

湿潤状態での泥岩の一軸引張試験

羽柴 公博^{1*}・大久保 誠介¹・福井 勝則¹

¹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）

*E-mail: hashiba@sys.t.u-tokyo.ac.jp

北海道天塩郡幌延町で採取された稚内層珪質泥岩を用いて、湿潤状態のもと一軸引張試験を行い、完全応力-歪曲線を取得した。深度500 m付近で採取された試料は、一軸引張強さと圧裂引張強さの差が小さく、一軸引張試験と一軸圧縮試験で得られた応力-歪曲線の形状が似ていた。一方、深度1000 m付近で採取された試料は、一軸引張強さと圧裂引張強さの差異が大きいこと、一軸引張試験と一軸圧縮試験で得られた応力-歪曲線の形状の違いが大きいことなど、深度500 m付近で採取された試料とは若干異なる傾向が見られた。深度による強度・変形特性の違いは、生成過程やそれによって生じる微視的な構造の違いに起因すると考えられた。

Key Words : rock, mudstone, uniaxial tension test, wet condition, complete stress-strain curve

1. はじめに

岩石の引張強さは圧縮強さよりも相当に小さいため、地下構造物を設計する際には、できる限り引張応力が生じないようにするのが望ましい。しかしながら、地下構造物が大規模な場合や複雑な形状の場合、もしくは内圧を受けるような場合などには、周辺岩盤には部分的に引張応力が生じる可能性がある。そのため、圧縮応力下だけではなく引張応力下での岩石の変形・破壊特性を把握することも重要である。

これまでの研究により、種々の岩石について一軸引張応力下での完全応力-歪曲線が求められてきた。Peng¹⁾は板状試験片の一軸引張試験により、4種類の岩石（花崗岩、砂岩、大理石、石灰岩）の完全応力-歪曲線を求めた。Nova and Zaninetti²⁾は円柱形試験片の一軸引張試験を行って片麻岩の完全応力-歪曲線を求め、一軸引張強さと層理面の関係を調べた。福井ら³⁾は、一軸圧縮試験と同形状の円柱形試験片を用いた一軸引張試験法を提案し、6種類の岩石（花崗岩、安山岩、2種類の砂岩、2種類の凝灰岩）の完全応力-歪曲線を求めた。この試験法により、一軸引張応力下での非弾性歪の変化⁴⁾や載荷速度依存性⁵⁾も調べられた。しかし、これらはすべて気乾状態での試験結果である。わが国は地下水位が高く、多くの地下構造物が湿潤状態に近いにもかかわらず、湿潤状態での一軸引張試験はほとんど行われていないのが現状である。

本研究では、北海道天塩郡幌延町で採取された泥岩を

用いて、湿潤状態での一軸引張試験を行い、完全応力-歪曲線を取得した。応力-歪曲線と試験片に生じた破断面の形状について、他の岩石との比較を行った。さらに、一軸引張試験結果と圧裂引張試験結果、一軸圧縮試験結果とを比較検討した。

2. 試料岩石と試験方法

試料岩石として、北海道天塩郡幌延町で掘削されたボーリング孔HDB-11の、深度492.0~550.5 m（深度500 m付近）および深度966.5~1016.7 m（深度1000 m付近）の地点から採取された稚内層珪質泥岩を用いた。採取されたボーリングコアは、乾燥を防ぐため原位置で密封した。試験室で開封したボーリングコアから、直径25 mm、高さ50 mmの円柱形試験片を作製した。試験片の軸方向はボーリングコアの軸方向（地表面と垂直な方向）と一致させた。なお試験片には、それほど明瞭ではないものの水平方向から傾いた層理面が観察された。試験片は試験直前まで水に浸して保管した。

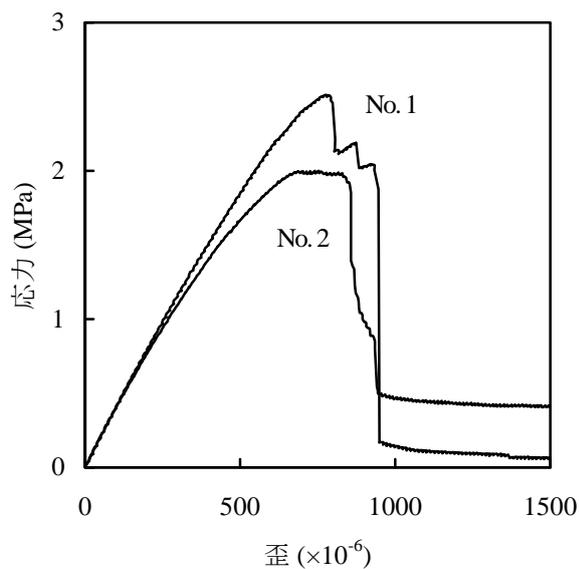
載荷には容量10 kNのサーボ試験機を用い、試験は福井ら³⁾と同様に以下の手順で行った。

