

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：82114

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21360209

研究課題名（和文） 連続繊維補強材・シート補強材の長期耐久性に関する研究

研究課題名（英文） Study on the long term durability of continuous fiber reinforcement and sheet reinforcement

研究代表者

西崎 到 (NISHIZAKI ITARU)

独立行政法人土木研究所・材料資源研究グループ・上席研究員

研究者番号：80355792

研究成果の概要（和文）：

連続繊維補強材・シート補強材の長期耐久性について、10年から20年程度の屋外暴露試験に供された供試体を用いて調査した。主要な連続繊維補強材（CFRP（2種類）、AFRP（2種類））の17年間暴露試験後の見かけのリラクゼーション率は、初期強度にあまりかわらず（最大で強度の0.8）20%前後であった。これらの材料は17年間暴露後の残存強度や力学特性についても大きな変化は認められず、実用上高い耐久性を有することが分かった。また連続繊維シート補強材ではCFRPシート2種類を調査し、10年間暴露試験後も引張特性は殆ど変化しないことから、繊維自体の劣化は殆どないと考えられるが、面内せん断特性は初期の5年程度で一定の水準まで強度（初期の80%程度）、弾性率（60%程度）とも低下し、その後一定値を保持する傾向があることが分かり、繊維と樹脂との付着の低下が比較的初期にある程度起きることが分かった。

研究成果の概要（英文）：

Long term durability of the continuous fiber reinforcement materials & sheet reinforcement materials was studied using specimens recovered from outdoor exposure tests for ten to twenty years. The results of the relaxation ratio after 17 years exposure were about 20% for two CFRP cables and two AFRP cables. No remarkable influence of the initial load was observed even the maximum case was 0.8 of the strength. The recovered cable specimens also showed almost same mechanical properties as the initial. Two types of CFRP sheet specimens recovered from ten years exposure showed no remarkable changes in tensile properties, however slight reduction of in-plane shear properties was observed (about 80% for strength and about 60% for modulus). This result suggests that the fiber itself has a good durability however the interface between fiber and resin shows slight deterioration in some cases.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2010年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	12,700,000	3,810,000	16,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学、土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：複合材料、ケーブル、シート、補強材料、耐久性

1. 研究開始当初の背景

沿岸の土木構造物は厳しい腐食環境にさらされるが、これらの腐食・防食対策は確立の途上であり、早急な対応が必要となっている。土木構造物の防食方法には様々な方法があるが、新しい手法として沿岸環境において腐食しない炭素繊維あるいはアラミド繊維などから構成される連続繊維補強材を利用する方法がある。素材が腐食しないことから信頼性が高い手法として1980年代より適用が進められており、既に実用化の域に達して普及が進んでいるところである。

また、塩害等によって劣化したコンクリートの補強が必要な場合は、従来は鋼板接着によって行われてきたが、補強鋼板の腐食などが課題となっていた。このため鋼板に代わって、連続繊維シート補強材を用いる方法が検討され、1990年代前半より本格的な適用が始まった。材料が腐食しない、施工が容易、などの利点が当初より注目され、阪神淡路大震災後に多くのコンクリート構造物補強が必要となったこともあり現在では広く普及している。

これらの連続繊維補強材・シート補強材は優れた材料であるが、その長期耐久性に関するデータが不足しているのが現状であった。連続繊維補強材は、常時緊張力がかかった状態で長期にわたり使用されるが、長期的な実際の挙動は不明の点が多く、厳しい条件では破断に到る事例も知られていた。また、連続繊維シート補強材については、素材のみならずコンクリートとの付着特性に関する耐久性も未解明であり、実際の耐久性についての研究が待たれていた。

2. 研究の目的

研究代表者らは、連続繊維補強材・シート補強材の土木用途における長期耐久性の解明のために、この材料の普及が始まった1990年頃より屋外暴露試験を開始し、材齢10~20年の暴露を経た供試体を保有していた。また連続繊維シート補強材については、この分野の研究が日本とともに進展しているカナダの研究グループ（シェルブルック大学）と研究協力を行い、共同で暴露試験を実施していた。本研究ではこれらの材齢10~20年程度の暴露供試体を回収して詳細な調査・分析を行うことで、連続繊維補強材・シート補強材の長期的な耐久性の解明を図ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 連続繊維補強材の耐久性評価

