免震構造用U型鋼材ダンパーの 水平2方向載荷実験に用いる標 準載荷履歴の提案

PROPOSAL OF STANDARD LOADING PROTOCOL FOR BI-AXIAL LOADING TEST OF U-SHAPED STEEL DAMPERS

山田 哲 ——— * 1 小林良平 ——— * 2
エネ・ディアナ — * 3 焦 瑜 ——— * 4
吉敷祥一 ——— * 5 小西克尚 ——— * 6
帆足勇磨 ——— * 7 西本晃治 ——— * 7

Satoshi YAMADA ——— * 1 Ryohei KOBAYASHI — * 2
Diana ENE ——— * 3 Yu JIAO ——— * 4
Shoichi KISHIKI ——— * 5 Yoshinao KONISHI — * 6
Yuuma HOASHI ——— * 7 Koji NISHIMOTO ——— * 7

キーワード：
免震建物, 鋼材ダンパー, 2方向載荷実験, 載荷履歴

Keywords:
Base isolated buildings, Steel damper, Bi-axial loading test, Loading protocol

A standard loading protocol for bi-axial loading test of U-shaped steel dampers using simple orbit is proposed. Proposed loading protocol consists of an elliptical orbit with aspect ratio of 3:1 and corresponding shear deformation angle of the major axis equal to 135%. The targeted cumulative damage is set at 1/3 of the limit state of U-shaped steel dampers under bi-axial loading. The values of the cumulative damage index D_2 and sway index J_s are selected based on analytical results obtained for extremely severe earthquakes.

1. はじめに

図1に示す免震構造用U型鋼材ダンパー(以後、U型鋼材ダンパー)は、鋼材の塑性変形により地震による入力エネルギーを吸収し免震層の応答変位が大きくなりすぎるのを防ぐとともに、地震後の揺れを収めるために設置される免震部材であり、免震構造用の履歴型ダンパーとして多用されている。地震時に多数回の繰り返し変形を受けるU型鋼材ダンパーの繰り返し変形性能を明らかにしておくことは、免震構造の安全性を検証する上で重要な課題であることから1方向繰り返し載荷実験を行い、0度方向の繰り返し変形に対する疲労曲線を提案した¹⁾。また、大地震のもとで免震建物は水平2方向に応答し、免震層に設置されたダンパーも水平2方向に変形することから、載荷履歴として正円、楕円軌跡を用いたU型鋼材ダンパーの水平2方向繰り返し載荷実験を行い、水平2方向載荷のもとで受ける円弧運動に伴う繰り返し変形性能の低下や、振れ変形に伴う取り付け架台への接触の可能性を明らかにし、水平2方向載荷のもとでの累積損傷度 D_2 、振れ影響指標 J_s 、これらの組み合わせで評価される繰り返し変形性能ならびに架台接触の評価指標 J_c として取りまとめた²⁾。さらに、地震応答時を模したランダムな水平2方向変形を与える動的載荷実験を行い、繰り返し変形性能の評価法により安全側の評価ができることなどを示した³⁾。

文献2)で提案した水平2方向荷重下での性能評価法の適用範囲は、幾何学的形状が比例関係にあり、使用鋼材、加工方法を同一とするU

型鋼材ダンパーとなる。使用鋼材や、加工方法、さらには形状を変えた場合に性能がどの程度変化するかを評価するには、一般的な部材で行われているように1方向の繰り返し載荷実験の結果を比較することも考えられるが、地震時に水平2方向に応答する免震層に設置されるダンパーの性能評価は、水平2方向載荷実験により行うことが望ましい。大地震時に受ける損傷を模擬できる標準的な載荷方法が確立できれば、性能評価を行う上で合理的である。また、地震で損傷を受けたダンパーの抜き取り試験を行うような場合にも、残存性能を評価する上で有用である。

本研究では、U型鋼材ダンパーを対象とした水平2方向載荷実験に用いるための標準的な載荷履歴を構築する。標準的な載荷履歴としては、1回の地震でU型鋼材ダンパーが変形性能の限界に至る極めて厳しい状況に相当する条件とすることも考えられるが、振幅が非常に大きくなることから実験装置に極めて大きなストロークが必要となるだけでなく、免震構造に用いられる履歴型ダンパーの高い

