

AE法による橋梁下部工の震害調査法の研究

羅 休¹・羽矢 洋²・稲葉智明³・塩谷智基⁴・中西康博⁵

¹(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 主任研究員 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: luo@rtri.or.jp

²(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 主任研究員 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: haya@rtri.or.jp

³(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 研究員 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: inaba@rtri.or.jp

⁴(株)飛鳥建設株式会社 技術研究所 地盤耐震研究室 主任

(〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬5472)

E-mail: tomoki_shiotani@tobishima.co.jp

⁵(株)飛鳥建設株式会社 技術研究所 地盤耐震研究室 研究員

(〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬5472)

E-mail: yasuhiro_nakanishi@tobishima.co.jp

鉄道構造物の下部工は、地中部に主要な構造部材である基礎を有するため、目視により震害調査や耐震診断を行うとすると、周辺地盤の掘削が必要になる。これらの掘削は高いコストを必要とする上、列車走行に支障をきたすため、現実的ではない。また、地盤の掘削を要しない能動的な検査法（例えば、衝撃弾性波法、超音波法および放射線法など）を用いる場合、コンクリートや地盤の大きい減衰を克服するためには、非常に強力な入力波が必要となり、現場への適用が困難である。そこで、著者らは供用中の列車荷重により、構造部材の損傷部から誘発させた二次起因のAE（アコースティック・エミッション）を利用した経済性と実用性に優れた検査法を開発し、模型実験や現場計測を通して本手法の妥当性を検証した。

Key Words : Seismic diagnosis, Secondary acoustic emission, Railway, Substructure, Experiment

1. はじめに

鉄道橋梁の震害調査や耐震診断を行う際に、上部工については、目視調査を中心に損傷の有無、位置および程度を確認することができる。一方、基礎を代表とする下部工は、地中にあるため、目視により調査をすると、周辺地盤の掘削が必要となる。これらの掘削作業は、高いコストと長い工期を必要とする上、供用中の列車走行に支障をきたすため、現実的ではない。このような状況に鑑み、著者らは供用中の列車荷重により、構造物の損傷部から誘発させたアコースティック・エミッション（二次起因のAE）を利用することにより、橋梁下部工に適する経済性と信頼性に優れた震害検査法を考案し、模型実験や現場計測を通して本検査法の妥当性と実用性を検証した。また、本手法の地盤中の基礎への適用性の検討を次の研究ステップとする予定である。

2. 提案法の概要

阪神大地震（1995）において数多くの基礎構造物が損傷を受けた。その後、基礎の震害調査や耐震診断のための非破壊検査技術に関する研究が盛んになってきた。この中、多く検討されているのは能動的な検査法である（例えば、衝撃弾性波法、超音波法、および放射線法など）。能動的な検査法は、入射波に対する反射波の変化から構造物の損傷状況を推定する手法である。このような手法は、減衰性の低い金属材料に適用し易いが、コンクリートのような減衰性が金属の数十倍の材料に対して、適切な手法とは言い難い。特に、橋梁下部工の場合、大きな体積を持つ上に地中部に設置した部分が多く、減衰の影響がさらに大きい。この大きな減衰を克服するためには、非常に強力な入射波が必要となる。しかし、強い入射波の発生が難しく、場合によっては環境や人体に害を

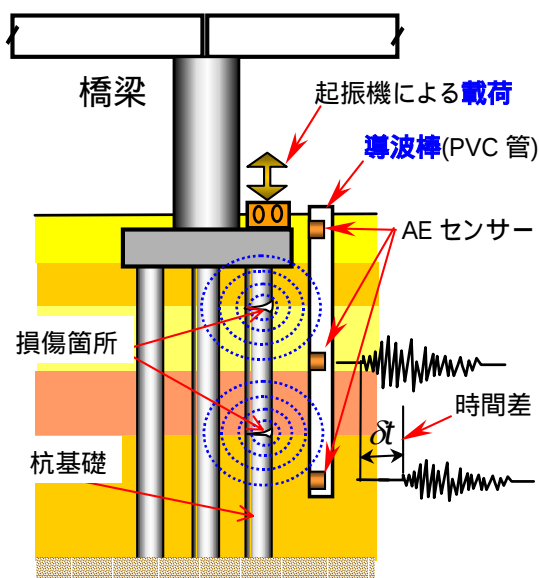


図-1 従来 AE 法による杭基礎の調査

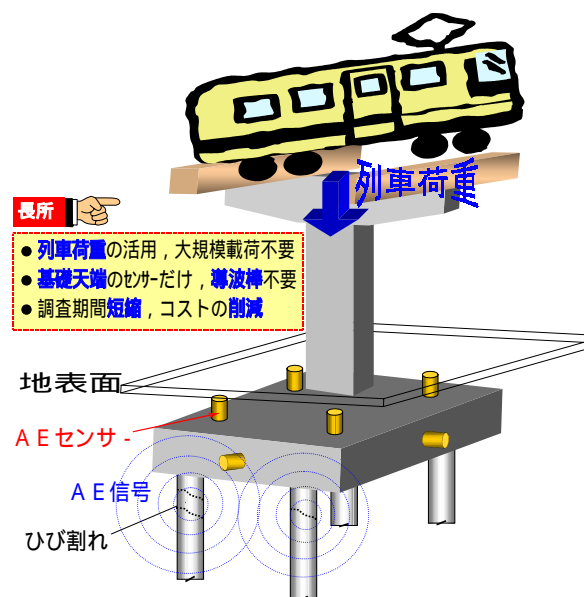


図-2 提案した列車荷重による AE 調査法

与えるため、現場への適用が困難である。そこで、今回提案する列車荷重を利用した AE 検査法は、受動的かつ強力な方法であるため、橋梁下部工の損傷検査に適切であると考えられる。

