

# 在来軸組戸建木造住宅を対象とした 2層木質制振架構の動的挙動に関する実験研究

○笠井 和彦<sup>1)</sup>, 坂田 弘安<sup>2)</sup>

1) 東京工業大学 応用セラミックス研究所 建築物理研究センター, kasai@serc.titech.ac.jp

2) 東京工業大学 応用セラミックス研究所 建築物理研究センター, hsakata@serc.titech.ac.jp

## 1. はじめに

我国では戸建木造住宅の8割強が在来軸組構法で作られており、既存不適格戸建木造住宅は全国に多数存在している。これら既存不適格建物の耐震補強および在来軸組構法による新築戸建木造住宅の耐震性能向上に向けて、パッシブ制振技術の2層在来軸組戸建木造住宅への合理的な導入方法を検討することは、重要な意味を持つ。

これまでに木質制振壁の動的載荷実験<sup>1)</sup>、2層分の質量を考慮した1層木質制振架構の振動台実験<sup>2)</sup>を行ってきた。本研究では2層木質架構に対して粘弾性・摩擦ダンパーの制振壁と構造用合板の耐力壁を組み込み、振動台実験によりその耐力要素の損傷レベルや減衰等の動的挙動を把握することを目的とする。

## 2. 2層木質制振架構の振動台実験概要

### 2.1 試験体の設定およびセットアップ

図1にセットアップを示す。試験体は在来軸組構法による2層戸建木造住宅の耐力要素の動的挙動を調べる目的で製作したもので、1辺が2730mmの立方体を鉛直方向に2つ積層した形状となっている。木質フレームはスプルース集成材の柱(105×105mm)、欧州赤松集成材の土台(105×105mm)・桁(105×180mm)、構造用合板の床(28mm厚 N75 釘@75)で構成される。

加振方向の中央に耐力要素を配置し、その他の構面は層せん断力を負担しないように、接合部をピンに近い形(かすがい+短ほぞのみ)とした。また、1層の階高中央以上の質量が既往の研究<sup>2)</sup>と等しくなるように錘の重量を決定した。すなわち、1層の設計せん断力を全重量と地震層せん断力係数0.2の積とし、壁倍率2をもつ壁要素が2P存在する場合に設計せん断力となるように重量を定めた。ここに、壁倍率とは層間変形角1/120radに対応する荷重を壁単位長さ1mあたりのせん断耐力1.96kNで除した値と定義した。1層に対する2層の質量比 $\alpha$ ( $m_2 / m_1$ )は総2階・重い屋根を想定した場合の設計用の床重量を用いて求め、0.9とした。また、耐

力要素の柱上に配置された錘は、柱の引き抜けに対して影響を与えようと考えられる。そこで、耐力要素の柱の長期軸力が実在の住宅とほぼ等しくなるように(1,2層柱の長期軸力は3.2kNと1.6kN)耐力要素の柱上の錘の量を決定し、残りの錘は耐力要素の柱に対する影響が少ない外側の構面上に配置した。さらに、加振直交方向の構面にはねじれを防止するために、断面寸法45×90mmの筋交いを取り付けた。ねじれ防止用の筋交いは、中央構面の柱に対して影響を避けるために、5mmのクリアランスを設けて取り付けた。

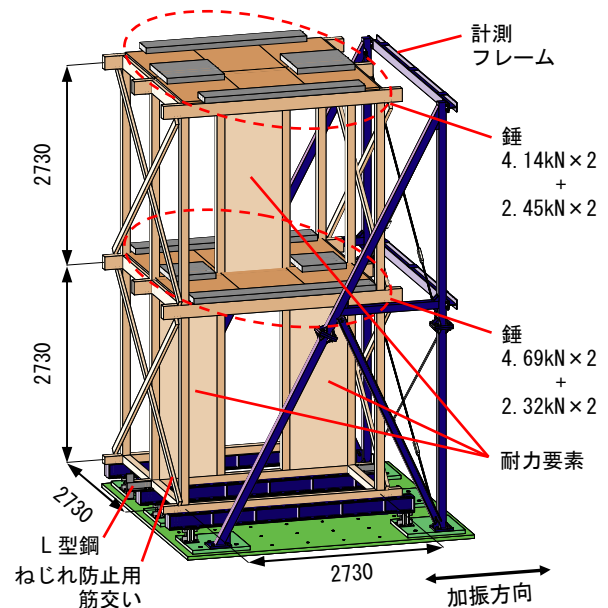


図1 セットアップ

### 2.2 試験体パラメータ

試験体一覧を表1に示す。表中の壁量とは、各壁要素の壁倍率にその長さに乗じたものの和である。2層部分の構造用合板に関しては村上・稲山式<sup>3)</sup>を用いて釘の本数によって剛性および耐力を調整したため、調整時の倍率を考慮した壁量を表記している。各試験体に関し、以下に述べる。なお、WP, WはWood panel、KはK型ブレース、VはViscoelastic damper、FはFriction damperを意味する。

表 1 試験体一覧

1P=0.91m

No.	1	2	3	4	5	6
試験体						
試験体名	2WP-1.6WP	2WP-1.2WP	2FK-1.6WP	2VK-1.6WP	2VK-VK	2VW-VW
種類	2層 構造用合板両面 1層 構造用合板	2層 構造用合板両面 1層 構造用合板	2層 構造用合板両面 1層 摩擦ダンパーK型	2層 構造用合板両面 1層 粘弾性ダンパーK型	2層 粘弾性ダンパーK型 1層 粘弾性ダンパーK型	2層 VK + 1.2WP 1層 2VK + 2WP
壁量	2層 4.8 × 1P 1層 3.0 × 2P	2層 3.6 × 1P 1層 3.0 × 2P	2層 3.6 × 1P 1層 6.0 × 2P	2層 3.6 × 1P 1層 5.0 × 2P	2層 5.0 × 1P 1層 5.0 × 2P	2層 8.6 × 1P 1層 8.0 × 2P
$\beta = k_2/k_1$	0.58	0.55	0.39	0.77	0.48	0.44
$T_1$ [s]	0.28	0.28	0.26	0.30	0.35	0.26

