

AE法による橋梁基礎の損傷調査

中西 康博¹・塩谷 智基¹・羅 休²・羽矢 洋²・稲葉 智明²

¹)正会員 飛鳥建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県東葛飾群関宿町木間ヶ瀬5472)

E-mail:yasuhiro_nakanishi@tobishima.co.jp

²)正会員 財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

地震被災後の下部構造物の損傷診断を行う場合、目視などの直接的調査が困難であるため、例えばAEなどの間接的手法が試みられてきた。AEによる杭の損傷診断は、既存損傷から生じるAE波の利用を前提として考案され、そのAE励起には、外力や内力変動が用いられた。著者らは、活荷重が期待できる構造物(例えば、鉄道構造物)に手法適用を限定することで、損傷箇所からのAE励起や損傷評価が可能と考え、一連の実験を実施した。まず、損傷の進行によるAEと損傷程度の評価を目的に模型杭の载荷実験を実施した。そして、実構造物への適用性検討を目的に実橋脚基礎のAE原位置調査を実施した。その結果、損傷部からの二次AEの存在が明らかになるとともに、二次AEを検討することで、破壊箇所の特定、破壊程度の把握が可能であることがわかった。

Key Words : AE (acoustic emission), damage diagnosis, railway foundation, model pile experiment, in-situ test

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震は、多くの構造物に甚大な被害をもたらした。被災後、特に鉄道や道路構造物は、可能な限りの早期の供用再開が望まれ、その開始を判断する合理的な損傷診断手法の確立が急務とされていた。橋梁等の上部構造物は、目視観察調査を中心に損傷の有無、位置、程度が比較的容易に把握できる一方、地中にある基礎などの下部構造物は、目視観察調査が実施可能な場合も、杭頭近傍までに限られ、高い掘削コストと調査範囲に限界があった。著者らは、掘削を行わずに杭基礎の損傷診断をする手法としてアコースティック・エミッション(AE)に着目し、被災したコンクリート杭の損傷診断に適用してきた¹⁾。ここで、AEとは、材料内部のひび割れの発生、進展、滑りなどにもない発生する弾性波のことである。AE法による杭基礎の損傷診断は、既損傷箇所からAEを誘発させ、そのAEを専用の計測システムを用いて検出・評価することで、損傷位置を特定しようとする手法である(図-1参照)。この手法は、杭基礎の全長にわたり、損傷位置が推定できるが、対象とする基礎杭の近傍にAE導波棒(ウェーブガイド)の設置が必要なことや、AEを誘発するために外力(あるいは内力変動)が必要となることなど、計測環境によっては、適用困難な場合もあった。

本研究は、構造物上を通過する列車や車両活荷重が期待できる構造物に適用範囲を限定するとともに、調査範囲を基礎杭頭部に限定し、改めてAE法によ

る構造物基礎の損傷診断手法の開発をしようとするものである(図-2参照)。

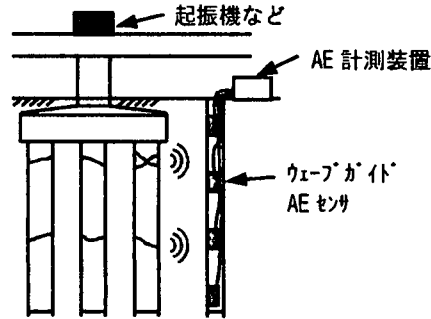


図-1 既往のAE基礎杭調査法

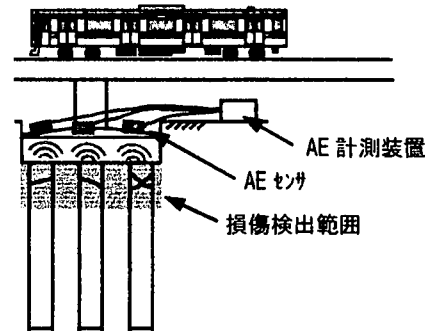


図-2 新しいAE基礎杭調査法

2. 主要検討事項

本手法が目的とする AE 計測は、上部構造物から下部構造物をモニタリングし、損傷位置の大きな把握と、損傷形態や程度を推定することにある。表-1 に段階的実験の流れを示す。フェーズ I では、既存損傷から発生した AE 波の特徴と、それがどのような損傷形態や程度に対応して発生するのかを把握する目的で実施する。フェーズ II では、上部構造の損傷を下部構造にあると仮定して、その損傷の位置や程度が判断できるかについて検討する。本論文では、現在までに実施された上述のフェーズ I の曲げ損傷（つまり、せん断損傷の検討は今後の課題）とフェーズ II について詳述する。

表-1 段階的な検討概要

フェーズ	実施内容	
I	実験	空中に設置した模型杭による AE 破壊実験
	検討項目	AE 位置標定技術、鉛直荷重と AE 発現の関係（カイザー効果考慮）
II	計測	気中部の損傷に着目した実構造物の AE 計測
	検討項目	フェーズ I で得た知見の実構造物への適用性検討
III	実験	土中に設置した模型杭による AE 破壊実験
	検討項目	杭と地盤の摩擦による AE 特性およびその除去方法
IV	計測	実構造物による検証
	検討項目	実構造物基礎への適用と手法の検証 専用計測システムの開発

