105 ワイヤロープ張力評価装置の開発

Development of a wire rope tension meter

○学 川上 雄一郎 (大分大学) 非 李 蓓 (東芝ロジスティクス)
 非 山口 安昭 (東芝ロジスティクス) 正 三浦 篤義 (大分大学)
 正 永利 益嗣 (大分大学) 正 今戸 啓二 (大分大学)

Yuichiro KAWAKAMI, Oita University, 700 Dannoharu, Oita

Bei LI, Toshiba Logistics, 1-14 Nisshincho, Kawasaki-ku, Kawasaki, Kanagawa

Yasuaki YAMAGUCHI, Toshiba Logistics, 1-14 Nisshincho, Kawasaki-ku, Kawasaki, Kanagawa

Atsuyoshi MIURA, Oita University, 700 Dannoharu, Oita

Masuji NAGATOSHI, Oita University, 700 Dannoharu, Oita

Keiji IMADO, Oita University, 700 Dannoharu, Oita

It is important to know the tension of wire rope in use to avoid accident. But most of wire ropes are being used without knowing their tension. So far many ideas have been proposed to evaluate wire rope tension in use. However, few ideas have been realized to the present. We developed a simple wire rope tension meter that could be attached to a wire rope easily in use. The device applies twisting torque to a part of the wire rope by a stepping motor. A linear relation between wire rope tension and the torque obtained by the device was confirmed by the experiments. In addition, the change of wire rope tension and twisting torque with time were evaluated. They decreased gradually with time. Therefore a decrement of wire rope tension is able to be estimated by twisting torque. A simple model was proposed to account for a linear relation between the wire rope tension and twisting torque and hysteresis loop associated with twist loading on a rope. From these experimental studies, the device seems to be effective for evaluation of wire rope tension.

Key Words: Wire rope, tension meter, twisting torque, stepping motor, hysteresis loop

1. はじめに

ワイヤロープはワイヤと呼ばれる鋼線やステンレス線をより合わせたストランドを、さらに心綱の周りに巻き付けることで作られ⁽¹⁾、大きな負荷能力と適度な柔軟性のため、重量物の搬送、エレベータ、ケーブルカー、ロープウェイ、吊り橋など、様々な所に利用されている。ところがワイヤロープの張力は、張力ベクトルの作用線上にロードセルを設置すれば評価できるものの、ロードセルは精密で高価なため、実働中の張力はほとんど評価されることなく使われている。一方、ワイヤロープを取り扱う現場の安全上、ロープ張力を後付式で簡便に測定可能な装置の開発が望まれていることは言うまでもない。そこでワイヤロープの張力測定法として垂直変位を与え

る方法⁽²⁾⁽³⁾、偶力を与える方法⁽⁴⁾、横振動の周波数スペクトルより求める方法⁽⁵⁾、横振動の振動数から求める方法⁽⁶⁾など多数の提案がある。しなしながら何れも普及には至っていない。材料力学のテキストにも紹介されている垂直変位を与える方法⁽²⁾⁽³⁾は、長さ L のワイヤロープに垂直荷重を与え、それによる垂直変位から張力を算出する。本来は垂直荷重を与えない状態の張力を知りたいのだが、この方法では理論的に不可能であり、大きな垂直荷重と正確な垂直変位を必要とし、得られる張力も垂直荷重のため本来必要とする値よりも大きくなる。

我々はワイヤロープの螺旋構造に着目し、ワイヤロープの捩じり剛性が螺旋構造のため張力に比例して強くなることを実験的に確認し、モデルによる考察も行った⁽⁷⁾。前報⁽⁷⁾では手でワイヤロープに捩じり負荷を与えており、詳細な実験はできなかった。本報ではステッピングモータとねじを利用した捩じり負荷装置を試作し、実験した結果について報告する。

2. 実験法

2・1 張力負荷装置 図1はワイヤロープに所定の張力を与える装置である。長さ2.2m、外寸76mmの角鋼管を2本平行に並べ、中央にM20のねじ穴をあけた鉄板で鋼管を連結しフレームとした。ねじにはワイヤロープをかけるフックを取付け、フックの位置をねじにより動かすことで張力を与えた。ねじを回す際のトルクがワイヤロープに作用しないよう、フックには回り止めを付けている。張力は薄板に貼ったひずみゲージにより検出した。

Fig.1 Experimental setup

Fig.2 Enlarged view of wire rope twister

2・2 ねじりトルク負荷装置 図2はステッピングモータを利用したワイヤロープ用捩り負荷装置の外観を示す。外寸25mm×12mm、長さ300mmの鋼管の両端に、市販のシャコ万を溶接してフレームとした。シャコ万には半円筒溝加工したブロックを溶接し、ワイヤロープへの取り付けを容易にした。半円筒溝加工ブロックにねじで固定した厚さ1.2mm、幅17mm、長さ135mmの鋼板を、捩りを与えるためのトルクアームとした。鋼板には負荷トルク検出用ひずみゲージを貼り付けている。

