

岩石強度に及ぼす化学添加物の効果

瀬戸政宏¹・Venkata S. VUTUKURI²・Dilip K. NAG³・勝山邦久¹

¹正会員 工博 工業技術院資源環境技術総合研究所 (〒305-8569 茨城県つくば市小野川 16-3)

² PhD The University of New South Wales (Sydney 2052, Australia)

³ MS Monash University (Churchill, Victoria 3842, Australia)

岩石強度に及ぼす化学薬剤の効果破壊形態別に明らかにするために、砂岩と花崗岩について圧裂引張試験と多段階三軸圧縮試験を3種類の化学薬剤雰囲気中で行った。その結果、岩石の引張強度は化学薬剤の濃度変化に対して有意に変化し、と電位がゼロを示す濃度において最低強度が出現することを明らかにした。一方、圧縮強度については化学薬剤、その濃度による有意な差は認められなかった。また、AE計測、表面硬度測定及びダブルトーション試験結果から、と電位がゼロを示す濃度においては純水条件に比較して塑性的な挙動が低下するために岩石表面が硬化してき裂が初生しにくくなるが、一旦き裂が開くと急速にき裂が成長するために最低引張強度がと電位ゼロ濃度で出現すると結論した。

Key Words: tensile strength, chemicals, Brazilian test, multi-stage triaxial test, zeta potential crack velocity, acoustic emission

1. はじめに

土木工事に関係する地下岩盤の開発や利用で対象となるような温度や圧力条件では、一般に岩石は脆性的に破壊する。脆性破壊は基本的には原子間の結合が外力によって分断されることによって発生するが、巨視的なき裂形成を伴う脆性破壊に先行して内部に存在するマイクロクラック先端に引張応力集中が生じる。この応力がある臨界値に達するとマイクロクラックは急速に成長するが、圧縮応力下ではマイクロクラックの無制限な進展はなく、アコースティックエミッション (Acoustic Emission, 以下 AE と略称) の発生を伴う微小破壊がまず発生する。その後、この微小破壊が集積し、それぞれのマイクロクラックが結合、成長することによって岩石内部にダイラタンシーが生じ、巨視的な破壊が発生する。巨視的な破壊に至る直前では、体積ひずみ速度の変化¹⁾や、AEにおけるb値の低下²⁾、AE震源分布のフラクタル次元の変化^{3),4)}等様々な特徴的な変化が観測され、それらは終局的な破壊の前兆現象として、破壊現象の予知にとっては重要である。

脆性材料の内部クラックの成長は環境中に含まれる腐食種 (水分, 化学種) に大きく影響されることは古くから知られている。例えば、引張応力が臨界値以下でも腐食種の助けを借りた化学反応によ

て応力腐食 (stress corrosion) 割れが発生する⁵⁾。これは、環境の影響を受けたクラック進展の典型的な例である。また、乾燥条件と湿潤条件下にある岩石では強度が異なり、湿潤条件下では強度が数10%低下する⁶⁾。これも、環境条件に影響された岩石内部のクラック進展速度の促進によって引き起こされていると考えられる。臨界値以下の引張応力で発生する応力腐食によるクラック進展現象や水による岩石強度の低下は、地下水を含む岩盤の長期安定性予測、長期強度の評価と直接的に関係しており、これに関連する地下発電所、地下備蓄、放射性廃棄物の地層処分等の分野では重要な課題と言える。このため、岩石のクラック進展に及ぼす水分の影響については多くの研究があり^{7)~9)}、水による応力腐食割れのメカニズムは、水分子とシリカとの化学反応によってシリカ分子が分断されることによるとされている。H⁺, OH⁻イオン以外の化学薬種の影響についても、例えば、地下水中に含まれているNa⁺, Ca²⁺, K⁺, Cl⁻イオン等の影響は地殻や地下空間における岩石の長期強度の評価において重要である。

また一方、化学薬剤によるき裂促進効果を岩石の破砕技術に利用するという応用面においても興味深い。つまり、石油備蓄、LNG地下備蓄等のエネルギー貯蔵、高エネルギー放射性廃棄物の地層処分、交通網整備に係わる山岳トンネル建設等の地下開発に

おいては、岩盤の掘削、切削作業の効率向上が、開発全体での効率面、コスト面での重要な要因となる。この岩盤の掘削・切削効率の向上を目的として、種々の掘削ビットの開発や大型の掘削機械の開発等がなされてきているが、この機械的な技術の改良に加えて、それを補完する化学的な掘削効率向上のための要素として、化学薬剤によるき裂成長促進効果の可能性が考えられる。

化学薬剤の岩石物性への影響については、まず岩石掘削の面から検討された。Rehbinder らのグループは¹⁰⁾、数種類の薬剤を用いて模擬掘削実験を行い、その効果を薬剤別に示している。また、この薬剤の効果のメカニズムを Rehbinder らは、鉱物への化学種の吸着による表面エネルギーの低下によって Griffith の理論に基づいてき裂進展が促進されるためと説明している。しかしながら、岩石の掘削プロセスで考えられる短時間で、新しいき裂形成とその新たに形成されたき裂への化学種の吸着が有意な効果を及ぼす速度で発生しているかについては疑問が残る。

一方、Westwood らは^{11)~13)}、酸化鉱物材料の硬度測定試験を溶液中で実施し、その硬度変化と電位との間に相関関係があることを見出している。すなわち、電位がゼロになる濃度において、材料の表面硬度が最大を示すというものである。掘削への効果として Westwood らは、電位がゼロの濃度においては材料表面の転移度(dislocation mobility)が最小になるために、掘削エネルギーが最も効率よく消費されると説明している。この後、電位と掘削効率、一軸圧縮強度、さらには応力腐食割れとの関係についていくつかの報告がされている。例えば、米国鉱山局の研究グループは¹⁴⁾、岩石ブロックを用いた室内での模擬掘削試験において、その掘削効率と電位との間に相関関係があることを報告している。Ishido らは¹⁵⁾、結晶質岩石の一軸圧縮強度が電位の変化に伴って有意に変化することを示している。一方、Wiederhorn らは¹⁶⁾応力腐食割れのと電位依存性は認められなかったと報告している。

