

令和 2 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03293

研究課題名（和文）インフラの性能回復からみた廃棄漁網の補修材料としての有用性評価に関する研究

研究課題名（英文）Effectiveness of nylon fiber recycled from fishing net as a repair material to restore structural capacity

研究代表者

横田 弘（YOKOTA, Hiroshi）

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：50344312

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 7,400,000円

研究成果の概要（和文）：廃棄漁網をリサイクルしたナイロン繊維のコンクリートの補修・補強材としての活用可能性を実験的に検討した。ナイロン繊維はコンクリートの圧縮強度を低下させるが、曲げ性能を改善させることを明らかにし、曲げ荷重下でのエネルギー吸収能力の増加を数値的に評価した。さらに、漁網の形状を活かした#状とすることが、最も有効な使用形態であることを示した。また、塩化物イオン浸透抵抗性や凍結融解抵抗性を向上させ、劣化の進行を抑制できることも明らかにした。このように、廃棄漁網をリサイクルして短繊維としてコンクリート補強材に利用できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素材自体の力学性能が他の一般的な有機繊維と比較して十分ではないリサイクルナイロン繊維をコンクリート補修・補強材として用い、特にコンクリートの引張性能や耐久性を向上できる可能性が示されたことで、今後さらなる研究や実用化に向けた検討および技術開発が期待できる。このことは、有害物質を発生させるため焼却処分が難しいとされる廃棄漁網を回収してリサイクルするための選択肢を増やすこととつながり、海洋生物や海洋環境に与える悪影響を低減させ、地球環境の保全や温暖化の防止にも意義がある。

研究成果の概要（英文）：This research program focused on the effectiveness of recycled nylon fiber from used fishing nets as a reinforcing material of concrete and mortar. The addition of fiber results in the decrease in compressive strength of concrete because of fiber's low Young's modulus. The reduction in strength is observed to be lower with higher fiber fraction and longer fibers. The addition of fiber affords a more ductile mode of failure, which leads to an increase in the load carrying capacity of fiber reinforced mortar. In the experiment, #-shape shows high effectiveness because it enhances flexural performance of mortar. Durability against free-thaw repetitions and chloride ion invasion are enhanced by adding the fiber. The experimental results confirmed that recycled nylon fiber has the potential for effectively reinforcing concrete and mortar and would be a possible way to recycle them, which can realize sustainability in the world.

研究分野：コンクリート工学、維持管理工学

キーワード：廃棄漁網 リサイクル ナイロン繊維 コンクリート構造物 補修材料 性能回復 力学性能 耐久性

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

海中で腐敗しないといった最大の利点から、天然繊維に代わって合成繊維を用いた漁網が世界中の漁業活動において普及している。特に、刺網等には高耐久性と低価格の点でナイロンが用いられており、ナイロン製の漁網の使用量は年々増加している。しかし、それに伴い海洋中に放置された漁網は毎年増加し、漁網の廃棄処理は重要な課題となっている。2009年の国際連合食糧農業機関(FAO)と国連環境計画(UNEP)の報告によると、年間の海洋ごみの約10%にあたる約64万トンもの漁具が海洋に放置されていると推測されている。海洋に放置された漁網は超長期間そこに残存し、環境破壊や景観悪化はもちろんのこと、海生生物に甚大な悪影響を与える。このように、海洋に放置された漁網は海洋生態系を破壊するため適宜回収されようとしているが、回収後の処理の方法も課題となって進んでいない。漁網に多用されるナイロンは最も廃棄処理が困難なプラスチックとして知られているため、リサイクルは緊急に求められる技術である。

一方、圧縮強度に比べ引張強度が非常に低いという欠点をもつコンクリートに代表されるセメント系複合材料は、その欠点を克服するために短繊維を補強材料として用いることが有効である。近年着目されている合成繊維は、引張強度や弾性係数において鋼繊維に劣るものの、耐久性上の懸念が少なく、また軽量で扱いやすいため運搬の容易さや作業時の安全性等の利点がある。しかし、漁網に用いられているナイロン繊維は、2014~2016年に実施した挑戦的萌芽研究26630208「複数回の補修を経たコンクリート部材の性能評価と延命化限界の解明」において、一般的なポリエチレン(PE)繊維等に比べてその性能は十分ではないことが明らかとなっている。

