

地層剥ぎ取り技法の物理的・化学的な理解

Physical and Chemical understanding of Surface Peeling Method from Outcrops

笠間友博¹⁾

Tomohiro KASAMA¹⁾

Abstract. The method of surface peel of outcrop is the application of the industrial technologies, but, its physics and chemistry are not considered well. In the case of surface peeling, it is very important that bonded zone is destroyed with material on the outcrop. But in the case of the industry, this kind of destruction is not necessary. There are many difference between geological surface peeling and industrial adhesion. But, it is better to record the detaching method (i.e. various angle exfoliation, cleaving, tensile rupture etc.) and the data of used adhesive when specimen was made. Some important problem still remains. What is the best keeping method of specimen? How long is the quality preservation period? These problems will become important in the future.

Key Words: peel strength, tensile strength, adhesive, adhesive strength, adherend failure

1. はじめに

地層の剥ぎ取りは、これまで様々な接着剤や裏打ち材が工夫されて用いられてきた（浜崎・三土, 1983；石浜, 2017）。剥ぎ取りで重要な接着剤は技術の発展とともに、家屋から航空機まで様々な分野に進出している。これと同時に、材料のリサイクルも重要な課題となっており、接着部分がきれいに剥がれるようにする技術研究も一方で盛んである。工業的観点から地層剥ぎ取りを見ると、被着材（堆積物や岩石）が基材破壊される必要があり、接着部分がきれいに剥がれないほど歓迎されるという、特異な技術分野であるといえる。それゆえに、工業で得られている情報は、直接地層剥ぎ取りには役立たないことが多いと予想されるが、こ

こでは地質学的な面ではなく、物理的・化学的な観点から、地層剥ぎ取り技法を俯瞰して、両者の接点を探ることとする。

2. 地層剥ぎ取りの力学

(1) 岩石の引張強度の弱さが剥ぎ取りを可能にする

露頭面の強度は、それを構成する堆積物や岩石により異なり、風化の影響によっても変化する。建築工学的に重視される石材の強度は、通常積載（圧縮）強度になるが、剥ぎ取りにおいては剥離によって露頭物質を採取するため、引張強度が問題となる。岩石の圧縮強度と引張強度との関係は古くから調べられており、例えば大阪・本館（1967）では、表1のようである。第新三系堆積岩類の剥ぎ取り標本は、神奈川県立生命の星・地球博物館でも収集している（KPM-NP 45, KPM-NP 60。KPM-NP は神奈川県立生命の星・地球博物館の剥ぎ取り・型取り標本の資料番号）。岩石の圧

¹⁾神奈川県立生命の星・地球博物館
〒250-0031 神奈川県小田原市入生田499
Kanagawa Prefectural Museum of Natural History
499 Iryuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan
kasama@nh.kanagawa-museum.jp

表 1. 岩石の圧縮強度と引張強度

岩石の種類	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	圧縮強度：引張強度
第三系砂岩	10～2235 (270)	1.80～173.26 (28.1)	9.60
第三系泥岩	10～263 (118)	1.50～19.54 (10.4)	11.3
第三系角礫凝灰岩	23～1805 (214)	4.02～178.36 (17.0)	12.5
安山岩	208～2505 (954)	5.6～194.44 (67.1)	14.2
花崗閃緑岩	1160～1635 (1459)	28.12～109.19 (68.7)	21.2

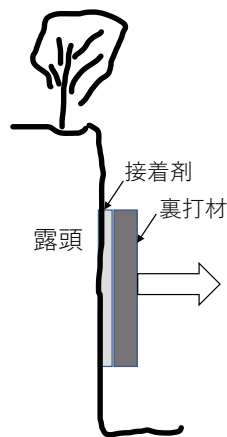
大阪・本館 (1968)

縮強度と引張強度の比、圧縮強度／引張強度は 10 ～ 20 と大きく、引張強度は圧縮強度に対して極端に弱いという特性があることが分かる。よって、露頭を支える十分な圧縮強度を岩石や堆積物がもっていても、引張強度が極端に弱いため地層剥ぎ取りが可能となることが予想される。