図1 U型鋼材ダンパー

¹⁾ 東京工業大学建築物理研究センター 教授・博士 (工学)
(〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

²⁾ 元東京工業大学 大学院生・修士 (工学)

³⁾ 東京工業大学 大学院生・修士 (工学)

⁴⁾ 東京理科大学工学部第2部建築学科 助教・博士 (工学)

⁵⁾ 東京工業大学建築物理研究センター 准教授・博士 (工学)

⁶⁾ 新日鉄住金エンジニアリング 博士 (工学)

⁷⁾ 新日鉄住金エンジニアリング 修士 (工学)

¹⁾ Prof., S. E. R. C. Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

²⁾ Former Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

³⁾ Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

⁴⁾ Assist. Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

⁵⁾ Assoc. Prof., S. E. R. C. Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

⁶⁾ Nippon Steel & Sumikin Engineering, Dr. Eng.

⁷⁾ Nippon Steel & Sumikin Engineering, M. Eng.

変形性能を踏まえると非現実的な条件となることから、設計で想定される大地震よりは厳しい条件として、1 回の地震(本震)で、U 型鋼材ダンパーが破断に至ると考えられる累積損傷の 1/3 の損傷を受ける厳しい状況に相当する条件を以て標準的な載荷履歴を構築する。

2. 地震応答解析による検討

2.1 解析概要

免震建物に設置された U 型鋼材ダンパーが、水平 2 方向の地震入力のもとで受ける変形の履歴を把握するために、地震応答解析を行った。解析では図 2 に示すように、免震建物の上部構造を質点に、免震層を MSS(Multiple Shear Spring)⁴⁾にモデル化し、水平 2 方向入力下での応答を計算した。MSS にモデル化した免震層の特性を図 3 ならびに表 1 に示す。ここで U 型鋼材ダンパーの復元力特性をバイリニア型にモデル化しているが、これは水平 2 方向外力を受ける U 型鋼材ダンパーの履歴挙動(実験結果)⁵⁾が、MSS モデルとノーマルバイリニア型の履歴モデルの組み合わせで精度良く追跡できる³⁾ことによる。

解析では、免震建物によく使われているサイズの U 型鋼材ダンパー 4UD40, 4UD50(名称の最初の数字 4 は 90° 間隔で 4 本組みとしていたことを、UD40 は U 型鋼材ダンパーのサイズを表す)を対象とした。U 型鋼材ダンパーの剛性・強度については 4UD40 の繰返し載荷実験結果⁶⁾を参考に、1 次剛性および 2 次剛性はカタログ値⁷⁾、降伏耐力 Q_y はカタログ値の 1.18 倍とした。また、解析モデルは 400mm 変形時のダンパーのせん断力係数を 0.03 とし、400mm 変形時に免震層の等価周期が 4.0 秒となるようにその他の諸元を設定した。

入力波については、様々な特性を持つ地震波を用いることとし、既報⁸⁾で免震層の変位軌跡(オービット)の形状を検討した強震記録の中から変位軌跡の形状の特徴が異なる 6 波を用いた。入力波の一覧を表 2 に示す。入力レベルについては、1 章で述べたように、1 回の地震(本震)で、U 型鋼材ダンパーが破断に至ると考えられる累積損傷の 1/3 の損傷を受ける厳しい状況に相当する条件を以て標準的な載荷履歴を設定することを目的とすることから、式(1)で表される 2 方向入力下での U 型鋼材ダンパーの損傷限界³⁾に対して、水平 2 方向変形を受ける場合の累積損傷度 D_2 と振じれ影響指標 J_f をいずれも 1/3 とした線を 1/3 損傷線として設定し、応答解析結果が 1/3 損傷線にのるように入力倍率を調節した。式(1)で表される損傷限界ならびに 1/3 損傷線については、解析結果と併せて次図図 6 に示す。

図3 免震層の特性

表1 U 型鋼材ダンパーの諸元

	δ_y^{*1}	k_e^{*2}	k_p^{*2}	h
	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[mm]
4UD40	22.3	5920	100	231
4UD50	32.9	8320	144	335