このようなことから、漁網からリサイクルしたナイロン繊維を短繊維のみならずの漁網の形態を活かした形状のまま用いるなど、より効果の高い利用方法を検討し、明らかにする必要がある。ナイロン繊維をコンクリート補強材として活用する研究は海外も含めてほとんど行われていない。セメントマトリックスとの付着性能が十分でないナイロン繊維の活用方法を力学特性および耐久性の観点から検討し提案することは、学術的および実用的な意義がある。

### 2. 研究の目的

本研究は、海洋に投棄されたり、回収が不可能となって放置されたりしている漁網からナイロン繊維を取り出し、コンクリート構造物の補修・補強材料あるいは建設資材としてリサイクル活用するための方法を検討することが目的である。そのために、コンクリートの力学性能等に与える影響を実験的に定量化するとともに、補修・補強材料としての劣化コンクリート構造物の性能改善効果も明らかにして、活用に向けた技術的資料を提供することを目的とする。PE繊維等の有機繊維を建設材料として用いることはこれまで広く行われているが、ナイロン繊維をこれらと同じように用いると、期待できる性能がこれらの繊維に比べて劣ることが分かっている。そのため、廃棄漁網のリサイクルにおいて形状や寸法等を工夫する必要がある。これらの廃棄漁網のリサイクル加工形態を実験パラメータとして、力学性能の改善効果の検討、劣化進行抑制性能からの効果の検証を行い、さらにサステナビリティからの考察も加えて、実用的に確実にその効果が得られるリサイクルナイロン繊維の活用方法を検討することを目的とする。

### 3. 研究の方法

研究の目的を効率的に達成するために、次の4つの研究項目に分けて実施した。

#### (1) 発生漁網の実態調査・分析

漁業従事者の協力を得て、北海道の歯舞漁港と忍路漁港において廃棄漁網の発生状況とその処分の実態に関する現地調査およびヒアリングを行い、材料的な視点から廃棄漁網の発生実態とともに、廃棄量が多いと見込まれる漁網の諸元を明らかにした。また、漁港管理者である北海道水産林務部からのヒアリングにより、道内での廃棄漁網の発生量や処分方法の現況について把握した。これらの結果に基づいて、項目(2)および(3)で研究の対象とする代表的な漁網リサイクルナイロン繊維の寸法等を決定した。

#### (2) 漁網をリサイクルしたナイロン繊維の力学性能改善効果の検討

リサイクルナイロン繊維をコンクリート(モルタル)中の補強繊維としての活用の可能性を試験により検討した。基礎物性を調べる試験では、モルタルの作業性(流動性)を確認した後、直径50×100mmまたは100×200mmの円柱試験体、および40×40×160mmまたは100×100×400mmの角柱試験体を用いて、圧縮強度、曲げ強度、ヤング率および曲げ変形性能を定量化した。その際、漁網を直線状の短繊維として裁断するだけでなく、結び目を一つ残したX状および結び目を4つ残した#状、さらにより広範囲にシート状として用いることを試みた。

さらに、ナイロン短繊維をポリマーセメントモルタルに(PCM)に練り混ぜ、劣化したコンクリートはりの断面修復用の補修材料として用いることの有効性を大型のはり試験体(断面150×100mm、長さ900mm)46体を用いて、実際に内部鉄筋に腐食を生じさせて確認した。PCMは劣化部分の深さ約50mmの部分をはつりとった後に吹付けによって修復するという実際の補修方法を模擬した。その際に、耐力と変形性能改善効果を確認した。なお、この試験は当初電食という促進手法によって鉄筋腐食を生じさせることを予定していたが、検討の結果それでは不十分で当初の研究目的を達成できないことが研究途中で判明したため、急遽海洋環境下での自然暴露による方法に変更した。

### (3) 漁網をリサイクルしたナイロン繊維の劣化進行抑制効果の検討

ナイロン短繊維のひび割れ発生抑制効果に着目し、劣化試験により劣化進行抑制効果を明らかにした。塩害の抑制効果については、(2)で述べたはり試験体および同時に暴露した円柱試験体と角柱試験体を用いて実施した。暴露試験は、鹿児島大学の協力を得て、鹿児島港内の干満帯に設置された海洋環境暴露試験場にて約2年間実施した。また、より詳細な塩化物イオン浸透性を調べるために、港湾空港技術研究所(横須賀市)の協力を得て、劣化因子のコンクリート中への浸透をより詳細に検討するための寸法100×100×100mmの立方体試験体48体を海水噴霧に約2年間暴露した。両試験とも暴露開始から定期的に試験体を回収し、試験体内に侵入した塩化物イオン量の定量化および分布測定を行った。

