

# 定量的AE解析によるコンクリートの内部ひび割れの評価

## Evaluation of Fracture Mechanisms in Concrete using Quantitative AE Analysis

(平成 15 年 9 月受理)

山ノ内 正 司\* (YAMANOUCHI Masaji)

### Abstract

In order to investigate fracture mechanisms in concrete, quantitative acoustic emission (AE) techniques can be applied. In this context a 3D localization of the recorded AE events is required. An eight channel acquisition unit was used to record AE parameters and waveforms. AE events, recorded during splitting tests, were analyzed quantitatively. With the help of a localization analysis and a relative moment tensor inversion analysis AE source characteristics could be recovered in relation to the stress state.

**Key words:** acoustic emission, relative moment tensor inversion, concrete, splitting test

### 1. はじめに

コンクリート構造物の巨視的なひび割れ先端には、ボンドクラックやモルタルクラックなどの微細なひび割れが累積した破壊進行領域と呼ばれる非線形領域が存在しており、構造物の力学的な非線形挙動を支配している。破壊進行領域の引張軟化モデルを構築するためには、この破壊進行領域の微視的なひび割れ挙動の解明が必要となる。

一方、これらの微細なひび割れが発生する際に、これまで蓄えられていたひずみエネルギーが開放されて弾性波となって伝播していく現象はアコースティックエミッション (Acoustic Emission, 以下AE) と呼ばれており、材料内の動的な破壊メカニズムを知る上で有力な手がかりとなっている。このAEを検出し、適当な解析あるいは解釈によって微細なひび割れを評価するAE手法は、様々な材料の研究、新素材の開発、品質管理、異常診断、地滑りの予知など、その応用範囲が徐々に広がっている<sup>1)</sup>。

これまでの研究によれば、コンクリートの一軸圧縮試験においてAE活性度の変化からコンクリートの損傷度が推定されることや<sup>3), 4)</sup>、破壊進行領域におけるAEエネルギーの変化がクラック形成エネルギーと密接に関係していること<sup>5)</sup>、およびAE波形のモーメントテンソル解析により破壊源特性を推定できることなどが明らかにされている<sup>6)-10)</sup>。

本研究では、コンクリートの割裂試験とAE計測を行い、AE波形の相対モーメントテンソル逆解析によ

り、内部ひび割れの破壊源特性を定量的に評価し、コンクリートの内部構造や破壊源の応力状態との関係を考察した。

### 2. 解析手法

#### 2-1. モーメントテンソル

等方な弾性体内部の点  $y$  に時刻  $t=0$  で割れが生じた時、時刻  $t$  で点  $x$  に生じる応答変位  $u_n(x, t)$  は、一般に次式で表される<sup>2)</sup>。

$$u_n(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} M_{pq} S(\tau) \frac{\partial}{\partial y_q} G_{np}(x, t - \tau; y, 0) d\tau \quad (1)$$

ここに、 $M_{pq}$  は9つの双力源を成分とするモーメントテンソルであり、 $p=q$  の時 dipole、 $p \neq q$  の時 couple と呼ばれている。どのような破壊源もこれらの成分でモデル化することができる。 $\partial G_{np} / \partial y_q$  は  $M_{pq}$  に対応した動的グリーン関数であり、 $S(t)$  は破壊源の時間関数を表している。

Fig. 1 に代表的な破壊源に対応する双力源と発生する P 波成分の放射形式を示す。引張型クラックは3つの正の dipole でモデル化され、応答変位はすべての方向に正の値を持っている。せん断型クラックは、体積変化を伴わない複双力源 double couple (以下 DC と表す) によってモデル化され、弾性波には押しと引きが現れる。また、CLDV (compensated linear vector dipole) は体積変化を伴わない3つの dipole から成り、DC と同様に押しと引きが現れてくる。

以上のように、 $M_{pq}$  の成分と発生する弾性波の放

\* 福島工業高等専門学校 建設環境工学科 (いわき市平上荒川字長尾 30)

