防火・耐震補強した在来軸組木造壁のせん断耐力特性と水平加力後の防耐火性能

—地震後の防火性能確保のための既存家屋の耐震・防火同時補強技術の開発—

SEISMIC AND POST-EARTHQUAKE FIRE-RESISTIVE PERFORMANCE OF CONVENTIONAL POST & BEAM WALL RETROFITTED FOR THE REDUCTION OF POST-EARTHQUAKE CITY FIRE HAZARD IN DENSELY INHABITED DISTRICTS

長谷見雄二 — *1 村上雅英 — *2
河合直人 — *3 山田 誠 — *4
安井 昇 — *1 鴛海四郎 — *4
清水庸介 — *4 小畑晴治 — *5
神谷秀美 — *6 坂田高洋 — *1
永盛洋樹 — *1

Yuji HASEMI — *1 Masahide MURAKAMI — *2
Naohito KAWAI — *3 Makoto YAMADA — *4
Noboru YASUI — *1 Shiro OSHIUMI — *4
Yosuke SHIMIZU — *4 Seiji KOBATA — *5
Hidemi KAMIYA — *6 Takahiro SAKATA — *1
Hiroki NAGAMORI — *1

キーワード：
木造密集地区, 在来軸組構法, 耐震・防火同時補強, せん断耐力試験, 載荷加熱試験

Keywords:
Wooden densely inhabited district, Conventional post-beam construction, Simultaneous seismic and fire resistance retrofit, Shear test, Loaded fire test

1. 研究の背景と目的

地震時等に大火となるおそれが大いいとされる木造密集地区は、2001年現在、全国で約8000haを占め、その防災対策は、大都市圏を中心に喫緊の課題となっている^{1),2)}。密集地区の防災的改善は、従来、耐火建築物による全面更新型の再開発を指向することが多かったが、全員合意を前提とすること、生活様態が一変すること、資金調達等のための事業性の成立が必要なことなどの点、多くの密集地区の実情からみて、短期間での整備には多くの困難がある。

一方、近年、地震時の人命尊重の立場から既存家屋の耐震改修に支援や助成を行う自治体もある。既存建物の改修で防災整備できれば、更新型整備の困難の多くを解決できようが、地震後の防火性能は考慮されていないため、防火的に脆弱な既存家屋を耐震改修しても、地震火災の脅威を解消できるわけではない。また、密集地区では延焼火災抑止を目的に外装の不燃化等が進められてきたが、地震後の市街地火災に対する有効性は明確でなく、防火改修と耐震改修は別の文脈の中で進められていたと言ってよい。しかし、密集地区の主体を占める軸組木造家屋の耐震性能と防火性能は、一般に、長期荷重を支持するだけでなく、水平力に対しても抵抗し、延焼防止のための区画性能も担う壁に主に依存する。従って、適当な面材で壁を補強して、適当なせん断耐力と防火性能を付与できれば、建物の耐震性能と地震後を含む防火性能を同時に改善できる可能性がある。

このような補強方法の開発の見通しをつけるには、社会的に受容できる費用のもと、建物の平面を大きく変えない範囲で、家屋全体の耐震・防火性能を必要な水準に改善できる補強設計の基盤となる部材レベルの補強技術が必要である。そこで、本報告では、外壁・間仕切り壁を対象

In-plane shear tests and loaded fire tests on post-shear test specimens are conducted on one-story tall conventional post-beam wooden walls retrofitted with both-sides panels for the improvement of seismic and post-earthquake fire resistance. The tests have verified high shear and post-earthquake fire performance of 12.5mm thick structural gypsum board, high density gypsum fiberboard, and ceramic-siding and steel-sandwich panel external walls.

に、既存軸組木造家屋の地震後の防火性能の確保を意図した面材補強仕様を考案し、そのせん断耐力特性と、水平加力後の防火性能を実験により把握した結果を報告する。

2. 部材レベルの補強の目標と実験の基本計画

2.1 家屋全体の補強の目標と部材レベルでの研究課題

法令上、市街地の小規模木造建築に要求される基本的な防火性能は日常時の近隣火災による屋内への類焼の防止性能であり、規制対象は、ほぼ、外壁・軒裏・外部開口部に限られる。従来の防火補強は、この趣旨で進められてきたが、地震火災の危険を軽減するには、地震後も、これらの外周部材が期待される防火性能を維持できるようにすることが第一義である。しかし、地震後には消火力を確実に期待できないこと、また、地震による外装材の剥落や開口部の脱落により類焼防止性能が低下する家屋があると予想されることから、地震後の市街地火災を抑制するためには、外周部材の類焼防止性能の確保だけでなく、当該家屋で出火した場合の近隣建物への延焼危険を抑制できる補強を行う意義が大きい。

