

京町家の火災による崩壊メカニズム

Collapse analysis of Kyo-mchiya caused by fire

須田達¹・鈴木祥之²・原田和典³・樋本圭佑⁴

Tatsuru Suda, Yoshiyuki Suzuki, Kazunori Harada, Keisuke Himoto

¹博(工) 木四郎建築設計室 (〒605-0811 京都府京都市東山区小松町148-1)

Kishiro Architecture and Design, Dr. Eng.

²教授 工博 立命館大学 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dr.Eng

³准教授 博(工) 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

Associate Professor, Graduate School of Architectural Engineering, Kyoto University, Dr.Eng

⁴助教 博(工) 京都大学次世代開拓研究ユニット (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Research Associate, Kyoto University Pioneering Research Unit for Next Generation, Dr. Eng.

A two-story wooden building, which is called “Kyo-machiya”, collapsed by a fire in Kyoto city on September 24, 2007. During the fire fighting some fighters were buried and injured. It is important to clarify the structural mechanism of the collapse to consider safety measures for the fire fighting. In this study, an on-site after-fire investigation of the burnt building and the reconstruction of the collapse of the wooden frames were carried out. From these investigations, it is supposed that the collapse of the building was caused by the breakage of a column. In order to verify the possibility of the collapse of the column, the load to the column and the decrease of the column section were examined, and burn experiments of wooden members were carried out. From the experiments, the speed of charring and the decrease in the column section were estimated. The deterioration in strength of the burnt column was also estimated. From a buckling analysis, it was found that the building collapsed following the buckling of a column in the fire.

Key Words : *Kyo-machiya, Buckling, Strength reduction of column, wood combustion*

1. はじめに

平成19年9月24日に京都市内において、2階建て木造建物で火災が発生し、消火活動中に建物の崩落事故が起こった。その後の現場検証から出火発生時間が推定されており、出火から消防覚知までは、通報が遅れたこともあり、約11分かかっている。消防覚知から消火活動が開始され約90分後に鎮圧された。火災建物の崩落は消火活動開始から約15分後に起こり、2階部分が崩落した。つまり火災建物の崩落は火災発生から約26分後に発生したことになる。またこの時は消防活動による建物内部への進入直後のことであり、消防覚知から比較的早い時間で火災建物の崩落が起こったため、消火活動に支障をきたした。当然、火災建物内の居住者や消化活動に当たった消防隊員にとって極めて危険な状況になったことは容易に想像できる。木造建物の火災はこれからも起こり得ることであり、このような崩落の原因を明らかにして、今後の対策を検討する必要があると言える。

本報では崩落の原因を明らかにすることを目的として、火災直後に現場調査、およびその後に主要構造材を回収して火災による損傷状態の調査を実施して、火災建物の崩落のメカニズムを分析した。さらに柱材に

組の状況や間取りの形状について調べた。写真1から6に火災鎮火直後の各状況を示す。

写真1は2階部分が崩落した状況である。同写真で平行四辺形に変形している構面は、小黒柱で支えられていた2階のY4構面である。写真2は崩落した部材などを搬出した後、現場で検証を行っているときの状況である。Y7構面から後方部分は崩落せずに残っており、崩落はY1構面からY7構面間で起きている。写真3は2階床の一部が外れて、大量の積載物が見えている状況である。崩落した箇所においても大量の荷物類が散乱していた状況から、2階床には相当量の積載物があったと推定される。写真4は図1に示す平面図でX2Y7に位置する柱で、2階の梁との仕口部分を示す。柱のY構面側は燃焼しており炭化しているのに対して、X構面側は燃焼した形跡はなく炭化していない。ほぞ穴には崩落した2階の梁のほぞが残っており、ちぎれて切断されたような断面を残している。

