

論文 常時微動荷重下における鉄筋コンクリート梁の AE 発生挙動に関する検討

森 大介*¹ 岡本享久*² 内田昌勝*³ 柴田辰正*¹

要旨：アコースティック・エミッション(AE)法による RC 構造物の健全性診断において、活荷重の作用がきわめて小さい建築系のコンクリート構造物の AE 法の適用は困難とされていたが、常時微動振動に注目し、解決を計ったものである。鉄筋コンクリート梁に疲労試験機により常時微動レベルの荷重を作用させ、発生する AE の測定・分析を行った。その結果、常時微動により発生した AE を分析することにより、過去の荷重履歴によって生じた劣化の程度を推定できることがわかった。

キーワード：鉄筋コンクリート、ひびわれ、常時微動、アコースティック・エミッション、非破壊検査

1.はじめに

阪神淡路大震災を機にコンクリート構造物の安全性への不安、および国内の経済状況の変化などから、最近、建築系鉄筋コンクリート構造物の補修・補強工事が著しく増加している。その際、事前の非破壊検査による構造物の健全性診断を正確に行うことが要求され、ひびわれの大きさ、進展などの検知精度の向上等が望まれている。橋梁等の土木構造物においては、自動車の走行による活荷重によって構造物内部から発生する AE を計測し、鉄筋コンクリート構造物のひびわれの発生状況等の健全性診断が行われている[1]。建築構造物においては、振動荷重の常時発生源がないため、屋上にマスダンパーを設置して建築物に人工的に振動荷重を与え診断する方法が考えられているが、大規模な運搬、設置などが必要とされ、経済的な方法とはいえない。

そこで本研究では、構造物が種々の震動源からランダムな波で常時振動されることに着目し、以下の手順で AE 法の建築系構造物への適用を計ったものである。まず、静的荷重を受ける無筋コンクリートおよび繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリートについて、純曲げのひびわれによる AE および純せん断のひびわれによる AE についてそれぞれ特徴を解明した。続いて、荷重レベルを曲げひびわれ発生程度の荷重、鉄筋がその許容応力度に達したときの荷重、および鉄筋が降伏するときの荷重の 3 種のレベルについて、疑似常時微動の下鉄筋コンクリートからの AE 挙動を解析した。これらの結果から、常時微動下にある実際の建築系コンクリート構造物のひびわれを中心とする劣化の程度を予測する方法をここに提案するものである。

2.静的繰り返し載荷下における鉄筋コンクリートの AE 波形とひびわれパターンの識別との関係

2.1 実験概要

静的繰り返し載荷による検討では、10×10×40cm の試験体を使って、無筋コンクリート及び鉄筋コンクリートに純曲げおよび純せん断載荷を行い、その際に発生する AE の波形を図 1 に示すような AE 計測システムを使用して測定を行った。AE センサーは 150kHz 共振型センサーを用いた。プリアンプの増幅率は 40dB とし、しきい値 40dB を越えた AE の波形を AE 測定装置(6 チャ

*1 日本セメント(株)中央研究所 研究員 工修 (正会員)

*2 日本セメント(株)中央研究所 主席研究員 工博 (正会員)

*3 日本セメント(株)中央研究所 副主任研究員 工修 (正会員)

ンネル型)にて計測・記録を行った。図 2 にセンサーの配置を示す。記録した AE 波形は信号処理を行い、図 3 に示すようなパラメータデータにより検討を行った。コンクリートの調合は表 1 に示すとおりである。試験体は打設翌日に脱型し、材齢 28 日まで気中養生を行い、載荷試験を行った。試験時のコンクリートの圧縮強度は、 $40.2(\text{N}/\text{mm}^2)$ であった。載荷方法は、曲げは JIS A 1106 に、せん断は二面せん断により、JCI 繊維補強コンクリートのせん断試験方法 SF-6 に準拠して行った。鉄筋コンクリートの繰り返し載荷は試験体下部のひびわれ幅の変化が 0.1,0.2,0.3,0.4mm および破壊までの 5 回行った。試験体にはひびわれ発生位置を特定するために、純曲げには長手方向中央部に、純せん断はせん断面の上下にノッチを導入した。無筋コンクリートは急激な破壊を防ぐために試験体下部にゴム塊を敷いた。なお、鉄筋コンクリートは D10 の異形鉄筋を長手方向中央に引張面からかぶり 25mm の位置に設置した。

