

## I-175

## ファジィ理論を応用したケーブル構造物の形状決定法

日立造船(株) 正員 金吉正勝 京都大学工学部 正員 古田 均  
日立造船(株) 正員 田中 洋 大阪市建設局 正員 亀井正博

## 1. まえがき

吊橋のキャットウォークなどのケーブル構造物の設計を行う場合、その構造力学的特性により、外力とケーブル張力および境界条件から決まる形状を、いかに求めるかが問題となる。形状決定に関する研究には、有限変形理論を応用した解析<sup>1), 2)</sup>や最適値問題の手法を用いた解析<sup>3)</sup>などがある。

本報告では、ファジィ理論を用いたケーブル構造物の形状決定法を開発したので、その定式化と簡単なモデルによる例を示し、その有効性について述べる。

## 2. ファジィ形状決定法

ケーブル要素 $k$ の始端 $i$ 、終端 $j$ の座標を $(X_i, Y_i, Z_i)$ 、 $(X_j, Y_j, Z_j)$ とし、部材長を $l_k$ 、張力を $N_k$ とすると、格点 $i$ のつり合い条件式は、

$$\sum_{k=1}^M (X_i - X_j) \cdot N_k / l_k = P_{Xi} \quad \sum_{k=1}^M (Y_i - Y_j) \cdot N_k / l_k = P_{Yi} \quad \sum_{k=1}^M (Z_i - Z_j) \cdot N_k / l_k = P_{Zi} \quad (1)$$

となる。

ここに、 $P_{Xi}, P_{Yi}, P_{Zi}$  : 格点 $i$ における $X, Y, Z$ 方向の外力、 $M$  : 格点 $i$ に集まる部材の総数

ケーブル構造物の全格点について(1)式が成立するのでマトリックス表示をすると下記の式となる。

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{Z} = \mathbf{P} \quad (2)$$

ここに、 $\mathbf{N}$ は $N_k / l_k$ からなる行列であり、 $\mathbf{Z}$ は格点座標、 $\mathbf{P}$ は外力より成るベクトルである。

(2)式において $\mathbf{N}$ ＝一定とし、境界条件の処理を行うと格点座標は $\mathbf{Z} = \mathbf{N}^{-1} \cdot \mathbf{P}$ で求まる。求まった座標より部材長 $l_k$ を計算すると、 $\mathbf{N}$ ＝一定の条件より部材張力 $N_k$ を計算することができる。完全につり合っている場合は、仮定した座標、部材長、張力は上記で求めた結果と一致するが一般にはつり合い条件を満たしていないので設計目標値の座標、張力に近い値をいかに見いだすかが問題となる。

$F_0$ を座標、張力の設計目標値の中心値、 $\Delta F$ を設計目標値の幅、すなわちあいまい度の幅とすると、収束後のつり合い時の座標、張力は $\tilde{F}_0 = (F_0, \Delta F)$ となる。記号 $\sim$ はファジィ集合を表す。収束計算 $i$ 回目の座標、張力を $F_i$ 、 $i+1$ 回を $\tilde{F}_{i+1}$ とすると $\tilde{F}_{i+1} = F_i + \sum \tilde{X}_i \cdot K_i$ となる。ここに $\tilde{X}_i$ は張力の変動幅であり図-1に示す $c_i$ と $\alpha_i$ を代表値とするメンバーシップ関数を持つファジィ量である。 $K_i$ は単位張力の変化による座標、張力の影響値であり、(2)式より求められる。収束後の座標、張力を幅のあるあいまいな値(ファジィ出力)と考えているので、張力の調整量すなわちファジィ量は以下の(3)～(6)式を解くことによって、ファジィ回帰モデルのMax問題として定式化される<sup>4)</sup>。

$$\text{目的関数} \quad \text{MAX} \rightarrow J(c_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_i \cdot |k_{ji}| \quad (3)$$

$$\text{制約条件} \quad F_{0j} \geq F_j + (1-h) \sum_{i=1}^N c_i |k_{ji}| - (1-h) \Delta F_j + \sum_{i=1}^N \alpha_i k_{ji} \quad (4)$$

$$-F_{0j} \geq F_j + (1-h) \sum_{i=1}^N c_i |k_{ji}| - (1-h) \Delta F_j - \sum_{i=1}^N \alpha_i k_{ji} \quad (5)$$

$$j=1, 2, \dots, M \quad c_i \geq 0 \quad (6)$$

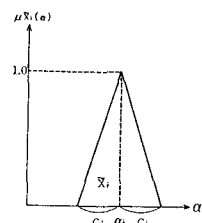


図-1  $\tilde{X}_i$ のメンバーシップ関数

ここに、 $M$  : 座標、張力照査項目数、 $N$  : 部材数

$k_{ji}$  : 部材 $i$ の単位張力の変化による座標、張力の $j$ 成分の影響値

$F_{0j}$ :座標、張力のj成分の設計目標値の中央値  
 $\Delta F_j$ :座標、張力のj成分の設計目標値の中央値に  
対する上下限値の幅  
 $c_i, \alpha_i: \tilde{X}_i$ のメンバーシップ関数(図-1)の代表値  
 $h$ :適合度を計る基準パラメータ  $h(0 \leq h < 1)$