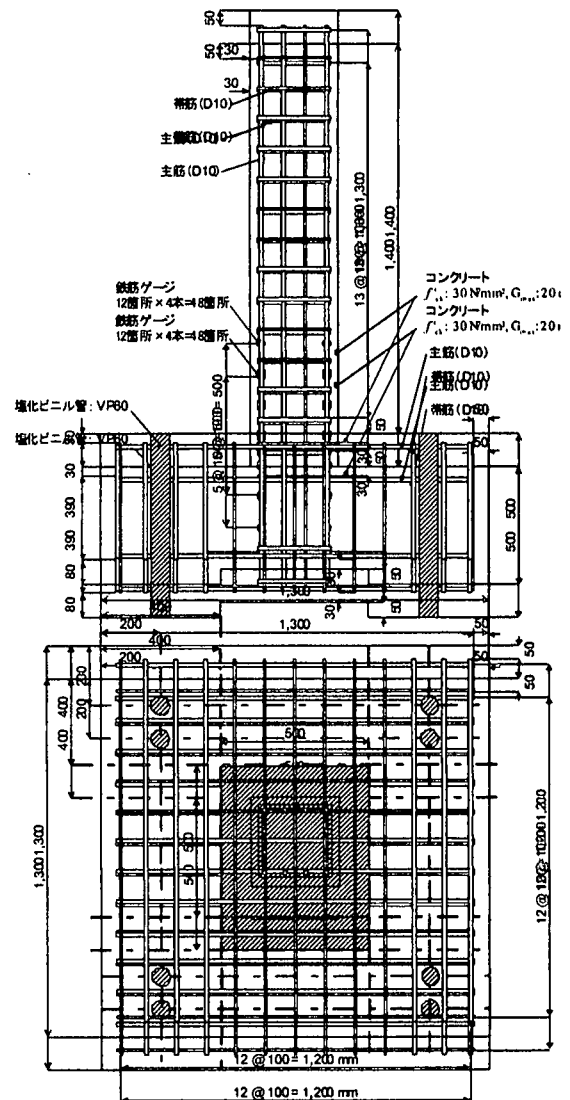


図-3 供試体の概要

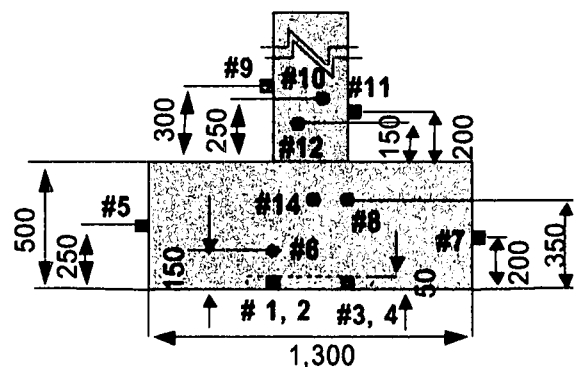


図-4 供試体とAEセンサ配置

3. 空中に設置した模型杭による AE破壊実験

(1) 実験概要

実験に用いた供試体は、実基礎杭の性状を反映できるように図-3 のような逆 T 型の形状および、寸法とし、D10 の鉄筋を用いて製作した。コンクリート強度は $f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$ とし、フーチング表面（図-3、供試体底面）に AE センサが設置できるように、 $50 \times 50 \times 5 \text{ cm}$ の箱抜きを行いコンクリートを打設した。

AE センサは、図-4 に示すように杭頭部の損傷を網羅できる配置とし、フーチングおよび、杭体に合計 14 個設置した。AE センサ（60 kHz 共振型）で検出された AE 信号は、プリアンプで 40 dB 増幅後、MISTRAS AE システム（PAC 社製）でしきい値 45 dB で AE パラメータおよび AE 波形を収録した。

図-5 に実験概要図を示す。本実験では、損傷程度と検出された AE 波の特徴を把握するために、まず段階的水平荷重により杭頭部に曲げ損傷を与え、各水平荷重レベルで列車荷重を想定した鉛直荷重を実施し、損傷レベルに対応した AE 波の検出を試みた。

ここで、水平荷点は、杭等より杭辺の2倍の位置：600 mmとした。また、各段階で損傷進展を視覚的に把握できるように、各水平変位ピークでクラックスケッチを実施した。

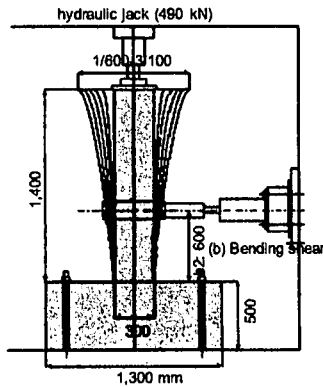


図-5 実験概要（供試体と荷位置）

水平荷荷は、1/600, 1/400, 1/200, 1/100 (1δ), 2/100 (2δ), 3/100 (3δ)の部材角を目標に変位制御で行った。各段階で正負交番繰返し水平荷荷を行った後、既損傷部より発生するAEの発現、および傾向を検討するために、3回の繰返し鉛直荷荷（0～200 kN）を行った。この荷荷サイクルを各部材角について2回行った。ここで、き裂の発生、進展にともない発生するAE波と既存き裂（損傷）からのAE波を区別するために前者を“一次AE”，後者を“二次AE”と呼ぶ。図-6に部材角1δと2δに対応した水平変位と、各交番荷荷後に実施した鉛直荷荷を示す。

