

岩盤空洞のクリープ挙動に関する実験研究

鈴木 健一郎 鳥井 原 誠

Experimental Study on Creep Behavior of Underground Rock Cavern

Kenichirou Suzuki Makoto Torihara

Abstract

Evolution of cracks leading to brittle failure under dry conditions has been elucidated by tri-axial creep tests and rock-cavern model tests on granitic rocks. A micromechanical model considering time-dependent crack growth was applied to simulate the results of cavern-model tests. This paper describes the evolution of cracks leading to brittle failure under saturated conditions during tri-axial creep tests and rock-cavern model tests on granitic rocks. The strength of saturated granitic rock was 3% lower than that of dried granitic rock, and the duration to creep failure of saturated rock was 10 to 100 times shorter than that of dried granitic rock. During rock-cavern model tests under saturated conditions, damage evolved uniformly around the cavern. This was different from the damage evolution of the dried rock-cavern model. These results suggested that the water accelerated crack evolution.

概 要

地下空洞掘削に伴う周辺岩盤の物性変化の範囲および程度を把握するために、花崗岩の三軸クリープ試験、空洞模型試験を実施した。脆性破壊におけるクラックの進展を明らかにし、クラック進展の時間依存性を考慮したマイクロメカニクスモデルを用いて空洞模型試験のシミュレーションを行った。この研究では、飽和状態での岩石および空洞模型のクリープ試験を実施し、乾燥状態での亀裂進展挙動との比較を試みた。飽和状態の岩石強度は、乾燥状態のそれより3%低下する、クリープ破壊までの時間は10倍から100倍早くなることが明らかになった。飽和状態の空洞模型試験では、クリープ時の亀裂の進展が空洞周辺一様に及び、乾燥状態の進展挙動とは異なる傾向が認められた。これらの結果は、地下水の存在がクリープ損傷などで形成されたクラックの進展をさらに進める効果を持っていることを示唆している。

1. はじめに

地下空洞掘削に伴う周辺岩盤の物性変化の範囲および程度を把握することは、地下空洞の設計・施工の最適化およびコスト削減の観点から重要となる。地下空洞掘削により影響を受ける領域は、掘削により物理的ダメージを受けて物性が変化する領域（掘削損傷領域）と応力再配分現象に伴う既存亀裂の変位や空隙の閉塞などにより物性が変化する領域（応力再配分領域）の組合せで構成されるという概念モデルが構築されている¹⁾。空洞が地下深部に建設され、大規模な掘削が行われる場合に、地下水の存在を無視することはできない。

これまで、筆者らは岩石の三軸クリープ試験を実施し、破壊時のクラック密度は、クリープ状態では、静的な圧縮試験におけるそれより増加していることを示した²⁾。また、空洞模型試験では、一軸応力状態では脆性破壊が空洞天端および底盤から進展し、二軸応力状態では、空洞側壁部から進展していく周辺のひずみ、破壊時のAE位置標定、空洞周辺の間隙率の変化、比抵抗値の増加で捉えられることを示した²⁾。さらに、クラックの進展を考慮した解析においても同様な傾向を捉えることができた³⁾。

岩石の脆性破壊は、クラックの発生・進展により起こることが知られている⁴⁾。このようなクラックは岩盤の強

度を低下させるだけでなく、水みちとしての役割を果たす。したがって、脆性破壊の進行に伴うクラックの変化を定量的に捉えることが、岩盤の強度、空洞周りの透水係数を考える上で必要となる。これまで、直接観察によるクラックの幾何の定量化により、その情報をクラックテンソル F_{ij} などに変換するを行ってきた⁵⁾。しかし、Odaら⁶⁾によりクラックの進展を直接観察ではなく、弾性波速度変化から表現できることが示された。

この研究では、水で飽和した岩石および模型空洞の破壊試験およびクリープ試験により、岩盤の挙動への地下水の影響を明らかにすることが目的である。岩石試験では、脆性破壊への水の影響が、強度およびクリープ破壊までの時間に与える影響を調べた。また、花崗岩の薄板に円孔を設けて岩盤空洞を模擬した物理モデルによる試験（以後、空洞模型試験と呼ぶ）では、空洞の変形と周辺岩盤のひずみ分布、および損傷の進展を調べた。これらの結果をこれまで実施した乾燥状態での破壊試験およびクリープ試験それぞれの試験結果と比較した。

