

免震U型ダンパーの開発

Development of U-shaped Steel Damper For Seismic Isolation System

鈴木 一 弁^{*(1)} 渡 辺 厚^{*(1)} 佐 伯 英 一 郎^{*(2)}
 Kazuaki SUZUKI Atsushi WATANABE Eiichiro SAEKI

抄 録

日本における免震構法は阪神淡路大震災を機に幅広く認められ、民間建物を始め、自治体庁舎、消防署等の震災時に防災拠点となる重要建築物に多く採用されている。U型ダンパーの特徴を簡単に紹介し、水平方向性能及び速度・温度依存性能に関して実験を行ったのでその結果を示した。

Abstract

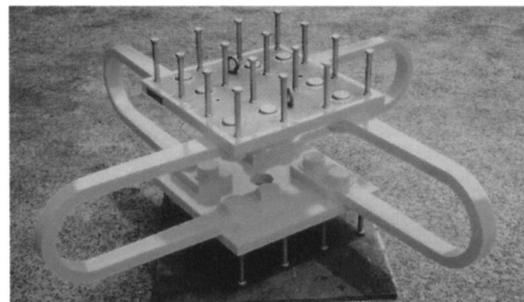
Seismic isolation system was widely admitted after Hanshin-Awaji (Kobe) Earthquake in Japan. It has been adopted in important buildings that become a disaster prevention base after earthquakes such as public office buildings and fire stations including a private building a lot. In this paper, the authors easily describe the feature of U-shaped steel damper and the results of experiments to the horizontal property and the velocity and the temperature dependency.

1. はじめに

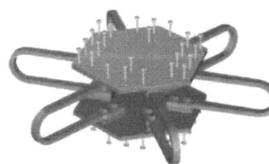
1995年1月17日に発生した阪神淡路大震災から早くも10年が経過する。この震災で死者6400人、全壊住家18万世帯(10万棟)、非住家の被害500棟もの大被害を受けた。この教訓を機にライフラインや公共建造物の耐震性、防災計画、救援活動等、様々な分野に対し見直しが行われ、地震に対する意識やその備えの重要性が認識された。先に起きた新潟県中越地震では、少なからずその教訓が役に立っているように思える。

建築の分野においても、阪神大震災を機に建築物の耐震性能の重要性が幅広く認識され、地震被害を最小限にする耐震建築の研究開発が活発に行われてきた。その中で免震構法は耐震性能において最も優れた技術として評価されてきた。免震建築は民間の集合住宅を始め、首相官邸、美術館、消防署、庁舎等の特に社会的な重要建築物や防災拠点となる建築物に多く採用された。これは現行の建築基準法では、地震によって建築物が被害、損傷を受けることが前提となっているからである。しかし現実には建物に被害を受けてしまうと財産を失うことになり、公共建築物は地震後にその機能を果たせなくなってしまうため、地震後も無被害、無損傷となる免震構法が必要とされてきた。

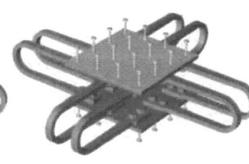
これまで免震構造物は全国に約1000件建てられている。新日本製鐵は逸早く免震鋼棒ダンパーを商品化し、エニコムハイコムセンターを設計・施工するなど積極的に免震構法に取り組み、技術力を活かした商品として免震ダンパーを販売してきた。免震U型ダンパー(図1, 2)は、これまで培ってきたノウハウを活かした新日本製鐵オリジナルのダンパーである。



