

免震 U 型ダンパーの 残存疲労性能評価法の確立

～東日本地方太平洋沖地震を経験した免震 U 型ダンパーの
包括的な評価を通して～

Evaluation of the Fatigue Life of U-shaped Steel Dampers
after Extreme Earthquake Loading
～Through the comprehensive post-Great East Japan
Earthquake evaluations of U-shaped dampers～

小西 克尚 Yoshinao KONISHI
建築鋼構造事業部
設計技術部商品技術室
シニアマネジャー

川村 典久 Norihisa KAWAMURA
米国現地法人
シニアマネジャー

抄 録

U型ダンパーは免震用のエネルギー吸収装置として広く普及している。履歴系ダンパーとして低サイクル疲労破壊や繰り返し変形性能(疲労性能)の特性は、数多くの試験によって確立されていた。東日本地方太平洋沖地震(マグニチュード9.0)の後、U型ダンパーが導入された宮城県内にある免震建物の地震後の包括的な評価が行われた。地震を経験したU型ダンパーの残存疲労性能は(1)罫書き板による方法、(2)近傍の観測記録を使った解析的手法による方法、(3)免震U型ダンパーの形状変化による方法を用いて評価を行ない、さらに、建物から地震を経験したU型ダンパーを抜き取り実験により残存疲労性能を調査することで残存疲労性能の評価方法の妥当性の検証を行った。

Abstract

U-shaped steel dampers are widely used as energy dissipation devices for seismically isolated structures. As a hysteretic damper subjected to low-cyclic fatigue fracture, cyclic deformation (fatigue) characteristics has been studied and established through numerous testing programs. Following the M9.0 Great East Japan Earthquake, a comprehensive post-earthquake evaluation was performed on the isolated building with U-shaped dampers located in Miyagi prefecture. The evaluation focused on residual capacity of U-shaped steel dampers and its methods are summarized as follows: (1) based on the orbit recorded by a scratch plate, (2) based on a non-linear seismic response analysis using registered ground motion records at nearby sites and (3) based on the deformation of the U-shaped dampers. In addition, one U-shaped damper unit were detached from the building and subjected to cyclic loading tests to determine continuous integrity of the U-shaped dampers.

1 技術的背景

免震 U 型ダンパーは、高品質の鋼材を加工したダンパーであり、U 型形状の複数のダンパーロッドを多方向に配置して組み合わせることで無方向性を実現している^{1), 2)}。鋼材は温度、載荷速度や経年に対しても安定した性能を示すため、これらの各種依存性の少ないダンパーであることが知られている。柱の直下に配置される積層ゴム一体型免震 U 型ダンパー図 1(a)と、梁の下に設置される別置型免震 U 型ダンパー図 1(b)が用意されている。

U 型ダンパーは鋼材の塑性化により地震エネルギーを吸収し、複数回の地震に対するエネルギーを吸収できるように開発されている。既往の研究³⁾では、図 2 に示すように変位振幅 δ_t を図 3 に示すダンパー高さ h で割ったせん断変形角 $\gamma_t (= \delta_t/h)$ で基準化することで異なるサイズ(UD40～UD60)のダンパーの繰り返し性能を定量化できることを示している。図 4 に示すように一定振幅下でのダンパーの載荷方向(図 3 参照)ごとの繰り返し性能を破断回数 N_f との関係式(式(1)、(2a)、(2b))にて評価している。これを疲労性能式と呼ぶことにする。

$$0^\circ \text{ 方向} : 0^\circ \gamma_t = 2370 N_f^{0.66} \quad (20.0\% \leq 0^\circ \gamma_t \leq 500.0\%) \quad \dots (1)$$

$$90^\circ \text{ 方向} : 90^\circ \gamma_t = 2535 N_f^{0.55} \quad (20.0\% \leq 90^\circ \gamma_t \leq 253.5\%) \quad \dots (2a)$$

$$90^\circ \gamma_t = 664 N_f^{0.23} \quad (253.5\% \leq 90^\circ \gamma_t \leq 500.0\%) \quad \dots (2b)$$

