

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18828

研究課題名（和文）ケイ酸ゲルによるコンクリート空隙の閉塞メカニズムの解明：補修材が拓く深海への挑戦

研究課題名（英文）Elucidating the mechanism of concrete void closure by silica gel: repair materials open the way to the deep sea.

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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：ケイ酸塩系表面含浸材（補修材）に関する申請者の研究では、従来の工程を省略したところ、本来期待できない高い水分浸透抵抗性が確認された（特願2020-190615）。本研究では、コンクリート空隙中においてケイ酸の凝集体（ゲル）が生成され、ゲルの吸水膨潤により空隙が閉塞したことで、水分浸透が抑制されるという仮説を立て、

【課題1】空隙におけるケイ酸ゲルの生成メカニズム（仮説）を検証し、【課題2】コンクリートの空隙に生成させたケイ酸ゲルの膨潤作用によって、鉄筋腐食をもたらす雨水や海水の浸透を止めるという、新しい補修コンセプトを創出した（特願2023-138819）。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリート標準示方書の耐久性照査は、点検負担の大きい中性化から、水分浸透に基づいた鉄筋腐食へと転換しつつある。この転換には、照査体系の整備に加え、水分浸透を抑制する補修材の開発が必要不可欠である。本研究では、これまでの補修材の施工不良メカニズムの解明とともに、そのメカニズムを水分浸透抑制に利用し、鉄筋コンクリートの劣化因子である二酸化炭素、塩分、酸性雨との接触によりバリア機能を発現する「毒を以て毒を制す」新たな補修コンセプトを提案した。

研究成果の概要（英文）：The applicant's research on silicate surface impregnation materials (repair materials) confirmed a high resistance to moisture penetration, which was not originally expected, when the conventional process was omitted (Patent Application 2020-190615). In this study, it was hypothesized that silicate aggregates (gels) are formed in the concrete voids and that the voids are blocked by the water absorption and swelling of the gels, thereby inhibiting water penetration, Subject 1: The mechanism of silica gel formation in the voids (hypothesis) was verified, and Subject 2: A new repair concept was created in which the swelling action of silica gel formed in the voids of concrete stops the penetration of rainwater and seawater, which can cause corrosion of steel bars (Patent Application 2023-138819).

研究分野：コンクリート工学

キーワード：ケイ酸 ゲル 止水 補修 劣化 含浸 コンクリート 空隙

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

実構造物の劣化要因に関する研究[基盤A 岸利治 分担]により、コンクリート標準示方書の耐久性照査は、点検負担の大きい中性化から、水分浸透に基づいた鉄筋腐食へと転換しつつある。この転換には、照査体系の整備に加え、水分浸透を抑制する補修材の開発が必要不可欠である。ケイ酸塩系表面含浸材(補修材)に関する申請者の研究では、従来の工程を省略したところ、本来期待できない高い水分浸透抵抗性が確認された(特願2020-190615)。この結果からは、コンクリート空隙中においてケイ酸の凝集体(ゲル)が生成され、ゲルの吸水膨潤により空隙が閉塞したことで、水分浸透が抑制されるという仮説を得た。

2. 研究の目的

本課題では、【課題1】空隙におけるケイ酸ゲルの生成メカニズム(仮説)を検証することで、【課題2】コンクリートの空隙に生成させたケイ酸ゲルの膨潤作用によって、鉄筋腐食をもたらす雨水や海水の浸透を止めるという、新しい補修コンセプトを創出する。そして、【課題3】ケイ酸ゲルの持つ水圧緩衝や耐Ca溶脱抵抗性などの特性(深海生物が生成するゲル状アルミニウムも同じ効果を持つ)を生かし、深海構造物への適応性についても探る。

3. 研究の方法

コンクリート構造物の長寿命化には、雨水浸透を防ぐなど止水性を高めることが最も有効である。申請者が見出したケイ酸ゲルには、止水性を飛躍的に高める可能性がある。ただし、コンクリートの内部におけるケイ酸ゲル生成の制御と耐久性が課題である。本研究では、深海生物が生成するゲル状アルミニウムの、耐水圧メカニズム、耐Ca溶出メカニズムに学び、ケイ酸ゲルの耐久性を向上させる。以下に申請研究の方法の概要を示す。

課題1：コンクリート空隙中におけるケイ酸のゲル化およびガラス化メカニズムの解明

コンクリート構造物の長寿命化には、雨水浸透を防ぐなど止水性を高めることが最も有効である。申請者が見出したケイ酸ゲルには、止水性を飛躍的に高める可能性がある。ケイ酸ゲルを補修材として使用するには、コンクリートの内部におけるケイ酸のゲル化・ガラス化を制御する必要がある。ここでは、ケイ酸のゲル化・ガラス化メカニズムを解明し、両形態を同時に発現させる条件を見出すことが課題である。以下のようなステップでアプローチする。

