

角錐圧子ハンマを用いたガラスの反発試験におけるハンマ傾斜角の影響

Effects of Hammer Inclination Angle in Rebound Hardness Test of Glass Using Hammer with a Pyramidal Indenter

九州工大・院（正）*梅田 莉駆 九州工大・学（非）伊藤 樹 九州工大・工（正）松田 健次

Riku Umeda, Itsuki Ito, Kenji Matsuda

Kyushu Institute of Technology

1. 緒言

著者らは、ガラスのような脆性材料の破壊のし難さを簡便に評価する手法について検討しており、先の研究では、ダイヤモンド四角錐圧子を付与した高剛性のハンマをガラスに衝突させると、負荷過程でハンマ振動が急激に増加するという現象があること、また、その一因がガラスの破壊に伴う衝突荷重の急減であることを明らかにした¹⁾。この結果は、き裂の発生時期がハンマ振動に注目することにより特定でき、その時の応力状態を把握できれば破壊強度の推定が可能になることを示唆している。ただし、同一の試料に同じハンマを同一高さから落下させた場合においても、ハンマ振動が生じる場合と生じない場合が存在した。この要因として、ハンマ軸が鉛直方向から傾いていた可能性が考えられる。また、自由落下したハンマは運動を停止するまで繰り返し試料表面に衝突したため、それによって損傷状態が変化するという問題もあった。そこで本研究では、ハンマ軸を鉛直軸から任意の方向に傾斜可能で、かつ、二度打ちを防止できる装置を新たに開発し、ハンマ傾斜角がハンマ反発挙動と衝突部の損傷に及ぼす影響を調査した。

2. 実験装置および実験方法

本実験で用いた試験装置を Fig. 1 に示す。ハンマは直径約 0.1mm の釣糸 3 本で上下運動可能なハンマステーから吊り下げられている。ソレノイドが動作するとハンマステーに撃力を与え、ハンマステーが、ハンマが自由落下する速度より速い速度で下向きにはじかれることで、糸がたわみ、ハンマが自由落下する。ハンマステーは撃力を受けた後に引張ばねによって引き戻されるが、適切なばね定数のばねを選択することにより二度打ちする前にハンマを初期位置まで引き上げることができる。さらに、ハンマを吊り下げている 3 本の糸の長さを調節することでハンマに傾斜角を与えることが可能である。

ハンマには、超硬合金製の軸部先端にダイヤモンド四角錐圧子を付与したものを用いた。圧子対面角は 136°、ハンマの質量は 39.2g である。試験片には直径 40mm、厚さ 4mm の光学ウインドウ(石英ガラス)を使用した。試験片は修正液を用いて試料台上に接着した。

ハンマの鉛直方向の速度はレーザードップラー振動計で測定した。一方、ハンマの水平方向の挙動は 2 つの二次元レーザ変位計を用いて計測した。

本実験では目標落下高さを 4mm で固定し、ハンマの傾斜角 ϕ を 0~2° で変化させ実験を行った。ここで、 ϕ は鉛直軸とハンマ軸のなす角と定義しており、2 つのレーザ変位計から得られたハンマの中心座標から算出した。

3. 実験結果

3.1 炭素鋼を用いたハンマ傾斜角の妥当性の確認

Figure 2 は、試料として炭素鋼を用いた実験において、レーザ変位計から算出した傾斜角 ϕ_1 と形成された圧痕形状から導いた傾斜角 ϕ_2 を比較したものである。両者はよく一致していることが分かる。

3.2 反発係数

Figure 3 に反発係数 e とハンマ傾斜角 ϕ の関係を示す。ここで、図中の赤のプロットはハンマを対角線方向に傾斜させた場合(Case I)、青のプロットは対角線方向から 45°回転させた方向に傾けた場合(Case II)の結果である。全体的には傾斜角によらずほぼ一定の値が得られているが、傾斜角が 0.6° と 2° 付近に他より明らかに低い結果 A、B が見受けられる。