木造建物の市街地火災危険は、本質的には、火災の進行に伴って建物が炎上崩壊して近隣建物に著しい延焼危険をもたらす点に由来する³⁾。このため、火災時の建物の炎上崩壊を抑制できれば、近隣への延焼危険を軽減でき、その考え方は大型建築や3階建て木造に適用される準耐火構造に導入されている⁴⁾。建物の炎上崩壊を防止するためには、長期荷重を支える主な部材、即ち、住宅では壁等が火災継続中、崩壊しないように防火性能を向上させれば良い。もとより、建物の耐震改修は、対象が外壁だけで完結するとは限らず、補強は屋内に及ぶ場合があるから、間仕

*1 早稲田大学理工学術院
(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

*2 近畿大学理工学部建築学科

*3 独立行政法人建築研究所構造研究グループ

*4 財日本住宅・木材技術センター

*5 財日本開発構想研究所

*6 ㈱マヌ都市建築研究所

*1 Waseda University, Faculty of Science and Engineering

*2 Kinki University, Department of Architecture

*3 Building Research Institute, Structure Group

*4 Japan Housing and Wood Technology Center

*5 Research Institute for Urban & Environmental Development, Japan

*6 Manu Institute for Urban Design and Architecture, Inc.

切り壁については防火補強を耐震改修と兼用できれば、生活への影響・配線・配管の損傷等、間仕切り壁補強特有の欠点を緩和できよう。

2.2 間仕切り壁補強の目標と補強設計の考え方

ここでは、2.1 の考察に基づき、外壁の類焼防止性能だけでなく、屋内火災の近隣への延焼防止も視野に入れて、部材レベルで、地震後に必要な防火性能を確保する補強方法を検討する。即ち、実験は外壁・間仕切り壁の両方について行い、外壁については屋内側火災も想定する。なお、一般的な小規模木造では、内部に防火区画が生じないから、建物の炎上崩壊防止を目的に間仕切り壁を防火補強する場合でも、間仕切り壁には、防火区画としての性能である遮熱性・遮炎性は必要なく、壁の両側から火災加熱された場合の非損傷性だけを評価すれば良いとも考えられる。しかし、間仕切り壁で、ある程度の時間の延焼防止性能を達成できれば、更に、開口部に防火性能を付与することにより、家屋内での火災拡大を抑制でき、家屋周囲への延焼危険の軽減にも有効である。また、壁を載荷して両面加熱する実験は、現在の壁炉では技術的に困難なうえ、木造住宅の一般的な間仕切り壁は、構造上の防火規制対象とならないため、一般的な防火性能すら十分には把握されておらず、遮熱性・遮炎性が維持できなくなった後の試験体の挙動については、安全管理の面でも不明

確である。このため、本報告では、間仕切り壁については、水平加力後の状態で、片面加熱時の部材の防火性能一般を把握することとする。

住宅の間仕切り壁は、在来の建築材料で施工されることが多いこと、また、密集地区で補強を必要とする家屋は大量であり、整備を促進するには、補強コストの抑制、地域工務店等による施工の容易性、材料の調達容易性も重要な条件であることを考慮して、間仕切り壁については、オープン工法による補強の可能性も検討することとした。

2.3 実験条件の考え方

せん断耐力試験では、最大変形角の設定を次の2段階とした。
①面材系耐力壁の最大荷重 P_{max} が発生する付近の変形角として $1/60rad$
②面材系耐力壁のほぼ終局変位となる $(0.8P_{max})$ 時の変形角として $1/30rad$
試験体の防火性能については、一般的な住宅の火災継続時間がほぼ 30 分以内であること、また、それ故、住宅火災による加熱を想定した防火構造の性能評価では、標準耐火加熱 30 分を評価基準としていることを考慮して、水平加力後に ISO834 標準耐火加熱 30 分間、延焼防止に関わる基本的防火性能を確保できることを目標とする。載荷加熱実験では、後で詳述するように、原則として荷重を一般的な 2 階建て木造家屋の 1 階の柱一本当たり平均荷重の 2 倍に設定した。

1-1 軸組図 (各試験体共通)
図1 試験体構成概要 (単位: mm)

図2 試験体温度測定位置 (単位: mm)

