

# 「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2年2月10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の抑制であり、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) 平成 31 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

- ・黒錆を除去したφ13mm 丸鋼がかぶり 10、20、30mm で埋設された水セメント比 60%のコンクリートに薄塗材 E、防水形複層 E を施し、北海道、茨城、沖縄でばくろを継続して行っている。ばくろ後 1 年程度経過した試験体の湿度変化の結果、外部からの水分供給の影響がかぶり厚さによって異なることが確認された。また、雨掛りや仕上種類の影響を比較した結果、防水形複層 E は水分移動抑制効果が極めて高いこと、薄塗材 E では仕上無しと同程度に乾燥が進行すること等の特性を確認した。
- ・水セメント比を 3 水準に変化させたコンクリートについて 1 日～1 年の 6 水準で塩水浸漬後、屋外曝露試験を開始した。試験の結果、塩水浸漬期間が長くなるとコンクリート内部に浸透する塩化物量も多くなった。曝露開始後は、水セメント比が高くなると表層の塩化物が内部に浸透しやすくなる傾向を示した。なお、雨掛かりの有無による差は現状ではみられない。
- ・セメント種類、鉄筋種類、水セメント比等の条件を変えた鉄筋コンクリート供試体の劣化試験を開始するのに先立って、セメント硬化体の用いた基礎的検討を行った。普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント（B 種、C 種）を用いた実験の結果、中性化後の水分拡散係数はセメント種によらず同程度のオーダーとなったこと、平衡含水率曲線は水セメント比やセメント種類によらず同様の形状を示した。

##### 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

- ・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ついては、文献調査を行った結果、飛来塩分と中性化の複合作用による劣化は稀であり、内在塩分と中性化の複合作用による劣化が主であった。また、文献調査を行った範囲では、この複合作用による劣化は西日本地域で 1986 年のコンクリート中の塩分総量規制前に建設された構造物にみられたものであり、塩分総量規制以降の構造物にはみられていないことから、新たに供試体を作製するのは再考することとした。

##### ③ 鉄筋発錆状況の評価法に関する検証

- ・促進中性化養生中の供試体に対して、自然電位／分極抵抗法、およびダミー鉄筋の電気抵抗の評価法および供試体内部の含水状況に関する測定を実施し、屋内気乾環境におけるコンクリートの

乾燥挙動、および自然電位および分極抵抗（腐食速度）の測定値に及ぼす湿度の影響を評価した。測定結果から、コンクリート表面の乾燥は自然電位および分極抵抗の計測結果に大きく影響すること、および黒錆の有無および塩化物含有量の違いの影響が自然電位の測定結果に顕著となった。

- ・ 様々な仕上材を施したコンクリートにより構成されたモデル建物のばくろ 30 年時における仕上材の劣化状況の把握、中性化深さおよび腐食深さ（コロージョンインディケータ法）の測定を行った。その結果、塗圧が厚い、防水効果が高いとされる仕上材を用いることにより、中性化および腐食深さが抑制されることが確認された。また、腐食深さと中性化深さの関係は、中性化が到達した地点において、ある程度の時間が経過した後に腐食が開始することが明らかとなった。

#### （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

- ・ 本検証に関しては、普通コンクリートを用いた検討に、混和材料を用いたコンクリートを追加して行う計画をしている。コンクリートの全断面が中性化し、ある程度ばくろを行った後に供試体を作製し、試験を開始する予定である。

##### 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、コンクリートの調合設計時において予測の難しいスランプフロー値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 36 調合とし、検証用には学習用データと異なる 3 調合を用いた。計算の結果、学習用データ数が非常に少ないにもかかわらず、精度よくスランプフロー値を予測できた。

#### （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

##### ①3次元空間において建築物の変状・損傷情報を取得するための技術情報の収集

- ・ ドローンの安全運用に関わる仕様書等の作成と実務者教育の実施

日本建築ドローン協会（JADA）と共同で以下のマニュアル・仕様書等を作成した。

- a) 「建築ドローン標準業務仕様書（案）【点検・調査編】」の作成
- b) 「建築物へのドローン活用のための安全マニュアル（第2版）」の改訂
- c) 「居住者から見た建築物調査時等のドローンの評価手法研究会報告書」の作成
- d) 建築ドローン安全教育講習会の実施
- e) 建築ドローン安全教育講習レベルアップ研修会の立案と実施

