

# 博士論文審査報告書

論文題目

火災加熱を受ける木質部材内部の  
熱水分同時移動が  
力学的性能へ及ぼす影響の評価に  
関する研究

**Evaluation of Influence of  
Heat and Water Transfer  
in Wooden Members Exposed to  
Fire Heating**

申請者

鈴木 達朗

Tatsuro SUZUKI

2021年2月

近年、低炭素社会の実現や森林資源の有効活用等の観点から、国内外で大規模木造建築物への関心が急速に高まっている。大規模化する木造建築物の火災安全性の確保や、適正な大きさの部材断面を設計する必要性から、木質部材の防耐火性能の合理的な設計・評価手法の整備が重要となっているが、鉄骨造や鉄筋コンクリート造に比較して木造では工学的な耐火性能予測法の確立が遅れている。その要因として、木材が含む水分が挙げられる。木材は、常温下でも含水率が上昇すると力学的性能が低下する材料であるが、火災時に高温に曝されると、蒸発した水分が低温側に移動し、凝縮することで、火災中も荷重を担うことが期待されている部分で含水率が上昇すると考えられる。さらに、含水率上昇による力学的性能の低下は高温時に顕著になることが、材料レベルで明らかになっている。これまでの木質部材の耐火性能の予測手法では、火災加熱時の断面内部の含水率上昇による力学的性能の低下は考慮されていないため、実際の火災時には予測された耐火性能が発揮されない可能性がある。

そこで、本論文では火災加熱を受ける木質部材内部で起こる熱水分移動に着目し、その測定・予測法の開発と力学的性能への影響の定量的評価について研究されている。本論文は7章より構成され、各章の審査の要旨を以下に述べる。

第1章「序論」では、研究背景・目的及び本研究の特徴が述べられている。本論文では、加熱実験中の木質部材内部の含水率の動的測定法の開発により、熱水分移動予測モデルの検証やパラメータ同定を可能にし、木質部材の力学的挙動までを一貫して予測・評価するための基盤とすることが目標とされている。

第2章「小型含水率計の開発」では、木質部材内部の局所的な含水率の変化を加熱実験のような制約の多い条件下で測定できる装置を開発している。加熱時の木質部材内部の状態のうち、温度については熱電対で測定可能であったが、含水率を動的に測定する技術は未開発であった。これまで把握が進んでいなかった加熱時の部材内部の含水率の測定が可能になったことは、木質部材の耐火性能評価のみならず、木材の燃焼過程の把握にも極めて有益な成果であると評価できる。

第3章「小型含水率計による含水率の変化の測定」では、第2章で開発された含水率計を用いて、加熱を受ける木材平板内部の含水率分布の変化を実際に測定し、理論的に予想される含水率変化の基本的特徴が、本含水率計で捉えられることを確認している。この測定では、加熱面付近では含水率が一時的に増加した後、沸点に近づくと減少すること、加熱面から離れ、沸点未満で温度が緩慢に上昇する部分では徐々に含水率が増加することが確認されている。以上より、開発された含水率計が加熱実験に使用可能であり、木材内部の含水率が外部からの加熱により上昇することが実際に確かめられたことは、貴重な成果である。

第 4 章「熱水分同時移動モデルによる温度・含水率分布の変化の予測」では、火災加熱時の木質部材内部の温度と含水率の変化を予測可能にするため、熱水分同時移動理論モデルを開発して、第 3 章の実験結果との比較検討が行われている。理論モデルは、多孔質固体中の水の相変化を伴うエネルギー・物質移動理論に基づき、温度、含水率、全圧及び水蒸気圧を変数とするものである。内部の含水率の上昇は、加熱面付近での水分の蒸発による水蒸気の発生、非加熱面側への水蒸気の移動、水蒸気分圧が増加することによる相対湿度の増加、相対湿度の増加による平衡含水率の上昇、最後に、平衡含水率に近づくために含水率が上昇するという諸過程の反映として発生するが、本モデルによる数値計算の結果は、この含水率の上昇過程を再現することができ、実験結果とも概ね一致している。解析により部材内部の熱水分移動を再現できたことは、水分を考慮した木質部材の耐火性能の的確な予測を可能にする上で重要な成果である。

第 5 章「高温時の力学的性能の温度・含水率依存性の定量化」では、高温時の木材のヤング係数及び曲げ強度の常温時からの残存率を、曲げ試験結果の回帰分析により温度・含水率の関数として算出する計算式を導出している。対象は日本国内で建築用材として使われることの多い 9 樹種に及ぶ。この成果は、木質準耐火構造等の部材断面の実用的設計が、従来、部材表面付近の温度評価のみに依存していたのに比べて、必要断面の予測精度を格段に高めるものと評価できる。更に、この成果は、火災加熱時や火災終了後の木質部材内部の温度・含水率分布から部材の耐力を工学的に予測評価するうえで重要な価値を有すると評価できる。

第 6 章「実大部材における熱水分同時移動解析による力学的性能予測のケーススタディ」では、第 4 章の熱水分同時移動解析と、第 5 章の力学的性能の残存率の計算式を用いて、火災加熱を受ける実大の柱・梁部材の含水率の変化が力学的性能に及ぼす影響の評価例が示されている。評価にあたっては、まず、実大部材の断面を有限要素に分割し、熱水分同時移動解析を行って、各要素の温度及び含水率分布の推移を算出している。次に、各要素の力学的性能の残存率を、熱水分同時移動解析によって得られた温度及び含水率から算出している。最後に、断面全体で発揮できる耐力が求められている。解析結果と載荷加熱実験結果の比較によると、含水率を考慮した場合、部材の崩壊時間を実験より短く予測したのに対し、含水率を考慮しない場合は崩壊時間を実験より長く予測する結果となっている。以上より、熱水分同時移動解析を用いることにより、火災時の木質部材の耐力を安全側の設計を導くように予測できることが示された。火災時の部材の加熱性状は、建築空間等の影響を受け多様であるが、一般的な耐火加熱試験で再現できる加熱条件に限られるのに対して、熱水分同時移動解析により多様な加熱条件のもとでの部材耐力の評価が可能となる見通しを得られたことは重要な成果である。

第7章「総括」では、本論文の成果を総括している。各章の成果を簡潔にまとめている他、今後の展望として、開発された含水率計による測定例を充実させることが、火災加熱を受ける各種の木質部材の力学的性能の予測精度の向上と木造建築物の耐火設計の合理化に寄与することが示されている。

以上を要するに、本論文は、火災加熱を受ける木質部材内部の熱水分移動が、力学的性能へ及ぼす影響の評価を可能にしたものである。この成果は、木質部材の耐火性能予測の困難性を克服して技術開発を容易にすると同時に、木造建築物の火災時の安全性向上や大規模木造建築物の普及に貢献しうる。よって、建築防災工学の発展へ寄与するものと認められ、博士（工学）の論文に値するものと認める。

2021年2月

審査員

主査 早稲田大学理工学術院 教授

工学博士 早稲田大学 長谷見雄二

早稲田大学理工学術院 教授

工学博士 早稲田大学 田辺 新一

早稲田大学理工学術院 教授

博士（工学）早稲田大学 興石 直幸

早稲田大学理工学術院 教授

博士（工学）早稲田大学 高口 洋人