

令和元年6月19日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H04027

研究課題名(和文) 歴史的建造物の保存活用のための調査と補修・補強工法に関する研究 - 軍艦島を対象に -

研究課題名(英文) Study on repair and strengthening methods for conservation of historical structures, especially existing in Gunkanjima island

研究代表者

原田 哲夫 (HARADA, Tetsuo)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：50136636

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、端島(軍艦島)の護岸構造物、生産施設、RC建築物等の歴史的構造物を保存活用していくために必要な維持管理、補修・補強工法に関して、現状の材料的・構造的健全性の評価、補修・補強材料の性能評価、および新たな補修・補強工法の開発と適用性の検討を行った。その結果、護岸コンクリートのひび割れやコンクリート部と石積部の肌別れが一部において緩やかに進行しているものの、護岸コンクリートの材料的健全性は十分有していることが明らかとなった。また補修工法として表面含浸材の有効性を明らかにした。さらに、補強システムとして、CFRPアンカートラス構造、高性能コンクリート箱板圧着構造を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の実施により、軍艦島の護岸構造物、生産施設、RC建物の保存活用に直接役立つのみならず、広く歴史的構造物の保存活用のための維持管理、補修・補強の在り方、さらには今後の日本のインフラ老朽化問題にも資する実用的かつ学術的に有用な多くの知見が得られたものと考えている。

研究成果の概要(英文)：This study dealt with repair and strengthening methods in order to conserve historical structures: concrete revetment, industrial facilities and RC buildings in Gunkanjima island. Estimation of material and structural soundness, performance evaluation of repair and strengthening materials, and development of new repair and strengthening methods carried out. As a result, it was found that shore concrete has enough material soundness though some cracks in revetment and gaps between strengthening concrete and masonry have progressed. Moreover, it was clarified effectiveness of surface impregnation materials. CFRP anchor-truss structure and high-performance concrete box press joint structure are proposed.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：歴史的構造物 保存活用 補修 補強 軍艦島

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

世界文化遺産に推薦されている「明治日本の産業革命遺産 九州・山口と関連地域」の構成資産の一つである端島炭鉱（通称：軍艦島）は、長崎半島から西に約 4.5km、長崎港から南西に約 19km の外洋に位置し、南北に約 480m、東西に約 160m、外周約 1.2km の島である。その外周は、直立式のコンクリート製護岸となっている。この島では明治 23（1890）年以降、本格的な海底炭鉱として操業が開始された。その後、採掘技術の発達とともに明治 30（1897）年から昭和 6（1931）年にかけて 6 回にわたり周囲の埋立てと護岸築造による拡張が繰り返された。現存する護岸が築造されてから、最も新しい拡張護岸においても 83 年、最初の拡張護岸では 117 年もの年月が経過している。この島は外洋に位置しており、たびたび台風により大きな被害を受け、護岸も局部的に倒壊や破損を生じたが、コンクリートによる再構築やコンクリートを旧来の石積護岸の海側あるいは陸側に巻き立てる補強がなされてきた。島内には、日本近代化の象徴として歴史的、文化的価値が高く世界的にも貴重な海底炭鉱遺構や、1916 年に完成したわが国最初の鉄筋コンクリート造 7 階建てアパートをはじめとして、年代とともに新築あるいは増築されていった鉄筋コンクリート造高層アパート群が現存している。軍艦島全体の歴史的、文化的、学術的価値を守っていくためには、護岸の健全度を把握した上で適切な状態に維持管理することが極めて重要である。

しかしながら、現在の軍艦島の護岸構造物の現状は図-1、写真-1 に示すように様々な変状が顕在化してきており、護岸機能の低下が懸念される状況にある。さらには写真-2 に示すように護岸機能の低下が島内の建築物に及ぼす影響が顕著に生じている箇所が随所に見られる。このように護岸機能の低下が軍艦島の歴史的構造物として種々の価値に影響を及ぼさないように、詳細な調査により現状を把握するとともに、護岸の変状の発生・進行メカニズムを整理し、さらには維持管理、補修・補修工法を選定・実施することが喫緊の課題となっている。

