

# 「RC造建築物の変状・損傷の早期確認と鉄筋腐食の抑制技術等に関する研究」

## (平成 28 年度～平成 30 年度) 評価書 (終了時)

平成 31 年 2 月 26 日 (火)  
建築研究所研究評価委員会  
材料分科会長 近藤 照夫

### 1. 研究課題の概要

#### (1) 背景及び目的・必要性

既存 RC 造建築物については、持続型社会の形成に向けた利活用とそのため健全性診断と長寿命化のための維持管理技術の開発が課題であり、関連学会等においても新たな指針、仕様書の作成が検討されている。建築物の健全性診断においては法 12 条による定期検査報告が義務づけられているが、費用や日数等の負担が大きいため適正な検査報告が行われていない場合も多い。一方、RC 造建築物の耐久性判断の基本は鉄筋腐食の有無であるが、一般にはコンクリートの中性化深さと令第 79 条や品確法の劣化対策評価方法基準等による鉄筋のかぶり厚さとの対比で行われている。しかし、中性化や塩分浸透等がかぶり厚さに達する事と鉄筋腐食の開始とは必ずしも同じではないため、中性化等がかぶり厚さに達した後も継続して使用する際の耐久性判断の基準がまだ十分に整理されていない。さらに、健全な継続使用のためには定期的な補修・改修が不可欠であり、施工後数十年を経た建築物の場合には繰返し実施されている場合もあるが、補修・改修した箇所が健全な状態で維持されているかの情報も十分に整理されていない。

本研究では、RC 造建築物を長期継続使用する上で、不可欠な建築物外皮全面の変状・損傷を簡便に確認する技術の開発、中性化等がかぶり厚さに達した後の鉄筋腐食予測のための技術資料の整備、及び補修・改修後の劣化評価に関する技術開発を目的とする。

#### (2) 研究開発の概要

本研究では、今後建築物を長期に継続使用する上で必要となる耐久性に関わる技術を開発することを目的とし、①建築物外皮の変状・損傷を容易に確認する技術と既存診断技術への支援システムの開発、②鉄筋腐食に関わるコンクリート中の中性化や塩分浸透に関する技術的検討、③補修・改修後の構造部材の耐久性評価に関する技術的検討を実施し、これらの成果を既存建築ストックの持続的維持管理に資する技術資料として提示し、公表する。

#### (3) 達成すべき目標

- 1) 建築物外皮の変状・損傷を容易に確認する技術と既存診断技術への支援システムの開発
  - ・無人航空機に撮影装置等を搭載した検査機器等を用いた劣化モニタリング技術の導入・開発を行い、建築物外皮の変状・損傷を早期に全面確認できる技術を開発する。
  - ・これら技術を活用して、建築物外皮の変状・損傷の状態を整理・分析し、既存診断技術に支援可能なシステムを提案する。
- 2) 鉄筋腐食に関わるコンクリート中の中性化や塩分浸透に関する技術的検討
  - ・既存建築物の調査とともに、試験体を用いた屋外暴露試験や促進劣化試験等により、コンクリートの使用材料や物性の影響による鉄筋腐食状態とコンクリート中の中性化や塩分浸透の進行を

予測するための技術資料を作成し、評価基準を提案する。

### 3) 補修・改修後の構造部材の耐久性評価に関する技術的検討

- ・既存建築物の調査とともに、試験体を用いた屋外暴露試験や促進劣化試験等に基づいて、補修された部位の劣化状況を定量評価するための技術資料を作成し、評価基準を提案する。

## (4) 達成状況

上記達成すべき目標の3項目について、以下の通り進捗と達成状況を示す。

### <H30年度の成果>

#### 1) 建物外皮の変状・損傷を容易に確認する技術と既存診断技術への支援システムの開発

##### ①建物変状・損傷のデータベース化

建築物を対象としてドローン等を活用して外壁や屋根の変状・損傷を調査する場合、前提条件としてドローンの飛行に対する安全運用と建築物へのアクセシビリティ（接近のし易さ）の精度検証が必要となった。これより、建築研究所が主導的に研究協力している日本建築ドローン協会にてドローンの活用に関わる基礎知識、ドローン技術と安全運用、建築物の施工管理・点検調査におけるドローンの安全活用を解説した「建築物へのドローン活用のための安全マニュアル」を作成した。また2018年9月に上記マニュアルを教材として、建築物へのドローンの安全活用を促進していくために「建築ドローン安全教育講習会」を開催した。この中で建築物を対象としてドローンの安全運用・管理を行う「ドローン飛行管理責任者」の役割を設けた。

