

3. 信楽花崗岩の硬度特性

Physical and mechanical property of the Shigaraki granite

○荒木裕行（香川大学大学院工学研究科），長谷川修一（香川大学工学部）

田中基紀（株式会社姫野組），蒲田洋（株式会社推研）

Hiroyuki ARAKI, Syuichi HASEGAWA, Motoki TANAKA and Hiroshi KABATA

1. はじめに

滋賀県甲賀市信楽町は，琵琶湖南部の後期白亜紀花崗岩類が広く分布している地域に位置する．同町牧-勅旨地域を通る国道 307 号線の GL-5.3m～GL-6.3m 付近において，掘進機を用いた管渠築造工事が行われた．この工事に伴って実施された地質調査ボーリングでは，土被り 5m 程度にもかかわらず長さ約 3m にわたる信楽花崗岩の連続コアが採取された．一見すると，RQD100% とコア採取率も高く，既往の調査で得られた一軸圧縮強度も 82.5MPa であることから，硬質岩であると判断された．

しかしながら，同掘進機を用いて花崗岩地山を掘削する場合，通常は岩石が割裂した数 cm 程度の鱗片状残土が排出されるが，当該箇所では 0.07mm 以下の細粒分含有率が 89.5% のスライム状残土が発生する事態となった（写真-1）．当時用いられていた掘進機のゲージカッターは 200MPa 以上の硬岩の掘削事例もある硬岩用のものであることから，対象岩盤はかなりの強度を持ち，割裂しにくい岩質であるのではないかと推測された．

そこで，本論では地質調査ボーリングで得られたコアを対象として各種試験を実施し，明らかとなった信楽花崗岩の特性について述べる．

2. 調査概要

2. 1 対象試料

（1）信楽花崗岩コア概況および試料

対象とする信楽花崗岩（粗粒黒雲母花崗岩）のボーリングコア（写真-2）は全体的に白灰色を呈しており，弱い変質作用を受けているものと推定された．コア中 4.3m～4.6m 付近において，地表面からの風化を受けて赤褐色を呈した割れ目があるほかは，亀裂も認められず概ね連続したコアが採取されている．このボーリングコア中の 3ヶ所（1.6m～1.7m，3.6m～3.7m，4.85m～4.95m）から長さ 5cm の短円柱形試料を 2 試料ずつ採取し，計 6 試料を検討対象とした（写真-2）．

（2）比較検討試料

比較検討試料として，香川県高松市庵治町産の庵治花崗岩（白亜紀後期の細粒黒雲母花崗岩）および兵庫県西脇市産の花崗斑岩（白亜紀後期の溶結凝灰岩）を用意した（写真-2）．庵治花崗岩については直径約 5cm，長さ約 10cm の加工品を用いて整形した計 6 試料を対象とする．これに西脇産花崗斑岩 1 試料を加えた計 7 試料を用いて，信楽花崗岩との比較検討を行った．

