

龍谷大学南龔及び北龔の土壁＋木摺漆喰壁及び筋違座屈拘束補強の性能試験

- 種別：材料試験 [木材・煉瓦・鉄・コンクリート・その他]、重量測定、
要素試験 [接合部・軸組・壁・水平構面 (床・天井・小屋組・屋根)・非構造部材・その他]、
補強性能試験 [接合部・軸組・壁・水平構面 (床・天井・小屋組・屋根)・非構造部材・その他]

●基本情報

文化財名称：龍谷大学南龔及び北龔

文化財種別 (指定年月日)：重要文化財 (平成 10 年 5 月 1 日)

所在地：京都府京都市下京区猪熊通七条上る大工町 125 番地の 1

所有者 (管理団体)：学校法人龍谷大学 (学校法人龍谷大学)

構造形式：(南龔) 木造、建築面積 694.8 m²、二階建、棧瓦葺 (内装を除く)

(北龔) 木造、建築面積 683.6 m²、二階建、棧瓦葺 (内装を除く)

建築年：明治 12 年

事業名称：重要文化財 (建造物) 龍谷大学南龔及び北龔耐震対策工事事業

事業期間：令和 4 年 6 月～令和 7 年 3 月

工事種別：耐震対策工事

事業者：学校法人龍谷大学

設計監理：株式会社日建設計

実験計画者：株式会社日建設計

実験機関：大阪工業大学 工学部 建築学科 瀧野研究室

実験年月日：令和 5 年 3 月 8 日～29 日

引用・参考文献：「伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル」(木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会 2004 年)

「座屈拘束された筋かいをもつ壁構面の耐震性能」(2015 年 10 月_日本建築学会技術報告集第 21 巻第 49 号 信州大学五十田教授ら)

「伝統的構法のための木造耐震設計法」(伝統的構法木造建築物設計マニュアル編集委員会 2019 年)

●実験に至る経緯と目的

龍谷大学南龔及び北龔の外壁は、外部側を土壁漆喰仕上げ、内側を木摺漆喰としている。また、平成3年～8年にかけて基礎の鉄筋コンクリート造布基礎化や筋違補強などの耐震改修を行っている。耐震診断を行うにあたり、高い階高を有する土壁・木摺漆喰壁の耐力および筋違を $R=1/15$ の大変形まで座屈しないようにするための座屈拘束補強の効果を確認する必要がある。既存の実験データの少ない壁形状および補強方法について、耐力・補強効果を確認することを目的に実験を行った。

