

8. 岩盤斜面の安定性評価を行う上での引張強度の利用可能性

Availability of tensile strength of rocks for rock slope stability assessment

○浦越拓野, 川越健, 太田岳洋, 榎本秀明 (鉄道総研), 石田良二 (JR 総研エンジニアリング)

Takuya Urakoshi, Takeshi Kawagoe, Takehiro Ohta, Hideaki Enomoto, Ryoji Ishida

1. はじめに

鉄道沿線においては毎年、岩盤斜面災害が発生しており、安定性評価手法の確立が必要とされている。このうち、広域にわたる鉄道沿線の斜面からの危険斜面の抽出法としては、現地において、落石の主要な素因と考えられる項目の有無やその程度を調査・点数化する経験的・統計的手法¹⁾が採られている。また、地形・植生条件に注目し数値地形モデルや衛星情報を利用した研究²⁾がなされている。しかし、危険斜面上の不安定岩塊についての安定性評価は地質学の知識を持った者による目視による検討によってなされているのが主であり、現場技術者が簡易で定量的に安定性を評価できる手法が必要である。

一般的に、落石は岩塊の自重が分離面となる部分(節理などの不連続面あるいは母岩)の引張強度とせん断強度を超えたときに発生すると想定される。図1のような高角度の傾斜の割れ目を伴う不安定岩塊やオーバースタック状の不安定岩塊を想定すると、引張強度が落石を規制している可能性が考えられる。また、せん断強度が落石を規制している場合でも、落石発生時には引張破壊を伴うと考えられる。

そこで、本研究では引張強度に注目した不安定岩塊の安定性評価手法の提案を最終目的とする。本報告の範囲では、引張強度を推定する上で、現地での試験が可能である点載荷試験に注目し、落石を規制していると考えられる不連続面や異方性を有する試料に対する試験結果と落石との関係を検討した結果、および引張強度の利用可能性を述べる。

また、JR沿線での落石災害が発生した地点の地質を整理した

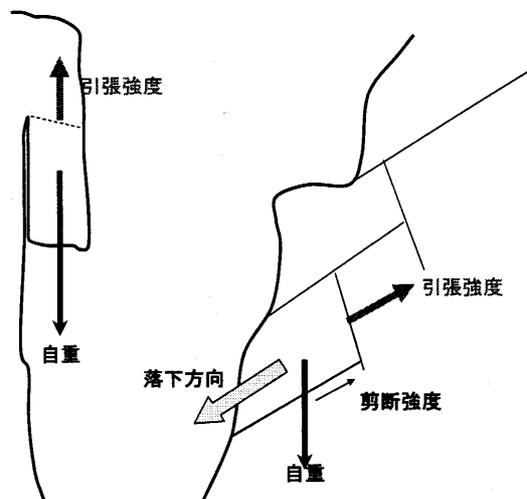


図1 本研究での不連続面の引張強度の位置づけと破壊のモード 左:柱状節理の発達した溶結凝灰岩など, 右:割れ目の発達した堆積岩など。

結果、約74%が中・古生代の堆積岩と火成岩地域で発生していた(未公表)。そこで、研究を進めるにあたって、このような地域から2箇所を調査フィールドとして取り上げた。調査地点の一方は、割れ目が発達した四万十帯の砂岩である。他方は、柱状節理が発達した阿蘇4火砕流堆積物の溶結部であり、レンズ状の軽石が認められ力学的な異方性を有することが想定される。

2. 点載荷試験

引張試験は、供試体を直接引張る方法(直接引張試験)と供試体に圧縮力を与え、供試体内部に引張応力を発生させる方法(間接引張試験)とに分けられる。前者については、供試体の整形や試験装置への固定に困難が伴う。一方、後者に関しては、純粋な引張応力下での破壊ではないという問題を持つ。

本研究では、現地での試験が可能であることから、間接引張試験の一種である点載荷試験法に注目した。この試験では、供試体上下に円錐状の載荷器具を介して圧縮力をかけることで、載荷点をつなぐ軸(載荷軸)上に軸直交方向への引張応力を発生させ、供試体を引張破壊させる(図2)。

