

# 鉄筋とコンクリートの相互作用による破壊源の RMT 解析

福島工業高等専門学校 学生会員 小野和也  
 福島工業高等専門学校 前田 躍  
 福島工業高等専門学校 正会員 山ノ内正司

## 1.はじめに

コンクリートの巨視的なひび割れ先端には、微細なひび割れが累積した破壊進行領域が形成され、力学的な非線形挙動を支配している。そのため、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、コンクリートの微細なひび割れが発生する際に、それまで蓄えられたエネルギーの解放により、アコースティックエミッション(以下 AE)と呼ばれる弾性波が発生し、破壊源特性(モーメントテンソル)に応じた放射形式を有している。

これまで、AE波形解析により、モーメントテンソルを推定した研究はいくつか行われているが、近年、相対モーメントテンソル解析(RMT解析)の有効性が示されている。<sup>1)</sup>

鈴木・山ノ内は、鉄筋の引抜き試験時のAE波形に基づいて、破壊源位置標定解析と定性的な破壊モードの推定を行った<sup>2)</sup>。

本研究では、RMT解析を用いて鉄筋とコンクリートの相互作用によって生じた破壊源特性を定量的に評価することを目的とした。

## 2.相対モーメントテンソル解析(RMT解析)

一般に弾性体内部の領域を破壊源とするととき、任意の点Xの応答変位は次式で表される。

$$u^n(X, t) = \int_{\Sigma} m_{pq} * G_{ip \cdot q} d\Sigma \quad (1)$$

ここに $m_{pq}$ はモーメントテンソル、 $G_{ip \cdot q}$ はモーメントテンソルに関する動的グリーン関数、記号\*は合成積を表している。ここで、AE波形の波長よりも小さいサイズの領域内にある複数の破壊源(クラスタ)を対象とすれば、動的グリーン関数に含まれる破壊源と観測点の位置関係を表す項が等しいと見なせるため、遠方場のP波成分のみに着目すれば、2つの破壊源に関して式(1)は次のように変換される。

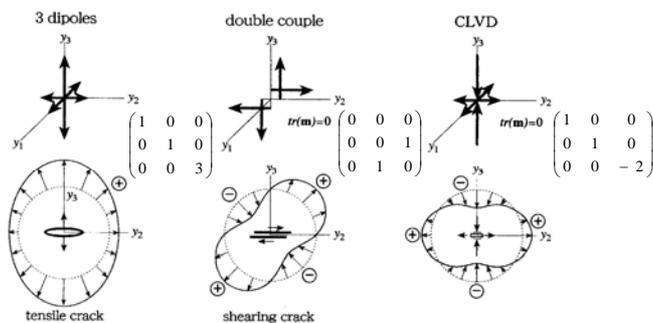


図1. 代表的な破壊源のモーメントテンソルと放射形式

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

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波形の振幅で、 $m_i$ 、 $a_i$ は次式で表される。

$$m_i = \begin{pmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{22} \\ m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{pmatrix}_i \quad (3) \quad a_i = \begin{pmatrix} \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \varphi \\ \sin^2 \theta \cdot \sin^2 \varphi \\ \sin^2 \theta \cdot \sin^2 \varphi \\ \sin 2\theta \cdot \cos \varphi \\ \sin 2\theta \cdot \sin \varphi \\ -\sin^2 \theta + 1 \end{pmatrix}_i \quad (4)$$

この式を、クラスタ内全てのイベントに適用することで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、固有値解析によって、DC成分とCLVD成分に分解できる。

図2のグラフは、横軸にCLVDの強さを表すT、縦軸に体積膨張を表すkをとり、2つのパラメータにより破壊源を表現している。Tとkは次式で定義される。

$$T = 2e_3' / |e_1'| \quad (5) \quad k = 2m_v / (|m_v| + |e_1'|) \quad (6)$$

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、 $|e_1'|$ 、 $|e_2'|$ 、 $|e_3'|$ を満たす。また、DC成分の強さは、 $DC = 1 - |T|$ で表される。図1に示した代表的な破壊源について、tensile crackは(T,k)=(-1,0.5)、shearing crackは(T,k)=(0,0)、+CLVDは(T,k)=(1,0)に位置している。

