

振動台実験による部分骨組の耐震性能評価

制振ダンパーを組み込んだ鋼構造骨組の耐震性 その2

EVALUATION OF SEISMIC PERFORMANCE OF PARTIAL FRAMES
USING THE SHAKING TABLE TEST

Seismic performance of moment resisting steel frame with damper Part 2

山口路夫*¹, 山田 哲*², 前田泰史*³, 荻原みき*⁴竹内 徹*³, 成川匡文*⁴, 中島正愛*⁵, 和田 章*⁶*Michio YAMAGUCHI, Satoshi YAMADA, Yasushi MAEDA, Miki OGIHARA,
Toru TAKEUCHI, Masafumi NARIKAWA, Masayoshi NAKASHIMA and Akira WADA*

In this paper, evaluation of seismic performance of moment resisting steel frame using the shaking table test is discussed. Specimens are moment resisting steel frame with or without use of the buckling resisting brace. Three different type waves (El Centro, Hachinohe and Kobe) are inputted in the shaking table with two levels (level 1 = 25kine, level 2 = 50kine).

As a result of the test, we have confirmed that moment resisting steel frame with the buckling resistant brace can greatly reduce both the deformation angle and maximum strain at the edge of the beams in their mainframe. It was also shown that a capacity for energy absorption and fatigue properties of the damper decreases when set within the frame. However, the buckling resistant brace within the frame has enough capacity to resist level 2 earthquakes more than 30 times.

Keyword: shaking table test, steel structure, partial frame, buckling resistant brace, seismic performance

振動台実験 鋼構造 部分骨組 座屈拘束ブレース 耐震性能

1 序

1994年, 1995年に起こった、ノースリッジ地震、兵庫県南部地震の被害を受けて、構造物を鉛直荷重を支持する主体構造と動的な外乱に抵抗するエネルギー吸収機構に分離し、主体構造を弾性範囲にとどめる「損傷制御構造」¹⁾が注目されている。損傷制御構造では、大地震後もエネルギー吸収部材のみの点検、場合によっては補修により継続的な使用が可能となる。近年、損傷制御構造など^{1)~3)}などの高層建築物への適用は盛んになり、大空間建築から低層建築まで広い範囲への応用が期待されている。

制振部材を含む構造物の全体挙動は、部材実験とその結果のモデル化、及び数値計算を用いて予測される。このような手法を用いた場合、モデル化や数値計算による誤差など、不透明なエラーを取り除くことは出来ない。本研究では、立場を変え、前報⁴⁾で報告した振動台実験手法を用い、より現実的な部材、現実的な端部拘束条件を用い、構造物を上部構造をモデル化した1質点振動系へと置換し、実験を行う。そのため、数値的な誤差などの不透明なエラーを排除でき、クリアな閉じた系の中で部分骨組の耐震性能を評価する事が出来ると言える。

本報では、上記の方法を用いて、以下の2つについての研究成果を報告する。一つ目は、保有水平耐力を揃えて設計した純ラーメン骨組と制振ダンパーとして座屈拘束ブレースを組み込んだ損傷制御骨組の骨組と

しての耐震性能を比較、二つ目として、損傷制御骨組に関して、骨組に組み込まれた座屈拘束ブレースの、破断に至るまでのエネルギー吸収性能、及び疲労特性の定量的評価を示す。

疲労特性は、最大変形能力や累積塑性変形倍率と共に、鋼製の履歴ダンパーの性能を示す指標⁵⁾とされ、その疲労特性は「応力集中や初期不整の影響を排除した鋼材の純粋な状態での素材レベルの性能→応力集中や初期不整の影響を含んだ部材としての総合的な部材レベルの性能→骨組に組み込まれた状態で座屈拘束ブレースの端部に生じるモーメントの影響など、現実的な外力条件、材端拘束条件での骨組レベルの性能」と低減すると考えられる。本研究で用いるものと同様な形式の座屈拘束ブレースについては、すでに素材レベル⁶⁾⁷⁾、部材をモデル化した要素レベル⁸⁾、部材レベル⁹⁾¹⁰⁾の研究が報告され、疲労特性は素材から要素で1/2~1/5程度に、また、素材から部材で1/6~1/10程度になることが明らかにされている。また、異なる形式の座屈拘束ブレースについても、数多くの研究が行われており^{11)~20)など}、それらの中で疲労特性については、文献16)~18)などで取り上げられている。しかし、骨組に組み込まれた状態までを反映した研究は少なく^{19)20)など}、さらに実時間に則し、ランダムな履歴を受けた座屈拘束ブレースの疲労寿命の定量的な評価は、これまでほとんど行われていないのが現状である。しかし、損傷制御骨組の耐震性能の評価には必要不可欠な研究課題である。

*¹ 東京工業大学 大学院生(日本学術振興会 特別研究員)*² 東京工業大学建築物理研究センター 助教授・博士(工学)*³ 新日本製鐵建築事業部*⁴ 東京電力電力技術研究所*⁵ 京都大学防災研究所 教授・Ph. D.*⁶ 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology (JSPS Research Fellow)

Assoc. Prof., S.E.R.C., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Building Construction Division, Nippon Steel Corporation

Power Engineering R&D Center, Tokyo Electric Power Company

Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Ph. D.

Prof., S.E.R.C., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

2 実験概要

2-1 実験方法

本研究で用いる振動台実験方法⁹⁾の概念を図1に示す。この方法は、実構造物の部分骨組の地震時挙動を近似的に再現することを目的としたもので、部分試験体に直列に接続された上部構造柔性モデルバネを有し、実構造物と同等の固有周期を実現している。また、錘を振り子としてつり下げることにより、振動台が錘の重量を支持する必要がなくなるなどの特徴を持つ。

2-2 試験体

試験体は梁の反曲点位置で取り出した1/2スパン部分骨組とした。試験体は、一般的な構造形式である純ラーメン構造と制振ダンパーとして、座屈拘束ブレースを組み込んだ損傷制御骨組の2種類とし、それぞれ1体ずつ製作した。図2に純ラーメン骨組試験体、図3に損傷制御骨組試験体を示す。試験体サイズは共通で、仕口パネル中央から加力点までを2500 mm、梁材エンドプレート端部までを2000 mmとした。断面形状は柱材、梁材共にH型断面と寸法を同図中に示す。図4に示す座屈拘束ブレースは軸方向力を伝達し、塑性化によりエネルギーを吸収する鋼材（以下、芯材）を鋼管、モルタルおよび緩衝材によって拘束するものである。芯材は極低降伏点鋼（BT-LYP100）とし、16x25 mmの矩形断面とした。文献10)に示される平板断面の座屈拘束ブレースを参考に、継ぎ手部分から2段階で絞りを入れている。図5に予備解析で求めた試験体のせん断力-層間変形（角）関係を示す。両骨組は、主体構造塑性化時の水平耐力を描いて設計されている。両試験体セットアップ時の実験システムの固有周期と減衰を表1に示す。実験システムの固有周期は、試験体に直列に接続された上部構造柔性モデルバネの影響により近い値を示す。

