

外周拘束軸圧縮による六角管の成形

塑学 *吉見海翔 (名工大・院)
塑賛 森 雄二郎 (新郊パイプ工業)

機塑正 北村憲彦 (名工大院)

1. まえがき

輸送機械の省エネルギーや操作性向上を目的に部品の軽量化がより必要とされている。そこで構造的に軽量で高剛性の中空部材の利用も進んでいる。さらに最適な厚み分布や外形形状を自在に成形できれば、様々な設計要件にも対応しやすい。管端の増肉については既報^{1),2)}で、厚肉円管の軸方向圧縮における限界が向上する条件を検討し、管の外周拘束が座屈の抑制と増肉に効果があることを示した。本報では外面が六角形の異形管の成形を試みる。

2. 実験と変形解析

2.1 実験方法と条件

正六角形穴のコンテナにパイプを挿入し、パンチで軸方向に圧縮する。試験片材質 STKM12A, 外径 9.5 mm, 内径 6.5 mm, 圧縮速度は 0.1 mm/s である。試験片長さ 30 mm のとき圧縮量 8 mm で、この時の潤滑は VG2 または牛脂黒鉛(牛脂 75% + 黒鉛 25%) である。別の実験で試験片長さ 35 mm には圧縮量 2, 4, 6, 8 mm で、潤滑は牛脂黒鉛とする。

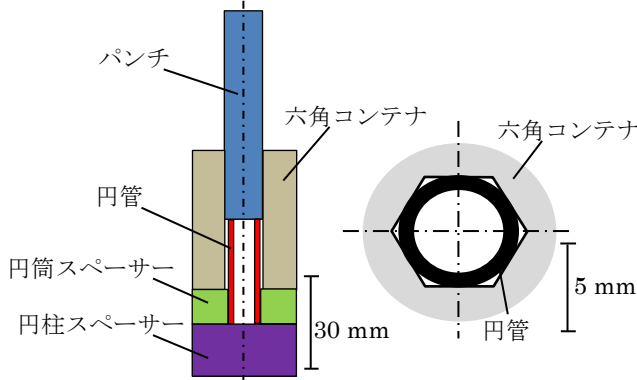


図1 六角穴コンテナを用いた円筒圧縮試験

2.2 FEM による変形解析と条件

本実験について市販ソフト DEFORM で FEM 解析する。パンチとコンテナを剛体、試験片を剛塑性体とする。試験片の最大要素数は 320 707 個である。円管の引張試験の結果から変形抵抗 $Y = 760\epsilon^{0.23}$ [MPa], $0.1 < \epsilon < 0.4$ で近似する。試験片長さ 30 mm, 圧縮量 6 mm, 摩擦係数 $\mu = 0.01, 0.05, 0.1$ とし、圧縮速度 0.1 mm/s とする。

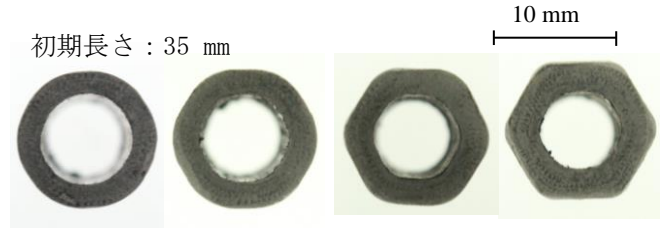
3. 六角コンテナを用いた円筒圧縮

3.1 圧縮過程の変形観察

ここでは、試験片初期長さ 35 mm を牛脂黒鉛で潤滑し、それぞれ 2, 4, 6, 8 mm 圧縮した後の試験片を観察する。圧縮後の試験片端面を図 2 に示す。圧下が進むにつれ外側が六角形に近づき、増肉も進む。特に角部の厚みが増加している。角部は、初期の円管より外側の半径位置で、その隙間に材料が流動している。内側も少しずつ縮小している。

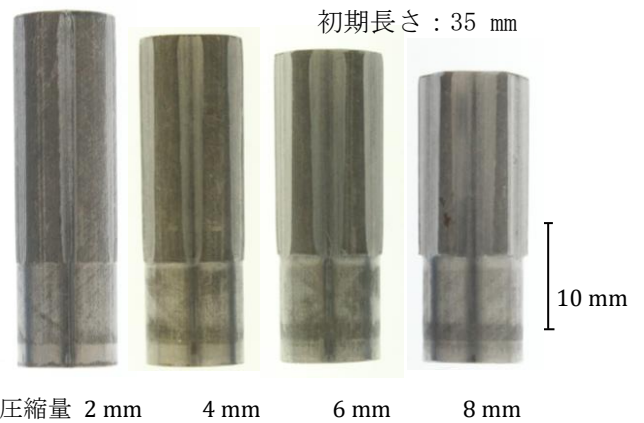
図 3 に側面を示す。コンテナと接触していない部分(角隙間)には不均一な隙間や接触も見られず、座屈・折込みも認められない。前報²⁾の外周に隙間のある軸圧縮と違い六角面による拘束が座屈防止を助けている。圧縮が進むにつれ、コンテナとの接触面積は順調に増加している。接触幅は上部で広く、下部ほど狭い。上部ほど角部への材料が下部より先に生じているといえる。上部では、下部より

