

慶島建設 正 ○ 田中秀夫
 東京都立大学 正 長嶋文雄
 同上 正 伊藤文人

1. まえがき

長大トラス橋の立体振動解析を行なう場合、F.E.M解析は、利用性と解の厳密性の観点から最も優れた手法と言えるが、コンピュータの記憶容量及びCPUタイムが膨大になる問題点がある。これを改善すべく、種々の自由度低減法が提案されているが、その対象は特定の骨組形状に限られる場合が多く、また扱いにくいものであった。本報告は、立体トラス構造系に対して、従来のF.E.M解析の流れの中にわずかな変更(変数変換し、互に独立な系に分離)を加えることにより、自由度を低減したより一般性のある立体トラス橋の新動的応答解析モデルを提案する。

2. 新解析モデル

Fig.1の点(S)-(S+1)の変位ベクトルは、2点の関係より次式となる。

$$d_s = (d_{s+1} + d_s)/2 - (d_{s+1} - d_s)/2, \quad d_{s+1} = (d_{s+1} + d_s)/2 + (d_{s+1} - d_s)/2 \quad (1)$$

式(1)は、単位ベクトル e_1, e_2, e_3 を用いて表わすと次式となる。

$$d_s = \{(u_{s+1} + u_s)e_1 + (v_{s+1} + v_s)e_2 + (w_{s+1} + w_s)e_3\}/2 - \{(u_{s+1} - u_s)e_1 + (v_{s+1} - v_s)e_2 + (w_{s+1} - w_s)e_3\}/2 \quad (2)$$

$$d_{s+1} = \{(u_{s+1} + u_s)e_1 + (v_{s+1} + v_s)e_2 + (w_{s+1} + w_s)e_3\}/2 + \{(u_{s+1} - u_s)e_1 + (v_{s+1} - v_s)e_2 + (w_{s+1} - w_s)e_3\}/2$$

式(2)より、任意の2点の変位は、小カッコ内の6個の新しい変位変数で表現出来る。一般的直線トラス橋は、橋軸を含む垂直平面に対して対称な2節点(対節点)の組み合わせ構造物と言える。[本モデルの条件] そこで、式(2)で導いた6個の変形及び変位モード(Fig.2)を規準とし、Fig.3の変換マトリックスを導いた。ここで、立体トラス橋を構成する部材は、Fig.4に示すA, B, Cの3種類と考えられる。

①-横桁 ②-弦材, 斜材, 垂直材 ③-横構, 対傾構

これから3種類の対部材に関し、剛性, 質量, 減衰マトリックスについて、変数変換前と後を図示したのが、Fig.5である。Fig.5(b)より、あらゆる骨組形状に対し、対称モード(Fig.2下段)と非対称モード(Fig.2上段)の挙動に分離して、解析出来ることが明らかである。

A, B, C, A_2	B_2	C_2	$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{pmatrix}_{(s, s+1)}$
A_2	A_3, B, C, C_2	B_2	
B_2	C_2, A, B, C, A_2	A_2	
C_2	B_2, A_2	A_2, B, C, A_2	

(C). 変換前

A, B, C, C_1	B_1, C_1	O	$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{pmatrix}_{(s, s+1)}$
O	A_1, B, C, C_1	B_1, C_1	
B_1, C_1	O	A_1, B, C, C_1	
O	B_1, C_1	O, A_1, B, C, C_1	

(D). 変換後

Fig.5

A: 横桁に対する各マトリックス B: 弦材, 斜材, 垂直材に対する各マトリックス C: 横構, 対傾構に対する各マトリックス
 横・縦: $\{u^*, v^*, w^*, \theta_x^*, \theta_y^*, \theta_z^*\}$ に対するそれぞれの変形モード

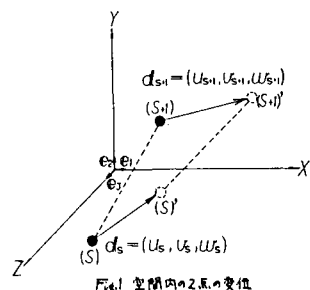


Fig.1 空間内2点の変位

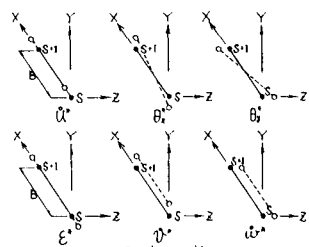


Fig.2 基本モード

$$\begin{Bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \\ \theta_x^* \\ \theta_y^* \\ \theta_z^* \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ v_s \\ w_s \\ u_{s+1} \\ v_{s+1} \\ w_{s+1} \end{Bmatrix}$$