岩石の力学特性に及ぼす化学薬剤の影響については、上に述べたように諸説があり、水分子以外の化学種が岩石の力学特性に及ぼす作用効果については、そのメカニズムも含めてまだ十分に明らかになっていない。

本研究では、岩石への化学成分の効果を破壊形態別に明らかにするために、圧裂引張試験と多段階三軸圧縮試験を化学溶液雰囲気中で AE 計測と併せて実施して検討を行った。後述するように、圧裂引張試験では引張型の破壊が、また三軸圧縮試験ではせ

ん断型の破壊が巨視的に確認された。また、強度変化と電位との関係について明らかにするために、使用した溶液と岩石の組み合わせで電位の測定も併せて実施した。本論文では、化学溶液と岩石の引張強度と三軸圧縮強度との関係について電位との関連も含めて報告すると共に、同時に計測された AE 計測結果、表面硬度計測結果及びダブルトーション(DT)試験によるき裂進展速度計測結果をもとにそのメカニズムについて考察を加える。

2. 実験方法

(1) 岩石試料

本研究で使用した岩石試料はオーストラリア産の砂岩及び花崗岩で、砂岩はニューサウスウェールズ州ゴスフォード産砂岩、花崗岩は西オーストリア産のものである。両岩石の主要鉱物は石英で、砂岩の場合の SiO₂ 含有率は 81.0%、花崗岩で 74.9%である。ゴスフォード産砂岩は、ニューサウスウェールズ州の地表下約 800m の深度まで賦存しており、この地域の地層の主要構成岩石である。試験に用いた岩石試験片は、シドニー市の北西約 100km にあるゴスフォードの採石場で切り出された単一のブロックから作成した 30cm 角のブロックにコアボーリングを行って作成した。また、西オーストラリア産花崗岩は、主要地層である砂岩層に現在の地表付近までマグマが貫入し冷却して生成されたものである。試験片は、西オーストラリア州パース市の北東約 200km にある採石場で切り出された単一ブロックから 30cm 角のブロックを 4 個作成し、それらブロックにコアボーリングを行って作成した。

実験に供した岩石試験片の寸法は、圧裂引張試験の場合は直径 44mm、厚さ 20mm、三軸圧縮試験の場合には直径 44mm、長さ 110mm とした。また、三軸圧縮試験においては、試験片の端面の平行度は ±1/50mm 以内になるように整形した。

(2) 化学溶液と使用水の条件

本研究では 3 種類の薬剤を使用し、所定濃度の溶液を作成する際には蒸留水を用いた。使用した薬剤は、塩基性薬剤として塩化アルミニウム、界面活性剤としてアニオン系のドデシルトリメチルアンモニウムブロマイド(以下、DTAB と呼称)、非イオン系高分子薬剤としてポリエチレンオキシド(以下、PEO と呼称)を用いた。これら 3 種類の薬剤は、過去に実施された一軸圧縮試験、掘削模擬試験で用いられた薬剤と同じもので³⁾⁻⁸⁾、今回はそれらの結果との比較を行うことも一つの目的としてこれらの薬剤

を選んだ。

(3) 圧裂試験方法

圧裂引張試験を実施するには、まず 110°C で 48 時間真空乾燥を行い、その後所定濃度の溶液に 48 時間浸漬させた。載荷に際しては 2 個の AE センサーを接着した試験片を、溶液を満した容器の中に入れて載荷を行った。載荷に使用したサーボ制御式材料試験機は容量 500kN の Schenk 製 TREBEL である。載荷は変位制御で行ったが、制御に用いた変位信号はプラテン間に置いた 3 個の差動トランスからの平均出力である。なお、試験の際の変位速度は 50 $\mu\text{m}/\text{min}$ とした。試験は、各溶液濃度において最低 10 個、最大 20 個の試験片を用いて行った。

(4) 多段階三軸圧縮試験

多段階三軸圧縮試験では、所定濃度の溶液に 8 ヶ月間浸漬させた湿潤岩石試験片をフック式の三軸セルにセットして行った。浸漬後の岩石の吸水含水比は砂岩の場合 12~13% であった。花崗岩の場合、試験機の載荷容量が花崗岩の封圧下での強度に比較して小さかったので、三軸圧縮試験は砂岩のみについて実施した。

多段階三軸圧縮試験で設定した封圧は、3, 5, 10, 15, 及び 20 MPa の 5 種類で、それぞれの封圧下での軸応力の最大値を検出直後に、次の封圧値に封圧を上げていくステップを繰り返し、最後の封圧 20 MPa では最大値を検出後も試験を続行して、ポストフェイリュアー域の挙動を計測した。試験は飽和岩石試験片を用いて非排水の条件で行ったが、間隙水圧の測定、及び制御は実施していない。また、試験での載荷は、試験機のプラテン間に取り付けた 3 台の差動トランス型変位計の平均値を制御信号とする変位制御で行い、その変位速度は 100 $\mu\text{m}/\text{min}$ とした。

(5) AE 計測方法

AE の計測には PAC 製 MISTRAS-2001 システムを使用した。本システムは 2 チャンネル構成で、AE のカウント、エネルギー、振幅、持続時間等ほとんどすべての特性パラメータの計測が可能なのである。使用したセンサーは PAC 製 nano-30 で、共振周波数が 300kHz のものである。AE 計測は圧裂引張試験時に行ったが、試験ではセンサーを試験片に直接エレクトロンワックスを用いて接着し、AE 計測システムが有する周波数フィルターを用いて低周波 AE と高周波 AE の両方を計測した。低周波 AE の周波数レンジは 50~200kHz、高周波 AE は 200~400kHz

