

「岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討」  
に関する報告書

平成 26 年 3 月

地盤工学会

岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討 WG

## 目次

1. はじめに	1
2. 基準化検討 WG の設立の経緯と目的	2
3. 基準化検討 WG メンバーの構成	4
4. 基準化検討 WG 活動の経緯	5
5. 試験方法に関する資料収集と整理	22
6. 試験方法の基準化に関する検討	30
7. 一軸引張り試験の一斉試験	79
8. 岩石の一軸引張り試験方法の基準化素案	89
9. 岩石の一軸引張り試験方法基準化 WG 設立趣意書	92
10. あとがき	94

## 1. はじめに

岩石及び岩盤の引張り強さを調べる試験方法には複数の方法が存在し、(公社)地盤工学会では圧裂試験が平成14年に基準化されている。この圧裂試験は、簡便でコンクリートやモルタルでも実績のある方法であるが、さまざまな問題があることが指摘されている。一方、簡便さでは圧裂試験には劣るが、原理が分かり易い一軸引張り試験も我が国でしばしば実施されており、海外(ASTMやISRM)では基準化もなされている。さらに近年、斜面の安定性評価や補強工の設計に岩盤の引張り強さを考慮することを目指して、現場で実施する岩盤の一軸引張り試験の研究・技術開発も進んでいる。

このような状況を鑑みて、岩石及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WGを基準部に設けることが平成25年12月26日の基準部会で決定された。その後、平成26年5月に基準化検討WGが発足し、6月から活動を開始した。WGを構成するメンバーは3章に示す10名で、各人が所属する大学、研究所、建設会社、調査会社において岩石及び岩盤の引張り強さを調べる方法に関わってきた技術者・研究者である。

4章に示すように実質的に約10ヶ月の活動期間中に幹事会2回とWG4回の会合を行い、その検討の成果を報告書として取りまとめたものが本書である。活動の主な内容は、関連する資料の収集と整理、基準化の検討、岩石の一軸引張り試験の一斉試験の3項目である。検討の内容はそれぞれ5章、6章、7章にまとめられている。

これらの活動を通じて、採取した試料(供試体)に対して室内で行う「岩石の一軸引張り試験方法」と、成形した試験体に対して原位置で行う「岩盤の一軸引張り試験方法」のそれぞれについて基準化の必要性と可能性を検討した。その結果、前者の岩石試験については必要性が高く、かつ、「岩石の一軸圧縮試験方法」の基準をベースとした基準化が可能との結論が異論なく得られた。一方、後者の岩盤試験については必要性が高いことは認められるが、実施例が少なく技術的に未成熟である(研究段階にある)ことから基準化の可能性が問題となった。WGにおいて慎重に審議した結果、岩盤試験は基準化には時期尚早であるとの結論に達した。この基準化の検討の経緯は6章にまとめられており、岩石試験については7章に基準化の素案を、9章には基準部会に提出した「岩石の一軸引張り試験方法基準化WG設立趣意書」を示した。

基準部会で基準化WGの設立が承認されれば、平成26年4月より基準化の作業に入り、平成28年には新しい地盤工学基準「岩石の一軸引張り試験方法」が制定される予定である。

## 2. 基準化検討WGの設立の経緯と目的

### (1) 背景・経緯

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。そのため、岩盤中の不連続面の影響を考慮して、岩盤の引張り強さをゼロとして（無視して）保守的に評価されてきた。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震の発生以降、設計基準等の見直しによって設計用地震動が非常に大きく設定されるようになり、岩盤といえども引張り強さを適切に評価しなければ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ず、岩盤上に重要土木構造物を構築することが困難になってきた。このような状況から、岩盤を対象とする構造物の設計において、岩盤あるいは岩石の引張り強さを調べる試験方法や適切な評価方法の確立が求められている。

岩石の引張り試験方法には、一軸引張り試験、圧裂試験、曲げ試験、インデンテーション試験等がある。平成8年度に「岩の一軸および三軸試験方法検討委員会」で実施されたアンケート調査によると、引張り試験方法としては、硬岩を対象とした場合、「圧裂試験」と「一軸引張り試験」の実施割合は6:1であり、軟岩を対象とした場合には「圧裂試験」だけが行われていた。一軸引張り試験が理想的な応力状態の下で直接的に引張り強さを求める試験であるのに対し、圧裂試験は荷重の作用点近傍の応力集中や破断面に沿って非一様な圧縮応力が作用すること等の問題が認識されていたが、簡便で実務的に最も利用頻度が高いこと等の理由により平成14年に「圧裂による岩石の引張り強さ試験（JGS2551-2009）」のみが基準化された。しかし、圧裂試験については、近年も様々な問題点が指摘されており、一軸引張り試験による引張り強さの重要性も指摘されている。

一方、原位置の岩盤の引張り試験方法についても複数の試験方法が技術開発され、実施例も報告されるようになってきた。

以上のように、新設・既設構造物の耐震性能のチェックや評価が厳しくなり、岩石及び岩盤の引張り強さを適切に評価しなければならない状況の中、圧裂試験以外の試験方法の中で応力状態が理想的でありかつ実績もある一軸引張り試験方法の基準化が急務となっている。

### (2) 一軸引張り試験方法の基準化検討の必要性

前述したように、既に基準化されている圧裂試験には、様々な問題があることが従来から認識されていた。軟岩やセメント改良土においては、一軸引張り試験と圧裂試験から得られる引張り強さが2倍程度も異なる場合があることも指摘されている。従来のように、設計において引張り強さを参考値としてのみ参照するのであれば実務上の問題は小さいが、引張り強さを設計値として評価しようとするならば上記のような問題を解決する必要がある。一方、硬岩においては一軸引張り試験が実務で用いられていることから、試験方法の基準化が求められている。また、原位置で行う岩盤試験を想定した場合、圧裂試験は困難であり、一軸引張り試験に類似した試験方法が想定されるが、現状の技術状況を調査する必要がある。

以上のことから、近い将来に普及が期待され、現行の圧裂試験方法に対する代替になり得る一軸引張り試験方法の基準化の必要性と可能性を検討する必要がある。

(3) 基準化検討 WG における検討内容

岩石、岩盤及び岩石質地盤材料（セメント改良土等）を対象として室内及び原位置で行う一軸引張り試験方法に関して、以下の作業を行い、基準化の可能性を検討する。

- 既往の試験方法ならびにデータ収集
- 基準化のための課題の整理
- 基準案の構成原案の取りまとめ

(4) 基準化検討 WG の活動期間

平成 25 年 4 月～平成 26 年 3 月（1 カ年）

### 3. 基準化検討WGメンバーの構成

岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討WGのメンバーの構成は次表の通りである。

表 3.1 基準化検討WGのメンバー構成

会務	氏名	所属
リーダー	谷 和夫	(独) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター
幹事	白鷺 卓	鹿島建設(株) 技術研究所 岩盤・地下水グループ
幹事	羽柴 公博	東京大学 大学院工学系研究科 システム創成学専攻
幹事	岡田 哲実	(一財) 電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域
メンバー	及川 寧己	(独) 産業技術総合研究所 つくば中央第七事業所 地圏資源環境研究部門 地圏環境システム研究グループ
メンバー	小野 正樹	応用地質(株) エンジニアリング本部 コアラボ試験センターさいたまラボ
メンバー	嶋本 敬介	(公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
メンバー	中村 敏明	(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 地質解析事業部 力学物性部 物性試験課
メンバー	早野 公敏	横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院
メンバー	若林 成樹	清水建設(株) 技術研究所 社会基盤技術センター 地下技術グループ
事務局	齋藤 あや	(公社) 地盤工学会 一般事業課

#### 4. 基準化検討 WG 活動の経緯

活動の経緯は以下のとおりである。WG および WG 幹事会の議事録を次頁以降に示す。

- (1) 第1回 WG：平成 25 年 6 月 14 日
  - ・活動方針および文献調査の作業分担の確認
  - ・東京大学の試験装置見学
- (2) 第1回 WG 幹事会：平成 25 年 7 月 12 日
  - ・文献調査のとりまとめ方針等の検討
- (3) 第2回 WG 幹事会：平成 25 年 8 月 23 日
  - ・文献調査結果のとりまとめ方針の検討
  - ・一斉試験案の検討
- (4) 第2回 WG：平成 25 年 9 月 27 日
  - ・文献調査結果の各グループからの紹介
  - ・電力中央研究所の試験装置見学
- (5) 第3回 WG：平成 25 年 12 月 2 日
  - ・文献調査結果の各グループからの紹介
  - ・基準化の方針の確定
  - ・横浜国立大学の試験装置見学
- (6) 第4回 WG：平成 26 年 2 月 24 日
  - ・報告書原稿の確認

社団法人 地盤工学会  
 岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討 WG (WG13)  
 第 1 回 WG 議事録

日時	平成 25 年 6 月 14 日 9:00~12:00					場所	東京大学工学部 4 号館 3 階 422 号室				
リーダー	谷 和夫	○	メンバー	及川寧己	○	メンバー	中村敏明	○	メンバー	若林成樹	○
幹事	白鷺 卓	○	メンバー	小野正樹	○	メンバー	羽柴公博	○			
幹事	岡田哲実	○	メンバー	嶋本敬介	○	メンバー	早野公敏	○	事務局	齋藤あや	-

配付資料

番号	内容
資料 1-1	WG 名簿
資料 1-2	WG 設立趣意書
資料 1-3	室内試験規格基準委員会（親委員会）前回議事録
資料 1-4	親委員会予算関連資料
資料 1-5	基準部規定、規格・規準に関する細則など
資料 1-6	WG の工程案
資料 1-7	文献調査リスト（案）
資料 1-8	海外の引張り試験の基準（ISRM、ASTM）
資料 1-9	岩石の圧裂試験 JGS 基準
資料 1-10	引張り試験の一斉試験の案
資料 1-11	作業分担案

議 題：

0. 谷リーダーの開会の挨拶及び資料の確認

1. 自己紹介及び名簿の確認

- ・名簿（資料 1-1）に誤りはないことを確認した。

2. 設立趣意書等の説明（岡田幹事、資料 1-2~1-5）

- ・親委員会（室内試験規格・基準委員会）には、7/19（金）に WG13 の活動について岡田幹事が説明する。
- ・WG13 の H25 年度予算は 423,000 円で、旅費等に利用する。
- ・資料 1-5、p.11、4（2）に示された基準化の条件①~④のうち、WG13 は②~④に該当すると思われる。今後、情報を収集・分析して、これらの条件が該当するかを検討する。
- ・議事録及び最終報告書は JGS の Web サイトに公開される。

- ・ WG12「岩石の繰返し強度試験方法基準化」の最終報告書を回覧した。岡田幹事が、電子ファイルの入手方法を連絡する。
  - ・ WG13は岩石（室内）のみならず岩盤（原位置）も対象に基準化を検討するが、現在の親委員会は「室内」である。岩盤（原位置）について基準化することが決定したら速やかに「地盤調査規格・基準委員会」へ説明する必要がある。谷リーダーが、適宜、利藤委員長と相談することとした。
  - ・ 交通費の精算方法は、口座振り込みにする事とした。
    - 白鷺幹事へ口座番号を連絡する。白鷺幹事から JGS 事務局へ一括して連絡する。
3. 活動方針、作業分担、今後の予定等の説明（岡田幹事、資料 1-6～1-11）
- ・ 工程表（資料 1-6）について了承された。室内試験 G 及び原位置試験 G は、WG の間に、必要に応じて開催することができる。
  - ・ 文献調査リスト（資料 1-7）について：
    - － 手持ち資料を論文リスト（表の左側）に入力し、6 月末までに白鷺幹事まで提出する。
    - － リストの電子ファイルは岡田幹事からメンバーへ送付する。
    - － メンバー全員からのリストを白鷺幹事がまとめ、幹事会（7/12（月）AM）でリストの調査項目（表の右側）を決定する。
  - ・ 一斉試験について（資料 1-10）：
    - － メンバー以外の機関・会社へも働きかける。一軸引張り試験の実績がある機関・会社についての情報があれば WG 内で周知することを確認した。
    - － 目的は、試験装置の仕様・試験条件等の実態と試験結果のばらつきを明らかにすることである。
    - － 供試体は田下凝灰岩で了承された。
  - ・ 作業分担（資料 1-11）は以下のとおりで了承された。岩石のリーダーは羽柴委員→幹事となることで承認された。
    - － 岩石（室内）担当：羽柴幹事、及川委員、小野委員、嶋本委員、早野委員
    - － 岩盤（原位置担当）：岡田幹事、白鷺幹事、中村委員、若林委員
  - ・ 基準化の見込みについて以下の意見があった。

**【岩石】**

- － 基準化できるが、そのレベル（試験装置の仕様など）には留意すべき。
- － ISRM、ASTM ではすでに基準化されており、このレベルを参考にすることができる。
- － 各機関・会社にアンケート調査を実施したらどうか。全体を包含するようなレベルに設定することができる。
- － ニーズについては、原子力施設の周辺斜面の安定問題で最も高い。入力地震動が大きい日本では、今後、他の構造物でも問題になると思われる。

**【岩盤】**

- － 普及度が低いため、基準化は時期尚早かもしれない。試験方法を提案する論文と基準の中間的なもの、あるいは ISO の TR (Technical Report) のようなものは作れる可能性がある。
- ・ アンケート案は、以前に「岩石の一軸・三軸試験の基準検討」で実施した事例を参考に幹事で作成する。事例は谷リーダーが提供することとした。
- ・ 今後の予定：
  - － 第 2 回 WG 9/27 (月) 14:00～ @電中研 (我孫子)
  - － 第 3 回 WG 11/25 (月) 14:00～ @横浜国大
  - － 第 4 回 WG は後日決定

以上

社団法人 地盤工学会  
 岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討WG (WG13)  
 第1回WG幹事会 議事録

日時	平成25年7月12日 10:00~12:00					場所	地盤工学会 3階小会議室				
リーダー	谷 和夫	○	幹事	岡田哲実	○	メンバー	嶋本敬介	×	メンバー	若林成樹	×
幹事	白鷺 卓	○	メンバー	及川寧己	×	メンバー	中村敏明	×			
幹事	羽柴公博	○	メンバー	小野正樹	×	メンバー	早野公敏	×	事務局	齋藤あや	—

配付資料

番号	内容
資料 1S-1	第1回WG議事録
資料 1S-2	文献取りまとめ案
資料 1S-3	アンケート案
資料 1S-4	一斉試験案
資料 1S-5	WG13 工程表

議 題：

1. 文献の取りまとめ方針 (資料 1S-1)

- ・ 「基準および解説を想定して参考となると思われる部分」の「基準および」を削除
- ・ 「試験結果の整理」に「・報告」を追加
- ・ 「サイズ」を「形状・寸法」に変更
- ・ 「含水状態」を「供試体の保管方法」に変更
- ・ 「端面の処理」を「供試体の整形の方法」に変更
- ・ 「試験方法」の下位は「接着・載荷方法」「計測方法」に変更
- ・ 「試験装置」を追加。その下位を「球座の有無」「装置の容量」とする。
- ・ 「その他注目すべき点」を削除
- ・ 「研究の目的 (あるいは概要)」を「概要」に変更し、「30字程度」と加筆
- ・ 「引張り強さを求めるニーズに関する情報」を表の中に追加
- ・ 当面は、現在挙がっている文献を取りまとめの対象とする。将来的に、必要に応じて追加する。
- ・ 海外文献が不足していることを案内文に加えて周知する。
- ・ 7/22までにメンバーに担当する文献の取りまとめを依頼し、8/16を回答の締切りとする。

2. アンケート調査 (資料 1S-3)

- ・ 調査内容は、「岩 (岩石・岩盤)・改良土の圧裂試験以外の引張り試験」とする。

- ・ 調査対象は、国研、大学、大手ゼネコンの技研、大手の地盤調査コンサルとし、連絡先リストを作成する。地盤調査コンサルについては全地連に確認する。学会の特別会員へのメール配信も検討する。
- ・ アンケート送付前に、圧裂試験以外で引張り試験を実施した経験のある人の連絡先を収集する。
- ・ 原位置試験は実績が少ないことから、経験者に直接ヒアリングする。
- ・ 三軸引張り試験は、経験があるかないかのみ質問する。その後、個別にヒアリングする。
- ・ アンケートには連絡先（メールアドレスと電話番号）を記入してもらう。
- ・ 設問に、設計において試験の結果（引張り強さや剛性）を考慮したかを質問する。
- ・ ニーズを引き出すためのアンケート（質問）は、設問の作成が容易ではないので、行わない。

### 3. 一斉試験の内容（資料 1S-4）

- ・ 接着方法と球座（試験装置）の違い（ばらつき）を明らかにすること（＝機関の違い）にターゲットを絞って実施する。それ以外の条件（供試体の含水状態、载荷の制御方法等）は指定する。
- ・ ばらつきが評価できるように、1条件当たり4本以上を実施する。
- ・ 供試体は田下凝灰岩とする。
- ・ 载荷の制御方法は変位制御で、破壊に至る時間5～10分を原則とする。田下石凝灰岩を対象とすると、0.0002mm/s程度か。ただし、機械的な遊びも考慮する必要があるため、さらに検討する。
- ・ 参加機関はチラシ、個人的なコンタクト、アンケート結果を参考に依頼する。

### 4. スケジュール確認（資料 1S-5）

- ・ 次回幹事会：8/23（金）10:00～12:00 @地盤工学会

以上

公益社団法人 地盤工学会  
 岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討 WG (WG13)  
 第 2 回 WG 幹事会 議事録

日時	平成 25 年 8 月 23 日 10:00~12:00					場所	地盤工学会 3 階小会議室				
リーダー	谷 和夫	○	幹事	岡田哲実	○	メンバー	嶋本敬介	×	メンバー	若林成樹	×
幹事	白鷺 卓	○	メンバー	及川寧己	×	メンバー	中村敏明	×			
幹事	羽柴公博	○	メンバー	小野正樹	×	メンバー	早野公敏	×	事務局	齋藤あや	—

配付資料

番号	内容
資料 2S-1	第 1 回 WG 幹事会議事録
資料 2S-2	第 1 回親委員会（室内試験規格・基準委員会）議事録
資料 2S-3	文献調査取りまとめ
資料 2S-4	アンケート調査（案）
資料 2S-5	一斉試験（案）
資料 2S-6	WG13 工程表
資料 2S-7	基準化 WG 設立趣意書（動的試験）

議 題：

1. 前回幹事会議事録の確認（資料 2S-1）
  - ・ 了承された。
  
2. 親委員会議事録の確認（資料 2S-2、2S-7）
  - ・ 岡田幹事の任期（3 年）が経過したため、白鷺幹事が後任として引き継ぐ。
  - ・ 9 月に WG13 の設立趣意書を提出する必要がある。
    - 室内試験（岩石）については、委員のほぼ全員が「基準化が妥当である」という意見だったので、基準化 WG 設立趣意書を提出する。
    - ◇ 委員の意見の反映はメール審議で行う。
    - 原位置試験（岩盤）については、基準化には慎重な委員も多かったため、現段階では基準化 WG 設立趣意書を提出しない。基準化検討 WG 終了時に、検討の結果を踏まえて改めて判断する。
  
3. 文献調査の取りまとめ方針（資料 2S-3）
  - ・ 「動的繰返し強度・変形試験方法基準化検討 WG」報告書における 6 章に該当するレポートを作成する。

- 締切り 9/27 (金), 3 ページ程度の概要
- 文献調査の結果一覧表を元に、項目立て (目次) と主な結論 (内容) を作成
- 文献調査の結果一覧表の「記載なし」は「-」に置換
- ・ 分担は、原位置試験を 1 グループ、室内試験を 2 グループとする。
  - 原位置試験：谷リーダー、岡田幹事、白鷺幹事
  - 室内試験 (供試体、試験方法、試験装置)：若林委員 (リーダー)、小野委員、中村委員
  - 室内試験 (一軸引張り強度特性・変形特性、圧裂との関連)：及川委員 (リーダー)、早野委員、嶋本委員
  - 室内試験の全体を羽柴委員が統括する。
- ・ 各自所有する論文 (pdf ファイル) を岡田幹事へ送付するよう委員へ依頼する。集まった pdf ファイルは岡田幹事が CD 等に焼き、委員へ配布する。

#### 4. アンケート案 (資料 2S-4)

- ・ 調査の結果を WG の成果にさせることが容易ではないと判断されるので、アンケートの実施は見送る。
- ・ 普及度についての質問に対して、以下を検討する。
  - 大手コンサル 5 社にヒアリングし、情報を得る。
  - 一軸引張り試験に関する論文数、試験本数等をカウントする。
- ・ アンケート実施の見送りについては次回 WG で議論する。

#### 5. 一斉試験案 (資料 2S-5)

- ・ コアを供試体に成形した上で各機関に送付する。
  - 圧裂の載荷軸を明示し、破壊面の方向を一軸引張り試験と一致させる。
  - 一軸引張り試験は、一方式当たり 4 本実施する。
  - 含水条件は乾燥とし、室内自然乾燥で 2 週間とする。
- ・ 詳細は次回 WG で議論する。
- ・ WG 名で論文を提出しても良い。

#### 6. スケジュール確認 (資料 2S-6)

- ・ 次回 WG (9/27) 開催案内の送付時に以下の案内をする。
  - 設立趣意書のメール審議
  - 岡田幹事へ論文 pdf の送付
  - 文献調査の取りまとめのレポート (概要) の作成
  - 電中研の試験施設の見学
  - 懇親会

以上

公益社団法人 地盤工学会  
 岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討 WG (WG13)  
 第 2 回 WG

日時	平成 25 年 9 月 27 日 14:00～17:30					場所	電力中央研究所 3D 会議室				
リーダー	谷 和夫	○	幹事	岡田哲実	○	メンバー	嶋本敬介	○	メンバー	若林成樹	○
幹事	白鷺 卓	○	メンバー	及川寧己	○	メンバー	中村敏明	○			
幹事	羽柴公博	○	メンバー	小野正樹	○	メンバー	早野公敏	×	事務局	齋藤あや	—

配付資料

番号	内容
資料 2-1	第 1 回 WG の議事録
資料 2-2	第 1 回および第 2 回 WG 幹事会の議事録
資料 2-3	第 1 回親委員会（室内試験規格・基準委員会）の議事録
資料 2-4	文献調査の結果一覧表
資料 2-5-1	文献調査①_室内試験（供試体、試験方法、試験装置）
資料 2-5-2	文献調査②_室内試験（試験結果の解釈と利用）
資料 2-5-3	文献調査③_原位置試験
資料 2-6	一斉試験（案）
資料 2-7	アンケート調査（案）
資料 2-8	WG13 工程表
資料 2-9	基準化 WG 設立趣意書（岩石の繰返し強度試験）
資料 2-10	中空円筒供試体を用いた岩盤の引張り試験方法

議 題：

1. 議事録（前回、幹事会、親委員会）の確認（資料 2-1～2-3）
  - ・ 内容を出席者全員で確認した。
  
2. アンケート調査（資料 2-7）
  - ・ 調査を実施しても有益な情報が得られる可能性が低いと想定されることから、実施を見送るという幹事会の考えが説明された。
  - ・ 議論の結果、実施しないこととした。
  - ・ なお、試験の実績・普及度等の情報収集については、文献調査あるいは文献の著者への直接のヒアリング等に対応する。
  
3. 文献調査

- 3 グループから調査結果の取りまとめの方針が紹介された。(資料 2-5-1~2-5-3)
- 3.1 室内試験 (供試体、試験方法、装置) (若林リーダー)
- ・ 基準化というゴールを意識し過ぎずに、まずは各試験方法の長所・短所を整理する。
  - ・ 既存の基準の章立てに合わせて編集する。
  - ・ 問題点や解決すべき課題、基準化の可能性については、メンバー3人の意見を取りまとめて記述する。
- 3.2 室内試験 (試験結果の解釈と利用) (及川リーダー)
- ・ 「2章 寸法効果」と「3章 载荷速度」には、一軸引張強さに影響を及ぼす因子 (何に依存するのか) に関する知見を整理する。
  - ・ 「8章 ひずみの評価方法」と「9章 試験結果の質の評価」は若林チームの担当とする。
  - ・ 6章タイトルの「破壊条件」は「破壊規準」とする。
- 3.3 原位置試験 (白鷺幹事)
- ・ グルーピングをし、既存の基準の章立てを参考にして、各試験方法の比較表を作成する。
4. 今後のスケジュールおよび設立趣意書について
- ・ 次回は、12/2 (月) 15:00~ @横浜国大に変更する。
  - ・ 今年12月には、報告書の8割完成を目指す。
  - ・ 基準化の素案は、次回12/2のWGで結論を出してから作成する。  
→ WG13 工程表 (資料 2-8) の「基準素案の検討」を12月まで延ばす。
5. 一斉試験
- ・ 清水建設では実施できない。東大は時期が未定で、産総研は高橋学氏に確認する。
  - ・ 参加の可能性がある5者には、岡田幹事から確認する。
  - ・ 協同組合 (中部、関西) には、中村委員から確認する。
  - ・ 鉄道総研には、嶋本委員が確認する。
  - ・ 基礎地盤コンサルタンツには、岡田幹事が打診する。
  - ・ 供試体の高さは100mmを基本とするが、実施者の希望に合わせてカットする。
  - ・ ひずみゲージも送付する。
  - ・ 10月中に供試体及びひずみゲージを実施者に送付し、今年11月から来年1月に試験を実施してもらう。
6. JGS 地盤工学研究発表会への論文投稿と Discussion session (DS) の応募
- ・ 文献調査の3チームから各1編、一斉試験で1編を、来年度の研究発表会等に投稿し、会員に成果を還元することを前向きに検討する。著者は、WG名でも良いし、2~3人の担当グループ毎でも良い。
  - ・ 再来年度の研究発表会において、DSの開催も検討したい。

## 7. 基準化に向けての見込みについて

- 室内試験の基準化は、総論としては一同が同意した。
  - 一軸圧縮試験の基準が、過度に装置や手法を限定していないという意味で、良い例となる。
  - どこまで記述・指定するか、留意点をどう記述するか等は検討の要がある。
  - 圧裂試験で求められる引張り強さとは、名称や記号を区別する必要がある。
- 原位置試験の基準化は、WG内でもう少し議論する。

以上

公益社団法人 地盤工学会  
 岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討 WG (WG13)  
 第 3 回 WG 議事録

日時	平成 25 年 12 月 2 日 15:00~17:30				場所	横浜国立大学 土木工学棟 1F 102 室					
リーダー	谷 和夫	○	幹事	岡田哲実	○	メンバー	嶋本敬介	○	メンバー	若林成樹	○
幹事	白鷺 卓	○	メンバー	及川寧己	○	メンバー	中村敏明	×			
幹事	羽柴公博	○	メンバー	小野正樹	○	メンバー	早野公敏	○	事務局	齋藤あや	—

配付資料

番号	内容
資料 3-1	第 2 回 WG 議事録
資料 3-2-1	文献調査①_室内試験（供試体，試験方法，試験装置）について
資料 3-2-2	文献調査②_室内試験（試験結果の解釈と利用）について
資料 3-2-3	文献調査③_原位置試験
資料 3-3	一斉試験案
資料 3-4	WG13 工程表

議 事：

1. 前回議事録の確認（資料 3-1）

内容を出席者全員で確認した。

2. 文献調査（資料 3-2-1~3）

3 グループから調査結果の取りまとめ案が紹介された。

2.1 室内試験（試験方法）：若林委員（小野委員，中村委員）

- ・ 応力制御の最大値 1.0MPa/s は非常に速い。  
 → 動的試験が該当する。通常は「破壊に要する時間が 5~10 分程度」が一般的か。
- ・ 初めて実験を実施する人にインストラクションとなるか。  
 → そのつもりでは書いていない。  
 → 基本的な事項をきちんと記載すれば，実験を実施するための最小限の情報は含まれるのではないか。
- ・ 図-1 と図-2 は，供試体内に一樣な引張り応力を作用させる機構で同じ方式である。図-3 は供試体の特定の面で引張り破壊させる機構で，図-4 は回転中心に引張り応力が最大となる遠心応力場を作用させる機構で，合計 3 種類（4 種類ではなく）の载荷機構（試験の方式）がある。

- ・ 基準案では、試験体の形状は特定しないのか。
  - 形状を特定すると、供試体の設置方式や装置も特定されてしまう。自由度を持たせるために、特定はしていない。
  - 基本は直円柱とし、その他の形状を採用した場合は報告事項に記載させることも可能である。
  - 供試体の形状の観点から、供試体の設置方法や装置のタイプ等を分類・整理できないか。
- ・ 図-3の直接せん断試験機を応用した方法は、どのように引張り破壊させるのか。
  - ひょうたん型の供試体を左右の箱に固定して引っ張る。破壊面が箱間のくびれ部に特定されている。
- ・ 基準案 (pp.5~7) は、文献調査から外して、報告書の最後に移動する。
- ・ ①試験の方式、②供試体の形状、③供試体の設置方法、④載荷方法、⑤計測方法の順に並べ替える。
- ・ 概要と詳述 (参考資料) の2部構成を、1部構成とする。

## 2.2 室内試験 (解釈と利用) : 及川委員 (早野委員, 嶋本委員)

- ・ 章立て (項目案) は過不足ない。
  - 1.1項は「サンプリング時の試料の乱れ」とし、1.1項と1.2項は該当する文献がなければ削除する。
- ・ 「強度」を「強さ」に変更する。(ただし、強度特性はOK。)
- ・ 圧裂試験と一軸引張り試験の結果の比較において、異方性は考慮されているか。
  - 論文に拠る。留意すべきことは指摘する。
- ・ 21-22ページの\*印の3項目は、該当する節・項に移動する。