点載荷試験からの引張強度の評価式として、いくつかの式が提案されている^{3),4),5)}。このうち、点載荷強度 S_t および点載荷強さ I_s は破壊時の載荷重 P を用いて、

$$S_t = 0.9 \frac{P}{D^2} \quad (1)$$

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (2)$$

と定義される。ここに、 D は載荷点の間隔である。また、 D_e は等価コア径で、両載荷点を含む断面のうち面積が最小となる面の面積 A を用いて、

$$D_e^2 = \frac{A}{\pi/4} \quad (3)$$

による。 S_t は点載荷試験から(直接引張試験で得られる)引張強度を推定する目的で提案され⁵⁾、 I_s は一軸圧縮強度の推定や岩盤分

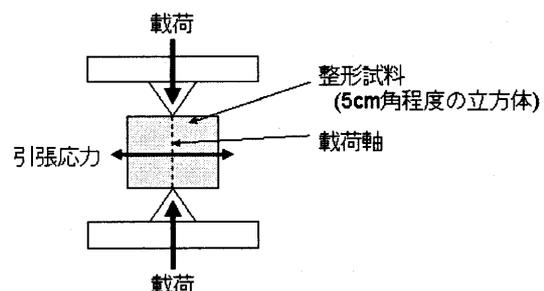


図2 点載荷試験の概念図

類のための指標を、現地で得る目的で提案されている⁴⁾。

さて、式(1)~(3)は、力学特性について等方かつ均質とみなせる材料に対する評価式である。一方、本研究では、割れ目を有する試料や異方性を有する試料に対して試験を行うが、これまでにこのような場合の上記評価式の有効性や妥当性は議論されていない。そこで、まずは式(1)~(3)をこのような試料に対する試験結果にも適用し、引張強度に関連のあるインデックスとしての利用可能性と妥当性を検討する。ただし、粘土で充填された割れ目では点載荷試験機の載荷器具が貫入することが想定されるため、このような割れ目を検討対象から除外した。

試験は、以下の手順により実施した。

- i) 現地で採取した岩塊から5cm角を基準として4~6cm角の立方体を切り出し、試料(整形試料)とした。
- ii) 整形試料に対して点載荷試験を行った。試験機には、手動ポンプによる油圧式の点載荷試験機(応用地質MODEL-4326)を用いた。載荷重はアナログゲージで示され、その最小目盛りはレンジ0~3.2kNでは0.064kN、レンジ0~44.8kNでは1.28kNである。試験方法は地盤工学会の指針³⁾に準じた。
- iii) 試料破壊時の載荷重から、点載荷強度 S_p や点載荷強さ I_p を算出した。但し、破壊後の破断面上に2つの載荷点が位置しない場合の試験結果は除外した。

なお、点載荷試験は非整形の試料に対しても実施可能であるとされているが、本研究では、割れ目面と載荷軸を一致させたときの載荷器具と試料の接触角度、接触面積の条件、試料形状の条件を統一するために、試料を立方体に整形した。

3. 2つの岩種での点載荷試験と結果

3.1 割れ目を有する砂岩での例 (山梨県大月, 四万十層群)

1) 採取地点, 岩石の概要

試料の採取地点は、山梨県大月市真木地区(図3)である。本地点の地質は、古第三紀四万十層群(瀬戸川層群)春気川類層に属する泥質砂岩であり、ややホルンフェルス化している。露頭では層理面に沿う割れ目様の不連続面(非造構的節理)と、堆積構造を切る割れ目が認められる。後者は開口程度が大きく、引張強度を有していない場合が多い。割れ目面上は、面全体が酸化し黄褐色を呈している場合と環状に外側から酸化帯が形成され中心に未酸化部が残されている場合とに大別される。割れ目面から母岩内部方向へは、最大で1mm程度の厚さで黄褐色を呈する風化が認められるものもある。その他の領域(割れ目の近傍でない母岩部)は、概して新鮮である。

本地点では、崩落状況から割れ目が落石を規制していると考え、現地で割れ目を含む岩塊を採取した。なお、割れ目を有していない新鮮な母岩(新鮮岩と呼ぶ)の物性は、以下のとおりであった。

