

# 免制震デバイスの疲労特性 ～ 実大動的載荷試験による性能把握 ～

Fatigue Properties of Unbonded Braces and U-shaped Steel Dampers  
-Dynamic Loading Tests with practical-scale specimens-

吉川 秀章\* 建築・鋼構造事業部 建築鉄構ユニット シニアマネジャー  
Hideaki YOSHIKAWA

西本 晃治 建築・鋼構造事業部 建築鉄構ユニット マネジャー  
Koji NISHIMOTO

小西 宏明 建築・鋼構造事業部 建築鉄構ユニット マネジャー  
Hiroaki KONISHI

渡辺 厚 技術総括部 技術管理室長  
Atsushi WATANABE

## 抄録

阪神・淡路大震災以降、建築物の耐震性能の明確化を求める社会的なニーズの高まり、制振構造や免震構造がこれに応える耐震設計技術として広まってきた。なかでも、鋼材の履歴減衰を利用したアンボンドブレースや免震 U 型ダンパーは、その大きなエネルギー吸収能力と安定した品質という特長を有することから、建築分野において数多くの実績をもつデバイスであり、最近ではプラントおよび橋梁分野での適用も図られている。本稿では、これらのデバイスの実大試験体による動的載荷試験を行い、デバイスの実挙動を再現するとともに、実用域における疲労特性について報告する。

## Abstract

After the big earthquake in Hanshin-Awaji area in January, 1995, with the growing social needs which demand the clarification of seismic performances of buildings, seismic isolation structures and seismic control structures attract attention as a design technology to meet such needs. Above all, unbonded braces and U-shaped dampers which utilize hysteresis energy absorption of steel products, have ability for large energy absorption and stable quality. Therefore, they are devices having the many results in the field of building, and the application in the field of plant and bridge are planned recently. In this report, we examined dynamic loading by the practical-scale examination body of these devices and reproduced the actual behavior of the device and showed fatigue properties in the practical used range.

## 1. 緒言

地震国であるわが国の建築物にとって、予測できない大地震にいかに対応するかが最大の課題であり、従来の耐震設計では建物の柱や梁の塑性変形による地震エネルギー吸収を利用して大地震に対する耐震性能を確保してきた。しかしながら阪神・淡路大震災において、倒壊をまぬがれ人命の損傷を防いだ建物でも、柱梁等の主体構造に残留変形や溶接部損傷が多発した。さらに、これらの部位は長期荷重を支えているため、被災後の補修が非常に困難であり、実質的に建築財産の保全ができないことが問題点として指摘されるようになった。(図 1(a))

この問題を解決する手法として、ブレースなどの長

期荷重を支持しない部位を低い地震入力レベルから塑性化させることにより、ダンパーとして地震エネルギーを集中させ、主体構造を弾性域にとどめる設計法(制振構造)が多く採用されるようになってきている。(図 1(b))

また、免震層に配置した積層ゴムなどにより建物重量を支持して免震層のみを大きく変形させ、建物に伝わる地震エネルギーを大きく(およそ 1/3 ~ 1/5 に)低減し、上部構造だけでなく内容物の安全(転倒被害をなくすなど)も確保する免震構造も普及してきた。この免震構造においても、免震層のエネルギーを吸収し過大な変形をおさえるために免震層にダンパーが配置されている。(図 1(c))

これらの新しい設計法においてダンパー（減衰部材）は大地震の大きなエネルギーを吸収する重要なデバイスであり、中でも鋼材の履歴減衰を利用したものは、大きなエネルギー吸収能力と安定した品質からその実績も多い。当社の免制震デバイス商品では、制振構造として鋼管とモルタルによりブレース材の座屈を拘束したアンボンドブレースが超高層ビルなどで用いられ、近年橋梁構造物への適用も図られている。また、免震構造では鋼板をU字型に曲げ加工したU型ダンパーが免震ダンパーの主流となっており、近年プラント分野での適用も図られてきた。

これらのデバイスの性能確認は、従来、試験機の制約などから相似則を前提とした、縮小試験体や静的加力により行われてきたが、制振構造・免震構造の広がりとともに実挙動の把握を求める機運が高まった。そこで本稿では、アンボンドブレースと免震U型ダンパーについて実大試験体による動的载荷試験を行い、実挙動を再現するとともに、実用域における疲労性能について検討を行う。

## 2. アンボンドブレース

アンボンドブレースは、図2に示すように、芯となる中心鋼材を鋼管とコンクリートで拘束し、座屈させずに

安定的に塑性化するようにしたブレースである。中心鋼材とコンクリートの間には特殊な緩衝材（アンボンド材）を用い、鋼管とコンクリートには軸力が加わらないようになっており、この組み合わせにより、引張・圧縮ともに同性状の安定した履歴特性をもつ。アンボンドブレースを制振デバイス（ダンパー）として用いる場合には、中心鋼材に降伏点を管理した極低降伏点鋼（LYP225など）を用いる。

