

破碎した堆積軟岩の強度回復特性

羽柴 公博^{1*}・大久保 誠介¹・福井 勝則¹・雷 鳴¹

¹東京大学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

最近になって、地下を掘削後に適切な支保が施された場合は、損傷を受けた周辺の岩盤が徐々に回復する可能性があることが明らかになってきた。そこで本研究では、北海道幌延町で採取された堆積軟岩を用いて、力学特性の回復に関する検討を行った。試験では、岩石試験片を厚肉円筒内で破壊させ、さらに押し込んだ後に取り出して、一軸圧縮試験を行った。押し込みの際の最大荷重が大きいかほど一軸圧縮強さが増加し、試験結果は過去に得られている他の岩石の結果と似た傾向を示した。さらに、押し込みの際の荷重の保持時間が長いほど一軸圧縮強さが大きくなる傾向が見られた。また、一軸圧縮強さだけでなく弾性波速度も回復することが確認された。

Key Words : rock, recovery, uniaxial compressive strength, elastic wave velocity, compaction

1. はじめに

地下を掘削すると、その周辺の岩盤は掘削の衝撃や応力状態の変化により損傷を受ける。この損傷を受けた領域は緩み領域と呼ばれることがある。従来は、時間の経過とともに緩み領域は拡大していき、地下構造物の安定性は徐々に低下すると考えられることが多かった。しかし最近になって、掘削後に適切な支保が施された場合は、緩み領域が徐々に回復する可能性があることが、室内試験や原位置調査で明らかになってきた。

大久保他¹⁾は、岩石試験片を厚肉円筒内で破壊させ、さらに押し込んだ後に取り出して、一軸圧縮試験を行った。その結果、押し込みの際の荷重が大きいかほど一軸圧縮強さが大きくなり、岩種によっては、元の健全な試験片よりも一軸圧縮強さが大きくなることを確認した。石島他²⁾は、約50年前の長壁式採炭パネルの採掘跡を調査し、かつての破碎ずりが現在では固結し、ある程度の強度を持つようになったことを報告している。試験条件がやや異なるが、Dieterich³⁾はせん断試験において、試験前に垂直荷重を加える時間が長いほどせん断抵抗が大きくなることを確認した。Lindqvist and Lai⁴⁾は、押し固めた岩粉に圧子を貫入し、押し固めの際の荷重が大きいかほど圧子の貫入抵抗が大きいかことを報告している。

これらの研究結果は、地質学が対象とする時間よりもかなり短い時間、すなわち数十年から数百年の間でも、ある応力状態のもとでは岩石の力学特性が回復する可能性を示している。高レベル放射性廃棄物の地層処分施設

をはじめとする地下構造物の長期安定性を評価するためには、岩石のこのような回復特性を把握することが重要と考えられる。しかし、これまでの研究は岩種や試験条件に限られており、岩石の回復特性に関しては、検討の余地が多く残されているのが現状である。

そこで本研究では、北海道幌延町で採取された堆積軟岩を用いて、力学特性の回復に関する検討を行った。まず、大久保他¹⁾と同様の試験を行い、強度回復に及ぼす押し込み荷重の影響を検討した。次いで、破碎した試験片の押し込みを一定時間保持し、一軸圧縮強さや弾性波速度の回復に及ぼす荷重保持時間の影響を検討した。さらに、これらの結果と過去に得られている他の岩石の結果とを比較検討した。

2. 試験方法

試験には、北海道幌延町で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。そのボーリングコアから、直径25 mm、高さ25 mmの円柱形試験片を作製し、試験直前まで水に浸して保管した。ボーリング孔や採取深度については表-1にまとめて示した。本研究では、採取場所や採取深度が異なる5種類の試料を用いたが、以下ではこれらを試料A～Eと呼ぶことにする。

試験では、図-1のように、まず試験片を外径50 mm、内径27 mmの鋼製厚肉円筒に入れ、直径25 mmの押し棒

表-1 試料岩石と試験条件

	試料A	試料B	試料C	試料D	試料E
ボーリング孔	HDB-6	HDB-10	HDB-11		
深度	400m付近	500m付近	500m付近	700m付近	1000m付近
試験	①	②			
試験装置	200kN万能試験機	1500kNサーボ試験機			
押し込み最大荷重	9.8, 19.6, 39.2, 58.8 kN	39.2 kN			
荷重保持時間	-	10秒, 4時間, 24時間			

