

財産保持性に優れた木造制振住宅の開発

笠井 和彦¹⁾, 坂田 弘安²⁾, 大木 洋司³⁾, 和田 章³⁾

- 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
- 3) 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, ooki@serc.titech.ac.jp
- 4) 東京工業大学 統合研究院, wada@serc.titech.ac.jp

1. はじめに

都市の地震災害の大小は、多数存在する住宅の被害によって決まると言っても過言ではなく、国民の大多数が生活の基盤としている戸建木造住宅の被害を最小化する必要がある。その手段の一つとして、新旧の木造住宅の耐震性能を向上させる制振技術を開発するため、大地震での倒壊防止・人命保護という従来の目標と対比して、本研究では地震後の財産保持までを目標としている。筆者らはこれまでに、木質制振壁の動的載荷実験^{1),2)}、1層と2層の質量を1層の天井に載せた1層木質制振架構の振動台実験^{3),4)}、2層木質制振架構の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した。

しかし、まだ明らかになっていないことが多くあり、その中で本年は 連梁効果の把握と 雑壁の構造躯体への影響の把握を目的とした。すなわち、本年は 3P 木質制振架構の動的強制変形実験、ならびに雑壁を付加した2層木質制振架構の振動台実験を行い、実際の建物に制振壁が挿入されることを想定した実験を行うことでそれらの影響を把握する。

2. 3P 木質制振架構の動的強制変形実験

これまでに行われてきた制振壁の正弦波加振実験により、提案する制振壁単体の性能が明らかにされた^{1),2)}。しかしながら、実際に壁が軸組へ挿入される際には他の壁との相互作用や支持条件等の影響で、単体実験の時とは挙動が異なってくると予想される。そこで、制振壁が実際に軸組へ配置されたときの挙動を明らかに

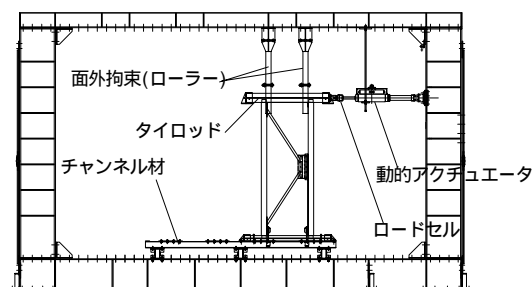
することを目的とし、ここは連梁効果を把握する。

2.1 試験体

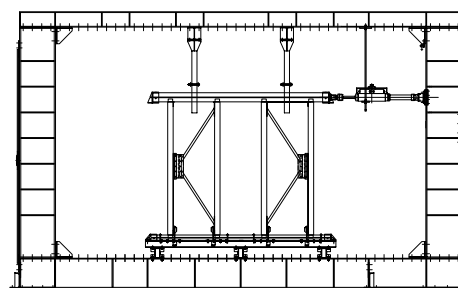
図1に試験体を示す。制振壁の仕様は基本的に文献2)と同様とした。1P (P=910mm)の制振壁の試験体と、3Pの両側に1Pの制振壁を配した試験体がある。制振壁の詳細に関しては紙面の都合上割愛する。それぞれのダンパー部は粘弾性ダンパーもしくは摩擦ダンパーを有する。

2.2 実験概要

試験体は図2に示す載荷装置に取り付けた。試験体土台を住宅の基礎を想定したチャンネル材に固定し、桁の木口面をタイロッドで挟み、タイロッドの取り付け具と動的アクチュエータを接続した。また、桁を