2-3 入力波および入力レベルの設定

表2に入力波を示す。振動特性の異なる3種類の強震記録波形に若干の補正を加え入力波とした。表3に設定した入力レベルを示す。入力レベルは、2段階とし、地震動の最大速度で基準化した。入力レベルの設定は、実験システムをモデル化した1質点系弾塑性解析に基づいて行った。Level 1は両骨組の主体構造が弾性範囲に留まる程度の入力とし、最大速度を25kineと設定した。Level 2は純ラーメン骨組が大きく塑性化する入力としてLevel 1を2倍し、最大速度を50kineと設定した。

2-4 加振手順および各加振での目標

両試験体について行った加振の順序および各加振での目標を示す。

1. パルス加振

小振幅のパルス波を入力し、固有周期と減衰の検証を行う。

2. 性能比較加振

各入力波、各入力レベルでの耐震性能を骨組の履歴特性、最大層間変形角、梁端部の最大歪み等に着眼し比較する。

2-1. Level 1 加振

最大速度 25kine。入力順序はEl Centro, Hachinohe, Kobe

主体構造が弾性範囲に留まる程度での耐震性能を比較する。

2-2. Level 2 加振

最大速度 50kine。入力順序はEl Centro, Hachinohe, Kobe

純ラーメン骨組が大きく塑性化する範囲での耐震性能を比較する。

3. 終局加振

損傷制御骨組について座屈拘束ブレースの芯材が破断に至るまで繰

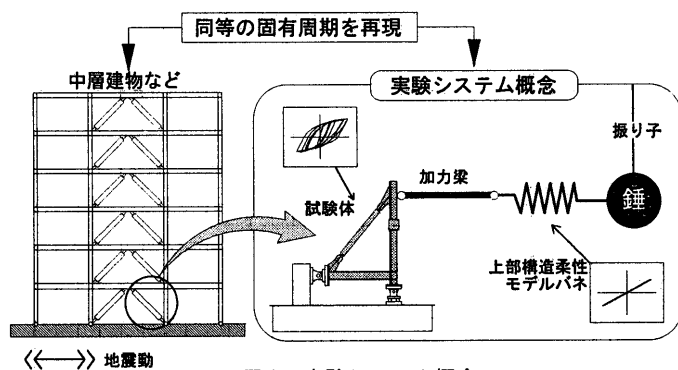


図1 実験システム概念

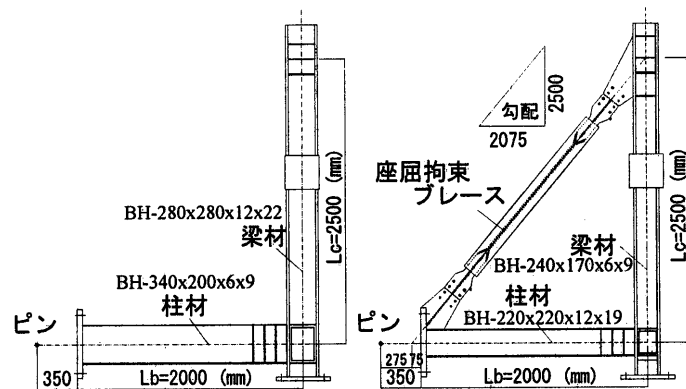


図2 試験体（純ラーメン骨組）

図3 試験体（損傷制御骨組）

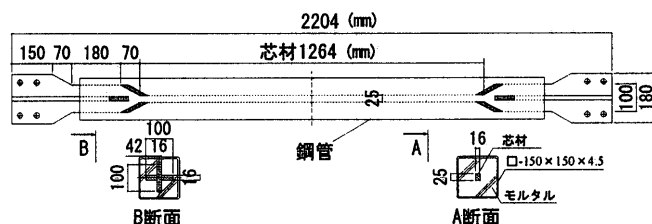


図4 座屈拘束ブレース

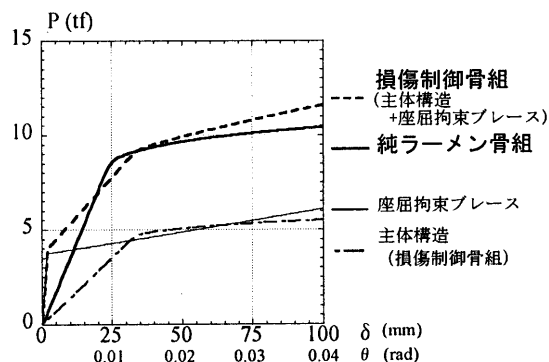


図5 試験体のせん断力-層間変形（角）関係

表1 実験システムの固有周期と減衰

試験体種類	固有周期(s)	減衰(%)
純ラーメン骨組	0.82	1.7
損傷制御骨組	0.70	2.3

表3 入力レベル

入力レベル	地震動の最大速度
Level 1	25kine
Level 2	50kine

表2 入力波

年	地震	観測地	成分	以下記述
1940	インベリアルバレイ地震	El Centro	NS成分	El Centro
1968	十勝沖地震	八戸	EW成分	Hachinohe
1995	兵庫県南部地震	神戸海洋気象台	NS成分	Kobe

り返し加振を行い、骨組に組み込まれた座屈拘束ブレースの疲労特性を検証する。最大速度を60kineに基準化したEl Centro、逆El Centro^{注1)}、Kobe Level 2等を試験体の残留変形を考慮しながら入力した。

注1): 逆とは、入力波(加速度記録)の正負を逆にしたもの

2-5 計測

図6に試験体の変位計測位置を示す。また、せん断力、層間変形、層間変形角を次のようにして求めた。

骨組の負担するのせん断力、主体構造の負担するせん断力をそれぞれ P 、 P_f とする。 P はロードセルの計測値とし、 P_f は、弾性範囲に留まる柱材の2断面(図5参照)に貼付した歪みゲージの計測値から各断面のモーメント(M_1 、 M_2)を算出し、その勾配から求める。また、ダンパーの負担するせん断力(P_d)と軸力(N_d)は式1,2を用いて算出する。

$$P_d = P - P_f \quad \dots (式1)$$

$$N_d = P_d \cdot \frac{\sqrt{L_b^2 + L_c^2}}{L_b} \quad \dots (式2)$$

層間変形(δ)には図5中に示す3カ所の変位計測データから、式3のように求める。層間変形角(θ)は式4とする。

$$\delta = \delta_1 - (\delta_2 + \delta_3) / 2.0 \quad \dots (式3)$$

$$\theta = \delta / L_c \quad \dots (式4)$$

3 性能比較加振結果による骨組の耐震性能比較

3-1 各加振での入力エネルギー

図7に各加振での入力エネルギー量(速度換算値²⁾)を示す。実線は、純ラーメン骨組加振時の台上加速度から求めた、減衰10%エネルギースペクトルである。また、プロットは横軸に各試験体セットアップ時の弾性固有周期をとり、台上加速度及び振動台と錘の相対変位から算出した実験値である。実験システムの剛性は試験体に直列に接続された上部構造柔性モデルパネの影響により比較的近い値を示している。そのため、入力エネルギーについてもほぼ同等なものであると判断し、以降に骨組としての耐震性能を比較を行う。

