

令和 6 年 9 月 19 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01419

研究課題名（和文）既設土木FRP構造物の外観評価と残存性能の関係性の解明

研究課題名（英文）Investigation on the relationship between visual inspection results and remaining performance of existing civil FRP structures

研究代表者

北根 安雄 (Kitane, Yasuo)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：10444415

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,680,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、土木FRP構造物の維持管理に資するデータを収集することを目的として、まず、約20年間暴露されたFRP部材の材料試験および部材実験を行い、暴露後の残存性能を把握するとともに外観評価と比較した。水分の影響による劣化の場合、外観評価では性能低下を判断することが難しいことを明らかにした。また、表面補修や強度回復補修を行い、その性能回復効果を確認した。表面補修された試験体については、20年間の屋外暴露実験を継続中である。さらに、複数の非破壊試験を用いて、FRPの残存性能評価を試み、弾性率については一部評価可能であるが、劣化による強度低下の評価は現時点では難しいことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

FRPが土木構造物に適用され始めてから数十年が経過しているが、土木FRP構造物の維持管理方法は未だ確立されていない。本研究の成果は、土木FRP構造物の点検における外観評価の判断材料になるとともに、劣化が大きい場合の補修事例も示しており、FRP構造物の維持管理に有用な知見を提示している。また、外観では判断することが難しい水分による劣化が大きいことも実験的に明らかにしており、今後水分による長期的な劣化プロセスおよびその程度を明らかにする必要性が示されたことは学術的にも意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to collect data that will contribute to the maintenance of civil FRP structures, material tests and component tests were conducted on FRP components exposed for approximately 20 years to understand the remaining performance after exposure and to compare it with the visual evaluation. It was found that in the case of moisture-induced deterioration, it is difficult to determine the remaining mechanical performance by visual evaluation. Surface repairs and strength restoration repairs were also conducted to confirm the effectiveness of the performance restoration. Outdoor exposure tests for 20 years are still ongoing for the surface-repaired specimens. Furthermore, evaluation of the residual performance of FRP by several different nondestructive tests was attempted, and it was found that at present it may be difficult to evaluate the strength degradation due to material deterioration, although the elastic modulus degradation may be evaluated for a certain cases.

研究分野：構造工学

キーワード：FRP 劣化 残存性能 外観評価 非破壊試験 補修 維持管理

1. 研究開始当初の背景

本研究は、既設土木 FRP 構造物の維持管理方法に着目した。FRP は、軽量性や耐食性に非常に優れた材料であり、その軽量性から比強度・比剛性も高く、さらに施工性にも優れている構造材料である。土木構造物への適用は、1960 年代に水門扉への適用が確認され、1980 年ごろにコンクリートの補強筋への利用が始まり、1990 年代に橋梁の主部材への適用が見られる。日本では、40 年以上経過した FRP 水門扉が存在し、2000 年に完成したオール FRP 構造のロードパーク橋（歩道橋）も、建設後 20 年以上が経過している。

このように既設土木 FRP 構造物の経年が進んできているが、規模が大きくまた設計耐用年数も長い土木構造物の FRP 部材の維持管理方法は未だ確立されておらず、その確立が求められている。航空機や船舶などは比較的大型構造物であるが、移動が可能であるために、専用のドックで点検や補修ができるのに対し、土木構造物の場合は、現場施工が必要となる特徴がある。さらに、FRP は、コンクリートや鋼などの建設材料よりも耐食性が要求される環境で使用される場合が多いことから、設計段階で維持管理計画を策定し、建設後、点検、診断、措置、記録の維持管理サイクルを回していくことにより、長期的に安全な構造物を維持していくことが望まれる。

2. 研究の目的

本研究では、土木 FRP 構造物でみられる変状を整理し、劣化した FRP の材料試験や部材実験を実施することで残存性能を把握し、最終的に外観変状のレベルと残存性能との関係を明らかにすることを第 1 の目的とした。その結果、変状のレベルから補修要否の判断および補修方法の選択ができることを目指した。また、表面保護層の補修、強度回復補修について、その性能回復効果を実験的に明らかにすることも目的とする。

3. 研究の方法

以下に示す方法により、研究を実施した。

- (1) FRP 構造物の変状、非破壊検査、補修に関する文献調査

最新の知見を得るために、非破壊検査や補修などについては、土木構造物に限らず、異分野の文献についても調査した。

- (2) 既設土木 FRP 構造物における変状調査

既設土木 FRP 構造物における変状に関する情報収集を実施した。対象構造物は、主に FRP 水門扉と FRP 歩道橋とした。これらの調査から、点検時に使用できる、変状の種類や変状のレベルに対するサンプル写真を収集した。

