

## 動的繰り返し載荷実験結果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

HYSTERESIS CHARACTERISTICS OF STEEL MATERIAL FOR DAMPERS  
BASED ON DYNAMIC AND CYCLIC LOADING TESTSExperimental study on cyclic behavior of steel material for  
dampers considering a strain rate dependence Part 1山田 哲\*<sup>1</sup>, 山口路夫\*<sup>2</sup>, 竹内百合\*<sup>2</sup>, 竹内 徹\*<sup>3</sup>, 和田 章\*<sup>4</sup>

Satoshi YAMADA, Michio YAMAGUCHI, Yuri TAKEUCHI,

Toru TAKEUCHI and Akira WADA

In this paper, the strain rate dependency of low yield strength steel is discussed. Concerning seismic members, the hysteretic steel dampers are generally the most used. Low yield strength steel has been developed and used as yielding steel core of buckling resisting braces. One well-known feature of the low yield strength steel is the strain rate dependency, however, only few studies about their dependency were published. In this study, the dynamic behavior of a low yield strength steel is divided into a component depending on displacement between a component depending on strain rate. Through the dynamic and hysteretic loading test, each component is evaluated. At last, hysteresis characteristic considering strain rate dependence is modeled.

**Keyword:** low yield strength steel, dynamic behavior, hysteresis, strain rate, characteristic model

極低降伏点鋼 動的挙動 繰り返し履歴 歪み速度 履歴モデル

## 1 序

近年、建築構造物の耐震、耐風を目的とした制振構造の制振部材として、多種多様なダンパーの開発が行われている。それらのうち一般的なものとして、鋼材の塑性変形によってエネルギーを吸収する履歴型ダンパーがあり、ダンパー用鋼材として「建築構造用圧延鋼材 (SN材)」や「低降伏点鋼 ( $\sigma_y = 205 \sim 245 \text{ N/mm}^2$  程度)」、または「極低降伏点鋼 ( $\sigma_y = 80 \sim 120 \text{ N/mm}^2$ , LYP100と記述)」などが用いられている。極低降伏点鋼は他の鋼材と比較して、降伏点が低いため地震時に小さな変形からエネルギー吸収を期待できる反面、強風においても塑性化が生じる可能性があることが指摘されている<sup>1)</sup>など。そのため、極低降伏点鋼については、低サイクル疲労特性に関する多くの研究<sup>12)</sup>が行われている。佐伯ら<sup>2) 3)</sup>は、低サイクル疲労特性・破壊に到るまでの履歴曲線の特性を、歪み速度・歪みレベルの観点から明らかにしている。小野ら<sup>4) 5)</sup>は、性質の異なる種々の素材を相対的・総合的に扱う研究の中で極低降伏点鋼を扱い、素材特性値を用いて履歴挙動を表す構成式を示している。また、多くの研究<sup>6) 7)</sup>などで極低降伏点鋼が歪み速度に依存した性質を持つことが指摘されているものの、それらの研究の多くは、一方向引張試験に限定され、最大応力の上昇は歪み速度 50%/sec で 15%程度であることが報告されている<sup>7)</sup>。また、繰り返し履歴を与えた場合においては、限られた歪み速度の条件下での研究報告に留まっており、繰り返し荷重下における歪み速度と応力に関する定性的、定量的評価は未だなされていない。

鋼材について行われた実験の成果は、その特徴を反映した履歴モデル

として数値解析等に用いることとなる。そのため、鋼材の履歴モデルに関しては多くの研究<sup>8) 9)</sup>などがある。しかし、鋼材の持つ動的特性までを反映した履歴モデル<sup>9) ~ 11)</sup>の提案は少ない。谷村ら<sup>10) 11)</sup>は、 $10^3 \text{ s}^{-1}$  (10%/sec)までの高歪み速度域を対象とした高速引張試験を行い、鋼材の動的特性を反映した構成式を提案している。また、小野ら<sup>5)</sup>は歪み速度と温度の変化による履歴特性の変化を考慮し、R指標という評価基準を設け、定式化を行っている。しかしながら、一般的な鋼材の履歴モデルにおいても、その対応範囲は単調載荷試験に限られている。

現在、極低降伏点鋼はダンパー用鋼材として一般的に用いられているが、それらの構造物の耐震性能を正確に評価するためには、歪み速度と繰り返し履歴の影響に基づく耐力上昇を考慮した履歴モデルの構築が必要不可欠であるといえる。

本研究では、数値解析に容易に用いることが出来る歪み速度の影響を考慮した履歴モデルの構築を念頭に置き、極低降伏点鋼の持つ性質を、変位に依存する部分と速度に依存する部分に分離する。変位に依存する部分に比べ、研究成果の少ない極低降伏点鋼の速度に依存する性質に焦点をおいた要素実験を行い、歪み速度の影響による応力の上昇を定量的に評価する。そして、得られた結果を基に、動的な条件下における応力上昇のモデル化を行う。提案するモデルは、歪み速度の影響を受け上昇した応力を準静的実験での応力または静的な履歴モデルに乗じる倍率として表現するものである。従って、静的な荷重条件下における履歴モデルにその倍率を乗じることにより、歪み速度の影響を考慮した履歴モデルとなる。

\*<sup>1</sup> 東京工業大学建築物理研究センター 助教授・博士(工学)\*<sup>2</sup> 東京工業大学 大学院生\*<sup>3</sup> 新日本製鐵建築事業部 博士(工学)\*<sup>4</sup> 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

Building Construction Division, Nippon Steel Corporation, Dr. Eng.

Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

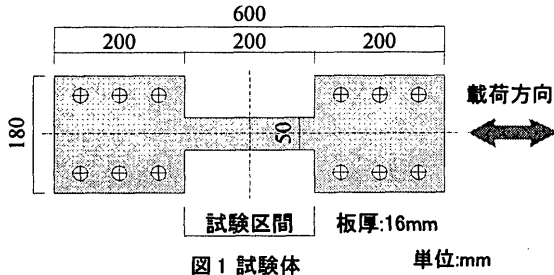


図1 試験体

表1 鋼材の機械的性質

試験体	降伏点 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	破断伸び %	降伏比 %
シリーズ				
LYP1	*83	249	49.5	0.3
LYP2	*80	237	44.2	0.3

\*0.2%オフセット耐力

表2 荷重一覧

試験体名	試験体名	入力波	歪み速度 %/sec
LYP1_01	LYP2_01	三角波	0.01
LYP1_02	LYP2_02	三角波	1.00
LYP1_03	LYP2_03	三角波	10.0
LYP1_04	LYP2_04	三角波	20.0
-	LYP2_05	三角波	5.0
-	LYP2_06	三角波	15.0
-	LYP2_07	三角波	30.0
LYP1_05	-	サイン波	-
LYP1_06	-	三角波	0.01
-	LYP2_08	注1合成波	-
-	LYP2_09	三角波	0.01

