

補修した鉄筋コンクリートはりのAE特性

ACOUSTIC EMISSION FROM REPAIRED REINFORCED CONCRETE BEAMS

長瀧重義*・岡本享久**・曾我寿孝***・湯山茂徳****

By Shigeyoshi NAGATAKI, Takahisa OKAMOTO,

Toshitaka SOGA and Shigenori YUYAMA

The acoustic emission behaviors of repaired reinforced concrete beams under flexure load was studied. Useful correlation was established between the acoustic emission activity and crack growth in the repaired reinforced concrete beams. Three different acoustic emission activities were observed during the flexural loading. Flexural crack initiation, flexural crack propagation and slip between repair material and old concrete were identified by monitoring the acoustic emission. The zone of slip initiation and development can be identified from the acoustic emission event-location plot, showing major acoustic emission concentration areas. Repetitive loading showed that the Kaiser effect was not valid after slip was happened at the connected face between repair material and old concrete. Flexural crack growth acoustic emission burst event signals were found to be of higher amplitude compared with those due to the slip. The accumulated number of burst events of these high-amplitude emissions, monitored by the use of a high threshold, showed good correlation with the crack growth in the beam.

Keywords : acoustic emission, repaired reinforced concrete beams, slip, Kaiser effect, hit rate, amplitude

1. 目 的

近年コンクリート構造物の早期劣化問題が顕在化し、補修工事の件数、費用ともに増加の一途をたどっており、これに対応してさまざまな補修材料および補修工法が開発されつつある¹⁾。しかしながら、補修後のコンクリート構造物の耐用性の評価、すなわち設計目的に応じた機能を発揮しているかあるいはその構造部位が機能を継続して維持しているかに関する評価は主として目視による観察が判断の根拠となっており、補修後の接合面を中心とする内部欠陥の発生、進展に関しては全く判断資料がないのが現状である。

コンクリート工学へのアコースティック・エミッション(AE)の適用に関する研究は1985年以降急増している。特に、コンクリート構造物の維持・管理分野において有用な手段となることが期待され、ひびわれを中心と

した診断に大いにその威力を発揮しつつある。柿沢ら²⁾はRCはりの疲労試験において、曲げ破壊を生じたはりでは、繰り返し载荷によりAE発生頻度は初期の増加の後に安定期として発生率の低下する時期があり、その後再びAEが急増して破壊に至っていること、またせん断破壊を生じたはりでは、初期のAE発生頻度の繰り返し回数に伴う増加が一定のまま全体破壊に至っていることを指摘している。さらに、大津^{2),3)}はAE波動のコンクリート中の伝播に際しては、波動の減衰が大きく、数mに及ぶような範囲の破壊源探査は精度的に問題があるとしている。新関ら⁴⁾はAEによるコンクリートの破壊靱性試験中の破壊進行領域の解析ではAE発生数の95%が目視可能な巨視的クラック面の平均の中心から、このクラック面垂直方向の25~40mm以内に分布することを述べている。加藤ら⁵⁾はAE法によるコンクリート割裂試験中の破壊挙動について検討し、割裂のメカニズムをひびわれ発生位置を中心に考察を加えている。補修したコンクリート構造部材の健全度評価にあたって、補修材と既設コンクリートの接合面における健全度が重要な診断項目となる。しかしながら、これまでの研究において、AE法によるモードI(開口形)とモードII(面内せん断形)のひびわれパターンの識別が明確にできておらず、曲げひびわれと接合面のずれの判別が難しい。さら

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 目黒区大岡山 2-12-1)

** 正会員 工博 日本セメント(株)中央研究所コンクリート研究部 (〒135 江東区清澄 1-2-23)

*** 正会員 JR西日本旅客鉄道福岡支社 (〒804 北九州市小倉北区京橋 4-7)

**** 工博 日本フィジカルアコースティクス(株) (〒150 渋谷区東 2-17-10, 岡本 LKビル 8F)

にはコンクリートの圧縮試験を例にとると、内部欠陥が進展する過程において、それ以前の荷重履歴に対しては、その先行荷重値を越えて荷重されなければAEがほとんど検出されない現象、すなわちカイザー効果とこれらのモードとの関連性が明確になっていない。以上がAE法の補修したコンクリート部材への適用性の主たる障壁となっていると思われる。

