バウシinger効果を考慮したダンパー用鋼材の簡潔な履歴モデル

SIMPLE HYSTERESIS MODEL OF STEEL FOR DAMPER CONSIDERING THE BAUSCHINGER EFFECT

山田 哲^{*1}, 吉敷 祥一^{*2}
Satoshi YAMADA and Shoichi KISHIKI

Recently, steel with low yield point, such as LYP100 and LYP225, is used for damper. In this study, relationship between true stress and true strain of steel for damper is simply modeled considering the Bauschinger effect. This hysteresis model is composed of skeleton curve, Bauschinger part and unloading part. Skeleton curve corresponds to the stress-strain relationship of monotonic loading test. Bauschinger part is modeled as a function of the cumulative strain in the skeleton curve on the basis of experimental result of cyclic loading test. Though the hysteresis model is simple, it corresponds well to the experimental result. It is enough effective in order to analyze the behavior of dampers in the plastic range.

Keywords: Steel for Damper, Hysteresis Model, True Stress - True Strain Relationship, Bauschinger Effect, Energy Absorption
ダンパー用鋼材、履歴モデル、真応力度-真歪度関係、バウシinger効果、エネルギー吸収

1. 序

地震による入力エネルギーを部材の塑性歪エネルギーとして吸収させる耐震極限設計¹⁾において、ランダムな繰り返し外力を受ける部材の履歴挙動を予測し塑性変形能力の評価を行うことは、部材のエネルギー吸収能力に基づく建物の耐震性能の評価を行う上での基本となる。部材レベルにおける履歴挙動の予測と塑性変形能力の評価を行うには、部材レベルでの実験結果を蓄積するだけでなく、繰り返し応力を受ける鋼素材の履歴挙動を知っておくことも重要である。エネルギーの授受に着目した耐震極限設計の考えを発展させた柔剛混合構造²⁾や損傷制御構造³⁾では、重力を支持する主架構を強震下においても弾性範囲に留め、エネルギー吸収部材であるダンパーにより地震に抵抗することから、地震荷重下におけるダンパーの履歴挙動の把握は、建物の性能を評価する上での重要な前提となる。

任意の載荷履歴を受ける鋼素材の履歴挙動に関する研究はこれまでも数多く行われており^{4)~6)}など、構築された鋼素材の履歴則の数値モデルは発達した数値解析手法に適用されることで、鋼部材や鋼構造物の弾塑性域にわたる履歴挙動を予測するための有力なツールとなっている。精緻な数値解析を行うためには解析で必要とする精度に応じた精緻な履歴モデルが必要であるが、大局的に物理現象を理解するためには、できるだけ簡単な表現であると同時に原理に忠実なモデルを使うことが有効である。

既報⁷⁾において、構造用鋼材の軸方向繰り返し載荷実験結果に基づき、その真応力度-真歪度関係をバウシinger効果を考慮した簡潔な表現でモデル化した。この履歴モデルは、任意の載荷履歴を受

ける鋼素材の履歴曲線を、一方向載荷下における真応力度-真歪度関係と対応する骨格曲線、既に経験した応力レベルでの負荷履歴であるバウシinger部及び弾性除荷部により表現した加藤・秋山・青木・山内らの研究^{5), 6)}に基づくものであり、秋山・高橋⁸⁾による部材レベルでの履歴モデルと対応するものである。本研究においては、ダンパー用の鋼材である極低降伏点鋼 LYP100 および低降伏点鋼 LYP225 を対象に軸方向繰り返し載荷実験を行い、実験結果に基づき素材レベルでのバウシinger効果を考慮した簡潔な履歴モデルの構築を行う。また、同一の載荷履歴で行った極低降伏点鋼および低降伏点鋼の実験結果を、既報⁷⁾で行った SN400 の実験結果と比較し、鋼種による履歴挙動の違いを考察する。

2. 鋼材の軸方向繰り返し載荷実験と履歴挙動のモデル化

2.1 試験体

試験体は図-1に示す形状を有し、板厚 16mm の鋼板から圧延方向と載荷方向が一致するように切り出した。試験区間は中央平行部 200mm であり、試験区間両端の押さえ部には、試験区間の軸方向長さの変化を計測するための変位計を接続する M12 全ねじ棒が点付け溶接されている。試験区間の幅は、アクチュエーターの容量と材料の強度の関係から、LYP100 の試験体については 50mm、LYP225 の試験体については 40mm とした。また、試験区間端部の仕上げは R=0.25mm とし、試験区間の平均応力度をできるだけ一定に保つようにした。

