

# 鉄道橋梁下部工の耐震診断に二次AE法の適用 性に関する検証

羅 休1・羽矢 洋2・稲葉智明3・塩谷智基4・

 <sup>1</sup>(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: <u>luo@rtri.or.jp</u>
<sup>2</sup>(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: <u>haya@rtri.or.jp</u>
<sup>3</sup>(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: <u>inaba@rtri.or.jp</u>
<sup>4</sup>(株)飛島建設株式会社 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,

鉄道構造物は、インフラ構造物の中でも先行して整備されたため、耐震診断を行う上で問題点を抱えて いるものも多い.特に、橋脚と基礎からなる橋梁下部工は、地中部にも主要な構造部材があり、それらの 目視調査は、掘削を伴うため困難といえ、耐震診断はより一層難しい.そこで、筆者らは模型供試体によ るAE(アコースティック・エミッション)実験および実現場のAE計測を行い、列車荷重により誘発され た二次起因のAEを利用した経済的な検査法を開発した.本研究では、震害を受けた橋脚や高架橋の柱を 対象として、二次AE法による損傷検査を行うことによって手法の適用性を検証した.また、削孔による 損傷調査および他の非破壊検査法(衝撃振動試験法や弾性波トモグラフィ法)との整合性を把握した.

Key Words : Seismic diagnosis, Secondary acoustic emission, Substructure, In-situ Experiment, Train loading

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部大地震の際に,数多くの基礎構 造物が損傷を受けた.それ以来,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も大き く、減衰の影響がさらに顕著である、このような大きな 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,場合よって は環境や人体に害を与えるため,現場への適用が困難で ある.そこで,筆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れた二次起因の AE(アコーステ

ィック・エミッション)を利用することにより,橋梁下 部工に適する便利かつ経済的な耐震診断手法を開発した <sup>1,2),</sup>.この提案法は,強力な列車荷重を利用した受動的 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.また,実鉄道構造物と供用中の列車を対 象とした AE 現場計測を数多く行い,提案法の有効性を 検証した<sup>3,4,5</sup>.

本研究では,震害を受けた鉄道の橋脚を対象に,削孔を 行いボアホールカメラにより損傷状況を調べて,二次 AE 法の診断結果と比較することによって本提案法の精 度を把握した.さらに,橋脚補修前おける健全度診断と 補修後における補修効果の確認について,本提案法と他 の検査法(衝撃振動試験法や弾性波トモグラフィ法)と の整合性を検討した.

## 2. 二次 AE 法の概要

鉄道橋梁の下部工は,地中部に主要な構造部材である 基礎を有するが,目視により検査を行うとすると,周辺



図-1 列車荷重による二次 AE 検査法および診断フロー

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,現場へ の適用が難しい.そこで,図-1に示すように列車走行に 伴い構造物の損傷部から発生する二次起因の AE を利用 した検査法を提案した.

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. 従来地震の際に,過大な外力によって発生した構造物の 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.この二次 AE 検査法を確 立するためには,これまでに数回の模型や現場実験を行 ってきた.ここではその中の一部分を簡単に紹介する.



本実験は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 平面計測網による杭頭損傷検出の可能性につい て検討を行った.実験における AE センサー配置の模式 図を図-2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.実験風景 および載荷・計測システムを図-3に示す.実験のステッ プは図-2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



図-2 模擬列車荷重による模型杭の AE 実験模式図



図-3 模型実験における載荷および計測システム

想定した正負交番繰返し水平載荷を行った.載荷は変 位制御によって,1/600,1/400,1/200,1/100(10,:引 張り鉄筋が降伏する時の部材角),20,30,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,水平載荷の各載荷段階において,繰返し鉛直載荷を行った.鉛直載荷は荷重制御で,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 の載荷と同時に, 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.

図-4は, 平面と立体 AE 計測網で標定された AE 源の 比較図である.この図から, 平面標定による杭体内の AE 源の分布は立体標定による結果と類似であることが 分かった.ただし, 平面標定による AE 源の数は立体標 定より少ない.その原因は, 平面標定に用いられた AE センサーの数が少ないからである(フーチング表面の 4 個だけ).この結果から,現場において掘削せずにフー チング表面の AE センサーにより杭頭の損傷を探知でき ることが示唆された.

