

高温環境における堆積軟岩の圧密非排水三軸圧縮試験

Consolidated Undrained Triaxial Compression Test of Sedimentary Soft Rock at a High Temperature

藤沼晋也*・岡田哲実**・日比野敏***・横倉俊幸****

Shinya FUJINUMA, Tetsuji OKADA, Satoshi HIBINO, and Toshiyuki YOKOKURA

ABSTRACT

The geological disposal is a method of isolating high level radioactive wastes in deep geological formations. Since isolating high level radioactive wastes generate heat due to collapse of Nuclide, the foundation around facility of geological disposal will be in a high temperature state. therefore, it is important to undersatand effects of high temerature on rock behavior. This paper presents results of a study on dependability of mechanical properties at high temperature (60℃) on consolidated undrained triaxial compression test of two types of sedimentary soft rock, siltstone and fine-grained sandstone. The results reveal that compressive strength and cohesion decreased after heating, but residual strength is not affected by heating. The results also reveal that stiffness of siltstone increase and that of fine-grained sandstone decreased after heating as a general trend in this study.

Key Words : high temperature, soft rock, mechanical property

1. はじめに

我が国における高レベル放射性廃棄物の地層処分の概念として、ガラス固化した廃棄体を格納容器に収め、その周りをベントナイトを主体とする緩衝材で囲み、岩盤中に埋設する方法が考えられている¹⁾。ガラス固化した廃棄体は、核種の崩壊に伴い熱を発生する。この発熱によって、緩衝材や周辺岩盤は熱の影響を受けることになり、常温とは異なった温度環境になることが予測されている。従って高温環境が及ぼす岩盤への影響を解明することは、処分施設の安定性検討にとって重要な課題のひとつである。

岩石の力学特性の温度依存性については、花崗岩や安山岩などの火成岩において、数多くの研究が見られる²⁾。花崗岩については、温度上昇に伴い、鉱物粒子の熱膨張率の違いによる微小クラックの進展により、強度・剛性が低下することが分かっている。また、安山岩については、温度の上昇に伴って、強度・剛性は増加することが多く、この理由として、石基の部分がガラス質である場合や粘土鉱物が含まれている場合には、焼成と類似の現象が生じ、粒子の結合が強くなることや加熱に伴う脱水により粒子が滑りにくくなるといったことが考えられている³⁾。一方、堆積岩（特に堆積軟岩）について、温度依存性に関する研究は、ほとんどなされておらず、一般的な結論を得るに至っていない。

そこで本研究では、堆積軟岩における力学特性の温度依存性を把握するとともに、その温度効果のメカニズムを解明するために、高温環境における圧密非排水三軸圧縮試験を実施した。

* 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

** (財)電力中央研究所 地圏環境部

*** (財)電力中央研究所

**** (株)シー・アール・エス 地質・耐震構造部 地質地盤グループ

2. 実験概要

使用した試料は新第三紀鮮新世のシルト岩及び第四紀の細粒砂岩である。表-1に基本物性値を示す。

供試体は両岩種ともに、直径50mm、高さ100mmに成形したものを使用した。シルト岩は地下30mからブロックサンプリングした試料をビットでコアリングし、上下端面はマイターボックス、直ナイフ及びカッターを用いて成形した。また細粒砂岩も地下170m～175mから採取した内径60mm前後のコアをシルト岩と同様の方法で成形をした。

直径、高さ、重量を計測した後、超音波速度測定を実施し、試料の初期物性を把握した。さらにその後真空ポンプにより真空引きをした水中に24時間以上浸し、飽和させた試料についても同様に超音波速度測定を行った。その結果得られたS波速度、動ポアソン比、動せん断弾性係数等のデータとサンプリング時に計測した初期物性との比較を行い、それらの値が極端に異なっている場合には、試験に用いなかった。詳しい初期データについては表-2に示す。

