

論文 AE 法による鉄筋コンクリート床版の疲労劣化評価

湯山茂徳^{*1}・李正旺^{*2}・吉沢勝^{*3}・魚本健人^{*4}

要旨：鉄筋コンクリート床版の疲労破壊を AE 法でモニタリングする手法を確立するために、モデル道路橋床版に対して、繰返し載荷試験を実施した。その結果、検出された AE 信号の活動度を調べることで、ひび割れ進展過程を評価できることが示された。また、AE 発生源の二次元位置標定により、ひび割れが最初に供試体の中央から集中的に発生し、その後徐々に周辺部へ進展する過程をモニターできることが明らかになった。さらに、荷重位相と AE の発生挙動との関係を解析することにより、劣化が進行し最終破壊に至る過程を評価できる可能性のあることが示された。

キーワード：アコースティック・エミッション, 疲労, 鉄筋コンクリート, 床版, 劣化

1. はじめに

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、交通量の増大及び車両の大型化による繰返し荷重の増加、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上で、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判断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おり、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てきている^{3)~5)}。しかしながら、これまで鉄筋コンクリート床版を対象とした AE 法による疲労劣

化評価の実施例は報告されていない。

本研究は、AE 法による鉄筋コンクリート床版の疲労劣化評価への適用性を検討することを目的とし、鉄筋コンクリート・モデル道路橋床版を用い、上面湛水下の床版の疲労載荷による劣化損傷過程における、AE の挙動を調べたものである。

2. 試験概要

実験には、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。

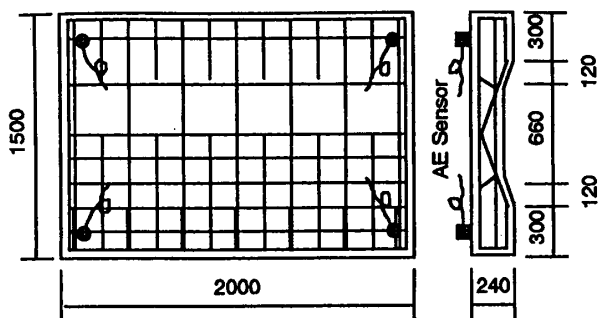


図-1 鉄筋コンクリート床版供試体及び AE センサー配置

^{*1}日本フィジカルアコースティクス (株) 代表取締役 工博 (正会員)

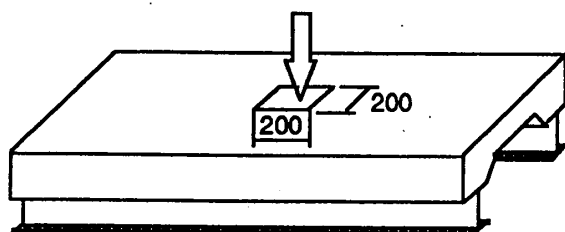
^{*2}日本フィジカルアコースティクス (株) 工博

^{*3}(財)首都高速道路技術センター 開発研究部 工修 (正会員)

^{*4}東京大学生産技術研究所教授 工博 (正会員)

表－1 コンクリート物性値

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kgf/cm ²)				最大粗骨材 寸法(mm)	スパン [*] (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 (kgf/cm ²)	動弾性係数 (kgf/cm ²)
		W	C	S	G						
64.0	48.5	165	258	892	972	25	7.5	4.5	401	2.8 ×10 ⁵	3.5 ×10 ⁵



図－2 供試体の支持方法

表－2 各段階における最大荷重値及び
くり返し数

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

供試体の外形寸法は、スパン方向 1500mm，スパン直行方向 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、載荷点は 200mm × 200mm 一点集中載荷とした。コンクリートの物性値が表－1 に

示されている。

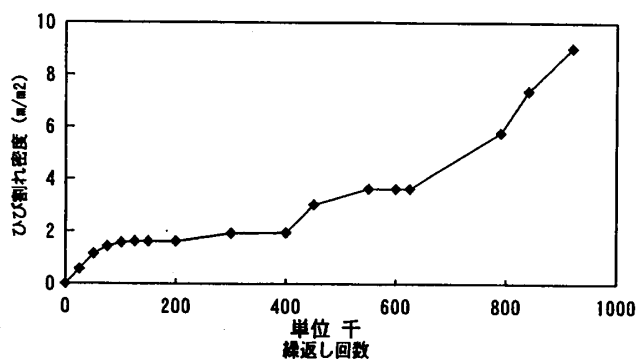
動的載荷試験は 450kN の電気油圧サーボ式疲労試験機を用い、0.7Hz の正弦波を荷重制御による片振り圧縮で実施した。異なる 7 つの条件下で試験は行われたが、本報告における試験時の環境条件は供試体上面に水を張った状態（湛水）であり、繰返し荷重の最大値は 150 kN，200kN，225kN，250kN，270kN に設定し、載荷試験を段階的に行った。各段階における最大荷重値，経過した繰返し数などが表－2 にまとめられている。

