

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630039

研究課題名(和文)反発硬さ試験法の新しい展開

研究課題名(英文)New Aspects of Rebound Hardness Testing Method

研究代表者

松田 健次(MATSUDA, Kenji)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40229480

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：(1)反発硬さ試験において、試験片の固定方法が好ましくない場合には、試験片の弾性変形が十分に回復する前にハンマが離れることによって、反発後の試験片の振動が増加し、これが反発係数の低下の一因となることを確認した。(2)四角錐圧子を有する高剛性ハンマを用いると、測定面上の潤滑油の有無や衝突速度の影響を受けずほぼ一定の反発係数が得られることを明らかにした。(3)ガラスの測定においても、上記(2)のハンマを用いると、衝突速度の影響を受けずほぼ一定の反発係数が得られる試料のあることが確認できた。さらに、ハンマ衝突時のガラスの変形および破壊挙動がハンマ反発挙動に大きく反映されることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：(1) If a specimen is fixed by inadequate manner, the hammer is released from the specimen surface before the elastic deformation of the specimen has been restored, and then the vibration of the specimen after the impact increases, which results in one of the causes of decreasing in the coefficient of restitution. (2) In the case of the hammer with a pyramidal tip and a high rigidity body, the coefficient of restitution remains almost a constant value irrespective of the existence of the lubricant on the specimen surface and of the impact velocity. (3) There exists a kind of glass of which almost a constant coefficient of restitution can be obtained irrespective of the impact velocity when the hammer mentioned in the above item (2) is used. Furthermore, it becomes clear that the deformation and destructive behaviors of glass due to the collision could strongly affect the hammer motion after the impact.

研究分野：トライボロジー

キーワード：反発硬さ試験 反発係数 脆性材料 破壊じん性値 潤滑油 ハンマ振動

1. 研究開始当初の背景

(1) 反発硬さ試験は、試験機が小形・軽量で操作が簡便であり、測定に要する時間も極めて短いという特徴を有しているため、特に現場の評価手段として強い支持を得ている。ただし、既存の試験法では独自の定義で「硬さ」を定めているためにその物理的意味は曖昧である。さらに、既存の試験法では球体の圧子が使用されているが、球体の反発係数は衝突速度の増大とともに低下することが知られており、衝突条件（例えば衝突速度）の異なる結果を直接比較することが理論的に不可能であるという問題があった。

これに対して申請者は、四角錐のような尖端形状の圧子を有する高剛性のハンマを測定物に衝突させると、衝突速度やハンマ質量によらずほぼ一定の反発係数が得られることを明らかにした²⁾。この新たに発見された現象を利用して、これまで測定物の単なる硬さ比較法として用いられるに過ぎなかった反発式の硬さ試験法を再構築することにより、他の手法では評価が困難であった特性も比較的容易に測定可能になるものと期待される。

(2) 反発試験の特徴の1つは、衝突時に失われるエネルギーをダイレクトに測定していることにある。損失エネルギーが塑性変形によるものであれば、それは「硬さ」の指標となるが、破壊を伴うものであれば、破壊のし難さ、例えば「破壊じん性」の指標にもなると期待される。また、反発試験は基本的に衝突現象を扱う試験であるから、ハンマの衝突速度の影響を明らかにできれば、エロージョン問題における衝突速度の影響を解明するための指針も得られるものと期待される。

(3) 申請者のこれまでのセラミックス試料を用いた反発硬さ実験では、データが大きくばらつくことを経験している。試料と試料台表面が全面にわたって均一に接触する状態は期待しがたく、加工性の困難さから、それを修正することも容易でない。また、JIS R 1610の硬さ試験法に、試料の最小厚さが0.5mm以上と規定されているように、比較的薄い試料を用いる場合も多く、破壊の危険性から試料を固定する力にも注意が必要である。信頼性の高い測定データを得るには、まず、試料測定方法が反発挙動に及ぼす影響を解明することが重要となる。

(4) また、現場での使用を想定した場合、試料表面が潤滑油等の液体で覆われている可能性も考えられるが、これらの影響の程度を把握することも、迅速で信頼性の高い試験実現のために必要である。

2. 研究の目的

- (1) 試験片固定方法による反発挙動の変動メカニズムの解明と好ましい固定方法の提案
- (2) 潤滑面の反発係数に及ぼす潤滑油の種類および圧子形状の影響の把握
- (3) 脆性材料の反発試験における破壊現象と

