木造軸組工法耐力壁の静的・動的性状に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON STATIC AND DYNAMIC PROPERTIES OF SHEAR WALLS
OF WOODEN POST AND BEAM CONSTRUCTION町田 健一^{*1}, 綿引 誠^{*1}, 大橋 好光^{*2}, 坂本 功^{*3}*Kenichi MACHIDA, Makoto WATAHIKI, Yoshimitsu OHASHI
and Isao SAKAMOTO*

Static and dynamic loading tests were carried out in 8 types of shear walls of wooden post and beam construction. Comparative analyses of the results proved the followings with regard to “static and dynamic properties” and “influence of cyclic loading”. In the all types, the dynamic load exceeded 1.1-1.5 times as much as the static load even in small displacement. Regarding the maximum load, the static and dynamic loads were almost the same in wooden elements, and the dynamic load was larger than the static load in inorganic elements. “ δ_u ” of the all types and “ δ_y ” of the wooden elements were smaller under the dynamic load than under the static load. The failure type of wooden boards changed from “pull-out of nails” to “mixture of punch-outs” under the dynamic load, and the others had no change in the static and dynamic loads. Through the influence of cyclic load, the maximum load of the static loading test of plywood and inorganic boards decreased at 10%-20% range.

Keywords : *Wooden Post and Beam Construction, Shear Wall, Static Loading Test, Dynamic Loading Test*

木造軸組工法、耐力壁、静的加力試験、動的加力試験

1. はじめに

1995年の「阪神・淡路大震災」を機に、木造軸組工法住宅の耐震性能は大きな進化を遂げている。震災による6,400人を上回る犠牲者の内、8割近くは圧死によると推定され、大部分は倒壊した建物の下敷きになったためと考えられている。大きな被害が発生した建物は古い構法のものや耐力壁が少ないものであったとの原因分析²⁾がなされている。建物の部位のうち耐力壁が耐震性能に大きな役割を果たしていることは明白である。耐力壁に対しては単に量的な要求の他に、より優れた性能への質的な要求がありそれを満足させるべく改良が行われているが、その性能の見極め方も重要である。

現在、2階建てまでの木造住宅は建築基準法施行令46条によるいわゆる壁量規定ルートによって設計されており、耐力壁の性能評価は「壁倍率」を基本に行われているのが一般的である。壁倍率を求める具体の試験法及び評価法は、各性能評価機関の業務規定³⁾の中で定められており、加力方法として静的正負交番同一履歴3回繰り返し加力が用いられている。

ここで実際に建物に加わる外力を想定すると、地震動は言うまで

もなく動的なものであるため、静的試験による評価が安全側であるか否かの判断、つまり静的性状と動的性状の違いを把握することは重要である。また、一方向単調加力についても、直下型地震や風荷重などの一方向に大きく加わる力を想定すると、その性状を把握しておくことは重要である。

耐力壁の静的・動的性状に関する既往の研究として、山田ら⁴⁾は筋かい・合板・貫・土壁耐力壁と軸組フレームについて実験を行い、土壁と軸組フレームで層間変形が0.02rad.を超えると動的実験が静的実験の復元力を上回ると荷重速度の影響を報告している。また、箕輪ら⁵⁾は合板耐力壁について動的が静的繰り返しの1.09倍の最大荷重を示し、最大荷重時の変形角は動的が静的の72%であると報告している。

一方で耐力壁自体の仕様に目を向けると、従来一般的であった筋かいや構造用合板に代表される木質系面材に加え、例えば窯業系面材のような防火性能を合わせ持つといった多機能の特徴とした新しい耐力壁が多数上市されている状況や、間仕切壁に多用され建物全体の耐震性能への影響が大きい石膏ボード⁶⁾も含め、耐力壁仕様の違いによる性状を把握することも重要である。

本論文の一部は既に文献1)で発表したものである。

^{*1} 住友林業株式会社 主任研究員

^{*2} 武蔵工業大学 教授・工博

^{*3} 東京大学大学院 教授・工博

Senior Researcher, Sumitomo Forestry Co., Ltd.
Prof., Musashi Institute of Technology, Dr. Eng.
Prof., The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

2. 3 静的加力試験概要

試験体は、各耐力要素を両端のグリッドに配置した幅 3,640 mm、高さ 3,055 mm の壁試験体である。試験方法は柱脚固定式（無載荷）の面内せん断試験とし、全ての柱頭柱脚にホールダウン金物（S-HD15）を設置し、土台の 3 ヲ所をアンカーボルトで試験機に緊結した。繰り返し加力（S1）の制御は、見かけのせん断変形角（1/600, 1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50 rad.）を基準として 3 回ずつ繰り返し、最終的には S1・S2 共に最大荷重を記録した後、最大荷重の 80% の荷重に低下するか若しくは 1/15 rad. を超えるまで押し側に加力した。加力速度は概ね 0.05~0.1kine である。

