三曲面モデルのパラメータ同定手法改良による 各種鋼材の繰り返し挙動の再現精度の改良

名古屋工業大学大学院 学生員 〇中村 信哉 名古屋工業大学大学院 フェロー会員 後藤 芳顯 名古屋工業大学大学院 正会員 海老澤健正

1.はじめに: 構造物の地震時終局挙動は材料非線形性に大きく影響されるため、これを精度良く解析するには鋼材 の繰り返し構成則の高精度化が求められる.著者らは汎用的に用いられている鋼材 SS400 や SM490 を対象に繰り返 し挙動を精緻に表現できる材料構成則として三曲面モデル¹⁰を提案し、多軸応力下への拡張も行った.同時に、有限 要素法の各種要素に導入できるように三曲面モデルによる構成則の Subroutine 開発を行った、さらに、過去 10 年以上 わたり各種構造物を対象とした多数の繰り返し載荷実験や振動台実験を実施し、実験結果と有限要素解析結果が一致 するように、三曲面モデルのパラメータのキャリブレーションを行ってきた.また、このような解析を通じて数値計 算での安定性を向上させるため Subroutine の改良も行った.その結果、静的繰り返し解析のみならず時刻歴応答解析 でも構造物の挙動が高精度で予測可能になった.しかしながら、近年、SM570、SBHS500、SBHS700 などの高性能鋼 の使用が増加する傾向にあり、これらの鋼材にも対応できるように三曲面モデルの適用性を従来のパラメータ同 定手法²を用いて検討したが、繰り返し挙動の再現性にやや劣ることが判明した.ここでは、材料パラメータ同定法 を改良することにより、三曲面モデルによる再現精度を向上させ適用可能な鋼種範囲の拡大を図る.

2. 材料試験: SS400, SM490, SM570, SBHS500, SBHS700の5種類の鋼材の繰り返し荷重下での挙動を把握するために一軸の材料試験を実施する.一般的な一軸引張試験に加え,繰り返し荷重下での挙動把握のための引張・圧縮の一軸繰り返し載荷試験の2種類を実施する.一軸引張試験にはJIS4号試験片を用いるが,繰り返し載荷試験では圧縮時の座屈を防止するために平行部を短くした図1に示す試験片を用いるとともに,試験装置に側方変位拘束装置を導入する.材料試験での応力は試験機のロードセルの値から,ひずみは伸び計の値から算出する.

3. 三曲面モデル: 三曲面モデルは、鋼材が大ひずみの繰り返し載荷を受けた際の挙動について、降伏棚の減少、弾 性域の縮小・拡大、硬化係数の変化等の重要な特性を少ないパラメータで表わせるモデルである. そのうち、繰り返 し挙動に関わるパラメータは弾性域の縮小・拡大と塑性域での挙動を表すパラメータに大別される.

(a) 弾性域の縮小・拡大: 三曲面モデルでは、有効相当塑性ひずみの関数として弾性域の縮小・拡大が表現される.

 $f = f_b - (f_b - \sigma_y) e^{-\beta \varepsilon_y^{ep}} \qquad \left(\overline{\varepsilon}^{ep} \le \varepsilon_{yp}^{0}\right)$ (1a) $f = f_b - (f_b - \sigma_y) e^{-\beta \varepsilon_{yp}^{0}} + \frac{\sigma_{\max} - \sigma_y}{\rho} \qquad \left(\overline{\varepsilon}^{ep} > \varepsilon_{yp}^{0}\right)$ (1b)

ここに、降伏曲面半径 f , 有効相当塑性ひずみ $\varepsilon^{e^{\rho}}$, 初期降伏棚 長さ ε_{yp}^{0} である.式中の f_{b} , β , ρ の値の従来の同定法は、まず 材料試験の応力-ひずみ関係からオフセット法により各載荷サイ クルでの降伏曲面半径を算出する.それを有効相当塑性ひずみ $\varepsilon^{e^{\rho}}$ 一降伏曲面半径 f の関係としてプロットし、式(1a)、式(1b)で表さ れる曲線でフィッティングさせるようにパラメータを同定する.



(b) 塑性域挙動: 各繰り返し載荷での塑性域での挙動は,降伏応力で無次元化した不連 続曲面半径の最大値 β_{dc} ,不連続曲面外側での硬化係数を定めるパラメータ ξ ,不連続曲 面内外での硬化係数比 κ により表現される.従来, $\beta_{dc} = \sigma_u / \sigma_y (\sigma_u は境界曲面半径)とし,$ $<math>\xi$ は単調引張試験での硬化域の応力-ひずみ関係に対するフィッティング, κ は構造実験 とのキャリブレーションにより決定される.



