#### 4.6 AE 法によるコンクリート部材の破壊進行評価における可視化

### 4.6.1 概要

### (1) 一般的な評価方法と課題

アコースティック・エミッション(AE)とは、「固体が変形あるいは破壊する際に、それまで蓄えていたひずみ エネルギーが解放されて弾性波が生じる現象、またはそのようにして発生する弾性波動」と定義される.この原理 を利用した AE 法とは、材料内部のひび割れの発生やその進展で生じる弾性波を材料表面に設置した AE センサ(主 に圧電素子を利用)で検出し、ひび割れの位置、規模、さらには発生メカニズムなどが評価できる非破壊試験であ る.AE 活動の種類としては、上述の元々の発生メカニズムとなるひび割れの発生などの他に、材料中に既に存在 するひび割れや欠陥(損傷)箇所から生じる弾性波に基づくものがあり、前者を一次 AE 活動、後者を二次 AE 活動 といい、構造物の健全性診断は主に後者の二次 AE 活動が中心に検討されている.

AE 波動の解析手法は、地震波と同様の取扱いが行われ、例えば、AE 波の発生位置の推定手法(位置標定)、発生 メカニズムを推定するのに用いられるモーメントテンソルによる定量的波形解析、さらに AE 波の大きさと頻度分 布により大規模破壊の開始、あるいはその前兆を推定する振幅規模別頻度解析(b値,m値)などが挙げられ、こ れらは地震学での成果を利用したものである.

しかし、コンクリート構造物に AE 計測を適用した事例数が超音波法などの一般的に用いられる非破壊試験法に 比べて少なく、計測で得られたデータの総合的な判断は試験者により異なり、技術者レベルの向上や解析手法など の標準化が望まれる.

(2) 可視化により期待される効果

AE 法による部材,構造物の損傷度を定量的に評価するには,得られた AE 信号を的確に整理することが必要となる. つまり,AE 計測を行った周囲のバックグラウンドノイズと計測対象物から発生した AE 信号を分類し,有効なAE 信号のみを対象として解析を行うことが重要である. これらの分類手法としては,AE パラメータの組み合わせが有効である. AE パラメータとは,AE 信号波形の性質を数値的に表現したものであり,その代表的なものを挙げれば,最大振幅値,AE カウント数,AE エネルギー,信号継続時間,立上り時間,立上り勾配(RA 値),平均周波数などがある.上記のパラメータを組み合わせることにより,コンクリート内部で発生したAEが一次AE であるか、二次 AE であるかを推定することができ,計測対象物の状態を知ることができる<sup>1</sup>.

また,AE 源の位置標定結果により損傷部の位置を把握することは非常に重要であり、構造物の補修・補強工法の決定に役立つ情報となる.一般的な位置標定解析結果は、面的あるいは立体的に可視化することで、損傷位置が 把握される.破壊の進行に伴いAE 発生源の位置が変化するような場合には、荷重情報と組み合わせたAE 源位置標 定結果の表示により、試験者の破壊進行推察に役立つと思われる.

(3) 可視化事例の概要

AE 法を適用したコンクリート供試体の破壊試験におけるデータ処理手法の概要を記す. 検出された AE 信号の一 般的なデータ解析手法は, 図4.6.1 に示すように, 時刻歴の累積 AE ヒット数の変化と AE 源位置標定(多チャンネ ル計測の場合)である. 詳細な破壊進行の検討に際しては, AE パラメータを選定して, 適切な評価を行う必要が ある. 上述の通り, AE パラメータとは, AE 信号波形を特性化したものであるため, 計測の対象としていない AE 信号をこの特性値(パラメータ値)を用いて排除することができる. 本事例では, 検出された AE 信号から有効 AE 信号を判別する手法と AE 源位置標定結果の可視化手法について示し, 試験者のより深い理解のためのデータ処理 方法について示す.



図 4.6.1 AE 法における可視化のステップ

# 4.6.2 可視化の事例

【ステップ1】

図4.6.2 に示すようなコンクリートと補修材料から構成される供試体の付着界面でのせん断破壊試験時に AE 法を適用した事例<sup>2),3)</sup>を紹介する.一般的なデータ処理では,図4.6.3 の時刻歴における荷重と累積 AE ヒット数の関係から,破壊進行に伴う AE ヒット数の増加を確認し,供試体内部の破壊の進行が AE ヒット数の増加として捉えることができる.また,図4.6.4 のように AE 源の位置が二次元または三次元表示により特定され,破壊位置の視覚的把握が実施できる.









