

繰り返し大ひずみを受ける構造用鋼材の一軸試験と材料構成則の精緻化に関する検討

三菱重工業株式会社 正会員 ○須原正好, 名古屋工業大学 フェロー会員 後藤芳樹

1. はじめに: 損傷制御型の構造においてエネルギー吸収部材として設置される鋼製ダンパーには, 極大地震時に大きな塑性変形が繰り返し発生する. そのため, ダンパーの設計やダンパーを組み込んだ全体挙動の把握には大ひずみ領域を含めた精緻な材料構成則が必要である. しかし, ダンパーに使用される鋼種は近年になって開発され流通し始めたものであり, またダンパーが受けるような繰り返し大ひずみ下においては材料特性を把握するための実験が困難なため, その材料特性を精緻に表現する材料構成則の検討はほとんどなされていない.

そこで本研究では, まず大ひずみ領域までの一軸繰り返し載荷試験を工夫して実施した. その後, 既存の三曲面モデルをベースとして対象鋼種の材料特性を精緻に表現するよう修正し, 材料定数を同定した. ここで, 材料構成則は様々な鋼種に対して適用できることが望ましいため, ダンパーへの使用が想定されるLYP225, SN400Bの他にSM490YB, S35CNを対象鋼種として一軸繰り返し塑性挙動を大ひずみ領域まで表現できるより精緻なモデルの構築を目指した.

2. 三曲面モデルの修正: ここでは, 有効相当塑性ひずみの概念を導入し, 大ひずみ領域まで対応できる三曲面モデル¹⁾をベースに様々な鋼種の一軸挙動をより精緻に表現できるよう修正した. ここで, 有効相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^{ep}$ は相当応力がそれまでに受けた最大の相当応力 $\bar{\sigma}_{max}$ 以上となるときに増加した相当塑性ひずみの総和を表す. 以下では主に修正した点について述べる. 三曲面モデルは降伏曲面, 不連続曲面及び境界曲面を持つ. 不連続曲面は $\bar{\sigma}_{max}$ を半径として等方的に拡大し, 不連続曲面上では応力点が不連続曲面上内側にあるか外側にあるかで硬化係数 H^p が異なる値をとる(図-1 参照). 不連続曲面上の硬化係数は $\bar{\epsilon}^{ep}$ の関数として評価し, n 番目の負荷で応力点が不連続曲面に接したときの不連続面上内側での硬化係数を $H_{dci(n)}^p$, 外側での硬化係数を $H_{dco(n)}^p$ として,

$$H_{dco(n)}^p = 0 \quad (\bar{\epsilon}_{dc(n)}^{ep} - \epsilon_{yp}^0 < 0) \quad (1)$$

$$H_{dci(n)}^p = \kappa E_{yp} \quad (2)$$

$$H_{dci(n)}^p = \kappa H_{mon}^p (\bar{\epsilon}_{dc(n)}^{ep} - \epsilon_{yp}^0) \quad (\bar{\epsilon}_{dc(n)}^{ep} - \epsilon_{yp}^0 \geq 0) \quad (3)$$

$$H_{dco(n)}^p = H_{mon}^p (\bar{\epsilon}_{dc(n)}^{ep} - \epsilon_{yp}^0) \quad (4)$$

ここに, $\bar{\epsilon}_{dc(n)}^{ep}$ は n 番目の負荷で応力点が不連続曲面に接し

たときの $\bar{\epsilon}^{ep}$, $H_{mon}^p (\bar{\epsilon}_{dc(n)}^{ep} - \epsilon_{yp}^0)$ は一軸単調引張試験より得られるひずみ硬化域での硬化係数, E_{yp} , ϵ_{yp}^0 はひずみ硬化開始点での硬化係数及び $\bar{\epsilon}^{ep}$ であり, κ はこれまで定数であったが, 修正三曲面モデルでは対象鋼種に合うよう $\bar{\epsilon}^{ep}$ の関数として定数 $C_1 \sim C_3$ を用いた次式のように定義した.

$$\kappa = C_1 \exp(-C_2 \bar{\epsilon}^{ep}) + C_3 \bar{\epsilon}^{ep} + 1 \quad (5)$$

また, ひずみ硬化係数は修正三曲面モデルでは精度向上のため不連続曲面内側において次式で評価する.

$$H^p = h \left[\frac{\delta}{\delta_{in} - \delta} \right]^n \quad (\bar{\sigma} \leq \sigma_{dc(n)}) \quad (6)$$