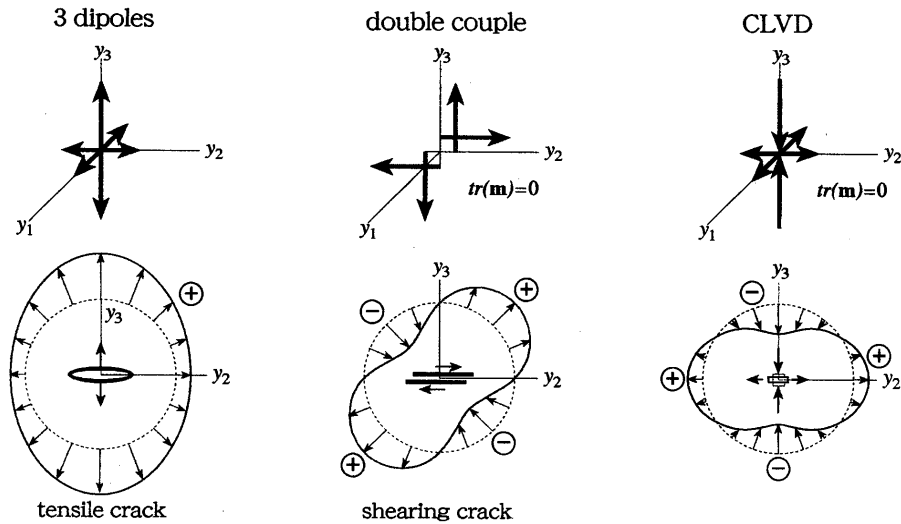


Fig. 1 Correlation between models of the typical fracture mechanisms and estimated radiation patterns.

射形式が対応しているため、AE波形の第一波の振幅の大きさから破壊源のモーメントテンソル  $M_{pq}$  を逆解析により推定することが可能である。この場合、少なくとも6つの観測点が必要になる。

2-2. 相対モーメントテンソル逆解析

これまで、グリーン関数を用いて直接モーメントテンソルを推定した研究が報告されているが<sup>6),9)</sup>、本研究では、Dahmにより提案された相対モーメントテンソル逆解析手法を用いた<sup>10),11)</sup>。この手法は、AE波形の波長よりも小さいサイズの領域内にある破壊源については、複雑なグリーン関数を用いなくても、簡単な代数方程式によりモーメントテンソルを求めることができるという方法である。

遠方場のP波成分に限定すれば、式(1)は次のように変形される。

$$u_{ij} = I_j^P \sum_{k=1}^6 m_{ki} a_{jk} \quad (2)$$

ここに、 $u_{ij}$  は j 番目のAEセンサーで検出されたイベント番号 i のAE波形の振幅 ( $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, 1$ )、 $I_j^P$  はグリーン関数のP波成分のスカラ部分と破壊源の時間関数の積で表されるものであり、 $m_i$  と  $a_i$  はそれぞれ、式(3)と式(4)のようになる。 $m_i$  の最初の4つの成分は couple を、第5成分は、CLVD を表している。第6成分は、爆発に相当する成分である。

$$m_i = \begin{bmatrix} 0.5(M_{22} - M_{11}) \\ M_{12} \\ M_{13} \\ M_{23} \\ [0.5(M_{11} + M_{22}) - M_{33}]/3 \\ (M_{11} + M_{22} + M_{33})/3 \end{bmatrix}_i \quad (3)$$

$$a_i = \begin{bmatrix} -\sin^2 \theta \cos 2\alpha \\ \sin^2 \theta \sin 2\alpha \\ \sin 2\theta \cos \alpha \\ \sin 2\theta \sin \alpha \\ \sin^2 \theta - 2\cos^2 \theta \\ 1 \end{bmatrix}_i \quad (4)$$

Fig. 2に示すように、AE波形の波長よりも小さいサイズの領域内にいくつかのイベントが存在する場合、すべての破壊源の時間関数が同じであると仮定すれば、イベント番号1と2の関係は、 $I_j^P$  が消去されて式(5)となる。この関係をクラスター内のすべてのAEイベントに適用すると、式(6)の代数方程式が得られ、これによりクラスター内のすべてのイベントのモーメントテンソル  $m_i$  を相対的に求めることができる。ここに、cは任意の定数であり、 $A_i$  は式(8)で与えられる。

$$u_{1j} \sum_{k=1}^6 m_{k2} a_{jk} = u_{2j} \sum_{k=1}^6 m_{k1} a_{jk} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_2 & A_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -A_3 & 0 & A_1 & 0 & \dots & 0 \\ -A_4 & 0 & 0 & A_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -A_n & 0 & 0 & 0 & \dots & A_1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ \vdots \\ m_{n-1} \\ m_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$1 = \{1, 1, 1, 1, 1, 1\} \quad (7)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} u_{i1} a_{11} & u_{i1} a_{12} & \dots & u_{i1} a_{16} \\ u_{i2} a_{21} & u_{i2} a_{22} & \dots & u_{i2} a_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{in} a_{n1} & u_{in} a_{n2} & \dots & u_{in} a_{n6} \end{bmatrix} \quad (8)$$