注1: 2種類のサイン波を合成

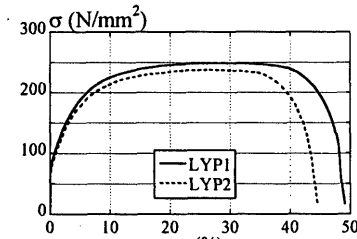


図2 応力度 - 歪度関係

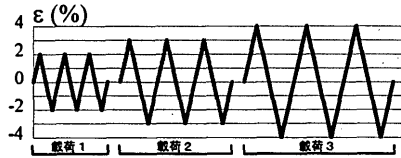


図5 荷重履歴

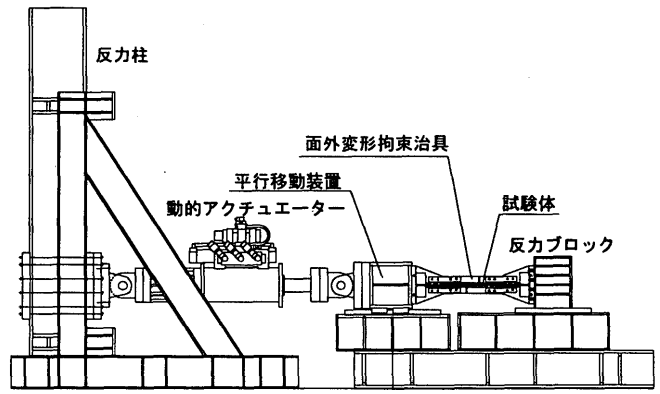


図3 実験装置全体

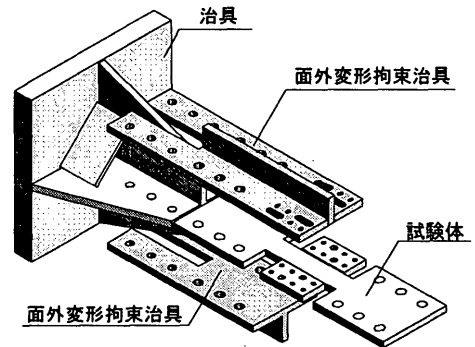


図4 試験区間の座屈拘束

2 要素を用いた軸方向動的繰り返し荷重試験

座屈拘束ブレース芯材をモデル化した試験体を用い、歪み速度をパラメータとした要素実験を行った。変位履歴を揃えて行った歪み速度0.01%/secの準静的実験と動的実験の結果を比較することにより、歪み速度と応力の上昇の関係を解明する。

2.1 試験体

図1に座屈拘束ブレース芯材をモデル化した試験体を示す。鋼材には極低降伏点鋼を用い、異なる2種類のロットから試験体名称LYP1、LYP2の2シリーズ、計15体の試験体を製作した。試験体の寸法は、板厚を16mmとし、試験区間の幅を50mm、長さを200mmとした。試験区間の両脇に、試験区間における軸方向変形を計測するための変位計を接続するための全ネジ棒を点付け溶接し、ネジ棒間の変形を制御変位とした。試験区間端部には1mm程度のRを設け、加工時のノッチによる亀裂の発生を防いでいる。また、試験区間の局所的な応力は一定とはならないが、Rを小さく設定することにより、試験区間の平均応力をできるだけ一定に保つようにした。試験体に用いた2種類のロットの鋼材について、JIS1A号引張試験片を用い、素材試験を行った。応力度 - 歪度関係を図2に示し、素材試験結果を表1に示す。

2.2 実験装置

図3に実験装置全体を示す。試験体の一端を反力ブロックに固定し、もう一端を平行移動装置を介して動的アクチュエーターに取り付けた。荷重は図1中に示す軸方向荷重とし、引張を正、圧縮を負として表現する。試験体の荷重は、ジャッキヘッドに取り付けられたロードセルの計測値を用い、変位は、試験区間両側に取り付けた2本の変位計の計測値を平均した値を用いた。試験体の試験区間での座屈を防ぐために設置した面外変形拘束治具を図4に示す。この治具は、試験体の試験区間を強軸、弱軸共に拘束する。試験体の試験区間と治具の間には一定の隙間を設け、テフ

ロンシートを貼付し、試験体変形時の摩擦力の低減をはかった。また、圧縮応力下での体積増に対しては、一定に設けたクリアランスとテフロンシートの変形により対応させた。

2.3 荷重履歴

歪み速度をパラメータとした荷重一覧を表2に示し、荷重の基本パターンを図5に示す。荷重には、歪み速度が一定となる三角波を用い、歪み速度をパラメーターと設定したもので、各振幅(2%, 3%, 4%)共に3サイクルずつ行い、試験体が破断に至るまで繰り返し荷重を行った。歪み速度0.01%/sec 準静的実験結果と他の動的実験結果を比較することにより、歪み速度が応力に与える影響を考察する。試験体LYP1\_01~04、LYP2\_01~07については、上記の三角波による荷重を行った。また、LYP1\_05では、1サイクルの中で速度の変化するサイン波を用いた荷重行い、LYP2\_08では、周波数の異なる2種類のサイン波を重ね合わせた入力波を作成し、荷重を行った。それぞれ、歪み速度をパラメータとし、LYP1\_05、LYP2\_09の準静的実験結果と比較する。

3 実験結果

3.1 データ処理

本実験では、試験体の荷重履歴として、歪み速度が一定となる三角波を用いているが、荷重が高速かつ繰り返しであるため、厳密に歪み速度を一定に保つことは、非常に困難である。そのため、計測された変位記録から、各瞬間の歪み速度を求め、各瞬間の歪み速度と応力の上昇の関係を評価する。計測データは1次処理として移動平均処理を行った。また、実験結果は、体積一定の仮定に基づき、式(1)、式(2)から得られる真応力度( $\sigma$ : 以下、応力と記す)、真歪み度( $\epsilon$ : 以下、歪みと記す)を用いて表す。