次に、図-1には本実験で使用した高温三軸圧力室を示す。荷重は、セル内部のロードセルにより計測した。また軸ひずみは、ひずみゲージ、非接触型変位計、外部変位計の3つで計測を行った。まず供試体側面に対角に2枚のひずみゲージ（ゲージ長30mm）を直接貼付し、厚さ0.5mmのラテックス製のゴムメンブレンをかぶせ、試験機に設置する。ひずみゲージは、メンブレンにゲージ線が取り出せるほどの小さな穴を開けて取り出した。供試体の温度は、セル内に取り付けられたヒーターによりセル水を加熱することで上昇させ、その際の昇温速度は熱衝撃による影響を受けない速度⁴⁾の0.5℃/minとした。昇温中およびせん断中は、セル内の温度を均一にするために、攪拌プロペラを回し、セル水を攪拌する。攪拌によってセル内の温度が均一となることは、事前に確認した。

試験温度は、常温（22.5℃～25.5℃）と60℃の2種類とし、有効拘束圧はシルト岩に関しては0.4、0.8、1.6、3.2、4.8MPaの5種類、細粒砂岩に関しては0.4、0.8、1.6、3.2MPaの4種類とした。試験温度が60℃の場合は、常温でまず圧密を行い、その後排水条件下で供試体の温度を60℃まで上昇させた。その後、ひずみゲージ、非接触型変位計、外部変位計などの各計器類の出力値及びビュレット水位それぞれが変化しなくなるのを待って、せん断を開始した。せん断速度はひずみ制御で約0.05%/minとした。

3. 実験結果

表-1 シルト岩及び細粒砂岩の基本物性値

岩種		シルト岩	細粒砂岩
土粒子密度	ρ_s (g/cm ³)	2.50	2.70
含水比	ω (%)	40.1	17.2
湿潤密度	ρ_t (g/cm ³)	1.63	2.03
乾燥密度	ρ_d (g/cm ³)	1.17	1.73
間隙比	e	1.14	0.56