3-2 せん断力-層間変形角関係の比較

2種類の骨組の振動台実験結果について、せん断力-層間変形角関係を示し、両骨組の応答の特徴を分析する。

図8にLevel 1のそれぞれの入力に対する、純ラーメン骨組(左側)と損傷制御骨組(右側)のせん断力(P)-層間変形角(θ)関係を示し、図9にLevel 2入力時の結果を同様示す。損傷制御骨組については、同図中に主体構造のせん断力-層間変形角関係をあわせて示す。

(i) Level 1 加振結果

純ラーメン骨組は3種類のどの入力波を用いた場合においても、線形的なせん断力-層間変形角関係を示す。一方、損傷制御骨組は、座屈拘束ブレース芯材に用いた極低降伏点鋼の塑性化により、エネルギーを吸収し、変形を抑制している。そのため、図8中に示す主体構造は、弾性範囲に留まり線形挙動を示している。Level 1の入力では水平耐力を揃えて設計した純ラーメン骨組が線形な挙動を示す入力においても、損傷制御骨組は、制振部材として組み込んだ座屈拘束ブレースが機能し、層間変形角が低減されることを確認した。

(ii) Level 2 加振結果

純ラーメン骨組は3種類のどの入力についても大きな履歴ループを描き、主体構造が損傷を受けている。El Centroの入力時に比較的中振幅の振動を繰り返し損傷を受けているのに対して、Hachinohe、Kobeの

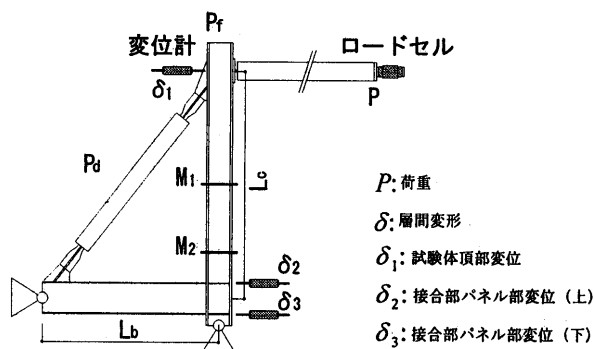


図6 代表的計測位置

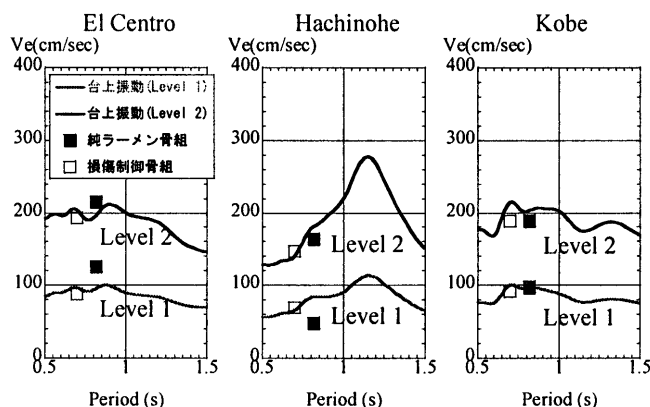


図7 各加振での入力エネルギー量(速度換算値)

入力では1または2サイクルの大きな振幅により損傷を受けている。これは、実験システムへの入力エネルギー量とも対応している。

損傷制御骨組でも、同様に3種類のすべての入力において骨組は大きな履歴ループを描き、エネルギーを吸収している。しかし、図9中に示す主体構造のせん断力-層間変形角関係は線形的な挙動を示し、骨組による履歴吸収エネルギーは、座屈拘束ブレースによって吸収されていることが分かる。El Centro入力時に比較的中振幅を繰り返し、Hachinohe、Kobeの入力において、1または2サイクルの大きな振幅によってエネルギーを吸収する特徴は、純ラーメン骨組と対応する。損傷制御骨組を対象としLevel 2の入力をした振動台実験においても制振部材として組み込んだ座屈拘束ブレースがエネルギー吸収機構としての役割を発揮し、実際に層間変形角を低減できていることが分かる。

注2)純ラーメン骨組のKobe入力時⁽ⁱ⁾では一部変位計のレンジアウトが生じたが、変位計計測点と同じ位置を計測した加速度記録を数値積分し、補間した。

3-3 各加振での最大層間変形角の比較

骨組としての耐震性能評価について重要な指標の一つである最大層間変形角に着目し、両骨組の応答の特徴を示す。

図10に各加振での最大層間変形角($|\theta|_{\max}$:絶対値)、両骨組の主体構造の降伏変形角(θ_y :計算値)を示す。損傷制御骨組の主体構造は、大きな弾性範囲を持つように梁せい、柱せいを小さくしている。

(i) Level 1 加振

純ラーメン骨組は、図8に示すせん断力-層間変形角関係では線形的な挙動を示すが、どの入力波を用いた場合においても降伏変形角を越える変形が生じている。3種類の入力ともに1.3~1.5 θ_y 程度の変形角が生じている。一方、損傷制御骨組の主体構造は、それ自体が大きな弾性範囲を持つこと、また、骨組の変形を抑制することが出来たこと

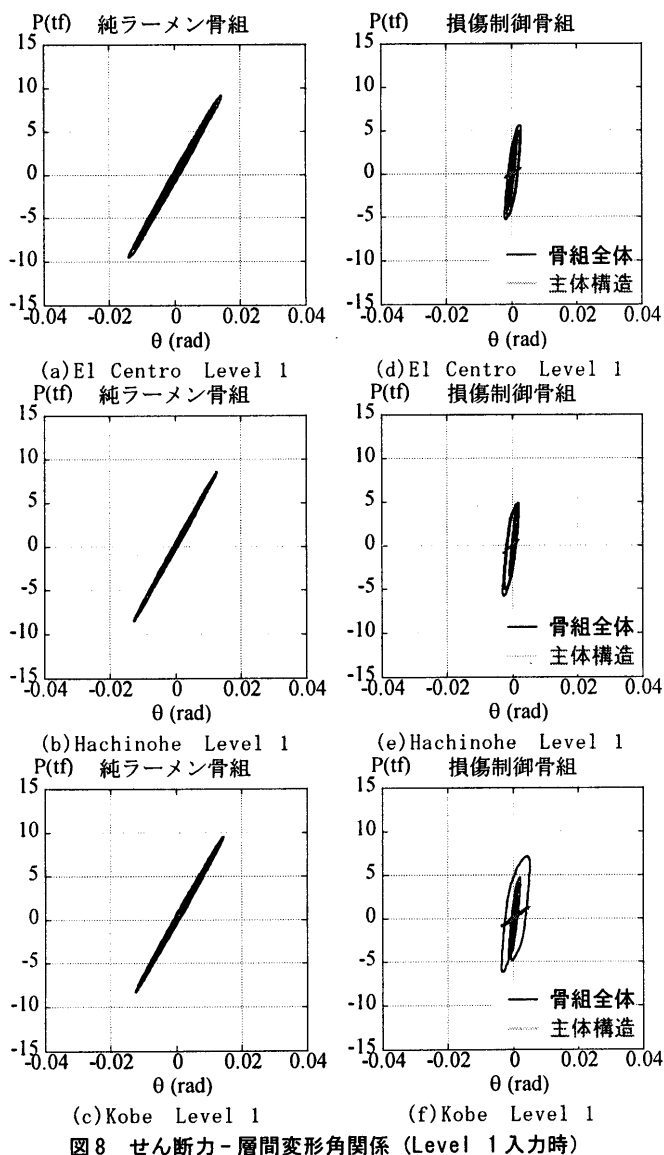


図8 せん断力-層間変形角関係 (Level 1入力時)

