

平成 27 年 5 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360226

研究課題名(和文) ひび割れ修復機能を持つ超長寿命コンクリート系複合材料及び構造システムの開拓と展開

研究課題名(英文) Development of self-repairing concrete-based composite materials and structural systems

研究代表者

荒木 慶一 (Araki, Yoshikazu)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50324653

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：寿命が百年を超え数百年に至るような超長寿命コンクリート構造物の実現に向け、これまでに実施してきた研究成果を基に、ひび割れを自動的もしくは極めて容易に修復できる機能を持つ新しいコンクリート系複合材料及び構造システムを開発する。実験を通じてひび割れ修復性、施工性、構造性能など総合的な観点から提案複合材料及び構造システムの評価を行う。また実用化に向け、化学・力学モデルを構築し材料設計と構造設計に必要な基礎資料を整備する。

研究成果の概要(英文)：In order to realize super long service life of more than 100 to 1000 years, we develop a new type of self-repairing concrete based composite material and structural systems. In the present self-repairing concrete, the cracks can be automatically or very easily repaired. We perform a number of experiments of the proposed composite material and structural systems to study the repairing capability, constructability, and structural performance. From the experimental results, we make chemical and mechanical models and prepare fundamental data necessary for material and structural design.

研究分野：建築構造学

キーワード：超長寿命コンクリート 自己修復 ひび割れ 超弾性合金 形状記憶合金 バクテリア 自己治癒

1. 研究開始当初の背景

適切に設計施工されたコンクリート構造物は一定の構造性能と耐久性を備えているが寿命は数十年程度である。通常より水セメント比を低くした高耐久コンクリートを用いた場合でも寿命は百年程度である。近年、環境問題への意識の高まりや経済面の制約などの背景の下で、寿命が百年を超え数百年に至るようなコンクリート構造物の超長寿命化が社会的要請となりつつある。

コンクリート構造物では、地震、温度変化、乾燥収縮、凍結融解などによりひび割れが発生する。可視レベルのひび割れは、強度や剛性など構造性能の劣化や、気密性や防水性の低下につながる。目視で確認できない微細なひび割れであっても、空気中の炭酸ガス、酸性雨、塩分が躯体に入り込みやすくなり中性化や塩害を促進することで耐久性を損なう。特に地震の頻度が高い我国では、数百年にわたりひび割れの発生を完全に阻止することは困難（事実上不可能）なため、真の超長寿命化を実現するにはひび割れを自動的もしくは極めて容易に修復できる機能を持つコンクリート系の複合材料及び構造システムの開発が必要不可欠である。修復はおろか検査すら難しい特殊構造物（放射性廃棄物処理施設など）では、ひび割れ修復へのニーズが特に高い。

このような背景の下、コンクリート工学の分野では自動的にひび割れを修復する機能を持つ自己修復コンクリートに関する研究が国内外で注目を集めている。これまでに提案されたひび割れ修復機構は、(1)セメント自体の水和反応を利用するものと、(2)補修材（接着剤）を内蔵した脆性材料（ガラスなど）のカプセルやパイプをコンクリートに一体化させたものに大別できる。前者の機構は経済性や施工性の面で優れており、繰返し修復を行えるという長所を持つ。しかし、水和反応には水が必要なため屋外など水の供給が可能な箇所では適用できず、修復に時間を要し強度回復も明確でないという短所を持つ。一方、後者の機構は適用箇所に制限がなく屋内でも適用でき、修復に要する時間も短く強度回復も明確であるという長所を持つ。しかし、脆性材料を添加するため経済性や施工性が低く、修復は一度しか行えないという短所を持つ。

2. 研究の目的

- (1) Pareek の network 中空路を用いたひび割れ修復機構と、荒木らの銅系超弾性合金主筋を利用したひび割れ制御機構の組み合わせによる新しい超長寿命コンクリート系構造システムを提案する。
- (2) 実験を通して提案構造システムの修復性、施工性、構造性能などを検討する。実験結果を基に力学モデルを構築し、材料設計及び構造設計の基礎資料を整備する。