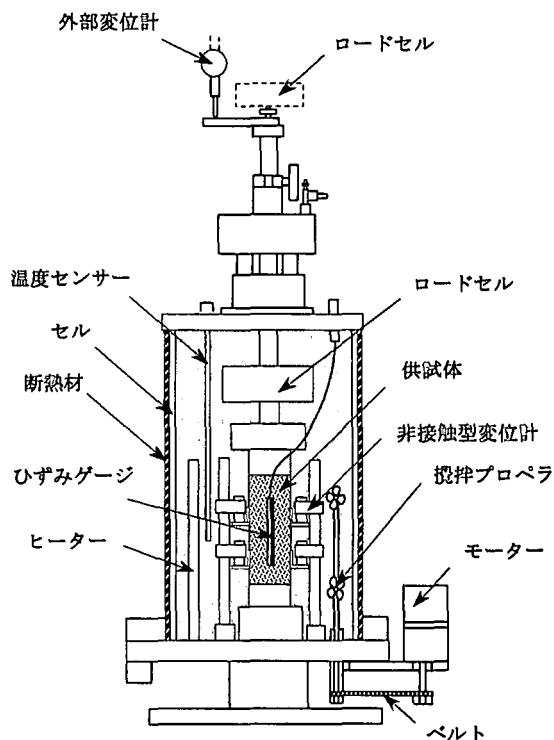


図-1 本実験で使用した高温三軸圧力室

図-2はシルト岩における有効拘束圧 $\sigma'_v = 4.8\text{MPa}$ の時の主応力差と三種類の 방법으로計測した軸ひずみの関係

表-2 全試験結果一覧

試料	温度	σ_c' (MPa)	ρ_t (g/cm ³)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	ν_d	G_d (MPa)	E_d (MPa)	q_f (MPa)	ε_f (%)	q_r (MPa)	E_{50} (MPa)	A_f
シルト岩	常温	0.4	1.70	568	1852	0.448	547	1677	3.51	0.579	2.49	858	0.100
		0.8	1.72	571	1850	0.447	560	1760	4.04	0.465	3.30	1275	0.168
		1.6	1.72	544	1917	0.456	511	1642	4.46	0.820	3.36	784	0.242
		3.2	1.70	538	1754	0.448	493	1419	4.72	2.060	4.71	1247	0.341
		4.8	1.71	561	1848	0.449	538	1651	4.65	1.667	4.12	912	0.650
	60℃	0.4	1.70	584	1850	0.443	574	1585	3.41	0.582	2.67	1059	0.091
		0.8	1.71	599	1818	0.445	580	1622	3.62	0.490	2.95	1362	0.173
		1.6	1.69	581	1723	0.439	612	1488	3.89	0.514	3.44	1316	0.303
		3.2	1.68	539	1856	0.436	572	1427	3.93	1.116	3.63	794	0.504
		4.8	1.72	577	1782	0.454	488	1560	4.40	1.714	3.96	988	0.719
細粒砂岩	常温	0.4	1.86	562	906	0.186	319	942	4.66	1.588	3.82	488	-0.081
		0.8	1.86	523	836	0.179	356	1045	4.90	2.345	4.82	807	-0.088
		1.6	1.89	550	854	0.144	362	1064	5.49	3.585	5.49	818	0.009
		3.2	1.83	602	943	0.156	365	1073	6.40	1.508	6.29	1660	0.229
	60℃	0.4	1.81	585	901	0.135	349	1027	3.44	2.792	3.42	368	-0.131
		0.8	1.77	595	1054	0.266	318	936	4.15	1.412	4.09	627	-0.051
		1.6	1.83	625	1035	0.213	359	1057	4.36	0.604	4.28	1558	0.149
		3.2	1.85	622	1021	0.204	332	978	4.47	1.526	4.35	1624	0.375

σ_c' : 有効拘束圧 ρ_t : 湿潤密度 V_s : S波速度 V_p : P波速度 ν_d : 動ポアソン比 G_d : 動せん断弾性係数
 E_d : 動弾性係数 q_f : 破壊強度 ε_f : 破壊時の軸ひずみ q_r : 残留強度 E_{50} : 弾性係数 A_f : 破壊時の間隙圧係数

を示したものである。常温、60℃ともに、ひずみゲージと非接触型変位計で計測したひずみは各応力段階でほぼ等しい値となっているが、破壊直前においてはひずみゲージで計測したひずみの方がより小さくなっている。これはひずみゲージはそれほど大きなひずみを計測できないため、その機能が失われつつあるからであると考えられる。また外部変位計で計測されたひずみはベッディングエラーによって非接触型変位計およびひずみゲージで計測されたひずみよりも大きくなっている。従ってこれ以降、非接触型変位計で計測されたひずみをもって軸ひずみとする。

表-2に本実験における全試験結果の一覧を示す。

図-3にはシルト岩、図-4には細粒砂岩における主応力差と非接触型変位計で計測された軸ひずみの関係を示す。シルト岩に関しては低拘束圧条件で主応力差が最大となる点が明瞭で破壊が脆性的に起こっており、高拘束圧条件に移行するにつれ破壊が延性的になっている。一方、細粒砂岩に関しては、低拘束圧条件から主応力差が最大となる点がほとんどあられわれず破壊が延性的に起こっている。加熱による強度変化について見てみると、両岩種ともにすべての有効拘束圧で60℃における主応力差の最大値が常温よりも小さくなっている。このことは表-2からも読み取れ、加熱により供試体の強度が減少していることが分かる。また花崗岩などにおいては、拘束圧が大きくなると強度減少の割合が小さくなると報告されているが⁵⁾、本実験においてはそのような傾向は見られなかった。