- (3) 約 20 年間暴露された FRP の残存性能評価

国立研究開発法人土木研究所・つくば屋外暴露場で暴露されていた 2 種類の GFRP 引抜成形材に対して、材料試験および部材試験を実施することにより、残存性能の評価を行った。2 種類の暴露材の 1 つは、GFRP 歩道橋床版であり、3 室ボックス形状の引抜成形材で、塗装などの表面保護層がない状態で、23 年間屋外暴露に供された。もう 1 つは、引抜成形 GFRP 角パイプであり、無塗装のパイプと、ふっ素樹脂上塗り塗料により塗装を施されたパイプがあり、暴露架台に固定され 24.6 年間屋外暴露に供された。屋外暴露場における各材料の外観を図 1 に示す。

- (4) 劣化した FRP の補修実験

上記(3)で材料試験を行った結果、歩道橋床版材料は強度低下が小さかったため、表面保護層を形成する補修を実施し、耐久性能の回復を目指した。補修後の試験体は、暴露試験により、補修後の耐久性能を評価する。角パイプ材料については、材料試験・部材試験から強度低下が認められたため、強度回復補修を行い、部材曲げ試験により性能回復効果を確認した。

- (5) 非破壊検査による劣化した FRP の性能評価

FRP の非破壊検査については、FRP の信頼性向上のために、FRP 製品製造過程の各段階で発生する欠陥を検出する方法が、さまざまな分野で検討されてきた。本研究では、土木 FRP 構造物の維持管理で使用できる技術を対象とするため、GFRP 構造物の非破壊検査に注目し、初期欠



(a) GFRP 歩道橋床版



(b) GFRP 角パイプ

図 1 供試体暴露状況

陥ではなく、供用中の劣化による構造性能の変化を現場で検出する技術に着目した。まず、FRPの代表的な非破壊検査技術に関する文献調査を行い、土木 FRP 構造物の維持管理で使用するための非破壊検査方法 3 種類について、実験的検討を行い、その適用可能性について検討した。

(6) FRP 土木構造物の標準的な点検方法の提案

変状調査および長期暴露された FRP 材料の残存性能評価結果をもとに、FRP 特有の点検項目の抽出と、外観評価による土木 FRP 構造物の構造性能評価方法の提案を行った。

4. 研究成果

(1) 既設土木 FRP 構造物における変状調査

変状調査は、土木学会複合構造委員会 FRP 複合構造の設計・維持管理に関する調査研究小委員会の協力を得て実施した。FRP 構造物を構成する要素の変状を、劣化・損傷の要因別に整理した。劣化・損傷の要因は、環境作用による劣化、外力による損傷、設計施工における問題の 3 つに大きく分けられ、このうち、環境作用による劣化についての劣化因子としては、紫外線、温度・湿度、雨水・砂に分類して変状を整理した。また、劣化・損傷事例については、表面被覆材のひび割れ、表面被覆材の剥離、表面被覆材の白亜化（チョーキング）、表面被覆材の変色、生物付着、繊維の露出、FRP 積層部の割れ、白化、外力による損傷、表面保護層の摩耗・損耗、ふくれ、接合金属部品の腐食の 12 種類の変状に着目し、事例写真を収集した。

(2) 約 20 年間暴露された FRP の残存性能評価

各材料の寸法図および部材内の面の名称を図 2 に示す。未暴露供試体と暴露供試体に対して同様の材料試験により機械的特性を比較することにより、暴露供試体の残存力学性能について検討した。試験方向で、0°方向は引抜方向、90°方向は引抜直角方向を示している。

歩道橋床版の材料試験

床版試験体の材料試験結果(0°引張,0°引張,90°引張,45°引張(面内せん断))を図 3 に示す。ここでは、各種試験の暴露試験片における力学性能を、未暴露試験片の対応する力学性能で除したものを保持率と称する。弾性係数と強度の保持率、および未暴露試験片と暴露試験片において両側 t 検定を行うことにより得られる P 値を示す。有意水準は 10%とした。

