

大深度岩盤地下空洞の安定性評価に関する研究

岩盤の損傷進展に関する実験的研究

鈴木 健一郎 並木 和人

(本社土木技術本部環境技術第二部)

鳥井原 誠

Evaluation for the Stability of a Deep Underground Rock Cavern

An Experimental Study on Damage Growth in Rock Masses

Kenichirou Suzuki Kazuto Namiki

Makoto Toriihara

Abstract

To characterize rock behavior around a cavern, tri-axial compression tests and rock cavern model tests were conducted and crack geometry evolution during brittle failure was investigated. It was demonstrated that crack tensor F_{ij} was closely related the second rank tensor V_{ij} which was determined by measuring the elastic wave velocity in at least six directions. Crack tensors showed that crack nucleation and growth progressed in the same manner as in an initial anisotropic structure. Resistivity measurement for large columns before and after failure tests showed that crack distribution depends upon stress condition at failure. Rock-cavern model tests showed that cracks evolved at the sidewall of the cavern in the biaxial compression stress state by monitoring AE and measuring porosity.

概要

放射性廃棄物の地層処分施設やLPG, LNGの備蓄施設などの構造物の安定性評価には,高品質な予測が要求される。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,花崗岩の三軸圧縮試験,空洞模型試験を実施し,脆性破壊におけるクラックの進展を明らかにすることを試みた。三軸圧縮試験では,脆性破壊過程での多方向の弾性波速度測定から,速度値をクラックテンソルに変換でき,クラックの進展は初期の異方構造は残して進行することが示された。また,大型円柱試験における比抵抗測定では,クラック進展の分布が応力条件により異なることが示された。二軸応力状態の空洞模型試験では,損傷が空洞側壁部から進展することを,ひずみ,AE,間隙率,比抵抗値の増加で捉えることができた。

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)の組合わ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は,岩盤の破壊や塑性化などの非弾性状態の岩盤物性を表現し,挙動を再現する必要があるが,それに対応する数値解析手法はほとんど現存しないのが実状である。

本研究の目的は,応力集中による岩盤破壊や塑性化のメカニズムを明らかにし,その領域の岩盤物性を表現できる解析手法を開発することである。その第一段階とし

て,ここでは,岩石および模型空洞の破壊試験により脆性破壊におけるクラックなどの損傷の進展およびその調査手法の検討を行った。

岩石の脆性破壊は,クラックの発生・進展により引き起こされることが知られている²⁾。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。従って,脆性破壊の進行に伴うクラックの幾何学的および量的変化を定量的に捉えることは,岩盤の強度,空洞周辺の透水係数を考える上で必要となる。従来,クラックの幾何は多大な労力をかけてクラックを直接観察し,その情報をクラックテンソル F_{ij} などで定量化してきた³⁾。本研究では,クラック進展を直接観察ではなく弾性波速度変化から捉えることを試みた。さらに,弾性波速度変化をクラックの進展量として表すため, F_{ij} に結び付け,脆性破壊に関する考察を行った⁶⁾。

一方で,地下深部の岩盤においては,飽和状態と考えられ,弾性波速度が岩盤損傷に対し鈍感になる。このため,含水状態に敏感であるとされる比抵抗探査法の適用

可能性の検討も行った。ここでは、圧縮および伸長クリープ試験で人工的に内部クラックを生じさせた大型の円柱供試体について、比抵抗計測の損傷把握に対する適用性について評価した⁷⁾。

岩盤空洞周辺の脆性破壊現象を再現し、損傷の定量的評価を目的に、花崗岩の薄板に円孔を有する物理モデル(空洞模型)を作成し、二軸圧縮試験により空洞周辺岩盤の脆性破壊がどのように発生し、進行していくかを、周辺岩盤の円周方向と半径方向のひずみ、AE計測による位置標定、空隙径分布の測定により調べた⁸⁾。

