

座屈拘束ブレースを有する損傷制御構造部分骨組の実大振動台実験 FULL-SCALE SHAKING TABLE TEST OF DAMAGE TOLERANT STRUCTURE WITH A BUCKLING RESISTANT BRACE

山口路夫*1, 山田 哲*2, 松本由香*3, 谷川敬祐*1, 小野森司*4
竹内 徹*5, 小川信行*6, 秋山 宏*7

Michio YAMAGUCHI, Satoshi YAMADA, Yuka MATSUMOTO, Keisuke TANIKAWA,
Shinji ONO, Toru TAKEUCHI, Nobuyuki OGAWA and Hiroshi AKIYAMA

In this paper, a test procedure and test results of shaking table tests that specimens are partial frame model of damage tolerant structure with buckling resistant brace are shown. Four kinds of buckling resistant braces, which performs different characteristic, are set in the steel frame. Two different type waves (Kobe and Hachinohe) are inputted in the shaking table with four input levels (level1,2,3,4). In this study, Level 3 and 4 are configured as very severe earthquake.

As a result, it was confirmed that buckling resistant brace can behave effectively in each input levels under the condition sat within the frame. The damper can reduce total damages at beam-to-column connection of the frame, unless the damper reaches a fracture.

Keyword: Damage Tolerant Structure, Buckling Resistant Brace, Full Scale, Shaking Table Test, Very Severe Earthquake
損傷制御構造、座屈拘束ブレース、実大実験、振動台実験、過大入力

1 序

鉛直荷重を比較的水平剛性の小さな主体構造で支持し、地震や風などの動的外乱をエネルギー吸収要素で抵抗する構造形式は、「柔剛混合構造」¹⁾や「損傷制御構造」²⁾または、「パッシブ制振構造」として認知されている。これらの構造形式は、大地震後もエネルギー吸収要素のみを点検し、必要があれば取り替えることで、建物の継続的な使用が可能となる。そのため、損傷制御構造やその他の制振架構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。

このような構造物の耐震性能の評価に関する研究は、解析的な研究³⁾~⁵⁾などや、エネルギー吸収要素の部材性能に関する実験研究^{6)~8)}などを中心に行われている。多くの場合、エネルギー吸収要素（以下、ダンパー）の部材実験を行い、実験結果を反映した履歴モデルを構築し、この履歴モデルを用いて骨組としての耐震性能を解析的に評価する。このような手法を用いた場合、履歴モデルの適用範囲は、部材実験での変位、荷重、変形速度範囲に限定されるだけでなく、部材実験における境界条件の影響などを排除することができない。そのため、ダンパーまたは主体構造が終局状態に達するような過大な入力（以下、過大入力）を想定した場合の構造物の終局状態の挙動までを、適切に予測することは困難であると言わざるを得ない。

過大入力を想定したダンパーを有する骨組の地震時挙動に関する研究

としては、田川らの解析的研究⁹⁾や、秋山らの振動台を用いた実験的研究¹⁰⁾がある。文献9)では、履歴型ダンパーの破断を考慮した数値解析法を示し、数値解析を行っているが、ダンパーの終局状態での性能やダンパーが骨組に組み込まれることによって生じる付加的な力や変形は、考慮されていない。文献10)では、柱梁接合部を半剛接合とした主体構造と鋼棒のせん断変形によりエネルギーを吸収するダンパー(DURダンパー)または、スリットプレートのせん断変形によりエネルギーを吸収するダンパー(DUSダンパー)を試験体として、ダンパーが終局状態に達する振動台加振を行っている。ただし、入力が弾性加振と終局加振の2種類に設定されているため、ダンパーによる効率的なエネルギー吸収が期待できる入力レベルでの地震時挙動に関する知見は得られていない。

本研究では、文献11)で提案された振動台実験手法を用い、損傷制御部分骨組を対象とした振動台実験を行う。試験体は、主体構造に鋼構造剛接骨組を用い、ダンパーに数多くの研究成果^{12)~14)}が報告され、安定した履歴挙動を示すことが知られている座屈拘束ブレースを用いる。振動台への入力は、構造物の設計時に考慮する入力（以下、設計レベル）から、設計レベルを大きく超え、部材の破断などが生じる可能性のある過大入力までを対象とする。本報では、得られた実験結果のうち、各加振でのせん断力-変形関係、主体構造とダンパーのエネルギー吸収分担、および梁材の損傷に着目し、主体構造と座屈拘束ブレース、および両者を併せた骨組の地震時挙動の解明を目指す。

*1 東京工業大学 大学院生

*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 横浜国立大学大学院 助手・博士(工学)

*4 横浜国立大学 大学院生

*5 新日本製鐵 博士(工学)

(研究当時 東京工業大学 大学院生)

*6 独立行政法人防災科学技術研究所 工博

*7 日本大学総合科学技術研究所 教授,

東京大学 名誉教授・工博

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

Assoc. Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of

Technology, Dr. Eng.

Research Assoc., Yokohama National Univ., Dr. Eng.

Graduate Student, Yokohama National Univ.

Nippon Steel Corporation, Dr. Eng.

(Former Graduate Student, Tokyo Institute of Technology)

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Eng.

Prof., Nihon Univ., Prof. Emeritus, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

表3 主体構造とダンパーの設計耐力

	Qyf (kN)	δyf(mm)	Kf(kN/mm)		
主体構造	415.5	33.0	12.6		
種類	Qyd (kN)	δyd(mm)	Kd(kN/mm)	Qyd/Qyf	Kd/Kf
LYP100	141.1	2.30	61.4	0.34	4.87
SS400-	143.1	2.90	49.3	0.34	3.92
SS400+	320.5	2.90	110.5	0.77	8.78
LYP235	122.5	1.30	94.2	0.29	7.48

ただし、表中のQydは、降伏応力(σy)以下の値を用いている。
 LYP100 σy 220MPa
 LYP235 σy 240MPa
 SS400 σy 280MPa

