



廃棄漁網を再利用した繊維補強コンクリートの試作とその室内試験結果

(国研) 土木研究所寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム ○長谷 一矢
室蘭開発建設部 苫小牧港湾事務所 計画課 青野 奨
港湾空港部 港湾建設課 恵平 寿輝

循環型社会の構築に資するため、建設現場では廃棄物の3Rが推進されている。一方で、全国1位の漁業生産量を誇る北海道では、毎年約2,000 tの漁網が廃棄され、その8割は循環利用されずに処分されている。この廃棄漁網を繊維補強コンクリートに再利用すべく、漁網繊維補強コンクリートの試作と各種室内試験を行った。その結果、漁網繊維の混入によりスランプが低下すること、空気量が増加すること、これに関連して圧縮強度も変化すること、繊維の架橋効果により曲げ強度が僅かに増加すること、靱性が向上すること、凍結融解抵抗性は低下しないことなどがわかった。本試験条件における結果ではあるが、以上の詳細を報告する。

キーワード：循環型社会、リサイクル、ナイロン繊維、靱性強化

1. はじめに

港湾・漁港の建設工事においては、環境への負荷が少ない循環型社会の構築に資するため、廃棄物の3Rの推進が求められている。一方で、全国1位の漁業生産量を誇る北海道では、毎年約2,000 tの漁網が廃棄され、その8割は循環利用されずに処分されている。この廃棄漁網を繊維補強コンクリートに再利用する取り組みが「北海道の港湾・漁港の技術開発ビジョン¹⁾」で進められている。既にプラスチック短繊維（例えば、PVA短繊維）をコンクリートに混入することによる靱性の強化やコスト削減効果が確認されており、ケーソン式護岸のフーチングや消波ブロックへの利用が想定されている²⁾。そして、廃棄漁網を短繊維として使用する基礎研究³⁾⁴⁾が北海道大学において行われている。この技術を現地実装することが本取り組みの目標である。

本報告は、廃棄漁網から漁網繊維を製作する過程を経て、網繊維補強コンクリート（写真-1）を試作し、そのワーカビリティ、強度特性、耐久性、表面の仕上がりについて室内試験で調べた結果を報告するものである。

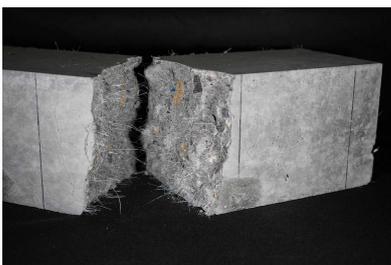


写真-1 漁網繊維補強コンクリート

2. 漁網繊維補強コンクリートの試作

(1) 漁網繊維の形状

漁網繊維は、1枚の廃棄漁網を細かく裁断することにより製作する。本報告で使用した漁網繊維は、北海道苫小牧市にある工場で裁断したものと、筆者が紙用の卓上裁断器を用いて手作業で裁断したものの2種類である。前者の工場では、道内各地からナイロン製の廃棄漁網を収集し、裁断、洗浄、ペレット化までを行っている。漁網繊維補強コンクリートを現地実装する場合、大量の漁網繊維が必要となることから、工場からの供給が現実的である。

