

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

EXPERIMENTAL EVALUATION OF CYCLIC DEFORMATION CAPACITY OF
U-SHAPED STEEL DAMPERS FOR BASE-ISOLATED STRUCTURES

吉敷 祥一*, 大河原 勇太**, 山田 哲***, 和田 章****

Shoichi KISHIKI, Yuta OHKAWARA, Satoshi YAMADA
and Akira WADA

U-shaped steel dampers are used widely for energy dissipation in base-isolated structures. However, dynamic loading tests of full-scale U-shaped steel dampers had not been conducted yet. Therefore, effects of dynamic loadings on cyclic behavior and cyclic deformation capacity of the dampers had not been made clear. In this paper, dynamic loading tests of full-scale U-shaped steel dampers were carried out to verify these effects. The major findings obtained from the tests are: (1) cyclic deformation capacity of various-sized U-shaped steel dampers can be evaluated based on horizontal shear deformation γ calculated from the lateral displacement δ divided by the height of the dampers; (2) in-plane (0-degree) loading is the critical direction for U-shaped steel dampers in the range of horizontal shear deformation γ from 20 to 200%; (3) the effect of dynamic loading on cyclic behavior and fatigue characteristics is minimal.

Keywords : Base-isolated structure, Steel damper, Full-scale specimen, Dynamic loading test, Cyclic deformation capacity

免震構造, 鋼材ダンパー, 実大試験体, 動的載荷実験, 繰り返し性能

1. 序

免震構造は建物の機能維持や財産保全の観点からも優れた構造形式である。免震構造とすることで1994年のノースリッジ地震では震央付近においても病院の機能が完全に維持され、1995年の兵庫県南部地震では上部構造の水平加速度が基礎部での水平加速度の約1/3程度に低減されたことが観測されている¹⁾。このように実地震動に対してもその有効性が実証された免震構造は、我が国にも1000棟以上の建物に採用されるようになった。

免震構造には(1)上部構造を安定して支持しつつ、水平方向にやわらかく動き、地震後は建物を元の位置に戻そうとする機構、(2)地震入力エネルギーを吸収して揺れを抑える機構、が必要である。前者には積層ゴムアイソレータが用いられ、後者には鋼材、鉛、オイルなどを利用したダンパーが用いられる。鋼材や鉛を用いた免震構造用ダンパーには、水平方向のあらゆる向きの変形に追従でき、水平方向の大変形に伴う材軸方向の伸びに対応できることが要求される。この点が制振構造に用いられるダンパーとは異なり、特殊な形状のダンパー^{例えば2)}などが開発されてきた所以であった。しかし、今日では積層ゴムアイソレータ周辺に併設できるU字形鋼材ダンパーが開発され、免震構造にもシンプルな形状のダンパーが用いられるようになった^{3), 4)}。ダ

ンパーを積層ゴムアイソレータ周辺に併設することによって、ダンパーの本数を選択でき、設置場所の形状に沿って配置できるようになった。また、エネルギー吸収機構を兼ねた鉛プラグ入り積層ゴムアイソレータなどに比べるとダンパー部分の点検や取り換えも容易に行えるといった利点を有する。

免震構造用のU字形鋼材ダンパーについては、開発当初から数多くの載荷実験による性能確認が行われてきた^{3), 4)}。しかし、実大規模の部材に対して地震時を想定した実速度での載荷実験はほとんど行われておらず、一連の実験結果を統一的に評価する方法も検討されていない。U字形鋼材ダンパーは、実際には配置の異なる複数本のダンパーを組み合わせてエネルギー吸収部材として用いる。本研究ではこの実大規模のU字形鋼材ダンパー単体を対象に1方向載荷下の力学挙動に着目した動的繰り返し載荷実験を行い、部材単体としての疲労性能、載荷速度の影響を明らかにする。また、U字形鋼材ダンパーは積層ゴムアイソレータの高さに合わせて大きさを変更する必要があるため、様々な大きさの試験体を用いて行われた既往の実験結果^{3), 4)}を含めて定変位振幅下の疲労性能を検討し、ダンパーの大きさによる影響を排除した評価方法を提示する。

* 東京工業大学建築物理研究センター 助教・博士(工学)

Assistant Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

** 元東京工業大学 大学院生・修士(工学)

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

*** 東京工業大学統合研究院 准教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Integrated Institute, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

**** 東京工業大学統合研究院 教授・博士(工学)

Prof., Integrated Institute, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

2. 実験計画

2.1. 試験体

試験体は免震構造用のエネルギー吸収部材として用いられるU字形鋼材ダンパー(以後、Uダンパー)である。Uダンパーは特別なSN490B材をU字形に冷間曲げ加工した後、熱処理を施して製作される。Uダンパーの形状を図1に示す。試験体と同一ロットの鋼材に試験体製作時と同様の熱処理を施し、JIS-4号引張試験片に加工して行った素材試験の結果を参考として表1に示す。

試験体はほぼ相似形で大きさを変えた3種類を用意した。寸法の小さな試験体からそれぞれS, M, Lと記載する。試験体Sの高さ h を基準にM, Lの寸法比を表すと、それぞれ1.45, 1.96となる。試験体の形状と代表的な寸法を表2にまとめる。なお、いずれの試験体も実際の免震構造にエネルギー吸収部材として設置されている実大規模の部材である。

2.2. 荷装置

荷装置を図2に示す。試験体下部を反力治具に固定し、試験体上部を加力治具、平行移動装置、3台のロードセルを介してアクチュエータに接続する。荷方向は図1に示す面内方向 0° と面外方向 90° 、その中間である 45° とした。試験体と反力治具、加力治具の間には接合用の鋼板を介し、この鋼板の穴位置を変えることで試験体の荷方向を変化させる。接合用の鋼板は積層ゴムアイソレータのフランジを想定したものであり、Uダンパーは鋼板に設けたタップ穴を介して接合する。試験体S, M, Lに使用したボルトの呼び径はそれぞれM39, M56, M76であり、各々の締め付け力はトルクレンチで管理し、トルク値を490, 690, 1080[N・m]以上とした。また、加力治具AとBはPC鋼棒で圧着接合し、加力治具Bの位置と反力治具の高さを変えることで試験体の大きさに対応する。