図 4.6.4 AE 源位置標定結果

# 【ステップ 2】

AE パラメータは AE 波形の性質や形状を数値化したものであるため、予め目的とする AE 波形の特徴あるいは、 ノイズと見なされる AE 波形の特徴が把握できる場合、不要なデータを排除することで、破壊に伴い発生する有効 な AE データのみに着目して破壊メカニズムを検討することができる。例えば、AE エネルギーが 0、AE カウント数 が 1 であるものは、スパイクノイズの特徴的なパラメータ値と考えることができる。図4.6.5 に AE エネルギーと AE カウント数の関係を示す。図より、AE カウント数が 1 であるにも関わらず高い AE エネルギーを保持しているも のもあるが、これらは波形の形状を的確に表したパラメータとは考えにくい、また、AE エネルギーが 0 であるに も関わらず、AE カウント数があるパラメータも存在している。これらも同様にデータ解析にとって有効な AE パラ メータとは言い難いので、排除できる。



また、位置標定された AE 源に対して、モーメントテンソル解析を実施することでさらに有益な情報を得ること が可能である. 図4.6.4 に対して、モーメントテンソル解析手法である、SiGMA (simplified Green's functions for moment tensor analysis) 解析 <sup>4)</sup>を適用した事例を図4.6.6 に示す. SiGMA 解析とは、三次元 AE 位置標定解析と モーメントテンソル解析から構成される解析手法であり、マイクロクラックの発生位置およびマイクロクラックの 形成モード (引張型,混合型,せん断型)、さらにはクラック面の運動方向およびクラック面の法線方向までが同 定可能となる. 図4.6.7 に供試体長軸方向におけるクラック種別の AE イベント数を示す. 図より、曲げスパン内 に多数の引張型の AE イベントが発生し、せん断付着界面において多数のせん断型の AE イベントが発生しているこ とが視覚的に把握可能である.



図 4.6.6 SiGMA 解析結果



図 4.6.7 供試体長軸方向における AE イベント数

ここで,図4.6.4 や図4.6.6 の結果では,曲げスパン内および付着界面に多数のAE源がプロットされているが, 破壊進行の観点からは,どちらの領域から破壊が始まっているかについては判断ができない.そこで,位置標定結 果と荷重の時間的推移の検討にあたっては,図4.6.8 に示す供試体長軸方向の位置標定結果と荷重の時間的推移を 調べることが有効である.図よりわかるように,60kN付近で曲げスパン内(-0.10 < x(m) < 0)にAE源が多数位 置標定され,荷重の停滞が確認できる.その後,破壊源が付着界面に移行し,最終的にせん断付着界面でせん断破 壊が生じたことがわかる.このように,面的,立体的な広がりをもつ位置標定結果に,荷重情報を組み合わせるこ とで,破壊の詳細な過程を知ることができる.



図 4.6.8 AE 源位置標定結果(供試体長軸方向)と荷重の関係

また,AE 源位置標定結果に破壊の規模を表す尺度を設けることで,新たな知見を得ることができる.図4.6.9 は、図4.6.4の位置標定結果にAEエネルギーの大きさを円の大きさで示した例である.この図より,付着界面上 部で界面を破壊するのに要したエネルギーが際立って大きいことがわかり,付着界面における骨材のかみ合わせが 非常に大きい効果をもたらしていることが推察できる.



図 4.6.9 AE 源位置標定結果とエネルギーの関係

#### 4.6.3 可視化の効果と課題

AE 法による破壊過程の把握やメカニズム解明において, AE パラメータを組み合わせた評価が行われるが, その前処理として, 有効 AE パラメータの抽出が必要となる. 有効 AE パラメータの選定にあたって, ここではその一例を挙げたが, 計測対象物の特性や計測周辺のノイズ, しきい値の設定により抽出方法は変わると思われる. また, パラメータを組み合わせたひび割れ分類手法 (平均周波数と RA 値の関係<sup>1)</sup>) などは, 未だ発展途上の技術であり, 今後詳細な規格の整備が必要である.

