岩石の一軸引張り試験方法の違いによる 引張り強さのばらつきの評価

岡田 哲実^{1*}・羽柴 公博²・早野 公敏³・及川 寧己⁴・小野 正樹⁵・中村敏明⁶

¹(一財)電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
²東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
³横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
⁴(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 試験環境システム研究グ

ループ(〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1中央第七)

⁵応用地質(株) エネルギー事業部 地球環境部 (〒336-0015 さいたま市南区太田窪2-2-19) ⁶(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 (〒331-0811 さいたま 市北区吉野町2-272-3)

*E-mail: t-okada@criepi.denken.or.jp

各機関が所有する一軸引張り試験装置の違いによる引張り強さのばらつきを明らかにし、岩石の一軸引 張り試験の標準化のための基礎資料を得るため、凝灰岩を用いて一軸引張り試験および圧裂引張り試験の 一斉試験を実施した.試験装置以外の条件は可能な限り統一した.一斉試験の結果、岩石の一軸引張り試 験から得られる引張り強さのばらつきは、接着剤部分で破壊した試験結果を除けば、圧裂試験のばらつき と比較するとかなり小さいこと、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の引張り 強さは0~40%ほど小さいこと、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ことが明らかとなった.

Key Words : direct tension test, splitting tensile strength test, tensile strength, laboratory test

1. はじめに

岩石の圧裂試験¹と異なり、一軸引張り試験は引張り 応力場での応力-ひずみ関係が得られる利点を有する-方,試験方法の難しさから国内では試験方法の標準化に は至っていなかった.しかしながら、東北地方太平洋沖 地震以降,岩盤の引張り強さを適切に評価しなければな らなくなってきたこと,圧裂試験と一軸引張り試験から 異なる引張り強さが得られる場合があること,岩石の一 軸引張り試験に関する多くの研究が蓄積されていること 等から,一軸引張り試験の標準化に向けた検討が必要に なってきた².

そこで、各機関が実施している一軸引張り試験の方法 および装置(例えば接着方法や自在継手の有無等)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標 準化のための基礎資料とする.

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、一軸引張り試験用と圧裂試験用の供試体を採取した.両試験の破壊面の方向を一致させるため、図-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



図-1 供試体のサンプリング方向

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.

3. 試験条件

一軸引張り試験の共通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¹⁾ 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.

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-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.

各機関の一軸引張り試験装置の外観を写真-1~写真-9

に示す.機関Aの試験装置は剛性試験機で、自在継手は 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自在 継手を有しており、供試体をキャップ、ペデスタルに接 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, 自在継手は用い 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、 供試体の上下に自在継手を有しており,供試体をキャッ プ,ペデスタル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、自在継手は用いず、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 上下に自在継手を有しており、供試体をキャップ、ペデ スタル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、ペデスタルに 接着した後に試験する構造であるが、自在継手は用いて 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、 結果として自在継手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自在 継手は有していない.

ー軸引張り試験の供試体をキャップ、ペデスタル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がシアノアクリレート系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.高さと直径が等しいのは機関 D,E,Hであり、それ以外の機関では高さは直径の約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は自在継手を用いておらず、機関B,C,E,Gは自在継手を有している.供試体のサイズは全ての機関で直径50mm、高さ50mmである.

表-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 | | А | В | | С | | D | _ | _ | 0 | ц |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | B-1 | B-2 | C-1 | C-2 | U | E | Г | G | п |
| 一軸 | 直径(mm) | 50 | 50 | 50 | 30 | 35 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| | 高さ(mm) | 100 | 100 | 100 | 60 | 60 | 50 | 50 | 100 | 100 | 50 |
| | 本数 | 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 | | 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 |
| | 自在継手 | 無 | 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 | | | 三軸セル |
| 圧裂 | 直径(mm) | 50 | 50 | | 50 | | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| | 高さ(mm) | 50 | 50 | | 50 | | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| | 本数 | 4 | 4 | | 5 | | 3 | 6 | 3 | 3 | 2 |
| | 球座 | 無 | 有 | | 有 | | 無 | 有 | 無 | 有 | 無 |



写真-1機関Aの装置



写真-5 機関Dの装置



写真-2 機関 B-1の試験装置



写真-6 機関Eの装置



写真-7 機関Fの装置



写真-3 機関 B-2の試験装置



写真-4 機関Cの装置



写真-8機関Gの装置



写真-9 機関Hの装置

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-2に示す.図-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自在継手を使用し、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.