上記の(3)~(6)式を解くことによって張力の修正値が求まるが、  
(2)式においてNの変化と座標Zが非線形であることを線形近似  
したため、実際の収束のための繰り返し計算では張力Nの修正  
すべき値に制約を設ける必要がある。

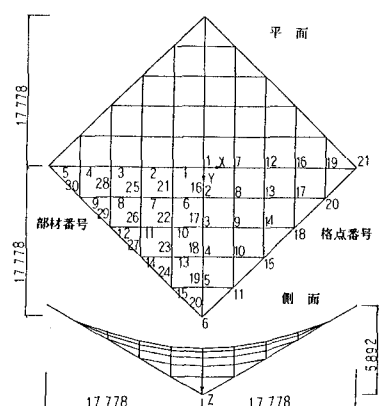


図-2 ケーブルネット骨組図

### 3. 数値計算例

文献3)のケーブルネットモデル  
(図-2)で計算を行った結果を表-1、  
2に示す。なお設計目標値の幅は、  
X,Y,Z座標をそれぞれ0.5M,0.55M,  
2.5Mとし、張力は、部材1-15を1tf、  
部材16-19を0.1tf、部材20-30を  
0.45tfとした。

表-1 目標形状と収束後の形状

| 格点<br>番号 | 荷重<br>(tf) | 目 標 形 状 |        |        | 収 束 後 の 形 状 |         |        |        |         |        |
|----------|------------|---------|--------|--------|-------------|---------|--------|--------|---------|--------|
|          |            | X(m)    | Y(m)   | Z(m)   | 文 献 3       | 計 算 例 1 | 本 法    | 文 献 3  | 計 算 例 1 | 本 法    |
| 1        | 0.125      | 0.000   | 0.000  | 0.000  | 0.000       | 0.000   | -0.081 | 0.000  | 0.000   | -0.107 |
| 2        | 0.252      | 0.000   | 3.536  | 0.000  | 0.000       | 3.512   | 0.192  | 0.000  | 3.491   | 0.172  |
| 3        | 0.254      | 0.000   | 7.071  | 0.000  | 0.000       | 7.014   | 0.582  | 0.000  | 7.027   | 0.581  |
| 4        | 0.256      | 0.000   | 10.707 | 0.000  | 0.000       | 10.591  | 1.143  | 0.000  | 10.669  | 1.160  |
| 5        | 0.259      | 0.000   | 14.142 | 0.000  | 0.000       | 13.968  | 1.880  | 0.000  | 14.081  | 1.900  |
| 6        | 0.000      | 0.000   | 17.778 | 2.946  | 0.000       | 17.778  | 2.946  | 0.000  | 17.778  | 2.946  |
| 7        | 0.251      | 3.536   | 0.000  | 0.000  | 3.444       | 0.000   | -0.194 | 3.335  | 0.000   | -0.217 |
| 8        | 0.503      | 3.536   | 3.536  | 0.000  | 3.468       | 3.514   | 0.073  | 3.350  | 3.494   | 0.058  |
| 9        | 0.508      | 3.536   | 7.071  | 0.000  | 3.506       | 7.021   | 0.454  | 3.372  | 7.032   | 0.458  |
| 10       | 0.515      | 3.536   | 10.707 | 0.000  | 3.516       | 10.592  | 1.000  | 3.433  | 10.678  | 1.025  |
| 11       | 0.000      | 3.536   | 14.142 | 1.768  | 3.536       | 14.142  | 1.768  | 3.536  | 14.142  | 1.768  |
| 12       | 0.252      | 7.071   | 0.000  | 0.000  | 6.875       | 0.000   | -0.528 | 7.067  | 0.000   | -0.586 |
| 13       | 0.506      | 7.071   | 3.536  | 0.000  | 6.929       | 3.520   | -0.281 | 7.003  | 3.503   | -0.315 |
| 14       | 0.510      | 7.071   | 7.071  | 0.000  | 7.021       | 7.043   | 0.072  | 7.001  | 7.047   | 0.068  |
| 15       | 0.000      | 7.071   | 10.707 | 0.588  | 7.071       | 10.707  | 0.588  | 7.071  | 10.707  | 0.588  |
| 16       | 0.255      | 10.707  | 0.000  | 0.000  | 10.375      | 0.000   | -1.090 | 10.668 | 0.000   | -1.171 |
| 17       | 0.510      | 10.707  | 3.536  | 0.000  | 10.466      | 3.523   | -0.883 | 10.657 | 3.518   | -0.935 |
| 18       | 0.000      | 10.707  | 7.071  | -0.588 | 10.707      | 7.071   | -0.588 | 10.707 | 7.071   | -0.588 |
| 19       | 0.259      | 14.142  | 0.000  | 0.000  | 13.835      | 0.000   | -1.810 | 13.996 | 0.000   | -1.910 |
| 20       | 0.000      | 14.142  | 3.536  | -1.768 | 14.142      | 3.536   | -1.768 | 14.142 | 3.536   | -1.768 |
| 21       | 0.000      | 17.778  | 0.000  | -2.946 | 17.778      | 0.000   | -2.946 | 17.778 | 0.000   | -2.946 |