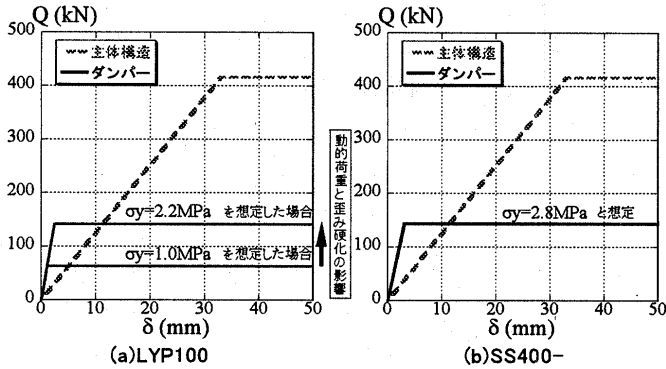


図5 せん断力-水平変形関係(設定値)

2.3 主体構造と座屈拘束ブレースの耐力分担

表3に、試験体設計時に設定した主体構造と座屈拘束ブレースの降伏せん断力、降伏変形、水平剛性、降伏せん断力比、剛性比を示す。試験体設計時の基本的な条件として、実験装置の最大荷重を1000kNと設定している。また、設計時においては、座屈拘束ブレース芯材に用いる鋼材の降伏応力度を、座屈拘束ブレースの動的実験結果¹⁵⁾を参考として表3に示す値に仮定している。これは、振動台に繰り返し入力を行うことを想定し、また、徐々に入力を強化した加振を計画したことに対応して、歪み硬化の影響が少なくなった状態での座屈拘束ブレースの性能に焦点を当てたことによる。図5に設計時に仮定したLYP100とSS400-のせん断力-水平変形関係を示す。上記のように極低降伏点鋼の降伏応力度をσy=220MPa程度と設定した上で、LYP100とSS400-の降伏せん断力を揃えて設計している。試験体設計時においては、まず先に耐力に関する条件を設定し、LYP100とSS400-の基本試験体で、主体構造に対し座屈拘束ブレースが1/3程度の降伏せん断力を有するように設計を行っている。剛性については、座屈拘束ブレースの部材寸法を実大スケールと合わせているので、ほぼ自動的に決まり、表3に示すように、主体構造の弾性剛性に対して座屈拘束ブレースが3.89~8.70倍の剛性を有する設定となる。

3 実験方法

3.1 実験装置

本研究で用いた実験装置は、文献11)で提案され、大型振動台上に配置された慣性加力装置である。図6に実験装置の概要を示す。この装置は、振動台、重錘、加振フレーム、加力梁、および試験体によって構成され、重錘は、台上に配置した積層ゴムにより支持されている。振動台加振によって重錘に慣性力が生じ、慣性力は、加力梁を介して試験体へと伝達される。試験体の支持条件は、柱材端部2箇所、梁材加力点でのピン支持であり、重錘および加力梁に面外変形を拘束するための治具を配置している。実験装置の質量は、そのほとんどが重錘と加振フレームの質量であり、積層ゴムと試験体を並列バネとした「1質

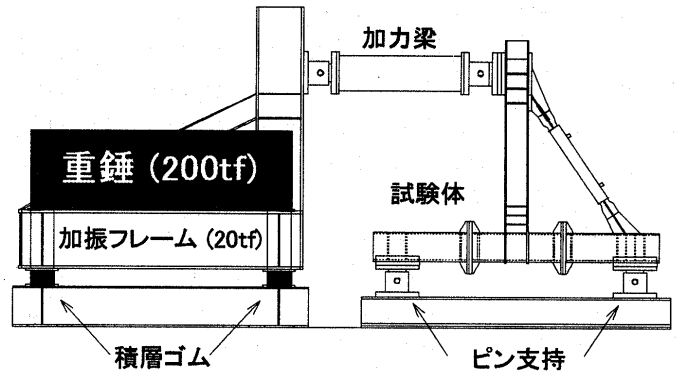


図6 実験装置概略

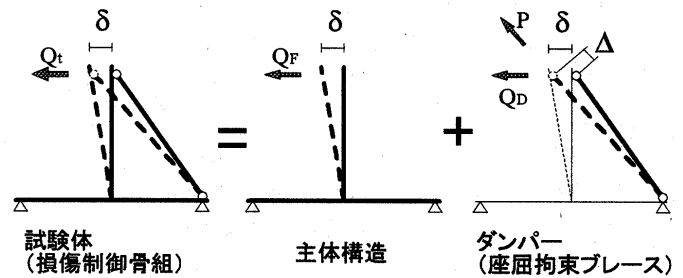


図7 試験体の力と変形の分離

点系」と見なすことができ、実構造物の全体挙動との対応を考えると、設定したある層の中の部分骨組の挙動を近似的に再現していると言える¹⁶⁾。積層ゴムは、合計2.0kN/mmの弾性剛性を有し、加振中の加振フレーム、加力梁、およびピンの変形を足し合わせ、剛性として評価すると、7.4kN/mmとなる¹⁰⁾。

3.2 計測と記号の定義

実験装置には、加速度計、変位計(バネ式、ワイヤー式、レーザー式)、歪みゲージなどの各種センサーを設置し、試験体の動的挙動を計測している。主な計測項目は、①試験体に作用するせん断力、②ダンパーに作用する軸力、③主体構造の梁材に作用するせん断力、④試験体の加力点での水平変位、⑤梁端部(ダイアフラム側)における回転角と水平変位、⑥ダンパーの軸方向変形、⑦梁端部における歪み分布である。これらのデータのサンプリングは1/1000秒刻みで行い、電気的なノイズを除去するために、5ステップ分の平均値を取り、1/200秒刻みのデータとして扱った。

本研究では、図7に示すように試験体(主体構造およびダンパー)の負担する力、変形、吸収エネルギー量を主体構造とダンパーの負担分に分離し、考察を行う。図中Qtは、試験体に作用するせん断力、δは試験体加力点での水平変位、QFは主体構造の負担するせん断力、QDはダンパーの負担するせん断力、Pはダンパーに作用する軸力、Δはダンパーの軸方向変形である。

