

「建築材料の状態・挙動に基づくRC造建築物の耐久性評価に関する研究」

(平成31年度～令和3年度) 評価書 (終了時)

令和4年3月28日(月)
建築研究所研究評価委員会
材料分科会長 大久保 孝昭

1. 研究課題の概要

(1) 背景及び目的・必要性

RC造建築物の長寿命化あるいは延命化の技術的検討が、国あるいは関連学会等において積極的に取り組まれている。これら社会的要請に対する建築材料側の対応として、今後その使用が期待される様々な材料及び建築物の様々な環境条件に基づく劣化の進行状況の推定精度の向上、及び社会実装が可能な評価手法の検証や評価基準の提案等の広範囲な検討が必要となる。

RC造建築物の性能確保、特に構造性能や防耐火性能等の確保にも影響を及ぼすと考えられる耐久性確保の基本は、その構成材料の状態・挙動、すなわち鉄筋腐食とそれに伴うひび割れ発生抑制であり、これらは、RC造建築物の耐久性等関連規定、すなわち、コンクリートの中酸化・塩分浸透の評価と鉄筋のかぶり厚さの確保により実現されている。一方、中酸化や塩分等の鉄筋への到達と鉄筋腐食の開始とは必ずしも同時ではないことが実RC造建築物では散見され、中酸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十分には整理されていないといえる。さらに、今後その使用が期待される様々なコンクリートおよびその構成材料に対しても、現行のRC造建築物に関する耐久性等関連規定は、十分に対応できていないこと等が指摘されている。

そのため、今後RC造建築物における鉄筋腐食をより具体的・実用的かつ早期に推定・診断及び評価する手法の開発が必要である。そのためには、コンクリートの各種混和材等の構成材料の影響、及び中酸化・塩害・含水率等の影響を、時間的スケールで複合的に検討することが重要である。また、最近のAI、VR/AR、ドローン等の技術の実用化・高度化に伴い、建築材料や建築物の環境条件を踏まえた新築時の最適な材料設計の実施から早期の既存建築物の耐久性診断に至るまで、これらの技術は耐久性に関わる推定精度の向上や診断の効率化に寄与すると考えられ、今後、広範囲な活用が期待されている。例えば、建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こと等から、ドローン等が活用され始めている。

本研究では、RC造建築物を長期に継続使用する上で必要となる、建築材料の状態・挙動に基づく耐久性確保の方法、すなわち、鉄筋腐食とびひび割れの抑制に関わる評価手法(設計・施工・品管・診断)を整備することを目的とし、①中酸化や塩害による鉄筋腐食評価手法、②鉄筋コンクリートの耐久性に及ぼす構成材料の影響評価手法、③建築物の変状・損傷の早期確認と診断支援技術、の社会実装について検討し、その成果を技術資料として提供する。

(2) 研究開発の概要

本研究では、RC造建築物を長期に継続使用する上で必要となる、建築材料の状態・挙動に基づく耐久性確保の方法、すなわち、鉄筋腐食とびひび割れの抑制に関わる評価手法(設計・施工・品管・診断)を整備することを目的とし、①中酸化や塩害による鉄筋腐食評価手法、②鉄筋コンクリートの耐久性に及ぼす構成材料の影響評価手法、③建築物の変状・損傷の早期確認と診断支援技術、について検討し、これら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: 中性化や塩分浸透による鉄筋の腐食からコンクリートの劣化（ひび割れ）までを対象とした鉄筋腐食評価手法に関する技術資料
 - ・ 中性化や塩分が鉄筋到達、鉄筋腐食の開始、その後の腐食進行・ひび割れ発生まで、一連の建築材料の状態・挙動を整理する。
 - ・ 鉄筋腐食が及ぼす RC 建築物の性能評価方法を提案する。
- ②: RC 造建築物の耐久性評価に及ぼす各種混和材料の影響評価に関する技術資料
 - ・ 各種混和材料を用いたコンクリート内部の鉄筋の腐食条件を整理し、その評価基準を提案する。
 - ・ 最適化手法を用いた材料（調合）設計手法に関する技術資料を提示する。
- ③: 建築物の変状・損傷を容易に点検調査する技術支援システムを社会実装可能な水準で構築
 - ・ 3次元空間上で、建築物の変状・損傷を安全かつ効率的に点検調査可能なドローン技術を構築し、技術資料として提示する。
 - ・ ドローン等を活用して、建築物の変状・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開発し、技術資料として提示する。

