

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月17日現在

機関番号：12501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860014

研究課題名（和文）鋼材の動的応答特性の高精度化
及びその鋼構造物の耐震性能設計への展開研究課題名（英文）Improvement on steel dynamic hysteretic model
and evolution to the seismic design of steel buildings

研究代表者

島田 侑子（SHIMADA YUKO）

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90586554

研究成果の概要（和文）：本研究は、建物部材に用いられる鋼材の動的繰返し載荷実験を実施して動的履歴特性を検討し、歪速度が耐震性能に及ぼす影響を評価するものである。まず柱や梁、履歴ダンパーに用いられる鋼種について、歪速度を変化させた繰返し載荷実験を行った。鋼種によらず、歪速度が増加すると降伏応力度は増加するが、ある程度塑性化が進むと増加は頭打ちとなり、載荷直後数サイクルに主たる歪速度の影響が確認された。また既往の実験研究から鋼材における歪速度の影響に関するデータベースを作成し、歪速度と履歴との関係を示した。

研究成果の概要（英文）：This study is consideration of dynamic hysteretic characteristics based on the dynamic cyclic loading tests of structural steel and evaluation of strain-rate effect in seismic performance of steel buildings. First, I have conducted a series of dynamic cyclic loading test of steel which popularly used as hysteretic damper, column, and beam. Regardless of steel kinds, yield strength glowed up when strain-rate was increased. However, the glow of strength was stopped in large plastic deformation. Strain-rate was affected only several cycles after loading have started. Second, I made a database of steel performances affected strain-rate base on previous experimental studies.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2011年度	1,140,000	342,000	1,482,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：

科研費の分科・細目：工学、構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：歪速度、動的特性、履歴モデル、繰返し挙動、エネルギー

1. 研究開始当初の背景

建物の制振構造において、鋼材が塑性変形してエネルギーを吸収する履歴型ダンパーは近年になって使用範囲が拡大しつつあり、それに伴って開発が進められている。ダンパー用の鋼材としては建築構造用圧延鋼材、低降伏点鋼、極低降伏点鋼などがあ

るが、降伏点の低い鋼材は微小変形を起こす地震だけでなく強風などの低サイクル外力に対する疲労により早期に塑性化する可能性がある。この傾向に関して過去に行われた実験研究から、歪速度が大きくなると最大応力が大きくなることがわかっており、履歴特性に影響を与える要素として歪速度

を検討する必要がある指摘されている。しかし過去の歪速度に関する研究は、単調荷重実験や限られた範囲での歪振幅を対象としたものに留まっているため定量的な評価はなされていない。最近になってこの点を解決すべく研究が行われ、履歴特性の一部を定式化できたが、それを骨組の応答解析に適用して設計時に検討できるようになるまでには至っていない。一方、歪速度は降伏点が高い鋼材だけでなく、一般的な構造用鋼材にも生じる。柱や梁の場合はその影響は十分小さく無視できるとされるが、その判断を妥当とする判断基準をどの程度とすればよいのかわかっていない。

このように歪速度が鋼材の履歴特性に与える影響について、鋼種、歪振幅、入力される波の性質など系統だった検討は十分になされておらず、ランダムな地震動を主として受ける鋼材の動的特性、特に履歴特性に対して歪速度が及ぼす要因を明確に把握することが必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究は、これまで定性的な評価に留まっていた歪速度がダンパー用鋼材の履歴特性に及ぼす影響を定量的に評価することを目的とする。そもそも骨組内の制振ブレースが有する履歴特性は変位依存成分と速度依存成分が混在しており、速度依存成分である歪速度が鋼材の動的特性に及ぼす影響については、既往の研究でも多く指摘されてきたもののその詳細を把握するまでには至っていないことから、総合的な評価はなされていないことから、この点を補完するものである。

