

# AEヘルスマonitoringシステムの構築に関する一考察

Consideration on Establishment of AE Health Monitoring System for Steel Infrastructures

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 葛西祐介 (Yusuke Kasai)  
株式会社エーティック 正員 小幡卓司 (Takashi Obata)

## 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、多数の社会基盤施設が建設されてきた。従来では、新たな道路ネットワークの形成等の開発的資本投資も行われてきたが、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から、維持管理ならびに補修・補強の強化による既存構造物の長寿命化の実現は、近年においては土木技術者に対する社会の要請と言っても過言ではないと考えられる<sup>1)</sup>。

供用中の橋梁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<sup>2),3)</sup>、構造物の損傷・健全度に対する工学的評価・判定は専門技術者の判断に委ねられる場合が数多くある。我が国においても、検査・診断技術者のための教育や資格等が徐々に整備されつつあるが、今後急激に高まるであろう人的ニーズへの対応は、今だ困難であると判断せざるを得ない。よって、この問題解決には橋梁の損傷度・健全度診断に用いる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確立することが重要であると考えられる。ここで、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、超音波領域における検査方法が知られている<sup>4)</sup>。しかしながら、この方法を社会基盤構造物へ適用することを考慮すると、頻度解析などの方法ではコンクリートのひび割れなどに伴って発生する突発型のAEの発生回数を常時モニタリングする必要があるため、検査時における能動的な加振によってAEを検出、解析し、健全・損傷度を定量的に評価する手法を構築することが望ましい。

以上を踏まえて、著者らは社会基盤構造物の損傷同定に用いるために、橋梁の一部分を模して製作された2種類の鋼製供試体を対象にAEモニタリングを実施した。

二つの供試体にセンサーを設置し、仮想的な損傷を与えることによって、AEの伝播速度にどのような変化が生じるか、損傷箇所からの反射波がどのように観測されるか等の検討を行い、考察を加えた。よって、本研究はこれらの結果を報告するものである。

## 2. モニタリングシステム

本研究では4chのAEモニタリングシステムを構築し、二つの供試体に対して打撃による高周波振動応答を発生させ、健全時および損傷時における測定を行った。

具体的には4基のAEセンサーと、写真-1に示すよう



写真-1 AEモニタリングシステム



写真-2 センサー設置状況

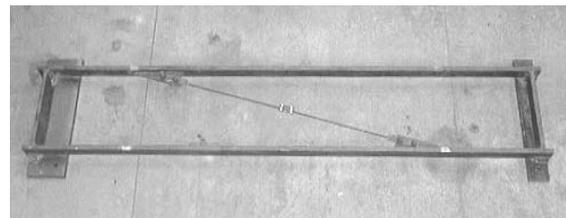


写真-3 鋼製供試体1



写真-4 鋼製供試体2

表-1 鋼製供試体1 諸元

部 材	$l \times h \times b$ (mm)
主桁, 端横桁	平鋼 2500×65×22
	平鋼 400×65×22
横構 (斜材)	平鋼 1120×21×4
ガセットプレート	平鋼 263×9×69

表-2 鋼製供試体2 諸元

部 材	$l \times h \times b$ (mm)
主桁, 横桁	H鋼 4800×125×60
	H鋼 600×125×60
横構 (斜材)	山形鋼 1200×50×50

な、センサーから入力されたデジタル信号を PC に取り込むための DAQ パッドとノート PC からなるものである。写真-2 にセンサーとその設置状況を示す。AE データの測定に関しては、サンプリング周波数 300kHz、データ点数 32768 個でモニタリングを行う。供試体表面に設置したセンサーから入力された AE データは、専用アンプ(増幅器)を経由して、40dB、すなわち振幅増幅比 100 倍として、DAQ パッドを介して PC 側のデータ測定用プログラム (Labview) によって記録される。

### 3. 実験方法

本研究の実験供試体は、写真-3 と写真-4 に示すように橋梁構造物の横構と主桁 1 パネル分を模した部分模型(以下、供試体 1 とする)と、主桁、横桁、横構からなる橋梁全体を模した模型(以下、供試体 2 とする)の 2 種類である。表-1,2 にそれぞれの供試体の諸元を示す。なお、

