

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06591

研究課題名（和文）経年劣化した鉄筋コンクリート造建築物の耐久性予測に基づく寿命制御手法の構築

研究課題名（英文）Life Control Method Based on Durability Prediction of Existing Concrete Reinforced Concrete Buildings

研究代表者

佐藤 幸恵（Sato, Sachie）

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号：70408714

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、良好な社会基盤の形成のために既存建築物の性能の向上や寿命の延伸が重要となっていることを踏まえ、経年劣化した既存鉄筋コンクリート造（RC造）建築物の性能を評価し、今後の維持管理や寿命延伸のための基礎資料とすることを目的に検討を行った。既存校舎の調査および劣化状況分析、中性化進行メカニズムの検討を行った。また、約25年北海道の沿岸地域で暴露試験を行った供試体の分析を行い、表面被覆材や断面修復材の評価を行った。また、経年建物の補修情報を集約するための写真による三次元復元手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存建築物の多くの調査データを収集し、実際のデータに立脚した中性化進行メカニズムを提案した。また、既存建築物の調査が、紙面による台帳管理になりがちであることから、これをデジタル管理することを目的に、スマートフォンカメラを利用した三次元情報化のための技術的検討を行った。簡易的に、特別な機器や技術を要しない技術であることから、汎用化のための一助となると期待できる。長期間暴露試験を行った供試体を分析し、仕上材の遮塩性能を明確にし、適正なメンテナンス期間を提案した。

研究成果の概要（英文）：This study evaluates the performance of existing reinforced concrete (RC) buildings that have deteriorated over time, considering that it is essential to improve the performance and extend the life of existing buildings to form an excellent social infrastructure. Therefore, this study conducted to provide primary data for future maintenance and life extension. We investigated the existing school buildings, analyzed its deterioration, and investigated the mechanism of carbonation progress with different thickness mortar finishings. Also, we analyzed the specimens exposed in the coastal condition of Hokkaido for about 25 years, evaluated surface coating materials, and cross-section repair materials. We also proposed a three-dimensional reconstruction method using photographs to gathering information for old buildings.

研究分野：建築構造材料

キーワード：既存建築物 中性化 耐久性

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

既存建築物を建築ストックとして有効活用することは、地球環境問題および経済的な観点からも重要な課題として求められている。特に、鉄筋コンクリート構造の建築物は、共同住宅、学校、病院、庁舎、公共建築物など社会的に重要な建築物に使用されることが多く、長寿命化のための研究開発が必要不可欠である。これらの建築物の寿命に関わる RC 造建築物の材料物性の経年変化は、圧縮強度に代表される力学特性と、中性化や塩化物イオンの浸透などによる化学的変化に起因する¹⁾²⁾。また、地震国である我が国では構造性能の評価は重要であり、一般的には耐震診断が普及している。耐震診断では、構造上重要でない壁などから採取したコア供試体の強度が柱などの構造耐力上主要な部分と同等の強度を持つとの前提条件で評価が行われている。しかし、施工後の環境条件や部材形状の違いから、必ずしも同じ強度発現であるとはいえず、コンクリートが経年した場合に生じる組織の化学的な変質が強度特性に影響を与えることが報告されている³⁾。申請者らは、膨大な実大施工実験の結果をもとにした強度発現特性の分析や、多数の実構造物から採取したコア強度を調査し、統計的な評価を行ってきた。本研究では、これらの知見に加え、コンクリートの経年的な力学特性の変化がコンクリート部材の性能に与える影響を実験的に検討し解析することによって経年 RC 造建築物の構造性能評価手法の構築を目的としている。また、材料的な変化に基づく鉄筋コンクリート造建築物の劣化判定は、コンクリート内部の鉄筋が腐食した場合の度合い、進行状態の評価によって行われる。鉄筋腐食が進行し、コンクリートにひび割れや剥落が生じるようになると、RC 造建築物として寿命がきたとみなすことになる。そのため、コンクリートの劣化進行を前提とした鉄筋腐食状況に基づき寿命評価が行われる。構造体コンクリート内部の鉄筋が腐食する要因のうち代表的なものはコンクリートの中性化と、コンクリートに内在する塩化物イオンの作用が代表的である。しかし、中性化や塩化物イオンが存在しても鉄筋が腐食するには酸素と水分の供給が必要であり、これらの供給がなく、コンクリートがある含水率以下に乾燥していれば、鉄筋は直ちに腐食するわけではないことが指摘されている⁴⁾。そのことから、コンクリート中の鉄筋腐食の予測には、中性化等の材料変化に対する含水率の影響評価が重要となる。

