

氏名（本籍）	はる はた まさ かず 春 畑 仁 一（大阪府）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	乙第1106号
学位授与の日付	2021年3月18日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	火災を受けた鉄筋コンクリート造集合住宅の 火害部コンクリートの強度低下とその調査手 法に関する研究

論文審査委員	（主査）嘱託教授 池田 憲一
	教授 河野 守 嘱託教授 松原 美之
	教授 市村 志朗 教授 今村 啓一
	教授 兼松 学 准教授 水野 雅之

論文内容の要旨

1. 論文の構成

本論文は以下の5章によって構成する。

第1章 序論

第2章 火災建物の被害と鉄筋コンクリート部材が受ける火災加熱温度の検討

第3章 片面から火災加熱を受けたコンクリート部材の強度低下に関する検討

第4章 火災加熱を受けたコンクリート部材から採取したコアの圧縮応力-体積ひずみ
曲線による臨界応力度を用いた火害劣化深さの推定に関する検討

第5章 結論

2. 論文の要旨

本研究は、火災を受けた鉄筋コンクリート造（以下、RC造と記す）集合住宅の構造部材を対象として、被災したRC造部材が受ける火災外力を推定し、コンクリート表面から内部に受けた火害による強度低下の範囲を明確にした。また、被災したコンクリート部材を補修するために検討される火害劣化深さを推定する方法を提案した。

2.1 第1章

第1章では本研究の背景と課題を述べ、研究の目的、本論文の構成を述べた。

2.2 第2章

第2章では、火災時にRC造の集合住宅が被災する火災外力を明確にするため、火災建物の被害と鉄筋コンクリート部材が受ける火災加熱温度および火災継続時間の検討を行なった。国内の火災件数と火害調査件数からRC造部材が受ける火災加熱温度を求めるため、調査機関による建物の火害調査事例を集計した。また、出火件数が多かった火災継続時間における集合住宅に対して耐火性検証法によって火災外力を類型化し、火災温度と火災継続時間を推定した。加えて、類型化した火災外力に対して、有限要素法による非線形解析を行い部材内部の温度を推定し、調査結果を比較して妥当性を検証した。

その結果、火害調査結果における統計調査では、国内の建物火災件数は年々減少しているが、火害調査・診断の件数は増加傾向にあること、火害調査件数はRC造の共同住宅が最多であること、RC造の集合住宅における火災は全体の89.8%が出火発生から1時間30分以内に、また遅くとも3時間以内にはほとんどが鎮圧されていること、集合住宅の火害調査における火害部から採取されたコンクリートコアの圧縮強度は、全体の76.4%が低下していることなどを明らかとした。また、集合住宅の耐火性能検証による最高火災温度および火災継続時間の推定においては、統計調査を用いて設計図書が残存した3件の耐火性検証を行った。集合住宅が火災を受け盛期火災に成長した場合、いずれ集合住宅においても火災温度と火災継続時間の関係は、ISO834に示される標準加熱曲線を上回ることを確認した。

耐火性検証法により求めた集合住宅の火災温度と火災継続時間の関係を用いた熱伝導解析の結果、モデル化した3つの火災温度は、いずれにおいても、火害調査の目視観察により推定した最高受熱温度よりも高い温度であることを明らかとした。なお、これらの結果から、現状の火害診断においては安全側の判定となっている。

2.3 第3章

第3章では、片面から火災加熱を受けたコンクリート部材の強度低下に関する実験的検討を行った。本章では、まず、RC造天井部材を模擬したコンクリート試験体を作製し、第2章により類型化した火災外力のうち、火害調査実績およびモデル化した火災温度と火災継続時間から加熱実験のパラメータを設定し、ISO834の標準加熱曲線を用いて火災加熱を与えたコンクリート試験体を作製した。次に、この試験体加熱面からJIS規格に基づくコンクリートコアおよび直径30mmの小径のコンクリートコアをそれぞれ採取して強度分布を求めた。

その結果、JIS規格に基づくコンクリートコアの圧縮強度は、加熱面の最高到達温度が高くなる（コンクリート火災継続時間が長くなる）ほど低下し、火災前と比較して火災継続時間が15分で約89%、30分で約76%、60分で59%程度となり、130分では43%程度残存することを明らかにした。これは、火害調査実績から得られた圧縮強度残存比の方が本実験結果よりも1.2～1.3倍高くなる傾向を示している。

小径コアの圧縮強度結果からは、加熱面側と内側で生じた差が明らかとなり、その差を定量的に把握することができた。加熱面側（加熱面から60mmまで）の小径コアの圧縮強度は、火災継続時間が60分で60%低下し半分以下となっている。一方、内部側（60～120mm）

