

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

Consideration on reinforcement effect of fishing net recycled nylon fibers in mortar

北海道大学大学院 〇学生員 海野 太貴 (Daiki Unno)
北海道大学大学院工学研究院 フェロー 横田 弘 (Hiroshi Yokota)

1. はじめに

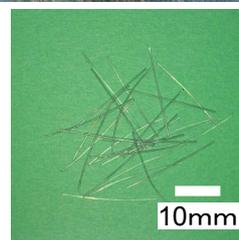
現在、世界の漁業活動において、海中で腐敗しないといった利点から、天然繊維に代わって合成繊維を用いた漁網が普及している。特に、刺網等には高耐久性と低価格の観点からナイロンが用いられており、ナイロン製の漁網の使用量は年々増加している。しかし、それに伴い海洋中に放置される漁網は毎年増加し、漁網の廃棄処理は重要な課題となっている。2009年の国際連合食糧農業機関 (FAO) と国連環境計画 (UNEP) の報告によると、年間の海洋ごみの10%にあたる約64万トンもの漁具が海中に放置されていると推測されている¹⁾。海中に放置された漁網は何百年の間残存し、海洋生態系の破壊にもつながるといった理由から、適宜回収され始めている。しかし、回収後には有害物質を発生させる焼却処分だけでなく、できる限りリサイクルすることが求められている。

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セメント系複合材料に対し、引張強度の向上やひび割れ制御等様々な性能の改善の手法として、短繊維の混入による補強についての研究が行われてきた。短繊維の一つとして用いられている鋼繊維は、質量が大きいという欠点に加え、経年劣化に伴ってコンクリート表面付近で発生する点錆や錆汁により美観を損ねることが懸念される。一方、鋼繊維の代わりに使用され始めた合成繊維は、引張強度やヤング率は鋼繊維に劣るものの、錆の発生の心配がなく、また軽量で扱いやすいため運搬や作業時の安全性等の利点があるといったこと等、鋼繊維とは異なる優位性を有している²⁾。そのため、合成繊維をモルタルやコンクリートの補強材料として活用するための研究が進められてきた。筆者等による既往の研究においては、廃棄漁網をリサイクルしたナイロン繊維の混入条件によって異なる補強効果が得られた³⁾。そこで、本研究では、既往の研究を踏まえ、リサイクルナイロン繊維の混入による、モルタルの強度や繊維の引抜けに対する抵抗性の変化をより詳細に評価することを目的とし、ナイロン繊維の直径や繊維の形状等を実験因子として追加実験を行い、検討した。

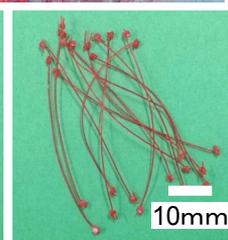
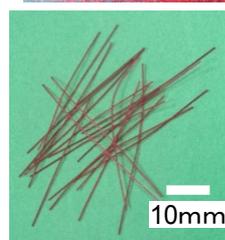
2. 試験概要

2.1 ナイロン繊維

用いた漁網は、北海道根室市歯舞漁港にて使用されていたナイロン製の漁網であり、70mm四方のメッシュ構造で繊維の直径が0.39mm (以下、タイプ A) と、40mm四方のメッシュ構造で繊維の直径が0.35mm (以下、タイプ B) の二種類である。タイプ A の漁網は、



a) タイプ A の漁網およびタイプ A-i



b) タイプ B の漁網およびタイプ B-i (左下)、タイプ B-ii (右下)

写真-1 漁網と各種繊維の外観

長さ 20mm, 30mm, 40mm (以下、タイプ A-i) に裁断し、タイプ B の漁網は 20mm, 40mm (以下、タイプ B-i) に加えて、両端に結び目を残して 45mm (以下、タイプ B-ii) に裁断した。本研究で使用したナイロン製の漁網と裁断後のナイロン繊維の外観を写真-1 に示す。

2.2 ナイロン繊維の耐アルカリ性試験

ASTM D543-95 に準拠して、ナイロン繊維の耐アルカリ性試験を行った。まず、裁断したナイロン繊維からランダムに数十本取り出し、質量計測および引張強度試験

表-1 ナイロン繊維の耐アルカリ性試験結果

繊維の種類	引張強度				増加率(%)	質量		
	アルカリ浸漬前(MPa)		アルカリ浸漬後(MPa)			アルカリ浸漬前(g)	アルカリ浸漬後(g)	増加率(%)
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差				
タイプA	457.1	42.3	461.9	9.8	1.0	0.660	0.653	-1.1
タイプB	424.5	6.9	415.4	40.5	-2.0	0.603	0.596	-1.1

