

CS-16 鉄筋コンクリートの曲げ破壊におけるA E波形の逆解析

熊本大学工学部 正会員 重石光弘

熊本大学工学部 非会員 辻 伸幸

熊本大学工学部 正会員 友田祐一

1. はじめに

固体材料におけるひびわれ現象においては、肉眼で確認できるひびわれが発生する以前から、微小なひびわれが無数に形成され、そのエネルギー開放過程によってA E（アコースティック・エミッション）と呼ばれる弾性波動現象がみられる¹⁾。本研究では、鉄筋コンクリートにおけるひびわれ現象でのA E波動を検出し、その信号波形から発生源である微小ひびわれを逆解析することによって、破壊機構の観察を試みた。

2. A E波形の逆解析によるA E発生源の定量評価

微小ひびわれの発生に伴うA E波動は境界要素法に基づいて一般化されており、その基礎式はA E波の到達直後の項のみ、すなわちP波初動部を取り出して、次式で表わされる²⁾。

$$A(x) = \frac{1}{4\pi\rho v_p^3} \operatorname{Re}(s, \gamma) \frac{\gamma_p \gamma_q m_{pq}}{R} \cdot DF \quad (1)$$

ここに、 $A(x)$ は観測点 x におけるA Eセンサ出力、 ρ は伝播媒体密度、 v_p は伝播速度、 R は観測点と発生源との距離、 s はA Eセンサ感度方向ベクトル、 γ は観測点から発生源への方向ベクトル、 $\operatorname{Re}(s, \gamma)$ はA E波の入射（反射）係数、 m_{pq} は発生源に関するモーメントテンソル、 DF は微小ひびわれ面積である。式(1)中の m_{pq} は、A E発生源である微小ひびわれの幾何学諸量を表す2階の対称テンソルで、次式のように表わされる。

$$m_{pq} = \lambda b l_k n_k \delta_{pq} + \mu b l_p n_q + \mu b l_q n_p \quad (2)$$

ここで、 λ, μ はLame's Constants、 δ_{pq} はKronecker's Delta、 bl はBurger's Vector、 l はひびわれ面の運動方向ベクトル、 n はひびわれ面の法線方向ベクトルを表している。これに固有値解析を適用すれば、モーメントテンソルの持つ微小ひびわれの幾何学的な情報として、次のような主値と主方向が得られる。

$$\begin{aligned} \text{最大(第一)固有値: } e_1 &= \mu b \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} + 1 \right) & \text{第一固有ベクトル: } e_1 &= l + n \\ \text{中間(第二)固有値: } e_2 &= 2\mu b \nu \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} \right) & \text{第二固有ベクトル: } e_2 &= l \times n \\ \text{最小(第三)固有値: } e_3 &= \mu b \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} - 1 \right) & \text{第三固有ベクトル: } e_3 &= l - n \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 ν はPoisson's Ratioである。さらにこれらの固有値は、図1に示すようなせん断成分 X 、引張偏差成分 Y 、および引張釣合成分 Z に分解することができ³⁾、各成分は次式により一意的に導くことができる。

$$e_1 = X + Y + Z, \quad e_2 = -0.5Y + Z, \quad e_3 = -X - 0.5Y + Z \quad (4)$$

これらにより、A E波の発生源である微小ひびわれの発生モードを、せん断成分の含有率によって分類することができ、式(3)で表わされる固有ベクトルとの関係から微小ひびわれの開き方向を決定することができる。せん断成分が比較的小さいA E源の発生モードは引張卓越型と見なすことができ、この微小ひびわれの開き方向は、第一固有ベクトルの方向であると考えられる。一方、せん断成分が比較的多く含まれる場合には発生モードがせん断卓越型であると見なす

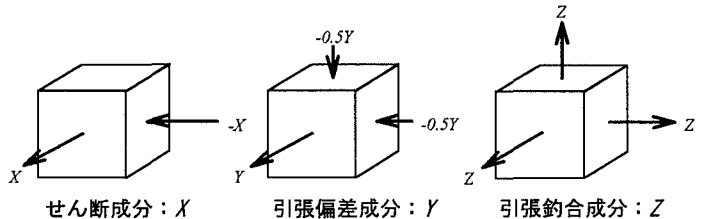


図1 モーメントテンソルの固有値の成分分解

ことができ、第一固有ベクトルと第三固有ベクトルの和の方向が、微小ひびわれ面の法線方向またはその運動方向を示していると考えられる。

3. 鉄筋コンクリート梁の曲げ破壊の観察

図2の様な下縁中央にノッチを設けた鉄筋コンクリート梁供試体に対し、図3に示す様に曲げ载荷を行い、その際に検出されたAE波に対して、前述のAE波形解析法を適用して、AEの発生源となった微小亀裂の位置、形成モード（せん断型・引張型）およびその微小亀裂の面の運動方向を逆解析した。