2.2 実験結果と考察

(1)無筋コンクリート

曲げ破壊およびせん断破壊により発生した AE のパラメータデータの立ち上がり時間を最大振幅値で除した値[2](以下立ち上がり時間振幅比とする)で、コンクリートの破壊状況と AE 波形のパターンを対比させ評価した。図 4 に曲げ、図 5 にせん断の評価結果を載荷荷重とともに示す。測定した代表的な AE 波形を図 6 に示す。曲げ破壊の場合、図 4 に示すように最大荷重付近の試験体破壊時に立ち上がり時間振幅比の小さい、つまり図 6 の(1)に示すように立ち上がり時間の小さい波形が多く発生していた。この波形はコンクリートの破壊やひびわれの進展によって発生する AE であり、曲げ破壊によりひびわれが発生した際の AE と考えられた。せん断破壊の場合、図 5 に示すように立ち上がり時間振幅比の小さい AE だけでなく、立ち上がり時間振幅比の大きい、つまり立ち上がり時間の大きい図 6(2)に示すような波形が、荷重が最大に近づくに従って発生していた。このような波形の AE はひびわれ面の摩擦等によって発生する。よって、こ

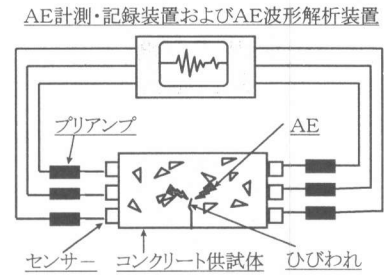


図 1 AE 測定システム(概略図)

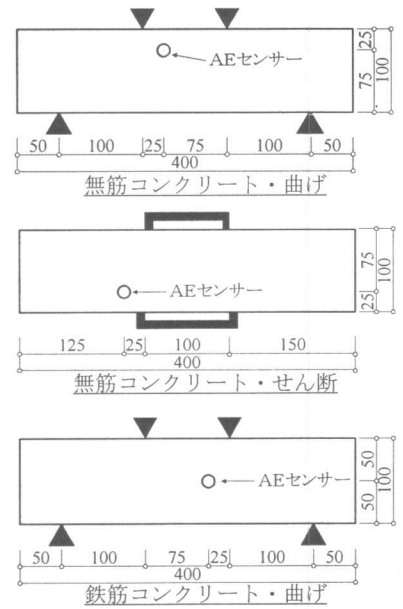


図 2 センサーの配置(単位：mm)

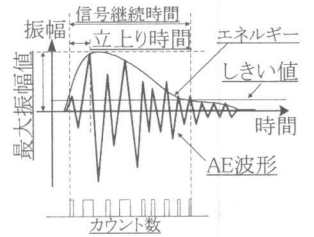


図 3 測定した AE パラメータ

表 1 コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	目標 Air (%)	目標 SL (cm)	単位量 (kg/m ³)				
				W*1	C*2	S*3	G*4	AE 減水剤
49.8	44.7	4.5	15	166	334	802	1021	0.835

注)*1：W:工業用水
 *2：C:普通ポルトランドセメント(比重3.16)
 *3：S:千葉産山砂、高知産砕砂(表乾比重2.62、粗粒率2.60)
 *4：G:上磯産砕石(表乾比重2.70、実積率61%)

