スロット形光ファイバテープケーブルにおける スロットロッドの変形挙動の解析*

阿部 博之^{*1}, 楠見 嘉宏^{*2}, 坂 真澄^{*1}

Deformation of Slot Rods in a Slot-Type Optical Fiber Cable

Hiroyuki ABÉ, Yoshihiro KUSUMI, and Masumi SAKA

By applying Love's equilibrium equations, the forces and bending moments in slot rods of an optical fiber cable have been determined. The deformation of the slot rod subjected to the forces and bending moments just derived has been analyzed by means of the three-dimensional finite element method. The results for the cable with 600 optical fibers showed that the deformation of the slot was so small that the clearance between the fiber tapes and the lateral wall of the slot was sufficient when the cable was subjected to the extentional strain of 0.1 % and the curvature due to bending was not larger than 1/1100 1/mm.

Key Words: Structural Analysis, Slot Rod, Love's Equilibrium Equation, Slot, Polyethylene Circular Cylinder, Tensile Force, Bending Moment, Shear Force, Three-Dimensional Finite Element Method

1. 緒 言

現在, 低損失かつ大容量という伝送特性を有する光ファイバを, 加入者線路に導入するための準備が盛んに行われている。電話局と企業, 家庭などの各加入者端末を結ぶ加入者線路では, 各加入者への回線としてそれぞれ1本の光ファイバを用いる。そのため, 1本のケーブル内に, 100, 200, 600本というように多数の光ファイバを集合させなければならない。このようなケーブルの多心高密度化の要求にこたえ, 最近スロット形600心光ファイバテープケーブルが開発されている⁽¹⁾。

その構造を図1に示す。図1において, 100心スロットユニットは, テンションメンバを有するポリエチレン円柱のまわりに, それ自身にねじれを生じないようにらせん状に巻かれている。同ユニットの詳細を図2に示す。同ユニットは, 5本のらせん状の溝(スロット)を有するスロットロッド〔図2(a)〕のスロット内に, 5心光ファイバテープ〔図2(b)〕を4枚積層し

図1 スロット形600心光ファイバテープケーブルの構造

(a) スロットロッド (b) 5心光ファイバテープ断面

(c) スロットユニット断面

図2 スロットユニットの構造

* 平成元年3月18日 東北支部第24期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和63年7月8日。

^{*1} 正員, 東北大学工学部 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

^{*2} 准員, 三菱電機(株)中央研究所 (〒661 尼崎市塚口本町8-1)。

たものを挿入し、さらに図2(c)のようにプラスチックテープで押え巻きをしたものである。

ところで上記ケーブルの布設には、既設地下溝道などが利用される。これらは一般に道路に沿って設けられているため、曲がり角を有している。したがって布設時あるいは布設後に、ケーブルは引張力とともに曲げをも受けることになる。ケーブルに作用するこのような負荷のために、ケーブルの構成要素であるスロットロッドの変形は増大する。この変形が過大となり、光ファイバケーブルに側圧が作用する状態が起これると、光損失の急激な増加を招くことになる⁽²⁾。そのためケーブルに上記のような負荷が作用した場合のスロットロッドの変形挙動を正確に把握しておくことが必要となる。そこで本研究は、複雑な形状を有するスロットロッドの変形挙動の解析を行う。

さて、スロットロッドの変形挙動を解析するためには、まず複合構造体であるケーブル内でスロットロッドにいかなる力、モーメントが作用しているかを解明する必要がある。ところでこのような複合構造体内でらせん状に巻かれているロッドの力、モーメントを評価する方法として、ワイヤロープの分野で従来から用いられているものがある⁽³⁾⁽⁴⁾。この方法は、ロッドに関する Love の平衡方程式⁽⁵⁾に基づいている。ワイヤロープ内においては、らせん状に巻かれているロッド(ストランド)は、その軸方向に関して一定のねじれを生じている。