$$\sigma = n \sigma \cdot (1 + n \epsilon) \quad \dots (1)$$

$$\epsilon = \ln(1 + n \epsilon) \quad \dots (2)$$

$n \sigma$ : 公称応力、 $n \epsilon$ : 公称歪み

遅い ← 歪み速度 → 速い

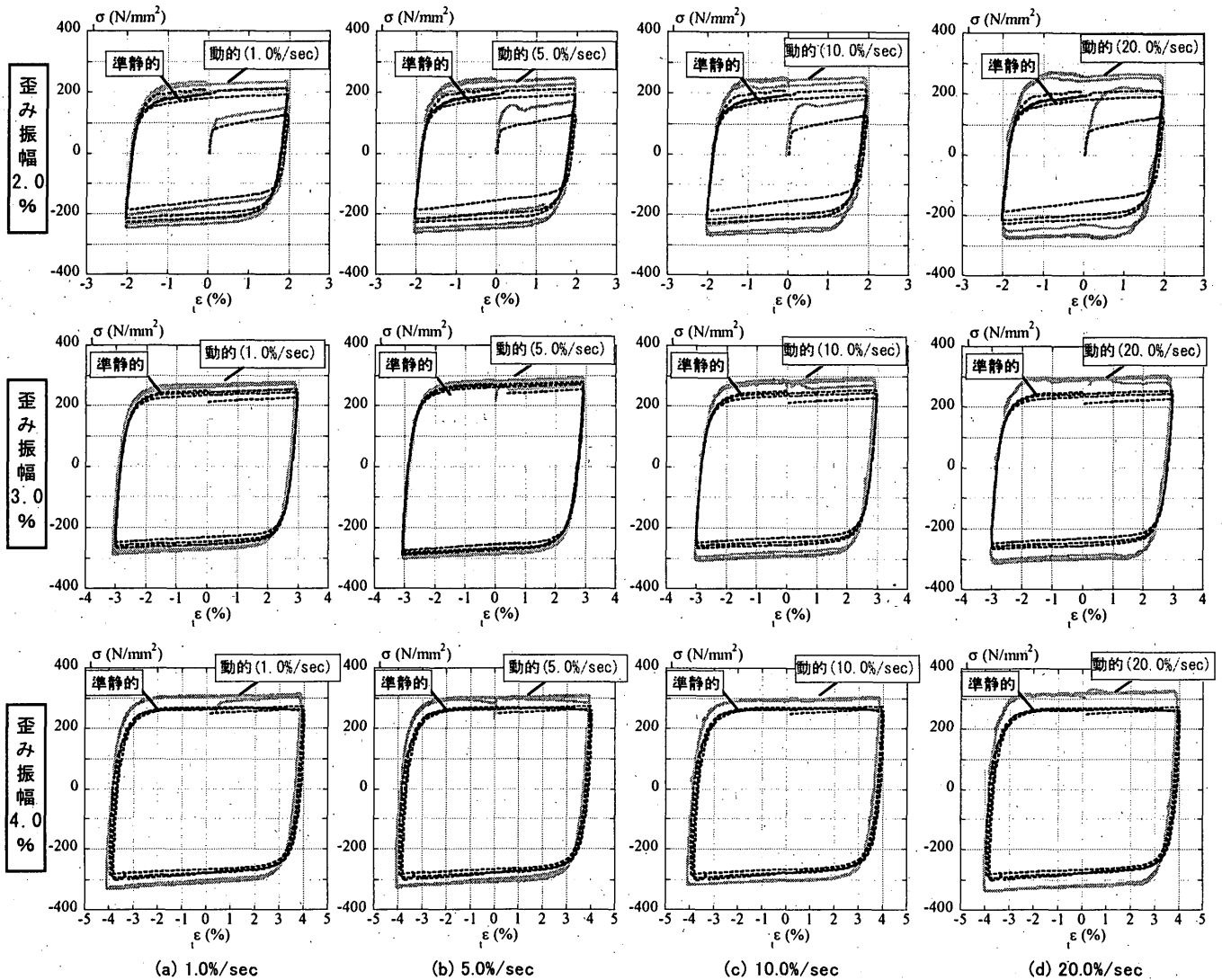


図6 応力-歪み関係

3.2 応力-歪み関係

図6に、歪み速度(a)1.0%/sec、(b)5.0%/sec、(c)10.0%/sec、(d)20.0%/secの動的実験結果を例として、応力-歪み関係を示す。また、各図中に0.01%/secで行った準静的実験結果を併せて示し、履歴形状における歪み速度の影響を見る。例示する実験結果は、LYP2で示される試験体シリーズである(以下同様)。すべての载荷において、動的実験での応力は、準静的実験結果を上回り、大きな履歴ループを描いている。また、その傾向は、歪み速度の速い载荷ほど、処女载荷に近く歪み硬化の進展していないほど強い。表3に、図6に示した各载荷での応力の正負の最大値を示す。また、図7に動的実験での正負最大値を、準静的実験での正負最大値で除した値を各歪み速度ごとに並べ、入力した歪み振幅ごとに示す。準静的実験での最大値に比べ、動的実験での最大値は、ある程度のばらつきはあるが、歪み速度の大きなものほど大きな値を示し、鋼材の持つ速度依存性が顕著に現れていることがわかる。特に、歪み硬化が大きく進展していない歪み振幅2%载荷時の最大値は、その後の歪み振幅3%、歪み振幅4%载荷時と比較すると、その倍率は大きな値となっており、歪み速度5%/secの载荷で10%程度、歪み速度20%/secの载荷で20%程度、最大応力が上昇している。

表3 正負の最大応力度

試験体名	歪み速度 (%/sec)	歪み振幅2% 応力(N/mm <sup>2</sup> )		歪み振幅3% 応力(N/mm <sup>2</sup> )		歪み振幅4% 応力(N/mm <sup>2</sup> )	
		引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮
LYP2_03	0.01	220	-227	256	-266	275	-302
LYP2_01	1.0	237	-247	281	-288	304	-322
LYP2_06	5.0	237	-250	280	-288	297	-311
LYP2_04	10.0	242	-262	284	-296	306	-318
LYP2_05	20.0	266	-267	294	-302	319	-328