## 2.3 原位置試験 : 白鷺幹事 (岡田幹事, 谷リーダー)

- ・ 3章 (まとめ) のニーズは、「試験の目的」として最初に移動する。
- ・ 3章 (まとめ) は文献調査から外して、基準化の可否を検討する部分に移動する。
- ・ 表の分類で、孔底での試験 (高田ほか, 2000) の孔の大きさはどの程度か。
  - 径66mm程度か。
- ・ 表の分類で、ブロック引張り試験 (仲村ほか, 2006) は、コンクリートと岩盤の付着強さを求めているのではないか。
  - 論文では、ブロック側の破壊面に岩盤が付着していたと記されていた。
- ・ 2章 (試験結果の整理) について、(1)試験結果は残すが、(2)試験体の形状効果は室内試験の影響因子に移動する。(3)は原位置試験も含めた成果をまとめた文献は紹介するが、原位置試験に無関係の文献 (寸法効果を解析的にのみ検討しているもの等) は外す。

## 3. 基準化の可否

### 3.1 室内試験

- ・ 基準化は可とする。供試体の形状や装置への設置方法等を特定するか。
- ・ 特定すると選択の自由度がなくなるので、幅を持たせた方が良い。
- ・ 一様な応力とひずみが試験体に作用することを検証することを求めたらどうか。  
→ 検証は難しい。
- ・ ばらつきを減らすために基準化するので、網羅的にすると基準として意味がない。
- ・ 基本の形状を特定して、それ以外を採用した場合は報告させることは可能である。
- ・ 基本は一軸圧縮試験と同様に「直円柱を基本とする」と記述するのが良いのではないか。
- ・ 基準化 WG への課題として申し送る。

### 3.2 原位置試験

- ・ 基準化は否とする。
- ・ 各試験方法の実績が少ないこと、技術的に未成熟（研究段階）であることを理由とする。
- ・ 整理した内容は貴重な情報である。WG の報告書として公表する以外にも、引用しやすいように、論文等として公表をする。

## 4. 一斉試験（資料 3-3）

- ・ 超音波伝播速度測定は、電中研で送付前に実施する。
- ・ 試験体には、異方性が考慮できるように、載荷方向のマークがついている。
- ・ 水浸中の試験体は、炉乾燥 24 時間後、送付までデシケータで養生する。
- ・ ひずみゲージのゲージ長は 20mm，リード線付き（2m 程度）とする。1 試験体あたり 4 枚（2 対，東西南北）を軸方向に貼付する。
- ・ 破壊位置が分かるように破壊後の写真・スケッチを報告事項に追加する。
- ・ 各機関は、密度（寸法と質量）を試験前に測定する。
- ・ 試験結果は 1 月末までに幹事に送付し、幹事が取りまとめる。

## 5. 今後のスケジュール及び発表先について（資料 3-4）

- ・ 次回は 2/24（月）14:00～ @地盤工学会（岡田幹事が会場を確認する）
- ・ 親委員会（室内試験規格・基準委員会）への答申（設立趣意書）案は、岡田幹事と白鷺幹事で作成し、12/20 までにメール審議をする。
- ・ 報告書の全体目次は、岡田幹事が作成し、12 月中に全メンバーへ送付する。
- ・ 室内試験の文献調査に関する原稿は、羽柴幹事が取りまとめ、原位置試験の原稿との整合を 3 幹事で調整する。
- ・ 文献調査の内容は、外部発表を積極的に検討する。  
→ 基本的に地盤工学会の学会誌や研究集会を対象とする。  
◇ 地盤工学会誌，地盤工学研究発表会，地盤工学シンポジウム（テーマあり）  
→ 土木学会主催だが岩盤力学シンポジウムも可能か。

以上

社団法人 地盤工学会  
 岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討 WG (WG13)  
 第 4 回 WG 議事録

日時	平成 26 年 2 月 24 日 14:00～17:00					場所	地盤工学会 3F 中会議室				
リーダー	谷 和夫	○	幹事	岡田哲実	○	メンバー	嶋本敬介	○	メンバー	若林成樹	○
幹事	白鷺 卓	×	メンバー	及川寧己	○	メンバー	中村敏明	○			
幹事	羽柴公博	○	メンバー	小野正樹	○	メンバー	早野公敏	○	事務	齋藤あや	—

配付資料

番号	内容
資料 4-1	第 3 回 WG 議事録
資料 4-2	基準化 WG 設立趣意書
資料 4-3	文献調査_室内試験
資料 4-4	報告書構成案
資料 4-5-0	一斉試験の概要
資料 4-5-1	一斉試験の結果 (東大)
資料 4-5-2	一斉試験の結果 (応用地質)
資料 4-5-3	一斉試験の結果 (ダイヤコンサルタント)
資料 4-5-4	一斉試験の結果 (鉄道総研)
資料 4-5-5	一斉試験の結果 (横浜国立大学)
資料 4-5-6	一斉試験の結果 (電中研)
資料 4-5-7	一斉試験の結果 (産総研)
資料 4-5-8	一斉試験の結果 (ブロック別一覧表)
資料 4-6	WG13 工程表
資料 4-7	基準化 WG 工程表

議 事 :

1. 前回議事録等の確認

資料 4-1 を基に、前回議事録を確認した。

2. 親委員会報告

資料 4-2 を基に、基準化 WG の設立が規格基準部会で承認されたことが報告された。なお、表題の「および岩盤」は削除する。

### 3. 報告書案の紹介

資料 4-3, 4-4 を基に、報告書案が紹介された。議論の後、下記のとおり修正することが決まった。

#### (1) 全体構成（目次）

- ・ 基準化 WG の設立趣意書をあとがきの前に加える。
- ・ アンケート案は付録に加えない。

#### (2) はじめに

- ・ 谷リーダーが、次章「基準化検討 WG の設立の経緯と目的」とあわせ、再構成して記載し、岡田幹事に送付する（3/5 まで）。

#### (3) 基準化検討 WG メンバーの構成

- ・ 「勤務先」を「所属」に変更する。

#### (4) 基準化検討 WG 活動の経緯

- ・ 第 1 回 WG 議事録：タイトルのゴシックフォントを明朝に修正する。
- ・ 第 1 回 WG 議事録：メンバーの名前が消えている部分があるので修正する。
- ・ 第 1&2 回 WG 幹事会議事録：事務局、齋藤さんの出欠に「－」を加える。
- ・ 第 2 回 WG 議事録：タイトルのゴシックフォントを明朝に修正する。

#### (5) 試験方法に関する資料収集と整理

- ・ 文献調査の一覧表（表 5.1）が不鮮明なため、鮮明なものに差し替える。

#### (6) 試験方法の基準化に関する検討

- ・ 6.1.2：図表に 6.1.1 に続く番号、およびタイトルをつける。  
※本件については及川委員が修正後、羽柴幹事に送付する（3/4 まで）。
- ・ 6.1.3：タイトルを「基準化にあたっての課題」と修正する。
- ・ 6.1.3：課題について以下の 4 点について箇条書きで記載する。
  - ①一軸引張り試験方法のメリットやデメリットを解説する必要がある。
  - ②圧裂試験、一軸引張り試験の引張り強さの標記をどちらの方法で求めたかがわかるようにする必要がある。
  - ③一軸引張り試験には複数の方法が存在するので整理する必要がある。
  - ④海外では既に基準化されているので国際整合化に対応する必要がある。
- ・ 6.1.3：上記①～④以外に、及川委員がとりまとめた 6.1.2 に記載の課題についても箇条書きで加える。  
※本件については及川委員が修正後、羽柴幹事に送付する（3/4 まで）。
- ・ 6.1.4：基本的に基準化 WG 設立趣意書に記載の文章に変更する。
- ・ 6.2.4：基本的に基準化 WG 設立趣意書に記載の文章に変更する。
- ・ 上記 6.1 に関する修正部分を羽柴幹事が取りまとめ、岡田幹事に送付する（3/5 まで）。
- ・ 上記 6.2 に関する修正部分を岡田幹事が取りまとめる（3/6 まで）。

#### (7) 試験方法の基準化に関する検討

- ・ 本章については 3 月末の完成を目標に記載する。

(8) まとがき

- ・ 谷リーダーが記載し、岡田幹事に送付する (3/5 まで)。

(9) 以上の(7)以外の修正を実施し、3/6に岡田幹事が親委員会に報告書の修正版を送付する。

#### 4. 一斉試験の結果報告

資料 4-5-0～4-5-8 を基に、一斉試験を実施した委員より結果が報告された。質疑の後、以下のことが決まった。

- ・ 資料 4-5-0 の一斉試験の方法の中で「引張り強度」と記載の部分は「引張り強さ」に変更する。
- ・ 岡田幹事が結果の取りまとめ用の一覧表を作成して、一斉試験を実施した者に送付する (3 月前半まで)。 一斉試験を実施した者は表を埋めて、岡田幹事に送付する (3 月後半まで)。 なお、取りまとめ用の一覧表には以下の項目を追加する。

① 一軸引張り試験の破壊時間と破壊ひずみ。

※ひずみについてはゲージ 4 枚平均を使用する。1 枚が計測できてない場合は対面位置の 2 枚平均を使用する。

② 圧裂試験の破壊時間と破壊変位。

③ 圧裂試験における球座使用の有無。

④ 試験前に質量を計測した場合は「試験前質量」。

⑤ 使用した接着剤。

⑥ 一軸引張り試験の破壊位置 (試験面上端からの距離)。

⑦ ひずみゲージ 4 枚のばらつき (偏り度合)。

※定義：最大強さの 50%、90%における (最大ひずみ－最小ひずみ) / (平均ひずみ)

⑧ 超音波速度

#### 5. その他

- ・ 資料 4-6, 4-7 を基に、スケジュールが紹介された。
- ・ 基準化 WG 設立時にメンバーを数名増やすことになった。候補者として、一斉試験に参加してくださった基礎地盤コンサルタンツ (株) の山田眞一氏、改良土を対象に引張り試験に関する論文を執筆されている芝浦工大の並河努教授の名前が挙げられた。その他、公的機関の方やコンクリート関係で引張り試験を専門に実施されている方に参加してもらえないかとの意見があった。
- ・ 基準化検討 WG の成果については、2015 年の地盤工学研究発表会への投稿を目指すこととなった (室内試験関係 2 編, 原位置試験 1 編, 一斉試験数編)。
- ・ 次回基準化 WG は 4～6 月に第 1 回目を開催することとなった。

以上

## 5. 試験方法に関する資料収集と整理

国内外の文献を検索し、岩石（室内）および岩盤（原位置）を対象とした一軸引張り試験に関する文献を収集し、それらを供試体、試験方法、試験装置等に分類した（表 5.1）。表は岩石（室内）および岩盤（原位置）の別に年代順に表示してある。岩石（室内）関係が 117 文献であるのに対して、岩盤（原位置）関係は 8 文献のみであった。







表 5.1(4) 文献調査結果一覧 (室内その4)

発行年	著者名	題名	掲載雑誌	巻号	頁	備考	基準の解法を想定して考慮されると思われる部分				供試体		検定内容		試験方法		試験装置		標準化の参考となる点	概要(30字程度)	引張り強さ(σ <sub>引張</sub> )を求めるコーブに関する情報	科目	
							試験器具	試験方法	試験結果の整理・報告	試験結果の利用	その他	形状・寸法	供試体の保管方法	供試体の成形の方法	個数	強度	変形	接着方法					載荷方法
2003	小野 直人, 黒崎ひろみ	圧縮・引張り試験機の試作	土木学会年次学術講演会講演要録集第3部	58巻	337-338	早野先生リスト	○	○												地大型圧縮・引張り試験機を試作	試作した直接引張りの試験機と注釈試験の結果を比較	粘土の引張強度に関する情報を得るため	嶋本
2003	福井勝則, 大久保誠一, 岩野正太	軸引張力下での三城目安山岩と山下福沢岩の載荷速度依存性	土木学会論文集	No.730	冊-62	59-71	○	○												載荷速度依存性を調べる簡単な方法を提案	応力-ひずみ関係の載荷速度依存性	岩盤構造物の長期安定性を評価するため引張り力下での速度依存性が重要	岡田
2003	井本武夫, 久保田正郎, 島田英樹, 松井紀久男, 福井雄二, 丁基雄, 藤井明, 和田春樹, 藤本一孝	岩石の動的引張強度評価法の検討	資源・素材2003(春季大会)		73-74		○	○												水中衝撃を用いた岩石の動的破壊試験法を検討	発破作業における破壊現象の理解のため	岡田	
2003	柳井健, 八尾真太郎, 伊藤謙志	備前年度の土中水の状態と引張強度の関係について	第8回地盤工学シンポジウム		1-8		○	○												土中水の変化に伴う引張強度の変化を定量的に説明することを目的とし、実験および解析的検討を実施	不飽和土の強度発現機構	岡田	
2004	H.Nakata, S.Chakrabarti, J.Koike	A Direct Tensile Strength Testing Method for Unsaturated Geomaterials	Geotechnical Testing Journal	Vol.27	No.4	1-6	○	○												不飽和粘土・セメントを添加した玄武岩の直接引張試験を実施	舗装の破壊ひび割れ、不同沈下や斜土部の崩壊による引張	嶋本	
2005	藤井幸泰, 竹村貴人, 高橋学, 林為人, 赤岩俊治	異方性を考慮した稲田花崗岩の一軸引張試験の特性	応用地質	第46巻	4号	227-231	○	○												稲田花崗岩のmin. grain, hardwayにそれぞれ平行な一軸引張試験を実施させて、表裏面の断面形状・鉱物組成や割れ目位置を調査		中村	
2005	A. Coviello, R. Lagoia, R. Nova	On the measurement of the tensile strength of soft rocks	Rock Mech. Rock Engng.	38		251-273	○	○												異なる直径の試験片の一軸引張強度を求めた。	一軸引張試験結果、圧縮引張試験結果、面内試験結果などの比較	羽柴	
2005	X. Yu, C. D. da Gama, Y. Na, Q. Wang, Q. Xie	Deformation behaviour of rocks under compression and direct tension	J. S. Afr. Inst. Min. Metall.	105		55-62	○	○												一軸引張試験と一軸圧縮試験でのヤング率を比較した。	一軸引張力下と一軸圧縮力下での変形特性の比較	羽柴	
2005	尾原 祐三	熊本安山岩の応力腐食指数	資源と素材	Vol.121		84-89	○	○												熊本の本都賀圧下での圧縮試験、一軸圧縮試験を行い、応力腐食指数を評価	地層処分施設の長期安定性評価	若林	
2006	藤原裕野, 川崎健, 太田信彦, 榎本秀明, 石田良二	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	日本応用地質学会平成18年学術発表会			29-32	○	○												岩盤斜面に適用可能な載荷試験に着目し、風化程度や異方性に着目した点載荷試験を実施	崩壊発生危険性を評価するため	嶋本	
2006	藤井幸泰, 藤原三郎, 高橋学, 竹村貴人, 林為人	デジタル立体写真測量による、地口岩層の異方性と一軸引張試験面形状の相違について	応用地質	第47巻	5号	252-258	○	○												デジタル写真測量技術を用いて、定量的に表す手法を検討		中村	
2006	香村雄一, 稲田善紀	稲田岩が巨視的破壊に至るまでの微視的破壊挙動に関する考察	資源と素材	Vol.122		65-70	○	○												稲田岩を対象とした異方性について		中村	
2006	S. Okubo, K. Fukui, Q. Qi	Uniaxial compression and tension tests of andesite and loading rate dependence of peak strength	Int. J. Coal Geol.	68		196-204	○	○												一軸引張力下での載荷速度依存性を検討した。	尾原の坑道の安定性に関する基礎データの取得	羽柴	
2006	岸本優介, 嶋野慶次, 飯島大輔, 平野雄大	脆性を重視したコンクリートの一軸引張試験方法に関する検討	コンクリート工学年次論文集	Vol.28	No.1	P.461-466														連続繊維シートと硬質塩化ビニル管を応用した円柱型一軸引張試験方法について検討	コンクリート部材における乾燥収縮ひび割れ予測	若林	
2007	川崎健, 榎本秀明, 太田信彦, 榎本秀明	岩盤斜面の安定性に係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	49-54	○	○												不連続面のある供試体で不連続面の方向が異なる場合の直接引張試験を実施し、点載荷試験と比較	崩壊発生危険性を評価するため	嶋本	
2007	林為人, 高橋学, 中村敏明, 藤井幸泰	稲田花崗岩の引張り強さ・変形特性および異方性・岩石の一軸引張試験と圧縮試験の比較を中心として	地盤工学ジャーナル	Vol.3	No.2	165-173	○	○												引張強さを求める目的であれば、簡便な圧縮試験で概ね満足できる。ただし、複数回の試験が必要。引張り状態の変形特性を目的とするならば、一軸引張は必要不可欠である。	一軸引張試験と圧縮試験との相違点を検討	中村	
2007	林為人, 高橋学, 藤井幸泰, 西山哲, 竹村貴人	軸引張力下における数種類の花崗岩質岩石と堆積岩の引張強度・変形特性	材料	Vol.56	No.7	654-659	○	○												数種類の岩石を用いた変形特性について考察	引張の変形特性を得るためには、圧縮試験だけでなく、引張試験が必要	中村	
2007	Y. Fujii, T. Takemura, M. Takahashi, W. Lin	Surface features of uniaxial tensile fractures and their relation to rock anisotropy in Inada granite	Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.	44		98-107	○	○												一軸引張強度と地力-歪曲線の異方性を検討した。	一軸引張強度と地力-歪曲線の異方性の把握	羽柴	
2007	水田武利, 六塚忠信, 福嶋唯史, 岩瀬裕之	粘性に富む材料と脆性的なコンクリートとを複合させた場合の引張・曲げ破壊挙動	土木学会第61回年次学術講演会			V-331														通常のコンクリートと繊維補強セメントを組み合わせた複合材料の一軸引張挙動と曲げ挙動の比較	繊維補強セメント複合材料を引張り材として利用するため	若林	
2007	田中英樹, 反田治男, 鈴木行次, 藤本繁喜, 飯下直人	原子炉施設基礎の基礎・地盤間の付着力に関する研究(その1 変形試験)	日本建築学会大会学術講演要録集			1073-1074	○	○												基礎とコンクリートの付着強度を求めるための一軸引張り試験を実施	原子炉施設基礎の地震時浮上挙動の評価に必要	白鷺	
2007	独立行政法人原子力安全基盤機構	平成18年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 原子力施設の非線形地盤・構造物相互作用試験及び基礎整備 基礎浮上り評価手法の調査に係る報告書 平成19年7月	07基礎研-0010				○	○												基礎とコンクリートの付着強度を求めるための一軸引張り試験を実施	原子炉施設基礎の地震時浮上り挙動の評価に必要	白鷺	
2007	T.Namikawa, J.Koseki	Evaluation of Tensile Strength of Cement-treated Sand Based on Several Types of Laboratory tests	Soils and Foundations	Vol.47	No.4		○	○												数値解析で試験手法による強度の差を考察	遠心力を利用した新しい引張り試験方法の提案	セメント改良土で引張り強さの評価が必要となることが多い	岡田
2008	林 為人, 高橋学, 藤井 幸泰, 竹村 貴人	軸引張り状態における花崗岩質岩石の破壊後の残留ひずみ	第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集			531-534	○	○												引張破断後の変形挙動を整理し、残留ひずみの挙動について報告	残留ひずみに関する既往の研究例が少ない	小野	

表 5.1(5) 文献調査結果一覧 (室内その 5)

発行年	著者名	題名	掲載誌	巻号	頁	備考	岩石 (種別)	岩盤 (層位)	基準の解法を想定して参考となると思われる部分					供試体		検定内容		試験方法		試験装置		基準化の参考となる点	概要(30字程度)	引張り強さ(σ引張)を求めるモードに関する情報	脚注	
									試験結果 の整理・報告	試験結果 の解釈と利用	その他	種類	形状・寸法	供試体の保管 方法	供試体の整形の方法	個数	強度	変形	接着方法	載荷方法	載荷速度					変形の計測方 法
2008	藤井 幸義, 高橋 孝, 杉戸 明彦	稲田花崗岩の二軸引張り試験の精度評価—レーザー写真測量を用いて—	深田地質研究所年報		9号	139-147	○																		小野	
2008	川越純, 増城祐野, 太田信洋, 長谷川 博, 本谷日出男	落石発生時に創成する面の引張強度に関する検討	岩石力学国内シンポジウム	Vol.12	ROM BUN NO.4 6		○																		嶋本	
2008	林為人, 高橋孝, 中村敏明, 藤井幸義	稲田花崗岩の引張り強さ・変形特性およびその異方性—岩石の二軸引張り試験と圧縮試験の比較を中心として—	地盤工学ジャーナル	Vol.3	No.2	185-173	○																		嶋本	
2008	高橋直樹, 高橋孝, 木山民, 竹村真人	封圧下における束縛砂岩の伸縮試験	第12回岩石力学シンポジウム講演論文集			723-728																			中村	
2009	安達 優	コンクリートの引張特性及び試験方法と準直線引張試験の開発	東進土木研究所月報		No.6 70	33-38	○																		小野	
2009	関西電力株式会社	高圧電圧(4号機)の新設機材に用いた耐震安全性評価(中間報告書追補版)に関する補足説明資料 地震応答解析及び耐震安全性評価結果について—安全上重要な建物・構築物—参考資料 2009年11月30日	構造B10-4-2(構造B15-4-5再配布)				○	○																		白鷺
2009	納谷順広, 岡田哲夫	一軸引張り試験による礫岩の引張り強さの評価	第44回地盤工学研究発表会				○																		岡田	
2010	羽柴公博, 大久保誠助, 福井朝司	岩盤状態での岩質の一軸引張り試験	第39回岩石力学に関するシンポジウム講演集			289-93	○																		若林	
2011	青野泰久, 谷 和夫, 岡田哲夫	圧縮引張り試験と一軸引張り試験による土石の引張り強さの比較	第46回地盤工学研究発表会			41-42																			谷	
2011	Aono, Y., Tam, K. and Okada, T	Comparison between splitting tensile strength test and uniaxial tensile test on Tage stone	Proc. 4th Korea-Japan Geotechnical Workshop			79-84																			谷	
2011	藤 隆	弾性上軸方向が難読できる材料に対する圧縮試験による縦弾性係数異方性の決定方法	Journal of the society of materials science, japan	Vol.60	No.3	229-234																			谷	
2011	藤井 幸義, 高橋 孝, 杉戸 明彦, 竹村 真人, 木山 民	二軸引張り試験で形成された束縛砂岩中の割れの形状と形成メカニズム	応用地質	52巻	5号	176-183																			小野	
2011	林 為人, 高橋孝, 中村敏明, 藤井幸義	稲田花崗岩の引張り強さ・変形特性およびその異方性—岩石の一軸引張り試験と圧縮試験の比較を中心として—	地盤工学ジャーナル	Vol.3	No.2	183-173	○																		小野	
2011	羽柴公博, 大久保誠助, 福井朝司	気象状態と湿度状態での岩石の一軸引張り強度と非弾性変	Journal of MMD	Vol.127		2675-681	○																		若林	
2011	青野 泰之	岩石のさまざまな引張り試験の検討	環道国立大学卒業論文				○																		岡田	
2012	高橋 直樹, 高橋 孝, 竹村 真人, 藤井 幸義, 木山 民	二軸引張りおよび二軸伸縮条件下における束縛砂岩の強度・変形特性	応用地質	53巻	3号	12-128	○																		小野	
2012	新田貴恒, 二橋博三, 秋田宏	ひずみ硬化セメント複合材料の一軸引張り試験用治具の開発に関する研究	コンクリート工学論文集	第23巻	2号	81-90																			中村	
2012	真田 昌隆, 岸 裕和, 杉田 祐, 林 及彦, 武部 龍治, 大久保誠助	岩石の強度回復特性—一般化応力緩和挙動に関する研究(N)	JAEA-Research	2012-025			○																		若林	
2012	茂井壯, 岡島隆裕, 廣瀬利明	若材時コンクリートの引張特性に関する実験的検討	土木学会第66回年次学術講演会			V-296	○																		若林	
2013	藤田海斗, 谷 和夫	軟岩を主な対象とした新しい引張り試験方法の開発	第13回岩石力学国内シンポジウム&第6回日韓ジョイントシンポジウム			185-190	○																		谷	
2013	田井隆理子, 早野公敏, 谷 和夫	凍結凍融を用いた固結した地盤材料の引張り強度試験の開発	第48回地盤工学研究発表会			599-600	○																		谷	

表 5.1(6) 文献調査結果一覧 (室内その 6)

発行年	著者名	題名	掲載雑誌	巻号	頁	備考	岩石 (室内)	岩盤 (原位置)	基準の解説を想定して参考となると思われる部分					供試体				検討内容		試験方法				試験装置		基準化の参考となりそうな点	概要(30字程度)	引張り強さ(σ <sub>引張</sub> )を求めるところに関する情報	担当	
									総則	試験器具	試験方法	試験結果の整理・報告	試験結果の解釈と利用	その他	岩種	形状・寸法	供試体の保管方法	供試体の整形の方法	個数	強度	変形	接着方法	載荷方法	載荷速度	変形の計測方法					球座の有無
2013	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		601-602		○	○	○	○				田下凝灰岩	中空円筒形、直径50mm、中央孔8mm、高さ100mm	水中	工作機械使用	9本	○	○	接着剤不明	応力制御(手動)	—	ひずみゲージ	無し	—	将来的に原位置試験を想定した試験方法の提案	中空円筒供試体を用いた引張り試験方法の考案と室内試験装置の開発	設計用地震動の巨大化に対応した耐震設計における引張り耐力の評価	岡田

表 5.1(7) 文献調査結果一覧 (原位置)

発行年	著者名	題名	掲載誌	巻号	頁	備考	岩石 (種別)	岩盤 (原位置)	基準の解釈を想定して参考となると思われる部分					供試体				検討内容		試験装置				基準化の参考となり得る点	概要(30字程度)	引張り強さ(σ引)を求めるコースに関する情報	担当						
									総則	試験器具	試験方法	試験結果 の整理・考 察	試験結果 の解釈と利 用	その他	種類	形状・寸法	供試体の保管 方法	供試体の整形の方法	個数	強度	変形	接着方法	載荷方法					載荷速度	変形の計測方 法	破産の有無	装置の容量		
2009	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	279-282		○							安山岩類, 凝灰岩類, 火山礫岩類, 花崗岩	円筒試体(コアバレルを利用), 直径は記載ないが50mmと思われる。高さ1.5~2D。	原位置試験	-	多数	○		接着なし, コアバレルを利用	応力制御	0.1~1kg/cm <sup>2</sup> /s	-	無し	-	室内の圧縮試験と原位置引張り試験との比較結果あり	ボーリング孔内で容易に実施できる原位置岩盤の引張り試験方法を提案	岩盤区分に利用	岡田		
2006	柳村治郎, 沼村耕一, 村中健二	大型構造物基礎岩盤としての丸瀬埴砂岩の変形・強度特性に関する考察	土木学会論文集C	Vol.62	No.2	412-428		○							砂岩(丸瀬埴(新第三系相良層群)のうち優勢な泥岩)	岩盤平面面に直接コンクリートブロック(接着面300×300mm, 高さ400mm)打設	-	-	4	○		モルタル	-	-	リニアゲージ	破壊	980N×2台	-	室内岩石試験(二軸圧縮), 原位置岩盤試験(平載載荷, センサー, 引張)を実施	大型構造物基礎の設計の際の支持力, 沈下(変形), 予ばりに関する検討を行うために, 合理的で信頼性の高い基礎岩盤の変形・強度特性が必要		白鷺	
2007	田中英明, 反田治男, 鈴木哲夫, 藤吉繁喜, 藤下直人	原子炉施設基礎・地盤の付着強度に関する研究(その1) 要素試験	日本建築学会大会学術講演発表論文集			1073-1074		○	○	○					花崗岩, 砂岩, 凝灰岩	100×100×高さ200mmの角柱	-	縦100×横60mm×高さ100mmの岩盤にコンクリートを100mm打設。横60mm×縦100mmを2割カット。	各岩種12個	○		エポキシ樹脂	-	-	-	-	-	岩盤とコンクリートの付着強度を求めるための一軸引張り試験を実施	原子炉施設基礎の地震時浮上り挙動の評価に必要		白鷺		
2007	独立行政法人原子力安全基盤機構	平成18年度 原子炉施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 原子炉施設の新築形地盤・構造物相互作用試験及び基礎型保 基礎浮上り評価手法の調査に係る報告書 平成19年7月	07基礎保-0010					○	○	○					花崗岩, 砂岩, 凝灰岩	100×100×高さ200mmの角柱	-	縦100×横60mm×高さ100mmの岩盤にコンクリートを100mm打設。横60mm×縦100mmを2割カット。	各岩種12個	○		エポキシ樹脂	-	-	-	ユニバーサルジョイント	-	-	岩盤とコンクリートの付着強度を求めるための一軸引張り試験を実施	原子炉施設基礎の地震時浮上り挙動の評価に必要		白鷺	
2009	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	特報2009-264336, 特報2011-107049					○	○	○					中空円筒	-	ロータリッドリング	-	-	○	○	接着剤等	-	-	外周側面での局所的な変位(軸方向, 周方向)を計測	-	軸のずれを防止するガイド機構等	中空円筒の試験体を利用した原位置岩盤三軸引張り試験の方法を提案した。		谷			
2009	関西電力株式会社	高圧受電所, 4号機 新耐震設計に照らした耐震安全性評価(中間報告書追加編)に関する補足説明資料 地盤応答解析及び耐震安全性評価結果について(安全上重要な建物・構築物)参考資料 2009年11月30日	構造B16-4-2(構造B15-4-5再配布)					○	○	○					花崗岩, 凝灰岩, 石英閃緑岩	100×100×高さ200mmの角柱	-	室内: 100×100×200mmの角柱 原位置: 3辺100mmの立方体	試験岩: 27 花崗岩: 10 石英閃緑岩: 23	○		-	-	-	-	原位置: 圧縮式変位計 原位置: コニバーサルジョイント	室内: 250kN 原位置: 100kN	-	-	岩盤とコンクリートの付着強度を求めるための一軸引張り試験を室内及び原位置で実施		白鷺	
2011	大村泰弘, 伊藤修郎, 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	759-760		○							砂岩(中生界ジュラ系上部の粗粒~中粒の石英及び長石の粘り子からなるアルコックス質)	一辺100mmの立方体	自然	-	5	○			鋼製型枠で覆い, 試験体上の隙間にはモルタルを流し込み, 養生。さらに, 試験体に4本のアンカー(L=250mm)を打設し, 鋼製型枠に固定。	応力制御	10kN/m <sup>2</sup> /min	-	ユニバーサルジョイント	220kN	-	亀裂性岩盤の引張強度の評価を原位置で実施	亀裂性岩盤斜面の地震時安定解析では岩盤の引張強度を全く見込まないが, これを適切に評価できれば, 周辺斜面を代表とする地盤の合理的な耐震安全性評価が可能		白鷺
2013	岡田哲実, 納谷朋次, 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提案	第48回地盤工学研究発表会			601-602		○	○	○					田下凝灰岩	中空円筒形, 直径50mm, 中央孔8mm, 高さ100mm	水中	工作機械使用	9本	○	○	接着剤不明	応力制御(手動)	-	ロゾムゲージ	無し	-	将来的に原位置試験を想定した試験方法の提案	中空円筒形状の試験体を用いた引張り試験方法の提案と室内試験装置の開発	設計用地震動の巨大化に対応した耐震設計における引張り耐力の評価		岡田	