2. 2 試験手順

岩石の性質を多方面から検証するため，図-1 のフローに沿って試験を実施した．本論では，物理試



写真-1 掘削残土の比較

左-当該地点で発生した信楽花崗岩のスライム状掘削残土

右-割裂した花崗岩の岩片からなる通常の掘削残土

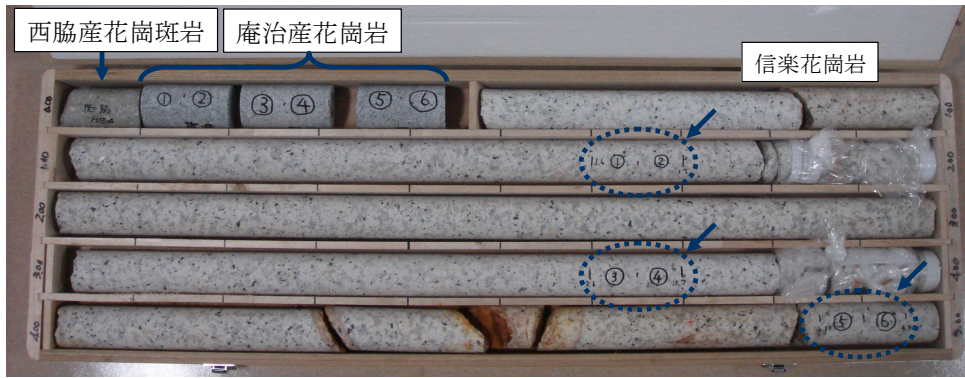


写真-2 信楽花崗岩のボーリングコアと比較検討試料（サンプリング箇所）

験として密度試験（かさ比重）および超音波速度試験、力学試験としてビッカース硬度試験および点荷試験、鉱物学的試験としてX線回折試験および偏光顕微鏡観察を行った。

物理試験および力学試験では、直径および長さが約5cmの短円柱形供試体を用いて実施した。含水状態については、物理試験では強制乾燥状態と強制湿潤状態それぞれにおいて、力学試験では自然乾燥状態で試験を行った。なお、強制乾燥状態とは110℃で24時間以上乾燥させた状態、強制湿潤状態とは72時間以上水浸して飽和湿潤となった状態とした。

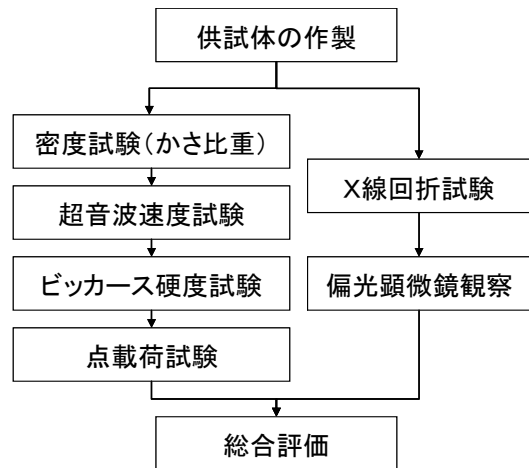


図-1 試験フロー

3. 物理試験（密度試験，超音波速度試験）

3.1 試験概要

密度試験については、ノギス法を用いて各試料の強制乾燥状態と強制湿潤状態（表乾状態）のかさ比重および吸水率を求めた。また、超音波試験については応用地質社製ソニックビューアーSXを用い、強制乾燥状態と強制湿潤状態のP波速度およびS波速度を求めた。

3.2 試験結果と考察

密度試験および超音波速度試験の結果を、図-2、図-3、表-1に示す。まず、密度試験の結果であるが、岩種別の平均値で比較すると乾燥密度、湿潤密度（表乾状態）ともに信楽花崗岩が最も小さく、庵治花崗岩が最も大きい。また、吸水率で比較すると信楽花崗岩が最も大きく、庵治花崗岩が最も小さい結果となった。庵治花崗岩の吸水率は、比較検討試料と比べて2倍以上と高いことがわかる。

次に超音波速度試験の結果である。水中ではS波は伝達されないが、P波は伝達される特性がある。

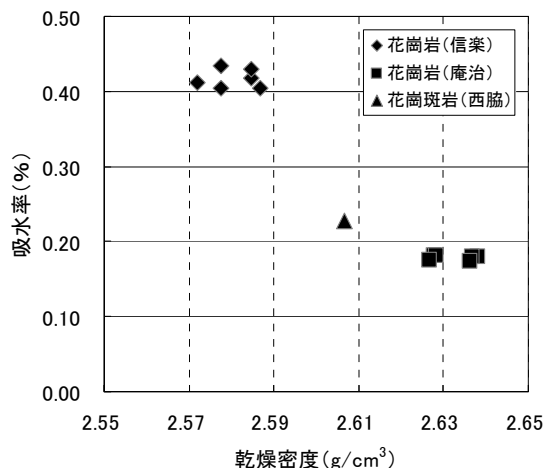


図-2 吸水率と乾燥密度の関係

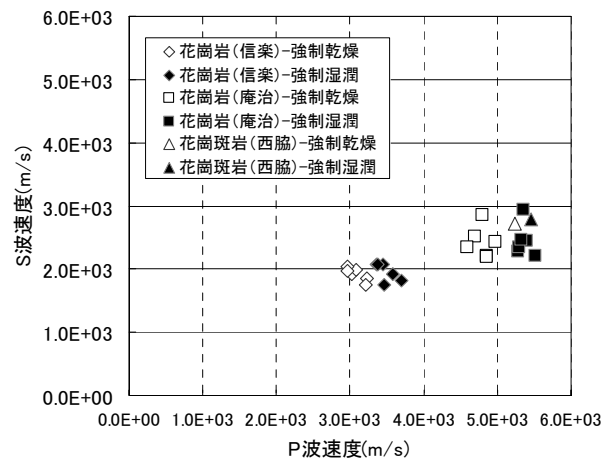


図-3 S波速度とP波速度の関係

そのため、S波速度は含水状態に関係なくほぼ一定の値を示すのに対し、P波速度は強制乾燥状態より強制湿潤状態の方が速くなっていることがわかる。また、岩石種別でみると信楽花崗岩はP波速度、S波速度ともに著しく小さい。

