

岩石の長期クリープ特性にもとづく高精度非線形粘弾性モデルの構築

研究代表者 東京大学大学院工学系研究科 准教授 羽柴 公博

1. 緒言

原子力発電によって発生する高レベル放射性廃棄物は、地下 300 m 以深の地層に処分することになっており、その検討が進められている。地層処分においては、数 km 四方にわたって多くの坑道が掘削され、数十年かけて廃棄物が埋設された後は、数千年から数万年という長期にわたって坑道の安定性が求められる。その間、坑道周辺の岩盤には応力が加わり続けるが、一定の応力のもとでも岩盤は徐々に変形していく（これをクリープ特性という）。このような岩盤のクリープ特性を予測し、坑道の長期安定性を評価するためには、室内試験などによって岩石のクリープ特性を調べ、それを再現する高精度な粘弾性モデルを構築したうえで、坑道の変形挙動の数値シミュレーションを行う必要がある。地層処分坑道は鉱山坑道や土木トンネルと比べて、大規模で格段に長期にわたる安定性評価が必要なため、過去に構築された地下構造物の調査や地質現象の調査などによる検証も有効である。本研究では、このうちの室内試験と粘弾性モデルの高度化を目的とした。

これまでも岩石のクリープ試験が数多く行われてきたが、そのほとんどの試験は長くても数日から数週間で終了している。過去に試験期間が 5 年を超えたのは、Ito and Sasajima (1987) の 3 本の花崗岩と 3 本の斑れい岩の小試験片の試験、Ito and Kumagai (1994) の花崗岩の巨大試験片の試験であり、それぞれの 10 年間の結果が報告されている。また Kumagai (1991) では、2 本の花崗岩の巨大試験片による、1957 年からの 30 年間の試験結果が報告されている。ただし、これらの試験はすべて曲げクリープ試験であり、岩石試験として一般的な圧縮クリープ試験ではない。

本研究では、過去に例のない約 28 年間の圧縮クリープ試験結果を分析するとともに、短期間で長期クリープ特性を把握するための新しい試験法を開発した。それらの結果をもとに岩石の高精度非線形粘弾性モデルを構築した。

2. 長期クリープ試験結果の分析

2.1 試験の概要

試験装置の模式図を図 1 に示す。コンプレッサから送られた圧縮空気は、減圧弁によって設定された圧力に減圧され、空気圧シリンダに送られる。コンプレッサは圧力の上限と下限が設定されており、圧力が下限まで下がるとモータが運転を始め、上限に達するとモータが停止する。減圧弁のブリード孔からは空気が絶えず漏れるようになっているが、その量は微少である。そのため、コンプレッサのモータは約 1 時間ごとに 1 分程度の運転で済むので、長期間の使用に適している。空気圧シリンダには、空気の漏れ止め用のシールが使われていないので、試験片に加わる荷重は圧力×有効受圧面積で計算できる。この圧

力はブルドン管式圧力計に表示される。試験は、図に示すように試験片を水没させた状態で行っており、水は、大気中に放置することで二酸化炭素が溶解込み、pH が 6 程度となったイオン交換水を用いている。変位の測定には 2 個の歪ゲージ式カンチレバ型変位計を用いており、その出力は直流式歪増幅器を経て、デジタルマルチメータ、さらには PC に送られる。試験が長期にわたること、また、クリープ試験では試験開始直後や破壊直前に変位が単調に増加していくことから、PC には、変位計の出力がある値をとった最後の時刻を保存している。