2. 供試体および試験方法

2.1 クラックの進展と弾性波速度試験

本研究では、岩石試料として稲田花崗岩を用いた。稲田花崗岩には、互いに直交する3つの割れやすい面が存在し³⁾、割れやすい順からRift, Grain, Hardway面と呼ばれ、これらの面に直交する軸をそれぞれR, G, H軸と呼ぶ(Fig. 1)。実験は、拘束圧80MPa, 6つの応力レベル(破壊応力の85, 90, 95, 98, 100%および破壊後)において、H軸を載荷軸として実施した。実験終了後、供試体の中央部からFig. 1に示す18面体試料を作成し、9方向の弾性波(P波)速度 v を測定した。得られた v を用いて、次式で定義される2階のテンソル V_{ij} を算出した。

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 = V_{ij} p_i p_j$$

ここで、 v_0 は全てのクラックが閉じている時のP波速度、 p_i, p_j は測定方向の方向余弦である。

2.2 クラックの変化と比抵抗トモグラフィ

用いた岩石は大島花崗岩であり、供試体は直径約150mm, 高さ約300mmの円柱(大型円柱供試体)である。岩盤多機能試験装置⁴⁾により、三種類の試験(一軸圧縮クリープ試験, 三軸圧縮クリープ試験(側方拘束圧40MPa), 伸長クリープ試験(側方拘束圧113MPa))を実施した供試体について、ハイレジスタンスメーター(アジレントテクノロジー製, 4339B)を用いて比抵抗値を計測した。ハイレジスタンスメーターは、接地抵抗など、比較的高比抵抗の測定を対象に用いられる測定装置である。Fig. 2のように円柱供試体の側面に等間隔に電極を設置した側線を4本設け、各点間の抵抗値を計測した。1側線あたりの電極数は8点である。電極には、シート状の導電性ゲルを1cm角にしたものを用いた。計測は供試体を水浸して実施しており、計測前には、水浸容器に供試体を密閉した後、真空ポンプによる吸引を行って、水浸を完全な状態としている。計測された比抵抗値を用いて、FEMモデルによる比抵抗トモグラフィ解析を行い、供試体内の比抵抗構造の可視化断面図を作成した。解析はトモグラフィ解析ソフトE-Tomoを用いて実施した。

2.3 空洞模型試験

空洞模型は、花崗岩の500mm×500mm×50mmの平板の中心に直径160mmの円孔を有するものである。空洞模型を岩盤多機能試験装置⁴⁾を用いて、鉛直方向および水平方向からの二軸状態で載荷し、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、載荷板とのなじみをよくした。

載荷は、側方向(x)荷重および鉛直方向(z)荷重を所定の荷重となるまで、10kN/minの速度で載荷し、その後、鉛直方向の載荷を変位制御により0.025mm/minの速度で載荷し、破壊または破壊以前の所定の荷重にて除荷した。試験状況および計測状況をそれぞれPhoto 1とFig. 3に示す。空洞模型全体の変形は、渦電流式非接触変位計により計測した載荷板の変位により代表させた。空洞周辺岩盤の挙動を調べるために次の3項目の計測を行った。

- (1) 空洞側壁および周辺岩盤のひずみ分布: 空洞壁面で天端, 底盤, 左右側壁の4点において周方向の5mm長さのワイヤーストレインゲージを、周辺岩盤に、側壁から10mmと30mmの同心円上に左右側壁および天端, 底盤の4ヶ所の裏表に、それぞれ円周方向と半径方向に32点の5mm長さのワイヤーストレインゲージを設置した。
- (2) 損傷の進展状況: 8個のAEセンサーにより損傷の位置標定を行った。
- (3) 空隙径分布: 除荷後に、天端部と側壁部から直径15mmの小口径ボーリングを行い、採取したコアを空洞側壁

