海底ケーブルのキンク現象の解析*

藪 田 哲 郎**
Tetsuro YABUTA

Key Words: Elastiay, Structural Analysis, Cable Kink Analysis

1. ま え が き

海底ケーブルのキンク現象は、ケーブル障害上重要な問題としてよく知られている⁽¹⁾。海底ケーブルは、抗張力体としてひねり線構造を採用しているので、張力が印加するとねじりトルクが発生し、波およびうねりの影響によって、張力が減じるとケーブルに輪が生ずる。その概略図を図 1 に示す。この輪に再び張力が作用すると、ケーブルの輪が小さくなり、キンクが発生し、ケーブルに損傷を与える。

このキンク現象については、従来あまり検討例はなく、ケーブルの機械特性とキンクの発生についての関係は、完全に明確化されていないのが現状である。従来の解析例としては、ケーブルがねじれトルクを受けて輪を形成した後、キンクになるか、また輪がほどけるかといった観点から力のつりあい条件を用いた解析例^{(2)~(5)}が報告されている。しかし、曲げがたくねじれやすいケーブルがキンクになりがたいといった定性的な結果が得られているのみで、この不安定現象を完全には説明するには至っていない。また、ケーブルにねじれトルクが加わった時に、輪が形成するか否かの現象は、非常にマクロ的な観点から、エネルギー法を適用した報告例⁽⁶⁾があるが、この現象についても完全には説明されていない。

著者らは、不安定現象解明の一般的な手法のエネルギー法を用いて検討を加えることにより、ねじれトルクによって形成された輪は、ケーブルの輪に残留するねじれが大きいほど、キンクが発生しやすいことを理論的に明らかにした⁽⁷⁾。本報告では、この検討結果を展

させ、エネルギー法による理論解析および実験面からの検討を加えることにより、ケーブルの輪の形成およびキンク発生の現象を、ケーブルのスラック（ケーブルのたるみ）の面から統一的に明らかにしている。

2. キンク発生のメカニズム

キンク現象の説明図を図 2 に示す。図 2 (a) に示すようにケーブルに張力が印加されて、ねじられたケーブルの状態から、張力が減じると図 2 (b) に示すよう

図 1 キンク形成の概略図

図 2 キンク発生のメカニズム

* 昭和 57 年 10 月 23 日 東北支部仙台台地方講演会において論文講演として講演，原稿受付 昭和 57 年 5 月 26 日。

** 正員，電信電話公社茨城電気通信研究所（〒319-11 茨城県東海村白方白根 162）。

に、ほぼら線曲線に変形を起し始める。ケーブルの
スラックが大きくなると、図2(b)の変形が大きくなり、
ら線曲線が回転を始めて図2(c)のケーブルの輪
が形成される。また、再度張力が印加されると、図2
(d)の状態に示すようにケーブルの輪の径が減少して
ゆき、キンクに結びつく。また図2(d)の過程で、あ
る条件下では、ケーブルの輪が解放する。

3. エネルギー法を用いた理論解析

キンク現象は、キンク発生のメカニズムに示すよう
にねじれひずみエネルギーから曲げひずみエネルギーへの
不安定現象を伴う移行であり、このような現象の解析
に有効なエネルギー法を用いて基本的な解析を進めた。
解析を進めるにあたって、図2に示す変形の全過程を
統一的に記述できるモデルは、三次元的な変形を扱う
非線形モデルとなり解析が困難なので(a)から(b)の
変形移行状態、(c)の輪が変形する状態および(e)の
キンクの輪が解放する場合に分けて検討を進めた。

3.1 初期のら線変形 図2の(a)から(b)の変
形に移行する場合について検討を加える。問題の簡略
化のために、次の仮定を用いて検討を進める。

- (1) ケーブルの変形はら線変形を仮定する。
- (2) ケーブルの変形は、大きなひずみの領域でも
弾性変形が成り立つと仮定する。
- (3) ケーブルに加わる張力および圧縮力によるケ
ーブルの伸びまたは圧縮ひずみは無視する。

