

繰返し水平力を受ける在来軸組木造住宅の挙動に対する内外装材の影響

○坂田 弘安¹⁾, 笠井 和彦²⁾, 和田 章³⁾, 大木 洋司⁴⁾

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

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)}、2層分の質量を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⁵⁾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。

一方、これまでは主に構造躯体の挙動に着目して研究を行ってきたが、戸建住宅における剛性や耐力を評価する際に、外壁や内壁などの非構造体の影響を無視することはできない。その影響を加味した現実的な応答評価法・設計法を展開するために、ここでは内外装材が取り付けられた壁の強制変形実験を行い、復元力特性とその特徴、変形ごとの損傷度合、住宅における内外装材の量等に関して報告する。

2. 内外装壁の静的強制変形実験の概要

戸建木造住宅の設計の際に耐震要素としては含まれない内外装材による壁の強制変形実験(写真1)を行うことにより、内外装材による壁の層せん断力と層間変形の関係を把握する。また、各変形における損傷状態を把握することで、戸建木造制振住宅の設計クライテリアを検討するための基礎的資料を得る。

2.1 パラメータと試験体の詳細

表1に試験体パラメータを示す。壁の長さが1P(P=910mm)の試験体と、3Pの試験体があり、3Pの試験体は中央に内外装材を1P分配置したものと、3Pの全面に内外装材を配置したものがある。内装材としてはほとんどの住宅に用いられている石膏ボードを採用した。外装材としては窯業系サイディング材とモルタルを採用した。試験体名におけるGはGypsum、SはSiding、MはMortar、-は壁が存在し



写真1 内外装壁の静的強制変形実験概観

表1 試験体パラメータ

	1P	3P	
	G	-G-	GGG
石膏ボード			
窯業系サイディング	S	-S-	SSS
モルタル	M	-M-	MMM

ないことを意味し、3Pの壁は3つの記号を並べて示している。

各試験体の詳細として、図1に試験体のサイズおよび樹種を示す。木質フレームはスプルー集成材の柱(105×105mm)、オウシュウアカマツ集成材の土台(105×105mm)・桁(105×180mm)で構成される。柱・横架材接合部には図2に示す内使いL型金物を一つ配置した。

図3に内外装材による壁の詳細、図4に使用したタッカーを示す。石膏ボード内壁は910×2420×12mmの石膏ボードを、柱と間柱に対して長さ50mmのビスを150mmピッチで川の字に打ち付けている。窯業系サイディング材外壁は近年急速に普及しているものの一つである。モルタル外壁は比較的古い住宅に多いが、現在でも好んで使用されることの多い外壁である。窯業系サイディング外壁は以下の手順で施工した。タッカーを用いて200mm間隔で防水シートを留め、厚さ13mmの縦胴縁をその上から柱および間柱に対してN50釘を用いて150mm間隔で留め(写真2(a))、厚さ12mmのサイディング材を横