2. 研究の目的

良好な社会基盤の形成のために既存建築物の性能の向上や寿命の延伸が重要である。そのためには、コンクリートおよび鉄筋の物性変化を実環境との関係から明らかにし、経年劣化した既存鉄筋コンクリート造（RC 造）建築物の性能を適切に評価する必要がある。

本研究では、既存鉄筋コンクリート造建築物の経年後の部位・部材ごとの条件に応じた性能評価手法を構築することを目的とし、1) コンクリートの力学特性の経時変化が部材性能に及ぼす影響の検証、および2) 仕上材によるコンクリートの劣化抑制効果と鉄筋腐食速度の関係を含水状態との関係から明らかにし、3) 局所的に顕在化する劣化損傷が部材性能に及ぼす影響を、実構造物を対象とした調査・分析から定量評価を行い、RC 造建築物の寿命制御手法を提案する。

3. 研究の方法

本研究では、実構造物の調査、暴露試験による耐久性評価、建築物の劣化情報の集約化を行った。実構造物の調査については、過去に実施した実構造物調査結果をそれぞれ分析し、力学特性の変化、モルタル仕上げ厚さや含水率が中性化進行に及ぼす影響を検討した。また、異なる養生条件における中性化進行予測モデルの提案を行った。また、20 年以上北海道の沿岸地域で暴露試験を行った各種仕上げ材および断面修復材を有する供試体の鉄筋腐食および塩分浸透性評価を行った。既存建築物の劣化情報を集約するために、写真計測をベースとした既存建築物の三次元復元と劣化状況の記録を行うための基礎資料整備を行った。

4. 研究成果

(1)実構造物調査に基づく耐久性調査と各種養生条件におけるコンクリートの中性化進行モデル

本研究では、築40～60年の鉄筋コンクリート造学校建築、集合住宅から採取したコア供試体を用いて強度・ヤング係数、含水率、中性化深さを分析した。築50年以上が経過した校舎建築においては、図-1に示すように、全体として上層ほど圧縮強度が低い傾向があった。また、質量含水率と中性化深さの関係を分析したところ、図-2、図-3に示すように、コンクリートあるいは仕上げモルタルの含水率と中性化の関係は、含水率が高いほど中性化深さは小さいという結果が得られ、特にモルタルの含水率のほうが中性化進行を遅延させる効果があると確認された。採取したコア供試体の中性化を遅延させる水酸化カルシウム(CH)量、および炭酸カルシウム(CaCO₃)量を分析して中性化の進行過程の検討を行った。その結果を図-4に、供試体写真を写真-1に示す。屋内側では、フェノールフタレインによる呈色と比較して薄い呈色域ではCH量の残存量が少なくCaCO₃量が多くなる傾向があり、中性化はモルタル仕上げを通じて水酸化カルシウムを消費しながら進行する過程を確認した。

コンクリートの中性化進行は初期の養生条件などから表層部分と内部のコンクリートで不均質な品質をもつため、これが中性化進行過程に及ぼす影響を考慮して、養生条件を考慮したコンクリートの中性化進行のモデルを検討した。中性化進行は次のような進行をするものとしてモデル化した。

①表層コンクリート (x<10mm)

$$\Delta CO_2 = D_f \frac{C_0}{x} S \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\Delta CO_2 = H \cdot S \cdot \Delta x \quad (2)$$

②内部コンクリート (10mm<x)

$$\Delta CO_2 = D_f \frac{(C_0 - C')}{d} S \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$\Delta CO_2 = D_i \frac{C'}{(x-d)} S \cdot \Delta t \quad (4)$$

