

# 岩盤の原位置一軸引張り試験に関する文献調査

白鷺 卓<sup>1\*</sup>・谷 和夫<sup>2</sup>・岡田 哲実<sup>3</sup>

<sup>1</sup>鹿島建設株式会社 土木管理本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)

<sup>2</sup>(独)防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター (〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21)

<sup>3</sup>(一財)電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

\*E-mail: shirasag@kajima.com

従来、岩盤の引張り強さを調べる信頼性の高い試験方法や引張り強度特性の適切な評価方法が確立されていなかったために、岩盤構造物の耐震設計においては岩盤の引張り強さを期待せずに(ゼロと仮定して)保守的に安定性を評価してきた。しかし、従来よりも大きな設計用地震動を用いるために評価が過度に保守的になる一方で、試験方法の研究開発も進んできた。そこで、岩盤の引張り強さを原位置で調べる試験方法について文献調査を行ない、6編5例を収集・整理した。その結果、試験体の形状及び载荷方法の観点から3種類の試験方法が開発されていることが分かった。ただし、いずれも研究段階で実績も寡少であるため、標準化する段階には達していないと判断した。

**Key Words :** rock mass, in-situ test, direct tension test, tensile strength

## 1. はじめに

従来、岩盤基礎や岩盤斜面の安定性に関する設計では、地震動等の設計荷重に対して十分な耐力の余裕があった。また、岩盤中の不連続面の影響は評価が困難であり、岩盤の引張り強さを調べる信頼性の高い試験方法や引張り強度特性の適切な評価方法が確立されていなかった。そのため、岩盤構造物の耐震設計においては岩盤の引張り強さを期待せずに(ゼロと仮定して)保守的に安定性を評価してきた。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震後の設計基準等の見直しにより、設計用地震動が非常に大きく設定されるようになり、評価が過度に保守的になる傾向にある。その結果、十分な安定性が確保されていると思われる岩盤構造物であっても、安全率等の設計における評価基準値を満たすことができなくなっている。従来の設計方法が不適切であるというような被災事例はないという現状を考えると、設計用地震動のみを大きくすることは過大設計(不経済な設計)となり合理的ではない。設計上の不確かさを適切に反映した安全マージンを考慮できる範囲で、設計用地震動と共に岩盤の抵抗力も再評価するべきである。一方、岩盤の引張り強さを調べる試験方法や引張り強度特性の評価方法についても研究開発が進んでいる。そこで、従来は無視(ゼロと仮定)してきた岩盤の引張り強さを岩盤の抵抗力の成分として適切に評価できるレベルに至ったかどうか検討するべき

と考える。

このような背景の下、(公社)地盤工学会の室内試験規格・基準委員会では2013年度に「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)を設置して岩盤あるいは岩石の引張り強さを調べる試験方法の基準化の可否について検討を行った。以下に、その成果の一部として原位置における岩盤引張り試験方法について実施した文献調査の結果について報告する。

## 2. 原位置における岩盤引張り試験のニーズ

原位置における岩盤引張り試験のニーズとして以下の点が指摘することができる。

- 岩盤の引張り強さは、コア観察による岩盤分類(岩級区分)から統計的に推定されたり、限られたサンプルの室内岩石試験の結果から設定されたりする。しかし、岩盤の引張り強さを原位置で直接に調べた事例は極めて寡少であり、これらの評価手法の信頼性を高めるためにはデータベースを拡充する必要がある。
- 岩盤斜面や原子力発電所建屋などの基礎岩盤の耐震設計において、不連続性岩盤の引張り強さはこれまで評価が困難だったことから、安全側に見てゼロとされていた。しかし、引張り強さを適切に調べて評

