

実大振動台実験による建築鋼構造の脆性破壊過程解明と破壊抑止策の検証

その3. 損傷制御シリーズの実験結果

山口路夫¹・山田哲²・松本由香³・小川信行⁴・秋山宏⁵

¹ 修士(工学) 東京工業大学 大学院生 環境理工学創造専攻 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

² 博士(工学) 東京工業大学 助教授 建築物理研究センター (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

³ 博士(工学) 横浜国立大学助手 建築学コース (〒240-8501 常盤台 79-5)

⁴ 工博 防災科学技術研究所 (〒305-0006 つくば市天王台 3-1)

⁵ 工博 日本大学教授 総合科学研究所 (〒101-8308 千代田区神田駿河台 1-8-14)

In this paper, test results of shaking table tests are shown. Four kinds of buckling resistant braces 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 ultimate input. 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.

Key Words : shaking table test, full scale, damper

1. 序

本報その3では、応力集中が起きやすく破壊が発生しやすい梁端接合部の応力レベルを弾性範囲にとどめ、地震による入力エネルギーをダンパーで吸収する「損傷制御シリーズ」について行った振動台加振結果を示す。

実験計画についてはその1を参照とする。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¹⁾²⁾などが報告され、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、設計レベルで想定される入力から、過大入力に至るまで様々な入力レベルを想定し、段階的に加振を行う。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て評価を行う。

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-1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 Q_t 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、 Q_p は主体構造の負担するせん断力、 Q_D 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。

Q_p 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

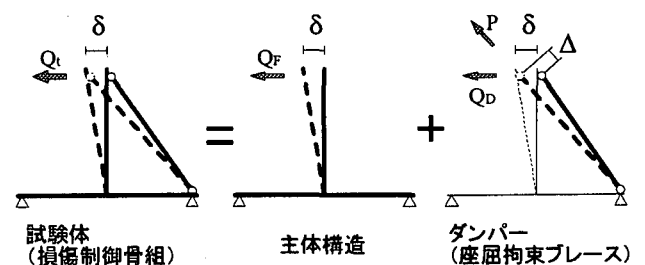


図-1 試験体の力と変形分離

(内側)および外側に取り付けられ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。

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

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. 実験結果

表-1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の載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。

(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-2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。

(2) セン断力 - 変形関係

試験体頂部に作用するせん断力 Q_i 、主体構造の負担するせん断力 Q_p 、座屈拘束ブレースの負担するせん断力 Q_b 、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-2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、入力レベルは上からLevel 1、Level 2、Level 3、Level 4である。

(a) 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の1/2の最大速度を設定したLevel 1の加振結果を見ると、座屈拘束ブレースの降伏せん断力を12.0~15.0tf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してい

表-1 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	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、各種座屈拘束ブ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。

表-2 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

る。また、Hachinoheの入力時においても、同様に各種座屈拘束ブレースは、塑性化によるエネルギー吸収がみられた。

(b) Level 2加振

基本試験体の主体構造が弾性限度の最大変形が生じる入力を設定したLevel 2の実験結果に着目する。

歪み硬化の影響が少なくなった時点での降伏軸力が同程度となるように設定したLYP100とSS400-のせん断力-変形関係を見ると、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、座屈拘束ブレースのせん断力-変形関係を見ると、