AE の発生起因には、固体材料のひび割れの発生と進展に伴う一次起因の AE（カイザー効果成立）と、既存亀裂面の擦れや開閉時に発生する二次起因の AE がある。一次起因の AE については、今までに多くの研究が報告されているが（例えば¹⁾、クラックの位置、種類および方向に基づく AE 源の特性化など）、二次起因の AE に関する研究はまだ少ない。従来地震の過大な外力によって生じた構造物の損傷箇所に対して、列車荷重のように、これまでに何度も経験してきている荷重レベルで発生する AE は、主に二次起因の AE と考えられる。本研究では、このような列車荷重により構造物に発生する二次起因の AE に主眼を置いて、新しい検査法の開発を試みた。

今までの AE 法による基礎杭の損傷診断では、図-1 に示すように既存の損傷箇所より AE を適切に誘発・検知して、評価を行う。この検査法が阪神大震災後の復興に適用され、その有効性は過去の研究により確認されている^{2,3)}。この手法は、基礎杭の深さ方向の損傷位置や損傷程度を推定することが可能であるが、対象とする基礎杭の近傍に AE センサーを取り付けた導波棒（ウェーブ・ガイド）の設置や、起振機による大掛かりな荷重が困難なため、鉄道構造物への適用には多くの問題点を抱えている。そこで、本研究では、図-2 に示すように起振機の代わりに構造物上を通過する列車荷重を利用し、導波

棒の代わりにフーチング表面に配置する AE 平面計測網を用いた便利かつ経済的な検査法を提案した⁴⁾。

本手法を確立するためには、気中と地中の両方における模型や現場実験が必要であるが、現在のところでは気中の実験が完成され、その解析および評価結果について報告する。

3. 模型実験

(1) 実験概要

本実験は気中に設置したコンクリート模型杭に対して、模擬列車荷重による二次起因 AE の特性およびフーチング表面に配置した AE 平面計測網の有効性検討を目的と

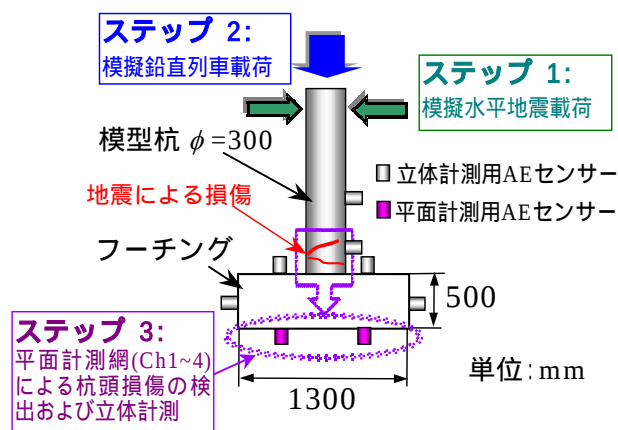


図-3 模擬列車荷重による模型杭の AE 実験模式図

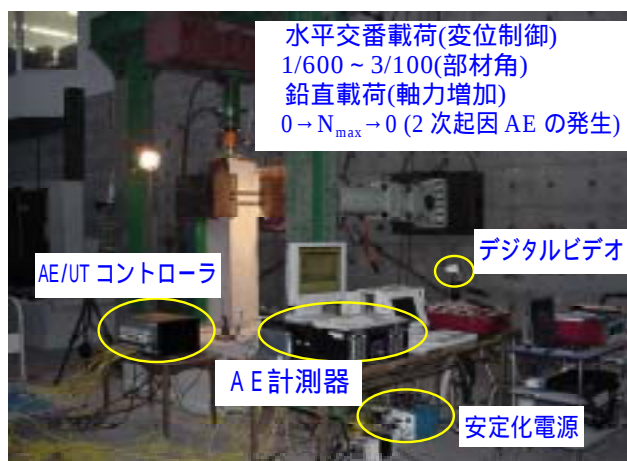


図-4 模型実験における载荷および計測システム

した．実験に用いる供試体は，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 $f_{ck} = 30\text{N/mm}^2$ を使用し，再現性を確認するために 2 体の供試体を作成した．

