

フィルム貼付した建築用板ガラスの衝撃破壊挙動シミュレーション解析

Numerical analysis of breakage behaviors of film-attached window-glass under impact load

李昊洋*, 向井洋一**

Li Haoyang, Mukai Yoichi

* 修 (工), 神戸大学大学院生, 工学研究科建築学専攻, (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

** 博 (工), 神戸大学教授, 工学研究科建築学専攻, (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

キーワード: 板ガラス, 飛散防止フィルム, FEM 解析, 耐衝撃性能

Keywords: Plate glass, Scattering prevention film, FEM analysis, Shock-resistant performance

1. はじめに

建築物への衝突作用や風圧作用による衝撃力に対しては、構造躯体の耐衝撃性ととも、建物表皮の非構造材の脆弱挙動への対策も重要である。特に、建物の建築計画上、開口部に対しては、光透過性を持つ板ガラス材の使用が不可欠であり、板ガラス材への衝撃作用対策の検討が必要となる。板ガラスへの衝撃作用に対しては、安全性を高める方法として、破片の飛散防止のために薄膜高分子フィルムをガラスに貼付する方法が考えられる。この方法は、既存のガラスに貼付するだけで、比較的安価で容易に安全性の向上が期待できる点から推奨される手法といえる。

板ガラスへの薄膜フィルム貼付による効果は破片の飛散防止だけでなく、衝撃力を受けるときの貫通抵抗力が増加すること¹⁾や、ガラスに発生するひずみの低減効果についても報告されており²⁾、これらは薄膜フィルム貼付が板ガラスの耐衝撃強度向上に寄与する根拠を示唆するものである。しかしながら、補強効果を定量的に評価するための検討は十分になされているとは言えない。建築用板ガラスの物性自体に、ばらつきがある上に、実際に使用されるフィルム材料の性能の相違や、貼付方法の違いが、板ガラスの耐衝撃性に大きく影響する可能性が考えられる。

本研究では、衝突作用を受ける板ガラスの破壊挙動と破片の飛散状態について、FEM 解析によりこれらを再現・可視化することを目的とし、適切なモデル構築に取組んでいる^{3,4)}。本報では、薄膜フィルムを貼付した板ガラス面に衝突作用を受けた際の破壊挙動について、耐衝撃性に影響を与える重要なフィルムの物性である、弾性係数や粘着強度とともに、フィルムの貼付方法の相違に対して、FEM 解析を行った検証結果を報告する。

2. 衝突実験の概要

衝突体による衝撃作用のもとで、実際の板ガラスの破壊状況を確認するために、まず衝撃破壊試験を実施し、高速度カメラを用いて板ガラスの破壊と破片の飛散挙動を観察した。実験実施状況の写真を図-1 に示す。衝突面に 100 mm×100 mm の正方形断面のアルミニウム板を接着した質量 45 kg の衝突体を振り子装置によりフロート板ガラス試験体の中央部分に向けて衝突させた。衝突速度を約 4 m/s とするために、衝突体は 0.8 m 振り上げた。薄膜フィルム材には、市販のガラス飛散防止シート(アクリル系粘着剤付ポリエステルフィルム製シート)を用いており、ガラスの被衝突面に対して裏面に水貼りにより貼付した。ガラス破片の飛散状況の記録用の高速度カメラをガラス試験体背部に設けたチャンバーボックス上部に下向きに設置した。同時に、衝突体の衝突速度を確認するため、ガラスの真横方向からも高速度カメラでの撮影を行った。

