

AE法による鉄筋コンクリート床版の疲労損傷評価

湯山茂徳¹・李 正旺²・友清 剛³・吉沢 勝³・魚本健人⁴

¹正会員 工博 博士(学術) 日本フィジカルアコースティクス株式会社(〒151-0011 東京都渋谷区東 2-17-10)

²工博 日本フィジカルアコースティクス株式会社(〒151-0011 東京都渋谷区東 2-17-10)

³正会員 財団法人首都高速道路技術センター(〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-10-11)

⁴正会員 工博 東京大学教授 国際産学・共同研究センター(〒106-8558 東京都港区六本木 7-22-1)

実験室において、モデル試験として AE 法による鉄筋コンクリート床版の疲労損傷評価への適用性を検討し、続いて現在供用中の実高架橋床版に対して、通常交通下で AE 計測を行った。モデル試験から、疲労荷重下におけるひび割れ(損傷)進行過程を、AE 信号を計測することで予測・評価できることが示された。また、荷重位相と AE 発生挙動との関係を調べ、最小荷重値付近の AE 信号を検出することにより、最終破壊の進行をモニターできる可能性のあることが確認された。さらに、実構造物における計測結果と、モデル試験で得た結果を比較、対照することにより、供用中の床版において、活荷重下で検出される AE エネルギー値のデータを用いて、損傷度を評価できる可能性のあることが示された。

Key Words : acoustic emission, damage evaluation, fatigue loading, reinforced concrete, slab

1. 緒言

昭和 30 年代後半から 40 年代にかけて施工された高速道路や橋梁などは、すでに建設後 30 年近く経過し、交通量の増大および車輛の大型化による繰り返し荷重の増加などの原因で、コンクリート床版など部材の劣化が進行している。また、阪神大震災の際には高速道路が大きな被害を受け、深刻な問題となった。こうした地震の被害を未然に防ぐために、コンクリート構造物の維持管理の重要性が認識され、各高速道路において、支脚の補強や床版の交換などの工事が行われている。このような工事を円滑に進めるうえで、工事部位の状況を適切に把握し、コンクリート構造物の劣化度を正確に評価可能な非破壊検査法¹⁾の開発が極めて重要である。

AE 法²⁾は構造物中の疲労損傷など、進展性欠陥の連続監視に優れているため、ひび割れ進展過程の評価を行う目的で、鉄筋コンクリート供試体や部材に対して多くの研究が進められつつある^{3)~5)}。しかしながら、これまでに鉄筋コンクリート床版を対象とした、AE 法による疲労損傷評価の試験例は報告されていない。

本研究では、まず実験室においてモデル試験を行い、AE 法による鉄筋コンクリート床版の疲労損傷評価への適用性を調査した。ここでは、鉄筋コンクリート・モデル道路橋床版を用い、上面湛水下における床版の、疲労载荷による劣化損傷過程に対して AE 発生挙動を解析して、基礎データを得た。続いて、現在供用中の実高架橋コンクリート床版において、通常交通下で AE 計測を行い、モデル試験で得た結果と比較対照し、実構造物診断に対する AE 法適用の有効性について検討した。

2. 試験方法

(1) モデル試験

実験室でのモデル試験には、図-1に示される鉄筋コンクリート・モデル道路橋床版を供試体として用いた。供試体の外形寸法は、スパン方向 1500mm、スパン直交方向 2000mm、中央部厚さ 160mm で、主鉄筋 D13、配筋 D10 が用いられている。供試体の支持条件は図-2に示すように二辺支持であり、载荷点は 200mm × 200mm

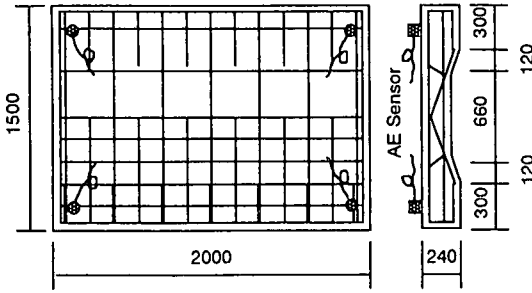


図-1 鉄筋コンクリート床版供試体および AE センサー配置

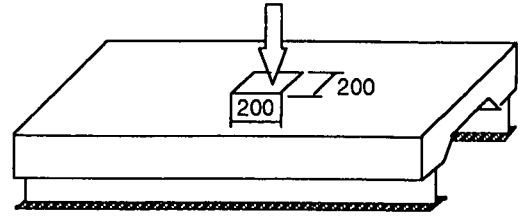


図-2 供試体の支持方法

表-1 コンクリートの配合と物性値

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				祖骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)	動弾性係数 (GPa)
		W	C	S	G						
64.0	48.5	165	258	892	972	25	7.5	4.5	39.3	27.5	34.3

