

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：32660

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860060

研究課題名(和文) 鋼製スリットダンパーの低サイクル疲労特性及び動的耐震性能の定量化

研究課題名(英文) Fatigue behavior of steel slit damper with various shapes

研究代表者

焦 瑜 (Jiao, Yu)

東京理科大学・工学部・助教

研究者番号：40632493

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、せん断降伏型履歴ダンパーの一種である鋼製スリットダンパーを対象とし、形状の違いがスリットダンパーの疲労特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。ダンパーの高さ、リブ端部の半径、リブの幅などの形状パラメーターを持つスリットダンパー試験体を用いて繰り返し載荷実験を行った。そして、せん断力を受けるスリットダンパーのリブの半スパンをモデルとした繰り返し載荷有限要素法解析を用いてパラメトリックスタディを行った。異なる形状を持つスリットダンパーリブ平行部端部の破断箇所近傍に生じた累積歪の大きさとダンパーの疲労寿命との関係を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of this study is to evaluate the low-cycle fatigue behavior of slit-dampers with different shapes. Cyclic loading tests of slit-dampers with various shapes were conducted. Eight series of different shaped slit-damper specimens (flexural yielding type) made of SN400B steel were tested during the experiment. Moreover, parametric study was carried out through FEM analysis, where the shape factors and loading histories were the parameters. Half-span of the damper strip were used as the analytical model in this study. It is found that the cumulative strain at the toe of the strips has strong correlation with the fatigue life of the damper. The effects of each shape parameter on the low-cycle fatigue behavior are evaluated based on the local strain history.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

キーワード：鋼製スリットダンパー 疲労性能 繰り返し載荷実験 有限要素法解析 エネルギー吸収能力

1. 研究開始当初の背景

地震動による建物への入力と建築物の耐震性能は、入力地震エネルギーと構造物のエネルギー吸収能力で表すことができる。そのため、制振ダンパーに関する研究は重要な課題となっている。現在、実用化されている制震装置には、鋼材ダンパー、粘弾性ダンパー、オイルダンパー及び TMD などが挙げられる。本研究では制振ダンパーで最も適用数の多い履歴型鋼材ダンパーの内、現状では汎用性が低いと思われる鋼製スリットダンパーに着目した。

このダンパーの特徴としては、優れたエネルギー吸収能力を持ち、大人が一人で持てる程度の大きさであるため、施工・交換の容易性などが挙げられる。また、設置箇所として間柱型、壁型及びシアリンク型が挙げられるうえに、形状寸法を変化させることで力学特性を調整できるため、新築の建物だけでなく耐震改修での利用を考えた場合、既存の建物に見合った寸法で要求性能を満たすダンパーが柔軟に設計できる。しかし、これまでの研究の多くはある形状を有するスリットダンパーの力学特性や低サイクル疲労特性を実験で調べることに留まれ、使用する際の自由度は低く、スリットダンパーの利点を活かしてきれていないことは現在汎用性が低い理由の一つとして考えられる。

2. 研究の目的

鋼製スリットダンパーの汎用性を高めるためには、設計者が求める性能及び使用箇所に応じた適切なダンパーを選択にできるため、スリットダンパーの主な設計パラメーターである形状と低サイクル疲労特性の関係を解明し、形状の影響を考慮できる一般化破壊モデルを把握することを本研究の目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、ダンパーリブの幅やリブ端部のスリット半径など形状ファクターをパラメーターとして、終局状態までスリットダンパー静的繰り返し載荷実験を実施し、スリットダンパーの低サイクル疲労特性について基本的なデータベースを構築する。そして、異なる形状を有するスリットダンパーの低サイクル疲労特性を実験である程度把握する上、有限要素法解析の手法を用いて各形状パラメーターが鋼製スリットダンパーの低サイクル疲労への影響を明らかにする。

3.1 鋼製スリットダンパーの繰り返し載荷実験

鋼製スリットダンパーの形状の違いが疲労特性に与える影響を検討するために、5つのパラメーターを設定し、形状の異なるスリットダンパーの一定振幅繰り返し載荷実験を行った。本研究では7種類3体ずつ計21体の試験体を設計した(図1、表1)。ここで、

