

(株) 神戸製鋼所 正 頭井 洋
 “ “ 大谷 修
 “ “ 新家 徹

1 よえがき

吊橋の主ケーブルを精度良く能率的に架設するには、時々刻々変化するケーブル温度を的確に把握する事が大事で著者らはケーブルの温度物性値を求める基礎的実験¹⁾や実物大ケーブルを用いた屋外実験および差分法による数値解析等架設途中のケーブル温度挙動に関する一連の研究を進めている。参考文献2)で報告しているように、差分法による数値計算手法は、ケーブル内の温度分布も含めた精度の良い解析ができる。しかし計算に必要なインプット量は相当多くなる上大型コンピュータを必要とし、現場における即時性等種々の条件を考えるとより簡単な計算法の開発が望まれる。ここではケーブルに出入りする熱量に着目してケーブルの平均温度のみを追跡する計算手法について述べる。この方法によると差分法に比べ計算時間、計算機容量が非常に少なくて済むことから小型の卓上計算機で計算でき、現場で手軽に利用できる。

2 理論

ケーブル温度に影響をおよぼす因子には、図1に示したように、外気温、日射、風等の天候条件と、ケーブルの表面熱伝達率や内部熱伝導、日射吸収率等の温度物性値があり、これらがすべて明らかになればケーブルの温度挙動を解析できる。表面熱伝達率は主としてケーブル形状、大きさおよび風速により支配され、内部熱伝導率は空隙率により変化する物性値と考えられる。このような温度物性値については、ステップ温度応答実験により明らかになっている。ケーブル内の温度分布も含めた詳細な解析を行うには、架設途中のように形状が変化して

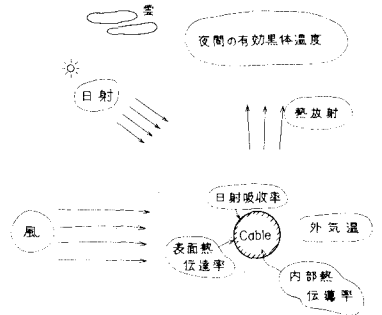


図1 ケーブル温度に影響する諸因子

いく場合には解析解が得られないのでFEMあるいは差分法等の数値計算手法によるざるをえず、著者らは差分法を用いた計算手法について報告している。一方ケーブルの形状、長さに関係するのはケーブルの平均温度であり、より簡単な平均温度推定法が施工管理の立場から必要とされる。ここではケーブルに出入りする熱量より平均温度を算定する計算手法について述べる。いまケーブル軸方向単位長当り、微小区間 ΔS に微小時間 Δt の間に流入する熱量を ΔQ とすると次式が成立する。

$$\Delta Q = \alpha(\theta_f - \theta_s) \cdot \Delta S \cdot \Delta t + \beta F \Delta S \cdot \Delta t + \epsilon \sigma (\theta_f^4 - \theta_s^4) \cdot \Delta S \cdot \Delta t \quad \text{--- (1)}$$

ここに α ; 局所熱伝達率, θ_f ; 外気温, θ_s ; 表面温度, β ; 日射吸収率, F ; ΔS 区間が単位時間当りに受ける太陽からの輻射エネルギー, ϵ ; 輻射率, σ ; ステファンボルツマス係数, θ_f ; 夜間有効黒体温度(絶対温度), θ_s ; 表面絶対温度である。式(1)の第1項は対流による伝熱量, 第2項は日射による伝熱量, 第3項は夜間の輻射による伝熱量を示している。 ΔQ の熱量増加により生じる温度上昇 $\Delta \theta$ は、次式で与えられる。

$$\Delta \theta = \Delta Q / c \rho A \quad \text{--- (2)}$$

ここに c ; ケーブル比熱, ρ ; 単位体積重量, A ; 断面積である。式(2)に代入し積分すると、時間 t におけるケーブル平均温度 θ を求める式が得られる。

$$\theta = \theta_0 + \frac{1}{c \rho A} \int_0^t \int_C [\alpha(\theta_f - \theta_s) + \beta F + \epsilon \sigma (\theta_f^4 - \theta_s^4)] dS \cdot dt \quad (3)$$