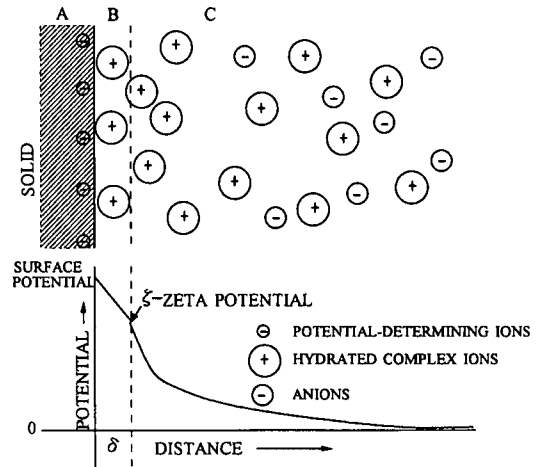


Fig.1 Schematic of structure of double layer and potential distribution in double layer in electrolyte solution. A: potential determining ion, B: Stern layer of chemisorbed ions of thickness δ , C: Gouy layer of diffuse ions.

である。

また、AE を検出する際のディスクリレベルは環境ノイズレベルより 5dB 高い 45dB に設定し 100dB までの信号を計測・解析した。したがって、AE 計測のダイナミックレンジは 55dB である。

(6) ζ 電位の測定方法

溶液中に置かれた固体の表面は正または負に帯電し、溶液中にある反対極性のイオンを引きつけ固液界面に電気二重層を形成する。界面電気二重層に関するモデルについては古くから多くが提案されているが、Fig. 1 に示すモデルが最も一般的である¹⁷⁾。同図に示すように、固液界面に発生する電気ポテンシャルは距離が増加するとゼロに近づいていくように変化する。ここで、 ζ 電位とは、同図上において、固液境界からの距離が δ の地点での電気ポテンシャルとして定義できる。本研究では、 ζ 電位の測定は Langley Ford 社製の COULTER DELSA-400 を用いて行った。本研究では、使用した両岩石の石英含有率が 70% 以上と大きいため、石英自体について過去において測定された ζ 電位測定結果と類似した結果が得られている。

(7) ダブルトーション (DT) 試験

DT 試験は板状試験片の長手方向の両端下部を支持し、四点荷重法で試験片の端に荷重を加えて、試験片の中央部の溝に沿ってき裂を進展させ、その速度を求める方法である。本研究では、一定荷重を試

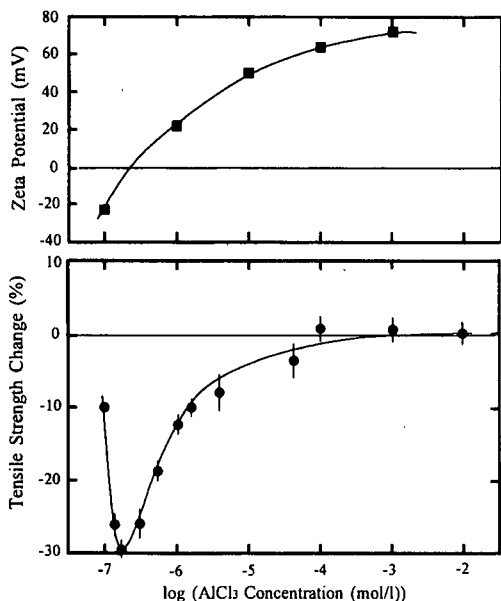


Fig.2 Variation of tensile strength and zeta potential of Gosford sandstone in AlCl_3 environment.

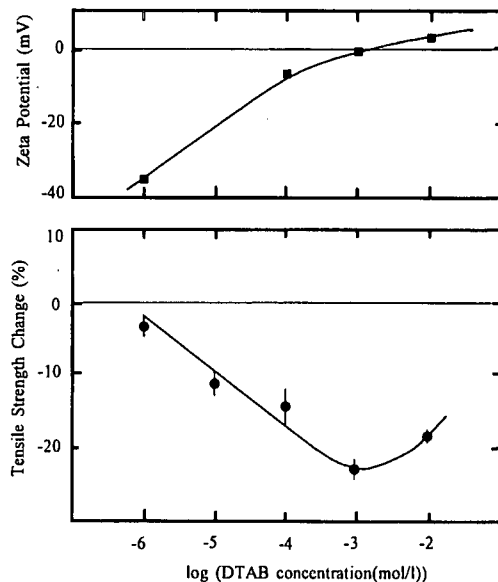


Fig.4 Variation of tensile strength and zeta potential of Gosford sandstone in DTAB environment.

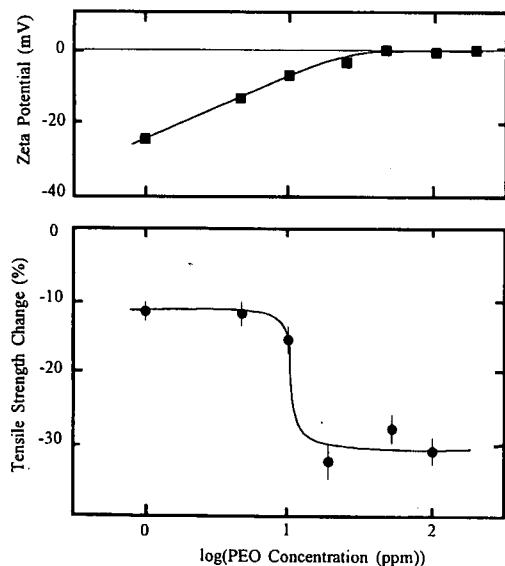


Fig.3 Variation of tensile strength and zeta potential of Gosford sandstone in PEO environment.

