AE震源分布からみた静的破碎剤による 破碎における熱応力の影響について*

石 田 毅¹ 福 井 久 明² 田 口 雅 輝³
末 宗 克 浩⁴ 水 田 義 明⁵

Effect of Thermal Stress in the Fracturing by Expansive Cement Agent, Deduced from AE Source Distribution

by Tsuyoshi ISHIDA^a, Hisaaki FUKUI^b, Masaki TAGUCHI^c,
Katsuhiro SUEMUNE^c and Yoshiaki MIZUTA^d

- a. Professor, Kyoto University, Kyoto, 615-8540 Japan
(Corresponding author E-mail: ishida@kumst.kyoto-u.ac.jp / FAX: 075-383-3213)
b. ROX Japan, Co. LTD.
c. Postgraduate student of Yamaguchi University
d. Professor, Sojo University (Emeritus Professor of Yamaguchi University)

Calcium oxide (CaO)-based expansive cement, also known as “non-explosive demolition agents”, has been widely used to fracture massive rocks and concrete structures. When water is added to expansive cement, calcium oxide reacts with water, and changes into calcium hydroxide expanding 1.96 times larger in volume with generating heat. In previous researches, although expansive pressure due to the volume increase has been only focused, effect of thermal stress induced by the heat has not been carefully discussed. In this meaning, the fracture mechanism of calcium oxide-based expansive cement has not been clarified.

To clarify the fracture mechanism, the authors made an experiment to fracture a mortar specimen of 300 mm cubic by setting a calcium oxide-based expansive cement in a 48 mm diameter hole bored in the center of the specimen. AE (acoustic emission) sources clustered on a middle part of the shortest line between the borehole wall and one of the lateral surfaces, just before macroscopic cracks generated. This suggests that macroscopic cracks originated between the borehole wall and the lateral surface rather than the vicinity of the hole. From the elastic theory, although the expansive pressure causes tensile stress in tangential direction of the hole, the stress is the maximum at the hole-wall and decrease in proportion to square of the distance from the hole. On the other hand, thermal stress due to heating of the hole is tensile away from a certain distance from the hole. Thus, it could be concluded that thermal stress has large effects in the fracture caused by the calcium oxide-based expansive cement, at least, in a rock or concrete block without preexisting crack.

KEY WORDS: Expansive Cement, Acoustic Emission, Thermal Stress, Fracture, Rock, Non-Explosion

1. は じ め に

住宅に近接している場合など、振動や騒音の発生を抑制しなければならない環境において岩盤やコンクリートを破碎する必要がある際には、静的破碎剤が用いられることが多い。静的破碎剤による破碎では、被破碎体にボーリング孔を穿ち、この孔に生石灰を主成分とする薬剤を充填して水を加える。生石灰 (CaO) は、水との水和反応により消石灰 (Ca (OH)₂) に変化するが、この過程で発熱を伴いながら体積が約 2 倍に膨張するため、この膨張圧により破碎が生じると考えられ、膨張圧に着目した破碎機構の研究

が進められてきた¹⁻⁴⁾。この化学反応においては、生石灰 1 モルあたり 15.6kcal の熱を発生する⁵⁾が、熱応力による破碎の影響に着目した研究は著者らの知る限りでは見当たらない。

筆者らは、中心にボーリング孔を穿った立方体のモルタル供試体を用いて 10 ～ 15 分程度で破碎が完了する速効性の静的破碎剤⁶⁾による破碎実験を行い、AE (Acoustic Emission) の測定を行って、亀裂発生メカニズムの検討を行った。その結果、少なくとも転石のような自由面に囲まれた破碎体の場合、膨張圧のみならず熱応力が破碎に大きな影響を与えていることがわかったので報告する。

なお、静的破碎剤にはいくつかの種類があり、破碎まで数時間から 10 数時間かかるいわゆる遅効性静的破碎剤の場合には破碎孔内の温度上昇は小さい。今回の実験では、中心の破碎孔に比べて周囲が空冷される幾何学的形状の供試体を用いて実験を行った点、また、反応が早く進み破碎孔の温度が上昇しやすい速効性の静的破碎剤を用いた点で、熱応力の影響が現れやすい条件になっている。

*2007 年 5 月 7 日受付 9 月 3 日受理

1. 普通会员 工博 京都大学大学院 教授 工学研究科社会基盤工学専攻
2. (株) ロックス・ジャパン 代表取締役
3. 元 山口大学 大学院生 理工学研究科 (現 (株) 構造技研新潟)
4. 元 山口大学 大学院生 理工学研究科 (現 中央開発 (株))
5. 普通会员 工博 山口大学名誉教授、崇城大学教授 工学部エコデザイン学科

[著者連絡先] FAX: 075-383-3213 (京大・石田)

E-mail: ishida@kumst.kyoto-u.ac.jp

キーワード: 静的破碎剤, AE, 熱応力, 破壊, 岩盤, 非発破

Fig.1 Specimen and positions of AE sensors. Dotted lines, U, M and L, indicate thermocouple holes to measure temperature in the specimen.