以上のとおり、信楽花崗岩は比較検討試料と比べて密度が小さく、吸水率が大きいという特徴を有していることから、岩石中の間隙が大きいものと考えられる。このことは、超音波速度試験の結果とも一致しており、岩自体が緻密でない判断できる。

4. ビッカース硬度試験

4.1 試験概要

ビッカース硬度は、対面の交角が135°であるダイヤモンド製圧子を材料に押し付け、出来た逆ピラミッド型の凹みの大きさを比較する押し込み強度のひとつである。凹みの対角線の長さをd(mm)とすると、ビッカース硬度(VDH)は、

$$VDH = 1.8544W / d^2 \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$$

で求められる¹⁾。

本試験では、信楽花崗岩および庵治花崗岩の短円柱形供試体を1試料ずつ採用した。各々の試料における研磨面を用い、長石部分と石英部分の硬度を各々20箇所ずつ計測した。岩石内に含まれる鉱物の硬度を計測することが目的であり、対象とする長石および石英が明確に区別できる必要があるため、西脇産花崗斑岩については計測を行っていない。

4.2 試験結果と考察

試験結果を図-4および表-3に示す。図-4のヒストグラムに示したとおり、長石、石英ともに庵治花崗岩より信楽花崗岩の方が低いVDH値に多く分布していることがわかる。表-3に示した平均値を用いて比較すると、信楽花崗岩の長石は庵治花崗岩の約3分の1、信楽花崗岩の石英は庵治花崗岩の約2分の1である。また、表-2に示した鉱物の一般値と比較すると、信楽花崗岩の長石の硬度は著しく小さく、また、石英の硬度についても一般値より低い。よって信楽花崗岩に含まれている鉱物は硬度が低下してい

表-1 物理試験結果(平均値)

		花崗岩 (信楽産)	花崗岩 (庵治産)	花崗斑岩 (西脇産)
密度試験	かさ比重(乾燥) (g/cm ³)	2.58	2.63	2.61
	かさ比重(湿潤) (g/cm ³)	2.59	2.64	2.61
	吸水率 (%)	0.42	0.18	0.23
超音波速度 試験	P波速度(乾燥) (m/s)	3.08E+03	4.80E+03	5.23E+03
	P波速度(湿潤) (m/s)	3.49E+03	5.36E+03	5.46E+03
	S波速度(乾燥) (m/s)	1.92E+03	2.42E+03	2.72E+03
	P波速度(湿潤) (m/s)	1.96E+03	2.45E+03	2.79E+03

※) 花崗岩(信楽産)、花崗岩(庵治産)は各6試料の平均値。
花崗斑岩(西脇産)は1試料の値。

表-2 ビッカース硬度の一般値¹⁾

鉱物名	VDH (kgf/mm ²)
滑石 talc	47
石膏 gypsum	60
方解石 calcite	105~136
蛍石 fluorite	175~200
正長石 orthoclase	714
石英 quartz	1103~1260
黄玉 topaz	1648
鋼玉 corundum	2085

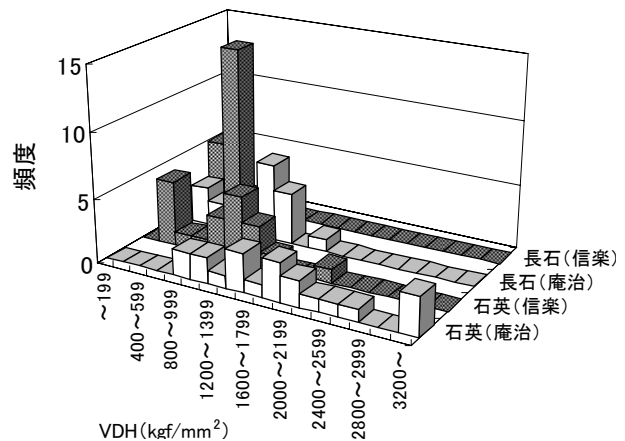


図-4 各鉱物のビッカース硬度分布

表-3 ビッカース硬度試験結果(平均値)