$$\Delta CO_2 = H \cdot S \cdot \Delta x \quad (5)$$

ここに

D_f: 表層コンクリートのCO₂拡散係数

D_i: 内部コンクリートのCO₂拡散係数

H: Ca(OH)₂の生成量

x: 中性化深さ

d₀: 中性化促進試験開始時の中性化深さ

d: 表層コンクリートと内部コンクリートの境界の中性化深さ

C₀: 外表面のCO₂量

C': 表層コンクリートと内部コンクリートの境界におけるCO₂濃度

また、これらの式を整理し次式を得る。

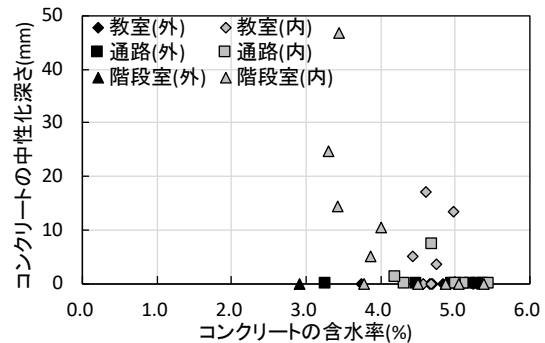
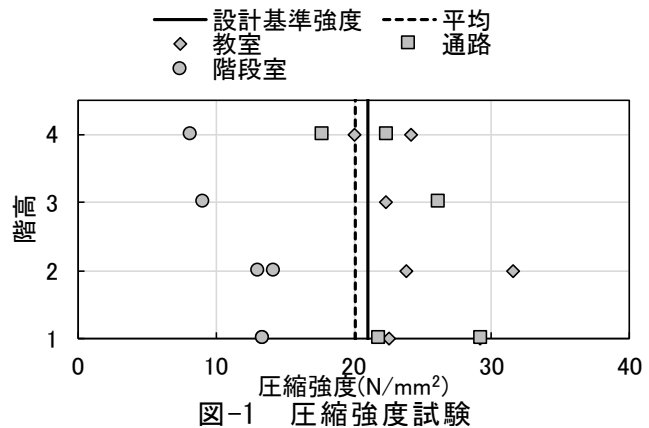


図-2 コンクリートの含水率と中性化深さの関係

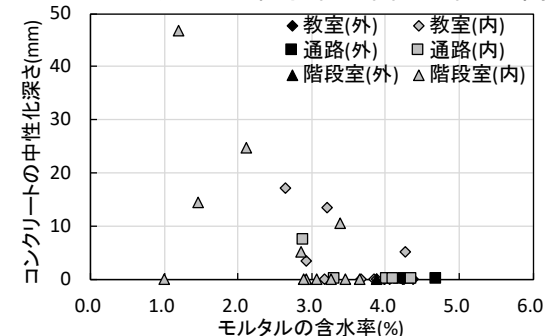


図-3 モルタルの含水率と中性化深さの関係

表層コンクリート

$$x = A_f \sqrt{t + B_f} \quad (6)$$

内部コンクリート

$$x = A_i \sqrt{t + B_i} + C_i \quad (7)$$

ここに、A：中性化速度係数

図-6 は封かん 5 日養生を行った場合の表層コンクリートと内部コンクリートの中性化速度係数の比較結果を示す。図より、表層部のほうが中性化速度係数は大きく、表層からの養生の影響を本解析方法により評価できることが確認された。

(2) 20 年以上北海道沿岸地域で暴露試験を行った供試体の耐久性

暴露試験は北海道の海岸地域にて実施し、今回は約 25 年経過した試験体の分析を行い、過去に実施した 4.8 年および 8 年での調査結果と比較し、経過した年数の違いによる劣化への影響や、表面被覆工法および断面修復工法の耐久性について考察した。

供試体は図-7 に示すような内部に異なるはつり深さで断面修復された鉄筋コンクリート供試体であり、鉄筋腐食状況、塩分浸透深さ等について分析した。

図-8 に腐食面積率の関係を示す。補修部、非補修部では、非補修の腐食面積率が高く、非補修部と境界部の違いでは境界部の腐食面積率が高くなる傾向を示した。

塩化物イオン量の分析結果を図-9 に示す。図より、全体を通じて、複層仕上塗材 (S) を施工した供試体の塩化物イオン量がいずれの補修材の中でも小さくなり、表面被覆材として複層仕上材 (S) の遮塩性能が卓越して高く、表面被覆材が健全であれば長期的に十分な躯体保護性能を確保できる。また、表面被覆材の遮塩率を求め比較したものを図-10 に示す。図-10 より、薄付仕上塗材 (L) は複層仕上塗材と比較して遮塩効果率の低下が 8 年以降の間で大きくなった。このことから、10 年前後でメンテ

