圧子形状による押し込みクラック形成機構の相違*

——硬ぜい材料の微視的破壊機構に関する研究（第3報）——

吉岡正人** 澤哲郎*** 室井邦雄***

Effect of the Shape of Indenter Tip on the Mechanism of Indentation Crack Formation
— Study on the Mechanism of Micro-Fracture of Brittle Materials (3rd Report) —

Masato YOSHIOKA, Tetsuro SAWA and Kunio MUROI

Indentations of 10N loads were made on glass with Vickers and cone indenters with nose radii of 0.1 and 0.01mm. The process of crack growth around the indentation was dynamically observed by using of a newly developed crack observing system. There were many differences in the crack growing process and its shape among indentations made by differently shaped indenters. Stress distribution around an indentation was analytically obtained by way of finite element method for both states of full loading and complete unloading. Comparing the analyzed results with the experimental results, the mechanism of crack growth during loading or unloading was discussed. The following conclusions were obtained; (1) In the loading period, only 0.01mm cone indenter generated cracks in a vertical direction. All other cracks observed grew in the unloading period. (2) Based on the analyzed stress state, most cracks are thought to be forced to grow by the abrupt change of stress distribution on the onset of unloading. (3) The difference of crack growing process among different shaped indentations is similarly explained.

Key words: indentation crack, glass, shape of indenter tip, nose radius, crack growing process, stress distribution around indentation, loading and unloading

1. 緒 言

ガラスなど硬ぜい材料に対する砥粒加工機構を解明するために、砥粒の作用を圧子による押し込みや引っかきによってモデル化することがこれまでしばしば行われてきた。圧子を材料表面に押しつけた時に発生する、いわゆるインデンテーションクラックについても、すでに多くの研究報告が提出され、クラックの形態や発生、成長の状況について、現象論的あるいは破壊力学に基づく理論的立場からの考察が行われてきた。これらの研究成果は、Lawn, Wilshaw らによってまとめられている¹⁾。その結果によれば、インデンテーションクラックの形態や規模は圧子先端形状によって大きく異なることが明らかにされている。またそれは、圧子接触点近傍の応力状態の相違によるものであることも理論的に説明がなされている。このような、現象的にクラックを観察し、その結果を応力解析的な手法を用いて説明する一連の研究の流れは、その後も Chiang^{2) 3)}, Evans⁴⁾, Hagan^{5) 6)} らによって継承され、数多くの研究成果が公表された。それらの研究により、現在では少なくとも現象論的には、圧子先端形状とクラックの形態や規模との関係は、多くの材料について明らかにされている。しかしながら、これらの研究の多くは、インデンテーションによる負荷および除荷終了後の観察結果に基づくものであり、したがって観察されたクラックが、一連の負荷、除荷過程のどの時点で形成されるのかは必ずしも明らかにされてはいなかった。それゆえ、クラックの形成機構については多分に推測の域を出ていないものであることは疑いがないところである。

そのような状況から、筆者らはすでに、負荷あるいは除荷中

にクラックの発生、成長する過程を動的な画像として観察、記録することの出来る装置を開発した。これを用いてビッカース圧子をガラスの表面に押し込んだ場合に発生するクラックの成長過程を観察し、その結果を第1報で報告した⁷⁾。その結果、ビッカース圧子による押し込みの場合には、いわゆる縦割れ、横割れとも除荷過程において発生、成長することが明らかになった。ところが、同様の装置を用いて行った円すい圧子による引っかきの場合には、縦割れが引っかき前方に発生し、さらにそれが圧子通過後に成長することも確認された⁸⁾。低速度の引っかきによる応力状態は、近似的には押し込み負荷、除荷が連続的に行われた場合と同様であると考えられるから、このことは、押し込み、引っかきという負荷形式の相違はあるにしても、クラックの形成過程に圧子の形状が影響を与える可能性を示唆しており、これまでの他の研究者らの観察結果とも一致している。そこで本研究では、まず実験的にいくつかの異なる先端形状をもつ圧子による押し込みを行って、これまで明らかにされていなかった動的なクラック形成過程の相違を観察した。さらに、圧子接触域近傍の応力状態の、負荷、除荷にともなう変化を有限要素法により解析的に求め、その結果に基づいて、観察された圧子形状によるクラック形成過程の相違の原因を力学的な側面から検討した。

