

曲げを受ける鉄筋コンクリートはりのA E発生特性とその劣化評価への適用性に関する基礎的検討

岩波 光保¹・鎌田 敏郎²・長瀧 重義³・大即 信明⁴

¹学生員 東京工業大学大学院博士後期課程 土木工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山2-4-24)

²正会員 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-193 岐阜市柳町4)

³フェロー会員 新潟大学教授 工学部建設学科 (〒950-2181 新潟市五十嵐二の町8050)

⁴正会員 東京工業大学教授 工学部開発システム工学科 (〒152-8552 目黒区大岡山2-4-24)

本研究では、曲げを受ける鉄筋コンクリート(RC)はりにおいて発生するひび割れ(曲げひび割れ、せん断ひび割れ、鉄筋とコンクリートの付着ひび割れ)をモデル化した試験を行い、これらのひび割れ種類の違いがA E発生特性に及ぼす影響をA E波形パラメータ解析により明らかにした。続いて、比較的大型のRCはりや栈橋上部工のRCはりの曲げ載荷時にA E計測を行うことにより、モデル試験結果の妥当性を確認し、RCはりの劣化評価手法の1つとしてのA E法の可能性について検討を行った。

Key Words : *acoustic emission, reinforced concrete beam, waveform parameter, crack type, diagnosis, field test*

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化の顕在化や高度成長期に整備された社会資本施設の更新時期の到来、さらには先般の阪神・淡路大震災などを契機として、コンクリート構造物の維持管理手法の確立が切に望まれている。このような構造物の維持管理を適切に行うためには、その劣化状況を的確に把握しておかなければならない¹⁾。しかし、既存の鉄筋コンクリート(RC)構造物の劣化状況は、その部位、原因、形態および程度が構造物ごとにそれぞれ異なり、さらに時々刻々変化している。中でも、コンクリートのひび割れはRC構造物において不可避なものであり、様々な意味で構造物全体に悪影響を及ぼす。また発生するひび割れの種類によって構造物に与える影響の程度が異なる。したがって、RC構造物の劣化評価に際しては、ひび割れの発生箇所や規模などを調べるだけでなく、その種類や進展状況も把握しておくことが重要であると考えられる。

このようなRC構造物の劣化評価に際しては、従来より用いられている目視観察、たわみ・振動計測だけでなく、適切な非破壊検査法もあわせて適用することが望ましいものとする。非破壊検査を併用

することにより、目視検査等では得ることのできない構造物内部の状況を知ることができ、また劣化程度の定量化に関しても重要な情報を得ることができ、現在、コンクリートの強度²⁾、コンクリートのひび割れ深さ推定³⁾、コンクリート中の鉄筋腐食診断⁴⁾などに対して各種非破壊試験法が適用されているが、構造物内部の劣化進展状況を動的に、かつリアルタイムで評価できる手法は存在しない。

このような評価に対して適用可能性のある手法として、アコースティックエミッション(AE)法⁵⁾が考えられる。AE法は、材料中の微小破壊の発生時に生じる弾性波をAEセンサにより検出し、その発生頻度や波形の特徴から破壊過程の評価や破壊源に関する様々な情報を得ようとする手法である。これまで、コンクリート構造を対象としたAE法では、多チャンネルにおいて同時計測されたAE波形のデータセットを解析することにより、マイクロレベルでの1つのひび割れのモードを同定する手法^{6)・7)}や、AE波形パラメータの分布特性からよりマクロなレベルでの材料の破壊過程を評価する手法^{8)~10)}などが検討されている。

ところで、RC構造の劣化進展は、コンクリート内部におけるマイクロレベルでの破壊がきわめて複雑

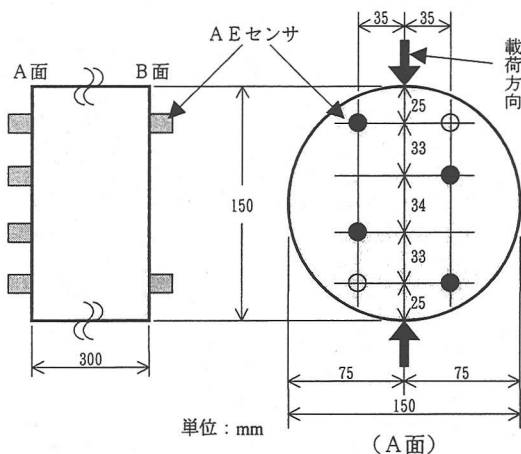


図-1 割裂引張試験

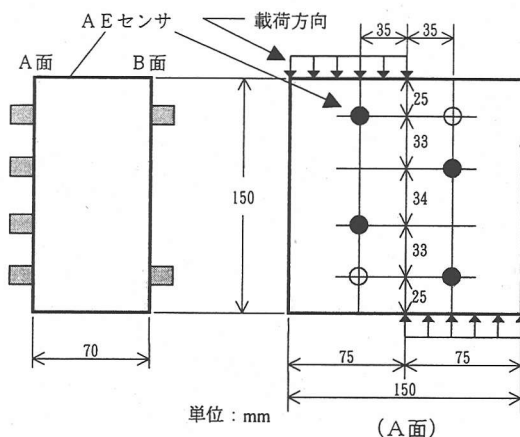


図-2 一面せん断試験

な形で集積した帰結であることはいうまでもない。したがって、RC構造物の劣化評価においては、ミクロレベルでの破壊の集積であるマクロレベルでのひび割れを評価対象とするのが適当であり、AE計測においては、ある段階において発生したAEを集積として捉えることが望ましいものと考えられる。この際の評価指標として、リアルタイムでの解析・記録が可能で、生じている破壊現象を迅速に評価できるAE波形パラメータを用いれば、原波形解析の場合と異なり棄却されるデータがほとんどなく、実用上極めて有効な手法となり得るものと考えられる。

そこで本研究においては、RCはりにおいて発生する主要なひび割れ(曲げひび割れ、せん断ひび割れ、鉄筋とコンクリート間の付着ひび割れ)を対象として、それらにともなうAE発生特性をモデル試験を通じて検討し、その特徴をAE波形パラメータを用いて整理した。そして、この結果の妥当性について検証するため、実験室内において、比較的大型のRCはりの曲げ試験時にAE計測を行い、さらに現在供用中の栈橋上部工のRCはりに対して、ダンプトラックの車輪荷重による載荷中にもAE計測を試みた。この際、AE法を実構造物に対して適用する際に懸案となるノイズの問題についても若干の検討を行い、RCはりの劣化評価の際に、目視観察やたわみ・振動計測などとあわせて、AE計測を実施する有効性・可能性を示した。

