

サン・ジョバンニ教会および サンティ・アンドレア・エ・プロコピオ教会岩盤の反発硬度

五十嵐心一*

Surface hardness of rock walls

at Chiesa dei SS. Andrea e Procopio and Chiesa di S. Giovanni

Shin-ichi Igarashi*

Mural paintings have been often drawn on rock walls daubed with rendering mortars. The rock wall itself can affect durability and stability of those paintings since the rock can be quite soft and porous. For instance, harmful substances to the paintings could be supplied thorough the back wall. In this article, surface hardness of the rock wall evaluated by the rebound hammer test is reported. The surface hardness of the walls were almost the same between two churches. Using equations to estimate mechanical properties of rock, the rocks at the two churches are classified into a range of grades between C_L and C_M in the Saito and Kikuchi classification. Their estimated compressive strength is between 20 and 30MN/m².

Key Words: Schmidt hammer, surface hardness, rebound hammer test, surface moisture, tuff

キーワード: シュミット式ハンマー, 表面硬度, 反発硬度法, 表面含水量, 凝灰岩,

1. 序論

2013年9月、イタリア国、プーリア州のサン・ジョバンニ教会およびサンティ・アンドレア・エ・プロコピオ教会の壁画調査に同行した。これらの教会に残る壁画は、これまで調査を行ってきた洞窟壁画[1, 2]と同時期に描かれたものようであるが、その他の共通点として、それらが南イタリアに広く分布する凝灰岩層を掘削して造られた洞窟であることが挙げられる。往事の技術で掘削が可能ということは、岩質が軟質であって表面の平滑化などの加工が容易であったことを意味するが、その一方で、岩質自体が多孔質でもあることも示唆する。そのため、描画層やその下地である漆喰層とは別に、それらの支持体である岩盤の力学的性質や物質透過性が、表面の壁画の耐久性に影響を及ぼすことは十分に予測される。このため、壁画調査においては壁画自体の劣化度を評価することの必要性については論を待たないが、その背面の岩盤の性質を明らかにして、表面の壁画の劣化との関連を検討することは重大な意義を有すると思われる。

岩盤の力学的特性を簡便に評価する方法としてシュミット式ハンマーを用いた反発硬度試験がある。本法は試験装置が小型で、試験方法も簡単で、極端に軟質、もしくは硬質でない限りは幅広く適用できる方法である。これまでも土木工事における事前の地山調査等に用いられており、測定された反発硬度と地山物性との関係についても多くの研究実績がある。



Fig.1 Schmidt hammer used for measuring surface hardness of rock walls at the churches

* 理工研究域 環境デザイン学系
金沢大学フレスコ壁画研究センター

* Institute of Science and Technology,
Research Center of Italian Mural Paintings

本報告においては、反発硬度法を適用して両教会の壁画の支持体となっている岩壁の表面硬度を測定した結果について報告し、岩盤の力学的特性の推定を行うことを目的とする。

2. 調査方法

2.1 反発硬度法

使用したシュミット式ハンマーを Fig.1 に示す。本ハンマーは本来コンクリートの反発硬度測定用のものであり、先端形状は棒状のプランジャーである。したがって、軟質の岩盤に適用した場合は、打撃面の窪みのために測定反発度は低く評価される傾向を持つと考えられる。しかし、現地の打撃においてはこのよう

発度を記録した。なお、打撃箇所の高さはほぼ一定となるようにし、水平方向の打撃を行った。サン・ジョバンニ教会およびサンティ・アンドレア・エ・プロコピオ教会の打撃箇所を Fig.2 に示す。いずれの教会においても、洞窟外側の自然暴露された岩壁面と洞窟内部の壁画描画面もしくはその近接点にて計測を行った。

2.2 表面含水率測定

高周波式水分計を用いて、反発硬度測定箇所と同じ場所にて表面含水率の測定を行った。本機器では、表面から 40mm までの深さの平均の含水状態が測定される。しかし、本機器はモルタルおよびコンクリートの表面含水状態の測定用に開発されたもの