2. 供試体および試験方法

試験試料には、茨城県筑波に分布する花崗閃緑岩である稲田花崗岩を用いた。稲田花崗岩の構成鉱物は、XRD分

析の結果より体積分率で石英39.72%, 斜長石30.73%, 正長石24.75%, 黒雲母3.98%, 0.82%の粘土鉱物である。

岩石試験は、地下深部の周辺環境が定応力下での岩石の変形にどのような影響を与えるかを考察するため、応力レベル、拘束圧 (40MPa, 80MPa) および湿潤環境 (乾燥・飽和) を変化させて行った。飽和状態の試料は、真空状態で2週間以上純水に浸すことで飽和状態の試料とした。

荷重条件は、拘束圧を0.1MPa/sの速度で所定の圧まで荷重し、その後軸差応力を1MPa/sの速度で所定のクリープ応力まで荷重し、クリープ破壊に達するまで保持した。

空洞模型は、同じ稲田花崗岩の500 mm×500 mm×50 mmの平板の中心に直径160 mmの円孔を有するものである。空洞模型の飽和化は、1ヶ月以上の水浸をもって飽和状態とした。この円形空洞を有する平板を岩盤多機能試験装置⁷⁾を用いて、鉛直方向および水平方向からの二軸状態で荷重し、平面応力状態における円形空洞周辺岩盤の挙動を調べた。空洞模型の周辺は、高強度モルタルによりキャッピングし、平行度を保ち、荷重板とのなじみをよくした。空洞模型の試験状況をPhoto 1に示す。

円形空洞を含む平板全体の変形は水平方向および鉛直方向にギャップセンサーを用い、空洞の鉛直方向および水平方向の内空変位はπ形変位計を用いて計測した (Fig. 1およびPhoto 2)。空洞側壁および周辺岩盤のひずみを合計40点の5 mm長さのワイヤーストレインゲージにより計測した。ワイヤーストレインゲージの貼り付け状況をFig. 2に示す。図は表裏面の貼り付け状況であるが、空洞側壁に関しては、左図に空洞周方向、右図に空洞軸方向の貼り付け状況を示した。また、クラックの進展状況を観測するため8個のAEセンサーを表裏面に4個ずつFig. 3のように設置し、損傷進展の位置標定を行った。

座標系は、x軸を模型左右方向、y軸を模型奥行き方向、z軸を鉛直方向とする。荷重は、x方向荷重およびz方向荷重を所定の荷重となるまで、10 kN/minの速度で荷重し、その後、z方向の荷重を変位制御により0.025 mm/minの速度で荷重し、所定の荷重にて周辺岩盤が破壊に達するまでの一定時間の荷重を行った。試験状況はPhoto 1に示すようである。

3. 試験結果および考察

3. 1 岩石供試体のクリープ試験結果

Fig. 4およびFig. 5に乾燥および飽和状態での試験結果をクリープ応力レベル σ とクリープ破壊時間 T_f の関係を示す³⁾。破壊時間と応力レベルの関係を

$$\sigma = a \text{Log}(T_f) + b$$

なる近似式により近似すると図の示したようにおよそ実験結果を反映している。これらのデータには、異なる方向から採取した供試体を含んでいる。稲田花崗岩には初期マイクロクラックの方向性により、割れやすい方向順にRight, Grain, Hardwayと呼ばれる、互いに直交する3つの面