0°方向の引張・圧縮試験では、弾性係数の保持率は、圧縮試験の B 面においては 0.95 であるが、その他の引張試験の A 面および B 面、圧縮試験の A 面では 0.98~1.01 に留まる。強度の保持率に関しては、引張試験の A 面で 0.96、B 面で 0.87、圧縮試験の A 面においては 0.97、B 面で 0.91 となり、圧縮・引張共に B 面の強度が A 面よりも低下している。また、有意差が認められたのは、B 面の引張強度と B 面の圧縮弾性率のみであった。以上から、0°方向の力学性能ではいずれも B 面でのみ有意な低下が認められることから、A 面の主要な環境因子である紫外線ではなく、B 面では、箱断面下面の内側表面において水分の滞留時間が長く、水の影響が大きく、樹脂の溶出や繊維と樹脂と繊維の剥離が劣化の要因として考えられた。

90°方向の引張・圧縮試験では、弾性率は未暴露試験片との有意な差がみられない。強度に関しては、引張強度が A 面と B 面共に大幅に低下しているのに対し、圧縮強度は暴露面においてほとんど変化せず、下面において増加した。

45°方向引張試験から得られたせん断弾性率の保持率は、暴露面で 0.99、下面で 0.94 であった。また、せん断強度の保持率は、暴露面において 0.73、下面において 0.80 と暴露面の方が低下していた。せん断強度が低下した要因としては、90°引張強度が低下した要因と同じく、樹脂と繊維の付着の劣化が要因だと考えられる。

角パイプの材料試験

角パイプの材料試験結果を図 4 に示す。有意水準 10%で両側 t 検定を行うことにより得られた P 値とあわせて示す。試験体の種類は次のようである。UU：塗装無・暴露無、UE：塗装無・暴露あり、PU：塗装あり・暴露無、PE：塗装あり・暴露あり。UE 試験体について、ローピング層の繊維の露出の程度でさらに分類し、露出が認められないものを UE-RN、小規模な露出のものを UE-RS、大規模な露出を UE-RL、不明なものを UE-RU とした。ここで、保持率や P 値を算出するにあたり、無塗装未暴露 UU 供試体と塗装未暴露 PU 供試体では塗装の有無という点で違いがあるが、未暴露において塗装の有無が力学性能に影響を及ぼすとは考えにくいので、UU 供試体と PU 供試体は区別していない。