- ①エポキシ系接着剤を試験片の上下端面と上下プラテン（載荷板）に塗る。
- ②試験片を上下プラテン間に挿入する。
- ③試験片と上下プラテンとを密着させ、試験片とプラテン間の接着剤を押し出す。
- ④上下プラテンの位置を固定したまま、1日程度接着剤

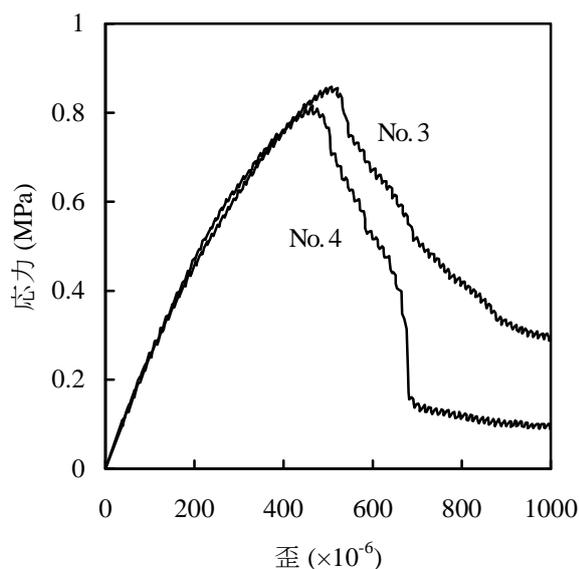
が硬化するのを待つ。

⑤一軸引張試験を実施する。

接着剤として、これまで乾燥した試験片に使用してきたニチバン製アラルダイトを試してみたところ、特に問題なく接着できたので、今回の試験でもアラルダイトを用いることにした。接着剤が硬化するのを待つ間、試験片を乾燥させないため、試験片に湿った脱脂綿を巻きつけ、さらにその外側をラップで覆った。一軸引張試験中も試験片は湿った脱脂綿とラップで覆ったままにした。一軸引張試験は歪速度 10^{-5} /sで行った。



(a) 深度 500 m 付近



(b) 深度 1000 m 付近

図-1 一軸引張試験で得られた応力-歪曲線

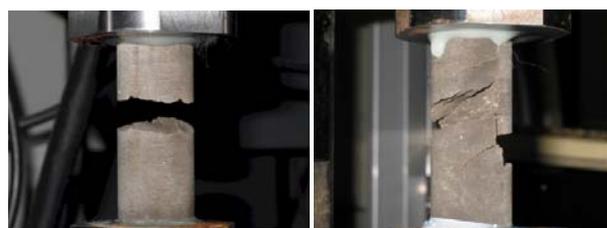
3. 一軸引張試験結果

一軸引張試験で得られた応力-歪曲線を図-1に示した。深度500 m付近の試験片No. 1では、試験開始からほぼ直線的に応力が増加していき、応力-歪曲線が若干上に凸になってから強度破壊点に達した。強度破壊点以降はわずかな応力の減少と増加を2回繰り返した後に、応力が0.2 MPa程度まで急激に減少した。その後は応力-歪曲線の傾きが緩やかになった。図-2(a)には試験終了後の試験片の写真を示したが、端面から離れた試験片の中央付近に破断面が生じたことがわかる。破断面は滑らかではなく若干の凹凸が見られた。

深度500 m付近の試験片No. 2では、試験開始からほぼ直線的に応力が増加していき、強度破壊点付近で応力がほぼ一定のまま歪が増加した後、急激に応力が減少した。応力が0.5 MPa程度まで急激に減少した後は、応力-歪曲線はほぼ水平になった。図-2(a)には試験終了後の試験片の写真を示したが、端面から離れた試験片の中央付近に複雑な形状の破断面が生じたことがわかる。破断面は種々の方向を向いた亀裂から構成されていた。