表1 試験体の詳細

試験体名	r(mm)	b(mm)	n(本)	t(mm)	h(mm)	B(mm)	D(mm)
Base ⁵⁾	10	15	9	16	130	315	310
R15 ⁵⁾	15	15	9	16	120	405	310
B20 ⁵⁾	10	20	9	16	130	360	310
N13 ⁵⁾	10	15	13	16	130	455	310
T22 ⁵⁾	10	15	9	22	130	360	310
T22/R5	5	15	9	22	140	225	310
D250/B15	10	15	9	16	70	315	250

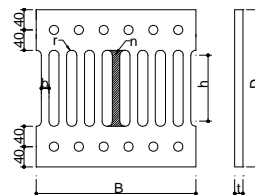


図1 試験体の形状

rはスリット孔端部の半径、bはリブの幅、nはリブの本数、tは試験体板厚、BとDはダンパーの幅、高さを意味する。本実験では同一ロットの鋼材(SN400B)を用いた。

図2に実験装置を示す。装置は、反力フレーム・オイルジャッキ(最大加力200kN、ストローク±150mm)・反力治具・加力治具・L型治具・横補剛材からなる。試験体の下部に高力ボルトでL型治具を介して反力治具に固定させ、反力治具を反力フレームに緊結し反力をとった。また、試験体の上部はL型治具と加力治具を介し、反力フレームに固定したジャッキに繋げて載荷した。また、加力中試験体の面外変形を防ぎ、さらに加力治具と反力治具を平行させて加力するため、加力治具と反力治具の間の4か所にピン柱(横補剛システム)を設置した。

本実験では、ジャッキに内蔵されたロードセルの値、及びバネ式変位計δ5からジャッキの鉛直変位の計測値より水平荷重を算出した。また、試験体の上下左右4箇所(δ1~δ4)を設置し、試験体水平変形を計測した。更に、局所に生じる歪を計測するため、リブの平行部端部及びリブの中央部両面に歪ゲージを貼付した。

載荷プログラムについて、各種試験体1体ずつに、部材角0.27rad、0.16rad、0.053radの3種類の一定変位振幅載荷履歴で加力した。

載荷中、全ての試験体において、損傷が集中すると思われる各リブの平行部端部にほぼ一様に延性亀裂が観測され、その後、加力に伴い、長さ及び深さ方向に進展し、終局状態に至った(図3)。本研究では、耐力が最大時の90%まで低下すると耐力が急激に低下し始め、その時点を終局状態と定義した。

図4にT22及びT22/R5試験体の荷重-変形関係を例示する。全ての試験体において荷重-変形関係は降伏した後も耐力が上昇し、終局状態まで安定した紡錘形の履歴ループを描いた。図中の▲は終局状態の位置を示している。また、全ての試験体において、ひずみが集中する箇所であるリブの平行部端部小口面に一様に延性亀裂が発生していた。載荷とともに進展し、終局状態に至った。