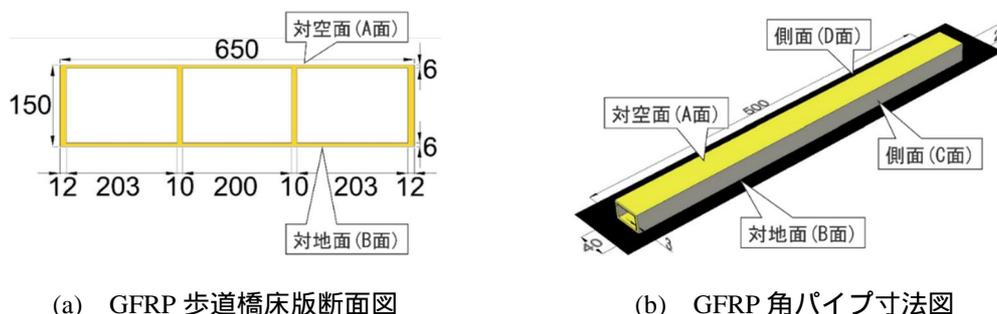


図 2 各材料の寸法図と面の名称

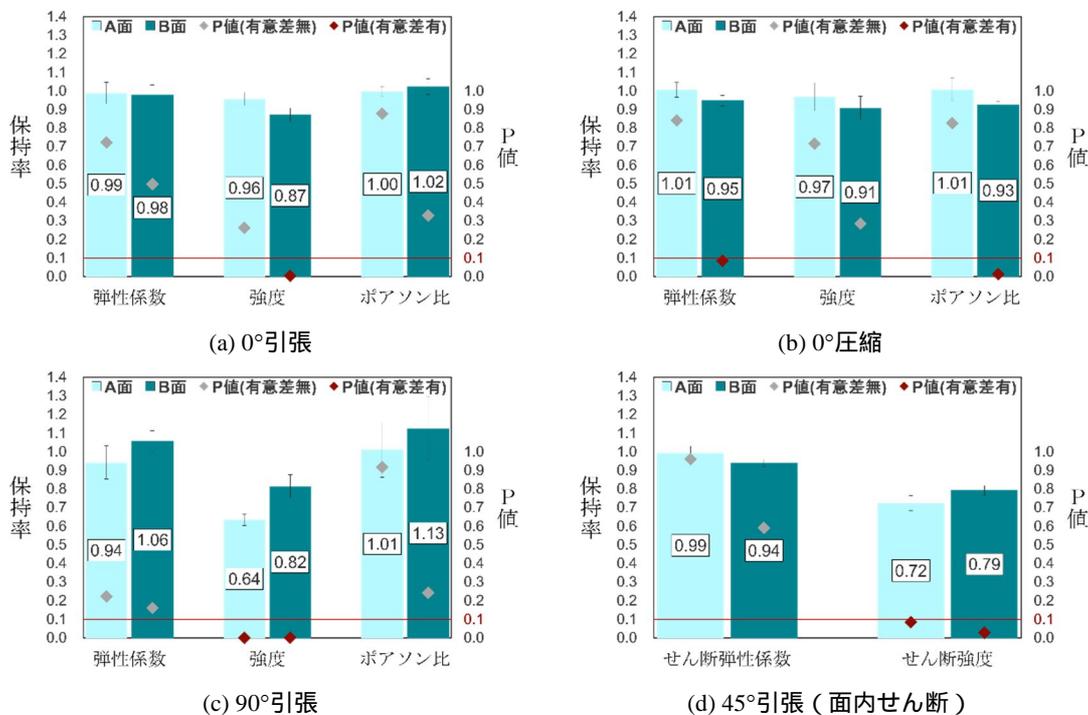


図3 GFRP 歩道橋床版の材料試験結果

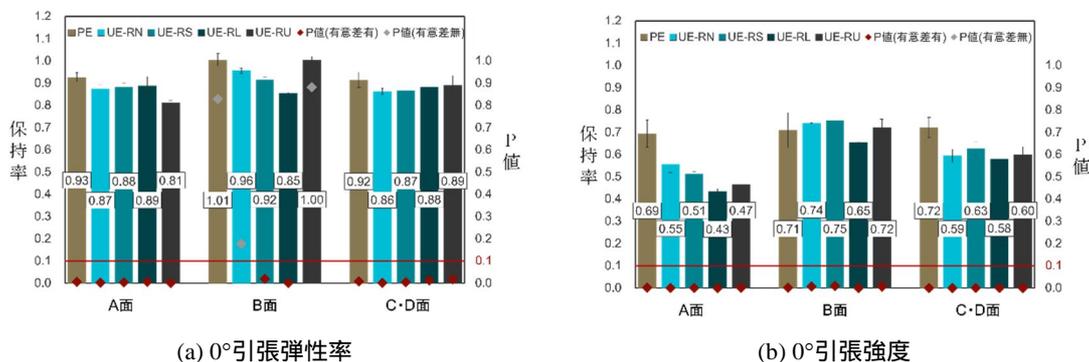


図4 GFRP 角パイプの材料試験結果

0°方向における引張弾性係数では、A面における弾性係数の保持率は0.81~0.93、C・D面においては保持率が0.89~0.92と、全供試体に有意な低下が見られたが、B面においてはUE-RS供試体およびUE-RL供試体を除き有意な低下は認められなかった。塗装の有無に着目すると、PE供試体ではいずれの面においてもUE供試体と比べ保持率が高くなる傾向が見られ、塗装により一定の劣化抑制効果が認められたが、ローピング層の繊維の露出程度に着目するとUE-RN~UE-RL供試体A面における保持率はほぼ変わらなかったことから、繊維の露出防止効果のみが原因ではないと推測され、塗装が雨などの水分の影響を抑制しているものと考えられる。

角パイプの部材曲げ試験

角パイプの部材としての残存性能を確認するため、暴露供試体および未暴露供試体を対象に部材4点曲げ試験を実施した。支間長420mmに対して、せん断支間140mm、曲げ試験140mmとした。図5に実験状況を示す。また供試体は、UU供試体を2体、PE供試体、UE-RN供試体、UE-RS供試体およびUE-RL供試体を各1体ずつとした。一般的にGFRPでは圧縮強度が引張強度より小さいため、今回の試験においても上フランジの圧縮破壊、もしくはウェブのせん断破壊により終局を迎える予想され、より安全側の評価とするために、暴露供試体において強度低下が大きいA面が圧縮側となるように、A面が上フランジ、B面が下フランジ、C面およびD面がウェブとなるように設置した。

4点曲げ試験で得られた、曲げ剛性および最大荷重の保持率を表1に示す。暴露により剛性は約10%、最大荷重は約40%低下したことがわかる。UU供試体では、せん断破壊と圧縮フランジ

