

[討議・回答]

陳 渠
石田 毅
佐々木俊二 共著
松永 烈
水田義明

“花崗岩の粒径が水圧破碎の破壊機構 に及ぼす影響について”への討議・回答

(土木学会論文集 No. 589/III-42 1998年3月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

—— 大津政康 (熊本大学)

Masayasu OHTSU

1. はじめに

高温岩体発電における熱変換のシステムは水が媒体であることより、熱水境界の形成と開発に関して水圧破碎による破壊面の生成過程の解明は非常に重要であると考えられる。本論文は、その破壊面の形成過程をアコースティック・エミッション (AE) により検討し、岩体の粒径と破壊モード及び機構の差異を明らかにした非常に価値ある論文と高く評価できる。ただし、結果に関して普遍性に問題が感じられ、それを踏まえた考察について不明確な点があると思われる為、討議をお願いする次第である。

2. 水圧破碎の亀裂面の方向と粒径

水圧破碎は膨張水圧を孔壁に作用させた場合に、膨張圧が岩体の引張強度に達した時点で破壊が開始されると考えられる。この際に応力状態を主に考察すれば、拘束圧の最も小さな方向に引張応力が発生し得るため、それに直角な方向に引張破壊面が形成されると考えられる。

筆者等の結果によれば、このような理論に従うのは粒径の小さな花崗岩の場合であり、粒径の大きな場合には、拘束圧とは無関係にリフト面に沿った破壊面が形成されたと報告されている。これは、非常に示唆に満ちた新たな知見と考えられる。ただし、破壊現象につきものの寸法効果についての検討はなされていないため、粒径と供試体寸法との関係の不明な点が残念である。これについては今後検討をお願いするものである。

3. 水圧破碎の破壊機構

筆者等が指摘している事実によれば、水圧破碎実験では最終破壊として、目視観察では引張破壊面が主に

観察される。ところが、従来からの AE 波動の観察ではせん断破壊の発生が主に観察されるという矛盾があるりとされている。これについてはメカニズム解によって考察がなされ、粒径による破壊モードとの関係が述べられている。ただし、そのデータ分析は普遍性において十分ではなく、以下に述べるような異なる捉え方も可能と考えられる。

4. モーメント・テンソル解による考察

地震学の分野から始められた P 波初動の向きに依存するメカニズム解では、例えば 1 つの計測点でも逆位相が得られれば、破壊機構はせん断と見なされるが、それは妥当な取り扱いであろうか。討議者が提案しているように²⁾、本来メカニズムを推定するには、モーメント・テンソル解を求める必要がある。その理由は、破壊機構の定量的な判別にモーメント・テンソルの固有値解析が有効なためである。引張とせん断の両成分が含まれる混合モードの破壊機構の場合に引張の寄与率 ($Y+Z$) とせん断の寄与率 (X) として、次のように固有値が分解可能なことを明らかにしている²⁾。

$$1.0 = X + Y + Z$$

$$\text{第 2 固有値/第 1 固有値} = 0 - 0.5Y + Z \quad (1)$$

$$\text{第 3 固有値/第 1 固有値} = -X - 0.5Y + Z$$

せん断寄与率 X が 0 で、 $Y=0.5$ 、 $Z=0.5$ ならば (引張 100%)、明らかに式 (1) の 3 式の左辺は正となり、 P は初動の位相は揃うことになる。また、 $X=1.0$ (せん断 100%) では、3 式の左辺は 1.0、0、-1.0 と位相の逆転が見られる。ところが、 $X=0.3$ 、 $Y=0.4$ 、 $Z=0.3$ を仮定すれば、せん断寄与率 (X) が 30% に過ぎないことから引張破壊であるにもかかわらず、式 (1) の 3 式の値は 1.0、0.1、-0.2 となり、位相逆転が認められる。これが、P 波初動のみからメカニズム解を求める場合の問題点として指摘できる。