- ・ ラインガイド式によるドローンの安全運用技術の開発

建築研究所の6階建て木造住宅実験棟を用いて、実験条件は垂直方向に釣糸を張ったラインにドローンを繋いだ時の飛行安定性を飛行軌跡と撮影画像の観点から評価を行った。実験の結果、ラインドローンを用いた場合、飛行精度と撮影精度が高くなることが示された。

- ・ MR（複合現実）を適用したドローンの安全飛行技術の開発

建物の壁面調査を対象とし、壁面前にHoloLensを通して仮想の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、外壁点検時のドローンの飛行精度をGPS位置情報により視覚的かつ定量的に把握可能なMR技術開発を行った。

##### ②ドローン等を活用した調査技術の適用範囲と開発すべき技術要素の抽出

- ・ ドローンの自動巡回システムと被災建物の位置情報システムの開発

平常時から災害時までの都市空間の状況を自動的にリアルタイムで分析するドローン技術システムを開発し、実証実験によりドローンを事前に設定した飛行ルートに従って飛行させ、被災した建物の位置を特定し地図上にマッピングすることができた。

- ・ 狭所暗所空間におけるマイクロドローンの活用の提案

重量 200g 未満のマイクロドローンを用いて狭所暗所空間の実証実験により、調査精度の確認

と課題を抽出した。飛行経路が特定されている点検は自動操縦型の方が優位性を持ち、事前に飛行経路が不明で特定の場所を特定する場合は手動操縦型が適用しやすいことが分かった。

- ・ドローン（4輪駆動車）を活用した自動制御・遠隔操作技術の開発  
4輪駆動車にオープンソースの自動制御プログラム（ArduPilot）を搭載し、操縦者のモニターからの監視により遠隔操作および屋外でのGPSを用いた自動走行の技術開発を行った。
- ・スマホ用AI画像認識・制御によるドローン自動制御技術の開発  
機械学習プログラムTensorFlowによるスマートフォンAIアプリを開発し、ArduPilot搭載ドローン（4輪駆動車）を制御するAI×ドローンの融合技術の提案を行った。実験の結果、AIが高い精度で人を認識した後、ドローンを停止させることができた。
- ・外壁点検の省力化に向けたARによる自動画像合成技術の開発  
AR（拡張現実）を用いて、事前に仮想空間の撮影ポイントを平面上に設定し、ドローンに搭載したスマートフォンのカメラにより写り込んだ際に画像を自動的に撮影し合成する技術を開発し、画像合成の精度向上は必要であるが簡便かつ短時間に画像を合成することができた。
- ・自動離着陸が可能な飛行機型のVTOLドローンを用いて、高度400mから50mまでの建物情報の取得精度の実証実験を行った。
- ・ドローンの飛行に影響を与える電波について実建物による電波環境調査により検証し、測定機器の測定レベルの差異についても評価を行った。

## 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少子高齢社会を迎えた我が国においては、建築物の長寿命化は重要な施策の一つである。また、自分の所有する建築物や住宅の長寿命化は、多くの国民の願いである。本研究はこのような高いニーズに適合した課題であり、RC造建築物を対象として系統的な研究計画が立案されている。
- ②RC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背景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。また、研究開発の計画が具体的に立案されている。
- ④住宅・建築・都市ストック活用推進及びマネジメント技術の高度化を実現するために必須の研究であり、国の方針や社会のニーズに適合していると考える。研究開発の内容も、前述の事項を満たすだけでなく、学協会で有識者の目指す形とも合致しており、適切に立案されていると考える。
- ⑤本研究は、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・診断および評価する手法を開発するもので、目標とする成果が国の方針や社会的ニーズに適合しており、研究開発の計画は具体的に立案されているものと考えられる。

- (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ドローンを用いた研究開発では、積極的に協会を設立して産学官連携の基盤を構築しており、極めて高く評価できる。また鉄筋コンクリート部材の耐久性評価に関する調査や実験においても、既往の建築研究所の成果を活用するとともに、日本建築学会や日本コンクリート工学会と連携を諮っていると評価できる。

