

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02376

研究課題名(和文)無機新材料の利用を核とするコンクリート系複合材料・部材・補修補強技術の開拓と展開

研究課題名(英文)Development of concrete composite materials, members, and repairing and strengthening techniques using new inorganic materials

研究代表者

荒木 慶一 (Araki, Yoshikazu)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：50324653

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、材料工学と構造工学の融合によりコンクリート構造の低炭素化と災害時機能維持を実現するための新しい材料・部材・補修補強技術の開発に向けた材料開発と基礎的検討を行った。具体的な成果は以下の通り。(1)単結晶形状記憶合金の量産技術を開発した。(2)コンクリート部材中の形状記憶合金の効率的な配置法を見出した。(3)アルカリ活性化材料のミクロ組織と力学特性の関係を明らかにした。(4)アルカリ活性化材料を既存鉄筋コンクリート構造の補修・補強材として利用することの実現性を確認した。(5)玄武岩繊維で補強したコンクリート部材の力学特性と耐火性能を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術面：本研究で扱う構造部材や補修補強法の実験データは皆無に近く、特性にも未知の点が多い。特に構造部材の開発は国際的に見ても極めて挑戦的な課題であり、開発に成功すれば建築構造・材料とその周辺分野における大きなブレークスルーとなる可能性を秘めている。

実用面：地球温暖化の深刻化、地震活動の活発化、長引く経済の停滞などの背景の下、コンクリート系構造の低炭素化と災害時機能維持を実現するための高性能で低廉な新しい材料や技術の開発が喫緊の社会的要請となっている。本研究はこの要請に直接応えるものである。

研究成果の概要(英文)：We have done fundamental studies on the development of new inorganic materials, members, and repairing and strengthening techniques for sustainable and resilient concrete structures. (1) We have developed a new technique for mass production of single crystal shape memory alloys. (2) We have found an efficient placement of shape memory alloys in concrete members. (3) We have examined the relationship between the mechanical properties and microstructure of alkali-activated materials. (4) We have confirmed excellent bond strength between alkali-activated materials and reinforced concrete. (5) We have examined the performance of concrete structures reinforced with basalt fibers.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：無機材料 アルカリ活性化材料 形状記憶合金 玄武岩繊維 コンクリート ジオポリマー 補修補強

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造の低炭素化に向け、世界の CO₂ 排出量の約 1 割を占めるセメントの利用削減、産業副産物の利用促進、耐久性向上による長寿命化に関する研究が国内外で活発化している。セメント利用量削減に向け、産業副産物であるフライアッシュやスラグを利用する研究が行われているが、これらの産業副産物を利用する場合でもセメント利用量削減や、これに伴う CO₂ 排出量削減には本質的な限界がある。既存・新設どちらのコンクリート構造でも、耐震性と耐久性の向上による長寿命化には繊維補強が効果的である。しかし、従来の繊維材料は耐久性、耐火性、経済性、施工性などいずれかの面で課題が残る。

このような状況の下、著者らは新しい結合材としてアルカリ活性化材料に、新しい繊維補強材料として玄武岩繊維に着目し、上記課題を克服すべく研究を展開している。アルカリ活性化材料は産業副産物であるフライアッシュやスラグに強アルカリ液を加えることで硬化する結合材で、セメントの完全代替(セメントレス化)が可能で CO₂ 排出量を大幅に削減でき(ポルトランドセメントと比較して 30~80% 程度の削減が可能)、耐火性や耐久性にも優れる。玄武岩繊維は溶岩の玄武岩を原材料とし、他の繊維材料と比較して際立った耐火性と耐久性を持つ。

応募者らは現在、優れた耐火性、耐久性、環境親和性という無機材料の特徴を最大限に活かすべく、アルカリ活性化材料と玄武岩繊維を利用した構造部材や補修補強技術の開発に向けた基礎研究を進めている。しかし、アルカリ活性化材料も玄武岩繊維も比較的新しい材料であるため、各材料単独でも実験データは限られている。

もう一つの課題であるコンクリート構造の災害時(特に地震時)の機能維持の実現に向け、プレストレス圧着を用いることで損傷や残留変形を抑制する自己復元構造に関する研究が国内外で活発化しており、実構造物への適用例も見られる。しかし、プレストレス導入が必要なため施工性や経済性に課題が残る。