地震などのように断層破壊が主であり、限られた計

測点である程度大きな地震しか明確な波形が記録できない場合には、メカニズム解による分析法も有効と考えられる。しかし、数千個にも及ぶ事象が容易に計測でき、かつ発生機構が引張もせん断もありうる AE 波形の場合に、メカニズム解による考察は必ずしも妥当ではないのではないか。その意味で、討議者は、従来からの不十分な計測と分析で得られている AE 波形のメカニズム解はせん断型が主であるという結論は誤った知見と考えている。筆者等のデータで、6 チャンネル以上の計測点で AE 波形の記録された事象については、是非、モーメント・テンソル解による考察を今後お願いしたい。

5. 本論文の考察への疑問点

水圧破碎でのマクロに観察される引張破壊に対して、何故 AE の解析によればせん断破壊が卓越して見られるかについては、筆者等の Hill のモデルに基づいた考察は妥当であるとは考えられる。しかし、粒径の大きな供試体のリフト面での破壊機構はせん断破壊であり、粒径の小さな供試体の拘束圧の低い面での機構は、引張破壊とメカニズム解により検証されたと言う点には問題があると思われる。それは、それぞれの供試体においてわずかに 5 個の AE 事象に対するメカニズム解を用いての考察であり、全体に対する考察としては不明確さをぬぐえない。AE 震源分布の事象数からすれば、この程度ではメカニズム解による機構解明への取り組みは、かなり普遍性を欠いていると考えられる。

例えば、筆者等によって実施された原位置試験の結果に関するモーメントテンソル解³⁾を示せば、図-1 のようである。図左下に示す方向に断層面が検出されていることから、これは本モデル実験でのリフト面での破壊に対応すると考えられる。×印で示すせん断破壊源と矢印で示す引張破壊源の分布は、明らかにその断層面に沿っている。筆者等の考察では、この場合にはせん断破壊が主に見られるとされているが、いずれの破壊も認められ、これが実際の水圧破碎での破壊機構と考えられる。

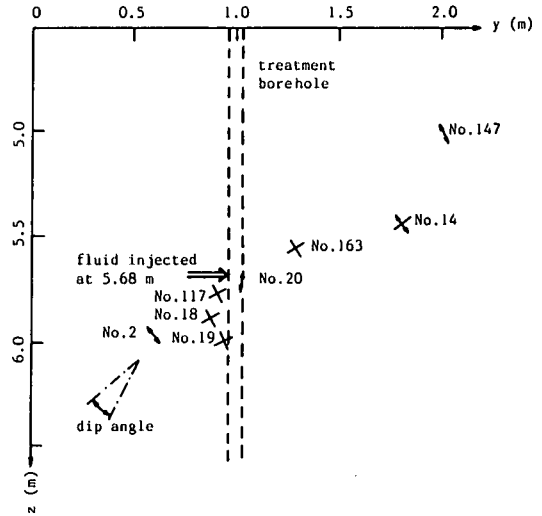


図-1 原位置水圧破碎試験のモーメント・テンソル解析結果³⁾

6. むすび

以上、該当論文について、質問をさせていただいたが、この討議は本論文の内容の不十分と思われる点を指摘したものであり、貴重な成果が今後の研究の深化に有益となるように不明確な点を検討いただければ幸いである。

参考文献

- 1) Talebi, S. and Cornet, F.: Analysis of the microseismicity induced by a fluid injection in a granite rock mass, *Geophysical Research Letters*, Vol. 14, 227-230, 1987.
- 2) Ohtsu, M.: Acoustic emission theory for moment tensor analysis, *Research on Nondestructive Evaluation*, Vol. 6, 169-184, 1995.
- 3) Ohtsu, M.: Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of acoustic emission source, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, No. B 4, 6211-6221, 1991.