2. 4 動的加力試験概要

各試験体へ入力した地震動のスケールと加振回数を表 2 に示す。加振回数とは、一つの試験体に対して最大荷重の 80% の荷重に低下するか若しくは 1/15 rad. を超えるまでに要した加振の回数である。振動台の制御精度は振幅が目標波の 80~90% であったが、周波数特性は基準波と概ね同じだった。

試験体の仕様は静的加力試験と同じである。但し、試験を安定的に行なうために 2 つの壁試験体を 910mm 幅で並列に配置し剛床を兼ねた鍾架台（写真 3）で梁上を連結した箱形の試験体とした。全ての柱頭柱脚にホールダウン金物（S-HD15）を設置し、直交側は合板による振れ止めを設けた。試験体の挙動は、サーボ型加速度計とレーザー変位計およびワイヤー巻取り式変位計を用いて各部を計測した。架台を含めた鍾の重量は、試験機に加振能力の関係から耐力壁の仕様によらず 50.8kN に統一した。壁倍率 1 あたりの基準耐力 1.96kN/m から層せん断力係数 C を求めると、壁倍率 2.5 で C=0.35 に相当する量であり、建築基準法で規定される C=0.2 より耐力壁が多い設定である。但し、試験体の固有振動数を常時微動で測定したところ、4~7Hz の範囲にあり近年の木造軸組工法住宅の特性に近いものであった。また、柱 1 本当たりの平均負担重量は 6.35kN で十分設計の範囲内にある。

3. 静的加力試験結果および考察

3. 1 解析方法

変形評価は見かけのせん断変形角を用いた。荷重の評価には軸組フレームの影響を除くため、図 3 に示すように各耐力壁の荷重から別試験で求めた軸組フレームのみの荷重を差し引いて評価することとした。具体的には 0.1mrad. ピッチの単位変形量に対応した荷重を直線補完によって求めた後、軸組フレーム分を単純に差し引いた。

3. 2 荷重変形関係

a) 繰り返しの影響

図 4 に静的繰り返し加力（S1）と単調加力（S2）の押し側の包絡線を、表 3 に特定変形角時荷重と荷重比（S1/S2）を示し、次に各仕様の特徴を示す。

・筋かい（B）：1/75rad. 付近まで差はなく、繰り返しの影響は見ら

表 2 動的加力試験—入力スケールと加振回数

	JMA-KOBE-NS波		EL Centro-NS波	
	割み加振 (DK1)	最大加振 (DK2)	割み加振 (DE1)	最大加振 (DE2)
B	10%~70% (7)	70% (2)	20%~180% (9)	180% (2)
G	15%~52.5% (6)	52.5% (3)	10%~100% (10)	100% (3)
P1	10%~90% (9)	90% (2)	20%~240% (12)	240% (3)
P2	10%~90% (9)	90% (3)	20%~240% (12)	240% (3)
Dms	10%~90% (9)	90% (3)	20%~240% (12)	240% (3)
Dmk	10%~90% (9)	90% (2)	20%~220% (11)	220% (3)
Ks	10%~120% (12)	120% (3)	20%~280% (14)	300% (3)
Kh	10%~120% (12)	120% (4)	20%~300% (15)	300% (5)

※カッコ内は加振回数

写真 3 鍾架台

図 3 軸組フレームの影響

図 4 静的加力試験—荷重変形関係 <S1・S2 の比較>

れない。その後はいずれの試験体も間柱の割裂をきっかけに圧縮筋かいのはらみ出しで荷重低下するため繰り返しの影響は明確では無い。

- ・石膏ボード (G) : ばらつきが大きい。1/100rad. 付近から徐々にS1が下回り最大で19%低下し、繰り返しの影響が見られた。
- ・構造用合板 (P1・P2) : P1 はばらつきがほとんど無く、S1 の荷重が初期で約 15%、最大荷重で 10%下回り繰り返しの影響が若干見られた。P2 はS2 のばらつきが特に大きく平均値と比較すると1/75rad. 付近より逆にS2の荷重が10%程度低下した。
- ・火山性ガラス質複層板 (Dms・Dmk) : 1/200rad. 付近より徐々にS1の荷重が低下し、Dmsでは最大荷重で21%下回り、繰り返しの影響が最も大きく現れた。Dmk-S2の最大荷重時変位がDms-S2より小さいのは、床勝ち納まりによって面材の割れが発生したことが原因である。その影響を除けばDmsと同じ性状と推定される。
- ・小幅板斜め貼合せ面材 (Ks・Kh) : ばらつきはほとんど無く、繰り返しの影響も見られない。

