

I-85

軸対称変形する円筒殻の塑性座屈モードの局所化と
繰り返し荷重下の挙動

本州四国連絡橋公団 正員 鳥羽 保行 名古屋工業大学 正員 後藤 芳顯
名古屋工業大学 学正員 小野 聖久 名古屋工業大学 正員 小畑 誠

1. まえがき

座屈モードの局所化現象は、構造物が最大荷重到達後、荷重減少経路上に存在する分岐点に起因して生ずる。地震等の繰り返し荷重下においては、この局所化により塑性変形が集中し、その耐荷力あるいは変形能が大きく低下することが実験などで観察されている。すでに著者らはこの局所化現象の解析手法を提示し、多点支持柱¹⁾トラス¹⁾、および圧縮板²⁾を例として繰り返し荷重下の座屈モードの局所化現象を理論的に明らかにした。ここでは

いま1つの例として繰り返し軸力を受ける軸対称変形する円筒殻についての座屈モードの局所化現象を明らかにする。なお、幾何学的非線形解析としては局所的な大変形挙動にも対応できるように有限ひずみ・有限変位を正確に扱う剛体変位除去の手法を用いる。

2. 二軸応力下の構成則

軸対称変形する円筒殻の場合、二軸応力状態となるので繰り返し荷重下の材料の構成則をDafalias-Popovの二曲面モデルを使用して誘導する。増分型の応力ひずみ関係を混合硬化則から導くと、次式のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_s \\ \Delta\sigma_n \end{Bmatrix} = \left[[I] + \frac{1}{h_i + h_k} [P] \right]^{-1} [E] \begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_s \\ \Delta\epsilon_n \end{Bmatrix}, \quad h_i + h_k = H_i + H_k + h \frac{\delta}{\delta_m - \delta} \quad (1-a, b)$$

この式で $[I]$ は単位行列、 $[E]$ は弾性剛性の行列、 $[P]$ は混合硬化則より求まる行列、 H_i, H_k は定数である。 h_i, h_k は、等方硬化、移動硬化係数で、式(1-b)で示されるようなDafalias-Popovのモデルから決定される量である。このモデルでの相当応力-相当塑性ひずみ関係を図1に示す。

3. 弾塑性分岐解析

座屈モードの局所化現象を正確に解析するためには、後座屈領域での分岐解析を行う必要がある。分岐解析は多軸応力下のHillの分岐条件に基づき実施するのであるが、局所化を生ずる分岐点一般在ピーク到達後の荷重減少経路上に存在するため、荷重制御型の分岐条件式を変位制御型に変換する。¹⁾

$$\begin{aligned} \Delta\Pi = & (\Delta\bar{D}^b_i - \Delta\bar{D}^f_i) \Delta\bar{K}^c_{ij} (\Delta\bar{D}^b_j - \Delta\bar{D}^f_j) \\ & + \sum_n \left[(\Delta\epsilon^f_{ij} - \Delta\epsilon^b_{ij}) \left\{ (E^c_{ijkl} - E^b_{ijkl}) \Delta\epsilon^b_{kl} + (E^f_{ijkl} - E^c_{ijkl}) \Delta\epsilon^f_{kl} \right\} \right]_n = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで $\Delta\bar{D}_i$ は非制御変位増分、 $\Delta\bar{K}_{ij}$ は変位増分型の接線剛性マトリックス、 $\Delta\epsilon_{ij}$ はひずみ増分、 E_{ijkl} は部材の接線剛性である。また、上添字 f, b は基本経路及び分岐経路を示し、 c は除荷の場合でも負荷剛性をとると仮定するcomparison solidsとしての構造システムを表す。分岐点の特定、分岐経路の追跡は式(2)より行う。

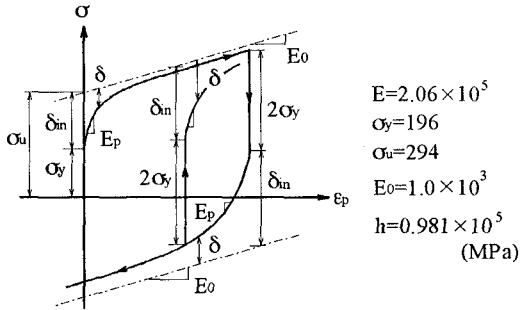


図1 相当応力-相当塑性ひずみ関係

$$\begin{aligned} E &= 2.06 \times 10^5 \\ \sigma_y &= 196 \\ \sigma_0 &= 294 \\ E_0 &= 1.0 \times 10^3 \\ h &= 0.981 \times 10^5 \quad (\text{MPa}) \end{aligned}$$