解析に用いた座標系は、図3に示す円筒座標 (r, θ, z) を用いた。ケーブルの変形のら線近似を以下のように仮定する。

$$r = R \quad z = b\theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

この時、曲線の曲率 κ とねじれ率 ϕ は次式で与えられる。

$$\kappa = \frac{R}{R^2 + b^2}, \quad \phi = \frac{b}{R^2 + b^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ら線曲線の一周期の長さ (領域 $\theta [0, 2\pi]$ に対応)
を l とすると、ら線変形が小さい領域では $R/l \ll 1$ と
なるので、幾何学的関係から次式が成り立つ。

図3 検討に用いた座標系

$$b \approx \frac{l}{2\pi} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi R}{l} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(2)、(3)を用いて、曲率 κ とねじれ率 ϕ を整理
すると次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= \frac{(2\pi)^2 R}{l^2} \\ \phi &\approx \frac{2\pi}{l} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi R}{l} \right)^2 \right\} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ケーブルのねじれ τ は、式(4)を用いて次式で与え
られる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。ただし $\Delta\tau_0$ は式(4)に示すねじれ率 ϕ で
表せない初期ねじれである。

$$\tau = \Delta\tau_0 + \phi = \Delta\tau_0 + \frac{2\pi}{l} - \frac{\pi}{l} \left(\frac{2\pi R}{l} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(5)より、ケーブルの初期ねじれ τ_0 は次式で与
えられる。

$$\tau_0 = \lim_{R \rightarrow 0} \tau = \Delta\tau_0 + \frac{2\pi}{l} \quad \dots\dots\dots (6)$$

次に、ケーブルの変形の安定度を求めるために、ポ
テンシャルエネルギー U を求める。ケーブルの曲線の
一周期の長さ l に貯えられるねじれひずみエネルギー
 V_T および曲げひずみエネルギー V_B は次式で与えられ
る。

$$V_T = \int_0^l \frac{1}{2} GJ \tau^2 dS, \quad V_B = \int_0^l \frac{1}{2} EI \kappa^2 dS \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 GJ : ケーブルのねじり剛性、 EI : ケー
ブルの曲げ剛性である。

式(4)、(5)、(6)を用いて、式(7)を整理すると
次式となる。

$$\left. \begin{aligned} V_T &= \frac{1}{2} GJ \left\{ \tau_0 - \frac{\pi}{l} \left(\frac{2\pi R}{l} \right)^2 \right\}^2 l \\ V_B &= \frac{1}{2} EI \left\{ \frac{(2\pi)^2 R}{l^2} \right\}^2 l \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

次に、外力のなす仕事 W について考える。直線状
態から、ら線変形に移行した時の変位量 Δl は次式で
与えられる。

$$\Delta l = l - 2\pi b \approx \frac{l}{2} \left(\frac{2\pi R}{l} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(9)を用いて、外力のなす仕事 W を求めると、
次式となる。

$$W = -P\Delta l = -P \frac{l}{2} \left(\frac{2\pi R}{l} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(8)、(10)よりポテンシャルエネルギー U は次式
で与えられる。

$$U = V_T + V_B - W = \frac{1}{2} GJ \left\{ \tau_0 - \frac{\pi}{l} \left(\frac{2\pi R}{l} \right)^2 \right\}^2 l + \frac{1}{2} EI \left\{ \frac{(2\pi)^2 R}{l^2} \right\}^2 l + P \frac{l}{2} \left(\frac{2\pi R}{l} \right)^2 \quad \dots\dots (11)$$

ケーブルの変形の平衡状態は次式で求められる。

$$\frac{\partial U}{\partial R} = \frac{1}{2} GJl \left\{ -2 \left(\frac{2\pi}{l} \right)^3 \tau_0 + \left(\frac{2\pi}{l} \right)^6 R^2 + 2\alpha \left(\frac{2\pi}{l} \right)^4 + 2\bar{P} \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 \right\} R = 0 \quad (12)$$

