



Title	一定応力と凍結融解作用を同時に受ける支笏溶結凝灰岩の変形挙動と寿命
Author(s)	木村, 拓朗; 児玉, 淳一; 菅原, 隆之 他
Description	資源・素材2017（札幌）：平成29年度資源・素材関係学協会合同秋季大会，2017年9月26日～28日，北海道大学，札幌市
Citation	資源・素材講演集2017（札幌），4(2)，PY2-76
Issue Date	2017-09-26
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/67671
Type	conference paper
File Information	PY2-76.pdf



若手ポスター発表 (Poster : MMIJ Students and Young Researchers)

岩盤工学 (Rock Engineering) Rock Engineering

2017年9月26日(火) 15:30 ~ 17:30 ポスター会場2 N301 (N棟3階/FI.3.,Build. N)

[PY2-76] 一定応力と凍結融解作用を同時に受ける支笏溶結凝灰岩の変形挙動と寿命 Mechanical behavior and life of Shikotsu welded tuff simultaneously exposed to constant stress and freeze-thaw cycles

○木村 拓朗¹、児玉 淳一¹、菅原 隆之¹、藤井 義明¹、福田 大祐¹ (1. 北海道大学)

○Takuro Kimura¹, Jun-ichi Kodama¹, Takayuki Sugawara¹, Yosiaki Fujii¹, Daisuke Fukuda¹ (1. hokkaido university)

キーワード：凍結融解、クリープ試験、損傷、支笏溶結凝灰岩、空隙率

Freeze-thaw, Creep test, Damage, Shikotsu welded tuff, Porosity

寒冷地における岩盤斜面の表層では、冬季に凍結融解と一定応力が同時に作用するため、かかる岩盤斜面の長期安定性の評価の基礎的研究には、両者の効果による岩石の損傷を把握することが重要である。

筆者らは空隙率約7%の含水飽和状態にある美唄砂岩を用いて、一定の応力を負荷する試験（クリープ試験）と一定の応力を負荷した状態で凍結融解作用を与える試験（ハイブリッド試験）を実施し、両者の変形挙動について比較している。そして、ハイブリッド試験における変形挙動はクリープ変形に似た挙動を示すが、凍結融解作用を与えることで最大主ひずみは増加し、一定応力のみを負荷した場合に比べて損傷が大きくなることを明らかにした。このようにハイブリッド試験では一定応力と凍結融解作用の両者により損傷が進行するが、凍結融解作用による損傷は岩石の空隙率の大きさに依存すると考えられる。本研究では、空隙率が約37%の含水飽和状態にある支笏溶結凝灰岩を対象に、クリープ試験とハイブリッド試験を実施した。そして両者の変形挙動と寿命の違いについて検討したうえ、ハイブリッド試験における一定応力と凍結融解作用の損傷の特徴について分析した。

1. はじめに

寒冷地における岩盤斜面の表層では、冬季に凍結融解作用¹⁾と一定応力が同時に作用することがある。そのため、かかる岩盤の長期安定性の評価には、両者が同時に作用したときの岩石の損傷を理解する必要がある。赤羽²⁾は岩石に一定の応力を与えた状態で凍結融解作用を与え、サイクル毎の残留ひずみの発生量は凍結融解作用のみを与えた場合に比べて非常に大きいことを報告している。しかし、対象とした岩石は空隙率が約 7%の美唄砂岩のみであり、岩種による違いは検討されていない。本研究では、含水飽和状態にある空隙率約 40%支笏溶結凝灰岩を用い、クリープ試験と一定応力を負荷した状態で+20℃から-20℃の範囲の温度変化を与える試験(ハイブリッド試験)を実施し、両者の寿命の違いについて検討した。また、クリープ試験とハイブリッド試験を交互に行う実験を行う事で、その変形挙動と AE の発生状況から損傷の発展の特徴を明らかにすることを目的とした。

2. 試験方法

2.1 供試岩石と供試体

空隙率が約 40%の支笏溶結凝灰岩の岩石ブロックを用意し、流理面に垂直にボーリングを行い、直径約 30mm、高さ約 60mm の円柱形供試体を作製した。そして次の手順で含水供試体を用意した。①+80℃の恒温槽に 24 時間以上静置し、十分に乾燥させる。②純水中に 1 週間以上真空脱気しながら静置する。なお試験中は水分の蒸発を防ぐため供試体をラップで包んだ。含水飽和供試体の一軸圧縮強度は 16.7MPa であった。