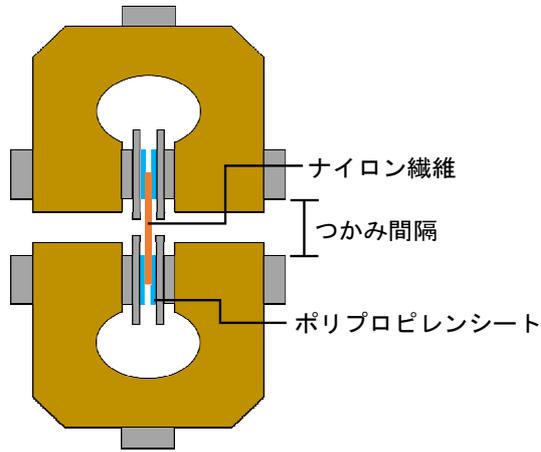


図-1 引張強度試験の概要

により引張強度を得た。なお、引張強度試験は取り付けに際して、図-1 に示すように、ナイロン繊維がつかみ部で傷つくのを防ぐためポリプロピレンのシートで挟み、さらに、繊維の滑りを防ぐためエポキシ樹脂を用いて固定した。つかみ間隔は 30mm、試験速度を 1mm/min とした。その後 1L の蒸留水に 10g の水酸化ナトリウム (NaOH) を加えたアルカリ性水溶液にナイロン繊維を 5 日間 (120h) 浸漬し、水分の蒸発を抑えながら試験中の温度を 60±2℃ に保った。繊維を取り出した後、繊維を水道水で洗浄し、常温で乾燥させ、再び質量計測と引張強度試験を行った。これにより、アルカリ性水溶液に浸漬させる前の質量および引張強度と比較し、ナイロン繊維の耐アルカリ性を評価した。

2.3 供試体の作製

作製したモルタル供試体は 40×40×160mm の角柱と φ 50×100mm のシリンダーとした。供試体作製において、セメントに普通ポルトランドセメント (ρ=3.16g/cm³)、細骨材に川砂 (ρ=2.71g/cm³) を用いた。ナイロン繊維の混入率は、タイプ A-i では体積比 1.0%、1.5%、2.0% の三水準、タイプ B-i では体積比 1.0%、2.0% の二水準、タイプ B-ii では体積比 0.5%、1.0% の二水準に設定した。モルタルの W/C は 0.45 とした。練混ぜには小型モルタルミキサーを用い、セメントと細骨材を低速度で 1 分間空練りした後、繊維を徐々に加えながら手練りした。最後に水を加え、再び小型モルタルミキサーで 2 分間本練りを行った。打ち込みから 24 時間後に脱型し、20℃ の水中で材齢 28 日まで養生した。

2.4 測定項目および試験方法

フレッシュモルタルの性状は、JIS R 5201 に準拠して、

表-2 使用した繊維ごとのフロー値

繊維の種類	繊維長 (mm)	アスペクト比 (繊維長/直径)	繊維混入率 (%)	フロー値 (mm)
-	-	-	0	255
タイプA-i	20	51	1.0	218
			1.5	209
			2.0	205
	30	77	1.0	216
			1.5	205
			2.0	188
40	103	1.0	210	
		1.5	207	
		2.0	182	
タイプB-i	20	57	1.0	231
			2.0	207
	40	114	1.0	217
2.0			183	
タイプB-ii	45	-	0.5	247
			1.0	227

テーブルフロー試験により測定した。養生終了後、シリンダー供試体は JIS A 1108 に準拠して圧縮強度試験を行った。角柱供試体は、JIS A 1106 に準拠して、曲げ載荷試験を行った。なお、曲げ載荷試験は支点間距離 120mm とし、中央集中荷重、載荷速度は 5mm/min とし、スパン中央部に変位計を設置してたわみを測定した。