ただし、 $\alpha = EI/GJ$ 、 $\bar{P} = P/GJ$ である。

また、平衡状態の安定度は、二次微分で与えられる。

$$\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} = \frac{1}{2} GJl \left\{ -2 \left(\frac{2\pi}{l} \right)^3 \tau_0 + 3 \left(\frac{2\pi}{l} \right)^6 R^2 + 2\alpha \left(\frac{2\pi}{l} \right)^4 + 2\bar{P} \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 \right\} \quad (13)$$

ここで、

$$F = -2 \left(\frac{2\pi}{l} \right)^3 \tau_0 + 2\alpha \left(\frac{2\pi}{l} \right)^4 + 2\bar{P} \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2$$

とおく。

(i) $F > 0$ の場合

この場合、式(12)より $R=0$ が平衡状態となる。また、 $R=0$ の平衡状態の安定度は式(13)より次式で与えられる。

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} \right)_{R=0} = \frac{1}{2} GJl F > 0 \quad (14)$$

式(14)に示すように、 $R=0$ は安定な平衡状態となる。

(ii) $F \leq 0$ の場合

この場合は、式(12)より平衡状態は次式で与えられる。

$$R=0 \text{ or } R=R_0 = \left(\frac{l}{2\pi} \right)^3 (-F)^{1/2} \quad (15)$$

式(15)に示すように、 $R=0$ の平衡状態の安定度は式(14)より $(\partial^2 U / \partial R^2) R=0 \leq 0$ となり不安定な平衡状態、また、 $R=R_0$ の平衡状態は次式で与えられる。

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} \right)_{R=R_0} = \frac{1}{2} GJl (-2F) \geq 0 \quad (16)$$

式(16)に示すように、 $R=R_0$ は安定な平衡状態となる。以上の検討結果から、ケーブルが線変形を始めるのは、 $F \leq 0$ の条件であり、このとき張力 P の条件は次式で与えられる。

$$P \leq GJ\tau_0 \left(\frac{2\pi}{l} \right) - EI \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 = P_0 \quad (17)$$

いっぽう、ケーブルに線変形が発生するのは、張力 P が減少する時であり、最も大きな張力 P でらせん変形が発生する条件 $P \leq (P_0)_{\max}$ が実際の場合に合致する。 $(P_0)_{\max}$ を与える条件は次式で与えられる。

$$l = \frac{4\pi\alpha}{\tau_0} \quad (18)$$

式(18)から、 $(P_0)_{\max}$ は次式で与えられる。

$$(P_0)_{\max} = GJ \frac{\tau_0^2}{4\alpha} \quad (19)$$

$P \leq (P_0)_{\max}$ の時、らせん変形を始め、その時の一周期のピッチ長 l は式(18)で与えられる。また、初期ねじれ τ_0 として、次の形で定義する。

$$\tau_0 = 2\pi/L \quad (20)$$

式(20)は、長さ L でケーブルが1回転ねじれていることを示している。式(20)を式(18)に代入するとその関係が得られる。

$$l \approx 2\alpha L \quad (21)$$

ケーブルが、完全弾性体の場合は、 $\alpha = 1 + \nu$ となるので⁽⁷⁾、 $l \approx 2L$ となる。すなわち、ケーブルの初期変形は、ケーブルがほぼ2回転ねじれた長さの周期で、ケーブルの初期変形が始まることを示している。

また、 $R \approx 0$ の近傍では、 Δl と R の関係は、式(9)より次式で与えられる。

$$R = \sqrt{\frac{2L\Delta l}{(2\pi)^2}} = \sqrt{\frac{\alpha L \Delta l}{\pi^2}} \quad (22)$$

