

# 静的破碎剤によるモルタル供試体破壊時のAE測定

福井久明\*, 大坂直哉\*\*, 石田 毅\*\*

\* (株) ロックス・ジャパン

〒101-0032 東京都千代田区岩本町2-16-9

\*\* 山口大学工学部社会建設工学科

〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1

2003年12月12日 受付 2004年 1月27日 受理

速効型静的破碎剤による岩石またはコンクリートブロック破壊時には、人の聴覚で感知可能な破壊音を発する。目視可能な巨大き裂前に先立つ破壊過程で発生する破壊音 (AE) は微小き裂の発生点およびき裂進展の位置を示していると考えられる。

本研究はモルタルブロックを対象とし、微視的き裂発生によるAE測定とその震源位置の決定および巨視的き裂終了迄のAE発生挙動と膨脹圧との関係を観測した結果を示したものである。

その結果、目視可能なき裂発生前の、(A) 膨脹圧が徐々に上昇している時間帯 (I期) では破碎剤の充填孔壁周辺にAE震源が集中する。次いで、(B) 膨脹圧が急激に上昇する時間帯 (II期) ではブロック体の特定外壁面にAEは集中し、一方この外壁部から中央充填孔との間の中間領域でAEは観測されない。

最終的に、(c) 目視可能な巨視的破壊が進行する (III期) では、II期のAE点が観測された外壁面と相対峙する外壁面にAE震源は集中し、この時間帯70秒間で21個の震源位置同定をおこなった。AE震源の位置と巨視的き裂面はほぼ完全に一致しており、AE震源の同定が破壊の初期過程解明に有効であることが判明した。

## 1. 緒言

固体内における塑性変形下での転位、もしくは巨視的破壊に至る前の微小き裂発生とその伝播等によって弾性エネルギーの急激な解放がある場合、破壊の前駆現象として通常AE (Acoustic Emission) と呼ばれる高周波の弾性波動が観測される。<sup>1) 2)</sup>

一般に、AE測定は金属材料分野では耐圧容器の破壊予知、応力腐蝕割れの発生とその進行予知<sup>3) 4)</sup>、またコンクリート分野では破壊に伴う内部構造の変化とAE発生特性<sup>5) 6)</sup>、さらに岩盤分野では特に深部炭鉱切羽での「山鳴り」、「山はね」現象に対しAE測定をおこないその予知と発生メカニズム解析の研究がおこなわれてきた。<sup>7) 8)</sup>

本研究はモルタルブロック内に充填した破碎剤から発する膨脹圧を利用し、破壊に至る迄の過程をAE測定によって連続的に解析したものである。即ち、発生するAE信号の震源位置同定からき裂発生箇所の時間変化を追跡し、負荷された膨脹圧力との関係より破壊過程の解明を目的としたものである。

## 2. 実験結果

### 2.1 AE測定方法

微弱信号であるAEの測定には共振型圧電素子センサーを用いた。

- ・ AEセンサー：Physical Acoustics Corporation 製R-15型 (径17.4mm, 厚さ6.3mm)
- ・ 共振周波数：150 KHz
- ・ 増巾：70dB (プリアンプ40dB, メインアンプ30dB)

上記センサーをモルタルブロック供試体に12個装着し計測した。計測システムの概要図をFig.1に示す。

AE発生数の計測はしきい値250mVに設定し、0.1秒毎のリングダウン計測法<sup>9)</sup>にて各センサーに対応するチャンネルで計測、記録した。

AE波形の収録は、AE波動が重畳し計測不能となるリング状態でのノイズ収録を防止するため、不感時間 (Dead Time) を4.4msに設定した。

AE波形はこの状態で、装置の記憶容量の上限である16300イベントまで連続測定可能である。

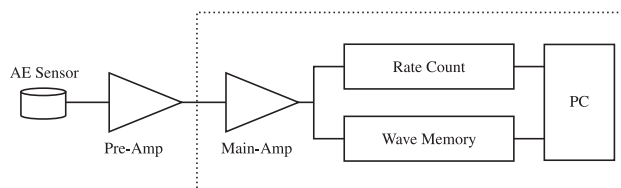


Fig.1 AE Monitoring System.