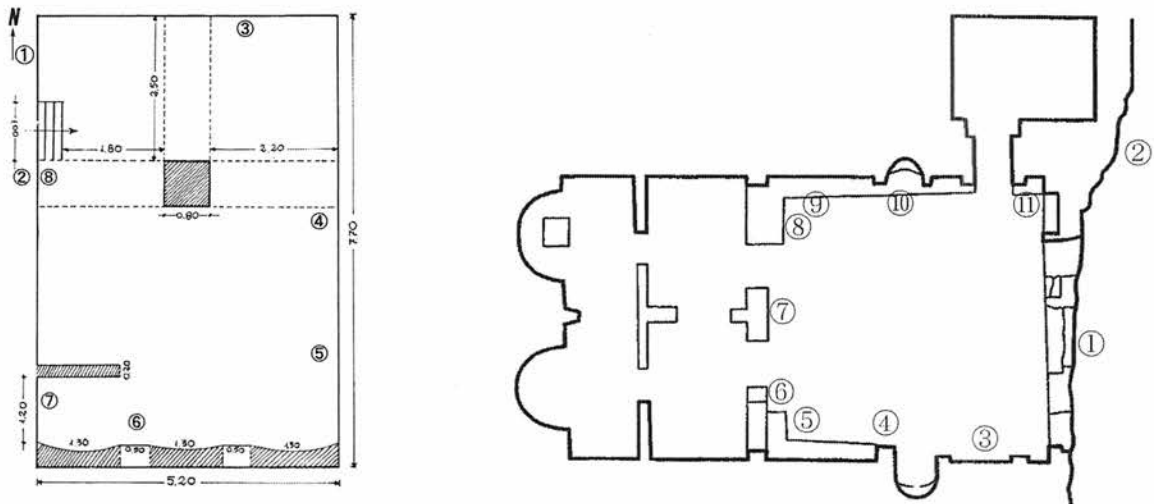


Fig. 2 Locations of the rebound hammer measurement: (a) Chiesa di S. Giovanni (b) Chiesa dei SS. Andrea e Procopio

な窪みが視認されたのはわずかであったため、測定反発度は岩盤の力学特性を反映していると判断して、測定位置間での比較を行うこととした。JIS Z JGS3411 に準じて、洞窟岩壁面の平滑面である各測定点において 10 回以上の打撃を行い、ハンマー反

であり、岩石に関する含水率を直読することはできない。また、

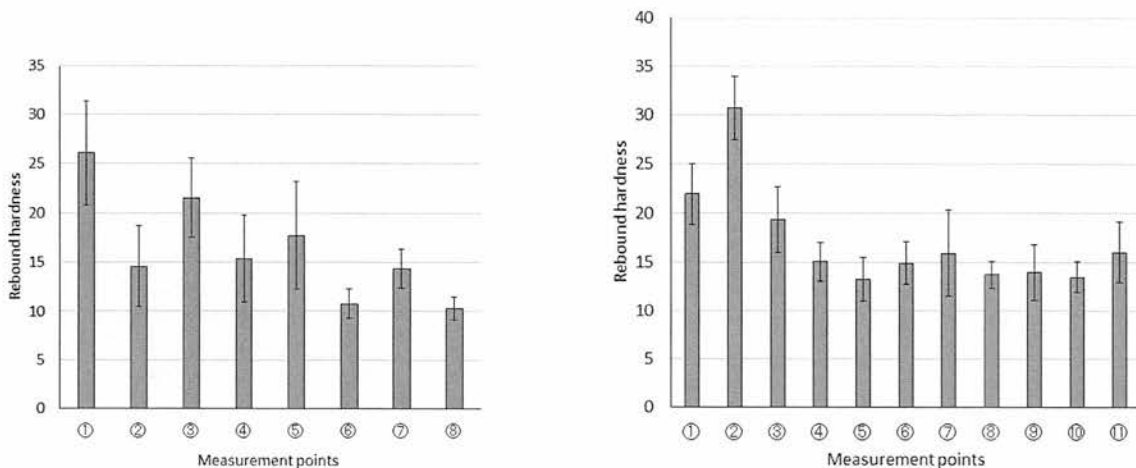


Fig.3 Results of the rebound hammer test: (a) Chiesa di S. Giovanni (b) Chiesa dei SS. Andrea e Procopio