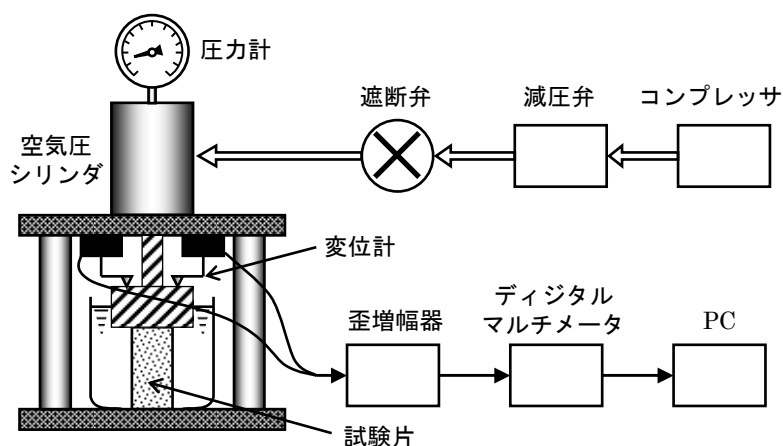


図1 クリープ試験装置の模式図

試料岩石として、栃木県宇都宮市産の新第三系のデイサイトー流紋岩質凝灰岩である田下凝灰岩を用いている。この岩石の主な力学特性を表1に示す。試験片は直径 25 mm、高さ 50 mm の円柱形であり、デシケータ内で真空脱気した後に、飽和状態となるまでイオン交換水を浸透させ、その後 1 か月以上水中に放置してから試験に用いた。試験では、試験片に加わる応力が、田下凝灰岩の湿潤状態での一軸圧縮強度の約 30%である 2.8 MPa になるように、減圧弁の出口圧力を調整した。試験開始時に遮断弁を開けることで、0.3 秒以内に試験片に所定の応力が加わる。

表1 田下凝灰岩の力学特性

	乾燥状態	湿潤状態
一軸圧縮強度 (MPa)	16	9.1
圧裂引張強度 (MPa)	1.9	0.9
ヤング率 (GPa)	3.6	2.6
比重	1.81	2.05
空隙率 (%)	25	25

2.2 試験の経緯

1994 年 11 月 22 日に東京大学工学部 4 号館の 1 階の試験室において、1 本目の試験片を用いた試験を開始した。この試験は、1996 年 8 月に変位計の出力値が不自然な動きを示すようになったため中止した。その後の調査により、歪増幅器の故障が判明し、零点に異常が生じていたことがわかった。そこで、試験中に測定装置に異常が生じても試験が継続できるような対応策を検討した。まず、任意の歪量を出力できるキャリブレータを用意し、歪増幅器に不具合が生じた場合には零点とゲインを確認することにした。変位計に異常が生じた場合は、変位計の接点とプラテンの間にブロックゲージを差し込んで点検を行うことにした。圧力計に異常が生じた場合は、遮断弁を閉じてから、遮断弁と減圧弁の間に別の圧力計を接続して、点検を行うこととした。また、これらの測定装置や PC などの故障に備えて、同機種を複数台保有することにした。

このような対応策を講じたうえで、1997 年 5 月 23 日に 2 本目の試験片を用いた試験を開始した。試験開始から 1 週間以上経過すると、変位の変化はかなり小さくなったので、それ以降は、変位の出力値に大きな変化がないこと、空気圧が設定値に保持されていること、を毎日確認している。また、試験片が水没していることを確認し、水が蒸発して減ってきた場合にはイオン交換水を継ぎ足している。さらに、コンプレッサのタンク内にたまった水を適宜排出している。

2000 年からは変位が減少することもあったため、毎週月曜日と金曜日に変位計の出力値を読み取って記録するようにした。変位が減少したのは、減圧弁を動かさなくても、シリンダ内の空気圧が少しずつ減少したためであった。試験の初期に生じたこの現象の原因は判然としなかったが、遮断弁を閉じた状態で、減圧弁のブリード孔や、コンプレッサから遮断弁までの配管を掃除し、空気圧を設定値に戻すことを適宜行ってきた。さらに、2008 年から 2010 年にかけては、測定装置に異常がなく、空気圧の表示値が一定であったにもかかわらず、変位が以前よりも小さい時期があった。そこで、2010 年 10 月に空気圧を設定値の 40%まで下げ、設定値の 50%との間で空気圧を 10 回程度増減させることを行った後に、設定値に戻した。

