

汎用ソフトのデータを用いた走行解析ソフトウェアの検討

Development of software for traffic induced vibration analysis using general-purpose software data

横川英彰*

Hideaki YOKOKAWA

*博士(工学) オイレス工業株式会社 免制震事業部技術開発部 (〒105-0003 東京都港区港南 1-6-34)

In Japan, seismic standards will change, making any seismic design of bridges was required to perform dynamic analysis. On the other hand, the dynamic problem of the same bridge, health monitoring or traffic induced vibration for the growing interest in bridge has not run most popular. So here is a model for the analysis of general-purpose software used in bridge seismic design using the results to be output from general-purpose software. This software is characterized by the work on the spreadsheet software. In this paper, first, to review the results with the stiffness and velocity of vehicle analysis was performed using the Software. Next, expand the Software, make the development of the theory of viscous damper and when using the MMD, we analyze the case of using the devices, to confirm the effectiveness of the device.

Key Words: traffic induced vibration, general-purpose software modal analysis spread sheet, macro programming

キーワード: 走行解析, 汎用ソフト, モーダル解析, 表計算ソフトウェア

1. はじめに

平成 14 年に改定された道路橋示方書¹⁾から、耐震設計が動的設計に移行し、示方書における“挙動が複雑な橋”は振動解析モデルが無いと設計が行えなくなった。この、“挙動が複雑な橋”は、いわゆる桁橋では多径間連続橋(免震橋・分散橋)も含まれる。この免震橋・分散橋は都市部、郊外部を問わず多く建設されている橋梁である。これら積層ゴム支承を用いた橋梁は、橋梁振動の観点から見ても、振動しやすいと考えられるため、常時に対しても動的検討を行い、その影響を評価する必要があると考えられる。

一方、過去に多く建設された橋梁の維持管理の必要性からも、橋梁振動が着目されつつある。近年研究が進められている橋梁のヘルスマニタリングの分野では、常時振動の観測結果から橋梁の状態を把握する研究例²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾があり、外力としては橋梁上を走行する車両もそのひとつとされている。また、環境振動対策⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾としても、橋梁の近隣に住む住民からの苦情等に対し、対策を考える上でのツールとしても橋梁振動を検討する意義は非常に深いと考えられる。しかし、このように

橋梁振動を検討する意味がありながらも、橋梁振動を解析するソフトウェアは、耐震解析用ソフトウェア(以下汎用ソフトとする)と比較して普及していない。そこで、著者は、示方書の改定により広く普及した耐震解析用動的解析モデル(以下動的解析モデルとする)を活用し、簡易的に橋梁振動を解析するソフトウェアを開発した。このソフトウェアは、汎用ソフトの動的解析モデルと、汎用ソフトによる解析結果を利用し、走行解析を行うものである。解析方法としてはモーダル解析を用い、解析ソフトのプラットフォームとしては表計算ソフトウェアである、マイクロソフトエクセルに付属している Visual Basic for Application を用い、可搬性を持たせている。

2. ソフトウェアの概要

図-1 に、本ソフトウェアの処理順序を示す。

本ソフトウェアは、汎用ソフトの解析モデルの節点座標のデータ、質点の質量データ、そして固有値解析結果のデータを読み込み、ソフトウェア内部で処理を行うことにより、モーダル解析を行う。一方、路面の

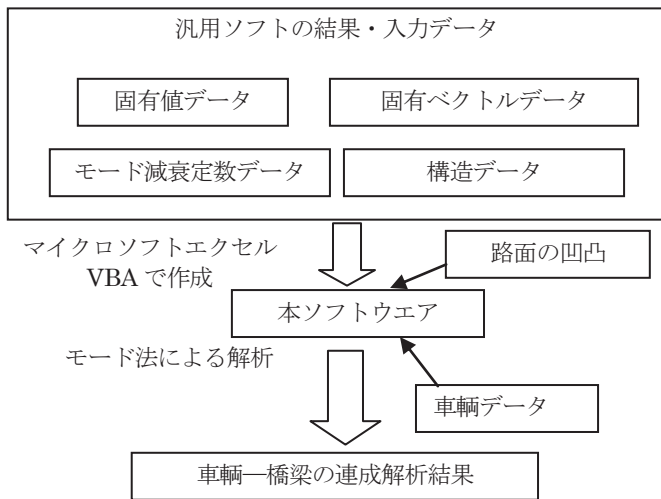


図-1 解析の流れ

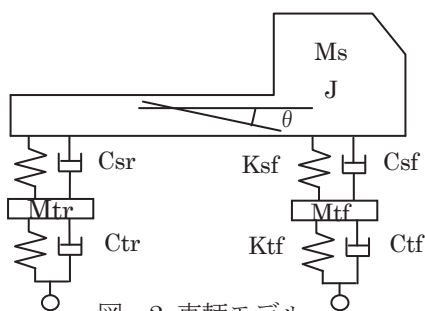


図-2 車両モデル

凹凸については、本ソフトウェアと同様に別途ソフトウェアを作成して算出している。

2.1 本ソフトウェアでのモーダル解析の方法

ここでは、汎用ソフトの動的解析モデルを用いたモーダル解析の方法¹¹⁾について説明する。

最初に、汎用ソフトから出力された固有値解析結果を読み込み、モードベクトルマトリックス ϕ を作成する。このモードベクトルマトリックス ϕ を用いて、質量マトリックスを正規化する。このモードベクトルマトリックスは、モード毎のベクトル最大値で正規化する。なお、この節点の質量は動的解析モデルから入力される。

