

論文

[1056] AE法のRC床版劣化度検査法への適用に関する研究

正会員 ○ 橘 吉宏 (川田工業中央研究室)

前田 研一 (川田工業中央研究室)

正会員 重石 光弘 (熊本大学大学院)

梶川 康男 (金沢大学工学部)

1. まえがき

橋梁構造物のなかでRC床版は、最も過酷な状況下にある。このRC床版は、重車両による荷重を繰り返し受けた結果、破損に至る場合がしばしばある。こうした事故を未然に防ぐには、劣化の早期発見が重要であり、劣化度を非破壊で検出する手法の1つとしてAE法が最近注目されている^{1)~3)}。このAE法を実用段階のRC床版検査法として用いるには、供用荷重のもとで発生するAEを対象に、検出されたAEから劣化要因やその程度を推定する技法が必要になるものと考えられる。AE法が実用段階の検査法として用いられている金属やFRPの試験では、実用化技法として多くの波形パラメータを利用して、その材料挙動解析と評価が行われている⁴⁾。著者らは以前に、波形パラメータとしてAE発生頻度と周波数分布に着目し、実橋RC床版への適用可能性を把握するために、基礎実験および実橋におけるAE計測を行った結果を報告した⁵⁾。本文は、AE法をRC床版劣化の実用化検査手法として用いることを目的として、波形パラメータとして上記2者に加えてAE継続時間にも着目し、これらの波形パラメータの利用法について考察を行い、実橋への適用性について検討を行った結果を報告するものである。

2. 実験方法

RC床版の劣化状態として、疲労と鉄筋腐食を想定した基礎実験を行った。

2.1 RC床版模型⁶⁾

実験は、図-1に示すRC床版模型を4体用いて行った。この模型は、実際の道路橋RC床版と同様の構造としたものである。模型4体のうち2体は腐食を想定したものであり腐食モデルとして電食を用いた。電食は、電流密度 0.4 mA/cm^2 で19日間の通電を行い全鉄筋を腐食させた。

2.2 荷重方法

荷重は、中央1点荷重と中央点を含む3点移動荷重の2種類とし、それぞれ非腐食と腐食模型に対して行った。中央1点荷重では、図-2に示すB点で60t(設計荷重8t)までの静的荷重を行った。移動荷重は、輪荷重による疲労を想定したものであり、表-1に示す要領で繰り返しおよび静的荷重を行った。

2.3 AE計測法

図-2に示すように、AEセンサー2chを床版上面に設置し、表-2に示す計測条件によって静的荷重時にAE計測を行った。この際、雑音消去のため、荷重位置および支点には

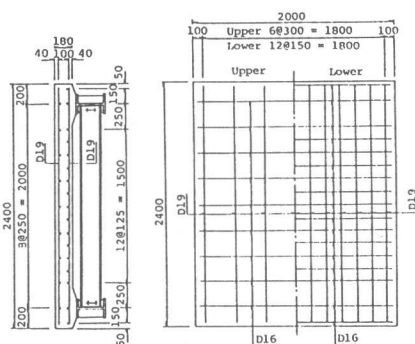


図-1 RC床版模型 (単位, mm)

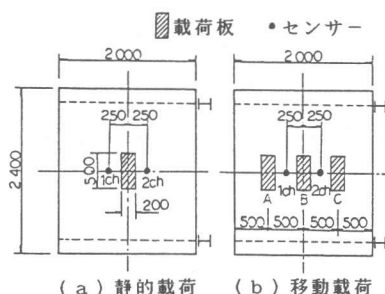


図-2 荷重板, センサー位置 (単位, mm)

表-1 移動載荷方法

疲労段階	繰返し載荷	静的載荷 (AE計測)
1	-----	B点 0-24-0 t
2	-----	C点 0-24-0 t
3	-----	A点 0-24-0 t
4	-----	B点 0-24-0 t
5	-----	C点 0-24-0 t
6	-----	A点 0-24-0 t
7	-----	B点 0-24-0 t
8	B点 1~12 t 1万回載荷	B点 0-24-0 t
9	C点 1~12 t 1万回載荷	B点 0-24-0 t
10	A点 1~12 t 1万回載荷	B点 0-24-0 t
11	B点 1~16 t 1万回載荷	B点 0-24-0 t
12	B点 1~24 t 1万回載荷	B点 0-24-0 t
13	C点 1~24 t 1万回載荷	B点 0-24-0 t
14	A点 1~24 t 1万回載荷	B点 0-24-0 t
15	-----	B点 0-36-0 t
16	B点 1~36 t 1万回載荷	B点 0-36-0 t
17	-----	B点 0-60-0 t

