

土塗り小壁を持つ木造軸組の水平耐力特性について

三谷 隆之*

鎌田 輝男**

Horizontal Bearing Capacity of Timber Frames with Soil Painted Small Wall (Kokabe)

Takayuki MITANI* and Teruo KAMADA**

ABSTRACT

Although wall systems are the important elements to resist horizontal force brought from earthquakes in Japanese traditional wooden houses, the overall walls are not preferred to secure an openhearted room arrangement and soil painted small walls, which are called Kokabe and are installed between ceiling and head jamb, are frequently used. The wall systems with kokabe are treated as non effective aseismic elements on the Building Standard Law in Japan but they have some contributions to horizontal bearing capacity of wooden houses. In this report, the horizontal bearing capacity of the wall system with kokabe are considered based the static push-pull experiments of the real size wall system with kokabe of different span length.

キーワード : 土塗り小壁, 柱間距離, 静的実験, 耐震性能

Keywords: Soil Paint Wall above Lintel, Column Span, Static Loading Test, Seismic Performance

1. はじめに

伝統的な木造建物では、開放的な間取りを確保するために、全面壁は少なく構面の一部が開口部となっている小壁等を多く配置する傾向がみられる。小壁は、現在の耐震設計において耐力壁として認められていないが、小壁を多く配置している伝統的な木造住宅の耐震性能評価を行う場合、小壁も重要な耐震要素となってくる。一般に木造住宅の耐震性は壁量によって評価されるが、小壁には、天井貫、胴貫、立貫などの貫材が入り竹小舞下地の土塗り壁によって水平移動に伴う軸組のせん断変形を拘束するため、小壁が水平抵抗力を有することは明らかである。しかし、土壁は、地方・地域により仕様が様々であり柱太さや小壁高さ、鴨居下長さ・壁厚など様々なパラメータが挙げられるため大きな課題となっている。

本研究では、基本として京都仕様の土壁を使用し、小壁の柱間距離をパラメータに実験を行い、小壁を構成する軸組の損傷状況の確認と復元力特性の把握を目的としている。

2. 土塗り小壁試験体¹⁾

土塗り小壁試験体の概略寸法と柱頭・柱脚接合部の詳細を図1および図2に示し、接合形式および部材寸法・材質を表1および表2に示す。

試験体の共通仕様としては、柱と土台120mm角、桁240mm×120mm、土台-鴨居間の高さ1820mmである。土壁部は、15mm×105mmの天井貫と胴貫および立貫を入れ、塗り厚60mmの竹小舞下地土塗り壁とした。なお、外側の壁(実験を行う際、正面に見る面)のみ漆喰仕上げとした。また、柱頭・柱脚接合部には、金物を用いない伝統的な長ほぞ+こみ栓仕様とし、柱-鴨居接合部のみ短ほぞ+釘打ちを使用した。試験体部材は、こみ栓(カシ材)以外をすべて徳島産のスギ材($E=700\text{kN/cm}^2$ 相当)を使用したものである。

試験体は、標準的な小壁として高さ2730mm、柱間距離1820mmの間幅試験体(標準試験体)を1としたとき、柱間距離を1/2とした半間幅試験体(柱間距離910mm)と柱間距離を2倍にした二間幅試験体(柱間距離3640mm)を2種類の計4体とした。二間幅試験体は、大きな開口部が確保できる柱間中央に束を使

*大学院建築学専攻 **建築学科

用した二間幅試験体と柱間中央に中間柱を使用した一間幅二連試験体の2種類とした。

3. 実験概要と加力計画

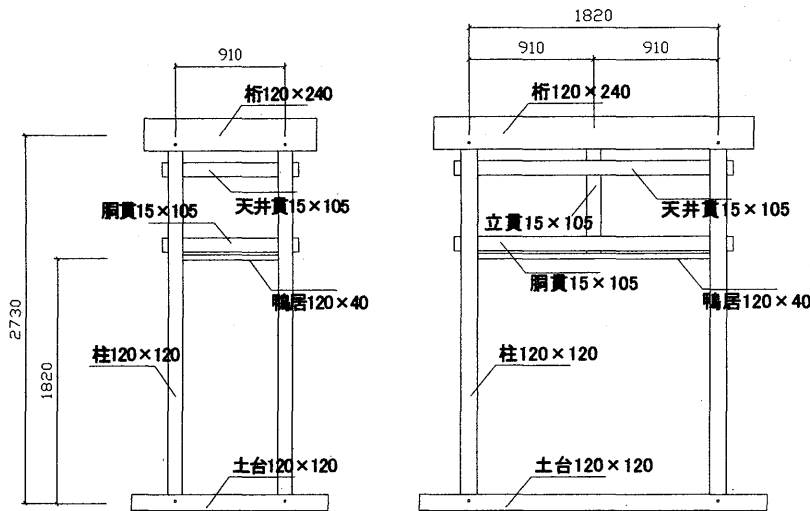
実験は、福山大学30号館(構造・材料開発研究センター)所有の木造軸組試験架台に試験体の土台をボルトで固定し、住宅の柱が負担する積載荷重を考慮して、柱一本に対して3.92kN(400kg)のおもりを柱頭に振り分けて載荷し、加力機(モートルシリンダ)により横架材部分を水平方向に繰り返し加力を行った。設置概要を図3に示す。また、このような軸組の積載荷重を考慮して実験を行う場合、柱頭部の水平移動が大きくなるにつれ左側の横架材端部で構面外へのねじれが発生し、軸組に水平加力が上手く伝わらず力を分散してしまうことが一昨年の研究で明らか