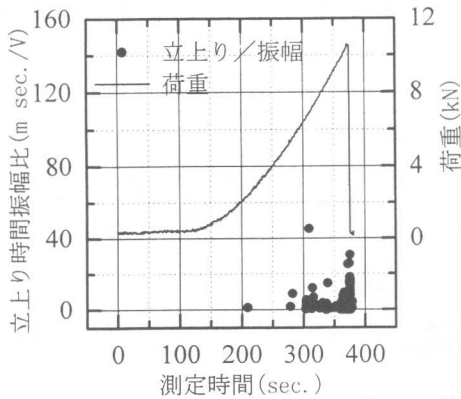


図4 曲げ破壊におけるAEと荷重履歴

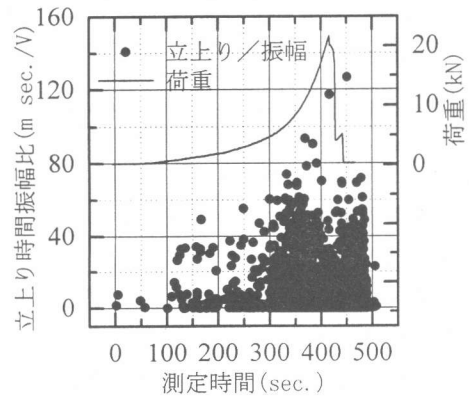


図5 せん断破壊におけるAEと荷重履歴

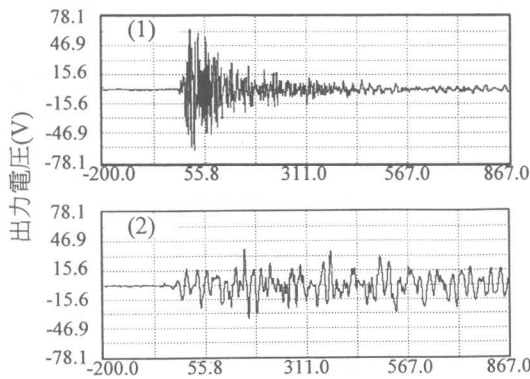


図6 代表的なAE波形

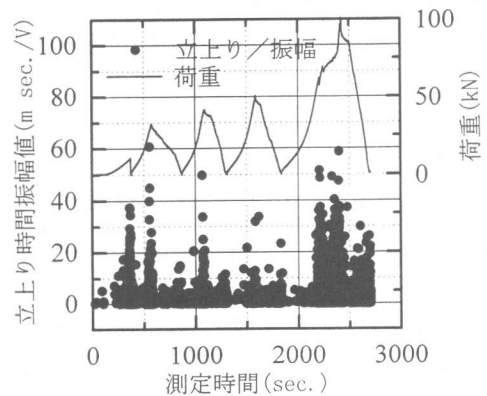


図7 曲げ破壊におけるAEと荷重履歴

(鉄筋コンクリート)

これらのAEはせん断破壊により、コンクリートのひびわれ面にずれが生じている状況をモニターしたものと考えられる。

(2)鉄筋コンクリート

立ち上がり時間振幅比と荷重履歴を経時変化で図7に示す。鉄筋コンクリート部材が降伏する以前の繰返し4回目までは主に立ち上がり時間振幅比の小さいAEが発生し、主にひびわれの進展等が進行している状態を示していると考えられる。鉄筋コンクリート部材が降伏した繰返し5回目では、立ち上がり時間振幅比の大きいAEが多発し、コンクリートと鉄筋のずれ、およびせん断ひびわれ面の形成を示していると考えられる。このように、AEパラメータデータにより、鉄筋コンクリートの繰返し荷重下においても破壊状況を識別できると考えられる。