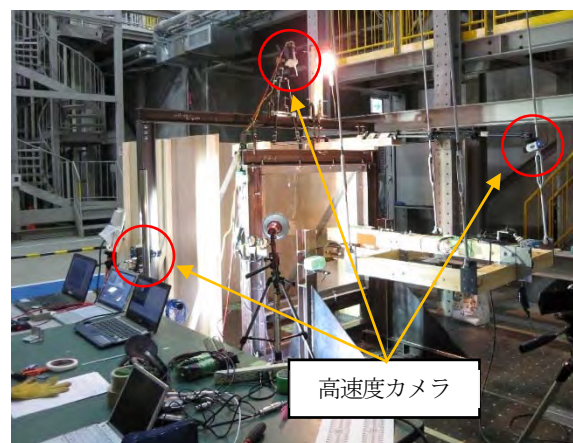


図-1 振り子式衝突実験装置の概要

3. FEM 解析モデル

FEM 解析では、衝突実験で用いた試験体の寸法に準じて数値モデル化し、解析には LS-DYNA を用いた。板ガラスと衝突体にはソリッド要素を用いた。板ガラスの要素サイズは天地・左右方向共に約 10 mm 程度とし、厚み方向は 2 mm とした。なお、メッシュ形状については、被衝突領域（板ガラスの中央部）から周辺に向けて、放射状に分布するように作成した。本解析対象の板ガラスの厚さは 6 mm である。フィルムの貼付方法については、一枚（全面）貼付と二枚（分割）貼付の 2 つのケースに対する解析を行う。一枚貼付の場合のモデル全体の要素総数は 42391 であり、二枚貼付の場合は 42328 となった。

表-1 FEM モデルの材料定数

ガラスモデル		
密度	ヤング係数	ポアソン比
2530 kg/m ³	210 GPa	0.2
衝突体モデル		
密度*	ヤング係数	ポアソン比
22500 kg/m ³	70 GPa	0.3
フィルムモデル		
密度	ヤング係数	ポアソン比
1410 kg/m ³	4 GPa	0.4

* 衝突体の密度は、モデル形状を直方体にデフォルメしているため、衝突体重量が一致するように定めている。

板ガラスモデルには、ガラスのような脆性材料に適した JOHNSON-HOLMQUIST-CERAMICS 材料モデル (MAT110) を適用した。板ガラスモデルの材料パラメータには、既往のパラメータサーベイ研究結果⁴⁾により、実験時の挙動を比較的良く再現できた物性値を与えている。フィルム材料には、ELASTIC (MAT001) 材料モデルを適用した。フィルムを貼付した破壊状態を再現するため、ガラスモデルとフィルムモデルとの間に接触条件として、AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK を適用した。本解析に用いた板ガラスモデル、衝突体モデル、フィルムモデルの主要な材料物性値を表-1 に示す。

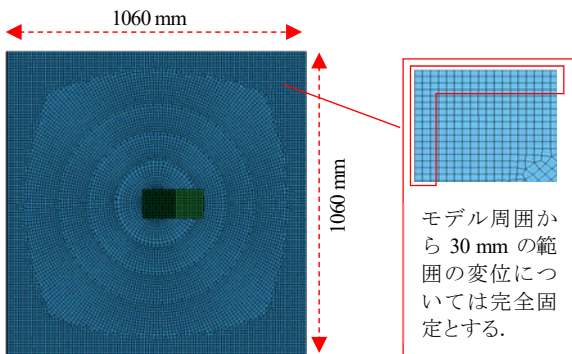


図-2 板ガラスの FE モデル

板ガラスモデルの破壊条件として、相当塑性ひずみが 0.24% を超えるか、引張強度 T が規定値を超えた時に破断するものと設定した。なお、ガラスモデルの周囲四辺から 30 mm の範囲は、図-2 に示すように、その変位を完全固定とする拘束条件を設定した。

