402 テーパー付箱型バルジ試験による管の成形性評価法

Formability evaluation method of tube materials by a tapered box-forming test

学 宮本俊介(都立大院)

○正 真鍋健一(都立大)

Shunsuke MIYAMOTO, Tokyo Metropolitan University, Minamiohsawa, Hachioji-shi, Tokyo

Ken-ichi MANABE, Tokyo Metropolitan University, Minamiohsawa, Hachioji-shi, Tokyo

In this study, we proposed a new formability testing method for hydroformed tubular products. This test was simulated and evaluated by the finite element method (FEM). The nonlinear explicit FEM program, LS-DYNA was used in the simulation. This new method is performed by changing the cross section of a circular tube to a tapered box shape. In order to determine the suitable testing conditions and the die geometry and dimensions, process parameters (friction coefficient μ , axial penetration parameter m) and material variables (n - and r -values) were taken as the influencing factors in the simulation. As a result, we found that the nominal die-fitting ratio (NDFR) obtained by measurement of the maximum tube expansion is an easy evaluation parameter. The suitable die angle, at which the die-fitting ability can be characterized, is predicted to be between 10 and 15 degrees. The possibility of combination with a taper die and a kite shape is shown as a hydroforming test for the various complicated hydroformed parts.

Key Words: Tube hydroforming, FEM, Tapered box-forming test, Nominal die-fitting ratio, Formability test

1. 緒言

近年チューブハイドロフォーミングについて、その様々な利点から多くの研究がなされてきている。これまで筆者らはチューブハイドロフォーミングの基礎的成形特性と支配因子を明らかにするため、内圧と軸押込みにより円管から正方形断面形状に成形するプロセスを取り上げ、変形挙動を詳細に検討し製品肉厚を一樣にするための成形条件や材料条件について FEM シミュレーションと実験から明らかにしてきた^{1) - 3)}。そのハイドロフォーミングはますます複雑な形状にも適用されようとしており、その複雑な形状に対してもブランク材の成形性を評価できる簡便な成形モデルの開発が望まれている。

本報では新たにテーパ付箱型モデルを提案し、ハイドロフォーミングにおける管の変形挙動を調べ、この試験法が成形特性を評価する上で有用であるかどうかについて FEM 解析により検討を行い、また型へのなじみ性評価について考察した。

2. テーパー付箱型モデルとそれを用いたバルジ試験解析

プロセスモデルは Fig.1 のように管材に内圧と軸押込み力を負荷し、金型によって断面を円形からテーパ付箱型正方形断面(成形部長さは 70mm 外径の 2 倍)へと成形するものである。金型小断面の一边の長さは 39mm、大断面は Fig.1 に示すテーパ角($\alpha=5, 10, 15^\circ$)により決定される。素管の寸法は外径 $Do=35\text{mm}$ 、内径 $Di=33\text{mm}$ 、肉厚 $t_0=1\text{mm}$ 、長さ $L_0=204\text{mm}$ とした。

FEM 解析には動的陽解法の LS-DYNA を使い、全体の 1/4 モデルで計算を行った。管、ダイ、パンチは四節点の Shell 要素とし、管材の要素数は 1860 である。物性タイプはダイとパンチを剛体とし、管材は式 (1) に示すべき乗則による面外異方性弾塑性モデルで、Table 1 および 2 に示す材料特性値を用いた。ここで ϵ_e は弾性域のひずみ、 ϵ_p は相当塑性ひずみである。

$$\sigma_y = k(\epsilon_e + \bar{\epsilon}_p)^n \quad (1)$$

負荷条件は式 (2) に示す軸押込みパラメータ m により内圧 P および軸押込み量 S を決定した。Fig.2 にその関係を示す。

$$m = \text{軸押込み量 } S \text{ (mm)} / \text{内圧 } P \text{ (MPa)} \quad (2)$$

材料および成形条件の影響を明らかにするため Table 2 に示す摩擦係数 μ 、軸押込みパラメータ m 、 n 値、 r 値を影響因子とした。また解析時間を 0.1 秒として、計算時間の短縮を図った。

Fig.1 Schematic of simulation model of a tapered box forming test

Table 1 Mechanical properties of tube

$\rho \times 10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	E(MPa)	F(MPa)	$\sigma_y \text{ (MPa)}$	ν
2.9	70×10^3	160.04	40.8	0.3

