303 静水圧依存性高分子材料の塑性構成式による V曲げと据込みシミュレーション

玉川大学 ○佐野村 幸夫 静岡大学 早川 邦夫

1 緒 言

熱可塑性高分子材料は，日用品だけでなく工業部品および構造材料として，広範囲に使用されている．例えば，自動車のバンパーは，耐衝撃用ポリプロピレン PP が採用されている．この部品に対して耐熱性評価が行われており，有限要素法による熱変形解析が実施されている [1]．この解析では，クリープ曲線が引張りと圧縮で異なることを考慮している．このことは，クリープ変形の静水圧依存性を意味する．一方，弾塑性解析では通常の Mises 型の降伏条件と連合流れ則を用いている．また，破壊靱性と耐衝撃性を向上したゴム強化 PMMA の切欠き先端の変形が，Mises 型の降伏条件と連合流れ則を用いた FEM 解析がなされており，実験との比較的良い一致が得られている [2]．

しかし，高分子材料の塑性変形は，著しい静水圧依存性が実験的に確認されており，弾塑性解析の精度向上には，静水圧依存性を適切に表現する弾塑性構成式を開発する必要がある．このため，前報では静水圧依存性高分子材料の塑性構成式を定式化した [3][4]．この構成式の妥当性を検討するためには，汎用有限要素法に組込んで，構造解析をする必要がある．

本研究では，静水圧依存性高分子材料の塑性構成式（等方硬化理論）を概説するとともに，この構成式を MSC.Marc に組込み曲げ解析と据込み解析した結果を報告する．

2 静水圧依存性高分子材料の塑性構成式（等方硬化理論）

2.1 理論の概要 本論文では，静水圧依存性のある降伏面として，次式を用いる．

$$\left.\begin{aligned} &f = (1-\beta)\sqrt{J_2} + \beta I_1 - \kappa = 0 \\ &I_1 = \sigma_{kk},\ J_2 = \tfrac{1}{2} s_{ij} s_{ij} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

ここで，I_1 および J_2 はそれぞれ応力の第 1 不変量および偏差応力の第 2 不変量を表す．また，κ は等方硬化変数であり，塑性ひずみの関数である．さらに，β は材料の静水圧依存性の程度を表す材料定数である．この値が $\beta=0$ のとき，静水圧依存性はなくなり，式(1)は Mises 型の降伏面に帰着する．

高分子材料の塑性変形後の体積変化は小さいので，塑性変形における非圧縮性を仮定する．そこで，塑性ポテンシャル g を次のように仮定する．

$$g = \sqrt{3J_2} \tag{2}$$

非連合流れ則を用いて，塑性ひずみ速度を

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{p} = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \tag{3}$$

で記述する．ここで，λ は Prager の適応の条件で求められる正値の未定定数である．

$$\left.\begin{aligned} &\dot{\varepsilon}_{ij}^{p} = \frac{3}{2H}\left[\frac{3}{2}(1-\beta)\frac{s_{kl}}{\sqrt{3J_2}} + \beta\delta_{kl}\right]\dot{\sigma}_{kl}\frac{s_{ij}}{\sqrt{3J_2}} \\ &H = \frac{d\kappa}{d\varepsilon^{p}}\ ,\ \varepsilon^{p} = \int_0\left(\frac{2}{3}\dot{\varepsilon}_{ij}^{p}\dot{\varepsilon}_{ij}^{p}\right)^{1/2} dt \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

等方硬化変数κは，PP の塑性変形挙動を適切に記述できるように，次式のような Swift の式を採用する．

$$\kappa = F\left(b + \overline{\varepsilon^{p}}\right)^{n} \tag{5}$$

ここでF，b，n は，材料定数である．

2.2 MSC. Marc への組込み 前節で定式化した構成式を MSC.Marc に組み込む．このため，応力速度$\dot{\sigma}_{ij}$ と全ひずみ速度$\dot{\varepsilon}_{ij}$ の関係を次式のように書き下す．

$$\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl}^{ep}\dot{\varepsilon}_{kl} \tag{6}$$