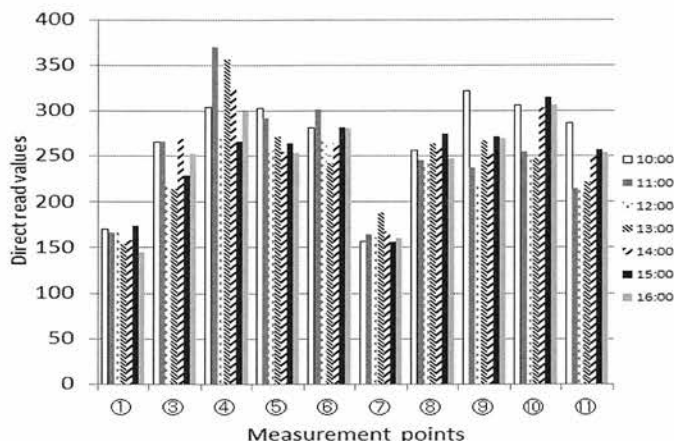
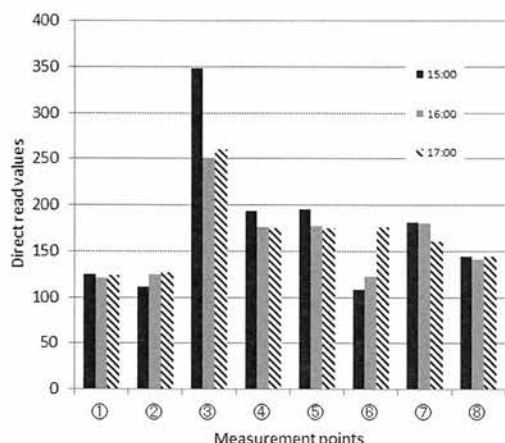


Fig. 4 Surface moisture contents of the rock walls: (a) Chiesa di S. Giovanni (b) Chiesa dei SS. Andrea e Procopio

対象岩盤について含水状態を変化させて校正曲線を得ることもできないため、直読値をそのまま記録した。

3. 結果

3.1 反発硬度測定結果

両教会岩盤の反発硬度の測定結果を Fig. 3 に示す。サン・ジョバンニ教会岩盤においては (Fig. 3(a)), 測定箇所①の外壁部の反発硬度が最も大きな値を示すが、同じ外壁部の②の反発硬度は大きくはなく、同様に見える岩壁であっても、反発硬度に大きな変動を生じることがわかる。また、概して南面および西面の内壁の反発硬度が大きく、壁面が比較的残存していた北面および東面 (測定点⑥, ⑦, ⑧) の反発硬度が低くなる傾向が認められる。さらに、それらの点においては測定値の変動も小さくなっている。

同様にサンティ・アンドレア・エ・プロコピオ教会岩盤の反発硬度の測定結果を Fig. 3(b) に示す。この場合も、洞窟外壁部である測定点①および②の反発硬度が高く、特に岩壁の色が赤色系で、他の凝灰岩とは異なった様子を呈してした②の測定点の硬度が大きくなっている。なお本教会における計測では、壁面現状維持の観点から、Fig. 3(b) に示したように、壁面の残る内陣ではなく、入口入ってすぐの比較的広い空間部分にて計測を行った。この部屋内にてどの壁面も反発硬度はほぼ同程度の値を示し、また、概してサン・ジョバンニ教会内壁面よりも硬度値の変動は小さくなっている。

3.2 表面含水状態

Fig. 4 に調査当日の岩盤の含水状態の日変化を示す。ただし図中の水分量は水分計による測定値は直読値であり、大きな値であるほど含水率が高いことを意味する。当日は概ね晴れの天候であったため、洞窟外部の表面含水量は内部に比べて小さく、より乾燥した状態にあったことがわかる。また、サン・ジョバンニ教会およびサンティ・アンドレア・エ・プロコピオ教会を比較すると、概してサンティ・アンドレア・エ・プロコピオ教会の含水率が高くなっている。

