日本建築学会技術報告集　第14巻 第27号，55-59，2008年６月
AIJ J. Technol. Des. Vol. 14, No. 27, 55-59, Jun., 2008

高減衰型粘弾性ダンパーを用いた梯子状梁による耐震補強効果

SEISMIC REINFORCEMENT EFFECT OF LADDERY BEAM INSTALLED WITH VISCOELASTIC DAMPERS

白山敦子 ——＊１　　鈴木祥之 ——＊２

Atsuko SHIRAYAMA —— ＊1　　Yoshiyuki SUZUKI —— ＊2

キーワード：
梯子状梁，高減衰型粘弾性ダンパー，振動台実験，耐震補強

Keywords :
Laddery beam, High damping viscoelastic damper, Shaking table test, Seismic reinforcement

In this paper, a laddery beam with high damping viscoelastic dampers is proposed to enhance seismic capacity of traditional timber structures. To make clear the effect of the reinforcement member, shaking table tests were conducted in the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University. As a result, a laddery beam with high damping viscoelastic dampers increased damping ratio and reduced response, compared with those without dampers. The laddery beam with viscoelastic dampers tested was proven to have effectiveness in enhancing seismic performance of traditional wooden frames during earthquakes.

１．はじめに

我が国には社寺建築に代表される伝統的な木造建物が多数存在する。これら伝統木造建物に対する耐震補強材として、梯子状梁が提案されている [1)]。梯子状梁補強材は図１に示すように、柱と柱をつなぐ２本の横架材と数本の束で構成され、束の本数を変えることにより、必要な補強性能(剛性･耐力)を調節することができる。

具体的な梯子状補強材の設置方法を図２に示す。この梯子状補強材は、社寺建築の天井裏や、京町家の通り庭部分などに設置することを想定しているが、梯子状梁の復元力特性については、比較的大きな変形性能をもつもの、スリップ形状で履歴面積は小さく地震入力エネルギーの吸収という意味では効果に乏しい [1)]。そこで、梯子状梁全体の履歴面積を大きくすることを目的として、層間変形が零近傍で最も大きな減衰力が得られる粘弾性ダンパーを取り付けることで、よりエネルギー吸収効果の高い梯子状補強材を提案する。

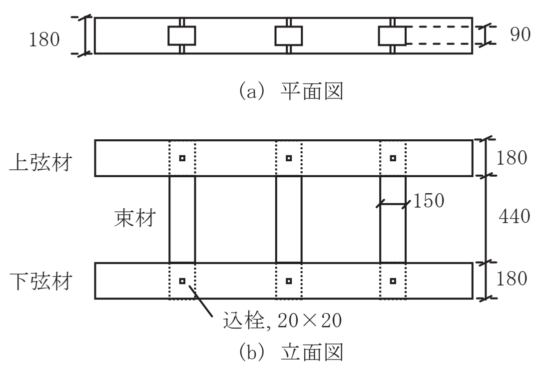


図1　梯子状梁の構成（単位：mm）

本研究では、SRI ハイブリッド株式会社により新しく開発された高減衰型粘弾性ダンパー [2)] を組み込んだ梯子状梁の振動台実験を行い、その耐震補強効果について検討を行う。付録１に高減衰型粘弾性ダンパーの基本的特性を示す。尚、この実験に用いられる粘弾性ダンパーは、比較的温度依存性が低い [付1, 4)] ため、木造建物など外気温に影響を受ける部位に設置しても安定した復元力を得ることが可能である。そこで、振動台実験では、高減衰型粘弾性ダンパー単体の基本的な振動特性(振幅依存性、振動数依存性、入力地震動の影響など)について検証し､次に梯子状梁に粘弾性ダンパーを取り付けた場合の耐震補強効果について検討を行う。

