

論文 損傷を受けた鉄筋コンクリートの低レベル繰り返し載荷時における AE 波形解析

辻 伸幸*¹・重石 光弘*²・大津 政康*³

要旨：供用中に損傷を受けた鉄筋コンクリートに、アコースティック・エミッション波形（AE-SiGMA）解析と周波数特性を用いて劣化評価を行うための基礎的研究を行った。あらかじめ静的曲げ載荷によって損傷を与えたRC供試体に対して、低い繰り返し載荷時に生じるアコースティック・エミッション波（AE波）を検出し、波形解析を行いAEの発生源であるクラックの位置とクラックの運動方向などの幾何学的諸量を逆解析によって求めるとともに、周波数の特性によって発生原因別のAE波の特徴を検討した。

キーワード：アコースティック・エミッション、疲労試験、SiGMA解析、周波数特性

1. はじめに

耐用年数を満たした公共建設物は、今後経済性や環境保全の点から、以前のように大規模な再開発が困難になると予想され、建設物の劣化度評価を行うことが重要になると考えられる。一般的に、材料の破壊はマイクロクラックが多数発生し、それらの集積により主破壊に至ると考えられており、マイクロクラックの発生する際には、アコースティック・エミッション（AE）と呼ばれる弾性波の放射現象のあることが知られている[1]。また、AEには、クラックの発生・進展によって発生するAEとクラックの面の接触・摩擦によって発生するAEの2種類あることも知られている。そこで、この弾性波の放射現象を利用して、内部のひびわれ発生状況を推定するAE-SiGMA解析[2]を適用することで、RC構造物の劣化度の評価を試み、また、周波数特性とAE波の発生源であるクラックの形成モードの関係について検討した。

2. 解析手法

AE-SiGMA解析は、クラック位置評定とクラックの面の方向、クラックの種類を同定するための解析手法である。AE波はエネルギーの解放過程において発生する弾性波動であり、弾性波動の基礎式に境界要素法を適用することでAE波動の基礎式は次のように与えられる。

$$u_i(x,t) = \int_F [T_{ik}(x,x',t) * b_k(x',t)] dS \quad (1)$$

ここで、 $u_i(x,t)$ は時刻 t における点 x での変位、 $T_{ik}(x,x',t)$ は点 x の変位によって発生する点 x' における応力ベクトル、 $b_k(x',t)$ はバーガスベクトル、 dS は面積要素である。また、p波の初動部のみについて考えれば、式(1)は次のように書き換えられる。

- *1 熊本大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻（正会員）
- *2 熊本大学助手 工学部土木環境工学科 博（工）（正会員）
- *3 熊本大学教授 工学部土木環境工学科 工博（正会員）

$$u_i(x) = \frac{1}{4\pi\rho} v_p^3 \cdot \frac{1}{R} \gamma_i \gamma_p \gamma_q m_{pq}(x') \cdot DF \quad (2)$$

DF ; 面積要素 R ; 発生源から検出点までの距離 γ_i ; p波の伝播方向
 γ_p, γ_q ; γ_i の p, q の方向余弦 ρ ; A E 波の伝播する物体の密度

m_{pq} は、モーメントテンソルと呼ばれる2階のテンソルで、6点以上の計測点で同一のA E波が計測されれば一意的に求められ、その成分の意味はクラックの法線ベクトルを n 、クラックの運動ベクトルを l として次のように表される。

$$m_{pq} = \begin{bmatrix} \lambda_k + 2\mu l_1 n_1 & \mu(l_1 n_2 + l_2 n_1) & \mu(l_1 n_3 + l_3 n_1) \\ \text{sym.} & \lambda_k n_k + 2\mu l_2 n_2 & \mu(l_2 n_3 + l_3 n_2) \\ & & \lambda_k n_k + 2\mu l_3 n_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 λ, μ はLameの定数である。また、モーメントテンソルを固有値解析することで、クラックの面の方向とクラックの種類が求められる。モーメントテンソルの固有値、固有ベクトルを示すと次式のようになる。

$$\begin{aligned} \text{最大主方向 : } e_{max} &= \mu b \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} + I \right) & e_{max} &= l + n \\ \text{中間主方向 : } e_{mid} &= 2\mu b \nu \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} \right) & e_{mid} &= l \times n \\ \text{最小主方向 : } e_{min} &= \mu b \left(\frac{l_k n_k}{1-2\nu} - I \right) & e_{min} &= l - n \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 ν はポアソン比である。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 、引張等方成分 Z のそれぞれに分解することが可能になる[3]。