^{*1} 東京工業大学建築物理研究センター 助教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

^{*2} 東京工業大学 大学院生・修士(工学)

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

試験体に使用した鋼材の JIS-1A 号試験片による引張試験結果を、図-2および表-1に示す。図中および表中の値は、公称応力度、公称歪度である。本実験では、LYP100 について 2 ロットの鋼材に対し 2 体ずつの 4 体、LYP225 について 2 ロットの鋼材に対し 4 体ずつの 8 体、合計 12 体の試験体について、载荷履歴をパラメーターとした実験を行った。このうち LYP100 の試験体 4 体は、極低降伏点鋼の歪速度依存性を調べるために行った実験⁹⁾において、準静的载荷の条件で载荷した試験体である。試験体一覧および各試験体に適用した载荷履歴を表-2に示す。载荷履歴は、規則的な漸増歪振幅と、ランダムな歪履歴をイメージして恣意的に作成したプログラム履歴である。L1_2_09 試験体、L2_1_04 試験体および L2_2_04 試験体に適用したプログラム履歴を図-3に示す。载荷履歴の制御には、試験区間における平均公称歪度を用いた。

2.2 実験方法

実験装置を図-4に示す。試験体の一端を反力ブロックに固定し、他端を平行移動装置を介して 500kN アクチュエーターに接続して、準静的(0.01%/sec)軸方向繰り返し载荷を行った。また、圧縮力下での試験区間における座屈を抑えるため、試験体周囲には図-5に示す面外変形拘束治具を設置した。この治具は、試験区間において強軸、弱軸ともに面外変形を拘束するものであり、試験体との間には摩擦力の発生を防ぐために一定の隙間を設け、隙間にはテフロンシートを挟んだ。圧縮力下における試験区間での体積増加についても、この隙間とテフロンシートの変形に対応させた。

試験体に作用する軸力は、アクチュエーターヘッドのロードセルで計測し、試験区間(200mm)に生じる長さの変化は、LYP100 の試験体については± 20mm 差動トランス型変位計により、LYP225 の試験体についてはバネ式 50mm 変位計により計測した。

図-1 試験体形状

図-2 素材試験結果(公称応力度-公称歪度関係)

表-1 素材試験結果一覧

鋼材	降伏強さ (MPa)	引張強さ (MPa)	降伏比	破断伸び (%)
LYP100 (1)	83.6 ^{#1}	249	0.34	49.5
LYP100 (2)	80.4 ^{#1}	237	0.34	44.2
LYP225 (1)	224 ^{#2}	294	0.76	40.8
LYP225 (2)	235 ^{#2}	291	0.81	41.6

#1: 0.2%オフセット耐力

#2: 上降伏点

表-2 試験体および载荷履歴

試験体名	鋼材	歪履歴
L1_1_01	LYP100 (1)	歪振幅で2%, 3%, 4%の漸増歪振幅 各振幅で3回繰り返し载荷
L1_1_06	LYP100 (1)	歪振幅で2%の定歪振幅载荷
L1_2_01	LYP100 (2)	歪振幅で2%, 3%, 4%の漸増歪振幅 各振幅で3回繰り返し载荷
L1_2_09	LYP100 (2)	プログラム (図-3参照)
L2_1_01	LYP225 (1)	歪振幅で0.5%ごとの漸増歪振幅 各振幅で2回繰り返し载荷
L2_1_02	LYP225 (1)	歪振幅で0.5%ごとの漸増歪片振幅 各振幅で1回载荷
L2_1_03	LYP225 (1)	歪振幅で2%, 3%, 4%の漸増歪振幅 各振幅で3回繰り返し载荷
L2_1_04	LYP225 (1)	プログラム (図-3参照)
L2_2_01	LYP225 (2)	歪振幅で0.5%ごとの漸増歪振幅 各振幅で2回繰り返し载荷
L2_2_02	LYP225 (2)	歪振幅で0.5%ごとの漸増歪片振幅 各振幅で1回载荷
L2_2_03	LYP225 (2)	歪振幅で2%, 3%, 4%の漸増歪振幅 各振幅で3回繰り返し载荷
L2_2_04	LYP225 (2)	プログラム (図-3参照)

