

岩石の一軸引張り試験の 試験方法に関する文献調査

小野 正樹^{1*}・若林 成樹²・中村 敏明³

¹応用地質(株) エネルギー事業部 (〒336-0015 埼玉県さいたま市南区太田窪2-2-19)

²清水建設(株) 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

³(株)ダイヤコンサルタント ジオエンジニアリング事業本部 (〒331-0811 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3)

*E-mail: ono-masaki@oyonet.oyo.co.jp

岩石の一軸引張り試験に関する研究論文を収集・調査し、試験方法という観点から一軸引張り試験の現状を整理した。調査結果から、試験の方式は大別すると3つに分類できること、試験に用いる供試体の形状は円柱形が最も多く、ついで供試体中央部にくびれを持たせたドッグボーン型がよく用いられていること、供試体の設置方法は、試験機プラテンへの直接接着方式とユニバーサルジョイントを用いた方式が大半を占めることなどが明らかとなった。また、一軸引張り試験方法の基準化という観点では、多くの研究成果の蓄積が進み、実施例も増加していること、試験方法の一部には研究者ごとに違いが認められるものの、試験の原理や載荷機構にはある程度の統一性が見られ、基準化できる可能性が高いことがわかった。

Key Words : *direct tension test, tensile strength, rock material, test method of tension test*

1. はじめに

近年、兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震といった大型地震の発生に伴い耐震設計基準の見直しが行われ、岩盤を対象とする構造物の設計にはこれまでよりも厳しい耐震設計が求められるようになってきている。そのため、岩盤の引張り強さを考慮せずに行われてきた従来の保守的な評価方法では新たな設計基準に対応することが困難な事例が増えており、設計において岩盤の引張り強さを適切に考慮する必要が生じている。このような背景から、岩盤または岩石の引張り強さを適切に評価するための試験方法が求められている。

実務において岩石の引張り強さを求める方法としては圧裂引張試験が用いられることが多い。圧裂引張試験には、試験方法がシンプルなこと、すでに(公社)地盤工学会で試験方法の基準化がなされ、試験方法の統一的な手順が示されていることなど実務的なメリットは多い一方で、荷重作用点近傍に応力が集中することや、供試体内部に非一様な圧縮応力が発生することなどの問題点が以前から指摘されている。

一軸引張り試験は、供試体内部に一様な引張り応力を作用させることができ、直接的に引張り強さを求めることができるため、原理の明快さという点では理想的な試

験である。これまでは、試験体に対して曲げ応力を作用させずに引っ張るには高度な試験技術が必要なことや、圧裂引張試験ほど簡便ではないなどの理由により、一軸引張り試験が実施される例は少なかったが、耐震性能評価の厳格化に伴い、より適切に引張り強さを把握するための試験方法として基準化の必要性が高まっている。

このような状況から(公社)地盤工学会では、岩石および岩盤の一軸引張り試験の基準化の必要性と可能性を検討するためのワーキンググループを設立し、平成25年の4月から翌年の3月まで活動を行った。本稿は、当該ワーキンググループの活動の中で実施した文献調査のうち、試験方法に着目して取りまとめたものである。

2. 調査の概要

文献調査では、岩石および岩盤を対象とした一軸引張り試験に関する文献を国内外から収集し、一軸引張り試験の現状を整理した。収集した文献数は計116編である。この中には、一軸引張り試験との関連性が強い圧裂引張試験や三軸引張試験に関するものも一部含まれているが、本稿ではこのうち一軸引張り試験のみを対象とした文献84編の調査結果を報告する。

3. 調査結果

(1) 試験装置

文献調査から、一軸引張り試験に用いる試験装置には複数の種類があることがわかった。試験装置により分類した結果を図-1に示す。なお、分類にあたっては使用した試験装置がわかる文献のみカウントしている。