写真-2に、この工場で裁断された漁網繊維の代表的な

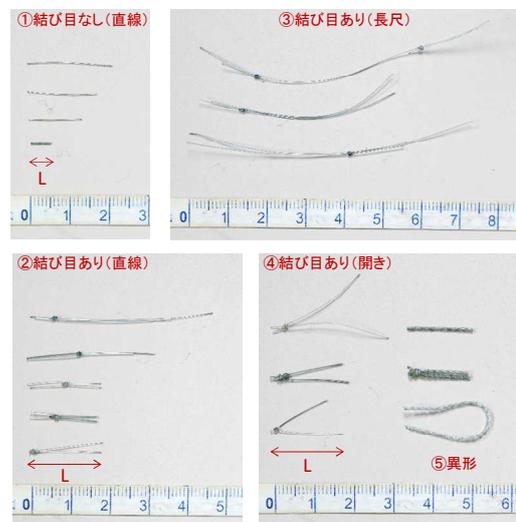


写真-2 工場で裁断された漁網繊維の代表的な形状

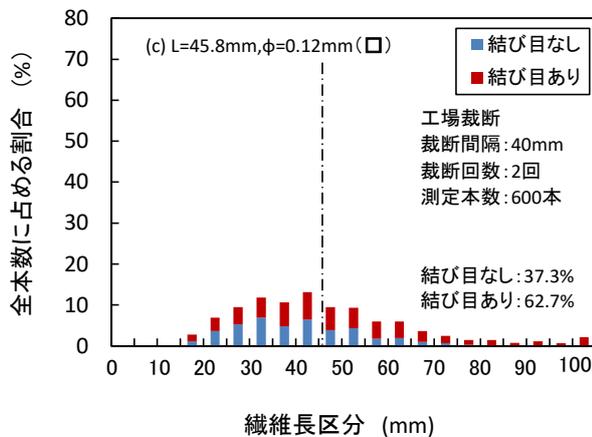
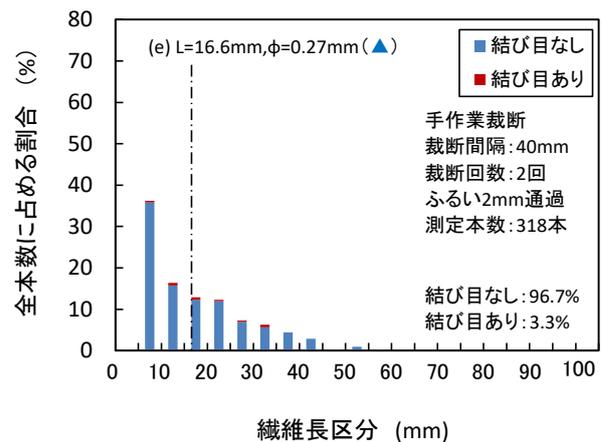
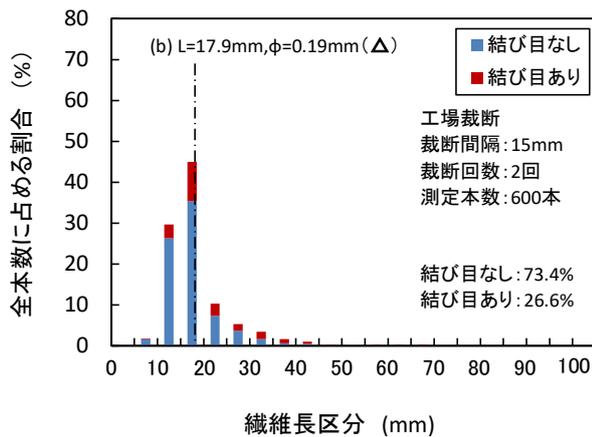
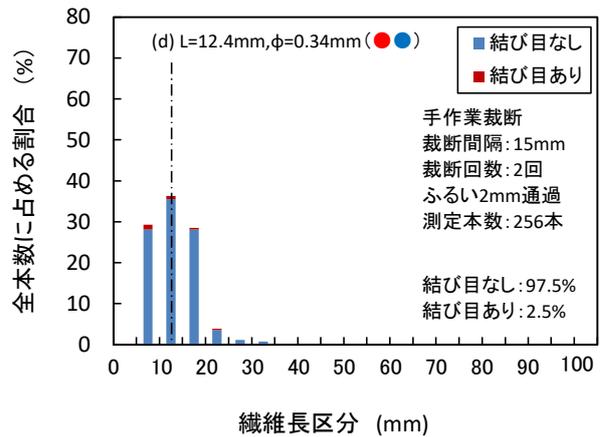
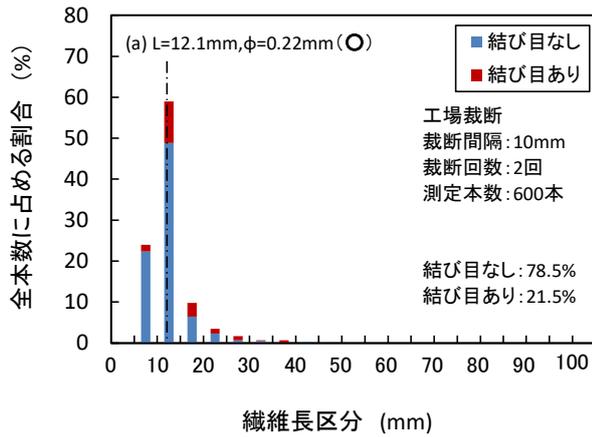


