

〔論 文〕

引張荷重を受けるワイヤロープ伸びの非線形性と非再現性

清水 健太*, 中山 周一*²

*日本文理大学工学部航空宇宙工学科 (2022年度卒業)

*²日本文理大学工学部航空宇宙工学科

Nonlinearity and Hysteresis of Wire Rope Elongation under Tension Load

Kenta SHIMIZU*, Shuichi NAKAYAMA *²

*Department of Aerospace, School of Engineering, Nippon Bunri University
(Graduate, AY2022)

*²Department of Aerospace, School of Engineering, Nippon Bunri University

Abstract

Wire rope shows different load-elongation characteristics from the solid bar because of its construction. In order to evaluate wire rope load-elongation characteristics including hysteresis and nonlinearity, a wire rope tension testing procedure was developed. By comparing two different length specimen test results, it becomes possible to remove fixed end influence and to extract wire rope elongation. Test results show that there is repeatable nonlinearity in low tension load condition.

キーワード：ワイヤロープ, 荷重-伸び特性, 非再現性, 非線形性

Keywords : wire rope, load-elongation characteristics, hysteresis, nonlinearity

1. はじめに

本論文の目的は、引張荷重を受けるワイヤロープの伸びに関する非線形性と非再現性を実験により確認することである。多数の鋼線を撚り合わせることで中実な鋼棒に比べて柔軟な特性を有するワイヤロープは、その構造様式により引張荷重を受けた場合の伸びも忠実な鋼棒と異なった特性を示すと考えられる。ワイヤロープを用いた2022年度卒業研究⁽¹⁾において、引張を受けるワイヤロープ伸びには、非線形性と非再現性があるとの感触を

得た。そこで、ワイヤロープの引張特性検証のため、ワイヤロープの引張試験を行うこととした。

ワイヤロープハンドブック⁽²⁾の引張特性の解説は三雲が行った引張試験⁽³⁾に基づいている。三雲は、供試体の固定端間距離ではなく「鋼索上の一定距離に印をつけ、この印の移動をカセットメータで読」むことでロープの伸びを求める必要があるとしている。固定端間距離による伸び計測は「鋼索取付部の滑り等のために過大に現れ、試験毎に異なる」問題があるからである。

安価に入手可能なワイヤクリップを使ったロープ固定により引張試験を始めた当初、三雲が指摘する滑りの間

題を経験した。滑りは、荷重／伸び曲線の不連続（非線形、非再現性）として表れる他、試験装置の「荷重が抜ける」現象としても捉えられる。固定端の滑り問題は、ワイヤクリップの締め付けトルクをトルクレンチで管理することで回避するとともに、クリップ間のロープ長さが異なる2種の供試体の試験結果から両者の差分を取ることでロープ固定端の影響を排除する方法を考案した。

2. 引張試験

2-1 供試体

ワイヤロープは、図1に示す卒業研究^(1,4)と同じMIL-83140準拠の3/16インチ(4.8mm)直径のロープを用いた。本ロープは、素線7本を撚(よ)り合わせたストランド19本からなる19×7⁽²⁾構成である。ストランドのうち、外層の12本のストランドはZ撚り⁽²⁾、その内側の7本は撚り方向が反対のS撚り⁽²⁾である。外層ストランドと内層ストランドで撚り方向が逆向きとなっているのはロープの自転を防ぐためである。以上、19×7の133本の素線で1本のワイヤロープを構成しており、素線直径は $4.8/15=0.32$ [mm]となる。