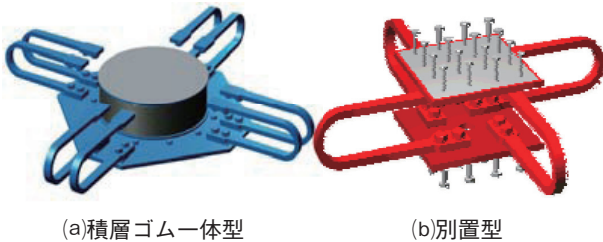


図 1 免震 U 型ダンパー
Fig. 1 U-shaped steel dampers

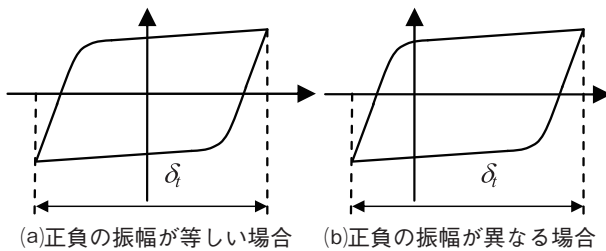


図 2 U 型ダンパーの変位振幅
Fig. 2 Amplitudes of deformations of U-damper

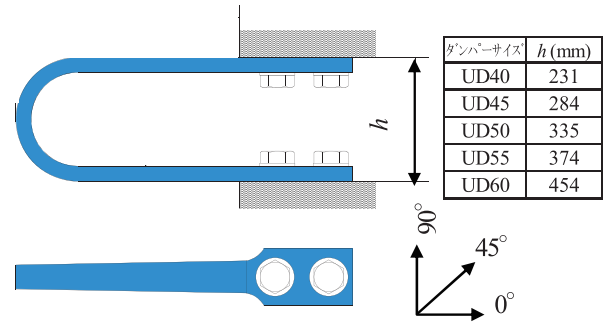


図 3 U 型ダンパー高さ h と載荷方向
Fig. 3 Height and loading directions of U-damper

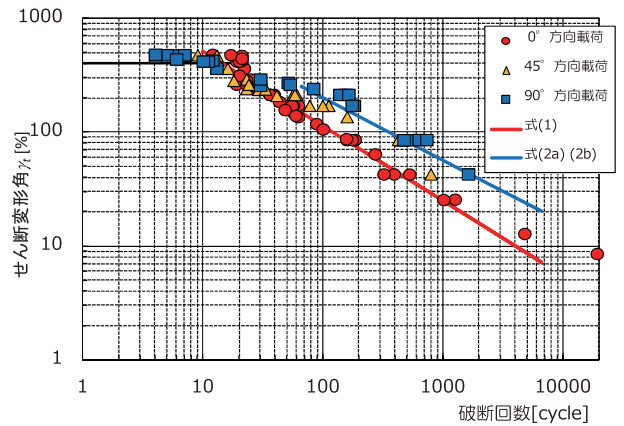


図 4 U 型ダンパーの破断回数とせん断変形角の関係
Fig. 4 Relationships between numbers of cyclic load and shear deformation angles of U-damper

一方、これまで大きな地震を経験した免震建物からダンパーを取り出して残存疲労性能を検証した調査はされておらず、また、地震を経験したダンパーの残存疲労性能を推定する手法についても確立されていなかった。今後、東海・東南海・南海地震のように非常に広域に大きな揺れを伴う地震や、首都直下地震など多くの免震建物が存在する地域を中心とした地震が発生したときに、速やかに復旧するにはダンパーの継続使用を判定するための残存疲労性能評価法が不可欠であると考え、本技術の開発を行うこととした。

2 地震を経験した免震 U 型ダンパーの残存疲労性能評価

東北地方太平洋沖地震を経験した免震 U 型ダンパーの調査は宮城県内の I 病院、T 大学施設、T 消防署施設の 3 つについて行われた。ここでは I 病院を代表として残存疲労損傷評価について述べる。

2.1 免震層の構造

図5に免震層の平面図を示す。免震層は天然ゴム支承、弾性すべり支承、免震U型ダンパーで構成されており、罫書計が4箇所(①~④)に設置されている。図6に免震層の復元力特性を示す。U型ダンパーの降伏層せん断力係数は0.05程度である。積層天然ゴム支承(NRB)のみでの固有周期は5.39秒、U型ダンパーの初期剛性とNRBでは1.45秒、極稀時(49cm)では3.73秒である。本地震での最大変形は21.3cmであり、等価固有周期は3.0秒であった。解析モデルを図7に上部構造の諸元を表1に示す。

2.2 解析的手法

(a)エネルギー速度(VE)スペクトルを用いた評価

近傍で記録された地震波によるダンパーの疲労損傷値評価を実施した。解析入力地震波については、I病院から約3.2km南下した地点の2011/3/11と2011/4/7の強震記録 K-net(MYG010)を採用した。

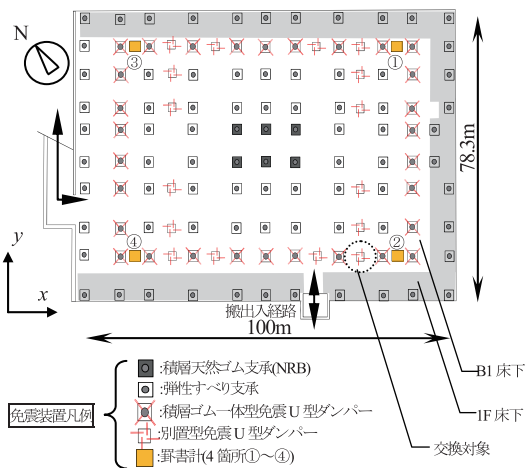


図5 I病院の免震層平面図
Fig. 5 Plan of isolate layer of building of I Hospital

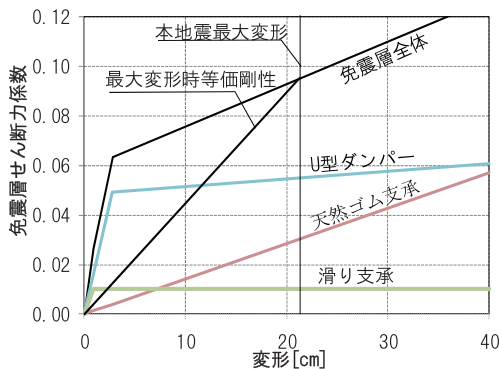


図6 免震層の履歴特性
Fig. 6 Hysteretic characteristics of isolated layer

図8に地動加速度を、図9に地震入力エネルギーを速度換算したエネルギー速度(VE)スペクトル⁷⁾を示す。

VEスペクトルを用いた評価にあたり、免震層の最大変形21.3cm程度における等価固有周期3.0秒に対して入力エネルギーを用いた。免震層に導入されたダンパーの数量は、ダンパーサイズUD50を8本組み合わせたUD50×8が37台分である。UD50×8の最大変形21.3cmに対するエネルギー吸収性能は、0°方向と90°方向の疲労性能式で破断繰返し回数を算出し、片側振幅21.3cmの1ループエネルギー吸収量から算出した。また、図5に示すように建物の基軸x-yと方向のNS-EWは若干のずれがあるものの、地震のNS方向入力がU型ダンパーの0°方向に、地震のEW方向入力がU型ダンパー