験片に加え、負荷時間とき裂進展距離からき裂進展速度を測定した。

3. 実験結果

(1) 圧裂引張強度への効果

Fig.2 に、塩化アルミニウム溶液中での試験で得ら

れた砂岩の圧裂引張強度変化と溶液濃度との関係と電位の測定結果と併せて示す。同図における引張強度変化は、純水中での引張強度に対する強度変化率として表しており、図中の負の符号は強度の減少を示している。これ以降に示す、Fig.3~Fig.7における引張強度変化も同様である。Fig.2 に示した塩化アルミニウム溶液中での砂岩の圧裂引張強度は、溶液濃度が 2.5×10^{-7} mol/l で極小値を示し、純水強度に比較して 30.8% の強度低下となっている。圧裂引張強度が極小値を示す濃度はと電位がゼロを示す濃度にほぼ一致している。

Fig.3 は PEO 溶液中での砂岩の圧裂引張強度変化と溶液濃度との関係と、と電位の計測結果と併せて示している。圧裂引張強度は濃度が 20ppm 以上になると急激に低下し、最大 33% の強度低下となっている。この結果をと電位の測定結果と比較すると、と電位は 50ppm から 150ppm の範囲でゼロになっており、大きな強度低下が発生している溶液濃度と良く対応している。

Fig.4 は DTAB 溶液中での砂岩の圧裂引張強度変化と溶液濃度との関係であるが、併せてと電位の測定結果も示している。最大の圧裂引張強度低下率は 23% で、溶液濃度 1.0×10^{-3} mol/l において発生している。最大の強度低下が発生している濃度は、と電位がゼロになる濃度と良く一致している。

Fig.5 から Fig.7 は、花崗岩の圧裂引張強度変化と

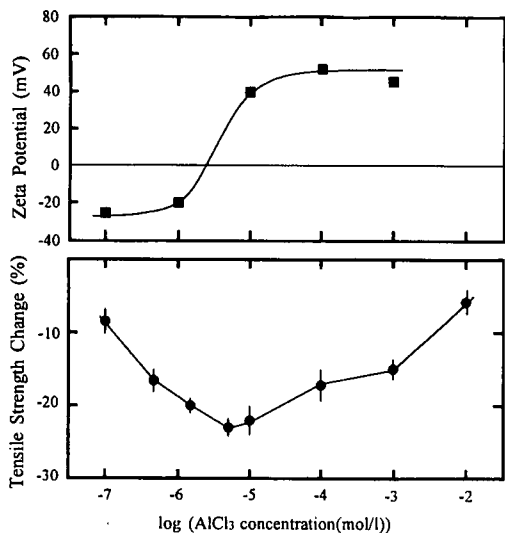


Fig.5 Variation of tensile strength and zeta potential of Western Australian granite in $AlCl_3$ environment.

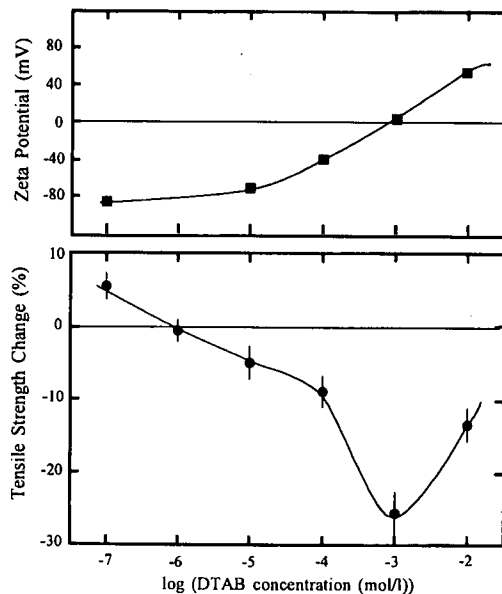


Fig.7 Variation of tensile strength and zeta potential of Western Australian granite in DTAB environment.

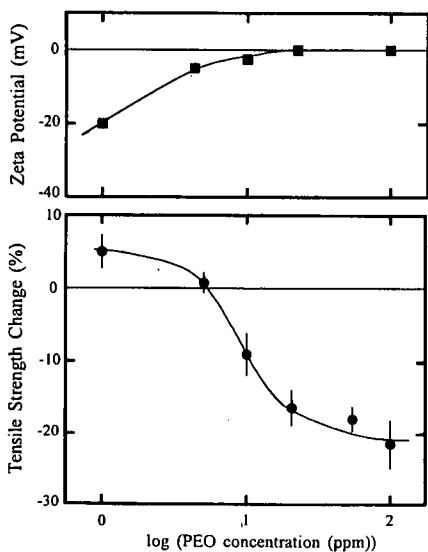


Fig.6 Variation of tensile strength and zeta potential of Western Australian granite in PEO environment.

$AlCl_3$ 溶液、PEO 溶液及び DTAB 溶液濃度との関係をそれぞれ示しており、併せてと電位の測定結果を示している。

Fig.5 は $AlCl_3$ 溶液中での結果を示しているが、最大の強度低下率は溶液濃度 $5.0 \times 10^{-6} \text{ mol/l}$ で発生している。この濃度はと電位ゼロの溶液濃度とは正確には一致していないが、負のと電位がゼロに近づくとともに圧裂引張強度は低下し、と電位が正に変化

していく過程で圧裂引張強度は増加しているように、と電位ゼロ濃度付近を起点にして強度変化している。したがって、この花崗岩の結果についても砂岩と同様なと電位依存性があると考えられる。Fig.6 と 7 はそれぞれ PEO 溶液中と DTAB 溶液中での試験結果を示している。強度低下率の変化特性が砂岩の場合と若干異なるが、溶液濃度の変化に対して有意に圧裂引張強度は変化しており、かつ DTAB 溶液において最大の強度低下がと電位がゼロになる溶液濃度で発生していることが明らかに認められる。また、PEO 溶液については、と電位がゼロに近づくに伴って強度低下が顕著になり、100ppm で約 20% の強度低下率を示している。