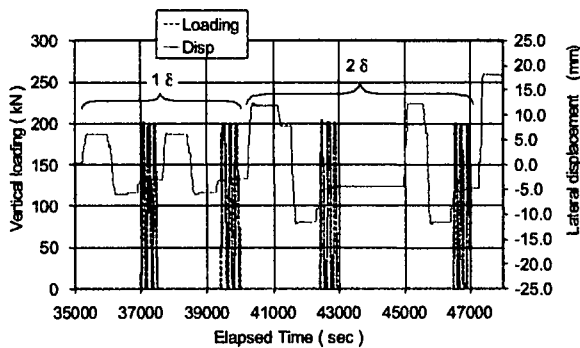


図-6 荷荷サイクル(部材角：1δ, 2δ)

(2) 実験結果と考察

図-7に水平変位とAE発生率（14チャンネルのみ）の経時変化を示す。ここで、鉛直荷荷の時間帯を横線で示す。同図より、初期変形からのAE発現が認められた。AEアクティビティーは、32,400秒（9時間）後の6mmの水平荷荷より高い傾向を示す。水平変位6mmは1/100の部材角に相当し、鉄筋の降伏点近傍と考えられる。鉛直荷荷時のAEアクティビティーは水平荷荷時に比べると低い、鉛直荷荷に対応したAE発現が認められた。

図-8に変形量6mm（1/100）を2回繰返した後に、

それぞれで実施した鉛直荷荷とAE発生率の拡大図を示す。図-8中37,000秒以降から3回の鉛直荷荷・除荷が与えられ、特に最初の鉛直荷荷に対応した活発なAE発現が認められた。2回目、3回目の鉛直荷荷時のAEアクティビティーは初回に比べて著しく低下した。これらの傾向は、2回目の水平荷荷後の鉛直荷荷過程でも同様であった。

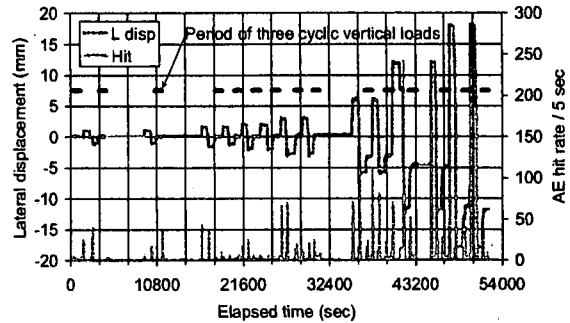


図-7 水平変位量とAE発生数の経時変化

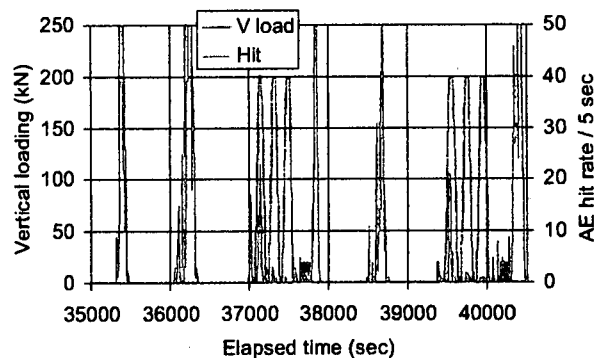


図-8 鉛直荷荷とAE発生数(1/100変形)

図-9に2回の1/100交番水平荷荷で得られたAE源の3次元位置標定結果を供試体側面に投影し示す。円プロットが1回目、線プロットが2回目の交番荷荷時に得られた結果である。同図より、2回目の水平交番荷荷時に得られたAE源が1回目で得られたAE源分布の範中にあり、杭左端部に集中していることがわかる。図-10に2回目の交番荷荷後、最初の鉛直荷荷時に得られたAE源（○プロット）と2回目の鉛直荷荷時（×プロット）のAE源を試験後に得られたクラックスケッチとともに示す。鉛直荷荷時のAE源は、水平荷荷時のAE源分布内にあり、2回目の水平荷荷時に得られたAE源分布付近にあることがわかる。つまり、鉛直荷荷により、既存損傷からの二次AEの励起が可能であり、その位置は交番水平荷荷で得られるAE源の共通位置（損傷位置）にあるといえる。さらに、これらのAE源は、斜めクラックが観察される位置に集中して得られていることから、鉛直荷荷による二次AEの発生は、せん断型クラックの卓越する位置に多く得られるものといえる。この結果は、既報²⁾の「クラック配向