静岡県の駿河湾沿岸に設置されている海洋技術総合研究施設（図-1）に10年以上暴露試験に供された連続繊維補強材について、

供試体の回収を行うとともに、その物性の調査を行った。

表-1 試験に供した連続繊維補強材

記号	形状	繊維	マトリクス	Vf	直径	定着
CFRP1	ストランド	炭素	エポキシ	64	12.5	付着
CFRP2	ロッド	炭素	エポキシ	65	8.0	付着
AFRP1	ロッド	アラミド	ビニルエステル	66	6.0	付着
AFRP2	組紐	アラミド	エポキシ	65	8.0	付着
GFRP	ロッド	ガラス	ビニルエステル	65	6.0	付着
VFRP	ロッド	ビニロン	エポキシ	72	6.0	付着

注：Vf：繊維体積含有率（%）

連続繊維補強材の種類は表-1に示す6種類である。緊張力を与えた状態下と無緊張のもの、またそれぞれに直射日光の比較的良く当たる環境と、当たらない環境での暴露条件を設定した。緊張条件下暴露供試体は、ステンレス製のフレームに所定の緊張力（各材料に応じそれぞれ2段階）を導入して設置（1水準あたり2本）した（図-2）。

暴露地点から回収した供試体は、外観調査を行った後、センターホールジャッキを用いて残存緊張力を測定し、その一部を残存強度評価の破壊試験に供した。

破断強度および引張弾性率は、連続繊維補強材の引張試験方法であるJSCE-E531に準拠して測定した。また、一部の補強材については、赤外線顕微鏡を使って、深さ方向への劣化の進行についての検討も実施した。



図-1 暴露施設 図-2 緊張条件下供試体

(2) 連続繊維シート補強材の耐久性評価

連続繊維シート補強材については、3つの異なる自然気象条件下での屋外暴露試験による耐久性評価を実施した。暴露場所は積雪寒冷地であるシェルブルック（カナダ）、温暖な茨城県つくば市、そして亜熱帯地域に位置し海浜環境でもある沖縄県大宜味村の3箇所であり、10年間にわたる暴露試験から回収した供試体を使用した。

主な供試体の種類は以下の3種類である。

① 一方向積層板

主として繊維自体の耐久性を評価することを目的とした。表-2に一方積層板供試体の概要を示す。

表-2 一方積層板供試体の概要

暴露試験片名	使用材料	積層構成
一方積層板 A	PAN系炭素繊維シート/ エポキシ樹脂 (製品 A)	[0°]4
一方積層板 B	PAN系炭素繊維シート/ エポキシ樹脂 (製品 B)	
一方積層板 AC	PAN系炭素繊維シート/ エポキシ樹脂 (製品 A) +アクリルウレタン樹脂塗料 (上塗り)	

異なるメーカーより入手した、2種類のCFRPシート(製品A, B)を試験に供した。マトリックス樹脂は、各メーカーが推奨するエポキシ樹脂の中から選定した。供試体は、一方配列の炭素繊維シートを幅250mm×長さ300mmの寸法に切断し、これに樹脂含浸させつつ4層積層し、硬化させて作製した。表面塗装の保護効果を評価するため、アクリルウレタン樹脂塗料を上塗りとして有する塗装供試体も試験に供した。

② ±45° 斜交積層板

主に屋外暴露による繊維/樹脂界面の劣化について調べるための、主軸に対し繊維を±45°方向に配向して積層した斜交積層板である。一方積層板と同様に2種類のCFRPシート(製品A, B)を用いた。幅250mm×長さ1000mmの一方配列の炭素繊維シートから、短辺が250mmの直角二等辺三角形を4枚、底辺が250mmの平行四辺形を2枚切り出し、それぞれに樹脂を含浸させつつ4層積層硬化させたものを供試体とした。

①と②の供試体は、所定の暴露期間に回収し、切り出したクーポン試験片について、ASTM D3039およびASTM D3518Mにより力学的特性を評価した。繰り返し数はいずれも5とした。また、未暴露の試験片についても同様に評価し、これを初期値とした。

③ 巻き立て補強コンクリート円柱

直径15cm長さ30cmのコンクリートに炭素繊維シートを2層巻き立てて補強したものを供試体とした。回収供試体はASTM C39に基づく圧縮試験で評価した。

4. 研究成果

(1) 連続繊維補強材

① 見かけのリラクセーション率

緊張荷重の残存率(見かけのリラクセーション率)の例を図-3に示す。図中では同一水準供試体の平均値を示す。CFRPおよびAFRPケーブルでは、0.6PuのCFRP1直射光なしをのぞいて、初期荷重にかかわ