さらに、凍結融解抵抗性の向上効果を検討することを目的に、40×40×160mmのモルタル角柱試験体を用いて330サイクルまで凍結融解試験を実施した。その間、動弾性係数の低下や質量減少量を定期的に測定した。

なお、ナイロン繊維はコンクリート中のアルカリ環境下においても十分な耐久性を有することが文献調査から得られたので、今回の試験項目からは除外した。

### (4) サステナビリティの観点からの効果の検討

ナイロン繊維を今回の研究のようにリサイクルして用いたとしても、いずれ構造物を廃棄する際に、ナイロン繊維が混入されたコンクリート塊の処分方法が問題となる。これに対する技術の確立は別研究として取り上げるべき難解なテーマであるが、既存の処理方法から有望な方法を文献調査から想定し、これに対するライフサイクルでの総合的なサステナビリティからの効果について試算を行って考察した。

## 4. 研究成果

### (1) 発生漁網の実態調査・分析

ヒアリングおよび現地調査において、北海道でも年間およそ2000トン(平成27年度)もの漁網が水産廃棄物として発生している実態が得られた。このうち、焼却等による処理が行われているものは34%、埋め立て処分は44%、リサイクルは22%と報告されており、リサイクルされている量は決して多くないことがわかった。ナイロンは最もリサイクルの難しいプラスチックであるとされており、リサイクルの重要性が再認識される。また、小規模な漁業者では、廃棄漁網の処理は業者に委託して行っているため、この費用が経営を圧迫している実態も確認され、廃棄漁網に付加価値をつけられるようなリサイクル等の技術の開発が切望されている実態も得られた。

北海道で発生する廃棄漁網の中で、コンクリート補強用短繊維として使用可能性が高いと考えられるものとして直径が0.23mm、0.24mm、0.52mmの3種類、網目の間隔が10mmあるいは20mm程度のものを研究の対象に選定し、項目(2)および(3)に引き継いだ。漁網が廃棄されるきっかけは、大型魚類の捕獲によって網が破損することが最も大きな理由であることがわかった。つまり、ナイロン繊維自体の損傷や劣化は少なく、付着した塩分を洗い流すことでコンクリート用補強材として十分に活用でき、継続的に十分な量が供給されることも調査の結果明らかとなった。

### (2) 漁網をリサイクルしたナイロン繊維の力学性能改善効果の検討

直径と長さを試験因子としてモルタルにリサイクルナイロン繊維を混入して基本的な力学性能を評価した。材齢28日における圧縮強度を図-1に、曲げ強度を図-2に示す。Pは繊維の混入されていないプレーンモルタルで、数字は直径(mm)、長さ(mm)、混入率(モルタル全量に対する体積比、%)を示している。ナイロン繊維の混入により、圧縮強度は直径0.52mmの繊維で最大27%、直径0.24mmの繊維で最大19%低下した。このように、圧縮強度は繊維の直径が大きいほど、長さが長いほど、混入率が大きいほど低下する傾向にあることが分かった。これは、ヤング率の低いナイロン繊維の混入あたかも空隙を増やしたことと同様の効果をもたらし、欠陥を生じさせているのではないかと結論づけた。また、繊維直交方向により大きな引張応力を発生させることも圧縮強度の低下の原因である。一方、曲げ強度は直径0.52mmの繊維で最大18%、直径0.24mmの繊維で最大27%の増加となった。繊維が長い場合にはセメントマトリックスとの付着がより強固となったことが高い曲げ強度をもたらす要因であることを明らかにした。