(a) 1P 試験体の場合



(b) 3P 試験体の場合

図2 セットアップ

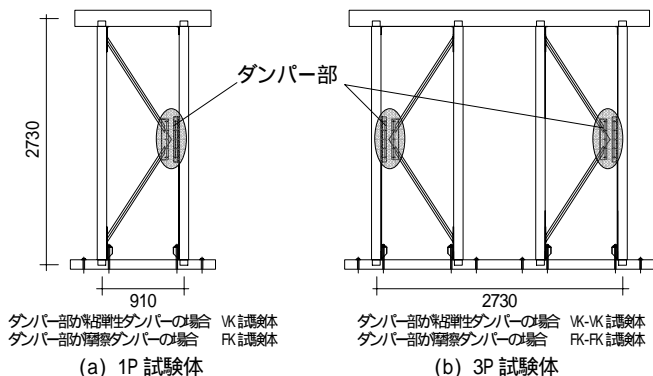


図1 試験体

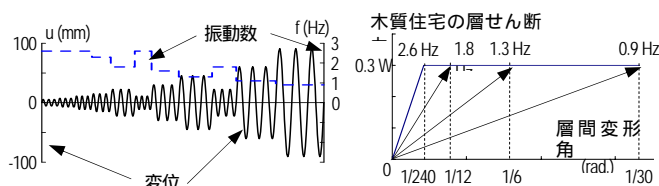


図3 変位履歴および振 図4 振動数決定における木質住宅の履歴モデル

表1 各サイクルの最大層せん断力と最大ダンパー荷重

層間変形 [rad.]	(A) 1サイクル目の最大層せん断力[kN]				(B) 1サイクル目の最大ダンパー荷重[kN]				(B) / (A)			
	VK	VK-VK	FK	FK-FK	VK	VK-VK	FK	FK-FK	VK	VK-VK	FK	FK-FK
480	2.7	6.6	5.1	12.5	7.6	17.9	15.6	36.8	2.87	2.71	3.05	2.94
360	3.2	8.2	6.3	15.4	9.5	23.1	19.6	46.3	2.94	2.81	3.10	3.00
240	4.5	11.8	8.6	19.8	13.4	33.7	27.1	60.2	2.98	2.85	3.14	3.03
180	5.7	14.9	9.3	21.9	17.2	43.4	29.0	66.6	3.02	2.91	3.12	3.04
120	8.8	20.8	10.2	23.7	27.3	61.3	32.0	71.6	3.10	2.95	3.15	3.02
90	11.3	26.2	10.6	24.3	34.5	77.6	33.0	72.4	3.07	2.97	3.11	2.98
60	16.0	36.6	11.3	25.4	49.3	110.5	33.6	74.0	3.08	3.02	2.96	2.91
45	20.3	45.8	11.6	26.0	63.1	140.2	33.8	73.9	3.11	3.06	2.91	2.84
30	28.2	-	12.3	27.2	88.7	-	32.7	72.9	3.15	-	2.64	2.68