2.3. 実験パラメータ

実験パラメータは、試験体の寸法、荷方向、荷速度、荷履歴とし、表3に示す計32体の試験体を用意した。試験体の寸法と荷方向は上述した3種類ずつのパラメータを用意した。荷速度は周期によって定め、静的荷の場合には周期100秒、動的荷の場合には周期4秒とした。動的荷ではさらに荷速度の影響を詳細に考察するため、3秒、5秒の周期の実験も併せて行った。荷履歴は一方向、定変位振幅、ランダム変位振幅の3シリーズに大別される。変位振幅は4章で述べるように既往の実験^{3), 4)}で行われていない範囲を主な対象とした。また、ランダム変位振幅とは、正負で異なる変位振幅を与えた荷プログラムを意味する。それぞれの目標変位振幅に対して静的荷の場合には三角波によって、動的荷の場合にはサイン波によって荷した。また、本実験で用いた試験機では、1.0 cm/sec以上の動的荷からアキュムレータに蓄積可能な油量の限界によってアクチュエータの走行距離が制限される。したがって、動的な繰り返し荷を行う際には数回の繰り返し荷毎にインターバルを設ける必要がある。アキュムレータの蓄圧に要する時間は1回の走行距離に比例するため、本実験では1回の荷でアクチュエータが走行する距離を2000mm前後と定め、約10分間のインターバルを設けて動的繰り返し荷を行った。

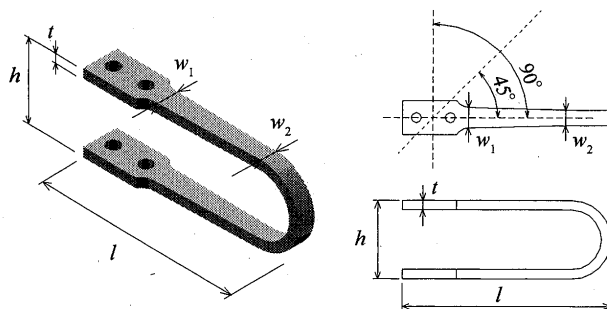


図1 試験体形状

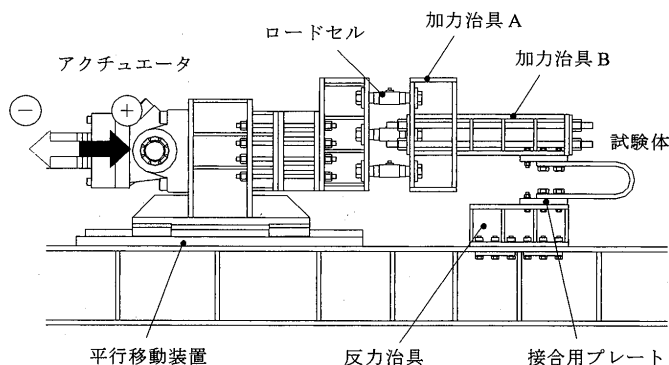


図2 荷装置

表1 素材試験結果

		降伏点 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	降伏比 [%]	破断伸び [%]
S	$t = 28$	378	544	69	37
M	$t = 40$	382	540	71	37
L	$t = 55$	380	545	70	38

※ t はJIS-4号試験片に加工する前の板厚

表2 試験体の代表的な寸法

	寸法 [mm]				
	t	w_1	w_2	l	h
S	28	60	45	416	232
M	40	87	65	602	335
L	55	118	88	817	454

表3 試験体一覧

	寸法	振幅 [mm]	荷周期 [sec]	最大速度 [cm/sec]	荷方向			
					0°	45°	90°	
一方向	S	+500	—	—	○	○	○	
		一定振幅	±30	4	4.7	○	○	○
				4	15.7	○	○	○
	±50		4	0.6	○	○	○	
			100	0.6	○	○	○	
	±100		3	52.4	○	○	○	
			4	39.3	○	○	○	
	M	±250	5	31.4	○	○	○	
			100	1.6	○	○	○	
		±43	4	6.8	○	○	○	
	L	±72	4	11.3	○	○	○	
		±145	4	22.8	○	○	○	
ランダム	S	±196	4	30.8	○	○	○	
		+100, ±0	4	7.9	○	○	○	
		+100, -50	4	11.8	○	○	○	
		+100, -100	4	15.7	○	○	○	

