

解 説

AE法によるコンクリート構造物の健全性評価

コンクリートの劣化診断

日本フィジカルアコースティクス(株) 湯山 茂徳
Shigenori Yuyama

コンクリート材料は、圧縮強度に比べて引張、せん断などの強度が低いため、鉄筋などの補強材とともに構造物に用いられる。コンクリートは、その化学的特性により、通常の使用環境下では鉄筋の腐食は起こらないとされ、維持管理は容易と考えられてきた。しかしながら現実には様々な使用環境のもとでコンクリートの劣化が報告されるようになり、さらに最近の阪神大震災においては、大変形と動的な効果による著しい被害が報告され、コンクリート構造物の劣化度をできる限り早期に、かつ定量的に評価可能な非破壊検査法の確立が強く望まれている。

非破壊検査法の1つに、固体内で発生する弾性波を検出・解析するAE法⁽¹⁾がある。AE法は、応力下で成長しつつあるひび割れの検出に極めて敏感なため、実験室における材料評価法として、広く用いられている。また、金属製構造物やFRP製構造物の健全性を診断する検査法として、すでに試験規格が制定され、世界各地で数多くの試験が行われている。一方コンクリート構造物においては、比較的早い時期から、実験室で計測が行われたにも関わらず、実構造物への応用例は少なく、本格的な適用がようやく始まろうとしている段階⁽²⁾と考えられる。

AE解析法には、検出したAE信号のヒット数、振幅値などの信号処理パラメータを用い、相対的AE活動度の変化を解析の対象とするパラメータ解析と、複数個の波形で構成されるAE波形セットに弾性波動理論に基づく解析を適用し、AE発生源に関する定量的情報を求めようとするモーメント・テンソル解析⁽³⁾⁽⁴⁾などの定量的波形解析がある。このうち、パラメータ

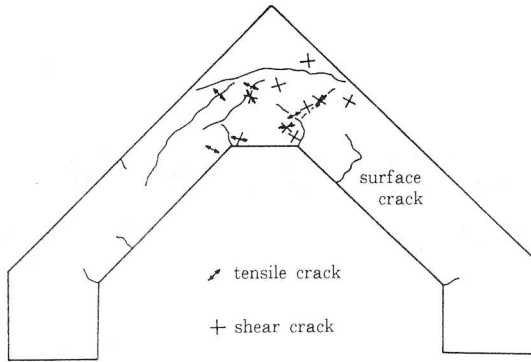
解析は、最も一般的な手法であり、実験室で多用される。また、金属あるいはFRP製構造物の試験規格も、この解析法をもとに制定されている。一方、モーメント・テンソル解析は、AEを生じたひび割れの、3次元的位置、種類、傾きの方向、さらに運動の方向が評価できるため、固体中に生ずるひび割れを定量的に評価し、その進展過程を可視化する手段として用いられている。

本稿では、コンクリート実構造物に対して、実際にAEモーメント・テンソル解析、およびパラメータ解析を適用し、健全性評価を行った事例を紹介する。

1. モーメント・テンソル解析適用による定量的評価

モーメントテンソル解析法の特徴は、AEを発生したクラックの、3次元的位置、種類、傾きの方向、さらに運動の方向が定量的に評価できることである。このため、固体中に生ずるクラック進展過程を、3次元空間中に図示することにより可視化できる。それゆえ、とりわけせん断型クラックの発生が重要な意味を持つコンクリート部材において、クラックの発生位置、荷重、発生状況などを解析する手法として、適用性が高いと考えられている。これまでに、実験室レベルの供試体、構造物の実物大モデル⁽⁴⁾、大型構造物の破壊試験⁽⁵⁾などに適用され、多くの成果をあげている。

第1図に、箱型ラーメン隅角部の破壊試験で得た結果が与えられている⁽⁴⁾。試験は、隅角部が開く方向の負荷-除荷を、最大荷重を少しずつ増加させながら繰り返す、という方法で行われた。その結果によると、