また、文化財としての歴史的価値、学術的価値が極めて高い構造物をどのように維持管理していくかは、供用中の構造物の維持管理とは異なり、新たな視点で考えていく必要がある。

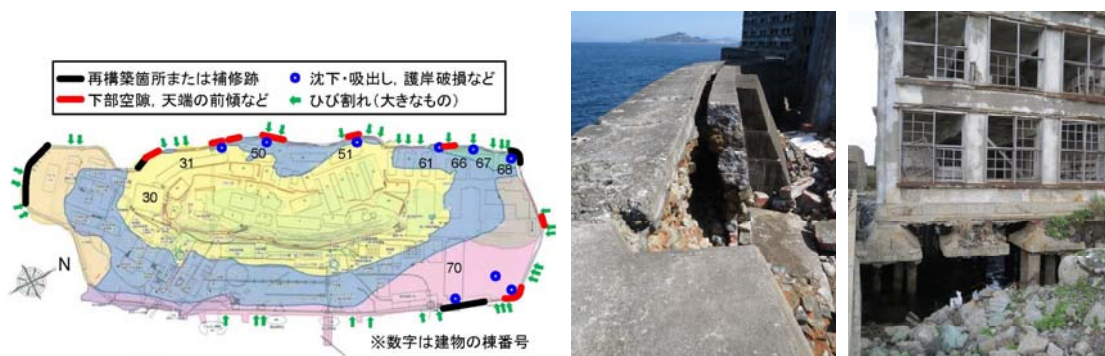


図-1 軍艦島の護岸全体の損傷状況



写真-1 護岸の変状事例



写真-2 基礎の洗掘事例

### 2. 研究の目的

本研究は、世界文化遺産「明治日本の産業革命遺産 九州・山口と関連地域」の構成資産の一つである端島炭鉱（軍艦島）を対象としている。なかでも、護岸構造物、生産施設、RC 建物を中心とした歴史的構造物を文化財、世界遺産として保存活用していくために必要な維持管理、補修・補強工法に関して、現状の材料的・構造的健全性の評価、補修・補強材料の性能評価、および新たな補修・補強工法の開発と適用性の検討を目的とした。

本研究では下記の 4 つの項目について検討した。

- (1) 護岸構造物の構造的健全度の現状調査と追跡定点観測
  - ・現状把握のための詳細点検調査／・変状箇所の定点観測／・環境作用（飛沫、飛来塩分など）
- (2) 護岸構造物および建築物の補修・補強工法の開発と技術提案
  - ・CFRP 製グラウンドアンカーによる護岸構造物の補強工法
  - ・RC 建物の外観保持のための補強工法
  - ・洗掘された建築物基礎の補強工法
- (3) 過酷環境下に供用された高経年コンクリートの材料的調査
  - ・建設年代の異なるコンクリートの物性、耐久性調査／・鉄筋の腐食状況調査
- (4) 過酷環境下における補修・補強材料の性能評価とそれらを用いた施工法の提案
  - ・補修・補強材料の暴露試験による評価とそれらを用いた具体的な施工法の提案

### 3. 研究の方法

- (1) 護岸構造物の構造的健全度の現状調査と追跡定点観測

① 定点観測ポイントにおいて、護岸コンクリートのひび割れ幅、コンクリート部と石積部の肌別れ幅のモニタリング調査を継続実施した。

② 薄板モルタル試験体による塩害環境調査を軍艦島全体において継続実施し、軍艦島島内の

塩害環境の空間的、季節的変動の基礎データを収集した。

(2) 護岸構造物および建築物の補修・補強工法の開発と技術提案

護岸構造物の補強工法として、CFRP 製グラウンドアンカーの適用を念頭に、施工法を含めた実用化技術の開発を行った。また、1916年に完成したわが国最初の鉄筋コンクリート造（RC造）7階建てアパートをはじめとする年代とともに新築あるいは増築されていったRC造高層アパート群は、存在そのものが文化財としての価値をもつとともに、いわゆる軍艦のシルエットを形成する重要な構造物でもある。そのため、外観を改変することなく建物の形状を保持し、ある程度の耐震性を保有する補強工法が要求されている。これには、建物内部にCFRPより線を用いた外ケーブル工法を適用した新たな補強工法や擬態パネルを用いる工法を考え、その適用性の検討を要素実験や模型実験により行った。