2. 実験方法

2・1 供試体と破碎方法

実験には、Fig. 1 に示すように、直径 48mm、深さ 260mm の破碎孔を中央に有する一辺 300mm の立方体のモルタル供試体を用いた。供試体には各面に 2 個ずつ合計 12 個の AE センサーを設置した。Fig. 1 に示すように座標系を定めた場合、X, Y, Z 3 方向の P 波伝播速度は $V_x=3.88$, $V_y=3.86$, $V_z=3.92$ km/s であった。また供試体内部の温度を測定するため、Fig. 1 に U, M, L で示すように、供試体の一側面の中央とその上下 100 mm の位置から直径 10 mm の細孔を 3 本、破碎孔に向けて平行に穿孔した。

破碎孔には、Fig. 2 に断面図を示すように、底部に静的破碎剤を 60mm 充填したのち、圧力計と熱電対を挿入し、さらにこれらと孔壁との隙間に静的破碎剤を充填した。その後、静的破碎剤に水を加え、飛散に対する安全対策のために供試体の上部からアクリル製の防護箱とネットをかぶせた。

実験に用いた静的破碎剤は 10 ～ 20℃ 程度の気温での使用に適するロックトーン 1020 型（河合石灰工業（株）製）である。実験環境は気温 17.5℃、湿度 48%、加えた水の温度は 15.0℃ であった。破碎孔の体積は 470cm³、圧力計の体積 24.5cm³ であり、熱電対の体積を無視すると破碎剤の充填体積は 446cm³ であった。ここに破碎剤 625g（単位体積当たりの破碎剤量 1.40g/cm³）を充填し、水 215g を加えたため、静的破碎剤に対する水の重量比は 34.4% となった。

2・2 温度と膨張圧の測定方法

破碎孔内の温度の測定は、防水のため二重管スミチューブで先端を保護した直径 0.32mm、測定温度範囲 -200℃ ～ 400℃ の T 型熱電対を用い、次に述べる膨張圧測定用の圧力計の表面に沿わせて固定し、Fig. 2 に示した孔内の TC1, TC2, TC3 の 3 点で行った。供試体内部の温度は、Fig. 1 に U, M, L で示した直径 10mm の各孔に、Fig. 3 に示すように 9 本ずつ熱電対を挿入し、孔内にセメントミルク（水－セメント比＝50%）を充填して測定した。これらの熱電対埋設孔の孔底が破碎孔の孔壁に貫通すると、孔内温度が熱伝導だけではなく物質移動によっても上昇し、供試体の他の部分より高温となることが危惧されたため、余裕を見て穿孔を破碎孔の孔壁から 21mm の位置までにとどめた。最深部 No.1 の熱電対の位置（温度測定点）は、セメントミルクの充填を確実にするため、孔底からさらに 5mm 離れた位置としたため、破碎孔の孔壁から 26mm の位置となった。No.1 ～ 8 は 10mm 間隔で、

Fig.2 Expansive cement, and thermocouples and a pressure transducer set in the hole.

Fig.3 Positions of measuring points in the thermocouple holes, U, M and L.

No.8 ～ 9 は 15mm 間隔で設置した。なお以下では孔内測定点を上中下 (U, M, L) と No.1 ～ 9 と組み合わせ U1, M1 等とよぶこととする。また U 孔と M 孔、M 孔と L 孔のそれぞれ中央の供試体側面に熱電対を貼り付け、供試体表面の温度を測定した。

膨張圧の測定には原田ら³⁾が開発し、（株）東京測器研究所が KPJ-60MPS 型として販売している圧力計を用いた。これは、直径 12.5mm、長さ 150mm の金属製円筒のほぼ中央断面（先端から 75mm の断面）の内側に 2 枚のひずみゲージを貼付したものであり、この断面を中心とした長さ 72mm の範囲が受感部で、最大容量は 60MPa である。測定ひずみから膨張圧への変換には、製作メーカーが示している静水圧試験による校正係数を用いた。今回の実験では、後で述べるように破碎孔内温度が 100℃ を超えることから、温度が圧力計に与える影響を確認しておく必要がある。そこで、製作メーカーの協力を得て、圧力計を電気炉に入れ無圧状態で温度を室温から 120℃ まで上昇させる試験を行った。その結果、温度上昇に伴い 0.02MPa/℃ の割合でほぼ直線的に圧力値の上昇を示すことがわかったため、破碎孔内の温度測定結果に対応する補正値を計算し、その値を差し引いたものを破碎剤の膨張圧とした。

膨張圧は 0.1 間隔で、温度は 1 秒間隔で測定して記録した。

2・3 AE の測定方法

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。このセンサーを、加熱して溶接させたワックス（（株）エヌエフ回路設計ブロック製、エレクトロニクス）を用いて、供試体の各面に 2 個ずつ、合計 12 個接着した (Fig. 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、メインアンプで 30dB、合計 70dB 増幅し、しきい値を 250mV に設定して、0.1 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 波形を収録すること

Fig.4 Changes of temperature, pressure and AE count rate with the elapsed time.

が必要であるが、静的破碎剤による破碎では主要な亀裂が短時間に進展し、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さなく収録できるAE測定装置が必要となる。そこで、分解能8bit、記録長2048byteのA/D変換機を12ch搭載し、DRAM (Dynamic Random Access Memory) にデータを記録することにより、最大16384個のAEの波形を連続的に収録できるAE装置⁷⁾を使用した。今回の測定ではサンプリングタイムを0.2 μ sに、また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)によるノイズを防ぐため、不感時間をAEの測定データ長409.6 μ s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、静的破碎剤による破碎の亀裂進展を十分観測することができる。また、震源決定できる良質なAE波形を選択的に収録できるよう、破碎孔をはさんでほぼ対角線の位置にある少なくとも1組のセンサーで受振したAE波形を取り込むAE波形収録のための論理を設定した。具体的には、AEセンサー番号が3と6、4と10、8と9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変換機にトリガーをかける論理を設定した。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

3・1 実験経過と測定値

実験中は、飛散防止のためのアクリル製の防護箱とネット越しに供試体を観察するとともに、破碎孔の温度と前述の波形収録の

論理を満たして収録されたAEイベントの数をモニター用の記録として利用した。破碎剤を充填した破碎孔に水を注入した2分後に各測定を開始したので、この時刻を実験開始時刻とした。実験開始1分50秒に、AEイベント6個の波形を初めて収録したが、この時点では供試体に目立った変化はなかった。実験開始4分20秒に、破碎孔上面から破碎剤が盛り上がってきたのを確認した。その後、少しずつ破碎剤の反応が進み、8分8秒には破碎孔の温度は約60℃まで上昇し、AEイベント60個の波形を収録した。実験開始約11分30秒で破碎剤の反応が急激に激しくなり、実験開始約12分で合計200個を超えるAEイベントの波形を収録した。実験開始12分26秒に、バキバキという音とともに巨視的亀裂の発生を目視で確認した。