Fig.3 変換マトリクス

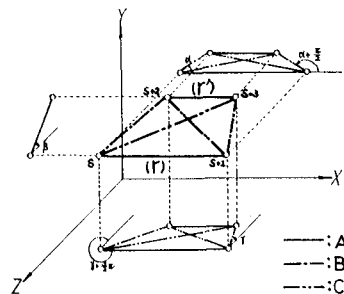


Fig.4 空間を構成する3種類の対部材

3. 物理的意味をもつ変数への変換

Fig. 3 で得られた新変数は、このままでは物理的に何を表わすか明らかではない。そこで、次の変換をするこ
 により物理的に意味を持つ変数となり、扱う問題によ、ては、非常に便利な変数となる。

$$\begin{Bmatrix} \delta_u \\ \delta_v \\ \delta_w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (u_{s+1} + u_s)/2 \\ (v_{s+1} - v_s)/B \\ (w_{s+1} - w_s)/B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{u}^* \\ \hat{v}^* \\ \hat{w}^* \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varphi_y \\ \varphi_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (u_{s+1} - u_s)/B \\ (v_{s+1} + v_s)/2 \\ (w_{s+1} + w_s)/2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^* \\ \varphi_y^* \\ \varphi_z^* \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 B : 対節点(s)-(s+1)の距離 $\hat{u}, \hat{v}, \hat{w}$: 対節点(s)-(s+1)の中間点のX, Y, Z方向変位
 ε_x : 部材(r)のひずみ φ_y, φ_z : Y, Z方向の回転角

4. 本モデルの適用諸条件

本解析モデルを使用する際、従来のF.E.M.解析の流れにそえばよいが、橋軸を含む垂直平面に対して対称であるという条件に基づいているため、次の3項目について検討する必要がある。

(i). 支点の拘束条件 支点の拘束条件を入れる場合、支点上の節点については、元来の変数に戻す必要があるが、Fig. 3の逆変換マトリックスが、単位マトリックスとなるため、本モデルでは、そのまま拘束条件を入れることが出来る。また、拘束条件が対節点において非対称である場合は、対称モードと非対称モード間に相互影響項が表われるが、共通変数の一方を消去してやれば、厳密に解析出来る。

(ii). 外力条件

①橋軸を含む垂直平面に対して対称で1方向にかかる場合——→外力の作用する方向のみの計算でよい。

②非対称入力あるいは多方向外力の場合——→対称モードと非対称モードの応答値の重ね合わせを行なう。

(iii). 非対称付加質量が加わる場合 静的問題においては、外力項として扱うため、(ii)-②の理論がそのまま適用できる。動的問題の場合は、本モデルの条件に反するものであるため、質量マトリックス内に連成が生じるが、その連成項を外力項にまわすことによって、本理論は依然として有効である。

5. 本モデルによる解析例

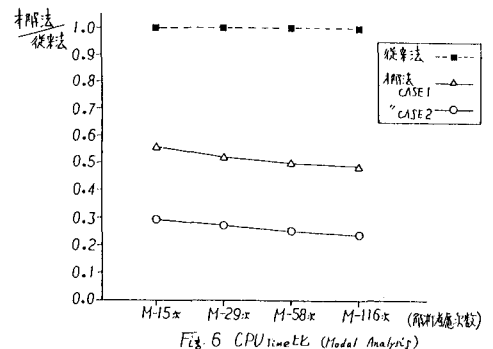
スパン126m, 全自由度数116の利根川ワーレントラス橋梁の動的応答解析を、従来のF.E.M.解析と、本解析モデルによる2通りの解析を行ない、CPUタイム及び記憶容量について比較したのが、Fig. 6及びTable 1である。ここで、Fig. 6中のCASE 1は、4-(ii)の外力条件の②に対するもの、CASE 2は①に対応するものである。

また、港大橋曲弦トラス橋(Fig. 7)の応答解析を行ない、その際得られた第1次固有振動数をTable 2に示した。曲弦トラスの解析により、本モデルの一般性が証明されたことになる。

6. 結論

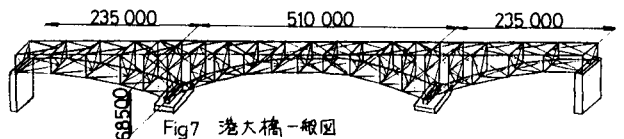
本解析法は、立体特性を示す非対称モードと、平面解析に対応する対称モードに分離して解析出来るものであり、そのことにより、CPUタイム、記憶容量が大幅に節約できることが明らかとなった。また、コンパクトなマトリックスを扱うため精度のよでも有効な手法である。

参考文献 1)小松・西村：平行弦トラス橋の立体振動特性について、土木学会論文報告集第297号 1980年5月 2) F. Nagashima・F. Itoh : A Method of Dynamic Analysis of Parallel Chord Space Truss, Memoirs of Faculty of Technology T.M.U. No.28 1978



従来法 (sec)	本解析法 (sec)	本解析法 / 従来法
1036	420	0.405

Table 1 記憶容量



水平方向	0.302 (Hz)
鉛直方向	0.419 (Hz)

Table 2 第1次固有振動数