実験における AE センサー配置の模式図を図-3 に示す．AE センサーの配置パターンは，平面と立体計測網の 2 種類がある．平面計測網はフーチングの表面に設置した 4 個のセンサー（Ch1~Ch4）および立体計測網は杭頭部の損傷を網羅できるように杭体やフーチングに配置した 14 個のセンサーからなる．AE 計測について，センサーは，60kHz 共振型を使用し，センサーで検出された AE は，40dB 増幅後 MISTRASAE システムにより，しきい値 45dB で AE パラメータおよび AE 波形を収録した．実験風景および载荷・計測システムを図-4 に示す．実験のステップは図-3 に示すように，次の通りである．

ステップ 1：杭頭部に損傷を与えるために，地震荷重を想定した正負交番繰返し水平载荷を行った．载荷は変位制御によって，1/600，1/400，1/200，1/100（ $1\theta_y$ ：引張り鉄筋が降伏する時の部材角）， $2\theta_y$ ， $3\theta_y$ の部材角を目標に，各段階で 2 サイクルを繰返した．

ステップ 2：列車荷重による杭頭損傷箇所から二次起因の AE を誘発するために，水平载荷の各载荷段階において，繰返し鉛直载荷を行った．鉛直载荷は荷重制御で，0 から最大 200kN までの繰返しを 3 回実施した．

ステップ 3：ステップ 1 とステップ 2 の载荷と同時に，平面および立体の AE 計測網により AE パラメータと AE 波形の収録を行った．

実験終了後，異なる载荷方式や計測網で得られた実験結果に対して，解析を行い AE 特性の比較や分析を行った．

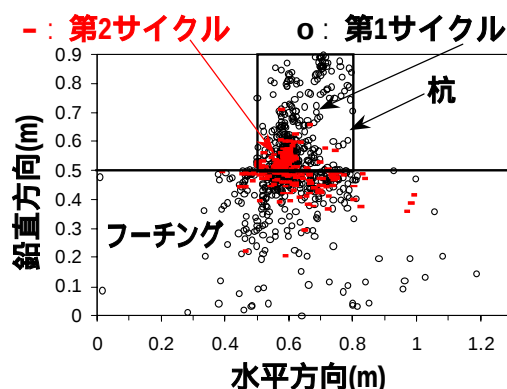


図-5 AE 源位置標定結果（水平载荷，部材角 1/100）

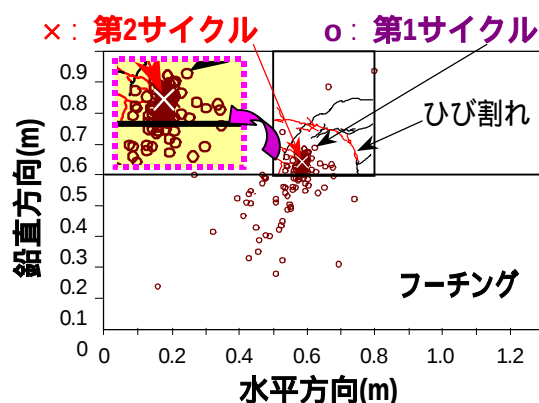


図-6 AE 源位置標定結果（鉛直载荷）

(2) 結果分析

まず，水平と鉛直载荷の際に立体計測網で標定した AE 源を側方向へ投影した結果を図-5，図-6 に示す．図-5 に示す $\circ$ が 1 回目， $-$ が 2 回目の水平交番载荷時に得られた結果である．同図より，2 回目の交番载荷時に得られる AE 源が 1 回目で得られた AE 源の範中にあり，杭左端部に集中していることがわかる．図-6 に 2 回目の水平交番载荷後，最初の鉛直载荷時に得られた AE 源 ($\circ$) と 2 回目の鉛直载荷時 ($\times$) の AE 源を試験後に得られたクラックスケッチと一緒に示す．鉛直载荷時の AE 源は，水平载荷時の AE 源分布内にあり，2 回目の水平载荷時に得られた AE 源分布の付近にあることが分かった．つまり，鉛直载荷により，既存損傷からの二次的な AE（二次起因の AE）の励起が可能であり，その位置は交番水平载荷で得られる AE 源の共通位置にあることがあきらかとなった．さらに，これらの AE 源は，斜めクラックが観察された位置に得られていることから，鉛直载荷による二次起因の AE は，せん断型クラックが卓越する位置に多く発生することを示している．この結果は，既報⁵⁾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

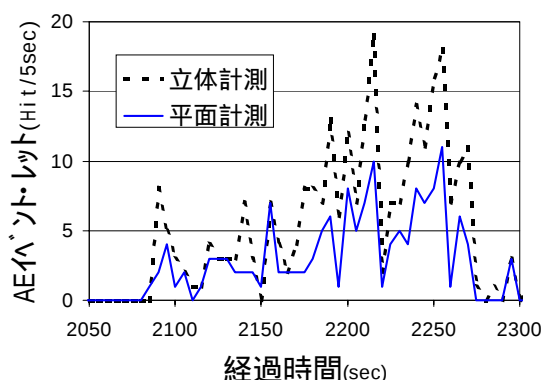


図-7 平面と立体計測網による AE 特性の比較(鉛直载荷)

