

文化財の強度測定法と風化度合いの定量化について

朽津 信明・李 心堅*・関 博充

1. はじめに

ある文化財の保存修復を考える際には、その文化財の劣化状況、すなわちそれがどの程度弱った状態にあるかを事前に認識しておく必要がある。そのためには、風化の度合いを定量的に表す方法が求められることになる。風化現象には、物性の変化や化学組成の変化など、様々な側面があるが、文化財保存という観点で考える場合には、中でも強度の低下が大きな問題となる場合が多い。従って、まずはその文化財の現状における強度を測定し、それを当初の強度や、あるいは想定される健全な状態の強度と比較して、状態の評価を行っていくことが重要だろう。

物体の強度を測定することに関しては、それぞれの材質についてそれぞれの分野でそれぞれの方法論が既に確立されているが、文化財であるという前提で考えると、それらの方法を単純に用いるのは困難である場合も多い。例えば通常の強度試験は、測定対象を整形してから破壊して測定を行うことが多いが、文化財の場合には破壊はおろか、整形すら許されない場合が殆どである。こうしたことから、文化財材料の劣化状況を記載するために行う強度測定法には、通常の場合に比べて大きな制約が必要となる。

そこで本稿では、文化財の中でも特に石造文化財や、煉瓦や土などの関連する材料でできた文化財の保存修復を見通して、現実に行える強度測定方法を紹介し、それぞれのメリットとデメリットを検証していく。

2. 確立された強度測定法

先述の通り、文化財ということに限らなければ、各材料の強度測定法は、それぞれの分野で既に確立されていると言える。例えば、ある岩石の強度を表現するのであれば、一軸圧縮強度、引張強度、曲げ強度、剪断強度など、それぞれ定義された意味を持つ強度の概念が存在する¹⁾。これらの強度測定については、定義された形状及び大きさに試料を整形し、それにそれぞれの方法で力を加えて、破壊された時の圧力の値を記録することになる。このうちの一軸圧縮強度は、圧縮方向の力に対する物体の強度の概念であり、文化財材料の強度を実感するには、比較的馴染みがある値と言える。

ある物体の一軸圧縮強度を測定するには、直径5cm、高さ10cmの円筒に整形された試料を上下から圧縮して、それが破壊されたときの圧力を読みとることになる。例えば、新鮮な花崗岩で200MPa程度、通常の堆積岩類で50～100MPa程度、柔らかめの凝灰岩で20MPa程度の値が目安である。新たな強度概念を提唱する場合には、このような過去に蓄積されたデータと比較する必要がある。

3. 試料整形を必要としない強度測定方法

先述の通り、可能であれば確立された強度測定法で文化財材料の強度が定義できるのが好ましいことは言うまでもないが、文化財という制約からそれが困難である場合も多い。そのような場合には、試料整形を行わずにできる測定法が必要となる。以下では、文化財分野に限らず、

* 龍門石窟研究院

既に行われている、試料整形を必要としない強度測定方法を紹介する。これらの方法で測定される強度の値は、それぞれで表現される意味合いが異なるため、目的に応じて使い分けられる必要がある。

3 - 1 . シュミットハンマー打撃試験

シュミットハンマーは、もとはシュミットによって提唱されたコンクリートのテスト法で²⁾、現在はいくつかの種類があるが、いずれも定義された形状・大きさ(一般に数cm大)のハンマーを用いて、一定の力で測定対象に打撃を与え、その反撥度(打撃前後のハンマーの移動距離比の百分率=R)を測定する(図1)。同じ力で叩いた場合に、硬い物質ほど反撥が大きく、柔らかい物質ほど反撥が小さくなることに基づいて、対象物の硬さを測定する方法である。過去にデータが蓄積されており、この測定値と一軸圧縮強度との間に相関関係が認められている³⁾ことから、試料整形をしなくとも、その場で打撃を加えるだけで強度を求めることができると言える。ただし、この場合に加える打撃は、金属製のハンマーによるので、この方法が使える文化財試料は現実には極めて限られると考えられる。

