

旧ハンター住宅における木骨煉瓦壁の性能試験

●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：旧ハンター住宅

文化財種別（指定年月日）：重要文化財（昭和 41 年 6 月 11 日）

所在地：兵庫県神戸市灘区青谷町 1-1-4 王子動物園内

所有者（管理団体）：神戸市

構造形式：木造（木骨煉瓦造）、建築面積 269.8m²、二階建、一部三階、スレート葺

建築年：明治 40 年（昭和 39 年移築）

事業名称：重要文化財旧ハンター住宅耐震診断事業

事業期間：令和 4 年 9 月～令和 7 年 8 月

工事種別：耐震診断

事業者：神戸市

設計監理：-

実験計画者：一般財団法人 建築研究協会

実験機関：大阪工業大学

実験年月日：実大実験(1)：令和 5 年 4 月～5 月、実大実験(2)：令和 6 年 10 月～11 月

引用・参考文献：日本建築学会『木質構造設計規準・同解説』、平成 18 年 12 月

●実験に至る経緯と目的

旧ハンター住宅は、外壁の多くが木骨煉瓦壁により構成される。木骨煉瓦架構に筋かいが組み合わされた構面も存在し、耐震診断を行うためにはこの木骨煉瓦架構の構造特性を把握する必要があるが、木骨煉瓦造建築の耐震性に関する研究は国内外を通じて極めて少ない。他文化財建造物の修理において木骨煉瓦壁の各種の実験が行われているが、柱・梁の寸法、煉瓦および目地の仕様、煉瓦の積み方や木架構との納まりなど本建物とは仕様が異なっているため、この実験結果を用いて診断することは難しいと考えられた。そのため、本建物の仕様に基づいた実験を行い、構造特性を把握する必要があった。

実大実験(1)では、現況の木骨煉瓦壁の力学的特性を確認することを目的に現況仕様に倣った木骨煉瓦壁試験体による載荷実験を実施した。実大実験(2)では、木骨煉瓦壁に対する補強効果の検証を目的に補強金物を追加した試験体による載荷実験を実施した。

● 姿図・寸法

【使用材料】

軸組：杉材 E70 相当 182×182

煉瓦：普通煉瓦（JIS R 1250 4 種相当）

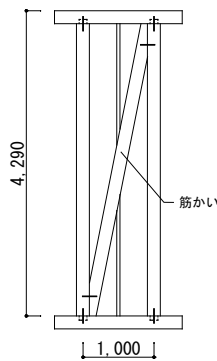
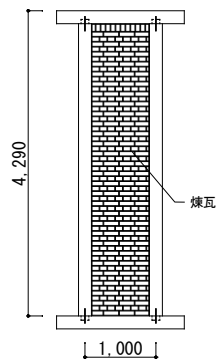
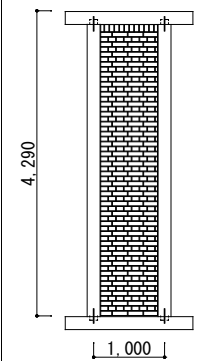
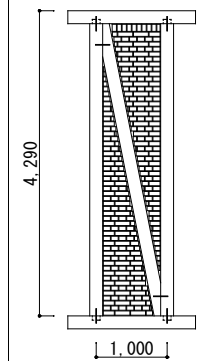
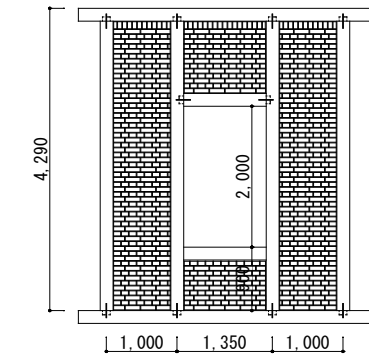
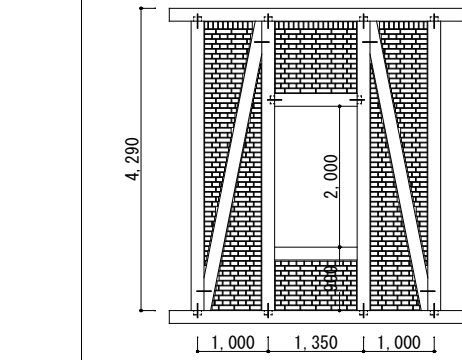
煉瓦目地：ポルトランドセメント（JIS R 5210）＋ 砂

