船舶係留時の係留索切断に関する基礎的研究－Ⅱ． －繰り返し荷重が索強度に及ぼす影響－

久保 雅義*・山本 一誠**・浅木 健司**

Basic Research on Breakage of Mooring Ropes on Ship Mooring-Ⅱ. -Effect of Repeated Load on Rope Strength-

Masayoshi KUBO, Kazusei YAMAMOTO and Kenji ASAKI

Abstract

In the previous report, the authors discussed that the tension of mooring ropes was different before and behind a fair leader, and that the strength of mooring ropes decreased near a fair leader under a constant load.

In this paper, the strength of mooring ropes is examined under the repeated load in order to estimate the fair leader effect.

The obtained results are summarized as follows:

- (1) Breakage of fiber ropes occurs surely near a fair leader under the repeated load, even if a fair leader works smoothly.
- (2) The breakage occurs at the load less than the strength of the ropes under the repeated load. The load is 50% of the strength in this experiment.
- (3) The smaller the angle of mooring rope at a fair leader is, the fewer the repetition till the breakage becomes.

1. 研究の目的

船舶の係留中における係留索の切断事故が後を絶たず、それが頻繁に発生する港もある⁽¹⁾。しかしほとんどの場合、単に索自体の切断に留まり、人身事故や係留設備の損傷事故等に波及しないため、災害事例として公表されないことが多い。

係留中の船舶は常に動揺しており、係留索は緊張と弛緩を交互に繰り返す。そのため、繰り返し荷重が索強度に及ぼす影響について検討する必要があるが、通常行われる引張試験のみでは不十分である。前報において⁽²⁾、係留索の切断事故はフェアリーダ付近で多く発生していることを報告した。索強度に関しては、これまでに様々な報告例があるが、繰り返し荷重については引張り疲労強度として、回転部においては摩耗特性としてあるのみで⁽³⁾⁽⁴⁾、それを合わせた今回のような報告例は著者らの調査する限りほとんどない。

今回、船上においてはフェアリーダ部にて係留索がいつも簡単に切断するという原因探究のため、繰り返し荷重がフェアリーダ部において索強度にどのような影響を及ぼすかについて索具引張試験機により、その切断までを調査した。その結果若干の知見が得られたので報告する。

2. 実験装置および実験方法

* 正会員 神戸商船大学 (〒658 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

**正会員 海技大学校 (〒659 芦屋市西蔵町12-24)

図1 索具引張試験機

実験には図1に示す索具引張試験機を用いた。本装置には、中央部にフェアリーダ、側部に索の固定点となる係止点を設けた。負荷荷重と繰返し周期を設定し、索の一端を移動チャックに、他端を係止点に取り付けた後、始動させると、移動チャックが前後に動き、繰返し運動をする。係止点はP₁からP₇まで変化させることにより、フェアリーダにおける索のなす角度θを変えることのできる構造となっている。実験に用いたフェアリーダは船用小型フェアリーダJIS-F2024、呼び径75mmで、よく整備されたものである。フェアリーダのローラー表面はペイントが施され、粗度計にて測定はしていないが、従来の摩耗試験に用いられるような摩耗ドラムと比べると、格段に滑らかである⁽⁵⁾⁽⁶⁾。なお以後、移動チャック側を引張側、係止点側を係止側と呼ぶ。

表1に供試索の諸元を示す。供試索には、係留索として通常使用されているナイロンエイトロープとワイヤーロープを用いた。いずれも同一コイルから抽出し、乾燥状態のものを使用した。実験に先立ち、引張試験を行い、それにより得られた切断荷重の平均値を供試索の索強度F₀とした。なお、このときの切断発生場所は、スプライス部であった。ワイヤーロープの引張側には、テールロープとして直径14mm、長さ1.6mのナイロンエイトロープを接続した。図2に示すように、接続部においては、ナイロン索のアイ部にシンブルを取り付けた。

表1 供試索の諸元

種	類	ナイロンエイトロープ			ワイヤーロープ
機	成	八つ打			6×24
直	径 (mm)	6	10	14	8
索	強度 (実測平均) F ₀ (kgf)	820	2500	4291	3258
索	強度 (公称値) (kgf)	940	2320	4640	3200
切	断時の伸び (公称値) (%)	44			—

図2 テールロープの接続

表2 実験時のコンディション

種	径 (mm)	荷重 係止点 (mm)	長さ (m)	0.9F ₀			0.8F ₀			0.7F ₀			0.6F ₀			0.5F ₀					
				繰返し周期 (sec.)																	
				480	720	960	480	720	960	480	720	960	480	720	960	480	720	960			
ナイロン	6	P 1	4	1(1206)	1(1252)	1(1279)	1(1228)														
		P 3	3	1(969)	1(989)	1(957)	1(904)														
		P 4	2.6	1(893)	1(867)	1(863)	1(841)														
		P 5	3	1(1008)	1(995)	1(988)	1(916)														
		P 7	4	1(1267)	1(1207)	1(1225)	1(1189)														
		P 1	4	1(1478)	1(1448)	1(1478)	1(1450)														
	10	P 3	3	1(1150)	1(1111)	1(1152)	1(1097)														
		P 4	2.6	1(1062)	1(1053)	1(1030)	1(1003)														
		P 5	3	1(1188)	1(1139)	1(1225)	1(1104)														
		P 7	4	1(1841)	1(1513)	1(1532)	1(1435)														
		P 1	4	1(1604)	1(1610)	1(1682)	1(1500)	1(1452)	1(1402)	1(1282)											
		P 3	3	1(1219)	1(1203)	1(1246)	1(1201)	1(1196)	1(1089)	1(1021)											
14	P 4	2.6	1(1113)	1(1087)	1(1091)	1(925)	1(1004)	1(975)	1(895)												
	P 5	3	1(1246)	1(1224)	1(1231)	1(1191)	1(1102)	1(1029)	1(1016)												
	P 7	4	1(1652)	1(1652)	1(1611)	1(1561)	1(1409)	1(1537)	1(592)												
	P 1	4	1(704)	1(694)	1(680)	1(670)															
	P 3	3	1(660)	1(629)	1(682)	1(619)															
	P 4	2.6	1(686)	1(684)	1(674)	1(665)															
ワイヤー	P 5	3	1(695)	1(720)	1(723)	1(691)															
	P 7	4	1(691)	1(735)	1(736)	1(709)															
	サンプリング間隔				250msec.									1000msec.							
※F ₀ :基礎度、ワイヤーはテールロープ付き																			単位: mm		

※F₀: 索強度、ワイヤーはテールロープ付き

単位: 本

索具引張試験機の各係止点ごとに、供試索を張り合わせ、最大負荷荷重 $L_{\max}$ (kgf) と繰り返し周期 T (sec.) を設定した。そして、供試索が切断するまでプログラム制御により移動チャックを往復運動させ、荷重をロードセルから、索の伸びを移動チャックの変位から計測した。なお、本プログラムの場合、下限荷重の設定は未設定で、最大負荷荷重と繰り返し周期により拘束され、必ずしも荷重0とはならない。表2に実験時のコンディションを示す。最大負荷荷重 $L_{\max}$ としては索強度 F_0 の90%から50%までの10%刻みにした。繰り返し周期 T に関しては係留中の船舶の動揺周期から10秒ないし100秒が適当であると考えられるが、本実験においては装置の性能上の制約から480、720、960秒とした。データのサンプリング間隔は250または1000msec.である。

3. 実験結果および考察

3.1 フェアリーダ部での索の動き

本実験において観測されたフェアリーダの動きは、目視観測の範囲内では、索の動きによく追従していた。しかし、詳細に観察すると、索の運動はフェアリーダの回転方向だけでなく、図3に示すような索中心を軸とした回転運動も加わっている。実際の船の運動は、3次元であるため、フェアリーダ部における索の運動はさらに複雑であると考えられる。

3.2 切断場所

図4は切断発生場所の分布を示している。最大負荷荷重 $L_{\max}$ が索強度 F_0 の90%の場合である。ナイロン索においてはフェアリーダ部における切断が全体の81%を占めている。また、ナイロンテールロープ付きワイヤーロープにおいてはフェアリーダ部では33%、スプライス部で67%と、スプライス部での切断頻度が高くなっている。テールロープ付きワイヤーロープの場合は、繰り返し荷重による索の伸縮はほとんどテールロープ部において起こる。したがって、フェアリーダ部における索の運動が減少し、その結果、索強度の低下が少なくなったものと推察できる。

つぎに、フェアリーダ部において、索強度の低下が著しいナイロン索について詳細に解析してみる。

図3 フェアリーダ部での索の挙動

図4 切断発生場所の分布

図5 係止点別切断発生場所

図6 最大負荷荷重別切断発生場所

図5は係止点と切断発生場所の関係を示したものである。最大負荷荷重 $L_{\max}$ が索強度 F_0 の90%の場合で、横軸は係止点を、縦軸は切断件数を示している。フェアリーダ部の切断についてみると、右下がりの傾向にあることがわかる。すなわち、フェアリーダ部において索のなす角度 θ が小さいほど、当該部分での切断の発生頻度が高くなることが考えられる。

図6は最大負荷荷重 $L_{\max}$ が切断発生場所に及ぼす影響を示したものである。横軸には索強度 F_0 に対する最大負荷荷重 $L_{\max}$ の割合を、縦軸には切断発生件数の割合を示す。最大負荷荷重 $L_{\max}$ が小さくなると、全てフェアリーダ部に切断していることがわかる。つまり、最大負荷荷重の大小に関わらず、フェアリーダ部において索強度の低下が推察される。

3.3 切断に至る状況

3.3.1 ナイロンエイトロープの場合

図7はナイロンエイトロープの張力と伸びの変化の時系列の例を示している。図中、実線は張力、点線は索の伸びの変化を表している。

索は緊張と弛緩を繰り返すうち、まず、索表面が毛羽立つ。そして、①の状態においては三味線の弦をつま弾くような音と同時に、ヤーンが2、3本まとまって切断する。その後さらに緊張と弛緩を繰り返すうち、②において①より大きな音を立てストランド1本が切断する。③の状態に近づくにつれ、ヤーンの切断が頻繁に発生し、不意の破裂音とともに索が一気に切断する。

ナイロン索の場合の切断荷重はいずれの場合も最大負荷荷重 $L_{\max}$ より低い値となっており、繰り返し荷重をかけることで索強度 F_0 以下の荷重にても索が切断することが観察された。

索はフェアリーダとの接触部分でなく、わずかに引張側に寄ったところで切断することが観察された。また、切断後の索の挙動についてであるが、図8に示すとおり、引張側切断片は移動チャックの方へ直線的に、係止側切断片は、係止点を中心とした円弧を描きながら収縮した。船上の係留作業においては、索の延長線上に作業者が位置するのは避けるべきであるといわれているが、本実験から、索の外側においても、索に足を払われる危険性のあることが観察されたので、この点についても留意する必要がある。

3.3.2 ワイヤロープの場合

図9はワイヤロープの張力と伸びの変化の時系列の例を示したものである。

ワイヤロープの場合も緊張と弛緩を繰り返すうち、三味線の弦をつま弾くよ

図7 張力と伸びの変化(a)

図8 フェアリーダ部での切断後の索挙動

図9 張力と伸びの変化(b)

うな音を発するが、表面的な異状は現れない。さらに緊張と弛緩を加えると、スプライス部分においてストランド間の間隔が広がるとともに、布をハサミにて切るような鈍い切断音が断続的に聞こえる。続いて、①においてひときわ大きな切断音と同時に芯索が切断し、②において不意の破裂音とともに、火花を散らし、スプライス部分にて切断となる。

本実験においては、ワイヤーロープの場合、最大負荷荷重 L_{max} として索強度 F_0 の90%を負荷しただけであるが、切断が発生しており、ナイロン索と同様、繰り返し荷重をかけることで、索強度 F_0 より低荷重にて切断することがわかった。

切断後の索の挙動は、図10に示すように、引張側スプライス部で切断した場合、テールロープのみが引張側へ直線的に、ワイヤーロープはフェアリーダ部までは直線的に、その後は係止点を中心とする円弧を描き収縮した。

3.4 周期と繰り返し回数

図11は繰り返し周期が切断までの繰り返し回数に及ぼす影響を示したものである。図中、横軸は繰り返し周期 T 秒、縦軸は切断までの繰り返し回数の平均 N_{avg} を表している。図から明かなように、右下がりの傾向があり、繰り返し周期が長くなると、切断までの所要繰り返し回数が少なくなると推察される。

3.5 係止点の影響

図12は係止点と切断荷重の関係を示したものである。図中、横軸は係止点を、縦軸は切断荷重 L_b の索強度 F_0 に対する割合を示している。係止点と切断荷重の間には顕著な傾向は見い出せない。本実験においては、係止点とフェアリーダとの距離が短く、すべての場合において同一長さとならなかったため、その影響がでた可能性がある。最大負荷荷重 L_{max} を索強度 F_0 の90%から50%までとしたが、いずれの場合においても索が切断しており、フェアリーダを介して繰り返し荷重をかけることにより、索の強度が大幅に低下することが確認できた。

図13は係止点別にみた切断までの繰り返し回数 N_b を表したものである。係止点 P_7 はほぼ直線引張りに近いものである。切断までの繰り返し回数は他の係止点に比べ、際だって多いことがわかる。つまり、フェアリーダにおける索のなす角度

図10 スプライス部での切断後の索挙動

図11 繰り返し周期と切断までの繰り返し回数

図12 係止点と切断荷重

図13 係止点と切断までの繰り返し回数

θ が小さいほど、切断までの所要繰返し回数は少なく、それだけ早く索が切断することとなる。

4. まとめ

船舶係留時の係留索切断に関して、繰返し荷重が、フェアリーダを介して導かれる索の強度に及ぼす影響を調査した。本研究により得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) フェアリーダが円滑に回転する場合であっても、繰返し荷重をかけることにより、索強度よりも低い荷重にて切断する。索強度の50%の最大負荷荷重においても、繰返し負荷することにより切断が起こる。
- (2) フェアリーダ部における索のなす角度が小さいほど、切断までの所要繰返し回数は少ない。
- (3) ナイロン索の切断は、フェアリーダ部において多く発生する。この場合、ファイバー、ヤーン、ストランドの順に徐々に切断する。
- (4) テールロープ付きワイヤーロープの切断は、ほとんどスプライス部で発生し、芯索から徐々に切断する。
- (5) 繰返し周期が長くなると、切断までの繰返し回数が少なくなる傾向がある。

本研究においては、実験装置の性能上、短周期における検討はできなかったが、船舶係留時の係留索切断の防止対策を検討する上での貴重な基礎資料を得ることができた。今後は、切断の瞬間の状況に対する定量的な解析とともに、理論解析を進め、さらに、実船における係留索の張力測定方法等も検討していきたい。

本研究にあたり、海技大学校 鹿沼洋司助手には、供試索の端末加工等ご援助ご助言を賜った。ここに謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) B.W. Wilson : The Threshold of Surge Damage for Moored Ships, Proc. Instn. Civ. Engs., 38 Sept. 1967 (a).
- (2) 久保雅義・山本一誠・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, 第94号, 1996. 3.
- (3) 鶴田三郎：合成繊維索の引張り疲労強度について, 日本航海学論文集第73号, 1985.
- (4) 鶴田三郎：合成繊維索の摩耗特性について, 日本航海学会論文集第75号.
- (5) J.F. Fory : Rope Abrasion Tester, OCIMF, 82. 3.
- (6) J.F. Fory : Rope Abrasion Tester, OCIMF, 83. 3.

質 疑 応 答

鶴田三郎 (東京商船大学) : 索強度よりもずいぶん低い荷重においても実験を行ったようですが、切断しなかった場合の残存強度等を計測されたでしょうか。

山本一誠 : 本実験は全て供試索が切断するまでを計測したものです。