

## 円柱の押し込みにおけるゴムの切断メカニズムの一考察(第2報)

## — 厚さの異なる試料の比較 —

## A Consideration on Rubber Cutting Mechanism during Cylinder Penetration (Part 2)

## — Comparison of Specimens with Different Thicknesses —

九工大・院(学)\*浅利 将人 九工大・学(非)佐々野 雄 九工大(正)松田 健次

Masato Asari, Takeshi Sasano, Kenji Matsuda

Kyusyu Institute of Technology

## 1. はじめに

本研究は、軟質材料の押し切りによる切断メカニズムを解明するために計画されたものである。前報<sup>1)</sup>では、シリコンゴム製ブロックに直径の異なる円柱を深く押し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。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。ここで、前報では、ゴムブロック厚さが円柱直径よりも大きいという関係にあったが、本研究では、ゴムブロック厚さが小さくなった場合を調査するとともに、接触面の摩擦の影響についても比較を行った。

## 2. 実験方法

長さを10 mm、幅を7 mmとし、厚さ0.5 mmを目標として作製したシリコ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し付け、破断するまでの押し込み変位と荷重を測定した。製作後に測定した試験片厚さは0.58 mm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、所定の押し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は2 mm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ブロックの中央に、剛体円柱を押し込む過程を解析した。解析には市販の非線形有限解析ソフト Marc Mentat 2020 を用いた。直方体ブロックはMoony 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一および第二不変量である。なお、紙面に垂直方向の厚さは7 mm としている。円柱とブロック、ブロックと剛体平面との接触面にはともに同じ摩擦条件を設定し、摩擦係数を 0.3 にした場合(Case I)、および摩擦応力限界 80 kPa<sup>2)</sup>を設定した場合(Case II)の2条件を比較した。なお、最大押し込み深さ(ブロック厚さ)に到達するまでのステップ数を前報<sup>1)</sup>と同じにすると解析が押し込み初期で進まなくなることが判明したため、厚さが大きい場合も含めてステップ数を小さくしている。

## 4. 結果と考察

## 4.1 変形状況

Figure 2 は、実験と解析において円柱を同程度押し付けた場合の試験片変形状況を比較したものである。ここで、黄色で示す解析結果は、厚さ0.5 mm のブロックに円柱を $\delta=0.284$  mm 押し付けた場合、赤色で示す実験結果は約  $\delta=0.29$  mm 押し付けた場合であり、両者をブロックの底面および円柱の位置が一致するように重ねて示している。円柱が押し込まれるにしたがって、実験および解析のいずれの場合においても、試験片の両端が持ち上がる挙動を確認できた。ただし、土台から底面が離れ始める付近の角度を比較すると、実験結果は  $4.7^\circ$  程度であるのに対し、解析結果では Case I の場合に  $11.7^\circ$ 、Case II の場合に  $8.6^\circ$  であった。摩擦条件の相違は巨視的な変形挙動にも影響を及ぼし、Case II の方が実験結果に近い形状を呈している。

## 4.2 押し込み変位と荷重の関係

Figure 3 に、円柱の押し込み量 $\delta$ と荷重  $F$  の関係を示す。解析は、押し込みが最も進まなかった Case I の  $h=5$  mm の場合にそろえて、試験片厚さの 78% までの結果を示している。実験結果では、 $\delta$  が試験片厚さに近づくにつれて  $F$  は急激に増加し、ある値に達した後に破断が生じ急減している。解析結果は、破断に至る前の実験結果と同様な様相を呈しているが、押し込み量の増加とともに摩擦条件の差異の影響が強く表れている。特に  $h=0.5$  mm の場合には Case I の荷重は