筋かい端部金物：PL-3.2 SS400（実大実験(2)）

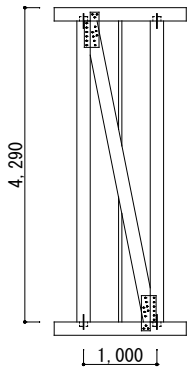
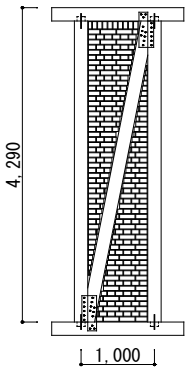
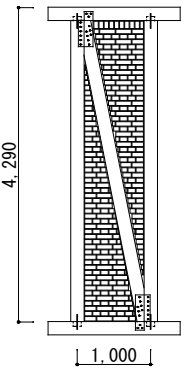
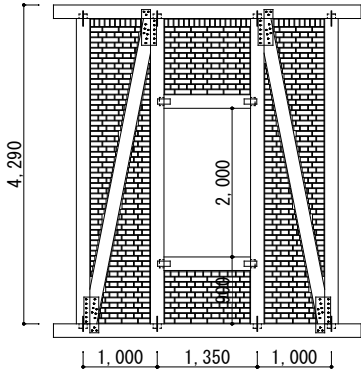
まぐさ・窓台端部金物：タナカ オメガプレート SD（実大実験(2)）

【試験体寸法】

実大実験(1)

試験体名	1-V 試験体	1-B1 試験体	1-B2 試験体	1-BV 試験体
フレーム	単独			
試験体数	1 体			
試験体 形状				
セメント:砂	-	1:2	1:3	1:2
試験体名	1-WB 試験体		1-WBV 試験体	
フレーム	複合			
試験体数	1 体			
試験体 形状				
セメント:砂	1:2		1:2	

実大実験(2)

試験体名	2-V 試験体	2-BV1 試験体	2-BV2 試験体
フレーム	単独		
試験体形状			
セメント：砂	-	1：2	1：2
試験体名	2-WBV 試験体		
フレーム	複合		
試験体形状			
セメント：砂	1：2		

●概要

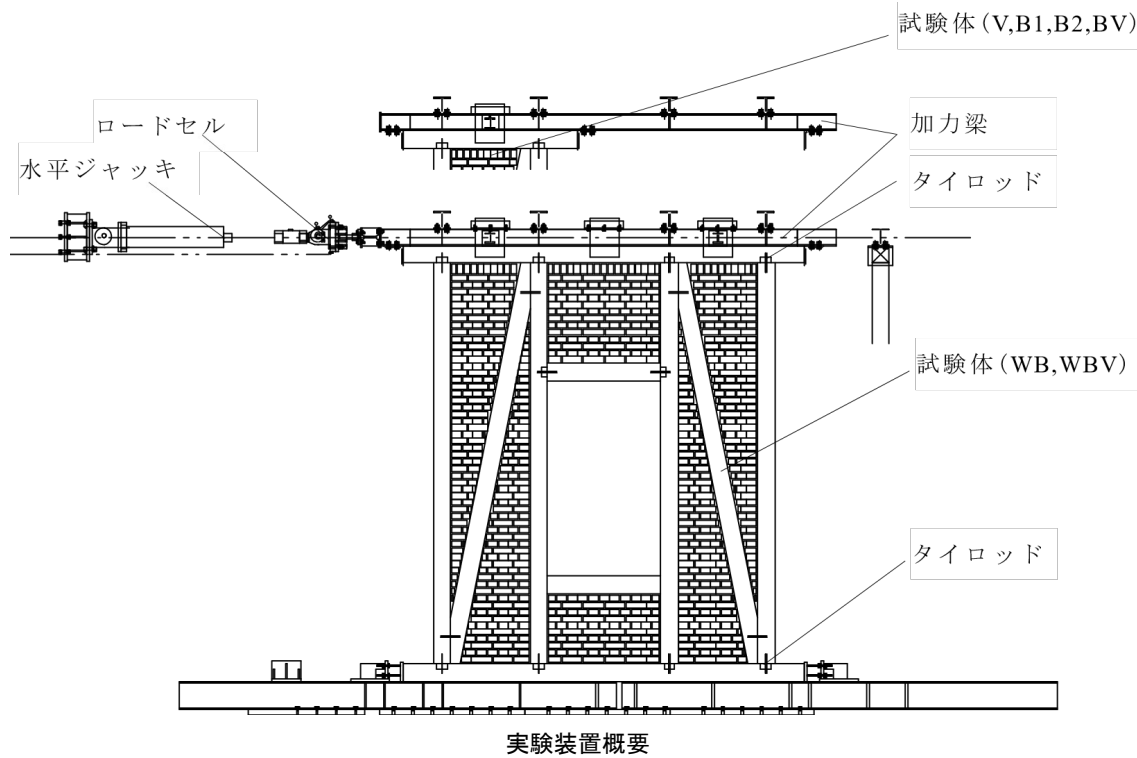
実大実験(1)では、現況仕様の木骨煉瓦壁を想定した試験体（単独フレーム4体、複合フレーム2体の計6体）について、載荷試験を実施した。