3. 研究の方法

(1) ダンパー用鋼材（普通鋼、低降伏点鋼など）について動的繰返し荷重実験を実施し、降伏点と荷重速度、歪振幅などに着目してデータの蓄積を図る。試験体は図1に示すような板状のものとし、繰返し荷重で面外変形を発生することのないように補剛治具を設置する（応力変化に伴う体積変化は試験体と補剛治具の間に一定のクリアランスを設けることで対応させる）。

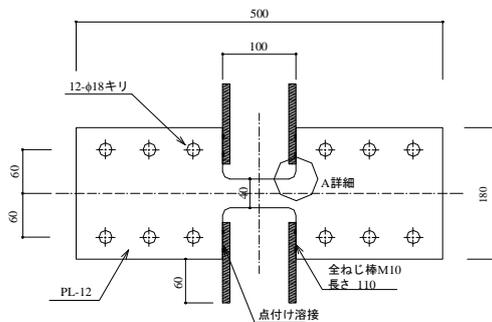


図1 試験体

セットアップは図2に示すように動的アクチュエーターに平行移動装置を介して試験体の一端を設置し、もう一端を固定する。実験時のパラメータは降伏点（鋼種）、歪速度、歪振幅、荷重パターンとする。鋼種としてはSS400、LY225、比較のためにSN490を実施した。歪速度は準静的荷重として0.1%/s、動的荷重として1%/s、10%/s、及び50%/sとした。繰返し荷重時の歪振幅は、降伏応力度程度の振幅範囲に相当する2%目標で正負繰返した場合（以下±2%荷重）と、十分塑性化した6%の引張歪と2%の圧縮歪の目標値で繰返した場合（以下+6%&-2%荷重）の場合を設定した。荷重パターンは歪速度一定となる三角波を入力して、破断に至るまで荷重した。これら動的荷重を行った場合と歪速度が非常に小さい準静的荷重を行った場合と比較して、歪速度の影響を検討する。

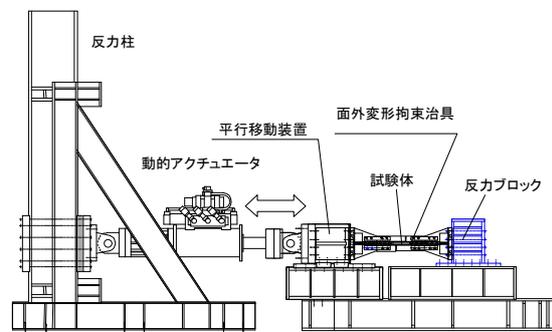


図2 実験セットアップ

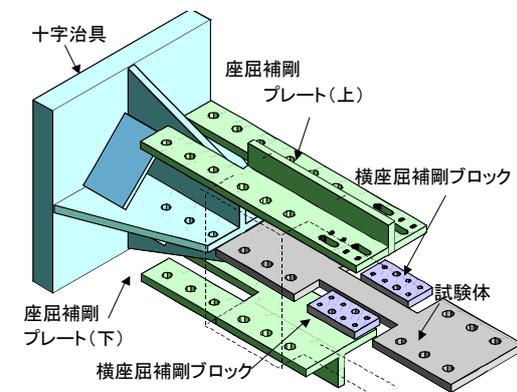


図3 座屈補剛治具

(2) 既往の研究において、鋼材を対象に動的荷重実験を行った結果から、鋼材の履歴特性と歪速度に関するデータベースを作成する。着目する項目は実験方法、鋼種と機械的性質、歪速度、歪振幅、荷重形式などであり、データベースを作成することで鋼材の履歴特性における歪速度の影響を定式化する場合の精度を向上させるのに有効なものとなる。

4. 研究成果

(1) ダンパー用鋼材の動的繰返し载荷実験

① ±2%振幅载荷シリーズ

図4に結果の一例として、SS400の試験体における応力度-歪関係のうち、±2%载荷の履歴を示す。実験結果をまとめるにあたっては実験で得られた工学応力と工学歪から真応力と真歪に変換した値で示す。まず全ての試験体において歪振幅が±1.5%程度になっているが、これは安全のためストロークで制御したことから、治具類の変形により試験体部の振幅が小さくなったものである。