本研究は劣化した部分をはつとり、この部分に補修材を充填するきわめて一般的補修工法を適用したRC部材を対象にして、補修後の荷重履歴の下で部材内に進展する劣化状態をAE法により定量的に評価することを目的としたものである。すなわち、部材に新たに発生する曲げひびわれ、せん断ひびわれ、および補修材と旧コンクリートの接合面のひびわれ、剝離について、この種の欠陥の発生、位置および進展状況、さらにはこれらの欠陥の種類の識別をアコースティック・エミッション(AE)計測によって評価し、この種の部材健全度評価に関する合理的な判断資料を提供するものである。

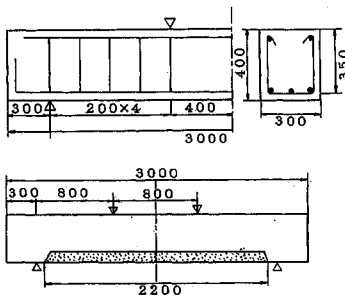
2. 実験概要

(1) 使用材料および供試体

補修材にはSBR系ポリマーセメントモルタルを使用し、補修材とコンクリートの物理的性質を表一に示す。供試体の寸法は図一に示すとおりであり、はりの横断面の高さは40cm、幅は30cmであり、はりの長さは300cmである。補修箇所の寸法は図一に示すように、補修厚さは10cm、補修長さは220cmである。軸方向鉄筋には引張鉄筋としてSD-30, D16($\sigma_{sy}=3687 \text{ kgf/cm}^2$, $E_s=2.14 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$)を3本(有効高さ35cm)、圧縮鉄筋としてSD-30, D13($\sigma_{sy}=3817 \text{ kgf/cm}^2$, $E_s=2.12 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$)を2本(上縁より3.5cmの位置)に配置

表一 補修材とコンクリートの物理的性質

	圧縮強度 kgf/cm ²	弾性係数 kgf/cm ²	引張強度 kgf/cm ²	曲げ強度 kgf/cm ²
補修材	43.0	19.1	50.4	123.5
コンクリート	38.3	28.7	28.0	44.5



図一 供試体寸法、補修箇所および配筋 (単位: mm)

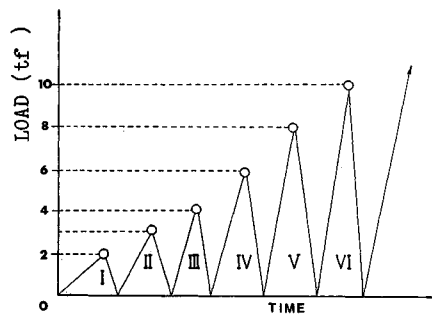
した。なお、せん断破壊を防ぐ目的でSD-30, D10のスターラップをせん断スパン内に20cm間隔に配置した。既設コンクリートを打設後1か月間湿潤養生を行い、接合面をビシャンハンマーによってチッピング処理した後補修材を打ち継いだ。なお、補修材の打設方向ははりを反転させ、重力方向に打ち継ぎ、3週間後に試験に供した。

(2) 荷重方法

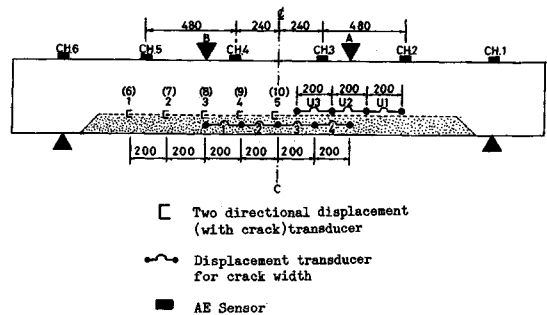
はりの曲げ試験は図一に示すように支間240cmの間を3等分点荷重試験で行い、図二のような荷重履歴曲線にて荷重を行った。各荷重増分ごとに図三に示す位置でAEの計測、ひびわれ進展状況、ひびわれ幅、補修材とコンクリートのずれ、鉄筋およびコンクリートのひずみを測定・観測した。なお、接合面に平行および垂直方向の変位を同時に測定する亀裂変位計ははりの両側面に貼付した[()内の数字は向こう側の側面に貼付した亀裂変位計を示す]。

(3) AEの計測

AE信号の検出、信号処理、データ解析にはPAC社製SPARTAN AE計測装置を用いた。150 Hz共振型高感度センサー(PAC R15)で検出されたAE信号は、プリアンプ内で100~300 kHzにバンドパスフィルターをかけた後40 dBに増幅されICCボードに入力される。信号処理部でデータを処理した後、主コンピュータに転送される。主コンピュータでは各種のパラメーターに対して、