実大実験(2)では、木骨煉瓦壁に筋かいが配置された試験体（単独フレーム3体、複合フレーム1体の計4体）について、筋かい端部およびまぐさ・窓台端部に補強金物を取り付けたうえで、載荷試験を実施した。

なお、煉瓦目地の配合比率は「旧ハンター氏邸移築工事報告書」を参考に、煉瓦組積体要素による予備実験（圧縮・せん断・引張）を実施し決定した。

●実験方法

タイロッド方式の正負漸増繰返し载荷実験とし、1/600～1/30 まで各ステップ正負 2 回の繰返し载荷を行い、引き側で最終破壊させた。荷重はアクチュエータに取り付けられたロードセルで測定し、変位は電気式変位計を用いて、横架材及び土台の水平変位、柱の浮き上がり変位、接合部の回転・めり込み量等を測定した。また、ひずみゲージを用いて柱及び筋交いのひずみ度を測定した。

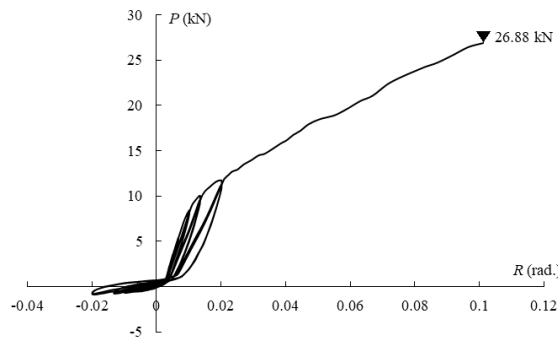


●特性値

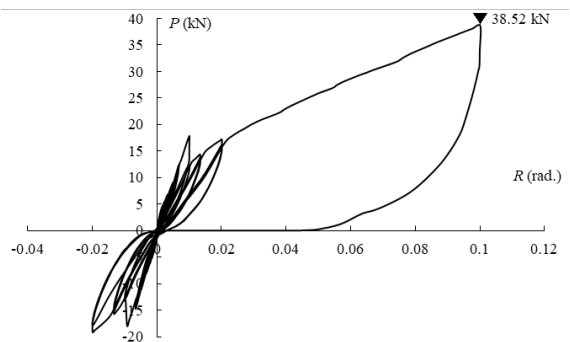
試験体名		1-V	1-B1	1-B2	1-BV	1-WB	1-WBV	2-V	2-BV1	2-BV2	2-WBV
壁長	m	1.00	1.00	1.00	1.00	3.35	3.35	1.00	1.00	1.00	3.35
初期剛性 K	kN/rad	712.64	1112.45	764.32	539.87	2318.63	1403.82	870.46	1186.98	1380.76	3711.32
Py	kN	10.09	17.65	17.91	4.04	61.95	39.27	7.48	27.66	10.65	71.28
P ₁₅₀	kN	5.38	10.24	12.35	3.80	34.17	17.61	6.36	10.56	9.99	36.24
P ₆₀	kN	11.07	18.19	15.79	4.67	49.61	30.54	10.45	23.23	15.84	64.52
P ₃₀	kN	14.65	19.16	21.13	5.73	76.51	45.50	12.77	33.00	19.67	92.93
$0.2\sqrt{(2\mu-1)P_u}$	kN	7.27	10.47	9.12	4.02	29.85	18.19	6.19	17.95	13.71	49.42
2/3P _{max}	kN	14.05	16.77	20.13	5.36	74.69	50.40	8.64	31.15	13.12	74.11
P ₁₅₀	kN	5.38	10.24	12.35	3.80	34.17	17.61	6.36	10.56	9.99	36.24
P _{min}	kN	5.38	10.24	9.12	3.80	29.85	17.61	6.19	10.56	9.99	36.24
P _{min} /m	kN/m	5.38	10.24	9.12	3.80	8.91	5.26	6.19	10.56	9.99	10.82
壁倍率		2.7	5.2	4.6	1.9	4.5	2.6	3.1	5.3	5.0	5.5