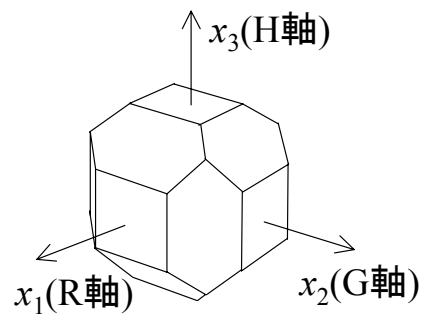


Fig. 1 弾性波測定用試料
A Sample of Super-Sonic Wave Test

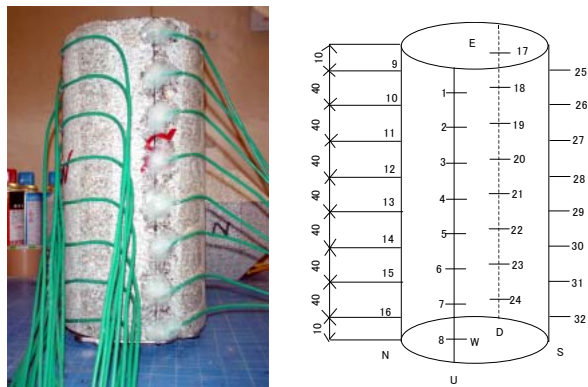


Fig. 2 電極接地状況および接地位置
Resistivity Measuring Pattern (View and Location)

から0 - 5 mm, 10 mm前後, 20 mm前後, 30 mm前後の位置で、それぞれ厚さ5 mmに切断し、水銀注入法により空隙径分布を計測した。

3. 試験結果および考察

3.1 弾性波速度とクラックの進展

脆性破壊の過程において、クラックの進展により変化する供試体中のP波速度分布をFig. 4に示す。ここでは、拘束圧80 MPaの条件下で脆性破壊の各応力状態にある試料に対して計測したP波速度をステレオネット上で表現している。Fig. 4より、破壊の進行に伴い荷重軸方向（H軸）と、インタクト（初期状態）な試料でマイクロクラックの集中しているR軸方向で顕著なP波速度の減少が見られる。これは、破壊の進行が初期異方性により制約されていることを示唆しているといえる。これをP波速度分布から決定される V_{ij} に変換することで、定量的に示すことができる。インタクトな供試体と、荷重軸をH軸、拘束圧80MPa下でピーク応力まで載荷した供試体の V_{ij} は次のようになる。

$$V_{ij}^{(インタクト)} = \begin{pmatrix} 0.55 & 0.00 & 0.02 \\ & 0.57 & -0.02 \\ \text{symm.} & & 0.62 \end{pmatrix}$$

$$V_{ij}^{(ピーク)} = \begin{pmatrix} 0.25 & -0.01 & 0.03 \\ & 0.29 & 0.00 \\ \text{symm.} & & 0.39 \end{pmatrix}$$

共に $V_{33} > V_{22} > V_{11}$ となり、破壊時も初期異方性を維持している事がわかる。各応力レベルでの V_{ij} の主値の逆数と、クラックの観察から得られた F_{ij} の主値⁵⁾を比較すると、Fig. 5のような関係にあることがわかり、この関係から、弾性波速度の計測により各供試体のクラック密度 F_0 を推定することができる。三軸試験から得られる塑性体積ひずみ $\epsilon_v^{(p)}$ と F_0 を比較するとFig. 6のような関係が得られる。Fig. 6の横軸 F_0 はクラック密度の増分であり、荷重前のインタクトからの F_0 の増分である。荷重軸をH軸、拘束圧80MPa下において、クラック密度と塑性体積ひずみ $\epsilon_v^{(p)}$ との関係は

$$\epsilon_{ii}^{(p)} = 5.91 \times 10^{-4} \Delta F_0$$

と近似される。すなわち、塑性体積ひずみ $\epsilon_v^{(p)}$ はクラック密度の増加と比例関係にあり、その比例定数は拘束圧下での荷重中におけるクラックの平均的なアスペクト比を表していると考えられる⁵⁾。