(1) 1, 2 層とも構造用合板の試験体

・ 2WP-1.6WP : 1 層に 1P あたり壁倍率 3 の構造用合板 2 級 9 mm 厚 (釘 CN50, 外周部 @100 mm, 中間部 200 mm) を 2P 配置した。2 層は 2 層の壁量が比較的大きい場合を想定し、1 層と 2 層の剛性比  $\beta (=k_2/k_1)$  が 0.8 となるように、構造用合板両面張りの釘の本数を調節した。柱脚部には引き寄せ金物、柱頭部には 2 枚ハンチ型金物 2 つを用いた。

・ 2WP-1.2WP : 1 層は上述した 2WP-1.6WP 試験体と同様である。重い屋根・総 2 階の場合、1 層と 2 層の必要壁量の比は 0.6 程度となることから、2 層の耐力要素は通常の構造用合板両面張りより釘の本数を少なくし、 $\beta=0.6$  となるように調節した。接合部は 2WP-1.6WP 試験体と同様である。

(2) 1 層が構造用合板、2 層が制振壁の試験体

・ 2FK-1.6WP : 1 層は、壁倍率 6 相当の性能を見込んだ摩擦ダンパー K 型を 2P 配置した。柱脚接合にはブレースと一体の引き寄せ金物と内使い L 型金物 2 個を併用した。柱頭接合には内使い L 型金物を 2 個用いた。2 層は 2WP-1.6WP 試験体と同様である。

・ 2VK-1.6WP : 1 層は、壁倍率 5 相当の性能を見込んだ粘弾性ダンパー K 型を 2P 配置した。ダンパー以外の詳細に関しては 2FK-1.6WP 試験体と同一である。

(3) 1, 2 層とも制振壁の試験体

・ 2VK-VK : 1 層は 2VK-1.6WP 試験体と同一である。2 層も、1 層と同様の制振壁を壁を中央に配置した。

・ 2VW-VW : 2VK-VK 試験体の上から 1, 2 層とも構造用合板 (2 級 9mm 厚) を配置した。間柱は存在しないが、釘の本数を調節することで、2WP-1.2WP 試験体の構造用合板と同等の剛性および耐力を付加した。

2.3 計測

図 2 に計測位置を示す。振動台上に設置した計測フレームから、振動台に対する試験体の相対変位を

計測した (図 2(a) 参照)。式 (1) から 1, 2 層の層間変位  $u_1, u_2$  を算出し、振動台、試験体土台、2 層の床、2 層の天井の加速度を用いて、式 (2) から 1, 2 層の層せん断力  $F_1, F_2$  を算出した。試験体土台の加速度を用いて式 (3) の関係を確認できたことから、層せん断力の導出は正しいことがわかる。変位計および加速度計は加振直交方向に 3 つ配置した。図 2(b) に平面的な配置の例として 2 層床レベルを示す。ここで式 (4) の関係が確認できたことから加振中の試験体にねじれは生じていないことがわかる。なお、データ整理の際には中央の値のみ用いている。

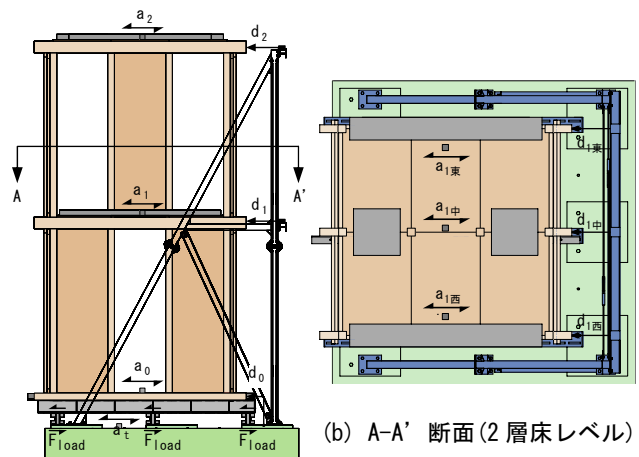
$$u_2 = d_2 - d_1 \quad u_1 = d_1 - d_0 \quad (1)$$

$$F_2 = m_2 \times a_2 \quad F_1 = F_2 + m_1 \times a_1 \quad (2)$$

$$\Sigma F_{load} = F_1 + m_0 \times a_0 \quad (3)$$

$$a_{1東} = a_{1中} = a_{1西} \quad d_{1東} = d_{1中} = d_{1西} \quad (4)$$

摩擦ダンパーを持つ試験体では高力ボルトにボルトゲージを挿入し、事前にボルトの歪と軸力の関係を調べることで、ボルト軸力を計測した。粘弾性ダ



(a) 立面

(b) A-A' 断面 (2 層床レベル)

図 2 計測位置

ンパーを持つ試験体では粘弾性体に熱電対を挿入し、粘弾性ダンパーの温度を計測した。引き寄せ金物を持つ柱に関しては、引き寄せボルトの軸力をセンターホール型ロードセルで計測した。

## 2.4 加振

表 2 に入力地震動を示す。入力として 1952Taft 波 EW, 1995JMA 神戸波 NS を用いた。最大加速度 0.2g の Taft 波と神戸波を入力後、0.6g 神戸波、0.2g 神戸波の 2 回目を入力し、引き寄せボルトを締め直した後に神戸波の原波 (0.83g 神戸波) を入力した。

表 2 入力地震動一覧

No.	Name	最大加速度(g)
1	W1	0.1
2	0.2gTaft波	0.2
3	W2	0.1
4	0.2g神戸波(1回目)	0.2
5	W3	0.1
6	0.6g神戸波	0.6
7	W4	0.1
8	0.2g神戸波(2回目)	0.2
9	W5	0.1
引き寄せボルト締め直し		
10	W6	0.1
11	0.83g神戸波(原波)	0.83
12	W7	0.1

各入力後に、土台の加速度  $a_0$  から求めた変位応答スペクトルおよび擬似加速度応答スペクトルが、目標のスペクトルと 0.1~1.0 秒の固有周期の範囲において、変動係数で 5%以内であることを確認した。