第1図 箱型ラーメン隅角部の破壊試験におけるモーメント・テンソル解析結果

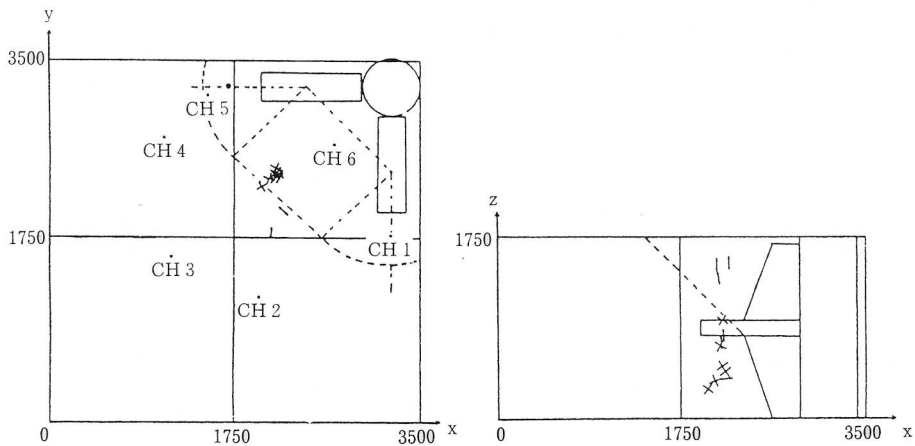
5回目の負荷において、主曲げクラックの開口量が0.2mmを越え、カイザー効果が成立しなくなると、初めてせん断型クラックが検出されるようになった。また、図中に示されるごとく、モーメントテンソル解析で得た各クラックの位置と種類、およびその運動方向は、表面上に目視されたクラックの発生状況と、よく一致していた。

これまで報告された事例に共通した現象として、「表面クラック幅が、0.12~0.2mm程度を越えると、鉄筋付近に発生するせん断型クラックが主要な役割を果たすようになるために、カイザー効果が成立しなくなり、また、除荷時にもせん断型クラックが多く発生するようになる。」こと⁽⁶⁾があげられる。現行の、鉄筋

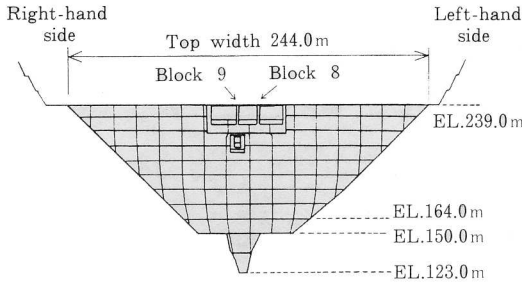
コンクリートに関する限界状態設計法によれば、表面にみられる許容クラック幅は、0.15~0.2mm以下とされ、この値を越えた場合は、耐久性に問題が生じるようになると考えられている。従って、鉄筋コンクリート部材の健全性評価を、AE法を用いて行う際に、カイザー効果成立の有無、および除荷時のAE活動の有無が、有効な判断基準になりうると思われる。

第2図は、送電用大型鉄塔基礎の引抜き試験時に発生するAEに、モーメントテンソル解析を適用した時得られた結果である⁽⁵⁾。試験は、6.5m×6.5m×1.75mの寸法を持つ大型供試体に対して行われた。第2図は1回目の載荷で得られた結果で、この過程で発生したのは大部分、図中⇔印で示される引張型クラックであるが、荷重が763 t・fに至り、初めてせん断型クラックの発生するのが確認された。この荷重は、ひずみ判定による斜めクラック発生荷重とよく一致していた。従って、モーメントテンソル解析は、実機大型コンクリート構造物の破壊進行過程を、定量的に評価するうえで、極めて有用な手段であると考えられる。

第3図に示される建設中のアーチダムの2次クーリング時およびジョイントグラウト時の挙動監視に、モーメントテンソル解析が適用された⁽⁷⁾。ダム堤体は、極めて大きなコンクリート構造物であり、通常のAE計測に用いられる周波数帯域(50kHz~1MHz)では減衰が大きいので、有意なAE信号を検出することは困難である。そこで、ここでは低周波数帯域で検出感度の高い15kHz共振防水プリアンプ内蔵型センサを