2. 各種ひび割れのモデル試験

(1) 開口型ひび割れおよびせん断型ひび割れによるAE発生特性

鉄筋コンクリートはりにおいて発生するひび割れ

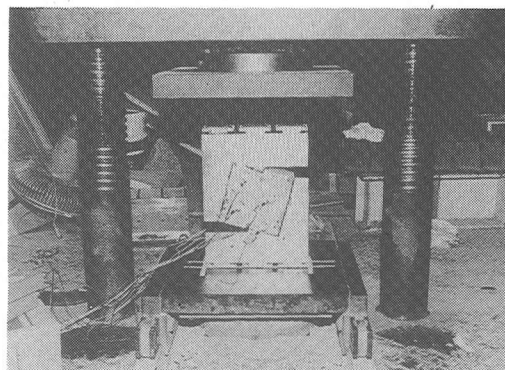


写真-1 一面せん断試験の状況

を大別すると、開口型のひび割れ(モードI)とせん断型のひび割れ(モードIIあるいはモードIII)となるものと考えられる。本研究で対象とする3種類のひび割れのうち、曲げひび割れは前者に、せん断ひび割れおよび鉄筋とコンクリート間の付着ひび割れは後者に属するものと考えられる。まず、これら2種類のひび割れにより生じるAEの発生特性について検討を行った。

a) 供試体概要およびセンサ配置

本研究においては、開口型ひび割れのモデル試験として、モルタル円柱供試体の割裂引張試験を、せん断型ひび割れのモデル試験として、モルタル角柱の一面せん断試験を行った。本来であればコンクリート供試体を用いるべきであるが、ひび割れの進展が粗骨材の存在により阻害されることによって、曲げひび割れの進展以外の現象に起因したAEが発生しないように、本実験ではモルタル供試体を用いて検討を行った。

割裂引張試験用の円柱供試体の概要およびセンサ

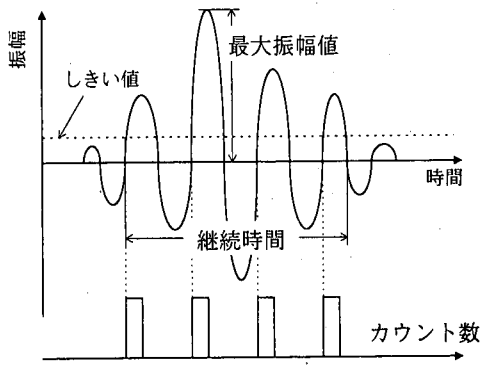


図-3 AE波形パラメータ

配置を図-1に、一面せん断試験用の角柱供試体の概要およびセンサ配置を図-2に示す。用いたモルタルの配合は水セメント比(W/C) = 0.50, 砂セメント比(S/C) = 2.27である。一面せん断試験時の状況を写真-1に示す。このように荷重にあたっては鋼製の治具を用いており、その際の荷重角度は試験の安定性やせん断破壊のしやすさなどを考慮して、せん断面が鉛直面に対して15度となるように設定した。さらに荷重治具と供試体間の摩擦によるノイズを除去するため、荷重治具と供試体の間にグリースを塗布し両者間を十分になじませた後、荷重を開始した。

試験に用いた供試体数については、いずれの試験においても3個としたが、得られた結果はほぼ同様のものであり、供試体間に顕著な差違は認められなかった。そこで、以降においては、計測結果の代表的なものを対象に検討を進めることとする。

b) AE計測

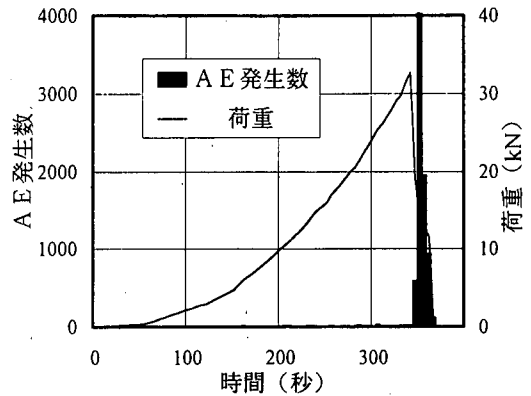
AE計測には、日本フィジカルアコースティクス社製のシステムを用いた。AEセンサには150kHz共振型のものを用い、検出したAE信号には100kHzハイパスフィルターをかけ、プリアンプにて40dB、メインアンプにて40dBの合計80dBの増幅処理を行った。またしきい値は50dB(基準電圧: $1.0 \times 10^{-6} V$)に設定した。

計測項目は、ある計測時間間隔におけるイベントパルス計数法によるAE発生数、ならびに図-3に示す各種のAE波形パラメータである。この際、AE発生数の計測時間間隔は、15秒とした。

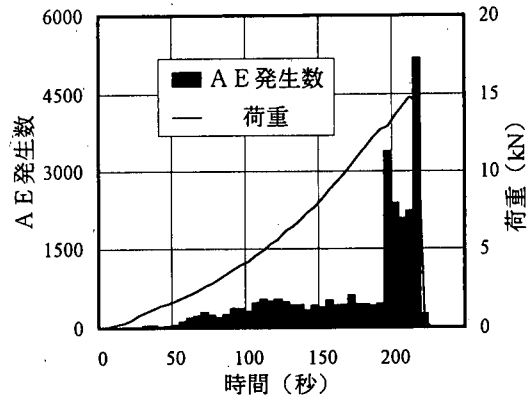
荷重時に、支点あるいは荷重点と供試体との間の摩擦により発生するノイズを除去するため、ゴム板やテフロンシートをそれらの間に挿入した。

c) 実験結果および考察

まず両試験における荷重とAE発生数の関係を図



(a) 割裂引張試験

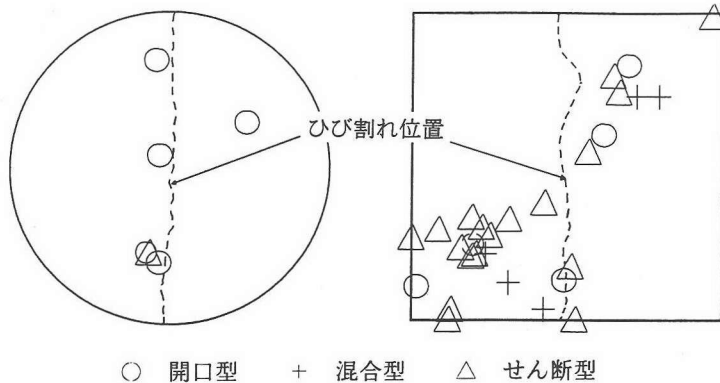


(b) 一面せん断試験

図-4 荷重荷重とAE発生数の関係

4に示す。これより、引張試験においては、最大荷重に達するまでAEの発生はほとんどみられず、最大荷重に達すると同時に急激にAEが発生する。これに対してせん断試験においては、荷重初期からほぼ一定数のAEが発生しており、最大荷重に達すると同時にAE発生数もピークを迎えている。これらのことから、本実験においては、引張破壊はほぼ脆性的に生じるのに対して、せん断破壊は漸次的に進展したものと考えられる。