$$\mathbf{M}_m = \phi^T \mathbf{M} \phi \quad (1)$$

式(1)に示した \mathbf{M}_m の対角項がモード質量マトリックスとなる。

次に、モード剛性マトリックス \mathbf{K}_m を作成する。 i 次モードのモード剛性 k_{mi} は、式(1)によって求められた i 次モードのモード質量 M_{mi} 、汎用ソフトの固有値解析結果から読み込まれた i 次モードの固有振動数 f_i から求める。

$$k_{mi} = M_{mi} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_i)^2 \quad (2)$$

式(2)によって求められた i 次モードのモード剛性

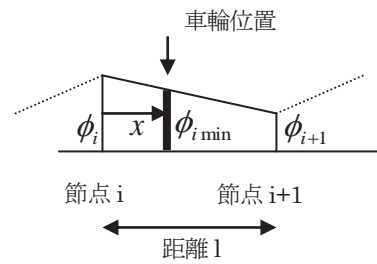


図-3 モードベクトルの線形補間

k_{mi} を対角に配置したマトリックスをモード剛性マトリックス \mathbf{K}_m とする。

さらに、モード減衰マトリックス \mathbf{C}_m を作成する。 i 次モードのモード質量 M_{mi} と、 i 次モードのモード剛性 k_{mi} 、さらに、式(1)によって求められた i 次モードのモード質量 M_{mi} 、汎用ソフトの固有値解析結果から読み込まれた、 i 次モードのモード減衰定数 h_{mi} から、 i 次モードの減衰係数 C_{mi} を求める。

$$C_{mi} = 2 \cdot h_{mi} \cdot M_{mi} \cdot k_{mi} \quad (3)$$

モード剛性マトリックスと同様に式(3)で求められた i 次モードの減衰係数 C_{mi} を対角項に配置することにより、 \mathbf{C}_m を作成する。これら質量、剛性、減衰の各マトリックスは対角項の値のみを扱う。

これら、汎用ソフトの固有値解析結果を利用することにより、本ソフトウェアで固有値解析や、モード減衰定数算出など、比較的煩雑な処理を行うことなく走行解析を実現することができる。

2.2 走行車両のモードベクトル¹²⁾

走行車両は、図-2に示すような4自由度車両¹³⁾を用いている。この4自由度車両は前後に車輪があり、その車輪の位置ごとの荷重を決定しなくてはならない。荷重を入力するためには、モードベクトルの値を計算しなくてはならないため、ここでは、車両の移動ポイントにおけるモードベクトルの決定法について説明する。

車輪位置のモードベクトル ϕ_{imin} は、以下のように線形補間して算出する。

$$\phi_{imin} = \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{l} \cdot x + \phi_i \quad (4)$$

ここに、 ϕ_i は節点 i のモードベクトル、 ϕ_{i+1} は節点 $i+1$ のモードベクトル、節点間の距離を l である。また、節点間に入った車輪位置を x とすると、式(4)により、車輪位置のモードベクトル ϕ_{imin} を算出することができる。この式の概念を図-3に示す。