図-3 プログラム履歴

図-4 実験装置

図-5 試験体の面外変形拘束

2.3 実験結果

2.3.1 真応力度-真歪度関係

試験体に作用する軸力を原断面積で、試験区間に生じる長さの変化を元長さで除すことで、公称応力度-公称歪度関係(σ - ϵ 関係)を得た。符号は引張側を正とした。これを、体積一定の仮定のもとで、式(1),(2)により真応力度-真歪度関係(σ - ϵ 関係)に置換した。

$$\sigma = (1 + \epsilon) \cdot \sigma_0 \quad (1)$$

$$\epsilon = \ln(1 + \epsilon_0) \quad (2)$$

2.3.2 真応力度-真歪度関係の分解

履歴モデルの構築を行うにあたり、まず真応力度-真歪度関係を、図-6に示すように骨格曲線、バウシinger部、弾性除荷部に分解した。図-6中、 E は弾性剛性、 $\Delta\epsilon_s$ は各サイクルでの骨格曲線における塑性歪の増分、 $\Delta\epsilon_B$ は各サイクルでのバウシinger部における塑性歪の増分である。骨格曲線は、圧縮・引張それぞれの領域において、初めて達する応力レベルにおける真応力度-真歪度関係の増分をつなぎ合わせたものである。ただし、素材試験において上昇伏点に達した後応力の変動を伴う長い降伏棚が観察された LYP225 については、初期降伏後、応力度の絶対値が正側について再び初期降伏応力度を超えるまで、負側については初めて初期降伏応力度を超えるまでは、素材試験結果における降伏棚の最小応力度を越えた部分を骨格曲線(降伏棚)と見なした。

2.4 骨格曲線

既往の研究^{5),9)など}において、繰り返し载荷を受けた鋼材の真応力度-真歪度関係における骨格曲線は、一方向载荷試験で得られた真応力度-真歪度関係と良い対応を示すことが知られている。また、低降伏点鋼・極低降伏点鋼においても、この関係が成り立つことは報告されている¹⁰⁾。本実験で用いた各試験体の真応力度-真歪度関係から抽出した骨格曲線を、真応力度-真歪度関係に置換した素材

試験結果と比較し、図-7に示す。LYP225 では、素材試験結果において上昇伏点に達した後急激に耐力が低下しているのに対し、繰返し载荷実験から得られた骨格曲線では降伏後さほど耐力が低下しておらず、降伏棚近傍における対応はあまり良くないが、全体的に見ればいずれの鋼材も骨格曲線は一方向载荷試験である素材試験の結果と概ね対応している。本研究では、骨格曲線は素材試験結果で代表するものとして、バウシinger部のみをモデル化する。

2.5 バウシinger部のモデル化

履歴曲線中に現れるバウシinger部の形状については、その段階までに鋼材が受けた履歴の影響を受けることが報告されている^{5),9)など}。本研究では、ダンパー用鋼材の真応力度-真歪度関係におけるバウシinger部を、文献⁸⁾における鋼部材の履歴モデル同様、バイリニア型の簡潔なモデルで表現することを試みた。バイリニア型の履歴モデルを規定する変数のうち、骨格復帰点における応力度 σ_{Bs} は引張側・圧縮側それぞれについての前サイクルまでに経験した最大応力度であり、立ち上がり剛性は弾性除荷部との連続性から弾性剛性とした。従って、実験結果に基づくバイリニア型のモデル化に必要な変数は、バウシinger部における塑性歪の進展 $\Delta\epsilon_B$ と、剛性変化点における応力度の骨格復帰点における応力度 σ_{Bs} に対する比率 α_B である。

このうち、バウシinger部における塑性歪の進展 $\Delta\epsilon_B$ について、実験で得られた各サイクルでの $\Delta\epsilon_B$ と、そこに至るまでの骨格曲線での累積歪 $\sum\Delta\epsilon_s$ の関係で、LYP100 について図-8(1)に、LYP225 について図-8(2)に示す。両者の間にはややばらつきは見られるものの、全体的に見れば LYP100 については式(3)で、LYP225 については式(4)で表される線形関係が概ね成り立っている。なお、LYP225 においては、载荷初期に比較的大きな歪振幅(1%以上)を与えた場合にバウシinger部における歪の進展が小さくなっている。

図-6 履歴曲線の分解

(1) LYP100(1)

(2) LYP100(2)

(3) LYP225(1)

(4) LYP225(2)

図-7 骨格曲線の対応

LYP100 について

$$\Delta \varepsilon_B = 0.125 \sum \Delta \varepsilon_s \quad (3)$$

LYP225 について

$$\Delta \varepsilon_B = 0.2 \sum \Delta \varepsilon_s \quad (4)$$

またバウシinger部の剛性変化点における応力度の骨格復帰点における応力度 σ_{BS} に対する比率 α_B については、図-9に示すように、骨格復帰点までにバイリニア型の履歴モデルで吸収する歪エネルギーと、実験結果においてバウシinger部で吸収した歪エネルギーが一致するように求めた。実験結果から求めた α_B の値を、 $\Delta \varepsilon_B$ との関係で、LYP100 について図-10(1)に、LYP225 について図-10(2)に示す。 α_B と $\Delta \varepsilon_B$ の間には、LYP100 では $\Delta \varepsilon_B$ の小さな領域において右肩上がり傾向が見られるが、いずれの鋼材にも共通の値として、式(5)で表した。

$$\alpha_B = 0.85 \quad (5)$$

2.6 履歴モデルと実験結果の比較

以上のように簡潔にモデル化したバウシinger部の履歴モデルを用いて、繰り返し軸応力を受けるダンパー用鋼材の履歴挙動のモデル化を行った。この履歴モデルは、骨格曲線、バウシinger部、弾性除荷部により構成され、バウシinger部の形状を規定する係数である $\Delta \varepsilon_B$ と α_B の値を除けば、文献 8)で提案された鋼部材の履歴モデルと基本的に同じものである。骨格曲線については、一般に履歴曲線から抽出された骨格曲線が単調載荷時の真応力度-真歪度関係

と良い対応を示す^{5), 6)}ことが知られていることから、真応力度-真歪度関係に置換した素材引張試験結果を用い、弾性除荷部については弾性剛性を、バウシinger部については前節で構築したモデルを用いる。ただし、初期降伏以降最初に逆側の応力領域に移る部分は、バウシinger効果により比例限が低下するバウシinger部としての挙動を示すが、正負それぞれの領域において、初めて達する荷重レベルにおける履歴曲線の増分をつなぎ合わせたものを骨格曲線とする骨格曲線の定義^{5), 6)}では骨格曲線に属すること、この部分を骨格曲線として作図した場合に単調載荷時の真応力度-真歪度関係と良い対応を示す^{5), 6)}ことから、骨格曲線と定義した上で、図-11に示すように、骨格復帰点に相当する $\Delta \varepsilon_B$ の塑性歪が生じる点に至るまでの区間をバウシinger部のモデルで置き換えた。

図-9 バウシinger部における剛性変化点

(1) LYP100

(2) LYP225

図-8 バウシinger部における塑性歪の進展 $\Delta \varepsilon_B$ と骨格曲線での累積歪 $\sum \Delta \varepsilon_s$ の関係

(1) LYP100

(2) LYP225

図-10 α_B と $\Delta \varepsilon_B$ の関係

本履歴モデルについて、実験と同じ歪履歴を与えた結果を実験結果と比較し、図-12に示す。また、各半サイクルでのピーク歪到達時の骨格曲線における累積歪と履歴吸収歪エネルギーについて、実験結果と履歴モデルを比較し、それぞれ図-13、図-14に示す。

まず履歴曲線の形状であるが、LYP100 については、実験結果と履歴モデルは良い対応を示している。一方 LYP225 については、繰返し載荷実験では素材試験結果で見られたような降伏点に達した後急激な耐力の低下が見られなかったことから、累積歪の小さな領域においては実験結果に対して履歴モデルの応力が低くなる傾向が見られる。特にランダムな歪履歴を与えた L2_1_04 ならびに L2_2_04 については、与えた累積の歪量が他の試験体と比べて小さいことから、全体的に対応が悪い。しかしながら、全試験体について累積歪の大きな領域まで見れば、実験結果と履歴モデルは概ね対応していると言えよう。また、鋼材の指標となる骨格曲線における累積歪と、履歴吸収歪エネルギーの履歴においては、両鋼種とも実

験結果と履歴モデルは良い対応を示している。本履歴モデルは簡潔なものではあるが、塑性域で繰返し荷重を受ける履歴型ダンパーの挙動を評価する上では十分有効であろう。

図-11 初期降伏後の挙動

図-12 実験結果と履歴モデルの比較

(1) LYP100

(1) LYP225

図-13 骨格曲線における累積歪の比較

(1) LYP100

(1) LYP225

図-14 履歴吸収歪エネルギーの比較

3. 鋼種の違いによる履歴挙動の比較

本研究では、ダンパー用の鋼材である極低降伏点鋼 LYP100 および低降伏点鋼 LYP225 について軸方向繰り返し載荷実験を行い、実験結果に基づき真応力度-真歪度関係におけるバウシinger部をバイリニア型にモデル化した。ここでは LYP100、LYP225 だけでなく、既報⁷⁾で扱った SN400 も併せて比較し、一般に履歴型ダンパーに用いられている鋼材の、鋼種による履歴挙動の違いを考察する。

まず、バウシinger部における塑性歪の進展 $\Delta \varepsilon_B$ であるが、いずれの鋼種においてもそこに至るまでの骨格曲線での累積歪 $\sum \Delta \varepsilon_s$ との間に線形関係が概ね成り立っており、その関係は

$$\text{LYP100 について } \Delta \varepsilon_B = 0.125 \sum \Delta \varepsilon_s$$

$$\text{LYP225 について } \Delta \varepsilon_B = 0.2 \sum \Delta \varepsilon_s$$

$$\text{SN400 について } \Delta \varepsilon_B = 0.33 \sum \Delta \varepsilon_s$$

となっている。骨格曲線での累積歪 $\sum \Delta \varepsilon_s$ に掛かる係数が小さいほど、繰り返し荷重下における累積歪においてバウシinger部の占める割合が小さくなり、骨格曲線の占める割合が大きくなる。骨格曲線における累積歪は鋼材の損傷の指標であり、累積歪に占める骨格曲線の割合が大きいということはそれだけ損傷が溜まりやすい、換言すると繰り返し荷重を受けた場合に、破断限界に近づきやすい性質を有していると言える。 $\sum \Delta \varepsilon_s$ に掛かる係数は、LYP100 < LYP225 < SN400 となっている。今回の実験および既報⁷⁾での素材試験において、破断伸びは LYP100 > LYP225 > SN400 (JIS-1A 号試験片でそれぞれ 45%程度、40%程度、35%程度)であったが、載荷

履歴によっては破断に至るまでの累積歪が逆転する可能性がある。

一方、バイリニア型にモデル化したバウシinger部の、剛性変化点における応力度の骨格復帰点における応力度 σ_{Bs} に対する比率 a_B であるが、その値が大きいほどバウシinger部での軟化の程度が低く、エネルギー吸収のロスが小さくなることを意味する。 a_B の値は、いずれの鋼種においてもほぼ一定値となっているおり、SN400 で 0.67 であるのに対して、LYP100 および LYP225 では 0.85 と高くなっている。バウシinger部における塑性歪の進展 $\Delta \varepsilon_B$ の骨格曲線での累積歪 $\sum \Delta \varepsilon_s$ に対する比率が小さいことと併せて、低降伏点鋼ならびに極低降伏点鋼は、一般の構造用鋼材に比べてバウシinger部におけるエネルギー吸収のロスが小さい鋼材であると言える。

既往の研究¹⁰⁾においては、低降伏点鋼ならびに極低降伏点鋼は SS400 材に比べ非常に大きな破断延性を有するにも関わらず、どちらかという降伏点の低い材種において疲労寿命が短くなる傾向があることが報告されている。バウシinger部における塑性歪の進展 $\Delta \varepsilon_B$ のそこに至るまでの骨格曲線での累積歪 $\sum \Delta \varepsilon_s$ に対する比率は、この知見を裏付ける結果となっている。また、筆者らが以前行った座屈拘束ブレースを組み込んだ実大部分骨組の振動台実験¹²⁾においても、SN400 を芯材とした座屈拘束ブレースを組み込んだ骨組の方が、LYP100 を芯材とした平行部長さの等しい座屈拘束ブレースを組み込んだ骨組に比べ、座屈拘束ブレース芯材の破断に至るまでに、より多くの加振に耐えた。この実験では、破断に至るまでの芯材の累積歪は、SN400 を用いた座屈拘束ブレースでは LYP100 を用いた座屈拘束ブレースの 1.5 倍以上¹³⁾であった。もっとも、いず