*1 カタログ値の1.18倍

*2 カタログ値

h : ダンパー高さ

$$D_2 = \begin{cases} 1.0 & (0.0 \leq J_f < 15.0) \\ 1.6 - 0.04J_f & (15.0 \leq J_f < 30.0) \\ 0.4 & (30.0 \leq J_f) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 D_2 は水平 2 方向変形を受ける場合の累積損傷度、 J_f は振じれ影響指標であり、それぞれ次式で定義される²⁾。

$$D_2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{0^\circ n_i}{0^\circ N_{fi}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{90^\circ n_i}{90^\circ N_{fi}} \right) = D_{0^\circ} + D_{90^\circ} \quad (2)$$

$$J_f = \sum_{j=1}^{total_step-1} \left(\gamma_j \times \gamma_{j+1} \times \frac{\gamma_j + \gamma_{j+1}}{2} \times |\Delta\phi_j| \right) \quad (3)$$

ここで、 $0^\circ N_{fi}$ 、 $90^\circ N_{fi}$ はそれぞれ 0 度方向ならびに 90 度方向の定振幅載荷における全振幅 a_i に対する破断回数、 $0^\circ n_i$ 、 $90^\circ n_i$ はそれぞれ 2 方向載荷のもとでの履歴の 0° 方向成分ならびに 90° 方向成分における全振幅 a_i での繰返し回数であり、 D_{0° 、 D_{90° はそれぞれ 0° 方向の変形成分と 90° 方向の変形成分に対する累積損傷度である。また、 γ_j は j ステップでの U 型鋼材ダンパーのせん断変形角(原点からの変位をダンパー高さで割った値)、 $\Delta\phi_j$ は j ステップから $j+1$ ステップの間での原点周りでの回転量の増分である。 γ_j と $\Delta\phi_j$ の定義を図 4 に示す。

2.2 解析結果

応答解析から得られた免震層の変位軌跡を図 5 に例示する。また、得られた変位軌跡より算出した各指標の計算結果一覧を表 3 に示す。解析では、U 型鋼材ダンパーは図 2 の x 方向と y 方向に設置し、地震記録の 2 成分も x 方向と y 方向に入力するものとした。

図2 解析モデル

図4 γ_j と $\Delta\phi_j$ の定義

解析で得られた免震層の x, y 各方向の変位履歴から、U 型鋼材ダンパーの累積損傷度を式(2)により算出した。すなわち、x 方向と y 方向の U 型鋼材ダンパーそれぞれの変位履歴について、図 1 に示す 0° 方向(U 型鋼材ダンパーの材軸方向)成分と 90° 方向 (U 型鋼材ダンパーの材軸方向と直交する方向) 成分の変位振幅ごとの頻度分布をレインフロー法により抽出し、各方向の疲労曲線¹⁾²⁾に対する損傷度 xD_0 , xD_{90} , yD_0 , yD_{90} を算出し、これらを合算することで 2 方向入力を受ける x, y 各方向の U 型鋼材ダンパーの累積損傷度 D_2 , $J_f D_2$ を求めた。そのうえで、これらの値のうち大きな方を 2 方向入力を受ける U 型鋼材ダンパーの累積損傷度 D_2 とした。表中の R_{max} は応答中に生じる原点からの最大変位を、 γ_{max} は R_{max} をダンパー高さで除したダンパーに生じる最大せん断変形角を表す。また、 J_{c_max} は応答中の J_c (変形した U 型鋼材ダンパーが架台に接触する条件を表す指標であり、絶対値が 26.8(rad)を超えると接触する²⁾) の最大値である。 J_c は次式で定義される。

$$J_c = \sum_{j=1}^{total_step-1} \left(\gamma_j \times \gamma_{j+1} \times \frac{\gamma_j + \gamma_{j+1}}{2} \times \Delta \phi_j \right) \quad (4)$$

図 5 の変位軌跡の形状は、SO を入力した場合のように 1 方向変形に近いものや、JS を入力した場合のように 2 方向に円弧状の履歴を描いているものと様々であり、変位軌跡の特徴が異なる様々な応答結果が得られた。ここで、入力波の PGA, PGV の値から、一度の地震動で累積損傷度が U 型鋼材ダンパーの損傷限界の 1/3 となるような入力の大きさが確認できるが、NS 成分と EW 成分のうちで大きな値となる PGV が小型の UD40 で 47(cm/s)から 149(cm/s)、標準的な大きさの UD50 では 75(cm/s)から 182(cm/s)と、PGV で 50(cm/s)とされるレベル 2 以上の大きな入力となっていることがわかる。また、応答中に U 型鋼材ダンパーに生じる最大せん断変形角 γ_{max} は 150%~300 %の範囲でばらついており、平均値は 200%程度である。