b) 耐力要素による比較

図5に繰り返し加力(S1)における各耐力要素の3体平均の押し側包絡線をまとめて示し、次に各仕様の特徴を示す。

- ・筋かい (B) : 面材系に比べ初期剛性が低く、1/75rad. 付近から筋かいのはらみ出しで荷重が一旦低下するものの、その後ははらみだしの増加と共に粘り強く推移する。
- ・石膏ボード (G) : 初期剛性は他の面材耐力壁に匹敵する程高いが1/100rad. 付近で最大荷重となりその後の荷重低下は早い。
- ・構造用合板 (P1・P2) : P2は粘り強い性状を示すものの、P1は釘のパンチアウト(釘頭貫通破壊)が発生するため最大荷重後の荷重低下が比較的早い。
- ・火山性ガラス質複層板 (Dms・Dmk) : 剛性は他の面材より高いが、最大荷重の発現が比較的早く、また最大荷重後の荷重低下も早い。
- ・小幅板斜め貼合せ面材 (Ks・Kh) : 壁倍率(規定値)が同じ2.5倍の仕様の中で最も高い耐力を示した。

3. 3 静的破壊性状

いずれの試験体も繰り返しの影響による最終的な破壊性状の違いは見られなかった。次に各仕様の特徴を示す。

- ・筋かい (B) : 圧縮側では、筋かい取合間柱の割裂後、筋かいが面外へはらみ出し座屈破断が発生した。実際の建物では面材による座屈止め効果がある。引張側では筋かい金物のねじが抜け出した。
- ・石膏ボード (G) : ねじパンチアウト及びねじ周りの面材縁切れ、床勝ち部で面材が床板と干渉し圧壊した。
- ・構造用合板 (P1・P2) : P1は数本の釘引き抜けが発生するがほとんどの釘がパンチアウトするため、最大荷重後の早期荷重低下に繋がったと推定出来る。P2は全く逆の構成で釘の引き抜け過程で粘

表3 静的加力試験—繰り返し加力と単調加力の荷重比

静的加力		特定変形角時荷重(kN)と荷重比											
		1/800	1/450	1/300	1/200	1/150	1/120	1/100	1/75	1/50	1/30	1/15	Pmax
B	繰り返し(S1)	3.81	4.62	5.98	7.86	9.31	10.55	11.68	11.16	9.81	9.64	5.38	12.36
	単調(S2)	3.51	4.22	5.56	7.27	8.92	10.39	11.55	12.21	11.00	10.78	5.97	12.98
	S1/S2	109%	109%	108%	108%	104%	102%	101%	91%	89%	89%	90%	95%
G	繰り返し(S1)	3.77	3.79	4.39	4.88	4.81	4.78	5.02	4.87	4.05	2.97	1.94	5.04
	単調(S2)	3.51	3.93	4.49	4.88	5.01	5.03	5.15	5.28	5.00	3.38	1.98	5.40
	S1/S2	107%	97%	98%	100%	96%	95%	97%	88%	81%	88%	98%	93%
P1	繰り返し(S1)	5.20	6.40	8.03	10.12	11.24	11.85	12.75	13.75	15.00	15.33	-	15.53
	単調(S2)	6.29	7.49	9.07	10.67	11.76	12.56	13.27	14.52	16.02	17.18	8.62	17.29
	S1/S2	83%	85%	89%	95%	96%	94%	96%	95%	94%	89%	-	90%
P2	繰り返し(S1)	6.17	7.17	8.57	10.11	10.97	11.73	12.66	13.66	15.30	16.16	13.48	16.37
	単調(S2)	6.48	7.53	8.95	10.33	11.21	11.87	12.48	13.31	14.07	14.02	10.72	14.55
	S1/S2	95%	95%	96%	98%	98%	99%	102%	103%	109%	115%	126%	113%
Dms	繰り返し(S1)	6.60	7.84	9.32	10.99	11.39	11.38	12.33	11.70	11.97	9.52	-	12.93
	単調(S2)	4.55	6.22	10.34	12.32	13.42	14.07	14.60	15.21	16.13	-	-	16.42
	S1/S2	145%	93%	90%	89%	85%	81%	84%	77%	74%	-	-	79%
Dmk	繰り返し(S1)	7.33	8.38	10.39	12.40	13.48	13.86	14.85	14.68	15.04	8.10	3.76	15.71
	単調(S2)	7.50	8.79	10.92	13.14	14.53	15.47	16.26	15.03	14.35	8.20	3.08	17.17
	S1/S2	98%	95%	95%	94%	93%	90%	91%	98%	105%	99%	122%	91%
Ka	繰り返し(S1)	7.55	8.55	10.32	11.88	12.73	13.43	14.41	15.66	17.78	21.43	21.44	23.36
	単調(S2)	7.51	8.61	10.30	11.96	12.99	13.82	14.59	16.08	18.40	21.74	21.24	23.15
	S1/S2	100%	99%	100%	99%	98%	97%	99%	97%	97%	99%	101%	101%
Kh	繰り返し(S1)	8.65	9.67	11.25	12.85	13.76	14.57	15.57	17.03	20.10	23.24	22.97	25.12
	単調(S2)	7.44	8.56	10.37	12.18	13.44	14.42	15.28	16.88	19.37	22.44	23.34	23.96
	S1/S2	116%	113%	108%	106%	102%	101%	102%	101%	104%	104%	98%	105%