また,平面と立体計測網による AE 特性の比較例として,列車荷重を模擬した鉛直載荷による 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-5



図-4 平面と立体計測網による AE 源の標定結果の平面投影



図-5 平面と立体計測網による AE 特性の比較(鉛直載荷)

に示す.鉛直載荷に励起された 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かになっている.平面 と立体計測網による結果の比較について,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.

#### (2) 現場計測実験

現場計測の対象構造物は,地震で被災された高速鉄道 のラーメン高架橋の柱部分である.この柱は,地上部で 顕著な損傷は認められなかったが,調査のために掘削し た後,地中部に種々の様式の亀裂が確認された.特に北 側面は,フーチング上部約1m位置に幅0.5mmのせん断 亀裂が特徴的であった.フーチング表面までの土被りは 約2.3mである.図-6に示すように,柱の基部に近づく ほど損傷程度が大きくなるため,AE センサー網の配置 は損傷程度に応じてA配置(損傷程度大)およびB配 置(損傷程度中)と設置した.

供用中の列車が通過した際に収録した AE のパラメー ターから標定した AE 源を図-7,図-8に示す.ここで, AE 源の大きさは,AE 源算出に寄与した全 AE ヒットの 平均値として示している.A 配置は上下線,各 6本,4 本の列車で,B 配置は上下線ともに各 2本の列車のみで の結果である.したがって,サンプリング母数が異なる ので,各配置(損傷差異)と AE 源の数量に関して言及 することはできないが,AE 源の規模(円直径の大き さ)について,A 配置は B 配置より大きいことが分かっ た.また,AE センサで検出可能な最大深度は,約2~3 m であることから,AE センサー網の外挿により目に見え ない基礎の損傷調査が可能であることを示唆している.



図-6 損傷程度に対応した AE センサの配置区間



3. 二次 AE 法精度の検証

本研究では,二次 AE 法の検査精度を把握するために, 地震によって内部損傷を受けたと思われる実橋脚を対象 として,削孔による損傷の実態調査と二次 AE 法の検査 結果を比較し,補修前・補修後における二次起因の AE 特性の変化および衝撃振動試験法や弾性波トモグラフィ 法との整合性を検討した.

(1) 補修前における二次 AE 法の検査

#### a) 対象構造物の概要

図-9に示すように,対象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り、その うちの P3 と P4 は、十数年前発生した地震により損傷を 受けた、衝撃振動試験の固有値解析によると、P3 と P4 の躯体剛性は大きく低下し、判定区分は健全度の低い A ランクとなっている、それに対して、P2 は健全な S ラン クとなっている、今回は比較検討のため、健全な橋脚 P2 に対しても列車荷重による二次起因の AE 計測を実施 した.

#### b) 二次 AE 法の検査結果

各橋脚の AE 源の三次元位置標定結果を図-10に示す. そこで,同一の計測条件で同じ橋梁内健全の橋脚と不健 全の橋脚の間で,列車荷重による二次起因の AE 源の発 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 P3 と P4 橋脚に発生した AE イ ベント数は,健全度の高い P2 橋脚よりはるかに多いこ とが分かった.図中 AE 源の大きさはイベントのパワー を意味し,その直径でイベントに寄与した全 AE ヒット の平均最大振幅値(電圧)を示している.したがって, イベントのパワーから推定しても P3 と P4 橋脚の損傷程 度は P2 橋脚より高いことが示唆されている.この結果 から,二次 AE 法と衝撃振動試験法の判定結果が概ねー 致したことが検証された.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 を誘発できることが確 認された.

- (2) 削孔による損傷調査
- a) 作業の概要

図-10に示す二次 AEの調査結果に基づき,損傷程度の

高い P3 と P4橋脚を補修することにした.二次 AE 源の 標定結果から, P3橋脚の内部に数多くの大きい AE イベ ントが存在することが分かった.この重度損傷と考えら れる P3橋脚内部の実状況を確かめるために,補修工事 の前に P3橋脚に対して削孔を行いボアホールカメラに よる観察やコアの蛍光剤圧入試験を実施した.また,補 修工事の効果を確認するために,補修後に二次 AE 計測, 衝撃振動試験および弾性トモグラフィも行った.図-11 に補修前・補修後における各検査法の作業流れを示す.