●姿図・寸法

【使用材料】

柱・梁・土台：ヒノキ

筋違・木格子・木摺：スギ

土：深草産土

生漆喰：消石灰、麻苧(17mm)、粉糊（角又）、1mm 珪砂

砂漆喰：消石灰、麻苧(17mm)、粉糊（角又）、4.5mm 砂

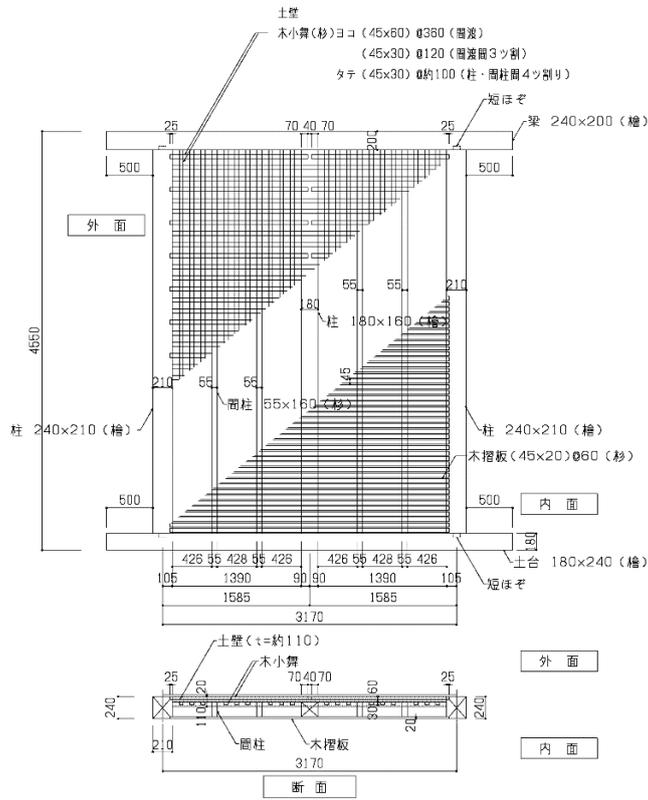
荒壁パネル

【試験体寸法】

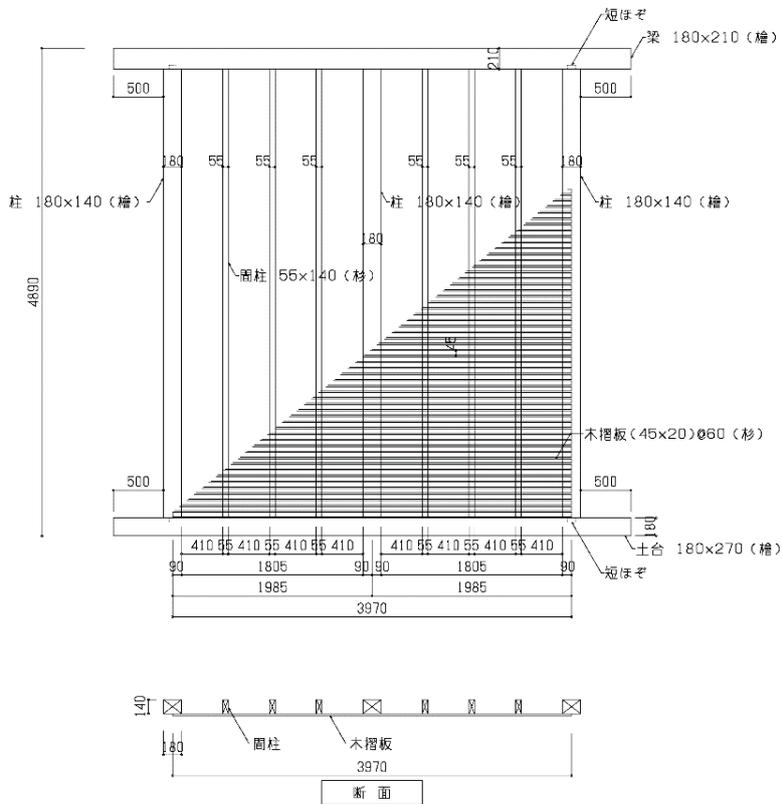
試験体名称		仕様	寸法（高さ×幅）mm
試験体 1	A-1	木摺り漆喰+土壁※ （木小舞／t=約 110mm/裏返し有）	4360×3170
試験体 2	A-2	木摺り漆喰	4695×3970
試験体 3	B	木摺り漆喰+土壁※ （竹小舞／t=約 40mm/裏返し無）	3730×1970
試験体 4	C-1a	筋違+木格子	3980×6055
試験体 5	C-1b	筋違+木格子+荒壁パネル	3980×6055
試験体 6	C-2	筋違+木格子+荒壁パネル+金物補強	3980×6055

