

ISO試験法に基づく板ガラスの耐衝撃破壊特性

丸山 敬・河井宏允・西村宏昭*・加茂正人・前田 豊*

* 日本建築総合試験所

要 旨

本研究では、ISO規格（ISO 16932）に規定された建物開口部におけるガラスの耐衝撃破壊性能評価方法に従って衝撃試験を行うことのできる試験装置を作成し、種々の板ガラスを試験体として用いた衝撃試験を行い、耐衝撃破壊性能を明らかにした。得られた結果をまとめると、今回試験体として用いた普通フロートガラス（厚さ5, 6, 8, 10, 12mm）、強化ガラス（厚さ5, 6, 8, 10mm）、網入りガラス（厚さ6.8, 10mm）は、ISO規格に従う判定に不合格であった。合わせガラス（中間膜の厚さ30, 60, 90milの3種類とガラス厚さ3, 5mmの2種類の組み合わせ）ではISO規格に従う加撃体A, B, Cによる、フィルム貼りガラス（フィルム厚さ50, 100, 350, 450 μ mの4種類とガラス厚さ5, 6mmの2種類の組み合わせ）では加撃体A, Bによる衝撃試験に合格した。

キーワード：強風、飛来物、板ガラス、耐衝撃試験、破壊特性

1. はじめに

日本において、外装材の耐風性能はこれまで、強風による耐風圧性能に関してのみ評価されており、建築基準法・同施工法や建築物荷重指針・同解説でも、耐えるべき風圧力の算定方法のみが示されているだけで、飛散物に対する破壊についての耐風性能の評価方法がない。一方、アメリカ合衆国やISO規格では、外装材や建物開口部におけるガラスの耐衝撃破壊性能評価方法が示されており、鋼球および、サイズの異なる木片を高速で試験体に衝突させる衝撃試験を行った後、繰り返し圧力载荷により強風下の耐破壊性能を評価するとしている。この試験で用いられる小さな鋼球および木片による加撃体は、小石などが強風により飛ばされることによる飛来物と、飛散木片を主なターゲットにしたものである。

本報告書は、ISO規格ISO 16932（2007:以下ISO 16932と表示）による建物開口部におけるガラスの耐衝撃破壊性能評価方法に従って、衝撃試験を行うことのできる試験装置を作成し、種々の板ガラスを用いて衝撃試験を行い、それらの耐衝撃破壊性能をISO 16932に従って評価した結果をまとめたものである。

2. 試験の概要

本試験で採用した衝撃試験方法と評価基準であるISO 16932の基となったASCE7では、ガラスの被害と建物の被害の拡大を防ぐために、建築物の開口部は飛散物に対して耐衝撃性能を有するか、耐衝撃性能を有するカバーで保護することを要求している。そして、これらの要求性能を保証するためにASTM E1886-04に定める方法により試験を行い、ASTM E1996-04に定める加撃体に対して安全であることが求められる。そこでは、加撃体として小石等の比較的小さな飛散物を想定した鋼球と、比較的大きな飛散物を想定した2×4の木片が規定されており、本試験でもそれらを踏襲したISO 16932に基づき、加撃体には鋼球と2×4の木片を用いた。

飛散物を発生させる気象現象としては竜巻やダウンバーストなどの突風や台風が挙げられる。なかでも、台風による強風の継続時間は竜巻やダウンバーストに比べて長く、強風の初期に飛散物によって被害を受けた建築物はその後長時間の強風に曝されることになる。したがって、台風を対象とした場合には、飛散物衝突後に長時間変動圧力が継続した後

Table 1 Missile's level of ISO 16932

タイプ	質量・材質	衝突速度（誤差）
A	2g ± 0.1g/個・鋼球 10 個	39.7m/s（±1%）
B	2.05 ± 0.1kg・2×4 木材	12.2m/s（±2%）
C	4.1 ± 0.1kg・2×4 木材	15.3m/s（±2%）
D	4.1 ± 0.1kg・2×4 木材	24.4m/s（±1%）
E	6.8 ± 0.1kg・2×4 木材	22.4m/s（±2%）

も大きな開口が生じないことを確認する手順が加わり、ISO 16932でもそのような圧力载荷試験後に試験体に所定以上の開口や亀裂が生じないことが求められる。すなわち、衝撃試験は以下のような手順で行われる。

- [1] 所定の加撃体を試験体の所定の位置に衝突させ、亀裂あるいは開口が生じるかを調べる。亀裂あるいは開口が生じなかった場合は試験に合格とし、加撃体が貫通するか、規定以上の開口あるいは亀裂、すなわち、直径76mmの硬い球が通過する開口より大きな開口あるいは125mm以上の亀裂が見られた場合には不合格とする。
- [2] 亀裂あるいは開口が生じたが、規定以下の大きさの場合には引き続き圧力载荷試験を行う。
- [3] 圧力载荷中または終了時まで規定以上の開口あるいは亀裂が生じるか、試験体に取り付け枠から脱落した場合には試験に不合格とし、それ以外は合格とする。

以下に、衝撃試験装置、加撃体と加撃位置、圧力载荷試験装置の概要を述べる。なお、試験手順および評価方法の詳細は丸山（2010）を参照されたい。

2.1 衝撃試験装置

ISO 16932では加撃体による衝撃試験を行い、規定以上の開口あるいは亀裂が生じた場合には引き続き圧力载荷試験を行うこととなっている。本試験では、ISO 16932で規定された加撃体を所定の速度で所定の位置に衝突させることができる試験装置を作成し、試験体への衝撃試験を行った。試験装置はエアータンクに塩ビパイプの砲身を取付け、砲身内に装填された加撃体をエアータンク内の圧縮空気で射出するものである。試験装置とその性能の詳細は丸山ら（2008,2009）を参照されたい。

2.2 加撃体と加撃位置

ISO 16932によると試験体に衝突させる加撃体はミサイル（missile）と呼ばれ、Table 1に示すように重さや速度の異なるA,B,C,D,Eの5つの加撃体のタイプが定義されており、大きく分けて鋼球と2×4の木片に分けられる。加撃体タイプAである鋼球

