研究論文

多重板厚方向流路を用いた自己修復複合材構造の機能性評価

加藤 佳樹^{*1}, 水口 周^{*2}, 荻原 慎二^{*3}, 武田 展雄^{*4}

(2019年4月6日受付)

Self-Healing Composite Structures
Using Multiple Through-thickness Microvascular ChannelsYoshiki KATO,^{*1} Shu MINAKUCHI,^{*2} Shinji OGIHARA^{*3} and Nobuo TAKEDA^{*4}

(Received April 6, 2019)

Abstract: Self-healing composites using microvascular channel networks have been intensively studied. Microvascular networks in composite in-plane directions are normally utilized to deliver healing agents to damaged areas. However, this channel configuration is not optimal to form robust networks and to infuse large damaged areas. This study proposes a self-healing system using multiple short microvascular channels in the through-thickness direction. First, the impregnation advantage of using this channel configuration is confirmed through delamination infiltration tests. Next, the feasibility of this channel configuration is evaluated by tensile tests and four-point bending tests. Double cantilever beam tests were then conducted to confirm its healing function. Finally, this system is applied to composite stiffened panels and the healing performance is evaluated using compression testing following panel indentation. The healing system almost fully recovered the original strength, confirming its high potential under practical conditions. Additionally, the weight reduction potential of the self-healing system was discussed through a strength comparison of specimens with different thicknesses.

Key words: Self-healing, Tensile strength, Bending strength, Fracture toughness, Compression after indentation

1. 緒 言

複合材料は高比剛性および高比強度という特徴を持ち、航空機構造で広く使用されているが、目視等により発見困難な内部損傷により材料強度が著しく低下する。そのため、現在の航空機の設計では損傷の発生による強度低下を前提とした設計が行われ、結果として未損傷の状態では余剰の多い設計となっている。そうしたなか内部損傷の発生と同時に修復する自己修復材料が研究されている^{1,2)}。修復剤を封入した微細なカプセルを構造内に分散させ、損傷が発生した際にカプセルが割れることで

亀裂を修復剤で満たし治癒するアプローチや^{3,4)}、構造内に導入した流路を用いて外部供給源から損傷に修復剤を含浸させる手法⁵⁻⁸⁾、さらには可逆的に結合および分離できる樹脂を母材として使用する方法^{9,10)}など、これまで様々なアプローチが提案されてきている。特に構造に流路を導入する手法では、複合材面内方向の流路を用いた研究が多数展開されてきており、ガラス中空管 (hollow glass fibers, HGH)¹¹⁾、ポリ乳酸の脱重合反応¹²⁾、離形処理した金属製ワイヤの引き抜き¹³⁾などを用いて、複合材料内に微細な流路を導入している。しかしながら、面内方向の流路を用いた自己修復システムでは、例えば複合材パネルの対向する側面間が単一の流路で形成されるなど、それぞれの流路長が非常に長くなることが想定される。この場合、流路内の一箇所が閉塞することで全体の修復機能を喪失し、また複数箇所同時に損傷が発生した場合には、外部供給源に近い側にある損傷の含浸に修復剤が消費され、供給源から遠い側の損傷を修復でき

^{*1,*3} 東京理科大学

Tokyo University of Science

^{*1} 大学院生 Graduate Student, ^{*3} 教授 Professor^{*2,*4} 東京大学

The University of Tokyo

^{*2} 准教授 Associate Professor, ^{*4} 名誉教授 Professor Emeritus

Fig. 1 Damage impregnation by in-plane channel and through-thickness channels.

ない可能性もある。さらには、修復剤が損傷端部の流路破断点から損傷内に注入されるため、特に損傷が大きい場合に全域を完全に含浸することが難しい¹⁴⁾。著者らの研究グループにおいても、これまでに面内方向流路を用いた自己修復システムを複合材補強板部材に導入し、衝撃後圧縮強度の回復を実証してきているが、修復剤の未含浸部分が発生し強度の完全な回復には至らなかった¹⁵⁾。

