

水平2方向変形を受けるせん断パネルダンパーの力学挙動

東京工業大学 山本 優子

1. はじめに

近年,地震入力エネルギーを制振部材に吸収させることにより,主架構(柱,梁)の損傷を抑制する制振構造が広く普及している.制振部材は,基本的には面内挙動の把握が重要であり,これまでに数多くの研究が行われている¹⁾など.しかし,実際の建物は3次的に挙動するため,面外方向や水平2方向の挙動に関する検討も要求されるようになってきている^{2,3)}など.本研究では,間柱型のせん断パネルダンパーを対象とした水平2方向の繰り返し載荷実験を行い,面外方向の挙動だけでなく,水平2方向の挙動を検討する.

2. 実験計画

2.1. 実験計画

セットアップを図1に示す.実験装置は反力フレーム,ハット治具,十字梁,載荷台からなる.載荷台は下部をリニアスライダにより支持し,水平方向に直交する2台の水平ジャッキを取り付けている.試験体は,上部を十字梁に,下部を載荷台に固定し,水平ジャッキにより水平2方向の変形を与える.実験中は,試験体の高さを一定に保つために鉛直ジャッキの変位を一定に保持し,試験体に逆対称曲げを作用させる.

2.2 試験体

試験体の概要を図2に示す.せん断パネルダンパーはパネルウェブとフランジからなる断面を指す.パネルウェブは板厚6mmの低降伏点鋼を用い,表と裏で直交するように縦あるいは横方向の座屈補剛材を配して一辺の幅厚比が36の正方形のサブパネルを構成する.使用鋼材の材料試験結果を表1に示す.

2.3 計測計画

計測項目は,荷重,変位,ひずみである.荷重は水平トラス梁に取り付けられた2分力計ロードセルにて計測する.計測の概要を図3に示す.変位はすべて載荷台からの相対変位として,せん断パネルダンパー4隅の表裏に取り付けたターゲットの8点の面内・面外方向の水平変位および鉛直変位を計測した.面内・面外方向のせん断変形角 γ は,水平変形をせん断パネルダンパー高さ(h_p :660mm)で除した変

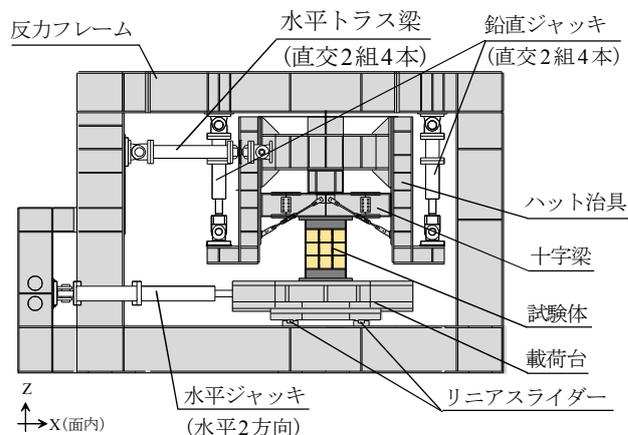


図1 セットアップ

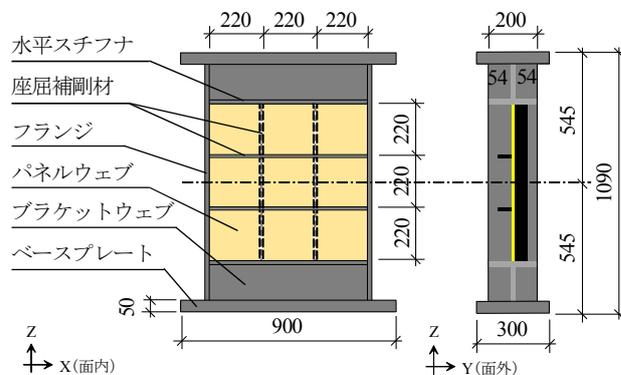


図2 試験体の概要

表1 使用鋼材の材料試験結果

部位	鋼種	t (mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	Y.R. (%)	ϵ_u (%)
パネルウェブ	LYP225	6	198	288	76	44
座屈補剛材	SS400	6	270	433	62	40
フランジ	SM490A	19	413	554	75	41
ブラケットウェブ 水平スチフナ	SM490A	16	362	508	71	42