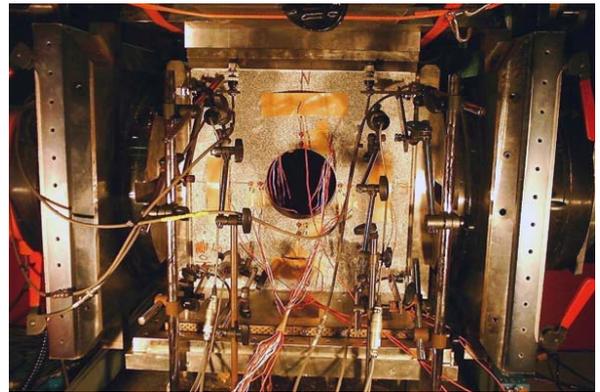


Photo 1 空洞模型試験状況
Set Up of Cavern-Model Test

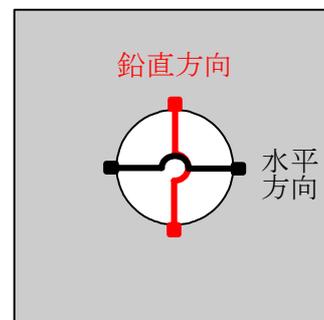


Fig. 1 πゲージ設置位置
Location of π-type gage to Measure Convergence

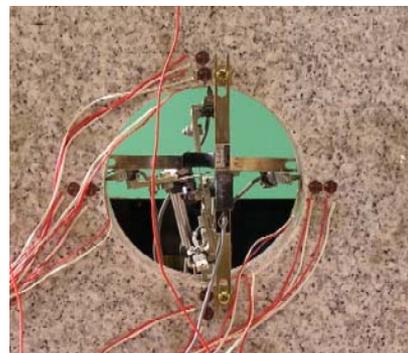


Photo 2 πゲージ取付け状況
Set Up of π-type gage to Measure Convergence

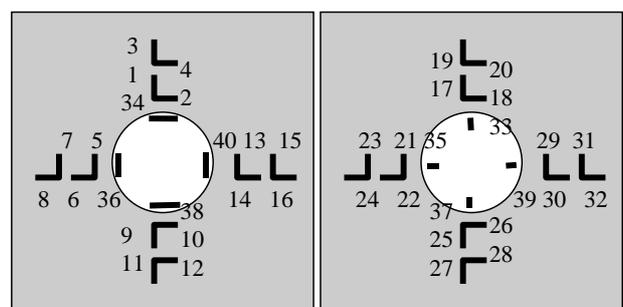


Fig. 2 ひずみゲージの貼り付け状況 (表裏面)
Location of Wire-Strain Gages to Measure Strain around the Cavern

が存在するが、乾燥状態において、別々に実施した試験からは、方向によるクリープ破壊時間の差は、拘束圧によらず顕著に表れなかったために、ここでは同一グループとして考えた。Fig. 4に示すように、拘束圧による違いは大きく、同一のクリープ応力レベルであっても破壊に要する時間は高拘束圧(80MPa)の破壊時間は、低拘束圧(40MPa)の場合の10-100倍であった。拘束圧はクラックの開口を抑制するため、クラック進展速度を鈍化させるものと考えられる。いずれの場合もy軸の切片100%は静的な破壊応力レベルと一致した。また、Fig. 5に示す水で飽和されている試料は、乾燥状態の試料に比べ10倍程度のクリープ破壊時間の差があった。また破壊強度は乾燥状態に比べて飽和状態のものは3%程度小さくなった。これらの理由として、クラック先端部の局所的な破壊に水が関与しており、特に石英などのSiO₂から構成される鉱物の場合、Si-O結合が結合力の弱い水素結合に置換されることなどが上げられる⁸⁾。

また、クラックの観察からは、静的な载荷では、拘束圧によらず、破壊時の亀裂密度はクラックテンソルの第一不変量F₀でおおよそF₀=7から8で破壊が起こるとされているが⁹⁾、クリープ破壊直前のF₀は9.75と大きな値を取った。また、試料内部を観察すると、3次クリープ近傍の試料には微小なせん断帯が形成されており、このことが、クラック密度を大きくしている要因であると考えられる。

3. 2 空洞模型試験結果

鉛直方向に40MPa(破壊時58MPaの80%)まで段階的に载荷し、その後一定軸差応力を負荷したケースの結果について述べる。Fig. 6には、空洞内空変位の経時変化を示した(内空NSがz方向、内空EWがx方向)。一軸クリープおよび二軸クリープにおいてもz方向は破壊応力の80%の一定荷重のクリープ試験であるが、それぞれおよそ4日と2日の間に破壊には至らなかった。しかし、空洞周辺の応力集中のために空洞内空は時間に依存した挙動を示した。最終時の変化は除荷による変化である。

Fig. 7は、一軸クリープ試験中のAE発生位置である。一軸クリープ試験では、空洞天端および底盤から損傷が進展している様子が見られる。空洞の天端および底盤では引張破壊が進行していることが確認された。その傾向は時間とともに変化は見られず、損傷の集中が進行した。二軸クリープ試験におけるAE発生位置をFig. 8に示す。二軸クリープ試験では、AEは空洞側壁付近で発生しており、損傷が側壁から進展していることが伺える。比抵抗値の分布もおおよそ損傷の発生・進展を反映した分布となっている²⁾。