と二次 AE の発生傾向」に合致し、AE による損傷評価がせん断型クラックに特に有効であることが再認識された。

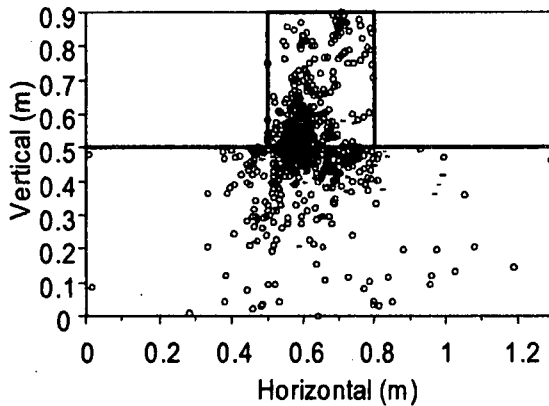


図-9 AE 源位置標定結果(1/100変形)

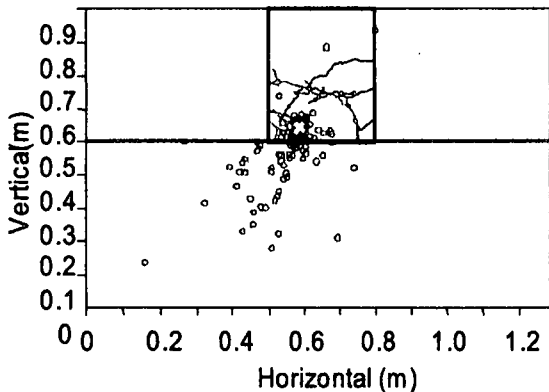


図-10 AE 源位置標定結果(鉛直載荷)

図-11 に各水平載荷の繰返し回数毎の AE 総数を最初の水平載荷時に得られた AE 総数で除し、無次元化した値を Cyclic AE ratio として示す。図-11 より変形量 1/200 までの AE 総数は少なく、1/100 から数多く得られる。水平載荷に関するカイザー効果は、Cyclic AE ratio より、1/100 がカイザー効果不成立の目安といえ、Cyclic AE ratio が 0.5 以上、つまり最初の載荷時に得られた AE 総数の半数以上の AE が 2 回目の載荷でも得られた。さらに、3/100 では 2 回目の AE 総数が 1 回目以上となる結果となった。前述したように 1/100 は鉄筋の降伏点近傍であり、繰返しによる AE 発生傾向は材料の破壊過程を反映した結果といえる。

図-12 に各水平載荷後、3 回実施した鉛直載荷時の AE 発生総数を示す。図-12 中、○プロットは、最初の鉛直載荷で得られた AE 総数で 2 回目の AE 総数を除し無次元化した値、×プロットは同様に 3 回目の AE 総数を除し無次元化した値を示す。1/400 以降、2 回目の載荷で得られる AE 総数は 1 回目の 10% 前後となる。3 回目には得られる AE 総数は、

1/100 以降 1 回目の AE 総数の 5% 前後となり、図-12 の水平載荷で確認できた供試体の損傷は、鉛直載荷では不明確となった。これらは、実験条件に起因するものといえ、軸力無作用下の水平載荷により、1/100 の鉄筋降伏点以降、杭体接合部に塑性ヒンジが生じ、杭体自身の損傷が進行しなかったためと考えられる。

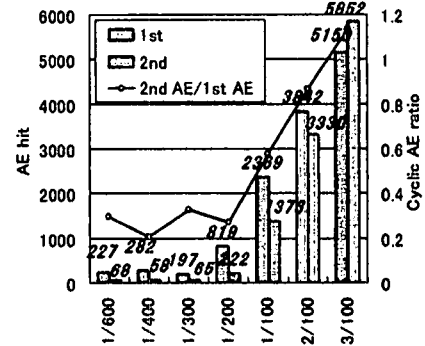


図-11 水平載荷毎の AE 発生数

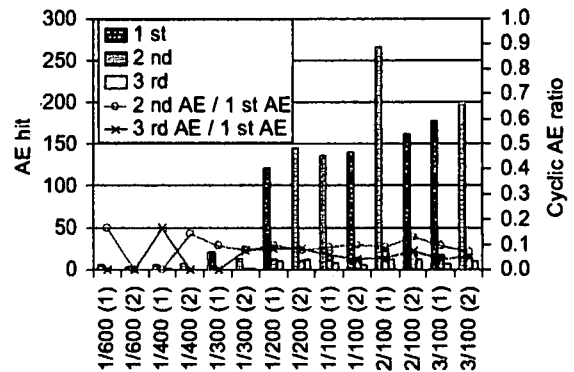


図-12 鉛直載荷毎の AE 発生数

これまでの検討より、鉛直載荷により水平載荷で与えた損傷部からの AE 発生が確認された。また、繰返し鉛直載荷の 2、3 回目の AE 発生数は、1 回目に比べて大きく減少したが、AE の発生は認められた。これは、「その材料が安定状態ならば、材料が有する最大履歴荷重まで AE は発生しない」というカイザー効果の不成立を示している。