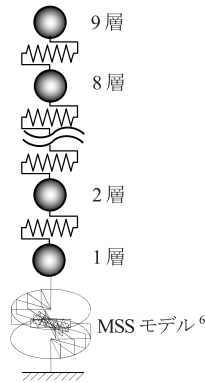


図7 解析モデル
Fig. 7 Analysis model

表1 上部構造諸元
Table 1 Dimensions of the superstructure

層	重量 [kN]	フレーム剛性 [kN/cm]
9	5628	3378
8	26059	9932
2層	20219	13828
1層	20215	17223
6	22232	20526
4	58023	48969
3	19119	28597
2	47172	29975
1	64139	27747

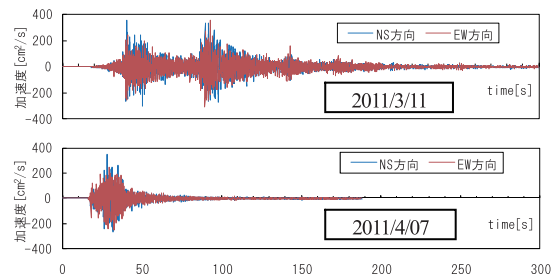


図8 地動加速度(MYG010)
Fig. 8 Ground accelerations (MYG010)

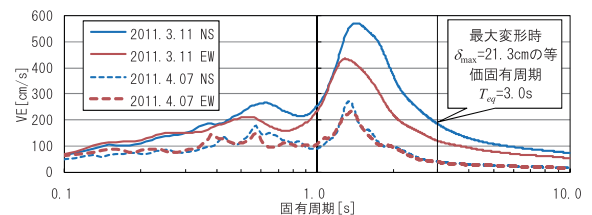


図9 エネルギー速度(VE)スペクトル(MYG010)
Fig. 9 Velocity energy (VE) Spectrum (MYG010)

表2 VE スペクトルによるダンパーの損傷評価
Table 2 Fatigue damage values based on VE Spectrum

エネルギー速度	2011/3/11	NS	NSV_E [cm/s]	185
		EW	EWV_E [cm/s]	120
	2011/4/7	NS	NSV_E [cm/s]	40
		EW	EWV_E [cm/s]	39
入力エネルギー	2011/3/11	NS	$NS E$ [kN·m]	60933
		EW	$EW E$ [kN·m]	25637
	2011/4/7	NS	$NS E$ [kN·m]	2849
		EW	$EW E$ [kN·m]	2807
1基への入力エネルギー		NS	$nSE = \sum NS E / 37$ [kN·m]	1724
		EW	$nWE = \sum EW E / 37$ [kN·m]	768
1基のエネルギー吸収性能		0°方向	${}_0W_P$ [kN·m]	28000
		90°方向	${}_{90}W_P$ [kN·m]	78000
地震による損傷の推定値		0°方向	${}_0D = nSE / {}_0W_P$ [-]	0.060
		90°方向	${}_{90}D = nWE / {}_{90}W_P$ [-]	0.010
		2方向	$D = {}_0D + {}_{90}D$ [-]	0.070

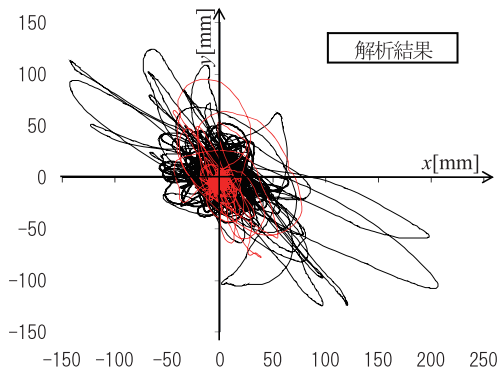


図10 応答解析のオービット
Fig. 10 Orbit of response analysis

の90°方向に入力されたと仮定した。ダンパーの疲労損傷値は表2に示すように0.070であった。

(b)時刻歴応答解析を用いた評価

応答解析より得られた免震層のオービットを図10に、免震層の罫書記録の一例を図11に示す。建物の長手方向をx、短辺方向をyとした。NS/EWの変位を座標変換することによりx/y方向変位を得た。応答解析のオービットと罫書記録は、振幅の主方向がやや異なっているものの、変位軌跡の特性および最大振幅は概ね一致している。

