

氏名（本籍）	おか ぎき とも ひと 岡 崎 智 仁（京都府）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 917 号
学位授与の日付	平成 28 年 3 月 18 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	火災時における鋼構造架構の梁の伸び出し量 評価に関する研究

論文審査委員（主査）教授 辻本 誠  
嘱託教授 池田 憲一 嘱託教授 松原 美之  
准教授 松山 賢 教授 河野 守

## 論文内容の要旨

鋼材は高い強度と剛性を有し、その機械的性質のばらつきが小さいことから、建物に使用される最も一般的な構造材料の一つである。一方で、鋼材は熱伝導率が高く、火災などの加熱による温度上昇が著しい材料である。そのため、鋼構造建物では火災時における架構の熱変形に対する配慮が必要となる。架構の構造安定性に大きな影響を及ぼす熱変形の一つとして、鋼梁の熱膨張による材軸方向の伸び出しが考えられる。これまでも、鋼梁の伸び出しが取り付く柱に過大な部材角を生じさせ、層崩壊などの脆性的な建物の崩壊を引き起こす可能性が懸念されてきたが、実建物における鋼梁の火災時伸び出し挙動について定量的に把握した研究は少なく、そのメカニズムは十分に解明されていない。我が国の耐火性能設計では、鋼梁の火災時伸び出し長さを、取り付く柱の部材角が  $1/50$  rad 以下となるよう制限を設けることが多い。建物の火災時における構造安定性を単に梁の伸び出し長さで評価するのであれば、伸び出し長さを自由膨張に等しいものとして取り扱うことが設計実務上は安全側の評価となる。しかし、実建物では大梁は柱に接続され、小梁は大梁に接続されることが一般的である。さらには RC スラブを介して周辺の柱や梁、ブレース架構などの耐震要素とも連続的に一体となっており、鋼梁の火災時伸び出しはこれら周辺の部材により拘束されると考えられる。解析技術の進歩により、鋼柱と鋼梁のみから成る架構については、その火災時熱変形挙動を比較的短い解析時間と少ない労力で予測することが可能となりつつある。し

かし、RC スラブについては構成主材料がコンクリートであるためコンクリートの火災時ひび割れを考慮した大変形挙動を評価する必要がある、膨大な解析時間と労力が必要となる。また、比較対象となる架構レベルでの火災実験研究が少なく、架構解析結果の妥当性の検証は現状では困難である。また、耐火性能設計のような実務では、設計工数などの経済的理由から簡便かつ正確な設計手法が求められ、現状では火災時における鋼構造架構の梁の伸び出し量評価手法は確立されていない。

このような背景を受け、本論文は建物の RC スラブが火災時における鋼梁の伸び出しを拘束する効果についての評価式を、実大寸法での RC スラブ付鋼梁の火災実験結果から実験式として誘導し、耐火設計などの実務において鋼構造架構の梁の伸び出し量の簡便かつ精度よい評価手法を構築したものである。

第 1 章は序論であり、研究の背景と目的および関連する既往研究についてまとめている。既往研究調査では、過去に国内外で実施された実大火災実験や火害事例についてその概要を示すとともに、これまで行われてきた架構解析手法とその精度、一般的な耐火性能設計で採用されている鋼構造架構の熱変形挙動評価方法における課題について整理している。また、既往研究で提案されている、架構熱応力解析における RC スラブのモデル化手法についても述べている。

第 2 章では実大寸法の RC スラブ付鋼梁の火災実験について、試験体仕様および試験体に用いた材料の要素実験結果、試験体の温度計測結果、変位計測結果、ひずみ計測結果、実験後の RC スラブひび割れ観測結果について示している。実験の結果から、評価基点を梁断面の図心位置とした場合、鋼梁の火災時伸び出し量は一般的な耐火性能設計で慣例的に使用される鋼の線膨張係数  $12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  と鋼梁の平均鋼材温度の積から求まる熱膨張量より大きくなることを示した。梁断面内の伸び出し量分布については、上フランジのみが RC スラブによって拘束され、ウェブおよび下フランジが他からの拘束を受けない鋼梁の火災時伸び出し量は、下フランジについては Eurocode4 で規定される自由膨張量に概ね等しく、ウェブ位置では自由膨張量の 80%程度に収束する一方で、上フランジについては、加熱初期から RC スラブの熱膨張が鈍化するまでの時間は、RC スラブの熱膨張により上フランジが引っ張られることで自由膨張量を超える伸び出し量が鋼梁上フランジに生じることを明らかにしている。