本研究で提案する複合材料や構造システムが実用化され多くの建物で採用されれば、構造物の超長寿命化による環境負荷低減や、地震後の即時復旧による構造物の機能維持の面で大きな貢献が果たせる。我国のみならず世界的に見ても、新規建造物の中でコンクリート系構造物が占める割合は依然として高いため、本研究成果が実用化された時の波及効果は極めて高い。

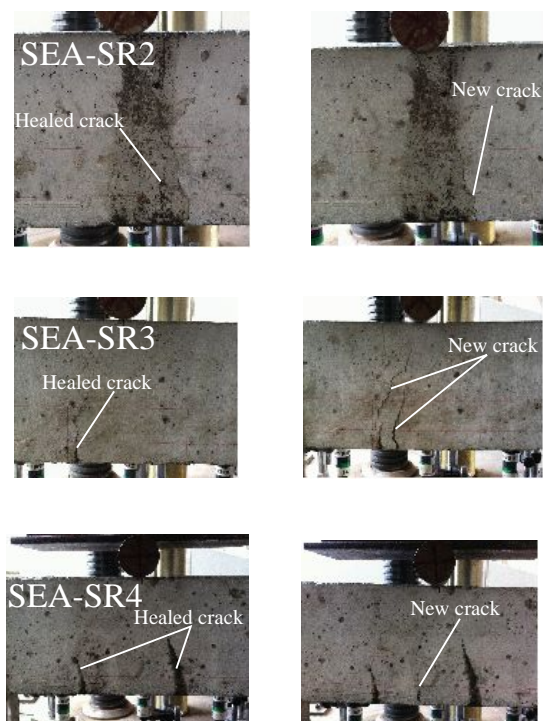
3. 研究の方法

- (1) 複数のひび割れ修復機構（network 中空路、バクテリア）とひび割れ制御機構（銅系超弾性合金主筋、通常主筋、通常短繊維）の組み合わせに対して、縮小梁試験体を作成してひび割れの生成と修復を繰返し行う実験を実施し、ひび割れの修復性を検討する。
- (2) 上記実験結果を基に、化学モデルと力学モデルを構築し、材料設計及び力学設計の基礎資料を整備する。また、適用箇所や用途に応じて最適な手法を選択するためのデータベースを作成する。

4. 研究成果

- (1) 超弾性合金主筋とネットワーク孔を用いた縮小梁部材のひび割れ修復実験

銅系超弾性合金棒を主筋の一部に用い、予め設置したネットワーク孔を用いてエポキシ樹脂を圧送するコンクリートのひび割れ修復技術について、縮小梁部材を用いた実験を実施した。人為的に与えたひび割れに対して、ひび割れ幅に応じてエポキシの粘性を変更することで、効果的にひび割れを修復できることを実証した。修復が的確に行われ、再載荷により新しいクラックが発生していることを示す写真を以下に示す。



また、超弾性合金棒の表面処理とコンクリートとの付着の関係について実験的検討を行い、付着を取り除くことでひび割れ閉塞率や変形回復率を大幅に向上できることを示した。

さらに、有限要素法を用いて実験結果を再現できる力学モデルを構築した。

(2) 超弾性合金を用いた RC 梁部材自己修復システムの開発

本研究では、発生したひび割れを検知し、自動的に修復を行う自己修復コンクリート用システム（以下、Auto Self-Repairing System ASRS）を開発し、引張側主筋に SEA を用いた RC 梁部材の曲げ試験を行った。その結果、SEA の特性により、除荷後の変形回復率が高くなり、ひび割れの自己修復が容易に行う事が出来ることを確認した。ASRS を用いる事で常時ひび割れをセンサー監視する事により、ひび割れの検出から補修剤の注入までの過程を完全自動化で素早く行う事が可能となった。

(3) 自己修復システムを付与したモルタルの鉄筋腐食に対する抵抗性の検討

本研究では、ひび割れの自己修復機能を有するモルタルの耐久性向上を目的として、モルタル内部に設けたネットワークに撥水及び遮塩機能を有するシラン系含浸材を注入し、ネットワーク及び鉄筋の周辺に劣化因子からの保護層を形成させた。さらに、ひび割れを発生させて自己修復を行った後、塩水浸漬による乾湿繰り返し試験を行った。その結果、モルタル表面からの Cl⁻ の浸透が抑制されることを確認した。また、自己修復により、ひび割れが閉塞され、鉄筋腐食の抑制と共に曲げ強度が回復することを確認した。