## 6. 試験方法の基準化に関する検討

### 6. 1 岩石の一軸引張り試験方法

岩石の一軸引張り試験方法に関する国内外の主要な研究論文を収集し、現状を整理した。文献収集は岩石および岩石質地盤材料について行った。これらの文献に基づき、一軸引張り試験方法および試験結果の解釈と利用に関する現状と実態、基準化にあたっての課題を検討・抽出するとともに、基準化の必要性について検討した。

#### 6. 1. 1 資料収集等に基づく試験方法の現状・実態

岩石、岩石質地盤材料の一軸引張り強さに関する文献は87編、その内、変形特性を含む文献は57編である。

##### (1) 試験の方式

一軸引張り試験の方式には、①引張り試験機または圧縮試験機を用いる方式、②直接せん断試験機を用いる方式、③遠心載荷試験機を用いる方式などがある。

##### ①引張り試験機または圧縮試験機を用いる方式

・引張り試験機を用いて供試体に直接引張力を作用させる方式

1. 福井ら (1993,1995&1998), 大久保ら (1993), 真田ら (2012), 羽柴ら (2010) : 独自に開発したサーボ試験機。供試体は試験機の上下プラテンに直接接着。(図-6.1 参照)
2. 林ら (2008) : 電気式サーボモータ式材料試験装置。供試体はエンドピースを介してプラテンに固定。
3. 甲村ら (1997) : 油圧サーボ試験機。供試体は試験機の上下プラテンに直接接着。
4. 古関ら (2001), 三平ら (2001, 2002) : 三軸引張試験装置。供試体はユニバーサルジョイントを介して試験機と接続される。
5. P.Townhill (1985) : 試験装置不明。供試体両端は特殊なクランプにより保持。
6. 木下ら (1999) : 試験装置不明。供試体は試験機の上下プラテンに直接接着。
7. 青野ら (2011) : 引張試験装置。供試体は球座を介して試験機と接続される。(図-6.2 参照)
8. I.Hawkes (1973) : インストロン試験装置。供試体は上下プラテンにエポキシ樹脂で接着。ワイヤーを介して試験装置と接続される。
9. 永山ら (1991) : 引張試験装置。供試体は上下プラテンにエポキシ樹脂で接着。
10. 稲田ら (2001) : 引張試験装置。供試体は上下プラテンにエポキシ樹脂で接着。ボールジョイントを介して試験装置と接続される。
11. 藤井ら (2002) : 引張試験装置。供試体は試験機の上下プラテンに直接接着。
12. 林ら (2002) : 引張り試験装置。供試体は試験機の上下プラテンに直接接着。または上端には球座の場合もあり。(図-6.3 参照)

・圧縮試験機の圧縮力を治具により供試体に引張力として作用させる方式  
(中空円筒とジャッキも含む)

- 1.藤掛ら (1998) : 一軸引張試験装置。圧縮力により供試体下側が固定された加力フレームを下方向へ押し下げることで引張力を作用させる方式。供試体の両端面は鋼製取付用治具に接着され、治具はベアリング付アイボルトを介して試験機と接続される。(図-6.4参照)
- 2.安達ら (2009) : 一軸引張試験装置。供試体上下端面をテーパのついた取付用治具へ接着し、ガイドリングにより取付用治具のテーパ部分を保持する。試験機の圧縮力により下部ガイドリングを押し下げることで引張力を作用させる方式。
- 3.大竹ら (1991) : 一軸引張疲労試験機。圧縮力により供試体下側が固定された加力フレームを下方向へ押し下げることで引張力を作用させる方式。球座としてベアリングボールを使用
- 4.岡田ら (2013) : 中空供試体で、中心のセンターガイドに反力を持たせ、曲げモーメントの発生を抑制。(図-6.5参照)

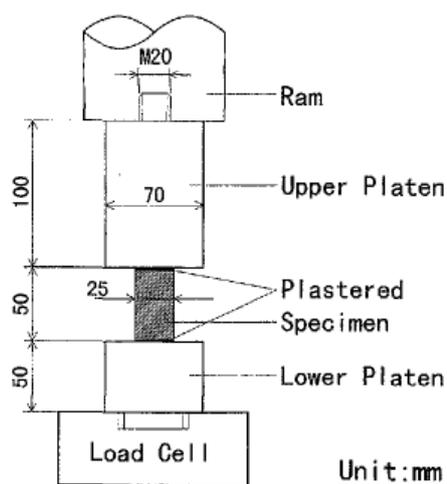


図-6.1 引張り試験機を用いた方式の例  
(1)

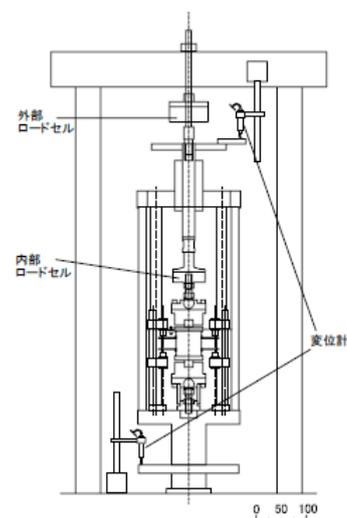


図-6.2 引張り試験機を用いた方式の例  
(2)

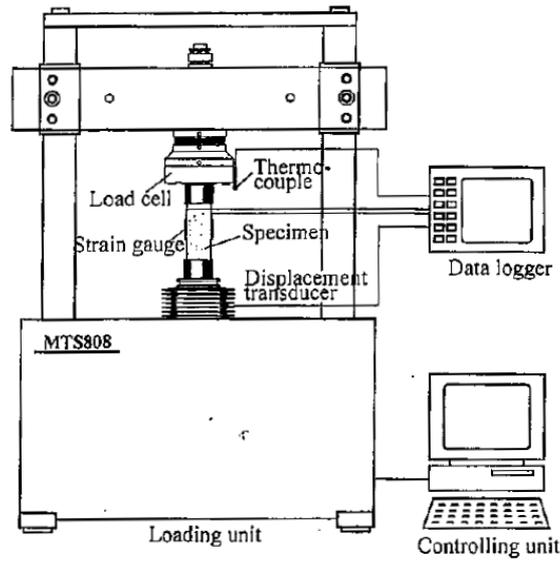


図-6.3 引張り試験機を用いた方式の例 (3)

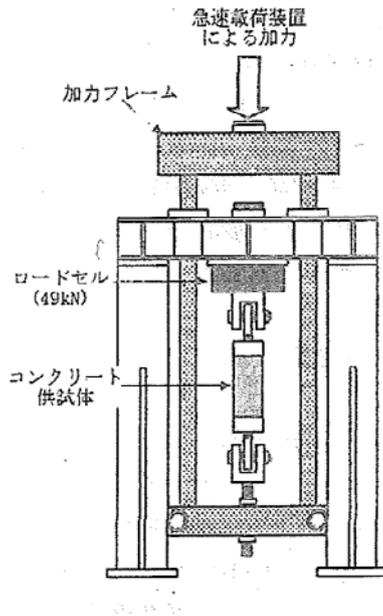


図-6.4 圧縮試験機を用いた方式の例

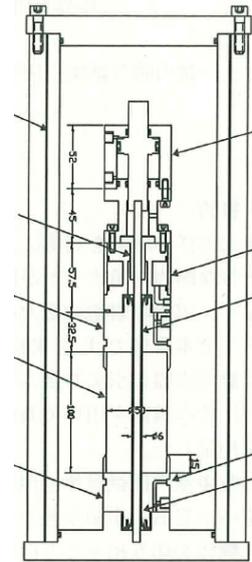


図-6.5 圧縮試験機を用いた方式

②直接せん断試験機を用いた方式

1.H.Nahlawiら (2004), 須永ら (1998) : 直接せん断試験機のフレームを利用した引張り試験機。供試体を 2 つに分かれた箱型容器に収め、これら容器を試験機に固定。水平方向載荷方式。(図-6.6 参照)

2.小野ら (2003) : モーター式圧縮・引張試験機。供試体両端は石膏により試験機へ直接固定。

水平方向載荷方式。

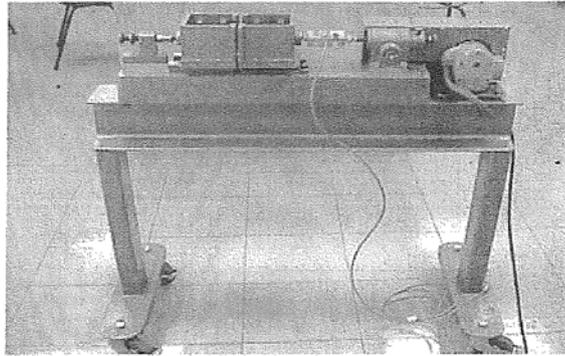


図-6.6 直接せん断試験機を用いた方式の例

### ③遠心載荷試験機を用いた方式

1.田井ら（2013）：遠心載荷試験機。遠心載荷装置で引張力を載荷。錘を両端に接着し、回転速度で引張力を調整。供試体は直径 50mm（図-6.7 参照）

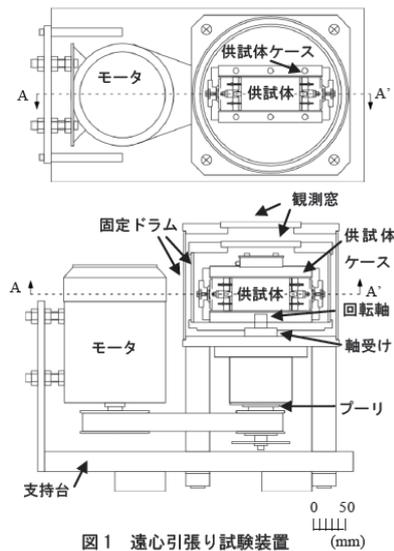


図-6.7 遠心載荷試験機を用いた方式の例

## (2) 供試体の形状

### ①円柱供試体

今回の調査範囲では、円柱供試体を用いて試験を実施している例が最も多く、供試体の直径は 25mm～50mm 程度、直径と高さの比は 1～2 程度を採用している場合が多い（例えば S.Okubo (1996)）。供試体直径の最小および最大値という観点では、G. Wijk (1978) らが、直径 8mm～62mm、高さとの比を 1～4 の範囲で変化させた花崗岩の一軸引張試験を実

施している。また、コンクリートを対象とした一軸引張試験では、直径が 71.4mm の供試体を用いている例もある（藤掛ら（1998））。

また、岡田ら（2013）は中空円筒形を用いている

## ②ドッグボーン型供試体

円柱供試体について多い形状は、供試体中央部にくびれを持たせたいわゆるドッグボーン型と呼ばれる形状（例えば秋哲ら（1995）、古関ら（2001）など）。すべての文献において、供試体上下の固定部から中央のくびれにかけて曲率を持たせている。今回の調査範囲では形状の詳細が示されている文献はあまり見つからなかったものの、ドッグボーン形状についてある程度情報が示されている文献はいくつかある。例を以下に示す。

- ・古関ら（2001）の実験では供試体端部直径が 5cm に対して中央部分の直径は 4cm に成形されている。
- ・岡ら（1968）が行った検討では、試験片の有効長（固定治具間の供試体長さ）は有効直径（くびれ部分の直径）の 1.5 倍以上、2 倍以下とし、有効直径は 25mm～30mm のドッグボーン型供試体を用いて行われている。
- ・P.Townhill（1985）の実験では、供試体上下部分の直径が 45mm、くびれ部の最小直径を 25mm としている。
- ・長谷川ら（1962）：ドッグボーン型（直径 50mm、長さ 190mm）

## ③その他の形状

円柱またはドッグボーン型以外の形状としては、四角柱（たとえば小出ら（2000）、及川ら（1998））や、ひょうたん型（西林ら（1985））などの例があるものの、その採用例は少ない。

## (3) 供試体の設置方法

### ①供試体端面を直接プラテンへ固定する方式

- 1.福井ら（1993,1995&1998）、真田ら（2012）、羽柴ら（2010）：供試体は試験機の上下プラテンに直接接着。接着にはエポキシ系接着剤を使用。
- 2.林ら（2008）：供試体はエンドピースを介してプラテンに固定。エンドピースと供試体の接着はエポキシ系接着剤（アラルダイト）を使用。
- 3.甲村ら（1997）：供試体下側は試験機プラテンに直接接着。供試体上側には球座を使用、供試体と球座下面および球座と上部プラテンはエポキシ樹脂系接着剤で接着。
- 4.木下ら（1999）：供試体とプラテンを直接接着。福井ら（1994）の方法に従う。
- 5.永山ら（1991）：引張試験装置。供試体は上下プラテンにエポキシ樹脂で接着。
- 6.藤井ら（2002）：引張試験装置。供試体は試験機の上下プラテンに直接接着。
- 7.林ら（2002, 2007）：引張り試験装置。供試体は試験機の上下プラテンに直接接着。または上端には球座の場合もあり。（図・6.8 参照）

8.甲村ら（2006）：引張り試験装置。供試体は試験機の下プラテンに直接接着。上は球座。（図-6.9 参照）

②球座を用いる方式

球座にはユニバーサルジョイント，リングチェーン，ローラーチェーン，ボールジョイントなども含む。これらを使用して曲げモーメント，偏芯の影響を低減させる。

- 1.古関ら（2001）：供試体上下部分はユニバーサルジョイントを介して試験機に固定。供試体上下の固定には石膏を使用。固定部分は供試体端面および側面の一部。
- 2.安達ら（2009）：供試体両端面をテーパのついた取付用治具へ接着。接着には FRP シートを使用。
- 3.藤掛ら（1998）：供試体の両端面は鋼製取付用治具に接着され，治具はベアリング付アイボルトを介して試験機と接続される。取付用治具と供試体端面の接着はエポキシ系接着剤を使用。
- 4.I.Hawkes ら（1969）：既往文献のレビューのなかで，エポキシ系接着剤により供試体両端面を取付用治具（鋼製またはアルミニウム製）に接着し，上下の治具を鋼製ケーブルによって引っ張る例が示されている。
- 5.谷ら（1996），青野ら（2011）：エポキシ系接着剤により供試体両端面をアタッチメントに接着。（図-6.10 参照）
- 6.稲田ら（2001）：ボールジョイントを介して試験機に接続。
- 7.菊田ら（2012）：ユニバーサルジョイントを介して試験機に接続。（図-6.11 参照）

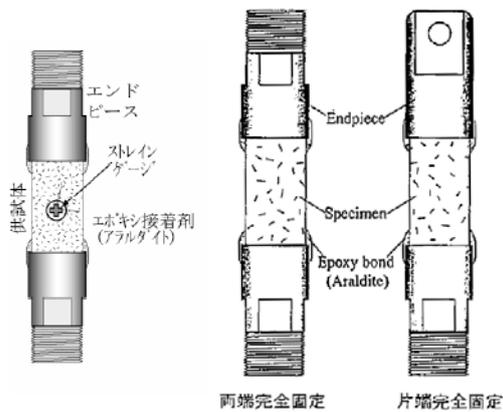


図-6.8 下端は直接固定，上端は球座

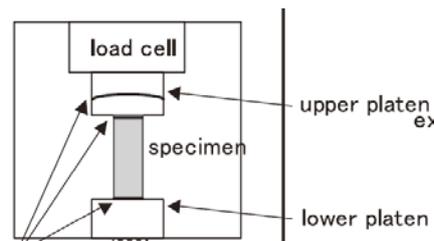


図-6.9 下端は直接固定，上端は球座

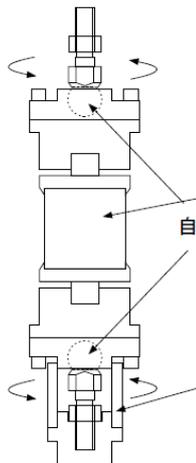


図-6.10 球座などを使用する例

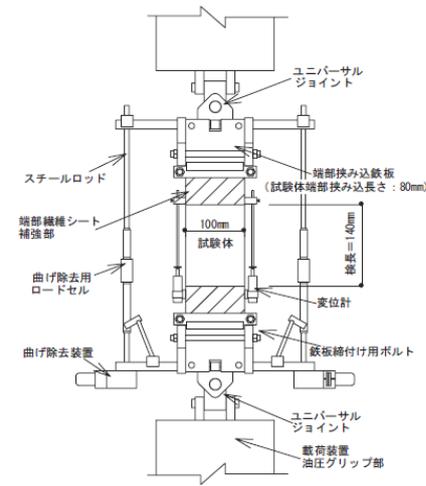


図-6.11 上下端とも球座  
(ユニバーサルジョイント)

③機械的に固定する方式

- 1.H.Nahlawi ら (2004), 須永ら (1998) : 供試体を 2 つに分かれた箱型容器に収め, これら容器を試験機に固定。水平方向載荷方式。
- 2.P.Townhill (1985) : 供試体両端は特殊なクランプにより保持。
- 3.R.Nova (1990) : 供試体両端をウェッジ型グリップで試験機に固定。(図-6.12 参照)
- 4.P.Towinhill (1985) : ドックボーン型の供試体の両端をローラー付きのクランプで挟んで試験機に固定。(図-6.13 参照)
- 5.菊田ら (2012) : チャックにより試験機に固定。(図-6.14 参照)
- 6.福岡ら (1990) : ラバー (空圧) により試験機に固定。(図-6.15 参照)

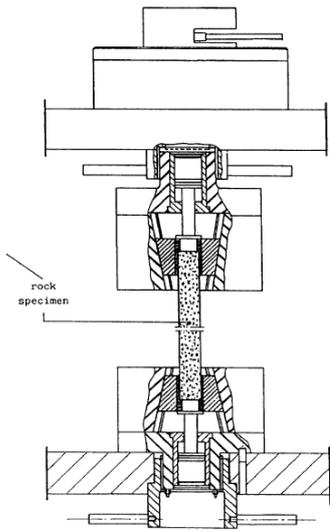


図-6.12 ウェッジ型グリッ

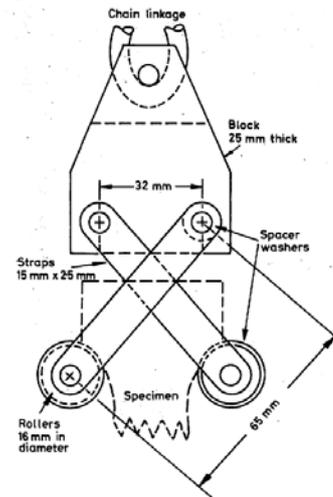


図-6.13 ローラー付きクランプを使用

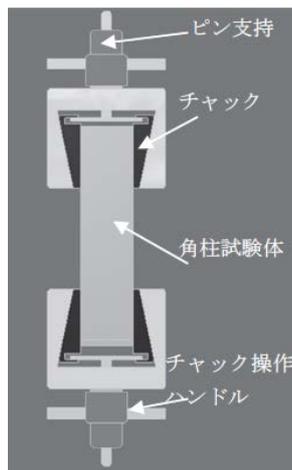


図-6.14 ウェッジ型グリッ

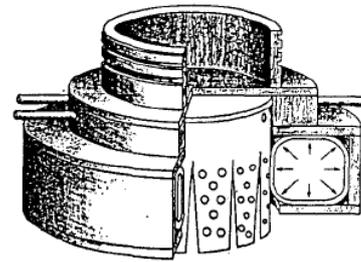


図-6.15 ラバー（空圧）を使用

#### ④軸合わせ治具

偏芯载荷の影響を低減するために载荷軸と試験体の軸合わせを行う治具を使用している例がある。

1. 谷ら（1996），青野ら（2011）：供試体とアタッチメントの軸がずれないように治具を用いて接着する。（図-6.16 参照）
2. 岡ら（1968）：芯合わせ治具（図-6.17 参照）

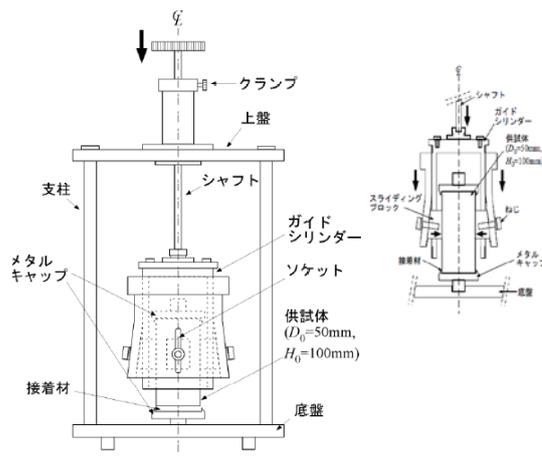


図-6.16 芯合わせ治具の例

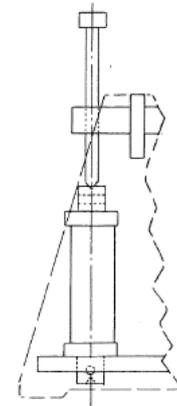


図-6.17 芯合わせ治具

### ⑤接着剤

エポキシ系接着剤を使用している例が圧倒的に多い。そのほかの材料として石膏（古関ら（2001））やFRPシート（安達ら（2009））などがある。また、羽柴ら（2011）、真田ら（2012）は市販されているエポキシ系接着剤よりも水中での接着性に優れた接着剤（ソテック性 D2）を使用して、湿潤状態の岩石の引張強度を求めている。

### （4） 載荷方法

ひずみ制御または変位制御方式を採用している割合の方が、応力制御方式または荷重制御方式に比べて多いようである。

#### ①ひずみ制御方式，変位制御方式

1. 福井ら（1993）： 載荷速度の依存性を検討するために  $10^{-7} \sim 10^{-4} \text{ sec}$  で引張強度が顕著なひずみ速度依存性を示すことを確認。
2. 福井ら（1995）： 載荷速度は  $10^{-6} \text{ sec}$ 。  $1.5 \times 10^{-3}$  レベルのひずみまで計測している。
3. 木下ら（1999）： 載荷速度は  $10^{-7} \sim 10^{-1} \text{ sec}$ 。 引張強度が顕著なひずみ速度依存性を示すことを確認。
4. 林ら（2008）： 載荷速度は  $0.0036 \text{ mm/min}$  で実施。これは  $1 \times 10^{-6} \text{ sec}$  のひずみ速度に相当。 稲田花崗岩を用いた試験に要した時間は  $10 \sim 20$  分程度（破壊ひずみは  $0.0003$  程度）。
5. 羽柴ら（2011）： 載荷速度は  $10^{-6} \text{ sec}$ 。（破壊ひずみは  $0.0005 \sim 0.001$  程度）
6. 古関ら（2001）： 載荷速度は  $0.01 \text{ \%/min}$ 。
7. S.S.Peng（1975）：  $2.2 \times 10^{-3} \text{ s} \sim 2.2 \times 10^{-8} \text{ sec}$
8. G.Wijkら（1978）：  $1 \text{ mm/min}$

#### ②応力制御方式，荷重制御方式

1. 岡ら（1968）：  $3 \sim 10 \text{ kg/cm}^2 \text{ sec}$

2. 藤掛ら (1998) :  $2 \times 10^{-2} \sim 1.5 \times 10^4$  (MPa/sec)。制御をしたのは最低応力速度の場合のみ。それ以外の条件では、応力速度を制御したわけではなく、急速載荷をした結果、計算すると上記のような高応力速度が得られた。
3. 甲村ら (1997) : 0.1MPa/sec。引張強度は 6~8.9MPa。
4. J. Liao ら (1997) : 0.01~0.1MPa/sec

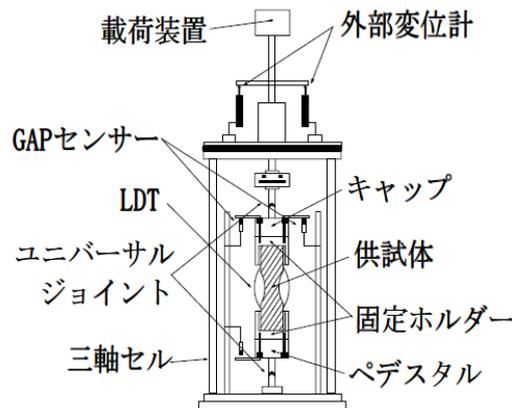


図-6.18 LDT, GAPセンサー, 変位計

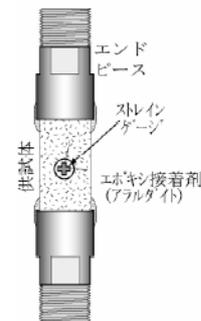


図-6.19 ひずみゲージ

## (5) 計測方法

### ①変位測定

試験体側面に接着した歪みゲージやLDTで測定する場合と治具間の変位を変位計で測定する場合がある。

1. 三平ら (2001, 2002) : LDT, GAPセンサー, 変位計で計測 (図-6.18参照)
2. 林ら (2007) : ひずみゲージ (図-6.19参照)
3. 納谷ら (2009) : ギャップセンサー (図-6.20参照)
4. 甲村ら (2006) : 軸方向は変位計, 周方向はチェーン式変位計 (図-6.21参照)

### ②供試体の作製, 供試体の測定

#### ・供試体端面の整形方法

供試体端面の整形方法については、研磨機により供試体上下端面を研磨している例が多い。研磨作業は、特に供試体をプラテンへ直接接着する方式を採用する場合に重要と思われる。

ISRM 指針では端面並行度 1/1000 以内、側面直線性 0.1mm 以内としている。

1. 藤掛ら (1998) : コンクリートカッターで切断後、研磨機により切断面を研磨。
2. 林ら (2008) : 供試体上下端面を研削盤により研磨、その平行度は $\pm 0.01\text{mm}$  以内。ノギスの最小読み取り精度である  $0.05\text{mm}$  未満であることを確認。
3. 羽柴ら (2011) : 試験片の両端面は、平面研削盤により平行度 $\pm 0.01\text{mm}$  以内に整形。

### ③試験個数

1条件で5, 10, 15本以上と記載されている。

### ④保管状況

- 1.福井ら（1998）：温度 $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $60\pm 15\%$ の室内で2週間以上放置した自然乾燥状態
- 2.秋ら（1998）：温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $65\pm 15\%$ の室内で1ヶ月以上放置した自然乾燥状態
- 3.林ら（2007）：所定の寸法に作成後に $60^{\circ}\text{C}$ で炉乾燥
- 4.甲村ら（2006）：室内で3か月以上乾燥

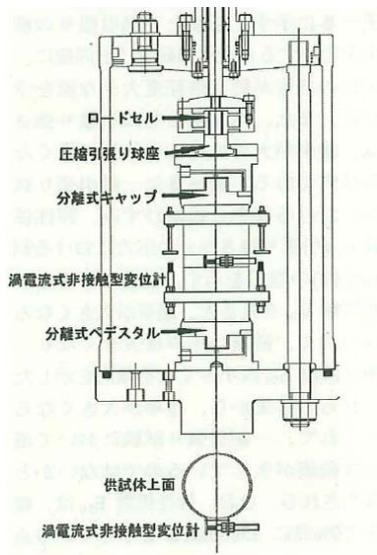


図-6.20 GAPセンサー

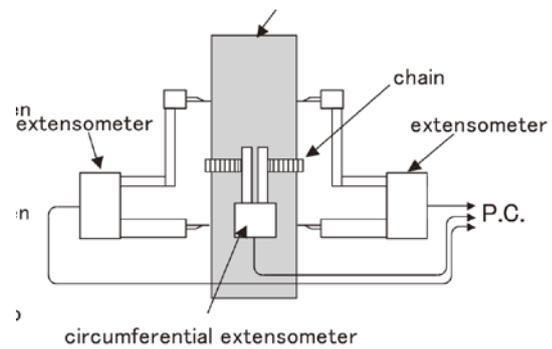


図-6.21 軸方向：変位計，周方向：チェーン式

## 6. 1. 2 資料収集等に基づく試験結果の解釈と利用に関する現状・実態

室内一軸引張り試験に関して収集した文献は 116 編、その内で試験結果の解釈と利用について有用な知見が示されたものは 62 編ある。それぞれの文献の内容において、下記の項目に従って整理することとし、文献に記述がある場合は、文献名とそこに示されている知見の概要を記した。さらに得られた知見に基づき、室内一軸引張り試験結果の解釈と利用の際の留意点等について述べた。

### (1) 一軸引張り強さに及ぼす影響因子

一軸引張り試験では、試験結果に影響を及ぼす幾つかの影響因子があることが知られている。ここでは、含水状態、寸法効果、載荷速度(変形速度)依存性、異方性、不均質性の 5 点に着目して調査を行った。この内、特に含水状態と寸法効果については、原位置岩盤と室内試験における試料の状況の違いを考慮して、その結果を利用する必要がある。

#### (I) 含水状態

岩石を用いた試験では、岩種にもよるが、含水状態では乾燥状態よりも強度は低下することが知られている。本調査でも同様で、特に軟岩の場合は半分ほどにまで低下する例が報告されている。(①,④,⑤) また未固結の粘土を用いた試験では、含水比の影響で強度が変化する例が報告されている。(③) 圧裂引張りの場合も堆積岩の強度低下が報告されている一方で、花こう岩の強度変化は見られないと報告されている。(②)

程度の大小はあるが、含水の影響により一軸引張り強さは低下すると考えられる。室内試験は乾燥状態で実施される場合が主と考えられるが、現場の岩盤は一般に含水状態でありこの点に留意する必要がある。

#### ①発破振動計測と引張強度試験に基づく掘削損傷領域の評価(1999)木下直人, 掘田政國, 松井裕哉, 杉原弘造

花崗岩坑道周囲岩盤の発破時の損傷評価のため、ひずみ載荷速度を変えた一軸引張り試験を実施し、載荷速度依存性を調べて、外挿により発破時の引張り強さを算出

花崗岩の異方性と含水の影響も考慮、

水により強度低下が生じる。ひずみ載荷速度依存性は大きくなる。

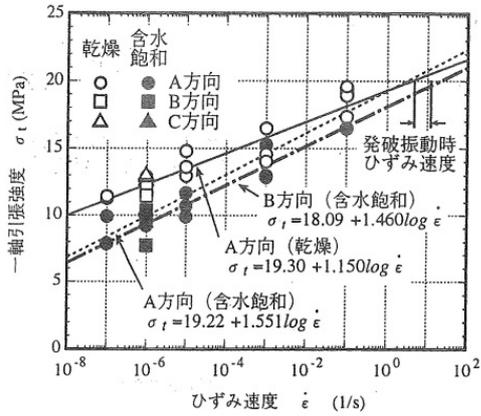


図-6.22 一軸引張強度とひずみ速度の関係および発破振動時における引張強度の推定

②丁祐鎮, 緒方雄二, 和田有司, 瀬戸政宏, 勝山邦久, 小川輝繁: 岩石の引張強度に及ぼすひずみ速度および水分飽和の影響, 土木学会論文集, No.673, III-54, 53-39, 2001  
水分飽和の影響により, 空隙率の高い来待砂岩と田下凝灰岩はそれぞれ 55~57%, 65~68% 圧裂試験による引張り強さが低下した. 一方, 空隙率が小さい稲田花崗岩では乾燥状態と湿潤状態で有意な違いは認められない.

