

論文 AE 法による鉄筋コンクリート梁部材の健全性評価方法に関する研究

内田昌勝*1・大津政康*2・岡本享久*3・森大介*4

要旨：鉄筋コンクリート(RC)梁部材の典型的な破壊形式である曲げ破壊あるいはせん断破壊に至るまでの進行過程を AE 法にて評価し、現状の劣化した実建造物の健全度評価のための基礎資料を得る目的で本研究を実施した。RC 部材の曲げひび割れの進展度は、除荷時に発生する AE のヒット数および累積エネルギー量の変化より把握することができた。また、最終的に斜め引張破壊に到達する梁では、事前に RA 値(立上り時間/振幅値)の大きな AE が多く発生することが認められた。これらの成果は現状の RC 部材の劣化進行過程の把握とその劣化進行がせん断破壊主導型に結びつくか否かの判断に際し有用な資料になる。

キーワード：鉄筋コンクリート梁, アコースティック・エミッション, 曲げ破壊, せん断破壊, せん断スパン比, 健全性

1. はじめに

社会の成熟化や環境問題の顕在化に伴って、社会基盤の中核として高度成長期に急激に整備されたコンクリート建造物の維持・管理が大きな問題となっている。

そこで、鉄筋コンクリート(RC)内部で発生するひび割れの進展状況を敏感にかつ精度良く検出することができる¹⁾²⁾³⁾アコースティックエミッション(AE)法に着目し、RC 建造物の劣化部位の位置、損傷あるいは劣化の程度と AE 挙動の関連について検討した。

外力を受ける RC 梁部材が曲げひび割れ発生から曲げ破壊主導型の方にひび割れの進展状況が変化するか、あるいはせん断破壊主導型の方向に進むかの判断について、発生する AE との相関について検討した。すなわち、本研究では、これらの影

響を検討するため、せん断スパン比(a/d)を4および6として破

壊形態を変化させ、繰り返し漸増曲げ・せん断载荷を行い、部材の耐荷挙動とその時発生する AE から得られる情報との関連を調べ、考察を加えたものである。

2. 実験概要

2.1 試験体の条件

試験体の寸法は、幅 100×高さ 200×長さ 3200mm とし、コンクリートは呼び強度 30、スランプ 15cm、粗骨材最大寸法が 20mm のレディーミクストコンクリートを用いた(表-1)。鉄筋は D13 (SD295A)の異形鉄筋を用い、図-1 に示すようにかぶり 30mm の位置に、均等に 2 本配筋した。なお、せん断破壊を誘発するため、せん断補強筋は配置しなかった。

表-1 コンクリートの物理的性質

フレッシュコンクリート		硬化コンクリート				
スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	2面せん断 強度(N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	超音波伝播 速度(m/sec)
14.5	4.8	32.4	3.06	5.10	27.7	4000

*1 日本セメント(株)中央研究所 建材研究部 副主任研究員 (正会員)

*2 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 工博 (正会員)

*3 日本セメント(株)中央研究所 建材研究部 主席研究員 工博 (正会員)

*4 日本セメント(株)中央研究所 建材研究部 研究員 (正会員)

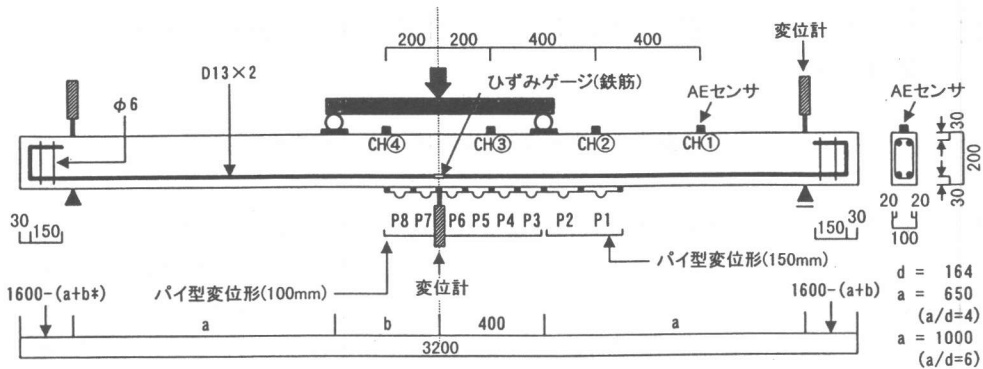


図-1 載荷状況と各計測器の位置 (mm)