3.2 クラック進展と比抵抗トモグラフィ

圧縮および伸長試験によって損傷を与えた大型円柱供試体の内部のクラックの進展状況の把握を、比抵抗計測を用いて試みた。計測された値を用いて比抵抗分布およ

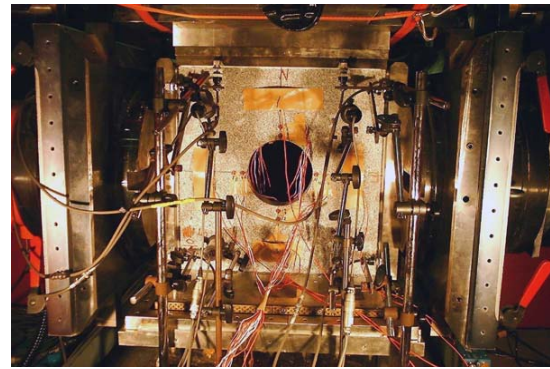


Photo 1 空洞模型試験状況
Schematic View of Cavern Model Test

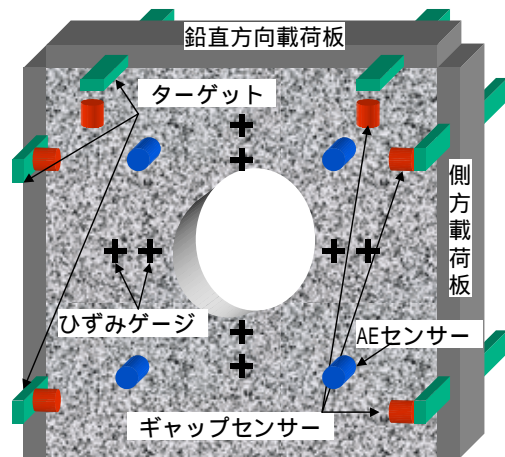


Fig. 3 計測配置
Measuring System of Cavern Model Test

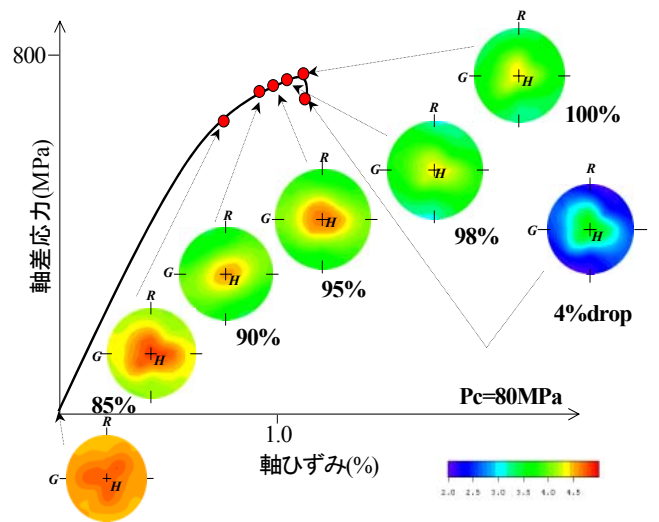


Fig. 4 脆性破壊過程でのP波速度分布の変化
(下半球ステレオネット投影)
Change in P-wave Velocity during Brittle Failure

び試験前後における比抵抗変化率について可視化解析を実施し、一軸圧縮クリープ試験、三軸圧縮クリープ試験および伸長クリープ試験におけるそれぞれの損傷状態の違いについて可視化を行った。

一軸圧縮クリープ試験と三軸圧縮クリープ試験において試験後における比抵抗分布の比較をFig. 7に示した。一軸試験においては、供試体の中心周辺の範囲に過ぎないのに対し、三軸試験を実施したのものには、より広域で全体的に低比抵抗域が発生している。これは、三軸圧縮クリープ試験においては、供試体内部の損傷領域がより広範に及んでいることを示唆している。