図-1から、一軸引張り試験の多くは引張り試験装置を用いて実施されていることがわかる。引張り試験装置としては、一軸・三軸試験装置や剛性試験装置など通常は圧縮試験に使用する試験装置を活用している例が多い。これらの試験装置はほとんどの試験機関で保有していると考えられることから、もっともな結果と考えられる。また、数は少ないものの直接せん断試験装置を用いている研究もあった。ユニークな方式としては、供試体を高速で回転させることにより、遠心力によって供試体へ引張力を作用させている研究も見られた¹⁾。遠心力による載荷方式では、回転の中心位置からの距離によって供試体内部の軸応力が異なるため、引張り試験装置や直接せん断試験装置による方法とは供試体内部の応力状態がこととなるが、試験の実施に高度な技術を要せず、簡易な試験装置で実施可能であるというメリットがある。

本調査では、試験装置に複数の種類が認められたものの、引張り破断面を規定せずに、供試体内部に引張り応力のみを作用させて試験を行うという試験の原理はどの研究も同じであり、試験の原理自体には統一性が見られることがわかった。

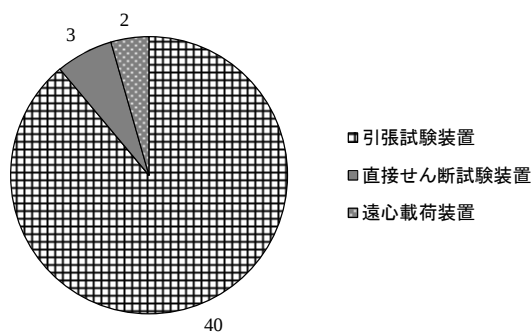


図-1 試験装置

(2) 供試体の形状および寸法

一軸引張り試験で用いる供試体の形状による分類結果を図-2に示す。今回の文献調査では円柱供試体を用いている例が最も多く、全体の68% (57例/84例) を占めることがわかった。次に多いのはドッグボーン型と呼ばれる供試体であり全体の19% (16例/84例) を占める。ドッグボーンという形状に明確な定義はないが、本稿では、供

試体の両端部分の直径よりも中央部の直径を細くしてくびれを作ることにより、くびれ部分で引張り破壊が生じるようにした形状の供試体をドッグボーンと定義する。3番目に多かった形状は角柱供試体であり全体の12%

(10例/84例) を占める。角柱供試体を用いている10件の文献のうち4件がコンクリートに関する研究であり、他の形状の供試体と比べてコンクリート分野での採用割合が高いことがわかった。また、ユニークな方法としては中空円筒型の供試体を用いている研究例²⁾もあった。

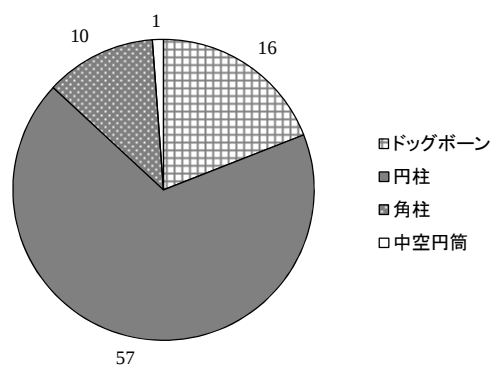


図-2 供試体の形状

円柱供試体の直径による分類を図-3に示す。今回の調査では、直径20mm超～40mm以下のサイズを用いている例が最も多く、全体の59% (49例/83例) を占めることがわかった。次いで多いのは直径40mm超～60mm以下のサイズであり、全体の28% (23例/83例) であった。したがって、直径20mm超～60mm以下の供試体の利用率は全体の約90%を占めることになる。(公社)土木学会や(公社)地盤工学会で基準化されている一軸圧縮試験方法では、円柱供試体の直径の適用範囲を20mm～100mmとしている。採用率の約9割を占める直径20mm超～60mm以下という範囲は、実務レベルでよく用いられている一軸圧縮試験用供試体の直径範囲内にあることがわかった。

次に、ドッグボーン供試体の有効直径による分類を図-4に示す。ここでいう有効直径とはくびれ部分の直径をいう。ドッグボーン供試体においても、20mm超～60mm以下の有効直径を採用している割合が高く、全体の約90% (11例/12例) を占めることがわかった。ドッグボーンの形状は研究者によってさまざまであるが、有効直径に関してはおおむね円柱供試体と同じようなサイズが用いられていることがわかった。