Type of four dampers



Type of six dampers



Type of eight dampers

図1 免震U型ダンパー
U-shaped steel damper for seismic isolation system

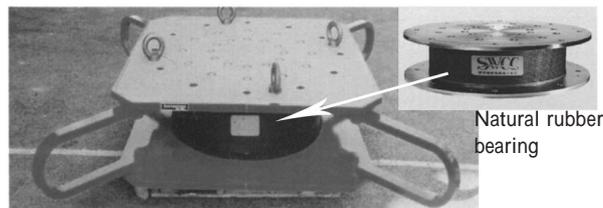


図2 積層ゴム一体型免震U型ダンパー
U-shaped steel damper with natural rubber bearing

^{*(1)} 建築事業部 技術開発グループ マネジャー
東京都千代田区大手町2-6-3 〒100-8071 TEL:(03)3275-6704

^{*(2)} 建築事業部 部長 工博

2. 免震U型ダンパーの特徴

地震は建物を上下左右あらゆる方向へ揺らし、特に免震装置は水平方向へ大きく変形する。免震ダンパーは地震時の水平360度全方向の変形に対し、方向依存性がない安定した性能が必要となる。またアンボンドブレースと同様に、鋼材を積極的に塑性化させることにより、塑性履歴を利用して地震エネルギーを吸収する新しい鋼材の使い方をしており、新日本製鐵の鉄素材、加工技術を活用したエンジニアリング商品である。免震ダンパーは、大地震時に30cm以上大きく変形するため、ダンパーの歪が約10%で繰り返される極低サイクル疲労領域の過酷な使い方を(図3, 4)。

(1) U型形状【水平方向性能の無方向性、疲労・変形性能に優れる】

ダンパーをU型形状にし、長さ、幅、板厚、高さ等の寸法を最適化したことで、地震時の水平360度から受ける変形に対し、ダン

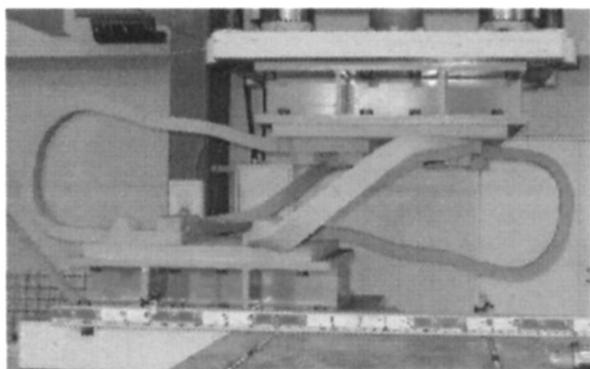


図3 変形状況
Deformed shape

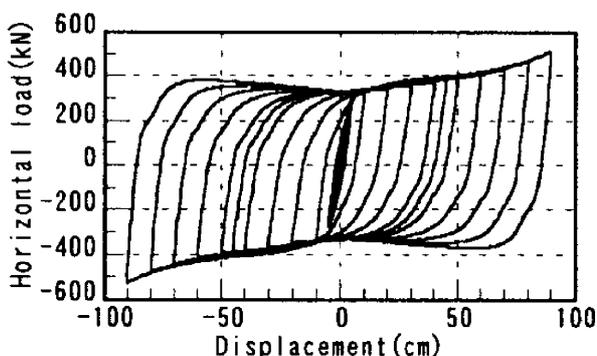


図4 履歴曲線
Hysteresis curve

パーに生じる歪みを局部的に集中せずダンパー全体に分散させ塑性化させることができる。またダンパーの水平方向性能の剛性、降伏せん断力や疲労特性に対し方向性を少なくすることができる。

(2) 製造方法【冷間成型を実現したことによりコストは低下し、高品質となった】

冷間成型(プレス加工)により大量生産が可能となり、低コスト、高品質を可能とした。

(3) 商品構成【相似形状と組合せ本数により低コスト化、設計自由度を向上させた】

ダンパーの商品構成は、ダンパーのサイズを相似則に変化させることで決定している(表1)。設計時に必要とされるダンパーの変形性能、疲労特性に対してはダンパーのサイズを選択することで決定し、必要な降伏せん断力や設置可能箇所数に対しては、ダンパーの組合せ本数によって選択できるように設計の自由度を向上させている(図1)。また積層ゴムアイソレータとの一体型タイプ(図2)を開発し、他社競合ダンパーとの対抗商品の商品化した。

3. U型ダンパーの性能概要

U型ダンパーの性能を確認するために数々の性能確認実験を行った。以下では水平方向依存性と温度・速度依存性の2種類の実験により、ダンパーの主な性能を紹介する。

3.1 水平方向依存性

3.1.1 実験概要

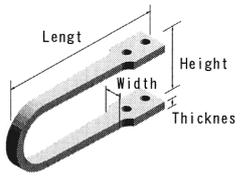
U型ダンパーUD40の単体試験体に対し、水平加力方向による影響を確認するため、0度面内方向から90度面外方向まで加力角度を変え、力学的性能及び疲労性能を比較した。加力速度は10mm/sで静的に載荷した。試験体の鋼材はSM490相当品で、曲げ加工後、熱処理したものをを使用した。