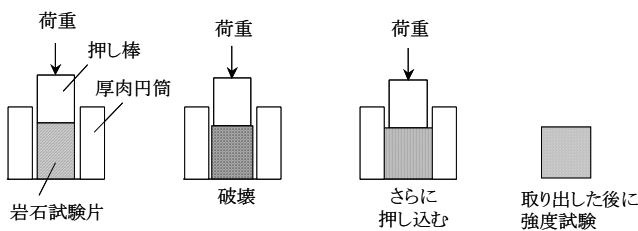


図-1 試験方法

で試験片に圧縮荷重を加えた。ピーク強度を過ぎると荷重はいったん下がるが、なおも押し棒を押し込み続けた（押し込み過程）。やがて、荷重が押し込み最大荷重に達したら試験機を止めて試験片を取り出し、取り出した試験片を用いて一軸圧縮試験を行った。以上が、回復に及ぼす押し込み最大荷重の影響を調べた試験であり、以下では試験①と呼ぶことにする。なお、試験①は試料Aを用いて行った。

試験①と同様に所定の押し込み最大荷重に達するまで押し棒を押し込み続けた（押し込み過程）後、ある一定の時間だけ押し込み荷重を保持し（荷重保持過程）、その後に取り出した試験片を用いて一軸圧縮試験を行った。これは、回復に及ぼす荷重保持時間の影響を調べた試験であり、以下では試験②と呼ぶことにする。試験②は試料B～Eを用いて行った。

試験①と試験②で用いた試験装置と試験条件を表-1に示した。試験①には万能試験機を用いた。押し込み過程では10～20分で所定の最大荷重に達するように、また、押し込み過程後の一軸圧縮試験では約4分でピーク強度に達するように載荷速度を調整した。試験②の押し込み過程は、まず、一定の変位速度 5.0×10^{-3} mm/sで押し棒を押し込んだ。試験②では所定の押し込み荷重に達したときにすみやかに荷重を保持するため、途中で荷重制御しておく必要があった。そこで、試験結果にその影響が現れにくいと考えられる荷重が比較的小さいうち、すな

わち、強度破壊点を過ぎた試験開始約30分後に一定の荷重速度25 N/sに切り換えた。試験②の荷重保持過程後の一軸圧縮試験は、一定の歪速度 10^{-4} /sで行った。

試料CとEでは、荷重保持過程後に弾性波速度測定を実施した。測定では、試験片の両端面に圧電素子を押し当て、パルス電圧発生装置（昭和電気研究所製、MODEL 4701）により、一方の圧電素子から発振周波数100 Hzでパルス状に電圧を発生させた。もう一方の圧電素子でその受信波をとらえ、その時間差から試験片を伝搬するP波弾性波速度を求めた。

3. 試験結果

(1) 押し込み最大荷重の影響（試験①）

試料Aを用いた試験①の押し込み過程における応力-歪曲線の一例を図-2に示した。今回の試験ではかなり変形が大きくなったが、簡明さを重んじて、軸歪は初期長さ、応力は初期断面積を基準として計算した。そのため、みかけの軸歪、みかけの応力と称するのが正しいが、煩雑さを避けるため以下では単に軸歪、応力とする。図よりわかるように、載荷開始から応力は増加していき、20 MPa程度の一軸圧縮強さに達した後、応力は低下した。軸歪が4～5 %付近で応力は極小値約6 MPaとなり、その後は軸歪が増加するにしたがって、応力は下に凸の曲線を描きながら増加した。

図-3には、押し込み過程前の健全な試験片と、押し込み過程後に厚肉円筒から取り出した試験片の写真を示した。押し込み過程後の試験片の側面には細かいひび割れが見られたが、比較的滑らかであった。上面や下面にもひび割れが見られる場合があった。押し込み過程後の試験片よりも押し棒の直径の方が若干小さいため、上面の周縁は面取りをしたような状況であった。

