

亀裂を有する岩盤における粘性流体による水圧破碎 新規亀裂造成メカニズムのAE測定による検討

中山芳樹¹・石田毅²・大池泰弘³・水田義明⁴

¹正会員 (株)日本パブリック 技術開発部 (〒270-1153 千葉県我孫子市緑1-1-3)

²正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

³正会員 工修 元山口大学大学院学生, 現在, 基礎地盤コンサルタンツ(株)中国支社地質部
(〒731-0135 広島市安佐南区長束4-13-25)

⁴正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

2軸載荷状態の花崗岩供試体にまず水で水圧破碎亀裂を造成し,これを既存亀裂とみなし,次に最大及び最小拘束圧の載荷方向を逆転させ,水の80倍の粘度を有する油を用いて水圧破碎を行った。その結果,既存亀裂と直交する最大加圧方向に新規亀裂が造成された。圧力の経時変化は,3回の小さな圧力低下の後,4回目に大きな圧力低下を示した。AEの震源決定結果から,最初の3回の圧力低下は孔内に残っていた水が既存亀裂に浸入したため,4回目の大きな圧力低下は新規亀裂が造成されたためと思われる。以上のことから,亀裂を有する岩盤においても粘性の高い流体を用いれば,最大地圧方向に新たな亀裂を造成して地圧を測定できること,またその際孔内に残留している水が破碎に影響を与えることがわかった。

Key Words: hydraulic fracturing, acoustic emission, stress measurement, preexisting joints, rock mechanics

1. はじめに

地下の開発を安全にかつ合理的に行うためには,岩盤内に作用している地圧の方向と大きさを測定することが重要であり,簡便で信頼性の高い地圧測定法の開発が求められている。水圧破碎法はオーバーコアリングを必要としないので深い位置での測定が可能であり経済的かつ計測が容易である。また,応力を直接測定するので岩盤の弾性係数(ヤング率,ポアソン比)の評価を必要としないという利点がある。しかし亀裂を有する岩盤では,亀裂から逸水し水圧が上がらないため,水圧破碎により新たな亀裂を造成することが困難であり,水圧破碎による地圧測定を通常の方法で行うことは困難である。一方,地下空間の利用が活発になるにつれ,亀裂が多く存在する岩盤においても地圧を測定する必要がある場合が増えており,亀裂を有する岩盤における水圧破碎地圧測定法の適用は,新たな研究課題となっている。

Cornet and Valette¹⁾は,新たな亀裂を水圧破碎で造成するのではなく,走向と傾斜を測定した複数の既存の亀裂に水を圧入して,亀裂に直方向の地圧

を測定することにより地圧状態を測定することを提案し,実際の測定例を示している。一方Zoback et al.²⁾は,破碎流体に粘性の高い泥水を使用すれば,亀裂を有する岩盤においても,既存亀裂の影響を受けずに最大地圧の作用方向に新たな水圧破碎亀裂が発生することを室内実験で示している。従って,粘性の高い流体を用いれば,亀裂を有する岩盤においても新たな亀裂を造成して水圧破碎による地圧測定が行える可能性がある。しかし,亀裂を有する岩盤における新規亀裂の造成メカニズムは十分解明されていない。そこで,2軸載荷状態の花崗岩供試体にまず水を破碎流体に用いて通常の水圧破碎を行い,造成した亀裂を既存亀裂とみなして,最大及び最小拘束圧の載荷方向を逆転させ,水の80倍の粘度を有する油を破碎流体に用いて新規水圧破碎亀裂を造成する室内実験を行った。そしてこの実験の際にAE (Acoustic Emission)の測定を行い,亀裂を有する岩盤における粘性流体による水圧破碎地圧測定法の可能性と問題点を明らかにするため,粘性流体による新規亀裂の発生機構を検討したので報告する。

2. 実験方法

(1) 岩石供試体と破碎流体

供試体には1辺190mmの中国産緑目花崗岩（平均粒径0.5mm程度）の立方体を用いた。花崗岩には一般に、最も割れやすい面（rift plane）、これに直交する2番目に割れやすい面（grain plane）、これら2面に直交する割れにくい面（hardway plane）の3つの石目がある³⁾。また、P波速度の測定を行うと、最も割れやすい面であるrift planeに直交する測線が最小となることが知られている。そこで、実験前に、これら3方向のP波伝播速度の測定を行った。図-1のように座標系を定めた場合、供試体のP波速度はX方向が4.57km/s、Y方向が4.52km/s、Z方向が4.26km/sであった。rift planeが亀裂の発生方向に影響を与えないように、P波速度の最も小さい方向、即ちrift planeに直交するZ方向に直径20mmのボーリング孔を削孔した。

破碎流体には粘度1cP ($1cP = 1 \times 10^{-3} Pa \cdot s$)の水と粘度80cPの自動車用ミッションオイル（富士興産MPギヤーマルチ：GL-5 80W-90）を用いた。

なお図-1は、説明の都合上、次の(2)で述べる水による破碎時の载荷状態ではなく、水による亀裂造成後の(3)で述べる油による破碎時の载荷状態を示しているので注意されたい。

(2) 水による水圧破碎（既存亀裂の造成）

供試体への拘束圧の载荷は図-2に示すように岩石供試体と反力枠の間にフラット・ジャッキを挿入することで行った。供試体への拘束圧として、X方向に7.5MPa、Y方向に2.5MPa载荷し、この2軸応力状態の下で実験を実施した。Kirschの解⁴⁾によれば、この载荷状態では、ボーリング孔の孔壁に作用する接線方向の直応力は、最小で0MPa（孔壁上のX座標最大及び最小の点）、最大で20MPa（孔壁上のY座標最大及び最小の点）の圧縮応力となる。X方向に亀裂が発生しやすい、安定した実験条件が得られると考えて、この载荷状態を選んだ。破碎孔には図-3に示す全長325mm、直径19.5mm、加圧区間の長さ60mm、直径18mmのメカニカル・タイプのダブル・パッカーを挿入した。このパッカーは、2つのナットを締めつけることにより、スペーサーを介して加圧区間をはさむ2つの長さ10mmのシーリング・ゴムを圧縮して側方に膨張させ、長さ60mmの加圧区間を密閉する仕組みになっている。注水孔から170mmの位置にあるパッカーの接続口に配管を接続し、容量60cm³、最大加圧能力350MPaのスクリーポンプ（HIP社製 87-6-5型）を1.5秒に約1回転の速度で回転させて破碎流体

