

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振動発生機構

Possible Mechanism for Hammer Vibration in Rebound Hardness Test of Glass Using Hammer with Pyramidal Indenter

九工大・院（正）岡島 秀汰 九工大・院（正）陳 璐 九工大（正）*松田 健次

Shuta Okajima, Lu Chen, Kenji Matsuda

Kyusyu Institute of Technology

1. 緒言

衝突前後の速度比，あるいは落下高さに対する反発高さの割合から硬さ値を定義する反発硬さ試験は，衝突によるハンマエネルギーの散逸の程度を評価していると言える．主として塑性変形にエネルギーが費やされる金属材料では，硬さ値はその材料の塑性変形のしにくさを表す．一方，脆性材料にハンマが衝突することによって破壊が生じ，それにハンマエネルギーが費やされれば，反発硬さ試験によって材料の破壊のしにくさも評価できると期待される．前報¹⁾において，対面角 136° のダイヤモンド四角錐圧子を超硬合金製の軸に付与した高剛性のハンマ（質量 39g ）を，高さ 4mm から合成石英表面に落下させたところ，Fig. 1 に示すように負荷過程においてハンマに大きな振動が生じ，反発係数が低下する場合のあることが明らかとなった．しかし，その発生メカニズムは明らかでなかった．そこで本研究では，金属材料の測定では振動が生じ難い高剛性ハンマに振動が生じる原因を，2種類の解析手法を通して調査した．

2. 解析方法

2.1 簡易モデル解析

松田らの手法²⁾を用いて，緒言で述べたハンマを8個の質点がばねで直列に連結されているFig. 2のモデルで置き換えた．その先端に衝突荷重の経時変化を与えることによりハンマ挙動を解析した．なお，ハンマには落下高さ $h=4\text{mm}$ に相当する衝突速度 280.1mm/s を初速度として与えた．

2.2 三次元有限要素解析

三次元弾塑性有限要素法を用いて反発過程を解析した．Figure 3 に作成したモデルを示す．ハンマの形状・寸法は前報¹⁾で用いたものに極力一致させた，すなわち，超硬合金の軸の先端に対面角 $\alpha=136^\circ$ のダイヤモンド四角錐圧子を付与したものである．試験片は直径 8mm ，厚さ 4mm の合成石英とし，その中心にハンマを衝突させた．モデルの対称性から解析領域は圧痕の対角線方向から 45° 傾いた面に挟まれた4分の1領域とした．試験片を圧痕の対角線を含むX-Z平面で分割し，両者の接触面を凝着した．この凝着面は垂直応力閾値を超える引張応力を受けると破断する．本解析では，圧子先端が試験片表面に接触している状態を初期条件とし，落下高さ $h=4\text{mm}$ に相当する衝突速度 280.1mm/s をハンマに初速度として与えた．圧子先端と試験片表面間の摩擦係数は 0.3 とした．また，微小押し込み硬さ試験を再現した有限要素解析を実施し，同解析から得られる荷重-押し込み変位曲線が合成石英の実験結果に一致するようにガラスの応力-ひずみ曲線を決定した．

3. 解析結果と考察

3.1 簡易モデル解析

モデル化したハンマ先端にFig. 4に示す2つの荷重波形を与えた．荷重波形Aは，負荷過程で大きな振動が生じなかった場合の加速度波形の測定結果をもとに作成している．荷重波形Bは，荷重波形Aを基準にして衝突開始から約 0.12ms 後に波形を下方方向にずらした曲線である．ただし，荷重波形AとBの負荷過程における力積が等しくなるように時間を調整した．

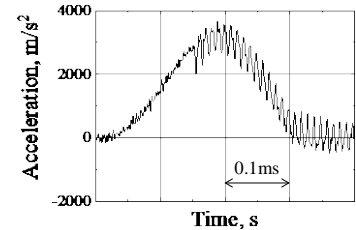


Fig. 1 Variation of the acceleration of the top of the hammer obtained in the previous study for glass specimen

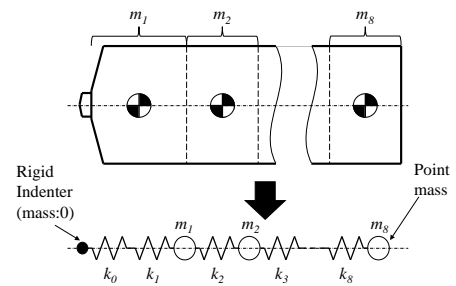
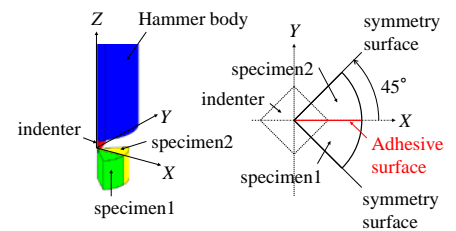


Fig. 2 Simple hammer model



(a) Overall image (b) Specimen surface

Fig. 3 Finite element analysis model

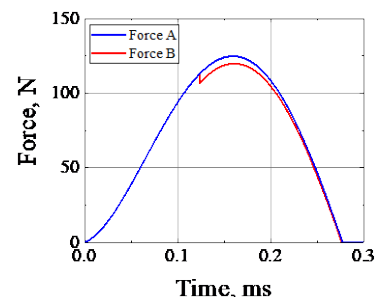


Fig. 4 Time variations of impact force applied to the simple model hammer

Figure 5 に得られた加速度波形を示す。荷重波形 B を用いた解析では Fig.1 のように衝突荷重が変化したタイミングでハンマに振動が発生していることが分かる。また、荷重波形 B は荷重波形 A よりも反発係数が低下していた。これは除荷過程においてハンマが受ける力積が減少したことによるものと考えられる。このことから、Fig. 1 に示すようなハンマ振動の増加と反発係数の低下は衝突荷重の急激な減少が引き起こしたと考えられる。

