

第 22 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス

((株)) 富士セラミックス 山本 伊織

1. アコースティック・エミッション総合コンファレンスの概要

当該コンファレンスは 1977 年に第 1 回が開催され、2 年ごとに開催され、2019 年 10 月 23, 24 日の開催で第 22 回を迎えている。主催は(一社)日本非破壊検査協会アコースティック・エミッション部門で、多くの学会が協賛している。

プログラム案序文に「アコースティック・エミッション(AE)法は、破壊音の発生に伴って材料内部を伝搬する弾性波を検出する技術です。この特長を生かし、金属やセラミックス材料等の非破壊検査をはじめ、コンクリートや木材、各種構造物の内部で発生する破壊現象の解明や健全性評価、地熱開発での貯留計測、鉱山内岩盤の健全性モニタリングなど、様々な分野で用いられています。AE 法とその関連技術は、幅広い分野で多くの研究実績を挙げていることからわかるように、今後ますます重要度を増していくと考えられます。さらに、AE 法と近年急速な進歩を続けている情報通信・処理技術である IoT (Internet of Things)や AI (Artificial Intelligence)等との組み合わせにより、様々な分野でのブレークスルーが期待されます。」との記載があり、今回のコンファレンスでは、材料科学①②③、社会インフラ①②③、機械工学①②、電子情報工学の 9 セッション、29 編の発表があった。

コンファレンス資料を第 1 回からレビューすることは有意義と考えられるが、今回は第 22 回の発表内容について筆者が興味を持った 4 編の発表を紹介したい。なお、講演概要内の図表は著作権の関係で省略する。

2. 発表内容紹介

(1) CFRP 評価における周波数解析とパラメータ解析の検討

(株)IHI 検査計測 中村英之

2013 年に CFRP の健全性評価に重心周波数シフトの有効性が確認されたことが報告されて久しい。その後、この評価手法の有効性を示す報告は何回か示されたが、周波数変化が起こる要因の検討は十分とは言えなかった。また周波数解析を用いる評価手法は、処理時間を要し結果の表示にタイムラグが生じる問題がある。本検討では、これまでのデータを再解析し、周波数の変化が起こる現象を幾つかのパラメータを通じ検証することで周波数シフトが起こる要因とタイムラグを補う評価手法の可能性が確認できたので、その結果を紹介する。

キーワード：AE(Acoustic Emission)、重心周波数、CFRP、AE パラメータ

1. 重心周波数とピーク周波数の比較

図1は、CFRP試験片(250mm×250mm×t3 ストレート形状、50mm CFRP タブ付、材料 P3252S-20、16ply)に対する同一の引張試験データを重心周波数とピーク周波数のそれぞれで表したものである。

図1.周波数解析によるデータ表示(左：重心周波数、右：ピーク周波数)

図1左右の比較では、右図の最も高い周波数のグループの集中箇所の消滅と左図における重心周波数の低下が起こるタイミングが一致することが確認できる。重心周波数が低下する現象は、高いピーク周波数を有するAE波が検出されなくなった結果であることが推定できる。

2. 他AEパラメータによる比較

図1における周波数85kHz以下の低いピーク周波数のAEデータをAグループ、85kHzを超える高いピーク周波数のAEデータをBグループとして、2つのグループに分別し、AEパラメータの時間的推移を比較した。図2はAE活動を示すHit数/秒を示す。図3は、エネルギーによるAB両者の比較を示し、上図はAE波のエネルギー(波形の積分値)をプロット表示したものであり、下図は毎秒当たりのエネルギー積算値を示している。

図2.Hit数/秒によるAグループ・Bグループの比較

図3.エネルギー及び積算エネルギーによる比較

図2では、40秒、110秒、180秒にターニングポイントが存在することが確認できた。これらのターニングポイントでは、材料内部で起きている破壊現象の変化に応じたものと推定する。

以上に示すように、低いピーク周波数を有するAグループでは、破断前に高いエネルギーのAEが計測されるがHit数は減少し、Bグループで振幅が徐々に低下し破断前に検出されなくなることが確認された。

周波数解析に時間を要する問題を解決する一つの方策として、周波数フィルタにて高周波と低周波の帯域を区分したうえで、それぞれのHit数やエネルギーを観察することで、重心周波数による評価を補うことの可能性を示唆するものとする。

(2) 圧縮応力を導入したコンクリート中の弾性波伝搬速度およびAE発生挙動について

徳島大学 渡辺健

本研究では、プレストレスコンクリートにおける作用応力の非破壊的な評価手法の開発に関する基礎的検討として、圧縮応力とコンクリート中を伝わる弾性波伝搬速度の関係を明らかにするため、平板のコンクリート供試体での一軸圧縮載荷中の超音波速度、ひずみの計測およびAE法の適用を行った。

