

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：13901

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2022

課題番号：16KK0149

研究課題名（和文）無機新材料を用いたコンクリート系複合材料・部材のマルチスケール力学モデル構築（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Multi-scale models for concrete composites using new inorganic materials (Fostering Joint International Research)

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） 10,800,000円

渡航期間： 1ヶ月

研究成果の概要（和文）：大地震後のコンクリート構造物の機能維持の実現に向け、地震時に変形が集中する塑性ヒンジ部の主筋を超弾性合金（大変形後も荷重を除くだけで変形が回復する合金）で代替する構造の開発を進めている。本課題では特に新しく開発中の銅系超弾性合金を主たる対象として、ミクロ組織と力学特性や腐食特性との関係を調査した。また、得られた力学特性をもとに、他部材との接合を行うための手法を新たに開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大地震後の構造物の機能維持の実現は、地震国である我が国において喫緊の社会的要請である。この要請に応えるべく、超弾性合金を住宅などの建築物や橋梁などの土木構造物に適用する研究を展開している。本課題では、機能維持の実現に向けたキーマテリアルとなるポテンシャルを持つ新しい銅系超弾性合金を対象として、材料のミクロ組織と力学特性を明らかにした。また、得られた力学特性に基づき、従来の超弾性合金で課題となっていた他部材との接合方法を新たに開発した。これらの成果に基づき、米国において銅系超弾性合金を用いた橋梁の建設に向けた国際共同研究プロジェクトが始動するなど、社会実装に向けて大きな進展が得られた。

研究成果の概要（英文）：In order to maintain the functionality of concrete structures after a major earthquake, we are developing a structure wherein steel reinforcing bars at plastic hinge zones are replaced by superelastic alloy bars (alloys that recover its original shape by removing the load after a large deformation). In this project, the relationships between microstructure, mechanical properties, and corrosion properties were investigated, especially for the newly developed copper-based superelastic alloys. Furthermore, based on the obtained mechanical properties obtained, we have developed a new method for bonding the alloys with other materials.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：コンクリート 複合部材 力学モデル マルチスケール 超弾性合金 形状記憶合金

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 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

これまでに鉄筋コンクリート構造について多くの研究がなされ、過去の地震被害をふまえて必要な鉄筋量を確保することで十分な靱性を担保する設計が主流となっている。しかし、主筋が塑性変形を受けるような大変形が生じると、コンクリートに大きなひび割れや変形が残ったり、主筋の座屈により周辺のコンクリートが剥落するなど、継続利用や早期復旧が困難になる危険性がある。

近年、地震時に変形が集中し塑性変形が生じる塑性ヒンジに位置する主筋の一部を超弾性合金（大変形後も荷重を除くだけで変形が回復する合金）に置換し、その周辺のコンクリートを繊維補強することで、残留ひび割れや残留変形を抑制する研究が米国を中心に行われている。

これまでの研究開発はニッケルとチタンの合金である Ni-Ti 合金を対象に行われてきたが、Ni-Ti 合金では大径材で良好な変形回復や十分な靱性を実現するのが難しく、接合のための加熱を伴う加工により端部周辺が脆化する危険性がある。

このような状況の下、著者らは科研費基盤 (A) 16H02376 などの助成の下で新しい銅系の超弾性合金である Cu-Al-Mn 合金をコンクリート部材の塑性ヒンジ部の主筋として利用する研究を進めている。本課題は、科研費基盤 (A) 16H02376 を基課題としており、コンクリート部材の力学モデル構築に向けて、米国の研究者と共同で Cu-Al-Mn 合金をコンクリート部材に適用するための基礎的な検討を行った。

2. 研究の目的

- (1) Cu-Al-Mn 合金のマイクロ組織と力学特性の関係を明らかにする。特に単結晶の場合と複数結晶で結晶粒界がある場合について、結晶構造が疲労特性に及ぼす影響を明らかにする。
- (2) Cu-Al-Mn 合金を他の部材に接合するための手法を開発する。材料のマイクロ組織と接合部の力学的特性の関係を明らかにする。
- (3) Cu-Al-Mn 合金の基本的な耐食性を調査する。また、腐食が力学的特性に及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究の方法