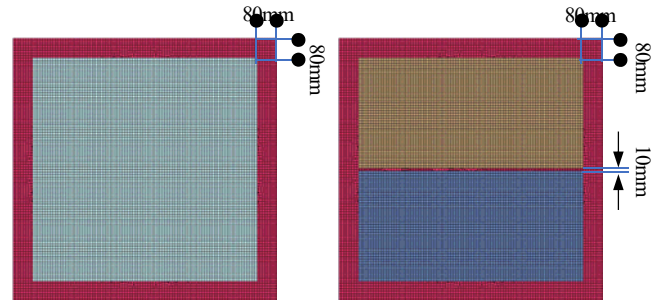


図-3 フィルム貼付した板ガラスの FE モデル

フィルム貼付した板ガラスのモデルは図-3 のようになり、フィルム部分が、ガラスの周囲四辺よりも、80 mm ずつ内側の領域に張り付けられた状態とした。ガラスモデルの周囲四辺から 30 mm の範囲を完全に固定とするため、ガラスの四周に、幅 50 mm のフィルム貼付のない部分を有する。なお、二枚貼付の場合は、二つのフィルム間に 10 mm の間隔を与えている。

本解析では、モデルの単位系は、kg, mm, s とし、力の単位には mN, 応力の単位には kPa を用いている。以下のシミュレーション結果では、すべて衝突後 0.09 s における実験結果、ないし解析結果の比較検証を行うものとした。ガラス材料の弾性に関しては異方性を考慮しないものとし、式(1)により、せん断弾性係数 G を与えるものとした（基準値は、 8.75×10^7 [kPa] とした）。また、最大引張強度 T の基準値には、 1.2×10^4 [kPa] を用いる。

$$G = E/2(1 + \nu) \quad (1)$$

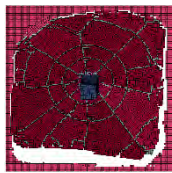


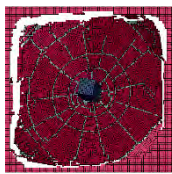
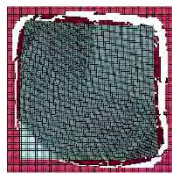

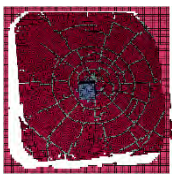


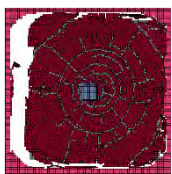


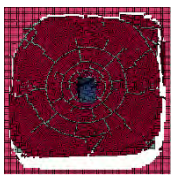


4. フィルムのヤング係数の影響

飛散防止シートに用いられるフィルム素材には、主にポリエステルフィルムが使用されており、近年フィルムを数十層にも積層して、破断特性を著しく向上させ、耐貫通性能を持たせた、新しいフィルム開発もなされている。衝撃作用に対するガラスの脆弱性を改善するためのフィルム貼付の効果に関しては、フィルム素材の弾性係数とともに、接着面の粘着に関する性能が重要な影響を有するものと考えられる。そこで、まずフィルムのヤング係数 (E) を影響因子と考えた FEM 解析を行った。

衝突実験に用いた飛散防止シートのフィルム素材の一般的なヤング係数の値は、 $E_0^f = 4 \times 10^6$ [kPa] 程度と考えられる。そこで、この値を基準値と考えて、フィルムのヤング係数 (E) が異なる場合のケーススタディを行った解析結果を表-2 に示す。なお、フィルムの粘着部

分の破壊状況を考慮するため、当該解析では、両者の接触条件において、せん断強度 (SFLS) の値を 1×10^4 [kPa] と引張強度 (NFLS) の値を 5×10^3 [kPa] とした⁵⁾。

表-2 フィルムのヤング係数 E が 4×10^5 から 8×10^6 [kPa] までの範囲の解析結果の比較

ヤング係数 E	解析結果		
	正面視	背面視	側面視
4×10^5			
2×10^6			
4×10^6			
6×10^6			
8×10^6			

これらのシミュレーション結果を比較すると、基準値 $E_0^f = 4 \times 10^6$ [kPa] に対して、フィルムのヤング係数 E が変化しても、亀裂の発生状況やガラス面の破壊性状に大きな差異は見られない。ただし、 E が 1桁小さい 4×10^5 [kPa] の場合、中央部分の衝突力を直接受けるエリアの面外への明確なたわみの集中が見られた。なお、ガラスの破損部分は一体的に飛散するが、 E の差異による相違はあまり見られない。フィルムのヤング係数がある程度大きければ、局所的な衝突による荷重がフィルム貼付範囲に分散され、フィルム境界に沿って生じるガラスの亀裂により、ガラス面全体が崩落する破壊性状となる。