実験結果から、杭の損傷過程は AE 源により可視化可能であり、鉛直載荷による AE 発生は、明らかに「既存損傷」から生じた AE であった。繰返し水平載荷による損傷進行は AE アクティビティーによりある程度評価できた。しかし、鉄筋降伏以降の損傷の主因は、塑性ヒンジを中心とする杭のロッキング挙動によりもたらされ、杭体自身の損傷進行は認められなかった。鉛直載荷の繰返しにより、AE アクティビティーの急激な低下が認められ、これらも杭体の損傷が重度に進行しなかったことに起因しているものと考えられた。しかしながら、実験結果より、AE による位置標定が概ね損傷位置と合致して

いること、既存損傷からの AE が特にせん断型の破壊が卓越した部位で鉛直荷重により励起可能であることがわかった。

4. 損傷を有する実上部構造物のAE計測

本来、表-1 に示したフェーズ I では、様々な損傷形態・程度と AE 特性を十分に検討する必要がある、それに基づき原位置計測で得られたデータを評価する必要があった。ここでは、先に損傷を有する鉄道基礎構造物が得られたため、フェーズ I の未検討事項を今後の課題とし、原位置 AE 計測による本手法の適用性を検討した。

(1) 計測概要

計測対象は、鉄道橋脚で無筋コンクリートから成り、建造から 70 年が経過していた。橋脚には、図-13 に示すクラックが貫通していた。このクラックには補修跡も認められたが、対応する資料が見つからなかったため、損傷は数十年以上前に生じたものと推測された。対象橋脚上部の路線は、1 日に上下併せて約 420 本の列車が通過することから、損傷発生後も、相当数の繰返し列車荷重を経験していることが推測された。

AE 計測は、図-14、図-15 に示す 2 種類のセンサ配置とした。つまり、図-14 のセンサ配置は、クラック全体を検討する目的で、また、図-15 のセンサ配置は、AE センサをクラック近傍に密に配置することにより損傷箇所から発生する AE 波を詳細に検討するための配置である。

AE センサ配置パターンと計測時間などを表-2 に示す。計測ケースは、AE センサ配置、計測時間、および列車本数から組合せた。

(2) 計測結果と考察

図-16 にケース 1-1 の計測で得られた AE 発生数（5 秒毎）と計測中に通過した列車の時間（○プロット）、および 1 車両あたりの測定荷重を示す。図-16 より、下り列車通過に対応した多くの AE が認められた。これは、パターン 1 のセンサ配置の場合、計測箇所の直上が下り線となることにも起因している。また、上り線通過時にも、下り線通過時に比べて発生数は少ないが AE の発生が確認できた。これらより、貫通クラックが重度損傷であると判断するなら、「カイザー効果は重度損傷では成立しない」ことが明らかである。つまり、前述の通り対象橋脚は一日に数百回の繰返し列車荷重を受けているので、カイザー効果が成立する場合、通常受ける活荷重では AE の発生は期待できない。しかし、計測時にも通常の活荷重により損傷箇所から AE の発生が確認された。つまり、カイザー効果は重度損傷を有するコンクリート構造物では成立しないものと考えられる。

その他、AE の発生数と車両重量に相関が認められた。

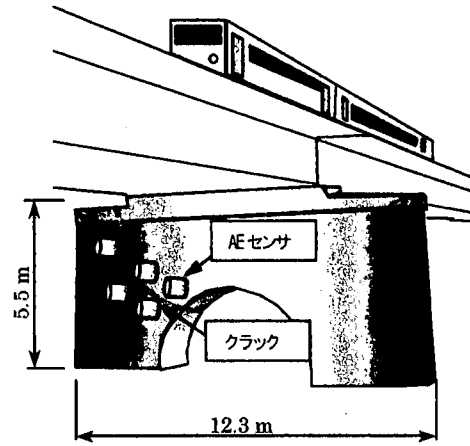


図-13 橋脚の状況

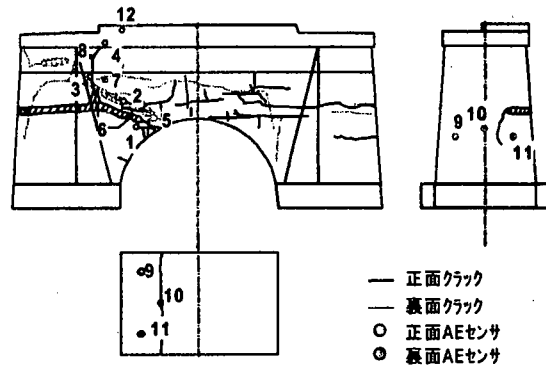


図-14 AEセンサ配置パターン1

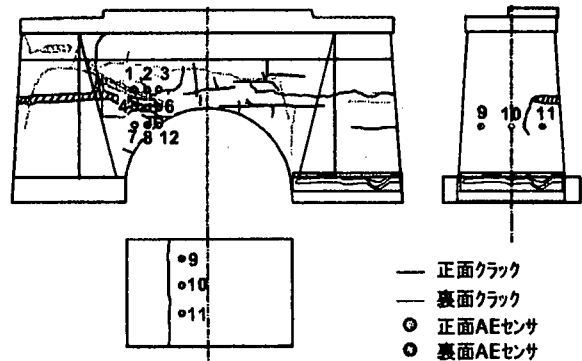


図-15 AEセンサ配置パターン2

表-2 計測状況

項目	計測ケース (AE センサ配置パターン)			
	1-1	1-2	1-3	2
計測開始時間	11:19:31	7:37:28	16:3:58	11:35:40
計測終了時間	12:19:04	9:01:50	17:37:15	12:06:17
計測時間	0:59:33	1:24:22	1:00:17	0:30:37
通過列車本数	21	50	27	10