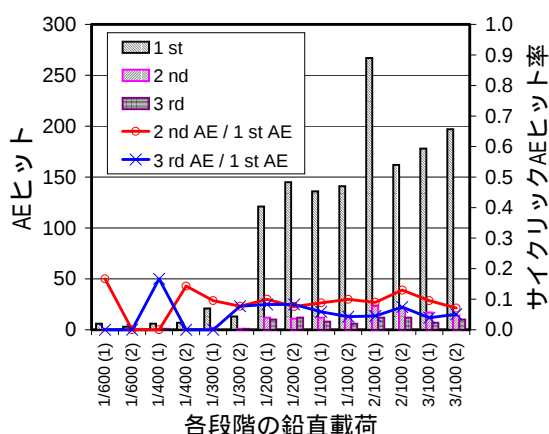


図-8 鉛直载荷のサイクル毎の AE 発生状況

有効であることが再認識された。

AE 平面計測網の有効性を検討するために、図-3 に示すフーチング表面に配置した 4 個の AE センサーからなる平面計測網と、杭頭部を包囲した立体計測網によって AE 源の標定や AE 特性の比較を行った。その結果の一例として、部材角が 3/100 になった水平载荷の後に、列車荷重を模擬した鉛直载荷による AE イベント・レート（各 5Sec 内のイベント数）の経時的な変化を図-7 に示す。この AE イベントは AE 源の標定ができた数を代表している。鉛直载荷に励起された AE は、主に既存の損傷箇所からの二次起因の AE であり、そのイベント数は一次起因の AE より少ないことが明らかになっている。また、平面と立体計測網による結果について、多少の差は生じるものが、全体的な傾向や特性が近似しているので、実務的には問題がないことが確認された。

図-8 に各水平载荷段階で 3 回実施した鉛直载荷毎の AE 発生総数を示す。図-8 中における○は、2 回目の AE 総数を最初の鉛直载荷で得られた AE 総数で無次元化した値、×は、同様に 3 回目の AE 総数を無次元化した値を示す。部材角 1/400 以降、2 回目の载荷で得られた AE 総数は 1 回目の 10%前後となる。3 回目以降に得られた AE

総数は、部材角 1/100 以降、1 回目の AE 総数の 5%前後に減少する傾向が見られる。この現象は、次のような実験条件に起因するものだと考えられる。

水平载荷を行う際に、上部構造物の死荷重による軸力が杭に作用されなかったため、曲げ変形による水平方向のクラックが卓越し、斜め方向のクラックが少なくなった。特に、部材角が 1/100 に達し、引張鉄筋が降伏した後、杭とフーチングの接合部に塑性ヒンジが徐々に形成され、杭体自身の損傷が進行し難くなった。

本模型杭が鉄道構造物の新しい耐震設計標準に準拠して作られたため、従来建設された構造物よりせん断破壊を防止するための帯鉄筋比が高く、せん断破壊のような斜め方向のクラックが発生し難い。

鉛直载荷の速度が遅く、通過中の実列車振動による動的な繰返し载荷を模擬できなかった。

以上の理由を検証し二次起因の AE 検査法の適用性を把握することを目的として、次のように二つ現場において、実橋脚・実列車荷重による AE 計測実験を行った。

4. 現場計測実験

(1) 現場計測実験

a) 実験概要

現場計測実験 は一車両編成の枝線上の橋梁を対象として行った。計測した構造物は建造してから 70 年以上が経過している無筋コンクリート橋脚である。本実験は、二次起因の AE 検査法の妥当性検討および衝撃振動試験法との比較を目的とした。衝撃振動試験法（インパクト）は、鉄道総研より開発され、現在鉄道分野で広く使われている橋梁下部工の健全度診断法であるため、本手法との整合性を検討する必要がある。図-9 に対象橋梁の全体図および関係する橋脚の衝撃振動試験による健全度の判定結果を示す。これらの橋脚のうち、3P と 4P は、十数年前に発生した地震により損傷を受けたものである。衝撃振動試験の固有値解析によると、3P と 4P の躯体剛性は 0.2 倍まで低下し、判定区分は健全度の低い A1 と A2 となっている。また、今回は比較検討を行うために、健全な橋脚 2P に対しても列車荷重により AE 計測を実施した。