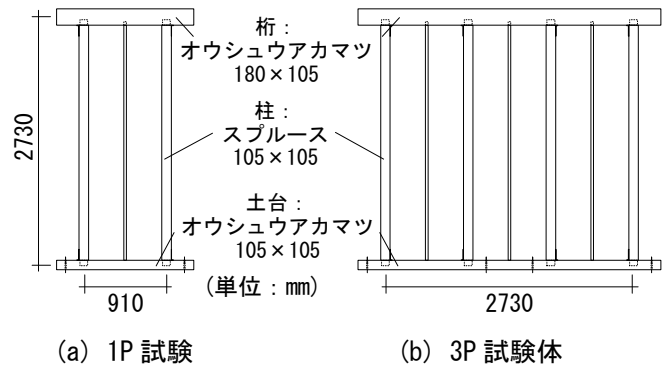


図1 試験体サイズおよび樹種

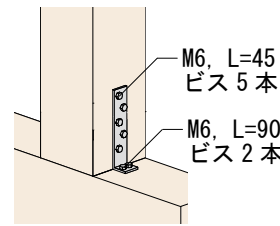


図2 内使いL型金物

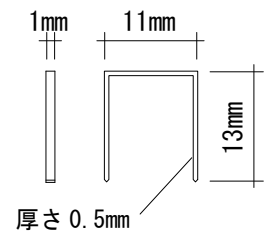


図4 使用したタッカー

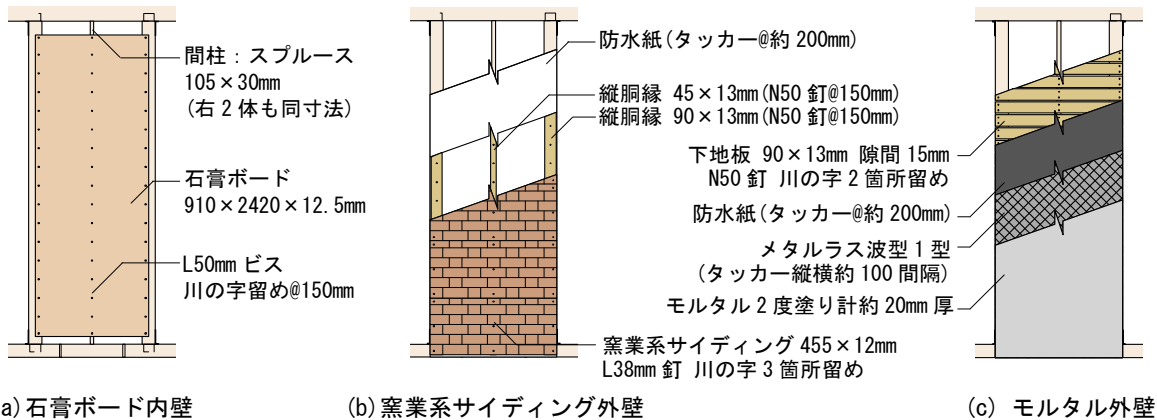


図3 内外装材による壁の詳細



(a) 下地の施工



(a) モルタル塗り外壁の下地板の施工



(b) 防水シートの施工



(c) メタルラスの施工



(b) 窯業系サイディング材の施工



(d) モルタル下塗り



(e) モルタル上塗り



(f) 刷毛引き仕上げ

写真2 窯業系サイディングの施工

写真3 モルタル外壁の施工

貼りした(写真 2(b))。一般的に用いられている通気構法である。モルタル外壁は以下の手順で施工した。下地として 105mm 間隔で厚さ 13mm 幅 90mm のスギ材を柱と間柱に対して N50 釘 2 本ずつで留め(写真 3(a))、防水シートをその上からタッカーを用いて 200mm 間隔で留めた(写真 3(b))。その後、メタルラスをその上から 100mm 間隔でタッカーを用いて留め(写真 3(c))、モルタルを下塗りとしてメタルラスが隠れるまで塗った(写真 3(d))。上塗りは 8 日後に下塗りとの合計の厚さが 20mm になるようにし(写真 3(e))、刷毛引きの仕上げとした(写真 3(f))。載荷はその 32 日後に行った。試験体の養生は試験場である住宅構造研究所の建物内で行った。

2. 2 実験方法

図 5 のように加力フレームの鉄骨基礎梁の上に試験体土台を乗せ、M12 アンカーボルト 4 本(1P の場合 2 本)を用いて試験体土台を上下方向に固定した。土台端部は鋼板を介して土台木口面を押さえることにより土台の水平方向のずれを防止した。また、スクリューボルトで 100kN アクチュエータと桁を連結した。面外拘束は 2 点で桁を面外方向にローラー支持する。

層間変形角 $\theta = 1/480, 1/360, 1/240, 1/180, 1/120, 1/240, 1/90, 1/60, 1/120, 1/45, 1/30, 1/15$ rad. の順に各 3 サイクルずつ変位制御の正負交番繰返し載荷とした。計測計画は図示しないが、架構のせん断力、層間変形、柱・横架材接合部の軸変形・回転変形、桁の回転、柱の軸歪を計測した。