フレーム中央にステッピングモータ取付用プレート(40×120×5mm)を固定し、プレート端にM8のめねじを加工したブロックを取り付けている。ステッピングモータはリニヤガイドを介してプレートに取付けた。ステッピングモータは先端に鋼球を圧入したM8、ピッチ1.25mmのねじを回し、トルク負荷アームを押す。ねじの回転に伴いステッピングモータはねじと一緒にリニヤガイド上を移動する。ワイヤロープからの捩りトルク反力はねじを介してブロックで受けるため、モータの軸にスラスト方向の力は作用しない。

2・3 実験手順 最初にワイヤロープに所定の張力6～10kNを与える。つぎに捩り負荷装置をワイヤロープにシャコ万で固定する。最後にトルク負荷アームを装置中央のワイヤロープにシャコ万により固定する。なおトルク負荷アームを取付ける際、鋼球先端と負荷アーム

Fig.3 Wire rope tested

の距離が常に約3mm一定になるよう治具を利用してセットした。その後、シャコ万によりトルク負荷アームをワイヤロープに固定した。実験はステッピングモータ駆動パルスデジタルメモリの外部トリガーとして使い、ねじ一回転当り160点の負荷トルクを記録した。そのためデータは、ねじ移動距離1.25/160≒7.8μm毎にサンプリングされる。ねじの移動距離(押し込み距離)は特に理由はないが、25mmと

Fig.4 Hysteresis loop of torque applied to wire rope

30mmの二種類について実験した。押し込み過程では鋼球は速度約6.4mm/sで進み、最大ストロークに達すると自動停止する。復帰ボタンを押すと出発地点に戻るようにPICを使い制御した。押込距離一定の条件下で時間に伴うワイヤロープ張力と捩りトルクの減少を調べる実験では、デジタルメモリの内部タイマーを利用して記録した。

2・4 試験用ワイヤロープ 試験用ワイヤロープはフックにかけるために両端をアイ加工した外径10mm、全長1.5mのものを使用した。図3に試験用ワイヤの写真を示す。より方で分類⁽⁸⁾すると、ストランドがZより、ワイヤ(素線)がSよりであるので、sZより(ordinary lay right sZ)となる。

3. 実験結果

ねじの押し込み距離に伴う捻じりトルクを測定した一例として、図4にワイヤロープ張力 $T=10\text{kN}$ 、最大押し込み距離 $S_{\text{max}}=25\text{mm}$ である場合の捻じりトルクの変化を示す。図は押し込み実験を繰り返し4回行った結果を示している。押し込み開始部のトルクが0の部分、鋼球がトルク負荷アームに接触していないためである。トルクの増加率は接触直後に最も大きく、押し込み距離の増加に伴い減少する。戻り行程はヒステリシスを描き、初回押し込みの場合、初回接触点から約6mm離れた点で鋼球はトルクアームから離脱する。これはワイヤロープ内の摩擦によるためであり、ある大きさのねじり角内ではワイヤロープは塑性的に振る舞う。2回目以降は接触開始点と離脱点はかなり近づくものの、塑性的性質は消滅することはない。初回押し込み時のときにトルクは最大となり、2回目以降は僅かに小さくなる。このことは押し込み距離 $S_{\text{max}}=30\text{mm}$ で行った実験でも同じであることを確認した。

図5(a), (b)にそれぞれ押し出し距離 $S=25\text{mm}$ と30mmの場合についてのワイヤロープ張力 T と捻じりトルク R の関係を示す。記号が4種類(R1, R4, L1, L4)あるのは、ワイヤロープに対する捻じり方向が図3に示すRとLの2種類、鋼球の押し出し回数を初回目と4回目の2種類で合計4種類としたためである。例えばR4はR方向の捩りの4回目のデータという意味である。図には最小二乗近似した直線もプロットしている。ばらつきはあるものの、捻じりトルク R は張力 T にほぼ比例して増加する。それぞれの押し出し距離についての近似直線の勾配 m は、25mmの場合； $m_{25}=0.0976$ 、30mmの場合； $m_{30}=0.1196$ となり、 $m_{30}/m_{25}\approx 30/25=1.2$ とほ