3.2 有限要素解析

有限要素解析を用いて荷重の減少が生じる原因を調査した。試験片の凝着面に破断が生じる垂直応力閾値が、衝突開始から 0.12ms 後に 5590 MPa から 270MPa に減少させた解析を実施した。繰返し計算における時間増分 Δt を 1×10^{-6} s と 5×10^{-7} s の 2 種類で解析した。Figure 6 にき裂発生前後の荷重波形を、Fig. 7 に加速度波形を示す。垂直応力閾値の低下と同時に荷重も減少し、それに伴いハンマに振動が生じたことが分かる。また、 Δt を減少させるとこの傾向がより強調される結果が得られた。このことから実際の実験では極めて短時間に荷重変化が生じることでより大きな影響を及ぼしたものと考えられる。加速度波形の衝突後の領域に対して高速フーリエ変換を行った結果を Fig. 8 に示す。 Δt を半減したことで一次の固有振動数(101kHz)の振幅は著しく増加したことが分かる。

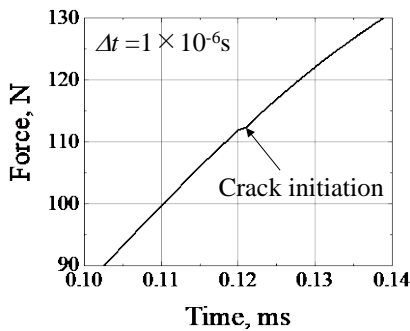
4. 結言

四角錐圧子を付与した高剛性ハンマをガラスに衝突させた際、負荷過程でハンマ振動が急激に増加する原因を 2 つの解析手法を通して検討した。その結果、ガラスの破壊に伴う衝突荷重の急減がこの現象の一因であることを明らかにした。

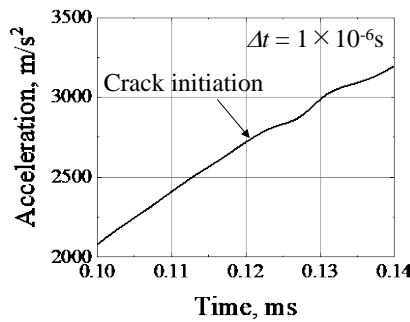
本研究は JSPS 科研費 JP22K03886 の助成を受けて行われたものである。

文献

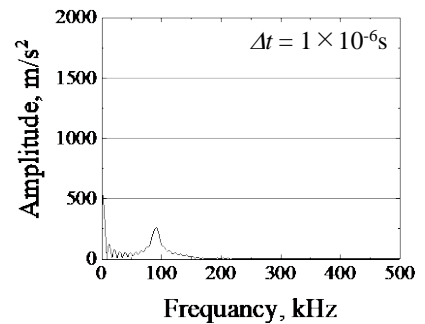
- 岡島・陳・松田, トライボロジー会議 2022 春 東京 予稿集 (2022), 156.
- 松田・兼田, 日本機械学会論文集, 66-652, A(2000), 2113.



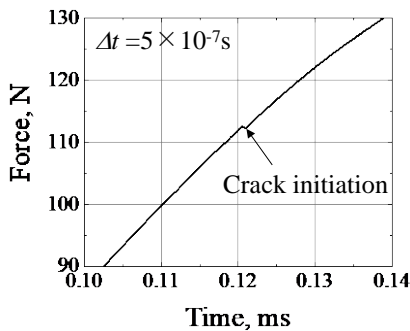
(a) $\Delta t = 1 \times 10^{-6}$ s ($e = 0.8431$)



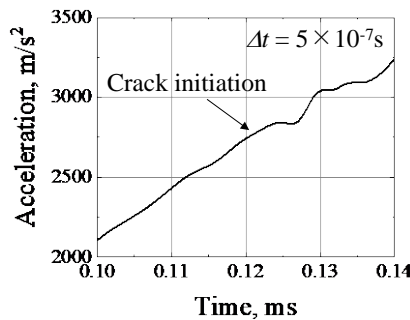
(a) $\Delta t = 1 \times 10^{-6}$ s ($e = 0.8431$)



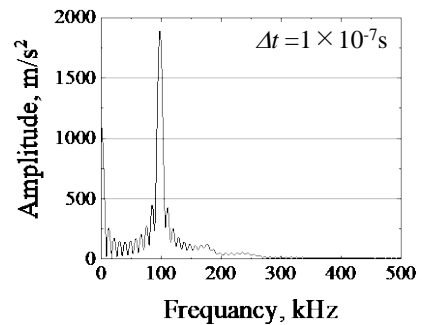
(a) $\Delta t = 1 \times 10^{-6}$ s ($e = 0.8431$)



(b) $\Delta t = 5 \times 10^{-7}$ s ($e = 0.8430$)



(b) $\Delta t = 5 \times 10^{-7}$ s ($e = 0.8430$)



(b) $\Delta t = 5 \times 10^{-7}$ s ($e = 0.8430$)

Fig. 6 Impact force waveforms before and after the threshold normal stress change obtained by the FEM

Fig. 7 Acceleration waveforms at the top of the hammer before and after the threshold normal stress change obtained by the FEM

Fig. 8 Acceleration spectrum at the top of the hammer after the impact obtained by the FEM