Fig. 4は、上から順に(a)破碎孔内部の3点で測定した温度、(b)膨張圧、(c)リングダウン法で計数したAE発生頻度を示す。横軸はいずれも経過時間であり、上述の実験開始時刻を0秒としている。

Fig. 4 (a)の破碎孔内の温度を見ると、実験開始後8分程で、破碎孔内の温度は約60℃まで上昇し、12分経過後さらにやや急激な上昇を示している。

Fig. 4 (b)の膨張圧の変化をみると、破碎孔内の温度が60℃に達した実験開始後8分以降、温度上昇に伴ってやや急激な圧力の上昇を示している。測定データを詳細に調べると、熱電対TC2が120.8℃の極大値を示した12分22秒の2秒前の12分20秒に最大値23.5MPaを記録した後、約1秒間ほぼこの圧力を維持した後、急激に低下を示していることがわかった。さらにその5秒後の12分26秒に、大きな破壊音とともに明瞭な巨視的亀裂が生じ、供試体は真2つに破壊された。従って、この膨張圧の低下は亀裂の発生により圧力が解放されたことによるものと思われる。なお、ここに示した膨張圧は先に述べた温度補正を行っている。

以下では膨張圧が最大値を示した後急激に低下した12分20秒を破壊時刻と呼ぶことにする。なお12分20秒における破碎孔内の温度の測定値は、TC3, TC2, TC1の順に86, 117, 99℃であった。

Fig. 4 (c)に示したAEの発生頻度は、各センサーについて0.1秒毎に記録された発生頻度から、全センサーの1秒毎の平均値を求めて対数で表示したものである。この図に見られるように、AEの発生は測定開始直後からカウントされているが、経過時間8分くらいまでは、温度と膨張圧が徐々に増加しているものの供試体に目立った変化はなかった。また前述の論理を満たして波形が収録されたAEイベントもほとんどなかったため、供試体の対角線の位置にある2つのセンサーに同時に波動が到達するようなエネルギーの大きなAEの発生はなかったと思われる。従ってこの時期までのAEは、供試体の破壊に伴うAEではなく、破碎孔内で破碎剤が水和反応によって膨張し、押し合って生じた微小な振動が原因ではないかと考えられる。その後10分を経過するころから断続的にAEが激しく発生しはじめ、温度や膨張圧が極大値を示した直後の12分22.5秒には、0.1秒間に11309個の発生頻度の最大値を記録した。図に示した1秒間の平均値を見ても、この時刻にはそれまでの1000倍近い1秒間に10万個近い発生頻度を記録していることがわかる。なおFig. 4の上部に矢印で範囲を示したI～IV期は、後に示すAE震源分布の時間的変化を検討する際の期間の区分を示す。

実験後に観察した亀裂のスケッチをFig. 5の供試体表面の展開図に示す。このように、2側面と破碎孔をつなぐY方向に亀裂が生じ、供試体は真2つに破壊された。

3・2 AE震源の空間分布とその経時変化

AE震源は、P波速度の異方性を考慮し^{8,9)}、P波初動の到達

Fig.5 Visible cracks observed on the surfaces of the specimen after the experiment.

時間から求めた。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 走時残差の絶対値は $(|t_i - T_i|)$ 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300mmであり、供試体の破壊を震源分布から考察するためには震源決定誤差がその4%の12mm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3.9km/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12mm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12mm程度と推定される。

上記の震源決定の条件を満たした330個のAE震源を●印でFig. 6に示す。先に述べたように、破壊時刻は便宜上膨張圧が最大値を記録した実験開始後12分20秒後としたが、この圧力はその後約1秒あまり維持され、その後急激に低下した。大きな破壊音が聞こえたのはさらにその5秒後の12分26秒であった。破壊時刻の2.3秒後の12分22.3秒までは、震源決定可能なAEが収録されていたため、Fig. 6はこの時刻までのAE震源を示している。なお、12分22.3秒以降は多くの波形が重畳して初動が読み取れない状態となり、震源決定できるAEは収録されていないかった。

さて、Fig. 6の左上のXY平面図を見ると、AE震源は $Y=300\text{mm}$ の供試体側面の X 座標160mm付近から破砕孔まで、 Y 方向にほぼ直線的に分布している。AE震源の空間分布は、Fig. 5のこの部分の亀裂の位置とよい一致を示していることが分かる。一方、 $Y=0\text{mm}$ の供試体側面と破砕孔の間には亀裂が発生しているが、対応する位置にAE震源の分布がみられない。この亀裂が、 $Y=300\text{mm}$ 側の亀裂が発生した後に発生したと考えると、この亀

Fig.6 Distribution of AE sources through the experiment.

裂の発生に伴うAE波動は先に発生した亀裂のために伝播が妨げられた、あるいは、先に発生した亀裂の摩擦などによるノイズに埋もれ、震源決定できる初動の明瞭なAE波形が収録できなかったと考えることができる。以下では、この仮定に基づき、破砕孔と $Y=300\text{mm}$ の側面の間に発生した亀裂に限って、その発生機構を論じることとする。なお、破砕孔内部に対応する位置には多くの震源が決定されたが、左上のXY平面図にこれらをそのまま図中に示すと破砕孔の位置が不明瞭となり亀裂進展に関する議論が困難となる。このため、ZYおよびZX平面図についてはそのままプロットしたが、XY平面図だけについては破砕孔内部に決定された震源を削除している。