2010 年からは、試験室の温度と湿度および水の温度の測定を行っている。ただし、試験中の試験片に影響がおよばないよう、水の温度については、試験装置の横に容器を置き、イオン交換水と別の試験片を入れた状態で測定している。同じ年には、腐食していた試験室の木製の扉を金属製の扉に交換した。2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、試験室のある東京都文京区は震度 5 弱を記録した。試験開始時は、キャリブレータによる歪増幅器の零点とゲインの確認は異常が生じた際の対応策と考えていたが、2014 年からは毎月 1 回、この確認を行うようにしている。

2014 年には、工学部 4 号館の工事のため、試験装置を移動させなければならなくなった。そこで、2014 年 5 月 22 日に、遮断弁を閉じた後にコンプレッサや測定装置の電源を落とし、コンプレッサから減圧弁までの配管を取り外した。その後、これらの装置を台車

に載せ、約 200 m 離れた工学部 3 号館の 4 階の試験室に移動し、試験装置を元の状態に戻した。これらの作業にかかった時間は約 1 時間であったが、この間も試験片への载荷は継続したままにした。工学部 3 号館において約 1 年間試験を行った後、工学部 4 号館の工事が終了したため、2015 年 6 月 1 日に前回の移動と同じ要領で、試験装置を工学部 4 号館に移動させた。試験室は以前とは違って工学部 4 号館の 2 階になり、空調機も新しいものになった。

2017 年には圧力計の故障に備えて、別のブルドン管式圧力計を、減圧弁と遮断弁の間に新たに設置した。2020 年からはカビの発生を防止するため、夏に除湿器を用いて湿度を下げるようにした。また、2023 年からは電気料金が上がったため、以前よりも夏の設定温度を少し上げ、冬の設定温度を少し下げている。これまでに故障した機器は、工学部 4 号館 1 階の試験室の空調機、コンプレッサ、PC のモニターであり、これらは速やかに交換した。このような経緯で、2025 年には試験開始から 28 年が経過した。

2.3 試験結果

1997 年 5 月 23 日の試験開始から 2025 年 11 月 28 日までのクリープ歪の経時変化を、図 2 に黒の実線で示した。前述のように、試験片には载荷開始から 0.3 秒以内で所定のク