2. 実 験

2.1 実験装置および方法

本研究で使用した押し込み装置および動的クラック観察記録装置については、第1報⁷⁾で詳しく説明したのでここでは省略する。ただし、押し込み用の圧子は、第1報ではすべてビッカース圧子を使用した。本研究においては、圧子先端形状がクラック形成過程におよぼす影響を観察することが目的であるから、

* 原稿受付 平成6年7月7日

** 正 会 員 山梨大学工学部（甲府市武田4-3-11）

*** 学生会員 山梨大学大学院

Fig.1 Indentation cracks generated in loading, in unloading and after unloading with different indenters

ビッカース圧子のほかに、先端半径0.1mmの球面圧子および半径0.01mmの球状の先端を持つ頂角90°の円すい圧子をもあわせて使用した。圧子の材質はいずれもダイヤモンドである。押し込み荷重、押し込み負荷、除荷速度はすべて一定で、それぞれ10N、0.35mm/sとした。試料には、第1報と同様に厚さ約1.3mmの市販のソーダ石灰ガラス（ビッカース硬さ $H_v = 6.0 \text{ GPa} (612 \text{ kgf/mm}^2)$ 、ヤング率 $E = 70 \text{ GPa} (7140 \text{ kgf/mm}^2)$)を使用した。

以上の条件により、試料表面に対し押し込み負荷、除荷を行いながら、クラック発生、成長過程を時間経過とともに連続的に観察、記録した。第1報でも述べた通り、本装置では、試料の押し込み側の表面とは逆側からの観察しか行えない。しかしここでは、試料内部のクラックの三次元的形状は求められないので、試料裏面からの観察において、クラック形成過程に特に著しい相違の見られたビッカース圧子と円すい圧子によるクラックについては、負荷、除荷終了後に、押し込み点付近に押し込み面に垂直な断面を作成し、断面上のクラック形態もあわせて観察した。断面の作成方法なども第1報で述べたのと同じである。

2.2 実験結果

図1に、それぞれの先端形状の圧子による押し込み時に観察された代表的なクラックの顕微鏡写真を、負荷中、除荷中および除荷後に分けて示す。図1(a)はビッカース圧子、(b)は球面圧子、(c)は円すい圧子によるクラック像である。これ

らの写真から、圧子押し込みによって形成されるクラックは、その形態、規模とも負荷時と除荷時とは大きく異なり、また圧子先端形状によっても異なることが明らかである。まず、ビッカース圧子の押し込みによるクラックは、すべて除荷中または除荷終了後に形成され、その形態は、圧痕の角部から放射状に伸びる縦割れと写真上では白く光って見える横割れに大別される。写真(a)では、左上方のみにこのような白く光った部分が見られるが、これは顕微鏡写真撮影時の照明の方向によるもので、実際には横割れは他の領域にも発生している。この横割れは、縦割れと縦割れの間に形成されることが多かった。これらの観察結果は、第1報における観察結果と完全に一致している。また、除荷中の縦割れ、横割れの成長過程については、まず除荷中に縦割れが成長し、除荷完了後に横割れの成長へと連続的に変化しているが、これらについては第1報で詳しく述べたので、これ以上繰り返さない。

球面圧子によるクラックは、ビッカース圧子によるクラックと同様、すべて除荷中に形成されることが図1(b)から明らかである。この他にも、球面圧子によるクラックで負荷中に形成されたものは一例も観察されなかった。しかしながら、形成されたクラックの形態や規模は、ビッカース圧子の場合とは異なっている。まず、形態について見ると、ビッカース圧子の場合縦割れがほとんど圧痕の角部から成長しているのに対し、球面圧子では縦割れの発生地点に規則性が認められない。これは圧子の形状から見て当然のことであろう。さらに、図1(b)には、圧痕の肩部あるいはその少し外側に、円周状の割れが認められる(図1(b)矢印A)。これはいわゆるヘルツクラックに相当するものと思われるが、本実験の範囲内では、球面圧子の場合に特有のもので、他の圧子による押し込みでは観察されなかった。クラックの規模について見ると、球面圧子の場合には、縦割れの長さはビッカース圧子の場合より若干小さいが、横割れはやや大きいようである。観察されたクラック規模の測定結果については、円すい圧子の場合もふくめて、表1にまとめる。