一方、光ファイバケーブル内のスロットロッドは、先に説明したように、ねじれが生じないように巻かれている。そのため上記ワイヤロープに関する評価法を適用することができない。そこで本研究では、ワイヤロープの評価法を修正、改善することにより、ねじれが生じないように巻かれているスロットロッドに作用する力、モーメントの評価を行う。

次に、得られた力、モーメントを用い、三次元有限要素法によりスロットロッドの変形解析を行う。これにより光ファイバケーブルに側圧を加える原因となるスロットの部分の変形挙動を明らかにする。

2. スロットロッドに作用する力、モーメント

2.1 スロットロッドの簡略モデル スロットロッドは実際には図3に示すような複雑な形状を有するが、本節では、簡略化のためにスロットロッドを、中心に半径 R_t の鋼線を有する円柱として扱う。同簡略モデルの半径については、以後の解析に必要となる次に示す三つの式において、それぞれ異なる値を用いる。それらの値を以下のようにして求める。

(1) スロットロッドにおける引張力と伸びひずみの関係式 簡略モデルが、実際のスロットロッドとほぼ同じ剛性を有するように、簡略モデル断面のポリエチレンの面積と、図3におけるポリエチレンの面積が等しくなるように円の半径 R_{st} を求める。

(2) スロットロッドにおける曲げモーメントと曲率の関係式 簡略モデルが、実際のスロットロッドとほぼ同じ曲げ剛性を有するように、簡略モデル断面のポリエチレン部分の断面二次モーメントと、図3におけるポリエチレン部分の断面二次モーメントが等しくなるように円の半径 R_{sm} を求める。

(3) スロットロッドの中心線のらせん半径を表す式 この場合は、スロットロッドの半径 R_s をそのまま用いる。

以後簡略モデルの半径として、スロットロッドの伸びひずみと引張力の関係を表す式には R_{st} を用い、曲率と曲げモーメントの関係を表す式には R_{sm} を、またスロットロッド中心線のらせん半径を表す式には R_s を用いるものとする。

なお本研究ではスロットロッドとポリエチレン円柱の間の摩擦は無視する。

2.2 スロットロッドの初期状態 真直なスロットロッドを半径 R_p なる円形断面をもつポリエチレン円柱のまわりに、 T_0 なる引張力をかけながら、スロットロッド自身にねじれを生じないように巻き付けただけの状態を初期状態と呼ぶことにする(図4)。初期状態のスロットロッドの中心線のらせん角を α 、らせん半径を $r(=R_s+R_p)$ とする。

図3 スロットロッド断面

図4 初期状態

引張力 T_0 はどの断面においても同一であることを考慮すると、初期状態のスロットロッドの中心線 S_0 に関して Love の平衡方程式⁽⁵⁾は次のように表される。

$$\frac{dN_0}{dS_0} + T_0 x'_0 + X_0 = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dN'_0}{dS_0} - T_0 x_0 + Y_0 = 0 \quad (2)$$

$$-N_0 x'_0 + N'_0 x_0 = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dG_0}{dS_0} - N'_0 = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dG'_0}{dS_0} + N_0 = 0 \quad (5)$$

$$-G_0 x'_0 + G'_0 x_0 = 0 \quad (6)$$

ここに N_0, N'_0 はせん断力, G_0, G'_0 は曲げモーメント, X_0, Y_0 は単位長さあたりの分布力, x_0, x'_0 は曲率を表し、未知量はこれらの8個である。なお二つの量の前者は x 軸, 後者は y 軸に関する成分であり、ここで x, y, z は z 軸をスロットロッドの軸線に接するように選んだ直角座標である。また添字 0 が付されているものは、初期状態に関するものであることを示す。ところで、スロットロッドの曲げ剛性を A_b とすると次式が成り立つ。

$$G_0 = A_b x_0 \quad (7)$$

$$G'_0 = A_b x'_0 \quad (8)$$

ここに A_b は近似として次式で表される。

$$A_b = \frac{\pi}{4} (R_t^4 E_t + R_{sm}^4 E_s) \quad (9)$$

ここに E_t, E_s はそれぞれスロットロッドの鋼線、ポリエチレンの縦弾性係数である。

いま角度変数として、スロットロッドの中心線がポリエチレン円柱のまわりをまわる角度 θ を導入する(図5)。また直角座標系 X, Y, Z を次のような絶対座標系として導入する。 Z 軸をポリエチレン円柱の中心線と一致させ、 $\theta=0$ のとき X_0 が X 軸の負の方向を向くように X 軸をとる。

