

プロジェクト 1

弾性波を用いた材料の劣化と応力履歴の非破壊的評価法に関する研究

森 康彦 (機械工学科)

1. はじめに

経年構造における問題すなわち劣化損傷は、内容的には、環境の化学的あるいは物理的作用により、時間を経て材料としての品質に低下をきたす「材質劣化」と、その材質劣化あるいは材料の置かれた環境と応力のもとで経年的に誘発される割れ（き裂）等の「劣化による損傷」がある。この二つは必ずしも明瞭に区別しえないが、いずれにしても割れを誘発あるいは加速する現象としてとらえることができる。

本研究は、この視点から、経年構造のヘルスマニタリングに関し、主に弾性波の特性を応用する非破壊的な計測・評価技術の開発を行ってきたものである。すなわち、材質劣化の点からは、環境が負荷された材料の残存強度と環境負荷履歴の計測と評価法について、また、劣化による損傷としての割れの視点からは、劣化による破壊靱性の低下に特に注目した。その際、き裂に対する材料の抵抗は弾塑性破壊靱性で表されるが、試験法は複数の試験片が必要となるなど複雑である。そこで本研究では、AE法を用いた単一試験片による弾塑性破壊靱性の決定法についても検討を加えた。さらに、AEによる材料評価に関し、変動する応力負荷を受ける部材の荷重履歴の推定に電磁放射現象の計測と複合した技術を検討している。

2. 研究経過および成果

2.1 弾性波を用いた樹脂材料の環境劣化の評価

これまでに、フェノール樹脂板（紙基材積層板）の耐候性強度について、促進暴露試験装置によって表 1 に示す条件の環境負荷を付与した供試材の曲げ試験とAE試験、並びに超音波試験を実施してきた。その結果、機械的性質の暴露の進行による変化は、図 1 に示すような、曲げ強さと曲げ弾性率の低下として現れた。

表1 暴露試験の条件（暴露 1 サイクル）

1. キセノンランプ式耐候性試験：100 時間
(紫外線量 0.3 MJ/m^2 、水噴霧量 2.4 l)
2. 塩水噴霧試験：24 時間
(塩水濃度5%、噴霧量 63 ml)
3. 恒温恒湿乾燥：44 時間
(温度 23°C 、湿度 50%)

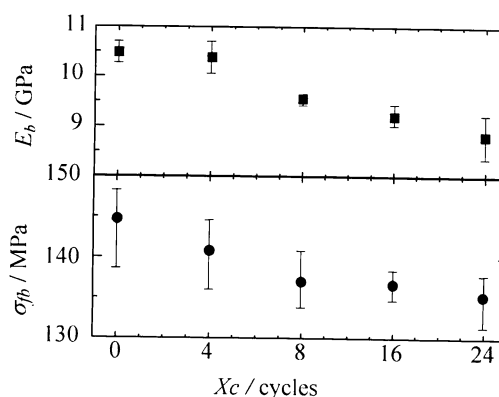


図1 曲げ強さと曲げ弾性率の暴露による変化
(紙基材フェノール樹脂積層板)

このような機械的性質の暴露による変化に対して、超音波の伝搬速度の変化すなわち音弾性効果が明らかにみられ、超音波の音速測定によって残存強度の推定と、弾性率の変化を非破壊的に評価できることを示した。非破壊的応力測定法としての音弾性効果の有効性は、金属材料ではかなり研究されているが、樹脂材料については弾性波の減衰が大きいこともあって、あまり研究がなされていない問題であった。

これまでの試験において、特筆すべきことに、曲げ試験に伴うAEには、環境負荷履歴の記憶効果があるという新たな知見を得たことをあげることができる。図 2 は、暴露試験片の曲げ試験で発生したAEの相対エネルギーの暴露の進行に対する変化を示すものである。暴露時間 X_c の経過とともにAEエネルギーが減少するという

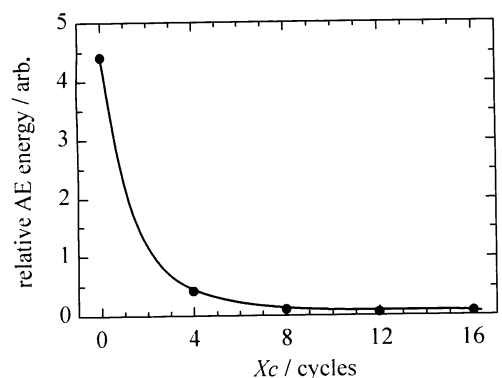


図2 暴露の進行による相対AEエネルギーの変化
(紙基材フェノール樹脂積層板)