〔試験体 I-1、I-2、I-4、I-5：両面同面材張り〕

〔試験体 I-3：両面同面材張り〕

〔試験体 E-1〕

〔試験体 E-2〕

1-2 面材構成図

表 1 試験体概要一覧

試験体 記号	部 位	試験体、材料仕様等				構法	変形角 (rad)
		加熱面材料 (mm)	非加熱面材料 (mm)	張り方	目地処理		
I-1 (a)	間 仕 切 壁 ・ 外 壁 屋 内 側	せっこうボードGB-R (12.5)	せっこうボードGB-R (12.5)	直貼り	パテ処理*1	オー プ ン	1/60
I-1 (b)							1/30
I-2 (a)		構造用せっこうボードA種 (12.5)	構造用せっこうボードA種 (12.5)	直貼り			1/60
I-2 (b)							1/30
I-3 (a)		合板 (4)+せっこうボードGB- R (9.5)	合板 (4)+せっこうボードGB- R (9.5)	胴縁 (15×33) @455			1/60
I-3 (b)							1/30
I-4 (a)		ガラス繊維不織布せっこう板 (12.5)	ガラス繊維不織布せっこう板 (12.5)	直貼り	なし	個 別	1/60
I-4 (b)							1/30
I-5 (a)		セルローズ繊維混入せっこう 板 (12.7)	セルローズ繊維混入せっこう 板 (12.7)	直貼り			1/60
I-5 (b)							1/30
E-1 (a)	外 壁	金属断熱サンドイッチパネル *2 (35)	せっこうボードGB-R (12.5)	木ずり (加熱面) 直貼り (非加熱面)	なし (加熱面) パテ処理*1 (非加熱面)	個 別	1/60
E-1 (b)							1/30
E-2 (a)		窯業系サイディング*3 (24)	せっこうボードGB-R (12.5)	胴縁 (24×50) @303 (加熱面)	変成シリコンシール (加熱面)		1/60
E-2 (b)				直貼り (非加熱面)	パテ処理*1 (非加熱面)		1/30

*1: 炭酸カルシウム系目地処理材 *2: 金属断熱サンドイッチパネル (ポリソシアヌレートフォーム充填)

*3: 窯業系サイディング (バルブ・ビニロン繊維混入セメントケイ酸カルシウム板)

表 2 試験体構成材料の密度及び含水率

試験体 記号	部材名 (厚さ: mm)	密度 (g/cm ³)	含水率 (%)
I-1 ~ I-5, E-1, E-2	柱 (スギ)	0.48	13.5
	間柱 (スギ)	0.46	8.3
I-1, E-1, E-2	せっこうボード (12.5)	0.65	0.4
I-2	構造用せっこうボード・ A種 (12.5)	1.07	0.4
	せっこうボード (9.5)	0.70	0.5
I-3	胴縁 (15×33mm) (スギ)	0.37	12.9
	胴縁 (15×70mm) (スギ)	0.44	14.2
I-4	ガラス繊維不織布せっ こう板 (12.5)	0.92	1.3
I-5	セルローズ繊維混入せ っこう板 (12.7)	1.00	0.6
E-1	金属断熱サンドイッチパ ネル (35)	0.25	—
	木ずり (12×75mm) (スギ)	0.37	14.6
E-2	窯業系サイディング (24)	1.14	5.7
	合板胴縁 (24×50mm)	0.60	7.6

3. 実験方法

3.1 試験体の設計・仕様

(1) 補強面材の選択と設計

試験体は、表 1 のように、軸組に両側から面材補強したものを、間仕切り壁 5 仕様 (I-1 ~ I-5)、外壁 2 仕様 (E-1, E-2) 設計し、1/60rad (表の(a))、1/30rad (同(b)) の 2 段階の最大変形角についてせん断耐力試験を行うため、各仕様、2 体ずつ製作した。

地震による防火性能の低下を抑制するために、補強面材は、既往の材料データ等から、水平加力時の面外変形を抑制し易いと考えられる材料を選択した。更に、間仕切り壁については、せん断耐力・防火性能の確保と既存家屋内での工事の容易性の両立を考慮して、補強面材は片側総厚 12.5mm を目安として設計した。オープン工法中、I-3 は、密集地区の既存建物で多く利用される化粧合板に、住宅で普通に使われているせっこうボード厚さ 9.5mm を被せたものである。外壁の屋外側は、屋外から施工可能な工法 2 仕様を選び、屋内側は、間仕切り壁仕様で目標防火性能に達したオープン工法として、せっこうボード 12.5mm を選択した。

(2) 補強面材以外の仕様・試験体の基本構成

試験体は、補強効果の比較のため、補強材料以外は、特に必要がある場合以外、できるだけ同じ条件とした。即ち、軸組、胴縁はいずれもスギを使用し、間仕切り壁試験体の補強材料の取り付けは、I-3 で、密集地区の建物に多く見られる仕様にならない、合板の下地を横胴縁仕様 (15×33mm、間隔 455mm) とした他は、面材単体を柱、間柱、受材に直接、張り付けた (図 1)。また、ビスの種類・留付け間隔を統一した (L=28mm、@150mm) が、I-5 のみ、別途、実施した最大変形角 1/15rad のせん断耐力試験¹⁰⁾と条件を合わせるため、留付け具としてくぎ (CN-65) を、間隔 @100mm (外周)、@200mm (中央) で使用した。