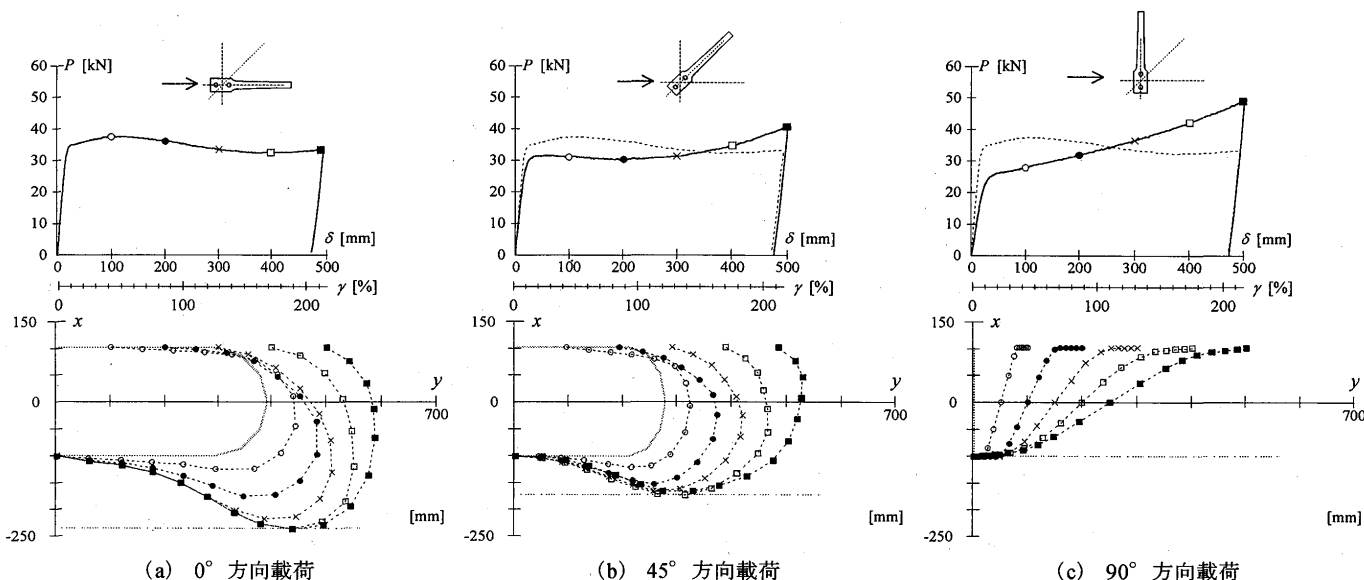


図3 試験体Sの一方方向荷重下の履歴挙動(荷重-変形($P-\delta$)関係)と変形状態

3. 一方方向荷重下での挙動

3.1. 履歴挙動と変形状態

まず、Uダンパーの基本的な挙動を把握するために、試験体Sを対象として 0° 、 45° 、 90° 方向の一方方向荷重実験を行った。実験より得られた荷重-変形($P-\delta$)関係と試験体の変形状態を図3に示す。荷重 P は3台のロードセルの和であり、変形 δ はアクチュエータのストロークとした。試験体の変形状態はあらかじめ試験体にマーカーを貼付しておき、荷重中に撮影したデジタルビデオのデータからマーカーの軌跡を抽出した。いずれの試験体も急激な耐力低下や亀裂の発生は見られず、アクチュエータの最大ストロークである500mmまで変形した。 0° 方向荷重では100mm近傍で最大耐力(38 kN)に達し、最大耐力以後は緩やかに耐力が低下するものの、400mm以降で再び耐力が上昇している。 45° 方向荷重では降伏耐力をほぼ一定に保持して変形しており、300mm以降から耐力の上昇が見られる。 90° 方向荷重では降伏後の二次剛性が高く、この剛性を保持したまま最大変形に達している。

次いで試験体の変形状態を考察する。 0° と 45° 方向では試験体が材軸方向に曲げられながら変形するため、試験体先端部での沈み込みが見られた。この試験体の沈み込みは最大変形に到達する前に頭打ちとなっている。材軸方向に荷重している 0° 方向は 45° 方向よりも沈み込みが頭打ちとなるのが遅く、最終的な沈み込み量が多い。 0° 、 45° 方向荷重ともに試験体の沈み込みが頭打ちとなった時点と、荷重-変形関係の降伏耐力以降で再び耐力が上昇する時点はほぼ一致している。これは沈み込みが頭打ちとなった後は曲げ変形よりも材軸方向の伸びによって変形しているため、軸剛性の影響が荷重-変形関係に現れているものと考えられる。一方、 90° 方向荷重では試験体の沈み込みは見られず、荷重初期から接合部近傍がねじられながら材軸方向に伸びて変形している。 90° 方向荷重では降伏後の二次剛性が他の荷重方向に比べて高くなっていたが、これは上述した変形状態の違いによるものと考えられる。

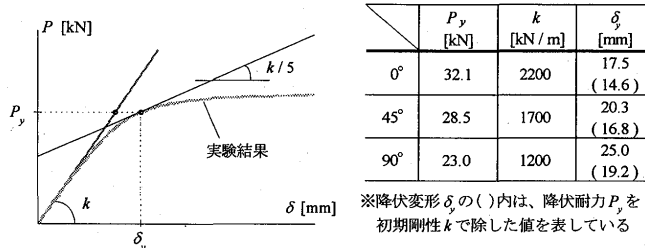


図4 試験体Sの降伏耐力 P_y 、初期剛性 k 、降伏変形 δ_y

各荷重方向の荷重-変形関係より得られる降伏耐力 P_y 、初期剛性 k 、降伏変形 δ_y を、それぞれの算出方法と併せて図4に示す。初期剛性 k は荷重-変形関係の初期勾配であり、降伏耐力 P_y は荷重-変形関係の接線剛性が初期剛性の1/5にまで低下したときの荷重、降伏変形 δ_y は降伏耐力到達時の変形とした。一方方向荷重実験より得られた降伏耐力と初期剛性は、 0° 方向荷重時がもっとも大きく、 45° 、 90° と荷重角度が大きくなると降伏耐力と初期剛性は小さくなっている。また、 45° 方向荷重時の降伏耐力と初期剛性は、 0° 、 90° 方向のほぼ中間値に相当する。一方、降伏変形を見ると、荷重角度が大きくなるほど比例限が小さく、緩やかに降伏耐力に達しており、降伏変形 δ_y は大きくなっている。表中の()内には降伏耐力 P_y を初期剛性 k で除した変形量を参考値として示した。荷重角度が大きくなるほど降伏変形 δ_y とこの参考値との差が大きくなっていることから、荷重角度が大きくなるほど比例限が小さくなり、緩やかに降伏耐力に達していることが分かる。

3.2. ひずみ分布

次いで試験体のひずみ履歴を考察する。ひずみゲージは図5に示すようにボルト接合部側のA断面から先端部のI断面までの上下17断面を対象とし、断面の内側と外側に1枚ずつ、計34ヶ所に貼付した。 0° 、 45° 方向荷重を行った試験体のひずみ履歴を図6、図7に示す。 90° 方向荷重は繰り返し荷重時にいずれの振幅においても高力ボルト接合部近傍で破断が生じたため、ここではひずみ履歴の考察を省略した。図中には次章で示す繰り

返し載荷実験において亀裂が確認できた側のひずみ履歴を示した。すなわち、 0° 方向では内側、 45° 方向では外側である。

0° 方向載荷の試験体は、試験体上部では外側が引張、内側が圧縮、試験体下部では外側が圧縮、内側が引張となって変形している。弾性範囲での曲率分布を図8に示す。U字形の先端部は曲率が小さいが、平坦部のA～F断面の曲率は等しい。降伏時も平坦部のひずみはほぼ同時に使用鋼材の降伏ひずみ ϵ_y (0.18%)に達している。また、その時の変形量は15～20mm程度であり、荷重-変形関係から求めた降伏変形 δ_y とよい対応を示している。降伏ひずみ到達後も各断面のひずみはほぼ均等に増大していくが、降伏耐力 P_y に達すると、ひずみが1～4%に急激に増え、すぐに0.5%程度まで除荷されるといった現象が各断面で現れている。この現象はU字形付け根部のF断面から始まり、変形の進行とともにボルト接合部に近いA断面へと移行している。したがって、 0° 方向載荷では平坦部の各断面がほぼ均等に降伏するが、それ以後はひずみ集中の生じる断面が存在し、変位振幅によってひずみ集中の生じる断面が変化していると考えられる。