式(5)によって、せん断成分の占める比率(せん断寄与率)が求められ、そのクラックの生成モードがせん断が卓越したものであったか、あるいは引張が卓越したものであったかを定量的に示すことになる。

$$e_{max}/e_{max} = 1.0 = X + Y + Z \quad e_{mid}/e_{max} = -0.5Y + Z \quad e_{min}/e_{max} = -X - 0.5Y + Z \quad (5)$$

SiGMA解析の解析結果を直接確認し、その信頼性を検討することは特別な場合を除いて不可能である為、Post-SiGMA解析[2]と呼ばれる後処理解析を用いることで、SiGMA解析の解析結果の信頼性を検討する。

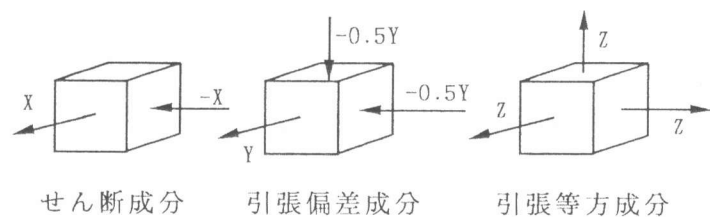


図-1 モーメントテンソルの固有値の成分分解

3. 実験概要

実験に使用した供試体は、D10の異形鉄筋を図2のように配置した標準角柱供試体で、下面に深さ10mm、幅1mmのノッチを疑似既存ひび割れを想定して加工した。使用したコンクリートの示方配合を表1に示す。また、コンクリートの物性値は、圧縮強度 $\sigma_p = 49.5\text{MPa}$ 、ヤング率 $E = 34.9\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.215$ 、p波の伝播速度 $v_p = 4770\text{m/sec}$ であった。

表-1 示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位体積重量(kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE剤
20	4.6	4.1	50.0	48.0	172	346	836	1026	0.104

静的曲げ荷重（40kN程度）によって曲げひび割れを進展させた供試体に、直ちに1回目の繰り返し荷重を行った。一連の過程で発生したAE波を図3のような波形解析が可能な6チャンネルのAE計測システムにより検出し、変位計による鉛直方向の変位、ロードセルによる荷重荷重もあわせて計測した。AEセンサは200~1000kHzの周波数帯域での応答が平坦な広帯域型センサを使用し、図4のように供試体表面に配置した。また、AEセンサが検出したAE波をプリアンプ及びメインアンプによって、60dBに増幅し、トリガチャンネルとしたセンサ#1において、しきい値（センサ出力に対して120mV）以上のAE波を記録するように設定した。また、荷重変位曲線を図5に示す。