(3) 過酷環境下に供用された高経年コンクリートの材料的調査

長崎市より提供された護岸より採取されたコンクリートコアを用いて、中性化深さ、圧縮強度、静弾性係数、全塩化物イオン濃度分布等の測定を実施した。

(4) 過酷環境下における補修・補強材料の性能評価とそれらを用いた施工法の提案

①長崎市により実施された16号棟の補修工事の対象箇所の鉄筋腐食調査を継続実施し、軍艦島の実構造物における補修効果のデータの蓄積を図った。また、腐食センサーを埋め込み表面含浸材を塗布したコンクリート試験体についても鉄筋腐食調査を継続的に実施した。

②(2)で述べたCFRPより線を用いる工法の定着には、筆者らが開発した定着用膨張材（HEM）による定着法を用いるが、マルチ配置CFRPより線を14.5年間緊張・定着したHEM定着体を用いて、HEMの材料的な長期安定性と耐久性を化学分析により検討した。

4. 研究成果

(1) 護岸構造物の構造的健全度の現状調査と追跡定点観測

①護岸コンクリートのひび割れ幅、コンクリート部と石積部の肌別れ幅のモニタリング調査

3年間の護岸コンクリートのひび割れ幅、コンクリート部と石積部の肌別れ幅の定点観測結果、護岸コンクリートのひび割れ幅はほとんど変化が確認されなかったが、コンクリート部と石積部の肌別れ幅においては一部の測定箇所において肌別れ幅の増加が確認された。

②塩害環境の定量評価

図-2に護岸の海側法面頂部における捕集塩化物イオン量に及ぼす護岸位置の影響を東西南北4つの地点の測定結果を用いて示す。季節によらず、北側、西側、南側護岸の捕集塩化物イオン量が東側に比べて多い。これは軍艦島における卓越風向が北北西であることが起因していると考えられる。季節変動に関しては、護岸の方位によらず冬場に捕集塩化物イオン量が多いことがわかる。南側護岸において夏場に捕集塩化物イオン量が多くなっているのは、7、8月に九州を通過した台風の影響のためと考えられる。

図-3に建物ごとの暴露位置の高さの違いによる捕集塩化物イオン量の比較結果を示す。島内北西部の16号棟、西部の31号棟では設置高さが高くなるにしたがって、捕集塩化物イオン量が少なくなるのに対し、北部の65号棟では多くなっている。これは、65号棟は、海側に高さ15mの建物があり、飛来塩分の障壁として作用したためと考えられる。