図二 荷重履歴曲線



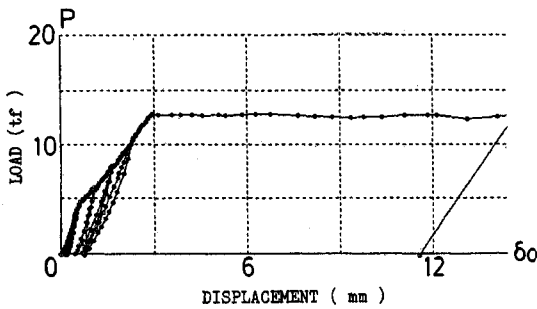
図三 各種計測機器の配置位置

解析を行うことができ、その結果をグラフ化してCRTに表示する。本研究に用いたAE信号処理パラメーターは、ヒット数、AE信号の最大振幅値、AE発生位置である。

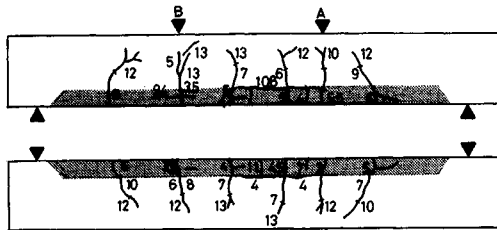
3. 各荷重履歴とひびわれおよびずれの進展状況の関係

図一4は作用荷重 (P) とスパン中央のたわみ量 (δ_c) の関係を示す。残留たわみ量は4サイクル目の載荷から、すなわち最大荷重6tfを作用させた後から大きくなった。続いてひびわれの進展状況を図一5に示す。初ひびわれは補修材に発生した曲げひびわれであり、RC部材の断面修復した補修部の載荷点Aおよび載荷点Bの真下・下縁から $P=3$ tf になったときに発生した。この曲げひびわれの発生の際、ほぼ同一位置に局部的なずれが4tf付近で発生し、8tf付近になると純曲げ区間における接合面長の約60%にわたってずれた。その後、既設コンクリートにも曲げひびわれは発生するがずれの影響により、補修部分と既設コンクリート部分が局部的に分離していることとなり、既設コンクリートの曲げ引張部には鉄筋が配置されておらず、鉄筋によるひびわれ拉幅の拘束がないことから、コンクリートに発生する応力の再配分がされにくい。その結果既設コンクリート部分のひびわれ本数は補修材で充填した部分のそれより少ない結果となった。

図一6は図一3に示した二軸亀裂変位計により測定し

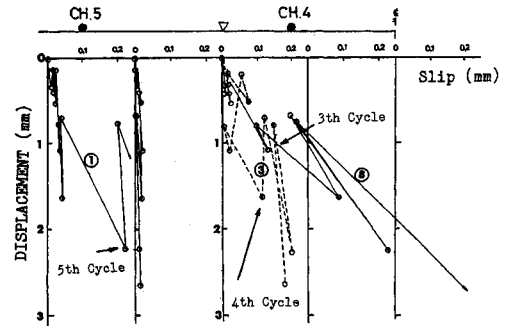


図一4 作用荷重とスパン中央のたわみ量の関係

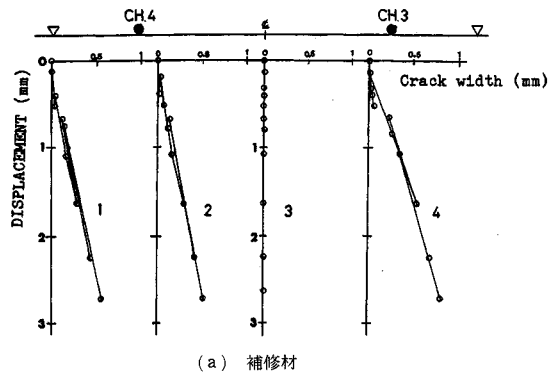


図一5 ひびわれの進展状況 (数字は荷重を示す, tf)

