ロックウール断熱材を用いた木造断熱壁体の防耐火性能に関する研究

STUDY ON THE FIRE PROTECTING PERFORMANCE OF WOODEN EXTERNAL WALL WITH ROCKWOOL INSULATION

糸毛 治*, 鈴木大隆**, 長谷見雄二***
Osamu ITOGE, Hirotaka SUZUKI and Yuji HASEMI

Fire resistance tests are conducted on small-scale specimens of wooden wall with different positions and thicknesses of rockwool insulation in the wall. The tests have revealed significant influence that position and thickness of insulation in the wall give to the fire protecting performance of the wooden wall. It has been also clarified that putting insulation between wooden posts does not always make mechanical fire resistance improve, because positional relation between wooden post and insulated layer changed thermal distribution in the wall and damage wooden post given.

Keywords : *Wooden wall, Rock-wool-insulation, Constructing method on Insulated wall, Insulation Thickness, Fire Protecting Performance*

木造壁体, ロックウール断熱材, 断熱工法, 断熱材厚さ, 防耐火性能

1. はじめに

地球環境問題への対応として、住宅における省エネルギー化が求められる中、住宅の断熱化が急速に普及している。他国に比べ我が国の住宅構法は多種多様であり、使用される断熱材や適用される断熱工法により、建築外皮としての外壁の壁体仕様は多岐にわたる。

木造住宅の外壁の一般的な断熱工法には、軸間に断熱材を充てんする充てん断熱工法、木造躯体の屋外側に断熱材を張る外張断熱工法、これらを組み合わせた付加断熱工法の3つがあり、外壁となる耐力壁の防耐火性能には、非損傷性、遮熱性、遮炎性の3つが求められる。不燃性断熱材を用いた場合、断熱材が厚くなると、遮熱性は有利になるが、非損傷性は木柱部の温度上昇に支配されるため、木柱との位置関係によっては不利側になる可能性がある。この断熱材と木柱の位置関係は断熱工法により異なるため、断熱工法ごとに壁体の防耐火性能と木柱や断熱材の寸法等の関係は異なると予想される。従って、断熱工法の防耐火性能に関する技術開発や性能評価を見通し良く進めるためには、断熱工法ごとに、木造壁体の防耐火性能が木柱や断熱材の寸法等とどう関係するのかを明らかにする必要がある。

本研究では断熱材の寸法に着目し、小規模の試験体による試験(以下、小型試験)にて、断熱工法ごとに防耐火性能と断熱材の厚さや位置との関係について検討を行った。小型試験では、壁体の断面方向の温度分布は実大壁を火災加熱した時と変わらないようにできるため、遮熱性および遮炎性は再現できる。一方、非損傷性は、小型

試験では建材の変形量や脱落、木柱の座屈が再現できず、実大試験により検討が必要であるが、小型試験であっても非損傷性を支配する木材の炭化性状と柱の温度分布を把握すれば、非損傷性と壁の設計内容の関係の見通しは得られると考えられる。

また各種発泡プラスチック断熱材などの有機系断熱材では、壁体内で断熱材自体が燃焼してしまい、断熱工法による断熱材の設定位置や厚みによる伝熱的な要因が把握できない。従って、本研究では不燃材料であり最も高温時の熱変性が少ないロックウール断熱材を用い、屋外加熱および屋内加熱それぞれの評価を行った。

2. 試験方法

2.1 試験法

試験は、幅 800 mm×高さ 800 mmの小規模の試験体(加熱面:幅 600 mm×高さ 600 mm)を用いた。炉内温度を試験体表面から 100 mmの位置でφ3.2 mmのシース熱電対(K熱電対)により測定し、ISO834加熱曲線に合うように加熱を行った。なお、試験体仕様は防火構造を基本に設計した。防火構造では、屋外側のみ 30 分の火災加熱を想定するが、この種の構成の壁は、被覆厚を操作して準耐火構造まで用いられる可能性があるため、屋外加熱、屋内加熱の両方について非載荷で加熱時間を 60 分とした。

2.2 試験体仕様

試験体の仕様一覧を表 1 に示す。本研究では充てん断熱工法、外張断熱工法、付加断熱工法の3つの断熱工法を対象とした。充てん

* 北海道立総合研究機構北方建築総合研究所
研究主任・工修

** 北海道立総合研究機構北方建築総合研究所
部長・博士(工学)

*** 早稲田大学理工学術院 教授・工博

Researcher, Hokkaido Research Organization Northern Regional Building Research Institute, M. Eng.
General Manager, Hokkaido Research Organization Northern Regional Building Research Institute, Dr. Eng.
Prof., Department of Architecture, Waseda Univ., Dr. Eng.

工法では、厚さ 55 mm の断熱材を室内側と外気側にそれぞれ配置した半充てん壁体、100 mm の断熱材を配置した充てん壁体の 3 種類を試験体とした。外張断熱工法では、外張断熱材の厚さをそれぞれ 25 mm、60 mm、100 mm とした壁体の 3 種類を試験体とした。付加断熱工法では、100 mm の断熱材を充てんした上で、付加断熱材の厚さをそれぞれ 25 mm、60 mm、100 mm とした壁体の 3 種類を試験体とした。さらに断熱材を有しない場合として無断熱壁体を加え、計 10 種類を試験体とした。なお試験体 1 種類につき、屋外加熱、屋内加熱それぞれ 1 体ずつ計 2 体の試験を行った。