岩石名(採取地)	対象鉱物	VDH (kgf/mm ²)
花崗岩(信楽)	長石	254
花崗岩(庵治)	長石	903
花崗岩(信楽)	石英	931
花崗岩(庵治)	石英	1907

※) 最大および最小に近い値より2サンプルを除外し平均値を算出している。

ることが明らかである。

ただし、庵治花崗岩の長石や石英では硬度にばらつきがみられる。これは、測定鉱物の硬度だけでなく、測定鉱物の周辺鉱物の存在や深度方向の鉱物の厚さも関係していると考えられる。

5. 点載荷試験

5. 1 試験概要

試料を2点で挟んで載荷することにより試料を破断させ、その最大荷重から点載荷強度を求める。点載荷試験では、供試体中心線に沿って生ずる引張応力により破断するため、引張強度に近い値としてみなすことができる。本試験では応用地質社製点載荷試験器を用いた。点載荷強度の算定式は、以下の通り日本道路公団規格 JHS715-1997²⁾ に基づくものとする。

$$St = 0.9 \times P / D^2$$

St : 点載荷強度 (MPa)
 P : 最大荷重 (N)
 D : 載荷点間距離 (mm)

また、点載荷強度より換算一軸圧縮強度を算出した。算定式は以下の通りである。

$$qu = 25 \times St_{50}$$

qu : 換算一軸圧縮強度 (MPa)
 St_{50} : $D = 50(mm)$ に相当する荷重から求めた点載荷強度 (MPa)

ただし、本試験では直径約 50 mmの短円柱形供試体を用いているため、 $St = St_{50}$ とした。

5. 2 試験結果と考察

試験結果を表-4 に示す。点載荷強度を比較すると信楽花崗岩で約 4MPa、庵治花崗岩で 8MPa、西脇産花崗斑岩で約 9MPa であり、信楽花崗岩は庵治花崗岩の約半分の引張強度しかないことがわかる。なお、点載荷強度から求めた信楽花崗岩の換算一軸圧縮強度は 98MPa であり、既往の一軸圧縮強度とほぼ同程度である。

また、試験後の信楽花崗岩試料の状況を写真-3 に示す。いずれの破断面も岩芯から割裂して形成されていることが確認された。信楽花崗岩は、庵治花崗岩の半分以下といった小さな荷重で破断しており、決して割裂しにくいわけではないことが明らかとなった。

表-4 点載荷試験結果 (平均値)

岩石名(産地)	最大荷重 P(N)	点載荷強度 St(MPa)	換算一軸圧縮強度 qu(MPa)
花崗岩(信楽)	1.05E+04	3.92	98
花崗岩(庵治)	2.37E+04	7.93	198
花崗斑岩(西脇)	2.57E+04	9.34	233

※) 花崗岩(信楽産)、花崗岩(庵治産)は各6試料の平均値。
花崗斑岩(西脇産)は1試料の値。



写真-3 試験後の供試体状況
(信楽花崗岩, 上段: 側面, 下段: 破断面)

6. X線回折試験

6. 1 試験概要

各岩供試体内に含まれている物質の同定を行うため、島津製作所製 X線回折装置 XRD-6100 を用いて X線回折を実施した。X線のターゲットは Cu、管電圧は 35.0V、管電流は 30.0mA、走査速度は 2.00° /分とし、各岩石の粉末試料を用いて X線回折試験を行った。

表-5 X線回折試験結果

岩石名(産地)	石英	長石	黒雲母	緑泥石
花崗岩(信楽)	+++++	++++	+	?
花崗岩(庵治)	+++++	++++	+++	+
花崗斑岩(西脇)	+++++	+++	++	+

(相対量比) +++++:非常に多い, ++++:多い,
+++普通, ++:少ない, +非常に少ない, ?:微量

6. 2 試験結果と考察

X線回折による分析結果を表-5に示す。なお、X線回折ではアルカリ長石と斜長石の分類が難しいため、まとめて長石としている。信楽花崗岩、庵治花崗岩、西脇花崗斑岩ともに、鉱物組成はよく似ており、石英を主体として長石および黒雲母を伴っていることがわかる。