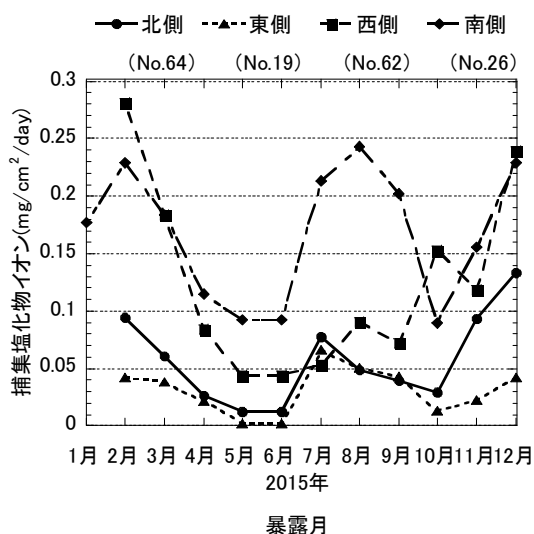


図-2 塩害環境の月変動に及ぼす護岸位置の影響

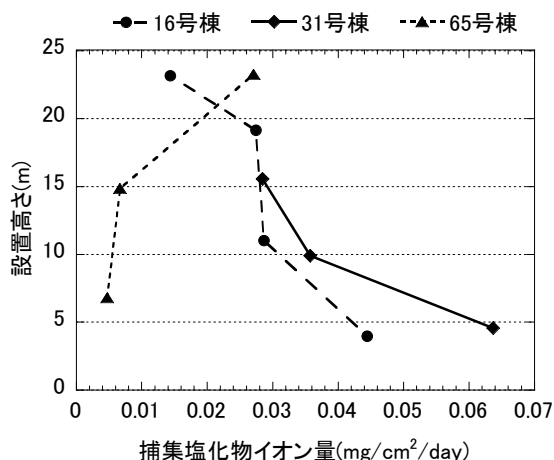


図-3 建物高さの影響

(2) 護岸構造物および建築物の補修・補強工法の開発と技術提案

①CFRP 製グラウンドアンカーによる護岸構造物の補強工法の提案について

図-4にCFRPより線を用いたグラウンドアンカーによる護岸の補強概念図を示す。5年間の暴露試験結果から、CFRPより線は、高腐食環境下においても強度の低下や表面の劣化は見られ

ず、永久アンカーの tendon として安定した物性を示した。

また、新素材（炭素繊維，エポキシ樹脂，ガラス長繊維強化プラスチック）を使用したグラウンドアンカーシステムは pH3~4，地温 80°C 程度の環境であればアンカー材料としての性能に問題がないことが確認された。

## ②30号棟の保全に関する考え方と新工法の提案

30号棟は近い将来、自然倒壊が予想されるために、まずは倒壊を未然に防止できる工法を提案した。図-5に示すように、CFRPより線により緊張連結した高性能コンクリート箱板（HPC板）で構成された支持躯体（壁状躯体）が、外周部と中庭部にチューブ構造を形成して、既存コンクリート部を支持し、自然倒壊を防ぐ工法である。基本的にチューブ構造は、高性能コンクリート箱板圧着工法により形成されることになる。新設躯体と既存コンクリートとは、床位置で圧縮のみ（もたれ荷重）抵抗するように接合する。また、支持躯体には足場、階段や開口部が設定できる。

最外周部には、既存コンクリートの外形、色彩を転写した HPC 板（擬態造作パネル、脱着可能）を取り付け、廃墟感のある景観を演出する。最上部は、チューブ構造を繋ぐように架け渡した CFRP より線を下地として、その上をフッ素コーティングテントで覆い、海からの飛来塩分、雨水浸潤を防止して既存コンクリート部の劣化を遅延できる。

なお、高性能コンクリート箱板（HPC板）は、フライアッシュを混入したプレキャスト部材として工場で作製される。フライアッシュの混入により、フレッシュ時の流動性の改善が図れること、硬化コンクリートとしては高い遮塩性を有し、耐久性能の向上が期待できることはすでに実証済みである。

### (3) 過酷環境下に供用された高経年コンクリートの材料的調査

図-6に圧縮強度の深さ方向分布を示す。コアにより異なる傾向を示す場合もあるものの、概ね深さ方向で同程度の圧縮強度、または深部のコンクリートの方が圧縮強度がやや大きくなる傾向が認められる。いずれのコアにおいても圧縮強度は 21N/mm<sup>2</sup> 程度以上の値であり、十分な強度を保持していると考えられる。海側、島内側いずれのコアにおいても表層部の著しい強度低下はなく、80年程度経過しているものの構造上問題となるような強度低下は認められない。

図-7に $\sqrt{t}$ 則に基づき中性化深さの測定結果より求めた中性化速度係数を示す。海側より採取したコア、島内側より採取したコアのいずれの場合においても、コア採取箇所により中性化速度係数に大きなばらつきはあるものの、概ね島内側のコアの方が中性化速度係数が大きい傾向が認められる。海側から採取したコアでも SP.49 のように中性化速度係数が島内側のコアと同程度の場合もあるが、護岸の上部より採取しており、比較的中性化が進行しやすい環境にあったためと考えられる。