ここで θ_0 は $t=0$ のケーブル平均温度、 $\oint_0$ はケーブル周に沿う線積分を示している。式(3)の積分項の α_1 項は、平均熱伝達率 α_m および平均表面温度 θ_{sm} 、周長 S を用いて $\frac{S}{CFA} \int_0^t \alpha_m \cdot (\theta_f - \theta_{sm}) \cdot dt$ と表わせる。 α_2 項の日射に関する項は、ケーブル軸が南北を向いているとして $\frac{S}{CFA} \int_0^t D(t) \cdot J_h(t) \cdot \sqrt{1 + \cot^2 \lambda} \cdot \sin^2 \hat{A} \cdot dt$ と表わせる。ここに $D(t)$; 時刻 t におけるケーブルの日射方向垂直面への投影長、 $J_h(t)$; 水平面日射量、 λ ; 太陽高度、 $\hat{A}$; 太陽の方位(南中時を0とする)。 J_h は日射計による測定値として得られ、理論的には $J_h = J_0 P^{asech} \sinh$ で与えられる。ここに J_0 ; 太陽定数(約 $1164 \text{ Kcal/m}^2\text{h}$)、 P ; 透過率である。また α_3 項の夜間の天空への輻射に関する項は、結果のみを示すと $\frac{1}{CFA} \int_0^t 4.88 \cdot E \cdot D_m \left[\left(\frac{\theta_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_s}{100} \right)^4 \right] \cdot dt$ となる。ここに D_m ; ケーブルの水平長である。以上を式(3)に代入すると次式が得られる。

$$\theta = \theta_0 + \frac{1}{CFA} \int_0^t \alpha_m (\theta_f - \theta_{sm}) dt + \frac{S}{CFA} \int_0^t D(t) \cdot J_h(t) \sqrt{1 + \cot^2 \lambda} \cdot \sin^2 \hat{A} dt + \frac{1}{CFA} \int_0^t 4.88 E D_m \left[\left(\frac{\theta_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_s}{100} \right)^4 \right] \cdot dt \quad \text{----- (4)}$$

式(4) よりわかるように 簡単な積分なので卓上計算機で計算できる。計算に必要な計測項目は、各時間ステップごとの外気温、ケーブル表面の平均温度、日射量および風速である。時間ステップは1時間程度で十分である。

3. 数値計算

本手法の妥当性、精度確認のために、解が得られている円形断面について計算を行った。外気温の変動は $\sin$ 関数で与え、日射量は秋季の晴天時に相当する値を与えた。図2はその結果を示したもので、径 60cm 、風速は 1 m/sec とした。図2に Ref. 3 としたものは、原田・長谷川が導いた計算式³⁾より求めたものである。図2より本文の手法による計算値は、Ref. 3 の値と良く一致していることがわかる。つぎに屋外実物大模型実験結果との比較について述べる。図3はその一例を示したもので、図の供試体の記号は、別に報告している実験系列に対応している。²⁾ 図3より、各供試体とも、本文の手法により求めたケーブル平均温度は実験値と良く一致しており、架設途中のケーブル平均温度をかなりの精度で追跡できることがわかる。供試体 EF について計算値と実験値は良く一致していた。

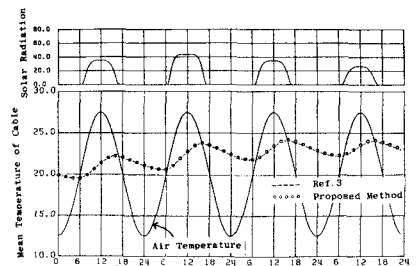


図2 円形断面の平均温度

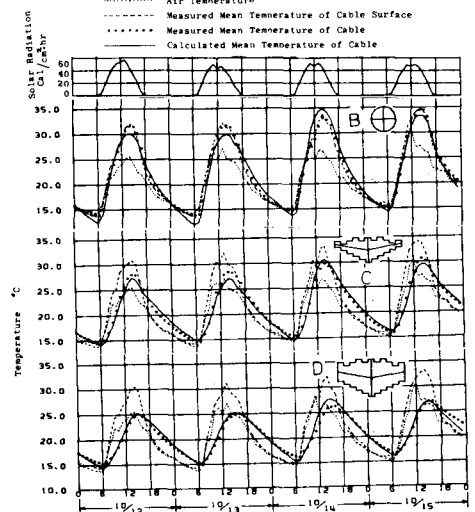


図3. 屋外実験結果との比較

4. あとがき

本文で示した手法によれば、比較的簡単な計算で架設途中のケーブル平均温度を精度良く推定できる。実際の適用に際しては、平均温度の初期値をできるだけ正確に推定する必要があるが、差分法による計算値²⁾を利用するか屋外実験結果より得られる推定値を用いる方法が考えられる。

参考文献

- 1) 大谷・頭井・新家, 吊橋主ケーブルの架設途中における温度応答特性について (オ一報), 第33回講演会 I-96, 1998
- 2) 大谷・頭井・新家, (オ二報), 本講演概要集, 1999
- 3) 原田・長谷川, 吊橋ケーブルの温度応答に関する研究, 土木学会論文報告集, 第251号, 1976. 7.