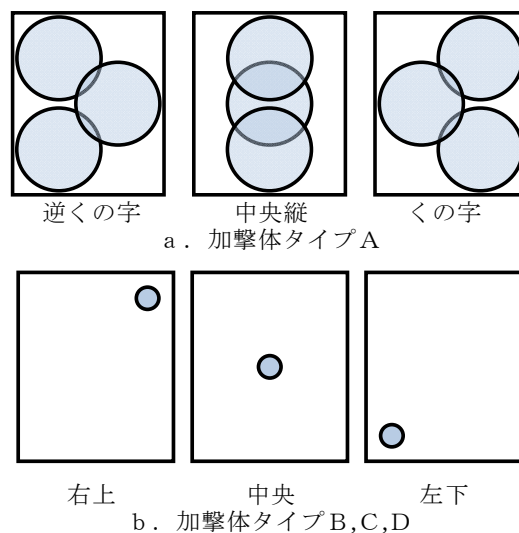


Fig. 1 Impact locations

は1個当たり2g±0.1g、直径約8 mmの鋼球10個を3ヶ所、Fig1aに示す一定の範囲内（半径中250mmの円内）に衝突させ、3枚全てが前述の判定条件に合格した場合のみ合格となる。加撃体のタイプB,C,D,EはタイプAよりも大きな飛散物を模擬しており、試験の再現性等を考慮して2×4規格の木片により飛散物を模擬している。2×4の木片による加撃体はタイプによりそれぞれ重さと衝突速度が異なり、B,C,D,Eの順に衝撃力が大きくなっている。タイプDは、1974年のオーストラリア・ダーウィンを襲ったサイクロン・トレーシーによる壊滅的な被害の教訓からダーウィ地区建築マニュアルに採用された試験用加撃体とほぼ同じである。タイプEはアメリカ・エネルギー省が原子力発電所のような危険物質を貯蔵する施設用に決定したもの（DOS Standard, 2002）で、巨大トルネードでしか生じ得ない加撃体であり、わが国の台風の強風下における一般の建築物に適用することは非現実的である。ちなみにフロリダ建築基準（FBC, 2004）では、Table 1のタイプAとタイプCに相当する加撃体のみが規定されている。加撃体B,C,D,Eの試験体への衝突位置はFig.1bに示すように3枚の試験体のそれぞれ異なる位置の一定の範囲内（半径65mmの円内）に衝突させ、3枚全てが前述の判定条件に合格した場合にのみ、その加撃体に対して合格となる。

Table 2 Level of protection

- レベル 1：飛散物の脅威が低い地域、すなわち、海岸線から内陸に入った地域と厳格な領域区分管理によって飛散物の確率が低減される地域を含む地域で推奨される防御レベル。この防御レベルは飛散物の脅威がほとんどない“厳格に管理された地域”に対して推奨される。
- レベル 2：通常の飛散物の脅威がある地域で推奨される基本防御レベルで、飛散物に対する法的規制により管理された地域における最低限の防御として推奨される。
- レベル 3：さらに高度な防御が推奨される管理地域内で推奨される強化防御レベル。飛散物に対する法的規制が制定された地域の防御として設定される。
- レベル 4：飛散物に対する法的管理地域内の最重要施設に対する防御として推奨される防御レベル、あるいは、飛散物に対する強化防御を行い、法的管理されているが厳しい状況の地域で推奨される防御レベル。

Table 3 Required missiles for testing for classification

防御レベル	レベル 1		レベル 2		レベル 3		レベル 4	
ガラスの設置高さ (m)	>10	≤10	>10	≤10	>10	≤10	>10	≤10
強風ゾーン 1 (50m/s ≤ V < 55m/s)	無	無	A	B	C	C	C	D
強風ゾーン 2 (55m/s ≤ V < 60m/s)	無	無	A	B	C	C	C	D
強風ゾーン 3 (60m/s ≤ V < 65m/s)	A	B	A	C	C	D	D	E
強風ゾーン 4 (65m/s ≤ V)	A	B	B	C	C	D	D	E

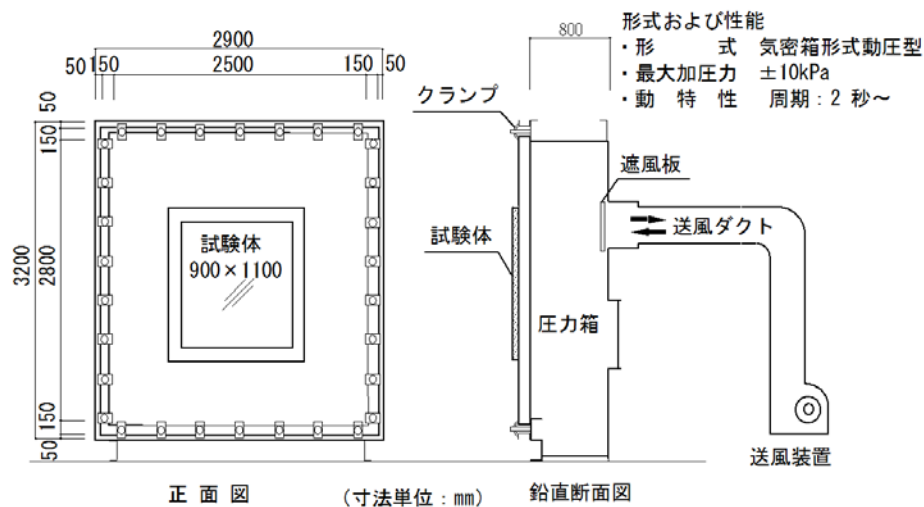


Fig. 2 Pressure loading apparatus

ISO16932では試験体が耐えるべき加撃体の種類は、建築物の防御レベル (Table 2) と強風ゾーンごとに Table 3 に示すように、試験体であるガラスが設置される高さによって選択することになっている。Table 3 から分かるように、相対的に軽量の飛来物が建築物の高い位置のガラスに衝突するとしている。強風ゾーンは基準風速 V のみで表されており、その値はガスト風速で与えられている。

2.3. 圧力载荷試験装置

台風の場合のように、飛散物衝突後に変動風圧が

長時間継続して加わることを考慮し、規定の変動圧力を载荷後に大きな開口が生じないことを確認するための圧力载荷試験装置を日本建築総合試験所所有の圧力箱を改造して作成した。元の圧力箱はサッシや外壁などの建材の耐風圧性能を試験する装置で、正負繰り返し最大加圧能力 $\pm 10\text{kPa}$ 、圧力の向きは弁の切り替えで変更する。試験体は最大幅 2.6m × 高さ 2.9m まで試験が可能で、装置の前面に Fig. 2 に示すように衝撃試験装置で用いたものと同じ試験体支持フレームを取り付け、試験体への加撃を直接行えるようにした。