アンボンドブレースは建築では1988年以降500棟を超える建物に採用され、建築を対象とした地震時の振幅に対しては文献1において疲労特性が報告されている。本稿では、従来建築物において一般的に使われてきたアンボンドブレースを橋梁構造物に適用する際に、地震時の大きな振幅のみではなく、温度変化に伴う桁方向の伸縮や車両荷重時などの小さな振幅に対する疲労について実験を行い、その性能を報告する。



図2 アンボンドブレースの構成

Fig.2 Constitution of the unbonded braces

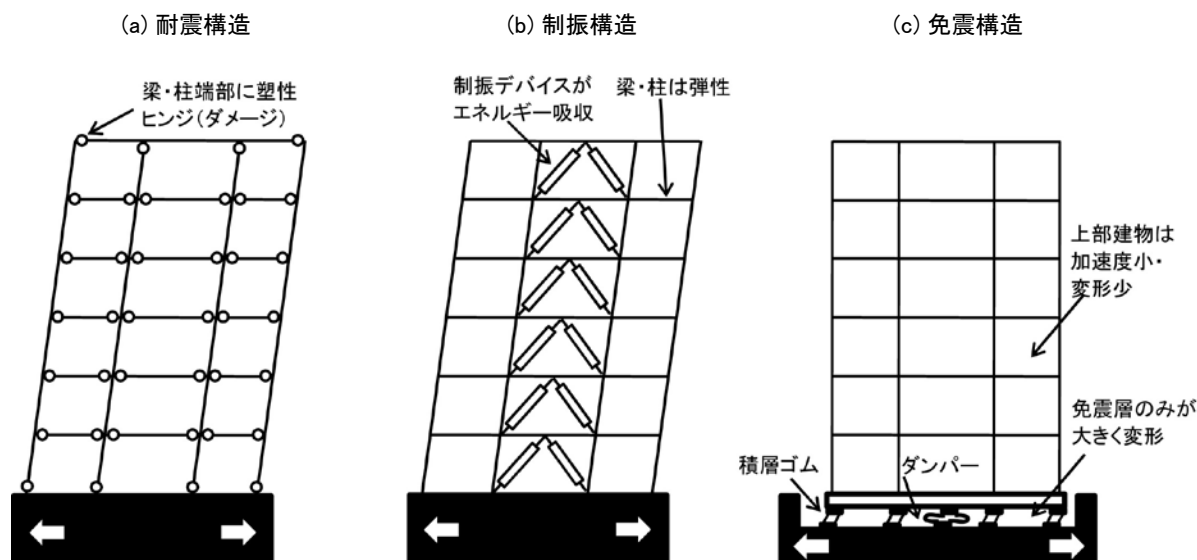


図1 耐震設計法の比較

Fig.1 Comparison of the structural design

## 2-1. 試験概要

試験体は、表1および図3に示す4種類15体(\*印の試験体は文献1)による)である。試験体TP-4、TP-5は、変断面型アンボンドブレースであり、見掛け上の剛性を高める為に部材が塑性化する部位を限定(平均歪区間の1/3)した形状となっている。表中の「歪振幅」は芯材、「平均歪振幅」は端部接合部を除いた部分の軸方向歪を表す。

