

## ケブラーロープの端末部の強度

肥山, 央  
九州大学応用力学研究所 : 助手

古賀, 洋治  
九州大学応用力学研究所 : 技官

高雄, 善裕  
九州大学応用力学研究所 : 助教授

<https://doi.org/10.15017/4743896>

---

出版情報 : 應用力學研究所所報. 68, pp.235-246, 1989-10. 九州大学応用力学研究所  
バージョン :  
権利関係 :



## ケブラーロープの端末部の強度

肥 山 央\* 古 賀 洋 治†  
高 雄 善 裕‡

### 概 要

ロープ端末継手の疲労試験を、特に高圧海水環境下で行なうには、実験室レベルの長さ1 m以下の疲労試験用供試体を製作しなければならない。繊維ロープにおける強度上のネックの一つは端末部である。まず、組紐構造ケブラー29ロープを使用した端末処理法について詳述する。次に、この端末処理によるケブラーロープの静的試験と大気中での疲労試験を行なう。これにより、今回の短いロープにたいする端末処理法が妥当であったことを、有限要素法による数値的検討とともに示す。

**Key words :** Joints, Rope, Composite Materials, Terminal, Strength

### 1. 序

ロープは、古くから船舶用途あるいは橋梁構造部材として、一方向荷重のみを受け持つ部分に使われてきた。その材料は鋼材あるいは植物性繊維であった。しかしながら、特に、近年における海洋土木事業発展により、ロープの性能や性質についての要求は厳しくなり<sup>1)2)</sup>、先端合成繊維やその複合材料を使用する傾向が見られる。

海底油田掘削用構造物などの係留<sup>1)</sup>には、主に、安価で比較的特性のよくわかった鋼材が用いられてきた。水深500 m以下の係留には鎖が、それ以上の係留では中間にワイヤーロープを配し軽量化を計ったシステムが使われている。水深1000 m以上の係留になると、通常のやり方では構造物側の係留線が立ち上がり、構造物の位置決め精度が悪くなる。このため、極端に長い索を使うか、動的な位置維持制御機構を備える必要がある。なお、水深150 m以下では鎖の自重で係留線に適当な緩みが生じ、係留線の有効剛性が低下し、索の張力が軽減される。また、鋼材の弱点である腐食の問題に対しては構造安全率を大きく取るか、または定期的な係留索の交換で対処している。

しかし、深海で大型海洋構造物を半永久的に位置精度よく係留する場合、鋼製ロープの使用は不利になる。つまり、半永久的な係留では、設計荷重(係数)が大きく、鋼製ロープによる係留システムの使

\* 九州大学助手，応用力学研究所

† 文部技官，九州大学応用力学研究所

‡ 九州大学助教授，応用力学研究所

用可能水深は小さくなる。これを回避するため、係留索の海中重量の軽量化を計らなければならない。鋼製ロープの中間に浮体を取り付けたり、ゴムを芯材に使用する方法<sup>9)</sup>もある。しかし、深海での半永久係留の場合、巨大浮体とそれを取り付けた係留システムの敷設に多大の費用を要する。このため、1970年にその生産技術が確立し、海中重量の軽量化を飛躍的に改善するケブラー繊維のロープが目ざされてきた。ケブラー (Kevlar) は米国デュボン社が開発した有機繊維の商品名である。高剛性タイプのケブラー49と高伸性タイプのケブラー29がある。表1<sup>9)</sup>に示す様に、鋼製ワイヤーロープと比較すると同一強度を有するケブラーの重量は空中で1/4、海中で1/10になる。剛性と破断伸びはワイヤーロープにほぼ等しい。それまでのナイロンやポリエステルなどの繊維ロープでは、剛性が低いため構造物の正確な位置決めが困難であった。また、破断歪が50%にも達し破断時に2次の災害を招く危険もあった。ケブラーロープではワイヤーロープと比べると海中重量が極端に軽減するばかりでなく、疲労特性と耐食性も向上する<sup>9)</sup>。橋梁についても海洋構造物と同じ状況がある。20—30年後の予定であるが、スペインとモロッコ両国の間のジブラルタル海峡(最短距離15 km)に吊橋をかける計画がある<sup>2)</sup>。水深300 m程度のところに基礎塔を建て、世界最大となる明石海峡大橋(1998年完成予定)級の2000 m程度のスパンを10個連ねる案の他に、水深350 m位置に両大陸から2本の基礎塔を建て3100 m, 8400 m, 4700 mの3個のスパンを吊り下げる案がある。前者ではワイヤーロープを使用できるが、後者では空中重量の関係から複合材料ロープしか使用できない。この場合の繊維には剛性に関係からカーボンが検討されている。カーボン複合材の価格が今の半分になると経済的にも有利な構造物となる。現在、スパンのひな型製作が行なわれ、ロープについても、現存の吊橋のワイヤーロープ数本を複合材ロープで置き換えるプログラムが計画され、その端末処理も問題点の一つになっている。