3.1.2 実験結果

図5~7に0度面内、45度・90度面外方向の静的漸増加力試験結果を示す。各方向ともに安定した履歴特性を示している。図8, 9に各加力方向における降伏せん断力、降伏変位、一次剛性、二次剛性の関係を示す。降伏せん断力は、面外2.8tf~面内3.0tfの範囲であり、方向性による違いがあまり生じていない。降伏せん断力及び一次剛性は、加力角度が増加するほど低下し、降伏変位、二次剛性は逆に増加した。なお、力学的性状は、振幅±30cmの1サイクル吸収エネルギーが、実験値とパイリニアモデルによる計算値とが等しくなるようにして求めた。0度面内、45度・90度面外方向の定変位繰返し加力試験結果を図5~7中にグレー色にて示す。各方向共に繰返し加力時も安定した復元力特性を示した。

表1 U型ダンパーのサイズと性能
Size & properties of U-shaped damper

* : Displacement for 5 cycles to fracture

Model	Size					Properties using four U-dampers				
	Length (mm)	Height (mm)	Thickness (mm)	Width (mm)		Yield shear force (kN)	Horizontal 1st stiffness (kN/m)	Horizontal 2nd stiffness (kN/m)	Horizontal elastic limit displacement (mm)	Horizontal limit displacement*
UD40	610	231	28	60	112	5920	100	19	550	
UD45	785	297	36	77	184	7600	128	24	650	
UD50	872	330	40	85	232	8320	144	28	750	
UD55	981	371	45	96	304	9600	160	32	850	
UD60	1199	453	55	118	432	11600	196	37	1000	

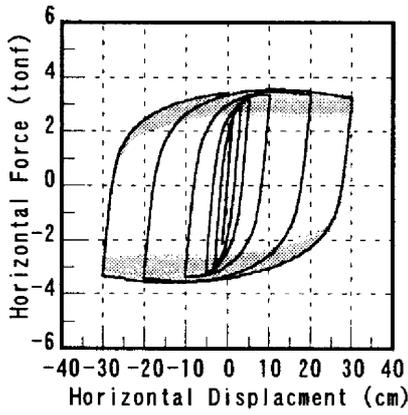


図5 面内0度方向履歴曲線
Hysteresis curve (In-plane direction)

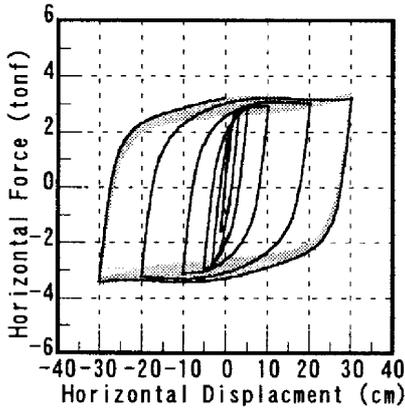


図6 45度方向履歴曲線
Hysteresis curve (45deg. Direction)

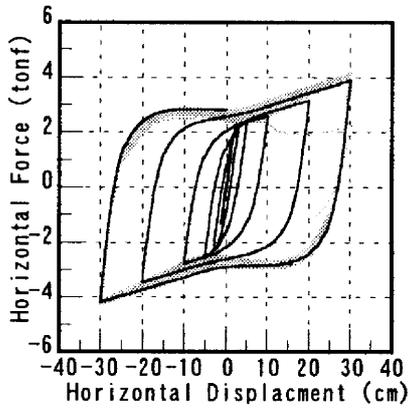


図7 面外90度方向履歴曲線
Hysteresis curve (Out of plane direction)

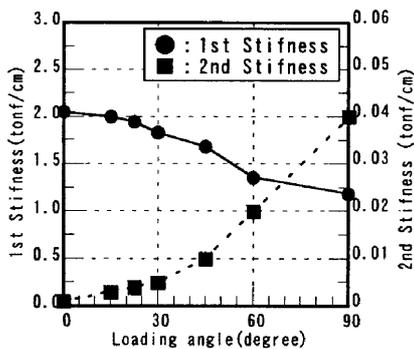


図8 載荷角度による剛性の変化
Effect of stiffness by loading angle

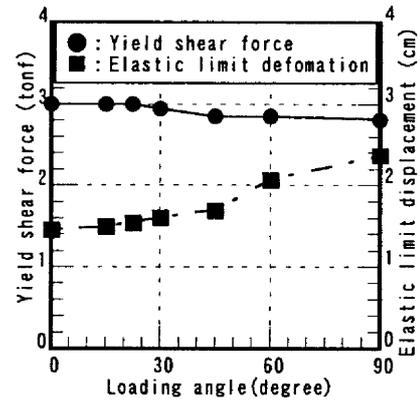


図9 載荷角度による降伏せん断と降伏変位の変化
Effect of yield shear force & elastic limit displacement by loading angle