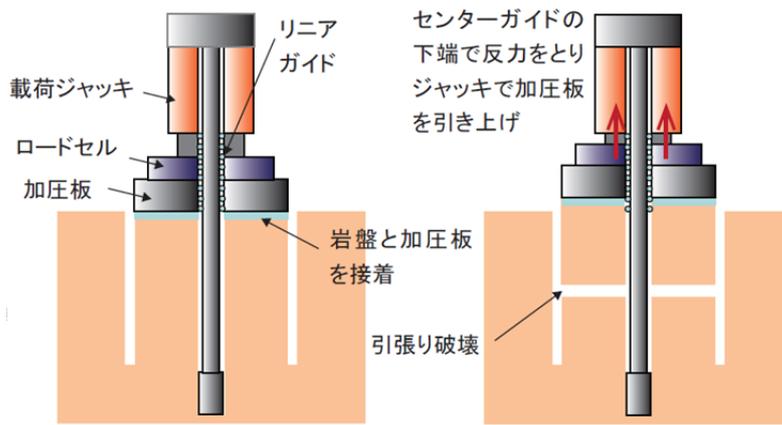


図-1 岡田ほか (2013) の試験装置<sup>3)</sup>

価できるようになれば、より合理的な設計が可能となる<sup>1)</sup>。

- 設計用地震動の見直しに合わせて、岩盤の抵抗力も適切に再評価することで、行き過ぎた過大設計（不経済な設計）を是正することができる。

### 3. 資料収集等に基づく試験方法の現状・実態

原位置における岩盤引張り試験方法に関する文献調査の結果、全部で6編5例を収集し、試験装置、試験体の作製及び試験方法に関する現状と実態について整理した。

報告事例は全て一軸引張り試験であり、試験体の形状及び载荷方法の観点から、円柱体引張りタイプ（岡田・谷 (2009)<sup>2)</sup>及び岡田ほか (2013)<sup>3)</sup>、高田ほか (2000)<sup>4)</sup>、岩盤（ブロック）せん断試験のブロックを引き上げるブロック引張りタイプ（仲村ほか (2006)<sup>5)</sup>、岩盤（ロック）せん断試験の試験体（ロック）を引き上げるロック引張りタイプ（野崎・新 (2003)<sup>6)</sup>及び大村ほか (2011)<sup>1)</sup>の3つに分類される。

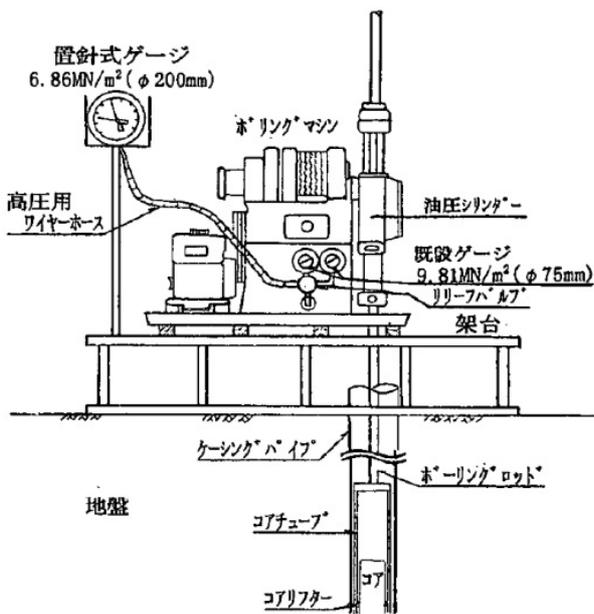


図-2 高田ほか (2000) の試験装置<sup>4)</sup>

#### (1) 試験装置

##### a) 载荷装置

岡田・谷 (2009)<sup>2)</sup>は、岩盤を露頭で中空厚肉円筒形に切り出し、中空部に挿入したセンターガイドで反力を取って円筒形の試験体の上端を引き上げる試験方法を考案し（図-1）、岡田ほか (2013)<sup>3)</sup>では原位置試験を想定した室内試験装置を開発している。高い精度でセンターガイドを試験体の中心軸に設置できるため、曲げモーメントを抑制して試験体をまっすぐ引き上げることができる。

高田ほか (2000)<sup>4)</sup>は、円柱試験体を孔底に作製し、コアリフターで挟んでコアチューブごと引き上げる試験方法を開発している（図-2）。

仲村ほか (2006)<sup>5)</sup>は、岩盤（ブロック）せん断試験と同様に水平かつ平滑に整形した岩盤面上にモルタルブロックを打設し、それを引き上げる試験方法を開発している（図-3）。

一方、野崎・新 (2003)<sup>6)</sup>は、岩盤から切り出した一辺195mmの立方体に対し、引張りを含む低垂直応力下で岩盤（ロック）せん断試験を実施している（図-4）。セ