第 3 章では鋼梁の温度上昇に伴うヤング係数の低下を考慮した断面一次モーメントから求まる図心位置を中立軸位置（伸び出し評価基点）と仮定し、この中立軸位置における実験での伸び出し量が鋼梁の断面内に平面保持を仮定した場合に Eurocode4 に規定される熱ひずみ量を用いて算出される自由膨張量の概ね 90%に収束することを示し、RC スラブが鋼梁の伸び出し拘束に寄与することを明らかにした。また、実験結果は一般的な耐火性能設計での鋼梁の火災時伸び出し量評価方法である鋼材温度と鋼の線膨張係数の積から求まる単純な自由

膨張量の 80%程度であることを示した。第 2 章で述べた RC スラブが鋼梁を引っ張る時間領域にあるか、鋼梁の火災時伸び出しを拘束する時間領域にあるかについては、RC スラブと鋼梁の中立軸位置熱ひずみ量差の時間積分値を熱ひずみ差速度としてその値の正負により領域判定を行う手法を示した。RC スラブが鋼梁の火災時伸び出しを拘束する時間領域において、RC スラブの鋼梁伸び出し拘束効果（抵抗機構）は、実験での RC スラブのひび割れ状況などから観測結果などから RC スラブの面内曲げ抵抗と仮定することが妥当であると判断し、ひび割れ発生後の塑性大変形挙動を考慮した RC スラブの火災時面内曲げ剛性評価式を構築している。さらに、この塑性域を考慮した RC スラブの火災時面内曲げ剛性を鋼梁の材端ばねとして取り扱い、熱応力による縮み量と熱膨張による伸び量の関係から導かれる簡易な理論式によって算出される鋼梁伸び出し量の理論値と実験結果が精度よく一致することを示した。このように、材端がばね支持される梁部材には伸び出しに加えて熱応力としての軸力も生じるが、実験で計測した加熱梁固定端のジャッキ水平反力から、加熱梁が RC スラブに引っ張られる時間では加熱梁には引張軸力が生じ、RC スラブに拘束される時間領域ではその梁軸力は圧縮側に急転した後一定値に収束し、加熱梁温度の上昇による耐力とヤング係数の低下に起因する加熱梁の面外変形やウェブの局部座屈の発生によってこの熱応力が緩和されるといふ鋼梁の火災時軸力変動の推移を定性的に示した。なお、鋼梁の温度上昇に伴うヤング係数の減少によって鉛直荷重によるたわみが増大し、その鉛直たわみが鋼梁の伸び出し量を低減させる可能性も考えられるが、本論文での実大火災実験では試験体自重以外の鉛直荷重は載荷しておらず、鋼梁の鉛直たわみによる伸び出し引き戻し効果は大きく見積もっても 1%に満たない程度であること、すなわち、本論文の実大火災実験で得られた鋼梁の伸び出し量が自由膨張量と比べて小さいことの主要因が RC スラブの伸び出し拘束効果によるものであることを示した。

第 4 章では実際の鋼構造建物において火災加熱を受ける鋼梁の伸び出し拘束効果として寄与する要素、すなわち、加熱梁に直接取り付く柱や直交梁の曲げ剛性と、RC スラブの面内曲げ剛性、RC スラブを介して連続的に加熱梁と接続される周辺架構の水平剛性を加熱梁の材端ばねとして集約し、ばね支持された線材要素の圧縮ひずみと熱膨張ひずみの関係から成る単純な理論的数値計算に基づく梁の火災時伸び出し量評価手法を示した。その評価手法の妥当性を確認するため、過去に実施した加熱を受ける鋼梁に RC スラブを介して接続された非加熱のブレース架鋼から成る実大鋼構造架構の実大火災実験をケーススタディモデルとして、鋼梁伸び出し量の実験結果と理論値の比較を行った。実験結果と本論文で提案する鋼梁伸び出し量評価手法を用いた理論値は、鋼梁に局部座屈や面外変形が生じるまでの時間では精度よく一致しており提案する評価手法の妥当性を示した。なお、鋼梁に局部座屈が発生したと考えられる時間以降は、実験結果と理論値で乖離が生じているが、伸び出し量の値としては

理論値が実験値を上回る結果となっており、耐火性能設計などの実務で用いる評価手法としては安全側の手法となっている。また、一般的な耐火性能設計において鋼梁の伸び出し量を評価する際に用いられる鋼の線膨張係数と鋼材温度の積から求まる単純な自由膨張量に対しては、第3章で述べた RC スラブ付鋼梁と同様に概ね 80%程度の伸び出し量となっており、本論文で提案する鋼梁の伸び出し量評価手法は、安全側の評価かつ建物の経済設計に有用な評価手法であることを示した。