Fig. 8は、一軸圧縮クリープ試験と伸長クリープ試験の実施前後の計測値をもとに、実施後の実施前に比べた比抵抗変化率分布について比較したものである。一軸圧縮クリープ試験においては、供試体の中心周辺に比抵抗の大きな減少領域が分布しているのに対し、伸長クリープ試験前後のものは、供試体の周囲に減少領域が分布している。これより、圧縮試験と伸長試験では、比抵抗変化領域、すなわち試験によって発生した損傷箇所が明らかに違っていることが示唆される。伸長クリープ試験実施後の供試体には、上部にディスクリングがみられ、この損傷範囲は比抵抗値の大きく減少した範囲とおおむね整合的であることがわかってきている。

Fig. 9に、今回の試験結果によって得られた、比抵抗トモグラフィ計測より想定された、各試験条件における岩盤損傷の状態をまとめた。これら試験結果において、低比抵抗を示す範囲が特徴づけられる結果が得られたことにより、本手法が岩盤損傷の成因による分類評価に有効であることが確認できた。今後は比抵抗のシミュレーションなどを行って、現象のモデル化を解析的手法によって検証することも想定している。また、計測値の安定性の議論については未だ不十分な点を残しており、計測手法を確立することも重要である。

3.3 空洞模型試験におけるクラックの進展

等方40 MPaの状態から、鉛直方向(z方向)に58MPa(破壊時74MPaの80%)の軸差応力を負荷し、除荷したケースにおけるクラックの進展を例に述べる。Fig. 10には、空洞側壁部のひずみを軸差応力に対して示した。側壁部のひずみ(#36および#40)は圧縮3000 μ に達し、天端(#34)および底盤(#38)では、1000 μ 程度の引張ひずみが発生した。除荷時に残留ひずみが生じていることから、これらの位置では局所的な破壊状態にあったと考えられる。Fig. 11は、空洞境界からの距離10 mmの位置におけるひずみの変化である。天端および底盤においては、半径方向(#1, #9, #17, #25)に数10 μ 程度の圧縮ひずみ、周方向(#2, #10, #18, #26)には引張ひずみが300~400 μ 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1000~2000 μ の圧縮ひずみと半径方向に若干の引張が現れている。Fig. 12は、空洞境界から30 mmの位置におけるひずみである。天端および底盤においては、

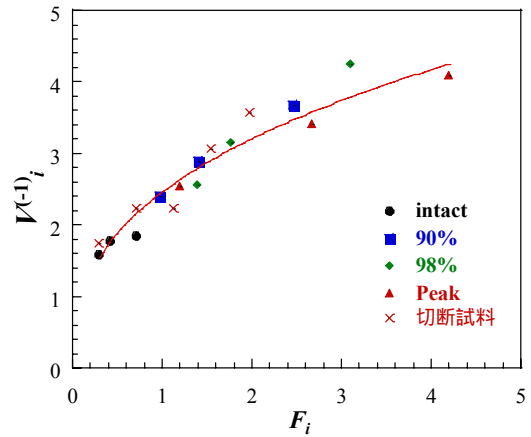


Fig. 5 V_{ij} の主値の逆数 $V_{ij}^{(-1)}$ とクラックの観察から得られた F_{ij} の主値 (F_{ij}) の関係

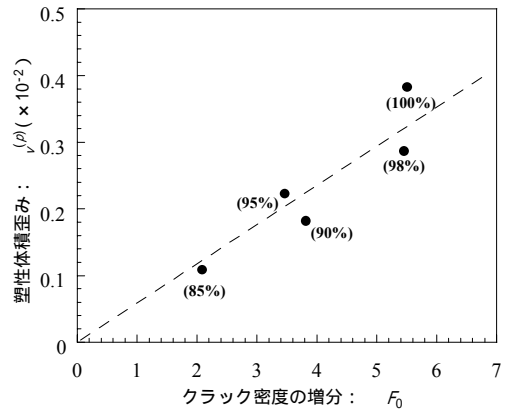


Fig. 6 脆性破壊過程でのクラック密度 F_0 の変化 (括弧内は応力レベルを示す)
Change in Crack Density F_0 during Brittle Failure

