伝統軸組構法による木造土壁の 火災安全性実験

LOADED FIRE RESISTANCE TESTS ON TRADITIONAL WOODEN SOIL WALL CONSTRUCTION

安井 昇 —*1 長谷見雄二 —*2
木下孝一 —*3 秋月通孝 —*4
吉田正友 —*5 山本幸一 —*6
田村佳英 —*7

Noboru YASUI —*1 Yuji HASEMI —*2
Koichi KINOSHITA —*3 Michitaka AKIZUKI —*4
Masatomo YOSHIDA —*5 Koichi YAMAMOTO —*6
Yoshihide TAMURA —*7

キーワード：
木造土壁，載荷加熱試験，準耐火構造，水平加力試験

Keywords：
Wooden soil wall, Loaded fire resistance test, Quasi-fireproof construction, Horizontal loading test

In order to clarify potential fire safety capabilities of Japanese traditional post and beam wooden construction, loaded fire resistance tests have been carried out on two kinds of reinforced soil wall construction infilled in timber frame with and without horizontal deformation simulating an effect of strong earthquake. The test results suggest high feasibility of traditional timber frame reinforced soil wall construction to urban buildings. This indicates an encouraging prospect for the rational fire safety assessment of historic buildings and further development of fire-safe-traditional constructions for the restoration of historic buildings.

1. はじめに

これまでの木造建築部材の防火性能に関する研究開発は、主として枠組壁工法やプレファブ工法、重木構造のような近代工業的木造を中心に進められてきており、土壁を用いた伝統的な構法の防火性能の把握や改良については、ほとんど研究がなされてこなかった。このため、伝統木造の建設機会が減少しているだけでなく、歴史的町並みの保存・修景も大きな困難に直面している。建築基準法では、伝統木造土壁構法は「土蔵造」「土塗真壁造で裏返し塗りをしたもの」がわずかに防火構造に位置づけられているにすぎないが^{*1}、これは、木造土壁の防火性能に関するデータが決定的に不足しているためと考えられる。唯一、小規模な試験体を用いて山田ら²が行った土壁防火実験の結果を詳しく見ると、土の塗り厚の確保、裏返し塗り、ちりじゃくりなどの工夫をすれば、土壁で耐火加熱1時間程度の燃え抜け防止性能を実現できることが予想される。そこで更に、加熱中の軸組の変形を抑制することができれば木造土壁でも準

耐火構造を達成できる可能性もある。歴史的町並みで一般的な2階建の建築物を考えた場合、法令上、準耐火構造までの仕様は要求されないが、今後、市街地での伝統木造の需要を喚起するには、容積率を有効に利用できる3階建てが可能になるようにする必要が大きいことを考慮し、木造土壁で達成可能な防火性能の見通しを明らかにするために実大規模の試験体を製作し、準耐火試験に相当する載荷加熱試験を行った。今回は、改正建築基準法施行直前の平成12年3月に実験を行ったため、載荷加熱試験方法は、旧建築基準法平成5年告示第1454号の別記第一の規定に準拠して行った。また、地震後の火災における延焼や類焼を抑制する性能を確認するために大地震に相当する水平加力を加えた後にも載荷加熱試験を行った。

2. 試験体

試験体の仕様を表1に、試験体の構成図及び外観をそれぞれ、図1、写真1に示す。試験体は2仕様各2体の合計4体とし、すべて数寄屋棟梁である木下孝一が製作した。一つは、京都で町家再生の振興を図っている関西木造住文化研究会が計画し、木下が実施設計、施工した江戸末期創建と推定される京都西陣の町家の修復・再生事例³⁾の外壁仕様（以下、KN工法）、他は京都で広く使われている土壁をやや防火的に強化した工法（以下、一般工法）で、仕様の詳細も木下の設計による。KN工法では、120mm角柱を使用し、丸竹の小舞下地の両側に約120mmの土を塗り、その外側に11mmの焼杉板を大壁となるように施工した。一方、一般工法は105mm角柱を使用し、割竹の小舞下地の両側に約50mmの土を塗り、その外側に約20mmのラスモルタルを大壁となるように施工した。