建物の用途・高さ・部位に関わる事項として、建物外壁と屋根に分類し、変状・劣化の代表事例として外壁面にクラックスケールを貼り付け、ドローンに搭載したカメラ（一般：2000万画素、高解像度：1億画素）の視認性について実証実験により検証した。撮影距離5mにおいて2000万画素は1.5mm幅を目視することは難しい。1億画素ではクラックスケールの元画像よりは幅の端部が不鮮明になるが、幅0.25mm程度までは目視確認が可能である。さらに撮影距離5、10、15mの3条件について、クラックスケール画像を2値化処理した。1億画素では撮影距離5mでは0.2～0.7mm、距離10mでは0.55～1.45mm、距離15mでは1.5mm以上で、クラックスケールの基準幅を特定できると判断された。また、変状・劣化のm単位、cm単位、mm単位に分類して、地上38mからのドローンに搭載した可視カメラ（1億画素）により撮影精度の検証を実施した。

以上より、調査診断する上で必要となる変状・劣化の要求条件において、使用するドローン（機器）やカメラを選定することが重要と考えられた。

##### ②既存劣化診断への支援システムの開発

建物点検の省力化について、ドローンによる自動点検技術はその解決方法の一つとして適用可能と考えられる。これより自律制御型ドローンの開発と、搭載カメラによる効率的点検調査方法の提案をした。本研究ではGPSに依存しないカメラの画像情報により自己位置推定するSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)を活用した。ドローンの前方に搭載されたXY座標系における空間認識用のステレオカメラと高さ方向を認識する単眼カメラにより、建物点検に活用可能な完全自律制御型のドローンを共同開発した。PC上で設定したXZ座標系における飛行ルートに従ってドローンを自動で飛行させ、下方に向けられた単眼カメラによる地上の特徴点を見つけZ方向の位置を捕捉し、ドローンに搭載された2眼カメラが建物の梁と床部分の距離を推定し、その状況はPC上で色情報として表示させた。現段階では対象物への回避機能として画像認識技術が適用されているレベルであるが、今後はAI等を活用して変状・不具合の中質が可能となると考えられる。

#### 2) 鉄筋腐食に関わるコンクリート中の中性化や塩分浸透に関する技術的検討

##### ①中性化促進と塩分浸透促進試験

29年度からの継続で、鉄筋を埋め込んだ試験体について、中性化促進試験（9ヶ月）と塩分浸透促

進試験（6ヶ月）を実施し、埋め込まれた鉄筋の腐食状況について確認を行った。そして、その後に中性化深さの測定し、試験体を表層から、0～5、5～15、15～25mmでカットした後に塩分および亜硝酸の滴定を実施した。

#### ②屋外暴露試験による鉄筋腐食状況の検討

建築研究所のばくろ場にてばくろ試験（9ヶ月）を行った試験体について、①と同様に鉄筋の腐食状況の確認、中性化深さ測定、塩分および亜硝酸の滴定を実施した。

### 3) 補修・改修後の構造部材の耐久性評価に関する技術的検討

#### ①補修部における材料レベル・構造レベル試験体の物性の検討

当初各試験体について、物性試験を行う予定であったが、物性に関しては、文献調査によった。その結果、鉄筋が埋め込まれた試験体の付着性状は、腐食発生初期では付着強度が上がるが、鉄筋周囲にひび割れが発生するくらいに腐食が進行すると付着強度が低下することが示されている。なお、各地でばくろしている試験体（1年）について、中性化深さ測定、塩分測定、鉄筋の腐食状況の確認を行い、それぞれ、劣化の進行状況を把握した。