AE震源分布の変化を詳細に検討するため、Fig. 6の空間分布をFig. 4の上部に示したI～IV期の4つの期間に区分してFig. 7(a)～(d)に示す。Fig. 7(a)を見ると、I期（実験開始～11分50秒）には、AE震源は最小抵抗線（破砕孔と端面を結ぶ最短距離）の4方向および破砕孔周辺にまばらに分布している。この4方向に分布するAE震源のうち、 $Y=300\text{mm}$ の供試体側面近傍に分布する5個の震源の位置は、この後に震源が集中する位置に一致しており、巨視的亀裂の発生に先立つAEの可能性もある。Fig. 7においてもFig. 6と同様、破砕孔内部に決定された震源をXY平面図には示していないが、ZYおよびZX平面図をみるとこの時期、破砕孔内の底部に対応する位置に多くの震源が分布していることがわかる。これらのAEは、破砕剤が水和反応によって膨張し破砕孔内でひしめき合って発生したものと思われ、震源決定の誤差が12mm程度であることを考え合わせると、XY平面図の破砕孔周辺に分布するAEのいくつかは、破砕孔内で発生した破砕剤のAEが誤差のためプロットされている可能性がある。

膨張圧が急激な低下を示した破壊時刻12分20秒の30秒前から8.5秒前に対応する第II期（11分50秒～12分11.5秒）に入ると、AE震源は供試体側面付近や破砕孔周辺に分布せず、破砕孔から+Y方向の最小抵抗線に沿う Y 座標190～290mmの間に密に分布し、この分布位置は巨視的亀裂の発生位置に一致する。

破壊時刻の8.5秒前から5秒前に対応する第III期（12分11.5秒～12分15秒）に入ると、震源集中域は破砕孔の方向には拡大しないが、側面方向に向かって拡大しII期には発生しなかった $Y=290\sim 300\text{mm}$ の範囲にAEの発生が見られる。

破壊直前の5秒間と直後の2.3秒間である第IV期（12分15秒～12分22.3秒）には、ついに破砕孔周辺にも震源集中域が拡大し、供試体側面から破砕孔にまで震源集中域が連続する。

Fig.7 Change of AE sources distribution from the period I through IV.

Fig.8 Change of coordinates of the located AE sources with the elapsed time.

このような AE の震源分布, 特に II 期及び III 期の震源分布に注目すれば, 亀裂は破砕孔から進展したのではなく, 供試体側面と破砕孔の中間的な位置から発生したと思われる。

Z 方向の震源分布を ZY および ZX 平面図でみると, I 期には破砕孔内の底部に対応する位置に多くの震源が分布しており, これらの AE は, 水和反応による膨張に伴って発生した破砕剤の AE と思われる。II 期になると震源は一転して供試体上部に集中し, 上端部の破砕孔周辺から Y=300mm の側面付近の上半分に向けて平面状に広がる傾向が見られる。III 期から IV 期にかけては, この平面状の分布が徐々に下部に広がる傾向が見られる。このことは, 供試体の破壊が供試体上部から底部に向け, 裂けるように発生したことを示唆している。

AE 震源分布の経時変化を検討するため, 横軸に時間 (min) をとり, 縦軸に X, Y, Z の各軸 (mm) をとり, AE の震源座標を○印でプロットした時空間分布を Fig. 8 (a) (b) (c) に示す。これらの図には, 破砕孔内に決定された震源も削除することなく示している。Fig. 8 (a) の上部に示した I ~ IV 期は, Fig. 7 の震源分布の検討の際に用いた時間範囲の区分を示す。Fig. 8 (a) (b) の中央部の 2 本の実線は破砕孔の孔壁の位置を示すが, I 期の AE 震源はこれらの図に示すように破砕孔内に分布していることから, 先に述べたように, 破砕剤が水和反応により膨張しひしめき合うことで発生したものと考えられる。II ~ IV 期は膨張圧・温度・AE 発生頻度に急激な変化が見られる時期に対応するが, Fig. 7 (b) に示

Fig.9 Illustration of P-wave radiation pattern with shear fracture.

Table 1 Numbers of the AE sources classified into the three fracture modes for each period.

Period	I	II	III	IV	Total
Tension	5	18	44	55	122
Shear	4	0	4	8	16
Implosion	14	1	1	3	19

すように Y 方向に広く分布し、この時期に巨視的亀裂が発生したことを示している。

3・3 AE 震源のメカニズム解析

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、初動が震源に向かうか遠ざかるかによってそれぞれ引き波、押し波のいずれかの極性を有している。いま Fig. 9 のように、最大圧縮主応力の方向が P 方向、最小圧縮主応力の方向が T 方向から作用し、原点 0 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。これに対し引張破壊 (Tension 型破壊) や爆発的な破壊 (Explosion 型破壊) の場合には、すべての観測点で押し波が観測される。一方、真空管の破裂、空洞の陥没のように周辺の媒体が内側に引っ張り込まれるような圧壊型破壊 (Implosion 型破壊) では、すべての観測点で引き波が観測される。

AE 震源の破壊メカニズムを知ることは、静的破砕剤による供試体破砕がどのように発生しているかを検討する上で有用である。そこで極性値の統計解析¹⁰⁾と断層面解析 (Fault-plane solution)¹¹⁾により破壊メカニズムを検討した。なお、本実験を行うにあたり、厚さ 1cm 程度の鉄板に AE センサーを設置しパチンコ玉を当て、あらかじめ押し波の初動の極性を調べた。その結果、初動のトレースはすべてのセンサーが図の上で下向きを示したので、P 波初動が下向きならば押し波、上向きならば引き波とした。

3・3・1 極性値の統計解析の方法 極性値の統計解析は、イベント毎に、押し波初動が観測された観測点の数と引き波初動が観測された観測点の数をカウントし、その比率から破壊メカニズムを推定する方法である。Zang ら¹⁰⁾は震源決定された各々の AE イベントの破壊形式を式 (1) によって分類することを提案している。

$$pol = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k A_i \dots\dots\dots (1)$$

ここで k は震源決定に用いたセンサー数、 A_i の値は震源決定に用

Fig.10 Y-coordinates of the AE sources classified into the three fracture modes and the pressure change for 32 s just before the macroscopic fracture occurred. The positions of the bars with the numbers in the circles indicate the time when stress distributions are shown in Fig. 11.