時刻歴変位応答からレインフロー法により頻度分布を算出し、図2より破断回数 N_f を算出し、各振

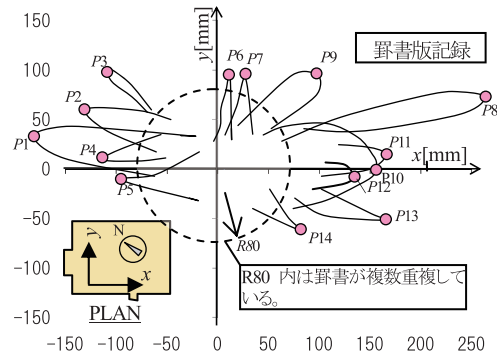


図11 罫書記録のオービット
Fig. 11 Orbit of the scratch plate

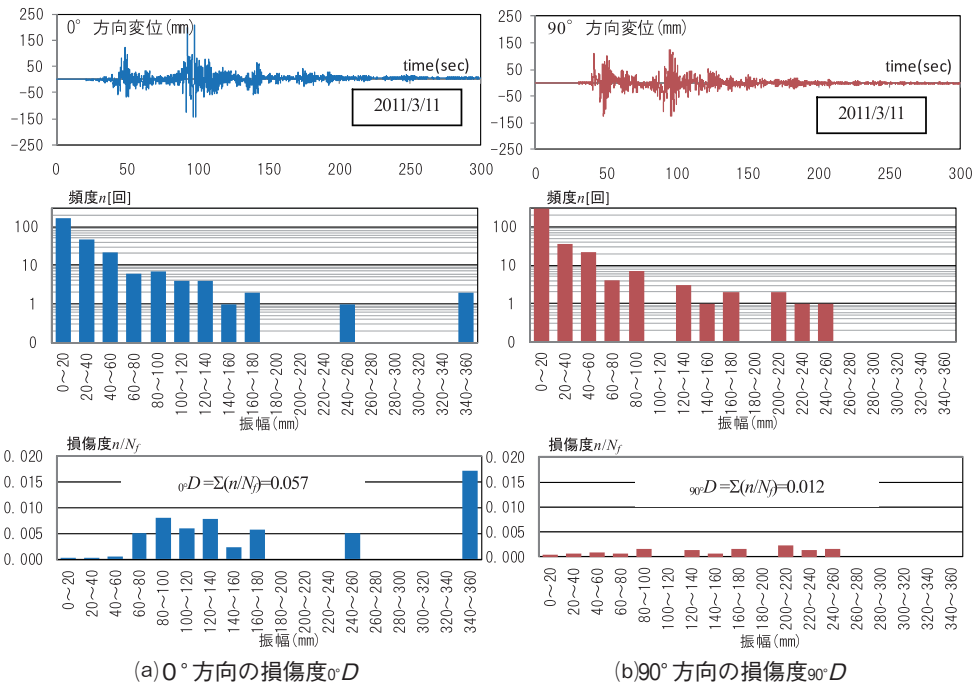


図12 応答解析による損傷評価 MYG010 2011/3/11 (${}_0D + {}_{90}D = 0.057 + 0.012 = 0.069$)
Fig. 12 Fatigue values based on a non-linear seismic response analysis MYG010 2011/3/11 (${}_0D + {}_{90}D = 0.057 + 0.012 = 0.069$)

幅の損傷度を求めた。図12のように0°方向、90°方向の各疲労性能式(1)、(2a)、(2b)を用いての疲労損傷値 n/N_f の総和を求めると、 $\sigma D + 90^\circ D = 0.057 + 0.012 = 0.067$ となる。さらに、2011/4/7の観測波を使って同様に疲労損傷値を求めると、 $\sigma D + 90^\circ D = 0.011$ であり、すべての総和を求めると、疲労損傷値は0.078となる。

2.3 罫書記録からの推定

罫書記録を基にした損傷評価を行う。判別の難しい半径80mmの範囲では損傷に寄与しない程度の繰り返し回数であったと仮定した。罫書板①においては図13に示すように正側でP1~P5、負側でP6~P14の計14点が抽出された。図14の δ_{p1x} 、 δ_{p2x} 、 δ_{p1y} 、 δ_{p2y} のようにピーク点の座標を x 方向/ y 方向に

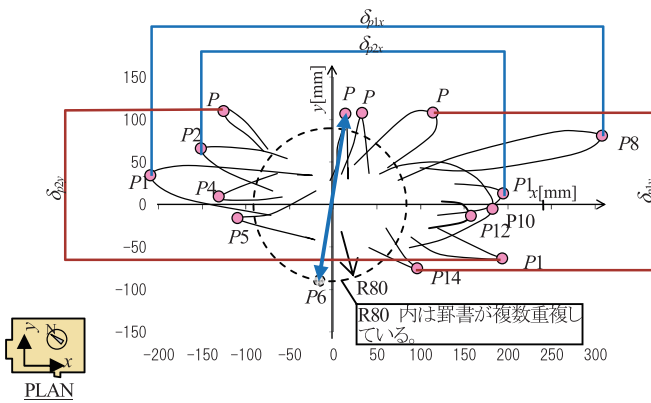


図13 罫書記録の振幅の仮定
Fig. 13 Assumption of Amplitude of a scratch plate

分解し、方向ごとに原点から遠いピーク点同士を順々に結ぶ距離を計測し、それを振幅と見なす。ここで一方に対して他方のピーク点の数に差があるため、他方に対応するピーク点がない場合は罫書記録の判別が難しい半径80mmの円周上に、原点に対して点対称となる位置に仮想のピーク点を仮定する。それぞれの方向ごとの疲労性能式(1)、(2a)、(2b)に対して疲労損傷値 σD 、 $90^\circ D$ を算出し合算する。結果を表3に示す。疲労損傷値 D は0.041であった。

2.4 抜取疲労試験

図5に示す南側の別置型ダンパー(8本組)を調査対象として選定した。写真1に調査対象の震災後の状況を示す。エネルギー吸収した結果、塑性変形し

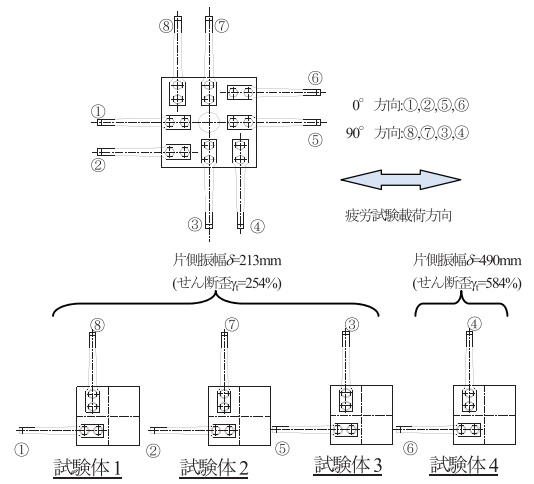


図14 試験体
Fig. 14 Samples under tests

表3 罫書記録からの疲労損傷推定値

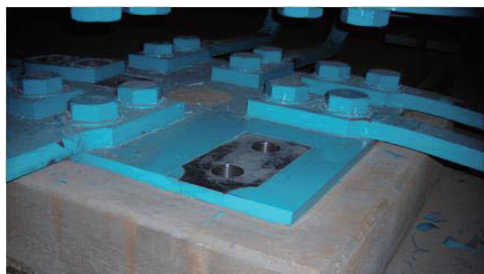
Table 3 Fatigue damage values based on the orbit recorded by a scratch plate