図10に繰返し加力時の各方向における破断位置を示す。面内繰返し振幅 $\pm 30\text{cm}$ はD, 45度方向 $\pm 30\text{cm}$ はA, 面外 $\pm 30\text{cm}$ はEで破断しており, 各方向によって破断位置が変化している。地震時にダンパーは360度全方向から変形を受けるが, 常にダンパーの特定場所に歪みが集中するのではなく, 部材全体に歪みを分散させエネルギー吸収すると考えられる。また面内方向では, 繰返し振幅 $\pm 30\text{cm}$ と $\pm 50\text{cm}$ とでは破断位置が変わっており, 面内方向の疲労特性が30cm以上になっても他方向より低下しないのは, 部材全体を塑性化させているからである。

3.1.3 疲労特性

図11にダンパーが破断するまでの破断回数Nfと振幅（片振幅）

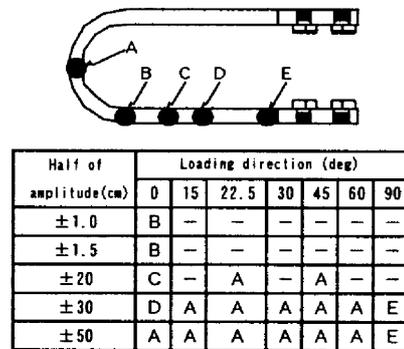


図10 破断位置図
Failure patterns of specimen

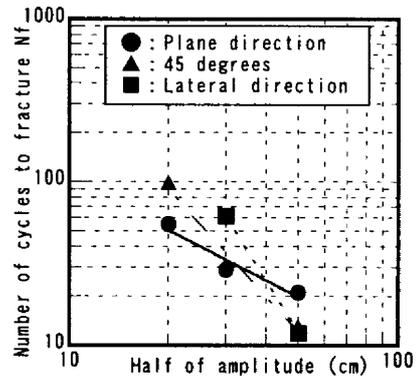


図11 疲労曲線
Fatigue property

の関係を示す。振幅が30cm位までは面内方向の破断回数が少なく、30cm以上は45度方向が支配的となった。

3.1.4 まとめ

各方向共に安定した復元力特性が得られ、耐力、剛性の方向依存性が少ない事を確認した。

3.2 速度・温度依存性

3.2.1 実験概要

試験体図と試験装置図を図12に示す。本試験の試験体は、UD40試験体(板厚28mm)に対し、約1/3.11倍(=0.322)に縮小した相似形モデルである。ダンパーの鋼材は、板厚9mmのSN 490B(JIS G 3136)を曲げ加工後、熱処理したものである。試験体の機械的性質は、上降伏点341N/mm²、引張強度503N/mm²、シャルピー衝撃値 20 Jである。試験体の上下端部を載荷装置にボルトで固定し、500kNアクチュエータにより水平方向に強制変形を与える。加振は、正弦波による変位制御にて、ダンパーが破断に至るまで行った。試験体の温度調整は、加振装置の周囲を発砲スチロールで養生し、加温にはジェットヒーターにて、冷却には液体窒素を用いて行った。表2に試験内容を示す。加力方向は、面内0度方向、45度方向、面外90度方向の3方向で行った。

3.2.2 実験結果

(1)実大と縮小試験体との比較

実大と縮小試験体の比較を表3に示す。なお、縮小試験体の値は、実大に換算した値である。また、解析用バイリニアモデルの換算値は、最大振幅3回目のループの1サイクル吸収エネルギーと

