繰り返し荷重を受ける索内部にかかる力 に関する実験的研究

山本 一誠*・久保 雅義**・浅木 健司*・鹿沼 洋司*

An Experimental Research on Internal Stress of Ropes Under Repeated Load

Kazusei YAMAMOTO, Masayoshi KUBO

Kenji ASAKI and Youji KANUMA

Abstract

Repeated loads are applied to mooring ropes of a vessel under mooring. Occasionally, their breakage may happen and may lead to a serious accident. The authors considered that causes of the mooring rope's breakage are the rope repeated pulling and the resulted heat.

In the tensile tests, the temperature of rope rises when a rope is pulling. It is observed with an infrared camera. At first the authors considered that the area under Load-Stroke Curve indicates the energy that the rope gets and the energy transfers to the heat and then the temperature of rope rises. The authors guessed that the characteristic of rope changes due to the heat, with the result that a rope becomes weak. However, from Energy Conservation Law, the consideration was very illogicality. Then the authors consider that a friction in the rope generates a fever and the fever makes the temperature of the rope to rise.

In this research, the force in the mooring rope under tensile test is investigated with a subminiature pressure sensor and a non-contact infrared thermometer.

The obtained results are summarized as follows;

- (1) The pressure in the rope is measured with the pressure sensor. The force on the sensor in the rope is about 4% of the tensile load.
- (2) The temperature rise of mooring ropes under repeated load was investigated continuously.
- (3) The numerical calculated results show the almost same tendency as the measurement ones.

Keywords : Mooring Rope, Internal Stress, Repeated Load, Temperature Rise

キーワード: 係留索, 内部圧力, 繰り返し荷重, 温度上昇

1. はじめに

船舶係留時の係留索切断に関して、原因調査および事故防止のため、著者らは、これまで実験および調査を重ねてきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。そして、係留索切断原因の一つに索の温度上昇による索強度の劣化をとりあげた。これは実験を通して、供試索の取替え時、実験

前と実験後で供試索の温度について変化のあることを経験したからである。そして、赤外線カメラを用いて撮影を行い、切断直後および繰り返し荷重を与えた後、供試索の温度上昇を確認した。繰り返し荷重を受ける索の温度上昇については、索に与えられる力がすべて熱に変化するものとして、調査を進め

* 正会員 海技大学校 (〒659-0026 芦屋市西蔵町12-24) yamamoto@mail.mtc.ac.jp

** 正会員 神戸大学海事科学部 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1) kubomasa@maritime.kobe-u.ac.jp

た⁽⁴⁾。数値計算によっても索内部の熱分布を求め、その結果は実験値にほぼ近似するものであった⁽⁵⁾。

しかし、エネルギー保存則の考えより、索に与えられる力が熱に変化するものと短絡的に考えるのではなく、索内部での摩擦等によって熱が発生し、その熱により索の温度が上昇を引き起こすものと推察した。

今回、実際の係留索の動きにおいて、索内部に何らかの力が働いているのか、またそれが索にどのような影響を与えるかを引っ張り試験機、ボタン型圧力センサーおよび放射温度計を用いて調査した。その結果、繰り返し荷重を与えられる索の内部圧力について、若干の知見が得られたので報告する。

2. 実験方法

実際の係留状態を模して、Fig.1 のように横型引っ張り試験機をもちいて、供試索に実験条件(Table 1)で繰り返し荷重をかけた。実験においては、実際に使用されている係留索に近い直径のものを使用した。

Fig.1 Experimental Equipment

Table 1 Experiment conditions

Rope	Nylon
Strand	8
Diameter	40 mm
Length without Eye Splice	2.4 m
Breaking Strength	28 tonf
Tensile Load	600 kgf
Period	180 sec.
Length	4 m
Weight	3.9 kg
Specific heat c	0.4 cal/g.m°C

繰り返し荷重と繰り返し時間は、試験機性能に制約されて、破断荷重の2%および180秒とした。実験中は、索内部に設置したボタン型圧力センサー(Fig.2)にて索内部にかかる圧力を、放射温度計によ

り索表面温度を連続計測した。放射温度計を用いるにあたり、供試索の放射率が不明であるため、索表面を黒体スプレーにて処理した。測定場所は、放射温度計のツインビームマーカで特定し、直径2.5mmの範囲内の温度を測定した。ボタン型圧力センサーは表面およびコードを厚さ0.8mmのゴム板で保護した。ボタン型圧力センサーの大きさは、直径6mm、厚さ 0.6 ± 0.1 mmである。