ケブラーの実用化が進んでいるのは<sup>9)</sup>、陸上では電線補強のための電気機械ケーブル、レーダ用維持ケーブル<sup>6)</sup>、橋梁架設時ケーブル、電線架設時パイロットロープ、海洋関係では科学装置係留ライン<sup>7)</sup>、ヨットライン<sup>8)</sup>などの荷重レベルの低い用途のものが多い。

ケブラーロープの通常の静的強度や疲労強度は、単一繊維、繊維束、撚り繊維、樹脂含浸繊維束などについて実験的<sup>9)</sup>あるいは理論的<sup>10)</sup>に解析されてきた。しかし、大型海洋構造物を深海に係留する時に問題となる、高圧海中での特性の研究は不十分である。環境試験や静荷重試験でのデータはあるが<sup>11)</sup>、高圧海中での疲労という複合条件下の研究は見られない。また、実用上問題となってくる端末継手部分の解析は、実用化の進んでいるものが耐力限界をそれほど厳密に求めていないこともあり、あまり行なわれていない。限られた形状のものにつきメーカーサイドで幾つか試みられている<sup>12)</sup>程度で、著者の知る

表1 各種ロープの性能対比(直径12 mm)

項 目	ケブラ29ロープ	ワイヤロープ	ナイロンロープ
引張強さ (kg)	6000	6680	2950
破断時の伸び率 (%)	4.5	3.4	51.0
弾性係数 (kg/mm <sup>2</sup> )	2000~5000	4500	500以下
単位質量 (g/m)	112	478	88.5

かぎり通常の文献には見られない。

一般に、ロープの強度試験にはかなり長いロープが必要である。しかし、ロープ端末処理に注目しその疲労強度試験を、特に高圧海水環境下で行なうには、実験室レベルの長さ1m以下の疲労試験用供試体を製作しなければならない。鋼製や従来の合成繊維ロープにおいては塑性変形<sup>13)</sup>が起こるが、ケブラーロープでは塑性変形は認められず、破断ひずみは小さい。このため、供試体端末を処理する際には、原糸に作用する張力が均一になるよう、より一層の積極的手法が必要である。

本論文では、高圧海中における疲労試験が可能な供試体を製作する方法について、その端末処理を中心に述べる。また、この端末処理によるケブラーロープの静的試験と大気中での疲労試験を行なう。これにより、今回の短いロープにたいする端末処理法が妥当であったことを、有限要素法による数値的検討とともに示す。

ロープの形態には(a)ポリエステルやエポキシ樹脂を含浸したもの、(b)ワイヤーロープ構造のもの、(c)組紐構造のものがある。(a)では樹脂を硬化させて使用するもので、強度があがり<sup>10)</sup>繊維相互間および外部からの摩擦にも強い構造になるが、曲げに弱く操作性が他の構造に比べて劣る。(b)では軸荷重でロープが捻れる。(c)では捻れは起きないが、繊維間の摩擦が懸念される。(b)と(c)はいずれも曲がり易く操作性が良い。次の章で示すように、これらのロープにたいし大略4種類の端末処理法がある。特別な理由はないが、試験中にロープの回転が少なく操作し易い組紐構造を試験用ロープに選択する。端末処理形式として、ロープと形状が変わらず端末強度の大きい金属ソケット樹脂接着法を使用する。

## 2. ケブラーロープと端末処理

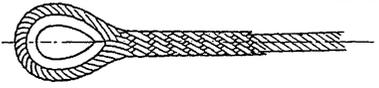
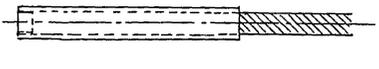
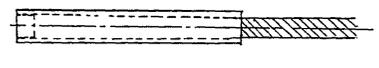
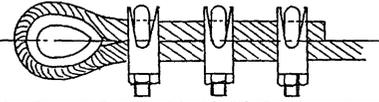
### 2.1. ロープ