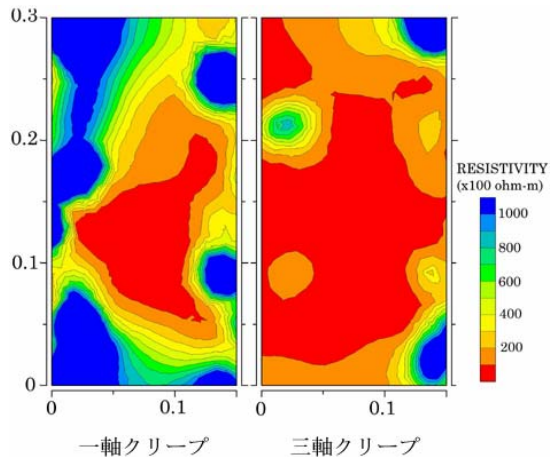


Fig. 7 一軸圧縮クリープ試験と三軸圧縮クリープ試験実施後における比抵抗分布 (E-W断面)
Resistivity Distribution of Specimens that subjected to Uniaxial Creep and Triaxial Creep Tests

半径方向(#3,#11,#19,#27)に100 μ程度の圧縮ひずみ,周方向(#4,#12,#20,#28)に100 μ弱の引張ひずみが現れている。境界近傍より引張は小さく,圧縮は大きくなっている。空洞側壁部には,左右および表裏およそ等しく1500 μ程度の圧縮ひずみと半径方向には,近傍において現れていた引張側のひずみが圧縮側に変わっている。

次に AEの発生状況の一例をFig. 13に示す。この場合,空洞右側壁からイベントがみられるようになったのは破壊のおよそ50%程度の軸差荷重が負荷された段階(左図参照)からである。この段階で,空洞境界部での圧縮ひずみは1500 μ(0.15%)であり(Fig. 10参照),岩石供試体の破壊ひずみ(1%程度)より小さな値となっている。

間隙径分布の測定は異なるケースのものについて実施した。間隙率を空洞側壁からの距離で整理した結果をFig. 14に示す。Fig. には等方30MPaで破壊時軸差応力の90%で除荷した場合と等方20MPaで破壊まで載荷後除荷した場合の2ケースについて計測した結果をプロットした。新鮮花崗岩のデータを損傷のないものとして空洞壁面からの距離40 mm位置に()付きで示した。Fig.より空洞壁面からの距離に対して,およそ20mm離れると損傷の影響はなくなり,新鮮花崗岩の間隙率と変わらない状態となっている。Fig. 15には,空洞側壁からの距離と平均空隙径との関係を示した。プロットおよび()付き表示はFig. 14と同様である。おおよその傾向として平均径は,空洞側壁から離れるに従い減少している傾向がある。しかし,側壁最近でなく少々離れたところに間隙径のピークが見られることは興味深い。新鮮部の平均径が大きくなる点は検討課題として残された。

4. まとめ

岩盤における脆性破壊の過程において起こる現象を様々な角度から捉え, 解明することを試みた。

弾性波速度計測とクラックの観察から

- 1) 花崗岩質岩石では初期のクラック異方性を保ちながらクラックが進展していく。
- 2) P波速度の分布から決定された V_p は観察から得られたクラック密度と高い相関があることが示された。このことは, 多方向のP波速度分布からクラック密度,クラックテンソルが推定できることを示唆している。
- 3) クラックの進展過程でのクラックのアスペクト比を推定することは, 透水係数を推定する際の重要な情報となりえる。