ここではまず、それぞれのモデル試験において、対象としているひび割れの発生が卓越していることを理論的に確認するため、検出されたAEの波形解析を行った。本研究においては、モーメントテンソル解析⁹⁾を用いた手法により供試体中で発生したひび割れ種類の識別を試みた。本手法は、検出されたAE波の初動到達時間と初動振幅から、ひび割れの幾何情報を表すモーメントテンソルを求めるものである。しかし、モーメントテンソルの各成分が決定できても、ひび割れの発生機構に関する情報を直接的に得ることはできない。そこでモーメントテンソ



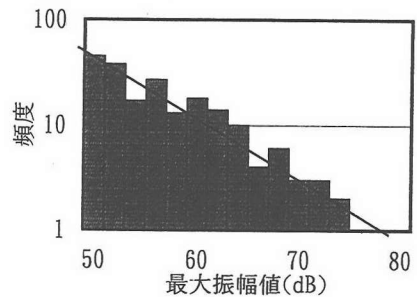
(a) 割裂引張試験 (b) 一面せん断試験

図-5 モーメントテンソル解析結果

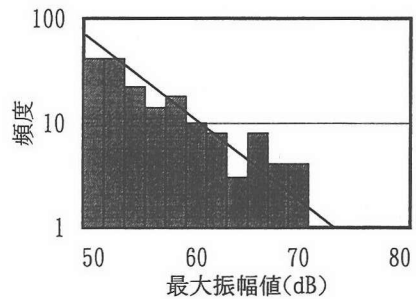
ルの固有値解析を行い、得られた3つの固有値を開口型ひび割れに起因する成分とせん断型ひび割れに起因する成分に分解し、その寄与率からひび割れ種類の識別を行うのが一般的である。本研究においては、既往の研究¹¹⁾に基づいて、せん断型の寄与率が0～40%を開口型、40～60%を混合型、60～100%をせん断型としてひび割れ種類の識別を行った。

解析の対象としたAEデータは、AE発生時のピーク近傍において6個のAEセンサで同時に検出された100組である。これらのモーメントテンソル解析結果を位置標定結果とあわせて図-5に示す。図中、点線がひび割れ発生位置を示している。このように、解析を行った100個のデータのうち最終的に解が求められたものは引張試験およびせん断試験で、それぞれ6個、28個と少なかった。また一部せん断試験において、ひび割れ発生位置を考慮すると位置標定結果が悪いものも存在するが、割裂引張試験においては開口型ひび割れが、また一面せん断試験においてはせん断型ひび割れが卓越して発生していることが確認できる。一面せん断試験の位置標定結果が実際のひび割れ発生位置と合致しなかった原因としては、試験終了後に確認された供試体中におけるひび割れの分岐などが考えられる。

このように、それぞれの試験において、開口型あるいはせん断型のひび割れが卓越して発生していることがモーメントテンソル解析により理論的に確かめられたので、次に、これらの結果をより簡易的で実用的なAE波形パラメータを用いて整理し、ひび割れ種類の違いがAE発生特性に及ぼす影響を調べた。本研究では図-3に示す最大振幅値および式(1)で定義される平均周波数¹²⁾を波形パラメータと



(a) 割裂引張試験

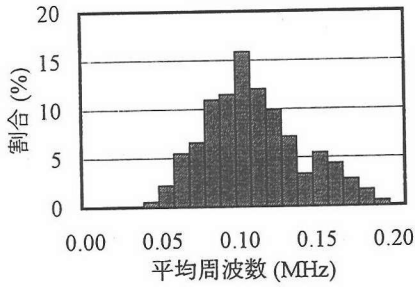


(b) 一面せん断試験

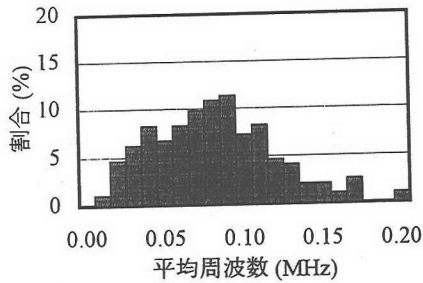
図-6 最大振幅値の頻度分布

して用いることとした。これらのパラメータは、それぞれAE発生源における微小破壊の規模および進展速度を代表するパラメータであると考えられることができる。

$$\text{平均周波数} = \frac{\text{カウント数}}{\text{継続時間}} \quad (1)$$



(a) 割裂引張試験



(b) 一面せん断試験

図-7 平均周波数の頻度分布

両試験において検出されたA Eの最大振幅値と平均周波数の頻度分布を図-6~7にそれぞれ示す。これらによれば、割裂引張試験時の開口型ひび割れに起因するA Eの方が、最大振幅値は大きく、平均周波数は高い傾向にある。このことから、開口型のひび割れの方が、生じる破壊の規模は大きく進展速度は速いことが推測される。これは、図-4からも明らかのように、割裂引張試験の方が脆性的な破壊形態を示しており、それまでに蓄積していたひずみエネルギーを急激に放出したためであると考えられる。

これらの試験結果を、振幅分布については地震学の分野で一般に用いられているb値^{1,3)}により、また平均周波数についてはその平均値により整理した結果を図-8に示す。このように、これらの指標を用いることにより、パラメータの分布特性の違いを的確に表すことができる。したがって、本研究ではこれ以降、これら2つの指標を用いてA E計測結果を整理することとする。

(2) コンクリートの曲げひび割れに関する検討

先の検討においては、開口型ひび割れのモデル試験として、モルタル供試体の割裂引張試験を行った。しかしながら、実際のRCはりで生じる開口型ひび

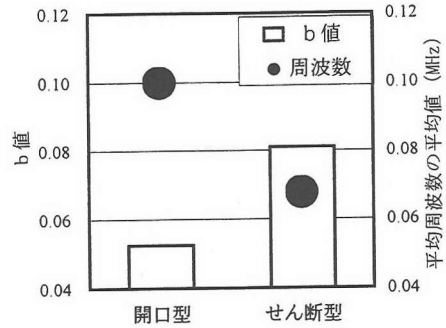


図-8 ひび割れ種類が波形パラメータに及ぼす影響

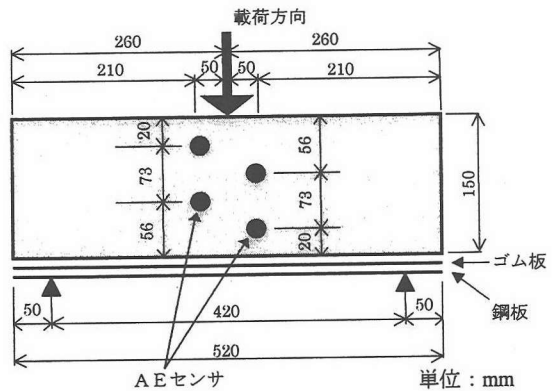


図-9 無筋コンクリートの曲げ試験

割れは曲げひび割れであること、さらに先の実験においてはモルタル供試体を用いていたことから、ここでは無筋コンクリート角柱の曲げ試験を行い、その際に生じるA Eの発生特性を割裂引張試験時のものと比較・検討した。

a) 供試体概要およびセンサ配置

用いた供試体の概要とセンサ配置を図-9に示す。用いたコンクリートの配合は、W/C = 0.50、細骨材率 (s/a) = 0.47 である。供試体中央に高さ 10mm ノッチを設けることにより、供試体中央から曲げひび割れが発生するように配慮した。また供試体の急激な破壊を防止するため、供試体底面に厚さ 5mm の鋼板を設置して载荷を行った。また鋼板とコンクリート間の摩擦によるノイズを除去するため、両者の間に厚さ 5mm のゴム板を挿入し、それらの接合部にはグリースを十分塗布した。