一回の 2 方向入力で累積損傷度が U 型鋼材ダンパーの損傷限界の 1/3 となる場合の累積損傷度 D_2 と振じれ影響指標 J_f の関係を図 6 に示す。図 6 上段は、式(1)で与えられる水平 2 方向変形を受ける U 型鋼材ダンパーの損傷限界を実線で、損傷度が 1/3 となる 1/3 損傷線を破線で示しており、下段には 1/3 損傷線を拡大して示している。解析のプロットは、1/3 損傷線上にあることが確認できる。ここで上段の図には、既報²⁾³⁾における円・楕円軌跡ならびにランダム軌跡による実験結果を併せて示しており、式(1)が 2 方向変形を受ける U 型鋼材ダンパーの損傷限界の下限值を与えることが確認できる。

式(1)で与えられる水平 2 方向変形を受ける U 型鋼材ダンパーの損傷限界は振じれ影響指標 J_f の増加に伴い低下するが、 J_f が 30 以上となると下げ止まり、一定($D_2=0.4$)となる。1/3 損傷線においては、 J_f が 10 以上で一定($D_2=0.133$)となる。一度の地震動で累積損傷度が U 型鋼材ダンパーの損傷限界の 1/3 となる解析結果のプロットは、 J_f の増加に伴う繰り返し変形性能の低下が下げ止まる、 J_f が 10 となるあたりに集まっている。次章で設定する標準的な載荷履歴は、応答解析結果が集まっている 1 セットの載荷で振じれ影響指標 J_f が 10、累積損傷度 D_2 が 0.133 となるあたりを狙って設定する。

また、載荷中のねじれ変形の影響のうち、架台接触に関わる指標 J_c について、時刻歴における J_c の推移を図 7 に例示する。 J_c が架台接

触限界(絶対値で 26.8(rad))に至るとダンパーが架台に接触を起こすが、回転方向が逆転すると解放される。図 7 から、ほとんどの場合継続時間中に回転方向が逆転することで J_c の蓄積が抑えられ、架台接触限界に対して十分小さい値に留まっていた。累積損傷度が U 型鋼材ダンパーの損傷限界の 1/3 となるような地震入力 1 回では、 J_c は架台に接触するような値には至らないことが確認できたことから、次章で設定する標準的な載荷履歴においては、回転方向を途中で変えるなどして載荷中に接触が生じないようにする。

3. 標準載荷履歴の設定

本章では、前章で行った応答解析の結果を踏まえ、U 型鋼材ダンパーの水平 2 方向載荷実験に用いる標準載荷履歴を設定する。

回転を伴う単純な水平 2 方向変位軌跡としては、円・楕円軌跡が考えられる。日本免震構造協会では、高減衰積層ゴムについて、長径と短径の比が 2 : 1 となる楕円軌跡を基本とした研究が多数行われている⁹⁾など。本研究においても楕円軌跡を用いることとし、その長径と短径の比ならびに振幅を適切に設定することで、累積損傷度が U 型鋼材ダンパーの損傷限界の 1/3 となるような地震入力 1 回と累積損傷度 D_2 と振じれ影響指標 J_f が対応し、載荷中に架台接触の可能性が生じない簡便な載荷履歴を構築する。

まず、楕円載荷を行った場合の累積損傷度 D_2 、振じれ影響指標 J_f と繰り返し変形性能の関係であるが、長径と短径の比率を 3:1 とし、長径方向のせん断変形角(全振幅) ϕ_f が 77.5 (%)ならびに 230.5 (%)で連続的に楕円軌跡の強制変形を与えた場合の、長径方向に設置した U 型鋼材ダンパーの累積損傷度 D_2 と振じれ影響指標 J_f が蓄積する過程を図 8 に例示する。楕円軌跡による載荷の場合には、 D_2 と J_f の比率は一定となり、この比率は長径と短径の比率および振幅である長径方向のせん断変形角によって決まる。