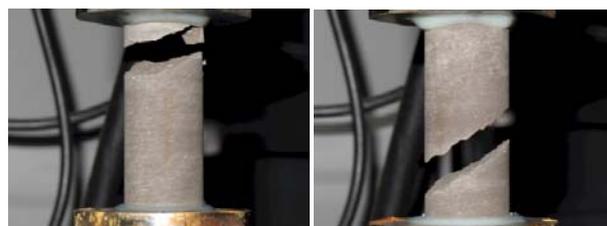
図-1(b)に示した深度1000 m付近の試験片No. 3では、試験開始からほぼ直線的に応力が増加していき、その後、応力-歪曲線が若干上に凸になってから強度破壊点に達した。強度破壊点を越えると若干下に凸の曲線を描きながら応力が減少した。図-2(b)には試験終了後の試験片の写真を示したが、上部プラテンの近傍に水平面からやや傾いた破断面が生じた。

深度1000 m付近の試験片No. 4でも、試験開始からほぼ



No. 1 No. 2

(a) 深度 500 m 付近



No. 3 No. 4

(b) 深度 1000 m 付近

図-2 図-1に示した試験片の試験終了後の写真

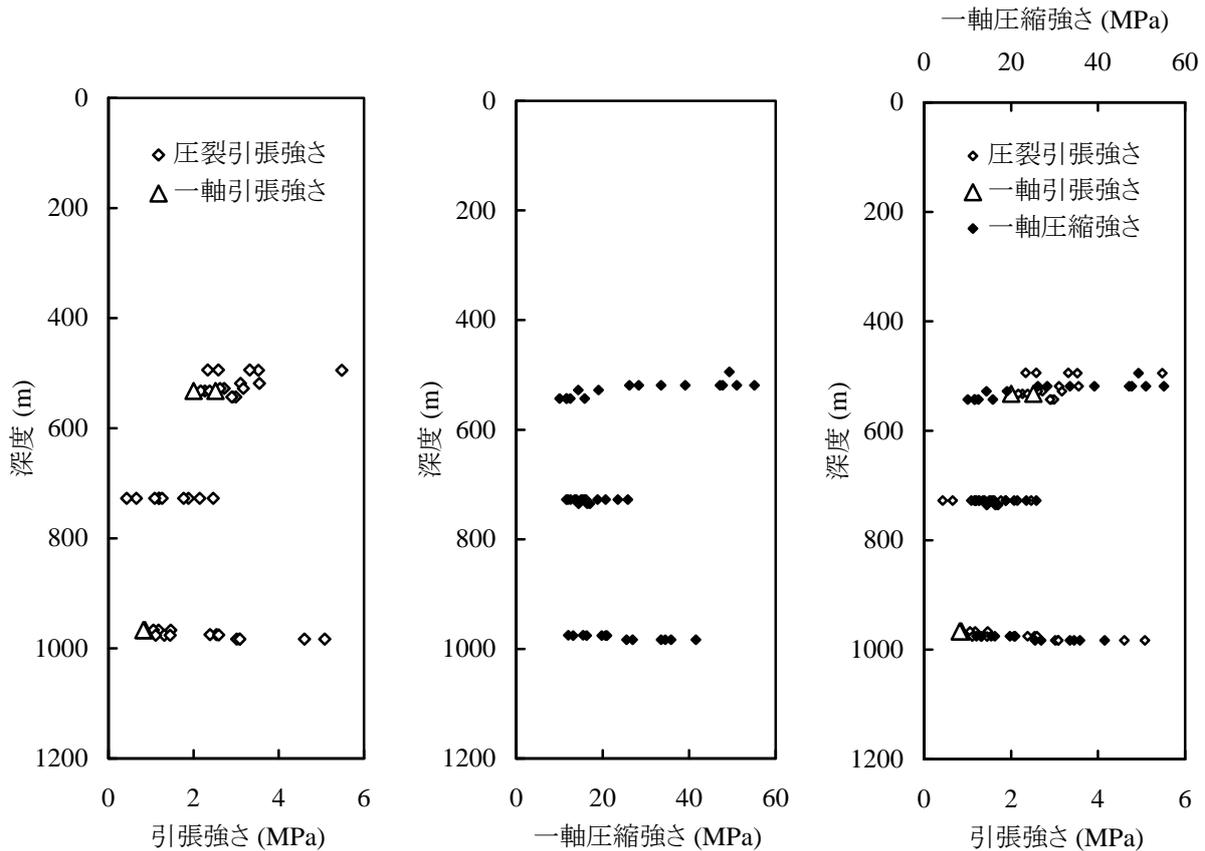


図-3 試料の採取深度と一軸引張強さ、圧裂引張強さ、一軸圧縮強さの関係

直線的に応力が増加していき、その後、応力-歪曲線が若干上に凸になってから強度破壊点に達した。強度破壊点以降で応力が0.1 MPa程度まで減少した後は、応力-歪曲線の傾きが緩やかになった。図-2(b)には試験終了後の試験片の写真を示したが、載荷軸方向と約45°の角度をなす破断面が生じたことがわかる。

