

軟岩の一軸引張り試験と圧裂試験による 引張強さの比較に関する一考察

西山 理沙^{1*}・太田 征志¹・小川 浩司²・宇野 晴彦¹・金谷賢生¹

¹日本原燃株式会社 再処理事業部 土木建築部（〒039-3212青森県上北郡六ヶ所村大字尾駁字沖付4-108）

²応用地質株式会社 エネルギー事業部 地盤物性部（〒336-0015 埼玉県さいたま市南区太田窪2-2-19）

*E-mail: risa.nishiyama@jnnl.co.jp

軟岩の引張り強さは、その簡易性から圧裂試験による間接測定が行われている。しかし、一軸圧縮強さが5MPa程度以下の軟岩においては、供試体内における局所的な応力集中による破壊が起こりやすいため、引張り強さは試験方法により影響を受けることが懸念される。ここでは、試験方法の違いによる引張り強さの相違を把握することを目的として、凝灰岩、砂岩、泥岩等の岩種を用いて、同種岩石による一軸引張り試験と圧裂試験を実施した。その結果、湿潤密度、弾性波速度等の物理特性がほぼ等しい場合には、一軸引張り強さと圧裂引張強さに大きな差がないことが確認できた。また、一部の岩種について異方性の確認試験を実施した結果、顕著な異方性は認められなかった。

Key Words : soft-rock, uniaxial tension test, brazilian test, tensile strength

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震の発生後、重要構造物に対する地震動による設計荷重が大きく設定されるようになり、それを支持する基礎地盤の安定性評価に当たっては、より適切な物性値の設定が必要となってきた。

従来の評価方法では、岩盤の引張り強さは考慮しないものとして、すべり安全率等の地盤安定性評価を実施してきたが、基礎地盤の安定性評価の信頼性を上げるためには、本来、岩盤が有している引張り強さを考慮すべきと考えられる。

引張り強さが 2MPa 程度以上の岩石については、圧裂引張り強さと一軸引張り強さは、実用レベルでほぼ一致しているとされてきた¹⁾。また、一軸引張り試験と比較すると、圧裂試験は簡便で実用性が高い。そのため、岩盤の引張り強さは、圧裂試験による引張り強さを適用してきたが、軟岩における一軸引張り試験と圧裂試験による引張り強さの差異については、これまでの研究によって以下のような指摘がされている。

- ・圧裂試験では理論上は線荷重を前提としているが、軟岩では載荷板と供試体側面の接触部が押しつぶされて面で接触することにより、線荷重でなく帯荷重となる。そのため、理想的な応力状態となっておらず、引張り応力が理論と異なっている²⁾。
- ・圧裂試験では理論上の破壊面の位置は載荷軸面上に固

定されるが、一軸引張り試験では供試体の最も弱い横断面で破壊が生じる。したがって、不均質な供試体の場合は圧裂試験より一軸引張り試験の方が強度が小さくなる³⁾。

- ・延性的な材料では残留強度が大きいいため、圧裂試験で供試体の一部に引張り破壊が生じた後も荷重が増加し、結果として引張り強さを過大に評価する⁴⁾。
- ・圧裂試験は載荷部の応力集中によるせん断破壊の影響を受けて引張り強さを過小評価する可能性がある⁵⁾。

上記のように、一概にどちらの試験の強度が大きいということではないが、最近の多くの研究では、圧裂試験が引張り強さを大きく評価している可能性が指摘されている^{3,6)}。

そこで、試験方法の違いによる軟岩の引張り強さの相違を把握することを目的として、種々の岩石による一軸引張り試験と圧裂試験を実施し比較検討した。また、一軸引張り試験の寸法と引張り方向による影響についても検討した。