また、それぞれの前後で 0.1g ホワイトノイズ波 (適用範囲は 0.1~30Hz) を入力した。ホワイトノイズ波による応答は非常に小さく、よって線形と仮定できると考え、試験体土台・2 層の床・2 層の天井における伝達関数と概ね一致する伝達関数をもつ線形 2 質点系の 1 次の固有周期と減衰定数を、試験体の小振幅時における 1 次の固有周期・減衰定数  $T_1, h_1$  と定義した。

最初の加振(ホワイトノイズ 1 回目)前に、引き寄せ金物の引き寄せボルトの軸力は 10kN に調節して加振を行った。途中の引き寄せボルトの締め直しは 0.6g 神戸波のような大地震を経験した後にいった。2WP-1.6WP 試験体に関しては神戸波原波の加振前に、摩擦ダンパーのボルトを一旦緩め、残留変形を解除した。2WP-1.6WP 試験体に関しては試験体の倒壊の可能性を危惧し、神戸波原波は入力していない。また、2VW-VW 試験体に関しては神戸波原波を 2 回入力した。粘弾性ダンパーを持つ試験体に関しては、各加振毎に粘弾性体の温度を 20℃に調節して加振を行った。

## 3. 2 層木質制振架構の振動台実験結果

### 3.1 層せん断力と層間変位の関係

層せん断力と層間変位の関係を図 3、層間変位の最大値を表 3 に示す。

1, 2 層とも構造用合板で構成される試験体(図 3 上 2 試験体)では、神戸波 0.2g 1 回目の入力ではいずれも 1/240rad. 以内に納まっている。しかしなが

ら、0.6g 神戸波の入力ではいずれもスリップ履歴を示し、その後の 0.2g(2 回目)の入力では剛性が下がり、0.2g 1 回目の加振よりも変形が大きくなった。外観上の損傷としては構造用合板に打ちつけた四隅の釘が僅かに抜け出す(写真 1(a))程度であった。神戸波原波の入力では 2WP-1.6WP 試験体の 2 層は構造用合板の片側半分の釘がほとんど抜け(写真 1(b))、最大で約 1/15rad. まで変形したが、倒壊はしなかった。2WP-1.6WP 試験体において、0.6g 神戸波の入力では 1, 2 層の最大層間変位は 2 層の方が 1 層に対して 1.5 倍程度であるのに対し、神戸波原波の入力では 2 層が 1 層に対して 2 倍以上変形した。このことから、複数回の地震を経験すると、損傷の大きい方に変形が集中することがわかる。2WP-1.6WP 試験体は主に 1 層が損傷したが、2WP-1.2WP 試験体は 2 層が損傷する結果となった。僅かな剛性比の差で変形の大きくなる層が変化したことから、変形モードは 1, 2 層の剛性比に敏感であることがわかる。

1 層が制振壁、2 層が構造用合板で構成される試験体(図 3 中 2 試験体)では、摩擦ダンパーを有する層(2FK-1.6WP の 1 層)はダンパーの滑り荷重に対応した層せん断力で頭打ちとなるが、この壁以外に剛性を持つ要素が存在しないため、加振終了後に変形が約 1/120rad. 残留した。粘弾性ダンパーを有する層(2VK-1.6WP の 1 層)は 0.6g 神戸波の入力時に最大で約 1/80rad. 変形するものの、その後の 0.2g(2 回目)の入力でも 1 回目とほぼ同程度の変形に留まっていることから、架構の損傷は少ないといえる。また、2 層の構造用合板は両方ともスリップ履歴となり、剛性が著しく低下した。加振終了後には、2FK-1.6WP 試験体は 1 層で約 1/46rad. の残留変形が生じ、2 層は四隅の釘が僅かに抜け出していた(写真 1(c))。2VK-1.6WP 試験体は 1 層の損傷は見あたらなかったものの、2 層では釘が全般的に 1cm 程度抜け出していた(写真 1(d))。

粘弾性ダンパーが全ての耐力要素に入った試験体(図 3 下 2 試験体)では、0.6g の入力で 2VK-VK 試験体は 2 層が 1/75rad. まで変形したが、その上から

表 3 層間変位の最大値

(変形角は層間変形角を  $1/x$  の形式で表した時の  $x$ )

試験体	層	0.2gTaft		0.2g神戸		0.6g神戸		0.2g神戸(2)		神戸原波	
		最大値 mm	変形角 rad	最大値 mm	変形角 rad	最大値 mm	変形角 rad	最大値 mm	変形角 rad	最大値 mm	変形角 rad
2WP-1.6WP	2	5.2	525	5.5	496	36.9	74	22.7	120	-	-
	1	6.1	448	8.0	341	70.4	39	53.1	51	-	-
2WP-1.2WP	2	5.5	496	6.7	407	64.9	42	37.1	74	184.2	15
	1	5.8	471	6.4	427	53.2	51	35.2	78	80.3	34
2FK-1.6WP	2	5.2	525	6.0	455	43.4	63	23.4	117	91.9	30
	1	3.0	910	3.2	853	41.0	67	29.8	92	101.0	27
2VK-1.6WP	2	4.6	593	5.7	479	52.8	52	26.9	101	107.9	25
	1	5.7	479	6.6	414	32.0	85	9.5	287	37.3	73
2VK-VK	2	8.0	341	7.7	355	35.3	77	11.4	239	56.5	48
	1	5.7	479	6.1	448	28.6	95	10.3	265	41.5	66
2VW-VW	2	4.9	557	5.3	515	23.4	117	7.4	369	34.3	80
	1	3.0	910	3.3	827	15.7	174	5.0	546	22.3	122