第2図 送電用大型鉄塔基礎の引抜き試験時に発生したモーメント・テンソル解析結果



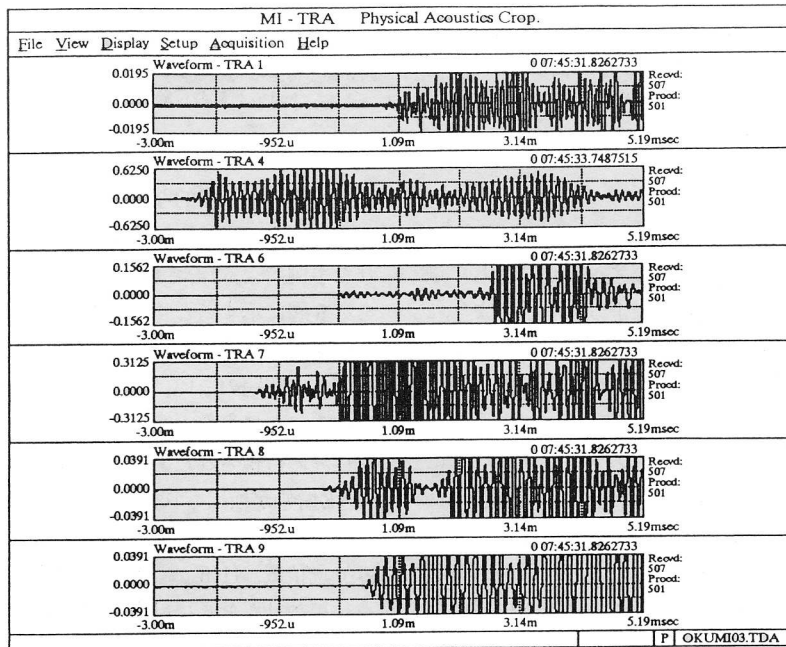
第3図 建設中のアーチダムの下流面展開図

コンクリート表面近くに埋設して計測を行った。この時最大センサ間距離は、約20m程度であった。第4図に、2次クーリング中に検出された、モーメントテンソル解析が可能なAE波形セットの一例を示す。計測中にこうした波形セットが十数組検出された。そのAE発生源は、冷却用パイプの機械的雑音によるものと推定され、クラックの発生・成長などダム堤体にとって危険な現象は生じていないことが確認された。

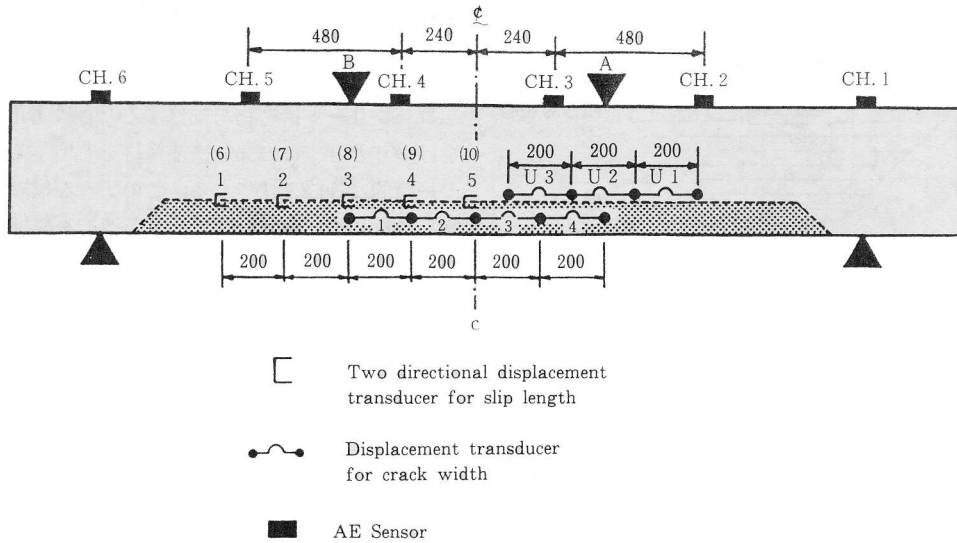
2. AEパラメータ解析によるコンクリートはりの劣化度診断

コンクリート構造物を補修するときは劣化した部分をはつりとり、この部分に補修材を充填するというのが一般的な補修工法である。このような供試体(第5図)に対して、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を評価する目的で、繰り返し曲げ荷重が負荷され、その部材内に進展する劣化状態を、AE法で監視・解析することが行われた⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