試験体の共通仕様として、外装材は市販品の窯業系サイディング厚さ 15 mm、通気層は通気胴縁により厚さ 18 mm、内装材はせっこうボード厚さ 9.5 mm とし、充てん断熱材は袋入りロックウール 24K、外張断熱材はロックウール 40K を用いた。防風層は透湿防水シート厚さ 0.17 mm、防湿層はポリエチレンシート厚さ 0.2 mm を用いて、木柱や枠材等の木材は、ホワイトウッドと呼ばれる北欧産材を使用した。なお木材の重量含水率は 10～15%wt の範囲にあり、その他の各種建材は含水率調整を行わず、市販品を気乾させた上で用いた。

表 1 試験体の仕様一覧

試験体No.	断熱工法	試験体仕様		壁体の熱貫流抵抗* (m ² ・K/W)			試験体の共通仕様
		外張断熱材	充てん断熱材	試験体*	試験体断熱部*	実大仕様*	
1	無断熱	無断熱壁体	なし	0.41	0.35	0.32	外装材 : 窯業系サイディング (厚さ 15 mm・市販品) 通気層 : 通気胴縁 (厚さ 18 mm) 内装材 : せっこうボード (厚さ 9.5 mm) 充てん断熱材 : 袋入りロックウール 24K λ=0.038W/m ² K 外張断熱材 : ロックウール 40K λ=0.038W/m ² K 防風層 : 透湿防水シート厚さ 0.17 mm 防湿層 : ポリエチレンシート厚さ 0.2 mm 木柱・枠材 : ホワイトウッド (北欧産材) を使用 木材の重量含水率は 10～15%wt の範囲 ※木材以外の各種建材は特に含水率調整は行わず、市販品を気乾させた上で用いた。
2-1	充てん	55 mm 室内側配置	24K 55 mm	1.67	1.80	1.49	
2-2	断熱	55 mm 外気側配置	24K 55 mm	1.73	1.89	1.55	
2-3	工法	100 mm 充てん	24K 100 mm	2.39	2.99	2.19	
3-1	外張	25 mm 外張	40K 25 mm	1.19	1.10	0.95	
3-2	断熱	60 mm 外張	40K 60 mm	2.13	2.02	1.78	
3-3	工法	100 mm 外張	40K 100 mm	3.19	3.08	2.71	
4-1	付加	25 mm 付加	40K 25 mm	3.13	3.64	2.92	
4-2	断熱	60 mm 付加	40K 60 mm	4.11	4.57	3.83	
4-3	工法	100 mm 付加	40K 100 mm	5.20	5.62	4.83	

※実際の壁体と試験体では、断熱材と木材部の見付面積の割合が異なる。また試験時、試験体の通気層の上端と下端を塞いだうえで試験を行う。これらの理由より、実際の壁体と試験体では熱貫流抵抗の値が異なる。ここでは、次に示す算出方法にて、試験体、試験体断熱部、実大仕様の 3 つの値をそれぞれ求めた。
試験体 : 試験を実施した小型試験体で、両端の枠材、中央の木柱の熱橋部も考慮し、通気層は空気層として外装材から内装材の層構成で算出した。
試験体断熱部 : 試験を実施した小型試験体で、木材部の熱橋を考慮せず、断熱材部のみを対象に、通気層は空気層として外装材から内装材の層構成で算出した。
実大仕様 : 実際の壁体仕様で熱橋 (105 mm×105 mm の木柱を 1,820 mm 間隔で、柱間に 45 mm×105 mm の間柱を 455 mm 間隔で設置) を考慮し、通気層から内装材の層構成で算出した。

図 1 試験体概要および断熱工法ごとの試験体仕様

2.3 測定項目

1) 遮熱性・遮炎性

壁体内部の温度分布を把握するため、図 1 中に示す温度測定位置に K タイプ (CA) 熱電対を設置して、試験体裏面の温度、壁体内部の断熱材および内装材の各表面温度を測定した。壁体の遮熱性は、試験体裏面の温度が国土交通省指定性能評価機関の「防耐火性能試験・評価業務方法書」²⁾に定められた規定値 (平均: 初期温度+140K、最高: 初期温度+180K) に達する時間で評価し、試験開始後 30 分、45 分、60 分における試験体裏面温度上昇の平均値および最高値を参考として用いた。遮炎性は非加熱面側からの目視観察で確認した。

2) 非損傷性

非損傷性は載荷と変形評価を必要とするため、小型試験では直接把握できない。ただ非損傷性は木柱が長期許容応力度の荷重に対し座屈するか否かで決まるため、木柱の損傷の程度が大きく影響する。そこで試験終了後の木柱に対し、最も炭化が進んでいる部分を目視で確認し、断面寸法が最も小さい部分 (最小断面と称す。) の断面積と断面二次モーメントを求め、試験前を 100%とした時の断面積と断面二次モーメントの残存割合を算出した。

また本研究で対象とする大壁の木造断熱壁体では、木柱は内外装材や断熱材に被覆された状態で火熱を受ける。さらに断熱工法により木柱と断熱材の位置関係、木柱の被覆状況が異なるため、木柱各箇所での火熱の受け方は様ではない。断熱工法による木柱の火熱の受け方の違いを把握するため、表2に示すように試験前の木柱の表面に熱電対を設置し、柱正面、柱角部、柱側面の表面付近温度（以下、それぞれ柱正面温度、柱角部温度、柱側面温度と称す。）を測定した。柱正面温度、柱角部温度、柱側面温度が、それぞれ木材の着火温度(260℃と仮定する)を上回った時間を、その点での木柱表面の着火時間とし、この着火時間から試験終了までの時間を木柱の燃焼時間とした。既往研究³⁾を参考に、図2に示すように、その測定点での試験終了後の炭化深さを計測した。さらに測定点ごとに炭化深さを木柱の燃焼時間で除した値の平均値を着火後の炭化速度とした。