先に生じた材料流動によって、加工硬化と断面積が増加する。このとき未変形の下部では同じ荷重を受ければ、下部のほうが変形しやすい。この繰り返して上から順に増肉することで座屈せずに六角形管が成形されると推察される。



圧縮量 2 mm 4 mm 6 mm 8 mm

図2 試験片写真(端面)



圧縮量 2 mm 4 mm 6 mm 8 mm

図3 試験片側面

3.2 摩擦の影響による形状の違い

試験片の初期長さを 30 mm, 圧縮量を 8 mm とし、摩擦を変えるため、潤滑剤を牛脂黒鉛と VG2 を用いて比較する。図 4 に荷重-ストローク線図を示す。圧縮初期から安定して荷重が増加している。もし圧縮途中で座屈が生じれば、荷重は急に低下するが、そのような荷重の変化は見られない。VG2 で潤滑した場合の荷重が牛脂で潤滑した時よ

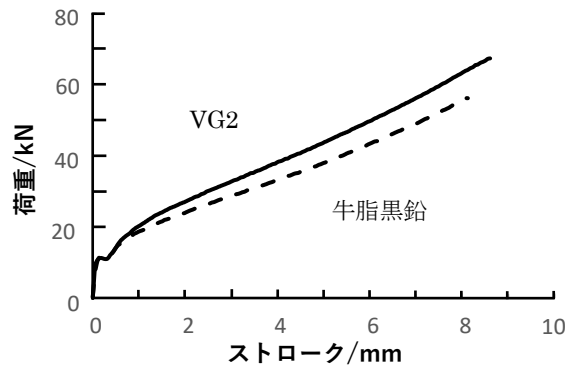


図4 荷重-ストローク線図

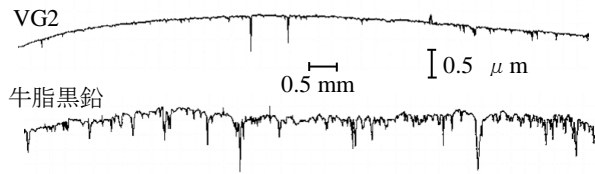


図5 試験片側面の軸方向粗さ曲線

り高い。コンテナとの間の摩擦抵抗を VG2 では十分に低減できていない。

試験後の試験片側面の軸方向粗さ曲線を図5に示す。VG2を用いた場合にはかなり凹凸は小さい。牛脂黒鉛では表面に粗さの深い谷があり、粗さの高い山はなく、0.1~0.5 μmの細かい凹凸の平坦な部分が多く残っている。

VG2は低粘度であるため、圧縮中にコンテナと管材の間から潤滑油が排出され、相当に薄い潤滑膜とみられ、摩擦の増加を防ぐことは難しかったと推測される。これに対して、牛脂黒鉛では、圧縮初期にスクイーズ効果によって捕捉された厚い潤滑膜の中で一旦は自由粗さが生じたことが、粗さの深い谷から推察される。さらに圧縮されコンテナと管材が強く接触すると、自由粗さの山はつぶされ平坦になる。その平坦部に残っている細かい粗さは、その過程でコンテナと管材の間に潤滑剤が入り込めて生じた二次的な粗さと考えられる。潤滑効果による摩擦の低下は牛脂黒鉛を用いたほうが荷重が低いことに反映されている。