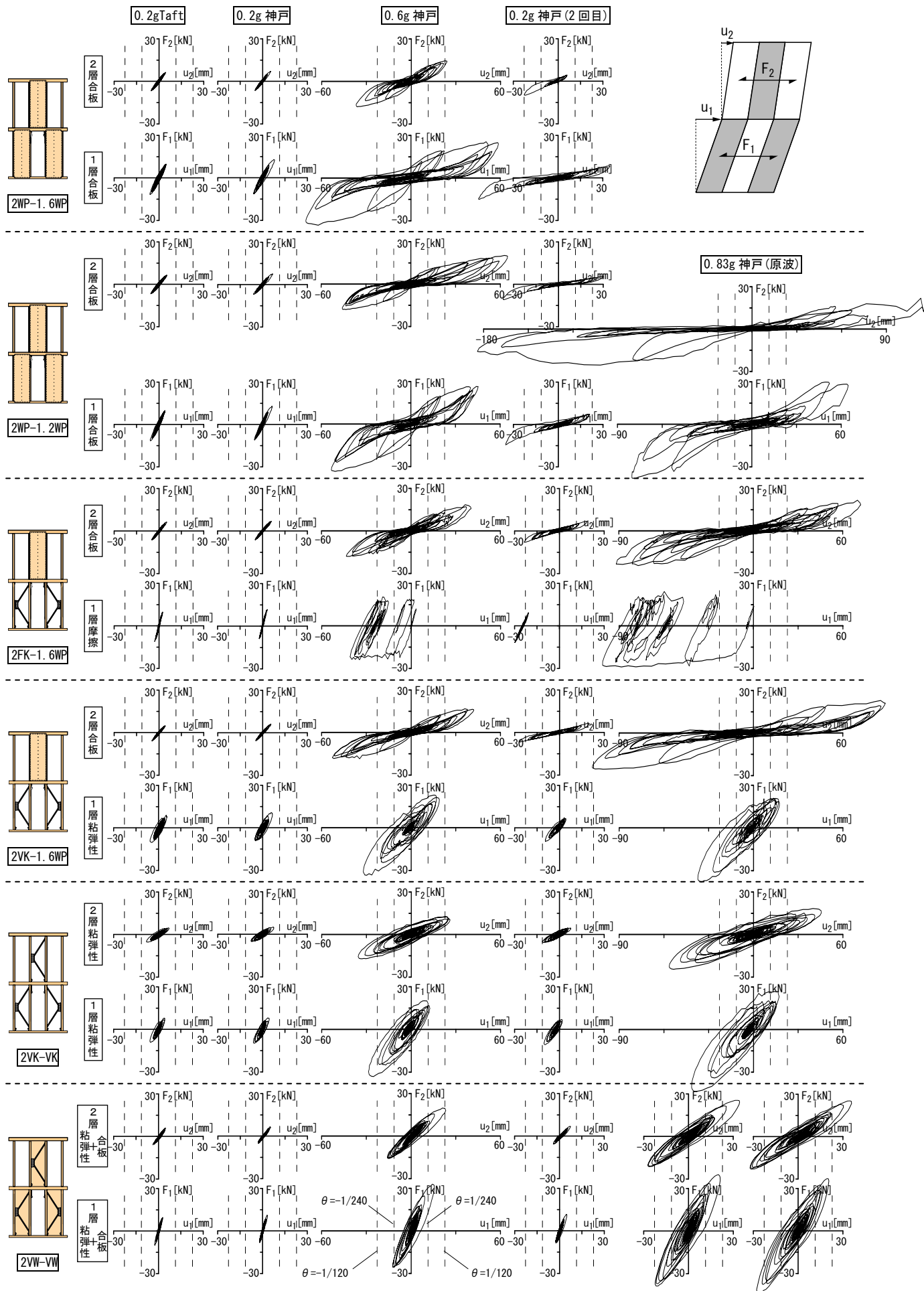


図3 層せん断力と層間変位の関係

合板を貼ることで変形は 1/120rad. に留まった。神戸波原波の入力では 2VK-VW 試験体は 2 層が 1/120rad. を超えて変形するものの、その後に再び神戸波原波を入力しても、変形レベルはほとんど変わらなかった。このことから粘弾性ダンパーと並列に付加した構造用合板が効率的に機能していることがわかる。加振終了後の試験体は、両試験体とも特に外観上の損傷はなかった。

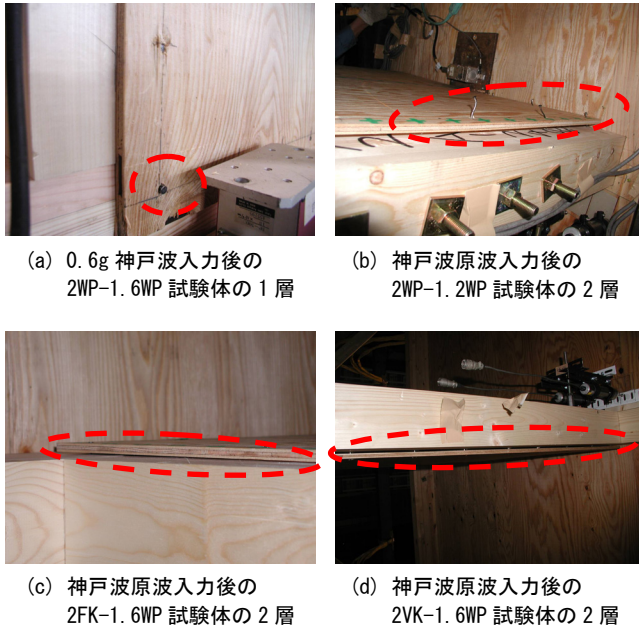


写真1 加振終了後の合板壁における釘の抜け出し

### 3.2 1層と2層の剛性比

壁量と 1・2 層の剛性比  $\beta (=k_2/k_1)$  を表 4 に示す。全ての試験体で壁量(実験値)が設計値の壁量を上回っていることがわかる。2WP-1.6WP, 2WP-1.2WP 試験体では、 $\beta (=k_2/k_1)$  が 0.8 と 0.6 となるように釘の本数を調整したが、ホワイトノイズの入力結果では二つの試験体に差が生じていない。これは合板と木質フレームが摩擦により一体化し、最大加速度 0.1g のような小さな入力では摩擦の影響だけが現れているためと考えられる。0.2g Taft 波から算出した剛性比では両試験体に差が生じていることからそれは明らかである。また、1 層の引き寄せ金物は基礎を想定した剛の H 鋼を反力としているのに対し、2 層の引き寄せ金物は 1 層の柱および梁を反力としているため、同仕様の耐力要素では 2 層の剛性が想定より小さくなり、 $\beta$  は小さくなっている。