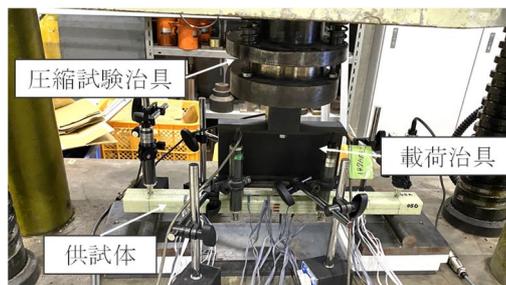


図5 曲げ荷重実験供試体設置状況

の局部座屈の両方の破壊モードが見られた UE 供試体では、圧縮フランジの局部座屈後、ウェブとフランジの結合部に割れが生じる破壊モードであった。劣化によって、角部の回転拘束が UU 供試体より小さくなったことが原因と考えられる。

(3) 劣化した FRP の補修実験

歩道橋床版

GFRP 歩道橋床版は、材料試験の結果から、安全性を損なうような強度低下はみられなかったが、無塗装であるため暴露面の樹脂減少に伴い、最表面のコンティニアスストランドマットが露出している。そこで FRP 層の保護強化と外観の修復を兼ねた 5 種類の補修方法にて表面補修を行い、屋外暴露実験により補修後の耐久性能を評価することとした。暴露実験では、補修後の暴露期間を 20 年間に設定し、物性試験、X 線 CT、SEM、顕微 IR 観察、付着試験および非破壊試験(透水試験、光沢度、色差測定)により、経年での性能を評価することとした。屋外暴露試験は、2022 年 12 月から土木研究所名護暴露試験場にて実施している。試験体設置状況を図 6 に示す。

角パイプ

部材曲げ耐力に著しい低下が見られた角パイプ UE 供試体(無塗装暴露)に対し補修を行うことにより、その最大曲げ耐力および剛性を回復させることを目標とし補修を行い、性能回復効果を 4 点曲げ試験により確認した。UE 供試体のうち UE-RS 供試体を対象とし、その内 6 体に対して 3 種類の補修を施した。補修方法は、FRP による接着補修とし、全面の供試体全長に対する補修とした。

補修に用いた FRP は、ガラス繊維を用いた成形方法が異なる 2 種類の FRP と、炭素繊維を用いた FRP の計 3 種類とした。以下、ガラス繊維を用いた補修材を GF および GF2 とし、炭素繊維を用いた補修材を CF と称する。GF では、樹脂にビニエステル樹脂を用いており、VaRTM 成形により成形された溝形材を接着する方法で補修された。GF2 では、樹脂にエポキシ樹脂を用いており、補修面に直接積層し、赤外線により樹脂を硬化させる方法で行った。次に CF では、樹脂にエポキシ樹脂を用いており、ハンドレイアップ成形で角パイプに直接成形した。図 7 に補修後角パイプの 4 点曲げ試験結果を示す。性能回復効果を未暴露供試体との比として、剛性および最大荷重について示す。GF2 では最大荷重が未暴露供試体まで回復していないが、GF および CF では、剛性・最大荷重ともに、未暴露供試体以上に回復されたことがわかる。

(4) 非破壊検査による劣化した FRP の性能評価

本研究では、FRP の劣化を評価するための非破壊検査として、a) 透水試験による表面保護層の劣化評価、b) 超音波探傷試験による FRP の V_f 評価、c) 打音による FRP の劣化評価を検討した。

透水試験による表面保護層の劣化評価方法については、表面補修を行った暴露試験体に対して継続的に試験を実施していくことにより、今後その有効性を確認していく予定である。超音波探傷試験による FRP の V_f 評価については、板厚方向の縦波音速と V_f との相関性を示すことができたが、 V_f が大きく変化しないと検知できないため、樹脂の劣化などを評価するためにはさらなる検討が必要であることが明らかとなった。最後に、打音による FRP の劣化評価については、人間の聴覚で検知できる打音の違いをマイクロホンによる音の計測で定量化することを試みたが、マイクロホンの計測では劣化をとらえることができなかった。