表1 接合形式

接合箇所	接合形式
柱頭・柱脚	長ほぞ+こみ栓
貫	通し貫+楔
鴨居	短ほぞ+釘

表2 部材寸法および材質

部材名	断面(mm)	材質
桁	240×120	スギ
柱・土台	120×120	スギ
貫	15×105	スギ
鴨居	120×40	スギ
束	120×120	スギ
壁厚	60mm	



半間幅試験体

一間幅試験体

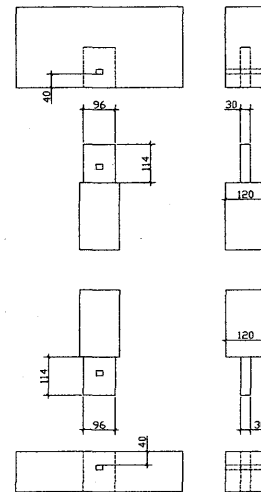
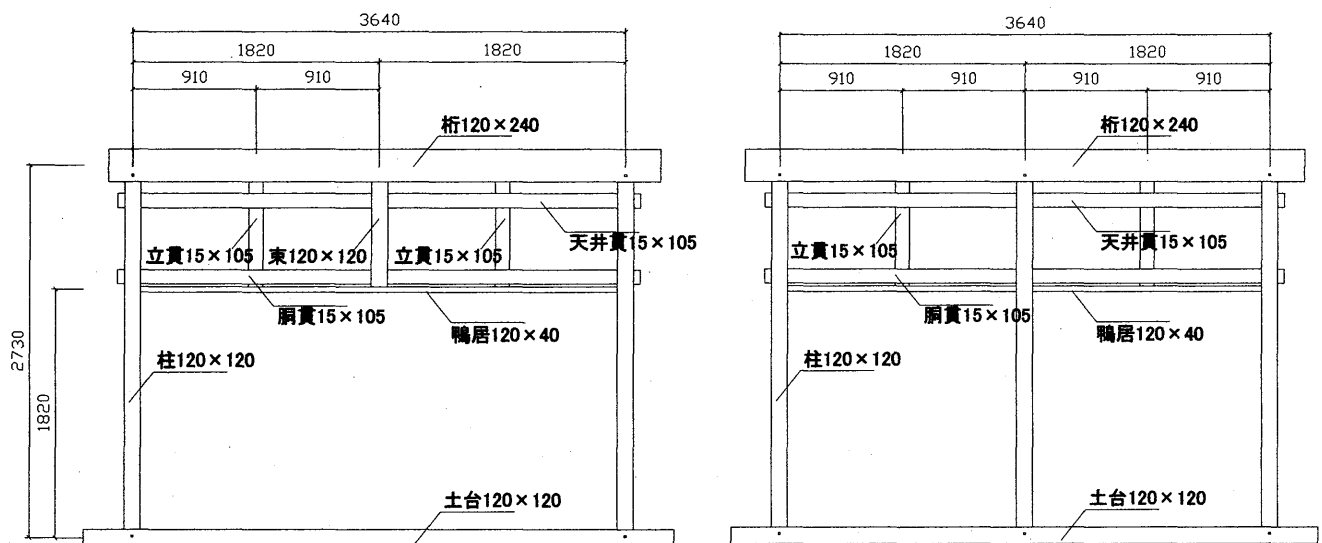


図2 柱頭・柱脚接合部



二間幅試験体

一間幅二連試験体

図1 試験体概要

注) 寸法は、すべてmmである

とされた²⁾。そのため、横架材には軸組の構面外へのねじれを防止するために、試験架台フレームに振れ止めを設置した。

測定位置を図4に示す。柱の傾斜と柱および鴨居の抜けを計測するために、ポテンシオメータ式変位計と歪みゲージ式変位計を設置し、柱頭柱脚部と貫および鴨居位置における柱の曲げ変形を計測するために歪みゲージを部材両面に貼りつけた。計測点数は、半間幅試験体-変位計8点、ひずみゲージ20点、一

間幅試験体-変位計10点、歪みゲージ20点、二間幅試験体-変位計20点、歪みゲージ29点、一間幅二連試験体-変位計20点、歪みゲージ24点を設置した。

加力計画を図5に示す。加力計画は、加力機のストロークが±250mmであるため、柱頭-柱脚間の変形量から算出した層間変形角において、1/600, 1/450, 1/300, 1/200, 1/100, 1/75, 1/50, 1/30, 1/15, 1/11.6(rad)に相当する柱頭の水平変位(mm)を制御し、各ステップごと3回繰り返し加力を行った。また、最大変位