により、弾性範囲内に留まり損傷は受けていない。

(ii) Level 2加振

純ラーメン骨組は3種類の入力ともに降伏変形角を大きく越えている。特にHachinoheとKobe入力時には $3.9\theta_y$ 程度の変形が生じている。損傷制御骨組はEl CentroとHachinoheの入力時に主体構造は弾性範囲に留まるがKobeの入力時は降伏変形角を越え $1.4\theta_y$ 程度の変形角となる。この大きさは純ラーメン骨組のLevel 1加振時と同程度である。

3-4 各加振での梁端部平均最大歪みの比較

相対的に柱に比べ梁が弱い主体構造への損傷は、梁端部の塑性化として発現する。そのため、梁端部に生じる最大歪みを比較することで損傷制御骨組での主体構造への損傷抑制効果を検討することが出来る。

図11に梁端部に貼付した歪みゲージの位置を示す。梁材のフランジ面に計6枚貼付した歪みゲージのうち上側、下側各3枚の計測値を平均し、その絶対値の最大値(以下、最大歪み)を最大歪みとする。図12に両骨組の各加振での最大歪みを示す。また、同図中に梁フランジの材料試験から得られた降伏歪み量($\epsilon_y = 0.142\%$)を示す。

(i) Level 1加振

純ラーメン骨組の3種類の入力において梁端部の最大歪みは ϵ_y を超えているが、損傷制御骨組の主体構造は弾性範囲に留まっている。この

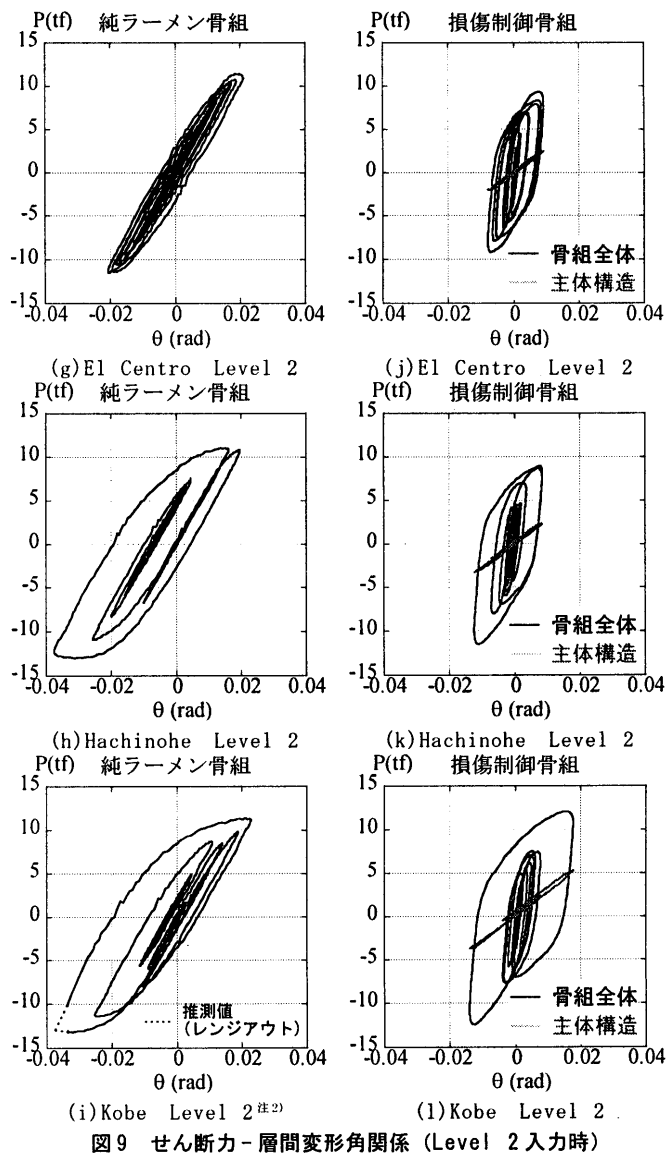


図9 せん断力-層間変形角関係 (Level 2入力時)

とき、既に損傷制御骨組の座屈拘束ブレース芯材の最大歪みは、塑性域に達しエネルギーを吸収している。そのため、損傷制御骨組の変形は純ラーメン骨組に対し大きく抑制されている。

(ii) Level 2加振

純ラーメン骨組の最大歪みは ϵ_y を大きく越え、最大値は $7\epsilon_y \sim 10\epsilon_y$ 程度となる。損傷制御骨組の主体構造はEl Centro入力時に弾性範囲に留まる。Hachinohe、Kobeの入力では ϵ_y を越えるが、最大値はHachinoheで $1.2\epsilon_y$ 程度、Kobeで $1.7\epsilon_y$ 程度となる。

純ラーメン骨組は、弾性範囲を超えた梁端部に局所的に歪みが集中し損傷を受けているのに対し、損傷制御骨組は、塑性化が進展している座屈拘束ブレース芯材によって、エネルギー吸収がなされ、変形が抑制される。そのため、純ラーメン骨組と比較して主体構造への損傷を大きく低減できている。

3-5 各加振での最大せん断力-層間変形角関係

最大層間変形角と設計時の主要な要素となる最大せん断力に着目し、両骨組の応答特性を示す。

図13に各加振での最大せん断力と最大層間変形角を示す。純ラーメン骨組のLevel 1では弾性的な挙動を示したため、プロットは原点を通る直線上に配置されている。Level 2の入力では、Hachinohe、Kobeの