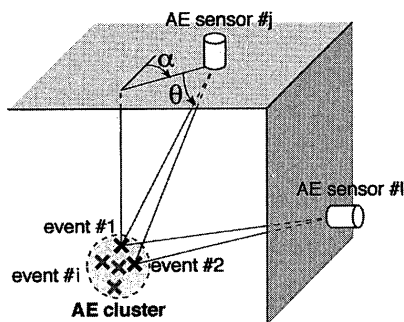


Fig. 2 AE cluster.

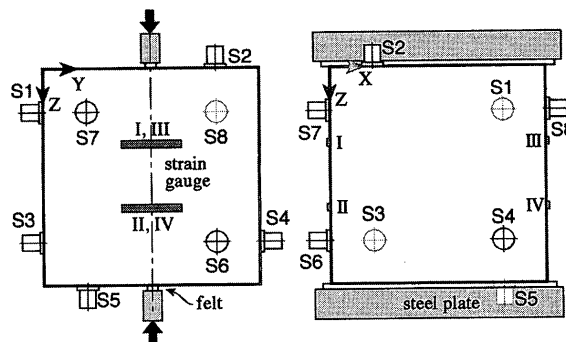


Fig. 3 Setup of the splitting test.

### 3. 実験概要

巨視的に単純なひび割れが形成されることと、領域によって特徴的な応力状態が生じることから、Fig. 3に示すようなドイツ工業規格に基づいた割裂試験<sup>12)</sup>を行った。コンクリートの破壊過程を把握する目的で、荷重軸と直交する方向のひずみを4箇所(I~IV)で測定し、荷重方法は応力制御方式とした。また、荷重用金属プレートとコンクリート供試体の間には、幅10mm、厚さ5mmのフェルトを挿入している。

供試体形状は、一辺の長さが200mmの正方体とした。水セメント比は47%(B45)と67%(B15)とし、最大骨材寸法が16mmの川砂利を使用した。

AEについては、サンプリングタイムを200nsec、波形長を4Kwordsとして8チャンネルのAE波形を記録した。AE計測装置の波形分解能は12bit、波形記録速度は1イベント当り約1秒である。図中S<sub>1</sub>はAEセンサーの配置場所を示している。

予備実験と本実験により明らかになった供試体の力学的諸特性はTable 1の通りである。なお、供試体記号の数字は、それぞれ設計基準強度を表している。

### 4. 結果と考察

#### 4-1. 破壊過程とAE発生状況

Fig. 4は、荷重、ひずみおよびAE活性度の経時変化を示したものである。いずれの供試体もひずみの非線形成分が顕著になる直前から連続的にAEが発生し

始めている。この開始点P<sub>1</sub>の荷重比P<sub>1</sub>/P<sub>max</sub>はB15の0.56に対してB45では0.73となり、強度が高い程大きくなる。またその後の非弾性ひずみの増加に伴うAEイベントの増加の割合も高く、一軸圧縮試験の結果と同様の傾向を示している<sup>4)</sup>。両者とも記録されたイベントの内、約半数が位置標定された。

これらのAE発生源分布をFig. 5に示す。主な発生位置が供試体表面付近に限られていたため、XY平面とYZ平面については、発生源から表面までの距離が近い方の平面にプロットした。図中の実線は試験終了後に確認された表面クラックを表している。

荷重面端部では端面拘束により応力集中度が高まり、Zone A, B, DとZone E, Fから破壊が始まっている。荷重比P/P<sub>max</sub>=0.9以降は表面中央部のZone CおよびZone Gから割裂クラックが形成され始めており、その後、割裂クラックの急激な成長と二次クラックの発生により供試体は二分された。AE発生源分布が表面クラックとよく一致していることが分る。