上記したように、3 種類の化学薬剤を用いて圧裂引張強度への効果を検討した結果、圧裂引張強度はそれぞれの溶液について濃度変化に対応して有意に変化した。本研究で使用した砂岩と花崗岩は均質な岩石で、肉眼で確認できる程度のクラックや不連続面は存在しなかった。また、本実験で得られた強度値の標準偏差は 7% 以下であったので、ここで示した強度低下率は有意なものであると考えられる。また、最大の強度低下率はと電位がゼロになる溶液濃度で認められ、さらにその強度低下率が約 20~30% と大きいことから判断して、圧裂引張強度の低下に対してと電位が有意な影響を及ぼしていると考えられる。

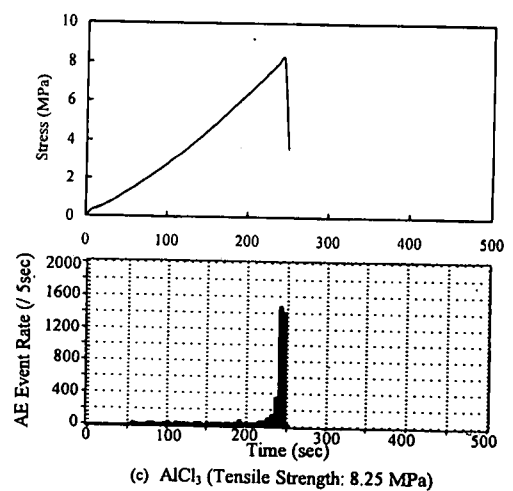
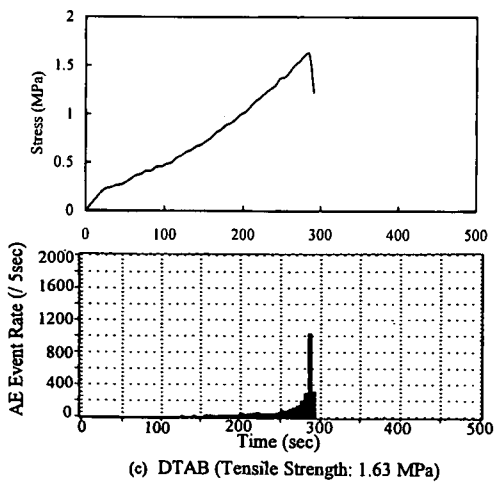
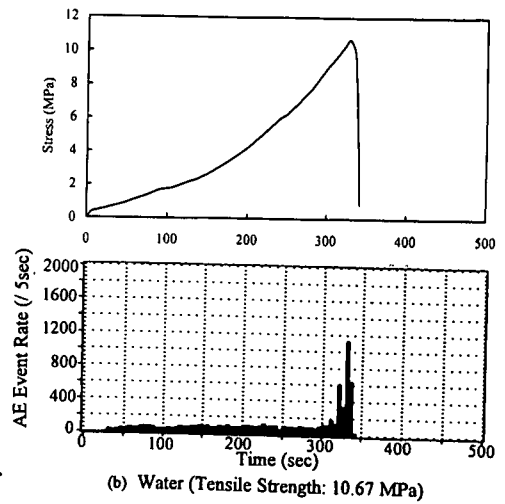
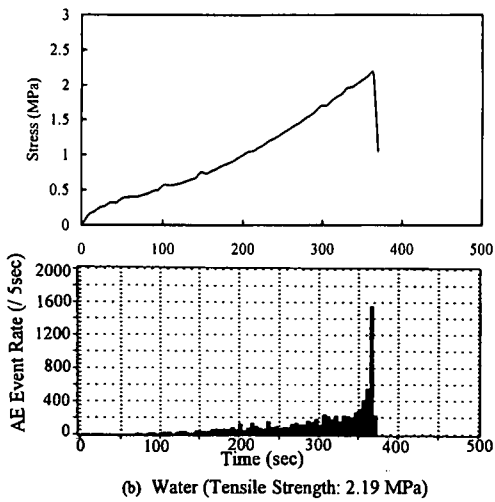
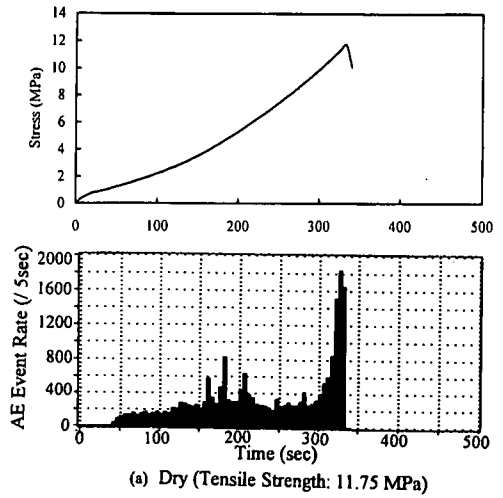
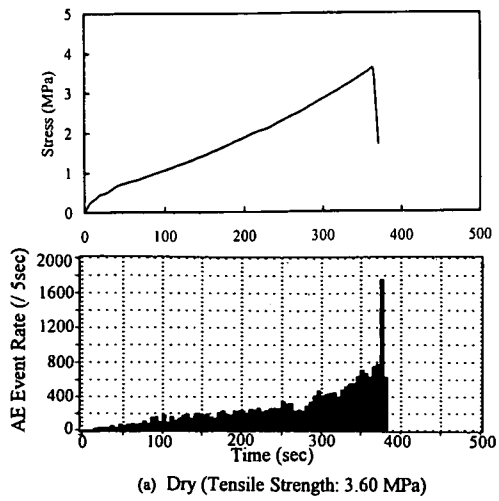


Fig.8 AE behaviors of dry sandstone, water-saturated sandstone and saturated sandstone with DTAB(10^{-3} mol/l) during Brazilian test.

