

# 論文審査報告書

氏名	やしき かずひで 屋敷和秀
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博機第47号
学位授与日	令和4年3月19日
論文題目	セルロースナノファイバー添加アクリル中間膜を用いたガラス/ ポリカーボネート積層安全ガラスの衝撃破壊挙動に関する研究
論文審査委員	(主査) 富山県立大学 教授 真田和昭 教授 中川慎二 教授 堀川教世 准教授 棚橋満 名古屋大学 教授 荒井政大

## 内容の要旨

工作機械には、その多くは目視による確認ができるように窓が設置されており、各種安全ガラスが採用されている。工作機械の窓として使用される安全ガラスに対しては、安全性、視認性、切削油に耐える耐薬品性が要求されている。ポリカーボネート(PC)をアクリル中間膜(ACIL)で貼り合わせた合わせガラス構造のガラス/ポリカーボネート(G/PC)積層安全ガラスは、これらの要求を満たしている。近年では、加工精度や加工効率の向上によって、加工速度の高速化や主軸の高回転化が進んでおり、危険性は増大している。一方で、工作機械の小型化やカバーの開閉機構の多様化も進んでおり、工作室内部の空間の確保と軽量化の観点から、安全ガラスの薄肉化が望まれている。従って、耐衝撃性を向上させた安全ガラスを開発し、構成部材の厚さを最適化することで、安全ガラスの薄肉化を図ることが重要である。

G/PC積層安全ガラスの耐衝撃性は、ACILの特性に大きな影響を受けると予想されるため、ACILへのフィラー添加等により複合材料化し、力学特性を変化させることで、G/PC積層安全ガラスに対してより最適な中間膜特性が得られる可能性がある。安全ガラスにおいては透明性も重要な要求特性であることから、フィラーを添加してもACILの透明性を維持しなければならない。そこで、ACILへ添加するフィラーとして、繊維径がナノサイズで高アスペクト比が特徴であるセルロースナノファイバー(CNF)に着目した。CNFは、繊維径が可視光線領域の波長(380~780 nm)よりも十分に小さく、CNF添加による光の散乱が起きにくいいため、ACILの透明性を損なわないことが期待できる。しかし、G/PC積層安全ガラスのACILへCNFを添加することで、耐衝撃性を向上させようとする検討は、ほとんど行なわれていない。また、G/PC積層安全ガラスの衝撃破壊挙動も十分に解明されておらず、G/PC積層安全ガラスの薄肉化のための設計指針も確立されていないのが現状である。そこで本論文では、

G/PC 積層安全ガラスの耐衝撃性向上と薄肉化のための積層構造設計指針の確立を目的として、CNF を用いたアクリル中間膜の複合材料化に関する検討、G/PC 積層安全ガラスの衝撃破壊挙動解明のための実験と有限要素法による数値シミュレーションを行なっている。

本論文は5つの章から構成されており、第1章では研究背景と目的、第2章ではガラス／ポリカーボネート積層安全ガラスの特性評価、第3章ではセルロースナノファイバー添加アクリル中間膜を用いたガラス／ポリカーボネート積層安全ガラスの特性評価、第4章ではセルロースナノファイバー添加アクリル中間膜の接着特性評価、第5章では結論が纏められている。

第1章では、安全ガラスの分類、工作機械で使用される安全ガラスの要求特性と課題を示した。また、安全ガラスの中でもさらに安全性を高めた合わせガラスとフィルターとして注目されている CNF に関して、これまでの研究動向を調査し、G/PC 積層安全ガラスに対する研究の位置づけを明らかにして、本論文の目的を示した。

第2章では、G/PC 積層安全ガラスの落錘衝撃試験を行い、各部材構成における臨界衝撃エネルギーと衝撃破壊による損傷状態に及ぼす構成部材の影響を検討した。また、G/PC 積層安全ガラスの落錘衝撃試験に関する有限要素解析を陽解法ソルバーLS-DYNA を用いて行い、G/PC 積層安全ガラスの衝撃破壊挙動と加撃体の衝撃エネルギーの関連性について考察した。