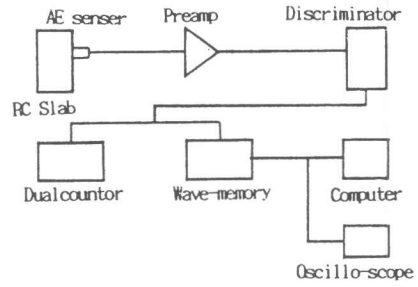


図-3 計測システム

ゴム板を設置した。計測は、頻度計数と波形に対して行い、頻度計数についてはリングダウン法によって、波形については、無作為にサンプリングした波形をデジタルメモリーで記録後、FFT法によって解析し、同時にAE継続時間も求めた。図-3に計測システムを示す。

表-2 AE計測条件

センサー	共振周波数	150kHz
増幅度	アリアンプ	40dB
	メインアンプ	20dB
フィルター	1MHz ローパス	
ディスクリレベル		150mV

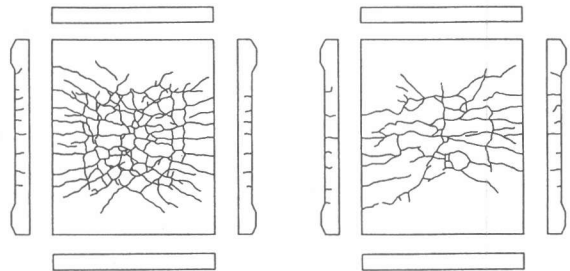
3. 疲労および腐食損傷をうけたRC床版の挙動

3.1 腐食損傷状況

鉄筋が腐食すると、腐食生成物の膨張によりコンクリートにひびわれが生ずる。載荷試験後に実施したはつり調査の結果では、腐食模型は主鉄筋と配力鉄筋とを含む水平面状にこのひびわれが広がっていた。このような、水平面状ひびわれの存在による波形パラメータの変化が予想される。

3.2 移動載荷時の挙動

一般にRC床版は、輪荷重による疲労の進行にともない、床版の剛性が低下することが知られている。ここでは示していないが、移動載荷を行った床版模型は各疲労段階で剛性の低下を生じており、その度合いは非腐食、腐食模型ともにほぼ同程度であった。しかしながら、図-4に示したひびわれ形状は、非腐食、腐食模型で相違がみられ、網目状となる非腐食模型に対して、腐食模型では主鉄筋方向のひびわれが卓越した。このようなひびわれ形状の相違による波形パラメータの変化も予想される。



(a) 非腐食模型

(b) 腐食模型

図-4 ひびわれ形状（移動載荷終了時）

3.3 静的中央1点載荷時の挙動

非腐食および腐食模型の、静的中央1点載荷時における荷重変位曲線を図-5に示す。ここで実施した60tまでの載荷試験で、非腐食模型は破壊を生じなかったが、腐食模型は押し抜きせん断破壊を生じた。この押し抜きせん断破壊状況は、載荷板直下で陥没したが、一般的なRC床版の押し

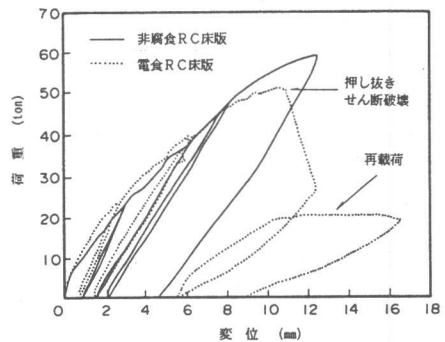


図-5 荷重-変位関係

抜きせん断破壊形状として報告されている陥没と同時に生ずる床版下面のはく離破壊は確認されなかった。また、非腐食模型は30t付近で鉄筋降伏が生じたが、腐食模型では鉄筋降伏が生じなかった。このような挙動の相違によっても、波形パラメータの変化が予想される。