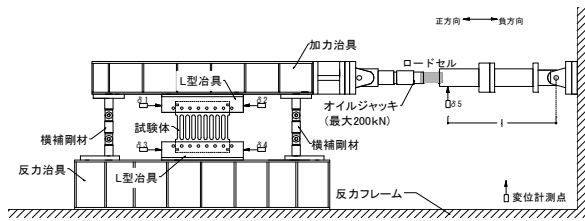


図2 実験装置と変位計の設置箇所

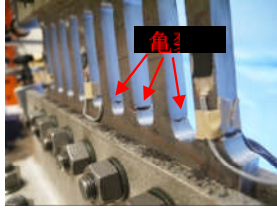


図3 亀裂発生箇所

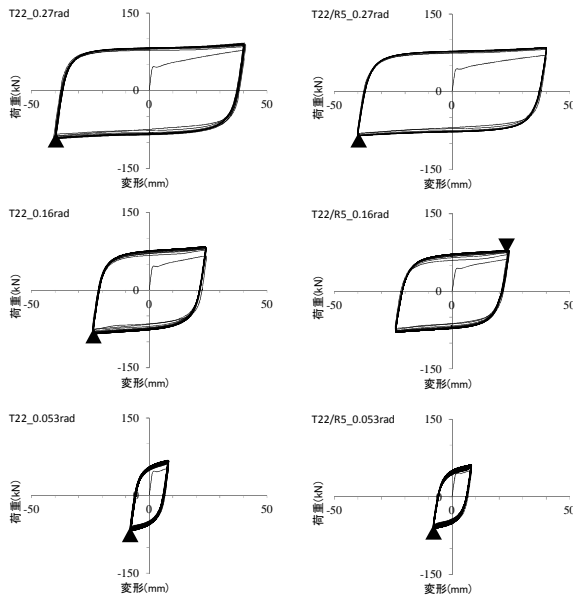


図4 荷重-変形関係

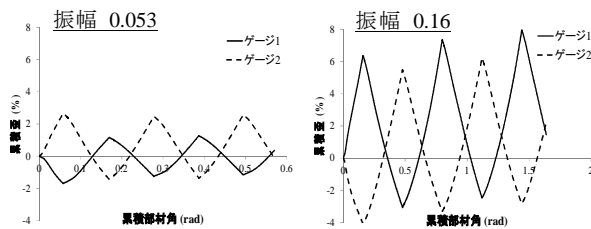


図5 リブ平行部端部歪履歴(R15 試験体)

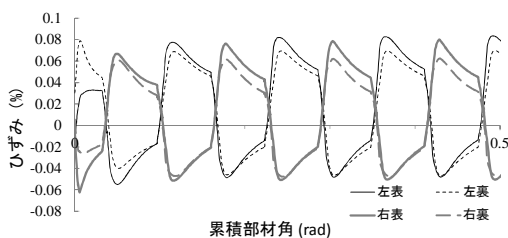


図6 リブ中央部歪履歴(D250/B15、0.053rad)

図5に、R15 試験体を例とし、最初の3サイクルリブ平行部端部の歪履歴を示す。振幅の大きい試験体にリブ端部に生じた歪履歴の振幅も大きくなった。塑性化した後、繰り返し载荷による局所微小曲げにより、各サイクルの最大歪が引張側にシフトしていく傾向が見られた。

試験体左端部及び右端部リブ中央の歪履歴(1~10サイクル)を図6に示す。軸力の指標である中央部に生じた最大歪みは0.08%以下であり、軸力の影響は少なかったことが分かった。また、試験体左右両端部リブ表と裏の歪の値は殆ど差がないことより、試験体の面外曲げは生じていなかったことが確認できた。

3.2 鋼製スリットダンパーの繰り返し有限要素法解析

本研究の有限要素法解析に汎用解析プログラム ABAQUS (V6.9) を使用した。試験体は軸対称の形状であるため、解析対象部分はリブ1本の半分とその周辺部分とした。解析モデルの例を図7に示す。メッシュの大きさは、どの試験体の解析モデルにおいてもエネルギー吸収部分であるリブの平行部の端部周辺を1mm程度とし、要素の縦横比が2を超えないように分割した。使用した要素は3次元4節点低減積分シェル要素 S4R である。板厚16mm、22mmの試験体ともに、厚さ方向の積分点は5つであり、厚さ方向の積分方法はシェル要素で一般的である Simpson 積分を使用している。材料特性は $E=205\text{GPa}$ 、ポアソン比0.3、Von Mises の降伏条件とし、降伏耐力は材料試験結果を用いた。塑性化後は等方硬化則、移動硬化則を考慮した混合硬化則を採用した。また、境界条件は図7に示す解析モデルにおいて、下辺は完全固定、上辺は自由端とし実験と同様に X 軸方向に3種類の強制変位を作用させた。

終局状態までの実験結果と解析結果の荷重-変形関係の一例を図8に示す。全ての試験体において図4と同様に、初期剛性やひずみ硬化による耐力上昇、最大荷重、バウシニング効果など、解析結果は実験結果と概ね良い一致を示した。また、実験値と解析値のリブ一本当たりの終局状態までの累積塑性エネルギーを比較すると誤差は最大でも30%以内と履歴ループの形状のみならず、エネルギー吸収量の対応関係も良好であると考えられる。

図9に Mises の応力図の一例を示す。全ての試験体において、エネルギー吸収部であり、実験時亀裂の発生していたリブの平行部の端部において、応力が集中していることが分かる。また、曲げ応力によってリブの平行部端部が塑性化し、時間の経過に伴い、塑性化領域が側面から内側、中央部分へと広がっていく様子を解析結果から確認することが出来た。図10に実験と解析結果のひずみ履歴の一例を示す。解析におけるひずみデータは、