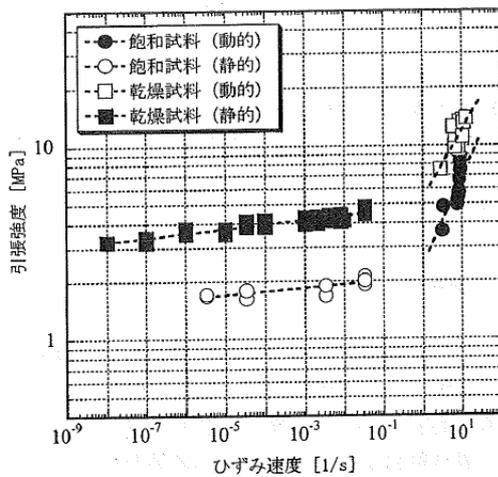


図-6.23 飽和状態及び乾燥状態の来待砂岩における引張強度とひずみ速度との関係

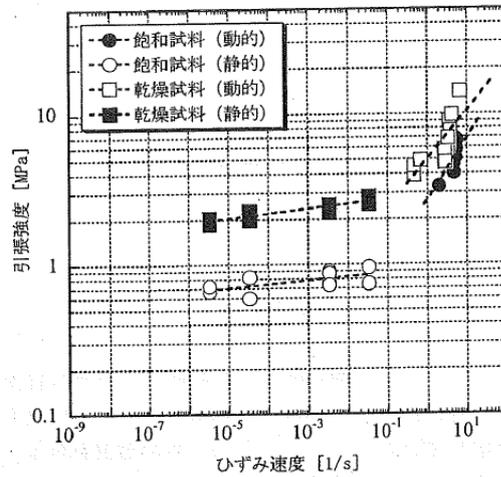


図-6.24 飽和状態及び乾燥状態の田下凝灰岩における引張強度とひずみ速度との関係

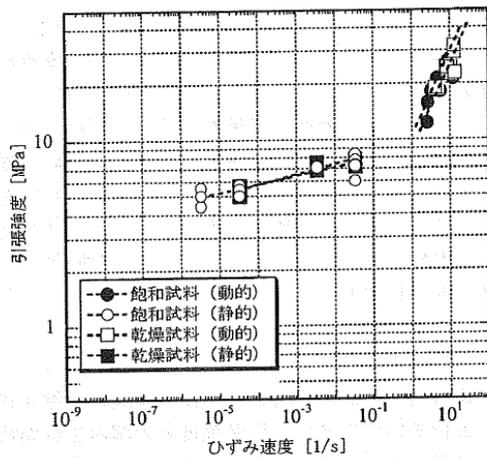


図-6.25 飽和状態及び乾燥状態の稲田花崗岩における引張強度とひずみ速度との関係

- ③備前粘土の土中水の状態と引張強度の関係について(2003)榊井健, 八尾眞太郎, 伊藤淳志  
不飽和土の含水状態と引張り強さの関係について調べた。含水比 10%以下のところで含水比の低下に伴って強度は増加する結果が得られた。毛管力の発現に対応するものと考えられる。

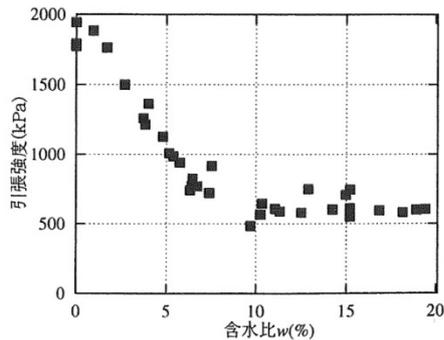


図-6.26 引張強度測定結果

- ④On the measurement of the tensile strength of soft rocks (2005) A. Coviello, R. Lagioia, R. Nova  
軟岩(石灰砂岩, 引張り強さ概ね 1MPa 以下)の引張り強さを、一軸引張り、圧裂引張り、3点曲げ、4点曲げ等の各種試験を行い比較。一軸引張りの寸法効果や含水の影響も調べている。この軟岩の場合は含水させると 40%程の強度低下を生ずる。
- ⑤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(2011)羽柴公博, 大久保誠介, 福井勝則  
一軸引張り試験は通常、乾燥状態の試験片を用いて実施される場合が多いと考えられるより原位置岩盤に近い条件(湿潤状態)での一軸引張り特性の変化をしらべた  
圧裂引張りでは含水により強度低下が生じる、強度の低下は岩種によるが半分になるものも一軸引張りでも同様の例が報告されている  
本報においても、同様に岩種により程度の差はあるが、含水により一軸引張り強さの低下が見られた

表-6.1 Mechanical properties of sample rock.

		Specific gravity	Porosity (%)	Uniaxial tension strength (MPa)		Inelastic strain at peak strength ( $10^{-3}$ )	
				Average	SD*	Average	SD*
Sanjome andesite A	Air-Dried	2.24	13.3	4.3	0.74	76	8.5
	Water-saturated	2.37		1.8	0.20	261	27
Sanjome andesite B	Air-Dried	2.13	17.0	6.3	0.36	176	47
	Water-saturated	2.30		4.1	0.20	429	77
Inada granite	Air-Dried	2.61	1.1	6.6	0.19	117	10
	Water-saturated	2.63		6.1	0.27	148	31
Honkomatsu andesite	Air-Dried	2.24	16.1	5.8	0.59	105	34
	Water-saturated	2.40		3.8	0.60	182	56
Kawazu tuff	Air-Dried	1.88	28.9	3.4	0.75	106	40
	Water-saturated	2.17		1.6	0.23	181	59

\* Standard deviation

また、著しく強度が低下する岩種ではその変形特性も明らかに異なっていた  
変形特性の違いは、非弾性ひずみ成分の増加の仕方によって生じていると考え、実験結果を定性的に説明できた

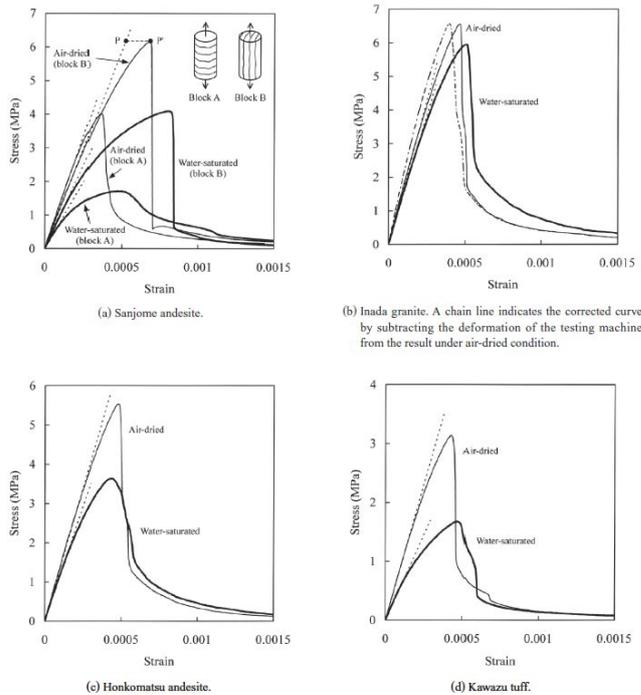


図-6.27 Stress-strain curves in uniaxial tension under air-dried (thin lines) and water-saturated (thick lines) conditions. Dotted lines indicate the initial Young's moduli.

## (II) 寸法効果

寸法効果については、一軸引張り試験の場合は直径の異なる端部ホルダーを用意する必要があり、煩雑であることから例は少ないようだ。岩石を用いた試験では、一般に試験片サイズが大きくなるにつれて強度は低下することが知られている。一軸引張りでは強度低下を報告する①や強度低下が顕著でない④(軟岩)がある。またシミュレーションで検討をした②ではある程度のサイズになるとあまり強度低下しないことが示されている。一軸引張りではないが圧裂引張り

でも直径の増加に応じて強度低下する④や強度上昇する⑤がある。

文献調査では、一軸引張ではサイズが小さいと過大評価する場合は報告されている。室内試験は、現場の岩盤の大きさに比して小スケールであり、過大な強度評価となっている可能性に留意する必要がある。

①Uniaxial Testing in Rock Mechanics Laboratories(1970)I.Hawkes, M.Mellor

ワイブル則を紹介し、

$$\frac{S_{v2}}{S_{v1}} = \left(\frac{V1}{V2}\right)^{\left(\frac{1}{m}\right)}$$

V1,V2;試験片体積, S<sub>v1</sub>, S<sub>v2</sub>;体積 V1,V2 に対応する強度, m 寸法効果を表す定数

コンクリートの一軸引張りで m=24~48、岩石の圧裂引張りで 10 以下という値が示されている。

②強度のばらつきを考慮した一軸引張試験の計算機シミュレーション(1995)趙顕、大久保誠介、福井勝則

寸法効果と载荷速度依存性をシミュレーションで検討

寸法の増大(要素数の増加)による引張り強さの低下は、要素の不均質性が大きいほど顕著であった。一方で寸法がある程度以上大きくなると強度はあまり低下しなくなる。

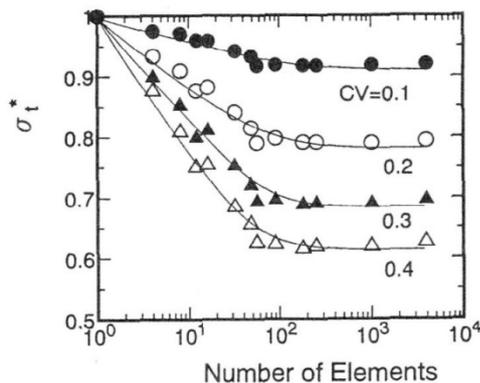


図-6.28 要素数の増大に伴う一軸引張強度  $\sigma_t^*$  の低下。  
一軸引張強度は 10 回の計算結果の単純平均値。  
変動係数以外は標準値を使用。

③セメント安定処理土の圧裂引張試験における寸法効果(1996)林規夫、落合英俊、大嶺聖、安福則之

圧裂引張りのみ、一軸引張りなし

室内試験と現場施工との関係性(寸法効果)、最弱リンク説ベース(ワイブル則?)

室内試験をベースに寸法効果の評価式を決定、現場施工側で確認したわけではない

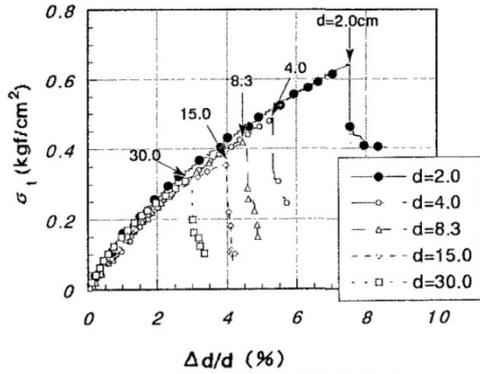


図-6.29 圧裂引張応力と圧縮率の関係  
(セメント添加量300kg/m<sup>3</sup>)

\* 矢印元の数字は試験片の直径

- ④ On the measurement of the tensile strength of soft rocks (2005) A. Coviello, R. Lagioia, R. Nova  
 軟岩(石灰砂岩, 引張り強さ概ね 1MPa 以下)の引張り強さを、一軸引張り、圧裂引張り、3 点曲げ、4 点曲げ等の各種試験を行い比較。一軸引張りの寸法効果や含水の影響も調べている。  
 この軟岩では寸法効果は顕著ではないようだ。

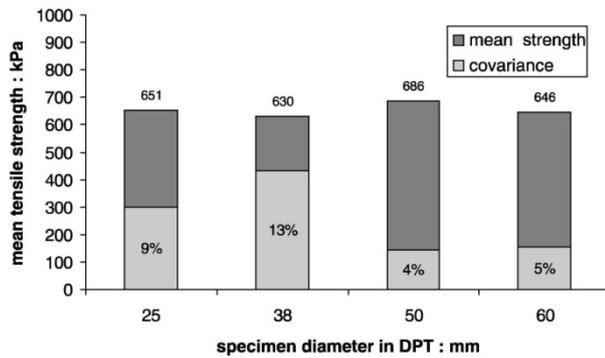
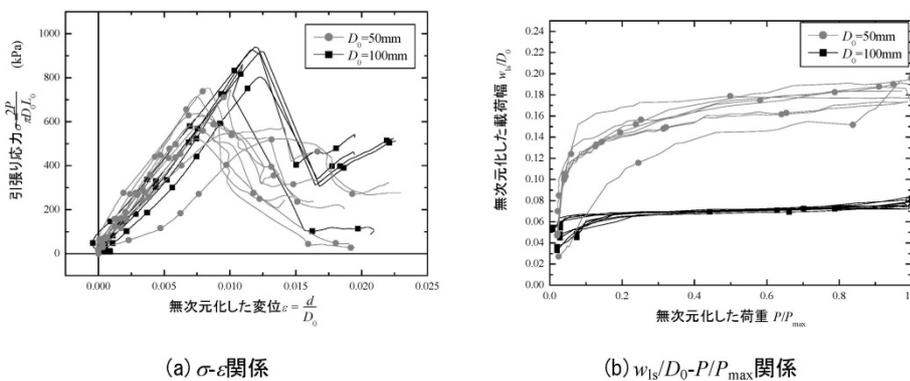


図-6.30 Direct Pull Tests on dry Gravina Calcarenite (Montescaglioso) with various specimen diameters.  
Effect of specimen size on tensile strength

- ⑤ 圧裂引張り試験と一軸引張り試験による田下石の引張り強さの比較(2011)青野泰久, 谷 和夫, 岡田哲実  
 圧裂引張りの寸法効果の記述有り、サイズの大きい方が強い



(a)  $\sigma$ - $\epsilon$ 関係

(b)  $w_s/D_0$ - $P/P_{max}$ 関係

図-6.31 圧裂引張り試験の結果

### (Ⅲ) 載荷速度

岩石の変形破壊挙動には、一般に載荷速度依存性があり、載荷速度が大きくなるにつれて強度は緩やかに上昇することが知られている。一軸引張り試験においても、花こう岩を用いた①、④や安山岩を用いた③、凝灰岩を用いた⑤でこの挙動の発現が報告されている。そして②では、含水によりこの載荷速度依存性が強くなることが、③では圧裂引張り強さや一軸圧縮強さとの相関(増加率がほぼ同じ)が報告されている。また、シミュレーションで検討した①では、サイズが大きくなるに従い、載荷速度依存性が弱くなると報告している。

文献調査では載荷速度依存性があることが示されており、特に発破や地震動などの速い現象を扱う場合は、この載荷速度依存性に留意する必要がある。

#### ①強度のばらつきを考慮した一軸引張り試験の計算機シミュレーション(1995)趙頌、大久保誠介、福井勝則

寸法効果と載荷速度依存性をシミュレーションで検討

寸法の増大(要素数の増加)による引張り強さの載荷速度依存性の低減は、要素の不均質性が大きいほど顕著であった。

一方で寸法がある程度以上大きくなると載荷速度依存性の変化は小さくなる。

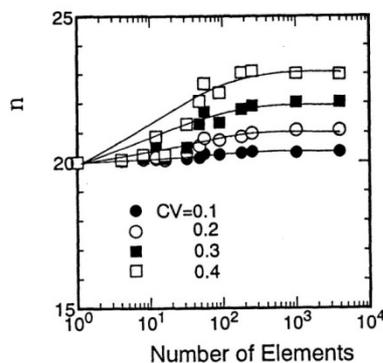


図-6.32 載荷速度依存性を示すパラメータ  $n$  の要素数依存性

#### ②発破振動計測と引張り強度試験に基づく掘削損傷領域の評価(1999)木下直人, 掘田政國, 松井裕哉, 杉原弘造

花崗岩坑道周囲岩盤の発破時の損傷評価のため、ひずみ載荷速度を変えた一軸引張り試験を実施し、載荷速度依存性を調べて、外挿により発破時の引張り強さを算出。

花崗岩の異方性と含水の影響も考慮

含水により強度低下が生じる。ひずみ載荷速度依存性は大きくなる。

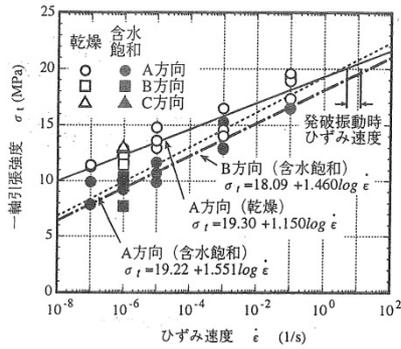


図-6.33 一軸引張強度とひずみ速度の関係および発破振動時における引張強度の推定

③大久保誠介, 金豊年, 秋山政雄: 一軸引張強度と圧裂引張強度の載荷速度依存性, 資源と素材, Vol.109, pp.865-869, 1993

三城目安山岩の試験結果に関する限り, 一軸引張り試験, 圧裂引張り試験, 一軸圧縮試験の載荷速度依存性は互換性が認められた。(載荷速度を10倍ずつ変化させた時の強度の増分を基準強度で割った値は, 全て6%前後。)

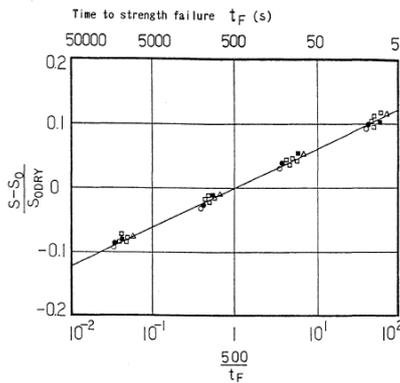


図-6.34 Fig. 9 Comprehensive diagram for loading rate dependency. Ordinate and abscissa are the strength and the loading rate in normalized forms, respectively. cf. eq. (6)

- △ : uniaxial tensile strength in air-dried condition
- : indirect tensile strength in air-dried condition
- : indirect tensile strength in water-saturated condition
- : uniaxial compressive strength in air-dried condition<sup>3) 4) 5)</sup>
- : uniaxial compressive strength in water-saturated condition<sup>4)</sup>

Solid line: fracture toughness obtained by three-point-bending tests on beam specimens<sup>12)</sup>

表-6.2 ble 6 Values of  $S_0$  and  $\Delta S$  obtained by compressive and tensile tests.

Test	Condition	$S_0$ (MPa)	$\Delta S$ (MPa)	$\Delta S/S_0$ (%)	$\Delta S/S_0$ DRY (%)
Uniaxial tension	air-dried	4.30	0.26	6.05	6.05
Indirect tension	air-dried	5.62	0.32	5.69	5.69
	water-saturated	4.09	0.34	8.31	6.02
Uniaxial compression*	air-dried	87.9	5.48	6.23	6.23
	water-saturated	68.3	5.61	8.21	6.38

\* Okubo et al (1992)

④丁祐鎮, 緒方雄二, 和田有司, 瀬戸政宏, 勝山邦久, 小川輝繁: 岩石の引張強度に及ぼすひずみ速度および水分飽和の影響, 土木学会論文集, No.673, III-54, 53-39, 2001

来待砂岩, 田下凝灰岩および稲田花崗岩を対象とした圧裂試験およびホプキンソン効果を利用した実験結果より, 岩石の引張り強さは乾燥状態のみならず飽和状態においてもひずみ速度の増加に伴い増加する。特に乾燥状態の動的引張り強さは岩種によらずひずみ速度の約 1/3 乗に比例する。

⑤福井勝則, 大久保誠介, 岩野圭太: 一軸引張応力下での三城目安山岩と田下凝灰岩の載荷速度依存性, 土木学会論文集, No.730, III-62, 59-71, 2003

載荷速度が一桁増加したときの田下凝灰岩の一軸引張り強さの増加率は、一軸圧縮強さの場合とほぼ同様。またヤング率の増加率も一軸圧縮強さの増加率とほぼ同様。載荷速度依存性をより簡便に求めるために同一の供試体で載荷速度を交互に変える試験を実施し、従来とほぼ同じ結果になることを示している。供試体のばらつきが大きい田下凝灰岩の場合などにとくに有効な試験法である。

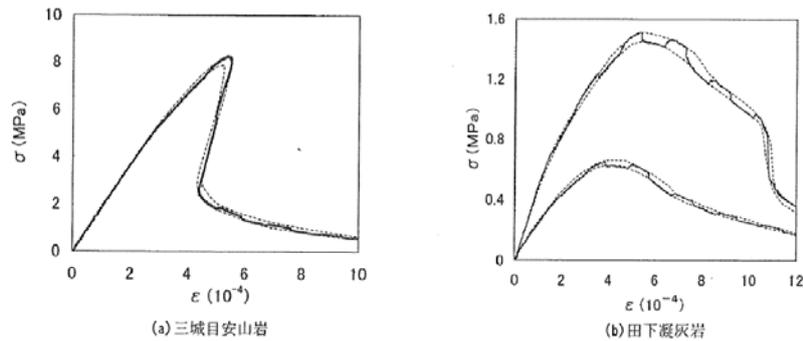


図-6.35 図-11 載荷速度を変化させて得た応力-ひずみ曲線。実線が応力-ひずみ曲線。破線は  $10^{-5}\text{s}^{-1}$  および  $10^{-6}\text{s}^{-1}$  の推定した曲線

#### (IV) 異方性

岩石は程度は異なるが一般に異方性を有する。これはその成因等によるが、直交異方性を示す花こう岩や、面内等方性を示す堆積岩などが知られている。簡便のために等方的に扱う場合も多いが、異方性を考慮すべき場合もある。③では花こう岩の一軸引張り強さ異方性について調べ、リフトと呼ばれるもっともクラックが発達した面に垂直方向の引張り強さの違いが、他の変形特性の違いに比べて端的に大きかったと報告している。①でも同じく花崗岩を対象に、rift面に平行な石英粒内クラックの強い卓越を報告している。②では大谷石の一軸引張試験を行った結果、一軸引張強度は載荷方向で大きな差が見られ異方性を示す一方で、一軸引張破壊時のひずみは載荷方向による差が小さく、応力に比べてひずみは異方性の影響を受けにくいことを報告している。

- ①藤井幸泰、竹村貴人、高橋学、林為人、赤岩俊治 異方性を考慮した稲田花崗岩の一軸引張割れ目の特性，応用地質，第46巻， 4号，227-231，2005

稲田花崗岩を rift 面,grain 面,hardway 面にそれぞれ垂直な方向に一軸引張で破壊したところ、割れ目のほとんどは粒内を通過することがわかった。それぞれの面に平行な壁面構成鉱物比を花崗岩の造岩構成鉱物比と比較すると,rift 面に平行な割れ目は母岩の構成鉱物比とほぼ一致し,grain 面と hardway 面は長石の通過割合が高く石英の通過割合が低い。とくに hardway 面に平行な割れ目はこの特徴が顕著である。この壁面鉱物比の違いは、石英が長石よりも元来割れにくい性質をもつことと、稲田花崗岩中に選択的に配列した初期クラックが原因と考えられる。すなわち rift 面に平行な石英粒内クラックの強い卓越,grain 面に平行な石英粒内クラックの卓越,hardway 面を構成するクラックは石英内と長石内ではそれほど差がない性質を反映していると考えられる。

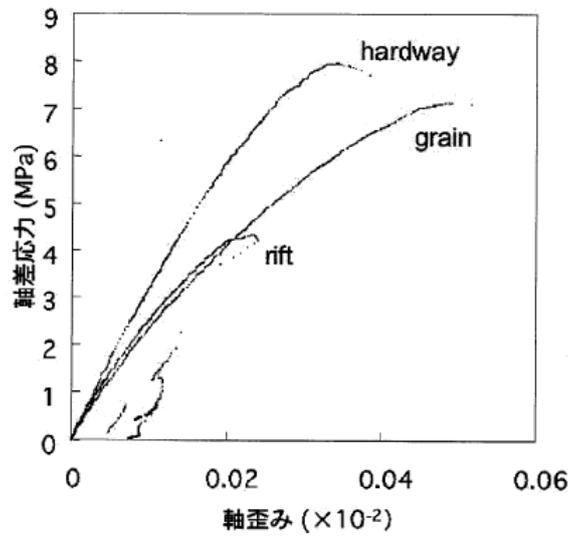


図-6.36 -2 载荷軸方向別の応力—ひずみ曲線

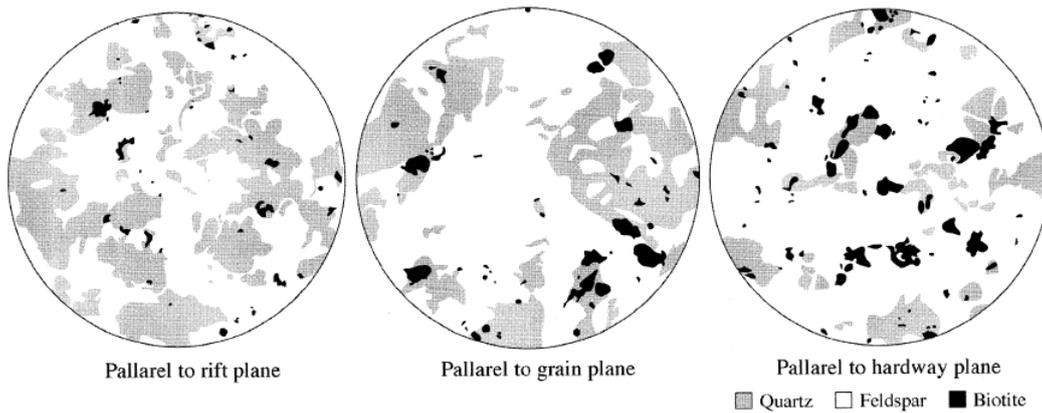


図-6.37 -4 引張割れ目の破断面観察

②甲村雄一、稲田善紀：凝灰岩が巨視的破壊に至るまでの微視的な破壊挙動に関する考察，資源と素材，Vol.122，65-70，2006

大谷石の一軸引張試験を行った結果，一軸引張強度は载荷方向で大きな差が見られ異方性を示す。一方，一軸引張破壊時のひずみは载荷方向による差が小さく，応力に比べてひずみは異方性の影響を受けにくいことがわかった。

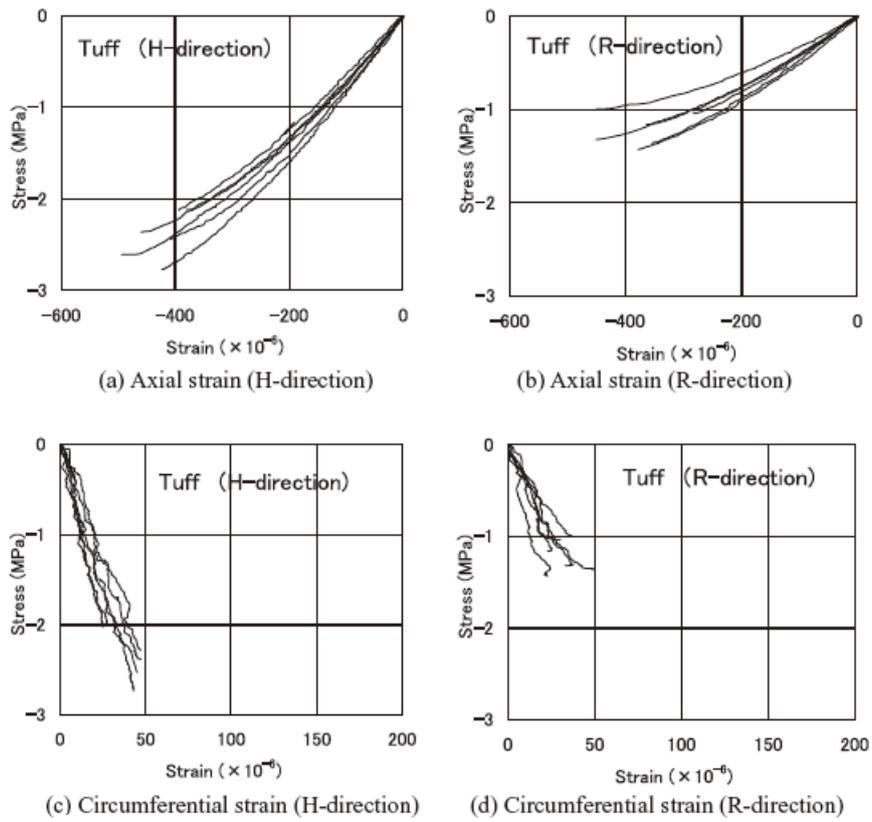


図-6.38 Stress-strain curves obtained by uni-axial tension tests.