スロットロッドに作用する接触力の大きさを F_0 とすると、 F_0 は S_0 に関して一定である。このとき、 X_0, Y_0 は F_0 を用いて次式で表される。

$$X_0 = F_0 \cos \theta \quad (10)$$

$$Y_0 = F_0 \sin \theta \quad (11)$$

式(7)~(11)を式(1)~(6)に代入して整理し、さらに、

$$\frac{d^2 G_0}{dS_0^2} = \frac{\cos^2 \alpha}{r^2} \frac{d^2 G_0}{d\theta^2} \quad (12)$$

などを用いて書き直すと、次の三つの式が得られる。

$$\frac{d^2 G_0}{d\theta^2} - B G_0 = -\frac{F_0 r^2}{\cos^2 \alpha} \sin \theta \quad (13)$$

$$\frac{d^2 G'_0}{d\theta^2} - B G'_0 = \frac{F_0 r^2}{\cos^2 \alpha} \cos \theta \quad (14)$$

$$\frac{d}{d\theta} (G_0^2 + G'^2_0) = 0 \quad (15)$$

ここに

$$B = \frac{T_0 r^2}{A_b \cos^2 \alpha} \quad (16)$$

ここで $\theta=0, \pi/2$ のところを考えると、境界条件として次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} G_0 &= 0 \quad (\theta=0) \\ G_0 &= -A_b \frac{\cos^2 \alpha}{r} \quad (\theta=\pi/2) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} G'_0 &= A_b \frac{\cos^2 \alpha}{r} \quad (\theta=0) \\ G'_0 &= 0 \quad (\theta=\pi/2) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式(13)~(15)を式(17)~(18)のもとで解くことにより、初期状態においてスロットロッド中心線に作用する力、モーメントを求めることができる。

2.3 ケーブルに引張力が作用する場合 初期状態にあるケーブルにおいて図6に示すようにテンションメンバとスロットロッドを一体として引張り、テンションメンバの軸方向に伸びひずみ ϵ_p を与えるものとする。

ケーブルに伸びひずみ ϵ_p が与えられたとき、スロットロッドに生じる引張力の変化量 ΔT_1 とスロットロッドの伸びひずみ ϵ_s の関係は近似的に次式で与えられる。

$$\Delta T_1 = \pi (R_t^2 E_t + R_{st}^2 E_s) \epsilon_s \quad (19)$$

またスロットロッドの中心線が描くらせん半径の変化

図5 角度変数 θ の導入

図6 引張力の作用するケーブル

量 Δr_1 は次式で表される。

$$\Delta r_1 = \{\nu_t R_t + \nu_s (R_s - R_t)\} \varepsilon_s + \nu_p R_p \varepsilon_p \quad \cdots (20)$$

ここに ν_t, ν_s はそれぞれスロットロッドの鋼線, ポリエチレンのポアソン比, ν_p はポリエチレン円柱のポアソン比である。またケーブルに引張力が作用する前後における幾何学的考察より次の二つの式が得られる⁽³⁾。

$$\varepsilon_p = \varepsilon_s + \Delta \alpha_1 \cot \alpha \quad \cdots (21)$$

$$\Delta \alpha_1 = \left(\frac{\Delta r_1}{r} + \varepsilon_s \right) \cot \alpha \quad \cdots (22)$$