ここで δ は降伏曲面上の応力点と境界曲面との距離であり, δ_{in} はある載荷サイクルで初期降伏したときの δ の値, h は硬化形状のパラメータである. なお, これまでは式(6)において $n=1$ とした二曲面モデルの式で評価しており, 不連続曲面外側においてはこれまで通り $n=1$ とした式を用いる. また n はやはりすべての対象鋼種に合うよう $\bar{\epsilon}^{ep}$ の関数とし定数 $D_1 \sim D_3$ を用いて次式のように定義した.

$$n = D_1 \bar{\epsilon}^{ep} \exp(-D_2 \bar{\epsilon}^{ep}) + D_3 \quad (7)$$

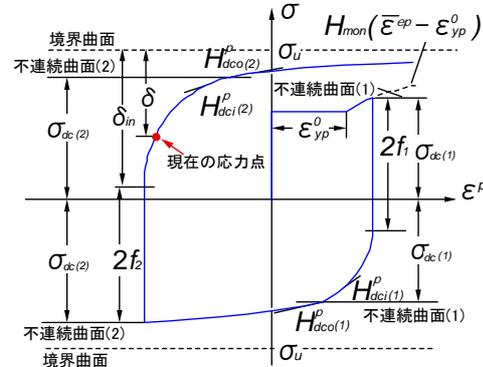


図-1 三曲面モデルの一軸挙動

3. 一軸材料試験: 以下に実施した実験の種類と目的を示す. また, 各実験の載荷パターンを図-2に示す. なお, これら実験は文献²⁾等を参考に計画した.

(1) 単調引張り試験

ヤング率, 降伏応力, E_{yp} , ϵ_{yp}^0 , H_{mon}^p 等の材料定数を得る

(2) $\bar{\epsilon}^{ep}$ 増分の小さい繰り返し載荷試験

降伏曲面半径に関わる材料定数を得る

(3) 両振り漸増型繰り返し載荷試験

不連続曲面内側の関数形, 定数(C_i , D_i)の検討

(4) 両振り漸増暫減型繰り返し載荷試験

支配パラメータを $\bar{\epsilon}^{ep}$ とした点の妥当性検証

キーワード: 繰り返し 大ひずみ 一軸試験 材料構成則

連絡先: 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学

供試体は、実験1のみ JIS4号試験片を用い、その他には FEM 解析を実施し振幅 $20\varepsilon_y$ までは座屈しないことを確認した図-3 に示す形状を用いた。なお、繰り返し载荷用供試体については端部の拘束の影響を受けないよう標点間距離を 12.7mm とした。

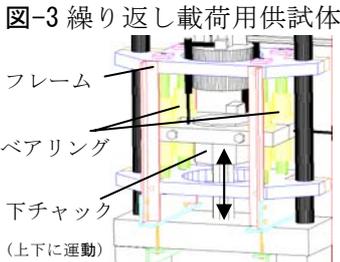
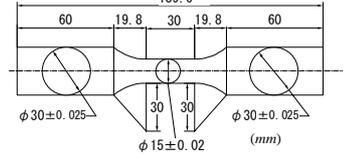


図-4 水平変位拘束治具

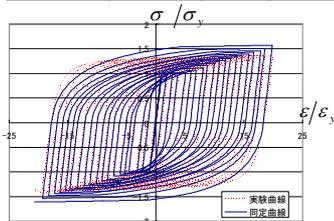
また、供試体の座屈防止及び試験機保護のため図-4 に示すような加振機軸の水平変位拘束治具を設置した。なお、試験はすべて静的と見なせるよう標点間の平均ひずみ速度を最大で $0.001/\text{s}$ に制御して実施した。

4. 同定結果：表-1 に同定した主な定数を示し、同定に用いた実験との比較例(LYP225)を図-5、図-6 に示す。

表-1 同定した主な材料定数

材料定数	E (MPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ε_{yp}^0	E_{sp} (MPa)	f_b/σ_y
LYP225	2.07E+05	243	409	0.0222	2.78E+03	0.521
SN400B	2.10E+05	272	529	0.0123	5.50E+03	0.505
SM490YB	2.01E+05	363	645	0.0110	7.51E+03	0.454
S35CN	2.07E+05	365	688	0.0132	8.82E+03	0.534

※ f_b は縮小した降伏曲面半径の最小値



(a) 既往の三曲面モデル

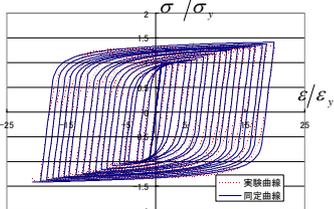
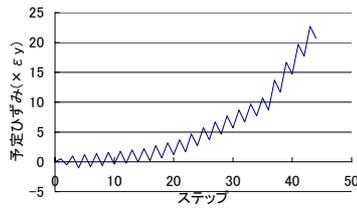