(4) 達成状況

本研究では（4-1）中性化や塩害による鉄筋腐食評価手法、（4-2）鉄筋コンクリートの耐久性に及ぼす構成材料の影響評価手法、（4-3）建築物の変状・損傷の早期確認と診断支援技術の3つのサブテーマに分け、R3年度および第4期の成果（（4-1）と（4-2）は後期3年間の【総括】、（4-3）は前期・後期6年間の【総括】）について達成状況を示す。

（4-1）中性化や塩害による鉄筋腐食評価手法

1) 中性化や塩分浸透による鉄筋コンクリートへの影響に関する検証

①津波等により一時的に塩水を被ったコンクリートへの塩分浸透に関する検討

2020年度に水セメント比40、50、60%のコンクリート供試体について、塩水浸漬1日、4、13、26、52週後に屋内、屋外（雨掛かりあり）、屋外（雨掛かりなし）でばくろを開始、ばくろ52週（1年）までのデータを取得したが、浸漬後の塩分の変化（移動）はほとんどみられなかった。本実験は、ばくろ5年時（2023年度）、10年時（2028年度）に分析を行う計画である。現状では、一時的に塩水を被ったRC造建築物に関して、その後、すぐに鉄筋が腐食するような状況にはならないと考えられる。

②仕上材料による劣化対策の検討

コンクリートに17種類の仕上塗材を施工した供試体の促進中性化試験を実施し、それらの屋外ばくろ試験を実施している。また、仕上塗材について、新設および促進耐候性試験後に二酸化炭素透過度試験を実施し、促進中性化試験結果との関係から、仕上塗材の性能評価に基づいたRC造建築物の劣化対策に関する評価方法基準（案）を検討した。

2) 中性化および塩分の複合作用による鉄筋コンクリートへの影響に関する検証

①建築物の老朽化認定に関する検討

老朽化が進み維持修繕が困難なマンションの建替え等の円滑化を図るため、マンション建替法改正案に基づく老朽化認定基準を提案するための評価方法基準（案）の検討を行い、その成果が「要除却認定実務マニュアル」に反映された。

3) 鉄筋発錆状況の評価法に関する検証

②モデル建物を用いた30年曝露による検討

30年曝露試験で得られた成果は、RILEMで現在行われている委員会TC-D0C (Degradation of organic finishing materials and its relation to concrete carbonation.) の最終報告書に反映させる予定である。

③コンクリート表面のひび割れと鉄筋腐食に関する検討

コンクリート表面に仕上げがある場合を想定し、モルタル仕上げが施された壁試験体を用い、鉄筋腐食から表面における変状の顕在化までを電食により行い、目視や打診によるひび割れや浮き、剥離、剥落と鉄筋腐食の関係に関する検討を行った。その結果、かぶり厚さ 10mm と小さいと、主に、鉄筋に沿ったひび割れ、浮きが、かぶり厚さが 30mm 以上では鉄筋に沿ったひび割れが多くなった。

【総括（R 元年度～R3 年度の成果）】

「住宅の品質確保の促進等に関する法律」や「長期優良住宅の普及の促進に関する法律」に関する仕上塗材の中性化抑制効果の検討について、かぶり厚さを低減できる仕上塗材の評価基準（案）を提案した。また、査読付き論文にて公開予定である。老朽化が進み維持修繕が困難なマンションの建替え等の円滑化を図るため、マンション建替法改正案に基づく老朽化認定基準を提案するための評価方法基準（案）を検討し、検討内容が「要除却認定実務マニュアル」に反映された。検討内容の一部は査読付き論文にて公開された。