図-1(d), (e) 手作業で裁断した漁網繊維の繊維長分布

図-1(a), (b), (c) 工場の裁断機で裁断した漁網繊維の繊維長分布

図-1(a), (b), (c)に、その漁網繊維長分布を示す。漁網繊維のサンプリング方法や測定方法については昨年の報告⁶⁾と同様である。横軸に5 mm間隔の繊維長区分を、縦軸にサンプリングした全本数に対する各区分の本数の割合を示した。また、結び目あり・なしについても色分けして示した。詳細な情報は図中に示した。裁断間隔を狭く(10 mm, 15 mm)すると、裁断間隔に近い繊維長に分布が集中する傾向にあるが、裁断間隔を広く(40 mm)すると繊維長の分布は広がる傾向にあった。

形状を示す。写真に示すとおり繊維形状は均等ではなく、①結び目がない直線的なもの、②結び目がある直線的なもの、③結び目があり長尺のもの、④結び目を起点に繊維が開いているもの、⑤異形のものがある。本数としては①②が大部分を占める傾向にあった。

工場裁断とは別に、結び目がほぼない漁網繊維を、手作業で2種類製作した。工場での裁断を模擬し、1枚刃の卓上裁断器を用いて裁断を行い、格子間隔2 mmのふるいを通過させることで、結び目がある繊維の大部分を除去した。図-1(d), (e)に、その繊維長分布を示す。工場裁断と同じ裁断間隔であっても、ふるいを通過させる工程を経るため、工場裁断とは異なる繊維長分布となった。

ここで裁断方法について説明するが、この工場では一定の時間間隔で駆動する1枚刃の切断部に、等速で廃棄漁網を通過させて裁断しているとのことであった。この裁断機の裁断間隔を調節することにより漁網の繊維長が変化し、また、一度裁断した漁網を再度刃先に送ることで複数回裁断することも可能である。本報告では、この裁断間隔を調節し、3種類の漁網繊維を製作した。

以上のとおり、漁網繊維長の分布は裁断方法を調整することである程度管理できそうである。しかし、漁網繊維の繊維径については収集された廃棄漁網に依存するため、図-1の5種類の漁網繊維についても全て異なる繊維径となっている。廃棄漁網を直径別に選別することは困難であることから、繊維径の不均一を許容した品質管理が必要になると思われる。

表-1 ベースコンクリートの配合

	セメント種	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単体量(kg/m ³)					(目標値) 設計基準強度 (N/mm ²)	(目標値) スランブ (cm)	(目標値) 空気量 (%)
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤 A			
配合A	N	40	40.25	40.41	130	323	771	1,137	3.23	曲げ 4.5	6.5	5.5
配合B	N	20	40.36	43.65	136	337	822	1,061	3.37	曲げ 4.5	6.5	5.5

表-2 試験ケース一覧

No.	供試体作成日		ベース配合	裁断間隔 (mm)	漁網混入率 (%)	結び目		流動化材 (%)	圧縮強度試験 JIS A 1108	曲げ強度試験 JIS A 1106	曲げタフネス試験 JSCE-G552-2013	凍結融解試験 JIS A 1148
	2022.7.20	2022.11.17				あり	なし					
1	○		A	0	0.0	○		○	○			
2	○		A	10	0.5	○		○	○			
3	○		A	10	1.0	○		○	○			
4	○		A	10	2.0	○		○	○			
5	○		A	15	0.5	○		○	○			
6	○		A	15	1.0	○		○	○			
7	○		A	15	2.0	○		○	○			
8		○	A	40	2.0	○		○	○			
9		○	A	0	0.0	○		○	(○)	○		
10		○	A	15	2.0	○			(○)	○		
11		○	A	40	2.0	○			(○)	○		
12		○	A	15	2.0		○	○	(○)	○		
13		○	A	15	2.0		○	○	(○)	○		
14		○	A	40	2.0			○	(○)	○		
15		○	B	0	0.0	○					○	
16		○	B	15	2.0	○					○	
17		○	B	40	2.0	○					○	