その結果から、AE法で欠陥の進展状態を敏感にモニターできること、検出したAE信号の振幅値を解析することにより、異なるAE発生要因をある程度識別できること、また、欠陥の発生部位を特定化できることなどが示されている。さらに、劣化度を診断する有効な判断基準として、CBI比が提案されている。これは、再負荷時にAEの発生した荷重と以前に経験した最大荷重との比を表したもので、鋼構造物やFRP構造物の健全性診断指標として用いられるフェリシティー比と同じ定義に基づいている。第1表に繰り返し負荷



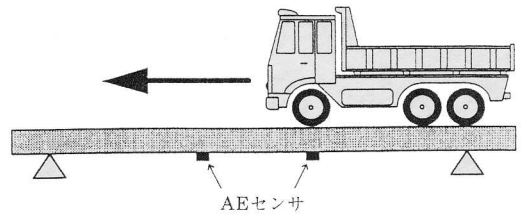
第4図 2次クーリング中に検出されたモーメント・テンソル解析が可能なAE波形セット



第5図 補修した鉄筋コンクリート供試体と各種センサの取付位置

第1表 繰り返し荷重下における劣化の進行とCBI (Concrete Beam Integrity) 比の変化

CYCLE	CH	CH 2 (hit)	CH 3 (hit)	CH 4 (hit)	CH 5 (hit)	CH 1~6 (hit)	CH 1~6 (energy)
2 nd		1.25	—	1.25	—	1.25	1.25
3 rd		1.16	1.16	1.16	—	1.16	1.16
4 th		1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
5 th		0.69	0.69	0.69	1.00	0.69	0.69
6 th		0.53	0.53	0.53	0.80	0.53	0.53
7 th		0.68	0.40	0.50	0.68	0.40	0.25

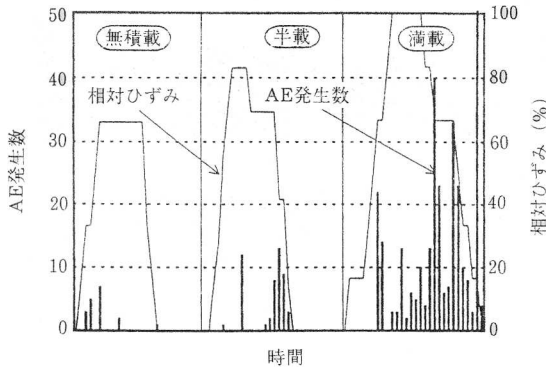


第6図 荷重の異なるダンプトラックの往復による鉄筋コンクリートはりの載荷試験

過程で得たCBI比がまとめられている。それによると、4回目の負荷で接合面で大規模なすべりが発生して以後、5回目の負荷以降はこの値が1以下を示すようになり、さらに一般的傾向として、損傷部が拡大するとともにCBI比はさらに小さな値をとり、除荷時にも大量のAE信号が検出されるようになる。

一方、前述したように、モーメントテンソル解析により、鉄筋コンクリート供試体において表面クラック幅が、0.12~0.2mmを越え、鉄筋付近でせん断型クラック発生が主な役割を果たすようになると、以後の再負荷時にカイザー効果が成立しなくなることが定量的に示されている。従って、CBI比は補修したコンクリート構造物のみならず、通常のコンクリート構造物の健全