表3 縮小試験体と実大試験体の比較

Comparisons 1/3 scaled specimens with full-scale specimens

Specimen No.	Loading direction	Amplitude (cm)	Yield shear force (kN)	1st stiffness (kN/cm)	1 cycle energy (kN/cm)	Cycle dependency W1 (50)/W1 (3)	Number of cycles to fracture
1	In-plane	20	30	20	2236	0.80	62
			29	20	2113	0.78	55
9	45 degrees	20	28	16	2015	0.83	111
			28	16	1875	0.82	99
12	Out of plane	20	28	11	1752	0.92	181
			27	12	1688	-	-

等価になるように近似して求めた。結果は、バイリニアモデル化した時の一次剛性、降伏せん断力ともに、ほぼ同等の値を示した。破断回数においては、縮小試験体の方が実大試験体よりも約10%多い程度で、概ね良い一致を示している。従って、縮小試験体は板厚9mmの小さな試験体ではあるが、復元力特性の比較においては良く一致している。

(2)速度依存性

面内0度・45度、面外90度の各方向の振幅±6.4cmにおいて、最大速度を静的(0.7cm/s)、14.3cm/s、23.8cm/s、35.7cm/sに変化させた場合のバイリニアモデル値、1サイクル吸収エネルギー量、破断回数を比較した。図13~15に、各方向の静的加力の結果を1.0に基準化し、その増減の割合を比較した結果を、図16に破断回数と最大速度の関係を示す。

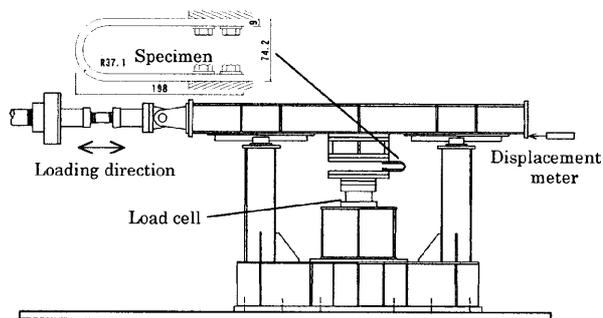


図12 速度・温度依存性の実験装置概要
Elevation view of test set-up

表2 試験内容
Loading pattern

Temperature ()	Loading direction	Specimen No.	Period (s)	Amplitude (cm)	Max. velocity (cm/s)		
					1/3 scaled	Full scale (×3.11)	
20	In-plane	1	Static	6.4	0.7	2.2	
		2	2.8	6.4	14.3	44.4	
		3	1.7	6.4	23.8	73.9	
		4	1.1	6.4	35.7	111.1	
	45 degrees	5	Static	6.4	0.7	2.2	
		6	1.7	6.4	23.8	73.9	
		Out of Plane	7	Static	6.4	0.7	2.2
			8	1.7	6.4	23.8	73.9
40	In-plane	9	1.7	6.4	23.8	73.9	
-10		10	1.7	6.4	23.8	73.9	
-30		11	1.7	6.4	23.8	73.9	
-50		12	1.7	6.4	23.8	73.9	