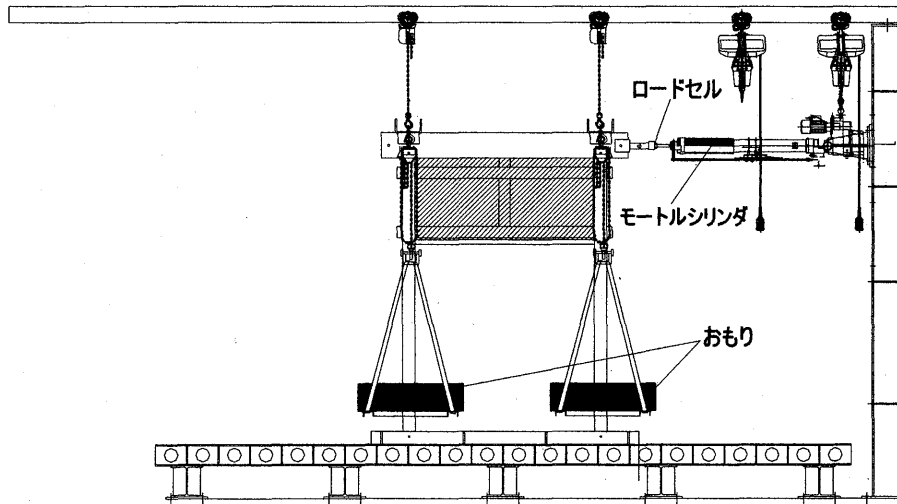
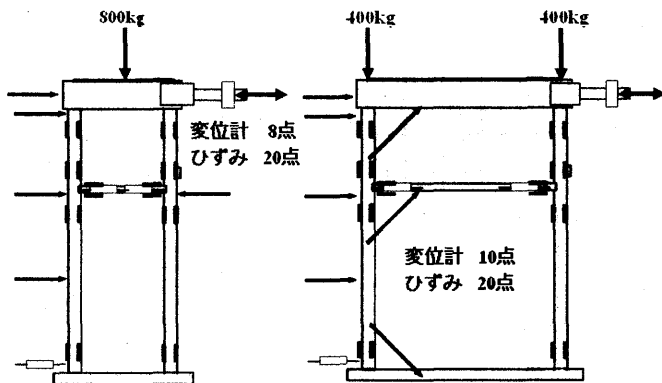
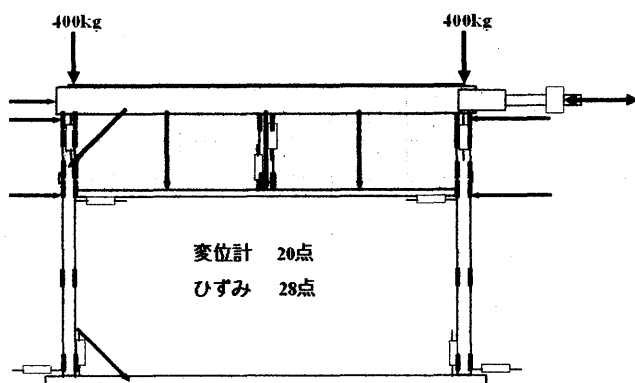


図3 設置概要



半間幅試験体

一間幅試験体



二間幅試験体

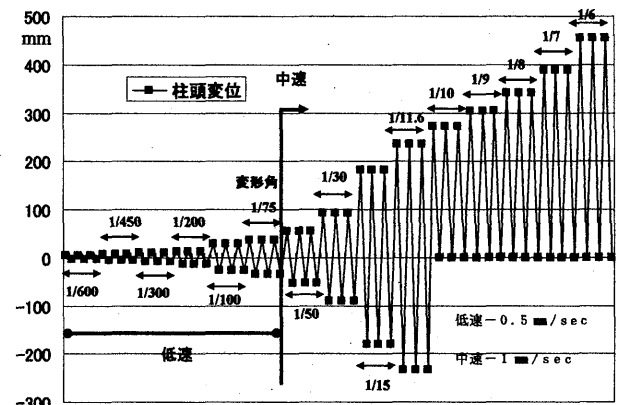
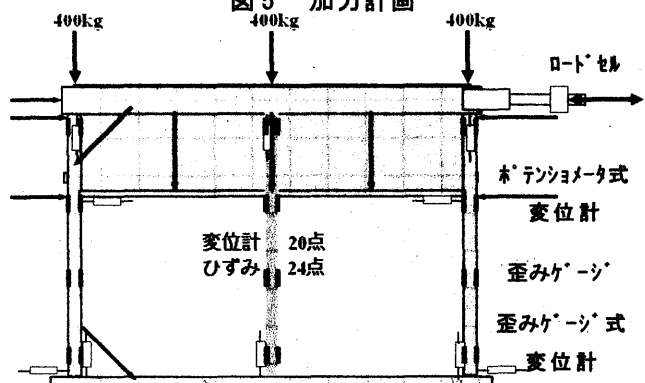


図5 加力計画



一間幅二連試験体

図4 測定位置

を与えてもなお軸組に顕著な耐力低下や柱の折損が確認できない場合は、加力ピンジグを交換し層間変形角で1/10, 1/9, 1/8, 1/7, 1/6(rad)に相当する片振りで各ステップ3回繰り返し加力を行った。

4. 実験結果³⁾

土塗り小壁の繰り返し加力に対する復元力特性を図6に示す。試験体は、製作後4ヶ月を経過しており十分乾燥していたため、柱-土壁間に1~2mm程度の際間が発生していた。そのため、加力の初期段階を除いて、1/200rad(柱頭変位13.7mm)程度以内では