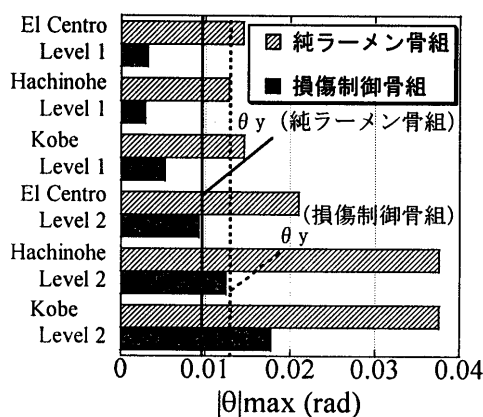


図10 最大層間変形角比較

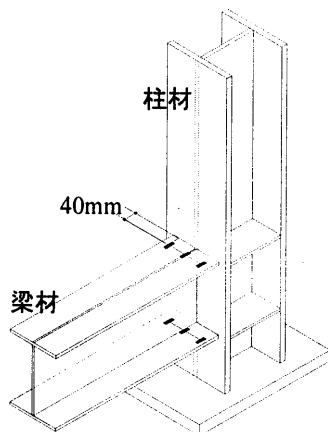


図11 梁端部歪みゲージ貼付位置

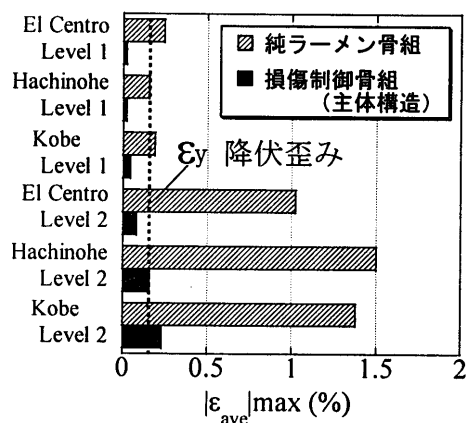


図12 梁端部最大平均歪み比較

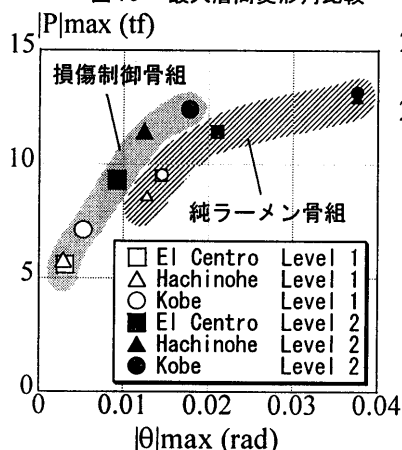


図13 各加振での最大せん断力
- 最大層間変形角関係

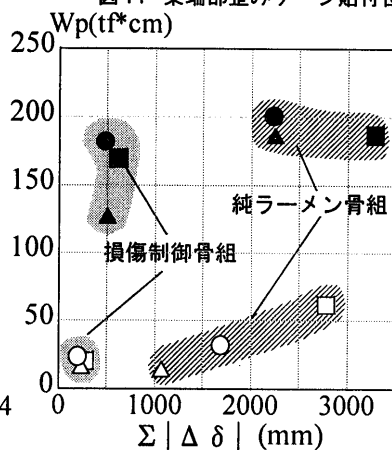


図14 各加振での履歴吸収エネルギー
- 累積層間変形

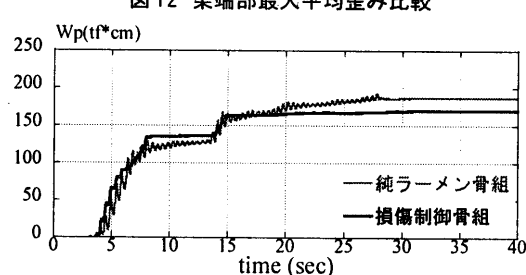


図15 時刻歴-履歴吸収エネルギー

(El Centro Level 2入力時)

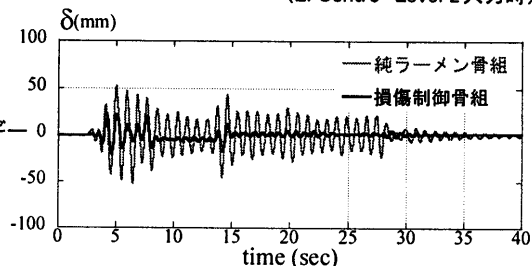


図16 時刻歴-層間変形 (El Centro Level 2入力時)

入力時に大きな変形（最大層間変形角 1/27 程度）を示し、最大せん断力は塑性化に伴い頭打ちになる。

損傷制御骨組は、Level 1 の入力で最大変形層間変形角 1/340 ~ 190 程度であり、純ラーメン骨組に対し最大層間変形角を大きく低減できている。最大せん断力についても、純ラーメン骨組と比較して小さな値となる。Level 2 の入力では最大層間変形角と最大せん断力は、入力波の種類によりその値は大きく異なるが、純ラーメン骨組での結果と比較すると最大層間変形、最大せん断力ともに小さな値を示す。これらは6種類すべての加振結果について共通するもので、損傷制御骨組は、水平耐力を揃えて設計した純ラーメン骨組に対して、最大層間変形角、最大せん断力ともに実際に低減できることが確認された。また、最大層間変形角、最大せん断力は、図5に示した骨組のせん断力-層間変形角関係の形状と対応した分布となり、両骨組の特徴を反映している。

3-6 各加振での履歴吸収エネルギー-累積層間変形関係

図14に層間変形に関する積分値として得られる骨組の塑性化による履歴吸収エネルギー(Wp)と累積層間変形(Σ|Δδ|、弾性変形を含む)の関係を示し、両骨組の応答特性を示す。各加振での例として図15に骨組の履歴吸収エネルギー、図16に層間変形を時刻歴で示す。入力にはEl Centro Level 2である。両骨組の履歴吸収エネルギーに大きな差は見られないが、層間変形では顕著な差が見られる。図8、図9のせん断力-層間変形角関係からも分かるように2種類の骨組の降伏変形角が大きく違うため、純ラーメン骨組が大きな弾性範囲の中で振幅を繰り返したのに対し、損傷制御骨組は変形角の小さな比較的早い段階からエ

ネルギー吸収がなされている。そのため試験体の層間変形の増分の絶対値を累加した累積層間変形の値は大きな違いを示し、両骨組での累積層間変形を比較すると損傷制御骨組は純ラーメン骨組に対し2割程度の値となる。

以上から、損傷制御骨組は純ラーメン骨組に対して履歴吸収エネルギー量は同程度であっても、累積層間変形を大きく低減できることが分かる。また、図14では純ラーメン骨組では入力レベルよりも入力波の種類に大きく依存していることが分かる。

4 骨組に組み込まれた座屈拘束ブレースの破断に至るまでの疲労寿命

損傷制御骨組に対してダンパー芯材が破断に至るまで繰り返し行った終局加振と、座屈拘束ブレースの部材実験の概要と結果を示す。実験結果から、骨組に組み込まれランダムな履歴を受けた座屈拘束ブレースの破断に至るまでの疲労寿命を定量的に評価する。評価手法は、座屈拘束ブレース芯材の破断に至るまでの履歴吸収エネルギーと破断に至るまでの累積損傷度とする。本研究で用いる振動台実験方法⁴⁾は実構造の部分骨組の地震時挙動を近似的に再現するものであり、ダンパーの変形履歴は実構造物に配置されたダンパーの地震時挙動と対応するものである。そのため、本研究により、より現実に近い状態での座屈拘束ブレースの疲労特性を解明することが出来る。

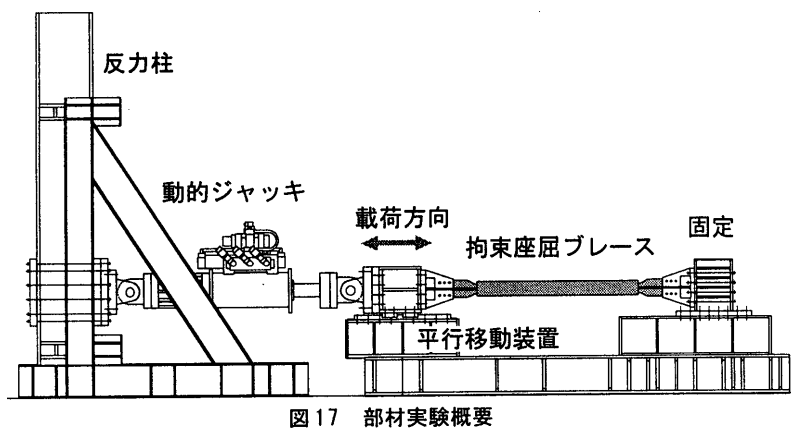


図17 部材実験概要

4-1 終局加振概要

損傷制御骨組を対象として、座屈拘束ブレースの芯材が破断に至るまで繰り返し加振を行った。終局加振の入力波としては、最大速度を60kineに基準化したEl Centro、逆El Centro、およびKobe Level 2を主に用いた。座屈拘束ブレースの軸方向変形については、ブレース上下の計測値を平均し軸方向変形量とした。歪みは軸方向変形量を座屈拘束ブレース心材長さで除した値とし、応力は軸力を芯材原断面積で除した値とした。