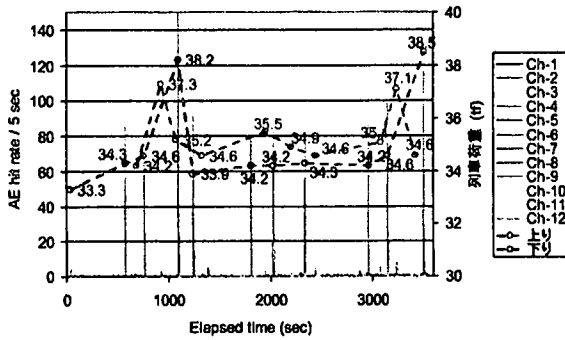


図-16 AE発生数と列車荷重

ケース 1-2 より得られた AE 源位置標定結果 (3次元) を図-17 に示す。図-17 より、AE 源の多くは、橋脚を貫通したクラック周辺の橋脚内部に現れ、AE 源は内部損傷箇所から生じた二次起因の AE であると考えられた。このことは、対象橋脚が弾性的変形挙動 (図-19 で残留ひずみ認められない) を示しているにも関わらず、既存損傷箇所からの AE 発生が認められることから明らかである。

ケース 1-2 で得られた AE 源数は、417 イベントで 1 回の列車通過で得られる AE イベント数は平均 8 個であった。一方ケース 1-1 での列車あたりの AE イベントは 6 個となった。これは、パターン 1-2 が、通勤時間帯で乗車率が高く、列車重量が大きかったためと考えられ、図-16 で示した通過車両重量と AE 発生数の相関が AE イベント数でも確認できた。

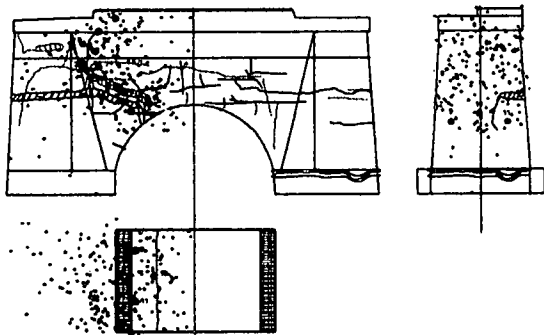


図-17 AE 位置標定結果 (パターン1-2)

図-18 にパターン 2 による位置標定結果を示す。×プロットが、AE 源の最大振幅値が 50 dB 以上を、△が 50 dB 未満を表している。ここで、AE 源の最大振幅値は、別に求めた AE 距離減衰特性に基づき、各センサで検出された AE 最大振幅値を AE 源での値として逆算したものである。同図より、重度損傷と考えられる主要クラック部に 50 dB 以上の振幅を有する AE 源の集中が確認された。つまり、比較的大きな最大振幅値を有する AE 源に着目することで、損傷部の位置特定や破壊規模を推定できる可能性が示唆された。今後、多数実構造物での AE 計測を実施し、AE パラメータと損傷程度などを整理することにより AE パラメータによる損傷程度 (規模) が

推定できる可能性がある。

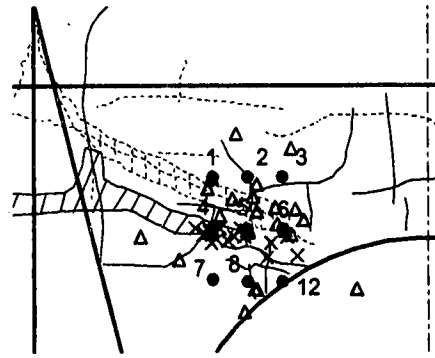


図-18 AE 位置標定結果 (パターン2)

5. AE計測による構造物の損傷評価

(社) 日本非破壊検査協会では、AE を利用した損傷評価標準「NDIS2421: コンクリート構造物のアコースティック・エミッション試験法」³⁾ を定めている。この試験標準は主にコンクリート構造物の AE 計測方法自身を規定する試験基準であるが、構造物の損傷評価方法も言及している。以下、NDIS2421 の損傷評価方法を詳述する。損傷評価には、材料 (構造物) の最大履歴荷重と AE 発生荷重 (load 比)、載荷・除荷に生じる AE アクティビティ (Calm 比) を用い、具体的には、AE 発現荷重を履歴最大荷重で除した値を load 比、載荷除荷のサイクルにおいて、除荷時に得られた AE 総数を載荷時の AE 総数で除して得られる値を Calm 比とし、両比を関数とした 2 次元平面で損傷程度が評価できるとしている。