(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-3~図-6に示す.なお凡例は各機関を示す.

図-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-4より,一軸引張り試験と圧裂試験のP波速度Vpを 比較すると,一軸引張り試験のVpが2.05~2.25 (km/s) に 分布しているのに対して,圧裂試験のVpは2.55~2.85 (km/s) に分布しており大きく異なっている.図-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.Vp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Vpの偏りは見られない.図-5より,一軸引張り 試験と圧裂試験のS波速度(V₂)を比較すると,一軸引 張り試験のVsが1.2~1.6 (km/s) に分布しているのに対し て,圧裂試験のVsは1.2~1.7 (km/s) に分布しており,Vp と比較して両試験の供試体の差は小さい.Vs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Vsが小さい.

図-6では、供試体の大ひずみレベルの剛性と一軸引張

り強さの関係を検討するため、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-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-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.

(3) 載荷速度の影響

一軸引張り試験の載荷速度については, 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載荷速度が 異なる結果となった. 圧裂試験についても 地盤工学会基準の載荷速度で行った機関と 一軸引張り試験と同様に0.01mm/minの載荷 速度で実施した機関があり,載荷速度が異 なる結果となった. そこで、載荷速度を表 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に示すとおり、引張り強 さと比較した. なお,一般には載荷速度が 速いほど、引張り強さも大きい. 図-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 (3×10⁴~7×10² MPa/s) であるこ とがわかる. 図-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 機関で載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、載荷速度依存性 を示すはずが、機関の違いにより、見かけ 上, 載荷速度依存性を示さなかった可能性 も考えられる. 図-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載 荷速度を変えた圧裂試験を行っており、や や載荷速度依存性を示す傾向が見られる.

(4) 一軸引張り試験における曲げの影響

ー軸引張り試験では、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(最大ひずみー最小ひずみ)/(平均ひずみ)を「ひずみゲージ 偏り度」と定義し、図-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-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-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.

(5) 一軸引張り試験における破壊位置の影響

ー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*_o)で割った値のパーセント表示 (*h*/*h*o×100)を「破壊位置(%)」と定義し,引張り強さ との関係を図-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.

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。

謝辞:この論文の内容は(公社)地盤工学会の室内試験 規格・基準委員会の下に設置された岩石および岩盤の一 軸引張り試験方法基準化検討WG(WGリーダー,谷和 夫)において実施した調査の成果をとりまとめたもので ある.本論文の著者以外に,(公財)鉄道総合技術研究 所の嶋本敬介氏,基礎地盤コンサルタンツ(株)の山田 眞一氏にも一斉試験にご協力いただきました.また,同 WGメンバーには試験結果のとりまとめに対するご協力 をいただきました.ここに記して感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 地盤工学会:地盤材料の方法と解説 第11章 圧裂による岩石の引張り強さ試験方法(JGS2551-2009), pp.901-911, 2009.
- 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:「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,公益社団法人地盤工学会WEBサイト https://www.jiban.or.jp/index.php?option=com_content&view=article&id =1142%3Awg13wg&catid=94%3A2008-09-15-06-51-48&Itemid=164, 2014.

EVALUATION OF VARIATON OF THE TENSILE STRENGTH OBTAINED BY THE DIFFERENT DIRECT TENSION TEST METHODS

Testuji OKADA, Kimihiro HASHIBA, Kimitoshi HAYANO, Yasuki OIKAWA, Masaki ONO and Toshiaki NAKAMURA

A direct tension test and a splitting tensile strength test on Oya tuff were performed by eight institutes to evaluate the variation of the tensile strength obtained by the different test method. The results are as follows. (1) The variation of tensile strengths by the direct tension test is smaller than that by the splitting tensile strength test. (2) The tensile strength obtained by the direct tension test is about 0-40% smaller than that obtained by the splitting tensile strength test. (3) The tensile strengths obtained by the direct tension test is about 0-40% smaller than that obtained by the splitting tensile strength test. (3) The tensile strengths obtained by the direct tension test seem to be independent of the locations of the tensile fractures in the specimens.