の面積に対する集中荷重とした。コンクリートの配合、および物性値が表-1に示されている。

動的荷重試験は 450kN の電気油圧サーボ式疲労試験機を用い、0.7Hz の正弦波を荷重制御による片振り圧縮で実施した。異なる 7 つの条件下で試験は行われたが、本報告における試験時の環境条件は供試体上面に水を張った状態（湛水）であり、繰返し荷重の最大値は 150kN, 200kN, 225kN, 250kN, 270kN に設定し、荷重試験を段階的に行った。各段階における最大荷重値、経過した繰返し数などが表-2にまとめられている。また、試験実施状況が写真-1に示されている。

表-2 各段階における最大荷重および経過した繰返し数

荷重 (kN)	段階	経過した繰返し数
150	1	0~25000
	2	25000~50000
	3	50000~75000
	4	75000~100000
	5	100000~125000
	6	125000~150000
	7	150000~200000
	8	200000~300000
	9	300000~400000
200	10	400000~410000
	11	410000~450000
	12	450000~460000
	13	460000~500000
225	14	500000~525000
	15	525000~550000
	16	550000~600000
	17	600000~625000
	18	625000~790000
250	19	790000~840000
270	20	840000~917000

(2) 実構造物での計測

AE 計測は、供用開始後約 27 年経過した実高架橋のコンクリート床版口、およびハに対して行われた。図-3にその模式図が示されている。床版は 4.8m × 3.4m の寸法を持ち、板厚は 180mm である。表面には厚さ 60mm のアスファルト舗装が施してある。また、床版の表面側には、中央分離帯が設置されている。本計測では、通常供用中の活加重疲労下で、2 時間連続的に AE 信号の検出を行った。

(3) AE 計測法

AE 計測には、PAC 社製 MISTRAS 4 チャンネ

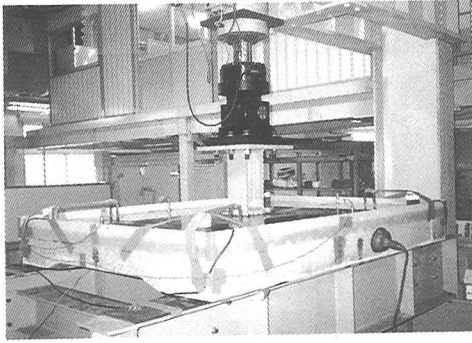


写真-1 載荷試験状況

ル AE 計測システムを用いた。PAC R6 (60kHz 共振型) プリアンプ内蔵 AE センサーで検出した AE 信号は、同軸ケーブルを介して MISTRAS システムに入力され、直ちにデジタル信号処理が行われる。こうして取得したデータに対して、ヒット数、カウント数、エネルギー、振幅値など、通常の AE パラメータ解析を行い、また必要に応じて、波形解析、および周波数解析を並列的に実施した。

4 個の AE センサーは、モデル試験の場合、図-1に示されるように床版の四隅に取り付けられた。一方、実構造物の床版では、図-3に示されるように、各床版の中央付近に、それぞれ 2 個ずつ取り付けられた。

3. 試験結果

(1) モデル試験

a) ひび割れの進展と AE 発生挙動

図-4に荷重繰返し数と、ひび割れ密度との関係が示されている。ここで、ひび割れ密度とは、変状分布図をもとに、格子密度法により 1m^2 あたりのひび割れ長さを算出した値である。図から明らかなように、ひび割れの進展は、荷重繰返し数 $0 \sim 10^5$ において、初期ひび割れの発生から、急速なひび割れ(損傷)進展の生じる第 I 段階、繰返し数 $10^5 \sim 4.0 \times 10^5$ において、ひび割れ進展がほとんど見られない安定的な第 II 段階、繰返し数 $4.0 \sim 7.9 \times 10^5$ において、ほぼ一定の速度でひび割れ密度の増加する第 III 段階(荷重最大値は、第 I, II 段階の 150kN から 200 および 225kN へ増加している。), そして 7.9×10^5 から急速に密度が増

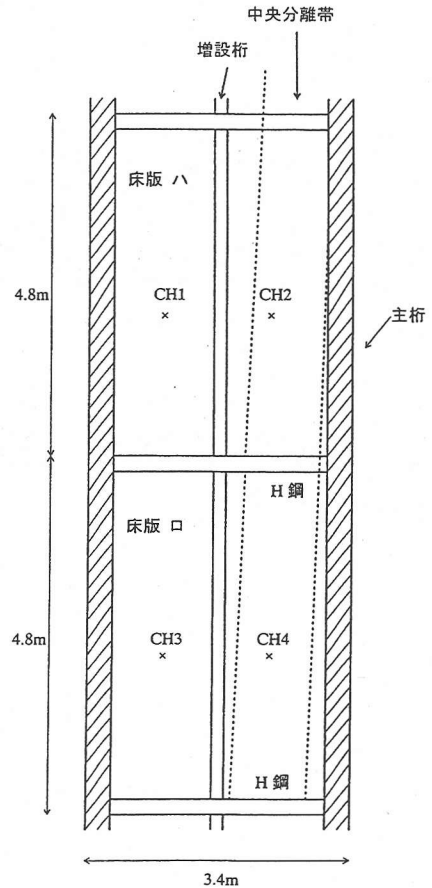


図-3 実高架橋のコンクリート床版(模式図)