0°方向					90°方向				
全振幅 [mm]	組合せ	γ_i [%]	破断回数 N	損傷値 $1/N$	全振幅 [mm]	組合せ	γ_i [%]	破断回数	$1/N$ 値
423	P 8 + P 1	126	85	0.0118	150	P 9 + P 14	45	1539	0.0006
282	P 11 + P 2	84	157	0.0064	146	P 3 + P 13	44	1616	0.0006
265	P 13 + P 4	79	173	0.0058	103	P 7 + P 5	31	3048	0.0003
260	P 10 + P 3	78	178	0.0056	94	P 6 + P 12	28	3599	0.0003
218	P 12 + P 5	65	232	0.0043	89	P 8 + P 8'	26	3994	0.0003
166	P 9 + P 9'	50	351	0.0028	69	P 2 + P 2'	21	6237	0.0002
143	P 14 + P 14'	43	440	0.0023	57	P 1 + P 1'	17	—	—
42	P 7 + P 7'	12	—	—	32	P 11 + P 11'	9	—	—
32	P 6 + P 6'	10	—	—	24	P 4 + P 4'	7	—	—
—	—	—	—	—	0	P 10 + P 10'	0	—	—
σD	—	—	—	0.039	$90^\circ D$	—	—	—	0.002
$D (= \sigma D + 90^\circ D) =$				0.041					

形状が変化していることがわかる。東北地方太平洋沖地震が発生した同年の2011/6に調査対象のダンパーの抜取工事及び新品の取付工事を実施した。そのためダンパーは本震だけでなく、6月までの強い余震を経験した状態にある。写真1 (b)はU型ダンパーロッドを抜き取った状況である。



(a)震災後の変形状況



(b)抜取状況

写真1 調査対象のU型ダンパーの状況写真
Photo 1 Conditions of U-damper surveyed

図13の罫書記録のように、免震層の変位は長手方向が支配的であった。そのため、図14の①、②、⑤、⑥は0°方向変形が支配的となり、③、④、⑦、⑧は90°方向変形が支配的である。U型ダンパーは0°方向と90°方向とで、歪が集中する部位が異なるため、地震と同様の変形状態になるように載荷することで、地震で損傷を受けた部位に再度歪を集中させることとなり、最も厳しい条件での疲労試験を実現できると考えられる。試験体は、8本組のU型ダンパーから2本組を4セット作成する。0°方向と90°方向の変形を受けたものを組み合わせ、地震動と同様の方向に載荷を行う。試験体1～3の加振振幅は、4つの罫書板記録の最大振幅変形の平均値426mm(±213mm)による正負交番繰返加力とした。一方、本建物のダンパーの設計性能要求値は「±490mm×10回分」であった。試験体4では、地震を経験した後もこの設計要求値以上の性能を有しているかを試すこととした。

試験状況を写真2、3に示す。図15に試験体1、4の荷重変形関係を、図16に試験体1、4の各回のエネルギー吸収量を示す。荷重変形関係において荷重が大きなループは0°方向ダンパーと90°方向ダンパーの双方がエネルギー吸収をしているときであり、荷重が小さいループは0°方向ダンパーが破断した以降を示す。ダンパーは破断直前まで安定した履歴ループを描き、エネルギー吸収量も大幅な低下は見られない。

表4に試験体の破断回数を示す。式(1)、(2a)、(2b)は既往の実験結果に基づく新品の平均値である。試験体1～3においては、平均値84回に対して、76、70、77回となっている。ここから、残存疲労性能を算出すると、76/84、70/84、77/84となり平均で0.88となる。一方、試験体4においては設計許容変形490mmにおいて0°方向ダンパーで25回、90°方向ダンパーで41回と設計要求(10回分)を十分に満たしており、新品と比較しても破断回数の低下が見られなかった。これは、U型ダンパーは振幅によって歪が集中する部位が異なり、試験体4が地震時で経験した以上の大きな振幅加振したためだと考えられる。