ここで、原位置での AE 計測に基づき上述の load 比、Calm 比を適用しようとする場合を考える。このとき、特に load 比算出の基準となる対象構造物の最大履歴荷重の推定は実務上困難となる。さらに、カイザー効果を起源とする load 比は、AE 計測時に与えた荷重条件 (方向、荷重値など) と損傷が生じたときに与えた荷重条件の一致が不可欠となり、現実的にこれらの比を原位置試験の評価に適用するのは困難といえる。

そこで、著者らは上記 Load 比の考え方を改め、現場計測期間中の最大値に基づく RTRI 比 (Ratio of repeated train load at the onset of AE activity to relative max load during a inspection period)⁴⁾⁵⁾ を提案している。ここで、RTRI 比は、以下の式に基づき計測期間中に得た荷重、変位などの計測ピーク値を基準とし、Calm 比もそれに併せて算出する。

$$RTRI = \frac{\text{AE発生変位}}{\text{計測期間最大変位}}$$

$$Calm = \frac{\text{変位ピークからのAE発生総数}}{\text{変位ピークまでのAE発生総数}}$$

ここで、上式中の変位は荷重を反映する計測値などとして行うことができる。

(1) 空中に設置した模型杭による AE破壊実験

3章で示した模型杭に上載死荷重 400 kN を与え、再度繰返し水平載荷 (18-3δ) と、各部材角で繰返し鉛直載荷を行った。ここで、死荷重は、損傷形態を曲げ (死荷重なし) から曲げせん断損傷まで進展させる目的で与えた。図-19 に上載荷重下で得られた AE アクティビティーを利用して得た損傷評価結果を示す。ここで、損傷は交番水平繰返し載荷で与えられ、Calm 比および RTRI 比は繰返し鉛直載荷に基づき算出した。つまり、損傷が生じた荷重条件と各比を得た荷重条件は全く異なることに注意されたい。同図より、部材角 1δ に比べ、2δ 以上で RTRI 比が 1 未満となることからわかる。Calm 比については、0.1 以上の範囲でばらつきが大きい。除荷過程の AE アクティビティーが損傷を評価できる指標となり得ることが確認できる。

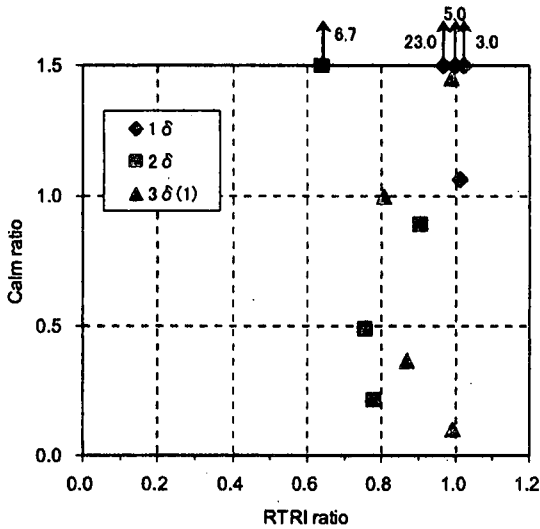


図-19 模型杭の損傷評価結果

(2) 損傷を有する実上部構造物の AE計測

一例として、表-2 のパターン 1-3 で得られた計測データに基づき検討を加える。図-20 にクラック変位計 1~3 の変位時刻歴を示す。同図より、全てのクラック変位計で同様な挙動が確認できる。ここで、クラック変位 3 を例に Calm 比、RTRI 比の算出方法を図-21 に示す。同図より、Calm 比は、変位の減少過程で得られた AE 総数 3298 を増加過程で得られた 4522 で除した “0.73” として得られる。RTRI 比も同様に、AE 出現時変位 0.0712 を計測最大変位 0.1166 で除した “0.61” として得られる。このような算出法により、13 本の下り列車通過時に得られた AE データを用いて両比を求めた。得られた Calm 比と RTRI 比を図-22 に示す。ここで、同図には各プロットに対応した列車荷重 (tf) を併記している。図-21 より、RTRI 比は 0.8 以下、Calm 比は 0.5 以上となった。つまり、せん断型貫通クラックが重度の

損傷と考えた場合、プロット結果のばらつきは大きいものの、0.5 以上の Calm 比、0.8 以下の RTRI 比が重度損傷を示す指標といえる。また、列車荷重と判定結果には相関が認められないことから、損傷が重度の構造物では、載荷荷重の大小かわからず、損傷評価が可能であることを示しているといえる。

