

12 合成繊維索の安全ガイドライン化に係る検討

穴井 陽祐*, 安藤 孝弘**, 津村 秀一*, 前田 克弥***
中條 俊樹****, 徳永 祐二*****, 畑 和宏*****

Study on Safety Guidelines for Synthetic Fiber Ropes

by

ANAI Yosuke, ANDO Takahiro, TSUMURA Shuichi, MAEDA Katsuya, CHUJO Toshiki,
TOKUNAGA Yuji, and HATA Kazuhiro

Abstract

The safety guidelines for floating offshore wind turbines are revised according to technological advancements and changes in social conditions at any time. A prior study conducted in FY2018 summarized the revision policy regarding the damage stability requirement, and in FY2019, a study was conducted on the application of synthetic fiber ropes and a concrete floating structure. In the study on synthetic fiber ropes, fatigue strength tests were carried out to understand its fatigue properties. We also investigated the effects of biofouling on fiber rope. This paper mainly describes the results of the fatigue test and future directions for the development of guidelines.

* 産業システム系, ** 構造安全評価系, *** 企画部, **** 海洋先端技術系,
***** 東京製綱繊維ロープ株式会社

原稿受付 令和2年4月30日

審査日 令和2年6月10日

1. はじめに

浮体式洋上風力発電施設の安全性を確保するための浮体式洋上風力発電施設技術基準¹⁾は、その技術の進歩や社会情勢の変化に合わせて随時改正が行われている。国土交通省海事局では、平成 30 年度より当該基準の改正に関する事業を開始しており、初年度である平成 30 年度には船舶の衝突における損傷時復原性規定の合理化が実施され、令和元年度の事業として合成繊維索を用いた係留系（チェーンや鋼製ワイヤーを用いたハイブリッド型を含む）およびコンクリート製浮体構造の設計に関して具体的な安全性評価方法の検討を行っている。現在、国内に設置されている浮体式洋上風力発電施設は、主に係留索としてチェーンを用い、浮体構造物については、鋼材を主な材料としている。しかしながら、欧州や海洋石油・ガス開発用の浮体構造物においては係留索に合成繊維索を用いたものや、浮体構造物にコンクリートを利用したものが存在しており、浮体式洋上風力発電施設にもこれらの材料を利用することにより、建造コストや係留設置コストなどの低減に繋がることが期待される。本事業において当所では合成繊維索の安全性評価方法の検討に取り組んでおり、合成繊維索を用いた係留系の一体解析による安全性評価手法、合成繊維索の疲労強度および生物付着影響等について検討した。本報告では、合成繊維索の疲労試験結果およびこれに基づく疲労強度評価手法のガイドライン化の方向性について述べる。

2. 合成繊維索の疲労試験

2. 1 概要

2. 1. 1 合成繊維索の疲労強度評価に関する現状

鋼製チェーンによるカテナリー係留よりも、合成繊維索によるトート係留のほうが低コストとなる可能性がある。また、合成繊維索を用いたトート係留の設計においては、使用実績の多いポリエステル製ロープと比べて伸びが大きく、かつ同等の強度を有するナイロン製ロープの特性²⁾を活かした係留系設計が期待されているものの、ナイロン製ロープの適用に関する知見が少ないのが現状である。特に、実用化に向けては耐用年数の算定が必要であり、そのために疲労特性を把握することが重要である。

一般に、係留系の疲労設計においては、疲労設計曲線とマイナー則を用いて疲労被害度を算出し、この疲労被害度に対して、適切な安全率を考慮したうえで設計される。疲労設計曲線に関しては、ISO19901-7³⁾において、ロープ材料がアラミドやナイロン等の場合には、疲労設計曲線を作成するには疲労試験データが不十分であるが、より良い情報が無い場合には、らせんストランドワイヤーロープの T-N 線図を使用可能とされている。なお、このらせんストランドワイヤーロープの T-N 線図は、平均張力と最小破断強度（Minimum Breaking Strength, 以下 MBS と称す）の比 Q が 0.3 のときには、ISO18962-1⁴⁾に規定された荷重範囲と最小繰返し数の関係（後述する式(2.1)）と同等となる。