2. 対象岩盤および試験方法

(1) 対象岩盤

本稿では、6つの岩種を対象に試験を実施した。試験対象の岩種は、細粒砂岩、泥岩、凝灰岩、軽石凝灰岩、

砂質軽石凝灰岩および軽石質砂岩である。

これらのうち細粒砂岩と泥岩は、調査用の試掘坑底盤から直接鉛直下方向にコアドリルと一重管サンプラーを用いて掘進し、試料を採取した。

泥岩を除く岩種については、地表から鉛直下方向に掘進深度 50m 程度のボーリングを行い、ロータリー式スリーブ内蔵二重管サンプラーを用いて径 125mm のコア試料を採取した。

なお、採取した深度におけるこれらの試料の一軸圧縮強さは1〜5MPa程度である。

(2) 供試体作製方法

採取した試料を用いて目的に応じた寸法と方向の供試体を、直ナイフ、トリマー、マイターボックス等を用いて作製した。

a) 試験法の違いによる強度差検討のための供試体作製

一軸引張り強さと圧裂引張り強さを比較するため、採取位置が近く、かつ引張り応力の方向が同一となるようにそれぞれの供試体を作製した。供試体径は 50mm とし、径 125mm のボーリングコア試料や径 200mm の試掘坑採取試料から切り出して整形した。引張り応力の方向は鉛直方向が主となる供試体を作製したが、後述する異方性検討用のため引張り方向が水平 3 方向となる供試体も作製した（図-1）。

b) 寸法による強度差検討のための供試体作製

一軸引張り強さの寸法効果を検討するため、採取位置が近く、かつ引張り応力の方向が同一となるように、径 50mm と 125mm の供試体を作製した。引張り応力の方向は鉛直方向に統一した。

ボーリングコア試料を用いた検討では、コア径のままの約 125mm の径の供試体とその近傍の深度の試料から切り出して整形した約 50mm 径の供試体で比較を行った。

一方、試掘坑で採取した試料を用いた検討では、同一または近傍のコア径 200mm の試料からともに切り出して整形した径 125mm と 50mm の供試体で比較を行った。泥岩については採取したコア径のままの径 200mm の供試体でも一軸引張り試験を実施した。

c) 異方性による強度差検討のための供試体作製

一軸引張り強さの異方性を検討するため、近い採取位置の試料から、複数の载荷方向の供試体を作製した。供試体径は 50mm とし、試料から切り出して整形した。

ボーリングコア試料を用いた検討では、図-1 に示す鉛直方向と水平 3 方向の合計 4 方向に引張り応力が発生するような供試体を作製し比較した。

試掘坑で採取した試料を用いた検討では、泥岩は、試掘坑内に鍵層等が無く堆積構造が不明であったため、鉛直方向と水平 3 方向の合計 4 方向に引張り応力が発生するような供試体を準備した。一方、細粒砂岩は、試掘坑