写真5、6は京町家の特徴的な通り庭の軸組部分を示している。一般的に通り庭の外壁側の柱（側柱¹⁾と呼ぶ）は、基礎からもやまでの通し柱となっている。一般に側壁と居室側の柱に架かる梁（側つなぎ¹⁾と呼ぶ）を設ける場合は、柱にほぞ穴を設けて梁を差し込む構造とする¹⁾。しかし火災建物の側柱は写真5に示すように、柱の中間に壁と直角の向きにほぞを設けている。写真6では側柱を側つなぎに差し込んでいる。これは建設当初は2戸建て以上の長屋で、写真5、6に示す側壁は内壁であり、その側壁を介して繋がっていた建物が取り壊されて現状の状況に改築されたと考えられる。



写真1 2階部分が崩落した状況



写真2 火災鎮火後の火災建物の状況



写真3 2階の積載物の状況



写真4 仕口部分の状況

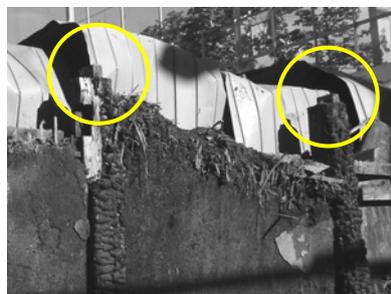


写真5 側柱の構造



写真6 つなぎ梁の構造

(2) 主要構造部材の燃焼状況調査

第二次調査では崩落した主要構造部を整理して、座屈し崩落した小黒柱を中心に軸組の再現を行い、燃焼状況、座屈状況について調査した。写真7は崩落部分の軸組を再現した状況である。写真8は小黒柱と2階の梁との接合部を示す。小黒柱付近は出火元と推定されており、小黒柱およびその周辺の梁の炭化状況が著しい。しかし接合部分は火災の影響をほとんど受けておらず、炭化もしていない。写真9はササラの接合部の状況で、写真8と同様に接合部は炭化していない。写真10は座屈した小黒柱を示す。小黒柱の座屈箇所は燃焼によって焼け細りが生じており、著しく断面が小さくなっていることを確認した。以上のことから火災建物の崩壊は、小黒柱が座屈することによって生じたと考えられる。なお焼け細り後の小黒柱の断面寸法は約70mm程度になっていたが、燃焼前の断面は、燃焼していない部分の計測により、約120mm程度であるから、柱は両面から約25mm程度ずつ減少したことになる。



写真7 崩落した軸組の再現状況



写真8 小黒柱を中心とした梁の仕口部分



写真9 ササラの仕口部分

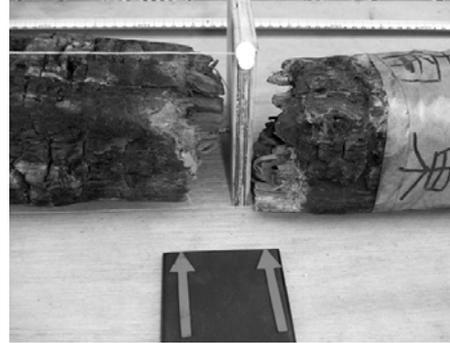


写真10 座屈した小黒柱

4. 木材の燃焼実験

火災建物の崩落は、小黒柱が断面の焼け細りによって強度が低下し、座屈することで引き起こされた可能性が高い。既往の研究では、大断面集成材の炭化速度について多くの実験的な知見が得られており、その速度は約0.6mm/分とされている²⁾。しかし火災建物で使われている柱は100mm角程度のすぎ材であり、大断面集成材と同等の燃焼性状とは言い難い。そこで火災建物の柱を想定して断面が90mm角、105mm角、120mm角のすぎ材の耐火実験を行った。加熱時間は火災初期段階を想定して10分、15分、20分の3つとし、加熱方法はISO384の標準加熱曲線に従っている。