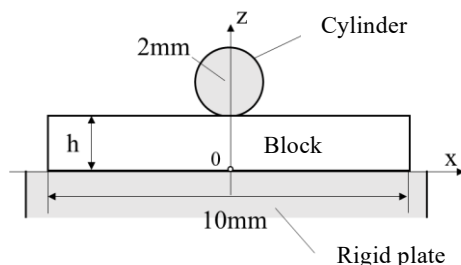
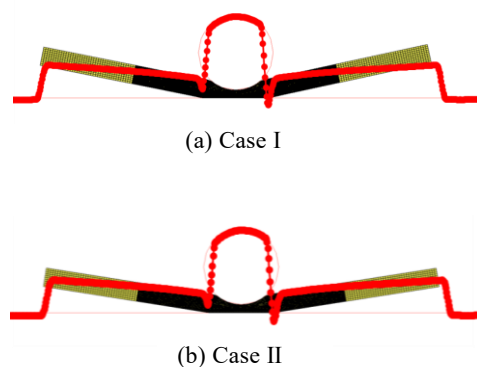


Fig. 1 Analysis model

Fig. 2 Comparison of deformation shapes between experiment for  $\delta=0.29$  mm and FEM for  $\delta=0.284$  mm

Case II に比べて著しく増加しており、最大押し込み深さ付近では2倍以上の値となる。実験と解析では初期厚さが若干異なるために直接の比較はできないが、押し込み割合  $\delta/h$  が 78% の値を比較すると、Case II の方が実験に近いことが分かる。

なお、実験における最大押し込み荷重  $F_{\max}$  の値を比較すると、 $h=0.58\text{mm}$  の場合は  $h=4.7\text{mm}$  の場合と比較して 1/7 程度と小さく、試験厚さが切断に必要な荷重に大きな影響を与えることを示唆している。一方、Case II の解析結果における  $\delta/h=0.78$  の荷重を比較すると、 $h=0.5\text{mm}$  は  $h=5\text{mm}$  の 1/3 程度であり、実験結果の  $F_{\max}$  に比べて厚さの影響の程度はかなり小さい。ただし、 $h=4.7\text{mm}$  の試験片は厚さに対して、約 95% 押し込んだ所で切断されたのに対して、 $h=0.58\text{mm}$  の試験片では約 85% 押し込んだ所で切断された。実験と同じ押し込み割合  $\delta/h$  における荷重を比較すれば、解析結果においても厚さの影響は拡大することが予想される。

### 4.3 応力分布

Figure 4 は、Case II の場合の  $\delta/h=0.81$  における  $x$  方向応力  $\sigma_x$  の等高線図である。いずれの厚さの場合も円柱下の若干内部に入った場所に最大の引張り応力が発生していることが分かる。Figure 5 (a) は、Fig. 4 における円柱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。最大引張応力の発生場所は、 $h=5\text{mm}$  では円柱にかなり近い領域であるのに対し、試験片厚さが減少するに従い中央部に移動しており、 $h=0.5\text{mm}$  では左右対称に近い形態を呈している。Figure 5(b) は、Case I の場合の  $h=5\text{mm}$  と  $h=0.5\text{mm}$  の結果を比較したものである。 $h=0.5\text{mm}$  における最大引張応力値は Case II より若干大きくなっているものの、その発生位置には大差は認められない。一方、Case I の場合には、円柱および下部剛体平面近傍に大きい圧縮応力が発生している。Case I では接触面に摩擦応力限界を容易に凌駕するような高いせん断応力が発生するために、摩擦が特に表面付近の応力分布に大きな影響を与えたと考えられる。

## 5. 結言

厚さの異なるゴムブロック試験片に円柱を押し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、試験片の厚さが小さくなると、最大引張応力の発生場所が円柱付近から中央付近に移動すること、また、接触面の摩擦条件の差異の影響が大きくなることを明らかにした。

本研究は、九州工業大学令和 6 年度先鋭的テーマ発掘事業の支援を得た。

## 文献

- 1) 松田健次, 石川孝治郎, 佐々野雄: 円柱の押し込みにおけるゴムの切断メカニズムの一考察
- 2) Kenji Matsuda, Daisuke Hashimoto, Kenya Nakamura: Real contact area friction property of rubber with two-dimensional regular wavy surface, Tribology International 93 (2016) 523-529