飽和状態における空洞模型のクリープ試験結果をFig. 9に示す。側方向に10MPa、鉛直方向に40MPa一定の場合のクリープ挙動である。空洞の変形モードは鉛直方向に空洞閉塞、水平方向に空洞が広がる扁平状態になる傾向は乾燥状態のそれと同様である。Fig. 10には、空洞壁面、空洞周辺に貼ったストレインゲージの挙動を示した。空洞側壁部のひずみは天端および底盤部では小さな圧縮および引

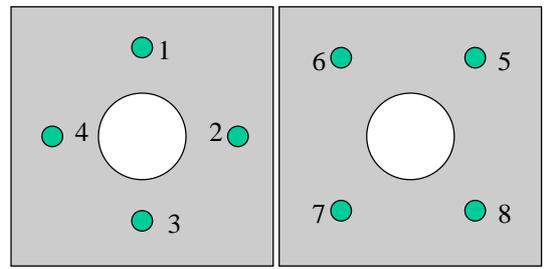


Fig. 3 AEセンサーの取り付け状況
Set-Up of AE Sensors to Determine the Location of Damage Evolution

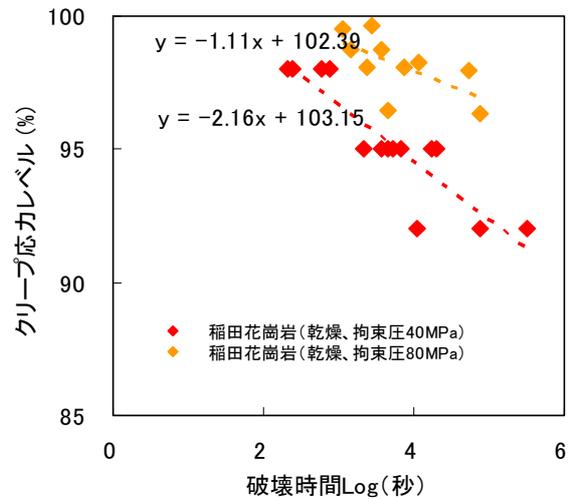


Fig. 4 クリープ応力レベルとクリープ破壊時間の関係 (乾燥状態)

The Relationship between Creep Stress Level and Duration of Creep Failure (Dry condition)

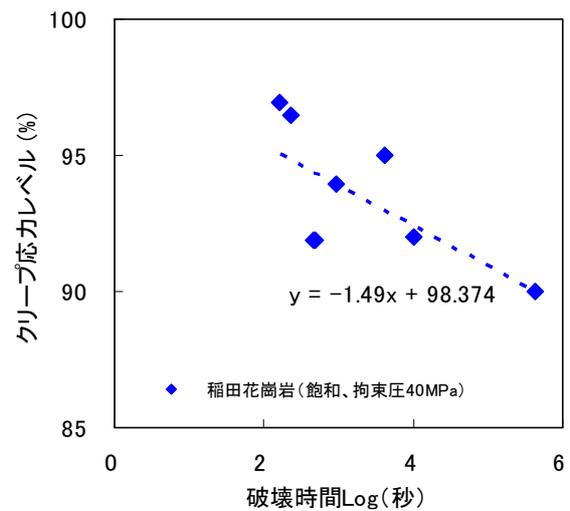


Fig. 5 クリープ応力レベルとクリープ破壊時間の関係 (飽和状態)

The Relationship between Creep Stress Level and Duration of Creep Failure (Saturated condition)

張から時間と共に圧縮ひずみが増加し、側壁部では 400μ および 600μ から 100μ 程度の時間増加を示している。空洞境界から 10 mm の位置に貼ったワイヤーストレインゲージの結果である。天端および底盤においては、半径方向のひずみ (#1, #9, #17, #25、Fig. 2参照)には数 10μ 程度の圧縮ひずみ、周方向 (#2, #10, #18, #26、Fig. 2参照)

には引張側のひずみが $300\sim 400\mu$ 現れている。空洞側壁部には、左右および表裏およそ等しく $1000\sim 2000\mu$ の圧縮ひずみと半径方向に若干の引張が現れている。これらの傾向も乾燥状態と変わらない。最終の変形は除荷時のものである。

