様　式　C－19、F－19－1、Z－19　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　４ 年　６ 月 ２０ 日現在

機関番号：１３９０３
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：１９Ｈ０２２１３

研究課題名（和文）維持管理負担の軽減に向けたかぶり剥落要因の検証と雨水侵入による照査体系への転換

研究課題名（英文）Verification of the cause of the peeling of the cover concrete and conversion to the inspection design by rainwater infiltration to reduce the maintenance cost

研究代表者
吉田　亮（Yoshida, Ryo）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：４０５４８５７５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　6,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、維持管理にかかる費用と労力を抜本的に減じるために、コンクリート標準示方書における鉄筋腐食の照査について、補修予定の実構造物を調査し、かぶり剥落に対する中性化・雨水侵入の影響を検証した。本検証により鉄筋腐食の照査における因子として、中性化と雨水侵入を同等に扱うことの、工学的根拠が示された。
また、新たな照査式・検査手法を整えるために、実構造物のかぶりから採取したコアを用いて、降雨パターンと雨水侵入性状の関係などの基礎データを取得し、かぶりにおける雨水侵入のメカニズムと空隙構造に基づいた構成則を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
コンクリート工学の開設以来、疑われなかった中性化寿命（仮）説について、設計供用年数を超えた実構造物の調査により検証した。この検証は、当時の設計思想に科学的根拠を与えるものであり、経験工学で体系化されたコンクリート工学を科学として深化させることに貢献した。また、鉄筋腐食の照査において中性化と雨水侵入を同等に扱うことは、点検や詳細調査による維持管理コストを下げるという社会的要求に応えるものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to drastically reduce the cost for maintenance, it was investigated that the actual structure to be repaired for the verification of reinforcing bar corrosion in the concrete standard specification, and carbonation and rainwater intrusion against peeling covered concrete. This verification showed the engineering basis for treating carbonation and rainwater intrusion equally as factors in the verification of rebar corrosion.
In addition, in order to prepare a new inspection method, basic data such as the relationship between rainfall pattern and rainwater intrusion property was acquired using the core collected from the cover of the actual structure, and the mechanism of rainwater intrusion in the cover was obtained. It was proposed that a constitutive rule based on the pore structure.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：中性化　かぶり　腐食　雨がかり　実構造物　水分移動　混和材　空隙構造

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

1926 年に濱田らによって示された「中性化深さによるコンクリートの寿命予測（√ｔ則）」は、国内初のコンクリート建築規準に採用された。本研究は、実構造物かぶりの剥落に対する中性化・雨水侵入の影響度を示すことにより、これまで疑われることがなかった「中性化寿命説」について初めて検証するものである。

また、維持管理負担の軽減に向けた新たな照査体系を整えるために、実際のかぶりコンクリートにおける雨水侵入現象について、空隙の構造を基にメカニズムを明らかとし、雨水侵入の構成則とその抵抗性を評価する現場非破壊試験を提案する。環境負荷低減の対策として用いられる高炉スラグ微粉末など、混和材を使用したコンクリートに示される高い雨水侵入抵抗性は、従来の空隙率（総量）を基にした水分移動則では正しく評価できていない。本研究では、従来の空隙率ではなく、空隙の構造を、水分移動（非インクボトル）と水分滞留（インクボトル）という機能によって分離することで、雨水侵入メカニズムにアプローチする。

２．研究の目的

本研究の目的は、実構造物かぶりコンクリートの剥落要因が、中性化ではなく雨水侵入であることを示し、雨水侵入を要因とした新たな鉄筋腐食の照査体系に転換することで、維持管理にかかる費用と労力を抜本的に減じることである。この社会的要求に応えるために本研究では、補修予定の実構造物を調査し、かぶり剥落に対する中性化・雨水侵入の影響を統計解析により定量化する。また、新たな照査式・検査手法を整えるために、実構造物のかぶりから採取したコアを用いて、降雨パターンと雨水侵入性状の関係などの基礎データを取得し、かぶりにおける雨水侵入のメカニズムと空隙構造に基づいた構成則を提案する。

３．研究の方法

本研究の目的は、実構造物かぶりコンクリートの剥落要因が、中性化ではなく雨水侵入であることを示し、雨水侵入を要因とした新たな鉄筋腐食の照査体系に転換することである。本研究では、課題[1] -[3]とサブテーマ(a)、(b)を設け、目的を達成する。

［課題 1］かぶりの剥落に対する中性化・雨水侵入の影響度の把握

標準示方書（以下、示方書）では、鉄筋腐食の照査における因子として、中性化と雨水侵入を同等に扱うよう改訂された。しかし、かぶりの剥落に対する中性化と雨水侵入の影響を定量評価した研究はなく、その根拠を示す必要がある。