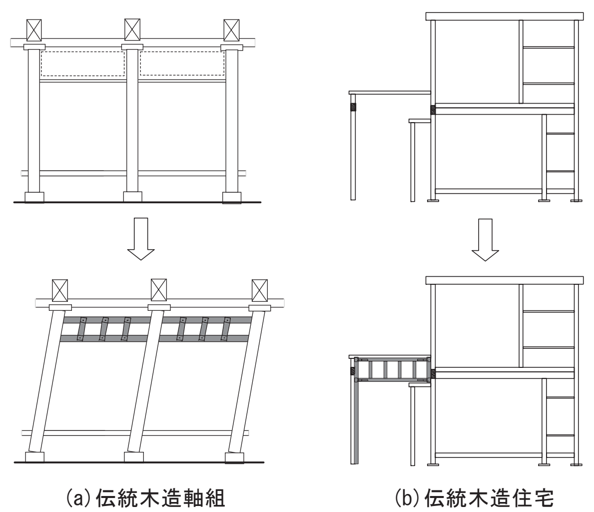


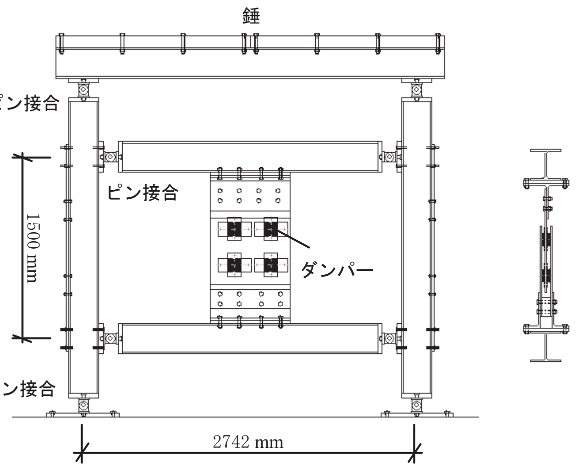
図２　梯子状梁の取り付け例

＊1　京都大学大学院工学研究科建築学専攻　大学院生・修士(工学)
日本学術振興会　特別研究員
(〒615-8530　京都市西京区京都大学桂)
＊2　京都大学防災研究所　教授・工博

＊1　Graduate Student, Graduate School of Engineering, Kyoto University, M. Eng.
Research Fellow, Japan Society for the Promotion of Science
＊2　Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Eng.

２．高減衰型粘弾性ダンパー単体の振動台実験

2.1 試験体の概要



(a)立面図　　　　　　　　(b)断面図

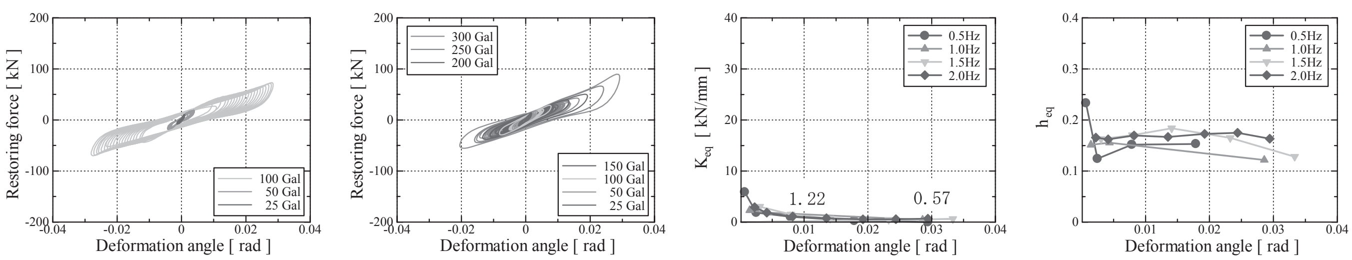
図３　試験体概要

図３に高減衰型粘弾性ダンパー単体の試験体立面図ならびに断面図を示す。試験体フレームは、1×1 スパンの鉄骨４本柱の立体軸組とし、長手方向は 2742mm、短手方向は 1350mm、接合部はすべてピン接合とした。また、頂部に慣性力として 160kN の錘を載せ、その中に粘弾性ダンパーを設置した。本実験における粘弾性体のせん断面積は 100mm×100mm、厚さは 20mm とし、個数は 4、8、16 個となるケースを扱った。本ダンパーは、木造建物への設置を目的とし、変形角が比較的大きな 1/30rad までを対象としているため、厚さを 20mm と設定した。実建物に、本ダンパーを適用する場合は、必要とする剛性と減衰定数に応じて厚みとせん断面積を調節することになる。本振動台実験では、16 個の粘弾性ダンパーを使用し、本ダンパーは、比較的、繰り返し使用しても安定した履歴特性が得られるため[付 1,3)]、4 個、8 個の試験体は、一度使用したものを用いている。また、実験時の気温は、基準温度である 20℃前後である。

