合わせガラスの衝撃破壊実験とその考察*

尾田 十八 *1

木田 外明 *2

小西美智孝 *3

古出 雅士 *4

稲葉 允 *4

Dynamic Fracture Experiment of Laminated Glass
and Its Considerations

Juhachi ODA, Sotoaki KIDA, Michitaka KONISHI, Masashi KOIDE AND Makoto INABA

Square plates of laminated glass, whose interlayer is the polyvinyl butyral, are impacted transversely by a circular steel ball. The impact critical energies U_c and U_p , which are the energy to initiate a crack in the outerlayer glasses and penetration energy of the ball, are measured by changing the dropping height of the ball. The static bending strength and U_c are dependent on the total thickness T of glass in the laminated glass. But, U_p is independent of T and dependent on the thickness of the interlayer. In the laminated glass, the crack initiates from the glass of the impact side, and the next cracks initiate from the glass of the side on the reverse of the impact side. The penetration fracture of the laminated glasses consists of three steps. The first step is until initial cracks initiate in the outerlayer glasses, the second step is the bending fracture of the laminated glass, and the third step is the fracture due to shearing of the interlayer.

Key Words; Fracture, Composite Materials, Laminated Glass, Polyvinyl Butyral, Fracture Mechanism, Penetration Fracture

1. 緒言

ガラスは外部からの衝撃に対し低荷重で破壊し、破壊後はその形状を保持する能力をもたない。この欠点を補うため、ガラスの間に中間膜と称するプラスチックフィルムをはさみ、中間膜の変形によってエネルギーを吸収するような構成にしたものが合わせガラスである。従って、合わせガラスは剛性を分担するガラス板とエネルギー吸収を分担する中間膜という別個の機能をもつ材料が複合されて成り立っている。ガラス板は通常のガラスを、中間膜はポリビニルブチラル⁽¹⁾（略称P.V.B）が一般に使われている。近年、この合わせガラスは自動車の前面窓ガラスとしての利用はもちろん、各種建築構造物へも広く利用される傾向にある。しかし、その破壊メカニズムはほとんど明確にされていない。そこで本研究ではこの点を明らかにする目的で、「自動車用安全合わせガラス試験法」で規定された合わせガラス試験片を用いて、初期き裂発生実験お

よび貫通破壊実験等を行った。そして初期き裂が発生するまでのエネルギーは合わせガラスのガラス厚さが、貫通破壊では中間膜が大きな影響を及ぼすことなどを明らかにした。さらに実験結果を総合して、合わせガラスの貫通破壊過程を考察したのでここに報告する。

2. 合わせガラス供試片の構造と特性

本研究では、図1にその引張試験特性を示すA、B2種類のP.V.Bで作られた合わせガラスをそれぞれ合わせガラスA、Bと定義し、各種実験ではこれらと中間膜のない単体ガラス板の3種類を供試片として用いる。図2はこのような合わせガラス板から作られた短冊型試験片の形状を示す。また、表1はそれらの寸法を示す。

さて、図2の試験片を用いて各種ガラス板の引張試験を行った。図3はそれらの応力-ひずみ線図（ここで応力は引張荷重を各試料の中間膜を含めた全断面積で割ったものである。）を示す。これより合わせガラスの引張応力-ひずみ関係は直線的で、単体ガラスのそれとはほぼ同様の傾向を示すものであることがわかる。一方、静的3点曲げ試験も行った。図4はその負荷重と荷重点直下の試験片の自由面長手方向のひずみとの関係を示す。以上の結果より、静的引張強さおよび曲

* 平成元年11月10日 材料力学講演会において講演、原稿受付 平成元年4月24日。

*1 正員、金沢大学工学部（〒920 金沢市小立野2-40-20）。

*2 正員、金沢工業大学（〒921 石川県石川郡野々市町扇ヶ丘7-1）。

*3 学生員、金沢大学大学院（〒920 金沢市小立野2-40-20）。

*4 昭和電工川崎樹脂研究所（〒210 川崎市川崎区千鳥町3-2）。

げ強さは単体ガラス、合わせガラスB、合わせガラスAの順でその値が低下しており、これは先の表1からもわかるように、それらのガラス部の厚さの影響によるものと考えられる。