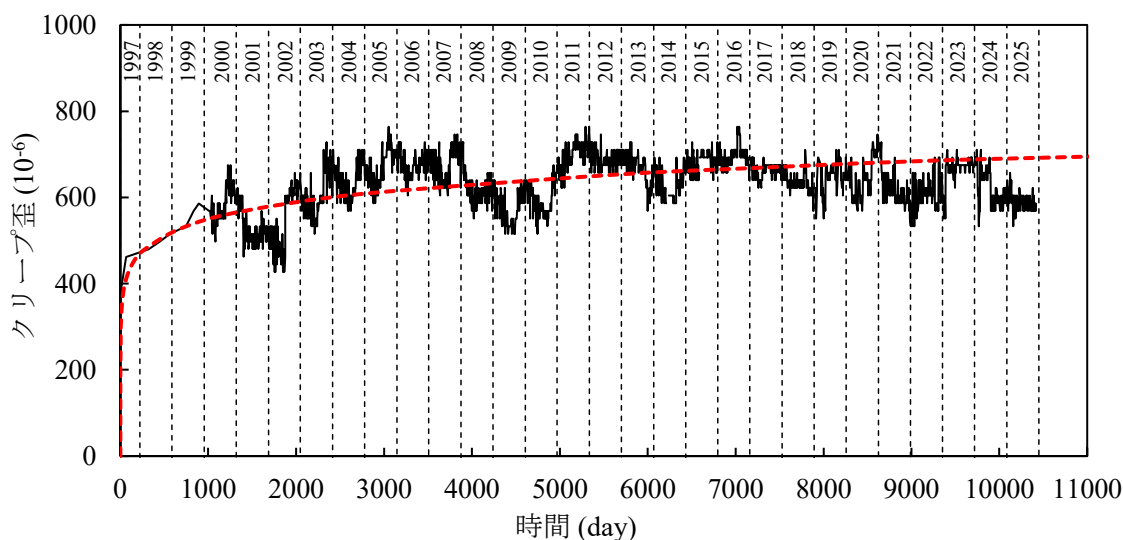


図 2 クリープ歪の経時変化
(試験結果を黒の実線，式(1)による計算結果を赤の破線で示した)

リープ応力が加わるが、多少の振動が生じるため、载荷開始から 1 秒が経過した時点をクリック歪の原点とした。試験開始から 2000 年の途中までは PC に記録した結果、それ以降は毎週月曜日と金曜日に記録した結果である。クリープ歪は、試験開始直後は急激に増加したが、その後は緩やかに増加し、2001 年以降は細かく変動しながら増減を繰り返す

た．このクリープ歪の増減の原因として、前述のようにシリンダ内の空気圧が少しずつ減少し、減圧弁の調整を行ったことなどが考えられる．2002 年，2003 年，2004 年，2005 年，2007 年に減圧弁の調整を行ったことにより，クリープ歪が回復した．2008 年から 2010 年にクリープ歪が小さく，その後に元に戻ったことは前述したとおりである．2011 年の東北地方太平洋沖地震の影響や，2014 年と 2015 年の試験装置の移動の影響は，クリープ歪にはほとんど見られなかった．また，毎年 9 月には電気設備の点検による数時間の停電があったが，停電が復旧した後，クリープ歪は停電前の値に戻った．

図には，クリープ歪の経時変化を次式で近似して赤の破線で示した．

$$\varepsilon_{cr} = \alpha t^{\frac{1}{\mu}} \quad (1)$$

ε_{cr} はクリープ歪， t は時間 (s) であり， α は 180×10^{-6} ， μ は 13 とした．図からわかるように，28 年間のクリープ歪には変動が見られたが，長期的な傾向は破線で近似できている．ただし，2024 年の中頃から 2025 年にかけてはクリープ歪が少し小さくなっている．この原因については不明であるが，2008 年から 2010 年にかけてクリープ歪が小さくなった現象と似ているため，その際に実施した対応策を今後実施するかどうか検討する必要がある．

2.4 長期と短期のクリープ試験結果の比較

図 3 には，クリープ応力レベル 30%での本研究の結果と，過去に行われた高応力レベルでの結果 (Chu 1995) を片対数グラフ上に示した．なお，過去の高応力レベルでのクリープ試験は，本研究と同じ試験装置を用いて，田下凝灰岩の試験片を水没させた状態で行われた．図には，式(1)での計算結果を赤の破線で示した．いずれのクリープ応力でも，下に凸の曲線を描きながらクリープ歪は増加していき，高応力レベルでは破壊に至った．そこで，短期間のクリープ試験結果を整理して得られたクリープ寿命とクリープ応力の関係を図 4 に丸印で示した．なお，本研究では試験片を水没させた状態（湿潤状態）で試験を行っているが，比較のため，乾燥状態での結果も示した．試験片ごとのばらつきがあるものの，クリープ応力とクリープ寿命の関係は片対数グラフ上で直線的で，その傾きは乾燥状態と湿潤状態ではほぼ同じであった．

