論文 漁網を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

海野 太貴^{*1}・Shanya Orasutthikul^{*2}・横田 弘^{*3}・橋本 勝文^{*4}

要旨:合成繊維であるナイロン製の漁網からナイロン繊維を取り出し、モルタル中の補強繊維としての活用 の可能性を検討した。検討に際しては、ナイロン繊維の耐アルカリ性試験および繊維補強されたモルタルの 載荷試験を行い力学性能等を評価した。実験結果から、圧縮強度はプレーンモルタルと比べ低下したが、曲 げ強度は増加することがわかった。また、曲げじん性は増進し、リサイクルナイロン繊維は補強繊維として の効果を発揮した。ただし、他の合成繊維と比較すると、セメントマトリクスとの付着強度が低いという課 題が残り、今後のリサイクル促進に向けたナイロン繊維の形状等についての課題が明らかとなった。 キーワード:リサイクルナイロン繊維、合成繊維補強、圧縮強度、曲げ強度、曲げじん性

1. はじめに

現在、世界の漁業活動においては、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 10%にあたる約 64 万トンも の漁具が海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もの間残存し、景観悪化はも ちろん、海岸に漂着するまでにアザラシをはじめとした 海獣を巻き込み,死に追いやることになる。このように, 海洋中に放置された漁網は海洋生態系を破壊するため, 適宜回収され始めているが、その後の処理も有害物質を 発生させる焼却処分だけでなく、リサイクルすることが 重要となってくる。

一方, 圧縮強度に比べ, 引張強度が非常に低いという 欠点をもつセメント系複合材料に対し, 引張強度の向上 やひび割れ抑制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 いことや, 経年劣化に伴ってモルタル表面付近で発生す る点錆や錆汁により美観が損ねることが懸念される。一 方で, 鋼繊維の代わりに使用されはじめた合成繊維は, 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、モルタル中の繊維 補強として合成繊維を用いた研究が進められてきた。近 年には、廃棄漁網をモルタル中の補強繊維として用いた 研究事例³⁾があり、補強繊維として漁網の再利用が着目 されている。

本研究では、上述の背景から、モルタル中に合成繊維 である漁網から裁断したナイロン繊維を補強材料として 用い、ナイロン繊維の繊維長、径、混入率の違いによる モルタルの力学性能を比較することで、リサイクルした 建設材料としてのナイロン製漁網の適用性を検討した。 また、親水性に優れ、モルタルとの付着が良好なため、 実際に現場にて使用されている合成繊維であり、古くか ら検討されているポリビニルアルコール繊維(以下,PVA 繊維)および本研究にて用いるナイロン繊維と同じくリ サイクル材料であるポリエチレンテレフタレート繊維 (以下、PET 繊維)の二種類について、ナイロン製漁網 繊維を用いた場合と比較した。

2. 試験概要

2.1 繊維

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を長さ20mm,30mm,40mmに裁断し,モルタル 補強用ナイロン繊維とした。再利用した漁網は70mm四 方のメッシュ構造で直径が0.39mm(以下,タイプA)と, 40mm四方のメッシュ構造で直径が0.35mm(以下,タイ プB)の色の異なる二種類を用意した。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。PVA 繊維は、ナイロン繊維と同じく表面 が滑らかで,繊維長18mm,30mmで径の異なる二種類の

*1	北海道大学 工学音	邓環境社会工学科	(学生会員)			
*2	北海道大学大学院	工学院北方圈環境	竟政策工学専攻	博士課程		
*3	北海道大学大学院	工学研究院北方圏	國環境政策工学部	邓門 教授	博士 (工)	(正会員)
*4	北海道大学大学院	工学研究院北方圈	國環境政策工学部	3門 助教	博士 (工)	(正会員)



写真-2 PVA 繊維(左,中央)および PET 繊維(右)



繊維を用意した。PET 繊維はナイロン繊維や PVA 繊維と 異なり表面に凹凸を有し,直径の等しい長さ 30mm と 40mm の二種類を用意した。PVA 繊維および PET 繊維の 外観を**写真-2**に示す。

また、それぞれのナイロン繊維に対し、ナイロン繊維 をポリプロピレンのシートにエポキシ樹脂で固定し、引 張試験機のつかみ部に取り付けることで引張強度を測定 した。つかみ間隔は 30mm として試験速度を 1mm/min に 設定した。引張試験の様子を図-1 に示す。測定したナ イロン繊維の引張強度および公表されている PVA 繊維, PET 繊維の物性値を表-1 に示す。