（4-2）鉄筋コンクリートの耐久性に及ぼす構成材料の影響評価手法

1) 鉄筋発錆状況の評価法に関する検証

①促進中性化後のばくろ試験

全断面が促進中性化により中性化した後にばくろを開始して、約 1.5 年経過時の自然電位を測定し、一部の供試体について鉄筋の腐食状況を確認した。その結果、自然電位は鉄筋に黒錆がない方が、また、内在塩化の多い方の自然電位が低くなった。なお、腐食状況はグレードⅡ程度であり、今後もばくろを継続する必要がある。

②混和材料が混入された鉄筋コンクリート供試体のばくろ試験

混和材料に高炉スラグ微粉末を用い（0、50、70%）、脱型時期を 3、7 日とした水セメント比 50、60% の鉄筋コンクリート供試体（かぶり 30mm）を作製し、促進中性化を行い、中性化深さ 30mm 到達後にばくろ（雨掛かりあり、雨掛かりなし）とし、鉄筋腐食状況を確認するための実験を行っている。現在、水セメント比 50% のスラグ 70%・3 日脱型、水セメント比 60% のスラグ 50 および 70%・3 および 7 日脱型についてばくろを開始した。

2) 最適化手法を用いた材料（調合）設計に関する検討

混合セメントを用いた鉄筋コンクリート造建築物（以下、RC 造建築物）や鉄筋コンクリート部材（以下、RC 部材）を対象とし、コンクリートの物理的耐用年数（中性化抵抗性）とコンクリートの製造時および供用時に排出される環境負荷量（CO₂ 排出量）削減に関する環境負荷評価の検討を行った。ここでは、建築研究資料 No. 91「建築のライフサイクルエネルギー算出プログラムマニュアル」で検討されたモデル建物（3 階建て RC 造）を対象として環境負荷量（コンクリート 1m³ および 1t あたりの CO₂ 排出量、年あたりの CO₂ 排出量、コンクリート使用材料における再資源投入量）の算出を行った。

【総括（R 元年度～R3 年度の成果）】

機械学習を用いた汎用の予測分析ソフトウェアを用い、スランプ予測や強度予測に関する検討を行い、機械学習による予測可能性を示した。また、環境配慮の観点から、物理的耐用年数と環境負荷量の関係についてシミュレーションを行った。本検討内容は、査読付き論文に投稿中である。

（4-3）建築物の変状・損傷の早期確認と診断支援技術の社会実装

1) 建築物の点検調査用ドローンプラットフォームの開発と普及

2) 建築物の変状・損傷に関わる 3 次元空間情報取得管理システムの開発

①ドローンを用いた超高層建物外壁点検調査

都市部における高層建物を対象として、ドローンを用いた効率的かつ安全な外壁点検調査の検討を行うために、高さ約 90m の高層マンション壁面を利用した係留式ドローンによる調査の可能範囲、調査時間、外壁の変状・ひび割れの撮影精度の比較検討を行った。双眼鏡による目視調査の場合、視認可能な

範囲は壁面全体面積の70%程度で、調査可能範囲に絞ると地上に近い約20%となった。一方、ドローンによる調査では壁面全体の調査が可能であった。一方、ひび割れの抽出について、ドローンによる調査では高層階で検出できていたが、低層階では確認できなかった。

②建研・中野区・JADA・JUIDAによる共同研究

建築研究所と中野区、日本建築ドローン協会及び日本UAS産業振興協議会は、ドローンを活用した共同研究の実施に向け、相互協力に関する覚書を2021年5月に締結した。また、中野区建物および敷地を用いて都市部におけるドローンの利用に関わる実証実験を行った。実験1では道路に面した高層建物外壁について、ドローンを使用して安全に外壁点検可能かを検証した。実験2ではドローンを中野サンプラザから離陸し中野区役所屋上に着陸し、別建物屋上に緊急着陸ができるかを検証した。これら成果をもとに、今後、「都市ドローン研究開発コンソーシアムの設立（案）」、あるいは高層建物等へのドローン安全飛行技能教育の実装に繋げていく予定である。