※ 曲げ強度試験の(○)は、曲げタフネス試験によるもの。

(2) ベースコンクリートの配合

漁網繊維補強コンクリートを試作するにあたり、コンクリート舗装への適用を想定した。表-1に漁網繊維を練り混ぜるベースコンクリートの配合を示す。この配合は北海道の港湾や漁港で使用されるコンクリート舗装の標準配合(C-7S)であり、これを配合Aとする。そして、後述する凍結融解試験用に配合Aの粗骨材最大寸法を20 mmに変更した配合を配合Bとする。なお、漁網繊維はベースコンクリートの外数で配合した。この理由は、実際の施工において、アジテーター車で運搬される生コンに、後から漁網繊維を追加投入することが想定されるためである。

繊維の形状と混入率を変化させて実施した。また、流動化剤を後添加するケースも実施した。

(2) 練り混ぜ方法

コンクリートの練り混ぜ方法は、次の手順で行った。最初に、細骨材、セメント、水、混和剤を二軸強制練りミキサーに投入し、30秒間攪拌した。続けて粗骨材を投入し、60秒間攪拌した。練り上がったベースコンクリートを排出せずに漁網繊維を投入し、30秒間攪拌した。流動化剤を後添加するケースについては、ここに流動化剤を添加し、さらに60秒間攪拌した。目視ではあるが、漁網繊維は均等に分散しているようであった。

3. 室内試験内容

(1) 試験内容

本報告では、ワーカビリティ、強度特性、耐久性に着目した室内試験を実施した。ワーカビリティを評価する試験項目としてスランブ試験、空気量試験を、強度特性を把握する試験項目として、圧縮強度試験、曲げ強度試験、曲げタフネス試験を、耐久性を評価する試験項目として凍結融解試験(A法)を実施することとした。

表-2に試験ケースの一覧を示す。各試験は、ベースコンクリートをA配合またはB配合として、混入する漁網

4. 室内試験結果

(1) ワーカビリティ

図-2は、漁網繊維を混入した時のスランブと混入率の関係を繊維形状別に示したものである。図中の○△□に着目すると、混入率が増加するにつれてスランブが低下する傾向にあった。これは漁網繊維による表面積効果と内部摩擦の増大⁷⁾によるものであると考えられる。そして、繊維形状の違いによる差もみられ、繊維長が長いほどスランブが低下する傾向にあった。これは、漁網繊維のかさばり効果⁷⁾であると考えられる。なお、繊維長と