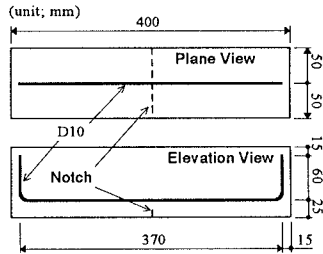


図2 鉄筋コンクリート梁供試体

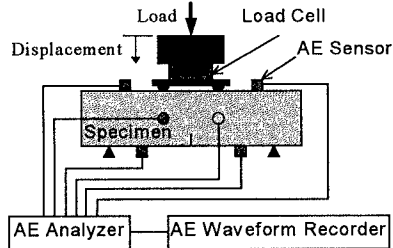


図3 曲げ破壊試験におけるAE計測

図4は、得られた逆解析結果の中から、形成モードがせん断成分率75%以上のせん断型微小ひびわれ（×印）およびせん断成分率25%以下の引張型微小ひびわれ（↔印）を抜粋し、その微小ひびわれの発生位置にそのひびわれ面の運動方向とともに、载荷試験における時間履歴順に表示したものである。これらの結果から、ノッチ先端から進展するひびわれの形成過程として、段階(i)から段階(iv)にかけて初期の段階では引張型亀裂が多数形成され、次第にせん断型亀裂が順次ひびわれの進展方向へ形成されていったことが観察される。また、最後の段階(v)では、鉄筋位置周辺にもせん断型微小ひびわれが存在しており、これらは鉄筋とコンクリートとの付着切断に寄与したものであることが伺える。

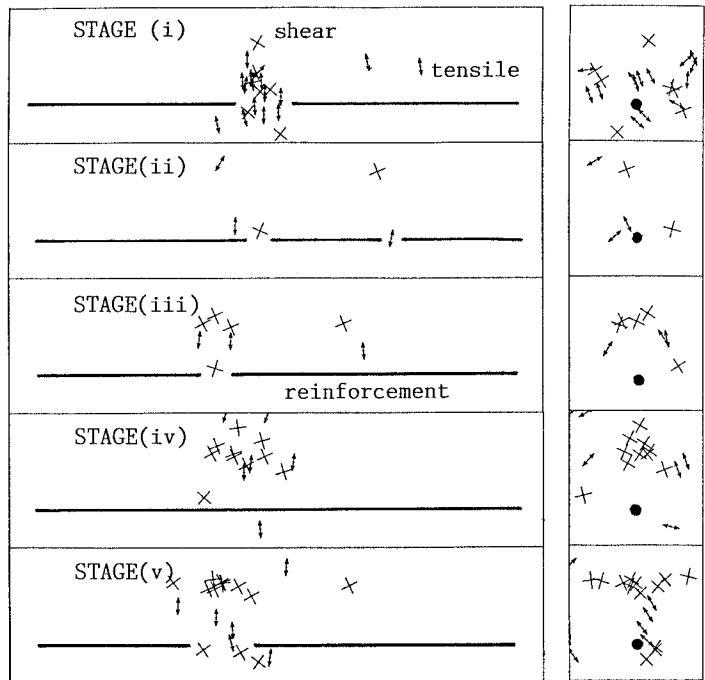


図4 鉄筋コンクリート梁の曲げ破壊時のAE波形解析結果

【参考文献】

- 1) 大津政康, 「アコースティック・エミッションの理論と特性」, 森北出版, 1988.
- 2) M.Ohtsu, M.Shigeishi, H.Iwase, 'AE Observation in the Pull-out Process of Shallow Hook Anchors', Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, No.408 / V-11, 1989, pp.177-186.
- 3) L.Kunopoff, and M.J.Randall, 'The Compensated Linear Vector Dipole: A Possible Mechanism for Deep Earthquakes', Journal of Geophysical Research, Vol.75, No.26, 1970, pp.4957-4963.