ハンマ反発挙動との関係の把握

3. 研究の方法

図1に、本研究で用いたハンマの形状・寸法を示す。ハンマAは、超合金製の本体先端部に対面角 136° のダイヤモンド四角錐圧子がろう付けされている。質量 m は39.2gである。ハンマBは、日本工業規格(JIS B7727)のショア硬さ試験用ハンマと同じ形状寸法の鋼製軸部の先端に、直径2mmの軸受用窒化ケイ素球を圧入したものであり、質量は38.3gである。

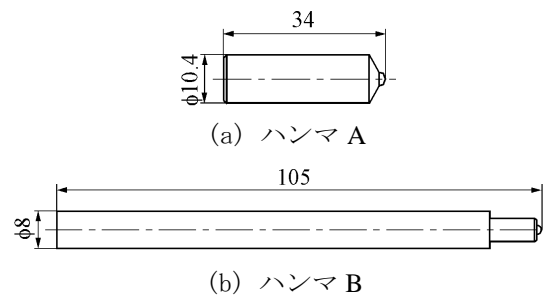


図1 ハンマの寸法・形状

(1) 試験片固定方法による反発挙動の変動メカニズムの解明と好ましい固定方法の提案

図2に自由落下式反発硬さ試験装置の概略図を示す。ハンマAを上下動可能なスタンドに取り付けられたモーターハンドで掴み、これを開くことで試験片上に自由落下させる構造となっている。このとき、ハンマ上端にレーザードップラー振動計のレーザーを照射することにより、その反発挙動を測定した。さらに、基台に空けた貫通穴にもう1台のレーザードップラー振動計のレーザーを通過させ、プリズム型鏡で 90° 反射させて試験片背面の中心に照射することにより、試験片の挙動を計測した。

試験片には直径25mm、厚さが3mm、5mm、10mmの3種のマルエージング鋼(HV \approx 315)と、直径40mm、厚さ5mmの強化ガラス(HV \approx 570)を用いた。ハンマ落下高さ H はマルエージング鋼では10mm、強化ガラスでは4mmとした。

マルエージング鋼の場合は、試験片上部に固定用のリングをのせ、等間隔に配置した4本のボルトで基台に締結した。一方、強化ガラスの場合は、図3に示すように4つまたは3つの固定用ブロックにそれぞれボルトを通し、締結した。ボルトには皿バネを挟み込み、皿バネのたわみによってボルトの締結力を定量化した。本実験ではボルト一本当たりの締結力を150Nとした。

固定条件として、二種類の厚さ(0.5mm、1mm)のシリコーンゴムを試験片と基台の間に挟みこむことでその影響を調べた。さらに強化ガラスの場合には、図3に示すように1個または3個のワッシャーをシリコーンゴムの代わりに挟むことで接地状態を変化させた実験も行った。