Fig.9 AE behavior of granite in dry, water and AlCl₃ (5×10^{-6} mol/l) environment during Brazilian test.

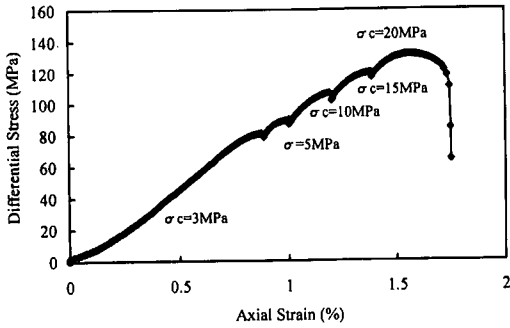


Fig. 10 Variation of axial stress during multi-stage triaxial test of a dry sandstone.

(2) 圧裂引張試験時の AE 発生特性

Fig. 8 は、3 種類の異なる条件下、すなわち乾燥、純水中、化学溶液中（典型例として、DTAB 1×10^{-3} mol/l 溶液）での砂岩の荷重開始から破壊までの典型的な AE 発生状況を示している。同図において、縦軸は 5 秒間での AE イベントレートで、横軸は時間（秒）である。なお、3 条件での AE 発生状況の比較を容易にするために、縦軸の最大値は 3 条件の結果すべてにおいて同じとしている。

同図に示すように、AE 活動は乾燥条件下で最も活発で、荷重初期から多数の AE が発生している。

一方、純水中と電位がゼロを示す濃度の DTAB 溶液中においては破壊直前まで AE 活動度は乾燥条件と比較して低下している。また、純水条件と溶液条件での AE 活動度においても差が認められ、純水中での AE 活動度の方が DTAB 溶液中での活動度より高いものであった。同図に示した試験片の引張強度は、乾燥試験片で 3.60MPa、純水飽和試験片で 2.19MPa、DTAB 溶液飽和試験片で 1.63MPa であった。この結果から、化学溶液の効果によって強度とともに、破壊前の AE 活動度が低下することが明らかになった。

Fig. 9 は、花崗岩の乾燥、純水中、花崗岩が最低強度を示した AlCl_3 溶液中での圧裂引張試験時における AE 発生特性の比較を示している。強度は乾燥条件で 11.75 MPa、純水条件で 10.67 MPa、 AlCl_3 溶液条件で 8.25 MPa となっており、さらに同図に示すように、強度と同様の順で破壊までの AE 活動度が低下するという砂岩の場合と同様な傾向を示している。

(3) 三軸圧縮強度への効果

多段階三軸圧縮試験では 20MPa まで封圧を上昇

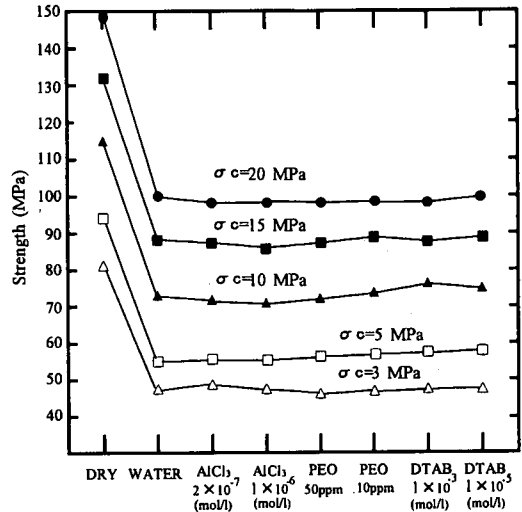


Fig. 11 Strengths of dry sandstone, water-saturated sandstone and saturated sandstone with three different kinds of chemical solutions in multi-stage triaxial tests.

させて、各封圧条件でのピーク強度を求めたが、材料試験機の容量の問題（最大荷重 500kN）から花崗岩についての試験は行わず、砂岩についてのみ検討した。砂岩試験片は先述したように、所定の濃度の溶液に 8 ヶ月間浸漬させた。溶液の濃度は 2 種類を選んだが、その一つは圧裂引張強度が最低を示した濃度で、他の一つは強度低下率が顕著でなかった濃度を選んだ。 AlCl_3 溶液では 2.5×10^{-7} mol/l と 1.0×10^{-6} mol/l、DTAB 溶液では 1×10^{-3} mol/l と 1×10^{-5} mol/l、PEO 溶液では 50ppm と 10ppm とした。これと比較のために、純水飽和試験片について試験を行った。例として、Fig. 10 に乾燥砂岩の多段階三軸圧縮試験の結果を一例として、差応力-軸ひずみの関係を示す。各封圧下での圧縮強度はそれぞれの封圧条件で検出されたピーク値を、その条件での強度とした。Fig. 11 は、各封圧条件でのピーク強度を溶液条件との関係でプロットしたものである。本試験では、各条件において 5 個の試験片について試験を行ったが、標準偏差は 3% 以下で高い再現性を示した。同図には併せて、純水飽和試験片と乾燥試験片の結果を示している。同図に示すように、純水飽和試験片の封圧下での強度は、乾燥試験片の強度と比較して、各封圧条件下で 30% 以上低下している。しかし、純水飽和試験片と溶液飽和試験片の強度を比較すると、圧裂引張強度が最低値を示した濃度において、3 種類の溶液すべてにおいて有意な差は認められない。なお、本多段階三軸圧縮試験において観察

Table 1 Summary of shore hardness testing results

Environments	Shore Hardness	S.D.
DRY	81.71	5.46
WATER	59.75	4.35
DTAB(1×10^{-3} mol/l)	65.30	4.51

S.D. : 標準偏差 (Standard Deviation の略)

