

AEによるモルタルとコンクリートの破壊進行領域内の 微視的破壊機構の解析

AE ANALYSES OF MICROFRACTURING MECHANISMS IN FRACTURE PROCESS ZONE IN MORTAR AND CONCRETE

新関 茂^{*} 佐武正雄^{**} 郷家光男^{**}

By Shigeru Niiseki, Masao Satake and Mitsuo Gohke

AE waves are monitored in the fracture toughness testing of DCB specimens. By using AE waveform analysis, moment tensors are determined from the amplitude of the first P-wave of AE, and, to investigate microfracturing mechanisms in the fracture process zone, eigenvalues and eigenvectors of moment tensors are analyzed. As a result of the above waveform analyses, statistical distributions of directions of normal vectors on microcrack surfaces and angles between directions of normal vectors on microcrack surfaces and of Burgers vectors are shown. From these statistical distributions, it is discussed that almost all the fracture modes of microcracks in the fracture process zone are the mixed type I and II or I and III though macrocracks are in the fracture mode I, and most of the directions of microcracks are not necessarily identical with those of macrocracks.

1. まえがき

コンクリートの破壊は、従来から、クラックの発生・進展と密接に関連していることが知られている。特に、コンクリート内の巨視的クラック先端近傍の多数の微視的破壊が生じる破壊進行領域の解明は、最近のコンクリート工学の中心的問題の一つである。しかしながら、現在、コンクリート内部の破壊進行領域を観察する方法は、AE や X 線¹⁾などの方法に限られている。特に、AEでは、X線が透過しにくい厚さや幅を持つ供試体の内部の破壊現象を観察することができる。

上記のような状況を考慮して、材料内の微視的クラックの形成にともなって発生するAEは、微視的破壊機構に関する種々の情報を含んでいると考えられる。筆者の一人はすでにコンクリートの二重片持梁供試体の破壊じん性試験におけるAEを計測し、AE発生原の3次元的な分布に着目した破壊進行領域の解析を行なっ

* 工博 東北大学助手 工学部土木工学科 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

** 工博 東北学院大学教授 工学部土木工学科 (〒985 多賀城市中央1の13の1)

*** 工修 清水建設 (〒105-07 東京都港区芝浦1-2-3)

ている²⁾。本研究では、モーメントテンソルを用いた波形解析理論を適用し、モーメントテンソルの固有値と固有ベクトルの解析を行なうことによって、コンクリートの微視的破壊機構を考察したものである。

2. AE波形解析の概要

等方弾性体内に微小なクラックが点 ξ に発生し、変位の食い違いが生じたとすれば、この変位の食い違いを表すBurgersベクトルを b , 食い違い面 Σ 上の法線ベクトルを n とくと、時間 t での点 x での変位ベクトル u は、次式で表される³⁾。

$$u_i(x, t) = \int_{\Sigma} G_{nk, l}(x, t; \xi) * M_{kl}(\xi, t) d\Sigma \quad (1)$$

$$M_{kl}(\xi, t) = b_i(\xi, t) n_i C_{ijkl} \quad (2)$$

G_{nk} は無限弾性体の Green 関数、 $M_{kl}(\xi, t)$ はモーメントテンソル、 C_{ijkl} は弾性係数テンソル、 $*$ は合成積を表す。食い違い面の面積 ΔA が距離 $r = |\xi - x|$ 及びAEの波長に比べて十分に小さい場合には、点音源近似が成立する。したがって、Green関数の具体形を式(1)に代入して、P波による変位のうちで、遠方で卓越する項に着目すれば、式(1)は

$$u_i(x, t) = \frac{1}{4\pi\rho V_p^3} \frac{\gamma_i \gamma_n \gamma_k}{r} M_{kl}(\xi) \dot{S}(t - \frac{r}{V_p}) \Delta A \quad (3)$$

となる。上式の γ はベクトル r の方向余弦ベクトル、 $M_{kl}(\xi)$ と $S(t)$ は $M_{kl}(\xi, t)$ の空間と時間に関する部分の関数(すなわち、 $M_{kl}(\xi, t) = M_{kl}(\xi) \cdot S(t)$)、 $S(t)$ は食い違い面の形成に関する時間関数、また、 $\dot{S}$ は $S(t)$ の時間に関する導関数である。式(3)の両辺を時間 t に関して2回微分して、P波初期の到達時間における S の値を k とすれば、式(3)は、