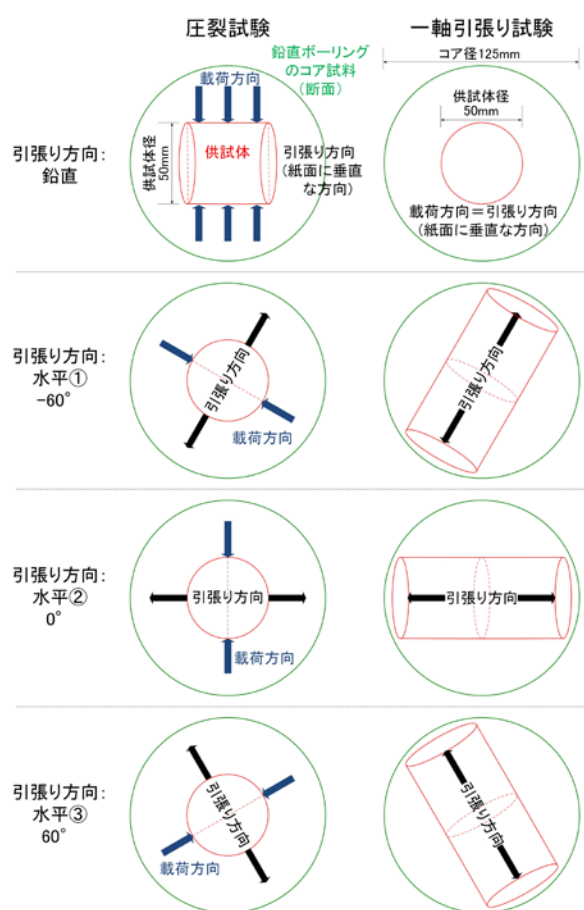


図-1 異方性検討供試体の引張り方向の例

内で確認された鍵層の走向・傾斜が評価可能であったため、その層理面に直交する方向と層理面に水平な 3 方向の合計 4 方向に引張り応力が発生するような供試体を準備して比較した。

(3) 引張り試験方法

圧裂試験と一軸引張り試験方法を下記に示す。その他、湿潤密度試験（ノギス法，JGS 2132-2009）や、引張り方向の超音波速度測定（P 波と S 波，JGS 1220-2009）を実施した。

a) 圧裂試験

圧裂試験は、JIS M 0303:2000 「岩石の引張強さ試験方法」と JGS 2551-2009 「圧裂による岩石の引張り強さ試験方法」に準拠して実施した。供試体寸法は、直径 50mm、直径：長さ＝1：1 とした。自然状態の供試体に対して、1〜15 分で破壊するような载荷速度により荷重の最大値から圧裂引張り強さを求めた。

b) 一軸引張り試験

岩石の引張り強さを求める試験として原理が最も明快であるのは一軸引張り試験である。円柱供試体の上下端面に載荷板を接着するなどして軸方向に直接引張る方法であり、応力状態が比較的理想的である。一軸引張り試験は、地盤工学会で現在基準化が行われており、公示中

の基準案「岩石の一軸引張り試験方法」を参照して試験を実施した。

供試体寸法は、直径 50～200mm、直径：高さ＝1：2 とし、自然状態の供試体に対して、軸ひずみ速度 0.02%/min 程度で軸方向の引張り力の最大値を確認するまで載荷した。

供試体と上部および下部の載荷板との間の接着には、エポキシ系接着剤を用いた。供試体と接着剤を塗布した載荷板を片面ずつ接着させ、接着剤硬化後に試験機にセットした。一軸引張り試験装置は、荷重の偏心・傾斜を防ぐように、ユニバーサルジョイント（自在継手）を上下に組み込む方式を用いた。

試験結果から引張り応力の最大値を一軸引張り強さとして求めた。軸ひずみの測定は、LDT（局所変位計：Local Deformation Transducer）により供試体側面の対面する 2 か所で実施した。

3. 試験法の違いによる試験結果

一軸引張り試験の応力ひずみ曲線の一例を図-2 に示す。細粒砂岩、泥岩および軽石質砂岩では多くが弾性的に引張り応力が増加した後に脆性的に破断した。一方、軽石凝灰岩の多くや砂質軽石凝灰岩の半数程度は延性的な挙動を示した後に破断した。凝灰岩は、その中間的な挙動を示した。

一軸引張り強さと圧裂引張り強さの比較結果を湿潤密度および超音波伝播速度と合わせて図-3 と図-4 に示す。各試料のセットは、採取位置が近く、かつ引張り応力の方向が同一となるような供試体を選定し比較した。

図によれば、延性的な軽石凝灰岩と砂質軽石凝灰岩は、密度差や超音波伝播速度に若干差があるにもかかわらず、一軸引張り強さと圧裂引張り強さに大きな差は認められない。また、凝灰岩は密度差や超音波伝播速度に差は認められないが、一軸引張り強さと圧裂引張り強さには強