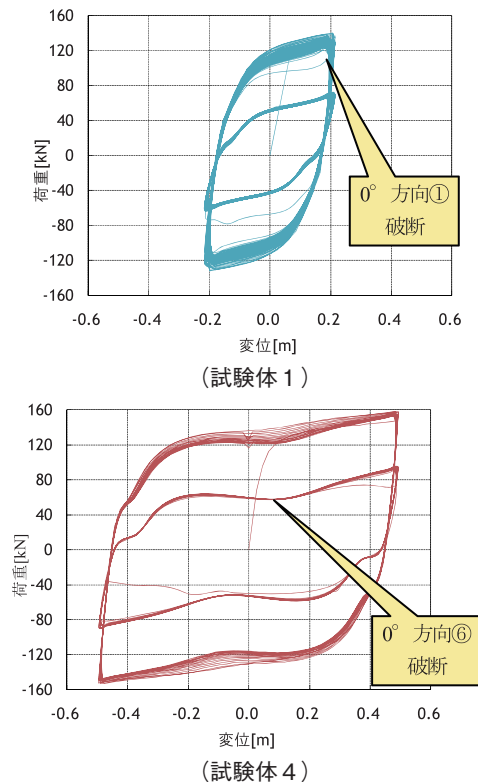
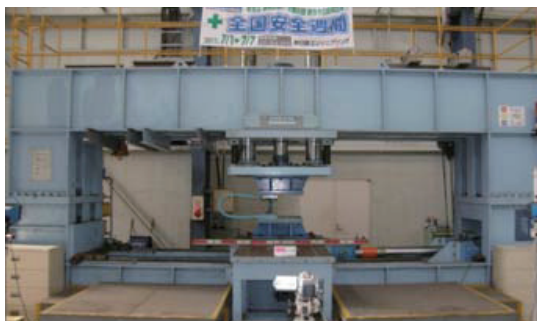
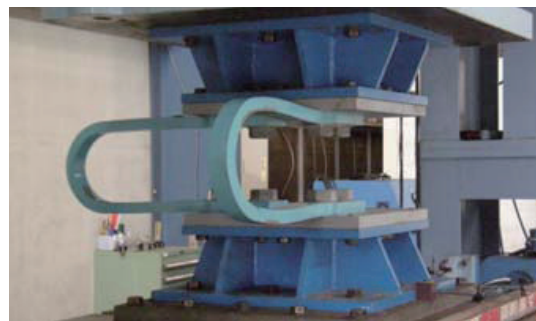


図15 荷重変形関係
Fig. 15 Relationships between loads and deformations



(a)正面から



(b)斜めから

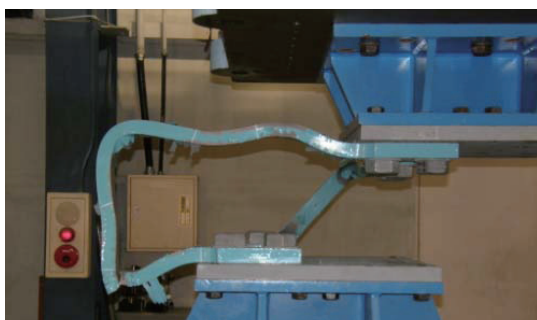
写真2 U型ダンパーロッドの試験体設置状況
Photo 2 Situations of samples



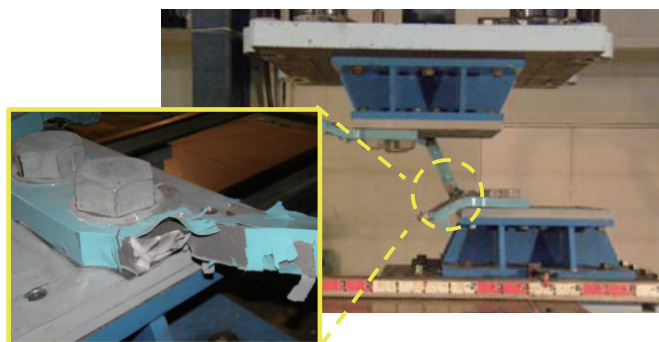
(a)試験体1_0°方向ダンパー破断状況



(b)試験体1_90°方向ダンパー300サイクル終了時



(c)試験体4_0°方向ダンパー破断状況



(c)試験体4_90°方向ダンパー破断状況

写真3 U型ダンパーロッドの試験状況
Photo 3 Situations of Tests

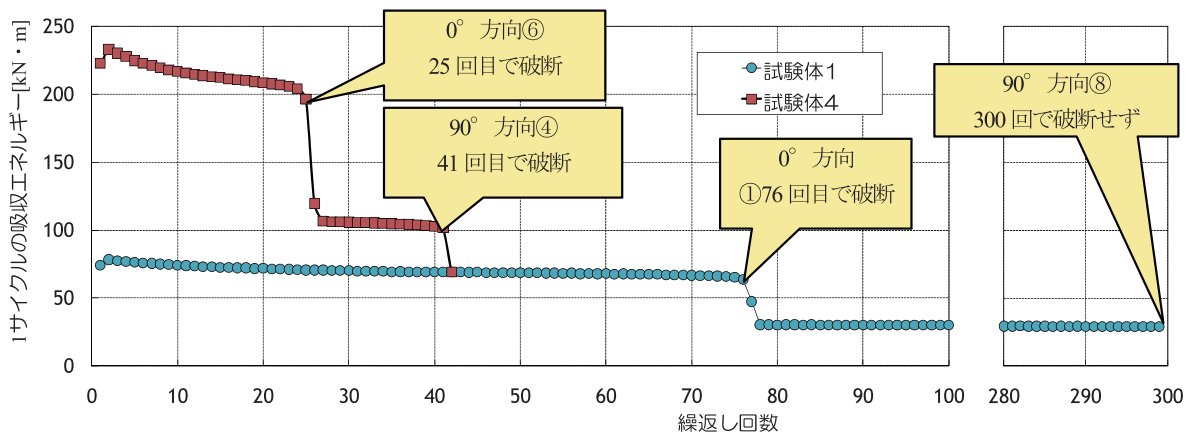


図16 エネルギー吸収の推移
Fig. 16 Changes in energy absorption

表 4 抜取疲労試験結果
Table 4 Results of cyclic loading tests

試験体 No.	試験加振振幅		破断回数	
	片側振幅値 δ [mm]	せん断変形角 γ_i [%]	新品疲労性能式(1) N_{f0}	試験結果 N_{fi}
1	±213	127	0°方向： 84	①：0°方向：76 ⑧：90°方向：300回で破断に至らず
2				②：0°方向：70 ⑦：90°方向：300回で破断に至らず
3				③：0°方向：77 ⑥：90°方向：300回で破断に至らず
4	±490	292	0°方向： 24	④：0°方向：25 ⑤：90°方向：41

