

岩石の引張強度と風化程度に着目した落石危険度評価

防災技術研究部 地質
副主任研究員 長谷川 淳

1. はじめに

落石は地形・地質条件など多くの素因が複雑に関与し、気象条件などの誘因との因果関係も不明瞭であるなど、その発生機構は未解明な部分が多く、また発生予測も困難である¹⁾。このため、岩盤斜面における落石の発生危険度評価や落石発生予測手法はいまだ研究段階にある。鉄道においても毎年数件程度の落石災害が発生しており、事業者は落石災害を防止するために斜面管理図などに記載された情報をもとに目視などによる定期的な点検を行い、その結果に応じて防災対策工事を実施している。しかし対策工の選定にあたっては定性的な危険度評価結果を用いる場合が多く、より効率的な対策を実施するための定量的な落石危険度評価手法の確立が求められている。

落石は、その発生形態から剥落型落石と転落型落石に区分される²⁾。このうち剥落型落石は岩盤斜面に見られる既存の割れ目の伸展や新たな割れ目の形成によりその一部が不安定化し（浮き石となり）、剥がれ落ちる現象である。このため、剥落型落石の発生危険度を評価するには、岩石が岩盤斜面から剥離する面（以下、剥離面と称する）が有する強度を把握する手法が有効であるといえる。

そこで、剥落型落石の発生源となりうる岩盤斜面を対象として、剥離面が有する強度や岩石の風化程度等の関係について検討を行った。なお、剥離面には引張力、せん断力等が作用していると考えられるが、今回対象とした岩盤斜面では、現地において剥離面に引張力が卓越して作用していると考えられる状況（例えばオーバーハングなど）が見られたため、特に引張強さに着目して検討を行った。

2. 検討対象斜面の概要

鉄道総研が収集した 1987～2005 年に JR 沿線で発生した主な落石災害に関する調査資料から、落石災害事例のうち約 4 割が火成岩分布地域で、約 3 割が中・古生代の堆積岩分布地域で発生していることがわかった^{3, 4)}。特に後者については、その地質分布が JR 沿線全体の地質分布⁴⁾に占める割合が約 1 割にすぎないことから、他の地質区分に比べ落石が発生しやすい地質であるといえる。中・古生代の堆積岩の代表的なものとしては砂岩、頁岩（粘板岩を含む）、チャートなどが挙げられるが、このうち本研究では砂岩を対象とした。検討対象斜面は山梨県大月市付近に分布する四万十層群の砂岩からなる切土のり面で、のり面の傾斜は約 60 度、のり面工などは特に行われておらず、岩盤が露出している。岩盤には褐色や茶褐色を呈する割れ目が発達し、これらの割れ目を剥離面として剥落したと考えられる転石がのり尻に多数見られた。

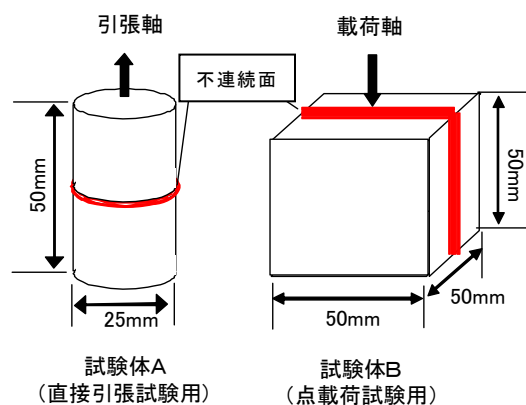


図1 点載荷試験用の供試体（左）と直接引張試験用の供試体（右）

3. 検討方法

実際の斜面で剥離面の引張強さを計測することは困難である。そこで、対象斜面から採取した岩石について、割れ目を含み周囲に比べ強度が低いと推定される面（以下、不連続面と称する）を有する供試体を作成し、直接引張試験と点載荷試験を行った（図1）。なお点載荷試験については、非整形試料も試験対象とした。また試験前には不連続面の風化程度（表1）を観察・記載し、試験後には試験で破壊した面（以下、破壊面と称する）の風化程度の観察および元素分析による風化程度の評価を行った。

4. 検討結果

4.1 非整形試料による不連続面の風化程度と点載荷強さの関係

不連続面の風化程度や不連続面に含まれる割れ目の最大開口幅がその面の引張強さに与える影響について検討するため、非整形試料を用いて点載荷試験を行った。点載荷試験では、非整形試料に見られる不連続面と載荷軸が重なるように試験を行った。