の圧縮強度は、火災継続時間が 60 分で 84%程度、130 分で 68%程度残存している。なお、小径コアの最高到達温度と圧縮強度残存比との関係には高い相関が認められた。

これらの結果より、火災継続時間が 30 分以内であれば、加熱面から深さ 60mm 内部のコンクリートの圧縮強度の低下は 14%程度であることから、火害の程度は軽微と考えられる。一方、加熱面側から 60mm までのコンクリートの圧縮強度は、火災継続時間が 15 分であっても 27%程度の低下が求められることから、火害の影響を少なからず受けていると考えることができ、補修範囲の対象として検討するための判断材料になることが示唆された。

続いて、加熱面温度を限定したモルタル試験体から採取したコアをスライスして作製した試験片を用いて、加熱面から内側に向かって連続して圧縮・曲げ・引張強度を求めることにより、加熱面から内部 200mm までの強度分布を把握した。その結果、各種試験方法の特性を定量的に把握し、コアをスライスして各深さの強度分布を求める場合には、曲げ試験が最適であることを明らかとした。

最後に、この曲げ試験によって、加熱冷却後のコンクリート試験体から採取したコアをスライスして曲げ強度を測定し、加熱面から深さ方向に強度を求めた結果、火災加熱を受けたコンクリート試験体では、化学的性質の変化および物理的性質の変化によるひび割れ、また、部材の熱応力によるひび割れにより、加熱面から 140mm 程度まで強度低下があることが把握できた。

2.4 第 4 章

第 4 章では、火災加熱を受けたコンクリート部材から採取したコアを用いて、臨界応力度(圧縮試験時に、モルタルクラック、モルタルと粗骨材の界面発生するボンドクラック、骨材内部に発生する骨材クラックがそれぞれ連結して、進展する巨視的なひび割れが形成され始める時の応力で、図 1 に示す圧縮試験時に試験体が収縮から膨張に転じる点：変形特異点に達した時の応力度)を深さ方向に連続して求めることにより、火害劣化深さの推定する方法について検討を行った。

本章では、火害調査時に被災部の構造部材の圧縮強度を確認する目的で採取されるコアに着目し、従来行われているコアの圧縮強度試験を行う際に、コアを切断することなく加熱面から内部に至る劣化範囲を把握する方法について実験的に検討し、その方法を示した。

本実験では、火災加熱を受けたコンクリート試験体から採取したコアの圧縮強度試験を実施する際に、コアの軸方向にひずみゲージを連続して貼付し、圧縮強度に至るまでの軸方向およびその直交方向のひずみから得られる体積ひずみを測定した。

その結果、体積ひずみは、コアの深さ方向における最弱部から順番に臨界応力度に達することを明らかにし、その臨界応力度を求めることによって、火害劣化深さを定量化する方法を示した。

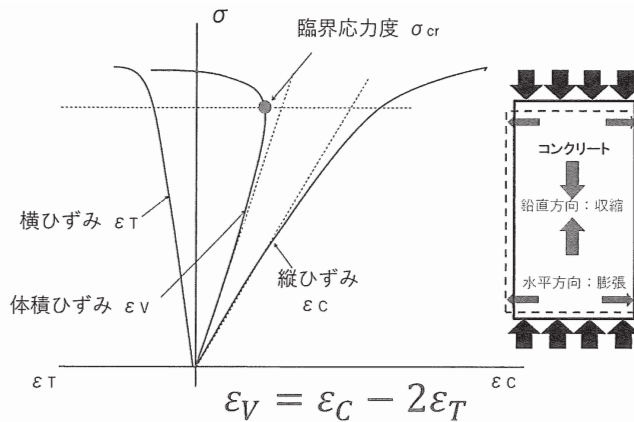


図1 コンクリートの圧縮試験時における圧縮応力と体積ひずみとの関係

2.5 第5章

第5章では本研究によって得られた結論および今後の課題について述べた。

火災後の建物の再利用を目的とした火災調査は、被災したRC造構造部材の補修範囲(広さと深さ)を求めることが重要である。本研究では、RC造の集合住宅の火災に焦点を絞り、実火災事例による火災温度と火災継続時間から熱伝導解析によって、被災部コンクリートの表面から内部における温度勾配を把握し、その強度低下を実験的に明らかにした。そして、従来、火災調査で実施しているコアの圧縮試験を応用して、コアの表面から深さ方向に連続して臨界応力度を求めることにより、劣化深さを推定できる方法を示した。