された巨視的な破壊面は、載荷軸に対して約 30° の角度を有するせん断面であった。

4. 考察

本研究では、砂岩及び花崗岩の両岩石において、その圧裂引張強度が化学溶液の濃度に関係して有意に変化し、さらにその変化がと電位と関係することを示した。この結果は、Ishido ら¹⁵⁾が石英閃緑岩を用いて行った DTAB 溶液中での一軸圧縮試験の結果と同様な傾向を示している。

一方、三軸圧縮強度については、試験を行った砂岩の場合、3 種類の溶液条件すべてにおいて、濃度に対して有意な変化を示さず、さらにその強度変化も純水飽和条件と比較してわずかであった。三軸圧縮強度に薬剤の効果が有意に発生しなかった原因の一つとして、試験片としては飽和状態であったが破壊試験中に溶液が供給されない条件であったために、き裂先端での薬剤種と鉱物との接触が発生しなかったことが考えられる。今後、三軸圧縮応力下においては排水、非排水の両条件での比較検討が必要と考えられる。

AE の発生挙動に着目すると、圧裂引張破壊試験中の AE 活動度は、乾燥条件下で最も活発で、と電位がゼロを示す溶液濃度において最も不活発であった。また、AE 発生パターンとしては、乾燥条件下での試験では試験開始直後から AE が発生し始め、荷重レベルの増加に合わせてその活動度が増加する発生パターンを示すのに対して、と電位がゼロを示す濃度の化学溶液中での AE 発生パターンは、最終破壊直前まで AE はほとんど発生せず、破壊直前に急増して破壊に至っている。以上のような AE 発生挙動からそれぞれの条件での微小破壊挙動を推察すると、乾燥条件下では、破壊に至るまで微小破壊が徐々に蓄積して破壊に至るのに対して、と電位がゼロを示す濃度の化学溶液中では、AE の発生を伴う微小破壊が最終破壊直前まで発生せず、微小破壊が発生した直後にき裂が急速に進展して破壊したことを示している。純水及びと電位がゼロを示す濃度の溶液中での AE 活動度の低下は、クラック成長にあたって

Table 2 Crack velocities measured by DT test under constant load.

	V (m/sec)	V (m/sec)
	Parallel to rift plane	Parallel to grain plane
DRY	2.98×10^{-6}	4.01×10^{-6}
WATER	2.00×10^{-5}	5.98×10^{-6}
DTAB (1×10^{-3} mol/l)	2.89×10^{-4}	9.98×10^{-6}

クラック先端での塑性変形を示唆していると推察される。岩石内には微小なクラックや結晶粒子間の空隙等が潜在的に存在するが、湿潤条件ではそれらクラック面間の摩擦係数が減少し、それによって発生するすべり変形によってクラック先端の塑性鈍化 (plastic blunting) が起こる。この塑性鈍化によるクラック曲率半径の増大によって、クラック先端に生じる引張応力集中が低下するために、クラック伸長によって放出されるひずみエネルギーが小さく AE 発生率が低下するものと考えられる。

では、純水条件とと電位がゼロを示す溶液条件では変形メカニズムにどのような違いが考えられるであろうか。それについて検討するために、表面硬度 (ショア硬度) と DT 試験によるき裂進展速度の面から比較検討を行った。

Table 1 は、純水とと電位がゼロを示す DTAB 溶液条件下の花崗岩試験片の表面硬度 (ショア硬度) 測定結果を示している。本試験結果は、各条件で 100 個の試験片について調べた結果の平均値である。この結果から、と電位がゼロを示す溶液条件下の値が純水条件より高い値を示すことが分かる。つまり、純水条件下とと電位がゼロを示す溶液条件下の結果でみると、引張強度は薬剤の添加によって低下するが、表面硬度は逆に増加するという Westwood らが酸化化合物で得た結果^{11),12)}とほぼ同様の結果を示している。つまり、と電位ゼロの濃度では、純水環境に比較して塑性的な挙動が抑えられると考えられる。

Table 2 は、花崗岩の板状試験片を作成し、Waza らが行ったのと同様な定荷重条件下での DT 試験¹⁸⁾から、き裂進展速度を求めた結果の一例である。ここでは、応力拡大係数 K_I を $1.18 \text{ MN/m}^{3/2}$ と一定にし、乾燥及び純水条件とと電位がゼロを示す DTAB 溶液条件下の結果を示している。また、試験片は試験前に溶液中に浸漬させることはせず、試験時において初めて乾燥試験片を溶液中にセットした。き裂進展速度 V は、リフトプレインとグレイプレインに平行な方向でそれぞれ異なるが、両者において DTAB

溶液中でのき裂進展速度の方が大きい。つまり、DT試験で認められる開口型のき裂進展速度はと電位ゼロの溶液条件の方が純水に比較して大きいといえる。

表面硬度測定とDT試験によるき裂進展速度結果を基に引張強度への化学薬剤添加の効果を推察すると、岩石は化学薬剤の作用によって、と電位ゼロの濃度では純水条件に比較して塑性的な挙動が抑えられて表面が硬化する。しかし、DT試験でのき裂進展速度の測定結果にみられるように、一旦き裂が開口し、き裂先端が溶液に接触する条件になると純水条件よりも脆性的にき裂成長が発生するために、引張強度に対して有意な影響が出現すると考えられる。したがって、化学薬剤を添加した条件での岩石掘削を考えると、ビットの作用によってき裂が発生するとその新しいき裂に化学薬剤が接触してき裂成長を促進し、破碎効率を高める作用として働くと考えられる。

と電位の実質的な作用メカニズムについてはまだ未解明であるが、定性的には化学薬剤による強度への効果とその作用メカニズムが明らかになった。また、と電位をゼロにする濃度での化学薬剤の添加によって、特に引張破壊、たとえば水圧破碎、岩石切削、浅部でのボーリング掘削、岩石粉碎においてはその破碎、粉碎効率の向上を図れる可能性があるものと考えられる。