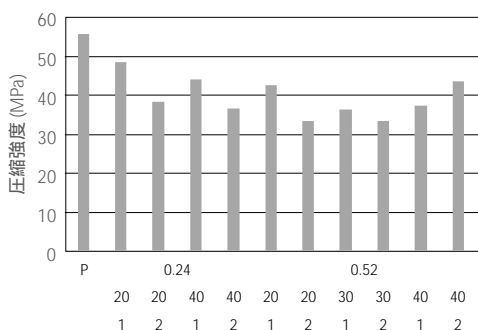


図-1 圧縮強度

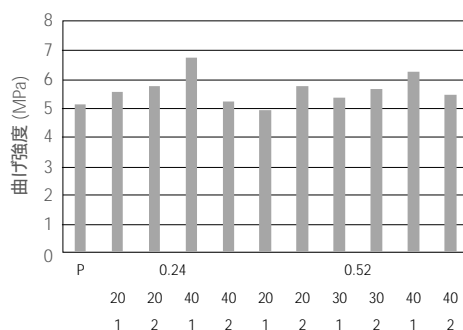


図-2 曲げ強度

短繊維としての活用に加え、漁網の形態をより活かした形状・寸法のナイロン繊維の活用としてX状および#状の利用可能性を検討した。一例として図-3に圧縮強度を示す。ここで、繊維記号に続く数字は混入率（1は1.0%、2は2.0%）を示している。繊維を混入していないプレーンモルタル（P）と比べて短繊維（S）では同程度に、#とXは圧縮強度が小さくなった。いずれのケースも繊維の混入率が増えると圧縮強度が低下した。これは上述のように繊維が空隙のようにふるまって圧縮強度が低下するためであることや、ナイロン繊維が結び目を起点として変形しやすいため、モルタルと繊維の間に空隙が生じ、さらなる強度低下に至ったものと結論付けた。

モルタルの曲げ試験で得られた荷重とたわみの関係を元にエネルギー吸収能力を明らかにした。短繊維の場合と比べて、曲げ最大荷重はほぼ同じであったが、最大荷重後の保持荷重は、#2が相当大きくなった。これは、X状のものよりも優れていた。#の形状が結び目を多数有することから、モルタルとの摩擦抵抗が大きくなり、繊維の引き抜け抵抗が大きくなったことによるものと考えられる。このように引張性能が改善され、繊維の混入による効果が最も高いのはエネルギー吸収能力に影響する。エネルギー吸収能力が高いと例えば地震の際に有利である。エネルギー吸収能力をじん性係数（ピーク荷重時の吸収エネルギーに対する、変位量がピーク時の3倍（ $I_5$ ）5.5倍（ $I_{10}$ ）10.5倍（ $I_{20}$ ）時の吸収エネルギーの比）で比較した結果を図-4に示す。 $I_{20}$ で比較すると、#2が12.7と最も高くなり、短繊維のまま（同じ直径で長さが10mmの場合）で用いた場合と比べても約3.5倍の値を示したことから、この形状の優位性が明らかにされた。

以上をまとめると、繊維長および繊維混入率が大きくなるとモルタルの強度の低下が顕著になるが、ひび割れ発生後の荷重保持性能は改善されることが明らかとなった。このことは繊維の直径が大きくなるとより効果的である。特に、#の形状はひび割れ発生後も大きな保持荷重を達成できる。短繊維として用いた場合には、漁網に存在する結び目を繊維の両端に残しても、それが繊維の引抜けに対する抵抗性を向上させることには大きく寄与しない結果となったが、単に短繊維の両端に存在する結び目とは異なり、#のように繊維中間に多く存在する結び目が効果的であることを明らかにした。漁網裁断の手間を考えると、#の形状が圧縮強度の低下はあるものの曲げ荷重保持性能が大きく改善されることから、最も有効な活用方法であることが明らかになった。

結び目の存在が力学的性質の向上に寄与する場合とそうでない場合があることがわかり、今後詳細な検討が必要である。また、漁網をより広範囲に裁断して用いる場合には繊維の寸法が大きくなるため、繊維の均等な分散性を実現しようとすると、さらに大型のはり試験体で有効性を確認する必要がある。これについてはこの研究期間では実験の実施にまで至らなかったが、既に材料を準備し試験体の設計を行ったので、引き続き継続して実施する予定である。

ナイロン短繊維を混入したポリマーセメントモルタル（PCM）を補修材料として、これを吹付けて断面修復を行った場合の性能改善効果について試験により検討した。図-5に示すように、リサイクルナイロン繊維（RN）を混入することで、補修前の試験体（RC）よりも約40%耐力の向上が得られた。また、最大荷重到達後も荷重を保持できることから、よりじん性に富む挙動を示す可能性を示した。ただし、繊維を入れないPCM（NF）やPE繊維PCM（PE）と比べて約10%の向上にとどまった一方で、じん性は十分に改善されていない結果となった。耐力の向上は、ナイロン繊維を混入することで曲げ強度が改善されることによる。また、繊維の混入によりひび割れの分散に貢献することも明らかとなり、このことが破壊の局所化を防止すると考えられた。このように、コンクリート構造物の補修・補強を有効に行えることがわかった。今回示した試験結果は暴露後1年経過時のもので、予想よりも鉄筋の腐食が進行していない状況での試験となった。暴露はさらに継続して実施中であり、暴露開始後2年経過時点での試験を行って総合的な結論を出す予定である。