A Eの計測条件に関しては、2. (1)の場合と同一である。

b) 実験結果および考察

曲げひび割れ発生時に検出されたA Eについて、

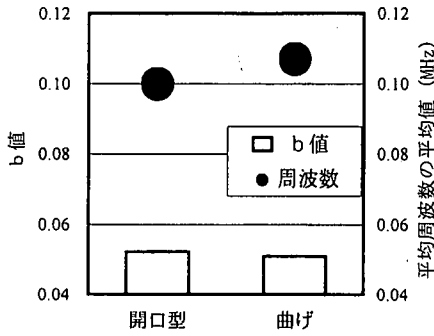


図-10 b値と平均周波数

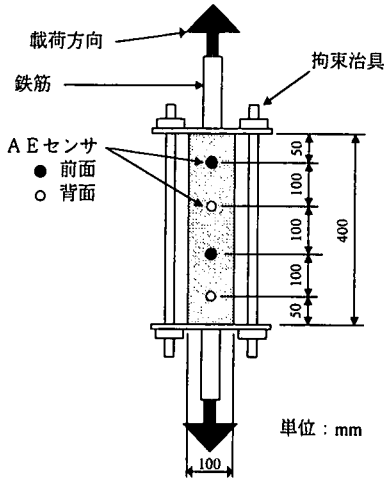
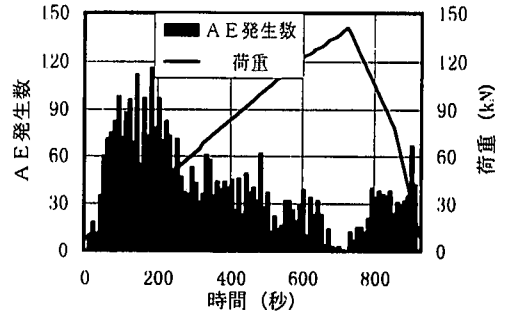


図-11 両引試験

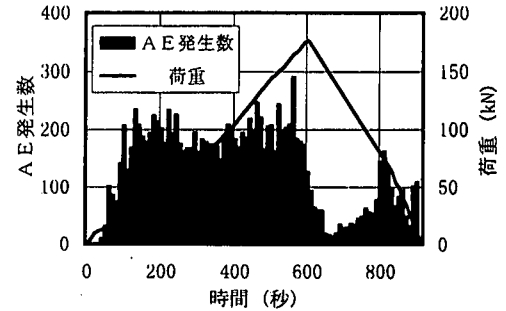
b 値ならびに平均周波数分布の平均値を求めた結果を図-10に示す。図には、あわせて割裂引張試験の結果についても示してある。これによれば、両者はほぼ同様の傾向を示しており、コンクリートの曲げひび割れ発生時においても、最大振幅値が大きく、平均周波数の高いAEが卓越している。さらに、モルタルとコンクリートの違いが、これらの指標に及ぼす影響は小さいことがわかった。

(3) 鉄筋とコンクリート間の付着ひび割れに関する検討

RCはりにおいては、曲げひび割れやせん断ひび割れだけでなく、鉄筋とコンクリート間の付着ひび割れも存在する。このひび割れは、せん断型のひび割れに属するものであり、この存在は、鉄筋腐食に悪影響を及ぼす塩化物イオンや酸素といった有害物質が浸透する際の「水みち」となるため、RCはりの耐久性を考慮する上で重要なひび割れであると考えられる。そこで本研究では、鉄筋とコンクリ



(a) 丸鋼を用いた場合



(b) 異形鉄筋を用いた場合

図-12 載荷荷重とAE発生数の関係

ート間の付着ひび割れに起因するAEの発生特性について検討するため、そのモデル試験として、鉄筋コンクリートの両引試験を行った。

a) 供試体概要およびセンサ配置

図-11に、供試体概要およびセンサ配置を示す。このように本試験では、 $100 \times 100 \times 400$ (mm)のコンクリート角柱の中心に配置した直径25mmの鉄筋に引張力を加えることにより、鉄筋とコンクリートの間に付着ひび割れを発生させた。供試体中央に設置する鉄筋には、直径25mmの丸鋼および公称直径25mmの異形鉄筋を用い、鉄筋形状の違いがAE発生特性に及ぼす影響について検討を行った。また用いたコンクリートの配合は、 $W/C = 0.50$ 、 $s/a = 0.47$ である。

載荷時において、付着ひび割れの発生より前に、コンクリート部分に引張りひび割れが生じるのを防止するため、鋼製の拘束治具を用いてコンクリート部分を拘束した。AEの計測条件に関しては、2.(1)の場合と同一である。

b) 実験結果および考察

丸鋼および異形鉄筋を用いた供試体の両引試験時の荷重とAE発生数の関係を図-12にそれぞれ示す。これらによると、いずれの場合においても載荷初期において多数のAEが発生しており、鉄筋とコ

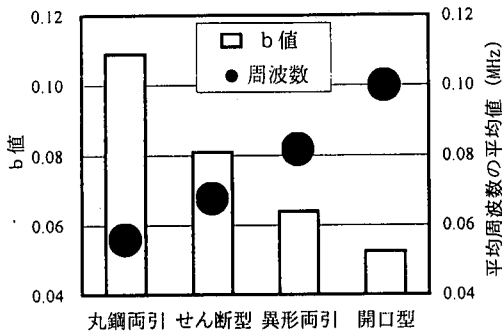


図-13 b値と平均周波数

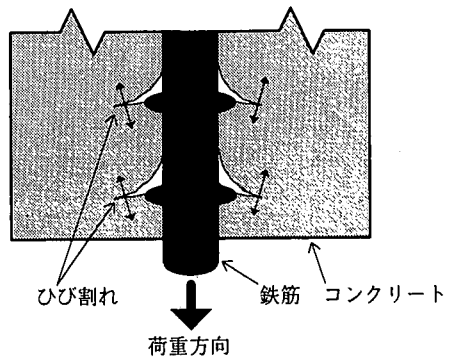


図-14 異形鉄筋周辺のひび割れ

ンクリート間の付着ひび割れの生成が推測される。しかし、その後のAE発生挙動には、両者に違いが認められる。すなわち、丸鋼を用いた供試体においてはAEの発生は穏やかになっていくものの、異形鉄筋を用いた供試体においては、最大荷重付近までAEの発生は活発な状態を保っている。これは、異形鉄筋における節の影響であると考えられる。異形鉄筋を用いた供試体の場合、付着ひび割れが発生した後、節の存在により鉄筋周辺のコンクリート部分にひび割れが発生しているものと考えられる¹⁴⁾。