Fig. 11にAE計測による損傷の進展状況を示す。損傷

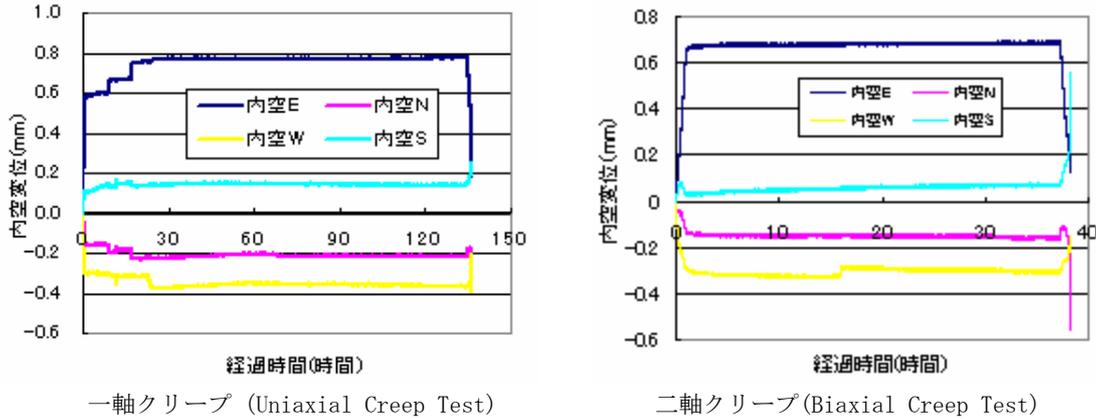


Fig. 6 空洞内空変位の経時変化
Creep Curves of Convergence

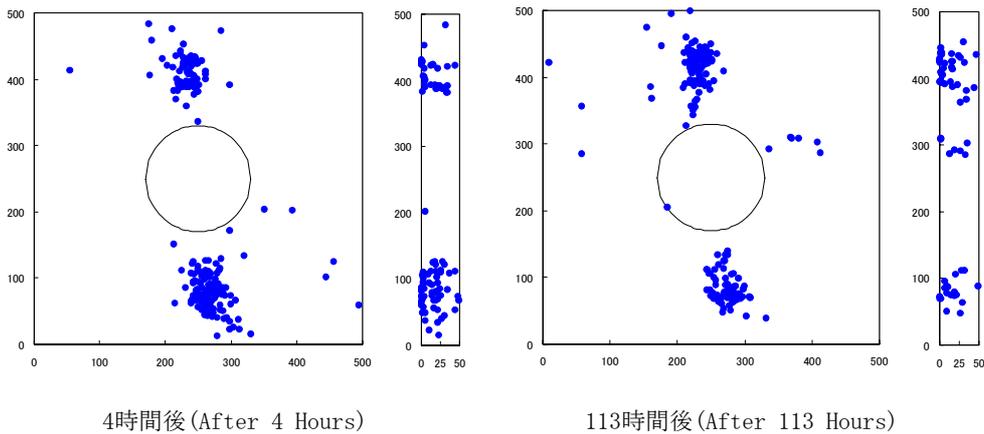


Fig. 7 一軸クリープ中のAEイベント発生位置 (乾燥状態)
Location of AE Events during Uniaxial Creep Test (Dry Condition)