ISO 16932で規定された圧力载荷順序はTable 4, Fig. 3に示すように、正圧に続く負圧の合計9,000回の繰り返しで、低層建築物の風洞試験による変動風圧の圧力レベルと一台風の通過による風圧変動の変化を模擬している。ここで荷重の向きは、「正」が加撃体の当る面を押す方向、「負」はその面を引く方

Table 4 Cycle static air-pressure differentials

载荷順	荷重の向き	圧力サイクル	繰り返し数
1	正	0.2P から 0.5P	3500
2	正	0.0P から 0.6P	300
3	正	0.5P から 0.8P	600
4	正	0.3P から 1.0P	100
5	負	0.3P から 1.0P	50
6	負	0.5P から 0.8P	1050
7	負	0.0P から 0.6P	50
8	負	0.2P から 0.5P	3350

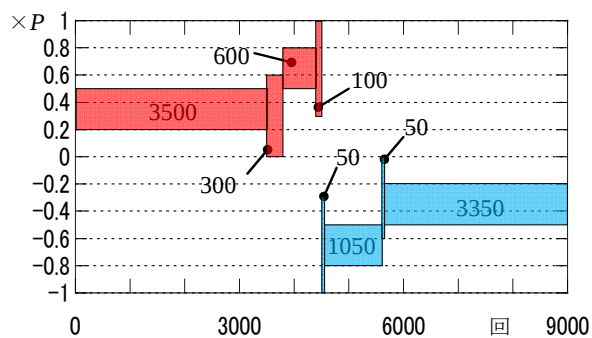


Fig. 3 Cycle static air-pressure differentials

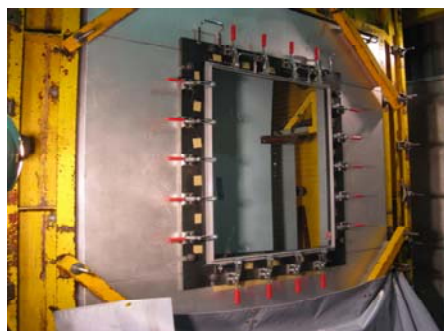
向に作用する圧力を意味している。各繰り返し载荷の基準となる風圧力Pは、ASTM E1996では正圧と負圧とで異なる設計圧力 P_{pos} と P_{neg} を採用することになっているが、ISO 16932では区別されておらず、基準風速Vで一意に決定される値としている。なお、ISO 16932では基準風速をガスト風速で与えているが、建築基準法で風荷重の算定の基準となる速度圧が10分間平均風速を基にしているため、Table 5でも基準風速を10分間平均風速に換算した値 V_{10} (m/s)を参考値として示している。実際の圧力载荷で用いた風圧Pは強風ゾーンを1として2490Paとしている。圧力の変動周期はISO 16932では1秒以上5秒以下としており、ここでは2秒周期の正弦波として与えた。Fig. 3に示す全変動圧力载荷を終了するには5時間を要した。試験体の設置状況と、圧力载荷の様子をFig. 4に示す。

3. 試験体

試験体には厚さ5, 6, 8, 10, 12mmの普通フロートガラス、厚さ5, 6, 8, 10mmの強化ガラス、厚さ6.8, 10mmの網入りガラス、中間膜の厚さ30, 60, 90milの3種類とガラス厚さ3, 5mmの2種類を組み合わせた合わせガラス、および、フィルム厚さ50, 100, 350, 450 μ mの4種類とガラス厚さ5, 6mmの2種類を組み合わせたフィルム貼りガラスを用いた。フィルム貼りガラスについては、フィルムをガラス全面に貼ってサッシ等のフレームに収められる場合と、既存のガラス面にフィルムを貼る場合のよう

Table 5 Wind zone, basic wind speed V, 10 minutes mean wind speed V_{10} and pressure P

強風ゾーン	基本風速 V (m/s)	10 分間平均風速換算値 V_{10} (m/s)	風圧 P (Pa)
1	$50 \leq V < 55$	$32 \leq V_{10} < 35$	2490
2	$55 \leq V < 60$	$35 \leq V_{10} < 38$	2970
3	$60 \leq V < 65$	$38 \leq V_{10} < 41$	3450
4	$65 \leq V$	$41 \leq V_{10}$	3640



全体図

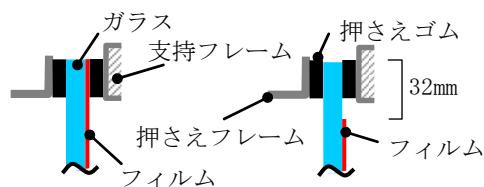


負圧の载荷時



正圧の载荷時

Fig. 4 Set-up of specimen on the pressure loading apparatus



a. overall filmed b. partially filmed
Fig. 5 Engagement of filmed glass and test flame

に、サッシ等のフレームに収められない場合がある。前者はフレームの押さえ部分にフィルムが入っているので、後者に比べて耐衝撃破壊性能が上がる可能性がある。したがって、試験にはフィルムをガラス全面に貼ったもの（以降“全面貼り”と表示）とフレームに収まる部分を貼りしるとして、周囲を少し残してフィルムを貼ったもの（以降“部分貼り”と表示）を用いた。貼りしるはISO規格の試験に用いられる押さえフレームの幅30mmより少し内側になるように32mmとした。これによりFig. 5に示すように、全面貼りではフィルムとガラスを共に、部分貼りではガラスのみを押さえフレームで支持フレームに固定し、フィルムの端部と押さえフレームの間には約2mmの隙間がある。試験体の大きさはISO 16932で定められている幅90cm、高さ110cmとした。