QFは、梁材の弾性範囲にとどまると考えられる2断面に貼付した歪みゲージの計測値を用いて算出する。Δは、試験体に組み込まれた座屈拘束ブレースの主体構造側(内側)および外側に取り付けた平行移動装置上での計測値を平均したものであり、座屈拘束ブレースに生じる曲げ変形分を除去した値である。また、Pは式(1)を用いて算出する。

$$P = Q_D \frac{\sqrt{(L_c + \delta)^2 + L_b^2}}{L_c + \delta} \dots (1)$$

L_c : 接合部パネル中央からピン中央までの長さ
 L_b : 接合部パネル中央から加力点までの長さ

3.3 入力および加振手順

入力に用いた2種の強震記録波形を表4に示す。兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録NS成分(以下Kobe)と十勝沖地震八戸港湾記録EW成分(以下Hachinohe)の加速度記録を用い、振動台の動きを可動範囲にとどめるため0.2Hz以下(Hachinohe Level 4(80kine)では、0.3Hz以下)の低周波成分を除去し、入力波とした。

入力レベル設定時の留意点を以下に示す。

- ①実験システムへの総入力エネルギー量¹⁾の速度換算値²⁾(式2参照、以下 V_E)が揃うように、最大速度を設定する。
- ②基本試験体(主体構造およびLYP100またはSS400-)での主体構造の最大変形が弾性限度となる入力レベルをLevel 2とする。
- ③地震動の最大速度で、Level 2の1/2をLevel 1、3/2倍をLevel 3、N/2倍の入力レベルをLevel Nとする。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \dots (2)$$

V_E : 総入力エネルギー量の速度換算値
 E : 総入力エネルギー量
 M : 質量

本研究では、Level 1、2を通常設計で考慮する程度の入力、Level 3以上の入力を、ダンパーまたは主体構造が終局状態に達することが想定される過大入力と位置づけている。

図8に地震動の最大速度を50kineに基準化したKobeとHachinoheの10%減衰エネルギースペクトルを示す。図中に本実験で仮定した実験装置全体の固有周期(0.5秒程度)を示す。最大速度で基準化した場合、固有周期0.5秒程度で V_E の値が入力波により大きく異なること、いずれの入力波においても固有周期0.5秒程度での V_E の変化量が大きいことがわかる。本研究では、主体構造に弾性限度の最大変形が生じる入力をLevel 2と設定し、実験装置をモデル化した1質点系弾塑性解析を用い、Level 2の入力を $V_E=80\text{cm/s}$ 程度と設定した。対応するKobe、Hachinoheの最大速度はそれぞれ25kine、40kineであり、最大速度を用いて入力レベルを表現する。表5に、本研究で設定した各入力レベルを地震動の最大速度を用いて示す。

各種座屈拘束プレースを組み込んだ試験体ごとの加振は、以下の順序で行うものとする。

- ①パルス加振→①Kobe Level 1→②Hachinohe Level 1
- ③Kobe Level 2→④Hachinohe Level 2
- ⑤Kobe Level 3→⑥Hachinohe Level 3
- ⑦Kobe Level 4→⑧Hachinohe Level 4

まず、各座屈拘束プレースを主体構造へと設置した後、パルス加振を行い、固有周期と減衰の検証を行う。その後、4種の全試験体のLevel 1、Level 2の加振を続けて行う。そのとき主体構造は振動台上に設置したまま、座屈拘束プレースのみを取り替える。その後、各試験体ごとにLevel 3、Level 4の加振を行い、座屈拘束プレース芯材が破断に至るまで、適宜入力を判断し加振を続ける。また、主体構造の梁端部に大きな損傷が見られた場合、適宜判断し主体構造を入れ替えることとした。

4 実験結果

表6に今回の一連の実験での加振一覧を示す。表は、加振を行った時系列に沿って示してある。今回2体製作した主体構造をそれぞれ、frame1、frame2とし、通番26の载荷終了後主体構造をframe1からframe2へと交換している。また、表中のNOは各種ダンパーにふり当てた番号であり、本論文ではこのうち1のダンパーを用いた実験結果を扱う。入力波の欄に示す(Rev.)とは、振動台へ入力した加速度記録の正負を逆にしたものである。

表4 入力波

年	地震	記録	成分	本文中の表記
1995	兵庫県南部地震	神戸海洋気象台記録	NS成分	Kobe
1968	十勝沖地震	八戸港湾記録	EW成分	Hachinohe

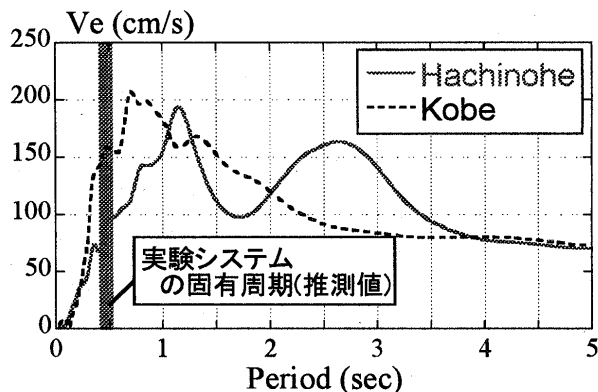


図8 エネルギースペクトル

表5 入力レベルと最大速度

入力波	入力レベルと最大速度(kine)				
	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Kobe	12.5	25.0	37.5	50.0	62.5
Hachinohe	20.0	40.0	60.0	80.0	-