3. 試験結果および解析

3.1 ナイロン繊維の耐アルカリ性試験

耐アルカリ性試験結果を表-1 に示す。タイプ A、タイプ B とともに繊維の引張強度および質量の増減は 2.0% 以下であった。標準偏差を考慮すると、この差は、測定上のばらつきの範囲であると考えられる。したがって、アルカリ性であるセメント系複合材料中での繊維補強として用いても、漁網を再利用したナイロン繊維は劣化せず、十分な耐アルカリ性を有していると言える。

3.2 テーブルフロー試験

テーブルフロー試験の結果を表-2 に示す。フロー値は、繊維混入率および繊維長の増加に伴い減少した。これは、繊維同士が絡み合い、モルタルの流動性を低下させたためであると考えられる。

3.3 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-2 に示す。繊維補強されたモルタルは、プレーンモルタルよりも低い圧縮強度を示し、最大でタイプ B-i の繊維長 40mm、繊維混入率 2.0% の場合で約 49% 低下した。合成繊維はモルタルと比較すると変形しやすく、圧縮時においてモルタル中で空隙のように挙動することから、これによって圧縮強度の低下が引き起こされたものと考えられる⁴⁾。特にタイプ

A-i とタイプ B-i では、繊維混入率および繊維長の増加に伴って圧縮強度が減少する傾向が見られた。繊維混入率が影響する原因については、前述の空隙的挙動を示す部分の体積が増えたことが原因であると考えられる。一方で繊維長の増加については、空隙的挙動部分の連続性が増すことにより、モルタルの損傷をより進展しやすくしたためであると考えられる。また、タイプ A-i とタイプ B-i を等しい繊維長および繊維混入率で比較すると、直径が細いタイプ B-i の方が圧縮強度は低い傾向にあった。これは、繊維の分散性が影響したことによるものと考えられる。繊維混入率が一定の条件で繊維の直径が小さいことはモルタル中の繊維本数が多くなることを意味し、その増加はモルタル中での繊維の分散性の低下を招きやすい。分散性が低下しモルタル中で繊維同士が重なると、より大きな変形が起こりやすい部分が生じてしまい、結果として上記のような圧縮強度の低下を引き起こしたものと考えられる。また、タイプ B-ii は同じ 1.0%の繊維混入率の中で最も低い圧縮強度を示した。タイプ B-ii においては、結び目により繊維同士の絡み合いが助長されたことで、分散性の低下がより顕著に生じるものと考えられる。したがって、タイプ B-ii の結果からもモルタル中のナイロン繊維の分散性の悪化が圧縮強度低下につながると言える。

3.4 曲げ載荷試験

(1) 曲げ強度

曲げ強度を式(1)にて算出した。

$$f_b = \frac{3 \times P \times l}{2 \times b \times h^2} \quad (1)$$

ここで、

f_b : 曲げ強度(MPa), P : 最大荷重(N), l : スパン(mm),

b : 破断面の幅(mm), h : 破断面の高さ(mm)

得られた曲げ強度を図-3 に示す。繊維補強されたモルタルは、プレーンモルタルよりも高い曲げ強度を示す傾向があり、最大でタイプ A-i の繊維長 20mm, 繊維混入率 1.0%のモルタルは約 53%増加した。これは、モルタル中に混入された繊維がひび割れ進展領域において荷重に伴うひび割れの発生を抑制するためであると考えられる。ここでタイプ A-i とタイプ B-i では、いずれにおいても繊維長ならびに繊維混入率の減少に伴って高い曲げ強度を示す傾向が見られた。また、等しい繊維長および繊維混入率で比較すると、直径の太いタイプ A-i の方が高い曲げ強度を示す傾向が見られた。繊維長および繊維混入率の減少は練混ぜ時におけるモルタル中での繊維の分散性を良好にし、また圧縮強度においても述べたとおり、繊維の直径が大きいことも繊維の分散性が良好であることにつながる。これらの繊維が固まることなくより多くの範囲においてひび割れの発生を抑制するため、曲げ強度が増加すると考えられる。またタイプ B-ii の曲げ強度は、繊維混入率の大きい方が低い値を示し、同じ 1.0%の繊維混入率の中で最も低い値を示した。繊維混入率の増加と結び目導入による繊維同士の絡み合いは、分散性を低下させ、曲げ強度が低下したと考える。