$$C_{ijkl}^{ep} = C_{ijkl}^{e} - \alpha\frac{3}{2\sqrt{3J_2}}\frac{C_{ijpq}^{e}s_{pq}\left\{\frac{3}{2}(1-\beta)s_{mn}C_{mnkl}^{e} + \beta\sqrt{3J_2}\,\delta_{mn}C_{mnkl}^{e}\right\}}{\sqrt{3J_2}\,H + (1-\beta)\dfrac{9}{4\sqrt{3J_2}}C_{ijkl}^{e}s_{ij}s_{kl}}$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 & f = 0 \ \text{and}\ \dfrac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}\dot{\sigma}_{ij} \geqq 0 \quad \text{loading} \\ 0 & f = 0 \ \text{or}\ \dfrac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}\dot{\sigma}_{ij} < 0 \quad \text{unloading} \end{cases}$$

ここでC_{ijkl}^{e} は，弾性係数テンソルを表す．軸対称問題と平面ひずみ問題では

$$C_{ijkl}^{e} = \frac{2\nu G}{1-2\nu}\delta_{ij}\delta_{kl} + G\left(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}\right) \tag{7}$$

となり，平面応力問題では

$$\left.\begin{aligned} &C_{1111}^{e} = C_{2222}^{e} = \frac{2G}{1-\nu},\ C_{1122}^{e} = C_{2211}^{e} = \frac{2G\nu}{1-\nu} \\ &C_{1212}^{e} = G,\ \text{other}\ C_{ijkl}^{e} = 0 \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

となる．ここでGとνは，それぞれ横弾性係数およびポアソン比である．塑性構成式に非連合流れ則を仮定したために，弾塑性接線係数テンソルC_{ijkl}^{ep} およびこれから計算される接線係数マトリックスは，非対称になることに注意する必要がある．

3 曲げと据込みの有限要素シミュレーション

3.1 曲げ ここでは，上述の塑性構成式の妥当性と限界を検討するために，まずポリプロピレンの 90° V 曲げ加工を解析する．**Figure 1** のようなパンチ先端 R_p=9mm，ダイ肩幅 L=70mm の金型を用いた．板の寸法は，板厚 t=6mm，板幅 b=15mm および長さ l=95mm である．対称性により曲げ加工の右半分のみを解析する．パンチとダイは，剛体要素を使用した．一方，板は updated Lagrange 法による大変形に適用できる４次

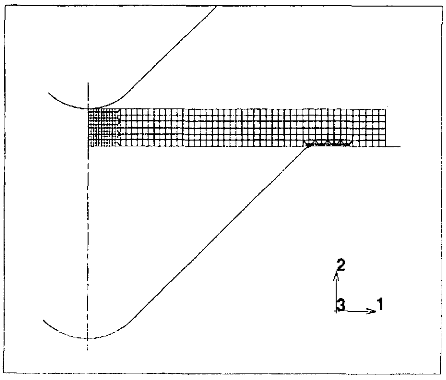

Figure 1 Discretized model of V-bend forming.

のアイソパラメトリック要素を用いた．パンチと板およびダイと板には，クーロン摩擦を仮定したスライドラインを定義した．ここでは，摩擦係数を$\mu=0$とした．板の材料定数は，次の値を用いた．

$$\left.\begin{aligned} &G = 724\mathrm{MPa}, \nu = 0.36 \\ &F = 67.2\mathrm{MPa}, b = 6.53\times10^{-4}, n = 0.217 \\ &\beta = 0.0 \text{ or } 0.17 \end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

ここでは，平面応力と平面ひずみで解析した．ただし，b/t=2.5なので，平面応力解析がより良い近似となると考えられる[5]．

Figure 2 は，パンチストロークS=1.5mmにおける円周方向の塑性ひずみ分布を示す．FEM解析は，平面ひずみで実施した．板の底面から引張り塑性ひずみを生じて，曲げ加工が進行していく様子が伺える．