表-2 載荷条件

a/d	曲げひび割れ荷重(kN)	部材耐力 (kN)	繰返し曲げ荷重(kN)			
			1 st	2 nd	3 rd	4 th
4	8.74	40.0	9.0	20.0	30.0	40.0
6	5.94	26.1	6.0	12.0	18.0	26.0

2.2 計測方法

部材のたわみ量、開口部材および鉄筋のひずみ量は図-1に示す、変位計、パイゲージおよびひずみゲージで、曲げ荷重はロードセルでそれぞれ計測した。

AE センサは、60 から 200kHz まで平坦な周波数特性を持つ広帯域型センサを用い、曲げひび割れの発生・進展から斜め引張ひび割れの発生・進展の挙動、最終の破壊についてを十分に計測できるように、400mm 間隔で 4 個配置した(図-1)。なお、カプラントとして、シリコングリースを用いた。4 個のセンサで検出した AE 信号はプリアンプにより 60dB に増幅され、AE 計測装置に入力される。AE 信号のしきい値は環境ノイズが入らない最低値として 50dB に設定した。計測した AE 波形は、図-2 に示す信号処理を行い、各パラメータ値を用いて解析した。

2.3 載荷方法

載荷方法は図-1 に示すように 2 線載荷とした。想定した破壊形式は、a/d=4 のとき典型的なせん断破壊である斜め引張破壊を、a/d=6 では典型的な曲げ破壊(曲げ引張破壊)である。a/d=4 の条件では破壊位置を制御するため、一方の載荷位置と載荷点までの距離(b)を大きく設定した

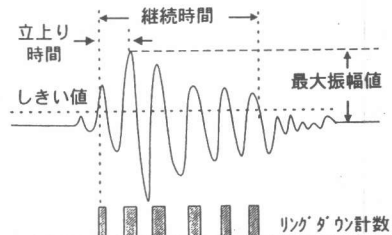


図-2 AE の信号処理パラメータ

(500mm)。

繰返し載荷条件は、表-2 に示すように、使用したコンクリートおよび鉄筋の物性値から計算した曲げひび割れが発生する荷重から部材耐力までを均等に 4 段階に分け、荷重を加えた。

3. RC 部材の耐荷挙動

ひび割れの発生状況を図-3 に示す。

a/d=4 の場合、3 ステップまで曲げひび割れが進展し、4 ステップ以降では曲げひび割れが進展せず、代りに斜め引張ひび割れが発生し、斜め引張破壊のせん断破壊にて部材耐力に達した。

a/d=6 の場合、中央部分の主曲げひび割れが拡大して典型的な曲げ引張破壊にて部材耐力に達した。なお、終局時の挙動を調べるため鉄筋が降伏した後一旦除荷し、さらに部材耐力まで荷重を加えた。

図-4 に繰返し曲げ試験時の荷重とたわみ量および鉄筋のひずみ量の関係を示す。たわみ量の変化はいずれも 2 ステップ後に大きくなった。また、ひずみ量の変化から、曲げ破壊した a/d=6

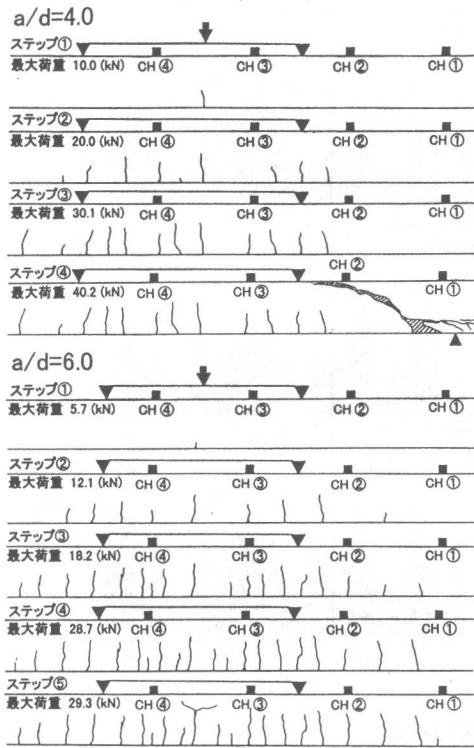


図-3 ひび割れ発生状況

の梁では4ステップで鉄筋が降伏し、せん断破壊した $a/d=4$ の梁では最大耐力に至るまで鉄筋は降伏していないことが分かる。

各繰返し荷重ステップごとに計測された開口変位量の最大値を表-3に示す。いずれの载荷条件でも、2ステップで最大開口変位量が 0.2 mm を超えており、試験体の中央(P7,P8)部分で変位量が最大となった。