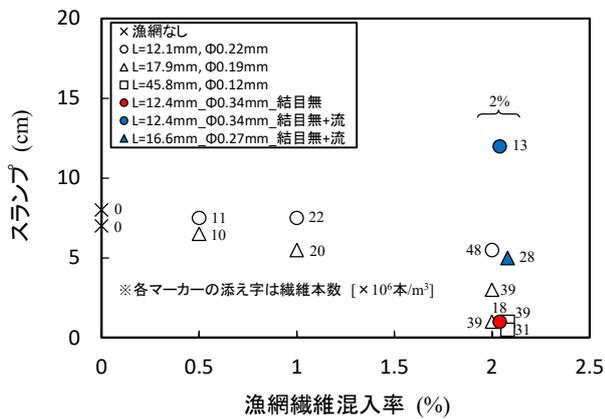


図-2 スランプ試験結果

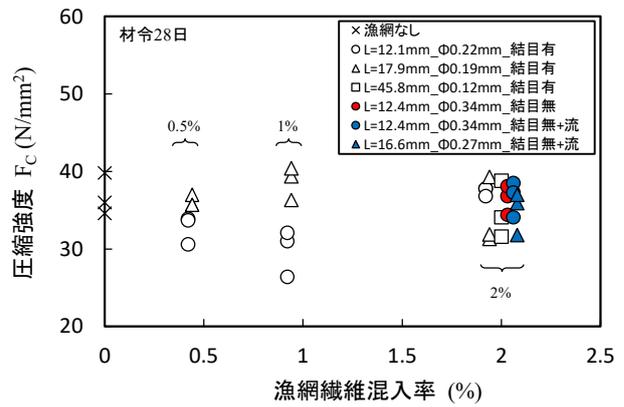


図-4 圧縮強度試験結果

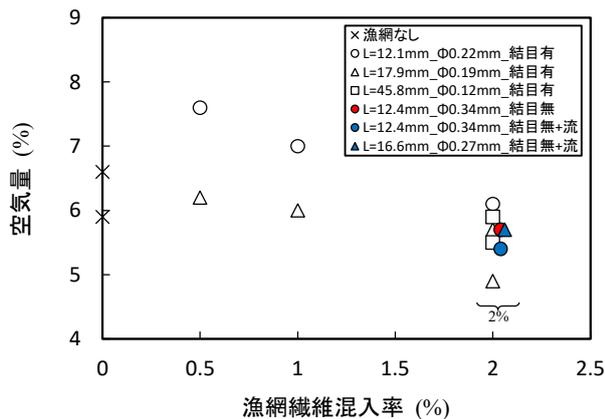


図-3 空気量試験結果

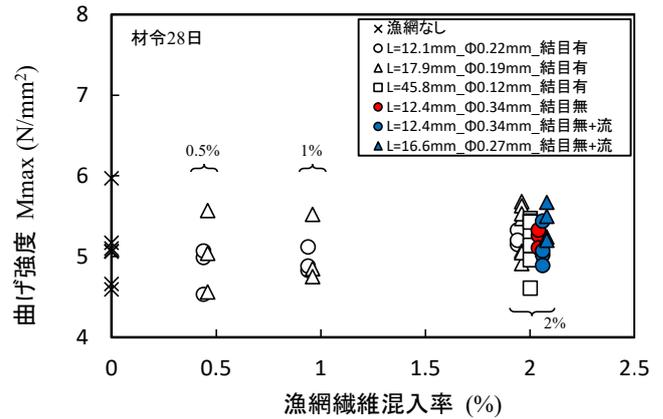


図-5 曲げ強度試験結果

繊維径の両方が異なるため、繊維本数を算出して図示したが、○△□については同一の混入率で概ね同じ本数となっており、図におけるスランプの差は繊維本数の影響ではないようである。

続いて、結び目がない漁網繊維●に着目すると、同じ混入率の○よりもスランプが小さかった。これは、結び目がある繊維が概ね2本1組の状態で分散しているのに対し、結び目がない繊維は1本1本が独立して分散しているため、実質の繊維本数の違いがスランプ低下に影響したのではないかとと思われる。さらに、漁網混入後に流動化剤の後添加を試したところ、使用限界の1.2%添加により●のスランプを●まで増加させることができた。漁網繊維の練り混ぜは、現場でアジテーター車により行うことが想定されるが、流動化剤の後添加により、現場でのスランプ調整が可能であるものと思われる。

図-3は、漁網繊維を混入した時の空気量と混入率の関係を繊維形状別に示したものである。漁網なしに比べて、空気量が増加するケースと減少するケースがみられた。既往の研究によれば、鋼繊維では増加傾向⁷⁾、PVA短繊維では減少傾向⁹⁾を示すとされており、漁網繊維の混入が空気量を変化させるメカニズムについて、今後明らかにしていきたいと考えている。

