たわみ特性値を利用した既存橋梁の変状検知手法の開発－解析的検討－

（株）構造計画研究所　　正会員　○矢部　明人
山口大学大学院　　学生会員　　礒田　聡史
山口大学大学院　　フェロー会員　　宮本　文穂

１.はじめに

日本国内の橋梁維持管理の現場では，目視や各種センサを使ったモニタリング（Structural Health Monitoring：SHM)によって定期的に変状検知が実施されている．特に常時監視に対してはSHMの今後の有効性と可能性を示す研究成果が報告されている[1)]．一方で，SHM 導入・維持に関する各種コストや技術的課題も指摘されており，より簡便な手法の開発が必要となっている．

そこで，SHM に関する各種問題を解決する手段の一つとして，国内の多くの橋梁がスパン 10m～20m 程度の短スパン橋梁であることを鑑み，それらを対象に，公共交通機関である路線バスを利用した新たなモニタリング手法の実証実験が行われている[2)]．

本論文では，路線バスを利用した橋梁の異常検知手法に利用している「たわみ特性値」についてその理論的背景と，走行振動シミュレーション結果から得られたその特徴について検討を加えたものである．

２．路線バスによる既存橋梁のたわみ特性値の算出方法

走行する路線バスと橋梁の関係については，橋梁-路面-車両の動的連成系の運動方程式で定式化される．その１回走行時の応答は橋梁側車両側双方非定常の応答となる[3)]．

一方で，橋梁や路線バスの力学的な条件，および路面の凹凸の条件をそろえて繰り返し計測した結果を連ねる場合，計測結果のばらつき条件が一定の確率分布で表すことができれば，その繰り返し応答は非定常応答の繰り返しということになり，定常性を有する応答として取り扱うことが可能であると考えられる．

ここで，一定速度で走行する路線バスの後輪車軸の鉛直変位$\delta_a(t)$は，橋梁の剛性とバスの車両重量に依存する静的変位$\delta_{sa}(t)$と，路面の凹凸と橋梁と車両振動特性に依存する動的変位$\delta_{da}(t)$の和として，

$$\delta_a(t) = \delta_{sa}(t) + \delta_{da}(t) \qquad (1)$$

と表すことができる．また，路面凹凸は平均値0の定常ランダムガウス過程とし，橋梁と車両の相互作用を含む動的変位はエルゴード過程により，フーリエ級数で展開可能であると考えると，動的変位$\delta_{da}(t)$はそれらの和として，

$$\delta_{da}(t) = S_r(\Omega, t) + \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \cdot e^{2\pi f t i} df \qquad (2)$$

$S_r(\Omega, t)$：路面凹凸の密度関数，Ω：路面空間周波数，$X(f)$：フーリエ係数

と表すことができる．式(2)において，第2項のサンプル平均は0である．したがって，$\delta_{da}(t)$により得られた十分な数のサンプルN個の平均は，0に近づいていく．

次に，$\delta_a(t)$における計測値からk個サンプリングし，その平均を$\overline{\delta a\,(t)}$とし，

$$\overline{\delta a\,(t)} = \frac{\sum_{j=1}^{k} \delta_a(j)}{k} \qquad (3)$$

と表す，そのサンプリング平均の分布は中心極限定理により，正規分布に従うことから，$\overline{\delta a\,(t)}$はある一定の値μ_aに収斂する．このプロセスをデータ濃縮と呼ぶこととする．

ここで，十分な数n個のサンプル平均値$\delta_a(j)$に対して，

$$\mu_a = \frac{\sum_{i=1}^{n} \overline{\delta a\,(t)}_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{nk} (\delta_a(j))_i}{nk} \qquad (4)$$

キーワード　たわみ特性値，データ濃縮，SHM，橋梁異常検知
連絡先　　〒164-0011　東京都中野区中央４丁目５番３号　（株）構造計画研究所　ＴＥＬ03-5342-1138

を定義し，「たわみ特性値」と呼ぶこととする．

3．サブストラクチャー法による走行振動シミュレーションを用いたたわみ特性値についての検討

2008 年 9 月に茨城県東茨城郡の涸沼川にかかる「川根大橋」にて試験的に実施した路線バス通過時の橋梁振動と路線バス後輪車軸鉛直振動同時計測実験を元に，たわみ特性値が路面凹凸の違いや損傷有無，走行速度の違いによってどのような影響を受けるか，サブストラクチャー法 [4]による走行振動シミュレーションを用いて検討を行った．**図-1** に橋梁と路線バスの解析モデルを示す．路面の凹凸は ISO（国際標準化機構）の評価基準モデル Very-Good～Average について各 100 パターン異なる凹凸を設定し，橋梁モデルは健全時および主桁の下面一面が剥離した状態を変状時としたモデルを用いた．また，走行速度については 30km/h と 40km/h とした．**図-2** に全組み合わせ 600 ケースの結果について，後輪バネ下応答結果より求めたたわみ特性値を示す．走行速度および路面凹凸の違いにかかわらず，健全時μ_a=-1.5 近傍，変状時μ_a=-2.2 近傍にそれぞれ収斂していることが確認できる．従って，後輪バネ下応答結果より求めたたわみ特性値は，路面の凹凸，走行速度の違い対して影響が小さい有効な変状検知指標であると考えられる．