計測は、AE の他に橋脚のひずみ、クラック変位、加速度および列車軸重を同時に測定し比較検討を行った。一橋脚に対して、次のような計測項目と数量を実施した。

AE

12ヶ所

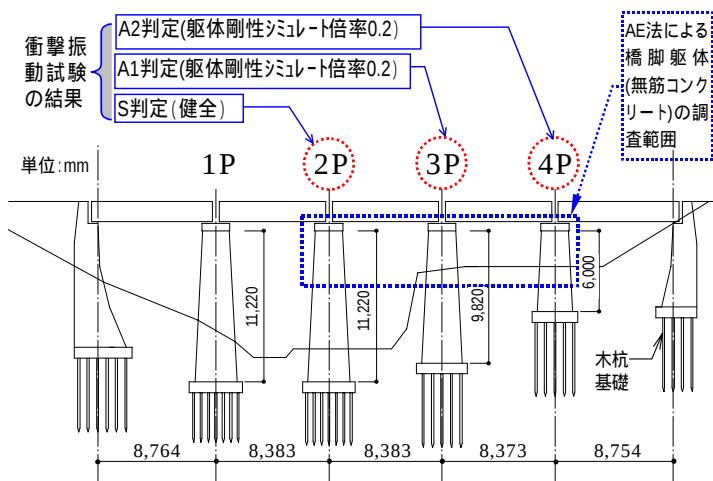


図-9 対象橋梁全体図および衝撃振動試験による判定結果

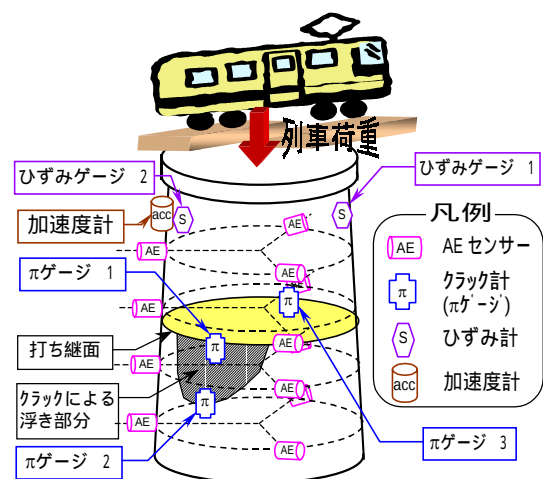


図-10 橋脚 3P のセンサ配置図

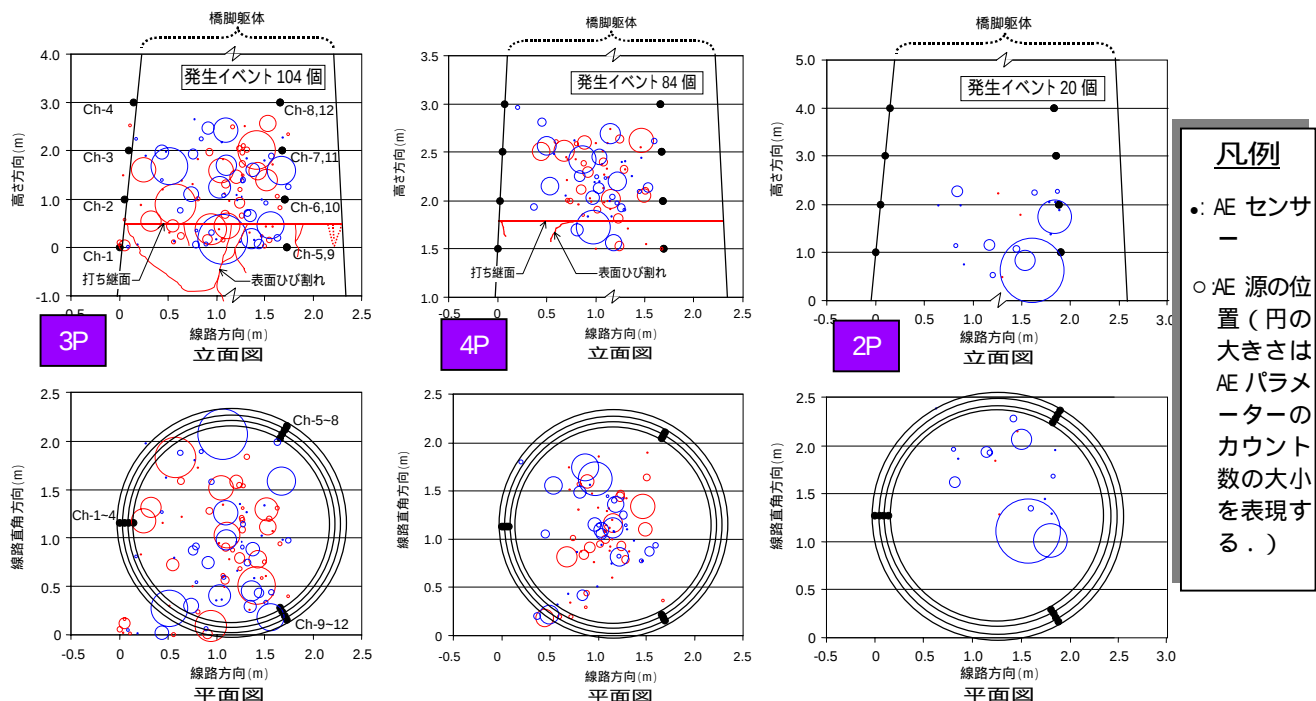


図-11 三次元位置標定結果 (AE 源の立面投影と平面投影) (左: 橋脚 3P, 中: 4P, 右: 2P)

クラック変位(P2を除く) 3ヶ所
ひずみ 2ヶ所
鉛直加速度 1ヶ所
列車軸重 2ヶ所

図-10 は橋脚 3P を例として、各測定器の配置状況を示す。AE センサーは、60kHz 共振型を使用して AE 信号のパラメータおよび波形を記録した。

b) 計測結果と考察

各橋脚の AE 源の三次元位置標定結果を図-11 に示す。そこで、同一の計測条件で同じ橋梁内変状がある橋脚と変状がない橋脚の間で、AE の発生状況に明瞭で差異が

得られた。衝撃振動試験により健全度が低いと判定された 3P と 4P 橋脚に発生した AE イベント数は 104 個と 84 個であった。これに対して、健全度の高い 2P は 20 個であった。これは、AE 法と衝撃振動試験法の結果が概ね一致することを示している。また、今回の計測では一車両編成の枝線上の橋梁を対象としたため、列車の軸重より換算した列車の荷重は 300kN 程度であったことから、小さな列車荷重でも二次起因の AE を誘発することができた。

