

(株) 神戸製鋼所

正員 大谷 勝

正員 頭井 洋

正員 新家 徹

1 お え が き

外気温や日射の変動によりケーブル内の温度分布変化およびそれに伴うケーブル長さの変化は、ケーブルの施工精度・効率向上の上から重要な問題となる。特にケーブルのサグ調整の際、ケーブルの平均温度を正確に推定することが重要となる。この平均温度を推定する方法としては、1). ケーブル断面内に多数点の測点を取り、温度センサー等により直接計測する方法、2). 代表温度測点と数点計測し、それらから平均温度を推定する方法、3). 解析的に数値計算により求める方法等が考えられる。従来は、主に2)の方法を採用しているが、代表温度測点をどこにするか、またそれらからいかに平均温度を推定するかについて明確でないように思われる。

本研究は、架設途中の吊橋ケーブルの温度応答特性を明らかにすることを目的として実施しているもので、本報では、そのオ1段階としてケーブルの拘束値(熱伝導率 λ 、熱伝達率 α)をステップ温度応答実験により求め、その特性について述べる。

2 ステップ温度応答

ここでは、ケーブル拘束値を求めた下記の特性を明らかにした。

1). ケーブル空隙率の相異による熱伝導率の相異

2). 風速の相異による熱伝達率の相異

2-1 解析理論

物体の初期温度が断面内で一定 U_0 に保たれており、それを恒温室(U_{ext} 温度)に投入したときの物体各断面(r , z)での経時温度 U_{ci} は、次式で求められる。

円形断面の場合(2次元伝熱)

$$U_{ci} = U_{\text{ext}} - (U_{\text{ext}} - U_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\alpha_n r/a)}{\alpha_n J_1(\alpha_n a)} \frac{J_0(\alpha_n z/a)}{J_0(\alpha_n a)} e^{-\alpha_n^2 t} \quad (1)$$

ただし $\alpha_n a$ は $J_0(x) - \alpha h J_1(x) = 0$ の n 番目の根、 J_0 : 階乗1種ベッセル関数

$h = \alpha/\lambda$, $K = \lambda/c_p$, a : ケーブル半径, c_p : ケーブル熱容量, t : 経時応答時間

矩形断面の場合(1次元伝熱)

$$U_{ci} = U_{\text{ext}} - (U_{\text{ext}} - U_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \sin(M_n l/2)}{M_n \sin(M_n l)} \cos(M_n z) e^{-M_n^2 t} \quad (2)$$

ただし M_n は $\tan(2l/2) - h/\lambda = 0$ の n 番目の根、 l : 断面の長さ

拘束値の決定は、拘束値を関数として断面内の代表点における実測値と解析値の差の2乗和を最小にする最適化手法により行った。

2-2 ステップ温度応答実験と考察

本実験に用いた供試体は、5mmφのピアノ線束を束ねて平行線ケーブルとしたものであり、その諸元および測定位置をオ1表に示した。まず熱伝導率は空隙率により相異すると考えられるので、その関係を明らかにするため、空隙率を種々変化させて供試体を用いて、無風の状態で実験を行った。実験結果から上記の方法により求めた各熱伝導率をオ2表およびオ1図に示す。熱伝導率は20%~30%の間で極端に減少している。この原因は、素線同士の接触による熱伝導が空隙率の20%~30%を境に激減し、30%以上の

第1表 ステップ温度応答供試体一覧表

供試体名称	寸法	空隙率	供試体形状および測点位置
C20	φ300×500	20%	断面図: 300, 500 測点位置: 断面図に示す
C40	φ300×500	40%	断面図: 300, 500 測点位置: 断面図に示す
R20	150×100×200	18.3%	断面図: 150, 200 測点位置: 断面図に示す
R30	150×100×200	32.2%	断面図: 150, 200 測点位置: 断面図に示す
R40	150×100×200	40.8%	断面図: 150, 200 測点位置: 断面図に示す
R50	150×100×200	51.3%	断面図: 150, 200 測点位置: 断面図に示す

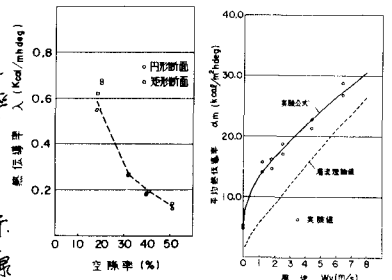
第2表 実験より求めた物性値

空隙率と熱伝導率の関係			
供試体種類	空隙率 (%)	熱伝導率 λ (Kcal/m·sec)	熱伝達率 α (Kcal/m ² ·sec)
C20	20	0.671	5.00
C40	40	0.183	4.91
R20	18	0.585	
R30	32	0.266	
R40	41	0.195	
R50	51	0.125	

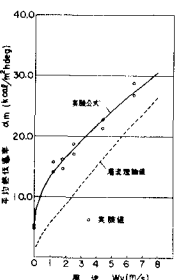
風速と熱伝達率の関係

供試体種類	風速 (m/s)	熱伝導率 λ (Kcal/m·sec)	熱伝達率 α (Kcal/m ² ·sec)
C20	0	0.671	5.0
	1.2	0.665	14.9
	1.8	0.665	15.4
	2.5	0.665	17.9
	4.4	0.665	22.0
	6.4	0.666	27.8