動的解析モデルは、主眼が橋脚や基礎、支承におか

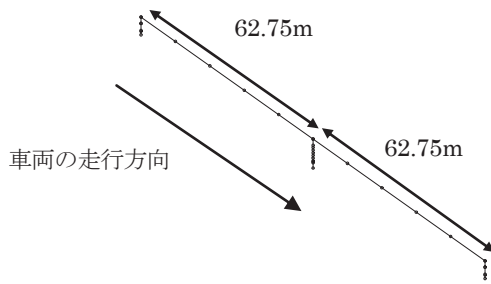


図-4 対象橋梁の解析モデル

表-1 対象橋梁の緒元

橋長	(m)	125.5
上部構造質量	(kN)	26104
橋脚高さ	(m)	10.6
橋台高さ	(m)	6.45

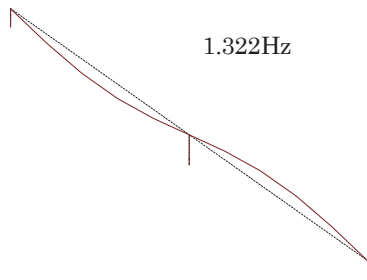


図-5 上部構造曲げ1次モードのモード形状

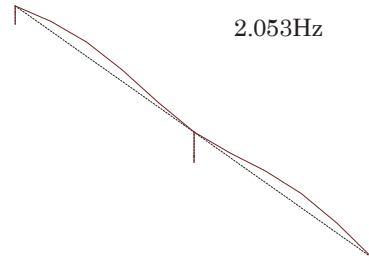


図-6 上部構造曲げ2次モードのモード形状

れているため、上部構造の節点は細かく区切られておらず、この線形補間を用いることにより走行解析を実現できる。

2.3 時間積分の方法

走行解析を行う際の時間積分の方法は、さまざまな方法が提案されてきたが、本ソフトウェアは走行車両を外力として連成させているため、陰解法のNewmarkのβ法¹¹⁾を用いている。なお、収束判定は加速度の誤差としている。

2.4 路面の凹凸の作成

路面の凹凸は、下記のような方法¹⁶⁾で作成している。路面の凹凸のスペクトル密度関数 $S(\Omega)$ は式(5)のように示される。

$$S(\Omega) = \frac{a}{\Omega^n} \quad (5)$$

これは空間周波数 Ω での、パワースペクトル密度 $S(\Omega)$ を表現した式である。

この式(5)から、位置 x の路面の凹凸 $R(x)$ は以下の式で算出することができる。

$$R(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{4 \cdot S(\bar{\Omega}_i) \cdot \Delta\Omega} \cos(\bar{\Omega}_i \cdot x + \theta_i) \quad (6)$$

また、 $\bar{\Omega}_i$ は

$$\bar{\Omega}_i = \frac{\Omega_i + \Omega_{i-1}}{2} \quad (7)$$

さらに

$$\Delta\Omega = \Omega_i - \Omega_{i-1} \quad (8)$$

ここに、 N ：空間周波数の分割数、 θ_i は一様乱数により決定した $\bar{\Omega}_i$ に対応する位相である。

ここで発生させた路面の凹凸だけでは、ジョイント部の段差など、計算的に算出できない凹凸も表現させるため、プラットフォームの機能を有効に活用する。式(6)で算出された路面の凹凸を一度スプレッドシートに打ち出し、人間の手により路面の凹凸を編集し、テキストファイルとして出力する機能を付加させた。これにより、簡単にジョイント部の路面の凹凸などを編集することが可能となった。

以上、汎用ソフトのデータを活用しつつ、さらにプラットフォーム機能を活用したソフトウェアを開発した。

3. 本ソフトウェアでの解析の一例

ここでは、本ソフトウェアで解析を行った結果の一例を示す。対象橋梁は2径間連続橋梁とし、走行車両は前述の4自由度モデルとした。

3.1 対象橋梁の解析モデル

対象橋梁の解析モデルを図-4に、橋梁の諸元を表-1に示す。この解析モデルは耐震解析用モデルである。この橋梁は可動固定形式の橋梁である。上部構造の節点は図-4に示したように比較的粗く切られ、橋脚の節点は塑性ヒンジなどが考慮されているモデルである。

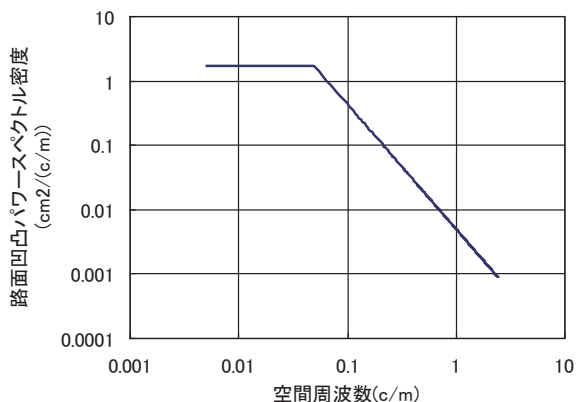


図-7 路面の凹凸パワースペクトル密度

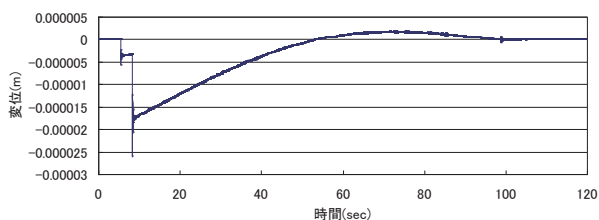


図-9 時速 5km での入口変位

基礎ばねについては、耐震設計で用いられているばねを用いているが、ここでは、上部構造の挙動を評価するため耐震設計の値をそのまま用いている。

図-5 と図-6 に上部構造の曲げが卓越するモード形状を示す。上部構造曲げ 1 次モードでは 1.322Hz，上部構造曲げ 2 次モードでは 2.053Hz である。

