

I - A 93

くり返し作用を受ける薄板の局所的な変形について

東北大学大学院工学研究科 ○学生員 寺沢 直樹
 東北大学大学院工学研究科 正 員 岩熊 哲夫
 建設省 土木研究所 正 員 白戸 真大
 東北大学大学院工学研究科 正 員 中沢 正利

1. まえがき

兵庫県南部地震の鋼製橋脚等の被害から、特にくり返し作用による局部座屈現象とその後の挙動は大きな注目を集めた。そのような挙動の有限要素法による数値シミュレーションで、特にくり返し作用を念頭に置いた多曲面モデルを用いた研究が数多く行われ、巨視的にはよく捉えられた報告がなされている。しかし局所的には非常に大きな変形が発生することから、巨視的な挙動は実験と定量的に合致したとしても、構成モデルの違いで微視的な挙動は大きく異なることも予想される。そこで本研究では、代表的な塑性の流れ則に非共軸性を考慮し、その材料に巨視的なすべりが発生した後の挙動も含めてモデル化した構成則¹⁾を用いて、平面ひずみ問題の範囲で薄板のくり返し作用に対する鋼材料そのものの応答の、構成モデルによる違いについて比較検討を試みる。

2. 基礎方程式

大変形問題でも弾性部分は通常の Hooke の法則に従うとし、降伏条件は Mises の条件で与えられるとする。ただし、ひずみ速度と応力速度との関係には、塑性ポテンシャルによる項以外に非共軸項を加え

$$d_{ij}^p = \frac{1}{H} \frac{\sigma'_{ij} \sigma'_{kl}}{(2\bar{\sigma})^2} \nabla \sigma'_{kl} + A \left\{ \nabla \sigma'_{ij} - \frac{1}{2\bar{\sigma}^2} \sigma'_{kl} \nabla \sigma'_{kl} \sigma'_{ij} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

とする。ここに A はある種の材料パラメータあるいは変形履歴に依存する係数で、非共軸性を代表するパラメータである。これは、解釈としては降伏曲面に角点の発生を取り入れたモデルと考えられ、鋼のような材料でも一方に大きな変形が発生した場合には存在する可能性のある成分である。もちろん、もともとは地盤材料のようなすべり変形を主とする材料で考察されたモデルである。

そのすべり変形は、鋼のような場合でも引っ張り試験のリューダース帯として観察される。こういったメカニズムが発生するとした後の挙動も、大変形を扱う場合には考慮する必要がある。そこで、その発生条件は Hill²⁾ のせん断帯の発生条件

$$\det |\nu_i F_{ijkl} \nu_l| = 0 \dots\dots\dots (2)$$

で与えられるものとする。ここに ν はすべり面の法線方向単位ベクトルである。一旦すべりが始ったあとは、二重すべりモデル³⁾で挙動を表す。つまり、総変形速度が

$$d = d^e + d^p + d^m \dots\dots\dots (3)$$

で分解できるとし、第一項目は Hooke の法則による弾性成分、第二項目が式 (1) の塑性成分、第三項目が式 (2) を満足した後のすべり変形成分である。最終的には、応力－ひずみ速度の定義に以上のモデルを代入して構成則が得られる。

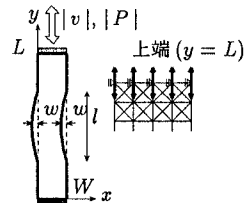


図-1 平面ひずみ解析対象と载荷条件

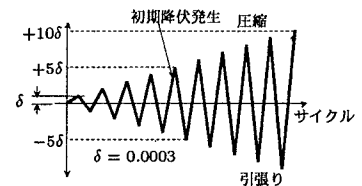


図-2 くり返し载荷方向

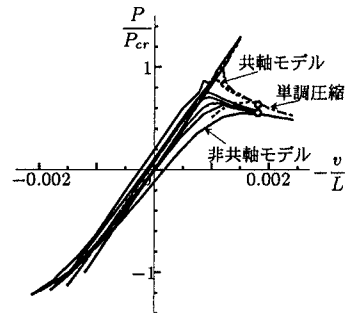


図-3 反力－変位量関係

Key Words: 平面ひずみ問題, 非共軸性, 局部座屈, くり返し作用,

〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (022-217-7443, FAX 022-217-7441)