### <H28～30年度の成果>

#### 1) 建物外皮の変状・損傷を容易に確認する技術と既存診断技術への支援システムの開発

サブテーマ（1）の3カ年の成果（アウトプット）を次に記述する。ドローンに可視カメラ・赤外線カメラを搭載し、RC造建物をを用いて外壁・屋根のひび割れ、劣化状況の観察を行った。また、ドローンによる点検調査と既存点検（地上からの点検等）とのコスト・調査時間の比較検討を行い、ドローンによる建物点検への優位性を示した。また、非GPS環境下で飛行可能なVisual SLAMを利用したドローンの開発と実証実験を行い、その適用性について検討した。建築外壁・屋根のひび割れ・補修部を対象として、解像度の異なるカメラの性能の影響、撮影対象物からの離隔距離の影響について、取得した画像から撮影精度を判断した。これらドローンは非接触方式で画像により、建物外皮の変状・損傷を容易に確認するスクリーニングとして適用できることを示した。

研究の活用方法（アウトカム）について次に示す。H30年9月に（一社）日本建築ドローン協会（JADA）を設立した。本協会にて各種専門委員会を設置し、建築分野におけるドローン技術の活用について有識者と技術者とともに検討を開始した。さらに、日本建築ドローン協会にてドローンの活用に関わる基礎知識、ドローン技術と安全運用、建築物の施工管理・点検調査におけるドローンの安全活用を解説した「建築物へのドローン活用のための安全マニュアル」を作成し、2018年9月に上記マニュアルを教材として、建築物へのドローンの安全活用を促進していくために「建築ドローン安全教育講習会」を実施した。なお、「建築物へのドローン活用のための安全マニュアル」は、建築基準法第12条に基づく建築物の定期報告において規定されている外壁調査に関わる国交省基準整備促進事業T3「非接触方式による外壁調査の診断手法及び調査基準の検討」の報告書の中で、本マニュアルが参考資料・付録として引用される予定である。

さらに、学術分野では日本建築学会ではH29年度から毎年「建築ドローンシンポジウム」を企画し、これまで2冊の報告書にまとめ、本研究に関わる建物点検等の最新の技術情報を幅広く関係者に普及させる取り組みを行った。これら一連の成果は、日本建築学会、講演・シンポジウム、外部委員会、その他研究成果の最大化に向けた取組を幅広く公表を行った。

#### 2) 鉄筋腐食に関わるコンクリート中の中性化や塩分浸透に関する技術的検討

サブテーマ（2）の3カ年の成果（アウトプット）を次に記述する。本研究の成果として以下の評価基準を設けることが有効であると考えられる。

【塩分浸透】：鉄筋周辺の塩化物イオン量や亜硝酸塩量を評価指標とし、一定の値以下／以上とな

るよう管理する。具体例として、早期に鉄筋周辺部に腐食抑制に効果がある補修材を施工するとよい。

【中性化】：鉄筋周辺のコンクリートの含水率（あるいは湿度）を評価指標とし、一定の値以下となるよう管理する。具体例として、約3.5%以下とする調査結果が得られた。

文献調査、報告書等、そして本課題での鉄筋腐食状況の確認結果、実地調査結果を基に、コンクリートの中性化や塩分浸透と、その後の鉄筋腐食に関する知見をまとめた。

塩分に関しては、塩分が鉄筋位置に到達すると早期に鉄筋が腐食する可能性が高い。本課題では、塩分に対して鉄筋腐食抑制があると言われている亜硝酸リチウムモルタルを用いた検討を行っているが、現状では、塩分が内在している場合では、表層側（亜硝酸リチウムモルタル施工側）の鉄筋腐食は抑制されても、内部側では腐食する場合がみられる。そのため、鉄筋腐食の抑制には早期に鉄筋周辺部にそれらの材料が到達するように施工（注入等）する必要がある。

中性化に関しては、中性化深さが鉄筋位置に到達後、直ちに腐食することではなく、その進行は塩分の場合と比較して非常に緩慢である。また、屋外側では中性化が鉄筋まで到達した後、鉄筋が腐食しない場合と鉄筋が腐食する場合がある（本課題における調査では腐食していた）。一方、屋内側では中性化進行しても鉄筋が腐食していない場合が多い。これは、屋内側のコンクリート中の含水率が低いことが要因であり、その値は3.5%程度であった。つまり、屋外側であっても、表面からの水分（雨水等）の侵入を防ぎ、コンクリートの含水率を低くコントロールできれば、中性化がある程度進んだコンクリート建築物の長期供用も可能と考えられる。