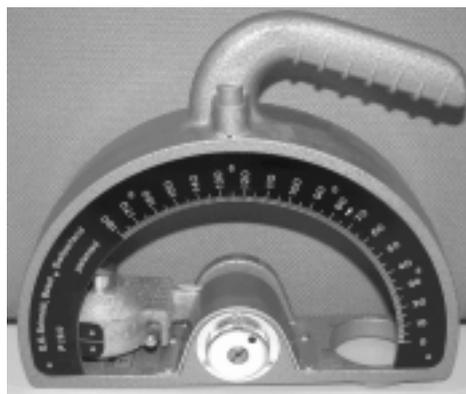


図1 シュミットハンマーの例
写真は、P型と呼ばれるタイプ。他にも数種類のタイプが知られている。

3 - 2 . エコーチップ試験

原理的にはシュミットハンマー打撃試験と類似するが、打撃部分が1cm未満と小さい点がシュミットハンマーと異なり(図2)、反撥値(反撥速度と打撃速度との比の千分率=L)をもって硬さと認識する点もシュミットハンマーと基本的に同じである⁴⁾。近年になってデータが蓄積されてきており、一軸圧縮強度との相関も指摘されている⁵⁾。試料整形の必要はなく、上記シュミットハンマーに比べれば、測定対象に与える衝撃(エネルギー)も約11Nmmと二桁程度小さいが、脆弱な試料の場合には測定後の表面に打撃の痕跡を残す場合もあるので注意が必要である。そのようなことを避ける意味で、どちらかと言えば硬めの石材の評価に向いていると言える。



図2 エコーチップ試験風景

3 - 3 . 針貫入試験

定義された大きさの針(径約0.6mm,長さ10mm)を測定対象に差し込む際にかかる力(N)を測定し、針貫入勾配(N/mm)で表現する⁶⁾(図3)。硬い試料ほど針貫入勾配値は大きくなり、柔らかい試料ほど小さくなる。この針貫入勾配値と一軸圧縮強度との相関関係も指摘されているため、現地で瞬時に対象物の強度を認識することができる。ただし、ある程度以上の硬

さの物体には、そもそも針を刺すことができないため、計測できないという問題がある。また、測定後には、径1mm程度の穴を対象部分に残すことになる。いわゆる「軟岩」と呼ばれる柔らかめの石材や、日干し煉瓦などの土でできた文化財の評価に適している。



図3 針貫入試験器（軟岩ペネトロ計）

3 - 4 . モース硬度計

極めて原始的な硬度測定法で、十種類の決まった硬度の鉱物を用いて1から順番に対象物を引っ掻いていき、どの段階で傷を付けられるかで対象物の硬度を測定する方法である⁷⁾(図4)。これは対象の大きさに制限は殆どなく、また測定後に対象物に残る傷も僅かなものにするのできる方法である。例えば硬度1の鉱物では傷が付けられなかった対象物に、硬度2の鉱物では傷つけることができた場合には、モース硬度1.5と表現し、単位は持たない。つまり断続的な測定値しか得られないため定量性はなく、あくまでも相対的に「硬いか柔らかいか」を示すに過ぎず、一軸圧縮強度などの他の物理量と対比することは容易ではない。破片など、他の物性測定が困難な場合に、この方法が有効となる場合がある。



図4 モース硬度測定風景

3 - 5 . 木屋式硬度計

試料を試料台に乗せて、それに上下から力を加えていき、破壊されたときの力の値を測定する⁸⁾(図5)。構図は、上記の一軸圧縮試験と類似するようにも見えるが、力は試料に対して面ではなく点として加えられるため、値は圧力(Pa)ではなく力(N)の単位で表現される。従って、試料整形の必要はなく、径1cm未満の小さな試料ですぐに測定が可能だが、その値の持つ意味を、他の強度の概念と対比することは容易ではない。また、その計測値は強度だけでなく、試料の大きさや形状にも左右されるため、一つの測定値を別の測定値と比較する場合にも注意が必要となる。



図5 木屋式硬度計

3 - 6 . 固結強度測定

圧力を加えて破砕する方法では強度を測定できないような、ごく脆弱な状態の物体の固結状態を評価する方法である。細かい穴(径3mm)が多数空いた状態の円筒(径80mm)の内部に試料