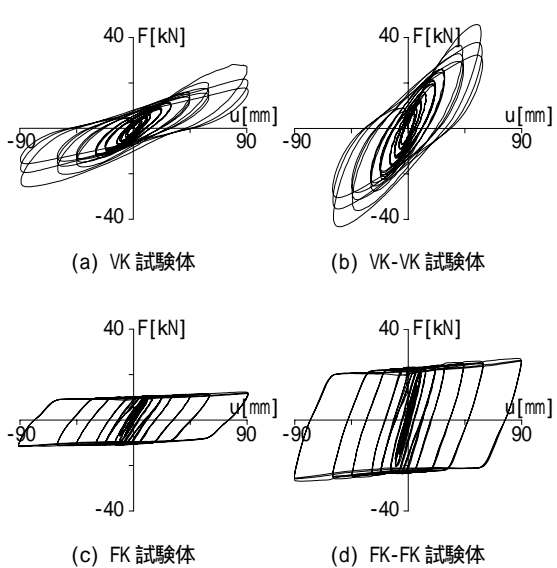


図5 層せん断力 - 層間変形関係

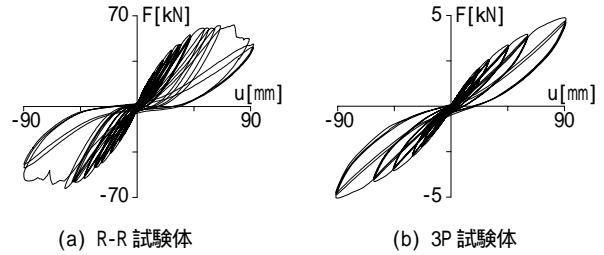


図6 R-R試験体とN-N試験体のF-u関係

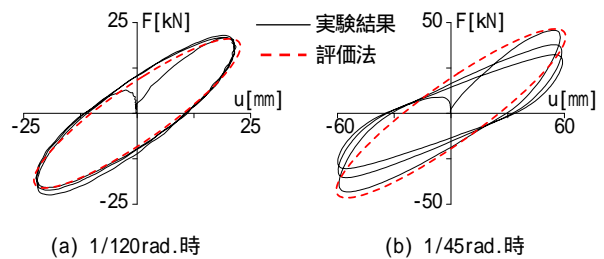


図7 VK-VK試験体における評価法と実験値の比

面外方向に2箇所ローラー支持することで、面外変形を拘束した。

荷重は、図3実線に示す荷重サイクルに従い、 $=1/480, 1/360, 1/240, 1/180, 1/120, 1/240, 1/90, 1/60, 1/120, 1/45, 1/30$ rad. の順に各3サイクルずつ正弦波変位制御の正負交番繰返し荷重とした。これらの加振は連続して行わず、各層間変形角3サイクルずつ止め、荷重を行った。なお、VK-VK試験体のみ、加振の都合上30rad.の加振を行っていない。図3破線は動的荷重での各サイクルにおける振動数を示すものであり、図4のように制振架構を導入した木質住宅の履歴の骨格曲線を仮定し、そのモデルの等価周期で決定している。紙幅の都合上、計測計画は図示しないが、架構のせん断力、層間変形、桁中央加速度、ダンパー力、ダンパー変形、柱・横架材接合部の軸変形、せん断変形、回転を計測した。粘弾性ダンパーを使用した試験体では粘弾性体の温度、摩擦ダンパーを使用した試験体では摩擦パッドを締め付ける高力ボルトの軸力を計測した。粘弾性ダンパー試験体の荷重は、変形を入力する前に粘弾性体の温度が 20 ± 0.3 になるように調節してから行った。摩擦ダンパーを有する試験体では、高力ボルトの軸力が安定してから加振した。

2.3 層せん断力と層間変形の関係

図5に層せん断力と層間変形を、表1に各サ

イクルの最大層せん断力と最大ダンパー荷重を示す。層せん断力に関しては、桁頂部の加速度記録を用いて、ロードセルから得られる荷重から試験体上部および加力治具の慣性力を引くことで求めた。

粘弾性ダンパーを有する試験体は楕円の履歴を示し、摩擦ダンパーを有する試験体では2次勾配が低く、完全弾塑性に近い矩形の履歴となった。表1で、VKとVK-VKを比べると、最大層せん断力は各サイクルともVK-VKはVKの2.5倍程度の力を負担していることがわかる。また、(B)/(A)の比を比べると、VKよりVK-VKの方が低く、同様にFKよりFK-FKの方が低い傾向となっている。このことから、3Pの試験体は1Pの試験体より、ダンパー以外の架構の負担する力が大きいことがわかる。

2.4 木質制振架構の履歴特性評価

筆者らは、ダンパー部を剛(以後、状態R)および非拘束(以後、状態N)に置換した架構の静的荷重実験を行うことにより、制振架構の履歴特性を良い精度で評価できる方法を提案した²⁾。ここではその精度を確認するため、VK-VK試験体に対してその評価手法を展開する。

VK-VK試験体の状態RとしてR-R試験体、状態NとしてN-N試験体の強制変形実験を行った。層せん断力と層間変形を、図6に示す。さらにそれらの実

験から得られた R(状態Rのダンパー力と層せん断力の比)=3.23, N(状態Nのダンパー部変形と層間変形の比)=0.32 を用い、履歴の評価を行った。例として 1/120rad., 1/45rad.時の結果を図7に示す。二つの履歴はほぼ一致していることから、最大耐力・等価剛性・等価減衰を良い精度で評価できたと考えられる。