いた i 番目センサーが感知した AE 波の P 波初動が押し波なら「-1」、引き波なら「+1」とする。例えば震源決定に用いたセンサー数が 7 個で、押し波初動が観測された観測点の数が 4、引き波の数が 3 であったとすると、式 (1) により、

$$pol = \frac{1}{7} \times (-1+1-1-1+1+1-1) = -0.14$$

となる。破壊形式は引張 (Tension) 型破壊、せん断 (Shear) 型破壊、圧壊 (Implosion) 型破壊の 3 形式に分類されると仮定すると、理論的には pol 値はそれぞれ -1, 0, +1 となるが誤差範囲を許容して次のように分類することとする。なおこの方法では、爆発的な破壊は引張型破壊に含まれるとして取り扱われることになる。

引張 (Tension) 型破壊: $-1 \leq pol \leq -0.25$ (理論値 -1)

せん断 (Shear) 型破壊: $-0.25 \leq pol \leq 0.25$ (理論値 0)

圧壊 (Implosion) 型破壊: $-0.25 \leq pol \leq 0.25$ (理論値 +1)

よって、上述の例の場合はせん断型破壊に分類される。このようにこの方法によれば押し波と引き波がどのような比率で観測されたか計算するだけで破壊形式を単純に分類することができる。もし、ほとんどのセンサーが押し波もしくは引き波の初動を観測したならば、その AE イベントはそれぞれ引張型破壊、圧壊型破壊となる。

3・3・2 極性値の統計解析の結果 AE 震源の決定には 5 個以上のセンサーで初動が読み取れた AE データを用いたが、極性値の統計解析には、震源決定された AE のうち、7 個以上のセンサーで初動の極性値が読みとれる AE データだけを解析の対象とした。解析対象とした AE 震源は 157 個であり、この解析による破壊形式の分類結果は、引張型破壊が 122 個、せん断型破壊が 16 個、圧壊型破壊が 19 個であった。Table 1 に経過時間時間区分毎に破壊形式別の AE 発生個数を示す。

多くの AE の震源が決定され、AE 震源分布の変化が明瞭に見られた破壊直前の 30 秒間 (直後 2.3 秒間を含む) である経過時間 11 分 50 秒 ~ 12 分 22.3 秒 (II ~ IV 期) の AE 震源を、横軸に経過時間、縦軸に震源の Y 座標をとり、破壊形式をシンボルで区別して Fig. 10 に示す。この図で①~④の線で示す時刻は、あとで Fig. 11 に示す応力解析を行った時刻である。またこの図の下

Fig.11 Stress distribution in the specimen at the elapsed time, 720, 730, 735 and 742 s. In the middle figure, (b), since the four lines are on top of the others, they look like one line respectively.

には、比較のため膨張圧の変化も示した。この図から、引張型破壊の AE 震源は、II 期では Y 座標 190 ~ 260mm の範囲にしか分布していないが、III 期では供試体端面及び破砕孔に向け徐々に広がり、IV 期になると破砕孔周辺にも分布していることがわかる。また、せん断型破壊は引張型破壊が発生したあとに発生している。これについては引張型破壊によって破壊された部分及び周辺が擦れ合っせん断型破壊の AE と判別される振動を発生した可能性がある。

なお、Table 1 を見ると実験開始から経過時間 11 分 50 秒までの I 期には、他の期間と異なり圧壊型破壊を示す AE が多い。これらの震源は、すでに示した Fig. 8 からわかるように、破砕孔内及び破砕孔周辺に位置している。このうち破砕孔内の AE 震源は破砕剤が膨張し空隙が押し潰されて発生したものと推測される。また、破砕孔周辺の圧壊型破壊は、破砕剤が水和反応により発熱し、モルタル供試体が暖められて膨張し内部の空隙が押し潰されて発生したと考えることができる。

以上のことから、今回の実験で生じた供試体の巨視的破壊は、供試体側面と破砕孔の中間の位置で生じた引張型破壊による微小破壊の集積の結果生じたと思われる。

3・3・3 断層面解析による極性値の統計解析結果の妥当性の確認 著者らは、これまで地下発電所空洞掘削時の岩盤の微小破壊や岩石の水圧破砕メカニズムなどを AE の断層面解析によ

り検討してきたが^{7,12-15}、Zang ら¹⁰が提案した極性値の統計解析法を用いるのは今回が初めてであった。極性値の統計解析法は、主観を排して多くの AE データを単純に分類できる利点を有するが、理論値から 25% の誤差を許容して破壊モードの分類を行っている点や、特にせん断型破壊では、押し引きの分布がせん断破壊で生じる 4 象限分布を示していない場合や、節面が巨視的な破壊面の方向と大きく食い違う矛盾したデータも排除することなくせん断型と分類してしまう点にあいまいさを残している。そこで、極性値の統計解析の対象とした 158 個の AE すべてに対し、従来から著者らが利用している断層面解析を行った。まず引張型破壊と圧壊型破壊に対しては、理論値に対する 25% の誤差を許容せず、すべてのセンサーで押し波を測定した場合だけを引張型破壊、すべてのセンサーで引き波を測定した場合だけを圧壊型破壊とすることにした。せん断型破壊については、ステレオネット上で押し波・引き波を 4 象限に区分でき、かつ節面の方向が巨視的破壊の方向と大きく矛盾しないものだけをせん断型破壊とした。その結果、解析の対象とした 158 個の AE のうち 49% の 77 個は破壊モードの分類ができなかったが、残りの 81 個については、引張型破壊が 70 個、せん断型破壊が 11 個、圧壊型破壊が 0 個と分類された。I ~ IV 期の各期毎にも分類された AE の個数を比べてみたが、傾向として、Table 1 や Fig. 10 に示した結果と大きな違いはなく、今回行った極性値の統計解析の結果は十分に信頼できると思われた。