AE 源位置標定は、図化することで説得力を増す有効なツールであるが、その前段として、AE 波初動部をどのように検出するかによって位置標定結果や精度が変わることに留意が必要である.一般に行われる AE 源位置標定は、 複数のセンサで検出された AE 波において、しきい値を超える時間を到達時間として、各センサ間の到達時間差よ り計算されるが、その位置標定精度は高いと言えないのが現状であり、これを改善した初動部読み取り手法も提案 されている<sup>5)</sup>. AE 源位置標定においては、予めこれらの精度を検証しておくことが望ましい.

以上に示した実験室レベルでの詳細検討とは別に,実務上AE計測は,段階的あるいは,戦略的に実施されている<sup>6</sup>. すなわち,粗いセンサ配置での一次元のAE源標定(大まかな相対的損傷領域の把握),そして,続いて行われる密なセンサ配置による詳細なAE源標定(詳細な損傷部位あるいは位置の把握)である.この場合,前者はAEイベントやヒットによる相対的損傷領域把握のための可視化,後者は二次元あるいは三次元AE源による損傷位置の特定,さらには,得られたAEパラメータによる損傷度の可視化ということができる.このような取り組みを,様々な破壊規模を含む多様な構造物に実施し,AEデータベースを構築することで更にAE計測可視化技術が一般化するものと考えている.

## 参考文献

- 社団法人日本建材産業協会:アコースティック・エミッションによるコンクリートのひび割れ監視方法, JCMS-III B5706-2003, コンクリートの非破壊検査方法, pp. 47-64, 2003.
- 2) Kentaro OHNO, Kimitaka UJI, Atsushi UENO and So KUROHARA : Estimation of AE Source Mechanisms in Bonding Surface between Existing Concrete and Repairing Material under Shear Tests, Proceedings of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011, 2011.
- 3) 黒原創,大野健太郎,宇治公隆,上野敦: AE 法によるコンクリートと補修材のせん断付着強度試験法における破壊機構の考察,コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 2, pp. 1375-1380, 2012.
- 4) 大津政康,重石光弘,湯山茂徳,岡本享久: AE モーメントテンソル解析のための SiGMA コードの開発,非破壊検査, Vol. 42, No. 10, pp. 570-575, 1993.
- 5) 大野健太郎, 下薗晋一郎, 沢田陽佑, 大津政康: AE 波初動部の自動読み取りの開発による SiGMA 解析の改良, 非破壊検査, Vol. 57, No. 11, pp. 531-536, 2008.
- 6) 塩谷智基:特集 予防保全型維持管理の導入に向けて, Part4 点検・検査技術および評価方法の最前線,弾 性波法によるコンクリート構造物の健全性調査,土木学会,土木学会誌, Vol.95, No.12, pp. 32-35, 2010.

(執筆者:大野 健太郎)

#### 4.7 河川堤防の健全度評価における統合物理探査による可視化

### 4.7.1 概要

#### (1) 一般的な評価方法と課題

地盤調査における物理探査は、もともと地下を可視化する技術といえる.物理探査には利用する物理現象の違いによって多数の探査手法があり、調査の目的や現場条件に応じて使い分けられている.物理探査で求められる地下構造とは、利用する物理現象によって異なるため、まずは目的・対象に最適な探査手法を選択する必要があり、これには経験を要する.また、一つの探査手法によって求める物理量は、地盤の持つ多くの性質を反映しているため、必ずしも知りたい情報が直接得られるわけではない.たとえば、地下水の分布を調べるために電気探査を実施し、比抵抗分布を求めることを考える.地盤中の空隙が水で満たされているか、空気で満たされているかによって比抵抗は大きく異なるので地下水の発見は容易であるように思われるが、比抵抗は土の種類(粘土、砂、礫など)によっても大きく異なるし、地下水そのものの比抵抗も場所によって異なることから、それらの条件の組み合わせによっては、地下水の発見が難しいこともある.また、市街地では、埋設管やガードレールなど、電気探査に影響を及ぼす導電性の構造物などが存在するため、探査そのものの適用が難しくなる.このように、物理探査は、適用性の検討と探査結果の解釈が重要であるといえる.