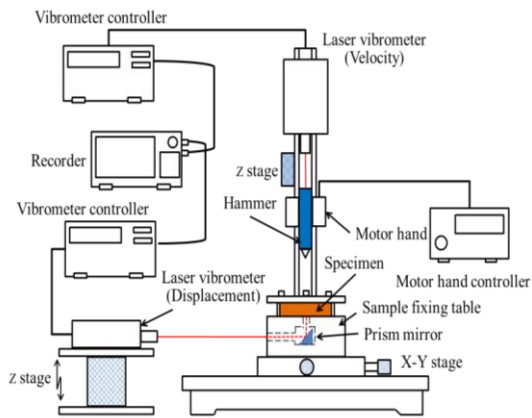


図2 実験装置概略図

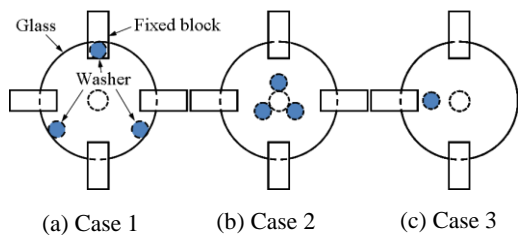


図3 ガラスの固定方法

(2) 潤滑面の反発係数に及ぼす潤滑油の種類および圧子形状の影響の把握

試験片には、上記と同じマルエージング鋼（直径 25 mm、厚さ 10 mm）を使用した。用いた潤滑油は、VG-100（大気圧下粘度 $\mu = 0.085 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、粘度-圧力係数 $\alpha = 20 \text{ GPa}^{-1}$ ）と TN-320（ $\mu = 0.34 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、 $\alpha = 60 \text{ GPa}^{-1}$ ）の 2 種類である。試験片表面に厚さ 1.5 mm のワッシャーを置き、その表面と液面が一致するように潤滑油を注ぐことにより、潤滑油厚さを約 1.5 mm とした。この潤滑面に、ハンマ A および B を種々の高さから落下させ、反発挙動および圧痕形状を比較した。なお、試験片を載せている鋼ブロックの側面にラバーヒータを巻き付け、先端を潤滑油中に差し込んだ熱電対の信号に基づいて、温調器で油温を 40°C に制御している。

(3) 脆性材料の反発試験における破壊現象とハンマ反発挙動との関係の把握

上記ハンマ A を、強度の異なる 2 種類のガラスに衝突させ、その反発挙動およびき裂発生挙動を比較した。試験片には、直径 40mm、厚さ 5 mm の並ガラス（ソーダガラス、ヤング率 $E = 73 \text{ GPa}$ ）および強化ガラス（ホウケイ酸ガラス、 $E = 64 \text{ GPa}$ ）を用いた。ハンマ落下高さは、0.6, 1.3, 2.1, 3.6, 6.5 mm を目標値として各高さ 3 回実施した。また、試験荷重 9.8~98 N で付与したビッカース圧痕と比較することにより、圧痕き裂形成に及ぼす負荷速度の影響についても検討した。

なお一部の試験では、10 万コマ/秒の高速ビデオカメラを用いて、衝突時の試験片の挙動を表面および側面から観察した。

4. 研究成果

(1) 試験片固定方法による反発挙動の変動メカニズムの解明と好ましい固定方法の提案

図 4 にハンマ速度と試験片変位の経時変化を示す。ハンマ速度は鉛直上向きを正としており、衝突時に負から正へと急激に変化している。一方、試験片変位は鉛直下向きを正としており、ハンマの衝突によって下向きに大きく変位し、その後減衰しながら振動が継続していることがわかる。ここで、試験片振動の第一波、第二波の振幅 A_1, A_2 をそれぞれ図 4 (a) のように定義した。 A_2 と反発係数 e ($= -v_2/v_1$, v_1 : 衝突前の速度, v_2 : 衝突直後の速度) の関係を調べた結果を図 5 に示す。試験片がマルエージング鋼および強化ガラスのいずれの場合においても、 A_2 が増加するに従い反発係数は低下する傾向が認められる。ただし、 A_2 がある値以下になるとほとんど反発係数に影響しない領域があることも分かる。

マルエージング鋼における反発係数は、1 mm のゴムを挟んだ場合に大きく減少している。図 4 (a) において、ゴムの厚さが 1 mm の場合と 0.5 mm の場合を比較すると、衝突時の試験片変位 A_1 は 1 mm の方が 3~4 倍程度大きくなるとともに、最大変位に到達するまで要する時間も増大している。一方、衝突によるハンマ速度の立ち上がりには試験片固定方法の影響はほとんど生じていない。その結果、ゴム 1mm の場合には、ハンマが試験片に最大に押し込まれた状態、すなわちハンマ速度が 0 になった以降も試験片は下方に変位を増大させており、ハンマが試験片から一旦分離した後再び衝突することによって生じたと考えられる階段状の速度波形が、衝突終了近傍に認められる。

一方、強化ガラスにおける反発係数は、Case 3 の固定条件の場合に大きく減少している。図 4 (b) で何も挟まない場合、0.5 と 1mm のゴムを挟んだ時、および Case 1, Case 2 の場合を比較すると、第一波の大きさは異なるものの、いずれもハンマ速度が 0 になる近傍で試験片変位は最大を示している。一方、Case 3 の場合はマルエージング鋼に厚さ 1mm のゴムを挟んだ場合と同様に、試験片の最大変位はハンマの最大押し込み時よりかなり遅れて生じていることがわかる。

すなわち、好ましくない固定条件の場合、衝突によって生じた試験片の弾性変位が十分に回復する前に試験片からハンマが離れてしまい、これによって試験片に残留する振動エネルギーの増加が、反発係数を低下させる一因であることを確認した。これを防ぐには、衝突点を取り囲むように配置された 3 つの支持点が少なくとも存在すること、または、試料台に接する試験片背面の粗さやうねりを吸収できるようなゴム等の弾性率の小さい薄いシートを試料の下に挟むことが有効である。