2.2 ナイロン繊維の耐アルカリ性試験

ナイロン繊維に対し,耐アルカリ性試験(ASTM D543-95)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によ り引張強度を得た。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

表-1 使用した繊維

始めの話物	直径	繊維長	密度	引張強度	ヤング率	
や戦が臣 ひり 不里 尖貝	(mm)	(mm)	(g/cm ³)	(MPa)	(GPa)	
タイプA	0.39	20,30,40	1 1 2	457.1		
タイプB	0.35	20,30,40	1.13	424.5	_	
	0.20	18	1 20	975.0	27.0	
PVA	0.66	30	1.30	900.0	23.0	
PET	0.70	30,40	1.32	450.0	20.0以上	

表-2 使用した繊維ごとのスランプフロー値

雄雄の種類	繊維長	アスペクト比	繊維混入率	スランプフロー
和以不住しノイ里矢貝	(mm)	(繊維長/直径)	(%)	(mm)
-	_	-	0	255
	20	51	1.0	218
			1.5	209
			2.0	205
		77	1.0	216
タイプA	30		1.5	205
			2.0	188
	40		1.0	210
		103	1.5	207
			2.0	182
	20	57	1.5	226
タイプB	30	86	1.5	216
	40	114	1.5	207
	10	00	1.0	213
D\/A	10	90	1.5	169
FVA	30	45	1.0	213
		45	1.5	189
	30	12	1.0	244
DET		40	1.5	219
	40	57	1.0	229
		57	1.5	196

ン繊維を5日間(120h)浸漬させ,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,繊維を上水道水で洗浄し,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 供試体の作製と試験方法

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。使用材料は、セメント に普通ポルトランドセメント (p=3.16g/cm³), 細骨材に川 砂(p=2.71g/cm³)を用いた。ナイロン繊維の混入率は, タイプ A では体積比 1.0%, 1.5%, 2.0%の三水準, タイ プBでは体積比 1.5%に設定し、PVA 繊維の混入率およ び PET 繊維の混入率は、どちらも体積比 1.0%、1.5%の 二水準, W/Cは0.45とし, モルタルを構成するセメント と細骨材の質量比は1:1.5とした。練混ぜには、小型モル タルミキサーを用いた。セメントと細骨材を低速度で1 分間空練りし、次に、繊維を徐々に加えながら手練りし た。最後に水を加えた後に、再び小型モルタルミキサー で2分間本練りを行った。なお、フレッシュモルタルの 性状は、テーブルフロー試験(JISR 5201)により確認し、 その結果を表-2に示す。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。養生終了後、

圧縮強度試験(JISA1108),および曲げ強度試験(JISA
 1106)を行った。曲げ強度試験はスパン 120mm で中央集
 中荷重,載荷速度は 5mm/min とした。

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-3 に示す。タイプ A, タ イプ B ともに繊維の引張強度および質量の減少は, ほぼ 見られなかった。ナイロン繊維はリサイクル材料である ため, すべての繊維から一定の強度を得ることは難しい と考えられる。しかしながら, ここで得られた結果の増 減分は測定上のばらつきの範囲内であり, 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 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-2 に示す。若干の例外は見られるものの、ナイロン繊維長が長いほど、また、繊維 混入率が高くなるほど、繊維補強モルタルの圧縮強度は 低下する結果となった。最も大きく低下したのは、タイ プAの繊維長40mm、混入率2.0%の供試体で、プレーン モルタルと比べ、約40%の圧縮強度の低下が見られた。 タイプAとタイプBの繊維を比較すると、繊維長30mm の場合を除いて、直径が細いタイプBの方が圧縮強度は 高かった。ナイロンは柔軟で、モルタルと比較すると非 常に変形しやすいため、圧縮時においてモルタル中のナ イロン繊維の存在が、空間のような働きをしてしまい、 強度低下を引き起こしたのではないかと考えられる³⁾。 一般に、ナイロンはPVAやPETよりもヤング率が低く、 本研究では使用した繊維の特徴からもよりこの傾向が顕 著に現れたと考える。