Table 2 Forming condition and material properties

coefficient of friction μ	μ_k (kinetic)	0	0.06	0.1
	μ_s (static)	0	0.1	0.15
axial loading parameter m	1.0, 1.5, 2.0			
n -value	0.1, 0.2, 0.3,			
r -value	0.5, 1.0, 2.0, 3.0

Fig.2 Internal pressure vs. Axial displacement

3. 解析結果および考察

3. 1 テーパー付箱型モデルの特徴

Fig.3 はテーパー角 15° およびテーパー無モデルにおける同条件での製品形状の比較である。実線は金型形状を破線は製品形状を示している。テーパー角 15° モデルでは摩擦条件の違いにより型なじみに差が生じているのが分かる。つまりテーパー付箱型モデルは型なじみ性を評価する上で有用であるといえる。本報では型なじみ性をあらわすパラメータとして、Fig.4 に示す最大バルジ高さ H_{max} 、金型の高さ H_{die} を用いて公称型なじみ比 (NDFR) を式(3)のように定義した。

$$NDFR = \frac{\text{Maximum height of bulging } H_{max}(\text{mm})}{\text{Height of small corner square die } H_{die}(\text{mm})} \quad (3)$$

Fig.4 New evaluation parameter for a tapered box forming test

3. 2 最適テーパー角 α の考察

Fig.5 に NDFR と各影響因子の関係を示す。ここで NDFR と各影響因子が線形関係を持つとき、評価試験法として適しているといえる。Fig.5 (a) は NDFR と摩擦係数の関係を示しているが、テーパー角 5° ではその影響は小さく、テーパー角 10° および 15° においては右下がりの線形関係にあることが確認でき、摩擦条件の違いが NDFR に影響をもたらしていることが分かる。他の影響因子においてもテーパー角 10° および 15° において線形関係を見て取ることができる。以上の結果より、このテーパー付箱型モデルの最適テーパー角 α は $10 \sim 15^\circ$ の間に存在し、この評価試験法は軸方向における型なじみ性や各影響因子の効果など、管材の成形性を評価する上で有用であるといえる。

4. 異形断面ハイドロフォーミングへの適用

これまでに筆者らは正方形断面以外に、異形断面製品への適用を視野に入れ型断面モデルを提案した⁴⁾。この型断面モデルは断面上に異なる3つのコーナー(60° , 90° , 120°)を配すことにより、Fig.6 に示すように断面方向での型なじみ性を評価できることが分かる。本報で提案したテーパー付箱型モデルとこの型断面モデルを複合させたテーパー付型断面モデルを新たに提案することにより、ますます形状が複雑化するチューブハイドロフォーミングに対応した成形性評価ができるとと思われる。

5. 結論

本報では型なじみ性に注目した新しい管材の評価試験法の F E M 解析を行い、以下のような結論を得た。

- 1) 管材の成形性を評価する試験法として「テーパー付箱型モデル」を提案し、最適テーパー角 α ($=10 \sim 15^\circ$) を明らかにすることによりその有効性を示した。
- 2) 型なじみ性を評価する簡便なパラメータとして「公称型なじみ比 (NDFR)」を提案した。
- 3) より複雑な形状にも対応できる「テーパー付型断面モデル」の可能性を示した。

参考文献

- 1) 網野, 真鍋: 48 回塑加連講論 (1997) 373.
- 2) 真鍋, 網野: 49 回塑加連講論 (1998) 303.
- 3) K.MANABE, M.AMINO: Proc. AMPT'98, Vol.1 (1998) 523.
- 4) 真鍋, 國部, 中村: 50 回塑加連講論 (1999) 445.
- 5) K. Manabe, S. Miyamoto: Proc. NUMIFORM2001 (2001) 855.

(a) Taper $\alpha=15\text{-degree}$

(b) Non-tapered

Fig.3 Comparisons of a tapered and a non-tapered box forming test results at the same conditions (effect of μ , $m=1.5$, $n=0.22$, $r=2.27$)

(a) Coefficient of friction μ_k

(b) Axial penetration parameter m

(c) n -value

(d) r -value

Fig.5 Effect of various factors on NDFR in a tapered box

Fig.6 Effect of friction coefficient on product profiles and NDFR in a kite shape box test