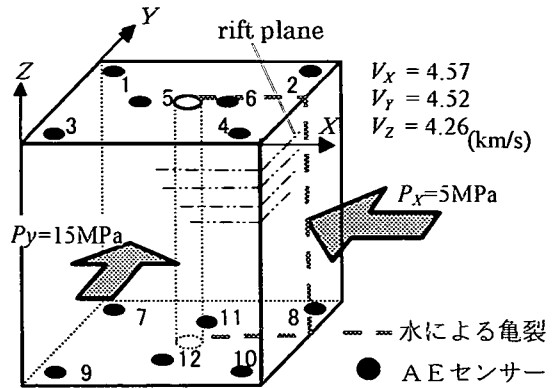


図-1 供試体の载荷状態(油による亀裂造成時)とAEセンサーの配置

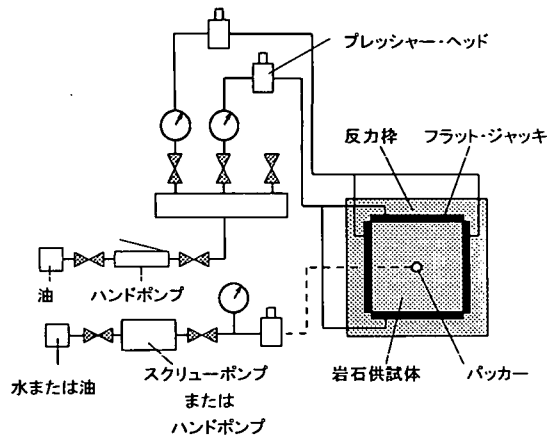


図-2 孔内圧と拘束圧の载荷方法

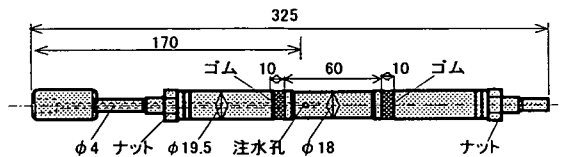


図-3 実験に用いた水圧破碎用パッカー（単位：mm）

を圧入し破碎孔の内壁を加圧した。スクリーポンプは、小さい流量で安定した加圧ができる特徴がある。このスクリーポンプは加圧流体を1回転で0.355cm³吐出するため、1秒間にほぼ0.25cm³/sの流量となる。

水による水圧破碎後、供試体を载荷枠から取り外したり、パッカーを閉め直したりすると亀裂のずれや拡大が生じる原因となるため、拘束圧を载荷したままで観察できる上下面のみを目視で観察し、最大加圧方向であるX方向に亀裂が造成されたことを確認した。

(3) 粘性流体による水圧破碎（新規亀裂の造成）

水による破碎亀裂を既存亀裂に見立て、これと垂直に亀裂を生じさせるため、最大及び最小拘束圧の載荷方向を逆転させ、また最大、最小拘束圧とも水による破碎の場合の2倍の大きさとし、X方向に5MPa、Y方向に15MPaの圧力を載荷した（図-1参照）。Kirschの解⁹によれば、この載荷状態では、ボーリング孔の孔壁に作用する接線方向の直応力は、最小で0MPa（孔壁上のY座標最大及び最小の点）、最大で40MPa（孔壁上のX座標最大及び最小の点）の圧縮応力となる。供試体への拘束圧を水による破碎の場合の2倍の大きさとしたのは、Zobackらの実験結果²⁾や予備試験の結果から、粘性流体を用いた場合、破碎に要する圧力の大きさが水の場合より大きいと予想されたためである。すなわち、水の場合より大きな破碎圧力が作用しても、孔壁の亀裂位置（孔壁上のX座標最大及び最小の点付近）が圧縮応力状態で亀裂が開口せず、かつ最大加圧方向のY方向に亀裂が発生しやすい、安定した実験状態を得るため拘束圧を2倍とした。

破碎孔への加圧は、破碎流体が既存亀裂から多少漏れても孔内圧を十分に上昇させることができるよう、スクリュウポンプに比べて流量の大きなハンドポンプ（REKEN SEIKI P-2B型、最大加圧能力70MPa）を用いた。このハンドポンプは、低圧時（2MPa）に13.0cm³、高圧時（70MPa）には2.3 cm³の加圧流体を1ストロークで吐出する。後に述べるように破碎圧は35MPaであったので、破碎時の1ストロークの吐出量は、比例配分で考えて約8cm³となる。1秒間に1ストロークの間隔で加圧したので、破碎時の流量は約8cm³/s程度と思われる。

油による破碎の終了後は、供試体を載荷枠からはずし、目視により表面の亀裂の観察を行った。

(4) 圧力測定方法

破碎孔の内圧はブルドン管式圧力計（最大圧力35MPa）を目視で確認するとともに、ポンプとパッカーの間に設置したひずみゲージ式変換器（KYOWA PG500KUM、最大圧力50MPa）で検出し、AE測定装置のアナログ電圧入力端子に接続して0.01秒ごとにA/D変換し、コンピューターに記録した。またX、Y方向に載荷したフラットジャッキの油圧は、ハンドポンプでそれぞれ所定の圧力まで加圧した後、管路を閉じて、圧力変動を破碎孔の内圧と同じように測定した。

(5) AE測定方法

AEセンサーには共振周波数150kHz、直径17.4mm、厚さ16.3mmの円柱型センサー（Physical Acoustics Corporation製、R15型）を用いた。AEセンサーの接着

には、加熱して溶融すると粘り気のある液体となり冷えると硬く固結する棒状の蝟（株）エヌエフ回路設計ブロック製、エレクトロソックス）を用い、これを半田こてで溶かしてAEセンサーの底面につけ、供試体の上下面に6個ずつ合計12個接着した（図-1参照）。今回の実験では、各チャンネルともセンサーで受信したAE信号を、プリアンプで40dB（100倍）、メインアンプで30dB（31.6倍）、合計70dB（3160倍）増幅し、しきい値を250mVに設定して、0.01秒毎にリングダウン計数法でチャンネル毎にAE発生数を計数して記録した。

震源決定やメカニズム解析のためにはAE波形を記録することが必要であるが、水圧破碎では主要な亀裂が瞬時に進展し、この間に大量のAEが発生して供試体の巨視的な破壊に至る。このため、短時間に大量のAE波形データを取りこぼしなく収録できるAE測定装置が必要となる。そこで、最小サンプリング時間50ns、分解能8bit、記録長2048byteのA/D変換器を12ch搭載し、イベント間の最小不感時間（dead time）の長さを128byteに設定して、最大16384個のAEの波形を連続的に収録できるAE装置（岩通01型AEデータ集録解析装置、特注品）を新たに導入して今回の測定に使用した。この装置でサンプリング時間を最小の50nsに設定した場合、102.4μsの継続時間を有する各AE波形を、6.4μsの不感時間で1.78s間連続的に測定することができる。波形データは、2048byte×12ch×16384個=393MBとなり膨大であるが、測定中はこれをDRAM（Dynamic Random Access Memory）に保存し、測定終了後、圧力などのデータとともに650MBのPD（Phase Change Rewrite-able Disk）に転送して収録する。

今回の測定ではサンプリングタイムを0.2μsに設定した。AE波形の記録長は2048byteであるから、各AEイベントの測定継続時間は0.2μs×2048byte=409.6μsとなる。センサーのリングング（受振したAE信号が減衰せず次のAE信号を受振しても波動が重畳して初動が読み取れない状態）によるノイズの収録を防ぐため、不感時間をこの測定継続時間409.6μsの約11倍の4.4msに設定した。このため、1秒間に約200個のAEイベントを78s間連続的に観測することが可能であり、水圧破碎による亀裂の進展を十分観測することができる。またAEセンサー番号が1と7、4と10、5と11の3組のうち、いずれか1組の2つのセンサーでしきい値以上の電圧の信号を同時に観測した時にだけ、A/D変換器にトリガーをかけることとし、震源決定できる良質なAE信号を選択的に収録できるよう工夫した。なお、プレトリガーは記録長の1/2に設定した。