③林為人, 高橋学, 中村敏明, 藤井幸泰: 稲田花崗岩の引張り強さ・変形特性およびその異方性—岩石の一軸引張試験と圧裂引張試験の比較を中心として, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, No.2, pp.165-173, 2008.

稲田花崗岩の引張り強さは R 方向で顕著に小さかった。引張り強さの異方性度合いが, ヤング率, 一軸圧縮強さ, 弾性波速度などの異方性度合いと比べてかなり大きかった。

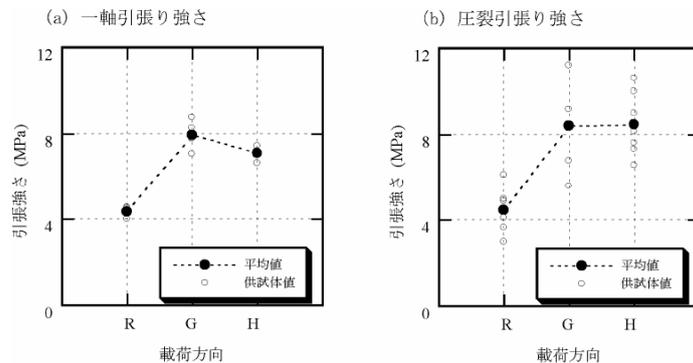


図-6.39 稲田花崗岩の三方向における一軸引張り強さと圧裂引張り強さ

表-6.3 稲田花崗岩の乾燥状態における引張り強さ・変形特性の異方性度合い

物性項目	R, G, H の3方向における			異方性度合い (%)	
	平均値	最大値	最小値		
一軸引張り強さ (MPa)	6.45	7.92	4.34	56	
ヤング率 $E_{50}$ (GPa)	割線	28.5	31.6	26.7	17
	接線	23.7	26.8	22.1	20
圧裂引張り強さ (MPa)	7.09	8.45	4.43	57	
一軸圧縮強さ (MPa)	168	179	163	10	
弾性波速度 (km/s)	P波	4.09	4.31	3.80	12
	S波	2.59	2.65	2.48	7

(V) 不均質性

岩石は様々な大きさの鉱物の集合体であり、一般に不均質性を有する。たとえ一様に微細な粒子からなるように見える岩であってもその不均質性には留意すべきであり、可能であれば事前にP波速度計測等の非破壊手段により不均質性に関するデータを得ておくことは有用である。この不均一性があるため、試験結果は程度の差はあるがバラツキを有する。精度のよい評価には十分な個数の試験を実施することが重要である。

①では一軸引張り強さのバラツキについて実験的に検討している。含水の影響は小さく、圧裂引張り強さと一軸引張り強さのバラツキは大差なく、一軸圧縮強さと一軸引張り強さのバラツキも大差なかったと報告している。

①秋哲淵, 大久保誠介, 福井勝則: 気乾状態と湿潤状態での岩石の圧裂・一軸引張り強度の分布特性, 資源と素材, Vol.111, No.4, pp.231-237

一軸圧縮強さ, 圧裂引張り強さ, 一軸引張り強さはワイブル分布に従う。ワイブル分布の形状関数  $b$  は気乾状態と湿潤状態でさほど変わらない。

$b$  は圧裂引張り強さと一軸引張り強さでほぼ一致する。

$b$  は圧縮強さと引張り強さで大差ない。

(2) 一軸引張り強さと引張り変形特性(ヤング率・ポアソン比)

圧縮領域では、岩石試験において圧縮強さとヤング率は正の相関を示すことが知られている。端的にいえば固い岩ほど強いという傾向があることを意味する。この文献調査でも、②において間接的に一軸引張り強さとヤング率の間に良い正の相関があるとする記述が見られるが、深成岩を対象とするものであり限定的である。そこで、本調査で収集した文献の中から、表形式で一軸引張り強さとヤング率が示されているものをピックアップしまとめてみた。下表がその一覧である。10編の文献から、堆積岩を含む11種の地盤材料のデータが得られた。なおその中には同一試料で力学的異方性を調べたものや、同一試料で載荷速度を変化させたものも含まれている。

表-6.4 各種の岩石の一軸引張り強さとヤング率

岩種	産地名	一軸引張り強さ [MPa]	接線			Note	Reference
			ヤング率 [GPa]	ヤング率(E0) [GPa]	ヤング率(E50) [GPa]		
花こう岩	Barre	13.5		51.7	35.2		1)
	稲田	8.6		32.2			5)
	稲田	6.1			25.0		4)
	稲田	4.3			22.1	*1 リフト	10)
	稲田	7.9			26.8	*1 グレイン	10)
稲田	7.1			22.2	*1 ハードウェイ	10)	
トータル岩	長屋	5.4			9.7		9)
	長屋	9.7			22.0		9)
	長屋	7.5			20.3		9)
	石森	10.2			30.1		9)
花こう閃緑岩	初森	5.6			9.1		9)
	初森	7.2			20.8		9)
	三春	1.7			8.1		9)
	三春	7.7			23.9		9)
斑れい岩	移ヶ岳	12.3			48.1		9)
	移ヶ岳	15.2			46.4		9)
安山岩	三城目	4.3		16.5			5)
	三城目	6.0		18.7	16.6	*2 10 <sup>-7</sup> /s	7)
	三城目	6.2		18.4	16.5	*2 10 <sup>-6</sup> /s	7)
	三城目	6.4		19.1	17.8	*2 10 <sup>-5</sup> /s	7)
	三城目	7.1		20.9	17.6	*2 10 <sup>-4</sup> /s	7)
片麻岩	Luserna	2.5	11.6			*3 0度	3)
	Luserna	2.4	10.2			*3 15度	3)
	Luserna	2.8	14.2			*3 30度	3)
	Luserna	4.5	14.6			*3 45度	3)
	Luserna	5.5	21.3			*3 60度	3)
	Luserna	7.9	19.8			*3 75度	3)
	Luserna	8.8	24.7			*3 90度	3)
石灰岩	Indiana	5.9		37.9	29.6		1)
	砂岩	Berea	1.2	4.8	1.4		1)
砂岩	Chunar	3.0		16.3	7.3		2)
	平島	2.5		15.4			5)
	白浜	2.3		10.3			5)
	誅早	5.9		25.2			5)
	凝灰岩	田下	2.3		7.6		
田下		1.3		3.8	2.3	*2 10 <sup>-7</sup> /s	7)
田下		1.3		4.1	2.5	*2 10 <sup>-6</sup> /s	7)
田下		1.6		4.2	2.8	*2 10 <sup>-5</sup> /s	7)
田下		1.6		4.4	2.8	*2 10 <sup>-4</sup> /s	7)
石炭		Beijing	0.42	1.70			
	Beijing	1.04	3.00				8)
	Beijing	0.57	2.10				8)
	土丹	0.33	0.72			E20	6)

- 1) I.Hawkes, M.Mellor, S.Gariepy (1973) Deformation of Rocks under Uniaxial Tension, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.
- 2) P.Pande & D.P.Singh (1986) Deformation of a Rock in Different Tensile Tests, Engineering Geology
- 3) R.Nova & A.Zanetti (1990) An Investigation into the Tensile Behaviour of a Schistose Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.
- 4) 及川寧己, 山口勉, 福井勝則, 大久保誠介 (1998) 周圧下における岩石の引張試験, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集
- 5) 福井勝則, 大久保 誠介, 清水 剛 (1998) 一軸引張荷重下での岩石の除荷・載荷試験, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集
- 6) 木村有仁, 大久保誠介, 福井勝則 (2001) 土丹の力学特性について, 資源・素材2001(春季大会)
- 7) 福井勝則, 大久保誠介, 岩野圭太 (2003) 一軸引張応力下での三城目安山岩と田下凝灰岩の載荷速度依存性, 土木学会論文集
- 8) S. Okubo, K. Fukui, Q. Qi (2006) Uniaxial compression and tension tests of anthracite and loading rate dependence of peak strength, Int. J. Coal Geol.
- 9) 林為人, 高橋学, 藤井幸泰, 西山哲, 竹村貴人 (2007) 一軸引張状態における数種類の花崗岩質岩石と斑れい岩の変形特性, 材料
- 10) 林為人, 高橋学, 中村敬明, 藤井幸泰 (2008) 稲田花崗岩の引張り強さ・変形特性およびその異方性, 地盤工学ジャーナル

\*1:各異方面に垂直方向に載荷  
 \*2:載荷速度  
 \*3:片理面からの垂直度, 0度が垂直, 90度が平行

この表を基に一軸引張り強さとヤング率を図示したものが下図である。明瞭な正の相関があることが分かる。

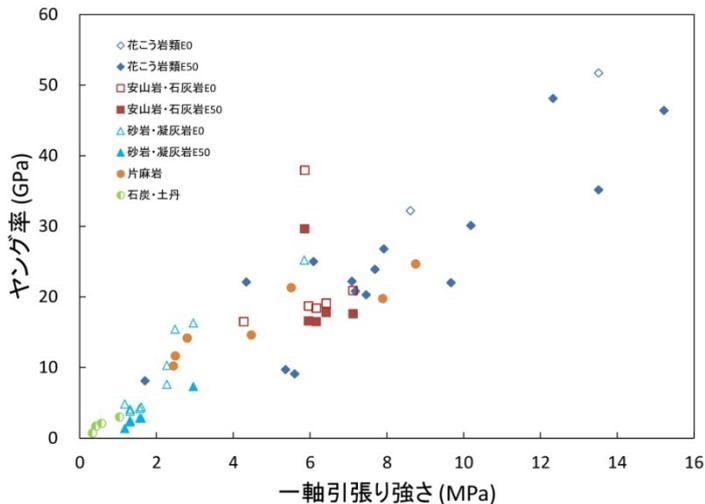


図-6.40 各種の岩石の一軸引張り強さとヤング率の関係

ヤング率とポアソン比の関係では、②で正の相関を示すという報告がある。構成粒子間の結合が弱いほど、ポアソン比も小さくなる（一軸引張り状態の横変形も小さい）と考察している。①では引張り試験中の挙動を調べ、強度破壊点を境に、非弾性ひずみの増加からコンプライアンスの増加へと、変形挙動の質が変化していると報告している。

- ①一軸引張り応力下での岩石の破壊過程に関する研究(1998)福井勝則、大久保誠介、清水剛  
 完全応力-歪曲線と除荷・載荷繰り返しによるコンプライアンス変化  
 応力帰還制御、 0.5MPa 刻みで除荷・載荷  
 強度破壊点以降の挙動含め、コンプライアンスの変化と非弾性ひずみの変化から考察  
 強度破壊点以前は非弾性ひずみの増加が主、強度破壊点以後はコンプライアンスの増加が主

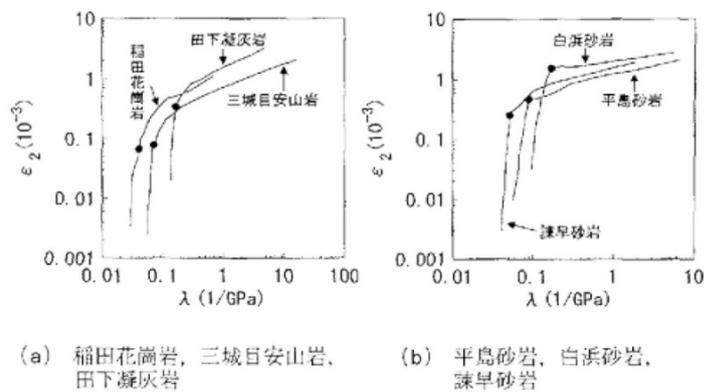


図-6.41 コンプライアンス  $\lambda$  と非弾性歪  $\epsilon_2$  の関係

\*図の黒点が強度破壊点

- (①)一軸引張り荷重下での岩石の除荷・載荷試験(1998)福井勝則、大久保誠助、清水剛、第 10 回岩の力学国内シンポジウム、も同様の内容)
- ②一軸引張り状態における数種類の花崗岩質岩石と斑れい岩の変形特性(2007)林為人、高橋学、藤井幸泰、西山哲、竹村貴人  
 ヤング率とポアソン比の関係  
 引張り側の変形特性(ヤング率とポアソン比)は鉱物粒子間の結合の弱さを反映していると考えられる

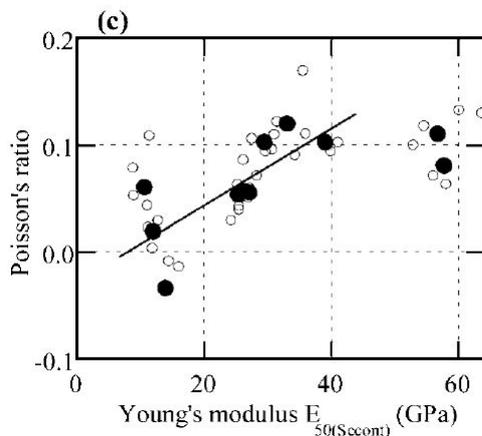


図-6.42 ヤング率とポアソン比の関係

\*ヤング率とポアソン比に正の相関がみられるようだ(60GPa 付近のはんれい岩を除く)

### (3) 他の試験で得られた力学特性等との関係

ここでは一軸引張り強さと他の力学特性との関係について記す。一軸引張り試験は技術的な難しさのために、広く実施されているとは言い難いところがある。一軸引張り試験結果の妥当性について、容易に実施可能な方法で得られる各種の力学特性結果を用いることは有用と考えられる。特に簡便な引張り強さ計測法として広く実施されている圧裂引張り試験との関係は重要である。

#### (I) 圧裂引張り強さ

圧裂引張り試験は、その実施の簡便さから広く用いられている引張り強さ計測法であり、例えば「圧裂による岩石の引張り強さ試験方法」として地盤工学会でも基準化されている(JGS2551-2009)。圧縮試験により引張り強さを求めるという点が最大の特徴であり、一軸引張り試験で必要となる種々の器具は不要である。一方で、試験片内部に圧縮応力が生じたり、試験片の変形による影響が生じたりと、測定法としては得てして過大評価になりやすいという性質があるといわれている。本文献調査においては、そのように差が認められるという報告は⑤⑥⑧⑨⑩⑪、差が認められるがその差は小さいという報告は①④⑦、逆に一軸引張りの方が大きくなるものが②③と⑥の一部である。硬岩と軟岩という観点からは、硬岩( $\sigma_t > 1\text{MPa}$ )では差が小さいと報告されているのが①⑥⑦、差があるというのが⑩。軟岩( $\sigma_t < 1\text{MPa}$ )では差があるというのが⑤⑥⑧⑨⑩、差が小さいのが④、逆転している②と③も軟岩相当である。また力学的異方性を有すると考えられる試料を扱う場合には、圧裂引張り試験の結果と一軸引張り試験の結果を比較する際に、異方軸と引張り軸方向との関係に留意する必要がある。本文献調査においても、⑤⑥⑦では異方性を考慮し引張り軸方向を揃えた上での比較を行っている。

①岩石の引張り強さの測定法(1968)岡 行俊, 小林良二, 高多 明, 西松裕一

一軸引張りと一軸引張りの比較

注意深く行えば実施機関が異なっても結果はほぼ一致

一軸引張り と 圧裂引張りの比較

圧裂引張りがやや大きい目の傾向となるが、検定(5%)で有意な程でもない

\*記述の割に、有意差のあるケースがまみられる

圧裂引張りはバラツキが大きく、試験片形状が結果に影響を与える

表-6.5 1 軸引張強さと圧裂引張強さの有意差の検定

試験者	岩 石	自由度	$t_0$	$t$	棄 却
岡	村田安山岩	33.9	2.05	2.032	○
	秋吉大理石	32.8	0.422	2.035	
	荻野凝灰岩	16.0	1.81	2.120	
小 林	村田安山岩	22.1	3.94	2.074	○
	秋吉大理石	19.3	3.54	2.091	
	荻野凝灰岩	13.8	1.17	2.148	
高 多	村田安山岩	11.0	0.628	2.201	
	秋吉大理石	16.2	0	2.100	
	荻野凝灰岩	17.5	0.112	2.069	
西 松	村田安山岩	19.9	5.74	2.087	○
	秋吉大理石	20.6	6.08	2.082	
	荻野凝灰岩	13.7	2.34	2.150	

$t$ ; 5%検定での境界値、 $t_0 < t$  であれば 95%の確率で有意でない(平均値に差がない)

②セメント改良土の引張強度特性(2001)古関 潤一, 佐藤 剛司

セメント改良粘性土の一軸引張り強さと割裂引張り強さの比較

既往の研究では一軸引張り強さの方がやや大きい値となる

セメント改良砂質土(豊浦砂+セメント+ベントナイト+水)の一軸引張り強さと割裂引張り強さの比較

ドグボーン型の試験片を使う三軸引張り試験装置を使用

Φ50mm×100mm

本研究でも一軸引張り強さの方がやや大きい値となる

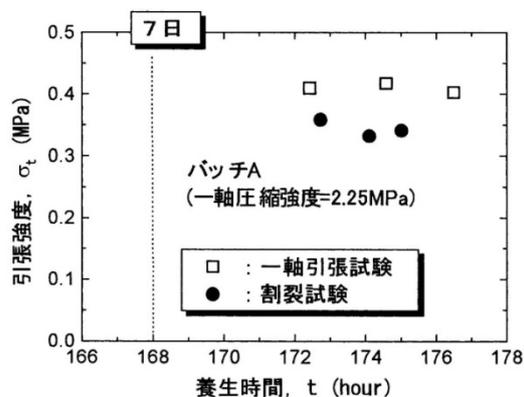


図-6.43 一軸引張強度と割裂引張強度の比較<sup>4)</sup>

③小野直人, 黒崎ひろみ: 圧縮・引張り試験機の試作, 土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ, Vol.58, pp.337-338, 2003.

「徳大型引張り試験機」を試作し, 圧裂試験結果と比較した. その結果, 徳大型の一軸引張り試験による引張り強さは圧裂試験よりも 2 倍大きく, 破壊ひずみは 1/6 であった. これは, 圧裂試験で図のように楔が形成され, 楔部 A-D のせん断抵抗力の水平成分が影響したためと考えられる.

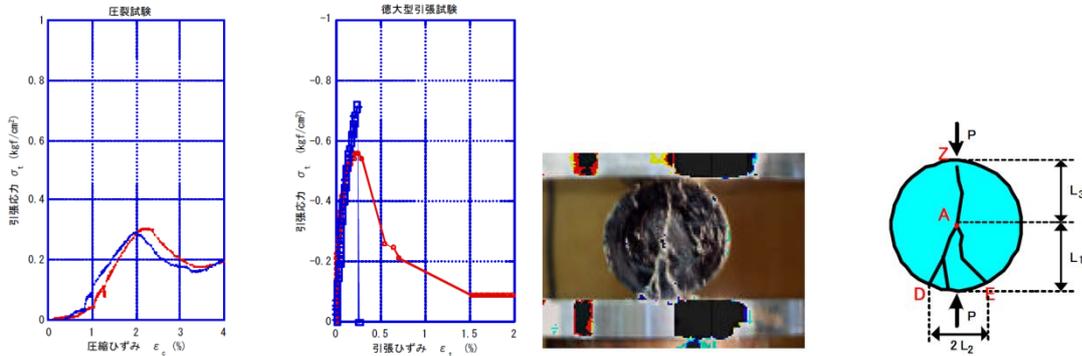


図-6.44 圧裂試験時の応力とひずみの関係 図-6.45 圧裂試験片の破壊の様子

④On the measurement of the tensile strength of soft rocks (2005) A. Coviello, R. Lagioia, R. Nova

軟岩(石灰砂岩, 引張り強さ概ね 1MPa 以下)の引張り強さを, 一軸引張り, 圧裂引張り, 3 点曲げ, 4 点曲げ等の各種試験を行い比較. 一軸引張りの寸法効果や含水の影響も調べている. 既往の研究で一軸引張りとは圧裂引張りなどの間接的に求めるやりかたとの比較を例示(引張り強さ概ね 2MPa 以上の岩). 間接的に求める手法の方が一軸引張りよりも大きい値となる傾向がある. 圧裂引張りは間接的に求める手法の中では比較的一軸引張りに近い値となる. この軟岩でも同様の傾向が見られ, 曲げ試験は大き目の値であるが, 圧裂はほぼ同じ値となっている.

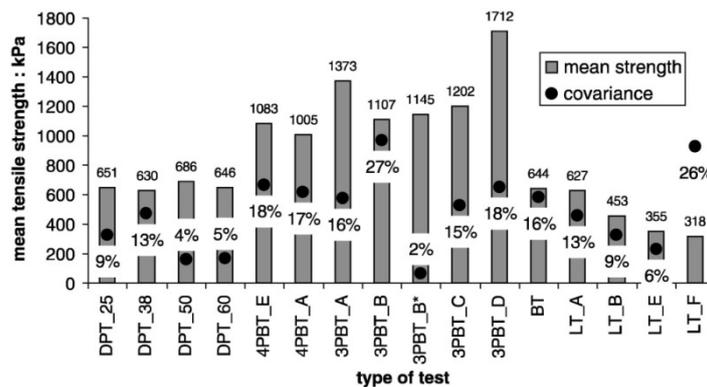


図-6.46 29. Summary of various tension tests results on dry Gravina Calcarenite (Montescaglioso). (DPT\_X:direct pull test, X indicates specimen diameter; 3PBT\_X: three points bending test, letters indicate geometry of Fig. 16; 4PBT\_X: four points bending test, letter indicates specimen geometry of Fig. 16; BT: Brazilian test; LT\_X: Luong test, letters indicate geometry of Fig. 26)

⑤圧裂引張り試験と一軸引張り試験による田下石の引張り強さの比較(2011)青野泰久, 谷 和夫, 岡田哲実

圧裂引張りの方が一軸引張りよりも高めに出る傾向が見える

なぜ圧裂引張りの方が高くでるのかをよく検討している

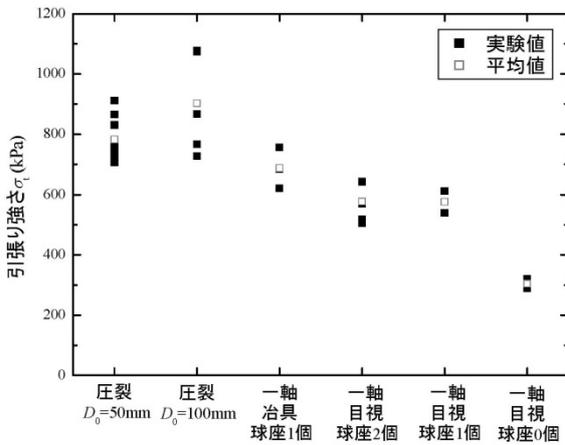
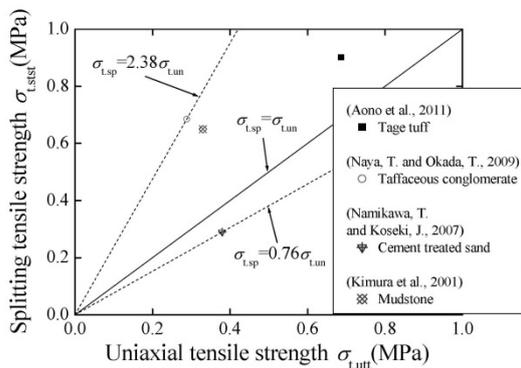


図-6.47 試験の結果

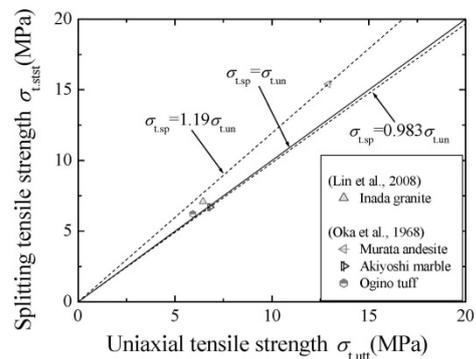
⑥ Comparison between splitting tensile strength test and uniaxial tensile test on Tage stone (2011) Aono, Y., Tani, K. and Okada, T

圧裂引張りの方が一軸引張りよりも高めに出る傾向が見える(強度にもよる)

なぜ圧裂引張りの方が高くでるのかをよく検討している



(a)  $0 \leq \sigma_{t, stst}, \sigma_{t, utt} \leq 1 \text{MPa}$



(b)  $0 \leq \sigma_{t, stst}, \sigma_{t, utt} \leq 25 \text{MPa}$

図-6.48 Relationships between splitting tensile strength and uniaxial tensile strength

⑦ 林為人, 高橋学, 中村敏明, 藤井幸泰: 稲田花崗岩の引張り強さ・変形特性およびその異方性—岩石の一軸引張試験と圧裂引張試験の比較を中心として, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, No.2, pp.165-173, 2008.

圧裂引張り強さは一軸引張り強さよりやや大きめになる傾向が認められたものの, その差は小さかった. ただし, 圧裂引張り試験はばらつきが比較的大きいため, 3 供試体以上の試験数が望ましい.

⑧西林清茂，細谷芳巳，小日向隆：試験法の相違によるセメント混合固結土の引張・曲げ強度特性，昭和59年度土木学会関東支部年研究発表会，Vol.12，pp.109-110，1985.

引張り強さは，割裂引張り強さが最も大きく，ひょうたん形供試体直接引張り試験，円柱供試体直接引張り試験の順であった．円柱供試体で強度が極端に小さいのは接着部分が離れたものが大部分である．

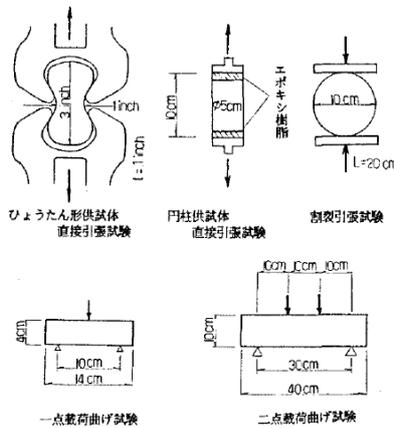


図-6.49 供試体寸法および載荷試験方法

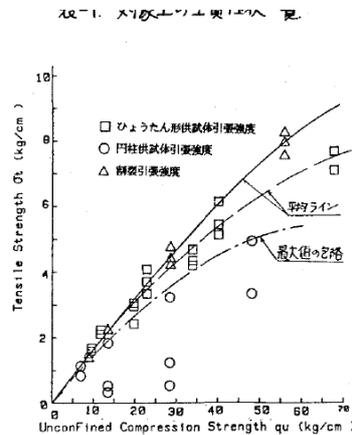


図-6.50 引張強度試験結果

⑨木村有仁，大久保誠介，福井勝則：土丹の力学特性について，資源・素材 2001（春季大会）pp.171-172，2001.

土丹で引張り試験を実施した結果，圧裂引張り強さは一軸引張り強さの約2倍であった．この原因として，土丹の残留強度が大きいこと，土丹の脆性度が低いいため載荷点付近で変形が起きやすいことが考えられる．なお，圧裂引張り試験の破断面は標準的であった．

⑩納谷朋広，岡田哲実，一軸引張り試験による礫岩の引張り強さの評価，第44回地盤工学研究発表会，2009.

新第三系の凝灰質の礫岩を対象に圧裂試験による引張り強さと比較したところ，圧裂試験による引張り強さは，一軸引張り強さの約2倍となった．

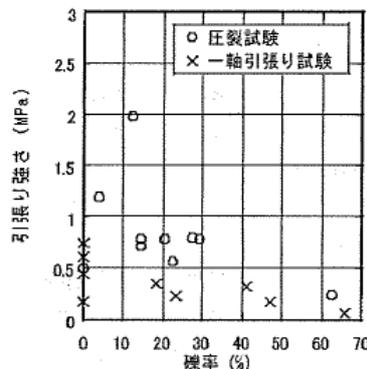


図-6.51 試験結果の比較

⑪羽柴公博，大久保誠助，福井勝則：湿潤状態での泥岩の一軸引張試験，第39回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.89-93，2010.