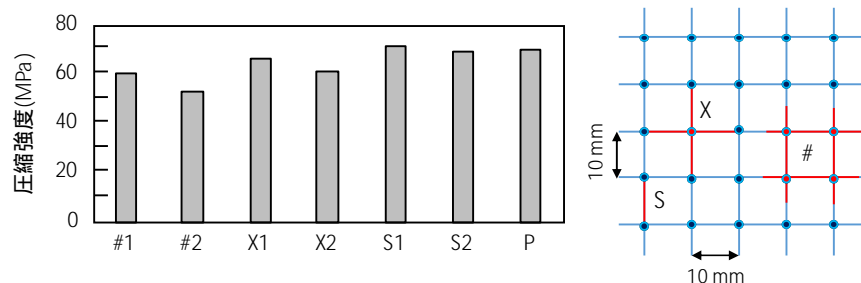


図-3 #状およびX状の繊維を混入したモルタルの圧縮強度

### (3) 漁網をリサイクルしたナイロン繊維の劣化進行抑制効果の検討

実海洋環境下における暴露試験から劣化進行抑制効果を検討した。既述のように、リサイクルナイロン繊維の混入によりコンクリートのひび割れ分散性能が向上することにより塩化物イオン浸透抵抗性が若干改善されることが明らかになった。図-6に塩化物イオンの試験体内への浸透状況、図-7に小型試験体から得られた塩化物イオンの拡散係数について示す。

ナイロン繊維を混入することでプレーン（NF）と比べて拡散係数が65%程度小さくなったことから、塩化物イオンの侵入を抑制し、塩害の進行を抑制する効果が期待できることが分かった。



加えて、寒冷地における耐凍害性の向上効果を凍結融解試験により評価した。繊維の種類や混入量の違いによる凍結融解抵抗性の違いについての知見が得られた。330回の凍結融解サイクルに供した結果、リサイクルナイロン繊維を混入した場合は、繊維とモルタルの界面より容易に水分が侵入するものの、モルタル表面にある繊維がひび割れに架橋し劣化の進行を抑制することが明らかとなった。このことは、相対動弾性係数の低下が抑制されること(図-8)が確認できた。一方、リサイクルナイロン繊維を混入するとスケーリングによる質量減少率(図-9)は若干大きくなる傾向が示された。これは、モルタル表面にある繊維間のモルタル分が塊となって容易に剝離し訳すなるためであることも確認できた。