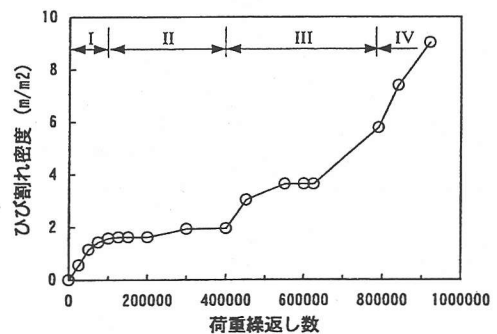


図-4 荷重繰返し数に対するひび割れ密度の変化、および損傷段階の変化

加し、押し抜きせん断による最終破壊に至る第 IV 段階に分けられる⁶⁾。

図-5に、荷重繰返し数に対する AE ヒット

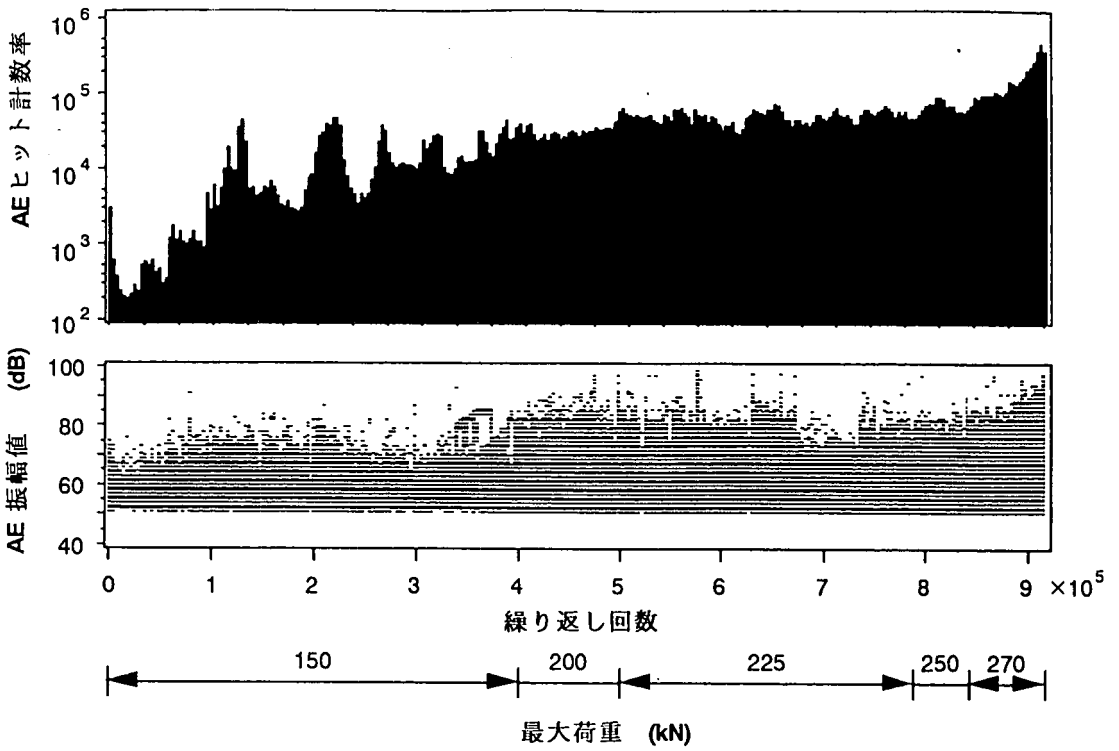


図-5 AE ヒット計数率および振幅値の履歴と最大荷重値の変化

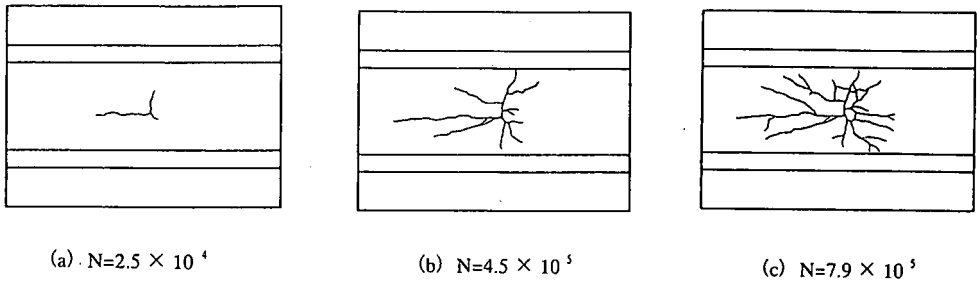


図-6 ひび割れ観察結果

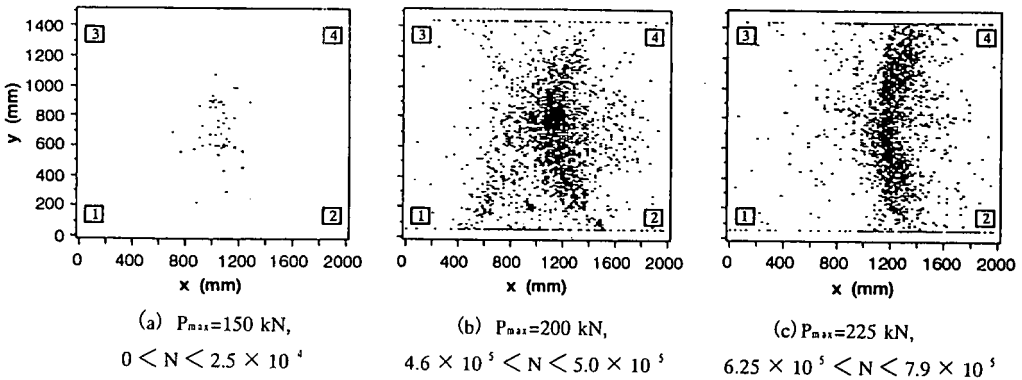


図-7 AE 発生源の二次元位置標定

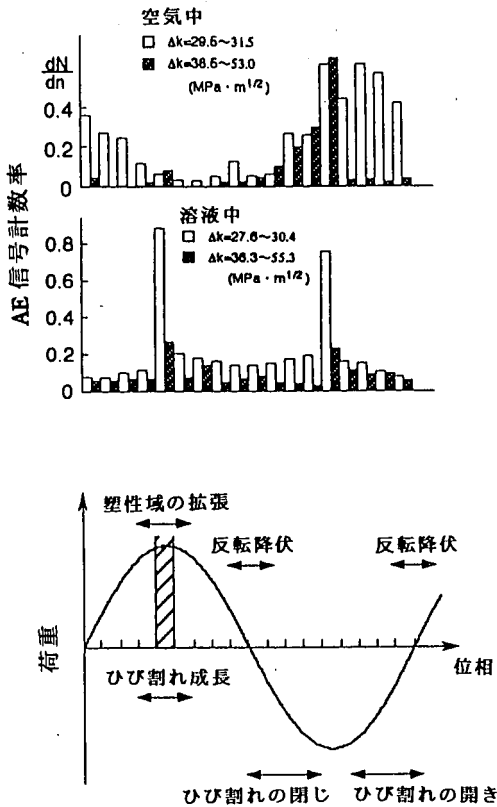


図-8 荷重位相とAE発生との関係

計数率および振幅値の履歴が、最大荷重値の変化とともに示されている。ひび割れ進展の第I段階において、初期ひび割れの発生とともに大きなAE活動度が観察されるがやがて低下し、その後ひび割れ密度の増加とともにAE活動度も増加する。第II段階では、AE活動度に増減はあるものの、全体的にはゆるやかに増加し、第III段階ではほぼ一定の活動度が観察される。第IV段階にはいと最終破壊(繰返し数 9.17×10^5)の直前、 8.8×10^5 付近より、活動度は急速に増加する。このことから、AE信号をモニターすることにより、その活動度が安定的な状態から急速に増加し始める時点をもって、疲労荷重下における最終破壊(第III段階から第IV段階への変化)過程を予測・評価できる可能性のあることが理解される。

b) AE発生源の位置標定

図-6に、荷重繰返し数が 2.5×10^4 、 4.5×10^4 、および 7.9×10^5 回終了時の、ひび割れ目視観察結果が、(a)、(b)、(c)にそれぞれ示されている。

一方図-7に、繰返し数が $0 \sim 2.5 \times 10^4$ 、

$4.6 \sim 5.0 \times 10^5$ 、および $6.25 \sim 7.9 \times 10^5$ における、AE発生源の平面位置標定結果が示されている。ひび割れ位置と、AE位置標定結果の詳細な対応は困難であるが、標定位置とひび割れ位置の間には、大まかに見て対応関係が見られる。したがって、AE発生源の位置標定を行うことにより、ひび割れ進行部位を、ある程度特定化することが可能と考えられる。