ただし、 Δl は1周期ピッチ l に対応した変位量である。

3・2 ケーブルの輪の形成および解放 本項では、図2の(c)のケーブルの輪の形成および図2(e)の張力印加後の輪の解放について検討を加える。解析に用いたモデルを図4に示す。この図に示すように、モデルはケーブルの輪の形成または解放がまさに始まろうとする時点を考慮して、ケーブルの交差点が微少量 δ ほど変形した場合を考える。ケーブルの変形は、3・1項と同様線近似を考える⁽⁷⁾。解析にあたっては、無次元パラメータ $\lambda (= \delta/\pi R)$ を用いて検討を進めた。

$$r = R \begin{cases} z = R\lambda\theta & 0 \leq \theta \leq \pi \\ z = 0 & -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq 0 \\ z = R\pi\lambda & \pi \leq \theta \leq \frac{3}{2}\pi \end{cases} \quad (23)$$

この時、ケーブルのループに貯えられる曲げひずみのエネルギー V_B 、ねじれひずみのエネルギー V_T および外力のなす仕事 W は、式(2)、(7)を用いて次式で

図4 検討に用いた座標系

表される⁽⁷⁾。

$$\left. \begin{aligned} V_B &= \frac{1}{2} \frac{\pi EI}{R} (1 + \lambda^2)^{-\frac{3}{2}} + \frac{1}{2} \frac{\pi EI}{R} \\ V_T &= \frac{1}{2} \pi GJR \left(\frac{1}{R} \frac{\lambda}{1 + \lambda^2} + \tau_r \right)^2 \\ &\quad \times (1 + \lambda^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \pi GJ \tau_r^2 R \\ W &= -2\pi RP + PR\lambda^2 (1 + \lambda)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

ただし、 τ_r はケーブルに残留するねじれである。

ポテンシャルエネルギー U は、式(24)を用いて次式で与えられる。

$$U = V_B + V_T - W \dots\dots\dots (25)$$

平衡状態は次式で与えられる。

$$\frac{\partial U}{\partial \lambda} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial R} = 0 \dots\dots\dots (26)$$

$\lambda \ll 1$ を考慮して、二次の微小項まで考慮すると式(26)は次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial \lambda} &= -\frac{3\pi EI}{2R} \lambda + \frac{\pi GJ}{R} \lambda \\ &\quad + \frac{\pi GJ \tau_r}{2} \left(1 - \frac{3}{2} \lambda^2 \right) - 2PR\lambda = 0 \dots\dots\dots (27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial R} &= -\frac{\pi EI}{R^2} \left(1 - \frac{3}{4} \lambda^2 \right) - \frac{\pi GJ}{2R^2} \lambda^2 + \pi GJ \tau_r^2 \\ &\quad \times \left(1 + \frac{1}{4} \lambda^2 \right) + 2\pi P = 0 \dots\dots\dots (28) \end{aligned}$$

$\lambda \ll 1$ を考慮して、式(28)を解くと、次式が得られる。

$$R \approx R_0 = \sqrt{\frac{EI}{2P + GJ\tau_r^2}} \dots\dots\dots (29)$$

式(29)を用いて、式(27)を解くと次式が得られる。

$$\lambda \approx \lambda_0 = \frac{-\frac{\pi}{2} GJ \tau_r}{\frac{\pi GJ}{R_0} - \frac{3\pi EI}{2R_0} - 2PR_0} \dots\dots\dots (30)$$

弾性体の場合は、分母 < 0 ⁽⁷⁾ になるので、 $\lambda_0 > 0$ となる。

$\lambda = \lambda_0$ の安定状態は、次式で求められる。

$$\begin{aligned} I &= \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial \lambda^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial \lambda \partial R} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial R \partial \lambda} & \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} \end{vmatrix}_{\substack{\lambda = \lambda_0 \\ R = R_0}} \approx \frac{2\pi EI}{R_0^3} \left(-\frac{3\pi EI}{2R_0} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\pi GJ}{R_0} - \frac{3}{2} \pi GJ \tau_r \lambda_0 - 2PR_0 \right) < 0 \dots\dots\dots (31) \end{aligned}$$