3.2 路面の凹凸

ここで用いた路面の凹凸のスペクトルを図-7 に、路面の凹凸を図-8 に示す。

3.3 解析条件

解析条件は、時間積分間隔を 0.005 秒とし、収束値は 10^{-10} とした。考慮するモード次数は支点変位を計算することを考慮し 35 次モードまでとした。車両の走行速度については、上部構造の剛性評価を行うための準静的なケースとして時速 1km と時速 5km、標準的な速度として時速 60km、高速道路を想定した 100km の 4 ケースとする。

3.4 解析結果

(1) 準静的な速度による本ソフトウェア上での剛性評価

図-9 に時速 5km で車両が走行したときの第一径間桁中央部の桁の変位を、同じ条件で図-10 に第一径間の入り口の桁変位を、図-11 に時速 1km で車両が走行したときの桁の各節点の変位と静的解析から得た各節点の変位の比較を示す。

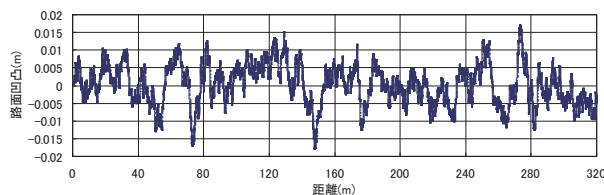


図-8 路面の凹凸

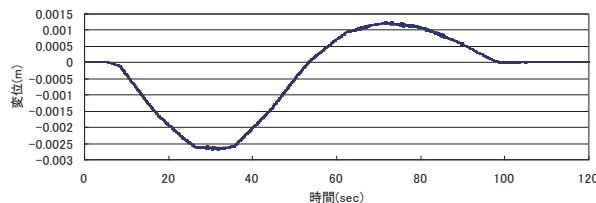


図-10 時速 5km 第一径間中央部変位

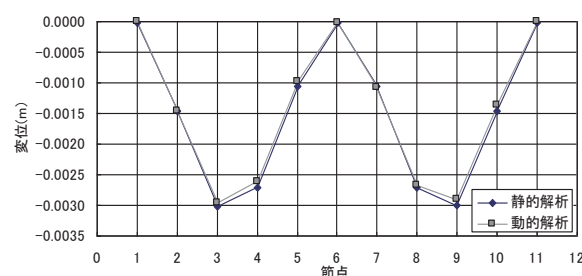


図-11 静的解析と時速 1km での各変位との比

図-9 から、時間が進むにつれ、車両が移動し変位が増加し、一度 0 に戻る様子が見える。この変位が 0 となるのは第二径間に入ったことを示している。さらに時間が進むと変位が第一径間に車両があったときと逆方向に振れている。このことから、橋梁の静的な挙動も概ね再現できていると考えられる。また、図-10 から、第一径間に車両が入ったとき、前輪が入り一度変位し、後輪が入ってさらに変位が増加する様子が見える。このことから、車両についても応答の評価ができていくことが分かる。一方、図-11 に示した静的解析と本ソフトウェアから得た各節点の変位の比較より、両者ほぼ結果が一致しており、本ソフトウェアによる剛性評価が可能といえる。

(2) 標準的な速度と高速道路を想定した速度

図-12 に標準的な速度で車両を走行させたときの第一径間の桁中央のたわみ変位を、図-13 に第一径間入り口のたわみ変位を示す。また、図-14 に高速道路を想定した速度で車両を走行させたときの第一径間の桁中央のたわみ変位を、図-15 に第一径間の入り口のたわみ変位を示す。

図-12 と図-14 を比較すると、時速 60km の結果は、振動振幅が時速 100km の結果と比較して小さい。これは、速度が速いほどに橋梁の応答が大きくなること本ソフトウェアで解析できていることが分かる。