50N/mm程度の剛性を持つ紡錘型の復元力特性を示しているが、それ以上では顕著な逆S字型の復元力特性となったと考えられる。また、いずれの試験体とも層間変形角約1/15rad程度で最大耐力に達し、半間幅および一間幅試験体では、最大耐力後も軸組の曲げ破壊は確認されず、土壁の圧壊により耐力低下したため実験を終了した。二間幅および一間幅二連試験体では、最大耐力に達した直後に左柱に割裂および表面割裂破壊が確認され、最大耐力の8割を下回ったため実験を終了した。

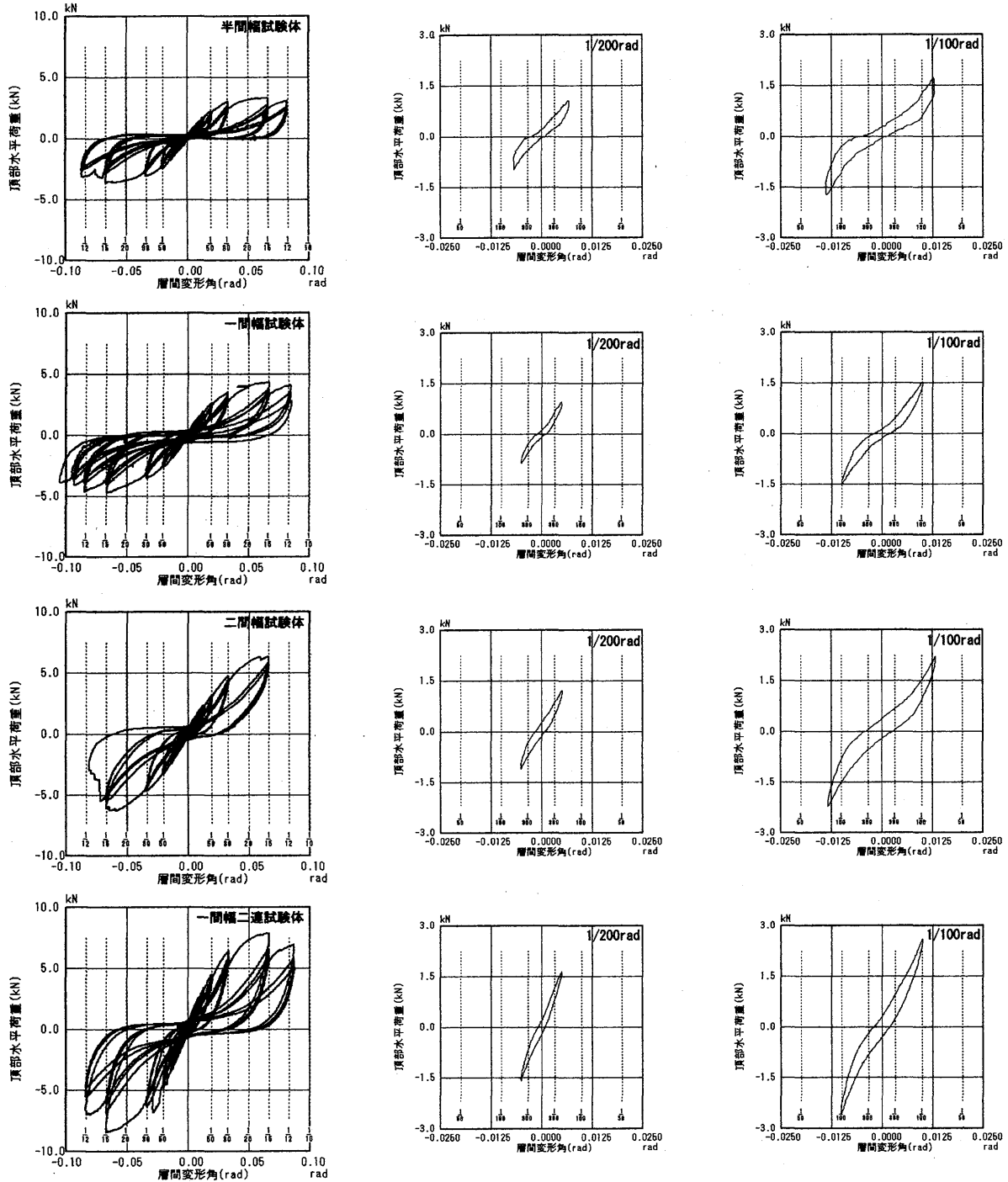


図6 復元力特性

5. 損傷状況

土塗り小壁の損傷状況を写真1に示す。各試験体とも層間変形角 $1/100\text{rad}$ 程度より小壁隅角部に微少な損傷が起り始め、 $1/30\text{rad}$ 程度より漆喰の剥離が確認された。半間幅と一間幅および一間幅二連試験体では、実験終了後、写真に見られるような圧壊が小壁隅角部に確認されたが、二間幅試験体では微少ひび割れのみ確認された。この損傷の違いは、柱間距離が長くなり剛性の増した壁の柱間中央に中間柱でなく拘束力の小さい束を使用していることにより微少ひび割れしか確認できなかったのだと考えられる。また、半間幅および一間幅試験体では、終局時において柱の曲げ破壊は確認されず土壁の圧壊により耐力低下に至った。二間幅試験体では $1/14\text{rad}$ へ向かう加