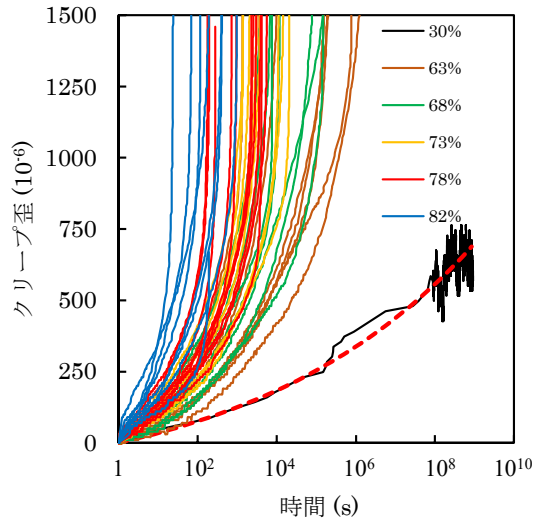


図3 長期と短期のクリープ試験結果
(数字はクリープ応力レベルを表す、
黒の実線と赤の破線は図2と同じ結果)

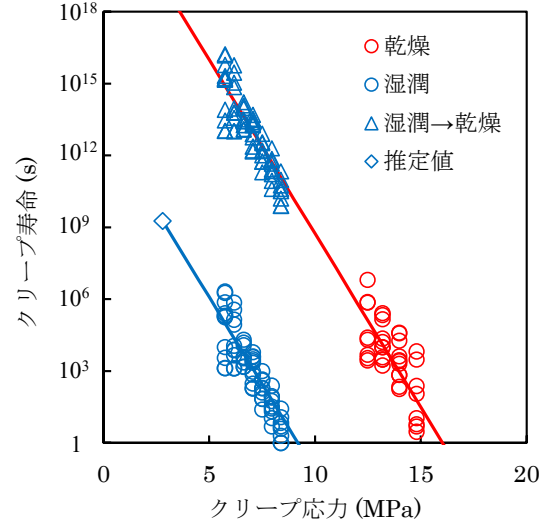


図4 クリープ応力とクリープ寿命の関係
(青と赤の実線は式(4)による計算結果)

速度過程論にもとづき、岩石の破壊が進行する速度 r が応力 σ の関数で表されるとし、その応力の関数を a と b を定数として次式のように仮定する。

$$r = a \exp(b\sigma) \quad (2)$$

また、 r の積分値がある値 R になった時に破壊が生じるという仮定もおく。

$$R = \int_0^{t_{cr}} r dt \quad (3)$$

クリープ試験では、式(2)に $\sigma = \sigma_{cr}$ を代入し、それを式(3)に代入すると、次式のようにクリープ寿命 t_{cr} が得られる。

$$t_{cr} = \frac{R}{a \exp(b\sigma_{cr})} \quad (4)$$

式(4)で R と b が乾燥状態と湿潤状態で変化しないとすると、同じクリープ応力のもとでは、湿潤状態でのクリープ寿命を定数倍すると乾燥状態でのクリープ寿命となる。このようにして変換したクリープ応力と湿潤状態でのクリープ寿命の関係を図4に三角印で示し

た．乾燥状態での結果を近似した赤の直線が，湿潤状態を変換した結果もうまく近似しており，理論式が試験結果をうまく再現していることがわかる．これらの結果から，長期クリープ試験（湿潤状態でクリープ応力 2.8 MPa）におけるクリープ寿命を推定したところ，四角印で示したように 1.5×10^{19} s（約 58 年）となった．

3. 短期間で長期クリープ特性を把握するための新しい試験法の提案

通常のクリープ試験では，クリープ応力レベルが低い場合，試験開始からしばらくすると歪の変化が非常に小さくなり，破壊挙動を調べることができなかった．この問題を解決するため，クリープ試験において歪速度が加速していき破壊にいたる過程を調べる加速クリープ試験を過去に開発した（Hashiba and Fukui 2024）．図 5(a)に概念図を示すが，この試験では一定の歪速度で載荷を行い，応力-歪曲線のピークを過ぎた後に C 点から除荷をする．その後，応力を一定に保って D 点からクリープ試験を行うことで，E 点で破壊が生じることになる．通常のクリープ試験では，応力-歪曲線のピークに達する前の A 点で応力を一定にして，その後 D 点を経て E 点に達するが，加速クリープ試験では A 点から D 点までの破線部を省略していることになる．つまり加速クリープ試験では，図 6 に模式的に示したように，破壊直前で歪速度が加速する赤丸で囲んだ部分のみの結果を得ることができる．