3. 実験結果

3. 1 層せん断力と層間変形の関係および損傷

図 6 に層せん断力と層間変形の関係を示す。図 6 における破線は $1/120$ rad. を示している。図 6 右のグ

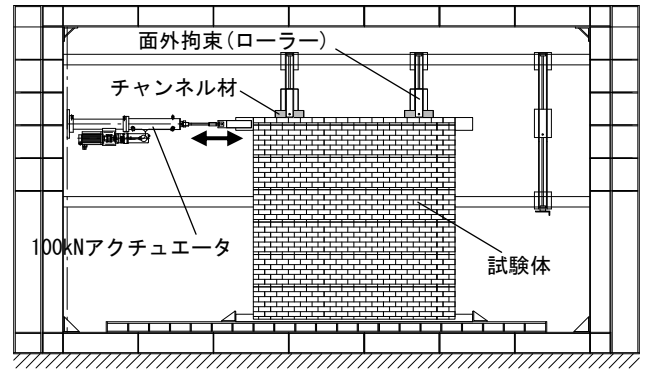


図 5 セットアップ

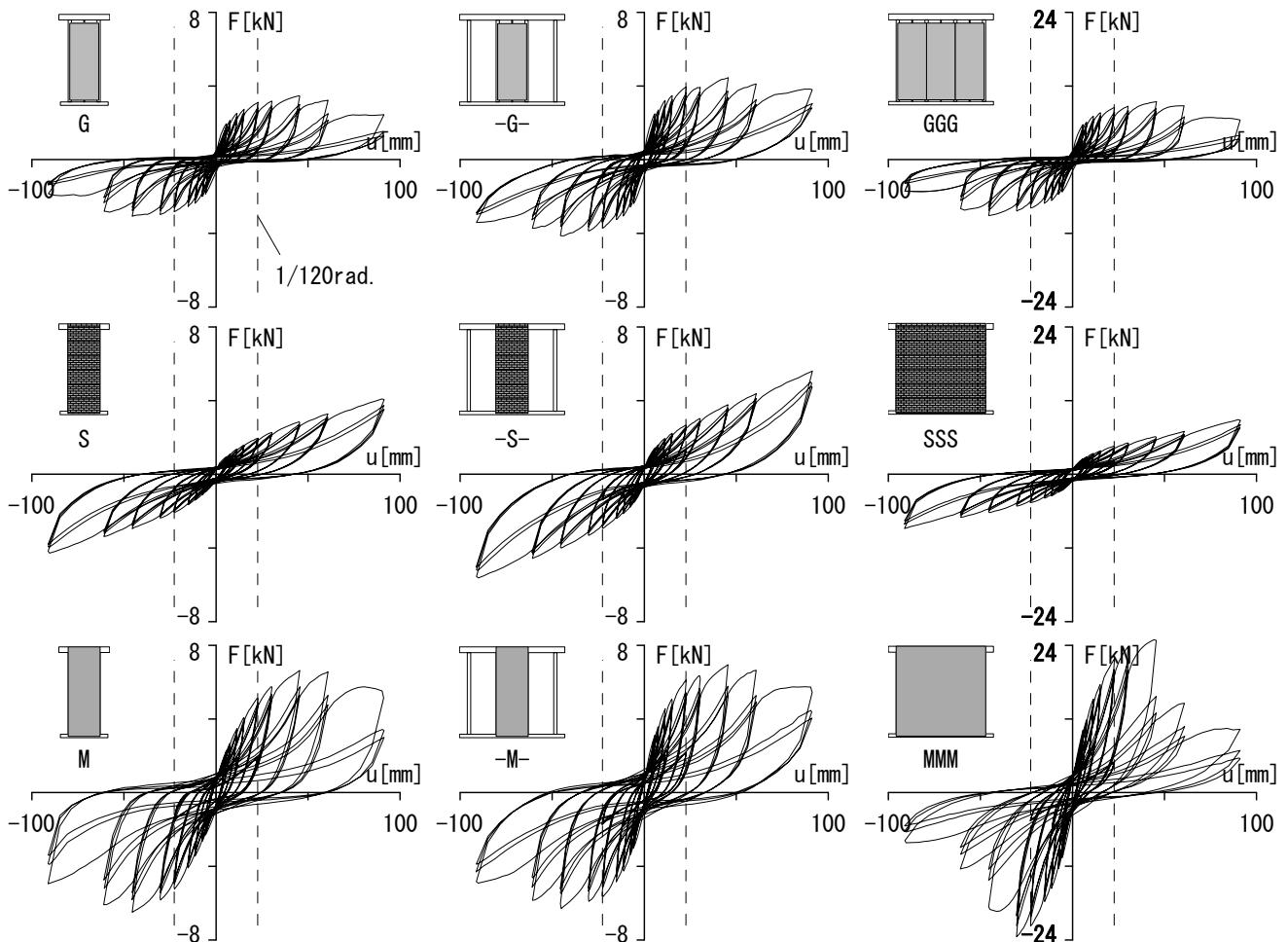


図 6 層せん断力と層間変形の関係

ラフは壁が3枚配置されているため、縦軸を3倍のレンジで示している。層せん断力と層間変形の関係では全ての試験体でスリップ型の履歴を示していることがわかる。

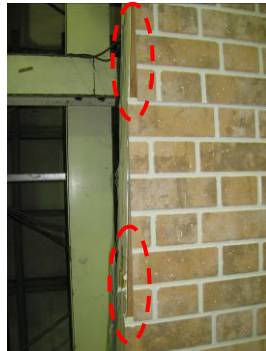
石膏ボード内壁の試験体は1/240rad.程度の変形から打ち付けたビスが石膏ボードにめり込んでいるのが確認できるようになり、変形が進むにつれてめり込む量が大きくなった。1/60rad.変形時には四隅のボードが破け(写真4(a))、石膏が剥落するとともに最大耐力を迎えている。1/30rad.変形時にはビスのパンチングが数箇所みられたが、間柱に打ち付けたビスは1/30rad.変形時でもほとんどめり込みが見られなかったため、変形が進んでも石膏ボード全体が壁から剥離することはないといえる。