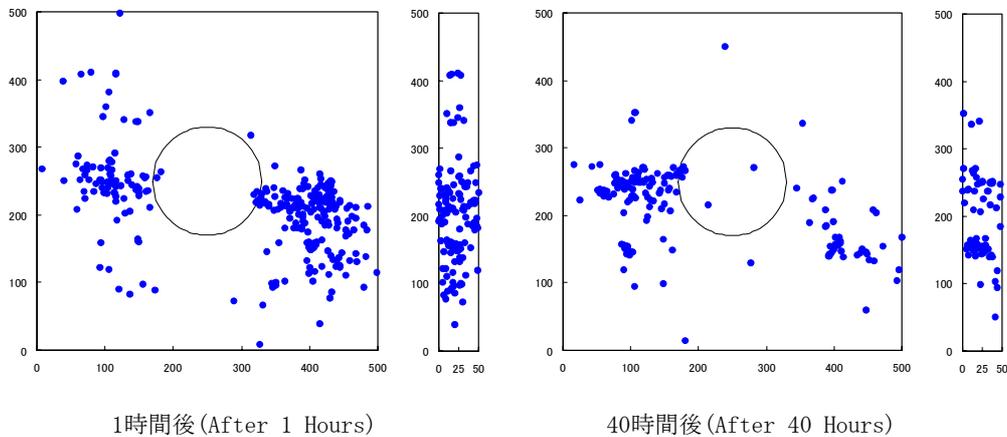


Fig. 8 二軸クリープ中のAEイベント発生位置 (乾燥状態)
Location of AE Events during Biaxial Creep Test (Dry Condition)

はクリープ開始から10時間までとその後27時間までの損傷の発生位置に点がプロットされている。損傷は空洞周辺

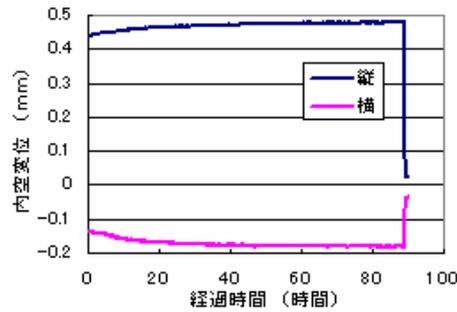
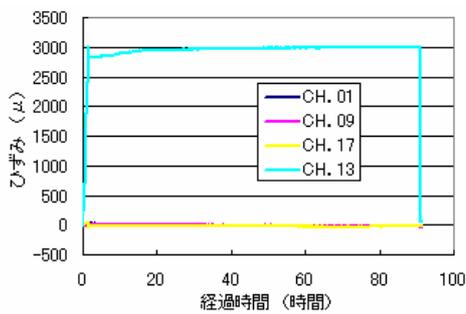
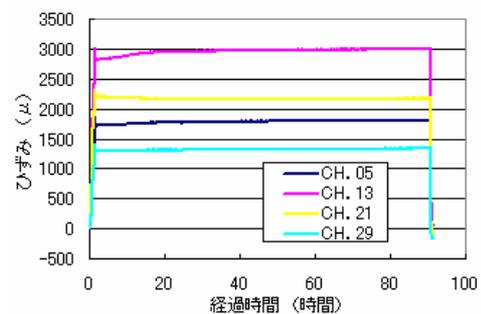


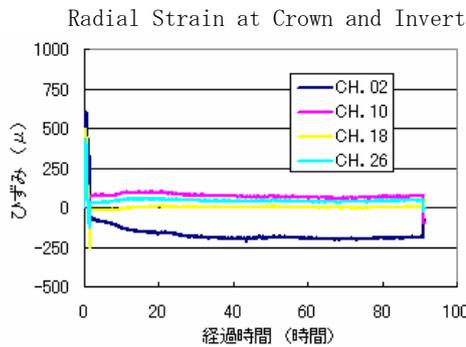
Fig. 9 空洞内空変位の経時変化
Creep Curves of Convergence



