

高強度ガラスの衝撃に対する破壊挙動

日本電気硝子㈱ ○細田 洋平 森岡 康介 濱田 聖司

Fracture behavior of high-strength glass against impact

Yohei HOSODA, Kosuke MORIOKA and Seiji HAMADA

1 緒 言

ソーダ石灰ガラスは一般的なガラス材料として知られており、窓ガラスをはじめ、身の回りの様々な用途で用いられている。近年、自然災害等の増加から、飛来物によるガラスの破損報告が増加しており、より耐衝撃に優れた高強度なガラスが求められている。板ガラスの破壊モードとして、一般的に曲げ破壊とヘルツ破壊が知られている。曲げ破壊は板ガラス全体が変形し、その衝撃面と反対の面に引張応力が生じることによる破壊である。一方でヘルツ破壊は衝撃点周辺の微小領域が変形し、引張応力が生じることによる破壊である。飛来物等の衝撃による破壊では後者のヘルツ破壊が発生するケースが多いと考えられるが、ヘルツ破壊の発生を利用した強度試験方法はあまり報告されていない。本研究では、ヘルツ破壊下において、開発した板ガラスの強度を測定する目的で、鋼球を用いた板ガラスへの衝撃試験を行い、ヘルツ破壊の発生条件を明らかにした。結果、開発した板ガラスは、ヘルツ破壊下において、ソーダ石灰ガラスと比較して非常に高い強度を示した。

2 ヘルツ破壊発生条件調査

2.1 試験方法 鋼球と板ガラスの接触面に働くヘルツ応力は鋼球の直径、速度、質量が関係しているため、それらをパラメータとして、ヘルツ破壊の発生有無を調査した。Fig.1 に本試験で用いた装置構成を示す。鋼球には SUJ-2 製 (ヤング率 207GPa) を使用し、直径を 2.5mm ~ 25mm、速度を 5m/s ~ 30m/s、質量を 4g ~ 64g、の間で変化させた。鋼球射出手法は、独自で製作したバネの弾性力を利用した射出装置を使用した。また試験用板ガラスには市販のソーダ石灰ガラス (寸法 50mm × 50mm、肉厚 8mm、両面鏡面加工品) を使用した。板ガラスの 4 辺それぞれの端部より 5mm の領域を支持枠に挟みこむことで板ガラスを固定し、鋼球と板ガラスの衝突の様子は高速度カメラ (Photron 製 FASTCAM mini AX-200) により、ヘルツ破壊時に生じるコーン形状のクラック片 (以下、ヘルツコーン) の発生有無を観察した。

2.2 ヘルツ破壊観察結果 Fig.2 は直径 13mm、速度 13.8m/s、質量 9g、で鋼球を衝突させた際の高速度カメラによる観察結果と破壊後のソーダ石灰ガラスの外観である。高速度カメラでは鋼球が衝突した瞬間にクラックが伝播し、ヘルツコーンが衝突面と反対側から抜け落ちる様子が観察できた (Fig.2(a))。試験後に回収したヘルツコーンを Fig.2(b) に示す。

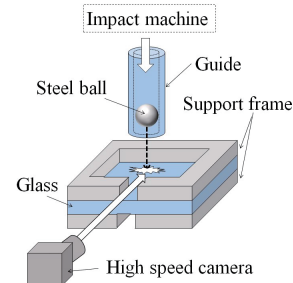


Fig.1. A schematic illustration of steel ball impact test.

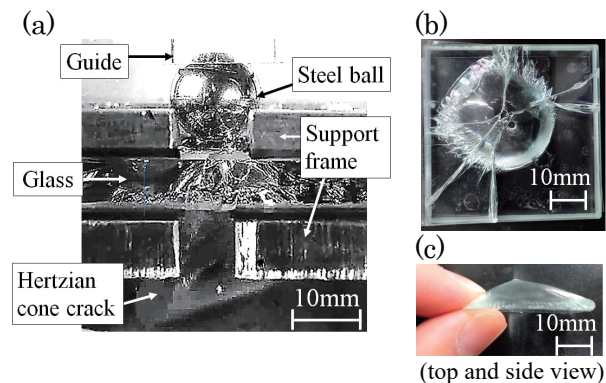


Fig.2. Observation of Hertzian fracture, (a) Picture by high speed camera, (b) Appearance of glass sample after impact test and (c) Hertzian cone crack.

2.3 鋼球の直径と速度の関係 Fig.3. に鋼球の直径を変えて試験を行い、破壊が起こった場合にヘルツ破壊 (○) と曲げ破壊 (□) を分類してプロットした図を示す。破壊が起こらなかった場合は (×) をプロットした。

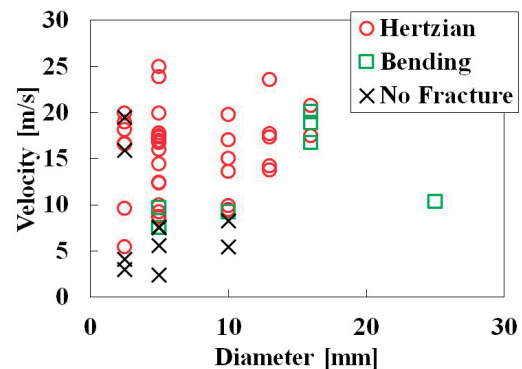


Fig.3. Fracture mode by changing diameter and velocity of steel ball.