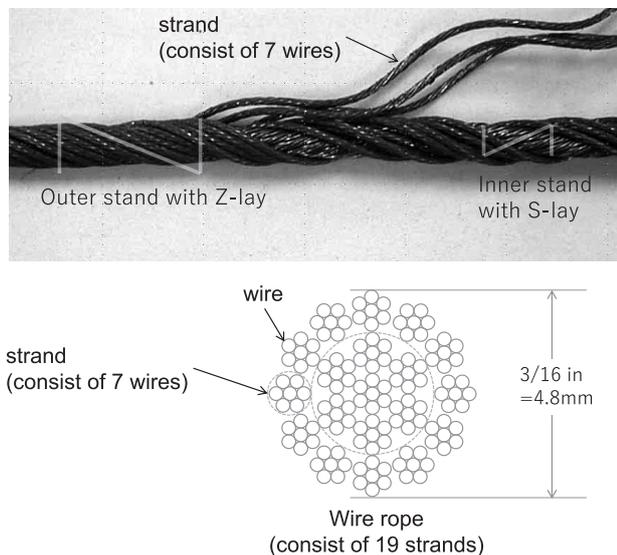


図1. MIL-DTL-83140 3/16 inch wire rope

ワイヤクリップにより供試体端部を環状にし、その環状部に丸棒を通し、丸棒をチャックで挟んで試験装置に固定する方法とした。同じ環状部寸法を持つが、クリップ間の長さが異なる250mm供試体と500mm供試体を作成した(図2)。

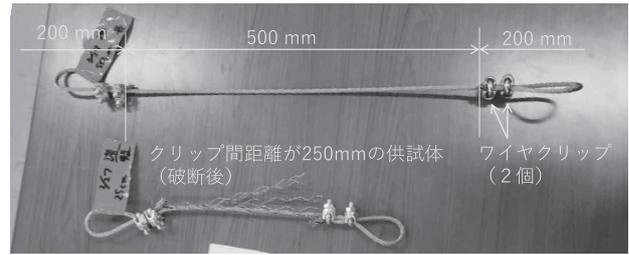


図2. 供試体2種

2-2 試験方法

破断強度1510kgf (MIL-83140から3330lb) よりも小さい引張荷重まで負荷の後、除荷するサイクルを5回繰り返した。これは、三雲⁽³⁾の「60%繰返荷重負荷試験」と同様である。試験装置は本学11号館に設置されている50TON 万能材料試験機(株式会社東京衡機製造所)を用いた。供試体の上部固定端が上方に移動することで供試体に引張荷重が負荷される。図3に示すように供試体上部固定部に固定した巻き尺で下方固定端部までの長さを読み取った。巻き尺の値が1mm変化するごとにコールし、その時の試験装置の荷重計指示を読み取った。250mm供試体の試験結果を別表1および別表2に、500mm供試体の結果を別表3に示す。250mm供試体の試験では、1回目の除荷後、供試体が緩み試験装置から外れた。



図3. 引張試験装置と計測値

2-3 試験結果

三雲と同様、荷重－伸びで整理した結果を図4および図5に示す。伸びは、荷重負荷時の巻き尺読取り値と、初回の荷重負荷前の巻き尺読取り値の差分とした。初回荷重負荷後、供試体が外れてしまった250mm供試体の2回目以降の伸びの基準値については、次の方法で推定した。図5に示すように250mm供試体では、初回の試験結果と2回目以降の試験結果を線形外挿すると1400 [kgf] で両者は交差する。250mm供試体でも同様な結