比抵抗計測から, 応力状態により発生するクラックの分布に違いがあることが示され, 比抵抗計測がクラックの成因による分類評価に有効であることが示唆された。

空洞模型試験では, 側方拘束圧が存在する応力状態では, 脆性破壊が応力集中により空洞側壁部から進展する。ひずみ, AE, 間隙径の増加で捉えることができた。今後

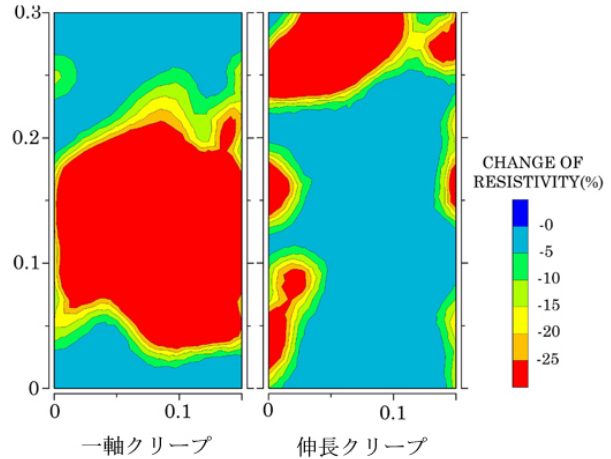


Fig. 8 一軸圧縮クリープ試験と伸長クリープ試験実施前後における比抵抗変化率分布 (N-S断面)
Resistivity Change Ratio of Uniaxial Creep and Extension Creep Tests

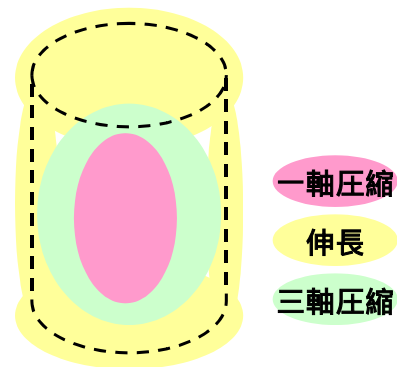


Fig. 9 トモグラフィー結果より推定された各試験における岩盤の損傷状態
Damage Distribution deduced with Resistivity Tomography

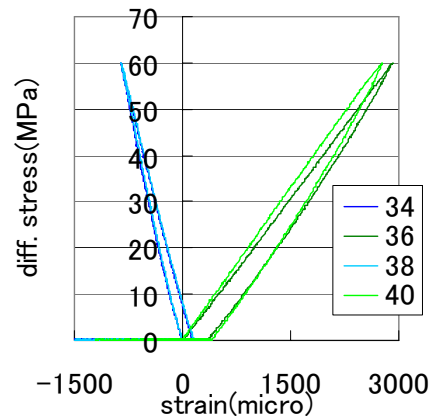


Fig. 10 空洞側壁のひずみ
Strains at the Wall of Cavern

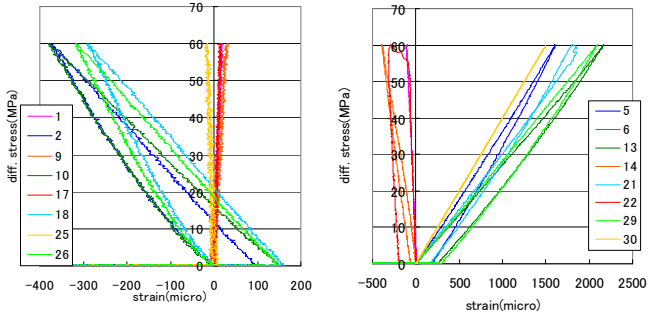


Fig. 11 空洞側壁10mm位置でのひずみ
(左:天端, 右:側方)

Strains at 10mm distance from Cavern wall

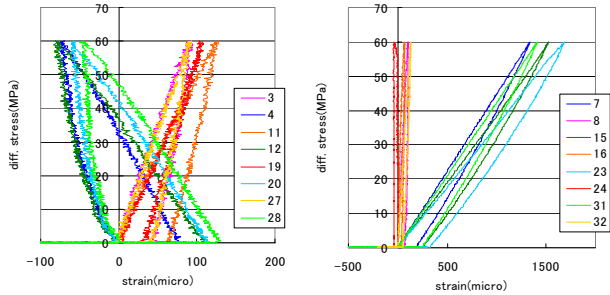


Fig. 12 空洞側壁30mm位置でのひずみ
(左:天端, 右:側方)