窯業系サイディング外壁の試験体は変形が進むにつれてサイディング材同士の層毎にずれ(写真4(b))が大きくなった。サイディング材を留めている釘の引き抜けは1/60rad.の程度の変形時から若干確認できるよう(写真4(c))になったほどで小さかった。履歴を見ると変形とともに耐力が上昇していることがわかる。

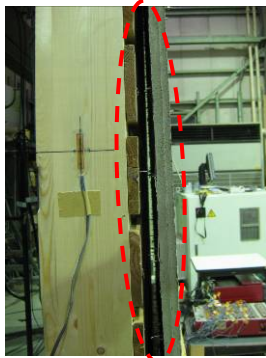
モルタル外壁の試験体は変形が進むとともにタッカーが下地板から抜け出した。それによりモルタルが防水紙と一体になって下地板から剥離した。1/30rad.変形してもモルタルにひび割れは生じなかった。1/30rad.の載荷後はモルタルが全体的に下地板から剥離(写真4(d))し、その後1/15rad.までの載



(a) GGG 試験体 1/60rad. 時
四隅の剥離



(b) -S-試験体 1/30rad. 時
サイディングのずれ



(d) MMM 試験体 1/30rad. 時
モルタルの剥離



(c) -S-試験体 1/30rad. 時
釘の引き抜け

写真4 試験体の損傷

荷を行ったところ、完全に剥離して一枚板のままモルタルが落下した。耐力や剛性は窯業系サイディング外壁より高いが、1/60rad.程度で最大耐力迎え、その後は耐力が低下した。特にMMM試験体では耐力の低下が著しかった。