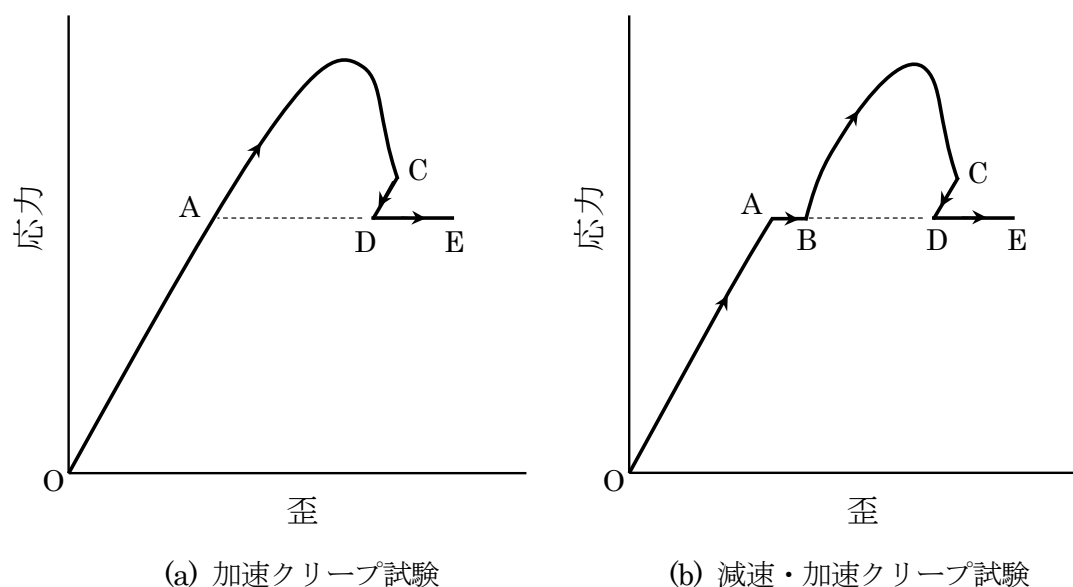


図 5 短期間で長期クリープ特性を把握するための試験法の概念図

加速クリープ試験では，クリープ破壊直前の挙動を調べることができるが，クリープ開始から歪速度が減速していく区間（減速クリープ）を省略しているため，クリープ寿命を知ることはできない．そこで本研究では，加速クリープ試験の前に減速クリープ試験を行うことで，低いクリープ応力レベルでのクリープ寿命を推定する方法について検討した．

この新しい試験法（減速・加速クリープ試験）の概念を図 5(b)に示すが，まず A 点まで載荷した後に応力を一定にして減速クリープのデータを取得する．その後，B 点から再載荷を行い，応力-歪曲線のピークを過ぎた後に C 点から除荷をする．そして，D 点から応力を一定にしてクリープ試験を行うことで，E 点で破壊が生じることになる．すなわち，過去に提案した加速クリープ試験では図 5(a)において A 点から D 点までを省略したが，今回提案する減速・加速クリープ試験は図 5(b)において B 点から D 点までを省略することになり，図 6 の青丸と赤丸に囲まれた部分の結果を得ることになる．この 2 つの曲線をつなぐことで，クリープ寿命を推定できるのではないかと考えた．この減速・加速クリープ試験を乾燥状態の田下凝灰岩に適用したところ，図 6 の概念図と似た結果が得られ，短期間の試験結果から長期間のクリープ寿命が推定できた（Hashiba and Fukui 2025）．