果になると仮定し、2回目の以降の基準値を548mmとした。

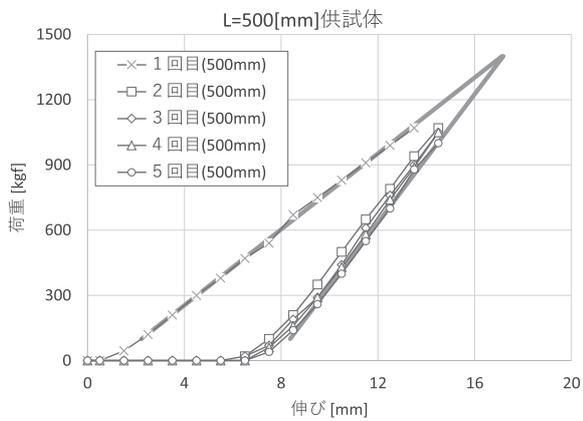


図4. 500mm 供試体試験結果

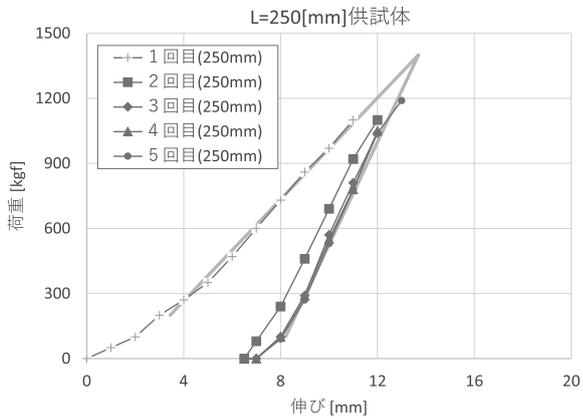


図5. 250mm 供試体試験結果

図4（別表3）、図5（別表2）から、2回目以降は荷重表示がゼロのまま伸びが継続している。この荷重表示がゼロのまま伸びが継続する現象は、一見すると、三雲が「鋼索取付部の滑り等を示している」と説明する結果と同じ結果に見えるが、次の理由から異なる。ひとつは、荷重負荷中に荷重の抜けは認められず、供試体固定端が滑った可能性は低いこと。もう一つは、滑りであれば非再現性を有すると思われるのに対し、3回目以降は再現性を有することである。以上から、本実験における荷重表示がゼロのまま伸びが継続する現象は、引張によるクリップ間のロープの伸び以外に固定端の「環状部」の伸びの影響である。「環状部」の伸びには、ワイヤロープの曲げ変形が含まれることになる。

500mm 供試体と250mm 供試体共に固定端となる環状部に割り当てたロープ長さは同じであるので、両者の固定端（環状部）が同じ特性を示すと仮定すると、500mm

供試体と250mm 供試体の差異は、ワイヤクリップ間の250mm 分のロープに起因する筈である。この両者の差異を $\Delta 250\text{mm}$ 部と呼び、両者の試験結果から $\Delta 250\text{mm}$ 部の引張特性を抽出することを試みる。この処理により、三雲がカセットメータを用いた結果と同等の結果が得られることが期待される。

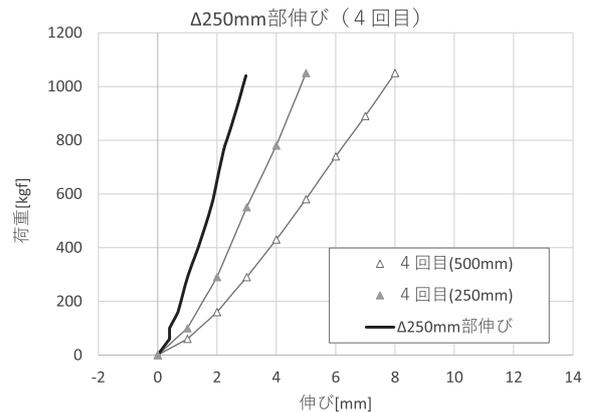


図6. $\Delta 250\text{mm}$ 部の引張特性（4回目）

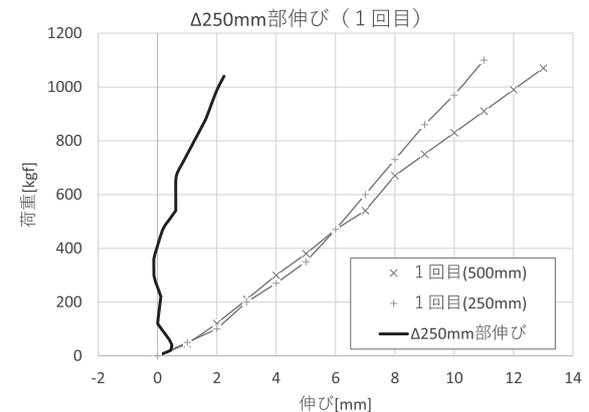


図7. $\Delta 250\text{mm}$ 部の引張特性（1回目）

一定の再現性が確認できる2回目以降のデータから代表例とし4回目のデータに対して線形補間を行った上で、同じ荷重における伸び計測値の差を取り、 $\Delta 250\text{mm}$ 部の伸びを抽出した結果を図6に示す。横軸の伸びは、荷重増加が捉えられた伸び計測の一つ前の伸び値をゼロに取り直している。図6に併記されている250mm 供試体、500mm 供試体の計測値の低荷重域の非線形性は異なっているように、両者の差分である「 $\Delta 250\text{mm}$ 部」の太線にも非線形性が確認できる。この非線形性は図4および5から分かるように再現性を有する。