- (1) 疲労特性：単結晶棒材（図 1 (a)）と複数結晶板材（図 1 (b)）を対象として、結晶構造の違いが疲労特性に及ぼす影響を繰返し引張試験により調査する。
- (2) 接合方法：カップラーを用いて他部材と接合するために熱間加工であるヘッディング加工（図 2）を行う。引張試験などを通して、ヘッディング部と周辺部のマイクロ組織と力学特性の関係を調べる。
- (3) 耐食性：図 1 と同じ試験体を対象として、塩水噴霧試験や引張試験などを行い、マイクロ組織と腐食が力学特性に及ぼす影響を調べる。

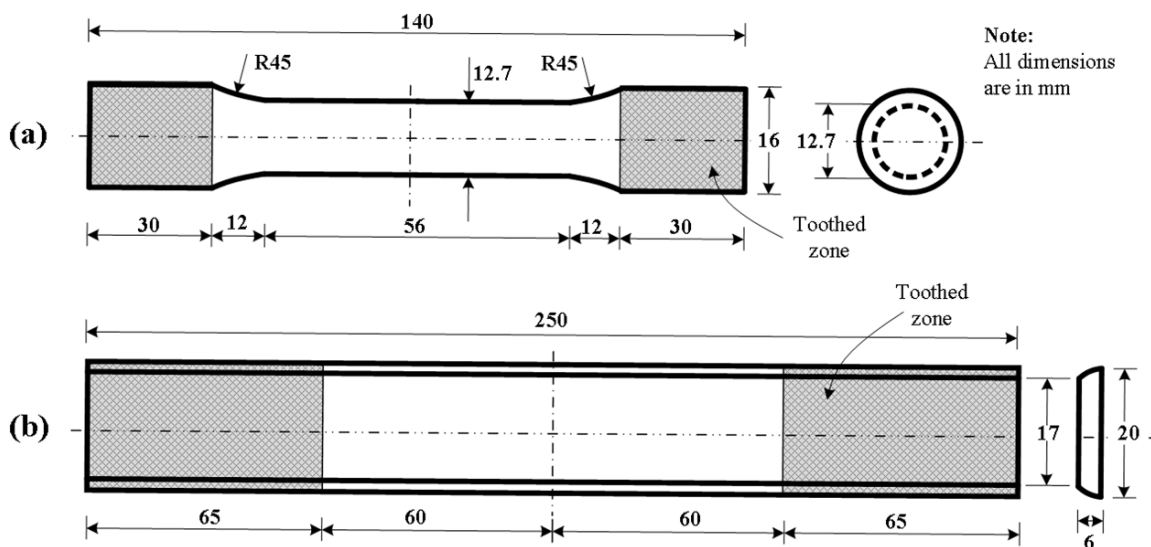


図 1：疲労試験及び耐食性試験の試験体：(a)単結晶試験体、(b)複数結晶試験体

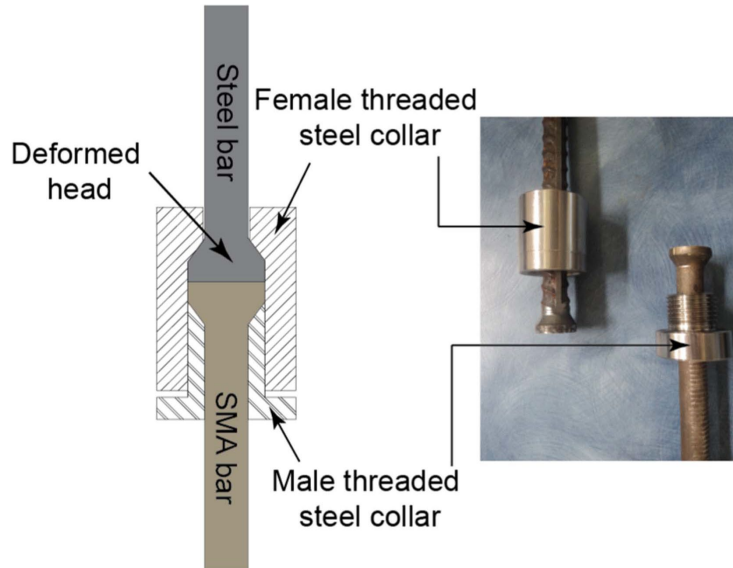
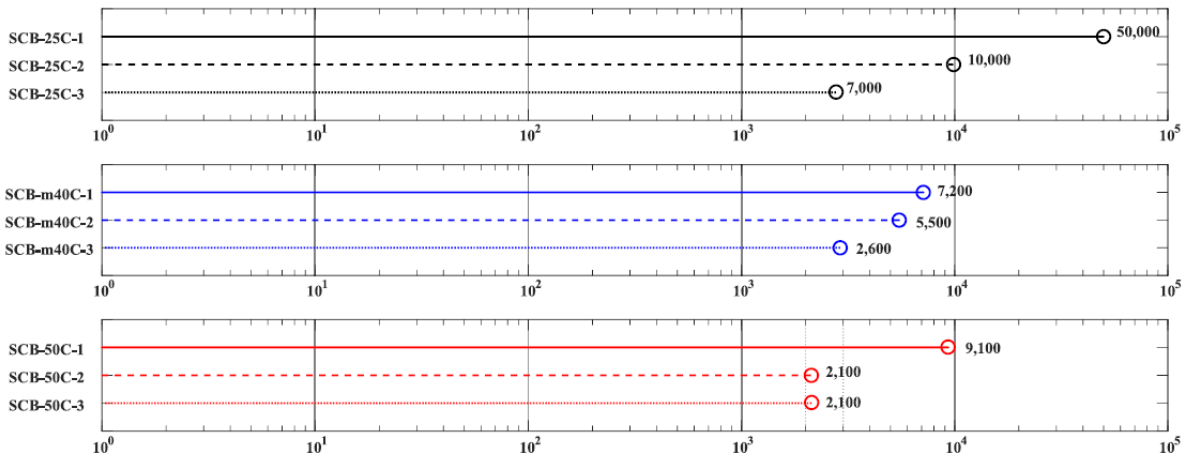


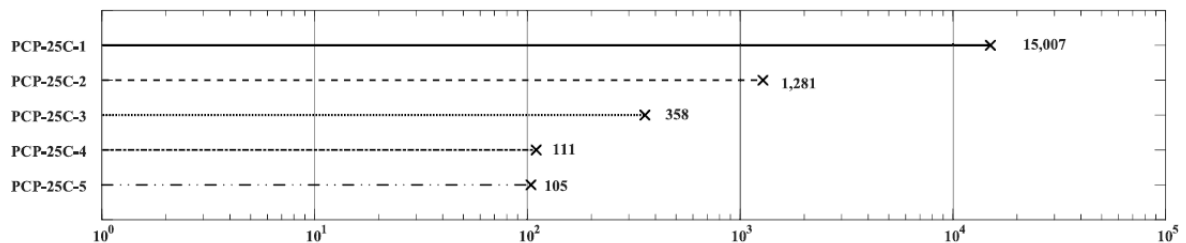
図 2 : ヘッディング加工とカップラー

4. 研究成果

- (1) 疲労特性：単結晶棒材は 100 サイクル程度まで安定した履歴特性を示し、数千サイクルの荷重に対して破断が生じなかった (図 3 (a))。一方、複数結晶板材の結果はバラツキが大きく、100 サイクル程度で破断する試験体もあった (図 3 (b))。



(a)



(b)

図 3 : 破断に至るサイクル数の比較 : (a)単結晶試験体、(b)複数結晶試験体

- (2) 接合方法：ヘッディング加工を行う場合、従来の Ni-Ti 合金では加工部周辺における脆性破壊が課題であった。一方、Cu-Al-Mn 合金ではヘッディング加工部以外の部位で靱性の高い破壊性情を示すことを確認できた (図 4)。また、加工部周辺のマイクロ組織の分析結果から、脆性破壊を回避するための力学的なメカニズムを明らかにした。



図4：引張試験後の破断性情

- (3) 耐食性：腐食の基礎特性として分極曲線を得た。また、その結果から腐食速度を計算し、Cu-Al-Mn合金が普通鋼材よりも優れた耐食性を持つことを確認した。また、腐食が力学特性に及ぼす影響は質量変化にほぼ比例することを確認した。