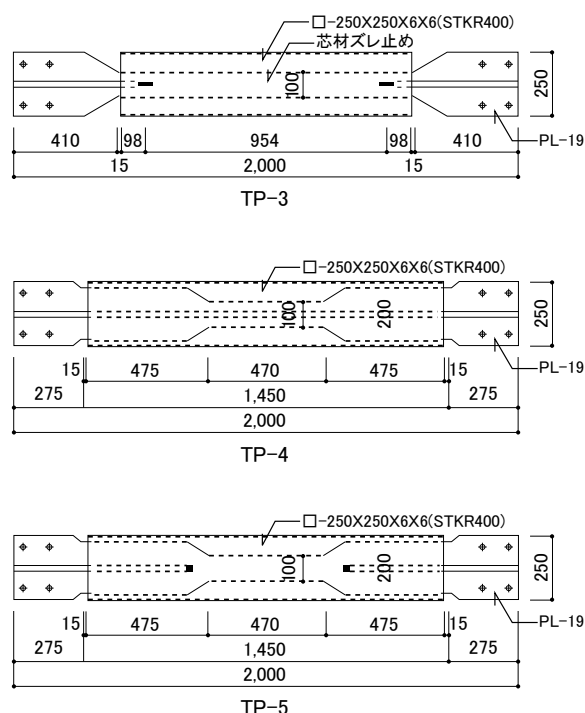


図3 試験体  
Fig.3 Specimens

表1 試験体諸元および試験結果一覧  
Table1 Properties of specimens and results

シリーズ	試験体名	材質	芯材断面形状	芯材板厚 (mm)	芯材幅 (mm)	芯材面積 (cm <sup>2</sup> )	部材長 (mm)	芯材長 (mm)	平均歪区間長 (mm)	集中度 α	降伏軸力 (kN)	歪振幅 (%)	歪速度 (%/sec)	破断繰返し回数 Nr(cycles)	破断位置
TP-3	400-016	SN400B	-	19	100	19	2,000	954	954	1.0	447	0.16	0.64	51,900	リブ先端
	400-019	SN400B	-	19	100	19	2,000	954	954	1.0	447	0.19	0.95	15,914	リブ先端
	*400-040	SN400B	-	25	100	25	2,000	960	960	1.0	588	0.40	0.10	4,050 (ループ)	中間
	*400-150	SN400B	-	25	100	25	2,000	960	960	1.0	588	1.50	0.10	211 (ループ)	ズレ止め
	400-200	SN400B	-	25	100	25	2,000	960	960	1.0	588	2.00	0.10	140 (ループ)	ズレ止め
	490-011	SN490B	-	19	100	19	2,000	954	954	1.0	618	0.11	0.55	204,000 (75% 耐力)	リブ先端
TP-4	490-022	SN490B	-	19	100	19	2,000	954	954	1.0	618	0.22	1.10	27,105	リブ先端
	225+008	LYP225	+	19	100	34	2,000	470	1,450	3.1	774	0.12(0.08)	0.60(0.40)	453,396	リブ先端
	225+013	LYP225	+	19	100	34	2,000	470	1,450	3.1	774	0.20(0.13)	1.00(0.65)	25,000 (75% 耐力)	リブ先端
	*225+016	LYP225	+	16	100	29	2,000	470	1,450	3.1	662	0.26(0.16)	0.16(0.10)	4,150 (75% 耐力)	リブ先端
TP-5	*225+150	LYP225	+	16	100	29	2,000	470	1,450	3.1	662	4.30(1.50)	0.29(0.10)	18 (ループ)	中間
	225-005	LYP225	-	19	100	19	2,000	470	1,450	3.1	428	0.10(0.05)	0.50(0.25)	502,609	リブ先端
	225-010	LYP225	-	19	100	19	2,000	470	1,450	3.1	428	0.20(0.10)	1.00(0.50)	6,121	ズレ止め
	*225-016	LYP225	-	28	100	28	2,000	470	1,450	3.1	630	0.36(0.16)	0.23(0.10)	2,520 (75% 耐力)	リブ先端
	*225-150	LYP225	-	28	100	28	2,000	470	1,450	3.1	630	4.50(1.50)	0.30(0.10)	33 (ループ)	中間

注1) TP-4, TP-5の( )内の数値は平均歪振幅、平均歪速度を示す。  
 注2) 試験体225-005では、繰返し回数50万回以降の歪振幅は0.19(0.10%)である。  
 注3) \*印の試験体は文献1)による。

試験は、写真1に示すように、2000kNアクチュエータを使用し、芯材に所定の軸方向歪が生ずるように荷重制御による軸方向交番載荷により行う。歪振幅は、小振幅時として0.10~0.22%、大振幅時<sup>1)</sup>として0.26~4.50%である。



写真1 荷重状況  
Photo.1 Elevation view of test set-up

## 2-2. 試験結果

試験体225-150について、応力と歪の関係を図4に示す。最大軸力時と破断繰返し回数時で同形状の安定した履歴特性を示している。

破断繰返し回数を表1、芯材の歪振幅と破断繰返し回数<sup>1)</sup>の関係を図5に示す。芯材の鋼種および断面形状による疲労特性に大きな差は無く、下式の回帰式で表せられる。

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_t &= 1.06N_f^{-0.17} & (\Delta \epsilon_t \leq 0.22\%) \\ \Delta \epsilon_t &= 20.48N_f^{-0.49} & (\Delta \epsilon_t > 0.22\%) \end{aligned}$$

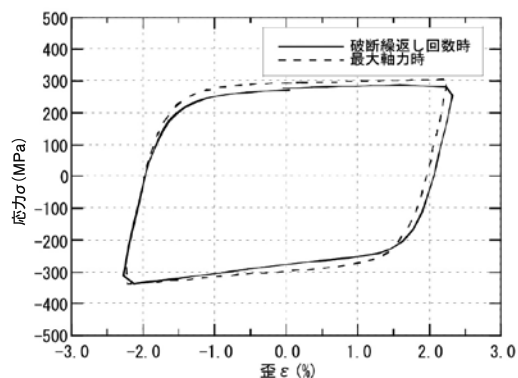


図4 応力-歪関係(試験体 225-150)