を入れ、円筒を一定速度 ($0.367s^{-1}$) で回転させることによって試料を破壊・粉化させ、穴から崩落した粒子の重さを計測していく⁹⁾(図6)。崩落粒子の重さの増加速度が大きい試料は固結強度が低く、逆に増加速度が小さい試料は固結強度が高いと認識し、一般には崩落重量と当初重量との比が、定義された比率(例えば8割など)を越えるのに要した所要時間(S)で表現される。試料は径1cm未満の小さなもので測定ができ、厳密な試料整形も必要ないが、木屋式と同様に試料の大きさや形状に左右される面があるため、一つの測定値を別の測定値と比較する場合に注意が必要となる。また、時間の単位で表された固結強度の値を、他の強度の概念と対比することも容易ではない。文化財で言えば、手で崩せる状態にまで劣化した部分の評価や、日干し煉瓦などの土でできた文化財の測定に適している。

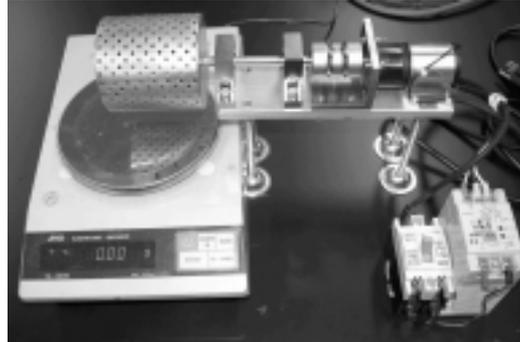


図6 固結強度の測定風景

4. その他の評価方法

前章で見た各方法は、意味はそれぞれで異なるとは言え、物体の強度を直接測定する方法だったが、強度の絶対値を測るのではなく、「ある物体がどのくらい傷んだ状態にあるか」を実感するために行われる方法もある。以下では、強度測定法以外の方法で、文化財の劣化状況を認識するために用いられる方法を見ていく。

4-1. 浸食量・崩落量調査

崖面が年々後退していく様子を、崖面に釘を打ち込んでそれに定期的に印を付けていくことで認識するという研究が、地形学などの分野で行われることがある。文化財でも、洞窟遺跡のある崖が、どのくらいの速度で痩せていっているかを見積もった研究例¹⁰⁾があり、こうした方法は、大きな屋外文化財の傷み方を実感するには有効な場合がある。また逆に、崖面や壁面の下に箱のような物を置いておき、そこに集まってくる崩落物の量を定期的に測ることから、崖面後退や壁面後退を実感する方法もある。この方法は、文化財建造物の劣化速度を認識するために用いられた例が報告されている¹¹⁾(図7)。文化財の場合には、釘を打ち込むことが許される対象は限定されるが、崩落物を測定する方法は、基本的にどんな文化財にも応用可能である。また、レーザー三次元計測を一定期間をおいて複数回行うことにより、時間の経過とともにその文化財の形状がどのように変化したかを厳密に議論した研究もあり¹²⁾、こうした方法でも、「どのくらい傷んだか」を認識できる場合がある。この場合には、対象物には基本的に損傷を与えずに測定することができる。



図7 壁面崩落量の測定 (Kuchitsu¹¹⁾による)

4 - 2 . 測色

岩石が風化する際には、色も変化する場合が比較的多い。その色の変化がもしも一定の傾向を持つような状況であれば、色を測定することから風化度合いを認識することが可能となる場合もある。例えば砂岩が風化する際には、黄色みや赤みが増すような傾向が定量的に報告されている¹³⁾。測定にはいろいろなタイプの測色計が知られているが、基本的には対象物を傷つけることなく測定が行える場合が多い(図8)。ただし、測定された色の変化が、本当に風化の概念を正しく反映できているのか、すなわち、他の要因で色が変わった可能性がないかについては、別途検証が必要である。



図8 測色計の例
他にも数種類のタイプが知られている。

4 - 3 . 帯磁率測定

磁鉄鉱など、磁性を示す鉱物を含んだ岩石が風化し、その磁性を含んだ鉱物の変質して磁性を失えば、結果として岩石全体の磁性が弱まることになる。このことに基づいて、帯磁率を測定することで岩石の風化度合いを認識することができる場合もある¹⁴⁾。具体的には、凝灰岩に彫られた磨崖仏で計測された報告が知られている。これも、測定対象を基本的に傷つけることなく、その場で測定が行える。ただし、対象となりうる岩石は、ある程度以上の磁性をもとと示す岩石ということに限られる。

