

ケーブル要素と弦要素を用いた斜張橋の動的応答の比較に関する研究

長崎大学工学部 学生会員 ○木村 剛 中国 福州大学 非会員 呉 慶雄
長崎大学工学部 フェロー 高橋和雄 長崎大学工学部 正会員 中村聖三

1. まえがき

斜張橋全体のケーブルの局部振動を含めた応答を評価する際には一般的に汎用ソフトにおいてケーブル要素を弦要素として解析を行っている。しかし、ケーブルの支点変位、係数励振振動、サグの影響などを評価した厳密な解析を行えない。そこで本研究では、ケーブルの応答評価を行える有限要素法プログラムを使用し、このケーブル要素と弦要素を用いて、支持ケーブルを分割する斜張橋モデルへの応用の場合に、鉛直正弦波加振およびねじれ正弦波加振により両者で得られる応答の違いを評価する。対象橋梁としては長崎県の大島大橋を用いる。

2. ケーブル要素と弦要素の剛性マトリクス

2-1 ケーブル要素のマトリクス

文献¹⁾を参考にケーブル要素の剛性マトリクス $[K]^e_{\text{Cable}}$ を以下に示す。

$$[K]^e_{\text{Cable}} = \frac{E_c A_c}{L_0 (L_0 + e)^2} \begin{bmatrix} (L_0 + u)^2 & (L_0 + u)v & (L_0 + u)w & -(L_0 + u)^2 & -(L_0 + u)v & -(L_0 + u)w \\ & v^2 & vw & -(L_0 + u)v & -v^2 & -vw \\ & & w^2 & -(L_0 + u)w & -vw & -w^2 \\ & & & (L_0 + u)^2 & (L_0 + u)v & (L_0 + u)w \\ \text{sym.} & & & & v^2 & vw \\ & & & & & w^2 \end{bmatrix} + \frac{P}{(L_0 + e)^3} \begin{bmatrix} v^2 + w^2 & -(L_0 + u)v & -(L_0 + u)w & -v^2 - w^2 & (L_0 + u)v & (L_0 + u)w \\ & (L_0 + u)^2 + w^2 & -vw & (L_0 + u)v & -(L_0 + u)^2 - w^2 & vw \\ & & (L_0 + u)^2 + v^2 & (L_0 + u)w & vw & -(L_0 + u)^2 - v^2 \\ & & & v^2 + w^2 & -(L_0 + u)v & -(L_0 + u)w \\ \text{sym.} & & & & (L_0 + u)^2 + w^2 & -vw \\ & & & & & (L_0 + u)^2 + v^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 X_i, Y_i, Z_i ：局部座標系。 u, v, w ： X_i, Y_i, Z_i 方向の相対変位。 L_0 ：要素の初期長さ。 P_0 ：初期軸力。 $P = P_0 + (E_c A_c / L_0)$
 e ：変形後軸力。 E_c ：ヤング係数。 A_c ：断面積。 $e = \{(L_0 + u)^2 + v^2 + w^2\}^{1/2} - L_0$ ：要素伸び。

2-2 弦要素のマトリクス

文献²⁾を参考に弦要素の剛性マトリクス $[K]^e_{\text{Chord}}$ を以下に示す。

$$[K]^e_{\text{Chord}} = \frac{E_c A_c}{L_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1 & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & 0 & 0 \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} + \frac{P_0}{L_0} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & -1 \\ & & & 0 & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & 1 & 0 \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 P_0 ：初期軸力。また、この弦要素の剛性マトリクス $[K]^e_{\text{Chord}}$ は、(1)式の剛性マトリクス $[K]^e_{\text{Cable}}$ において $u = v = w = 0, P_0 = P$ とおくことによっても求められる。

3. 解析対象と解析モデル

解析対象の大島大橋は、3径間連続鋼斜張橋で中央径間 350m、側径間 160m、幅員 9.75mの斜張橋である。また、解析においてケーブルは8分割したモデルを用いる。図-1に解析モデルを示す。減衰は部材ごと考慮したレーリー減衰とし、主桁および主塔の減衰定数は0.02、ケーブルの減衰定数は0.001を用いる。

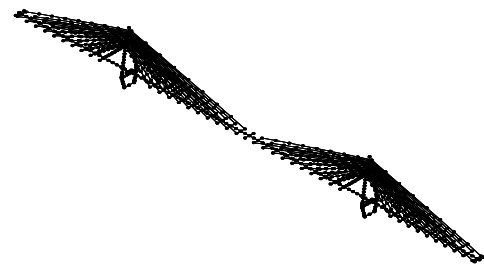


図-1 ケーブルを分割した解析モデル

キーワード：ケーブル、係数励振振動、有限要素プログラム、動的解析

連絡先：長崎大学工学部社会開発工学科開発工学科 〒852-8521 長崎市文教町 1-14 TEL：095-819-2610 FAX：095-819-2627

4．斜張橋の応答特性

起振機実験を想定して斜張橋を正弦波加振する場合の応答を求める。表 - 1 に斜長橋の全体振動の鉛直対称 1 次振動とねじれ対称 1 次振動の固有振動数および振動モードを示す。鉛直正弦波加振は鉛直対称 1 次振動数と同一の加振振動数および加振力の振幅 50kN で行う。ねじれ正弦波加振はねじれ対称 1 次振動数と同一の加振振動数および加振力 500kN・m で行う。