表6 本研究での加振一覧

通番	ダンパー種	NO	入力波	入力レベル	主体構造種	備考
1	SS400+	1	パルス	-	frame1	
2	SS400+	1	Kobe	Level 1	frame1	
3	SS400+	1	Hachinohe	Level 1	frame1	
4	SS400+	1	Kobe	Level 2	frame1	
5	SS400+	1	Hachinohe	Level 2	frame1	
6	LYP235	1	パルス	-	frame1	
7	LYP235	1	Kobe	Level 1	frame1	
8	LYP235	1	Hachinohe	Level 1	frame1	
9	LYP235	1	Kobe	Level 2	frame1	
10	LYP235	1	Hachinohe	Level 2	frame1	
11	SS400-	1	パルス	-	frame1	
12	SS400-	1	Kobe	Level 1	frame1	
13	SS400-	1	Hachinohe	Level 1	frame1	
14	SS400-	1	Kobe	Level 2	frame1	
15	SS400-	1	Hachinohe	Level 2	frame1	
16	LYP100	1	パルス	-	frame1	
17	LYP100	1	Kobe	Level 1	frame1	
18	LYP100	1	Hachinohe	Level 1	frame1	
19	LYP100	1	Kobe	Level 2	frame1	
20	LYP100	1	Hachinohe	Level 2	frame1	
21	LYP100	1	Kobe	Level 3	frame1	
22	LYP100	1	Hachinohe	Level 3	frame1	
23	LYP100	1	Kobe	Level 4	frame1	
24	LYP100	1	Hachinohe	Level 4	frame1	破断
25	LYP235	1	Kobe	Level 3	frame1	
26	LYP235	1	Hachinohe	Level 3	frame1	破断
27	LYP100	2	パルス	-	frame2	
28	LYP100	2	Kobe	Level 3	frame2	
29	LYP100	2	Hachinohe	Level 3	frame2	
30	LYP100	2	Kobe	Level 4	frame2	
31	LYP100	2	Kobe(Rev.)	Level 5	frame3	破断
32	SS400-	2	パルス	-	frame2	
33	SS400-	2	Kobe	Level 3	frame2	
34	SS400-	2	Hachinohe	Level 3	frame2	
35	SS400-	2	Kobe	Level 4	frame2	
36	SS400-	2	Kobe(Rev.)	Level 5	frame2	
37	SS400-	2	Kobe	Level 3	frame2	
38	SS400-	2	Kobe	Level 3	frame2	
39	SS400-	2	Kobe(Rev.)	Level 3	frame2	
40	SS400-	2	Kobe(Rev.)	Level 3	frame2	
41	SS400-	1	Kobe	Level 3	frame1	
42	SS400-	1	Hachinohe	Level 3	frame1	
43	SS400-	1	Kobe	Level 4	frame1	
44	SS400-	1	Hachinohe	Level 4	frame1	
45	SS400-	1	Kobe(Rev.)	Level 4	frame1	
46	SS400-	1	Kobe	Level 4	frame1	破断
47	SS400+	1	Kobe	Level 3	frame1	
48	SS400+	1	Hachinohe	Level 3	frame1	
49	SS400+	1	Kobe	Level 4	frame1	
50	SS400+	1	Hachinohe	Level 4	frame1	

表中のNOは、各種座屈拘束プレースでの番号であり、本論文ではNOが1の実験結果を用いて、一連の実験結果の評価を行っている。また、frame1は主体構造1体目、frame2は2体目を示している。

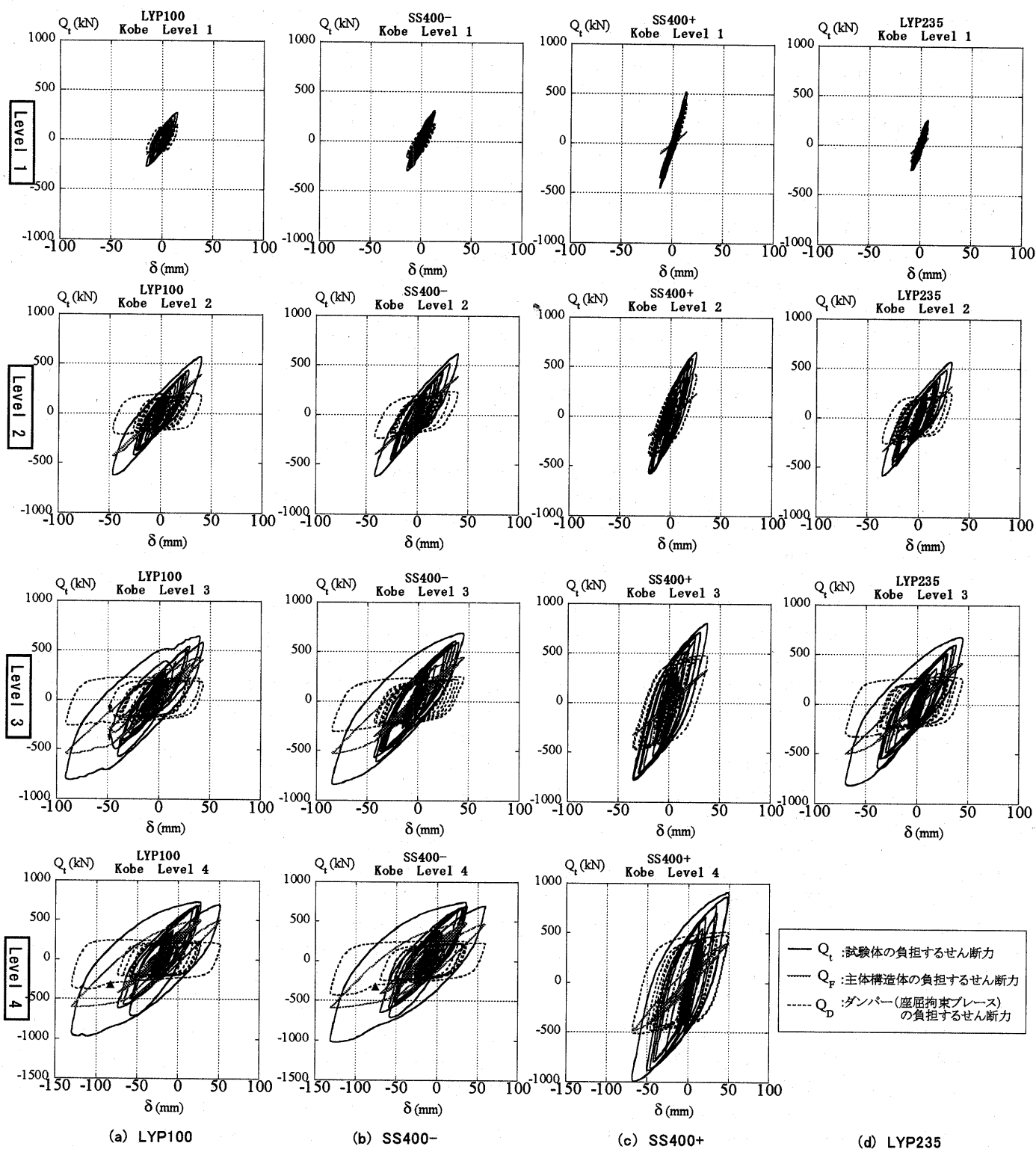


図9 せん断力 - 変形関係

4.1 固有周期、減衰

各種座屈拘束ブレースを主体構造へ組み入れて行った、パルス加振での固有周期と減衰を表7に示す。固有周期は、実験計画時の予測値より若干大きめの値を示したものの、主体構造に組み込んだ座屈拘束ブレースの力学特性を反映した結果であると言える。減衰には、ばらつきが見られ、既往の慣性加力装置を用いた実験結果^{17)~19)}より若干大きめの値を示したが、実験には支障がないと判断した。