図7に1/120rad.までの層せん断力と層間変形の関係を示す。石膏ボード内壁およびモルタル外壁による試験体は初期剛性が高いものの、1/120rad.時にはスリップ型の履歴を示し、損傷していることがわかる。一方、窯業系サイディング外壁による試験体は初期剛性は低いものの、1/120rad.の変形時でも弾性的な挙動を示していることから、他の2種類の壁と比べて損傷が少ないといえる。

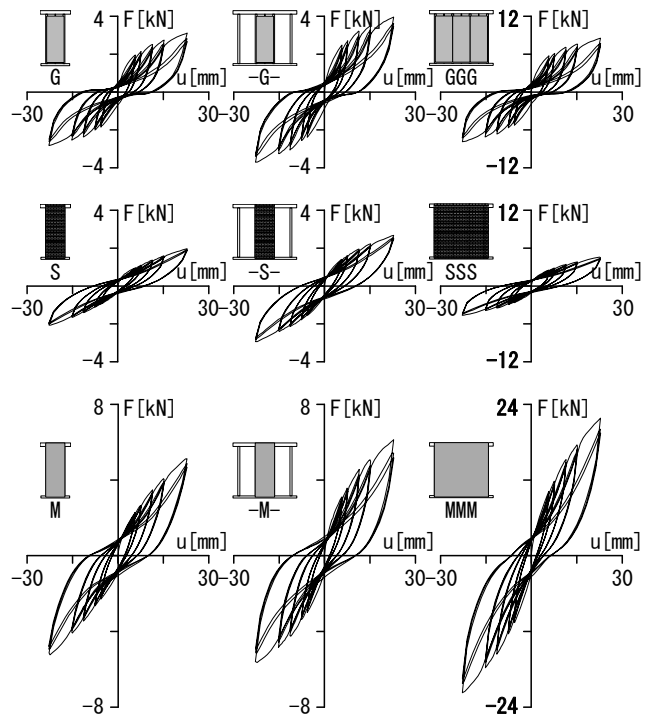


図7 1/120rad. までの層せん断力と層間変形の関係

3. 2 包絡線の比較

図8に包絡線の比較を示す。包絡線は層せん断力と層間変形の関係における正負平均の骨格曲線を抽出し、実験の載荷サイクルにおける最大変形時の点を結ぶことで作成した。

壁1Pあたりで比較するために壁を3枚有する試験体に関しては荷重を3で除して示している。G試験体と-G試験体の挙動を比べると、層間変形1/30rad. ($u=91\text{mm}$)以降の変形では石膏ボードによる影響がほとんど無くなっていると考えられるにもかかわらず、耐力に2倍程度の差が生じている。また、全体的に1Pの試験体に対して3Pの中央に壁が配置された試験体は耐力が高くなっている。これは、内外装材の負担する層せん断力が比較的小さく、内外装材の取り付けられている骨組みが比較的大きい層せん

断力を負担しているためと考えられる。

そこで骨組みが負担する層せん断力を考慮するため、文献 6)における-Zero-試験体の層せん断力と層間変形の関係(図 9)を用いる。すなわち、1P の試験体に関しては包絡線から-Zero-試験体の包絡線を引き、3P の試験体に関しては柱の本数を考慮して-Zero-試験体の包絡線の荷重を 2 倍にしてから引くことにする。図 10 に-Zero-試験体分の荷重を引いた場合の包絡線を示す。石膏ボード内壁に関しては 1P あたりの荷重-変形関係にほとんど差が出ていない。窯業系サイディング外壁に関しては SSS/3 の耐力が低くなっているが、これは壁が 3P ある場合、それぞれの壁に共通の柱があることで 1P あたりの釘の本数が 1P の試験体と比べて相対的に少なくなったためと考えられる。モルタル外壁に関しては MMM/3 の初期変形時の耐力が高くなっている。これはモルタル自体が剛体のように挙動し、モルタルの回転中心からより離れたタッカーに大きなせん断ずれが生じることで力を多く負担したためと考えられる。