写真11、12に火災建物の小黒柱と同じ120mm角の木材試験体の燃焼後の状態を示す。写真11は各加熱時間で取り出した木材試験体の表面の燃焼状態を示す。同写真は左から加熱時間0分、10分、15分、20分の状態である。写真12は加熱時間20分の木材試験体の断面である。外側の黒くなっている部分が炭化した状態であり、構造材としての有効な断面が減少していることが分かる。なお焼失深さ、炭化深さは図3のように定義している。



写真11 各燃焼時間の木材試験体(120mm角)の状況



写真12 木材試験体(120mm角)の炭化状況(断面)

図4は炭化深さを計測した結果で、燃焼時間との関係を示している。同図は実線で各試験体の計測結果を示しており、点線で炭化速度0.6mm/分と1.0mm/分の場合を示している。いずれの試験体についても炭化深さは、ほぼ燃焼時間に比例して深くなり、炭化速度は0.8～1.0mm/分となった。

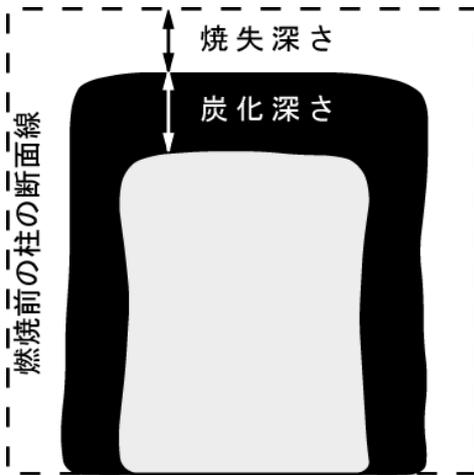


図3 焼失深さと炭化深さの定義

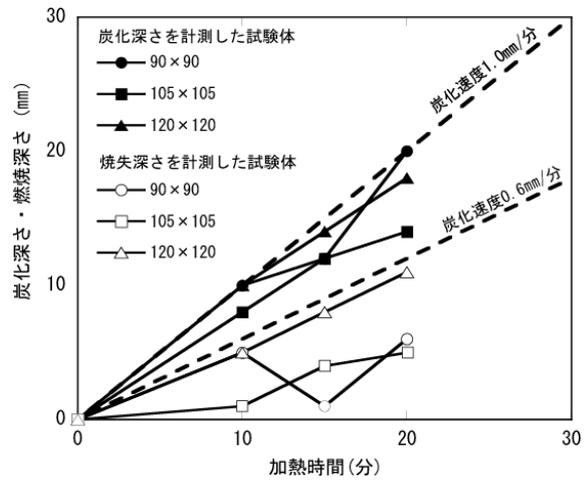


図4 燃焼実験による木材試験体の焼失速度と炭化速度

5. 崩壊メカニズムの検証

(1) 検討方法

火災建物の崩壊は小黒柱が座屈し、小黒柱に架かる梁が崩落することで全体的な崩壊になったと考えられる。小黒柱の断面は燃焼によって焼け細っており、そのため、鉛直荷重が支えられなくなって座屈したと考えられる。火災時の状況を想定し、小黒柱の座屈について検討を行う。検討モデルを図5(a)、(b)に示し、小黒柱の高さ(2.4m)、断面寸法、座屈位置(1.35m)は第二次調査から得られた結果に基づいている。まず図5(a)の検討モデルでは、焼け細りにより柱の断面が減少した場合の座屈の検討を行う。その際に焼け細りが両端から均等に進行するとは考えづらく、負担重量による軸力は柱芯からずれて生じると考えられる。そこで負担重量は柱断面の端部にかけることとした。つぎに同図(b)の検討モデルでは、柱に過大な応力が生じることで徐々に柱の傾斜が大きくなると考え、焼け細りにより減少した断面の柱が傾斜した場合の座屈の検討を行う。これらの検討モデルでは、燃焼部分に(1)式の圧縮応力と(2)式の曲げ応力が同時に生じ