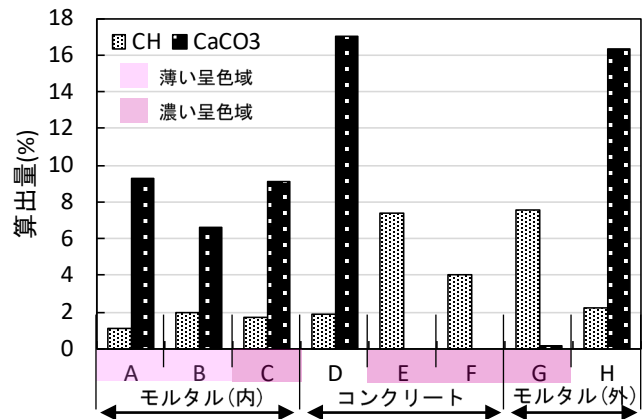


図-4 コア供試体中の CH および CaCO₃ の定量結果

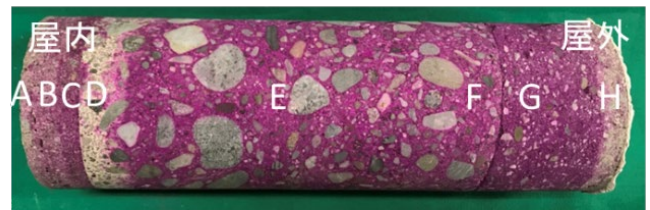


写真-1 コア試料採取箇所

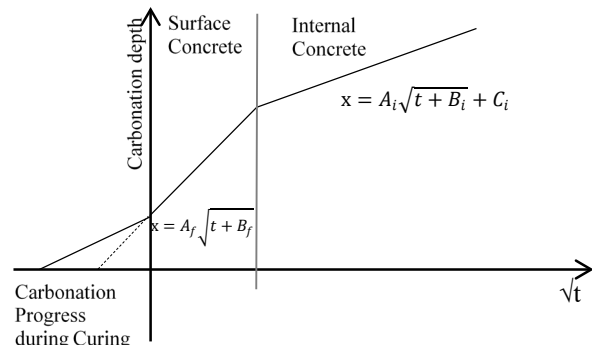


図-5 中性化進行モデル

- ◆ N
- FA15
- ▲ FA25
- × BB
- * BFS30
- BFS50
- + BFS70
- y=x

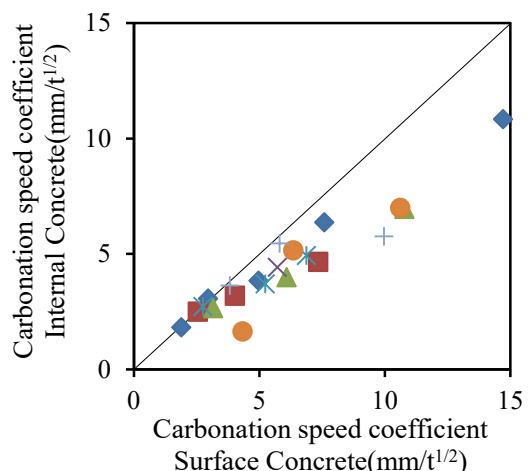


図-6 表層コンクリートと内部コンクリートの中性化速度係数の解析結果の比較

ナンスを行うことで長期的な躯体保護効果の保持が可能と考えられる。

(3) 写真計測を用いた既存建築物の三次元復元手法の検討

経年建築物ではCAD情報がなく、また、改築や所有者の変更に伴って正確な情報記録が得られない場合がある。維持管理を行うためには、紙図面などのアナログ情報をデジタル化して一元管理する必要がある。

建築物の図面情報については、近年技術開発の進んでいる三次元化が考えられるが、レーザースキャナなどの高価な機器が必要である。ここでは、より簡易に低コストで三次元復元を実現するため、スマートフォンカメラで撮影した写真による建築物の三次元復元手法を検討した。写真-2は、教室をスマートフォンカメラで撮影し、三次元復元を行ったものである。通常の写真画像は画像縁部に歪曲収差が生じるため復元結果に歪みが生じやすいが、新たな写真撮影手法を提案して比較的精度の高い復元を実現することが可能となった。今後、これを利用してBIMデータとしての活用や劣化情報の書込みを行う予定である。

参考文献

- 1) 建設省：建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」報告書、国土開発技術研究センター、1988.11
- 2) 建築物耐久性向上技術普及委員会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術、国土開発技術研究センター、1986.6
- 3) 丸山一平, 五十嵐豪：高経年化した部材中のコンクリート強度予測手法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 673巻, pp. 323-332, 2012.3
- 4) 山本佳城：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性に及ぼすコンクリートの含水状態の影響に関する研究, 宇都宮大学学位論文, 2004.3