信楽花崗岩は、黒雲母などの有色鉱物の含有が少なく、緑泥石については非常に微量で明確には同定できていない。また、長石が変質した粘土鉱物の含有も認められなかった。庵治花崗岩および西脇産花崗斑岩については、信楽花崗岩と比較して黒雲母の含有量が多く、また黒雲母の変質による緑泥石の含有も認められた。したがって、信楽花崗岩の長石は白濁しているように見えるが、これは変質作用によって粘土鉱物が生成しているためではないことが明らかになった。

7. 偏光顕微鏡観察

7. 1 試験概要

岩石の鉱物組成やその変形、変質の程度などといったミクロな情報を得ることにより、岩石性状をより詳細に把握するため、信楽花崗岩、庵治花崗岩、西脇産花崗斑岩それぞれ1試料ずつ、薄片観察を行った。

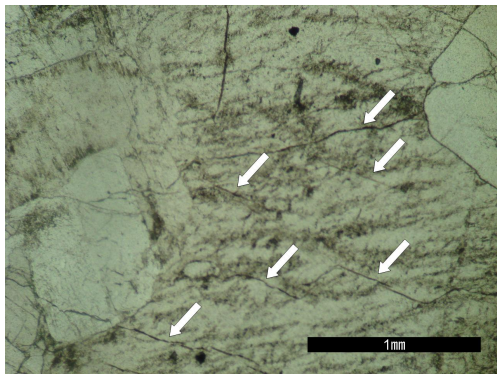


写真-4 信楽花崗岩 (オープンニコル)

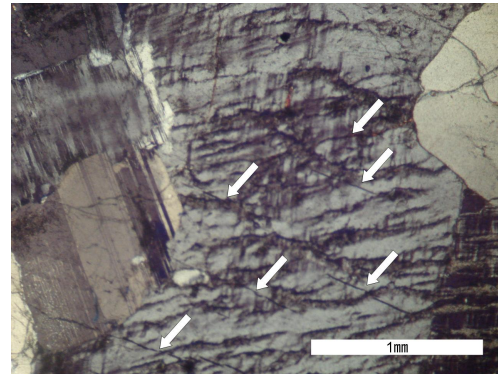


写真-5 信楽花崗岩 (クロスニコル)

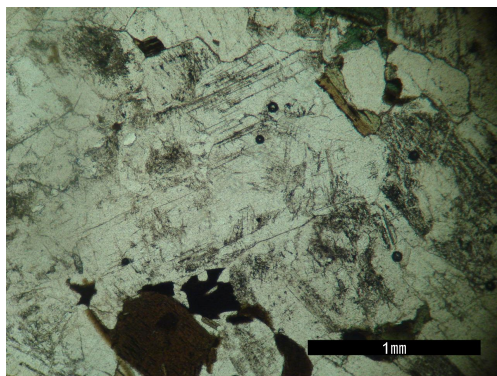


写真-6 庵治花崗岩 (オープンニコル)

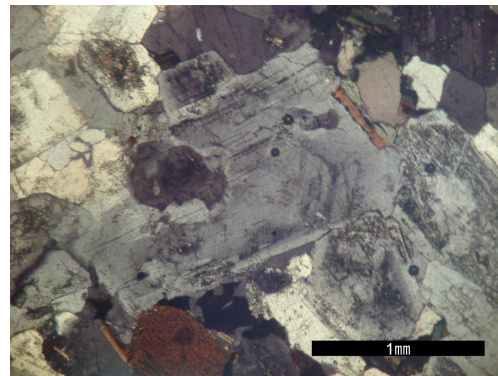


写真-7 庵治花崗岩 (クロスニコル)

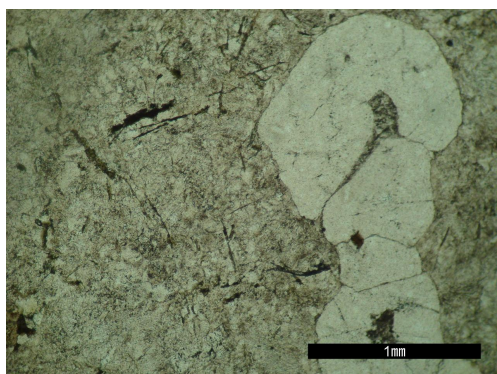


写真-8 西脇産凝灰岩 (オープンニコル)