2.2 試験方法

(1) 載荷装置：材料試験機 (INSTRON 社製、最大荷重 300kN) を用い、プログラムで温度を制御できる恒温槽内 (LP-ZPS 日本医化器械政製作所) で載荷した。

(2) 変形の計測：供試体の中央に径方向変位計 (RAW-30 東京測器研究所製) を取り付け、径ひずみを計測した。また、供試体の両脇に軸方向変位計 (CDP-5 東京測器研究所製) を設置し、軸ひずみを計測した。なお、軸方向変位計の感知レバー部の凍結を防ぐために、この部分をラップで包んだ。

(3) AE の計測：岩石の破壊過程を追跡するため、AE センサ (共振周波数 150kHz) を供試体の側面に取り付け、AE イベントの発生数を計測した。AE 波をプリアンプとメインアンプ (40dB) で増幅した後、バンドパスフィルタ (100~200kHz) を通過した波のうち振幅が 70mV を越えるものを AE 波とみなした。

3. ハイブリッド試験

3.1 試験条件

1.7MPa (含水供試体の一軸圧縮強度の 70%) の一定応力を負荷し、凍結融解作用を与え、破断に至るまで試験を続ける (Fig 1)。5 日間で破断に至らなかった場合は、そこで試験を終了する。凍結融解サイクルは次のように与えた。①2h かけて+20℃から -20℃まで温度を下げる。②温度を 2h -20℃で一定に保つ。③2h かけて温度を+20℃まで温度を上げる。④温度を 2h +20℃一定に保つ。

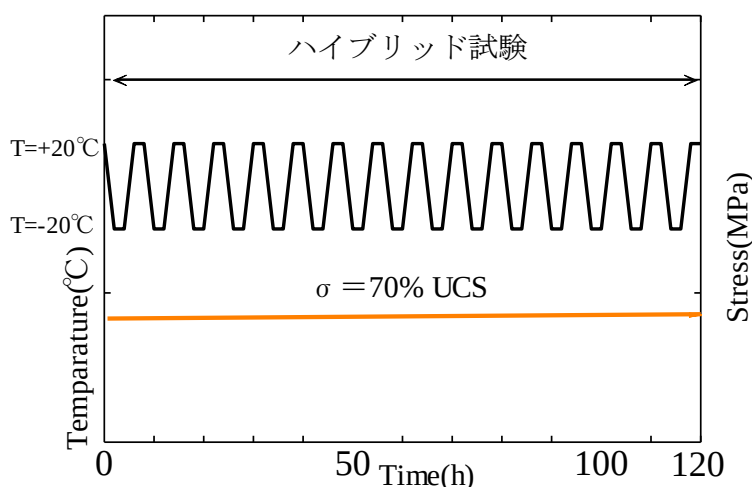


Fig 1 ハイブリッド試験中の温度と一定応力

3.2 試験結果

クリープ試験とハイブリッド試験の寿命を Table 1 に示す。クリープ試験とハイブリッド試験はそれぞれ 7 つの供試体で行った。未破壊の供試体を除くと、寿命の平均時間は、クリープ試験が 61.7h、ハイブリッド試験が 20.6h であった。未破壊の供試体の破壊時間を 120h とすると、寿命の平均はハイブリッド試験が 34.8h、クリープ試験が 95.0h となり、ハイブリッド試験のほうがクリープ試験よりも岩石の寿命が短かった。

Table1 クリープ応力とクリープ寿命の関係

	供試体番号	寿命(h)		供試体番号	寿命(h)
クリープ試験	①	34	ハイブリッド試験	⑧	0.4
	②	58.3		⑨	6
	③	92.8		⑩	9.6
	④	>120		⑪	16.9
	⑤	>120		⑫	45.2
	⑥	>120		⑬	46
	⑦	>120		⑭	>120