そこで本研究では従来の面内方向流路に代わって多重板厚方向流路を用いた自己修復システムを提案する。Fig. 1は層間剥離を修復する際の2つの流路の違いを模式的に示した図である。格子状に設けられた面内方向流路では、構造端部から加圧注入された修復剤が、構造内を長距離移動したのちに剥離端部の複数の流路破断点から損傷内に注入され、剥離内部を流動しながら含浸を行う。このため、長距離移動の際に粘性により修復材の圧力が低下し、注入口から離れた位置まで修復剤が到達しづらくなる。特に剥離サイズが大きい場合には、端部まで含浸することが難しい。一方で板厚方向流路では、修復剤を構造裏面から高い圧力のまま損傷部に直接注入できる。含浸自体も損傷の大きさに応じて、損傷領域の内側から多点かつ多方向に行われるため、修復剤を剥離端部まで含浸させることが容易である。また多重流路を用いるため冗長性が高く、単一の流路が閉塞した場合にもシステム全体としての修復機能を保つことができる。構造裏面に荷重を分担しない犠牲層を設け、その内部の空洞を用いて板厚方向流路を連結し複数のユニットを構成することで、各流路に修復剤注入機構が不要な実用的シ

Fig. 2 Practical system consisting of several units with multiple through-thickness channels. After damage, healing agent selectively flows into damaged unit and pressure sensor detect it. Simultaneous damage detection/healing is possible.

ステムを構築することができる (Fig. 2)。逆止弁を用いて損傷の発生したユニットのみに選択的に修復剤を注入し、その際の流路内圧力変動を圧力センサで検知することで、損傷を発生と同時に検知・修復することも可能になる¹⁶⁾。

本研究では、多重板厚方向流路を用いた修復システムの機能性を実験的に検証する。まず板厚方向流路導入の妥当性を、修復剤含浸試験や強度試験を用いて評価する。次に、補強パネルを用いた押し込み後圧縮試験を実施し、実用環境での修復機能の評価を行う。最後に、構造軽量化に向けた検討として、板厚の異なる供試体を用

Fig. 3 Schematic of delamination infiltration test specimen.

Fig. 4 Photograph of delamination and bending crack.

いた考察を行う。

2. 多重板厚方向流路導入の妥当性評価

多重板厚方向流路導入の妥当性を評価するために以下の3種類の実験を行った。初めに層間剥離への修復剤含浸挙動を含浸試験により評価した。次に流路導入による材料強度への影響を調べるため引張および四点曲げ試験を実施した。最後に修復機能を実証するために double cantilever beam (DCB) 試験を実施した。

2.1 含浸試験

2.1.1 材料と試験方法

これまでに層間剥離内への修復剤含浸挙動を評価した研究が報告されているが、そのほとんどが面内方向流路を用いた修復システムに関するものである^{17,18)}。ここでは提案する多重板厚方向流路の含浸挙動を半透明のガラス繊維強化プラスチック積層板を用いて可視化し、面内方向流路との比較を行うことでその有効性を評価した。

Fig. 3 に用いた試験片の概要を示す。材料はガラス繊維/エポキシプリプレグ (リカライト EGP-87 LA15NR, (株)日本理化工業所, プリプレグ厚さ 0.15 mm) で、積層構成は $[0_6/90_6]_s$ である。試験片の板厚方向および面内方向に流路を形成するため、積層時に離型処理を行った金属素線を埋め込んだ。板厚方向への金属素線の埋め

Fig. 5 Schematic of infiltration test.

込みは、すべてのプリプレグを積層した後に超音波ホーンを用いて行った。一方で面内方向の金属素線は積層時に裏面側の0/90層間に挟むことで埋め込みを行った。試験片硬化後に金属素線を引き抜くことで流路を導入した。面内流路は試験片中央の0°方向に配置し、板厚方向流路はその直線上に10 mm 間隔で複数箇所を導入した。なお、本試験では直線領域に配置された流路を用いた比較を目的としており、面内流路では単一の流路、また板厚方向流路では直線状に配置された複数の流路を用いている。板厚方向流路では多くの樹脂注入口を同一面積に対して設けることができる利点があり、面内流路とは本数が異なっている。円孔(直径 76 mm)を有する金属治具上に単純支持した試験片の中央に、万能試験機 (AG-100kN Plus, 島津製作所) を用いて半径 30 mm の球状先端を持つ圧子を 1 mm/min の速度で 6.5 mm 押し込み、層間剥離を発生させた。Fig. 4 に試験片裏面から光を当てた際の試験片の写真を示す。なお破線は色の变化より確認できた層間剥離の端部を表している。含浸剤には水溶性のグリセリン(粘度 100 mPa・s, (株)健栄製薬)を選択した。これは試験後に含浸剤を洗い流すことで、同一の試験片で板厚方向流路あるいは面内方向流路を用いた試験をそれぞれ実施し比較を行うためである。なおグリセリンの粘度 100 mPa・s は、修復剤で想定される低粘度エポキシ樹脂と同等である¹⁹⁾。Fig. 5 に含浸試験の概要を示す。試験片に接着したチューブとコンプレッサ (0.1 MPa) を用いて、含浸剤を加圧注入した。