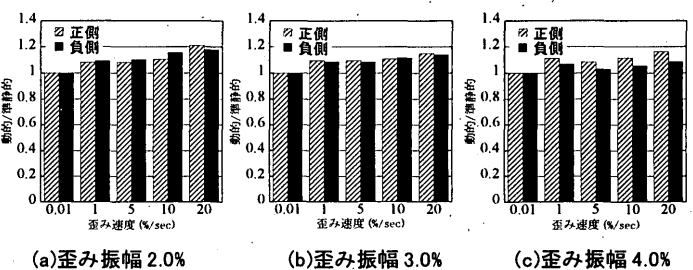


図7 正負の最大応力の比較

遅い ← 歪み速度 → 速い

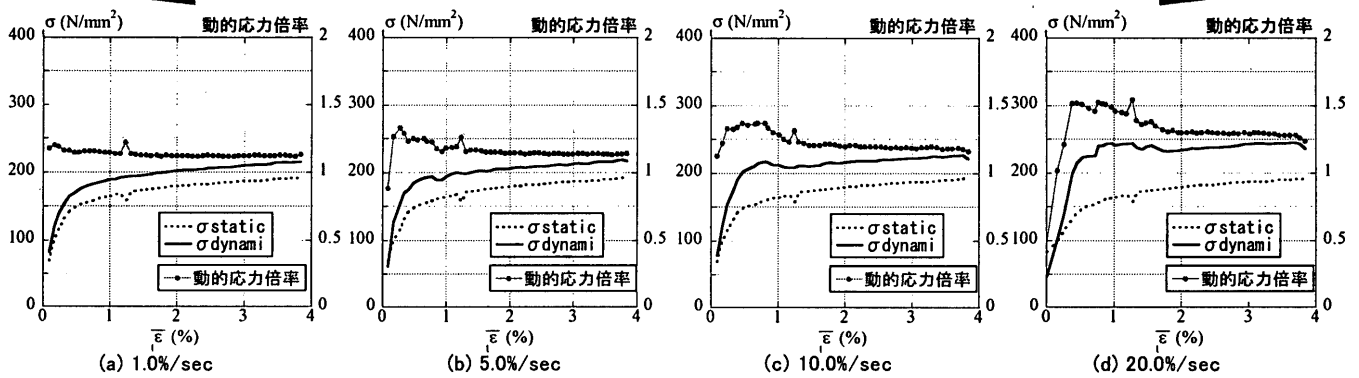


図8 応力、動的応力倍率 - 相対真歪関係

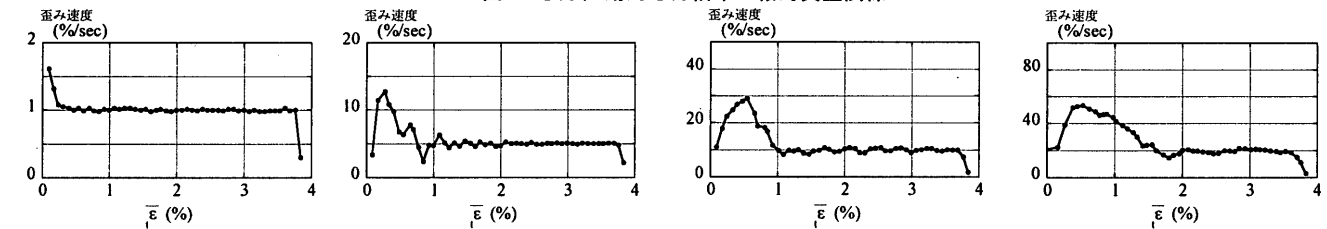


図9 歪み速度 - 相対真歪関係

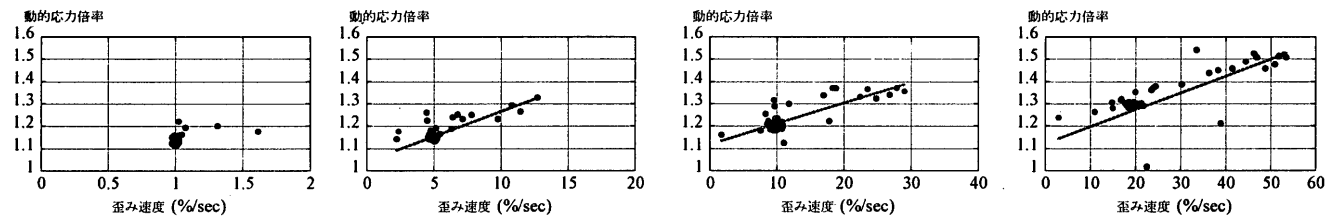


図10 動的応力倍率 - 歪み速度関係

### 3.3 動的応力倍率の定義

動的な影響による応力の上昇を定量的に評価する指標として、同様な歪み履歴を経験した点での「動的応力倍率」( $\alpha_d$ )を式(3)のように定義し、動的応力倍率を用いて実験結果の考察を行う。

$$\alpha_d = \frac{\text{動的荷重時の応力}(\sigma_{dynamic})}{\text{準静的荷重時の応力}(\sigma_{static})} \quad \dots (3)$$

動的応力倍率の算出については、実験データに以下の処理を行うものとする。まず、実験結果から得られた応力-歪み関係を、X軸(真応力のゼロ)で分け、3サイクルの履歴を7つに分割する。分割した各半サイクルごとに、応力のゼロクロス時の歪みをゼロとし、新たに相対真歪み( $\bar{\epsilon}$ )を算出する。得られた相対真歪みを横軸に、応力を縦軸にとり、半サイクル毎に、動的な実験結果と準静的な実験結果とを比較し、同様な歪み履歴を経験した時点での、動的応力倍率を算出する。動的応力倍率は、各半サイクル毎に相対真歪みの最大値を50分割し、それぞれの位置での動的応力倍率を算出する。同時にそれぞれの瞬間での歪み速度を記録する。

### 3.4 歪み速度と動的応力倍率の関係性

3.3に示した手順で3サイクルの実験結果を7つに分割した履歴のうち、3番目(引張側)の実験結果を例に、動的応力倍率と歪み速度の相関関係を考察する。図8~10に示した実験結果は、図6で示した実験結果のうち、歪み振幅2%の結果を用いている。

図8に、3.3に示した手順を用いて算出した応力と相対真歪みの関係を示す。各図に動的および準静的実験結果を示し、各半サイクルでの最大歪みを50分割した時点での動的応力倍率を併せて示す。また、図

9に、動的応力倍率を算出した50点での相対真歪みと瞬間の歪み速度を示す。図8を見ると、設定した歪み速度の違いによらず、応力-相対真歪み関係は紡錘型の履歴ループと類似した形状を示している。しかし、設定した歪み速度の大きなものほど、応力は全歪み域を通し、大きな値を示すことがわかる。動的な実験結果での真応力を準静的実験結果で除した動的応力倍率に着目すると、相対真歪みの小さな範囲ではばらつきが見られるものの、最終的には、歪み速度1.0%/secの入力で1.12程度、5.0%/secで1.14程度、10.0%/secで1.2程度、20.0%/secで1.3程度の値に収束する傾向にあることがわかる。

相対真歪みの小さな範囲での、動的応力倍率のばらつきは、図9に示した歪み速度-相対真歪み関係からその原因を見いだすことができる。図8と図9中の相対真歪みは同一であり、各プロットはそれぞれ対応関係にある。図9の歪み速度-相対真歪み関係に着目すると、载荷履歴は歪み速度一定となる三角波としているが、歪み速度は、完全には一定値となっていないことがわかる。これは、本実験において大きな歪み速度を再現するために変位振幅を小さく設定して動的アクチュエータを制御しようとしたが、完全に制御しきれなかったことによる。しかしながら、各瞬間の歪み速度と動的応力倍率に着目することにより、適切な評価をすることができるといえる。

相対真歪みの大きな範囲では、歪み速度は一定値に収束しており、各歪み速度における図8の動的応力倍率-相対真歪み関係と図9の履歴形状は、概ね類似形状を示していることがわかる。相対真歪みの小さな範囲では、歪み速度が一定とならずに、速度の大きな方にばらつきが見られ、相対真歪みの増大の伴い一定値へと収束する傾向は、全