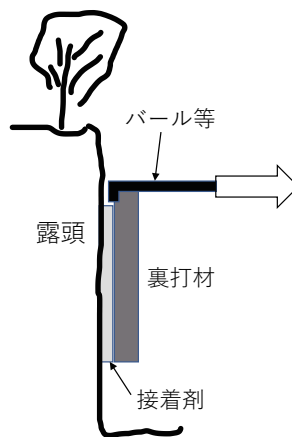
(2) 剥ぎ取りの剥がし方によって異なる接着剤の強度

(1) より、単純に岩石の引張強度を上回る接着強度が接着剤に発生すれば、剥ぎ取りは可能になるように思われるが、接着強度は岩石の引張強度と単純に比較できない。もちろん地層剥ぎ取りは、露頭面(被着材)の付着物、凹凸、風化など、室内試験とは全く異なる

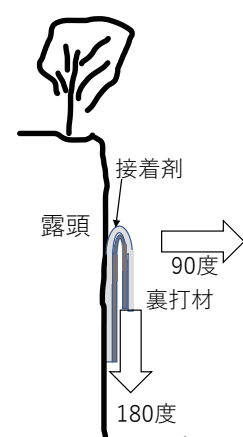
(a)



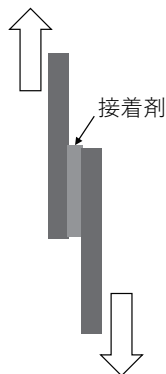
引張強度の発現



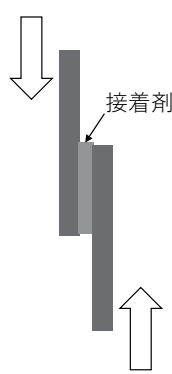
割裂強度の発現

剥離強度の発現
180° 剥離と 90° 剥離

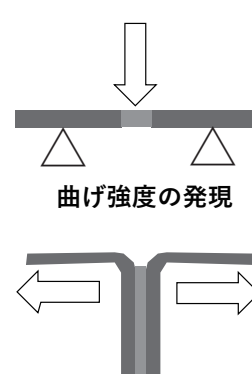
(b)



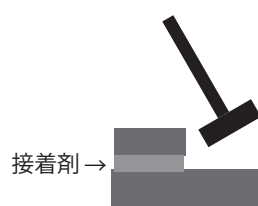
引張せん断強度の発現



圧縮せん断強度の発現



T型剥離強度の発現



衝撃強度の発現

図 1. さまざまな接着強度.

表 2. エポキシ系接着剤の接着強度

試験の種類	接着強さ
引張	317 kgf/cm ²
引張せん断	245 kgf/cm ²
圧縮せん断	308 kgf/cm ²
割裂	878 kgf/25mm
曲げ	24.5 kg f /cm ²
剥離(T型)	1.6 kgf/25mm

日本接着剤工業会接着剤読本編集委員会（2009）

条件下で行われることは当然である。しかし、それらを除くことが出来たとしても、接着強度が、引き剥がそうとする力のかけ方によって何種類も存在し、同じ接着剤でも値は大きく変化する。日本工業規格（JIS）では、下記 7 種類の試験方法を規定している。

- ① 引張接着強さ（JIS K 6849）
- ② 引張せん断接着強さ（JIS K 6850）
- ③ 圧縮せん断接着強さ（JIS K 6852）
- ④ 割裂接着強さ（JIS K 6853）
- ⑤ 剥離接着強さ（JIS K 6854）
- ⑥ 衝撃接着強さ（JIS K 6855）
- ⑦ 曲げ接着強さ（JIS K 6856）

図 1 に示した例のうち (a) は実際に地層剥ぎ取り場面で想定される強度、(b) は地層剥ぎ取り場面には想定されないが、JIS の強度試験にはある強度である。

表 2 は、軟鋼板をエポキシ樹脂系接着剤で接着し、JIS の強度試験で測定した結果である（日本接着剤工業会接着剤読本編集委員会，2009）。強度のうち引張強度、引張せん断強度、圧縮せん断強度、曲げ強度は岩石の引張強度と同じように圧力の単位で表すが、粘着テープのように少なくとも一方の接着物が自由