P3 橋脚の打続き不良およびそこから延びる形で亀裂 が発生している様子を図-12に示す.この橋脚に関して4 箇所の削孔および,BIPS (Borehole Image Processing System)による孔壁観察を実施した.図-13にボーリング の詳細図を示す.ボーリングは水平打継目下のコンクリ ートはく離塊を貫通するように最下部 AE センサからの 高さ0.5 m位置にNo.1, 1.36 m位置にNo. 2, 2.48 m位置に No. 3, さらにNo. 2 と No. 3 の間, 1.92 m高さから水平打



図-11 削孔による損傷調査および補修前・補修後における各検査法の作業流れ



図-12 P3橋脚の表面損傷状況



図-13 ボーリング詳細図(上図:立面図,下図:平面図)

継面を貫通するように鉛直下向き 30°に No.4を削孔した.ここで,削孔径は 50 mm であり,ボーリング孔とBIP システムの観察数量(長さ)は約 9mであった.また,蛍光剤圧入法の適用は,No.4 斜孔より採取されたコアを対象として,特に水平打続き目付近のコアを重点的に調べた.

b) 調査結果



図-14 No.4 斜孔のボアホールカメラ結果(左)とコアの状態(右)



図-15 No.4 斜孔のコア蛍光剤圧入後の紫外線照射画像

代表的な結果として図-14に示すように,No4 斜孔の ボアホールカメラ観察結果より,全区間で細かなセメン ト分の抜け落ちが観察され,骨材周辺の間隙も認められ た.全体的に変色している箇所が多く,劣化が推察され た.孔深 1.37 m に 0.5 mm 未満の開口をともなう亀裂が 認められ,この位置は橋脚の水平打ち継目と一致してい た.なお,図-15に示す蛍光剤圧入観察断面の紫外線照 射画像からは,打継目近傍においてセメント分の融脱に 伴う多数の空隙発生が原因と考えられる蛍光剤の浸透が, 明瞭に確認された(緑・白く映っている部分は深度の劣 化により蛍光剤が浸透し易い部分である).



図-16 P3橋脚打継部の補修状況



図-17 弾性波トモグラフィ法の解析断面

(3) 補修後における各検査法の比較

削孔および削孔後のコア観察と孔内カメラ観察を実施 した後,補修を行ない,再度,二次 AE 計測を実施した. また,他の検査法との整合性を検討するために,衝撃振 動試験法および弾性波トモグラフィ法も実施した.

補修は,重度損傷の中でも損傷程度が大きいと考えら

れた P3 橋脚について, 飛島建設(株)が開発した無機 系コンクリート改質剤 CS-21 と超微粒子セメントを混合 した注入剤を圧入・固化させることで行なった(図-16).P4 橋脚については,既往の有機系エポキシ補修剤 を用いた.また,二次 AE の計測は,補修前と同じ条件 で行った.

P3 橋脚における補修前・後に実施した弾性波トモグ ラフィ解析断面を図-17に示す.図-17に解析断面を, 図- 18(a)に補修前,(b)に補修後の結果を示した.なお, 図には二次 AE 法で計測された AE 源も一緒にプロット している.AE 源のパワーを代表する各 AE センサで得 られた AE 信号の平均最大振幅値(電圧)を円の直径で 書き表した.この図より,補修前においては,打継面近 傍の弾性波速度が2000 m/sの低速度域となっているのに 対し,補修後の結果ではその低速度域が消失し,4000 m/s 以上が中心となるまで顕著な速度増加が認められる とともに,AE 源のパワーを表す二次 AE の振幅値も大 幅に減少したことが明確に認められる.補修後における パワー小さな AE 源の発生原因として,注入後まもなく の間に注入材とひび割れ間の馴染み変形によるものと考 えられる.