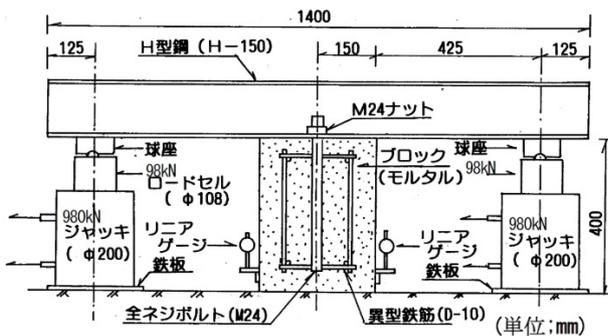


図-3 仲村ほか (2006) の試験装置<sup>5)</sup>

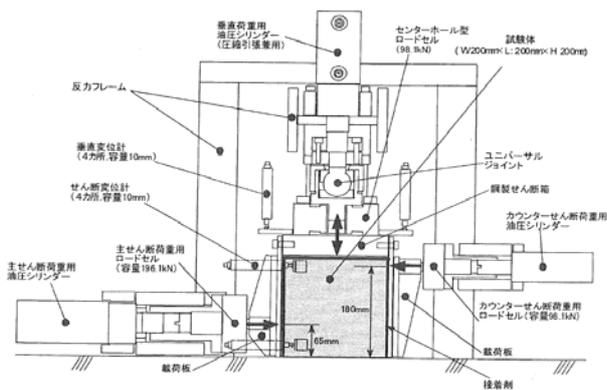


図-4 野崎・新 (2003) の試験装置<sup>9)</sup>

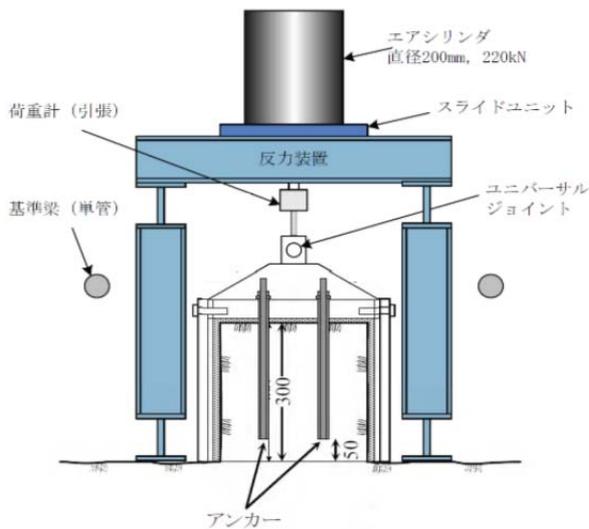


図-5 大村ほか (2011) の試験装置<sup>1)</sup>

ん断荷重を載荷しないで引張りの直荷重で破壊に至れば岩盤引張り試験となる。また、大村ほか (2011)<sup>1)</sup>も同じ目的で開発された試験機を利用しており、岩盤から切り出した一辺 300mm の立方体の試験体を引き上げる機構となっている (図-5)。

#### b) 接着剤 (材) あるいは試験体の保持方法

高田ほか (2000)<sup>4)</sup>はコアリフターで挟んでコアチューブごと持ち上げるため、接着剤を使用しない。岡田・谷 (2009)<sup>2)</sup>及び岡田ほか (2013)<sup>3)</sup>は接着剤を使用するが、その種類は明示されていない。野崎・新 (2003)<sup>9)</sup>はエポキシ樹脂系の接着剤を試験体の5面に塗布し、せん断箱を固定する。仲村ほか (2006)<sup>5)</sup>及び大村ほか (2011)<sup>1)</sup>は接着材としてモルタルを使用している。特に、大村ほか (2011)<sup>1)</sup>は試験体 (ロック) の5面を鋼製型枠で覆い、隙間にはモルタルを流し込み、さらに4本のアンカーを打設して固定している。

#### c) 引張り荷重の載荷機構 (球座等)

岡田・谷 (2009)<sup>2)</sup>及び岡田ほか (2013)<sup>3)</sup>、高田ほか (2000)<sup>4)</sup>では球座は使用しない。仲村ほか (2006)<sup>5)</sup>は

球座を、野崎・新 (2003)<sup>9)</sup>及び大村ほか (2011)<sup>1)</sup>はユニバーサルジョイントを使用している。

#### d) 測定装置

荷重の計測には、高田ほか (2000)<sup>4)</sup>以外はいずれもロードセルを使用している。高田ほか (2000)<sup>4)</sup>は置針式ゲージを使用している。