本課題では、かぶりの剥落に対する中性化・雨水侵入の影響を定量化する。構造物は、愛知県、名古屋市などで補修が予定されている橋梁などを対象とし、建設年と環境などの条件により選定を行う。調査では、雨掛かり・剥落の有無、かぶり深さ、中性化深さのデータを収集し、これらのデータをロジスティック回帰分析により、オッズ数などを算出することで、剥落に対する中性化・雨水侵入の影響を定量的に評価する。

［課題 2］かぶりにおける雨水侵入のメカニズムと空隙構造に基づいた構成則

前述の通り現示方書では、暫定的に、雨水侵入による鉄筋腐食の照査式が提示された。今後の改定に向けて、より多くの実構造物における水分移動現象の検証、そして科学的根拠に基づいた雨水侵入による鉄筋腐食の照査式を提案することが、求められている。本課題では、これらの要求に応えるためのサブテーマ(a)、(b)を設ける。

(a)実構造物コアを用いた降雨パターンによる腐食因子の輸送性状の把握

現行の示方書では、雨水が鉄筋位置に到達する頻度により、鉄筋腐食のリスクを判定している。照査の精度を上げるためには、第一に、実構造物のかぶりコンクリートにおける、溶存酸素など腐食因子の雨水侵入による輸送量・頻度の実態を把握する必要がある。

本実験では、実構造物かぶりから採取したコンクリートコアを、かぶり厚さが 5、10、20、30、40、50㎜となるように切断し、側面をシーリングする。コア裏面には 02、湿度センサーを貼付し、各かぶり厚さにおける酸素・湿度の経時変化、雨水侵入限界深さの情報を取得する。そして、統計解析により、降雨パターンと腐食物質の輸送量・深さの関係を検討する。降雨前のコンクリートの乾燥状態、降雨の強度や継続時間が、かぶり内部における雨水侵入深さに及ぼす影響を、鉄筋に雨水が到達する確率として算出する。

(b)混和材がつくるインクボトル空隙の水分移動モデルへの実装

実構造物の調査結果に示される混和材を用いたコンクリートの高い雨水侵入抵抗性は、湿度が一定である促進試験の結果を基に考案された既存式では評価が難しいと報告されている。実環境では湿度変化により水分凝縮や膨潤をもたらし、物質移動のネットワークが閉塞するが、混和材ではその傾向が顕著であり、特有のインクボトル構造を持つと考えた。

申請者は、混和材を用いたコンクリートが湿度環境により、物質移動抵抗性を大きく変化させることを実験により示してきた。また、独自提案手法により、その湿度依存性をもたらす特有のインクボトル空隙を定量化した。しかし、この構造をモデル化し移動特性を表現することはできていない。本課題では、これまでに行った透水試験と空隙構造分析の結果を基に、ボトルネックを介在させる空隙ネットワークにおける流れの数値解析を行い、水分移動則に実装するためにインクボトル空隙のモデル化を行う。

［課題 3］かぶりの雨水侵入抵抗性を評価する非破壊試験の提案

現行のかぶりの品質評価には、表面吸水試験、透気試験などの非破壊試験がある。しかし、[課題 2(b)]と同じ理由により、混和材がもつ高い物質移動抵抗性を評価できていない。新たな照査体系を整えるためには、このインクボトル空隙がもたらす移動挙動を理解し、その影響を評価することが、非破壊試験に求められる。

申請者は、混和材を用いたコンクリートにおける吸水・乾燥量と、非インクボトル空隙量（空隙総量からインクボトル空隙を差し引いた空隙量）に強い相関関係があることを見出した。実構造物では、吸水・乾燥する（雨水の出入りしやすい）空隙を定量化することで、雨水侵入抵抗性が評価できる可能性があると考えた。非破壊試験の開発における課題は、定常状態で乾燥させるための真空容器の製作と、真空圧力と水分が逸散する空隙の直径の関係を実験によって明らかにすることである。

４．研究成果

［1］かぶりの剥落に対する中性化・雨水侵入の影響度の把握： 構造物は、愛知県、名古屋市などで補修中の橋梁を対象とし、建設年と環境などの条件により選定を行った。調査では、雨掛かり・剥落の有無、かぶり深さ、中性化深さのデータを収集し、これらのデータをロジスティック回帰分析により、剥落に対する中性化・雨水侵入の影響を定量的に評価した。これにより、コンクリート標準示方書では、鉄筋腐食の照査における因子として、中性化と雨水侵入を同等に扱うことの、工学的根拠を示した。