フィルムを一枚貼付した板ガラスの試験体の破壊状況を図-4 に示す。この実験結果を FEM 解析結果と比較すると、 E が基準値より小さいケースについて、解析結果が実験結果を概ね再現できていると考えられる。

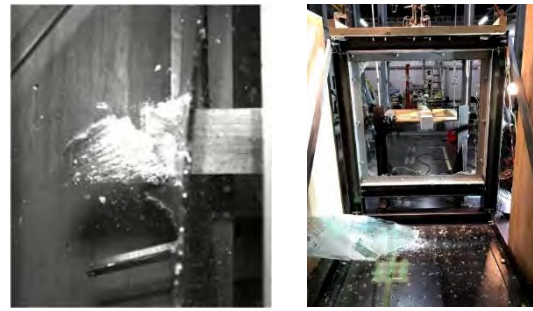


図-4 フィルムを一枚貼付した板ガラスの衝突実験における破壊挙動

5. フィルムの粘着強度と貼付方法の影響

今回の実験ではフィルムをガラス面に水貼りにより貼付したが、フィルム材の貼付方法 (静電吸着法、接着剤の使用など)、貼付時のガラス表面とフィルム表面の清浄度 (粉塵、気泡、水滴など)、貼付時の温度や湿度、接着剤の種類や物理的な性質、などの条件により、フィルムの吸着性能にばらつきが生じる。こうしたフィルム貼付時の条件を正確に測定することは通常困難であり、従って、解析においても、粘着力のばらつきに配慮する必要がある。例えば、フィルムの粘着性能を実験的に計測した既往研究^{6,7)}によれば、せん断強度 (SFLS) は、 $6 \sim 20 \times 10^3$ [kPa]、引張強度 (NFLS) は、 $4 \sim 20 \times 10^3$ [kPa] 程度の値であったとの結果が報告されている。

そこで、以下においては、フィルムの粘着性能のばらつきに関して、フィルムモデルとガラスモデルとの間の接触条件の設定において、せん断強度 (SFLS) と引張強度 (NFLS) の値をパラメータとし、FEM 解析による破壊性状の変化を観察する。

また、フィルム材の貼付領域の面積、すなわち、フィルムをガラス面全体に一枚貼付とするか、分割したフィルムを並べて貼付するか、など、フィルムの貼付方法の相違によっても、板ガラスの破壊性状が異なるものと考えられる。以下では、一枚貼付と二枚貼付の場合に対する比較検証も併せて行う。

5.1 フィルムの粘着強度の影響 (一枚貼付)

フィルムをガラス面全体に一枚貼付とした場合について、フィルムとガラスの接着面の粘着性を表現する物性値として、せん断強度 (SFLS) の値と引張強度 (NFLS) の値をパラメータとしたシミュレーション解析を行った。ここでは、①引張強度のテスト値として、 $N = 5 \times 10^2, 5 \times 10^3$ [kPa] のいずれかとした場合について、せん断強度の値を $S = 1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$ [kPa] の範囲で変化させた場合の比較検討結果 (表-3a, 3b)、②せん断強度のテスト値として、 $S = 1 \times 10^3, 1 \times 10^4$ [kPa] のいずれかとした場合について、引張強度の値を $N = 5 \times 10^2 \sim 1 \times 10^4$ [kPa] の範囲で変化させた場合の比較

表-3a 粘着部のせん断強度 S の値の相違による
解析結果の比較 : $N = 5 \times 10^2$ [kPa] (一枚貼付)