4. 考 察

今回の実験では、静的破砕剤の膨張圧による応力と反応時の発熱による熱応力が、モルタル供試体内に作用していると考えられる。ここでは、実測値に基づいて供試体内の応力分布を解析し、いずれの応力が供試体の破壊に大きく影響しているかを検討する。

4・1 膨張圧による応力

破砕孔内の膨張圧がモルタル供試体内に働く応力を検討するため、今回用いた立方体のモルタル供試体を内径 a 、外径 b とする半径 r の厚肉円筒と仮定し、次式に示す理論式¹⁶⁾を用いて解析を行った。

$$\sigma_\theta = -\frac{a^2 b^2 (p_0 - p_i)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} + \frac{p_i a^2 - p_0 b^2}{b^2 - a^2} \dots \dots \dots (2)$$

$$\sigma_r = \frac{a^2 b^2 (p_0 - p_i)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} + \frac{p_i a^2 - p_0 b^2}{b^2 - a^2} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、式 (2) は接線方向応力 σ_θ を、式 (3) は半径方向応力 σ_r を求める式であり、 p_i は内圧、 p_0 は外圧を示す。内径 $a=24\text{mm}$ 、外径 $b=150\text{mm}$ とし、今回の実験では拘束圧を作用させていないため $p_0 = 0$ とした。また p_i には破砕孔内の圧力計で測定した膨張圧の値を用いた。なお以下では引張応力を正としている。

Fig. 11 (a) に、実験開始から 12 分 00 秒、12 分 10 秒、12 分 15 秒及び 12 分 22 秒における、静的破砕剤の膨張圧によって生じた供試体内の接線方向応力と半径方向応力の分布を示す、これらの時刻は Fig. 10 に①、②、③及び④で示した時刻に対応する。

この結果をみると、半径方向応力は全領域で圧縮となるが、接線方向応力は全領域で引張となり、破砕孔壁面で最大の引張応力を示し、孔壁から離れるに連れて低下することがわかった。このことは、膨張圧だけで供試体が引張破壊するのであれば、孔壁から亀裂が進展することを意味している。

4・2 熱応力

Fig. 11 (b) に、Fig. 11 (a) と同様、実験開始から 12 分 00 秒、

12分10秒、12分15秒及び12分22秒における、供試体内部の温度分布と、この温度分布に基づく次に述べる方法で求めた熱応力分布の計算結果を示す。図にはこの4つの時刻に対応する4本の曲線を描いているが、この20秒間にほとんど温度分布の変化がないため、曲線が重なり1本の曲線に見える。

温度分布の曲線上に丸印で示した点は、3本の温度測定孔のうち最も上部のU孔で測定した供試体内部の温度である。最も上部のU孔の測定値を選んだのは、Fig. 7 (b) (c) (d)に見られるように、12分00秒～22秒のこの時期に、供試体上部から亀裂が発生したと思われるからである。なお、図には示していないが、3本の温度測定孔の測定結果を比較すると、上部U孔、中央部M孔の温度はほとんど同じであるが、下部L孔の温度はこれら2孔に比べてやや低く、破砕の生じたこの時期には、破砕孔に最も近い測定点で2℃程度の差がある。これは、破砕孔が供試体を貫通しておらず、供試体下部の4cmには静的破砕剤が充填されていなかったことが原因のひとつと思われる。

円筒の定常熱伝導の解を参考にして、供試体の温度分布が次式の半径 r の関数で表せると仮定し、図の丸印の10点の温度測定値から、定数 $A_1 \sim A_4$ を最小2乗法で求めると¹⁷⁾、温度分布は図の曲線で表される。ここに $\ln$ は自然対数を示す。

$$T(r) = A_1 + \frac{A_2}{\ln r} + A_3 \ln r + A_4 (\ln r)^2 \dots\dots\dots (4)$$

図より明らかなように、破砕孔近傍に測定点がないため、温度変化が最も大きなこの部分の温度分布が測定値から外挿されており、孔壁位置の温度も約50℃とこの時期に破砕孔内部で測定された86～117℃に比べてかなり低い値となっている。しかし、著者のひとりが行った稲田花崗岩立方体ブロックのヒーターを用いた加熱実験では、ヒーター表面温度を2時間かけて500℃に上昇させ30分間維持した後においても、ヒーター孔に充填した厚さ3mmの砂と6mmの花崗岩を隔てた花崗岩の内部の測定点では230℃までしか温度が上昇していなかった事実があり¹⁷⁾、供試体内部温度は少なくとも破砕孔の内部温度にまでは上昇していなかった可能性が高い。

温度分布の測定結果にはこのような不十分さがあるが、次に、供試体を軸対称の温度分布をもつ内径 a 、外径 b の円筒と仮定し、次式¹⁶⁾で熱応力を求めた。

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{r^2} \left[\frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b T(r) r dr + \int_a^r T(r) r dr - T(r) r^2 \right] \dots\dots (5)$$

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{r^2} \left[\frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b T(r) r dr - \int_a^r T(r) r dr \right] \dots\dots\dots (6)$$

式(5)は接線方向応力 σ_θ を、式(6)は半径方向応力 σ_r を求める式であり、これらの計算において、内外径には $a=24.0\text{mm}$ 、 $b=150\text{mm}$ の値を、ヤング率 E には別途行ったコア試験から得た $E=31\text{GPa}$ を用いた。またモルタルの線膨張係数 α には、理科年表¹⁸⁾を参考に $\alpha=14 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ を用いた。