しかしながら、近年では、建物の長期火災が発生していることから、長時間火災を受けるRC造構造部材の火災劣化について、データを蓄積することが重要であると考えられる。また、火災劣化深さ推定方法については、まだまだ蓄積データが乏しいと言わざるを得ないのが現状である。様々な火災事例に対して、実験的ならびに解析的に検討していくことが必要であると考えている。さらには、第4章で示した火災劣化深さの推定方法は、ひずみゲージによる限られた測定範囲のデータであることが懸念される。将来的にはハイスピードカメラを用いた画像処理解析などにより、広範囲の測定が可能で、より簡便に、高精度の測定方法が望まれる。

2.6 謝辞, 研究業績

謝辞, 研究業績を述べた。

論文審査の結果の要旨

提出された本論文について、学長からの審査付託を受けて、標記7名の審査委員で構成する審査委員会を組織し、審査を行った。

審査委員会においては、学位申請者から学位論文の内容や前回審査における指摘事項の対応結果について説明させ、その後、質疑応答を実施することで、博士論文として満たすべき条件や必要な修正点を確認するという形式で進めた。

第1回審査では、学位申請者から学位論文の第1章～第3章について説明があった。

第1章「序論」では、本研究の背景および関連する既往研究について述べ、本研究の目的と論文の全体構成を示している。本研究は、火災を受けた鉄筋コンクリート造（以下、RC造と記す）集合住宅の構造部材を対象として、被災したRC造部材が受ける火災外力を推定し、コンクリート表面から内部に及んだ火害による強度低下の範囲を明確にしている。また、被災したコンクリート部材を補修するために検討される火害劣化深さを推定する方法を提案している。

第2章「火災建物の被害と鉄筋コンクリート部材が受ける火災加熱温度の検討」では、火災時にRC造の集合住宅が被災する火災外力を明確にするため、火災建物の被害と鉄筋コンクリート部材が受ける火災温度および火災継続時間の検討を行っている。その結果、RC造の集合住宅における火災は全体の89.8%が出火発生から1時間30分以内にはほとんどが鎮圧されていること、集合住宅の火害調査における火害部から採取されたコンクリートコア（以下、コアと記す）の圧縮強度は、全体の76.4%が低下していること、また、集合住宅が火災を受け盛期火災に成長した場合、火災温度がIS0834に示される標準加熱曲線を上回ること、耐火性能検証法により求めた集合住宅の火災温度と火災継続時間の関係を用いた熱伝導解析を3例行い、いずれにおいても、火害調査の目視観察により推定した最高受熱温度よりも高い温度であることなどを明確にしている。

第3章「火災を受けたコンクリート部材の強度低下に関する検討」では、火災加熱を受けたコンクリート部材の強度低下に関する実験的検討を行っている。その結果、JIS規格に基づくコアの圧縮強度は、加熱面の最高到達温度が高くなる（火災継続時間が長くなる）ほど低下し、火害調査実績から得られた圧縮強度残存比の方が本実験結果よりも1.2～1.3倍高くなる傾向を示していること、小径コアの圧縮強度結果から、加熱面側（と加熱面から60mmまで）内部側（60～120mm）に強度の分布があることを明確にし、補修範囲の対象として検討するための判断材料になることを示唆していること、また、コアをスライスした試験片の曲げ強度結果から、化学的性質の変化および物理的性質の変化によるひび割れ、また、熱応力によるひび割れにより、加熱面から140mm程度まで強度低下があることを明確にしている。

第2回審査では、学位申請者から学位論文の第4章、第5章について説明があった。

第4章「加熱冷却後のコンクリート円柱供試体による圧縮応力-体積ひずみ曲線から求めた臨界応力度に関する検討」では、火害調査時に被災部の構造部材の圧縮強度を確認する目的で採取されるコアに着目し、コアを切断することなく加熱面から内部に至る火害劣化深さを把握する方法について実験的に検討している。その結果、コアの深さ方向における最弱部から順番に臨界応力度に達することを明らかにし、その臨界応力度を求めることによって、火害劣化深さを定量化する方法を示している。さらに、その方法

を火災後の構造物から採取したコアに対して適用し、加熱面からの深さ方向の臨界応力度を求め、火害劣化深さを確認している。その結果、火害劣化深さは加熱面から 65mm と推定できることを示している。

第 5 章「総括」では、第 2 章から第 4 章で得られた知見を示し、今後の課題および展望について記述している。

第 3 回審査は、公聴会を兼ねて実施し、学位申請者から学位論文の全章について説明があった。本論文では、火災を受けた RC 造集合住宅の構造部材を対象として、コンクリート表面から内部に及んだ火害による強度低下の範囲を明確にし、被災したコンクリート部材を補修するために検討される火害劣化深さを推定する方法を提案している。

本論文は、被災したコンクリート部材を補修するために必要となる、火害劣化深さを検討する上で工学的な貢献度が極めて高いものである。

以上により、本論文は、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。