4. 試験結果

前章で述べた試験体を用いて、ISO規格に従った衝撃試験および衝撃試験後に圧力载荷試験を行った結果を以下にまとめる。

4.1. 普通フロートガラス，強化ガラス，網入りガラス

(1) 普通フロートガラス

加撃体Aは厚さ5mmから12mmまでの普通フロートガラスを貫通した（Fig. 6）が、亀裂は開口付近にのみ生じ、全体には広がらなかった。加撃体Bも貫通し（Fig.7），ガラス厚が厚くなるほど亀裂の入る範囲および開口が広がる傾向があった。ただし、中央への加撃では10mm厚の場合1回の、12mm厚では4回の加撃では開口、亀裂ともに生じず、それぞれ2回目、5回目の加撃で割れた。なお、別の試験体を用いた加撃体Bの中央部への加撃では、厚さ10、12mmともに1回の加撃で割れた。以上より、ISO規格に対しては厚さ12mmまでの普通フロートガラスは加撃体Aおよび加撃体Bに対して不合格となった。

(2) 強化ガラス

加撃体Aは厚さ5mmから10mmまでの強化ガラスを貫通した。その際、亀裂は全体に広がるが、開口は全体には広がらなかった（Fig. 8）。加撃体Bを中央部に加撃した場合、5mm厚の場合、3回目までは割れず4回目に、6mm厚の場合、1回目までは割れず2回目に貫通した。それ以外では、加撃体は貫通し、亀裂は全体に広がり、ガラス厚が薄いほど開口も大きくなった（Fig. 9）。なお、別の試験体を用いた加撃体Bの中央部への加撃では、厚さ5mmの場合3回の加撃でも割れず、厚さ6mmの場合1回の加撃で割れた。一方、加撃体Bを左上部に加撃した場合、5mmから8mmまでの強化ガラスは貫通したが、10mmの強化ガラスは、5回の加撃でも割れなかった（Fig. 10）。