表 4 壁量と 1・2 層の剛性比

試験体	想定	壁量		壁量(実験値)		W1による			0.2g Taft波による		
	$\beta$	1層	2層	1層	2層	k1	k2	$\beta$	k1	k2	$\beta$
	-	[m]		[m]		[kN]			[kN]		
2WP-1.6WP	0.80	6.0	4.8	11.1	8.3	2.80	1.62	0.58	1.95	1.35	0.69
2WP-1.2WP	0.60	6.0	3.6	12.6	7.6	2.83	1.56	0.55	2.10	1.19	0.56
2FK-1.6WP	0.60	8.0	4.8	11.8	8.4	3.80	1.48	0.39	3.62	1.24	0.34
2VK-1.6WP	0.48	10.0	4.8	16.9	7.7	1.70	1.30	0.77	1.55	1.11	0.72
2VK-VK	0.50	10.0	5.0	17.5	7.3	1.47	0.71	0.48	1.50	0.60	0.40
2VW-VW	0.54	16.0	8.6	23.7	11.5	3.23	1.41	0.44	3.35	1.34	0.40

### 3.3 ダンパーの挙動

図 4 に 2FK-1.6WP, 2VK-1.6WP, 2VK-VK, 2VW-VW 試験体のダンパー可動方向力とダンパー変位の関係を示す。1 層に関してはダンパーが 2 つ存在するが、その履歴形状がほぼ一致したため、図 4 に関しては片側のダンパーのみを示している。また、表 5 に加振中の粘弾性ダンパー温度の最大値を示す。ダンパー①, ②が 1 層のダンパー、ダンパー③が 2 層のダンパーである。

摩擦ダンパーは初期剛性が非常に高い。最初に入力した 0.2g の 2 波においては殆ど滑らず、ほぼ弾性であった。0.6g 神戸波ですべり荷重約 25kN の矩形の履歴を示した。また、残留変形は 8mm ほどであった。0.2g 神戸波(2 回目)の入力においても滑らず弾性であった。神戸波原波の入力では、再び滑り始めるもダンパー性能の低下は見られなかった。

2VK-VK 試験体の粘弾性ダンパーは、最初に入力した 0.2g の 2 波において楕円の履歴を示したことから、粘弾性ダンパーが 0.2g レベルの小振幅の入力に対しても機能していることが分かる。0.6g 神戸波の入力において、前の 2 波と比べ、等価剛性がやや低い、これはダンパーの損傷によるものではなく、粘弾性体の加振中の温度上昇によるものである(表 5)。0.2g 神戸波 2 回目の履歴形状が 0.2g 神戸波(1 回目)とほぼ同じであることから、神戸 0.6g 波の入力に対してもダンパー自身に損傷がないと言える。神戸波原波の入力においては、2 層の粘弾性ダンパーが最大で約 9mm 変形した。粘弾性ダンパーの厚さは 3mm のため、歪で 300%のせん断変形をしたことになるが、本実験に用いた粘弾性体は 300%まではほとんど損傷しないと考えられるため<sup>4)</sup>、粘弾性ダンパーの損傷は起きていないと考えられる。また、全加振においてダンパー③はダンパー①, ②よりも変形が大きく、描く楕円の面積も大きくなるため、粘弾性体の温度は一番高く上昇している。2VW-VW 試験体の粘弾性ダンパーも 2VK-VK 試験体と同様の傾向を示したが、層間変位が小さくなった分ダンパー変位もそれぞれ小さくなっている。2VW-VW 試験体の層せん断力と層間変位の関係において、各層とも 2VK-VK 試験体よりも損失剛性が低下しているのはそのためである。

### 3.4 エネルギー吸収

図 5 に各層全体とダンパーのエネルギー吸収量を示す。横軸は試験体ナンバー(表 1)を表している。全体の吸収量は層せん断力-層間変位の履歴面積(図 3)から、ダンパーの吸収量は各ダンパーの履歴面積(図 4)の合計から求めた。