Fig. 11 (b)に示した熱応力の分布は、このようにして求めた結果である。この図から、半径方向に作用する熱応力は全領域で圧縮であるが、接線方向の熱応力は約 $r=50\text{mm}$ （供試体中心からの距離）から供試体端面の範囲では引張応力が作用することがわかる。また引張応力の最大値を調べると、 $r=79\text{mm}$ の位置で $\sigma_\theta=1.20\text{MPa}$ であることがわかった。先に述べた著者のひとりが行った30cm角の稲田花崗岩の加熱実験¹⁷⁾では、 $r=124\text{mm}$ の位置で引張応力の最大値が生じているが、著者の一人が関わった

同じ形状の稲田花崗岩と三城目安山岩に対する実験¹⁹⁾においては、物性の温度依存性を考慮した解析を行うと引張応力の最大値は供試体側面に生じることが示され、AEの震源分布からも亀裂が供試体側面から発生する傾向が明瞭に見られる。また、Jansenらが似た形状のLac du Bonnet花崗岩で行った加熱実験²⁰⁾でも供試体側面から亀裂が発生する傾向が見られる。従って、岩石供試体を用いて加熱試験のような熱応力だけが作用する試験を行うと、ヒーター孔周辺からではなく、供試体側面やヒーター孔と側面の中間部分から亀裂が発生することが理解できる。なお、Fig. 11 (b)の応力値の縦軸は(a)に比べて1/3の大きさになっており、熱応力の絶対値は膨張圧によるそれよりも小さいことに注意を要する。

4・3 考察

Fig. 11 (c)は、(a)に示した膨張圧による応力の分布と(b)に示した熱応力の分布を重ね合わせて得た、実験開始から12分00秒、12分10秒、12分15秒及び12分22秒における接線方向応力の分布図である。接線方向応力は、ここに示したすべての時刻、すべての領域で引張となっており、○印はそれぞれの時刻における引張応力の最大値とその発生位置を示す。破線は、別途行ったコアの圧裂試験から得た引張強度である。この図より、実験開始後12分10秒を過ぎた頃に、孔壁から15mm（破砕孔中心から40mm）程度離れた位置で、接線方向応力が引張強度に達したことがわかる。

しかしこの応力値の算定には、いくつかの問題点がある。まず、膨張圧の測定は金属製円筒の中央断面に2枚のひずみゲージを貼付した単純な測定器を使用している。この測定器は静的破砕剤の膨張圧測定用に開発されたものであり³⁾、静水圧状態で得た校正値を用いているが、今回の実験では破砕直後の圧力解放時に負の圧力を示すなど、静水圧的な载荷状態になっていない可能性がある。また著者らが念のため調べたところ、この測定器は温度上昇だけで圧力値の増大を示す傾向があることがわかったため、電気炉を用いた試験結果に基づいて補正を行い、温度の影響を取り除いているものの、多少の誤差が生じている可能性がある。一方、温度分布の測定では破砕孔近傍に測定点を設置できなかったため、温度変化が最も大きな破砕孔近傍の温度分布が測定値から外挿されている。また著者らの所有する設備では線膨張率の測定が困難なため、熱応力の算出においては理科年表で調べた値を参考にして用いている。

これらの問題点はあるが、AEの震源分布からみて、少なくとも破砕孔から亀裂が進展したとは思えず、亀裂の発生箇所は、供試体側面と破砕孔の中間的な位置と思われ、またAEのメカニズム解析から、引張破壊が卓越していることは確かである。

加熱のみによる岩石ブロックの破砕実験では、すでに述べたように、供試体側面、あるいは、供試体側面と破砕孔の中間的な位置から破壊が生じると思われる。一方、黒髪島花崗岩のブロックにウレタン・パッカーを挿入して加圧し、膨張圧だけを作用させる試験^{13, 15)}を行うと、AE震源は破砕孔周辺にだけ分布し、亀裂が破砕孔周辺から供試体側面に向けて進展していく傾向が顕著である。少なくとも、今回の実験で得られたAE震源分布の経時変化は、このウレタン・パッカーによる実験で得られたそれと大きく異なっている。また著者らのグループは、一辺20cmのモルタルブロックの中央部に直径55mmの破砕孔を設けて静的破砕剤による破砕実験を行い、AEの震源分布の特徴だけを整理して報告したが、この実験においても、供試体側面から亀裂が発生する傾向が顕著であった²¹⁾。この実験では、供試体の大きさに比較して破砕孔の直径が大きいため、今回の実験ではこの点を改善

するとともに、供試体内部の温度測定を行って熱応力の影響程度を定量的に評価しようとしたものである。

以上のことから、膨張圧だけで破壊が生じるのであれば破砕孔から亀裂が生じるはずであるにもかかわらず、供試体側面と破砕孔の中間的な位置から亀裂が発生したことから、熱応力がかなりの程度影響していることは間違いないと思われる。このことから、静的破砕による破砕設計では熱応力を考慮することが重要であり、少なくとも転石の破砕のように今回の実験に近い条件下での破砕では、熱熱応力の影響が大きく表れることに注意する必要があるといえる。

5. ま と め

中心に直径 48mm のボーリング孔を穿った一辺 300mm の立方体のモルタル供試体立方体を用いて静的破砕剤による破砕実験を行ったところ、12 分あまりで相対する 2 側面と破砕孔をつなぐ一方向に亀裂が生じ、供試体は真 2 つに破壊された。この間、AE (Acoustic Emission)、膨張圧、破砕孔内部及び供試体内部温度の測定を行って、静的破砕剤に破砕機構を検討した。その結果、次のことがわかった。