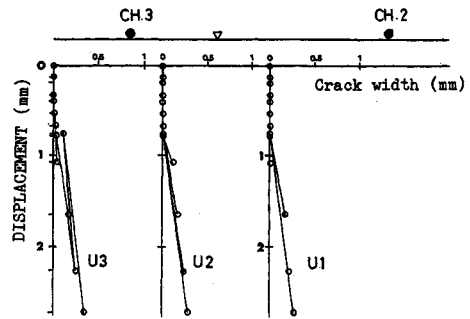
た各サイクルの最大荷重作用時の δ_c とずれ量の関係を測定位置別に示す。なお、図中の①、③および⑧は図一3の二軸亀裂変位計の位置を示す番号と対応している。この図より、①の位置の接合面のずれ量は5回目のサイクルの最大荷重 $P=8$ tf に上昇する途中に、③および⑧の位置のそれは3回目と4回目のサイクルの最大荷重すなわちそれぞれ $P=4$ tf および $P=6$ tf に上昇する途中に発生している。また、補修材と既設コンクリートの接合面に発生したずれ挙動の特徴として、ひとたびずれが発生すると除荷後においてもその荷重履歴サイクルの最大



図一6 スパン中央のたわみ量と接合面のすべり量の関係



(a) 補修材



(b) 既設コンクリート

図一7 スパン中央のたわみ量と曲げひびわれ幅の関係

荷重作用時におけるずれ量の約40~60%の残留ずれ量が生じている。亀裂変位計を貼付した付近の接合面では、目視によりずれによるひびわれは発見できなかったが、亀裂変位計によって3および4サイクル目で変位計番号3および8には明瞭なずれが生じていた。

図-7(a)および(b)はそれぞれ補修材および既設コンクリートに発生した曲げひびわれ幅(ω)と δ_c の関係を測定位置別に示す。この図より曲げひびわれの特徴として、 ω と δ_c の関係はほぼ直線関係となり、サイクルが異なっても同一直線上に分布する。

以上のことより、ずれはひとたび発生すると、除荷してもそのサイクルの最大荷重時のずれ量の約50%の残留ずれ量が残るが、曲げによるひびわれは除荷してもその前のサイクルの残留ずれ量程度しか残らないことが認められた。

4. アコースティック・エミッションによるひびわれおよびずれの発生・その位置および進展状況の把握

図-8, 図-9, 図-10 および図-11 は AE センサーの貼付位置, すなわちそれぞれ Ch. 2, Ch. 3, Ch. 4 および Ch. 5 で計測したヒット計数率および δ_c の時間履歴の関係を示す。なお, 図中の Stage I, II, III, ……VI は図-2 の荷重履歴曲線と対応し, それぞれの履歴(Stage)の最大荷重は 2, 3, 4, 6, 8, 10 tf および破壊荷重である。Ch. 2, Ch. 3, Ch. 4 の位置のヒット計数率から 3 tf (すなわち, 第 2 回目のサイクル) できわめて短時間にこの部分に卓越した AE が発生していることがわかり, これは図-5 の補修材への初曲げひびわれの発生と対応する。さらに Ch. 5 では AE は発生しておらず, この点でも図-5 に示す各荷重段階別のひびわれ伸展状況と一致した。すなわち, Ch. 5 付近のはり下縁には曲げひびわれが発生していない。補修材と既設コンクリートの接合面における局部的なずれの発生はこれらの図より Ch. 2, Ch. 3 の 2 と 3 サイクルの間に存在するヒット計数率の多い部分であり, 載荷試験中に図-5 の $P=4$ tf で観察したずれによるひびわれと対応する。その後発生するずれは, Ch. 2 では 5 サイクル目 ($P=8$ tf) であり, Ch. 3 および Ch. 4 で 4 サイクル目 ($P=6$ tf) および Ch. 5 で 6 サイクル目 ($P=10$ tf) であることが認められた。この結果は図-6 で示した二軸亀裂変位計によるずれの発生とその位置の関係ときわめて相関性が高いことがわかった。特にカイザー効果はずれの発生とともに図-8 で示すように成立しなくなり, ずれが発生した後は各サイクルの最大荷重に到達する前に AE が発生し, 荷重の除荷時においても AE の発生が認められ, 曲げひびわれの場合とかなり異なる結果となった。

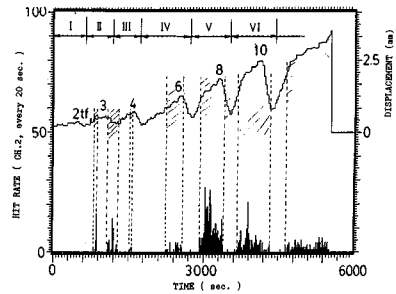


図-8 ヒット計数率とスパン中央のたわみ量の時間履歴 (Ch. 2)

