

A E 波形解析を利用した接着結合系の劣化診断法

西岡 健一*, ○ 江口 伸**, 原賀 康介***, 野中 保雄**
 * NTT (株), ** 東京理科大学, *** 三菱電機 (株)

In-situ Detection Method for Degradation of Adhesive Joint Using Spectrum Analysis of Acoustic Emission.

K. Nishioka*, N. Eguchi**, K. Haraga***, Y. Nonaka**

* Nippon Telegraph and Telephone Corporation, ** Science Univ. of Tokyo, *** Mitsubishi Electric Corporation

1. 緒言

接着剤による接合は、外観、意匠性に優れ、接合部の応力集中が他の接合方法に比較して起こりづらい。このような多くの利点を持つことから、現在では接着接合系は非常に多岐にわたる分野で利用されている。しかし、接着接合の破壊強度あるいは破壊強度の時間的経過に伴う低下、つまり劣化などが、接着時の種々の条件や接着系の置かれる自然環境によって比較的大きく左右されることが知られおり、このことがある意味で接着接合系の利用範囲を狭める一つの要因となっている。この接着系の信頼性を制御する、あるいは致命的な破壊に至る以前に破壊の兆候を検知する試みは多く行われており、その1つとしてアコースティック・エミッション（以下A E）を用いた診断法がすでに紹介されている。A E現象は、構造物の安全性の確認や監視などに積極的に利用されており、接着接合系においても不良接着部を含む場合と含まない場合でA Eの発生の方針に違いがあることが報告されている。本研究では、このA E波の波形が破壊モードによって異なることに注目し、波形を監視することによる接着系のその場的な劣化検知方法を紹介する。

2. 実験方法

2. 1 試験片の作成および破壊試験

試験片の作成に当たり、接着剤としてウレタン系接着剤 UX-2070（電気化学工業社）を、被着体としては、ステンレス板 SUS304 を用いた。試験片の寸法は JIS K-6850 に準拠し、被着体寸法を $100 \times 25 \times 1.6\text{mm}$ 、ラップ長を 12.5mm とした。被着体の前処理としてアセトンによる洗浄を施し、洗浄後にプライマー処理を必要とする被着体に対して、P-1000（電気化学工業社）によるプライマー処理を施した場合には破壊モードがほぼ完全に凝集破壊となり、処理を行わない場合には、ほぼ完全に界面破壊となる。本研究では、試験片を一定時間、温水中に浸漬することで劣化させる温水浸漬試験を行った。温水の温度を 90°C とし、各劣化時間に対して試験片を 3 本づつ劣化させ、劣化試験後に室温のもとで破壊試験を行った。破壊試験として、Tensilon/STMF1000 引張り試験機（東洋ポールドウィン社）を用いた引張りせん断試験を行い、試験時

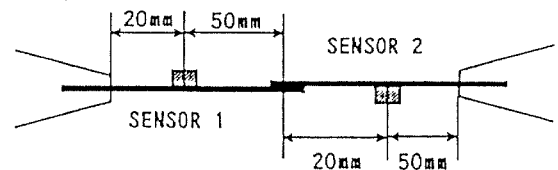


Fig. 1 Locations of AE sensors on the single lapped specimen.

のクロスヘッドスピードを0.2 mm/minとした。

2. 2 AE観測システム

本研究で用いられたAE観測システム(NF回路設計ブロック社)では、AE波形のサンプリングタイムを500 μ sec, サンプル点数を1024点とした。このシステムでは、AE波形とAE発生時の応力が同時に記録されるように設計されている。AEセンサーとしては平坦な周波数特性を持つAE-900F2(NF回路設計ブロック社)が用いられた。引張りせん断試験中のチャック部など接着部外から発生するAE波あるいは機械的雑音を除去するため、2つのAEセンサーが図1に示されるように試験片中央から等間隔に設置されている。それぞれのAEセンサーの設置位置におけるAE波の到達時間差がある一定値以下であった場合、接着部からAE波が発生したと認識される。

2. 3 AE波形解析

本実験では、得られたAE波形を自己回帰モデルに当てはめることでスペクトルを求めた。この方法は、 $X(f)$ をフーリエ変換された関数、 G を定数として次式を用いてスペクトルを求めるものである。

$$X(f) = G \left\{ 1 - \sum_{k=1}^M a_k \exp(-i2\pi f k \Delta T) \right\} \quad (1)$$