実験時の塑性ひずみゲージ貼付付近に相当する要素のひずみデータを出力している。また、実験時のひずみの計測には限度があるため、実験データが計測できているところまでのひずみの履歴を示している。図 10 より、サイクル数が増すごとに微小曲げの蓄積によってひずみ履歴が正側にシフトする様子は解析結果からも確認でき、歪みレベルでも解析結果は実験結果を模擬できたと考えられる。

4. 研究成果

図 11 にすべての試験体破断までのエネルギー吸収（等価累積塑性変形倍率－振幅の関係）及び疲労曲線（全振幅－破断までの繰り返し回数の関係）を示している。異なる形状の試験体共に振幅が小さくなると繰り返し回数及びエネルギー吸収量は増加した。各形状の試験体の振幅－サイクル数関係は両対数グラフでほぼ平行直線になることが分かった。

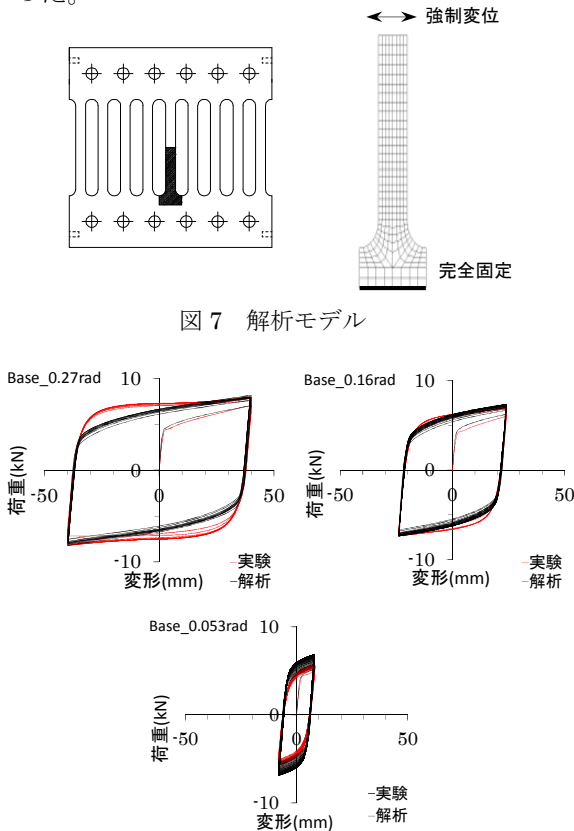


図 7 解析モデル

図 8 実験・解析結果の比較(荷重－変形関係(Base))

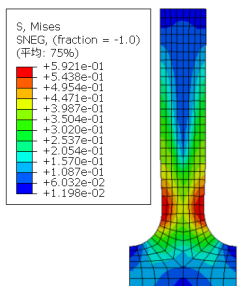


図 9 Mises の応力図 (Base_0.27rad)

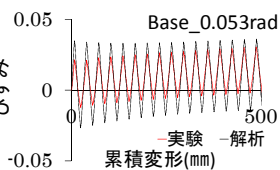


図 10 実験・解析結果の比較(歪履歴(Base))

図 12 より、R15 の方が Base よりも大きいひずみが生じていることが分かった。その結果、スリット孔端部の半径が大きい R15 の方が終局状態までの繰り返し回数・等価累積塑性変形倍率は小さくなった(図 11)。Base に比べ半径の大きい R15 の方がリブ平行部の長さが短いため、同じ荷重振幅を受ける場合リブ平行部の変形角が大きくなり、平行部縁に生じるひずみが大きくなったためであると考えられる。

破断箇所近傍（リブ平行部端部）における累積歪みの進展は図 12 に示している（振幅は 0.053 rad）。T22 と T22/R5 の累積歪み履歴を見ると、荷重の途中まで両者はほぼ等しい値を示した。しかし、累積部材角は 1rad になった以降、T22 より T22/R5 の方が累積歪みの上昇が若干大きくなり、破断までの繰り返し回数は少なかった(図 11)。原因として半径の小さいことによる歪みが集中し、T22/R5 の方が先に破断に至ったと考えられる。

図 12 より、Base よりも B20 に生じているひずみが大きいことがわかる。その結果、リブの幅が大きい B20 の方が、終局状態までの繰り返し回数・等価累積塑性変形倍率は小さくなった(図 10)。これは同じ荷重履歴を受ける場合リブ幅が大きい B20 の方が平行部縁に生じるひずみが大きくなったためであると考えられる。

