	30.3	53.9
伊奈川花崗岩	石英	30	3.17	7.19	78.9	68.3
	長石	30	3.46	5.88	67.1	61.7
屋久島花崗岩	石英	30	3.37	6.21	71.3	64.3
	長石	30	3.39	6.92	63.3	69.1

- ・ボーリングコアを用いた各種試験では、伊奈川花崗岩および屋久島花崗岩と比べて信楽花崗岩は密度が小さく超音波伝播速度が遅い岩石であり、点載荷強度も小さかった。
- ・花崗岩を構成している造岩鉱物粒子の硬度、複合ヤング率、弾性回復率を測定すると、伊奈川花崗岩および屋久島花崗岩の石英および長石粒子と、信楽花崗岩の石英粒子は概ね標準的な値であったが、信楽花崗岩の長石は著しく小さかった。

以上の結果より、当該の信楽花崗岩地山は、施工当初は不連続面の少ない新鮮な岩盤であるように判断されたが、実際には花崗岩としては密度が小さく緻密でない岩石で構成されている岩盤であるといえる。さらに微視的にみると、信楽花崗岩はそれを構成している造岩鉱物粒子の粒径が大きく、石英と長石が主体の粗粒花崗岩である。その石英は標準的な性質を示すが長石は脆弱で、伊奈川花崗岩や屋久島花崗岩と比較して両鉱物の力学特性の差異が顕著であり、局所的な力学特性のコントラストが顕著な岩石であるといえる。

(3) 掘削トラブルの原因に関する検討

信楽花崗岩が切羽において岩片としては破壊せずに掘削速度が低下した点、ローラービットのチップは磨耗が

少なかったが母材部分に顕著な磨耗が確認された点について、信楽花崗岩の岩石・鉱物レベルにおける性質を踏まえて検討する。

当該箇所で行われたローラービット（ゲージカッター）は、チップの打撃と回転運動により岩石の圧砕、割裂・せん断破壊を生じさせることで掘削を行う。良好な掘削状況の模式図を図-12に示す。

一方で、信楽花崗岩を掘削した場合は、その大半を占める長石が脆弱であるため、岩片として割裂・せん断破壊に至る以前に長石部分が粉碎され、比較的粒径の小さい掘削ずりが発生した可能性が高い。そのため、切羽ではチップに触れる部分のみが掘削される状態であり、切羽にチップの軌跡が形成され易かったのもこの結果であるといえる（図-13 i)~ii)）。また、ゲージカッターは外周方向に若干傾斜して配置されており、切羽のチップ部分だけが掘削されていくことでゲージカッターの母材が切羽に接触し易くなる（図-13 iii)~iv)）。通常、母材部分は切羽との接触を想定しておらず、超硬チップほど硬質な材料が用いられていない。信楽花崗岩には脆弱な長石粒子だけではなく、標準的な力学特性を有した硬質な石英粒子も含まれていることから、母材部分が切羽に押し付けられることで顕著な磨耗が生じたものと推定される。さらに、硬質な石英粒子はチップの打撃によって生じた

図-12 ゲージカッターによる岩盤の良好な掘削状況の模式図

図-13 ゲージカッターによる信楽花崗岩の掘削状況の推定図

掘削ずりにも含まれているため、掘削ずりが母材周辺に付着することで磨耗を進め、ゲージカッターの破損につながった可能性が高い。同時に、掘削ずりはさらにすりつぶされることになり、最終的に図-2に示したような粉末状となったものとみられる。2.で述べた通り、掘進機に備わっている掘削ずり用クラッシャーは粒径 30 mm 程度にしか破碎できないこと、カッターヘッドと切羽の間には十分な隙間が存在しており、掘削ずりがローラービット以外の箇所と切羽の間で破碎された可能性が低いことも、以上の考察を支持するものである。

以上のように、信楽花崗岩は岩石レベルでの強度は小さいが、掘削時にはこの強度値で評価できるような割裂・せん断破壊を発生させることができなかったため、掘削速度が著しく低下したと推定される。換言すれば、割裂・せん断破壊を生じさせることができないような掘削状況の場合、岩石レベルの強度は掘削の難易を検討する指標としての必ずしも十分ではない場合がある。信楽花崗岩の事例と同じ工法において顕著なトラブルが生じなかった伊奈川花崗岩と、掘削トラブルが生じた既往事例⁷⁾の花崗岩の一軸圧縮強さがいずれも同程度であることから、このことが示唆される。また、既往事例⁷⁾の花崗岩は鉱物粒子内に既存クラックが多く存在している特徴を有していることや、信楽花崗岩は脆弱な長石粒子