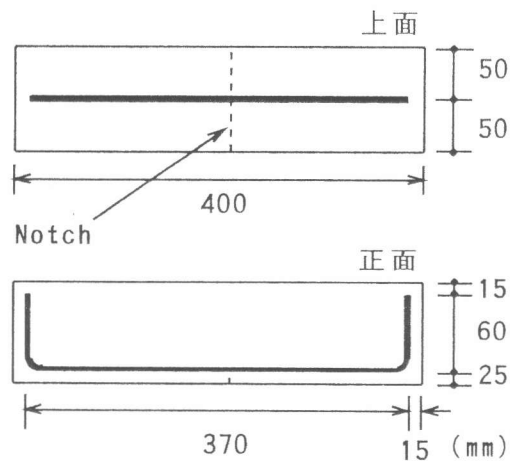


図-2 供試体

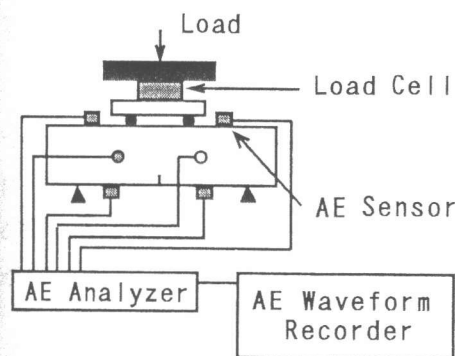


図-3 AE計測システム

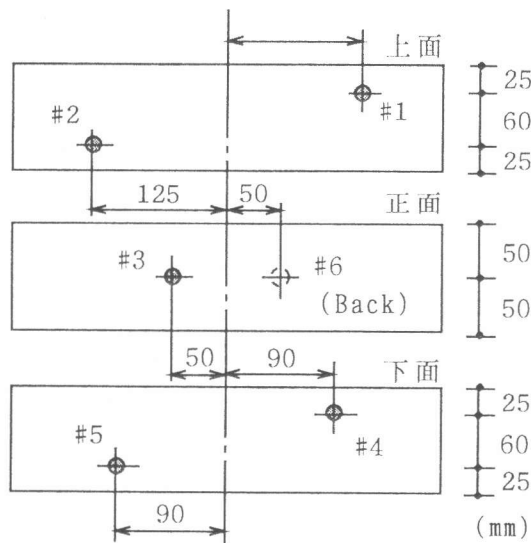


図-4 AEセンサ配置図

4. 解析結果および考察

4.1 SiGMA解析の解析結果および考察

1つのマイクロクラックが発生すると、6個のAEセンサがそれぞれAE波を検出し、1事象となる。実験において記録された総事象数は2548、SiGMA解析の結果が得られた事象数は462、Post-SiGMA解析によって信頼性の確認された事象数は74であった。

図7、8は、最終的に得られた解析結果の74事象を図5に示す前半部の44事象、後半部の30事象に分けて示したものである。また、実線は最終的な破断面を表している。

クラックの形成モードのせん断寄与率が25%以下のクラックを引張クラック、25%から75%のクラックを引張とせん断の混合クラック、75%以上のクラックをせん断クラックとしてクラックを分類した。

図中の両矢印 \leftrightarrow で、あるいは2つの両矢印が交差する印は引張クラックを表し、単なる2線分が降参する \times 印はせん断クラック、または引張とせん断の混合クラックを表している。この場合、交差した線分の一方はクラックの面の法線ベクトル n を示し、他方はクラックの運動方向 l を示している。したがって、交差する線分の形成する角が直角に近い \times 印がせん断クラック、鋭角な \times 印は、せん断寄与率の低い混合クラックとなる。これらの簡単なモデルを図6に示す。

AEの発生源であるクラックはノッチの先端から発生したひび割れに沿って分布しており、実験の前半部においてはひび割れの周辺に集中している。実験の後半部においては実験の前半部のクラックの分布領域よりも遠方に分散して存在している。この結果は、ひび割れの進展に伴い、破壊進行領域が移動しているということを示しているものと考えられる。

また、実験の後半部においては実験の前半部よりもせん断寄与率の高いせん断クラック及び混合クラックが卓越して発生している。

図7、8の側面の図から、マイクロクラックが実験の前半部においては供試体の下半分の部分に大多数が分布しており、後半部においては供試体の上半分に分布している様子が見受けられることから、実験の前半部においては供試体の下部においてひび割れが発生あるいは進展し、後半部においては更にそれらのひび割れが供試体上部にまで進展していったと考えられる。