稚内層珪質泥岩において，地表面と垂直な方向のボーリングコア（水平方向から傾いた層理面

あり)の一軸引張り試験の結果と、層理面に垂直に載荷した圧裂引張り試験結果を比較した。湿潤状態で実施した。その結果、層理面の影響が大きい深度 1000m の岩では、一軸引張り強さは圧裂引張り強さの最小値と同程度であり、平均して 1/4 程度であった。

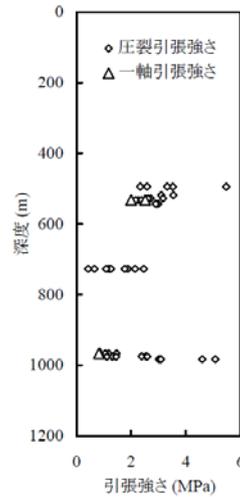


図-6.52 圧裂引張り強さと一軸引張り強さの比較

## (II) 点載荷試験

点載荷試験は現場等で簡便に実施できるように考案された圧縮～引張り型の試験で、圧裂引張りとは違い不定形の試料を対象にしているのと、圧縮強さも同時に評価することも可能である。通常、引張り強さ指数に0.9などの係数をかけた値を引張り強さとすることがよく行われるが、①では一軸引張り試験で得られた値とは大きく違う結果となったことが報告されている。

①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。

堆積面方向に扁平な黒色本質レンズが存在する岩石において、レンズと垂直方向，水平方向のそれぞれについて、一軸引張り試験と点載荷試験を実施した。

その結果、レンズが伸びる方向に引張り応力を作用させた場合の方が強度は大きく、点載荷強さと一軸引張り強さの値は約 2 : 1 であった。

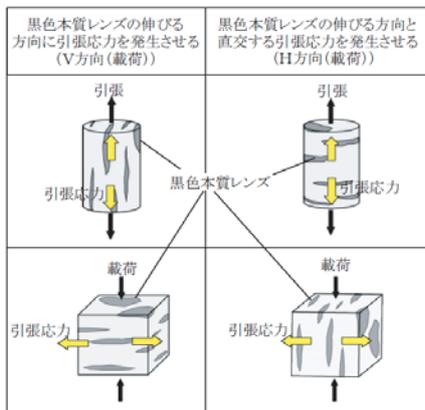


図-6.53 載荷方向と黒色本質レンズの関係

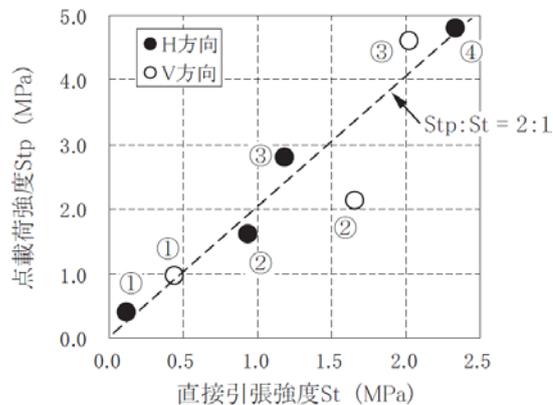


図-6.54 点載荷強度と直接引張り強度

### (Ⅲ) 一軸圧縮強さや圧縮変形特性

本文献調査においては、圧縮試験との比較においては、花こう岩類では引張りの方がヤング率、ポアソン比共に低い値となるようだ。(②③④⑤⑥) 一方砂岩ではヤング率があまり変わらないものも報告されている。(④) また圧縮・引張りの各領域で正規化して比較すると似たような応力-ひずみ挙動となっていると報告されている。(①)

- ①福井勝則, 金豊年, 大久保誠介: 一軸引張荷重下での岩石の完全応力-歪曲線, 資源と素材, Vol.111, No.1, pp.25-29, 1995.

三城目安山岩, 稲田花崗岩, 河津凝灰岩, 多胡砂岩, 来待砂岩, 田下凝灰岩のそれぞれで一軸圧縮試験と一軸引張り試験を実施し比較した. 応力をそれぞれ圧縮強さ, 引張り強さで正規化したものを $\sigma^*$ とすると, 全ての岩石で引張りの方が応力-ひずみ曲線の曲がり始める応力が小さい. 強度破壊点以降の応力-ひずみ曲線の傾きは, 岩によって, 引張りの方が緩やかである場合, 圧縮の方が緩やかである場合があるが, 基本的には両者の曲線は似ている.

- ②甲村雄一, 下河内隆文, 稲田善紀, 上田貴夫(1997)稲田花崗岩の引張応力下における応力-ひずみ特性, 第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol.28, pp.214-218

ヤング率, ポアソン比ともに引張り応力下における値は圧縮応力下における値に比べて小さい.

- ③稲田花崗岩の一軸引張強さおよび引張変形特性(2002)林為人, 高橋学

一軸引張り状態における数種類の花崗岩質岩石と斑れい岩の変形特性(2007)の前論文

引張りのヤング率は一軸圧縮のヤング率の半分

引張りのポアソン比は明らかに小さい

引張り時の応力-ひずみ曲線は一軸圧縮試験時の応力-ひずみ曲線と異なる形状

\*図面省略

- ④Deformation behavior of rocks under compression and direct tension(2005) X. Yu, C. D. da Gama, Y. Na, Q. Wang, Q. Xie

一軸圧縮試験と一軸圧縮~一軸引張り試験を実施し、一軸圧縮時と一軸引張り時の挙動を比較、砂岩、花こう岩、砂質泥岩、花こう片麻岩の4種の岩石を使用

ヤング率は岩種により、圧縮と引張りであまり変わらないもの(砂岩;1/1、花こう岩;1/1.16)と大きく低下するもの(砂質泥岩;1/6、花こう片麻岩;1/2)が見られた。特に砂質泥岩は端的に変化こう片麻岩;1/2)が見られた。特に砂質泥岩は端的に変化。

ポアソン比も同様に、引張りで少し低下するもの(砂岩;1/1.28、花こう岩;1/1.33)と大きく低下するもの(砂質泥岩;1/6、花こう片麻岩;1/2.14)が見られた。

表-6.6 4種類の岩石の一軸圧縮試験及び一軸圧縮～一軸引張り試験結果

	The parameters	Dayao sandstone	Songshujiao granite	Songshujiao mudstone	Xiaowan granite-gneiss
Uniaxial compression test	$E_{CA}$ (GPa)	49.35	66.39	12.32	41.98
	Variation coefficient (%)	18	20	9	15
	$E_{C50}$ (GPa)	50.44	65.40	11.35	36.36
	Variation coefficient (%)	19	29	28	20
	$\nu_{CA}$	0.181	0.153	0.449	0.226
	Variation coefficient (%)	15	31	5	40
Compression-tension test	$\nu_{CS0}$	0.155	0.134	0.305	0.163
	Variation coefficient (%)	14	63	5	26
	$E_{CA}$ (GPa)	49.36	58.60	8.37	36.18
	Variation coefficient (%)	11	25	5	24
	$E_{TA}$ (GPa)	51.31	52.03	2.54	23.49
	Variation coefficient (%)	9	36	16	42
The ratio	$E_{T50}$ (GPa)	51.52	55.47	4.51	28.61
	Variation coefficient (%)	17	34	10	33
	$\nu_{CA}$	0.171	0.124	0.110	0.100
	Variation coefficient (%)	20	33	22	38
	$\nu_{TA}$	0.168	0.096	0.043	0.086
	Variation coefficient (%)	15	40	36	48
The ratio	$\nu_{T50}$	0.144	0.119	0.050	0.104
	Variation coefficient (%)	32	37	25	42
	$E_{CA}/E_{TA}$	1	1.16	6.03	2.05
	Variation coefficient (%)	11	12	14	27
The ratio	$\nu_{CA}/\nu_{TA}$	1.28	1.33	6.19	2.14
	Variation coefficient (%)	18	18	14	57

- ⑤一軸引張り状態における数種類の花崗岩質岩石と斑れい岩の変形特性(2007)林為人、高橋学、藤井幸泰、西山哲、竹村貴人  
 一軸引張りのヤング率は一軸圧縮のヤング率よりも小さいようだ  
 花崗岩類中心に幾種類か試験  
 引張りのポアソン比は明らかに小さい  
 引張り側の変形特性(ヤング率とポアソン比)は鉱物粒子間の結合の弱さを反映していると考えられる

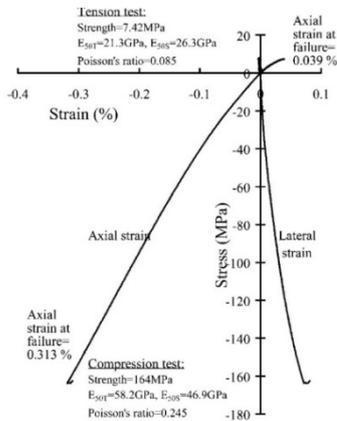


図-6.55 Stress-strain curves in uniaxial tension and in uniaxial compression.  $E_{30T}$  and  $E_{50S}$  denote tangent and second Young's modulus determined at a stress level corresponding to 50% of the strength, respectively.

- ⑥林為人、高橋学、藤井幸泰、竹村貴人(2008)一軸引張り状態における花崗岩質岩石の破壊後の残留ひずみ、第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.531-534  
 一軸引張り試験から求めた、最終強度の50%応力レベルにおけるポアソン比は、トータル岩で0.05、花崗閃緑岩で0.02と、圧縮状態のポアソン比と比較してかなり小さい。

破断位置以外で引張り軸方向に正のひずみが残留した。このことから、局所だけに破断が生じるのではなく、まず全体的にマイクロクラックが発生し、次第にクラックの集中域を形成して最終的に破断に至ると推測される。

#### (IV) P波速度

P波速度は岩石内部のクラック量によって増減するため、その分布の異方性を調べる目的で計測される場合がある。弾性波透過方向のクラック量が多ければ、P波速度は低下しその方向の引張り強さの低下やヤング率の低下をもたらす。①ではP波速度と引張り強さ・P波速度とヤング率に正の相関があると報告されている。

- ①一軸引張状態における数種類の花崗岩質岩石と斑れい岩の変形特性(2007)林為人、高橋学、藤井幸泰、西山哲、竹村貴人  
 花崗岩中心に幾種類か試験  
 P波速度と強度・ヤング率の関係

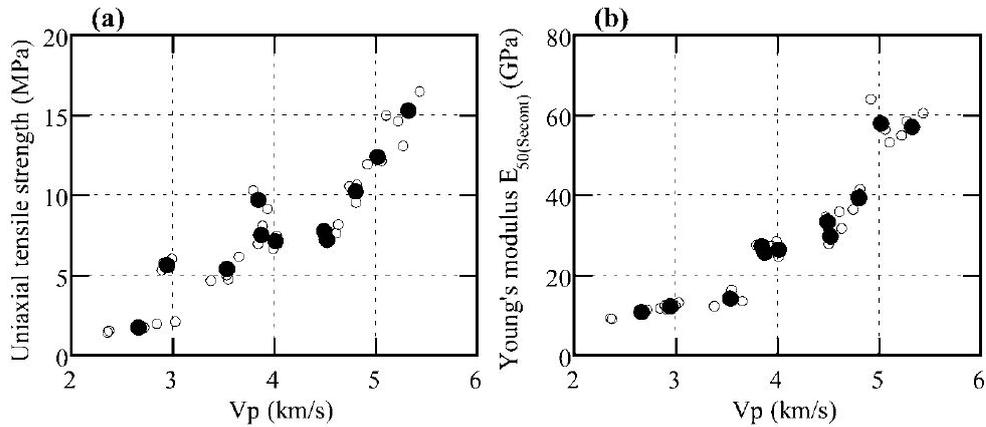


図-6.56 弾性波速度と一軸引張り強さ 図-6.57 弾性波速度とヤング率

#### (V) 破断面形状

破断面形状は引張りによる破壊現象を考察するうえで重要である。①では花崗岩の異方面を使って、破断面形状と強度の関係について調べ、破断面形状が複雑でなくなると強度が低下することを示した。

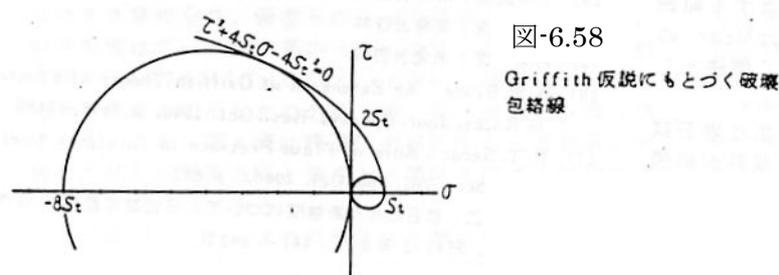
- ①デジタル立体写真測量による、稲田花崗岩の異方性と一軸引張破断面粗度の違いについて(2006)  
 藤井幸泰、堀信三郎、高橋学、竹村貴人、林為人  
 花崗岩の異方面を使って破断面粗度と引張り強さを調べた  
 破断面がもっとも平滑な Rift 面に垂直に引っ張った試料が最も強度が小さい

表-6.7 各試料の破断面粗度と一軸引張強度

試料名	引張強度 (MPa)	RMS (mm)	CLA (mm)	MAX (mm)	$1/\kappa (\times 100)$
R-1	4.53	0.52	0.43	2.68	5.89
R-2	3.99	0.56	0.46	3.05	4.75
R-3	3.49	0.48	0.37	2.71	6.93
R-平均	4.00	0.52	0.42	2.81	5.86
G-1	7.19	0.73	0.62	3.61	8.97
G-2	6.64	0.64	0.53	4.00	8.26
G-3	6.61	0.76	0.63	4.38	7.19
G-平均	6.81	0.71	0.60	4.00	8.14
H-1	8.24	0.83	0.67	4.38	8.99
H-2	8.74	0.71	0.60	3.29	9.15
H-3	7.85	0.83	0.64	4.36	7.63
H-平均	8.28	0.79	0.64	4.01	8.59

(4) 一軸引張り強さを反映した破壊規準

岩石の破壊規準は岩盤の安定性等を評価する場合に重要である。岩石は材料としてみた場合に引張り強さが圧縮強さと比較して極端に低いという特徴を有し、岩盤内構造物等の設計等においては注意を要する。引張強さを基にした破壊規準として、古くはグリフィスの破壊規準が知られているが、これはそもそも単純な形状のき裂が伸びる現象を仮定しているので、試験片全体の破壊を評価する目的には適当でないと評価されている(②)。他にはモールの破壊包絡線(①)やモール-クーロンの破壊規準と引張り強さを組み合わせたものが良く知られている。これら以外にも岩石の破壊規準は様々なものが提案されている。また有効応力と全応力の違いが及ぼす影響も報告されている(④)。



グリフィスの破壊規準

$$\tau^2 + 4St\sigma - 4St^2 = 0, St: \text{引張強さ}$$

岩石のせん断強さ測定法(1968)石原俊, 三沢清扶, 小林良二より

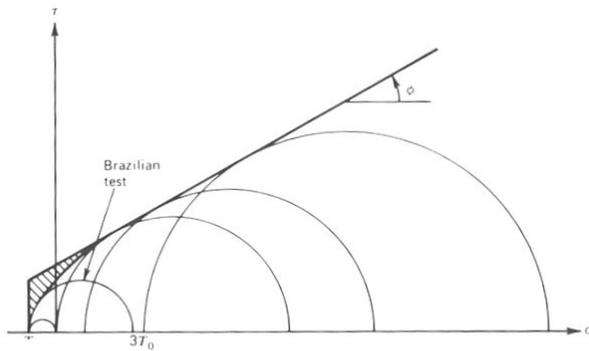


図-6.59 Comparison of empirical envelope and Mohr-Coulomb criterion in the tensile region. Inside the ruled region, the Mohr-Coulomb criterion with tension cutoff overestimates the strength.

モーラークーロンの破壊規準と引張り強さを組み合わせた破壊規準

Introduction to Rock Mechanics(1989)R.E.Goodman より

①New laboratory methods of studying the mechanical properties of rocks(1969)J.Bernaix

岩盤マトリクス強度(破壊規準)を評価

一軸引張り試験は破壊規準を調べるのに、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験とともに実施

破壊規準はモールの破壊包絡線(FIG.9)

得られた強度にはバラツキがあり、そのバラツキを考慮した幅のある破壊規準(intrinsic zone と称し、FIG.9のグレー部)と評価

相対的に一軸試験のバラツキが大きいため、その影響が大きい領域で一面せん断試験を追加実施

バラツキは平均値からやや下に山がくる分布で、いわゆるワイブル則っぽいが、文中コメントなし

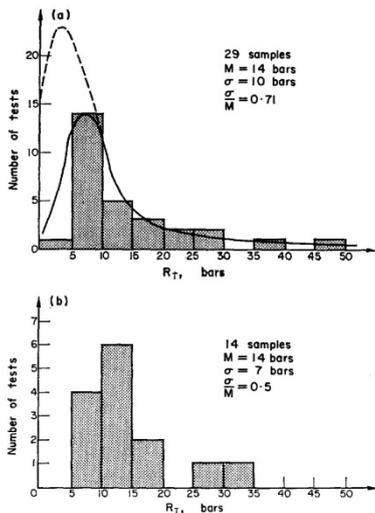


図-6.60 Malpasset M III 2—linear tension. Centrifugal tension—36 mm diameter.

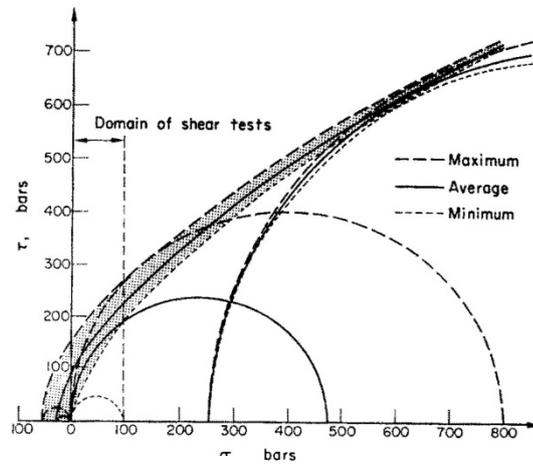


図-6.61 Intrinsic zone.

②Uniaxial Testing in Rock Mechanics Laboratories(1970)I.Hawkes, M.Mellor

グリフィスの破壊規準を紹介しているが、試験片全体の破壊現象を表現する目的にはあわないと結論づけている。

③福井勝則, 金豊年, 大久保誠介: 一軸引張荷重下での岩石の完全応力-歪曲線, 資源と素材, Vol.111, No.1, pp.25-29, 1995.

岩石が不均質であれば破断面の凹凸が大きく, 得られる応力-ひずみ曲線は延性的となるが, 均質な岩石の破断面は平面状で, 応力-ひずみ曲線はグリフィス理論から得られるように脆性的となると予想される。

④Tani, K.: Triaxial extension tests of cemented soils and soft rocks, Proc. 1st Asian Rock Mechanics Symposium, Vol.1, 315-320, 1997

三軸引張り試験により求めた有効応力表示の人工軟岩の引張り強さは, 圧密拘束圧によらずユニークに定まる. 一方で全応力表示の引張り強さにはばらつきが大きい. また有効応力表示のせん断破壊規準は, 引張り破壊を生じる引張り応力領域まで拡張することができる。

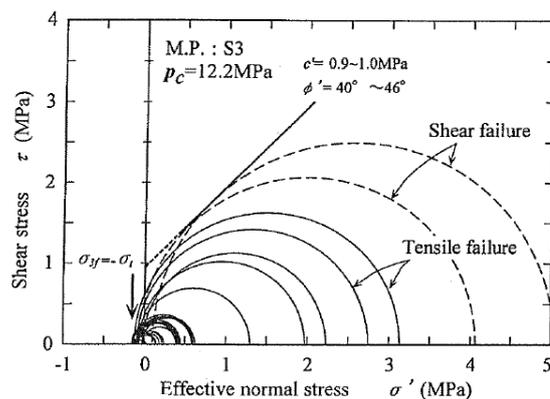
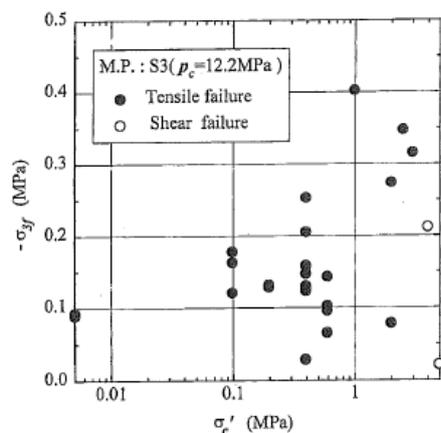
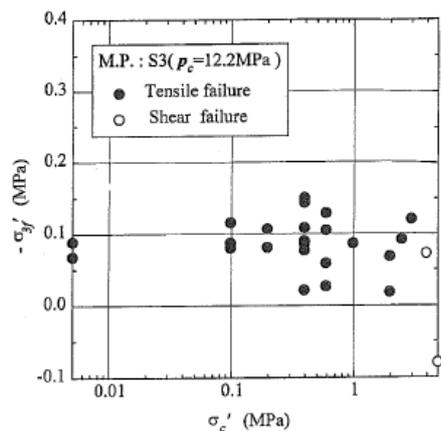


図-6.63 Mohr's stress circles for failure conditions (M.P.: S3A)

図-6.62 有効応力表示と全応力表示の引張り強さと圧密拘束圧

(5) 一軸引張り強さをを用いた岩盤評価の例

ここでは引張強さをを用いて岩盤の評価を行った例を示す。①は岩盤内に開削した空洞周りの安定性解析、②は斜面の安定解析に一軸引張試験で得たデータを用いている。

①発破振動計測と引張り強度試験に基づく掘削損傷領域の評価(1999)木下直人, 掘田政國, 松井裕哉, 杉原弘造

幾つかの条件下での引張り強さの中から最も弱いものを用いている(安全側)

引張り強さとシミュレータを用いて評価した発破時の応力場に基づく損傷領域は、普通発破よりもスームブラッシングの方が損傷領域が小さくなる計算結果

普通発破により作製した現場床板の損傷領域(床板透水試験にて計測)の結果と整合的

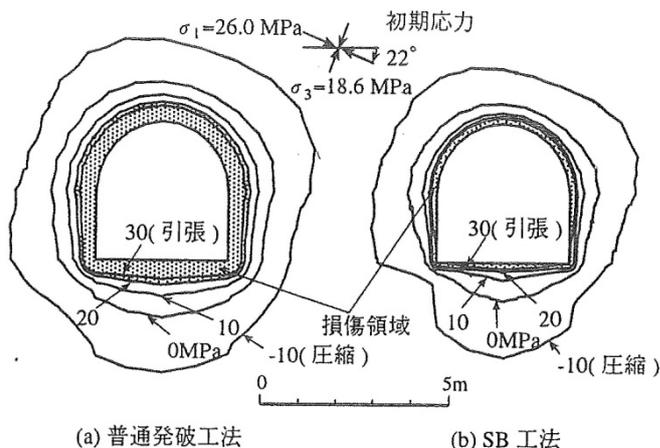


図-6.64 発破による損傷領域

②川越健, 浦越拓野, 太田岳洋, 長谷川淳, 木谷日出男: 落石発生時に剥離する面の引張強さに関する検討, 岩の力学国内シンポジウム, Vol.12, ROMBUNNO.46

落石危険性の評価のために, 割れ目が発達した四万十層群に属する弱い接触変成作用を受けた主に砂岩からなる切り取り斜面の岩塊を採取し, 一軸引張り試験を実施した. その結果, 引張り試験による破壊面の新鮮部の面積に比例して引張り破壊荷重が増加することがわかった.



図-6.65 引張り試験によって生じた破断面の様子

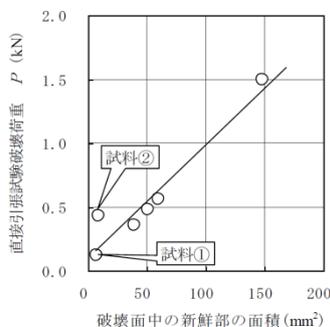


図-6.66 破断面中の新鮮部面積と破壊荷重の関係

### 6. 1. 3 基準化にあたっての課題

岩石の一軸引張り試験の基準化にあたっての課題は以下のとおりである。

- ①引張り強さは、圧裂試験によって求めることが一般的と考えられ、認知度も高いと思われる（試験方法の基準化も済んでいる）。同じ目的の値を、別の一軸引張り試験方法で求めることになるため、その違い（メリット、デメリット、理論的背景など）を解説する必要がある。
- ②圧裂試験と一軸引張り試験の引張り強さの標記を、どちらの方法で求めたかがわかるようにする必要がある。
- ③一軸引張り試験には複数の方法が存在するので、それらを整理する必要がある。
- ④海外では既に基準化されているので、国際整合化に対応する必要がある。
- ⑤岩石を用いた力学試験では、試験結果に影響を及ぼす幾つかの因子があることが知られている。ここでは、含水状態、寸法効果、載荷速度(変形速度)依存性、異方性、不均質性の 5 点に着目して文献調査を行った。いずれの項目も程度の差はあるが、一軸引張り強さに影響を及ぼすようである。よって基準化にあたってはこれらの因子に留意して進める必要がある。

### 6. 1. 4 まとめ

岩石を対象とした室内一軸引張り試験については、これまで多くの研究が蓄積されている上、実施例も最近増加していること、試験体の形状や載荷装置等に複数の種類が認められるものの試験の原理や載荷の機構は同一であり、試験方法の標準化が可能なことがわかった。また、海外（ISRM および ASTM）では、すでに一軸引張り試験が基準化されており、将来の統一的な ISO の基準化を見据えれば、国内での基準化の意義は大きい。以上の理由から、結果として基準化が適切であると判断した。

## 6. 2 岩盤（原位置）の試験法

岩盤（原位置）の引張り試験に関する国内の主要な研究論文を収集し、現状を整理した。ただし、論文数は表 5.1(7)に示したとおり、わずか 8 編のみであった。

### 6. 2. 1 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の一軸引張り試験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及び実態について整理した。

#### (1) 試験の方式

試験体形状の観点から大きく分類すると、円柱体タイプ(岡田&谷(2009)及び岡田ほか(2013)、高田ほか(2000))、原位置における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))、原位置におけるロックせん断試験の試験体を引き上げるロック引張りタイプ(野崎&新(2003)及び大村ほか(2011))の3つに分けられる(表1)。

さらに、文献調査により、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明らかになった。

- ・ コア観察による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試験結果から設定されたりする引張り強さを原位置で求める必要がある。
- ・ 亀裂性岩盤斜面や原子力発電所建屋などの基礎岩盤の耐震安定解析において、亀裂を含む岩盤の引張り強さはこれまで評価できなかったことから、安全側に見てゼロとされているが、引張強さを実測できるようになれば、合理的な耐震安定性検討及び設計が可能となる。
- ・ 東北地方太平洋沖地震以降、耐震設計用地震動が大きくなっており、従来の保守的な評価方法では耐震安定性及びその余裕度を現実的に評価できなくなっている。

以降では表 6.8 の内容について詳しく記載する。



(1) 試験装置

① 荷装置

岡田&谷 (2009) は、岩盤を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を引き上げる試験方法を考案し (図 6.67)、岡田ほか (2013) では原位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中心に設置できるため、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。

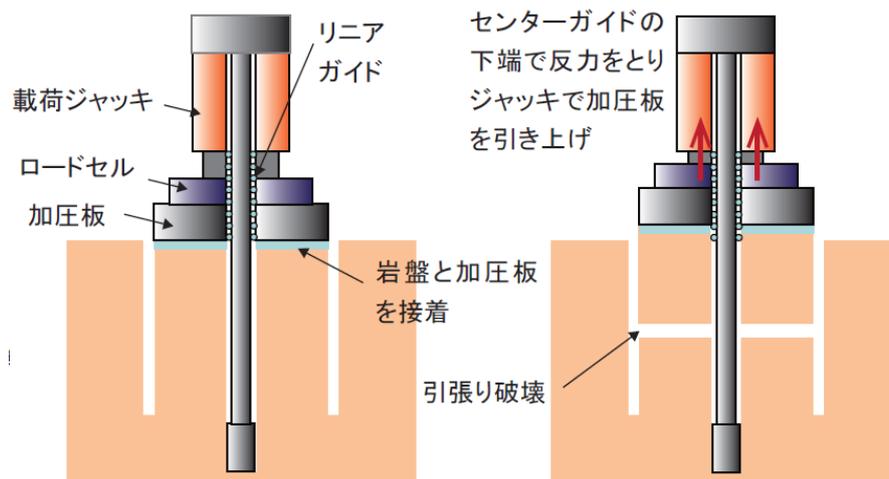


図 6.67 岡田ほか (2013) の試験装置概念図

高田ほか (2000) は、コアボーリングによって円柱試験体を岩盤から切り出し、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 6.68)。

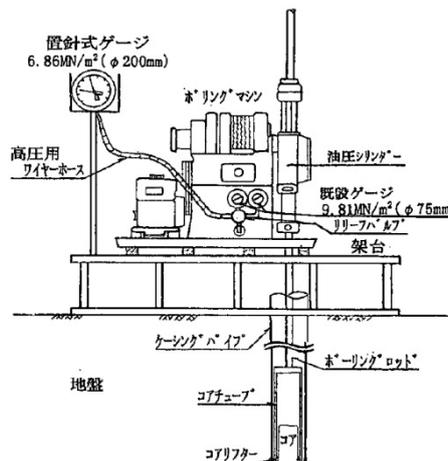


図 6.68 高田ほか (2000) の試験装置

仲村ほか (2006) は、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 6.69)。

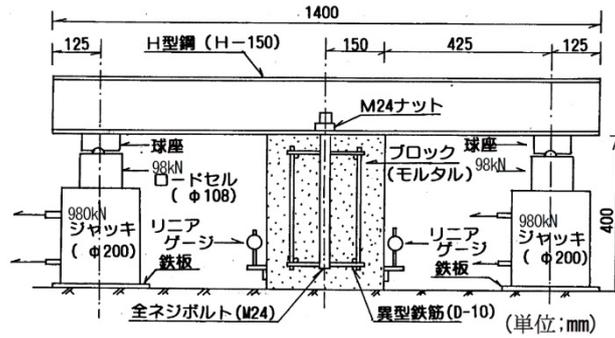


図 6.69 仲村ほか (2006) の試験装置

野崎&新 (2003) 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せん断試験を実施するための試験機を開発している (図 6.70)。また、大村ほか (2011) 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 6.71)。いずれも原位置岩盤せん断試験を目的とした試験装置であるが、引張り試験も実施可能な装置となっているため、文献調査の対象とした。