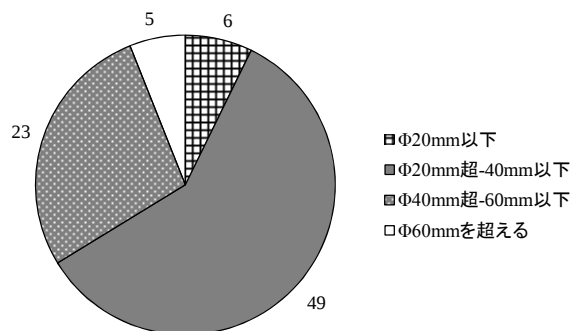


図-3 円柱供試体の直径

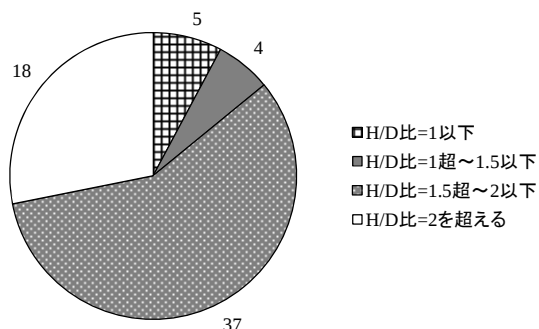


図-5 円柱供試体の高さとの比

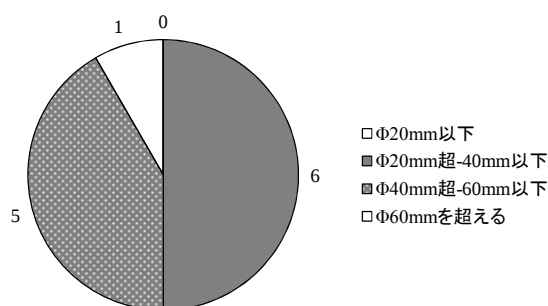


図-4 ドッグボーン供試体の有効直径

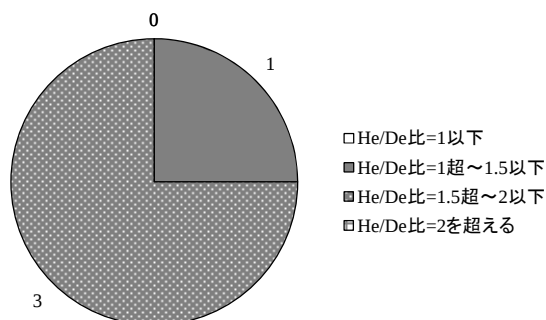


図-6 ドッグボーン供試体の有効高さとの比

円柱供試体の高さとの比 (H/D比) による分類結果を図-5に示す。調査から、高さとの比が1.5超~2以下の供試体の採用率が最も高く、全体の58% (37例/64例) を占めることがわかった。2000年以降の文献に限ると、高さとの比が2の供試体を採用している研究例は82% (23例/28例) であり、近年ではH/D比を2とする研究が増加傾向にある。平成8年に(公社)地盤工学会が実施した岩の一軸および三軸試験に関するアンケート調査³⁾では、力学試験に用いる供試体の高さとの比を2と回答した研究機関が9割以上となっており、本調査の結果も既往のアンケート結果と調和的である。

ドッグボーン供試体における有効高さとの有効直径の比 (He/De比) による分類結果を図-6に示す。ここでいう有効高さとはくびれ部分の長さをいう。今回の文献調査では有効高さに記述している文献が少なく、図-6は必ずしも現状を反映しているとは言いが、今回の調査範囲に限っては、ドッグボーン供試体においても有効高さとの有効直径の比は1.5超~2以下を採用している研究が多かった。