続いて、クリープ試験とハイブリッド試験による寿命の差異について統計的な検定³⁾を行った。以下で述べる検定結果は未破壊の供試体の寿命を 120h として計算したものである。まず、クリープ試験とハイブリッド試験による寿命の 2 群のデータの等分散性を調べるために、帰無仮説を「両者の寿命の母分散に差がない」として F 検定を行った (Table 2)。有意水準は 5% と設定した。その結果、F 値は 1.325834 となり、F 値限界値 (5.050329) よりも小さくなり、帰無仮説は棄却できない。よって、2 群の平均の差の検定に普通の t 検定を用いても良いということがわかった。

Table 2 F 検定統計量

	ハイブリッド試験	クリープ試験
平均(Creep life)	34.87142857	95.01428571
分散	1743.475714	1262.121429
観測数	7	7
自由度	6	6
観測された分散比(F値)	1.381385083	
P(F<=f) 片側	0.352404488	
F 境界値 片側	4.283865714	

次に、帰無仮説を「両者の寿命の平均に差がない」とした t 検定を用いて、クリープ試験とハイブリッド試験による寿命の差異を検討した (Table 3)。有意水準を 5% とすると、t=-2.902469677 となり、t の限界値は 2.178813 となった。今回の実験で生じた t 値 (-2.90247) は帰無仮説が正しいことを前提とした t 分布では棄却域に入ることになり、「有意水準 5% で、ハイブリッド試験とクリープ試験の寿命には統計的な差があるといえる」という結論となった。

Table 3 t 検定統計量

	ハイブリッド試験	クリープ試験
平均Creep life (h)	34.87142857	95.01428571
分散	1743.475714	1262.121429
観測数	7	7
プールされた分散	1502.798571	
仮説平均との差異	0	
自由度	12	
t	-2.902469677	
P(T<=t) 片側	0.006632663	
t 境界値 片側	1.782287548	
P(T<=t) 両側	0.013265326	
t 境界値 両側	2.178812827	

4.クリープ試験とハイブリッド試験

4.1 試験条件：10.9MPa の一定の応力（含水供試体の一軸圧縮強度の 65%）を負荷した状態で恒温槽の温度を次のように制御した（Fig2）。①+20℃で 8h 一定に保つ。②+20℃～-20℃の間で変化させ、凍結融解作用を 1 サイクル(6h)与える。③+20℃で 10h 一定に保つ。②、③を 15 回繰り返す。続いて一定応力の応力レベルを 11.7MPa（含水供試体の一軸圧縮強度の 70%）まで増加させて、上記①に戻り、一定応力が 10.9MPa のときと同様の試験を続ける。以下では、温度を+20℃に保っている上記①と③のプロセスをクリーププロセスと呼び、温度を+20℃～-20℃の間で変化させているプロセスをハイブリッドプロセスと呼ぶことにする。

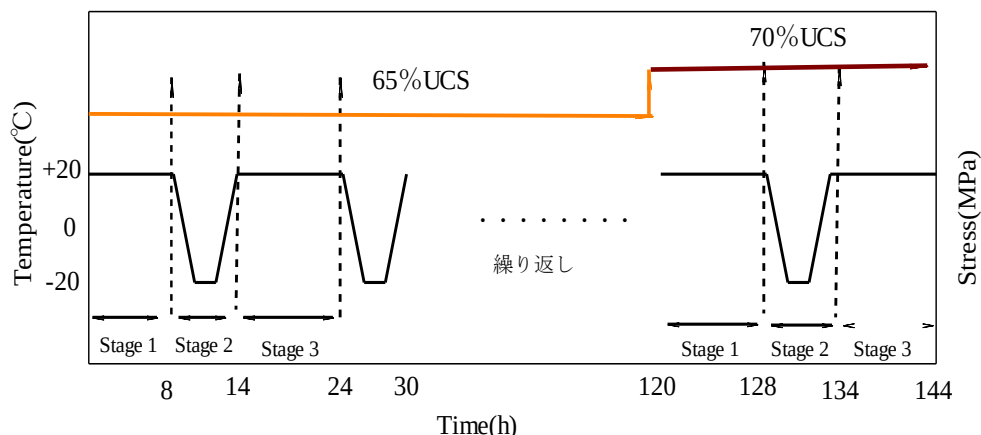
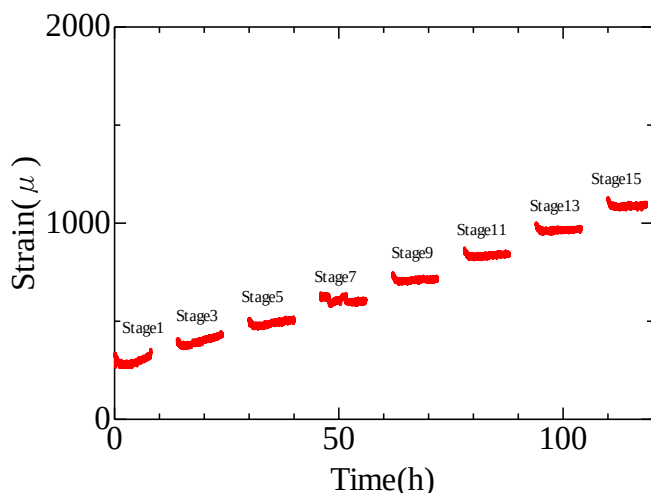