円すい圧子によるクラックは、その形態、規模ともに、ビッカース圧子、球面圧子の場合とくらべて極端に異なっていた。まず図1(c)から、負荷中においてすでに縦割れが発生しているのがわかる。図1(c)の写真では、ちょうどこうもりが翼を広げたように黒い割れの部分が観察される(図1(c)矢印B)が、これも照明の方向の関係でこのように見えるのであって、実際には、試料表面にほぼ垂直な縦割れである。これらの縦割れは、除荷中にさらに成長するが、除荷中にはこの他に、別の新しい縦割れが発生し、成長する(図1(c)矢印C)。また除荷中には、これらの縦割れをつなぐように横割れが形成され、その一部は試料表面に貫通して欠落を起こすこともあった。これは、ビッカース圧子や球面圧子による押し込みでは観察されなかったことである。円周方向の割れは球面圧子の場合ほど顕著には認められなかった。クラックの規模については、縦割れ、横割れともビッカース圧子や球面圧子の場合に比べて25~50%大きかった。各圧子の押し込みによるクラック長さの測定結果をまとめた表1中の各値は、圧痕中心からクラック先端までの長さを示しており、観察された20~50例についての平均値である。なお、個々の測定値は最大30%程度ばらついていた。

次に、クラックの三次元形状について述べる。図2に、ビッカース圧子および円すい圧子により形成されたクラックの、試料表面に垂直な断面上における形状を示す。ともに圧痕から垂

Table 1 Terminal crack length for different indenters

Kind of crack	Vickers	Spherical	Cone
vertical	75.9 μm	65.8 μm	99.0 μm
lateral	56.9 μm	64.7 μm	89.9 μm
crack tip	not observed	not observed	106.2 μm
circular	not observed	43.9 μm	not observed

indentation load:10N, indentation rate:0.35mm/s

Fig.2 Cracks on vertical section for different indenters

直下方に縦割れが成長し、ある深さで横方向あるいは斜め下方に湾曲している点は同じである。しかし、縦割れが湾曲し始める地点は、同一荷重に対しては円すい圧子のほうがやや深いようである。横割れの方向は、円すい圧子のほうが水平に近い。また、子細に観察すると、円すい圧子による押し込みでは、試料表面のごく浅い部分（10 μm 以下）に試料表面とほとんど平行な横割れが形成された痕跡が認められるが、これは断面を作成する際にほとんど欠落してしまい、断面上にはわずかなくぼみとして残る場合が多かった。

3. 押し込み点付近の弾塑性的応力解析

3.1 解析方法

これまでに見たような、圧子先端形状の相違によるクラック発生、成長過程や規模の相違を力学的な観点から説明するために、押し込み点付近の応力解析を有限要素法を用いて行った。まず解析に用いた仮定および解析手順について説明する。実際の圧子による押し込みによる応力状態は、もちろん三次元的な分布になっているはずであり、解析にもそのような取扱いが必要であると思われるが、本解析では単純化のために二次元平面ひずみ問題として取り扱った。すなわち、たとえばビッカース圧子による押し込みは、図3に示すような頂角136°のくさび型圧子による押し込みで置き換えて取り扱った。球面、円すい圧子の場合も、先端部の角度および先端半径を変えるだけで同様の取扱いを行った。したがって、得られる解析結果には、たとえば圧子のコーナ部の存在に起因するような、圧子形状の三次元的相違に基づく応力分布の相違点は含まれない。しかしながら、横割れの形態や深さなどは、主に図3のモデル領域内の平面内応力の状態に支配されると考えられるから、少なくとも定性的には、このような二次元的応力解析結果に基づいた議論を行うことが可能であろう。