3. 解析例

解析対象は図-1に示したような薄板で、橋脚基部付近のフランジ板の厚さ方向断面を眺めたものとして捉えている。縦 500mm、横 10mm の $L/W = 50$ としたが、完全系のままでは座屈が生じないので、図のような初期不整を入れておく。ここに初期不整を入れる領域は、 $l = 250 \text{ mm}$ にしてある。有限要素メッシュは 3200 定ひずみ速度三角形要素としたが、厚さ方向に 4 分割とやや粗い形状になっている。また材料定数等は文献¹⁾と同じにしたが SM490 程度のモデルになっている。初期不整の大きさ w については、ここでは $w/W = 0.03$ の場合を以下に示す。载荷は図示したように、下端を x, y の 2 方向には止め、上端を x 方向のみに止めて、 $\pm y$ 方向に強制変位を与えることによって行った。図-2 は定振幅のくり返し回数 1 の载荷方法を示し、図-3 は上端の反力と変位量の関係を示す。

まず図-3 に一点鎖線で示した単調圧縮载荷を行ったが、非共軸、共軸モデルともに $-v/L = 0.00125$ 付近で両端固定の座屈荷重 P_{cr} 付近のピークを示した後、降伏により上下端及び中央部に塑性ヒンジを形成して急激に耐力が低下した。2 つのモデルでは、反力・変位の相対差が約 5% で、変形形状もほぼ同様だが、相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$ の値が非共軸モデルで約 15% 大きい結果を示した。巨視的には 5% 程度の差に対し微視的には約 15% の差が見られ、非共軸モデルがより柔な応答を示した。

次にくり返し圧縮・引張り载荷では、単調圧縮の結果から 5 サイクル目の圧縮段階で初期降伏が発生するように、図-2 の δ を 0.003 と設定した。図-3 の実線が非共軸モデルの場合、点線が共軸モデルの場合の結果を示している。単調圧縮の場合と異なり、 5δ の圧縮された状態では 2 つのモデルともに降伏は発生しているが、荷重がくり返し载荷の影響から $P/P_{cr} = 1.3$ 付近まで到達する。これはくり返し履歴中に何らかの部分降伏等で有効座屈長が実質的に短くなったためだと考えられる。6 サイクル目からは塑性域が拡大し始め、その反力のピークは非共軸モデルで $P/P_{cr} = 0.7$ 付近、共軸モデルで $P/P_{cr} = 0.9$ に現れ、その後もピークは下がっていく。図から、くり返し载荷を受けた場合はどの段階でも単調圧縮の場合よりも低い荷重レベルでの履歴曲線を描き、くり返し作用で靱性を失っていくのがわかる。また降伏後の引張り载荷段階では塑性硬化の影響で残留ひずみが見られる。

ここで 2 つのモデルでは、 5δ の圧縮された状態において巨視的にはもちろん微視的にもほぼ同様であった。これに対し、引張り・圧縮を 1 サイクル経験した図に丸点で示した 6δ の圧縮された状態では反力が約 15% と巨視的にも差が現れたものの、図-4 に示したように相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$ の分布パターンも異なり、同位置で示すその最大値は非共軸モデルが 2 倍大きい値を示した。このように巨視的には約 15% の差に対し、微視的には 2 倍の違いが見られ、材料内部の挙動は大きく異なっている。

4. まとめ

2 つの構成モデルによる薄板のくり返し圧縮・引張りを数値解析した。巨視的な挙動はほぼ同様であるのに対して、発生する相当塑性ひずみは大きく異なった結果が得られた。このように構成モデルがそれぞれ予測する、破壊や損傷といった状態に影響を与える局所的な変形に大きな違いが現れ、くり返し作用を受ける場合の大変形挙動を数値シミュレーションする際に構成則の違いを注意するべきであることが明らかになった。

参考文献

- 1) 白戸真大・岩熊哲夫: 微視すべりを組み込んだ構成モデルとその大変形問題への応用, 土木学会論文集(投稿中).
- 2) Hill, R. and Hutchinson, J. W.: Bifurcation phenomena in the plain tension test. *Int. J. Mech. Phys. Solids* vol.23, pp.421-441, 1975.
- 3) Asaro, R. J.: Micromechanics of Crystals and Polycrystals, *Advances in Appl. Mech.* Vol.23, pp.1-115, 1983.

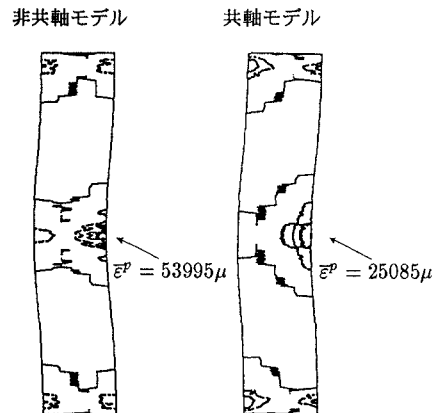


図-4 6δ の圧縮された状態での変形形状及び相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$ 分布(横方向 10 倍拡大)