3.2 層木質制振架構の振動台実験

昨年度に行った2層木質制振架構の振動台実験に引き続き、本年度も2層木質制振架構の振動台実験を行った。昨年度も使用した速度依存型ダンパーを再び用いてその有用性を再確認すると共に、非構造部材として実建物において無視できない雑壁の影響を検証する。

3.1 実験概要

3.1.1 試験体およびセットアップ

本実験では2体の試験体を用意した。図8にセットアップを、表2に2試験体の特徴を示す。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。どちらも加振方向の中央に耐力要素があるが、外側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)とした試験体(2FW-FW)と、内外装材を取り付けた試験体(2FK-FK(S+G))がある。

1層の階高中央以上の質量が既往の研究^{2),3)}と等しくと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(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られ。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。

(1)2FW-FW 試験体

加振方向の中央に耐力要素として壁倍率6相当の性能を見込んだ摩擦ダンパー-K型を1層に2P、2層に1P配置し、さらにその上から構造用合板を貼り付けた。

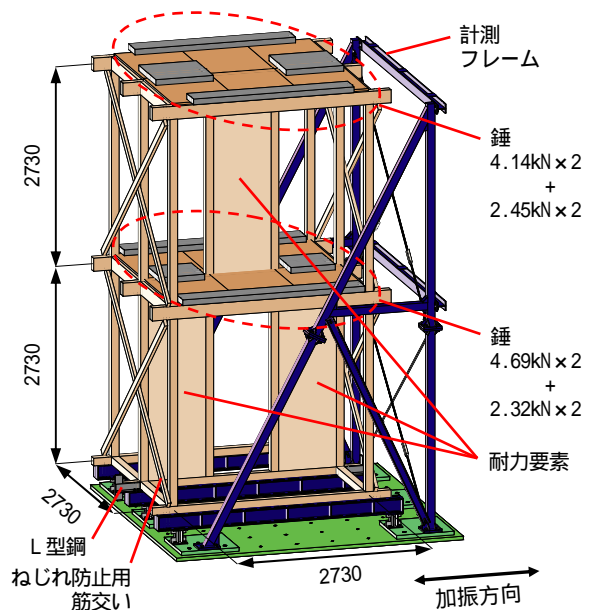


図8 セットアップ

表2 試験体

試験体番号	1	2
試験体名	2FW-FW	2FK-FK(S+G)
中央構面	1層 (摩擦ダンパー+合板)×2	摩擦ダンパー×2
	2層 (摩擦ダンパー+合板)×1	摩擦ダンパー×1
外側構面	内側	石膏ボード
	外側	窯業系サイディング
中央構面		
外側構面		

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。外側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

(2)2FK-FK(S+G)試験体

加振方向の中央は、構造用合板が貼られていないこと以外は2FW-FW試験体の中央構面と同一である。すなわち、摩擦ダンパー-K型を1層に2P、2層に1P配置し、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。外側の構面には内外装材として石膏ボード内壁と窯業系サイディング外壁を1,2層

の両面に配置した。なお、外装材の量に関しては、実存住宅2棟と教材住宅の調査から床面積辺りの量を算出し、本試験体が相当する床面積に適する量として、各層に石膏ボード内壁を6P、窯業系サイディング外壁を2P配置した。

3.1.2 計測

図9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9(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9(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。

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

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

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

$$a_{1E} = a_{1C} = a_{1W} \quad d_{1E} = d_{1C} = d_{1W} \quad (4)$$

摩擦ダンパーの高力ボルトには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。

3.1.3 加振

表3に加振スケジュールを示す。入力として、1995JMA 神戸波NSを用いた。最大加速度0.2gの神戸波を入力後、0.6g神戸波、続いて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2回入力した。2FK-FK(S+G)試験体では、その後に1.09g神戸波も入力した。

