

斜張橋の地震応答解析と耐震設計

京都大学工学部 正員 山田善一
 京都大学工学部 正員 河野健二
 大阪市役所 正員 ○丸山忠明

1. まえがき

斜張橋の構成要素は、主桁、これを斜めにつづいているケーブル、およびケーブルを支えるタワーの3要素からなる。従来、有限要素法を用いて斜張橋の動的解析を行なう場合、主桁、タワーについてははり要素として取り扱い、ケーブルは引張材として軸方向のみの振動を取り扱っていた。しかし、ケーブルの重量は全体重量の約5%前後をしめ、また文献(1)によるとケーブルの振動が系全体の振動特性に大きな影響を与えることを報告している。そこで本研究では、斜張橋のケーブルに着目し、ケーブルの横振動が構造全体の振動特性に及ぼす影響を及ぼすかを調べ、その結果より、斜張橋の耐震設計を行なう場合、ケーブルの取り扱いについて二三の考察を加えるものである。

2. ケーブルの定式化

ケーブルの横振動を弦の振動と考え、棒要素の幾何学的非線形理論より、ケーブルの剛性マトリックス、質量マトリックスを次のように求めた。

Fig-1のようなピン結合の棒要素が初期の位置A, Bより作用荷重の影響でA', B'の位置に変化したものとする。変位はFig-1のように u_1, u_2, u_3, u_4 とし棒の断面積A長さ l , ヤング率をEとする。棒要素の軸方向ひずみ ϵ_{xx} は2次の非線形項を導入すると次式で表わされる。

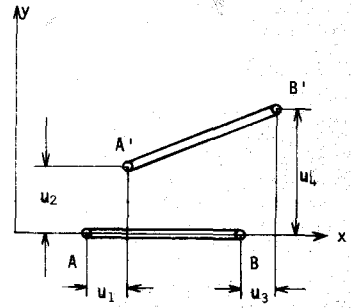


Fig - 1 Cable Element Model

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 \quad (1)$$

ここで任意的 (x, y) の変位 u_x, u_y を軸方向にわたって線形に変化すると仮定すると

$$\begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1-\xi & 0 & \xi & 0 \\ 0 & 1-\xi & 0 & \xi \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここに $\xi = \frac{x}{l}$

よって、この棒要素A', B'にたくわえられるひずみエネルギーUはフックの法則より次の式で与えられる。

$$U = \frac{1}{2} \int_V E \epsilon_{xx}^2 dV = \frac{AE}{2} \int_0^l \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial u_x}{\partial x} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^4 \right] dx \quad (3)$$

式(2)をxについて偏微分し、それを式(3)に代入して高次の項 $(\partial u_y / \partial x)^4$ を無視すると次の

よくなる。

$$U = \frac{AE}{2l^2} \int_0^l (u_1^2 - 2u_1u_3 + u_3^2) dx + \frac{AE}{2l^2} \int_0^l (u_3 - u_1)(u_2^2 - 2u_2u_4 + u_4^2) dx$$

$$= \frac{AE}{2l} (u_1^2 - 2u_1u_3 + u_3^2) + \frac{AE}{2l^2} (u_3 - u_1)(u_2^2 - 2u_2u_4 + u_4^2) \quad (4)$$

ここで棒の軸方向引張力は比較的大きなためを生じている場合でもある定数と仮定する。

すなわち $F = \frac{AE}{l} (u_3 - u_1) : \text{const}$ (5)

ここに F は軸方向引張力

式(4)を整理し、式(5)を代入して Castigliano の第1定理を適用して、要素の力と変位の関係式を求めるとケーブル要素の剛性マトリックスが求められる。また、式(2)の形状関数より質量マトリックスが求められる。

$$[K]_c^e = \begin{bmatrix} \frac{AE}{l} & & & \\ & F/l & \text{S.Y.M} & \\ -\frac{AE}{l} & & \frac{AE}{l} & \\ & -F/l & & F/l \end{bmatrix} \quad [M]_c^e = P \cdot A \cdot l \begin{bmatrix} 1/3 & & & \\ & 1/3 & \text{S.Y.M} & \\ 1/6 & & 1/3 & \\ & 1/6 & & 1/3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここに P は要素の密度

3. 計算例

本研究では斜張橋の形式を次の4つに分類し、ケーブルの横振動を考慮しない場合とする場合について地震応答解析を行ない比較検討した。

- 1) Radial Type
- 2) Harp Type (A) ケーブルの横振動を考慮しない場合
- 3) Fan Type (B) ケーブルの横振動を考慮した場合
- 4) Multi Type

地震応答解析の手法としては次の3つを行なった。

- 1) sine 波入力による定常応答解析
- 2) 建設省土木技術研究所の提案した速度応答スペクトルを用いたスペクトル応答解析
- 3) β -法による実地震応答解析

詳細な計算結果については、当日講演時に発表いたします。

4. あとがき

計算結果より、次のようなことがいえる。

- 1) ケーブルの横振動が主桁、タワーの振動エネルギーを吸収し、主桁、タワーの応答に関して減衰効果を示して、安全側に作用することがわかる。
- 2) Harp Type は他の形式に比較してケーブルの横振動の影響が大きい。
- 3) Multi Type は静的問題と同様にケーブルによる断面力の平滑化の効果が大きく、適当なケーブル断面積を決定すると剛性も高くなり、有利な設計が可能となる。

[参考文献]

- (1) 山田, 江見, 河野 "斜張橋の振動特性" 土木学会第30回年次学術講演会概要集