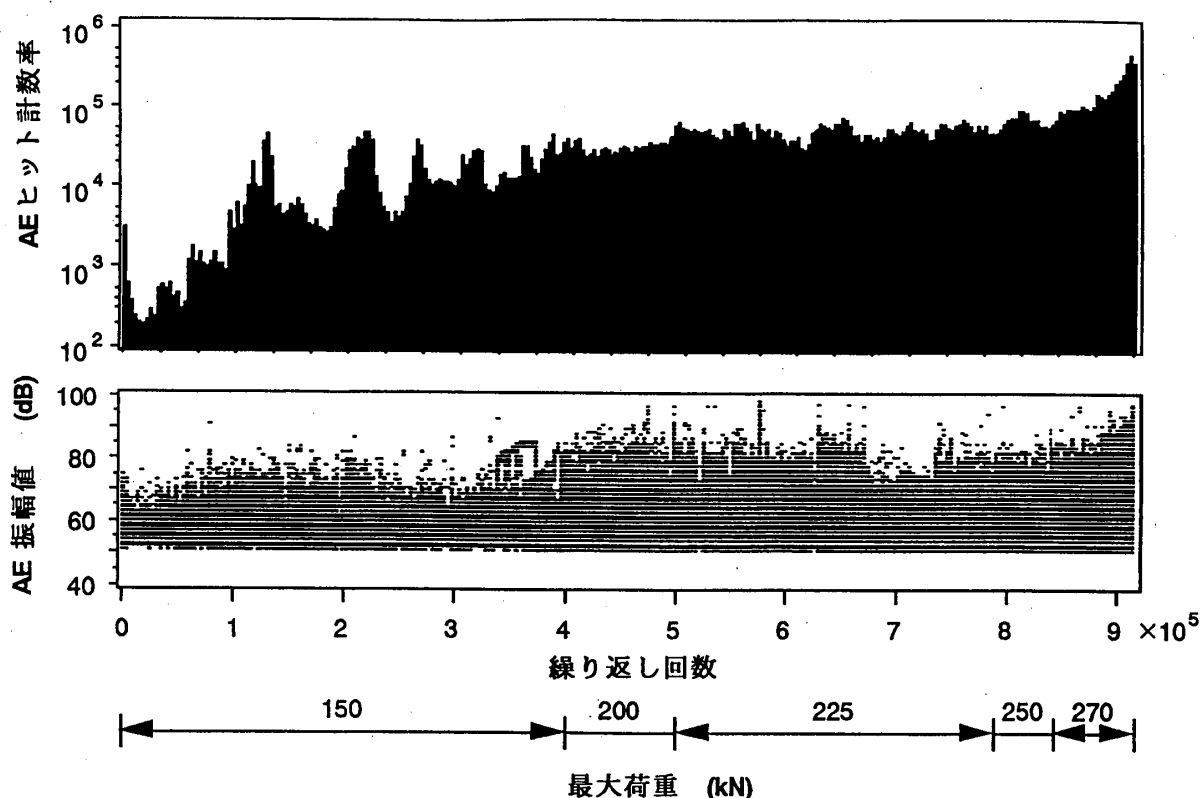
AE 計測には、PAC 社製 MISTRAS 4 チャンネル AE 計測システムを用いた。変換子は 60kHz 共振型 (R6) AE センサーを使用した。AE センサーの位置が図－1 に示されている。

3. 試験結果

3.1 ひび割れの進展と AE 発生挙動

図－3 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 1m²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、

図－3 荷重くり返し数と
ひび割れ密度との関係



図－４ AE ヒット計数率及び振幅値の履歴と最大荷重値の変化

荷重繰り返し数 $0 \sim 10^5$ において、初期ひび割れの発生から、急速なひび割れ進展の生じる第Ⅰ段階、繰り返し数 $10^5 \sim 4 \times 10^5$ 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、繰り返し数 $4 \sim 8 \times 10^5$ 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 200～225kN へ増加している。）、そして 8×10^5 から急速に密度が増加し、最終破壊に至る第Ⅳ段階に分けられる。

図－４に、荷重繰り返し数に対する AE ヒット計数率及び振幅値の履歴が、荷重最大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（ヒット信号検出数）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段階にはいると最終破壊（繰り返し数 9.17×10^5 回）の直前、 8.8×10^5 回付近より、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。