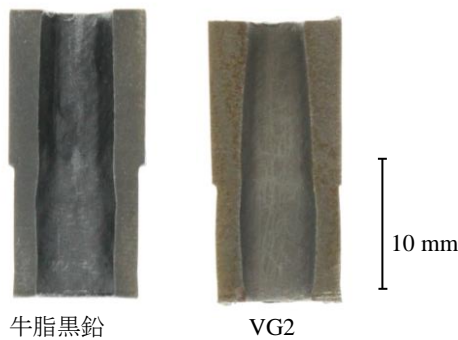


図6 試験片断面図

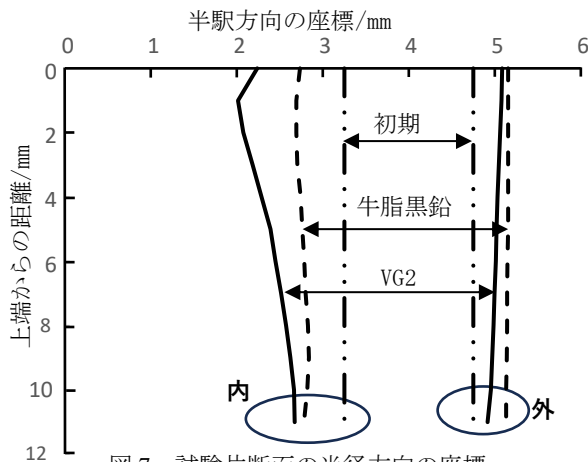


図7 試験片断面の半径方向の座標

初期長さ 30 mm の試験片を、牛脂黒鉛または VG2 で潤滑して、8 mm 圧縮した後の試験片の縦断面を図6に示す。一つの六角面に平行に管中心を通る面（中央断面）で半分にワイヤーカットした。潤滑にかかわらず、座屈なく増肉

している。牛脂黒鉛で潤滑した場合には、圧縮部では、外側への材料流動が優勢で、軸方向にほぼ均一に増肉している。これに比べ VG2 では、外側への材料流動は下部より上部で多く、上部で内側にも流動し、下部で流動は少ない。

図4、5の結果も併せて工業的活用の観点からは、管の外側のコンテナとの接触部で摩擦を下げることは、軸方向に均一な管の圧縮に効果的であるといえる。VG2のようにコンテナと管材との接触部の摩擦が高い場合には、パンチが押ししている上端面近くで、優先的に変形が進んでいる。

図6をマイクロメーター付きの万能投影機で拡大して測定し、試験片断面の外面と内面の位置を図7に示す。牛脂黒鉛では、上端面付近で少し内側への材料流動が見られるが、それ以外はほぼ厚さは均一に外側へ流動している。牛脂黒鉛を用いた場合よりも VG2 では上端面で内側への材料流動が多く、外側については VG2 もこの圧縮率で下まで変形域が拡大し、六角面が成形されている。

六角穴コンテナを用いた円筒圧縮試験のシミュレーション解析した際の断面図における相当ひずみ分布を図8に示す。コンテナと管との間の摩擦係数が低いものほど、同じ圧縮量に対して軸方向で下の方まで均一に変形域が広がっている。逆に摩擦の大きい場合には試験片上部の内側でも高い相当ひずみが現れている。

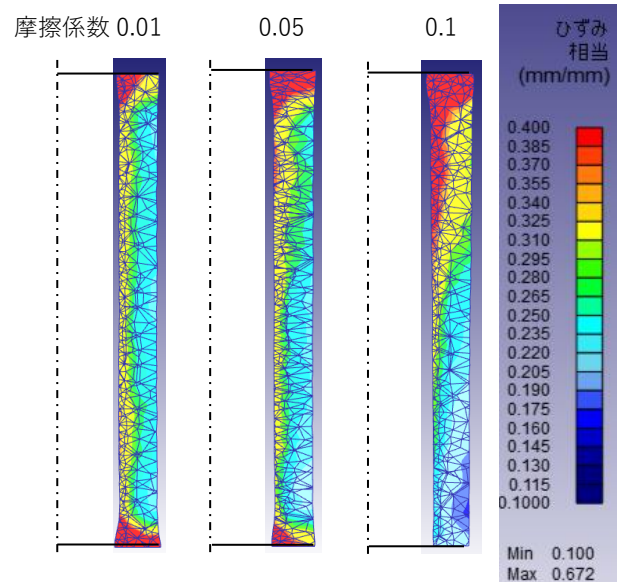


図8 相当ひずみ分布

4. まとめ

六角穴コンテナを用いて円管を軸方向圧縮し、六角異形管の成形を試みた。結果を以下にまとめる。

- 1) 今回の圧縮の範囲では(長さ 30~35 mm, 圧下率 5~35%), 座屈・折れこみは生じず、良好に増肉した。
- 2) 圧縮につれて管とコンテナの六角面との間の隙間(角隙間)に向かって、外側へ材料が流動し、結果的にその部分の増肉が進んだ。
- 3) このような角隙間への材料流動は、管の上部で優勢に生じ、圧下につれて、下に広がっていった。
- 4) VG2 より潤滑性の高い牛脂黒鉛を用いると、材料は全体で均一に変形し、VG2 を用いると上端付近で内側への材料流動も進んだ。

参考文献

- 1) 久能木: 科学研究報告書, 30-2(1954), 63-92.
- 2) 長谷川ら: 第 65 回塑加連講論集, (2014), 255-256.