次に、解析対象としたガラスの応力-ひずみ関係については以下のように仮定した。通常、ガラスはぜい性材料と考えられているが、きわめて高い圧縮応力下では、塑性変形、高密度化などの諸現象を起こすという報告がある⁹⁾。圧縮降伏を起こし

Fig.3 Two dimensional model of indentation for Vickers indenter **Fig.4** Stress-strain relation used for the analysis

た後、ガラスがどのような応力-ひずみ関係にしたがって変形するかについては、ガラスが引張応力に対して破壊応力がきわめて小さいため、通常の圧縮試験などの方法で求めることが出来ない。そこで、本解析では、図4に示すようなDugdaleの求めた様々な材料に対する圧縮応力-ひずみ関係の一般形¹⁰⁾がガラスについても成り立つと仮定した。すなわち、ガラスはある降伏応力下で圧縮降伏し、その後ある程度通常の塑性変形を示しながらひずみが增大する。しかし、ひずみがある大きさに達すると、異常硬化領域に入り、その後はほとんど塑性変形を示さず、弾性変形領域と同じような応力-ひずみ関係に従うものとした。このような変形様式は、押し込み変形の場合、ひずみがある大きさ以上に達する圧痕の直下領域では、材料の剛体化が起こるとするMarshのモデル⁹⁾とも一致する。図4のような応力-ひずみ関係が成立しなくなるのは、応力値が異常硬化領域をさらに超えて、相転移などの特異現象を起こす状態に達する場合などが考えられるが、本解析によって得られた圧縮応力の最大値は10GPa程度であり、そのような現象は想像しにくい。したがって、本解析の応力範囲内では、図4のような応力-ひずみ関係を想定することは妥当であると考えられる。具体的には、ヤング率、降伏応力の値は文献¹¹⁾を参照してそれぞれ70GPa、8GPaとし、ポアソン比も同様に0.24とした。また図4のIIすなわち塑性変形領域は、降伏点から相当ひずみの大きさが0.2に達する点までとした。領域III（異常硬化領域）以後は、応力/ひずみ勾配は応力増分に比例して増大するものとした。また、除荷後は、領域I、IIからの除荷では通常のヤング率にしたがって弾性的に除荷が行われるが、領域IIIからの除荷では負荷中に到達した最大の応力/ひずみ勾配の直線にそって除荷されるものとした。

解析対象としたのは、押し込み点を中心として、図5に示すよ

Fig.5 Analyzed area around indentation

Fig.6 Restricted displacements of nodes on contact area

うな縦 $312\mu\text{m}$ 、横 $208\mu\text{m}$ の領域であるが、問題の対称性から、解析は図の右半分（O E C D）についてのみ行い、辺 E C、C D上の節点を拘束した。図 6 に、圧子侵入にともなう節点変位の与え方を示す。まず図 6 のように押し込み点の位置にある節点 1 だけに微小強制変位を増分的に与え、節点 1 と 2 の傾きが圧子の形状によって決まるある値に達したら、節点 2 も圧子に接触したと考えて、以後は節点 2 にも 1 と同じだけの強制変位増分を与える。以下同様の手順をくり返すことにより、圧子と接触する節点が増加してゆく。強制変位節点の反力の総和を接触面積で割った値が 10N の押し込みにおける面積当たりの押し込み力に等しくなるところまで変位を増加した後、負荷過程と全く逆の過程をたどって除荷を完了させた。なお、除荷過程に入る直前に、すべての要素の応力-ひずみ関係を書き換えるのは上に述べた通りである。