Fig 2 試験中の温度と一定応力

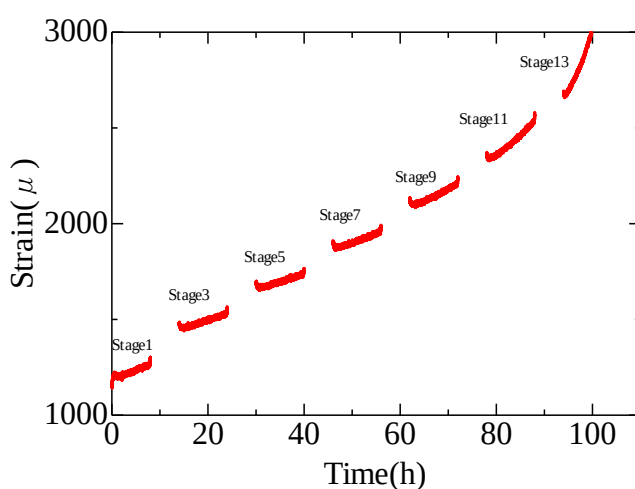
4.2 試験結果

4.2.1 ひずみと経過時間の関係

温度が+20℃のときの（Fig.1 中の Stage 1,3,5,7,9,11,13,15）ひずみと時間の関係を Fig.3、4 に示す。Fig.3、4 は、それぞれ、変位計で計測した径ひずみと軸ひずみの結果である。図中の縦軸のひずみはいずれも伸長を正としている。Fig3 と Fig.4 から、時間経過と共に横ひずみと径ひずみの値は伸長側に増加していること、応力レベルに関わらず、図示した各 stage の間には不連続的なひずみの増加が認められ、凍結融解履歴により残留ひずみが発生していることがわかる。また、応力レベル 70%の方が 65%の時よりもクリーププロセスにおけるひずみの増加量は大きい。図示したいずれの Stage においても、ハイブリッドプロセス終了直後に若干のひずみの収縮が見られる。この原因は明らかではないが、温度変化による変位計のみかけひずみの可能性がある。Fig4 から、応力レベルに関わらず軸ひずみは収縮方向に増加するが、径ひずみと同様に応力レベル 70%の方が 65%の時よりもクリーププロセスにおけるひずみの増加量は大きいことがわかる。しかし、径ひずみに比べ、stage 間の不連続的なひずみの増加は小さく、また、クリーププロセスにおけるひずみの増加も小さい。なお、応力レベル 70%の Stage1 終了後と Stage3 開始時の軸ひずみを比較すると、残留ひずみが伸長方向に発生しているが、この原因は不明である。