車両が橋梁上を退出した後の波形から、時速 100km

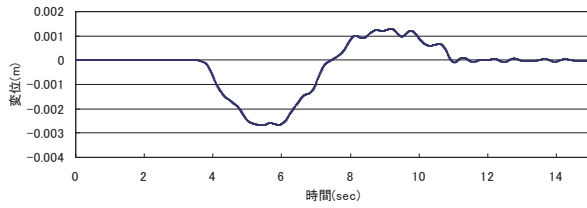


図-12 時速 60km 第一径間中央部変位

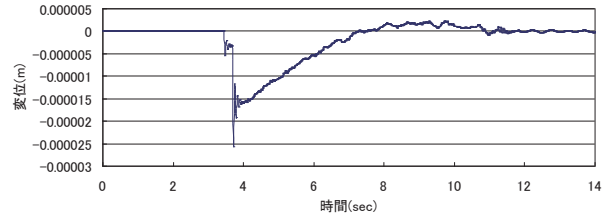


図-13 時速 60km での入口変位

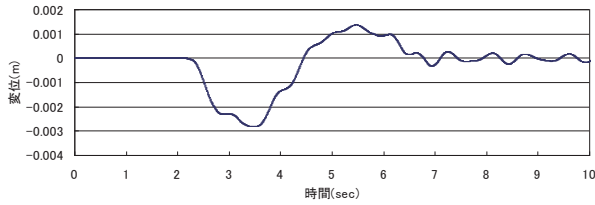


図-14 時速 100km 第一径間中央部変位

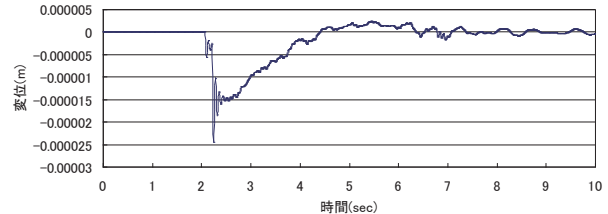


図-15 時速 100km での入口変位

の結果と、時速 60km の結果を比較すると、後者は自由振動しているものの振幅が小さい。このことから、本ソフトウェアで、車両の速度の違いによる応答の違いを評価できることが分かった。

図-13 と図-15 を比較すると、時速 100km の結果は、前輪が橋梁に進入ところで、衝撃と見られる細かな振動が起こっているが、時速 60km の結果ではその振動が小さい。また、後輪が橋梁に進入した場合についても同様な現象が起っており、橋梁に車両が進入したときの衝撃についても解析ができることが分かる。また、時間が経過するにしたがって、変位が大きく変化するが、時速 100km の結果は時速 60km の結果と比較して、振幅が大きい。この結果から、変位を元に解析される支点反力についても、車両の速度の違いを評価できることが分かる。

4. 振動制御への拡張

これまで、本ソフトウェアの妥当性について検討を行ったが、ここでは、橋梁の振動制御デバイスの効果を検討するために、本ソフトウェアを拡張した。対象とするのは、交通振動対策で用いられることが多い TMD や粘性ダンパーである。ここでは最初に、拡張に際しての理論を示し、その後、マルチマスダンパー (MMD)¹⁵⁾や、粘性ダンパーを設置した場合の解析例を示し、これらのダンパーの効果について検討する。

4.1 拡張に際しての理論

(1) MMD

MMD は複数の TMD を設置し、それぞれについて固有振動数を微妙に変化させ、全体でバンド幅を持たせてロバスト性を持たせるデバイスである。写真-1 に MMD を実橋に設置した CG による設置例を示す。MM

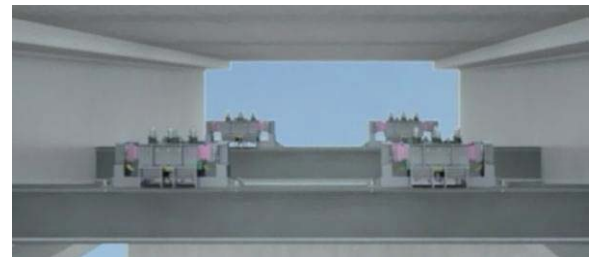


写真-1 MMD の一例

D は力学的には TMD が複数設置されるのと同じであるため、ここでは、MMD のうちのひとつに着目し説明を行う。

まず、MMD 一つあたりの運動方程式は、以下のよう示される。

$$m_T \ddot{u}_T + c_T \dot{u}_T + k_T u_T = F_T \quad (9)$$

ここに、 m_T は質量、 c_T は減衰係数、 k_T は剛性である。また、 F_T は外力、 u_T は変位である。式(9)は、一般的な 1 自由度系の運動方程式であるが、式(9)と橋梁と連成するためには、外力 F_T は式(10)のように示すことができる。

$$F_T = k_T \left(\sum_{i=1}^N \phi_i(x_T) \cdot u_i \right) + c_T \left(\sum_{i=1}^N \phi_i(x_T) \cdot \dot{u}_i \right) \quad (10)$$

ここに、 $\phi_i(x_T)$ は i 次モードの MMD 設置点 x_T でのモードベクトルの値、 u_i は i 次モードの橋梁の変位である。なお、式(10)は、式(9)において、MMD 設置点 x_T での橋梁の変位や速度と、MMD の変位や速度との相対値を計算するための項である。

一方、橋梁に対する MMD の反力は式(11)のように示される。

表-2 MMD のパラメータ

固有振動数(Hz)	減衰定数
1.86	0.0363
1.96	0.0380
2.06	0.0396
2.18	0.0419

※質量は一つあたり 50kN としている

$$F_{Tj} = \phi_j(x_T) \left\{ \begin{array}{l} k_T \left(u_T - \sum_{i=1}^N \phi_i(x_T) \cdot u_i \right) + \\ c_T \left(\dot{u}_T - \sum_{i=1}^N \phi_i(x_T) \cdot \dot{u}_i \right) \end{array} \right\} \quad (11)$$

ここに、 F_{Tj} は j 次モードにおける MMD 一つあたりの反力、 $\phi_j(x_T)$ は、 j 次モードにおける MMD 設置点におけるモードベクトルである。ここで示した方法は、走行車両と同様に、外力で連成しているため、収束計算が必要となる。また、MMD は TMD を複数設置したのと同じであるため、式(9)から式(11)までを設置数分だけ解くことにより MMD を表現する。