変形の計測には、岡田・谷 (2009)<sup>2)</sup>及び岡田ほか (2013)<sup>3)</sup>は、外周側面で局所的な変位 (軸方向, 周方向) をひずみゲージで計測している。高田ほか (2000)<sup>4)</sup>及び大村ほか (2011)<sup>1)</sup>では明記されていない。それ以外はブロックに外部から変位計を設置している。

## (2) 試験体の作製

円柱体引張りタイプの岡田・谷 (2009)<sup>2)</sup>及び岡田ほか (2013)<sup>3)</sup>、高田ほか (2000)<sup>4)</sup>では、ロータリードリリングで試験体を作製する。サイズは前者が直径600mm程度、後者は明記されていないが、図から直径50mmのコアと推測できる。また、前者のセンター孔の直径は80mm程度である。

ブロック引張りタイプの仲村 (2006)<sup>5)</sup>では、300mm四方の平面状の接着面を作製している。

ロック引張りタイプの野崎・新 (2003)<sup>9)</sup>及び大村ほか (2011)<sup>1)</sup>では、それぞれ一辺195mm及び300mmの立方体を岩盤から切り出す。

## (3) 試験方法

### a) 制御方式

いずれも応力制御方式である。

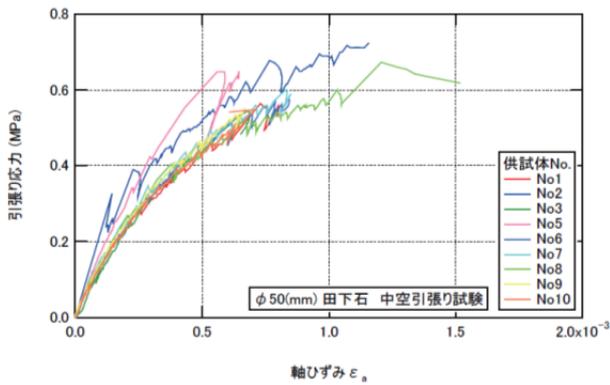
### b) 載荷速度

高田ほか (2000)<sup>4)</sup>では10~100kN/m<sup>2</sup>/s、野崎・新 (2003)<sup>9)</sup>では0.0490MPa/min、大村ほか (2011)<sup>1)</sup>では10kN/m<sup>2</sup>/minとされている。そのほかでは明示されていない。

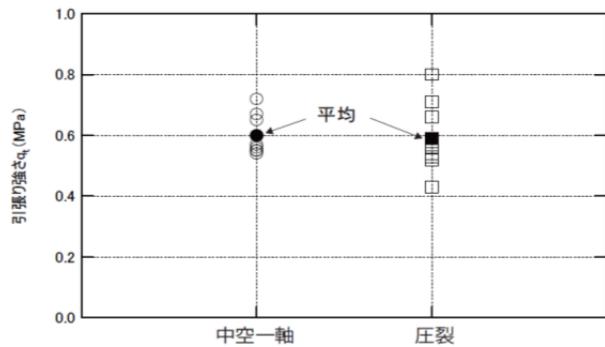
## 4. 試験結果の整理

### (1) 試験結果

岡田ほか (2013)<sup>3)</sup>は中空円筒型の原位置試験と同様の原理に基づく室内引張り試験の10個の供試体 (直径50mm, 高さ100mm) に対して実施した試験の結果について、図-6a) に示すような応力-軸ひずみ関係を示している。破壊ひずみは0.06~0.12%であった。破断面は概ね中央付近 (供試体上端より平均65mmの位置) で、加圧板と供試体の境界で破壊したものは1本もなかった。また、一軸引張り試験と圧裂試験から得られた引張り強さの比較をしており、両試験の引張り強さはほぼ同等で、ばらつきは一軸引張り試験の方が小さいことを確認している (図-6b) )。



