

AE を用いた社会基盤構造物の損傷同定に関する基礎的研究

Fundamental Study on Damage Identification of Infrastructures by using AE Monitoring data

北海道大学大学院工学研究科 学生員 浅香康弘 (Yasuhiro Asaka)
 北海道大学大学院工学研究科 正員 小幡卓司 (Takashi Obata)
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)

1. まえがき

わが国では、第二次世界大戦後の国土の復興とその後の高度経済成長において、非常に多数の社会基盤施設が建設されてきた。これらの基盤施設は、今日では壮年期を迎えつつあると言われており、その老朽化はこのまま無対策で経緯すれば急速に進むことが予測されている。従来では、新たな道路ネットワークの形成を目指すような開発的資本投資も行われてきたが、近年の投資余力の減少や工事に起因する交通規制による社会的損失、あるいは環境への意識の高まり等から、今後は維持管理を強化し、必要に応じて補修を行うことにより、既存橋梁の長寿命化を目指すことが大きな課題となりつつある¹⁾。

供用中の構造物における健全度に対する現状把握は、これらを実現するための重要な要素技術となっているが^{2),3)}、構造物の損傷・健全度に対する工学的評価・判定は専ら専門技術者の判断に委ねられる場合が大半である。しかしながら、我が国においてはこのような技術者養成の教育システム等も整備されていないため、今後急激に高まるであろう人的ニーズに対応することは、極めて困難であると判断せざるを得ない。よって、上記の問題解決には、橋梁の損傷度・健全度診断に際して何らかのモニタリングシステムを構築し、測定から診断まで一貫して行える手法を早期に確立することが極めて重要であると考えられる。

一方、構造物の非破壊検査法の一つとして、材料の微小な変形や亀裂・クラックの発生に伴って、材料が内部に蓄えていたひずみエネルギーを弾性波として放出する AE (アコースティックエミッション) と呼ばれる現象を利用した、超音波領域を対象とした方法が知られている⁴⁾。このことから、構造物もしくは材料の表面に設置されたセンサーによって、打撃等によって励起された AE による弾性波を検出し、データ解析等を施すことで構造物や材料の損傷を把握することも十分可能であるものと推定される。したがって、このような超音波領域の弾性波応答からの損傷同定が可能となれば、モニタリングデータの維持管理への適用が容易に実現できる可能性を有するものと考えられる。

以上を踏まえて、本研究では AE センサーを用いたモニタリングシステムの構築と、AE モニタリングによる社会基盤構造物の損傷同定手法について考察を加えることを目的とする。具体的には、橋梁の部分模型を模して製作された鋼製供試体と凍結融解作用を受けるコンクリート供試体の 2 種類を対象にモニタリングを実施して、測定された AE データに対して、コヒー