しかしながら、疲労設計曲線の作成に必要な疲労試験データの取得にあたっては実機で用いられる合成繊維索（フルロープ）の強度試験が実施可能な設備は国内にないため、海外での試験を余儀なくされており、コスト増加の一因となっている。

2. 1. 2 疲労試験方法の検討

このような現状を踏まえ、本試験では国内現有設備で実施可能な試験による代替の可能性について検討を行った。まず、ナイロン製ロープを浮体係留として実運用中の企業を含む関連企業、団体を対象として、合成繊維索による係留や合成繊維索の試験方法等に関してヒアリング調査を行った。本調査の結果を踏まえて、合成繊維索としてパラレル構造のフルロープを検討対象とし、フルロープを構成するサブロープを用いた疲労試験を実施することとした。これは、本研究で想定するパラレル構造のフルロープに関しては、構成するサブロープの疲労強度に支配されると考えられるためであり、前述のヒアリング調査においても得られた見解である。主に以下の理由によると考えられる。

- 本研究で想定するパラレル構造のフルロープの場合は、サブロープはブレード構造であり、フルロープはパラレル構造となる。
- ブレード構造のロープは、ストランドが組点での点接触が生じ、面圧が集中すること。（パラレル構造のロープはストランドが線で接触し面圧が分散する）

また、一般にナイロン製ロープはポリエステル製ロープに比べ耐水性でやや劣るとされているため、実際の運用に則した人工海水中での試験を実施することとした。

2. 2 疲労試験

疲労試験においては、疲労強度に影響を及ぼすと考えられる以下の因子について検討を行った。

- ① ロープ材料（ナイロンおよびポリエステル）
- ② 乾湿条件
- ③ 初期張力の有無

2. 2. 1 供試体

供試材料はナイロンおよびポリエステルであり、供試体はフルロープを構成するサブロープを加工して製作した。また、供試体寸法は後述する疲労試験機の性能および試験を実施する荷重条件から推定される供試体の伸びを考慮して決定した。供試体寸法を表-1 に、供試体の構造を図-1 に、供試体の一例の写真を図-2 に示す。

表-1 供試体寸法（ねらい寸法）

供試材料	ロープ径 [mm]	ロープ長さ（※） [mm]
ナイロン	φ 6	300
ポリエステル	φ 10	500

※ アイ開口部の中心間長さ



図-1 供試体の構造 (12 打ちロープ, 2×6 構造)

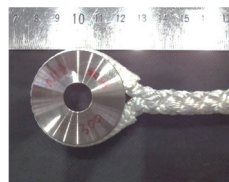


図-2 供試体の一例 (供試材料：ナイロン)

なお、シンプル形状は涙型および丸型を使用した(図-3 参照)。涙型シンプルは試験中のシンプル破損の懸念から肉盛り溶接による補強を実施して製作したものであり、丸型シンプルは機械加工により製作したものである。シンプル形状が二種類である理由は、当初は涙型シンプルを使用していたところ、試験中にシンプルが回転し、シンプル端部とロープとの接触・擦れによりアイ部ロープが破断するという現象が起こったためである。破損が生じた様子を図-4 に示す。図より、上部のシンプルが回転し、アイ部のカバーおよびロープが破損している様子が確認できる。シンプルの回転は試験中のアイ部ロープおよびカバーの破損によるシンプル左右での荷重のアンバランスに起因すると考えられたが、試験中にシンプルの回転を修正することが不可能であることから、回転してもロープへの過度な負荷が生じない丸型とした。またシンプル形状の変更に伴い、アイ部カバーの固定方法も変更した。これらの変更により、試験中のシンプルの回転およびこれに起因するアイ部ロープの破断は無くなった。