表7 実験装置の固有周期と減衰

試験体	固有周期(s)	減衰(%)
LP100	0.53	4.1
SS400-	0.51	3.2
SS400+	0.46	4.5
LYP235	0.50	3.5

4.2 せん断力 - 変形関係

試験体頂部に作用するせん断力 Q_t 、主体構造の負担するせん断力 Q_F 、座屈拘束プレースの負担するせん断力 Q_D 、および試験体の加力点での水平変位 δ によって描かれるせん断力 - 変形関係に着目し、各試験体の応答性状を比較する。図9にせん断力 - 相関変形関係を示す。入力波はすべて Kobe であり、入力レベルは上が Level 1 である。

4.2.1 Level 1 加振

基本試験体の主体構造が弾性限度の変形が生じる入力 $1/2$ の最大速度を設定した Level 1 の加振結果を見ると、座屈拘束プレースの降伏せん断力を 120 ~ 150kN 程度に設定した LYP100、SS400-、LYP235 では、ダンパー芯材が降伏することにより、エネルギーを吸収し制振効果を発揮していることがわかる。ダンパーの負担せん断力の大きな SS400+ では、図を同一レンジで比較すると他の試験体ほど明確な塑性化は見られないが、ダンパー芯材は既に降伏に至っている。また、SS400+ での正負の最大せん断力は、他の試験体に対し大きな値を示す。Hachinohe の入力時においても、同様に各種座屈拘束プレースは、塑性化によるエネルギー吸収がみられた。

4.2.2 Level 2 加振

設計レベルの上限の入力と設定した Level 2 の実験結果に着目する。降伏軸力が同程度となるように設定した LYP100 と SS400- の実験結果を見ると、せん断力と変形の正負の最大値は近い値を示し、履歴ループも類似していることがわかる。また、座屈拘束プレースのせん断力 - 変形関係を見ると、座屈拘束プレースはともに明瞭なバイリニア型に対応した履歴ループを描いている。バイリニア型を仮定した場合の2次剛性は若干異なるが、これは図9に示した座屈拘束プレース芯材の素材特性を反映した傾向と言える。主体構造のせん断力 - 変形関係は、設計時に想定した降伏変形を多少越えた変形を示しているが、ともに概ね線形挙動を示している。

LYP235 の実験結果は、LYP100 と SS400- の基本試験体と類似した履歴ループを示しているが、荷重、変形の最大値は小さな値を示している。これは、LYP235 が剛性が高く、降伏変形が小さい特徴を反映し、小さな変形から塑性化によりエネルギー吸収を行うことができていることにより、正負の最大値を低減できていると言える。

SS400+ は、他の試験体に比べ、同一の変形でのダンパーの吸収エネルギー量が多いため、変形の最大値は小さな値となっている。また、変形が大きく低減されたことにより、試験体全体のせん断力の最大値も低減され、他の試験体の最大値と同等な値となっている。このとき、主体構造の最大変形は、弾性範囲内に収まっている。

4.2.3 Level 3 加振

Level 2 の 1.5 倍の入力を設定し、過大入力として位置づけている Level 3 実験結果を基に、過大入力時の損傷制御骨組の挙動を分析する。

LYP100 実験結果を見ると、座屈拘束プレースが安定した弾塑性性状を示していることがわかる。Level 3 の加振では、Level 1、Level 2 加振と比較して、正負の大変形を繰り返す、歪み硬化の進展も頭打ちとなっている。そのため、座屈拘束プレースの負担する各ループの正負最大せん断力の増加は少なくなっている。また、せん断力の最大値は引張側で 220kN 程度、圧縮側で 260kN 程度の値となっている。主体構造は、Level 1、2 と比較して大きな塑性化が見られ、弾塑性挙動を示していることが分かる。最大変形は、91mm 程度と主体構造設計時に想定した降伏変形の 3 倍程度の変形が生じているが、安定した履歴挙動を示している。

SS400- の加振結果に着目すると、せん断力、変形の正負最大値は LYP100 と同程度の値を示し、座屈拘束プレース、主体構造ともに安定した弾塑性挙動を示している。座屈拘束プレースのせん断力の最大値は引

張側で 250kN 程度を示し、圧縮側では、最大変形発現時に 350kN 程度の値を示している。

SS400+ では主体構造が弾性的挙動を示し、正負の最大変形は、他の試験体に対し、大きく低減されていることがわかる。最大変形は、他の試験体の Level 2 での最大値と同程度となっている。座屈拘束プレースの最大せん断力は、圧縮引張ともに 500kN 程度となっている。

LYP235 は LYP100、SS400- の基本試験体と比較して、履歴吸収エネルギー量は同程度であるものの、正負の最大変形を抑制できている。これは、座屈拘束プレースの降伏変形が小さいため、効率的にエネルギー吸収が行われたこと、せん断力の最大値が引張側で 280kN 程度、圧縮側で 340kN 程度の値を示し、基本試験体に対して、同一の変形で多くのエネルギー吸収が行われる座屈拘束プレースであったことが影響していると言える。しかし、他の座屈拘束プレースに比べ、芯材長さを短く設定したため、ある振幅が生じた場合の芯材の歪みは大きい。そのため、損傷も蓄積され、LYP235 は Hachinohe、Level 3 の加振時に破断に至った。しかし、Kobe Level 3 の加振においては、安定した履歴挙動を示し、破断に至る直前まで、有効に機能していた。