表3 入力地震動一覧

No.	Name	最大加速度(g)
1	W1	0.1
2	0.2g神戸波(1回目)	0.2
3	W2	0.1
4	0.6g神戸波	0.6
5	W3	0.1
6	0.2g神戸波(2回目)	0.2
7	W4	0.1
引寄せ金物締め直し		
8	W5	0.1
9	0.83g神戸波	0.83
10	W6	0.1
11	0.83g神戸波(2回目)	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)を入力することで、試験体の固有振動数を把握した。

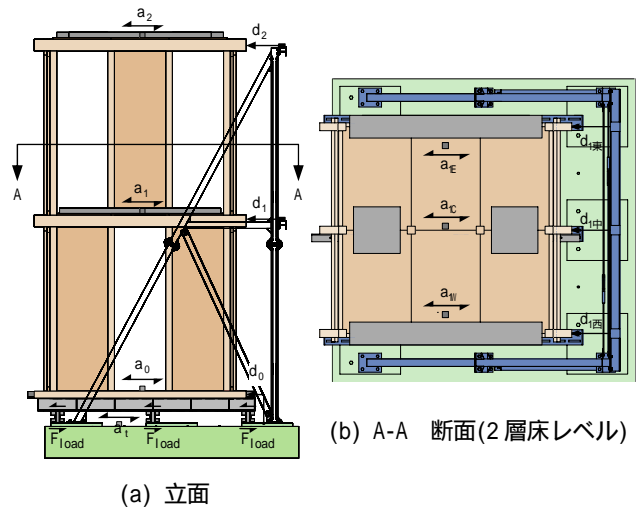
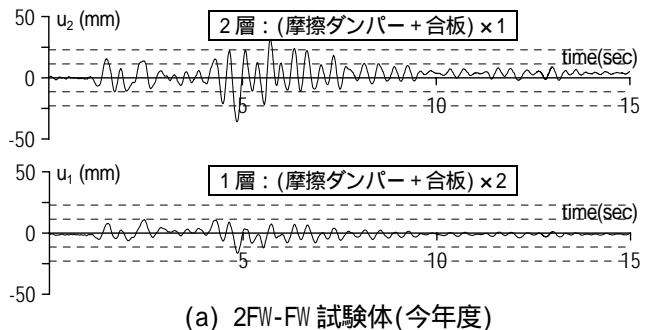
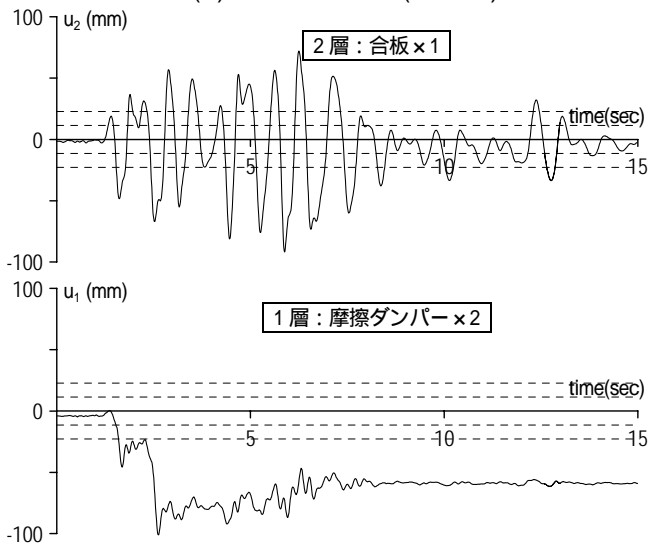


図9 計測位置



(a) 2FW-FW 試験体(今年度)



(b) 2FK-1.6WP 試験体(昨年度)

図10 0.83g神戸波入力時の層間変形の時刻歴波形

3.2 実験結果

3.2.1 層間変形の時刻歴波形

2FW-FW 試験体における0.83g神戸波入力時の層間変形の時刻歴波形を図10(a)に示す。また、比較として昨年度に行った2FK-1.6WP試験体の同地震波入力時の時刻歴波形を図10(b)に示す。