2.1.2 試験結果

面内方向流路、多重板厚方向流路どちらを用いた場合にも、注入開始後すぐに剥離内に含浸剤が流入し、押し込み負荷の際の曲げ変形により発生した裏面のベンディングクラックからグリセリンの漏れ出しが観察された。Fig. 6 はそれぞれの流路を用いた場合の加圧注入1分後の写真を示している。面内方向流路では剥離端部において未含浸領域が観察された。写真左側より注入を行った

Fig. 6 Infiltration of delamination. Photographs were taken 1 min after injection.

が、特に下流の右側剥離端部に広く未含浸域を確認できる。含浸方向が一方であり含浸剤の注入圧力が下流において低下することが原因と考えられる。なおこの後注入を続けたが、含浸剤はペンディングクラックから漏れ出るのみで、未含浸域は減少しなかった。また、本試験においては加圧注入口から剥離端までは30 mm程度であったが、航空機などの大型構造においては数メートルの距離が想定され、さらに含浸が困難になることが予想される。一方で多重板厚方向流路の場合では、大きなドライスポットは見られず、ほぼ完全に含浸している様子が確認できる。層間剥離内側の多点から多方向に広がるように含浸したため、剥離内全域で十分な注入加圧が維持され、剥離端まで含浸したと考えられる。以上より多重板厚方向流路の含浸性が、従来の面内方向流路よりも優れていることが確認できた。

2.2 流路導入による材料強度への影響評価

2.2.1 材料および試験方法

流路導入による材料の引張および圧縮強度への影響を調べるため、引張および四点曲げ試験を実施した。板厚方向流路を導入した試験片に追加して、面内方向流路を導入した試験片と流路のない試験片も作製し強度の比較を行った。

まず Fig. 7 に引張試験に用いた試験片の概要を示す。図中の白点線は試験片中央位置を示している。材料は炭素繊維/エポキシプリプレグ(T700S/2592, (株)東レ)で積層構成は $[0/90]_{2S}$ である。含浸試験と同様に10 mm間隔で板厚方向流路を形成することを想定し、ここでは流路の周期性を考慮した10 mmの試験片幅で流路が中

Fig. 7 Schematic of tensile test specimens.

Fig. 8 Schematic of four-point bending test specimens.

央に配置された試験片構成とした。先述した金属素線を用いた方法で試験片内部に直径0.2 mmの流路を形成した。板厚方向流路は試験片中央に、面内方向流路は板厚中央の90°層間に繊維に沿って配置した。万能試験機(AG-100kN Plus, 島津製作所)を用いて変位制御1 mm/minで破断するまで引張荷重を負荷した。各試験条件において3回の試験を実施した。

次に圧縮強度を評価するために用いた四点曲げ試験片を Fig. 8 に示す。材料には炭素繊維/エポキシプリプレグ(T700S/2592, (株)東レ)を用い、積層構成は $[0_2/90_2]_{4S}$ とした。四点曲げ試験片は内側圧子間の試験片上面で圧縮破壊するため、この領域に流路を設けて試験を行った。板厚方向流路は試験片幅方向中央に一箇所、面内方向流路は試験片幅方向(90°方向)に一箇所形成した。一般に面内方向流路を用いた自己修復複合材では、流路を厚さ方向に分散させて損傷含浸機能を向上させるため²⁰⁾,