PVA 繊維では、繊維長 18mm, 混入率 1.0%の供試体の み、プレーンモルタルと比べ約 4.3%の圧縮強度の増加が 見られた。ナイロン繊維と同じく、繊維長が長く、直径 が太いほど、また、繊維混入率が高くなるほど圧縮強度 は低下した。一方で、PET 繊維は、繊維混入率増加によ る圧縮強度の低下はナイロン繊維と同様の傾向であるが、 この場合には繊維長が長くなるほど圧縮強度は増加した。 これは、圧縮応力下において供試体の圧縮応力軸方向の 垂直方向への膨張に対する抵抗性が増加することで破壊 が遅れたため、圧縮強度が増加したと考えられる⁴⁾。PET 繊維に関しては後述する繊維表面の影響が大きく、繊維 長が長くなるとより引抜けに抵抗したためこのような結 果になったと考える。

3.3 曲げ載荷試験

(1) 曲げ強度

曲げ強度を式(1)にて算出した。

表-3 ナイロン繊維の耐アルカリ性試験結果

繊維	タイプA	タイプB	
こでで ここで ここで ここで た の の	アルカリ浸漬前	457.1	424.5
51饭强度(IVIFa)	アルカリ浸漬後	461.9	415.4
増加	1.0	-2.0	
<u> </u>	アルカリ浸漬前	0.660	0.603
貝里(9)	アルカリ浸漬後	0.653	0.596
増加	-1.1	-1.1	



図-3 曲げ強度



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

ここで,

*f*_b:曲げ強度(MPa), *P*:最大荷重(N), *l*:スパン(mm), *b*: 破断断面の幅(mm), *h*:破断断面の高さ(mm)

得られた曲げ強度を図-3に示す。タイプBの繊維長 30mm を除き、繊維混入によりプレーンモルタルよりも 高い曲げ強度を示した。本研究で用いた補強繊維の中で、 タイプAのナイロン繊維で繊維長が20mm、繊維混入率 が1.0%の供試体が最も高い曲げ強度を示した。繊維は小 さなひび割れに架橋し、ひび割れの拡大を防ぐため最大 荷重が増加する。そのため、繊維数が多いほど効果は期 待できると言える。しかし、繊維混入率にはワーカビリ ティの低下などに関するその他の制限が存在するため、 使用する繊維の種類に応じて最大の曲げ強度を得るため の繊維混入率は異なると考えられる。

(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供試体の荷 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を生じた以降(以下,ポストピー ク領域)の挙動を十分に観察できる変位量まで示してい る。ナイロン繊維においては、繊維長が長いほど、また、 繊維混入率が高いほどポストピーク領域で,より大きな 荷重を保持した。また,等しい混入率でタイプAとタイ プBのナイロン繊維を比較したところ,タイプBの方 が,繊維長が短い場合に高い荷重を保持した。これは, ポストピーク領域での挙動に影響する繊維の架橋効果が 繊維の引抜け挙動に依存したためであると考えられる。 すなわち,繊維長が長いことでモルタルとの摩擦力が増 し,繊維の引抜け抵抗力が大きくなり,また,混入して いる繊維本数が多いことで応力が分散し,繊維一本あた りが負担する応力が小さくなったと考えられる。

PVA 繊維では、ポストピーク領域で、混入率 1.0%の場 合は繊維長 30mm の供試体の方が高い荷重を示した。混 入率 1.5%の場合は両繊維長の供試体ともポストピーク 領域の初期では初期ひび割れ発生時の荷重を上回ったが、 変位量が増加すると、繊維長が長く、直径が太い方がよ り高い荷重を示した。これは、繊維径が細い方は、繊維 が引き抜けるより先に破断してしまうものも存在するの に対し、太い方は、破断ではなく引き抜けが生じ、より 多くの荷重を支えることができるためであると考える⁵。 また、PVA 繊維は分子構造に存在する親水基がセメント マトリクスとの間で強力なケミカル結合を生じて引抜け 抵抗力を向上させるため、初めは高い荷重を示した。し



 タイプA
 タイプB
 PVA (直径 0.66mm)
 PVA (直径 0.20mm)
 PET 繊維

 写真-3
 各繊維の練混ぜ前の繊維の表面(上)および曲げ試験後ひび割れ部より取り出した繊維の表面(下)

