1606 非比例負荷時の応力-ひずみ応答の解析

Numerical observation for stress-strain responses during non-proportional loading

○学 赤木 宏行 学 田村 翔平
正 上森 武 正 吉田 総仁

Hiroyuki AKAGI, Kinki University, Umenobe1 Takaya Higashi-Hiroshima Hiroshima
Syohei TAMURA, Hiroshima University
Takeshi UEMORI, Kinki University
Fusahiro YOSHIDA, Hiroshima University

1. 諸言

自動車構造部材の成形に用いられるプレス工程は、複雑な製品形状を可能にするため多段プレス加工が採用されている。しかし多段プレス加工によって成形される金属材料の負荷経路は複雑であり、その予測は困難である。プレス成形シミュレーションを高精度にするためには、プレス成形時の複雑な負荷経路における変形挙動の解明とその再現をすることが重要である。

そこで本研究では、複雑な負荷経路を解明するため非比例負荷時の流動応力の変化(交差効果)に着目し、単軸引張試験(予ひずみ負荷試験)を行った後、角度を変えて非比例圧縮試験を行い負荷方向の変化がおよぼす応力状態の解明を行った。その結果をもとに、複雑な負荷経路の弾塑性変形挙動を再現するための弾塑性構成式を作成し、非比例負荷時の応力-ひずみ応答の解析を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材

本研究で使用した供試材は、270MPa 級 IF 鋼板 (板厚 1.4mm) を用いた。

Fig.1 Conceptual diagram of pre-strain load experimental and non-proportional compression experimental

2.2 予ひずみ負荷試験

予ひずみを与えるために(株)島津製作所製アムスラー型万能試験機 UMH-100 を用いて予ひずみ負荷試験を行った。制御方法は荷重制御により行った。ひずみは2つの平行部のうち片方の中央に添付した単軸塑性域ゲージ YEFLA-2 より計測した。試験は、Fig. 1 の概念図より①→②(IF 鋼の真ひずみが $\epsilon=5\%$ に到達する所)まで単軸引張試験を行い除荷(②→③)した。

2.3 非比例圧縮試験

予ひずみ付加後の圧縮での交差効果挙動を観察するために

非比例圧縮試験を行った。5%予ひずみを付加した後、 α 方向 (0° 15° 30° 45° 60° 75° 90°) に試験片を切り出し各方向で圧縮試験(③→④)を行った。

3. 弾塑性構成式

今回の弾塑性変形挙動を再現するために重要なことは、予ひずみ負荷試験後に行う面内応力反転試験でのバウシinger 効果や繰返し加工硬化などの応力状態を精度良く表現できるモデルが必要である。しかし従来のモデルでは、等方硬化則や線形移動硬化則によるデフォルト設定が行われておりバウシinger 効果を精度よく表現出来ていなかった。そこで、本研究では応力反転後に起こるバウシinger 効果を高精度に再現できる Yoshida-Uemori モデルを基とした、弾塑性構成式により非比例負荷時の応力-ひずみ応答の解析を行った。

以下に、Yoshida-Uemori モデルの概念図とそのモデルについての理論を述べる。

Fig.2 Schematic illustration of the motion of yield surface within the bounding surface (Yoshida-Uemori model)

$$f = \phi(\sigma - \alpha) - (Y + T) = 0 \quad (1)$$

$$F = \phi(\sigma - \beta) - (B + R) = 0 \quad (2)$$

$$d\epsilon^p = \frac{\partial f}{\partial \sigma} d\lambda \quad (3)$$

ここで、 ϕ は降伏関数で算出される相当応力、 Y は初期降伏応力である。また、 α および β はそれぞれの降伏曲面および限界曲面の中心、 B および R は限界曲面の初期半径とその等方硬化応力収束値を表している。

また、限界曲面の中心 β に対する降伏曲面の中心 α の相対的移動を表す背応力 α^* は

$$\alpha^* = \alpha - \beta \quad (4)$$

と表され、 α^* および β の発展式は

$$d\alpha^* = C \left[\left(\frac{\alpha}{Y} \right) (\sigma - \alpha) - \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha^*}} \alpha^* \right] d\bar{\varepsilon}^p \quad (5)$$

$$d\beta = m \left[\left(\frac{b}{Y} \right) (\sigma - \alpha) - \beta \right] d\bar{\varepsilon}^p \quad (6)$$

$$\alpha = B + R - Y = \alpha_0 + R \quad (7)$$

となる。 b , C , および m は降伏曲面ならびに曲面境界の移動硬化量を決定する材料定数である。また、交差効果による流動応力の再現には降伏曲面の等方硬化を考慮したものが必要であり、それは式(1)の T であり、その発展式は以下となる。

$$dT = \left[C_{Th} \left(1 - \frac{(\sigma - \alpha) : \alpha}{\|\sigma - \alpha\| \|\alpha\|} \right) a - C_{Ts} T \right] d\bar{\varepsilon}^p \quad (8)$$