Strains at 30mm distance from Cavern wall

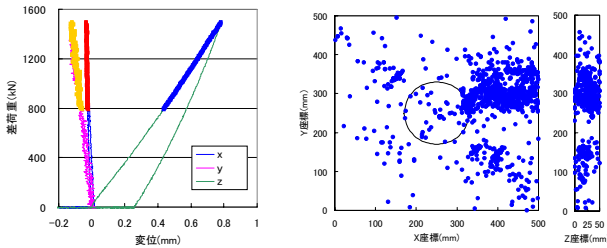


Fig. 13 AEイベント発生応力レベルと位置
Stress level and Location of AE Events

は, AE計測結果の詳細な分析と損傷進展の分布を点ではなく領域として捉えていく必要がある。

謝辞

本研究は委託研究「応力集中による破壊現象のモデル化に関する研究その1、その2」についてまとめたものである。核燃料サイクル開発機構中間氏、共同研究者である埼玉大学小田教授、竹村助手(当時)に感謝する。

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 - 分冊3 地層処分シス

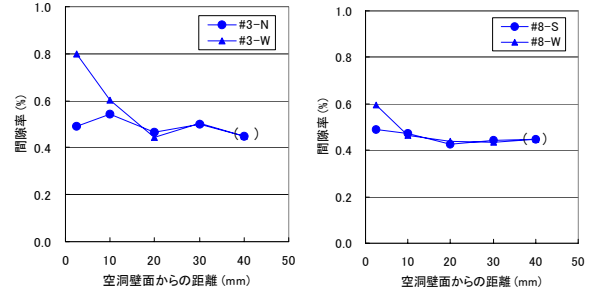


Fig. 14 空洞側壁からの距離と間隙率
(左:等方30MPa,90%载荷,右:側圧20MPa,100%)
Porosity vs. Distance from Cavern Wall

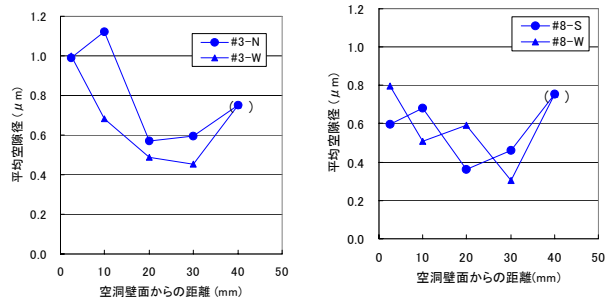


Fig. 15 空洞側壁からの距離と間隙径
(左:等方30MPa,90%载荷,右:側圧20MPa,100%)
Pore Diameter vs. Distance from Cavern Wall

テムの安全評価, 核燃料サイクル開発機構技術資料 JNC TN1410 99-0231)

Brace, W. et.al.: Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *J. Geophys. Rec.*, 68, 3709-3713. (1966)

2) Suzuki, K., et.al.: Permeability changes in granite with crack growth during immersion in hot water, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol.35, No. 7, pp.907-921, (1998)

3) 鈴木ほか, 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, - A271, (2000)

4) 竹村貴人・小田匡寛: 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, pp.453-464, (2002)

5) 竹村貴人, 小田匡寛, 亀田 篤, 鈴木健一郎, 中間 茂雄: 弾性波速度とクラックテンソルによる岩石の脆性破壊機構, 第58回土木学会年次学術講演会, - 323, (2003)

6) 並木 和人, 鈴木健一郎, 小田匡寛, 中間茂雄: 比抵抗計測を用いた大型岩石供試体の損傷の可視化(その2), 第58回土木学会年次学術講演会, - 340, (2003)

7) 鈴木健一郎, 並木和人, 小田匡寛, 中間茂雄: 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, - 341, (2003)