図-4には、押し込み過程後の一軸圧縮試験で得られた応力-歪曲線を、押し込み最大荷重ごとに一例ずつ示し

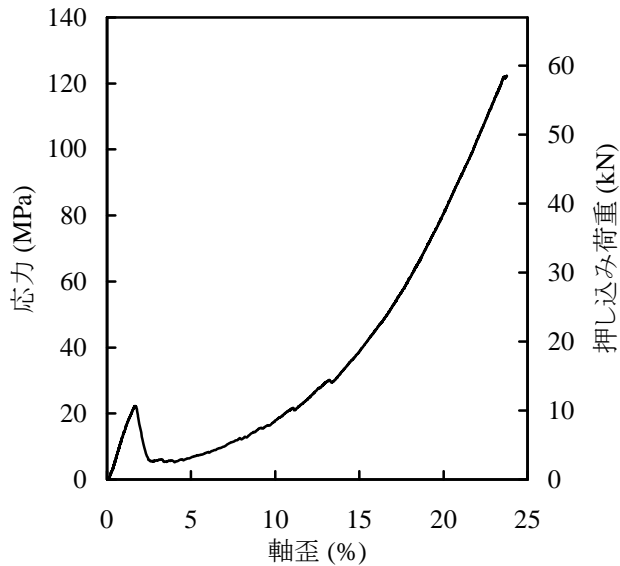


図-2 押し込み過程での応力-歪曲線
(試験①, 試料A, 押し込み最大荷重58.8 kN)

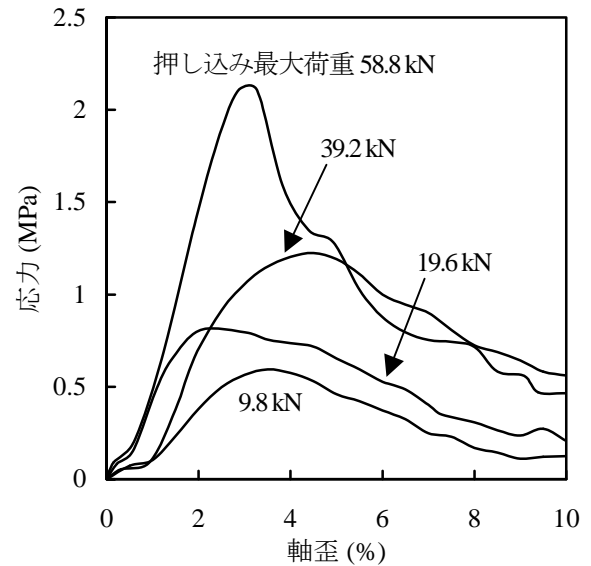
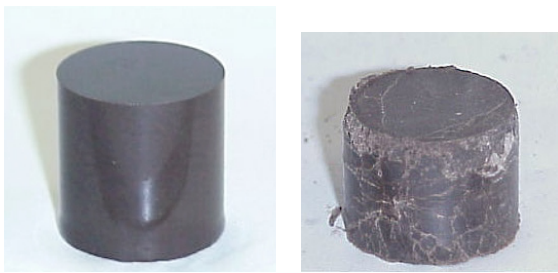


図-4 押し込み過程後の一軸圧縮試験での応力-歪曲線
(試験①, 試料A)



(a) 押し込み過程前 (b) 押し込み過程後

図-3 試験片の写真

(試験①, 試料A, 押し込み最大荷重58.8 kN)

た. 押し込み過程により試験片の平行度が低下したため、軸歪1%以下では軸歪の増加による応力の増加が小さかった. それ以降は、応力と軸歪はほぼ直線的に増加し、一軸圧縮強さに達した.

図-5には、押し込み最大荷重と押し込み過程後の一軸圧縮強さの関係を示した. 押し込み最大荷重が増加すると一軸圧縮強さも明瞭に増加し、両者の関係は原点を通る直線でほぼ近似できた.