4.2.4 Level 4 加振

Level 2 の 2 倍の最大速度と設定し、過大入力として位置づけている Level 4 での損傷制御骨組の挙動を分析する。

LYP100 での座屈拘束プレースのせん断力 - 変形関係を見ると、引張側の最大値は 250kN 程度であり、Level 3 での加振と大きな差は見られないものの、圧縮側では図中に示した▲印付近から耐力が大きく上昇し、最大 370kN 程度となっている。このとき、座屈拘束プレースの軸変形は 40mm 程度である。これは、図4に示した座屈拘束プレースのクッション材を片側 25mm と設定し、圧縮変形を最大 50mm と設定したことにより、座屈拘束プレース芯材端部の十字断面部分と、鋼管内のモルタルが衝突し、ダンパーの負担する軸力が大きく増大したためである。圧縮変形を 50mm と設定したにもかかわらず、40mm 程度の変形から耐力が増大した原因としては、鋼管内のモルタルが 40mm の変形の発現以前に崩れていたことや、座屈拘束プレースに作用している曲げ変形の影響などが考えられる。また、加振終了時の座屈拘束プレースを観察すると、クッション材を配置した芯材端部周辺の鋼管の表面が大きくふくれあがり、鋼管内のモルタルと芯材端部十字断面部分が衝突していることが推測できた。主体構造のせん断力 - 変形関係は大きく塑性化し、損傷を受けている。

SS400- の座屈拘束プレースについても同様な傾向が見られる。引張側の最大せん断力は、250kN 程度と Level 3 加振時と同程度であり、図中▲印では 300kN 程度であり、Level 3 の同様な変形時のせん断力と同等な値を示している。しかし、▲印以降、耐力は大きく上昇し、最大 430kN となっている。LYP100 よりも耐力の上昇が大きくなっているのは、芯材に用いた鋼材が同一変形時において極低降伏点鋼よりも応力が高いこと、また、モルタルと衝突する部分の断面積が大きいためであると考えられる。また、主体構造は、大きな履歴ループを描き、損傷を受けていることがわかる。このときの最大変形は、LYP100 と同程度の値となっている。

SS400+ は主体構造、座屈拘束プレースともに安定した履歴ループを描いている。座屈拘束プレースの最大せん断力は、圧縮引張ともに 500kN を超え、多くのエネルギーを吸収している様子が見られる。そのため、LYP100、SS400- に対し、変形を大きく低減できている。

4.3 各加振での主体構造とダンパーのエネルギー吸収分担

図10に各種試験体での各加振における主体構造の履歴吸収エネルギー量 W_{pf} と座屈拘束プレースの履歴吸収エネルギー量 W_{pd} を示す。 W_{pf} と W_{pd} は、それぞれ、試験体頂部に作用するせん断力 Q_t から分割