このような状況の下、著者らは加熱することなく荷重を除くのみで変形が回復する超弾性特性と呼ばれる特性を持つ高性能で低廉な新しい銅系形状記憶合金の開発に成功した。また、形状記憶合金を主筋の一部に適用したコンクリート構造の実験や試設計を通して、開発中の形状記憶合金の利用により耐震・制震構造と同程度のコストで自己復元構造を実現できることを示した。しかし、設計に必要な実験データの整備や力学モデルの構築は緒についたばかりである。

2. 研究の目的

本研究では材料工学と構造工学の融合によりコンクリート系構造の低炭素化と災害時機能維持を実現するための新しい無機材料を用いたコンクリート系複合材料・部材・補修補強技術を開発し、設計法構築に向けた学理を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

1. アルカリ活性化材料、玄武岩繊維、形状記憶合金など高性能で低廉な無機新材料と、これらを用いたコンクリート系複合材料を開発する。
2. 製造法の最適化に向け、材料組成やナノ・ミクロ組織と物理・化学的性質の関係を調査する。
3. アルカリ活性化材料を用いた補修補強技術の開発に向け、アルカリ活性化材料と鋼材とコンクリートとの付着特性を調査する。
4. 地震や火災による損傷の制御と災害後の継続利用が可能なコンクリート構造の開発に向け、玄武岩繊維や形状記憶合金で補強したコンクリート部材の性能評価を行う。

4. 研究成果

本研究課題で得られた主要な成果は以下の通りである。

(1) 単結晶形状記憶合金の量産技術の開発^[4]

銅を主成分とする形状記憶合金の単結晶部材が量産できる製造プロセスを開発した。通常、金属は多数の結晶粒で構成される。本研究では、単純な熱処理で特定の結晶粒が急激に大きくなる「異常粒成長現象」を引き起こすメカニズムを解明した。また、長さ70cmの単結晶棒材の製造に成功した。実用面では、単結晶形状記憶合金部材の製造に要するコストを飛躍的に低減できる。また、部材を単結晶化することで、変形回復や疲労などの特性を数倍から数十倍に向上でき、建

物の耐震性を高める構造部材としての実用化に道筋がついた。

(2) 形状記憶合金で補強したコンクリート部材の力学特性の調査[3]

ここでは、主筋の一部（梁端などのヒンジ形成位置）に超弾性合金を代替したRC梁が、一般的なRC梁に比べ強度及び剛性などの構造性能で劣ることに着目し、形状記憶合金の配筋位置を変えるヒンジリロケーションによって、当梁の構造性能がどの程度改善されるか実験的に検討した。結果として、形状記憶合金配筋位置を梁中央側に移したヒンジリロケーションによって、耐力・剛性・エネルギー吸収量などが向上することを確認した。また、有限要素解析法を用いて、実験結果を精度よく推定できることを確認した。

(3) アルカリ活性化材料のミクロ組織と力学特性の調査[1]

フライアッシュ、アルカリ溶液、シリカガラスによるアルカリ活性硬化体ならびにゼオライト型ジオポリマーの製造メカニズムについて構成比を変化させて検討した。分析としては、FE-SEM/EDS分析、²⁹Si-、²⁷Al-MAS-NRA、FT-IR、TG/DTG、インデンテーション、である。分析の結果、シリカガラスを用いた場合には、容易にゼオライト型の3次元結合が生成され強度が発展しやすい傾向にあること、フライアッシュにアルカリ活性を与えた場合には、シリカが1次的に生成され、AlもSiのネットワークの構築に貢献すること、pHが高い場合、NaがSi-ONaを生成して、ネットワークの構築が一定程度発展後に緩慢になることが推察され、強度停滞の要因となることを示唆された。

(4) アルカリ活性化材料の付着特性の調査[2]

優れた耐酸性、耐熱性、強度を持つアルカリ活性化材料を既存鉄筋コンクリート構造の補修材として利用することと実現性を検討するために、アルカリ活性化材料とコンクリート、鉄筋、鋼板との付着特性を調査した。その結果、アルカリ活性化材料は、乾燥したコンクリート、鋼板、鉄筋とは、母材の強度以上の付着強度を確保できることを確認した。一方、乾燥していないコンクリートでは、水の存在によりアルカリ濃度が低下し、付着強度が低下することを見出した。

(5) 玄武岩繊維補強によるコンクリートの耐火性能向上[5]