乾燥密度: 2.67g/cm³

超音波伝播速度(P波): 6.1 km/s

一軸圧縮強度: 0.30GPa

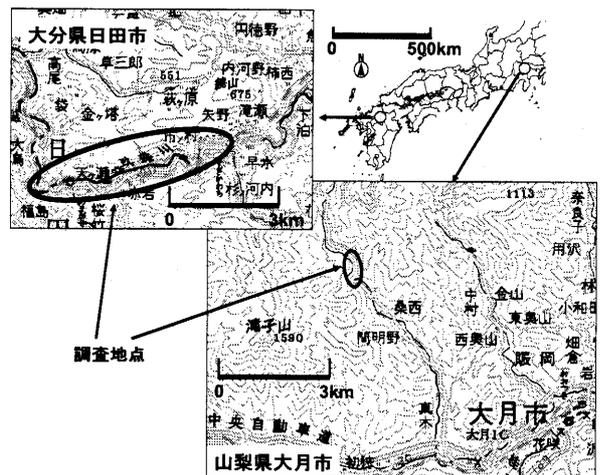


図3 調査地点位置図 国土地理院数値地図 200000(地図画像)より作成した。

2) 点載荷試験を行う上での留意点

割れ目が試料の中心に位置するように整形を行った。また、割れ目が載荷軸に一致するように点載荷試験を実施した。

3) 試験結果

割れ目を有する試料の点載荷試験では、割れ目に沿って破壊が発生した。また、比較のために実施した新鮮岩に対する試験での破断面には、貝殻様の形状が認められることから、引張破壊が発生している⁷⁾と考えた。

試料の破断面上の全面積 A_1 、および破断面上の新鮮部の面積 A_2 に対する、試料破壊時の載荷重 P の関係を図4および図5にそれぞれ示す。ここで、新鮮部とは、破断面上で泥質砂岩の母岩の色(暗灰色)と同じ色と判断された領域である。これらから、破断面の面積 A_1 と P に相関が見られず、新鮮部の面積 A_2 と P に相関が認められることが分かる。また、図5では、新鮮岩に対する試験結果の $P \cdot A_2$ のトレンド上に、割れ目を含む試料の試験結果が分布する。これは、割れ目面上の新鮮部が引張強度を有していたこと、また、新鮮部は新鮮岩とほぼ同等の引張強度を有することを示唆している。

一方、新鮮部の面積がほとんどない($A_2 \approx 0$)にもかかわらず、最大で8kN程度の載荷に耐える試料が認められた。このことは、風化部も強度を有することを示唆している。この原因として、酸化鉄によるセメンテーションが発生し引張強度を有していることなどが考えられる。このことに関し、新鮮部以外の風化程度や風化生成物と引張強度の関係を明らかにすることは、今後の課題である。

図6に式(3)において $A=A_2$ を代入し、式(2)により点載荷強さ I_p を計算した結果を示す。 D_e が小さい($D_e < 25\text{mm}$ 程度)領域では、 I_p 値が相対的に大きく評価されている。この原因として、①新鮮部の面積を過小に評価した可能性、②新鮮部の面積で圧縮荷重を規格化することに関して力学的な問題がある可能性、③実際は風化部の寄与による引張強度を新鮮部の引張強度とみなしている可能性などがある。

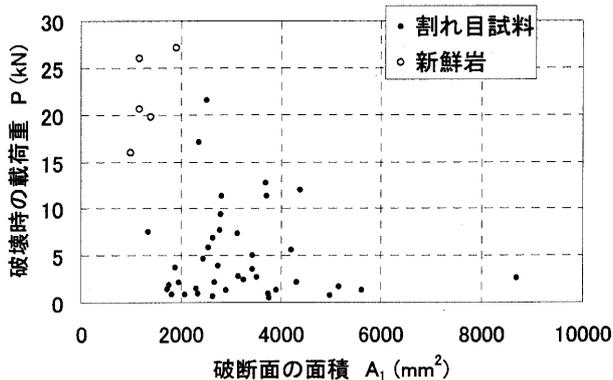


図4 破断面の面積 A_1 と破壊時の載荷重 P の関係

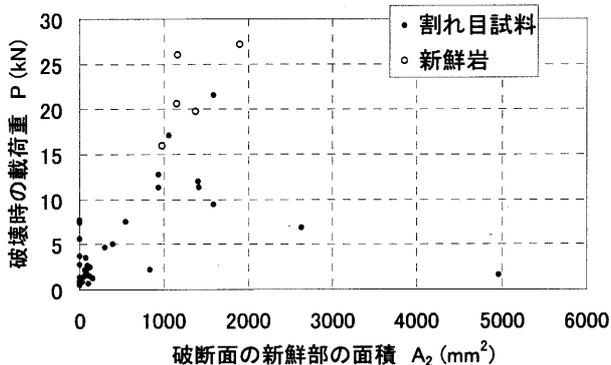


図5 破断面の新鮮部の面積 A_2 と破壊時の載荷重 P の関係

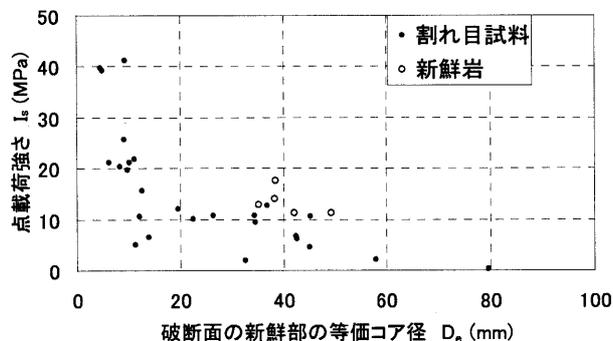


図6 破断面の新鮮部の面積 A_2 を用いた、等価コア径 D_e と点載荷強さ I_s の関係

3.2 溶結凝灰岩での例 (大分県天ヶ瀬)