 $A_{error(i)}$

キーワード: 繰り返し載荷,高強度鋼,材料構成則

連絡先: 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 TEL 052-735-5021 FAX 052-735-5563

4.新しいパラメータ同定方法: 従来の同定方法では、弾性域の縮小・拡大に関するパラメータはオフセット法による降伏曲面半径を介した同定であるため、必ずしも応力ーひずみ関係を再現する最適値となっていない.また、塑性域の挙動を表すパラメータは材料試験での繰り返し挙動とは関連付けて決定されていない.そこで、これら6個のパラメータを繰り返し材料試験の応力ーひずみ関係と直接フィッティングすることで同定し、繰り返し挙動の再現性向上を図る.同定おいては、実験と解析における応力ーひずみ関係の平均誤差面積比 A_{ratio} を最小にする最適化問題として定式化を行う.ここで、平均誤差面積比A_{ratio} を最前における応力ーひずみ関係の平均誤差面積比 A_{ratio} を最小にする最適化問題として定式化を行う.ここで、平均誤差面積 と A_{ratio} とは、図 2、式(2a)で表される1サイクルの誤差面積比 A_{ratio} を全載荷サイクル数Nにわたって平均化したものである.

$$A_{ratio(i)} = A_{error(i)} / A_{(i)}$$
(2a)
$$A_{ratio}^{ave} = \sum A_{ratio(i)} / N$$
(2b)

5. 同定結果: 表1に各パラメータの各同定結果および平均誤 差面積比を,図3に各同定結果を用いた真応力-対数ひずみ関 係を実験結果と比較して示す. なお, κについては, 従来, 構 造実験から同定された $\kappa=2$ を用いていたが、今回は材料試験と の比較を行うのでκのみは従来手法においても材料試験とのフ ィッティングから同定した値を用いる.図3を見ると,SM570 等の高強度鋼では実験結果に比べ従来手法では第2,4象限が角 張った形状の応力--ひずみ関係になるのに対し、本手法では実 _ 験結果を良く再現するものとなっており、誤差面積比も49%~ 72%程度減少している. また, SS400 などにおいても誤差の低 減が見られる.パラメータの値について、例外はあるものの、 本手法による値は従来法に比べ f_h が小さく ρ が大きくなって おり,弾性域が小さいことを表している.したがって,従来法 においてオフセット法により決定される降伏曲面半径は最大で 30%程度過大に評価している可能性が考えられる.また、不連 -20 続曲面半径の最大値 β_d が小さくなっており不連続曲面が境界 曲面まで到達しないことから、実際の鋼材においては境界曲面 付近での硬化係数が従来法による値よりも小さいと考えられ る.

表1 材料パラメータ同定結果

| | | (| a) 4- | 于法 | | | |
|---------|----------------|------|-------|-------------------------------|------|-----|-------------------|
| 鋼種 | f_b/σ_y | β | ρ | eta_{dc} | ξ | к | A_{ratio}^{ave} |
| SS400 | 0.426 | 332 | 26 | 1.76 | 0.92 | 2.9 | 5.33 |
| SM490 | 0.329 | 302 | 10 | 1.31 | 0.98 | 2.3 | 4.24 |
| SM570 | 0.407 | 706 | 17 | 1.30 | 1.00 | 3.6 | 3.07 |
| SBHS500 | 0.547 | 843 | 22 | 1.26 | 0.99 | 2.9 | 4.88 |
| SBHS700 | 0.517 | 705 | 8 | 1.09 | 0.79 | 3.9 | 3.54 |
| | | (b) |)従来 | 医手法 | | | |
| 鋼種 | f_b/σ_y | β | ρ | $eta_{\scriptscriptstyle dc}$ | ξ | к | A_{ratio}^{ave} |
| SS400 | 0.441 | 259 | 13 | 1.87 | 0.68 | 2.8 | 6.23 |
| SM490 | 0.429 | 255 | 6 | 1.56 | 0.95 | 2.3 | 6.87 |
| SM570 | 0.517 | 606 | 7 | 1.49 | 0.98 | 3.1 | 11.05 |
| SBHS500 | 0.558 | 1764 | 24 | 1.34 | 0.99 | 3.4 | 9.61 |
| SBHS700 | 0.420 | 448 | 1 | 1.17 | 0.99 | 3.8 | 7.29 |



6. まとめ: 本研究では、パラメータ同定法を改良することで、三曲面モデルの精度向上を行った. その結果、従来の同定法ではやや精度が劣る高性能鋼においても精度良く実験結果が再現できることが判明した. また、従来のオフ セット法では降伏曲面半径を若干過大評価している可能性があることも判明した. ただし、本手法は数値的な最適化 であるためパラメータの持つ物理的意味が希薄になっており、今後、異なるロット間の検証が必要である.

謝辞: 本研究の一部は,一般社団法人日本鉄鋼連盟「鋼構造研究・教育助成事業(一般研究助成)」および公益財 団法人中部電気利用基礎研究振興財団による助成を受けたものである.ここに記して謝意を表する.

<u>参考文献:</u> 1) 後藤芳顯他, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.189-206, 1998. 2) 後藤芳顯他, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, pp.513-529, 2008.