力時に左柱-鴨居側面に割裂破壊が確認され、一間幅二連試験体では $1/16\text{rad}$ へ向かう加力時に左柱-鴨居側面に節の亀裂から木目に沿った表面割裂破壊が確認された。これらの破壊状況を写真2に示す。

実験終了後、各試験体の柱-土台・横架材接合部を解体し柱ほぞ端の損傷状況を確認した。各試験体で写真3に見られるような柱ほぞ端の破壊あるいはひび割れが確認された。このような破壊は、柱頭接合部よりも柱脚接合部で多くの損傷が確認されたが顕著な差は見られなかった。この原因として考えられることは、小壁を持つ木造軸組では小壁を含む柱頭接合部は層間変形角に対して接合部の変形が小さく、逆に柱脚接合部の変形角は層間変形角より大きい可能性が指摘される。

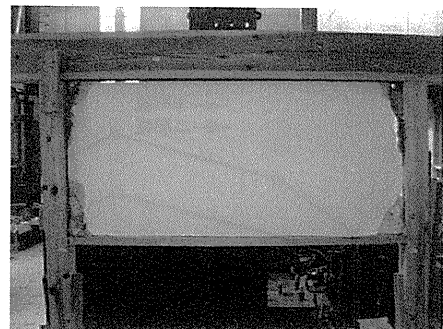
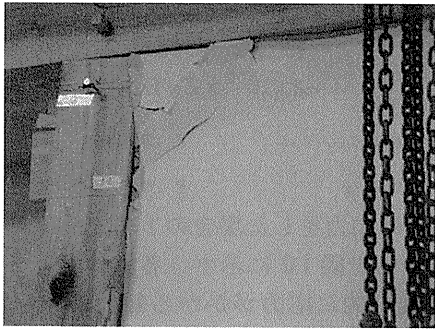
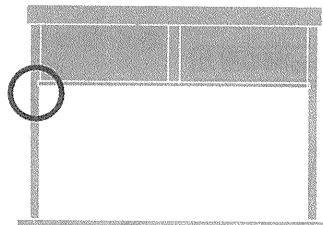
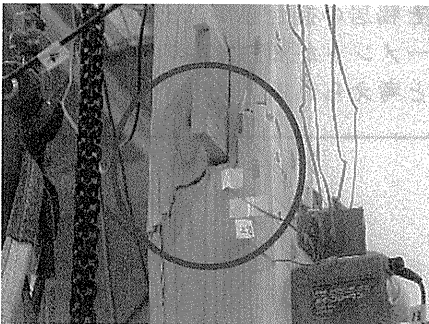
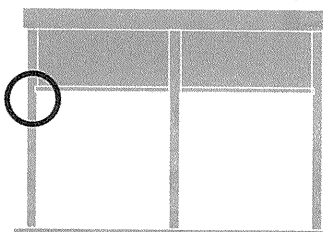
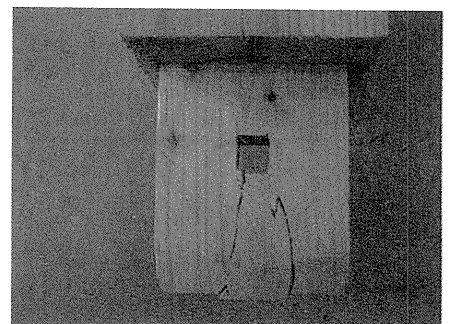


写真1 小壁の損傷状況



割裂破壊



表面割裂破壊

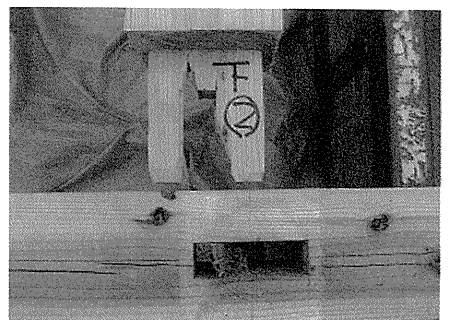


写真3 ほぞの損傷状況

写真2 破壊状況

6. 考察

6.1 耐力特性

土塗り小壁の繰り返し加力に対する復元力特性より求めた耐力特性のグラフを図7に示し、耐力特性について総括したものを表3に示す。

耐力特性について半間幅と一間幅および二間幅試験体の3試験体を比較すると、変形性能には顕著な差は確認されないが、柱間距離を長くとることにより増加の傾向にあることが確認できる。これは、柱間距離を長くとることにより小壁の剛性が増したためだと考えられる。また、二間幅の2試験体を比較すると、一間幅二連試験体の方が大きな値を示していることが確認できる。これは、二間幅試験体では柱間中央に束を使用したのに対して、一間幅二連試験体では、中間柱を使用したことにより剛性が増したためだと考えられる。また、図8より、壁倍率を評価する際必要となる P_u 値(短期許容せん断耐力)は、