(2) 強度特性

a) 圧縮強度

図-4は、漁網繊維を混入した時の圧縮強度と混入率の関係を繊維形状別に示したものである。混入率が変化することにより圧縮強度が増減しており、一定の傾向はみられない。図中の○に着目すると、混入率0.5%と1%で圧縮強度が他に比べて低下している。ここで、図-3の空気量を見ると、同じ混入率の○は他に比べてやや高い値となっている。コンクリートは空隙が増加すると圧縮強度が低下⁹⁾することから、今回の圧縮強度が変化する要因のひとつが空気量にあると思われる。また、既往の研究³⁾では漁網繊維の混入により圧縮強度が低下すると報告されており、この影響も含まれていると思われる。例えば、混入率2%のデータは全体的に漁網なしに比べて空気量が低く、これにより圧縮強度は増加することになるが、漁網繊維の混入による強度低下と相殺され、結果的に漁網なしの圧縮強度と同程度になっているのではないかとと思われる。漁網繊維による圧縮強度への影響度については、今後明らかにしていきたい。

b) 曲げ強度

図-5は、漁網繊維を混入した時の曲げ強度と混入率の関係を繊維形状別に示したものである。漁網なしのデータがばらついているが、その平均値5.1 N/mm²を基準にすると、混入率の増加に伴い曲げ強度は僅かに増加した。

既往の研究³⁾ではモルタル供試体に漁網繊維を使用した場合、2割程度の曲げ強度の増加がデータとして報告されているが、コンクリート供試体に使用した場合はモルタルほど効果を発揮しないようである。この要因として、粗骨材最大粒径の影響が考えられる。例えば、鋼繊維の場合、粗骨材最大粒径が鋼繊維長の1/2の時に曲げ強度が最大となることが明らかにされている⁷⁾。本報告では、粗骨材最大粒径40 mmに対して、平均12.1~45.8 mmの繊維長で試験しているため、曲げ強度がほとんど増加しなかった可能性はある。

c) 曲げタフネス

図-6は、曲げタフネス試験における荷重と供試体中央の変位の関係を繊維形状別に示したものである。曲げタフネス試験は曲げ試験とほぼ同じ試験方法であるが、載荷荷重と供試体の変位を連続計測することに特長がある。タフネス試験は1ケースあたり4本の供試体を試験するが、ここでは後述する曲げ靱性係数の平均値に最も近い供試体のデータを示している。図より、載荷開始後、荷重と変位は直線的に増加するが、曲げ強度に達したところでひび割れが急激に進展し、荷重が一気に低下する。しかし、漁網繊維の架橋効果により供試体は破断することなく、ある程度の荷重を保持したまま、徐々に変位が大きくなる。繊維形状により多少異なるが、ピーク荷重の1/4程度が保持荷重として得られている。

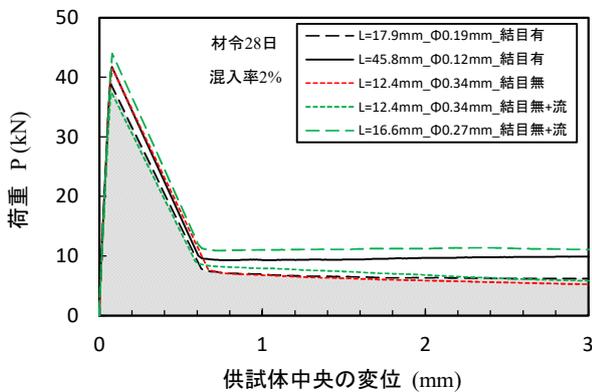


図-6 曲げタフネス試験結果 (荷重と供試体中央の変位)

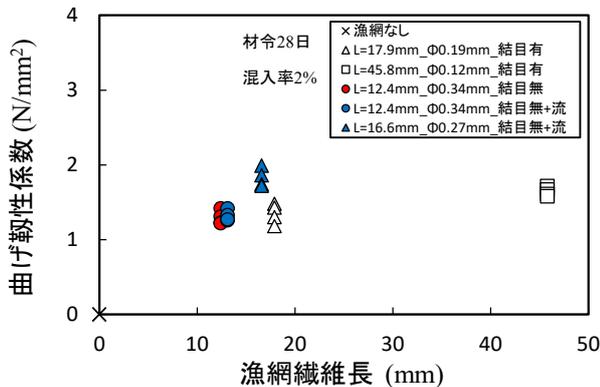


図-7 曲げタフネス試験結果 (漁網繊維長と曲げ靱性係数)