t: 板厚, σ_y : 降伏点, σ_u : 引張強さ, Y.R.: 降伏比, ϵ_u : 破断伸び

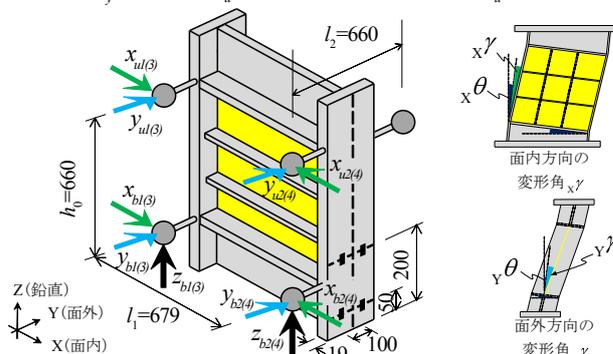


図3 計測の概要

形角から,せん断パネルダンパー下部の鉛直方向の変位計より得られる回転成分 θ を除去したものである.

2.4 載荷方法

変位軌跡を図4に示す.本実験のパラメータは面

内・面外方向の変位軌跡とし、面内方向のみ、面外方向のみ、水平2方向载荷の3種類を用意する。面内方向のみ、面外方向のみは、対応する水平ジャッキのストロークを制御することで所定の変形角を与える。一方の水平2方向载荷では、2台の水平ジャッキのストロークを同時に楕円状(12角形)を描くように制御することで、層間変形角 R を与える。水平2方向载荷としては、面内：面外=1:0.5, 1:1, 1:2の3パターンを用意する。

次いで、载荷プログラムの一例を図5に示す。実験は面内方向の層間変形角 xR を基準として行う。すなわち、 $xR=0.1, 0.3, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0\%$ の正負各2サイクルの漸増振幅载荷(フェーズI)と、 $xR=\pm 3.0\%$ の一定振幅载荷(フェーズII)を行う。

2.5. 試験体の降伏耐力

2.5.1 2軸曲げ連成

2軸曲げとせん断力を受ける試験体の降伏耐力を検討する。まず、2軸曲げによる全塑性曲げ耐力 M_p を考える。対象とする断面は、より大きな曲げモーメントが作用するブラケット断面とする。本論文では、面内方向の曲げモーメントを xM (Y軸まわり)、面外方向の曲げモーメントを yM (X軸まわり)とする。全塑性曲げ耐力 M_p については、2軸曲げ作用時における中立軸位置を図6(a)のように考える。図6(b)は図6(a)のときの断面の応力度分布である。X軸から中立軸までの距離をパラメータ α とし、それぞれ全塑性曲げ耐力は(1)~(6)式で与えられる。

[$0 < \alpha \leq t_w/2$ のとき]

$$xM_p = \frac{d_w^2 \cdot \alpha}{2} \cdot \sigma_{wy} + 2\alpha \cdot (d_w + t_f) \cdot t_f \cdot \sigma_{fy} \quad \dots(1)$$

$$yM_p = \frac{(t_w^2 - \alpha^2) \cdot d_w}{4} \cdot \sigma_{wy} + \frac{t_f \cdot (B^2 - 4\alpha^2)}{2} \cdot \sigma_{fy} \quad \dots(2)$$

[$t_w/2 < \alpha \leq B/2$ のとき]

$$xM_p = \frac{d_w^2 \cdot t_w}{4} \cdot \sigma_{wy} + 2\alpha \cdot (d_w + t_f) \cdot t_f \cdot \sigma_{fy} \quad \dots(3)$$

$$yM_p = \frac{t_f^3 (d_w + t_f)^2}{16\alpha^2} \cdot \sigma_{wy} + \frac{t_f \cdot (B^2 - 4\alpha^2)}{2} \cdot \sigma_{fy} \quad \dots(4)$$