ここで a_k を k 番目のAR(Autoregressive)係数と呼ぶ。スペクトルをどの程度まで正確に求めるかはAR係数の個数 M に依存し、サンプル点数を N としたとき、 $M=2 \sim 3\sqrt{N}$ が適当なAR係数の数であるという報告がある。本実験では M を90としてスペクトルを求めた。また、本研究ではさらに M を3とすることによってスペクトルの概形を求め、その際得られるAR係数に注目してAE波の分類を試みた。

3. 実験結果および考察

3. 1 破壊モードとAE波の周波数特性

図2には、プライマー処理を施した接着系(以後C試験片と呼ぶ)に温水浸漬試験を行った時の、劣化時間と接着系の破壊強度の関係を示している。全体的な傾向として、劣化時間と共に破壊強度は低下する。破壊部の目視による観察から、劣化時間が長くなるにつれ、外側から徐々に界面破壊部の面積が大きくなっていく傾向が認められた。本研究ではこの接着系のように、劣化に伴って破壊モードが変化する接着系を観測対象としている。そのため、接着系の劣化とAE波形の関係を検討するのに先立ち、凝集破壊あるいは界面破壊時に発生するAE波の波形を比較検討する必要がある。今回の実験に用いた接着

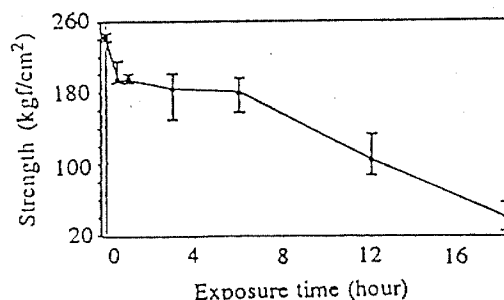


Fig. 2 Relationship between exposure time and strength after the environment test in the hot water.

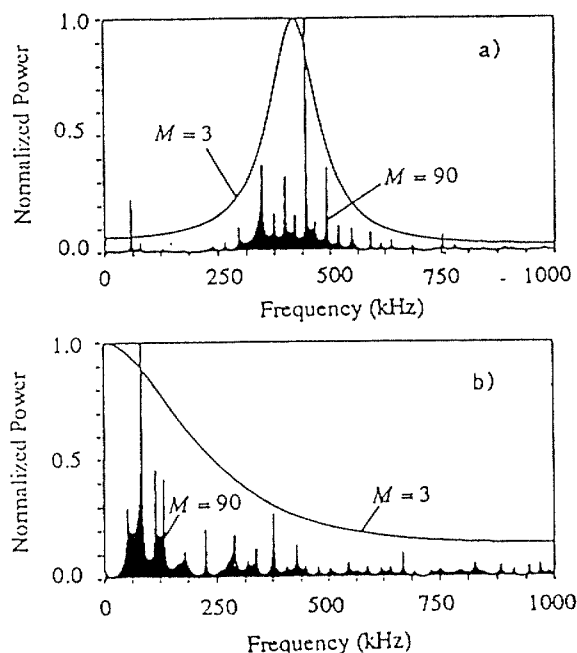


Fig. 3 Power spectra of 3 and 90 coefficients for the AE signals observed during shear-tensile test. a) A sample, b) C sample.