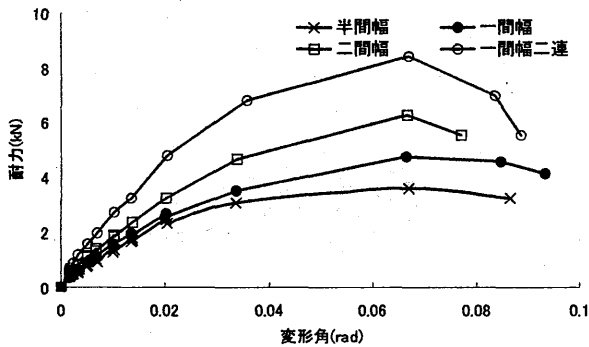


図7 耐力特性

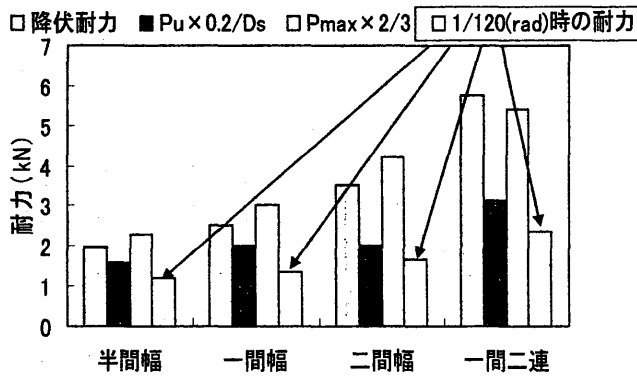


図8 P_u 値

各試験体において特定変形角時(1/120)の耐力で決まっていることが確認できる。さらに、この値より求めた壁倍率(図9)では、柱間距離を長くとることにより約1/2になっていることが確認できる。これは、壁倍率を求める際に微小変化しか見られない P_u 値と壁の基準耐力の積を柱間距離で除しているためだと考えられる。なお、この評価法は全面壁の場合であるが、今回のような小壁であっても壁量で検討を行った結果妥当な値であったと考えられる。

6.2 曲げモーメント

実験において、軸組の柱頭柱脚部と貫および鴨居位置における柱の曲げ変形を計測するために歪みゲージを設置した。歪みゲージは、各点部材両側面に貼ってあるため、式(1)の評価法より中立軸の値を算出した後、式(2)の評価法により曲げモーメントを算出した。

$$\varepsilon = (\text{左側}\varepsilon - \text{右側}\varepsilon) / 2 \dots \dots \dots (1)$$

$$M = \varepsilon \times 10^{-6} \times Z \times E \dots \dots \dots (2)$$

M: 曲げモーメント

Z: 断面係数

ε : 歪み

E: ヤング係数

左方向に加力をした場合の1/15 rad 時の曲げモーメント分布を図10に示す。各試験体とも、加力方向の柱に集中的に応力がかかる傾向がみられた。このことは、加力方向の柱では鴨居が柱を押しするため、鴨居上下で柱の曲げモーメントが最大となり、もう一方の柱では、柱と鴨居の接合部がほぞから外れてしまうため曲げモーメントが加力方向の柱に比べて小さくなったのだと考えられる。

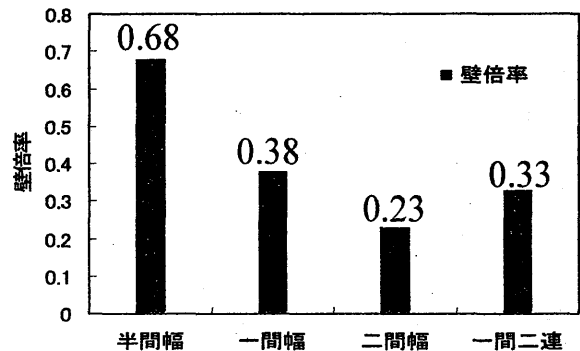


図9 壁倍率

表3 耐力特性

試験体	最大耐力	最大耐力時の変形角	終局耐力	降伏耐力	降伏変形角	初期剛性	構造特性係数	$P_u \times (0.2/D_s)$	1/120(rad)時の耐力	壁倍率
	P_{max} (kN)	D_{max} (rad)	P_u (kN)	P_y (kN)	D_y (rad)	K (kN/rad)	$D_s = 1/\sqrt{2\mu-1}$	(kN)	(kN)	
半間幅試験体	3.61	0.0603	3.11	1.97	0.0181	126.75	0.406	1.58	1.20	0.67
一間幅試験体	4.71	0.0659	4.11	2.52	0.0184	137.16	0.396	2.07	1.37	0.38
二間幅試験体	6.32	0.0589	5.62	3.32	0.0204	163.02	0.555	2.02	1.64	0.23
一間幅二連試験体	8.40	0.0661	7.58	6.81	0.0283	240.16	0.518	2.92	2.32	0.33

また、二間幅試験体の割裂破壊前の曲げモーメント分布では、左柱鴨居上下に非常に大きな力が発生し、左柱鴨居部の破壊後、応力が約1/3.5減という結果となった。しかし、破壊形式が折損ではなく割裂破壊であったため、抵抗力の低下はあったものの倒壊には至らなかった。一間幅二連試験体では、中間柱と土壁部の曲げモーメント分布において中間柱と土壁間で圧壊がおり、歪みゲージが押しつぶされたため1/50rad程度より異常な値が計測された。正常であれば、左柱鴨居部と同等若しくはそれ以上の応力を有していたことを確認した。このことより、一間幅二連試験体の表面割裂破壊前の曲げモーメント分布では各柱に力が分散していたと考えられる。左柱鴨居部の破壊後、応力が約1/7減という結果となったが、破壊時における右柱の応力に大きな変化が見られないことから、中間柱の抵抗力が支配的であ