4. 曲げ部材の劣化度評価

4.1 荷重履歴と AE

パラメータ

図-5に荷重とAE振幅値の履歴を示す。载荷時には、事前ステップで受けた荷重値を超える頃から 70 dB 以上の大振幅のAEが多発し、1秒当たりのAE

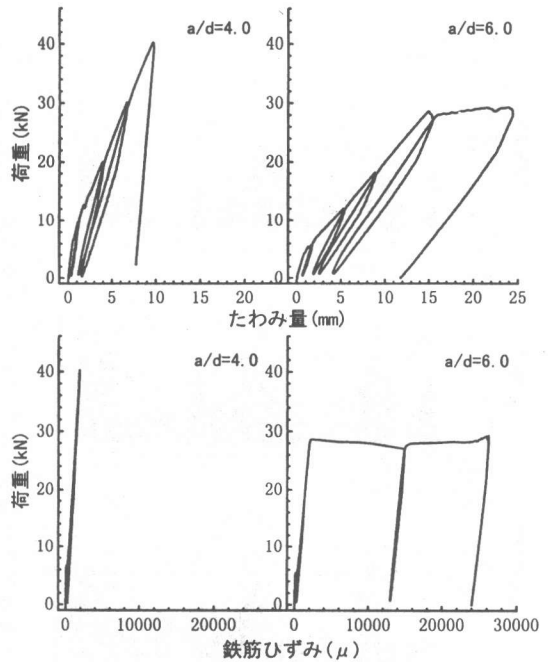


図-4 荷重とたわみおよび荷重の関係

ヒット数であるヒットレート(図-6)も急増した。一方、除荷時には a/d が4より6で、かつ、センサの位置が中央に近い(CH③)ほど、すなわち最大開口変位量が多いほど、大振幅のAEが頻発した。そこで、次に、最大開口変位量と除荷時のAEパラメータの関係を検討した。

4.2 最大ひび割れ幅の評価

除荷時に発生するAEの特性をより定量的につかむため、下縁部コンクリートに曲げひび割れが発生した荷重(σ_t)の1/2以下に着目し、ヒット数と累積エネルギー量を求め、部材が受けている最大開口変位量、すなわち最大曲げひび

表-3 最大開口変位(mm)

a/d	荷重ステップ	最大荷重(kN)	パイゲージ位置							
			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
4	1	10.0	0.03	0.01	-0.01	0.01	0.01	0.01	0.09	0.03
	2	20.0	0.09	0.07	-0.02	0.22	0.04	0.00	0.28	0.10
	3	30.1	0.17	0.14	-0.04	0.41	0.05	0.04	0.45	0.72
	4	40.2	0.24	0.22	-0.04	0.59	0.06	0.08	0.62	0.85
6	1	5.7	0.01	0.01	0.03	-0.01	0.01	0.01	0.10	0.09
	2	12.1	0.11	0.14	0.10	0.05	0.06	0.05	0.22	0.16
	3	18.2	0.20	0.26	0.15	0.10	0.11	0.07	0.33	0.25
	4	28.7	0.35	0.46	0.26	0.16	0.19	0.13	0.79	0.25
	5	29.3	0.37	0.49	0.28	0.17	0.45	0.12	2.75	0.25