ここに $\Delta \alpha_1$ はスロットロッド中心線のらせん角の変化量である。

式(19)～(22)より ΔT_1 は ε_p を用いて表される。この ΔT_1 を用いると、2・2節と同様にして、ケーブルに伸びひずみ ε_p が与えられたときに、スロットロッド中心線に作用する力、モーメントが求まる。なお通常 ($\varepsilon_p \leq 0.1\%$) においては、 $\Delta r_1, \Delta \alpha_1$ はそれぞれ r, α に比べて十分小さく、このとき曲げモーメントの変化量 $\Delta G_1, \Delta G'_1$, せん断力の変化量 $\Delta N_1, \Delta N'_1$ はそれぞれ G_0, G'_0, N_0, N'_0 に対して十分小さく無視できる。

2・4 ケーブルに曲げモーメントが作用する場合

初期状態にあるケーブルにおいて、2・3節と同様にテンションメンバとスロットロッドを一体として曲げ、図7のようにポリエチレン円柱の中心軸に X - Z 平面の一定の曲率 x_p を与えるものとする。このとき変形後のケーブルの各断面においてスロットロッドの引張力の変化量 ΔT_2 と釣り合う力は存在しない。すなわち

$$\Delta T_2 = 0 \quad \cdots (23)$$

である。

さらに、2・2節と同様に次式が成り立つ。

$$G_0 + \Delta G_2 = A_b (x_0 + \Delta x_2) \quad \cdots (24)$$

$$G'_0 + \Delta G'_2 = A_b (x'_0 + \Delta x'_2) \quad \cdots (25)$$

式(23)～(25)と、スロットロッドの周期性を考慮し、2・2節と同様にすると、ケーブルに x_p の曲率を与えられた後のスロットロッドに関する整理された平衡方程式として次の三つの式が得られる。なお、ケーブルに曲げモーメントを作用させることにより生じるスロ

ットロッドに働く力およびモーメントの変化量には、 Δ と添字 2 を付して表す。また S_2 は変形後のスロットロッドの中心線である。

$$\frac{d^2(G_0 + \Delta G_2)}{dS_2^2} - \frac{T_0}{A_b} (G_0 + \Delta G_2) - (X_0 + \Delta X_2) = 0 \quad \cdots (26)$$

$$\frac{d^2(G'_0 + \Delta G'_2)}{dS_2^2} - \frac{T_0}{A_b} (G'_0 + \Delta G'_2) + (Y_0 + \Delta Y_2) = 0 \quad \cdots (27)$$

$$\frac{d}{dS_2} \{ (G_0 + \Delta G_2)^2 + (G'_0 + \Delta G'_2)^2 \} = 0 \quad \cdots (28)$$

いま、問題を簡単にするため、図7のようにスロットロッドの一周期を対象とする。また図7にあるように角度変数 $\xi(\theta_b)$ を導入する。ここに θ_b は曲げ変形後のケーブル断面においてスロットロッド中心線がポリエチレン円柱のまわりをまわる角度で、初期状態での同断面における θ に対応する。

式(28)より、2・2節と同様に考えると曲げモーメントの大きさ G_b は θ_b によらず、次式により $\Delta G_2, \Delta G'_2$ と関係づけられる。

$$G_0 + \Delta G_2 = -G_b \sin \theta_b \quad \cdots (29)$$

$$G'_0 + \Delta G'_2 = G_b \cos \theta_b \quad \cdots (30)$$

G_b が求まれば、スロットロッドに作用する力、モーメントが決定できる。以下のようにして G_b を求める。

図7よりスロットロッドの中心線 S_2 が描く曲線は次式で表される。

$$X = r \cos \theta_b \cos \xi(\theta_b) - \frac{1}{x_p} \{1 - \cos \xi(\theta_b)\} \quad \cdots (31)$$

$$Y = r \sin \theta_b \quad \cdots (32)$$

$$Z = r \cos \theta_b \sin \xi(\theta_b) + \frac{1}{x_p} \sin \xi(\theta_b) \quad \cdots (33)$$