4. AE発生頻度

4. 1 中央1点荷重時のAE累加発生頻度

非腐食および腐食模型の、静的中央1点荷重時における荷重増加時のAE累加発生頻度を図-6に示す。非腐食、腐食模型における発生頻度の違いは、前述した、両者の破壊形態の相違によるものと考えられる。

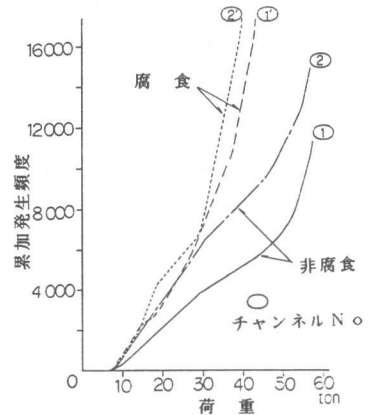


図-6 AE累加発生頻度（荷重時）

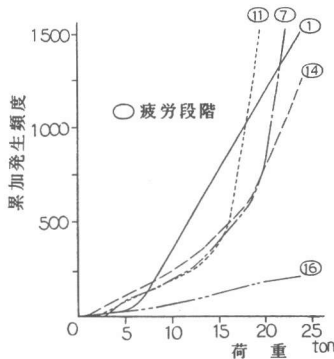


図-7 AE累加発生頻度
（非腐食，荷重時）

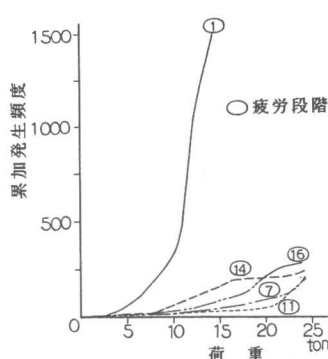


図-8 AE累加発生頻度
（腐食，荷重時）

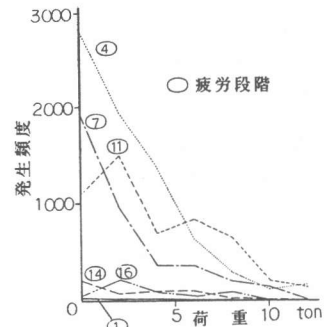


図-9 AE発生頻度
（非腐食，除荷時）

4. 2 疲労の進展とAE累加発生頻度

移動荷重時における各疲労段階での荷重増加時のAE累加発生頻度を図-7～8に、また荷重除荷時のAE発生頻度を図-9～10に示す。これらの図から、非腐食、腐食とも疲労を受けるとAE発生頻度が変化することがわかる。特に、ひびわれが十分に出現した第16段階においても、両者とも荷重時および除荷時にAEが発生し、RC床版模型では、ひびわれ開閉時にもAEが発生することが確認された。実橋RC床版でも、ひびわれの進展に加えてひびわれの開閉によりAEが発生するものと考えられた。

5. 周波数分布

非腐食および腐食模型の、中央1点荷重時と疲労段階第17段階目に無作為にサンプルしたAEについてFFT法による波形解析を行い、考察を行った。

5. 1 データ整理方法

FFT法による波形解析結果は、図-11に示すように複数のピークを持つものが多かった。したがって

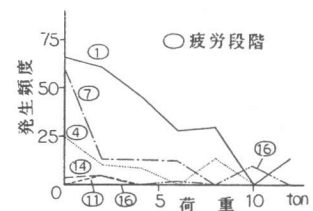


図-10 AE発生頻度
（腐食，除荷時）

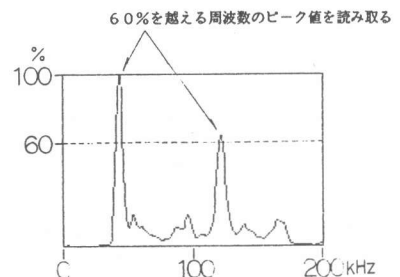


図-11 スペクトル図（平滑化後）
の整理方法

データ整理方法としてFFT法で描いたスペクトル図を平滑化した後に、図-11に示す方法で周波数のピーク値を読み取ることにした。このように読み取ったピーク値を10kHzの周波数区間ごとに累計したものを100分率で示し、図-12~15にまとめた。なお、170kHz以上の周波数については、その度数が非常に少なかったために対象外とした。