※土壁は柱面外側に 20mm ふかして製作しているが、構造上有効な土壁厚さは柱断面内の範囲とし、上記土壁厚さにふかし部分は含んでいない。

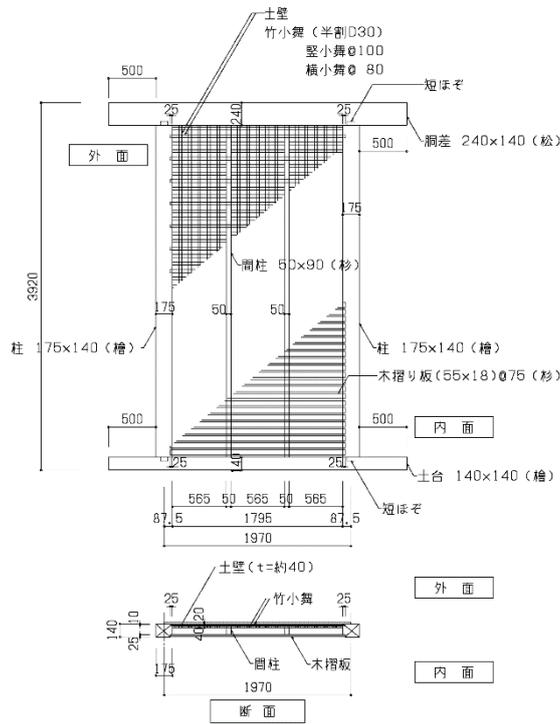
以下に試験体姿図を示す。



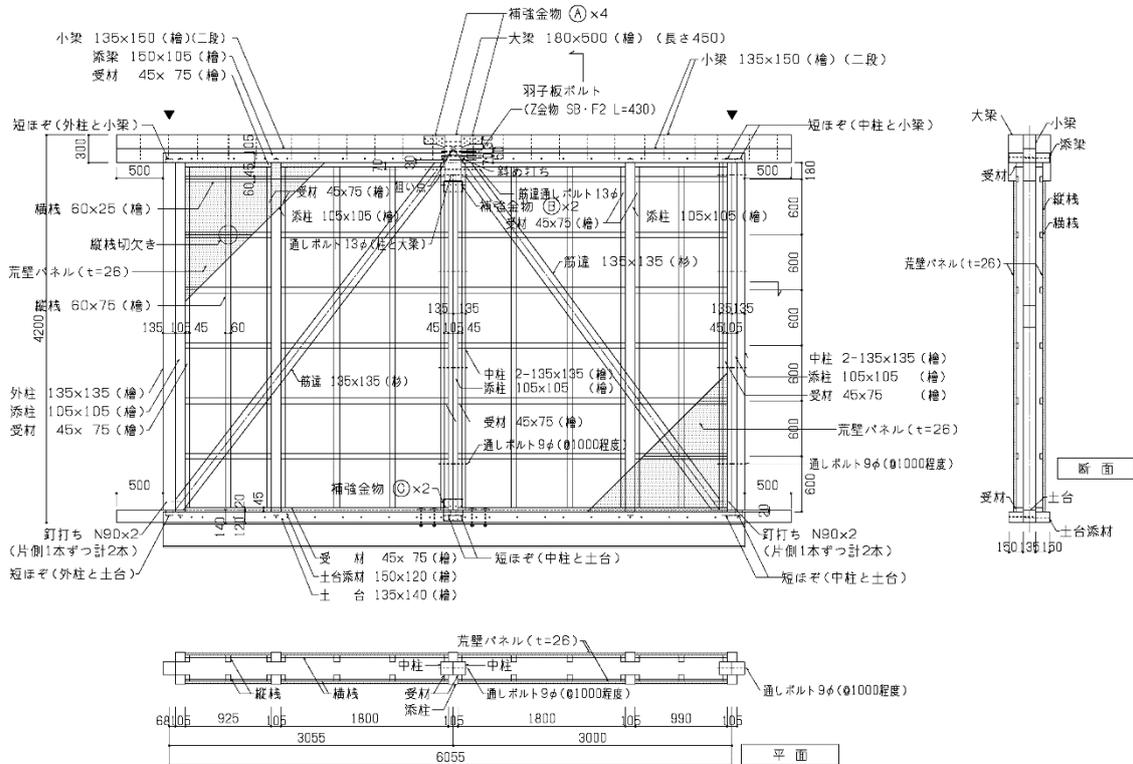
試験体 1 (A-1)



試験体 2 (A-2)



試験体 3 (B)