かし、変位量が増加し、すべり量が増加するとこのケミ カル結合が喪失し、引抜け抵抗力が小さくなってしまう。 そのため、PET 繊維と比較すると、ポストピーク領域で は、変位量の増加に伴ってより荷重の変化が大きい傾向 を示すと考える⁹。PET 繊維においては、繊維長が長い ほど、また、繊維混入率が高いほどポストピーク領域に おいてより高い荷重を示した。特に、本研究で用いた補 強繊維の中では、ポストピーク領域で最も高い荷重を保 持していた。これは、繊維の表面の形状が繊維の引き抜 き抵抗性に大きく影響した結果である⁷⁾。

写真-3 に各繊維の練混ぜ前の繊維の表面の様子およ び曲げ試験後,ひび割れ部より引き抜けたあとの各繊維 を取り出して観察した表面の様子を示す。なお,繊維径 の細い PVA 繊維のみ破断しているものも存在した。ナイ ロン繊維はタイプ A,タイプ B どちらも直径の変化もほ とんどなく,形状に大きな変化は見られなかった。PVA 繊維はケミカル結合によって表面にモルタルが付着した が,直径の太い方にその傾向がより顕著に見られた。PET 繊維は練混ぜ前に表面に見られた凹凸が引き抜けた後に 削られ,表面はほぼ滑らかになっていた。これより,PET 繊維は表面の形状が引抜け抵抗力に大きく影響したと考 えられる。繊維の引抜けはポストピーク領域の挙動に大 きく影響しているが,繊維の表面の様子の変化から,PVA 繊維や PET 繊維と比べナイロン繊維は,変位量の小さな 段階から,繊維の引抜けが容易に起こったと考えられる。

(3) 曲げじん性および残留強度係数

得られた荷重変位曲線をより定量的に理解するために、 小さなモルタル供試体の評価に適した ASTM C 1018-97 に基づいて、じん性係数および残留強度係数を導いた。 図-5 は荷重変位曲線の概念図であり、図中の δ は初期 ひび割れ時の変位とし、点 $A \sim H \epsilon$ ASTM で示されてい



図-5 荷重変位曲線の概念図

繊維の種類	槭維長	冺人平	ιι	ん1生19	新致	人留强	残留蚀度除敛	
	(mm)	(%)	I ₅	<i>I</i> ₁₀	I ₂₀	R _{5.10}	R _{10.20}	
		1.0	1.7	2.0	2.5	6.1	4.4	
	20	1.5	2.1	2.6	3.4	9.9	8.5	
		2.0	2.2	3.0	4.4	15.5	13.8	
		1.0	1.9	2.6	3.8	13.3	Attemp Attemp Attemp	
タイプA	30	1.5	2.5	4.0	6.8	29.6	27.9	
		2.0	2.4	3.8	6.1	26.6	23.6	
		1.0	2.2	3.5	5.3	25.9	17.9	
	40	1.5	2.8	4.5	8.0	33.7	34.6	
		2.0	3.0	5.0	10.0	41.7	50.0	
	20	1.5	2.3	3.2	5.0	18.6	17.9	
タイプB	30	1.5	2.8	3.9	6.2	22.0	22.8	
	40	1.5	2.1	3.2	5.4	21.5	21.8	
	19	1.0	4.6	7.6	11.3	59.6	37.1	
P\/A	10	1.5	5.9	10.6	13.4	95.3	27.6	
	30	1.0	5.1	7.8	12.4	53.8	45.7	
	30	1.5	6.2	13.3	20.5	142.1	71.7	
	30	1.0	4.6	9.6	18.7	99.4	23.6 17.9 34.6 50.0 17.9 22.8 21.8 37.1 27.6 45.7 71.7 91.2 127.3 106.1 104.3	
PET	- 30	1.5	4.6	10.3	23.1	115.4	127.3	
	40	1.0	5.1	10.9	21.5	114.9	8.5 13.8 12.5 27.9 23.6 17.9 34.6 50.0 17.9 22.8 21.8 37.1 27.6 45.7 71.7 91.2 127.3 106.1 104.3	
	40	1.5	6.0	13.0	23.4	138.8	104.3	

表-4 曲げじん性係数および残留強度係数

るとおり定めた。さらに、荷重変位曲線下の面積を式(2) で算出した。

$$S_{\delta'} = \int_{0}^{\delta'} P \,\delta d\,\delta \tag{2}$$

ここで,

 $S_{\delta'}$:荷重変位曲線下の面積(kN・mm), P:荷重(kN)