$$\ddot{u}_n(x) = K \frac{\gamma_i \gamma_n \gamma_k}{r} M_{kl}(\xi) \quad (4)$$

ここに

$$K = \frac{k \Delta A}{4\pi\rho V_p^3} \quad (5)$$

と書き改められる。本研究で使用したトランスデューサーは、共振周波数140KHzの加速度応答型のもので、トランスデューサーの底面の圧力に比例した電圧を出力する。したがって、P波初動の到達時間がわかれば、AE源の位置 ξ が決定され、 r 及び γ が得られ、トランスデューサーから出力されるP波初動が測定されれば、供試体の自由表面における反射係数を考慮して、式(4)から、モーメントテンソル M_{kl} が求められる。等方弾性体の場合、このモーメントテンソルの最大、中間、最小の固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ は、それぞれ次のように表される。

$$\lambda_1 = \mu b \frac{l_i n_i}{(1 - 2\nu) + 1} \quad (6)$$

$$\lambda_2 = \mu b \frac{2\nu l_i n_i}{1 - 2\nu} \quad (7)$$

$$\lambda_3 = \mu b \frac{l_i n_i}{(1 - 2\nu) - 1} \quad (8)$$

ここに

$$\underline{n} = b\underline{l} \quad (9)$$

また、 $\underline{l}$ は単位ベクトル、 μ はラーメの定数、 ν はポアソン比である。したがって、式 (6) より食い違い面の法線ベクトル $\underline{n}$ と Burgers ベクトルの単位ベクトル $\underline{l}$ のなす角は α は

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{\lambda_1 + \lambda_3 - 2\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3} \quad (10)$$

となる。また、それぞれの固有値に対応する固有ベクトルの $\underline{e}_1, \underline{e}_2, \underline{e}_3$ の方向は、それぞれ、

$$\underline{l} + \underline{n}, \quad \underline{l} \times \underline{n}, \quad \underline{l} - \underline{n} \quad (11)$$

である。したがって、食い違い面の法線ベクトル $\underline{n}$ と Burgers ベクトルの単位ベクトル $\underline{l}$ は、式 (10) と (11) から求められる。

3. 実験方法

破壊じん性試験には、Table 1 の配合 1 のコンクリートと配合 2 のモルタルを用いて作成した二重片持梁 (DCB) 供試体を使用した。Fig. 1 は実験方法、供試体寸法および配合 2 のモルタル供試体における繰り返し載荷曲線の例を示したものである。作成したコンクリート及びモルタル供試体は、すべて同一寸法で、厚さ 120mm、幅 440mm、高さ 600mm で、ノッチの延長上のリガメント部の両面に深さ 10mm の V 字型の Groove を有している。クラックの進展を拘束しないように、供試体の下端は 1 点支持とし、供試体の上部に取り付けたローラーを介して載荷した。載荷速度は、0.02mm/分とした。また、巨視的クラックの不安定進展を避けるために繰り返し載荷を行った。このような載荷と並行して、表面及び裏面の Groove に沿って進展する巨視的クラック長の測定及び AE 波の計測を行った。巨視的クラックは、二重片持梁供試体のノッチ先端から、下の方に向かって直線的進展する。トランスデューサーは供試体の表面と裏面にそれぞれ 4 個ずつ取付け、実験中に少なくとも一回トランスデューサーを再配置し、常にクラック先端を取り囲むようにした。

Table 1 Mix proportion of concrete and mortal

series	maximum grain size (mm)	W/C (%)	S/a (%)	unit weight (kg/m ³)			
				W	C	S	G
1	30	40	40	174	484	672	1066
2	5	40	—	296	750	1162	—