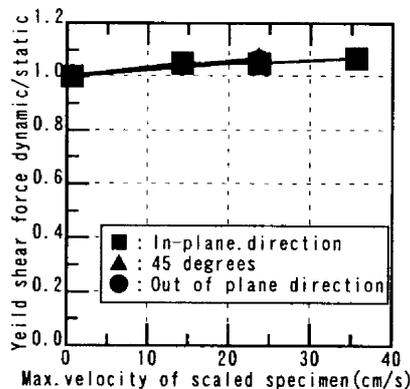


図13 降伏せん断力と最大速度
Yield shear force vs. Max. velocity

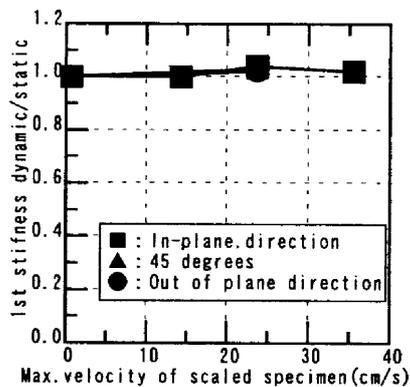


図14 一次剛性と最大速度
1st stiffness vs. Max. velocity

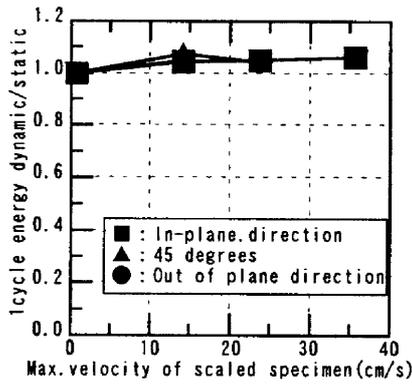


図15 1サイクル吸収エネルギーと最大速度
1 cycle energy vs. Max. velocity

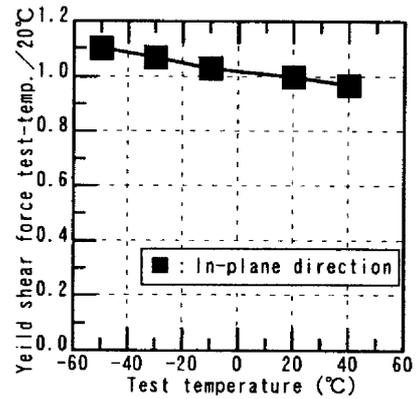


図17 降伏せん断力と温度
Yield shear force vs. test temperature

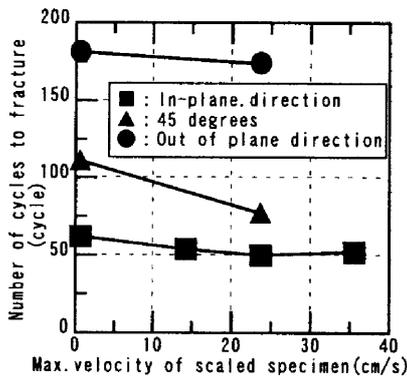


図16 破断回数と最大速度
Number of cycles to fracture vs. Max. V

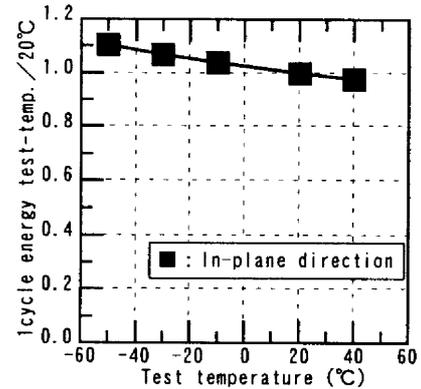


図18 1サイクル吸収エネルギーと温度
1 cycle energy vs. test temperature

降伏せん断力、1サイクル吸収エネルギーは、ひずみ速度の増加にとともに、最大速度35.7cm/sにおける降伏せん断力は+7%、1サイクル吸収エネルギーは+6%増加した。また、破断回数は速度が増加する毎に減少し、±6.4cmにおける疲労の支配的方向である面内方向では約20%低下した。一次剛性に関しては、速度の変化による増加分は+2~3%であり、速度による影響は少ない。

(3)温度依存性

面内0度方向の振幅±6.4cm、最大速度23.8cm/sにおいて、温度を40、20、-10、-30、-50に变化させた場合のバイリニアモデル値、1サイクル吸収エネルギー量を比較した。図17、18に、20の結果を1.0に基準化し、その増減の割合を比較したものを示す。

降伏せん断力、1サイクル吸収エネルギーは、温度が低下する毎に増加し、降伏せん断力、1サイクル吸収エネルギー共に、40~-50で-3%~+10%变化した。主に免震装置が設置される免震層の温度は、実用上20~-10で使用されると想定した場合、降伏せん断力及び1サイクル吸収エネルギーの増加は、共に+3%程度となる。

3.2.3 まとめ

(1)速度、温度を变化させても安定した復元力特性を示した。UD55

のダンパー(板厚45mm)で、固有周期3秒、振幅±35cmの正弦波と想定した場合、最大速度は73cm/sとなり、降伏せん断力は+3%増加する。

(2)温度の影響による復元力特性の変化は、実用上20~-10程度で使用する場合、+3%程度となる。

(3)縮小試験体により、本報の速度・温度範囲においては、速度・温度依存性を予測できることを確認した。

4. おわりに

最も優れた耐震技術である免震構法を更に普及させ、今後も地震に強い構造物を一つでも多く増やしていきたいと考えている。

謝 辞

速度・温度依存性の実験においては、福岡大学高山峯夫教授にご指導をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 鈴木一弁 渡辺厚 ほか:免震U型ダンパーに関する実験的研究.日本建築学会大会梗概集B-2分冊.1999.2000