らず17年間(約15万時間)後のリラクセーション率は20%前後であった。導入緊張レベルの影響がもっとも顕著に現れたのはGFRPであり、0.4Pu供試体では暴露中に全て破断したのに対して、0.25Puはいずれも健全でリラクセーション率も非常に小さかった。VFRPのリラクセーション率は60%程度であった。

直射光の影響は、CFRP1では、直射光の有無によるリラクセーション率に20%程度の差が、GFRPおよびVFRPでは10%程度の差がみられた。その他の材料では、直射光ありの方が若干リラクセーション率が大きい傾向を示すものもあったが、その相違は小さく、直射日光の影響は顕著ではなかった。

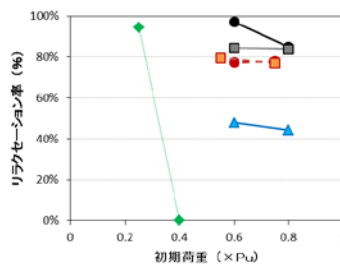


図-3 暴露後のリラクセーション率(直射光なし)

② 残存引張破断荷重

a) CFRPケーブル

緊張下で17年間暴露したCFRPケーブルの破断強度を図-4に示す。

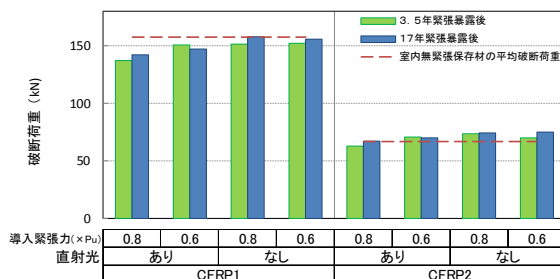


図-4 CFRPケーブルの残存強度特性

CFRP1の直射光ありの場合、特に導入緊張力が大きい場合にやや強度低下の傾向が見られた。それ以外は比較試験体と概ね同程度の破断荷重を示した。本試験は1条件あたりの繰り返し数が2本と少ないものの、各条件の結果を全体として捉えれば4または8本であり、有意な強度低下はないものと判断できる。CFRPケーブルは高緊張荷重下の屋外で線材が露出した状態にあったが、本試験結果からはこのような状態であっても、ケーブルの大きな強度低下は生じないことが実証的に確かめられたといえる。

b) AFRPケーブル

AFRPケーブルの破断強度を図-5に示す。

CFRPに比べると試験結果のばらつきがやや大きく、AFRP1の一部に強度低下の傾向がみられた。既往の調査例では、0.75Puはアラミド繊維にとって許容緊張力レベルとされる。0.6Puまでの供試体の試験結果では比較材からの強度減はわずかであり、大きな強度低下を生じたとはいえない。AFRPケーブルについては、これらの知見をもとに許容緊張レベルを精査し安全率をもって使用することで十分な耐久性が確保できると考えられる。

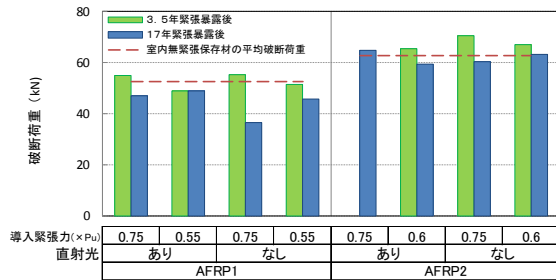


図-5 AFRPケーブルの残存強度特性

c) GFRPおよびVFRPケーブル

図-6にGFRPおよびVFRPケーブルの破断強度を示す。GFRPケーブルは、導入緊張レベルの影響が顕著に現れ、0.4Pu供試体では、3.5年経過の時点で残存強度に大きな低下（直射光ありで約2割、直射光なしで約1割）が見られ、17年後の調査時点では全ての供試体がクリーブ破断していた。0.25Puについては、外観はいずれも健全でリラクセーション率も非常に小さかったが、暴露年数の経過とともに破断強度は低下していることがわかった。ガラス繊維は荷重保持率は良いものの、大荷重が常時作用する用途には不向きと考えられる。