3. 衝撃破壊試験と結果

3.1 初期き裂発生試験 図5に示すような振り子型試験装置を用いて、合わせガラスに衝撃子を衝突させる動的曲げ試験を行う。衝撃子は直径80.2mm、質量2.257kgのもので、試験片は図6に示すような正方形形状の板である。このような衝撃子や供試片はJIS R 3212(自動車用安全合わせガラス試験法)で規定されたものに対応している。ここで、負荷を受ける面を衝撃面、その反対側の面を自由面と定義する。実験では、衝撃子の落下高さ h を初期き裂が発生するまで段階的に変え、衝撃子の位置エネルギー(これを衝撃エネルギーと呼ぶことにする)と試験片の自由面のひずみの動的挙動を測定した。図7はこのような試験によって求められた衝撃エネルギー-ひずみ関係を示す。このような

各曲線の最終点のエネルギーは初期き裂発生限界エネルギー U_0 として定義できるもので、その値は静的曲げ試験の場合と同様、単体ガラスが最大で合わせガラスAが最小であることがわかる。すなわち、 U_0 もガラス板の厚さの厚いものほど大きい。このことは、この試験での衝撃負荷による破壊挙動がほぼ静的な破壊挙動に近いものであることを推察させる。また、図8に初期き裂発生時の合わせガラス試験片の破壊状況の一例を示す。すべての試験片において、その初期き裂は自由面および衝撃面でほぼ同時に生ずるか、いくらか後者の

表1 各種ガラスの板厚

	Total Thickness T mm	Thickness of Glass t_1 mm	Thickness of PVB t_2 mm
Single Glass	4.70	—	—
Laminated Glass A	4.20	1.60	1.00
Laminated Glass B	4.60	2.05	0.50

図1 P.V.Bの応力-ひずみ線図

図2 短冊型合わせガラス試験片の寸法形状

図3 各種ガラスの応力-ひずみ線図

図4 荷重-ひずみ線図

図5 振り子型動的曲げ試験装置

図6 板型合わせガラス試験片の寸法形状

図7 衝撃エネルギーひずみ線図

図8 初期き裂発生状態の一例

方が先に生ずるように思われた。

3.2 貫通試験 図9に示すような落下型試験装置を用いて、3.1で述べたと同様の衝撃子と試験片により、衝撃子が試験片を貫通する境界のエネルギー U を測定する。実験では試験片をゴムを介して治具にはさみ、ボルトで四方を圧着固定し、その中心にビニールパイプを通じて衝撃子を自然落下させ、試験片の貫通破壊の瞬間の写真を撮影した。この試験は合わせガラスが最低限必要な耐貫通性をもっているかどうかを調べるために必要なもので、その詳細は JIS R3212で規定されており、上述の方法もこれに準拠している。図10はこの試験での貫通破壊時の破壊状態および破壊後の状態を示す試験片の一例である。これらより貫通時には試験片はかなり大きく変形していること、また、き裂の分布は明らかに合わせガラスAが最も多く、しかもそれが板全体にはほぼ均等に広がっているのに対し、合わせガラスBでは中心部に集中していることがわかる。さらに、ここには示していないが単体ガラスではそのき裂数は非常に少ない。また、表2はこの試験での貫通破壊エネルギー U を先に述べた U の値と共に示す。この表より、 U は図10のき裂分布挙動と対応し、合わせガラスAが最大で、き裂数の少ないB、単体ガラスの順に小さくなっている。しかもこれはすでに述べて

図9 落下型試験装置

(a) 合わせガラス A

(b) 合わせガラス A

(c) 合わせガラス B

図10 貫通破壊後の状態の一例

きた静的曲げ強さおよび λ の傾向とは反対である。つまり、 λ は単に合わせガラス板の静弾性的特性やそれによる破壊則のみで推定できない複雑なものであることを意味している。