この式に示すように、 $I < 0$ となり、 $\lambda = \lambda_0 > 0$ は不安定な平衡状態となる。この結果からは、 $\lambda = 0$ の近傍では安定な平衡状態が存在しないように示されているが、実際には、図5に示すように、ケーブルの輪が図4に示す状態($\delta = 0$)から角度 ϕ だけ回転した状態で安定状態が存在する⁽⁷⁾。ポテンシャルエネルギーの概略

図を図6に示す。この図では、ケーブルが角度 ϕ_0 だけ回転した状態が安定な平衡状態となる。

再度張力が印加された場合、回転角 ϕ_0 はしだいに零に近づいてゆき、ケーブル径が減少していく⁽⁷⁾ (この現象は、図2の(d)の領域に対応する)。この理論結果に示すように、この領域では輪は解放しない。しかし、第4章の実験結果に示すように、張力が印加し、ケーブルの輪が減少する領域で、輪が再度解放する現象が認められる。

これは、ケーブル径 d の影響により、ケーブルの輪が解放しない領域でも、次式に示す初期変形 λ_l が存在するためによる。

$$\lambda_l = d/\pi R_0 \dots\dots\dots (32)$$

図6に示すように、初期変形 λ_l が、式(30)に示す不安定な平衡状態 λ_0 より大きくなれば輪が解放する。この時の条件は次式で与えられる。

$$\lambda_l \geq \lambda_0 \dots\dots\dots (33)$$

式(33)を R_0 について解くと次式が得られる。

$$R_0 \leq \sqrt{\frac{1}{\pi} \left\{ \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\pi} \right) \alpha - 1 \right\} \frac{d}{\tau_r}} \dots\dots\dots (34)$$

ただし、

$$\alpha = EI/GJ$$

この結果に示すように、曲率半径 R_0 が式(34)に示す値より小さい時に、ケーブルの輪が解放することがわ

図5 ケーブルの輪のねじれ現象

図6 ポテンシャルエネルギーの変化

かる。

理論解析を行うことによって、キック現象の一部が解明できたが、次章で実験面からの検討を加えることによって、キック現象の全体的な把握を行う。さらに、実験結果との比較より、理論解析の妥当性について検討を加える。

4. 実験面からの検討

ケーブルのキック現象の解明のために、図7に示す光ファイバ心線を用いて実験面からの検討を行った。光ファイバ心線を試料として選定した理由は、次の理由による。実際の海底ケーブルを用いると、大口径であり、キック現象を再現するには、非常に大きな実験装置が必要となり実験が困難であるが、光ファイバ心線は細径で扱いやすい利点を持ち、さらに大変形領域でも弾性変形が成り立ち、理論結果との対応がしやすいことによる。また、実験結果は実際のケーブルキック現象解明に適用できるように解析との対応の形で整理を進めた。

4.1 実験方法 図7に示す試料を用いて、図8に示す実験方法で実験を行った。実験においては、試料に初期ねじれを与えておいて、端末の移動量（これはケーブルのスラックに対応する） ΔL 、ケーブルの変形、その時の印加張力 P 、ねじれトルク T を測定した。測定においては、特にケーブルの輪の形成時、輪の解放時を注目して行った。

4.2 実験結果 図9に端末移動量 ΔL とトルク T および張力 P の関係を示す。端末移動量 ΔL は、図1に示すケーブルの布設および引揚時のケーブルスラック（ケーブルの余長）に対応する。トルクの変化を図9に示すが、図中の(b)、(c)、(d)、(e)の記号は、図2の変形の(b)、(c)、(d)、(e)に対応し、