3.3 ハンマの振動

Figure 4 に、Fig. 3 で小さい反発係数を示した結果 A、B における衝突時のハンマ加速度波形を示す。結果 A では最大加速度に到達する前に振動が始まっており、結果 B では最大加速度に到達した直後に振動が起きている。Figure 5 は結果 A の衝突後の加速度波形の振幅スペクトルである。ハンマ固有振動数（一次は 101kHz）に大きいピークが認められる。

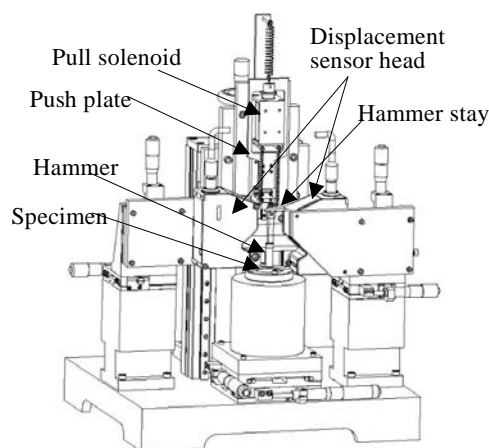


Fig. 1 Experimental apparatus

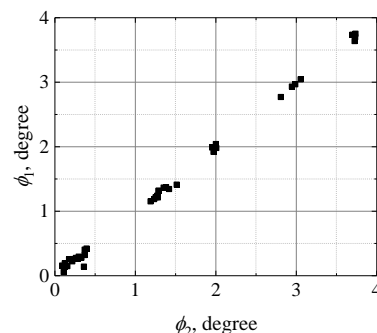


Fig. 2 Relation between ϕ_1 and ϕ_2

Figure 6 に、衝突後の加速度波形から得られた一次の固有振動数の振幅 A_{H1} と傾斜角の関係を示す。Case I の結果 A, B 以外に、Case II の場合にも傾斜角 $0.6^\circ \sim 0.9^\circ$ の範囲に比較的大きな結果 C, D が存在する。これら以外の結果に関しては、Case I, II のいずれの場合においても、傾斜角によらず振幅は比較的小さい値を維持している。

3.4 圧痕き裂

Figure 7 に、ハンマに大きな振動が生じた結果 A と D の圧痕を示す。A の圧痕ではハンマは左方向に、また D の圧痕ではハンマは右上方向に傾斜している。A, D のどちらもハンマを傾けた方向の剥離領域が大きくなっていることが分かる。

Figure 8 に、き裂長さ L と振動振幅 A_{H1} の関係を示す。ここではラジアルクラックに着目し、対角線方向に生じる 2 本の直交するラジアルクラック長さの平均を L とした。なお、ラテラルクラック等によりラジアルクラックの先端が不明な場合には、対角線方向の最大のき裂寸法を測定した。 A_{H1} が小さい領域での L は大きく変動しているが、 A_{H1} が増加すればき裂長さも増加する傾向が認められる。

4. 考察

大きなハンマ振動が生じた場合にはラジアルクラック長さも大きい傾向があるという結果は、前報¹⁾で解明したハンマ振動発生機構、すなわち、ガラスの破壊に伴う衝突荷重の急減がハンマ振動発生の要因であることの妥当性を支持していると言える。ハンマ傾斜角の影響について現時点では定かなことを言い難いが、大きなハンマ振動が生じる割合、例えば振動振幅 A_{H1} が 50 m/s^2 を超える結果の割合を比較すると、傾斜角が 0.4° 未満では 9 回中 0 回であるのに対し、 $0.4^\circ \sim 2^\circ$ では、13 回中 4 回であることから推察すると、ハンマ軸の傾斜は破壊に対してより厳しい応力状態を引き起こしているのではないかと考えられる。今回の実験結果で、ハンマ傾斜角の違いによってき裂の発生時期が異なったこと、また、ハンマの傾ける方向によってハンマの振動振幅やき裂長さの最大値に相違が認められたことも含めて、今後のさらなる実験・解析を通じて定量的な現象の解明をめざしていく予定である。