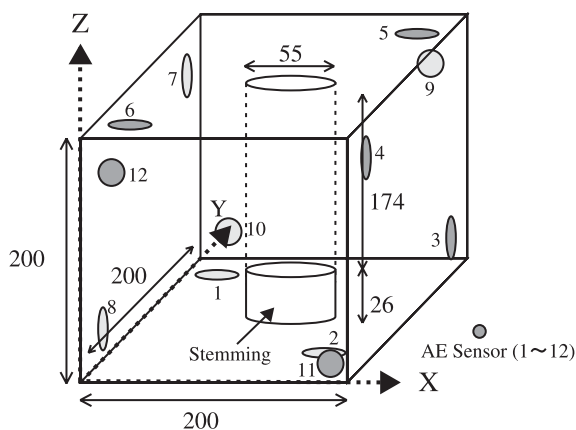


Fig.2 Size of test block and position of AE sensors.

2.2 破砕供試体とAEセンサーの配置

1辺20cmのモルタル立方体を破砕供試体として用い中央部垂直方向に径55mmの孔を貫通させ、供試体下部より26mmは粘土にて填塞した。

AEセンサーの取付けは、各面に2個ずつFig.2で示す位置に貼布した。なおモルタルブロック供試体の3方向P波伝播速度は  $V_x = 3.98\text{km/sec}$ ,  $V_y = 3.93\text{km/sec}$ ,  $V_z = 3.86\text{km/sec}$ であった。

2.3 モルタル供試体の破砕方法

供試体中心の穿孔中へ膨脹圧力、発熱温度を測定するセンサーをあらかじめ挿入し、次に破砕剤をその空隙に充填した。上部開孔部より注水した後膨脹圧上昇に伴って発生するAE震源を三次元的に同定し、モルタルブロック破砕終了迄測定した。

Table 1に破砕条件と膨脹圧、発熱温度測定用の各センサースペックを示し、Fig.3に圧力および温度センサー配置図を示す。

2.4 供試体の巨視的破壊

注水開始後10分間は目視、聴覚においてき裂発生時の変化は確認できないものの、11分後温度モニターTC3が80℃を越えた後、破砕剤は開孔部より盛り上がりその後30秒間

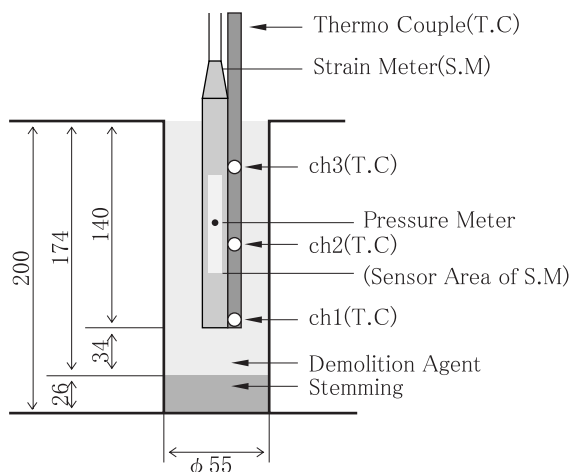


Fig.3 Arrangement of temperature and pressure gauge within borehole.

Table 1 Demolition condition and specification of sensors measuring expansion pressure and temperature by hydration.

Kind of Demolition Agent		Rock-Tone® (B) 1020
Weight of Demolition Agent		507 g
Poured Water Volume		122 cc
Water Ratio		24%
Sensor	Expansion Pressure	Ni-Cr Strain Guage (KPJ-60MPa by Tpkyo Sokki)
	Hydration Temperature	Copper-Constantan Thermo Couple (NR-1000 by Keensu Ltd)

にて100個を越えるAEイベントの波形を収録した。13分後に聴覚可能な破砕音を伴ない供試体はY方向に沿ってき裂が発生し破断した。Fig.4にき裂線のスケッチ図を示す。