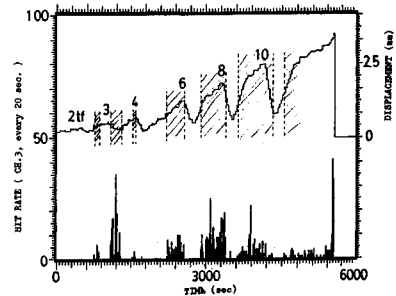


図-9 ヒット計数率とスパン中央のたわみ量の時間履歴 (Ch. 3)

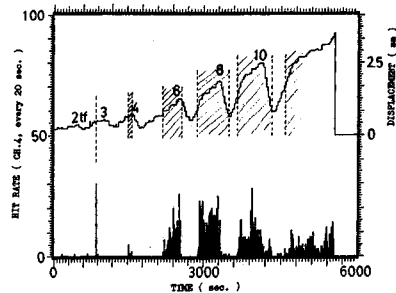


図-10 ヒット計数率とスパン中央のたわみ量の時間履歴 (Ch. 4)

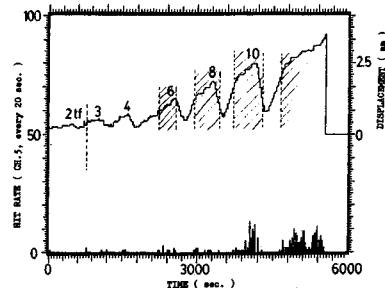


図-11 ヒット計数率とスパン中央のたわみ量の時間履歴 (Ch. 5)

以上のことより、今回貼付した6個のAEセンサーから、曲げひびわれの発生時期とその位置、さらにはずれの発生時期とその位置が判断できた。特にずれの場合には、曲げひびわれの場合と全く異なり、従来からいわれているせん断およびねじりを受ける部材のひびわれ面の骨材のかみ合い作用と同様に、荷重作用によりいったんずれたひびわれ界面は除荷しても残留ずれ量が残ることが認められ、カイザー効果がずれの場合には成立しないことがわかった。

5. アコースティック・エミッションによる補修したRC部材の健全度評価

4.で述べたように、本研究では各チャンネルごとに監視領域を定めるゾーン標定法とAE信号到達時間差に基づく直線位置標定法の2つの方法を用いた。ゾーン標定法では図-5および6と図-8, 9, 10および11との対応がよいことが認められた。また試験片の形状により、直線位置標定法では少なくとも最初に発生した主亀裂の長手方向に対する位置はAE位置法により検出された。なお、載荷点Aの真下の主曲げひびわれが発生した直後と、最終段階におけるAEのイベント数から図-12および図-13に示すように、Ch.2とCh.3の間に発生した主曲げひびわれの進展、さらには最終段階で接合面全長にわたって発生したずれ量を知ることができた。

続いて、Ch.1からCh.6までの6個のAEセンサーからの情報を総合的に判断すると次のようになる。図-14はヒット計数率および変位の時間履歴を示す。すなわち、図-8、図-9、図-10および図-11で示す個々のセンサーに入力した情報にCh.1およびCh.6のセンサーの情報を加えた総計と考えてよい。この図から3tf付近で

の曲げひびわれ、4tf付近での局部的なずれ、6tf付近からの本格的なずれを精度よく推測していることがわかる。図-15に示すAEの最大振幅値の分布の時間による変化よりもある程度推定がつく。このように今回の実験によりゾーン標定法であれ、直線位置標定法であれ、AE源の「位置」を正確に求めることは不可能だが、AE源の生じた「領域」を明白に表示することが可能となったといえる。図-16はAEヒット数を縦軸(Y軸)、AEの振

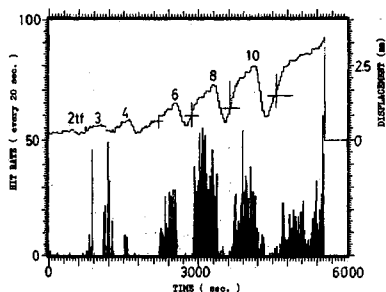


図-14 ヒット計数率とスパン中央のたわみ量の時間履歴 (Ch.1からCh.6までの総和)