3. 実験結果と考察

(1) 圧力及びAE発生頻度の経時変化

今回の実験ではすでに述べたように、2軸載荷状態の花崗岩供試体にまず水で水圧破砕亀裂を造成し、これを既存亀裂とみなし、次に最大及び最小拘束圧の載荷方向を逆転させ、水の80倍の粘度を有する油を用いて水圧破砕を行った。いずれの場合も破砕が発生して圧力が低下し始めるとただちにバルブを閉じ破砕流体の注入を中止した。

圧力とAE発生頻度の経時変化を図-4、図-5に示す。これらの図はそれぞれ破砕流体に水と油を用いた場合の圧力とAE発生頻度の経時変化である。図中、太い実線は破砕孔に作用する圧力 P_o を、細い実線は供試体のX方向とY方向にそれぞれに載荷した拘束圧 P_x 、 P_y を示す。棒グラフは、12個すべてのセンサーで受振したAE信号に対し、ディスクリレベルを250mVに設定してリングダウン法で計数したAE発生数の0.01秒間の平均値を示している。

図-4の水による水圧破砕の場合を見ると、孔内圧力が10MPaを超えると、小さな脈動がみられる。これは、スクリーポンプを手で回転させて加圧していたため、1ストロークごとに手を持ち変える必要があり、また10MPaを超える高压になると、回転させるのに大きな力が必要となり、ストロークの切り替え時に圧力が低下したためである。水による破砕では孔内圧力が22.5MPaに達した後、矢印の点で破砕が生じ、内圧が急激に低下した。AEは破砕の直前から集中的に発生していることがわかる。後で示すように、亀裂は破砕孔からX方向に進展し、供試体表面に達している。

図-5の油による破砕では、孔内圧力の加圧にハンドポンプを用いた。図に矢印で示したように圧力の小さなピークを4回記録した後、大きな圧力低下を伴って破砕している。ピーク時の孔内圧力はそれぞれ、35.0MPa、34.5MPa、33.5MPa、33.0MPaと徐々に小さくなっている。水による水圧破砕の後、供試体からパッカーをとりはずすと造成した亀裂のずれや拡大が生じる可能性があるため、パッカー上部で配管を取り替え、そのまま破砕流体を油に切り替えて注入した。このためパッカー内には水が6cm³程度残ったままとなっていた。後で示す震源決定の結果から1回目から3回目の圧力低下に伴うAEは既存亀裂に沿って発生しており、1回目から3回目の圧力低下はこのパッカー内に残っていた水が既存亀裂内に浸入したため生じたものと思われる。一方、4回目の大きな圧力低下は、AEの震源分布が造成された新規亀裂に沿っているため、新規亀裂が造成され破砕流体が生

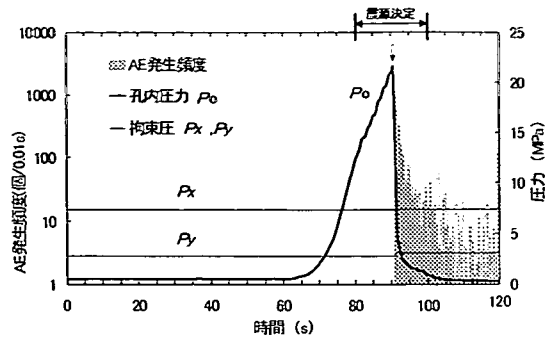


図-4 水による破砕時の孔内圧と拘束圧の変化とAE発生頻度

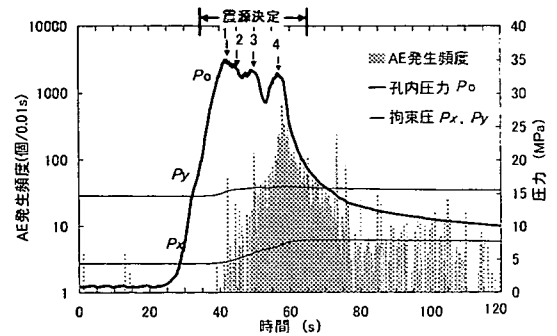


図-5 油による破砕時の孔内圧、拘束圧の変化とAE発生頻度

じた亀裂に流入したためと思われる。

水による破砕では $P_x=7.5$ MPa、 $P_y=2.5$ MPa、油による破砕では $P_x=5$ MPa、 $P_y=15$ MPaと拘束圧の大きさが2倍違うので、圧力時間曲線を比較して議論するには注意を要するが、次のような違いを指摘することができる。

油の場合の圧力-時間曲線を、水の場合と比べると、破砕圧力の大きさの違いにまず特徴が見られる。油の場合の新規亀裂の発生圧力はすでに述べたように4回目のピークの33.0MPaと考えられるが、これは水の場合の22.5MPaのおよそ1.5倍の大きさである。水による破砕と油による破砕で載荷した拘束圧の大きさは異なるが、亀裂発生位置の接線方向の直応力の大きさはいずれの場合も0である。Schmitt and Zoback⁵⁾は、ガラスと加圧速度を変えた花崗岩に対する水圧破砕実験から、加圧速度が大きい場合には岩盤中に水が浸透せず間隙水圧が小さくなるため、破砕圧が大きくなると報告している。このような破砕圧の加圧速度依存性は、ボーリング孔の孔壁に微小亀裂の存在を仮定し、その亀裂進展条件を破壊力学的に定式化した理論解析の結果でも同じ傾向が示されている⁶⁾。今回の実験の場合供試体は同じ花崗岩であるが、粘性の大きい油では浸透性が低いため、水

に比べて破砕圧が大きくなると思われ、このことが破砕圧の大きさに顕著な違いが生じた原因ではないかと思われる。

また、破砕が発生して加圧を中止した後の孔内圧力は、水による破砕では22.5MPaの最大圧を示した10秒後には2MPaまで急激に低下しているのに対し、油による破砕では最大圧34.7MPaを示した10秒後にはまだ20MPaと高い圧力を示している。これは油の場合粘性が大きく、油が亀裂に浸透して孔内圧力が低下するのに時間を要するためと思われる。