なお、この結果に基づき、下記(3)の並ガラ

スを用いた実験において試験下面に薄い高分子シートを敷いて試していたところ、ハンマ落下高さが大きい場合に並ガラスが巨視的に割れてしまうという現象が生じた。試験片周囲を上部からブロックで押し付けたために、試験片上面に引張の応力が発生したためだと考えられる。測定箇所を確保するために試験片中央付近を押し付けることは困難

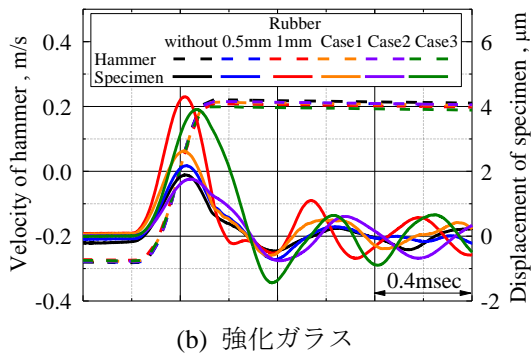
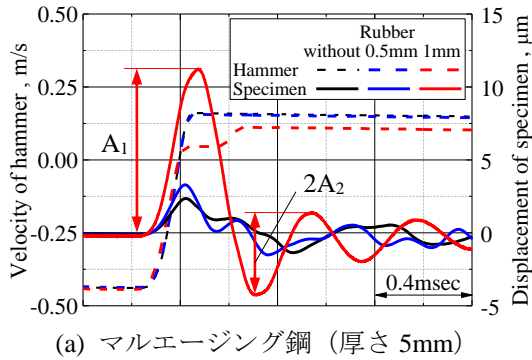
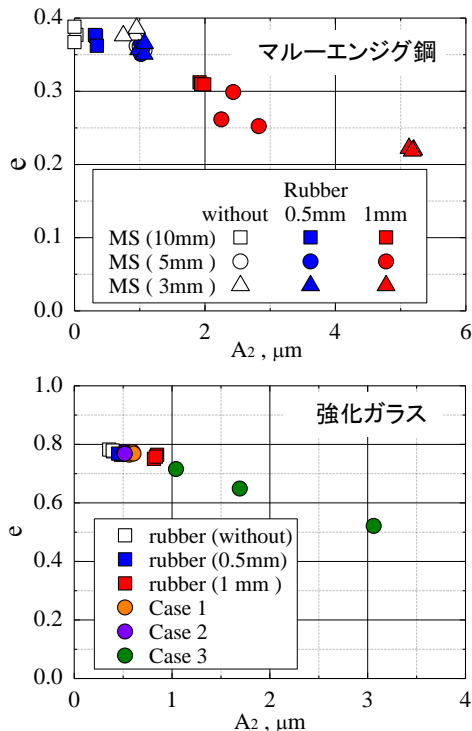


図4 衝突時のハンマ速度と試験片変位の経過変化



なため、思考錯誤の結果、文具用修正液を試験片下面の外周付近および中央付近に塗布して直接基台に貼り付けることにより安定したデータの得られることが確認できた。したがって、下記(3)の研究においてはこの手法を用いている。

(2) 潤滑面の反発係数に及ぼす潤滑油の種類および圧子形状の影響の把握

ハンマ A, B の反発係数と落下高さの関係を図6に示す。ここで、落下高さはレーザドップラー振動計から得られた衝突直前の速度から算出している。先端に軸受用球を圧入しているハンマ B の無潤滑の場合、落下高さの低下とともに反発係数は増加するが、TN320 の結果は全体的に無潤滑状態より低く、その差は落下高さが減少するにしたがい増加している。一方、ハンマ A の場合、潤滑油の種類やその有無の影響は小さく、落下高さによらずほぼ一定の反発係数が得られている。