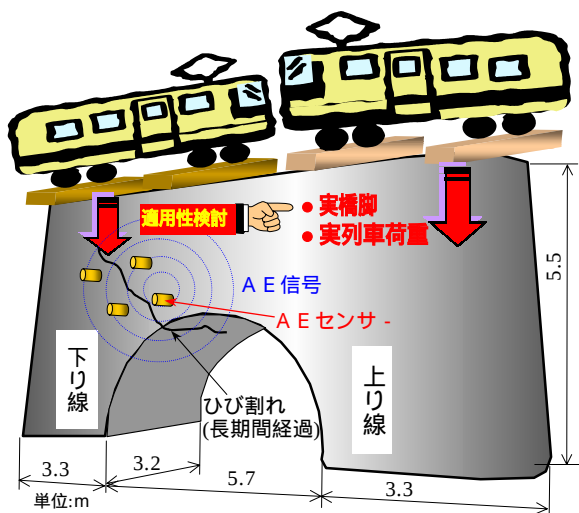


図-12 既存のひび割れのある橋脚および AE 計測模式図

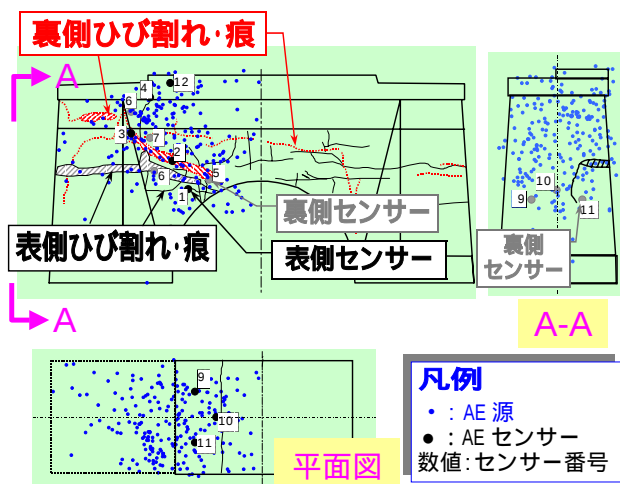


図-13 損傷状況および AE 源標定結果(センサー配置 A)

(2) 現場計測実験

a) 実験概要

現場計測実験 は都市部の本線（複線）橋梁で行った。対象構造物は、建造してから約 70 年以上が経過しているアーチ状の無筋コンクリート橋脚である。本橋脚の損傷位置および AE 現場計測の模式図を図-12 に示す。過去の地震や基礎の不等沈下によって生じたひび割れは橋脚を貫通していることが確認されている。また、図-13 に示すようなひび割れの補修痕跡が認められることから、損傷は数十年前に生じたものと考えられる。この線路には、1 日に上下線で約 420 本の列車が通過しており、橋脚は相当数の繰返し列車荷重を経験していると推測される。現場実験は、次の 3 点について精査・検証を行なった。

長期に渡って列車の繰返し荷重を受けた橋脚の損傷箇所からの二次起因 AE の検出

AE 源の標定および損傷程度の判定

実構造物における列車荷重による二次起因 AE の特徴計測は、60kHz 共振型の AE センサーを使用して AE 信号のパラメータおよび AE 波形を記録した。検討の目的に応じて、5 パターンの AE センサーの配置を設定した。そのうち、図-13、図-14 にセンサーは橋脚のクラック・ゾーンを包囲する配置（配置 A）と片側表面を密にする配置（配置 B）の 2 パターンのセンサー配置と計測結果を示す。

b) 結果分析

AE センサー配置 A により得られた AE 源の位置標定結果（3 次元）を図-13 に示す。そこで、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 源は内部クラックの擦れによる二次起因の AE であると考えられる。計測した 52 本の列車で得られた AE 源の数は、

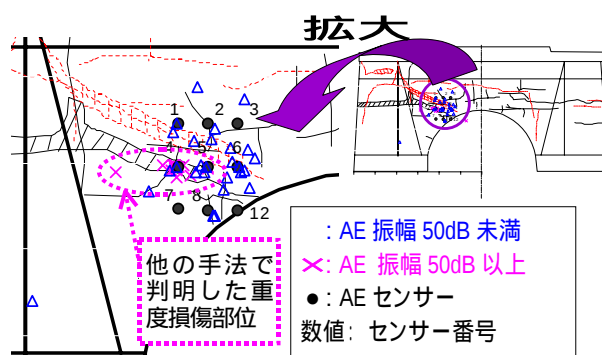


図-14 AE 波の振幅値とクラックの関係(センサー配置 B)