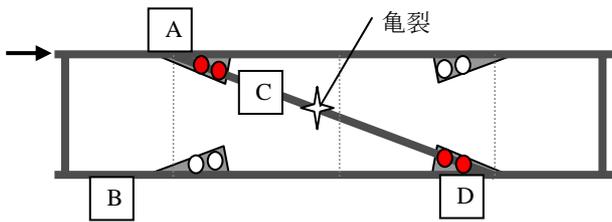


図-1 供試体 1 概略図とセンサー配置

仮想的な損傷状態は斜材に深さ 3 段階の亀裂を発生させることで表現することとし、供試体 1 では亀裂 00mm、10mm と 20mm、供試体 2 では亀裂 00mm、25mm と 50mm の各 3 ケースの損傷状態とした。

実験方法に関しては、図-1、2 の矢印の位置に鋼球の振り子運動を利用した打撃を与え、センサーの配置は伝播速度の変化の検出可能性や、反射波を捉えるために有効な位置、このシステムの実用化などを考慮した上で予備実験を行い決定し、測定を行った。供試体 2 のセンサー A<sub>f</sub> および A<sub>w</sub> はそれぞれ主桁の上フランジとウェブ部に設置することとした。なお、各ボルトの締め付けトルクは 240Nm としている。

### 4. 測定・解析結果とその考察

図-3 に供試体 1 のセンサー C の各損傷状態における測定結果を示す。センサー C は亀裂の最も近傍に設置され

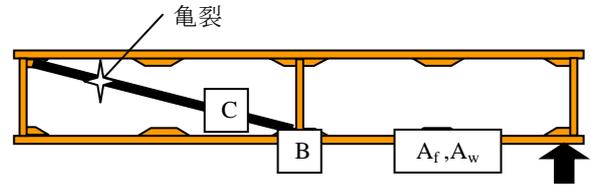


図-2 供試体 2 概略図とセンサー配置

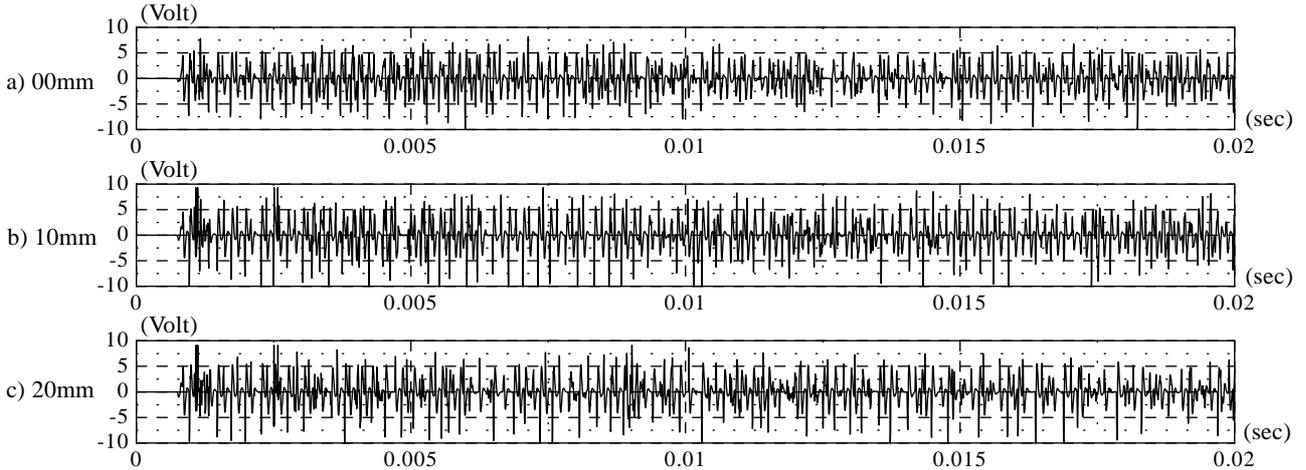


図-3 AE 波形 (供試体 1・センサー C)

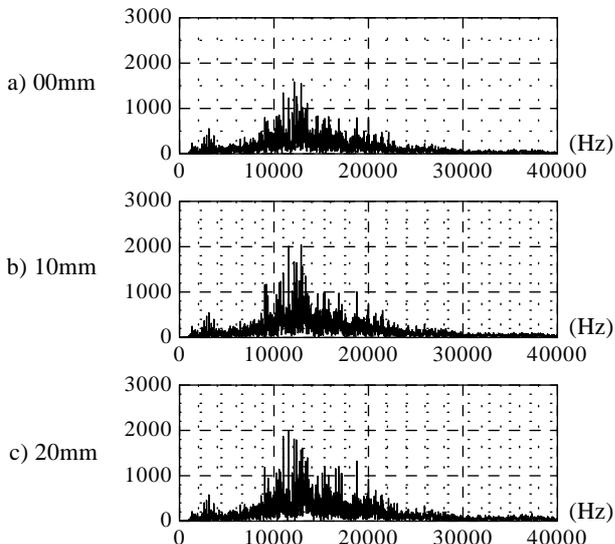


図-4 フーリエスペクトル(供試体 1・センサー A<sub>w</sub>)