試験体の製作は平成12年1月中旬より開始した。KN工法では約

表1 試験体仕様一覧

単位: mm

試験体No	A	B	C	D
工 法	KN工法		一般工法	
外形寸法	W=1,940、H=2,862		W=1,925、H=2,862	
軸組	柱	杉4寸(120)角(芯持材、並1等材)	杉3寸5分(105)角(芯持材、並1等材)	
	土台桁	杉: W4寸(120)×H4寸5分(136)(芯持材、並1等材)		
	仕口	長ホソ差し、込み栓締め		
土壁	外壁仕上	焼杉板(t=11)張		ラスモルタル(t=20)塗
	塗り厚	荒壁裏返し塗(3寸5分:105mm) +中塗(6分:18mm) 合計塗り厚=4寸1分:123mm	荒壁裏返し塗(1寸2分:36mm) +中塗(4分5厘:13.5mm) 合計塗り厚=1寸6分5厘:50mm	
	含水率	4.0%		4.3%

* 軸組木材及び仕上モルタルの含水率は測定していない。

*1 早稲田大学理工学研究科 大学院生・工修
(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
*2 早稲田大学理工学部 教授・工博
*3 数寄屋研究所心傳庵 棟梁
*4 早稲田大学理工学研究科 大学院生
(現 大成建設(株) 工修)
*5 財団法人建築総合試験所 建築物理部長・博士(工学)
*6 財団法人建築総合試験所 研究員
*7 関西木造住文化研究会 代表幹事

*1 Graduate Student, School of Science and Engineering, Waseda University, M. Eng.
*2 Prof., School of Science and Engineering, Waseda University, Dr. Eng.
*3 Building Master, Shinden-An Sukiya Design and Carpentry Co.
*4 Former Graduate Student, School of Science and Engineering, Waseda University
*5 Director, General Building Research Corporation of Japan, Dr. Eng.
*6 Researcher, General Building Research Corporation of Japan
*7 Secretariat, Kansai Association for Research in Traditional Housings

図1 試験体構成図

写真1 試験体全景 (KN工法)

4ヶ月間、練り置きした土(大亀谷の土+解体建物の古土に藁を加えて寝かしたものを)、一般工法では市販品の土を使用し、1月下旬から3月上旬にかけて、荒壁塗り(外側)→荒壁裏返し塗り(内壁)→荒壁増塗り(外側)(KN工法のみ)→中塗(内壁)→外部板張りまたはラスモルタル塗りの順で施工した。土壁の乾燥には不利な時期であったが、屋根のある半屋外で、ビニルシートで壁をつくり、ストーブを用いるなどして凍結を防止しながら乾燥養生した後、3月下旬に(財)日本建築総合試験所において実験を行った。土壁の含水率は表1に示すようにKN工法4.0%、一般工法4.3%であった。これは、真夏に約2ヶ月間の十分な乾燥養生を行った場合⁴⁾より約1~2%高かった。

3. 実験方法

KN工法・一般工法ともに2体のうち1体は水平加力を加えず長期(鉛直)荷重による載荷加熱試験を行い、もう1体は大地震を想定した水平加力(1/100rad)を与えて変形をさせた上で、同じく載荷加熱試験を行った。載荷加熱試験装置を図2に示す。

3-1. 水平(剪断)加力試験

試験体B及び試験体Dの各試験体の土台を載荷加熱試験装置に固定し、加力を行う桁の小口部分にスチール製のプレートを取付け、変形角が $\pm 1/100\text{rad}$ となるように水平加力を正負3回繰り返した。この水平加力条件は平成8年度に建設省が行った「市街地における木造3階建共同住宅の延焼性状に関する実大火災実験」の際の各種木造外壁部材について行われた部材試験²⁾に合わせた。

3-2. 載荷加熱試験

(1)加力方法

加力は加熱される軸組部材(両端の柱)に長期許容応力度に相当する応力が生じるように載荷した。また、この長期許容荷重は表2に示すように座屈許容耐力とめり込み耐力のうち小さい方を採用した。

(2)加熱方法

ISO834に規定する標準加熱曲線に準拠して加熱を行った。

(3)測定項目

(ア)温度 試験体を6ブロック(図3)に分け、それぞれ図4のように8点づつ埋め込んだ直径0.65mmのK(CA)熱電対で、試験体内部の温度変化を30秒間隔で測定した。測定位置については燃え抜け

図2 載荷加熱装置

表2 長期許容荷重 (単位: kN)

	KN工法	一般工法
座屈荷重	94.2	58.9
めり込み荷重	◎56.5	◎43.4

等が起こった場合にどの部分が弱点となるか、逆に十分な耐火性能が得られた場合にどの程度の仕様で防火性能を十分に確保できるかを知らるために加熱面から非加熱面への断面方向に密に配置した。さらに、輸送・養生中や水平加力試験で非加熱面に発生した亀裂が防火性能にどのような影響を与えるかを知らるためにその亀裂部分の温度測定も行った。