3.2 AE源の位置標定

図－５に、荷重繰り返し数が 2.5×10^4 、 4.5×10^5 、及び 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－６に、繰り返し数が $0 \sim 2.5 \times 10^4$ 、 $4.6 \sim 5.0 \times 10^5$ 、及び $6.25 \sim 7.9 \times 10^5$ 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

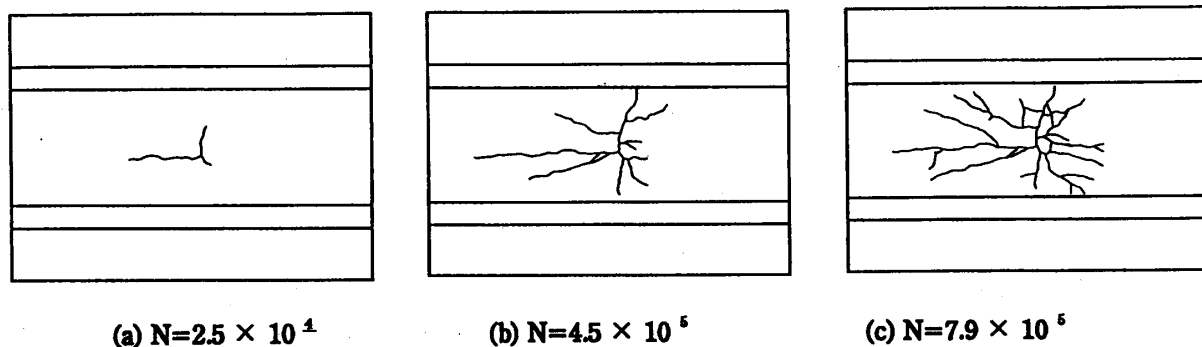


図-5 ひび割れ観察結果

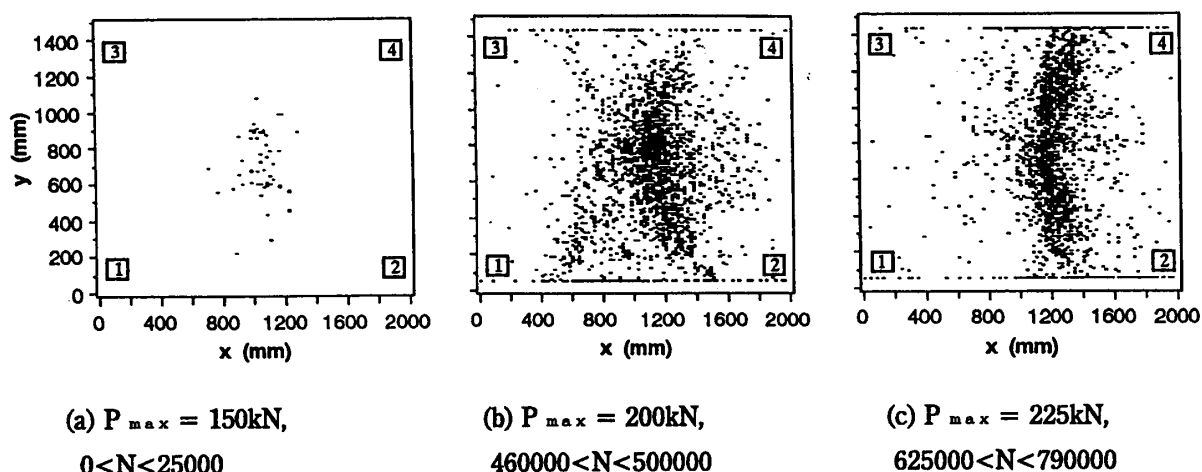


図-6 AE発生源の二次元位置標定

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。

3.3 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が多く行われている^{6) 7)}。図-7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⁷⁾。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 及び 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-8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-8(a)には、くり返し数 $3.0 \sim 4.0 \times 10^5$ （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が顕著に検出されるのは、繰返し数 $3.8 \sim 3.9 \times 10^5$ 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つ