(2) 荷重変位曲線

繊維種類および混入率を変化させた場合のモルタル供

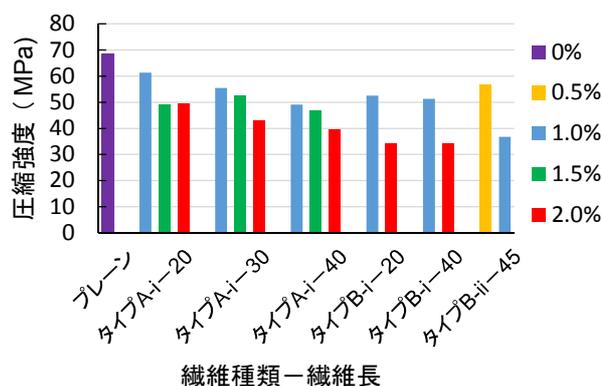


図-2 圧縮強度

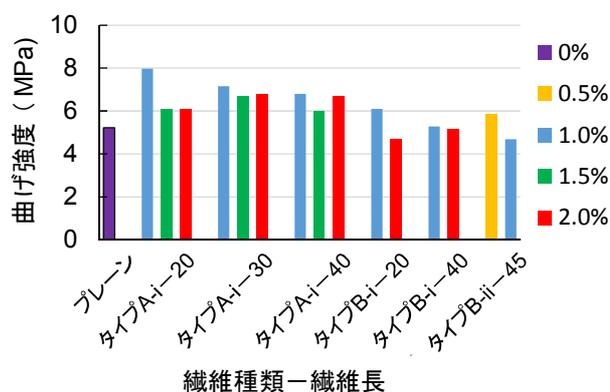


図-3 曲げ強度

試体の荷重変位曲線を図-4 に示す。なお、同図は補強繊維の種類ごとに初期ひび割れ発生後（以下、ポストピーク領域）の挙動を十分に観察できる変位まで示している。タイプ A-i とタイプ B-i ではどちらも、繊維長が長いほど、また、繊維混入率が大きいほどポストピーク領域でより大きな荷重を保持した。特に、繊維長 40mm, 混入率 2.0%では、変位量に伴って再び荷重の増加が見られた。繊維長が増加すると、モルタルとの接触面積が大きくなり、繊維一本に作用する摩擦力が向上したため、引抜けに対してより抵抗したと考える⁵⁾。一方、繊維混入率の増加による影響については、ひび割れに架橋する繊維本数が多くなり、繊維一本あたりの負担する応力が小さくなったことが増加の要因であると考えられる。また、タイプ A-i とタイプ B-i を比較したところ、繊維長が長くなると直径の太いタイプ A-i の方がポストピーク領域において高い荷重を保持する傾向が見られた。直径が大きくなるということは、モルタル中の繊維本数が減少するが、一本あたりの表面積が大きくなることを意味する。この関係と上記の強度上昇要因を踏まえると、繊維一本あたりに着目した場合に摩擦力向上の影響が負担応力減少の影響を上回ったためこのような結果になったと考えられる。タイプ B-ii については、混入率の等しい他の合成繊維と比較してもポストピーク領域における荷重は低く、両端の結び目のみでは引抜けに対し、十分な効果を発揮しなかったと考える。

4. まとめ

ナイロン製の漁網をモルタル補強繊維として再利用し、混入条件を変えて実験を行い、繊維補強モルタルの力学性能を検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) モルタルの圧縮強度は、リサイクルナイロン繊維の繊維長増加に伴って空散的に挙動する箇所の連続性の上昇と、繊維混入率増加による分散性の悪化によって低下する。
- (2) 繊維長および繊維混入率が小さくなるにつれて曲げ強度は増加する。また、混入したリサイクルナイロン繊維の分散性が曲げ強度に大きく影響する。
- (3) 高い圧縮および曲げ強度を得る混入条件とは異なり、リサイクルナイロン繊維の繊維長および繊維混入率の増加に伴って、ひび割れ発生後にモルタルが保持できる荷重が増加する。
- (4) リサイクルナイロン繊維の直径が太い方が、繊維の表面積増加や良好な分散性等により、優れた圧縮および曲げ性能を発揮できる。
- (5) 両端に結び目を持つ繊維は、その形状がモルタル中の繊維の分散性に影響したため強度は減少しやすく、また、両端の結び目のみでは十分な引抜けに対する抵抗性を発揮しない。