(5) FRP 土木構造物の標準的な点検方法の提案

(1) で記載した既設土木 FRP 構造物における変状調査結果をもとに、FRP 構造物特有の点検・記録項目、変状の種類を抽出した。また、土木学会複合構造標準示方書に準拠した「外観変状に基づく FRP 構造物の性能評価手法」として、外観変状のグレードと力学的抵抗性のレベルの関係や外観変状グレードと構造性能レベルの関係の例を複数提示し、土木学会複合構造委員会 FRP 複合構造の設計・維持管理に関する調査研究小委員会の報告書「FRP 複合構造の設計・維持管理に関する最新の調査報告」第 3 部にまとめた。

(6) まとめ

3 年間の研究により、水分の影響による劣化の場合、外観評価では性能低下を判別することが難しいことを明らかにした。また表面補修や強度回復補修ではその性能回復効果を確認するとともに、表面補修された試験体については、20 年間の屋外暴露実験を継続中である。さらに、複数の非破壊試験を用いて、FRP の残存性能評価を試み、弾性率については一部評価可能であるが、劣化による強度低下の評価は現時点では難しいことを明らかにした。

表 1 剛性・最大荷重の保持率(4点曲げ試験)

	PE	UE-RN	UE-RS	UE-RL
剛性	0.96	0.90	0.90	0.91
最大荷重	1.07	0.64	0.57	0.53



図 6 表面補修後の暴露試験体設置状況

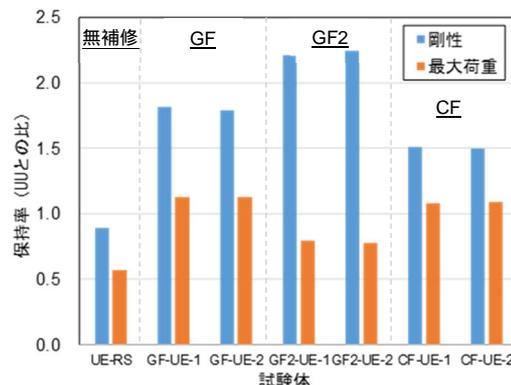


図 7 補修後 GFRP 角パイプの性能回復

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 佐藤 顕彦, 北根 安雄, 日比 英輝, 五井 良直, 杉浦 邦征	4. 巻 78
2. 論文標題 ハンドレイアップ成形GFRPの疲労強度および繰り返し載荷に伴う剛性低下の評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 11_54 ~ 11_65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejseee.78.5_11_54	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 辰田翔太, 北根安雄, 日比英輝, 佐藤顕彦, 杉浦邦征, 西崎到	4. 巻 79
2. 論文標題 約20年間暴露されたGFRP引抜成形箱形断面部材に対する残存曲げ性能の実験的評価	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 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.22-14004	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 佐藤顕彦, 西崎 到, 富山禎仁, 北根安雄, 杉浦邦征	4. 巻 79
2. 論文標題 21年間暴露したハイブリッドFRP引抜成形材の力学性能および微細構造の評価	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 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.22-00138	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 辰田 翔太, 北根 安雄, 日比 英輝, 佐藤 顕彦, 杉浦 邦征, 西崎 到
2. 発表標題 約20年間暴露されたGFRP引抜成形角パイプの 曲げ耐荷力実験
3. 学会等名 第9回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤 顕彦, 北根 安雄, 杉浦 邦征, 日比 英輝, 五井 良直
2. 発表標題 ハンドレイアップ成形GFRPの疲労損傷が 構造部材の残存剛性に与える影響
3. 学会等名 第9回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shota Tatsuta, Yasuo Kitane, Hideki Hibi, Kunitomo Sugiura
2. 発表標題 Study on Evaluation of Residual Performance of GFRP Pultrusion Molded Materials with Long-term Exposure by Ultrasonic Testing
3. 学会等名 The 8th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辰田翔太, 北根安雄, 日比英輝, 佐藤顕彦, 五井良直, 杉浦邦征, 西崎到
2. 発表標題 材料試験及び非破壊検査による約20年間暴露されたGFRP引抜成形材の残存性能評価
3. 学会等名 第14回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 土木学会複合構造委員会FRP複合構造の設計・維持管理に関する調査研究小委員会(編) 西崎到, 橋本国太郎, 北根安雄, 竿代矢須子, 日比英輝, 三ツ木幸子, 西増弘美, 細沼宏之, 川島陽子, 藤田直博, 秀熊拓也	4. 発行年 2023年
2. 出版社 土木学会	5. 総ページ数 409
3. 書名 FRP複合構造の設計・維持管理に関する最新の調査報告	

〔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	橋本 国太郎 (Hashimoto Kunitaro) (40467452)	神戸大学・工学研究科・准教授 (14501)	

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