全度を表わす一般的な指標になりうると考えられる。実構造物に、この評価法を適用し、有効性の確認された事例⁽¹⁰⁾が報告されている。経年劣化した栈橋上を第6図に示すごとく、荷重の異なるダンプトラックを往復させた時にAE信号を計測して得られたもので、補修して問題のないはりからは全くAE信号が検出されなかったにもかかわらず、表面クラックが存在し、さび汁の目視された劣化はりにおいては、極めて多量のAE信号が検出された。第7図にその結果が与えられている。異なる荷重を持つダンプトラック(自重のみで無積載、11.5t:半載、14.5t:全載、17.4t)を往復させたときに計測されたAEヒット信号計数率を、はりの主鉄筋に取り付けたひずみゲージの計測結果と同時に示したもので、第1回載荷(自重のみ)で



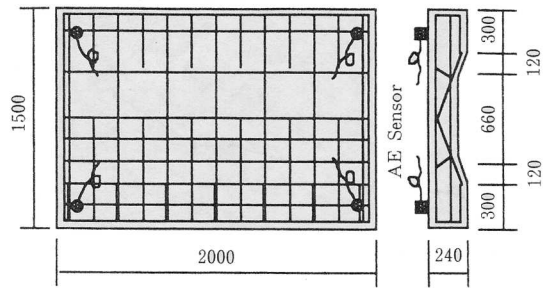
第7図 AE信号計数率と主鉄筋ひずみ量の各載荷過程における履歴

載荷初期にかなりのAE信号が検出されている。また、第2回載荷(半載)では、カイザー効果がほぼ成立しているが、除荷時に多くの信号が検出されるようになり、第3回載荷ではカイザー効果は全く成立せず、除荷時に極めて多くのAE信号が検出されている。ここで、第3回載荷時におけるCBI比は、約0.6であった。このように、劣化の進んだ実構造物において、劣化度診断の指標としてCBI比が有効であり、除荷時に検出されるAE信号が劣化損傷の評価基準として有用であることが確認された。

こうした、カイザー効果の不成立現象に基づくCBI比、および除荷時におけるAE発生挙動は、コンクリートはりの劣化度判定基準として有効性が極めて高い。この基準を実構造物に適用し、信頼度の高い評価を行うには、実験室における精密な試験を繰り返し、それと同時にできる限り多くの実構造物に適用し、信頼性の高いデータベースを構築する必要がある。現在、こうした作業が精力的に進められつつあり⁽⁴¹⁾、これに基づくコンクリートはりのAE試験法、およびその判定法に関する規格⁽⁴²⁾が提案されている。

3. コンクリート床版の疲労劣化評価

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両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



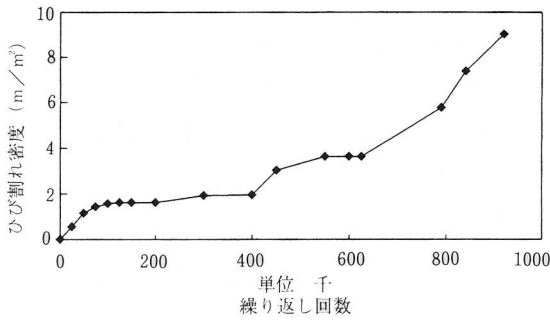
第8図 モデル道路橋鉄筋コンクリート床版とAEセンサ位置

化が進行している。

道路橋鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版)の損傷過程を把握する点検手法として、各種非破壊検査の適用が試みられている。損傷評価に非破壊検査を適用する目的は、ひび割れ密度による表面的な情報に加え、内部の情報を把握することで損傷度評価の精度を向上させることにある。しかしながら、現状で適用されている非破壊検査法は、RC床版の損傷度との関係が明確にされていないため、損傷度評価の精度向上ではなく、参考値としての適用にとどまっている。そこで、各種非破壊検査法のうち、コンクリート内部のひび割れ損傷をリアルタイムで監視できるAE法に着目し、疲労荷重下において、RC床版の損傷度とAEの関係が調査された。

モデル試験として第8図に示されるRC床版に対して、繰り返し載荷試験が行われた⁽⁴³⁾。疲労荷重は、電気油圧サーボ式疲労試験機を用い、荷重制御による1点集中、片振り圧縮で載荷された。ここで疲労荷重の最大値は150kNから270kNまで段階的に増加された。第8図中には、AEセンサ取付位置が同時に示されている。