ここでは圧縮特性に特に影響を与えると考えられる表面近傍の流路として、表面から3層目と4層目の90°層の間に繊維に沿って流路を形成した Case 1 と、1層目と2層目の0°層の間に繊維に直交する流路を形成した Case 2 の試験片を作製した。一方の板厚方向流路を導入した試験片では、圧縮ひずみが最大となる試験片上面に流路口を配置させ、強度が最も低くなるケースを想定した試験を実施した。試験は ASTM D7264 を参照し、万能試験機 (AG-100kN Plus, 島津製作所) を用いて、支点圧子半径 5 mm, 外側圧子間距離 144 mm, 内側圧子間距離 72 mm, 試験速度 5 mm/min で破壊するまで曲げ荷重を負荷した。なお圧子部での局部破壊を抑えるため試験片との間にクッション材として厚さ 1 mm のテフロンシートを挿入した。各条件で 5 回試験を実施した。

2.2.2 試験結果

引張および四点曲げ試験で得られた破壊荷重を Fig. 9, 10 に示す。エラーバーは標準偏差を示す。引張試験においては、流路を導入した試験片でも引張破断は流路のない箇所で見られ、破壊荷重には流路の有りなしで有意な差は生じなかった。なお事前検証で実施した流路径 0.5 mm の試験片では、流路位置において引張破断が発生し破壊荷重も低下することを確認しており、流路径が 0.2 mm 以下の場合には引張強度に流路が与える影響を無視できることが分かった。一方の四点曲げ試験においては、流路のない試験片は大半が内側圧子直下で破壊したのに対し、流路を有する試験片では流路位置で圧縮破壊が発生した。これは流路縁で繊維のミスアライメントが生じたことで圧縮強度が低下したことに起因するものであると考えられる。特に面内方向流路で繊維と直交する方向に形成した Case 2 においては、50% 近くまで強度が低下している。一方で板厚方向流路を導入した試験片は流路なしの場合の強度の 80% 程度まで耐荷しており、板厚方向流路が構造強度を著しく低下させないことが分かる。また流路の板厚方向の分布構成によっては、板厚方向流路の方が面内方向流路よりも、材料強度に与える影響が小さいケースがあることが確認できた。

2.3 DCB 試験による修復機能評価

2.3.1 材料と試験方法

最後に DCB 試験を用いて板厚方向流路による亀裂修復機能の評価を行った。試験片の概要を Fig. 11 に示す。材料には炭素繊維/エポキシプリプレグ (T700S/2592, (株)東レ) を用い、積層構成は $[0]_{32}$ とした。初期亀裂として離型処理した厚さ 12.5 μm のポリイミドフィルムを中間層 (16, 17 層間) に埋め込んだ。また金属線を用

Fig. 9 Result of tensile tests. Error bar indicates standard deviation.

Fig. 10 Result of four-point bending tests. Error bar indicates standard deviation.

Fig. 11 Schematic of DCB test specimen.

いて直径 0.2 mm の板厚方向流路を計 4 本形成した。板厚方向流路は注入口から剝離までの距離が短く、短時間で亀裂を含浸できるため、硬化時間の短いシアノアクリレート系接着剤を修復剤として使用した。具体的には

Fig. 12 Load-displacement curves obtained in DCB tests.

耐衝撃性や靱性に優れる Loctite480 (Henkel) を選定した。粘度は約 200 mPa・s と比較的高いが、板厚方向流路においては十分に亀裂を含浸することができる。試験は ASTM D5528 を参照し、万能試験機 (AG-100kN Plus, 島津製作所) を用いて開口変位速度 2 mm/min で亀裂進展させた後に修復を行った。流路口に取り付けたチューブから修復剤を 5 分間加圧注入 (0.1 MPa) した。注入時に修復剤が溢れないように試験片側面を密閉した。注入後 30 分常温環境下に放置して修復剤を硬化させたのち、再度 DCB 試験を行い修復機能を評価した。

2.3.2 試験結果

Fig. 12 に得られた荷重変位曲線を示す。最初の試験 (Virgin) においては、弾性変形の後に亀裂が安定成長したのに対して、修復後 (Healed) ではより高い荷重まで耐荷してから亀裂が不安定に進展した。修復後試験片の破面を観察したところ、修復剤が完全に亀裂を含浸していることが確認できた。亀裂は修復剤内を進展しており、最初の試験で確認された繊維架橋は修復後の試験片には見られなかった。修正梁理論により計算した初期亀裂位置での破壊靱性値は、最初の試験の 0.28 kJ/m^2 から修復後には 0.67 kJ/m^2 まで向上しており、修復剤と試験片破面が優れた接着強度を有すること、また修復剤自体の靱性が母材樹脂よりも高かったため靱性が向上したと考えられる。以上により、板厚方向流路による高粘度修復剤の含浸および選定した接着剤の高い亀裂修復機能を確認した。

3. 板厚方向流路システムの補強パネルへの適用

航空機構造を模擬した補強パネルに板厚方向流路を用いた修復システムを適用し、押し込み後圧縮試験で修復機能の実証を行った。

Fig. 13 Schematic of CFRP stiffened panel with sealing.