落錘衝撃試験では、PC 厚さの増大に伴い、臨界衝撃エネルギーは増大し、PC 厚さが同一である場合には ACIL 厚さが大きくなると臨界衝撃エネルギーは増大することを明らかにした。また、損傷状態は、PC 厚さが小さくなるほど損傷状態が大きくなり、PC 厚さ 3 mm から 1 mm になると損傷状態に大きな変化があった。PC 厚さが同一の場合、ACIL 厚さが大きくなると全体の損傷の程度が大きくなり、加撃体衝突部付近では損傷の程度は小さくなった。中間膜厚さを変化させることで損傷状態が大きく変化することから、中間膜の力学特性と厚さを最適化することで、同一厚さのガラスおよび PC を使用した構成であっても耐衝撃性を向上できることが示唆された。厚さ 5 mm の PC を用いた G/PC 積層安全ガラスは、厚さ 5 mm の PC 単体の場合に比べて、臨界衝撃エネルギーが 2 倍程度増大することを明らかにした。

陽解法有限要素解析では、加撃体衝突時に衝突部より応力が発生し、時間経過とともに、応力の発生範囲が G/PC 積層安全ガラス全体へ拡大していくことが明らかとなった。また、PC 厚さが増大すると剛性は増大し、衝撃荷重を G/PC 積層安全ガラス全体で受けやすくなり、PC 厚さが減少すると剛性は減少し、衝撃荷重を G/PC 積層安全ガラス全体で受けにくくなる特性に変化した。さらに、ACIL 厚さが増大すると、ACIL によって、衝撃荷重を G/PC 積層安全ガラス全体に伝播させやすくなり、加撃体衝突部付近の応力集中を緩和させることが明らかとなった。

落錘衝撃試験と陽解法有限要素解析の結果を比較すると、実験によって厚さ 3 mm の PC を用いた G/PC 積層安全ガラスの臨界衝撃エネルギーが約 300 J 付近に存在する結果が得られたこと、解析によって ACIL 厚さが増大すると臨界衝撃エネルギーがわずかに増大する結果が得られたことから、解析結果は実際の実験結果を良く表現していることを確認できた。

第3章では、ビーズミルにより得られた CNF 分散液を用いて CNF 添加アクリル中間膜を作製し、光学特性および引張特性評価を行うとともに、CNF 添加アクリル中間膜を用いた G/PC 積層安全ガラスの落錘衝撃試験によって G/PC 積層安全ガラスの耐衝撃性を評価している。また、CNF 添加アクリル中間膜の微視構造を考慮した代表体積要素モデルを用いた弾性特性に関する有限要素解析を行い、弾性特性に及ぼす CNF の添加量とアスペクト比の影響を明らかにした。

引張試験結果から、CNF-L/ACIL の場合では、応力に及ぼす CNF 添加の影響は小さいが、高ひずみ領域では、少量の CNF 添加によって応力は増大するものの、CNF 濃度が増大すると応力は単調に減少する傾向を示した。一方、CNF-S/ACIL の場合では、応力は CNF 濃度 0.2wt% の場合のみで増大した。また、これには CNF 濃度に最適値があると考えられ、CNF のアスペクト比によって異なることが示唆された。

CNF/ACIL の引張特性に関する有限要素解析では、CNF と ACIL の界面が完全に接着していると仮定した場合、CNF アスペクト比 10 の場合において、添加量 0.1wt% 程度では応力にはほとんど影響はなかったが、CNF 添加量の増大に伴い応力の増大が顕著に表れることが明らかとなった。一方、CNF 添加量 5wt% の場合において、CNF アスペクト比の影響が大きく現れ、20%ひずみにおける応力はアスペクト比が大きくなると顕著に増大した。

動的粘弾性測定 (DMA) 試験では、ACIL に CNF を添加した場合は、CNF 濃度 0wt% の場合と比較すると、周波数 1 Hz における  $E'$  および  $E''$  の温度分散曲線は、ガラス転移に伴う変曲領域においてやや減少する傾向を示し、 $\tan \delta$  の温度分散曲線は、低温側へシフトした。また、CNF 添加量が増大すると、 $E'$  および  $E''$  はさらに減少し、 $\tan \delta$  はさらに低温側にシフトしたが、その程度はいずれも微小であった。さらに、時間-温度換算則に基づいた WLF 式によって得られた  $\tan \delta$  のマスターカーブより、DMA 試験で得られない高周波数領域において、CNF 濃度 0.5wt% の場合では、0wt% の場合よりも  $\tan \delta$  がやや高い値で推移することが明らかとなった。