2.5 AE発生頻度と膨脹圧の測定結果

開孔部より注水後3分以降の供試体破断迄のAE発生頻度、膨脹圧および水和発熱温度の測定結果をFig.5に示す。

注水後膨脹圧が急上昇する12分40秒前後迄〔図中 (a)〕をI期とし、膨脹圧が最高値を示す13分10秒迄を〔図中 (b)〕II期、最終的に供試体の破断終結とAE発生が終了する14分20秒前後迄〔図中 (c)〕をIII期とし、各時間帯におけるAE震源位置を同定することにより破壊初期過程の解析を次に試みた。

2.6 AE震源の空間分布

(1) 震源決定の方法<sup>10)</sup>

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。従ってAEセンサーで読み取られた少なくとも5個のAEイベントに対し最小二乗法を適用し震源決定をおこなった。

次に供試体弾性波速度の不均一性、時刻設定測定精度等より震源決定誤差は6% (約  $2\sigma$ ) 以下、即ち供試体辺長200mmに対し12mm以下の精度を目標設定した。依って供

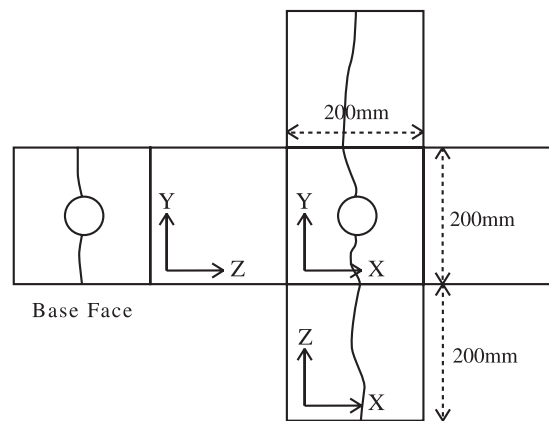


Fig.4 Cracks observed at the surface of the specimen.

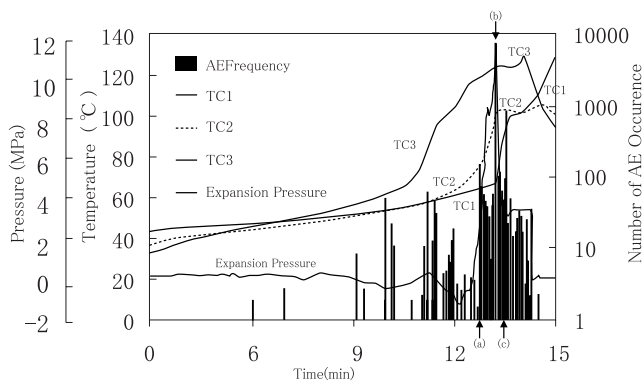


Fig.5 Observation results of AE frequency, expansion pressure and hydration temp (TC1, TC2, TC3).

試体P波速度はおよそ4km/sであるため走時残査は3μsとなる。

上記より震源決定のための条件は下記の3項目とした。

- 1 センサー数5個以上で同時にP波初動を読みとれたAE波をデータ化, 処理する。
- 2 走時残査は3μs以下。
- 3 走時残査の絶対値 |ti - Ti| の最大値は3μs以下とする。

※AEセンサーi番目で受信したP波初動到着時刻をti, 震源座標と発生時刻から逆算されるP波初動到着時刻をTiとする。

(2) 空間分布測定結果

膨脹圧およびAE発生挙動 (Fig.5) で変動を示すI期からIII期の各ステージにおいて上記3条件を満たし決定されたAE震源をFig.6~Fig.8に示す。

水和発熱による孔内の温度上昇はあるものの, 急速な膨脹圧が発生する以前の時間帯びI期 (3分~12分40秒) で, 震源が決定されたAE数は5個であった。その空間位置はX-Y断面では剤充填孔の周辺に分布しており, Z軸に対しては上部領域から下部領域に亘りほぼ均一に発生している。この領域に発生するAEは膨脹圧からの圧縮応力に起因するものと考えられる。次に膨脹圧が急速に上昇開始し最高圧を示す時間帯II期 (12分40秒~13分10秒) で震源決定されたAE数は46個であった。その空間位置はX-Y断面でみると供試体の一側壁面に限定されており他の側壁面でのAE発生は観測されない。一方Z軸方向に対してはI期と同様上部から下部領域に亘り均一に発生している。この外壁面周辺でAEが集中し発生する要因として膨脹圧は30秒間で12MPa迄上昇し時間当り非常に大きな圧力変動が内圧応力として負荷されるため, 微小クラックの発生は構造体内部で弱いマイクロストラクチャーを持つ側壁面領域に集中しAE点が観測されたものと考えられる。一方この時間帯は水和発熱による急激な温度上昇が観測されているため熱応力による引張応力も考慮する必要がある。<sup>11) 12)</sup>