VFRPケーブルは、若干の強度低下の兆候が見られるものの有意なものとは言えず、緊張下での屋外曝露においても大きな強度低下の懸念は少ないとみられる。

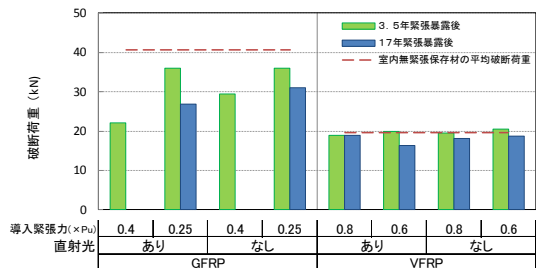
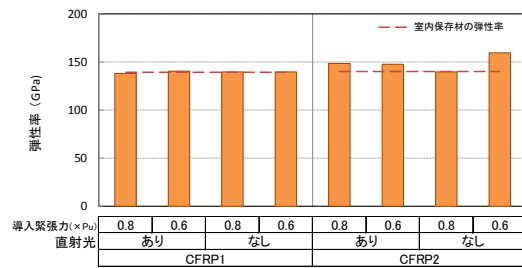


図-6 GFRP・VFRPケーブルの残存強度特性

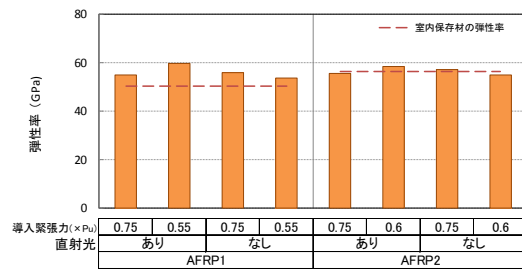
③ 弾性率の変化

17年間緊張曝露した後の引張強度試験から得られた引張弾性率の値を、比較材の結果とともに図-7に示す。AFRP1に若干の弾性率増加の兆候が見られるが、これが劣化硬化によるものか等については不明であ

る。その他のケーブル材については、引張弾性率には大きな変化はみられなかった。



(a)CFRPケーブル



(b)AFRPケーブル

図-7 GFRP・VFRPケーブルの残存強度特性

④ 赤外線顕微鏡による測定結果

図-8はAFRP2の表面付近と内部の典型的な赤外線スペクトルである。表面付近のスペクトルは内部に比べ、1550cm⁻¹付近のピークが大きくなっていた。

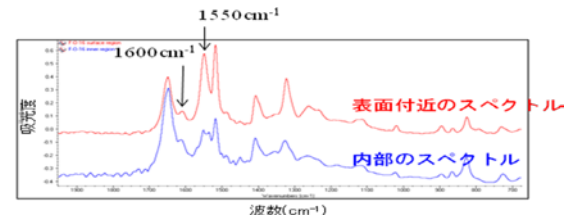


図-8 AFRP2の典型的な赤外線スペクトル

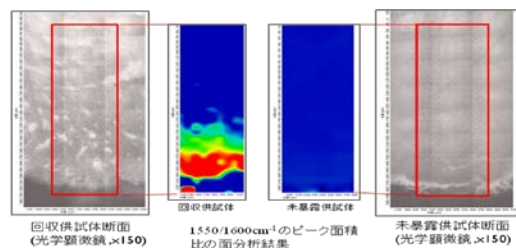


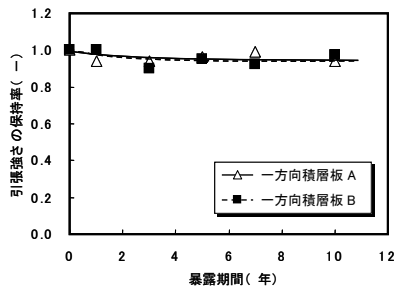
図-9 回収供試体と未暴露供試体の赤外線顕微鏡による断面観察

このピークの面積を、1600cm⁻¹のピーク（ベンゼン環の骨格と考えられる）を基準に、1550cm⁻¹/1600cm⁻¹のピーク面積比を2次元的に表したのが図-9である。対応する光学顕微鏡の測定範囲をあわせて示した。暴露後の供試体では、1550cm⁻¹/1600cm⁻¹ピーク面積比が大きい領域が表面付近に認められるのに対して、未暴露供試体ではこ