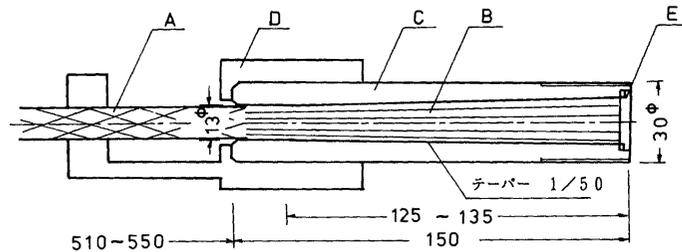
実験に使用したロープはケブラー29ロープである。その公称直径は $\phi 12$  mmで、ケブラー本体の直径は $\phi 9.7$  mmである。内部構造は16本の繊維束(ストランド)を2組ずつ8個に分けてあみあげた、 $8 \times 2$ の非自転性の組紐である。これをポリエステル繊維で被覆している。型録上の引張強さは端末を後述のアイスブライス加工した時、6000 kgfとなっている。

### 2.2. 端末処理

一般に行なわれているロープの端末処理方法を表2<sup>4)</sup>に示す。アイスブライス法を基準にしたメーカーサイドの強度が中央に与えられている。パイブロック法とワイヤクリップ法は加工は簡単であるが強度は小さい。荷重レベルの大きい大型海洋構造物の深海係留には不相当と思われる。金属ソケット樹脂接着法の強度はアイスブライス法の0.8以上となっているが、接着加工方法によってはアイスブライス法と同等の強度が得られることもある。またロープ部分とそれ程変らない形状をしており、ハンドリングがアイスブライス法に比べ比較的によいと思われる。今回は第一報として金属ソケット樹脂接着法で端末を処理し海水高圧中での疲労試験用ロープ供試体を作成する。

表2 ロープの端末処理方法と強度

加工法	強度比較	形状
1. アイスブライス加工法。 被覆材を除きロープのストランド間にストランドを差し込む。	1.0	
2. 金属ソケット樹脂接着法。 被覆材を取除きエポキシ樹脂で金属ソケットの内部に接着。	0.8以上	
3. パイプロック法。 被覆材はそのまま金属パイプに通しそのパイプをかしめる。	0.6~0.7	
4. ワイヤクリップ法。 被覆材はそのままロープを折曲げワイヤクリップで止める。	0.5~0.6	



- A ロープ
- B ロープ繊維、樹脂
- C ソケット
- D ロープ固定兼芯出材
- E パッキン、蓋

図1 ロープ端末部

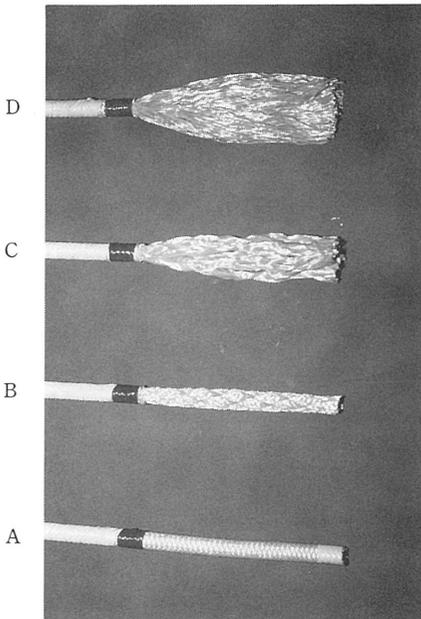
### 2.3. ソケット

ソケットを図1 Cに示す。φ30×150 mmの丸鋼にφ13 mmの穴をあけ、これをテーパ1/50のリーマーで仕上げている。なおロープ側の一部には平行部分を残している。このテーパ部分でロープの引張力を保持している。右端部Eは接着用樹脂の流出を防ぐためOリングを介して蓋をする。右外側部に試験機に取付けるためのネジを設けている。