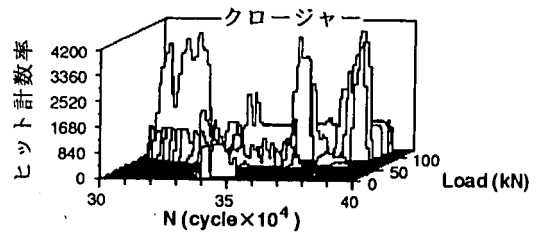
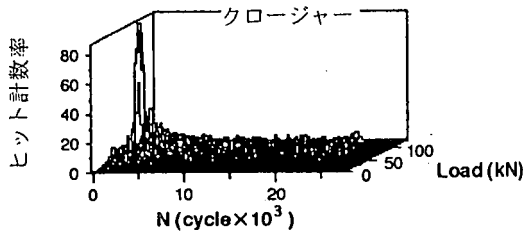
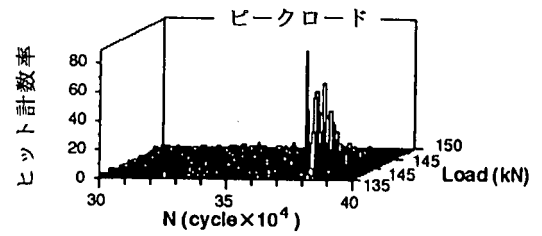
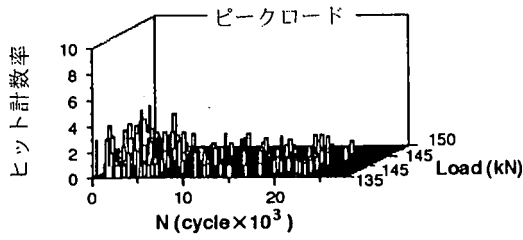
c) 荷重位相とAE発生との関係

これまで、金属材料や複合材料に対して繰り返し荷重下(疲労)における、ひび割れ進展とAE発生挙動に関する研究^{7),8)}が行われている。図-8にこれらの研究で明らかにされた荷重位相と、AE発生挙動との関係が模式的に示されている⁸⁾。ここで最大荷重付近で検出されるAEは、主としてひび割れ進展に起因すると考えられ、Peak Load AEと呼ばれる。一方、除荷時あるいは再負荷時に検出されるAEは、それぞれ Closure および Opening AEと呼ばれ、ひび割れ面の開閉で生ずる摩擦音など、機械的要因で発生したAEであるとされる。

これまで、鉄筋コンクリート製の供試体に対してこうした解析手法が適用された例は報告されていない。本研究では、金属材料等に用いられた手法をもとに、荷重位相とAE発生挙動との関係に注目した解析を行った。図-9に、その解析結果が示されている。ここでは、最大荷重値の90~100%レベルの荷重位相で検出されるAEを Peak Load AEと、またそれ以下の荷重値で検出されるすべてのAEを Closure AEと定義してある。

図-9(a)に、荷重繰返し数 $0 \sim 2.5 \times 10^4$ (第I段階)で得た結果が与えられている。この図からわかるように Peak Load AEは特に第I段階の初期に最も多く検出され、その後活動度はやや低下し安定的な発生状態を示している。これは、繰返し載荷開始直後に、初期微小ひび割れの発生により、ひび割れ密度が急増するが、その後載荷数の増加とともにひび割れ進展はほぼ一定の速度で生ずるようになるという、ひび割れ発生・進展過程に対応していると考えられる。したがって、Peak Load AEは、コンクリート床版の疲労過程においても、ひび割れの発生、進展に強い相関を持ち、これらが主なAE発生源であると推察される。

図-9(b)には、繰返し数 $3.0 \sim 4.0 \times 10^5$ (第II段階)における結果が示されている。第II段階において Peak Load AEが顕著に検出さ

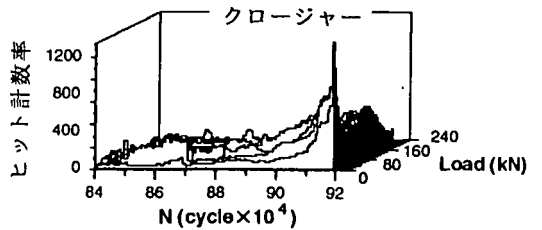
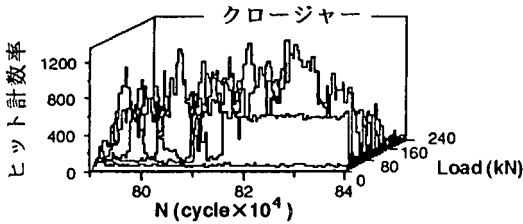
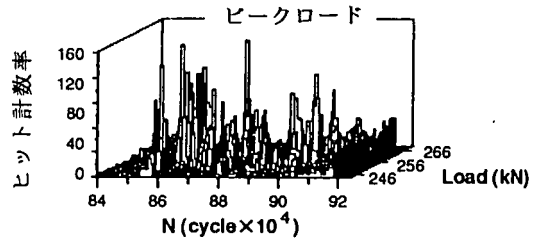
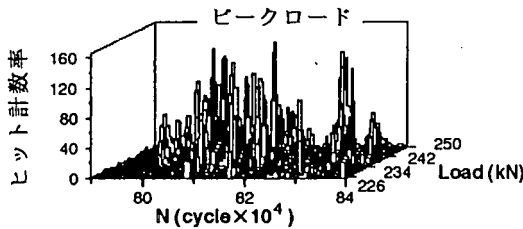