Figure 3 は，曲げ加工における全ひずみ分布の変化を示す．

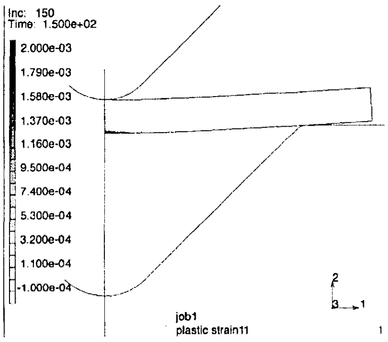

Figure 2 Distribution of plastic bending strain ε_{11}^{p} at punch stroke of $S=1.5\mathrm{mm}$

いずれのβの値でもSが小さいときには，曲げ変形が弾性変形で生じるために，中立面が板の中心と一致する．一方，Sの増大に伴って，板の曲げが塑性変形で進行するために，中立面の位置が中心から外れる．β=0の場合には，β=0.17と比べて大きなひずみを予測することになる．

3.2 据込み つづいてポリプロピレンの据込み解析を行った．円柱の寸法は，直径d=15mmおよび高さh=10mmである．軸対称問題として解析し，端面の摩擦係数をμ=0.2とした．**Figure 4** のように，円柱は剛体要素に挟まれて，x方向に据込み解析が実施される．

Figure 5 は，据込み時の荷重-ストローク曲線を示す．静水圧依存性によって，β=0.17の場合はβ=0と比べて大きな荷重を予測する．

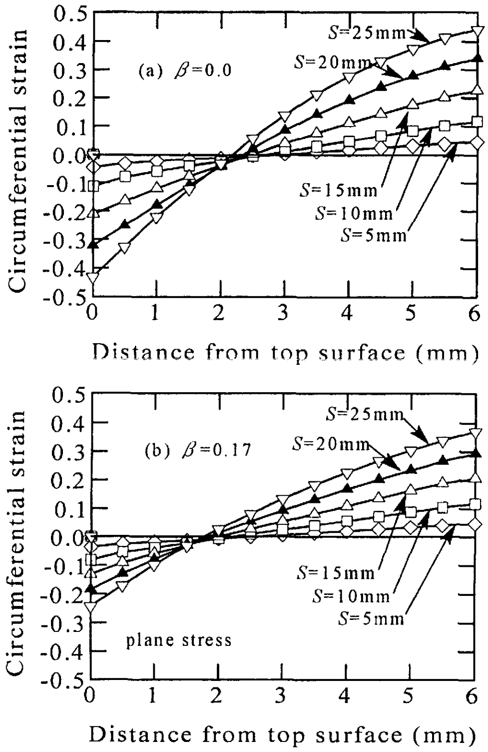

Figure 3 Circumferential strain distributions at various stroke.

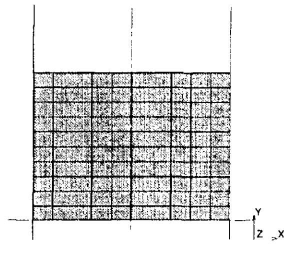

Figure 4 Discretazed model for axisymmetric upsetting of polymer materials

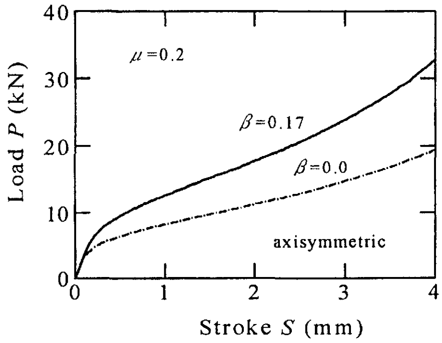

Figure 5 Load – stroke curves under upsetting.

参考文献

1) 高原忠良，杉本好央，成形加工，**15**，208（2003）.
2) M. Todo, K. Arakawa and K. Takahashi, Key Engineering, **183-187**, 409(2000).
3) 佐野村幸夫，材料，**50**，968(2001).
4) 佐野村幸夫，早川邦夫，材料，**53**，143(2004).
5) 風間宏一，永井康友，塑性と加工，**45**，40(2004).