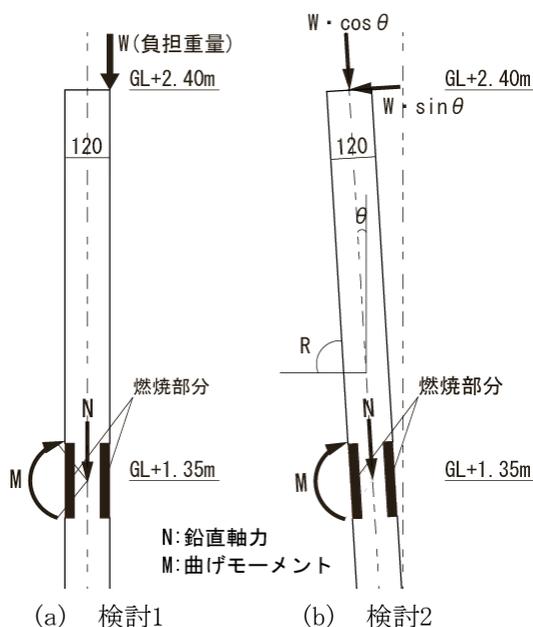


図5 検討モデル

$$\sigma_c = N/A \quad (1)$$

$$\sigma_b = M/Z \quad (2)$$

$$f = \sigma_c + \sigma_b \quad (3)$$

$$f/F = \sigma_c/F_c + \sigma_b/F_b \quad (4)$$

σ_c : 圧縮応力度

σ_b : 曲げ応力度

N: 圧縮力

M: 曲げモーメント

F_c : 圧縮強度

F_b : 曲げ強度

A: 断面積

Z: 断面係数

ることになり、燃焼部分の応力は (3) 式の合力 (f) となる。また (3) 式の各応力をそれぞれの基準強度で基準化すると (4) 式となり、その値を f/F で表す。各応力が基準強度を超えると座屈すると考えて、 f/F の値が 1.0 を超えることで座屈すると判定する。

(2) 負担重量

小黒柱は通し柱で、小屋組レベルでは桁がなく母屋を直接支持し、2階の床レベルでは3方から梁を架けて床を支持する構造である。柱が負担する重量は屋根、2階内壁、2階床およびその積載物であり、外壁の重量は負担しない。小黒柱が負担する重量は外壁、1階床を除く建物重量を算出し、単位床面積あたりの重量 (以下、単位重量) を算出する。負担面積は、柱間を等分して区切られる部分とする。

ここで京町家の建物重量は、そのほとんどが屋根重量と土壁重量である¹⁾³⁾。そこで屋根構面、壁構面の単位重量は京町家に関する既往の研究¹⁾³⁾に基づいて設定し、その他は建築基準法施行令 84 条に基づいて設定する。積載重量は写真 3 で示したように相当多いことが分かる。さらに消火活動による放水によって、積載物の重量が重くなると想像できる。しかし、このような要因を踏まえて実際の積載重量を推定することは不可能なので、積載重量は建築基準法施行令 85 条に基づいて $1300\text{N}/\text{m}^2$ を設定する。表 2 に推定した建物重量、積載重量を示し、表 3 に小黒柱の負担面積、単位重量、小黒柱が負担する重量を示す。

表 2 建物重量と積載重量の推定値

建物総重量 (kN)	252.3
建物重量(外壁、1階床を除く)(kN)	97.6
積載重量 (kN)	40.4

表 3 小黒柱の負担面積と負担重量

小黒柱の負担面積 (m^2)	5.86
負担面積あたりの重量 (kN/m^2)	2.70
小黒柱の負担重量 (kN)	15.82

(3) 材料強度

木材の断面性能を表 4 に示す。平成 12 年建設省告示 1452 では、日本農林規格による目視等級で区分される甲種、乙種、機械等級で区分される E150、E130、E110、E90、E70、あるいは日本農林規格に定められていない木材を無等級などとして、それぞれの材料強度の基準を定めている。小黒柱の材料強度は不明であるため、表 4 に示す機械等級および無等級材の材料強度を参照し、検討を行うこととする。柱としてはひのき材も一般的に用いられるため、参考としてひのきの材料強度も合わせて示す。

