

655 押し込みによる変形挙動に及ぼす圧子形状の影響

Influence of indenter geometry on deformation behavior by indentation

○学 佐藤 隼輔 (新潟大院)

正 大木 基史 (新潟大)

正 石橋 達弥 (新潟大)

学 武士俣 斉宏 (新潟大院)

Syunsuke SATO, Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-cho, Niigata

Motofumi OHKI, Faculty of Engineering, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-cho, Niigata

Tatsuya ISHIBASI, Faculty of Engineering, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-cho, Niigata

Masahiro BUSHIMATA, Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-cho, Niigata

Key Words : Indenter geometry, Deformation behavior, Indentation

1. 緒言

硬さ試験は材料の特性評価によく用いられる試験で、硬さ試験には、ブリネル硬さ試験、ピッカース硬さ試験、ロックウェル硬さ試験などがあり、それぞれ異なった特徴を持っている。大きな違いの1つに圧子の形状があげられる。

金属のような弾塑性材料への押し込みについては、圧子形状の相違が材料内部の変形破壊挙動に直接的には影響しないということが知られている。一方ぜい性材料の場合、押し込み起因するき裂発生が圧子形状に依存するため、圧子形状が変形破壊挙動に影響を与える可能性がある。そこで本研究では、ぜい性材料に対して円錐および角錐圧子での押し込み試験を行い、押し込み起因して発生する弾性波の検出と併せて、球と平面における弾性接触理論を用いた試験結果の解析を行った。

2. 試験方法

2.1 試験機及び圧子

本研究では、研究室で設計、開発した縦型微小押し込み試験機DVH2003を用いた。この試験機には、荷重測定装置としてロードセル、変位測定装置として2つのリニアセンサーを圧子部に取り付けており、これらから得られたデータはAD/ボードを介してコンピュータに取り込む方式となっている。試験機の特徴として、測定部の移動によりロードセルのコードが引きずられ、試験結果に影響を与えるという可能性を排除するため、圧子、変位センサー、ロードセルが一体となった測定部を固定し、その測定部に対して試験片を移動を行うという点がある。圧子は、ピッカースダイヤモンド四角錐圧子とロックウェルダイヤモンド円錐圧子の二つを使用した。Fig.1に縦型微小押し込み試験機模式図を、Fig.2に2種類の圧子模式図を示す。

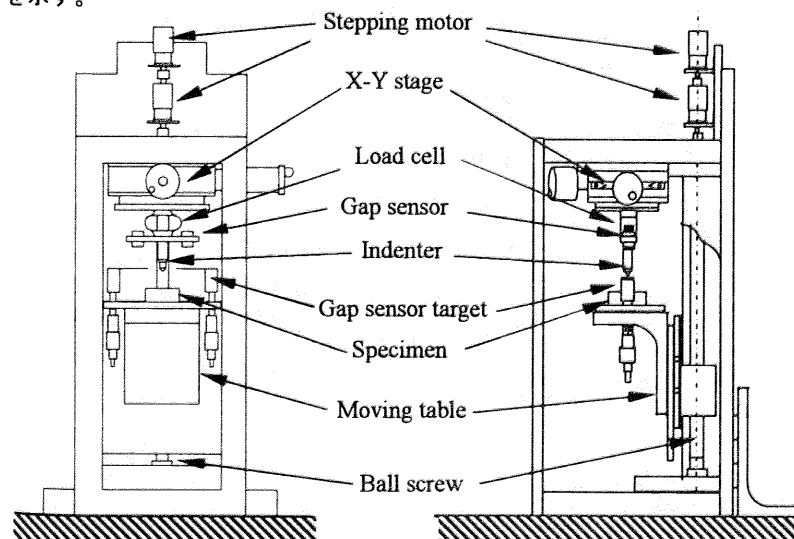


Fig.1 Schematic illustration of DVH2003

2.2 試験片及び試験条件

試験片として、典型的なぜい性材料であるガラス(BK7)を、また校正用として炭素鋼硬さ基準片(HV500)を使用した。試験条件として、試験荷重はロックウェル圧子で4.9~29.4[N](0.5~3[kgf])間の6段階、ピッカース圧子で2.45~9.8[N](0.25~1[kgf])間の4段階とし、各荷重3回ずつ試験した。環境条件としては、室温22°C、湿度は55%である。また押し込みに伴う弾性波を検出するため、試験片表面の押し込み位置近傍にAEセンサーを取り付け、試験を行った。