昨年度の2FK-1.6WP試験体では、摩擦ダンパーのみで構成される1層は約60mm(1/45rad.)もの残留変形を生じ、構造用合板のみで構成される2層は大きく変形

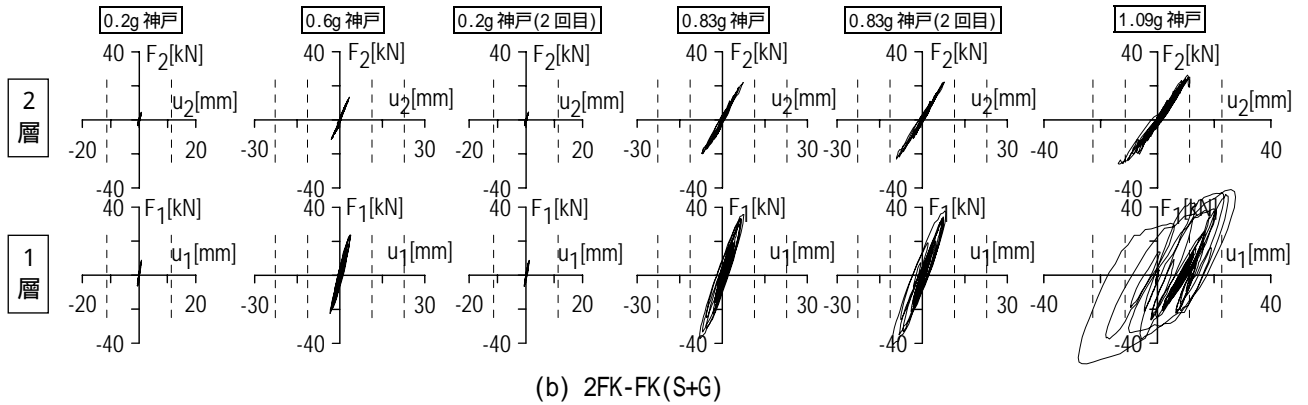
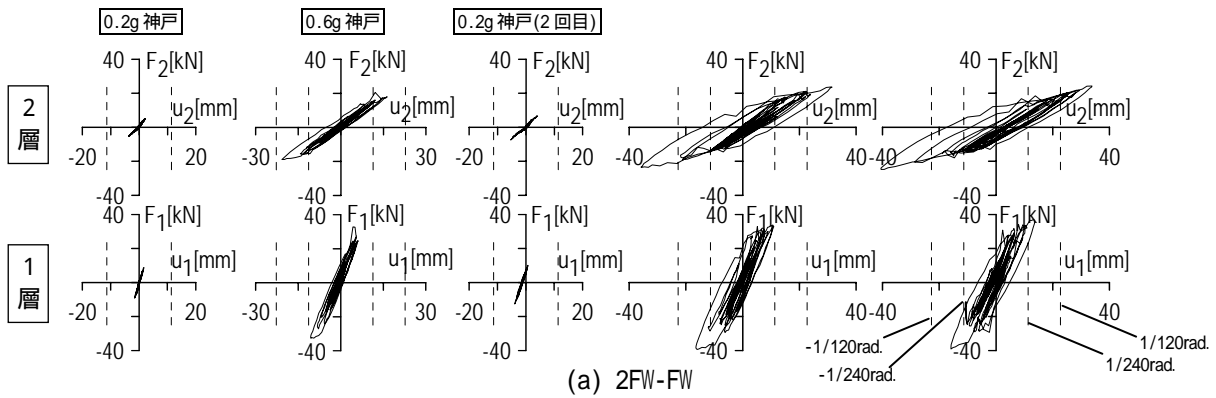