また,AE 振幅規模別頻度分布の指標とした改良 b 値 による損傷度評価の可能性を検討した.地震の発生と似 ているように,通常,規模の大きな材料破壊頻度が規模 の小さな破壊頻度に比べて少なく,両者を対数表示した 場合,直線近似できることが知られている.その頻度を 累積表示した場合,近似直線の負勾配は b 値として呼ば れる.地盤,岩盤,コンクリートの破壊過程が改良 b 値 により定量化できることが過去の研究により検証されて いる<sup>6</sup>.今回,P3 橋脚における補修前と補修後の改良 b 値の変化を図-19に示す.この図から,改良 b 値は補修



図-18 P3橋脚における弾性波トモグラフィ法および二次AE法の結果に基づく考察



前の 0.0817 から補修後の 0.2508 に増加したことにより, 二次 AE 法においても b 値による定量化評価の可能が示 唆された.

なお,橋脚の健全度を量る上での指標である固有振動 数の把握を目的に衝撃振動試験を実施し,補修前・後に おける各々の固有振動数を計測した.その結果は.補強 前が 6.0Hz であったものが補強後においては 7.3Hz にま で上昇したが,これは打継部およびクラック発生箇所に 注入剤が適切にいきわたり,その結果、橋脚躯体の曲げ 剛性EIが改善されたことによるものと考えられる.

### 4. まとめ

本研究では,模型実験や実現場実験により,列車荷重 で誘発される構造物の損傷部位から発生する二次起因の AE を利用した耐震診断手法の適用性を検証した.また, 二次 AE 法の検討を深度化するために,震害を受けた鉄道 の橋脚を対象に,削孔を行いボアホールカメラにより損傷 状況を調べて,二次 AE 法の診断結果と比較することに よって本提案法の良い精度が確認された.さらに,橋脚 補修前おける健全度診断と補修後における補修効果の確 認について,本提案法と衝撃振動試験法や弾性波トモグ ラフィ法との整合性を検証した.今後,この手法を更な る簡便化して耐震診断の実務に行かしたいと考えている.

#### 参考文献

- 2)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.
- Luo X., H. Haya, T. Inaba, T. Shiotani, Y. Nakanishi: Damage evaluation of railway structures by using train-induced AE, Elsevier, *International Journal Construction and Building Materials*, 2004; Vol. 18, No.3, pp.215-223.
- 3)羅休,羽矢洋,稲葉智明,塩谷智基,中西康博:AE法による鉄道橋梁下部工の損傷調査法に関する実験的検証,鉄道総研報告,Vol.17,No.3,pp.29-34,2003/3.
- 4) 羅休,稲葉智明,塩谷智基,中西康博:列車荷重によるA Eを利用した下部工の震害調査法の現場検証(その1 現場 計測概要および AE 源の標定),第 59 回土木学会年次学術 講演会, CD-ROM, No.5-086, 20049.
- 5) 塩谷智基,中西康博,羅休,稲葉智明:列車荷重によるA Eを利用した下部工の震害調査法の現場検証(その2 損傷 評価指標に関する検討),第 59 回土木学会年次学術講演会, CD-ROM, No.5-087, 20049.
- Shiotani, T., Li, Z., Yuyama, S. and Ohtsu, M.: Application of the AE improved *b*-value to quantitative evaluation of fracture process in concretematerials, AEWG, Journal of Acoustic Emission, Vol. 19, pp.118-133, 2001. (2005. 3. 15受付)

## APPLICABILITY VERIFICATION OF SECONDARY AE TECHNIQUE FOR SEISMIC DIAGNOSIS OF RAILWAY BRIDGE SUBSTRUCTURES

#### Xiu LUO, Hiroshi HAYA, Tomoaki INABA, Tomoki SHIOTANI

Since railway structures were constructed precedently compared with other infrastructures, there are a lot of problems in seismic diagnosis. In particular, it is very difficult to diagnose the substructures embedded in ground with visual methods which need excavation. The authors, therefore, have developed a passive inspection method taking advantage of secondary AE (Acoustic Emission) induced by trains in servicing. In this study, the applicability of the proposed method is verified by applying the secondary AE technique to the piers and columns of railway structures, which were damaged during past earthquakes. Moreover, the consistency among the secondary AE technique and other nondestructive inspection methods, e.g. the impact vibration test and the seismic tomography, is well grasped.