SFLS	NFLS : $N = 5 \times 10^2$		
	正面視	背面視	側面視
1×10^3			
3×10^3			
5×10^3			
1×10^4			
2×10^4			

表-3b 粘着部のせん断強度 S の値の相違による
解析結果の比較 : $N = 5 \times 10^3$ [kPa] (一枚貼付)

SFLS	NFLS : $N = 5 \times 10^3$		
	正面視	背面視	側面視
1×10^3			
3×10^3			
5×10^3			
1×10^4			
2×10^4			

検討結果 (表-4a, 4b) を示す。

フィルムを一枚貼付とした場合について、表-3a のシミュレーション結果に見られるように、粘着部の引張強度の値を非常に小さく設定した場合 ($N = 5 \times 10^2$ [kPa]) には、粘着部のせん断強度 S の値の相違によらず、衝突体がガラス面を貫通するとともに、フィルム材がガラス面から剥離してしまう様子が観察される。ガラス面の破壊範囲は、粘着部のせん断強度 S の値が大きくなるにつれて、中央部から周辺部に向かって広範となり、 $S = 5 \times 10^3$ [kPa] 程度以上の場合は、ガラス縁端四周のフィルムを貼付していない領域に沿ってガラスに亀裂を生じ、破片が全面的に崩落する様子が見られる。

一方、表-3b のシミュレーション結果に見られるように、粘着部の引張強度の値をある程度大きく設定した場合 ($N = 5 \times 10^3$ [kPa]) には、粘着部のせん断強度の値が $S = 1 \times 10^3$ [kPa] の場合を除いて、フィルム材は衝突後もガラス面から剥離せず、ガラス縁端四周のフィルムを貼付していない領域に沿ってガラス面が破壊し、ガラス面全体が、衝突体の運動エネルギーを受けて、後方に押し

出される挙動がみられる。(但し、今回の解析では、フィルム厚をやや大きく設定していたため (1 mm)、衝突体の衝突箇所のフィルム面の面外孕み出しが再現されず、フィルム+ガラスの挙動の再現が十分ではない。)

続いて、表-4a のシミュレーション結果に見られるように、粘着部のせん断強度の値を非常に小さく設定した場合 ($S = 1 \times 10^3$ [kPa]) には、粘着部の引張強度 N の値の相違によらず、衝突体がガラス面を貫通するとともに、フィルム材がガラス面から剥離してしまう様子が観察される。破壊性状も N の値の相違によらず、いずれも大差なく、ガラス面の破壊範囲については、衝突体の衝突部分近傍に集中しており、ガラス面の縁端まで衝突応力が伝達されていないことがわかる。すなわち、衝突体の衝撃力をガラス面全体に分散し、貫通を防止するためには、粘着部のせん断強度の大きさの設定が重要な因子となることが示唆される。

これと比べて、表-4b のシミュレーション結果を見ると、粘着部のせん断強度の値をある程度大きく設定した場合 ($S = 1 \times 10^4$ [kPa]) には、粘着部の引張強度 N の値

表-4a 粘着部の引張強度 N の値の相違による
解析結果の比較 : $S = 1 \times 10^3$ [kPa] (一枚貼付)

NFLS	SFLS : $S = 1 \times 10^3$		
	正面視	背面視	側面視
5×10^2			
1.5×10^3			
2.5×10^3			
5×10^3			
1×10^4			

表-4b 粘着部の引張強度 N の値の相違による
解析結果の比較 : $S = 1 \times 10^4$ [kPa] (一枚貼付)

NFLS	SFLS : $S = 1 \times 10^4$		
	正面視	背面視	側面視
5×10^2			
1.5×10^3			
2.5×10^3			
5×10^3			
1×10^4			

の相違によらず、ガラス縁端四周のフィルムを貼付していない領域に沿ってガラス面の破壊が生じていることがわかる。粘着部の引張強度の値は非常に小さい $N = 5 \times 10^2$ [kPa] の場合を除いて、フィルム材は衝突後もガラス面から剥離しておらず、破壊性状は N の値の相違によらず、いずれも大差は見られない。