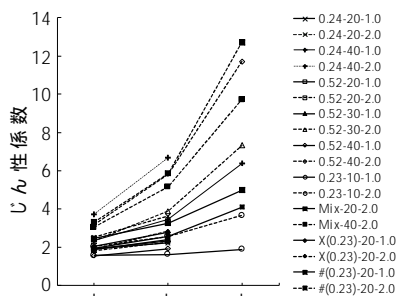


図-4 じん性係数

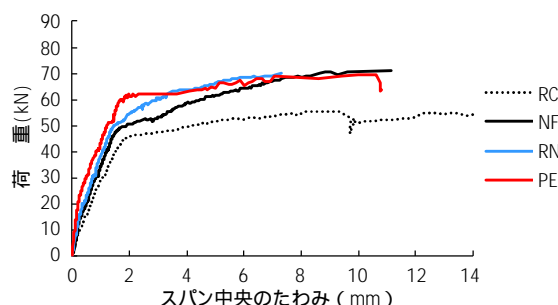


図-5 断面修復後の曲げ性能の改善状況

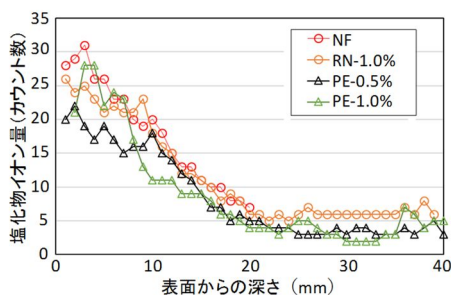


図-6 塩化物イオン量の深さ方向の分布

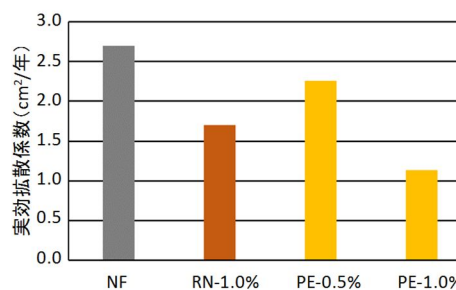


図-7 実効拡散係数

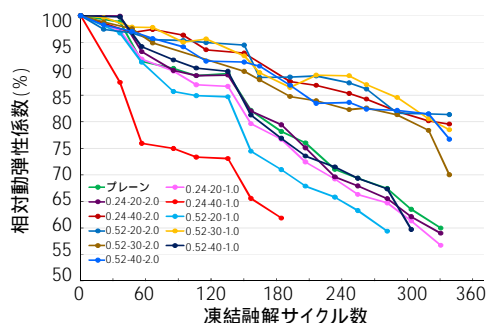


図-8 相対動弾性係数の変化

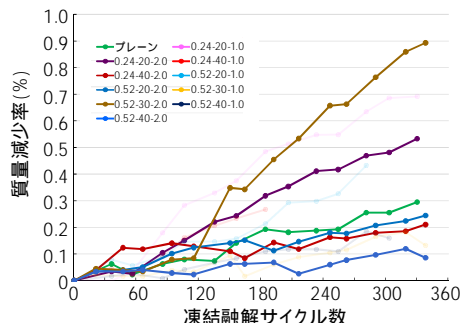


図-9 質量減少率

#### (4) サステナビリティの観点からの効果の検討

ナイロンは製造にも多量の二酸化炭素が発生する(ナイロンを 1kg 製造すると 1.91kg の CO<sub>2</sub> が放出される)ため、有害物質を発生させる焼却処分だけでなく、リサイクルすることが重要である。今回の検討では、永久的にサステナブルとなり得る手法は見出すことができなかったが、廃棄漁網を回収してリサイクルすることは、サステナビリティの環境的側面と経済的側面からの試算の結果、効果を期待できることがわかった。ナイロンは現在の技術では再生処理が難しいとされるが、現在では衣類、装身具、靴へのリサイクルが進められている。これに加えて、コンクリートへの短繊維としての混入は、再生処理技術が将来開発されるまで有効な手法の選択肢の一つとなる可能性が示された。

#### (5) まとめ

研究の結果、漁網からリサイクルされたナイロン短繊維は、コンクリートの曲げ性能を向上させ、補修・補強材として使用した場合に、力学性能の改善効果および劣化進行の抑制効果が期待できることがわかった。またそのための繊維の使用方法についても明らかにした。これらの成果は、まだリサイクルナイロン繊維についての検討が十分でない中で、国際的にも影響度が高く、今後の研究や技術開発に与えるインパクトも高いと考えられる。劣化進行の抑制については現在も研究を進めており、継続して取り組んでいく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Teeranai Srimahachota, Haruka Matsuura, Hiroshi Yokota
2. 発表標題 Mechanical properties of polymer cement mortar reinforced with polyethylene and recycled nylon fibers
3. 学会等名 3rd ACF Symposium, Assessment and Intervention of Existing Structures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Yokota, Teeranai Srimahachota, Haruka Matsuura, Shun Yamaguchi
2. 発表標題 Recycling of waste fishing net as short fibers to reinforce cement mortar
3. 学会等名 International Conference on Building Materials (ICBM 2019) on Science and Technology of Building Materials for Sustainable Development (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松浦 悠、横田 弘
2. 発表標題 リサイクルナイロン短繊維補強モルタルの耐凍害性評価
3. 学会等名 土木学会北海道支部 令和元年度年次技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口 駿, 横田 弘
2. 発表標題 様々な形状を有するリサイクルナイロン繊維で補強したモルタルの力学性能
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 海野太貴、横田 弘
2. 発表標題 リサイクルナイロン繊維のモルタル補強効果に関する検討
3. 学会等名 平成29年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Teeranai Srimahachota, Haruka Matsuura, Hiroshi Yokota, Yoshikazu Akira
2. 発表標題 Recycled nylon fiber from waste fishing nets as reinforcement in polymer cement mortar for the repair of corroded RC beams (発表確定)
3. 学会等名 6th International Conference on Construction Materials, ConMat 20 (国際学会)
4. 発表年 2020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