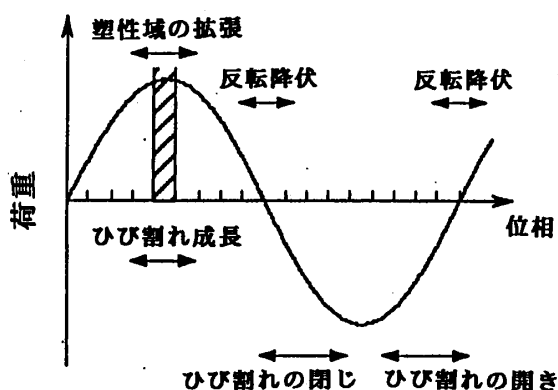
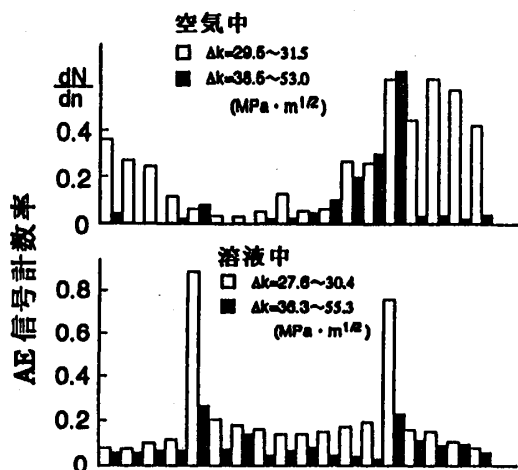


図-7 荷重位相と AE 発生との関係

で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-8 (b) 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、押し抜きせん断破壊による最終破壊の進行過程

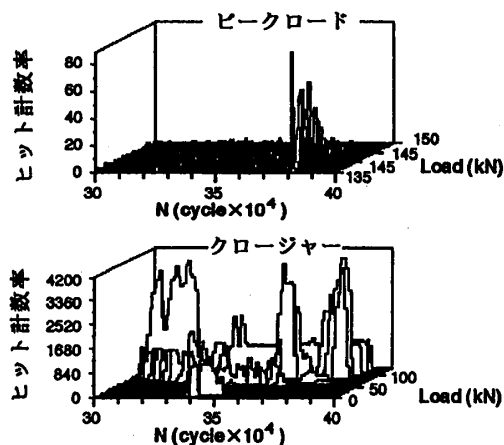
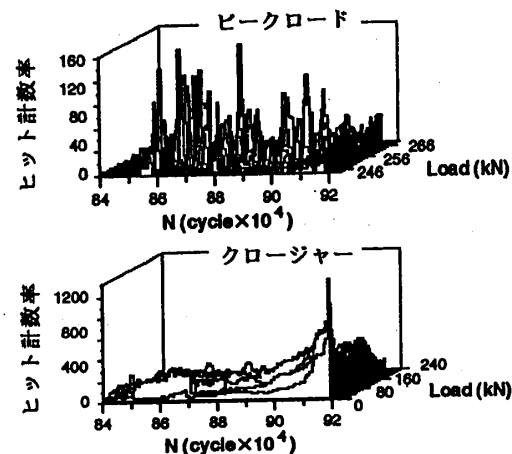
(a) $P_{max} = 150\text{kN}$, $3 \times 10^5 < N < 4 \times 10^5$ (b) $P_{max} = 270\text{kN}$, $8.4 \times 10^5 < N < 9.17 \times 10^5$

図-8 荷重位相と AE 発生挙動

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。

4. 考察

本研究では初期載荷から最終破壊（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、実構造物において劣化進行を評価する際、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-9 は、繰返し数が 10^4 回経過した後にその後の 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-4 に示される全期間の計

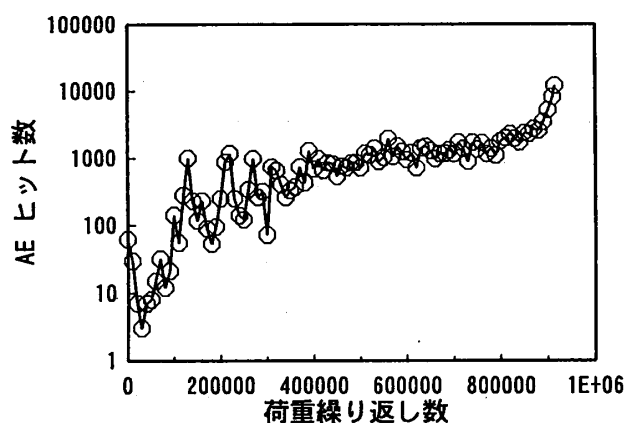


図-9 周期的な短期間の計測で検出された
AE ヒット数の履歴

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、劣化進行を 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考えられる。

5. 終りに

鉄筋コンクリート製モデル道路橋床版において、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、以下の結果を得た。

- (1) 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（劣化）進行過程を、AE 信号を計測することで予測・評価できる可能性のあることが示された。
- (2) ひび割れの目視観察結果と AE 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可能性のあ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) はひび割れ進行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。

-) 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な評価を行えることが示された。

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) 大平貴現・岸輝雄：疲労き裂進展に伴う AE における力学的条件及び材料特性の影響，非破壊検査，Vol.30, No.11, pp.922-928, 1981.11
- 7) 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