Fig.4  $\sigma - \epsilon$  curve(No.225-150)

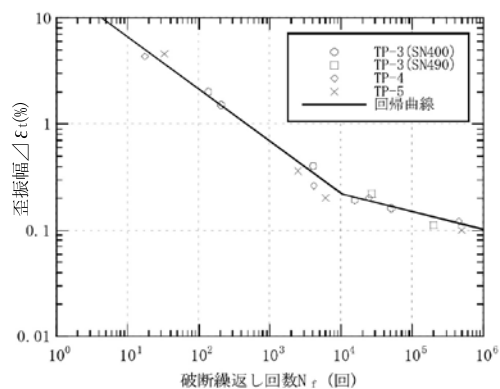


図5 疲労曲線

Fig.5 Fatigue property

### 2-3. 適用概要

アンボンドブレースを橋梁構造物に適用する際の概念図を図6に示す。引張圧縮ともに同性状の有効なエネルギー吸収機構により、橋梁上下部工に作用する地震力を低減でき、橋桁方向の取付け時には落橋防止装置を兼ねることも可能である。

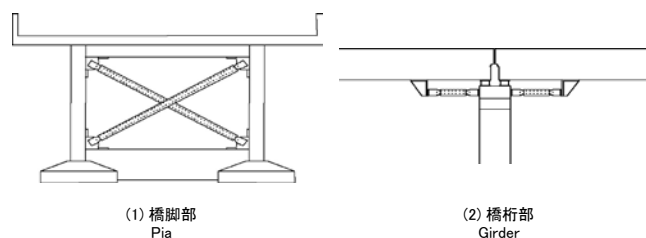


図6 適用概念図

Fig.6 Fatigue of application conception

参考に、図6(2)の形式で長さ20mの橋桁に長さ5mのアンボンドブレースを適用したとして、温度による橋桁の伸び縮みに対する疲労を検討する。温度変化を30℃とすると、伸縮量は7.2mmとなりアンボンドブ

レースのひずみ量0.14%で破断までの繰返し回数約60万回に相当し、毎日30℃の変化が発生したとして約1600年に相当する。

### 3. 免震U型ダンパー

免震U型ダンパーは図7に示すように、圧延鋼材(SN490B材)をU型に成型したダンパーロッドを4～8本組み合わせたものである。(図8)また、相似形で5種類のサイズがあり免震設計の要求により適切な本数・サイズの組み合わせで使用される。建築では2001年以降200棟を超える免震構造に適用されており、最近では熔融炉プラントの免震でも採用されている。

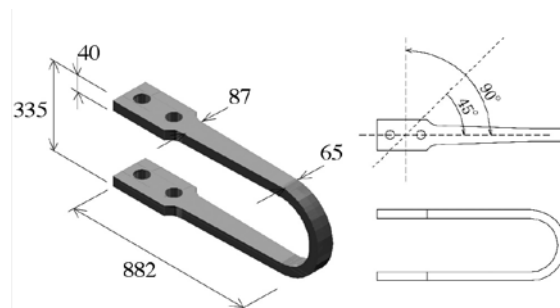


図7 U型ダンパーの形状と寸法

Fig.7 Size of U-shaped damper

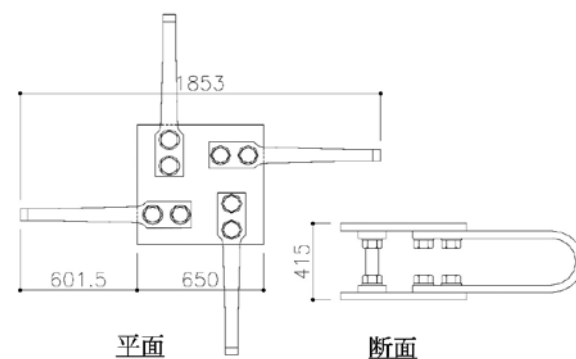


図8 4本組での組み立て(NSUD50×4)

Fig.8 Type of 4 dampers (NSUD50×4)

U型ダンパーについて静的な実験は行われている<sup>4)</sup>などが、地震を想定した速度での動的試験については、文献5)で報告された実験があるものの、これまで殆ど行われていない。また同実験では載荷装置の制約により、片振幅で250mmを超える変形領域での実験はできていない。本稿では、U型ダンパーの実大動的載荷実験を行い、動的荷重下における大変形領域での基本的性能を明らかにするとともに、地震応答下での挙動を確認する。