(3) 供試体の固定方法

引張り試験装置や直接せん断試験装置を用いて一軸引張り試験を行う場合には、何らかの方法により供試体の端部を試験装置に固定する必要がある。固定方法による分類結果を図-7に示す。今回の調査範囲では、供試体を試験機に固定する方法としてエポキシ系接着剤を用いている研究が最も多く、全体の76% (45例/59例) を占めることがわかった。特に花崗岩や安山岩など硬岩の引張り試験においては、ほとんどの研究者がエポキシ系接着剤を採用している。いくつかの研究では、水中での接着性を高めたエポキシ系接着剤を開発して、湿潤状態での一軸引張り試験を行っている例^{4) 5)}もあった。その他の固定方法としては、接着に石膏を用いる方法や、専用治具で機械的に供試体端部を固定する方法が見られたが、その研究例は少ない。ユニークな固定方法としては、供試体端部をラバーを介した空気圧により締め付けることで固定する方法を採用している研究もあったが、対象としている試験材料の引張り強さは数10kPa程度であり、引張り強さの大きな岩石を固定する方法として採用している例はなかった。

一軸引張り試験で重要な点の1つは、引張り試験中に供試体に曲げ応力を作用させないことである。曲げ応力

が生じる要因としては、供試体の中心軸と載荷軸のずれや、供試体端面の並行度のずれなどがあげられる。そのため、主に後者の要因による影響を緩和する目的で、ユニバーサルジョイントやボールジョイントのような可動部を持つ継手（以降、自在継手と記す）を介して供試体へ引張力を作用させている研究例もあった。図-8に供試体の設置にあたって自在継手を用いているか否かで分類した結果を示す。図から、一軸引張り試験に自在継手を用いる割合と用いない割合はほぼ同じであることがわかる。自在継手として用いられている治具には、ユニバーサルジョイント、ボールジョイント、ベアリング付きアイボルト、ピンジョイント、リンクチェーンおよびケーブルなどがあり、研究者によってさまざまな種類の継手が用いられていることがわかった。

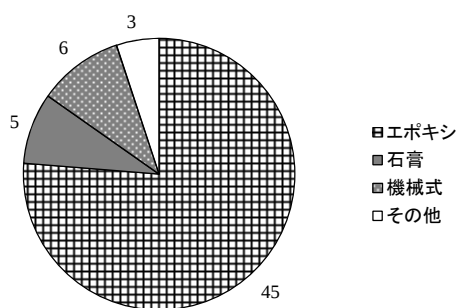


図-7 供試体の固定方法

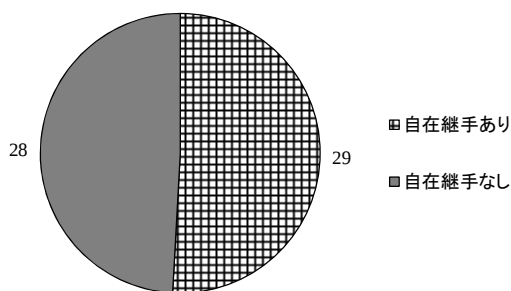


図-8 自在継手のありなし

(4) 載荷方法

一軸引張り試験の載荷方法による分類結果を図-9に示す。今回の調査範囲では、変位またはひずみ制御により試験を行っている例が最も多く、全体の65%（45例/69例）を占めることがわかった。荷重または応力制御による例は全体の32%（22例/69例）であった。図中の回転速度制御は遠心載荷による一軸引張り試験での制御方法である。

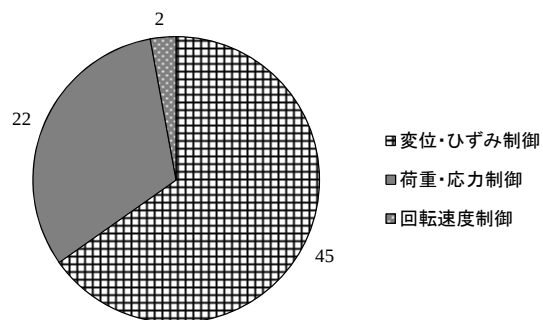


図-9 一軸引張り試験の制御方式

(5) 変位の計測方法

今回の調査では、一軸引張り試験中の供試体の変位またはひずみを計測している例も多く見られた。全部で84編の文献のうち、強度特性だけでなく変形特性も検討している文献は58編であった。変位の計測方法に関する分類を図-10に示す。今回の調査では、ひずみゲージやLDTなどを用いて供試体の局所ひずみを直接測定している研究がもっとも多く、全体の65%（35例/54例）を占めた。その他の計測方法としては、供試体を固定する治具の内側に変位計を設置して治具間の変位量を測定する方法、固定治具の外側に変位計を設置してアクチュエーターまたは試験機ピストンの変位量を測定する方法が用いられていた。