③狭所空間の点検調査を可能とするマイクロドローンの技術開発

日本建築ドローン協会の協力を得て、マイクロドローンの活用に関するアンケート調査（計40件）を実施した。屋根・床下・EV設備点検へのマイクロドローン活用の期待が高い。マイクロドローンの課題に関しては、バッテリーが回収できないリスク、電波障害、操縦技能など広範囲にわたり、各種ガイドラインの整備や人材教育が必要であると考えられた。マイクロドローン用の模擬空間モデルを製作し、その模擬空間に対してマイクロドローンを飛行させて性能検証を行った。実証実験により、狭所空間において産業用5.7GHzマイクロドローンの有効性が確認されたが、その操縦には高い技能が要求されることが示された。

④建物被害状況把握のための災害支援ドローンシステム開発

つくば市との包括共同研究の一環として実施した。実験では災害状況を想定し、災害対策本部から本研究で開発した複合ドローン（親機+子機）を離陸させ、親機は被災建物周りの状況を状況把握し、親機から離脱した子機は被災建物内部の調査を行うことを想定して実証実験を行った。親機の上に汎用小型ドローンを搭載して、つくば市役所屋根からの子機搭載親機飛行→訓練棟前からの子機離脱→訓練棟内部の子機屋内飛行とマネキン撮影→訓練棟前への子機の親機帰還までの一連の調査が可能であることを示した。一方、開発したVSLAM・LTE回線・自動制御子機を用いた場合、LTE回線遅延によりドローンの制御が困難となり今後の改善点として挙げられた。

⑤ドローン飛行管理用MRシステムの開発

前年度に引き続き、MRによる外壁点検のドローン操縦管理技術開発に関わる実証実験を実施した。複数の検査員を用いた実験により、目視では飛行中のドローンの位置を認識しにくいことを明らかにした。そこでドローンに搭載したVisual SLAM情報により得た位置情報を直感的に分かりやすく表示するMRシステムを開発し、比較的遠距離からもドローンの飛行位置を認識しやすくすることが可能となった。

⑥建設作業型ロボットハンド×AI×ドローンシステムの開発

ボルトの教師データをAI（プログラム）に学習させ、飛行実験により、AIカメラによるボルトの認識・ロボットアームの自動作動・ボルト位置までのドローンの自律制御まではできた。しかし、ドローンの飛行状態でボルトをロボットハンドで掴むためには高い飛行安定性とロボットハンドを掴む精度が求められることが分かった。

⑦市販AIドローンの活用の検討

市販のAIドローンにより、建築研究所6階建物壁面を対象に、現場で自動飛行から撮影状況確認まで一連の作業の性能検証を行った。AIドローンによる効率的な点検調査が可能と考えられた。

⑧定期報告制度における赤外線調査（無人航空機による赤外線調査を含む）による外壁調査ガイドライン（案）および⑨赤外線+ドローンによる建物外壁点検教育映像制作（動画）

日本建築防災協会が主体となり、建築研究所は委員会に参画し、建築物の定期調査報告関連告示改正に関わるガイドライン（案）及び、ガイドライン（案）を補完するための動画教材を作成した。

その他

ドローンの社会実装に向けて、以下の学術・産業分野に関わる活動を行った。

- ⑩2021 年度日本建築学会研究協議会開催「ドローン技術の社会実装」
- ⑪日本建築ドローン協会「建築物へのドローン活用のための安全マニュアル」改定
- ⑫日本建築ドローン協会・建築ドローン安全教育講習会実施