[$B/2 < \alpha$ のとき]

$$xM_p = \frac{d_w^2 \cdot t_w}{4} \cdot \sigma_{wy} + (d_w + t_f) \cdot t_f \cdot B \cdot \sigma_{fy} \quad \dots(5)$$

$$yM_p = 0 \quad \dots(6)$$

これら全塑性曲げ耐力に対応するせん断力 xQ_p 、 yQ_p は、境界条件を両端固定として得る。

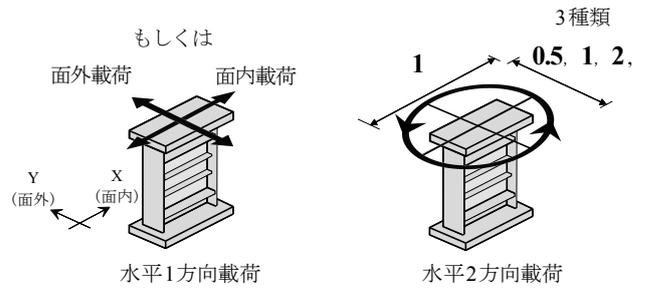


図4 変位軌跡

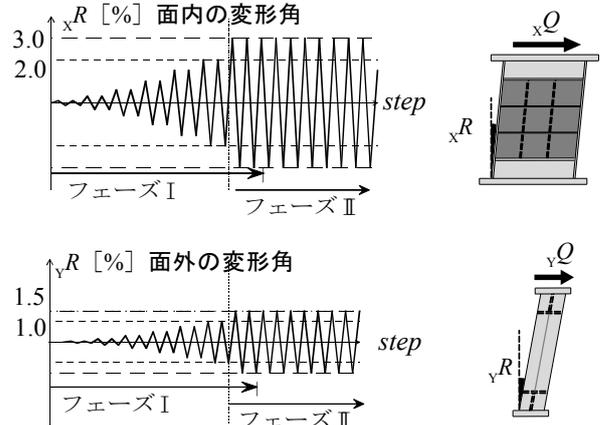


図5 载荷プログラム(面内：面外=1：0.5の例)

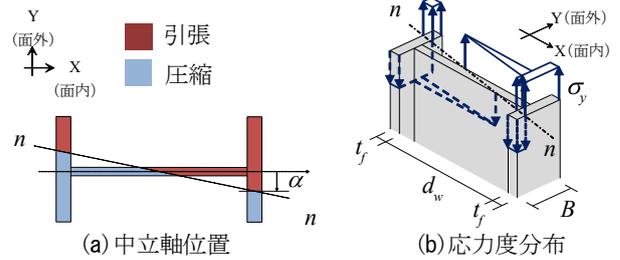


図6 全塑性曲げモーメントにおける応力度分布

2.5.2 降伏せん断耐力

せん断耐力については、面内方向ではパネルウェブのせん断降伏により、面外方向ではフランジのせん断降伏により決まるものとする。すなわち、面内方向の降伏せん断耐力 xQ_y は、パネルウェブの降伏せん断応力度にパネルウェブの断面積 A_{pw} を乗じたものである。同様に、面外方向の降伏せん断耐力 yQ_y は、フランジの降伏せん断応力度にフランジの断面積 A_f を乗じたものである。

3. 実験結果と考察

3.1 試験体の損傷状況と実験経過

まず、試験体の損傷状況と実験経過をみる。試験体の損傷状況を表2に、代表する損傷状況を図7に示す。面内方向载荷のみの損傷状況は、せん断変形がパネルウェブに集中し、中段のサブパネルにせん断座屈が確認された(図7左)。载荷は $\pm 3.0\%$ を50サイクルまで行い、最終的にはサブパネルに亀裂がみられた。一方、面外方向载荷のみでは試験体全体が曲