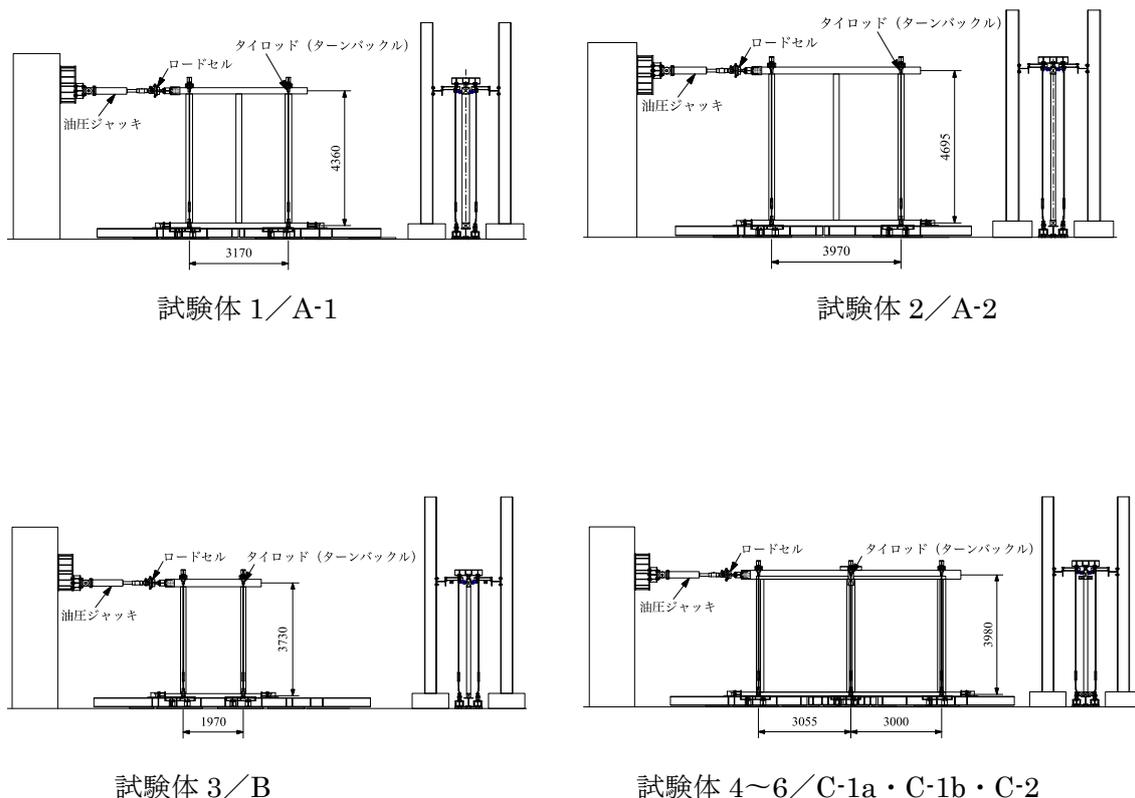
試験体 6 (C-2)

●概要

既存の土壁および木摺漆喰壁の耐力性能及び筋違の座屈拘束補強効果を確認するためそれぞれ試験体を作成し、水平加力試験を行った。試験体は、土壁+木摺漆喰壁試験について寸法を変えた2体、木摺漆喰壁を1体、筋違試験体を3体作成した。

●実験方法

加力方法を下図に示す。鉄骨フレームに試験体を設置し、タイロッド式により試験体上部の梁に連結した油圧ジャッキにより水平力を加えた。加力は見かけのせん断変形角による変位制御とし、変形角が1/600、1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50radとなるような正負交番繰り返し加力とした。同一変形角での繰り返し回数は2回とし、最後に加力限界まで片側加力を行った。なお、紙面の右側に変形する方向（油圧ジャッキ：押し側）を正側加力とした。また、試験体6（C-2）では、中柱の柱頭部・柱脚部に設ける補強金物の性能を確認するため、中央のタイロッドを取り外して加力を行った。