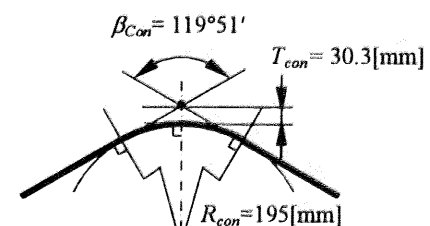
3. 押し込み試験解析理論

押し込み試験データを解析するに際して、球と平面との弾性接触状態における荷重と変位の関係を表わすヘルツによる理論的關係式^{(1),(2)}を用いた。式(1)にヘルツの關係式を示す。

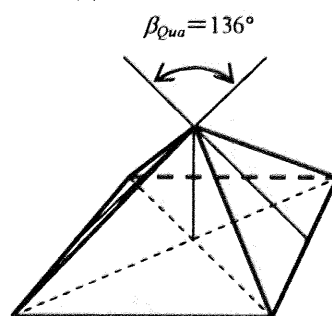
$$F_{IS} = (2\sqrt{2}/3)(\sqrt{D_B}/f(E)) h_{IS}^{3/2} \quad (1)$$

$$f(E) = I(E) + S(E) \quad (2)$$

F_{IS} : 押し込み荷重 D_B : 圧子の直径 h_{IS} : 変位
 $I(E) = (1-\nu_I^2)/E_I$: 圧子の弾性パラメーター
 $S(E) = (1-\nu_S^2)/E_S$: 試験片の弾性パラメーター
 ν_I : 圧子のポアソン比 E_I : 圧子のヤング率
 ν_S : 試験片のポアソン比 E_S : 試験片のヤング率

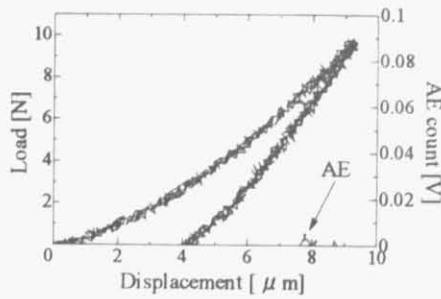


(a) Rockwell indenter



(b) Vickers indenter

Fig.2 Vickers indenter and Rockwell indenter

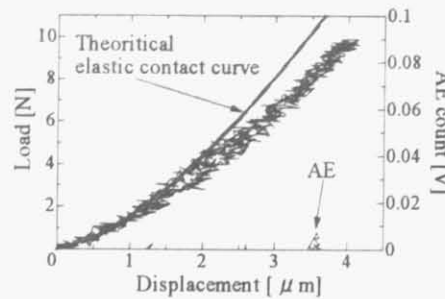


(a) Load-Displacement-AE count curve

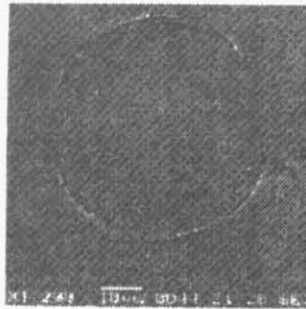


(b) Observation of indentation

Fig. 3 Results of Indentation by Vickers indenter (Indentation load : 9.8[N])

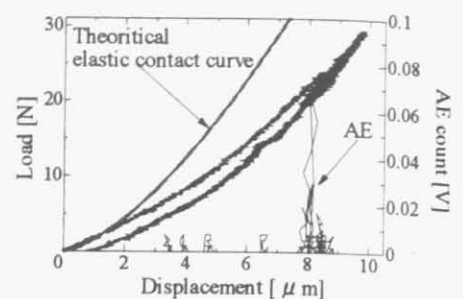


(a) Load-Displacement-AE count curve

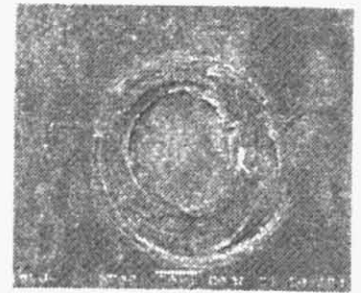


(b) Observation of indentation

Fig. 4 Results of Indentation by Rockwell indenter (Indentation load : 9.8[N])