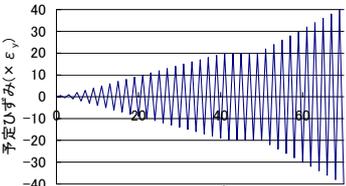
図-6 実験(3)への同定

(8)式分母はその半サイクルにおいて塑性変形によって消費されるエネルギーに相当し、分子は実験曲線とモデル曲線とで囲まれる面積にあたる。1 ケースの試験全体に対する一致度としては平均誤差面積比 A_{ratio}^{avr}

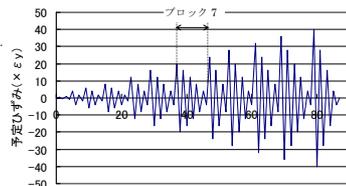
$$A_{ratio}^{avr} = \frac{\sum A_{ratio}}{2N} \quad N: \text{サイクル数} \quad (9)$$



(a) 実験(2)



(b) 実験(3)



(c) 実験(4)

図-2 実験载荷パターン

また、供試体の座屈防止及び試験機保護のため図-4 に示すような加振機軸の水平変位拘束治具を設置した。なお、試験はすべて静的と見なせるよう標点間の平均ひずみ速度を最大で $0.001/\text{s}$ に制御して実施した。

を用い、これを目的関数として材料定数を最適化した。

また、 A_{ratio} 分布は図-7 に示すようであり、特に相当塑性 図-7 実験(3)に対する A_{ratio} 分布ひずみ ε^p の大きい領域で改善効果が高いことが分かる。また κ, n を ε^{ep} の関数とした修正後モデルと各半サイクルで最適に設定した場合では A_{ratio} で 5% 以内の差であり関数形は妥当であったと考えられる。

5. モデルの検証：これまでに同定した構成則により、図-2(c) に示す実験(4)の履歴を再現し実験曲線と比較した。

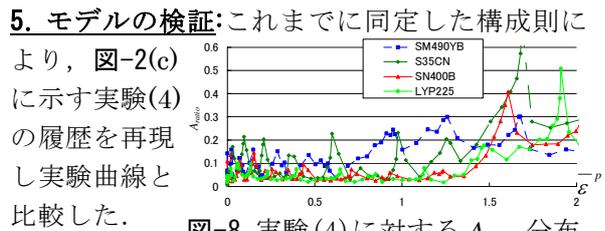
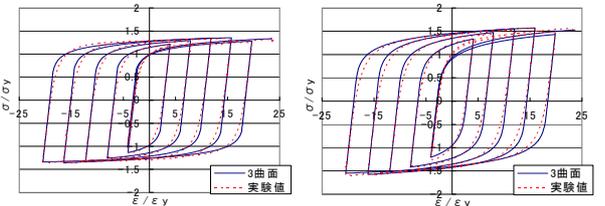
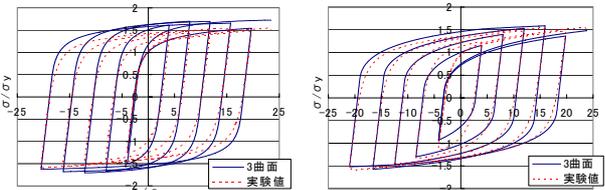


図-8 実験(4)に対する A_ratio 分布



(a) LYP225

(b) SN400B



(c) SM490YB

(d) S35CN

図-9 実験(4) block7 における実験-モデル比較
図-8 によると、すべての鋼種について ε^p が 90% 程度の領域までは A_{ratio} が 20% 程度以内となり、精度良く表現できている。ただし、SM490YB や S35CN では振幅を小さくした場合の誤差面積比が大きくなっており、これは同定時に δ_m の影響を考えていない点が原因と考えられる。

6. まとめ：本研究では、まず様々な履歴の一軸試験データを得た。また、既往の三曲面モデルに対して修正を加え LYP225, SN400B, SM490YB, S35CN の 4 鋼種について一軸試験に基づいた材料定数を同定することで様々な一軸载荷に対して ε^p で 90%, ε^{ep} で 12% 程度の領域まで A_{ratio} が 20% 以内、LYP225, SN400B に限れば ε^p で 140%, ε^{ep} で 15% 程度の領域まで A_{ratio} が 10% 以内と精度の良いモデルを構築することができた。

【参考文献】

- 1) 後藤他, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp189-206, 1998.4
- 2) 西村他, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.27-38, 1995.4