(a) 涙型シンプル



(b) 丸型シンプル

図-3 使用した二種類のシンプル形状

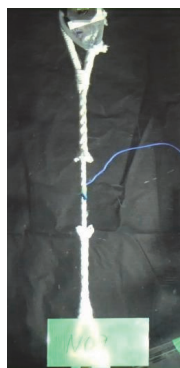
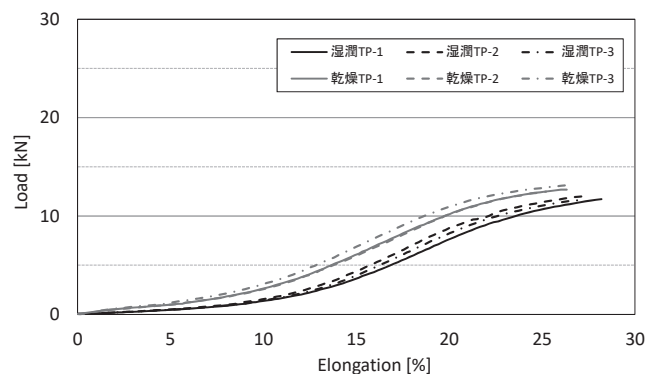


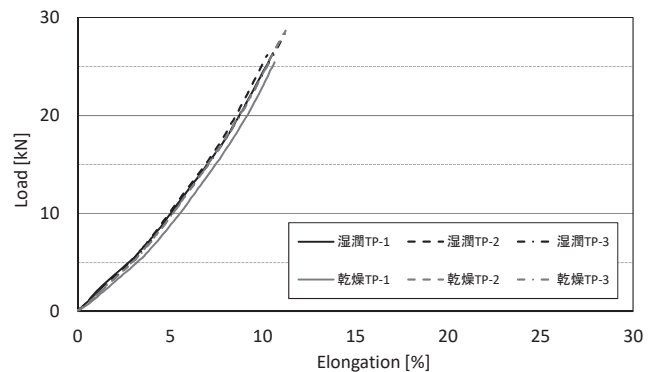
図-4 シンプルの回転によるアイ部カバーおよびロープの破損

疲労試験の実施に先立ち、疲労試験用の供試体を用いた破断試験を行った。これは、疲労試験の荷重条件の設定に必要な MBS を取得するためである。当該試験は乾燥時と湿潤時においてそれぞれ3本ずつ実施し、湿潤時の試験方法は ABS THE APPLICATION OF FIBER ROPE FOR OFFSHORE MOORING / SECTION8 / 4.1.1 procedure A⁵⁾ に準拠した。得られた結果を図-5 に示す。

図より、ナイロン製供試体はポリエステル製供試体と比べて、伸びが大きく破断強度が小さいこと、湿潤時における低荷重域での剛性の低下が大きいこと、湿潤時における破断荷重の低下が大きいことがわかる。



(a) 供試材料：ナイロン



(b) 供試材料：ポリエステル

図-5 疲労試験用供試体の破断試験結果

以上の結果を踏まえ、本試験では人工海水中での疲労試験を行うことから、得られた結果のうち湿潤時の破断強度試験結果をもとに、ロープ製造時のばらつきや安全率等を考慮して供試体の MBS を設定した。ナイロン製ならびにポリエステル製供試体の MBS を表-2 に示す。

表-2 疲労試験用供試体の MBS

供試材料	MBS [kN]
ナイロン	10.2
ポリエステル	23.5

2. 2. 2 試験方法および試験条件

試験方法は、基本的には ISO18692-1:2018 Fiber rope for offshore stationkeeping / B.5 Cyclic loading endurance test⁴⁾に則った。ただし、本試験においてはさらに広範な検討を行うべく ISO 規格の規定外となる条件についても試験を実施した。本試験と ISO 規格を比較したものを表-3 に示す。