(2) 可視化により期待される効果

ここでは「可視化」として、複数の探査手法で同一地点の探査を行い、その結果の組み合わせにより、地盤の 状態を推定する方法について述べる.前述のとおり、一つの探査手法では結果の解釈に任意性が大きく、知りた い情報を得ることが難しい場合には、性質の異なる複数の探査手法を利用することにより、地下の可視化精度の 向上が期待できる.

### (3) 可視化事例の概要

ここでは河川堤防の健全度評価のために、表面波探査と電気探査を組み合わせて実施する「統合物理探査」に ついて紹介する.河川堤防のような延長の長い構造物の調査は、これまでは一定間隔ごとのボーリングによって 行われてきた.しかし、ボーリングはいわば点情報であり、ボーリングデータのない区間については、何らかの 知見に基づいて推定するしかない.一方、物理探査は断面情報を連続的に取得できることが最大のメリットであ り、ところどころでボーリングデータとの対比によるキャリブレーションを行うことで、堤防の状態を客観的に 可視化することができる.河川堤防の健全度として、堤体への浸透に対する健全度を例にあげ紹介する.

### 4.7.2 可視化の事例

#### 【ステップ1】表面波探査と電気探査の実施

一般に、表面波探査は地震計を、電気探査は電極を、地表に設置して測定を行い、これを順次移動しながら測定 範囲をカバーする.しかし、これには手間がかかるため、近年、より効率的な測定システムが考案され普及してい る.

表面波探査においては、ランドストリーマと呼ばれる地震計牽引装置が利用されている.これは、一定の間隔に 24~48 個の地震計をロープと信号ケーブルで接続したもので、全体を牽引することで展開移動ができる.移動中 は、振動ノイズが発生するので、一定間隔移動させたのちに一旦停止して表面波の起振を行う.表面波探査の波形 データは、コンピュータで自動解析され、堤防の縦断方向に連続的なS波速度断面図を得ることができる.

電気探査においては、電極を打設しなくても地盤中に電流を流すことのできる、牽引式電気探査装置が開発され 市販されるようになった.人や車両により、一定の速度で測線上を牽引することで、連続的に電気探査データを取 得することができる. 電気探査のデータは, コンピュータで自動解析され, 堤防の縦断方向に連続的な比抵抗断面 図を得ることができる.

【ステップ2】S波速度と比抵抗のクロスプロット解析

得られた探査結果の同一地点のS波速度と比抵抗値を抜き出して,横軸にS波速度,縦軸に比抵抗をとったグラフにクロスプロットする(図4.7.1). これによって,調査地におけるS波速度と比抵抗の関係がわかる. この中から,抽出したい地盤状況に対応する領域を選択する. すなわち,堤防が浸透に対して危険な状態にある箇所を抽出したい場合,堤体土質が砂礫などの粒径が粗いもので構成され,しかも緩んでいるようなところが対象となる. 比抵抗は,粘性土に比べて砂質土や礫質土で高くなる.また,S波速度は緩んだ地盤では低速度を示す.そこで,高比抵抗・低S波速度で特徴づけられる領域が,堤防の浸透に対する危険個所であると考えることができる.ただし,どのくらい高比抵抗でどのくらい低S波速度の領域を抽出すればよいかという絶対値は決まっておらず,相対的なものである.そこで,その閾値を決定するために,探査範囲でのボーリングデータなどが不可欠になってくる. ボーリング調査などで得られた堤防の状態と探査結果を対比して,たとえば比抵抗の閾値をどの程度に設定すれば,砂質土と粘性土を区分できるかといった作業により,閾値を決定する.S波速度の相関から,S波速度の閾値を決定する.

【ステップ3】安全性評価断面図の出力

クロスプロット解析で、S波速度と比抵抗の閾値によって4象限に区分された個々のデータは、それぞれ位置の 情報を持っているので、区分された象限ごとに着色して断面図上に戻せば、地下のどの位置がどの象限の属性を持 つか知ることができる.ここでは、高比抵抗・低S波速度で特徴づけられる、クロスプロットの左上の象限を、堤 防の浸透に対する危険個所と考えたので、当該象限を表す着色部(赤色)がその位置を示すことになる.これを「統 合物理探査」では、安全性評価断面図と呼んでいる.