表 4 木材の材料強度

	すぎ		ひのき(参考)	
	曲げ強度(F_b)	圧縮強度(F_c)	曲げ強度(F_b)	圧縮強度(F_c)
無等級	22.2	17.7	26.7	20.7
E70	29.4	23.4	22.2	18.0
E90	34.8	28.2	30.6	24.6
E110	40.8	32.4	38.4	31.2
E130	46.2	37.2	46.8	37.8
E150	51.6	41.4	55.2	44.4

(4) 各パラメータに対する小黒柱の座屈の検討

まず、柱が負担する重量は表 3 で示した重量として、柱の断面寸法を増減させて図 5(a) の検討モデルについて分析を行った。柱の断面寸法と座屈の関係を図 6 に示す。柱は角材と仮定しており横軸は柱の断面の辺長、縦軸は材料強度に対して発生する応力の値 (f/F) で示しており、1.0 を超えると座屈の危険性があると判断する。図 6 より、柱の断面寸法が小さくなるに従って累乗的に座屈に対する危険性が高くなるのがわかる。また材料強度 (無等級、E70~E150) によっても異なり、座屈する可能性がある柱の断面寸法に 60 mm~80 mm 程度の幅がある。

つぎに、柱の断面を 70 mm 角として、積載重量を増減して図 5(a) の検討モデルで分析を行った。床面積当たりの積載重量と座屈の関係を図 7 に示す。横軸は単位積載重量としている。材料強度によって座屈の危険

性は大きく異なり、無等級材は積載荷重が約 0.4kN/m^2 で座屈する可能性があるが、E90 の材では約 2kN/m^2 となった。

また、負担重量は表3に示す重量、柱の断面は70mm角として、図5(b)の検討モデルのように柱を傾斜させて分析を行った。柱の傾斜角と座屈の関係を図8に示す。柱の傾斜が無ければ座屈する可能性は低く、柱の傾斜角が大きくなると座屈の危険性は比例的に高くなるのがわかる。対象とした火災建物が崩壊する前に傾斜していたかは不明であるが、僅かな傾斜でも座屈を助長する効果があるとわかる。

さらに既往の研究⁴⁾⁵⁾によれば、木材は加熱することで部材温度が高くなると材料強度は低下し、部材温度が約 200°C 前後で曲げ強度および圧縮強度ともに半減すると報告されている。

(5) 小黒柱の座屈シミュレーション

火災建物は火災発生から約 26 分後に崩落が発生しており、座屈した小黒柱の断面寸法は、120 mmから 70 mmに減少したことが、第一次調査および第二次調査で判明していることである。これに対して、これまでの検討を踏まえて、倒壊の原因としている小黒柱の座屈について、以下に示す条件に基づいて分析を行う。木材の耐火実験による柱断面の焼け細りの結果も踏まえている。柱の傾斜については全く不明なため考慮しない。

- ・柱断面は当初の 120 mm角から火災による炭化で 1mm/min の減少をする。
- ・材料強度は火災前の強度を 100%とし、実際に崩落が発生した約 26 分間で 50%までに低下する。
- ・積載重量は放水による重量増加により、座屈するまで $10\text{N/m}^2/\text{min}$ 増加する。
- ・材種はすぎとし、材料強度はすぎの一般的な強度を想定して無等級材、機械等級 E70 から E110 とする。
- ・小黒柱の負担面積は 5.86 m^2 、単位重量は 2.7kN/m^2 とする。