5.2 RC床版模型の周波数分布

中央1点載荷時に発生したAEの周波数分布を図-12~13に、疲労段階第17段階目に発生したAEの周波数分布を図-14~15にまとめた。周波数分布は、センサーの特性を考慮すると、いずれの場合についても40~70 KHz付近で卓越周波数がみられる傾向にあり、損傷の要因や

程度によってこの傾向は変わらなかった。なお、150KHz付近で卓越周波数がみられるのは、センサーの共振周波数を検出しているためである。この40~70 KHzの

周波数帯は、文献3)で、ひびわれの生じている実橋RC床版を対象にAE計測を行い、ひびわれから発生するAEの卓越周波数帯として報告されている40~50 KHzとほぼ一致しており、上述した卓越周波数帯が、床版ひびわれから発生するAEの1つの特徴であると言えよう。

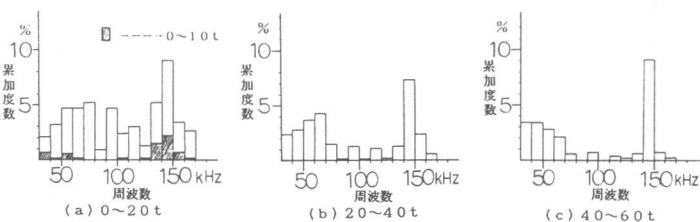


図-12 非腐食模型中央1点載荷時のAE周波数分布状態（荷重増加時）

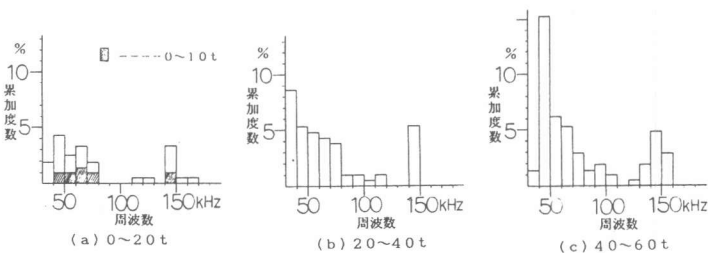


図-13 腐食模型中央1点載荷時のAE周波数分布状態（荷重増加時、再載荷時含まず）

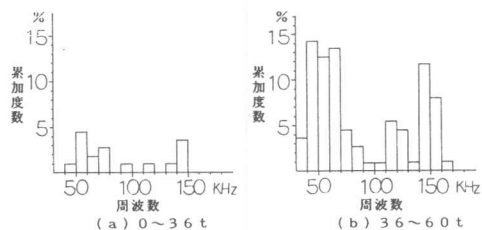


図-14 非腐食模型第17段階目のAE周波数分布状態（荷重増加時）

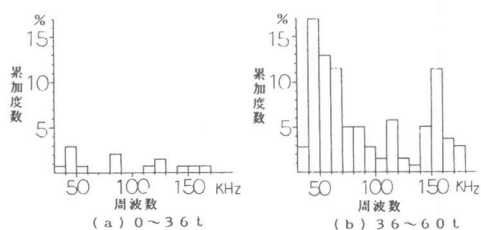


図-15 腐食模型第17段階目のAE周波数分布状態（荷重増加時、再載荷時含まず）

6. AE継続時間

前述のFFT法による波形解析でサンプルしたAEについて、継続時間を求め考察を行った。

6.1 データ整理方法

通常、AE継続時間はAE1イベントに対してディスクリレベルを基準にして求められる。しかし、1センサーで広い範囲にわたり発生源の異なる

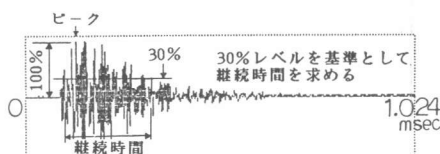


図-16 AE継続時間の整理方法

るAEを計測しようとするRC床版では、ディスクリレベルを基準にした継続時間は、検出されたAEの特性を適切に表現しているとは思えない。そこでここでは、図-16に示すように継続時間の測定基準を、検出された波形のピークの30%レベルに設定し、AE継続時間を求めた。このように求めたAE継続時間を0.1 msecの時間区間ごとに累計したものを100分率で示し、図-17~20にまとめた。