4 - 4 . 間隙率・粒度・密度測定

岩石が風化すると、強度が低下する以外にも様々な物性が変化する。例えば風化が進行するほど、間隙率は上昇する傾向があり、粒度は低下する(または比表面積=単位重さあたりの全表面積の合計値が増加する)傾向にあり、かさ密度(空隙部分も含めた体積あたりの重さ)も低下することが多い¹⁵⁾。従って、厳密に定義された強度測定を行わなくとも、これらの値を計測することから、岩石の風化度合いを認識できる場合もある。これらの測定では、試料整形は基本的に必要なく、必要な試料の大きさも径1cm程度で十分な場合が多い。ただし、それらの物性値が、強度の概念とどのような関係にあるかは別途検討が必要である。

4 - 5 . 化学分析

岩石は風化することにより、化学組成も変化する場合が多い(化学風化)。従って、対象試料の化学組成を調べれば、岩石がどの程度風化しているかを定義することができる場合がある。化学分析結果に基づいて風化度合いを数値化して定義する方法は過去に数多く知られており、それぞれの目的に応じて、いろいろな計算が行われている¹⁶⁾。化学分析は一般に試料整形を必要としないが、厳密に行うにはある程度の試料破壊が必要となることが多い。また、化学変化と強度変化との直接的な対比をすることは困難である場合が多い。

5 . 各評価方法の対比

上記で紹介した強度測定法は、それぞれの分野ではデータが蓄積されているが、相互に比較

検討が行われることは希である。そこで、文化財で利用可能と考えられる各種の強度の概念を、同一試料を複数の方法で計測することによって比較してみることにする。なお、強度測定においては、一般に強固な岩石についての測定例が多く知られており、逆に脆弱なものの測定例が少なく、その対比がより困難であることから、ここでは特に土でできた文化財の強度評価を見通して、土の強度を様々な方法で計測して比較する。

5 - 1 . 試料と方法

予め一軸圧縮強度の求められている試料に対して、エコーチップ試験、針貫入試験、モース硬度計、木屋式硬度計、固結強度測定の種類試験を行って、それぞれの結果を比較した。試料は、荒木田土をベースにして、それに以下に示す各比率で珪砂を混ぜて全体を均質に練り、径5cm、高さ10cmに整形してからそれを風乾させ、実験室の環境条件で一日以上放置しても重さが変化しない状態となった段階で供試体とした。配合比は、試料1と2は土100%、試料3は土71.4%、砂28.6%、試料4と5は土62.5%、砂37.5%、試料6は土52.6%、砂47.4%、試料7は土47.6%、砂52.4%、試料8は土20%、砂80%であり、このうちの試料2については50kPaの、それ以外の試料についてはいずれも100kPaの圧密をそれぞれ整形前に加えてから供試体を得た。それぞれの試料を一軸圧縮試験¹⁾に供し、破碎された試料の残骸を用いて、他の各種測定を行った。なお、各一軸圧縮強度は順番に、3.841MPa、2.740MPa、2.420MPa、1.596MPa、1.396MPa、1.260MPa、1.176MPa、0.742MPaであった。

エコーチップ試験は、破碎後の試料のなるべく平らな面を使って、単打法⁴⁾によりランダムに20箇所計測した値を平均した。針貫入試験は、破碎後のなるべく大きな破片を用いて、5回行った針貫入勾配値を平均した。モース硬度は、他の試験を行っていない部分において計測した。木屋式硬度は、大きさや形状による影響を避けるため、角をなるべく削り落として球形に近い形状で、重さを0.2gに調整した試料を用い、5回測定した上で最大値と最小値を除いた残る3回の平均値をとった。最後に固結強度は、木屋式硬度を測定したのと同様の状態に試料を調整し、崩落試料が0.1g(初期重量の半分)を越えるまでに要した時間を3回測定し、その中間値を採用した。