開口変位量が 0.2 mm 以上

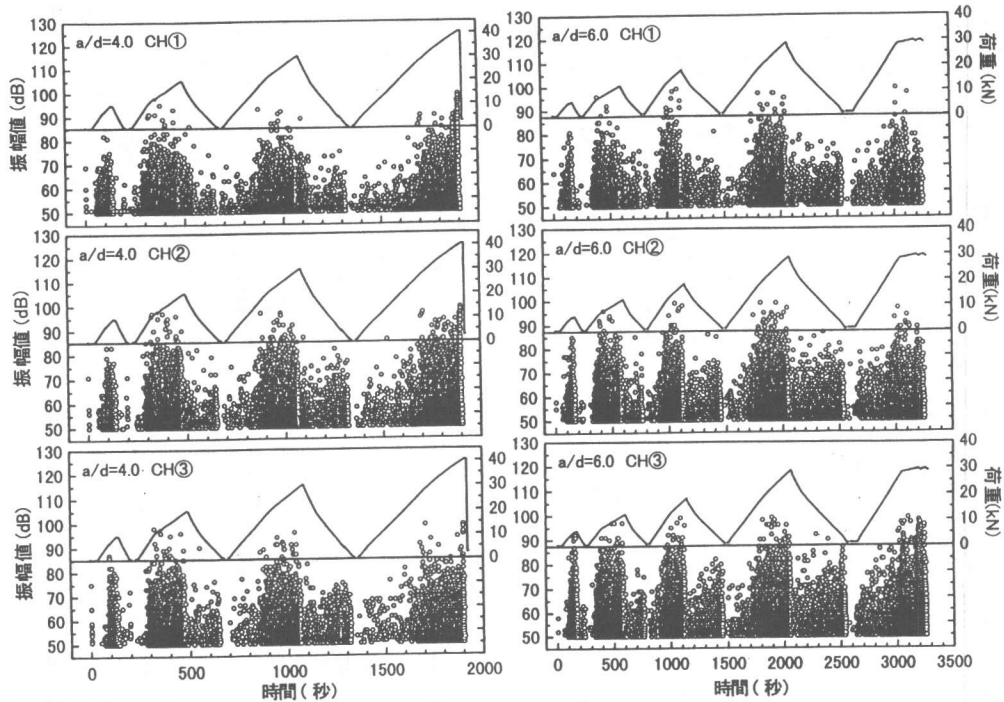


図-5 振幅値と荷重の履歴

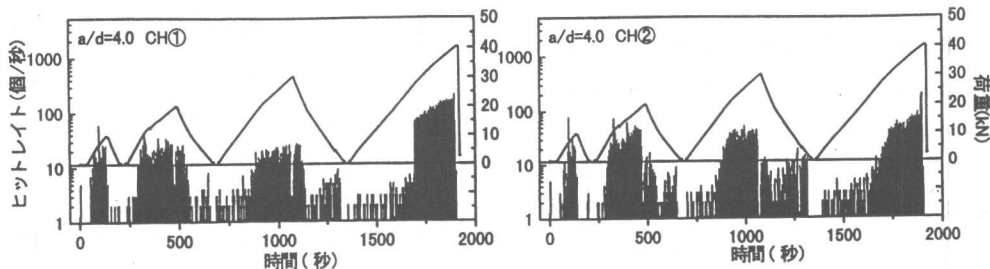


図-6 ヒットレートと荷重の履歴

割れとの関係を調べた。ここで、各センサが AE を検知できる範囲は、その減衰特性などから各取付け位置から 40cm 以内にあるひび割れが対象となる。

図-7 に示すよう、最大開口変位量の増加に伴い、除荷時の AE ヒット数および累積エネルギー量が直線的に増加することが分かった。

除荷時に発生する AE は、荷重が小さくなるほどその発生頻度が増加しているため、ひび割れ界面が元の状態に戻る際に発生したと考えられる。ここで、部材に生じた曲げひび割

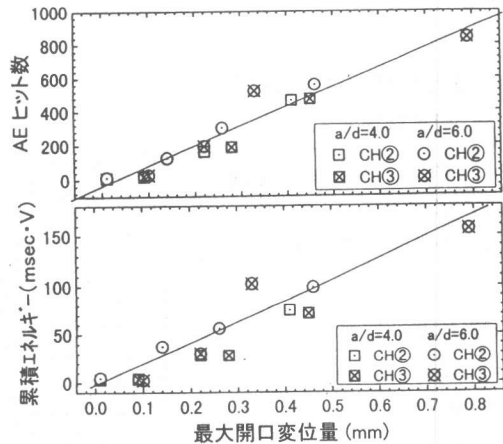


図-7 最大ひび割れ幅と除荷時の AE 特性

れの拡大に伴って、ひび割れ界面でずれが生じると考えれば、除荷時の AE のヒット数や累積エネルギー量の増加は説明することができる。

この方法は、小さい荷重(たとえば、部材上を走向するダンブトラック等の変動荷重)を利用して、部材の劣化度を評価できることから、実構造物における適用性も高いと考えられる。