(4) 高耐久高密度コンクリートの開発と耐久性評価実験

放射性物質を遮蔽するための、比重 5 の高密度を持ち、打ち込み(自由な整形)が可能なコンクリートの配合について検討を行い、遮蔽性能実証実験、強度試験、耐久性評価試験を実施した。本研究で見出した配合は、従来の重量コンクリートと比較して水セメント比が低く、所定の遮蔽性能を満たしたうえで、高強度かつ高耐久性を有することを実証した。

(5) バクテリアを用いたひび割れ修復実験

オランダのデルフト工科大学と共同で、バクテリアによるモルタルのひび割れ修復機能に関して、ポリマーセメントモルタルを対象に実験による検討を行った。適切な種類のポリマーを適量配合することで、従来のモルタルと比較して、3 倍程度の幅を持つひび割れを修復できることを実験的に実証した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 14 件)

- [1] 上野 拓, 尾形 雅人, 荒木 慶一, Pareek, S.: 超弾性合金を用いた自己修復 RC 梁部材の開発, コンクリート工学年次論文集, 掲載決定
- [2] 尾形 雅人, 荒木 慶一, Pareek, S.: 自己修復システムを付与したモルタルの鉄筋腐食に対する抵抗性の検討, コンクリート工学年次論文集, 掲載決定
- [3] Pareek, S., Shrestha, K.C., Suzuki, Y., Omori, T., Kainuma, R., Araki, Y.: Feasibility of externally activated self-repairing concrete with epoxy injection network system and Cu-Al-Mn superelastic alloy reinforcing bars, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, 105027, 2014.
DOI:10.1088/0964-1726/23/10/105027
- [4] Kimura, K., Suzuki, Y., Takata, T., Fujikura, Y., Kubota, H., Lee, Y., Pareek, S., Araki, Y.: A development of optimized radiation shielding design method for contaminated soil in Fukushima, *Progress in Nuclear Science and Technology*, Vol. 4, pp. 51-55, 2014.
DOI: 10.15669/pnst.4.51
- [5] Pareek, S., 三浦 裕騎, 荒木 慶一, Shrestha, K.C.: 超弾性合金及び自己修復ネットワークシステムを用いた RC 梁部材の曲げ性状に及ぼす付着の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, pp. 1642-1647, 2014.
- [6] 尾形雅人, Pareek, S.: ネットワーク及び補修剤を用いた自己修復システムの防錆性向上に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, pp. 1654-1659, 2014.
- [7] 鈴木 裕介, 木村 健一, Pareek, S., 荒木 慶一: 鉄粒粉骨材を用いた高密度モルタルの基礎物性と γ 線遮蔽性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, pp. 1762-1767, 2014.
- [8] Shrestha, K.C., Araki, Y., Nagae, T., Koetaka, Y., Suzuki, Y., Omori, T., Sutou, Y., Kainuma, R., Ishida, K.: Feasibility of Cu-Al-Mn superelastic alloy bars as reinforcements in concrete beams, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, 025025, 2013.
DOI:10.1088/0964-1726/22/2/025025
- [9] 鈴木 裕介, 木村 健一, Pareek, S., 藤倉 裕介, 李 有震, 荒木 慶一: 放射性セシウム汚染土体積線源を用いたコンクリート円筒容器の γ 線遮蔽性能評価, コンクリート工学論文集, 第 24 巻, 第 2 号, pp. 43-52, 2013.
- [10] 木村 健一, 鈴木 裕介, 藤倉 裕介, 荒

木 慶一: 放射能汚染灰及び電解水素水を用いたモルタル供試体の放射線量変化に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, pp. 1489-1494, 2013.

- [11] 大平 旭洋・三浦 裕騎・Pareek, S.: ネットワーク及び補修剤を用いた自己修復システムによる耐久性向上に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, pp. 1393-1398, 2013.
- [12] Shrestha, K.C., Miura, Y., Pareek, S., Araki, Y.: Activated network self-healing of reinforced concrete beams with super-elastic alloy bars, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, pp. 1399-1404, 2013.
- [13] Shrestha, K.C., Pareek, S., Omori, T., Araki, Y.: Feasibility of self-repair network system in concrete beams reinforced with Cu-Al-Mn superelastic alloy bars, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, pp. 1438-1443, 2012.
- [14] 大平 旭洋, 三浦 裕騎, Pareek, S., ネットワーク及び補修剤を用いた自己修復システムの非破壊試験によるコンクリートひび割れの自己修復性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, pp. 1444-1449, 2012.