表2 木柱表面の温度測定位置

屋外加熱の場合		屋内加熱の場合	
充てん工法 (無断熱)	外張断熱工法 (付加断熱工法)	充てん工法 (無断熱)	外張断熱工法 (付加断熱工法)

×：温度測定位置（柱正面：各上下2点、柱側面A～C：左右2面各上下計4点）
なお温度測定位置の上下方向の位置は、図1中に示す。

図2 炭化深さ測定位置

3. 充てん断熱工法の試験結果及び考察

3-1 屋外加熱

1) 遮熱性・遮炎性

図3 各層の平均温度の推移 (1.無断熱壁体・屋外加熱)

断熱材が充てんされることで加熱側から非加熱側への熱の移動が妨げられ、断熱材の加熱面側では温度がより高く、非加熱面側では温度がより低くなった（図3・図4）。従って、外装材等の面材が脱落せず保持されていれば、壁体の遮熱性は断熱化されることで向上する。但し、断熱化されることで、断熱材の加熱面側にある外装材は、裏面側の下地となる通気胴縁や留付材を含め高温に曝されることになり、実大試験では脱落の危険性が高くなると考えられる。

遮炎性および遮熱性の検討結果を表3に示す。無断熱壁体は、45分での裏面温度上昇度が平均 100K 程度に留まり、45 分の遮熱性を有している。また無断熱壁体に厚さ 55 mm の断熱材を充てんすることで、壁体の熱貫流抵抗は 0.41 m² K/W から 1.67 m² K/W～1.73 m² K/W となり、壁体の断熱性能を高めることで 60 分の遮熱性を確保できた。断熱材厚さを 100 mm にして、壁体の断熱性能をさらに高めても、裏面温度上昇度は 10K 程度しか低下しなかった。従って、この構成の断熱壁体では 55 mm の断熱材を充てんした段階で、60 分の遮熱性を有するだけの壁体の断熱性は十分に得られると考えられる。

2) 非損傷性

試験終了後（60 分加熱）の木柱の最小断面は、断熱材位置や厚さにより柱断面の形状が異なった（表4）。最小断面の断面積の残存割合（以下、柱断面残存率と称す。）に大きな差は見られなかったが、断面二次モーメントは、無断熱壁体が最も大きな値となり、断熱材を充てんすることで非損傷性に不利な影響を及ぼす結果となった。

木柱の柱角部温度、柱側面温度（図5）を見ると、無断熱壁体では熱が非加熱面側へ抜け、局部的に温度が高くなる部分は見られなかった。一方、断熱材が充てんされると、木柱の加熱面側に近い柱角部、柱側面 A の位置で、木材の着火温度（260℃）に達する時間が無断熱壁体より早く、着火後も高い温度で推移している。

特に 55 mm 外気側配置壁体、100 mm 充てん壁体では、断熱材の加熱面側表面（以下、断熱材表面と称す。）は、ともに防風層の非加熱面側（以下、防風層裏面と称す。）に位置し、断熱材で遮られた熱によって木柱の加熱面側に近い位置が無断熱壁体に比べ激しく燃焼し

図4 各層の平均温度の推移 (2-3.100 mm充てん・屋外加熱)

表3 遮炎性および遮熱性の検討結果（充てん断熱工法・屋外加熱）

試験 体No.	断熱 工法	試験体仕様	試験体の熱貫流抵抗 (㎡・K/W)		遮炎性 炎の貫通 の有無	各層の温度上昇度が遮熱性の規定値を超える時間（分） (規定値：平均 140K または最高 180K)				試験体裏面の温度上昇度（K）						
			試験体	試験体断熱部		防風層裏面*	断熱材・中空断熱材層	GB 表面**	試験体裏面	初期 温度	30 分		45 分		60 分	
											平均	最高	平均	最高	平均	最高
1	無断熱	無断熱壁体	0.41	0.35	なし	12.5	—	16.3	51.1	15	78	84	100	109	231	270
2-1	充てん	55mm室内側配置	1.67	1.80	なし	13.2	13.8	39.2	超えず*	23	33	37	59	71	75	78
2-2	断熱	55mm外気側配置	1.73	1.89	なし	13.6	25.5	44.1	超えず*	21	40	46	70	78	78	85
2-3	工法	100mm充てん	2.39	2.99	なし	12.5	—	53.2	超えず*	23	26	27	37	40	66	74

*防風層裏面：防風層の非加熱面側表面

**GB 表面：せっこうボード (GB) の加熱面側表面

たとえられる。その結果、最も影響を与える柱の周縁部の欠損が大きくなり、断面二次モーメントは無断熱壁体に比べ低くなったと考えられる。一方、55 mm外気側配置壁体は断熱材が薄く、かつ非加熱面側では木柱は空気層に露出しており放熱が促されたため、柱側面 B の位置では、100 mm 充てん壁体に比べ低い温度推移となった。55 mm室内側配置壁体では、断熱材の加熱面側にある防風層裏面、木部が空気層に露出している柱角部、柱側面 A ではほぼ同じ温度推移となった。断熱材により熱が妨げられ、断熱材の加熱面側で一様な熱分布になっていると考えられる。

柱角部での着火後の炭化速度は、無断熱壁体では 0.46 mm/分に対し、充てん断熱壁体ではいずれも大きくなった。炭化速度からも、充てん断熱材により、柱角部での燃焼が進んでいることが分かる。

柱側面 B では、55 mm外気側配置壁体、100 mm 充てん壁体で炭化がなく、木柱の被覆効果が確認された。炭化が見られた無断熱壁体、

55 mm室内側配置壁体では柱側面の着火後の炭化速度はそれぞれ 0.15 mm/分、0.13 mm/分となった。2 面加熱を受ける柱角部と比べ、柱側面 B では側面部からの 1 面加熱でかつ受ける熱量が低いため、着火後の炭化速度は柱角部の半分以下になったと考えられる。