4-2 部材実験概要

部材実験概要を図17に示す。試験体は振動台実験に用いた座屈拘束ブレースと同一鋼材、同一形状とした。試験体の一端を固定、他端を平行移動装置に固定し、軸方向载荷を行った。载荷に用いた変位履歴は4-1で示した損傷制御骨組の振動台実験での軸方向変位履歴を再現したもので、骨組に組み込まれた座屈拘束ブレースに生じる曲げ成分を排除している。

部材実験では、振動台実験で座屈拘束ブレースが経験する変形履歴と1対1に対応する载荷を行ったが、振動台実験での芯材破断後は試験体の残留変形を考慮しながら、適宜変形履歴を選択し、芯材が破断に至るまで载荷を続けた。後述するように主として振動台実験でのEl Centro、逆El Centro、Kobe Level 2入力時の座屈拘束ブレースの変形履歴を用いた。

4-3 実験結果および評価

4-3.1 履歴吸収エネルギーによる比較

表4に振動台実験および部材実験結果を示す。振動台実験については終局加振に用いた入力波、入力レベルおよび各加振における座屈拘束ブレースの履歴吸収エネルギーを示す。表中の通番は、振動台実験での加振、部材実験での载荷の順序を示す。振動台実験での履歴番号は振動台実験での座屈拘束ブレースの軸方向変形履歴とする。部材実験の欄で示す履歴番号は、载荷に用いた振動台実験での軸方向変位履歴の番号である。

振動台実験では計27回（パルス加振を除く）の振動台加振、部材実験では計44回の動的载荷によりダンパー芯材が破断していることから、骨組に組み込まれた振動台実験では疲労性能が低下していることが分かる。次に、履歴吸収エネルギーに着目する。図18に加振または载荷回数と履歴吸収エネルギーの関係を示す。各加振、各载荷での履歴吸収エネルギーは部材実験での値が若干大きめの値を示すが、比較的良好な対応を示す。破断時までの履歴吸収エネルギーを比較すると、振動台実験でのダンパーの履歴吸収エネルギー(Wp_{shake})は5475tf*cm、部

表4 振動台実験、部材実験結果

振動台実験				部材実験	
履歴番号	入力波	入力レベル	Wp_{shake} (tf*cm)	通番	履歴番号 (tf*cm)
1	El_Centro	Level_1	20.3	1	1
2	Hachinohe	Level_1	16.4	2	2
3	Kobe	Level_1	24.7	3	3
4	El_Centro	Level_2	170.3	4	4
5	Hachinohe	Level_2	127.6	5	5
6	Kobe	Level_2	182.5	6	6
7	逆El_Centro	Level_2	178.6	7	7
8	逆Hachinohe	Level_2	141.6	8	8
9	逆Kobe	Level_2	182.3	9	9
10	El_Centro	60kine	271.4	10	10
11	逆El_Centro	60kine	285.3	11	11
12	El_Centro	60kine	267.2	12	12
13	逆El_Centro	60kine	274.0	13	13
14	El_Centro	60kine	268.4	14	14
15	逆El_Centro	60kine	276.8	15	15
16	El_Centro	60kine	256.2	16	16
17	逆El_Centro	60kine	268.0	17	17
18	El_Centro	60kine	257.7	18	18
19	逆El_Centro	60kine	264.6	19	19
20	El_Centro	60kine	245.8	20	20
21	El_Centro	60kine	259.4	21	21
22	El_Centro	60kine	252.0	22	22
23	El_Centro	60kine	228.7	23	23
24	El_Centro	60kine	226.7	24	24
25	Kobe	Level_2	160.5	25	25
26	Kobe	Level_2	170.0	26	26
27	Kobe	Level_2	197.4	27	26
				28	14
				29	15
				30	26
				31	14
				32	15
				33	25
				34	14
				35	15
				36	26
				37	14
				38	15
				39	26
				40	14
				41	15
				42	26
				43	14
				44	15

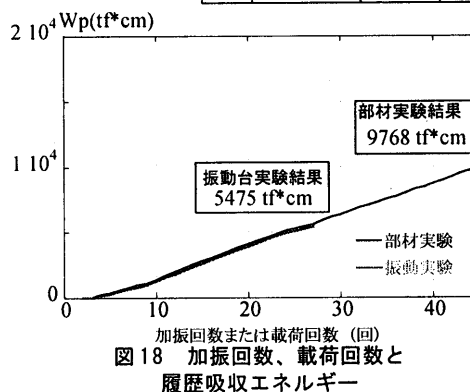


図18 加振回数、载荷回数と履歴吸収エネルギー

材実験による履歴吸収エネルギー(Wp_{memb})は9768tf*cmであり、その割合は0.56となる。

$$\frac{Wp_{shake}}{Wp_{memb}} = 0.56$$

そのため、破断に至るまでの履歴吸収エネルギーは骨組に組み込まれることにより6割程度に低減する事が分かる。破断した後の座屈拘束ブレース芯材を観察すると、破断は座屈拘束ブレースの芯材端部から10cm程度の位置で生じており、座屈拘束ブレースの疲労性能の低減は、骨組に組み込まれた事による端部拘束の影響を受けていることが考えられる。また、座屈拘束ブレースの芯材には、断面の短辺方向、長辺方向共に多次の座屈モードが生じていた。これは、本研究で用いた座屈拘束ブレースの芯材が、16x25の矩形断面であることが一因であると考えられる。そのため、長辺方向に座屈の生じにくい幅の広い芯材を用いた座屈拘束ブレースについては、本研究以上の疲労性能を発揮すると推測される。

また、今回設定したLevel 2の振動台加振での最大の履歴吸収エネルギーは182.5tf*cmであり、破断に至るまでの履歴吸収エネルギーの3.3%程度である。今回用いた座屈拘束ブレースは、保有水平耐力を揃えて設計した純ラーメン骨組が、最大層間変形角1/30程度の大きな変形をする入力に対しても、30回程度耐えることの出来るエネルギー吸収能力を有すること実験的に示した。

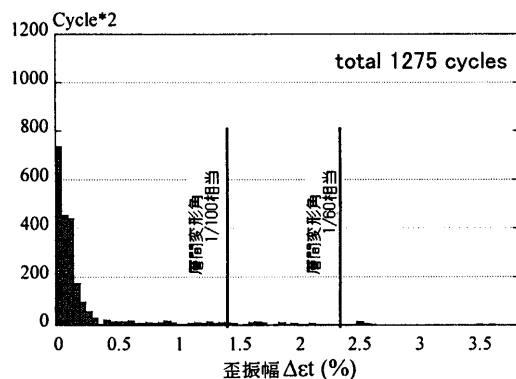


図 19 歪み振幅の分布 (振動台実験結果)