(b)は初期らせん変形の成長過程、(c)はケーブルの輪の発生時、(d)は再度張力印加時でケーブルの輪の径が減少する領域(e)は張力印加時に、ケーブルの輪が再度解放する領域である。図中のケーブルの輪が形成する時[(c)の領域]、およびケーブルの輪が再度解放する時[(e)の領域]は、不連続で、急激な変化が生じる。これは、第3章の検討結果に示すように、ケーブルの変形が他の安定な状態に急激に遷移する状態を示している。また、(b)の初期変形の成長過程では、ケーブル端でのトルクはしだいに減少する。また、張力印加時のケーブル径が減少する領域では、トルクがほとんど変化しないことがわかる。

張力変化については、図9に示すように、(b)の初期変形の成長過程およびケーブルの輪の形成時には張力はほとんど零である。しかし、ケーブルの輪がしばらくの過程でしだいに張力が増加していく。

図10に(b)の初期変形の成長過程におけるらせん曲線の成長とスラック ΔL の関係を示す。理論値は式(22)を用いた計算値である。この図に示すように、計

図9 端末移動量 ΔL とトルク T および張力 P の関係

図7 実験試料

図8 実験概略図

図10 ケーブルの輪の成長と端末移動量 ΔL の関係

算値と実験値はほぼ一致し、らせん曲線近似のモデルがほぼ初期変形成長の現象を表していることがわかる。

図 11 に、ケーブルの輪の形成時の、ケーブルのスラック ΔL とケーブルの初期ねじれ τ_0 の関係を示す。この図に示すように、初期ねじれ τ_0 が大きければ大きいほど小さなケーブルスラック ΔL でケーブルの輪が形成することがわかる。計算値は式(29)を用いて、下記に示す式で求めた。ただし、張力 P は、図 9 の結果に示すように、ほぼ零なので、 $P=0$ とした。

$$\Delta L = 2\pi R = 2\pi \alpha^{\frac{1}{2}} / \tau_r \quad \dots\dots\dots (35)$$

ただし、 τ_r はケーブルの輪に残留するねじれである。計算においては、ケーブルの輪の形成によるねじれの減少分はケーブル全長 L_0 で均等に減少するとして、次式で残留ねじれを推定した。

$$\tau_r = \tau_0 - 2\pi / L_0 \quad \dots\dots\dots (36)$$

図 11 に、計算値と実験値の比較を示すが、両者はほぼ一致し、計算値の妥当性が推定できる。式(36)か

図 11 ケーブルの輪の形成時の初期ねじれ τ_0 と端末移動量 ΔL の関係

らわかるように、 L_0 が非常に長い場合は、 $\tau_r \approx \tau_0$ となり、残留ねじれ τ_r と初期ねじれ τ_0 はほぼ等しくなる。この時、式(20)を用いて、式(35)を整理すると次式となる。

$$\Delta L = \alpha^{\frac{1}{2}} L \approx L \quad \dots\dots\dots (37)$$

式(37)に示すように、ケーブルの輪が形成するのに必要なスラック ΔL は、ほぼケーブルの 1 回転に対応した長さ L と等しくなる。

図 12 に、ケーブルの輪が解放する時のケーブルスラック ΔL 、ケーブル径 d と残留ねじれ τ_r の関係を示す。計算値は、式(34)を用いて計算を行った。

$$\Delta L = 2\pi R = \sqrt{4\pi \left\{ \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\pi} \right) \alpha - 1 \right\} \frac{d}{\tau_r}} \quad \dots\dots\dots (38)$$

計算値と実験値はほぼ一致するが、計算値が実験値に比較して大きくなる。これは、ケーブルの輪を完全な円として近似しているが、実際は図 2 に示すように、完全な円ではなく、変形の近似の誤差が、計算値と実験値の差になったものと推定される。

図 12 に示すように、 d/τ_r が大きいほど（すなわち、

図 12 ケーブルの輪の解放時の残留ねじれ τ_r およびケーブル径 d と端末移動量 ΔL の関係

図 13 キンク現象の概略図

ケーブル径が大きく残留ねじれが小さいほど), 大きなケーブルの輪でケーブルが解放することがわかる。また, d/τ_r が小さくなればなるほど, ケーブルの輪が解放する径が小さくなることがわかる。