図7に、各条件下で形成された圧痕の断面形状を示す。ハンマ B の場合、いずれの潤滑

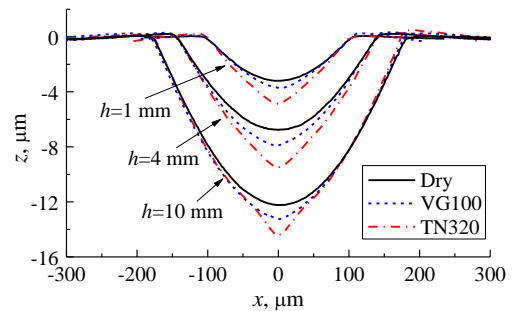
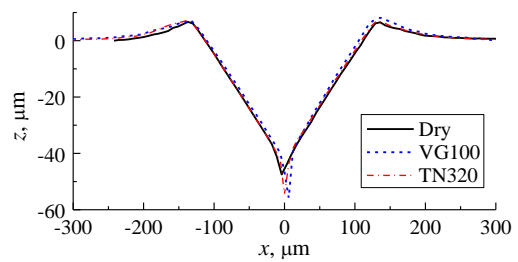
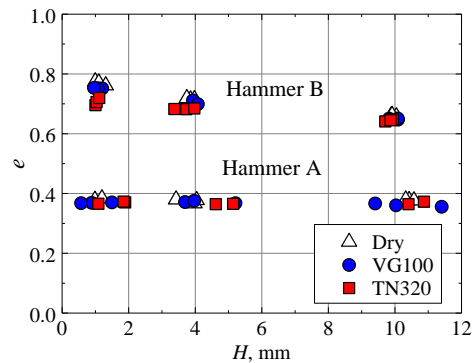


図7 圧痕断面形状

油を使用した場合も、無潤滑下よりも深い圧痕が形成され、特に TN320 の場合にその程度が大きい。これは、高圧粘度が高く流動性を失った TN320 が衝突面に閉じ込められ、あたかも球面圧子の先端部が閉込め油膜分だけ隆起したような形状のハンマを、試験片表面に衝突させた場合と同様な現象が生じたためだと予想される。このため、圧痕中央付近の塑性ひずみが増大し、衝突時に失われるエネルギーが増大したため、反発係数は低下したと考えられる。一方、ハンマ A の場合、潤滑油の存在により圧痕の中央部のみ深くなる傾向が認められるが、その領域は極めて小さく、反発挙動に及ぼす影響は、無視できる程度に小さいことが示唆される。

なお、アルミニウム ($HV \approx 30$) および高硬度のマルエージング鋼 ($HV \approx 700$) に対しても、ハンマ A の場合には上記と同様な結果が得られることを確認した。

(3) 脆性材料の反発試験における破壊現象とハンマ反発挙動との関係の把握

図 8 に落下高さ H と反発係数 e の関係を示す。強化ガラス(G2)では、落下高さによらずほぼ一定の反発係数が得られるのに対し、並ガラス(G1)の場合、全体的に強化ガラスよりも低下し、ばらつきも大きいことが分かる。図 9, 10 にそれぞれ、試験荷重 $F=98\text{ N}$ のビッカース硬さ試験および落下高さ $H \approx 2.1\text{ mm}$ の反発試験で形成された圧痕を示す。ここで、反発試験における衝突荷重は、並ガラスが 75 N 、強化ガラスが 73 N である。圧痕対角線の延長上にラジアルき裂、また、試験片表面下に表面に平行なラテラルき裂の発生が認められる。ラジアルき裂の寸法は並ガラスの方が大きい、強化ガラスには複雑なき裂の形成あるいは破壊の形跡が認められ圧痕が不明瞭になっている。また、反発試験においては、並ガラスにおいても多くの表面はく離れた形跡が認められ、高速ビデオカメラによる撮影によって、衝突時に多くの薄片が表面から飛び散っている様子が観察された。

図 11 に、図 10 の反発試験における加速度の経時変化を示す。いずれのガラスも衝突時に 2000 m/s^2 程度に達する大きな加速度が生じているが、並ガラスのみ衝突によって大きく振動している。ここで、衝突後の加速度波形に対して高速フーリエ変換を実施しハンマの一次固有振動数(101 kHz)における振幅を求め、落下高さとの関係を調べた結果を図 12 に示す。G2 はいずれの落下高さにおいても顕著な振動は認められなかったのに対し、G1 は全体的に振幅が大きく、特に落下高さが高くなるにつれ大きな振幅を呈する傾向が認められた。現在のところ、ガラス試料の違いによって衝突後にハンマが振動する原因は明らかではないが、申請者らの先の金属試料を用いた研究³⁾と同様に、脆性材料においてもハンマ振動が有効な評価因子となりうる可能性のあることが示唆される。