417 イベントであり、1 回の列車通過時に得られたイベント数は平均約 8 個となる。

図-14 には、センサー配置 B による AE 源の位置標定結果を示す。このプロットは、AE 源からセンサーまでの距離減衰を考慮した AE 源での AE 最大振幅値が 50dB 以上（×）と 50dB 未満（○）を分類して表示したものである。その結果、重度損傷と考えられる主要なクラック部に大振幅の AE 源が標定されることが確認され、AE 源の最大振幅値を検討することにより、相対的な損傷部の位置特定と損傷程度を把握することができると考えられる。つまり、異なる種類やケースの実構造物の計測を多数行い、最大振幅値および AE 特性に関するデータベースを構築することにより、AE パラメータによる損傷の規模を推定できる可能性がある。

c) 新しい評価指標の提案

実列車荷重で計測した橋脚の既存損傷部からの二次起因 AE のデータを用いて、日本非破壊検査協会が規定した AE に関する試験方法 NDIS2421⁹⁾を参考し、損傷評価の検討を行った。NDIS2421 は、カイザー効果（健全な構造物では履歴最大荷重まで AE が発生しない現象）を

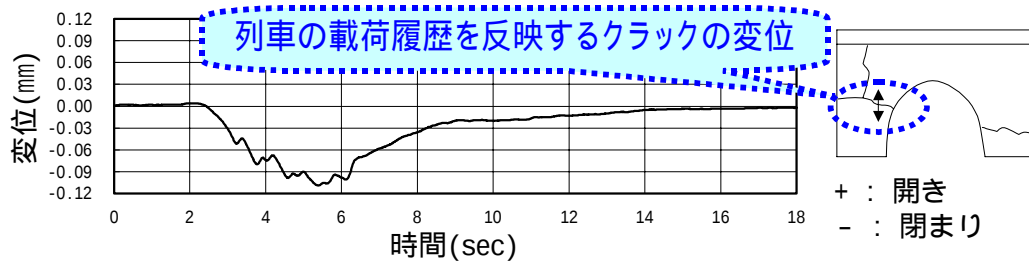


図-15 橋脚クラックの挙動を示す変位時刻歴

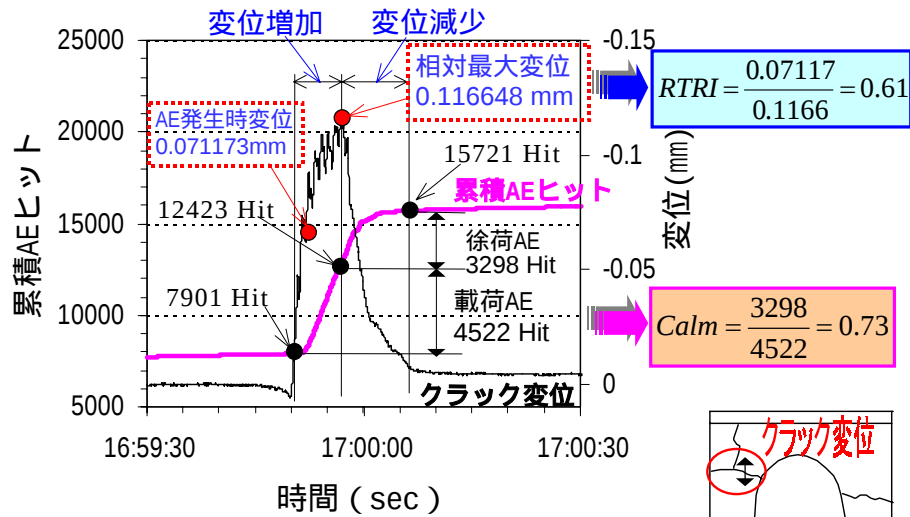


図-16 変位過程に基づく RTRI 比と Calm 比の算定例

利用した Load 比と Calm 比（不健全な構造物では，载荷時に比べて除荷時にも AE が活発になる健全性の指標）を組み合わせたものである．実構造物に対して上記手法による検討例は少ない．これは，Load 比を算出するための最大履歴荷重や作用した荷重を現地で計測することが困難なためと考えられる．本検討では，Load 比の代わりに RTRI 比(Ratio of repeated Train load at the onset of AE activity to Relative max load for Inspection period)を提案し，列車荷重による二次起因の AE に基づく損傷評価を試みた．つまり，本橋脚損傷の直接な原因は，数十年前の地震や基礎の不等沈下で発生した過大な内力によるものと推測されている．このような以前の最大履歴荷重を求められないため，RTRI 比で相対的な最大荷重を用いるわけである．また，計測条件によって，列車荷重を正確に把握できない場合には，列車载荷の履歴と相関する他の計測値（例えば，レールのひずみ，構造物の変形など）を用いることができる．今回の実験は，図-15 に示す計測した橋脚クラックの変位過程に基づき，式（1）と式（2）により RTRI 比と Calm 比を求めた．