4. 数値計算例

円筒の単調载荷時の挙動として、上端の変位 δ と圧縮荷重 P との関係を図3に示す。この解析に用いたモデルの境界条件は、図2にあるように両端完全固定である。このような境界条件で圧縮荷重を加えると、まず対称な曲げ変形が生じる。そして対称のまま変形が進み、やがて極限点を迎える。これとほぼ同時に分岐が生じる。この分岐により上端あるいは下端近傍に座屈モードの局所化が生じ、塑性変形が集中して荷重が大きく低下する。

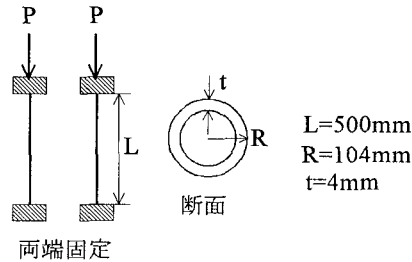


図2 解析モデル

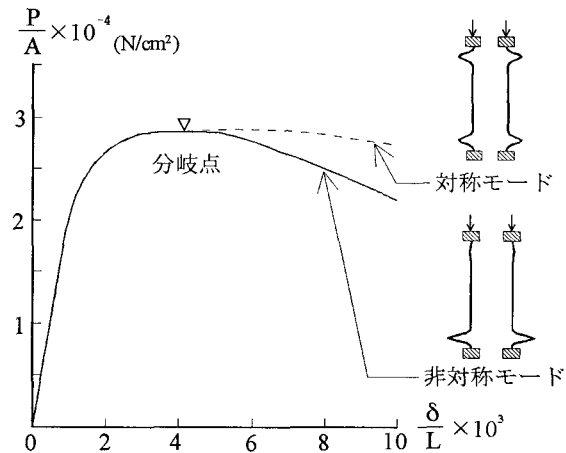


図3 単調载荷条件下の挙動

次に繰り返し荷重下の挙動を図4に示す。繰り返しの制御変位は、分岐点を越えた位置に設定している。円筒の繰り返しの場合、引っ張り荷重を加えた時に、フープ方向の応力によって複雑な変形が生じる。したがって、これをさらに圧縮すると前回の変形モードと同じモードで圧縮されるとは限らない。この解析では第1回目の载荷で変形が局所化した部分と、9回繰り返した後に最終的に局所化した部分に違いが見られる。したがって繰り返し荷重下の荷重低下も一様ではない。

5. まとめ

ここでは、二軸応力を受ける円筒殻を例に多軸応力下の塑性座屈モードの局所化現象を解析する手法を提示し、繰り返し荷重下の局所化現象を検討した。この結果より、繰り返し荷重を受ける円筒殻の荷重低下は圧縮板や多点支持柱と異なり一様ではなく、より複雑な挙動を示すことが明らかになった。

【参考文献】

- 1) 後藤芳顯, 川西直樹, 鳥羽保行, 小畑誠 : 土木学会論文集, No.483/I-26, pp87-96, 1994.1
- 2) 後藤芳顯, 松岡宏典, 鳥羽保行 : 土木学会中部支部講演概要集, I-18, pp35-36, 1994.3

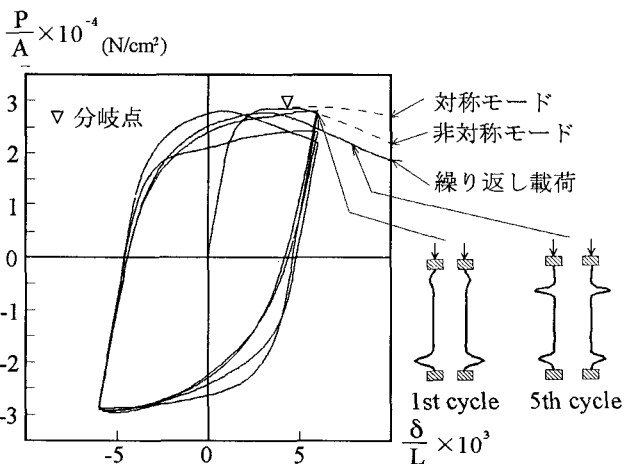


図4 繰り返し荷重条件下の挙動