(a) In the case of pushing is 25mm

(b) In the case of pushing is 30mm

Fig.5 Relation between torque and wire rope tension

ば押し出し距離 S ，即ち捻じり角度に比例して大きくなる。

図6はワイヤロープに $T=10\text{kN}$ の張力を与え，押し出し距離 $S=30\text{mm}$ の捻じりを与えたまま，放置した場合の張力 T と捻じりトルク R の時間的変化を示す。それぞれ時間とともに減少していくことが分かる。このことは貨物をワイヤロープで固縛して輸送する際，途中で増し締めが必要となる可能性のあることを意味している。しかしながら現状はワイヤロープの張力を安価で科学的に管理する方法がなく，作業者の勘と経験を頼りにしていることは問題である。

4. 考 察

実験よりワイヤの一部を捻じめるのに必要なトルク R は張力 T にほぼ比例して増加することが明らかとなった。前報⁽⁷⁾では，ワイヤロープ長 100mm につき， 90° だけ予め捻じりを与えた直径 $d=3\text{mm}$ のワイヤロープを，万能試験機により連続的に張力を増加させ，張力 T とトルク R が比例関係にあることを報告した。張力 T とトルク R の比例関係は Klaus らの報告⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾と一致している。しかしながら前報⁽⁷⁾での実験方法や Klaus らの実験方法⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾は現場では不可能なため，現場で取り扱い容易な後付け方式を考案して実験した。ワイヤ径が $d=10\text{mm}$ と前報よりかなり剛性が増したため， 90° 捻じり変形させるには，捻じりトルクを大きくするか，ねじり長さを長くする必要がある。簡単のためワイヤロープを連続体と仮定すると，捻じり剛性は極断面二次モーメントに比例

Fig.6 Tension of wire rope and twisting torque decrease gradually with time

するので，直径 $d=10\text{mm}$ のワイヤロープの捻じり剛性は， $d=3\text{mm}$ のワイヤロープの捻じり剛性の $(10/3)^4=123$ 倍にもなる。そこで $d=10\text{mm}$ のワイヤロープに， $d=3\text{mm}$ のワイヤロープと同じトルクで 90° の捻じり変形させるには， 12.3m の長さが必要となり非現実的となる。今回の実験では長さ 300mm の中央に捻じりトルクを与えているため，固定部を境に捩じり方向は逆転し，それぞれの捻じり部の長さは 150mm となる。中央を捻じる理由は，ワイヤロープの捻じり剛性が捻じりトルクの方で異なるためである⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。中央部を捻じることで両側のワイヤロープの捻じり変形の向きは逆となり，ワイヤロープの構造に起因した捻じり剛性の異方性を小さくするためと，長さが不定となる試験部外側のワイヤの捩じり剛性の影響を排除する目的がある。図5の実験結果からは，ばらつきはあるものの捻じり剛性の異方性は確認できない。

ばらつきの原因は素線やストランドの摩擦が原因と思われる。Costello の著書⁽¹⁾には摩擦の影響は非常に小さいとされている。しかしながらそれは主に軸方向負荷を受けた場合についての考察であり，本実験結果に適用することはできない。一方，Klaus の論文⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾には捻じり負荷を与えた場合について詳述し，トルクの理論式や使い易くした式を提案し，代表的ワイヤロープに対する係数表も示している。しかしながらこれらは長いワイヤロープ全体を捻じった場合の実験結果であり，本実験のようにワイヤの一部を捻じったものではない。我々の実験では押し出し距離 30mm の場合，ねじり角 ϕ は $\phi \approx 10^\circ$ である。捻じり長さは 150mm であるので，単位長さ当たりのねじり角 ω は， $\omega=67 \times 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{mm}$ となる。この値は Klaus の論文⁽⁸⁾にある値と比較すると約半分である。

図4に示したヒステリシス曲線は張力に伴い微妙に形状は変化する。そこで値の最も安定した4回目のヒステリシスループについて，閉曲線の面積を，押し込み側曲線(上側曲線)と x 軸との間の面積で除すことで，エネルギー損失率を求めた。なお曲線内の面積はグリーンの補助定理⁽¹¹⁾を利用した線積分により求めた。図7に結果を示す。図より張力の増加に伴いエネルギー損失率は小さくなることが分る。損失率が小さくなる理由は，摩擦損失が張力には無関係とすると，張力の増加に伴いワイヤロープの捩じり剛性が増大した分だけ損失率は減少することになる。Klaus の著書⁽⁸⁾にある捩じりトルクについての式でも張力とは無関係な項が含まれている。なお本装置では回転鋼球とトルクアームとの間で滑りによる摩

Fig.7 Energy loss factor associated with twisting decreases with tension of wire rope

