

## 円柱の押込みにおけるゴム切断メカニズムの一考察

A Consideration on Rubber Cutting Mechanism during Cylinder Penetration

九工大（正）\*松田 健次 九工大・学（非）石川 孝治郎 九工大・学（非）佐々野 雄

Kenji Matsuda, Kojiro Ishikawa, Takeshi Sasano

Kyushu Institute of Technology

### 1. はじめに

物をたちきる「切断」加工には種々の手法が存在するが、本研究で対象とするのは、物に対して刃を垂直に切り下ろして切断する最も単純な手法である。包丁は身近な刃の例であるが、いわゆる切れ味をよくするために、材質や刃先角、刃厚などに工夫がなされている。一方、機械、医薬、情報通信等の多くの分野でも、より高品質の切断を実現することによって省力化、省資源、低コスト、環境改善を求める強いニーズがある。包丁で食材を切断する場合、一般的に刃を刃渡り方向に移動させながら切断が行われるが、これは刃と被切断物との摩擦によって刃に垂直方向の引張応力が発生し、これが切断の駆動力となると言われている<sup>1)</sup>。一方、刃渡り方向の運動なしに刃を押付けて切断を行う場合もある。甘藷のような、切断に至るまでに巨視的に大きな変形が生じない材料に対してはその切断メカニズムが検討されているが<sup>2)</sup>、ゴムのような軟質材料については必ずしも明らかにされていない。

そこで、本研究は軟質材料の切断メカニズムを解明することを目的として計画されたものである。どんなに尖った刃でも刃先は有限の大きさの曲率半径を有する円弧状となっていると考え、第一段階として本研究では、ゴムブロックに円柱を深く押込んだ際の変形挙動や応力変化を、実験・解析を通して調査した。

### 2. 実験方法

長さを 16mm、幅を 7mm とし、高さ 5mm を目標とし製作したシリコーンゴム製ブロックの長手方向の中央に、表面に対して軸が平行になるように円柱を押付け、破断するまでの押込み変位と荷重を測定した。製作後に測定した試験片高さは 4.7mm ( $d=2\text{mm}$  の円柱押付け) と 4.9mm ( $d=4\text{mm}$  の円柱押付け) であった。また、試験片上部に設置した二次元レーザ変位計のレーザを、試験片の幅方向の中央に照射することによって、所定の押込み変位における試験片の長手方向の表面形状を測定した。押し付けた円柱の直径  $d$  は、2 mm と 4mm の 2 種類である。

### 3. 解析方法

Figure 1 に解析モデルを示す。平面ひずみ状態を仮定し、剛体平面上に載せた直方体状ブロックの中央に、剛体円柱 ( $d=2, 4\text{mm}$ ) を押込む過程を解析した。解析には市販の非線形有限要素解析ソフト Marc Mentat 2020 を用いた。直方体状ブロックは Mooney 体とし、実験で用いたゴムの応力–ひずみ線図を参考にして  $w = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)$  で表されるひずみエネルギー密度関数の材料定数  $C_{10}, C_{01}$  をそれぞれ 0.1, 0.05 とした。ここで、 $I_1, I_2$  はそれぞれ偏差ひずみの第 1 および第 2 不变量である。なお、紙面に垂直方向の厚さは 7mm としている。

### 4. 結果と考察

#### 4.1 実験結果と解析結果の比較

Figure 2 に、 $d=2\text{mm}$  の円柱を  $\delta=2.0\text{mm}$  および  $3.6\text{mm}$  押し込んだ時の試験片形状を示す。黄色が解析結果、紫色が二次元レーザ変位計により計測された表面形状である。ここで、赤色の円は二次元レーザ変位計により計測された円柱の一部の形状から創成したものであり、その円と解析における円柱を重ねて示している。解析結果は変形挙動を比較的良好に再現できていると言える。

Figure 3 に、円柱の押込み量  $\delta$  と荷重  $F$  の関係を示す。実験値の  $F$  は  $\delta$  が試験片高さに近づくにつれて急激に増加した後、破断が生じて急減した。一方、解析結果は、いずれの円柱の場合も  $\delta=4.1 \sim 4.2\text{mm}$  の間で解析が進まなくなつたため、わずかに  $\delta$  が小さかつた  $d=4\text{mm}$  の場合にそろえて  $\delta=4.115\text{mm}$  までの結果を示している。 $d=4\text{mm}$  では計算が止まるまで実験値に比較的近い値を示しているが、 $d=2\text{mm}$  では  $\delta=3\text{mm}$  程度以降大きく乖離している。平面ひずみを仮定していることや、大ひずみまでのゴムの特性が正しく反映されていない可能性がある等、実験を正しくモデル化できていないと思われる点は多々あり、円柱直径によってこのような傾向の相違が生じる原因については今後検討が必要である。