図 11 層間変形と層せん断力の関係

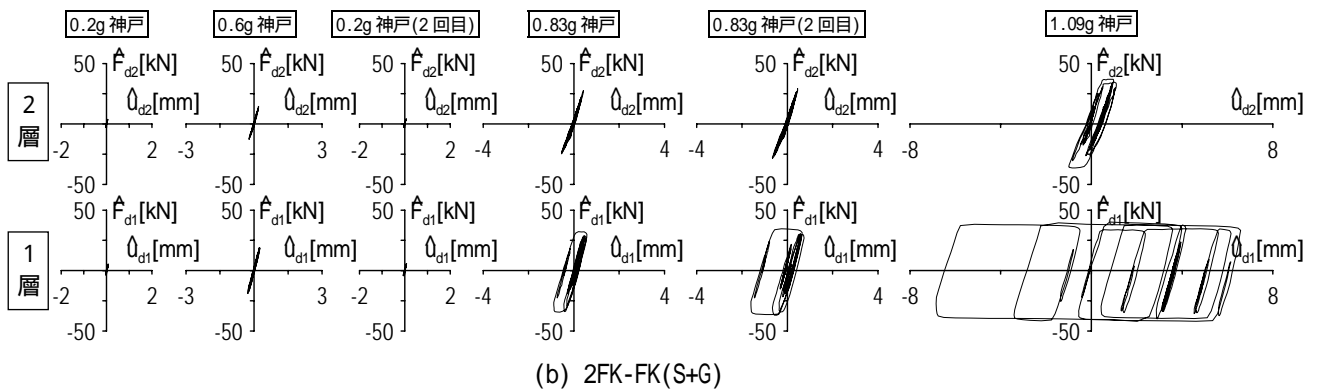
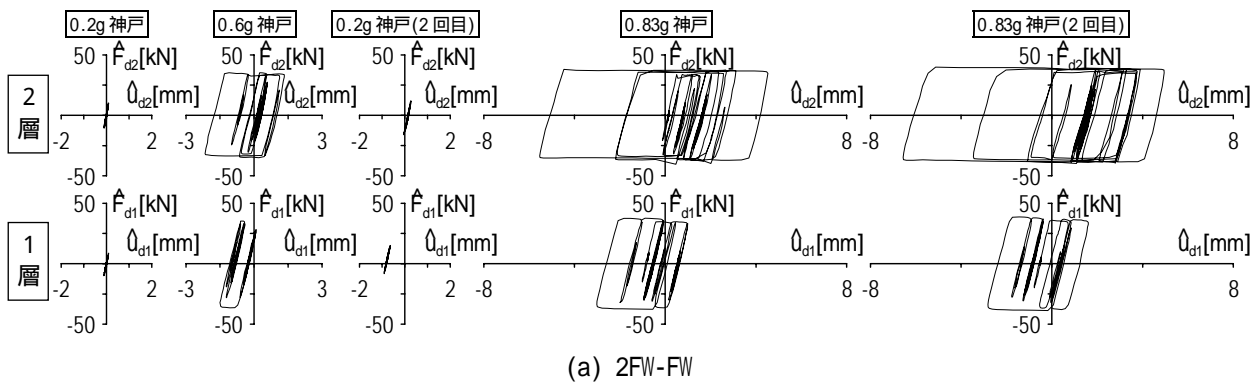


図 12 ダンパーの荷重と変形の関係

し、損傷することにより固有周期が伸びていることがわかる。一方、今年度の2FW-FW試験体では、2層で最大約30mm(1/90rad.)変形するものの、その後残留変形を生じることもなく、周期も安定していることがわかる。

2次剛性の低い摩擦ダンパーは、他に弾性要素が存在しない場合、急激な加速度を受けることにより大きく変形し、その後復元力が小さいため残留変形が生じやすい²⁾。今年度の2FW-FW試験体により、構造用合板が弾性要素として有効に働くことが確認できる。

3.2.2 層せん断力と層間変形の関係

図 11 に層間変形と層せん断力の関係を示す。2FW-FW 試験体は最大加速度 0.2g の地震波入力ではダンパーが滑らず弾性挙動を示したが、最大加速度 0.6g 以上の地震波入力では弾塑性形の履歴となった。2FK-FK(S+G)試験体は、1,2 層とも初期剛性が非常に高く、0.6g 以下の入力では弾性挙動を示した。