4. 住宅における内外装材の壁量

図 8 に示した G 試験体、S 試験体、M 試験体の包絡線を用いて、それぞれの壁倍率を算定する。壁倍

率は、①変形角 1/120rad.時強度(P_{120})、②降伏強度(P_y)、③最大耐力の 2/3 の強度($2/3P_{max}$)、および④終局耐力と靱性から決まる値($0.2P_u/D_s$)の 4 つの値の最小値により決定される^{付録 7)}。試験体の壁長さが 0.91m のため、4 つの最小値を 0.91m で除し、更に 1.96kN で除すことにより壁倍率を求めた。以上の手順により求めた値を表 2 に示す。

ここで教材住宅および実在する 2 階建て木造軸組住宅計 4 棟の内外装材の量を開口低減係数 K_0 ⁸⁾ を用いて調査した結果、単位面積 $1m^2$ あたりの内外装材の量は 4 棟で概ね等しく、平均して表 3(a)の値とな

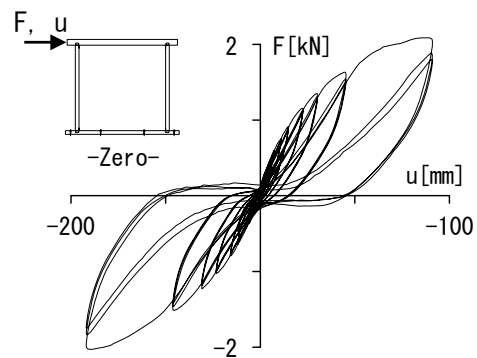


図 9 -Zero-試験体の F-u 関係

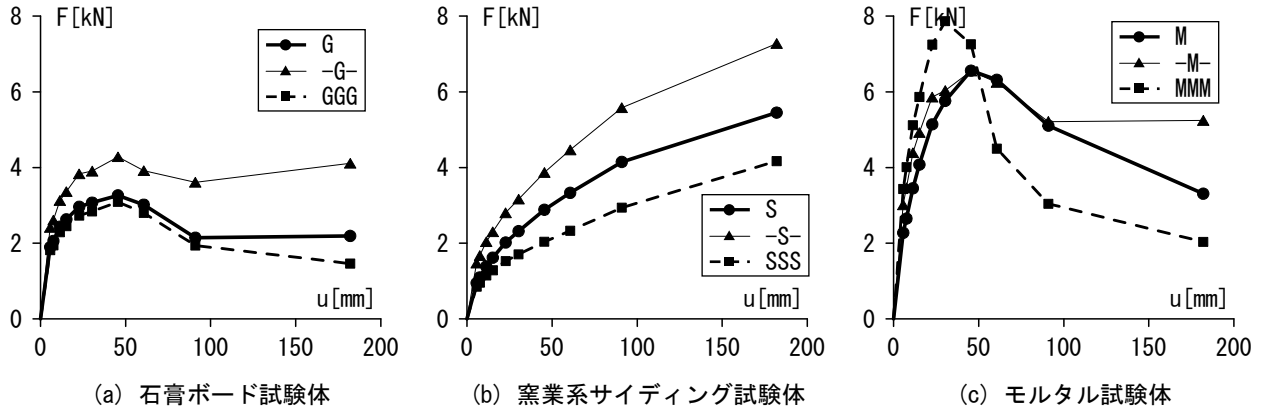


図 8 1P あたりの包絡線の比較

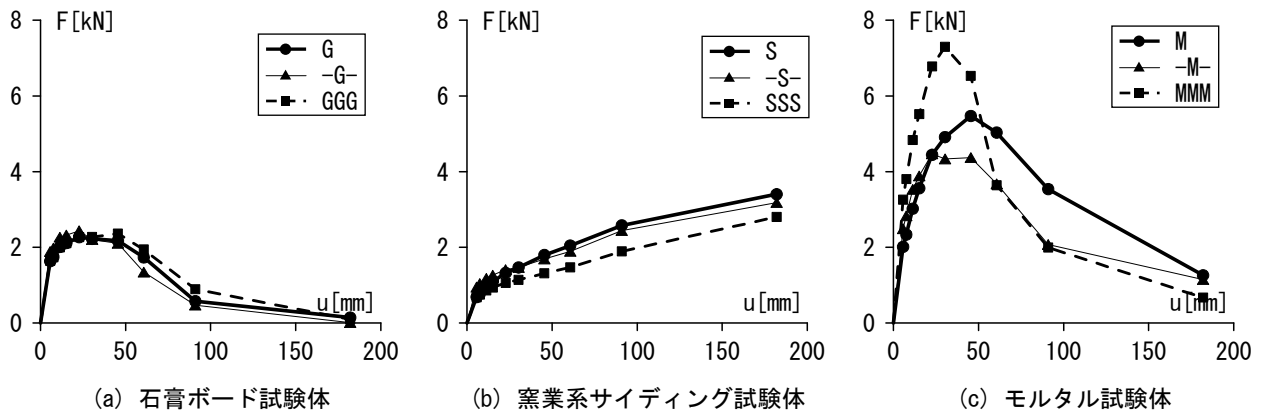


図 10 1P あたりの包絡線の比較(骨組負担分を引いた場合)

った。そこで、石膏ボード内壁の壁倍率 1.1、窯業系サイディング外壁の壁倍率 1.0、モルタル外壁の壁倍率 1.9 を表 3(a)の各値に乗じると、窯業系サイディング外壁の場合表 3(b)、モルタル外壁の場合表 3(c)の値となる。耐力要素の設計時に用いる必要最低壁量は 2 階建ての重い屋根の住宅で 1 層が 0.33m^2 、2 層が 0.21m^2 である⁹⁾ことから、内外装材が必要最低壁量の 2 倍近い壁量を確保しているといえる。