(a) $P_{max}=150$ kN,

(b) $P_{max}=150$ kN,

$0 < N < 2.5 \times 10^4$

$3.0 \times 10^5 < N < 4.0 \times 10^5$



(c) $P_{max}=250$ kN,

(d) $P_{max}=270$ kN,

$7.9 \times 10^5 < N < 8.4 \times 10^5$

$8.4 \times 10^5 < N < 9.17 \times 10^5$

図-9 荷重位相と AE 発生挙動

れるのは、繰り返し数 $3.8 \sim 3.9 \times 10^5$ においてのみであり、大部分の期間でほとんど検出されていない。このことは、Peak Load AE がひび割れの進展に起因したものであり、これが検出されないのは、第 II 段階では目視観察によってもひび割れ進展はほとんど観察されないことに対応していると考えられる。一方 Closure AE は、繰り返し数の全領域において 50kN を越える荷重位相で継続的に検出されている。これは既存のひび割れが開閉するなど機械的要因で生じたものと考えられる。

図-9(c)に繰り返し数 $7.9 \sim 8.4 \times 10^5$ (第 III 段階の終了時～第 IV 段階) で得た結果が与えられている。Peak Load AE は、第 III 段階から第 IV 段階へ移行し、ひび割れ密度の増加が加速されるとともに多く検出されている。一方、この段階ですでに多くのひび割れが床版内に存在するために、載荷、除荷の繰り返しにより、これらが開閉すると考えられ、機械的要因で発生する Closure AE が全荷重位相で大量に発生することから、その検出数は Peak Load AE より一桁程度大きくなっている。

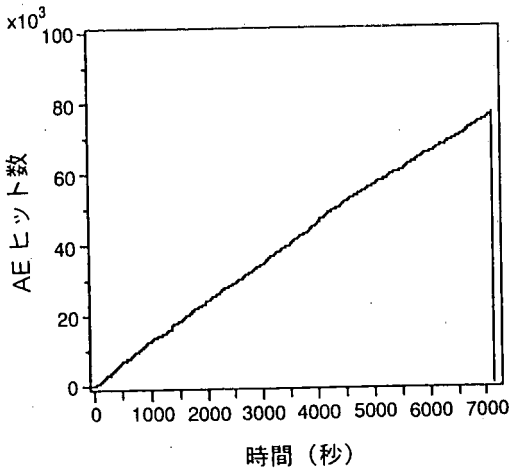


図-10 全計測期間中に、CH1で検出された AE ヒット数の履歴

図-9(d)には、第IV段階で最終破壊に至る、繰返し数 $8.4 \sim 9.17 \times 10^5$ における解析結果が示されている。ここで特徴的なことは、荷重レベルの小さな位相で、最終破壊が近づくとともに Closure AE の活動度が急激に増加することである。これは、この段階で供試体中には多数のひび割れが存在し、機械的要因による AE 信号が、最小荷重値付近で多く発生するようになるためと考えられる。この結果は、最小荷重値付近の Closure AE を検出することにより、最終破壊の進行過程を、実用的にモニターできる可能性のあることを示唆している。

(2) 実構造物での計測

図-10に、全計測期間(2時間)中に、センサー CH1 で検出された AE ヒット数の履歴が与えられている。時間の経過とともに、検出数は、ほぼ直線的に増加している。こうした傾向は、CH2 ~ CH4 においても同じであった。また、AE エネルギーあるいは、カウント数の履歴など、異なるパラメータにおいても同様の結果を与えていた。したがって、計測期間中に、活荷重を与える交通量に大きな変化はなく、ほぼ定常的な状態で AE 計測は行われたものと考えられる。