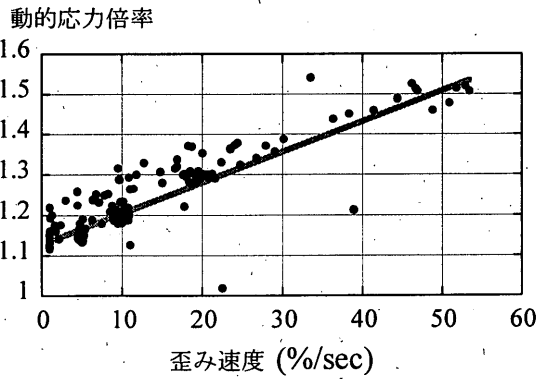


図 11 動的応力倍率 - 歪み速度関係 (図 10 のまとめ)

載荷に共通して現れており、動的応力倍率もそれと対応している。

図 10 に各半サイクルでの、各瞬間の動的応力倍率 - 歪み速度関係を示す。図 9 では、歪み速度、動的応力倍率ともにある程度のばらつきが生じていたが、図 10 として表現すると、それらのばらつきは、概ね線形近似でできることがわかる (各図中の直線より)。また、図 10 に示した、4種の歪み速度での半サイクルの実験結果を、各瞬間の動的応力倍率 - 歪み速度関係でまとめると、図 11 となる。この図は、歪み振幅 2.0% で行った 3 サイクルの載荷のうちの限定された部分ではあるが、各瞬間の動的応力倍率と歪み速度の関係を、概ね一次式として表現できることがわかる。

#### 4 歪み速度を変数とした動的応力倍率の定式化

##### 4.1 歪み速度と動的応力倍率に着目した定式化

歪み速度を変数とした動的応力倍率の定式化では、物理現象との対応を図りつつ、振動方程式への適用を考慮し、パラメータを絞った簡易な関数として表現することを目指す。

上記の方針に従い、定式化を行う。定式化には、異なる 2 種類のロットの鋼板から製作されたすべての試験体の実験結果を用いる。

すべての実験結果について、3.3 での処理を行って得られた各瞬間の動的応力倍率と歪み速度を図 12 に示す。図中では歪み速度を絶対値として表している。同一の歪み速度における動的応力倍率には、ある程度のばらつきが見られるが、巨視的に見ると歪み速度が大きくなほど、動的応力倍率も大きな値を示す傾向にあると言える。動的応力倍率のばらつきが生じる原因としては、鋼材の経験する累積歪みなどが考えられ、次節でその影響を考察する。また、歪み速度 50%/sec 以上の領域では、動的応力倍率は頭打ちとなる傾向にあることがわかる。

上記の傾向を反映し、歪み速度と動的応力倍率の関係を、トリニア型へ定式化する。歪み速度の範囲を、① 0.0 ~ 1.0%/sec、② 1.0 ~ 50.0%/sec、③ 50.0%/sec 以上の 3 つの領域に分け、以下の方針に従い、定式化を行う。

まず、地震時にダンパーが、最も多く経験することが考えられる上記②の歪み速度範囲では、最小二乗法を用いて近似した直線を導き出す。結果として得られた式を式(4)に示す。このとき、導き出される傾きを  $R_d$  として扱う。

$$\alpha_d = R_d \cdot \dot{\epsilon} + 1.1, R_d = 0.0043 \quad \dots (4)$$

$\alpha_d$ : 動的応力倍率、 $R_d$ : 直線の傾き、 $\dot{\epsilon}$ : 歪み速度 (%/sec)

歪み速度③の領域では、歪み速度 50%/sec で②の範囲の直線と接続する事を条件とする。得られた直線は、式(5)となる。

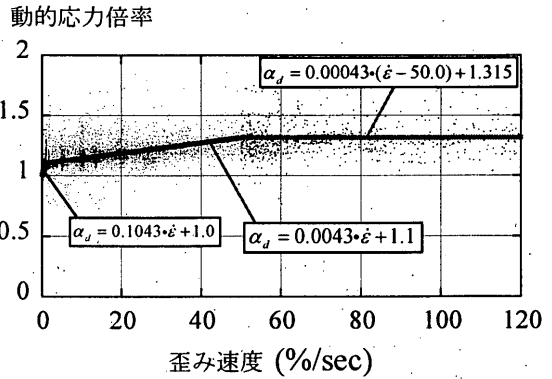


図 12 動的応力倍率 - 歪み速度関係 (全実験結果)

$$\alpha_d = R_d \cdot (\dot{\epsilon} - 50.0) + 1.315, R_d = 0.00043 \quad \dots (5)$$

$\alpha_d$ : 動的応力倍率、 $R_d$ : 直線の傾き、 $\dot{\epsilon}$ : 歪み速度 (%/sec)

このとき、 $R_d$  は式 4 の 1/10 の値となっている。歪み速度 1%/sec 以下の範囲①では、歪み速度 0.0 で、動的応力倍率が 1.0 となるという物理的条件を考慮し、歪み速度 0.0、動的応力倍率 1.0 の点を直線の始点 (以下始点と記す) とした。この直線(式 6)は、始点を通り、歪み速度 1.0%/sec で、②の範囲の直線と接続される。

$$\alpha_d = R_d \cdot \dot{\epsilon} + 1.0, R_d = 0.1043 \quad \dots (6)$$

$\alpha_d$ : 動的応力倍率、 $R_d$ : 直線の傾き、 $\dot{\epsilon}$ : 歪み速度 (%/sec)

上記のように 3 分割された直線を、歪み速度と動的応力倍率の関係の一般形の式として定義する。

##### 4.2 累積歪みの影響を考慮した定式化

前節で示した一般形では、同一の歪み速度に対し、動的応力倍率の値にばらつきがられる。そのため、歪み速度に対する、動的応力倍率の傾きとして表される  $R_d$  を累積歪みの関数としてとらえ、一般形の式に補正を加える。

図 13 に 3 サイクルで載加した実験結果を、3.3 で説明した条件によって分割した半サイクルごとの歪み速度と動的応力倍率の関係を示す。また、同図中に、式(4)と同じ形状の帰直線を示す。実験結果は歪み振幅 2.0% の載荷を用いている。直線の傾き  $R_d$  は、載荷が進むにつれて、(累積歪みが増大するにつれて) 小さくなっていることがわかる。特にはじめの数回の半サイクルでの  $R_d$  の変化が著しいことがわかる。この傾向をより深く分析するため、多くの実験結果を、各半サイクルごとに整理し、各半サイクルごとに直線の傾き  $R_d$  を求め、図 14 に示す。図 14 は縦軸に、直線の傾き  $R_d$  をとり、横軸には、各半サイクルでの平均の累積歪みを用いて示している。

直線の傾きである  $R_d$  は累積歪みの増大に伴って、減少しており、その様子は、式(9)に示す曲線と良い対応を示していることがわかる。

$$R_d = \frac{0.03}{\sum |\Delta \epsilon| + 0.5} + 0.005 \quad \dots (7)$$

$R_d$ : 直線の傾き、 $\sum |\Delta \epsilon|$ : 累積歪み(%)