3 形状変化に注目した免震 U 型ダンパーの残存疲労性能評価

2章で示した疲労損傷評価では、近傍の観測波や罫書記録を用いたが、より簡易的に損傷を評価する方法を考案する。図18は、U型ダンパーの繰り返し回数とダンパーの形状変化を示している。U型ダンパーは、このように高さが徐々に大きくなり、破断に至る。この形状変化を、元のダンパー高さ H に対して、形状変化後の高さを H' として、形状変化比 H'/H に着目し、疲労損傷値との相関性について調べた。図19は、新品の疲労試験と3章で示した抜取疲労試験における形状変化比 H'/H と疲労損傷値 D の関係を示している。 $\gamma_i = 70\%$ (片振幅変位約 $\delta = 12\text{cm}$) では、疲労損傷値 $D = 0.1$ に対応する形状変化比 H'/H は約1.1、比較的振幅の大きい領域 $\gamma_i = 150\%$ 、 300% では疲労損傷値 $D = 0.1$ に相当する形状変化率 H'/H は概ね1.2、比較的振幅の小さい領域 $\gamma_i = 40\%$ では、累積損傷度 $D = 0.1$ に相当する形状変化率 H'/H は概ね1.03程度であった。このように形状変化率 H'/H は振幅の大きさに依存しており、地震のようなランダム波においては変化率 H'/H で疲労損傷値 D の精緻な値を予測するのは難しいことがわかる。

2.5 疲労損傷評価法の妥当性について

疲労試験から得られた残存疲労性能と、疲労損傷評価法より得た疲労損傷値を足して1.0であれば疲労損傷評価法が妥当であると言える。前章で残存疲労性能を算出したように0.88と考え、応答スペクトルによる方法、時刻歴応答解析による方法、罫書き記録による方法の疲労損傷評価値と足し合わせた値で妥当性を検証する。図17に疲労損傷評価法ごとの結果を示す。VEスペクトルによる方法と応答解析による方法はある程度の精度で疲労損傷値を予想できている。一方で、罫書き記録による損傷評価がもっとも疲労損傷値を過小に評価している。これは罫書き記録は小さい振幅を無視して計算しているためであり、それを考慮する必要がある。石巻赤十字病院の他、2つの建物に対しても同様の検討を行った結果、応答解析から求めた疲労損傷値に対して罫書き記録の疲労損傷値は0.50～0.75程度であり、罫書き記録による損傷評価は、小さい振幅を無視したことを補う係数として、1.5倍～2.0倍する必要があることがわかっている⁵⁾。

そこで、形状変化率 H'/H は疲労損傷値 D の精緻な予測ではなく、疲労損傷を検討する必要があるか、あるいは無損傷と考えてよいかの一次判定の指標として利用することを検討する。

まず、 $\gamma_i < 40\%$ 程度の振幅にダンパーサイズ UD50を例に考える。 $\gamma_i = 40\%$ 程度疲労回数は図4から0°方向載荷で450回程度、90°方向載荷で2000回程度である。一方、図3に示すようにUD50のダンパー高さ h は335mmであり、 $\gamma_i = 40\%$ は振幅134mmに相当する。図12は東日本太平洋沖地震に対する振幅頻度分布であり、振幅120～140mmの頻度は各方向とも3回である。東日本太平洋沖地震は継続時間が300秒以上と非常に長いことで知られているが、振幅120～140mmの疲労損傷値は $2/450 + 2/2000 = 1/183$ となり1%未満である。以上の検討から、一般に地震時の $\gamma_i < 40\%$ 程度の振幅の損傷は無視できると考えた。次に、I病院の疲労損傷値は図17に示すように0.1程度に相当することがわかって

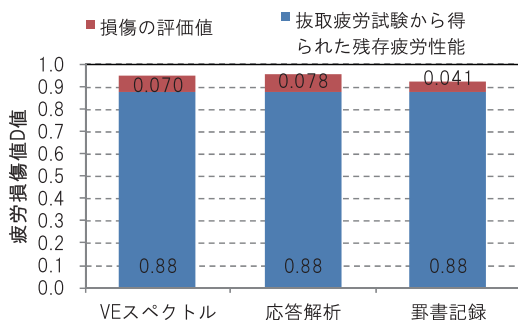


図17 損傷評価法による比較
Fig. 17 Comparison of damage evaluation method

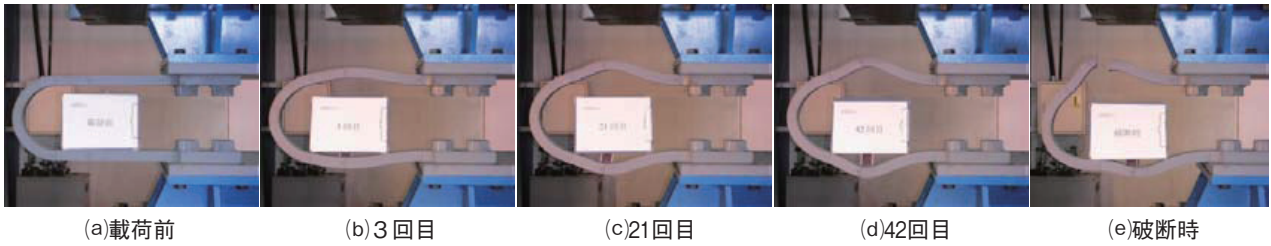


図18 せん断歪 $\gamma_t = 150\%$ のときの繰り返し回数とダンパー形状
 Fig. 18 Deformations of Damper under cyclic loading for shear strain $\gamma_t = 150\%$

