

氏名	吉谷 公江
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	総博乙第15号
学位授与年月日	令和元年9月20日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項
文部科学省報告番号	乙第343号

学位論文題目 包括熱伝導率を用いた防耐火試験時の遮熱性予測  
(Study on prediction method for the insulation using inclusive thermal conductivity in fire resistance tests)

論文審査委員	主査	島根大学准教授	清水 貴史
		島根大学教授	廣光 一郎
		島根大学教授	中村 豊
		島根大学教授	澤田 樹一郎
		大阪工業大学特任教授	吉田 正友

## 論文内容の要旨

防耐火性能は、建築基準法・告示の他に国土交通大臣の防耐火個別認定により確保する必要がある。その際、企業は予備試験を繰り返し実施して仕様を検討し、第三者機関による防耐火試験を経て認定を取得することとなる。防耐火試験は一度の試験において試験体が完全に破壊されるため、些細な変更においてもその都度試験体の製作・加熱試験を繰り返す必要があり、予備試験を含めると企業が実施する試験回数は膨大となる。また、試験体の構成や試験時間によっては、試験体が燃焼している最中に試験炉から試験体を外すことがあり、発熱・発煙による人体への危険性は極めて高い。そのため、数値計算を用いて遮熱性予測により試験回数を削減できれば、試験の実施に必要な費用や期間を削減できるだけでなく、人体への影響回避につながると考えられる。

防耐火試験時に材料内部を熱が伝わる過程においては、材料の熱物性値（熱伝導率・比熱・密度）に変化が生じるほか、水分の移動や蒸発も生じる。すなわち、材料が加熱されることで材料自体にクラックが生じ、加熱面からの距離によって材料内部の水分量にも偏りが生じる結果として、場所ごとに熱の伝わりやすさが異なる環境となっていると考えられる。本研究ではこの違いに着目し、防耐火試験時の実用的な遮熱性予測手法の確立を目的として、高温下での水分移動を含む材料内部の場所ごとの熱の伝わりやすさを考慮した熱物性値（包括熱伝導率）の推定と遮熱性予測手法を提案し、それらの有用性を明らかにするものとする。

本論文は8章により構成され、以下にその概要を示す。

1章では、序章として、本研究の背景及び目的について述べるとともに、防耐火性能予測手法及び熱物性値測定・予測手法についての既往の研究についてまとめている。

第2章では、ALC単体、せっこうボード単体、窯業系サイディング・せっこうボードの2層構成、窯業系サイディング・グラスウールボード・せっこうボードの3層構成について、標準加熱温度における小型加熱試験を実施した結果を述べている。これらの結果から、試験体内部に熱電対を設置することで、加熱側から非加熱側への熱伝導を実験データとして得られることを示した。また、X線CTを用いて加熱試験後のALCを測定し、独立気泡がクラックによりつながることを確認し、加熱温度ごとの熱の伝わりやすさの変化についても言及している。さらに、加熱試験後のせっこうボードについては、クラックの入り方について確認し、せっこうボードの脱落しやすい温度域及びその要因を探ったうえで、X線CTの結果をもとに包括熱伝導率の分布及び温度依存性について検討を行っている。

第3章では、包括熱伝導率を用いた耐火試験時の遮熱性予測手法を提案している。水分を含む材料が片側から加熱されることで、クラックや水分挙動等の影響が場所ごとに異なると考えられるため、実験結果から推定する「材料の変化に起因する熱の伝わりやすさを全て包含した『包括熱伝導率』」を推定し、その包括熱伝導率を用いれば厚さを変化させた場合の遮熱性予測が可能となるという仮説を立て、非定常熱伝導方程式をもとにした1次元の解析モデルを構築した。さらに、材料単体、2層構成、3層構成のそれぞれについて包括熱伝導率の推定方法を提案し、材料厚さが増減する場合のそれぞれについて包括熱伝導率の割り当て方法についても示している。

第4章では、ALC単体の加熱試験結果を用いて、遮熱性予測を行っている。まず厚さ50mmのALCについて包括熱伝導率の推定を行い、材料厚さを厚くして予測する場合の包括熱伝導率の割り当て方法及び遮熱性予測を行い、妥当性について検討している。その結果、ALC単体では100mmに厚さを増した場合でも精度よく裏面温度予測ができることが示された。