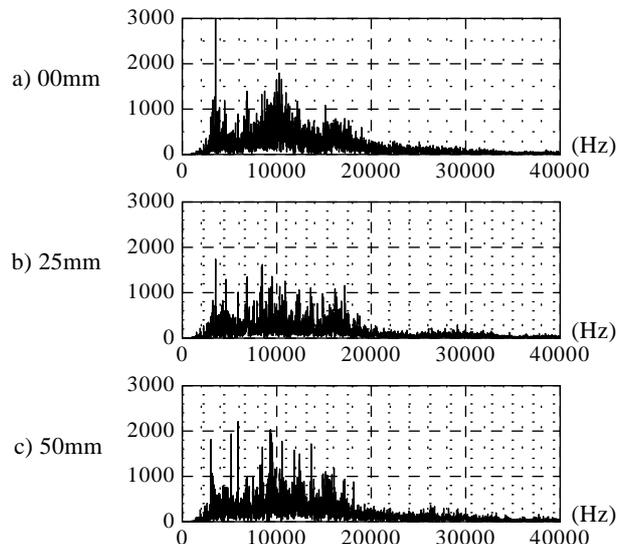


図-5 フーリエスペクトル(供試体 2・センサー C)

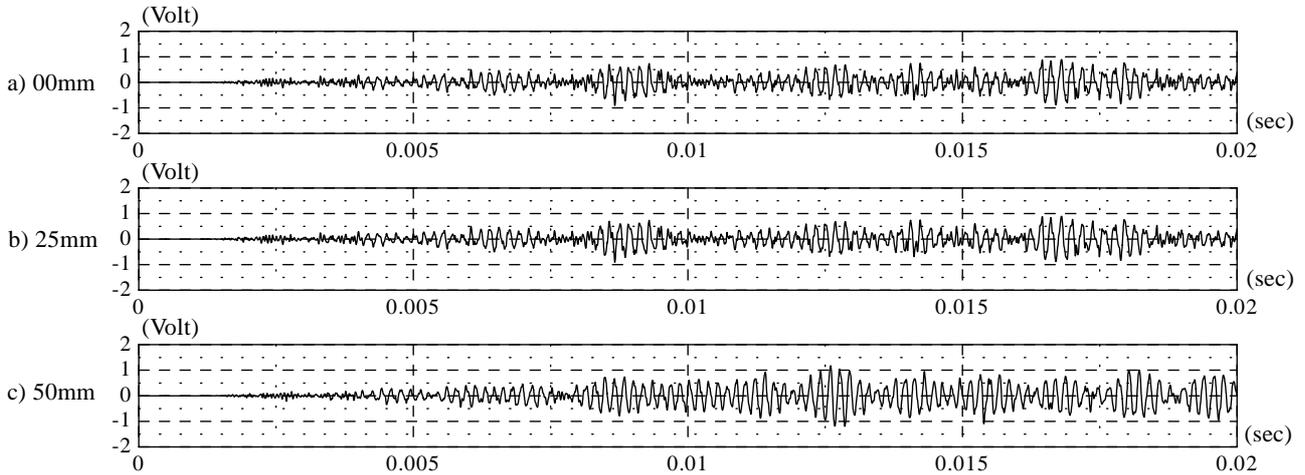


図-6 AE 波形 -5000~6000Hz- (供試体 2・センサーC)