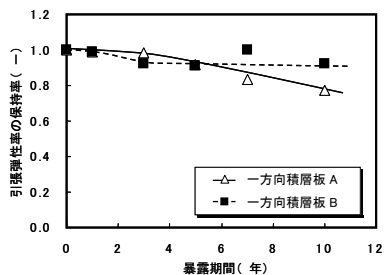
のような領域は存在しない。このことから、この赤外線スペクトルがFRPケーブルの劣化反応によるものと考えられ、その深さが0.8mm程度に及ぶことなどが分かった。またAFRP1についても赤外線スペクトルの変化は異なる(1715cm⁻¹に、内部のスペクトルには認められなかった新たなピークの発生が認められた。)ものの、表面での化学変化が0.2mm程度の深さで認められた。CFRPケーブルでは、観測範囲内の赤外線スペクトルに相違は認められなかった。

(2) 連続繊維シート補強材
① 材種による劣化挙動の相違

図-10 に一方向積層板の引張特性の経時変化を、図-11 に±45°斜交積層板の面内せん断特性の経時変化をそれぞれ示す。データは3箇所の暴露地の平均値とした。また、グラフの縦軸はそれぞれの初期値に対する割合(保持率)として表した。



(a) 引張強さの経時変化

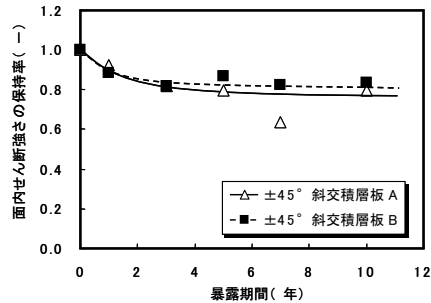


(b) 引張弾性率の経時変化

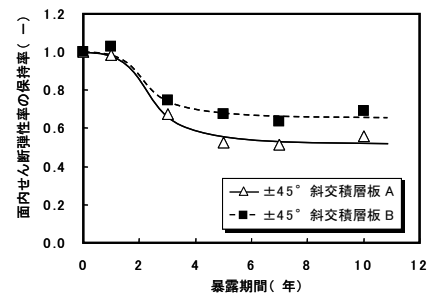
図-10 一方向積層板の引張特性の経時変化(材種による劣化挙動の相違)

一方向積層板の引張強さは、10年間の暴露期間を通じて著しい変化を見せなかった。この結果は、炭素繊維自体が10年間暴露後においても全く劣化していないか、あるいはほとんど劣化していないことを示唆している。その一方で、±45°斜交積層板の面内せん断強さは20%程度減少したことから、マトリックス樹脂と炭素繊維との界面はわずかに劣化しているものと推察される。しかしこの強度低下は、暴露開始からおおよそ3年の間に生じ、その後はほぼ一定レベルの強度を保ち続けた。引張弾性率および面内せん断弾性率の低下は、それぞれの強

度低下よりも大きかった。製品A、Bの結果にはほとんど差異が無かったが、製品Aの方がBよりも、劣化による強度低下がやや大きく生じる傾向となった。全体的に見ると、試験に供したCFRP積層板は屋外暴露によりわずかな強度低下を示すものの、10年間の暴露期間を通じ、実用上問題のない力学的性能を保持していると考えられる。



(a) 面内せん断強さの経時変化



(b) 面内せん断弾性率の経時変化

図-11 斜交積層板の面内せん断特性の経時変化(材種による劣化挙動の相違)

② 暴露環境による劣化挙動の差異

図-12は屋外暴露による一方向積層板の引張特性の経時変化の例である。暴露地(すなわち暴露環境)ごとに、製品A(無塗装)およびBの平均値で整理している。

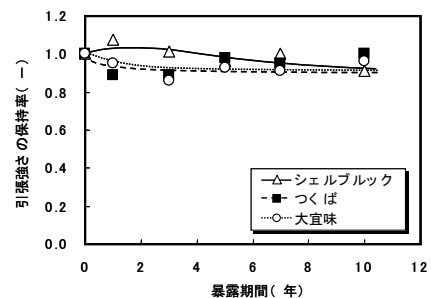


図-12 暴露地による引張強さの経時変化

沖縄県大宜味村に暴露した試験片の強度低下は、他の暴露地よりもやや大きい場合があるものの、気象条件の相違が比較的大きいと考えられるのに対し、今回の試験の範囲内では暴露環境による劣化挙動への影