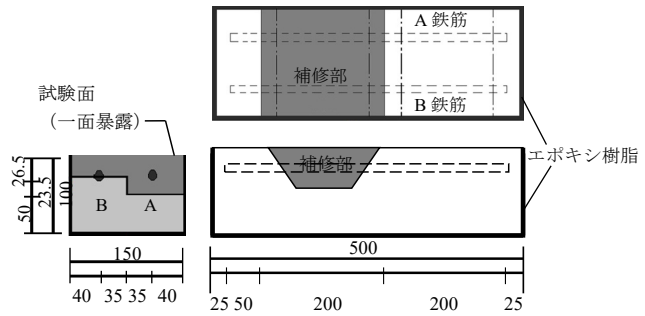


図-7 供試体概要

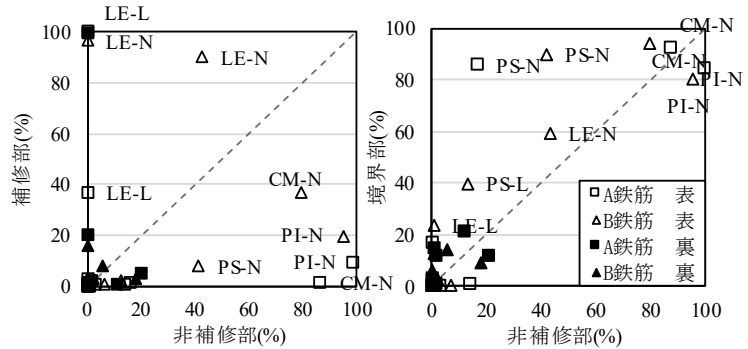


図-8 腐食面積率の関係

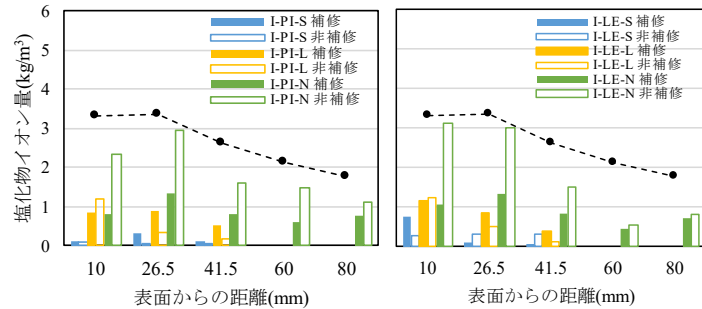


図-9 塩化物イオン量

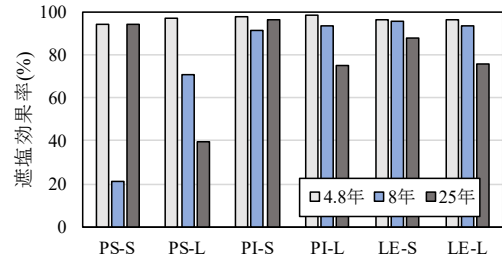


図-10 遮塩率の計算結果 (非補修部)