2.2 加振概要

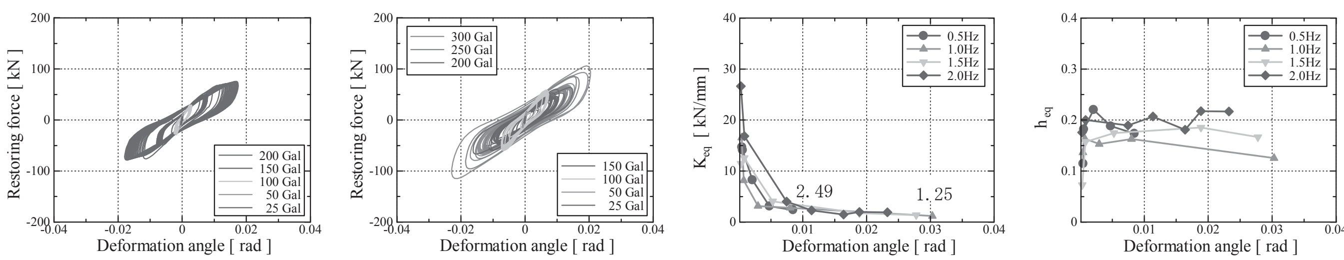
加振実験では、試験体の基本的な振動特性を把握するために、固有振動数毎(0.5、1.0、1.5、2.0Hz)に 20 サイクルの正弦波加振を行った。また、模擬波加振として建築センター波(BCJ-L2)、El Centro NS 波、Taft EW 波、Hachinohe NS 波、JMA KOBE NS 波を用いた。尚、正弦波加振、模擬波加振ともに最大変形角が 0.03rad(1/30)程度となるよう最大入力加速度を 25Gal から徐々に上げ加振を行った。

加振方向については、試験体長手方向とした入力を行い、柱頭部および柱脚部の水平変位を振動台外部に設置したレーザー変位計にて計測し、2 点間の距離を柱高さで除して層間変形角を算出した。応答加速度については試験体頂部および振動台位置で計測し、その加速度記録に基づき復元力を算出、質点重量についてはピン接合部より上部部材の重量計測により得た。



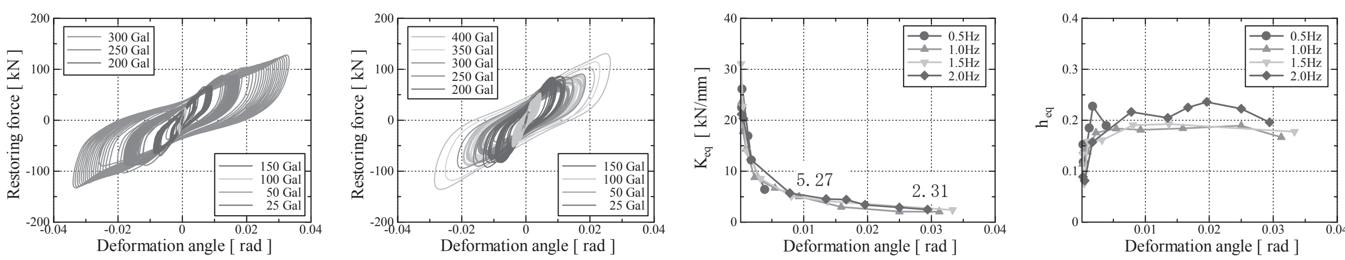
(a) Sin 波 1.0Hz　(b) Sin 波 2.0Hz　(c) 等価剛性　(d) 等価粘性減衰定数

図４　粘弾性ダンパーの振動特性（100mm×100mm-4 個：せん断面積 40000mm^2）



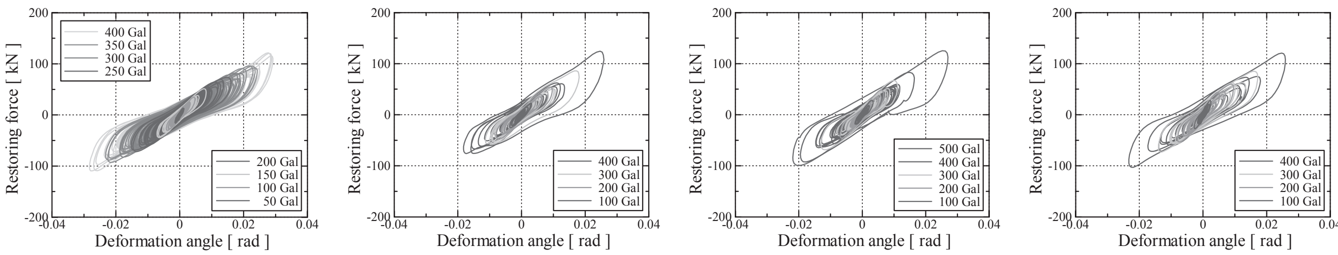
(a) Sin 波 1.0Hz　(b) Sin 波 2.0Hz　(c) 等価剛性　(d) 等価粘性減衰定数