5 破壊形態と AE の発生挙動

5.1 破壊進展位置

図-8 に繰返し荷重ステップと AE ヒット数の関係を示す。a/d=4 では、最大耐力に至る 4 ステップで部材端部(CH①)の AE センサのヒット数が急増し、a/d=6 では、いずれの荷重レベルにおいても CH①~③の順に AE ヒット数が多くなった。

a/d=4 で急増した AE の発生源を調べるため、AE の一次元位置評定を行った結果(図-9)、CH①側で主に AE が発生しているのが分かった。また、CH①および②の AE ヒットレート(図-6)を見ると、CH②付近では、斜めひび割れが成長する直前で AE の発生数が急増しているが、破壊荷重の 70%を超えた頃の発生数は CH①と比較して遥かに小さくなっている。図-3 のひび割れの発生状況と合せて見ると、CH①で 4 ステップに急増した AE は、鉄筋とコンクリートの付着部分から発生している可能性が大きいと言える。

一方、a/d=6 では、図-3 より中央部分で発生するひび割れの本数が多いことや、最大荷重が大きくなるほど開口変位量が増加していることから(表-3)、CH①~③の順に AE ヒット数が多くなっているのは曲げひび割れの拡大に対応していると言える。

5.2 破壊形態の識別

RC 梁部材・曲げスパン下縁の曲げひび割れが発生・進展する場合、図-2 の AE パラメータのうち、立上り時間が短い AE が多く計測され、反対にせん断ひび割れなどのずれが発生・進展している場合には、立上り時間が長い AE が多

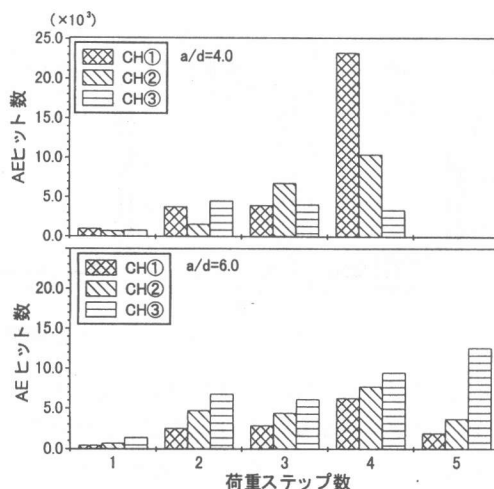


図-8 繰返し荷重ステップと AE ヒット数

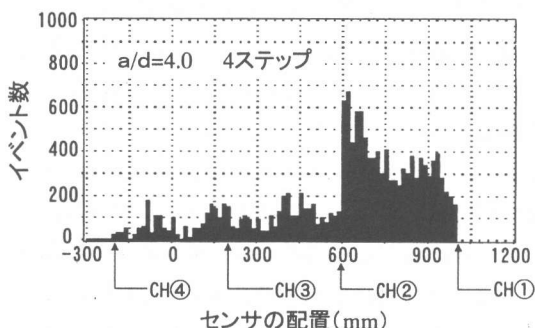


図-9 一次元位置評定結果

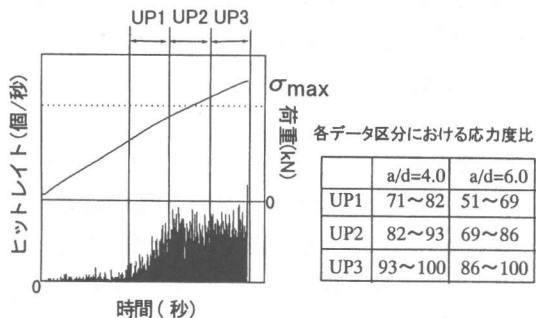


図-10 データの区分方法

く計測されることが報告されている⁴⁾⁵⁾。

そこで、立上り時間を振幅値で除した値を RA 値と定義して、斜め引張破壊および曲げ引張破壊に至るまで(4 ステップ)のデータを着目し、AE 発生数が増加し始める点から部材耐力に至るまでのデータを時間で 3 等分し(図-10)、各段階でどのような特徴を持つ AE が発生しているかを調べた。