45° 方向載荷の試験体も 0° 方向載荷と同様に、試験体上部では外側が引張、内側が圧縮、試験体下部では外側が圧縮、内側が引張となって変形している。しかし、図8に示すように試験体上部ではU字形の付け根部分の曲率が、試験体下部ではボルト接合部に近い断面の曲率がもっとも大きい。これは降伏ひずみに達する際も同様であり、試験体上部ではU字形の付け根部分に近いF断面が降伏ひずみに達し、順次ボルト接合部に近いA断面に向かって降伏域が広がっている。同様に試験体下部では

ボルト接合部に近いA断面がまず降伏ひずみに達し、付け根部分に近いF断面に向かって降伏域が広がっている。また、平坦部分であるA～F断面のすべてが降伏ひずみに達する変形は20～40mm程度であり、荷重-変形関係から求めた降伏変形に比べると若干大きい。このことは荷重-変形関係において比例限が小さく、緩やかに降伏耐力に達していたことと一致する。降伏耐力に達すると試験体の上部と下部でU字形付け根部分のF断面のひずみが急激に増え、その後は付け根周辺部のE断面やG断面、あるいは少し離れたD断面のひずみが大きくなる。さらに

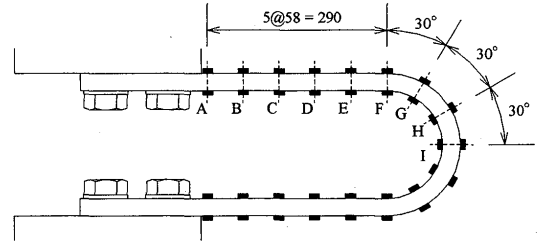
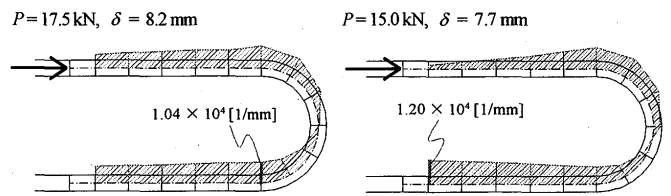
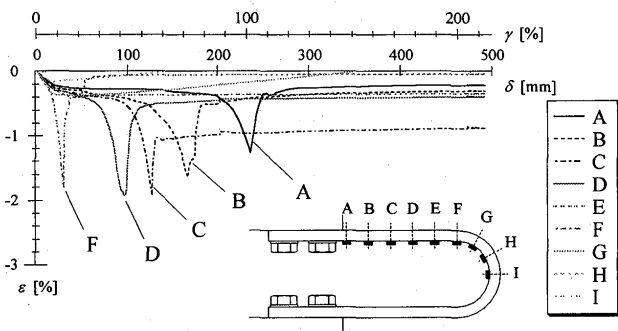


図5 ひずみゲージの貼付位置

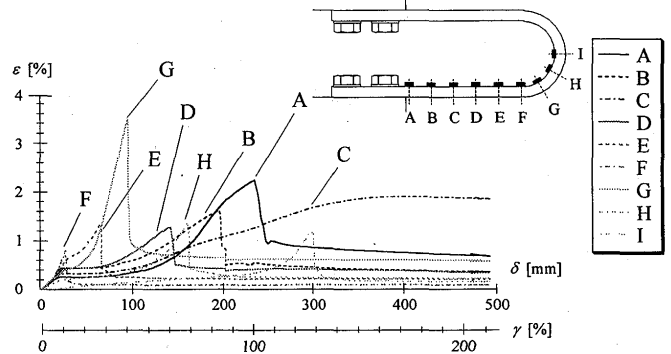


(a) 0° 方向載荷 (b) 45° 方向載荷

図8 Uダンパーの曲率分布(引張となる側に表示)

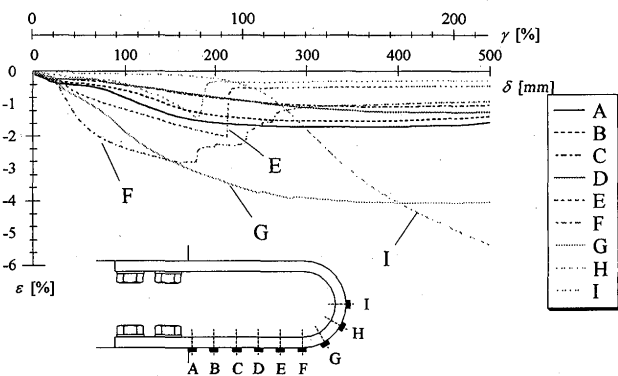


(a) 試験体上部の内側

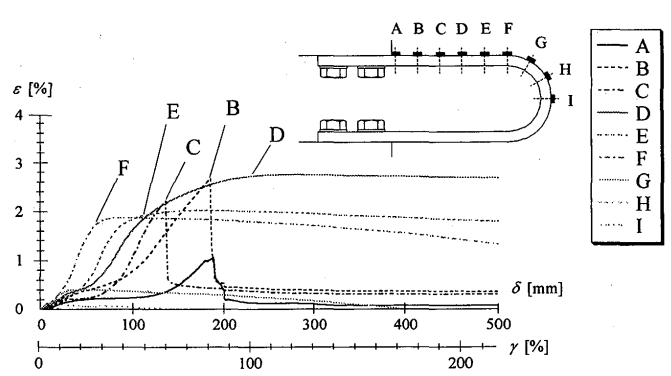


(b) 試験体下部の内側

図6 一方向載荷下のひずみ履歴(載荷方向 0°)



(a) 試験体下部の外側



(b) 試験体上部の外側

図7 一方向載荷下のひずみ履歴(載荷方向 45°)