【ケイ酸ゲルを効率的に生成する条件】には、ケイ酸の濃度、アルミニウム酸化物の種類、溶媒となるアルカリ性溶液のpHを設定し、ゲルの生成状況を観察することで、最適な条件を見出す。そして生成されたゲルについてゼータ電位と粒子径を計測し、ケイ酸の凝集構造と水の含みやすさの特性を把握する。

【ケイ酸のガラス化させる条件】を見出し、ケイ酸ガラスを空隙壁面(骨格)に生成させることで表面硬度を上げる。アルミニウムでケイ酸を架橋させたアルミノケイ酸塩鉱物を空隙壁面に生成させることで硬度を上げる。架橋を効率良く進めるための助剤として、Naイオンを含むアルカリ水溶液を添加するため、その添加量についても検討を行う。

【ゲル化とガラス化を同時に発現させる条件】では、骨格を補強する硬い鉱物をつくるためのアルミニウムの種類と、水圧を緩衝するゲルをつくるためのアルミニウムの種類について、溶媒のpHと含有するアルカリ金属を選定する。現段階では、深海生物(オオソコエビ)が生成するアルミニウムゲルを参考に、アルミニウム酸化物として、溶解したときに自身がゲルを生成する特性をもつ水酸化アルミニウムを候補として考えている。

課題2：促進劣化試験による耐久性の検証：実構造物への適応検討

上記のように開発された補修材を実務において使用してもらうためには、と補修したことによる効果(延命年数)の予測と材料自体の耐久性(補修の更新スパン)を評価する必要がある。ここでは、補修したコンクリートの中性化や塩害などに対する抵抗性と、生成されるゲルの二酸化炭素や塩化物イオンによる変質などについて、明らかにすることを課題とする。

実構造物への適応検討の試験には、コンクリート供試体を用いて促進暴露試験を行う。促進暴露試験にはサンシャインウェザーメータを使用し、日射と雨風による促進劣化作用を与える。また暴露試験後の止水効果およびケイ酸ゲルの変化を、吸水試験、空隙分析により確認する。

課題3：深海への挑戦：ゲルによる水圧緩衝とガラス化による骨格の補強

深海という極限環境に生息するオオソコエビは、アルミニウムを含んだゲルによって、水圧の低減だけでなく、高濃度の海水への外骨格のCaイオンの溶出を防いでいる。本研究で開発したケイ酸ゲルにも、浸透水による剥離破壊や溶解など、深海におけるコンクリートの劣化（岩波ら2020）を防ぐ可能性があると考えられる。

本課題では、アルミニウムを含んだケイ酸ゲルによる耐溶出抵抗性について、浸漬試験を行った試料のCa、Si濃度をEDS分析により評価する。また、200Paの水圧を載荷した供試体の変形・変質を観察する。

4．研究成果

コンクリート標準示方書の耐久性照査は、点検負担の大きい中性化から、水分浸透に基づいた鉄筋腐食へと転換しつつある。この転換には、照査体系の整備に加え、水分浸透を抑制する補修材の開発が必要不可欠である。本研究では、これまでの補修材の施工不良メカニズムの解明とともに、そのメカニズムを水分浸透抑制に利用し、鉄筋コンクリートの劣化因子である二酸化炭素、塩分、酸性雨との接触によりバリア機能を発現する「毒を以て毒を制す」新たな補修コンセプトを提案した。具体的な成果を以下に示す。

2022年度では、ケイ酸塩系表面含浸材（補修材）に関する申請者の研究では、従来の工程を省略したところ、本来期待できない高い水分浸透抵抗性が確認された（特願2020-190615）。本研究では、コンクリート空隙中においてケイ酸の凝集体（ゲル）が生成され、ゲルの吸水膨潤により空隙が閉塞したことで、水分浸透が抑制されるという仮説を立て、【課題1】空隙におけるケイ酸ゲルの生成メカニズム（仮説）を検証した。ゼータ電位による粒子間の斥力とvan der Waals力による引力の大小関係から、シリカ粒子の凝集と分散性状を示すことで明らかにし、論文としてまとめた。

2023年度は、【課題1】で得られたメカニズムを基に、ゲルを生成させたいセメント硬化体中の空隙構造の環境を想定した条件についても検討した。そのなかで、鉄筋の腐食因子である二酸化炭素、塩化物イオン、酸の共存環境において、ゲルが生成することを発見し、鉄筋コンクリートの劣化因子の侵入により空隙内でゲルを生成するバリア機能発現の可能性、新たな補修工法のヒントも見出すことができた（特願2023-138819）。補修材によるコンクリートの耐久性向上効果の検証【課題2】については、乾燥収縮試験、中性化促進試験、そして塩水浸漬試験において、補修効果が得られた。コンクリートの空隙に生成させたケイ酸ゲルの膨潤作用によって、鉄筋腐食をもたらす雨水や海水の浸透を止めるという研究成果は、新しい補修コンセプトを創出し、特許として認められ、2024年度の論文に投稿した。

