

京都大学	博士（工 学）	氏名	水上 点晴
論文題目	区画火災に曝される含湿区画壁の温度上昇簡易予測手法		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>含水率は火災加熱を受けた時の建築物の区画壁の温度上昇に大きく影響するが、これまで水分を含む壁体の火災加熱時の温度上昇を簡易に予測する手段が無かったため、高コストの耐火試験が必要とされ、また標準加熱温度と異なる火災温度上昇に対しては区画壁の温度上昇を簡単に予測することが出来なかった。本論文は、水分を含む区画壁の火災加熱時温度上昇を簡易に予測する手法について研究した結果を取り纏めたものであり、7章で構成される。</p> <p>第1章は序論であり、本研究を行うに至った背景としての建築構法の耐火性能試験に関わる諸課題および既往の関連研究の状況について要約し、本研究の目的と本論文の構成について記述している。</p> <p>第2章では、塗り厚や表面材を変化させた土壁の標準加熱曲線下における耐火加熱実験を行った結果について記述している。このうち塗り厚を変化させた試験では壁の含水率は3.4%および7.5%の2条件であるが、加熱に伴う水分蒸発の影響で100℃付近での温度停留が観測された。この温度停留時間ならびに耐火試験における遮熱基準温度である200℃への到達時間は、塗り厚にかかわらず温度測定点の加熱面からの距離に応じてほぼ一定の値となる結果を得た。この温度停留時間は、加熱側表面からの距離が大きいほど長くなるが、上記の含水率の範囲では、温度停留の前後の温度上昇速度は概ね等しいため、水分を含む土壁内部の任意の位置の温度が、ある温度に上昇する時間は、水分の影響を除いた乾燥状態における温度上昇と、水分蒸発に要する温度停留時間を足し合わせることで予測可能という推測を得ている。</p> <p>第3章では、加熱温度一定の条件下における含湿壁の温度上昇時間を、乾燥壁の温度上昇時間と水分蒸発時間の和として計算する簡易式を構築している。乾燥壁の温度上昇時間については半無限固体に対する熱伝導理論解をベースにして近似的な簡易式を構築し、加熱温度を表面温度と等しいとした仮定による誤差と適用範囲を明らかにしている。水分蒸発時間については、壁体内に加熱側の乾燥部分と非加熱側の含湿部分を考え、その境界面が加熱側からの熱伝導流束に比例する速度で後退するとして導いた。これによれば、一定温度で加熱される乾燥壁の加熱表面から或る距離 x の点で水分が蒸発する加熱開始後の時間は含水率に比例し、距離 x の2乗に比例する予測になる。この水分蒸発モデルの妥当性は1次元熱伝導数値解析モデルにおいて差分間隔を小さくして行くに従い温度停留の予測が小さくなる結果によって検証している。なお、簡易モデルでも1次元熱伝導数値解析モデルでも蒸発した水分は壁の温度変化に影響を及ぼさないで速やかに壁外に逸散するものと仮定されている。</p> <p>第4章では、第3章の加熱温度一定の条件下における遮熱時間を求める簡易予測式を、耐火試験の標準加熱温度曲線下における温度上昇時間を求める簡易式へ拡張している。ここでは、まず標準加熱の上昇温度が時間 t の関数として $\beta t^{1/6}$ の式で精度よく近似できることを利用して、任意の時間 t までの加熱温度の時間平均を求めて、これを等価加熱温度として与えれば3章と同様な方法で温度上昇時間が安全側に妥当な精度で求められることを数値解析との比較により明らかにした。また、等価加熱温度を水分蒸発時間の予測にも適用し、その妥当性の範囲を確認している。次いで、この乾燥壁の温度上昇時間と蒸発時間を加算して含湿壁の温度上昇を簡易予測する手法を耐火試験加熱温度条件に適用し、満足な精度の予測が得</p>			

氏名	水上 点晴
----	-------

られることを確認している。さらに、この簡易予測式により含湿壁内の点における温度上昇履歴を計算する方法を示し、数値計算との比較で良好な一致が得られることを確認した。

また土壁の耐火加熱実験における水分蒸発前の時間帯を考え、温度測定データに基づき簡易式に必要な熱拡散率 α を同定している。ある温度測定点での推定熱拡散率は、加熱初期を除いて温度依存性が見られないことから、80℃に達する時間での温度測定データを用いて熱拡散率を推定した。推定した熱拡散率は、加熱面からの距離によって値に多少の変動が見られ、木舞層の影響も考えられたため、木舞層より加熱側の点を除いて平均化した値を採用している。