(イ)載荷荷重と軸方向及び面外方向変位 試験体への載荷荷重は、載荷加熱試験装置下部に設置したロードセルを用い測定した。軸方向の変位は同じく下部に設置した3個の変位計で、面外方向の変位は試験体の正面に取り付けた3個の変位計で30秒間隔で測定した。

その他、炉内圧力の測定、試験体加熱面及び非加熱面の目視観察、VTR撮影、試験体非加熱面の熱映像記録、加熱終了後の軸組の炭化深さの測定を行った。

4. 実験結果

4-1. 水平(剪断)加力試験結果

水平加力試験開始前の試験体の養生・輸送時に試験体D（一般工法）のみ、加熱面（モルタル面）の中央部横方向に一カ所、非加熱面（土壁面）の縦方向に一カ所のひび割れが生じた。

水平加力試験において、試験体B（KN工法）は、加熱面（焼杉板面）、非加熱面（土壁裏面）ともにクラックの発生はなかった。試験体Dは、正負の加力を繰り返すたびに養生・輸送中に発生したクラックを中心にひび割れが放射状に広がった。これらのクラックの最大巾は0.2mmであった。

4-2. 載荷加熱試験結果

図3 温度測定部位

- ①柱前面温度
- ②柱側面温度（加熱側）
- ③柱側面温度（中央）
- ④柱側面温度（非加熱側）
- ⑤杉板裏面温度（KN工法）
- ⑥土壁表面温度（KN工法）
- ⑦横貫表面温度（土壁内）
- ⑧土壁裏面温度

図5 温度測定結果〔測定部位Ⅲ〕
(○内の数字は図4と対応)

図6 軸方向収縮量測定結果

図7 面外方向変形量測定結果

止まりと着火を繰り返した後、10分を超えた頃に焼杉板が燃え抜け、落下し始めた。その後、土壁が直接加熱されたが特に大きな変化は見られなかった。非加熱面は土壁に含まれる水分に由来すると思われる湯気の発生は見られたが特に大きな変化は見られず、土壁裏面の温度も最高で68℃(試験体B)であり、炉内表面の焼杉板は燃焼するが、試験体内部に対しては断熱の効果を示している。

一方、一般工法の載荷加熱時間は試験体Cで61分、水平加力を行った試験体Dで51.5分となった。どちらの実験も軸方向最大収縮量が急激に増加し、規定値を超えそうになったため安全を考慮して加熱を中止した。試験体加熱面を見ると、加熱開始後5～6分でモルタル表面の一部が爆裂し、17分を過ぎた頃からモルタルの下地に用いたアスファルトルーフィング及び木ズリがモルタル裏面で燃焼し、火災の一部がモルタルの爆裂部から炉側に吹き出し始めた。非加熱面は湯気の発生とモルタル下地の燃焼による黒煙の発生が柱際から見られたものの炎の貫通など大きな変化は見られなかった。土壁裏面の最高温度は水平加力試験の際に発生したひび割れ部で98℃(試験体C)と、耐火性判定基準値(平均155℃:旧建築基準法平成5年告示1454号別記第一に定める値[初期温度+140℃])を大きく下回った。また、試験体C、Dともに35分を過ぎた頃から軸方向収縮量(図6)及び面外方向変形量(図7)が急激に増加し始めたが、この時刻と柱の加熱側表面の温度(図5の①の温度)が急激に上昇し始めた時刻とがほぼ一致しており、柱の燃焼による断面の減少が壁の面外変形の大きな要因になっていることがわかる。

(2)加熱終了後の軸組の炭化深さ及び土壁内部状況

実験後の柱の炭化状況を図8に示す。KN工法(120mm角柱)では柱中央部で最大19mm、端部で最大36mm炭化した。最大90分の加熱を受けてもこの程度の炭化で済んだのは、柱表面が約