深度500 m付近の試験片の一軸引張強さは深度1000 m付近の試験片の約2.5倍であったが、残留強度は両者で同程度であった。

4. 考察

(1) 破壊様式

図-1(a)に示したように、深度500 m付近の試験片では、強度破壊点付近で応力が減少と増加を繰り返したり（試験片No. 1）、応力がほぼ一定のまま歪が増加したりした（試験片No. 2）。このような複雑な現象は他の岩石の一軸引張試験では見られなかった³⁾。その後、応力が急激に減少する様子は、来待砂岩、多胡砂岩、三城目安山岩、稲田花崗岩など比較的硬質な岩石の気乾状態での結果と似ていた³⁾。

福井ら³⁾は、三城目安山岩の一軸引張試験で生じた破断面にはかなり大きな凹凸が見られ、凹凸の高低差は4

～6 mmであったと述べている。図-2(a)に示したように、試験片No. 1に生じた破断面の凹凸の高低差は三城目安山岩と同程度であった。しかし、試験片No. 2の破断面はかなり複雑な形状をしており、凹凸の高低差は20～30 mmもあった。いずれの試験片でも、複数の層理面で生じた亀裂が完全に伸びきらず、それぞれが連結したように見える。亀裂が完全に伸びきらなかった原因としては、粒子や層理面の結合の強さなどに起因する不均質性の影響が考えられる。

図-1(b)に示した深度1000 m付近の試験片では、強度破壊点以降で応力が比較的緩やかに減少した。応力-歪曲線の形状は田下凝灰岩や河津凝灰岩などの比較的軟質な岩石の気乾状態での結果と似ていた³⁾。図-2(b)に示したように、深度1000 m付近の2本の試験片には、ほぼ層理面に沿って破断面が生じた。破断面は水平面から傾いており、深度500 m付近の試験片に生じた破断面よりは若干滑らかであった。

ボーリング孔HDB-11の深度500 m付近は、稚内層の上部に位置し遷移帯と呼ばれている⁹⁾。深度1000 m付近の稚内層下部とは生成過程や微視的な構造が異なっている可能性があり、その違いが一軸引張強さや応力-歪曲線、破断面の形状などの違いに現れたと考えられる。今回の試験結果を見ると、深度500 m付近の方が深度1000 m付

近よりも、層理面がより強く固結していると予想された。

(2) 圧裂引張試験結果および一軸圧縮試験結果との比較

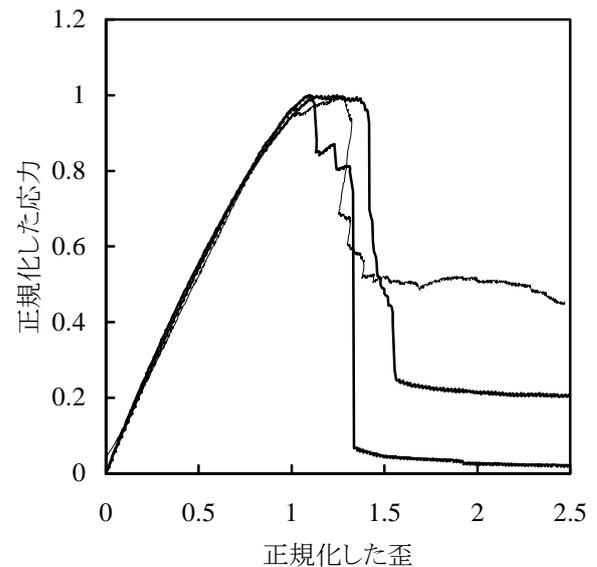
一軸引張試験に用いた試験片と同一のボーリング孔から採取されたコアより試験片を作製して、圧裂引張試験を行った。試験には直径25 mm、高さ12.5 mmの試験片を用い、層理面に垂直に载荷を行った。図-3(a)には採取深度と圧裂引張強さの関係を◇で示した。圧裂引張強さは、深度500 m付近では2~5.5 MPa、深度700 m付近では0.5~2.5 MPa、深度1000 m付近では1~5 MPaとかなりばらついた。