図 2. 割裂（上方から）に近い剥ぎ取り（KPM-NP 64，富士宝永スコリア，茅ヶ崎市）。

に曲がるものであれば、剥離強度（T 型剥離、90 度剥離、180 度剥離）で表す。剥離強度は、面ではなく剥離を起こしつつ後退する線に作用し、その線の長さ（テープならばテープ幅）に抗力が比例するため、単位長さあたりの力で示される。表 2 の値を比較すると、引張では 1 cm² あたり、317 kgf と大人 5 人はぶら下がるが、剥離では幅 2.5 cm あたり、たった 1.6 kg のものしか吊り下げられない。このように接着剤の強度が、力のかかり方によって変化するため JIS によって試験項目が細分されているということは、すなわち、地層剥ぎ取りにおいても接着剤や裏打ち材が同じでも、剥がす時の方法によって接着力は変化していることを意味する。接着強度試験では被着材が接着剤よりも先に破壊されることはないが、地層剥ぎ取りでは被着材（露頭面）が先に破壊されることが必要である。このため、接着力の差は露頭面破壊の差異となって表れるはずである。さらに接着剤



図 3. 90° 剥離に近い剥ぎ取り（KPM-NP 49，始良 Tn テフラ，厚木市）。



図 4. 180° 剥離に近い剥ぎ取り (KPM-NP 5, 箱根東京テフラ, 伊勢原市) .

は高分子化合物で粘弾性があるため、剥がす方法だけではなく剥がす速度も接着力に影響を与える。つまり、遅く剥がすと粘性体としての性質（柔らかさ）が現れ、速く剥がすと弾性体としての性質（硬さ）が現れる。剥離強度は硬化後も柔らかい接着剤の方が大きく、エポキシ樹脂系接着剤のような硬い接着剤では小さくなる傾向がある。接着剤の物性は温度（特にガラス転移温度）によっても変化するが、地層剥ぎ取りでは現場で温度管理することは無理なので、ここでは除しておく。

地層剥ぎ取りでは、とにかく露頭物質を欠損なく回収することが重要であり、剥がす方法や方向、速度についての議論はない。これは考えてみれば不思議なことである。図 2 は後述するハイセル SAC-100 による剥ぎ取り作業であるが、小型で対象が砂丘内の富士宝永テフラ (KPM-NP 64) であったため上から下へ割裂に近い方法で回収した。しかし、大面積の標本や対象が固結した地層では、ハイセルなどのウレタン樹脂系接着剤は、柔軟性があるため剥離で剥ぎ取り作業を行うことも多い。表 2 からは、剥離は楽に剥ぎ取りを回収することはできても、剥ぎ取り面には大きな力が作用していない（露頭面を回収しきれない）可能性があ

ることが分かる。さらに細かい点を指摘すれば、この剥離について、90° 剥離 (T 型剥離の一方のみの場合、図 3) とした場合と 180° 剥離 (図 4) とした場合では、接着力が異なるので付着する物質は異なる可能性がある。これは、現場で複数回の剥ぎ取りを行って、最良の剥がし方を探ればいいのだが、非現実的である。また、45° 剥離のように 90° 未満の角度では、引張せん断の成分が加わり、露頭面のせん断破壊が生じてくる。さらに剥離角度が増すにつれ、剥ぎ取られた地層物質が接着剤や裏打材の変形に追従できなくなり、脆性破壊が顕著に出現する。これは 180° 剥離では最大となる。泥層や火山灰層では、固結していなくても脆性破壊による細かいクラックが入る場合がある。したがって、厳密には 1 枚の剥ぎ取り内で作業方法を統一して作業を行うべきであり、剥離であれば剥離方向や剥離角度を一定とし、そのデータも残しておくことが必要であろう。