4-1 鉛直正弦波加振による応答

図 - 2 に鉛直正弦波加振の応答を示す。図 - 2 (a) にはケーブルの鉛直方向最大振幅、図 - 2 (b) には主桁の鉛直方向最大変位を示す。図 - 2 (a) よりケーブル要素による解析においては C1、C2、C19 および C20 において振幅が卓越している。これはケーブル C1、C2、C19 および C20 の固有振動数が鉛直対称 1 次振動数 (0.297Hz) と 1 : 2 の関係で分数調波共振が発生するためである。しかし、弦要素による解析では卓越した振幅が見られない。これは、弦要素による解析では分数調波共振を考慮できないためである。また、図 - 2 (b) より主桁の変位は、弦要素の結果が最大で約 56% 大きくなる。

4-2 ねじれ正弦波加振による応答

図 - 3 にねじれ正弦波加振の応答を示す。図 - 3 (a) にはケーブルの鉛直方向最大振幅、図 - 3 (b) には主桁の鉛直方向最大変位を示す。図 - 3 (a) よりケーブル要素による解析では C1、C2、C19 および C20 の振幅が卓越している。これは、C1、C2、C19 および C20 の固有振動数とねじれ対称 1 次固有振動数 (1.137Hz) が 1 : 2 となり主不安定領域における係数励振振動が発生しているためである。しかし、弦要素では卓越した振幅が見られない。これは、弦要素による解析では係数励振振動を考慮できないためである。また、C12 および C13 においては、ケーブルの固有振動数とねじれ対称 1 次固有振動数 (1.137Hz) が 1 : 1 となり副不安定領域における係数励振振動が発生し、ケーブル要素では卓越した振幅が見られる。弦要素でも卓越した振幅がみられ、ケーブル要素に比べ振幅が大きくなっている。これは、弦要素では強制振動により卓越した振幅が発生しているためである。主桁の応答に関しては、図 - 3 (b) よりケーブル要素で見られた鉛直方向変位が、弦要素では主桁の鉛直方向応答は発生していない。

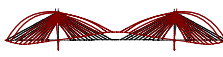
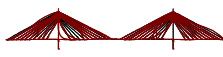
5．まとめ

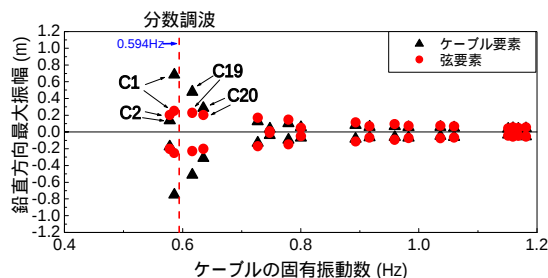
弦要素による解析ではケーブル特有の分数調波共振および係数励振振動を考慮できない。その結果、主桁の応答に差が見られる。よって、斜張橋において動的応答を行う際には本研究で用いた有限要素法プログラムを用いた解析が必要である。

参考文献 1) 高橋和雄、大淵隆司、呉慶雄、中村聖三：有限要素法によるケーブルの振動解析、長崎大学工学部研究報告、第 33 巻、第 61 号、pp.103 - 108、2003.7。

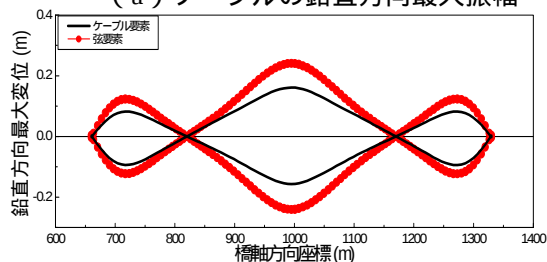
2) (株) アーク情報システム：TDAP 機能説明書、2003.9。

表 - 1 固有振動数および振動モード

No	振動数 (Hz)	振動モード図
鉛直 1 次	0.297	
ねじれ 1 次	1.137	



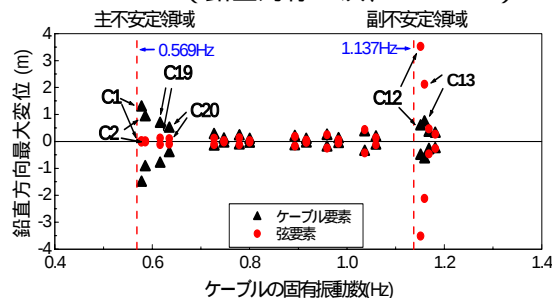
(a) ケーブルの鉛直方向最大振幅



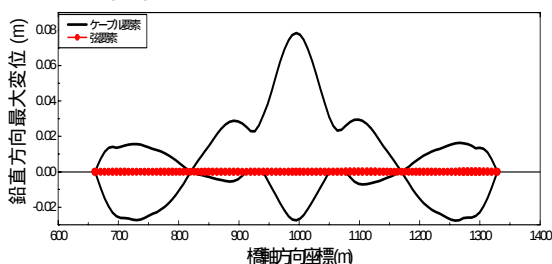
(b) 主桁の鉛直方向最大振幅

図 - 2 鉛直正弦波加振による応答

(鉛直対称 1 次、0.297Hz)



(a) ケーブルの鉛直方向最大振幅



(b) 主桁の鉛直方向最大振幅

図 - 3 ねじれ正弦波加振による応答

(ねじれ対称 1 次、1.137Hz)