上記の累積歪みと、直線の傾きである  $R_d$  の関係を反映し、前節に示した歪み速度と動的応力倍率の関係に修正を加える。

まず、前節で歪み速度を 3 つに分けた領域のうち、歪み速度 1.0%/sec ~ 50.0%/sec の範囲②では、式(4)の  $R_d$  に上記の式(7)を用いる。歪み速度 1.0%/sec 以下の範囲①では、始点と範囲②の直線とを結ぶ線とする。範囲③では、式(4)と式(5)で見られた 50.0%/sec 以上では、 $R_d$  が 1/10 になる

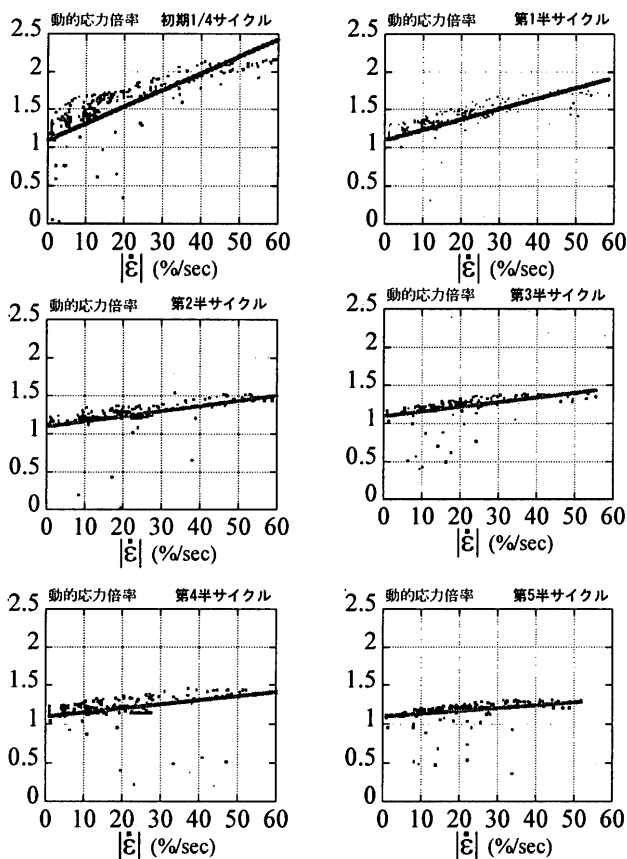


図13 各半サイクルごとの動的応力倍率 - 歪み速度関係

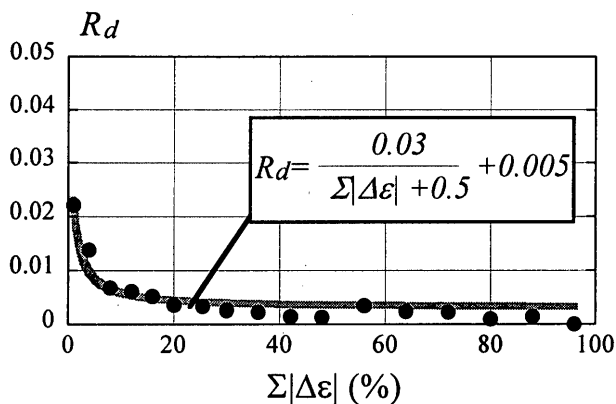


図14 R - 累積歪み関係

関係を考慮し、高歪み速度域における動的応力倍率の上昇に頭打ちをかけ、 $R_d$ を式(7)の1/10とする。また、範囲③の直線は、50.0%/secで②の範囲の直線と接続されることとする。このような条件を用いて、導き出した歪み速度と累積歪みと応力の関係は、式(8)~(10)のようにモデル化できる。

5 提案する履歴モデルの実験結果との対応

5.1 応力 - 累積歪み関係による比較

前節で示した履歴モデルを用いた予測値と実験結果との対応を見る。図15に、各歪み速度における応力(絶対値) - 累積歪み関係を示す。動的および準静的実験結果とともに、前節で提案したモデルを用いた予測値を示す。(a)に示す歪み速度1.0%/secは、トリニア型の直線の境界値付近の歪み速度となっている。しかし、数値のばらつきは見られず、動的実験結果と予測値とは、図中の全歪み域を通し良い対応を示している。また、歪み速度(b)5.0%/sec、(c)10.0%/secでは、歪み速度の影響により、応力はそれぞれ準静的実験結果と比較し、10%程度、20%程度上昇しているが、予測値についても同等な応力の上昇が見られる。(d)に示す20%/secの実験結果では、他の実験結果に比べ高速なため、動的な応力、予測値ともにばらつきが見られる。しかし、巨視的に見ると、予測値は、動的な影響による応力の上昇を反映していると言える。

5.2 応力度 - 歪度関係による比較

図16に、歪み速度10.0%/secで行った3種類の歪み振幅での実験結果と、予測値との対応を示す。载荷中の瞬間の歪み速度の範囲は、-23.0 ~ 28.2%/sec程度である。図16(a)に示す、歪み振幅2.0%の初期载荷では、準静的実験と比較し、動的実験では降伏応力が大きく上昇している。提案する履歴モデルを用いた予測値は、実験値より若干小さな値を示すが、全体的には良い対応を示しているといえる。予測値の曲線の形状も、動的実験結果と対応した形状であることがわかる。また、圧縮側、引張側の最大値においても、動的実験と予測値は、近い値を示しており、歪み速度の影響による応力の上昇を精度良く予測していると言える。(b)、(c)の歪み振幅3.0%、4.0%载荷時の実験値と予測値についても同様に、動的実験結果と予測値は良い対応を示す。

次に、周期と振幅の異なる2種類のサイン波を合成した入力波(合成波と記す)を用いた実験結果から、より現実的な歪み履歴での実験結果と、予測値との対応を検討する。図17に载荷に用いた歪み履歴を示す。合成したサイン波の周期は、それぞれ2.4秒、0.8秒である。また、予測値の算出に用いる準静的実験結果は、歪み速度0.01%/secに設定し、図17と同様な歪み履歴とした。図18に、動的および準静的実験

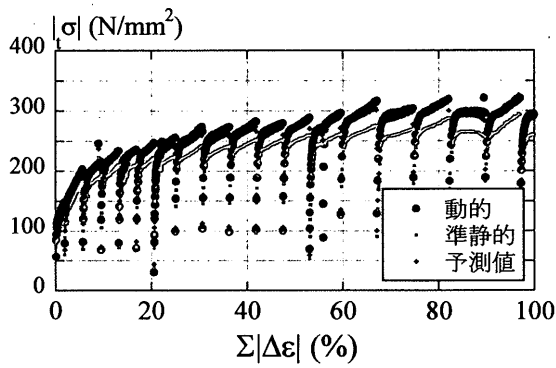
$$\sigma_{dynamic} = \left( \left( \alpha_{d(1\%/sec, \Sigma|\Delta\epsilon|)} - 1.0 \right) \cdot |\dot{\epsilon}| + 1.0 \right) \cdot \sigma_{static} \quad (|\dot{\epsilon}| < 1.0) \quad \dots (8)$$

$$\sigma_{dynamic} = \left( \left( \frac{0.03}{\Sigma|\Delta\epsilon| + 0.5} + 0.005 \right) \cdot |\dot{\epsilon}| + 1.1 \right) \cdot \sigma_{static} \quad (1.0 \leq |\dot{\epsilon}| < 50.0) \quad \dots (9)$$