図-7は、曲げタフネス試験における繊維長と曲げ靱性係数の関係を繊維形状別に示したものである。曲げ靱性係数は、図-6における塗りつぶし部分の面積に比例し、ポストピーク領域での保持荷重の高さが大きく影響する。図より、繊維長が長くなるにつれて曲げ靱性係数は増加するようである。ただし、繊維径の影響も含むため、さらに詳しく調べる必要がある。また、流動化剤の添加による効果も確認したが、●●のとおりに大差は見られなかった。これは、流動化剤を添加しなくても、本報告で使用した二軸強制練りミキサーにより十分繊維が分散していたためであると考えられる。

繊維形状と曲げタフネスの関係については、今後も引き続き検討を進める予定である。

(3) 耐久性

図-8は、凍結融解試験結果であり、相対動弾性係数とサイクル数の関係を示している。漁網繊維の混入率は2%とし、繊維形状は2種類とした。1ケースあたり3本の供試体で試験しており、3本の平均値を示している。相対動弾性係数は凍結融解抵抗性の評価指標であり、値が大きいほど凍結融解抵抗性が高い。土木学会では、相対動弾性係数85%をひとつの最小限界値として定めている。

図より、漁網なし●と漁網あり■は、概ね同じ傾向を示しており、漁網繊維を混入しても漁網なしと同等の凍結融解抵抗性を有しているようである。また、■よりも▲の方が係数値が高いが、これは空気量の差によるものと考えられる。さらに着目すべきは、●よりも■の空気量が低く、通常■の方が低い係数値を示すはずであるが、両者がほぼ同じ値を示していることである。これは、漁網繊維が凍結膨張によるコンクリートの破壊を抑制した結果ではないかと想像するが、今後、更なるデータの蓄積により確認したいと考えている。

(4) コンクリート表面の仕上がり

写真-3は、漁網繊維を混入したコンクリート表面の仕上がりである。一例として、図-1(e)を2%混入した供試体の写真を示す。供試体作成においては、型枠にコンクリートを打設し、天端面をコテで均すが、漁網繊維が表

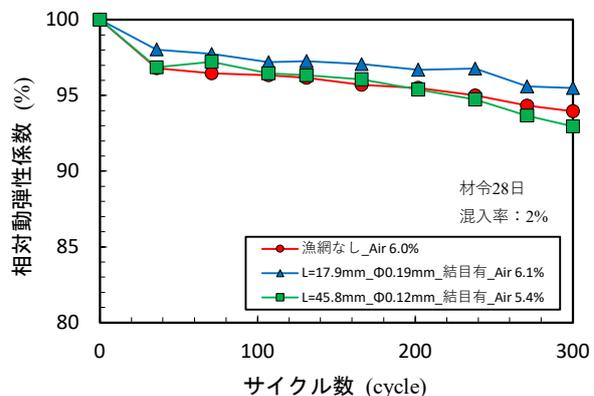


図-8 凍結融解試験結果

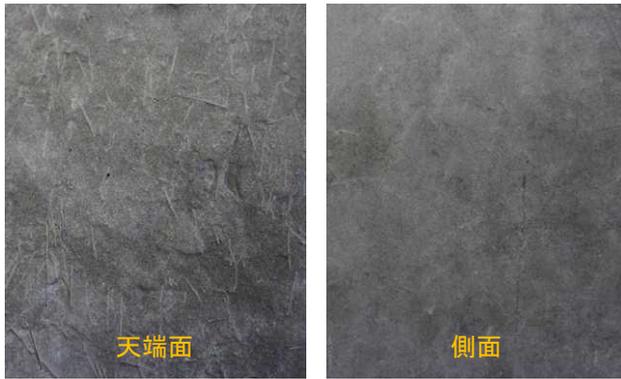


写真-3 コンクリート表面の仕上がり

面から突き出し易く、通常の均し作業よりも手間がかかった。実際の工事において構造物表面に罫目を入れる場合があるが、繊維の抜け出しには注意が必要である。硬化後の供試体天端面は、写真のとおり漁網繊維の存在が見て取れる状態であった。