4. 衝撃破壊機構と考察

4.1 き裂の発生と伝ば挙動 前章の試験、つまり初期き裂発生試験および貫通破壊試験から、合わせガラスの内部の破壊の順序はガラス板の破壊の後、中間膜の破壊が起こることは明らかである。しかし、中間膜をはさむ2枚のガラス板のどちらに早くき裂が発生し、それがどのように伝ばしてゆくのかは不明である。そこでまず、ガラス板におけるき裂の発生と伝ば挙動を本節で明確にしたい。そのため、図2に示した短冊型合わせガラス試験片と類似な形状で、その板厚が先のA、B試験片の各部分のそれぞれ約3倍程度のモデル $t_1 = 5.9\text{mm}$, $t_2 = 2.15\text{mm}$ のものを作製した。それに曲げ衝撃荷重を作用させ、衝撃面側と自由面側のどちらから先に初期き裂が発生するかを、図11に示す階段波発生回路⁽²⁾を用いて調べることにした。階段波発生回路とは、き裂が発生伝ばして導電性塗料が次々に切断されると、抵抗を直列に接続したバイパス回路がそれに応じて開き、回路の抵抗が増加し、電圧が階段状に変化する回路である。結果を図12に示す。この結果より、初期き裂は衝撃面側に発生し、それは自由面側より約 $790\mu\text{s}$ も早いことがわかる。このことは非常に興味深いことで我々に次のような事を推測させる。つまり、合わせガラス板がいわゆるガラス板と中間膜との組合せ板であることから、その静的曲げ理論より、引張応力は自由面側でしか生じないはずである。よって、き裂は常に自由面側から生ずることになるが、上の事実はこれと異なっている。このことは上、

表2 初期き裂発生エネルギー U_c および貫通エネルギー U_p

Specimens	Crack Initiation Test	Penetration Test	$\frac{U_c}{U_p}$
	U_c J	U_p J	
Single Glass	8.18	16.9	0.484
Laminated Glass A	4.84	135.2	0.036
Laminated Glass B	7.02	90.2	0.078

図11 初期き裂発生順序の観察装置

図12 階段波出力波形

下層のガラス板が中間膜と独立に単独で曲げられていることを予測させる。そしてこのような現象は中間膜のヤング率がガラス板のその約 $1/57,000$ ときわめて小さいことと動的な曲げ現象特有のもののためと思われる。そこでこのような考え方の妥当性を次に動的有限要素法を用いて検討してみる。

4.2 動的有限要素法による曲げ解析 上述したき裂の発生順序を理論的に確認するため動的有限要素法解析を行った。図13に 4.1 で用いた試験片の解析モデルを示す。要素数 47, 節点数182, モデル長さ300mmである。なお、中心から133mm以降を硬質ゴム(ヤング率 588 MPa, ポアソン比0.40)を介して圧着固定させたものとする。本解析では負荷荷重をヘルツの接触理論に基づいた分布荷重とし、その総荷重が 800N となるものを考えた。さらに、応力波はひずみゲージによる実測波形を考慮して次式で近似した。

$$\sigma = \begin{cases} 0.05 \cdot W \cdot t & (0 \leq t \leq 125) \\ W (4.77 + 0.0017t) & (125 \leq t \leq 3600) \\ W (21.8 - 0.0032t) & (3600 \leq t) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、W: 負荷荷重 (N), t: 時間 (μ s)。

このような条件で総荷重 800N が作用する場合の荷重点直下における衝撃面側のガラスと中間膜との接合面の応力および自由面側のガラスの表面の応力の変化

図13 動的有限要素法における要素分割図

図14 衝撃曲げによる衝撃点直下の応力の変化

図15 衝撃曲げによる試験片長手方向の応力分布

図16 動的有限要素法による曲げ挙動解析

および自由面側ガラス表面に添付されたひずみゲージより測定された応力波を図14に示す。ここで解析応力値が波うっているが、これは本解析モデルの横振動を考慮することで説明がつく。つまり、試験片の両端付近をゴムで圧着されている状態は試験片が単純支持されているのとはほぼ等価であると考えられるので、その横振動の固有振動数は次式で与えられる⁽³⁾。

$$f = \frac{\pi^2}{2\pi^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = 390\text{Hz} (= \text{周期} 2560\mu\text{s}) \quad (2)$$