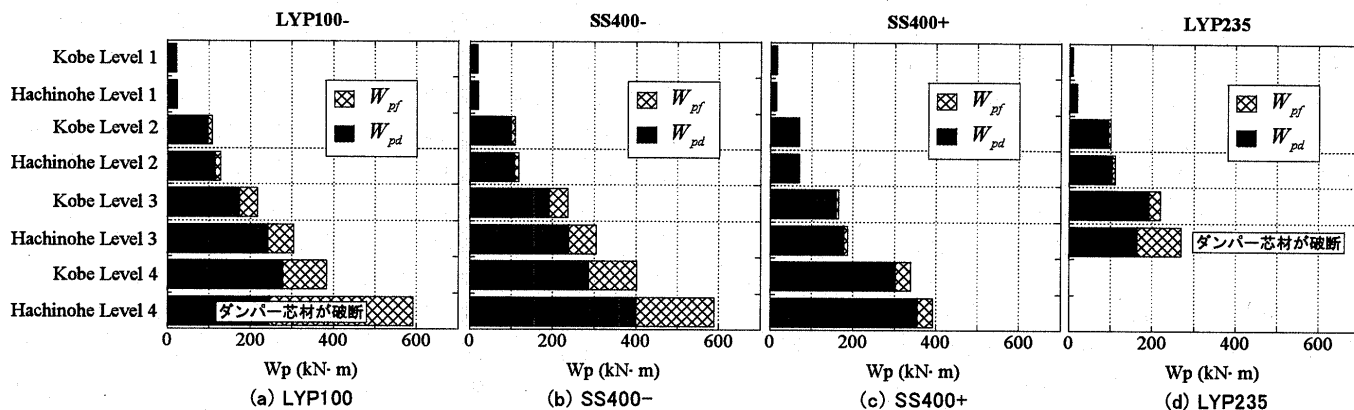


図 10 各加振での履歴吸収エネルギー量

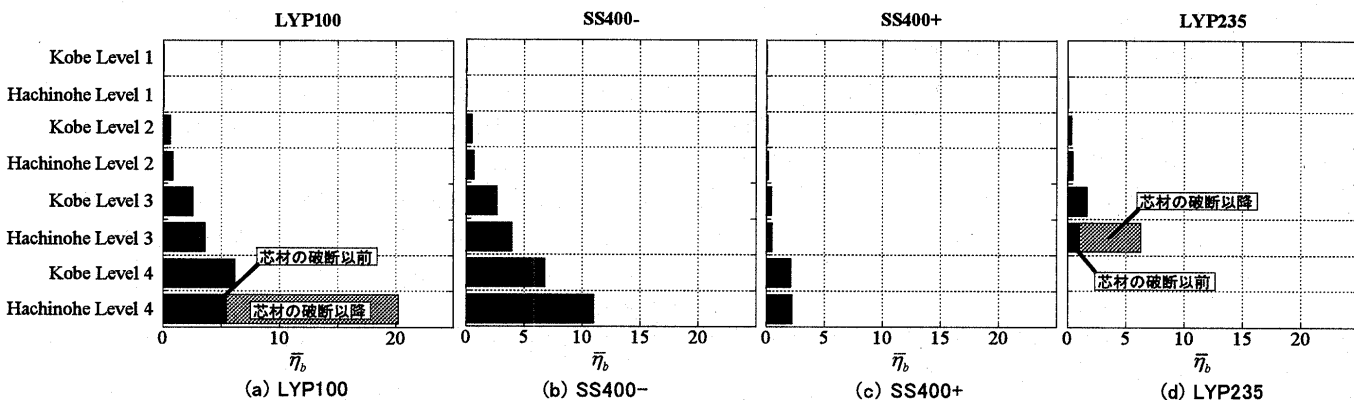


図 11 各加振での主体構造梁材の損傷

した主体構造の負担せん断力 Q_p 、ダンパーの負担せん断力 Q_D 、および加力点の水平変位 δ を用いて算出した。

Level 1 の加振では、どの試験体も主体構造は弾性範囲にとどまり、骨組によるエネルギー吸収は、座屈拘束ブレースによりなされている。

Level 2 の加振では、SS400+ を除く試験体で主体構造の降伏変形 (計算値) を越える変形が生じていた。そのため、履歴吸収エネルギー量もその結果を反映し、主体構造によるエネルギー吸収が見られる。しかし、骨組によって吸収されたエネルギーの9割以上が、座屈拘束ブレースによって吸収されている。このことから、Level 2 の加振において座屈拘束ブレースが有効に機能し、主体構造の損傷を低減できたと言える。主体構造と、座屈拘束ブレースの履歴吸収エネルギー量の和は、SS400+ をのぞき、概ね $100\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度であり、大きな差は見られないことが分かる。

過大入力と設定した Level 3 の加振では、Kobe、Hachinohe ともに主体構造は大きく塑性化し、損傷を受けている。SS400+ を除く試験体は Kobe を用いた加振時に $220\text{kN}\cdot\text{m}$ のエネルギーを吸収し、そのうち8割以上をダンパーが負担していることが分かる。LYP100 と SS400- の Hachinohe での加振においても、骨組としての吸収エネルギー量約 $300\text{kN}\cdot\text{m}$ のうち、その8割をダンパーが負担している。LYP235 においては、Hachinohe 加振時にダンパー芯材が破断に至り、その後主体構造が大きく損傷を受けている。SS400+ に関しては、最大変形を低減できたことにより、主体構造の受けた損傷は少ない。

Level 4 の加振では、LYP100 が Hachinohe の加振で破断に至った。しかし、座屈拘束ブレースは、破断直前の Kobe 加振時まで有効に機能していた。Kobe では骨組全体で $4000\text{tf}\cdot\text{cm}$ 程度のエネルギーを吸収しているが、このうち7割以上は、座屈拘束ブレースが吸収したエネルギー量である。SS400- においても Kobe 加振時は、安定した履歴挙動を示し、エネルギー量についても LYP100 と同等な値を示している。SS400-

の Hachinohe では、今回図示した全加振の中で最も多くのエネルギー吸収が見られるが、骨組の吸収エネルギー量のうち約7割がダンパーによってなされている。SS400+ では、試験体の最大変形は抑制され、主体構造の損傷は少ない。また、吸収エネルギー量の9割をダンパーが吸収している。以上から、座屈拘束ブレースが破断に至らなければ、設計レベルを大きく超える過大入力に対してもエネルギー吸収分担が明確に成されることが分かる。

4.4 各加振での主体構造の損傷

本実験で用いた試験体の主体構造では、柱とパネルは弾性範囲に留まるように設計されているので、主体構造の損傷は全て梁材の塑性仕事に集約される。各加振で主体構造の梁材に生じた損傷を、梁材の等価累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}_b$ で表し、図 11 に示す。 $\bar{\eta}_b$ は、主体構造の履歴吸収エネルギー量 W_{pf} を、梁のせん断力-変形関係における骨格曲線から図 12 に示す General-Yield 法により求めた降伏耐力 Q_{pb}' と、 Q_{pb}' に対応する塑性変形 δ_{pb}' (計算値) の積で除することにより求めた値である。(式(3)参照)

$$\bar{\eta}_b = \frac{W_{pf}}{Q_{pb}' \cdot \delta_{pb}'} \quad \dots (3)$$

また、ダンパー芯材が破断に至った加振については、破断前と破断以後の $\bar{\eta}_b$ を分けて示した。設計レベルの上限に相当する Level2 加振では、 $\bar{\eta}_b$ は基本試験体と設定した LYP100、SS400- で 0.8 程度であり、主体構造への損傷はほとんど問題にならない程度であることがわかる。また、過大入力を想定し、入力波の最大速度を Level2 加振の 1.5 倍とした Level3 加振においても、加振中にダンパーの破断した LYP235 (hachinohe) を除き、 $\bar{\eta}_b$ は 4 程度に抑えられている。これは、非常に靱性の低い鋼材を用いた場合を除けば、破断により決まる梁の終局状態までの変形¹⁹⁾ に比べて十分小さな値と考えられる。さらに、入力波の最大速度を Level2 加

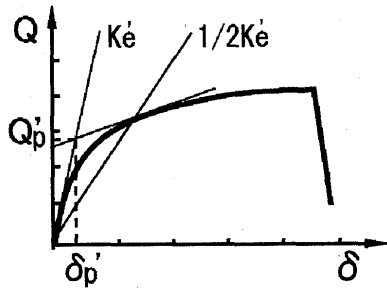


図12 General-Yield法

振の2倍としたLevel4加振においても、加振中にダンパーが破断しなければ、基本試験体と設定したLYP100、SS400-で $\bar{\eta}_b$ は6~11程度に抑えられている。1自由度系による実験結果であるという制約はあるが、設計レベルの2倍程度の過大入力下においても、ダンパーは破断しない限り主体構造の損傷を抑制するために有効に機能するといえる。また、加振中にダンパー芯材が破断に至ったLYP100 Hachinohe Level 4とLYP235 Hachinohe Level 3ででの、ダンパー芯材の破断以前と破断以後の $\bar{\eta}_b$ を比較すると、梁材はダンパー芯材の破断以後に大きく損傷を受けていることが分かる。しかし、今回の実験では破断には至らなかった。

5 結論

本研究では、エネルギー吸収要素として座屈拘束ブレースを有する損傷制御部分骨組を試験体として、慣性加力装置を用いた実大振動台実験を行った。力学的特性の異なる4種類の座屈拘束ブレースを主体構造へ組み込み込んだ試験体に対して、4段階の入力レベルでの加振を行った。4段階の入力レベルとは、主体構造が弾性限度の変形となる入力レベルをLevel 2と設定し、最大速度でその半分をLevel 1、1.5倍をLevel 3、2倍をLevel 4と設定した。また、Level 1、2を通常設計で想定する入力、Level 3以上をダンパーまたは主体構造が終局状態に達するような過大入力と位置づけている。振動台実験は、座屈拘束ブレースの破断以後も継続して加振が続けられる。そのため、本研究では、設計レベルから過大入力までを対象とした範囲の中で、部分骨組の以下の異なる3種の状態(①~③)に関する知見を得ることができたと言え、以下に示す。