一方、型枠に拘束される供試体側面は、写真のとおり滑らかであり、通常のコンクリート表面と遜色ない仕上がりであった。なお、供試体底面も側面と同様の仕上がりであった。

コンクリート表面の仕上がりは美観に直結するものであるが、それ以外にも繊維離脱への影響も懸念される。今後、コンクリート表面のスケーリング試験を実施し、繊維離脱への影響を調べたいと考えている。

5. まとめ

漁網繊維補強コンクリートを試作し、そのワーカビリティ、強度特性、耐久性、表面の仕上りを室内試験により調べ、以下の結果を得た。

- 1) スランプ試験の結果、漁網繊維の混入率が増加するほどスランプは低下し、繊維が長いほどその傾向は強かった。
- 2) 空気量試験の結果、漁網繊維の混入は空気量に影響するようで、その増減傾向は繊維形状と混入率により異なった。
- 3) 圧縮強度試験の結果、繊維形状や混入率との明確な相関は見られなかった。圧縮強度は、空気量に連動した強度の増減と、繊維混入による強度低下を合わせて決まるものではないかと思われる。
- 4) 曲げ強度試験の結果、混入率の増加に伴い曲げ強度は増加傾向を示したが、それは僅かであり、本試験条件においては最大6.2%の増加であった。
- 5) タフネス試験の結果、漁網繊維の混入によりポスト

ピーク領域での保持荷重を確認した。本試験条件においては、最大曲げ荷重の1/4程度の保持荷重を有していた。

- 6) 凍結融解試験の結果、漁網繊維の混入による相対動弾性係数の低下は確認されなかった。漁網なしと同等の凍結融解抵抗性を有しているようである。
- 7) コンクリート表面の仕上がりについて、コテ均しを行った天端面で漁網繊維の存在が見て取れる状態であったが、型枠に拘束された側面は一般的なコンクリート壁面と遜色ない仕上がりであった。

今後は、漁網繊維の配合条件からワーカビリティ、強度、耐久性を推定できるように、本報告の試験項目について条件を拡大し、考察を深めたいと考えている。また、ひび割れ発生後のひび割れ拡大抑制効果やコンクリートの欠損抑制効果についてなど、更なる漁網繊維活用の有効性についても調べていきたい。

謝辞：北海道大学名誉教授横田弘先生には、試験方針について多大なる助言をいただきました。そして、(株)鈴木商会菅原道紀氏、熊谷知哉氏には、漁網繊維の製作にあたりご協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省北海道開発局 Web : https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kk/kou_ken/ud49g7000000jypy.html (2024年1月12日確認)
- 2) 伊藤始・横田弘・岩波光保：短繊維補強コンクリートの港湾構造物への適用性評価に関する研究，港湾空港技術研究所報告，Vol.44，No.3，pp.3-37，2005。
- 3) 海野太貴・Shanya Orasuthikul・横田弘・橋本勝文：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.38 No.1，pp.1857-1862，2016。
- 4) 山口駿・横田弘：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，土木学会第74回年次学術講演会，V-536，2019。
- 5) 松浦悠・横田弘：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，土木学会北海道支部論文報告集，第76号，E-18，2020。
- 6) 長谷一矢・本間薫・水口陽介：漁網繊維補強コンクリートの繊維形状管理に関する研究，北海道開発技術研究発表会論文集，第66回，2023。
- 7) 小林一輔：繊維補強コンクリートー特性と応用一，(株)オーム社，1981。
- 8) 伊藤始・岩波光保・横田弘：短繊維補強コンクリートの施工性に関する検討，港湾空港技術研究所資料，No.1087，2004。
- 9) 丸安隆和・水野俊一：新版コンクリート工学，(株)コロナ社，1975。