図5 静的加力試験—荷重変形関係 <耐力壁仕様の比較>

り強い性状を示したと推定出来る。

- ・火山性ガラス質複層板 (Dms・Dmk) : 釘やねじのパンチアウトや一部面材縁切れ、面材の割れで破壊。
- ・小幅板斜め貼合せ面材 (Ks・Kh) : 釘頭が面材に大きくめり込みながら引き抜けるのが特徴。釘の引き抜け主体だが、パンチアウトも発生した。

4. 動的加力試験結果および考察

4. 1 解析方法

荷重は、錘を含めた試験体の上半分の質量に錘架台位置で計測した加速度を乗じて求めた。また、静的加力試験と同様に別試験で求めた軸組フレーム荷重を差し引くと共に、静的加力試験と比較するため1構面分の荷重(全体の1/2)に変換した。変形は、試験体頂部と振動台の絶対変位の差から求めた見かけのせん断変形角を用いた。荷重変形の包絡線は加振毎のデータをすべて連結して求めた。

4. 2 荷重変形関係

a) 試験方法による比較

図6に各耐力要素の動的加力試験の包絡線を示す。2種類の地震波による違いが現れたのは小幅板斜め貼合せ面材 (Ks・Kh) のみで、JMA-KOBE-NS 波を使用した加振(DK1, DK2)の方がEL Centro-NS 波を

使用した加振 (DE1, DE2) よりも荷重が 10% 程度上回った。その他の仕様は、初期はほぼ同等で塑性化するに従いばらついた。また、2 種類の加振方法について比較すると、刻み加振 (DK1, DE1) の方が最大加振 (DK2, DE2) よりも若干荷重が小さい傾向が見られたが、顕著な差はなく概ね同じであった。

b) 耐力要素による比較

図 7 に動的加力試験の 4 体平均 (DK1, DK2, DE1, DE2) の包絡線を示し、次に各仕様の特徴を示す。

- ・筋かい (B) : 1/100rad. 付近の比較的小さい変形角から圧縮筋かいが面外にはらみ出して座屈破断が発生し荷重低下した。
- ・石膏ボード (G) : 初期剛性は高いが約 1/100rad. と早い段階で最大荷重を迎え、その後の荷重低下も比較的早い。
- ・構造用合板 (P1・P2) : 荷重は小幅板斜め貼合せ面材の 70~80% 程度であるが、同じように粘り強い性状を示す。
- ・火山性ガラス質複層板 (Dms・Dmk) : 初期の剛性は高いものの、最大荷重の発現が 1/100~1/50rad. の間と早く、その後の荷重低下も比較的早い。
- ・小幅板斜め貼合せ面材 (Ks・Kh) : 5 種類の中で最も耐力が高く、塑性後の変形能力も大きい。

4. 3 動的破壊性状

動的破壊性状は、構造用合板 (P2) と小幅板斜め貼合せ面材 (Ks・Kh) において、静的に比べて破壊性状が変化した。その他の要素では静的との違いは無かった。

- ・構造用合板 (P1・P2) : P1 は釘のパンチアウトで静的と変わらないが、P2 では釘の引き抜けと合わせ DE1 と DE2 で釘のパンチアウトが多数混在した。
- ・小幅板斜め貼合せ面材 (Ks・Kh) : 釘頭がめり込みながら引き抜け最終的な破壊として釘の引き抜けが主体であるのは静的と変わらないが、DK1, DK2 でパンチアウトが多数混在した。

5. 静的と動的の比較

5. 1 荷重変形関係

図 8 に静的試験 (S1・S2) と動的試験 (D) の平均包絡線を、表 4 に荷重比 (D/S1) を示す。動的荷重 (D) は全ての仕様で小変形領域から静的荷重 (S1) を概ね 1.1~1.5 倍上回った。最大荷重は、木質系要素 (B・P1・P2・Ks・Kh) では静動によらずほぼ同等で、無機系要素 (G・Dms・Dmk) では動的が上回る傾向であった。木質系面材 (P1・P2・Ks・Kh) の最大荷重は、動的の方が小さな変形角で発生した。次に各仕様の静的繰り返し (S1) に対する動的 (D) の特徴を示す。

