

岩石の引張強さに着目した 落下岩塊の大きさの推定

浦越 拓野^{1*}・川越 健¹・太田 岳洋¹・石原 朋和¹

¹財団法人鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 地質（〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38）

*E-mail: urakoshi@rttri.or.jp

柱状節理が発達した岩盤斜面におけるオーバーハングを呈する柱状岩塊を対象に、落下岩塊の大きさの推定方法を提案することを目的として、現地採取試料に対する引張試験を行い、引張強さから落下岩塊の大きさを推定する方法を検討した。ここでは柱状岩塊の側面は節理によって母岩と切り離され、柱状岩塊はその上部と母岩との間の引張強さのみで保持されているとモデル化し、引張強さと密度から保持される最大の岩塊の長さを推定するノモグラムを作成した。また引張試験で得られた引張強さとノモグラムから落下岩塊の長さを予測した。このノモグラムは落石対策工を計画する際の落下岩塊の大きさ推定や、不安定岩塊の安定性の検討に利用できる可能性がある。

Key Words : rock fall, tensile strength, size

1. はじめに

わが国の鉄道沿線には多くの岩盤斜面が分布しており、これらの斜面での落石対策は鉄道の安全確保のために必要不可欠である。落石対策として主に不安定岩塊の除去やワイヤロープ掛工等による固定といった発生源対策、落石止柵や落石覆による斜面途中対策や線路際対策がなされている¹⁾。このような対策工を計画するためには、落下岩塊の大きさを推定できることが望ましい。

岩盤斜面のうち柱状節理が発達した斜面では、オーバーハングを呈する柱状の不安定岩塊が多数認められる。現地観察の結果、柱状岩塊の側面が節理によって母岩と切り離され、岩塊上部のみが母岩とつながっていると推定される場合も多い。この場合は、柱状岩塊と母岩との間の引張強さで岩塊が保持されているとモデル化でき、引張強さと岩塊の自重を比較することで落下岩塊の大きさを推定できる可能性がある。

以上を背景とし、筆者らは柱状節理が発達した斜面での落下岩塊の大きさを推定方法を提案することを目的として、現地採取試料に対する引張試験を行い、引張強さから落下岩塊の大きさを推定する方法を検討した。本論文ではこれらについてまとめる。

2. 研究対象地域と引張試験

(1) 研究対象地域と試料

本研究での対象地域は、大分県日田市天瀬周辺とした。地質は阿蘇火砕流(Aso-4)の溶結凝灰岩で、現地では溶結程度や風化程度が異なる岩が確認された。斜面には柱状節理が発達し、オーバーハングを呈する柱状の不安定岩塊が多数認められた(図-1)。またオーバーハング箇所下方には多数の転石が確認された。岩塊中には柱状節理の節理面に対して直交方向に伸びたパミスレンズ(本質岩片)が認められた。

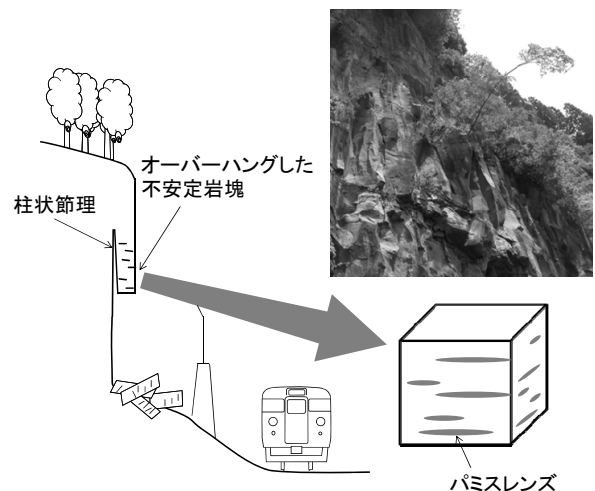


図-1 現地写真と斜面状況の概念図。

引張試験に供するため、現地において露頭や転石から溶結程度や風化程度別が異なる試料を採取した。溶結程度や風化程度を反映し、基質の色(灰色～黄色)、パミスレンズの大きさやその色(黒色～黄色)が試料ごとに異なっていた。

採取した試料から引張強さを求めるため、直接引張試験と点載荷試験を行った。また岩石の乾燥密度をJGS-2132(浮力法)に準拠して求めた。

(2) 引張試験

a) 直接引張試験

現地採取試料から直径25mm、高さ50mmの円柱供試体を作成し、直接引張試験を行った(図-2(a))。なおパミスレンズの伸びた向きにより引張強さに異方性がある²⁾ため、パミスレンズに直交する向きを円柱供試体の軸方向として統一した。これにより得られる引張強さは、現地において柱状岩塊の重さにより発生する引張の方向と一致する方向の引張強さとなる。