表2 入力波一覧

No.	地震	記録	略称
1	1995年 兵庫県南部地震	JMA神戸	KB
2		尼崎	AM
3	1940年 Imperial Valley地震	El Centro	EL
4	2011年 東北地方太平洋沖地震	JMA仙台	JS
5	1994年 Northridge地震	Sylmar Olive	SO
6	1989年 Loma Prieta地震	Agnews State Hospital	LP

表3 解析結果一覧

	入力波	入力倍率	R_{max} [mm]	γ_{max} [%]	D_2	J_f [rad]	J_{c_max} [rad]	NS方向		EW方向	
								PGA [cm/s ²]	PGV [cm/s]	PGA [cm/s ²]	PGV [cm/s]
4UD40	KB	1.49	450	195	0.136	14.81	4.98	1223	133	923	116
	AM	0.97	409	177	0.136	14.13	-7.26	220	48	343	83
	EL	1.35	433	187	0.134	10.01	-3.27	461	51	284	66
	JS	1.18	434	188	0.150	9.64	7.92	484	64	375	64
	SO	1.15	707	306	0.173	9.16	-2.27	681	90	950	149
	LP	1.80	384	166	0.156	9.50	-1.84	281	32	304	47
	平均		470	203	0.148	11.21	±4.59	558	70	530	88
4UD50	KB	1.93	710	212	0.133	13.62	6.19	1584	172	1195	151
	AM	1.47	524	156	0.135	10.40	-3.40	333	73	520	126
	EL	2.34	833	249	0.151	9.52	-7.24	800	89	492	114
	JS	1.68	462	138	0.168	9.25	8.15	689	91	534	92
	SO	1.41	801	239	0.174	9.16	-3.21	835	110	1165	182
	LP	2.88	492	147	0.142	9.81	3.18	450	51	486	75
	平均		637	190	0.151	10.29	±5.23	782	98	732	123

図5 変位軌跡 (4UD50)

図6 D_2 - J_f 関係

図7 継続時間中の J_c の推移 (4UD40)

表4 $D_2=0.4$, $J_f=30$ (rad) となる楕円軌跡での繰り返し数

	せん断変形角(長径方向) (全振幅)		N_f
	$a\gamma_t$ (%)	$a\gamma$ (%)	
正円	104	52	34
2:1楕円	176	88	18
3:1楕円	231	116	13
4:1楕円	288	144	9

前章で行った応答解析の結果では、地震応答による 1/3 損傷線上の D_2 - J_f のプロットは、損じれ影響指標 J_f の増加に伴う繰り返し変形性能の低下が下げ止まるあたりに集まっている。図 8 に例示したように、楕円軌跡による载荷においては D_2 と J_f の比率は一定となることから、水平 2 方向载荷のもとでの損傷限界が下げ止まる $D_2=0.4$ 、 $J_f=30$ (rad) となる長径と短径の比率および振幅である長径方向のせん断変形角と繰り返し数の組み合わせに基づき、累積損傷度が U 型鋼材ダンパーの損傷限界の 1/3 となるような载荷履歴を構築する。

$D_2=0.4$ 、 $J_f=30$ (rad) となる長径と短径の比率および振幅である長径方向のせん断変形角と破断までの繰り返し数の組み合わせを表 4 に示す。これらの組み合わせの中で、長径と短径の比率が 2:1 となる楕円軌跡による载荷では、振幅が小さく繰り返し回数が増え、1/3 損傷線との対応では 6 回の繰り返しと、1 回の地震に対する応答で生じる大振幅での繰り返し数に比べかなり多くなる。一方、長径と短径の比率が 4:1 の楕円では、オービットの形状が 1 方向载荷に近くなることから、本研究では長径と短径の比率が 3:1 となる楕円を採用することとした。

実際に実験を行う際には、载荷開始時に原点から楕円軌跡まで変形させることから、この変形に伴う損傷度も考慮する必要がある。载荷開始時の直線挙動の影響も含め、表 5 ならびに図 9 に示す 1 セットの载荷で損傷限界の 1/3 の損傷となる楕円軌跡による载荷履歴を標準的な载荷履歴として提案する。

提案する载荷履歴は、長径と短径の比率が 3:1 で長径方向のせん断変形角(片振幅)を $a\gamma=135$ (%) とした楕円状の変位履歴であり、直交させて設置した U 型鋼材ダンパーの 1 つの軸を長径方向とする載