次に、鉄筋とコンクリート間の付着ひび割れに起因するAEの発生特性について検討を行うため、両試験において载荷の初期に検出された300個のAEを対象として、b値ならびに平均周波数の平均値を算出した。その結果を図-13に示す。図中には、割裂引張試験および一面せん断試験の結果についてもあわせて示してある。これによれば、丸鋼を用いた供試体の両引試験結果は、割裂引張試験より一面せん断試験の結果に近く、鉄筋とコンクリート間にせん断型の付着ひび割れ(剥離)が発生していることを示している。一方、異形鉄筋を用いた供試体の両引試験結果は、丸鋼を用いた場合より、割裂引張試験時のAE発生特性に近いことがわかる。このことは、異形鉄筋の節によりコンクリートひび割れが生じることを反映したものであり、図-14に示すような開口型のひび割れの発生を考えることで説明できる。これらのことから、異形鉄筋を用いた両引試験におけるAE発生特性は、鉄筋とコンクリート間の付着ひび割れと開口型のコンクリートひび割れに起因するAE発生特性が混合したものであると考えられる。

(4) モデル試験結果のまとめ

以上より、AE波形パラメータとして最大振幅値および平均周波数に着目することにより、RCはり

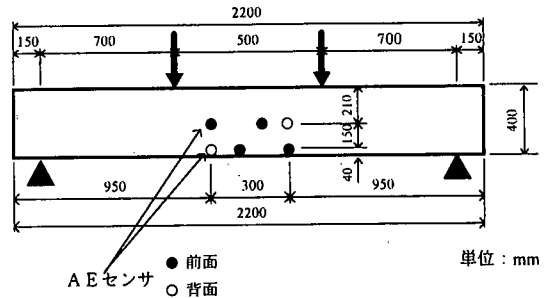


図-15 RCはりの曲げ試験

において発生する代表的なひび割れ種類ごとのAE発生特性を捉えることができた。曲げひび割れのような開口型のひび割れの方が、せん断ひび割れや鉄筋とコンクリート間の付着ひび割れに代表されるせん断型のひび割れと比較して、最大振幅値の頻度分布の傾き(b値)は小さく、平均周波数は高いことが示された。なお、ここで用いたパラメータ、特に平均周波数は、使用する計測システムの特性に大きく依存するものであり、その適用にあたっては十分に注意する必要がある。

3. RCはりの曲げ試験時におけるAE発生特性

モデル試験結果の妥当性を確認するため、比較的大型のRCはりの曲げ試験を行った。この際には、ある载荷段階において発生したAEを集合として捉えた場合の波形パラメータの分布特性の変化に着目して、曲げ破壊の進展にともなうひび割れ発生状況の変化を追跡した。

(1) 実験概要

a) 供試体概要

用いた供試体は、図-15に示す300×400×

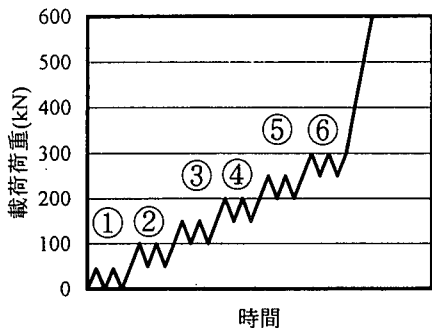


図-16 荷重パターンの概念図

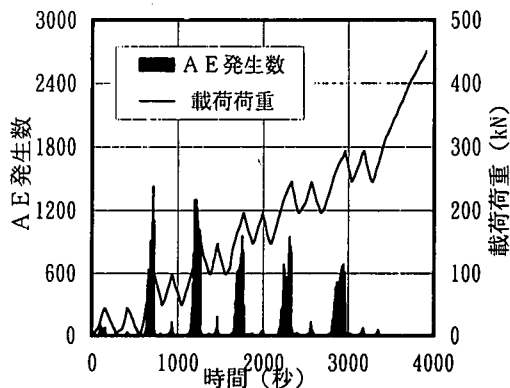


図-17 荷重荷重とAE発生数の関係

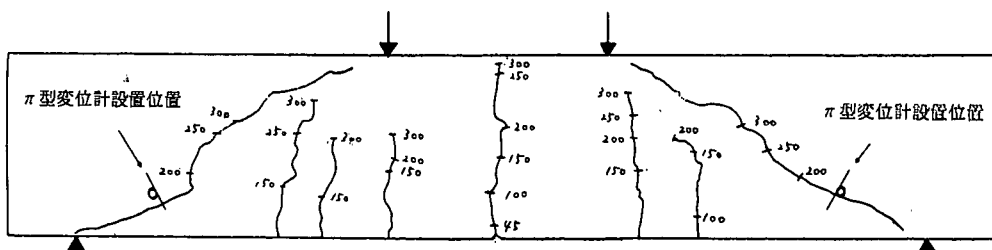


図-18 RCはりのひび割れパターン

2200 (mm)の比較的大型のRCはりである。はりの作製にあたっては、鉄筋下面にブリーディングが生じ付着ひび割れが発生しやすくなるように、コンクリートのW/Cおよび単位水量をそれぞれ0.70、 210kg/m^3 と大きくし、s/aは0.50とした。なお、曲げ試験時のコンクリートの圧縮強度は27.4MPaであった。配筋については、はりの引張側に公称直径32mmの異形鉄筋を2本配置し、またはりの急激なせん断破壊を防止するためはりの曲げ区間以外にスターラップを10ヶ所配置した。この際、鉄筋のかぶりは70mmとした。このように、主鉄筋に太い径を有する鉄筋を用いたのは、鉄筋近傍におけるAEの発生を位置標定により確認しやすくするためである。また荷重試験中に、曲げひび割れおよびせん断ひび割れがともに発生するように、はりのせん断スパンと有効高さの比(a/d)を2.23とした。

荷重パターンについては、図-16に示すように、まず曲げひび割れの発生が確認される(45kN)まで行い、その後は破壊荷重(500kN)の10%刻みの繰返し荷重を破壊荷重の60%まで行った。図中に示す①~⑥を、これ以降「荷重ステップ」と呼ぶ。

b) AE計測

AE計測は、2.(1)のモデル試験の場合と同一

のシステムを用いて行い、計測条件についてもしきい値以外は同一とした。本試験におけるしきい値は、荷重時におけるノイズレベルなどを考慮して、44dBに設定した。また支点あるいは荷重点と供試体との間の摩擦によるノイズを除去するため、0.1mm厚のテフロンシートをそれらの間に2枚挿入した。