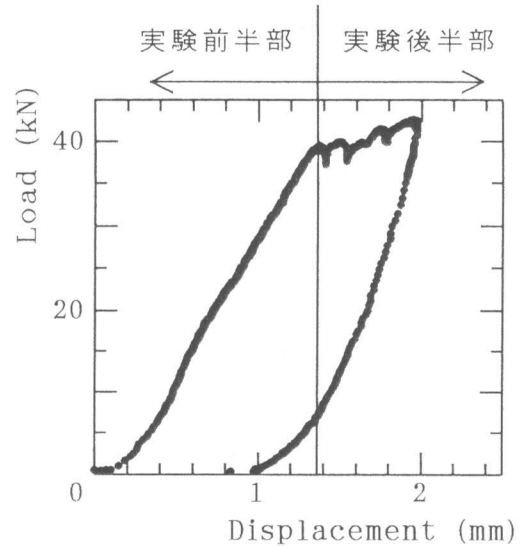


図-5 荷重変位曲線

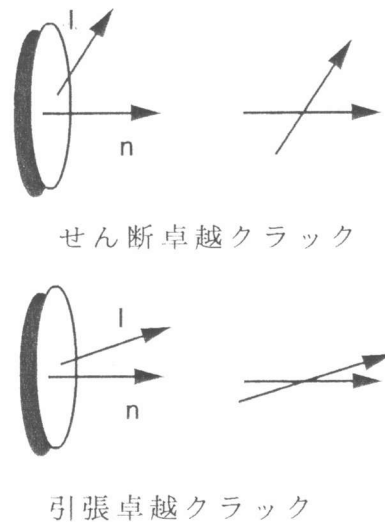


図-6 クラックのモデル図

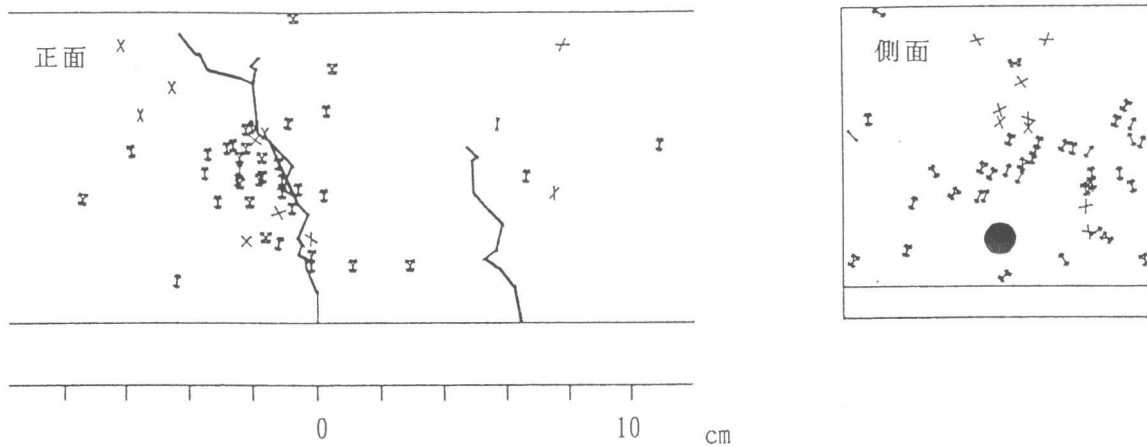


図-7 AE波形の逆解析結果（前半部）

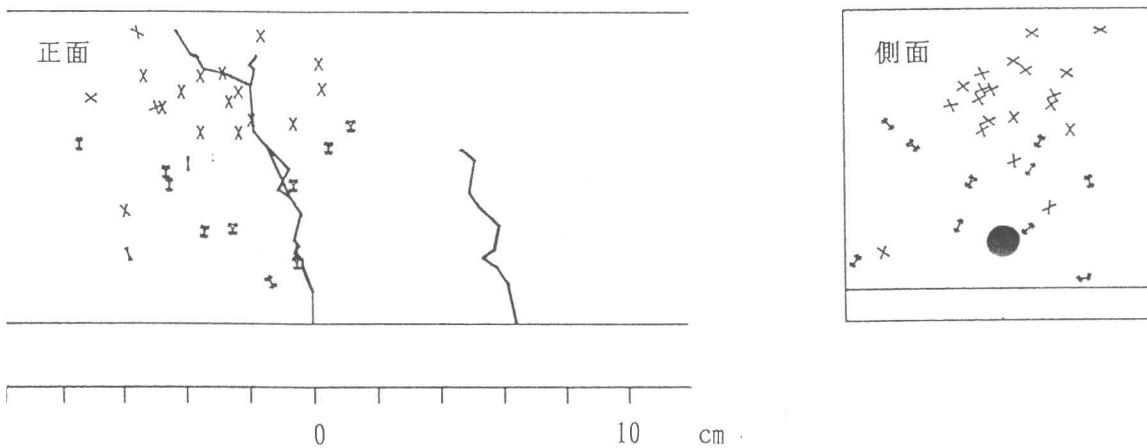


図-8 AE波形の逆解析結果（後半部）

4. 2 AE波の周波数特性と形成モードのせん断寄与率についての考察

SiGMA解析の解析結果のうち信頼の置ける74事象について、トリガチャンネルであるセンサ#1におけるAE波をFFT処理し、周波数分布とクラックの形成モードのせん断寄与率の関係について検討した。せん断寄与率の低いクラックの生成によって発生したAE波とせん断寄与率の高いクラックの生成によって発生したAE波の典型的な周波数分布の例として、せん断寄与率が17.38%, 90.57%のAE波の周波数分布を図9, 10に示す。

図9, 10から、周波数のピーク値は形成モードのせん断寄与率に関係なく50kHz付近の値をとることがわかる。このことから、周波数のピークの値はクラックの形成モードに関係なく、破壊される材料の性質に依存するのではないかと考えられる。また、せん断成分率の低いクラックの周波数分布は、せん断寄与率の高いものに比べより広帯域な性質が認められた。終局破壊が近づくにつれてせん断クラックの増加した結果とこれらの結果から、せん断寄与率と周波数分布の関係は、劣化の評価を行う上で利用できると考えられる。