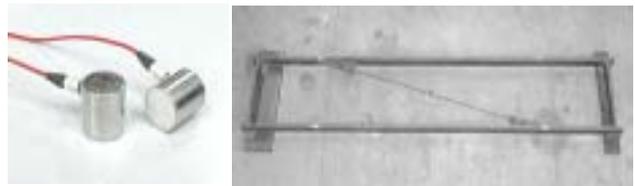


写真-1 AE センサー 写真-2 鋼製の橋梁部分模型

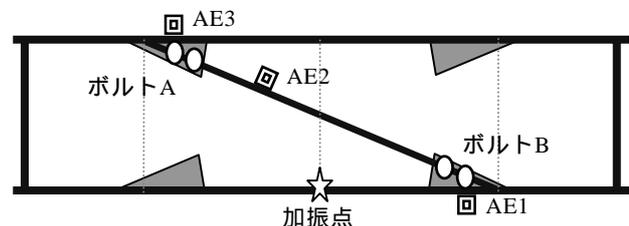


図-1 鋼製供試体の概略図

レンスを算出し、各損傷状態の比較検討を行うものとする。

2. モニタリングシステム

本研究における AE モニタリングシステムは、2 台の AE センサーと最大 500kHz までのサンプリングが可能な DAQ カードを PC に接続したものとなっている。AE センサーから入力されたデータは DAQ カードを介して PC に取り込まれ、PC 側のデータ測定用プログラムによって収録および解析がなされる。また DAQ カードは複数のデータを同時に測定可能であり、多点における AE モニタリングを実現することができる。本研究で用いる AE センサーは写真-1 に示したものとなっており、無指向性で周波数帯域が 35 ~ 100kHz の共振型センサーを使用している。共振型 AE センサーでは、特定の周波数帯域に対して高感度の測定が可能となる共振周波数を持っており、本研究では共振周波数が 50kHz のものを用いている⁴⁾。実験におけるモニタリングに際しては、AE データの測定に対するサンプリング周波数は 200kHz、データ点数は 32768 に設定し、各供試体に対して直接 AE センサーを接着固定することでデータの測定を行うこととした。

3. 実験供試体ならびに実験方法

前述のとおり本研究においては、鋼とコンクリートの 2 種類の供試体を対象とした損傷同定実験を行う。

まず鋼製供試体は、写真-2 に示すような橋梁構造物の主桁と横桁および横構によって構成される部分模型を想定して製作されたものである。主桁と横構はガセットブ



写真-3 測定状況

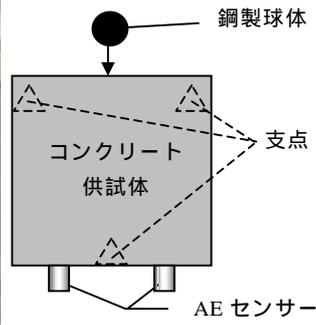


図-2 測定方法の概略図

レートを介して、ボルト A、ボルト B 計 4 つの高力ボルトによって接合されており、また供試体の両端は固定支持されている。図-1 は本研究で用いた供試体の概略図と AE データの各測点である。供試体に対する加振方法としては、鋼製球体の振り子運動打撃によって行い、加振点は片側の主桁中央とした。仮想的な損傷状態については、加振点から離れたボルト A の締付けトルクを健全状態の 240N・m から 200,160,120,80,40N・m、手締めと 40N・m ごとに減少させることで計 7 つの損傷状態を設定した。また、このとき加振点側のボルト B の締付けトルクは 240N・m に固定した。

次にコンクリート供試体については、凍結融解作用を受ける供試体を対象にモニタリングならびに損傷同定を実施する。実験対象となるコンクリートの供試体は、150×150×60mm の立方体の形状として、水セメント比 W/C50%、材齢 200 日、圧縮強度が 50Mpa 程度のものを計 32 体用意した。コンクリート供試体は、材齢 200 日で一度載荷試験を実施して、ひび割れを発生させた後に凍結融解実験を行い、最終的に強度試験を行うというものである。AE データの測定状況ならびに概略図はそれぞれ写真-3 と図-2 に示したとおりである。加振方法は鋼製球体の振り子運動打撃によって行い、打撃面の反対側に対称に設置された 2 台の AE センサーによってモニタリングを行う。これらのモニタリングデータに対して解析を行い、健全状態、載荷試験後、凍結融解後と異なる 3 つの損傷状態に対する比較検討を行うものとする。ここで供試体の損傷状態について言及すると、まず「健全状態」は損傷のない状態であり、供試体の一軸圧縮強度の測定結果における平均値は 48Mpa 程度であった。「載荷試験後」は凍結融解に先立って実施された載荷試験により 1000μ 程度のひび割れが発生した状態であり、強度の平均値は 38Mpa 程度となっている。「凍結融解後」は凍結融解作用を受けた後の強度の平均値が約 28Mpa となった状態であり、3 つの損傷状態のうち最も損傷が進行したケースとなっている。

4. 解析手法

前述のとおり、本研究では健全度あるいは損傷度評価を行うための解析手法として、AE データに対してコヒーレンスを算出し、周波数特性の変化に着目することで、各損傷状態の比較検討を行うこととした。