3.1 材料と押し込み試験方法

Fig. 13 に用いた試験片の概要を示す。材料は CFRP プリプレグ (T700S/2592, (株) 東レ) で、試験片は二つの L 型部材 (スティフナ)、スキン、およびそれらの間を埋めるデルトイドから構成されている。積層構成はスキン、スティフナともに $[45/0/-45/90]_s$ であり、デルトイド部は 0° 材を体積分充填したもので構成した。板厚方向流路を前節同様の手法で片側のスティフナフランジ部に 5 箇所導入した。

押し込み試験は試験片の四辺を単純支持する金属治具を用いて実施した。スキン側表面から流路位置のフランジ部を直径 30 mm の半球状圧子で 6.25 mm 押し込んだ。押し込み位置を Fig. 13 に示す。除荷後の表面押し込み痕深さは 0.25 mm 以下であり、目視発見困難な損傷 (barely visible damage) を模擬できている。生じた損傷を超音波検査装置 (Matrixeye, (株) 東芝) により観察した後に修復を行った。事前検証試験を行った際、修復剤を加圧注入するとスキン/フランジ間の剥がれから修復剤が大量に漏れ出し、損傷を十分に含浸することができなかったため、試験片のスキン/フランジ間をシール材 (パスコーク, セメダイン) で覆った試験片とシール材のない試験片を作製した。修復剤には前節と同様に Loctite480 (Henkel) を使用し、修復剤をフランジ側面に接着したチューブを用いて加圧注入 (0.1 MPa) した後、常温環境下で 30 分硬化させた。硬化後に再度超音波観察を行った。

3.2 内部損傷の超音波観察結果

Fig. 14 および 15 はそれぞれ、シーリングなしおよびシーリング有りの場合の超音波観察結果を示している。なお、図中のそれぞれの損傷は、反射波の到達時間より

Fig. 14 Ultrasonic C-scan of specimen without sealing.

Fig. 15 Ultrasonic C-scan of specimen with sealing.

識別している。シーリングのない場合、スキン/フランジ剥がれとスキン/フランジ界面近傍の剝離が一部含浸されているのみであり、損傷全体の修復には至っていない。これは、前述の通りスキン/フランジ間の開口部に修復剤が漏れ出たために、損傷内部まで加圧注入することができなかったためと考えられる。一方でシーリング有りの場合には、スキン表面近傍の剝離およびスキン/フランジ界面の剥がれ端部のわずかな領域を除き、内部の損傷は全体にわたってほぼ完全に修復されたことが確認できる。スキン表面近傍の剝離は、そこまで板厚方向流路が達し

Fig. 16 Comparison of compressive strength.

ていなかったために修復できなかったと考えられる。またスキン/フランジ界面の未含浸部は、修復剤の粘性が高く亀裂端部まで含浸しなかったため生じたと考えられる。以上は、シーリングによる含浸機能の向上を強く示唆する結果であった。

3.3 圧縮試験

前節の損傷修復試験片 (Healed) に追加し、無損傷試験片 (Virgin) と修復試験の際と同じ押し込み変位を与えた損傷試験片 (Damaged) を作製した。補強パネル端部の形状に合致する T 字型溝を加工したアルミ製治具とエポキシ系接着剤を用いて、端部 20 mm をポッティング処理したのちに、万能試験機 (AG-100kN Plus, 島津製作所) を用いて 0.5 mm/min の速度で圧縮荷重を負荷し強度を評価した。低荷重域において、試験片の表裏両面に貼り付けた 4 枚のひずみゲージの出力が一致し、試験片両端が平行であることを確認したのちに荷重を増加させた。損傷修復試験片においては最終破壊直前に亀裂音が鳴った時点で除荷し、試験機から取り外した後に超音波観察を行った。観察後に再度試験機に取り付け、最終破壊まで圧縮荷重を負荷した。