［2］かぶりにおける雨水侵入のメカニズムと空隙構造に基づいた構成則： 実構造物かぶりから採取したコアを用いて、各かぶり厚さにおける湿度の経時変化、雨水侵入限界深さの情報を取得した。また、これらの水分移動性状を理解するために、水分移動場となる空隙構造の情報を、コアの深さ方向における空隙構造の変化として取得した。現行の示方書における鉄筋腐食予測式は、雨水が鉄筋位置に到達する頻度により、鉄筋腐食のリスクを判定している。照査の精度向上のために、実構造物のかぶりコンクリートにおける、腐食因子の雨水侵入による輸送量・頻度の実態を把握した。そして、水分移動に対する、(b)混和材がつくるインクボトル空隙の構造と影響について実験データとして把握し、トライボロジー現象再考の課題を得た。

[3]かぶりの雨水侵入抵抗性を評価する非破壊試験の提案： 混和材を用いたコンクリートにおける吸水・乾燥量と、連続空隙の強い相関関係を確認した。実構造物では、吸水・乾燥しやすい連続空隙を定量化する非破壊試験により、雨水侵入抵抗性が評価できる可能性を見出した。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計11件（うち査読付論文　11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	４．巻
Natsuki Ogura, Ryo Yoshida, Shinichi Igarashi	1
２．論文標題	５．発行年
Relations of Index and Water Movement in Cement Paste of Connected Pore Measured by Mercury Intrusion Porosimetery Test	2021年
３．雑誌名	６．最初と最後の頁
The 9th International Conference of Asian Concrete Federation	-
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
なし	有
オープンアクセス	国際共著
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	－

１．著者名	４．巻
Jun Kato, Ryo Yoshida, Masaharu Kondo, Masayoshi Fuji	1
２．論文標題	５．発行年
Improvement of Water Absorption Resistant and Mechanism on The Hardened Cement Paste by Impregnation of Colloidal Silica	2021年
３．雑誌名	６．最初と最後の頁
The 9th International Conference of Asian Concrete Federation	-
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
なし	有
オープンアクセス	国際共著
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	－

１．著者名	４．巻
伊藤稔，鷲見高典，加藤諄，吉田亮	43
２．論文標題	５．発行年
都市高速道路の壁高欄に適した表面保護工法とその材料について	2021年
３．雑誌名	６．最初と最後の頁
コンクリート工学年次論文集	532-537
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
なし	有
オープンアクセス	国際共著
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	－

１．著者名	４．巻
加藤諄，吉田亮，近藤政晴，藤正督	43
２．論文標題	５．発行年
水分浸透抵抗性を向上させるケイ酸ゲルの生成メカニズムに関する基礎研究	2021年
３．雑誌名	６．最初と最後の頁
コンクリート工学年次論文集	1055-1060
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
なし	有
オープンアクセス	国際共著
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	－

1．著者名 植隆太郎，加藤諄，吉田亮	4．巻 74
2．論文標題 セメコン植アルミノケイ酸塩鉱物の形成メカニズムに学ぶ新たな表面含浸材の開発	5．発行年 2021年
3．雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6．最初と最後の頁 318-324
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14250/cement.74.318	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 加藤諄，植隆太郎，吉田亮	4．巻 74
2．論文標題 表面含浸材の組合せによる相互作用が改質効果に与える影響に関する研究	5．発行年 2021年
3．雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6．最初と最後の頁 302-309
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14250/cement.74.302	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 植隆太郎，菅沼美紀，吉田亮，加藤諄	4．巻 42
2．論文標題 表面含浸材の塗布方法による劣化セメントペーストの改質効果とその機構に関する研究	5．発行年 2020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 1408-1413
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 吉田亮，岸利治	4．巻 42
2．論文標題 OPCペースト硬化体における空隙の連続性に及ぼす養生の影響	5．発行年 2020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 413-418
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 大島美穂，米塚真道，吉田亮	４．巻 19
２．論文標題 降雨パターンによるコンクリート内の湿度変化に関する一考察	５．発行年 2019年
３．雑誌名 コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集	６．最初と最後の頁 401，406
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 内山重一，吉田亮，荻野祐一，大島美穂	４．巻 40
２．論文標題 吸水ロボットによる余剰水の除去が土間コンクリートの硬化体物性に与える影響	５．発行年 2019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 1277,1282
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 菅沼美紀，吉田亮，北村真也，石田敦則	４．巻 40
２．論文標題 表面含浸材の塗布方法が劣化コンクリートの表面硬度に与える影響に関する研究	５．発行年 2019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 587,594
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 -