表-3 本試験と ISO 規格における試験内容の比較

項目	ISO 規格 (番号)	本研究との比較
荷重範囲 R	(B. 5. 1) 以下の範囲から少なくとも 1 条件 $40 \leq R \leq 50\% \text{MBS}$	$40 \leq R \leq 50\% \text{MBS}$ 以外の荷重条件においても実施
最大荷重 $F_{\max}$	(B. 5. 1) $52 \leq F_{\max} \leq 55\% \text{MBS}$	$F_{\max} > 60\% \text{MBS}$, $F_{\max} < 42\% \text{MBS}$ においても実施
事前载荷	(B. 5. 2, d), e)) 繰り返し载荷前に 50→30%MBS を载荷	荷重範囲内での事前 载荷を実施
最小 繰返し数	(B. 5. 1, Fig. B. 2) $40 \leq R \leq 50\% \text{MBS}$ の範囲においては最小繰返し数の規定がある (※)	- 基本は疲労破断に至るまで実施 - 試験期間を考慮し、一部試験では最小繰返し数以上の载荷後に残存強度試験を実施
浸漬する 液体	(B. 2. 2, B. 5. 2) Fresh water	- 湿潤条件下では、人工海水中で実施 - 乾燥状態でも実施

※ ISO18692-1/B. 5. 1⁴⁾においては、 $40 \leq R \leq 50\% \text{MBS}$ の範囲において、式 (2. 1) で最小繰返し数が規定されている。

$$NR^{5.05} = 166 \quad (2.1)$$

ただし、

R: MBS で無次元化した荷重範囲

N = 17, 000 (R = 0. 4 のとき)

N = 5, 500 (R = 0. 5 のとき)

である。

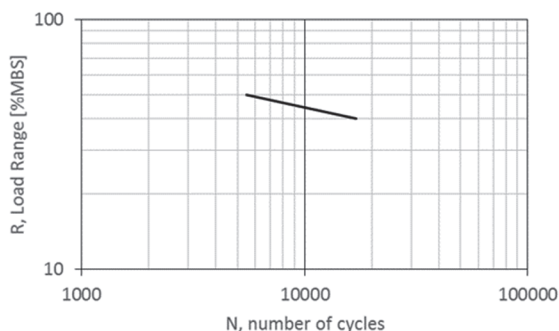


図-6 ISO18692-1 における荷重範囲と最小繰返し数の関係

実施した疲労試験条件を表-4 に示す。本試験では、疲労強度に対する初期張力の有無を検討するにあたり、初期張力を 2%MBS と設定し、供試体に対する固定荷重とした。したがって、表中における最小荷重が 2%MBS の条件は初期張力がある場合に相当し、最小荷重が 0 の条件は初期張力が無い場合に相当する。なお、全ての試験において、载荷周波数は ISO 規格の規定範囲内である 0. 1Hz⁴⁾とした。

表-4 疲労試験用供試体の MBS

(a) 供試材料：ナイロン (MBS : 10. 2[kN])

供試体 ID	乾湿 条件	最小荷重 [%MBS]	最大荷重 [%MBS]
N-W-2-22	湿潤	2	22
N-W-2-35			35
N-W-2-42			42
N-W-2-62			62
N-W-2-82			82
N-W-0-33		0	33
N-W-0-40			40
N-W-0-50			50
N-W-0-60			60
N-D-2-35	乾燥	2	35
N-D-2-52			52
N-D-2-62			62
N-D-2-82			82

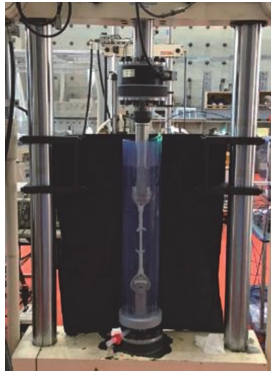
(b) 供試材料：ポリエステル (MBS : 23. 5[kN])