(2) 実験結果および考察

図-17に、荷重荷重とAE発生数の関係を示す。このように、荷重ステップが変化するとともに多くのAEの発生が認められ、ひび割れの発生・進展が推測される。また荷重試験終了時における供試体側面のひび割れパターンを図-18に示す。これより、荷重荷重45kN時に曲げひび割れが、また荷重荷重200kN時にせん断ひび割れが発生していることがわかる。次に、これらのひび割れとAE発生特性との関係について検討を行うこととした。

各荷重ステップごとに、b値および平均周波数の平均値を求めた結果を図-19に示す。これによれば、荷重ステップ1において、b値が小さく平均周波数の平均値が大きくなっており、曲げひび割れの発生が推測される。このことは、この荷重ステップ

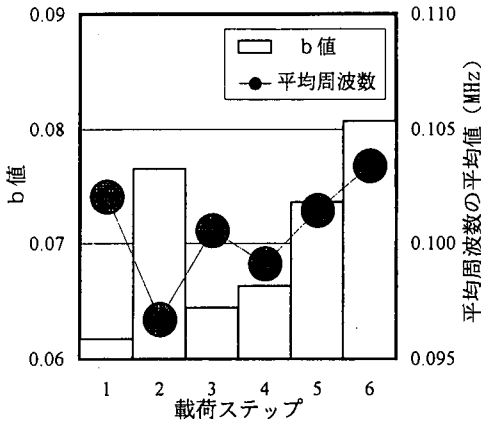


図-19 曲げ破壊の進展にともなう波形パラメータの変化

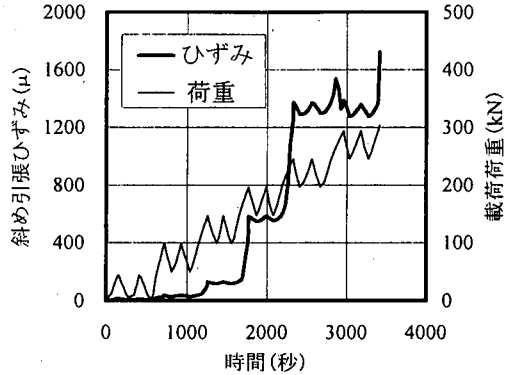


図-21 載荷荷重と斜め引張りひずみの関係

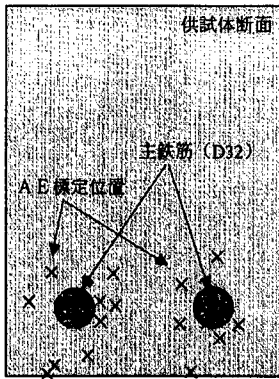


図-20 鉄筋近傍に標定されたAE

1 (0-45kN) が、曲げひび割れ発生荷重までの繰り返し載荷を行った段階であることと一致する。

また次の載荷ステップ2においては、b値が大きく、また平均周波数の平均値が他の載荷段階よりも低くなっており、せん断型ひび割れの発生が推測される。この場合、鉄筋とコンクリート間の付着ひび割れの発生が曲げひび割れの発生に続いて生じたものと考えられる。このことを実証するため、載荷ステップ2において検出されたAEの位置標定結果を図-20に示す。このように、標定可能であったAEは少なかったものの、AE発生源は鉄筋近傍に集中しており、鉄筋とコンクリート間において付着ひび割れが発生していたことが確認できる。さらに載荷ステップの後半においては、b値が次第に大きくなっており、せん断ひび割れの特徴がとらえられている。このことは、図-21に示すように、せん断ひび割れの発生が予想される載荷点と支点を結ぶ線上に設置したπ型変位計により測定された斜め引張りひずみの変化とよく対応している。

以上より、RCはりの曲げ載荷時に検出されたAEの最大振幅値から求められるb値および平均周波数に着目することにより、曲げを受けるRCはりの破壊過程の進展にともなうひび割れ発生状況の推移を的確に表現することができた。このことから、先のモデル試験結果の妥当性が示されたといえる。

4. 実構造物に対するAE法の適用可能性に関する基礎的検討

ここでは、実構造物のRCはりを対象として、その曲げ載荷中に発生するAEの発生特性について検討を行った。この際には、AE発生特性とはりの外観観察結果、主鉄筋のひずみ計測結果などとの対応関係を調べ、RCはりの劣化評価手法の1つとしてのAE法の可能性について検討を行った。さらに、AE法を実構造物に適用する際に懸案となるノイズの問題についても若干の検討を行った。

(1) 対象とした構造物の概要

a) 構造物の概要

評価の対象とした構造物は、川崎市川崎区千鳥町に位置する荷役用栈橋で、上部工は鉄筋コンクリート構造よりなっている。図-22に、その基本構造を示す。この栈橋は竣工後約30年を経過しており、竣工後25年経過時に一部補修が行われた。本実験においては、上部工の基本構造をなす法線直角方向の連続する2つの鉄筋コンクリートはり(図-22中のはりaおよびはりb)を対象とした。

b) 事前調査結果

対象とした2つのはりに対して事前に実施したはり表面の目視観察結果および自然電位計測結果を図

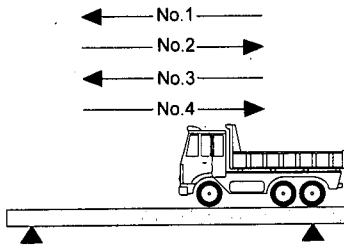


図-24 荷重方法

はりの剛性評価を行った。さらに、荷重中に検出されるA Eの発生特性を波形パラメータにより整理し、先のモデル試験の妥当性の検証を行った。

a) 荷重方法および荷重条件

はりに対する荷重は、20トンダンプトラックの車輪荷重により行った。荷重の方法としては、図-22に示すように、片側の車輪をはりの直上で長手方向に移動させることにより、はりに対して曲げ荷重を加えた。また繰り返し荷重時のA E挙動に着目することによりRC部材の劣化度について評価した事例⁹⁾を参考として、本実験においても、図-24に示すように、それぞれのはりに対して往復2回の計4回の繰り返し荷重を行った。なお、ダンプトラックの移動速度については、時速5km程度とした。

荷重レベルについては、積載する水の量を調節することによって、全重量が113kN (LEVEL1)、142kN (LEVEL2)、171kN (LEVEL3)の異なる3段階とした。なお、これらの荷重レベルは、鉄筋コンクリートはりの設計上の許容応力度のそれぞれ50、55、60%に相当するものである。

b) 計測項目および計測方法

ダンプトラックによる荷重中には、コンクリート中の主鉄筋に生じるひずみと発生するA Eについて計測を行った。鉄筋ひずみの計測は、はりの主鉄筋の1本について、そのスパン中央部分を5cm程度はつりだし、鉄筋の側面にゲージ長5mmのひずみゲージを貼付して行った。このひずみゲージのデータは動ひずみ計の制御のもと、A E計測装置により記録された。