落錘衝撃試験の結果から、CNF-L/ACIL を用いた G/PC 積層安全ガラスは、CNF 濃度 0.5wt% までの範囲で、CNF 濃度が増大すると臨界衝撃エネルギーは増大した。これは、CNF-L/ACIL が加撃体の衝撃エネルギーを加撃体衝突部から、試験体全体へ散逸させているためであると考えられる。一方、CNF 濃度 1wt% の場合では、CNF 濃度 0wt% の場合よりも臨界衝撃エネルギーは減少した。加撃体衝突部付近のみ損傷の程度が大きい傾向を示したことから、CNF-L/ACIL が加撃体の衝撃エネルギーを試験体全体へうまく分配できない中間膜特性に変化したと考えられる。これより、ACIL への CNF 添加は G/PC 積層安全ガラスの耐衝撃性を向上させることが明らかとなり、その場合の CNF 濃度には 0 から 1.0wt% の範囲内に最適値があることが示唆された。

第 4 章では、G-CNF/ACIL および PC-CNF/ACIL 接着界面を有する試験片を用いたへき開試験と引張せん断試験を行い、G-CNF/ACIL および PC-CNF/ACIL 接着界面の接着強度を評価している。また、接着界面の接着強度を考慮した G/PC 積層安全ガラスの落錘衝撃試験に関する陽解法有限要素解析を行い、衝撃破壊挙動に及ぼす G-ACIL および PC-ACIL 接着界面の剥離の影響を検討した。

G-CNF/ACIL 接着界面におけるへき開試験および引張せん断試験では、接着強度は、CNF 濃度の増大に伴い減少する傾向を示した。また、破壊状態は、凝集破壊が支配的であり、接着界面の接着特性としては良好であった。試験体の破断面観察から、CNF 濃度の増大に伴い、線状のき裂から網目状のき裂に変化した。ACIL 内部に CNF が存在することにより、ACIL が微視的に破壊する特性に変化し、CNF 濃度の増大により、その傾向は強くなったと考えられる。

PC-CNF/ACIL 接着界面における引張せん断試験では、接着強度は、G-CNF/ACIL 接着界面の場合と同様に、CNF 濃度の増大に伴い減少する傾向を示した。また、G-CNF/ACIL 接着界面の場合と比べて、接着強度は著しく低下し、破壊状態は界面破壊が支配的であった。

PC-ACIL 接着界面の剥離の影響を考慮した G/PC 積層安全ガラスの落錘衝撃試験に関する陽解法有限要素解析では、せん断破壊応力を増大させた場合よりも垂直破壊応力を増大させた場合の方が、加撃

体速度の減衰の程度は大きくなる傾向を示した。これより、G/PC 積層安全ガラスの耐衝撃性向上には、PC-ACIL 接着界面の引張せん断強度よりもへき開接着強度を増大させる方が効果的であることが示唆された。また、垂直破壊応力とせん断破壊応力のバランスによって、時間経過における PC-ACIL 接着界面の剥離の挙動と相当応力分布は複雑に変化すると考えられる。

## 審査の結果の要旨

工作機械の窓として使用される安全ガラスに対しては、安全性、視認性、切削油に耐える耐薬品性が要求され、ガラス (G) とポリカーボネート (PC) をアクリル中間膜 (ACIL) で貼り合わせた合わせガラス構造のガラス/ポリカーボネート (G/PC) 積層安全ガラスが適用されている。本論文は、G/PC 積層安全ガラスの耐衝撃性向上と薄肉化のための積層構造設計指針の確立を目的として、CNF を用いたアクリル中間膜の複合材料化検討、G/PC 積層安全ガラスの衝撃破壊挙動解明のための実験と有限要素法による数値シミュレーションの結果について論じたものであり、全5章で構成されている。

第1章では、研究背景と目的を述べており、安全ガラスの分類、工作機械で使用される安全ガラスの要求特性と課題を示すとともに、セルロースナノファイバー (CNF) に関する研究動向を調査し、CNF 添加アクリル中間膜 (CNF/ACIL) を用いた G/PC 積層安全ガラスに対する研究の位置づけを明確にしている。