●荷重変形

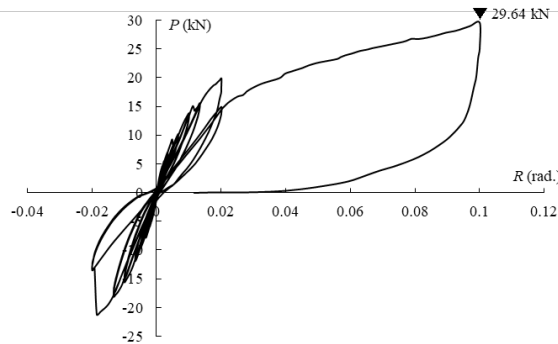
実大実験 (1)



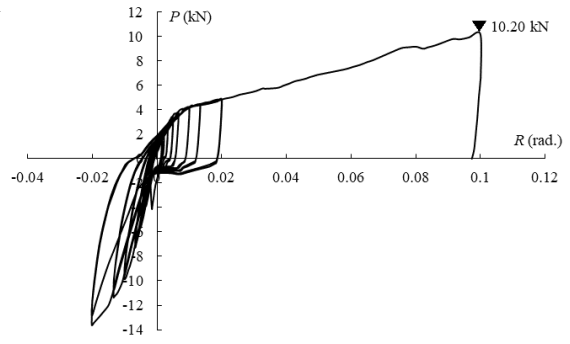
1-V



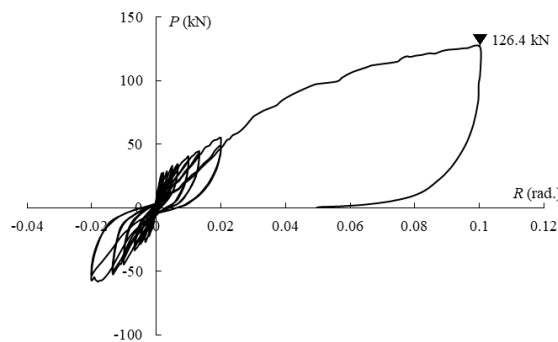
1-B1



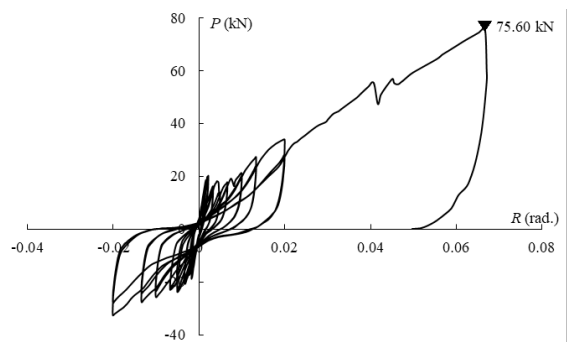
1-B2



1-BV

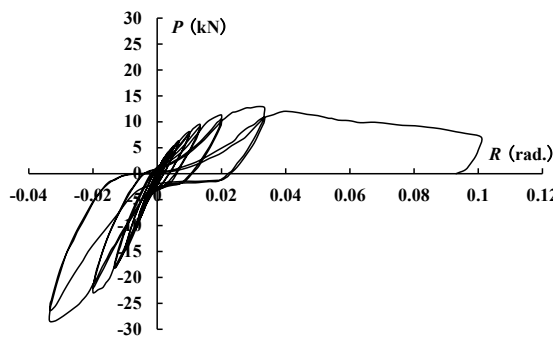


1-WB

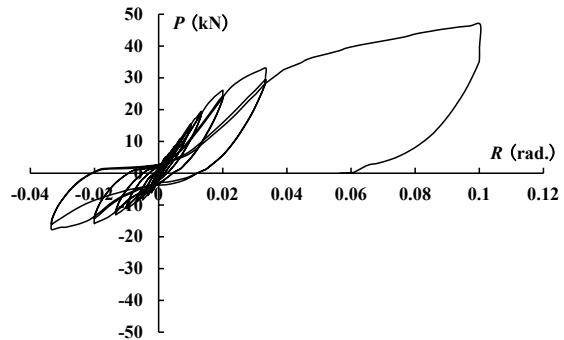


1-WBV

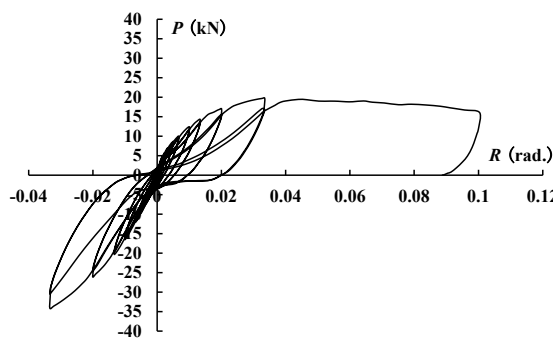
実大実験(2)



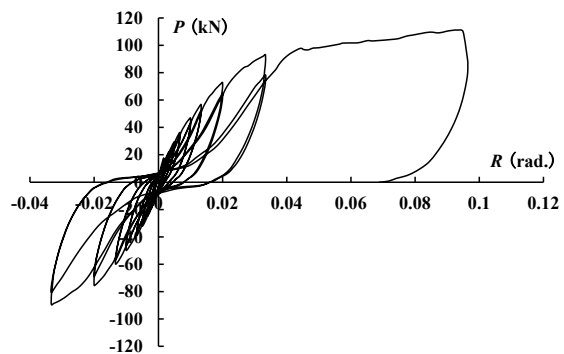
2-V



2-BV1



2-BV2



2-WBV

●破壊形状

実大実験(1)では、煉瓦隅部や筋かい端部でめり込みが進行する挙動が確認された。筋かい有りの試験体(1-BV・1-WBV)では筋かい上部の三角形の煉瓦壁が、変形が進行するにつれ筋かいに添って鉛直方向に滑り落ち、桁側でのめり込みが生じないということが判明し、煉瓦のみの試験体に比べて大幅に耐力が低下する結果となった。また、複合試験体(WB・WBV)では、垂壁・腰壁の圧縮ストラットに起因するまぐさ・窓台接合部の引き抜けや土台側の柱ほぞの破壊が顕著に見られた。

実大実験(2)では、筋かい端部のラグスクリューボルト孔に破壊が集中し、その破壊は筋かいの片側端部に集中する傾向が確認できた。ラグスクリューボルト自体の変形はわずかであったが、大変形時にはラグスクリューボルトの抜け出しに伴い、筋かい金物プレートの局部座屈様の変形が確認された。1-BV 試験体等で見られた筋かい上部側の煉瓦壁の落下は、筋かい金物を取り付けた場合でも同様に生じることが確認された。