直接引張試験は円柱供試体を接着剤(コニシ株式会社、アロンアルファ)で載荷盤に固定し、載荷盤を万能試験機(株式会社東京衡機製作所、油圧式、最大荷重294kN、最小目盛0.01kN)で引っ張る方法によった。破壊時の荷重 P と円柱供試体の半径 r (12.5mm)を用いて、引張強さ S_t を

$$S_t = \frac{P}{\pi r^2} \quad (1)$$

と求めた。ここで π は円周率である。

b) 点載荷試験

直接引張試験では円柱供試体の作成や試験に時間がかかり、多くの数の試験を行うことが難しい。そこで試料準備や試験が容易な点載荷試験を実施した。点載荷試験は間接引張試験の一種であり、非整形試料または整形試料に円錐型の載荷具を用いて圧縮荷重を載荷し、試料を

引張破壊させる試験である。本研究では、現地採取試料から1辺約50mmの立方体供試体を複数個切り出し、点載荷試験器(応用地質株式会社、Model-4326)を用いてパミスレンズに直交する向きに引張力が発生するように試験を行った(図-2(b))。破壊時の荷重 P と、載荷点間隔 D (約50mm)から点載荷強度 S_p ³⁾を

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

と求め、複数個の立方体供試体の平均値を計算した。ただし試験後の破断面が載荷点を含まない場合はせん断破壊が発生している可能性が高いと判断し、データから除外した。その他の試験手順はJGS-3421に準拠した。

3. 結果

(1) 直接引張試験結果

直接引張試験の結果を図-3に示す。引張強さは0.12～2.6MN/m²で、平均値は1.1 MN/m²であった。引張強さは試料によって大きく異なっているが、これは岩石の溶結程度や風化程度の違いを反映していると考えられる。引張強さと乾燥密度との間に明瞭な相関関係は認められない。

(2) 点載荷試験結果

a) 点載荷強度

点載荷試験の結果を図-4に示す。点載荷強度は0.39～5.5MN/m²であった。

乾燥密度が1.9g/cm³以下の場合には点載荷強度は2.2MN/m²以下であった。一方、乾燥密度が1.9 g/cm³より大きい場合には点載荷強度は0.39～5.5 MN/m²までの値であった。このように乾燥密度が小さい場合には点載荷強度も小さい傾向が認められた。

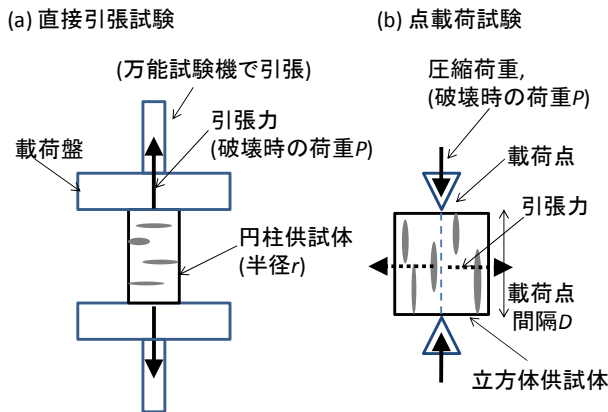


図-2 (a)直接引張試験および(b)点載荷試験の概念図。

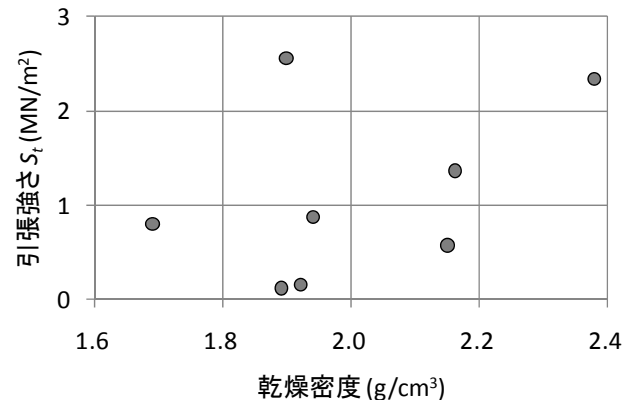


図-3 直接引張試験結果。

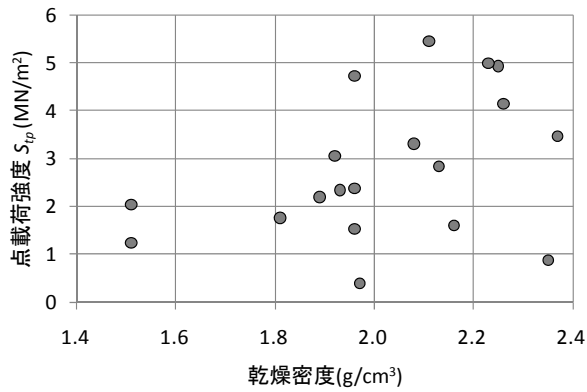


図-4 点載荷試験結果.