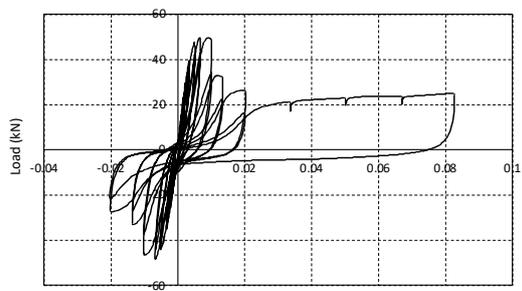
加力方法

●特性値

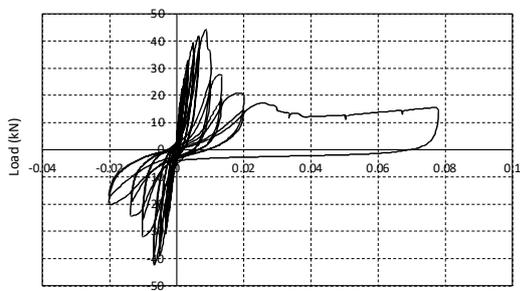
変形角	A-1	A-2	B	C-1a	C-1b	C-2
	荷重 (kN)					
1/600	22.7	19.3	8.6	9.1	32.5	34.7
1/450	29.3	23.2	10.5	13.2	40.3	42
1/300	39	30.2	13.7	21.6	54.2	55.1
1/200	46.8	34.7	16.9	36	72.2	71.9
1/150	50	39.3	18.5	48.3	87.1	78.9
1/100	48.7	34.1	19.1	63	112.7	105.9
1/75	32.3	24.6	15.7	75.1	136.7	126
1/50	26.2	17.5	14.5	78.1	169.9	156.3
1/30	21.2	11	10.6	61.4	208.4	198.7
1/20	22.9	10.3	1.3	28.4	233.9	227
1/15	23.8	11.8	9.3	24.3	-	92.2
1/10	25.1	12.4	8.7	-	-	-

●荷重変形

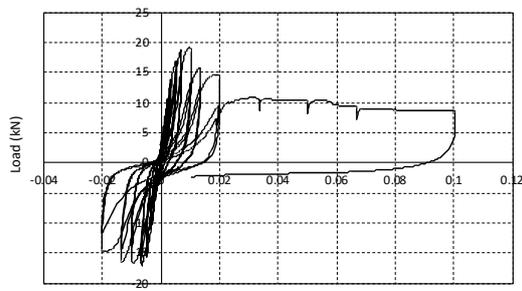
実験で得られた荷重変形関係のグラフを以下に示す。



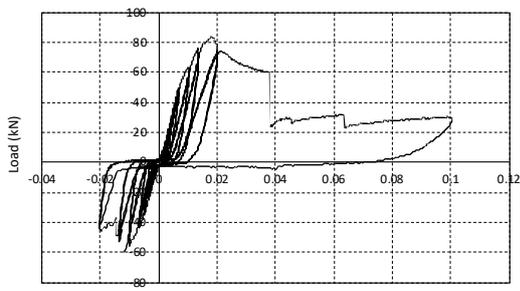
試験体 1 (A-1)



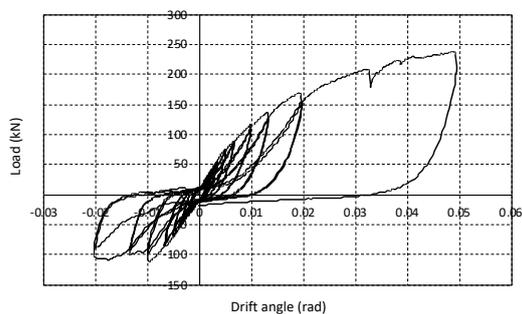
試験体 2 (A-2)



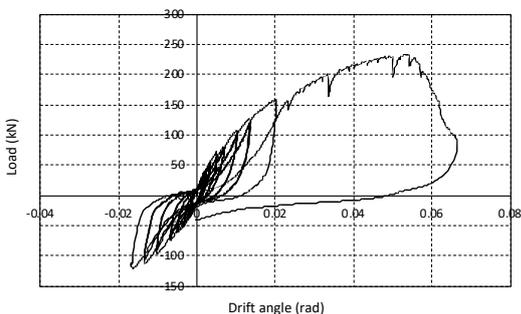
試験体 3 (B)



試験体 4 (C-1a)



試験体 5 (C-1b)



試験体 6 (C-2)

●破壊形状

・試験体 1 (A-1)