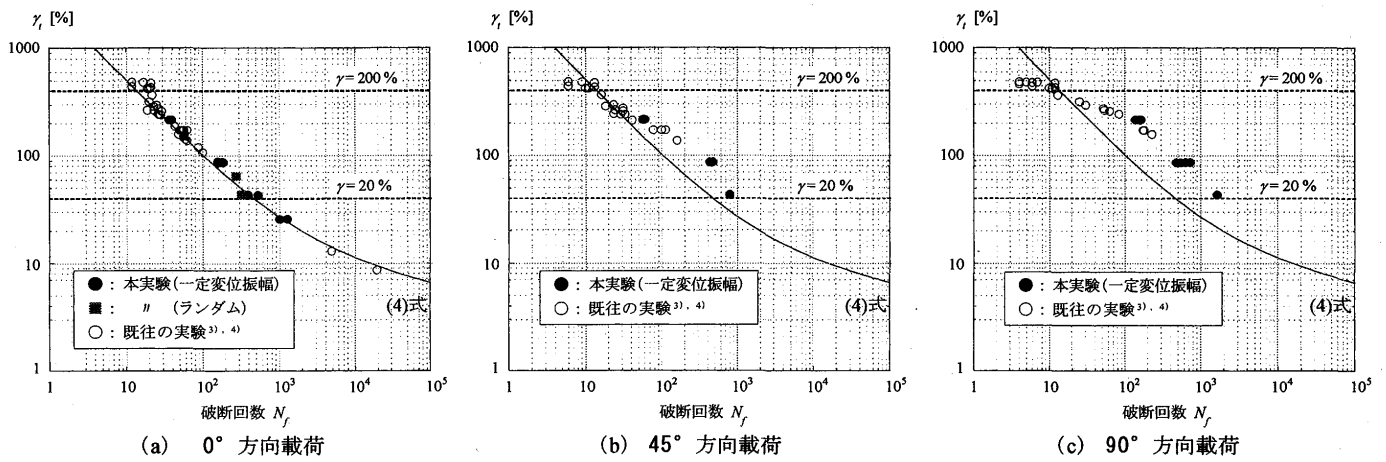


図 10 Uダンパーの疲労性能(全変位振幅 δ_i の平均せん断変形角 γ_i と破断回数 N_f の関係)

変形が進んで250mmを越えるとU字形先端部であるI断面のひずみが急激に増えている。しかし、 0° 方向载荷のようにひずみ増大後すぐに除荷される断面は少なく、増大したひずみをそのまま保持している断面が多い。これらのひずみ履歴は、次章の繰り返し载荷実験における振幅に対する破断位置の変化を考察する際にも参照していただきたい。

4. Uダンパーの疲労性能

4.1. 疲労性能の評価対象とした実験データとその整理方法

ここではUダンパーの繰り返し荷重下での疲労性能を評価する。本実験ではほぼ相似形で大きさの異なる3種類の試験体を用いた。これらの試験体の疲労性能を统一的に評価するため、Uダンパーの変形 δ を高さ h で除した平均せん断変形角 γ (図9)によって実験データを整理する。ここで定義した平均せん断変形角 γ は積層ゴムアイソレータ全体のせん断変形角と一致し、免震層の層間変形角とほぼ対応する値である。

$$\gamma = \frac{\delta}{h} \dots (1)$$

ここで、 δ : 試験体の変形, h : 試験体の高さ

本実験で得られた全変位振幅 δ_i に対する平均せん断変形角 γ_i と破断回数 N_f の関係を図10に黒塗りの●プロットとして示す。また、既往の実験データ^{3), 4)}などについても同様に整理し、図10に白抜ききの○プロットとして示す。全変位振幅 δ_i は図11(a)に示すように正負の最大変位の差分とし、破断回数 N_f はUダンパーが完全に破断した繰り返し回数とした。既往の実験データの詳細は付録の表A-1に示す。これらの実験では試験体S, M, Lに加え、SSS, SS, SM, SLと表記した4種類の試験体を含んでいるが、いずれの試験体もほぼ相似形であるため、平均せん断変形角 γ によって整理した。幾つかの実験データは未公表のものであるが、载荷装置は文献³⁾と同様のものが多く、試験条件も表中から十分に読み取れる情報を示した。本実験と既往の実験を比較すると、 0° 方向载荷では既往の実験に小振幅と大振幅の载荷が多く、本実験ではこれらの間にある変位振幅が対象である。また、 45° , 90° 方向载荷では、既往の実験に大振幅の载荷が多く、本実験では小振幅の実験が対象である。

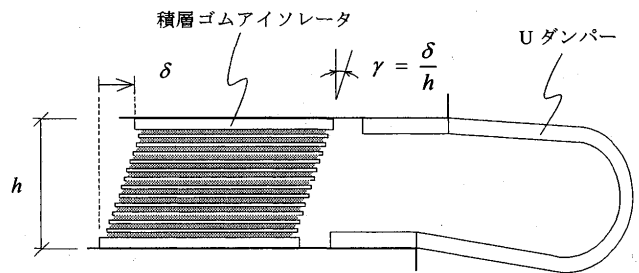
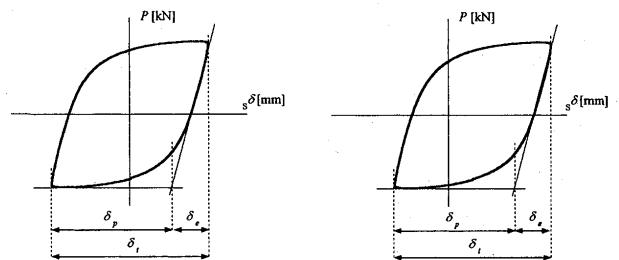