### 3-1. 試験体

免震U型ダンパーは、単体のダンパーを複数本組み合わせ合わせて使用し、このときの性能は単体性能の組み合わせで評価できる。また、サイズバリエーションについては、それらの性能に相似則が成立することがわかっている<sup>6)</sup>ことから、ここでは前述の図7、図8で示した中型のサイズNSUD50×4で代表した。U型ダンパーの大変形時の動的性能確認は単体試験によることとし、同一サイズ・同一ロットのものを6体用いた(試験体1～6)。また、地震応答下での挙動の確認は、実際の使用状況に合わせて4本組で実験を行った。(試験体7,8)。表2に4本組としたときの基本性能を示す。

表2 4本組での性能(NSUD50×4)

Table2 Properties of 4 dampers type (NSUD50×4)

降伏せん断力	232(kN)
初期剛性	8,320(kN/m)
2次剛性	144(kN/m)

### 3-2. 実験装置

実験は、大振幅での動的加振が可能な米国カリフォルニア大学サンディエゴ校の振動台を、動的载荷装置として用いた。この振動台は独立した4本のアクチュエーターに接続されており、これらを制御することで面内の自由な方向に加振することができる。载荷装置の概要を図9に示す。試験体の上部を治具を介して外部の反力梁に固定し、試験体の下部を治具を介して振動台に接続した。試験体に作用する荷重は、アクチュエーターのロードセルにより計測した。試験体の変形は、振動台の変位情報を用いた。

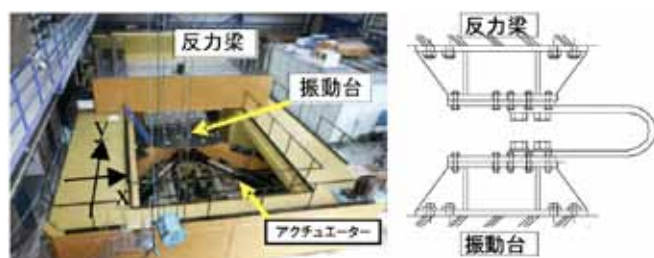


図9 载荷試験装置

Fig.9 Loading device

### 3-3. 载荷条件

本実験における载荷条件の一覧を、表3に示す。

単体試験体(試験体1～6)については、振幅及び载荷方向をパラメータとした周期4秒(免震建物の大地震時での固有周期を想定)での正弦波加振として、ダンパーが破断するまで繰り返し行う。振幅は試験体の限界変形の規定値となる±750mmと、その約半分の振幅となる±400mmの2種類とし、载荷方向はダンパーの長さ方向に対して0度、45度及び90度の3種類とした。

地震応答下での挙動を模擬した4本組(試験体7,8)での実験では、事前に応答解析を行い、解析結果の免震層における軌跡を、時間軸を変えずに载荷装置である振動台の制御変位情報として用いる。その方法を以下に示す。

#### ①免震建物の設定

応答解析に用いた解析モデルは、多質点せん断系で上部構造と免震層のアイソレーターを文献7)で用いられたモデルと同一とし、ダンパーを試験体7,8と同じ4本組U型ダンパーで12台とした。表4に解析モデルの諸元を示す。

#### ②入力地震波のレベル設定

入力地震波は、兵庫県南部地震JR鷹取記録と、インペリアルバレー地震エルセントロ記録を目的入力レベルに合うように増幅・低減させて用いる。水平方向2成分に同じ倍率を掛け、水平2方向の速度の自乗和ルートの最大値が0.5(m/s)となるようにしたものをL2レベル、0.75(m/s)となるようにしたものをL3レベルとする。

#### ③応答変位の算出

応答解析は、水平方向の1成分ずつ単独に行い、得られたX方向ならびにY方向の応答変位記録を組み合わせ免震層の軌跡とした。本手法により作成した、実験で用いる各入力波の各入力レベルでの軌跡を図10に示す。なお、鷹取原波については、载荷装置として用いる振動台の変形制限にかかることから、X方向(NS成分に対する応答解析結果)を66%に縮小して用いる。

表3 载荷条件一覧

Table3 Loading pattern

試験体	载荷条件	振幅	周期	载荷方向
1	定変位振幅繰返し	400mm	4秒	0度
2				45度
3				90度
4		750mm		0度
5				45度
6				90度
7	応答波	鷹取応答波 L2×3回+L3×1回+原波×1回		
8		エルセントロ応答波 L2×3回+L3×1回		
		鷹取応答波 原波×1回		

表4 解析モデル

Table4 Analysis model



上部構造の緒元		
階	質量 (t)	水平剛性 (kN/mm)
R	960	
6	800	3,300
5	800	3,580
4	800	3,580
3	800	4,140
2	800	4,420
1	1,200	4,710