あったと考えられる。これらのことより、二間幅試験体のような柱2本の試験体では左右どちらかの柱破壊後はもう一方の柱が外力を負担し、一間幅二連試験体のような柱3本の試験体では左右どちらかの柱破壊後は中間柱により倒壊には至らしめず抵抗していたと考えられる。さらに、一間幅二連試験体は表面割裂破壊にも関わらず抵抗力が激減した。このことより、節や木目等による破壊は、軸組に対して致命的な損害を与えると考えられる。

6.3 等価剛性および等価減衰比

図11, 12に各変形角における履歴ループから評価された等価剛性と等価減衰比のグラフを示す。

等価剛性は、図13にしたがって最大変位量と最大荷重の正負を結ぶ斜線の傾きより求め、等価減衰比も同様に履歴ループによって囲む面積 ΔW を求め、図中の三角形ABCの面積を W として $\Delta W / \pi W$ により求めた⁴⁾。

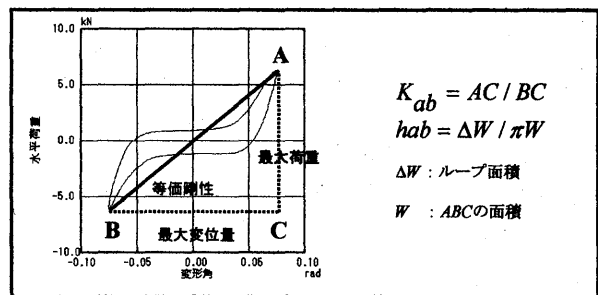
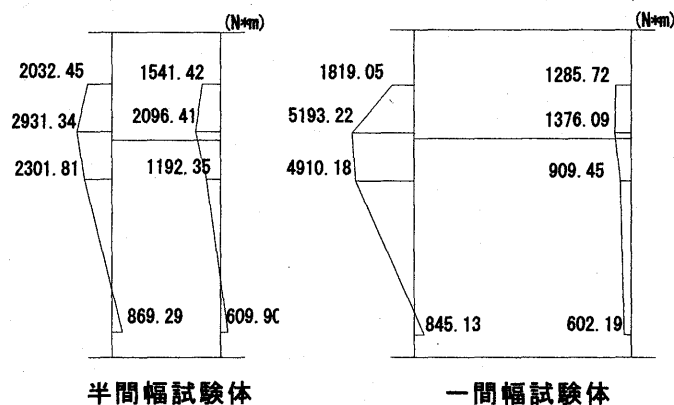