3.常時微動による鉄筋コンクリートのAEパラメータと破壊状況との関係に関する検討

3.1 実験概要

ここでは、鉄筋コンクリート梁の破壊状況を常時微動を模擬した動的載荷によって発生するAE

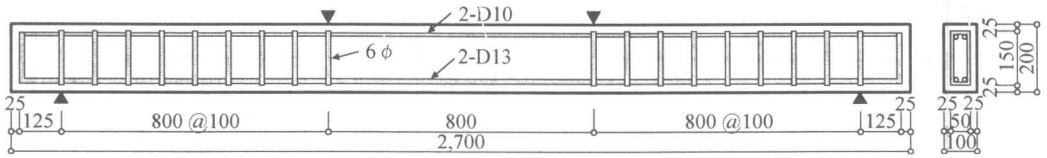


図 8 試験体の寸法及び配筋(単位：mm)

パラメータによる評価を試みた。試験体の作製に使用したコンクリートは 2. の実験と同様である。鉄筋は JIS G 3112(鉄筋コンクリート用棒鋼)に規定される棒鋼を使用した。試験体の寸法及び配筋を図 8 に示す。試験体の寸法は長さ 2700mm、高さ 200mm、幅 100mm とし、支点(図中▲印)と載荷点(図中▼印)の間にせん断補強筋を施した。載荷条件は、図 9 に示す載荷点(▼)に図 9 に示す 2 パターンの所定の中心荷重に対し振動幅 2kN、周波数 1Hz の動的の曲げ荷重を疲労試験機により載荷した。各ステップの時間は 1000 秒とした。振動の中心荷重は、10kN で初期ひびわれ発生する程度、20kN で梁が許容応力度に達する程度、30kN で引張鉄筋が降伏点付近の状態とした。各荷重レベルでのひびわれ発生状況を目視により Step2 終了後に確認したところ、支点間に長さ 100mm 程度の曲げひびわれがパターン①(20kN)では 8 本、パターン②(30kN)では 7 本発生していた。AE の測定方法は 2. の実験と同様なシステムにて行った。AE センサーの配置は、センサーが AE の検出可能な距離[3]を考慮して、図 10 に示すように試験体の支点間の側面片側に 6 箇所配置した。

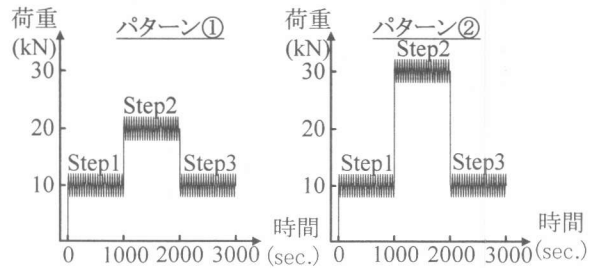


図 9 載荷パターン

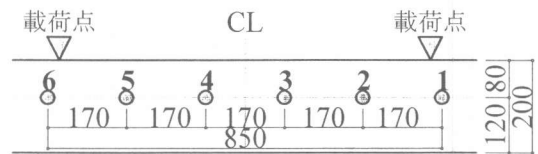


図 10 AE センサーの配置(単位：mm)

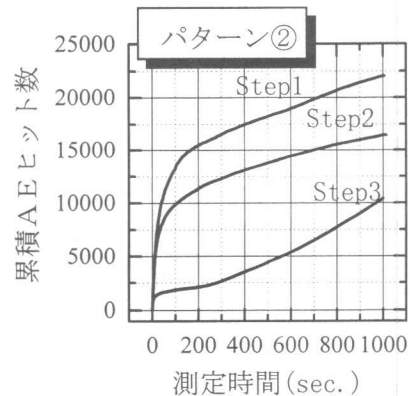
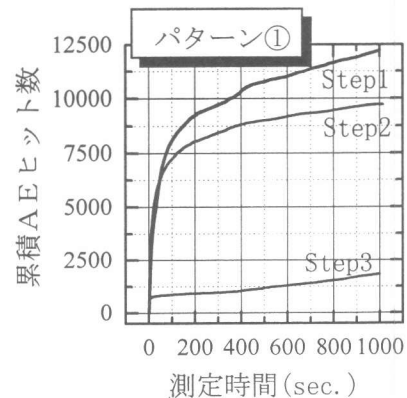