(2) 粘性ダンパー

粘性ダンパーは、耐震デバイスの一つとしても用いられているが、橋梁振動の低減にも用いられているデバイス¹⁷⁾の一つである。粘性ダンパーの一例を写真-2に示す。粘性ダンパーは式(12)のように、速度の累乗の非線形な減衰特性で示される。

なお、粘性ダンパーの種類によっては、粘弾性の特性を持つものがあるが、ここでは、速度に対して非線形特性を持つ例を対象とする。

粘性ダンパーは、一般的に式(12)のように示される。

$$F_d = C \cdot v_d^\alpha \quad (12)$$

ここに、 F_d は、粘性ダンパーの減衰力、 C は粘性ダンパーの減衰係数、 v_d は粘性ダンパーの相対速度、 α は速度の累乗数であり、粘性ダンパーの材料や構造により変化する値である。ここで、解析上、粘性ダンパーは式(13)のように示される。

$$F_d = \text{sgn}(v_d) \cdot C \cdot |v_d|^\alpha \quad (13)$$

ここに、 $\text{sgn}(v_d)$ は粘性ダンパーにおける相対速度の符号関数である。

i 次モードの粘性ダンパーの設置点 x_d のモードベクトルを $\phi_i(x_d)$ とすると、粘性ダンパー設置点の速度 v は、



写真-2 粘性ダンパーの一例

$$v = \sum_{i=1}^N v_i \cdot \phi_i(x) \quad (14)$$

となる。ここに、 v_i は i 次モードの橋梁の速度である。

一方、ダンパーの減衰力に着目すると、モデル上の点 x_d にダンパーが設置されているので、橋梁にかかるダンパーの減衰力は

$$F_{dj} = \phi_j(x_d) \cdot \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^N v_i \cdot \phi_i(x_d) \right) \cdot C \cdot \left| \sum_{i=1}^N v_i \cdot \phi_i(x_d) \right|^\alpha \quad (15)$$

ここに、 F_{dj} は j 次モードにおける粘性ダンパーの反力、 $\phi_j(x_d)$ は、 j 次モードにおける粘性ダンパー設置点におけるモードベクトルである。粘性ダンパーの計算に際しても、外力項に反力を導入しているため、収束計算が必要である。

4.2 MMD を用いた場合の解析例

(1) MMD のパラメータ

MMD のパラメータを表-2 に示す。これは、図-4 に示した対象橋梁の 2 次モードに対してチューニングを行った結果であり、設置箇所は第一径間の桁中央と、第二径間の桁中央にそれぞれ 4 基設置すると仮定した。表-2 から分かるように、2Hz を中心に、幅広く固有振動数を設定し、また一つ当たりの減衰定数は 4% 程度と通常の TMD の減衰定数(0.1 程度)¹⁹⁾と比較して小さな値となっている。

(2) MMD を用いた橋梁の応答解析例

表-2 に示した MMD を設置した橋梁の解析条件として、実際の橋梁に近い条件を考慮し、時速 100km で走行する車両が、5 台連行することとした。用いた車両は前述のモデルと同じである。なお、比較の対象として MMD を取り付けていない状態での結果も示す。

図-16 に第一径間入口の変位を、図-17 に第一径間桁中央部の変位、図-18 に第一径間桁中央部の速度を示す。

図-16 から、車両が橋梁に進入してくる 3 秒程度までは、強制加振されているため、MMD が付いているモデルと、付いていないモデル、両者ともほぼ同じ応

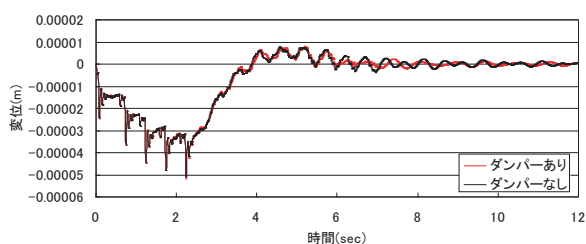


図-16 第一径間入口の変位の比較 (MMD)

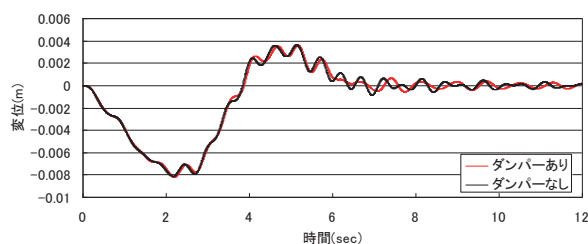


図-17 第一径間桁中央の変位の比較 (MMD)