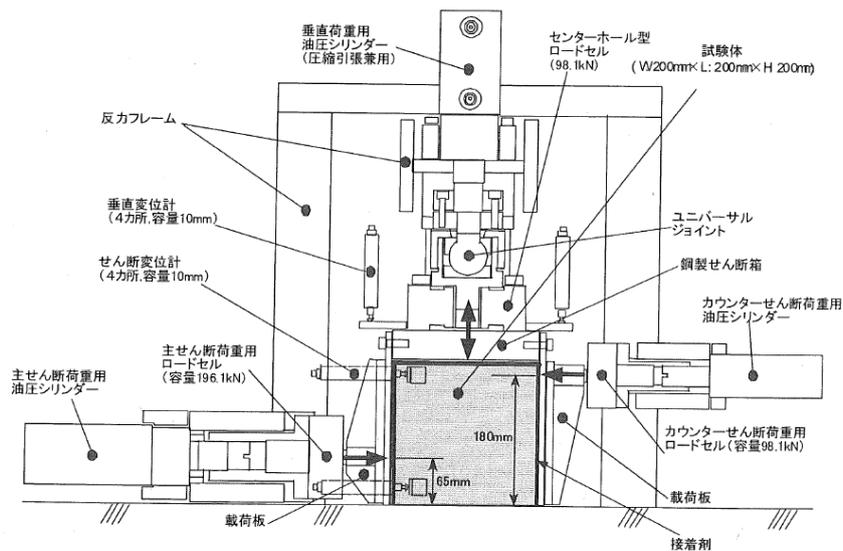


図 6.70 野崎&新 (2003) の試験装置

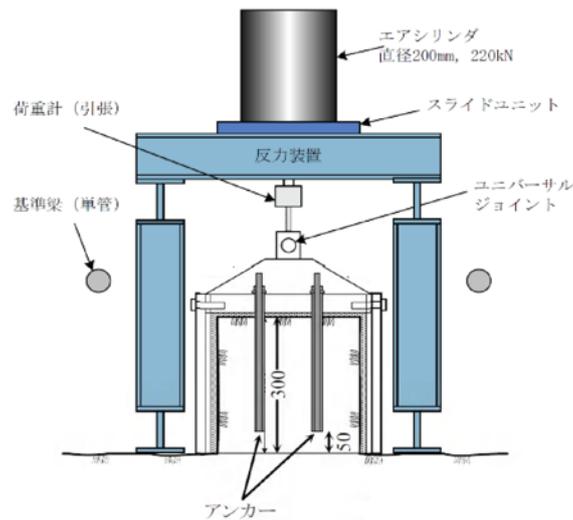


図 6.71 大村ほか (2011) の試験装置

## ②接着剤 (材) (試験体の保持方法)

高田ほか (2000) 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) 及び岡田ほか (2013) 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) はエポキシ樹脂系接着剤を試験体の 5 面に塗布し、せん断箱を接着する。仲村ほか (2006) 及び大村ほか (2011) 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) は突き出た 5 面を鋼製型枠で覆い、試験体との隙間にはモルタルを、さらに、試験体に 4 本のアンカーを打設して鋼製型枠に固定している。

## ③球座

岡田&谷 (2009) 及び岡田ほか (2013)、高田ほか (2000) では球座は使用しない。仲村ほか (2006) は球座を、野崎&新 (2003) 及び大村ほか (2011) はユニバーサルジョイントを使用している。

## ④測定装置

### (a) 荷重計

高田ほか (2000) 以外はいずれもロードセルを使用している。高田ほか (2000) は置針式ゲージ ( $6.86\text{MN/m}^2$ 、 $\phi 200\text{mm}$ ) を使用している。

### (b) 変位計

岡田&谷 (2009) 及び岡田ほか (2013) 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) 及び大村ほか (2011) 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

円柱状試験体を使用する岡田&谷（2009）及び岡田ほか（2013）、高田ほか（2000）では、ロータリードリリングで試験体を整形する。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。

ブロック引張りタイプの仲村（2006）の接着面は 300mm 四方としている。

ロック引張りタイプの野崎&新（2003）及び大村ほか（2011）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

#### ①制御方式

いずれも応力制御方式である。

#### ②载荷速度

高田ほか(2000)では 10~100kN/m<sup>2</sup>/s、野崎&新(2003)では 0.0490MPa/min、大村ほか(2011)では 10kN/m<sup>2</sup>/min とされている。

## 6. 2. 2 試験結果の整理

### （1）試験結果

岡田ほか（2013）は 10 個の試験体に対して実施した試験の結果について、図 6.72 に示すような応力一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。破壊面は平均すると供試体上端より 65mm の位置にあり、概ね中央付近と言える。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 6）。

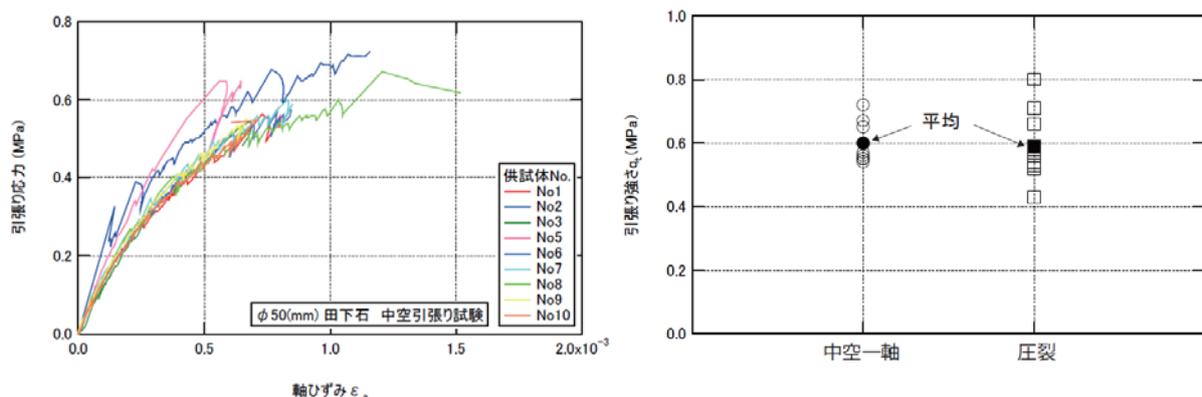


図 6.72 応力一軸ひずみ関係（左）及び一軸引張り試験と圧裂試験から得られた引張り強さの比較（右）

高田ほか（2000）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 ごとに約 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 7）。また、この結

果を岩種別及び岩種別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（図 6.73）、超音波（縦波及び横波）伝播速度との関係を示し、岩種にかかわらずそれぞれ相関があるとしている。

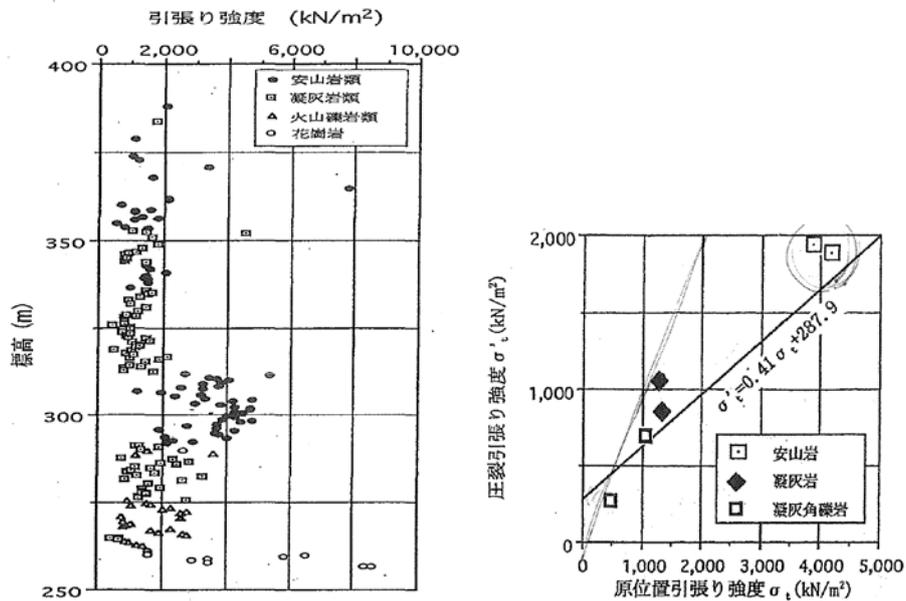


図 6.73 原位置引張り強度の深度分布（左）と圧裂引張り強度と原位置引張り強度の関係（右）

仲村ほか（2006）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）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 6.74 左）。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。また、圧縮応力下から引張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 6.74 右）。対象は軟岩（大谷石）であるが、低応力下で垂直応力に対するせん断強度が非線形となる傾向が見られる。また、同図中には、原位置試験の結果が室内の一面せん断試験と類似することが示されている。

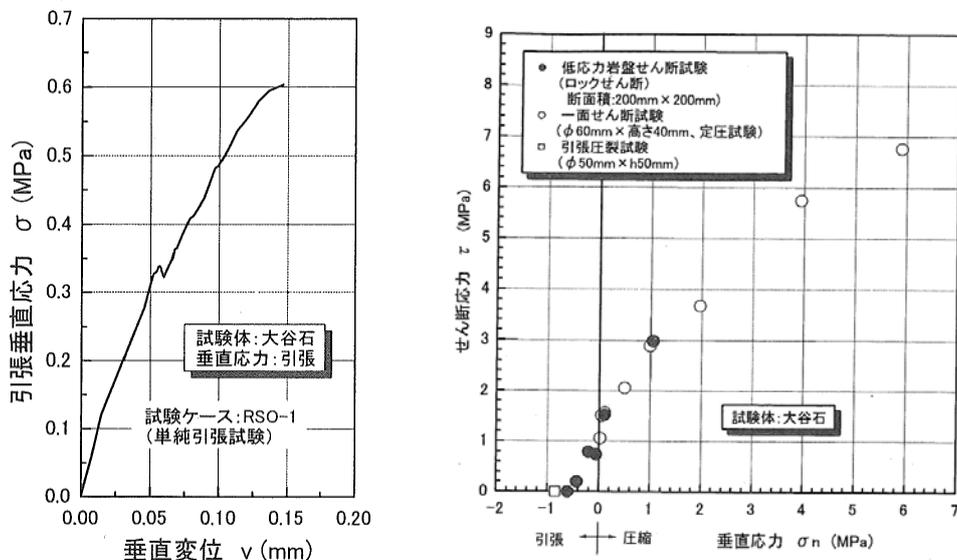


図 6.74 大谷石の一軸引張り試験結果（左）とせん断－垂直応力関係（右）

大村ほか（2011）では 5 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を示している（表 6.9）。合わせて示されている亀裂面積率については後述する。

表 6.9 原位置引張り試験結果一覧

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

## （2）試験体の寸法効果及び割れ目の影響

吉中ほか(1974)は、あらゆる強度の寸法効果について複数の文献を取りまとめている（図 6.75）。横軸は強度がほぼ一定な範囲の試料寸法を基準にし、それより寸法が大きい場合と比較したもので、破断面積比をとっている（基準面積は 4～13cm<sup>2</sup>）。(1) (5) (6) (7) は一軸圧縮試験、(2) (3) (4) は三軸圧縮試験及び原位置せん断試験の結果をまとめたものである。縦軸は寸法効果が現れない範囲での強度を基準にそれより大きい寸法での強度との比をとっている。

寸法効果による強度低下の要因として、不均質性の増大、それによる応力集中と進行性破壊を挙げている。

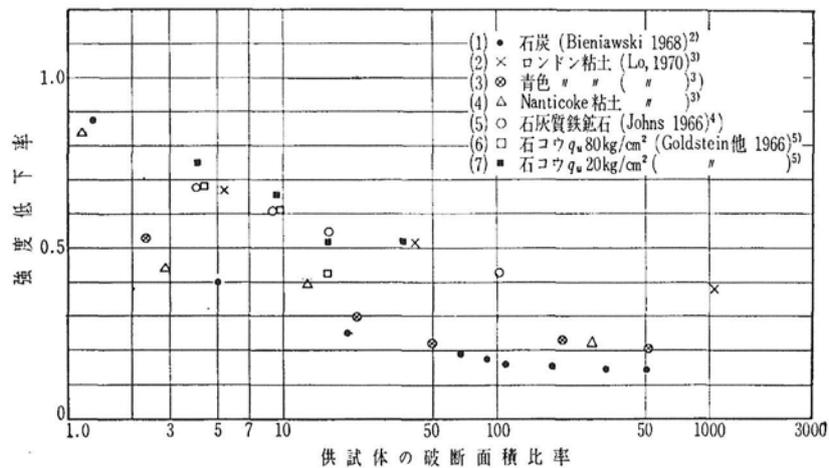


図 6.75 破断面積の増大に伴う強度の低下

大村ほか（2011）では、5 個の試験体の破壊面を観察し、破壊面全体（0.09 m<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 6.76 左）。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 6.76 右である。「正規化した引張強度」とは、亀裂面積率ゼロ、すなわち亀裂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、図のようなべき関数的な関係を示す。引張強さが亀裂面積率の増加に応じて非線形的に低下する理由として、亀裂面において破壊面が開口することにより、開口端部に応力集中が発生し、更なる開口を引き起こすことが考えられるとしている。

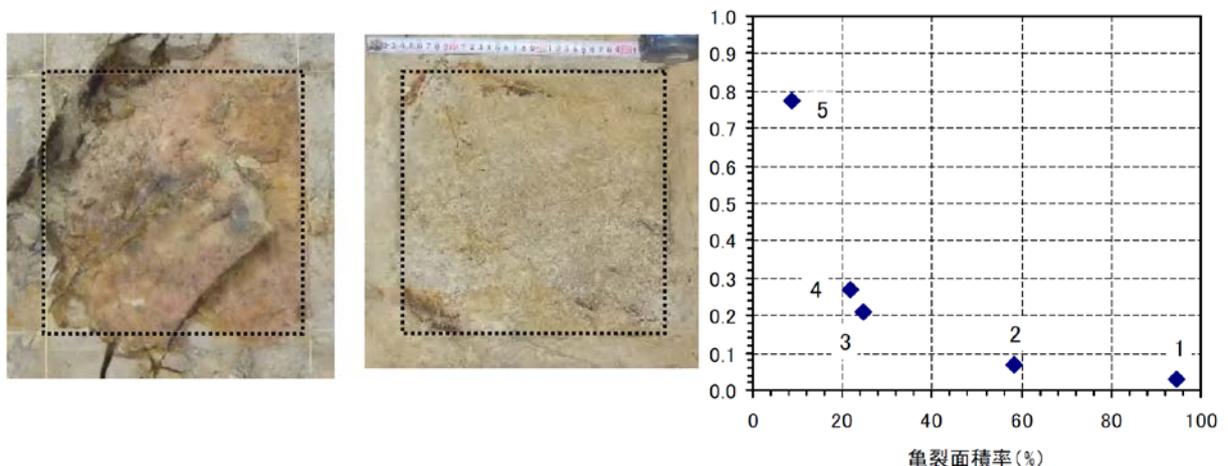


図 6.76 破壊面（左：試験番号 1，右：試験番号 5）（左）と引張り強さ－亀裂面積率関係（右）

### 6. 2. 3 基準化にあたっての課題

岩盤の一軸引張り試験の基準化にあたっての課題は以下のとおりである。

- ①岡田&谷（2009）及び岡田ほか（2013）が開発した試験方法では、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、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、引張り応力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。

- ②高田ほか（2000）の試験方法では、試験体成形はボーリングマシンによるコアリングであり、掘削中の振動等で試験体（コア）に損傷を与える可能性がある。また、試験体はコアリフターで挟むだけのため、引っ張り上げる最中に滑る可能性がある。中心性が確保されているかを確認できないことも課題である。
- ③仲村ほか（2006）が開発した試験方法では、岩盤の引張り強さだけでなく、付着面の引張り強度を含んだ値を求めている可能性がある。
- ④野崎&新（2003）及び大村ほか（2011）が開発した試験方法では、試験体に偏った割れ目が存在する場合、球座によって加圧面が回転し、引張強さを過小評価、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、いずれもせん断破壊させることが最終目的の試験機であることから、破壊面がせん断箱の直下に限られる。

#### 6. 2. 4 まとめ

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と考えられるが、これまでの事例が6編5例にとどまり、かつそれぞれの試験方法も技術的に未成熟で、いずれも研究段階にあることがわかった。よって、当面の基準化には時期尚早であると判断した。

## 7. 一軸引張り試験の一斉試験

### 7. 1 試験の目的

各機関における試験装置（例えば接着方法や球座の有無等）の違いによる岩石の一軸引張り試験結果のばらつきを明らかにするため、一斉試験を実施した。試験装置以外の条件（例えば含水条件や載荷速度等）は可能な限り統一した。また比較のため、一軸引張り試験に加えて圧裂試験も実施した。これらの試験結果を岩石の一軸引張り試験の基準及び解説の作成のための基礎資料とする。

### 7. 2 供試体

ブロックサンプリングした溶結凝灰岩（田下凝灰岩）から、一軸引張り試験用供試体と圧裂試験用供試体を採取した。両試験の破壊面の方向を一致させるため、図 7.1 に示すように、天地方向に一軸引張り試験用供試体を採取し、水平方向をマーキングした後、横方向から圧裂試験用供試体を採取した。圧裂試験の実施にあたっては、マーキングの方向が載荷軸と平行になるように供試体をセットした。供試体のサイズは直径 50mm×高さ 50mm ないし 100mm を原則とするが、基本的には各機関の要望に合わせて整形を行った。端面の整形には平面研削盤を使用した。整形後に 24 時間供試体を炉乾燥し、その後、温度が常温になるまでデシケータ内で保管した。デシケータ内での養生が終了した後に、供試体の質量、寸法及び超音波速度を測定し、これらの測定データと共に各機関に供試体を送付した。

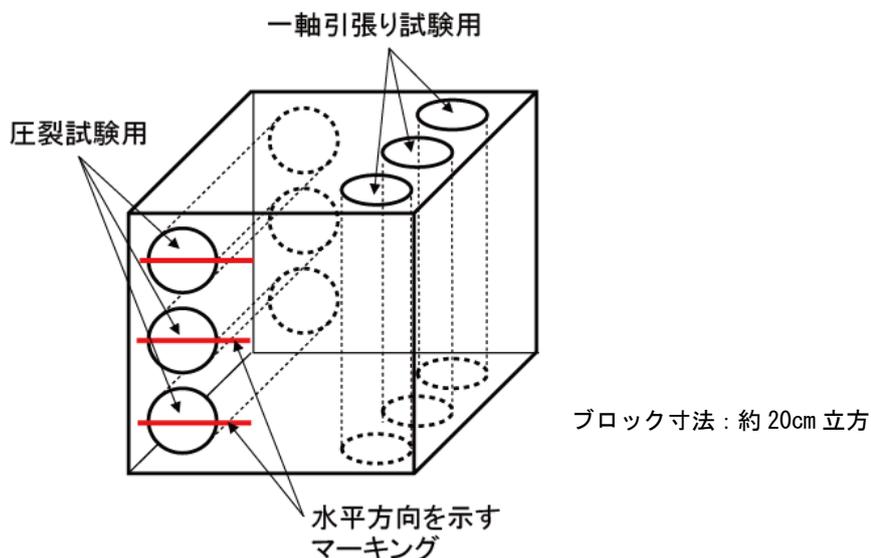


図 7.1 供試体のサンプリング方向

### 7. 3 共通の試験条件

一軸引張り試験の試験条件は以下とした。

- ・ 載荷の制御方法：変位制御（ただし、困難な場合は応力制御でも良い。）
- ・ 載荷速度：0.01mm/min（制御が困難な場合は可能な限りこの速度に近づける。）

- ・含水条件：送付された（乾燥）状態のまま試験を実施
- ・ひずみゲージによりひずみを計測する。（ひずみゲージ種類：東京測器研究所製（PFL-20-11）ゲージ長さ 20mm，貼付方法：1 試験体当たり 4 枚（軸方向，対角位置に 2 対・東西南北））

また，圧裂試験の試験条件については地盤工学会基準に従うこととした。地盤工学会基準の載荷速度は，破壊時間 1～15 分という規定であるが，試験条件の伝達が不十分であり，後述するように一軸引張り試験と同様に，載荷速度：0.01mm/min で実施した機関もあった。

#### 7. 4 参加機関と試験装置

参加機関の装置の特徴と供試体のサイズは表 7.1 の通り。機関 B については，2 種類の一軸引張り試験を行ったため，B-1，B-2 と記載している。機関 C については，一軸引張り試験方法は同じであるが，2 種類の直径の供試体を用いて試験を行ったため，C-1，C-2 と記載している。

表 7.1 各機関の装置の特徴および供試体サイズと数量

試験	機関	A		B		C		D	E	F	G	H
				B-1	B-2	C-1	C-2					
一軸	直径(mm)	50	50	50	50	30	35	50	50	50	50	50
	高さ(mm)	100	100	100	100	60	60	50	50	100	100	50
	本数	4	4	4	2	5	5	6	6	5	4	4
	接着剤	エポキシ系	エポキシ系	エポキシ系	エポキシ系	エポキシ系		瞬間接着剤	エポキシ系	エポキシ系	エポキシ系	エポキシ系
	球座	無	有(上下)	有(上下)	無	無		有(上下)	無	有(上下)	無	無
	特徴	剛性試験機		遠心方式		剛性試験機			中空供試体			
圧裂	直径(mm)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	高さ(mm)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	本数	4	4	4	4	5	5	3	6	3	3	2
	球座	無	有	有	有	有	有	無	有	無	有	無

各機関の一軸引張り試験装置の外観写真を写真 7.1～写真 7.9 に示す。機関 A の試験装置は剛性試験機で，球座は用いず，供試体を試験機内に接着剤で直接固定する方法である。機関 B の B-1 の試験装置は供試体の上下に球座を有しており，供試体をキャップ，ペDESTAL に接着した後に試験装置に取り付ける方法である。機関 B の B-2 の試験装置は，両端面に錘を取り付けた供試体を回転させて遠心力を負荷し，一軸引張り試験を行うユニークな試験装置である。機関 C の試験装置は，機関 A と類似した剛性試験機を用いた試験装置で，球座は用いず，供試体を試験機内に接着剤で直接固定する方法である。機関 D の試験装置は機関 B (B-1) と類似の構造で，供試体の上下に球座を有しており，供試体をキャップ，ペDESTAL に接着した後に試験装置に取り付ける方法である。機関 E の試験装置は中空円筒状の供試体を用いる試験装置で，球座は用いず，中空部分に引張り荷重の反力をとる支柱を有している。機関 F の試験装置は，機関 B (B-1) 及び機関 D と類似の構造で，供試体の上下に球座を有しており，供試体をキャップ，ペDESTAL に接着した後に試験装置に取り付ける方法である。機関 G の試験装置は，供試体をキャップ，ペDESTAL に接着した後に試験する構造であるが，球座は用いていない。ただし，ロードセルとキャップをつなぐ支柱が細いため，ロードセルとの結合部分で支柱が変形し易く，結果として球座のような役割を有している可能性がある。機関 H の試験装置は，三軸セルを利用して内部に供試体を設置する構造である。剛結タイプのセルで球座は有していない。

一軸引張り試験の供試体をキャップ、ペDESTALに固定する方法は全ての試験装置で接着剤を用いている。機関 D が瞬間接着剤を使用し、それ以外は二液混合のエポキシ系接着剤を使用している。供試体の直径は機関 C が 30mm と 35mm であるが、それ以外の機関は 50mm である。高さで直径が等しいのは、機関 D,E,H であり、それ以外の機関については、高さは直径の約 2 倍である。

圧裂試験については詳細に調査していないが、機関 A,D,F,H は球座を用いておらず、機関 B,C,E,G は球座を有している。供試体のサイズは全ての機関で直径 50mm、高さ 50mm である。



写真 7.1 機関 A の試験装置



写真 7.2 機関 B (B-1) の試験装置



写真 7.3 機関 B (B-2) の試験装置



写真 7.4 機関 C の試験装置



写真 7.5 機関 D の試験装置

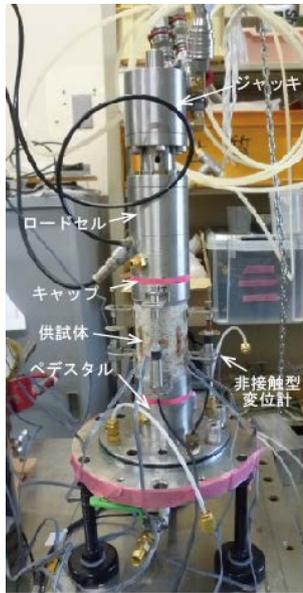


写真 7.6 機関 E の試験装置



写真 7.7 機関 F の試験装置



写真 7.8 機関 G の試験装置

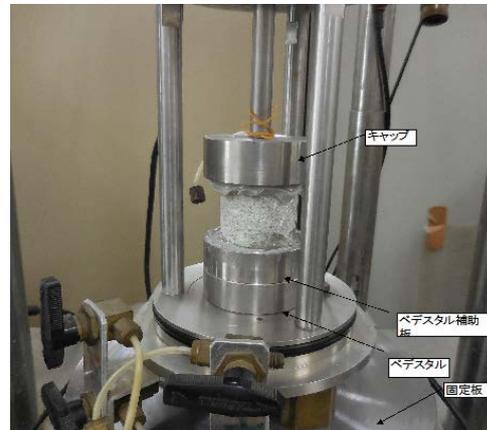


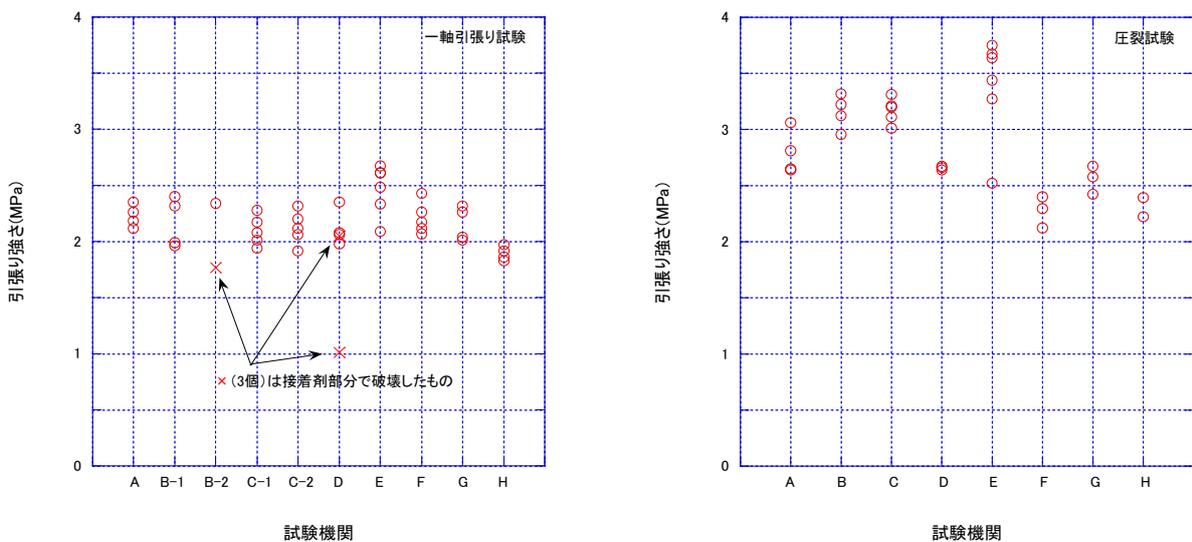
写真 7.9 機関 H の試験装置

## 7. 5. 試験結果

### (1) 各機関の引張り強さ

各機関の一軸引張り試験及び圧裂試験から得られた引張り強さを図 7.2 に示す。図 7.2(a)の中には、一軸引張り試験において、供試体で破壊せず、接着剤部分で破壊したもの（凡例×印）も含まれている。一軸引張り試験から得られる引張り強さは、接着剤部分で破壊したものを除くと各機関のばらつきは比較的小さく、1.8~2.7MPa の範囲であった。一方、圧裂試験から得られる引張り強さは、各機関のばらつきは比較的大きく、2.1~3.8MPa の範囲であった。圧裂試験と比較して一軸引張り試験の方が得られる引張り強さは小さいが、ばらつきも小さい。

機関 C の一軸引張り試験 C-1 と C-2 は供試体の直径のみが 30mm と 35mm で異なるが結果に大きな違いは見られなかった。機関 D,E,H は一軸引張り試験の高さと直径と等しく、それ以外の機関については、高さは直径の約 2 倍であるが、高さ/直径の比について一軸引張り強さに明瞭な傾向は見られなかった。また、機関 B-1,D,F は一軸引張り試験において球座を使用し、それ以外の機関は使用していないが、一軸引張り強さに明瞭な傾向は見られなかった。圧裂試験において、各機関の強度差が大きい理由は明確ではないが、球座を用いている機関 B,C,E,G の引張り強さが大きい傾向があるように見える。