次に拘束圧の変化を見ると、水の場合の最大拘束圧 P_x はほとんど変化が見られないのに対し、油の場合の最大拘束圧 P_y は破砕前から増加し始め1.5MPaの増大が見られる。これは、破砕孔の荷重圧が高圧になるに伴い、パッカー内に残っていた水が既存亀裂に浸入し、このため亀裂が開いて供試体が膨張し、フラット・ジャッキを押し戻したためと思われる。また、水の場合の最小拘束圧 P_y は亀裂の発生に伴い0.4MPaしか増加していないのに対し、油の場合の最小拘束圧 P_x は3.5MPa増加している。この P_x の圧力の増大は新規亀裂が造成された4度目の孔内圧力の低下に伴って上昇するはずであるが、図-5では1度目の孔内圧力の低下の直後から上昇が見られる。これはX方向に造成された既存亀裂を通じて供試体表面まで油が漏れ出し、 P_x を荷重するフラット・ジャッキの表面に圧力が作用したためと思われる。このことは、図-1より明らかなように既存亀裂が供試体の片方の側面にまで達していること、また実験後供試体を取り出したときに、フラット・ジャッキの表面や供試体の側面にかなりの量の油がついていたことと合理的に符合する。石田ら⁷⁾は、水と粘性の高い油でそれぞれ新規亀裂を造成した水圧破砕実験結果から、油の方が造成された亀裂の幅が大きく、破砕流体が亀裂に浸入した場合にも亀裂を大きく開口させ、亀裂に直方向に拘束圧を荷重するフラット・ジャッキを押し戻す程度が大きいことを指摘している。今回の実験結果もこれと同じ傾向を示しているといえるが、 P_x の大きな圧力の増大は、油による新規亀裂の開口のためだけでなく、既存亀裂を通じた破砕流体の漏洩による圧力の作用の影響も重畳しているといえる。

AE発生頻度を比べると、水による破砕では破砕直後に集中してAEが発生しているが、油による破砕では新規亀裂発生20秒前からAEが発生している。これは既に述べたように、パッカー内に残っていた水が既存亀裂内に浸入し、これに伴ってAEが発生したためと思われる。またAE発生頻度のピークは、水による破砕では91.13秒から91.14秒の0.1秒間の1582回、

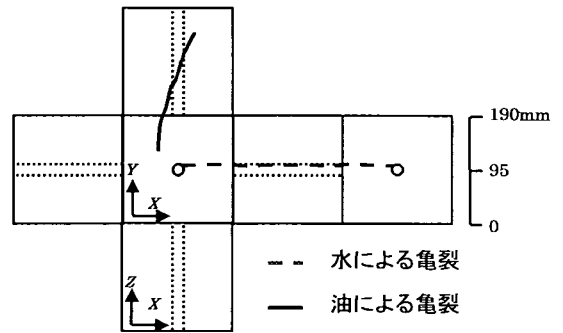


図-6 供試体表面の展開図上に示した可視亀裂のスケッチ

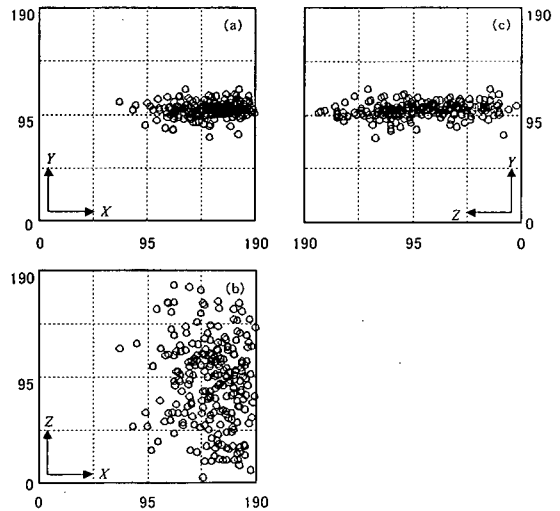


図-7 水による破砕時のAE震源分布
(a)XY平面図, (b)XZ断面図, (c)YZ断面図

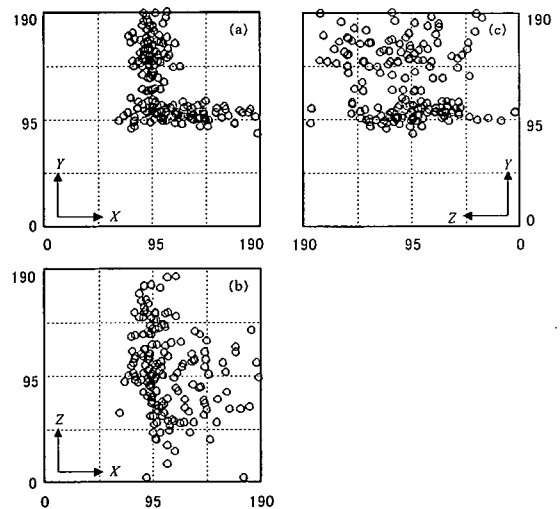


図-8 油による破砕時のAE震源分布
(a)XY平面図, (b)XZ断面図, (c)YZ断面図

油による破砕では57.86秒から57.87秒の0.1秒間の713回である。このことから、いずれも亀裂の造成直後にAE発生頻度が最大になっていることがわかる。

(2) AE震源の空間分布と供試体表面の亀裂

実験後に観察した供試体表面の亀裂のスケッチを図-6に示す。図中の破線は水による亀裂、実線は油による亀裂を示す。水を用いた場合の供試体表面の亀裂は上下面の両方に達しているのに対し、油を用いた場合の供試体表面の亀裂は上面の途中から側面の途中で止まっている。

AE震源は、供試体のP波速度の異方性を考慮し^{8),9)}、各センサーへのP波初動の到達時間の差から求めた。考察の対象とした震源は、次の4条件をすべて満たした震源のみである。

- ①センサー数（データ数）は5個以上である。
- ②決定された震源は、供試体内部にある。
- ③走時残差の標準偏差は $3\mu\text{s}$ 以下である。
- ④走時残差の絶対値（ $|t_i - T_i|$ ）の最大値は $3\mu\text{s}$ 以下である。

なお、 t_i は*i*番目のセンサーへのP波初動到達時刻であり、 T_i は決定された震源座標と発生時刻から逆算されるP波初動到達時刻である。

これらの条件を定めた理由は次の通りである。条件①については、震源決定の未知数は震源座標（*X*, *Y*, *Z*）と発生時刻の4つであるため、最小2乗法を適用するには最低5個のデータが必要なためである。条件②については、ここで考察の対象とするAEの発生は、供試体内部以外に考えられないためである。条件③④については、実験に用いた立方体供試体の1辺の長さが190mmであり、議論を行うためには震源決定誤差が、その7%の13mm程度以下であることが望ましいと思われること。一方、供試体の弾性波速度は4.5km/s程度であり、条件③④に定めた $3\mu\text{s}$ の間に弾性波が伝播する距離はそれぞれ13.5mm程度であることから、これらの値が走時残差の標準偏差と走時残差の絶対値の最大値の目安になると思われたからである。なお、パチンコ玉を供試体の上端面に落下させ、その振動をAEセンサーで受振して震源決定を行ったところ、上記の条件を満たして決定された震源は、落下点から数mm以内の位置に決定された。これらのことから、今回の実験における震源決定精度は数mm程度で、最大でも10数mm程度と推定される。

水を破砕流体として用いた実験では、図-4に示した80秒から100秒の間に発生したAEイベント1264個についてAE震源決定を行った。このうち先に示した4条件を満たした236個のAE震源を○印で図-7に示す。左上のXY平面図を見るとAE震源は破砕孔から、X方向