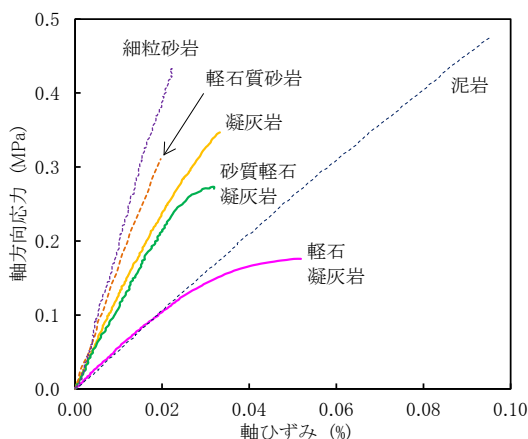


図-2 一軸引張り試験の応力ひずみ曲線の例

度比（一軸引張り強さ／圧裂引張り強さ）が 1.5 となるものも見られる。しかし、いずれの岩種においても一軸引張り強さと圧裂引張り強さには明瞭な強度の偏りは認められず、特に、延性的な材料が圧裂試験によって引張り強さを過大評価する傾向⁴⁾は認められない。

一方、脆性的な細粒砂岩、泥岩および軽石質砂岩では、密度差や超音波伝播速度の差はほとんど見られないが、一軸引張り強さと圧裂引張り強さの強度比に大きなばらつきが生じている。一軸引張り強さと圧裂引張り強さの強度比のばらつきは、密度や超音波伝播速度の差に比べて大きく、特に、図-4 に示す細粒砂岩と泥岩の強度比は 1.8～0.48 と大きなばらつきを示している。これは、脆性的な細粒砂岩や泥岩は、脆性破壊することにより弱面の影響を受けやすく、延性的な凝灰岩類に比べて、ばらつきが大きくなることが考えられる。

各試験後の供試体の破壊状況は、圧裂試験では多くの供試体で載荷面近傍での局所的な破壊は認められず、載荷上下面で供試体直径を 2 分する亀裂で破壊している。

一方、一軸引張り試験では、ばらつきの大きな細粒砂岩、泥岩を除いては、供試体中心部の 60% 範囲内で、ほぼ水平に近い破壊面を示しているものが多い。なお、細粒砂岩、泥岩には、堆積構造沿いに破壊しているものもあり、ばらつきの要因として考えられるが、一軸引張り強さと圧裂引張り強さには明瞭な強度の偏りは認められず、これらの破断面には引張り強さを支配するような強度への影響はないものと考ええる。

4. 寸法による強度差に関する試験結果

一軸引張り強さと供試体寸法の関係について図-5 に示す。なお、湿潤密度と超音波速度が同程度であることを確認している。図によれば、凝灰岩は、ばらつきが大きく、平均値では、寸法の大きい径 125mm の方が大きな値を示している。軽石凝灰岩は、供試体径によらず、ほぼ同程度の値を示している。砂質軽石凝灰岩は、供試体径が大きい方が一軸引張り強さが大きい傾向を示している。これら火山砕屑岩でばらつきが大きいのは、不均質性が高かった可能性が考えられる。また、細粒砂岩はばらつきが大きく、寸法の違いによる一定の傾向は認められない。泥岩を除く、これらの供試体の引張り強さは、図-3 と図-4 に示した径 50mm の強度のばらつき範囲内に収まっており、この供試体寸法範囲では引張り強さに寸法効果は認められない。

一方、泥岩では径 200mm の試験も実施しているが、密度が同程度であるにもかかわらず、供試体径が大きいほど一軸引張り強さが小さくなる傾向が認められる。これは、前述の一軸引張り強さと圧裂引張り強さの比較で