外壁試験体の屋外側は、E-1 を木ずり (12×75mm) 下地とし、E-2 を横胴縁 (24×50mm、間隔 303mm) 仕様とした。E-1 屋外側は、別途実施したせん断耐力試験⁷⁾と条件を合わせるため、ドリリングタッピンねじ (φ3.84×L80 外周 @106, 中央 @424)、E-2 屋外側は、コーチスクリューねじ (φ5×L50 @303) で留めつけた⁸⁾。I-5 以外は、補強面材の目地部を石膏パテで処理したが、I-5 については、上述のように他実験の試験体との整合のため、目地処理を行わなかった。試験体に用いた材料の密度及び含水率を表 2 に示す。

試験体は、幅 2,420mm、高さ 3,010mm で、上下に 105×105mm のせん断加力用の桁及び土台をボルト 4 本で留め付ける構造とした。水平加力を

受けた場合、目地部で防火上、弱点となる隙間を発生させる可能性が大きい。これを防火性能評価上、不利側で再現し、隙間の発生・拡大等の観察も容易にする目的で、試験体のほぼ中央に鉛直・水平 2 方向の目地が現れるようにした。このため、柱も、試験体の水平方向の midpoint に設置した。せん断加力試験後、桁と土台を取り外し、幅 2,120mm、高さ 2,800mm として載荷加熱用試験体とした。載荷は試験体中央の柱 1 本に対して行うため、柱は上下通しとし、桁及び土台は柱に突き付けとした。

3.2 実験方法

(1) せん断耐力試験

柱脚固定式⁹⁾により、面内せん断試験を行った。地震による壁構造の変形を想定し、表 1 に示した最大変形角まで、せん断加力により試験体に変形を与えた。変形角は、設定最大変形角以下の範囲で、1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50, 1/30rad まで各変位振幅 1 回の正負交番とした。

(2) 載荷加熱試験

載荷加熱試験では、載荷する柱を鉛直にする必要があるため、せん断耐力試験後、試験体の変形角を±0rad に戻して桁と土台を取り外した。加熱は ISO/834 耐火標準曲線に従い、試験体の裏面温度や変形が顕著になるまで継続した。荷重は、実験 I-5(a)、柱の長期許容応力度に相当する応力度が生じる荷重として 31kN を載荷した他は、木造建物の実態固定荷重に基づく柱 1 本の荷重 (N 値計算における鉛直荷重による押さえ (L) の「その他の柱」1 階柱脚の値 L=1.6 より求めた 8.48kN) の 2 倍に当たる 17kN とした。

試験体の温度測定は、図 2 に示すように、①間柱・柱表面 12 点、②加熱側石膏ボード等裏面 6 点、③柱側面 4 点、④非加熱側石膏ボード等表面 6 点、⑤非加熱側表面 9 点 (I-1(a) は 6 点)、⑥可動熱電対 1 点の計 37 点 (I-1(a) は 34 点) で行った。加熱中は、載荷荷重を制御しながら測定記録し、軸方向収縮量を試験体下端で 2 点、柱部材の面外方向変位量を 3 点計測した。

(3) せん断耐力特性・防火性能の評価

補強により達成されるせん断耐力特性と防火性能の指標として、せん断耐力実験結果から壁の壁倍率等を算定し、載荷加熱実験では、防耐火構造の性能評価で一般的に用いられる判定基準 (注 1) を満足する限界時間を、「防耐火時間」として表記する。

4. 実験結果

4.1 せん断耐力試験

(1) 耐力・剛性

表3 せん断耐力試験結果一覧 (耐力及び最大変形角 1/30 での損傷状況概要)