これらの条件に基づいて、図 5(a)の検討モデルで小黒柱の座屈に対するシミュレーションを行った結果を図 9 に示す。その結果から燃焼が開始して約 25 分後に小黒柱の断面は 120 mm角から 70 mm角に減少し、このため、材料強度が E110 以下の材では座屈する可能性があるといえ、火災建物の崩落を概ね説明できた。

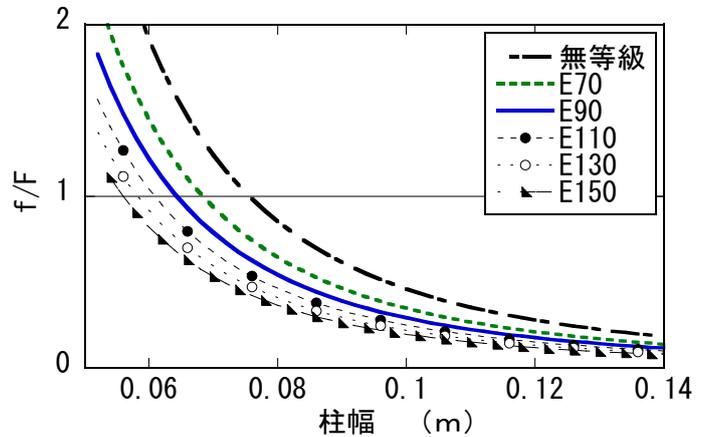


図 6 柱幅と座屈の関係

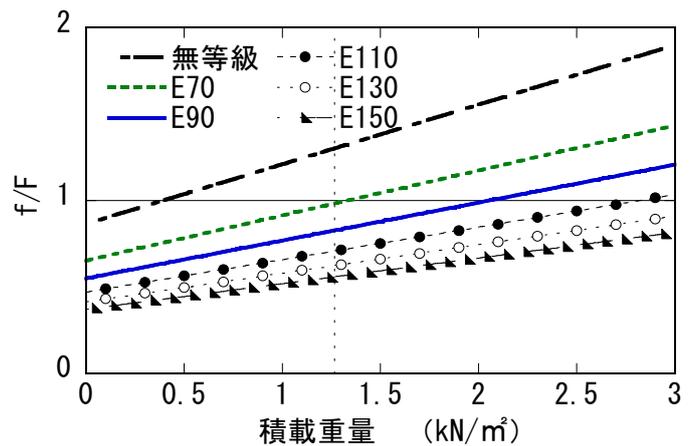


図 7 積載重量と座屈の関係

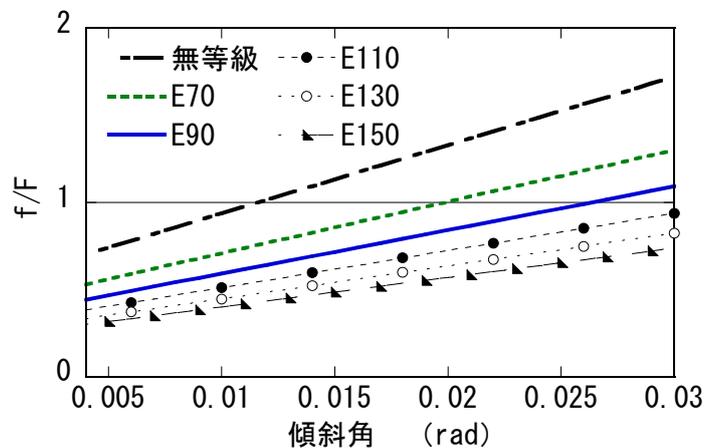


図 8 柱の傾斜と座屈の関係

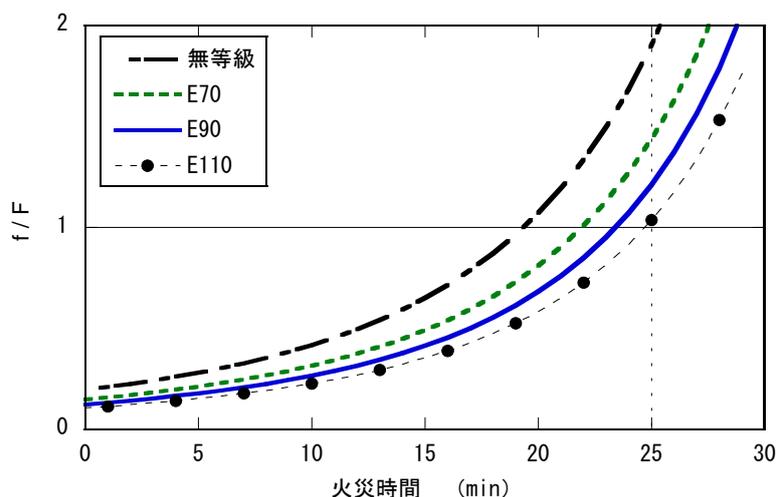


図9 小黒柱の座屈シミュレーション

6. まとめ

柱の座屈は、柱の断面積、材料強度、負担する重量などが大きな要因となっており、柱の断面が小さいほど、材料強度が小さいほど、負担する重量が大きいほど、座屈しやすい。

火災建物における座屈の分析では、そのほとんどの要素が不確定であったため、種々のパラメータを設定して分析を行っている。その結果、柱幅と座屈の関係や積載重量と座屈の関係の分析結果から、通常の状態であれば相当量の積載物であったとしても 100 mm角程度の断面があれば、材料強度に関わらず、座屈が発生する可能性は低いと言える。しかし火災による状況では、柱の断面寸法、材料強度は減少し、負担重量は増加するなど、座屈に関わる要因は全て不利な状況へ変化する。25 分間程度の燃焼であっても柱断面は焼け細り、強度低下も起こって柱の耐力を大きく低下させる。さらに柱の耐力が低下することによって建物全体が傾斜することも予想できる。同じ重量であっても建物が傾斜すれば柱にかかる負担は大きくなる。僅かな傾斜であっても座屈に対する影響は大きいことがわかった。これらの状況を鑑みれば、座屈する条件は十分に満たしていたと言える。