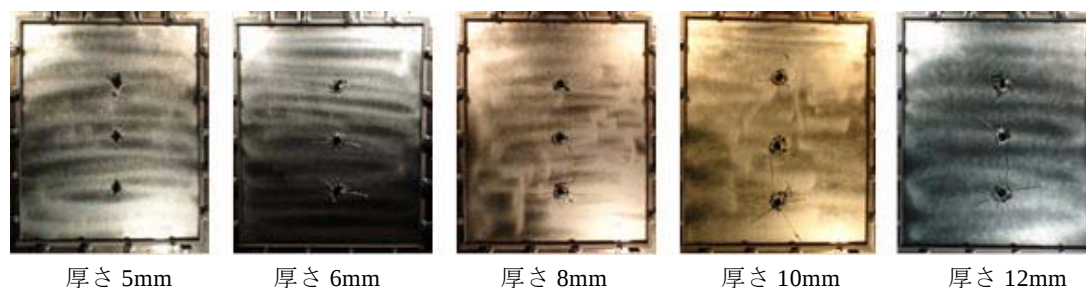


Fig. 6 Results of impact test of float glass by missile type A

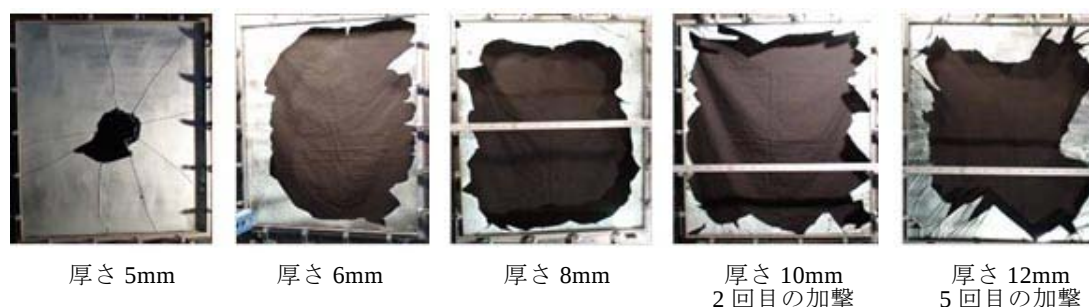


Fig. 7 Results of impact test of float glass by missile type B

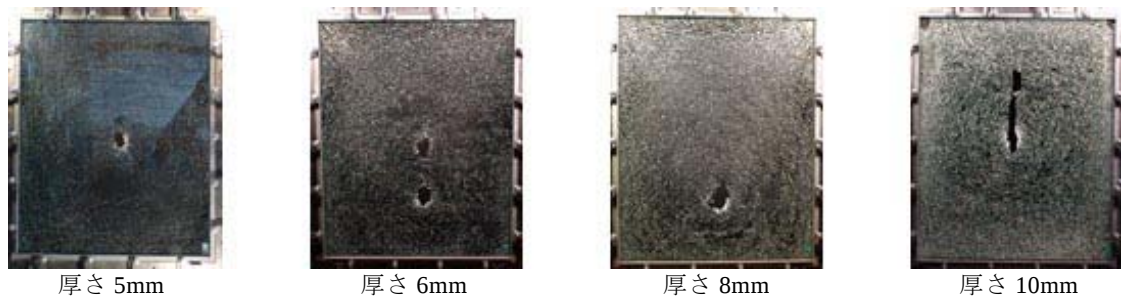


Fig. 8 Results of impact test of tempered glass by missile type A

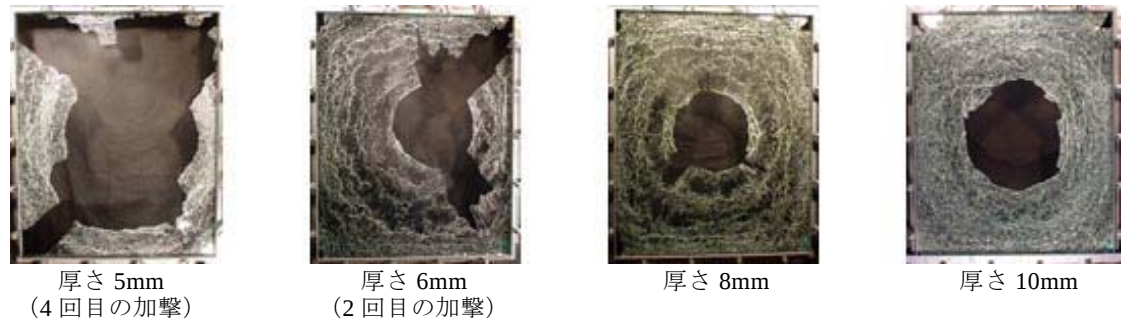


Fig. 9 Results of impact test of tempered glass by missile type B at center

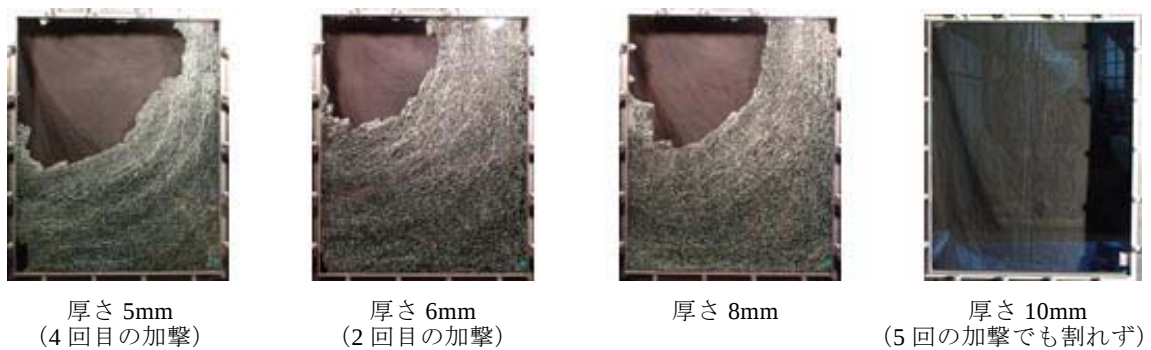


Fig. 10 Results of impact test of tempered glass by missile type B at upper left

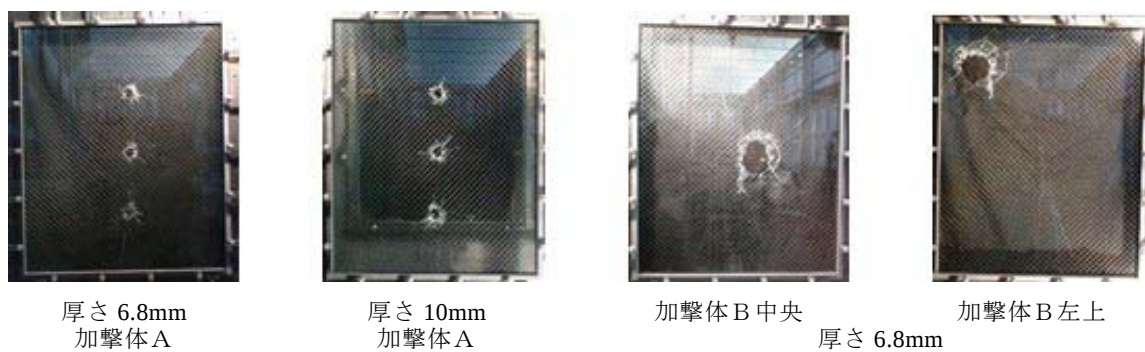


Fig. 11 Results of impact test of wired glass by missile type A and B

なお、別の10mmの強化ガラスの試験体に加撃体Bを右上および左下に加撃した場合にはいずれも割れ、割れは上下に広がった。以上より、ISO規格に対しては厚さ10mmまでの強化ガラスは加撃体Aおよび加撃体Bに対して不合格となった。

(3) 網入りガラス

Fig.11に示すように、加撃体Aは厚さ6.8mmおよび10mmの網入りガラスを貫通した。その際、亀裂は全

体には広がらなかった。加撃体Bは中央部、左上部に加撃した場合ともに貫通するが、亀裂は全体には広がらなかった。以上より、ISO規格に対しては厚さ10mmまでの網入りガラスは加撃体Aおよび加撃体Bに対して不合格となった。

以上、普通フロートガラス、強化ガラス、網入りガラスにISO規格に準じた試験結果をまとめると、Table 6 のようになる。

Table 6 Results of impact test by ISO method; float, tempered and wired glasses

ガラスの種類	厚さ (mm)	加撃体のタイプ						ISO 判定 結果
		A 加撃位置			B 加撃位置			
		>	中央	<	左上	中央	左下	
普通フロートガラス	5	—	×	—	×	×	—	×
普通フロートガラス	6	—	×	—	×	×	—	×
普通フロートガラス	8	—	×	—	×	×	—	×
普通フロートガラス	10	—	×	—	×	○2, ×	—	×
普通フロートガラス	12	—	×	—	×	○5, ×	—	×
強化ガラス	5	—	×	—	×	○4, >3	—	×
強化ガラス	6	—	×	—	×	○2, ×	—	×
強化ガラス	8	—	×	—	×	×	—	×
強化ガラス	10	—	×	—	○>5, ×	×	×	×
網入りガラス	6.8	—	×	—	×	×	—	×
網入りガラス	10	—	×	—	×	×	—	×

表中の記号の意味

○：開口，亀裂ともに生じなかった。

×：76mm以上の開口，あるいは，125mm以上の亀裂が生じた。→ISO 規準不合格。

—：試験を行っていない。

注：普通フロートガラス厚さ10, 12mm，強化ガラス厚さ5, 6, 10mmについては，1回の加撃で割れなかったものについて，2枚目の試験体による試験も行った。

右側の数字は，その回数で割れたことを示し，>5は5回加撃しても割れなかったことを表す。



a. 表（加撃面）



b. 裏（加撃反対面）

Fig. 12 Details of failure of laminated glass at impact points by missiles A

4.2. 合わせガラス

(1) 加撃体タイプAによる衝撃試験結果

加撃体Aの場合，全ての試験体において加撃体は貫通せず，フィルム面の亀裂もなく，開口も生じなかった。加撃面側（表側）では加撃体の衝突箇所のガラスは細かく破壊され，周囲に短い放射状の亀裂が生じ，さらにその外側を囲むように円周状の亀裂が生じた（Fig.12a）。一方，加撃面反対側（裏側）のガラスでは，鋼球の衝突箇所のガラスは細かく破壊され，その中心から放射状に亀裂が生じるが，加撃面側に見られたような外側を囲む円周状の亀裂は

少ない（Fig.12b）。また，加撃面反対側のガラスの亀裂はガラス中央部の加撃位置に多くみられ，取り付け枠に近い部分では加撃面反対側のガラスが割れない場合が多かった。加撃後の圧力载荷試験ではガラスの亀裂の伸展が見られる場合があったが，中間膜厚に亀裂や開口が生じることはなかった。