表2 試験体の損傷状況

パラメータ	$x\gamma=3.0\%$ サイクル 数[回]	弾性 剛性 [kN/%]	面内耐力[kN]				累積塑性 変形倍率	破壊状況
			$\sim x\gamma=2.0\%$		$x\gamma=3.0\%\sim$			
			max	min	max	min		
面内方向のみ	50	2282	595	-615	692	-712	1789	せん断変形, 中段のサブパネルのせん断座屈, 中段のサブパネルでの亀裂
面外方向のみ							82	ベースプレートとフランジ溶接部の亀裂
面内:面外 =1:0.5	50	2138	595	-597	705	-703	1773	せん断変形, 中段のサブパネルのせん断座屈, 中段のサブパネルでの亀裂
面内								
面内:面外 =1:1	50	2305	608	-598	682	-693	1691	せん断変形, 中段のサブパネルのせん断座屈 ベースプレートとフランジ溶接部の亀裂
面内:面外 =1:2	20	2128	621	-595	707	-677	853	せん断変形, 中段のサブパネル1つのせん断座屈せん断座屈 ベースプレートとフランジ溶接部の亀裂, フランジ全幅破断

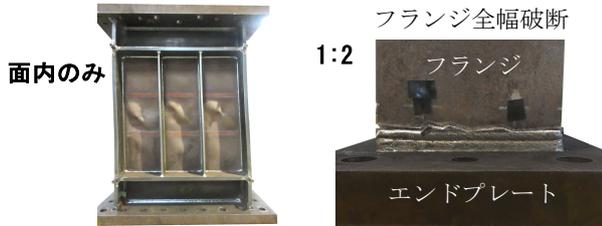


図7 代表的な試験体損傷状況

げ変形し, フランジとベースプレートの溶接部に亀裂が生じた. これに対し, 水平2方向载荷では, 全ての試験体でせん断パネルでのせん断変形, 中段のサブパネルにせん断座屈がみられた. また, 面内:面外=1:1, 1:2ではフランジとベースプレートの溶接部に亀裂が生じ, 面内:面外=1:2ではベースプレート付近でフランジの全幅にわたって破断が進展した(図7右).

3.2 せん断パネルダンパーの挙動

3.2.1 荷重変形角関係(フェーズI:漸増振幅载荷)

次いで, フェーズIにおけるせん断パネルダンパーの変形性能についてみる. 履歴性状について, 荷重-変形角関係を図8に示す. 縦軸はせん断力 Q , 横軸はせん断変形角 γ および層間変形角 R である. ここで, 面内方向の降伏せん断耐力を破線で示す. 面内方向のせん断パネルダンパーの挙動は, 変位軌跡によらず, 最大耐力と弾性剛性にほとんど差がない. また, 降伏耐力はパネルウェブのせん断降伏で決まっており, 安定した紡錘型の履歴性状を描いている. ブラケットを含む全体挙動と比べると, 膨らんだ履歴性状を示しており, ダンパーの寄与が大きいことが分かる.

一方, 面外方向のせん断パネルの挙動は, 面内:面外=1:0.5, 1:1では, ほぼ弾性挙動に留まっているのに対し, 面外のみ, 1:2では, 弾塑性挙動を示している. また, ブラケットを含む全体挙動と比べると, 曲げモーメント分布の反曲点に近い為, せん断パネルの寄与が小さいことが分かる.

3.2.2 ダンパーの変形割合(フェーズI:漸増振幅载荷)