5. 結論

本研究では、化学薬剤の添加による岩石強度への効果を圧裂引張強度と多段階三軸圧縮試験での封圧下での圧縮強度から検討し、AE計測結果、表面硬度測定結果、DT試験によるき裂進展速度測定結果と併せてそのメカニズムについて考察した。その結果、

- 1) 砂岩及び花崗岩の両岩石において、圧裂引張強度は化学薬剤の濃度変化に対して有意に変化し、と電位がゼロを示す濃度において最低強度を示すことを明らかにした。
- 2) 一方、多段階三軸圧縮試験で得られた圧縮強度は化学薬剤濃度に対して有意な変化を示さず、と電位ゼロの濃度条件においても純水条件に比較して有意な強度低下は認められないことを示した。
- 3) AE計測結果、表面硬度測定結果、DT試験によるき裂進展速度測定結果から、と電位ゼロの濃度での化学薬剤添加条件では、純水条件に比較して岩石表面は硬化しき裂は初生しにくい、一旦き裂が開口し、き裂先端が溶液に接触する条件になると脆性的にき裂が成長して破壊が発生することを明らかにした。

4) 3)で述べたと電位ゼロの溶液条件での塑性変形の抑制とき裂進展速度の増大が、純水条件に比較した有意な強度低下の原因と考えられる。

参考文献

- 1) Yanagidani, T., Ehara, O., Nishizawa, O., Kusunose, K. and Terada, M.: Localization of dilatancy in Ohshima granite under constant stress, *J. Geophys. Res.*, 90, pp.6840-6858, 1985.
- 2) Scholz, C.H.: Experimental study of the fracturing process in brittle rock, *J. Geophys. Res.*, 74, pp.1447-1454, 1968.
- 3) Hirata, T., Satoh, T. and Ito, K.: Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 90, pp.369-374, 1987.
- 4) Seto, M., Nishizawa, O. and Katsuyama, K.: The variation of hypocenter distribution of AE events in coal under triaxial compression, *J. Acoustic Emission*, 11, No.4, s.27-s36, 1993.
- 5) Anderson, O.L. and Grew, P.C.: Stress corrosion theory of crack propagation with applications to geophysics, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 15, pp.77-104, 1977.
- 6) Swolfs, H.S.: Chemical effects of pore fluids on rock properties, In "Underground Waste Management and Environmental Implications" Edited by T.D. Cook, pp.224-234, 1972.
- 7) Hillig, W.B. and Charles, R.J.: Surfaces, stress-dependent surface reactions and strength, In: V.F. Zackey (Editor), *High Strength Materials*, Wiley, NY, pp.682-705, 1965.
- 8) Colback, P.S.B. and Wiid, B.L.: The influence of moisture content on the compressive strength of rocks, *Proc. Rock Mech. Symp., Tronto*, pp.65-83, 1965.
- 9) Edward, M.V.E.: The mechanism of strength reduction due to moisture in coal mine shales, *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.*, 13, pp.61-67, 1976.
- 10) Reh binder, P.A., Schreiner, L.A. and Zhigach, K.F.: *Hardness reducers in drilling: a physico-chemical method of facilitating mechanical destruction of rocks during drilling*, Akad Naunk, USSR, Moscow, 1944, transl. by CSIRO, Melbourne, Australia, 1948.
- 11) Westwood, A.R.C., Goldheim, D.L. and Lye, R.G.: Reh binder effects in MgO, *Philos. Mag.*, 16, pp.505-519, 1967.
- 12) Westwood, A.R.C. and Macmillan, N.H.: Environmental-sensitive hardness of nonmetals, In: *The Science of Hardness Testing*, ASTM, Cleveland, Ohio., pp.377-417, 1973.
- 13) Westwood, A.R.C., Macmillan, N.H. and Kalyoncu, R.C.: Chemomechanical phenomena in hard rock drilling, *Trans. AIME*, 256, pp.106-111, 1974.
- 14) Engelmann, W.H., Watson, P.J., Tuzinski, P.A. and Pahlman, J.E.: Zeta potential control for simultaneous enhancement of penetration rates and bit life in rock drilling, *U.S. Bureau of Mines RI 9103*, 1987.
- 15) Ishido, T. and Nishizawa, O.: Effects of zeta potential on microcracks growth in rock under relatively low uniaxial compression, *J. Geophys. Res.*, 89, B6, pp.4153-4159,

- 1984.
- 16) Wiederhorn, S.M. and Johnson, H. : Effect of zeta potential on crack propagation in glass in aqueous solutions, *J. Amer. Ceram Soc.*, Vol.58, No.7-8, p.342, 1975.
- 17) Gaudin, A.M. and Fuerstenau, D.W. : Quartz flotation with anionic collectors, *AIME Trans.*, Vol.202, pp.66-72, 1955.
- 18) Waza, T., Kurita, K. and Mizutani, H. : The effect of water on the subcritical crack growth in silicate rocks, *Tectonophysics*, 67, pp.25-34, 1980.

(1997.12.12 受付)

THE EFFECT OF CHEMICAL ADDITIVES ON THE STRENGTH OF ROCK

Masahiro SETO, Venkata S. VUTUKURI, Dilip K. NAG and Kuniyama KATSUYAMA

Chemically induced change of the strength of sandstone and granite has been investigated to establish the fundamental knowledge for chemically enhanced fracturing, together with acoustic emission measurement during the experiments. The tensile strength varied with the concentration of chemical additives, became the lowest at the particular concentration which are consistent with the zero zeta-potential concentrations. AE activity is the most active in dry specimen, and the least AE activity was found in the saturated specimen with the chemical solution. The triaxial strengths did not vary significantly with concentration of the chemical solutions.