図8 柱の炭化状況

表3 試験方法の比較

		本実験 (旧建設省告示平成5年第1454号 別記第一に準じる)	(財)日本建築総合試験所 「耐火性能試験・評価業務方法書」 4.2 準耐火性能試験・評価方法
試験体寸法		W1,940mm×H2,862mm	W3,000mm×H3,000mm以上
構成方法		土台・桁勝ち (構架材にも荷重がかかる)	柱勝ち (柱のみに鉛直荷重がかかる)
軸組	載荷荷重	柱の長期許容応力度に相当する荷重	
		めりこみ荷重 (めりこみ荷重と座屈荷重の小さい方)	座屈荷重
評価基準	裏面温度	平均: 初期温度+140℃を越えない 最高: 初期温度+180℃を越えない	
	火災の貫通	無いこと	
	軸組の変形	軸方向最大収縮量 h/100を越えない 最大軸方向収縮速度 3h/1000を越えない h=試験体の初期高さ	
加熱方法		ISO834標準加熱曲線に準じる	

24mm厚の土壁と11mm厚の焼杉板に被覆されていたためと考えられる。また、一般工法(105mm角柱)は、柱中央部で最大12mm、端部で最大49mm炭化した。柱中央部と比較して、端部の炭化が大きかったのは、一般工法では、柱と壁の取り付け部にちりじゃくりを設けていなかったためと考えられる。柱中央部の炭化深さは、柱表面温度の急上昇から加熱終了までの時間(15～20分)に炭化速度の慣用値0.6mm/分を乗じた値に近い。

実験後の土壁内部の間渡し竹及び小舞竹は、KN工法、一般工法ともに一部炭化した部分はあったもののほぼ原形をとどめていた。

5. まとめ

KN工法は水平加力を受けない場合が68分、受けた場合が90分で、装置の事情のために加熱を中止したが、いずれにしても木造では最高の法令的位置付けである準耐火構造60分を上回った。また、一般工法は、水平加力を受けない場合が61分、受けた場合が51.5分で、いずれも一般の準耐火構造(45分)の性能を上回った。

本実験では、載荷加熱試験方法は旧建築基準法平成5年告示第1454号の別記第一の規定に準拠して行ったが、本実験と現行の建築基準法に基づく(財)日本建築総合試験所の「耐火性能試験・評価業務方法書」に規定された準耐火性能試験・評価方法との相違点を表3に示す。これによると、試験体の寸法と軸組の荷重条件が異なる以外は、後者の条件を満足している。ただし、本実験では、載荷荷重に座屈荷重とめり込み荷重のうち、小さい方のめりこみ荷重を採用したが、後者の規定によれば、座屈荷重を採用することとなる。一般工法では、軸組の変形により加熱中止になったので、仮に座屈荷重で載荷加熱試験を行った場合には、本実験よりも早い段階で軸組の変形が起こる可能性がある。

本実験により、伝統構法による木造土壁で準耐火構造以上の防火性能を達成できる見通しが明らかになったが、町家再生や町並み保存における修景などで必要性が高いのは準耐火構造よりも地域の意匠や構法の伝統にあった防火構造の開発だろう。今回の実験で準耐火時間が裏面への炎の貫通や裏面温度の上昇ではなく、軸組の変形で決まったことを考えると防火構造(30分)であれば、軸組、土壁部分ともに多様な可能性があると考えられる。

注1:平成13年国土交通省告示1684号で、防火構造の仕様規定のうち、伝統木造土壁構法関連のものは、「土蔵造」「土塗真壁造で裏返し塗りをしたもの。ただし、両側の土塗り厚がそれぞれ20mm以上」と規定された。

謝辞 この実験は関西木造住文化研究会(代表幹事:田村佳英)の「関西の木造伝統住文化再生5カ年計画プロジェクト」の一環として行われ、会員各位の協力を得た。試験体の製作・輸送は数寄屋研究所心傳庵の負担であり、実験の実施は、(財)日本建築総合試験所並びに特定非営利活動法人災害情報センターの協力のもとに実現したものである。ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 山田誠・菅原進一:木造住宅壁体の耐火性能について(1)(2)
木材工業 Vol.39-8, P24-29 Vol.39-9, P21-27, 1984
- 山田誠・長谷見雄二・安村基・阿部市郎:
木造3階建て共同住宅外壁部材の準耐火性能に関する水平加力の影響
日本建築学会技術報告集 第7号, P75-78, 1999/2
- 鈴木有:防災まちづくりと木造住文化共存の町家再生の試み
建築士 Vol.48, P12-13, 1999/11
- 上島基英・長谷見雄二・安井昇・畑俊充・木村忠紀・村上博他:
市街地型伝統軸組木造土壁構法の防火性能の再評価(その2)
日本建築学会関東支部研究報告集Ⅰ, P373-376, 2002/3

[2002年4月19日原稿受理 2002年7月23日採用決定]