図 9 平均せん断変形角 γ の定義



(a) 一定変位振幅の場合 (b) 正負で変位振幅が異なる場合

図 11 変位振幅範囲の定義

4.2. 疲労性能の評価

Uダンパーの疲労性能を評価する疲労曲線として、Manson-Coffin式⁵⁾を適用する。Manson-Coffin式のひずみ振幅を平均せん断変形角 γ の振幅に置き換え、全変位振幅 δ_i 、弾性変位振幅 δ_e 、塑性変位振幅 δ_p 、それぞれに対する平均せん断変形角 γ_i , γ_e , γ_p の破断回数 N_f を回帰すると、以下の3式が得られる。なお、ここで回帰の対象とした実験データは、既往の実験結果^{3), 4)}を含め、 0° 方向载荷を行った試験体Sのみである。

$$\gamma_e = 35 N_f^{-0.15} \dots (2)$$

$$\gamma_p = 3620 N_f^{-0.80} \dots (3)$$

$$\gamma_i = 35 N_f^{-0.15} + 3620 N_f^{-0.80} \dots (4)$$

疲労曲線((4)式)を図10中に実線で示す。疲労曲線と 0° 方向载荷のプロットを比較すると、疲労曲線は既往の実験結果^{3), 4)}を含めて良い対応を示している。前述したようにこれらのプロットには大きさの異なる試験体が含まれているが、試験体の全変

位振幅 δ_i を高さ h で除した平均せん断変形角 γ_i を用いることで、Uダンパーの疲労性能を統一的に評価できている。このことは、Uダンパーの 0° 方向載荷時における疲労性能(破断回数 N_f) が試験体の大きさに依らないことを表している。

次いで 45° 、 90° 方向載荷時における破断回数について見ると、 0° 方向と同様に全変位振幅 δ_i を試験体の高さ h で除した平均せん断変形角 γ_i を用いることによって、試験体の大きさに関係なく、Uダンパーの疲労性能の傾向が見て取れる。載荷方向の違いによる疲労性能を比較すると、全変位振幅の平均せん断変形角 γ_i が $40 \sim 400\%$ の範囲においては、ある変位振幅を受けた場合に 0° 方向載荷の破断回数が他の載荷方向より少ない。 45° や 90° 方向ではUダンパーが材軸方向に伸ばされながら変形するため、ひずみの集中は小さい。これに対して 0° 方向では降伏時は各断面のひずみがほぼ等しいが、上記の変位振幅(片変位振幅の平均せん断変形角 γ で $20 \sim 200\%$) の範囲では図6のひずみ履歴で示したようにひずみ集中の生じる部位が存在する。このことが上記の変位振幅において 0° 方向の破断が他の載荷方向に比べて支配的となっている原因であると考えられる。しかし、全変位振幅の平均せん断変形角 γ_i が 200% より大きくなると 45° と 90° 方向の破断回数が 0° 方向の疲労曲線に近づく傾向にあり、 γ_i が 400% 以上では 0° 方向よりも 45° や 90° 方向の破断回数が少なくなっている。一方向載荷を受ける 0° 方向の試験体を見ると、荷重-変形関係において片変位振幅の平均せん断変形角 γ が 200% ($\delta = 464\text{mm}$) に達する時点は、材軸方向の伸びの影響によって耐力が再び上昇し始める時点とほぼ一致している(図3)。したがって、平均せん断変形角 γ が 200% を越える変形領域では 0° 方向の曲げ変形によるひずみ集中は緩和され、 45° や 90° 方向の高力ボルト接合部近傍あるいはU字形先端部でのねじりによるひずみ集中の方が支配的になっていると考えられる。

一方、全変位振幅の平均せん断変形角 γ_i が 40% 程度の変位振幅は、わずか1体の実験結果であるが、 45° 、 90° 方向の破断回数が 0° 方向の疲労曲線に近づく傾向にある。さらに変位振幅が小さくなると 45° 、 90° 方向の破断が支配的になることも考えられ、全変位振幅の平均せん断変形角 γ_i が 40% より小さな変位振幅については載荷実験による確認が必要である。また、地震動などの動的外乱を考えると異なる変位振幅の組み合わせ、すなわちランダム変位振幅下における疲労性能についても検討が必要である。本実験ではわずか3体ではあるが、 0° 方向載荷で片変位振幅の平均せん断変形角 γ を 0 、 22 、 44% (片変位振幅 δ で 0 、 50 、 100mm) に限って、これらの振幅を組み合わせた正負で変位振幅の異なる繰返し載荷実験を行った。これらの試験体も図11(b)に示すように全変位振幅の平均せん断変形角 γ_i によって破断回数を整理し、実験結果を図10に■プロットで示した。いずれの試験体も疲労曲線と良い対応を示しており、今回の変位振幅の範囲では正負の変位振幅が異なる影響は小さく、全変位振幅を用いることで疲労性能を評価できている。しかしながら、Uダンパーはひずみの集中する断面が振幅によって変化するため、ランダムな変位振幅を組み合わせた場合の疲労性能については線形累積損傷則(Miner則)⁶⁾などを容易に適用できないと

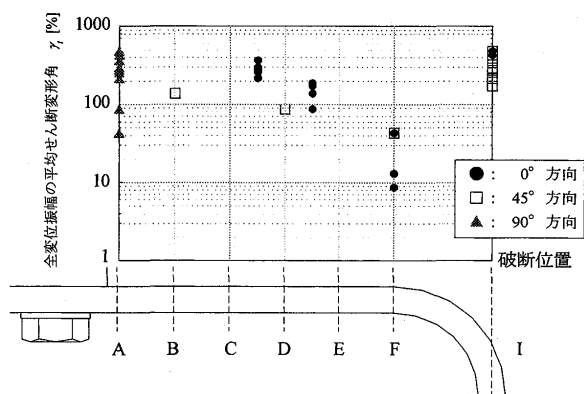


図12 全変位振幅の平均せん断変形角 γ_i と破断位置の関係

考えられる。ランダムな変位振幅に対する疲労性能の評価についても今後の検討課題である。

4.3. 変位振幅と破断位置の関係

全変位振幅の平均せん断変形角 γ_i と破断位置の関係を図12に示す。本実験結果に加え、破断位置について記載のある既往の実験データ^{3), 4)}も参照した。まず、 0° 方向載荷の破断位置を見ると、全変位振幅の平均せん断変形角 γ_i が $8 \sim 45\%$ の範囲ではU字形付け根部のF断面が破断し、それ以降では $85 \sim 170\%$ の範囲でDE間、 $220 \sim 390\%$ の範囲でCD間が破断している。繰返し載荷によって各断面ではひずみ硬化が生じるため、一方向載荷時のひずみ履歴を繰返し載荷時にそのまま適用することはできない。しかし、一定変位振幅の繰返し振幅載荷下における破断位置の振幅に対する変化と、図7に示した一方向載荷下におけるひずみ集中の生じる断面の振幅に対する変化を比較してみると、両者の傾向はほぼ一致している。したがって、定変位振幅の繰返し載荷下で危険断面となる位置は、一方向載荷下においてひずみ集中の生じる断面と、その断面が経験する繰返し回数によってほぼ説明できると考えられる。