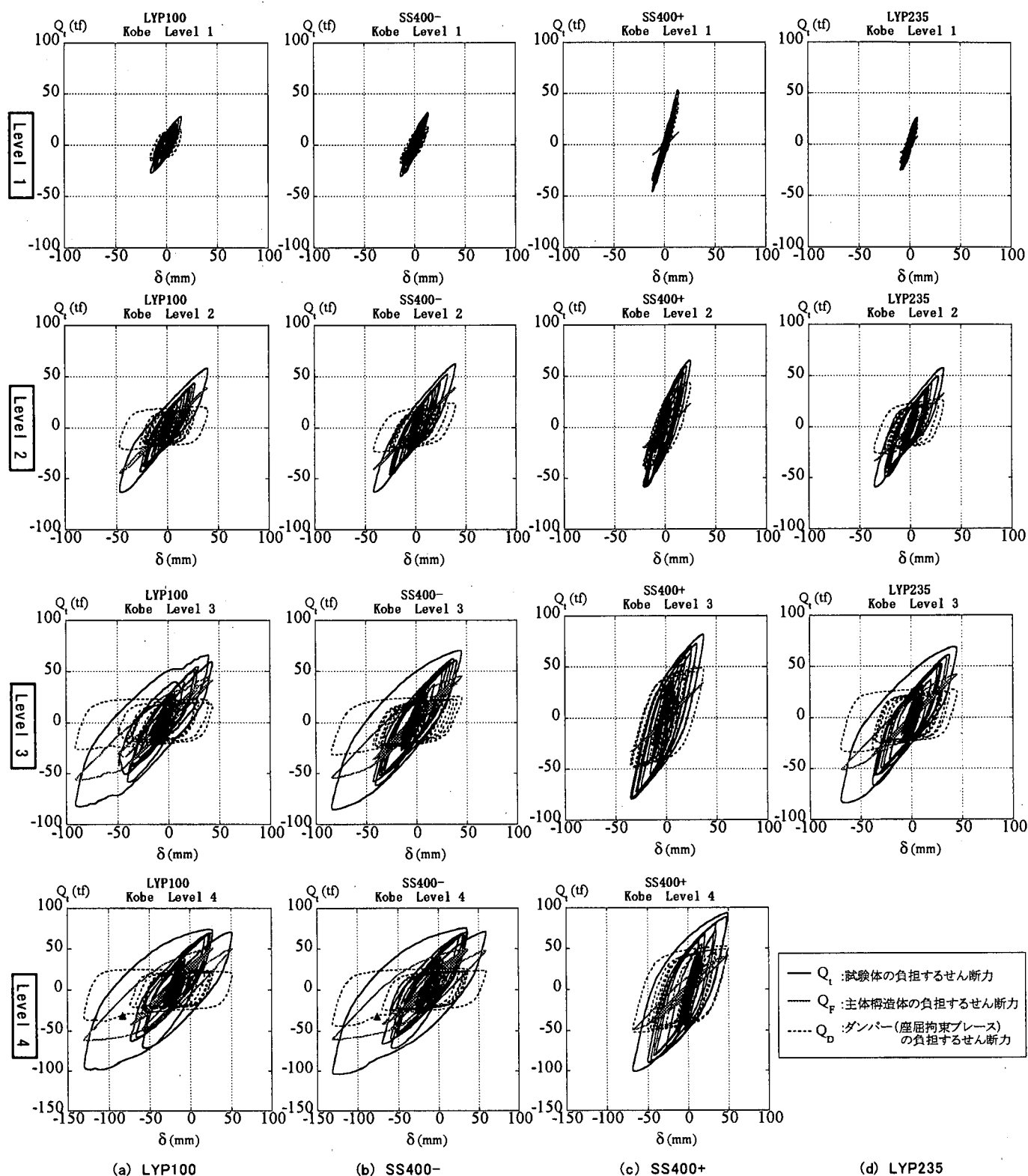


図-2 せん断力-変形関係

座屈拘束ブ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、これは座屈拘束ブレース芯材の素材特性を反映した傾向であると言える。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と言える。

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の座屈拘束ブレースの芯材長さを他の1/2に設定したため、ブレースの剛性が高く、降伏変形が小さい。そのため、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。

(c) 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のせん断力-変形関係を見ると、座屈拘束ブ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し、歪み硬化の進展も頭打ちとなっている。そのため、座屈拘束ブ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22tf程度、圧縮側で26tf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、座屈拘束ブレース、主体構造ともに安定した弾塑性挙動を示している。座屈拘束ブレースのせん断力の最大値は引張側で25tf程度を示し、圧縮側では、最大変形発現時に35tf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。最大変形の値は、概ね他の試験体のLevel 2での最大値と同程度となっている。座屈拘束ブレースの最大せん断力は、圧縮引張ともに50tf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、座屈拘束ブ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28tf程度、圧縮側で34tf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ブレースであったことが影響していると言える。しかし、他の座屈拘束ブレースに比べ、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、有効に機能していると言える。

(d) Level 4 加振

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

LYP100での座屈拘束ブレースのせん断力-変形関係を見ると、引張側の最大値は25tf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38tf程度となっている。このとき、座屈拘束ブレースの軸変形は40mm程度である。これは、図4に示した座屈拘束ブ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、座屈拘束ブ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、座屈拘束ブ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ブ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-の座屈拘束ブ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、25tf程度とLevel 3加振時と同程度であり、図中▲印では31tf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44tf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大きいこと、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、座屈拘束ブレースともに安定した履歴ループを描いている。座屈拘束ブレースの最大せん断力は、圧縮引張ともに50tfを超え、多くのエネルギーを吸収している様子が分かる。そのため、LYP100、SS400-に対し、変形を大きく低減できている。

(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-3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} と座屈拘束ブ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 から分割した主体構造の負担せん断力 Q_f 、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っており、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ことがわかる。