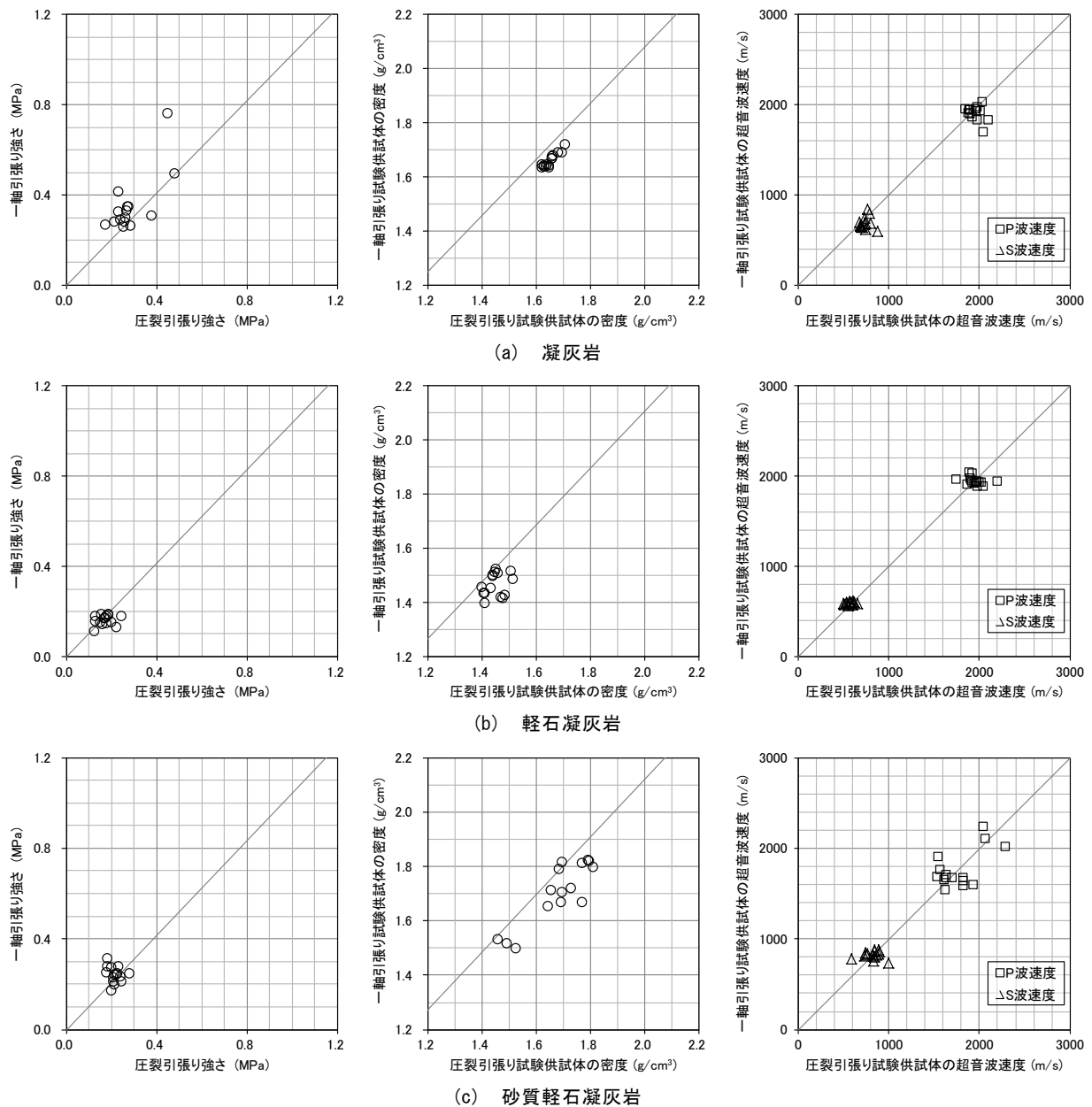


図-3 一軸引張り強さと圧裂引張り強さの比較（凝灰岩，軽石凝灰岩，砂質軽石凝灰岩）

も述べたように，一般的に考えられているように供試体寸法が大きくなると弱面を含む領域が多くなり，脆性的な挙動を示す泥岩で弱面の影響を受けて僅かではあるが寸法効果による引張り強さの低下が顕在化した可能性がある。