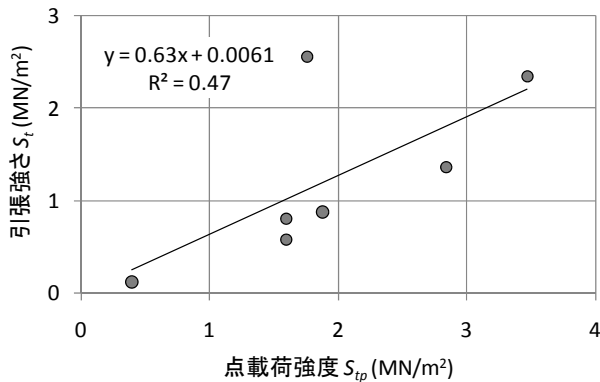


図-5 直接引張試験結果と点載荷試験結果の比較.
実線は線形回帰直線を示す.

b) 直接引張試験結果と点載荷試験結果の比較

同一の岩塊から直接引張試験用のコアと点載荷試験用の立方体試料を作成し、それぞれの試験を実施した7ケースについて、両者の結果を図-5に示す。図から引張強さと点載荷強度は正の相関が認められる。線形回帰(図-5の実線)を行うと

$$S_t = 0.63 \times S_p + 0.0061 \quad (3)$$

が得られ、その決定係数(R^2)は0.47であった。

4. 落下岩塊の大きさの推定

(1) 引張強さで保持できる岩塊の大きさの考え方

岩塊の側面が節理によって母岩と切り離され、上部の引張強さのみで母岩とつながっている場合に、岩塊が自重を保持できる条件を考える(図-6)。柱状岩塊の長さを L 、断面積を A 、密度を ρ 、重力加速度を g とすると、自重 W は

$$W = LA\rho g \quad (4)$$

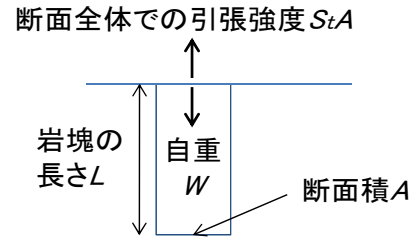


図-6 上部の引張強さで保持される岩塊のモデル

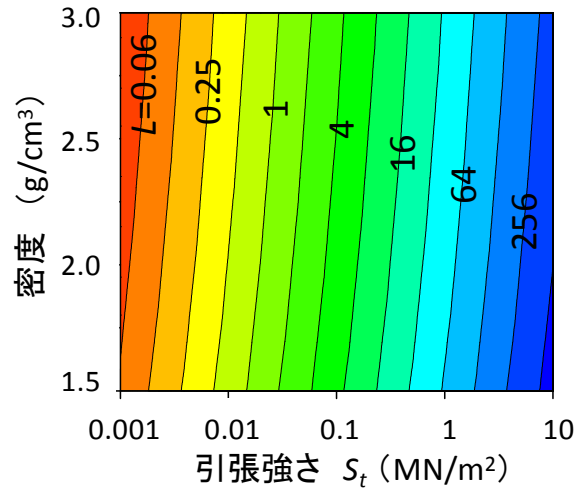


図-7 図-6のモデルで保持される最大の岩塊の長さ(m)を求めるノモグラム。等高線の間隔は2倍毎である。

である。このとき引張強さ S_t の岩塊が自重 W を保持できる条件は、

$$S_t A \geq W = LA\rho g \quad (5)$$

$$\therefore S_t \geq L\rho g \quad (6)$$

である。式(6)から岩塊が保持できる最大の岩塊の長さを計算できる(図-7)。図-7では任意の引張強さと、乾燥密度の組み合わせの岩塊が保持できる最大の長さが等高線で示されている。この長さは本節で検討したモデルでの落下岩塊の大きさと考えることができる。

(2) 引張試験結果を用いた検討

ノモグラム(図-7)に直接引張試験結果と点載荷試験結果を重ねたものを図-8に示す。ここで点載荷強度は式(3)を用いて引張強さに換算した。また縦軸は試験で得られた乾燥密度とした。図-8から引張強さが小さな試料(0.1MN/m²程度)では岩塊の長さが6mより長いと自重により引張破壊が発生すると予想される。また引張強さが大きな試料(2MN/m²程度)では128m程度の長さの柱状岩塊が保持されうる結果となった。