また、文献調査および実験（暴露、促進および現地調査）に基づき、コンクリート中の鉄筋腐食状況を非破壊で推定するための社会実装が可能な新しい手法を2種類（鉄筋の自然電位/分極抵抗法、ダミー鉄筋の電気抵抗法）選定し、具体的な評価基準を得るための建研独自の耐久性評価試験用供試体を作製し、計測を開始した。なお、コンクリートの中性化後の鉄筋発錆に関する耐久性試験には長期間を要するため、次期指定課題においても測定を継続し、実用的な評価基準を得ることを目指す。

### 3) 補修・改修後の構造部材の耐久性評価に関する技術的検討

サブテーマ（3）の3カ年の成果（アウトプット）を次に記述する。本研究の成果として以下の評価基準を設けることが有効であると考えられる。

【補修後の耐久性確保】：既存躯体と補修材の界面に欠陥を生じさせない材料選定と施工標準。本研究の範囲では、既存躯体と補修材の界面を覆うような塗材の選定と施工が有効であった。なお、有効な材料選定と施工標準の確立のための具体的な評価指標・基準は、後継の指定課題における検討を踏まえて提案する。

補修・改修後を行った部材には、既存躯体と補修材に界面ができる。補修材自体は耐久性が高いために、それ自体が劣化して躯体の再劣化とはなりにくい。しかし、既存躯体と補修材が温度変化等に対して一体となって挙動するとは限らず、界面に隙間等が生じた際には、そこから塩分や炭酸ガスが浸透する可能性が高く、再劣化する恐れがある。また、防水性の高い仕上塗材を施工することでコンクリートへの塩分浸透が抑制されることが確認した。補修後は、その表面に防水性の高い仕上塗材を施工することで塩分等の劣化因子が浸透すること抑制されることから、補修後は、界面を覆うように仕上塗材を施工することが望ましい。

## 2. 研究評価委員会（分科会）の所見（担当分科会名：材料分科会）

### ①研究開発の成果が十分に得られているか。

以下に6名の評価委員の所見を示す。

- ・本研究開発の目標である①建築外皮の変状・損傷の確認技術と既存診断技術への支援システムの開発 ②コンクリート中の中性化や塩分浸透の技術資料作成 ③補修・改修後の構造部材耐久性評価

の技術資料作成 に関して、十分な成果が得られていると判断できる。

- ・ 設定した目標を十分に達成している。
- ・ 当初の3項目の目標を十分に達成していると考ええる。
- ・ 各研究課題に対して、計画通りの成果が得られている。
- ・ 研究開発の成果は、十分に得られている。
- ・ 研究開発の成果は概ね十分に得られている。研究成果は、建築外皮の簡便な検査、中性化や塩分浸透による鉄筋腐食予測、補修、改修後のRC建造物の耐久性と長寿命化のための技術資料として活用される。

### ②その他の評価（研究成果の発表状況、外部機関との連携等に関する評価）

以下に6名の評価委員の所見を示す。

- ・ 論文・学会での口頭発表、講演会・シンポジウム等での発表、雑誌・機関誌等への投稿・寄稿、技術指導・外部委員会への出席等による研究成果の発表は多数実施され、日本建築ドローン協会の発足、関連学協会・大学・国総研等との共同研究により十分な連携が認められる。
- ・ 成果の公表は十分であり、特にドローンに関する検討では公表や外部機関との連携は申し分が無い。
- ・ 急速に進歩したUAV（無人飛行機）の技術を、迅速に建築分野に取り入れ、既存構造物調査へのUAVの活用方法を検討するとともに、（一社）日本建築ドローン協会を設立させるに至ったことは大きく評価する。
- ・ 研究成果の公表や外部機関との連携も十分対応されていると評価できる。
- ・ 査読付き論文8編を含め、多くの論文発表がある点は、評価できる。また、他団体と協力して日本建築ドローン協会を設立するなど、外部機関との連携も十分に取れている。
- ・ 本研究の成果の公表は、論文、学会発表、講演会、シンポジウム、雑誌投稿、外部委員会出席、講習会開催等により十分行われている。国総研、協会、材料メーカー、建設会社、大学等の外部機関との連携も適切に行われている。