その結果、弾性領域においては載荷軸方向での応力上昇に伴う超音波速度の上昇を確認した。また、載荷によるマイクロクラックの増加の影響について考察した。

キーワード：圧縮応力、マイクロクラック、超音波、弾性波伝搬速度

1. 実験概要

本研究で使用した無筋コンクリート供試体は、寸法を200×200×100mmとした平板であり、配合を単位水量175kg/m³、水セメント比をW/C=40%、60%とした。供試体は、28日間水中養生を実施後、20℃環境にて約3ヶ月間静置後に実験を実施した。

プレストレスを擬似的に作用させるため、供試体に0kN～900kNの範囲で一軸圧縮載荷を行い、表

-1 に示すように供試体に $0\sim 45\text{N/mm}^2$ の圧縮応力度を発生させた。その際、載荷時の応力-ひずみ関係を確認するため、供試体に縦方向と横方向に長さ 60mm のひずみゲージを設置した。

表-1 載荷荷重および作用する圧縮応力

超音波測定器は、ハンディタイプを採用し(仕様表-2)、載荷軸方向と載荷直角方向の2ケースで行った。

表-2 超音波測定装置の仕様

供試体内部から生じるマイクロクラックを AE 法により検出するため、AE センサ(150kHz 共振型)を図-2 のように4箇所設置し、測定を実施。

図-2 AE 計測の概要

2. 実験結果

載荷方向における測定結果を図-3 に示す。載荷による応力増加に伴い超音波速度が上昇し、AE 累積ヒット数も、応力の増加とともに上昇することが確認された。弾性波領域付近での応力レベルでは、載荷によるセメントペースト内部の微細な空隙や骨材とペースト界面の付着改善により弾性波が伝搬しやすくなったため、超音波速度が向上したと考えられる。

図-3 応力度と載荷方向の弾性波速度、ひずみ、AE 累積ヒット数 (W/C=40%)

図-5 載荷方向の応力度と弾性波速度、ひずみ、AE 累積ヒット数 (W/C=60%)

ひずみは、応力に伴い増加しているが、超音波速度の増加率はそれに対して小さなレベルになっている。既往の研究より、弾性域を超える荷重を載荷させた場合、塑性化によりひび割れが発生し弾性波速度が低下することが報告されている。今後さらなる検討が必要であるが、クラックの進展に起因する塑性化による速度低下の影響と、載荷方向のクラックの閉口の両方が超音波速度に影響を及ぼすと考えられる。

(3)AE による溶接の健全性評価

藤村クレスト(株) 西本重人

溶接中に発生するアコースティックエミッション(AE)の挙動を検討したところ、発生した AE のエネルギー値と溶接状態に相関が観察された。そこで、AE の挙動を詳細に検討した結果 ①溶け込み量は発生した AE のエネルギー積算値と相関があること ②溶け込み不良やブローホール、芯ブレなどの溶接不良は、AE のエネルギー値とそのばらつきにより識別できることが判明した。本結果により、溶接部を切断して組織観察する方法や、目視観察などにより評価されていた溶接部の健全性が、AE により定量的にしかも溶接加工中に評価できる可能性が明らかになった。

キーワード：溶接、AE、非破壊検査、品質管理、溶け込み量

1. 溶け込み量の評価

図1に、溶接時に発生した AE の包絡線検波波形を示す。溶接による金属の溶け込みを考えると与えられた熱エネルギーが蓄積されて材料を溶かして融合すると考えられる。したがって、溶け込み量は与えられたエネルギーと相関すると考えられるので、発生した AE 信号の積算値、すなわち AE のエネルギー値と相関があると推測できる。図2に、溶接電流を変化させて溶け込み量を変化させた場合の AE のエネルギー値の変化を示す。エネルギー値は 10ms ごとの積算エネルギー値を示すが、電流の増加に伴い、すなわち、溶け込み量の増加により AE のエネルギー値が増加していることが分かる。

図－1 正常溶接時の包絡線検波波形

2. 溶接不良の評価

今回は、評価する溶接不良として、一般的によく発生する②溶け込み不良 ③溶け込み過多 ④ブローホール ⑤芯ブレを取り上げ、AEによる識別の可能性を検討した。前述の溶け込み量の評価において、溶け込み量とAEのエネルギー値に相関が認められた。また、図2のAEのエネルギーの挙動から、条件によりばらつきが生じているように見える。そこで、各溶接のエネルギー分布を評価することにした。図3に計測されたAEのエネルギー分布を示す。各溶接状態により、分布の中心とばらつき幅が異なることが分かる。

図－2 溶接中のエネルギーの挙動

溶接不良によりAEのエネルギー値とそのばらつきに差異が認められたが、図3のような分布図は、実機における制御に使用するには不向きである。そこで、分布の中心を平均値でばらつき幅を標準偏差で表して整理した。図4に結果を示す。溶接不良が正常の状態と分離して評価できることが分かる。