試験体 記号	部位	試験体、材料仕様等		γ_m (rad)	Pmax (kN)	2/3Pmax (kN)	Py (kN)	0.2Pu/DS (kN)	P120 (kN)	1/30rad時の損傷状況
		面材 (mm)	接合具 (mm)							
I-1(a)	間 仕 切 壁	せっこうボードGB-R (12.5)	ねじL=28、@150	1/60	12.78	8.52	7.36	9.43	11.66	ボード角欠け、浮き、端部破壊。 ねじ頭貫通。目地開き約10mm。
I-1(b)		せっこうボードGB-R (12.5)	ねじL=28、@150	1/30	15.91	10.61	8.94	12.85	15.16	
I-2(a)	間 仕 切 壁	構造用せっこうボードA種 (12.5)	ねじL=28、@150	1/60	24.25	16.17	14.10	17.15	23.05	縦横パテ亀裂。ボード角欠け、浮き。 ねじ頭貫通。目地開き約2mm。
I-2(b)		構造用せっこうボードA種 (12.5)	ねじL=28、@150	1/30	27.84	18.56	16.02	25.39	26.80	
I-3(a)	外 壁	胴縁 (15×33) 合板 (4)	くぎN38、柱・間柱へ各1本	1/60	17.94	11.96	9.90	9.13	16.98	横パテの亀裂。ボード角欠け。 胴縁割れ。
I-3(b)		せっこうボードGB-R (9.5)	ねじL=28、@150	1/30	18.57	12.38	11.03	13.53	16.71	
I-4(a)	外 壁 内 側	ガラス繊維不織布せっこう板 (12.5)	ねじL=28、@150	1/60	26.34	17.56	14.95	16.28	24.53	縦横パテ亀裂。ボード角欠け。
I-4(b)		ガラス繊維不織布せっこう板 (12.5)	ねじL=28、@150	1/30	27.08	18.05	15.90	18.63	22.66	
I-5(a)	外 壁	セルローズ繊維混入せっこう板 (12.7)	くぎCN65、外周@150中央@200	1/60	40.15	26.77	23.18	18.52	35.56	ボード角欠け。土台のボード端部破 壊。仕口HD金物部破壊 (1/56rad時)。
I-5(b)		セルローズ繊維混入せっこう板 (12.7)	くぎCN65、外周@150中央@200	1/30	41.15	27.43	23.05	21.44	37.05	
E-1(a)	外 壁	木ずり (12×75) 金属断熱サンドイッチパネル (35)	くぎN38、柱・間柱へ各2本 ねじL=80、外周@106中央@424	1/60	20.71	13.81	11.52	9.79	18.00	サンドイッチパネル及び木ずりの横ズ レ。せっこうボードパテ亀裂、端部破 壊。ボード側ねじ頭貫通
E-1(b)		せっこうボードGB-R (12.5)	ねじL=28、@150	1/30	22.44	14.96	13.18	13.61	17.35	
E-2(a)	外 壁	胴縁 (24×50) 窯業系サイディング (24)	ねじL50、柱・間柱へ各1本 ねじL50、@303	1/60	20.29	13.53	10.29	8.05	15.68	サイディングの回転・ズレ。せっこう ボードの角欠け、縦横パテの亀裂
E-2(b)		せっこうボードGB-R (12.5)	ねじL=28、@150	1/30	23.67	15.78	12.78	11.92	16.55	

γ_m : 最大変形角、Pmax: 最大耐力、Py: 降伏耐力、Pu: 終局耐力、DS: 構造特性係数、P120: 1/120rad荷重

図3 荷重-変形角曲線 (最大変形角 1/30rad)

写真1 1/30rad 変形時の試験体の様子
(試験体: I-1(b)、下段: 目地交点付近詳細)

図4 荷重変形角包絡線

表4 面内せん断試験から求めた壁倍率、壁強さ倍率及び剛性

試験体	I-1(b)	I-2(b)	I-3(b)	I-4(b)	I-5(b)	E-1(b)	E-2(b)
試算壁倍率	1.2	2.2	1.5	2.2	3.0	3.6*	3.3*
決定要因	Py	Py	Py	Py	0.2Pu/DS	Py	0.2Pu/DS
壁強さ倍率 (kN/m) (0.2Pu/DS)/L	3.5	6.9	3.7	5.1	5.8	7.4	6.5
剛性P200/ γ /L (kN/rad/m)	790	1350	810	1090	1730	1610	1470
目地パテ処理	両面	両面	両面	なし	両面	裏面	裏面

*両面の数値

試験結果の一覧を表3に、また、最大変形角 1/30rad での荷重-変形角曲線を図3に示す。各仕様の耐力・剛性については次のようにまとめられる。

- 1) I-5は全試験体中、耐力、剛性とも最も優れていたが、仕口の強度が不十分で脚部破壊したため、耐力壁の諸性能は明確にならなかった。

- 2) I-2 は I-1 の約 2 倍の耐力、剛性を示した。
- 3) I-4 は荷重-変形角曲線が I-2 に酷似し、耐力、剛性も同程度である。
- 4) E-1 及び E-2 は、1/30rad でも荷重が上昇傾向にあり、高い靱性を示した。せっこうボードは、1/100~1/50rad で最大荷重となり破壊に至るため、この靱性は屋外側の金属断熱サンドイッチパネル及び窯業系サイディングの性能に起因すると考えられる。