(a) 一軸引張り試験

(b) 圧裂試験

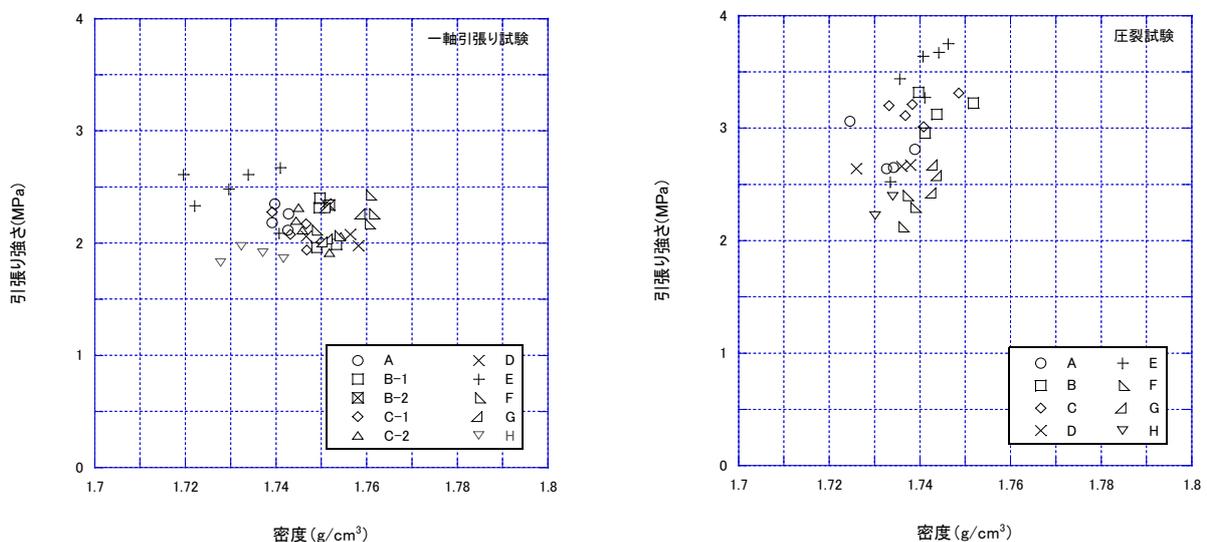
図 7.2 各機関の引張り強さの比較

(2) 物性と引張り強さの関係

各機関に配布された供試体に物性の偏りがないかどうか検討するため、一軸引張り試験と圧裂試験から得られた引張り強さと密度、超音波速度 ( $V_s$ ,  $V_p$ ), 剛性との関係を図 7.3~7.6 に示す。なお凡例は各機関を示す。

図 7.3 より、一軸引張り試験と圧裂試験の供試体の密度を比較すると、密度は平均的には若干一軸引張り試験の方が大きく、ばらつきも大きい。特に、機関 E と機関 H の密度が小さい。一方、引張り強さは圧裂試験の方が平均値もばらつきも大きい。また、密度と引張り強さの関係については、一軸引張り試験では明瞭な傾向は見られないが、圧裂試験では密度の増加に伴い引張り強さが増加する傾向がやや認められる。

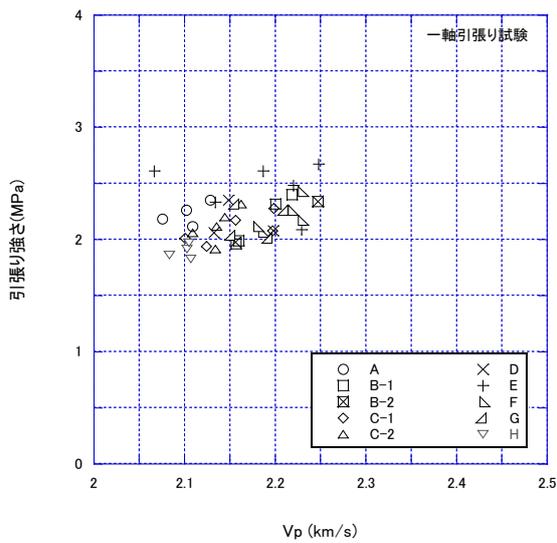
図 7.4 より、一軸引張り試験と圧裂試験の P 波速度 ( $V_p$ ) を比較すると、一軸引張り試験の  $V_p$  が 2.05~2.25 (km/s) に分布しているのに対して、圧裂試験の  $V_p$  は 2.55~2.85 (km/s) に分布しており大きく異なっている。図 7.1 に示すとおり、両供試体は超音波の伝播方向が異なるためと考えられる。 $V_p$  が大きくなると、引張り強さも大きくなる傾向を示す。その傾向は圧裂試験の方が顕著である。各機関で  $V_p$  の偏りは見られない。図 7.5 より、一軸引張り試験と圧裂試験の S 波速度 ( $V_s$ ) を比較すると、一軸引張り試験の  $V_s$  が 1.2~1.6 (km/s) に分布しているのに対して、圧裂試験の  $V_s$  は 1.2~1.7 (km/s) に分布しており、 $V_p$  と比較して両試験の供試体の差は小さい。 $V_s$  と引張り強さに明瞭な相関は見られない。密度と同様に、機関 E と機関 H の  $V_s$  が小さい。



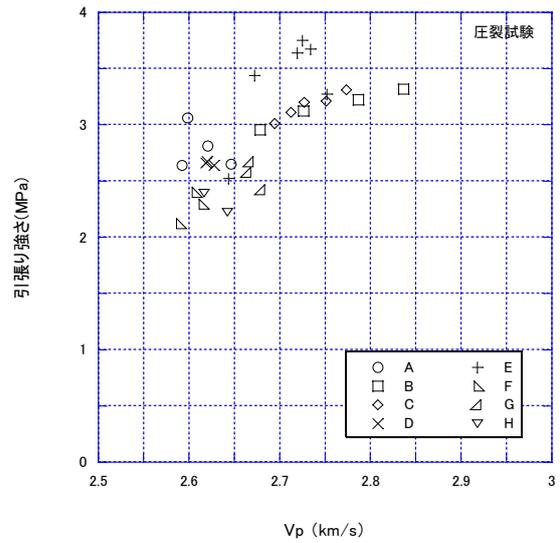
(a) 一軸引張り試験

(b) 圧裂試験

図 7.3 密度と引張り強さの関係

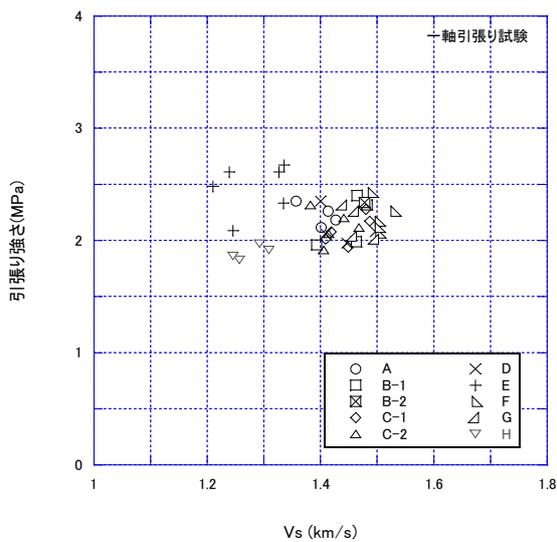


(a) 一軸引張り試験

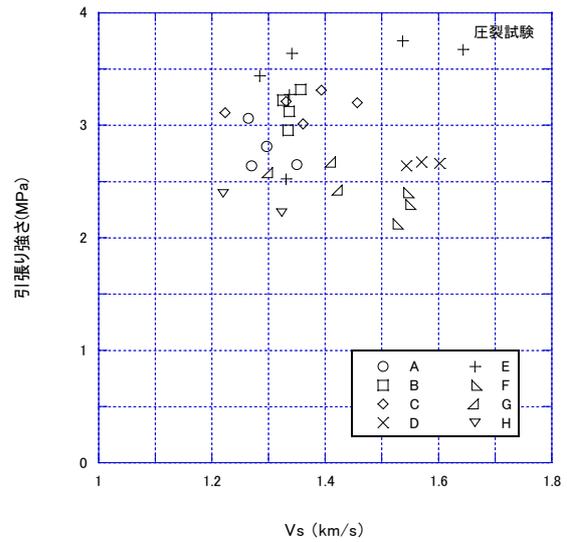


(b) 圧裂試験

図 7.4 P 波速度 ( $V_p$ ) と引張り強さの関係



(a) 一軸引張り試験



(b) 圧裂試験

図 7.5 S 波速度 ( $V_s$ ) と引張り強さの関係

図 7.6 では、供試体の（大ひずみレベルの）剛性と一軸引張り強さの関係を確認するため、剛性を表す指標として、一軸引張り試験については「引張り強さ/破壊ひずみ」、圧裂試験については「引張り強さ/破壊変位」を求め、引張り強さと比較した。破壊ひずみはひずみゲージの計測結果（2枚もしくは4枚の平均）を用い、破壊変位については変位計の計測結果を用いた。図 7.6(a)より一軸引張り試験については機関 H が他機関と比較して引張り強さが若干小さかったが、「引張り強さ/破壊ひずみ」も小さい結果となった。しかしながら、全体的には引張り強さと「引張り強さ/破壊ひずみ」に明瞭な相関は見られない。図 7.6(b)より、圧裂試験については、引張り強さ

と「引張り強さ/破壊変位」にやや正の相関が見られる。

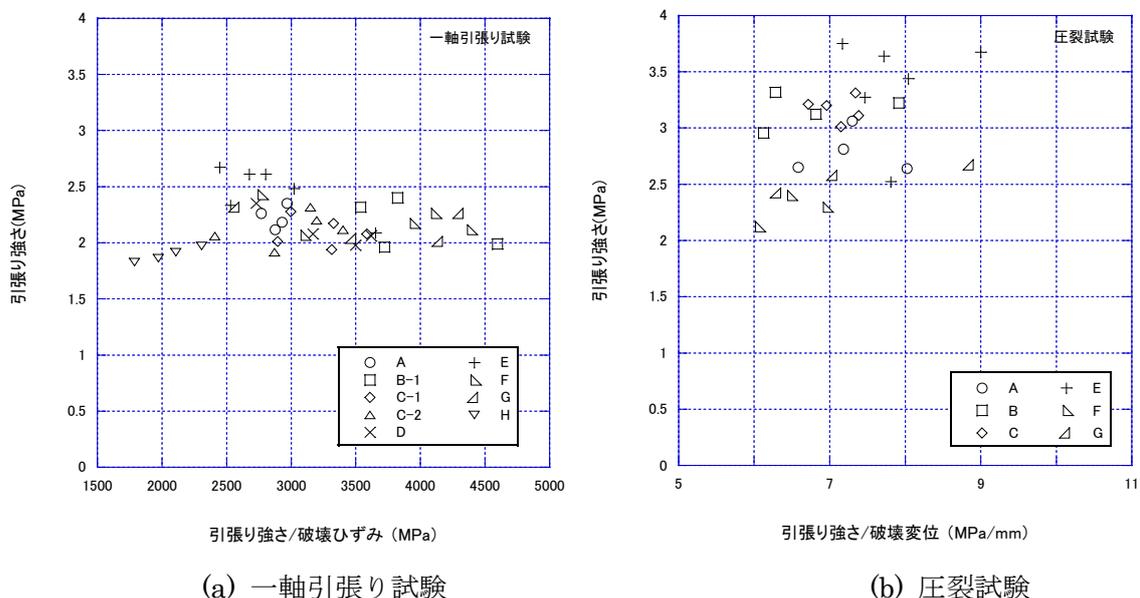
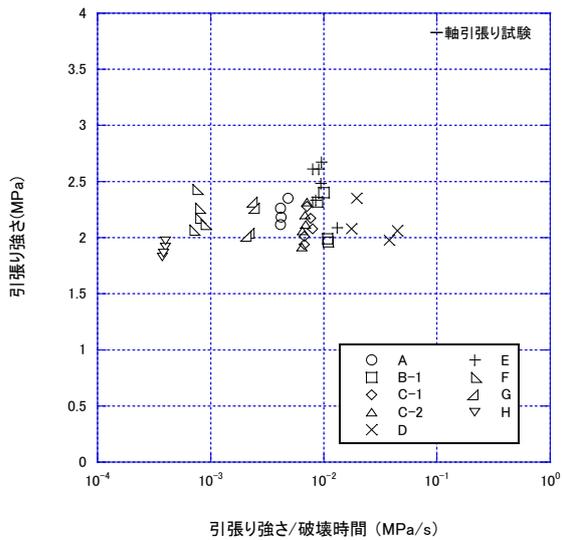


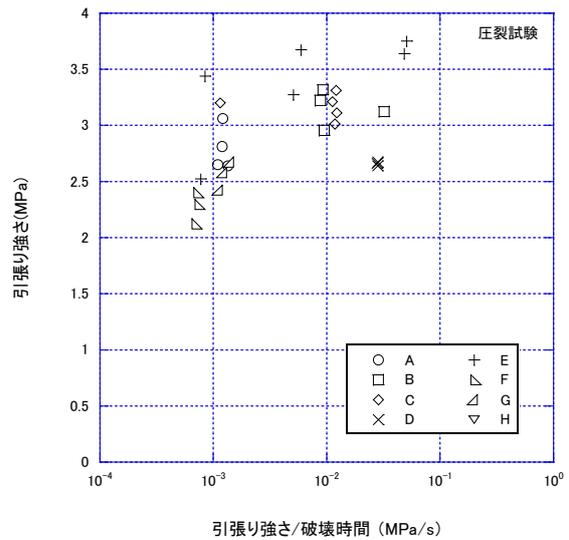
図 7.6 供試体の剛性に関する指標と引張り強さの関係

### (3) 荷速度の影響

一軸引張り試験の荷速度については、0.01mm/min を目指すことを試験条件として規定していたが、制御用の変位計の設置位置や装置の構造等から各機関の荷速度が異なる結果となった。圧裂試験についても地盤工学会基準の荷速度で行った機関と一軸引張り試験と同様に0.01mm/min の荷速度で実施した機関があり、荷速度が異なる結果となった。そこで、荷速度を表す指標として一軸引張り試験、圧裂試験ともに「引張り強さ/破壊時間」で一種の応力速度を求め、図 7.7 に示すとおり、引張り強さと比較した。なお、一般には荷速度が速いほど、引張り強さも大きい。図 7.7(a)と(b)の比較から、一軸引張り試験、圧裂試験ともに試験全体の「引張り強さ/破壊時間」はほぼ同等 ( $3 \times 10^{-4} \sim 7 \times 10^{-2} \text{ MPa/s}$ ) であることがわかる。図 7.7(a)より、一軸引張り試験については、機関により「引張り強さ/破壊時間」は 2 オーダーほど異なるが、全体としては明瞭な速度依存性は見られない。同一機関で荷速度を変えた試験を行っていないためはっきりしないが、荷速度依存性を示さずが、機関 (すなわち試験方法) の違いにより、見かけ上、荷速度依存性を示さなかった可能性も考えられる。図 7.7(b)より、圧裂試験については、全体的にはやや速度依存性が見られる。機関 E では、(試験数は少ないものの) 荷速度を変えた圧裂試験を行っており、やや荷速度依存性を示す傾向が見られる。



(a) 一軸引張り試験

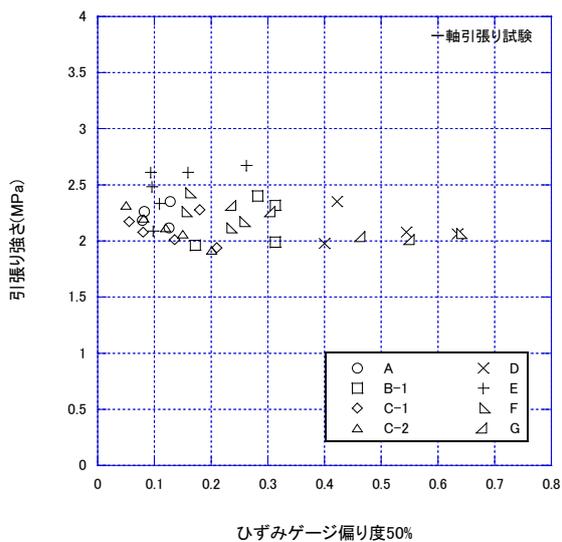


(b) 圧裂試験

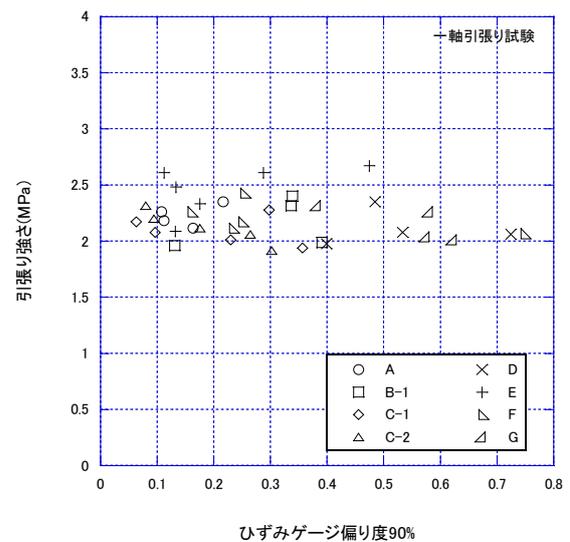
図 7.7 荷重速度に関する指標と引張り強さの関係

#### (4) 一軸引張り試験における曲げの影響

一軸引張り試験では、供試体の曲げが強度を過小評価する要因と考えられる。曲げの程度を評価するため、供試体に貼り付けた4枚のひずみゲージの(最大ひずみ-最小ひずみ)/(平均ひずみ)を「ひずみゲージ偏り度」と定義し、図7.8に示すとおり、最大引張り強さの50%、90%における「ひずみゲージ偏り度」と引張り強さの関係を求めた。図7.8(a)に示す最大引張り強さの50%の結果では、「ひずみゲージ偏り度」が小さい方が若干ではあるが引張り強さが大きい傾向が見られるが、図7.8(b)に示す最大引張り強さの90%の結果では、あまり相関が見られない。



(a) 最大引張り強さの50%



(b) 最大引張り強さの90%

図 7.8 供試体の曲げの程度に関する指標と引張り強さの関係

### (5) 一軸引張り試験における破壊位置の影響

一軸引張り試験における引張り破壊の位置（高さ）が結果として引張り強さに影響を与えている可能性が考えられる。このため、破壊の位置を表す指標として、供試体の中央高さから破壊位置までの距離（ $h_i$ ：上方は正）を供試体の高さ（ $h_0$ ）で割った値のパーセント表示（ $h_i/h_0 \times 100$ ）を「破壊位置(%)」と定義し、引張り強さとの関係を図 7.9 に示す。供試体の中央、上端、下端がそれぞれ「破壊位置(%)」=+0%，+50%，-50%である。図より、上下端付近で破壊したものが多い傾向があるが、破壊位置と引張り強さには明瞭な相関は見られない。

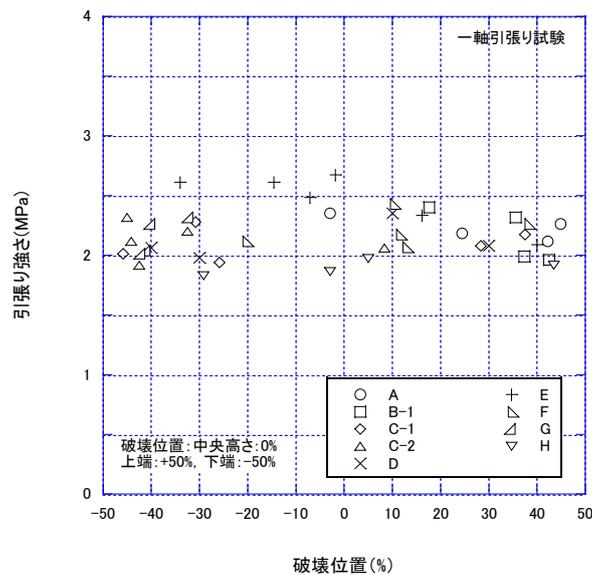


図 7.9 破壊の位置に関する指標と引張り強さの関係

### 7. 6 まとめ

- ・各機関における試験装置の違いによる岩石の一軸引張り試験結果のばらつきは、接着剤部分で破壊した試験結果を除けば、圧裂試験の結果と比較するとかなり小さい。
- ・圧裂試験から得られる引張り強さと比較すると、一軸引張り試験から得られる引張り強さは0～40%ほど小さい。その原因については現時点では不明である。
- ・一軸引張り試験における供試体の破壊位置については引張り強さと明瞭な相関は見られない。

## 8. 岩石の一軸引張り試験方法の基準化素案

---

### 岩石の一軸引張り試験方法 (岩石の一軸圧縮試験方法を参考に修正)

#### 1. 総則

##### 1. 1 試験の目的

この試験は、拘束圧を受けない状態で長軸方向に~~圧縮する~~引張るときの岩石の強度・変形特性を求めることを目的とする。

##### 1. 2 適用範囲

岩石および岩石質地盤材料を対象にする。

##### 1. 3 用語の定義

- (1) 拘束圧を受けない状態とは供試体の半径方向に応力を作用させない状態をいう。
- (2) 供試体とは試験に使用する整形された岩石および岩石質地盤材料をいう。
- (3) 岩石の~~一軸圧縮強さ~~一軸引張り強さとは拘束圧を受けない状態で供試体の長軸方向に作用する最大の~~圧縮応力~~引張応力をいい、その時の軸ひずみを破壊ひずみという。

#### 2. 試験用具

##### 2. 1 試験機の構成

試験機は~~圧縮装置~~載荷装置、荷重測定装置、変位測定装置から構成され、次に示す条件を満たすものとする。

- (1) 供試体の最大軸~~圧縮力~~引張力に対し、十分な負荷能力を有すること。
- (2) 軸変位または軸方向応力を連続して一定速度で与え得ること。
- (3) ~~軸圧縮力~~軸引張力を供試体の最大軸~~圧縮力~~軸引張力まで、その±1%の許容差で測定できること。
- (4) 軸変位あるいは軸ひずみを対象とする岩石に応じて十分な精度で測定できること。

##### 2. 2 その他の用具

- (1) 供試体寸法測定用具 供試体の直径および高さを0.1mm以下まで読み取れるもの。
- (2) はかり 0.01gまではかることができるもの
- (3) 供試体作製用具

#### 3. 供試体の作成と測定

##### 3. 1 供試体の形状および寸法

- (1) 供試体の形状は載荷装置に応じた形状、寸法とする。  
~~(1) 供試体の形状は直円柱を基本とする~~  
~~(2) 供試体の直径は、5.0cmを標準とする。~~

~~(3) 供試体の高さは直径の2倍を標準とする。~~

### 3. 2 供試体の作成

(1) 供試体は所定の形状、寸法になるよう作製する。

~~(1) 供試体側面を整形しない場合~~

~~(2) トリミングによる場合~~

~~(3) コアリングによる場合~~

### 3. 3 供試体の測定

(1) 供試体の形状の測定

~~(1) 供試体の直径の測定~~

~~(2) 供試体の高さの測定~~

(2) 供試体の質量の測定

(3) 必要に応じて岩片から含水比を測定

(4) 初期状態を観察し、記録する

## 4. 試験方法 (岩石の一軸圧縮試験法を修正)

~~一軸圧縮試験~~一軸引張試験は以下の手順で行う。

(1) 芯合わせ治具を用いるなどして供試体を装置の軸に一致するように載荷装置に設置する。

(2) 破壊までの時間を5~10分程度となるように軸応力速度または軸ひずみ速度を一定にして連続的に軸引張する。

(3) 軸引張中は軸引張力P (kN)をはかる。変形特性を求める場合には軸変位 $\Delta H$  (cm)あるいは軸ひずみ (%) もはかる

(4) 軸引張中に軸引張力の最大値を確認した後、軸引張を終了することを基本とする。

(5) 軸引張終了後、供試体の変形・破壊状況などを観察し、記録する。

## 5. 試験結果の整理 (岩石の一軸圧縮試験法に同じ)

### 5. 1 試験前の供試体の状態

試験前の供試体断面積の算出

### 5. 2 軸引張り過程

(1) 変位計、ひずみゲージを用いた場合の軸ひずみの算出

(2) 軸方向応力の算出

(3) 軸方向応力を縦軸に、軸ひずみを横軸にとって軸方向応力-軸ひずみ曲線を図示する。

(4) 軸方向応力の最大値から一軸引張り強さ、破壊ひずみを算出する。

(5) 変形係数を算出する

## 6. 報告事項 (岩石の一軸圧縮試験法に同じ)

試験結果について次の事項を報告する。

### 6. 1 試料に関する事項

- (1) 採取地点：地点名，採取深度
- (2) 岩石の種類
- (3) 採取方法

#### **6. 2 供試体に関する事項**

- (1) 供試体作成方法
- (2) 試験前の供試体の形状，寸法および湿潤密度
- (3) 測定した場合は，初期含水比
- (4) 試験前の供試体の観察結果

#### **6. 3 試験結果に関する事項**

- (1) 軸引張時の軸ひずみ速度または軸方向応力速度
- (2) 軸方向応力－軸ひずみ曲線
- (3) 一軸引張り強さおよび破壊ひずみ
- (4) 変形係数
- (5) 供試体の破壊状況
- (6) 本基準と部分的に異なる方法を用いた場合は，その内容

#### **6. 4 その他特記すべき事項**

## 9. 岩石の一軸引張り試験方法基準化 WG 設立趣意書

### 1. 趣意

#### (1) 背景・経緯

従来、岩盤を対象とした土木構造物の基礎や斜面の設計では、地震動などの設計荷重に対して十分な耐力の余裕があった。そのため、岩盤中に存在する天然の割れ目の影響を考慮して、岩盤の引張り強さはゼロとして（無視して）保守的に評価されてきた。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震の発生以降、設計基準等の見直しにより、設計用地震動がさらに大きくなっており、岩盤といえども引張り強さを適切に評価しなければ、設計における評価基準値を満たすことができず、岩盤上に重要土木構造物を構築することが困難になってきた。このような状況から、岩盤を対象とする構造物の設計において、岩盤あるいは岩石の引張り強さを適切に評価するための試験・調査方法が求められている。

岩石の引張り試験方法には、一軸引張り試験、圧裂試験、曲げ試験、インデンテーション試験等がある。平成8年度に「岩の一軸および三軸試験方法検討委員会」で実施されたアンケート調査によると、引張り試験方法としては、硬岩を対象とした場合、「圧裂試験」と「一軸引張り試験」の実施割合は6:1であった。一軸引張り試験が理想的な応力状態で直接的に引張り強さを求める試験であるのに対し、圧裂試験は荷重作用点付近での応力集中や応力分布が破断面に沿って非一様に分布すること等の問題が認識されていたが、簡便で実務的にも最も利用頻度が高いこと等の理由により、平成14年に「圧裂による岩石の引張り強さ試験方法（JGS2551-2009）」のみが基準化された。なお、圧裂試験については、一軸引張り試験と圧裂試験から得られる引張り強さの比が2倍程度異なる場合がある等、近年も様々な問題点が指摘されている。一方、岩盤の場合には、室内試験よりも原位置試験の方が重視される傾向がある。原位置の引張り試験を想定した場合、圧裂試験は困難であり、一軸引張り試験に類似した試験方法になるものと考えられるが、その試験方法については基準化されておらず、試験方法の確立が望まれている。

以上のように、新設・既設構造物の耐震性能のチェックや評価が厳しくなり、岩石および岩盤の引張り強さを適切に評価しなければならない状況の中、その試験方法が確立されていないのが実情であり、標記の試験方法の基準化が急務となっている。

#### (2) 基準化の必要性

このような背景を踏まえ、平成25年度から「岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討WG」が活動を開始した。同WGでは、①岩石を対象とした室内一軸引張り試験および②岩盤を対象とした原位置引張り試験について、国内外から幅広く関連文献を収集し、試験方法の現状と課題、試験結果の解釈と利用に関して整理し、基準化の可能性や必要性について検討を行った。

その結果、①岩石を対象とした室内一軸引張り試験については、これまで多くの研究が蓄積されている上、実施例も最近増加していること、試験体の形状や載荷装置等に複数の種類が認められるものの試験の原理や載荷の機構は同一であり、試験方法の標準化が可能なのことがわかった。また、海外（ISRMおよびASTM）では、すでに一軸引張り試験が基準化されており、将来の統一的

な ISO の基準化を見据えれば、国内での基準化の意義は大きい。以上の理由から、結果として基準化が適切であると判断した。

一方、②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と考えられるが、これまでの事例が 6 編 5 例にとどまり、かつそれぞれの試験方法も技術的に未成熟で、いずれも研究段階にあることがわかった。よって、当面の基準化には時期尚早であると判断した。

### (3) 活動内容

本 WG では「岩石の一軸引張り試験方法」の基準を作成する。基準の項目は以下のとおりとする。

- 1) 目的、適用範囲
- 2) 試験器具
- 3) 試験体の作製
- 4) 試験方法
- 5) 試験結果の整理方法
- 6) 報告事項

## 2. グループリーダー候補

防災科学技術研究所 谷 和夫

## 3. WG の活動期間

平成 26 年 4 月～平成 28 年 3 月 (2 ヶ年)

## 10. あとがき

この基準化検討WGが、非常に真面目で責任感の強いメンバーから構成されていたことは幸いであつた。幹事会2回とWG4回の合計6回の会合が開催されたが、欠席者は延べ3名という少なさであつた。また、資料の収集と整理については、10名のメンバーを3つのグループに分担してもらつたが、毎回のWGにおいて作業の進捗がきちんと各リーダー(若林委員, 及川委員, 白鷺幹事)から報告され、効率的に検討内容を議論することができた。さらに、岩石試験の実施が可能な組織に属する全てのメンバーが一斉試験に参加して下さり、貴重な情報を収集することができた。日常の業務で多忙であろうメンバーの全員が、学会の基準化活動に熱心に取り組んで下さったお蔭で、所定の成果を本書に取りまとめることができた。特に、検討活動の全体を取り仕切っていただいた岡田幹事, 白鷺幹事, 羽柴幹事のご尽力の貢献は大きい。末筆ながらメンバーの全員に対して感謝すると共に、各人の積極的な貢献に敬服する次第である。

また、基準化検討WGのメンバーではないが、一斉試験に参加していただいた基礎地盤コンサルタンツ(株)の山田眞一氏にも感謝いたします。

今後は、この基準化検討WGの検討結果に基づいて設立される「岩石の一軸引張り試験方法基準化WG」において、新しい地盤工学基準を作成する作業が始まる。試験方法の標準化を通じて、地盤工学及び岩盤工学の発展に寄与できれば望外の喜びである。

(文責: 谷 和夫)

以上