試験体の破壊の様子を写真 1 に示す。1/100rad 時から漆喰壁表面に亀裂が生じ始め、1/75rad 時には一部表面が浮き上がる様子を確認することができ、1/50rad の加力までに漆喰壁の表面部分が大きく崩れ落ちた。また、1/30rad 時には、次の層の漆喰壁も崩れ始め、一部では木摺りを表面にて確認することができた。また、反対側の土壁にも 1/100rad 時から水平方向の亀裂が生じ始めた。漆喰壁表面の崩落に伴い荷重も低下したが、1/50rad を超えたあたりから荷重低下は止まり、変形の進行に関わらずほぼ一定の荷重を保持した。これは、タイロッドにより柱の浮き上がり変形を抑え込んでいるため、柱の傾斜復元力特性のような効果が生じたことが原因であると考えられる。他の試験体でも同様の傾向が見受けられた。



写真 1 破壊の様子 (試験体 1/A-1) / 左：終局時 / 中央：1/75rad 時 / 右：1/30rad 時

・試験体 2 (A-2)

試験体の破壊の様子を写真 2 に示す。1/100rad の正側加力の際に漆喰壁表面に亀裂が生じるとともに一部表面が隆起している様子を確認し、その後の負側加力の際に隆起した漆喰壁表面の一部が崩れ落ちた。その後も加力の進展に伴い、漆喰が崩れ落ちるとともに、下

の層の漆喰壁に木摺りに沿った亀裂が徐々に発生していった。荷重も、亀裂が生じた1/100rad付近でピークを迎え、1/50radにむけて大きく荷重低下が生じている。1/50rad以降は荷重低下が止まり、1/30radを超えるあたりから若干の荷重上昇が見受けられた。



写真2 破壊の様子（試験体2/A-2）左：1/100rad時負側／中：1/50rad時／右終局時

・試験体3(B)

試験体の破壊の様子を写真3に示す。1/100radの正側加力の際に漆喰壁表面に亀裂が生じ、その後の負側加力の際に漆喰壁表面が大きく崩れ落ちた。その後も加力の進展に伴い、漆喰が崩れ落ちるとともに、下の層の漆喰壁に木摺りに沿った亀裂が徐々に発生していった。また、試験体の裏側は土壁が塗られているが、1/100rad時から土壁表層部（柱表面より外側に出ている部分）が剥離するような亀裂が少しずつ確認でき、加力の進行に伴い剥離する様子が顕著になっていった。また、1/15rad時には剥離とともに表面に大きな亀裂も生じ始めた。1/10radまでの加力を終えた際に、土壁の表面を一部剥がして内部の様子を確認したところ、部分的に亀裂が生じているものの、大きく崩れた様子などは見受けられなかった。荷重は1/100rad付近をピークに徐々に荷重低下が生じており、試験体1、試験体2とほぼ同様の復元力特性を示した。

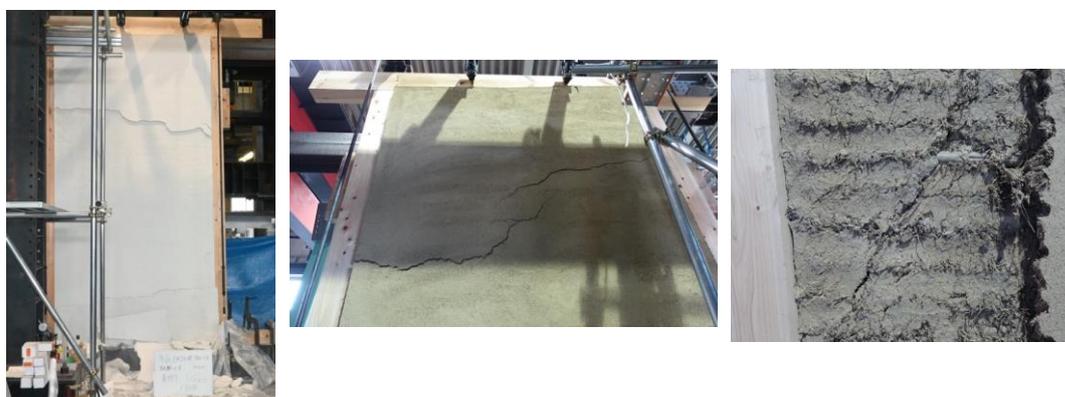


写真3 破壊の様子（試験体3/B）／左：1/100rad負／中：終局時／右：終局時土壁内部

・試験体 4 (C-1a)