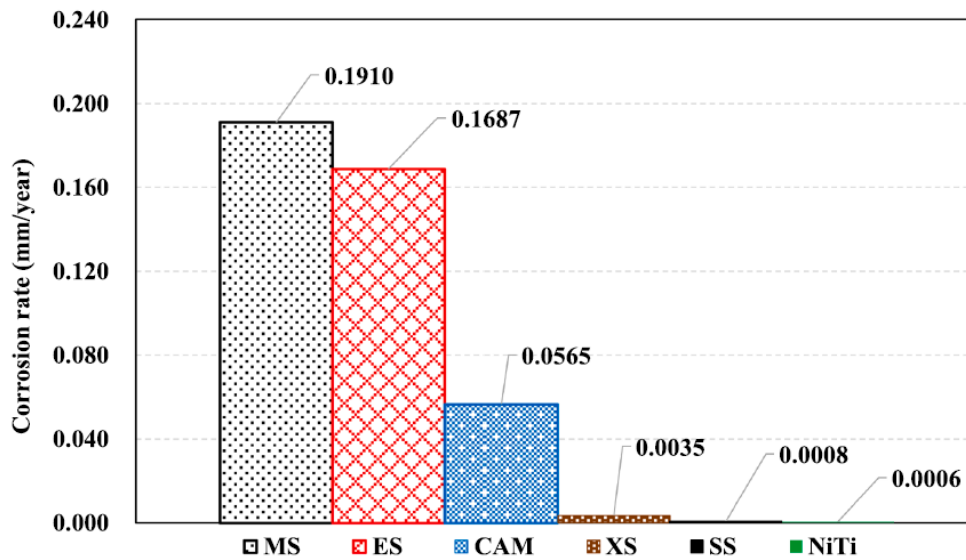


図5：腐食速度の比較 MS：普通鋼材、ES：エポキシコーティング鋼材、CAM：Cu-Al-Mn超弾性合金、XS：耐食鋼材、SS：ステンレス鋼材、NiTi：Ni-Ti超弾性合金

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1. 著者名 Pareek, S., Kise, S., Yamashita, F., Gencturk B., Hosseini F., Brown S.A., Araki, Y. | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Chemical resistance of Cu-Al-Mn superelastic alloy bars in acidic and alkaline environment | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 ASCE Journal of Materials in Civil Engineering | 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Kise Sumio, Mohebbi Alireza, Saiidi Mehdi Saiid, Omori Toshihiro, Kainuma Ryosuke, Shrestha Kshitij, Araki Yoshikazu | 4. 巻 - |
| 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 - |
| 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 Hong Huanpeng, Gencturk Bora, Brown Susan Alexis, Hosseini Farshid, Jain Amit, Aryan Hadi, Saiidi Saiid, Araki Yoshikazu, Kise Sumio | 4. 巻 350 |
| 2. 論文標題 Long-term corrosion resistance of Cu-Al-Mn superelastic alloys and steel rebar for use in bridges | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Construction and Building Materials | 6. 最初と最後の頁 128795 ~ 128795 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.conbuildmat.2022.128795 | 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 Hong Huanpeng, Gencturk Bora, Aryan Hadi, Jain Amit, Araki Yoshikazu, Saiidi M Saiid, Kise Sumio | 4. 巻 31 |
| 2. 論文標題 Low-cycle fatigue behavior of Cu-Al-Mn superelastic alloys at different temperatures | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Smart Materials and Structures | 6. 最初と最後の頁 115022 ~ 115022 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-665X/ac97d3 | 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 |

〔学会発表〕 計0件

〔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 |
|-------------------|----------------------------------|------------------------|----|
| 主たる渡航先の主たる海外共同研究者 | ゲンクターク ボラ (Gencturk Bora) | 南カリフォルニア大学・環境土木工学科・准教授 | |

| | 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 |
|-----------|---------------------------------|-----------------------|----|
| その他の研究協力者 | サイーディ サイド (Saiidi Saiid) | ネバダ大学・環境土木工学科・教授 | |

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 | | |
|---------|---------|------------|-------|
| | 米国 | 南カリフォルニア大学 | ネバダ大学 |