に直線的に分布している。図-6に示した供試体表面の水による亀裂のスケッチとAE震源の空間分布を比べると、両者がほぼ一致していることがわかる。

油を破砕流体として用いた実験では、図-5に示した35秒から65秒の間に発生したAEイベント2600個についてAE震源決定を行った。このうち先に示した4条件を満たした180個のAE震源を○印で図-8に示す。左上のXY平面図を見るとAE震源は破砕孔から、X方向およびY方向に直線的に分布している。X方向の震源は図-7の震源分布と一致しており、水による破砕で造成された既存亀裂に沿って発生していることがわかる。また、最大載荷方向であるY方向の震源は新規亀裂の発生にともない発生したAEであると考えられる。XZ平面図とYZ平面図を注意してみると、破砕孔近傍のAE震源はZ座標が50mm~150mmの範囲に多く分布していることがわかるが、これはダブル・バックアーの加圧区間がZ座標で65mm~125mmに位置するためである。またAE震源の空間分布と可視亀裂のスケッチを比べると、AE震源は水と油による2つの亀裂に沿っていることがわかる。油による破砕でY方向に進展した亀裂は、少なくとも供試体の側面ではYZ面に平行ではなくやや斜めに生じている。AEの震源分布はX方向に比べY方向の震源分布がやや広いが、必ずしも亀裂の傾きと明瞭に対応していない。これは、最終的な巨視亀裂だけでなくその周辺の微小な亀裂でもAEが発生するという現象そのものの特徴と、AEの震源決定精度の限界によるものと思われる。

(3) AE震源の時空間分布

水による破砕時のAE震源分布の経時変化を検討するため、横軸に時間をとり、縦軸にAE震源座標*X*, *Y*, *Z*のそれぞれの値をとって○印でプロットしたAE震源の時空間分布図を図-9(a) (b) (c)に示す。図-9(a) (b)の破線は破砕孔の中心座標*X*=95mm, *Y*=95mmをそれぞれ示し、図-9(c)の破線は、加圧区間の両端*Z*=65mm, *Z*=125mmの位置を示す。これらの図の下に図-9(d)として、孔内圧力とAE発生数の経時変化を再度示す。データを詳細に見ると、90.87秒に最大の孔内圧22.5MPaを記録すると同時にAEの発生が始まり、その0.15秒後の91.02秒に最大のAE発生頻度である1617個（12個のセンサーで受振した0.01秒間のAE発生頻度の平均値）を記録している。最大の孔内圧力を示した90.87秒~91.41秒の0.54秒の間には、先に示した供試体をはさんで向い合う2個のセンサー3組のうちいずれか1組で同時に250mV以上の振幅を記録するというA/D変換器へのトリガーの条件を満たして、100個前後のAEイベントの波形が収録された。しかし、それぞれのイベントの収録間に4.4msの不感時間を設

けていたにもかかわらず、これらイベントはいずれもセンサーのリングングやAE波とAE波の重畳のため大きな振幅が続く波形で、初動を読み取ることができず震源決定ができなかった。このため、図-9(a)(b)(c)に示した最初の震源は、孔内圧力がかかなり低下し5.3MPaとなった91.42秒に発生したAEである。

図-9(a)でX方向の経時変化を見ると、AE震源の分布は破碎孔からX軸の“+”の方向に広がり、+190mmの供試体表面にまで達している。図-9(b)を見ると、Y方向には破碎孔を中心とした狭い範囲にしか震源は分布していない。図-9(c)より明らかなように、Z方向に関しては破線で示した6.5mm~12.5mmに位置するダブル・パッカーの加圧区間を中心に上下に広く分布している。これらのことから、圧力が最大値に達した直後、亀裂がX方向に進展するとともに上下面に達し、次に圧入された水によってこの亀裂が平面的に拡大し、この間徐々に圧力が低下していったと思われる。

次に、既存亀裂を有する供試体での新規亀裂の発生を検討するため、油による破碎のAE震源の時空分布と孔内圧力、AEイベント数の経時変化を図-10に示す。図-10では55秒付近を境にAE震源の分布に顕著な変化が見られる。55秒まではY方向では破碎孔を中心とした狭い範囲かつ、X方向では破碎孔から“+”の方向に分布している。つまり既存亀裂でAEが発生していることがわかる。55秒を過ぎるとY軸の“+”の方向かつ、X方向では破碎孔を中心とした比較的狭い範囲でAEが発生していることから、最大拘束圧の荷重方向であるY方向に新規亀裂が発生したことを示している。すでに述べたように、水による破碎の後、パッカー上部で配管を切り替え、そのまま油を注入したため、パッカー内には6cm³程度の水が残った状態となっていた。図-10のAE震源の時空分布を見ると、図-10(d)の1~3の矢印で示した最初の3回のピークとその直後の圧力低下は、パッカー内に残っていた水が少しずつ既存亀裂に浸入して生じたものと考えられる。このうち3回目のピーク後の圧力低下は過去2回の圧力低下に比べて大きくAEの発生も激しい。圧力低下の傾向とAE発生頻度、震源決定の結果を見比べると、3回目のピークの後、パッカー内に残っていた水がそれまでに比べて多く既存亀裂に浸入して大きな圧力低下を生じたものと思われる。このためパッカー内に残っていた水の量が減少し、その後パッカー内が油で満たされて圧力が再び上昇し、最大荷重方向に新規亀裂が造成されたのではないと思われる。

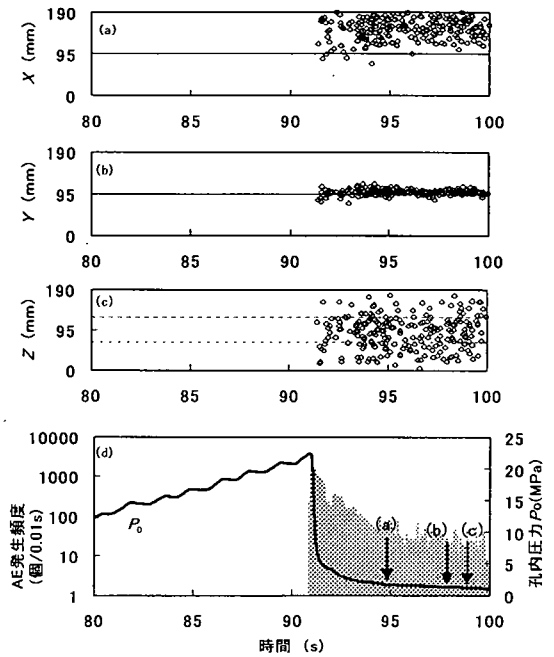


図-9 水による破碎時のAE震源の時空分布と孔内圧力変化。(a)震源のX方向への移動、(b)Y方向への移動、(c)Z方向への移動、(d)孔内圧力とAE発生頻度の経時変化