図５　粘弾性ダンパーの振動特性（100mm×100mm-8 個：せん断面積 80000mm^2）



(a) Sin 波 1.0Hz　(b) Sin 波 2.0Hz　(c) 等価剛性　(d) 等価粘性減衰定数

図６　粘弾性ダンパーの振動特性（100mm×100mm-16 個：せん断面積 160000mm^2）



（a） BCJ-L2 波　（b） El Centro NS 波　（c） Hachinohe NS 波　（d） JMA KOBE NS 波

図 7　粘弾性ダンパーの復元力特性（100mm × 100mm−8 個：せん断面積 80000mm^2）

2.3 実験結果

図4(a)(b)は粘弾性体の個数を4個としたケースについて、Sin波1.0Hz、2.0Hz加振としたときの復元力特性を示す。また、これら復元力の最大面積から､付録2に示す算出方法により算定した等価剛性を図4(c)に、等価減衰定数を図4(d)に示す。同様に、図5(a)～(d)は粘弾性体の個数を8個としたケース、図6(a)～(d)は粘弾性体の個数を16個としたケースの振動特性をそれぞれ示す。

これらの図より、いずれのケースについても、加振振動数に関係なく、加振レベルが大きくなるにつれて、紡鐘状の安定した履歴特性を示す。また、等価剛性については、変形角が 0.01rad 以下のときに加振振動数に対してばらつきが見られるものの、変形角が 0.01rad を超えると振動数に関わらずほぼ同一の剛性を有し、粘弾性体の個数を増やした場合には比例的に剛性が増加することがわかる。更に等価粘性減衰定数については、微小変形を除いた(0.005rad 以上)場合に、加振振動数によりばらつきが見られるものの、概ね15%～25%となる減衰定数を得ることがわかる。

また、粘弾性体の個数が8個のケースについて、入力地震動をBCJ-L2波、El Centro NS波、Hachinohe NS波、JMA KOBE NS波とした場合の復元力特性を図7(a)～(d)にそれぞれ示す。

これらの図より、正弦波加振と同様に模擬波加振においても、加振レベルが大きくなるにつれて、入力地震動に関係なく安定した履歴特性を示していることがわかる。

3．粘弾性ダンパーを取り付けた梯子状梁の振動台実験

3.1 試験体の概要

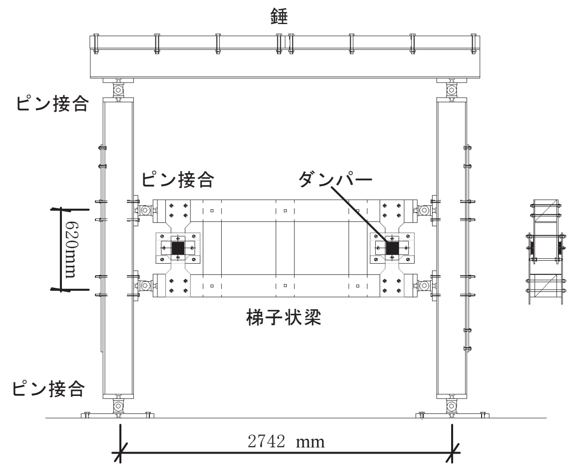
梯子状梁に粘弾性ダンパーを取り付けた試験体の設置状況を図 8 に示す。また、図 9 に梯子状梁のほぞ部の詳細を示す。ほぞの抜けを防止するために、ほぞ長さの中心に込栓を設け、ほぞ長さを 180 mm、ほぞ厚を 90mm、束長さを 440mm、束の本数を 3 本とした。梯子状梁の樹種としては、横架材・束にひのき、込栓にカシを使用した。粘弾性ダンパーの取り付け方法は、写真 1 に示すように梯子状梁の耐力要素である木材のめり込みや摩擦による履歴および変形性能を損なわないよう設置(個数は 8 個)した。