一般に短周期領域におけるエネルギースペクトルは固有周期に比例するが、本実験においてもこの傾向が現れており、1 次固有周期の短い 2FK-1.6WP,

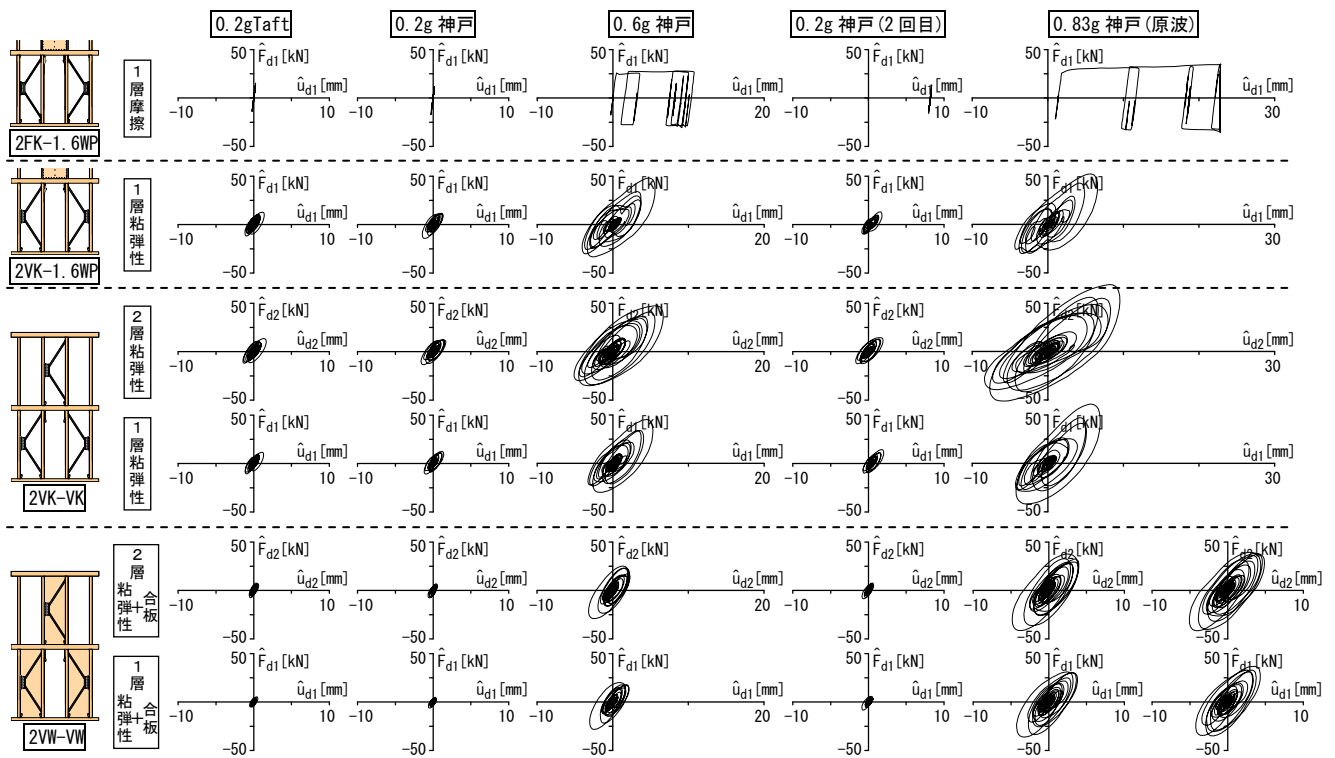


図4 ダンパー力とダンパー変位の関係

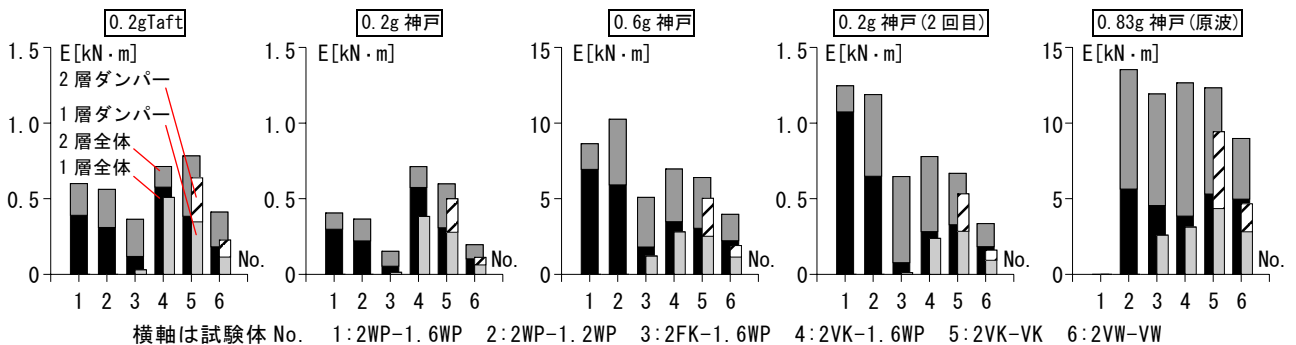


図5 エネルギー吸収

表5 ダンパー温度の最大上昇値

(単位: °C)

試験体名	ダンパー No.	入力地震動					
		0.2g Taft	0.2g 神戸	0.6g 神戸	0.2g 神戸(2)	0.83g 神戸	0.83g 神戸(2)
2VK-1.6WP	①	0.2	0.2	1.0	0.1	1.2	-
	②	0.2	0.1	0.8	0.2	0.8	
2VK-VK	①	0.3	0.3	2.4	0.3	3.9	
	②	0.3	0.3	2.5	0.3	4.2	
	③	0.3	0.3	3.0	0.4	6.6	
2VW-VW	①	0.1	0.1	1.0	0.1	2.4	
	②	0.2	0.1	1.2	0.1	2.8	3.1
	③	0.2	0.1	1.2	0.1	2.8	3.4

2VW-VW 試験体は他の試験体よりもエネルギー吸収量が少なかった。1, 2 層とも構造用合板で構成される試験体に関しては、0.2g 神戸波の 2 回目の入力で 1 回目の約 3 倍程度のエネルギーを吸収していることがわかる。これは 0.6g 神戸波の入力により架構が損傷し、1 次固有周期が延びたためと考えられる。

摩擦ダンパーを有する試験体では 0.2g 神戸波の入力ではダンパーに滑りが生じないためエネルギー

吸収量も少ないが、0.6g 神戸波の入力では 1 層全体が吸収したエネルギーの約 65%をダンパーが吸収した(図 5, No.4)。粘弾性ダンパーを有する試験体では常にほぼ一定のエネルギーを吸収し、VK-VK 試験体では全体の約 80%のエネルギーをダンパーが吸収した(図 5, No.5)。このように制振壁を持つ層では全体のエネルギーの大半をダンパーが吸収するため、架構の損傷が低いということがわかる。

### 3.5 架構の特性

最大加速度 0.1g のホワイトノイズ波の入力により算出した架構の特性を図 6 に示す。

1, 2 層とも構造用合板で構成される試験体において、2WP-1.6WP と 2WP-1.2WP 試験体には初期周期にほとんど差が生じなかった。これは 3.2 節にて詳述したように、構造用合板と木質フレームの接触面に発生する摩擦力の影響が大きいためと考えられる。また、0.2g の入力後では周期はほとんど変わらないことから、0.2g の入力では損傷は少ないことが確認できる。しかし 0.6g 神戸波以上の入力後では

固有振動数が著しく低下する。その際に減衰定数  $h_1$  が上昇するのは、エネルギー吸収能力が上がったためではなく架構が損傷してエネルギーを吸収したため、粘性減衰係数  $c_1$  の値の上昇が少ないことから明らかである。