3.2 解析結果および考察

図 7 に、ビッカース、球面圧子、円すい圧子それぞれについての、最大負荷時、完全除荷時の最大主応力方向および等主応力分布を示す。はじめに、ビッカース圧子の場合を例にとり、最大負荷状態と除荷終了状態における応力分布の相違点について述べる。最大負荷状態では、最大主応力方向は、圧痕直下では押し込み方向に対して直交しており、押し込み軸から遠ざかるにつれて押し込み点を中心とする同心円状に湾曲しているが、表面に近づくときと表面に平行になるように急激に屈曲している。この形は、いわゆる Boussinesq または Hertz の応力場¹⁾の形に近い。図 7 の主応力方向が、Hertz 場よりも表面付近での屈曲が大きいのは、圧子と表面との接触領域で、横方向の変位を拘束したためであろう。主応力の大きさは、圧痕直下数十 μm および圧痕肩部で最も大きい。注目すべき点は、圧痕直下および肩部のやや外側下部から斜め右下にかけて大きい圧縮領域が存在することである。そのため、もし荷重中にクラックが形成されるとすれば、圧痕直下部の縦割れおよび肩部から成長する Hertz クラックが考えられるが、

Fig.7 Stress trajectories(ST) and contours of principal stress(CP) for differently shaped indenters

両者とも上述の圧縮応力場のため成長が妨げられるものと思われる。ビッカース圧子による押込みでは、負荷中にクラックの成長が認められなかったのはそのためであろう。

次に、除荷終了状態の応力分布を見ると、負荷状態のそれとは全く異なっていることがわかる。最も大きな相違は、圧縮領域の位置が圧痕直下から圧痕肩部の真下付近に移動し、肩部から右下にかけて見られた大きな圧縮領域が右遠方の狭い領域に限られていることである。さらに、圧痕に近い表面に沿って新たな圧縮領域が出現している。そのため、負荷中には成長を妨げられていた縦割れが圧痕直下の圧縮領域の移動により成長するものと思われる。また、圧痕直下領域における主応力方向の変化も注目に値する。負荷中には、押込み方向に直交していた主応力方向が、除荷後には圧痕の下部においても押込み方向に平行な向きに変化している。クラックの成長方向が引張主応力に垂直な方向だとすると、圧痕直下の縦割れはどこかで横向きに成長方向を変化させなければならないが、その深さはおそらく肩部の圧縮領域の深さよりも大きいであろう。圧縮領域の深さは、図7では40 μm 程度であるから、この程度の深さで縦割れが横割れに変化することが予想される。図2では、ビッカース圧子による押込みの場合、約35 μm の深さで縦割れが横割れに変化しているが、ほぼ上記の予想と一致している。

球面圧子、円すい圧子による押込みの場合にも、上に述べたような最大負荷状態と除荷終了状態との応力分布変化の基本的な特長に共通する点も見られたが、圧子先端形状の相違により次のような相違点が認められた。第一に、最大負荷状態において、圧痕下部の引張応力値が円すい圧子の場合に極端に大きいことと、圧痕直下部の圧縮領域が比較的小さいことである。本解析では、圧子の侵入にともなう圧痕形成過程において接触領域内での材料の横方向移動を考慮していないから、圧縮領域の相違は図7に示されている程度であるが、実際の押込み過程では、圧子先端半径および先端角度が小さくなるほど、接触領域内での横移動も大きくなることが予想される。そうすると、圧痕直下の圧縮領域はさらに小さくなり、円すい圧子による押込みでは、負荷中に縦割れが成長する可能性が大きくなるものと考えられる。実験において、円すい圧子による押込みの場合にのみ負荷中に縦割れが成長したのは、以上の理由によるものと考えられる。

第二に、除荷状態において圧痕肩部の真下に残留する圧縮領域の大きさが、円すい圧子、ビッカース圧子、球面圧子の順に小さくなり、またその位置が浅くなっている。除荷による横割れの成長機構が、ビッカース圧子を例として述べた通りであるとする、横割れの深さはこの圧縮領域の深さに沿って深くなるはずである。この推定は、2.2節で述べた結果と一致する。第三に、最大負荷状態における圧痕肩部のやや外側から斜め右下にかけて存在する圧縮領域の位置が、球面圧子の場合に最も圧痕から遠い位置にあることである。したがって、肩部の引張応力によって発生した円周状割れが、圧縮領域によって成長を妨げられにくい条件にあると考えられる。そのため、球面圧子の場合にのみ肩部からの円周状割れが観察されたのであろう。最後に、すべての圧子による押込みにおいて、除荷終了後に表面に沿った細長い圧縮領域が残留しているが、これは、先に述べた過程により、除荷によって横方向に成長するクラックが表面に離脱し、チップとして欠落するのを妨げていると思われる。この残留圧縮領域は、球面圧子、ビッカース圧子、円すい圧子