(1998.6.26 受付)

▶回答者 (Closure)

石田 毅 (山口大学)・佐々木俊二 (電力中央研究所)

Tsuyoshi ISHIDA and Shunji SASAKI

感謝申し上げます。

さて、討議者の主要な指摘は、著者らが考察に用いた AE (アコースティック・エミッション) の P 波初動の押し引き分布に基づくメカニズム解析 (断層面解析) が、討議者が提案し使用されているモーメント・

1. はじめに

最初に、著者らの研究について貴重なご指摘をいただいたことに対し、討議者ならび論文集編集委員会に

テンソル解析に比べて、原理的に不十分であるとの指摘と思われる。そこで、この指摘に対して共著者中2名の見解を明らかにすることで、討議に対する回答としたい。なお、討議者から頂戴した他の指摘に対しては、最後にまとめて簡単に見解を述べる。

2. 観測者の立場からみたモーメント・テンソル解析の問題点

討議者の指摘の通り、メカニズム解析においては、せん断破壊か引張破壊かいわば黒か白の判断しかできず、1つの計測点でも逆位相が得られれば、破壊機構はせん断とみなされるのは事実である。この点、せん断と引張の中間的な破壊に対して、せん断成分と引張成分の混合割合を定量的に示すことのできるモーメント・テンソル解析は、原理的にはるかにメカニズム解析よりも優れているといえる。さらに、どちらがどちらとは言えない2者択一的な表示ではあるが、破壊時の変位方向を亀裂面(断層面)の方向とともに表示できるのも、モーメント・テンソル解析の優れた魅力である。

ではなぜ著者らが、モーメント・テンソル解析ではなく、メカニズム解析を用いているか。それは、観測者の立場からみてモーメント・テンソル解析の解析結果を保証する良好な波形データの取得が、現場でももちろんのこと、実験室においても、一般に現状では非常に困難であると考えているからである。

モーメント・テンソル解析が、メカニズム解析より解析結果においてより詳細な情報を提供できるのは、解析の入力に用いる情報量がメカニズム解析の場合より多いからである。すなわち、メカニズム解析では、各センサーで観測したP波初動が押しであるか引きであるかの極性だけをデータとして用いるのに対し、モーメント・テンソル解析では極性だけではなく初動の振幅値を用いる点に特徴がある。しかし、この振幅値を精度よく測定するのは、主に次の2点で容易ではない。

(1) 全チャンネルでセンサー感度を同一とすることの困難性

モーメント・テンソル解析では、多数のセンサーで観測したP波初動の振幅の相対的な大きさの違いに基づいて解析を行うため、全チャンネルでセンサー感度が同一であることが前提となる。しかし、たとえ市販されているセンサーの感度が同一であっても、センサーと供試体との接着の状態、例えば接着面に広がった接着剤の面積や厚さによって各センサーの感度は異なってくる。Fig. 1は、48×48×90 mmの花崗岩の

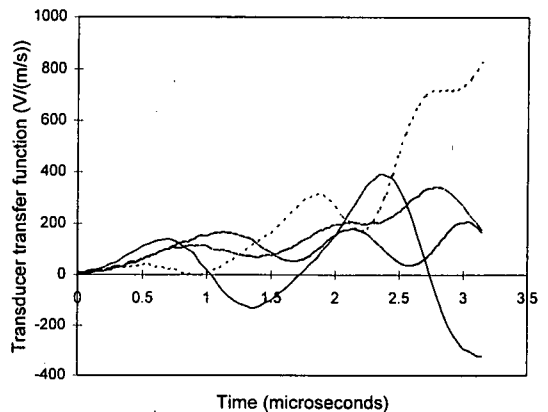


Fig. 1 Transfer functions for four AE sensors^{1),2)}.

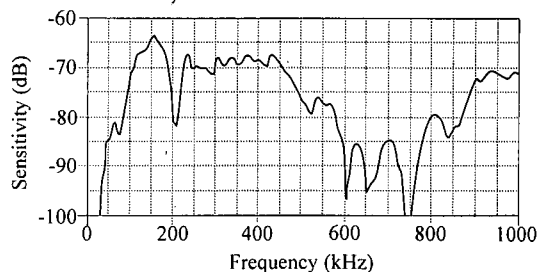


Fig. 2 Frequency response of an AE sensor.
(R 15 type, produced by Physical Acoustics Corporation.)