一方、A E計測は、1つのはりについてA Eセンサを2個貼付することにより行った。図-23に、センサの貼付位置を示す。センサには、60kHzおよび150kHz共振型の2種類のものを用い、実構造物におけるA E計測、特にコンクリート構造物の場合に適切なセンサの周波数帯域について検討を行った。計測システムには日本フィジカルアコースティクス社製のものを用い、増幅率はプリアンプ40dB、

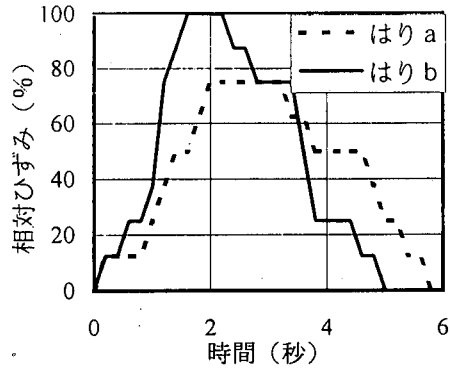


図-25 鉄筋ひずみの経時変化

メインアンプ18dBの合計58dBとし、しきい値は42dB (基準電圧: 1.0×10^{-6} V)に設定した。また周囲からの雑音の除去を目的として、プリアンプにて3kHzハイパスフィルターを用いた。

計測項目は、イベントパルス計数法によるA E発生数、ならびに波形パラメータの最大振幅値と平均周波数である。

(3) 結果および考察

a) ひずみ計測によるはりの剛性評価

図-25に、ダンプトラックによる荷重中に生じた主鉄筋のひずみの経時変化を示す。これは、荷重レベルがLEVEL3のときのものであり、各計測値ははりbの最大値により規準化してある。これによれば、生じたひずみの最大値は、はりaがはりbの3/4程度となっている。このように、はりbの方がはりaと比較して変形が大きく、はり部材全体としての剛性が低いのは、前述のように、はりbにおいては、ひび割れの発生による有効断面積の減少や鉄筋の腐食にともなう鉄筋とコンクリートの付着面積の減少などが生じているためであると考えられる。

b) センサの周波数帯域に関する検討

計測に使用したA Eセンサのうち、60kHz共振型センサを用いた場合には後述するようにA E信号を検出することが可能であったが、150kHz共振型を用いた場合には信号の検出ができなかった。これは、発生したA E波がコンクリート中を伝播する過程において、その高周波成分ほど減衰の影響を大きく受け、本実験のようにセンサ間隔が大きい場合には、A E波の高周波成分はセンサに到達する前にノイズレベル以下に減衰してしまうためであると考えられる。このようなことは、内部に亀裂を多く含む岩盤に対するA E計測の場合においてもあてはまる。以上より、コンクリート構造物のA E計測を行う際

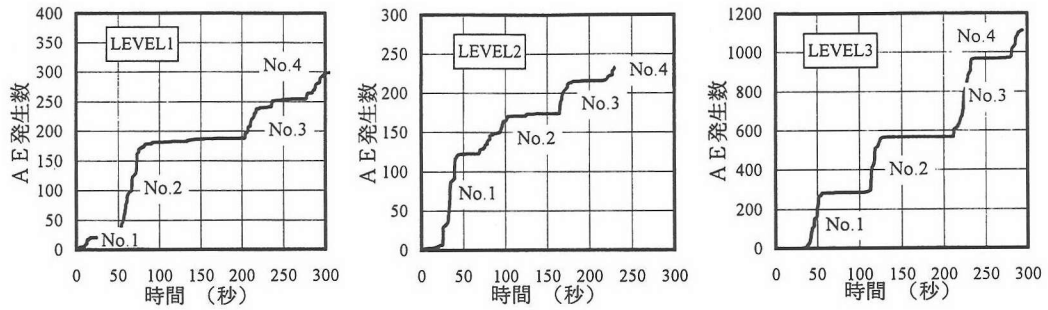


図-26 AE発生状況(はりb)

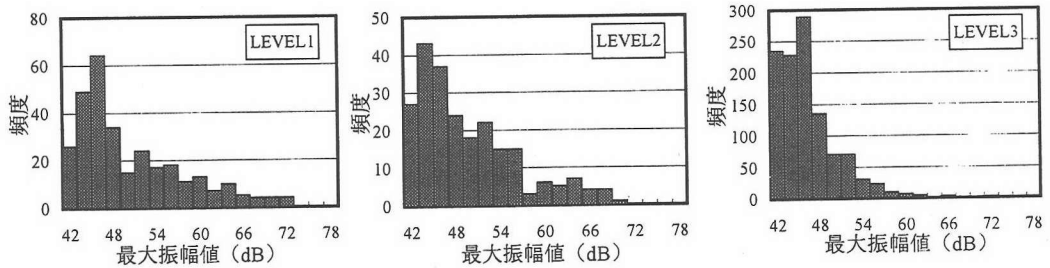


図-27 最大振幅値の頻度分布(はりb)

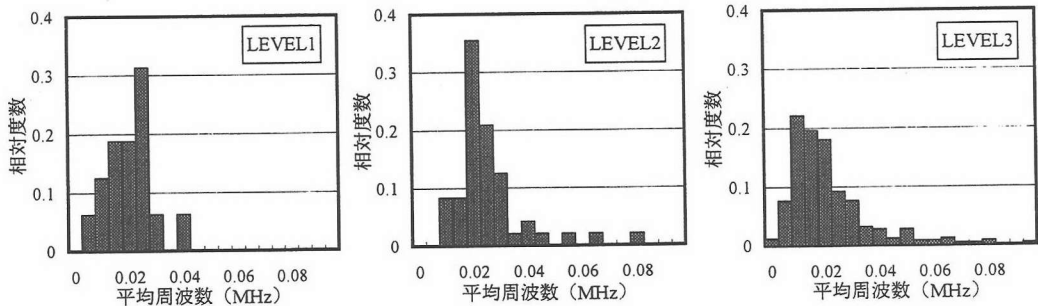


図-28 平均周波数の頻度分布(はりb)

には、センサ間隔等を考慮して適切な周波数帯域を有するセンサを用いる必要があるものと考えられる。

c) 波形パラメータによるAE発生特性の評価

次に、以上の種々の結果を踏まえた上で、载荷中のAE発生特性について検討を行った。なお、これ以降の検討は60kHz共振型センサによる計測結果をもとに行っている。まず、はりaにおいて载荷中に検出されたAEは、LEVEL1で7個、LEVEL2で2個、LEVEL3で5個と極めて少なかった。一方、はりbでは、図-26に示すように、相当数のAEが検出された。このように、はりaのように比較的健全なはりにおいては、AEの発生起因となるようなひび割れあるいは鉄筋の腐食が存在してしないため、今回用いたような荷重レベルの载荷ではA