ただし各物性値は実験を2回行った平均値である。



第1図 空隙率と熱伝導率の関係



第2図 風速と熱伝達率の関係

空隙では、接触による直接伝導が期待できないことによるものと考えられる。このことは別途に空隙率と接触量に用いる検討からも推察できる。

次に熱伝達率は、風速により変動することは周知のとおりである。例えばテーブルの場合の関係を調べるためにC20の試験体を用い、扇風機により風速を種々変化させて実験を行った。その結果得られた熱伝達率をオ2表・オ2図に示した。図中に破線で示した層流理論値は、次式により計算したものである。

$$\alpha_m = K_f C R_0^n / d \quad \text{----- (3)}$$

ただし K_f : 流体の熱伝達率, d : ケーブル直径, R_0 : レイ数 $= u d / \nu$, u : 風速

ν : 流体の動粘性係数, C, n は Re により種々に相付数

実験値と破線との相異の原因としては、本実験では扇風機で風速を与えたため層流より乱流に近いこと、また風速の小さい所では強制対流以外に自然対流の影響が現われること等が考えられる。そこで本文では次のような実験公式を導いた。(オ2図の実線)

$$\alpha_m = K_f C R_0^n / d + \alpha_0 e^{-\alpha_1} \quad \text{----- (4)}$$

ただし α_0 : 自然対流による熱伝達率, $C=0.8043, n=0.5226, \alpha_1=1.464 \times 10^4$

右辺第1項は強制対流によるもの、第2項は自然対流による熱伝達率

3 外気温の変動によるケーブル温度応答

ステップ温度応答で求めた物性値の妥当性を検証するために円形試験体C20を用いて外気温を任意に変動させて実験を行った。

円形断面の外気温による温度応答の理論式¹⁾は、次式で示される。

$$U_a = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2ah}{a^2 + (ah)^2} \frac{J_0(a R_0 / a)}{J_0(a R_0)} F_n(t) \quad \text{----- (5)}$$

ただし $F_n(t) = \frac{a^2}{a^2 + (ah)^2} K_0 \left(\frac{a R_0}{a} \right) e^{-\lambda_n^2 t} \left\{ f(t) - U_0 \right\} e^{\lambda_n^2 t}$, $f(t)$: 外気温

オ3図に式で求めた計算値と破線および点鎖線で示し、実験値を○×でプロットした。実験値と理論値はよく一致しており、物性値は妥当なものと考えられる。

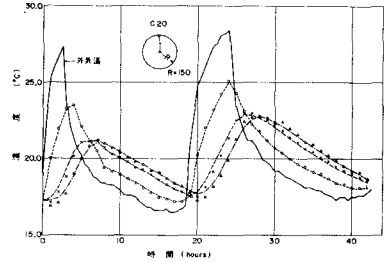
次に熱伝達率を風速の関数として与えた場合にその変動が、ケーブル平均温度にどのように影響するかを調べるために、外気温を $10 \sin(\omega t)$ でモデル化した時のケーブル平均温度を計算により求め、オ4図にその1例を示した。応答温度の最大値および風速の相異による位相の変化が明瞭にみられる。平均温度の相異が顕著な9時間後の応答に着目して風速との関係を示したのがオ5図である。風速の影響が顕著に現われるのは、0~2%の範囲であり、風速がそれ以上大きくなるとそれ程ケーブル平均温度に影響を与えないようである。

4 まとめ

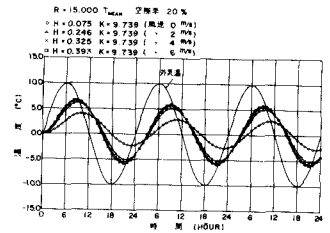
本研究では、従来明らかにされていなかった物性値の特性を調べ、2, 3の考察を行った。架設中のケーブルでは、空隙が大きいかつ種々変動する風を受ける。したがってケーブル平均温度をより正確に推定するためには、それらの影響を考慮した解析を行う必要があると思われる。また実橋の場合、日射およびふく射等の複雑な気象条件も影響してくると思われる。それらの問題点を解明するため、屋外実験および解析的検討を行って、この中で機会を改めて報告する予定である。本研究にあたって、当社中川知和氏の多大な協力を得ましたので、ここに付記し深く感謝の意を表します。

5 参考文献

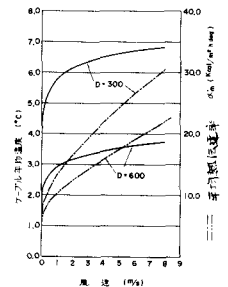
- 1) 長谷川 誠一、原田 康史; 円形ケーブルの温度測定実験、橋梁と基礎、1975年1月
- 2) 橋本 隆雄、原田 康史; 伝熱論、コロナ社、1975年7月
- 3) 渡辺 凱夫、中西 康; 最速伝導の手法による平均値の求め方、建築学雑誌、No.238、1975
- 4) 内田 秀雄; 伝熱工学、工業界、1971年2月



オ3図 外気温の変動に伴うケーブル温度応答結果 (風速18 m/s)



オ4図 外気温 (10sin ωt) の変動に伴うケーブル平均温度の応答 (風速の相異)



オ5図 ケーブル平均温度と特性値等の関係 (9時間後)