免震層の緒元		
アイソレーター	剛性	15.4kN/mm
ダンパー UD50x4 12台	1次剛性	99.8kN/mm
	2次剛性	1.73kN/mm
	降伏せん断力	2784kN
	降伏変位	27.9mm

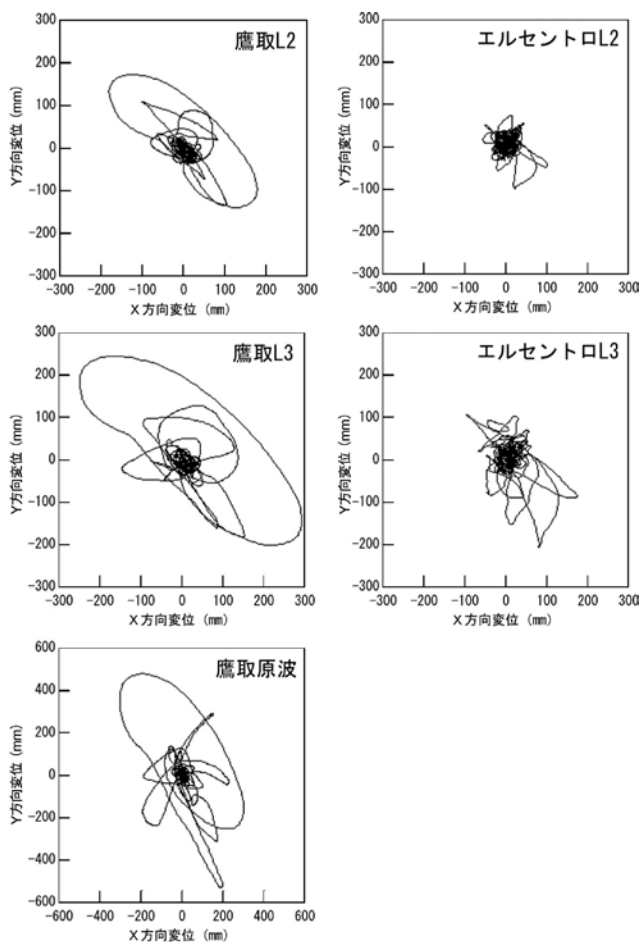


図10 予備応答解析により作成した免震層の軌跡(実験加振変位)

Fig.10 Trace of base-isolation story

## 3-4. 定変位繰返し载荷による疲労特性

まず、U型ダンパー単体について行った定振幅繰返し载荷実験について考察する。実験結果の一例として、0°、90°方向载荷を行った試験体の荷重-変形関係を、履歴が定常状態になっている数サイクルを抽出して図11に示す。いずれの試験体も安定した履歴挙動を示している。また、文献4で報告されている静的载荷実験時の履歴挙動とほぼ一致することが確認できた。

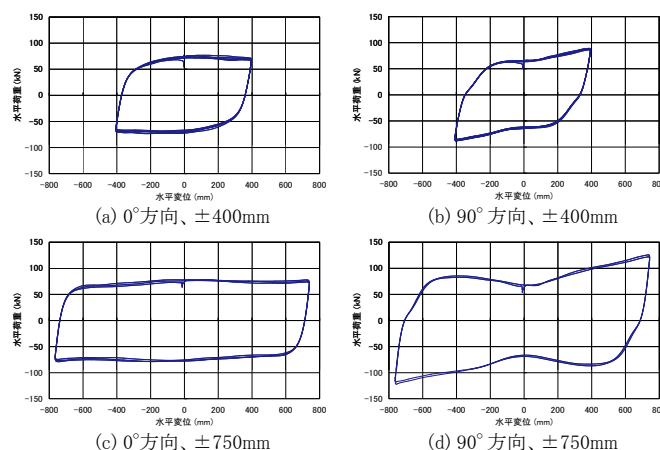


図11 免震U型ダンパーの荷重-変形関係

Fig.11 Q-δ curve of U-dampers

表5 定振幅载荷時の破断回数

Table5 Number of cycles to fracture

	片振幅 [mm]	载荷周期 [sec]	载荷方向	破断回数
1	400	4	0°	30
2			45°	40
3			90°	83
4	750		0°	21
5			45°	12
6			90°	8