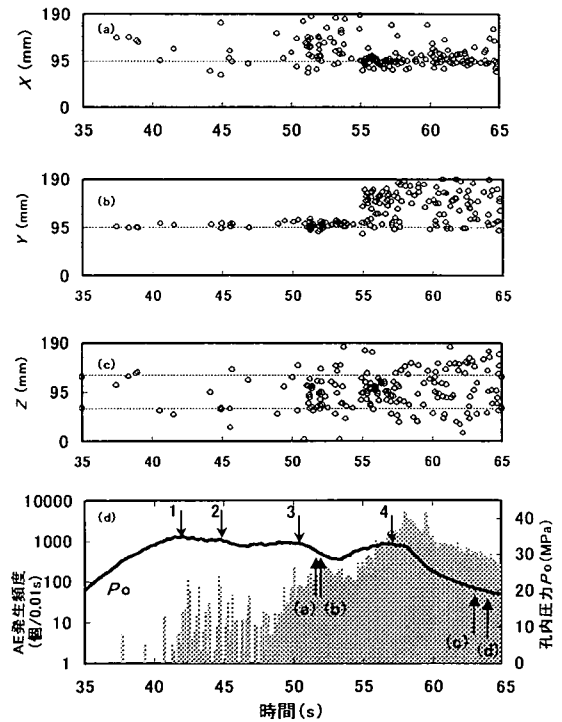


図-10 油による破碎時のAE震源の時空分布と孔内圧力変化。(a)震源のX方向への移動、(b)Y方向への移動、(c)Z方向への移動、(d)孔内圧力とAE発生頻度の経時変化

(4) AEのメカニズム解析

既存亀裂を有する供試体における新規亀裂の発生をさらに詳しく検討するため、AEのメカニズム解析による破壊機構の検討を行った。

a) メカニズム解析の概要

AEの発生に伴って観測点に伝播してくるP波初動の極性は初動が震源から観測点に向かうか、遠ざかるかによってそれぞれ押し波、引き波のいずれかの極性を有している。いま図-11のように、最大圧縮主応力の方向がP方向、最小圧縮主応力がT方向から作用し、原点Oで矢印のようなせん断破壊が生じ、これに伴ってAEが発生したとする。この場合第1及び第3象限にある観測点には初動が押し波のP波が、第2及び第4象限にある観測点には初動が引き波のP波が伝播してくる。逆に震源を決定したAEイベントに対し、多数の観測点でP波の初動の極性を調べることで、そのAEを発生させたせん断破壊の方向と作用した主応力の方向を知ることが出来る。すなわち、引き波と押し波の分布を区切る2つの線(図のX軸とY軸)を節面といい、そのいずれかがせん断破壊面の方向を示す。なお、いずれが実在の破壊面であるかはAEデータだけではわからない。それを知るためには、観察による巨視的亀裂面の方向など他のデータが必要である。また引き波と押し波の分布の中心方向がそのせん断破壊を生じさせた最大および最小主応力の方向であり、それぞれP軸およびT軸とよぶ。

引張破壊や爆発的な破壊の場合には、全ての観測点で押し波の初動が観測される。これとは逆に真空管の破裂や空洞の陥没のように周囲の媒体が内側に引張り込まれるような破壊では、全ての観測点で引き波の初動が観測される。一方、図-11のように押し引きの初動が交互に現れる分布を4象限型の分布とよび、このような押し引き分布を示すAEはせん断破壊に伴って生じたものとみなすことができる。図-11には簡単のため概念図を示したが、震源から各観測点への射出角と方位角を計算し、震源を中心とする球面上での初動の押し引き分布を考え、これをステレオネット上で整理することによって、同様の解析を3次的に行うことができる。このようにして得られた3次的な解をAEのメカニズム解とよぶ。上述の解析手法からわかるように、メカニズム解を得るためには、多数のセンサーで明瞭なP波初動をとらえる必要がある。そこで今回の実験では7個以上のセンサーで初動の押し引きの極性を明瞭に読み取れたAEイベントを、水による破碎については10数個、油による破碎については20数個選び出して、メカニズム解を求めた。

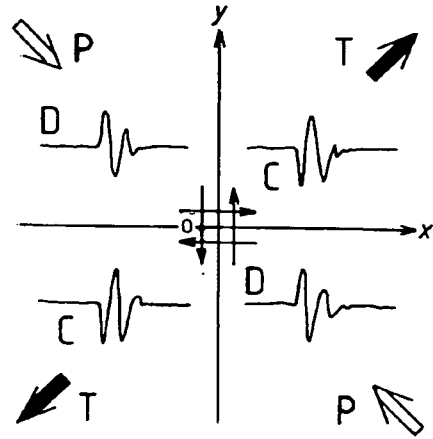
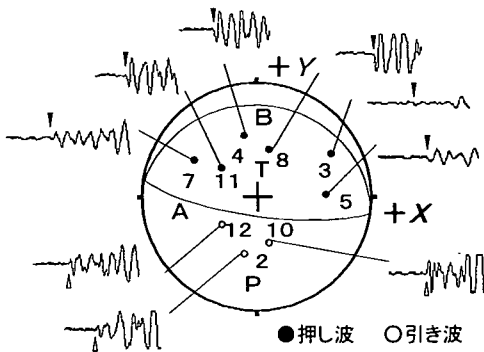


図-11 メカニズム解析の基礎となるせん断破壊に伴うP波初動分布の2次的説明図。Dは引き波(Dilatational), Cは押し波(Compressional)を示す。

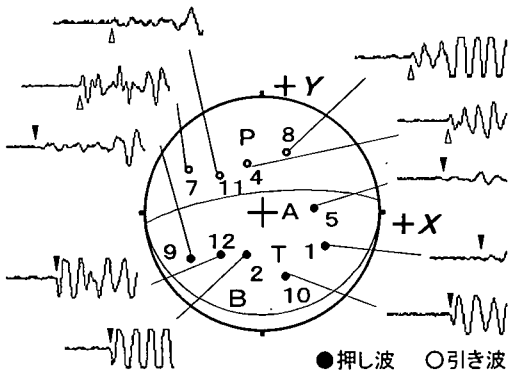
b) 水による水圧破碎AEデータの解析

図-12(a)(b)(c)は、いずれも水による破碎の際に得られた、AEイベントのメカニズム解であり、それぞれのAEイベントの発生時刻は図-9(d)の圧力時間曲線上に(a)(b)(c)の矢印で示した通りである。図-12において、●印は押し波の観測点、○印は引き波の観測点を示し、数字はセンサー番号を示す。なお、初動が押し波であるか引き波であるかは、実験前に、供試体の下端面にセンサーを接着し、上端面にパチンコ玉を落下させて波形を記録し、下向きの特レースが押し波であることを確認した。