5. 結言

四角錐圧子を付与した高剛性ハンマを、鉛直方向から $0 \sim 2^\circ$ の範囲で傾斜させ、ガラス表面に衝突させた。その結果、ハンマ傾斜角がハンマ反発挙動や衝突部の損傷に影響を及ぼすことを示唆する結果が得られた。

本研究は JSPS 科研費 JP22K03886 の助成を受けて行われたものである。

文献

- 1) 岡島・陳・松田：トライボロジー会議 2024 春 東京 予稿集 (2024) D29.

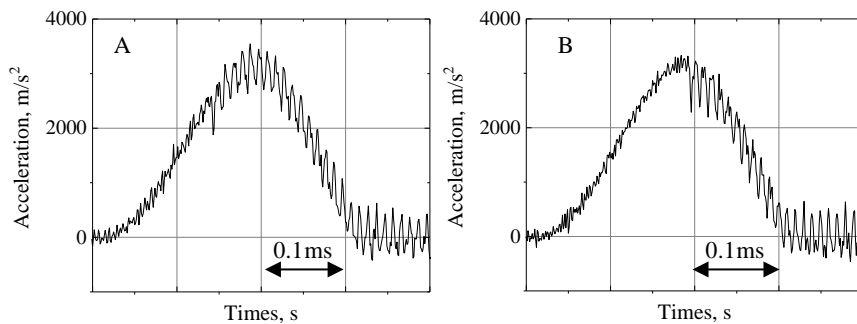


Fig. 4 Variation of the acceleration of the top of the hummer

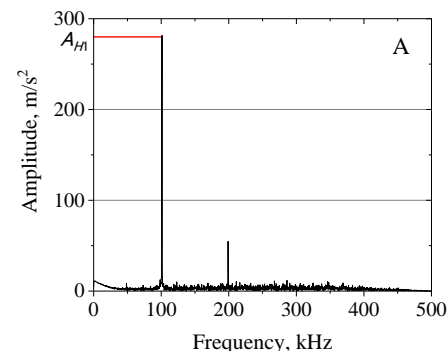


Fig. 5 Acceleration spectrum at the upper most of the hummer after the impact corresponding to A in Fig. 4

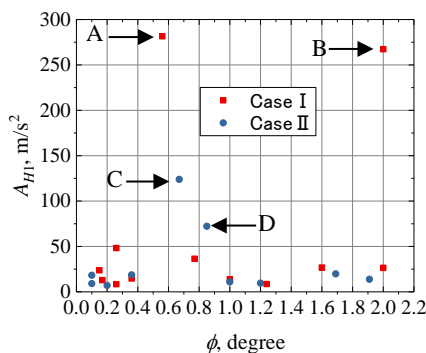


Fig. 6 Relationship between A_{H1} and ϕ

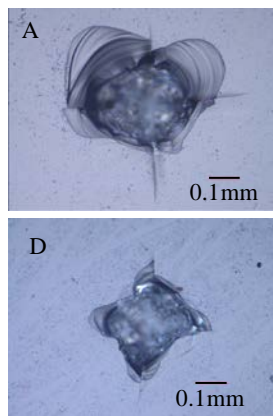


Fig. 7 Indentations

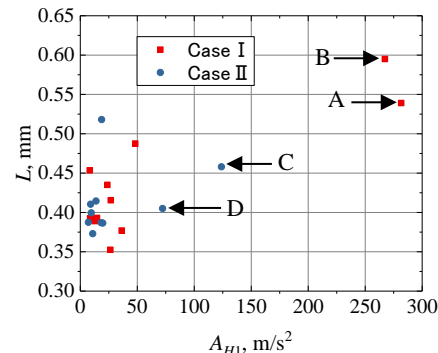


Fig. 8 Relationship between L and A_{H1}