(2) 試験体の損傷状況

最大変形角 1/30rad での損傷状況を表 3 に示す。損傷の主な特徴は、次のようにまとめられる。

- 1) 目地処理のパテは概ね 1/300rad で亀裂が入り、その後変形の増大と共に、亀裂が広がった。パテが一気に破壊する場合は荷重低下が認められた。
- 2) I-1(b) は終了時で目地の開きが 10mm 程度と顕著であった。
- 3) 1/60rad までの加力ではパテの亀裂は生じるが、1/30rad まで加力した場合に比べ、ねじのパンチングアウト、端部破壊は少ない。しかし、I-5(b) は仕口破壊を生じたため、ボードの損傷は I-5(a) と同程度となった。
- 4) 両面張り試験体の表裏の損傷状況はほぼ同程度である。
- 5) I-3(b) は、くぎによる胴縁の割れ破壊が顕著である。
- 6) せっこうボード張りの I-1(b)、2(b)、4(b) は試験体外周部のボードの端部破壊、パンチングアウト、浮き上がり等の破壊が顕著であったが、防火試験ではこの部分の被覆は維持されており、防火上は、ボード目地の開き、端部欠け等が性能低下要因になり得ると推測される。
- 7) E-2 は、変形角 1/30rad 時に窯業系サイディングが回転・ズレを生じたが、サイディング自身及び目地シールには亀裂などの目立った損傷は無かった。裏面のせっこうボードは縦目地・横目地交点付近での目地の開き(最大 12mm)、浮き(最大 9mm)が顕著であった。

(3) 壁倍率の試算

両面が同一仕様で 1/30rad まで加力した試験体について、荷重-変形角曲線の正加力側より包絡線(注 2)を作成し、文献 6 により壁倍率等を試算した。荷重変形角包絡線を図 4 に、また、壁倍率・壁強さ倍率・靱性を表 4 に示す。オープン工法のせっこうボード系の試験体 I-1、I-2、I-3 は、S56 建設省告示第 1100 号(最終改正：H19 国土交通省告示第 615 号)に記載された壁倍率とほぼ同じ値を示している。なお、外装材とせっこうボードを組み合わせた試験体 E-1 及び E-2 の、外装材のみの壁倍率等の耐力特性については、文献 7 及び 8 に詳細に報告されている。

4.2 載荷加熱試験

(1) 実験結果

実験結果概要を表 5 に、面外変形量、柱側面温度、裏面温度を図 5~7 に示す。I-3 以外の 6 仕様は全て、3.2 で定義した防耐火時間が 30 分を超え、中でも I-2、I-5、E-1、E-2 は、せん断耐力試験の最大変形角 1/30rad でも 45 分を超えた。加熱終了の理由は柱の変形と裏面温度上昇に分かれるが、I-5 の(a),(b)で異なる載荷荷重を使用した以外、同一仕様では、いずれも、せん断耐力試験の最大変形角が大きい方が、防耐火時間が短い。また、I-3 は目標には達しなかったが、加熱終了時間が目標に 1.75~3.25 分足りない程度であり、改良すれば目標に達する可能性がある。

(2) 補強仕様の水平加力後防耐火特性

図 6 を見ると、柱側面温度はどの実験でも 18 分頃まで面材からの水分蒸発のため 100℃程度で停滞するが、以後の経過は次のように分類できる。

A) 柱側面温度が 100℃前後から不連続的に上昇するもの I-3

B) 柱側面温度は緩慢に進むが木材の引火温度を超える 300~500℃から不連続的に上昇し、加熱終了に至るもの I-1, I-2

C) 柱側面温度の変化が加熱終了まで緩慢なもの I-4, I-5, E-1, E-2

柱側面温度の上昇が緩慢な場合は、壁内部に火炎が貫通しないまま加熱側面材の裏面温度が上昇して、その放射と壁体内中空部からの対流熱伝達によって柱側面が熱せられたことを表し、不連続的な上昇は柱への引火を表すと考えられる。柱の燃焼持続には酸素供給が必要なので、A)、B)では、少なくとも温度の急変後は加熱側面材に換気が生ずる程度の隙間が形成されていたと推測される。特に、A)では、加熱側面材の火炎貫通が柱への引火の直接の原因と考えられる。一方、C)では加熱終了まで加熱側面材に隙間等が生じなかったと推定される。I-4 は、1/30rad で 100℃以上での温度上昇速度が大きい、変形角の増加により隙間が発生したものと考えられる。I-5、E-1、E-2 では、せん断耐力試験の最大変形角に係らず、柱側面温度は、加熱終了近くまで大して変化せず、防耐火性能が水平加力の影響を大して受けないことを示している。