5. 異方性による強度差に関する試験結果

引張り応力方向と一軸引張り強さの関係について図-6に示す。

凝灰岩，軽石凝灰岩および砂質軽石凝灰岩のボーリングコア試料は基準とした方向のセットを複数深度で採取しているため，深度ごと（深度は，2m～4m 区間におい

て試料セットを A,B,C と表示）に比較を行った。図によれば，それぞれの試料毎には，引張り強さに異方性は認められなかった。

試掘坑で採取した試料の細粒砂岩では，周辺の鍵層で評価された層理面方向に対して直交あるいは平行な方向に引張り応力が発生するように試験を実施しているが，層理面に平行する方向は，3方向とも同程度の引張り強さを発揮しており，堆積方向と考えられる直交方向で引張り強さが大きい結果となっている。これは，細粒砂岩は粒状体の堆積構造配列により層理面直交方向が最弱にはならないことも考えられ，今後検討の余地がある。

一方，泥岩では，鉛直方向の一軸引張り強さが水平方向に比べて小さい結果となっており，試掘坑底盤での応力解放の影響を受けていることも考えられる。

6. まとめ

上記の検討により引張り強さが 2MPa 以下の軟岩において、湿潤密度、弾性波速度等の物理特性がほぼ等しい

場合には、一軸引張り強さと圧裂引張り強さに大きな差がないことが確認できた。また、引張り強さの異方性を検討するため、破断面が 4 方向となるようにそれぞれ供試体を作製し試験を実施した結果、全ての岩種において、