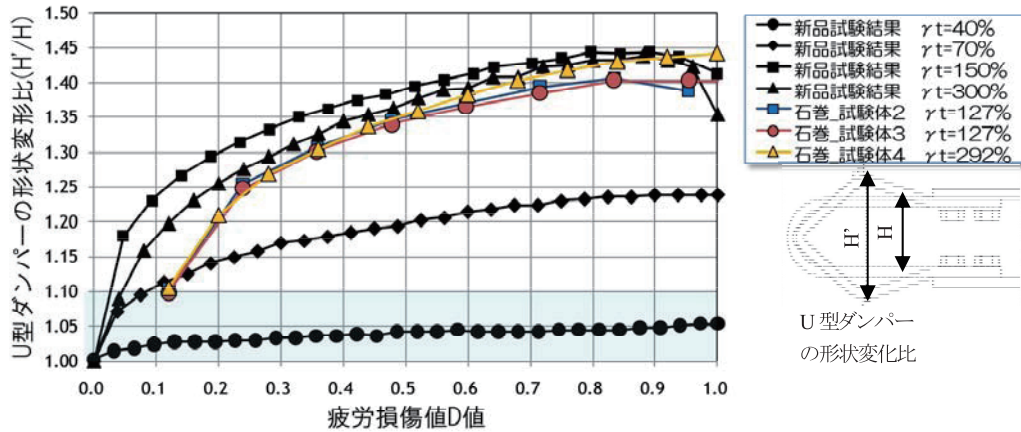


図19 ダンパーの形状変化比と疲労損傷値との関係
 Fig. 19 Relationships between shape change ratio of damper and fatigue value of damper

おり、形状変化率を調べると図19に示すように $H'/H = 1.1$ 程度であった。これは一定振幅の試験の $\gamma_t = 70\%$ に対応している。表3に罫書記録から推定したせん断歪では 0° 方向に $\gamma_t = 70\%$ 程度の振幅が多く含まれていることから説明できる。そこで、レベル2を超えるような大地震を経験した場合は、 $\gamma_t = 70\%$ 程度以上の振幅を複数回受けたと仮定し、形状変化率 $H'/H = 1.1$ 以下であれば、疲労損傷値 D は1.1以下であると判定することとした。仮に $\gamma_t = 150\%$ を超える振幅を経験した場合、疲労損傷値 D が1.05程度で $H'/H = 1.1$ 以上となるため、非常に安全側に損傷の有無を判定できる指標であるといえる。

4 おわりに

本技術は、これまでに検討がなされてこなかった地震を経験した免震U型ダンパーの損傷評価と残存疲労性能評価法を確立したものである。

東北地方太平洋沖地震による地震を経験した免震

建物のうち、免震層の変形が極めて大きいI病院の免震U型ダンパーの損傷度が10%程度であったことを実証できた。

残存疲労性能評価法としては、①VEスペクトルによる手法、②応答解析による手法、③罫書記録による手法、④形状変化比による手法について有効性を検証した。尚、④の形状変化による疲労損傷推定は、JSSI 免震建物の維持管理基準2012において、一次判定として採用されている。①～③は設計者が主体として行う2次判定の方法を示すものである。

この技術は、今後懸念されている広範囲に渡る大規模地震が発生した際に、地震を経験した免震建物の早期の復旧に大いに貢献するものと期待できる。

謝辞

JSSI 免震構造設計部会ダンパーWGのメンバーから貴重なご意見をいただきました。また、防災科学技術研究所のK-netのデータを利用致しました。また、地震を経験した建物の調査には日建設計の村上勝英氏、染谷朝幸氏、中西規夫氏、山下設計の阪

上浩二氏に多大なるご協力をいただきました。免震 U 型ダンパーの疲労損傷評価については東京工業大学教授山田哲先生、准教授吉敷祥一先生、東京理科大学助教焦瑜先生のご指導を賜りました。熱く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 鈴木一弁, 佐伯英一郎, 渡辺厚ほか: 免震 U 型ダンパーに関する実験的研究(その 1 単体加力実験, その 2 積層ゴムとの一体型実験), 日本建築学会大会学術講演(中国), B-2 分冊, pp. 665-668, 1999. 9
- 2) 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 速度・温度依存性, その 42 方向載荷試験, その 5 相似則に関する検討, その 6 大型実大 4 本組試験), 日本建築学会大会学術講演(東北), B-2 分冊, pp. 659-666, 2000. 9
- 3) 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り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 73 巻第 642 号, 2008. 2
- 4) (社)日本免震協会: 報告会東北地方太平洋地震に対する応答制御建築物調査
- 5) Norihisa KAWAMURA, Yoshinao KONISHI et.al: Evaluation of the Fatigue Life of U-shaped Steel Dampers after Extreme Earthquake Loading, 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures- commemorating JSSI 20th Anniversary -September 24-27 2013 Sendai Japan
- 6) 和田章, 広瀬景一: 2 方向地震動を受ける無限均等ラーメン構造の弾塑性応答性状, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 399 号, pp. 37-47, 1989 年 5 月
- 7) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999 年発行
- 8) 吉敷祥一, 高山大, 山田哲, エネ ディアナ, 小西克尚, 川村典久, 寺嶋正雄: 水平 2 方向載荷のける繰り返し変形性能に関する実験-免震構造用 U 字形鋼材ダンパーの水平 2 方向特性 その 1, 日本建築学会区御蔵系論文集, 2012. 10