U型ダンパー単体の定振幅下における疲労性能を考察する。定振幅繰返し载荷実験により得られた破断回数を、表5に示す。U型ダンパーは相似形で大きさの異なる数種類のものが存在するが、U型ダンパーの変形 $\delta$ を高さ $h$ で除した平均せん断変形角 $\gamma$ によって整理することで、0°方向の定振幅载荷における疲労性能を試験体の大きさに関係なく統一的に評価できる疲労曲線が下式で提案されている。<sup>5)</sup>

$$\gamma_e = 35N_f^{-0.15} \quad \dots(1)$$

$$\gamma_p = 3620N_f^{-0.90} \quad \dots(2)$$

$$\gamma_t = 35N_f^{-0.15} + 3620N_f^{-0.90} \quad \dots(3)$$

ここで、 $\gamma_t$ 、 $\gamma_e$ 、 $\gamma_p$ は全変位振幅 $\delta_t$ 、弾性変位振幅 $\delta_e$ 、塑性変位振幅 $\delta_p$ に対する平均せん断変形角(%)であり、 $N_f$ は破断回数である。既往の実験結果<sup>5)</sup>を○プロットで、本実験結果を●プロットで区別して表し、前述の0°方向载荷に対する疲労曲線と併せて図12に示す。いずれの試験体も全変位振幅 $\delta_t$ を高さ $h$ で除した平均せん断変形角を用いることで、既往の実験結果と非常に良い対応を示している。また、0°方向载荷については(3)式の疲労曲線とほぼ一致している。

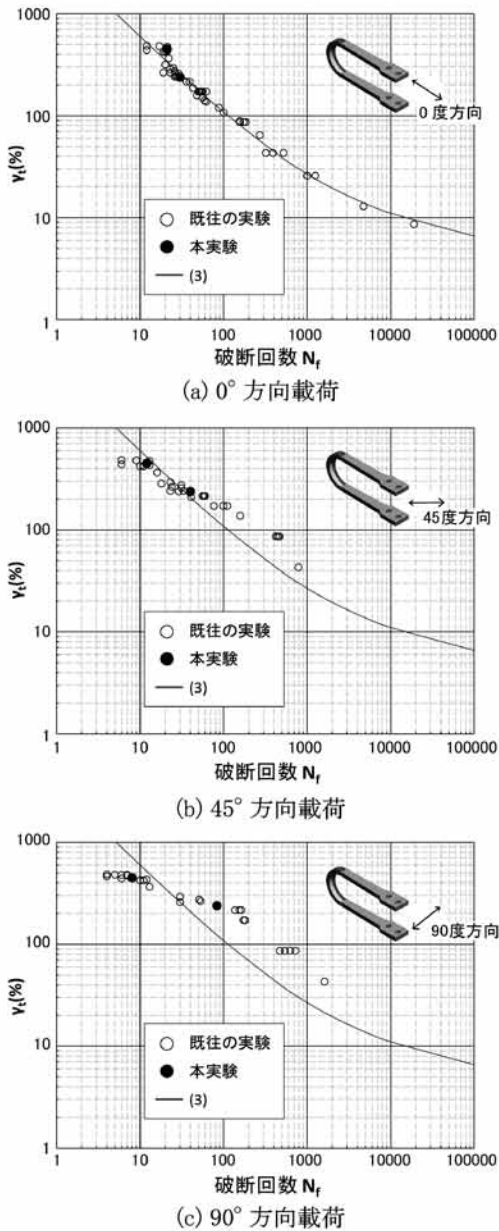


図12 U型ダンパー単体の定振幅下における疲労性能  
Fig.12 Fatigue property curve of single U-dampers

(3)式の疲労曲線を用いて、予備応答解析におけるダンパーの疲労を予測する。鷹取応答波では最大変位がL2、L3、原波それぞれのレベルに対して、24cm( $\gamma_t=141\%$ )、34cm( $\gamma_t=203\%$ )、53cm( $\gamma_t=316\%$ )であり、破断までの繰り返し回数にすると69回、41回、23回に相当する。大きな地震では最大振幅5回程度のエネルギーが入力されることを考慮すると、L2レベルを1回経験すると破断に対して7.3%のダメージを受けると推定できる。同様に、L3では12.2%、原波で21.7%のダメージに相当する。試験体7に与える7波の合計でも約80%のダメージで、ダンパーは破断しないことが予測できる。

次に、U型ダンパー単体の破断に至るまでの総エネルギー吸収量を考察する。本実験と同サイズのU型ダンパーを4本組み合わせて大変形領域まで静的に载荷した実験とのエネルギー吸収量を比較し、動的载荷の影響を検討する。実験は2対の対向するダンパーロードに対して载荷方向が0°、90°となる载荷を行ったもの(A方向)、4本全てのダンパーロードに対して45°方向载荷を行ったもの(B方向)がある。A方向に対してはU型ダンパー単体の0°と90°方向のエネルギー吸収量の和を2倍して比較し、B方向に対してはU型ダンパー単体の45°方向のエネルギー吸収量を4倍して比較する。なお、4本組ではいずれかのダンパーが破断した時点までの総エネルギー吸収量を算出しているため、A方向への換算は0°、90°方向のどちらかが破断するまでの総エネルギー吸収量を累計した。既往の実験結果と本実験結果の破断に至るまでの総エネルギー吸収量の比較を図13に示す。両者の対応は非常に良く、大変形領域の動的载荷を受けてもU型ダンパーのエネルギー吸収量が低下するようなことはなかった。