### 2.4. ロープのソケットへの装着

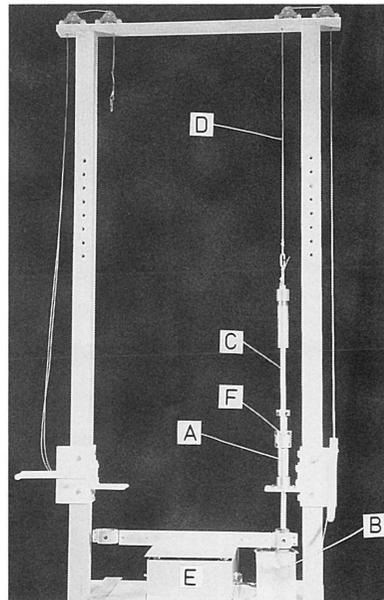
1本の供試体についてソケットを2回に分けて両端に装着する。1回目のソケットの接着について述べる。ソケットに入る部分の被覆材を取り除き、各ストランドを20~25本程度に分けて解きほぐす(写

真1)。これをアセトンで洗浄する。洗浄しないものも準備したが、両者に強度上差異は認められなかった。エポキシ樹脂をアミン系硬化剤と混ぜ、写真2に示す装置の試験管(B)に注ぐ。試験管を氷水を満したピーカーに入れ樹脂の温度を約10°Cに保ち、粘度をあげる。ロープのほぐした部分を約5分間この樹脂の中に入れる。このとき振動台(E)を使い樹脂を入れた試験管を上下振動させ、樹脂内の空気を外に出すと共に、樹脂を各繊維になじませる。その後、ワイヤーロープ(D)を使用して樹脂を充分含んだロープ部分をソケット内に引込む。ソケットのテーパーにより余分な樹脂がソケット端よりしぼり出される。ロープ側からもわずかにしぼり出されてくる。粘度が小さいと、樹脂の含みが不充分になり、硬化後のロッドとソケット間に空隙が発生する。また粘度が小さい時には、引上げ用ワイヤロープにかかる荷重が小さく、ソケット近傍でのロープの各ストランド間の張力が不均一となる。この結果、樹脂硬化接着後、樹脂を含浸している側と、していない側の両方で、ストランドの張り具合に不整が生じる。含浸していない側のストランドの張りの不整は、2回目のソケット固定過程である程度除くことができる。含浸している側の不整はロープに2~3 tonの負荷が作用した時に顕在化してくると考えられる。後の数値解析でわかる様に、ソケット入口近傍の樹脂硬化部に半径方向の引張応力が発生する。このため2~3 tonの負荷がかかると、この部分は縦方向に鋭い音を出してわずかに割れると思われる。割れた部



A : ロープ  
B : 被覆材を取る  
C : ストランドに分ける  
D : ストランドを細分する

写真1 ロープ



A : ソケット B : エポキシ系樹脂  
C : ロープ D : ワイヤロープ  
E : 振動台 F : ロープ固定兼芯出具

写真2 ロープとソケットの装着

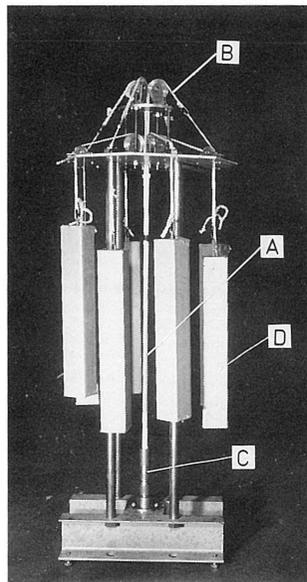
分の繊維は不整であるので、原糸、あるいはストランド間の張力に差違が生じ、最終破壊が低い荷重で起きる。次に図1のロープ固定兼芯出材(D)を使用しロープをソケットに固定する。樹脂の流出をパッキン材(E)で防止し、この部分を下にして、約35°Cで5時間程度硬化させる。

次にもう一方のソケットの接着を行う。ソケット部より先の被覆を取り除き、編みであるストランドを解きほぐし写真3に示すように各ストランド毎に同一張力(2ストランドに4.5 kgf 計36 kgf)を与える。更に各ストランドの張り具合を一様にするために、ロープの全長に沿って横方向にパイプレータで軽くたたき振動をさせる。これにより、各ストランドの交点での摩擦に起因するストランドのたるみをなくすることができる。被覆材の端部を糸とテープで固定する。その後の処理は1回目と同様である。

最後に供試体の後硬化を行なう。供試体を恒温槽に入れ、約53°Cで約5時間保持し端末処理は完了する。ソケット内でケブラー29とエポキシ樹脂は棒複合材、ケブラーロッドとなっている。供試体のソケット間の長さは510~550 mmとした。