図8 楕円軌跡による载荷における
累積損傷度 D_2 と損じれ影響指標 J_f の蓄積

荷履歴を基本とする。これを A 方向載荷と呼ぶ。長径方向が変化した場合には直交するそれぞれの U 型鋼材ダンパーへ累積する損傷の比率も変わることから、A 方向載荷に加え、長径方向を 45° ずらした B 方向載荷も設定する。いずれも原点から楕円の長径方向に直線で載荷した後、同一回転方向に A 方向載荷では 3 サイクル、B 方向載荷では 4 サイクルを 1 セットとする載荷を行う。提案する載荷履歴による累積損傷度 D_2 と捩じれ影響指標 J_f の蓄積を図 10 に示す。なお、1 セット終了時の架台接触に関わる指標 J_c 、A 方向載荷で ± 10.95 、B 方向載荷で ± 14.63 と、地震応答解析結果における J_c の最大値よりやや大きくなることから、2 セット目以降ではセットの変わり目で載荷方向を反転させて引き続き同一の楕円軌跡による載荷を行い、いずれかのダンパーが破断に至るまでの変形性能を確認することとした。

4. 実験による検討

前章で提案した、長径と短径の比率が 3:1 で長径方向のせん断変形角(片振幅)を $a\gamma=135(\%)$ とした楕円状の載荷履歴により、水平 2 方向外力を受ける U 型鋼材ダンパーの繰り返し変形性能が評価できるかを検証するため、2 方向載荷実験を行った。載荷には既報²⁾の実験同様、東京工業大学建築物理研究センターに設置された多自由度載荷実験装置を用い、試験体は 2 組の 4UD40 とし、1 方は A 方向載荷、他方は B 方向載荷で、1 セット毎に回転方向を変えいずれかの U 型鋼材ダンパーが破断するまで載荷を行った。載荷履歴を除く載荷方法、計測方法は既報²⁾と同様である。

図 11 に各試験体における載荷点の変位履歴変位オービットを、図 12 に x,y 各方向成分の荷重-変形関係を、図 13 に載荷開始から試験体が破断に至るまでの D_2 - J_f 関係の推移を示す。ここで、 Q_x, Q_y は復元力の x,y 方向成分である、また、 δ_x, δ_y は原点からの載荷点の変位の x,y 方向成分であり、U 型鋼材ダンパーのせん断変形の x,y 方向成分である。図 11 中の×は、試験体を構成する 4 本の U 型鋼材ダンパーのうちの 1 本が破断に至った時点を表す。

A 方向載荷を行った試験体では、損傷限界の下限となる 3 セットの載荷終了時点ではいずれのダンパーも破断には至らず、さらに載荷を続け 16 サイクル目で、累積損傷度の大きな y 方向のダンパーではなく、累積損傷度の小さな x 方向の 1 方のダンパーが破断し、載荷を終了した。破断した x 方向の U 型鋼材ダンパーの累積損傷度 D_2 は 0.43 であり、式(1)による損傷限界の下限をやや上回る程度であ

った。

一方、B 方向載荷を行った試験体でも、損傷限界の下限となる 3 セットの載荷終了時点ではいずれのダンパーも破断には至らなかったが、載荷を続けたところ 13 サイクル目で 1 本のダンパーが破断し、載荷を終了した。破断した U 型鋼材ダンパーの累積損傷度 D_2 は 0.43 であり、これも式(1)による損傷限界の下限をやや上回る程度であった。

A 方向載荷を行った試験体において累積損傷度が大きくなる y 方向の U 型鋼材ダンパーが損傷限界を大きく上回る繰り返し変形性能を示したが、破断した U 型鋼材ダンパーの累積損傷度はいずれも式(1)で表される損傷限界の下限をやや上回る程度であったことから、提案した載荷履歴を用いた 2 方向載荷実験により水平 2 方向荷重下における U 型鋼材ダンパーの累積変形性能が評価できたとと言える。

表5 提案する載荷履歴

	楕円形状	せん断変形角(長径方向)		1 セットあたりのサイクル数	1 セットあたりの累積損傷度 D_2	1 セットあたりの $J_f(\text{rad})$	1 セットあたりの $J_c(\text{rad})$
		(全振幅)	(片振幅)				
A方向載荷	3:1楕円	270	135	3	0.13	10.97	± 10.95
B方向載荷	3:1楕円	270	135	4	0.15	14.63	± 14.60