風化程度と点載荷強さの関係をみると、肉眼観察で風化が進行していると判断される不連続面で点載荷強さが小さくなる傾向が認められた（図2）。しかし、風化区分1または2の場合は、点載荷強さの値のばらつきが大きくなる。

一方、不連続面に含まれる割れ目の最大開口幅と点載荷強さについては顕著な関係は認められなかったが、最大開口幅が0.3mmより大きい場合は点載荷強さが 0.5N/mm^2 以下となった（図3）。また、最大開口幅が小さくなると、点載荷強さの値のばらつきが大きくなる傾向がみられる。

これらから、不連続面の風化程度や最大開口幅のみからその面の引張強さを評価するのは困難であるといえる。

4.2 破壊面の風化程度に関する検討

4.1で点載荷試験を行った試料についてその破壊面の状況を観察すると、破壊面には黄褐色～茶褐色を呈する領域と、灰色を呈する領域があることがわかった。これらの領域の分布状況の違いから、岩石の風化形態を、全面に黄褐色～茶褐色の領域が認められるAタイプと、黄褐色～茶褐色の領域が環状に認められるBタイプに区分し（図4）、それぞれのタイプの代表的な試料の破壊面と、比較のために点載荷試験を行った新鮮な岩石

表1 不連続面の風化程度の区分

区分	1	2	3
状況	新鮮、もしくはわずかに変色	割れ目に沿って変色	割れ目沿いの変色が岩石部分におよぶ

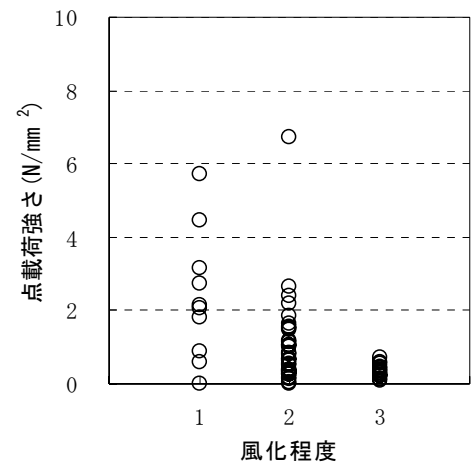


図2 不連続面の風化程度と点載荷強さの関係

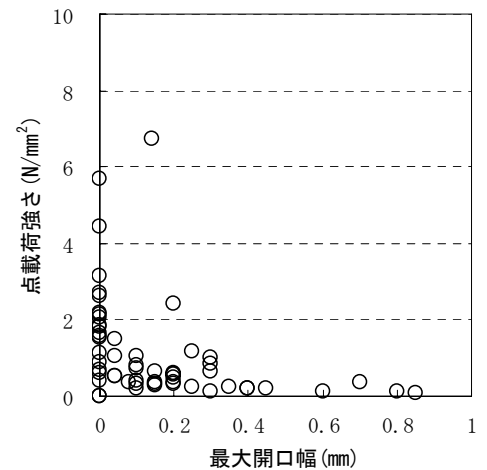


図3 不連続面の最大開口幅と点載荷強さの関係

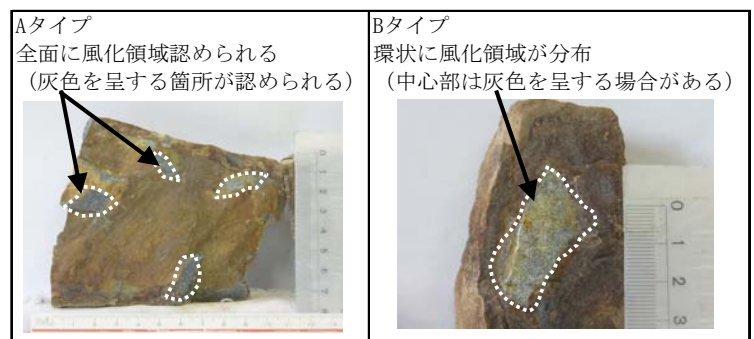


図4 破壊面の風化形態

試料の破壊面について元素分析を行った(図5). これより, 新鮮な岩石と破壊面中の灰色を呈する領域はほぼ同様の組成を示すが, 黄褐色~茶褐色を呈する領域は, 新鮮な岩石等に比べ SiO_2 に乏しく, Fe_2O_3^t (ここでは全鉄量を Fe_2O_3 として換算した量) に富むことがわかった. 一般に, 岩石はその大部分が SiO_2 からなり, また Fe_2O_3^t は, 岩石の風化にともない相対的に増加すると考えられる⁵⁾ ため, 破壊面中の灰色を呈する領域はほとんど風化していないといえる(以下, 破壊面中に見られる灰色を呈する領域を新鮮部, 黄褐色~茶褐色を呈する領域を風化部と称する).