第5章では、土壁以外の材料への適用性を検討している。まず石膏ボードの耐火加熱実験を行い、土壁では100℃付近にしか見られなかった温度停留域が、100℃付近と125℃付近で2段階に観測されること、加熱温度を上げることで、温度停留の時間が短くなると共に停留後の温度上昇勾配がきつくなることを明らかにした。このような性質を有する石膏ボードが加熱されたときの温度上昇を予測するために、前章までの簡易予測式を2段階の温度で結晶水が脱水するときの温度予測に拡張した。そして石膏ボード単層壁に対して、数値解および実験値との比較から、加熱条件を変えても非加熱側表面での温度上昇が200℃に達するまでの領域では、温度上昇を精度よく予測できることを示している。

第6章では、蒸発時間の予測式に含まれる比例定数Dの値についての再検討と一般化を行っている。比例定数Dは、第3章において簡易式と数値解の比較から求めていたが、含水率の高い条件では、蒸発時間の予測誤差が大きくなること、および蒸発後の温度上昇速度が蒸発前と大きく異なる。このため、蒸発点での熱収支式を解くことでフーリエ数に無次元化された蒸発到達点と、そこでの温度勾配を与える関係式を導いた。次いで、加熱温度一定の場合に対して、この蒸発到達点を用いて温度上昇時間を簡易式で予測した結果と数値解析解と比較し、良好な一致が得られることを確認した。

第7章は、本論文の総括であり、各章に記述される研究の成果を要約している。

氏名	水上 点晴
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

建築物の区画壁の含水率は火災加熱を受けた時の温度上昇に大きく影響するが、これまで水分を含む壁体の火災加熱時の温度上昇を簡易に予測する手段が無かったため、コストが大きい耐火試験を強いられ、また性能的耐火設計において標準加熱温度と異なる区画火災温度上昇が予測されても、それに対する区画壁の温度上昇を簡単に予測することが出来なかった。本論文は、水分を含む区画壁の火災加熱時温度上昇の簡易予測手法について研究した結果を取り纏めたものであり、その成果は以下に要約される。

- (1) 塗厚と表面被覆材の条件が異なる数種の土塗り壁の耐火実験を行って壁内温度上昇のデータを収集するとともに、土壁に含まれる水分蒸発のため温度が 100℃で停留する時間は加熱面からの距離にほぼ比例して長くなることを見出した。
- (2) 加熱温度が一定の場合の壁内部温度上昇時間と水分蒸発時間について簡易予測モデルを構築した。このモデルによれば、乾燥壁の或る位置で或る温度まで上昇する時間は加熱面からの距離の 2 乗に比例するが、それを含湿壁のある位置で水分の蒸発が完了するまでの加熱開始からの時間は含水率に比例し加熱面からの距離の 2 乗に比例することを予測し、これらを実験データおよび数値計算で検証した。また、含湿壁が或る温度に達する時間は乾燥壁の温度上昇と水分蒸発の時間の和として求める計算式を構築し、その妥当性と適用範囲を明らかにした。
- (3) 加熱温度が時間とともに変化する耐火試験の標準加熱条件に対して、加熱中の温度の時間平均を用いることで、加熱面から或る位置での温度が或る値に達するまでの時間が遮熱性評価上安全側に、かつ妥当な精度で予測できることを明らかにし、その予測計算式を求めた。またこの式は区画火災の温度上昇係数が標準耐火加熱試験と異なる場合にも適用可能なこと、およびその適用範囲を示した。
- (4) 結晶水が異なる温度で 2 段階に蒸発するため 2 段階に温度停留が発生する石膏ボード壁に対して加熱条件を変えた耐火実験を行って、停留後の温度上昇勾配が停留前に比較し急になること、また加熱温度が高いとこの温度停留時間は短くなることを見出した。この結果を受けて、結晶水が異なる温度で 2 段階に蒸発する石膏ボードの温度上昇を予測する計算式を構築し、加熱温度条件を変化させた実験および数値計算の結果との比較で検証した。
- (5) 含水率が高い区画壁において、任意の位置の温度上昇速度が水分蒸発終了後に蒸発以前より著しく大きく異なる原因は、蒸発終了までの時間が長くなるほど乾燥側の温度勾配が急になるためであることを明らかにし、またフーリエ数として無次元化した蒸発到達点、およびそこでの温度勾配を求めることで、含湿壁の水分蒸発を考慮した温度上昇をより精度良く予測する手法を示した。

以上の内容により、本論文は含湿壁の火災時温度予測に関して有用な手法を提示しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 24 年 1 月 25 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。