(2) 荷重保持時間の影響 (試験②)

試験②の押し込み過程における応力-歪曲線は、図-2に示した試験①とほぼ同じであった. 試料Bを用いた試験②の荷重保持過程における軸歪の経時変化を図-6に示した. 図には、保持時間4時間と24時間の結果を2本ずつ示した. いずれの試験片とも、荷重保持開始から約100sまでは若干下に凸の傾向が見られた. その後はほぼ直線

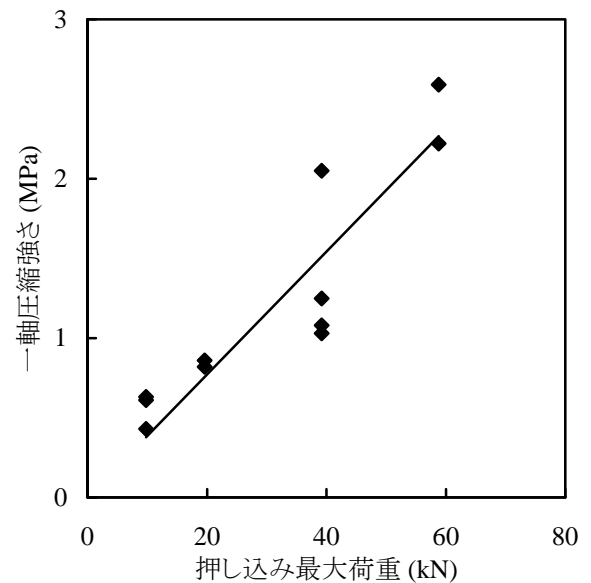


図-5 押し込み最大荷重と押し込み過程後の一軸圧縮強さの関係 (試験①, 試料A)

的に軸歪が増加し、通常のクリープ試験における対数クリープ則と比較的似ていた. 試料C, D, Eでもこれとほぼ同様の結果であった.

荷重保持過程後の試験片の様子は、図-3に示した試験①の結果とほぼ同じであり、目視による観察では保持時間による影響は明らかではなかった.

図-7には、試料B~Eで得られた、荷重保持時間と荷重保持過程後の一軸圧縮強さの関係を示した. 図に示したのは、各条件下での2~7本の平均値である. いずれの

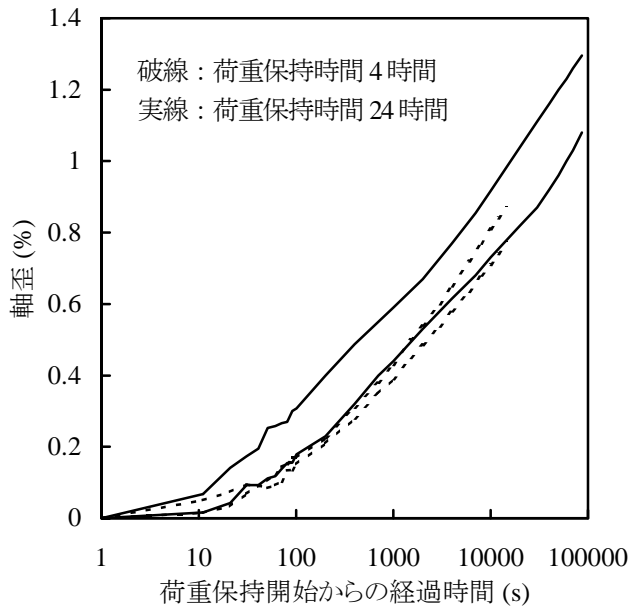


図-6 荷重保持過程での軸歪の経時変化 (試験②, 試料B)

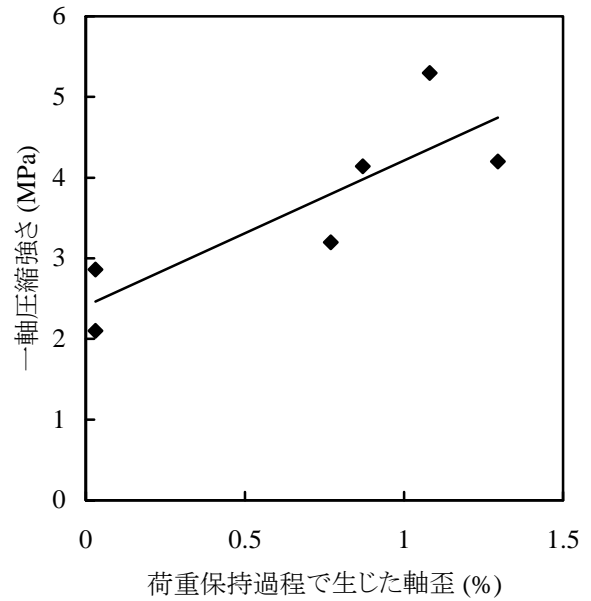


図-8 荷重保持過程で生じた軸歪と荷重保持過程後の一軸圧縮強さの関係 (試験②, 試料B)