変位量が 3δ, 5.5δ, 10.5δ でのじん性係数 *I*s, *I*₁₀, *E*₀を それぞれ,式(3),式(4)および式(5)により定義して算出し た。結果を**表-4**に示す。

$$I_5 = \frac{S_{3\delta}}{S_{\delta}} \tag{3}$$

$$I_{10} = \frac{S_{5.5\delta}}{S_{\delta}} \tag{4}$$

$$I_{20} = \frac{S_{10.5\delta}}{S_s} \tag{5}$$

次に、変位量が 3δ から 5.5δ にかけて、5.5δ から 10.5δ にかけての残留強度係数 R_{5.10}, R_{10.20}をそれぞれ、式(6)お よび式(7)により定義して算出した。結果を**表−4** に示す。

$$R_{5.10} = \frac{100}{(10-5)} (I_{10} - I_5) \tag{6}$$

$$R_{10,20} = \frac{100}{(20-10)} (I_{20} - I_{10}) \tag{7}$$

脆性破壊が起こるプレーンモルタルではじん性係数を 計算することができないため0とした。短繊維混入によ りエネルギー吸収能力,ひび割れ発生後の負荷応力の指 標であるじん性係数が増加したことがわかる。特に,タ イプ A の繊維長 20mm,混入率 1.0%の供試体と繊維長 40mm,混入率 2.0%の供試体を比較すると,じん性係数 I_{20} が4倍まで増加し,補強繊維の繊維長および混入率の 増加に伴ってじん性が向上したことがわかる。

同じように残留強度係数も補強繊維の繊維長および 混入率に伴って増加傾向にある。また, R5.10 と R10.20 を比 較すると、ナイロン繊維のタイプAの繊維長40mm、混 入率 2.0%の供試体は残留強度係数が R5.10 から R10.20 へ約 20% 増加している。一方,上記以外の供試体は残留強度 係数が R5.10 から R10.20 へ減少傾向にある。特に, PVA 繊 維の繊維長 18mm, 混入率 1.5%の供試体は約 70%減少し ている。これらの場合は、ひび割れ部に架橋する繊維が 変位量に伴って、引抜けを生じ易くなっており、供試体 が強度を保てなくなったためであると考える。残留強度 係数は、荷重変位曲線下の面積より算出したじん性係数 を用いて算出しているため、ポストピーク領域の挙動が 結果に影響している。すなわち、残留強度係数の向上の ためには補強繊維の種類が重要であり、繊維の形状,引 張強度, ヤング率に加えて, 繊維とセメントマトリクス との付着強度等を検討する必要がある。

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,

他の合成繊維ともモルタルの力学性能を検討した。ナイ ロン繊維の繊維混入率が高くなるほど他の合成繊維と同 様に圧縮強度は低下した。曲げ強度はナイロン繊維を混 入させた際に最も高い強度増加率を示した。また、ナイ ロン繊維の混入によりじん性の増加挙動が明らかとなっ た。リサイクル材料であるナイロン繊維は耐アルカリ性 もあり、補強繊維としての効果を発揮したが、他の合成 繊維素材と比較して著しく高いとは言えず、ナイロン繊 維とセメントマトリクスとの付着強度が結果に大きく影 響したと考えられる。そのため、ナイロン繊維とセメン トマトリクスとの付着強度を向上させる、あるいは、繊 維を混入する際の切断方法を工夫する等の検討を続ける 予定である。

謝辞:本研究は科研費(26630208)の助成を受けたもので ある。なお、本研究を行うにあたり、材料提供において は歯舞漁業協同組合の斉藤義嗣氏、クマシロシステム設 計(株)の河合孝治氏のご助力をいただいた。ここに深 く感謝の意を表します。

参考文献

- 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靭性ポリマーセメ 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
- Spadea, S. et al.: Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement, Construction and Building Materials 80, pp.200-209, Feb. 2015
- Ozger, OB. et al.: Effect of nylon fibers on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage systems. Materials and Design 51, pp.989-997, May 2013
- Redon, C. et al.: Measuring and Modifying Interface Properties of PVA Fibers in ECC Matrix. Journal of Materials in Civil Engineering, pp.399-406, Nov. 2001
- 6) 董 賀祥,西村 正,関 博:合成繊維の付着特性 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,第20巻,第1 号,pp.253-258,2009.1
- Kim, J.J. et al.: Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cementbased composites. Composites Part B 39, pp.442-450, May 2008