ここで

$$G_b = A_b x_b \quad \cdots (34)$$

なる曲率 x_b を考えると、 x_b は次式で表される。

$$(x_b)^2 = \left(\frac{d^2 X}{dS_2^2} \right)^2 + \left(\frac{d^2 Y}{dS_2^2} \right)^2 + \left(\frac{d^2 Z}{dS_2^2} \right)^2 \quad \cdots (35)$$

式(35)を用いて x_b を求めるためには、 $\xi(\theta_b)$ と θ_b の関係を明らかにしなければならない。式(31)～(33)より S_2 の微小長さ dS_2 は次式で表される。

$$dS_2 = \sqrt{r^2 + \left\{ B_2 \frac{d\xi(\theta_b)}{d\theta_b} \right\}^2} d\theta_b \quad \cdots (36)$$

ここに

$$B_2 = r \cos \theta_b + \frac{1}{x_p} \quad \cdots (37)$$

ケーブルの変形前後においてスロットロッドにかかる引張力の変化量は零であるから、 $dS_2 = dS_0$ である。したがって式(36)より

図7 曲げモーメントの作用するケーブル

$$\frac{d\xi(\theta_b)}{d\theta_b} = \frac{\sqrt{\left(\frac{r}{\cos \alpha} \frac{d\theta}{d\theta_b}\right)^2 - r^2}}{B_2} \dots (38)$$

ここで $dS_0 = (r/\cos \alpha) d\theta$ の関係を用いている。 θ と θ_b の関係がわかれば式(38)より $\xi(\theta_b)$ と θ_b の関係を求めることができる。

次に θ と θ_b の関係を次式で表す。

$$\theta = \theta_b + \sum_{n=1}^k C_n \sin n\theta_b \dots (39)$$

ここに $C_n(1, \dots, k)$ は未知定数である。式(39)を式(38)に代入し、さらに両辺を $\theta_b=0$ から 2π まで積分した式を求める。得られた積分方程式を満足し、かつ x_b が定数となるような $C_n(1, \dots, k)$ を最適化法により決定する。 C_n が求まれば、式(34)～(39)より G_b が求められる。ただし上記方法では、 $x_p > 1/1100 \text{ mm}^{-1}$ 、あるいは $k > 60$ となると計算精度が悪くなり有効な G_b を求めることが困難になる。例として、表1に示すスロット形600心光ファイバテープケーブルのスロットロッドに関するデータを用いたときの x_p と G_b の関係を図8に示す。

以上のように G_b が求まれば、スロットロッドに作用する力、モーメントを求めることができる。

3. スロットの変形解析

本章では、スロット形600心光ファイバテープケーブルを例として取り上げ、ケーブルに伸びひずみと同時に曲率が与えられたときのスロットロッドの変形について三次元有限要素解析を行う。使用する要素は八

表1 スロットロッドのデータ

A_b	0.084 Nm^2
α	84.28 deg
r	12.75 mm

図8 x_p と G_b の関係

節点アイソパラメトリック六面体要素である。このとき2章の計算を実行することにより、 $\theta = \theta_b = \pi$ においてスロットロッドに作用する力、モーメントが最大となるので、ここでは $\theta = \theta_b = \pi$ におけるスロットの変形に注目する。表2にスロット形600心光ファイバテープケーブルに関する種々の寸法および材料特性を示す。ここに p_1, p_2 はそれぞれスロットロッド、スロットのピッチである。 T_0 の値として 981 Nを用いる。

表2 スロット形600心光ファイバテープケーブルに関する種々の寸法・材料定数

Polyethylene Circular Cylinder	R_p	8.5 mm		
	v_p	0.46		
Slot Rod	p_1	800 mm	h	2.0 mm
	p_2	600 mm	E_s	294 MPa
	R_s	4.25 mm	E_t	176 GPa
	R_t	0.7 mm	v_s	0.46
	a_1	1.8 mm	v_t	0.30
	a_2	2.0 mm