リサイクルナイロン繊維は混入させる際に、モルタルの求める力学特性に応じて、上記に示した適する混入条件で用いることで適用範囲は広がると考えられる。今後は、漁網の加工形態等を検討し、より合理的なリサイクルのあり方を提案していく予定である。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 26630208, 17H03293 の助成を受けたものである。また、廃棄漁網は歯舞漁業協同組合の齊藤義嗣氏、クマシロシステム設計(株)の河合孝治氏より提供いただいた。ここに深く感謝の意を表します。

5. 参考文献

- 1) Cappell, R., Macfadyen, G. and Huntington, T.: Abandoned, lost or otherwise discarded fishing gear, FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No.523, UNEP Regional Seas Reports and Studies No.185, 2009
- 2) 早川健司, 平田隆祥, 紀陸和昭, 大屋戸理明: 有機短繊維を使用した湿式吹付け高靱性ポリマーセメントモルタルの基礎性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.379-384, 2009
- 3) 海野太貴, Shanya Orasutthikul, 横田 弘, 橋本勝文: 漁網利用したリサイクルナイロン繊維のモルタル補強材としての有効性, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1857-1862, 2016
- 4) Spadea, S. et al.: Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement, Construction and Building Materials 80, pp.200-209, 2015
- 5) 薫 賀祥, 西村 正, 関 博: 合成短繊維の付着特性が補強コンクリートの曲げ特性に与える影響に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol20, No.1, 2009

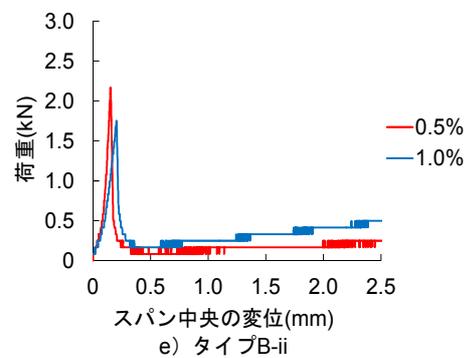
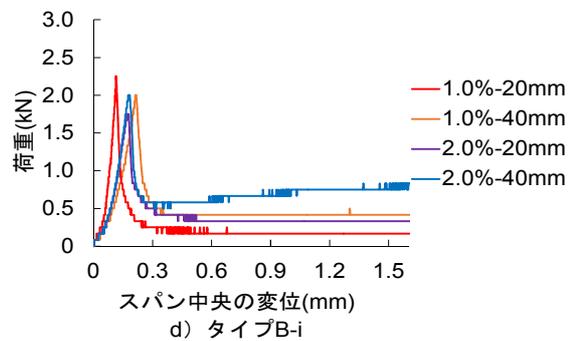
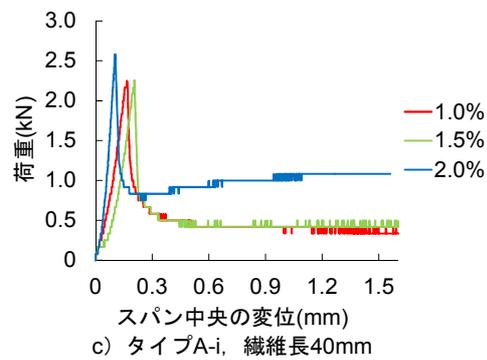
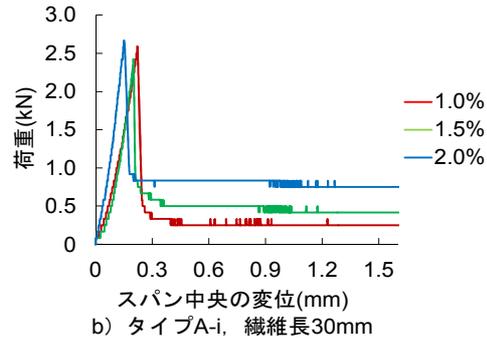
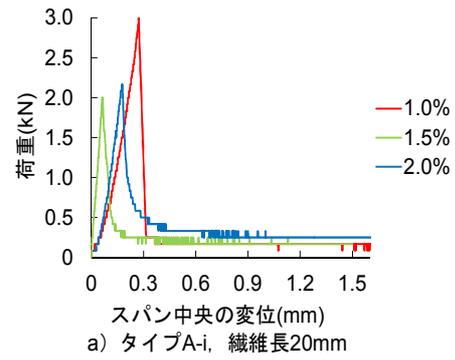


図-4 荷重変位曲線