(a)応力レベル 65%



(b)応力レベル 70%

Fig 3 径ひずみと経過時間の線図

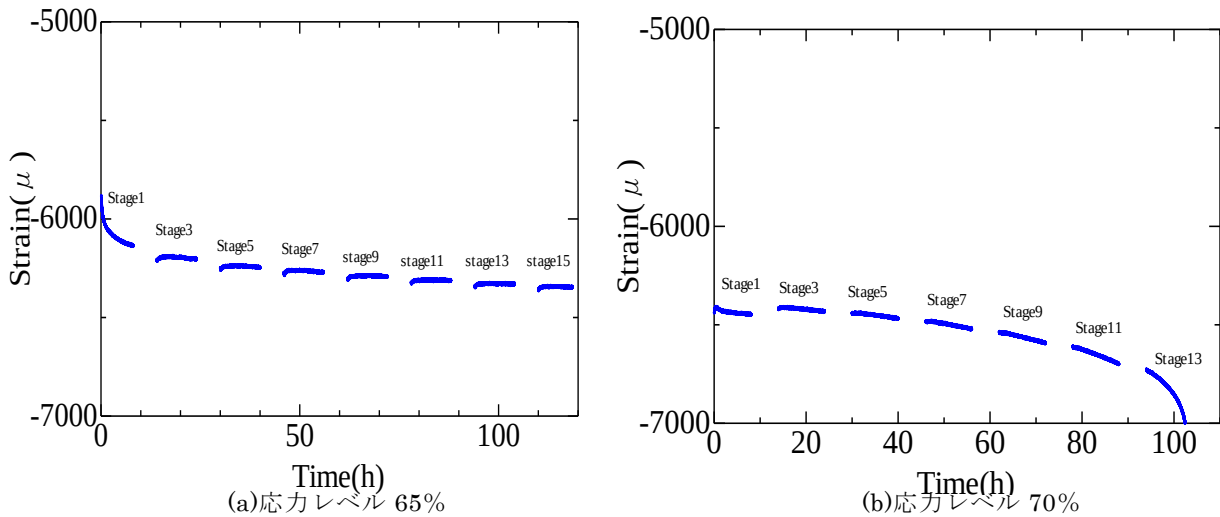


Fig 4 軸ひずみと経過時間の線図

4.2.2 AE の発生状況

Fig. 5 は AE の発生率と時間の関係を示した図である。応力レベル 65% の結果 (Fig.5(a)) を見ると、初期の Stage で AE が頻発し、その後、AE の発生率は時間とともに減少している。また、初期の Stage の AE の頻発は $-5^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ にかけて見られ、Stage2 の融解過程では AE の発生が見られるが、クリーブプロセスにおいては AE の発生はほとんど見られない。応力レベル 70% の結果を見ると、約 10 時間後の冷却過程で AE の発生が見られる以外は冷却過程での AE の発生はほとんど見られない。約 37、50、64 時間後に AE の発生が見られるが、これらはいずれもクリーブプロセスにおける発生である。また、Stage11 で AE が急増し、続く Stage12 の融解過程で AE の発生が見られ、その後のクリーブプロセスで最終的な破断に至った。以上のことから、初期の段階では、ハイブリッドプロセスにおいて岩石の損傷が進行するが、破断が近づくにつれ、クリーブプロセスで損傷が発達することがわかる。凍結融解作用による損傷が、その後のクリーブプロセスにおける損傷に影響を与える可能性があるが、両応力レベルの Stage2 の融解過程で認められた AE の発生はこれを示唆していると考ええる。