を含有している特徴があることを考慮すれば、砂状の掘削ずりの発生に伴って掘削速度が低下するようなトラブルは鉱物レベルの力学特性に影響を受けた可能性が高い。したがって、推進工法による岩盤掘削においては、岩石レベルでの力学特性のみならず鉱物レベルの力学特性を評価することも重要であるといえる。

本研究で用いた DSI 試験は、鉱物レベルにおける変形特性曲線に基づいて複合ヤング率、硬度、弾性回復率等を評価することができ、より円滑な岩盤掘削を目指して岩石の力学特性を適確に評価する上で有用であるといえる。

6. まとめ

本研究では、推進工法を用いて岩盤を掘削した際に、掘削速度が著しく低下するという掘削トラブルが生じた信楽花崗岩を対象とし、ボーリングコアを用いて岩石レベルの性質を明らかにするのみならず、花崗岩を主として構成している石英および長石粒子に対して DSI 試験を実施することで造岩鉱物の力学特性を明らかにし、トラブルの原因を検討した。また、本研究で用いた DSI 試験は未だ岩石や鉱物の評価手法として用いられた事例がほ

とんどないことから、単体鉱物試料を用いてその適用性の検討および基礎資料の取得を行った。その結果をまとめると、以下のとおりとなる。

- 1) 対象箇所の信楽花崗岩は、岩盤中に巨視的な亀裂は少ないものの、他の花崗岩試料と比較して緻密ではなく、点載荷強度も小さいため、比較的割裂破壊しやすい。
- 2) DSI 試験で得られた単体鉱物試料の複合ヤング率は文献値との乖離も小さく、同試験の鉱物試料に対する適用性は良好であった。
- 3) 伊奈川花崗岩および屋久島花崗岩に含まれる石英・長石粒子は、それぞれの単体鉱物試料とほぼ等しい力学特性を有している。
- 4) 信楽花崗岩の石英粒子は標準的な力学特性であるが、長石粒子は他の花崗岩試料や単体鉱物試料と比較して硬度および複合ヤング率が著しく小さい。同岩石は主要構成鉱物間の力学特性に大きな差異がある岩石である。
- 5) 信楽花崗岩の掘削事例では、岩石レベルの強度で評価できるような破壊を発生させることができなかったため、掘削速度が著しく低下したと推定される。
- 6) 掘進機を用いた掘削の場合、鉱物レベルにおける力学特性が掘削の難易度に対して影響を及ぼす可能性があり、これを明らかにする上で変形特性曲線から複合ヤング率、硬度、弾性回復率等を評価可能な DSI 試験は有用である。

謝辞：本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費（課題番号：21・9848）の助成を受けたものである。また、施工データや花崗岩試料の多くは株式会社推研より提供していただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 石川和秀：推進工法の現状と課題，土木技術，Vol.60，No.4，pp.23-29，2005。
- 2) 奥村雅俊：大津市里川雨水幹線管渠築造工事における超長距離推進工事と多曲線施工，土木技術，60 巻，4 号，pp.43-49，2005。
- 3) 島田英樹，笹岡孝司，松井紀久男：岩盤推進技術に関する動向，月刊推進技術，Vol.24，No.5，pp.3-6，2010。
- 4) 大久保誠介：トンネル掘進機のエキスパートシステム，資源・素材学会誌，Vol.106，No.6，pp.341-346，1999。
- 5) 池田和彦，西松裕一：全断面方式トンネル掘進機の地質に対する適用性，応用地質，Vol.22，No.2，pp.203-207，1981。
- 6) 野田彰：岩盤・巨礫に挑み続けて 30 年「岩盤・巨礫推進の基本的考え方と対処方法」―本間良治先生の講演論文より―，月刊推進技術，Vol.24，No.5，pp.7-21，2010。
- 7) 茅根幸雄，神田祝昭，木村誠，岡田晃典，宮沢正人，大野元章，小原勝巳：硬質な花崗岩地山における岩盤推進工法の適用，とびしま技報，No.57，pp.24-27，2008。