以上より、充てん断熱工法では、断熱材の位置、厚さにより、断熱材と木柱との位置関係、壁体内の温度分布が変化し、木柱が受ける損傷状況が異なる。断熱材が充てんされることで非加熱面側への放熱が妨げられ、断熱材の加熱面側では温度が高くなる。断熱材の加熱面側の温度は、断熱材表面の位置が加熱面に近いほど高温になり、その位置での木柱の断面欠損を大きくする傾向がある。その結果、木柱を含む層から非加熱面側への熱損失が大きい無断熱壁体が、他の充てん壁体に比べ、最も残存断面の断面二次モーメントが大きくなった。

よって、断熱材を充てんすることが、必ずしも、壁体の非損傷性

表 4 木柱最小断面の断面積残存率と断面二次モーメント、木柱の炭化速度

加熱面		屋外加熱				屋内加熱			
断熱工法		無断熱	充てん断熱工法			無断熱	充てん断熱工法		
試験体仕様		1.無断熱壁体	2-1.55 mm室内側配置	2-2.55 mm外気側配置	2-3.100 mm充てん	1.無断熱壁体	2-1.55 mm室内側配置	2-2.55 mm外気側配置	2-3.100 mm充てん
木柱断面写真	最小断面								
	断面残存率	74.0%	72.6%	73.2%	71.8%	31.3%	30.2%	35.8%	25.9%
断面二次モーメント(mm ⁴)	最小断面	5.86×10 ⁶	5.19×10 ⁶	4.31×10 ⁶	4.47×10 ⁶	1.06×10 ⁶	0.87×10 ⁶	1.41×10 ⁶	0.73×10 ⁶
断面二次モーメント残存率	最小断面	57.8%	51.3%	42.6%	44.1%	10.4%	8.6%	14.0%	7.2%
柱角部・炭化速度(mm/分)	温度測定位置	0.46	0.51	0.54	0.56	0.83	0.72	0.82	欠測
柱側面・炭化速度(mm/分)	温度測定位置	0.15	0.13	炭化部なし	炭化部なし	—	—	—	—

※炭化速度(mm/分)：測定点ごとに、炭化深さ(mm)を木柱の燃焼時間(分)で除した着火後の炭化速度の平均値。

※屋内加熱では柱の損傷が柱裏面まで及び、柱側面での加熱条件が柱側面からの一面加熱でなくなったため、柱側面の炭化速度は求めないこととした。

図 5 木柱側面部の平均温度推移 (充てん断熱工法・屋外加熱)

図 6 各層の平均温度の推移 (1.無断熱・屋内加熱)

図 7 各層の平均温度の推移 (2-3.100 mm 充てん・屋内加熱)

を高めることにならないことが分かった。今後、既往研究^{4)~5)}にあるように、柱内部の温度分布を測定し、ヤング係数の低下を加味した力学的な検討や実大試験による検証が必要である。

3-2 屋内加熱

1) 遮熱性・遮炎性

屋内加熱では、断熱材が充てんされることで加熱側のせっこうボードが高温に曝される（図6・図7）。しかし無断熱壁体と100mm充てん壁体で、せっこうボード裏面の温度推移が100℃より温度上昇し始める時間はほとんど変わらなかった。

遮炎性および遮熱性の検討結果を表5に示す。加熱側被覆がせっこうボードのみであるため、中空部への火炎貫通は屋外加熱時よりも早く、裏面温度も屋外加熱時より概して顕著である。防火構造では屋内加熱を想定する必要はなく、準耐火構造でも屋内加熱では遮熱性は要求されないが、厚さ55mm以上の断熱材を充てんした壁体で、45分の遮熱性を保持できている。無断熱壁体で60分の遮炎性は有しており、屋内加熱に対しても壁体の防耐火性能は非損傷性で決まると考えられる。

2) 非損傷性

試験終了後（60分加熱）の木柱の最小断面は、非加熱側である木材裏面での断面欠損もあり、いずれも断面積残存率が30%前後で、木柱の損傷が激しかった（表4）。屋内加熱60分に対して、内装材がせっこうボード9.5mmでは不十分であったと考えられる。

柱角部温度および柱側面温度（図8）を見ると、柱角部および柱側面各部における木材の着火温度に達する時間は、断熱材を充てんしてもほとんど変わらず、断熱材による被覆効果はあまり見られなかった。内装側のせっこうボードにできた亀裂により、火炎が壁体内に侵入し、断熱材が存在しても火熱が木柱と断熱材の間の隙間を通して、柱側面の表面を加熱したと考えられる。

そこで100mm充てん壁体を対象に、火熱が木柱と断熱材の間の隙間を通らないように、充てん断熱材の幅を柱間の間隔より10mm程度広くして、充てん断熱材が柱側面に密着するように施工して、再度試験を行い比較した（表6）。充てん断熱材を柱側面に密着させることで、充てん断熱材による木柱の被覆効果が発現され、非損傷性が大きく向上した。