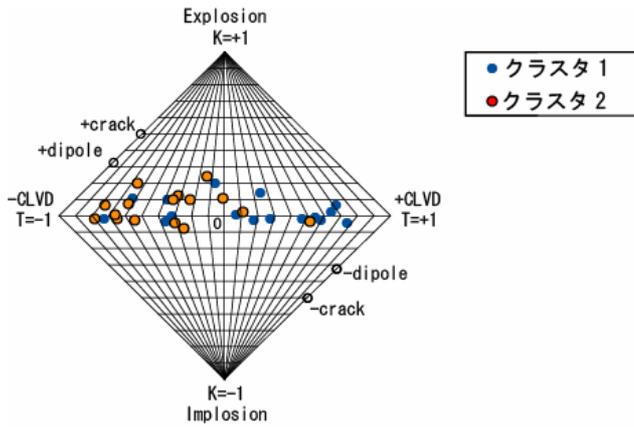


図 2.1.RMT 解析結果(クラスタ 1, クラスタ 2)

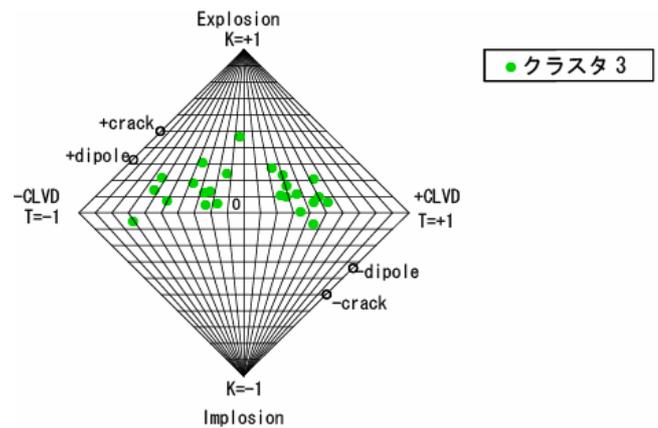


図 2.2.RMT 解析結果(クラスタ 3)

### 3. 実験概要

本研究では鉄筋の引抜き試験を行った。鉄筋の種類は異形鉄筋 D32、供試体形状は一辺の長さが 150mm の正方形とし、コンクリート下部から約 64mm の非定着長を設けている。水セメント比は 50%とし、最大骨材寸法は 20mm の砕石を使用した。

### 4. 実験結果と考察

この実験におけるイベントの座標を示したものを図 3 に、RMT 解析結果を図 2.1、図 2.2 に示す。解析時、クラスタ長は 1cm 程度、イベント数は、8~10 個程度と設定

している。図 3 には、鉄筋の挿入位置および、実際に起きたひび割れ具合が描かれている。また、クラスタ 1~4 は、RMT 解析を行ったクラスタの位置を示している。

図 3 から、鉄筋周辺にひび割れが集中していることがわかる。また、コンクリートに実際に入ったひび割れとコンクリートのイベントの位置がほぼ一致していることがわかる。

図 2.1 において、クラスタ 1 のイベントは T の値は広く分布しているが、体積膨張が小さいことが分かる。これは、このクラスタが鉄筋のふしの下部に集中しており、鉄筋のふしがすべることにより発生したものと考えられる。

クラスタ 2 のイベントは、クラスタ 1 と比べて k 値が大きい。図 2.2 のクラスタ 3 はさらに大きい k 値を示している。どちらも+dipole に近いイベントもある。どちらのクラスタも鉄筋から離れた所にあり、コンクリ

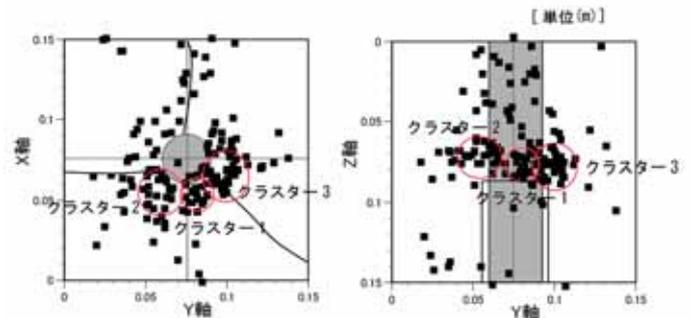


図 3. AE 発生源分布

ート内部で、一部、付着割裂破壊も引き起こされると推定される。

### 5. おわりに

今回の解析によって鉄筋周辺のイベントは、体積膨張が小さく、鉄筋から離れたイベントは+dipole に近い特性値を持つことが確認された。

しかし、T 値が広く分布する理由については、今後の検討が必要となる。さらに、RMT 解析の精度の向上や、汎用性の高度化を図っていくことも必要である。

### 6. 参考文献

- 1) Darm.T., Relative moment tensor inversion based on ray theory : theory and synthetic tests, Geophys.J.Int., 124, pp.245-257, 1996
- 2) 鈴木彩加, 山ノ内正司, 鉄筋周辺のコンクリートの破壊機構に関する研究, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2007