

「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（年度）

令和3年2月22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、コンクリートの中性化・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、中性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、及び中性化・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中性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中性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) 令和2年度の進捗・達成状況

(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コンクリート内部の温湿度と鉄筋腐食の関係に関する検討

鉄筋コンクリート供試体に関するばくろ試験を2018年度より北海道、茨城、沖縄で継続している。本年度、ばくろ3年時の試験を実施し、かぶり厚さ10mm部分の鉄筋腐食グレードⅡ～Ⅲを確認した。本結果から、次年度はコンクリート内部の温湿度と鉄筋腐食の関係について検討する。

②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

塩水浸漬1日、4、13、26、52週後の屋外ばくろ26、52週までのデータを取得した。現状では、浸漬後のばくろ期間26週と52週では明確な差はみられない。本実験に関しては、次回ばくろ5年時（2023年度）に分析を行う計画である。

③仕上材料による劣化対策の検討

国土交通省建築基準整備促進事業「M8 仕上塗材の性能評価に基づくRC造劣化対策の評価方法基準等の合理化に関する検討」の事業者（芝浦工業大学、建築研究振興協会、日本建築仕上材工業会）との共同研究により、長期優良住宅認定基準等の検討を開始した。ここでは、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およびばくろ試験を実施している。また、仕上塗材に関して、新設および促進耐候性試験後に二酸化炭素透過度の試験を実施している。上記結果より、材料劣化を考慮した長期優良住宅の認定基準（案）の作成を行う。

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

複合劣化については、昨年度の調査で西日本地域の築後50年程度経過した公営住宅において、鉄筋腐食による錆汁が表層にみられるものが確認された。今年度は、国土交通省建築基準整備促進事業「C1 マンションの老朽化認定に係る使用安全性評価基準等に関する検討」の事業者（建築研究振興協会、八洋コンサルタント）との共同研究により、その公営住宅を含めて10棟の集合住宅の解体前調査を行った。ここでは、コア抜きや研り等の破壊調査の前に、目視調査により建築物の劣化度を評価するというところを行い、その後の破壊調査の結果との関係から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）の作成を行っている。目視調査では、住戸毎にグリッド分けを行い、

その後、部材毎に仕上材の劣化、腐食に伴うひび割れ、腐食に伴う浮きや剥離といった分類分けをして、点数付けを行い、劣化度の数値化している。今後、この結果から、評価方法基準（案）を作成する。

3) 鉄筋発錆状況の評価法に関する検証

①モデル建物をを用いた 30 年曝露による検討

モデル建物の西面に施工されていた 26 種類の仕上材料を施工したコンクリートの中酸化深さおよび腐食深さ（コロージョンインディケータ法）についてデータを整理した。曝露前に促進中酸化を行った場合の腐食深さが大きくなる傾向にあること、また、中酸化後に腐食が進行することが再度、確認された。

②コンクリート内部の湿度予測に関する検討

鉄筋腐食には鉄筋周辺の水分が影響することから、1) ①で取得しているコンクリート内湿度のデータについて時系列分析を行うことによるコンクリート内部の湿度予測手法について検討した。ここでは、測定期間約 90 日分のデータを回帰分析して算出したパラメータ、そして、気象データを用いてその後の 60 日分の予測を行った。今回検討した手法を用いれば、アメダスデータからコンクリート内の温湿度予測の可能性があることが示された。今後は、予測モデルを改良し、適用範囲の拡大を計画している。

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

ここでは壁試験体を用いて、電食による鉄筋腐食から鉄筋が極度に腐食した際のコンクリートの剥離、剥落性状について検討を行った。検討の結果、コンクリートの剥離、剥落性状はかぶり厚さによって大きく異なることを確認するとともに、剥離、剥落の急速な進行を目視から判断できる可能性を示した。本件については、仕上材がある場合についても検討を行う必要がある。

(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

前年度より継続して促進中酸化養生を実施していた供試体について、令和 2 年 9 月にほぼ全断面が中酸化したことを確認し、屋内外環境でのばくろを開始した。本実験では、コンクリート中の塩化物量および鉄筋表面の黒錆の有無を要因として検討を行っているが、これらの要因が測定結果に影響している。また、混和材料が混入された鉄筋コンクリートの鉄筋発錆状況に関して文献調査等を行った結果、建築分野における研究はほとんど実施されていないことから、今年度、混和材料として高炉スラグ微粉末を用いた供試体を作製した。ここでは、基整促 M1 の調合をもとに鉄筋入り供試体を作製した。

2) 最適化手法を用いた材料（調合）設計に関する検討

機械学習を用いた汎用の予測分析ソフトウェアを用いて、過去の文献をもとにフライアッシュを用いたコンクリートの圧縮強度の予測モデルを作成し、予測精度の検証を行った。学習用データは 28 調合、検証には学習用データと異なる 6 調合を用いた。その結果、精度よく圧縮強度を予測できることが確認できた。

(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) ドローン等を活用した建築物点検調査の自動化技術の検討 及び 2) 現場情報を効率的に取得・分析するための画像診断技術の開発