屋内加熱では内装材がせっこうボードだけになる場合が多く、火

表5 遮炎性および遮熱性の検討結果（充てん断熱工法・屋内加熱）

試験 体No.	断熱 工法	試験体仕様	試験体の熱貫流抵抗		遮炎性	各層の温度上昇度が遮熱性の規定値を超える時間（分）				試験体裏面の温度上昇度（K）						
			(㎡・K/W)		炎の貫通	(規定値：平均 140K または 最高 180K)				初期 温度	30 分		45 分		60 分	
			試験体	試験体断熱部	の有無	GB 裏面*	断熱材・中空部裏面	防風層表面**	試験体裏面		平均	最高	平均	最高	平均	最高
1	無断熱	無断熱壁体	0.41	0.35	なし	12.1	—	14.7	42.1	18	86	88	168	222	333	430
2-1	充てん	55mm室内側配置	1.67	1.80	なし	11.5	15.4	16.3	46.1	20	71	85	112	157	233	393
2-2	断熱	55mm外気側配置	1.73	1.89	なし	11.7	11.8	17.9	48.9	20	73	80	92	116	232	438
2-3	工法	100mm充てん	2.39	2.99	なし	11.7	—	20.8	54.7	17	63	78	104	111	183	245

*GB裏面：せっこうボード（GB）の非加熱面側表面

**防風層表面：防風層の加熱面側表面

図8 木柱側面部の平均温度推移（充てん断熱工法・屋内加熱）

表6 100mm充てん壁体・施工法による比較

断熱工法・加熱面		充てん断熱工法・屋内加熱	
試験体仕様		2-3.100mm充てん	2-3.2.100mm充てん+RW密着
木柱断面写真	最小断面		
	断面積残存率	最小断面 25.9%	58.1%
断面二次モーメント(㎪)	最小断面	0.73×10 ⁶	2.78×10 ⁶
断面二次モーメント残存率	最小断面	7.2%	27.5%
柱角部・炭化速度(㎪/分)	温度測定位置	欠測	0.61
柱側面・炭化速度(㎪/分)	温度測定位置	—	0.21

炎が壁体内に侵入する可能性が高い。通常施工の充てん断熱工法では木柱の被覆効果が期待できない場合が多いと考えられ、断熱性の向上と防耐火性能の確保を両立させるには、断熱材を木柱に密着させる工夫が必要である。

4. 外張断熱工法・付加断熱工法の試験結果及び考察

4-1 屋外加熱

1) 遮熱性・遮炎性

遮炎性および遮熱性の検討結果を表7に示す。無断熱壁体に25mm外張することで、壁体の熱貫流抵抗は0.41 m² K/W から1.19 m² K/W となり、壁体の断熱性能を高めることで60分の遮熱性を確保できた。外張断熱工法では断熱材は木柱の屋外側に配置される。断熱材が厚くなるほど、壁も厚くなり、加熱表面から試験体裏面への距離が離れるため、遮熱性は向上する。従って、この構成の断熱壁体で今回試験を行った範囲では、少なくとも25mm以上の断熱材を外張すれば、遮熱性を考慮する必要はないと考えられる。

付加断熱工法では、外張断熱工法の壁体にさらに軸間に100mmの断熱材を充てんされるため、さらなる高断熱化となり、壁体の断熱

性能は向上する。付加断熱材がない100mm充てん壁体で、すでに60分の遮熱性は得られている。従って、この構成の断熱壁体であれば、付加断熱工法では付加断熱材の厚さを問わず、遮熱性を考慮する必要はないと考えられる。

2) 非損傷性

外張断熱工法および付加断熱工法では、屋外加熱に対して、外張（付加）断熱材により木柱は被覆されることになる。外張（付加）断熱材厚さが増すことで、柱角部、柱側面の温度が低く推移し、木材の着火温度（260℃）に達する時間が遅くなる。その結果、木材の燃焼時間は短くなり木柱の損傷が軽減される（表8・図11）。従って、外張（付加）断熱材厚さが増すほど、外張断熱工法および付加断熱工法では、屋外加熱時の非損傷性が向上する。

木柱が最も加熱を受ける柱正面、柱角部における最高温度推移をみる（図9～図10）。外張断熱工法では、外張25mmで43.0分、外張60mmで49.5分に、付加断熱工法では、付加25mmで27.5分、付加60mmで44.5分、付加100mmで54.5分にて、いずれも柱正面が木材着火温度（260℃）に達している。この構成の断熱壁体で今回試験を行った範囲では、外張（付加）断熱材の厚さを30分防火構

表7 遮炎性および遮熱性の検討結果（上段：外張断熱工法・屋外加熱、下段：付加断熱工法：屋外加熱）

試験体No.	断熱工法	試験体仕様	試験体の熱貫流抵抗 (㎡・K/W)		遮炎性	各層の温度上昇度が遮熱性の規定値を超える時間（分） (規定値：平均 140K または 最高 180K)				試験体裏面の温度上昇度（K）							
			試験体	試験体断熱部	炎の貫通 の有無	外張断熱材表面*	外張断熱材裏面**	GB 表面***	試験体裏面	初期 温度	30 分		45 分		60 分		
											平均	最高	平均	最高	平均	最高	
1	無断熱	無断熱	0.41	0.35	なし	—	12.5	16.3	51.1	15	78	84	100	109	231	270	
3-1	外張	25 mm外張	1.19	1.10	なし	14.9	23.5	40.1	超えず ^a	23	43	51	74	79	82	87	
3-2	断熱	60 mm外張	2.13	2.02	なし	12.6	37.9	56.8	超えず ^a	23	23	26	45	53	73	76	
3-3	工法	100 mm外張	3.19	3.08	なし	13.7	42.6	超えず ^a	超えず ^a	23	24	29	32	37	62	74	
2-3	充てん断熱工法	100 mm充てん	2.39	2.99	なし	—	12.5	53.2	超えず ^a	23	26	27	37	40	66	74	
4-1	付加	25 mm付加	3.13	3.64	なし	13.8	18.8	59.4	超えず ^a	24	21	28	35	37	62	69	
4-2	断熱	60 mm付加	4.11	4.57	なし	13.5	28.0	超えず ^a	超えず ^a	21	11	18	22	25	30	33	
4-3	工法	100 mm付加	5.20	5.62	なし	12.0	38.6	超えず ^a	超えず ^a	23	7	9	14	18	22	26	