系では、プライマー処理を施した試験片では、破壊モードがほぼ完全に凝集破壊になり、プライマー処理を施さない試験片（以後A試験片と呼ぶ）では、ほぼ完全に界面破壊になる特徴がある。それぞれの破壊モードのときに得られるAE波の典型的なパワースペクトルを図3に示す。図3 a)はA試験片から、b)はC試験片から得られたAE波のパワースペクトルであり、すなわち、図3 a)は界面破壊に対応したパワースペクトル、b)は凝集破壊に対応したパワースペクトルである。また、塗りつぶして表現されているスペクトルが $M=90$ 、曲線で表現しているのが $M=3$ で求めたスペクトルである。以後パワースペクトルは全て、この図と同じ形で表現している。A試験片から得られたAE波形では高周波成分にスペクトルが集中して現れているが（以下このタイプのパワースペクトルを持つAE波をA型波と呼ぶ）、C試験片から得られたAE波形では低周波成分にスペクトルが集中して（以下このタイプをC型波と呼ぶ）現れる。このようにA試験片とC試験片から得られたAE波形は異なる。この違いは、破壊部の機械的性質、すなわち接着層と被着体の弾性率の違いにより現れたものだと考えられる。今回被着体として用いたステンレス板及び接着剤として用いたウレタン系接着剤UX-2070の弾性率は、それぞれ常温でおよそ $2.0 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$, $2.4 \times 10^2 \text{ kg/mm}^2$ である。このように接着剤と被着体の弾性率は大きく異なり、この違いがAE波形に影響を及ぼしたと考えられる。図4は、健全なC試験片および90℃の温水中で12時間劣化させたC試験片から得られた典型的なAE波形である。劣化後の試験片から得られたAE波はA型波形を有しており、破壊モードが界面破壊であったことを示している。破断面の目視による観察でも、劣化後のC試験片では界面破壊を起こしていることが認められている。

3.2 AE波の分類

AE波は、発生機構の物理的特性の他に測定装置やAEセンサーの特性、その他様々な影響を受けており、個々のスペクトルを検討していくことは大変困難である。そこでAE波のスペクトルを大きな流れとしてとらえ、それを系統的に整理・分類するパターン認識を用いる。Ohtsuらによると、AE波のスペクトルを $M=3$ として求め、その際得られるAR係数を比較することで、破壊時に発生したAE波がどの破

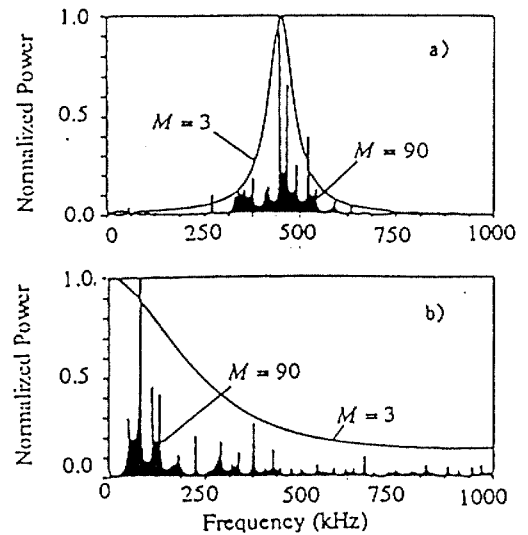


Fig. 4 Typical power spectra of AE signals observed during shear-tensile test for the samples before and after the environment test in the hot water. a) after the environment test, b) before the environment test.

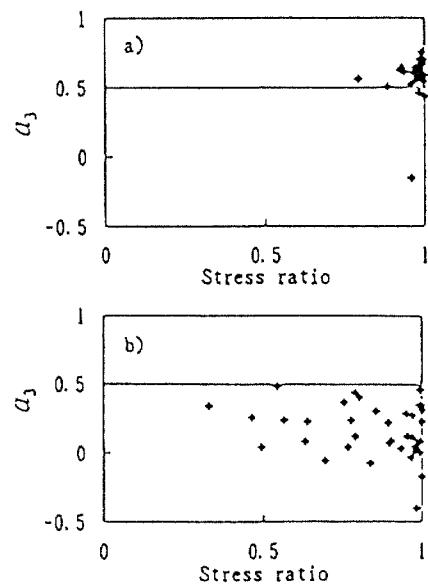


Fig. 5 Cross-plots of the stress ratio and third AR coefficient of AE signals observed during shear-tensile test. a) A sample, b) C sample.

壊モードに対応しているかを分類することが可能となる。そこで本実験においてもこの手法を取り入れた。図5は、A試験片、C試験片から得られたAE波形を3個のAR係数で表現し、その第3番目の係数 a_3 と応力比の関係を示したものである。ここで応力比とは、以下のように与えられるものである。

$$\text{応力比} = \frac{\text{AE発生時の応力}}{\text{最終破断応力}} \quad (2)$$

A試験片から得られたAE波のスペクトルは第3番目のAR係数の値が0.5以上を示すものが多く、C試験片から得られたAE波は0.5以下の値を示すものが多い傾向にある。このことから、 a_3 が0.5以上