4.3 点載荷試験による検討

点載荷試験には一辺が約 50mm の立方体に整形した供試体(図1)を用いた. 4.2 より, 破壊面中に見られる風化部では風化の進行により新鮮部に比べ強度が低下している可能性があるほか, 新鮮部は不定形であり, 点載荷強さを求めるうえで必要になる等価コア径⁶⁾を一義的に決定することはできないと考えられる. このため, 供試体破壊時の破壊荷重と新鮮部の面積の関係について検討した(図6, 7). なお岩石自体の強度を把握するため, 不連続面を含まない塊状試料についても試験を行った. 図より A タイプでは新鮮部の面積と破壊時荷重の間に正の相関が認められるが, B タイプでは明瞭な関係は認められない. このことから, 風化の形態の相違が点載荷試験時の破壊荷重に影響を与えている可能性がある.

4.4 直接引張試験による検討

直接引張試験では直径約 25mm, 長さ 50~60mm の供試体を作成し, 試験を行った(図1). その際, 表1の3に相当する風化程度の試料からは供試体を作成できなかったため(試料作成中に不連続面で割れてしまうため), 風化程度1および2の試料を対象とした. 直接引張試験で生じた破壊面の状況を図8に示す. 4.2 の供試体同様, 破壊面には風化部と新鮮部が見られる. 一般に直接引張試験結果は引張強さ(載荷荷重を供試体の断面積で除した値)で評価されるが, 図8のように断面内に新鮮部に比べ強度が低いと推定される風化部をとまなう場合, 載荷荷重を供試体の断面積で除算して引張強さを求めることは適当ではないと考えられる. そこで点載荷試験と同様に, 破壊面中の新鮮部の面積と破壊荷重の関係を検討した(図9). 両者の間に正の相関が見られることから, 破壊面に働く引張力の大部分を新鮮部が受け持っていると推定される. しかし新鮮部の面積が非常に小さい試料①, ②をみると, 両者の間で破壊荷重に差異がある.

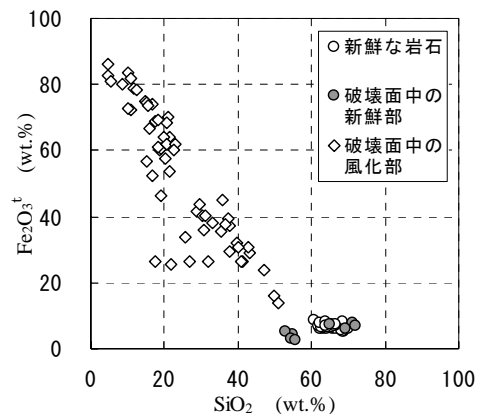


図5 点載荷試験時の破壊面における SiO_2 量と Fe_2O_3^t 量の関係

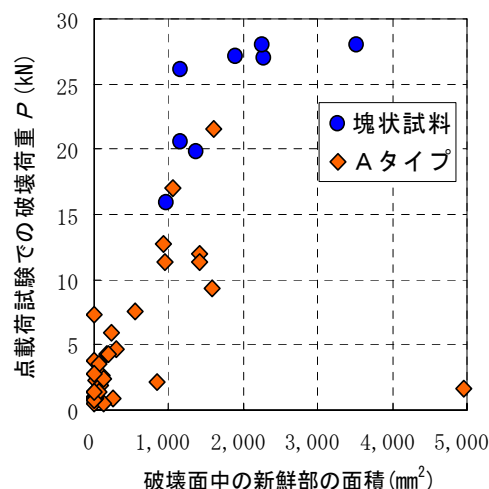


図6 点載荷試験時の破壊面における新鮮部の面積と破壊荷重の関係 (Aタイプ)