(3) 合成樹脂の引張強度

接着剤の強度も多様性があり、実際に現場で行われる剥がし取り作業も様々である状況において、1 つ絶対的な強度として確認すべきは硬化後の接着剤を樹脂

表 3. 合成樹脂の引張強度

樹脂の種類	引張強度 (kg f /cm ²)
エポキシ樹脂	285～927
ウレタン樹脂	10～713
クロロプレンゴム	50～250
エチレン酢酸ビニル共重合体	51～265

日本機械学会 (2011)、ポリマー辞典編集委員会 (2011)、プラスチック素材辞典ウェブ版 (2017)

材料として見た時の引張強度である。これは剥ぎ取り対象の岩石の強度に対して、果たして強いのであろうか。接着剤にも使用されるエポキシ樹脂をはじめ、合成樹脂（熱硬化性樹脂、熱可塑性樹脂ともに）の引張強度は表3に示すように幅があるが、概ね数百 kgf/cm² のオーダーで、これは第三系堆積岩ばかりではなく、安山岩や花崗閃緑岩の平均引張強度より1桁大きい。なお、合成樹脂の圧縮強度は、引張強度と同じオーダーで、こちらは第三系堆積岩の圧縮強度よりかなり小さい。接着強度は、現場での接着条件で異なるが、合成樹脂の強度が十分に発揮できれば、ほとんどの露頭は剥ぎ取り可能であることを示している。ただし、破壊が露頭面の深いところで起きると、露頭が崩れる恐れがある。

（4）人力で剥ぎ取るという接着強度の制約

合成樹脂の強度は十分に大きいですが、地層剥ぎ取りでは通常人力で接着面を回収しなくてはならない。剥がし取る力（人力）が接着剤で固められた裏打ち材に作用し、接着力を介して露頭面を破壊する必要がある。これらの力関係は以下ようになる。

裏打ち材の強度（接着剤と一体化した時の発現強度）
 > 剥ぎ取り標本を剥がし取る力（人力）> 接着力 > 露頭の岩石（地層）の引張強度

ここで重要なのは、実際に剥がし取る力である。露頭の堆積物や岩石の強度が人力を上回ると剥ぎ取りはできない。もし、堆積物や岩石の強度が人力を上回ってしまった場合に接着力も人力を上回ってしまうと剥ぎ取りは回収不能となってしまう。これは環境保全的にも問題である。よって接着強度は必要だが、人力の範囲内ということになる。

3. 接着剤について

（1）接着と露頭面

一般的に接着の仕組みには次の3つの要素があり、実際の接着では、これらの要因が複雑に作用しているといわれている。

- ・ 接着面の微細な凹凸に起因する投錨効果
- ・ 分子間力
- ・ 水素結合、化学結合といった分子間力より強い結合力

これらは接着剤を使用せずに物質同士を直接接触させても発生するが、より効果的に作用させるのが接着剤の役割である。露頭面を構成する鉱物やガラスには極性（電荷の偏り）が存在するため、露頭面には分子間力等の結合力は必ず作用する。また、露頭面は微細な凹凸に富むため投錨効果も十分発揮させることができる。したがって、ほとんどの接着剤は使用可能ではなく、現実はそのようではない。これには①～③の

3つの原因が考えられる。

- ① 露頭に存在する水。結合力は接着剤と被着材との間の濡れ性の良し悪しとして現れるが、水の存在によって濡れ性が悪くなる接着剤が多い。
- ② 露頭面という垂直な作業面とその大きな凹凸（微細なものではなく、塗った接着剤の厚さで埋めることのできない大きなもの）。こちらは投錨効果に影響を与える。微細な凹凸のある被着材、例えば木材などの接着では被着材どうしを圧縮させ、接着剤を浸透させることが重要になる。露頭面も同じで圧縮は非常に効果的なはずだが、大きな凹凸があるため、例えば板で押さえつけるようなことができない。さらに圧縮できないと、粘性の低い接着剤は下に垂れてしまい、効果的に露頭面に留まらなくなってしまう。
- ③ 接着強度。接着剤の接着強度は①、②の影響を受けるが、岩石や土砂が被着材となるため、ある程度の接着強度を持つ接着剤（極性の高い化合物からなる接着剤）が必要になる。

