

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 25 年 1 月 31 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560597

研究課題名（和文） 損傷制御構造における履歴型鋼材ダンパーの限界性能の解明

研究課題名（英文） Ultimate fracture performance of steel hysteresis dampers in damage control structures

研究代表者

見波 進 (MINAMI SUSUMU)

首都大学東京・都市環境科学研究科・助教

研究者番号：00219693

研究成果の概要（和文）：建物の自重を支持する弾性主架構（柔部分）と地震入力エネルギーを吸収する弾塑性要素（剛部分）から構成される耐震構造（損傷制御構造あるいは柔剛混合構造）において、強震時の応答制御要素として鋼材履歴ダンパーを用いる構造を対象として、破断で限界付けられる鋼材試験体に対し繰返し載荷実験を行い、一定振幅載荷と漸増振幅載荷の結果をランダム振幅載荷の結果と比較することにより、終局状態でのエネルギー吸収能力を定量的に評価する方法を検証した。

研究成果の概要（英文）： There is the so called "damage control structure" that composed with elastic main frames and elasto-plastic elements to absorb energy (hysteresis dampers). The ultimate performance of steel hysteresis damper is limited by its fracture. A method of estimating the energy absorption capacity of the dampers under ground motion is investigated based on cyclic loading tests.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	600,000	180,000	780,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

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：建築構造，鋼構造，鋼材，ダンパー，制振，地震応答，繰返し載荷実験，エネルギー吸収

1. 研究開始当初の背景

建物の自重を支持する弾性主架構（柔部分）と地震入力エネルギーを吸収する弾塑性要素（剛部分）から構成される耐震構造（柔剛混合構造[1]あるいは損傷制御構造[2]）においては、弾性架構の存在により、地震入力エネルギーが弾塑性要素で効率よく吸収さ

れる、さらに、地震終了時の残留変形が抑制されるという特徴がある。損傷制御構造には幾つかの手法があるが、風や環境振動の制御を対象としたものでは、エネルギー吸収装置として粘性ダンパーや粘弾性ダンパーを用いる場合がほとんどであるが、強震時の応答を制御対象としたものでは鋼材を始めとす

る履歴系の材料のダンパーを用いることが多い。鋼材を用いた履歴型ダンパーは、低コストな上、性能が安定しており信頼性が高く、その利点は多いが、その一方で繰返し荷重による破断により、そのエネルギー吸収能力が限界付けられる。

繰返し荷重を受ける鋼材の限界性能は、これまでいくつもの研究があり、明らかになっている部分も多い。鋼材の破断は、荷重の振幅と繰返し数により限界付けられる事実は一般に知られており、地震荷重を受ける場合の鋼材の破断において、鋼材の塑性化をもたらす繰返し数は、数回から数十回、近年注目されている長周期地震動でも高々数百回程度の低サイクルである。低サイクル繰返し時の破断限界に関しては、ある程度の知見がこれまで蓄積されており [3, 4 など], Manson-Coffin 則あるいは Miner 則といった金属疲労問題を拡張して検討されているが、ランダム荷重の場合の適用性については疑問視されている。桑村ら [5, 6] は、変位振幅と繰返し数により破断限界の予測式を提案しているが、ランダム荷重を受ける場合については今後の課題としている。

履歴型鋼材ダンパーを設計に用いるためには、地震荷重のようなランダムな振幅に対し、終局的なエネルギー吸収の限界能力を明確にすることは最も重要なことである。しかし、今までの研究のほとんどは定振幅ないし漸増振幅実験を行った研究に基づいて破断限界を検討したもので、ランダムな繰返し荷重を受ける場合の履歴型鋼材ダンパーの限界性能については未だ不明な点が多く、一般的に評価できる段階には至っていない。

一方、鋼材の応力歪関係や鋼構造部材の荷重変形関係が、スケルトン部とバウシंगाー部に分解することが出来るという考え方は一般によく知られている。鋼材の履歴特性のモデル化については、大井、高梨等の提案するスケルトンシフトモデル [7] のように、スケルトン部を多折線、バウシंगाー部を Ramberg-Osgood 曲線を用いて表わし、それらを組合せることで、高精度に鋼材の履歴特性を表わすことが出来るモデルが提案されている。秋山ら [8] は円形断面鋼棒について繰返し荷重実験を行い、荷重-変位関係をスケルトン部とバウシंगाー部に分解してエネルギー吸収能力の関係について明らかにしている。この中で、ランダム振幅による実験も行っているが、試験体数が少なく検証が不十分である。