図4.7.1 S波速度と比抵抗のクロスプロット解析

## 4.7.3 可視化の効果と課題

地盤調査における物理探査は、各種の物理現象を利用して、地下の物理量分布を可視化する技術である.しかし ながら、地盤調査において知りたい情報は、多くの場合、弾性波速度や電気比抵抗といった物理探査で直接求めら れる物理量の分布ではなく、力学的強度(一軸圧縮強さなど)や透水係数などの工学量の分布である.この点で、 物理探査は間接的な手法であるといえる.本稿では、河川堤防の浸透に対する健全度を評価するために、表面波探 査によるS波速度と電気探査による比抵抗を組み合わせる「統合物理探査」の技術について述べた.この中では、 比抵抗が土質区分(粒度)を反映し、S波速度が地盤の硬さや締り具合を反映するという性質に基づき、高比抵抗・ 低S波速度で特徴づけられる「緩い砂質土」の領域を抽出することが目的であった.

実際の調査において、地下の状態を正確に推定するためには、このように地盤の持つ異なった性質を反映する探 査手法を効果的に組み合わせて実施することが不可欠であるが、そのためにはコストも増加する.より効率的な測 定・解析システムの開発が望まれる.複数の探査結果から知りたい情報を抽出するためには、探査で求められる物 理量と地盤の状態の関係が明らかになっている必要がある.探査区間でのボーリング調査などによってキャリブレ ーションデータを取得することや、過去の事例から統計的に相関を求めておくことなどが望まれる.そのためには、 調査事例のデータベースを構築し、今後の調査の際に参照できるよう整備しておくことも重要な課題である.

(執筆者:斎藤 秀樹)

#### 4.8 衝撃弾性波法を利用した SIBIE による内部欠陥検出における可視化

### 4.8.1 概要

#### (1) 一般的な評価方法と課題

衝撃弾性波法は、コンクリート表面に打撃を与え反射波を加速度センサにより受信し、周波数成分を解析するこ とによって欠陥の状態、部材寸法を評価する手法である.また、衝撃弾性波法において、欠陥の状態や部材寸法を 決定するために周波数スペクトルの共振(ピーク)周波数が使用される.すなわち、共振が生じている箇所を知るこ とができれば欠陥の状態などを把握することができるのである.ピーク周波数を判断し欠陥位置や部材寸法を決定 するのは試験者の判断によるものである.

しかし、コンクリート内部は不均質であるため周波数スペクトルにピーク周波数は多数出現することが知られて おり、この多数のピーク周波数から適切なピーク周波数を見分けるのは非常に困難である.そこで、視覚的に共振 位置が把握できれば非常に有用である.そこで、周波数スペクトルデータを使用し、検査断面のどの位置で共振が 生じているのかを画像化する SIBIE (Stack Imaging of spectral amplitudes Based on the Impact-Echo)がある. SIBIE は検査断面を多数のセルに分割し、セルの中心を仮想点とし、各点で弾性波が反射すると仮定して各点での 理論周波数を算出する.そして、衝撃弾性波法で得られた周波数スペクトルを基に分析をおこない、各点の理論周 波数に対応する相対振幅値を取り出し、その値の和を各セルに当てはめる.この相対振幅値の和は各セルでの弾性 波の反射の強度となる.さらに、各セルの値の強弱を相対的に色付けすることで二次元画像を作成する.この断面 画像から、反射の強いセル、すなわち共振の生じているセルを知ることができ、コンクリート内部の欠陥位置が推 定できる.

(2) 可視化により期待される効果

衝撃弾性波法では計測で得られた波形を周波数解析し欠陥位置など知りたい情報を分析する.分析する試験者の 経験や知識によって評価は安全側にも危険側にも流れる恐れがある.そのため,分析し評価する場合は数名の試験 者の評価を総合的に判断するなどの手段が必要とされる.