図-8に全塩化物イオン濃度分布を示す。西部の護岸より採取した SP.47 と SP.42 を比較すると、圧倒的に護岸下部の SP.42 の塩分浸透量が多いが、北部の護岸より採取した SP.56 と SP.60 とでは西部ほど護岸上部と下部の差が大きくはない。これは、西部の SP.47 と SP.42 はコアを採取した護岸面がほとんど同じ方向を向いているが、北部の SP.56 と SP.60 はコアを採取した護岸面が 90° 異なっており、向きの違いによって塩分供給量が大きく異なったためと考えられる。また圧縮強度が 20~25N/mm<sup>2</sup> 程度である SP.56 や SP.60 の塩分浸透域の全塩化物イオン濃度分布の傾きは、圧縮強度が 30N/mm<sup>2</sup> 程度である SP.47 や SP.42 の傾きと比べてなだらかであり、より内部まで塩化物イオンが浸透している傾向が確認される。

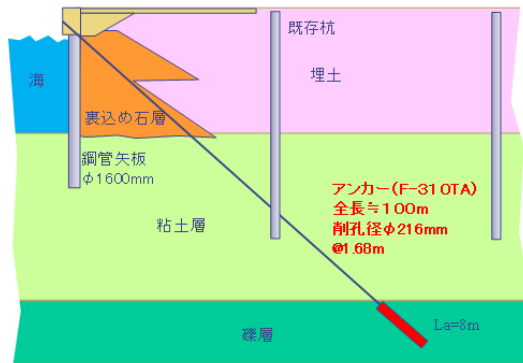


図-4 CFRPより線を用いたグラウンドアンカー

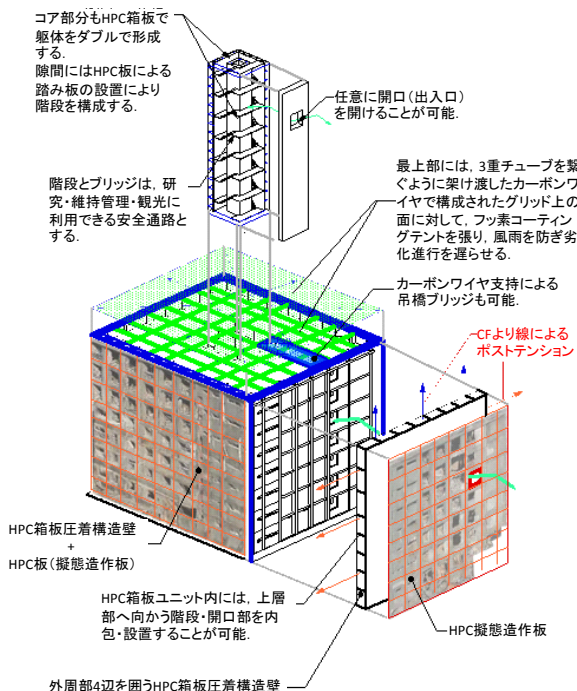


図-5 高性能コンクリート (HPC) 箱板圧着構造



(4) 過酷環境下における補修・補強材料の性能評価とそれらを用いた施工法の提案

①表面含浸材による鉄筋腐食抑制の効果検証

長崎市により実施された16号棟の補修工事の対象箇所の鉄筋腐食調査を継続実施した結果、表面含浸材塗布部分は未塗布部分に比べ若干の腐食抑制効果が確認された。表面含浸材塗布面が壁柱の一部のみであったため、未塗布面等より水が浸透し、十分な腐食抑制効果が発揮されなかったためと考えられる。表面含浸材の塗布範囲の適正化や他の排水・防水対策との併用により、鉄筋腐食抑制効果がさらに発揮されるものと思われる。