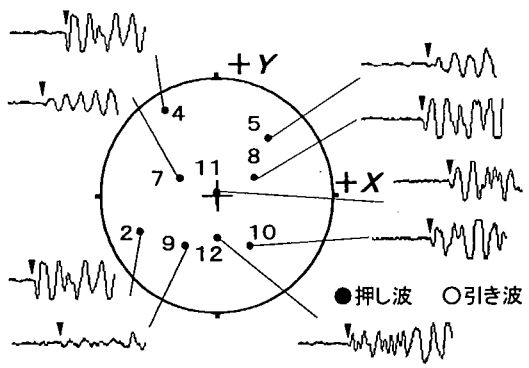
図-12(a)のAEの震源座標は、(X, Y, Z)=(153, 96, 111)(単位はmm)であり、水による破碎で+X方向に発生した亀裂上に位置する。この図を見ると各センサーのP波初動の極性は押し波と引き波が混在し、せん断破壊の4象限型の分布を示すことがわかる。●(押し波)と○(引き波)の分布を区切る図上の2本の曲線A, Bは空間的に直交する2つの平面に対応し、これが3次的な節面である。この図の9点の観測データでは、節面の選び方は必ずしも1通りに定まらないが、2つの節面は震源を中心とする球面上の大円であり、かつ互いに直交するという節面の条件を満たさなければならないため、選択の余地は余り多くない。これら2つの節面のいずれかがこのAEを発生させた微小破壊の実在の破壊面であるが、すでに述べたように、このAEの震源は+X方向に進展した亀裂面上にあるため、実在の破壊面はこの亀裂面に近い走向・傾斜を有する節面Aであると考えられる。図中のPの文字の位置がP軸の方向、すなわち、このAEを発生させた微小破壊に際して作用した最大圧縮主応力の3次的な方向を示すが、この方向は供試体の最大圧縮



(a) 発生時刻94.80s, 震源座標(153, 96, 111)

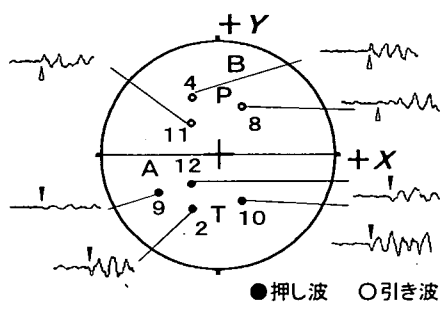


(b) 発生時刻97.50s, 震源座標(143, 100, 74)

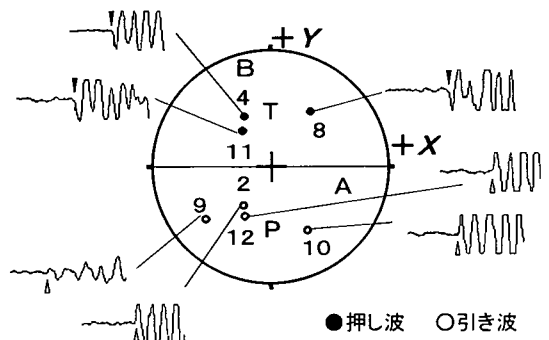


(c) 発生時刻98.90s, 震源座標(164, 102, 61)

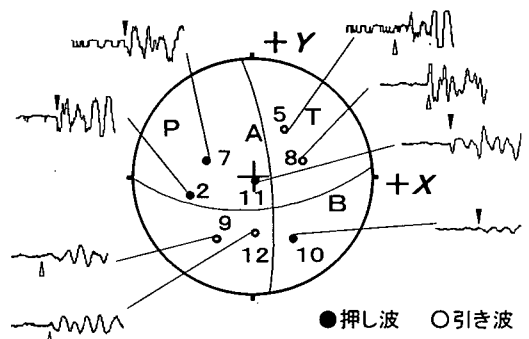
図-12 水による破碎時に発生したAEのメカニズム解 (震源座標の単位はmm)



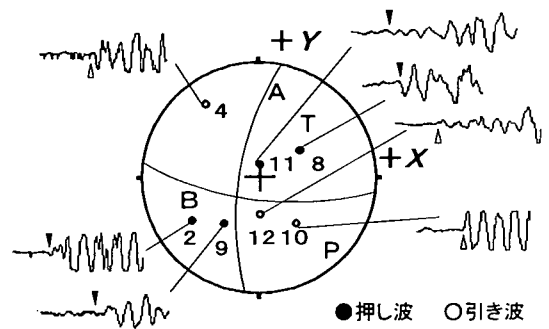
(a) 既存亀裂上で発生, 発生時刻51.18s, 震源座標(130, 95, 107)



(b) 既存亀裂上で発生, 発生時刻51.19s, 震源座標(124, 105, 73)



(c) 新規亀裂上で発生, 発生時刻63.23s, 震源座標(93, 146, 114)



(d) 新規亀裂上で発生, 発生時刻63.98s, 震源座標(95, 120, 136)

図-13 油による破碎時に発生したAEのメカニズム解

方向であるX方向とは一致せず、これに直交する中間主応力(Y方向)と最小主応力方向(Z方向)の中間的な方向を示している。

図-12(b)を見ると、図-12(a)と同じせん断破壊のメカニズムを示し、2つの節面の方向もほぼ同じであるが、P軸とT軸の方向が入れ替わっている。メカニズム解析を行った他のAEイベントの大半は、図-12(a)または図-12(b)のいずれかのメカニズム解を与える。しかしまれには、図-12(c)に示したような、全センサーで押し波のP波初動が観測される引張破壊を示唆するAEイベントが観測された。このような引張破壊は、破碎孔から圧入した水が亀裂を押し広げることにより発生したと考えられる。従って、過去の研究で示されたのと同様⁷⁾、水による破碎の場合にはせん断破壊が卓越するが、メカニズム解のP軸とT軸の方向が供試体に載荷している主応力方向と一致せず、しかもしばしばP軸とT軸の方向が入れ替わることから、AEの発生をもたらす微小破壊は、供試体内部に潜在する弱面に水が浸入して滑りが生じることにより発生し、これらの微小破壊面が連結することにより、巨視的な亀裂が最大圧縮方向に進展するのではないかとと思われる。

c) 粘性流体(油)による水圧破碎AEデータの解析

図-13(a)(b)(c)(d)は、いずれも油による破碎の際に得られた、AEイベントのメカニズム解である。図-13(a)(b)は、図-10(d)の圧力時間曲線上に矢印で示したように、3回目の圧力ピーク後に発生したAEイベントである。この時刻にはほぼすべてのAEが、先の水による破碎で発生した既存亀裂に沿って+X方向に発生しているが、これらのAEイベントの震源座標も(130, 95, 107)と(124, 105, 73)であり、いずれもこの亀裂上に位置している。これらのメカニズム解では、●(押し波)と○(引き波)の分布を区切る直径の線分とステレオネットの外形円が2つの節面を示すが、直径で表された節面Aが既存亀裂の走向・傾斜に一致するため、この節面がこのAEを発生させた微小破壊の現在の亀裂面に対応すると思われる。これらのメカニズム解は、図-12(a)(b)に示した水による破碎時のそれに極めて類似したせん断破壊のメカニズム解を示している。この時刻、すなわち亀裂が+X方向に進展して50~55秒に発生した他のAEも、これに似たせん断破壊のメカニズム解を示すものが支配的であった。

図-13(c)(d)に示したメカニズム解は、図-10(d)に示したように4回目の圧力ピーク後の、+Yの方向、すなわち最大載荷方向に新規亀裂が造成された時のAEイベントである。このAEの震源座標は、(93, 146, 114)と(95, 120, 136)であり、この+Y方向に進展した亀裂上にある。各センサーのP波初動の極性は図-13