尚、粘弾性体の諸元としてはせん断面積が 100mm×100mm と 70mm×70mm(せん断面積 39200mm^2：100mm×100mm のダンパー4 個分に相当となる)の 2 ケース、厚さは 20mm とした。

3.2 加振概要

加振はダンパー単体の振動台実験と同様に行い、ダンパーの耐震補強効果を検証するため、梯子状梁のみの加振も行った。

計測箇所についても、ダンパー単体実験のときと同様とした。



(a)立面図　(b)断面図

図 8　試験体概要(粘弾性ダンパー8 個)

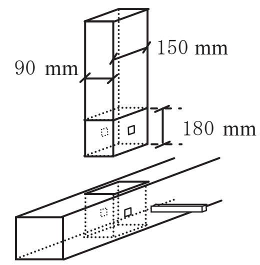


図 9　ほぞ詳細図

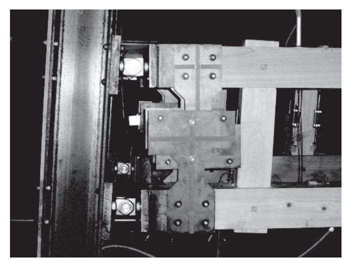
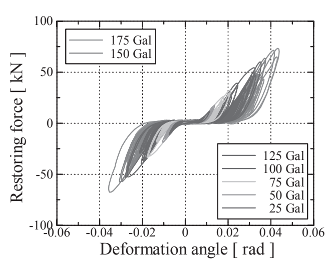


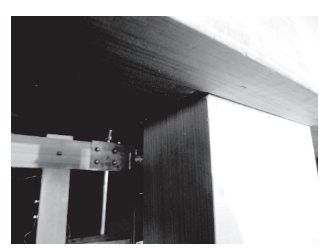
写真 1　ダンパー取り付け状況

3.3 実験結果

(1) 梯子状梁のみの振動特性

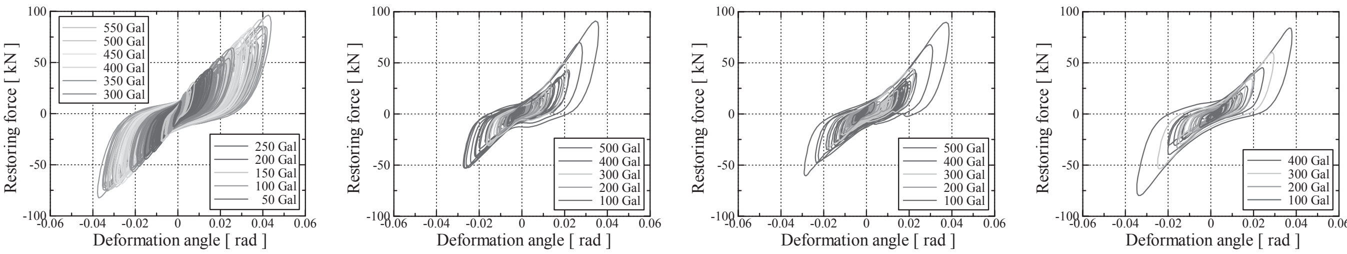
入力地震動をBCJ-L2波とした梯子状梁の復元力特性を図10(a)、ほぞ部の損傷状況写真を図10(b)にそれぞれ示す。図10(a)の復元力特性および図10(b)の損傷状況から判断できるように､束のめり込みや摩擦の効果により、大変形時においても耐力低下や大きな損傷は確認できない。