a) 応力-軸ひずみ関係



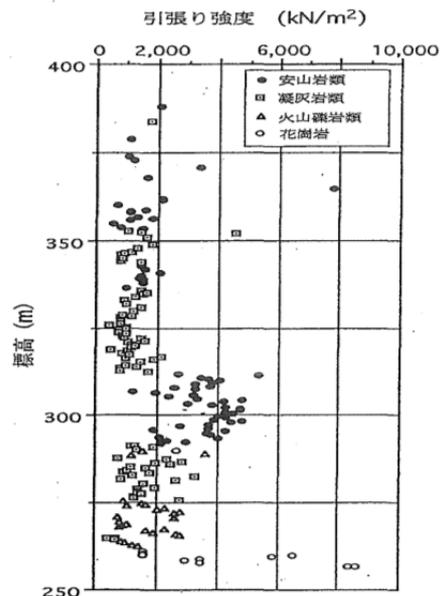
b) 中空一軸引張り試験と圧裂試験から得られた引張り強さの比較

図-6 室内における中空円筒型一軸引張り試験結果<sup>3)</sup>

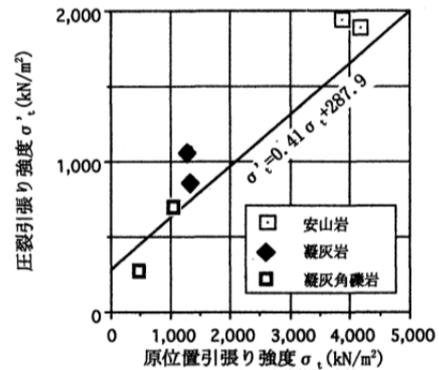
高田ほか (2000)<sup>4)</sup>では、鮮新世～更新世に不連続に堆積した火山岩類を対象に、深度方向0.5m毎に約275m区間にわたって実施した試験結果を深度分布で示している(図-7a)。また、この結果を岩種や岩盤分類(岩級区分)という観点から引張り強さの分布を分析している。さらに、原位置引張り強さと一軸圧縮強さ、圧裂引張り強さ、超音波(縦波及び横波)伝播速度との関係を示し、岩種に拠らずそれぞれ相関があるとしている(図-7b)。

仲村ほか (2006)<sup>5)</sup>では、4個の試験体に対して実施した試験の結果を引張り強さの一覧表として示すにとどめている。試験後にブロックの底面を観察し、破壊が岩盤内で生じていることを確認している。

野崎・新 (2003)<sup>6)</sup>は原位置試験を想定した室内モデル試験を行っており、一軸引張り試験は引張り垂直応力下でのせん断試験の初期垂直応力を設定する位置付けとしている。その結果として、2種類の岩石(大谷石、珪藻泥岩)それぞれの応力-変位関係が示されている(図-8a)。また、圧縮応力下から引張り応力下に至るせん断試験結果をせん断-垂直応力関係として示している(図-8b)。引張り強さはコアの圧裂引張り強さよりやや小さいものの同程度と評価されている。対象は軟岩



a) 原位置引張り強度の深度分布



b) 圧裂引張り強さと原位置引張り強さの関係

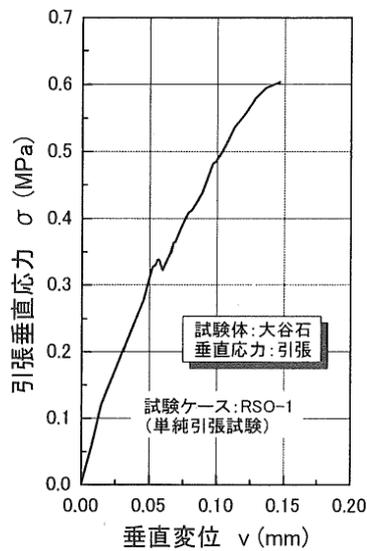
図-7 ボーリングマシンによる原位置引張り試験結果<sup>4)</sup>

表-2 原位置引張り試験の結果の一覧<sup>1)</sup>

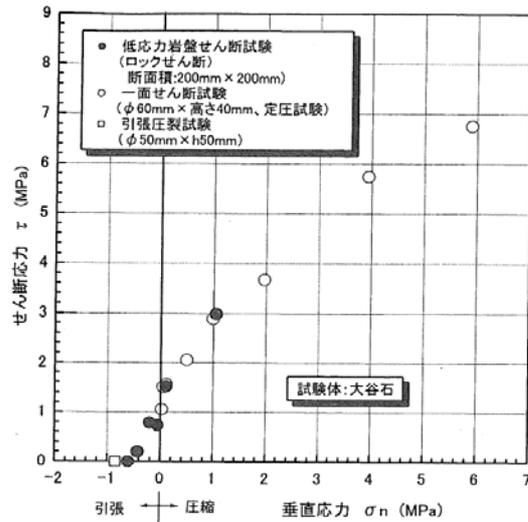
試験番号	引張強度	亀裂面積率	破壊面の特徴
	kN/m <sup>2</sup>	%	
1	6.3	94.7	低角亀裂で剥離、亀裂に粘土挟在
2	15.0	58.3	低角亀裂で剥離、亀裂に粘土挟在
3	46.3	24.6	低角亀裂で剥離、亀裂の一部に粘土挟在
4	59.4	21.8	低角亀裂で剥離、亀裂の一部に粘土挟在
5	170.3	8.8	ブロック下端の岩盤内で破壊