よって、この値は図14に示された解析値の応力の周期、約2500 μs によく一致しており、測定値もほぼこのような周期的変化を示していることがわかる。さてこの図で応力波が入射してから3600 μs 後におけるはりの長手方向の応力分布をあらためて図15に示す。図の横軸は荷重領域の中心を原点にとったはりの長手方向の位置を示す。これより、それぞれのガラス板があたかも単独で曲げられているような応力分布を示していること、また、衝撃面側のガラスの接着面での応力が最も大きいことがわかる。これらのことより、合わせガラスに衝撃荷重が作用したとき、衝撃面側から初期き裂が発生するという4.1で述べた実験事実が理論的にも確認できたといえよう。さらにこのことは図16に示したはりの変形挙動からも明らかである。つまり、この図より中間膜の厚さの変化等に注目すれば、衝撃面側のガラスが十分たわんだ後に自由面側のガラスがたわみ始めていることがわかる。

4.3 貫通破壊の過程と考察 以上すべての結果を総合して、合わせガラスの貫通破壊がどのような過程を経て生ずるかを推定してみる。

前2節の実験および計算結果から、板型合わせガラスに衝撃荷重が作用したとき、まず衝撃面側のガラスの接着面付近から初期き裂が発生する。つぎに、図10に示すように衝撃面側のガラスおよび自由面側のガラスにおいて半径方向および円周方向き裂が伝ばする。このようにある程度の半径方向および円周方向き裂がガラス板に伝ばすると次に合わせガラス全体が一体となって大きく変形した曲げ挙動を呈するものと、思われる。そして、この変形挙動がある程度進行するとき

裂部の中間膜が局部的に引張変形したり、また割れたガラスが切れ刃同様の役割を果たして中間膜をせん断変形させることによって、それが破断するものと考えられる。

5. 結 言

合わせガラスの破壊メカニズムを解明する目的で初期き裂発生実験および貫通破壊実験等を行い、次の結論を得た。

- (1) 合わせガラスの静的曲げ強さおよび初期き裂発生限界エネルギーは単体ガラスが最大で、合わせガラスB、合わせガラスAの順に小さくなる。これはガラス板の厚さの影響が大きいものと考えられる。
- (2) 貫通破壊エネルギーは、静的曲げ強さおよび初期き裂発生限界エネルギーと逆の傾向を示し、合わせガラスAが最大で単体ガラスが最小になる。
- (3) 合わせガラスの破壊挙動はまず衝撃面側のガラスの接着面からき裂が発生して表面まで進展し、その直後に自由面側のガラスの表面にき裂が発生して接着面まで進展する。
- (4) 合わせガラスの貫通破壊過程を推定してみると、まず、(3)の初期き裂の発生の後、衝撃面側および自由面側のガラスにおいて半径方向および円周方向き裂が伝ばしつつ、合わせガラス全体が大きく曲げ変形を示す。そして次に、き裂部の中間膜の局部的引張変形や割れたガラスの切れ刃効果によって中間膜が破断されることが考えられる。

なお、本研究を遂行する上で実験に協力していただいた当時卒業研究生であった山崎直哉氏(富士通(株))、山西喜彦氏(昭和電工(株))に心より感謝の意を表す。また、本研究の一部は昭和62、63年度文部省科学研究費・一般研究(c)NO.62550083の補助により行われたものである。

文献

- (1) James, A.S., 日本接着協会誌, 21-11(1985), 489.
- (2) 鶴崎・尾田, 機論, 50-453, A(昭59), 1062.
- (3) 斉藤, 工業基礎振動学, (1983), 202, 養賢堂.