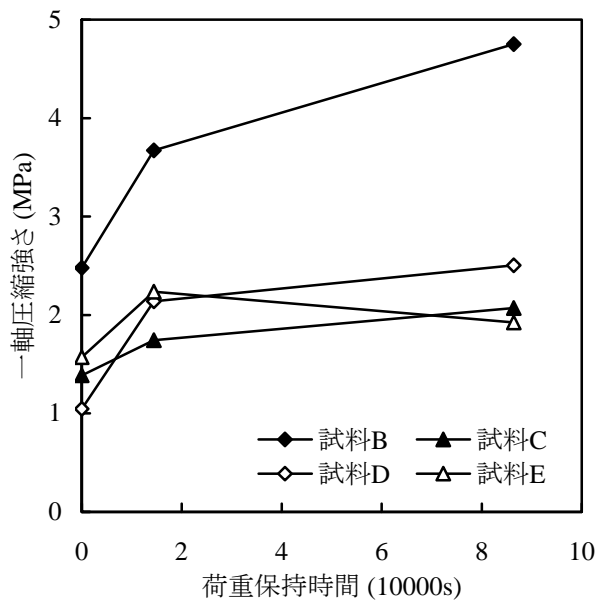


図-7 荷重保持時間と荷重保持過程後の一軸圧縮強さの関係 (試験②)

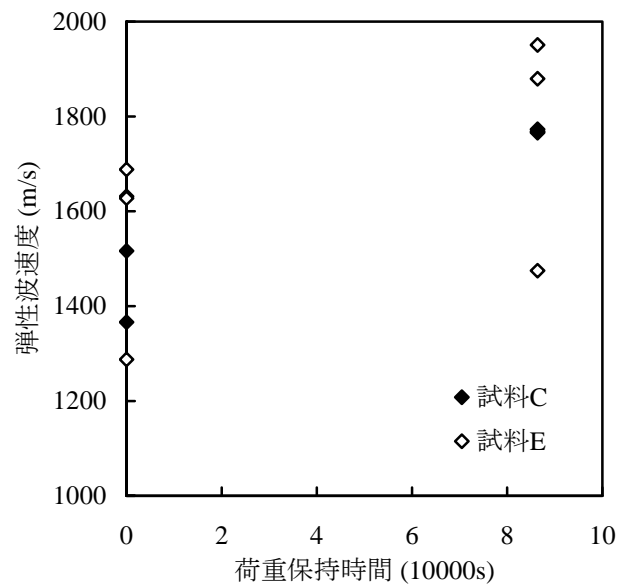


図-9 荷重保持時間と荷重保持過程後の弾性波速度の関係 (試験②)

試料でも、荷重保持時間10秒よりも4時間の方が一軸圧縮強さが大きくなった。試料B, C, Dでは、荷重保持時間24時間ではさらに一軸圧縮強さが大きくなり、試料Bでは保持時間10秒の2倍程度になった。

図-8には、図-6に示した荷重保持過程で生じた軸歪と荷重保持過程後の一軸圧縮強さの関係を示した。なお図には、荷重保持時間10秒の結果も示した。試験結果はややばらついているものの、荷重保持過程で生じた軸歪が大きいほど一軸圧縮強さが大きくなるという傾向が見ら

れ、両者の関係は図中の直線ではほぼ近似できた。この傾向は試料CとDでも同様に見られたが、試料Eでは試験結果のばらつきが大きく、明瞭な傾向は見られなかった。

試料CとEでは、荷重保持時間10秒と24時間での荷重保持過程後に試験片の弾性波速度を測定したので、その結果を図-9に示した。結果が重なっている場合もあるが、いずれの試料でも、各条件下での3本ずつの結果である。なお、押し込み過程前の健全な試験片の弾性波速度は2400 m/s程度であった。いずれの試料でも、荷重保持時