写真-2 対象写真

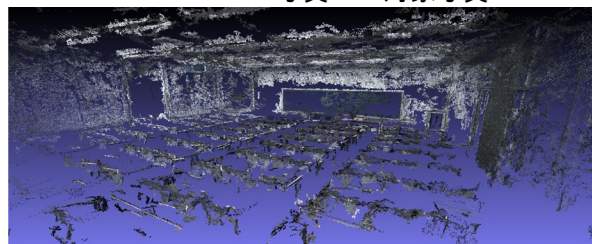


写真-3 復元結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sachie Sato, Yoshihiro Masuda, Masaru Kakegawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Long-term Performance of Repaires to Reinforced Concrete Exposed to Coastal Conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 15th International Conference on Durability of Building Materials and Components	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sachie Sato, Yoshihiro Masuda, Hiroyuki Tanano	4. 巻 80
2. 論文標題 Strength development properties of core specimens taken from structural concrete test specimens prepared all over Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Civill Engineering, ICSCEA2019	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 金子樹, 榎田佳寛, 佐藤幸恵, 阿部道彦, 安田正雪, 田中育	4. 巻 760
2. 論文標題 海岸付近の建築物におけるコンクリート中の塩化物イオンの拡散挙動について	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 771-779
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.3130/aijs.84.771	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 金子樹, 阿部道彦, 榎田佳寛	4. 巻 39
2. 論文標題 コンクリート中への塩化物イオン浸透における塩水浸漬促進試験の試験条件に関する検討	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 571-576
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中田 善久, 宮田 敦典, 大塚 秀三, 榊田 佳寛, 湯本 哲也, 平野 修也, 萩谷 俊祐, 菊地 貴志	4. 巻 56
2. 論文標題 JASS 5における調合条件の変遷と文献調査に基づく流動性を考慮したコンクリートの調合条件に関する一考察	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 SATO Sachie, MASUDA Yoshihiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Study of carbonation progress prediction on existing reinforced concrete buildings with variations in surface mortar layer	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 14th International Conference on Durability of Building Materials and Components	6. 最初と最後の頁 CDROM
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 金子 樹, 阿部 道彦, 榊田 佳寛	4. 巻 81
2. 論文標題 促進および屋外暴露環境におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散に関する考察	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 643 ~ 653
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://doi.org/10.3130/aijs.81.643	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田沼 毅彦, 杉山 央, 榊田 佳寛	4. 巻 53
2. 論文標題 外装仕上げとしてモルタル塗りを施した鉄筋コンクリート造建築物の中性化進行	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 31 ~ 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://doi.org/10.3130/aijt.23.31	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 掛川勝, 佐藤幸恵, 榎田佳寛
2. 発表標題 長期暴露試験体による鉄筋コンクリート補修工法の評価に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小笠原直哉, 佐藤幸恵, 榎田佳寛, 阿部道彦
2. 発表標題 22年間海岸地域で暴露した再生骨材コンクリートの耐久性に検討
3. 学会等名 日本建築学会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤幸恵, 神代泰道, 桜本文敏, 小島正朗, 丸山一平
2. 発表標題 マスコンクリートの構造体強度補正值と平均養生温度に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡辺太一, 佐藤幸恵, 榎田佳寛, 西祐宜
2. 発表標題 モルタルの品質がコンクリートの中酸化抑制に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S.Sato, N.Ogasahara, H.Nishi
2. 発表標題 Quantitative Evaluation of Cement Hydrates using Backscattered Electron Imaging
3. 学会等名 The 8th International Concrete of Asian Concrete Federation, Fuzhou,China (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sachie Sato, Yoshihiro Masuda, Naoko Tsuchiya
2. 発表標題 CARBONATION BEHAVIOR OF CONCRETE WITH EFFECTS OF CURING CONDITION AND MINERAL ADMIXTURES
3. 学会等名 第13回韓国日本建築材料施工Joint Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 蔦木啓斗, 佐藤幸恵, 丸山一平, 野口貴文
2. 発表標題 内部に温度分布を生じる低水セメント比ペースト供試体の強度および含水率分布に関する実験
3. 学会等名 第13回韓国日本建築材料施工Joint Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金子 樹, 関 新之介, 大倉 真人, 榎田 佳寛
2. 発表標題 セメント混合における高炉セメントA種相当のコンクリートの諸性状 その1 二酸化炭素排出量の削減効果および研究概要
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 関 新之介, 金子 樹, 大倉 真人, 榎田 佳寛
2. 発表標題 セメント混合における高炉セメントA種相当のコンクリートの諸性状 その2 強度性状
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大倉 真人, 関 新之介, 金子 樹, 榎田 佳寛
2. 発表標題 セメント混合における高炉セメントA種相当のコンクリートの諸性状 その3 耐久性
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤 淳, 中田 善久, 大塚 秀三, 榎田 佳寛, 宮田 敦典, 荒巻 卓見, 木村 友哉
2. 発表標題 模擬壁部材における表面からの採取位置を変えたコア強度に関する研究 その1 実験概要および高さ方向がコア強度に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木村 友哉, 中田 善久, 大塚 秀三, 榎田 佳寛, 宮田 敦典, 荒巻 卓見, 伊藤 淳
2. 発表標題 模擬壁部材における表面からの採取位置を変えたコア強度に関する研究 その2 表面部と中心部の違いがコア強度に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 髙木 啓斗, 佐藤 幸恵, 丸山 一平, 野口 貴文
2. 発表標題 内部に温度分布を生じる低水セメント比ペースト供試体の品質変動に関する基礎的実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 辻 大二郎, 榎田佳寛, 清水昭之, 今本 啓一, 棚野博之, 宮内博之, 鹿毛忠継 土屋 直子
2. 発表標題 混合セメントを用いたコンクリートの耐久性能 その7 中性化抵抗性の寄与率
3. 学会等名 2016年度日本建築学会大会(九州)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	榎田 吉弘 (Masuda Yoshihiro) (30272214)	日本大学・理工学部・教授 (32665)	