以上により、フィルムをガラス面全体にわたり一枚貼付とした場合においては、 N ないし S の値を小さく取ると、衝突体がガラス面を貫通するとともに、フィルムとガラスの剥離を生じる可能性があるといえる。なお、破壊領域の大きさについては、粘着部のせん断強度 S の値の影響が支配的であることが示唆される。

5.2 フィルムの粘着強度の影響 (二枚貼付)

既存の窓ガラス面に飛散防止のためのフィルム材を後貼りすることを考えると、ガラス面の四周に必ず補強されない境界部が生じることから、フィルム材の一枚貼付は、粘着部にある程度のせん断強度を与えれば、衝突により破壊されたガラス破片が、拡散することを抑制で

きる一方で、衝撃力が大きくなると、フィルム貼付部分全体が崩落するリスクを有することがわかる。そこで、ガラス面全体に対して、上下2段に分けた部分に、2枚に分割したフィルムをそれぞれ貼り付け、二枚貼付とした場合について、せん断強度 (SFLS) の値と引張強度 (NFLS) の値をパラメータとしたシミュレーション解析を行った。ここでは、①引張強度のテスト値として、 $N = 5 \times 10^2, 5 \times 10^3$ [kPa] のいずれかとした場合について、せん断強度の値を $S = 1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$ [kPa] の範囲で変化させた場合の比較検討結果 (表-5a, 5b)、②せん断強度のテスト値として、 $S = 1 \times 10^3, 1 \times 10^4$ [kPa] のいずれかとした場合について、引張強度の値を $N = 5 \times 10^2 \sim 1 \times 10^4$ [kPa] の範囲で変化させた場合の比較検討結果 (表-6a, 6b) を示す。

フィルム材を二枚貼付とした場合について、表-5a のシミュレーション結果に見られるように、粘着部の引張強度の値を非常に小さく設定した場合 ($N = 5 \times 10^2$ [kPa]) には、粘着部のせん断強度 S の値の相違によらず、衝突体がガラス面を貫通するとともに、フィルム材長辺のう

表-5a 粘着部のせん断強度 S の値の相違による
解析結果の比較 : $N = 5 \times 10^2$ [kPa] (二枚貼付)

SFLS	NFLS : $N = 5 \times 10^2$		
	正面視	背面視	側面視
1×10^3			
3×10^3			
5×10^3			
1×10^4			
2×10^4			

表-5b 粘着部のせん断強度 S の値の相違による
解析結果の比較 : $N = 5 \times 10^3$ [kPa] (二枚貼付)

SFLS	NFLS : $N = 5 \times 10^3$		
	正面視	背面視	側面視
1×10^3			
3×10^3			
5×10^3			
1×10^4			
2×10^4			

ち、衝突体が衝突するガラスの中央位置側からフィルム材がガラス面より剥離する様子が見られる。但し、ガラス面の破壊は、ガラス面中央の上下部分のフィルム間の分割線に沿って、水平方向の亀裂を生じることにより、ガラス面全体にわたる破壊が回避されていることがわかる。なお、粘着部のせん断強度 S の値によらず、衝突体の貫通前後において、速度の低減に寄与する効果は、ほとんどないものと考えられる。

一方、表-5b のシミュレーション結果に見られるように、粘着部の引張強度の値をある程度大きく設定した場合 ($N=5 \times 10^3$ [kPa]) には、粘着部のせん断強度の値が $S=1 \times 10^3$ [kPa] の場合を除いて、フィルム材は衝突後もガラス面から剥離せず、ガラス面中央高さの上下部分のフィルム間の分割線に沿って、フィルム+ガラス面が上下に分断され、それぞれの部分が、上下縁端部の水平線をヒンジとして、ガラス面が観音開きになるような破壊性状がみられる。衝突体の貫通は、いずれの条件下でも生じているが、 $N=5 \times 10^2$ [kPa] の場合と比べると、 S の値が大きくなるにつれて、衝突体の運動エネルギーが低