(大谷石)であるが、低応力下で垂直応力に対するせん断強さが非線形となる傾向が見られる。また、同図中には、岩盤せん断試験の結果が室内の一面せん断試験の結果と調和的であることが示されている。

大村ほか (2011)<sup>1)</sup>では5個の試験体に対して実施した



a) 応力-変位関係 (せん断荷重=0の場合)



b) せん断応力-垂直応力関係

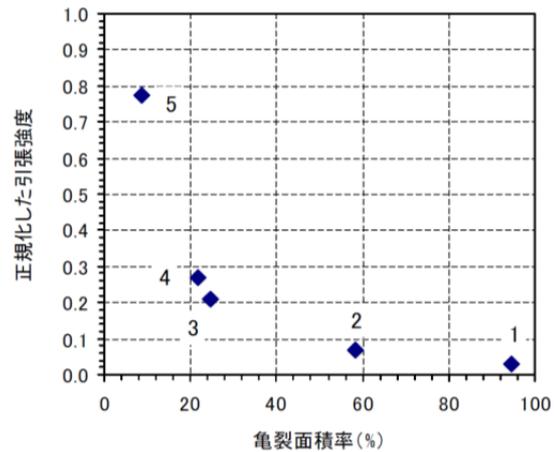
図-8 大谷石を対象に岩盤せん断試験を想定した室内モデル試験の結果<sup>9)</sup>



試験番号1

試験番号5

a) 破壊面の写真



b) 引張り強さ-亀裂面積率関係

図-9 原位置における一軸引張り試験の結果<sup>1)</sup>

試験の結果を引張り強さの一覧表として示している(表-2)。合わせて示されている亀裂面積率については後述する。

## (2) 試験体の不連続面の影響

大村ほか(2011)<sup>1)</sup>では、5個の試験体の破壊面を観察し、破壊面全体(0.09m<sup>2</sup>)に占める亀裂投影面の割合を亀裂面積率と定義している(図-9a)。この亀裂面積率と引張り強さとの関係を示したものが図-9bである。

「正規化した引張強度」とは、亀裂面積率ゼロ、すなわち不連続面を含まない試験体の引張り強さを室内におけるコアの一軸引張り強さ(220kN/m<sup>2</sup>)とし、それで原位置引張り強さを正規化したものである。図のように引張り強さが亀裂面積率の増加に応じて非線形(べき関数的)に低下する理由として、不連続面に沿って破壊面が開くことにより、開口端部に応力集中が発生し、破壊が進展すると推論している。

## 5. 各試験の破壊メカニズムと課題

各試験は、荷重の方法によって破壊メカニズムの観点から3つに分類される。

岡田・谷(2009)<sup>2)</sup>及び岡田ほか(2013)<sup>3)</sup>が開発した露頭で円柱試験体の上面に引張り荷重を載荷する方法は、破壊面を限定しない試験である。試験体は理想的に要素(応力とひずみが一様に分布する領域)で、破壊は最弱の断面で生じる。

高田ほか(2000)<sup>4)</sup>の孔底の円柱試験体の底部に引張り荷重を載荷する方法、野崎・新(2003)<sup>6)</sup>及び大村ほか(2011)<sup>1)</sup>の露頭の試験体(ロック)に引張り荷重を載荷する方法は、破壊面を試験体の底面に限定する試験である。

