

氏名（本籍） おう 王 ゆ 兪 しょう 翔（台湾）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 甲第 1039 号
学位授与の日付 2019 年 9 月 30 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目 鋼構造建築物の耐火性能予測技術の高度化に
関する研究
～耐火被覆の損傷を考慮した建築部材温度予
測モデルの構築～

論文審査委員 （主査）教授 大宮 喜文
教授 河野 守 教授 松山 賢
教授 衣笠 秀行 教授 兼松 学

論文内容の要旨

近年の防耐火設計では、開口面積を大きくとることで、火災の継続時間を短くする事例が見られる。その結果、火災の激しさ（温度上昇係数 α ）が大きくなり、火災温度が高温化する。耐火試験では 1 時間で 945℃となる火災を想定しているのに対して、実火災ではフラッシュオーバー後、1200℃以上の温度を計測することもある。しかし、1000℃を大きく超えるような条件での耐火被覆材料の高温特性の知見は不十分である。

一方、火災時に建築部材（構造部材、区画部材等）は熱変形等を起こし、それら部材に施した耐火被覆材は、目地の開きや亀裂等の損傷を生じる可能性がある。耐火被覆材が損傷を受けた建築部材の温度は、損傷がない場合に比べて、大きく上昇する恐れがある。これらの損傷は、建築部材の温度上昇を助長し、さらに隙間が増加し、耐火被覆材の熱劣化をもたらすという悪循環を招く。また、地震時の架構の変形等により、耐火被覆材に亀裂等の損傷を被るとその耐火性能は著しく低下する。

建築物の耐火性能を総合的に論じるためには、耐火被覆材の損傷と耐火性能の関係を定量的に把握することが必要不可欠であるが、研究成果の蓄積が乏し

いのが現状である。

本論文では、主要構造部に用いられる耐火被覆材に着目し、鋼構造建築物を対象とした建築部材の耐火性能予測技術の高度化を目的とし、第二章で素材実験により耐火被覆材の 1000℃以上の熱性質を明らかにし、加熱強度と鋼板に施された被覆材の熱的損傷の関係を把握し、第三章で区画部材に主に用いられる構成材料に着目して、せっこう系ボードやスタッドの熱変形等を定量化して、簡易温度予測モデルを構築し、第四章で構造部材に用いられる耐火被覆材に着目して、被覆材の隙間、亀裂等の損傷が鋼材温度に与える影響を定量化し、損傷を考慮した温度予測モデルを構築した。

以下に本論文の概要をまとめる。

第二章では、耐火被覆材の高温時の性質や亀裂、脱落等の劣化を考慮する上で、等価火災時間に換算した耐火被覆の温度上昇特性を利用するには知見が不十分であるため、高温時の耐火被覆材の熱伝導率、比熱、熱収縮率に代表される熱的性質を把握した。

TG-DTA および DSC による重量減少率と比熱の測定、熱収縮測定実験、標準加熱における素材実験を行った。含水材料の石膏では、40℃以上から徐々に脱水反応が活性化し、100～200℃の範囲で比熱が急激な変化が生じた。1000℃を超える温度域では、熱分解するため、重量減少率が小さくなった。

また、耐火被覆が施された鋼板を用い、多様な加熱強度を被る耐火被覆材の小規模加熱実験を行った。1150℃で亀裂が見られる程度であったが、1250℃で熔融して炉内に脱落した。被覆材の熱伝導率は加熱強度 α が大きくなると、損傷・熱特性により、同定した熱伝導率は 0.5 程度まで大きくなる傾向が見られた。

第三章では、強化せっこうボードを用いた乾式間仕切壁の耐火性能に与える種々の因子のうち、主として加熱強度に着目して、せっこうの熱分解による吸熱作用及び熱劣化、軽量鉄骨下地の熱変形の影響を、一連の加熱実験により把握した。

石膏の熱分解により発生した水分の状況を把握するため、石膏板(GB)及び強化せっこうボード(GB-F(V))を用い、中空層の湿度やボード内部の温度を測定し、多様な加熱強度を設定した加熱実験を行った。水分移動の影響はボードの厚さが大きいほど長く、素材実験で得られた熱物性を用いた解析値と比べて、実験値は、80～140℃で温度上昇の停滞時間が約 3～5 分長くなる。そして、水分移動の影響は、実効比熱として加熱面からの位置に応じた蒸発潜熱の増分を

考慮することで再現できた。

また、加熱による熱変形の影響が無視できる小規模試験体と面外変形が生じると考えられる中規模試験体を用い、4水準の加熱強度 ($\alpha=350, 460, 550, 650$) を設定して実験を行った。目地の開きとスタッドの熱変形が壁に影響を与える。中空層温度が 200°C 以後、強化せっこうボードの熱収縮が発生したあたりから、目地有りの試験体の方が温度上昇が速くなることが分かった。

さらに、材料の熱的变化、隙間の影響を考慮した実効熱物性値(実効比熱、実効熱伝導率)を用いることで、構築した温度予測モデルを用いて実験結果を概ね再現できた。

第四章では、地震時の架構の変形等により、耐火被覆材の亀裂などの物理的損傷による耐火性能が低下した構造部材を対象とし、耐火被覆の亀裂や接合部の隙間などの部分損傷を定量化し、鋼柱、梁の温度予測モデルを構築した。

耐火被覆を施した構造部材の損傷部分を想定した試験体を製作し、小規模加熱実験では、部材の耐火被覆部分に発生した亀裂を再現した隙間を設けて加熱を行い、鋼板の非加熱側温度を測定した。実験結果により、隙間形状（被覆材厚さと隙間幅）により隙間部鋼材への放射熱の影響を考慮した結果、 600°C に到達する時間率は、隙間幅 20mm になると 0.35 倍まで低下し、隙間幅 40mm になると 0.22 倍まで低下することを確認した。