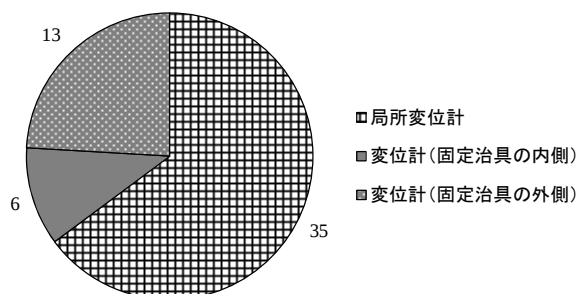


図-10 変位の計測方法

(6) 一軸引張り試験に関する研究の動向

調査した文献の出版年と文献数の関係を図-11に示す。本調査で扱った文献は1963年～2013年の間に出版されたものである。図から、一軸引張り試験に関する研究は1995年以降増加傾向にあることが伺える。

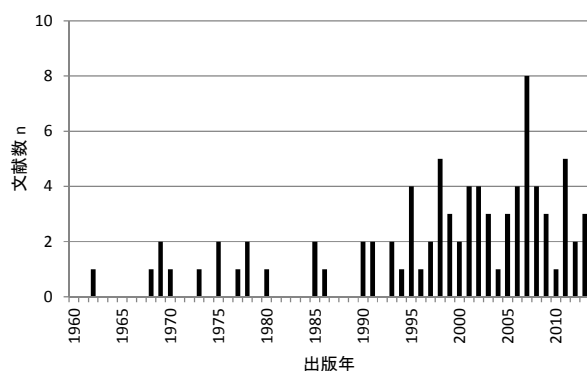


図-11 文献の出版年と文献数の関係

4. まとめ

文献調査の結果、岩石および岩石質地盤材料を対象とした一軸引張り試験は、これまでに多くの研究が行われており近年は増加傾向にあること、供試体の形状や試験の方式などには複数の方法が認められるものの、試験の原理や载荷の機構にはある程度の統一性が見られることがわかった。本調査の結果は、今後の一軸引張り試験の基準化に向けて有用な知見になるものと考えられる。

謝辞

なお、この論文の内容は（公社）地盤工学会の室内試験規格・基準委員会の下に設置された岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討 WG（WG リーダー、谷和夫）において実施した調査の成果をとりまとめたものである。

参考文献

- 1) 田井絵里子，早野公敏，谷和夫：遠心载荷を用いた固結した地盤材料の引張り試験の開発，第48回地盤工学研究発表会，pp.599-600，2013.
- 2) 岡田哲実，納谷朋宏，谷和夫：中空円筒形状の試験体を用いた岩盤の引張り試験方法の考案，第48回地盤工学研究発表会，pp.601-602，2013..
- 3) 地盤工学会 岩の一軸および三軸試験方法検討委員会：岩の一軸および三軸試験方法検討委員会 報告書，1998.
- 4) 羽柴公博，大久保誠助，福井勝則：気乾状態と湿潤状態での岩石の一軸引張強度と非弾性歪，The Mining and Materials processing Institute of Japan, Vol.126, pp.675-681, 2011.
- 5) 真田昌慶，岸裕和，杉田裕，林克彦，武部篤治，大久保誠介：岩石の強度回復特性・一般化応力緩和挙動に関する研究(V)，JAEA-RESEARCH, 2012-025, 2012.

LITERATURE SURVEY IN TEST METHODS OF DIRECT TENSION TEST ON ROCKS

Masaki ONO, Naruki WAKABAYASHI and Toshiaki NAKAMURA

The authors conducted literature research in test methods of direct tension test on rocks. The research revealed that test method can be categorized into three types, and right circular cylinder shape is most commonly used as the specimens. The second most is dog bone type specimen. The authors also found that specimens are cemented directly to platens or by means of flexible joint in many studies. Through the literature research, It was recognized that direct tension tests have been conducted extensively by many researchers and the principal of direct tension tests are found to be almost common among their studies.