その結果を図-11 に示す。曲げ引張破壊(a/d

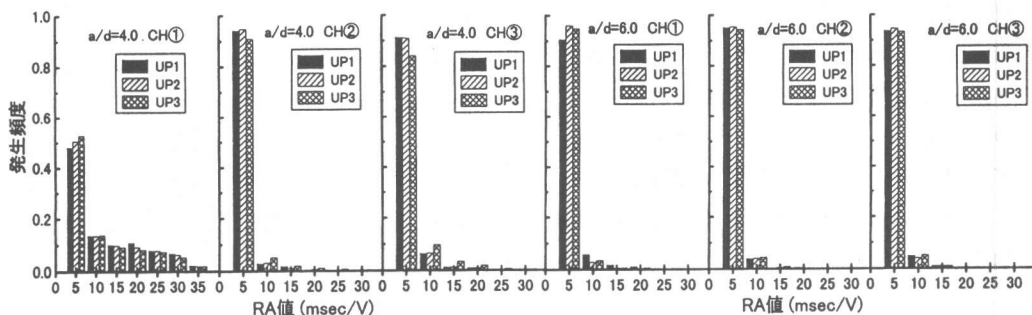


図-11 RA 値の頻度分布 (4 ステップ)

=6)を起こした部材では、いずれの結果も RA 値が 5 以下のデータが 90%以上を占め、曲げひび割れに起因する AE が卓越していることがわかる。一方、斜め引張破壊を起こした部材では、端部に配置したセンサ(CH①)で RA 値が 5 以上の AE 発生頻度が増加した。この場所は、図-3 のひび割れ図より、鉄筋とコンクリートの付着破壊を起こした位置に相当し、斜め引張ひび割れが発生する以前から鉄筋とコンクリートの付着界面ですれが発生している可能性を示している。

いずれにしても、斜め引張破壊が発生する部材では、ひび割れが発生する前から RA 値の大きい AE の頻度が増加するため、梁部材における曲げひび割れおよびせん断ひび割れの進展を予測するためには有効なパラメータと考えることができる。

6. まとめ

RC 梁部材の劣化度および破壊形態を AE 法にて評価する目的で、せん断スパン比を変化させることによって曲げ破壊あるいはせん断破壊を起こさせた。荷重方法は漸増繰返し曲げ・せん断荷重で行い、ひび割れの発生・進展・破壊までの劣化度と AE の発生挙動の関係を調べた。本研究の範囲内にて結果をまとめると以下のようになる。

(1)RC 部材に発生した最大ひび割れ幅と除荷時の AE のヒット数および累積エネルギー量には比例関係にあることが分かり、曲げひび割れが発生している部材の健全度評価に有効である。

(2)AE の発生位置や発生頻度の解析結果より、斜め引張破壊($a/d=4$)を起こした梁の部材端部(鉄筋の付着部分)で破壊が進行し、その後、斜め引張ひび割れが発生し部材耐力に至る現象を類推できた。

(3)斜め引張破壊は最大荷重の 70%程度から、RA 値(立上り時間/振幅値)の大きな AE が多く発生し、曲げ引張破壊では最大耐力に至るまで RA 値の大きな AE 発生頻度が少ない。

謝辞：本研究の一部は、日本建材産業協会のもとで行われた平成 9 年度通産省工業技術院の委託研究費に基づいて実施されたものであり、ここに深く謝意を表します。

[参考文献]

- 1) S.Yuyama, T.Okamoto and S.Nagtaki: Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Repaired Reinforced Concrete Beams, Mat. Eval., 52(1), pp.86-90,1994
- 2) Y.Murakami and S.Yuyama: Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Reinforced Concrete Beams Deteriorated due to Corrosion of Reinforcement, Progress in Acoustic Emission VIII (JSNDI), pp.217-224, 1996
- 3) 黒坂基, 鎌田敏郎, 長瀧重義: 鉄筋コンクリート梁のひび割れモニタリングにおける AE 法の適用, 第 51 回セメント技術大会講演要旨, pp.86-87, 1997
- 4) 川島正史, 鎌田敏郎, 長瀧重義・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
- 5) 森大介, 岡本享久, 内田昌勝, 柴田辰正: 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, コンクリート工学年次論文報告集, vol.19, No.1, pp.1327-1332, 1997