1-V 試験体 脚部 筋かいめり込み状況



1-B 試験体 脚部 煉瓦めり込み状況



1-WBV 試験体 筋かい・煉瓦の離間状況



1-WBV 試験体 脚部ひび割れ状況



2-V 試験体 筋かい端部破壊状況



2-BV2 試験体 頂部 煉瓦離間状況



2-WBV 試験体 筋かい端部金物変形状況



2-WBV 試験体 窓台端部破壊状況

●理論式

—

●モデル化

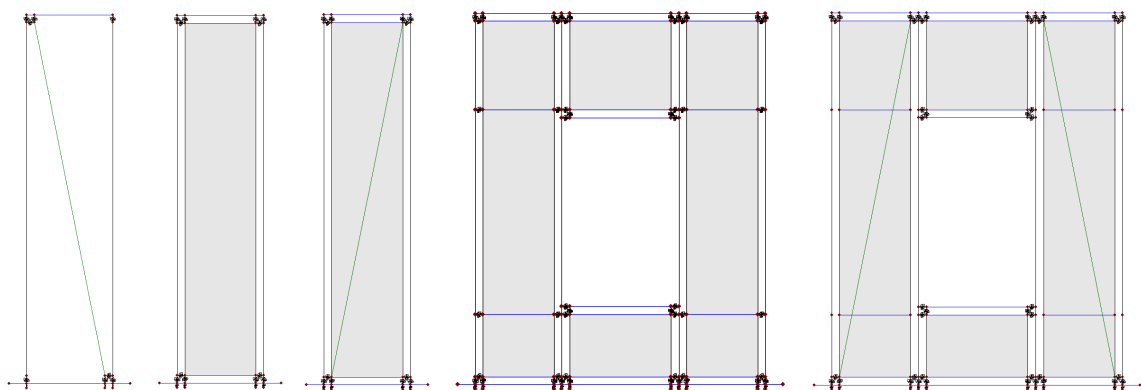
解析モデルの構築は、「任意形状立体フレームの弾塑性解析プログラム SNAP ver. 8 (株式会社 構造システム)」を使用した。

煉瓦壁部分を壁エレメントでモデル化し、木部との取合いは煉瓦壁の木部へのめり込みにより応力を伝達するものとし、煉瓦壁 4 隅にめり込みを考慮した軸方向スプリングを設置することでモデル化した。スプリングの剛性・耐力はめり込み幅、めり込み長さをそれぞれ 0.8 倍に低減し算出した。煉瓦壁に筋かいが組み込まれた場合は、煉瓦部のスプリングの剛性・耐力は 1/5 に低減させた。壁エレメントの剛性・耐力は実建物の調査結果の値を使用し、壁の曲げ耐力は無視した。複合フレームでは、全壁構面の壁エレメントをまぐさ・腰壁位置で分割した。

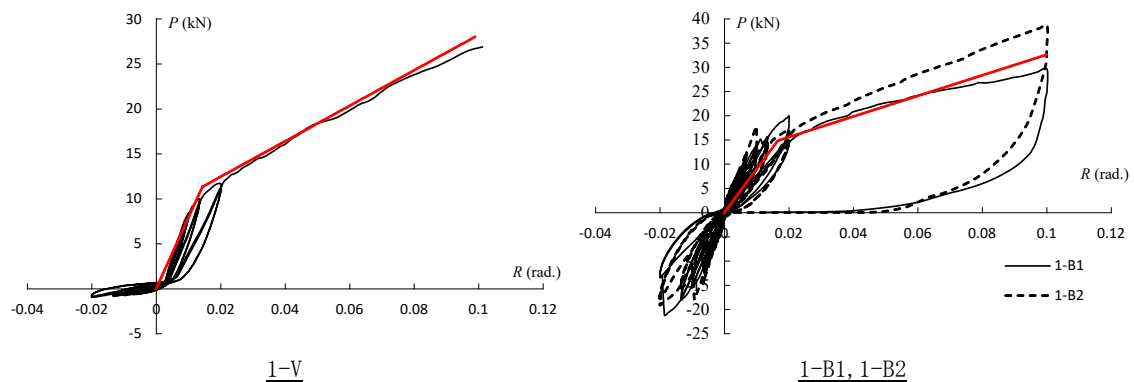
筋かいは、煉瓦壁同様に端部でのめり込みを軸方向スプリングとしてモデル化し、ブレース要素と柱梁とを接続させた。スプリングの剛性算出には初期スリップを考慮した。