の順に小さくなっているが、クラックチップ欠落の容易さは、これとは逆の順序になると思われる。この点も、実験結果と一致している。球面圧子による押込みで、もしクラックチップが離脱するとすれば、その大きさは圧縮領域の横方向の長さより大きくなければならないはずで、この結果は、第2報⁸⁾で述べたクラックCの大きさが、球面圧子による引っかきの場合に最も大きくなるという結果とも定性的に一致している。

4. 結 論

ガラス表面に対して、ビッカース、先端半径0.1mmの球面圧子、半径0.01mmの球形先端を持つ円すい圧子により負荷荷重10Nで押込みを行い、その際発生、成長するクラックを動的クラック観察装置により観察し、クラックの成長時期、その規模や形態に対する圧子形状の影響を実験的に求めた。さらに、有限要素法応力解析により圧痕周辺の応力状態を、最大負荷時、除荷終了時に分けて圧子形状ごとに求め、実験結果と比較した。おもな結論は以下の通りである。

- (1) 圧子の形状によって、クラックの形態、成長時期に大きな相違が認められた。負荷中に成長するのは、円すい圧子による縦割れのみで、その他のクラックはすべて除荷中に成長する。
- (2) 負荷中には観察されなかったクラックが除荷中に成長するのは、除荷にともなう応力状態の変化によるものであることが、圧痕周辺部の応力解析の結果から確認出来た。また、その成長方向は、解析結果から予想されるものと一致した。
- (3) 圧子形状の相違によるクラック形態や発生時期の相違も、解析結果から定性的に説明することが出来た。

参 考 文 献

- 1) B. Lawn and R. Wilshaw: Indentation Fracture: Principles and Applications, J. Mat. Sci., 10, (1975) 1049.
- 2) S. S. Chiang, D. B. Marshall and A. G. Evans: The Response of Solids to Elastic/Plastic Indentation. I., J. Appl. Phys., 53, 1, (1982) 298.
- 3) S. S. Chiang, D. B. Marshall and A. G. Evans: The Response of Solids to Elastic/Plastic Indentation. II., J. Appl. Phys., 53, 1, (1982) 312.
- 4) A. G. Evans and T. R. Wilshaw: Quasi-static Solid Particle Damage in Brittle Solids I., Acta Metall., 24, (1976) 939.
- 5) J. T. Hagan and M. V. Swain: The Origin of Median and Lateral Cracks around Plastic Indents in Brittle Materials, J. Phys. D, 11, (1978) 2091.
- 6) J. T. Hagan: Shear Deformation under Pyramidal Indentations in Soda lime Glass, J. Mat. Sci., 15, (1980) 1417.
- 7) 吉岡正人, 澤 哲郎: ガラス表面への押込みによるクラック形成過程の動的観察 — 硬ぜい材料の微視的破壊機構に関する研究 (第1報), 精密工学会誌, 60, 8 (1994) 1154.
- 8) 吉岡正人, 室井邦雄: ガラス表面への引っかきによるクラック形成過程の動的観察 — 硬ぜい材料の微視的破壊機構に関する研究 (第2報), 精密工学会誌, 60, 9 (1994) 1274.
- 9) D. M. Marsh: Plastic Flow in Glass, Proc. Roy. Soc. A, 279 (1963) 420.
- 10) D. S. Dugdale: Vickers Hardness and Compressive Strength, J. Mech. Phys. Solids, 6, (1958) 85.
- 11) 森田 昇, 呉 東権, 福留康行, 吉田嘉太郎: 脆性材料の研削加工における砥粒相互間の応力場の干渉作用, 砥粒加工学会誌, 37, 1 (1993) 31.