仲村ほか(2006)<sup>5)</sup>が開発した露頭のブロックに引張り荷重を載荷する方法は、破壊面をモルタルと岩盤の境

界面ないしその直下の岩盤に限定する試験である。岩盤の引張り強さと付着強さの弱い方またはその複合的な値を求めている。

各試験の課題は以下のとおりである。

岡田・谷 (2009)<sup>2)</sup>及び岡田ほか (2013)<sup>3)</sup>の方法では、岩盤の引張り強さによってはセンターガイドの剛性が不足してガイドに曲げが生じ、意図しない載荷板の回転や中心軸のずれが生じる可能性がある。また、載荷の反力をセンターガイドの下端で負担するため、下端部の状況によってはセンターガイドが沈下する可能性もある。

高田ほか (2000)<sup>4)</sup>の方法は、深部地盤に対しても適用できることが特徴であるが、岩盤試験と呼ぶには試験体の寸法がやや小さいと思われる。また、試験体の作製がボーリングマシンによるコアリングであり、掘削中のコアバレルの揺動等で試験体 (コア) に損傷を与える可能性がある。さらに、試験体はコアリフターで挟むため、引っ張り上げる最中に滑る可能性がある。試験体の中心軸と載荷軸が一致しているか (共軸性) を確認できないことも課題である。

仲村ほか (2006)<sup>5)</sup>の方法では、岩盤の引張り強さだけでなく、付着面の引張り強さを含んだ値を求めている可能性があり解釈が明確ではない。

野崎・新 (2003)<sup>6)</sup>及び大村ほか (2011)<sup>7)</sup>の方法では、試験体に非対称あるいは不均質に不連続面が分布する場合、球座によって加圧面が回転し、引張り強さを過小評価あるいは曲げ引張り強さを評価することになる可能性がある。また、いずれも引張り試験が主眼ではなく、せん断試験が最終目的であることから、前述のように、破壊面がせん断箱の直下に限られる。

全ての試験方法に共通する課題としては、岩盤の一軸引張り試験は、試験体の作製や重力による曲げの影響を考慮すると、載荷は鉛直上向きにほぼ限定されることである。つまり、引張り破壊面が水平に限定され、異方性の評価が困難である。

## 6. 基準化の可否の検討

岩盤を対象とした原位置引張り試験については、設計に直結すると考えられることから、基準化の必要性は高い。しかし、文献総数が6篇に留まり、かつ試験方法が一定の方法に収斂する段階に至っておらず、研究段階にある各試験方法も5章に記したように技術的に未成熟で (未解決な課題を抱えており) かつ実績も寡少である。よって、基準化検討WGは、当面の基準化には時期尚早であると判断した<sup>7)</sup>。一方で、今回調査した文献からいくつかのニーズを確認することができた。今後、各機関において岩盤の原位置における一軸引張り試験が多く実施され、それらの成果が広く発表されることにより、当該試験法が成熟したものになることを期待したい。

### 参考文献

- 1) 大村英昭, 伊藤悟郎, 小林正典: 引張応力下における岩盤のせん断挙動に関する研究—亀裂性岩盤を対象とした原位置引張り試験—, 土木学会第 66 回年次学術講演会, III-380, pp.759-760, 2011.
- 2) 岡田哲実, 谷和夫: 原位置岩盤引張り試験方法及び試験装置, 特願 2009-264336, 2009.
- 3) 岡田哲実, 納谷朋広, 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.
- 4) 高田誠, 川内野新, 山本茂雄, 北村良介: ボーリング孔を利用した新しい原位置岩盤強度評価法, 土木学会論文集, No.652/III-51, pp.279-282, 2000.
- 5) 仲村治朗, 河村精一, 村中健二: 大型構造物基礎岩盤としての互層堆積軟岩の変形・強度特性に関する考察, 土木学会論文集, Vol.62, No.2, pp.412-428, 2006.
- 6) 野崎隆司, 新孝一: 引張を含む低垂直応力下での原位置岩盤せん断試験法の考案, 電力中央研究所報告, 研究報告: U03009, 2003.
- 7) 岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討 WG: WG 報告書, 地盤工学会, 2013.

## LITERATURE REVIEW ABOUT DIRECT TENSION TEST OF ROCK MASS

Suguru SHIRASAGI, Kazuo TANI and Tetsuji OKADA

Field testing methods to evaluate tensile strengths of rock masses were investigated by literature review. Six papers for five different methods for direct tension tests were found. These can be categorized into three types with respect to the shapes of specimen and the loading systems. All the test methods were still under development/research stage, and their practical applications and/or experiences are limited. Thus, the standardization committee of the Japanese Geotechnical Society judged that standardization of these test methods was too early for the moment, at March 2013.