Eはあまり発生しないことが明らかとなった。

さらに、はりaにおいてAE発生数がこれだけ少なくなったことは特筆すべき点である。すなわち、このことは、本実験条件下において、ダンプトラックの車輪と舗装表面との摩擦、波力による栈橋の変形、あるいは波しぶきなどによる雑音をほとんど検出しなかったことを表している。したがって、実構造物に対してAE計測を行う場合でも、計測条件の設定および使用機器の選定などを適切に行えば、周辺からのノイズに影響されることなく適切な評価を行うことができるといえる。

次に、はりbにおけるAE計測結果を波形パラメータを用いて整理した。図-27~28に、はりbにおいて検出されたAE波形の最大振幅値および平

均周波数の頻度分布を示す。これによれば、LEVEL1 および LEVEL2 においては、比較的大きな振幅の A E が検出されているものの、LEVEL3 においては振幅の大きな A E は検出されていないことがわかる。一方、平均周波数に関しては、荷重レベルの増加にともなって低周波側にシフトしていくことがわかる。これらより、LEVEL1 および LEVEL2 においては曲げひび割れの発生・進展が、また LEVEL3 においてはせん断ひび割れあるいは鉄筋とコンクリート間の付着ひび割れの発生・進展が推測される。しかしながら、ここで用いたような荷重レベルは通常の供用において想定しうる範囲を超えるものではないため、新たなひび割れの発生・進展は考えにくく、この場合の A E の発生起因としては既に存在していたひび割れのかみ合い・ゆ着が外れたことなどが考えられる。

以上より、実構造物においても A E 計測は可能であり、外観の目視観察、主鉄筋のひずみ計測結果と対応した A E 発生特性が得られることがわかった。A E 法によれば、目視観察等では得ることのできない構造物内部のひび割れに関する情報を得ることができ、RC 構造物の劣化評価に際して、従来の検査に加えて A E 計測を行うことが有効であると考えられる。したがって今後、検出される A E と実現象との対応関係を明らかにすべく、さらなる検討を行っていく必要がある。

5. 結論

本研究においては、曲げを受ける RC はりにおいて発生する A E の発生特性を把握するため、各種ひび割れのモデル試験を行った。その結果、発生するひび割れ種類ごとに、検出される A E の最大振幅値および平均周波数の分布特性に違いが生じることがわかった。このことは、比較的大型の RC はりの曲げ載荷時の A E 計測結果ともよく一致しており、本手法の妥当性が示された。

さらに、現在供用中の栈橋上部工の鉄筋コンクリートはりを対象として、ダンプトラックの車輪荷重による載荷を行った際に発生する A E の計測を行った。その結果、載荷時の A E 発生特性は、目視観察、自然電位計測およびひずみ計測などの結果と対応関係があることが、波形パラメータを用いた解析により示された。以上より、RC はりの劣化評価手法の1つとしての A E 法の可能性が示された。また実構造物の A E 計測の際に懸案となるノイズの問題についても、センサ等の選択および測定条件の設定を適切に行うことによりクリアできることも明らかとな

った。

6. おわりに

コンクリート分野における A E 法は、実験室レベルでは広く用いられるようになってきており、極めて重要な知見も多く得られている。しかし、今後実構造物においても A E 法を適用していくためには、コンクリート中における減衰特性の解明、しきい値などの計測条件やセンサ種類などの計測機器の違いが識別結果に及ぼす影響などについて更なる検討を行い、A E 発生機構と検出 A E 波の対応関係について明らかにする必要があるものと考えられる。

またコンクリート実構造物に対する A E 法の適用事例は極めて少ないのが現状である。したがって、今後フィールド試験を多く実施することにより、測定データの蓄積をはかることも、本評価法に対する信頼性を向上させる上で重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の維持管理指針（案）、コンクリートライブラリー第 81 号、1995。
- 2) 例えば、日本建築学会：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル、1983。
- 3) 例えば、尼崎省二、明石外世樹：超音波法によるコンクリート部材のひび割れ深さ測定方法に関する研究、第 3 回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp.141-144、1981。
- 4) ASTM：Half Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, *ASTM C876-877*, 1977。
- 5) 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、1988。
- 6) 大津政康、重石光弘、湯山茂徳、岡本享久：A E モーメント・テンソル解析のための SIGMA コードの開発、非破壊検査、Vol.42, No.8, pp.570-575, 1993。
- 7) 重石光弘、大津政康：2次元モデルにおけるアコースティック・エミッション波形解析、材料、Vol.45, No.9, pp.1055-1060, 1996。
- 8) Yuyama, S., Okamoto, T. and Nagataki, S.: Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Repaired Reinforced Concrete Beams, *Materials Evaluation*, Vol.52, No.1, 1994。
- 9) 内田昌勝、大津政康、岡本享久、森大介：A E 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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20, No.1, pp.161-166, 1998。
- 10) 鎌田敏郎、長瀬重義、大即信明：非破壊試験法による新旧コンクリートの付着破壊過程の評価、セメント・

- コンクリート論文集, No.48. pp.186-191. 1994.
- 11) 大津政康 : A E モーメントテンソル解析における
SIGMA コードの後処理解析に関する研究, 非破壊検
査, Vol.43. No.12. pp.117-122. 1994.
- 12) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 渋谷豊茂 : 一方向強化炭素織
維 エポキシ樹脂複合材料の引張破壊特性と A E 波解
析, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.56. No.528.
pp.72-79. 1990.
- 13) 宇津徳二 : 地震学, 共立全書 . pp.129-136. 1977.
- 14) 大塚浩司 : X線造影撮影による鉄筋コンクリート内部
の微細ひびわれ検出に関する研究, 土木学会論文集,
No.451 V-17. pp.169-178. 1992.
- (1997. 12. 24 受付)

AE CHARACTERISTICS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS SUBJECTED TO FLEXURAL LOADING AND FUNDAMENTAL INVESTIGATION OF ITS APPLICABILITY TO EVALUATION OF DETERIORATION

Mitsuyasu IWANAMI, Toshiro KAMADA, Shigeyoshi NAGATAKI
and Nobuaki OTSUKI

In this study, AE signals due to cracks occurring dominantly in reinforced concrete (RC) beams was characterized by AE waveform parameters through the model tests for bending cracks, shearing cracks and bond cracks between reinforcing steel bars and concrete. Then in order to verify the validity of the results for these model tests, AE measurement was performed during the bending test for the RC beams. Finally, the loading to the existing RC beams of the in-service aging dock was carried out by moving the dump track on the beams so that the applicability of AE technique to the evaluation of the deterioration of RC beams subjected to flexural loading was examined.