Fig. 16 に各条件での破壊荷重を示す。無損傷試験片は 59.3 kN で、損傷試験片は 43.0 kN で破壊し、押し込み損傷により強度が 30% 程度低下することを確認した。損傷修復試験片では、シーリングなしの場合 44.0 kN で破壊し、未修復の損傷試験片とほとんど変わらなかった。一方でシーリング有りの場合には 57.3 kN で破壊し、無損傷試験片を基準とすると 96% まで強度が回復した。板厚方向流路による修復が実用的な試験片構成においても機能することが分かったとともに、シーリングの重要性が強度回復の観点からも確認された。損傷修復試験片の破壊前後の超音波観察結果を Fig. 17 に示す。修復剤の含浸しなかったスキン/フランジ界面剥がれ端部から新たな亀裂が進展し、最終的な破壊に至ったことが示唆さ

Fig. 17 Ultrasonic C-scan of healed specimen with sealing. Crack propagated from non-infiltrated area, leading to final failure.

れる。一方で修復部には最終破壊後にも剥がれが発生していなかった。より低粘度の修復剤を用いる、あるいは注入加圧力を増やす等により未含浸領域を減らすことで、さらなる強度向上が期待できる。

3.4 構造軽量化に向けた検証

現在の航空機構造においては、目視発見できない損傷は運用中に発見することができないため、損傷の発生による強度低下を前提とした構造設計が行われるが、損傷を発生と同時に修復可能なシステムを搭載することで強度低下を前提とする必要がなくなり、より軽量の構造が実現する可能性がある^{21,22)}。前述のように、板厚方向流路を用いた自己修復システムは、剥がれ損傷による強度低下を即座に回復可能であり、構造軽量化に向けた高いポテンシャルを有すると考えられる。ここでは、強度低下を前提とした従来の構造設計に基づく厚肉試験片と、3.3節までに実証した自己修復システムを備えた薄肉試験片の強度比較を行うことで、軽量化に向けた考察を行った。厚肉試験片のスキン部の積層構成は $[45/90/-45/0]_{2S}$ であり、3.3節の試験片の2倍の厚さを有する。流路の導入を含めて3.3節までと同様の方法で試験片を作製し、押し込み後圧縮試験を実施した。押し込み試験においてスキン部の損傷を抑制するために圧子直径を16mmに変更した以外は、すべて3.3節までと同一条件で試験を行った。

得られた圧縮強度をまとめたものをFig. 18に示す。左側は新たに得られた厚肉試験片の結果であり、右側の薄肉試験片の結果は前節のFig. 16から抜粋したものである。厚肉試験片では損傷のない場合では83.2 kN、損傷のある場合では60.9 kNで破壊し、薄肉試験片と同様に押し込み損傷によって強度が30%程度低下した。前述

Fig. 18 Comparison of compressive strength of thick and thin specimens. Thin specimen after healing has strength equivalent to that of thick damaged specimen, implying massive weight reduction is possible using self-healing system.

の通り、損傷を発見および修復できない従来の構造では、損傷による強度低下を前提とする必要があり、厚肉試験の損傷後強度を用いて構造設計を行う必要がある。一方で自己修復システムを備えた薄肉試験片においては、損傷を発生と同時に修復可能であるため、損傷修復後の強度を用いて構造設計を行うことができる。厚肉試験片と薄肉試験片の結果について、まず損傷後で比較すると、当然ながら厚肉試験片の方が薄肉試験片よりも高い強度を有したが、薄肉試験片では自己損傷修復システムが機能することで、損傷後の厚肉試験片と同等のレベルまで強度が回復している。この結果は、構造を大幅に薄肉化した場合にも、修復システムを備えることで従来構造と同等の機能を果たすことができる可能性を示唆している。今回は1ケースの試験に基づく考察であるため、今後様々な試験片構成および荷重条件下での検証が必要ではあるが、自己修復システムの有する高い潜在力を示す例であると考えている。

4. 結 言

本研究では、多重板厚方向流路を用いた自己修復システムの機能性を実験的に評価した。まず流路導入の妥当性を評価するため、修復剤の含浸試験および強度試験を行った。板厚方向流路は従来の面内方向流路と比較して損傷の含浸性に優れ、また材料強度にも著しい影響を与えないことを確認した。次にDCB試験を用いて機能性を実証した接着剤を用いて、補強パネルの修復を実施した。超音波観察結果から損傷含浸へのシール材の有効性