そこで,SIBIE では検査断面を二次元画像として表現することができるため欠陥位置や部材厚が迅速に視覚的・ 直感的に評価することが可能である.また,上記のように数値を分析する必要がなく評価にぶれが少なくなる利点 がある.

#### (3) 可視化事例の概要

衝撃弾性波法の結果に SIBIE を適用する際の手順を図4.8.1 に示す.

衝撃弾性波法による欠陥位置を把握する一般的なデータ処理手法は、1 データごとに処理したフーリエスペクト ルにより多重反射波の周波数を試験者が判断する.対象物の欠陥位置が比較的薄く密度が均一な場合は明確なピー クが得られることから判断が容易となるが、欠陥位置が深い場合や欠陥サイズが小さい、あるいは打撃する表面状 態が悪い場合は明確なピークが現れない場合があり正確な多重反射波の周波数の特定が困難となる.これらに対し ては、打撃の入力周波数を変えることにより、最適な周波数帯を明確とし多重反射波の周波数を判定する方法を用 いる場合がある.しかしながら、対策を講じた場合であっても、コンクリート内部の不均質さが影響し多数のピー クが現れ判断が困難になる場合が多い.本事例では、多数のピーク周波数が出現した場合に検査断面のどの位置か らの多重反射であるかを判断するために二次元画像を作成することを目的とする.対象物は内部欠陥をもつ供試体 を使用して衝撃弾性波法を実施し、それにより得られた周波数スペクトルデータを使用しSIBIEを適用する.





# 4.8.2 可視化の事例

【ステップ1】

内部欠陥を有するコンクリート供試体の表面に衝撃力を入力し波形データを取得する.波形データは図 4.8.2 に示す.波形データを高速フーリエ変換(FFT)し周波数スペクトルデータを取得する.周波数スペクトルデータは 図 4.8.3 に示す.周波数スペクトルデータをみると、多くのピーク周波数が出現しており欠陥位置および部材厚さの判断は非常に難しいことが理解できる.



【ステップ2】

検査断面のどの位置からの多重反射であるかを視覚的に判断することを目的とする. 図4.8.3 の周波数スペクト ルデータを利用し、検査断面の各要素に対する多重反射の強度を数値計算する.まず、図4.8.4 および図4.8.5 のように検査断面を要素に分割し、入力→各要素中心→出力の最短伝播距離を計算する.そして、各要素の理論的 周波数は波動速度と伝播距離から求めることができる.次に、求められる周波数に対応する強度(Power)を周波数 スペクトルデータより各要素に割り当てる.割り当てられた数値データをコンターにより二次元画像とする.



図 4.8.4 解析断面のモデル図



図 4.8.5 弾性波最短伝播経路の例

【ステップ 3】

図4.8.6に SIBIE によって作られた二次元画像を示す.各要素での強度が強い箇所を黒色で示し,弱い箇所を自 色および灰色で示している.このように各要素での理論周波数に対応する強度を画像にすることで内部欠陥の上の 位置で強い反射が確認できる.解読が困難であった周波数スペクトルと比較して視覚的に判断することができる. SIBIE はプレストレストコンクリートの内部に設置されるシース管内部のグラウト未充填を発見することを目的 として開発された.また,内部空隙やひび割れ深さ推定にも使用されることがある.



# 4.8.3 可視化の効果と課題

衝撃弾性波法は得られた波形から周波数スペクトルを求め、ピーク周波数を判読し欠陥位置や部材厚さを導出する.計測方法や計測対象によってピーク周波数は多く出現することがあり、試験者を非常に悩ませる要因になることが度々ある.試験者には判読のための経験と知識が必要とされる.

本事例では、検査断面を各要素に分割し、それらの要素の反射強度を二次元画像として可視化したものである. 事例では内部欠陥の位置を判断する内容である.可視化によって判読が困難であったピーク周波数を気にすること なく反射強度により内部欠陥位置を評価できているため試験者に対して有用なアシストができる方法であること が分かる.

ただし、使用する周波数スペクトルデータが一つであるためデータの正確性が非常に重要になる.また、入出力 点の間に入る内部欠陥に有効であり、入出力点間から外れると精度の低下が考えられる.よって、シースのグラウ ト未充填など使用する状況を細かく精査する必要がある.

(執筆者:渡海 雅信)