屋外側と屋内側における変状・損傷の早期確認と支援技術の社会実装を実現するために、屋外使用（非接触式、接触・破壊式）と屋内使用に分類し、ドローンを活用した点検調査手法について技術開発と成果の実装を目指した。さらに各点検技術に対してドローンの社会実装を図るため、共同研究による研究実施、及び日本建築ドローン協会と連携し専門委員会による組織的な取り組みにより、ガイドラインの検討や教育事業について検討を行った。

①外壁タイル張り点検におけるドローン開発と運用

建築基準法 12 条点検に関わるタイル張り外壁点検のための赤外線装置等搭載ドローンの開発と外壁

調査の実証実験の実施、及び建築物外壁調査実施マニュアル（案）を作成した。ドローンについては、建物や周囲環境条件に応じて GPS、Visual SLAM、係留ガイド方式を適切に選択することで安全安心なドローンの運用を行う制御方法を開発し、実物件 3 棟を利用してドローン飛行制御の検証実験により高い飛行精度であることを確認した。また、開発した赤外線装置においては地上の高性能カメラと同程度の検出精度を示し、ドローン飛行時のプロペラや上空の風の影響を受けない安定した赤外線画像を取得することができた。

②一般建築物用のドローン点検システムの開発

ドローンによる共同住宅の法定点検、安全点検、計画点検、緊急点検において、ドローンを通常業務として導入するための現実的かつ設計的観点から研究を行った。ドローンに関わる関連マニュアルの情報収集、及び既存点検とドローンの点検の利点・欠点を整理し、ドローンによる点検手法の導入或いは既存点検との併用技術について提案を試みた。今後、これら成果は管理会社における実建物へのドローンの導入への普及を促す予定である。

③MR による外壁点検のドローン操縦管理技術の開発

壁面前に HoloLens を通して 3D メッシュホログラムによるドローンの飛行ルートを表示し、点検時のドローンの飛行精度を Visual SLAM(映像から環境の 3 次元情報とカメラの位置姿勢を同時に推定) 情報により管理する MR 技術を開発した。今後、これら成果をドローンによる建物外壁点検時の操縦の精度確認だけでなく、関連団体におけるドローン飛行の人材育成教育のために普及させる予定である。

④微破壊・破壊試験へのドローンの適用性の検討

ドローンにより接触・(微)破壊調査等を可能とするドローン運用技術の開発を行った。ドローンによるドリル削孔が可能とする技術の一環として、ドローンが壁面上を安全かつ自由に移動な 4 点係留による実証実験、及びドリル削孔に必要な反力について計算・実験を行った。今後はドローンを適用した微破壊・破壊試験の開発の改良と実験を繰り返し、現場で適用可能な新たな技術開発として展開する予定である。

⑤屋内狭所空間におけるマイクロドローンの活用の検討

前年度に引き続き、屋内特に建築狭所空間の点検において、200g 未満のマイクロドローンを適用することで点検調査の効率化を図るためのドローンの選定や実証実験を実施した。また日本建築ドローン協会に建築狭所空間ドローン利活用 WG を設置し、建築狭所空間におけるマイクロドローン活用ガイドライン、操縦管理技能講習など業務に必要と考えられる項目について検討した。

⑥他ドローンに係る研究・活動

・ドローンによる建物被害状況分析システムの開発

内閣府 SIP 事業「リアルタイム建物被害状況分析システム」のソフトウェアを改良し、発災後 2 時以内における建物被害状況をドローンによりリアルタイムで観測し、被災した場所（ブルーシート等）を地図上にマッピングする技術開発の改良を行った。また建物火災時によるドローンの有効性について検証した。

・ドローン制御システムにおけるセキュリティの検証

ドローン制御及び取得したデータ情報の安全性を検証するため、ドローン制御システムにおける情報セキュリティ検証実験を行った。実験ではドローンを制御・通信をする Wi-Fi、ハードウェア、ソフトウェアに対するセキュリティホールの侵入試験を実施し、セキュリティレベルの等級付けをした。

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）

項目ごとの所見

- (1) 背景（目的・必要性）及び目標とする成果、成果の活用方法が国の方針や社会のニーズに適合しているか。研究開発の計画が具体的に立案されているか。

以下に 5 名の評価委員の所見を示す。

- ① RC建築物を長寿命化するための部材の耐久性に関する検討および検査の合理化のためのドローン技術の開発は、社会ニーズに合致した重要な研究課題であり、まさに建築研究所が先導して実施すべき課題である。
- ② RC構造物の耐久性向上は持続可能な社会を達成するための重要なテーマであり、本テーマは社会のニーズに適合している。研究開発の計画は具体的に立案されている。
- ③ RC造建築物の長寿命化あるいは延命化の技術的検討は社会的要請が高く、これに対する具体的な目標が示されており、それらの評価指針及び成果の具体的な活用方法が明確に提示され、これに基づき研究開発が具体的に立案されている。
- ④ 背景及び目標とするRC造建築物の長寿命化等は、持続可能な社会を達成するための国家政策のひとつであり、成果や成果の活用方法が国の方針や社会のニーズに適合している。また、研究開発の計画が具体的に立案されている。
- ⑤ 様々な観点から建築ストックの活用が検討されている中で、主にマンションなどで用いられるRC造建築物の長寿命化あるいは延命化の技術的検討は重要な課題の一つとなっている。これに対する法整備も進んでおり、本研究は、そのような国の方針に沿った課題であると考える。また、研究開発の計画も、現在の市場のニーズに合わせた具体的なものであると考える。