現在、京都市内には 2 万棟を超える京町家が現存しており、本報の火災建物と同様に火災による建物崩壊の危険性があると言える。軸組を耐火構造とすれば、火災時の崩壊を遅らせることができるが、既存する京町家の軸組を耐火構造に改修することは現実的に難しい。可燃物にもなり得る収容物を整理し、避難経路を確保しておくことや、2階の積載物を軽減しておくことが、簡便で有効な対策と言える。

謝辞

本研究は、平成19年に京都市から委託された「火災現場における建物崩落事故発生メカニズムに関する調査研究」によるものである。火災建物の火災鎮火直後の実地調査および崩落した主要構造部材を用いた軸組架構の再現調査では、木四郎建築設計室主宰・奥田辰雄氏および(株)木村工務店、京都府建築工業共同組合副理事長・木村忠紀氏に協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 須田達, 鈴木祥之, 奥田辰雄, 小笠原昌敏:京町家の構造調査に基づく構造特性の評価, 地域安全学会論文集No. 7, pp. 15-21, 2005. 11
- 2) 浜田稔:木材の燃焼速度, 日本火災学会論文集, Vol. 2(3), pp. 11-12, 1953
- 3) 鈴木祥之, 下西智也, 清水秀丸, 須田達, 小笠原昌敏, 杉山亮太:伝統木造住宅の重量算定-京町家の実大振動台実験における重量計測-, 日本建築学会技術報告集第24号, pp. 131-136, 2006. 12
- 4) 上杉三郎:スギ材の180℃以下加熱における曲げ性能, 木材学会誌, Vol. 38, No. 1, pp. 985-994, 1992.
- 5) Schaffer EL:State of structural timber fire endurance, Wood and Fiber, Vol. 9, No. 2, pp. 145-170, 1977