1)採取地点, 岩石の概要

大分県日田市天ヶ瀬周辺(図3)の阿蘇4火砕流堆積物の溶結部を対象にした。本地域の溶結凝灰岩は、柱状節理が発達しており、20mを越す直崖も見られる。含有される軽石は扁平に伸び、黒曜石化している。また、基質部全体が黒曜石化している部分もある。これらから、本地域の凝灰岩の溶結程度は全般に強いと考えられる。また、軽石が概ね水平方向に伸びていることから、この地点の溶結凝灰岩は水平方向と鉛直方向とで力学的な異方性を有することが想定される(図7)。試料採取地点と凝灰岩の溶結程度や風化程度等の特徴から、調査地点を表1のように区分した。

落石(転石)のレンズ状の軽石の広がりには直交する面は滑らか

な面を有する場合が多い。露頭との比較から、これは冷却時の柱状節理により形成された面であると想定される。一方、落石の軽石の広がりには平行な面には、滑らかな面を有する場合と、粗い面を有し、しばしばレンズ状の軽石と基質部の境界に一致する場合が認められる。前者では、滑らかな面となるために、冷却に伴う水平方向の節理の存在が唆される。後者では自重により機械的に破壊されたことが想定される。

柱状節理が発達した岩盤において落石が発生する際には、水平方向に破壊が生じることが必要である(図1)。そこで、母岩の引張強度について検討するため各ユニットから試料を採取した。

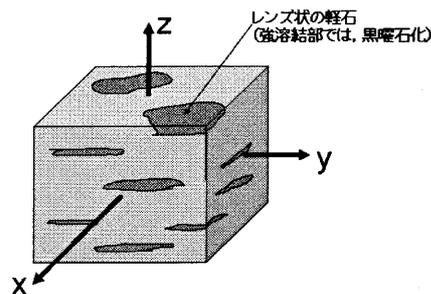


図7 レンズ状の軽石に注目した座標設定と整形方法

表1 各ユニットの特徴

地点	ユニット	岩相	節理の発達方向	軽石	石質岩片	
1	強溶結					
	I	強溶結, 明灰色	柱状	多い		
	II-1	強溶結, 灰色	柱状	多い	多い	
	II-2	灰色	板状	少ない		
	II-3	暗灰色	柱状	やや多い	少ない	
2	III	灰白色 (やや風化)	柱状	多い	多い	
	IV	黄灰色	方形	少ない	少ない	
	V	黄灰色 (風化)	柱状	多い	多い	
	6	I	弱溶結			
		II	強溶結			

2)点載荷試験を行う上での留意点

軽石の伸びている面と立方体の2面が平行になるように整形を行った。また、軽石が伸びている方向(x軸方向)とその直交方向(z軸方向)を載荷軸として点載荷試験を実施した(図7)。

3)試験結果

図8にユニット毎の点載荷強度(平均値)と乾燥密度の関係を示す。これから、①溶結程度や風化程度等に注目して分類したユニット毎に点載荷強度が異なること、②z軸載荷での点載荷強度はx軸載荷での点載荷強度に比べて大きいこと、③乾燥密度と点載荷強度に相関があることが分かる。

z軸載荷とx軸載荷とで点載荷強度が異なるのは、この溶結凝灰岩の異方性を反映した結果となっていると考える。載荷軸付

近にレンズ状の軽石と基質部の境界が位置する場合、試料の破断面がこの境界と一致する傾向にあり、これらの境界面によって引張強度が低下している可能性がある。このため、x軸载荷での試験では、点载荷強度が低くなっていると考えられる。

また、一般に溶結程度が高いほど密度が大きいと想定される。よって、乾燥密度と点载荷強度が相関を持つことは、点载荷強度が溶結程度に依存していることを示唆している。

点载荷試験において、整形試料は载荷軸を中心に2, 3片のブロックに破壊した。破断面には貝殻様の形状が認められるものもあり、破断面の形態からは引張破壊が発生していると考えられる。