図9 スロットロッドの要素分割
(節点数2106, 要素数1428)

図10 端面Aに作用させる引張力、曲げモーメント

表 3 種々の κ_p においてスロットロッドに作用する力, モーメント ($\varepsilon_p=0.1(\%)$)

κ_p	1/mm	1/1100	1/1300	1/1500	1/1700
$T_0 + \Delta T_1$	kN	1.262	1.262	1.262	1.262
$G_0 + \Delta G_2$	Nmm	0	0	0	0
$G_0' + \Delta G_2'$	Nmm	114.3	103.7	96.2	90.8
$N_0 + \Delta N_2$	N	0	0	0	0
$N_0' + \Delta N_2'$	N	1.51	1.28	1.12	1.03
$X_0 + \Delta X_1 + \Delta X_2$	N/mm	1.57	1.44	1.35	1.29
$Y_0 + \Delta Y_1 + \Delta Y_2$	N/mm	0	0	0	0

表 4 曲率 κ_p とスロットの最大変位量 ($\varepsilon_p=0.1(\%)$)

κ_p (1/mm)	η_1 Component of Displacement ($\times 10^{-2}$ mm)	η_2 Component of Displacement ($\times 10^{-2}$ mm)
1/1100	- 3.750	- 3.047
1/1300	- 3.638	- 2.980
1/1500	- 3.552	- 2.930
1/1700	- 3.492	- 2.895

図 11 肩部に接触力を受けるスロットロッド

またスロットロッドの要素分割を図 9 に示す。図 9 中において直角座標系 X, Y, Z は, Z 軸が無負荷のスロットロッドの中心軸に一致し, X, Y 軸が端面 B に存在するように定めた絶対座標系である。ここに端面 B は $\theta = \theta_0 = \pi$ に対応し, 変形の対称性を考慮して, 端面 B の Z 方向変位を拘束する。また端面 A に 2 章で得られる引張力, 曲げモーメント, せん断力を, また側面に単位長さあたりの分布力を与える。

上記の引張力, 曲げモーメントは, 図 10 に示すような応力分布を用いて端面 A に作用させる。これらの応力分布の合力, 合モーメントは, 上記の引張力, 曲げモーメントの値と同一である。またせん断力は, 端面 A の中心に作用させる。このように作用させた応力分布は, 実際の端面 A における応力分布と異なる。しかしながら, 図 9 に示した有限要素モデルの Z 軸方向長さをを用いると, 端面 B における変形に及ぼす, 端面 A における実際の応力分布との差異の影響が無視でき, 注目すべき端面 B における変形は, 実際の変形を表す。一方, 側面に作用させる単位長さあたりの分布

図 12 無負荷状態のスロットと光ファイバテープ

図 13 $\kappa_p = 1/1100, 1/1700 \text{ mm}^{-1}$ におけるスロットの変形 ($\varepsilon_p=0.1(\%)$)

力は, 式(40)⁽⁶⁾で与えられる幅 b [図 9 (b), (c)] の帯状領域に, その幅方向に関して一様な圧力として作用させる。なお圧力の大きさは, その単位長さあたりの合力が, 上記の分布力の合力の値と等しくなるように定める。

$$b = 2\sqrt{\frac{8(1-\nu^2)\rho_r P_n}{\pi E}} \dots\dots\dots (40)$$

ここに E , $\nu(=\nu_p=\nu_s)$ はそれぞれポリエチレンの縦弾性係数 (294 MPa), ポアソン比 (0.46) である。 P_n は上記の分布力の合力である。また ρ_r はスロットロッドの半径 R_s , ポリエチレン円柱の半径 R_p から式 (41) のように与えられる。

$$\frac{1}{\rho_r} = \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_p} \dots\dots\dots (41)$$