（2）接着剤の使用例 エポキシ樹脂系およびウレタン樹脂系接着剤

奈良国立文化財研究所埋蔵文化財センター（1980）は、特別に接着剤を調整したが、これにはエポキシ樹脂系（トマック NR-51）とウレタン樹脂系（トマック NS-10）がある。エポキシ樹脂系接着剤とウレタン樹脂系接着剤は、ともに2成分の化学反応で重合、硬化し、接着させるものである。この2成分の組み合わせには、それぞれ膨大な数が存在し、多様な製品がつくられている。ともに、極性の大きな樹脂からなる接着剤で、強力な接着力が得られることで知られている。

エポキシ樹脂系接着剤は、主にビスフェノール A グリシジルエーテルという両端にエポキシ基（CCO 三員環）をもつ極めて安定な化合物（主剤）と、活性水素をもつアミン等（硬化剤）とが反応することで硬化接着させるものである。硬化した樹脂は強靱で、広島原爆ドームの修理にも使用された（日本接着剤工業会・建築用接着剤協議会，2010）。また、水中硬化タイプなど水回りにも強い製品があるが、エポキシ樹脂は水との反応性はない。

ウレタン樹脂系接着剤は、末端にヒドロキシル基（-OH）のあるポリオール等の活性水素をもつ化合物とイソシアネート基（-NCO）をもつイソシアネートとの重合で硬化、接着させるものである。イソシアネート化合物は蒸気圧が高く、毒性も高いのでプレポリマー化して使用されることが多い（日本接着剤工業会接着剤読本編集委員会，2009）。また、イソシアネートは水の活性水素とともに反応し二酸化炭素を発生させて発泡、硬化する。このため、止水剤としても使用される。植木ほか（2008）によって、安価で容易に地層の剥ぎ取りが出来るとして紹介され、多く用いられているハ

イセル OH-1AX はウレタン樹脂系止水剤で、プレポリマー製品（反応物としてフェニルメタンイソシアネートを 10～20 %含む）である。また、トマック NS-10 もウレタン樹脂プレポリマー製品（反応物としてトリレンジイソシアネートを 5～8 %含む）である。ハイセル SAC-100 はトリレンジイソシアネートを 11 %含む点で、トマック NS-10 と似た製品と考えられる。これらは、イソシアネート基の多くが重合反応済みであるが、未反応のイソシアネート基が、水とマイルドに反応して硬化するように調整した製品と推定される。水との反応性は、露頭に存在する水問題を解決してくれるため、ウレタン樹脂系接着剤は地層剥ぎ取りに対して万能的な接着剤といえる。ただし、活性をもつイソシアネートが数～20%程度残存して含まれるため毒性があり、マニュアルに沿った正しい取扱いが必要である。

なお、ウレタン樹脂は湿気が多いと加水分解反応が起きる場合がある。ウレタン樹脂に限らず剥ぎ取りに使用した接着剤の寿命がどの程度なのか、この推定は難しい。実際、接着剤の耐用年数に基準があるわけではない。これに関連して、最良の保管環境や博物館収蔵庫で使用する燻蒸剤（酸化エチレン等）の影響など不明な点が多い。

3) 家庭用接着剤の応用 エラストマー系接着剤

上記のトマックやハイセルは業務用接着剤であるが、ホームセンター等で簡単に入手できる製品を使用した例として、エラストマー系接着剤の使用例がある。京都市青少年科学センター（1992）の 3M スプレーのり 99、戸倉（1996）の G17 スプレー、笠間ほか（2015）の Z2 ボンドスプレーがその例で、99 と Z2 はスチレン・ブタジエンゴム（SBR）、G17 はクロロプレンゴム（CR）の製品である。CR は濃黄色、SBR は無色透明、オープンタイム（貼りつけ可能時間）は SBR の方が長く、より大きい面積に対して裏打ち材を使用して剥ぎ取るには、作業時間が確保できる点で向いているが、CR の方が初期強度大で、剥離強度が特に大きいという特徴がある（日本接着剤工業会・建設用接着剤協議会、2010）。戸倉（1996）は裏打ち材なしで、CR を使用している。厚塗りをすると極端に硬化時間が遅くなるが、皮膜は強く、裏打ち材なしの使い方には適しているといえる。エラストマー系接着剤は十分な接着強度をもつが、露頭の水問題への対応は難しい。ただし、初期強度があるため、圧縮の問題にはあまり縛られないという利点がある。