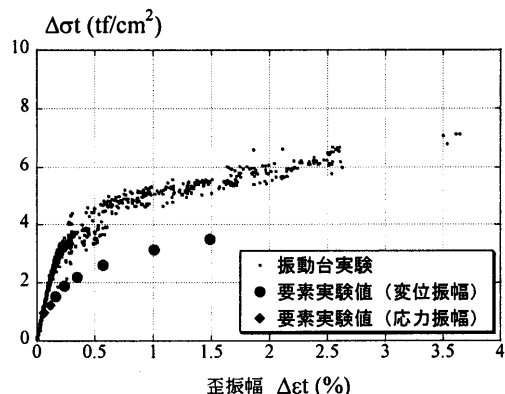


図 20 要素実験結果との対応 (振動台実験結果)

4-3.2 累積損傷度による比較

幅広い歪み振幅を経験したダンパーの性能は疲労特性で評価することが出来る。本研究では試験体数も多く、manson-coffin 型の疲労式の算出された要素実験⁹⁾を基準として、骨組に組み込まれランダムな履歴を受けた座屈拘束プレースの疲労性能を評価し、既往の実大部材の疲労試験結果⁹⁾との対応を示す。

応力振幅 ($\Delta \sigma$)、歪み振幅 ($\Delta \epsilon_t$) の定義については、単純なレンジ法²¹⁾を用いる。レンジ法はランダムな波形の隣り合う極大値と極小値の差を半サイクルとして応力、歪み振幅を説明するものである。

振動台実験での座屈拘束プレースの全変形履歴から、各半サイクルごとの応力振幅、歪み振幅を抽出し、図 19 に歪み振幅の分布を示す。座屈拘束プレースの歪み振幅と一般的な構造物の層間変形角の対応は文献 8) によると $\Delta \epsilon_t = 1.5\%$ で層間変形角 1/100 相当、 $\Delta \epsilon_t = 2.5\%$ で層間変形角 1/60 相当である。今回の振動台実験での分布は、歪み振幅 0.3% 以下の振幅が全サイクルの 85% を占め、それ以上は 2.5% 付近まではば一様に分布する。

図 20 にランダム波形から取り出した各半サイクルの $\Delta \sigma$ 、 $\Delta \epsilon_t$ と要素実験結果との対応を示す。要素実験のプロットは $N_f/2$ サイクルでの $\Delta \sigma$ 、 $\Delta \epsilon_t$ の値である。ほぼ全歪み振幅範囲において、振動実験による $\Delta \sigma$ が大きな値を示す。これは歪み振幅の定義や水平荷重 P の軸方向力 N への変換の相違を越える差異である。今回行った部材実験結果でも同様の傾向であり、歪み速度¹⁴⁾¹⁵⁾と繰り返し変形履歴の影響であると考えが断言するには到らない。

次にマイナー則を用いて累積損傷度 (D) を評価する。要素実験の manson-coffin 式 (図 21、式 5) を用いて、各半サイクルの歪み振幅に対応する破断繰返し数 (N_f) を算出し (図 21 参照)、その逆数の 1/2 を各半サイクル当たりの損傷とする。また、各半サイクル当たり損傷を全サ

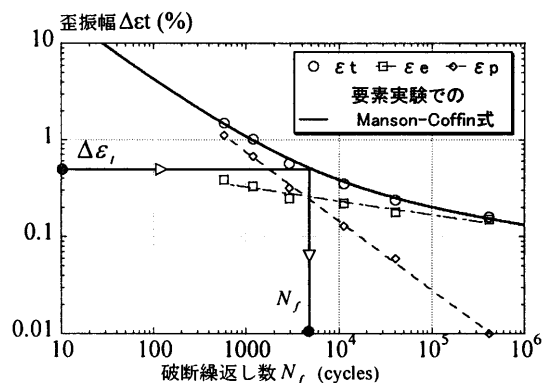


図 21 累積損傷—振幅回数関係

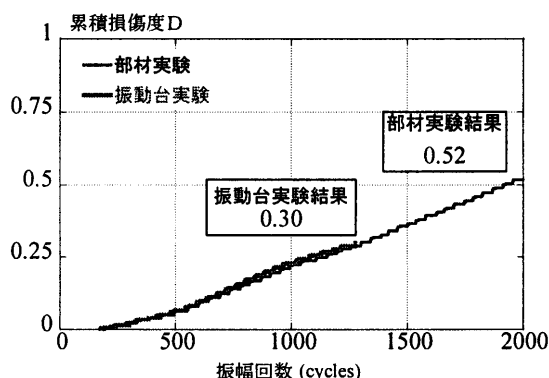


図 22 累積損傷度—振幅回数関係

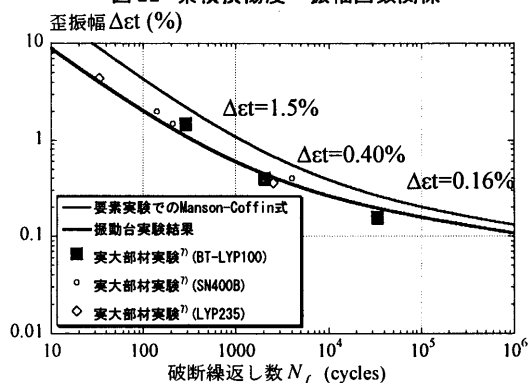


図 23 既往の部材実験との比較

イクルについて累加することにより累積損傷度 D (式 6) とする。

$$\epsilon_i = 101.0 N_f^{-0.71} + 0.88 N_f^{-0.14} \quad \dots \text{(式 5)}$$

$$D = \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{1}{2 \cdot N_f(\Delta \epsilon_i)} \right) \quad \dots \text{(式 6)}$$

図 22 に、振動台での実験結果と部材実験結果の各サイクルでの累積損傷度を示す。破断に至るまでの累積損傷度は要素レベルの実験に対し振動台実験で $D_{\text{shake}} = 0.30$ 、部材実験で $D_{\text{memb}} = 0.52$ という結果が得られた。要素に対し、破断に至るまでの疲労寿命はランダムな履歴を受けた部材で約 5 割に、骨組に組み込まれた部材で約 3 割に低減していることが分かる。また、2 種類の実験結果を比較すると、骨組に組み込まれることにより、破断に至るまでの疲労寿命は、履歴吸収エネルギーによる評価と同様に、今回の実験では 6 割程度に低減していることが分かる。

$$\frac{D_{\text{shake}}}{D_{\text{memb}}} = 0.59$$

次に既往の実大部材の疲労試験結果⁹⁾と比較する。文献 9) では本

研究で用いた座屈拘束ブレースと同様な形式の部材に対し、疲労試験が行われている。今回はそのうち芯材断面形状が平板断面で使用鋼材がBT-LYP100である3体の試験体の実験結果を用いて、今回算出した疲労寿命の低減との対応を見る。また、参考として文献9)の鋼材がSN400B、BT-LYP235の実験結果も併せて示す。