実際のケーブルのキンク現象の場合は, L_0 が非常に大きく, ケーブルのループが形成する時のねじれの緩和量が式(36)に示すように小さくなり, 式(38)の τ_r はほぼ τ_0 と等しくなると考えられる。

5. 考 察

3章の理論解析および4章の実験結果を用いて, ケーブルのキンク現象の考察を行う。

図13に, ケーブルのキンク現象の概略図を示す。横軸は, ケーブルスラック ΔL でケーブルの変形を整理している。この図に示すように, ケーブルのスラックに対応してケーブルの変形が分類できるが, ケーブルの変形のケーブルの輪の形成および解放の分岐点は, 次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_1 &= \alpha^{1/2} L \\ \Delta L_2 &= \beta (dL)^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (39)$$

ただし,

$$\beta = \left[2 \left\{ \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\pi} \right) \alpha - 1 \right\} \right]^{1/2}$$

であり, L はケーブルの1回転のねじれに対応する長さである。

式(39)に示すように, ケーブルのキンク現象は, ケーブルの初期ねじれ τ_0 (または, ケーブルの初期ねじれの1回転のねじれに対応した長さ L), 曲げ剛性とねじれ剛性の比 α , ケーブル径 d の三つのパラメータによって左右される。

以下に, ケーブルスラック ΔL によるケーブル変形の分類を示す。

(i) $\Delta L < \alpha^{1/2} L$ の時

この時, ケーブルの変形は, らせん変形となり, 再度張力が印加してスラックが小さくなった場合は変形が小さくなり, 直線の状態まで復帰する。

(ii) $\Delta L = \alpha^{1/2} L$ の時

ケーブルの輪が形成し, 図5に示すように新しい, 安定状態に移行する。

(iii) $\Delta L > \alpha^{1/2} L$ の時

輪が形成した後, 図6に示すように, ケーブルの輪が回転する現象を示す。

ケーブルスラック ΔL が再度減少する場合は, $\Delta L = \alpha^{1/2} L$ で輪は解放しない。この場合は, 以下に示すスラックで分類できる。

(iv) $\Delta L > \beta (dL)^{1/2}$ の時

この場合, ケーブルスラック ΔL が再度減少する時は, ケーブル径が減少するか, ケーブルの輪は解放しない。

(v) $\Delta L \leq \beta (dL)^{1/2}$ の時

この時, ケーブルの輪が再度解放し, ケーブルは直線または若干のらせん変形が残る。

この図に示すように, ケーブルが完全に, 弾性体の場合は, ケーブルの輪は解放する。しかし, 実際にケーブルの場合は, ケーブルの輪が解放せずしばらくして解放しない場合もある。これは, 実際のケーブルでは, ケーブルの曲率が小さくなると, 変形は塑性変形に移行し, 曲げ剛性が大幅に低下するためによる。このため, α が小さくなるので, 式(34)に示すように輪が解放する半径が小さくなり, 輪がなかなか解放せずケーブルの輪がしばらくしてキンク現象が結びつくことがわかる。

以上の検討結果からわかるように, ケーブルのキンクを抑制するためには, ケーブルの輪が形成を起こさせないことであり, そのためには, ケーブルスラック ΔL , ケーブル機械特性パラメータ α とケーブルのねじれ量を表すパラメータ L の間に, $\Delta L < \alpha^{1/2} L$ の関係に保つことである。具体的には, (a) α を大きくすることであり, 曲げ剛性を大きくし, ねじれ剛性を小さくすることであり, (b) ケーブルの初期ねじれを小さくし, 1回転のねじれに対応する長さを大きくし, (c) また, 布設時のケーブルスラック ΔL を小さくすることである。

6. ま と め

海底ケーブルのキンク現象について, エネルギー法を用いた理論解析および実験面から検討を加え, ケーブルスラックの観点から統一的に明らかにした。従来, キンクの防止については, 定性的な結果しか得られていなかったが, 本結果を用いることにより定量的な指針を与えることができた。