一方、荷重1回目のデータに対して、500mm 供試体と250mm 供試体との差分を取ると図7のような結果と

なり、 $\Delta 250\text{mm}$ 部の伸び特性をうまく抽出できなかつた。 $\Delta 250\text{mm}$ 部だけ、 500mm 供試体の方が伸びるはずなので、理屈に合わない。

一定の再現性が確認できる2回目以降の荷重範囲での線形的な引張剛性値を導出する。ワイヤクリップ間のロープの引張剛性を EA 、固定端（環状部）の引張剛性を $(EA)_x$ 、ワイヤクリップ間の長さを l_{250}, l_{500} 、固定端（環状部）の長さを l_x 、引張荷重を P とすると、供試体の伸び $\delta_{250}, \delta_{500}$ は次式で表される。

$$\begin{cases} \delta_{250} = \frac{Pl_{250}}{EA} + \frac{Pl_x}{(EA)_x} = \left(\frac{l_{250}}{EA} + \frac{l_x}{(EA)_x} \right) P \\ \delta_{500} = \frac{Pl_{500}}{EA} + \frac{Pl_x}{(EA)_x} = \left(\frac{l_{500}}{EA} + \frac{l_x}{(EA)_x} \right) P \end{cases}$$

3回目以降の荷重 100kgf 以上の領域に対して、線形近似を行い $(l_{250}/EA + l_x/(EA)_x)$ と $(l_{500}/EA + l_x/(EA)_x)$ を推定した結果を表1に示す。

表1. 引張剛性推定結果 [mm/kgf]

		線形値	平均値
250mm 供試体	3回目	0.00417	0.00419
	4回目	0.00417	
	5回目	0.00422	
500mm 供試体	3回目	0.00678	0.00675
	4回目	0.00669	
	5回目	0.00678	

$(l_{250}/EA + l_x/(EA)_x)$ と $(l_{500}/EA + l_x/(EA)_x)$ の2つの平均値の差を求めると、 0.00256 [mm/kgf] であった。これが $\Delta 250\text{mm}$ 部の引張剛性となる。クリップ部の $l_x/(EA)_x$ は 0.00162 [mm/kgf] となる。

素線断面積を133倍したロープの実断面積 10.7 [mm²] から $\Delta 250\text{mm}$ 部のヤング率 E を求めると 90 [GPa] となり、同じステンレス鋼 SUS304系のヤング率は 196 [GPa] に比べ半分程度になった。

3. まとめ

三雲が固定端間距離に基づく伸び計測は不適でカセットメータを使う必要があると指摘した課題に対して、出来合いの安価な構成でありながら、同等の成果を得る手法を考案した。考案した試験手法により、三雲と同様の試験結果を得るだけでなく、一定の再現性を有する2回目以降荷重荷重時においても低荷重域に非線形性が存在することを示すデータを取得できた。

ロープの引張特性に関し、非線形性と再現性の関係に

は注意が必要である。「永久伸」という言葉からは、除荷後に残る非再現な伸びを想像しがちであるが、「永久伸」は低荷重域の非線形性との兼ね合いから定義され⁽³⁾、除荷時に残る伸び（荷重荷重前の長さとの違い）とは異なる。低荷重域に非線形性があれば、「永久伸び」はゼロではない値を持つ。今回確認できた2回目以降の低荷重域の非線形性は再現性を有するので、再現性を有する「永久伸び」を意味する。これは、金属に一般的にみられる塑性変形とは全く異なる現象であり、ワイヤロープの構造自体に起因する現象とみるべきである。

三雲は、「初期永久伸びの大きさは工作の構造、製作条件によって相当異なる」と初回荷重荷重時の非再現の非線形性について言及しているが、本論文での4回目以降の見られる再現性を有する非線形性については言及していない。また、三雲が示す複数のロープ試験結果には、再現性を有する非線形性の存在を示唆する結果とそうではない結果の両方があり、ワイヤロープハンドブックに至っては、カセットメータによりロープの伸びを直接計測した場合には低荷重域では非線形性が無いとの印象を与える図が示されている。このように再現性のある低荷重域の非線形性の存在については、これまで論じられていない模様である。

