ゴム材料の弾塑性挙動における降伏曲面の歪みの影響

名古屋工業大学	学生会員	○森井 伸一
名古屋工業大学	フェロー会員	小畑 誠
名古屋丁業大学	フェロー会員	後藤芳顯

1. はじめに

橋梁の耐震設計においてはゴム支承が重要な役割を果たしており、その変形特性および破壊特性の的確な 評価の必要性が高い.ゴム支承のそれらの特性を知るには数100%におよぶひずみの範囲での、超弾性および 塑性挙動を正確に知る必要がある.著者らはこれまでに特に Mullins 効果に注目して応力ひずみ関係につい て検討を続けてきた.このとき、塑性モデルとしては移動および等方効果を導入した単純なJ2流れ理論を用 いたが、単純な一方向せん断の結果を再現する材料パラメータがとくにひずみの大きい領域において2方向 載荷の結果を再現することができないという問題があった.本研究では塑性モデルに新に降伏曲面の歪みを 導入してこの問題を検討する.

2. 降伏曲面の歪みを考慮した応力ひずみ関係

ゴム材料の応力ひずみ特性を表すモデルとして超弾性,塑性特性および損傷劣化挙動を含むもので構成する(図1).ブロック2のスライダ部分は流れ理論にもとづく塑性挙動に対応する.バネの超弾性部分には一般化された Mooney-Rivlin 型のエネルギ密度関数を用い,さらにブロック1のバネには損傷曲面による損傷の効果を含んでいる.本研究では塑性部分では次のような降伏関数をもとに流れ理論を構築する.

$$g = f - \tau_{y}, \quad f = \sqrt{\left(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}\right) A_{ijk\ell} \left(\sigma_{k\ell} - \alpha_{k\ell}\right)}, \quad D_{ij}^{p} = \frac{1}{h} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{k\ell}} d\sigma_{k\ell}$$
(1a-c)

ここに $A_{ijk\ell}$ は降伏曲面の歪み(図2)を2次形式として表す4階のテンソルであり初期状態で通常のミゼスの降伏条件に一致するようにクロネッカのデルタ δ_{ij} を使って初期値 $A^0_{ijk\ell}$ を次式のように定義する.

$$A_{ijk\ell}^{0} = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{2} \left(\delta_{ik} \delta_{j\ell} + \delta_{i\ell} \delta_{jk} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \delta_{k\ell} \right)$$
(2)

多結晶体の降伏曲面が塑性変形とともにその形状を変えていくことは結晶塑性学では当然の帰結であり、実際に金属材料ではロール方向により降伏応力が異なることがあるなどよく知られている事実である. ただし、 塑性変形そのものが大きくない場合や、変形がほぼ一軸とみなせる場合には問題にはならないのでこれまで 応力ひずみ関係においてこの点はあまり触れられてはいない. しかし塑性のメカニズムは異なるがゴムにお ける塑性のように数 100%の塑性変形が生じかつらせん載荷のように変形が比例載荷からおおきくはずれる 場合には問題となりうる. 従来の等方硬化、移動硬化に加えて降伏曲面の歪みも含めて硬化則および発展則 は相当塑性ひずみ($d\epsilon^{\prime}$)を用いて次のように与えることができる.

$$h = h_i + h_k + h_{d1} + h_{d2}$$
(3a)
$$d\tau_v = h_i d\overline{\varepsilon^p} , \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} d\alpha_{ii} = -h_k d\overline{\varepsilon^p} , \frac{\partial f}{\partial \varepsilon^p} dA_{iik\ell} = -(h_{d1} + h_{d2}) d\overline{\varepsilon^p}$$
(3b-d)



キーワード:ゴム材料,ゴム支承,降伏条件式,応力ひずみ関係

連絡先:〒466·8555 名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学社会工学専攻



 $d\overline{\varepsilon}^{p} = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{2}{3}} D_{ij}^{p} D_{ij}^{p} , \quad \mu = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{2}{3}} \left| A_{ijk\ell} \left(\sigma'_{k\ell} - \alpha_{k\ell} \right) \right|$ (3e,f) $dA_{ijk\ell} = -2\frac{h_{d1}}{f^3}d\overline{\varepsilon}^p A_{ijmn} \left(\sigma'_{mn} - \alpha_{mn}\right) \left(\sigma'_{pq} - \alpha_{pq}\right) A_{pqk\ell} - 2\frac{h_{d2}}{f} A_{ijk\ell}d\overline{\varepsilon}^p \quad (3g)$

式(3e)に現れ,式(3f)で定義するµは通常の流れ理論ではあらわれないスケー ルファクタであり降伏曲面の歪みがなければ1に等しい.式(3a)の $h_{d1} \ge h_{d2}$ が降伏曲面の歪みをあらわす Aike と関係するパラメーターであるが, hai は符 号により変形の性状が異なることに注意する.式(3g)が A_{iik}の発展則であり, これからこの定式化では応力空間中で降伏曲面の主軸は回転しないことおよ び h_a,が等方硬化の一部と考えることもできることがわかる.ただし,ここで は h_{a2} を等方硬化係数に含むことはせず独立したパラメータとしてあつかった. 図52方向載荷パターン





3. 数值計算例

対象としたのは別途載荷実験を行ったゴム支承模型である¹⁾.また計算モデルの設定や境界条件等は既報 のものと同じである.図3および4に計算結果の一例を平均応力一平均ひずみの関係として示す.図3は図 5 に示すようなにらせん状の変位を与えたものであり、図 4 は振幅幅を漸増させた一方向の繰返し載荷であ る. 超弾性, 損傷, および塑性に関する材料パラメータはあわせて 50 個以上ある. それらを決定するために は適切な最適化プロセスが必要である.詳細は省略するが超弾性,損傷,塑性の各部分ごとに全体のバラン スに考慮しながら最適な材料パラメータを決定していった.図3および4はそれらの最適化プロセスによっ て得られたひとつの結果であるが、降伏曲面の歪みに関わるパラメータのみをあげておくと h_{dl} = -0.2 と h_{d2}=0.05の定数である.降伏曲面の歪み従来の塑性モデルを用いた解析結果 2)と異なり同じ材料パラメー タに対してらせん載荷と一方向繰返し載荷の結果を同時によく再現していることがわかる.

4. まとめ

一般化された Mooney-Rivlin モデルをベースに異方性を持つ Mullins 効果を含むゴム材料の構成モデル,お よび降伏曲面の歪みを導入した塑性流れ理論を提案し、2 方向載荷を含む実験結果の再現を試みた. 降伏曲 面の歪みをともなわない従来の塑性理論よりも優れた実験結果の再現性を得た.

参考文献

1) 小畑誠,小岩千紗,後藤芳顯,材料劣化を考慮した繰返し載荷下のゴム支承挙動の解析,第20回性能に基づく橋梁等の耐震 設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.335-338, 2017

2) 森井伸一,小畑誠,後藤芳顯,2方向載荷時のゴム支承挙動の数値解析, I-537,第73回土木学会全国大会講演概要集 謝辞:本研究の一部は基盤研究(A)16H02359の援助を受けました.