供試体 ID	乾湿 条件	最小荷重 [%MBS]	最大荷重 [%MBS]
P-W-2-62	湿潤	2	62
P-W-2-72			72
P-W-2-82			82
P-W-0-60		0	60
P-W-0-70			70
P-W-0-80			80

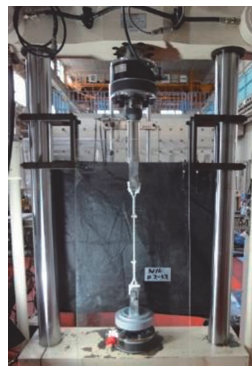
2. 2. 3 試験の実施

使用した試験機は载荷容量 100kN および 200kN の油圧サーボ式疲労試験機であり、アクチュエータとベース部に設置した専用の治具に供試体を取り付けた。湿潤条件においては試験機治具間に設置した水槽中 (透明 PVC パイプ、Φ140mm) に供試体を取り付け、人工海水中に供試体を完全に没水させた状態で 4 時間の浸漬後、事前载荷、繰り返し载荷を行った。各状態での試験の様子を図-7 に示す。また、試験中における計測項目は以下の通りである。

- 試験機荷重、変位
- 試験中映像
- 温湿度 (実験室内)
- 水温 (湿潤条件のみ)



(a) 湿潤状態での試験の例



(b) 乾燥状態での試験の例

図-7 疲労試験の様子

2. 2. 4 試験結果

本試験により得られた T-N 関係（ただし、N は試験開始から破断までの载荷繰返し数）を図-8 に示す。ただし、シンプルの回転によりアイ部から破断した結果は除き、シンプル形状の違いによる影響がない結果のみを採用している。なお、図中矢印付き記号はその繰返し数における未破断の結果を示す。また、図中実線は ISO18962-1⁴⁾に規定された荷重範囲と最小繰返し数の関係であり、図中破線は当該関係を外挿したものである。

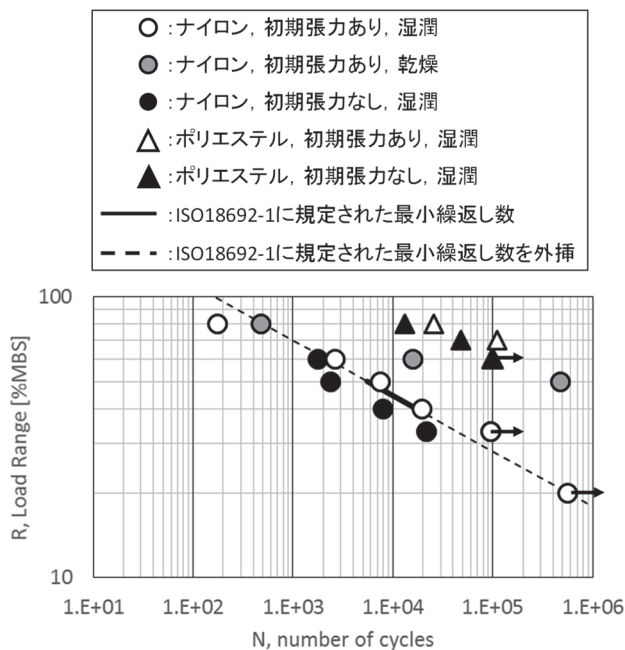


図-8 疲労試験結果

疲労強度に及ぼす各因子の影響は、次のとおりである。

① ロープ材料（ナイロンおよびポリエステル）

本試験では、供試材料としてナイロンおよびポリエステルを採用し、両者の疲労強度の比較を行った。その結果、湿潤状態においては、ナイロン製供試体はポリエステル製供試体よりも疲労強度が劣ることがわかった（表-5 (a) 参照）。