W; water C; cement S; fine aggregate
G; coarse aggregate a; total aggregate

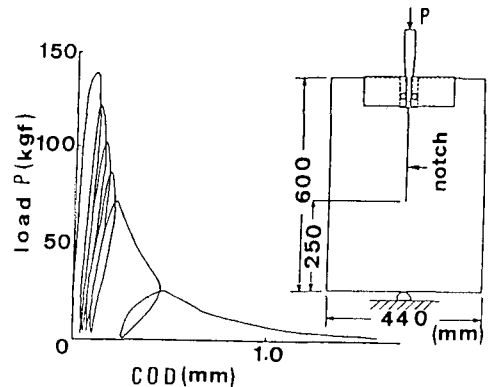


Fig.1 Load-COD relation and loading method

4. 実験・解析結果と考察

ここでは、波形解析の結果を示し、考察をおこなう。波形解析時の供試体における座標軸は Fig. 2 に示すように設定し、微小クラック面の法線ベクトル $\underline{n}$ の方向を示す θ と ϕ を Fig. 3 のように定める。位置標定可能であった AE 事象数は、配合 1 及び 2 の供試体で、それぞれ 272 個と 268 個であった。また、波形解析可能であったものは、それぞれ 192 個と 209 個であった。使用した AE 計測装置は 8 チャンネルであるが、位置標定とモーメントテンソルは、最低 6 個のチャンネルにおいて条件のよい AE 波が得られたものについて計算を行なった。Fig. 4 は、配合 1 と 2 の Burgers ベクトル $\underline{b}$ と微視クラック面の法線ベクトル $\underline{n}$ のなす角 α の頻度分布を 10° ごとに示したものである。この図は、配合 1 と 2 のどちらにおいても、微視的クラックは、そのほとんどが引張りとせん断の混合モードから形成され、特に、せん断モードの寄与が大きいものが多いことを

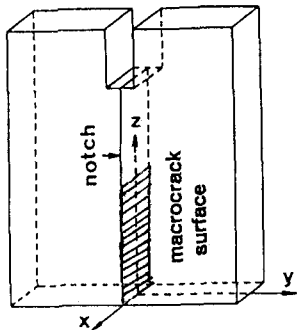


Fig.2 DCB specimen

示している。Fig. 5 と 6 は供試体及び巨視的応力分布の対称性を考慮し、配合1と2の微視的クラック面の法線ベクトル $\vec{n}$ の方向である θ と ϕ を 10° ごとに示したものである。Fig. 5は、法線ベクトル $\vec{n}$ の θ は配合1では、 $40 \sim 50^\circ$ と $80 \sim 90^\circ$ に、配合2では、 $30 \sim 40^\circ$ と $70 \sim 80^\circ$ にピークをもつ分布となることを示している。また、Fig. 6は $\vec{n}$ の ϕ は配合1では $40 \sim 50^\circ$ と $80 \sim 90^\circ$ 、配合2では $50 \sim 60^\circ$ と $80 \sim 90^\circ$ にピークをもつ分布となっている。

Fig. 2 の二重片持梁供試体の破壊じん性試験では、ノッチ先端から z 軸に沿って下方に進展する巨視的クラック先端近傍では、巨視的には y 軸方向に引っ張り応力、 z 軸方向には圧縮応力が作用している。したがって、ノッチ先端から延びるクラックは、巨視的にはモード I 型で表面に凹凸を持ち、引っ張り応力に垂直な方向、すなわち、 θ と ϕ が 90° 方向に法線ベクトルを持つ破壊面を形成する。一方、上記の結果が示すように、内部構造を持つモルタルやコンクリート内の微視的クラックは局所的条件に左右されて、巨視的クラックとは異なり、ほとんどモード I と II、又はモード I と III の混合型で発生・進展することを示している。コンクリートやモルタルは、様々な粒径の天然骨材が、セメントペーストによって結合された高度な複合材料である。したがって、微視的なクラックは、これらの骨材とセメントペーストの界面に発生・進展するものと考えられる。

次に、上記の結果を中央に円柱状の1個の疑似骨材を持つ2次元のモデルコンクリートを用いた一軸圧縮試験の結果⁴⁾と比較し考察する。この供試体の2次元平面内に、Fig. 3の $y-z$ 軸が、厚さ方向に x 軸があり、骨材の中心に原点があるものとするれば、疑似骨材とモルタルの界面のボンドクラックは、微視クラック面の法線ベクトルの θ が約 53° となる点を中心として、疑似骨材の表面に統計的分布をなして発生し、 θ が $35 \sim 90^\circ$ の範囲に進展する。その後、ボンドクラックの先端が $\theta = 35^\circ$ の点からモルタル部に侵入し、モルタルクラックが発生