間仕切り壁は、2.で指摘したように、家屋内で火災が拡大すると両面から加熱される可能性があるため、今後、両面加熱時の非損傷性の評価が必要である。両面加熱時には面材の水分蒸発も両面で起こるから、柱側面温度が 100℃前後で停滞する時間は本実験とあまり変化しないと予想されるが、柱側面温度が 100℃を超えると、両面加熱される場合の壁内中空部へ

表 5 水平加力後の試験体による載荷加熱試験結果概要

試験体記号	部位	載荷荷重 (kN/本)	変形角 (rad)	加熱時間 (分)	軸方向最大変位量 (mm)	軸方向最大収縮速度 (mm/分)	柱炭化深さ*1 (mm)	試験体最高裏面温度(℃)		火炎貫通時間 (分)	防耐火時間 (分)	加熱終了となった要因
								平均	最大[190℃超(分)]*2			
I-1(a)	間仕切り壁・外壁・内側	17.0	1/60	43	12	5.5	15	129	228 [42.25]	43	42.25	柱の面外変形
I-1(b)		17.0	1/30	36	5	0.4	17	126	222 [35.25]	36	35.25	裏面温度上昇
I-2(a)		17.0	1/60	52	4	0.5	21	141	317 [50.75]	なし	50.75	裏面温度上昇
I-2(b)		17.0	1/30	48	2	0.2	23	151	277 [47.0]	なし	47.0	裏面温度上昇
I-3(a)		17.0	1/60	30	4	0.7	17(5)	143	275 [28.25]	30	28.25	裏面温度上昇
I-3(b)	外壁・内側	17.0	1/30	28	1	0.2	15(10)	136	328 [26.75]	28	26.75	裏面温度上昇
I-4(a)		17.0	1/60	57	12	4.6	26	119	158 [超えず]	なし	57.0	柱の面外変形
I-4(b)		17.0	1/30	39	4	0.5	20	120	284 [36.5]	39	36.5	裏面温度上昇
I-5(a)		31.1	1/60	46	11	5.8	17	93	106 [超えず]	なし	46.0	柱の面外変形
I-5(b)		17.0	1/30	57	13	3.5	34	100	112 [超えず]	57	57.0	柱の面外変形
E-1(a)	外壁	17.0	1/60	60	4	0.4	11	146	308 [56.0]	60	56.0	裏面温度上昇
E-1(b)		17.0	1/30	58	2	0.2	15	182	259 [55.5]	なし	55.5	裏面温度上昇
E-2(a)		17.0	1/60	74.5	36	19.0	29	119	246 [73.5]	74.5	73.25	裏面温度上昇
E-2(b)		17.0	1/30	70	4	0.3	20	146	381 [55.25]	なし	55.0	裏面温度上昇

*1: 柱加熱側中央の炭化深さ。括弧内は柱非加熱面側中央の炭化深さ、*2: 試験体裏面最大温度が 190℃を超えた時間

写真 2 火炎貫通した様子
(試験体 I-1(b))

図5 荷重加熱試験における面外変形量

図6 荷重加熱試験における柱側面温度

図7 荷重加熱試験における試験体裏面温度

の入熱は片面加熱より増加するため、その温度上昇速度は片面加熱の2倍になると仮定すると、I-2(a), I-4(a), I-5は、両面加熱されても30分までは柱の引火に至らないと予想されるので、このままの仕様が両面火災加熱下で水平加力後の非損傷性を実験的に検証してみる価値は大きい。I-1, I-2(b), I-4(b)の結果を見ると、両面加熱時には30分以内に柱に引火する可能性が高く、その場合、非損傷性を損なう可能性もあるが、本実験で防火性能を決めた主要因が加熱側補強面材の火災貫通であったとすると、本実験の結果が目標に達しなかったI-3を含め、防耐火性能を向上させるには、補強面材の面外変形や目地部の隙間拡大の抑制等の検討が重要である。

5. まとめ

在来軸組木造壁の耐震・防火同時補強を、外壁2仕様、間仕切り壁5仕様、設計し、せん断耐力試験と、同試験後の荷重加熱試験を行った。水平加力後に30分間の火災加熱に耐えることを目標にすると、軸組木造家屋の耐震・防火同時補強技術の開発に関して、部材レベルでは下記の見通しが得られたといえる。