#### 4-2. 相対モーメントテンソル逆解析結果

まず、クラスタサイズ(立方体の一辺の長さ)と最小のイベント数を与えて、クラスタリングを行った。クラスタサイズを小さくし、最小イベント数を大きく設定すれば、推定誤差は小さくなる<sup>10)</sup>が、全クラスタに含まれる解析対象イベント数は少なくなる。そこで、解析対象イベント数をできる限り多くすることを優先に、最小イベント数を小さく設定してクラスタリングを行った。例えばAE発生源の密集度が高いZone Eでは、クラスタサイズ12mm、最小イベント

Table 1 Mechanical properties of concrete specimens.

specimen ID	W/C (%)	Compressive Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	P-wave Velocity (m/sec)
B15	66.7	20.1	2.29	4 329
B45	46.6	52.8	3.65	4 640

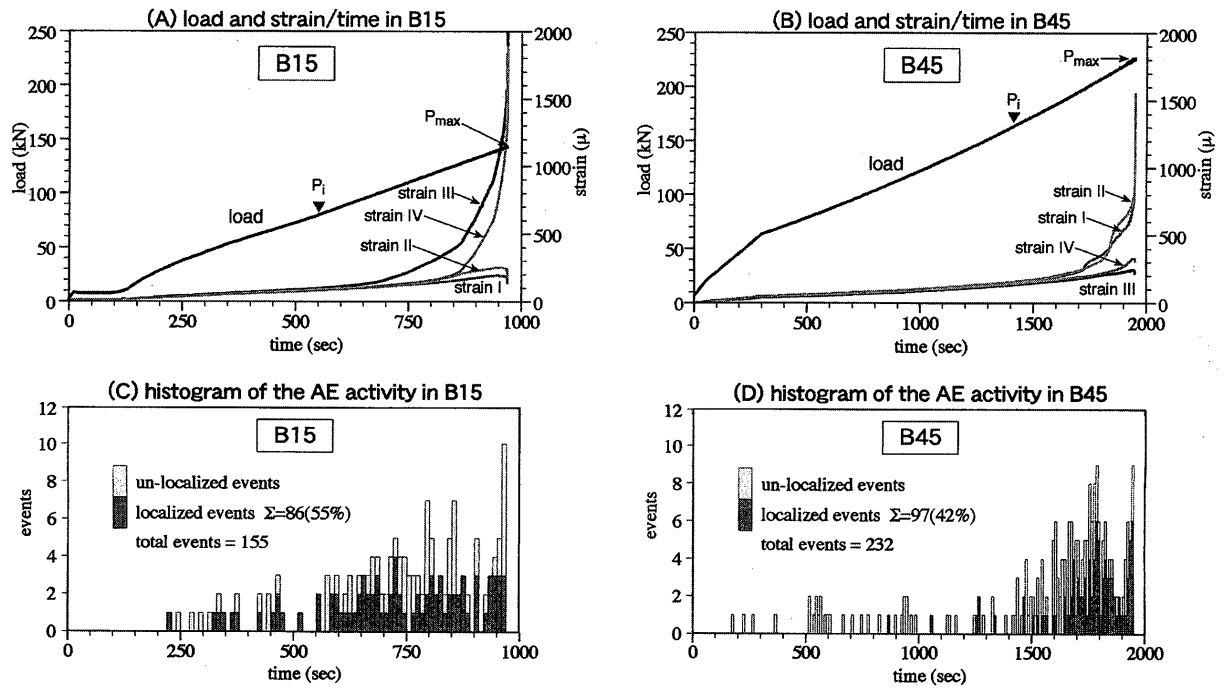


Fig. 4 Mechanical test data and a histogram of the acoustic emission activity during the splitting test. Events are counted at intervals of 10 seconds in the lower graph.