Level 2の加振では、SS400+を除く試験体で主体構造の

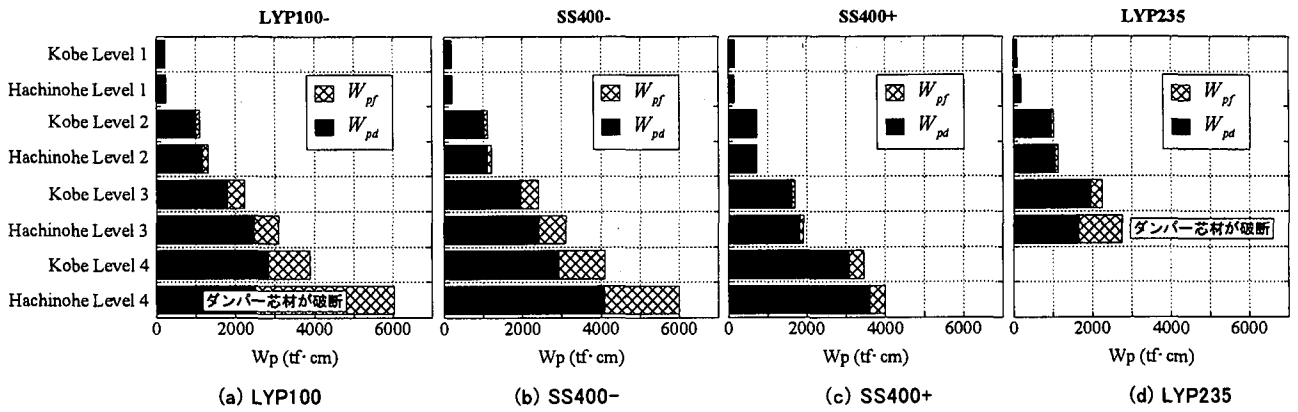


図-3 各加振での履歴吸収エネルギー量

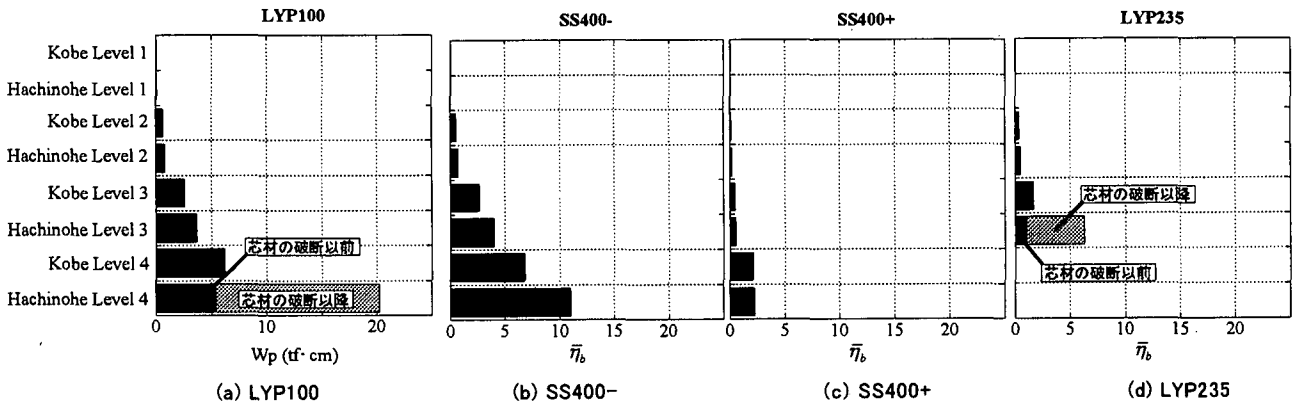


図-4 各加振での主体構造梁材の損傷

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1000tf·cm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2300tf·cm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3000tf·cm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、Kobe加振時まで有効に機能し、安定した履歴挙動を示している。骨組全

体で4000tf·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。

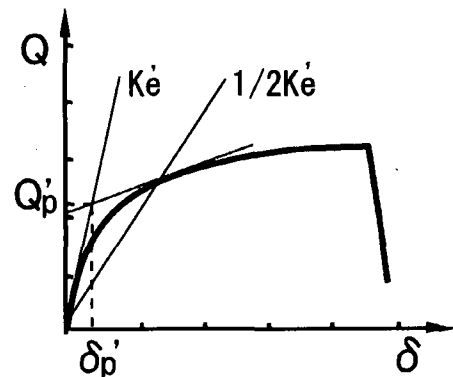


図-5 General-Yield法

(4) 各加振での主体構造損傷

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、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-4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-5に示す General-Yield 法により求めた降伏耐力 Q_{pb}' と、 Q_{pb}' に対応する弾性変形 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)

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

また、ダンパー芯材が破断に至った加振については、破断以前と破断以後の $\bar{\eta}_b$ 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³⁾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、設計時に想定した最大速度の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では、ダンパー芯材の破断以前と破断以後の $\bar{\eta}_b$ を分けて示している。梁材はどちらも場合も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。

4. 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い以下の知見を得た。4段階の入力レベルとは、Level 2を主体構造が弾性限程度の変形となる入力レベルと設定し、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。

- (i)通常設計で想定する入力と仮定したLevel 1、2の振動台加振において、主体構造へ組み込まれた各種座屈拘束ブレースは有効に機能する。
- (ii)過大入力と位置づけたLevel 3、4の振動台加振において、主体構造へ組み込まれた座屈拘束ブレースは有効に機能する。また、上記の入力で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せん断力は増加するが、座屈拘束ブレースは安定した履歴挙動を示す。
- (iii)Level 1、2の入力では、主体構造とダンパーのエネルギー吸収分担が明確になされ、骨組の吸収したエネルギーの約9割は、ダンパーによって吸収された。また、Level 3、4の入力では、ダンパー芯材が破断しなければ、ダンパーは約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量はダンパーに集約される。
- (iv)設計レベルの上限に相当するLevel2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Level2加振の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、設計時に想定した最大速度の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。

参考文献

- 1)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。
- 2)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。
- 3)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。