今後は, 海洋実験を行うことにより, 本解析の妥当性について検討を進める予定である。

本研究を進める機会を与えて下さった茨城電気通信研究所, 福富線路研究部長, 小島線路研究部統括役, また本研究を進めるにあたり有意義なご議論をいただいた, 根岸線路研究室長および石原調査役に深く感謝する。

文 献

- (1) 志村, 海底同軸通信方式, (昭53), 79, 電子通信学会。

- (2) 吉田, 住友電気集報, 35, (昭24), 17,
- (3) 吉田, 住友電気集報, 21, (昭24), 38,
- (4) 吉田, 住友電気集報, 40, (昭25), 28,
- (5) 吉村, 藤倉電線技報, 1 (昭24), 21,
- (6) Ross, A. L., *Trans. ASME. Ser. B.* 99-1 (1977), 112,
- (7) Yabuta, T., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 3, (1982), 584,
- (8) Love, A. F. H., *Mathematical Theory of Elasticity*, (1944), 381, Dover Pub.

討 論

〔質問〕 尾 田 十 八 (金沢大学工学部)

実用的問題と関連した興味深い研究とおもうが, この点からすると, 実際上はこの論文の終わりで述べられているようなキンク防止策が有効なのかどうかを, 実験を含めて実証してほしいが, この点いかがか。

また本論文で提出された理論は, キンクが1個以上, 連続的に発生したり, あるいはそれが次々と消えるような場合にも, そのまま適用できるのか。

〔回答〕 キンクの問題は, 海底ケーブルが開発された当時から, ケーブル障害上重要な問題としてよく知られていたが, 長年その現象は明らかにされていなかった。この理由としては, キンク現象はケーブルの輪の形成および解放を伴う不安定現象であり, またケーブルの変形は三次元的な挙動となり, 取扱いがたい問題となるためである。従来の検討結果としては, 参考文献(2)~(5)に示すケーブルの輪の解放条件, 参考文献(6)に示すケーブルの輪の形成条件についての報告例はあるが, 断片的な報告のみで, そのメカニズムは統一的に明らかにされていない。

ご指摘のとおり, 本論文の最終目的としては, 実際のケーブルのキンク現象の防止策にある。しかし, 本論文では, キンク現象解明の第一段階として, キンク現象時のケーブル変形を統一的に明らかにしようとするもので, 理論解析およびモデル実験を行うことにより基本的な現象を明らかにすることができ, 所期の目的を達成できたと考えている。

本解析結果を, 実際のケーブルのキンク現象を適用するに際しては, ケーブルねじれ剛性の異方性の問題, 変形時の塑性変形の問題, ケーブル変形の近似の問題などで精度が悪くなる可能性がある。しかし, 本論文の最後に, 3項めのキンク防止策を定性的に述べているが, この3項めは, 従来実際の海底ケーブルで経験的に明らかにされていることと一致し, 本論文で従来の経験則を物理的に説明することができたと考ええる。

本論文で, キンクの基本的現象を明らかにすることができたので, 今後は実際の海底ケーブルを用いた実験を行うことによって, ケーブルの設計に反映できる定量的な設計指針について検討を進める予定でいる。

また, 連続的なキンクの発生の問題については, ケーブルのねじれ量の観点から問題を扱うことによって, ケーブルの長手方向のケーブルのねじれ量と, ケーブルスラックの分布を把握することにより, 連続の問題を扱えるように意図して検討を進めた。しかし, ケーブルの輪の形成については, あるケーブル区間で図5に示す輪のねじれ現象が発生した場合, ケーブルのねじれは, 図5に示すケーブルの輪のねじれ現象で吸収され, この区間では輪の形成は起きない。このねじれ現象による吸収の影響区間は, 本解析では扱っておらず, 今後この面の検討を加えることができれば, 連続的な問題を扱えることができると考える。