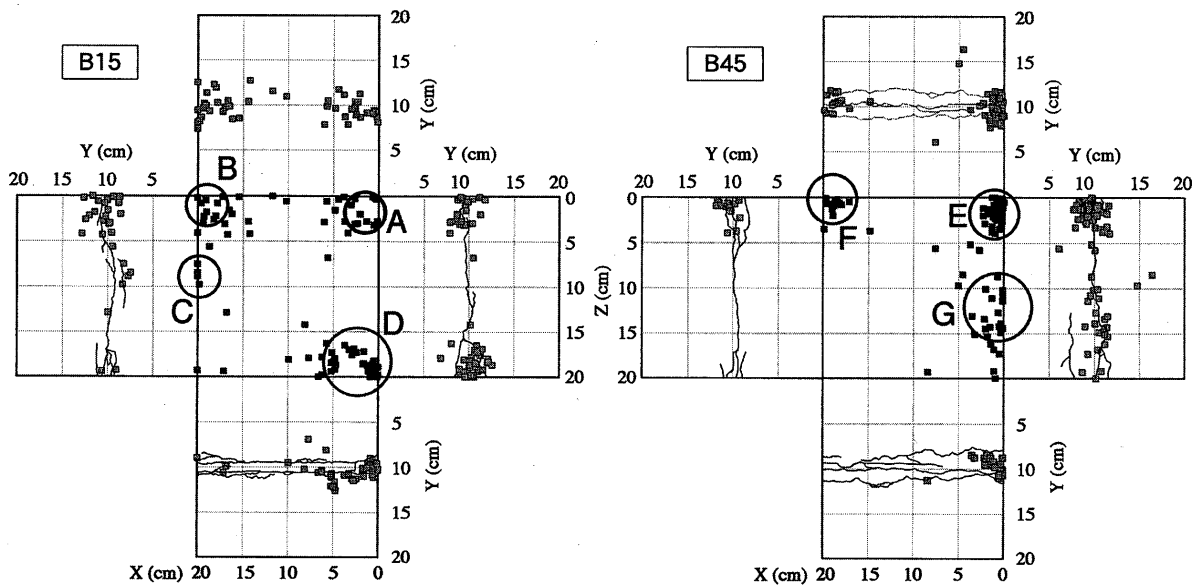


Fig. 5 Localization of AE sources and Crack Maps on the surfaces.

Table 2 Clustering data of AE Sources in B15.

zone	cluster No.	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	dL (mm)	iev
A	1	25	18	12	33	6
B	2	20	22	18	35	4
C	3	3	10	24	26	4
D	4	17	13	14	26	12
	5	5	16	11	20	5
	6	13	20	14	28	11

The symbols dx, dy and dz denote the cluster size in x, y and z direction respectively, and dL is the maximum length of the clusters.

Table 3 Clustering data of AE Sources in B45.

zone	cluster No.	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	dL (mm)	iev
E	1	10	11	12	19	14
	2	8	10	9	16	7
	3	11	11	12	20	10
	4	12	11	10	19	8
	5	5	13	8	16	7
	6	10	12	9	18	10
F	7	16	16	11	25	9
G	8	15	11	19	27	4
	9	15	4	20	25	6
	10	14	13	10	22	4
	11	19	11	13	26	4

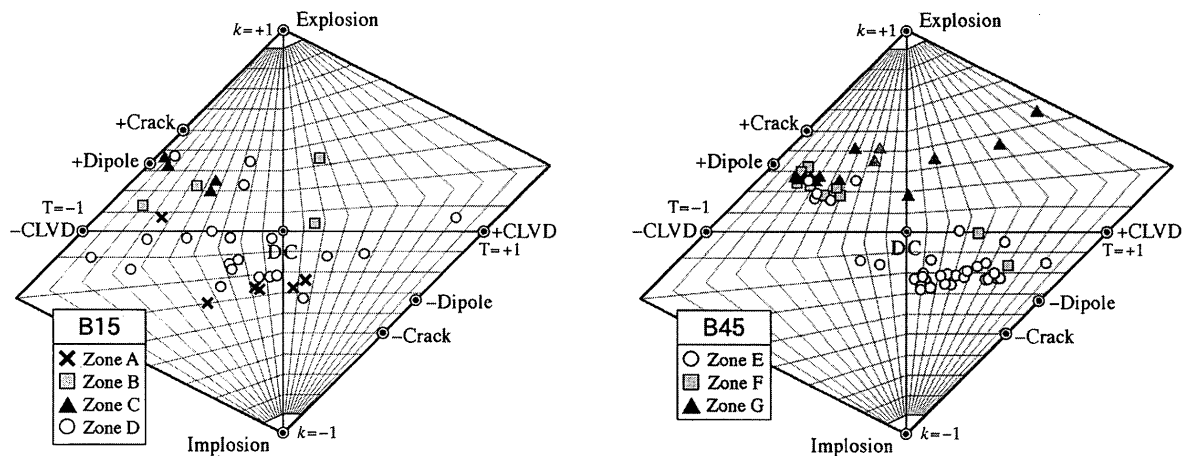


Fig. 6 Source Type Plot of B15 and B45.