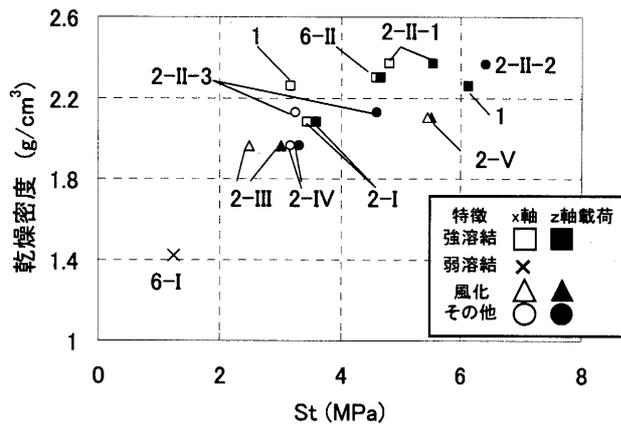


図8 乾燥密度と点载荷強度 St の関係 乾燥密度は、別途用意した岩石コアについて測定を行った結果である。

4. 考察

点载荷試験を割れ目を有する砂岩に対して適用することにより、破壊時の载荷重と破断面上の新鮮部の面積が相関を持つことが分かった。溶結凝灰岩では、点载荷強度がユニット毎に異なること、試料の異方性を反映すること、点载荷強度と密度に相関があることが分かった。また、破壊状況や破断面形状から、点载荷試験により引張破壊が発生していることが示唆された。これらのことから、割れ目などの不連続面や異方性を有する試料について、点载荷試験と式(1)~(3)による評価方法により、不連続面の引張強度あるいは試料の異方性を反映した引張強度の指標を得ることができると思われる。

このときには、柱状節理の発達した溶結凝灰岩におけるオーバーハング状の不安定岩塊(図1)に対して、点载荷強度と不安定岩塊の自重を比較することで、不安定岩塊間での相対的な安定性評価が可能である。

一方、点载荷試験と式(1)~(3)による評価方法により、不連続面や異方性を有する試料の引張強度を評価することに関する力学的な裏づけはなされていない。そのため、現段階では試験結果をインデックスとして用いることが望ましいと考える。点载荷試験の結果から引張強度の評価を試みるには、点载荷試験と直接引張試験を平行して実施し、経験的な関係式を得る必要があると考える。

5. 結論

引張強度に注目した岩盤斜面上の不安定岩塊についての安定性評価手法の提案を最終目的とし、本報告では不連続面や異方性を有する試料に対する点载荷試験の適用可能性と、落石に対する安定性評価への引張強度の利用可能性を検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 割れ目を有する砂岩では、新鮮岩を含めて、破壊時の载荷重と破断面上の新鮮部の面積に相関があることが明らかになった。
- 溶結凝灰岩では、点载荷強度についての異方性があることが確かめられた。また、溶結程度により点载荷強度が異なること、点载荷強度と密度に相関があることが明らかになった。
- 点载荷試験を用いて不連続面の引張強度や異方性を有する試料の引張強度の指標を得ることが可能であることが示された。

割れ目を含む砂岩では、新鮮部が引張強度を有していると想定されたため、実際の岩盤斜面上の割れ目において、新鮮部の面積を評価する手法の検討を行う。溶結凝灰岩に関しては、不安定岩塊の自重と点载荷強度の比較による安定性評価手法を開発していく。また、不連続面や異方性を有する試料に対して、点载荷試験と直接引張試験を平行して実施し、両者の試験結果の関係を検討する。

引用文献

- 1) 例えば、日本国有鉄道施設局土木課, 1978. 落石対策の手引, 日本鉄道施設協会.
- 2) 太田岳洋・長谷川淳・榎本秀明, 2005. 空間数値情報を利用した斜面の不安定性評価. 鉄道総研報告, 19(10), 27-32.
- 3) 地盤工学会基準部, 2004. 新規制定の地盤工学会基準案「岩石の点载荷試験方法」について(案). 土と基礎, 52-10 (561), 55-58.
- 4) Brook, N., 1985. The equivalent core diameter method of size and shape correction in point load testing. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 22, 61-70.
- 5) 平松良雄・岡行俊・木山英郎, 1965. 非整形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験. 日本鉱業会誌, 81, 1024-1030.
- 6) 日本道路公団, 1997. JHS 715-1997 ポイントロード試験機(点载荷試験機)による岩片の強度試験法.
- 7) Pollard, D. and Aydin, A., 1988. Progress in understanding jointing over the past century. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 100, 1181-1204.