加撃体Aの試験後の破壊の様子をFig.13に示す。

(2) 加撃体B, C, Dによる衝撃試験結果

加撃体Bの場合（Fig.14），ガラス厚3mm，中間膜厚60mil（以下“ガラス厚さ+中間膜厚さ+ガラス厚さ：3+60mil+3”と表示）およびガラス厚5mmで規定

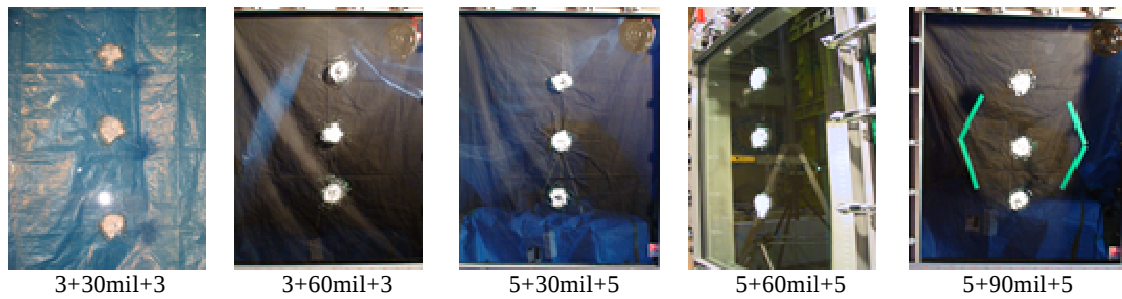


Fig. 13 Results of impact test of laminated glass by missile A

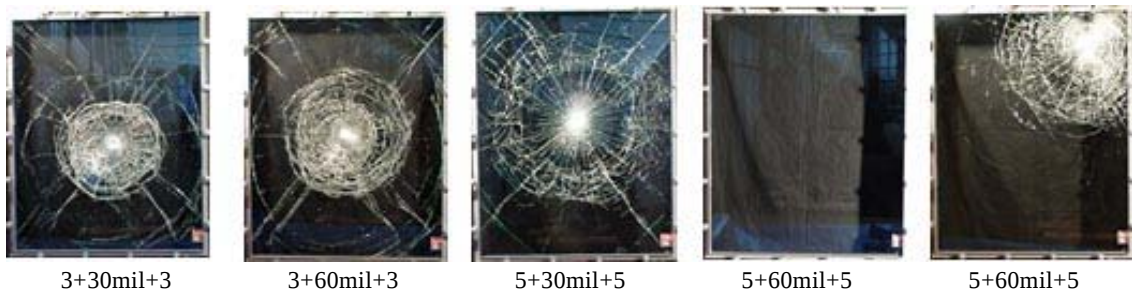


Fig. 14 Results of impact test of laminated glass by missile B

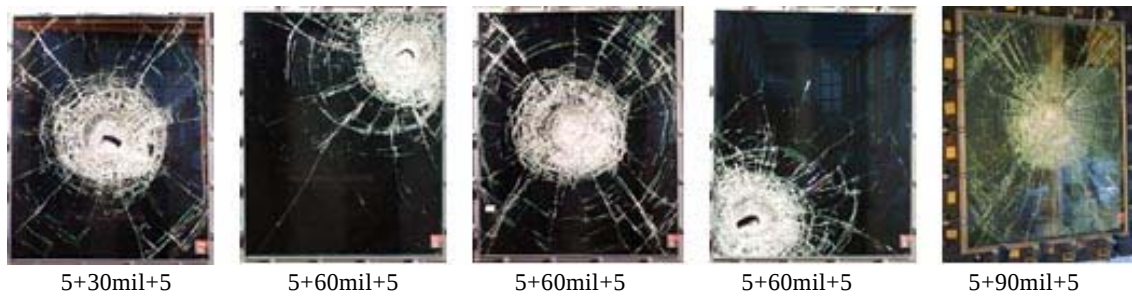


Fig. 15 Results of impact test of laminated glass by missile C



Fig. 16 Results of impact test of laminated glass by missile D; 5+90mil+5

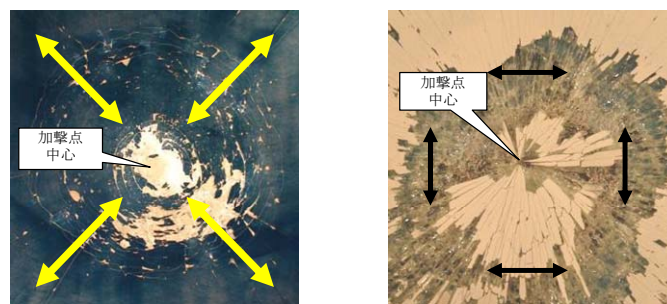


Fig. 17 Details of failure of laminated glass at impact point by missile B

Table 7 Results of impact test of laminated glasses by ISO method

ガラスの種類	加撃体の種類												ISO 判定 結果
	A			B			C			D			
	加撃位置			加撃位置			加撃位置			加撃位置			
> 中央 <	右上	中央	左下	右上	中央	左下	右上	中央	左下	右上	中	左下	
3mm+30mil+3mm	—	△	△	[△]	[△]	×	—	—	—	—	—	—	(A)
3mm+60mil+3mm	—	[△]	—	[△]	△	△	—	—	×	—	—	—	(B)
5mm+30mil+5mm	—	[△]	—	[△]	△	△	—	×	—	—	—	—	(B)
5mm+60mil+5mm	△	△	△	△	○, △	△	×	△	×	—	—	—	B
5mm+60mil+5mm (Du)	—	—	—	[△]	[△]	[△]	—	×	—	—	—	—	(B)
5mm+90mil+5mm	—	[△]	—	—	—	—	[△]	△	△	—	×	—	(C)

注：本結果は、ISO 規格 (ISO 16932) に準じて行われた試験結果を示す。

圧力载荷試験における最大载荷圧力は 2490Pa で、風速ゾーン 1 に対応する。

表中の記号の意味

○：開口、亀裂ともに生じなかった。

△：開口は生じなかったが、亀裂が生じた。[]が付かないものは圧力载荷試験にも合格。

×：加撃体が貫通したか、76mm 以上の開口か、125mm 以上の亀裂が生じた。→ISO 規格に不合格。

—：試験を行っていない。

[]：圧力载荷試験を行っていない。

()：予想判定結果であり、ISO で規定された全試験を行っていないので、最終的な判定結果が異なる可能性がある。

5mm+60mil+5mm (Du) は異なる中間膜を用いた製品を表す。

Table 8 Deformation after impact test (mm)