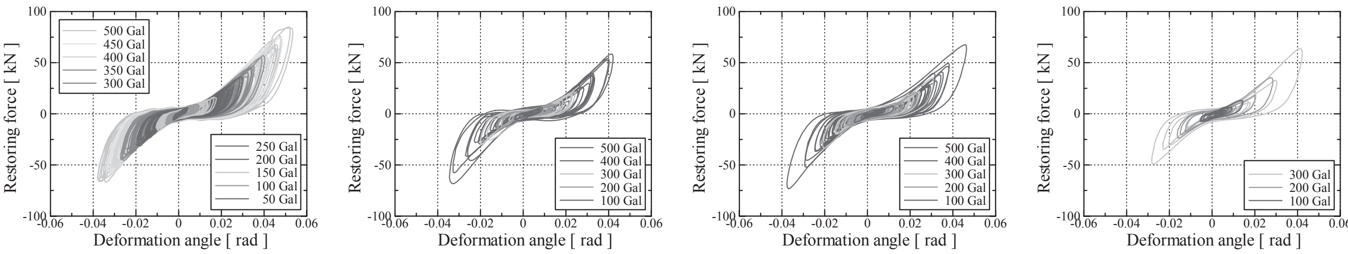
（a） 復元力特性　（b） 損傷状況

図 10　梯子状梁のみの振動特性（BCJ-L2 波）



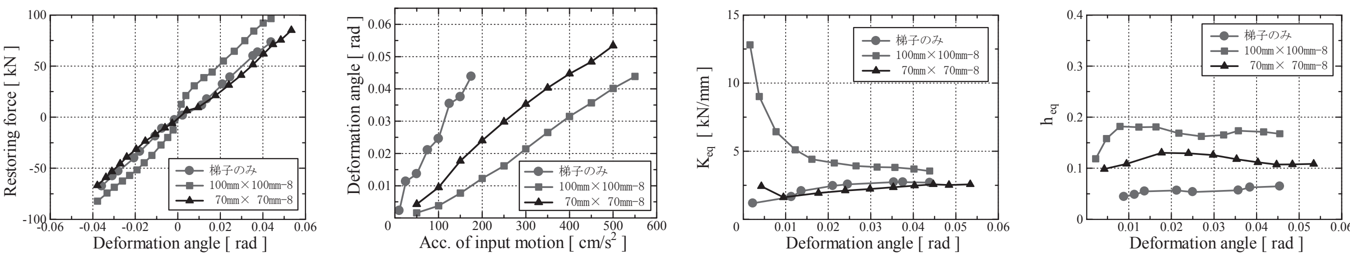
（a） BCJ-L2 波　（b） El Centro NS 波　（c） Hachinohe NS 波　（d） JMA KOBE NS 波

図 11　粘弾性ダンパー付き梯子状梁の復元力特性 （100mm×100mm-8 個：せん断面積 80000mm^2）



（a） BCJ-L2 波　（b） El Centro NS 波　（c） Hachinohe NS 波　（d） JMA KOBE NS 波

図 12　粘弾性ダンパー付き梯子状梁の復元力特性 （70mm×70mm-8 個：せん断面積 39200mm^2）



（a） 包絡曲線　（b） 入力加速度に対する変形角　（c） 等価剛性　（d） 等価減衰定数

図 13　各試験体（梯子状梁のみ・100mm×100mm・70mm×70mm）の比較 （BCJ-L2 波）

(2) 粘弾性ダンパーを取り付けた梯子状梁の振動特性

入力地震動をBCJ-L2波、El Centro NS波、Hachinohe NS波、JMA KOBE NS波とした場合について、粘弾性体のせん断面積が100mm×100mmとなるケースの復元力特性を図11(a)～(d)に、70mm×70mmとなるケースの復元力特性を図12(a)～(d)にそれぞれ示す。これらの図と図10(a)の梯子状梁のみの場合を比較すると、粘弾性体のせん断面積を大きくすることにより原点近傍の履歴面積が急拡大し、入力地震動に関係なくエネルギー吸収量が増大していることがわかる。

(3) 耐震補強効果について

耐震補強効果について、入力地震動をBCJ-L2波とした各試験体（梯子状梁のみのケース、粘弾性体のせん断面積が100mm×100mmのケース、70mm×70mmケース）の復元力特性から算出した包絡曲線（せん断力ー変形関係）を図13(a)に、地震入力加速度と最大変形角との関係を図13(b)に、等価剛性を図13(c)、等価減衰定数を図13(d)にそれぞれ示す。図13(b)より最大入力加速度が同レベルの場合、粘弾性ダンパーを取り付けた梯子状梁と梯子状梁のみの試験体を比較すると、せん断面積が70mm×70mmのケースでは1/2程度、100mm×100mmのケースでは1/3程度に低減することがわかる。また、図13(a)(c)よりせん断面積が100mm×100mmのケースでは梯子状梁のみのものよりも剛性が高く、70mm×70mmのケースでは梯子状梁のみのケースとほぼ同程度であることがわかる。さらに、図13(d)より、梯子状梁のみの減衰定数は5%程度であり、70mm×70mmのケースでは12%程度、100mm×100mmでは18%程度の減衰が得られる。