図－3 エネルギー分布

図－4 溶接状態の評価

3. 結言

溶接加工中に発生するAEの挙動を評価した結果、AEのエネルギー値を平均値で表し、ばらつき幅を標準偏差で表現したところ、溶接状態の健全性を評価できることが判明した。今回は比較的明確な不良状態を判断したが、今後は各不良の条件を変化させて、精度の検証を実施していく。

(4) 3次元弾性波・AE トモグラフィによる輪荷重試験下の浸水したRC床版の劣化損傷評価

京都大学 麻植久史

RC床版の劣化損傷進展は、水の存在に大きく影響を受けて促進することが知られているが、その促進過程や程度は明らかになっていない。本研究では、上面を浸水させたRC床版に対して輪荷重走行試験下で、鉄球打撃により励起した弾性波を使用した弾性波と静的載荷によるAEを使用したトモグラフィを行い、水の影響を伴うRC床版の劣化損傷進展と速度変化の関係を明らかにした。また、速度分布は、RC床版供試体を切断して目視で確認した土砂化部とよく対応した。これにより実床版においてもAEトモグラフィの適用が有用であることが示唆された。

キーワード：輪荷重試験、可視化、疲労試験、損傷評価、速度分布

1. 3次元弾性波&AE トモグラフィによる損傷進展評価

RC床版における疲労損傷を模擬するために、RC床版供試体に対し、輪荷重走行試験を実施した。試験は98kNの加重で10万回行った後、荷重を127.4kNに増加させて20万回まで実施し、次に156.8kNの荷重で疲労限界である214194回まで行った。また、載荷荷重を変更して輪荷重走行試験を始める前に、同荷重で静的載荷を行っている。供試体上面は浸水させており、水面が一定になるように数回に渡って注ぎ足しを行っている。3次元弾性波トモグラフィ実施のために、供試体表面において鉄球打撃による弾性波を励起し、センサまでの伝搬速度を計測した。

各段階で得られた速度分布を図1に示す。試験前の速度分布を見ると、上面から底面にかけて3300m/s以上の速度が広く分布している。やや低い速度分布が一部で見られるが、全体の平均速度は4400m/s

であり、基本的に健全であると言える。10万回実施後の速度分布では、3000m/s以下の部分も多少明瞭になり、それらは短軸方向に連続するように現れている点が特徴的である。平均速度も4000m/sとなっている。20万回実施後の速度分布では、3000m/s以下の速度が広く分布するようになり、損傷と判断できる2700m/s以下の値も床版中央から下部に向けて現れ始めている。しかし、平均速度は3800m/sとやや高い値を示すため健全部と損傷部が明瞭に分かれていると判断できる。疲労限界後の速度分布では、2700m/s以下の低速度分布がより広範囲で現れている。また、この低速度領域は中央部と下部で明瞭である。平均速度は3700m/sであり、20万回実施後と比べて平均速度の低下が小さい。この理由として、一部の位置で速度が低下しており、全体的な低下でないことを反映していることが考えられる。これにより、初期に生じた内部ひび割れに水が浸入し、その部分のひび割れ進展が加速して、早期に疲労限界に達してしまうと考えられる。

図-1 3次元弾性波・AEトモグラフィによる速度分布

2. 速度分布による土砂化位置推定

RC床版供試体の右側を短軸方向に4か所切り出した断面写真とこれに対応する速度分布を図2に示す。断面Aにおいては、上面と中央の境界部に土砂化が見られる。これは2700m/s以下の速度分布に対応し、多くは2300m/s以下で占められている。断面Bでは、最も土砂化部分が広く分布しており、上面から底面側に向かうひび割れも明瞭である。特に、y方向0.325m以下に幅広いひび割れが現れており、これは上記と同様の低速度傾向を示している。断面Cでは土砂化部分も薄くなり、上面から底面側に向かうひび割れもそれに対応する速度分布も断面Aとほぼ同様の傾向を示している。断面Dでは土砂化部、ひび割れ共に写真では確認できず、速度分布にも明瞭な低速度分布は現れていない。これより、土砂化部を3次元AE・弾性波トモグラフィによる速度分布で検知することが可能であり、その速度は2700m/s以下、特に2300m/s以下で示されることがわかった。

図-2 疲労限界状態の速度分布と短軸-鉛直方向断面図

3. 結言

浸水したRC床版供試体における内部損傷進展を速度分布より評価するために、3次元弾性波トモグラフィを実施した。これより、初期に生じた内部ひび割れに水が浸入し、その部分のひび割れ進展が加速して、早期に疲労限界に達してしまうと推定できた。また、同RC床版供試体を切り出して目視で確認した土砂化部と低速度帯が良い対応を示した。これより、実RC床版でもAEトモグラフィにより土砂化が検知できる可能性が示唆された。