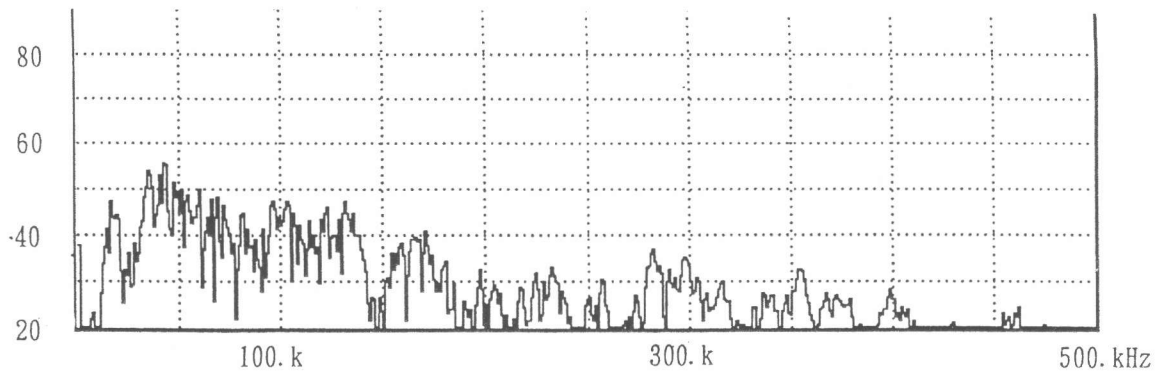


図-9 セン断寄与率の低いAE波の周波数分布（セン断寄与率：17.38%）

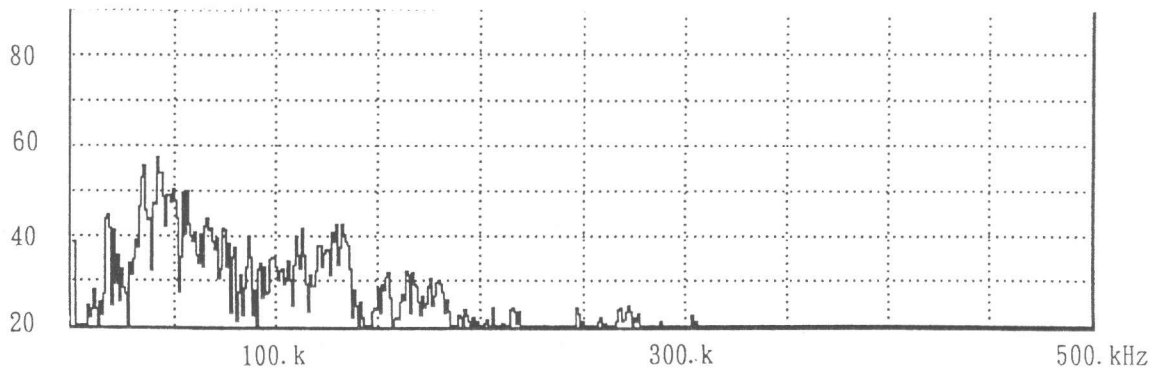


図-10 セン断寄与率の高いAE波の周波数分布（セン断寄与率：90.57%）

5. まとめ

本研究は、供用中に損傷を受けた鉄筋コンクリートの劣化の評価手法の開発のための基礎的研究を行ったものである。実験においては、既存ひび割れとして人工的にノッチを下面中央に加工した鉄筋コンクリート供試体に、静的曲げ荷重により供試体にあらかじめ損傷を与え、引き続き繰返し荷重を行った。この際に発生したAE波を検出し、SiGMA手法によりAEの発生源であるクラックの位置とクラックの幾何学的諸量の同定を行った。また、実験により得られたAE波をFFT処理し、周波数分布についても検討を行った。その結果、以下のような点が明らかになった。

- (1) 繰返し荷重による破壊過程では終局に近づくにしたがい、せん断クラックが増加する。
- (2) 引張クラックのスペクトル成分はせん断クラックよりも広帯域な周波数特性が認められる。
- (3) 終局破壊に近づくにつれて、せん断クラックの増加した結果を考慮すれば、スペクトル成分の変化も劣化評価に適用可能と考えられる。

参考文献

- [1] 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、1988
- [2] 大塚政暢、福岡貴己、友田祐一、大津政康：AE-SiGMA解析によるコンクリートの破壊進行領域の解明、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17, No. 1, pp. 1209-1214, 1995. 6
- [3] 重石光弘、大津政康：AE波形解析によるコンクリート部材の曲げ破壊の観察、第10回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集、1995. 7