Fig.2 Sensor and Rope

3. 実験結果

3.1 繰り返し荷重による索内部の力の変化

繰り返し荷重およびセンサー面における力の時系列の例を Fig.3(a)(b)に示す。破線は供試索に加えた荷重 (Tensile Load) L_T (kgf)を、実線はセンサー面が受ける力 (Internal Load) L_I (kgf)を、または、供試索に加えた荷重に対するセンサー面が受ける力の割合 $R(\%)$ を表している。

センサー面が受ける力は、センサーの受圧部面積を A_{ps} 、その圧力を p とすると、

$$L_I = A_{ps} \cdot p \quad (1)$$

から求まる。ただし、この値には、センサー受圧部面積を受圧面全体としていること、およびセンサーをゴム板で保護していることからの不確定な要素が含まれている。また、 R は、

$$R = \frac{L_I}{L_T} \times 100 \quad (2)$$

で求まる。

荷重が増加するとセンサー面での力も増加し、荷重が減少するとセンサー面での力も減少する傾向にある。しかし、その割合は、Fig.3(b)から明らかなように、荷重がある程度増加すると、ほぼ一定となり、それは供試索に加えた荷重のほぼ4%程度である。この一定に達した間も、索には荷重が与え続けられ

ている。その理由として、索内部の力は、索中心軸方向でなく荷重のかけられる索方向が大部分となり、索内部で摩擦等を起こし、熱エネルギーへ変化しているものと推察する。

Fig.3(a) Internal Load of Rope under Repeated Load

Fig.3(b) Internal Load of Rope under Repeated Load

3.2 繰返し荷重による索表面温度の変化

放射温度計により、繰返し荷重をうける供試索の表面温度の変化を Fig.4 に示す。図中、実線は索の温度 $T(^{\circ}\text{C})$ を、破線は供試索に加えた荷重 L_T を示している。索表面温度は 1 回目の引っ張りを除くと、やや右上がりの傾向を示している。これによりこれまでの推察が正しいものと確認された。

1 回目の引っ張り始めの索表面温度がいったん高くなっている。これは、供試索が試験機において弛んだ状態から引っ張り始めていること、その後は荷重が減少してもある程度緊張状態にあることから、索内部の構成が均一でないことによるものと推察される。つまり、索内部のストランド、ヤーン、繊維

は、引っ張り前索内部での緩んだ状態にあり、その後、繰返し荷重が与えられるに従い、索内部で整然となってくることによる原因と推察する。

Fig.4 Temperature of Rope under Repeated Load

4. 内部にかかる力による索温度の試算

索内部にかかる力による索温度を以下のようにして求めた。

4.1 スtrandの接触面積

供試索は Fig.5 に示すように 8 本のストランドにより構成される。2 本のストランドが組になり、4 組が交互に重なり合っている。これら重なりがストランドの接触面であり、Fig.5 に示すような四辺形として近似させる。丸数字はストランド番号である。

Fig.5 Strand and Rope

その 1 つの四辺形の面積 A_{si} は、

$$A_{si} = \frac{1}{2} \ell_d^2 \frac{1}{\tan\left(\frac{\theta_s}{2}\right)} \quad (3)$$

により求まる。図中、間隔 a においてストランドの接触について検討を行った。各ストランドが、交差し、擦れ合う接触面を調べたところ、7 カ所が該当

した。ただし、この観察には、引っ張り時の形状に近似させるため、供試索を接着剤にて固めたものを使用した。Table 2 にその結果を示す。この7カ所について、 $i=1$ から7までの A_{Si} の和が間隔 a における索内部の接触面積である。

また、ストランドの交差角 θ_s も、各ストランドの組み合わせについて測定し、それらの平均を取り、交差角を 63° とした。

間隔 a におけるストランドの接触を索内部での平均的な接触とみなした。供試索内部におけるストランドの接触面積 A_s は、索の長さ L 、間隔の長さ a とすると、

$$A_s = \frac{L}{a} \times \sum_{i=1}^7 A_{Si} \quad (4)$$

によって求まる。

Table 2 ℓ_a for A_{Si}

i	No. of Strand		ℓ_a (mm)
1	①	④	14
2	②	④	8
3	③	⑧	9
4	⑥	⑧	13
5	⑤	⑧	10
6	⑦	④	7
7	④	⑧	10

4.3 ストランドの摩擦係数

ストランドの摩擦係数 μ を求めるため、まず、摩擦係数のための傾き角 λ を求めた。供試索からストランドを取り出し、厚紙に貼り付け、Fig. 6 のようにして、実験をおこなった。それで得た傾き角の平均から摩擦係数を求めた。ストランドのあわせ角は、 0° (平行)、 23° 、 45° 、 67° 、 90° とした。その結果、傾き角が平均 21° にて、ストランドは滑り出した。摩擦係数は次式より求めた。

$$\mu = \tan \lambda \quad (5)$$

Fig. 6 Measurement of λ

4.4 索内部の摩擦係数

圧力センサーにより計測した索内部圧力 p とスト

ランドの接触面積 A_s から、索内部に働く力 F_{in} は、

$$F_{in} = A_s \cdot \alpha \cdot p \quad (6)$$

でもとまる。ただし、ストランドの接触面積には、その面積自体の変化、変位方向、圧力センサーの受圧構造や保護のためのゴム板等の影響が含まれるものと考え、ある係数 α をかけることとする。