一般に、コヒーレンスは 2 つの信号間の関連性の強

さと位相差を表すもので、一般的には卓越振動モードの推定等に用いられている。ここで 2 つの時系列データ X_m, Y_m に対するコヒーレンスならびに位相差はそれぞれ以下の式によって得られる。

$$coh^2 = \frac{|G_{xy}|^2}{G_x \cdot G_y} \dots \dots \dots (1)$$

$$\theta_{xy} = \tan^{-1} \frac{Q_{xy}}{K_{xy}} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 G_{xy} はデータ X_m, Y_m に対するクロススペクトル、 G_x, G_y はそれぞれ X_m, Y_m のパワースペクトルを表している。また K_{xy} はクロススペクトル G_{xy} の実部、 Q_{xy} は虚部を示しており、(2)式により位相差 θ_{xy} が得られる⁵⁾。

本研究では、鋼製供試体については同じ測点で得られた健全時と損傷時のデータ間でコヒーレンスを算出することで周波数特性の変化を検討する。また、コンクリート供試体においては、2 個のセンサー間のコヒーレンスを求め、3 種類の健全・損傷状態での比較を行った。

5. 実験・解析結果とその考察

まず鋼製の橋梁部分模型を対象に損傷同定実験を実施し、解析結果の比較検討を行った。前述のように、鋼製供試体に対してはボルト A 部の高力ボルトの締付けトルクを 240N・m から手締め状態まで 40N・m ごとに減少させることで計 7 つの損傷状態を設定し、AE データのモニタリングを行った。初めに、測定された AE データに対してフーリエスペクトルを算出し、各損傷状態における周波数特性の把握を試みた。一例として、全 3 測点における締付けトルク 240,120N・m、手締め状態の 3 つの損傷状態におけるフーリエスペクトルを図-3 に示す。図-3 に着目すると、ボルト B 付近に設置したセンサー 1 では、加振点に近く損傷箇所から離れていることもあり、どの損傷状態においてもほぼ同様の周波数応答となっている。一方、斜材接合部のボルト A に与えた損傷の影響が大きいと思われるセンサー 2,3 においては、240N・m から 120N・m まではほぼ変化がみられない結果となったが、手締めの状態まで損傷が進むことによって卓越周波数成分にある程度の変化が見られた。

さらに AE データに対して、前述のとおり、健全状態である 240N・m と各損傷状態の 2 つのデータ間におけるコヒーレンスを算出して、健全時のデータとの関連性の変化から損傷状態の把握を試みた。図-4 には、AE センサー 3 における 240N・m と 160N・m、240N・m と 80N・m、240N・m と手締めの測定データを用いて 3 ケースのコヒーレンスを算出した結果を示している。図-4 より、フーリエスペクトルの卓越成分が見られた 10kHz 以下の周波数範囲に着目すると、損傷の増大に伴い、240N・m における AE データとの相関が徐々に低くなっていく傾向を捉えることができる。具体的には、240N・m-160N・m 間ではコヒーレンスがほぼ 1 に近い値となっているが、240N・m-80N・m 間のコヒーレ