*外張断熱材表面：外張断熱材の加熱側表面   **外張断熱材裏面：外張断熱材の非加熱側表面   ***GB表面：せっこうボード（GB）の加熱側表面

表8 木柱最小断面の断面積残存率と断面二次モーメント、木柱の炭化速度（屋外加熱）

断熱工法		無断熱	外張断熱工法				充てん断熱工法	付加断熱工法			
試験体仕様		1-1.無断熱壁体	3-1.25mm外張	3-2.60mm外張	3-3.100mm外張	2-3.100mm充てん	4-1.25mm付加	4-2.60mm付加	4-3.100mm付加	4-3.100mm付加	4-3.100mm付加
木柱断面写真	最小断面										
	断面残存率	最小断面	74.0%	92.6%	94.3%	99.0%	71.8%	82.7%	94.2%	99.2%	99.2%
断面二次モーメント	最小断面	5.86×10 ⁶	8.05×10 ⁶	8.52×10 ⁶	9.85×10 ⁶	4.47×10 ⁶	6.09×10 ⁶	8.70×10 ⁶	10.00×10 ⁶	10.00×10 ⁶	10.00×10 ⁶
断面二次モーメント残存率	最小断面	57.8%	79.5%	84.1%	97.3%	44.1%	60.2%	85.9%	98.8%	98.8%	98.8%
柱角部・炭化速度(mm/分)	温度測定位置	0.46	0.48	0.49	炭化部なし	0.56	0.54	0.53	炭化部なし	炭化部なし	炭化部なし
柱側面・炭化速度(mm/分)	温度測定位置	0.15	炭化部なし	炭化部なし	炭化部なし	炭化部なし	炭化部なし	炭化部なし	炭化部なし	炭化部なし	炭化部なし

※炭化速度(mm/分)：測定点ごとに、炭化深さ(mm)を木柱の燃焼時間(分)で除した着火後の炭化速度の平均値。

図9 柱正面・柱角部における最高温度推移（外張断熱工法）

図10 柱正面・柱角部における最高温度推移（付加断熱工法）

造の場合は、少なくとも外張断熱工法で 25 mm 以上、付加断熱工法で 60 mm 以上、45 分準耐火構造の場合は、少なくとも外張断熱工法で 60 mm 以上、付加断熱工法で 100 mm 以上用いれば、外装材や外張断熱材の脱落がない限り木柱に炭化部が生じなくなると考えられる。

一方、同じ外張（付加）断熱材厚さで、外張断熱工法と付加断熱工法を比較すると、付加断熱工法の方が、木柱の中央より加熱面側にあたる柱角部、柱側面 A で高い温度で推移し、木材の着火温度（260℃）に達する時間が早くなった（図 11）。特に 25 mm 付加断熱壁体では 25 mm 外張断熱壁体より、柱断面残存率が約 10%、断面二次モーメントが約 20% 小さくなった。外張断熱工法では、外張断熱材の厚さに関わらず、断熱層の非加熱面側に木柱正面が位置する。一方、付加断熱工法では充てん断熱材が存在するため、付加断熱材の厚さが薄くなるほど、加熱面に近い木柱正面の断熱層における位置が、相対的に加熱面側へと変化する。そのため 25 mm 外張断熱壁体に、充てん断熱材を入れて 25 mm 付加断熱壁体とすると、非損傷性にとって不利な結果になったと考えられる。

しかし、外張（付加）断熱材の厚さが 60 mm、100 mm と厚くなると、付加断熱工法と外張断熱工法の非損傷性の差はほとんどなくなった。付加断熱工法では付加断熱材の厚さが増すほど、断熱層における付加断熱層の割合が大きくなり、付加断熱材の断熱性能が支配的となる。この点に加え、断熱材厚さによる木柱の被覆効果が大きくなるため、外張断熱工法に充てん断熱材を追加した時、柱角部の温度推移は若干、高くなるが、木柱の断面欠損にはその影響がほとんど見られなくなったと考えられる。

柱角部での着火後の炭化速度は、外張断熱工法では 0.46～0.49 mm/分であったに対し、付加断熱工法では 0.53～0.56 mm/分となった。軸間が中空の場合に比べ、軸間に断熱材が 100 mm 充てんされることで、柱角部での着火時間が早くなるだけでなく、着火以後の燃焼が

進みやすくなることが分かった。

以上より、外張断熱工法、付加断熱工法ともに、外張（付加）断熱材により木柱は被覆されるため、断熱材が厚いほど非損傷性は向上する。さらに外張（付加）断熱材がある一定の厚さを確保すれば、30 分加熱や 45 分加熱に対しては、外装材や外張断熱材の脱落がない限り木柱に炭化部が生じなくなる可能性がある。

しかし付加断熱工法では、外張断熱工法と比べると軸間に断熱材が充てんされることで、柱角部での着火時間、炭化速度ともに早くなる。付加断熱材厚さが十分でない外張断熱工法に比べ非損傷性が低下する場合がある。従って付加断熱工法においても、断熱材を充てんすることが、必ずしも壁体の非損傷性を高めることにならないことが分かった。

4-2 屋内加熱

1) 遮熱性・遮炎性

遮炎性および遮熱性の検討結果を表 9 に示す。前述の通り、準耐火構造でも遮熱性は屋内加熱では要求されないが、外張断熱工法では厚さ 25 mm 以上の断熱材を外張することで 45 分の遮熱性を、付加断熱工法では 60 分の遮熱性を保持できる結果となった。すべての外張断熱工法、付加断熱工法で遮炎性を有しており、屋内加熱に対する壁体の防耐火性能は、非損傷性で決まると考えられる。