6. 2 RC床版模型のAE継続時間

図-17~20に示したAE継続時間の分布から、非腐食と腐食、疲労前と疲労の進展により特徴あるAE継続時間の分布のあることがわかる。非腐食模型では、1点載荷時には0.4~0.6 msecの波が多いがその分散は大きい。また、疲労が進みひびわれの開閉によりAEが発生する図-19(a)に示す0~36tの範囲では、0.3~0.4msecの波が卓越してくることがわかる。

一方、腐食模型では、1点載荷時に0.3msec以下の短い継続時間のAEが卓越し、疲労が進行した段階ではさらに継続時間が短くなる傾向にあることがわかる。これは損傷要因によりAE発生機構が異なるためであると考えられ、AE継続時間はRC床版の損傷要因を推定する有力なパラメータの1つとなり得ることが言えた。

7. 実橋における計測例

以上に示した基礎実験結果の、実橋における適用可能性を把握するために、実橋RC床版のAE計測を試みた。

7. 1 計測の概要

対象とした橋梁は、昭和47年に架設された単純鋼I桁橋である。このRC床版の損傷状態としては、幅0.1mm程度の亀甲状ひびわれが数多く発生していたが、その他の損傷は特に見られなかった。AEの計測は、図-21に示すように、センサーを床版下面に設置し、図-3に示したシステムによって一般の通行車両を対象に、表-2の計測条件で計測を行った。

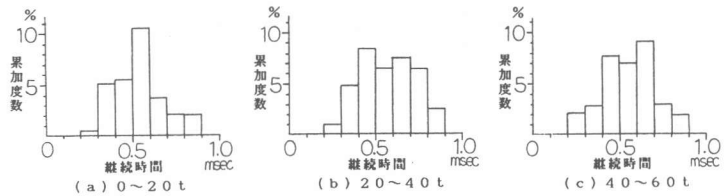


図-17 非腐食模型中央1点載荷時のAE継続時間分布状態(荷重増加時)

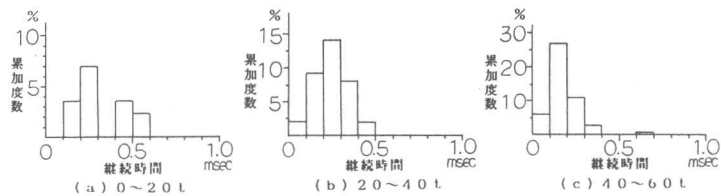


図-18 腐食模型中央1点載荷時のAE継続時間分布状態(荷重増加時、再載荷時含まず)

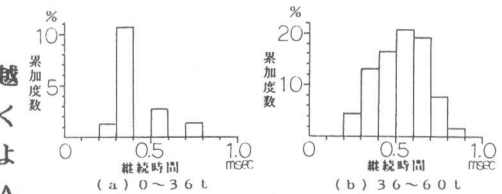


図-19 非腐食模型第17段階目のAE継続時間分布状態(荷重増加時)

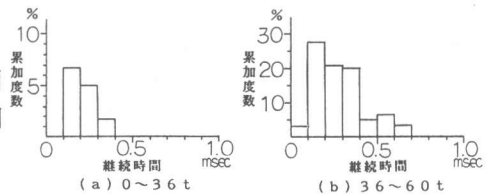


図-20 腐食模型第17段階目のAE継続時間分布状態(荷重増加時、再載荷時含まず)