結果である。AEは、それまでに材料に蓄えられていたひずみエネルギーが解放される際にもなって放出される弾性波である。暴露の進行とともにAEエネルギーが減少するという事は、環境負荷を付与する際、試験片は力学的には無負荷であっても、暴露によって応力負荷におけるに相当するひずみエネルギーの解放が生じていることを示唆するものである。これは、金属材料等の塑性変形に伴うAEのカイザー効果、すなわち、過去に応力が負荷された材料を、再度負荷する際には、先に負荷されていた最大応力を超えるまでAEが発生しないという不可逆的性質に対応する現象ともいえる。このAEの環境負荷に対する記憶効果は、応用においても重要な現象である。

そこで、ここでは、他のタイプのフェノール樹脂の耐候性強度を試験しつつ、このAEの記憶効果を追試することを重点的な目標とした。

耐候性試験の対象は、布基材フェノール樹脂積層板である。これを表1と同じ条件で暴露試験を行い、厚さ4mm、幅10mm、長さ100mmの試験片として曲げ試験とAE計測を実施した。

図3に、曲げ試験とAE計測の結果を試験片のたわみ δ に対して整理した一例を示す。荷重 P はたわみとともに単調に増加して、最大荷重で試験片は破断したが、暴露試験片についても観察された。また、曲げ強さ σ_b を暴露サイクル Xc に対して整理した結果を図4に示す。この結果、暴露試験片の曲げ強さは、暴露の初期4サイクルあたりで未暴露材の値よりやや高い値を示すが、以後、暴露の進行とともに低下してい

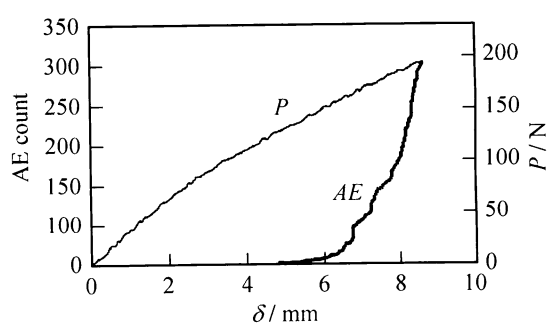


図3 曲げ試験とAE計測の結果
(布基材フェノール樹脂積層板, $Xc=0$)

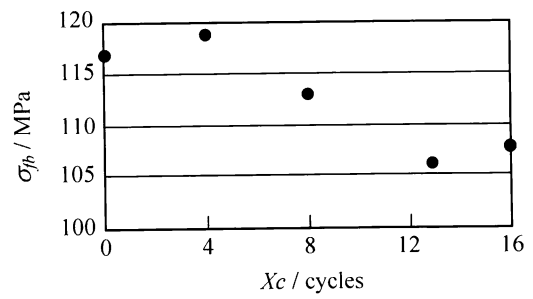


図4 曲げ強さの暴露による変化
(布基材フェノール樹脂積層板)

く傾向が見られる。

次に、AEの発生特性について考察する。曲げ試験で観察されるAEの発生状況は、図3に事象数の変化で示されるように、AEは、荷重-たわみ曲線がたわみ始めるあたりから発生が始まり、その後、試験片の破断まで急増していくことが他の暴露試験片でも観察された。

図5は、先に考察したAEの環境負荷に対する記憶効果を、ここで試験した布基材フェノール樹脂積層板について調べた結果である。この結果、暴露試験片で発生したAEの相対エネルギーは、暴露の進行とともに明らかに低下していく。

さらに、図6は、曲げ試験でAEの発生が顕著に始まる荷重の値を P_{AE} とし、これをそのときの最大荷重 P_{max} で正規化して、暴露サイクルに

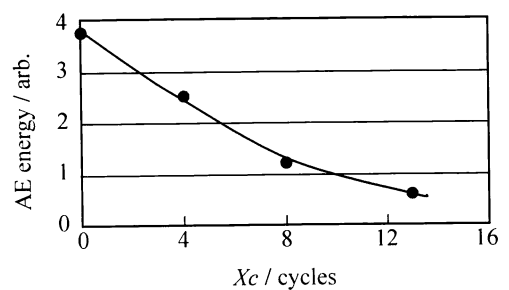


図5 暴露の進行による相対AEエネルギーの変化
(布基材フェノール樹脂積層板)