図23に要素実験の疲労曲線であるmanson-coffin式、振動台実験結果を反映し、要素に対して疲労性能を3割としたもの(要素のNfに0.3を乗じたもの)、及び既往の実大の座屈拘束ブレースの疲労試験結果のプロットを示す。実大部材の疲労試験での歪み振幅は、0.16%, 0.4%, 1.5%であり、要素実験と対応した累積損傷度はそれぞれ0.10, 0.22, 0.52となる。今回の振動台実験から得られた累積損傷度D=0.30は、大振幅側で「素材レベル→部材レベル→骨組レベル」と続く疲労性能の低減の下限値をとると考えられる。しかし、小振幅側については、振動台の実験での入力レベルをある程度大きく設定したこともあり、実大部材実験での値が下回り、疲労性能を過大に評価している。そのため、小振幅側については小さな地震動や風荷重などの入力条件をふまえた疲労性能の把握が必要であるといえる。また、今回設定したLevel 2加振、一回での累積損傷度の最大値は0.01程度であり、累積損傷度の尺度からも保有水平耐力を揃えて設計した純ラーメン骨組が最大層間変形角1/30程度の大きな変形をする入力に対して、今回用いた座屈拘束ブレースは30回程度耐えることの出来る疲労性能を有していたと言える。

5 結

本研究では、実建造物の地震時挙動を再現する振動台実験手法を用い、保有水平耐力を揃えて設計した純ラーメン骨組と損傷制御骨組に対して振動台実験を行い次の知見を得た。なお、本研究において地震動の最大速度を50kineと設定した入力をLevel 2と表記し、履歴吸収エネルギーをWp、累積損傷値をDと表記する。また、入力波は本文中で示したEl Centro、Hachinohe、Kobeである。

- (i) 損傷制御骨組は純ラーメン骨組が3種類の入力波を用いた弾性限度の入力、Level 2の入力のどの振動台加振についても、組み込まれた座屈拘束ブレースがエネルギー吸収能力を発揮するため、純ラーメン骨組と比較して層間変形角を大きく低減する事ができた。
- (ii) 損傷制御骨組は上記の2種類の入力、3種類の入力波のどの加振を行った場合においても、純ラーメン骨組と比較して梁端部の最大歪みを大きく低減できた。

また、本研究では、座屈拘束ブレース芯材が破断に至るまで行った振動台実験と部材単体の軸方向載荷実験から、以下の知見を得た。

- (i) 設定したLevel 2の振動台加振において、損傷制御骨組に組み込まれた座屈拘束ブレースが一回の振動台加振で経験するWpとDは、破断に至るまでのWpとDに対して共に3%程度であり、今回用いた座屈拘束ブレースはLevel 2の入力に対し30回程度耐えることの出来るエネルギー吸収能力および疲労性能を有していた。
- (ii) 本研究で用いた骨組に組み込まれ、繰り返し振動台加振を経験した座屈拘束ブレースの破断に至るまでのWpとDは、振動実験と同様な軸方向変形履歴を再現した部材実験と比較し、履歴吸収エネルギー、疲労性能共に6割程度となった。

謝 辞

本研究において高周波熱錬株式会社からPC鋼棒をご提供いただきました。本研究の一部は京都大学防災研究所、共同研究「大型鉄骨建

屋の合理的耐震性能に関する研究」として援助を受けています。付記して感謝の意を表します。また、京都大学防災研究所技官・市川信夫氏をはじめご協力いただいた関係各位に謝意を表します。最後に、本論文の筆頭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します。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 秋山 宏：建築物の耐震極限設計、東京大学出版会、1980。
- 3) 小堀鐸二：制震構造 理論と実際、鹿島出版界、1993。
- 4) 山小路夫、山田哲、前田泰史、荻原みき、竹内徹、成川匡文、中島正愛、和田章：実建造物の地震時挙動を再現する実大振動台実験手法の提案、制振ダンパーを組み込んだ鋼構造骨組の耐震性 その1、日本建築学会構造系論文集、No. 541、2001年3月。
- 5) 日本建築学会：動的外乱に対する設計－現状と展望－、日本建築学会、1999
- 6) 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
- 7) 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。
- 8) 前田泰史、中田安洋、岩田衛、和田章：軸降伏型履歴ダンパーの疲労特性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No. 503、pp. 103-110、1998年1月。
- 9) 前田泰史、中村博志、竹内徹、中田安洋、岩田衛、和田章：実大アンボンドブレースの疲労性能(その1：実験計画と結果概要)(その2：実験結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1、pp. 813-816、1999年
- 10) 佐伯英一郎、前田泰史、中村秀司、緑川光正、和田章：実大アンボンドブレースに関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No. 476、pp. 149-158、1995年10月
- 11) 今井克彦、脇山広三、多田元英、桑原進、米山隆也：二重鋼管の補剛効果に関する研究(その1、軸方向加力実験方法)、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1、pp. 1281-1282、1991。
- 12) 鈴木直幹、金子洋文、宇佐美徹、佐々木照夫、鴻野良太、井上一朗、多田元英：座屈補剛材を有するH形鋼ブレースの力学性状について(その1補剛材の基本的性質)、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1、pp. 393-394、1995。
- 13) 大田和彦、在永末徳、花井正実：高強度コンクリートを用いたプレキャスト制振ブレースの力学特性に関する研究(その3 制振ブレース部材の引張特性)、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1、pp. 397-398、1995。
- 14) 真鍋典生、下川弘海、神谷誠、森野捷輔、川口淳：角形鋼管で補剛された平鋼ブレースの弾塑性性状に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1、pp. 783-784、1996。
- 15) 鴻野良太、金子洋文、畠博志、宇佐美徹、佐々木照夫、鈴木直幹：端部に無補剛区間と有するH形鋼アンボンドブレースの力学性能 その1設計法、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1、pp. 985-986、1997。
- 16) 真瀬伸治、矢部喜堂、寺田岳彦、堀江竜巳、岡澤岳、堀富博、中村庄滋：極低降伏点鋼を用いたアンボンドブレースダンパーに関する研究 その2 低サイクル疲労実験、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1、pp. 409-410、1995。
- 17) 岡澤岳、矢部喜堂、真瀬伸治、兼光知巳：極低降伏点鋼を用いたアンボンドブレースダンパーに関する研究 その4 疲労特性と累積損傷評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 分冊、pp. 781-782、1996。
- 18) 中込忠男、岩本剛、加村久哉、下川弘海、原山浩一：極低降伏点鋼を用いた鋼管補剛平鋼ブレースの疲労特性に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No. 530、pp. 155-161、2000年4月。
- 19) 長尾直治、御厨孝二、松本祐二、高橋茂治：アンボンドブレースの耐震性能に関する研究(その4 架構実験の結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集C、pp. 1335-1336、S63。
- 20) 杉原広央、山小路夫、小波佐和子、黄一華、竹内徹、前田泰史、成川匡文、西村功、森秀樹、岩田衛、荻原みき、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、pp. 827-832、1999。
- 21) [社] 日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版、1993。
- 22) 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。
- 23) 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。

(2000年11月10日原稿受理、2001年4月18日採用決定)