〔学会発表〕　計14件（うち招待講演　0件／うち国際学会　0件）

１．発表者名 伊藤稔，鷲見高典，加藤諄，吉田亮
２．発表標題 都市高速道路の壁高欄に適した表面処理工法について
３．学会等名 令和3年度土木学会全国大会（オンライン）
４．発表年 2021年

１．発表者名
野倉誉斗，吉田亮，伊藤真弥

２．発表標題
湿潤・乾燥を受けるモルタルの湿度変化に対する厚さとW/Cおよび養生条件の影響

３．学会等名
令和3年度土木学会全国大会（オンライン）

４．発表年
2021年

１．発表者名
小倉夏槻，吉田亮，五十嵐心一

２．発表標題
水銀圧入法および画像解析法で得る空隙指標と水分移動現象の関係に関する研究

３．学会等名
令和3年度土木学会全国大会（オンライン）

４．発表年
2021年

１．発表者名
加藤諄，吉田亮，近藤政晴，藤正督

２．発表標題
ケイ酸塩系表面含浸材を用いた水分浸透抑制ゲルの生成条件に関する検証

３．学会等名
令和3年度土木学会全国大会（オンライン）

４．発表年
2021年

１．発表者名
小倉夏槻，吉田亮，五十嵐心一

２．発表標題
セメントペースト硬化体における水分移動性状と空隙指標の関係に関する一考察

３．学会等名
土木学会中部支部研究発表会

４．発表年
2021年

１．発表者名
加藤諄，吉田亮，近藤政晴

２．発表標題
ケイ酸塩含浸材のゲル化による水分浸透抵抗性を向上させた新工法の提案

３．学会等名
土木学会中部支部研究発表会

４．発表年
2021年

１．発表者名
野倉誉斗，林文香，吉田亮

２．発表標題
表層品質がモルタル硬化体の水分浸透・乾燥性状に及ぼす影響

３．学会等名
土木学会年次学術講演会

４．発表年
2021年

１．発表者名
加藤諄，植隆太郎，吉田亮

２．発表標題
アルミニウムの添加によるけい酸塩含浸材の硬度上昇メカニズムに関する一考察

３．学会等名
日本建築学会2020年度大会学術講演

４．発表年
2020年

１．発表者名
小倉夏槻，纐纈彩瑛，吉田亮，岸利治

２．発表標題
水銀圧入法で得られる空隙指標とセメントペースト硬化体の水分移動性状に関する一考察

３．学会等名
日本建築学会2020年度大会学術講演

４．発表年
2020年

１．発表者名
野倉誉斗，大島美穂，吉田亮，岸利治

２．発表標題
W/C および養生条件がモルタル硬化体における水分浸透性状に及ぼす影響

３．学会等名
日本建築学会2020年度大会学術講演

４．発表年
2020年

１．発表者名
植隆太郎，吉田亮

２．発表標題
アルミニウムを添加した含浸材による表面硬度への影響に関する研究

３．学会等名
土木学会中部支部研究発表会

４．発表年
2019年～2020年

１．発表者名
GANTOGMID Batsaikhan，吉田亮

２．発表標題
高炉スラグ微粉末を混和したW/B＝1.0のセメントペーストの硬化体物性に関する研究

３．学会等名
土木学会中部支部研究発表会

４．発表年
2019年～2020年

１．発表者名
吉田亮，菅沼美紀

２．発表標題
W/Cの大きなセメントペーストを用いた表面含浸材の改質メカニズムに関する一考察

３．学会等名
土木学会年次学術講演会

４．発表年
2019年

１．発表者名 阿部航司，大島美穂，吉田亮，齋藤和秀
２．発表標題 高炉スラグ細骨材の置換率がモルタルのフレッシュ性状と硬化体物性に及ぼす影響
３．学会等名 土木学会年次学術講演会
４．発表年 2019年

〔図書〕　計0件

〔出願〕　計2件

産業財産権の名称	発明者	権利者
コンクリート改質用改質水溶液及びコンクリートの改質方法	吉田亮，植隆太郎，加藤諄	名古屋工業大学
産業財産権の種類、番号	出願年	国内・外国の別
特許、特願2020-190612	2020年	国内

産業財産権の名称	発明者	権利者
44)被改質コンクリート、被改質コンクリート構造物及びコンクリートの改質方法	吉田亮，植隆太郎，加藤諄	名古屋工業大学
産業財産権の種類、番号	出願年	国内・外国の別
特許、特願2020-190612	2020年	国内

〔取得〕　計0件

〔その他〕

名古屋工業大学　地球・建設材料研究室 https://conmate.jp/

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

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関