また1層に制振壁、2層に構造用合板を配置した試験体では、損傷が2層の合板に集中するため、同様の傾向を示している。個々にみると、2FK-1.6WP試験体において減衰が低いのは、0.1gの入力では摩擦ダンパーが滑らず、エネルギーを吸収できないためである。2VK-1.6WP試験体においては最初は  $h_1 = 20\%$ 前後の性能を示したが、神戸波原波の入力後は  $c_1$  が大幅に低下した。これは神戸波原波の入力により2層が著しく変形し、ダンパーを持つ1層の層間変位が相対的に小さくなったためと考えられる。

全ての耐力要素に粘弾性ダンパーが入った試験体では共に粘性減衰が高く、特に2VK-VK試験体では0.6g神戸波以上の入力後も安定して  $h_1 = 22\%$ 前後の性能を保っている。また、 $T_1$ も常に安定した結果となっていることがわかる。

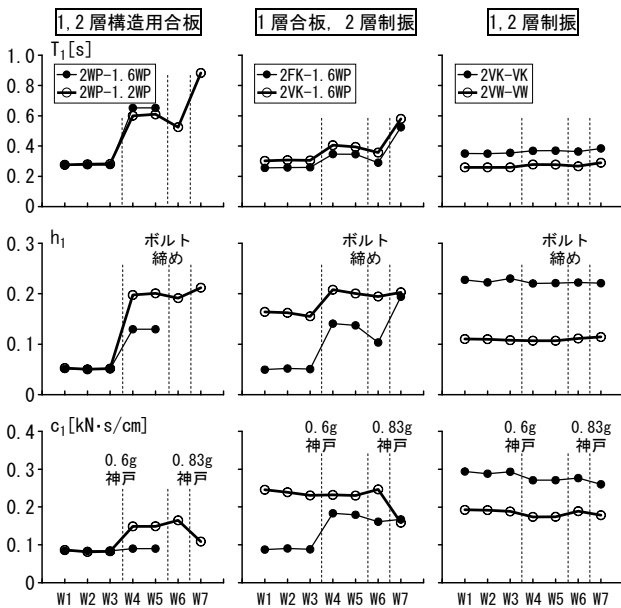


図6 架構の特性

#### 4. 地震応答解析

試験体は、加振方向に対して壁要素を含む中央構面と外側の構面から構成される。しかし、外側の構面に耐力壁は存在せず、接合部もピンに近い形状をしていることから、中央構面に比べて外側の構面が負担する層せん断力は極めて小さい(実験結果によると外側の2構面が負担する層せん断力は  $1/120\text{rad}$  変形時に  $0.6\text{kN}$  であり、これは一番剛性の低い耐力要素の5%未満)。そこで、中央構面のみを取り出した平面フレームの地震応答解析を行う。紙幅の都合上、ここでは2VK-VK試験体の結果のみを示す。

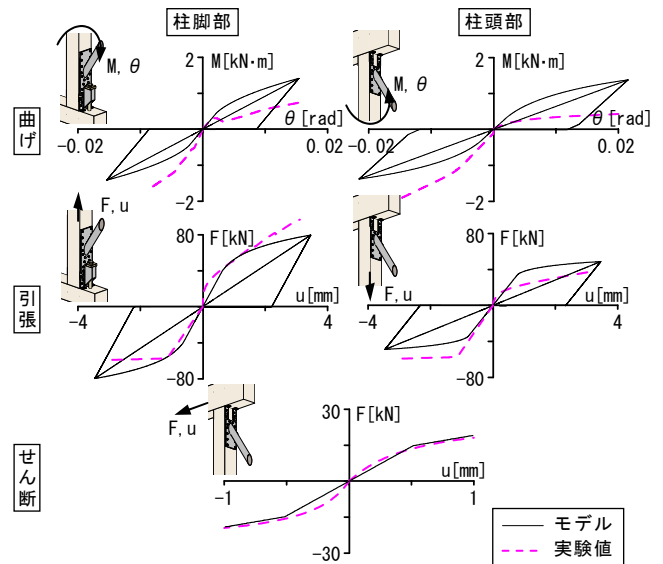


図7 接合部の履歴モデル

#### 4.1 接合部特性のモデル化と平面フレームモデル

昨年度までに行われた接合部の曲げ、引張、せん断に対する実験結果を元に、本実験に用いた接合部のモデル化を行う。本実験の試験体には柱脚部に内使いL型金物2個と引き寄せ金物、柱頭部には内使いL型金物2個がついている。なお、2層の耐力要素下の柱頭部には引き寄せ金物もついている。図7に接合部実験結果および解析用履歴モデルを示す。実験結果を見てわかるように、接合部の特性は加力の方向により異なる。本試験体では柱が偶数本存在するので、接合部の履歴モデルは正負の荷重の平均値に合わせてモデル化した。

引張に関しては、負側の柱のめり込みは、既往の研究<sup>5)</sup>からバイリニアに置換した。せん断に関しては、引き寄せ金物の影響は少ないので、柱脚部は柱頭部の履歴と等しいものとした。また、制振壁の動的強制変形実験の結果<sup>1)</sup>からその変形は小さかったことから、 $0.5\text{mm}$ 変形時の割線剛性を初期剛性とする弾塑性バネとした。

これらの接合部の特性を図8に示す平面フレームモデルに適用した。柱・梁・K型ブレースは材料特性値を用いた弾性部材とし、部材の減衰定数は剛性比

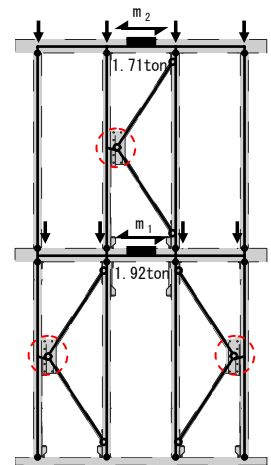


図8 平面フレームモデル

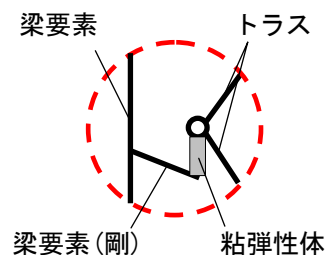


図9 粘弾性体の配置

例型の 2%とした。粘弾性体は図 9 のように配置した。質量は実験と同条件となるように設定した。すなわち、桁中央には水平方向への慣性力として働く質量  $m_1, m_2$  を図 8 のように配置し、試験体の長期軸力と同じ鉛直荷重をかけた状態で解析を行った。入力地震動は実験により試験体土台で得られた加速度記録を用いた。