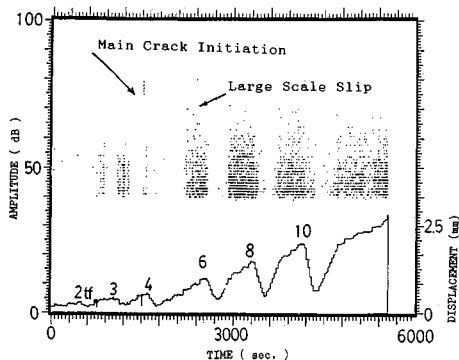


図-15 AEの振幅分布の時間変化

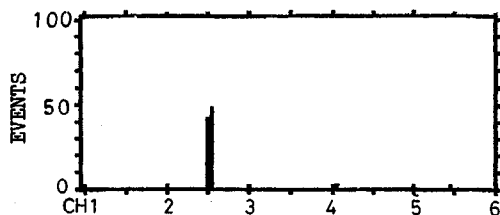


図-12 AEのイベント数 (初曲げひびわれ発生直後)

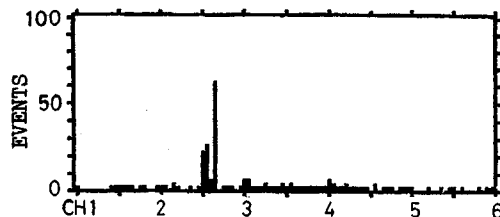


図-13 AEのイベント数 (終局時)

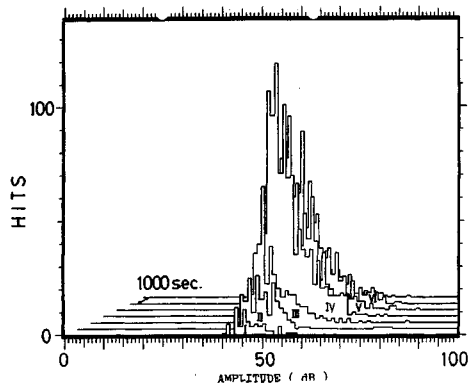


図-16 振幅分布の経時変化

幅分布を横軸 (X 軸) に、さらに各 Stage 別、すなわち各時間帯別を斜軸 (Z 軸) にとったものである。これらからも、主曲げひびわれは Stage I (2, 3 サイクル時, $P=2$ tf, 3 tf) でそのときの振幅は 80 dB であること、局部剝離は Stage II (3 サイクル時, $P=4$ tf) で振幅は 40~60 dB であること、本格的な剝離は Stage III (4 サイクル時, $P=6$ tf) で始まりそのときの振幅は 40~60 dB であったことが判別できた。

6. 結 論

本研究の範囲内で以下に示すような結論を得ることができた。

(1) 補修した鉄筋コンクリートはりの曲げ載荷試験に AE を適用した結果、曲げひびわれの発生時期とその領域、さらにはずれの発生時期とその領域が判断できた。特にずれの場合には、曲げひびわれの場合と全く異なり、荷重作用によりいったんずれたひびわれ界面は除荷しても残留ずれ量が残ることが認められ、これらの現象と対応してカイザー効果がずれの進展過程においては成立しないことがわかった。

(2) 補修した鉄筋コンクリート部材が外力作用により生じた内部欠陥の発生時期、発生場所さらには欠陥の種類が AE ときわめて密接な関係にあることが認められ、今後、補修したコンクリート構造物の健全度評価の有用な手段となるものと思われた。

謝 辞：本研究で実施した曲げ載荷実験の遂行にあたり、当時卒業生であった武蔵工業大学土木工学科 高橋正明氏には昼夜を惜しまぬご協力を得ました。ここに、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) たとえば、成井 信・上阪康雄・坂手道明：コンクリート構造物の維持と補修，鹿島出版会，1985年4月。
Robert G. Tracy and Russell S. Fling：Rehabilitation Strategies, A.C.I. Concrete International, Design & Construction, Vol. 11, No. 9, pp.41~45, 1989.
- 2) 丹羽義次・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，pp.27~42, 1988年8月。
- 3) 大津政康：コンクリート構造物の健全度診断へのアコースティック・エミッションの適用，コンクリート工学，Vol. 25, No. 12, pp.5~11, 1987.
- 4) 新関 茂・佐武正雄・黒田孝貴・森 稔英：AEによるコンクリートの破壊靱性試験中の破壊進行領域の解析，日本非破壊検査協会 006 特別研究会資料，No. 90, pp. 11~17, 1989.
- 5) 加藤久男・高木敏浩・魚本健人：AE法によるコンクリート割裂試験の破壊挙動に関する研究，日本非破壊検査協会 006 特別研究会資料，No. 87, pp.17~22, 1988.
- 6) 柿沢忠広・魚本健人：AE手法による鉄筋コンクリート梁の疲労破壊予測に関する研究，第7回コンクリート工学年次講演論文集，Vol. 7, pp.253~256, 1985.
(1990.2.24・受付)