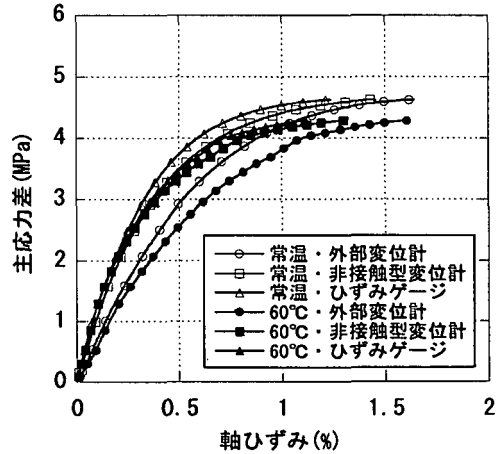


図-2 シルト岩における $\sigma_c' = 4.8 \text{ MPa}$ の時の主応力差とひずみの関係

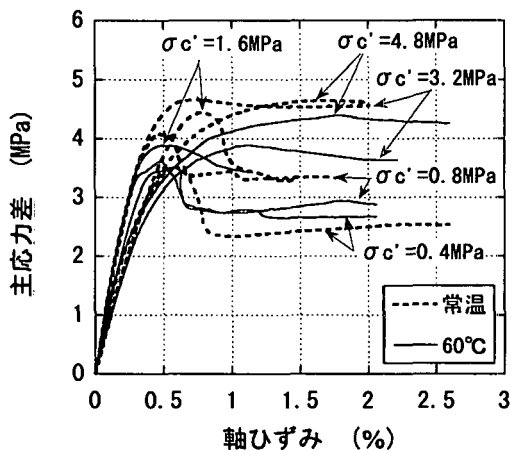


図-3 シルト岩における主応力差とひずみの関係

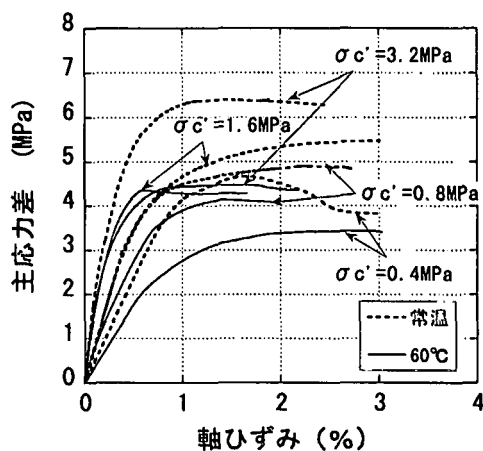


図-4 細粒砂岩における主応力差とひずみの関係

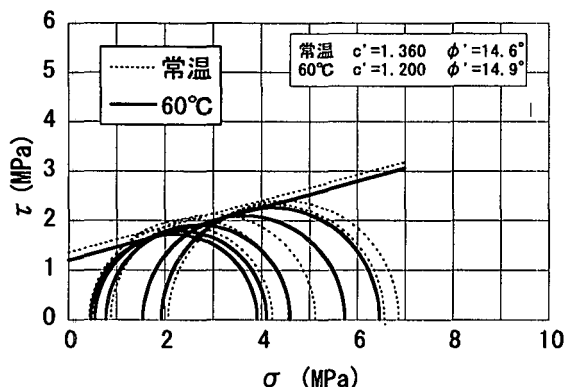


図-5 シルト岩におけるモールの
応力円及び破壊線

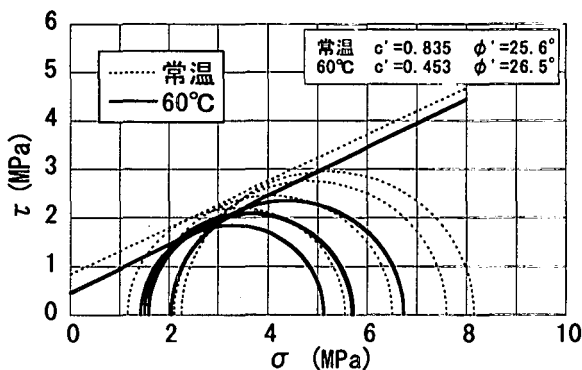


図-6 細粒砂岩におけるモールの
応力円及び破壊線

残留強度に関しては、今回の実験では温度の上昇による明確な傾向は見られなかった。供試体の剛性については、図-3よりシルト岩では常温と60℃にそれほど違いがないように見えるが、表-2に示した変形係数 E_{50} の結果では、 $\sigma'_{c'} = 3.2\text{MPa}$ を除いて60℃のほうが若干大きくなっている。細粒砂岩では図-4において全体的に常温よりも60℃のほうが小さくなっており、表-2に示した結果においても同様で、 $\sigma'_{c'} = 1.6\text{MPa}$ を除いて60℃のほうが小さくなっていることが分かる。本実験において、シルト岩では加熱することにより供試体の剛性は大きくなり、細粒砂岩においては逆に小さくなる傾向にあることが分かった。