- 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。
- ④様々な団体と連携しながら研究を進めており、効率的な研究体制となっている。特に、異分野のドローンを用いた研究に関しては、日本建築ドローン協会を設立する等の仕組みを立案しており、効率的な体制の構築により、急速に研究が進んだものと思われる。これらの取り組みにより、成果の最大化は実現されていると判断する。
- ⑤建築研究開発コンソーシアム、日本建築学会委員会、日本建築ドローン協会、SIP、共同研究等を通じて技術開発の連携が行われ、効果的かつ効率的、な研究体制がとられている。また、学会発表、講演会、シンポジウム、雑誌機関紙、技術指導、外部委員会出席等成果の最大化のための取組がなされている。

(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当初計画にしたがって、順調に研究が進められている。特に中性化、塩害によるRC部材の劣化に関しては系統的な計画に基づき、重要な成果が得られている。ドローンを用いた点検技術に関しても順調な成果を挙げており、最終成果が期待される。
- ②研究開発は目標に向けて順調に進捗している。
- ③研究課題に関して、有意義な研究成果が得られている。
- ④ドローンを用いた建築物調査技術に関しては一定の水準に達しており、順調に進捗しているものと思われる。RC造建築物の耐久性評価に関するコンクリート実験や文献調査も順調に進展していると判断しているが、明確な成果となるには次年度以降の実験データの分析が必要と思われる。
- ⑤各研究項目に関して、研究開発は順調に進捗しているものと考えられる。

総合所見

以下に5名の評価委員の所見を示す

- ①鉄筋コンクリート建築物の長寿命化に貢献できる課題であり、建築研究所として先導的に取り組むべき重要な課題である。設計段階のみならず維持・管理段階でのテーマにも取り組んでおり、中間段階として、一定の成果が導き出されている。最終成果として、学術論文だけではなく、産学を先導するような施策等に反映できる成果が期待できる。
- ②実験結果の有効性検証には長期間を有すると考えられ年度ごとの成果、評価が得難い。実験研究と並行して、外的要因と材料性能低下との関係の理論的考察、調査を行い、陽的な数値解法による推定式を継続的に提案するのが望ましい。
- ③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ことが目的であり、耐久性判断の基準である鉄筋腐食の評価及び鉄筋コンクリートの耐久性に関連する各種要因の影響評価、さらに、建物の外観等をドローンを使用して診断する技術開発などを実施することになっている。今年度の研究の進捗状況は、計画に基づき研究が実施され、成果が得られたものと評価できる。
- ④現状では順調に進捗していると考える。また、本課題の全体計画に含まれるポルトランドセメントを混和材料に置換したコンクリートを用いた建築物の耐久性評価に関する知見が整備されれば、新築RC造建築の施工時の低炭素化につながる。次年度の実験では、そのような研究も推進して欲しい。
- ⑤本研究に関しては、中性化や塩害による鉄筋腐食評価手法、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、建築物の変状・損傷の早期確認と診断支援技術の各項目について、成果は適切に達成されているものと考えられる。また、ドローン等を活用した調査技術の開発は、RC造建築物の耐久性調査のみに拘わらず、損傷調査や災害調査等にも活用でき成果が期待される。

#### (参考) 対応内容

- ・(3) ④研究開発が目標に向けて順調に進捗しているか。への対応  
今年度までに得られた実験データを分析し、明確な成果となるよう公表等を行う予定である。
- ・総合所見②への対応  
鉄筋コンクリート部材の耐久性に関して、理論的な考察を踏まえて、推定式の提案を試みる所存である。
- ・総合所見④への対応  
ポルトランドセメントを混和材料に置換したコンクリートの耐久性に関しては、次年度に実験を開始し、促進試験による知見の知見を整理するとともに、屋外曝露による試験も実施する予定である。
- ・総合所見⑤への対応  
来年度、他の機関との連携として関連付けている略的イノベーション創造プログラム（SIP）課題「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」にて、ドローンを活用して市街地から個別建物に至る被災状況を把握するための一連のシステムを継続的に開発する予定である。

### 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。~~