腐食センサーを埋め込み表面含浸材を塗布したコンクリート試験体を暴露し、鉄筋腐食調査を継続的に実施した結果、表面含浸材を塗布した試験体においては明確に腐食発生時期の遅延が確認された。

②CFRPより線を用いたHEM定着体の長期安定性

CFRPより線の大容量マルチケーブルの長期定着性能試験を約14年半実施し、その定着に使用されていた定着用膨張材の中性化深さ、水和状態、細孔径分布等の確認と水和組織の観察を行った。さらに得られた結果と既報の研究結果を照合しながら、定着用膨張材の長期耐久性に関する材料面での考察を行った。その結果、中性化深さ、水酸化カルシウムの生成量、細孔径分布の状態から、定着性能を保持できる状況にあることを確認した。また、膨張圧の発現に寄与する生石灰が残存していたことから、水和の進行により膨張圧を発現する可能性を有し、今後も定着性能を維持できることを示唆する結果を得た。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計13件)

- ① 佐々木謙二, 中山大誠, 原田哲夫, 松田浩, 早野博幸: 薄板モルタル法による海上橋, 護岸, 海洋建築物の塩害環境評価, 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, 査読有, Vol. 18, pp. 329-334, 2018
- ② 中山大誠, 佐々木謙二, 原田哲夫: 高炉セメントコンクリートの耐久性に及ぼすフライアッシュ混合の影響, 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, 査読有, Vol. 18, pp. 701-706, 2018.
- ③ 小林久美子, 原田哲夫, 古瀬徳明, 杉山彰徳: マルチ配置CFRPより線の定着に使用された定着用膨張材の長期性状について, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 40, No. 2, pp. 553-558, 2018
- ④ 古瀬徳明, 原田哲夫, 榎本 剛, 牛島健一: HEM定着法によるCFRPより線マルチ配置テンションの14.5年間の長期定着性能について, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 40, No. 2, pp. 559-564, 2018
- ⑤ 片山強, 佐々木謙二, 原田哲夫: プレキャストコンクリート製品の耐塩害設計に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 39, No. 1, pp. 709-714, 2017
- ⑥ 佐々木謙二, 行村岳哲, 原田哲夫: 薄板モルタル法による長崎市端島(軍艦島)の塩害環