(2) 他機関との関係等、効果的かつ効率的な研究のために必要な体制が取られているか。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ているか。

以下に5名の評価委員の所見を示す

- ① 他機関との連携は十分になされている。これまで建築研究所の先輩（性能指向型の耐久性（白山先生、上村先生など）、耐久性総プロ（友澤先生、榎田先生など）の成果を踏まえて活用するとともに、他大学・機関等の研究を調査し、これまで以上にリーダーシップを発揮していただきたい。
- ② 本研究は、外部機関との連携が計画されており、効果的かつ効率的な研究のために必要な体制が取られている。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ている。
- ③ 学会、研究会等との連携および協会との共同研究等を通じて効果的かつ効率的な研究が行われている。また、学会発表、雑誌、機関誌等への投稿により、研究成果の公表を行うとともに、講演会、シンポジウム、技術指導等を通じて成果の最大化のための取組がなされている。
- ④ 産官学など他機関との関係等、効果的かつ効率的な研究のために必要な体制が取られている。また、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ている。
- ⑤ 関連団体、大学、企業等と連携しながら研究を進めており、効率的な体制が取られていると考える。特に、ドローンを活用した外壁調査の分野では、業界全体の研究を牽引していると考える。また、コロナ禍であっても積極的に論文発表、技術指導、外部委員会への参加などを実施しており、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ていたものとする。

(3) 研究開発が目標に向けて順調に進捗しているか。

以下に5名の評価委員の所見を示す

- ① 目標に向けて順調に検討が進んでいる。
- ② 研究開発は目標に向けて順調に進捗している。
- ③ 設定された3つの課題について、研究開発が目標に向けて順調に進捗している。
- ④ コロナ禍にもかかわらず、個々の研究課題は目標に向けて順調に進捗し、有意義な成果が得られている。

- ⑤ コロナ禍であっても当初目標どおりに順調に進捗したと考える。

総合所見

以下に5名の評価委員の所見を示す

- ① 研究目標や進展状況は非常に評価できる。特にドローンに関しては対外的な成果の公表も十分である。委員会の折に少しコメントしたが、建築物の寿命を延ばすためには、「劣化予測とその予測に応じた予防保全、そして検査・診断を多くの建築物に適用しながら技術を高めていくこと」が必要な時期ではないかと常々思っている。この取組みを実施できるのは国内では「建築研究所の材料研究グループしかない」とも思っている。この分野の技術発展に貢献する成果を期待する。
- ② RC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は評価できるが、実験推進と並行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随時検証し、最終年度での評価法提案に結びつけてほしい。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となる。打診等一部接触、微破壊に関して新たな方法の提案は評価できるが、いずれも反力が鍵となる。ドローンと壁面との定着について、より効率的、確実な方法が確立できると良い。
- ③ 本研究開発は、①中性化や塩害による鉄筋腐食評価法、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サブテーマよりなり、それぞれ研究開発目標に向けて研究が順調に進捗している。最終的には③で開発された技術が①および②で開発された評価法と効果的にリンクして、建築材料や建築の環境条件を踏まえた材料設計からの耐久性診断の精度の向上および診断の効率化の実現に向けて成果がとりまとめられることが期待される。
- ④ 本研究開発は、RC造建築物を長期間継続使用するために必要な耐久性に関連する鉄筋腐食評価や各種要因の影響評価、さらに、ドローンを使用した建物診断技術の開発等を行うことが目的であり、中間年度である今年度は、当初計画に基づき研究等が実施され、成果が得られたものと評価できる。
- ⑤ 建築物ストックの活用に資するRC造建築物の長寿命化あるいは延命化の技術的検討に関しては、スクラップ・アンド・ビルドからの脱却には極めて重要な研究開発と考えている。また、ドローンによる外壁調査に関しても、現在、多くのマンションなどで総足場を架設して実施されている外壁調査に部分的に置き換わることができれば、省力化や作業の安全性の向上などに寄与するものとする。いずれの研究開発についても、今後の進展に期待する。

(参考) 対応内容

・総合所見①への対応

本研究の成果が関連基準の基礎資料として資すること、並びに社会実装可能なレベルで展開できるように、最終年度においても建築研究所が中心となり、産官学連携並びに異分野連携によりとりまとめていく所存である。

・総合所見②への対応

2020年度のばくろ試験で鉄筋腐食が確認されたので次年度は、その結果および外的要因である水分との関係について整理し、評価式を提案、また、検証を行い、妥当性を検証する所存である。

ドローンの開発と研究に関しては、壁面に対して（微）破壊が伴うドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験やアンカー施工等の作業において、各種試験機を搭載したドローンにより3次元空間上で実施が可能となる移動方法・固定方法・作業時の反力等を総合的に検討・開発し、実証実験により検証していく所存である。

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。~~