5 - 2 . 結果と評価

結果は表1に示す。

エコーチップ試験の結果は、おおよその傾向で見れば一軸圧縮強度の小さいものほど値が小さくなる傾向が見られた(図9)が、相関関係についてはこの計測方法での言及は困難であり、厳密な対応関係については既存の研究⁵⁾に従ったステップを踏んで評価を行うべきであろう。針

表1 各測定値の比較

試料	一軸圧縮強度 (MPa)	エコーチップ (L値)	針貫入勾配 (N/mm)	モース硬度	木屋式硬度 (N)	固結強度 (S)
1	3.841	258	19.6	2	15.19	不能
2	2.740	246	15.6	2	15.11	不能
3	2.420	219	14.4	2	9.64	不能
4	1.596	225	9.3	2	8.17	900
5	1.396	226	8.1	2	7.27	4200
6	1.260	196	4.1	2	3.43	1440
7	1.176	176	3.4	1.5	3.60	150
8	0.742	173	2.9	1	不能	110

貫入勾配値は、今回の試験結果の中では一軸圧縮強度との対応関係が最もよく（図9）、また全ての範囲で計測が可能だった。従って、測定後に小さな穴を残しても差し支えない文化財については、この方法での強度評価は有望と考えられる。モース硬度については、きざみが荒いために細かい評価ができていないが、一部脆弱な試料では硬度の違いを表現できる場合もあった。木屋式硬度については、大きさと形状をそろえて測定したためか一軸圧縮強度との対応関係が比較的好かった（図9）が、最も脆弱な試料では脆すぎて測定ができないという問題があった。最後に固結強度については、逆に硬い方の試料では計測ができなかった。また最も脆弱な試料7や8では、一軸圧縮強度と整合的な値を示したが、硬めの試料では値の逆転が見られ、硬い試料の評価には不向きな方法であることが考えられた。

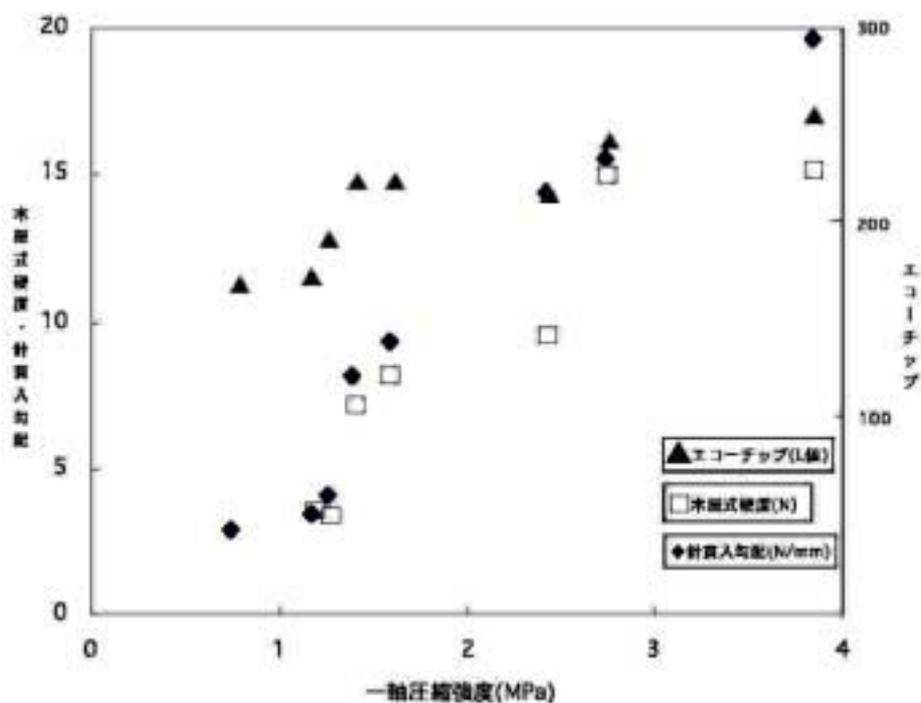


図9 エコーチップ硬度，針貫入勾配，木屋式硬度と，一軸圧縮強度との対応関係

6.まとめ

石造文化財及び煉瓦や土などでできた関連文化財の保存修復を見通して、文化財材料の強度を測定する方法について紹介した。各測定法には、測定対象による向き不向きがあり、また意味する強度の意味も微妙に異なっている。今回は土でできた文化財の強度評価を見通して、各測定法を比較検討したデータを示したが、それぞれの目的に応じた適切な方法で評価が行われることを希望する。

