衝撃損傷を受けた CFRP 構造への応力負荷時の AE 発生挙動

杉本聡太^{*1}, 水谷義弘^{*2}, 轟章^{*2}, 松崎亮介^{*2}

Acoustic Emission Behavior of Impact-Damaged CFRP Structures under Stress Loading

Sota SUGIMOTO^{*3}, Yoshihiro MIZUTANI,
Akira TODOROKI and Ryosuke MATSUZAKI

^{*3} Tokyo Institute of Technology Dept. of Mechanical Sciences and Engineering
2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

This study examined the applicability of acoustic emission (AE) method for the impact damage evaluation of CFRP pressure vessels. As a fundamental study, the characteristic features of AE signals obtained from impact-damaged CFRP laminates during tensile tests were analysed. Coupon-level CFRP specimens were prepared and impact forces were applied to the edge of the specimens so that the internal damages (e.g. delamination) could be observed from the edge-surface of the specimens. AE signals were detected via AE sensors mounted on the specimen surface during tensile loading test. For damaged specimen, it is found that the growth of delamination and the friction of delamination surfaces are the main AE sources. Also it is revealed that a large number of AE signals were detected during unloading period only for damaged specimens. These results showed a possibility that the AE method could be used for the impact damage evaluation of CFRP structures, including pressure vessels.

Key Words : CFRP, Pressure vessel, Impact damage evaluation, Acoustic Emission

1. 緒 言

CFRP 圧力容器は優れた比強度, 比剛性を有することから, 人工衛星の気蓄器など軽量化が要求される航空宇宙分野において広く利用されている。一方で, CFRP 圧力容器は工具落下などの衝撃により内部損傷を生じて強度が低下するため, 衝撃損傷を検出することが重要な課題となっているが, その検出手法は未だ確立していないのが現状である。

本研究では CFRP 圧力容器の衝撃損傷の検出手法として耐圧試験中に適用可能なアコースティック・エミッション (AE) 法の有効性を検討するため, CFRP 積層板を用いた基礎試験を実施した。衝撃損傷を付与する前後の CFRP 短冊形試験片に対して引張試験中に AE 計測を行うことで, 衝撃損傷を受けた CFRP 構造へ応力負荷時の AE 発生挙動の解明を試みた。

2. 試験方法

2・1 供試体 一方向 CFRP プリプレグシート PYROFIL#380 (三菱レイヨン) を使用し, 積層構成

は $[(0/45/90/-45)_2]_S$ の擬似等方性とした。積層板の板厚は 3.4mm である。作製した積層板を長手方向が 0° 層となるよう 220mm×30mm の短冊形に切り出し, 試験片の両端にアルミニウムのタブを接着した。試験片形状を図 1 に示す。試験片中央には広帯域型 AE センサ (PAC 社製, 型番 WD), 試験片両端のタブ付近には小型 AE センサ (PAC 社製, 型番 PICO) を取り付けた。

尚, 後者のセンサは試験片つかみ部からのノイズを除去するためのガードセンサとして用いた。

2・2 引張試験中の AE 計測及び衝撃試験 引張試験は引張圧縮試験機 (島津製作所製, 型番 AG-I 100kN) を用いて行い, 2 本の試験片 A, B に対して最大荷重をそれぞれ 45kN, 35kN とし単調負荷,

Fig. 1 Specimen configurations.

^{*1} 学生員, 東京工業大学 大学院理工学研究科.

^{*2} 正員, 東京工業大学 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)
E-mail: ssugimot@ginza.mes.titech.ac.jp

ホールド、単調除荷からなる引張試験を実施した。引張速度は 0.3mm/min とし、最大荷重にて 10 分間ホールドを行った。同一の試験片に対して引張試験を 2 回実施した後に AE センサを取り外し、落錘衝撃試験機を用いて衝撃試験を実施した。衝撃子の質量は 2.64kg であり、試験片 A, B に対してそれぞれ 4.0J/mm, 3.25J/mm の衝撃エネルギーを付与した。衝撃試験後には両試験片共に試験片側面に達する貫通はく離が観察された。試験片に再度 AE センサを取り付け、各試験片に対して引張試験中の AE 計測を 3 回実施し、衝撃付与前後の比較を行った。

3. 試験結果と考察

図 2 に試験片 A, B の引張試験中の累積 AE ヒット数の変化を示す。健全材として初回の引張試験時の結果を、損傷材として衝撃試験直後の引張試験時の結果を示した。図より、両試験片共に健全材は負荷直後からマイクロクラック等により AE が多く発生し、徐々にこれらが飽和し AE の発生が落ち着いた後に、荷重 32kN 付近から再び AE の発生が活発化していることが分かる。目視可能な損傷や繊維破断等の可聴音も観測されなかったことから、試験片内部でのマトリクスクラックの発生等が原因と考えられる。一方、衝撃付与後の損傷材では、荷重の増加につれて AE の発生が活発化していく傾向が見られた。図 3 に試験片 B の衝撃試験後の引張試験中に撮影した試験片側面の画像を示す。荷重の増加につれて衝撃によって生じたはく離が開き始める様子が観察でき、30kN 付近からは図 3(b), (c) に示すようなはく離の進展やトランスバースクラックの発生が確認できた。き裂の進展や発生が荷重の増加に伴い活発化し、AE の発生も活発になったと考えられる。また損傷材では、除荷時に多く AE が発生する傾向が見られた。図 4 に各試験片に対して計 5 回行った引張試験中の負荷時と除荷時に発生した AE の総数を示す。図 4(a) より負荷時の AE ヒット数は健全材でも初回と 2 回目では大きく異なり、衝撃試験後では試験をくり返すごとにヒット数が減少していることが分かる。一方で図 4(b) より除荷時には健全材の試験片からはほとんど AE の発生は見られないのに対し、衝撃付与後では試験回数を重ねても多くの AE が発生し、健全材との差が明確に表れた。除荷時にははく離部の摩擦等によって AE が生じると考えられ、除荷時の AE が衝撃損傷の検知に有効であると考えられる。

(結言・参考文献省略)

(a) Specimen A (impact energy 4.0J/mm, max. load 45 kN)

(b) Specimen B (impact energy 4.0J/mm, max. load 35 kN)

Fig. 2 Cumulative AE hits during tensile tests before/after impact tests. "Intact" and "Damaged" show results from first tensile test before and after the impact test, respectively.

Fig. 3 CCD images of specimen side. During first tensile test of specimen B after impact test at (a) 500s, (b) 747s and (c) 800s.

(a) Loading period

(b) Unloading period

Fig. 4 Sum of AE hits during loading and unloading period of tensile tests.