### 3. 強度試験

本論文における強度試験は電気油圧サーボ疲労試験機 EHF-EA10 (島津製作所製) を使用し、大気中で行った。



A:ロープ B:ストランド  
C:ソケット D:重錘

写真3 ストランドの不整の修正

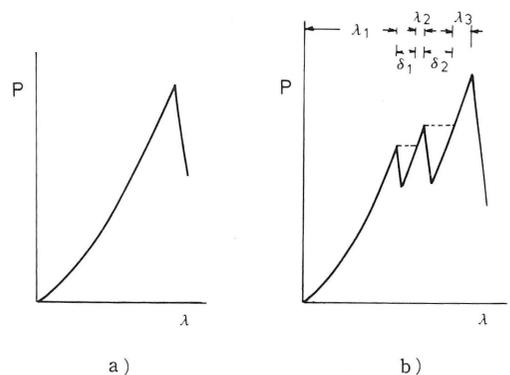


図2 P-λ線図

### 3.1. 静的引張試験

静的引張試験における荷重-伸び、 $P$ - $\lambda$ 曲線の例を図2に示す。図2 a)はソケットとケブラーロード間に滑りがなく破断した例であり、図2 b)ではこの間に滑りが生じたものの、ソケットのテーパーによりケブラーロードが圧縮の垂直抗力を受け、摩擦が発生し軸力を回復し破断に至っている。今回はこの例が非常に多く見られた。この滑りには樹脂中に残存する気泡による圧縮力の低下、ソケットとケブラーロードの接着不足、および後節の応力解析からわかる界面を開く垂直応力等が関連している。

ところで、著者は界面のせん断破壊→滑り→垂直抗力の発生→摩擦力→ロープ軸力の上昇というこのメカニズムこそが本継手の本質的な荷重支持機構と考えている。

$\delta_1$  と  $\delta_2$  は滑り量を示している。最終破断時のロープの伸びは各  $\lambda_i$  の和で、この場合  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$  となる。表3に試験片破断時の荷重と伸びをまとめている。最大引張力は  $P_{max} = 5900 \sim 6650$  kgf で平均値は 6340 kgf である。表1に示したアイスブライス時の型録強度 6000 kgf より大きい。

また同じケブラーロープでメーカーに供試体の製作を依頼した(ソケットの形状が多少異なる)。その最大引張力は  $P_{max} = 5600 \sim 6000$  kgf で平均値は 5770 kgf となった。2.4.項に述べた方法で製作したロープの結果が約1割程度強くなっている。

表3の伸びは破断時のソケット間の全伸び値である。( )内にソケットとケブラーロード間の滑りを除いたロープのみの伸びを示している。表1の型録の値とほぼ同じになっている。

ロープの破断例を写真4に示す。破断位置はいずれもロープとソケットの接合部境界の±10 mm 以内である。後節の応力解析によって得られる応力集中部に対応している。樹脂部分で破断した破面の平坦なものや、一部のストランドが先に切れ、残る繊維がぬけ出たものがある。

### 3.2. 疲労試験

まず、供試体に静的引張荷重 5500 kgf を加えてソケットとロード界面を滑らせ、界面に十分な垂直抗

表3 静的引張試験結果

		破断荷重 (kgf)	破断時の伸び (%)	備考
自作	1	6400	6.5 (5.8)	滑り小2回
	2	6530	8.6 (5.0)	滑り小4回大1回
	3	5950	8.7 (5.1)	滑り大3回
	4	6480	6.6 (4.4)	滑り大2回
	5	6650	6.0 (4.1)	滑り大2回
	6	6150	6.4 (3.9)	滑り大2回
	7	6550	6.6 (3.9)	滑り小1回大1回
	8	5900	5.1 (4.6)	滑り小1回大1回
	9	6250	6.1 (3.9)	滑り大2回
	平均	6340	(4.6)	
メーカー	T1	5600	6.7 (4.5)	滑り小5回大1回
	T2	6000	4.5 (4.4)	滑り小1回
	T3	5700	4.5 (4.5)	
	平均	5770	(4.5)	