2) 非損傷性

外張断熱工法、付加断熱工法ともに試験終了後（60 分加熱）の木柱の最小断面は、充てん断熱工法と同様に木柱の損傷が激しく、屋内加熱 60 分に対し、内装材がせっこうボード 9.5 mm では不十分であったと考えられる。しかし断面積残存率は、外張断熱工法は 30% 前後で無断熱壁体よりも小さくなる場合が見られたのに対し、付加断熱工法ではいずれも 40%～50% に留まった（表 10）。

外張断熱工法では木柱が断熱材の加熱面側で中空層にむき出しと

図 11 木柱側面部の平均温度推移（上段：外張断熱工法・屋外加熱、下段：付加断熱工法・屋外加熱）

なる。木柱の柱角部、柱側面の温度は、外張断熱材により裏面側への放熱が妨げられ、無断熱壁体に比べ様に高い温度推移となった（図 12）。そのため、無断熱壁体よりも木柱の損傷が進んだと考えられる。屋内加熱に対する外張断熱工法の非損傷性は、外張断熱材によって無断熱壁体に比べ不利側に作用すると考えられる。一方、外張断熱材厚さ 60 mm 以上では、木柱の断面積残存率と温度推移の

差異はあまり見られない。従って、その範囲では、外張断熱材厚さが非損傷性に与える影響は小さいと考えられる。

付加断熱工法は、付加断熱材により断熱層における木柱の位置が相対的に加熱側へと変化する。そのため、付加断熱工法では充てん断熱工法に比べ木柱への加熱条件が厳しくなると予測されるが、100 mm 充てん壁体に比べ、木柱の損傷は進んでいない。外張断熱工

表 9 遮炎性および遮熱性の検討結果（上段：外張断熱工法・屋内加熱、下段：付加断熱工法：屋内加熱）

試験体No.	断熱工法	試験体仕様	試験体の熱貫流抵抗 (㎡・K/W)		遮炎性 炎の貫通の有無	各層の温度上昇度が遮熱性の規定値を超える時間（分） (規定値：平均 140K または最高 180K)				試験体裏面の温度上昇度（K）							
			試験体	試験体断熱部		GB 表面*	外張断熱材表面**	外張断熱材裏面***	試験体裏面	初期温度	30 分		45 分		60 分		
											平均	最高	平均	最高	平均	最高	
1	無断熱	無断熱	0.41	0.35	なし	12.1	14.7	—	42.1	18	86	88	168	222	333	430	
3-1	外張	25 mm外張	1.19	1.10	なし	10.9	12.3	20.9	超えず*	19	66	81	85	88	133	178	
3-2	断熱	60 mm外張	2.13	2.02	なし	12.2	12.3	23.8	超えず*	19	48	53	82	86	114	160	
3-3	工法	100 mm外張	3.19	3.08	なし	12.3	12.5	28.5	超えず*	15	31	35	79	86	94	97	
2-3	充填断熱工法	100 mm充てん	2.39	2.99	なし	11.7	20.8	—	54.7	17	63	78	104	111	183	245	
4-1	付加	25 mm付加	3.13	3.64	なし	11.5	20.4	38.8	超えず*	14	10	23	44	75	85	94	
4-2	断熱	60 mm付加	4.11	4.57	なし	11.4	19.7	46.4	超えず*	14	7	10	29	35	69	86	
4-3	工法	100 mm付加	5.20	5.62	なし	11.4	20.6	56.3	超えず*	26	5	10	15	22	31	41	

*GB 表面：せっこうボード（GB）の加熱側表面

**外張断熱材表面：外張断熱材の加熱側表面

***外張断熱材裏面：外張断熱材の非加熱側表面

表 10 木柱最小断面の断面積残存率と断面二次モーメント、木柱の炭化速度（屋内加熱）

断熱工法		無断熱	外張断熱工法			充てん断熱工法	付加断熱工法			
試験体仕様		1-1.無断熱壁体	3-1.25 mm外張	3-2.60 mm外張	3-3.100 mm外張	2-3.100 mm充てん	4-1.25 mm付加	4-2.60 mm付加	4-3.100 mm付加	
木柱断面写真	最小断面									
		断面積残存率	最小断面	31.3%	32.7%	23.6%	24.9%	25.9%	40.7%	44.2%
断面二次モーメント(mm ⁴)		最小断面	1.06×10 ⁶	1.25×10 ⁶	0.67×10 ⁶	0.79×10 ⁶	0.73×10 ⁶	1.61×10 ⁶	1.99×10 ⁶	1.97×10 ⁶
断面二次モーメント残存率		最小断面	10.4%	12.3%	6.3%	7.8%	7.2%	15.9%	19.6%	19.5%
柱角部・炭化速度(mm/分)		温度測定位置	0.83	0.70	0.79	欠測	欠測	0.70	0.79	0.84

※炭化速度($\text{mm}/\text{分}$)：測定点ごとに、炭化深さ(mm)を木柱の燃焼時間(分)で除した着火後の炭化速度の平均値。

※屋内加熱では柱の損傷が柱裏面まで及び、柱側面での加熱条件が柱側面からの一面加熱でなくなったため、柱側面の炭化速度は求めないこととした。

図 12 木柱側面部の平均温度推移（上段：外張断熱工法・屋内加熱、下段：付加断熱工法・屋内加熱）

法と比較しても充てん断熱材による木柱の被覆効果は発揮され、付加断熱工法の非損傷性は外張断熱工法より向上している。

付加断熱工法でも、内装側のせっこうボードにできた亀裂により、火炎が壁体内に侵入したと考えられる。しかし付加断熱工法では、木柱は加熱面となる柱正面はせっこうボード、それ以外の3面はすべて断熱材で覆われている。そのため充てん断熱工法に比べ、木柱周辺の断熱材の通気抵抗が相対的に高くなり、木柱と断熱材の間の隙間を通る火熱が少なくなった結果、充てん断熱材による被覆効果が顕在化したと考えられる。また付加断熱材が厚くなるにつれ、木柱の断面積残存率が若干向上している。付加断熱材が厚くなることで木柱周辺の断熱材の通気抵抗が増したためと考えられる。