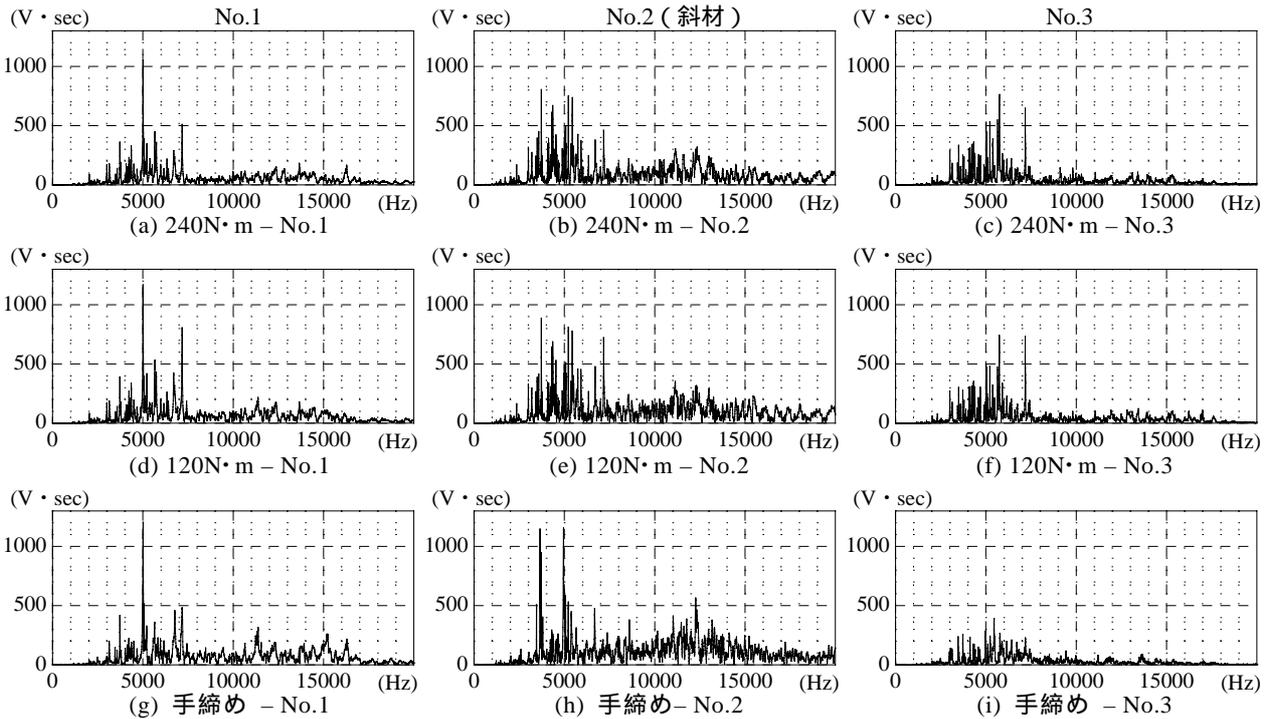


図-3 AEデータのフーリエスペクトル(鋼製供試体)

ンスでは約 0.6~0.8 に下がり、240N·m-手締め間についてはさらに大きな低下が見られ、0~0.4 程度となっている。これは、締め付けトルクの変化に伴う剛性低下が少ないと考えられる 160N·m までは、160N·m の場合と健全時で得られた AE データ間のコヒーレンスはかなり高い相関性を示すが、徐々に損傷が増大することで構造物内を伝播する AE データの周波数応答に変化が生じ、健全時との関連性が低くなったものと推定される。

次にコンクリート供試体を対象として AE モニタリングならびに損傷同定を実施した結果について記述する。コンクリート供試体に対しては、健全状態、載荷試験後、凍結融解後と異なる 3 つの損傷状態に対して測定された AE データから、フーリエスペクトルとコヒーレンスを算出し、損傷に伴う定性的傾向について考察を加える。コンクリート供試体については、供試体側面に対称に設置された 2 つの AE センサー間においてコヒーレンスを算出し、両データの相関関係の変化から損傷状態に対する比較検討を試みた。結果の一例として、図-5 には 32 個の供試体のうち、ある一つの供試体の 3 つの損傷状態におけるフーリエスペクトルを、図-6 には同じ供試体のセンサー1,2 の AE データを用いてコヒーレンスを算出した結果を示す。

まず図-5 に示したフーリエスペクトルの算出結果に着目すると、健全 載荷後 凍結融解後の損傷の増大に伴い、卓越周波数が徐々に低下していることがわかる。スペクトルの強度の大小にばらつきはあるものの、このような傾向はほぼすべての供試体で確認された。これは、ひび割れや材料そのものの劣化のような損傷によってコンクリート供試体の剛性が低下したことに起因するものと思われる。