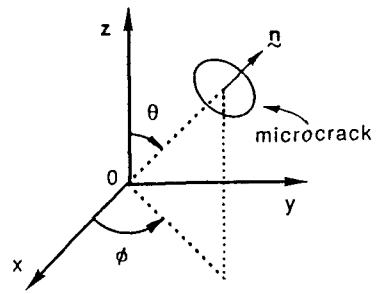


Fig.3 Angles θ and ϕ for normal vector $\vec{n}$ on microcrack surface

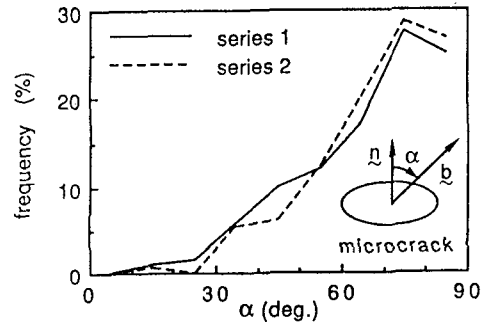


Fig.4 Statistical distribution of angle α

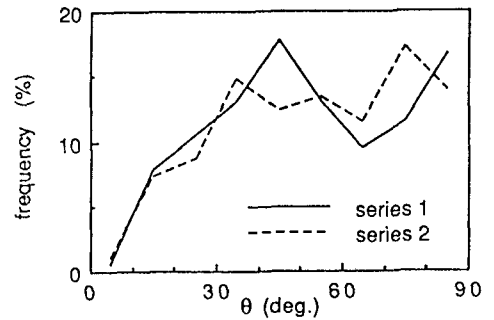


Fig.5 Statistical distribution of angle θ

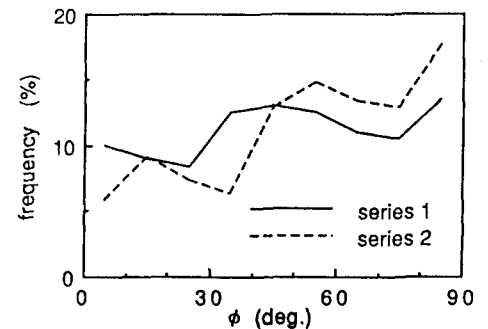


Fig.6 Statistical distribution of angle ϕ

して荷重軸方向に進展する。Fig. 5の配合 1 では $\theta = 40 \sim 50^\circ$, また, 配合 2 では $\theta = 30 \sim 40^\circ$ 方向で微視的クラックの発生が卓越しているが, これらの値はボンドクラック及びモルタルクラックの発生と関連していると考えられる。また, Fig. 5 では, 配合 1 及び 2 で共に $\theta = 30 \sim 90^\circ$ の方向で微視的クラックが頻発しているが, この方向は, ほぼ, 疑似骨材の表面にボンドクラックが形成される範囲と一致している。 $\theta = 90^\circ$ は凹凸を持つ巨視的クラックの平均的な方向であり, $\theta = 70 \sim 90^\circ$ における発生頻度の増加は, この巨視的なクラック面の形成と関連しているものと考えられる。

Fig. 6 は, 巨視的クラックの方向である $\phi = 90^\circ$ に近づくにつれて頻度が増加する傾向にあるが, $\phi = 0 \sim 90^\circ$ 間において, 極端な差のない頻度で微視的クラックが発生している。これは, 破壊進行領域内の骨材の横方向の面に全体的にボンドクラックが発生することに対応していると考えられる。

5. 結び

微視的なクラックの形成にともなって発生するAE波にモーメントテンソルを用いた波形解析理論を適用して, 間接的にコンクリート材料内の破壊進行領域における微視的破壊機構を考察した。その結果, 次のような結論が得られた。

- (1) 破壊進行領域内の微視的クラック形成時における 変位の食い違い方向は, 巨視的クラックとは異なっており, 微視的クラック面とは必ずしも直交しない。そして, ほとんどがせん断の寄与の大きい引張りとせん断のモード I と II 又は I と III の混合型で発生する (Fig. 4)。
- (2) 微視的クラック面の方向は, 巨視的クラックとは異なり, 統計的分布となっている (Fig. 5と6)。この統計的分は, 破壊進行領域内のボンドクラックおよびモルタルクラックの発生・進展と密接に関連していると考えられる。

謝辞

本研究における実験は, 東北大学建築学科の三橋博三助教授及び野村希晶助手との共同研究の一部としておこなわれたものであることを記し, ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 庄司芳之, 大塚浩司, 森植夫, コンクリートのひびわれ先端近傍の微視的破壊挙動に関する実験的研究, 土木学会第44回年次講演会概要集, V, pp. 526-527, 1989
- 2) 新関 茂, 三橋博三, 野村希晶, 改良された3次元AE位置標定法によるモルタルとコンクリートの破壊進行領域内の微視的クラックの解析, 構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 383-390, 1992
- 3) 大津政康, アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, pp. 74-99, 1988
- 4) Mihashi, H., Sasaki, T. and Izumi, M., Failure Process of Concrete Crack Initiation and Propagation, Mechanical Behaviour of Materials, Vol. 3, pp. 97-107, 1979

(1992年9月21日受付)