泉らの論文⁽⁴⁾の付録に、ストランドおよびロープの引張試験を行った結果が収録されている。ストランド試験では、端部は合金止め、伸びは「ストランドにクリップ式標点を 100mm 間隔で2ヶ所に取り付け、カメラでその間隔変化を追う方法で伸びを測定」としており、三雲が指摘する課題に対して妥当な対策が取られている。合金止めによる端部の剛性はロープに比べて十分高く、またすべりも発生しないと考えられるからである。一方、ロープ試験では「ワイヤロープの両端を回転拘束」、「ロープの伸びについては開始時の間隔が 100mm の2点間の長さの変化を、伸び計を使用して計測」とあり、若干不明なところがある。ただし、その結果は、本論文と同様、複数回の荷重荷重により再現性が出てきた状態でも低荷重域では非線形性が存在する結果となっている。なお、泉らの論文の主眼はロープの引張剛性ではなく径方向の剛性にあるためか、引張剛性に関する低荷重域の再現性を有する非線形性については特に言及がない。

清水の卒業研究⁽¹⁾では、多層巻きドラムにワイヤロープを巻き取る際に、ドラムに巻かれたロープに対する食い込み現象を研究対象とした。この食い込み現象が発生するか否かの要因として、ドラムに巻かれたロープ動きに注目した。このロープの動きは、ドラムに巻き取

られた時点のロープの張力の大小の影響している。この観点から、荷重履歴を有する低荷重域での非線形性が存在するか否かは、相応の関心事であった。

70年前の三雲⁽³⁾に比べると計測技術は大きく進歩しており、泉⁽⁵⁾の計測方法が現代に相応しい方法といえるだろう。これら先行事例に比較して、巻き尺等の出来合いの物品を用いた本論文の手法でも同等の結果を得ることができた点は創意工夫の賜物だと考える。

参考文献

- (1) 清水健太, 中山周一, クレーン・ウインチにおけるワイヤロープ食い込み現象, 日本機械学会九州支部第76期総会・講演会, E15, 2023/03/06
- (2) ワイヤロープハンドブック, 日刊工業新聞社, 1995. 3
- (3) 三雲英之助, 会田俊夫, 鋼索の引張試験の再検討と鋼索の引張弾性率について, 日本鑛業會誌, 68巻 (1952) 768号 p. 249-254
- (4) 中山周一, 伊賀本響, 羽木克昌, ワイヤロープの延性破壊, 日本機械学会九州支部第76期総会・講演会, D16, 2023/03/06
- (5) 泉聡志, 中谷起也, 太田仁衣奈, 波田野明日可, 山際謙太, エレベータ用ワイヤロープの径方向剛性を再現する有限要素モデリング, 日本機械学会論文集, 2021年87巻896号 p. 20-00418

付録

別表1. 250mm 供試体, 1回目結果

巻き尺読値 [mm]	荷重計読値 [kgf]
532	0
533	50
534	100
535	200
536	270
537	350
538	470
539	600
540	730
541	860
542	970
543	1100

別表2. 250mm 供試体, 2~5回結果

巻き尺読値 [mm]	荷重計読値[kgf]			
	#2	#3	#4	#5
554.5	0	0	0	0
555	80	0	0	0
556	240	100	100	90
557	460	290	290	270
558	690	570	550	530
559	920	810	780	780
560	1100	1040	1050	1040
561	—	—	—	1190

別表3. 500mm 供試体試験結果

巻き尺読値 [mm]	荷重計読値[kgf]				
	#1	#2	#3	#4	#5
794.5	0	0	0	0	0
795	0	0	0	0	0
796	45	0	0	0	0
797	120	0	0	0	0
798	210	0	0	0	0
799	300	0	0	0	0
800	380	0	0	0	0
801	470	20	20	0	0
802	540	100	70	60	40
803	670	210	190	160	140
804	750	350	290	290	260
805	830	500	440	430	400
806	910	650	610	580	550
807	990	790	760	740	700
808	1070	940	900	890	880
809	—	1070	1050	1050	1000