数 14 とした場合は、全部で 3 つのクラスタが形成され、解析対象イベント数はわずか 23 にとどまった。一方、緩い条件 (14mm-5 イベント) の場合は、6 つのクラスタが得られ、40 イベントが解析対象となった。各 Zone ごとにこの条件を変えてクラスタリングを行った結果を、Table 2 と Table 3 に示す。dL と lev はそれぞれ、クラスタ領域の最大寸法と、クラスタ内のイベント数を表している。

なお、AE 波形の第 1 波の波長が約  $8 \mu \text{sec}$  であったことから、逆解析が成立する限界の dL は 35mm となる。

相対モーメントテンソル逆解析は、T. Dahm と C. Grosse によって作成されたプログラム "RMTI-AE" により行った。得られたモーメントテンソルは、等方テンソルと偏差テンソルに分解される。さらに、偏差テンソルは、固有値解析により DC 成分と CLVD 成分に分解することができる。

Fig. 6 に示す Source-Type Plot は、横軸に CLVD の強さを表す T と縦軸に相対的な体積変化 (等方成分の強さ) を表す k をとり、2 つのパラメータにより破壊源を表現する方法である<sup>13)</sup>。T と k は次式で定義される。

$$T = 2e_3' / |e_1'| \quad (8)$$

$$k = 2m_v / (|m_v| + |e_1'|) \quad (9)$$

ここに、 $m_v = (M_{11} + M_{22} + M_{33}) / 3$ 、 $e_1'$  は偏差テンソルの固有値で、条件  $|e_1'| \geq |e_2'| \geq |e_3'|$  を満たす。なお、DC 成分の強さは、 $DC = 1 - |T|$  で表される。T-k 平面において、[Explosion] と [-CLVD] および [Implosion] と [+CLVD] をそれぞれ結ぶ直線上には dipole 成分のみを持つ破壊源がある。せん断クラックは [+CLVD] と [-CLVD] の中間点 [DC] に位置し

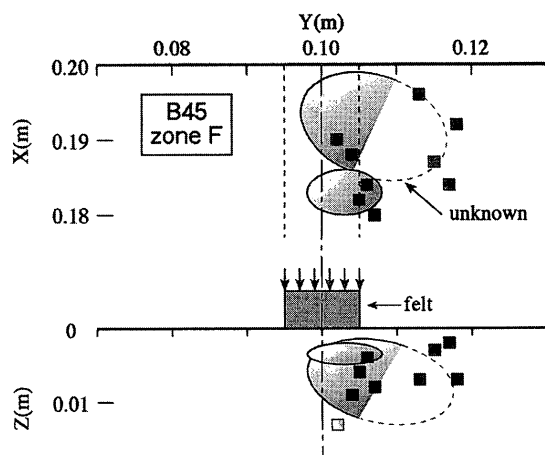


Fig. 7 Localization of AE sources and aggregates in zone F of B45.

ている。

B15 の Zone A, D と B45 の Zone E においては、破壊源の 80% 強が負の k 値を持っており、その多くが強い DC 成分を有している。特に Zone E ではその傾向が顕著である。Zone D と E の破断面には、粗骨材が集中して存在していることが実験後に観察された。この領域では載荷応力と端面拘束の影響で圧縮応力が卓越した三軸応力状態にあることから、骨材周辺に存在する多孔質層やモルタルが強い拘束のもとでせん断破壊した結果、せん断破壊領域が圧縮に伴って体積が減少したものと考えられる。

また、Zone E では多くの破壊源が +CLVD 寄りであるのに対して、Zone D では逆の傾向を示している。これは、供試体 B45 では引張強度が高いため、破壊時において端面拘束による圧縮応力も高い状態でひび割れが生じた結果、相対的に +CLVD 成分が卓越したものと考えられる。

Zone C と Zone G の AE 発生源は、割裂クラックの形成過程に関係したものであり、両者とも  $k = 0.2$

～0.45 の範囲に分布し、引張クラック (+Crack) や +Dipole に近い値を持っている。DC 成分が広く分布しているのは、微視的には割れ面の法線方向がランダムに分布していたためと考えられる。