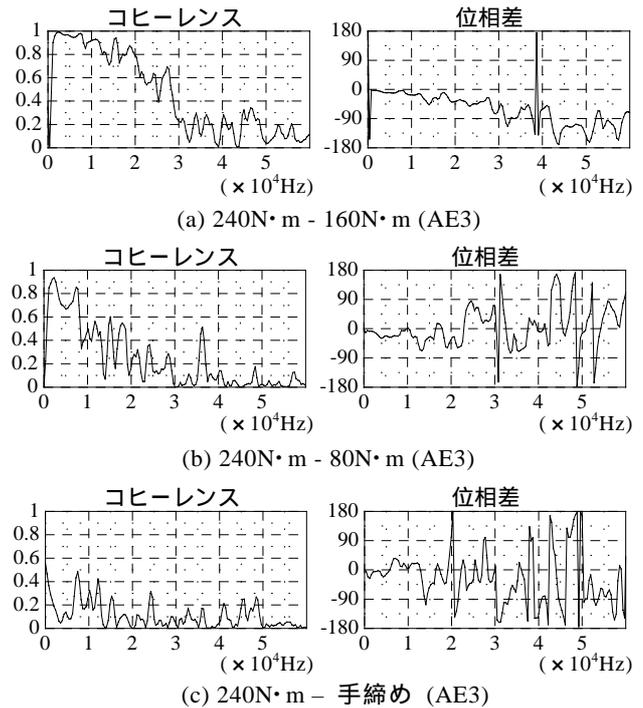


図-4 コヒーレンスと位相差(鋼製供試体)

コヒーレンスを算出した図-6 からは、フーリエスペクトルに見られたそれぞれの卓越周波数成分の周波数帯域に着目すると、健全状態ではコヒーレンスが 1 となり、センサー1,2 間の関連性が高くなっているが、損傷の増大に伴い、関連性が徐々に弱くなっている傾向が見られる。また、各状態を比較すると、損傷の増大に伴いコヒーレンスは明確に変化していることがわかる。これは、供試体側面に対称に設置された AE センサー1,2 において、健全状態ではほぼ同様なデータ

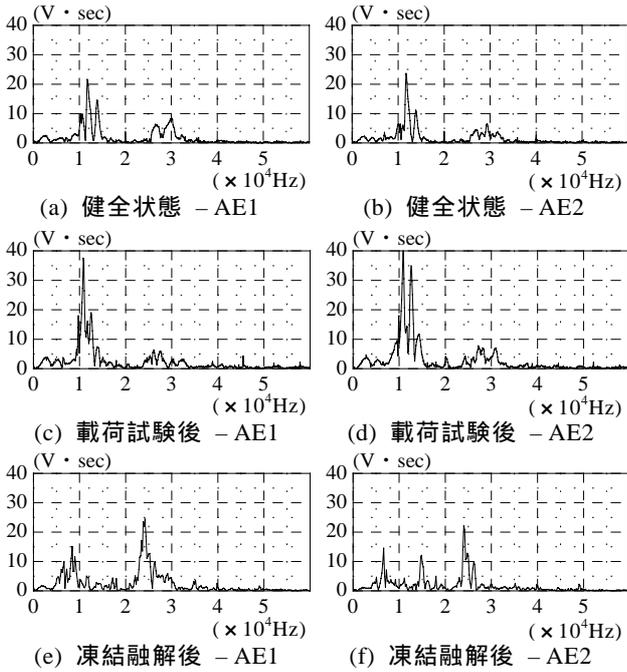


図-5 AEデータのフーリエスペクトル(コンクリート)

が得られるが、損傷の増大により供試体に生じるひび割れ等の影響から、両データ間に時間遅れや周波数特性の変化が現れ、コヒーレンスが低下したと思われる。このことから、多点に設置された AE センサー間においてコヒーレンスを算出して、損傷に伴う相関関係の低下を捉えることで損傷状態をある程度把握することも可能であると考えられる。

6. あとがき

以上のように、本研究は AE モニタリングシステムを用いて、鋼とコンクリートの供試体を対象とした損傷同定手法について検討を加えたものである。

まず鋼製供試体に対して AE モニタリングを実施して解析を行った結果、フーリエスペクトルからは、非常に損傷が増大した場合には、損傷箇所に近いセンサーでは卓越周波数に変化が見られたものの、損傷があまり小さくなく、センサー位置も損傷箇所からある程度遠い場合にはスペクトルの変化は判然としない結果が得られた。一方、健全・損傷間のデータでコヒーレンスを求めた結果においては、比較的損傷が小さい場合においてもデータ間の関連性は明確に変化し、ある程度容易に損傷の影響を評価でき得る可能性を有するものと思われる。