いずれの鋼種の場合においても歪速度が小さい0.1%/sの場合は、紡錘形の定常的な履歴挙動を示した。歪速度が10%/s、50%/sと高速になると履歴形状が円形に近づき、任意の半サイクルの履歴において応力が安定しない傾向が見られた。また0.1%/sや1%/sの場合には、歪硬化により最初の引張側半サイクルよりも2回目以降の引張側半サイクルの応力度が大きくなったが、歪速度があがり10%/sや50%/sになると最初の半サイクルの方が2回目以降の半サイクルより応力度が大きくなった。これらの傾向は、低降伏点鋼になると顕著に乱れが生じた。

② +6%&-2%振幅载荷シリーズ

図5に+6%&-2%振幅载荷の試験体の応力度-歪関係を例示する。目標振幅を±2%とした場合に比べて、振幅が大きくなると高速時の履歴は乱れが少なくなった。上記のように歪速度、歪振幅、鋼種により乱れは生じるが、10%/s程度までであれば応力が低下する前までの履歴はほぼBi-linearモデルとして考えられる。またそれ以上の歪速度を受けた場合も、最初のサイクル以外は概ね完全弾塑性型と見なせることからBi-linear型を元としてモデル化を検討できる。

③ 歪速度に対する降伏点と最大応力度

①②の履歴より、歪速度による履歴性状の変化を明確に示すものとして降伏点と最大応力度点が挙げられる。繰返し载荷試験体における降伏点は、応力度-歪関係から最初の引張側半サイクルにおける0.2%offset 応力度で定義する。図6に各歪速度に対する繰返し载荷試験体の降伏応力度を示す。いずれの鋼種においても歪速度が増加すると降伏応力度は増加し、準静的载荷である0.1%/sでの値に比べると1%/sでの値は殆ど変わらなかったが、10%/sでは1.0~1.2倍程度、50%/sでは鋼種によるが1.1~1.5倍程度増加した。なおここでは±2%振幅载荷の結果を示しているが、歪速度による降伏応力度の増加傾向について、振幅による差はほとんど生じなかった。

また、各試験体の全履歴において最大の応力度を最大応力度とする。図7に各歪速度に対する繰返し試験体の最大応力度を示す。歪

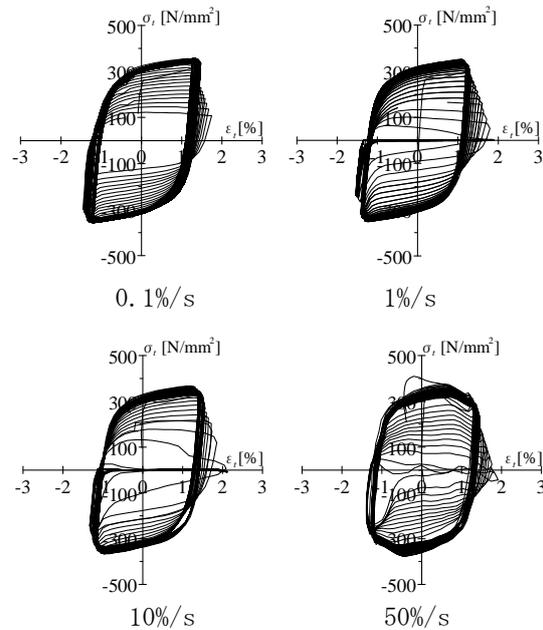


図4 応力度-歪関係 (±2%振幅载荷・SS400)