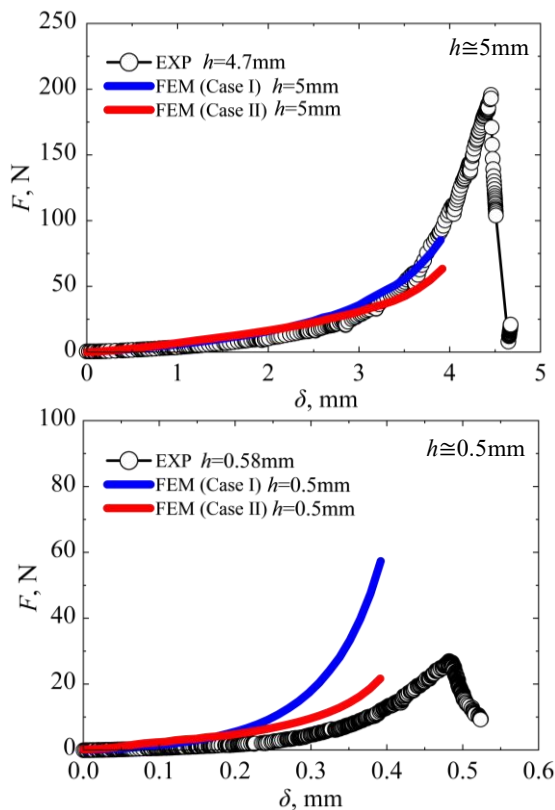


Fig. 3 Relation between indentation depth  $\delta$  and load  $F$

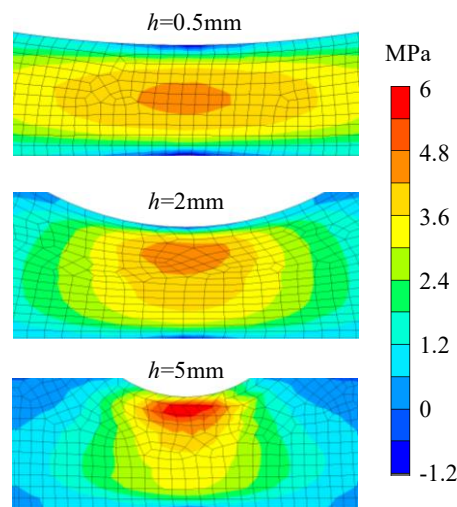


Fig. 4  $\sigma_x$  contour map under the cylinder at  $\delta/h=0.81$  (Case II)

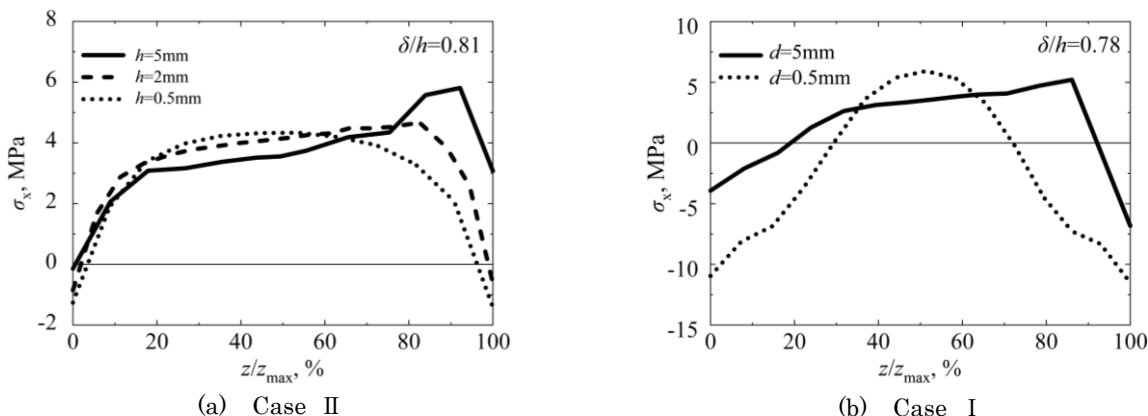


Fig. 5 Distribution of  $\sigma_x$  at the smallest cross section under the cylinder