試験体の破壊の様子を写真 4 に示す。筋かい端部は斜め打ちの釘が 2 本つけられているだけの仕様であるため、引張側の筋かいはほとんど機能せず、ほとんどが圧縮筋かいによる抵抗であった。1/100rad 時には圧縮筋かい側の柱脚が土台に対して大きくずれ始めていることを確認し、1/50rad 時には 60mm 程度もずれていることを目視により確認した。また、1/50rad 時には圧縮筋かいに座屈変形が生じ始めていることを目視により確認でき、最後の片側加力の途中 (1/25rad 付近) で座屈による曲げ破壊が発生し、大きく荷重低下が生じた。



写真 4 破壊の様子 (試験体 4/C-1a) /左：終局時/右：1/50rad 時柱脚

・試験体 5 (C-1b)

試験体の様子を写真 5 に示す。なお、本試験体では正側加力の際に圧縮筋かいとなる側に筋かいが面内に座屈しないためのボルトと合板を用いた座屈補剛を施している。1/75rad 時から荒壁パネルの端部に亀裂が発生していることを目視により確認し、加力の進行に伴いほとんどの荒壁パネル端部に亀裂が発生したが、荒壁パネルが大きく損傷することはない。なお、負側加力では試験体上部の梁の中央部の継手が破壊したことにより 1/100rad を超えたあたりから荷重が 100kN 付より大きな加力ができなかった。また、座屈による荷重低下は見られなかったが、正側加力で 1/50rad を超えたあたりから試験体全体の荷重上昇による面外変形が抑えきることができなかったため、1/20rad の手前で実験終了とした。試験体 4 と同様に、柱脚が土台に対してずれる様子が確認でき、特に 1/50rad を超えたあたりから変形がさらに進行している様子が確認できた。



写真 5 試験体 (試験体 5/C-1b) /左：面内座屈補剛状況/右：上部梁継手部の破壊

・試験体 6 (C-2)

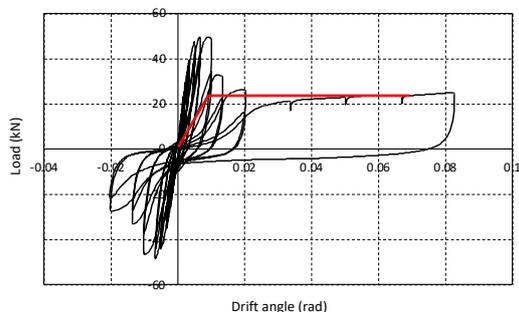
試験体の破壊の様子を写真 6 に示す。なお、本試験体では正側加力の際に圧縮筋かいとなる側に面内への座屈補剛を目的としたボルトと合板による補強を施している。1/150rad 時から上部の梁継手の鉛直方向のずれ変形を目視により確認でき、1/100rad 時から、土台中央部が浮き上がる様子も目視により確認できた。その後も変形の進行に伴い、中央部の柱脚が土台から離間するとともに、土台自体の浮き上がりも確認でき、上部の梁継手の鉛直方向のずれ変形も進行した。1/15rad 時には、中央部の柱脚が完全に浮き上がり、ほぞが全て目視で確認できた。さらに、終局時には中央部の柱脚金物が破壊する様子も確認することができた。荒壁パネルは、1/50rad 時から端部に亀裂が生じ始め、変形の進行に伴い徐々に端部の亀裂が発生した箇所が増えるとともに、荒壁パネル自体のせん断亀裂も生じ始めた。また、1/15rad 時には荒壁パネルが大きく波打ち、崩落寸前のパネルも生じ始めた。