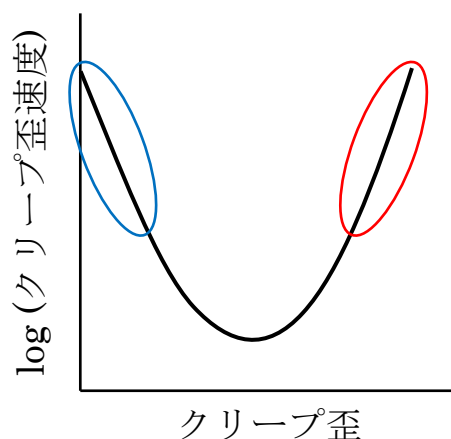


図 6 クリープ歪とクリープ歪速度の関係を表す概念図
(加速クリープ試験では赤丸で囲んだ部分，減速・加速クリープ試験では青丸と赤丸で囲んだ部分を得られる)

4. 高精度非線形粘弾性モデルの構築

岩石の変形や破壊，それらにおよぼす時間の影響を再現するため，次式で表されるコンプライアンス可変型モデルが提案されている（Okubo and Fukui 2006）．

$$\frac{d\lambda}{dt} = k\lambda^m\sigma^n \quad (5)$$

ここで， λ はコンプライアンス（＝歪／応力）， k ， m ， n は定数である．乾燥状態と湿潤状態での田下凝灰岩に適用するため，式(2)を参考にして応力の関数を次式のように変更する．

$$\frac{d\lambda}{dt} = k\lambda^m \exp(b\sigma) \quad (6)$$

$d\lambda/dt$ は破壊が進行する速度を表すので、2.4 での結果から、その速度は水分すなわち飽和度 w の影響を受けることがわかる。そこで、他の岩石の過去の検討結果から、次式のように定数 k が w の関数であるとする。

$$k = k_0 \exp\{-b \cdot f(w)\} \quad (7)$$

ここで、 k_0 は定数、 $f(w)$ は飽和度 w と飽和度 1 での強度の差である。式(7)を式(6)に代入して整理すると次式が得られる。

$$\frac{d\lambda}{dt} = k_0 \lambda^m \exp[b\{\sigma - f(w)\}] \quad (8)$$

この式は式(6)の k を k_0 、 σ を $\sigma - f(w)$ にした形になっており、飽和度 w が減少、すなわち、 $f(w)$ が増加すると破壊の進行速度が遅くなり、強度やクリープ寿命が増加することになる。

飽和度が一定のもとでは式(8)は式(6)と同じなので、本研究では式(6)を用いて二次元有限要素解析を行った。そのため、まず、各要素のコンプライアンス λ が、二次元応力下では次式のように変化するとした。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = k_1 (\lambda^*)^m \exp(b\Delta\sigma^*) \quad (9)$$

$$\text{ただし、} \lambda^* = \frac{\lambda}{\lambda_0}, \quad \Delta\sigma^* = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_0}$$

ここで、 λ_0 は初期コンプライアンス（ヤング率の逆数）、 $\Delta\sigma$ は差応力、 $\Delta\sigma_0$ は強度である。定数 k_1 は正規化した強度が 1 になるように決めた。破壊条件としては次式を採用した。

$$\Delta\sigma_0 = \sigma_c \left(1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_t}\right)^{0.5} - \sigma_3 \quad (10)$$

ここで、 σ_c は一軸圧縮強度、 σ_t は一軸引張強度、 σ_3 は周圧である。ポアソン比 ν は次式のように変化すると仮定した。

$$\nu = 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{\lambda^*} \quad (11)$$

ここで、 ν_0 はポアソン比の初期値である。

解析では、半径 2 m の円形トンネルに十分遠方から 10 MPa の地圧が等方的に加わるとして、トンネル壁面の変位の経時変化を求めた。なお、岩盤の物性値は Okubo and Jin (1993) を参考にして表 2 のようにした。図 7 には解析結果を青で示したが、比較のため、従来の式(5)を用いて同様の条件で解析した結果を赤で示した。なお、条件を合わせるため、式(5)の n は周圧によらず一定とした。いずれの式による結果とも、変位は時間とともに増加しており、両者の関係は下に凸の曲線で表された。ただし、本研究で構築した式(6)による計算の方が、変位が大きくなった。