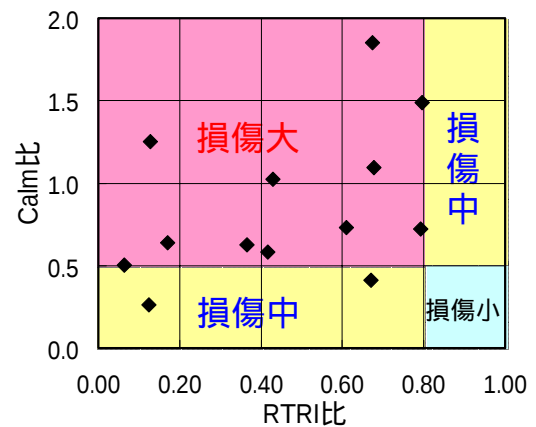


図-17 損傷程度評価マップ

$$RTRI = \frac{\text{変位量}_{\text{AE出現変位}}}{\text{変位量}_{\text{計測最大変位}}} \quad (1)$$

$$Calm = \frac{\text{AE hit数}_{\text{変位ピークから終了まで}}}{\text{AE hit数}_{\text{変位開始から変位ピークまで}}} \quad (2)$$

その一例として、図-16 は一列車通過中に発生した AE のヒット数とクラックの変位量から算出した RTRI 比と Calm 比を示す。図-17 は下り列車 13 本分の計算結果を用いた橋脚の損傷度マップを示す。プロットは概ね RTRI 比 0.8 以下、Calm 比 0.5 以上に得られている。また、今回の損傷判定結果は列車荷重との相関性が認められなかった。これは、損傷が一定の構造物では、列車荷重にかかわらず、常にある範囲内にプロットされることを表しているといえ、損傷評価法の妥当性を検証したものと見える。従来の経験を参考して、本橋脚の損傷基準値は、RTRI 比 0.8 以下、Calm 比 0.50 以上と考えることができる。これらの結果から、実列車荷重・実構造物においても損傷評価法の適用性について検証できたものと考ええる。

5. まとめ

本研究は、列車荷重により橋梁下部構造物の地震による損傷部から発生した二次起因の AE を利用した震害調査法の適用性を検討した。気中模型杭実験において、模擬列車荷重により杭体損傷部の二次起因 AE の誘発が可能であると確認された。また、フーチング表面に配置した平面計測網で得られた結果は、立体計測網による結果と多少の差があるが、実務的には問題がないことが明らかになった。二ヶ所の現場 AE 計測では、模型実験で得られた知見について検証を行った。実構造物では列車の繰り返し載荷を多数受けているにもかかわらず、二次起因の AE は数多く発生し、模型実験のように繰り返し鉛直載荷による AE 発生数の減少傾向は認められなかった。さらに、NDIS2421 の考え方を活用して、現場実務に適した新しい損傷評価指標 RTRI 比を提案し、Calm 比と RTRI 比を組合せた損傷評価手法を確立した。

今後、更に現場実験データを蓄積し、評価指標の精度向上を図るつもりである。また、最終開発目標である地中部材の損傷検出に向けて、基礎と地盤の摩擦の影響を引き続き検討し、本震害調査法の信頼性を高めていく予定である。

参考文献

- 1) Ohtsu M.: Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of AE source. *J. Geophys Res*, Vol. 96, pp. 6211-6221, 1991.
- 2) 橋梁基礎構造の形状および損傷調査マニュアル(案), 建設省土木研究所共同研究報告書, 整理番号第 236 号, 平成 11 年 12 月.
- 3) 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, 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, 土木学会, pp.127-134, 1999.
- 4) 羅休, 羽矢洋, 棚村史郎, 塩谷智基, 三輪滋, 中西康博: 列車荷重を利用した基礎の損傷探知法に関する基礎的研究(その 1 模型杭による AE 破壊実験概要), 第 56 回土木学会年次学術講演会概要集, CD 版, CS6-036, 2001.
- 5) Shiotani T., Shigeishi M., and Ohtsu M.: Acoustic emission characteristics of concrete-piles, *Construction and Buildings Materials*, Elsevier Science Ltd, Vol.13, pp. 73-85, 1999.
- 6) 社団法人日本非破壊検査協会: コンクリート構造物のアコースティック・エミッション試験方法, NDIS2421, 平成 12 年 7 月.

(2003.6.30受付)

STUDY ON AE TECHNIQUE FOR SEISMIC DIAGNOSIS OF BRIDGE SUBSTRUCTURES

Xiu LUO, Hiroshi HAYA, Tomoaki INABA,
Tomoki SHIOTANI and Yasuhiro NAKANISHI

While inspecting the earthquake-induced damage in invisible structures such as foundations with visual methods, it is generally needed to excavate the ground surrounding the foundation. As to railway structures this kind of excavation is impractical, because it costs high and also influences the running safety of trains. In the case of such active inspection methods as the ultrasonic testing or X-ray radiography are applied to the foundations, the input power should be strong enough against the decay due to high damping of massive concrete and soil around the foundations. In fact, generation of strong input waves is not easy. In particular, harmful radiation rays may threaten the safety of workers and environment. Therefore, the authors have developed a passive inspection method taking advantage of secondary AE (Acoustic Emission) generated at the damage parts of structures, which is induced by trains in servicing. Moreover, some model and in-situ experiments for AE monitoring were conducted to verify the adequacy of the proposed method.