第2章では、G/PC 積層安全ガラスの落錘衝撃試験を行い、各部材構成における臨界衝撃エネルギーと衝撃破壊による損傷状態に及ぼす構成部材の影響を検討している。また、G/PC 積層安全ガラスの落錘衝撃試験に関する有限要素解析を陽解法ソルバーLS-DYNA を用いて行い、G/PC 積層安全ガラスの衝撃破壊挙動と加撃体の衝撃エネルギーの関連性について考察している。落錘衝撃試験では、PC 厚さの増大に伴い、臨界衝撃エネルギーは増大し、PC 厚さが同一である場合には ACIL 厚さが大きくなると臨界衝撃エネルギーは増大することを明らかにしている。また、陽解法有限要素解析では、ACIL 厚さが増大すると、ACIL によって、衝撃荷重を G/PC 積層安全ガラス全体に伝播させやすくなり、加撃体衝突部付近の応力集中を緩和させることを明らかにしている。さらに、落錘衝撃試験と陽解法有限要素解析の結果から、厚さ 3 mm の PC を用いた G/PC 積層安全ガラスの臨界衝撃エネルギーが約 300 J 付近に存在することや、ACIL 厚さが増大すると臨界衝撃エネルギーがわずかに増大するという解析結果が実際の実験結果を良く表現していることを明らかにしている。これより、G/PC 積層安全ガラスの衝撃破壊挙動を精度良く表現できる解析モデルを提案することに成功している。

第3章では、CNF/ACIL の光学特性および力学特性を評価するとともに、CNF/ACIL を用いた G/PC 積層安全ガラスの落錘衝撃試験による耐衝撃性を評価している。また、CNF/ACIL の微視構造を考慮した代表体積要素モデルを用いた弾性特性に関する有限要素解析を行い、弾性特性に及ぼす CNF の添加量とアスペクト比の影響を検討している。落錘衝撃試験の結果から、CNF/ACIL を用いた G/PC 積層安全ガラスは、CNF 濃度 0.5 wt% までの範囲で、CNF 濃度が増大すると臨界衝撃エネルギーが増大したが、CNF 濃度 1 wt% の場合では、CNF 濃度 0 wt% の場合よりも臨界衝撃エネルギーが減少した。これより、ACIL への CNF 添加は、G/PC 積層安全ガラスの耐衝撃性を向上させることを明らかにしている。また、その場合の CNF 濃度の最適値は、1 wt% 未満であることを見出している。

第4章では、G-CNF/ACIL および PC-CNF/ACIL 接着界面を有する試験片を用いたへき開試験と引張せん断試験を行い、G-CNF/ACIL および PC-CNF/ACIL 接着界面の接着強度を評価している。また、接着界面の接着強度を考慮した G/PC 積層安全ガラスの落錘衝撃試験に関する陽解法有限要素解析を行い、衝撃破壊挙動に及ぼす G-ACIL および PC-ACIL 接着界面の剥離の影響を検討している。G-CNF/ACIL 接着界面および PC-CNF/ACIL 接着界面におけるへき開試験および引張せん断試験の結果から、接着強度が CNF 濃度の増大に伴い減少する傾向を示し、破断面に現れるき裂が線状から網目状に変化することを明らかにしている。これより、CNF が ACIL 内部に存在することにより、微小な

き裂が多数形成されることを明らかにし、これが G/PC 積層安全ガラスの耐衝撃性を向上させる一因になっていることを見出した。

第5章では、第4章までを統括し結論を述べるとともに今後の展望を述べている。

以上、本論文は、研究の方法論・研究手法、得られた結果とその解釈が適切であり、的確な文章表現が与えられている。その研究の手法・結果には独創性が認められ、その成果は機械工学の機械材料分野および材料力学分野における工学的な価値が認められ、工業の発展に貢献できると評価される。本論文に関連する発表論文は3編であり、いずれの論文も申請者が筆頭者である。

令和4年1月19日に博士論文の審査及び最終試験を実施し、申請者は当該分野および周辺分野に関して博士としての十分な全般的知識を持ち、学術研究にふさわしい討論ができ、独立して研究を遂行する能力を有するものと判定し、博士（工学）の学位論文として合格であると認められた。