ところで、端面 B における変形は、端面 B におけるポリエチレン円柱へのスロットロッドの接触状態によって異なるが、計算の結果、図 11 のように接する場合にスロットの変形が最大となる。そこで図 11 のようにスロットロッドとポリエチレン円柱が接触する場合において、ケーブルに伸びひずみ $\epsilon_p=0.1\%$ を与えながら、曲率 x_p を $1/1\,100$, $1/1\,300$, $1/1\,500$, $1/1\,700\text{mm}^{-1}$ と変化させたときの、スロットの変形の違いを調べる。表 3 におおのの場合にスロットロッドに作用する力、モーメントを示す。また図 12 は、スロットロッドの無負荷状態におけるスロットと光ファイバケーブルの関係を示したものである。

計算により得られた各曲率に対するスロットの最大変位量を表 4 に、また $x_p=1/1\,100$, $1/1\,700\text{mm}^{-1}$ におけるスロットの変形形状を図 13 に示す。ここに η_1 , η_2 は、図 13 に示す直角座標系で、図 13 において実線は無負荷状態のスロットの形状、破線、一点鎖線はそれぞれ $x_p=1/1\,100$, $1/1\,700\text{mm}^{-1}$ の変形後のスロットの形状を表す。

以上の結果から、スロットロッドをケーブル化しさらに、ケーブルに上記程度の伸びひずみおよび曲率を与えても、スロットの変形は小さく、光ファイバケーブルとの間にはまだ十分な余裕があることがわかる。

4. 結 論

光ファイバケーブルの多心高密度化を目的として開発されたスロット形光ファイバケーブルにおいて、その構成要素であるスロットロッドの変形挙動を把握することは、ケーブルの信頼性設計において重要である。本研究は、従来明らかにされていないスロットロッドの変形挙動を明らかにすることを目的とした

ものである。

このためまずスロットロッドがケーブル化され (初期状態)、さらにそのケーブルが引張力、曲げモーメントによる変形を受ける際に、スロットロッドに作用する力、モーメントを求めた。このときスロットロッドの簡略モデルを導入し、初期状態においてポリエチレン円柱のまわりにらせん状に巻かれているスロットロッドにはねじれが生じていないことを考慮して、Love の平衡方程式を解いた。なおスロットロッドとポリエチレン円柱の間の摩擦は無視している。これにより得られたスロットロッドに作用する力、モーメントを用い、実際のスロット形 600 心光ファイバケーブルのスロットロッドの形状・寸法により三次元有限要素解析を行った。これによりスロットの変形を詳細に調べた。

得られた結果を要約すると、初期状態のケーブルに伸びひずみ $\epsilon_p=0.1\%$ を与え、さらに曲率 $x_p=1/1\,100$, $1/1\,300$, $1/1\,500$, $1/1\,700\text{mm}^{-1}$ を与えた場合、スロットの変位量は十分小さく、光ファイバケーブルに側圧が作用するには至らない。したがって、ケーブルは上記の変形量以上の変形をある程度与えられた状態においても使用が可能である。

最後に、本研究にあたり有益な討論をいただいた東北大学 林一夫助教授、村岡幹夫助手ならびに原稿の作成にあたり協力をいただいた庄子孝夫技官に感謝の意を表す。また本研究におけるスロット形 600 心光ファイバケーブルに関する詳細なデータは、NTT 伝送システム研究所主幹研究員 勝山豊氏によって記し、感謝の意を表す。

文 献

- (1) 保 莉・ほか 3 名, 電子通信学会技術研究報告, 85-208 (1985), 45.
- (2) 藪田, 東北大学学位論文, (1983).
- (3) Costello, G. A. and Phillips, J. W., *J. Eng. Mech. Div., ASCE*, 102-EM1 (1976), 171.
- (4) Costello, G. A., *J. Eng. Mech. Div., ASCE*, 103-EM1 (1977), 481.
- (5) Love, A. E. H., *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*, (1944), 381, Dover.
- (6) 仙波, 歯車, 3 (1956), 750, 日刊工業新聞社.