本結果から鋼球の直径が 13mm 以下、速度が 10m/s 以上の場合にヘルツ破壊が発生しやすいことが分かった。つまり鋼球の直径が小さく、速度が速い場合にヘルツ破壊

が高い頻度で発生することが分かった。

2.4 運動量と速度の関係 Fig.4 に鋼球の運動量と速度の関係を鋼球の質量毎にプロットした図を示す。Fig.3と同様に破壊モードを分類した。運動量が $0.2\text{kg}\cdot\text{m/s}$ の部分に着目すると、同じ運動量であっても質量が大きい鋼球に比べて質量が小さい鋼球の方が、ヘルツ破壊が起きやすいことを確認した。鋼球の質量が 9g 以下、速度が 10m/s 以上の場合はすべてヘルツ破壊であった。

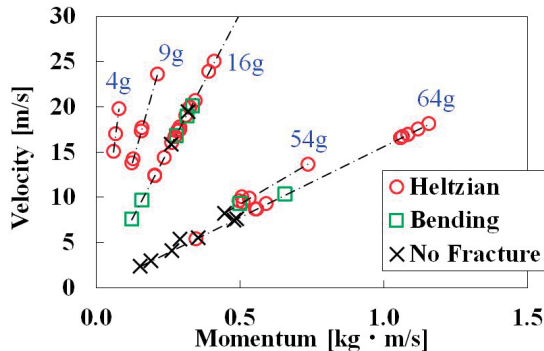


Fig.4. Fracture mode by changing momentum and velocity of steel ball.

2.5 ヘルツ破壊の発生条件まとめ 上記 2.3 項、2.4 項の結果を Table 1 に纏めた。Table1 より、ヘルツ破壊の発生条件を定量的に得ることができた。

Table 1 Occurrence condition of Hertzian fracture.

Velocity	Weight	Diameter
$\geq 10\text{m/s}$	$\leq 9\text{g}$	$\leq 13\text{mm}$

※Glass: soda-lime silicate (size $50\text{mm}\times 50\text{mm}\times 8\text{mm}$)

3 新規開発ガラスの強度試験

3.1 新規開発ガラスに関して 前項で得られたヘルツ破壊の発生条件を利用して、新規開発ガラスの強度試験を行なった。新規開発ガラスの特性に関して Table 2 に示す。新規開発ガラスは、ソーダ石灰ガラスと比較すると密度は同等であるが、熱膨張係数が低く、強度に関連する物性であるヤング率、ピッカース硬度、破壊靱性値が高いという特徴を有している。

Table 2 Properties of developed glass and soda-lime silicate glass.

		Developed glass	Soda-lime silicate glass
Density	g/cm^3	2.6	2.5
CTE (30-380°C)	$10^{-6}/^\circ\text{C}$	4.9	8.5
Young's modulus	GPa	98	72
Vickers Hardness	Hv	700	550
Fracture toughness	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$	0.9	0.7

3.2 試験方法 2.5 項のヘルツ破壊発生条件まとめを参考に試験には直径 10mm 、 4g の鋼球を用いた。板ガラス

は寸法 $50\text{mm}\times 50\text{mm}$ 、肉厚 7mm 、両面鏡面加工品を使用した。強度試験は、2.1 項と同様の方法で、鋼球の速度を変化させ、板ガラスに衝突させる試験を行い、板ガラスがヘルツ破壊にて破壊する直前の鋼球の速度と破壊した際の速度との中央値を算出した。またその速度における鋼球の運動エネルギーを破壊エネルギーとした。

3.3 試験結果 新規開発ガラスとソーダ石灰ガラスに関してヘルツ破壊の発生条件下にて強度比較を行った。いずれのガラスでも速度を大きくするとヘルツ破壊のみが発生することが確認できた。その破壊エネルギーの結果を Fig.5 に示す。ソーダ石灰ガラスは 0.5J でヘルツ破壊が発生したが、新規開発ガラスは 1.5J でヘルツ破壊が発生した。新規開発ガラスはソーダ石灰ガラスに対して約 3 倍の強度を有することが分かった。

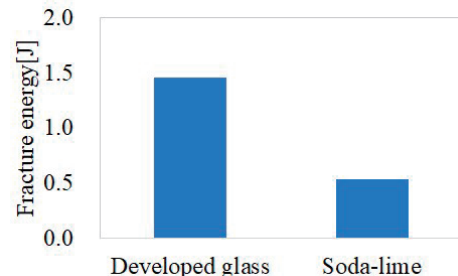


Fig.5. Fracture energy of developed glass and soda-lime silicate glass.

(Sample size: $50\text{mm}\times 50\text{mm}\times 7\text{mm}$, steel ball diameter and weight: 10mm , 4g)

4 まとめ

本研究では、板ガラスの破壊モードの一種であるヘルツ破壊に着目し、ヘルツ破壊の発生条件の調査と、得られた条件を利用して新規開発ガラスの強度試験を行い以下の結果が得られた。

(1)ヘルツ破壊の発生条件調査 自作の鋼球射出装置を用い、鋼球の速度、質量、直径を変化させ、板ガラスに発生するヘルツ破壊発生条件を得た。

(2)新規開発ガラスの強度試験 ヘルツ破壊発生条件下で新規開発ガラスとソーダ石灰ガラスの強度比較を行ったところ、新規開発ガラスはソーダ石灰ガラスに対して約 3 倍の衝撃強度を有することが分かった。

講演会当日はヘルツ破壊の発生を観察した動画や新規開発ガラスの強度試験の詳細、その他結果について報告する。

参考文献

- 1) 石川信隆, 大野友則, 他, 基礎からの衝撃工学(森北出版), 37-44 (2008)