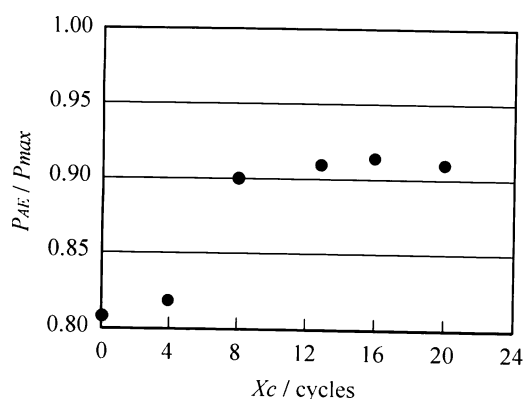


図6 最大荷重で正規化したAEの発生開始荷重と暴露時間の関係（布基材フェノール樹脂積層板）

対して整理したものである。この結果、AEの発生開始荷重レベルは、暴露が進行すると高くなり、暴露12サイクル以上では最大荷重の約90%となる。

この図6の結果は、図5に見られるAE相対エネルギーの暴露による低下とともに、AEには環境負荷に対する記憶効果があるという事実を補強するものである。したがって、AEの計測をもって、試料の暴露履歴の非破壊的な推定が可能となる。なお、図6において、AEの発生が最大荷重の90%以上の高いレベルとなるが、非破壊評価の面からは、十分な余裕があると考えられる。

2.2 劣化による損傷の評価

次に、劣化による損傷の評価について、環境付与試験片の破壊靱性試験とAE計測によって検討した。破壊靱性試験は、板厚 4 mm、高さ 10 mm、長さ 40 mmの片側切欠き試験片の4点曲げ試験として行った。ただし、試験片の片側表面だけが暴露されているものである。破壊靱性試験では、紙基材フェノール樹脂板は最大荷重で破断したが、布基材試料は最大荷重に到達した後も不安定き裂が成長していた。弾塑性破壊靱性 J_{IC} の評価は、破壊靱性試験で如何にき裂の進展開始を決定するかである。AEは、まさにき裂の発生に伴って検出されるものであるから、直接的にき裂進展開始点を検出できる。ただし、破壊靱性試験で計測されるAE発生開始は、計測時のAEしきい値に左右される。そこで、AEの発生が顕著に増加し始める荷重値をもって評価

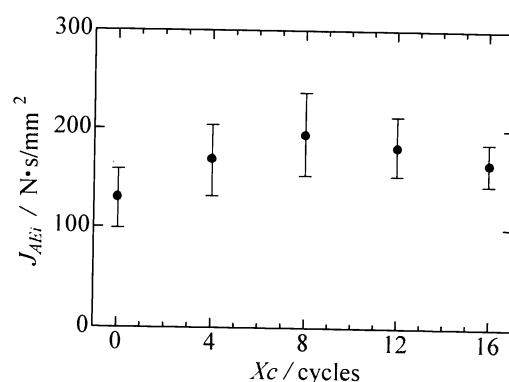


図7 AEで評価した弾塑性破壊靱性の暴露による変化（紙基材フェノール樹脂積層板）

することにした。ここで、き裂がある長さ進展するのに要するエネルギーである J 積分は、破壊靱性試験で計測された荷重－き裂開口変位曲線下の面積を基に計算されるものである。しかし、本研究では使用した4点曲げ試験治具の都合でき裂開口変位の測定ができなかったため、それを荷重－時間曲線下の面積に代え、見かけの J 積分であるとして J_{app} と表示し、AEで評価した J_{in} を J_{AEi} とした。こうして求めた J_{AEi} の暴露による変化を、紙面の都合により、紙基材フェノール樹脂積層板について図7に示す。この結果、相対値ではあるが、弾塑性破壊靱性はよく評価されているといえ、先の図1に与えられていた同試料の暴露に対する曲げ強さの変化とよく対応して変化しているといえる。なお、布基材フェノール樹脂積層板試料について評価した J_{AEi} も、暴露による変化は曲げ強さの変化に対応しているものであった。したがって、弾塑性破壊靱性の単一試験法としてAE法の有効性を示すことができた。

2.3 応力履歴のAEによる推定評価

応力変動を受ける環境下で、部材が過去に受けた最大応力の推定に、金属材料ではAEのカイザー効果を用いる方法の有効性は既に確認されている。しかしながら、初期的な荷重負荷の段階で無数の微視割れ（ひび割れ）が導入されるコンクリート部材や岩石などについては、再負荷の過程における単純なAE計測では、履歴最大応力の推定は困難である。その理由は、存在していた微視割れの破面間の摩擦によるAEが、再負荷時の低い荷重レベルから発生するからで

ある。したがって、これら摩擦によるAEの発生がある中で、新たに生じるき裂に伴うAEだけを識別して計測する必要がある。その方法として、AE信号の波形解析や振幅分布の時系列的な変化を解析する手法などがあるが、その結果に物理的な意味付けを持たせるには、かなり複雑な考察と解析を伴う。この問題に関し、誘電体材料については、き裂の生成に伴う電磁放射とAEとの同時計測は、極めて簡便かつ有効であることを提案する。図8は、稲田花崗岩の単軸圧縮変形試験で同時に記録されたAEと電磁放射(EP)信号波形の一例である。この例では目視的に、三つのEP事象と、それに伴って三つのAE事象が記録されている。また、図9は、同じく