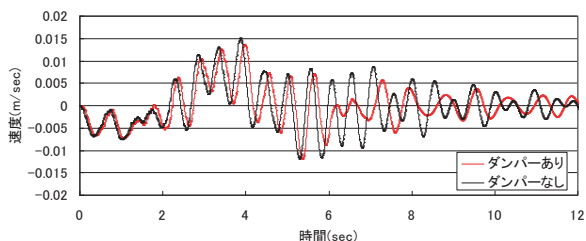


図-18 第一径間桁中央の速度の比較 (MMD)

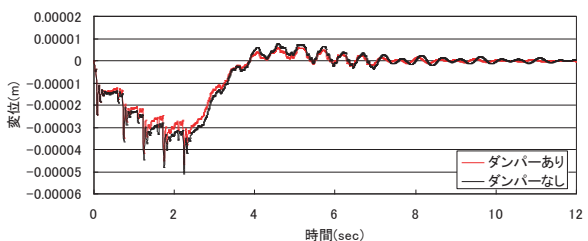


図-19 第一径間入口の変位の比較
(粘性ダンパー)

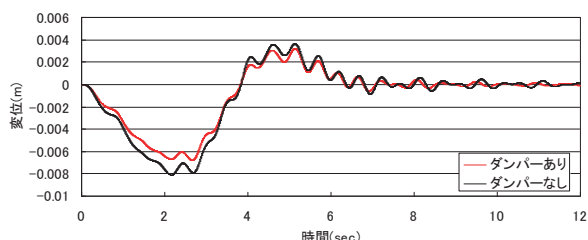


図-20 第一径間桁中央の変位の比較
(粘性ダンパー)

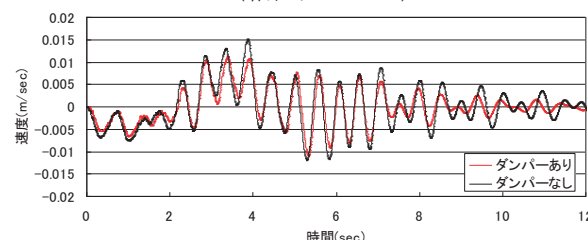


図-21 第一径間桁中央の速度の比較
(粘性ダンパー)

答となっているが、進入後径間を走行している応答に着目すると一度変位が0となった点以降（車両が第二径間を走行している時間）ではMMDを取り付けた場合のほうが、振幅が小さくなっている。同様に、図-17からも3秒程度までは、MMDの有無にかかわらずほぼ同じ変位を示しているが、車両が第二径間を走行している時間は、振幅が低減されていることが分かる。

一方、図-18の第一径間中央の速度応答に着目するとMMDによる位相のずれがあるものの、変位振幅より早い時間（3秒付近）より低減が見られる結果となった。この結果から、TMDの強制加振に対する効果と同じ傾向が得られることが分かった。従って、本ソフトウェアで、TMDなどの解析を行うことができることが分かった。

4.3 粘性ダンパーを用いた場合の解析例

(1) 粘性ダンパーのパラメータ

ここで用いる粘性ダンパーは、斜張橋のケーブル制振用いられるダンパーを想定している。設計式などは文献17)に記載されており、ここでは詳細を示さない。本デバイスは、温度依存性があり、ここでは標準的な温度として20℃として設定した。また、ダンパーの個数については別途行ったパラメトリック解析の結果から、第一径間の桁中央部に6基設置する。

(2) 粘性ダンパーを用いた橋梁の応答解析例

図-19に第一径間入口の変位を、図-20に第一径間桁中央部の変位、図-21に第一径間桁中央部の速度を示す。

図-19から、車両一台目が進入したときは、粘性ダンパーを設置していない場合と比較して、変位の低下は見られないが、車両二台目以降は、変位が低下していることが分かる。これは、粘性ダンパーにも反力の分担が起っていることを示している。一台目が進入したときは、粘性ダンパーが設置されている第一径間中央まで車両が到達しておらず、粘性ダンパーが完全に変位していないことが理由であると考えられる。しかし、全体的に変位振幅が抑えられており、粘性ダンパーの設置効果はあると考えられる。次に、図-20から、第一径間中央の変位は、粘性ダンパーが設置されていない結果と比較して1mm程度低く抑えられている。また、車両退出後の自由振動波形を見ても、速やかに振動が抑えられていることが分かる。この結果からも、粘性ダンパーは振動を抑制する効果があることが分かる。

最後に、図-21の速度波形を見ると、粘性ダンパーを設置した場合の波形は、設置しない場合の波形と比較して、振幅が小さくなっている。振幅が抑えられるのは、一台目の車両が進入した直後からであり、粘性ダンパー設置により支点反力が変化する一方、速度振

幅や変位振幅を抑制する効果があることが分かる。

以上のことから、粘性ダンパーを設置することにより、粘性ダンパーに反力の分担を解析できること、粘性ダンパーの効果により、桁中央の変位振幅が減少し、ダンパーとしての効果を解析できること、また、桁中央の応答速度の低減も解析できることから、本ソフトウェアは、粘性ダンパーを用いた場合の解析を行えることが分かる。