- ・筋かい (B) : 最大荷重を記録する 1/100rad. 付近まで動的荷重が 10~30% 上回った。その後、動的荷重は急激に低下し逆転した。
- ・石膏ボード (G) : 最大荷重を記録する 1/100rad. まで動的荷重が 30~50% 上回った。これは各耐力要素の中で最も高い割合である。

図 6 動的加力試験—荷重変形関係 <DK1・DK2・DE1・DE2 の比較>

図 7 動的加力試験—荷重変形関係 <耐力壁仕様の比較>

但し、その後は低下し 1/50rad. 付近で静的荷重と同等となった。

- ・構造用合板 (P1・P2) : 1/50rad. 付近まで動的荷重が 5~20%上回る。その後 1/50rad. を超えると逆転し動的が静的を下回った。特に P1 の荷重低下は急激である。最大荷重は動的の方が若干上回る程度で、最大荷重時変形角は動的の方が小さい。
- ・火山性ガラス質複層板 (Dms) : 1/30rad. 付近まで動的荷重が 30~40%と大きく上回る。その後どちらも比較的早く低下した。
- ・火山性ガラス質複層板 (Dmk) : 1/50rad. 付近まで動的荷重が 20~30%と大きく上回る。その後どちらも比較的早く低下した。
- ・小幅板斜め貼合せ面材 (Ks・Kh) : 1/50rad. 付近まで動的荷重が 20~40%と大きく上回る。その後 1/30rad. を超えると逆転し動的が静的を下回った。最大荷重は動的の方が若干上回る程度であるが、最大荷重時変形角は動的の方が明らかに小さい。

5. 2 完全弾塑性モデル

a) モデル化の目的

試験方法の違いによる傾向を定量的に把握する目的で、建築基準法施行令第 46 条第 4 項表 1 の (八) に基づく木造軸組工法耐力壁の評価方法^{7) 8)}である完全弾塑性モデルを用いて比較した。完全弾塑性モデルは、試験体毎に求め、三つの試験方法別に平均し比較した。動的加力試験の 4 体の試験体は入力波などが異なるが、同じ動的の試験としてまとめた。試験体毎に求めた完全弾塑性モデルを試験方法別に平均したものを図 9 に、完全弾塑性モデルと包絡線の特徴点の値を試験方法別に平均した一覧を表 5 に示す。特徴点の中から降伏耐力 (P_y)、降伏変位 (δ_y)、終局耐力 (P_u)、終局変位 (δ_u)、剛性 (k)、構造特性係数 (D_s) について、試験方法別に比較したものを図 10 に示す。次に考察を述べる。

b) 壁倍率の評価項目

表 5 ○印の四つの項目は、壁倍率の算出に用いる評価項目である。壁倍率は、この評価項目の値にそれぞれのばらつき係数 (母集団を正規分布と見なし統計的処理に基づく信頼水準 75% の 50% 下側許容限界をもとに求めた値) を乗じて得た値の最小値に、材料の耐久性や施工の影響等を勘案して仕様毎に設定された低減係数を乗じ、最後に壁倍率の基準耐力 (1.96kN/m/倍) で除して求めると規定^{3) 7)}されている。ここでは試験方法別の比較を目的とし、動的加力試験の 4 体の試験法が異なることや仕様によって低減係数が異なることなどからばらつき係数や低減係数は考慮せず静的加力試験も含め全て試験方法別の平均値で示した。また、動的加力試験の 4 体を同じ試験法と見なし、前述のばらつき係数を考慮しても本節の結論は変わらないことも確認した。

壁倍率を求める試験法である静的正負交番 3 回繰り返し加力試験 (S1) の評価項目の最小値に対して、静的一方向単調加力試験 (S2) と動的加力試験 (D) の値が上回る関係であれば、現状の壁倍率は加力方法によらず安全側の評価と判断でき、その比率は安全率に相当