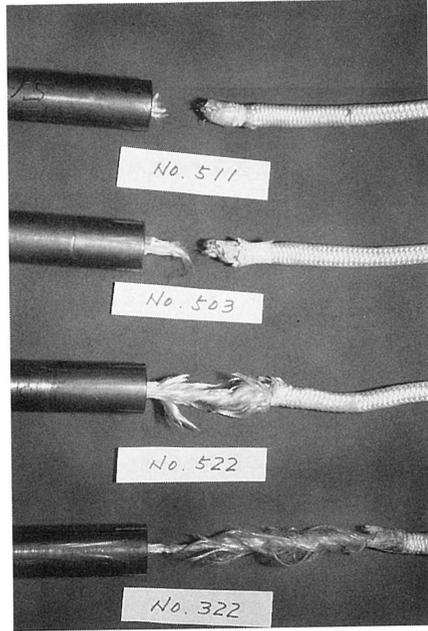


写真4 ロープの破断例

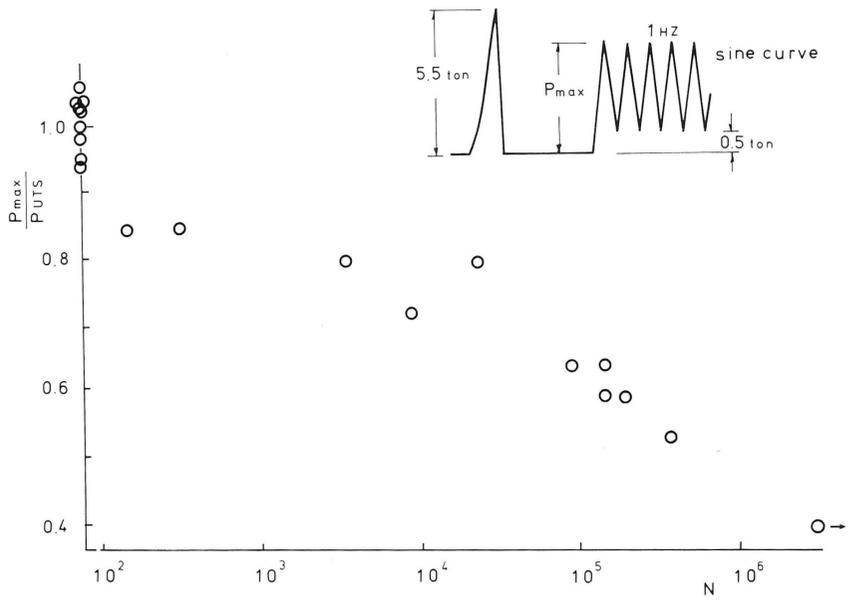


図3  $P_{max}/PUTS-N$  曲線

力と摩擦力を発生させる。除荷後、負荷速度 1 Hz の正弦波形疲労荷重を加える。最低荷重 500 kgf を一定として最大荷重  $P_{max}$  をパラメータにとる。 $P_{max}/P_{UTS}$ - $N$  曲線を図 3 に示している。縦軸上の値は自作の供試体の静的引張試験のデータである。最大引張荷重  $P_{UTS}$  はこれらの平均値である。 $P_{max}/P_{UTS} = 0.8$  付近に凸部があるが他の部分はほぼ直線的に変化している、このような疲労挙動の場合、安全率を 2 と考えると設計最大荷重に対して  $N = 5 \times 10^5$ 、安全率を 3 と考えると  $3 \times 10^6$  回程度の疲労に耐えることがわかった。

4. 有限要素法による応力解析

応用力学研究所に設置された M360-AP 電算機（富士通製）に、有限要素法による構造解析コード MARC K2 を適用し、軸対称問題の弾性計算を行った。図 4 に分割図を示す。上側 2 行の要素がソケットに対応し、下側の要素 5 行がロープ、およびロッドに対応する。ソケット右端を固定支持し、ロープの左端に一様分布荷重  $\sigma_0 (= 1)$  を加えている。軸対称の中心線は下側の要素線である。等方性ソケットと異方性（面内等方性）ロッド 1 の材料定数を表 4<sup>14)</sup> に示す。ロープ部の材料定数はロッドとは異なり、軸と垂直方向 ( $T$ ) のヤング率  $E_T$  はほぼ 0 とされる。しかし、ロープとロッドの境界が明確でないので、今回はロープ部にもロッドの材料定数を適用する。ロッド材料定数の異方性の効果を調べるため、 $E_T$  を  $E_L = 76 \text{ GPa}$  にとったロッド 3、中間の値をとったロッド 2 についても解析した。その他の材料定数をロッド 2、3 の項に示している。