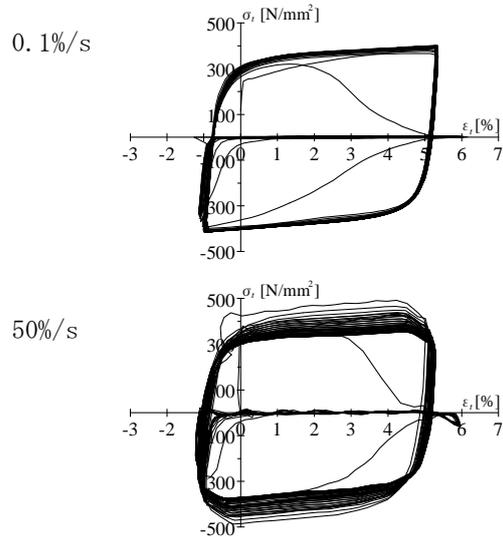


図5 応力度-歪関係 (+6%&-2%振幅载荷・SS400)

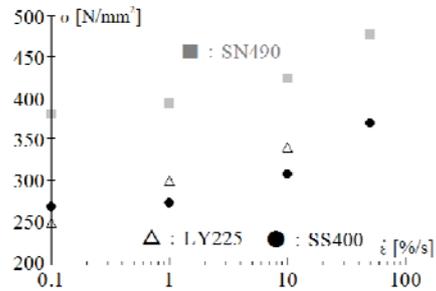


図6 繰返し試験体の降伏応力度

速度が増加すると最大応力度も増加傾向であるが、増加率は1.1~1.2倍程度であった。

④繰返し挙動における 0.2%offset 耐力

本研究では降伏応力度は 0.2%offset 耐力で算出したことから、各サイクルの 0.2%offset 耐力に着目する。繰返し定振幅荷重をした試験体の各半サイクルで得られた 0.2%offset 耐力を、準静的荷重である歪速度 0.1%/s で単調引張荷重した場合の降伏応力度 $\sigma_{y,m0.1}$ で除した 0.2%offset 耐力増加率を縦軸、累積歪を横軸としてプロットしたものを図 8 に例示する。ここでは煩雑のため、第 1~3 サイクル分及びその後は累積歪が 0.25 増加する毎にデータ点を抽出して示した。

±2%振幅荷重の場合、どの試験体でも降伏応力度を示す第 1 サイクルでの 0.2%offset 耐力増加率の値に比べ、その後のサイクルにおける 0.2%offset 耐力増加率は低下し、そのまま概ね頭打ちになった。頭打ち部分の耐力増加率の推移を見ると、高速荷重のセット開始時に値が多少増加する傾向があるが、これは後述するように高速荷重を始める際に歪速度が急激に上昇するためである。頭打ち部分の耐力倍率は平均値で、0.1%/s で 0.77、1%/s で 0.79、10%/s で 0.81、50%/s で 0.83 と、ほぼ 0.8 で推移している。また+6%~-2%振幅荷重の場合を見ると、ばらつきはあるものの、歪振幅が大きくなっても第 1 サイクル後はほぼ 0.8 程度で頭打ちとなる傾向を示した。よって 0.2%offset 耐力の値は、試験体が降伏する第 1 サイクルに関しては歪速度の影響が顕著であるが、それ以降はほぼ一定として定められる。

⑤繰返し挙動におけるピーク耐力

各半サイクルにおいて最大の応力をピーク耐力とする。0.2%offset 耐力と同様に、繰り返す各半サイクルでのピーク耐力を、準静的荷重である歪速度 0.1%/s で単調引張荷重した場合の最大応力度 $\sigma_{u,m0.1}$ で除したピーク耐力増加率を縦軸、累積歪を横軸としてプロットしたものを図 9 に例示する。

±2%振幅荷重の場合、0.1%/s、1%/s、10%/s では第 1 サイクルでのピーク耐力増加率の値は、その後のサイクルにおけるピーク耐力増加率よりやや小さく、第 2 サイクル以降は約 0.7 程度の増加率でそのまま概ね頭打ちになった。一方、50%/s の場合は第 1 サイクルでのピーク耐力増加率はそれ以降のサイクルでのピーク耐力増加率よりやや大きい。頭打ち部分のピーク耐力増加率は平均して 0.66 程度であった。これらの傾向は鋼種により多少の差が見られた。