図-11に、全計測期間中に検出された各チャンネルごとの AE ヒット総数(a)、および AE エ

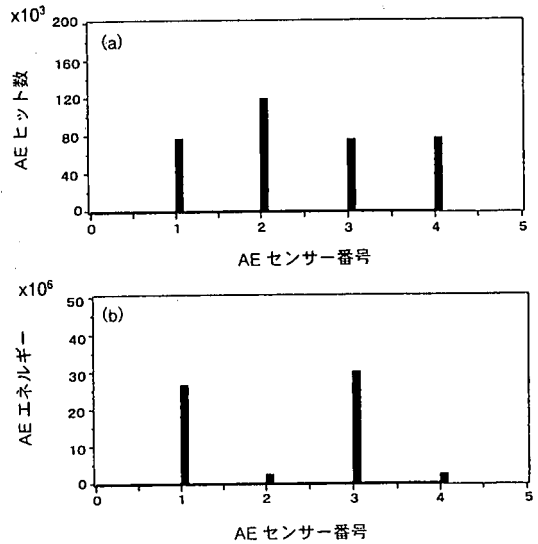


図-11 全計測期間中に検出された各チャンネル毎の AE ヒット総数(a)および AE エネルギー総数(b)

ネルギー値(b)が示されている。検出されたヒット数は、CH1, 3, 4 でほぼ等しく、約 8×10^4 であるが、CH2 のみでこれより約 50%程度大きい。

一方、AE エネルギーは CH2、および CH4 において 10^6 程度であるが、CH1 で 2.6×10^7 、また CH3 で 3.0×10^7 が検出されている。このように奇数チャンネルは、偶数チャンネルに比べ、一桁以上大きな AE エネルギーを検出している。これは、偶数チャンネルは床版表面に中央分離帯が設置され、車輛通行による活荷重が直接載荷されない部位に取り付けられているため、主として構造物全体の振動など間接的な原因で発生した AE を検出しているのに対し、奇数チャンネルは、通行帯裏面に取り付けられているので、車輛通行で生じた活荷重に起因する AE を直接検出しているためと考えられる。また、床版ハに取り付けられた CH1 と、同口に取り付けられた CH3 のエネルギー値を比べると、同じ活荷重下にもかかわらず口の場合の方が、ハに比べ約 15%程度検出値が大きい。ひび割れ密度の目視観察結果を、図-4に示されるモデル試験の結果と対照した場合、床版ハは損傷進行の第I段階中期に、また口は第I段階の後期に対応していた。したがって、前述した検出 AE エネルギー値の差は、床版間における損傷程度の違いに起因していると考えられる。

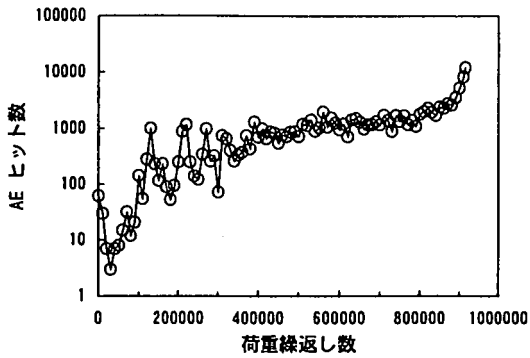


図-12 周期的な短期間の計測で検出された AE ヒット数の履歴

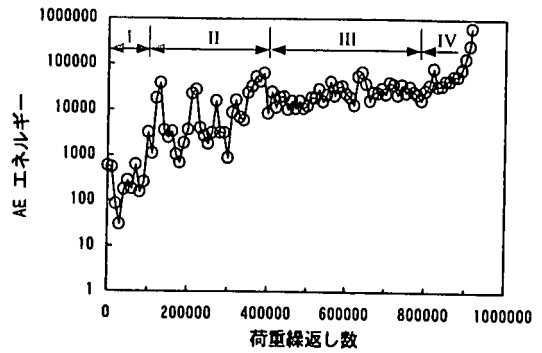


図-13 周期的な短期間の計測で検出された AE エネルギーの履歴と損傷段階の変化

4. 考察

本研究におけるモデル試験では、初期荷重から最終破壊(繰返し数 9.17×10^5)に至る、全期間において連続的に AE 計測を行った。しかしながら、実構造物において損傷進行を評価する際、その全期間にわたって計測を行うことは、実際には極めて困難と考えられる。

図-12は、繰返し数が 10^4 回経過したごとにその後の 100 回の期間で検出された AE ヒット総数を、繰返し数に対して示した履歴である。履歴曲線は、図-5に示される全期間の計測で得た AE ヒット計数率の履歴と、極めて類似している。したがって、損傷進行を AE 法でモニターする際に必ずしも全期間で連続的な計測を行う必要はなく、一定期間経過後、周期的に短期間の計測を行えば、劣化進行過程を十分評価できるものと考えられる。とりわけ実構造物においては、こうした計測法を適用することが、実用的かつ経済的であるとえられる。

同様の処理を、検出された AE エネルギーに対して行った結果が、図-13に示されている。図中には、参考のためモデル試験においてひび割れ進展の目視観察結果から得た、損傷の進行段階が示されている。

すでに述べたように、実構造物で供用中の床版に対して車輛通行下で行われた AE 計測結果によれば、損傷程度のより大きい床版口では、床版ハに比べ、同一の活荷重下で、15%程度大きなエネルギー値を検出している。図-13に示されるモデル試験結果を見ると、損傷段階 I に