### 4. むすび

本報告で示したケーブル構造物  
の形状決定法によって得られた結  
論は以下に示すとおりである。

- 1)文献3)の最適値問題での形状  
決定法のように座標と張力に  
乗ずる重みなどの必要性がなく計算方法が簡明である。
- 2)ケーブル構造物の形、すなわち座標、およびケーブル部材の  
張力を設計目標値という形で定式化できるので設計者の意図  
を反映した解が比較的短時間で得ることができる。
- 3)基本式は、線形計画問題であるので既存のプログラムバッケ  
ージが利用できシステム化が容易である。

### 参考文献

- 1)阿井、西野：変位法ケーブル構造系の一形状決定手法、  
土木学会第43回年次学術講演会講演概要集、1988.10
- 2)中西、波田：吊構造の形状決定問題に関する一計算手法について、  
日本建築学会論文報告集、第224号 1974.10
- 3)中西、波田：最適値問題の手法による吊構造の形状決定解析、  
日本建築学会論文報告集、第238号 1975.12
- 4)寺野、浅居、菅野：ファジィシステム入門、オーム社、  
PP.67-81、1987

表-2 目標張力と収束後の張力

| 部材<br>番号 | 目標張力<br>N(tf) | 収 束 後 の 張 力 |         |        |
|----------|---------------|-------------|---------|--------|
|          |               | 文 献 3       | 計 算 例 1 | 本 法    |
| 1        | 10.0          | 9.759       | 9.759   | 9.808  |
| 2        | 10.0          | 9.765       | 9.765   | 9.828  |
| 3        | 10.0          | 9.766       | 9.766   | 9.800  |
| 4        | 10.0          | 9.741       | 9.741   | 10.128 |
| 5        | 10.0          | 9.147       | 9.147   | 10.038 |
| 6        | 10.0          | 9.796       | 9.796   | 9.962  |
| 7        | 10.0          | 9.823       | 9.823   | 9.899  |
| 8        | 10.0          | 9.858       | 9.858   | 10.000 |
| 9        | 10.0          | 9.775       | 9.775   | 10.047 |
| 10       | 10.0          | 9.948       | 9.948   | 10.000 |
| 11       | 10.0          | 10.038      | 10.038  | 10.000 |
| 12       | 10.0          | 10.203      | 10.203  | 10.000 |
| 13       | 10.0          | 10.065      | 10.065  | 10.000 |
| 14       | 10.0          | 10.118      | 10.118  | 10.000 |
| 15       | 10.0          | 9.009       | 9.009   | 10.000 |
| 16       | 2.5           | 2.496       | 2.496   | 2.500  |
| 17       | 2.5           | 2.498       | 2.498   | 2.500  |
| 18       | 2.5           | 2.495       | 2.495   | 2.500  |
| 19       | 2.5           | 2.520       | 2.520   | 2.500  |
| 20       | 2.5           | 2.096       | 2.096   | 2.359  |
| 21       | 5.0           | 4.971       | 4.971   | 5.000  |
| 22       | 5.0           | 4.976       | 4.976   | 5.000  |
| 23       | 5.0           | 4.956       | 4.956   | 5.000  |
| 24       | 5.0           | 4.683       | 4.683   | 5.000  |
| 25       | 5.0           | 5.014       | 5.014   | 5.000  |
| 26       | 5.0           | 5.037       | 5.037   | 5.000  |
| 27       | 5.0           | 5.050       | 5.050   | 5.000  |
| 28       | 5.0           | 5.110       | 5.110   | 5.000  |
| 29       | 5.0           | 5.103       | 5.103   | 5.000  |
| 30       | 5.0           | 4.865       | 4.865   | 5.000  |