図13 等価剛性および等価減衰比の評価法

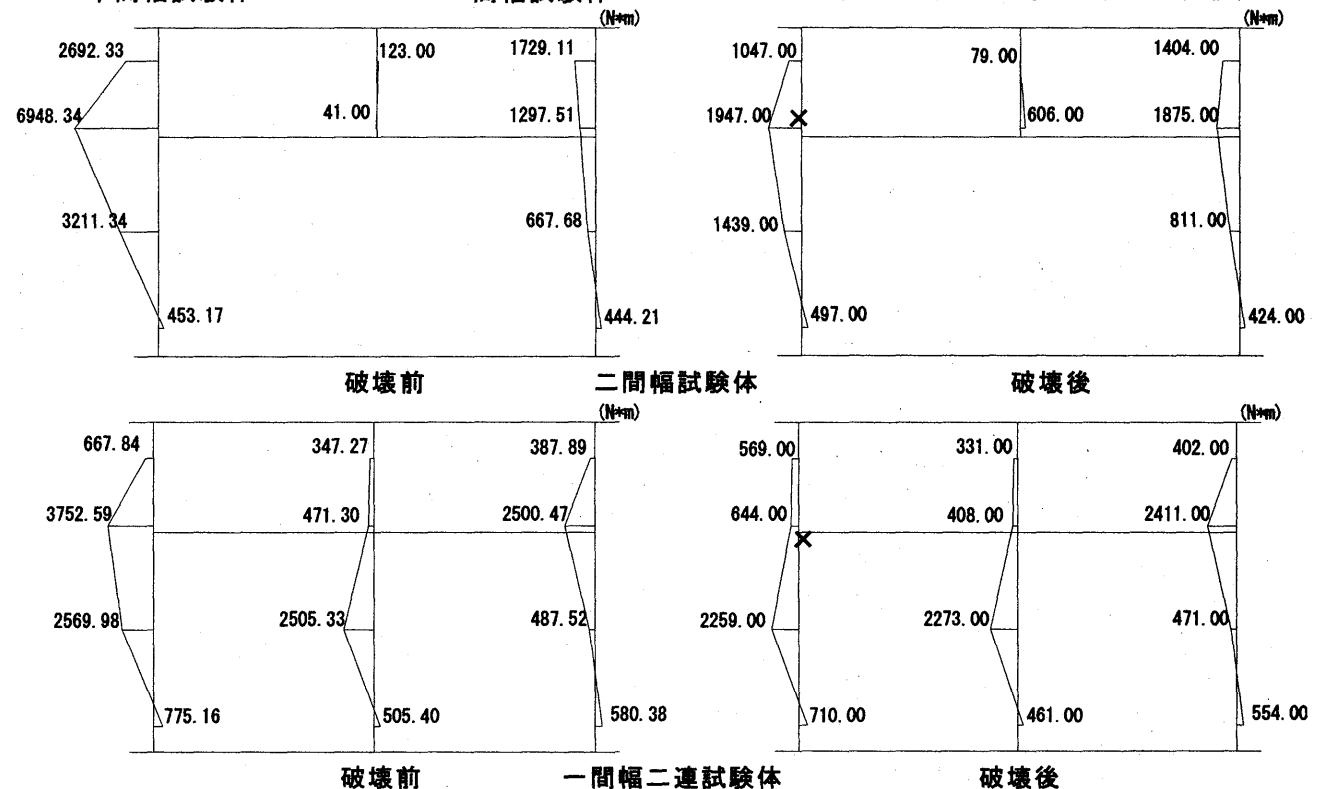


図10 モーメント分布

図12で確認される半間幅試験体の異常な値は、実験中の不備が考えられる。その他では、妥当な特性を示していると考えられる。また、図11では柱間距離が長くなることにより増加する結果となったが、柱間距離が一間幅試験体の2倍である一間幅二連試験体では2倍の剛性を有してはいなかった。これは、中間柱を使用した一間幅二連試験体では柱が3本であるため、単純に2倍の剛性を有さなかったのだと考えられる。仮に、壁量と柱本数が2倍の試験体であれば一間幅試験体の2倍の剛性を有したと推測される。二間幅試験体では一間幅二連試験体より剛性が低いという結果となったが、これは、二間幅試験体で使用している束は、土壁に対して中間柱のような拘束力がないためだと考えられる。

7. まとめ

本研究では、土塗り小壁の柱間距離をパラメータに実験を行い、小壁を構成する軸組の損傷状況と復元力特性について検討した。

土塗り小壁試験体は、柱間距離が長くなることにより耐力は上昇することが分かった。これは、柱間距離を長くとることにより、土壁のせん断耐力が増したため耐力および剛性が上昇したものだと考えられる。しかし、柱の負担する応力が左右均等でないため、 $1/15\text{rad}$ 程度より柱の曲げ破壊の可能性が高くなると考えられる。今後の課題として、応力が左右均等となるような補強方法を考えることが必要である。また、本研究において壁倍率を評価する際の P_u 値

は各試験体とも特定変形角($1/120\text{rad}$)時の耐力より決定し妥当な結果を得られたが、この値は柱-土壁間隙間が埋まり小壁として機能し始めた値だと考えられるため、より正確な値を求めるのであればこの値において P_u を決定するのは適切ではないと考えられる。さらに、木材特有の破壊形式である節や木目に沿う破壊は、軸組に致命的な損害を与えることが確認されたが、小壁はこのような致命的な破壊後も支持能力があると考えられるため、今後検討を行っていく必要があると考えられる。

謝辞

本研究は、日本建築学会近畿支部木造部会による土塗り小壁を持つ木造軸組の耐震性能評価に関する実験的研究として実施されたものであり、関係各位に感謝いたします。また、本研究の一部は、福山大学工学部建築学科鎌田研究室の卒業研究として、角山佳弘、村田悟、森江憲二、渡辺宏、各氏に組み込まれました。さらに、実験の実施に際しては、京都大学、金沢工業大学、豊橋技術科学大学の皆様より非常に多くの協力が得られました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 三谷隆之・鎌田輝男：土塗り小壁を持つ木造軸組の耐震性能評価に関する実験的研究-柱間距離をパラメータとした静的実験-，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 369-370, 2005. 9
- (2) 三谷隆之：木造軸組の復元力特性のモデル化に関する研究，福山大学卒業論文，2004. 3
- (3) 鎌田輝男・三谷隆之：土塗り小壁を持つ木造軸組の耐力特性について 壁長さをパラメータとする場合，日本地震工学会・大会-2004 梗概集，pp. 130-131, 2005. 1
- (4) 若林實：耐震建築の設計，彰国社，pp. 82-83, 1988. 5

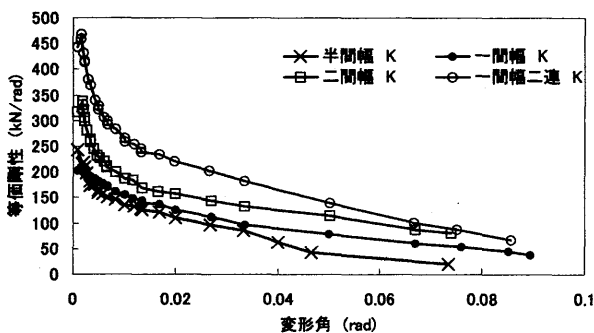


図11 等価剛性

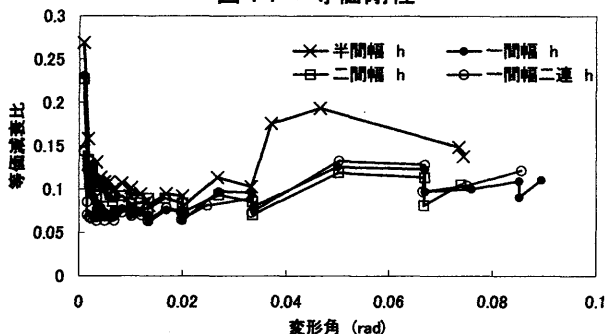


図12 等価減衰比