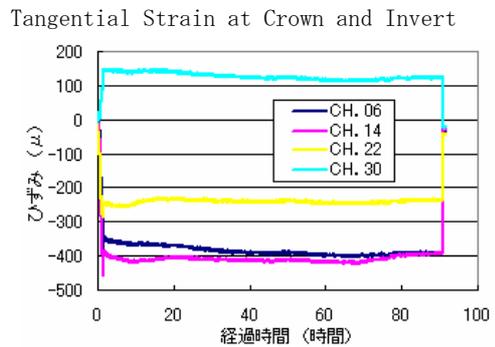
(a) 天端・底盤半径方向



(b) 天端・底盤周方向



(c) 側壁周方向



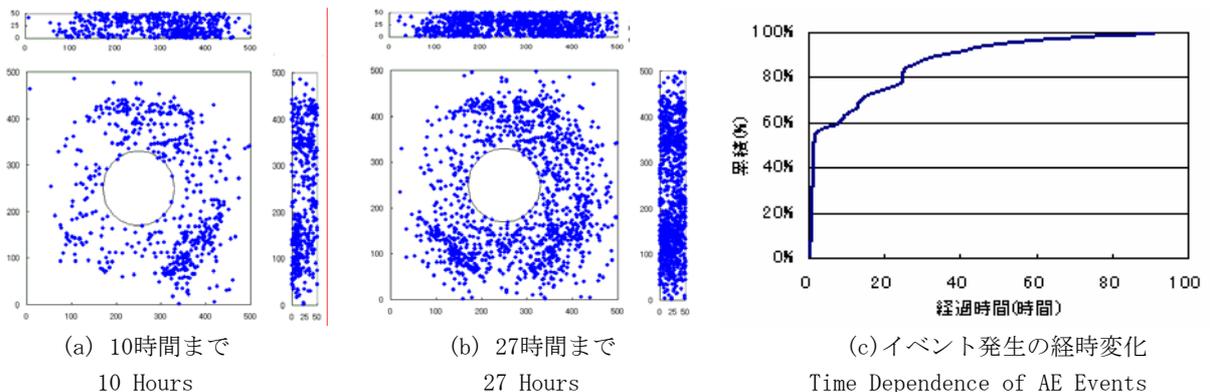
(d) 側壁半径方向

Tangential Strain at Side-Wall

Radial Strain at Side-Wall

Fig. 10 空洞周辺岩盤のひずみの経時変化

Creep Curves of Strains of Rock around the Cavern



(a) 10時間まで
10 Hours

(b) 27時間まで
27 Hours

(c) イベント発生の経時変化
Time Dependence of AE Events

Fig. 11 AE発生位置とイベント発生の経時変化 (飽和状態)

Location of AE Events during Biaxial Creep Test (Saturated Condition)

におよそ平均して広がっていることがわかる。この傾向は、乾燥状態の空洞モデルとの顕著な差異であり、飽和クリープ状態において、亀裂の進展が空洞周辺に及んでいることがわかる。興味ある結果であるが、メカニズムについてはデータを蓄積し、確認、検証していく必要がある。

4. まとめ

岩石の三軸クリープ試験を実施し、乾燥状態と飽和状態でのクリープ特性を比較した。飽和状態では、破壊強度は乾燥状態から3%程度低下する、クリープ破壊に至る時間も10~100倍程度早いことが示された。

空洞モデルのクリープ試験から、飽和状態では乾燥状態の空洞の変形モードと異なる傾向は得られなかったが、損傷の進展において、飽和状態と乾燥状態では空洞周辺の損傷の進展形式が明らかに異なることが示された。

これらの点は、損傷が空洞側壁において広がるだけでなく、天端および底盤においても空洞周辺に一樣に広がり、その周辺の透水性が増加することを意味する。したがって、地下水で満たされた深部岩盤における空洞掘削において十分な配慮が必要である。

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処分の技術的信頼性一分冊3 地層処分システムの安全評価, 核燃料サイクル開発機構技術資料 JNC TN1410 99-023. (1999)
- 2) 鈴木, 他: 大規模地下空洞の長期安定に関する研究, 大林組技術研究所報. (2004)
- 3) 鈴木, 他: 応力集中による破壊現象のモデル化に関する研究(その3), 核燃料サイクル開発機構技術資料(委託研究成果報告書;株式会社大林組), JNC TJ7 400 2005-034. (2005)
- 4) Brace, W. F., Paulding, B. W. Jr. & Scholz, C.: Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *J. Geophys. Res.*, 68, 3709-3713. (1966)
- 5) Oda, M., Katsube, T. & Takemura, T.: Microcrack evolution and brittle failure of Inada granite in triaxial compression tests at 140MPa, *J. Geophys. Res.*, 107 (B10), ECV9, 1-17. (2002)
- 6) 竹村, 他: マイクロクラックの3次元構造解析による花崗岩質岩石の脆性破壊機構, 日本地質学会誌, 108, 453-464. (2002)
- 7) Costin, L.S.: A microcrack model for the deformation and failure of brittle rock, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 88, No. B11, pp. 9485-9492. (1983a)
- 8) Masuda, K.: Effects of water on rock strength in a brittle regime, *J. Structural Geology*, 23, 1653-1657. (2001)
- 9) 鈴木, 他: 亀裂性岩盤の大型ブロックせん断試験, 第55回土木学会年次学術講演会, III-A271. (2000)
- 10) 鈴木, 他: 空洞モデル試験による周辺岩盤の損傷評価, 第58回土木学会年次学術講演会, III-A271. (2003)