(a)(b)と同様、押し波と引き波が混在し、せん断破壊を示す4象限型の分布を示す。現在の破壊面は新たに造成された巨視的な亀裂面であるYZ面に近い方向と考えられるから、いずれのAEイベントについても、2つの節面のうち節面Aが現在の亀裂面に対応するものと思われる。+Y方向に亀裂が進展した、55秒以降の他のAEについてメカニズム解を求めたが、図-13(c)(d)に似たせん断破壊を示すメカニズム解が支配的であった。

今回の実験と同じ80cPの粘度を有する油を破碎流体に用いて、既存亀裂のない黒髪島花崗岩を水圧破碎した実験では、引張破壊が卓越する結果が報告されている⁷⁾。図-13(a)(b)に示した3回目のピーク後に発生したAEは、既存亀裂上で発生したAEであり、既存亀裂が水の侵入によりずれて生じたAEと考えれば、せん断破壊型の破壊メカニズムは理解できる。しかし図-13(c)(d)に示したAEは、油の侵入による新規亀裂の造成に伴うAEであり、せん断型の破壊メカニズムを示したことは、過去の実験結果とは異なる。本実験では、すでに述べたようにパッカー内に少量の水が残った状態で破碎流体を油に切り替えた。このため残った水が油に混入し、過去の実験と異なるメカニズムで破壊が生じたのではないかと推測される。このことは、地圧測定結果には直接は影響を及ぼさないとと思われるが、亀裂の発生機構の観点から注意を要する。

4. まとめ

亀裂を有する岩盤における粘性流体による水圧破碎地圧測定の可能性と問題点を明らかにするため、亀裂を有する花崗岩供試体において粘性の高い油を破碎流体に用いて新たな水圧破碎亀裂を造成する室内実験を行った。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 実験では、水を破碎流体に用いて亀裂を造成した供試体を既存亀裂を有する供試体とみなし、最大載荷方向を水で破碎したときと90度逆転させ、水の80倍の粘度を有する油を用いて水圧破碎を行った。その結果、既存亀裂と直交する最大加圧方向に新規亀裂が造成された。このことから、亀裂を有する岩盤において粘性流体を用いれば水圧破碎地圧測定が基本的に可能であることが明らかとなった。
- (2) 油による水圧破碎では、小さな圧力のピークと低下を3回記録し、4回目の圧力ピーク後大きな圧力低下が生じた。震源決定の結果から、最初の3回の圧力低下はパッカー内に残っていた水が既

存亀裂に浸入したためと思われる、4回目の大きな圧力低下は新規亀裂が発生したためと思われる。従って、粘性流体を用いた水圧破碎の圧力記録においては、最終的な大きな圧力低下を示す直前の圧力値が、新規亀裂の破碎圧に対応するといえる。

- (3) 3回目の圧力低下時に既存亀裂上で発生したAEと、4回目の圧力低下時に新規亀裂上で発生したAEのメカニズム解を求めたところ、いずれもせん断型の破壊を示した。過去の実験では、破碎流体に水を用いた場合には今回と同様せん断破壊を生じるが、粘性の高い油を用いた場合には引張破壊のメカニズムが報告されている。このことから、油による新規亀裂の造成時にもせん断破壊のメカニズムが得られたのは、パッカー内に残っていた水が影響を与えたためではないかと思われる。このことは、地圧測定結果には直接は影響を及ぼさないとと思われるが、亀裂の発生機構の観点から注意を要する。
- (4) 以上のことから、亀裂を有する岩盤においても粘性の高い流体を利用することにより、既存亀裂の影響を受けずに新たな水圧破碎亀裂発生させ、地圧測定を行える可能性のあることが明らかとなった。しかし、粘性の高い流体を破碎流体に用いる場合、破碎流体内に水が混入しているとその水が既存亀裂に浸入し、複数のピーク圧力を示すなど圧力記録の解釈が複雑になること、また新規亀裂の造成時の破壊メカニズムにも影響を与えるため、できるだけ水の混入を避けることが望ましいことがわかった。今後この研究の成果に基づき、現実の現場測定に適用可能な測定法の開発を行っていきたいと考えている。

謝辞: 本研究の実施にあたり、当時山口大学工学部社会建設工学科4年生に在学した中島雅子さん(現在、岡山県土木部)の多大な協力を得た。ここに記して深く感謝の意を表するものである。

参考文献

- 1) Cornet, F. H. and Valette, B.: In situ determination from hydraulic injection test data, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, No. B13, pp. 11527-11537, 1984.
- 2) Zoback, M. D., Rummel, F., Jaug, R. and Raleigh, C. B.: Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pre-fractured rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst.*, Vol. 14, pp. 49-58, 1977.
- 3) 工藤洋三, 橋本堅一, 佐野修, 中川浩二: 石工の経験則と花崗岩の力学的性質, 土と基礎, 第34巻, 第343号, pp. 47-51, 1986.
- 4) Kirsch, C.: Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol. 42, pp. 797-807, 1898.
- 5) Schmitt, D. R. and Zoback, M. D.: Infiltration effects in the tensile rupture of thin walled cylinders of glass and granite: Implications for the hydraulic fracturing breakdown equation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst.*, Vol. 30, pp. 289-303, 1993.
- 6) Gragash, D. and Detournay, E.: An analysis of the influence of the pressurization rate on the borehole breakdown pressure, *Int. J. Solid Structures*, Vol. 34, No. 22, pp. 3099-3118, 1997.
- 7) 石田毅, 陳梁, 水田義明: AEデータから推定される水圧破碎における破碎流体の粘性の影響, 土木学会論文集, No. 547/III-36, pp. 183-198, 1996.
- 8) Rothman, R. L., Greenfield, R. J. and Hardy, Jr. H. R.: Errors in hypocenter location due to velocity anisotropy, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 64, No. 6, pp. 1993-1996, 1974.
- 9) 佐藤嘉晃, 勝山邦久: 縦波伝播速度の異方性がある場合のAE震源の数値解析法, 採鉱と保安, Vol. 31, No. 6, pp. 291-298, 1985.

(2001. 12. 4 受付)

ACOUSTIC EMISSION MONITORING OF A NEW CRACK GENERATION
BY VISCOUS FLUID INJECTION IN A GRANITE SPECIMEN
HAVING A PREEEXISTING JOINT

Yoshiki NAKAYAMA, Tsuyoshi ISHIDA, Yasuhiro OHIKE and Yoshiaki MIZUTA

Water was injected into a borehole and generated a crack in a biaxial loaded granite specimen. After that, regarding the crack as a preexisting joint, the maximum loading direction was turned with 90 degree and viscous oil having 80 times larger viscosity than that of water was injected into the borehole. Located sources of acoustic emission indicated that a new crack was generated in the direction normal to the preexisting joint after water remaining in the borehole seeped into the preexisting joint with several small pressure drops. The results clarify the possibility to measure stress state generating a new crack by using viscous fracturing fluid, even in a rock mass having preexisting joints.