また、中規模加熱実験では、部材の耐火被覆部分に発生した亀裂を再現した隙間を耐火被覆に設けて加熱を行い、鋼柱・梁の材軸方向の温度分布を測定した。実験結果により、鋼柱・梁の中空層がない場合には、目地部近傍は、目地からの伝熱の影響を受けるもののその影響の程度は相対的に小さく、熱抵抗係数は 0.8 倍程度に留まった。

さらに、炉内、耐火被覆材の小口面から鋼材への入熱、隙間部鋼材から被覆部鋼材への失熱及び隙間形状に関する形態係数を考慮し、簡易予測モデルを構築した。その結果、隙間部分が鋼材温度に与える影響を概ね再現できた。

以上、本論文では、主要構造部に用いられる耐火被覆材に着目し、耐火被覆材の高温熱的性質、損傷が建築部材に与える影響を把握し、損傷を考慮した建築部材温度の予測モデルを構築した。

論文審査の結果の要旨

本論文では、鋼構造建築物の耐火性能予測技術の高度化に関する研究について審査を行った。

建築物の耐火性能を総合的に論じるためには、耐火被覆材の損傷と耐火性能の関係を定量的に把握することが必要不可欠であるが、研究成果の蓄積が乏しいのが現状である。そこで本論文では、鋼構造建築物を対象とした建築部材の耐火性能予測技術の高度化を目的として、主要構造部に用いられる耐火被覆材に着目し、耐火被覆の損傷を考慮した建築部材温度予測モデルの構築を行っている。本論文は全5章で構成されている。

第1章では、既往研究から建築部材の耐火性能予測技術に関する知見が乏しい点に着目し、本論文の研究目的を示している。

第2章では、多様な加熱に対する建築部材への熱入力を適切に評価するため、耐火被覆材の熱的性質とその損傷状況について、熱重量示差熱分析装置 (TG-TDA) および示差走査熱量計 (DSC)を用いた熱物性試験、乾燥炉を用いた熱収縮実験、電気炉を用いたISO834に基づく標準加熱温度曲線による加熱試験によって把握している。耐火被覆材の高温時の熱的性質として温度変化による材料の物性の変化を明らかにしている。また、耐火被覆が施された鋼板を用い、多様な加熱に対する耐火被覆材の高温時の劣化特性や熱的物性を把握することを目的とし、電気炉を用いた小規模加熱実験および水平炉を用いた中規模加熱実験を行い、耐火被覆材の熱伝導率を同定している。同定熱伝導率を用いた建築部材温度予測を行う場合、第2章で実施した条件の範囲では、CFB (セラミックファイバブランケット) とRWF (耐熱ロックウールフェルト) は概ね1150℃、CSB (けい酸カルシウム板) type3 は概ね1200℃までが適用限界となることを示している。

第3章では、強化せっこうボードを用いた乾式間仕切壁の耐火性能に与える種々の因子のうち、主として加熱強度に対する石膏の熱分解による吸熱作用および熱劣化、軽量鉄骨下地の熱変形の影響について一連の加熱実験により把握している。石膏の熱分解により発生した水分の状況を把握するため、GB (石膏板) およびGB-F(V) (強化せっこうボード) を用い、多様な加熱強度を設定した実験から中空層の湿度やボード内部の温度を測定し、水分移動の影響を考慮した見かけ比熱を求めている。また、多様な加熱強度を受ける小規模および中規模の壁試験体を用いた加熱実験を行い、加熱強度が大きい条件では、強化せっこうボードの熱収縮がスタッドの熱変形に比べ温度変化に対し支配的であることを確認している。さらに、加熱実験の結果等から壁やボードの熱変形等によって発生する耐火被覆の隙間の変化を把握し、隙間の影響をせっこうボードの熱伝導率が見かけ上、変化したものとして実効熱伝導率を同定している。

第4章では、地震時の架構変形等に起因する耐火被覆材の亀裂等の物理的損傷による耐火性能が低下した構造部材に着目し、耐火被覆の亀裂や接合部の隙間などの部分損傷を定量化し、鋼柱等の温度予測モデルを構築している。実験結果より、中空層がある場合には、隙間から流入した高温ガスが試験体の上部に伝播し、鋼柱の温度が全体的に上

昇しやすくなるが、中空層がない場合には、隙間部の鋼材等が局部的に温度上昇し高温になることを確認している。また、汎用 FEM 解析ソフト ABAQUS により、損傷を模擬した隙間における鋼柱の温度上昇性状を再現し、RWF（耐熱ロックウールフェルト）を施した鋼柱の材軸方向温度分布を把握し、隙間幅が 100mm 程度になると熱抵抗係数が 0.1 倍程度まで低下し、隙間幅が 200mm 程度では無耐火被覆柱の熱抵抗係数と同程度となることを明らかにしている。さらに、無被覆部分と被覆部分に分離し、集中熱容量法に基づく鋼板の温度予測モデルを構築し、損傷を考慮した鋼材温度の予測方法を提案している。

第 5 章では、第 1 章から第 4 章において得られた知見を整理するとともに、今後の展望について論述している。

以上のように、本論文では、主要構造部に用いられる耐火被覆材の高温時の熱的性質を明らかにし、区画部材に用いられる構成材料の熱的損傷および構造部材に用いられる耐火被覆材の物理的損傷を定量化して、それらを考慮した温度予測モデルを構築している。本論文は、鋼構造建築物の耐火性能予測技術を高度化する上で工学的な貢献度が極めて高いものであることから、博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。