【総括（第4期中長期計画のプログラム（計6年間）の成果）】

第4期中長期計画のプログラム（計6年間）の成果は、建築分野におけるドローンの社会実装に向けて、「産官学領域において建築ドローン分野のプラットフォームを創成した」ことにある。①建物点検調査に関わるドローン技術の開発に焦点を絞り、H28 年度建築研究所指定課題におけるドローンの研究課題の立ち上げを起点として、日本建築学会にて「UAV を活用した建築保全技術開発WG」を設置し、国では建築基準整備促進事業 T3・NEDO 事業における法 12 条の赤外線装置搭載ドローンの利用の技術的検討を実施した。そして産業分野では（一社）日本建築ドローン協会を設立し、ドローン利用の安全教育や人材育成を行った。また、中野区等とのドローン共同研究の連携も行った。②災害調査においては SIP 事業を通して被災状況把握のためのドローンの開発や名古屋市、つくば市との研究連携による実証実験を行った。③ドローンの融合技術として AI、XR 等のデジタル技術の開発も行い、ドローン利用の可能性を技術的に示した。アウトカムとして、平成 20 年国土交通省告示第 282 号の一部改正（2022 年 4 月：建築物の定期調査報告における調査及び定期点検における点検の項目、方法及び結果の判定基準並びに調査結果表を定める件の一部改正（※無人航空機を含む））について、定期報告制度における赤外線調査（無人航空機による赤外線調査を含む）による外壁調査 ガイドライン（案）等の作成を通して、建築研究所の立場で貢献した。

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 5 名の評価委員の所見を示す

- ①十分な成果が得られている。
- ②各研究課題に対して、計画通りの成果が得られている。
- ③本課題によって、無人航空機が使えるように「建築物の定期調査報告関連告示」を改正できたこと、また「要除却認定実務マニュアル」に老朽化の認定基準案を反映できたことは、大きな成果と考えている。研究成果としては十分と思われる。
- ④十分な成果が得られていると思います。
- ⑤中性化、鉄筋腐食に関する RC 試験体の耐久性評価に加え、実際の建築部材を想定した複層部材の耐久性評価にも取り組んでおり、新しい知見が得られている。ドローンを用いた実建築物の検査技術については幅広い研究開発を行い、告示の基盤となる成果を挙げており、高く評価される。

（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 5 名の評価委員の所見を示す

- ①研究成果は広く公開されている。外部機関との連携、技術的支援や普及のための活動等、成果の最大化のための取組がなされた。
- ②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。
- ③3 年間で査読付 15 件を含 91 件の論文、学会発表があり、内容のレベルも含め、十分な研究成果が得られていると考える。また、講演会、雑誌等でも 39 件の発表があり、様々な場を活用して情報発信にも努めていると考える。外部機関との連携に関しても、45 件の技術指導、外部委員会への出席等があり、十分に機能したと考える。
- ④マニュアル・指針等への反映、査読付論文・雑誌への発表、技術指導、外部機関との連携、特許取得