また+6%~-2%振幅荷重の場合のピーク耐力増加率の推移を示す。頭打ちとなった部分の耐力増加率は歪振幅が大きくなるとやや大きい値を示した。

⑥歪速度を反映した鋼材のモデル化

①~⑤の検討より、歪速度を反映した鋼材の繰返し履歴特性をモデル化するにあつ

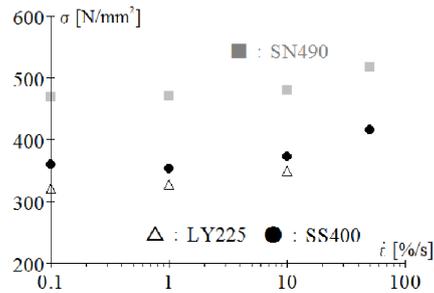


図 7 繰返し試験体の降伏応力度

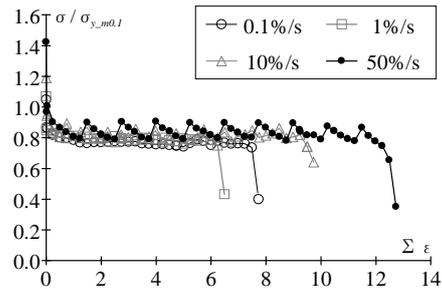


図 8 0.2%offset 耐力増加率 (±2%振幅荷重・SS400)

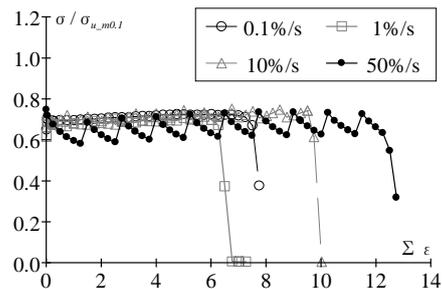


図 9 ピーク耐力増加率 (±2%振幅荷重・SS400)

ての方針は以下のように考えられる。

- ・降伏に至る第 1 サイクルについては歪速度、鋼種による耐力の違いが見られたため、モデル化する場合に別段の考慮が必要である。
- ・第 1 サイクル以後の耐力は、歪振幅によらず概ね一定の値で頭打ちになっており、また履歴形状が繰返し挙動の中で大きく変化しないことから、Bi-linear 型でモデル化を検討できる。

(2) 歪速度による鋼材の履歴挙動に関するデータベース

①データベースの概要

鋼材の歪速度や速度依存性に関して、鋼材を対象として歪速度を変化させた動的荷重実験を行った研究を調査した。ここで歪速度を扱った実験研究は建築分野において限定的であることから、機械分野・造船分野についても広く文献を調査し、建築分野で検討する範囲(本研究では 10^{-3} ~ 10^2 %/s を想定した)

の歪速度を扱った実験研究はデータベースに取り上げ、各種項目における歪速度の影響を全体的に把握するようにした。データベースは歪速度だけでなく、鋼種、試験体形状、降伏点（上降伏点・下降伏点）、最大応力、最大応力発生時歪、破断歪などの項目に着目して作成した。ここでは鋼種は普通鋼 SS400、SM50、SN490、高張力鋼 HT780、ステンレス鋼 SUS304、低降伏点鋼 LYP225、LYP100 と、一般的に梁や柱に用いられるものだけでなく履歴型ダンパーの芯材に使用されるものや高強度材、特殊鋼についても収録した。