② 乾湿条件

ナイロン製供試体の乾湿条件の違いによる疲労強度を比較すると、湿潤条件では乾燥条件に比べ大幅に疲労強度が低下することがわかった（表-5 (b) 参照）。

③ 初期張力の有無

本試験では、初期張力の有無による疲労強度の比較を行った。その結果、ナイロン製とポリエステル製供試体ともに、本試験の条件においては初期張力がない場合は初期張力がある場合に比べて疲労強度が若干劣ることがわかった（ナイロン製については表-5 (c) 参照）。

表-5 各因子が疲労強度に及ぼす影響

(a) ロープ材料

荷重範囲 R [%MBS]	繰返し数 (※)		繰返し数の 比 N_F/N_N
	ナイロン N_N [cycle]	ポリエステル N_P [cycle]	
60	2,645	(100, 630)	—
80	175	25,427	145

※初期張力あり、湿潤条件での比較

(b) 乾湿状態

荷重範囲 R [%MBS]	繰返し数 (※)		繰返し数の 比 N_D/N_W
	湿潤 N_W [cycle]	乾燥 N_D [cycle]	
33	(96, 141)	(100, 630)	—
50	7,502	475,258	63.4
60	2,645	15,914	6.02
80	175	478	2.73

※ナイロン、初期張力ありでの比較

(c) 初期張力の有無（ナイロン製供試体）

荷重範囲 R [%MBS]	繰返し数 (※)		繰返し数の 比 N_0/N_2
	初期張力あり N_2 [cycle]	初期張力なし N_0 [cycle]	
33	(96, 141)	21,652	—
40	19,619	7,888	0.402
50	7,502	2,360	0.314
60	2,645	1,786	0.675

※湿潤条件での比較

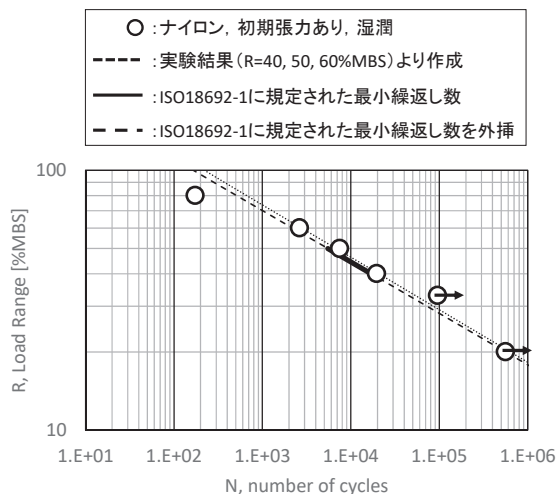
3. ガイドライン化の方向性と今後の課題

3. 1 ナイロン製ロープを用いた係留系の疲労設計

疲労試験の結果から、ナイロン製ロープの適用性の検討ならびに実機適用時における懸念点や留意点の洗い出しを行い、必要となる項目に関してはガイドラインへの反映を図るべく、ガイドライン化の方向性を検討した。

図-9 にナイロン製供試体の疲労破断強度（湿潤状態、初期張力あり）の試験結果と ISO18962-1⁴⁾に規定された荷重範囲と最小繰返し数の関係を示す。試験結果として湿潤状態、

初期張力ありの結果を選択した理由は、本条件の1つに ISO に規定された試験方法と一致する条件（荷重範囲 2～52%MBS）の結果を含むためである。図より、荷重範囲が 80%MBS の条件を除き、らせんストランドワイヤーロープの T-N 線図（ただし、 $Q=0.3$ のとき）と同等の結果を得られた。



図－9 疲労試験結果と ISO 既定の関係

したがって、ナイロン製ロープを用いた係留設計時の疲労設計曲線として、らせんストランドワイヤーロープの T-N 線図（ただし、 $Q=0.3$ のとき）を使用可能である旨を考慮すべきであると考えられる。なお、荷重範囲が 80%MBS の場合の結果の取扱いに関しては、