次にコンクリート供試体を対象とした解析結果について、フーリエスペクトルの算出結果からは、損傷の増大に伴い、卓越周波数が徐々に低周波数側に推移している傾向が確認された。また、コンクリート供試体に対称に設置された AE センサー1,2間のコヒーレンスを算出することにより、各損傷状態における卓越周波数帯域において、鋼製供試体と同様にデータ間の関連性の低下傾向を把握することができた。このことから、多点に設置された AE センサー間においてコヒーレンスを算出して、損傷に伴う相関関係の低下を捉え

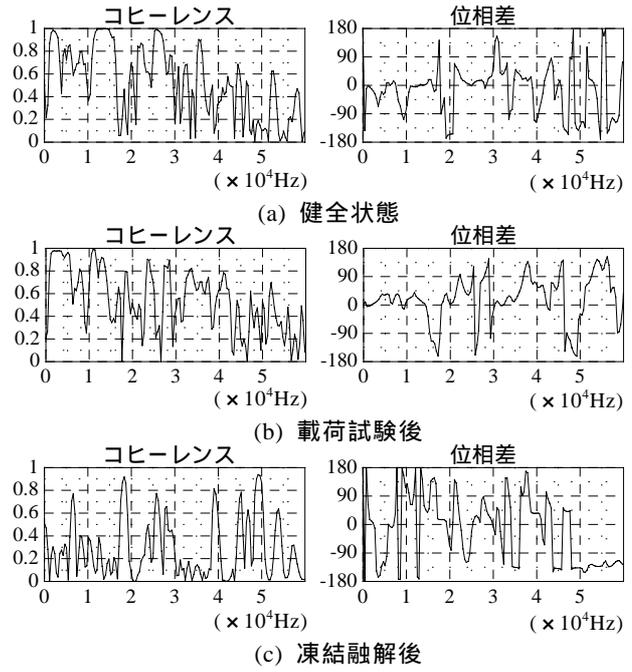


図-6 コヒーレンスと位相差(コンクリート)

ることで損傷状態を把握することも可能であると考えられる。したがって、AE モニタリングで得られたデータに周波数領域における解析法を適用すれば、社会基盤構造物の損傷に対する定性的評価は可能であると推定される。

参考文献

- 1) 西川和廣:道路橋の寿命と維持管理,土木学会論文集, No.501/I-29, pp.1-10, 1994.
- 2) 土木学会:橋梁振動モニタリングのガイドライン,土木学会, 2000.
- 3) 近藤一平,濱本卓司:振動台実験のランダム応答データを用いた多層構造物の損傷検出,日本建築学会構造系論文集,第473号, pp.67-74, 1995.
- 4) Nippon Physical Acoustics, Ltd ホームページ: <http://www.pacjapan.com/>
- 5) 橋梁振動研究委員会:橋梁振動の計測と解析,技報堂出版, 1993.
- 6) 加藤雅史,高木保志,島田静雄:PC 橋梁の破壊に伴う振動性状の変化に関する実験的研究,土木学会論文集, No.341, pp.113-118, 1984.
- 7) 小幡卓司,林川俊郎,佐藤浩一,水草浩一:振動モニタリングデータに基づいた鋼橋の損傷同定に関する基礎的研究,構造工学論文集, Vol.46A, pp.531-538, 2000.
- 8) 阿部雅人,藤野陽三,長山智則, Hong Vu-Manh:振動計測に基づく非比例減衰系の非反復損傷同定法,応用力学論文集, Vol. 5, pp.855-862, 2002.
- 9) 小幡卓司,植田康平,宮森保紀,林川俊郎,佐藤浩一:鋼橋の損傷同定における音響モニタリングの適用に関する基礎的研究,応用力学論文集, Vol. 5, pp.827-836, 2002.