(a) Load-Displacement-AE count curve



(b) Observation of indentation

Fig. 5 Results of Indentation by Rockwell indenter (Indentation load : 29.4[N])

4. 試験結果及び考察

Fig. 3 にビッカースダイヤモンド四角錐圧子、試験荷重 9.8[N]での試験による荷重-変位-AE 線図および圧痕画像を、Fig. 4 にロックウェルダイヤモンド円錐圧子、試験荷重 9.8[N]での試験による荷重-変位-AE 線図および圧痕画像を、Fig. 5 にロックウェルダイヤモンド円錐圧子、試験荷重 29.4[N]での試験による荷重-変位-AE 線図および圧痕画像を示す。また Fig. 4 および 5 には式(1)で示した関係式から得られる理論的弾性接触曲線も併記した。

4.1 ビッカース圧子による結果

ビッカースダイヤモンド四角錐圧子での試験結果について、2.45~9.8[N]のすべての荷重の圧痕観察において圧痕の角部から対角線方向にき裂の進展が見られた。一方、9.8[N]での荷重-変位-AE 線図においてはごく微弱な AE 信号しか検出されなかった。この原因として、ビッカース圧子によって生成される圧痕では角部での応力集中により押し込み過程中的ごく低荷重からき裂が発生すると考えられるため、それに付随する弾性波もごく微弱になったものと推察される。

4.2 ロックウェル圧子による結果

これに対して 9.8[N]でのロックウェルダイヤモンド円錐圧子での試験結果では、圧痕観察から圧子と試験片の接触領域と目される環状の痕（リングクラック）が見られた。また荷重-変位-AE 線図から、押し込み挙動は除荷後変位がほぼ 0 となり線図自体もヒステリシスを示さない事から弾性接触状態のように見受けられるが、併記した理論的弾性接触曲線とは荷重 4[N]、変位 2[μm]以上で一致しなくなる。この原因として、上述のリングクラック生成に伴い完全な弾性接触状態から逸脱してしまったことが考えられる。

また、ロックウェルダイヤモンド円錐圧子、29.4[N]での試験結果では、圧痕観察において多数のリングクラックおよび放射状のき裂（ラジアンクラック）が明瞭に認められると共に、荷重-変位-AE 線図において顕著な AE 信号が

発生していることがわかる。また、理論的弾性接触曲線との不一致も大きくなり、多数のリングクラックおよびラジアンクラックの影響で見かけ上、永久変形を生じていることが示された。

5. 結言

- (1) ビッカースダイヤモンド四角錐圧子で押し込んだとき、どの荷重でも圧痕角部での応力集中によりき裂がごく低荷重から入るため、微弱な弾性波しか発生しないことにより AE カウントが検出されなかったと考えられる。
- (2) ロックウェルダイヤモンド円錐圧子で押し込んだときとビッカースダイヤモンド四角錐圧子で押し込んだときの AE カウントの発生の違いは、圧痕およびき裂発生の方が異なるためと考えられる。
- (3) 弾性接触理論より解析した結果、荷重 9.8[N]での試験において、荷重 4[N]、変位 2[μm]程度までは一致しているが、それ以上では材料表面にリングクラックが生成されるため、理論的弾性接触状態から逸脱し一致しなくなると考えられる。また、荷重 29.4[N]での試験においては、多数のリングクラックおよびラジアンクラックの生成の影響により理論的弾性接触曲線との不一致も大きくなったと考えられる。その結果、見かけ上、永久変形が生じていることが示された。
- (4) 今後はより低荷重での球圧子による押し込み試験を行い、弾性接触理論による解析、き裂の有無による機械的特性値算出への影響について検討する。

参考文献

- (1) テイモシニコ, ゲーデー, 弾性論, コロナ社(1973)
- (2) T. ISHIBASHI, M. OHKI, S. KATAYAMA, S. TAKAGI; Practical Nanoindentation Theory and Experiments of the Pyramidal Indenter(7th.); J. Mater. Test. Res., Vol. 50, No. 2, 83(2005)