- 洋上風力発電施設において係留系に通常作用すると想定される荷重範囲より大幅に大きい荷重範囲である。
- 疲労試験後の供試体の目視観察の結果、他の試験条件で得られたロープ表面の毛羽や内部摩耗が確認できず、破壊モードが異なると考えられる。

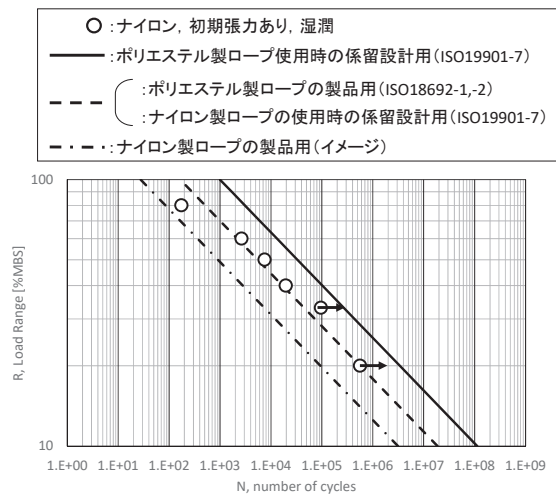
ことから、疲労設計用の荷重解析において荷重範囲が 50%MBS を超えるような場合は別途疲労設計データを取得する必要があると考えられる。これに加えて、本試験では試験本数が少ないこと、ダウンサイズしたサブロープ（径、構造は1種類）を使用しておりいわゆる寸法効果の有無は明らかでない点等も残されていることから、データ信頼性向上のためにも引き続きの検討が必要であると考えられる。

3.2 ナイロン製ロープの製造と承認

ISO18692-2⁶⁾においては、係留に使用するポリエステル製ロープが満たすべき要件について記載されている。疲労強度に関しては、ISO18692-1⁴⁾に規定された荷重範囲と最小繰返し数の関係に則って繰返し荷重を載荷し、その後の残存強度が 80%MBS を下回らないことが求められる。このときに使用する荷重範囲と最小繰返し数の関係は、係留設計時に使用する T-N 線図と異なる（図－10 参照、ただし各線は規定外の範囲も含む）。

合成繊維索の設計という観点で整合性をとるためには、ナ

イロン製ロープも同様の設定を検討すべきと考えられる。また、これにより今後ナイロン製ロープを用いた係留を検討する際に、ロープを製造するメーカーが実施すべき試験が明確になり、ひいてはメーカーの参入の促進、係留へのナイロン製ロープの適用促進につながると考えられる。



図－10 ナイロン製ロープの製品用の T-N 線図のイメージ

4. まとめ

洋上風力発電施設における合成繊維索の適用を想定して、ナイロン製サブロープおよびポリエステル製サブロープを用いた疲労試験を実施し、各ロープの疲労強度特性を取得した。また、得られた疲労試験結果に基づき、合成繊維索の疲労強度評価手法のガイドライン化に向けた方向性と今後の課題を示した。

謝辞

本研究は、国土交通省海事局の請負研究により実施しました。関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省海事局：浮体式洋上風力発電施設技術基準，（2012）。
- 2) I. M. L. Redge et. al：Nylon Fibre Rope Moorings for Wave Energy Converters, OCEANS 2010 MTS/IEEE, (2010).
- 3) ISO 19901-7:2013, Petroleum and natural gas industries - Specific requirements for offshore structures - Part 7: Stationkeeping systems for floating offshore structures and mobile offshore units, (2013).
- 4) ISO 18692-1:2018, Fibre ropes for offshore stationkeeping - Part 1: General specification, (2018).
- 5) ABS: THE APPLICATION OF FIBER ROPE FOR OFFSHORE MOORING, (2011).
- 6) ISO 18692-2:2019, Fibre ropes for offshore stationkeeping - Part 2: Polyester, (2019).