供試体に設置した同じ種類の圧電素子型 AE センサー4個の伝達関数を求めたものであるが、応答の違いが顕著である^{1),2)}。この図を示した Shah は、全く同一のセンサーを同じ量の接着剤を用いて、同じ圧力で同じ時間押し付けて供試体に接着し直しても、伝達関数が変わることも指摘している²⁾。

(2) 測定系の周波数特性の問題

モーメント・テンソル解析は地震の観測波形に対して多用されているが、地震観測で対象としている10 Hz以下の周波数では、周波数に対してほぼ一定の感度(周波数特性)を有する測定システムを使用することが可能である。しかし、数10 kHz以上という地震観測に比べて極めて高い周波数を対象とするAEの測定では、周波数に対して一定の感度を有する測定システムを使用することは困難である。例えば、Fig. 2は著者らが室内実験で使用することが多い、共振周波数150 kHzのAEセンサー(Physical Acoustics Corporation製、R 15型)の周波数特性の一例であるが、周波数に対して感度が大きく変化することがわかる。従って、各センサーで測定される周波数が異なれば、初

動の振幅値は異なってくる。

これらの2点以外にも、波動伝播経路における亀裂や、震源での破壊方向とセンサーの位置関係の違いも測定される振幅値に影響を与える。室内実験における岩石供試体の場合、実験の進行に伴い供試体内部に亀裂が発生し進展していく場合が多い。原位置岩盤の場合には、既存亀裂が存在するのが普通である。これらの亀裂が、AEの震源からセンサーまでの間に存在すれば、初動の振幅値は影響を受けやすく、亀裂のない場合に観測される振幅値と異なることが予想される^{3),4)}。また、震源において unilateral な破壊、すなわち、一方向に進行する破壊が生じる場合、破壊の進行方向にあるセンサーには大きな初動振幅が、逆方向にあるセンサーに小さな初動振幅が観測される⁵⁾。

このように初動の振幅値に誤差が含まれる可能性が高いため、回答者はモーメント・テンソルをあらかじめ決めて観測されるP波初動の振幅値を理論的に計算し、これに誤差として乱数を加え、モーメント・テンソルを逆算したことがある。その結果、わずかな誤差を与えただけで逆算されるモーメント・テンソル値が大きく変化してしまう傾向がみられた。

また一般に、初動極性よりもさらに高い精度が必要な振幅値を、未知数の5個（本来、未知数は6個であるが、モーメント・テンソルの成分相互の比率を求めれば解は得られるから、この意味で未知数は5個である。）を上回るセンサーで読み取れるAEイベントはそれほど多くない。また解析結果が得られた場合、その結果から現象を解明するには、何らかの基準に基づき信頼性の低いデータを棄却することが必要不可欠であるが、モーメント・テンソル解析の場合この点に適切な基準を見出しにくい。一方メカニズム解析の場合、得られた解の信頼性は波形上で初動の押し引きが明瞭か否かと、ステレオ・ネット上の押し引きの分布の特徴から、ある程度視覚的に判断できる。これも、回答者がモーメント・テンソル解析を用いずメカニズム解析を用いる理由のひとつである。

なお、討議者が図-1に示しておられる原位置水圧破碎試験⁶⁾のデータは、回答者らが実施した実験結果⁷⁾の観測波形を討議者に提供したものであるが、観測者の立場から申し上げて、残念ながら上述の問題が含まれたものであることを申し添える。

3. モーメント・テンソル解析の実用化への期待と今後の課題

最初に述べたように、モーメント・テンソル解析を用いた方がメカニズム解析を用いるより、破壊に関してより多くの有用な情報が得られるのは、回答者らも

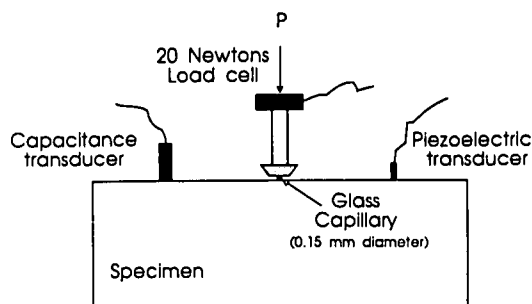


Fig. 3 Setup for the calibration of an AE sensor²⁾.