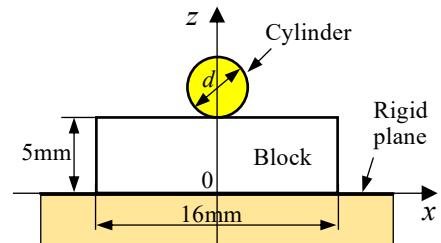


Fig.1 Analysis model

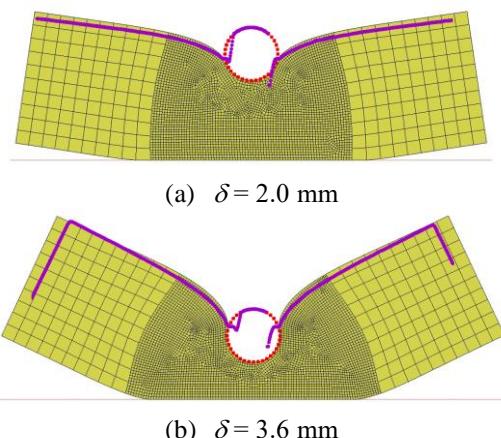


Fig. 2 Comparison of deformation shapes between experiment and FEM for  $\delta=2\text{mm}$

## 4.2 円柱直下の応力分布

Figure 4 は、 $\delta = 4.115\text{mm}$ における $x$ 方向応力 $\sigma_x$ の等高線図である。いずれの円柱の場合も円柱直下の若干内部に入った場所に引張応力が発生していることが分かる。Figure 5 は、Fig. 4 における円柱直下の最小断面近傍に存在する節点から求めた $\sigma_x$ の応力分布である。いずれの円柱の場合も、円柱および下部剛体平面近傍は強い圧縮状態である。一方、内部には高い引張応力が発生しているが、 $d=2\text{mm}$ では円柱にかなり近い領域で最大値を示している。

Figure 6 に、試験片に発生する $\sigma_x$ の最大値 $\sigma_{x,\max}$ と押込み変位 $\delta$ の関係を示す。両円柱とも同様な傾向であり、解析が停止する直前で著しい応力増加を示している。

## 4.3 破断面

Figure 7 は、ゴム試験片の破断面を左右見開きで撮影したものである。(a)が $d=2\text{mm}$ の円柱、(b)が $d=4\text{mm}$ の円柱を押し込んだものである。 $d=2\text{mm}$ の円柱の場合、破断面の上半分の凹凸が大きく下半分は比較的滑らかになっているが、 $d=4\text{mm}$ の円柱の場合は全体的に凹凸の大きい断面になっている。ゴムブロック試験片と同時に作成した引張試験片(幅 $10\text{mm}$ 、厚さ $2\text{mm}$ )の一方の縁にカッターで $3\text{mm}$ 程度の切れ込みを入れ引っ張ったところ、切れ込みを入れなかった部分の破面は滑らかになっていたことにより、滑らかな破断面はき裂が伝播する際にできたと考えられる。

## 4.4 切断メカニズム

破断面の様相とFig. 5 の応力分布の結果より、ゴムブロックは以下のメカニズムで破断したと推定される。すなわち、円柱を深く押し込むと円柱直下の断面には、表面付近に圧縮、中央付近に引張の応力が発生する。押込み変位の増加とともに応力は急激に増加し、ゴムの強度を凌駕すれば、引張の応力の高い中央部が分離し、それを起点としたき裂が表面まで進展して最終的に破断に至るのではないかと考えられる。

## 5. 結言

ゴムブロック試験片に円柱を押込んでいく過程における試験片形状および荷重の変化と、応力分布を調査した。その結果、円柱を深く押し込むことにより試験片内部には高い引張応力が発生し、これが駆動力となって破断が生じることが示唆された。

## 文献

- 1) 金沢：刃物の切れ味とトライボロジー、トライボロジスト、50, 6 (2005) 435.
- 2) 金沢・中川・三浦：ナイフ状刃物による切断加工に関する研究(第2報)，精密工学会誌、63, 1 (1997) 70.