4) 接着剤今後の展望

地層剥ぎ取りに使用する接着剤は、技術の進歩とともに今後も発展していくことが予想される。接着剤の大きな流れとしては、環境問題、労働安全衛生上から

無溶剤（有機溶剤）化の方向に向かっている（日本接着剤工業会、2009）。ウレタン樹脂プレポリマー製品やエラストマー系接着剤は、いずれも有機溶剤が含まれている。今まで有機溶剤に頼っていたものを、水を溶媒とするエマルジョン系接着剤として開発することや、ホットメルト系接着剤、紫外線硬化系接着剤といった無溶剤型接着剤への方向転換が試みられている。地層剥ぎ取りでも、このような技術開発がフィードバックされるであろう。この中で紫外線硬化型接着剤は高価であるが、ホットメルト系接着剤は非常に安価である。これについては別稿（笠間、2017）で述べる。

4. おわりに

地層剥ぎ取りは工業技術の応用であるが、工業的な施工方法とは一線を画して、広く一般に普及しながら技術的にも発展しているところが面白い。ただし、本報告で指摘したように、標本の剥離方法や使用接着剤のデータは残しておいたほうがよい。また、その最良の保管方法や現実的な耐用年数など不明な部分がある。保存の問題と耐用年数は将来的な課題として重要になっていくであろう。

引用文献

- 浜崎忠雄・三土正則、1983. 土壌モノリスの作製法. 農業技術研究所資料 B, 18: 1-27.
- 石浜佐栄子、2017. 露頭の状態保存のための地層剥ぎ取り・型取り・切り取り技法. 神奈川立博物館調査研究報告（自然科学）, (15): 13-20.
- 笠間友博、2017. 高速硬化接着剤としてグルーガン用スティックを使用した極微小面積試料の採集. 神奈川立博物館調査研究報告（自然科学）, (15): 21-26.
- 笠間友博・石浜佐栄子・新井田秀一、2015. 平成 23（2011）年東北地方太平洋沖地震での液状化に関連して行った博物館出張授業. 地学教育, 67: 157-170.
- 京都市青少年科学センター編、1992. 平成 4 年度第 5 回中学校理科実験観察講座：地層の観察とその活用法. 京都市青少年科学センター資料.
- 奈良国立文化財研究所埋蔵文化財センター、1980. 層位・遺跡断面等の剥ぎ取り転写法. 埋蔵文化財ニュース, 28: 1-8.
- 日本機械学会、2011. 機械実用便覧改訂第 7 版. 1110pp. 日本機械学会, 東京.
- 日本接着剤工業会接着剤読本編集委員会、2009. 接着剤読本. 248pp. 日本接着剤工業会, 東京.
- 日本接着剤工業会・建設用接着剤協議会、2010. 建築接着工法ハンドブック第 4 版. 185pp. 建築用接着剤協議会, 東京.
- 大阪昌春・本館静吾、1967. 岩石の圧縮強度と引張強度について. 北海道開発局土木試験所月報, (177): 1-7.
- プラスチック素材辞典ウェブ版、2017. <http://www.plastics-material.com/>.
- ポリマー辞典編集委員会、2011. ポリマー辞典. 619pp. 大成社, 東京.
- 戸倉正則、1996. スプレー式接着剤を用いた地層剥ぎ取り法. 堆積学研究, 43: 83-84.
- 植木岳雪・青木秀則・近藤玲介・鈴木毅彦、2008. 地層の剥ぎ取り標本の作製方法および授業での活用. 地学教育, 60 (6): 187-195.