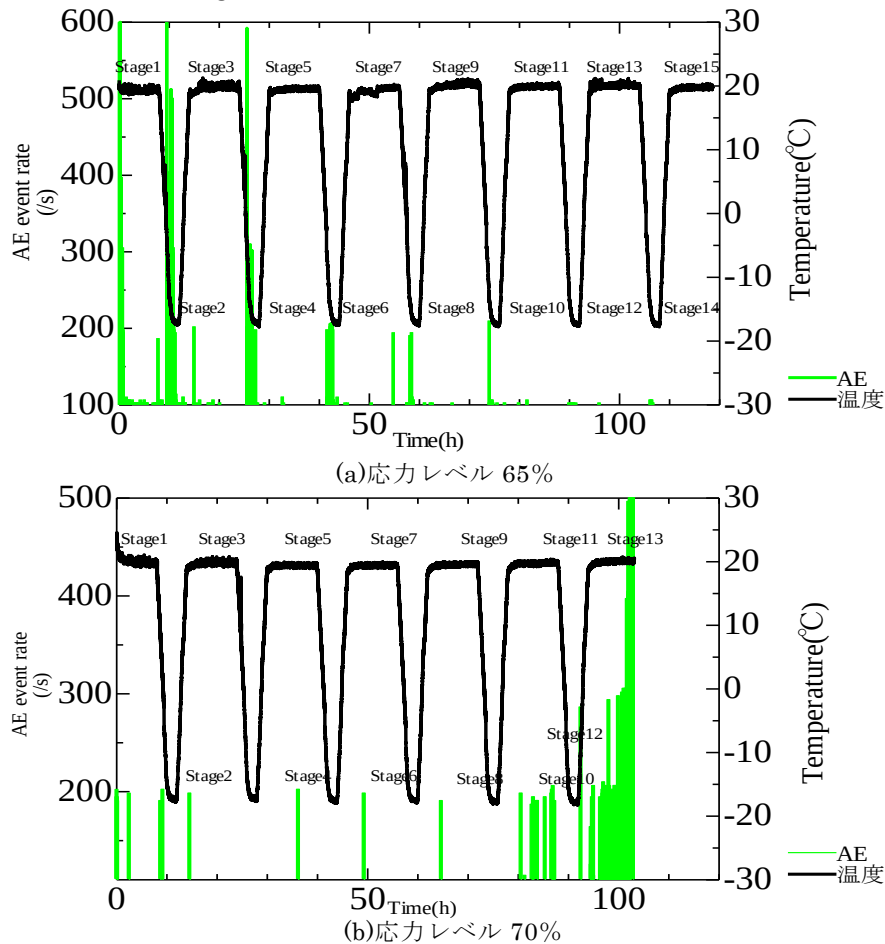


Fig 5 AE 発生状況

4.2.3 軸ひずみ増分と径ひずみ増分の比較

ハイブリッドプロセスとクリーププロセスにおける供試体のひずみ挙動の変化を把握するため、Fig6 のように各 Stage におけるひずみ増分を定義した。すなわち、凍結融解サイクル(6h)の開始時と終了時のひずみの差をハイブリッドプロセス(6h)のひずみ増分とし、凍結融解サイクルが終了してから4 時間後と 10 時間後のひずみの差(6h)をクリーププロセス(6h)のひずみ増分とした(Fig 7)。Fig.1 からわかるように、ハイブリッドプロセスでのひずみ増分は Stage2,4,6・・・14 で定義され、クリーププロセスでのひずみ増分は Stage3,5,7・・・15 で定義される。

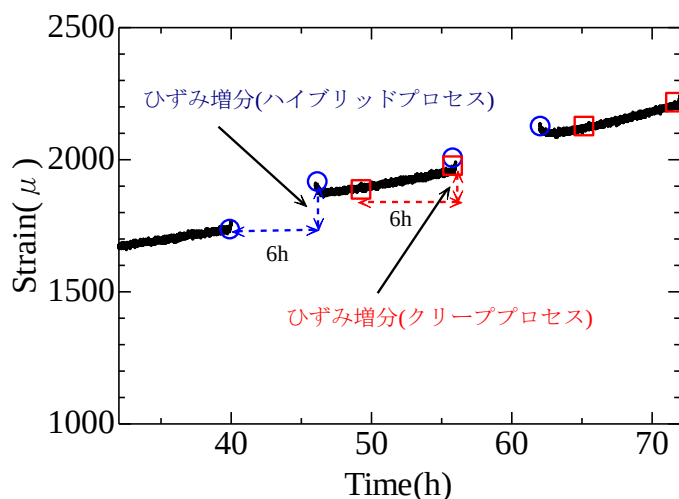


Fig 6 ひずみ増分説明図

ハイブリッドプロセスとクリーププロセスにおける軸ひずみ増分と径ひずみ増分を Fig.7 に示す。なお、変位計で得られた値で整理を行った。ひずみ増分は伸長を正としている。図より、応力レベルやプロセスに関わらず、軸ひずみ増分よりも径ひずみ増分の方が大きい値を示すことがわかる。また、両者のひずみの差は、クリーププロセスよりハイブリッドプロセスの方が大きい。これらのことより、凍結融解作用と一定応力による損傷はともに軸方向より横方向の変形に現れるが、この異方性の傾向は凍結融解作用による損傷において顕著であることがわかる。