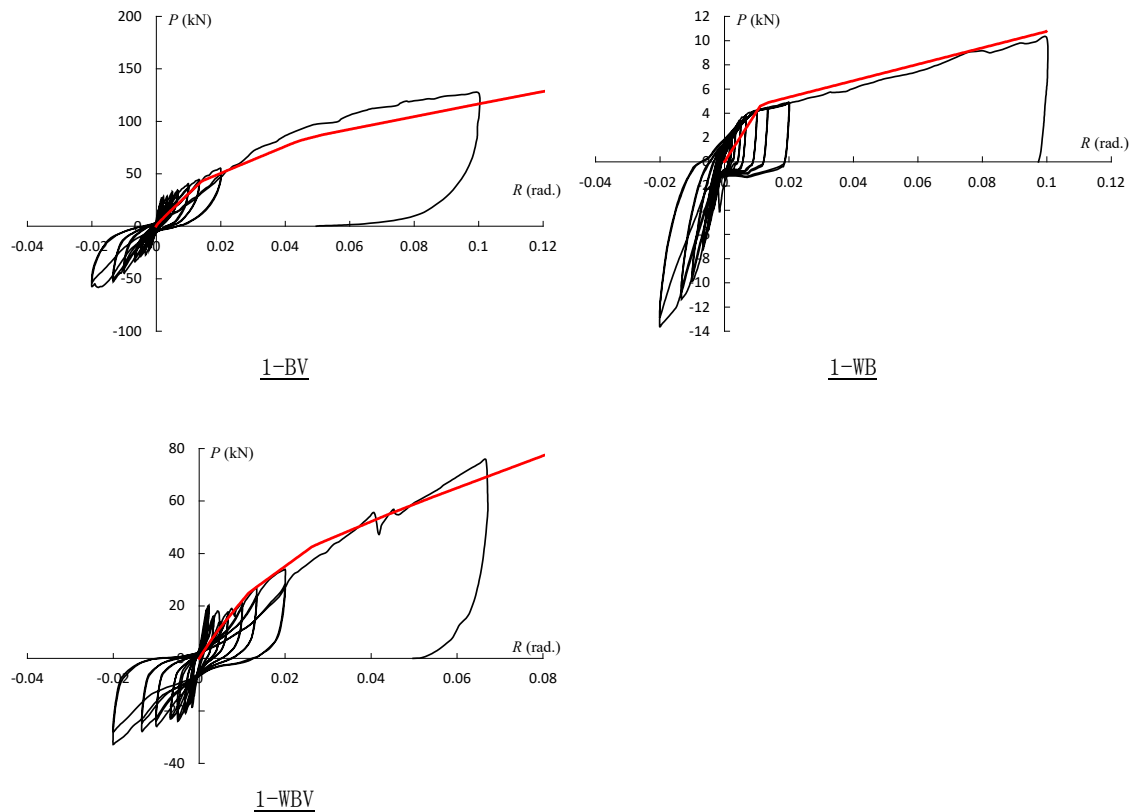
柱頭柱脚・まぐさ部の接合部はスプリング要素でモデル化し、回転剛性・耐力を考慮した。