Fig. 5 に洞窟内壁の各測定点の含水量の日変化の単純平均値と反発硬度の関係を示す。サン・ジョバンニ教会では両者の間に良好な相関性が認められるが、サンティ・アンドレア・エ・プロコピオ教会ではほとんど相関性はない。

3.3 反発硬度からの岩盤物性値の推定

(1) 岩盤分類

サン・ジョバンニ教会とサンティ・アンドレア・エ・プロコピオ教会内壁の反発硬度値は、平均するとどちらも約 15 程度である。測定値の変動については、Fig. 3(a) および (b) に示したようにサンティ・アンドレア・エ・プロコピオ教会の変動が小さくなっているが、その差はあまり大きくはない。よって、現地での目視判断と反発硬度値から、両者は同様な岩盤であったと判断してよいものと思われる。

シュミット式ハンマーによる反発硬度試験の目的は、原位置における岩盤の種類を推定することである。菊地および斎藤[3] はシュミットハンマーの反発度(S)と岩盤の変形係数(D)や弾性係数(E)との間には、以下の式(1)および(2)で表されるような相関性が存在することを指摘している。

$$\log D = 0.0431S + 2.106 \quad (1)$$

$$\log E = 0.0331S + 2.695 \quad (2)$$

これらの式に両測定値の反発硬度値 15 を代入すると、変形係数は 565 MN/m^2 、弾性係数は 1554 MN/m^2 程度の値を得る。これらの岩盤物性値を既往の岩盤等級分類[4]に当てはめると、現地の岩盤等級は等級 C_M と C_L の境界付近の軟質岩盤に分類される。 C_M 級および C_L 級の特徴としては、以下のように説明されている[4]。

C_M 級：造岩鉱物および粒子は石英を除けば風化作用を受けて多少軟質化しており、岩質も多少軟らかくなっている。節理あるいは亀裂間の粘着力は多少減少しており、ハンマーの普通程度の打撃によって割れ目に沿って岩塊が剥脱し、剥脱面には粘土質物質の層が残留することがある。ハン

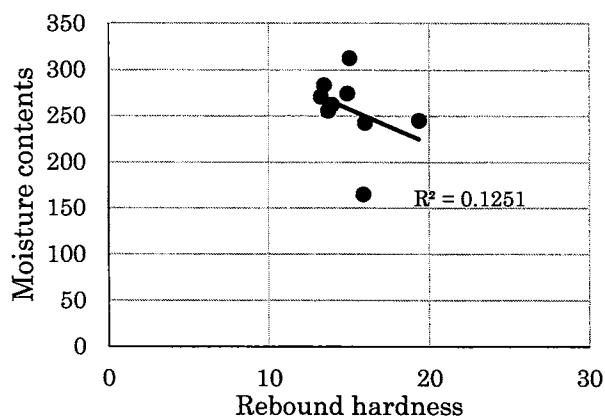
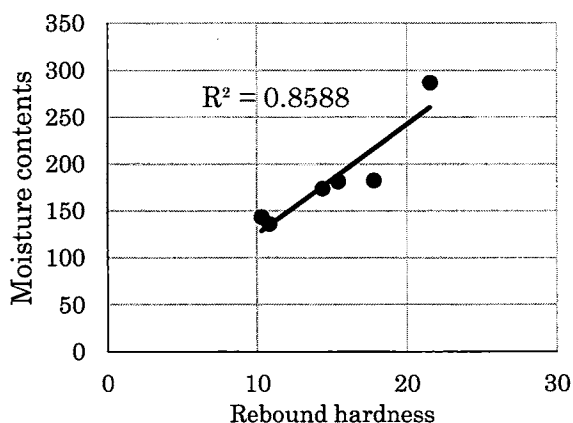


Fig. 5 Moisture contents vs. rebound hardness: (a) Chiesa di S. Giovanni (b) Chiesa dei SS. Andrea e Procopio