この発展式は、増加項と減少項から成っており、増加項は降伏後の一時的な流動応力の上昇幅を支配する物性値 C_{Th} 、降伏曲面に対する応力点の相対ベクトル $\sigma - \alpha$ と降伏曲面の背応力 α^* 内積を含む応力経路係数 $\lambda(\sigma - \alpha, \alpha)$ 、降伏曲面の半径と限界曲面の半径の差 $a (= a_0 + R)$ の積である。応力経路が変化した直後、 α ベクトルの方向はほぼ不変であるのに対し、 $\sigma - \alpha$ ベクトルの方向は敏感に変化する。これにより二つのベクトルは非共軸となり T は急激に増加する。 C_{Ts} は降伏曲面縮小速度を規定する材料物性値であり、 R_{sat} は限界曲面の等方硬化の収束値である。また、非等方硬化領域の取り扱いについて以下のような展開式を用いた。

$$g_\sigma = 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{\partial g_\alpha}{\partial \beta} : d\beta > 0 \quad \text{のとき} \quad (9)$$

$$dR = m(R_{sat} - R) d\bar{\varepsilon}^p$$

$$\text{それ以外では} \quad dR = m(R_{sat} - R) \left(1 - \frac{\beta : d\beta}{\|\beta\| \|d\beta\|} \right) d\bar{\varepsilon}^p \quad (10)$$

また、降伏前後での加工硬化係数の急激な変化を再現することが出来なため、その補正として降伏曲面の移動速度 C を以下のような変数とする

$$C = C_0 + C_c \left(1 - \frac{\sigma : \beta}{\|\sigma\| \|\beta\|} \right) \quad (11)$$

C_0 降伏曲面の初期移動速度であり、 C_c 移動速度の増加量である。また、構成式のパラメータはYoshida-Uemoriモデルの21個に加え降伏曲面の等方硬化量 T を加えた22個となる。

4. 実験結果

予ひずみ付加後の圧縮での交差効果挙動を観察するために非比例圧縮試験を行った結果をFig.3に示す。今回はIF鋼の真ひずみが $\varepsilon=5\%$ に到達する所まで予ひずみ負荷試験後に各方向に圧縮試験を行った。なお、今回は 0° 45° 90° の3方向を示した。 0° では、他の2方向に比べて早期に降伏しており降伏後は緩やかな硬化の後、顕著な硬化量の増加がみられた。 45° 90° では、ほぼ同じ所で降伏しており、 0° と比べると降伏応力の増加がみられた。降伏応力の増加量は、角度の増加に従い増えるが一定の降伏応力で収束している。降伏後の 45° 90° の流動応力はどちらも直線的ではあるが硬化量は 90° の方がより高い値であり、角度の変化と応力挙動の関係がわかった。

また、各方向のバウシinger効果の程度は、 0° のバウシinger効果が大きく 45° 90° はほぼ同じであり、角度が増すごとにバウシinger効果の程度は小さくなっている。

5. 非比例負荷における解析

5.1 解析条件

弾塑性構成式をLS-DYNA ver.971のユーザーサブルーチンumat48に導入した。弾塑性構成式は、硬化則と降伏関数を組合わせたものであるため硬化則は本モデル、降伏関数はHill' 90を用いた。降伏関数は、等塑性仕事曲面の表現性を考慮して選定した。

5.2 解析結果

非比例負荷の解析結果をFig.4に示す。 0° 45° 90° とも降伏応力の精度は良く実験結果と同じ値を示した。流動応力は解析結果では、 0° 方向に非等方硬化領域が顕著に再現されており、実験結果と異なったがその後の流動応力は一致した。その他の 45° 90° の解析結果は、どちらも流動応力は精度良く再現できることがわかった。

Fig.3 Stress-strain responses during non-proportional loading in each direction (Experimental results)

Fig.4 Stress-strain responses during non-proportional loading in each direction (Analysis results)

6. 結言

- (1) 圧縮での交差効果挙動は、角度の増加とともに降伏応力は増加し、バウシinger効果の程度は小さくなる。
- (2) Yoshida-Uemori modelに等方硬化量を考慮することにより、公差効果挙動を高精度に再現できた。

参考文献

澄川智史, 中村周平, 上森武, 吉田総仁: 応力経路変化における弾塑性変形挙動とそのモデル化, 第60回塑性加工連合講演会講演論文集, (2009), pp.29-30