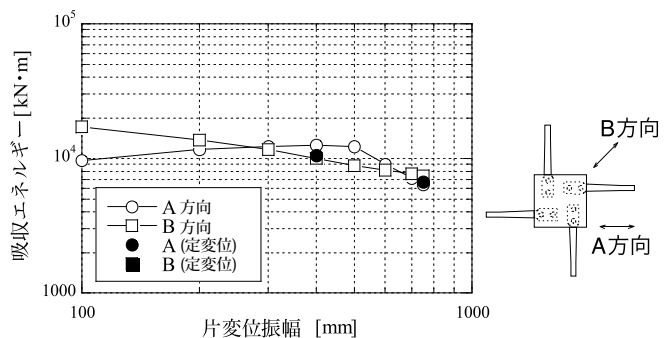
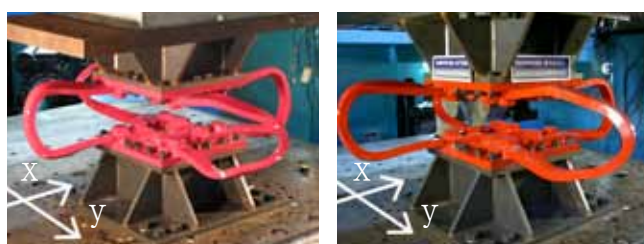


図13 破断に至るまでの総エネルギー吸収量  
Fig.13 Amount energy to fracture

### 3-5. 地震応答を与えたランダム载荷実験

U型ダンパーを4本組み合わせた部材に対して、地震入力時の免震層の応答軌跡を与えた実験結果について考察する。エルセントロ記録、神戸 JR 鷹取記録に対する応答軌跡に対してもU型ダンパーは破断することなく、十分な変形追従能力があることが確認できた。地震応答を与えた試験体の実験後の変形状態を写真2に示す。最大変形、累積変形量のもっとも大きなJR鷹取波の原波に対する応答軌跡を与えた後も、U型ダンパーの損傷はわずかに一部の塗装に剥離が見られる程度であった。



(a) 神戸 JR 鷹取

(b) エルセントロ

写真2 地震応答を与えた試験体の変形状態

Photo.2 Specimens after loading

写真3 アンボンドブレース採用物件（日本テレビタワー）  
Photo.3 Unbounded braces applied constructional case (Nittele tower)写真4 免震U型ダンパー採用物件（君津中央病院）  
Photo.4 U-shaped steel dampers applied constructional (Kimitsu chuo hospital)

## 4. 結言

免震・制振デバイスの一種であるアンボンドブレースおよび免震U型ダンパーについて、実大試験体における動的载荷試験を行い、実挙動を再現するとともに、実用域における疲労性能について検討を行い、地震時を想定した大振幅、温度変化に伴う桁方向の伸縮や車両荷重時などを想定した小振幅における疲労性能について明らかにした。アンボンドブレースは、オフィスビル（写真3）などの高層・大規模建築物で、免震U型ダンパーは病院（写真4）など防災拠点で数多く採用されているが、今後はその優れたエネルギー吸収能力を生かし、建築の枠を超えたより幅広い分野への適用を確立したい。

### 参考文献

- 1) 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特性（その1～2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 813-816、1999. 9
- 2) 藤本盛久、和田章、佐伯英一郎、渡辺厚、人見泰義：鋼管コンクリートにより座屈を拘束したアンボンドブレースに関する研究、構造工学論文集、Vol. 34B、1988. 3
- 3) 渡辺厚、西本晃治：鋼製U型ダンパーおよびアンボンドブレースの疲労性能試験、鋼構造年次論文報告集、pp. 309-312、2007. 11
- 4) 鈴木一弁、佐伯英一郎、渡辺厚：免震U型ダンパーに関する実験的研究（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.665-666、1999. 9
- 5) 吉敷祥一、大河原勇太、山田哲、和田章：免震構造用U字型鋼材ダンパーの繰返し変形性能に関する研究、日本建築学会構造系論文集 第624号、pp. 333-340、2008. 2
- 6) 鈴木一弁、渡辺厚、高山峯夫ほか：免震U型ダンパーに関する実験的研究（その3～6）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、B-2、pp. 659-660、2000. 9
- 7) 社団法人日本免震構造協会第4回技術報告会梗概集、2006. 11
- 8) 西本晃治、小西宏明、吉敷祥一、山田哲：免震U型ダンパーの実大試験体による動的载荷実験（その1～2）、日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）、B-2、pp. 405-408、2008. 9