図9 提案する載荷履歴

図10 提案する載荷履歴による累積損傷度 D_2 と捩じれ影響指標 J_f の蓄積

図11 各試験体のオービット

図12 各試験体の荷重-変形関係

図13 D_2 - J_f 関係

5. まとめ

U型鋼材ダンパーを対象とした水平2方向载荷実験に用いるための、標準的な载荷履歴を構築した。標準的な载荷履歴においては、設計で想定される大地震よりは厳しい条件として、1回の地震(本震)で、U型鋼材ダンパーが破断に至ると考えられる累積損傷の1/3の損傷を受ける厳しい状況に相当する条件を以て1セットの载荷を

行うこととした。

载荷履歴を構築するにあたっては、まず入力レベルを調整した特性の異なる6波の強震観測記録を用い、1回の入力で破断に至ると考えられる累積損傷の1/3程度の損傷を受ける場合にどの程度ねじれの影響を受けるのかを調べた。また、载荷履歴では、長径と短径の比率が3:1となる楕円軌道を採用することとし、地震応答で受ける累積損傷ならびに振れの影響と対応する载荷履歴として、

①直交させて設置したU型鋼材ダンパーの1つの軸を長径方向として、原点から楕円の長径方向に直線でせん断変形角が $\gamma=135$ (%)となるまで载荷した後、長径と短径の比率が3:1となる楕円軌道で同一回転方向に3サイクルの载荷を1セットとしてを行い、セットの終了後は载荷方向を反転させ3サイクルずつの载荷を、いずれかのダンパーが破断するまで行うA方向载荷

②直交させて設置したU型鋼材ダンパーの中間となる 45° 方向を長径方向として、原点から楕円の長径方向に直線でせん断変形角が $\gamma=135$ (%)となるまで载荷した後、長径と短径の比率が3:1となる楕円軌道で同一回転方向に4サイクルの载荷を1セットとしてを行い、セットの終了後は载荷方向を反転させ4サイクルずつの载荷を、いずれかのダンパーが破断するまで行うB方向载荷

を設定した。

提案した载荷履歴を用いた2方向载荷実験を行い、水平2方向荷重下におけるU型鋼材ダンパーの累積変形性能が評価できることを確認した。

参考文献

- 1)吉敷祥一, 大河原勇太, 山田 哲, 和田 章: 免震構造用U字形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624号, pp.333-340, 2008.2
- 2)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方向载荷下にお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, 日本建築学会構造系論文集 第77巻 第680号, pp.1579-1588, 2012.10
- 3)吉敷祥一, エネディアナ, 山田 哲, 寺嶋正雄, 小西克尚, 川村典久: ランダムな水平2方向変形に対する繰り返し変形性能— 免震構造用U字形鋼材ダンパーの水平2方向特性その2—, 日本建築学会構造系論文集 第79巻 第704号, pp.1457-1467, 2014.10
- 4)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集 第399号, pp.37-47, 1989.5
- 5)ENE Diana, 吉敷祥一, 山田 哲, 小西克尚, 川村典久, 寺嶋正雄: 2方向ランダム载荷を受ける免震U型ダンパーの履歴特性と塑性変形能力その2: 静的载荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集B-II分冊, pp.745-746, 2013.8
- 6)ENE Diana: Hysteretic Behavior and Plastic Deformation Capacity of U-shaped Steel Dampers Under 2D Random Loading, 東京工業大学修士論文, 2013.2
- 7)日本免震構造協会: 免震部材標準品リスト-2005-, pp.471-472, 2005.1
- 8)焦 瑜, 山田 哲, エネディアナ, 小林良平, 吉敷祥一, 小西克尚, 寺嶋正雄, 帆足勇磨: 免震層の野書き記録に基づく免震構造用U型鋼材ダンパーの損傷評価法, 日本建築学会技術報告集, 第48号, pp.649-654, 2015.6
- 9)日本免震構造協会: 水平1方向加力時の高減衰ゴム系積層ゴム支承の性状について—限界特性—, 2009.7

[2015年3月26日原稿受理 2015年7月21日採用決定]