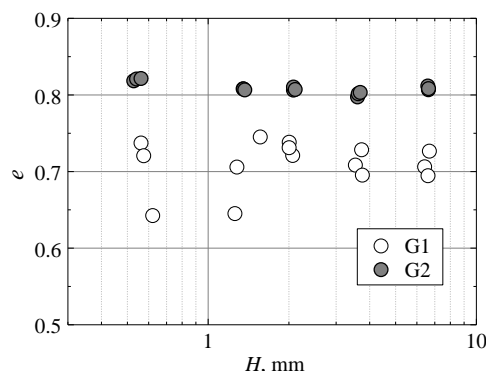


図 8 反発係数と落下高さの関係

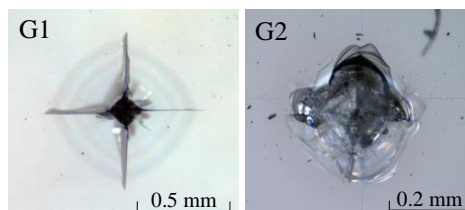


図 9 ビッカース硬さ試験で形成された圧痕 ($F=98\text{ N}$)

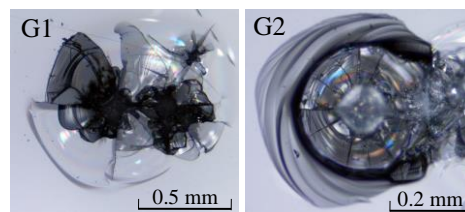


図 10 反発試験で形成された圧痕 ($H \approx 2.1\text{ mm}$)

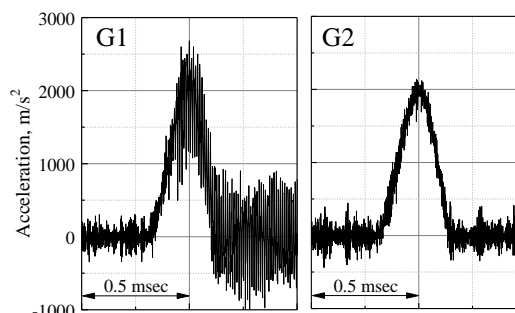


図 11 ハンマ衝突時の加速度波形 ($H \approx 2.1\text{ mm}$)

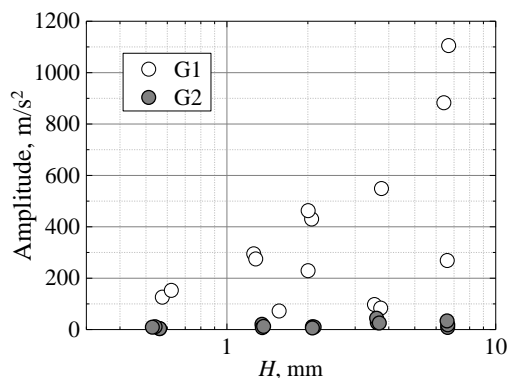


図 12 衝突後のハンマ加速度振幅と落下高さの関係

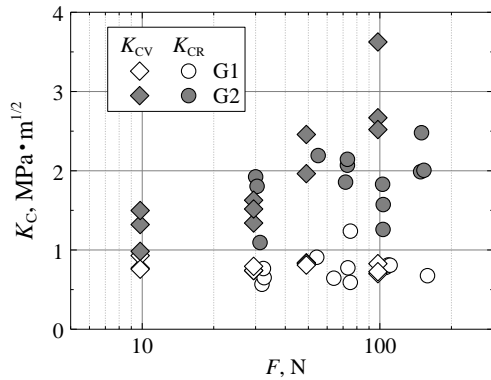


図 13 破壊じん性値と荷重の関係 (K_{CV} :ビッカース硬さ試験, K_{CR} :反発硬さ試験)

ここで、図 9, 10 に示したように、圧痕やき裂の先端は必ずしも明瞭でない場合があり測定精度には問題が残るが、衝突荷重に近い荷重 9.8~98 N で実施したビッカース硬さ試験および反発硬さ試験で形成された圧痕およびラジアルき裂の寸法を測定し、それぞれ IF 法⁴⁾を用いて次式より破壊じん性値 K_{CV} , K_{CR} ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) を算出した。

$$K_{CV}, K_{CR} = 0.018 \left(\frac{E}{HV} \right)^{1/2} \left(\frac{F}{C^{3/2}} \right) = 0.026 \frac{E^{1/2} F^{1/2} a}{C^{3/2}} \quad (1)$$