設計基準強度80～100MPaを有する超高強度コンクリートに、高い引張強度及び優れた耐熱性を有するバサルト繊維を用いた、超高強度バサルト繊維補強コンクリートの基礎力学性状を調査した。さらには、ポリプロピレン繊維を混合させた、超高強度ハイブリッド型バサルト繊維補強コンクリートの爆裂抵抗性について比較検討を行った。その結果、超高強度バサルト繊維補強コンクリートは高い力学的特性、超高強度ハイブリッド型バサルト繊維補強コンクリートは優れた爆裂抵抗性及び残存圧縮強度を示すことを見出した。

主要な研究業績

- [1] Matsuda, A., Maruyama, I., Meauwad, A., Pareek, A., Araki, Y.: Reaction, phases and microstructure of fly ash-based alkali-activated material and geopolymer, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 17, pp. 97-103, 2019, DOI: 10.3151/jact.17.93
- [2] Pareek, S., Kashima, H., Maruyama, I., Araki, Y.: Adhesion characteristics of geopolymer mortar to concrete and rebars, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 258, 01012, 2019, DOI:10.1051/mateconf/201925801012
- [3] Pareek, S., Suzuki, Y., Araki, Y., Youssef, M.A., Meshaly, M.: Plastic hinge relocation in concrete beams using Cu-Al-Mn SMA bars, *Engineering Structures*, Vol. 175, pp. 765-775, 2018, DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.08.072
- [4] Kusama, T., Omori, T., Saito, T., Kise, S., Tanaka, T., Araki, Y., Kainuma, R.: Ultra-large single crystals by abnormal grain growth, *Nature Communications*, Vol. 8, 354, 2017
- [5] 高橋広大, Sanjay PAREEK, 小澤満津雄: バサルト繊維を用いた超高強度コンクリートの基礎性状及び高温時における爆裂抵抗性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, pp. 1117-1122, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Matsuda Akira, Maruyama Ippei, Meawad Amr, Pareek Sanjay, Araki Yoshikazu	4. 巻 17
2. 論文標題 Reaction, Phases, and Microstructure of Fly Ash-Based Alkali-Activated Materials	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 93 ~ 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/jact.17.93	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 該当する
1. 著者名 Pareek Sanjay, Kashima Hiroo, Maruyama Ippei, Araki Yoshikazu	4. 巻 258
2. 論文標題 Adhesion characteristics of geopolymer mortar to concrete and rebars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 01012 ~ 01012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/mateconf/201925801012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kise S, Mohebbi A, Saïidi M S, Omori T, Kainuma R, Shrestha K C, Araki Y	4. 巻 27
2. 論文標題 Mechanical splicing of superelastic Cu-Al-Mn alloy bars with headed ends	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Smart Materials and Structures	6. 最初と最後の頁 065025 ~ 065025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-665X/aabf0d	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 該当する
1. 著者名 Pareek S., Suzuki Y., Araki Y., Youssef M.A., Meshaly M.	4. 巻 175
2. 論文標題 Plastic hinge relocation in reinforced concrete beams using Cu-Al-Mn SMA bars	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 765 ~ 775
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engstruct.2018.08.072	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 該当する