おいて、とりわけ初期に、荷重繰返し数の増加とともに検出されるエネルギーが急増するため、検出値は広範囲に分布している。しかしながら、その中期以降を見ると、損傷の進行とともにエネルギー値はほぼ連続的に増加している。一方、ひび割れ密度の評価から、床版ハは損傷進行の第 I 段階中期に、また床版口は同後期に対応することが確認されている。この結果を図-13と対照すると、実構造物で得た結果は、実験室における AE エネルギーの検出傾向と定性的に一致していることが理解される。したがって、実構造物で供用中の床版において、車輛通行下で一定時間 AE 計測を行い、AE エネルギー値を評価することにより、損傷度を判定できる可能性があると考えられる。

5. 結論

実験室で鉄筋コンクリート製モデル道路橋床版に対して、最終破壊に至る 9.17×10^6 回の繰返し荷重(疲労)試験を行い、その全期間で AE 信号を計測した。また、実橋で供用中の床版において、車輛通行による活荷重下で、2 時間連続的に AE を計測し、以下の結果を得た。

- (i) ひび割れ密度の履歴と AE 活動度の履歴を対照することにより、疲労荷重下におけるひび割れ(損傷)進行過程を、AE 信号を計測することで予測・評価できることが示された。

- (2) ひび割れの目視観察結果と AE 発生源の平面位置標定結果を対照させることにより、AE 源位置標定を用いて、ひび割れ発生部位をある程度特定化できることが明らかになった。
- (3) 荷重位相と AE 発生との関係を解析することで、最大荷重値付近の AE (Peak Load AE) はひび割れ進展に対応したものであり、また最小荷重値付近の AE 信号を検出することにより、最終破壊の進行過程を実用的にモニターできる可能性のあることが示唆された。
- (4) AE 法を用いて疲労劣化の進行を評価するには、必ずしもその全期間にわたり連続的な計測を行う必要はなく、一定周期ごとに短期間の計測を行えば、実用的には十分有効であることが示された。
- (5) 実構造物において、車輛通行で生ずる活荷重下で 2 時間 AE 計測を行い、損傷度の大きな床版の方が小さな床版より、検出される AE エネルギー値が、15%程度大きいことが確認された。
- (6) 実構造物における計測結果と、モデル試験で得た結果を比較、対照することにより、実構造物で供用中の床版において、活荷重下で検出される AE エネルギー値を用いて、床版の損傷度を評価できる可能性のあることが示された。

参考文献

- 1) 魚本健人, 加藤潔, 広野進: コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版(株), 1990.
- 2) 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(株), 1988.
- 3) 重石光弘, 大津政康: コンクリート構造物への AE 逆解析の適用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11, No. 1, pp. 311-316, 1989.
- 4) 長瀧重義, 岡本享久, 曾我寿孝, 湯山茂徳: 補修した鉄筋コンクリートはりの AE 特性, 土木学会論文集, No. 426/V-14, pp. 75-80, 1991. 2.
- 5) 長瀧重義, 鎌田敏郎, 矢崎剛吉, 黒坂基, 岩波光保: 非破壊試験における鋼・コンクリート合成構造の欠陥評価法に関する研究, 土木学会論文集, No. 564/V-35, pp. 133-143, 1997. 5.
- 6) コンクリート構造物の劣化診断に関する研究委員会報告書, 東京大学生産技術研究所, pp. 111-118, 1998 年 3 月.
- 7) 大平貴規, 岸輝雄: 疲労き裂進展に伴う AE における力学的条件および材料特性の影響, 非破壊検査, Vol. 30, No. 11, pp. 922-928, 1981. 11.
- 8) 湯山茂徳, 久松敬弘, 岸輝雄: 304 ステンレス鋼の腐食疲労特性と AE 解析, 日本金属学会誌, Vol. 46, No. 1, pp. 85-93, 1982. 1.

(1999. 2. 5 受付)

EVALUATION OF FATIGUE DAMAGE IN REINFORCED CONCRETE SLAB BY ACOUSTIC EMISSION

Shigenori YUYAMA, Zhang-Wang LI, Takeshi TOMOKIYO, Masaru YOSHIZAWA
and Taketo UOMOTO

Applicability of acoustic emission(AE) technique for evaluation of fatigue damage was examined in reinforced concrete(RC) slabs under cyclic loadings in both laboratory and real structure in service. The fundamental test performed in laboratory showed that cracking process can be practically monitored by the measurement of AE signals. The analysis of the relationship between loading phase and AE activity indicated that the final stages of the fracture process can be evaluated by detecting AE signals generated near the minimum loading phase. The comparison of the result from the real structure and that from the laboratory specimen demonstrated that AE energy can be an effective parameter for evaluation of fatigue damage in RC slabs in service.