荷重は、初期から緩やかな非線形性を示し、1/20rad を超えたあたりで最大荷重を迎え、その後は急激に荷重低下が生じ、1/15rad で加力終了とした。荷重低下は荒壁パネルの破壊や柱脚金物の破損に起因しているものであり、筋かいの座屈は生じていない。



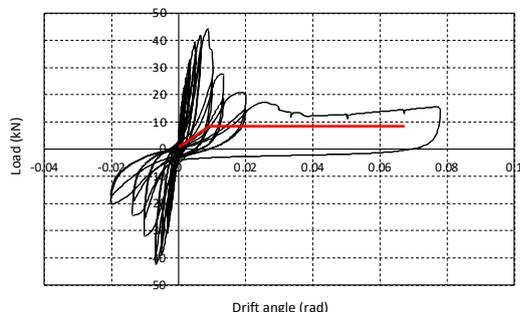
写真 6 破壊の様子 (試験体 6/C-2) / 左: 終局時 / 右: 1/15rad 時中央柱脚浮上り

●モデル化



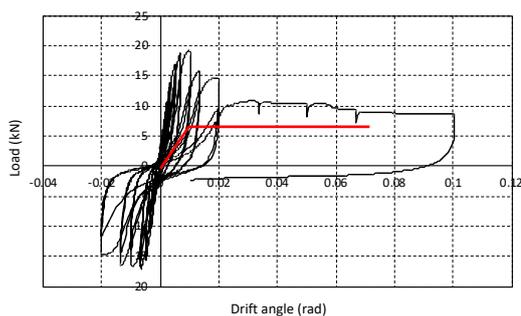
試験体 1 (A-1)

土壁 (t=110, 裏返し有) + 木摺漆喰壁 (H=4550)



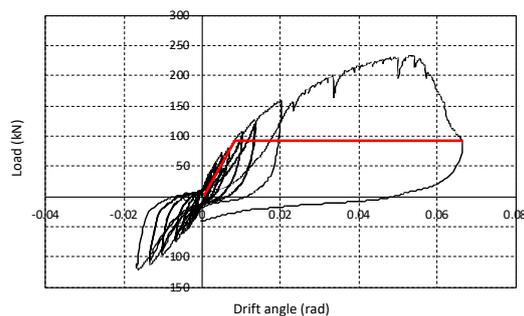
試験体 2 (A-2)

木摺漆喰壁 (H=4890)



試験体 3 (B)

土壁 (t=40, 裏返し無)+木摺漆喰壁 (H=3920)



試験体 6 (C-2)

荒壁パネル+筋違 (補強)

●考察

試験体 1・2・3 の結果より、木摺漆喰壁の耐力は $R=1/100$ 以下程度の変形が小さい領域では木摺漆喰壁の耐力は大きいですが、 $R=1/100$ を超えひび割れが生じると大きく耐力低下し、表層の漆喰が剥落した。

試験体 1 (A-1) の結果より、高さ約 4.4m×長さ約 3.2m (2 スパン) の土壁 (裏返し有) について、層間変形角 $R=1/15$ に対して 40kN/m² 程度の耐力を有することを確認した。

試験体 2 (A-2) の結果より、高さ約 4.7m×長さ約 4m (2 スパン) の木摺漆喰壁について層間変形角 $R=1/15$ に対して 2.5kN/m 程度の耐力を有することを確認した。

試験体 3 (B) の結果より、高さ約 3.7m×長さ約 2m (1 スパン) の土壁 (裏返し無) について、層間変形角 $R=1/15$ に対して 44kN/m² 程度の耐力を有することを確認した。

試験体 1 および試験体 3 の結果は、「伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル」に示される土壁耐力 (82kN/m²) より小さい値となっている。この原因として、試験体 1 については土壁の辺長比による影響、試験体 3 については裏返しが無いことによる影響と推定される。

本実験で採用した筋違の座屈拘束補強は、 $R=1/15$ まで筋違の構面外座屈を生じさせない効果があることが確認できた。柱脚の補強金物が終局時に土台から抜け出す破壊性状を示したが、上部梁の接合部の補強金物は損傷せずに架構として一定の耐力を保持 ($R=1/15$ で 90kN 程度) できることを確認した。