

鋼製橋脚耐荷力に及ぼす局所変形の影響

東北大学工学部 ○学生員 寺沢 直樹
 東北大学工学部 正 員 岩熊 哲夫
 東北大学工学部 正 員 中沢 正利

1. まえがき

兵庫県南部地震では鋼製橋脚の損傷事例が数多く見られ、矩形橋脚の補剛板の局部座屈や円形橋脚の提灯座屈等が観察された。そのような挙動の巨視的な解析は汎用プログラムで行われ、特に繰返し載荷を念頭に置いた多曲面モデルを用いた数多くの結果が報告されている。しかし、座屈及び座屈後の挙動では局所的には非常に大きなひずみが発生し、微視的には複雑な挙動をしているはずである。そう考えると、その数値シミュレーションをするにあたり、得られる巨視的挙動は同じようであっても、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、矩形橋脚のフランジに着目し、板一枚の厚さ方向を眺めた平面ひずみ問題として、板の圧縮挙動を3種類の構成則で予測し、その違い等について検討を試みる。

2. 基礎方程式

大変形問題での構成則を表す手段として、ここでは増分理論を用いることから、nominal 応力速度 $\dot{n}_{ij}$ と速度勾配 $v_{k,l}$ とを用いる。つまり構成則が

$$\dot{n}_{ij} = F_{ijkl} v_{k,l} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表される。ここに F は応力-ひずみの接線係数である。

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

$$d_{ij}^p = \frac{1}{H} \left(\frac{\sigma'_{ij}}{2\bar{\sigma}} + \frac{\beta}{3} \delta_{ij} \right) \left(\frac{\sigma'_{kl}}{2\bar{\sigma}} + \frac{\alpha}{3} \delta_{kl} \right) \bar{\sigma}_{kl} + A \left\{ \sigma'_{ij} - \frac{1}{2\bar{\sigma}^2} \sigma'_{kl} \bar{\sigma}_{kl} \sigma'_{ij} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

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向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

$$\det [\nu_i F_{ijkl} \nu_j] = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

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

$$d = d^e + d^p + d^m \quad \dots\dots\dots (4)$$

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 (2) の塑性成分、第三項目が式 (3) を満足した後のすべり変形成分である。最終的には、応力速度-ひずみ速度の定義に以上のモデルを代入し、式 (1) の形の構成モデルを表すことができる。

3. 解析方法と対象及び解析例

増分関係で与えられた構成則に従う材料のつり合い式は増分式でしか表せないので、単純な増分計算で非線形挙動を解析する。従って、増分量が小さくなるように十分細かい載荷あるいは強制変位ステップを用いなければならないことに注意する。

解析対象は図-1である。これは橋脚フランジの厚さ方向断面を眺めたものであり、平面ひずみ問題として捉える。縦 500mm、横 10mm の $L/W = 50$ としたが、単純圧縮では座屈が生じないので、実際に兵庫県南部

地震後、建設省土木研究所等により行われた鋼製橋脚の正負交番繰返し载荷実験⁴⁾の結果から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、実験結果から得られた有効座屈長、つまり $l = 250 \text{ mm}$ 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。材料定数等は文献¹⁾のものと同じにした。载荷は図示したように、下端を 2 方向に止め、上端を下方のみに強制的に押し下げることによって行った。いくつかの初期不整のパターンで解析した結果、増分強制変位は $-\Delta u/L = 5.0 \times 10^{-5}$ とすればよいと判断した。また、初期不整の大きさ v は $0.001W$ から $0.05W$ 位でいくつか解析した。図-2が $v = 0.03W$ のときの上端の反力と押し込み量との関係である。両端固定のオイラーの座屈荷重 $P_E = 4\pi^2 EI/L^2$ 付近に達したあと、急激に抵抗力が低下する。 v がこれより小さい場合はこのピーク点がもっと上に上がるが、それは、 v が小さくなるに従い初期不整のない完全系に近づき座屈しなくなるためであり、他方で降伏が進み急激な抵抗力の低下も示す。反対に v が大きいとピーク点は低くなる。これは曲げによる降伏で抵抗を早期に失うためである。

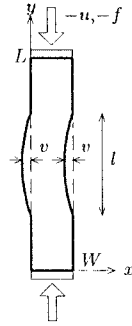


図-1 解析対象

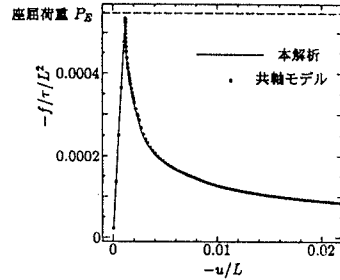


図-2 反力-押し込み量関係

この反力のピーク点付近で、上下端部の左側面、中央部の右側面に降伏した要素が集中し始める。その後、変位が進むにつれて塑性域が厚さ方向全体に拡がり、この 3 部分に塑性変形が集中する。図-3に $-u/L = 2.5 \times 10^{-3}$ における $\bar{\epsilon}^p = \sum (2d_{ij}^p d_{ij}^p)^{1/2}$ で定義する相当塑性ひずみの分布を示す。最も太い線が図に示した最大値をとり、細くなるに従い、順に小さい値となる。この図からも、前述のような塑性域が集中している様子がわかる。この 3 部分が塑性ヒンジとなり耐力低下が進むと同時に、その中間部は弾性除荷が進み、ほとんど変形しなくなる。

共軸モデルの場合の同様の解析を行ったが、図-2のその巨視的な関係はほぼ同様になる。しかし、微視的な視点に移ると非共軸モデルの解析結果が同じ変位を与える荷重が共軸モデルより約 30 ~ 40(kgf) 低いと同時に図-3の相当塑性ひずみ量は逆に 400μ 位大きい。分布はほぼ同じようだが、非共軸モデルの方が柔で変形が大きくなり、抵抗力も若干低下する。

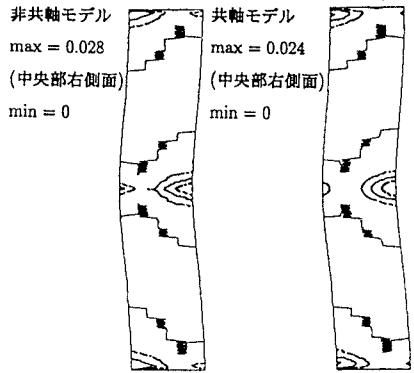


図-3 相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$, $-u/L = 2.5 \times 10^{-3}$

4. まとめ

粗いメッシュで 2 つの構成モデルにより平板の圧縮を数値解析した。巨視的な挙動や発生する変形パターンはほぼ同様だが、発生するひずみ量はより柔な非共軸モデルで大きめの値を得た。メッシュのせいもあり、その差は相対的にわずか 15% 程度だが、大変形挙動の数値シミュレーションで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.
- 4) 建設省土木研究所等: 道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同報告書 — 鋼製橋脚の正負交番繰返し载荷実験 —, 1997.