なお、今回の検討では壁倍率決定の際に行われるばらつきを考慮した低減や、耐久性・使用環境・施工性等を考慮した低減は行っていない。また、非構造部材として用いられる内外装材の場合、構造部材ほどの厳密な仕様規定はないことから、表 3 で求めた内外装材の壁量を、構造部材の壁量と同様に扱うことはできないと考える。ただし、戸建木造住宅における内外装材の寄与分を推測するには有効なデータであり、効率的な戸建木造制振住宅の設計には内外装材の影響を考慮する必要があるということを再確認することができる。

5. まとめ

戸建木造制振住宅の簡易設計法の提案に向けて、内装材として石膏ボード、外装材として窯業系サイディングとモルタル塗りの計 3 種類の内外装材に着目し、それぞれの壁の強制変形実験を行った。内外装材を取り付けた壁の層せん断力と層間変形の関係性を把握するとともに、実在する住宅 4 棟の調査を行うことで、内外装材が戸建木造住宅の全体の耐力に占める割合を把握した。また、内外装材の各変形時の損傷度合いを把握し、戸建木造制振住宅の設計クライテリアを決定するための基礎的資料を得た。

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

表 2 内外装材の壁倍率

試験体		G	S	M
P_{120}	kN	2.96	2.02	5.14
P_y	kN	1.94	2.89	3.52
$2/3P_{max}$	kN	2.18	3.63	4.37
$0.2P_u/D_s$	kN	2.27	1.86	3.31
4つの最小値	kN	1.94	1.86	3.31
壁倍率	-	1.1	1.0	1.9

表 3 内外装材の壁量

(a) 1m^2 あたりの存在壁量

	内装材	外装材
1層	0.403	0.131
2層	0.469	0.156

(単位: P/m^2)