表-2 湿潤状態における岩石の物性値

	比重	空隙率 (%)	一軸圧縮強さ (MPa)	n
幌延珪質泥岩	1.6~2.0	35~55	5~35	30~70
土丹	1.6	41	5.2	30
田下凝灰岩	1.7	30	16	23
来待砂岩	2.0	25	32	-
三城目安山岩	2.2	14	82	28

間10秒での弾性波速度は1300~1700 m/s程度と、健全な試験片の55~70%程度まで回復した。さらに、保持時間24時間では1500~2000 m/s程度と、試験前の値の60~80%程度まで回復した。試料Eは、試験片ごとのばらつきの影響もあり、一軸圧縮強さについては明瞭な回復特性が見られなかったが、弾性波速度については荷重保持時間が長くなるとともに回復する傾向が見られた。

4. 考察

大久保他¹⁾は土丹、田下凝灰岩、来待砂岩、三城目安山岩を用いて試験①を行った。これらの岩石と、本研究で用いた幌延珪質泥岩の湿潤状態での物性値^{1),6),7)}を表-2に示した。なお、一軸圧縮強さは健全な試験片での値である。nは粘性抵抗の非線形性の程度を表す定数であり、多くの岩石でクリープ寿命がクリープ応力のn乗にほぼ反比例することや、強度が載荷速度の1/(n+1)乗にほぼ比例することなどが知られている⁹⁾。

大久保他¹⁾は、岩種によらず、押し込み過程で生じた軸歪と押し込み過程後の一軸圧縮強さとの間にある一定の関係がある可能性を指摘した。そこで図-10には、大久保他¹⁾の結果に今回得られた幌延珪質泥岩の試験①の結果を合わせて示した。図よりわかるように、三城目安山岩は軸歪が10%程度までは一軸圧縮強さが減少した。大久保他¹⁾が指摘しているように、これは岩石の組織が壊れていく影響の方が、回復よりも大きいと考えられる。一方、軸歪が10%よりも大きいと、大久保他¹⁾が用いた4種類の岩石の結果は、若干下に凸の1本の曲線でほぼ表された。今回得られた幌延珪質泥岩の結果も、これらの結果とほぼ一致した。この結果より、岩種によらず、押し込み過程での軸歪を測定することで、一軸圧縮強さを推定できる可能性があるといえよう。