45° 方向載荷では全変位振幅の平均せん断変形角 γ_i が 43 、 86 、 129% と大きくなるにつれて、破断位置がF、D、B断面とU字形付け根部から高力ボルト接合部近傍へと移行している。変位振幅 172% 以上の試験体はいずれもU字形先端部のI断面が破断しているが、これは 45° 方向でUダンパーが材軸方向に伸ばされる際にはU字形先端部のねじりを伴うためである。 45° 方向載荷についても破断位置の振幅に対する変化と、図8に示した一方向載荷下におけるひずみ集中の生じる断面の振幅に対する変化を比較すると、両者の傾向はほぼ一致している。

90° 方向載荷については、いずれの試験体も高力ボルト接合部に近いA断面が破断している。 90° 方向載荷では高力ボルト接合部近傍がねじられながら材軸方向に伸びて変形しているため、高力ボルト接合部近傍のねじりが最も大きなひずみ集中を生じさせている。

5. 載荷速度の影響

5.1. 力学挙動に及ぼす影響

載荷速度が力学挙動に及ぼす影響を考察する。まず、静的載

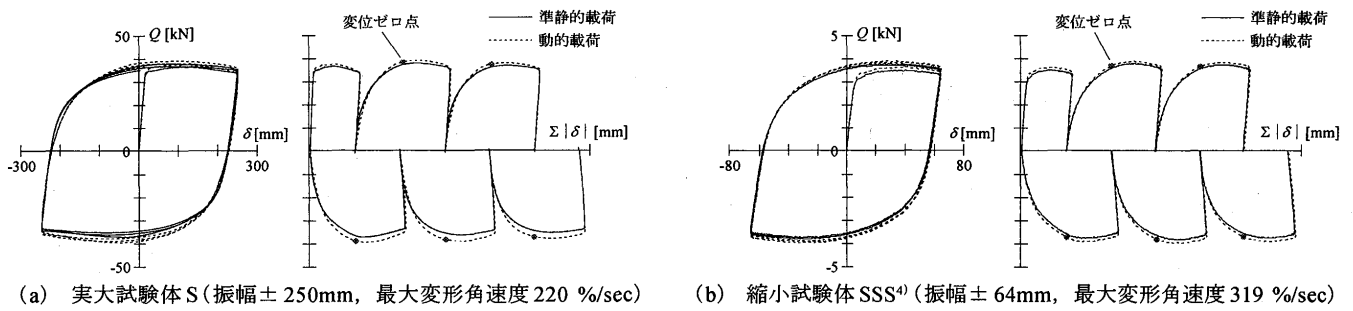


図 13 載荷速度が履歴挙動に及ぼす影響(0° 方向載荷下の荷重-変形(P-δ)関係)

荷と動的載荷を行った試験体の荷重-変形関係の比較を図 13 に例示する。図(a)は本実験の実大試験体 S, (b)は載荷速度の影響を検討した既往の研究⁴⁾の縮小試験体 SSS であり, 初期載荷から 3 サイクル目までの履歴曲線を示した。最大速度を試験体の高さ h で除した最大せん断変形角速度で表すと, それぞれ 220 %/sec, 319 %/sec となる。静的載荷と動的載荷を行った試験体の履歴曲線を比較すると, 最大速度に達する各サイクルの変位ゼロ点近傍から差が表れており, 動的載荷による耐力の上昇が見られる。しかし, 各サイクルでの耐力上昇は最大でも 10% 以下と小さい。また, 初期剛性 k や降伏耐力 P_y についても, 既往の実験⁴⁾と同様に, 動的載荷による上昇は 10% 以下であった。したがって, 動的載荷による載荷速度が剛性や耐力などの力学挙動に与える影響は小さいと言える。

5.2. 疲労性能(破断回数)に及ぼす影響

次いで載荷速度が U ダンパーの疲労性能に及ぼす影響を考察する。変位を試験体 S 相当に換算して求めた最大速度と破断回数 N_f の関係を図 14 に示す。図中の縦軸は動的載荷時の破断回数 N_d を静的載荷の破断回数 N_s で除した無次元量であり, 横軸には最大速度を試験体の高さ h で除した最大せん断変形角速度を示した。また, 本実験結果を黒塗りのプロットで, 既往の研究⁴⁾における縮小試験体の結果を白抜きのプロットで区別して示した。最大速度を最大せん断変形角速度で表すと, 本実験では 65 ~ 220 %/sec, 既往の実験⁴⁾では 190 ~ 490 %/sec となる。最大せん断変形角速度が 200%/sec 以下の動的載荷では静的載荷より破断回数が多く, 200%/sec より速くなると動的載荷の破断回数は静的載荷より少なくなっている。しかし, 載荷速度が速く, 破断回数が少なくなっているプロットは縮小試験体を用いた既往の実験結果⁴⁾であり, 本実験のように数回の載荷毎にインターバルを設けず, 試験体が破断に至るまで連続的に繰り返し載荷を行った実験結果である。本実験ではこのような連続載荷を模擬するために U 字形部分に断熱材を巻き付けた動的載荷実験を追加した。その時の破断回数を図 13 中に●プロットで示す。断熱材を巻き付けた場合, 不連続な動的載荷でも静的載荷より破断回数が約 10% 程度少なくなる結果が得られた。したがって, 破断に至るまで連続的に載荷を行ったことが, 動的載荷によって破断回数が少なくなった原因の一つであると考えられる。ダンパーが地震時に被る累積変形量は, 最大変位振幅においては数回程度の繰り返し回数であると考えられ, 不連続な動的載荷下での破断回数によって評価された疲労性能は十分に有用なものである。ここで