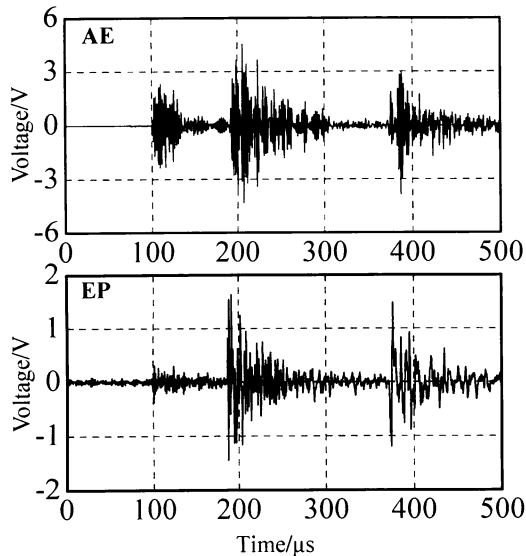


図8 同時に記録されたAEとEP信号波形の例
(稲田花崗岩の単軸圧縮変形)

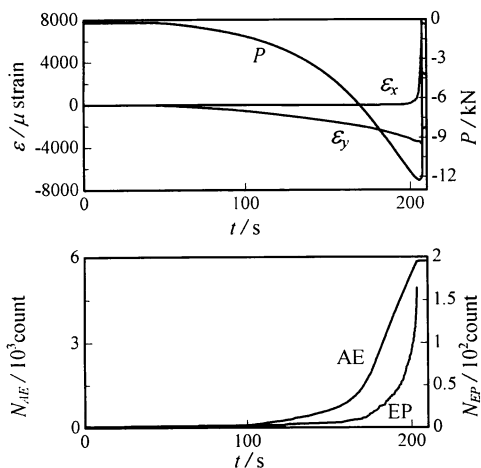


図9 試験経過時間に対する荷重、縦・横ひずみとAE及び電位信号の事象数の変化(稲田花崗岩)

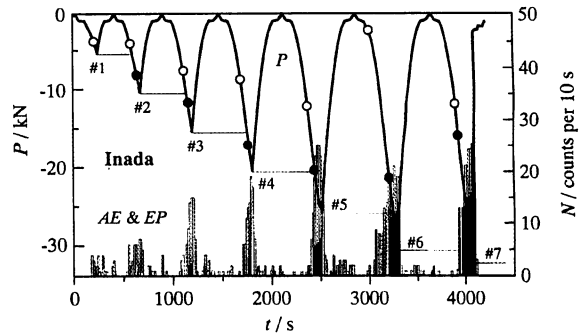


図10 電磁放射の計測による荷重履歴の推定
(稲田花崗岩の圧縮変形)

単軸圧縮変形試験の結果の一例で、AEは試料の圧縮荷重による横方向ひずみ ε_x が生じ始めるあたりから発生が始まり、 ε_x が増して試料の体積が横方向に膨張していく過程で顕著に発生し試料の破壊まで至っている。この結果からも明らかであるが、筆者らは、電磁放射の発生は試料内に生じる微視き裂、特に引張型き裂の生成に伴って卓越的に発生するものであり、その発生メカニズムは、材料に新たに生成されたき裂面上への電荷の再配分であることを明らかにしている。すなわち、電磁放射は新たなき裂が生成される際にのみ発生するものである。

図10は、カイザー効果試験の結果である。荷重負荷—除荷の繰り返しで、荷重曲線P上の●プロットは、荷重再負荷の過程で電磁放射(EP)の発生が開始する荷重に相当し、この荷重レベルはそれ以前に加えられた最大荷重にほぼ等しい値を示している。一方、AE発生開始荷重レベル(O)は、先行予荷重よりかなり低い値を示し、履歴最大荷重を正しく推定できない。すなわち、電磁放射の計測によって応力履歴を正しく推定できると結論できる。

3. おわりに

AE及び超音波を用いた材料劣化の評価、変動荷重を受ける部材の履歴応力の推定など、非破壊的材料評価のための計測・解析手法を検討、提案した。これらは個々には新しい有力な技術であるが万能な手法ではない。これら技術の応用範囲の拡大のために、適用可能な対象材料、劣化や破壊の様式と力学条件などを検討するとともに、検出・評価の限界を明らかにしていく必要がある。