また、タイロッド方式の実験と整合させるため、桁節点は鉛直方向の変位を拘束した。



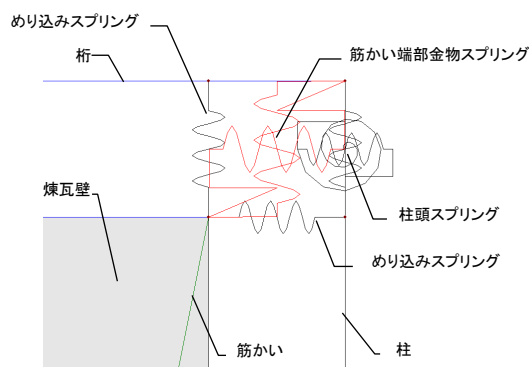
解析モデル図



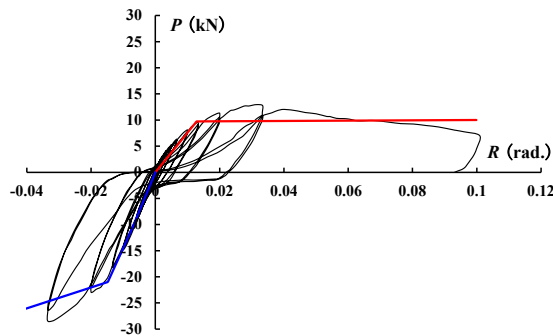


筋かい端部金物は、筋かい軸方向の耐力・剛性を算出し、鉛直・水平方向に分解した上で解析モデルにバイリニア型の復元力を持つスプリング要素として入力した。スプリングの耐力は柱側耐力と梁側耐力を合算した値と筋かい端部の耐力の小さい方とした。剛性は柱側と梁側は並列系、筋かい端部と柱側・梁側とは直列系であるとして算出した。プレートの変形は、ラグスクリーボルト接合部に比べ軸方向へ与える影響が少ないため、解析上無視した。

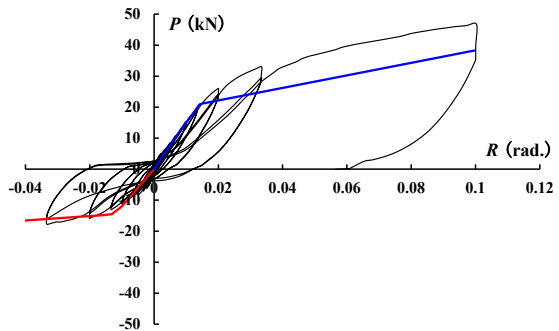
まぐさ・窓台接合部の金物（オメガプレート SD）は、接合部のスプリング要素の引張方向の復元力特性として解析モデルに評価した。復元力特性はバイリニア型とし、メーカー公開データの終局耐力 P_u の平均値を降伏耐力とした。



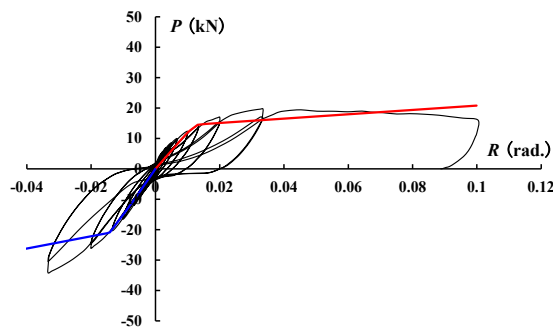
筋かい端部のモデル概要



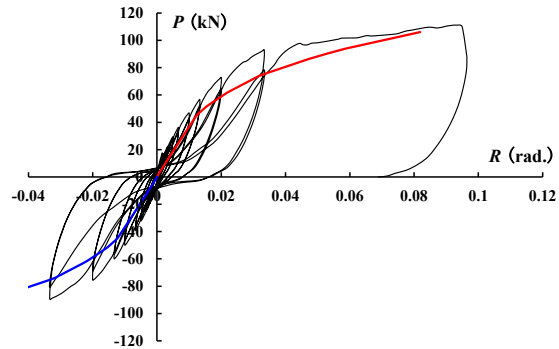
2-V



2-BV1



2-BV2



2-WBV

●考察

木骨煉瓦壁は接合部の耐力が担保されることが前提ではあるが、煉瓦隅部での木軸へのめり込み変形が卓越し、大変形まで比較的安定した挙動を示すことが判明した。ただし、木骨煉瓦壁に筋かいが組み込まれると、筋かいにより煉瓦壁が分断され、筋かい上部側の煉瓦壁が変形に伴い鉛直方向に滑り落ちるため、煉瓦のみの壁体に比べせん断力に対する抵抗力が大きく低下する。建築当時は、筋かいは構造的配慮のためと設置されたものと思われるが、結果として耐震性能を低下させる要因となっていると言える。

実大実験(2)において、上記問題の対応策として筋かい端部に補強金物を設置し、その補強効果を検証した結果、1/30rad 程度までは煉瓦のみの壁体とほぼ同等の性能を発揮した。ただし、1/30rad 以降の大変形領域においては煉瓦のみの壁体のような荷重上昇は見られず、ラグスクリュー部の変形が進行することで、緩やかに荷重低下が生じる結果となった。1/30rad 程度までは十分な補強効果が確認できたことから、耐震診断・補強計画における大地震動時の限界変形は 1/30rad に設定することが望ましいと判断した。