2. 研究の目的

上に示したとおり、地震荷重のようなランダムな振幅に対し、鋼材履歴ダンパーを用いるためには、終局的なエネルギー吸収の限界能力を明確にすることが重要である。

本研究では、破断で限界付けられる鋼材試験体に対し繰返し荷重実験を行い、一定振幅荷重と漸増振幅荷重の結果をランダム振幅荷重の結果と比較することにより、終局状態でのエネルギー吸収能力を定量的に評価する方法を検証することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 繰返し荷重実験

① 試験体形状

履歴型鋼材ダンパー試験体には SS400 鋼棒から切削加工で製作した図-1 に示す直径 14mm、曲げ試験部長さ 40mm の形状の試験体を用いる。鋼棒の両端には取り付け用のねじがあり、片持ち梁形式に固定し自由端側をピンを介して繰返し荷重する (図-2)。

② 荷重および測定

荷重治具に取付けたロードセルにより荷重 (Q)、変位計により荷重点ピン中心位置の荷重方向変位 (δ) を測定する。荷重、変位は連続的に測定し、測定値を用いてエネルギー (E) を算出する。変位とエネルギーについては、降伏荷重を Q_p 、降伏変位を δ_p とし、次式による無次元化表記である累積塑性変形倍率 η を用いる。

$$\eta = E / (Q_p \cdot \delta_p)$$

荷重はすべて準静的に変位制御で行う。実験は破断、すなわち荷重がほぼ 0 に至るまで行う。

・ 一定振幅荷重：正負対称交番の一定変位振幅で荷重する。

・ 漸増振幅荷重：正負対称交番の漸増変位振幅で荷重する。同じ大きさの変位振幅を正負一回ずつ等倍に漸増する振幅 ($x, -x, 2x, -2x, 3x, -3x, \dots$) で荷重する。

・ ランダム振幅荷重：地震応答解析に基づく変位振幅で荷重する。振動モデルは損傷制御構造を想定した主架構を模す弾性ばねとダンパーを模す履歴特性のばね、粘性減衰および質点から成る一自由度系を用いる (図-3)

③ 入力地震動

入力地震動には継続時間の異なる 5 波 JMA-Kobe (NS) 1995, El Centro (NS) 1940, K-NET 苫小牧 (NS) 2003, 想定南海地震西大阪予測波 [9], 告示波を用い、地動加速度を係数倍し大きさを調整する。

(2) ダンパーの性能限界評価法

荷重の回数は「半サイクル」を用いて表す。図-4 に示すように、半サイクルは荷重が 0 点を超えて、折返し、再び 0 点に至るまでとする。半サイクルで吸収するエネルギーを半サイクル吸収エネルギー ($\Delta \eta$, 同図中塗りつぶし範囲) とする。ある半サイクルでの折返し点での荷重が全体の最大荷重の 75% を最後に下回ったときを限界点と定義し、そこに至るまでの吸収エネルギーを評価する。ただし、

半サイクル吸収エネルギーのうち最大値の5%未満の大きさの小振幅成分は損傷にあまり関与しないものとし取り除く。残った半サイクルの数、即ち損傷に対し有効な半サイクルの数を有効半サイクル数とし N_e で表し、この有効な半サイクル吸収エネルギーの総和を有効吸収エネルギーとし η_e で表すこととする。また、次式による $\Delta \eta_m$ を平均エネルギー振幅とする。