響は顕著ではなかった。これらの傾向は弾性率および斜交供試体についても同様に認められた。

③ 表面塗装の保護効果

図-13は斜交供試体による面内せん断強さの経時変化である。GFRP引抜成形材に関する既往の研究では、屋外暴露によるFRPの力学的特性の低下に対し、表面塗装が良好な保護効果を示すことを確認している。しかし図-13では、表面塗装の有無にかかわらず積層板の強度低下はほぼ同等となり、CFRP積層板の強度低下に対する表面塗装の効果は認められなかった。なお、弾性率の低下に対しては、わずかながら表面塗装の効果の有する傾向が認められた。

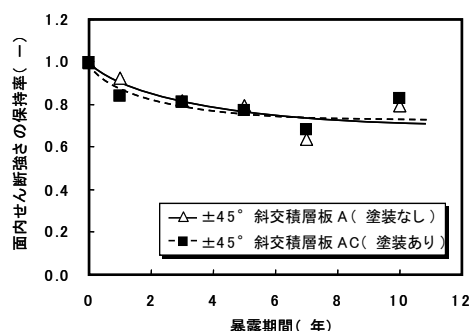


図-13 表面塗装の引張特性保護効果
(面内せん断強さの経時変化)

④ 巻き立て補強コンクリート円柱

無塗装の補強材ではマトリックス樹脂の黄変や減耗といった変状が顕著に認められたが、それらの補強効果に対する影響は認められず、いずれの供試体とも10年間暴露後もほぼ初期の強度を維持していた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① 西崎到「赤外線顕微鏡による連続繊維補強材の劣化観察」月刊建設, Vol.55, No.1, pp.52-53, 2011.

[学会発表] (計8件)

- ① Itaru Nishizaki and Iwao Sasaki, "Long-Term Durability of FRP Cables under Maritime Conditions", Proceedings of the 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2010), Vol. 1, pp.372-375, 2010.9.
- ② I. Nishizaki, P. Labossiere, K. W. Neale, M. Demers and T. Tomiyama, "Evaluation of the durability of CFRP sheets after climatic exposure", Proceedings of the fourth International Conference on Durability and Sustainability of Fibre Reinforced

Polymer (FRP) Composites for Construction and Rehabilitation (CDCC 2011), pp.91-99, 2011.7.

- ③ 佐々木巖、西崎到「長期屋外暴露試験における連続繊維補強材の見かけのリラクゼーション」土木学会年次講演会、論文番号 5-184, 2011.9.
- ④ 富山禎仁、西崎到, 「コンクリート補強用連続繊維シート (CFRP) の長期耐久性評価」、第9回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム, pp.290-295, 2011.11.
- ⑤ Iwao Sasaki, Itaru Nishizaki, "Tensile load relaxation of FRP cable system during long-term exposure tests ", Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, , Paper No. 691, 2012.6.
- ⑥ 富山禎仁、ピエール・ラボシエール、ケニス・W・ニール、マーク・ドメス、西崎到, "炭素繊維シート巻立て補強コンクリートの屋外耐久性に関する検討"第4回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集, Vol.4, pp.27-32, 2012.
- ⑦ 佐々木巖、西崎到, "FRP ケーブル材料の長期曝露後の残存強度特性"第4回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集, Vol.4, pp.33-37, 2012.

[図書] (計2件)

- ① 西崎到他 (共著), (株)技術情報協会, CFRPの樹脂含浸性向上と信頼性評価(分担執筆: 第7章第2節 屋外で使用するFRPの耐候性試験、寿命予測), 2010, pp.367-373.
- ② 西崎到他 (共著), (株)技術情報協会, 次世代自動車(EV・HV)に向けた自動車材料の樹脂化による車体軽量化 (共著、分担執筆: 第2章第17節 屋外で使用するFRPの耐候性試験、寿命予測), 2013

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西崎 到 (NISHIZAKI ITARU)

独立行政法人土木研究所・材料資源研究グループ・上席研究員

研究者番号: 80355792

(2) 研究分担者

佐々木 巖 (SASAKI IWAO)

独立行政法人土木研究所・材料資源研究グループ・主任研究員

研究者番号: 00355794

富山 禎仁 (TOMIYAMA TOMONORI)

独立行政法人土木研究所・材料資源研究グループ・主任研究員

研究者番号: 50370721