加撃体 ガラス種類	B 加撃位置			C 加撃位置			D 加撃位置		
	下	中	上	下	中	上	下	中	上
5mm+30mil+5mm	△17	△7	△32	—	—	—	—	—	—
5mm+60mil+5mm	△26	○0	△9	70	△43	60	—	—	—
5mm+90mil+5mm	—	—	—	—	—	—	—	×15	—

数字の前の記号の意味

×… 開口が生じた

△… 開口は生じなかったが、ひび割れは生じた

○… 開口、ひび割れともに生じなかった

以上の開口あるいは亀裂が生じなかったので、圧力载荷試験にまわされ、ISO の判定に合格した。加撃体 C (Fig.15) では 5+90mil+5 のみで規定以上の開口あるいは亀裂が生じず、圧力载荷試験においても ISO 規準の判定に合格した。加撃体タイプ D (Fig.16) は 5+90mil+5 でも貫通した。以上の結果を Table 7 にまとめる。

ガラスの破壊性状を詳しく見ると、加撃体が衝突した部分では細かな亀裂が入り、周囲に行くにしたがって、亀裂の間隔は大きくなった。亀裂には加撃点を中心とする円周状のものと、放射状のものが観察されるが、Fig.17 に示すように、円周状のものは加撃面側に、放射状のものは加撃面反対側のガラスに

多く生じている。このことから、加撃側のガラス面は加撃点を押しこむような曲げによって、加撃点を中心とした放射状の引張力 (Fig.17a) を受けて破壊していると考えられる。一方、加撃面反対側のガラス面では、加撃点を中心とした円周方向の引張力 (Fig.17b) を受けて破壊していると考えられる。また、5+60mil+5 では加撃体 B, C では中央の加撃位置の方が取り付け枠に近い部分よりも破壊の程度が少ないこと。Table 8 に示すように、中央の加撃位置で破壊後のガラスのたわみも小さいことから、2×4 木片による衝撃に対してガラス面が大きいたわむことのできる中央部の方が耐衝撃破壊性能は高いと考えられる。



Fig. 18 Results of impact test of partially filmed glasses by missile type A

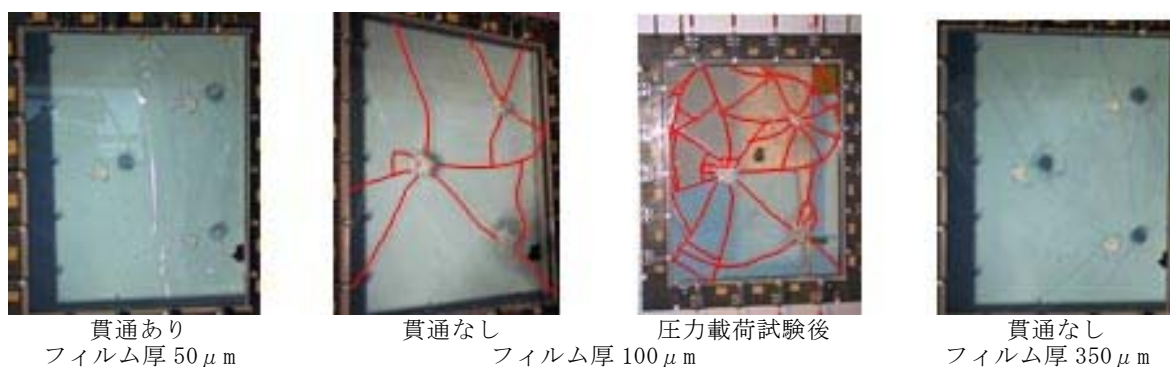


Fig. 19 Results of impact test of overall filmed glasses by missile type A

4.3. フィルム貼りガラス

(1) 加撃体A, フィルム部分貼り

Fig.18に示すように、四周に32mmの幅をあけたフィルム部分貼りに加撃体Aを中央部縦に加撃した場合、フィルム厚さ $50\mu\text{m}$ では加撃体が貫通した。フィルム厚さ $100\mu\text{m}$ および $350\mu\text{m}$ では、ISO規準の規定以上の開口および亀裂は生じず、また、加撃体の貫通も見られなかった。その後圧力载荷試験を行うと、試験後にガラス部分の亀裂は増加したがフィルム部分の亀裂は変化せず、また、開口の拡大もみられなかったのでISO規準に合格となった。

加撃体Aをくの字に加撃した場合、フィルム厚さ $100\mu\text{m}$ および $350\mu\text{m}$ ではISO規準の規定以上の開口および亀裂は生じず、加撃体の貫通も見られなかった。しかし、その後圧力载荷試験で、フィルム厚さ $100\mu\text{m}$ に関しては2490Pa圧力载荷実験時にガラス

の脱落がありISO規準に不合格となった。一方、フィルム厚さ $350\mu\text{m}$ に関しては試験後にガラス部分の亀裂は増加したがフィルム部分の亀裂は変化せず、また、開口の拡大もみられなかったのでISO規準に合格となった。

(2) 加撃体A, 全面貼り

フィルム全面貼りに加撃体Aをくの字に加撃した場合 (Fig.19), フィルム厚さ $50\mu\text{m}$ では加撃体が貫通した。フィルム厚さ $100\mu\text{m}$ および $350\mu\text{m}$ では、ISO規準の規定以上の開口および亀裂は生じず、また、加撃体の貫通も見られなかった。その後圧力载荷試験を行ったが、フィルム厚さ $100\mu\text{m}$ および $350\mu\text{m}$ 共に試験後にガラス部分の亀裂は増加したがフィルム部分の亀裂は変化せず、また、開口の拡大もみられなかったのでISO規準に合格となった。



加撃体貫通
フィルム厚 50 μ m



加撃体貫通
フィルム厚 100 μ m



加撃体貫通
フィルム厚 100 μ m



周辺部に亀裂あり
フィルム厚 100 μ m



周辺部に亀裂あり
フィルム厚 350 μ m



加撃体貫通
フィルム厚 350 μ m



加撃体貫通
フィルム厚 450 μ m

Fig. 20 Results of impact test of partially filmed glass by missile type B; glass thickness is 5mm