### ③総合所見

以下に6名の評価委員の所見を示す。

- ・ 本研究開発には、建築物の長期継続使用で必要となる耐久性に関わる以下のような技術を開発することを目的としている。①建築外皮の変状・損傷の容易に確認する技術と既存診断技術への支援システムの開発 ②鉄筋腐食に関わるコンクリート中の中性化や塩分浸透に関する技術資料作成 ③補修・改修後の構造部材耐久性評価に関する技術資料作成 これらの内容に対して、他機関との連携等を含めて、先行課題の成果を生かしつつ新たな調査・実験や検討による研究成果を得て、目標を達成していると判断できる。
- ・ ドローンに関する技術開発では、建築研究所が先導して建築物の調査に使う基盤を構築することができた。この分野の技術進歩に大きな貢献をしたものと評価される。また、RC構造物の中性化や塩害に基づく鉄筋腐食については、系統的な調査、実験研究を実施して十分な成果を得ており、施策への反映等が今後期待される。
- ・ 現在、マンション等の既存構造物の外壁調査では、建物全面に足場を構築し、時間をかけて調査を進めることが多い。将来的に、UAVの活用によってこのような作業の効率化がはかれれば、一般的なマンション居住者の費用負担も減ることになる。サブテーマ1は、被災時における建物調査の効率化も含め、UAVによる建物調査技術の推進は、国全体が得るものが大きいと考える。
- ・ 鉄筋コンクリート造の劣化事例の収集、劣化予測技術などの研究も進み、日本建築学会の標準仕様書の改定方針なども、中性化によるコンクリートの劣化のみで鉄筋コンクリート造の劣化を評価するのではなく、内在する鉄筋の腐食も含めて鉄筋コンクリート造の劣化を評価する方向に移行しつつある。サブテーマ2、3は、このような最新技術の動向を的確に捉えたものであると評価する。学協会との歩調もあわせ、最終的には消費者が、より合理的に設計された鉄筋コンクリート造建物

を購入できる方向に進めて頂きたい。

- ・本研究開発は、既存の RC 造の建物を長期に継続使用するために必要な耐久性を早期に判断するために建物の外観をドローンを使用して診断する技術開発、耐久性判断の基準である鉄筋腐食に関連する各種要因の評価、補修・交換後の耐久性評価など、RC 造の建築ストックを長期的に継続使用することを目標として実施され、当初の計画に基づく研究成果が得られたものと評価できる。
- ・持続可能な社会形成に貢献するために、既存建築ストックの維持管理に資する新たな劣化診断技術や鉄筋腐食に関わる耐久性の向上に資する技術的検討を行い、評価に値する成果を上げた。
- ・建物外皮の変状・損傷を容易に確認する技術と既存診断技術への支援システムの開発、鉄筋腐食に関わるコンクリート中の中性化や塩分浸透に関する技術的検討、補修・改修後の構造部材の耐久性評価に関する技術的検討の3課題について、概ね目標を達成している。

(参考) 建築研究所としての対応内容

- ・③総合所見「サブテーマ 2、3 は、学協会との歩調もあわせ、最終的には消費者が、より合理的に設計された鉄筋コンクリート造建物を購入できる方向に進めて頂きたい。」への対応  
⇒本終了課題に引き続き、平成 31 年度から実施予定の指定課題で継続して検討を進めるとともに、建築研究開発コンソーシアムにて「次世代鉄筋コンクリート造 (Next RC) に関する研究 (仮)」を立ち上げ、今後、RC 造建築物に必要とされる耐久性に関する要素技術、耐久性等関連規定とその実現方法についても研究討議を行う予定である。

### 3. 評価結果

- A 本研究で目指した目標を達成できた。
- ~~□ B 本研究で目指した目標を概ね達成できた。~~
- ~~□ C 本研究で目指した目標を達成できなかった。~~