そして、深海での高圧力下でのゲルによるコンクリートの保護については、2.5MPaの透水試験を行った際に、およそ1mm厚のゲル層だけでも、透水までの時間が100倍程度長くなることが確認でき、【課題3】ケイ酸ゲルの持つ水圧緩衝などの特性（深海生物が生成するゲル状アルミニウムも同じ効果を持つ）を生かした、深海構造物への適応性についてその可能性が見出された。

コンクリート構造物の長寿命化には、雨水など水分浸透抵抗性を高めることが最も有効である。本研究によって、コンクリート空隙中におけるケイ酸の凝集メカニズム解明【学理の究明】と同時に、ケイ酸ゲルの吸水膨潤による空隙の閉塞がもたらす水分浸透抑制効果の検証【新たな技術展開】が達成されたことで、老朽化が急速に進むコンクリート構造物の維持管理コストの削減に大きく寄与することが期待できる。そして、ケイ酸ゲルの水圧緩衝などの特性を生かし、レアメタルやメタンハイドレートなど海底資源の採掘現場の基礎となる深海構造物の保護材料としての展開も期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7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 吉田亮, 加藤諄, 近藤政晴, 藤正督,	4. 巻 Vol.45
2. 論文標題 表面含浸材に用いられるコロイダルシリカの凝集・分散メカニズムに関する研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 262-267
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 Shota Takinami, Ryo Yoshida, Ryo Kobayashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Water Pressure Variation on Porous Calcium-Silicate-Hydrates Using Molecular Dynamics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of Bridge Engineering Institute Conference	6. 最初と最後の頁 318-321
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 N'Da Yacoub Bouadou, Peter Kuiria Macharia, Lai Lai Mon and Ryo Yoshida,	4. 巻 -
2. 論文標題 Study of Water Absorption Properties in Actual Structure Concrete Based on Pore structure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of Bridge Engineering Institute Conference	6. 最初と最後の頁 400-403
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 Shota Takinami, Ryo Yoshida, Ryo Kobayashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Molecular dynamics on the pressure exerted by water molecules confined in microporous C-S-H	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The 16th International Congress on the Chemistry of Cement 2023	6. 最初と最後の頁 528-531
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 滝波将大, 吉田亮, 小林亮	4. 巻 46
2. 論文標題 C-S-H層間の水分子が及ぼす圧力変化に関する分子動力学法による検討	5. 発行年 2024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 -
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 後藤悠希, BOUADOU Nda Yacoub, 吉田亮, 岸利治	4. 巻 46
2. 論文標題 中性化した実構造物コンクリートの水分浸透性状と空隙構造に関する研究	5. 発行年 2024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 -
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 岩屋遼, 吉田亮, 橋本忍, 森河由紀弘, 太田敏孝	4. 巻 79
2. 論文標題 コンニャク石のインターロッキング構造を模倣した免振基礎の開発とその製造方法の提案	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 1 - 11
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9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊藤真弥, 吉田亮
2. 発表標題 長七たたきにおける骨材種類が強度特性および衝撃吸収性に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Peter Kuira Macharia, N'Da Yacoub Bouadou, Lai Lai Mon and Ryo Yoshida,
2. 発表標題 Study of Water Absorption Properties in Actual Structural Concrete Based onPore structure
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中田諒, 小林亮, 吉田亮
2. 発表標題 分子動力学法を用いたC-S-H微小空隙中の水分移動に関する基礎的検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 滝波将大, 吉田亮, 小林亮, 原宏明
2. 発表標題 分子動力学と量子化学に基づいた水分子によるC-S-Hの力学的特性・構造の変化に関する検討
3. 学会等名 令和5年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊藤真弥, 吉田亮
2. 発表標題 長七たたきの締固めによる骨材の粒度変化が強度特性に及ぼす影響
3. 学会等名 令和5年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 松長祐弥, 吉田亮, 原宏明, 瀧雅人
2. 発表標題 1H-NMR relaxometryによるT1-T2緩和相関測定を用いたOPCペースト硬化体の空隙構造の把握
3. 学会等名 令和5年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 後藤悠希, N'Da Yacoub Bouadou, Lai Lai Mon, 吉田亮
2. 発表標題 中性化による実構造物コンクリートの空隙構造と水分浸透性状に及ぼす影響
3. 学会等名 令和5年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 N'Da Yacoub Bouadou, Lai Lai Mon, Ryo Yoshida, Haruki Goto
2. 発表標題 Relationship between pore structure and moisture permeability properties of concrete subjected to different surfaces conditions
3. 学会等名 令和5年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊藤真弥, 吉田亮
2. 発表標題 長七たたきにおける骨材種類が強度特性および衝撃吸収性に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 52)セメント硬化体の表面含浸工法及びその表面保護状態の評価方法	発明者 名古屋工業大学	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-138819	取得年 2023年	国内・外国の別 国内

〔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
---------	---------