第9図に荷重繰り返し数と、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、荷重繰り返し数0~10⁵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10⁵~4×10⁵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4~8×10⁵において、ほぼ一定の速度でひ



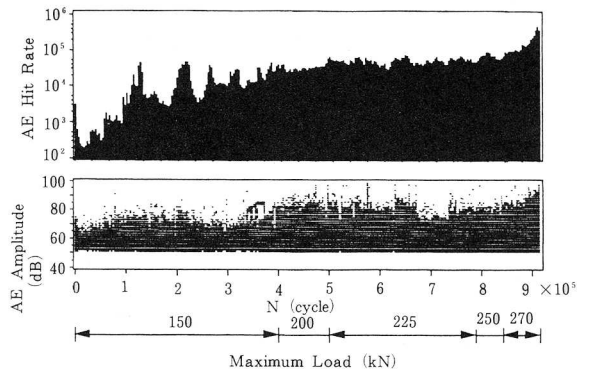
第9図 荷重繰り返し数とひび割れ密度との関係

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。

第10図に、荷重繰り返し数に対するAEヒット計数率および振幅値の履歴が、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段階への遷移）過程を予測・評価できる可能性のあることが理解される。

また、この試験においてAE発生源の2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。更に、荷重位相とAE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ている。

一方、大型旅客機のゴムタイヤを装着した移動載荷試験機により、建設後34年が経過したランプ部の橋梁から切り出されたRC床版に対して走行疲労試験が行われ、AEが計測された⁽⁴⁾。載荷荷重は、道路橋示方



第10図 荷重繰り返し数に対するAEヒット計数率および振幅値の履歴

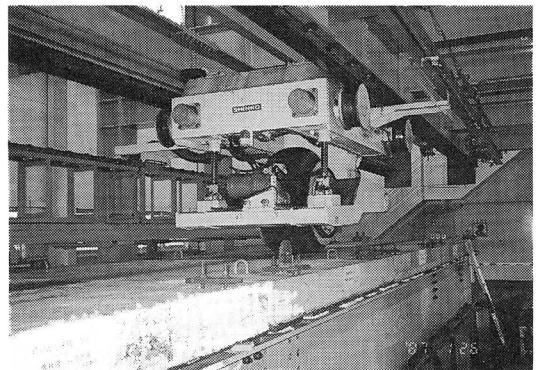
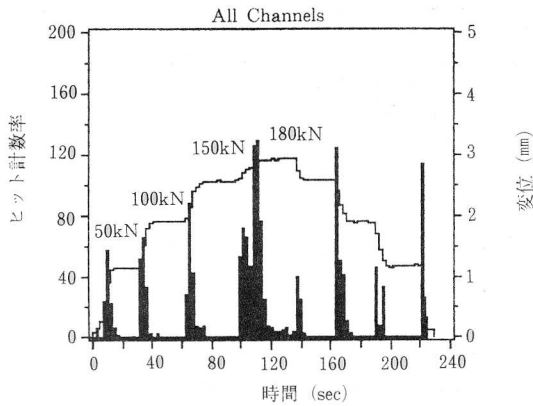


写真1 走行試験実施状況

書による設計荷重 $Pr=100kN$ から開始し、240kNまで段階的に増加させた。写真1に走行試験実施状況が示されている。

第11図に、首都高速道路公団における床版損傷ランクがB1からAへと遷移する段階で行われた静的載荷試験中に検出されたAEヒット計数率と、供試体下面中心点で計測された変位量の履歴が示されている。載荷は、0kN→50kN→100kN→150kN→180kNと段階的に行われ、また、除荷も同様に、除荷、保持をくり返し段階的に実施された。第11図に示されるように、50kNへの載荷時から荷重増加時に多くのAE信号が検出され、載荷中において最大ヒット計数率は130以上にまで至っている。さらに除荷時にも同程度のAE活動度が観察される。同様の計測は、異なる損傷程度、す