ここで, 層間変形に対するせん断パネルダンパー

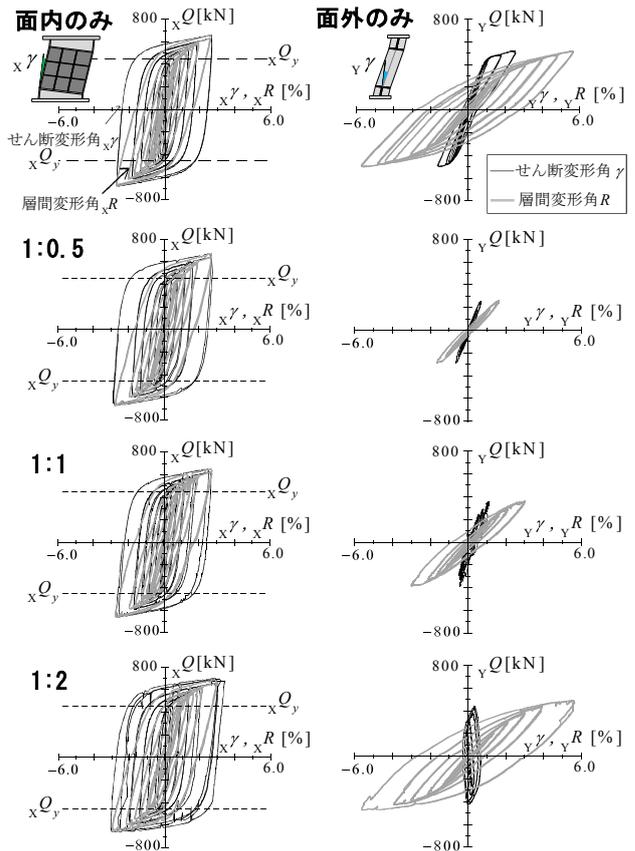


図8 荷重-変形角関係(フェーズI)

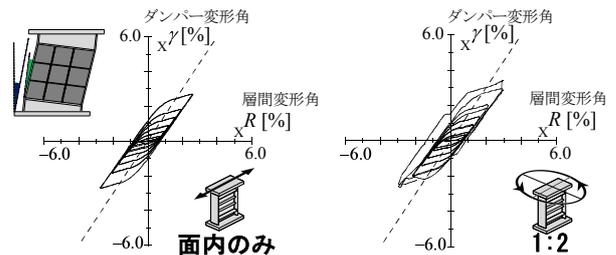


図9 面内方向のせん断変形角-層間変形角関係

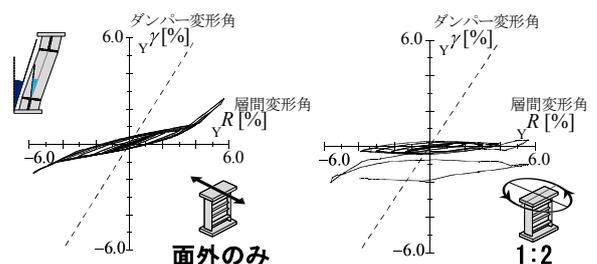


図10 面外方向のせん断変形角-層間変形角関係

の変形割合を検討する。まず、面内方向のダンパーの層間変形に対する変形割合を図9に示す。縦軸をダンパーの変形角 x_p 、横軸を層間変形角 x_R とし、ベースプレートを除いた試験体高さ h_i ($h_i:990\text{mm}$) をダンパー高さ h_b で除した比を破線で併せて示す。面内のみ、面内:面外=1:2 どちらも破線に対応した履歴を示しており、幾何学的条件に応じた変形をダンパーに集中させられていることが分かる。

同様に面外方向についてもダンパーの層間変形に対する変形割合を図10に示す。面外方向についてはダンパーの変形はほとんど生じておらず、フェーズ I の履歴性状については、変位軌跡の違いによる面内挙動への影響は見られなかった。

3.2.3 最大耐力の比較(フェーズII:一定振幅載荷)

一定振幅載荷時における繰り返し変形性能を図11に示す。縦軸は各サイクルの最大耐力 Q を全サイクルの最大耐力で除した値、横軸はサイクル数である。最大耐力は、面内:面外=1:0.5, 1:1 では、いずれの方向も50サイクルまで最大耐力の9割以上を維持している。一方、1:2ではフランジの片側において溶接部に亀裂進展が生じたため(図7右)、10サイクル目から急激に面外方向耐力が低下した。しかしながら、面内方向の最大耐力は9割以上を維持していることが分かる。