1. 著者名 鹿島大雄、Sanjay PAREEK、丸山一平、荒木慶一	4. 巻 40
2. 論文標題 養生条件及びAI(OH)3の添加量の違いがGPペーストの諸特性に及ぼす影響に関する実験的研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会年次論文集	6. 最初と最後の頁 1827-1832
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 Sanjay PAREEK、鹿島大雄、丸山一平、荒木慶一	4. 巻 40
2. 論文標題 各種異なる母材及び鉄筋に対するジオポリマーモルタルの付着特性に関する基礎的研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会年次論文集	6. 最初と最後の頁 1839-1844
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 松田明、丸山一平、Sanjay PAREEK、荒木慶一	4. 巻 40
2. 論文標題 MICROSTRUCTURE AND ELEMENT COMPOSITION OF AMORPHOUS IN FA-BASED ALKALI ACTIVATED MATERIAL AND GEOPOLYMER	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会年次論文集	6. 最初と最後の頁 1857-1862
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 Kusama Tomoe, Omori Toshihiro, Saito Takashi, Kise Sumio, Tanaka Toyonobu, Araki Yoshikazu, Kainuma Ryosuke	4. 巻 8
2. 論文標題 Ultra-large single crystals by abnormal grain growth	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature Communications	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) 10.1038/s41467-017-00383-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 松田明, 丸山一平, Sanjay PAREEK, 荒木慶一	4. 巻 39
2. 論文標題 REACTION AND RESULTANT PHYSICAL PROPERTIES OF FA-BASED ALKALI ACTIVATED MATERIALS AND GEOPOLYMER CURED AT 80	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 2041-2046
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 鹿島大雄, Sanjay PAREEK, 丸山一平, 荒木慶一	4. 巻 39
2. 論文標題 各種離型剤によるジオポリマーモルタルと鋼板の剥離性状に関する研究	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 2053-2058
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 鈴木裕介, 上野拓, パリーク サンジェイ, 荒木慶一	4. 巻 39
2. 論文標題 超弾性合金の配筋位置によってヒンジリロケーションしたRC梁の構造性能評価に関する基礎実験	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 1351-1356
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 高橋広大, Sanjay PAREEK, 小澤満津雄	4. 巻 39
2. 論文標題 バサルト繊維を用いた超高強度コンクリートの基礎性状及び高温時における爆裂抵抗性に関する実験的研究	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 1117-1122
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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 PEB Erdene, S Pareek, S Danzandorj, S Sambuuniam, R Thombare
2. 発表標題 Use of fly ash in production of foam glass
3. 学会等名 EuroCoalAsh Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S Sambuuniam, S Pareek, PEB Erdene, R Thombare, S Danzandorj
2. 発表標題 Study on utilization of fly ash in production of lightweight aggregate
3. 学会等名 EuroCoalAsh Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S Sambuuniam, S Danzandorj, S Pareek, PEB Erdene
2. 発表標題 A study on fiber reinforced geopolymer mortars
3. 学会等名 International Conference on Construction and Innovation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 PEB Erdene, S Danzandorj, S Pareek, S Sambuuniam
2. 発表標題 A review of phase change materials in concrete for a sustainable built environment
3. 学会等名 International Conference on Construction and Innovation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古川 敦士 , 鈴木 裕介 , 谷口 与史也 , 喜瀬 純男 , PAREEK Sanjay , 荒木 慶一
2. 発表標題 銅系超弾性合金を用いた自己復元型RC梁の構造特性に関する実験研究 PVA繊維との併用による変形及び損傷の制御
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古川 敦士 , 鈴木 裕介 , 喜瀬 純男 , PAREEK Sanjay , 荒木 慶一
2. 発表標題 塑性ヒンジ領域に銅系超弾性合金を用いた自己復元型RC梁の構造性能評価に関する実験 その2 実験結果
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木 裕介 , 古川 敦士 , 喜瀬 純男 , PAREEK Sanjay , 荒木 慶一
2. 発表標題 塑性ヒンジ領域に銅系超弾性合金を用いた自己復元型RC梁の構造性能評価に関する実験 その1 実験概要
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古川 敦士 , 鈴木 裕介 , 喜瀬 純男 , PAREEK Sanjay , 荒木 慶一
2. 発表標題 銅系超弾性合金を用いた自己復元型RC梁の構造性能改善に関する実験研究
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木 裕介, 喜瀬 純男, PAREEK Sanjay, 荒木 慶一
2. 発表標題 超弾性合金の配筋断面にヒンジリロケーションしたRC造部材の構造性能評価に関する実験研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松田 明, 丸山 一平, Pareek Sanjay, 荒木 慶一
2. 発表標題 bservation of reaction products in FA based alkali activated material and geopolymer using FE-SEM
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松田 明, 丸山 一平, Pareek Sanjay, 荒木 慶一
2. 発表標題 フライアッシュを用いたジオポリマー及びアルカリ活性粉体の生成条件の違いに関する検討
3. 学会等名 日本建築学会東海支部
4. 発表年 2017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	S a n j a y P A R E E K (Pareek Sanjay) (20287593)	日本大学・工学部・准教授 (32665)	

6. 研究組織（つづき）

	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	丸山 一平 (Maruyama Ippei) (40363030)	名古屋大学・環境学研究科・教授 (13901)	
研究分担者	長江 拓也 (Nagae Takuya) (90402932)	名古屋大学・減災連携研究センター・准教授 (13901)	
研究分担者	久保田 淳 (Kubota Jun) (20443723)	鹿島建設株式会社（技術研究所）・建築構造グループ・上席 研究員 (92604)	
研究分担者	佐々木 智大 (Sasaki Tomohiro) (00773409)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・その他部局等・主任 研究員 (82102)	