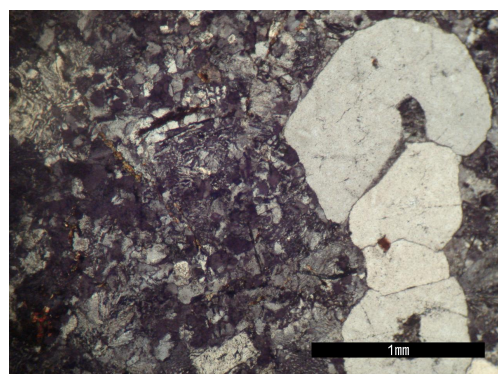


写真-9 西脇産凝灰岩 (クロスニコル)

7. 2 試験結果と考察

観察結果を写真4～写真9に示す。写真4, 写真5より, 信楽花崗岩中の長石は大きな結晶組織をしていることが分かる。同写真中央部の鉱物はラメラ構造が確認できることからアルカリ長石と考えられるが, 白濁しているうえ無数の微細なクラック(白矢印)も見られる。このクラックは隣接する石英中にまで達しており, その方向は概ね一定方向を指していることが確認できる。

写真6, 写真7に示す庵治花崗岩は, 全体的に結晶粒径が信楽花崗岩より小さく, 等粒状組織を有していることがわかる。また, 写真8, 写真9に示す西脇花崗斑岩は, 大きな結晶とその間を埋める細かい結晶に分かれる斑状組織であることがわかる。庵治花崗岩および西脇花崗斑岩においては, 信楽花崗岩に見られるような微細クラックは認められない。

以上より, 信楽花崗岩は庵治花崗岩及び西脇花崗斑岩と比較して結晶が粗粒で, 微細クラックが多いのが特徴である。ただし, 微細クラックの成因については不明である。

8. まとめ

8.1 試験結果のまとめ

試験結果をまとめると, 以下のとおりである。

- ・ 信楽花崗岩は, 庵治花崗岩や花崗斑岩と比較して, 密度, P波速度, S波速度が著しく小さいことから, 間隙が多く, 密実ではない。
- ・ 庵治花崗岩と比較して, 信楽花崗岩内の石英のVDHは約2分の1, 長石のVDHは約3分の1であり, 特に長石の硬度が小さい。
- ・ 信楽花崗岩の点載荷強度は, 庵治花崗岩や花崗斑岩と比較して約半分であり, 引張力に対する強度は小さい。また, いずれの供試体も岩芯から割裂している。
- ・ X線回折では, 信楽花崗岩の長石が粘土鉱物まで変質している証拠は認められない。
- ・ 偏光顕微鏡観察では, 信楽花崗岩の長石の変質は認められるが顕著ではない。ただし, 長石の結晶が大きいため, 劈開とともに微細なクラックが発達している。また, このクラックは石英中にも及んでいることが認められる。

8.1 信楽花崗岩の硬度特性

以上の試験結果より総合的に判断すると, 信楽花崗岩の硬度特性を把握する上で重要な要素は含有鉱物内の微細クラックであると考えられる。

まず, 密度および超音波速度が小さく, 吸水率が大きいことから岩石中に間隙が多いと考えられるが, この間隙は微細クラックによるものと推定される。この微細クラックが発達している結果として, 顕著な変質を受けていないにもかかわらず, 岩石中の長石および石英のビッカース硬度が著しく低下しているとみられる。また, 信楽花崗岩が新鮮な花崗岩と比較して白っぽく見えるのは, 弱い変質を受けていることではなく, 微細クラックが多数形成されていることが主たる原因と推定される。

したがって, 信楽花崗岩はその構成鉱物のうち長石の硬度が著しく低下しているため, ボーリングコアのRQDは良好であるものの, 岩石としての強度は見た目ほど大きくない。面的な載荷である一軸圧縮試験では100MPa程度の一軸圧縮強度が得られるが, 掘進機のように応力を集中させる載荷方法では割裂する前に長石がつぶれてしまう。そのため, 当該箇所では岩石を割裂することができず, 粉碎された砂・シルトサイズのスライム状の掘削残土が排出されたものと考えられる。

参考文献

- 1) 地盤工学会 編: 岩の調査と試験, 1989.
- 2) 日本道路公団: 「ポイントロード試験機(点載荷試験機)による岩片の強度試験法」, 日本道路公団規格 JHS 715-1997, 1997.