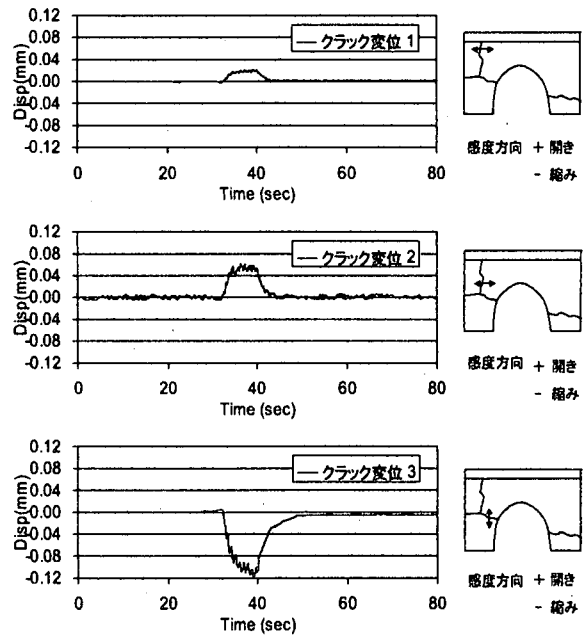


図-20 橋脚の挙動を示す変位時刻歴

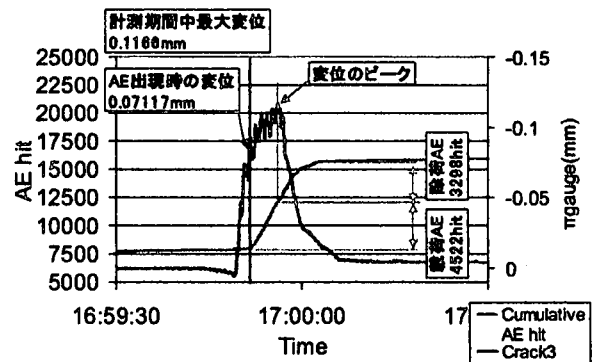


図-21 RTRI 比の算定例

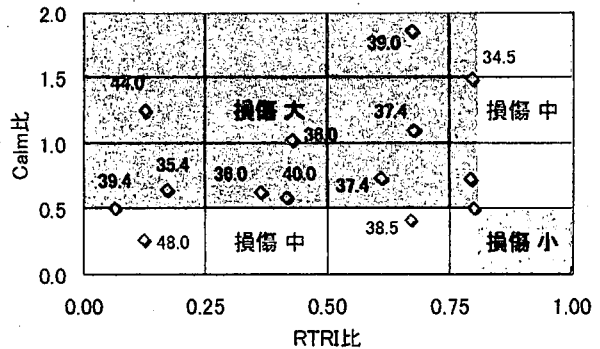


図-22 損傷評価結果

6. まとめ

列車などの交通活荷重により既損傷部から発生した二次起因の AE を対象に AE による構造物の損傷評価を検討した。本論文で示した検討事項は、その基礎実験の一部と原位置試験であり、それらを通じて以下の結論を得た。

- 1) 水平荷重により与えた損傷が鉛直荷重により判断でき、また、AE が生じる位置はせん断型破壊が卓越する部位にあった。
- 2) 本室内実験で主に再現できた曲げ損傷から、鉛直荷重の繰返しにともない、AE 発生数の減少が認められた。これらは、せん断損傷と併せて検討する必要がある、損傷形態と損傷程度を考慮した追加検討が必要と考えられた。
- 3) 相当数の繰返し列車荷重を既に受けたコンクリート構造物でも、有する損傷が重度と考えられる場合、カイザー効果は成立しない。つまり、履歴最大荷重まで AE 波が発生しないとするカイザー効果の影響を受けず原位置での AE 計測および損傷評価が可能であった。
- 4) NDIS2421 試験法の原位置試験適用への適用限界が明らかとなり、それを改善するために新しい指標 RTRI 比、ならびに Calm 比を提案した。
- 5) RTRI 比、および Calm 比は、計測期間に得られる変位などの計測値を基準としており、これらを原位置 AE 計測の損傷評価に適用した結果、損傷に合致した値が得られた。また、室内実験で得られた模型杭での AE データについても同様な妥当な結果が得られた。

今後、破壊形態・程度が判断できる試験体を用い、手法の高度化を図るとともに、構造物と地盤の相互作用により発生する AE の特性などを検討する予定である。

参考文献

- 1) 塩谷智基, 三輪滋, 市村靖光: フーチングを有するコンクリート杭のAE/衝撃弾性波による損傷調査, 土木学会, 第3回耐震補強・補修技術及び耐震診断技術に関するシンポジウム講演論文集, pp. 127-134, 1999.
- 2) Shiotani, T., M. Shigeishi and M. Ohtsu, "Acoustic emission characteristics of concrete-piles," *Construction and Buildings Materials* Vol. 13, Elsevier Science Ltd., pp. 73-85, 1999.
- 3) 社団法人日本非破壊検査協会: コンクリート構造物のアカースティック・エミッション試験方法, NDIS 2421, 2000. 7.
- 4) 塩谷智基, 中西康博, 羅休, 羽矢洋, 稲葉智明: 二次起因のAEを利用した損傷探知法の検証および鉄道現場への適用事例(その2 現場実験の結果および評価法の提案), 第57回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 373-374, 2002.
- 5) X, Luo., H. Haya., T. Inaba., T. Shiotani and Y. Nakanishi, "Experimental study on evaluation of breakage in foundations using train-induced acoustic emission,"