#### 4.2 解析結果の再現性

図 10 に実験で計測した 0.6g 神戸波の振動台加速度を入力した場合の層間変位の時刻歴、図 11 に層せん断力と層間変位の関係、図 12 にダンパー可動方向のダンパー力と変位の関係を示す。図 10 において実験値と解析値を比べると、2 層の層間変位で約 30%程度解析値が大きいのが、1 層の両者はほぼ一致しており、周期に関しては 1, 2 層ともほぼ一致している。図 11 では 2 層の剛性が解析値は実験値の約半分になっているものの、1 層の剛性はほぼ等しい。図 12 においては剛性に関して良い一致を示しているといえる。以上から 2 層に関して多少の誤差は生じているものの、実験をほぼ再現できていることがわかる。

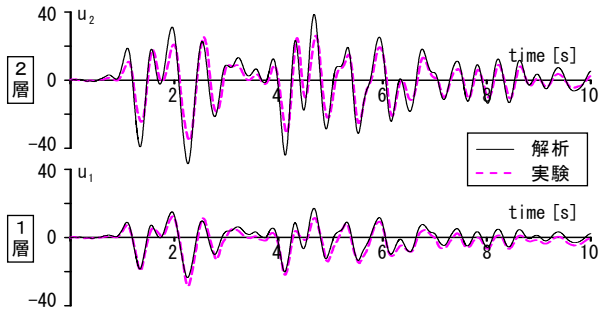


図 10 層間変形の時刻歴波形

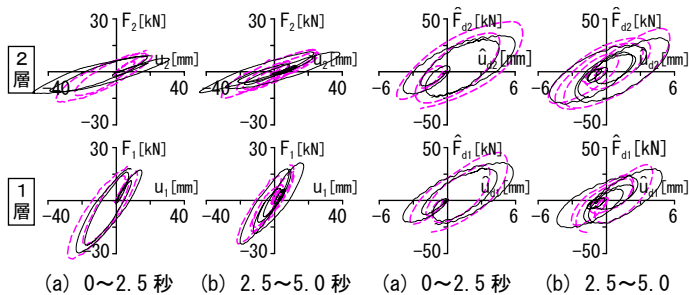


図 11 層の履歴

図 12 ダンパーの履歴

#### 4.3 確認

部材の最大荷重および接合部の変形量に関して確認を行う。部材の最大荷重を確認したところ、神戸波原波の入力においても曲げ・引張・せん断の全てにおいて短期許容応力度以下に留まっていた。このことから、損傷箇所は接合部に集中することがわかる。制振壁の設計時に設定した接合部の許容変形量は引張・せん断ともに 1mm であったのに対し、接合部の変形量は図 13 の値となった。一部引張変形で

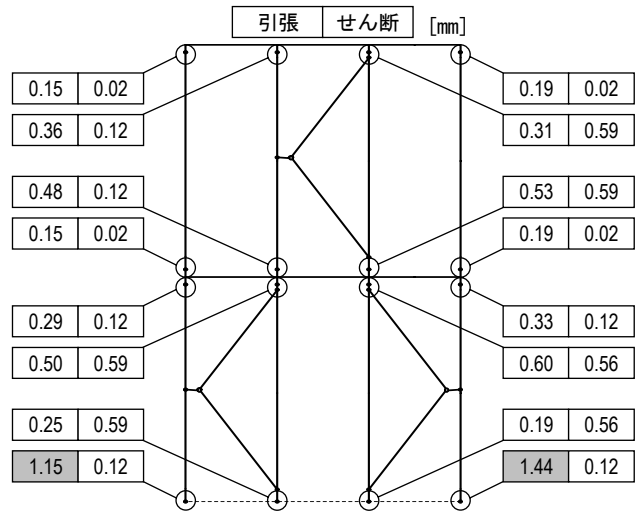


図 13 神戸波原波入力時の接合部の変形量

許容値を越えている箇所(図 13 の灰色)があるものの、ほぼ目標を達成できていることがわかる。

#### 5. まとめ

在来軸組構法による 2 層木質制振架構の振動台実験によりその動的挙動を把握した。以下に得られた知見をまとめる。

- 1) 構造用合板では釘が緩むとスリップ型の履歴を示し、その後は中規模地震でも変形が増大する。
- 2) 変形モードは 1, 2 層の剛性比に敏感である。
- 3) 粘弾性ダンパー制振壁を各層に組み込むと、ダンパーが全体の約 8 割のエネルギーを吸収し、神戸波原波に対しても架構の損傷を抑えることが可能である。また、並列に構造用合板を組み込むことで、さらに変形を抑えることが可能である。
- 4) 摩擦ダンパーを有する層は、その他に剛性を持つ壁が存在しないと残留変形が生じやすい。
- 5) 平面フレームモデルの地震応答解析を行うことで、実験の信頼性と設計の妥当性を確認した。

#### 参考文献

- 1) 笠井和彦, 坂田弘安, 和田章, 宮下健: K 型ブレースによるシアリンク制振機構を用いた木質架構の動的挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第 598 号, pp. 51-60, 2005.12
- 2) 笠井和彦, 和田章, 坂田弘安, 緑川光正, 大木洋司, 中川徹: 変位依存ダンパーをもつ木質架構の振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 594 号, pp. 101-110, 2005.8
- 3) 村上雅英, 稲山正弘: 任意の釘配列で打られた面材壁の弾塑性挙動の予測式, 日本建築学会構造系論文集, 第 519 号, pp. 87-93, 1999.5
- 4) 所健, 笠井和彦, 大熊潔: 粘弾性体の破壊挙動に関する実験的研究 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 315-316, 2001.9
- 5) 杜重堅: 集成材同士のめり込み挙動に関する実験的研究, 平成 13 年度東京工業大学大学院 修士論文, 2002