以上より、付加断熱工法では、充てん断熱工法に比べ、木柱周辺の断熱材の通気抵抗が相対的に高くなり、充てん断熱材による木柱の被覆効果が発揮される。非損傷性は充てん断熱工法、外張断熱工法に比べ高く、付加断熱材が厚くなるにつれ向上する傾向がある。

5. まとめ

木造断熱壁体において、断熱工法ごとに壁体の防耐火性能と断熱材の厚さや位置との関係を明らかにすることを目的に、ロックウール断熱材を用いた木造壁体を対象に、内外装材が脱落しない条件で小型試験体による加熱試験を行った。

充てん断熱工法、外張断熱工法、付加断熱工法いずれにおいても、今回試験を行った壁体はすべて、屋外加熱、屋内加熱に対し、60分の遮炎性を有しており、遮熱性は断熱材厚さが増すことで向上することが確認された。しかしながら非損傷性は、断熱材によって必ずしも性能が向上するとは言えず、低下する場合が見られた。以下、本研究で得られた非損傷性に関する知見を断熱工法ごとに記す。

5-1. 充てん断熱工法

- ・屋外加熱では充てん断熱材の位置、厚さにより、断熱材と木柱との位置関係、壁体内の温度分布が変化し、木柱が受ける損傷状況が異なる。軸間に断熱材を充てんすることで無断熱壁体に比べ非損傷性が低下する場合がある。
- ・屋内加熱では内装材のせっこうボードの厚さ、張り方を工夫しない限り、加熱開始後短時間に、目地を通じて、火炎が壁体内に侵入する可能性が高く、充てん断熱材による木柱の被覆効果が期待できない場合が多いと考えられる。充てん断熱材の幅を柱間より広くし、断熱材を木柱側面に密着させるよう施工にすることで、木柱の被覆効果が発現でき、非損傷性が向上する。

5-2. 外張断熱工法

- ・屋外加熱では外張断熱材が厚いほど非損傷性は向上する。
- ・屋内加熱では外張断熱材によって、非損傷性は無断熱壁体よりも不利側に作用するが、外張断熱材厚さ 60 mm以上では、外張断熱材厚さが非損傷性に与える影響は小さい。

5-3. 付加断熱工法

- ・屋外加熱では付加断熱材が厚いほど非損傷性は向上する。一方、外張断熱工法に比べると、柱角部での着火時間、炭化速度は早くなる。外張（付加）断熱材厚さが十分でないと、外張断熱工法に断熱材を充てんして付加断熱工法とした際に、非損傷性が低下する場合がある。

- ・屋内加熱では充てん断熱工法に比べ、木柱周辺の断熱材の通気抵抗が高くなり、充てん断熱材による木柱の被覆効果が発揮される。そのため非損傷性は充てん断熱工法、外張断熱工法に比べ高くなる。また付加断熱材が厚くなるにつれ、若干であるが、非損傷性が向上する傾向がある。

今回の検討で、軸間に断熱材を充てんすることは、遮熱性の向上には繋がるものの、非損傷性の低下を招く場合があること、また、その影響は断熱工法によって異なるが、断熱材の充てん方法によって非損傷性の低下を抑制できる見通しがあることなどが明らかになった。小型試験であるため、非損傷性への影響については、断熱工法において長期荷重を支持する木柱の断面性能への影響の把握に留まったが、この結果をもとに力学的検討を加え、実大試験による検証と合わせながら、より精緻な検討を行っていきたい。

謝辞

本研究は、北方建築総合研究所およびロックウール工業会との共同研究「新たな防火性能を付与した木造高断熱壁体の開発」の一環として行われた。宮崎孝司専務理事をはじめロックウール工業会の皆様方には、多大なるご助言、ご協力を賜りました。また試験実施にあたっては、北方建築総合研究所の野村広幸氏および小川貢氏に多大なるご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

関連する既往発表論文

- ・糸毛治・鈴木大隆：ロックウール断熱材を用いた木造外張断熱工法の遮熱性能に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），A-2 分冊 pp277-278，2009.9

参考文献

- 1) 財団法人建築環境省エネルギー機構：住宅の省エネルギー基準の解説第3版第7刷，pp187-192，2010.12
- 2) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構：防耐火性能試験・評価業務方法書，2010.6
- 3) 安井昇・長谷見雄二・秋月通孝・馬屋原敦・大西卓・上島基英・畑俊充・木村忠紀・田村佳英・村上博：木造土壁の各部仕様が防耐火性能に及ぼす影響 日本建築学会環境系論文集，第567号，pp7-13，2003.5
- 4) 安井昇・清水真理子・長谷見雄二・村上雅英・上島基英・木村忠紀・北後明彦・田村佳英・吉田正友・山本幸一：柱圧縮実験による木造土壁の火災加熱時の非損傷性予測と木造土壁外壁の防火設計，日本建築学会環境系論文集，第574号，pp1-6，2003.12
- 5) 清水真理子・長谷見雄二・村上雅英・安井昇：木造真壁の耐火性能予測，日本建築学会構造系論文集，第611号，pp165-170，2007.1

(2012年1月10日原稿受理，2012年3月2日採用決定)