図 8 荷重変形関係 <静的と動的の比較>

表 4 静的加力と動的加力の荷重比

動的/静的		特定変形角時荷重(kN)と荷重比											
		1/600	1/450	1/300	1/200	1/150	1/120	1/100	1/75	1/50	1/30	1/15	Pmax
B	静的(S1)	3.81	4.62	5.98	7.86	9.31	10.55	11.68	11.16	9.81	9.64	5.38	12.36
	動的(D)	4.95	5.75	7.30	9.25	10.90	12.26	12.97	11.84	10.84	5.75	0.85	13.51
	D/S1	130%	124%	122%	118%	117%	116%	111%	104%	110%	60%	12%	109%
G	静的(S1)	3.77	3.79	4.39	4.86	4.81	4.78	5.02	4.67	4.05	2.97	1.94	5.04
	動的(D)	4.92	5.42	5.74	6.98	6.99	7.41	7.56	6.64	4.46	2.66	-	7.75
	D/S1	131%	143%	131%	143%	146%	155%	150%	142%	110%	90%	-	154%
P1	静的(S1)	5.20	6.40	8.03	10.12	11.24	11.85	12.75	13.75	15.00	15.33	-	15.53
	動的(D)	7.74	8.85	10.86	12.27	12.90	13.17	14.50	14.79	15.96	9.89	2.07	16.92
	D/S1	149%	138%	135%	121%	115%	111%	114%	108%	106%	65%	-	109%
P2	静的(S1)	6.17	7.17	8.57	10.11	10.97	11.73	12.66	13.66	15.30	16.16	13.48	16.37
	動的(D)	6.75	8.01	9.82	11.70	12.56	12.78	13.34	14.44	16.09	13.59	6.58	16.72
	D/S1	109%	112%	114%	116%	115%	109%	105%	106%	105%	84%	49%	102%
Dms	静的(S1)	6.60	7.64	9.32	10.99	11.39	11.38	12.33	11.70	11.97	9.52	-	12.93
	動的(D)	9.13	10.66	13.23	14.56	15.96	15.92	16.35	16.40	16.05	6.84	-	18.16
	D/S1	138%	140%	142%	132%	140%	140%	133%	140%	134%	72%	-	140%
Dmk	静的(S1)	7.33	8.38	10.39	12.40	13.48	13.86	14.85	14.68	15.04	8.10	3.76	15.71
	動的(D)	9.41	11.25	13.47	14.56	16.03	18.09	19.13	18.83	19.44	-	-	20.27
	D/S1	128%	134%	130%	117%	119%	131%	129%	128%	129%	-	-	129%
Ks	静的(S1)	7.55	8.55	10.32	11.88	12.73	13.43	14.41	15.66	17.78	21.43	21.44	23.36
	動的(D)	9.54	11.30	13.32	15.48	16.84	17.37	18.31	20.66	21.59	21.57	15.00	25.17
	D/S1	126%	132%	129%	130%	132%	129%	127%	132%	121%	101%	70%	108%
Kh	静的(S1)	8.65	9.67	11.25	12.85	13.76	14.57	15.57	17.03	20.10	23.24	22.97	25.12
	動的(D)	12.02	13.49	15.66	17.51	18.27	19.64	21.00	21.99	22.72	23.68	15.02	25.40
	D/S1	139%	140%	139%	136%	133%	135%	135%	129%	113%	102%	65%	101%

する。表5の太枠は評価項目の中の最小値を示し、網掛けはS1の最小値を下回る場合を示す。動的加力試験(D)の値は、全ての仕様で静的繰り返し試験(S1)の最小値を上回り、安全率は概ね1.3倍の範囲にあることが分かった。静的単調加力(S2)の値は、5仕様(G・P2・Dmk・Ks・Kh)でS1の最小値を若干下回り、注意を要することが分かった。火山性ガラス質複層板(Dmk)の場合は、繰り返し加力の影響で荷重が徐々に低下する性状から、単調加力において繰り返し加力の影響が無いために上昇した荷重が早くに低下する性状となった。その影響で構造特性係数(Ds)が0.29から0.35と大きくなり最小値の評価項目がPyからPu・(0.2/Ds)に変わった結果、S2が若干下回った。Dms-S2も同じ性状である。構造用合板(P2)と小幅板斜め貼合せ面材(Kh)は、同じ評価項目のPyの中でS2が若干下回った。Pyには最大荷重及び最大荷重までの荷重変形関係が影響するが、P2とKhのS2はこれらがS1と比べ若干低かった。また、石膏ボード(G)と小幅板斜め貼合せ面材(Ks)は、顕著な差ではない。

c) 降伏耐力(Py)と降伏変位(δy)

降伏耐力(Py)は、全ての仕様で静的試験(S1・S2)よりも動的試験(D)の方が高く、1.1~1.4倍程度の動的安全率があることが分かった。特に無機系要素(G・Dms・Dmk)は1.3~1.4倍と高く、次いで筋かい(B)と小幅板斜め貼合せ面材(Ks・Kh)が1.15~1.2倍で、構造用合板(P1・P2)は1.1倍であった。降伏変位(δy)は、特に木質系要素(B・P1・P2・Ks・Kh)で静的繰り返し(S1)よりも動的(D)が小さくなる傾向を示した。Pyを δy で除して求めた剛性(k)は全ての仕様で動的(D)の方が高く概ね1.3~1.6倍であったが、小幅板斜め貼合せ面材(Kh)は2.3倍と最も高い比率を示した。

d) 終局耐力(Pu)と終局変位(δu)