異論のないところである。観測者の立場から、初動の振幅値を精度よく測定するうえでの問題点を2点指摘したが、これらのうち、(1)の感度の問題については、AEセンサーを設置した状態で感度を校正すれば問題がある程度解決すると思われる。

センサーの接着状態によって Fig. 1 のように伝達関数が異なることを指摘した Shah²⁾ は、3軸試験の岩石供試体に AE センサーを設置した後、Fig. 3 に示すように、供試体の表面にガラスの細い管を押しつけて折り、これを発振信号として各センサーごとに伝達関数を求めることを提案している。そして彼は、Fig. 1 の伝達関数を用いて deconvolution を行って得た変位関数と時間依存性を有するモーメント・テンソルの解から得られる変位関数の残差の2乗和が、全センサーについて最小になるようモーメント・テンソルを定めている^{1),2)}。このような方法で感度補正を施して得たモーメント・テンソルの解析結果^{1),2)}、あるいは、伝達関数まで求めなくとも、各センサーの感度を校正した解析結果^{8),9)}であっても、かなり信頼がおけるのではないと思われる。

一方現場での AE 測定についても、モーメント・テンソル解析を行った例が報告されており^{6),10)}、現場測定に適用可能な校正法についても開発が必要であろう。現場での感度校正には、再現性の高い弾性波の発振法が必要であるが、すでに測定波形のスタッピング（足し合わせ）が可能な再現性の高い発振法が高精度の弾性波速度測定技術として開発されており¹¹⁾、この技術が参考になるとと思われる。

先に、わずかな誤差の混入によりモーメント・テンソル解析結果が大きく異なる傾向があると述べた。また個々の AE イベントに対する解析結果の信頼性の評価法についても問題点を指摘した。これらに対しては、討議者らが提案されている方法、すなわち、解析で得たモーメント・テンソルからもう一度測定波形を逆解析し、これを測定波形と比較して解析結果の信頼性を確認する方法¹²⁾が有力な解決策と思われる。こ

の種の研究の発展により、結果の信頼性が簡単にかつ定量的に評価できるようになることを期待するものである。

4. まとめ

回答者は、討議者が提案され適用されてきたモーメント・テンソル解析が AE 測定による破壊のメカニズム解析の進歩に大きな貢献をしてきたことを認め、今後もこの手法が、他の研究者が提案されている類似した手法^{13),14),15)}とともに、さらに発展することを期待するものである。しかし観測者の立場として、モーメント・テンソル解析の前提を満たす信頼性の高い P 波初動の振幅値を測定することの難しさを考えると、回答者が用いているメカニズム解析が、モーメント・テンソル解析と比較して格段に劣るものではなく、測定データと解析手法の限界がほどよいレベルで適合した解析手法ではないかと考えている。今後、この種の討議を重ねることにより、測定手法と解析手法の両面から AE による解析手法の改善をはかることを大いに希望するものである。なお回答者のモーメント・テンソル解析法に対する理解不足から、上記の見解に誤りがあれば、別の機会に是非ご指摘いただきたい。