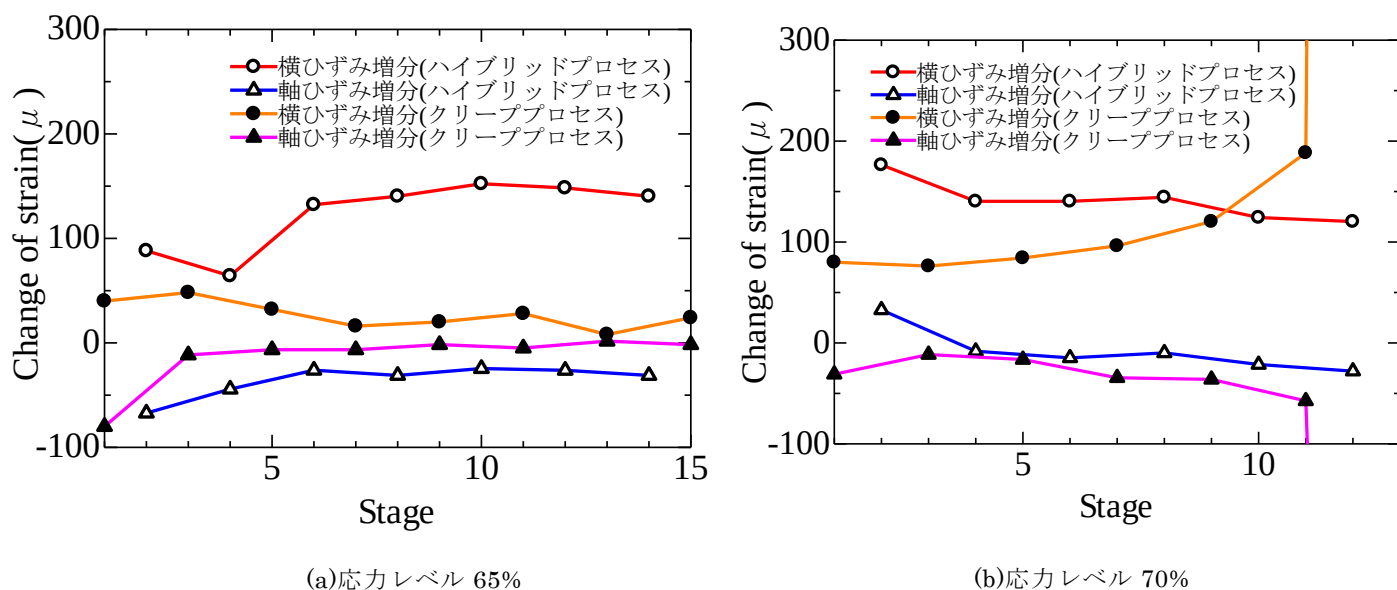


Fig 7 各 Stage における軸ひずみ増分と横ひずみ増分

4.2.4 岩石の損傷の発展

Fig 8は支笏溶結凝灰岩に対し、応力レベル 60%でクリープ試験を行った時のグラフである。横ひずみ速度と経過時間の関係を両対数座標で表示した。破壊時間は 96hであった。通常のクリープ試験では横ひずみ速度は両対数グラフ上で直線的に減少し、破壊に近づくと、ピーク値に達した後、滑らかな曲線を描き、増加に転じることがわかる。本試験のひずみ速度-時間線図をそれぞれ Fig 9に示す。クリープ試験である Stage のひずみ速度を比較し、ハイブリッド試験が岩石に与える損傷の程度を評価した。応力レベル 65%の時は、クリープ試験の時と同様、ひずみ速度は直線的に減少した。一方、応力レベル 70%の時はそうはならなかった。Stage3 の開始時のひずみ速度の値を ϵ_1 とする。Stage1 で得られたひずみ速度線図を外挿し、Stage3 の開始時間のひずみ速度 ϵ_0 を求める。この ϵ_0 はそのままクリープ試験を継続した時のひずみ速度を表す。Fig9(b)より ϵ_1 は ϵ_0 より上に位置していることがわかる。すなわち、これは Stage2 のハイブリッド試験により損傷の進行速度が大きくなったことを意味する。