図 4 で影をつけた部分の変位と主応力を図 5 に示す。点線が無負荷での要素図である。(a) の異方性を考慮した結果では、コーナーにおける応力の乱れが容易に収束しないことが、等方性ロッド (c) の変

表 4 材料定数

Steel	$E_s$	210.0 GPa	$\nu_s$	0.3		
-----						
ROd-1						
Kevlar (60%)	$E_L$	76.0 GPa	$\nu_{LT}$	0.34	$G_{LT}$	2.3 GPa
/Epoxy	$E_T$	5.5	$\nu_{TT}$	0.4		
Rod-2						
Transverse	$E_L$	76.0	$\nu_{LT}$	0.34	$G_{LT}$	14.9
Isotropy	$E_T$	40.0	$\nu_{TT}$	0.38		
Rod-3	$E$	76.0	$\nu$	0.34		

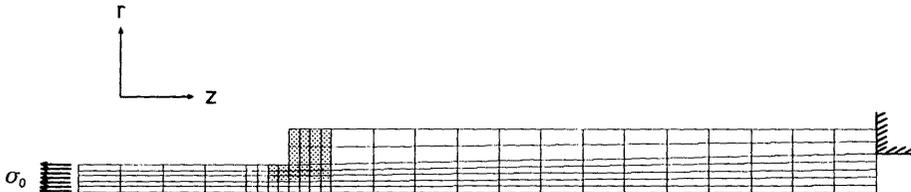


図 4 分割および境界条件

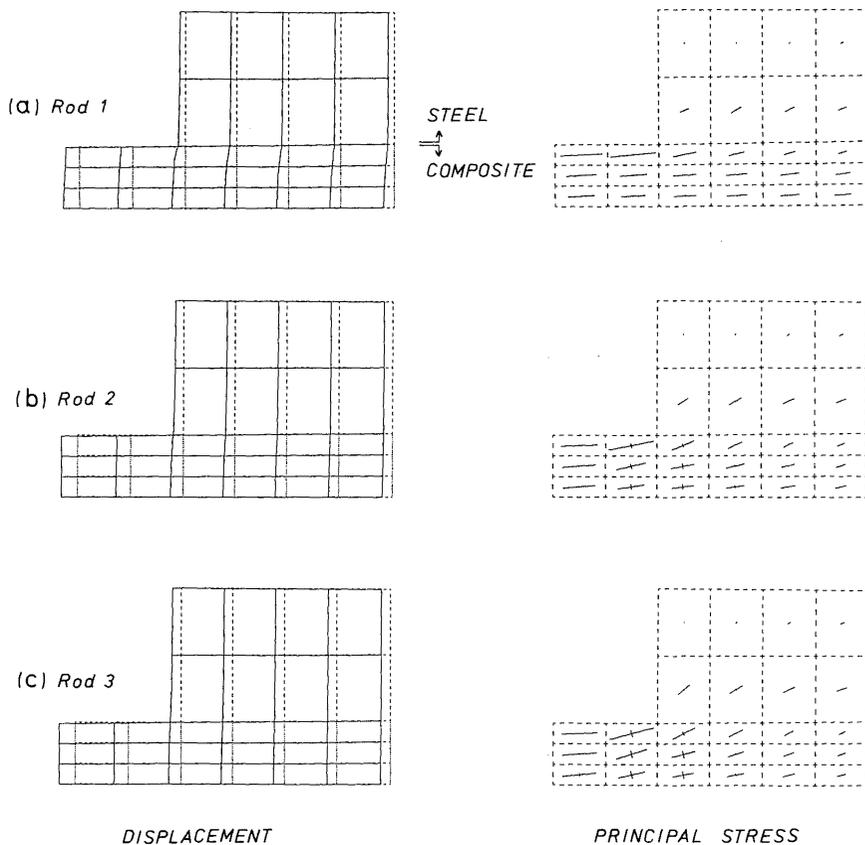


図5 変位および主応力線図

位と比較するとよくわかる。右に主応力の方向と値を示しているが全て引張である。異方性ロッド (a) では界面に発生する垂直引張応力が等方性ロッド (c) と比べかなり小さいことがわかる。静的引張試験において、ソケットとロッドの滑りが見られるのは、最終破断荷重の半分程度のかかなり高い荷重レベルであった。引張応力であることがソケットとロッドの剝離と相互の滑りを、また、かなり低い界面垂直引張であることが高い荷重レベルでの滑りを定性的に説明している。