図-5、6にはそれぞれシルト岩及び細粒砂岩における有効応力から求めたモールの応力円とモール・クーロンの破壊線を示す。両岩種ともに60℃の破壊線は常温の破壊線よりも下方に存在することが分かる。破壊線の傾きで表される内部摩擦角 ϕ' にはほとんど変化は見られないが、破壊線の切片で表される粘着力 c' は常温よりも60℃のほうが小さいことが分かる。つまり加熱による強度減少は粘着力の減少により引き起こされたものであると考えられる。

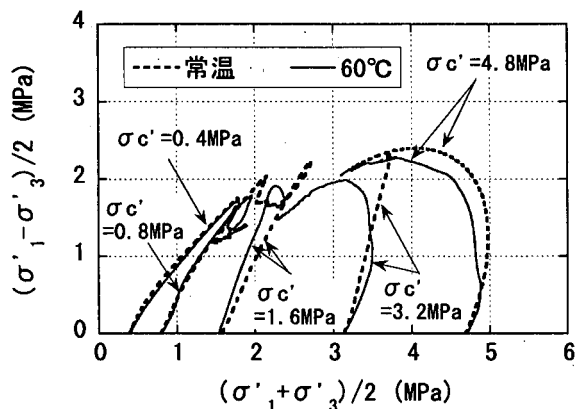


図-7 シルト岩における有効応力経路

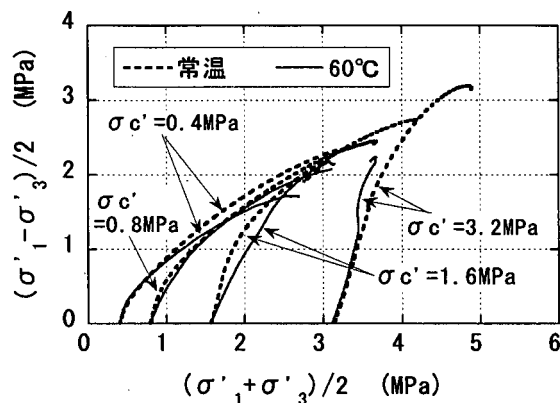


図-8 細粒砂岩における有効応力経路

4. 考察

非排水せん断試験における強度を考えるにあたって、せん断中に発生する間隙水圧の変化、すなわち有効応力の変化について、常温と60℃の違いを明確にしておく必要がある。

図-7, 8はシルト岩及び細粒砂岩における有効応力経路である。シルト岩では、低拘束圧状態においては、常温と60℃の経路にそれほど違いが現れておらず両者の経路はほぼ一致しているが、拘束圧が大きくなると両者の経路には違いが現れる。破壊直前の傾向として60℃のほうが過剰間隙水圧の発生が大きく収縮的傾向が強くなっているのが分かる。これに対し細粒砂岩では、低拘束圧時は負の過剰間隙水圧が発生しており、膨張的傾向にあることが分かるが、その度合いは常温よりも60℃のほうが大きい。拘束圧が大きくなると破壊直前の傾向としてそれが逆転し、60℃のほうが常温より過剰間隙水圧の発生が大きく、収縮的傾向が強くなることが分かる。