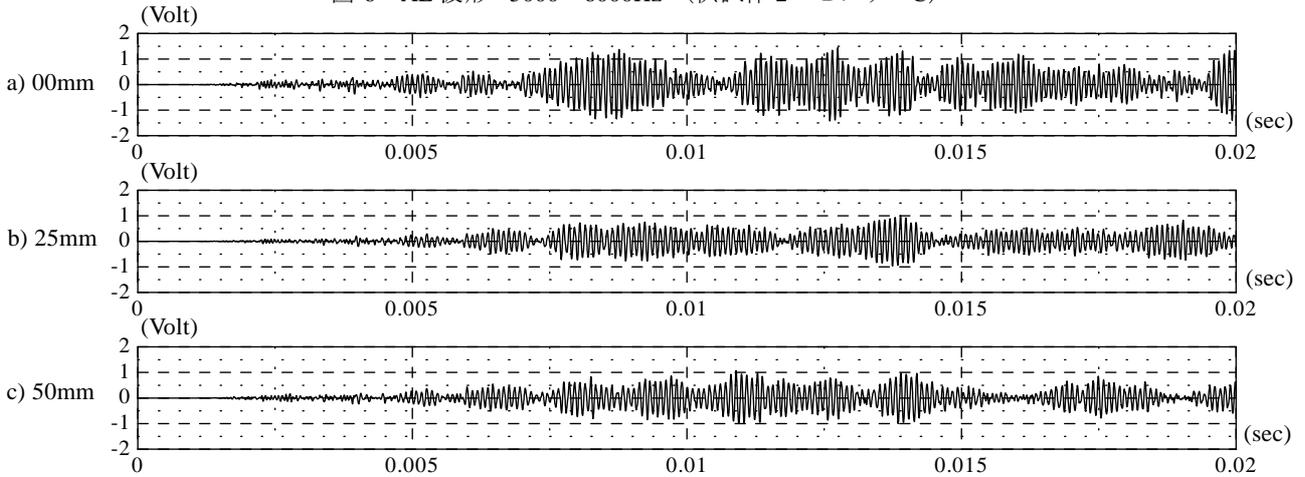


図-7 AE 波形 -10000~11000Hz- (供試体 2・センサーC)

たセンサーであることから、損傷が進行するにつれて反射波の影響により波形に何らかの変化が生じることも予想されたが、明確な変化を確認することができなかった。二つの供試体の全実験ケースに関して確認を行ったが、波形に多少の変化が生じるものはあるものの、反射波の影響を明確に捉えることができたものはなかった。これは反射する波は存在するものの加振点からの波が支配的に働くためであり、供試体の規模が小さいことから位相差も明確に発生しないためと推定される。よって、測定された波を直接精査することによって反射波を捉え、そこから損傷箇所までの距離を求めることは困難であると考えられる。

#### 4.1 フーリエスペクトル

周波数によっては反射波の影響を受けやすい帯域があると考え、フーリエスペクトルを算出した。一例として図-4、5に供試体2のセンサーA<sub>w</sub>およびCからの算出結果を示した。センサーA<sub>w</sub>に関しては損傷から距離があり、また加振点近傍に設置されたためか、損傷が進行してもスペクトルにはほとんど変化がみられない結果となった。しかし、センサーCでは損傷に伴い明らかに応答特性が変化する。これは亀裂の進展に応じて剛性低下による比較的低い振動応答の増加と、概ね20000Hz程度の帯域における反射波が増大したと推定され、結果として損傷時の方がフラットな応答特性を有するものと考えられる。

この傾向は供試体1からの算出結果や、供試体2で加振点を変えて実験を行った場合でも、卓越する帯域は若干変化するものの、同様の傾向が確認された。

#### 4.2 フィルタによる抽出

上述したように反射波の影響を受けることでスペクトルが大きく変化する帯域の存在が確認された。この帯域をバンドパスフィルタで抽出し、波形を確認することで反射波が入力された時間や、そこから損傷箇所までの距離を求めることが可能か検討を行った。

一例として供試体2のセンサーC、5000~6000Hzと10000~11000Hzにバンドパスフィルタをかけ、抽出した波形を図-6、7に示す。

図-6に関しては、亀裂が00mmと25mmの時の波形を比較するとほとんど違いが見られないが、亀裂が50mmになると約0.01秒から明らかに違う波形を示している。フーリエスペクトル算出結果からもこの帯域はスペクトルが損傷の増大に伴い増加することが確認できており、その結果と合致する波形となった。また図-7では亀裂が25mmの段階で健全時とは大きく違う波形を示す結果となり、25mmと50mmでは比較的变化の少ない応答特性を示している。