Base に比べ D250/B15 の方がリブ平行部端部に大きな累積歪みが生じた(図 12)。その結果、ダンパーの高さが低い D250/B15 の方が破断までの繰り返し回数及び等価累積塑性変形倍率は小さくなった(図 11)。曲げ降伏型試験体において、リブ平行部長さの違いによって、モーメント勾配・リブの塑性化領域が異なる。それによるリブ平行部端部における生じた累積歪みの違いが、Base と D250/B15 の疲労特性が異なった原因と考えられる。

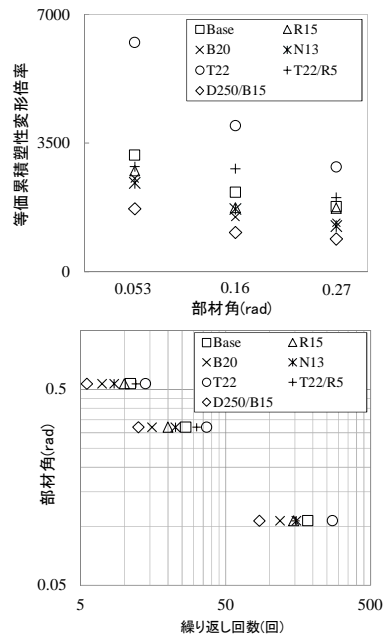


図 11 試験体の疲労特性

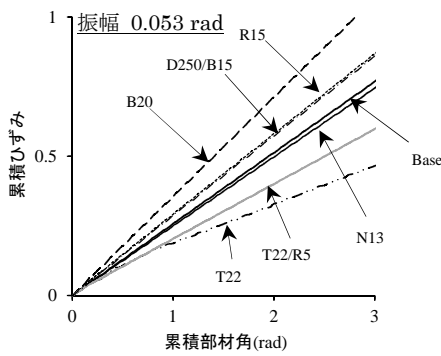


図 12 リブ平行部端部累積歪の進展

図 12 に示す累積ひずみの進展から、T22の方が生じているひずみは小さいことがわかる。板厚が厚いT22の方が終局状態までの繰返し回数・等価累積塑性変形倍率は大きくなった(図 11)。板厚の違いによって生じる三軸拘束の影響はその原因と考えられる。

図 12 に示す累積ひずみの進展は、Base と N13 でほぼ等しい値を示している。試験体に作用する荷重は概ね N13 の荷重の 9/13 が Base に作用しており、リブ一本当たりの負担に大差はみられない。リブの本数はスリットダンパーの疲労特性に明らかな影響がないことが確認できた。

以上、本研究では、繰返し載荷実験及び有限要素法解析の結果から、鋼製スリットダンパー平行部端部の破断箇所近傍に生じた累積歪の大きさがダンパーの疲労寿命に結びつくことが分かった。スリットダンパーの各形状パラメーターがダンパーの疲労特性に及ぼす影響を検討した。

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 1 件)

1) 勝山 由佳子、焦 瑜、河野 守, 鋼製スリットダンパーの形状の違いが疲労特性に及ぼす影響 (査読有り), 構造工学論文集, Vol. 60B, 2014 年 3 月

[学会発表] (計 4 件)

1) Yu Jiao, Yukako Katsuyama, and Mamoru Kohno, Cyclic loading tests of steel slit-dampers with various shapes. 10CUEE, Tokyo, 2013.3.1

2) 勝山 由佳子、焦 瑜、河野 守, 形状の異なる鋼製スリットダンパーの低さくルク疲労特性に関する実験研究, 2012 年度日本建築学会関東支部研究発表会, 2013 年 3 月 8 日 東京

3) 勝山 由佳子、焦 瑜、河野 守, 形状の異なる鋼製スリットダンパーの疲労特性に関する実験研究, 日本建築学会年度大会, 2013 年 8 月 30 日 札幌

4) 焦 瑜、河野 守, 鋼製スリットダンパーの繰返し載荷実験, 日本建築学会年度大会, 2014 年 9 月 14 日 神戸 (発表確定)

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

焦 瑜 (JIAO, Yu)
東京理科大学・工学部第二部・助教
研究者番号：40632493

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：