メカニズム解析手法以外に関する討議者からの指摘のうち、花崗岩の粒径の変化に伴う破壊機構の変化についての一般的な議論をするには、より多くの AE イベントに対し解析を行うべきであるとの指摘については、回答者らの努力不足を率直に認め、今後の研究に反映していきたいと考えている。しかし今回の解析結果に限って言えば、花崗岩の粒径の変化に伴う破壊機構の変化は、亀裂発生方向の変化や破壊圧の変化と合理的に符合し、また以前に報告した破碎流体の粘性の変化に伴う花崗岩の破壊機構の変化¹⁶⁾とも矛盾しないため、より多くの AE データの解析を行っても結論は変わらないと確信している。また粒径と供試体寸法との関係については、検討できるだけの十分な知見を有しておらず、今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) Shah, K. R. and Labuz, J. F.: Damage mechanisms in stressed rock from acoustic emission, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, No. B 8, pp. 15, 527-15, 539, 1995.
- 2) Shah, K. R.: Damage and localization in brittle materials, Ph. D. Thesis in University of Minnesota, 1994.
- 3) 井上博之, 金子勝比古, 佐々宏一, 伊藤一郎: 岩石破壊の進展に伴う弾性波の振幅の減衰, *日本鉱業会誌*, Vol. 94, No. 1083, pp. 323-328, 1978.
- 4) 佐々宏一, 南光宣和, 洪江隆雄: 弾性波を利用する岩盤監視, *日本鉱業会誌*, Vol. 98, No. 1135, pp. 927-931, 1982.
- 5) 笠原慶一: 地震の力学, 鹿島出版会, pp. 91-92, 1983.
- 6) Ohtsu, M.: Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of acoustic emission source: application to in situ hydrofracturing test, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, No. B 4, pp. 6211-6221, 1991.
- 7) 佐々木俊二, 石田毅, 金川忠: 高温岩体発電のための岩盤破碎評価技術の開発——水圧破碎で発生する AE の特性と破壊メカニズム——, *電力中央研究所報告・研究報告*, No. U 86032, 1987.
- 8) 石田毅, Joseph F. Labuz, Ketan Shah, Shongtao Dai: 平面ひずみ 2 軸試験時の AE 観測による円形断面空洞破壊機構の検討, *土木学会第 26 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集*, pp. 301-305, 1995.
- 9) Ishida, T., Labuz, J. F., Shah, K. and Dai, S.-T.: Characterization of failure around a circular tunnel in a laboratory biaxial test, *Proc. of 2nd North American Rock Mechanics Symposium*, Montreal, Canada, pp. 811-817, June, 1996.
- 10) Feignier, B. and Young, R. P.: Moment tensor inversion of induced microseismic events: Evidence of non-shear failures in the $-4 < M < -2$ moment magnitude range, *Geophysical Research Letters*, Vol. 19, No. 14, pp. 1503-1506, 1992.
- 11) 田中義晴, 稲葉力, 平田篤夫, 石田一成, 佐野修: 原位置における高精度弾性波測定システムを用いた岩盤モニタリング, *土木学会論文集*, No. 561/III-38, pp. 185-192, 1997 年 3 月.
- 12) 湯山茂徳, 今中拓一, 天津政康: AE 法による肉盛溶接部はく離の定量的評価, *圧力技術*, 第 25 巻, 第 6 号, pp. 297-303, 1987.
- 13) De Natale, G. and Zollo, A.: Earthquake focal mechanisms from inversion of first P and S wave motions, in *Digital Seismology and Fine Modelling of the Lithosphere* (Cassini, R., Nolet, G., and Panza, G., F., Eds., Plenum Publishing Co.), pp. 399-419, 1989.
- 14) O'Connell D. R. H., and Johnson, L. R.: Second-order moment tensors of microearthquakes at the Geysers geothermal field, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 78, pp. 1674-1692, 1988.
- 15) Carvalho, F. C. S., Shah, K. R. and Labuz, J. F.: Source model of acoustic emission using displacement discontinuities, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 35, No. 4/5, pp. 514-515, Paper No. 35, 1998.
- 16) 石田毅, 陳渠, 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*, 第 547 号/III-36, pp. 183-198, 1996 年 9 月.

(1998.10.20 受付)