$$\Delta \eta_m = \eta_e / N_e \quad (1)$$

本研究ではこれらの諸量について、実験結果に基づきエネルギー吸収に関する限界性能の評価を行う。

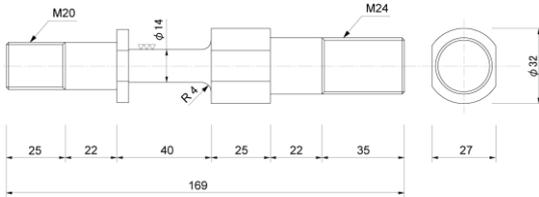


図-1 試験体形状

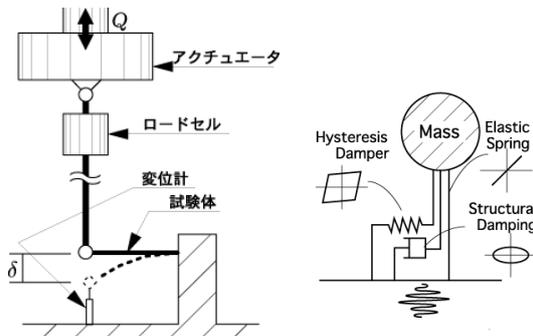


図-2 荷重セットアップ

図-3 振動モデル

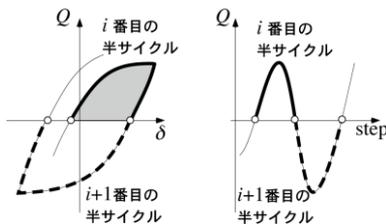


図-4 半サイクル

4. 研究成果

(1) 実験結果

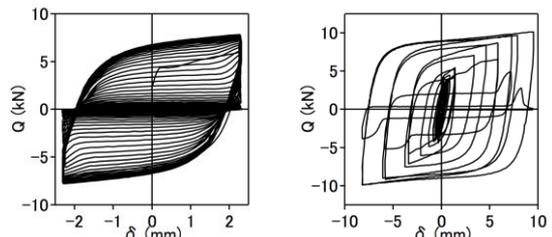
荷重変形関係の一例を図-5 に示す。図-5(a)の場合の半サイクル数と最大耐力の変化を図-6 に示す。過去の最大耐力の75%まで耐力が下がった点が限界点で、×印で示す。下の図は累積のエネルギー吸収量の変化を示す。限界点以降はほとんどエネルギーを吸収しておらずエネルギー吸収能力のほぼ限界に達していることが分かる。図-7 は図-5(b)の場合の半サイクルごとの $\Delta \eta$ である。このうち塗りつぶしの半サイクルが有効な $\Delta \eta$ である。

図-8 に一定振幅荷重の平均エネルギー振幅と有効半サイクル数の関係を○印で示す。振幅が小さくなると限界までの繰返し回数が增加することが分かる。これは通常の金属疲労における応力やひずみの振幅のS-N曲線に相当し、エネルギー振幅を用いても両対数グラフ上でほぼ直線関係となることが確認できる。これを同様の形式の下式で近似すると、

$$\Delta \eta_m = C / N_e^m \quad (2)$$

$C=502$, $m=0.757$ という結果が得られた。図中に実線で示す。

漸増振幅荷重、ランダム荷重の結果を同図中にそれぞれ▲印、●印で示す。同様に平均エネルギー振幅が小さくなると限界までの半サイクル数が増加することが見てとれる。



(a) 一定振幅荷重(±2.3mm) (b) ランダム荷重(Kobe)

図-5 荷重変形関係の例

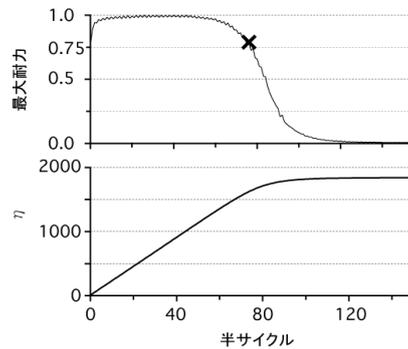


図-6 破断限界点

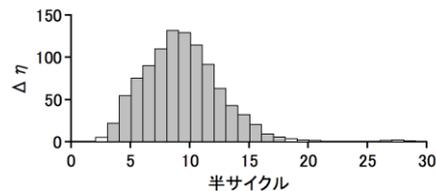


図-7 ランダム荷重の $\Delta \eta$ の例(Kobe)