図-15 同じ載荷履歴で行った鋼種の異なる試験体の実験結果の比較

れの試験体についても、Level2 相当を想定して設定した入力をさらに上回る入力を複数回行った後に破断に至ったものであり、座屈拘束ブレースの芯材としての変形能力には全く問題は無い。むしろ、座屈拘束ブレースが実際に機能する程度の歪レベルにおいては、耐力が低いことで小さな歪レベルからエネルギー吸収能力を発揮するだけでなく、除荷時に解放される弾性歪エネルギーが小さいこと、そしてバウシinger部の占める割合が小さいことで効率の良いエネルギー吸収性能が期待できることから、安定した塑性歪エネルギーの吸収が求められるダンパー用の鋼材としては LYP100 の方が SN400 より適していると考えられる。

ここで、本章で比較検討する 3 つの鋼種(LYP100、LYP225 および SN400)について、同じ載荷履歴で行った実験の結果(L1_1_01, L2_1_03, SN_10⁹⁾)を、図-15に示す。(1)~(3)がそれぞれの試験体の履歴曲線であり、(4)は累積歪と骨格曲線における累積歪の関係、(5)は累積歪と履歴吸収歪エネルギーの関係である。

履歴曲線の形状であるが、バウシinger部のモデル化の過程で明らかになったように、LYP100 と LYP225 ではバウシinger部における軟化の程度は低く、完全弾塑性型に近い形状となっているのに対し、SN400 ではバイリニア型の形状となっている。また、降伏点、降伏比ともに低い LYP100 では、載荷初期と履歴曲線が安定してから以降では、耐力に大きな隔たりが見られる。一方、降伏点の高い SN400 では、塑性化に伴うエネルギー吸収量も大きい。今回比較した 3 つの鋼種の中で、載荷初期から耐力、履歴曲線の形状とも安定しているのは、降伏比が高くバウシinger部における軟化の程度も低い LYP225 ということになる。

また、骨格曲線における累積歪については、履歴モデルにおける係数からも明らかのように、LYP100 がもっとも大きく、次いで LYP225、そして SN400 の順となった。これは、既往の研究^{11),12)}で報告されている、繰り返し荷重を受ける場合に大きな破断延性を有する降伏点の低い鋼材の方が早期に破断することを裏付けるものである。

一方、履歴吸収歪エネルギーについては、耐力が高いこともあり、SN400 が最も大きく、次いで LYP225、最小は LYP100 と耐力の順となった。いずれの鋼種についても、載荷初期から載荷終了に至るまで、安定したエネルギー吸収能力を発揮していることがわかる。

4. 結論

履歴型ダンパー用の鋼材として多用される極低降伏点鋼 LYP100 および低降伏点鋼 LYP225 について、載荷履歴をパラメーターとした軸方向繰り返し載荷実験を行い、真応力度-真歪度関係を、バウシinger効果を考慮した簡潔な表現でモデル化した。この履歴モデルは、既往の研究⁹⁾で提案された部材レベルにおける簡潔な履歴モデルを、前報⁷⁾において構造用鋼材の真応力度-真歪度関係に応用したものであり、極低降伏点鋼および低降伏点鋼に適用するにあたって、鋼材特有の係数を実験結果から求めたものである。実験と同じ歪履歴を与えた履歴モデルを実験結果と比較したところ、両者は損傷の指標となる骨格曲線における累積歪や履歴吸収歪エネルギーを含め、概ね良い対応を示した。本履歴モデルは簡潔なものではあるが、塑性域で繰り返し荷重を受ける履歴型ダンパーの挙動を評価する上では十分有効であろう。