擦損失もあるが、接触点に潤滑材を塗布してもほとんど実験結果に影響しなかったため、その影響は考慮しない。

ワイヤの構造による摩擦損失については複雑なため簡単には見積もれない。小野はワイヤ構造の数式による表現法について詳細にまとめている⁽¹²⁾が、摩擦力や応力の計算までは言及していない。一方、Costello⁽¹⁾と Klaus⁽⁸⁾は応力の計算については詳述しているものの、構造のベクトルによる表現法についての説明は希薄である。ここでは直感的に図8のような仮想モデルを考え、捩じりに伴う摩擦損失や張力に伴う捩じり剛性の変化について考える。図8はワイヤロープの素線やストランドを仮想的に平面に展開したイメージである。ワイヤロープを捻じめることは、水平面から θ だけ傾斜した仮想線に力 P を加え、その傾きをさらに ϕ だけ増すことになる。両端が拘束された長さ L の細線の中央に垂直荷重 P を加え、僅かな垂直変位 δ が生じた場合、張力 T 、 P 、 δ 、 L の関係は、

$$P = \frac{4\delta}{L} T \quad (1)$$

で表わされる⁽²⁾。図8の仮想線は傾斜しているため、(1)に適当な修正係数をかける必要があるが本質的違いはない。変位 δ と長さ L が一定であれば、垂直荷重 P は張力 T に比例することを(1)は示している。そのため図5に示したように、捻じりトルク R はワイヤロープの張力 T に比例する。一方、図8に示すモデルの y 方向を長さ H に拘束した場合、力 P を与えられることで仮想線同士は図8(b)に示すように軸方向に c だけ滑ることで摩擦が生じる。しなしながら仮想線同士に作用力は仮想線の張力とはほとんど無関係である。仮想モデルによる考察は、ベルトを捻じった際のトルクと張力の関係にも適用できる。

つぎに図6に示したように、ワイヤロープ張力 T とトルク R は時間とともに減少する。両者の関係を調べるため、時間を消去して、それぞれの値を(2)式で定義する減少率で比較した。

$$\left. \begin{aligned} \Delta_T &= \frac{T_{\max} - T}{T_{\max}} \\ \Delta_R &= \frac{R_{\max} - R}{R_{\max}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

結果を図9に示す。実験開始直後にトルクは急に減少するが、その後は張力減少率にほぼ比例するようになる。図より張力は4%、トルクは8%以上低下したことが分る。これらの結果より、ワイヤロープ張力を長期的にモ

Fig.8 Simplified model of wire rope in twisting

Fig.9 Relation between reducing rate of wire rope tension and twisting torque

ニターする際にも本張力評価装置は有効と思われる。

5. まとめ

ワイヤロープ張力の後付け式評価装置として、ステップモータを利用した捩じりトルク負荷装置を試作した。得られた結果をまとめるとつぎのようになる。

1. 捩じり角を一定にした場合、捩じりトルクは張力に比例して増加する。
2. 捩じりトルク負荷装置の負荷過程と除荷過程のトルク値は摩擦によりヒステリシス曲線となる。
3. ヒステリシス曲線より求めた損失エネルギー率は張力の増大に伴い減少する。
4. ワイヤロープ張力は時間とともに減少し、それに対応してトルク負荷装置のトルクも減少する。

参考文献

- (1) George A. Costello, Theory of Wire Ropes, 2nd Ed., Springer, pp.1-71, 1997.
- (2) 中原一郎, 材料力学, 上巻, pp.59, 養賢堂, 1983.
- (3) Raymond J. Roark and Warren C. Young, Formulas for Stress and Strain, 5th Ed., McGraw-Hill, pp.171, 1975.
- (4) 小堀元一, 張力測定具, 特開平 10-260096.
- (5) 村上卓也, 守谷敏之, ワイヤロープの張力測定方法, 特開 2001-153740.
- (6) 中野政輝, エレベータのロープ張力測定装置, 特開平 5-105349.
- (7) 川上雄一郎, 李蓓, 山口安昭, 三浦篤義, 今戸啓二, ワイヤ張力の一評価法, 日本機械学会 中国四国支部 徳島講演会演説文集, pp.205-206, 2010.
- (8) Klaus Feyrer, Wire Ropes, Springer, pp.34-112, 2010.
- (9) Klaus Feyrer and Gerhard Schiffner, Torque and

torsional stiffness of wire rope – Part I , Wire Vol. 36,
No.8, pp.318-320, 1986.

- (10) Klaus Feyrer and Gerhard Schiffner, Torque and
torsional stiffness of wire rope - Part II, Wire Vol. 37,
No.1, pp.23-27, 1987.
- (11) C.R.ワイリー, 富久泰明訳, 工業数学下巻, ブレイ
ン図書出版, pp.595-599,1970.
- (12) 小野進, 工学の数学ーワイヤロープの微分幾何学ー,
アグネ技術センター, pp.57-142, 2005.