ここで、 E はヤング率 (Pa), HV はビッカース硬さ (Pa), F は荷重 (N), C はラジアルき裂長さの平均値の半分 (m), a は圧痕の対角線長さの平均値の半分 (m) である。図 13 に荷重と破壊じん性値の関係を示す。反発試験における荷重 F は、衝突時の加速度波形の最大値近傍を 4 次関数で近似し、その最大値にハンマ質量を乗じることにより算出した。なお、反発試験において、ハンマは停止するまで繰り返し試験片に衝突するが、明らかに 2 打目以降の圧痕が 1 打目の圧痕に影響しているとみなされる場合や、寸法の測定が著しく困難であった値は省略している。ばらつきはあるが、並ガラスの場合、試験法や荷重 (あるいは落下高さ) に対する顕著な依存性は認められず、一般的に知られているソーダガラスの値 ($K_C = 0.75 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)⁵⁾ に比較的近い値を示している。一方、強化ガラスの場合、 K_{CV} の値は荷重の増加とともに著しく増加する傾向が認められる。ばらつきや測定精度の問題がありさらなる検討が必要と思われるが、本結果は、ガラスの種類によって破壊じん性値の速度依存性がかなり異なる可能性のあることを示唆しており、 K_C を把握する際には注意が必要であるといえる。

なお、限界破壊エネルギー $G = K_C^2 / E$ の関係式⁶⁾に、上記で算出した K_{CR} を代入することによって G を算出し、ラジアルき裂を半円形状、ラテラルき裂を円形形状と仮定してそれらの面積の和を乗じてき裂形成エネルギーを見積もったところ、並ガラスの場合は衝突前のハンマエネルギーの 0.6% 程度、強化ガラスの場合は 2% 程度となり、反発係数に及ぼす影響は必ずしも大きくない。並ガラスの

場合、衝突時に多くの薄片がガラス表面から飛び散っていたが、これが反発係のばらつきに関連している可能性も考えられる。

なお、ハンマ衝突時のき裂発生状況を試験片側面から高速ビデオカメラを使用して撮影したところ、き裂はハンマの除荷過程においても拡大し、完全にハンマが試験片表面から離れた後までその変化が観察された。このようなき裂発生時期はハンマ反発挙動に影響を及ぼしていることが予想される。ただし、その影響のみをハンマ速度、加速度波形から抽出することは必ずしも容易でなく、ハンマ振動のメカニズムの解明とともに、今後さらに検討していきたいと考えている。

<引用文献>

- 1) 例えば, W. Goldsmith, Impact, London, Arnold (1960) 258.
- 2) 松田健次, 吉川毅, 先端圧子ハンマを用いた反発硬さ試験, トライボロジー会議予稿集, 福井, 2010-9 (2010) 197-198.
- 3) 松田健次, 藤榮淳, ショア硬さ試験におけるハンマ振動の解析, 日本機械学会論文集, 70, A (2004) 1741-1746.
- 4) JIS R 1607, ファインセラミックスの室温破壊じん (靱) 性試験方法 (2010).
- 5) B. Lawn, Fracture of Brittle Solids, 2nd ed., Cambridge University Press (1993) 55.
- 6) 文献 5) の 41 ページ.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 4 件)

- ① Kenji Matsuda, Takeru Hashiguchi, Masanori Suematsu, Rebound Hardness Testing by Using Hammer with Pyramidal Indenter - Effect of Reducing the Impact Force on Restitution Coefficient, Fifth International Indentation Workshop (IIW5), Texas (USA), 2015 年 11 月 (発表確定).
- ② Shunsuke Miura, Kenji Matsuda, Rebound Hardness Test for Lubricated Surface by Using Spherical and Pyramidal Indenters, International Tribology Conference, 東京 (日本), 2015 年 9 月 (発表確定).
- ③ 松田健次, 橋口武尊, 末松正典, 先端圧子ハンマを用いた反発硬さ試験 - 反発係数に及ぼす衝突荷重低減の影響 -, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2014 春, 東京・渋谷, 2014 年 5 月 21 日.
- ④ 松田健次, 林田信吾, 球体および先端圧子ハンマによる潤滑面の反発係数の測定, 石油学会第 43 回石油・石油化学討論会 (招待講演), 福岡・北九州市, 2013 年 11 月 15 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 健次 (MATSUDA, Kenji)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 40229480