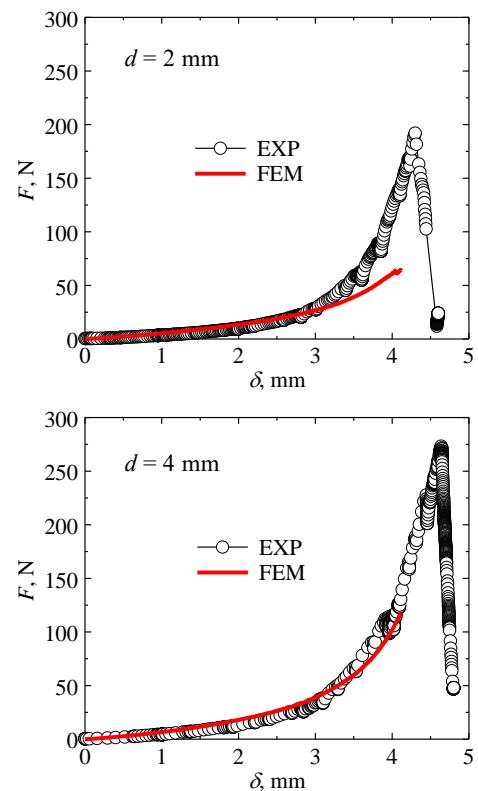


Fig. 3 Relation between indentation depth  $\delta$  and load  $F$

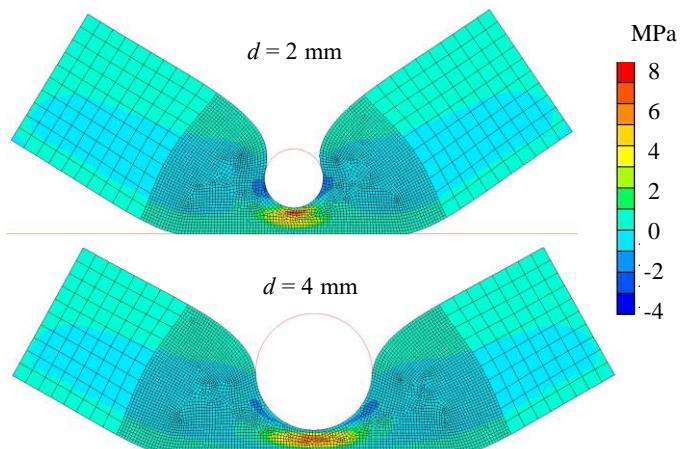


Fig. 4  $\sigma_x$  contour map at  $\delta = 4.115\text{ mm}$

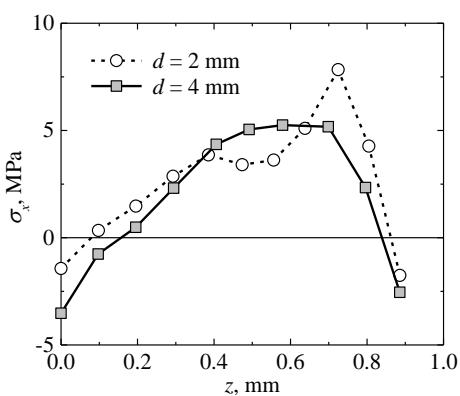


Fig. 5 Distribution of  $\sigma_x$  at the smallest cross section under the cylinder at  $\delta = 4.115\text{ mm}$

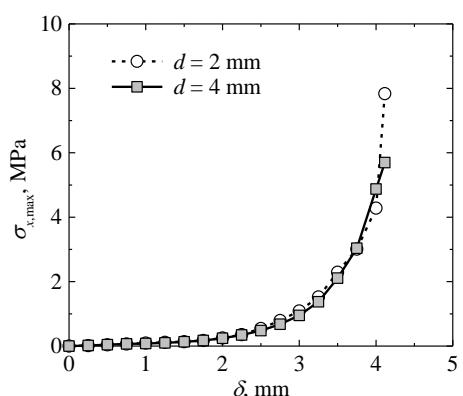


Fig. 6 Relation between indentation depth  $\delta$  and the maximum tensile stress  $\sigma_{x,\max}$

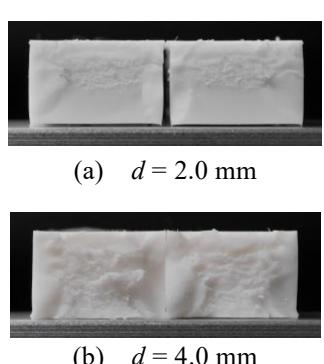


Fig. 7 Fractured surfaces of rubber specimens