以上の水圧の議論を表-2に記載した破壊時の間隙係数 A_f で詳しく見てみると、シルト岩では $\sigma'_{c0} = 0.4\text{MPa}$ を除いて60℃のほうが大きくなっており、全体的な傾向として加熱することにより供試体に発生する間隙水圧が大きくなっている。細粒砂岩では、高拘束圧条件においてはシルト岩と同様60℃のほうが発生する水圧は大きい、低拘束圧条件では、そのような傾向になく負の過剰間隙水圧が発生している。従ってシルト岩に関しては、加熱による強度低下が発生する間隙水圧の温度による違いに起因している可能性があるが、細粒砂岩に関しては、今後更なる議論が必要であろう。

加熱による強度低下の原因として考えられる他の要素は、熱による岩の微小構造の変化である。はじめに述べたように、花崗岩や安山岩などの加熱による強度変化には、その機構は違うけれども、加熱による微小構造の変化が原因とされている。本実験でも加熱によって微小構造に何らかの変化があった可能性があると考えられる。図-5, 6はモールの応力円と破壊線の関係で、常温に比べ60℃のほうが粘着力が小さくなったことを示した。粘着力は一般的に岩のもつ結合力により発揮される強度定数である。つまり加熱により結合力が弱くなった可能性が考えられる。しかしその詳細なメカニズムは今のところ明らかでない。従って今後の研究の課題として、岩の微小構造を把握し、粘性土に見られるような強度を発揮する粒子間の相互作用⁶⁾を把握する必要がある。

正規圧密粘土においては、加熱によって圧密が促進され、供試体の体積が収縮して、強度・剛性が大きく

なり、さらにせん断中の過剰間隙水圧の発生が少ないことが報告されている⁷⁾。従って本研究においても加熱による体積変化特性を把握する必要があると考えられるが、本研究においては加熱時の体積変化をビュレットでしか計測していないので、正確にその体積変化を把握することはできない。なぜなら、ビュレットで計測した排水量というのは、加熱による供試体の体積変化量だけではなく、間隙水の熱膨張量や加熱により分離した粒子の周りの吸着水量も含まれてしまうからである。ビュレットで計測された水の変化量から供試体の体積変化を知ることは難しいが、加熱によって強度が低下した事実や内部摩擦角があまり変わらなかったことから粘土ほどは加熱による圧密促進は顕著でない可能性がある。

5. おわりに

高温環境における堆積軟岩の力学特性の温度依存性を把握するために、シルト岩と細粒砂岩を用いて、常温と60℃で圧密非排水三軸圧縮試験を行った。その結果、シルト岩及び細粒砂岩ともに加熱によって圧縮強さが減少することが分かった。また加熱によって内部摩擦角はほとんど変化しなかったが、粘着力がわずかに減少した。しかし、それらの変化のメカニズムは、いまのところ明らかではない。メカニズム解明には例えば、加熱時の体積変化や構成鉱物等を明らかにする必要があると考える。今後は設定温度や試料を変えてさらに研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－総論レポート，JNC TN1400 99-020, 1999.
- 2) 例えば，F.E.Heuze: High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks-A review, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 20, No. 1, pp. 3-10, 1983.
- 3) 例えば，外尾善次郎・高島啓行：高温度における岩石の強度に関する研究（第1報），日本鉱業会誌，84巻，pp.1071-1076，1968.
- 4) 山口 梅太郎・宮崎 道雄：熱による岩石の強度の変化あるいは破壊について，日本鉱業会誌 86巻 986号，pp.346-351，1970.
- 5) 例えば，木下 直人・安部 透・若林 成樹・石田 毅：高温下岩石の力学特性に関する研究，土木学会論文集，No.561/Ⅲ-38，pp.151-162，1997.
- 6) Pisit Kuntiwattanakul・Ikuo Towhata・Kanta Ohishi・Ichiro Seko: TEMPERATURE EFFECTS ON UNDRAINED SHEAR CHARACTERISTICS OF CLAY, SOIL AND FOUNDATIONS, Vol.35, No.1, pp147-162, Mar.1995
- 7) 東畑 郁生・Pisit Kuntiwattanakul・大石 幹太・竹内 直樹：粘土の工学的性質に及ぼされる高温環境の影響，土と基礎，46-10，pp.27-30，1998.