- 1) 破砕孔と 2 側面の間に発生した 2 つの亀裂のうち、先に発生したと思われる 1 亀裂について、AE の震源分布の経時変化を検討したところ、亀裂は破砕孔からではなく、供試体側面と破砕孔の中間的な位置から発生したと思われた。
- 2) AE 波の P 波初動が押し波であるか引き波であるかを統計的に整理することにより、震源決定した AE の破壊メカニズムを、引張型、せん断型、圧壊型の 3 種類に分類したところ、ほとんど AE が引張型に分類された。このことから、今回の実験で生じた供試体の巨視的破壊は、引張破壊による微小破壊の集積によって生じたと思われた。
- 3) 破砕孔内に設置した圧力計による膨張圧の測定結果に基づき、供試体を厚肉円筒と仮定して、破壊時の供試体内の応力分布を求めた。その結果、半径方向応力は全領域で圧縮となるが、接線方向応力は全領域で引張となり、破砕孔壁面で最大の引張応力を示し、孔壁から離れるに連れて低下することがわかった。このことは、膨張圧だけで供試体が破砕されるのであれば、孔壁から亀裂が進展することを意味している。
- 4) 供試体内部に設置した熱電対による温度測定結果に基づいて、破壊時に供試体内部に作用した熱応力を求めた。その結果、半径方向に作用する熱応力は全領域で圧縮であるが、接線方向の熱応力は供試体中心から 50mm の位置を境として、それより破砕孔に近いところでは圧縮応力が、それより供試体側面に近いところでは引張応力が作用したことがわかった。過去の同様の形状の岩石供試体を用いた加熱試験実験では、供試体側面やヒーター孔と側面の中間的な位置から亀裂が発生することが報告されており、熱応力だけで破壊が生じるのであれば、破砕孔から離れた位置で亀裂が発生することがわかった。

- 5) 膨張圧による応力と熱応力を重ね合わせて得た接線方向の応力の分布を圧裂試験の引張強度と比較すると、破壊時に孔壁から 15mm 程度離れた位置で引張強度に達したことがわかった。この応力値の算定には不十分な点があるが、今回の実験における AE の震源分布は、ウレタン・パッカーを用いて膨張圧だけを載荷した過去の実験での震源分布とは少なくとも大きく異なり、熱応力がかなりの程度影響していることは間違いないと思われた。

- 6) 今回の実験は熱応力の影響が現れやすい境界条件になっているが、少なくとも転石の破砕のように、中心に位置する破砕孔に対して周囲が冷却される状態の破砕では、熱応力の影響が大きく表れることに注意する必要がある。

付 記 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金 (基盤研究 (C) 課題番号 13650986, 研究代表者: 石田毅) の助成を得て行った。

謝 辞 本研究を行うにあたり、山口大学理工学研究科の技術専門職員 (技術長) 兼行啓治氏、ならびに当時山口大学理工学研究科博士前期課程に在学中の岸口正也君 (現 サイトウコンサルタント (株))、田村晋吾君 (現 (株) 荒谷建設コンサルタント) に多大な協力を得た。ここに記して深く感謝する。

References

- 1) C. H. Dowding and J. F. Labuz: Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, **108**(1982), 1288-1299.
- 2) T. Harada, T. Idemitsu and A. Watanabe: Journal of the Japan Society of Civil Engineers, No.360/V-3(1985), 61-70.
- 3) T. Harada, K. Soeda, T. Idemitsu and A. Watanabe: Journals of the Japan Society of Civil Engineers, No.478/V-21(1993), 91-100.
- 4) D. E. Swanson and J. F. Labuz: Concrete Science and Engineering, **1**(1999), 166-172.
- 5) The Society of Inorganic Materials, Japan: *Handbook of Cement, Gypsum and Lime*, (Gihodo Shuppan, Tokyo, 1995), pp.120-124.
- 6) H. Fukui: Science and Technology of Energetic Materials, **62**(2001), 225-232.
- 7) Y. Nakayama, T. Ishida, Y. Ohike and Y. Mizuta: Journal of the Japan Society of Civil Engineers, No.715/III-60(2002), 345-356.
- 8) R. L. Rothman, R. J. Greenfield and Jr. H. R. Hardy: Bulletin of the Seismological Society of America, **64**(1974), 1993-1996.
- 9) Y. Sato and K. Katsuyama: Saiko to Hoan, **31**(1985), 291-298.
- 10) A. Zang, F. C. Wagner, S. Stanchits, G. Dresen, R. Andresen and M. A. Haidekker: Geophys. J. Int., **135**(1998), 1113-1130.
- 11) K. Kasahara: *Zishin no Rikigaku*, (Kajima Institute Publishing, Tokyo, 1983), pp.38-44.
- 12) T. Ishida, T. Kanagawa, Y. Uchita and M. Urayama: Journal of the Japan Society of Civil Engineers, No.529/III-33(1985), 19-28.
- 13) T. Ishida, Q. Chen and Y. Mizuta: Pure and Applied Geophysics, **150**(1997), 627-646.
- 14) Q. Chen, T. Ishida, S. Sasaki, I. Matsunaga and Y. Mizuta: Journal of the Japan Society of Civil Engineers, No.589/III-42(1998), 179-194.
- 15) T. Ishida, Q. Chen, Y. Mizuta and J-C. Roegiers: Transactions of the ASME, Journal of Energy Resource Technology, **126**(2004), 190-200.
- 16) S. P. Timoshenko and J. N. Goodier: *Theory of Elasticity* (Third Edition), (McGraw-Hill KOGAKUSHI, Tokyo, 1934), p.70, p.448.
- 17) T. Ishida, K. Kitano, N. Kinoshita and N. Wakabayashi: Journal of the Japan Society of Civil Engineers, No.418/III-13(1999), 153-161.
- 18) National Astronomical Observatory of Japan: *Rika Nenpyo*, (Maruzen, Tokyo, 1995), p.485.
- 19) N. Kinoshita, N. Wakabayashi, T. Ishida and K. Nakagawa: Journal of the Japan Society of Civil Engineers, No.624/III-47 (1999), 101-112.
- 20) D. P. Jansen, S. R. Carlson, R. P. Young and D. A. Hutchins: Journal of Geophysical Research, **98**(1993), 22231-22243.
- 21) H. Fukui, N. Ohsaka and T. Ishida: Science and Technology of Energetic Materials, **65**(2004), 21-24.