4．まとめ

本研究では、高減衰型粘弾性ダンパー単体の基本的な振動特性ならびに梯子状梁に高減衰型粘弾性ダンパーを取り付けた場合の耐震補強効果について振動台実験により検討を行った。

1） 梯子状梁に高減衰型粘弾性ダンパーを組み込むことにより、最大層間変形角は、梯子状梁の最大層間変形角の半分以下に低減することが可能である。
2） 梯子状梁の等価粘性減衰定数が 5%程度であるのに対し、梯子状梁に高減衰型粘弾性ダンパーを組み込むことで、12%～18%程度の等価粘性減衰が得られる。

謝辞

本研究は京都大学とSRIハイブリッド株式会社との共同研究である。本実験を行うにあたり、田中克往氏（SRIハイブリッド株式会社）を始め、数多くの方々に多大なる協力を頂いた。

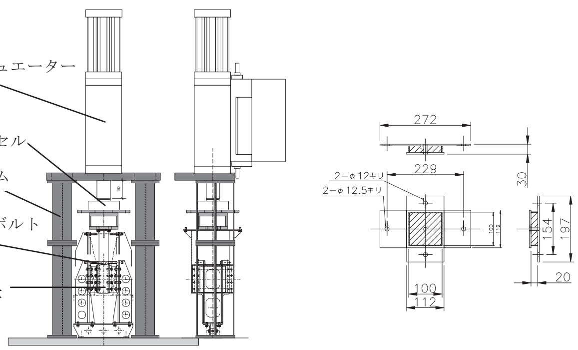
ここに記してお礼申し上げます。

参考文献

1） 白山敦子、鈴木祥之、佐々木孝史：「伝統木造軸組の梯子状梁による耐震補強」，第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集，Paper No. 0241，pp. 1070-1073，2006. 11
2） 建築技術性能証明評価概要報告書：「超高減衰型粘弾性ダンパーシステム」，SRI ハイブリッド株式会社，日本建築総合試験所，2006. 5
3） 日本免震構造協会：パッシブ制震構造 設計・施工マニュアル 第 2 版，2005

付録１　高減衰型粘弾性ダンパーの基本的特性

本研究で用いた粘弾性体のせん断面積が 100mm×100mm 、厚さが 20mm の粘弾性ダンパーの基本的な特性を以下に示す。静的実験として、図 A1 に示すような、同じ形状の試験体２個を１組として取り付けることにより１軸２面せん断試験を行っている。試験はアクチュエーターにより正負の正弦波加振を 4 サイクル繰り返し、計測した試験体の水平力と水平変位から、3 サイクル目のループを用いて本粘弾性ダンパーの履歴特性値（等価剛性 K_{eq} 、等価粘性減衰定数 h_{eq} 、切片荷重 Q_d）を得る。



（a）装置概要図　（b）試験体形状図

図 A1　１軸２面せん断試験

1）限界変形特性

水平方向に 5.0mm/sec の一定速度で載荷し、本粘弾性ダンパーにおいて、粘弾性体厚みの 400%の水平変位で水平力の低下（負剛性）がないことを確認した。

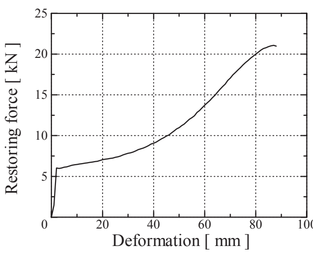


図 A2　限界変形特性

2）歪み依存性

歪みによる履歴特性値の基準水平変位（γ=±100%）に対する変化率を以下にまとめる。

表 A1　歪み依存性による変化率

歪み比（試験歪み/基準歪み）	周波数 0.1Hz 、温度 20℃		
	K_{eq}	h_{eq}	Q_d
50%/100%	1.69	0.90	0.75
200%/100%	0.62	1.06	1.34
300%/100%	0.49	0.97	1.42

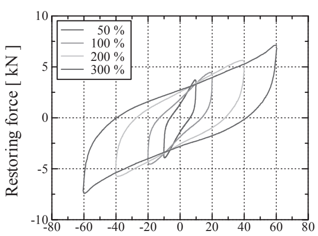


図 A3　復元力特性

3）繰り返し依存性

繰り返しによる履歴特性値の基準繰り返し回数（3 サイクル）に対する変化率を以下にまとめる。

表 A2　繰り返し依存性による変化率

繰り返し比（試験回数/基準回数）	歪み γ=±100% 、周波数 0.1Hz 、温度 20℃		
	K_{eq}	h_{eq}	Q_d
10/3	0.83	0.94	0.77
20/3	0.78	0.92	0.71
30/3	0.77	0.89	0.68
40/3	0.77	0.86	0.66