供試体き裂発生から破断終結およびAE発生が終結する時間帯III期 (13分10秒~14分20秒) の間で震源決定されたAE数は21個であった。その空間位置はX-Y断面ではII期で発生した供試体側面と相対する側壁面周辺部および中心充填孔とこの側壁面を結ぶ線上の供試体内部にAEは点発生した。またX-Y断面でみるとき裂造成位置に沿ってZ方向に一樣にAE点は分布しており, 巨視的き裂面と

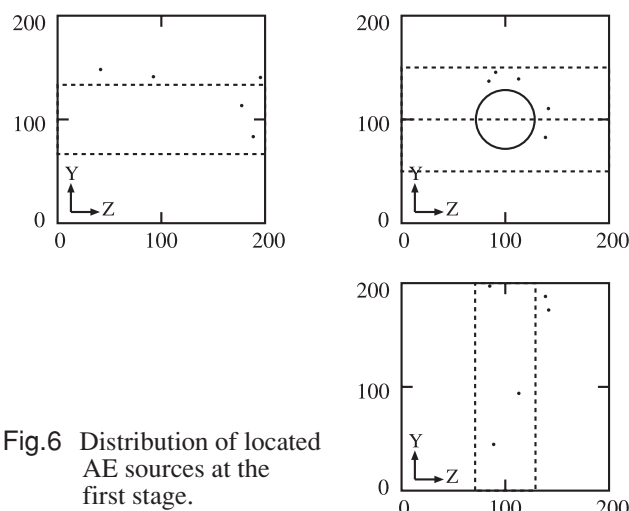


Fig.6 Distribution of located AE sources at the first stage.

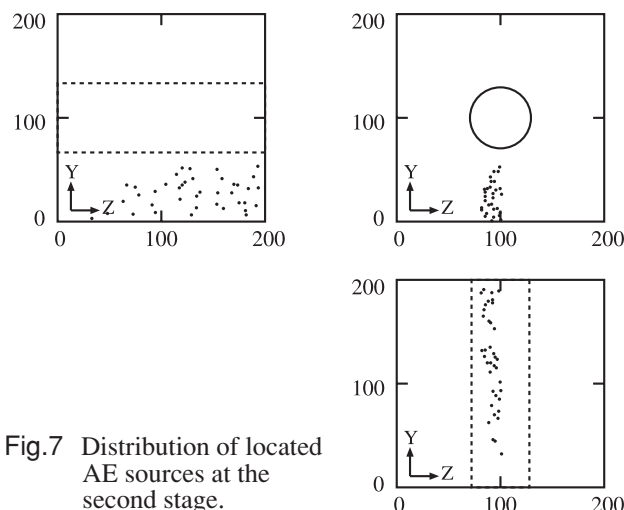


Fig.7 Distribution of located AE sources at the second stage.

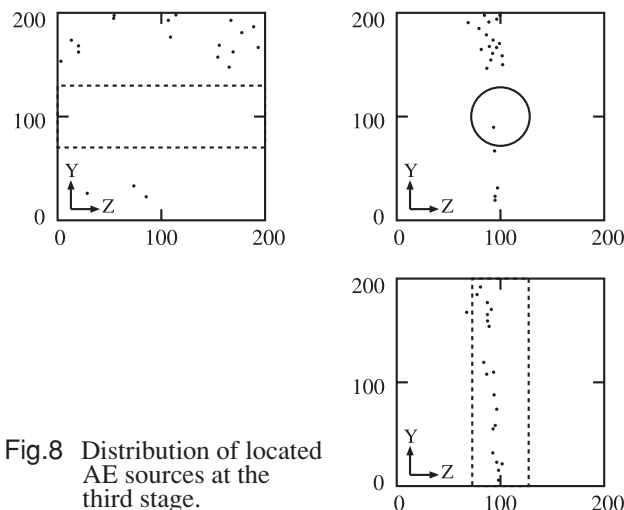


Fig.8 Distribution of located AE sources at the third stage.