今後、ロッドとロープの境界の影響、ロープの材料定数の影響、ロッドとソケットの接着引張強度を考慮した定量的解析、ロッドとソケットの摩擦係数、ロッドとソケットの滑りが応力分布に与える効果など、この継手機構には解析すべき基本的問題が多い。

## 5. 結 論

以上の結果より次のことがわかった。

1. 高圧海水中での疲労試験用の比較的短いケブラーロープ供試体（金属ソケット樹脂接着法端末処

理)を製作した。大気中における引張試験の結果、一般に強度上、最も有利と考えられているアイスマライス加工法とほぼ同等の強度を得ることができた。

2. 最低荷重を 500 kgf に保ち、最高荷重を 5500~2500 kgf の範囲にとり、一定荷重条件下の引張疲労試験を行った。その結果、最大引張強度に対して、安全率を 2 にとる設計では  $5 \times 10^5$  程度、安全率を 3 では  $2 \times 10^6$  程度の疲労に耐えることがわかった。
3. 数値解析の結果、ケブラーロープに金属ソケット樹脂接着法を適用すると、界面に比較的小さい垂直引張応力が作用することがわかった。これが比較的高い荷重レベルのソケットとケブラーロープの滑りを説明している。

### 謝 辞

東京製網繊維ロープ株式会社の沢藤、水本、伊藤の各氏には、端末処理用エポキシ樹脂の選定に貴重な助言をいただき、その購入に便宜を計っていただいた。応用力学研究所弾性学部門の福田重久助手には論文作成に協力いただいた。記して感謝申しあげたい。

### 参 考 文 献

- 1) Hervey, D., "Study Look at Synthetic Fiber Rope for Deep Water Rig Mooring", Sea Technology, 29, 1988, pp. 10-14, 16.
- 2) Meier, U. R. S., "Future Use of Advanced Composite in Bridge Construction Engineering", Fibre Reinforced Composites 1986, IMechE, 1986, pp. 217-223.
- 3) Nobukawa, H, Ogawa, Y and Matsuoka, S., "Development of Deep Water Line for OTEC System", Proc. 5th. Int. Offshore Mech. Arch. Eng. Symp., 2, 1986, pp. 636-640.
- 4) "エースライン (『ケブラー』製ロープ), 種類・構造・規格", 東京製網繊維ロープ株式会社, 東京.
- 5) 本田健二, "海洋資材としての繊維ロープ", 繊維学会誌, 40, 1984, pp. 362-365.
- 6) Scala, E., "High-Strength Filaments for Cables and Lines", Analysis of the Test Methods for High Modulus Fibers and Composites, ASTM STP 521, Whitney, J. M. (ed.), ASTM, 1973, pp. 390-409.
- 7) 田才福造 他 11 名, "総合ブイシステムによる海洋計測法の開発研究 (第 1 報)", 応用力学研究所々報, 52 号, 1980, pp. 29-98.
- 8) 大橋且典, "ダブルハンドレース用ヨット・ベンガル二世号", 強化プラスチック, 33, 1989, pp. 126-128.
- 9) Yang, H. H., "Aramid Fiber", Composite Materials Series, Vol. 2: Fibre Reinforcements for Composite Materials, Bunsell, A. R. (ed.), Elsevier, 1988, pp. 249-329.
- 10) Zweben, C., Smith, W. S. and Wardle, M. W., "Test Methods for Fiber Tensile Strength, Composite Flexural Modulus, and Properties of Fabric-Reinforced Laminates", Composite Materials: Testing and Design, ASTM STP 674, Tsai, S. W. (ed.), ASTM, 1979, pp. 228-262.
- 11) 高橋清, 桜田泰弘, 武田展雄, "AE 法を用いた高強度合成繊維束の破断試験 その 1—海洋環境の計測とシミュレーションに関する開発研究 第 6 報—", 応用力学研究所々報, 64 号, 1987, pp. 61-71.

- 12) “アラミド繊維ケブラー技術資料：ロープ・ケーブルへの応用について”，東レ株式会社ケブラー事業部，東京，1985.
- 13) Cabriel, K., “On the Fatigue Strength of Wires in Spiral Ropes”, J. Eng. Resource Tech., Trans. ASME, 109, 1985, pp. 107-112.
- 14) Hull, D., “An Introduction to Composite Materials”, Cambridge University Press, 1981.

(平成元年6月6日 受理)