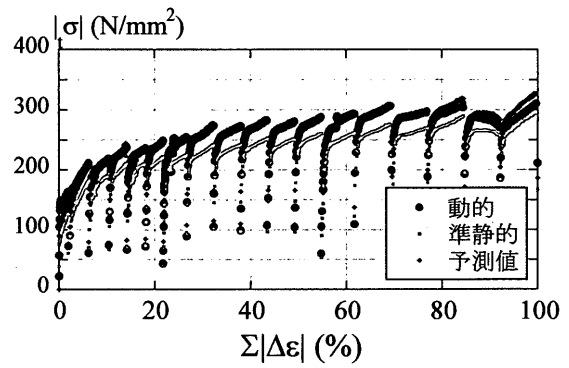
$$\sigma_{dynamic} = \left( \frac{1}{10} \cdot \left( \frac{0.03}{\Sigma|\Delta\epsilon| + 0.5} + 0.005 \right) \cdot (|\dot{\epsilon}| - 50.0) + \alpha_{d(50\%/sec, \Sigma|\Delta\epsilon|)} \right) \cdot \sigma_{static} \quad (50.0 \leq |\dot{\epsilon}|) \quad \dots (10)$$

$\sigma_{dynamic}$ : 動的な応力,  $\sigma_{static}$ : 準静的実験での応力,  $\Sigma|\Delta\epsilon|$ : 累積歪み (%),  $\dot{\epsilon}$ : 歪み速度 (%/sec)

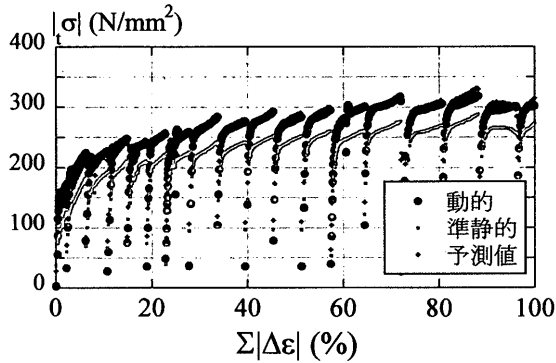
$\alpha_{d(50\%/sec, \Sigma|\Delta\epsilon|)}$ : ある累積歪み、歪み速度50.0%/secでの動的応力倍率,  $\alpha_{d(1\%/sec, \Sigma|\Delta\epsilon|)}$ : ある累積歪み、歪み速度1.0%/secでの動的応力倍率



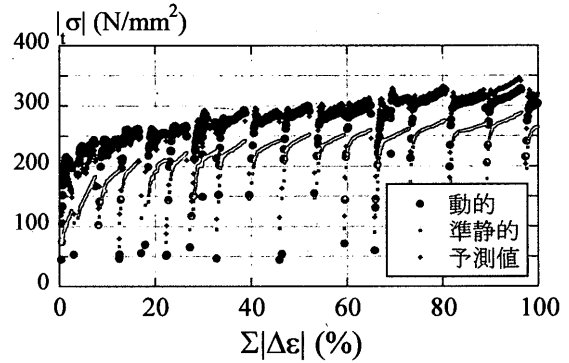
(a)歪み速度 1.0%/sec



(b)歪み速度 5.0%/sec

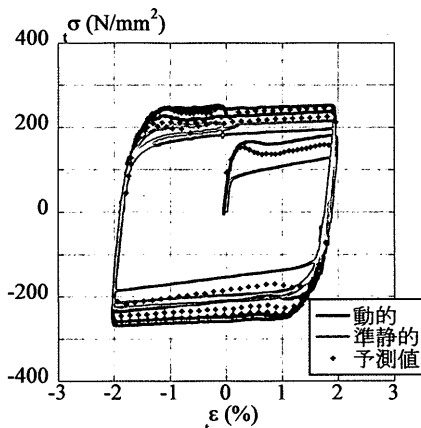


(c)歪み速度 10.0%/sec

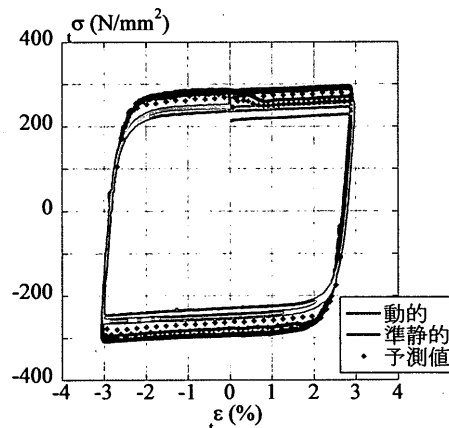


(d)歪み速度 20.0%/sec

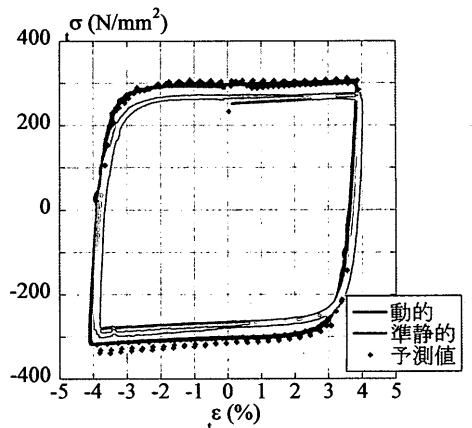
図15 実験値と予測値の応力(絶対値)- 累積歪み関係



(a)歪み速度 10.0%/sec、歪み振幅 2.0%



(b)歪み速度 10.0%/sec、歪み振幅 3.0%



(c)歪み速度 10.0%/sec、歪み振幅 4.0%

図16 実験値との対応 (応力-歪み関係)