①座屈拘束ブレースが破断していない設計レベル、過大入力での挙動、主体構造の損傷

(i)座屈拘束ブレースが破断していない状態において、通常設計で想定する入力と仮定したLevel 1, 2の入力と、設計レベルを大きく超える過大入力時において、主体構造に組み込まれた各種座屈拘束ブレースはともに有効に機能する。

(ii)エネルギー吸収分担が明確になされ、Level 1, 2で、9割程度ダンパーがエネルギーを吸収した。Level 3, 4の入力においても、破断に至らなければダンパーは7割程度のエネルギーを吸収し、骨組の吸収したエネルギーはダンパーに集約される。

(iii)設計レベルの上限に相当するLevel 2加振において、梁の等価累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}_b$ は基本試験体と設定したLYP100、SS400-で0.8程度であり、主体構造への損傷はほとんど問題にならない。入力波の最大速度をLevel 2加振の2倍としたLevel 4加振においても、加振中にダンパーが破断しなければ、基本試験体と設定したLYP100、SS400-で $\bar{\eta}_b$ は6~11程度となり、既往の実験結果から、延性的な破壊には至らないといえる。

②過大入力を受け、座屈拘束ブレースが破断した場合の座屈拘束ブレースと骨組の挙動

(i)過大入力と位置づけたLevel 3、4の振動台加振において、座屈拘束ブレースの圧縮側に大変形が生じ、芯材端部とモルタルが衝突した場合、座屈拘束ブレースの負担する軸力は大きく増加する。しかし、その後、座屈拘束ブレースは安定した履歴挙動を示す。

③座屈拘束ブレースが破断した後の挙動、主体構造の損傷

(i)座屈拘束ブレースが振動台加振中に破断に至った場合、主体構造に大きく損傷が蓄積する。今回の実験では、Hachinohe Level 4の座屈拘束ブレースが破断した振動台加振で、梁材の等価累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}_b$ は最大20程度となった。

本研究では、設計レベルの2倍程度の入力まで、骨組に組み込まれた状態において座屈拘束ブレースが有効に機能することが確認できた。また、座屈拘束ブレースが破断に至った場合、主体構造の損傷が急増したという事実から、骨組に組み込まれ動的な外力を受ける座屈拘束ブレースの破断限界を解明することが、次の課題である。

謝辞

振動台の制御に関し防災科学技術研究所・飯田晴男氏にご協力をいただいた。ここに厚く謝意を表す。また、本論文の第一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) 秋山 宏: 建築物の耐震極限設計, 東京大学出版会, 1980.
- 2) 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.
- 3) 秋山宏: 第1層エネルギー集中型柔剛混合構造の地震応答予測, 日本建築学会構造系論文集NO.400, pp.77-84, 1989年6月.
- 4) 中川肇, 浅野幸一郎: Poly-linear型履歴ダンパーを用いた多層構造物の最適地震応答制御について, 日本建築学会構造系論文集, NO.506, pp.93-100, 1998年4月
- 5) 呉誠, 西川孝夫: 構造物の弾塑性地震応答変形制御法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, NO.515, pp.45-52, 1999年1月.
- 6) 田中清, 佐々木康人: 極低降伏点鋼を用いた制震パネルダンパーの静的履歴減衰特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, NO.509, pp.159-166, 1998年7月
- 7) 曾田五月也, 高橋雄司: ランダム加力による粘弾性ダンパーの振動数依存性の定量化, 日本建築学会構造系論文集, NO.498, pp.43-50, 1997年8月.
- 8) 野村周平, 甲津功夫, 網川 隆: 鉛ダンパーの減衰特性に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, NO.526, pp.153-160, 1999年12月
- 9) 田川浩, 上谷宏二, 言谷聡志: 履歴ダンパーの破断を伴う鋼構造骨組の地震応答, 鋼構造論文集, 第5巻第20号, pp.127-135, 1998年12月.
- 10) 秋山宏, 山田哲, ベナベント アマデオ, 寺田岳彦, 北村春幸, 小倉桂治: プレース型履歴ダンパーを有する柔剛混合構造の実大振動台実験, 日本建築学会構造系論文集NO.541, pp.171-179, 2001年3月.
- 11) 秋山宏, 山田哲, 箕輪親宏, 寺本隆幸, 大竹章夫, 矢部喜堂: 慣性加力装置を用いた構造要素の実大振動台実験方法, 日本建築学会構造系論文集, NO.505, pp.139-146, 1998年3月.
- 12) 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
- 13) 佐伯英一郎, 岩松浩一, 和田章: 有限要素法によるアンボンドブレースの弾塑性挙動解析と実験結果との比較, 日本建築学会構造系論文集, NO.484, pp.111-119, 1996年6月.
- 14) 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、2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1分冊, pp.813-816, 1999年9月.
- 15) 山口路夫, 竹内百合, 山田 哲, 竹内 徹, 和田章: 極低降伏点鋼の速度依存性を考慮した履歴特性に関する研究(その1~3), 日本建築学会学術講演梗概集, C-1分冊, pp.675-680, 2001年9月
- 16) 山口路夫, 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: 実構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
- 17) 秋山宏, 山田哲, 高橋誠, 桂大輔, 木村克次, 矢野秀介: 露出型柱脚の実大振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, No.514, pp.185-192, 1998年12月.
- 18) 秋山宏, 山田哲, 松本由香, 田中宏志, 三山剛史, 寺田岳彦: 冷間成形角形鋼管柱の実大振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, No.521, pp.133-140, 1999年7月
- 19) 秋山 宏, 山田 哲, 松本由香, 松岡三郎, 大竹章夫, 杉本浩一: 実大柱梁接合部の試験温度による延性破壊一脆性破壊遷移, 日本建築学会構造系論文集, NO.522, pp.105-112, 1999年8月.

(2001年9月10日原稿受理, 2002年6月3日採用決定)