加撃体貫通
フィルム厚 150 μ m



加撃体貫通
フィルム厚 350 μ m



加撃体貫通
フィルム厚 450 μ m

Fig. 21 Results of impact test of partially filmed glass by missile type B; glass thickness is 6mm



加撃体貫通
フィルム厚 50 μ m



加撃体貫通
フィルム厚 100 μ m



加撃体貫通なし
フィルム厚 350 μ m



加撃体貫通なし
フィルム厚 450 μ m

Fig. 22 Results of impact test of overall filmed glass by missile type B; glass thickness is 5mm

(3) 加撃体B, 部分貼り

加撃体Bをフィルム部分貼りに加撃した場合、ガラス厚さ5および6mm, フィilm厚さ50, 100, 350および450 μ mの全ての試験で加撃体は貫通し、ISO規格に不合格となった (Fig.20,21)。

(4) 加撃体B, 全面貼り

加撃体Bを全面フィルム貼りに加撃した場合 (Fig.22), フィilm厚さ50 μ mおよび100 μ mでは加撃体は貫通し、ISO規格に不合格となった。フィルム厚さ350 μ mおよび450 μ mではいずれも加撃体は貫



加撃体貫通
フィルム厚 350 μm 全面貼り



加撃体貫通
フィルム厚 350 μm 部分貼り



加撃体貫通
フィルム厚 450 μm 部分貼り

Fig. 23 Results of impact test of filmed glasses by missile type C

Table 9 Results of impact test of filmed glasses by ISO method

ガラスの種類 厚さ シート厚 (mm) (μ m)			加撃体のタイプ									ISO 判定 結果
			A			B			C			
			加撃位置	加撃位置	加撃位置	加撃位置	加撃位置	加撃位置				
			>	中央	<	右上	中央	左下	右上	中央	左下	
全 面 貼	5	50	—	—	×	—	×	—	—	—	—	×
	5	100	—	—	△	—	×	—	—	—	—	(A)
	5	350	—	—	△	[△]	[△]	[△]	—	×	—	(B)
	5	450	—	—	—	[△]	—	[△]	×	—	—	(B)
部 分 貼	5	50	—	×	—	—	×	—	—	—	—	×
	5	100	—	△	▲	—	×	×	—	—	—	×
	5	350	—	△	△	×	×	—	—	×	—	(A)
	5	450	—	—	—	—	—	×	—	—	—	(A)
	6	100	—	—	—	—	—	×	—	—	—	(A)
	6	350	—	—	—	—	—	×	—	—	—	(A)
	6	450	—	—	—	—	—	×	—	—	—	(A)

表中の記号の意味

△：開口は生じなかったが、亀裂が生じた。[]の付かないものは圧力载荷試験で ISO 合格。

▲：開口は生じなかったが、亀裂が生じた。→圧力载荷試験で ISO 不合格。

×

—：試験を行っていない。

[]：圧力载荷試験を行っていない。

()：ISO で規定された全試験を行っていないので、最終的な判定結果が異なる可能性あり。

5. おわりに

通せず、ISO規格で不合格となるような亀裂および開口は開かなかった。続く圧力载荷実験は行っていないので、ISO規格で合格となるどうかは不明である。

(5) 加撃体 C

加撃体Cを用いた実験では、全面貼りフィルム厚 350 μm で、部分貼りフィルム厚 350, 450 μm とともに加撃体は貫通し、ISO 規準に不合格となった (Fig.23)。

以上、フィルム貼りガラスの ISO 基準に準じた試験結果をまとめると、Table 9 のようになる。

本研究ではISO規格に基づいて、種々の板ガラスの、耐衝撃破壊性能を明らかにした。今後、得られた結果を用いて、日本における建物開口部におけるガラスの耐衝撃破壊性能評価方法の策定のための資料としたい。また、日本における強風災害の主な原因となっている屋根瓦に関しては、別途、瓦を加撃体として射出できるように装置を改良し、ISO規格等で用いられる加撃体との対応を明らかにしていく予定である。最後に、それらの結果を用いて、既存の耐衝撃破壊性能評価方法と整合性のとれた日本国内用の規準やガイドラインの作成に資する予定である。

謝 辞

本研究は、平成 20－22 年度科学研究費補助金基盤研究(B)一般「強風下における飛来物による外装材の破壊性状に関する研究」の補助をうけて行われた。また、ガラス試験体は板硝子協会から、フィルムは日本ウインドウ・フィルム工業会から提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

丸山 敬（2010）：飛散物に対する外装材の耐衝撃性能の評価方法について，日本風工学会誌，Vol.35, No.1 (No.122), pp.33-40.
丸山 敬・河井宏允・西村宏昭（2008）：外装材の

耐衝撃性能試験用エアーキャノンの試作，日本建築学会大会学術講演梗概集B-1，pp. 283-284.

丸山 敬・河井宏允・西村宏昭・加茂正人（2009）：外装材耐衝撃性能試験用エアーキャノン，日本風工学会誌，Vol.34, No.2 (No.119), pp.31-38.

DOS Standard（2002）：Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, U.S. Department of Energy.

ISO 16932（2007）：Glass in building－Destructive - windstorm - resistant security glazing－Test and classification, 2007-07-01 First edition.

State of Florida: Florida Building Code (FBC)（2004）：Building, Section 1626”High Velocity Hurricane Zone”.

Impact Resistant and Failure Characteristics of Glazing Based on ISO Test Method

Takashi MARUYAMA, Hiromasa KAWAI, Hiroaki NISHIMURA*, Masato KAMO and Yutaka MAEDA*

* General Building Research Corporation of Japan

Synopsis

Impact resistant test of glazing was carried out based on ISO 16932. An air-cannon, that is a missile-propulsion device, for the impact resistant test of cladding against windborne debris was manufactured. A series of tests of various kinds of glasses was carried out to investigate the performance of impact resistant and the characteristics of failure. The performance of sheet glasses, such as float, tempered, wired, laminated and filmed glasses was evaluated by the specification of ISO16932.

Keywords: strong wind, flying debris, glazing, impact resistant test, failure characteristics