図 11 累積 AE ヒット数と測定時間の関係

3.2 実験結果と考察

(1) 累積 AE ヒット数

累積 AE ヒット数と測定時間との関係を図 11 に示す。パターン①および②ともに段階的であるが、振動荷重によって試験体に初めて損傷を受ける step1,2 では測定時間の経過に伴い AE の発生頻度は少なくなった。時間の経過に伴いひびわれ等の発生は徐々に少なくなる

ものと考えられる。しかし、パターン②の Step3 では、200 秒以降で AE 発生頻度が多かった。
 これにより、コンクリート構造物が受けた外的荷重の大きさを識別できるものと考えられる。

(2)常時微動荷重下の試験体の AE パラメータデータによる破壊状態の識別

図 12 に弾性範囲内の荷重を受けたパターン①および塑性範囲に至る荷重を受けたパターン②

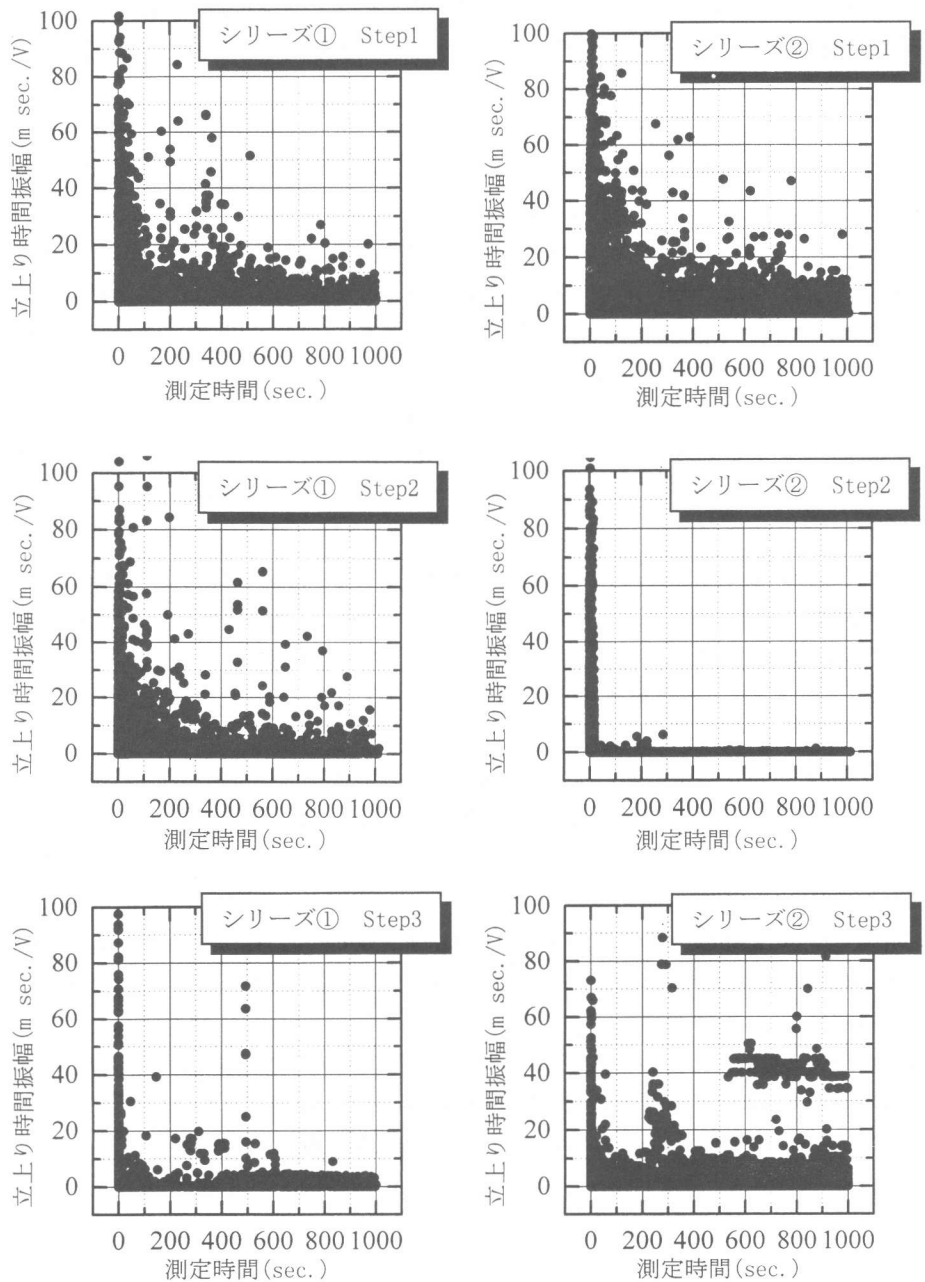


図 12 各ステップごとの立ち上がり時間振幅比の経時変化

の試験体が低レベルの荷重(常時微動荷重)下で微振動する際の AE の立ち上がり時間振幅比と経過時間との関係を示す。パターン②は、パターン①に比べ立ち上がり時間振幅比の大きい AE が生じている。これは、パターン①では試験体が受けた荷重レベルが弾性範囲にあるため、除荷後のコンクリートのひびわれ面と鉄筋間でのずれがほとんど生じていないため、ずれやこすれによる摩擦が少なくなったためと思われる。しかし、パターン②では弾性範囲を越える荷重を受けているため、立ち上がり時間振幅比の大きな AE が観察されたと考えられる。

従って、常時微動下において、立ち上がり時間振幅比の大きな AE が常時観察できるような場合は、その鉄筋コンクリート構造物が許容応力度以上の荷重を受けていると考えることができる。

4.まとめ

鉄筋コンクリート梁の健全性を評価する目的で常時微動を想定した振動曲げ載荷時に発生した AE の測定を行ったところ、以下の知見が得られた。