3.3 面内・面外の相互作用

ここで、フランジの断面減少が耐力に及ぼす影響を検討する。一定振幅載荷時における面内:面外=1:2の実験結果を降伏曲面と併せて図12に示す。縦軸と横軸はそれぞれ面外・面内方向のせん断力 yQ と xQ を表す。降伏曲面はパネルウェブの降伏せん断耐力と、(1)~(6)式のブラケット断面の2軸の全塑性曲げ耐力である。2軸曲げについては、フランジの幅を1.0, 0.8, 0.5, 0.2, 0.0倍と低減した曲線もそれぞれ示している。実験結果をみると、亀裂進展に伴う面外方向耐力の低下は、フランジの断面積の減少を考慮した2軸の全塑性曲げ耐力とよく対応している。一方、面内方向についてはいずれの場合もせん断降伏により耐力が決定しており、フランジの亀裂進展に伴う断面積減少の影響を受けていない。したがって、このようにブラケットウェブで十分に面内方向の耐力が確保できれば、ブラケットのフランジがほぼ全幅に渡って破断するような損傷が生じて、面内・面外

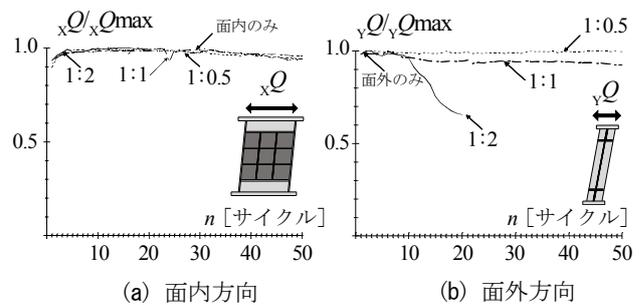


図11 各サイクル最大・最小耐力の比較(フェーズII)

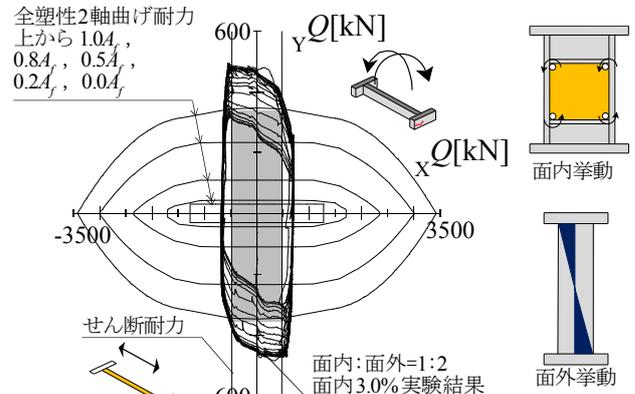


図12 実験結果とフランジ幅を低減した降伏曲面の相互作用は小さいと言える。

4. まとめ

水平2方向変形を受ける間柱型のせん断パネルダンパーの面外方向および水平2方向の挙動を把握するために実験を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- [1] せん断パネルダンパーの耐力は、面内方向についてはパネルウェブのせん断降伏によって決まり、面外方向についてはブラケットの曲げ降伏によって決まった。
- [2] 水平2方向載荷では、ブラケット部のフランジが全幅にわたって破断するような面内:面外=1:2の厳しい条件下でも、面内方向の耐力、剛性は、1方向載荷と同等の性状を示し、安定した復元力特性を得られた。
- [3] ブラケットウェブのみで十分に面内方向の耐力を確保できれば、面内・面外の相互作用の影響が小さく、面内方向の性能を確保できることを示した。

参考文献

- 1) 玉井宏章ほか:せん断パネルダンパーの最適スチフナ曲げ剛性比について、日本建築学会構造系論文集、第79巻、第706号、pp.1983-1990、2014.12
- 2) 大出大輔ほか:面外変形が高力ボルト摩擦接合滑りダンパーの性能に及ぼす影響、鋼構造年次論文報告集、第25巻、pp.919-924、2017.11
- 3) 小崎均ほか:二方向地震動入力を受ける座屈拘束ブレース付鉄骨架構のブレース構面外応答、構造工学論文集、Vol.61B、pp.401-408、2015.3