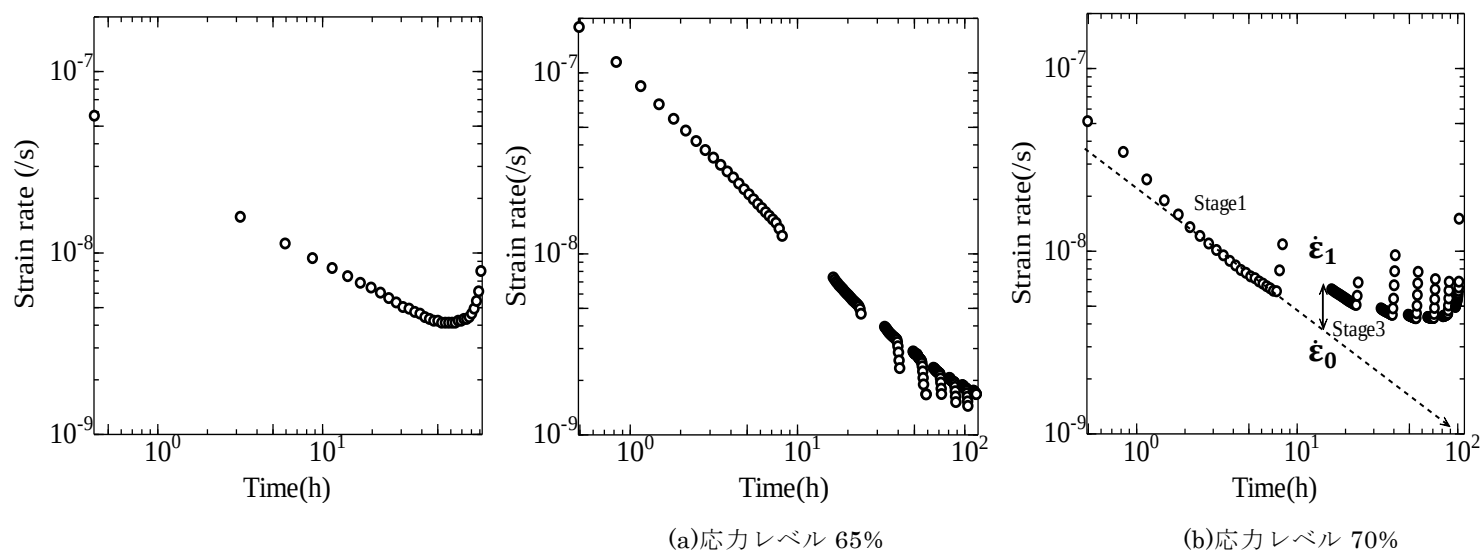


Fig 8 ひずみ速度と経過時間の関係(クリープ試験)

Fig 9 ひずみ速度と経過時間の関係(ハイブリッド試験)

5.まとめ

本研究では、支笏溶結凝灰岩の岩石供試体を対象として、凍結融解作用と一定応力を同時に作用させる試験(ハイブリッド試験)を行い、クリープ試験とハイブリッド試験における寿命の違いについて検討した。また、クリープ試験とハイブリッド試験を交互に繰り返した試験を行い、損傷の発展の特徴について検討した。得られた成果は以下の通りである。

- 1) クリープ試験とハイブリッド試験における寿命の差異について、t 検定による検定を行った結果、有意水準 5%で両者の寿命には差異があることがわかった。
- 2) 試験の初期の段階では、凍結融解作用による損傷が相対的に大きい、サイクル数が増すと次第に小さくなる。そして、最終破壊に近づくと一定応力による損傷が相対的に大きくなる。
- 3) 凍結融解作用による損傷と一定応力による損傷は異方性を示し、軸方向より横方向に大きく現れるが、この異方性の程度は凍結融解作用による損傷の方が大きい。
- 4) 凍結融解作用を与えたことにより、ひずみの速度が予想される値よりも大きくなったことからハイブリッド損傷の効果が確認できた。

引用文献

- 1) 福田正己(1974)、凍結-融解による岩石の風化、Low temperature Science. Series A, Physical sciences, 32 P 243-249
- 2) 赤羽一輝(2014)、一定応力と凍結融解作用を同時に受ける美唄砂岩の力学的挙動 北海道大学修士論文
- 3) 栗原伸一(2011)、入門統計学 オーム社出版