など、すべての面で活発に行われていると思います。

- ⑤日本建築ドローン協会、建築研究開発コンソーシアムなど、関連の研究開発機関との連携は密であり、建築学会等の学協会での論文公表も高く評価される。

(3) 総合所見

以下に5名の評価委員の所見を示す

- ①RCの耐久性研究に関しては、現象把握、再現性が難しい鉄筋腐食実験、外的要因の把握実験など評価できる。継続課題として、外的要因と材料性能低下との関係の推定式、評価式を検討し、実測データとの整合などその有効性を検証して欲しい。
ドローン開発に関しては、今後の建物点検の効率化に有効な技術である。取得画像による劣化診断評価の妥当性、告示制定への技術的資料提供など成果が得られた。打診等一部接触、微破壊に関して継続的な検討が望まれる。
- ②本研究開発は、RC造建築物を長期間継続使用するために、耐久性の判断基準である鉄筋腐食に関連する各種要因の評価、耐久性に影響を及ぼす構成材料の影響評価手法、さらに、建物の耐久性に関連する変形や損傷等をドローンを使用して診断を行うなどの研究開発が、外部関連機関等との連携のもとに実施され、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。さらに、ドローンを用いた建築保全技術の研究成果等は、次年度から実施される「建築物の安全・維持管理に資するドローンを活用した建築保全技術の開発」への活用が期待される。
- ③本研究課題では、鉄筋コンクリート造建築物の耐久性評価に大きく貢献できる多くの実験結果などを取り纏めたと考えている。この結果をもとに、関連告示の改正、マニュアルへの認定基準案の反映できたことは十分な研究成果に値すると考える。
- ④建築物の耐久性評価に関する重要な研究に対して、しっかりと成果をあげられていると思います。特に、RCの中性化や塩害による鉄筋腐食評価手法が「要除去認定実務マニュアル」に反映されたこと、ドローンを活用した建築物の安全・維持管理に関連して、建築物の変状・損傷の早期確認と診断支援技術が告示改正という形で合法的に行えるようになったことが素晴らしいと思います。セメントを用いないコンクリートのような材料を使用する傾向が高まっていると思われるので、このようなものへの対応も少し意識してもよいかと思えます。ドローンを活用した建築物の安全・維持管理に関しては、これから国際的に日本が先導してゆけそうで、大いに期待したいと考えます。特に、接触方式、係留技術にかかわる研究開発がうまく進むと社会的に大きな役割を果たしてくれると思います。
- ⑤RC造建築物の耐久性に関しては、大学や民間企業の研究所が実施できない課題に取り組んでおり、高く評価できる。後継の研究課題も設定されており、今後、劣化評価式の提案や後世に残す大型試験体の作製・暴露試験の計画など、建築研究所として相応しい研究と判断される。ドローンについては、建築分野におけるドローンの有効活用に関する技術の定着は、まさに建築研究所の研究成果が源となっており、本研究成果は高く評価される。後継の研究にも期待が大きい。

(参考) 建築研究所としての対応内容

・総合所見①への対応

- 「継続課題として、外的要因と材料性能低下との関係の推定式、評価式を検討し、実測データとの整合などその有効性を検証して欲しい。」について、本研究の後継課題「CO₂排出量削減に寄与するコンクリートに関する研究 (R4~6年度)」において、外的要因と材料性能低下に関して、実測データと整合性がとれるような推定式や評価式の検討を行います。
- 「打診等一部接触、微破壊に関して継続的な検討が望まれる。」について、本研究の後継課題「建築物の安全・維持管理に資するドローンを活用した建築保全技術の開発 (R4~6年度)」では「接触・破壊方式ドローンによる建築保全技術の開発」のサブテーマを設定し、研究開発と実証実験を行い、社

会実装可能となるような取り組みを行う予定です。

・総合所見④への対応

- 「セメントを用いないコンクリートのような材料を使用する傾向が高まっていると思われますので、このようなものへの対応も少し意識してもよいかと思えます。」について、本研究の後継課題「CO₂排出量削減に寄与するコンクリートに関する研究（R4～6年度）」では、現行のルール内で実現できるようなセメントの削減に関する検討を実施する予定ですが、セメントを用いない場合についても意識して進めるように致します。
- 「接触方式、係留技術にかかわる研究開発がうまく進むと社会的に大きな役割を果たしてくれると思えます。」について、本研究の後継課題「建築物の安全・維持管理に資するドローンを活用した建築保全技術の開発（R4～6年度）」では、係留技術の実用化及びこれら技術を利用した接触・微破壊方式の技術開発を行い、横断的に各団体と連携し各技術の実装を行う予定です。

3. 評価結果

■ A 研究開発課題として、目標の達成を見込むことができる。

~~□ B 研究開発課題として、目標の達成を概ね見込むことができる。~~

~~□ C 研究開発課題として、目標の達成を見込むことができない。~~