であれば界面破壊部から生じたAE波すなわちA型波形、0.5以下であれば凝集破壊部から発生したAE波すなわちC型波形であると分類することができると考えられる。

図9は、C試験片に温水浸漬試験を行い、劣化時間ごとの応力比と a_3 との関係を示したものである。接着系の劣化が進行するに伴って、 a_3 が0.5以上となるAE波すなわちA型波形が現れるようになる。また引っ張せん断試験で低応力時に発生するAE波、すなわち接着部の亀裂の起点となり得る最も弱い部分の破壊に伴って発生したAE波に注目すると、 a_3 が0.5以上となるA型波の傾向にある。このようにAE波形を3個のAR係数で求め、その際得られる a_3 に注目することで、破壊モードによるAE波の違いを分類することができ、本研究で用いた接着系のように劣化に伴って破壊モードが変化するような接着系では、この分類結果を利用して劣化状態をモニタリングすることが可能となる。

4. 結言

本研究では、同一の被着体・接着剤であるにもかかわらず破壊モードが異なる接着系に対して引っ張り試験を行いAE波形を比較検討した。また劣化に伴い破壊モードが変化する接着系を取り上げ、引っ張りせん断試験中に発生するAE波のパターン解析を行い以下のような結果を得た。

1. 接着剤と被着材の機械的性質が大きく異なる場合、破壊モードの違いがAE波形にも現れる可能性がある。
2. AEのスペクトルを3個のAR係数を用いて求め、その際得られる第3番目のAR係数に注目することで破壊モードをAE波形を用いて分類することができる。
3. 劣化試験に伴って破壊モードが変化するような接着系では、AE波のパターン解析を行うことで、接着部の劣化をその場的にモニタリングすることができる。

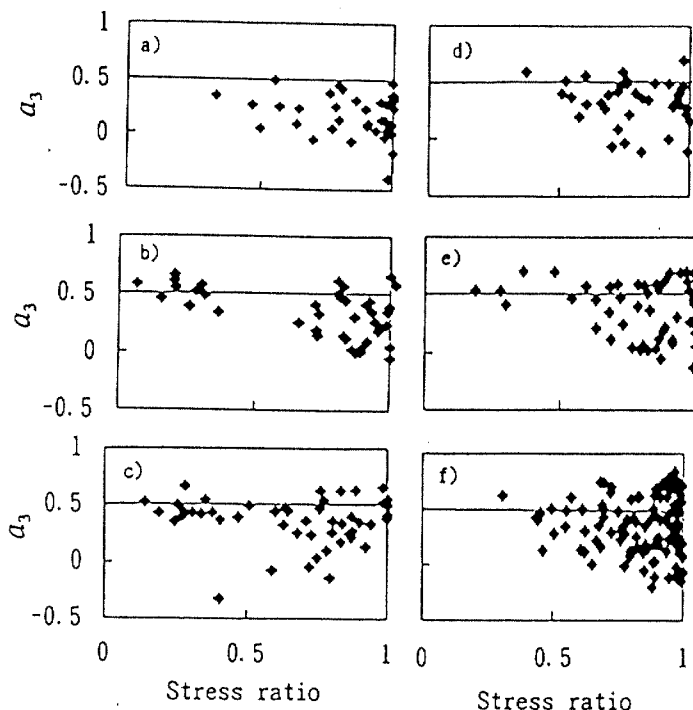


Fig. 6 Cross-plots of the stress ratio and third AR coefficient of AE signals from A samples after the exposure test in the hot water. a) 0 hour, b) 0.5 hour, c) 1 hour, d) 3 hour, e) 6 hour, f) 12 hour.

第33回 日本接着学会年次大会

講演要旨集

1995

会期：平成7年6月22日・23日

会場：関西大学100周年記念会館

共催・協賛

応用物理学会
強化プラスチック協会
近畿化学協会
高分子学会
色材協会
自動車技術会
繊維学会
精密工学会
電気学会
土木学会
日本化学会
日本機械学会
日本包装技術協会
大阪工研協会

日本建築学会
日本航空宇宙学会
日本ゴム協会
日本材料学会
日本電子材料技術協会
日本複合材料学会
日本木材学会
日本木材加工技術協会
日本レオロジー学会
日本バイオマテリアル学会
日本セラミックス協会
溶接学会
プラスチック成形加工学会
日本信頼性学会



日本接着学会