②データベースに基づく鋼材の履歴に対する歪速度の影響

データベースでは約 200 体の試験体についての情報をまとめたが、そのほとんどは高速であっても単調荷重であった。歪速度の増加に伴って上降伏点、下降伏点、引張強さ及び降伏後最大応力が上昇し、特に上降伏点が著しい。引張強さについては降伏点より上昇率が緩やかであった。応力の上昇は鋼種によって異なり、低降伏点鋼(LYP225、LYP100)は歪速度による変化を受けやすく、普通鋼や高張力鋼は比較的变化を受けにくい(図 10)。また、歪速度が大きくなると破断時の塑性歪が変化するが、低降伏点鋼は歪速度に反比例して小さくなり、その他の鋼材はほとんど変化しないかやや大きくなる傾向を示した(図 11)。

③(1)の実験との対応

2011 年に実施した繰返し高速荷重実験は単調荷重も繰返し荷重でも、降伏点および最大応力の応力上昇率はデータベースより示された上昇率とほぼ同じであった(図 12、13)。また繰返し高速荷重実験において、歪速度が応力度の上昇率に大きく寄与するのは最初の半サイクルであり、その後の履歴挙動、特に応力には歪速度の影響はそれほど生じないことから、データベースを使うことで歪速度の影響を顕著に受ける半サイクルの履歴挙動の詳細と歪速度との関係を示すことが可能であることを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

- ① Yuko Shimada, JooHo Kim, Yu Jiao, Satoshi Yamada, STRAIN-RATE EFFECT ON THE HYSTERETIC BEHAVIOR OF STRUCTURAL STEEL, 査読有り, 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering/ 4th Asia Conference on Earthquake Engineering (9CUEE&4ACEE),

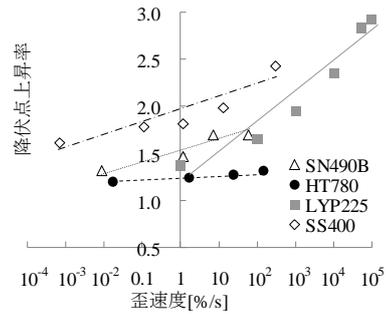


図 10 データベースによる応力上昇率

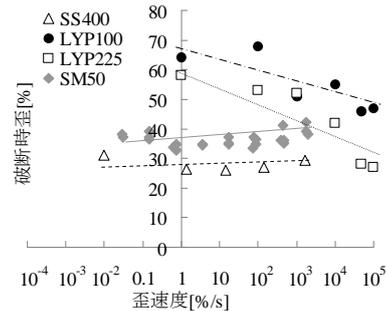


図 11 データベースによる破断歪

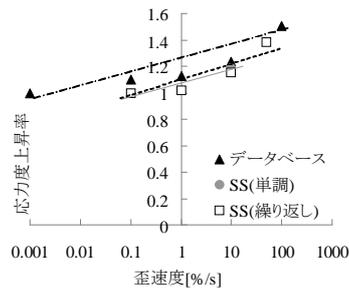


図 12 データベースと動的繰返し荷重実験の降伏点比較

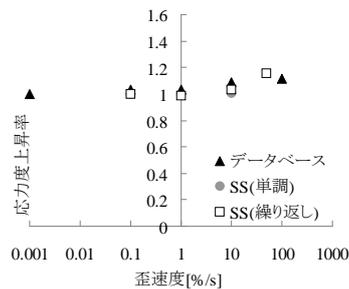


図 13 データベースと動的繰返し荷重実験の最大応力度比較

2012

- ② 島田侑子、金柱澁、焦瑜、山田哲、繰返し高速載荷実験による鋼材の動的応答特性（その1）、査読なし、2011年度日本建築学会関東支部研究報告集、2012、pp. 553-556
- ③ 金柱澁、島田侑子、焦瑜、山田哲、繰返し高速載荷実験による鋼材の動的応答特性（その2）、査読なし、2011年度日本建築学会関東支部研究報告集、2012、pp. 557-560

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

島田 侑子 (SHIMADA YUKO)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90586554