減され、同時刻における、貫通後の衝突体位置が手前側（衝突側）に留まっていることが観察される。



図-5 フィルムを二枚分割して貼付した板ガラスの
衝突実験における破壊挙動

続いて、表-6a のシミュレーション結果に見られるように、粘着部のせん断強度の値を非常に小さく設定した場合 ($S = 1 \times 10^3$ [kPa]) には、粘着部の引張強度 N の値の相違によらず、衝突体がガラス面を貫通するとともに、フィルム材がガラス面から剥離している様子が観察さ

表-6a 粘着部の引張強度 N の値の相違による
解析結果の比較 : $S = 1 \times 10^3$ [kPa] (二枚貼付)

NFLS	SFLS : $S = 1 \times 10^3$		
	正面視	背面視	側面視
5×10^2			
1.5×10^3			
2.5×10^3			
5×10^3			
1×10^4			

表-6b 粘着部の引張強度 N の値の相違による
解析結果の比較 : $S = 1 \times 10^4$ [kPa] (二枚貼付)

NFLS	SFLS : $S = 1 \times 10^4$		
	正面視	背面視	側面視
5×10^2			
1.5×10^3			
2.5×10^3			
5×10^3			
1×10^4			

れる。ガラス面の破壊性状については、 N の値の相違によらず、いずれの場合も、衝突体の衝突後すぐに、衝突位置の近傍からフィルムの剥離が生じ、フィルムによる衝撃緩和効果がほとんど得られないことが確認される。

これと比べて、表-6b のシミュレーション結果を見ると、粘着部のせん断強度の値をある程度大きく設定した場合 ($S = 1 \times 10^4$ [kPa]) には、粘着部の引張強度 N の値の相違によらず、フィルム材の分割線に対応するガラス面中央部に水平な亀裂を生じながら、衝突体が貫通する様子が見られる。いずれのケースもガラス面からのフィルム材の剥離は見られない。粘着部の引張強度の値が非常に小さい $N = 5 \times 10^2$ [kPa] の場合を除いて、ガラス面中央部の水平方向亀裂は、左右のガラス縁端部に到達すると、亀裂が縦方向に生じるとともに、ガラス面が観音開きになって破壊していることがわかる。ガラス破片の飛散は生じておらず、衝突体に押し出された破壊部分が面外にたわむ際に、衝突応力を分散するため、衝突体の速度を低減している様子が観察される。

図-5 にフィルム材を上下に分割し、二枚貼付とした

場合のガラス面への衝突実験時の破壊挙動を示す。シミュレーション結果と実験結果とを比較すると、 N と S の値の両方が、ある程度大きな値を取る場合においては、実験結果に近い現象が再現されていると考えられる。

以上のシミュレーション解析結果の分析を通して、フィルム材とガラス面との粘着性能に起因する衝突破壊性状の相違は、以下のように整理できる。

- ① 粘着層のせん断強度 S の値が非常に小さい場合、引張強度 N の値によらず、衝突体がガラス面を貫通するとともに、ガラス面からフィルム全体を瞬時に剥離させるため、フィルムの貼付効果がほとんど見られない。このことは、フィルムを一枚貼付とした場合も二枚貼付とした場合も同様である。
- ② N の値が非常に小さい場合、 S の値が小さければ、衝突時にフィルム材が、衝突体により剥離されるが、 S の値がある程度大きくなると、フィルムの剥離が起りにくくなるため、ガラス破片とフィルムが粘着した状態で飛散する現象が再現された。
- ③ フィルム材を一枚貼付とした場合において、 N の値