一般的に、健全時と損傷時の波形を比較し、その違いが確認された点から波の伝播速度を利用することで、亀裂までの距離を算出することが可能であると考えられる。

表-3 距離算出結果

センサー	亀裂深さ (mm)	算出結果 (m)	実際の距離 (m)
センサーA <sub>f</sub>	25	1.2336	2.7
	50	5.4939	
センサーA <sub>w</sub>	25	1.6205	2.7
	50	2.3521	
センサーB	25	1.7921	1.7
	50	1.9913	
センサーC	25	1.1928	1.0
	50	1.2021	

が、図-6、7からわかるように波形の違いは確認できるものの、反射波が入力された点を明確に捉えることは現時点では容易ではないと思われる。今後は抽出する帯域やバンドパスフィルタの設定を変更し、反射波をより明確に捉えられるよう検討を行っていく必要がある。

#### 4.3 距離の算定

波形の変化を精査することによって、反射波が入力されている点を捉えることは難しいことがわかった。しかし、波形に変化が現れているのは確かであり、何らかの方法で反射波をセンサーで十分に捕捉できれば、損傷箇所までの距離の算定を行うことは可能であると推定される。

そこで、健全時と損傷時の波形を重ね合わせて比較し、二つの波に一定の変化が現れた点を反射波がセンサーに到達した時間と考え、損傷箇所までの距離を算出するプログラムを供試体2を対称に作成した。

具体的には、MATLAB内に波形のデータを読み込ませ、移動平均をとった後、最大値で全体を除き無次元化する。これを亀裂00mm、25mm、50mmのそれぞれで行い、00mmの波と比較して25mm、50mmの波の振幅が5点連続で30%以上変化する箇所を反射波が到達した時間と考え、伝播速度を利用して距離を算出する。移動平均を取り、無次元化することで、各実験での入力の変異に対応でき、振動特性の変化のみを捉えることが可能であると思われる。30%の振幅の変化に関しては、各センサー、実験ケースのフーリエスペクトルやパワースペクトル密度値の算出値を元に決定し、反射波が到達すると、明確な応答の変化は一定時間継続すると考えられるため、今回はデジタルデータで5点が連続して変化した場合を設定した。

算出結果を表-3に示す。算出結果から明らかにように亀裂の近傍に設置されたセンサーほど実際の距離と誤差の少ない結果となった。これは亀裂との距離が近いほど反射波の影響を受けやすく、波形が明確に変化したためであると考えられる。一方で、加振点からの入力の影響が支配的に働くと、損傷箇所までの距離を正確に求められない傾向にあることがわかる。

以上のように、波形を無次元化し、移動平均でノイズの平滑化を行ったのみでも、ある程度損傷位置の同定が行える可能性を有すると思われる結果が得られた。したがって、適切なフィルタリング、スペクトルの最大値を一致させることによる入力の平均化、あるいは共分散関数等の統計的処理を加えることによって、さらに正確な位置同定も行えると推定される。

#### 5. あとがき

以上のように本研究は構造物の損傷および位置同定に用いるためにAEモニタリングシステムについて検討を加えたものである。

測定された波形からは損傷の進行に伴う明確な変化は見られなかった。これは加振点からの波が支配的に働き、加えて、供試体の規模も影響したものと推測される。

フーリエスペクトル算出結果では、損傷箇所の近傍設置されたセンサーでは損傷の進行に伴って、対称構造物の剛性低下と損傷箇所からの反射波の影響で、健全時よりも損傷時の算出結果の方がフラットな応答特性を持つことが確認され、この帯域にバンドパスフィルタをかけ波形を確認することで、反射波の影響を明確に確認できるものと考えられた。しかし、波形やスペクトルからは損傷の進行に伴う定性的な変化が生じることは確認できるものの、反射波が入力された点を捉え、そこから損傷箇所までの距離を算出することは容易ではないと思われる結果が得られた。

反射波が入力された点を正確に捉えるために、健全時の波形と損傷時の波形を比較し、その振幅に一定の違いが現れる点を求め、損傷箇所までの距離を算定するプログラムを作成した。算出結果は損傷の近傍に設置されたセンサーの結果ほど実際の距離との誤差が少ない結果となり、これは亀裂から反射する波を正確に捉えることが出来たためと考えられる。

今後は条件を変更して実験を行い、また、距離の算出方法に関しても、フーリエスペクトルの最大値から入力の平均化を行い、逆変換によって波形に戻す等の工夫を加え、適切なフィルタリングを行う、あるいは統計的処理を導入するような改善を加えることによって、より正確な同定手法の提案を試みる予定である。

#### 【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/>