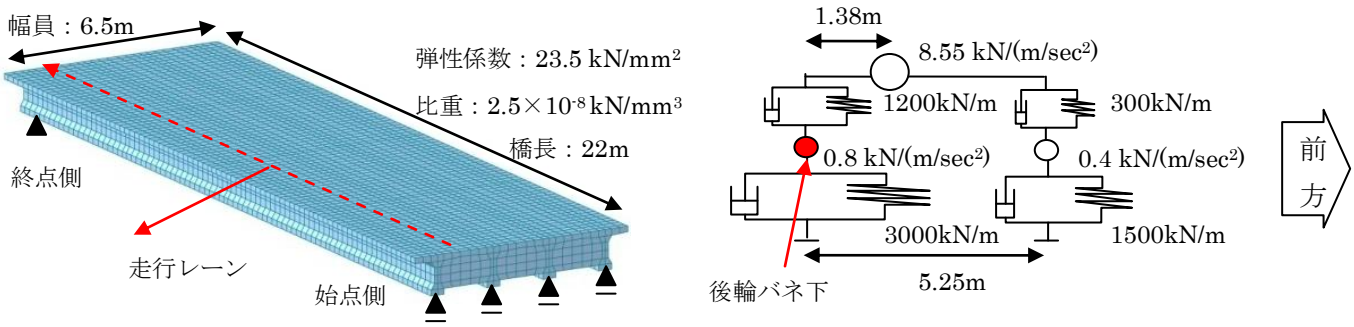

図-1 解析モデル

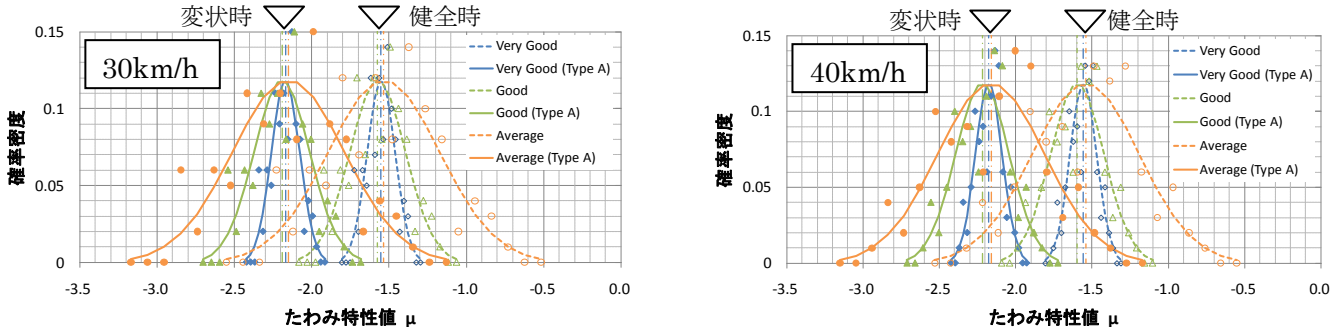

図-2 30km/hおよび40km/h走行時のバネした振動より求めたたわみ特定値の分布の例

4．まとめ

以上の考察から，走行中の路線バスのバネ下振動情報からデータ濃縮により求めたたわみ特性値は路面凹凸の違いや走行速度の違いの影響を受けずに健全時と変状時を判別することができる指標となり得るといえる．

今後の課題としては，実証実験を踏まえ，変状具合，温度，天候，乗車人数の違いがたわみ特性に与える影響についてより詳細な比較検討が必要であると考えられる．

参考文献

[1] 的場純一，畠中真一，藤野陽三，阿部雅人：センサを活用したインフラモニタリング技術の開発の方向性について，JICE REPORT vol.15，p24-28，2009.7

[2] 宇部市，″世界初の橋梁モニタリングシステム実証実験について″，
http://www.city.ube.yamaguchi.jp/houdou/kigyou_koutsuu/h22/monitoring.html

[3]金哲佑，川谷充郎：単一車両走行による橋梁振動データを用いた橋梁の健全度評価，鋼構造論文集，第 15 巻第 58 号，pp.37-46，2008.6.

[4]矢部明人：サブストラクチャー法を用いた移動体と構造物の動的相互作用解析手法の開発，土木学会第 61 回年次学術講演会 1-424，P845-846，2006.9.