謝辞

本稿を作成するに当たり，以下の方々から様々な有益な情報をご教示いただいた。筑波大学の松倉公憲氏，青木久氏，埼玉大学の小口千明氏，東ソー（株）の国吉実氏，徳島大学の西山賢一氏，早稲田大学の内田悦生氏。以上，記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 地盤工学会：『地盤工学ハンドブック』(1999)
- 2) Schmidt：A non-destructive concrete tester, Concrete, 59, 34-35 (1951)
- 3) Deere, D. U. and Miller, R. P.：Engineering classification and index properties for intact rocks, Tech. Report. Air Force Weapons Lab., New Mexico, No., AFNL-TR, 65-116 (1966)
- 4) 川崎了・吉田昌登・谷本親伯・舛屋直：簡易反発硬度試験による岩質材料の物性評価手法の開発 試験条件の影響と基本特性に関する調査，応用地質，41, 230-241 (2000)
- 5) 青木久・松倉公憲：エコーチップ硬さ試験機の紹介とその反発値と一軸圧縮強度との関係に関する一考察，地形，25, 267-276 (2004)
- 6) 土木学会：『軟岩の調査・試験の指針（案）』(1991)
- 7) Mohs, F.：Hemiprismatische Rubinblende.- Grundriss der Mineralogie, vol. II, 606-607 (1824)
- 8) 粉体工学会編『粉体工学便覧』，日刊工業新聞社 (1986)
- 9) 国吉実・村上次雄：粉体の弱い固結状態測定装置の開発 重炭酸ナトリウム粉体の固結の評価，資源と素材，117, 869-874 (2001)
- 10) 岩塚守公・福田正己：洞窟基盤岩石の調査.北海道余市郡余市町 (1973) 史跡フゴッペ洞窟保存工事報告, 14-20 (1973)
- 11) Kuchitsu, N.：Process of salt weathering at a brick building, Shimoren Kiln, Central Japan., Transactions J.G.U., 21, 261-276 (2000)
- 12) Masuda, T., Yamada, Y., Kuchitsu, N., and Ikeuchi, K.：Aged Shape Deterioration Visualization Based upon 3D Shape Measurement - Observing Brick Wall in Ayutthaya Relic，Conservation of monuments in Thailand [III] (2004)
- 13) 西山賢一：四万十帯砂岩の風化：色彩及び鉱物化学的性質の変化，地形，22, 23-42 (2001)
- 14) 内田悦生・安藤大介・前田庸之：大分磨崖仏の帯磁率および含水率に基づく非破壊劣化評価，岩石鉱物科学，30, 59-67 (2001)
- 15) 小口千明・八田珠郎・松倉公憲：神津島における多孔質流紋岩の風化とそれに伴う物性変化，地理学評論，67A-11, 775-793 (1994)
- 16) 小口千明・松倉公憲：化学風化の指標について，筑波大学水理実験センター報告，19, 11-18 (1994)

キーワード：強度 (strength)；風化 (weathering)；石造文化財 (stone cultural properties)；評価 (evaluation)；固結 (caking)

Methods to Measure Strength of Cultural Properties and Indexes of Weathering

Nobuaki KUCHITSU, LI Xin Jian* and Hiromitsu SEKI

When thinking about conservation of cultural properties, information about the strength of the cultural property must be understood. So in this paper, methods to measure the strength of stone and related materials, such as bricks and earths, are introduced. To realize the strength of a stone, its compressive strength is usually measured. However, that method requires destruction of samples more than 10cm in diameter. So it is not usable for cultural properties. Methods should be nondestructive or at least "nearly" nondestructive. Several methods are introduced in this paper as nearly nondestructive methods. Other methods to estimate the grade of weathering of materials are also introduced. These methods have, of course, merits and demerits, so they should be selected case by case.

* Longmen Grottoes Academy, Henan Province, China.