5. まとめ

ここでは、汎用ソフトの動的解析モデルとその解析結果を用いて解析を行うソフトウェアを開発し、そのソフトウェアを用いた解析例を示し、そこから得た応答に基づき本ソフトウェアの評価を行った。さらに、ソフトウェアに振動制御デバイスを設置した場合の解析も行えるように拡張し、解析を行い、振動制御デバイスを用いたときの橋梁の応答から、本ソフトウェアの評価を行った。ここで得られた知見は以下のとおりである。

- (1)遅い車両移動速度による準静的な挙動と汎用ソフトによる静的解析の結果を比較した結果はほぼ一致し、本ソフトウェアによる剛性評価は正しいことが分かった。
- (2)本ソフトウェアを用いて標準的な車両の移動速度と高速道路を想定した車両の移動速度の結果を比較した結果、前者より後者の方が支点変位、第一径間中央点の変位の両者とも後者の方が大きく、車両の移動速度による応答の違いを表現することが可能であることが分かった。
- (3)2種類の制振装置の応答解析方法を示し、それらの制振装置を用いた場合の走行解析の一例を示した。その結果、MMDでは、桁の変位振幅や速度振幅の低減が確認され、粘性ダンパーでは反力の分担や、応答低減などの応答解析が可能であることが示された。このことから、本ソフトウェアでも制振装置の応答評価を行うことが可能であると考えられる。

以上から、本ソフトウェアで走行解析を行うことが可能であることが示されたが、耐震設計を行うための解析モデルを用いることを趣旨としたため、上部構造の評価や基礎ばねの評価については、まだ考慮の余地があり、それらについては継続的に検討を行う必要があると考えている。

謝辞

本ソフトウェアを開発するにあたり、金沢大学深田准教授、京都大学金教授のご指導を頂きました。また、議論に当たっては鋼構造委員会 振動・騒音に配慮した鋼橋の使用性能評価に関する検討小委員会上でさまざまなご意見を戴きました。ここに謝意を示します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説,2002.3.
- 2) 長山智則, B. F.Spencer Jr.,藤野陽三：スマートセンサを用いた多点構造振動計測のためのミドルウェア, 土木学会論文集 A, No.65,pp. 523-535,2009.
- 3) 長井正嗣,宮下剛：社会基盤構造ヘルスマonitoringのためのMEMSを用いたセンサノード開発, 第62回年次学術講演会講演梗概集, I-91, 2007.9.
- 4) 吉岡勉, 原田政彦, 山口宏樹, 伊藤信：斜材の実損傷による鋼トラス橋の振動特性変化に関する一検討, 構造工学論文集, pp.199-208,2008.3.
- 5) 坂和平, 宮森保紀, 大島俊之：低温環境下におけるワイヤレスセンサーの適用性と電力消費, 第65回土木学会年次学術講演会講演概要集, I-508,2010.9.
- 6) 岡林隆敏,室井智文,奥松俊博,下妻達也：風力励起常時微動を用いた実現理論による道路橋振動特性推定における車両通過振動の影響, 構造工学論文集, pp.262-275,2011.3.
- 7) 梶川康男：道路橋の交通環境振動問題とその課題, 振動制御コロキウム講演論文集 PART A,pp.1-4,1995.8.
- 8) 比江島慎二,藤野陽三：桁端ダンパーによる橋梁の交通振動の軽減, No.465/I-23,pp. 107-111,1993.
- 9) 梶川康男,大嶋信太郎：周辺環境への影響を考慮した高架橋の防振効果に関する一解析法, 土木学会論文報告集, No.341,pp. 79-86, 1984.1.
- 10) 浜博和,深田宰史,梶川康男,松田哲夫,宮本雅章：RC中空床版高架橋の周辺で生じた環境振動に対する低減対策, 構造工学論文集, pp.252-261,2011.3.
- 11) 橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析, 技報堂出版,1993.
- 12) 中島章典,津村直宜：車両・橋梁系振動問題のためのシミュレーション法についての一考察,構造工学論文集,Vol.38A,pp.781-788,1992.3.
- 13) 深田宰史：橋梁の動的な性能照査のための立体解析モデルの確立に関する研究, ,金沢大学学位論文,1999.1.
- 14) 日野幹雄：スペクトル解析, 朝倉書店,pp.142-144,1977.10.00
- 15) 神谷圭二,鎌形健太郎,松本進,背戸一登：多重動吸振器の最適設計法,日本機械学会論文集（C編）No.601/62,pp.3400-3405,1996.9.
- 16) J. P. Den Hartog, Mechanical Vibrations, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1956
- 17) 米田昌弘, 下田郁夫：ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーの減衰付加特性に及ぼすばね剛性の影響とその設計用減衰評価曲線, 土木学会論文集, No.480/VI-21, pp.77~86, 1993.12.