第5章は総括であり、本論文で得られた成果と残された今後の課題について述べている。本論文では、RC スラブが火災加熱を受ける鋼梁の伸び出しを拘束する効果に着目して火災時における RC スラブの鋼梁伸び出し拘束効果を定量的に把握し、RC スラブの火災時面内曲げ剛性評価式と実建物で加熱を受ける梁に取り付く柱や直交梁の曲げ剛性、床スラブの面内曲げ剛性、周辺架構の水平剛性を材端部に集約した線材要素による、簡便かつ精度のよい鋼梁の火災時伸び出し量評価手法を提案した。一方で、本論文の実験では、全ての試験体の RC スラブは厚さ 150mm の等厚 RC スラブであり、加熱を受ける梁の両側に RC スラブが設置されていたが、実際の鋼構造建物では溝型鋼板デッキを用いた合成スラブの使用や建物外周の梁のように片側にしか床スラブが取り付けられない場合も想定される。また、RC スラブの面内曲げ剛性に影響を及ぼすスラブ支持スパンについても固定であった。本論文で提案する評価手法をより汎用性の高いものするには、スラブ断面内で厚さのことなる床スラブや建物外周梁のように加熱を受ける鋼梁の片側にしか床スラブが取り付けられない場合、スラブ支持スパンが変化した場合についても今後検討が必要である。

## 論文審査の結果の要旨

建築物の構造架構は、災害時における人命や財産保護の観点から、想定される全ての荷重に対して構造安定性を確保するように設計されなければならない。火災時における架構の構造安定性において、柱の果たす役割は重要であり、温度上昇に伴い柱にとりつく梁が伸びだすことにより柱頭が水平方向に押され、柱に過大な傾斜角（層間変形角）が生じることは、架構の構造安定性にとって致命的な結果に結びつくため、これに対する対処は設計上極めて重要な課題である。近年の鋼構造建築物、特に超高層事務所ビルでは、梁長さ 15 m を超える長大スパン化が一般的となり、火災時における梁の伸びだし量も相対的に大きくなり、梁の伸び出しが火災時における架構の崩壊要因となる可能性が高まっている。一方で、鋼梁の火災時伸び出し挙動については、十分に解明されておらず、一般的な弾塑性熱応力解析では、実現象を精確に再現することが困難である。また、実務レベルの耐火設計に採用できる、簡易で精度の高い手法は開発されていない。

このような背景のなかで、本論文は、火災時における鋼構造架構の梁の伸び出し挙動に主眼を置き行った研究成果をまとめたものであり、第1章から第5章までの5章で構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、既往研究の調査から、実建物における鋼梁の火災時伸び出し挙動が十分に解明されていないことを研究背景として示し、本論文の目的が実建物においてRCスラブが鋼梁の火災時伸び出しを拘束するメカニズムを解明し、実務で使用可能な簡便かつ精度のよい鋼梁の伸び出し量評価手法の提案であることを示している。

第2章では、実鋼構造建物の一部を模擬した4種類（鋼梁断面形状2通り×耐火被覆仕様2通り）の実大火災実験について述べられており、実験結果に基づいてRCスラブが鋼梁の伸び出しを拘束する効果を定量的に論じている。

第3章では、RCスラブの拘束メカニズムを面内曲げ抵抗として捉え、ひび割れによる剛性低下を考慮したRCスラブの火災時面内曲げ剛性評価式を実験式として構築している。また、この火災時面内曲げ剛性評価式を取り入れた梁の火災時伸び出し量評価手法を提案し、提案手法による解析値と実験結果が精度よく一致することを論じている。

第4章では、第3章で提案したRCスラブの火災時面内曲げ剛性評価式を鋼構造架構に拡大適用し、汎用解析プログラムに提案評価手法を取り入れた解析によって、提案手法が実務での耐火設計で有用であることを論じている。

第5章では、第2章から第4章までに得られた成果を整理するとともに、今後の課題および展望について記述している。

本論文の成果は、鋼構造架構におけるRCスラブ付き梁の伸び出し挙動を実験的に明らかにするとともに、鋼構造架構の梁の伸び出し量に関して設計実務で採用可能な簡便かつ精度の良い評価式を構築し、これにより耐火設計技術の高度化に寄与する提案を行ったことにある。

以上、本論文で得られた成果は、高層建築物の火災安全性評価における工学的な貢献度は極めて高いものである。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分価値あるものと認める。