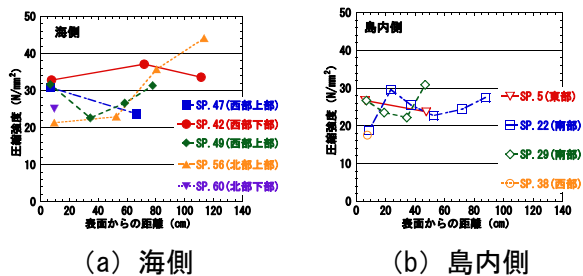


図-6 圧縮強度

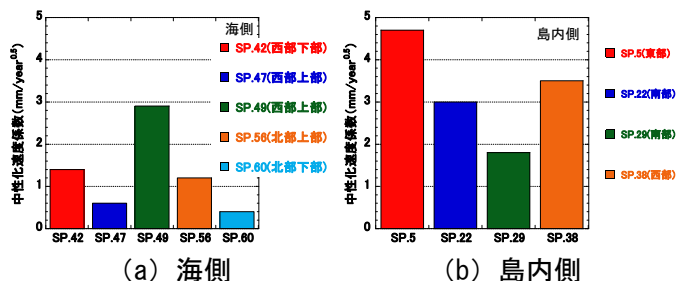


図-7 中性化速度係数

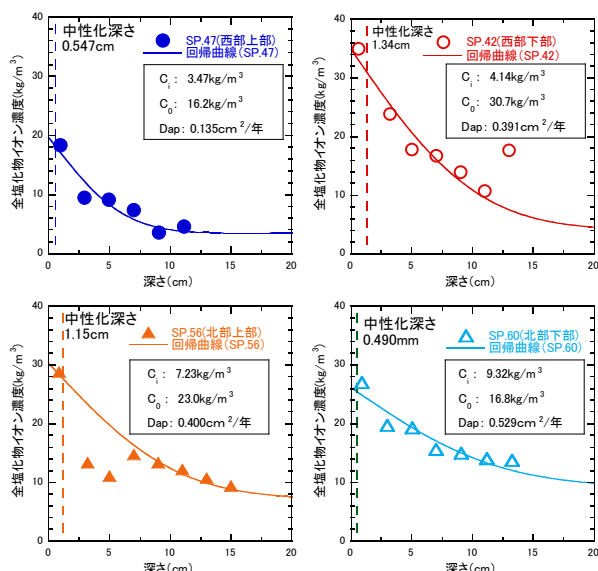


図-8 全塩化物イオン濃度分布

- 境評価, 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, 査読有, Vol. 16, pp. 517-522, 2016
- ⑦ 佐々木謙二, 片山強, 原田哲夫: PCa 製品を想定した初期温度履歴を与えたコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 37, No. 1, pp. 781-786, 2015
  - ⑧ Hiroshi Kimura, Tsuyoshi Enomoto, Shunji Hachisuka, Tetsuo Harada and Kenji Sasaki: Long Term Outdoor Tests of CFRP Strand Cable (CFCC) under UV Ray Exposure and Water Immersion, Proceedings of the International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures, 査読有, CD-ROM 10 pages, F0153, 2015
  - ⑨ Yasukiyo Ikuta, Tetsuo Harada, Kenji Sasaki and Myo Khin Tokuyama: Development of Intermediate Anchoring Device for PC Tendons Using Highly Expansive Material and its Anchoring Mechanism, Proceedings of the International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures, 査読有, CD-ROM 10 pages, FF0046, 2015
  - ⑩ Ryoichi Tanaka, Hideharu Naitou, Kiyofumi Sano, Tetsuo Harada and Osamu Kiyomiya: Soundness of Historical Concrete Revetment in Gunkanjima Island in Japan, Proceedings of the International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures, 査読有, CD-ROM 10 pages, FF0065, 2015
  - ⑪ Noriaki Kose, Tsuyoshi Enomoto, Kenichi Ushijima, Tetsuo Harada and Kenji Sasaki: Studies on Flexural Tensile Strength for External Cable Tendon Using CFRP Strands, Proceedings of the International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures, 査読有, CD-ROM 10 pages, FF0082, 2015
  - ⑫ Koichi Suga, Toshiro, Sugisaki, Motoji Tashiro and Tetsuo Harada: Proposal for Seismic Retrofitting of Existing Quay Walls Using New Anchor Material, Proceedings of the International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures, 査読有, CD-ROM 10 pages, FF0083, 2015
  - ⑬ Yasunori Ozasa, Tsuyoshi Katayama, Kenji Sasaki and Tetsuo Harada: Study on Accelerated Carbonation Depth of Concrete Subjected to High Temperature History Simulated Steam Curing, Proceedings of the International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures, 査読有, CD-ROM 10 pages, FF0093, 2015

[学会発表] (計4件)

- ① 中山大誠, 佐々木謙二, 原田哲夫: 高炉セメントにフライアッシュを混合したコンクリートの塩分浸透抵抗性に関する研究, 土木学会第73回年次学術講演会, 2018
- ② 佐々木謙二, 中山大誠, 原田哲夫: 高炉セメントにフライアッシュを混合したコンクリートの中酸化および塩分浸透抵抗性, 第72回セメント技術大会, 2018
- ③ 佐々木謙二: 薄板モルタルを用いた長崎県端島(軍艦島)の塩害環境評価に関する基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演会(九州), 2016
- ④ 佐々木謙二, 片山強, 原田哲夫: 初期高温履歴を与えたコンクリートの塩化物イオン浸透に関する実験的検討, 土木学会第70回年次学術講演会, 2015

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 佐々木 謙二

ローマ字氏名: (SASAKI, Kenji)

所属研究機関名: 長崎大学

部局名: 工学研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 20575394

※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、研究者個人に帰属されます。