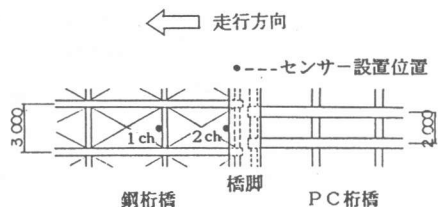


図-21 センサー設置位置

7. 2 AE計測結果

一般の通行車両を対象にした場合、AEは乗用車程度では検出されず、大型車が通行した際に検出された。図-22に示した周波数分布から、検出されたAEの卓越周波数帯は50~60KHzであることがわかる。この結果は、基礎実験から得られた床版ひびわれから発生するAEの卓越周波数とはほぼ一致していることから、さらにAE継続時間に対する検討を行うこととした。図-23は、AE継続時間の分布をまとめたものであり、0.3~0.4 msecの波が卓越していることがわかる。この分布は前出の図-19(a)に示した継続時間分布と類似しており、検出されたAEは、繰り返し移動載荷、すなわち疲労によるひびわれの開閉で発生するAEである可能性が高いことが推定された。

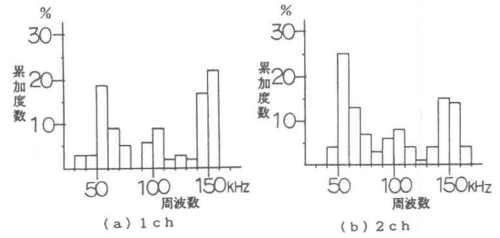


図-22 AE周波数分布状態

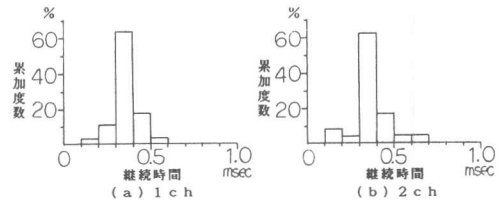


図-23 AE継続時間分布状態

8. まとめ

波形パラメータとして、AE発生頻度、周波数分布、AE継続時間に着目し、その利用法について基礎実験による検討を行い、実橋RC床版の劣化度検査への適用性について考察を行った結果、次のことがわかった。

- (1) AE継続時間は、損傷として疲労および鉄筋腐食を想定した場合、各損傷により特徴ある分布を示した。したがって実橋RC床版の劣化要因を分類するうえで有力なパラメータとなる。
- (2) 床版模型から検出されたAEの卓越周波数帯は、基礎実験結果では40~70KHzであり、損傷や程度によってほとんど変化しなかった。この卓越周波数帯は、既往の研究³⁾による実橋RC床版のひびわれから発生するAEのそれとほぼ一致し、上記の卓越周波数帯はRC床版の1つのAE特性と考えられた。
- (3) 実橋RC床版において、大型車程度の輪荷重でAEが検出され、AE継続時間の分布から検出されたAEは、疲労により生じたひびわれの開閉で発生するAEである可能性が高いことが推定された。

以上のように、RC床版劣化度検査法としての波形パラメータの1利用法を示すことができ、さらに多くの波形パラメータが利用できるようになれば、より詳細な劣化状態の情報が得られるものと思われる。そのためにも、AEに関するデータの蓄積が今後とも必要であると思われる。

[参考文献]

- 1) 魚本, 川上; AE計測によるコンクリート橋梁の耐久性診断に関する研究, コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集, 1988.
- 2) 大津, 川井, 湯治; AEの発生特性によるコンクリートの劣化度評価, コンクリート工学年次論文報告集10-2, 1988.
- 3) T.Ohtaki, T.Ohoka; AE Technique Evaluation of Deteriorated Viaduct, The 9th International Acoustic Emission Symposium, 1988.
- 4) 山口; AE計測と解析方法およびその応用性, 日本非破壊検査協会06特別研究委員会資料 No.87, 1988.
- 5) 作田, 橋, 前田, 梶川; AE法を用いたRC床版の劣化度検査法に関する基礎実験, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集(V), 1988.
- 6) 前田, 橋, 梶川, 角本; RC部材の鉄筋腐食による損傷時の挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 35A, 1989.
- 7) M.Ohtsu, K.Ono; Pattern Recognition Analysis of AE from Unidirectional Carbon Fiber-Epoxy Composites by using Autoregressive Modeling, J.of AE, vol.6, No.1, 1987.