

審査の結果の要旨

氏名 金永錫

本論文は「Improvement of Damage Tolerance in Brittle Materials Using a Tough Surface Composite Layer」（日本語訳：表面複合材料を用いた脆性材料の耐力学損傷性の向上）と題し、セラミックスなどの脆性破壊を生じる材料の表面に傷や衝撃に対して抵抗力のある薄い繊維強化セラミックスを設けることにより、耐力学損傷特性を大幅に改善する考え方を提案し、実験的に証明したものであり、全7章よりなる。

第1章は序論であり、構造用セラミックスを始めとする脆性材料の強度は、表面に傷が導入されることにより著しく低下し、構造部材としての機能が損なわれる問題が実用化への障害になっていることを指摘した。ついで、現状でのセラミックスコーティングによる表面保護では解決が難しく、何らかの新しい表面保護の手法が求められていることを示した。損傷許容性を持つ酸化物繊維強化酸化物基複合材料をセラミックスコーティングのかわりに用いると、損傷に強い表面ができるというアイデアを示し、証明することを本研究の目的としたことを述べている。

第2章では、織物構造とした Al_2O_3 繊維強化 Al_2O_3 マトリックス複合材料を、Si-Ti-C-O 繊維結合型複合材料の表面複合材料として用いた場合の効果を確かめた。平織状とした Al_2O_3 繊維に ZrO_2 を含浸させたものを Al_2O_3 マトリックス中に複合化したものを表面複合材料として用いた。この表面複合材料は本論文中を通して用いられているので、以後、SCL (Surface Composite Layer) と記述する。一層の織物からなる SCL と Si-Ti-C-O 繊維結合型複合材料を真空ホットプレス法で接合し、得られた接合体を用い、SCL 側の表面に鋼球押し込み試験を行い、破壊過程を詳細に調べた。その結果から、SCL が Si-Ti-C-O 繊維結合型複合材料に対する力学的な保護層として有効であることを確認した。

第3章では、SCL をガラス表面に接合したものを用い、破壊挙動の直接観察を試み、ガラス基材の破壊に対する SCL の効果を検証した。SCL には第2章と同様なものを用いた。接合体の SCL 側表面に ZrO_2 球を用いて圧子押し込み試験を室温で行った。試験の際に2個の CCD カメラを用いて亀裂の発生と破壊挙動を異なる角度から直接観察する方法を用い、直接観察によってガラス基材の初期亀裂発生とリング亀裂の形成および成長の様子を観察した。ガラス単体の初期亀裂発生荷重は約 0.9kN であるのに対し、SCL 接合ガラスの場合は約 1.8kN まで増加することを確認した。この現象は、SCL の内部に生じる微視破壊の累積と、界面の結合力がガラス基材表面への応力遮蔽に大きな影響を与えることに起因する、ことを有限要素法解析を用いて明らかにした。

第4章では、SCL と基材の接合力が基材亀裂発生挙動に及ぼす影響を調べた。SCL をガラスで挟んで作製したサンドイッチ試験片の熱暴露を行い、熱暴露時間を変えることにより界面結合力の異なる試験片を作製した。界面剥離の臨界エネルギー解放率を DCB 試験片を用いて測定した。その結果、熱暴露を行っていない試験片の界面の臨界エネルギー解放率は $0.02\text{J}/\text{m}^2$ で、10h 熱暴露したものと 20h 熱暴露したものはそれぞれ $0.03\text{J}/\text{m}^2$ と $0.09\text{J}/\text{m}^2$ であった。熱暴露時間の異なる試験片に第3章と同様の圧子押し込み試験を行い、押し込み試験から得られた亀裂発生荷重は臨界エネルギー解放率の増加に伴って増加することを

明らかにした。また、圧子押し込みにより損傷を与えた試験片の 3 点曲げ試験を行った。その結果、ガラス単体の場合には約 0.8kN で初期亀裂が発生した後、荷重は急激に減少したが、SCL を接合したガラスの強度は損傷のない試験片の場合とほぼ同じレベルであることを確認した。曲げ強度は界面の臨界エネルギー解放率に依存し、臨界エネルギー解放率が増加するとガラスに破壊が生じる押し込み荷重の許容量も増加することを確認した。これらの結果から、SCL を用いて力学損傷に対する大きな許容性を得るには、SCL と基材間の界面臨界エネルギー解放率を大きくすることが望ましいことを明らかにした。

第 5 章では、第 3 章と同様の材料を用いて、衝撃力が SCL 表面に加えられたときの SCL の効果を調べた。SCL を 1 層および 2 層接合した試験片表面に、直径 5mm の鋼球を 40 m/s と 110 m/s の速度で衝突させ、破壊の様子を超高速カメラで撮影するとともに、衝撃後の試験片の状況を詳細に観察した。衝突速度が 40m/s 以上ではガラス単体は細かい破片になったが、SCL を接合したガラスは細かな破片にはならず、コーン状の亀裂が表面近傍に生成するにとどまった。さらに、1 層よりも 2 層の SCL を用いた場合のほうが効果が顕著であることも確認した。これらの結果から、SCL が衝撃エネルギーを吸収し、ガラス基材に与えるエネルギーを減少できることを示した。

第 6 章では、SCL を接合したガラスの耐疲労挙動を調べた。第 3 章と同様の材料に ZrO_2 球を用いた繰り返し押し込み試験を、室温、大気中、1 Hz の周波数で行った。また、直径の異なる球状圧子を用いて同様の試験を行い、力学的条件の異なる環境下での疲労挙動の比較を行った。ガラス単体では押し込み回数が数回以内で亀裂の発生が観察された条件下で、SCL を接合したガラスの場合は繰り返し押し込み回数は 10^5 回までは極めてわずかの表面損傷しか観察されず、SCL は疲労負荷に対しても効果があることを証明した。

第 7 章は総括であり、本論文の結果を整理することにより、本論文で提案した表面複合材料(SCL)の考え方が、脆性材料の表面に対する外部からの力学損傷に対して効果があると結論できることを述べている。

以上のように本論文は、脆性的な破壊挙動を示す材料の表面を利用した耐力学特性の向上に対して新たな考え方を示し、それを実験的に検証したものであり、複合材料学に対する寄与が大であり、博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。