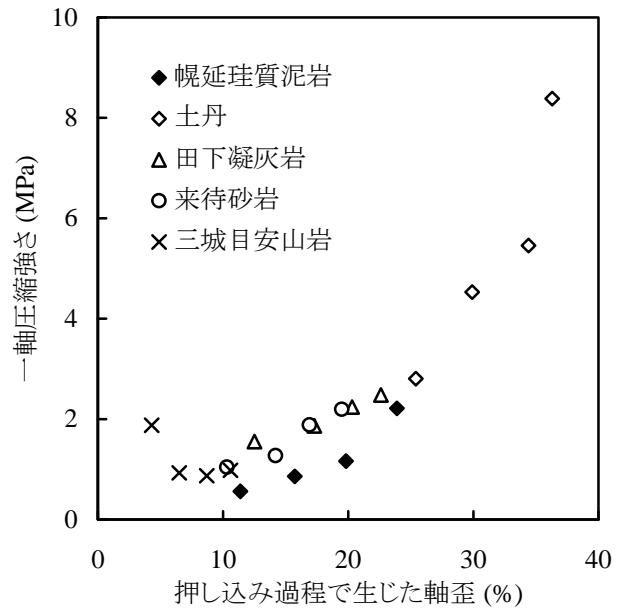


図-10 押し込み過程で生じた軸歪と押し込み過程後の一軸圧縮強さの関係
幌延珪質泥岩：試験①，試料A
その他の岩石：大久保他¹⁾

しかし、厳密に見ると、幌延珪質泥岩の結果は大久保他¹⁾の結果よりもやや下側に位置していることがわかる。土丹、田下凝灰岩、三城目安山岩は空隙率や一軸圧縮強さは異なるが、粘弾性の程度を表すnは比較的近い値であった。来待砂岩の湿潤状態でのnは求められていないが、気乾状態でのnは田下凝灰岩や三城目安山岩と近い値である⁹⁾。すなわち、大久保他¹⁾が用いた4岩種の粘弾性の程度は比較的揃っていたと考えられる。一方、表-2のように幌延珪質泥岩のnはこれら4岩種よりはやや大きかった、すなわち、粘弾性の程度がやや小さかった。岩石の回復特性の機構は種々考えられるが、回復特性と粘弾性的性質との関係について検討することは重要と考えており、今後、幅広い岩種での検討が必要である。

5. まとめ

採取場所と採取深度が異なる5つの試料を用いて、稚内層珪質泥岩の力学特性の回復について検討した。試料Aを用いて押し込み最大荷重の影響を調べたが、最大荷重が大きいほど押し込み過程後の一軸圧縮強さが顕著に増加した。押し込み過程で生じた軸歪と押し込み過程後の一軸圧縮強さの関係は、他の岩石と似た傾向を示した。一度破碎した岩石の一軸圧縮強さが回復する原因としては、破碎した岩片間の食い込みや、膠結物質による岩片

同士の固着などが考えられるが、機構の解明は今後の検討課題である。

試料B, C, Dは荷重保持時間の影響を調べたが、保持時間が長いほど荷重保持過程後の一軸圧縮強さが大きくなる傾向が見られた。今回の荷重保持時間は最長で24時間であったが、今後の重要な検討課題として、なるべく長期間の試験の実施があげられる。

試料Eは強度回復の程度は小さかったが、弾性波速度の回復は明瞭に観察された。すなわち、岩石の回復特性を調べる際には、一軸圧縮強さだけではなく弾性波速度も重要な指標の一つになることがわかった。今後、原位置岩盤の回復特性を調査する際には、データの取得が容易な弾性波速度測定が有効であるといえる。

岩石の透水特性の回復は、実務的にも重要な検討課題であり、今後は試験法も含めて検討していく必要があると考えている。

謝辞：実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) 大久保誠介, 福井勝則, 杉田隆博: 緩み領域の強度回復に関する基礎研究, 資源と素材, 117, pp.631-638, 2001.
- 2) 石島洋二, 藤井義明, 市原義久, 木山保, 高田迪彦, 菅原隆之, 熊倉聡: 原位置計測と坑内観察に基づく釧路コールマインにおける閉塞した空洞内の諸状態, *Journal of MMIJ*, 124, pp.445-451, 2008.
- 3) J. H. Dieterich: Time-dependent friction in rocks, *J. Geophys. Res.*, 77, pp.3690-3697, 1972.
- 4) J. H. Dieterich: Time-dependent friction as a possible mechanism for aftershocks, *J. Geophys. Res.*, 77, pp.3771-3781, 1972.
- 5) P. A. Lindqvist and H. H. Lai: Behaviour of the crushed zone in rock indentation, *Rock Mech. Rock Engng.*, 16, pp.199-207, 1983.
- 6) 大久保誠介, 福井勝則: コンプライアンス可変型構成方程式の定数について, 資源と素材, 113, pp.561-564, 1997.
- 7) 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.
- 8) K. Hashiba, S. Okubo and K. Fukui: A new testing method for investigating the loading rate dependency of peak and residual rock strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 43, pp.894-904, 2006.

STRENGTH RECOVERY OF WEAK SEDIMENTARY ROCKS FROM COMPLETE FAILURE

Kimihiko HASHIBA, Seisuke OKUBO, Katsunori FUKUI and Ming LEI

Recently, it was pointed out that loosen zone around an underground structure might be recovered gradually if it is properly supported by some means. In this study, strength recovery of failed siliceous mudstone obtained in Horonobe (Hokkaido) was investigated. In testing, a specimen was first broken and then compacted within a thick-walled pipe. Thereafter, the compacted specimen was pulled out from the pipe to measure its uniaxial compressive strength. It was found that strength of the compacted specimen increased with applied loads and its maintaining time similar to the results reported in previous studies. It is interesting to note that elastic wave velocity was also increased as strength.