Table 2 Change of AE source distributions with time.

Stage	Elapsed Time(s)	Expansion Pressure (MPa)	Number of located AE sources	Distribution of AE sources
I	760	~2.5	5	AE sources distributed randomly around the borehoe
II	30	2.5→11.5	46	AE sources clustered on a line between the borehole and one of lateralsurfaces
III	70	11.5→9.5	21	AE sources distributed in the opposite side on the borehole comparing to them in Stage II

AE発生震源は強く相関していることが明確となった。(Fig.4参照)

I期からIII期迄の膨脹圧とAE発生挙動との関係を上表に示す。

### 3. まとめ

AE震源は急速な膨脹圧が発生する以前の時間帯では剤充填孔の周辺でまばらに分布する。次に膨脹圧が急速に上昇開始し最高圧を示す時間帯では供試体の一側壁面にAEは集中し、その中間領域空間ではAEの発生は認められない。この自由面に近い領域でAEが発生する理由として、圧縮応力からの反転で引張応力に転換した応力とも単純に考え難く今後の検討を要する。一方、膨脹圧の発生時には破砕剤の水和熱により充填孔内部は120~140℃へ上昇しており、温度上昇にともなう熱応力の影響も推定され、今後この方面からも検討し、静的破砕剤の破壊機構について研究を進める予定である。

### 文 献

- 1) 石田毅, 「岩盤破壊音の科学」 P14 (1999) 近未来社.
- 2) 大津政康, 「アコースティック・エミッションの特性と理論」 P3 (1988) 森北出版.
- 3) 岸輝雄, 材料, 29, 765 (1980).
- 4) 尾上守夫, 山口楠雄, 他共著, 「アコースティック・エミッションの基礎と応用」 P171 (1976) コロナ社.
- 5) 大津政康, 松山公年, 田島二仁, 油野邦弘, 第4回地下と土木のAE国内コンファレンス論文集, P25~30 (1991).
- 6) 横道英雄, 池田郁雄, 松岡健一, セメント・コンクリート, 212, 2~6 (1964).
- 7) 平田篤夫, 田中義原, 荒井紀之, 平野享, 第4回地下と土木のAE国内コンファレンス論文集, P102~106 (1991).
- 8) 出口剛太, 上原正文, 炭鉱技術P7~14, S635.
- 9) 文献3) P767.
- 10) 文献1) P80~86.
- 11) 木下直人, 若林成樹, 石田毅, 中川浩二, 土木学会論文集, P101~112 No624 (1996).
- 12) D.P. Jansen, S.R. Carlson, J of Geophysical Research, P231~243, 98 (1993).

## Acoustic emission monitoring during breakage of a mortar specimen by expansive cement agent

Hisaaki Fukui\*, Naoto Ohsaka\*\*, and Tsuyoshi Ishida\*\*

Breaking rocks and concrete accompanies ultrasonic waves called acoustic emission. Since generation and extension of cracks causes the acoustic emission, their locations help to clarify the breaking mechanism. In this paper, the breaking mechanism of a 200 mm cubic mortar specimen by rapid type of expansive cement agent was investigated by locating acoustic emissions. At the first stage when expansive pressure of the cement agent increased gradually, acoustic emissions were distributed around the center hole of the specimen in which the cement agent was filled. At the second stage while the expansive pressure started to increase intensively and reached its maximum, they clustered near a surface on the one side of the specimen, in contrast to the distribution near the center hole at the first stage. Finally, at the third stage while visual cracks appeared and separated the specimen completely, they distributed along the cracks.

\*ROX JAPAN, Co. LTD. 2-16-9 Iwamotocho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0032, JAPAN.

\*\*Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube 755-8611, JAPAN.