〔学会発表〕(計 8 件)

- [1] Shrestha, K.C., Pareek, S., Suzuki, Y., Fujikura, Y., Kimura, K., Omori, T., Kainuma, R., Araki, Y.: Activated network repairing of concrete beams reinforced with Cu-Al-Mn superelastic alloy bars, *Proceedings of the 6th World Conference on Structural Control and Monitoring*, Barcelona, Spain, July 15-17, 2014.
- [2] Pareek, S.: Radiation shielding properties and freeze-thaw durability of high-density concrete for storage of radioactive contaminated soil in fukushima, 1st International conference on Ageing of Materials and Structures (AMS'14), DCMat Ageing Centre, Delft University of Technology, Delft, Netherland, May 16-18, 2014.
- [3] 三浦 裕騎, 荒木 慶一, Pareek, S., Shrestha, K.C.: Cu-Al-Mn 超弾性合金及びネットワークを用いた RC 梁における自己修復機能の向上に関する検討, 日本建築学会大会, 北海道大学, 2013 年 8 月 30 日
- [4] Pareek, S., 鈴木 裕介, 木村 健一, 荒木 慶一, 藤倉 裕介: 放射性セシウム汚染灰を用いた超高密度モルタル容器の γ 線遮蔽性能評価: その 1 高密度モルタルの材料物性, 日本建築学会大会, 北海道大学, 2013 年 8 月 30 日
- [5] 鈴木 裕介, 木村 健一, Pareek, S., 荒木

慶一, 藤倉 裕介: 放射性セシウム汚染灰を用いた超高密度モルタル容器の γ 線遮蔽性能評価: その 2 高密度モルタルの促進中性化試験及び γ 線遮蔽性能実験, 日本建築学会大会, 北海道大学, 2013 年 8 月 30 日

- [6] 木村 健一, 鈴木 裕介, Pareek, S., 荒木 慶一, 藤倉 裕介: 放射性セシウム汚染灰混入モルタル供試体の放射線量変化に関する基礎的研究, 日本建築学会大会, 北海道大学, 2013 年 8 月 30 日
- [7] 荒木 慶一, 鈴木 裕介, 木村 健一, Pareek, S., 藤倉 裕介: 放射性セシウム汚染灰混入モルタル供試体の放射線量変化に関する基礎的研究, 日本建築学会大会, 北海道大学, 2013 年 8 月 30 日
- [8] 鈴木 裕介, 木村 健一, 李 有震, Pareek, S., 荒木 慶一, 藤倉 裕介: 超重量コンクリートを用いた放射能による汚染物格納容器の開発, 日本建築学会大会, 名古屋大学, 2012 年 9 月 12 日
- [9] 三浦 裕騎, 大平 旭洋, Pareek, S., 荒木 慶一, Shrestha, K.C.: Cu-Al-Mn 超弾性合金を用いた自己修復コンクリートの基礎的研究(維持保全), 日本建築学会大会, 名古屋大学, 2012 年 9 月 12 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: コンクリート構造物のひび割れ補修部の検知方法
発明者: パリーク サンジェイ
権利者: 学校法人日本大学
種類: 特許
番号: 特願 2011-219075
出願年月日: 平成 23 年 10 月 3 日
国内外の別: 国内

取得状況(計 1 件)

名称: コンクリート構造物のひび割れ補修方法及びコンクリート構造物
発明者: パリーク サンジェイ
権利者: 学校法人日本大学
種類: 特許
番号: 第 5579031 号
出願年月日: 平成 22 年 11 月 26 日
取得年月日: 平成 26 年 7 月 18 日
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒木 慶一 (ARAKI Yoshikazu)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50324653

(2)研究分担者

パリーク サンジェイ (PAREEK Sanjay)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：20287593

(3)連携研究者

大森 俊洋 (OMORI Toshihiro)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60451530