マーによって打診すれば、多少濁った音を出す。

C₄級:造岩鉱物および粒子は風化作用を受けて軟質化しており、岩質も軟らかくなっている。節理あるいは亀裂間の粘着力は減少しており、ハンマーの軽打によって割れ目によって岩塊が剥脱し、剥脱面には粘土質物質が残留する。ハンマーによって打診すれば、濁った音を出す。

すなわち、目視観察において節理や亀裂などの存在は明確ではなかったが、軟質であるという経験的な判断と一致する分類となった。

一方、サンティ・アンドレア・エ・プロコピオ教会洞窟外側の測定点②は、その高い反発硬度から別の岩盤等級C₄に分類され、この等級では、「岩盤は堅硬で組織は新鮮」であると判断できる。実際、この部位から分析用の岩石片を採取することはやや困難であった。よって、現在よりもさらに数百年遡及した当時では、さらに堅牢な岩盤であったとも推察され、当時の掘削技術でこれを掘削することは困難であったと思われる。しかし、その一方において、この堅牢な岩壁の後背部には教会内部から右側へ掘削して造られた小部屋 (Fig. 2(b), point ④) が掘削されていた。おそらくこの小部屋は、教会洞窟内部を掘削しているときに軟質であることに気づき、拡大を意図して側方へ掘り進めたものと思われる。しかし、表面岩壁が堅牢で内部から外部に通じる出口を設けることができず、結果として用途の定まらない小部屋空間が残されることになったものと推察される。

(2) 岩盤の力学的特性の推定

シュミット式ハンマーを用いた反発硬度試験のもう一つの目的として、対象岩盤の物性値を推定することが挙げられる。本来、シュミット式ハンマー試験方法はコンクリートの非破壊試験方法の一つとして発展してきた検査法であり、コンクリートの場合は反発硬度とコンクリートの圧縮強度の間には良好な相関性が存在する。しかし、岩盤に適用した場合は、岩種により傾向が異なるため、明確な強度推定式を決定しづらい。しかし、Deere and Miller ら[5]の反発硬度と一軸圧縮強度の関係図を適用すると、一軸圧縮強度はおおよそ20MPa~30MPa程度の圧縮強度を持つと推定される。この圧縮強度は、現在使用されるコンクリート

の圧縮強度と同程度の大きさである。この推定値と現地目視観察の結果を考慮すると、日本地盤工学会基準[6]に従うならば、現地の岩盤は軟岩系塊状岩盤SMに分類される岩壁ということになる。

4. まとめ

サン・ジョバンニ教会とサンティ・アンドレア・エ・プロコピオ教会内壁に反発硬度法を適用して、岩盤の物性値の推定を行った。いずれの教会とも、内壁は岩盤は同等の反発硬度を示し、軟質に分類される値であり、軟質の凝灰岩層を掘削して造られた洞窟という定性的な認識と一致する結果を得た。また、岩質としては軟質で多孔質ではあるが、推定された一軸圧縮強度は20~30MPa程度であり、通常のコンクリートと同程度の圧縮強度を有していることが示された。

参考文献

- [1] 五十嵐心一, 石田聡史:サンミケーレデッレグロッテ教会壁画下地漆喰の分析, 2011 年度研究調査報告書, 金沢大学フレスコ壁画研究センター, pp. 71-74, 2012.
- [2] 五十嵐心一, 石田聡史:サン・ニコラ教会 (パラジャネッロ) 壁画下地片の分析, 2012 年度研究調査報告書, 金沢大学フレスコ壁画研究センター, pp. 75-78, 2012.
- [3] 菊地宏吉, 齊藤和雄:岩盤計測におけるロックハンマーの考案とその適用, 発電水力, No. 145, pp. 47-53, 1976.
- [4] 菊地宏吉, 藤枝誠, 岡信彦, 小林隆志:ダム基礎岩盤の耐荷性に関する地質工学的総合評価, 応用地質特別号, pp. 103-118, 1984.
- [5] Deere, D.U. and Miller, R.P.: Engineering classification and index properties for intact rock. Technical report No: AFNLTR-65-116, Air force weapons laboratory, New Mexico, USA, 1966.
- [6] 日本地盤工学会:岩盤の工学的分類方法, JGS3811, 2011.