と S の値がある程度大きい場合には、衝撃力がガラスの周囲に向かって分散されるため、フィルム材の外縁部に沿ったガラス面の亀裂が生じ、ガラス面全体が衝突体により押し出される破壊性状がみられた。ガラス破片の飛散が防止できる一方、ガラス面の大半が一体的に崩落する破壊性状となる。

- ④ フィルム材を二枚貼付とした場合、 N の値と S の値がある程度大きい場合には、2枚のフィルムの継ぎ目のラインに沿って亀裂が端部に進展し、その後上下に向かって縁端部の亀裂が生じ、衝突体の貫通時に、ガラス面が観音開きになる破壊性状がみられた。一枚貼付の場合と比較して、フィルム+ガラス面の面外変形が少なく、衝突体の速度低減効果は小さくなる。なお、破壊後のガラス面全体の崩落は生じにくくなることがわかる。

6. まとめ

本研究では、比較的低速で衝突作用を受けるガラス面において、フィルムをガラス表面に貼付した場合の破壊性状を可視化するために、衝突実験を実施するとともに、FEM 解析による実験結果の再現を試みた。解析では、フィルム材のヤング係数とともに、フィルムをガラス面に貼付した粘着層のせん断強度 S と引張強度 N の値の相違が解析結果に及ぼす影響を検証するとともに、フィルムの貼付方法（一枚貼付、二枚貼付）について、これらの破壊性状の相違について検討を行った。本報での検討範囲内においては、以下のような知見を得た。

- (1) フィルムとガラス面の粘着層のせん断強度 S と引張強度 N の値を一定とし、フィルム材のヤング係数を変化させた解析結果を見ると、ガラス面の破壊性状には、ほとんど相違がみられないことが分かった。
- (2) 粘着層のせん断強度 S と引張強度 N の値のいずれかが非常に小さい値をとると、衝突体の貫通後にフィルム材の剥離が生じるため、フィルム材の貼付効果は、ほとんど得られないことが分かった。
- (3) 粘着層のせん断強度 S と引張強度 N の値がある程度

大きく、衝突時にフィルム材がガラス面から剥離しにくい場合については、フィルム材をガラス面全体に対して一枚貼付とした場合は、フィルム材の周辺境界部に沿って、ガラス材に亀裂が生じ、ガラス面全体の崩落が生じた。一方、フィルム材を2枚に分割して二枚貼付とした場合は、フィルムの継ぎ目に沿った亀裂が生じ、ガラス面が観音開きとなって、衝突体が貫通する破壊性状がみられた。

参考文献

- 1) Peter Dietz: Research into the Use of Polymeric Film to Enhance the Safety of Side glass, SAE Transactions, Vol. 110, Section 5: Journal of Materials and Manufacturing, 782-785, 2001.
- 2) 小島朋久, 歌川和宏, 納富充雄: 薄膜フィルム貼付による板ガラスの耐衝撃強化, 実験力学, 18(2), 103-109, 2018.
- 3) 向井洋一, 小原博人, 松本真樹, 堀慶朗, 永野康行: 建築用板ガラスの衝撃破壊による被害拡散の低減対策に関する研究, 2019年度衝撃波シンポジウム論文集, (3B3-3)1-6, 2020.
- 4) 李昊洋, 向井洋一: 衝突作用を受ける建築用板ガラスの破壊挙動のシミュレーション解析, 2020年度衝撃波シンポジウム論文集, (2B1-4)1-4, 2021.
- 5) Xigong Zang, Hong Hao and Guowei Ma: Development of P-I curve for laminate glass windows, Australasian Structural Engineering Conference, 534-541, 2012.
- 6) Klára Machalická, Marina Eliášová: Adhesive joints in glass structures: effects of various materials in the connection, thickness of the adhesive layer, and ageing, International Journal of Adhesion & Adhesives, 72, 10-22, 2017.
- 7) K. Machalická, I. Horčíčková and M. Eliášová: Shear Adhesive Connections for Glass Structures, 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol.96, 012069.1-9, 2015.