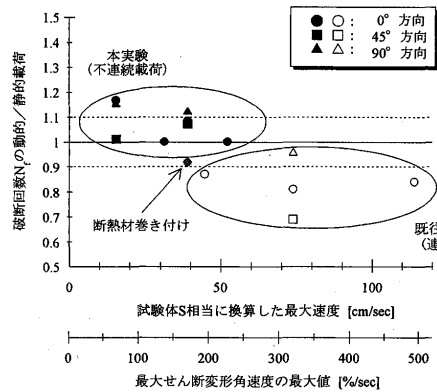


図 14 試験体 S 換算の最大速度と破断回数 N_f の関係

本実験における静的載荷と不連続な動的載荷を比較すると, 動的載荷によって疲労性能が著しく低下することはなかったことが分かる。したがって, 特に本実験で行った最大せん断変形角速度が 200%/sec 以下の範囲では, U ダンパーの疲労性能に及ぼす載荷速度の影響は小さいと言える。

6. 結

本研究では免震構造に用いられる U 字形鋼材ダンパーを対象とし, 部材単体としての力学挙動, 疲労性能, 載荷速度の影響を把握するため, 実大試験体を用いた動的繰り返し載荷実験を行った。本実験より得られた結果を以下にまとめる。

- 1) U ダンパーの変形 δ を高さ h で除した平均せん断変形角 γ を用いることで, 試験体の大きさに依らず, 定変位振幅下における疲労性能を統一的に評価できる。なお, この平均せん断変形角は積層ゴムアイソレータ全体のせん断変形角と一致し, 免震層の層間変形角とほぼ対応する値である。
- 2) 片変位振幅の平均せん断変形角 γ が 200% 以下の定変位振幅の繰り返し載荷下では, 同じ変位を受けた場合の破断は 0° 方向が支配的となる。また, その疲労性能は Manson-Coffin 式⁵⁾を適用した本文中の(4)式で表せる。
- 3) 片変位振幅の平均せん断変形角 γ が 20% 程度の小さな定変位振幅下では, 45° や 90° 方向の破断回数が 0° 方向の疲労曲線に近づく傾向にある。平均せん断変形角 γ が 20% 以下の塑性変形が小さな範囲における 45° や 90° 方向の実験は行われておらず, 今後の検討課題として挙げられる。
- 4) 最大速度を試験体の高さ h で除した最大せん断変形角速度が

65 ~ 500 %/sec となる動的载荷では、静的载荷時より耐力が上昇する。しかし、各サイクルでの耐力上昇は最大でも 10% 以下であり、また、初期剛性や降伏耐力の上昇についても 10% 以下であったことから、载荷速度がこれらの力学挙動に及ぼす影響は小さいと言える。

- 5) 不連続な動的载荷によって U ダンパーの疲労性能が静的载荷時より著しく低下することはなく、特に最大せん断変形角速度が 200%/sec 以下の範囲では、静的载荷時の破断回数によって U ダンパーの疲労性能を評価しても差し支えない。

謝辞

本実験を行う際には東京工業大学大学院生 植草雅浩君の協力を得ました。新日鉄エンジニアリングの渡辺 厚氏、小西宏明氏、西本晃治氏、新日本製鐵の鈴木一弁氏には実験データの一部を提供していただきました。また、竹中工務店の山本雅史博士には 2007 年度 建築学会大会学術講演の期間中に貴重なご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針，2001.9
- 2) 加藤巨邦，大塚 将，杉沢 充，早川邦夫，鈴木一弁，茂木正史：免震鋼棒ダンパーの実験的研究(その1 大変形対応型ダンパーの加力実験)，日本建築学会大会学術講演(近畿)，B-2 分冊，pp.721-722，1996.9
- 3) 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 単体による加力実験，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
- 4) 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4 2 方向载荷試験，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
- 5) S.S.Manson：Therman Stress and Low Cycle Fatigue, McGraw-Hill, 1966 Engineering, ASME, pp.565-571, 1961.12
- 6) M.A.Miner：Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied Mech, vol.2, pp..A159-A164, 1945.9

表 A-1 既往の実験データ

寸法	振幅 [mm]	载荷周期 [sec]	最大速度 [cm/sec]	载荷方向	破断回数	参考文献	備考							
SSS (h = 74.2)	±64			0°	57.4	0.7	62	試験温度 20°C						
					2.8	14.4	54							
					1.7	23.7	50							
					1.1	36.6	52							
					57.4	0.7	111							
					1.7	23.7	77							
				45°	57.4	0.7	181							
					1.7	23.7	174							
					90°	57.4	0.7		51	試験温度 40°C 試験温度 -10°C 試験温度 -30°C 試験温度 -50°C				
						1.7	23.7		52					
						1.7	23.7		56					
						1.7	23.7		56					
1.7	23.7	56												
1.7	23.7	56												
SS (h = 150)	±103 ±206 ±274	-	1.0	0°	62	文献4)								
					45°			158						
					0°			26						
					45°			31						
					90°			51						
					0°			22						
					45°			16						
					90°			13						
					S (h = 232)			±10 ±15 ±200 ±300 ±550 ±500	-	1.0	0°	19114	文献3)	
												4763		
												55		
												45°		
0°	29													
45°	31													
90°	30													
0°	21													
45°	13													
90°	7													
0°	21													
45°	13													
90°	12													
SM (h = 284)	±200 ±300 ±600	-	1.0	0°	59	未発表	試験温度 32°C							
					45°			41						
					90°			91						
					0°			19						
					45°			10						
					90°			11						
M (h = 335)	±200 ±400 ±800	-	1.0	0°	88	未発表								
					28									
					45°			29						
					90°			6						
					0°			43						
					0°			25						
ML (h = 374)	±350 ±550 ±900 ±200 ±450 ±900	-	1.0	0°	23	文献4)								
					45°			23						
					90°			30						
					0°			17						
					45°			9						
					90°			7						
				L (h = 454)	±200 ±550 ±600 ±650 ±1,000 ±1,050 ±1,100			-	1.0	0°	100	未発表		
											27			
											45°			33
											90°			5
											0°			156
											0°			26
45°	23													
90°	83													
0°	19													
0°	23													
45°	24													
90°	53													
0°	23													
45°	18													
0°	12													
45°	6													
90°	6													
0°	4													
90°	12													
45°	6													
90°	4													

※図 14 中の最大速度は、表中の速度を試験体 S 相当に換算した値である

(2007年 9 月 10 日原稿受理, 2007年 10 月 30 日採用決定)