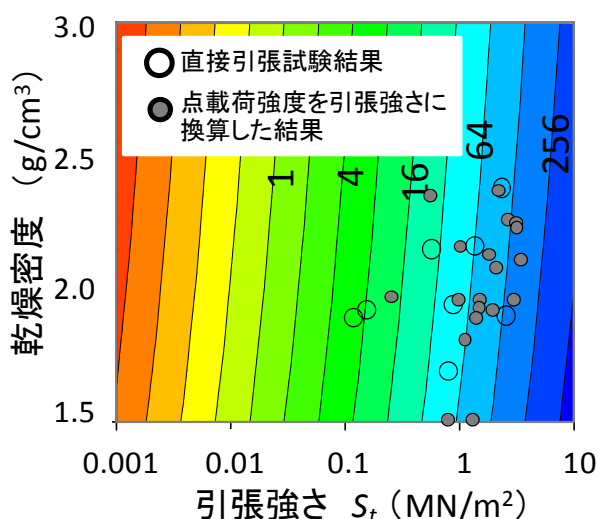


図-8 試験で得られた引張強さからの落下岩塊の長さ(m)の推定。

(3) ノモグラムの利用法に関する提案と課題

密度と引張強さを把握することで、図-7を根拠として落下しうる岩塊の大きさを推定し、対策工の仕様検討に活かすことができる。また例えば現地の不安定岩塊の長さと図-7から得られる長さの比を、安定性の指標とすることで、異なる不安定岩塊の安定性を定量的に比較し、対策順序の決定等に利用できることが期待される。

図-7を用いるためには、柱状岩塊の引張強さ、密度が必要である。このうち密度は弾性波速度と相関があることが報告されている⁴⁾。弾性波速度測定は現地で簡易に行うことができ、その結果から密度を推定することができる可能性がある。

また引張強さは、現地でも実施可能な点載荷試験を転石に対して実施し、点載荷強度を引張強さに換算して用いる方法や、サイトごとに弾性波速度などの非破壊調査により取得可能な物性と引張強さとの相関関係をあらかじめ求めておき、これを利用する方法などがありうると思う。密度や引張強さを求める方法は、今後の検討課題である。

図-8から実測された引張強さでは128m程度の岩塊が保

持されうるることとなる。しかし現地で確認された柱状の転石の長さは最大で8~10m程度であった。この違いの理由として、経年的な風化による引張強さが低下や力学的な不連続面の存在により、推定値より短い長さで柱状岩塊が落下する可能性が挙げられる。この点を考慮したノモグラムの利用法をあわせて検討する必要がある。

5. まとめ

柱状節理が発達した岩盤斜面におけるオーバーハングを呈する柱状岩塊を対象に、落下岩塊の大きさの推定方法を提案することを目的として、現地採取試料に対する引張試験を行い、引張強さから落下岩塊の大きさを推定する方法を検討した。ここでは柱状岩塊の側面は節理によって母岩と切り離され、柱状岩塊はその上部と母岩との間の引張強さのみで保持されているとモデル化し、引張強さと密度から保持されうる最大の岩塊の長さを推定するノモグラムを作成した。また引張試験で得られた引張強さとノモグラムから落下岩塊の長さを予測した。このノモグラムは落石対策工を計画する際の落下岩塊の大きさ推定や、不安定岩塊の安定性の検討に利用できる可能性がある。

参考文献

- 1) 財団法人鉄道総合技術研究所：落石対策技術マニュアル，1999。
- 2) 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，No.21，Vol.1，pp.49-54，2007。
- 3) 平松良雄，岡行俊・木山英朗：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，Vol.81，pp.1024-1030，1965。
- 4) 大久保彪，寺崎晃：岩石の物理的性質と弾性波速度，土と基礎，No.7，Vol.19，pp.31-37，1971。

謝辞：埼玉大学地圏科学研究センター長田昌彦准教授には直接引張試験についてご指導を頂きました。また匿名の査読者のご意見により、本論文の内容が改善されました。記して感謝いたします。

ESTIMATION OF SIZE OF FALLING ROCK BASED ON TENSILE STRENGTH

Takuya URAKOSHI, Takeshi KAWAGOE, Ohta TAKEHIRO and Tomokazu ISHIIHARA

A method to estimate size of a rock falling from rock slope with columnar joints was proposed by considering tensile strength. We modeled an overhang column rock on the slope as laterally separated and supported by tensile strength of its upper side, and drew a nomogram to estimate maximum length of the column rock based on the tensile strength and its density. We successfully estimated the maximum length using the nomogram and tensile strength data. This nomogram is available for estimating size of falling rock for planning a countermeasure against rock fall, or for quantification of stability of rocks.