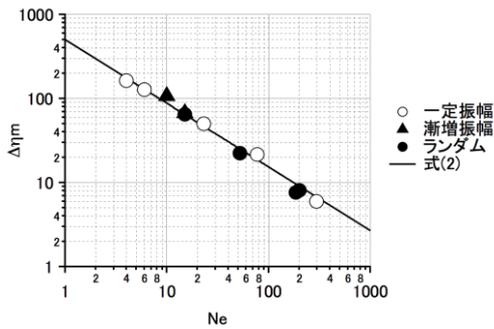


図-8 $\Delta \eta_m$ と N_e の関係

(2) 有効吸収エネルギーの推定

実験結果より有効半サイクル数と平均エネルギー振幅について漸増振幅やランダム载荷の場合も一定の関係が得られることが分かった。ここで、一定振幅载荷のエネルギー吸収性能を基準として実験結果を整理する。

鋼材ダンパーとしての疲労特性が式(2)により得られているとする。ダンパーが限界状態までに吸収できるエネルギーは次式で得られる。

$$\eta_e = \Delta \eta_m \cdot N_e = C \cdot N_e^{(1-m)} \quad (3)$$

この式を用いて吸収エネルギーを予測し実験値との対応を図-9に示す。図中の白抜きのプロットが式(3)による予測値である。多少ばらつきはあるものの概ね対応している。

半サイクルのエネルギー吸収量を振幅の指標として扱い、これを用いてMiner則に類似な方法で損傷度のD値を評価しD=1.0のときがダンパーの性能限界点に対応するとして吸収エネルギーの推定方法を文献[10]で提案されている。この方法による予測値を同図中に塗りつぶしのプロットで示す。本研究の簡易的な方法でもMiner則に類似の損傷度評価の方法と遜色ない結果となっている。

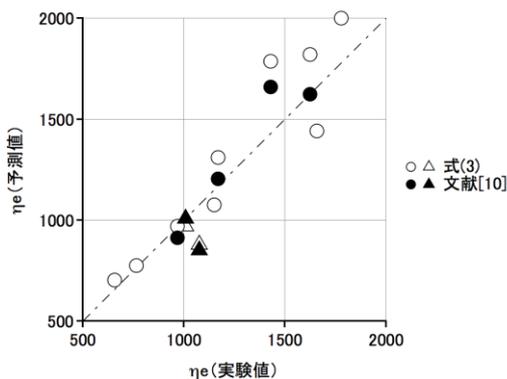


図-9 吸収エネルギーの予測

(3) まとめ

損傷制御構造において使用するエネルギー吸収要素としての鋼材履歴ダンパーの疲労特性が式(2)によって実験的に求まり、別

途、構造物が受ける地震規模に応じた繰返し回数や鋼材履歴ダンパーが受ける振幅が分かれば、式(3)により破断限界までのおおよそのエネルギー吸収量が予測できる。これによりエネルギーのつり合いに基づく設計[1]において、想定した地震による入力エネルギーとの比較により設計を行う上で有用な方法となる。

【参考文献】

- [1] 秋山宏：エネルギーの釣合いに基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，1999
- [2] 和田章，岩田衛，清水敬三，阿部重孝，川合広樹：建築物の損傷制御設計，丸善，1998
- [3] 中込忠男，李建：繰返し力を受けるSM490鋼の疲労性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No. 469，pp. 127-136，1995. 3
- [4] 小野徹郎，加古康也，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. 6
- [5] 一戸康生，桑村仁：鉄骨の脆性破断に及ぼす繰返し変位振幅の影響，日本建築学会構造系論文集，No. 534，pp. 145-151，2000. 8
- [6] 桑村仁，高木直人：「破断履歴の相似則」の検証，日本建築学会構造系論文集，No. 548，pp. 139-146，2001. 10
- [7] 孟令樺，大井謙一，高梨晃一：鉄骨骨組地震応答のための耐力劣化を伴う簡易部材モデル，日本建築学会構造系論文集，No. 437，pp. 115-124，1992. 7
- [8] 秋山宏，高橋誠，石軍：繰返しを受ける円形断面鋼棒の終局エネルギー吸収能力，日本建築学会構造系論文集，No. 475，pp. 145-154，1995. 9
- [9] 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性，2007. 12
- [10] 田原健一，山崎真司，見波進：損傷制御構造に設置された履歴ダンパーのエネルギー吸収能力予測法，日本建築学会構造系論文集，Vol. 73，No. 630，pp. 1353-1360，2008. 8

5. 主な発表論文等

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

見波 進 (MINAMI SUSUMU)

首都大学東京・都市環境科学研究科・助教

研究者番号：00219693

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし