船舶係留時の係留索切断に関する基礎的研究

久保 雅義*・山本 一誠**・浅木 健司**

Basic Research on Breakage of Mooring Ropes on Ship Mooring

Masayoshi KUBO, Kazusei YAMAMOTO and Kenji ASAKI

Abstract

There seems to be end of the number of breakage of mooring ropes on ship mooring. In ports facing to the open sea, they are occurring under severe weather conditions.

In the past, strength of mooring ropes themselves was researched, however, the strength was not investigated under the condition where the ropes were moored on the ship.

In this paper, the strength of mooring ropes was examined through a roller in order to estimate the fair leader effect.

The obtained results are summarized as follows:

- (1) Breakage of mooring ropes occurs near a fair leader, even if the turn of the roller is smooth.
- (2) Through the fair leader, rope of one side pulling is easier to break than that of two sides pulling.
- (3) In the case of one side pulling, the rope tends to break at the part where the rope of pulling side contacts at first with the roller. In the case of two sides, the rope tends to break near the eye sprice.

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、単に索自体の切断のみに留まり、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。船舶に備えるべき係留索の本数及びそれらの径に関しては、船舶設備規程に定められているが、岸壁のボラードから本船ウィンチまたはビットに至る係留索の導き方及びその所要本数等（以下、「係留索の取り方」という）については、岸壁と本船の係留設備の状況により様々で、一義的には規定できない。

索の強度に関しては、これまでに様々な報告例があるが^{(2)~(15)}、そのほとんどは、索単体における索強度に関するものであり、係留索の取り方が索強度に及ぼす影響に関してはあまり報告されていない。したがって、係留索の取り方については、今日においても、現場の経験に依存するところが大きい。

そこで本研究では、係留索切断事故防止の観点から、係留索の取り方が索強度に与える影響について調査した。

まず、アンケートにより切断事故の概要を把握し、さらに、種々の条件下における係留時の索張力を実船及び索具引張試験機により計測した。その結果若干の知見が得られたので報告する。

* 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 芦屋市西藏町12-24）

2. 係留索の切断に関するアンケート調査

係留索の切断事故の現状を把握するため、表1の項目についてアンケート調査を行った。調査対象者は、航海士または甲板部員として実務経験を有する海技大学校航海科学学生29名で、29名全員から回答を得ることができた。

表2は調査結果を示したものである。29名中23名が係留索切断の経験を有しており、これは全体の約80%に相当する。調査件数が少ないことを考慮しても、係留索の切断事故が頻繁に発生していることが分かる。切断箇所については、岸壁のボラード付近と回答した者が3件、本船と岸壁ボラード間が5件、フェアリーダ付近が14件、不明が1件となっており、フェアリーダ近傍での切断が最も多く、従来からいわれている、屈曲部での索強度の低下を裏付ける結果となっている。また、切断した索の材質については、鋼索か合成繊維索かのみを調査したのだが、全員が合成繊維索と回答している。

表3は、切断時の諸条件を示したものである。表中「オートテンション使用」とはオートテンションウィンチの使用の有無を、「回転部具合」とはフェアリーダの回転が滑らかであるか否かを示す。「索と回転部」は係留索がフェアリーダのローラ部分のみに接している場合は「ローラ上」を、ローラ以外の部分にも接している場合は「ローラ外」を示す。また「切断時の様子」については索がヤーンから徐々に切断する場合は「徐」とし、瞬時に切断する場合は「瞬」とした。表3から明らかなように、オートテンションウィンチの使用時にも切断事故は発生しており、ウィンチにより張力の制御を行っていても、切断する場合があることを意味する。係留索がフェアリーダのローラ部分のみに接している場合で、さらにローラの回転が円滑であっても、係留索が切断している。また切断時の状況は、一定でなく、徐々にヤーンから切断していく場合と、瞬間的に一気に切断する場合とがあることがわかった。切断した係留索の種類はブレストライン、スプリングラインが比較的多く、フェアリーダ部における係留索の導き方及び係留索のなす角が、切断の一因であると推察される。

3. 実験装置及び実験方法

係留索の切断事故は、フェアリーダ付近で多くが発生しており、さらにフェアリーダが円滑に回転する場合であっても切断したというアンケート結果を踏まえ、フェアリーダ前後における索張力を実船及び索具引張試験機において計測した。

荷重を加えたときの索の伸びが、フェアリーダ前後の索張力に及ぼす影響も調査するため、いずれの実験にも伸びの異なる2種類の索を供試索として用いた。表4に供試索の諸元を示す。供試索はいずれも同一種類については同一コイルから抽出したものである。実験に先立ち、供試索の索強度を索具引張試験機により測定した。表中「索強度(実測平均)」がその結果である。製造会社のそれについても、「索強度(公称値)」として記載した。なお、本報において「索強度」とは、一般にいわれている索本来の引張り強度のことである。

索張力の計測には、市販のロードセルを用いた。表5は、その検査成績表である。図1に示すように供

表1 アンケート項目

切断経験の有無	無元
切断した索の諸箇所	諸元
切断箇所	諸元
船体主要目及びコンディション	諸元
係留索の取り方	諸元
係留索の象徴	諸元
切断原因	諸元

表2 係留索切断経験と切断場所

切断の経験			
有			無
23			6
切断場所	岸壁	3	6
	船と岸壁の間	5	
	フェアリーダ部	14	
	わからない	1	

表3 係留索切断時の諸条件

事例	総トン数	オートテンション使用		回転部具合		索と回転部		切断時の様子		切断した係留索の種類							
		有	無	滑	堅	ローラ上	ローラ外	徐	瞬	H L	F B	F S	S L	A B	A S	T L	
A	350		○		○		○		○	○					○		
B	498	○		○		○		○			○						
C	499			○		○			○			○				○	
D	699	○		○		○			○			○					
E	699		○	○		○		○			○	○					
F	900		○		○	○		○		○							
G	2500		○	○		○			○			○			○		
H	4990		○		○		○										○
I	5300		○	○		○		○		○							
J	10000		○		○	○		○						○	○		
K	15000		○	○		○			○		○	○			○		
L	32000	○			○												○
M	40000	○		○		○		○				○					
N	100000		○	○		○		○					○	○			
合 計		4	9	9	5	11	2	7	5	3	3	6	2	5	1	2	

H L : HEAD LINE F B : FORWARD BREAST LINE F S : FORWARD SPRING
S L : STERN LINE A B : AFT BREAST LINE A S : AFT SPRING
T L : TUG LINE

試索端末にはアイスパライスを施し、ロードセルとはシャックルにより接続した。

3.1 フェアリーダ前後における索張力の計測（実験Ⅰ）

係留索の取り方、取り分けフェアリーダ部において係留索のなす角度が、索張力に及ぼす影響等を調査するため、実船において計測を行った。供試船は海技大学校練習船「海技丸」で、表6に同船の要目を示す。図2(a)~(c)に示すように、供試船の後部甲板より岸壁ボラードへ供試索を送り、フェアリーダをはさんで岸壁側及び船内側にロードセルを取り付け、索張力を計測した。また、船の動揺の影響を除き、緊張と弛緩を強制的に加えた場合の索の張力の変動をみるため、図2(d)~(e)のように、甲板上ビットと係船ウィンチの間に供試索を張り合わせた実験も行った。表8に実験Ⅰのコンディションを示す。大型タンカーの場合、係留索にはワイヤーロープ⁽¹⁶⁾を用い、その末端にはテールロープとしてワイヤーロープより伸びの大きい化繊索を接続する場合があるが、本研究においても、この状況を模擬した実験を行った。ただし、実験の利便性からワイヤーロープの代わりに同様に伸びの小さいケブラー索を使用した。なお、本研究において、テールロープの長さはケブラー索の長さの3分の1とした。

3.2 回転部を介する場合の索の切断実験（実験Ⅱ）

実船において、索を切断することは、安全性の点から問題があるので、回転部を介する場合の切断時の索強度を索具引張試験機を用いて計測した。本実験の場合、ブロックのシーブ部をフェアリーダのローラ部分の代用とした。供試索には表8に示すとおり、マニラ索、クレモナ索、ケブラー索を用いた。図3に示すように、索の一方を固定し、もう一方を引張る場合(a)と索の両方を引張る場合(b)の2通りについて実験を行い、いずれの場合もシーブ部の前後における張力を計測した。ケブラー索については、実験Ⅰと同様にその長さの3分の1のテールロープを接続した。

4. 実験結果と考察

4.1 フェアリーダ前後における索張力の変動

図4から図7に実験Ⅰにおける張力の変動の時系列を示す。実線は図2に示す計測点Aの張力を、破線は同じく計測点Bでの張力を表している。図4から明らかなように、索張力は一本の索のすべての場所において同一となるのではなく、フェアリーダの前後ではほとんどの場合異なる。しかし、図5に示すように、ケブラー索の場合は、フェアリーダの前後ではほとんど同一に近い値を表す。

索が緊張と弛緩を繰り返すと、張力もそれにともない変動する。緊張時の張力についてみると、船の動揺により変動した場合には岸壁側の張力が大きくなり、ウィンチ操作により強制的に張力を変動させた場合にはウィンチ側の張力が大きくなること図4および図6からわかる。すなわち、緊張時においては、荷重を加える側の張力が大きくなることわかる。このことは、係船ウィンチにて巻き込み操作している場合は船内側の張力が大きく、張り

表4 供試索の諸元

種 類	マニラ	クレモナ	ケブラー	ナイロン	ハイゼックス
紐 名	マニラ麻	外024ビニロン	ネオアラミド	ナイロン	ポリエチレン
構 成	三つ打	三つ打	無縫合わせ	八つ打	八つ打
直 径mm	14	12	6	20	14
索強度（実測平均）tonf	0.95	1.28	1.65	—	1.70
索強度（公称値）tonf	1.47	1.5	2.0	7.7	2.0
切 断 時 伸 び%	15	25	4.5	30	30

表5 ロードセルの検査成績表

項 目	計測点A用	計測点B用
容 量(tonf)	1	1
温 度(°C)	23	23
湿 度(%RH)	50	50
定格出力(Strain)	2995×10^{-6}	2997×10^{-6}
非直線性(%RO)	0.03	0.05
ヒステリシス(%RO)	0.03	0.03
こう正係数(tonf/ 1.0×10^{-6} Strain)	0.0003339	0.0003337
入 力 抵 抗(Ω)	348.8	349.4
出 力 抵 抗(Ω)	350.5	350.4

図1 ロードセルの取り付け方

表6 供試船要目

Loa	38.0m
Lpp	34.0m
B	6.8m
D	3.3m
d	2.2m
G. T.	157GT

表7 実験Ⅰのコンディション

係 止 点	岸壁ボラード		甲板上ビット	
	ナイロン 20mmφ	ケブラー 6mmφ	ナイロン 20mmφ	ケブラー 6mmφ
テールロープ	—	ナイロン 20mmφ	—	ナイロン 20mmφ
フェアリーダに おいて供試索の なす角度 θ	160°	160°	130°	130°
	115°	115°	120°	120°
	45°	45°	40°	40°
フェアリーダ	200mmφ			

合わせ後は岸壁側の張力が大きくなることを意味する。

緊張と弛緩を繰り返す場合の、フェアリーダ前後における索張力は、常に一方が卓越する場合と、緊張と弛緩の途中で卓越する側が逆転する場合とがある。

図8はフェアリーダ部において係留索のなす角度が張力に及ぼす影響を示したものである。前述の通り、索張力は常時変動しているが、ここでは緊張時のみについて示した。図中○印はナイロン索のみの場合で、×印はケブラー索にテールロープとしてナイロン索を接続した場合である。実線は岸壁ボラードに、破線は甲板上ビットに係止した場合を示す。 F_{SA} および F_{SB} はそれぞれ緊張時における計測点A及び計測点Bでの張力を示す。図から岸壁側張力は船内側張力に比べ、平均で約15%程度大きくなっているが、それが30%以上にも及ぶ場合があり、係留索を張り合わせる場合は、この点にも考慮すべきである。また、角度の影響についてみると若干異なる傾向を示すものもあるが、総体的には、フェアリーダ部において係留索のなす角が大きくなるとその前後での張力差が小さくなる傾向にあることがわかる。フェアリーダ前後における張力の差は、ロープ径及びロープの伸びが大きいほど、さらにフェアリーダ部において係留索のなす角が小さいほど、広がる傾向がある。すなわち、ロープ径、ロープの伸び及び係留索のなす角は、フェアリーダに対する係留索の接触面積に影響を及ぼすファクターであり、接触面積が大きくなるほど、張力差も大きくなることが推察される。

4.2 回転部を介する索強度

表9は実験IIの結果を示したものである。表中、 F_0 は著者らが実験した索強度の平均値を、 F_A 及び F_B はそれぞれ切断時における計測点A及び計測点Bにおける張力を示す。 R_A 及び R_B は F_A 及び F_B の F_0 に対する割合である。表から明らかなように、索の両方を同時に引張る場合ではほぼその索本来の強度にて切断しているが、一方を引張る場合には強度が約10%から20%低下している。すなわち、今回実験を行ったロープ径とシーブ径の比の範囲においては、両方に等しい荷重がかかる場合、屈曲部における索強度の低下は余り問題にならないことが推察できる。現場においては、バイト係留がこのことに相当すると考えられるが、その場合でも索を本船に引き込む際にはフェアリーダを介して一方を引張っている状態となるので、その部分での強度の低下を考慮しなければならない。

ここで、シーブ表面におけるロープの擦れについて考える。図9は、一方または両方を引張る場合の索のシーブ表面における移動量を示したものである。点S1と点S2はシーブ表面上同じ位置である。歪 ϵ は、シーブ部および直線部において同一であるとする。索の一方のみを引張る場合、点S0は点S0'に、点S1は点S1'に移動するが、点S0の移動はシーブを回転することになるので、点S1は $\Delta\ell_{S1}$ でと $\Delta\ell_{S0}$ の

図2 供試索の取り方

表8 実験IIのコンディション

引 張 り 方	索 の 一 方	索 の 両 方
供 試 索	マ ニ ラ 14mm	マニラ14mmφ
	ク レ モ ナ 12mmφ	クレモナ12mmφ
主供試索：ケブラー 6mmφ テールロープとして	ク レ モ ナ 12mmφ
	ハイゼックス 14mmφ	
ブ ロ ッ ク	60mmφ

図3 供試索の切断方法

図4 フェアリーダ前後における張力の変動—I

図5 フェアリーダ前後における張力の変動—II

図6 フェアリーダ前後における張力の変動—III

図7 フェアリーダ前後における張力の変動—IV

差に相当する量だけ、シーブ表面を擦ることになる。
よって、点S1がシーブ表面を擦る量は、

$$\Delta l_{s1} - \Delta l_{s0} = \varepsilon (l_{s1} - l_{s0})$$

$$= \varepsilon l_s \quad (1)$$

となる。つぎに、両方を引張る場合について考えると、この場合には両端に等しい荷重を加えるので、シーブは回転しないので、点S2はシーブ表面を擦って、点S2'に移動する。

$$\Delta l_{s2} = \varepsilon l_{s2} \quad (2)$$

となる。 $l_{s2} < l_s$ であるから、

$$\Delta l_{s1} - \Delta l_{s0} > \Delta l_{s2} \quad (3)$$

であり、一方を引張る場合のほうがシーブ表面を擦る量が大きくなるため、これが索強度低下の一因と推察する。シーブ表面において索の接触面積が大きい場合、シーブ前後の張力差が大きくなることを述べたが、擦れる面積も増大するため、索の強度低下を引き起こすものと考えられる。

切断箇所は図10に示すように、一方のみを引張る場合は、引張る側とシーブの接点付近(図中X-X)で、両方引張る場合はシーブ部分では切断せず、どちらか一方の索端のスプライス部分であった。— ※: ブロック径60mmφ

図8 係留索のなす角度とフェアリーダ前後の張力の比

表9 切断時の張力(一方を引張る場合と両方引張る場合)

供試索 (F ₀ kgf)	一方を引張る場合					両方を引張る場合				
	F _A kgf	R _A %	F _B kgf	R _B %	$\frac{F_A}{F_B}$	F _A kgf	R _A %	F _B kgf	R _B %	$\frac{F_A}{F_B}$
マニラ (950) 14mmφ	736.5	77.6	656.6	69.2	1.12	966.4	101.8	998	105.1	0.97
	786.9	82.9	688.5	72.5	1.14	986.8	103.9	996.3	104.9	1.00
	708	74.6	628.8	66.2	1.13	932	98.2	924.1	97.3	1.00
	790.2	83.2	704	74.2	1.12	916.5	96.5	920	96.9	1.00
	788.5	83.1	696.6	73.4	1.13					
平均	762	80.3	674.9	71.1	1.13	950.4	100.1	959.6	101.1	1.00
クルセ (1280) 12mmφ	1097	85.8	962.9	75.3	1.14	1177	92.0	1202	94.0	0.98
	1220	95.4	1094	85.5	1.12	1206	94.3	1251	97.8	0.96
	1152	90.1	1014	79.3	1.14	1224	95.7	1293	101.1	0.95
	1078	84.3	961.3	75.1	1.12	1081	84.5	1140	89.1	0.95
	1124	87.9	988.2	77.3	1.14	1292	101.0	1341	104.8	0.96
平均	1134	88.7	1004.1	78.5	1.13	1196	93.5	1245.4	97.4	0.96

図10 回転部を通るとき切断場所

図9 シープ表面における索の擦れ

表10 テールロープ使用時の切断張力

供試索 (F ₀ kgf)	F _A kgf	R _A %	F _B kgf	R _B %	$\frac{F_A}{F_B}$
ケブラー6mmφ	1130	88.3	992.5	77.6	1.14
(1650kgf)	1213	94.8	1083	84.7	1.12
◎クレモナ12mmφ	1246	97.4	1107	86.5	1.13
(1280kgf)	1153	90.1	1045	81.7	1.10
ブロック60mmφ	1284	100.4	1123	87.8	1.14
平均	1205	94.2	1070.1	83.7	1.13
◎ケブラー6mmφ	1581	96.0	1322	80.3	1.20
(1650kgf)	1436	87.2	1205	73.2	1.19
ハイベックス14mmφ	1344	81.6	1125	68.3	1.19
(1700kgf)					
ブロック230mmφ					
平均	1454	88.3	1217	73.9	1.19

※：◎は切断した索

方のみを引張る場合はその部分に荷重が集中するためであると考え。表10はテールロープ使用時の切断張力を示したものである。テールロープとしてケブラー索よりも低強度のクレモナ索を使用した場合、クレモナ索本来の強度に近い荷重でテールロープが切断した。テールロープにケブラー索と同程度の強度をもつ索を使用した場合には、ケブラー索のほう

が先に切断した。すなわち、テールロープを使用する場合には、メインのロープの切断を防止するために、メインのロープより強度の小さいものを使用すればテールロープが先に切断する。

5. 結 語

船舶係留時の係留索切断に関する基礎事項を調査するために、アンケートによりその概要を調査し、実船及び索具引張試験機を使用して、索の張力変動及び破断張力を計測した。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) 係留索の切断事故はフェアリーダ付近で発生することが多く、フェアリーダが円滑に回転する場合であっても発生する。
- (2) フェアリーダのような回転部を通る索に荷重をかける場合、索の両端を同時に引張るよりも一端を固定し、もう一方のみを引張るときの方が、強度が約10から20%低下する。
- (3) 回転部を通る索の切断箇所は、一方のみを引張った場合は、引張る側と回転部との接点付近であり、両端を同時に引張った場合は、いずれかの索端のスプライス部分である。
- (4) 索張力は一本の索のすべての場所において同一となるのではなく、フェアリーダの前後でほとんどの場合異なる。

- (5) 索が緊張と弛緩を繰り返すと、フェアリーダ前後における索張力もそれにともない変動するが、緊張時の張力は岸壁側の方が大きくなる傾向がある。
- (6) フェアリーダ前後における索張力の差は、フェアリーダにおいて索の接触面積が大きくなるほど広がる傾向があり、30%以上の差が生ずる場合もある。
- (7) 緊張と弛緩を繰り返す場合の、フェアリーダ前後における索張力は、常に一方が卓越する場合と、緊張と弛緩の途中で卓越する側が逆転する場合とがある。

本研究においては、実験装置の性能上、実験時の安全性の制約もあり、詳細な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しても定量的な解析を加えると共に、理論解析も進めていきたい。

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。海技大学校練習船「海技丸」乗組員の皆様には、実験時ご協力を賜った。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. C'w. Engs., 38 Sept. 1967(a).
- (2) 西原義久: ロープの接ぎ方とその強さについて (第一報), 日本航海学会誌第17号, 1957
- (3) 小池正衛: ポリエステル繊維ロープの係船索としての適性について, 船舶技術研究所第1回講演集, 1963
- (4) 小池正衛: ポリプロピレン繊維索の船舶用索としての適性について, 船舶技術研究所第2回講演集, 1963
- (5) 西原義久: 繊維索の曝露及び海水浸漬試験について, 日本航海学会誌第36号, 1967
- (6) 片上圭四郎: スプライスを施した索の強度変化について, 日本航海学会論文集第41号, 1969
- (7) 小山悟郎: 各種繊維ロープの耐候性について, 東京商船大学学術講演論文集第38回, 1978
- (8) 池上ほか: 帆走ギヤとして使用する化繊ロープの摩耗と強度について, 航海訓練所調査研究時報第53号, 1978
- (9) 田根一美: 合成繊維索とマニラロープの耐用標準について, 日本航海学会論文集第60号, 1979
- (10) 田中義久: 係留材料と強度, 日本造船学会誌第670号, 1985
- (11) 鶴田三郎: 合成繊維索の引張り疲労強度について, 日本航海学会誌第73号, 1985
- (12) 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, 1986
- (13) 中部繊維ロープ工業協同組合知識集約化委員会
: 合成繊維索の強度の経年変化, 中部繊維ロープ工業協同組合昭和52年度共同試験報告書, 1990
- (14) 橋本一明: 併用使用時における索の強度について, 東京商船大学学術講演論文集第39号, 1991
- (15) 小山悟郎: 屋外暴露された合成繊維索の強度について, 日本航海学会論文集第92号, 1995
- (16) 東京タンカー株式会社海務部編: ロープ類の知識, 成山堂書店, 1989

質 疑 応 答

鶴田三郎 (東京商船大学): アンケート結果から得られた、切断メカニズムの分類をお教え下さい。

山本一誠: 今回行ったアンケートは切断の概要を調査したもので、切断メカニズムについての詳細は得られておりませんが、ローラ部の回転が円滑であっても切断していること、および、主にブレストラインおよびスプリングが切断していること等から、フェアリーダ部において係留索のなす角が切断に関係しているものと考え、実験を行いました。

沖 剛志 (シバタ工業株式会社): 引張試験機を用いた切断試験は、静的引張試験なので、切断荷重付近の荷重で切断が生じたのであって、実際の船舶では動的な荷重の繰り返しによりフェアリーダ付近の索材に疲労が蓄積されるため、低い荷重で切断が生じると考えて良いのでしょうか。

山本一誠: 今回の実験は、実験装置の性能上の制約があり、静的な荷重について実験を行いました。フェアリーダ部において10~20%の低下が確認されました。聞き取り調査でも、かなり低いと思われる荷重でも切断したことが報告されていますので、ご指摘の通り、実際には動的荷重が加わるので、さらに低い荷重で切断するものと考えます。