また、摩擦から生じる力 F_{fr} は、

$$F_{fr} = \mu \cdot F_{in} \quad (7)$$

でもとまる。

4.5 ストランドの変位

実験より、供試索にかかる荷重とその変位が計測されている。実験時の観察より、供試索の変位がストランドの変位と同じであるとは、考えられないので、時間当たりの供試索の変位 $\Delta \ell$ から接触面積の変位 $\Delta \ell_B$ を考える。 ℓ_B は、

$$\ell_B = \ell_a \frac{1}{\tan\left(\frac{\theta_s}{2}\right)} \quad (8)$$

によりもとまる。以後の計算において、 ℓ_B は Table 2 よりもとめ、その平均をもちいた。

Fig. 7 A_{Si} and $\Delta \ell_B$

今、Fig. 7 に示すように、索に荷重がかけられると、ストランドの接触面 A_{Si} の面積は等しいまま、1 点破線、2 点破線の図のように接触面の上下が両方向に $\Delta \ell_B$ だけ変位するものとする。接触面の索方向のひずみ ε_B は、

$$\varepsilon_B = \frac{\Delta \ell_B}{\ell_B} \quad (9)$$

となる。

次に、索およびストランドののび量に着目する。索にかかる荷重 L_T による索の変位 $\Delta \ell$ と索長さ ℓ に

より索のひずみ ε_R は、

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (10)$$

によりもとまる。また、索の同じストランド上、長さ方向 5ヶ所において、2点間の距離 ℓ_s と荷重がか

けられたときの変位 $\Delta \ell_s$ から、これら 2点間のひずみ ε_s も、

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta \ell_s}{\ell_s} \quad (11)$$

によりもとまる。 ε_R を横軸に ε_s を縦軸にとったものを Fig.8 に示す。グラフは右上がりの傾向を示しており、計測場所(S1~S5)に関係なくほぼ同程度の値を示している。 ε_s がストランドの動きを正確に表しているとは考えがたいが、 ε_s の ε_R に対する割合 R_ε を、

$$R_\varepsilon = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_R} \quad (12)$$

からもとめ、その平均から $R_\varepsilon = 0.8$ を求めた。

Fig.8 ε_R and ε_s

また、変位の割合は索において等しいものとする、

$$R_\varepsilon = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_R} = \frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_R} \quad (13)$$

となり、式(9)および(13)より、接触面の変位 $\Delta \ell_B$ は、

$$\Delta \ell_B = R_\varepsilon \cdot \frac{\ell_B}{\ell} \cdot \Delta \ell \quad (14)$$

となる。

式(14)の $R_\varepsilon \cdot \ell_B / \ell$ を β とすると、

$$\beta = R_\varepsilon \cdot \frac{\ell_B}{\ell} \quad (15)$$

$\beta = 0.005$ となった。

4.6 単位時間の仕事量とエネルギー損失

次に、単位時間当たりの摩擦による仕事量 W_f は、

$$\Delta W_f = F_f \cdot \Delta \ell_B \quad (16)$$

により求まる。索においては、引っ張り時、弛緩時においても、ストランドが擦れ合うこととなり、連続して仕事量が発生している。この仕事量がすべて摩擦による発熱量 Q_f となる。1 Nm = 1 J、1 cal = 4.1855 J であるから、

$$\Delta Q_f = \frac{\Delta W_f}{4.1855} \quad (17)$$

が導かれる。

4.7 単位時間における温度上昇の試算

ここで、供試索の比熱を c 、供試索質量を m 、時間当たりの供試索の温度上昇を ΔT とおくと、単位時間当たりの摩擦による発熱量は、次式のように表せる。

$$\Delta Q_f = mc\Delta T \quad (18)$$

そして、時刻 j のとき、計算による索温度 T_c は、繰返し荷重をかける前の索温度を T_0 とすると、それまでの仕事量の総和と式(18)から、

$$\Delta T = \Delta Q_f / mc \quad (19)$$

$$T_c = T_0 + \sum_0^j \Delta T \quad (20)$$

より、求めることができる。ただし、伝熱の影響は考えないものとする。

4.8 計算方法

内部にかかる力による索温度の求め方を要約すると、Fig.9 のようになる。索内部の圧力が計測され、それが均一に縊られたストランドに働く。つぎに索の緊張弛緩にともない、それらストランドが摩擦される。その摩擦による仕事が熱に変換されるとして温度を計算し、測定温度と比較して、実験定数を誘導するものである。