表 2 有限要素解析で用いた岩盤の物性値

一軸圧縮強度 (MPa)	20
一軸引張強度 (MPa)	2.0
初期コンプライアンス (1/GPa)	0.5
初期ポアソン比	0.2
b	20
m	10

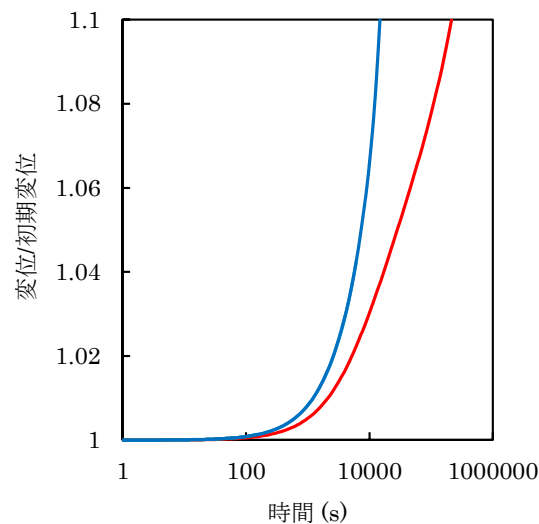


図 7 有限要素解析によるトンネル変位の計算結果
(青が式(6)、赤が式(5)での結果)

5. 結言

本研究では、過去に例のない約 28 年間の田下凝灰岩の圧縮クリープ試験結果を分析した。短期間の乾燥状態と湿潤状態でのクリープ試験結果と比較することで、長期間のクリープ試験におけるクリープ寿命を予測した。また、その予測精度をあげるため、短期間で長期クリープ特性を把握するための新しい試験法を開発し、乾燥状態での田下凝灰岩に適用した。約 28 年間のクリープ試験結果と比較検討するためには、今後、湿潤状態での試験結果を取得する必要がある。さらに、これらの結果をもとに岩石の高精度非線形粘弾性モデルを構築した。このモデルを有限要素解析に組み込むことで、トンネルの時間依存性挙動の数値シミュレーションに成功した。本研究の成果は、地層処分坑道をはじめとする地下空間の長期安定性評価において、精度と信頼性の向上に寄与することが期待される。

謝辞

本研究は「公益財団法人 JFE21 世紀財団」の研究助成の支援を受けて実施されたものです。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- Chu, S. Y. (1995): The time dependency of rocks under water-saturated condition, PhD thesis, The University of Tokyo (in Japanese).
- Hashiba, K. and Fukui, K. (2024): Experimental study on the accelerating creep of rock under dry and wet conditions based on a new test method, *Rock Mech. Rock Eng.*, 57, 5969-5983.
- Hashiba, K. and Fukui, K. (2025): Innovative test methods for investigating the time-dependent behavior of rock: review and new insights, *Rock Mech. Rock Eng.*, 58, 12913-12927.
- Ito, H. and Sasajima, S. (1987): A ten year creep experiment on small rock specimens, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 24, 113-121.
- Ito, H. and Kumagai, N. (1994): A creep experiment on a large granite beam started in 1980, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 31, 359-367.
- Kumagai, N. (1991): Collected papers on the ongoing laboratory experiments on the creep of granite to commemorate thirty years of continued research, *Yoshioka Syoten*, 165-181.
- Okubo, S. and Jin, F. (1993): Simulation of rock behaviour around circular roadway by non-linear rheological model, *Journal of MMIJ*, 109, 209-214 (in Japanese).
- Okubo, S. and Fukui, K. (2006): An analytical investigation of a variable-compliance-type constitutive equation, *Rock Mech. Rock Eng.*, 39, 233-253.