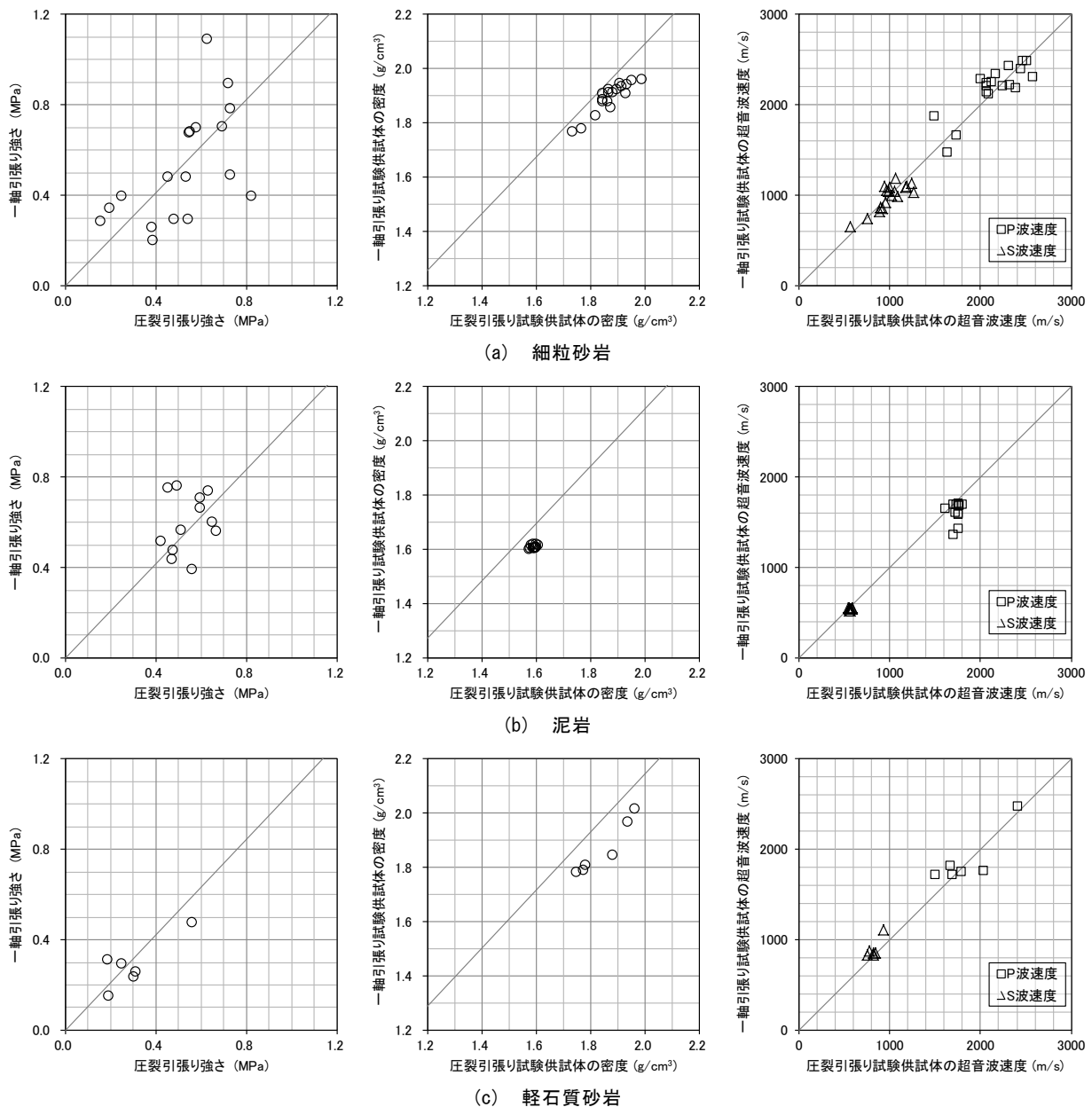


図-4 一軸引張り強さと圧裂引張り強さの比較（細粒砂岩，泥岩，軽石質砂岩）

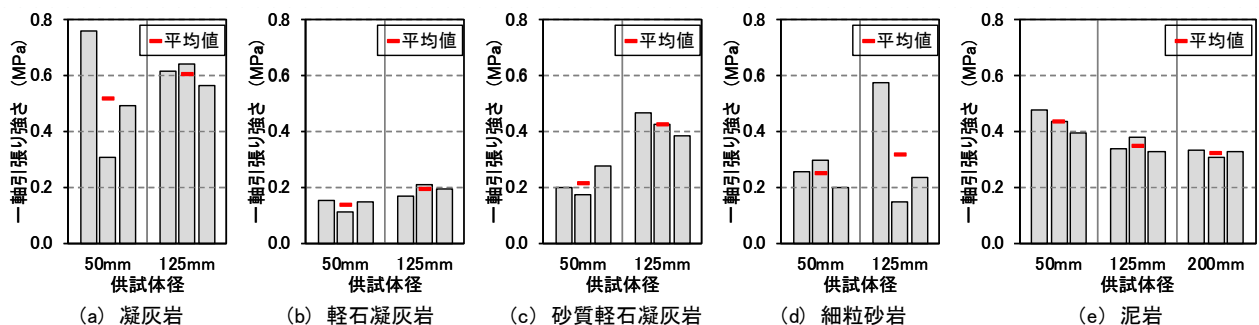


図-5 供試体寸法と一軸引張り強さ

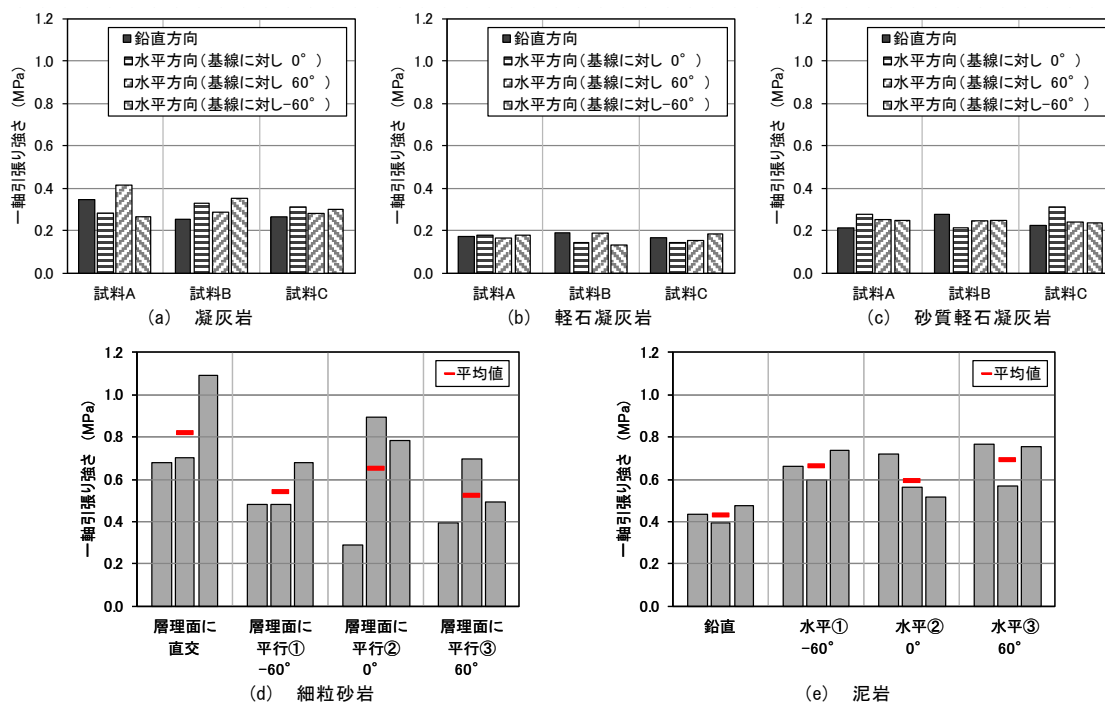


図-6 引張り方向と一軸引張り強さ

顕著な異方性は認められなかった。

したがって、本検討で対象とした軟岩においては、一軸引張り試験の引張り強さを正とした場合、圧裂試験における引張り強さも十分適用できるものとする。

なお、本検討では、供試体寸法など限られたパラメータ範囲で行っているため、十分な考察となっていないものもある。今後、供試体寸法と併せて引張り方向なども拡張した上で、検討することが望まれる。

謝辞

本稿をまとめるに当たっては、東京海洋大学 谷和夫教授および電力中央研究所 岡田哲実上席研究員に有益なご意見を頂きました。ここに、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山口梅太郎, 西松裕一: 岩石力学入門第3版, p.141, 東京大学出版会, 1991.
- 2) 青野泰久, 谷和夫, 岡田哲実, 酒井理哉: 田下凝灰岩の圧裂引張り試験における載荷点近傍の破壊のメカニズム, 第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.157-162, 2012.
- 3) 青野泰久, 谷和夫, 岡田哲実: 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, 第46回地盤工学研究発表会, pp.41-42, 2011.
- 4) 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・素材学会春季大会講演概要集, pp.171-172, 2001.
- 5) Namikawa, T. and Koseki, J.: Evaluation of tensile strength of cement-treated sand based on several types of laboratory tests. *Soils and Foundations*. Vol.47, No.4, pp. 657-674, 2007.
- 6) 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, pp.505-506, 2009.

COMPARISONS ON UNIAXIAL TENSION TEST AND BRAZILIAN TEST FOR THE DETERMINATION OF THE SOFT ROCK TENSILE STRENGTH

Risa NISHIYAMA, Masashi OOTA, Koji OGAWA, Haruhiko UNO
and Kensei KANAYA

Coventional Brazilian test has been applied to examining the tensile strength of soft rock. However, for the soft rock type that the compressive strength less than 5MPa, the stress concentration at rock sample is considered and probably induces the local rock failure and affects on the accuracy of uni-axial tension test. This study aims to compare the tensile strengths of different test methods, and both uniaxial tension test and Brazilian test were performed for tuff, sandstone and mudstone. As the result, for the rock that expresses similar physical properties (e.g. wet density, elastic wave velocity), the examined tensile strengths have no significant difference on uniaxial tension test and Brazilian test. Additionally, the authors also examine the anisotropy on tensile strength, the results indicate few anisotropy.