Fig.9 Concept of Calculation Method

5. 測定値と計算値の比較

供試索を繰り返し引っ張り、弛緩させたときの索にかかる荷重 L_T 、その変位 $\Delta\ell$ およびセンサー面が受ける力 L_I を Fig.10 に示す。図のような変化において、4.の試算によって、索温度 T_c を試算し、実験定数 α を求めた。

Fig.10 Tensile Test

次に、単位時間における索温度の計算値と表面温度の計測値を比較検討し、実験定数 α を誘導した。Fig.11(a)に $\alpha = 1$ 、Fig.11(b)に $\alpha = 6.5$ の場合の計算結果を示す。Fig.11 中、実線は放射温度計により計測した索表面温度 T 、太線は索内部にかかる圧力から計算した索の温度 T_c 、および破線は索にかかる荷重 L_T を示している。実験値も計算値も同じように右上がりの傾向にあり、引っ張り始めを除けば、傾向がほぼ一致しているので、温度上昇を計算することができる。

また、接触面は上下であるから、その変位が2倍であると考え、 $\beta=0.01$ として、 $\alpha=3.5$ が誘導される。その結果を Fig.11(c)に示す。

上記結果より、実験定数を誘導するにあたり、 β

もかなり大きな影響を含んでいるものとする。また、 α が大きくなる原因としては、接触面を平面における四辺形にて近似したためと、圧力センサーをゴム板で保護したため、その数値が小さくでたためと考える。本研究においては、Fig.11(c)の実験定数が適しているものと推察する。

Fig.11 (a) Experiment and Numerical Computation

Fig.11 (b) Experiment and Numerical Computation

Fig.11(c) Experiment and Numerical Computation

実験値と計算値には、若干の差がある原因として、以下のように考える。

- ① 引っ張り始めの計算値については、供試索内部のストランド、ヤーン、繊維の状態が、引っ張られた後の均一な状態と同じではなく、その変位も異なるのではないかと考える。この部分については、計算を別にするよう考える必要がある。
- ② 索内部にかかる力を測定するため、Fig.2 に示すボタン型圧力センサーを利用した。図から明らかなように、片面に受圧部があり、計測値は相対的なものである。索内部にセンサーを設置したが、損壊の恐れが少ない索中央部のみの設置であり、その他のストランド間の接触面では未設置である。索内部の圧力は、索内部の場所によって、その圧力に違いがあることも考えられる。また、圧力センサーをゴム板で保護したため、その数値が小さく出力していることも推察される。
- ③ ストランド間の摩擦を考えたが、ヤーン間、繊維間の摩擦も影響すると考える。
- ④ 実験定数を誘導するために、ストランドの接触面、変位およびその動きについて、さらなる調査が必要である。

6. まとめ

繰り返し荷重を受ける索について、その内部にかかる力を調査した。本研究により得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

- (1) 供試索に繰り返し荷重をあたえると、索軸方向へも荷重が加わり、その荷重は索にあたえた荷重の4%程度であった。
- (2) 索内部かかる圧力を元に摩擦力を求め、そしてその仕事量から繰り返し荷重を受ける索の温度上昇を計算した。その結果は計測値の傾向にほぼ一致した。
- (3) 先の調査報告⁽⁴⁾にて検討できなかった索の連続的な時系列温度上昇について、放射温度計を用いて、それを計測できた。

参考文献

- (1) 山本一誠・久保雅義・浅木健司：船舶係留時の係留索切断に関する基礎的研究，日本航海学会論文集，Vol.94，pp.73-79，1996.3
- (2) 山本一誠・久保雅義・浅木健司：船舶係留時の係留索切断に関する基礎的研究-II．一繰り返し荷重が索強度に及ぼす影響一，日本航海学会論文集，Vol.96，pp.269-274，1997.3
- (3) 山本一誠・久保雅義・浅木健司：船舶係留時の

係留索切断に関する基礎的研究-III．一船舶における係留索切断事故防止索の効果について一，日本航海学会論文集，Vol.100，pp.139-144，1999.3

- (4) 山本一誠・久保雅義・浅木健司・鹿沼洋司：繰り返し荷重を受ける索の温度上昇に関する実験的研究，日本航海学会論文，Vol.106，pp.167-174，2002.3
- (5) Kazuei YAMAMOTO・Masayoshi KUBO・Kenji ASAKI・Youji KANUMA: Numerical Calculation of Temperature Rise on Rope Pulling, Proceedings of ANC2003, pp153-159, 2003.9