同図には一軸引張強さを△で示した。深度500 m付近では、平均値で比較すると圧裂引張強さの方が一軸引張強さよりもやや大きかったものの、両者の差異は小さかった。一方、深度1000 m付近での一軸引張強さは圧裂引張強さの最小値と同程度であり、平均値で比較すると、圧裂引張強さは一軸引張強さの4倍程度であった。圧裂引張強さがかなり大きくなった原因として、圧裂引張試験では、破断面が層理面に垂直に生じるように载荷を行ったためと考えられる^{7,8)}。この結果からも、深度500 m付近よりも深度1000 m付近の試験片の方が、層理面の影響が大きく、引張強さの異方性も大きいことが予想された。

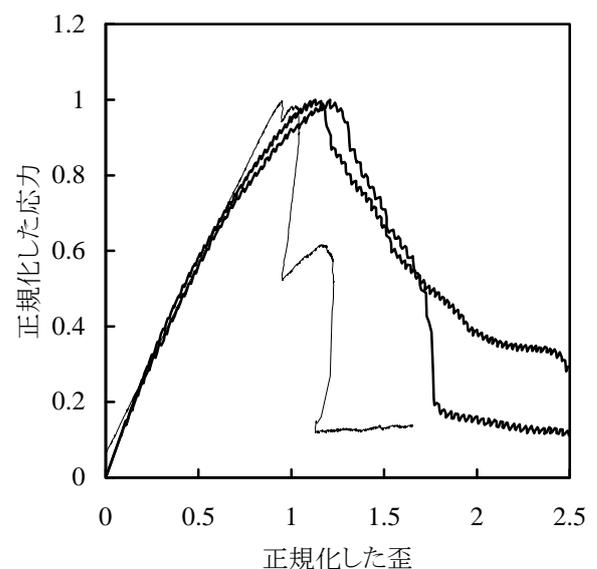
一軸引張試験および圧裂引張試験に用いた試験片と同一のボーリング孔から採取されたコアより試験片を作製して、一軸圧縮試験を行った。試験には一軸引張試験と同形状の試験片を用い、载荷方向も一軸引張試験と同じにした。図-3(b)には採取深度と一軸圧縮強さの関係を示した。一軸圧縮強さは深度500 m付近では10~55 MPa、深度700 m付近では10~25 MPa、深度1000 m付近では10~40 MPaと、圧裂引張強さと同様にかなりばらついた。

引張強さと圧縮強さを比較するため、図-3(c)では上の目盛が下の目盛の10倍になるようにし、一軸引張強さと圧裂引張強さは下の目盛に対応するように、一軸圧縮強さは上の目盛に対応するように試験結果を示した。試験結果はかなりばらついたが、このような整理を行うと、引張強さと圧縮強さの分布する範囲が各深度で比較的良く一致した。この結果より、脆性度は10程度であることが予想されるが、これは、多くの堆積岩の気乾状態での結果と同程度であった³⁾。

次に、一軸引張試験と一軸圧縮試験で得られた応力-歪曲線を比較してみる。図-1(a)に示した応力-歪曲線を、応力を強度で正規化し、歪を(強度/ヤング率)で正規化して図-4(a)に太線で示した。一軸圧縮試験で得られた応力-歪曲線の形状は試験片ごとにばらついたが、その中の一例を、一軸引張試験結果と同様の正規化を行って細線で示した。図よりわかるように、強度破壊点以前の応力-歪曲線の形状は、一軸引張試験と一軸圧縮試験と



(a) 深度 500 m 付近



(b) 深度 1000 m 付近

図-4 一軸引張試験(太線)と一軸圧縮試験(細線)で得られた応力-歪曲線の比較

で良く一致した。強度破壊点以降についても、何段階かにわたって応力が減少することや、ある程度の残留強さがあることなど、一軸引張試験と一軸圧縮試験とで共通点が見られた。

深度1000 m付近で得られた図-1(b)の結果についても、同様の正規化を行って図-4(b)に示した。深度500 m付近の結果に比べると深度1000 m付近の試料では、一軸引張試験と一軸圧縮試験の応力-歪曲線は大きな差異が見ら