- ① 普通合板4mm厚+せっこうボード9.5mm厚以外の全試験体は、変形角1/30radの水平加力後も30分以上の防火区画性能を達成できた。
- ② 間仕切り壁中、セルローズ繊維混入せっこう板12.7mm厚は、耐震補強部材に相応しいせん断耐力特性を持ち、変形角1/30radの水平加力後も、両面加熱下で30分以上の非損傷性を達成できる見通しが得られた。
- ③ 間仕切り壁のうち、ガラス繊維不織布せっこう板12.5mm厚及びオーブン工法の構造用せっこうボード12.5mm厚は、耐震補強部材に相応しいせん断耐力特性を持ち、変形角1/60radの水平加力後も、両面加熱下で30分以上の非損傷性を達成できる見通しが得られた。
- ④ 外壁については、屋外側に金属断熱サンドイッチパネル35mmまたは窯業系サイディング24mm厚、屋内側をせっこうボード12.5mm以上とすれば、耐震補強部材に相応しいせん断耐力特性と、変形角1/30radの水平加力後も30分以上の延焼防止性能を達成できる。

本実験を踏まえて、部材レベルで更に検討されるべき主な課題としては、間仕切り壁が両面加熱された場合の非損傷性の実証的把握、両面加熱時の非損傷性を向上させるための補強面材の面外変形や目地部の隙間拡大の抑制等の工夫等があげられよう。

注1：遮熱性・非損傷性の評価基準は、指定性能評価機関の「防耐火性能試験・評価業務方法書」に従い、以下のように設定し、遮熱性は目視観察による。本実験では $h=2800\text{mm}$ 、初期温度 $\theta_0=10^\circ\text{C}$ であり、()内はそれを代入した基準値である。但し、試験体の変形が急速に進む場合は安全管理上、下記条件、特に非損傷性基準値に達しなくても加熱を中止し、その時間をもって防耐火時間とした。

①非損傷性 最大軸方向収縮率 $\leq h/100(28\text{mm})$ 、最大軸方向収縮速度 $\leq 3h/1000(8.4\text{mm/分})$

②遮熱性 裏面平均温度 $\leq \theta_0+140^\circ\text{C}(150^\circ\text{C})$ 、裏面最高温度 $\leq \theta_0+180^\circ\text{C}(190^\circ\text{C})$

注2：包絡線は、最初の繰り返しのピークまで全ての計測点を直線で結び、その後は各繰り返し加力のピークを順次結んで作成した。また、破壊により荷重が低下した場合は、破壊の状況を表示するように破壊時の計測点を、包絡線を結ぶ点に採用した。

付記 本実験は、平成17～18年度国土交通省建設技術研究開発助成「密集地区の面的整備に資する既存建物付加型防耐火補強技術の開発」(研究代表者：長谷見雄二)の一環として実施した。実験に際しては、日本住宅木材技術センター高田峰幸氏、佐藤肇氏、早稲田大学稲葉さとみ氏、小川敦史氏、橋本信氏、平井宏幸氏、川越裕子氏の協力を得た。また、試験体製作にあたって、(社)石膏ボード工業会、日鉄住金鋼板(株)、旭トステム外装(株)、パワースケープより資材の提供を受けた。記して感謝の意を表したい。なお、本研究課題については、本報告に含まないものもあわせ、文献(9),(10),(11),(12)で口頭発表した。

参考文献

- 1) 内閣府都市再生本部、都市再生プロジェクト(第三次決定)、2001年12月4日
- 2) 第19期日本学術会議勧告、大都市における地震災害時の安全の確保について、2005
- 3) 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、1999.2
- 4) 市街地における木造3階建て共同住宅の延焼性状に関する実大火災実験、建築研究資料、No.93、1999.
- 5) (財)日本住宅・木材技術センター、木造の耐力壁及びその壁倍率性能評価業務方法書
- 6) (財)日本建築防災協会、木造住宅の耐震診断と補強方法2005年版
- 7) 藤田正則、村上雅英他、鋼板サンドイッチパネルを使用した木造軸組耐力壁の開発、日本建築学会技術報告集、第13巻、第25号、2007.6
- 8) 萩原慎太郎、小原勝彦他、外装サイディング材の耐力能力とエネルギー吸収性能に関する研究(その5)～(その6)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、2007
- 9) 長谷見雄二他、木造密集地区の面的整備に資する既存建物付加型防耐火補強技術の開発(その1)～(その6)、日本建築学会大会学術講演梗概集、防火、2006
- 10) 村上雅英他、木造密集地区の面的整備に資する既存建物付加型防耐火補強技術の開発(その7)～(その8)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、2006
- 11) 永盛洋樹他、木造密集地区の面的整備に資する既存建物付加型防耐火補強技術の開発(その9)、日本建築学会関東支部研究発表会研究報告集、防火、2006年度
- 12) 安井昇他、木造密集地区の面的整備に資する既存建物付加型防耐火補強技術の開発(その10)～(その11)、日本建築学会大会学術講演梗概集、防火、2007

[2007年10月19日原稿受理 2007年12月12日採用決定]