また、LYP100、LYP225 だけでなく SN400 も併せて、一般にダ

ンパーに用いられている鋼材について、鋼種による履歴挙動の違いを比較したところ、バウシinger部における塑性歪の進展 $\Delta\epsilon_B$ のそこに至るまでの骨格曲線での累積歪 $\sum\Delta\epsilon_s$ に対する比率が、 $LYP100 < LYP225 < SN400$ となっていた。この比率が小さいほど、繰り返し荷重下における累積歪において、バウシinger部の占める割合が小さく、鋼材の損傷の指標である骨格曲線の占める割合が大きくなる。即ち、今回比較した3つの鋼種の中では、降伏点が高い鋼材ほど破断限界に近づきやすい性質を有していることが履歴モデルの特性の中で明らかとなった。これは、既往の研究で報告されている実験結果^{11), 12)}を裏付けるものである。もっとも、履歴型ダンパーは鋼材の破断限界に比べかなり小さな歪レベルで用いられており、破断限界に至るまでの変形能力はほとんど問題にはならない。破断が問題とならないとすれば、耐力が低いことで除荷時に解放される弾性歪エネルギーが小さいだけでなく、バウシinger部における塑性歪みの進展が小さくかつバウシinger部における剛性変化点の応力が高いことから、バウシinger部におけるエネルギー吸収のロスが小さく効率の良いエネルギー吸収性能が期待できる低降伏点鋼 LYP225 や極低降伏点鋼 LYP100 の方が、ダンパー用の鋼材として適した性質を持っていると考えられる。さらに、降伏点・降伏比とともに低い極低降伏点鋼 LYP100 では、載荷初期と履歴曲線が安定してから以降では耐力に大きな隔たりが見られるが、降伏比が高くバウシinger部における軟化の程度も低い低降伏点鋼 LYP225 は載荷初期から耐力、履歴曲線の形状とも安定しており、今回比較した鋼材(LYP100, LYP225, SN400)の中では、安定したエネルギー吸収が求められるダンパー用の鋼材としては最も適していると言える。

謝辞

本研究で用いた試験体に用いた鋼材は、新日本製鐵(株) 建築事業部からご提供いただいた。LYP100 の実験は、元東京工業大学大学院 山小路夫(現新日本製鐵)、同 竹内百合(現構造計画研究所)、同 今枝知子(現国土交通省)の各氏によって行われたものである。また、本論文の作成にあたっては、東京工業大学大学院 鄭 景殊氏に作業を手伝っていただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 秋山 宏: 建築物の耐震極限設計 第2版, 東京大学出版会, 1987
- 2) 和田 章, 岩田 衛, 清水敬三, 安部重孝, 川合廣樹: 建築物の損傷制御設計, 丸善, 1998
- 3) 小野徹郎, 上之郷貴重, 吉田文久, 岩田 衛, 林 賢一: 金属系素材の素材特性及び履歴挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 498 号, pp.137-143, 1997.8
- 4) 田中良仁, 水野英二, 瀧 赤, 宇佐見勉: 降伏棚を有する鋼材の繰り返し弾塑性モデル - 二曲面塑性モデルの開発 -, 土木学会 構造工学論文集 A, Vol.37A, pp.1-14, 1991
- 5) 加藤 勉, 青木博文, 山内泰之: 引張・圧縮繰返し荷重を受ける鋼素材の挙動に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.803-804, 1970.9
- 6) 加藤 勉, 秋山 宏, 山内泰之: 鋼材の応力-ひずみ履歴曲線に関する実験則, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.937-938, 1973.10
- 7) 山田 哲, 今枝知子, 岡田 健: バウシinger効果を考慮した構造用鋼材の簡潔な履歴モデル, 日本建築学会構造系論文集 第 559 号, pp.225-232, 2002.9
- 8) 秋山 宏, 高橋 誠: 鋼構造剛接骨組の耐震性に及ぼすバウシinger効果の影響, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 418 号, pp.49-57, 1990.12
- 9) 山田 哲, 山小路夫, 竹内百合, 竹内 徹, 和田 章: 動的繰返し載荷実験に基づくダンパー用鋼材の履歴特性の評価 速度依存性を考慮したダンパー用鋼材の履歴特性に関する研究 その1, 日本建築学会構造系論文集 第 553 号, pp.121-128, 2002.3
- 10) 佐伯英一郎, 杉沢 充, 山口種美, 望月晴雄, 和田 章: 低降伏点鋼のヒステリシス及びヒステリシスエネルギー, 日本建築学会構造系論文集 第 473 号, pp.159-168, 1995.7
- 11) 佐伯英一郎, 杉沢 充, 山口種美, 望月晴雄, 和田 章: 低降伏点鋼の低サイクル疲労特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第 472 号, pp.139-147, 1995.6
- 12) 山小路夫, 山田 哲, 松本由香, 谷川敬祐, 小野森司, 竹内 徹, 小川信行, 秋山 宏: 座屈拘束ブレースを有する損傷制御構造部分骨組の実大振動台実験, 日本建築学会構造系論文集 第 558 号, pp.189-196, 2002.8
- 13) 山小路夫: 座屈拘束ブレースを有する鋼構造骨組の実大振動台実験, 東京工業大学博士論文, 2002.6

(2003年10月30日原稿受理, 2004年4月7日採用決定)