れた。この原因の一つとして、一軸引張強さと圧裂引張強さの差異が大きかったのと同様に層理面の影響が考えられた。強度破壊点以前では、一軸引張試験での応力-歪曲線は強度破壊点のかなり前から上に凸になったが、一軸圧縮試験では強度破壊点付近までほぼ直線であった。強度破壊点以降についても、一軸引張試験よりも一軸圧縮試験の方が応力の減少が急激であった。

5. まとめ

北海道天塩郡幌延町で採取された稚内層珪質泥岩を用いて、湿潤状態での一軸引張試験を行い、完全応力-歪曲線の取得に成功した。

深度500 m付近で採取された試料は、一軸引張強さと圧裂引張強さの差が小さく、一軸引張試験と一軸圧縮試験で得られた応力-歪曲線の形状が似ていた。これらの結果は、他の多くの岩石、特に比較的硬質な堆積岩と類似していることがわかった。ただし、他の岩石では見られないような複雑な破断面が生じる可能性があることが確認された。

深度1000 m付近で採取された試料は、ほぼ層理面に沿って破断面が生じた。応力-歪曲線の形状は田下凝灰岩や河津凝灰岩などの比較的軟質な岩石の結果と似ていた。一軸引張強さと圧裂引張強さの差異が大きいこと、一軸引張試験と一軸圧縮試験で得られた応力-歪曲線の形状の違いが大きいことなど、深度500 m付近で採取された試料とは若干異なる傾向が見られた。この原因の一つとして、深度1000 m付近の方が変形・破壊特性に及ぼす層理面の影響が大きいことが考えられた。

深度500 m付近は稚内層上部の遷移帯、深度1000 m付近は稚内層下部に位置し、両者の試料の強度・変形特性の違いは、生成過程やそれによって生じる微視的な構造の違いに起因する可能性がある。しかし、今回得られた

一軸引張試験結果は各深度で2本ずつと少なく、今後、試験結果を蓄積して検討していく必要がある。また、より実際に近い環境を実現するため、試験片を水没させた状態での一軸引張試験の実施も重要である。そのため、今後、試験装置の改造や接着剤の検討を行う予定にしている。湿潤状態での一軸引張試験はこれまであまり行われていないため、他の岩石の試験結果を蓄積することも重要な課題である。

謝辞：試験に際してご助力いただいた、東京大学工学系研究科技術職員の畠山正樹氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) Peng, S.S.: A note on the fracture propagation and time-dependent behavior of rocks in uniaxial tension, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 12, pp. 125-127, 1975.
- 2) Nova, R. and Zaninetti, A.: An investigation into the tensile behaviour of a schistose rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 27, pp. 231-242, 1990.
- 3) 福井勝則, 金豊年, 大久保誠介：一軸引張応力下での岩石の完全応力-歪曲線, 資源と素材, 111, pp. 25-29, 1995.
- 4) 福井勝則, 大久保誠介, 清水剛：一軸引張応力下での岩石の破壊過程に関する研究, 資源と素材, 114, pp. 925-930, 1998.
- 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, 729, pp. 59-71, 2003.
- 6) 松井裕哉, 新里忠史, 山口雄大：幌延深地層研究計画平成17年度調査研究成果報告, JAEA-Research 2006-073, 第4章, 2006.
- 7) 工藤洋三, 佐野修, 古川浩平, 中川浩二：花崗岩の圧裂強度実験結果のばらつきに関する研究, 土木学会論文集, 400, pp. 233-241, 1988.
- 8) Claessona, J. and Bohloli, B.: Brazilian test: stress field and tensile strength of anisotropic rocks using an analytical solution, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 39, pp. 991-1004, 2002.

UNIAXIAL TENSION TEST WITH MUDSTONE UNDER WET CONDITION

Kimihiko HASHIBA, Seisuke OKUBO and Katsunori FUKUI

Siliceous mudstone sampled in Horonobe, Hokkaido was applied to uniaxial tension test under wet condition, and complete stress-strain curve was obtained. As for rock samples at 500 m depth, uniaxial tensile strength was almost equal to indirect tensile strength, and the shape of stress-strain curve was similar between uniaxial tension and compression. As for rock samples at 1000 m depth, uniaxial tensile strength was much smaller than indirect tensile strength, and the shape of stress-strain curve in uniaxial tension was different from that in uniaxial compression. It can be said that formation process and microscopic structure considerably affect the strength and deformation properties of siliceous mudstone.