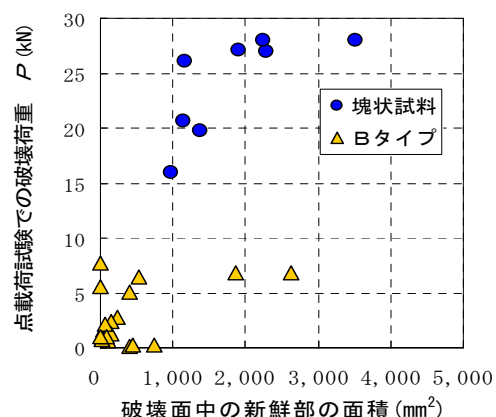


図7 点載荷試験時の破壊面における新鮮部の面積と破壊荷重の関係 (Bタイプ)

また試料①, ②の破壊面を観察すると, 試料②に比べ試料①では破壊面の風化部に濃い茶褐色を呈する領域がより多く認められるほか, Fe_2O_3^t 量も多い(図10). これらのことから試料①は試料②に比べ相対的に風化しており, 風化の程度が不連続面の引張強さに影響を与える可能性があることを示唆している.

5. まとめ

本検討では, 定量的な落石危険度評価の確立に資することを目的として, 不連続面の引張強さや岩石の風化程度に関する検討を行った. その結果は以下のとおりである.

- ・不連続面の引張強さを評価するためには外見の風化程度のみではなく, 破壊面の風化程度を把握する必要がある.
- ・不連続面を対象として直接引張試験や点載荷試験を行った際の破壊荷重と, 破壊面に見られる新鮮部(未風化ないしはそれに近い状態にある部分)の面積の間には正の相関がみられる.
- ・不連続面の引張強さには, その面の風化の形態や程度が影響する場合がある.

今後は風化と引張強さの関係について定量的な検討を行い, 落石危険度評価に反映させていく予定である.

【参考文献】

- 1) 大西有三, 西山哲: 岩盤崩壊と落石問題に関する現状と課題, 地すべり, Vol.39, No.1, pp.1-13, 2002.
- 2) 鉄道総合技術研究所: 落石対策技術マニュアル, p.154, 1999.
- 3) 川越健, 浦越拓野, 太田岳洋, 榎本秀明: 岩盤斜面の安定性に係わる不連続面の引張強度に関する検討, 鉄道総研報告, Vol.21, No.1, pp.49-54, 2007.
- 4) 吉川恵也, 桜井孝, 佐久間文彦: 鉄道沿線の落石の実態調査, 鉄道技術研究報告, No.1260, 1984.
- 5) 中村康夫: 岩石材料の風化指標, 応用地質, Vol.39, No.2, pp.221-229, 1998.
- 6) 地盤工学会: 岩石の点載荷試験方法 (JGS 3421-2005), 2005.



図8 直接引張試験時の破壊面の状況

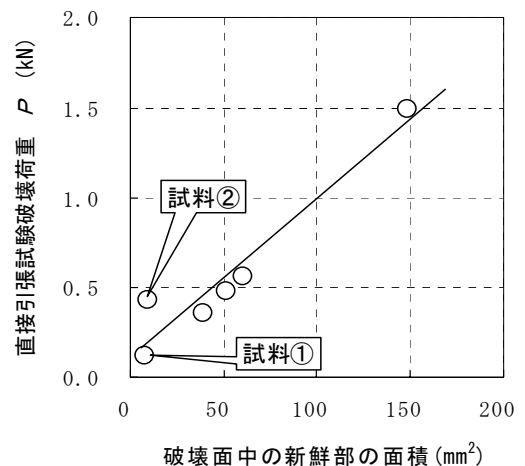


図9 直接引張試験時の破壊面における新鮮部の面積と破壊荷重の関係

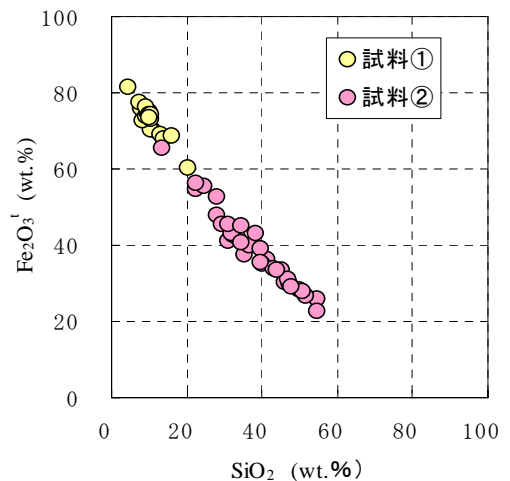


図10 直接引張試験時の破壊面における SiO_2 量と Fe_2O_3^t 量の関係