B45 の載荷面近傍 Zone F では、もう一方の載荷面近傍の Zone E とは異なる破壊機構を示していた。2 つの破壊源を除いて  $k=0.15\sim 0.3$ 、 $DC=0.2\sim 0.6$  の範囲に分布しており、+Dipole に近い特性値を持っている。この領域では Fig. 7 に示すように、骨材とモルタルの剥離が観察され、AE 発生源は骨材表面の近くに分布していた。荷重比が  $P/P_{max}=0.7\sim 0.9$  の範囲で発生した破壊源であることを考えれば、これらは、ボンドクラックに対応した破壊源特性を表しているものと推定される。同じ特性を持つ破壊源が Zone E の中にもいくつか確認される。

## 5. まとめ

AE 計測と相対モーメントテンソル逆解析によって、コンクリートの割れ試験時のひび割れ特性を推定した結果、以下の知見を得た。

- (1) 圧縮応力が卓越した多軸応力状態のもとで生じる破壊源は負の等方成分を持ち、DC 成分も大きい。
- (2) +Dipole に近い特性値を持つ破壊源は、ボンドクラックに対応していると推定される。
- (3) 巨視的な引張クラック形成時における破壊源は、+Crack と同程度の等方成分を持っているが DC 成分も大きい。

今後、相対モーメントテンソル解析をコンクリートばりの曲げ試験に適用し、破壊進行領域のより詳細な解明に役立てたいと考えている。

## 謝辞

本研究は、平成 13 年度文部科学省在外研究員として、ドイツ国シュツットガルト大学建設材料研究所において行った研究成果の一部をまとめたものであり、公私にわたりご指導と暖かいご助言を頂いた H.-W. Reinhardt 教授に心から感謝いたします。

また、相対モーメントテンソル解析について貴重なご助言を頂いた C. Grosse 博士、および実験全般にわたり援助を頂いた F. Finck 研究員と G. Schmidt テクニシャンに深く感謝いたします。

最後に、貴重な機会を与えて下さいました福島工業高等専門学校の関係諸氏に心から感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 勝山邦久編著, 現場技術者のための AE 技術の応用, アイピーシー, pp.121-259, 1994.
- 2) Aki, K., P. G. Richards, Quantitative Seismology-Theory and Methods. Vol. 1, Freeman and Company, 1980.
- 3) 油野邦弘, 井上芳樹, 大津政康, AE 発生挙動の確率過程論解析によるコンクリートの劣化度評価研究, 土木学会論文集, No. 520/Vol.28, pp.13-23, 1995.
- 4) 山ノ内正司, 損傷変数に基づいたコンクリートの AE 発生特性の定式化とその考察, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp.431-436, 1997.
- 5) 山ノ内正司, AE 解析によるコンクリートの引張軟化過程の考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp.919-924, 1999.
- 6) Ohtsu, M., M. Shigeishi, H. Iwase and W. Koyanagi, Determination of crack location, type and orientation in concrete structures using acoustic emission, Magazine of Concrete Research, Vol. 43, pp.127-134, 1991.
- 7) Finck, F., Application of the moment tensor inversion in material testing, Otto-Graf-Journal, Vol. 12, pp.145-156, 2001.
- 8) Grosse, C., H.-W. Reinhardt and F. Finck, Signal-Based Acoustic emission techniques in civil engineering, J. of Materials in Civil Engineering, Vol. 15, Issue 3, pp.274-279, 2003.
- 9) Ross, A., G. R. Foulger and B. R. Julian, Source process of industrially-induced earthquakes at the Geysers geothermal area, California, Geophysics, Vol. 64, No. 6, pp.1877-1889, 1999.
- 10) Dahm, T., Relative moment tensor inversion based on ray theory: theory and synthetic tests, Geophys. J. Int., 124, pp.245-257, 1996.
- 11) Manthei, G., J. Eisenblaetter and T. Dahm, Moment tensor evaluation of acoustic emission sources in salt rock, Construction and Building Materials, Vol. 15, pp.297-309, 2001.
- 12) Prüfverfahren für Beton-Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Tech. rep., DIN1048, Teil 5, 7.4.2, Deutsches Institut für Normung, 1991.
- 13) Hudson, J. A., R. G. Pearce and R. M. Rogers, Source type plot for inversion of the moment tensor, J. Geophys. Res., Vol. 94, No. B1, pp.765-774, 1989.