終局耐力(Pu)は、降伏耐力(Py)の傾向と同様で、特に無機系

図9 完全弾塑性モデル <試験方法別の平均モデル比較>

表5 完全弾塑性モデルと包絡線の特徴点の一覧

耐力要素	B			G			P1			P2			Dms			Dmk			Ks			Kh		
試験方法	D	S1	S2	D	S1	S2	D	S1	S2	D	S1	S2	D	S1	S2	D	S1	S2	D	S1	S2	D	S1	S2
○降伏耐力 Py (kN)	7.34	6.32	6.16	4.42	3.22	3.20	10.30	9.66	9.67	10.47	9.17	8.35	11.08	8.20	9.95	12.15	9.16	9.63	14.63	11.88	11.83	14.53	12.96	12.59
○Pu × (0.2/Ds) (kN)	5.88	5.47	6.86	5.01	4.33	4.93	11.65	9.89	12.90	12.18	13.15	13.84	11.78	9.39	9.29	11.56	9.68	8.77	17.13	16.36	16.94	23.85	17.26	17.50
○0.2/3Pmax (kN)	9.01	8.24	8.66	5.17	3.36	3.60	11.28	10.36	11.53	11.15	10.92	9.70	12.11	8.62	10.95	13.51	10.47	11.45	16.78	15.57	15.44	16.93	16.74	15.97
○見掛け1/120rad (kN)	12.26	10.55	10.39	7.41	4.78	5.03	13.17	11.85	12.56	12.78	11.73	11.87	15.92	11.38	14.07	18.09	13.86	15.47	17.37	13.43	13.82	19.64	14.57	14.42
終局耐力 Pu (kN)	11.95	10.90	11.31	6.94	4.44	4.99	15.19	13.94	15.95	14.64	15.10	13.41	16.13	11.46	14.92	18.03	13.94	15.55	21.84	20.40	20.68	22.00	22.12	21.79
最大荷重 Pmax (kN)	13.51	12.36	12.98	7.75	5.04	5.40	16.92	15.53	17.29	16.72	16.37	14.55	18.16	12.93	16.42	20.27	15.71	17.17	25.17	23.36	23.15	25.40	25.12	23.96
降伏変位 δy (rad.)	1/302	1/278	1/254	1/762	1/826	1/725	1/340	1/220	1/257	1/280	1/238	1/358	1/418	1/352	1/321	1/373	1/371	1/382	1/248	1/190	1/205	1/373	1/181	1/181
降伏点変位 δv (rad.)	1/186	1/162	1/138	1/482	1/605	1/467	1/231	1/154	1/156	1/203	1/145	1/223	1/288	1/261	1/214	1/251	1/244	1/237	1/166	1/110	1/117	1/246	1/107	1/105
終局変位 δu (rad.)	1/48	1/32	1/25	1/68	1/44	1/36	1/29	1/23	1/18	1/21	1/15	1/16	1/39	1/30	1/40	1/45	1/36	1/48	1/20	1/13	1/13	1/16	1/13	1/12
Pmax時変形角 (rad.)	1/92	1/82	1/80	1/105	1/100	1/72	1/46	1/28	1/28	1/29	1/27	1/35	1/48	1/54	1/47	1/52	1/60	1/81	1/32	1/20	1/21	1/34	1/21	1/18
構造特性係数 Ds	0.41	0.40	0.33	0.28	0.20	0.20	0.26	0.28	0.25	0.24	0.23	0.19	0.27	0.24	0.32	0.31	0.29	0.35	0.26	0.25	0.24	0.18	0.26	0.25
剛性 k (kN/mm)	0.82	0.65	0.58	1.24	0.98	0.86	1.29	0.79	0.92	1.08	0.81	1.10	1.71	1.06	1.18	1.67	1.25	1.36	1.34	0.83	0.89	2.00	0.87	0.84

※○印は壁倍率の評価項目を示し、太枠欄はその中の最小値を示す。

網掛け欄は、動的加力(D)若しくは静的単調加力(S2)の最小値が静的繰り返し加力(S1)の最小値を下回るケースを示す。

要素 (Dms・Dmk・G) が動的試験 (D) で高くなる傾向であった。終局変位 (δu) は、全ての仕様で静的繰り返し試験 (S1) よりも動的試験 (D) の方が小さな変位となり、動的において早期の荷重低下の傾向を示した。また、終局変位 (δu) は、二つのグループに分けられる。一つは δu が 1/20 rad. 以上の大変形を示す構造用合板 (P2) と小幅度斜め貼合せ面材 (Ks・Kh) のグループであり、もう一つは δu が 1/50~1/30rad. にある筋かい (B)・石膏ボード (G)・火山性ガラス質複層板 (Dms・Dmk) のグループである。これは破壊性状によって分類が可能である。「P2・Ks・Kh」は、面材自体は壊れずに釘が引き抜けて壊れるタイプ (接合具破壊) で、「B・G・Dms・Dmk」は耐力要素自体が座屈破断や割れによって壊れるタイプ (母材破壊) である。また、構造用合板 (P1) はパンチアウト破壊であるがパンチアウトには釘の引き抜けが伴うため母材と接合具破壊の混在となり中間的な変位となった。破壊性状は、終局変位 (δu) に大きく影響している。

e) 構造特性係数 (Ds)