- 8) 難波明弘：カットから面盤の設計製作まで，月刊推進技術，Vol.24，No.5，pp.60-64，2010。
- 9) 地盤工学会：岩の調査と試験，pp.485-490，pp.381-382，1989。
- 10) 中澤一 編：JIS 使い方シリーズ 金属材料試験マニュアル，pp.101-134，日本規格協会，1987。
- 11) Sánchez Delgado, N., Rodríguez-Rey, A., Suárez del Río, L.M., Díez Sarria, I., Calleja, L., Ruiz de Argandoña, V.G.: The influence of rock microhardness on the sawability of Pink Porrino granite (Spain), *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol.42, No.1, pp.161-166, 2005.
- 12) Xie, J. and Tamaki, J.: Parameterization of micro-hardness distribution in granite related to abrasive machining performance, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.186, pp.253-258, 2007.
- 13) Beste, U. and Jacobson, S.: Micro scale hardness distribution of rock types related to rock drill wear, *Wear*, Vol.254, No.11, pp. 1147-1154, 2003.
- 14) 藤原雅美：インデンテーション法による材料の力学物性評価，軽金属，Vo.52，No.6，pp.282-290，2002。
- 15) 周琵琶湖花崗岩団体研究グループ：琵琶湖周辺の花崗岩質岩体，地質学雑誌，Vol.88，No.4，pp.289-298，1982。
- 16) 仲井豊：愛知県三河地方の花崗岩類，地球科学，Vol.24，No.4，pp.139-145，1970。
- 17) 川野良信，安間了：屋久島花崗岩の主成分・微量成分組成，日本地質学会第 98 年学術大会講演要旨，p.397，1991。
- 18) 地盤工学会：岩石の密度試験方法（JGS2132-2009），2009。
- 19) 地盤工学会：パルス透過法による岩石の超音波速度測定法（JGS2110-2009），2009。
- 20) 地盤工学会：岩石の点載荷試験方法（JGS3421-2005），2005。
- 21) 大野卓志，米津明生，小川武史，秋光純：インデンテーション法による微小領域の力学特性および強度特性評価，材料試験技術，Vol.49，No.3，pp.149-156，2004。
- 22) 片山繁雄：めつき皮膜の硬さ評価試験技術とその応用，表面技術，Vol.58，No.4，2007。
- 23) Oliver, W. C. and Pharr, G. M.: An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, *Journal of Materials Research*, Vol.7, No.6, pp.1564-1583, 1992.
- 24) Sneddon, I. N.: The relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile, *International Journal of Engineering Science*, Vol.3, No.1, pp.47-57, 1965.
- 25) Oliver, W. C. and Pharr, G. M.: Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements, *Journal of Material Research*, Vol.19, No.1, pp.3-20, 2004.
- 26) Simons, G. and Wang, H.: *Single Crystal Elastic Constants and Calculated Aggregate Properties*, The MIT Press, 1971.
- 27) Sawa, T. and Tanaka, K.: Simplified method for analyzing nanoindentation data and evaluating performance of nanoindentation instruments, *Journal of Materials Research*, Vol.16, No.11, pp.3084-3096, 2001.

- 28) Araki, H. and Hasegawa, S.: Evaluation of Mineral Properties by Depth Sensing Indentation Test, *Proceeding of 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, CD-ROM, Paper No. 241,

2011.

(2011. 12. 26 受付)

APPLICATION OF MICRO INDENTATION TEST FOR EVALUATION OF GRANITE PROPERTIES TO AFFECT EXCAVATION PERFORMANCE USING PIPE-JACKING METHOD

Hiroyuki ARAKI and Shuichi HASEGAWA

The pipe-jacking method which use the tunnelling machine have often been adopted in the construction for the pipe of gas and sewage. The performance of a tunneling machine in rock mass is usually evaluated based on the intact rock strength and the rock mass property including the crack. However, the performance is affected by not only its compressive strength but also the comprehensive characteristics including the type and properties of rock-forming minerals. In this study, mechanical properties of rock-forming minerals contained in some granite were evaluated by depth sensing indentation test (DSI test). The relationship between these properties and difficulty of excavation was also discussed. As a result, the intact rock strength of the granite in which the excavation trouble occurred was smaller than that of other granites, and the mechanical properties of feldspar grains contained in the granite were remarkably different from those of other granites. These test results suggest that the mechanical characteristic of minerals greatly influence the performance of excavation with a tunnelling machine, and DSI test is useful to clarify these properties.