2FW-FW 試験体では 1 よりも 2 の方が変形が大きくなっているのに対し、2FK-FK(S+G)試験体は 2 層よりも 1 層の方が変形が大きくなっている。どちらも耐力要素のみの 1,2 層の剛性比は 0.5 だが、耐力要素のみで構成される 2FW-FW 試験体に対して、内外装材といった仕上げを施した 2FK-FK(S+G)は 1 層の変形の方が大きくなっている。このことから内外装材の影響は無視できないほどに大きいということが再確認できる。

3.2.3 ダンパーの挙動

図 12 にダンパーの可動方向の荷重変形関係を示す。1 層にある 2 つのダンパーの履歴はほぼ同形状だったため、代表して 1 層は左側のダンパーの履歴を示す。ダンパーの滑り荷重(=36kN)に達する前は剛体で、想定したダンパーの滑り荷重(=36kN)に達するとダンパーが滑り出していることがわかる。滑り荷重はどれもほぼ一定で 36kN に近い値となっていることから、本実験が適当であったことを確認できる。

3.2.4 内外装材の力分担

2FK-FK(S+G)に関して中央構面が負担する層せん断力はダンパーが負担する層せん断力の約 1/3 倍であるため、層せん断力からダンパー荷重の 1/3 を差し引くことで内外装材の負担する層せん断力を算出することができる。以上の算出法を用いて、1.09g 神戸波を入力したときの 1 層の内外装材の負担層せん断力を層間変形との関係として図 13 に示す。

1/120rad.変形時の内外装材負担分の層せん断力は約 22kN 程度であり、これは壁倍率に直すと約 11 となる。耐力要素とは履歴形状が異なることから一概に壁倍率で比較することは難しいが、耐力要素と比べても十分に影響を与える耐力を有しており、剛性が鍵となる制振の設計で無視することはできないと考えられる。

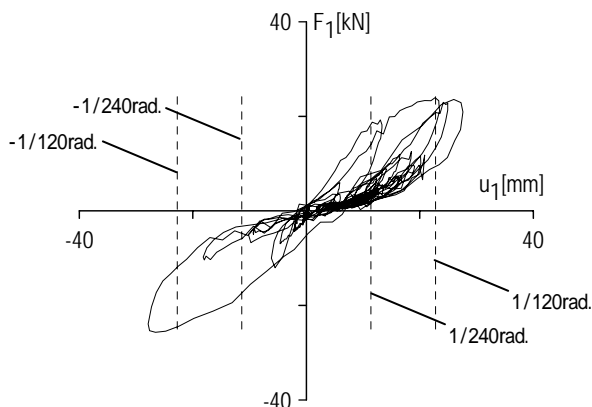


図 13 内外装材が負担する層せん断力

4. まとめ

木質制振架構の動的強制変形実験ならびに 2 層木質制振架構の振動台実験を行うことで、地震時の耐力要素や内外装材といった仕上げ材に関する基礎的データを得た。得られた知見を以下に示す。

木質制振架構の動的強制変形実験に関して

- ・VK-VK 試験体は VK 試験体の 2.5 倍程度の力を負担した。
- ・3P の試験体に対しても既提案の履歴特性評価法を適用できることを確認した。

2 層木質制振架構の振動台実験に関して

- ・摩擦ダンパーは弾性要素を付加することで残留変形を低減することが可能である。
- ・内外装材が負担する層せん断力は耐力要素と比べても決して小さくなく、今後定量的に評価して制振設計の際に考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 坂田弘安, 笠井和彦, 和田章, 宮下健: 合板パネル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に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 594 号, pp. 65-73, 2005.8
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 坂田弘安, 笠井和彦, 和田章, 緑川光正, 大木洋司, 中川徹, 松田和浩: 速度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 615 号, 2007.5 掲載予定