構造特性係数 (Ds) の値が、静的繰り返し試験 (S1) に対して大きくなり降伏後の変形能力が小さくなる傾向を示したのは、石膏ボード (G) の動的試験 (D) と火山性ガラス質複層板 (Dms・Dmk) の静的単調加力試験 (S2) であった。他の仕様と異なり、石膏ボード (G) は動的試験 (D) で終局変位 (δu) は小さくなるのに対し降伏点変位 (δv) は若干大きくなり、火山性ガラス質複層板 (Dms・Dmk) は静的単調加力 (S2) で降伏点変位 (δv) は若干大きくなるのに対し終局変位 (δu) は小さくなるのが原因である。ほかは動的試験 (D) で構造特性係数 (Ds) が若干大きくなる傾向を示す仕様が多い。また、脆性的な破壊をした筋かい (B) の Ds は、0.33~0.41 とほかと比べて大きい。

6. まとめ

5 種類 8 仕様の木造軸組工法耐力壁に対して、静的と動的の 2 種類の加力方法について、それぞれ繰り返しと単調の合計 4 種類の試験を行った。「静的加力と動的加力の違い」と「繰り返しの影響」について比較分析を行い、次のようなことがわかった。

- ・全ての仕様で動的試験の荷重は、小変形領域から概ね 1.1~1.5 倍の比で静的試験の荷重を上回った。特に、無機系要素 (G・Dms・Dmk) は 1.3~1.5 倍と高い比を示した。
- ・最大荷重は、木質系要素 (B・P1・P2・Ks・Kh) ではほぼ同じで、無機系要素 (G・Dms・Dmk) では動的が上回る傾向であった。
- ・全ての仕様で完全弾塑性モデルの終局変位 (δu) は、動的の方が小さく早期の荷重低下の傾向を示し、降伏変位 (δy) も特に木質系要素 (B・P1・P2・Ks・Kh) で動的の方が小さくなる傾向を示した。
- ・破壊性状は、木質系面材 (P2・Ks・Kh) が動的で釘引き抜け主体からパンチアウト混在に変化した。その他は静的と同じであった。
- ・壁倍率の評価項目において、静的繰り返し加力試験の結果は概ね安全側であったが、単調加力が下回るケースもあり注意を要する。

・繰り返しによる影響は、構造用合板 (P1) と無機系要素 (G・Dms・Dmk) の静的加力で見られ、最大荷重で約 10~20%低下した。

なお、今後は接合部レベル (釘・ねじ) の加力試験などを行い静的・動的性状の検討を行う予定である。

図 10 完全弾塑性モデルの特徴点の比較

参考文献

- 1) 町田健一、綿引誠、大橋好光、金井正博、高橋浩一、中野一郎：各種耐力壁による静的・動的加力試験 (その 1~3)、日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海)、構造Ⅲ、pp99-104、2003.9
- 2) 坂本功、大橋好光、宮野道雄、土井正、村上雅英、宮澤健二：阪神大震災に見る木造住宅と地震、鹿島出版会、1997.4
- 3) 例えば、(財)日本住宅・木材技術センター：木造の耐力壁及びその倍率性能評価業務方法書、2001.5
- 4) 山田真澄、鈴木祥之、後藤正美、清水秀丸：単位木造フレームを用いた動的・静的実験による木造軸組の耐震性能評価、日本建築学会構造系論文集、第 582 号、pp95-102、2004.8
- 5) 策輪親宏、山口修由：振動台実験による木造耐力壁の動的耐震性能評価 第 3 報、合板釘耐力壁の荷重速度効果と動的降伏点、日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州)、構造Ⅲ、pp149-150、1998.9
- 6) 塩沢伸明、那須秀行、町田健一、石山央樹、大橋好光：面材耐力壁を用いた木造軸組構法住宅の実大静加力実験 (その 2) 壁の加算則の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸)、構造Ⅲ、pp111-112、2002.8
- 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、pp146、2001.12
- 8) 軽部正彦、原田真樹、林知行：荷重変形曲線のモデル化とその問題点共有のための提案 特徴点抽出の自動化ツールについて、日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東)、構造Ⅲ、pp215-216、2001.9

(2004年12月8日原稿受理、2005年4月14日採用決定)