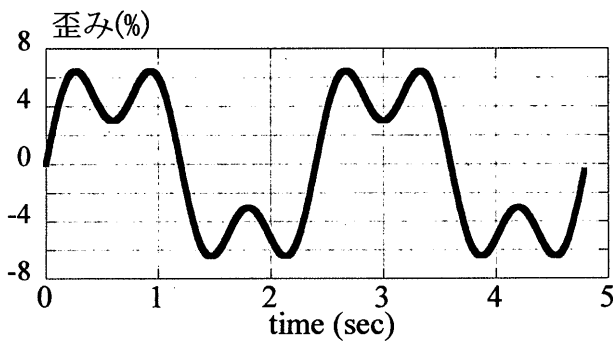


図17 合成波の歪み履歴

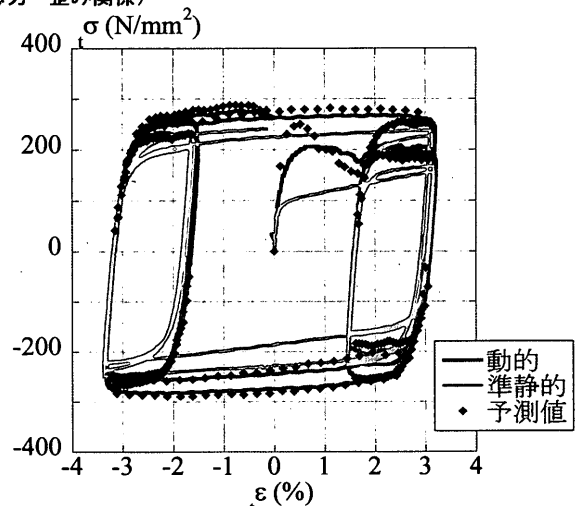


図18 合成波における実験値との対応 (応力-歪み関係)

結果とともに、予測値を示す。入力に用いた履歴の歪み速度範囲は、理論値が $\pm 39.2\%/sec$ の範囲なのに対し、実験値が正側最大値で $46.3\%/sec$ から負側最大値で $-24.8\%/sec$ の歪み速度範囲であった。初期载荷の部分で予測値が、実験値の1.2倍程度の値を示していることがわかる。これは、累積歪みの小さな時点での、歪み速度と動的応力倍率の傾き $R_d$ を大きく設定しているためで、図17の履歴のように载荷スタートと同時に大きな歪み速度を経験する履歴によって、その影響が顕著になったと言える。しかし、実験値との差異は2割程度であり、また、構造物の地震時挙動を考えると、大きな歪み速度を経験する以前に、幾らかの累積歪みを経験すると考えられるので、生じた差異は今回設定した履歴特有のもので大きな問題ではないと考える。その後、動的実験結果と予測値とは、良い対応を示していると言え、载荷中に歪み速度が大きく変動する履歴に対しても、提案する履歴モデルが適用できることがわかる。

## 6 結論

ダンパー用鋼材として用いられる極低降伏点鋼を対象として、極低降伏点鋼の持つ速度依存性に着目し、要素実験を行った。要素実験は、座屈拘束プレースをモデル化し、異なるロットの鋼板から製作した試験片を用い、歪み速度をパラメータとした動的繰り返し载荷実験とした。本研究で得られた知見は下のようにまとめられる。なお、実験結果にはロットの違いによる差異は見られなかった。

- (i) 入力波に三角波を用いた動的繰り返し実験では、歪み速度を $0.01\%/sec$ に設定した準静的実験結果に対し、応力が上昇する。定量的な指標としては、歪み振幅を2.0%に設定した処女载荷で、歪み速度 $5\%/sec$ で1割程度、歪み速度 $20.0\%/sec$ で2割程度、圧縮側、引張側のいずれにおいても最大応力が増大する。また、载荷を続けると、応力の上昇する割合は小さくなる。
- (ii) 動的な影響による応力の上昇を定量的に評価する指標として、「動的応力倍率」( $\alpha_d$ )を定義した。実験で得られた、真応力-真歪み関係を整理し、動的応力倍率と歪み速度は、概ね線形関係にあることを示した。
- (iii) 実験結果を基に、各瞬間の歪み速度と動的応力倍率に着目し、定式化を行った。歪み速度 $0.0\%/sec$ で動的応力倍率が1となる物理的条件および、歪み速度が $50.0\%/sec$ 以上で応力の上昇は少なくなるという実験結果から、トリニア型の一般形の式を提案した。
- (iv) 上記のトリニア型の一般式をより精度の高いものとするため、動的応力倍率と、歪み速度を関数として表現した場合、傾きとして表される $R_d$ を、累積歪みの関数として表した。また、動的応力倍率を歪み速度と累積歪みの関数として表現し、歪み速度の影響による応力の

上昇を表現する履歴モデルとして提案した。

- (v) 提案した履歴モデルを用いて、動的実験結果と、履歴モデルを用いた予測値がある程度の精度をもって対応することを示した。また、実構造物の地震時挙動を考慮して、周期と振幅の異なる2種類のサイン波を合成した入力波を用いた動的実験結果と予測値を比較した。载荷のごく初期に、大きな歪み速度を受ける場合にある程度の誤差が生じるものの、本研究で提案する履歴モデルは、実験結果を全体的に精度良く予測することが可能であることを示した。

## 謝辞

本論文の第二著者は日本学術振興会特別研究員である。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 小野徹郎、加古泰也、佐藤篤司、岩田衛：金属系素材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、No.532、pp.193-199、2000年6月
- 2) 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、No.472、pp.139-147、1995年6月
- 3) 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特性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.473、pp.159-168、1995年7月
- 4) 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、No.498、pp.137-143、1997年8月
- 5) 小野徹郎、佐藤篤司：金属系素材の応力-歪み度関係の定式化、日本建築学会構造系論文集、No.532、pp.177-184、2000年6月
- 6) 鈴木孝彦、澤泉紳一、山口種美、池辺卓：極低降伏点鋼の機械的性質に及ぼす歪み速度の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1、pp.501-502、1997年9月
- 7) 前田泰史、中田安洋、鈴木孝彦、岩田衛：軸降伏型履歴ダンパーの機械的性質に及ぼす歪み速度の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1、p.845-846、1998年9月
- 8) 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年10月
- 9) 富森雅春、加古泰也、小野徹郎、佐藤篤司：金属系素材の力学的特性に及ぼす切欠、温度、歪み速度の影響(その5)、温度、歪み速度をパラメータとした応力-歪み度関係の定式化、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1、p.327-328、1999年9月
- 10) 谷村眞治、三村耕司、平井更之右：広ひずみ速度域における鋼構造材の強度と歪み速度依存性、第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集、pp.81-86、2000年3月
- 11) S.Tanimura, K.Mimura and W. Zhu: A dynamic constitutive equation and its experimental verification, Proc. of J.Phys IV France 10,Pr9-33-39,2000
- 12) 成川匡文、小波佐和子、山口路夫、前田泰史、竹内徹、大島豊、舛田健次、荻原みき、山田哲、中島正愛、和田 章：履歴ダンパーを組み込んだ鋼構造骨組の耐震性能に関する研究(その1~3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1分冊、pp.925-930、2000年9月
- 13) 竹内百合、山口路夫、山田哲、竹内徹、和田章：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、日本建築学会関東支部研究報告集1、pp.221-pp.224、2001年3月

(2001年9月10日原稿受理、2001年11月16日採用決定)