第11図 AEヒット計数率と変位量の履歴

なわち損傷ランクB2、Aでも行われた。その結果、損傷がB2→B1→Aと進行するのにもとない、載荷中に検出される最大AEヒット計数率は、50→130→270と変化し、また、除荷時に検出される計数率も10→120→250と変化することが示された。従って、ヒット計数率は、RC床版の劣化進行を表わす、有効な指標になり得るものと考えられる。なお、この試験中に検出されたAE信号の発生源は、載荷時および除荷時とも既存ひび割れの開閉など摩擦による機械的要因が主なものとされ、さらに損傷が進行すると、鉄筋とコンクリートのすべりなどの発生源も考慮する必要があると考えられる。

海外における事例を参照するまでもなく、最近の経済事情からすれば、インフラストラクチャーを建設するときに、「建設のみ」を考える時代は終わり、建設と同時に、すでに建設されたものをいかにして少しでも長く使用するかを考える……すなわちライフサイクル長期化の時代へと転換しつつある。この時、構造物の劣化度を評価し、合理的な維持管理を行うための情報を与え得る技術の確立が、必要不可欠になる。コンクリート内部で発生するひび割れを敏感に検出することができ、さらにその発生位置を特定化し、また、変動荷重下など動的環境下でこれら欠陥の監視を可能にするAE法は、その特徴を利用し、維持管理あるいは施工管理の様々な分野で適用されつつある。とりわけこの10年間における技術の発達は見ざましく、本稿

で紹介したように、ひび割れの定量的評価法としてのモーメント・テンソル解析法の確立、構造物の劣化度診断法としてのCBI比の提案、など今後AE法を実構造物に適用していく上で、基礎情報を与える重要な技術的発展が見られた。

現在、コンクリートの劣化、および欠陥を評価する検査法としては、AE法の他に、目視検査、打音法、超音波法、X線法、レーダー法、赤外線法などがある。これらは、いずれもその適用性、あるいは信頼性に一長一短があり、そのみで完全な評価を行うことのできる検査法は存在しない。AE法は、動的環境中において実時間で欠陥の成長を検出でき、また、その位置をある程度特定化しうる、という特徴を持つ。従って、他の検査法と組合せ、総合的に判断することで、より精度の高いコンクリート構造物の健全性評価を行うことが可能となり、維持管理および施工管理のために有用な情報を得ることができるようになると考えられる。

<参考文献>

- (1) 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。
- (2) 湯山茂徳：最近のAE法によるコンクリート構造物検査、非破壊検査、44(1)、pp.8-14、(1995)。
- (3) 大津政康、重石光弘、湯山茂徳、岡本享久：AE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、42(10)、pp.570-575、(1993)。
- (4) 湯山茂徳、岡本享久、重石光弘、大津政康：モーメント・テンソル解析適用による鉄筋コンクリート供試体中に生ずるひび割れ進展過程の定量的評価と可視化、非破壊検査、43(8)、pp.514-522、(1994)。
- (5) 村上祐治、清水保、神山英幸、松島学、湯山茂徳：送電用鉄塔基礎の定着引抜き実験に関する変形挙動とAE特性(そのⅡ、モーメント・テンソル解析)、第9回AE総合コンファレンス論文集、pp.143-150、(1993年11月11日、12日)、(沖縄)。
- (6) 長瀧重義、岡本享久、綾田隆史、湯山茂徳：AE法による鉄筋コンクリート部材のひび割れ進展状況の把握、土木工学における非破壊評価シンポジウム講演論文集、土木工学構造工学委員会、pp.139-144、(1991)。
- (7) 岡本享久、峰村修、坂田昇、湯山茂徳、丸山久一：アーチダム堤体のAE計測によるジョイントグラウト時の挙動監視、1997年度土木学会講演集。
- (8) S.Yuyama, T.Okamoto and S.Nagataki: Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Repaired Reinforced Concrete Beams, Mat.Eval., 52(1), pp.86-90, (1994)。
- (9) 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、第426号、pp.75-80、(1991年2月)。
- (10) T.Kamada, M.Iwanami, S.Nagataki, S.Yuyama and N.Ohtsuki: Application of Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Marine Concrete Structures, Progress in Acoustic Emission VII (JSNDI), pp.355-360, (1996)。