を確認するとともに、強度を96%まで回復できることを実証し、多重板厚方向流路を用いた修復システムの有効性を確認した。最後に、板厚の異なる供試体の比較を通して、自己修復システムによる構造軽量化に関する考察を行った。

本研究はJSPS 科研費 25709082 の助成を受けて行ったものである。また(株)日本理化工業所からはガラス繊維/エポキシブリブregを提供いただいた。ここに、甚大なる謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) B.J. Blaiszik, S.L.B. Kramer, S.C. Olugebefola, J. S. Moore, N.R. Sottos & S.R. White : *Ann. Rev. Mater. Res.*, **40** (2010), 179-211.
- 2) R.S. Trask, H.R. Williams & I.P. Bond : *Bioinspir. Biomim.*, **2**, 1 (2007), 1-9.
- 3) S.R. White, N.R. Sottos, P.H. Geubelle, J.S. Moore, M.R. Kessler, S.R. Sriram, E.N. Brown & S. Viswanathan : *Nature*, **409**, 6822 (2001), 794-797.
- 4) A.J. Patel, N.R. Sottos, E.D. Wetzel & S.R. White : *Composites Part A*, **41** (2010), 360-368.
- 5) M.U. Saeed, B.B. Li & Z.F. Chen : *Compos. Struct.*, **154**, 15 (2016), 129-141.
- 6) J.F. Patrick, K.R. Hart, B.P. Krull, C.E. Diesendruck, J.S. Moore, S.R. White & N.R. Sottos : *Adv. Mater.*, **26**, 25 (2014), 4302-4308.
- 7) K.S. Toohey, N.R. Sottos, J.A. Lewis, J.S. Moore & S.R. White : *Nat. Mater.*, **6**, 8 (2007), 581-585.
- 8) J.F. Cullinan, P. Velut, V. Michaud, M.R. Wisnom & I.P. Bond : *Composites: Part A*, **87** (2016), 203-211.
- 9) E.B. Murphy, E. Bolanos, C. Schaffner-Hamann, F. Wudl, S.R. Nutt & M.L. Auad : *Macromolecules*, **41**, 14 (2008), 5203-5209.
- 10) X.X. Chen, M.A. Dam, K. Ono, A. Mal, H.B. Shen, S.R. Nutt, K. Sheran & F. Wudl : *Science*, **295**, 5560 (2002), 1698-1702.
- 11) J.W.C. Pang & I.P. Bond : *Compos. Sci. Technol.*, **65** (2005), 1791-1799.
- 12) H. Dong, A.P. Esser-Kahn, P.R. Thakre, J.F. Patrick, N.R. Sottos, S.R. White & J.S. Moore : *ACS Appl. Mater. Inter.*, **4** (2011), 503-509.
- 13) R. Luterbacher, R.S. Trask & I.P. Bond : *Smart Mater. Struct.*, **25**, 1 (2016), 015003.
- 14) C.J. Norris, J.A.P. White, G. McCombe, P. Chatterjee, I.P. Bond & R.S. Trask : *Smart Mater. Struct.*, **21**, 9 (2012), 094027.
- 15) N. Sakurayama, S. Minakuchi & N. Takeda : *Compos. Struct.*, **132** (2015), 833-841.
- 16) S. Minakuchi, D. Sun & N. Takeda : *Smart Mater. Struct.*, **23**, 11 (2014), 115014.
- 17) A.J. Russell & C.P. Bowers : Repairing delaminations with low viscosity epoxy resins, Debonding/Delamination of Composites AGARD-CP-530 (1992).
- 18) J. Hall, I.P.S. Qamar, T.C.S. Rendall & R.S. Trask : *Smart Mater. Struct.*, **24** (2015), 037002.
- 19) R. Luterbacher, T.S. Coope, R.S. Trask & I.P. Bond : *Compos. Sci. Technol.*, **136** (2016), 67-75.
- 20) R.S. Trask, G.J. Williams & I.P. Bond : *J. R. Soc. Interface*, **4** (2007), 363-371.
- 21) 水口 周, 高井 元, 大嶽晴佳, 武田展雄 : 材料システム, **30** (2012), 47-51.
- 22) S. Minakuchi, K. Yokota & N. Takeda : Proc. IWISHM (2015), pp. 1112-1119.