第5章では、せっこうボード単体の加熱試験結果を用いて遮熱性予測を行っている。最も厚い15mmについて包括熱伝導率の推定を行い、材料厚さを薄くして予測する場合の包括熱伝導率の割り当て及び遮熱性予測を行い、妥当性について検討した結果、せっこうボード単体では、15mmから9mmまで薄くした場合においても精度よく裏面温度予測ができた。

第6章では、2層構成（窯業系サイディング+せっこうボード）の加熱試験結果を用いて、遮熱性予測を行った。窯業系サイディング及びせっこうボードのそれぞれの包括熱伝導率を推定し、第5章と同様に、せっこうボードの厚さが薄くなる場合の包括熱伝導率の割り当て及び遮熱性予測を行い、妥当性について検討した。その結果、第5章とは異なる包括熱伝導率の推定値となったが、この値を用いれば精度よく裏面温度予測ができることが示唆された。

第7章では、3層構成（窯業系サイディング+グラスウールボード+せっこうボード）の加熱試験結果を用いて、遮熱性予測を行っている。試験体の層構成が増すと包括熱伝導率の推定も煩雑となるため、少ない層構成で推定した包括熱伝導率を多層構成においても用いることができれば、包括熱伝導率を用いた遮熱性予測は実用性が増すと考えられる。したがって、1層目の窯業系サイディング及び3層目のせっこうボードのそれぞれの包括熱伝導率は第6章（2層構成）で推定した値を用い、2層目のグラスウールボードの包括熱伝導率を推定した。さらに、せっこうボードの厚さを薄くする場合の包括熱伝導率の割り当て及び遮熱性予測を行い、妥当性についての検討を行った。その結果、この場合においても高い精度で裏面温度予測ができることが確認され、少ない層構成から得られた包括熱伝導率を多層構成の遮熱性予測に用いることが可能であると示唆された。

第8章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、防耐火試験時の実用的な遮熱性予測手法の確立を目的とし、高温下での水分移動を含む材料の変化に起因する熱の伝わりやすさを包含させた「包括熱伝導率」を用いた遮熱性予測手法を提案し、それらの有効性を検証したものである。得られた主な成果は以下の通りである。

(1) 小型加熱試験後の試験体を X 線 CT により空隙率測定を行うことで、加熱温度ごとの熱の伝わりやすさの変化及びクラックの入り方について検討を行い、包括熱伝導率の分布及び温度依存性についての根拠を導いた。

(2) 防耐火試験時の遮熱性予測手法として、一次元の有限差分法を用いた数値解析モデル及び予測手法を提案した。また、数値解析に用いる包括熱伝導率の推定方法及び材料厚さを変更する際の包括熱伝導率の設定方法を提案した。

(3) ALC 単層について包括熱伝導率の推定を行い、材料厚さを増す場合の包括熱伝導率の設定及び遮熱性予測を行い、それらの妥当性を確認した。

(4) せっこうボード単層について包括熱伝導率の推定を行い、材料厚さを薄くする場合の包括熱伝導率の設定及び遮熱性予測を行い、それらの妥当性を確認した。

(5) 2 層及び 3 層の積層構成について包括熱伝導率の推定を行い、非加熱側材料厚さを薄くする場合の包括熱伝導率の設定及び遮熱性予測を行い、それらの妥当性を確認した。このとき、2 層構成で推定した包括熱伝導率を 3 層構成の予測に用いた場合においても、遮熱性予測は精度よくできたことから、少ない層構成の包括熱伝導率を多層の遮熱性予測に用いることが可能であることを明らかにした。

このように、本論文はこれまで困難であった遮熱性予測の実現を目的とし、包括熱伝導率という新たな概念を用いた手法を提案し、加熱試験及び数値解析によりその妥当性を検討したものであり、学術上においても、実際上においても寄与するところが少なくない。また、本論文の内容は、日本建築学会論文集に査読付論文として 2 編が、火災学会誌においても査読付論文として 1 編が掲載されており、そのうち日本建築学会論文集に掲載された 1 編については英文翻訳論文も掲載されている。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。