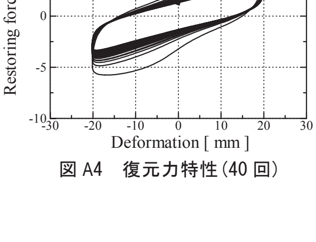


図 A4　復元力特性（40 回）

4）温度依存性

温度による履歴特性値の基準温度（20℃）に対する変化率を以下にまとめる。

表 A3　温度依存性による変化率

温度比（試験温度/基準温度）	歪み γ=±100% 、周波数 0.1 Hz		
	K_{eq}	h_{eq}	Q_d
-10℃/20℃	2.13	1.21	2.56
0℃/20℃	1.61	1.09	1.73
10℃/20℃	1.24	1.06	1.30
30℃/20℃	0.84	0.95	0.80
40℃/20℃	0.75	0.90	0.66

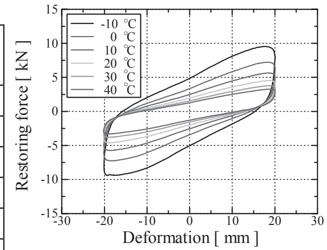


図 A5　復元力特性

5）経年変化

経年変化による履歴特性値の基準値（経年 0 年）に対する各経過相当年数の変化率を以下にまとめる。

表 A4　経年変化による変化率

経年比	歪み γ=±100% 、周波数 0.1Hz 、温度 20℃		
	K_{eq}	h_{eq}	Q_d
10 年後/0 年	1.08	0.92	1.05
20 年後/0 年	1.10	0.92	1.05
40 年後/0 年	1.15	0.92	1.07
60 年後/0 年	1.15	0.91	1.07

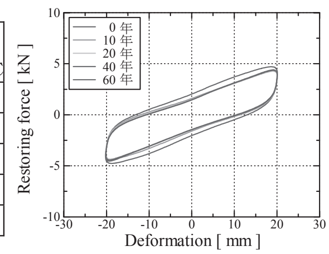


図 A6　復元力特性

6）周波数依存性

周波数による履歴特性値の基準周波数（0.1Hz）に対する変化率を以下にまとめる。

表 A5　周波数依存性による変化率

周波数比（試験周波数/基準周波数）	歪み γ=±25% 、温度 20℃		
	K_{eq}	h_{eq}	Q_d
0.05/0.1	1.00	0.98	0.99
0.5/0.1	1.04	1.01	1.04
1.0/0.1	1.06	1.03	1.07
2.0/0.1	1.15	1.02	1.14
3.0/0.1	1.16	1.06	1.23

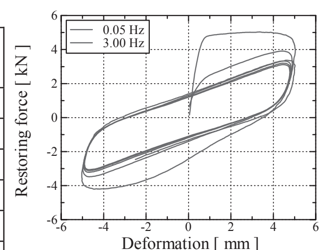


図 A7　復元力特性

7）製造ばらつき

履歴特性値の製造ばらつきの基準値を以下にまとめる。

表 A6　製造ばらつき

	歪み γ=±100% 、周波数 0.1 Hz 、温度 20℃		
	K_{eq}	h_{eq}	Q_d
粘弾性ダンパー	−15%～+15%	−15%～+15%	−15%～+15%

付録２　各種算出方法

本論文で用いている用語の定義を以下に示す。

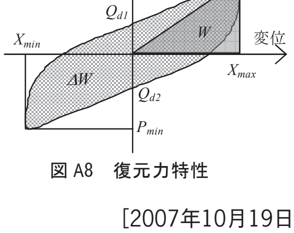


図 A8　復元力特性

等価剛性： $K_{eq}=\dfrac{P_{\max}-P_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}}$　（kN/mm）

等価粘性減衰定数： $h_{eq}=\dfrac{1}{4\pi}\cdot\dfrac{\Delta W}{W}$

切片荷重： $Q_d=\dfrac{|Q_{d1}|-|Q_{d2}|}{2}$　（kN）

［2007年10月19日原稿受理　2008年１月７日採用決定］