(b) 外壁が窯業系サイディングの場合の内外装材の存在壁量

	内装材	外装材	合計
1層	0.404	0.119	0.523
2層	0.469	0.142	0.611

(単位: m/m^2)

(c) 外壁がモルタル塗りの場合の内外装材の存在壁量

	内装材	外装材	合計
1層	0.404	0.227	0.630
2層	0.469	0.269	0.738

(単位: m/m^2)

- 5) 松田和浩, 笠井和彦, 坂田弘安, 大木洋司, 和田章, 中山一孝: 財産保持に優れた制振住宅に関する開発の経過報告, その 17 2 層木質制振架構の振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.851-852, 2006.9
- 6) 松田和浩, 坂田弘安, 笠井和彦, 大木洋司: 木質制振壁の動的強制変形応答に関する実験研究, 構造工学論文集, 日本建築学会・土木学会, Vol.54B, 2008.3
- 7) (財)日本住宅・木材技術センター: 木造軸組工法住宅の許容応力度設計 第 3 版, 2006 年
- 8) (財)日本建築防災協会: 木造住宅の耐震診断と補強方法 木造住宅の耐震精密診断と補強方法(改訂版), 2006 年
- 9) 社団法人 日本建築学会: 木質構造設計基準・同解説 - 許容応力度・許容耐力設計法- 第 4 版, 2006 年

付録 1: 壁倍率の算定手順

壁倍率算定の際に用いられる、完全弾塑性モデルによる降伏耐力、終局耐力等の算定手順⁷⁾を図 A-1 とともに以下に示す。

- 1) 包絡線上の $0.1P_{max}$ と $0.4P_{max}$ を結ぶ第 I 直線を引く。
- 2) 包絡線上の $0.4P_{max}$ と $0.9P_{max}$ を結ぶ第 II 直線を引く。
- 3) 包絡線に接するまで第 II 直線を平行移動し、これを第 III 直線とする。
- 4) 第 I 直線と第 III 直線との交点の荷重を降伏耐力 P_y とし、この点から X 軸に平行に第 IV 直線を引く。
- 5) 第 IV 直線と包絡線との交点の変位を降伏変位 δ_y とする。

- 6) 原点と (δ_y, P_y) を結ぶ直線を第V直線とし、それを初期剛性 K と定める。
- 7) 最大荷重後の $0.8P_{max}$ 荷重低下域の包絡線上の変位を終局変位 δ_u と定める。
- 8) 包絡線と X 軸および δ_u で囲まれる面積を S とする。
- 9) 第V直線と δ_u と X 軸および X 軸に平行な直線で囲まれる台形の面積が S と等しくなるように X 軸に平行な第VI直線を引く。
- 10) 第V直線と第VI直線との交点の荷重を完全弾塑性モデルの終局耐力 P_u と定め、その時の変位を完全弾塑性モデルの降伏点変位 δ_v とする。
- 11) 塑性率 $\mu = \delta_u / \delta_v$ とする。
- 12) 構造特性係数 D_s は、塑性率 μ を用い、 $D_s = 1/\sqrt{2\mu-1}$ とする。

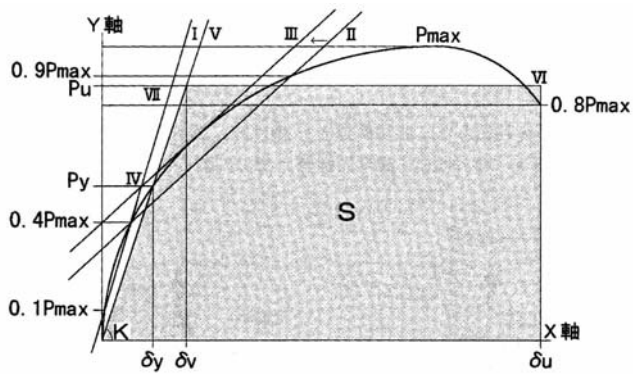


図 A-1 完全弾塑性モデルによる降伏耐力・終局耐力等の求め方