- (1)無筋コンクリートが静的載荷による純曲げおよび純せん断力を受けた時の AE パラメータの変化に着目して検討した。その結果、引張応力が主体の曲げ載荷時には、立ち上がり時間振幅比の小さい AE が発生し、せん断応力が主体のせん断載荷時には骨材界面でこすれが生じるため、立ち上がり時間振幅比の大きい AE が数多く発生することがわかった。
- (2)鉄筋コンクリートに曲げ荷重を繰り返し載荷した場合も同様に、部材として降伏するまでは、引張型主体のひびわれの進展による破壊による AE が発生するが、部材が降伏した後は鉄筋とコンクリートのずれやせん断ひびわれの形成により、立ち上がり時間振幅比の大きい AE が多数発生した。
- (3)鉄筋コンクリート梁が降伏荷重より小さい荷重を受けた後に常時微動荷重を加えた場合 AE の累積ヒット数は時間の経過に伴って徐々に増加する。しかし、降伏荷重を受けた後に常時微動が作用すると、時間の経過に伴って AE の累積ヒット数が急増する。従って、これらを利用することで、鉄筋コンクリート構造物が受けた荷重が降伏荷重より大きいかどうかを識別することができる。
- (4)鉄筋コンクリート梁が降伏荷重より大きい荷重を受けた後に常時微動を加えた場合、立ち上がり時間振幅比が大きい AE が数多く観察されることがわかった。

参考文献

- [1]Kamada, T., et al. : Application of Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Marine Concrete Structures, Progress in Acoustic Emission VIII ,The Japanese Society for NDI, pp.355-360,Nov. 1996
- [2]川島正史、鎌田敏郎、長滝重義、大即信明:コンクリート部材から発生する AE の簡易識別方法による評価、土木学会第 49 回年次学術講演会講演梗概集、pp.148-149、1994
- [3]大津政康ほか:アコースティックエミッションⅡ、(社)日本非破壊検査協会、pp.40-42、1995