

構造ヘルスマニタリングの簡素化に向けた橋桁のモデル化に関する基礎的研究

山口大学大学院 学生会員 ○磯部優梨子
山口大学大学院 正会員 渡邊学歩
山口大学大学院 学生会員 内藤慎也

1. はじめに

橋梁の維持管理が重要視される中、老朽化とそれに伴う事故が頻発したこともあり、橋梁の維持管理では、全橋梁を対象とした近接目視による点検が義務化されるようになった。近接目視による点検は、顕著な損傷劣化が認められる構造物に対して有効な手段であるが、損傷の見落としが発生しやすい場合、外部からでは損傷の発見が難しく健全度評価が難しい場合、および定量的・客観的な健全度評価が求められる場合には、構造ヘルスマニタリング(SHM)や非破壊検査などを用いた健全度評価が必要となる。本研究では、SHMの本格的な活用に向けて、構造ヘルスマニタリングの簡素化を目的として、橋長や幅員が構造ヘルスマニタリング桁のたわみ挙動への影響を数値解析により検討した。

2. 車両走行試験を活用したヘルスマニタリング

著者らのグループでは、既存の橋梁構造物に加速度センサーや変位計を設置し、車両走行時の桁のたわみの計測し、構造逆解析により橋桁の損傷度評価を行ってきた。車両を質点とばね要素からなる簡易モデル(2軸2自由度系)を用いても、車両走行時の桁のたわみを工学上十分な精度で再現可能となることを示した。

実橋(単純桁2連の橋梁)上を車両が走行する際の桁のたわみを図-1に示すが、桁のたわみ挙動には、2つのピークが見られる。これは、車両のホイールベース(車軸間距離:6.5m)に比べて橋桁スパン(8m)が短い橋梁に特有な応答で、各輪軸が橋桁中央を通過する際に橋桁のたわみが極大となる双峰状の応答を示す。また、このたわみの極大値の比率から、輪荷重の比率ならびに車両重心位置を同定することが出来るため、車両のモデル化に必要なばね定数等を実験により同定することが可能となる。本ケースでは、桁のたわみのピークの比率が1:2の比であるため、図-2に示すように、バスの重心位置をホイールベースの2/3としてモデル化することで、車両走行時の桁のたわみの再現性が良くなることが明らかにした。また、桁の曲げ剛性を同定した結果、モニタリング実施時点で橋桁の曲げ剛性が、設計時の初期剛性と比較して50%(降伏剛性程度)にまで低下していたことが明らかになった。本橋は過去の補修工事によって、橋桁表面の損傷が識別しにくくなっており、こうした橋梁に対する構造健全度評価に対して、有効な手段であることを示した。

3. 橋長が橋桁のたわみ挙動の違いに与える影響

ここでは、橋長を変化させた場合に橋桁のたわみ挙動に影響するかを数値解析による検討を行った。橋桁を、梁要素により、スパン4m、12mおよび16mの場合について作成し、荷重を1mずつ移動させることで、車両走行時の桁中央のたわみ挙動(移動平均値)を同定した。図-3にそれぞれの桁中央のたわみ挙動を示すが、

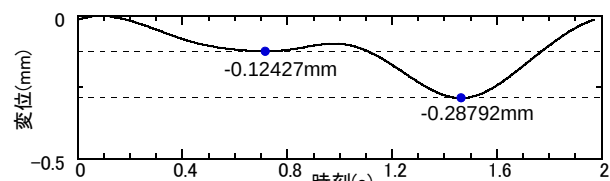


図-1 桁のたわみ時刻歴応答(動的成分除去)

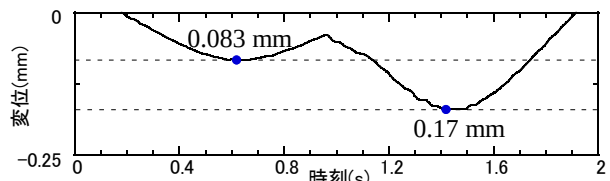
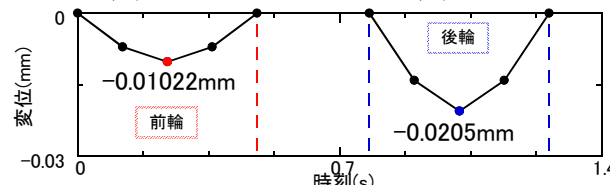
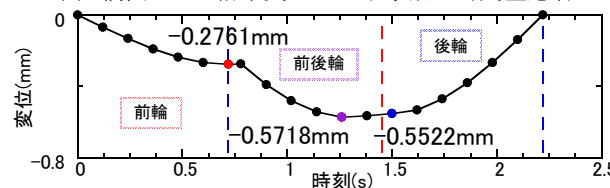


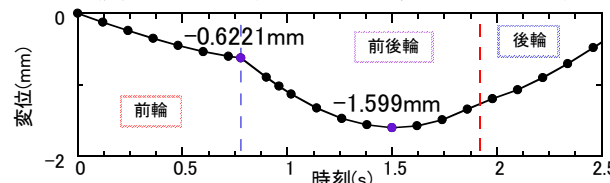
図-2 重心位置がホイールベースの2/3位置の場合



(a) 橋長4mの桁中央のたわみ挙動の時刻歴応答



(b) 橋長12mの桁中央のたわみ挙動の時刻歴応答



(c) 橋長16mの桁中央のたわみ挙動の時刻歴応答

図-3 桁中央のたわみ挙動の時刻歴応答

橋桁のスパンが 4m の場合 (図-3(a) 参照) は、スパンがホイールベースより短いため、前輪、後輪のみが桁中央に載荷され、1 つ目、2 つ目のピークができるため、前述のスパン 8m の時と同様に、ピークの比からバスの重心位置が算出できる。スパンが 12m の場合 (図-3(b) 参照) は、橋長がホイールベースより長い場合、前輪と後輪が桁内に同時に進入し、車両重心が橋桁中央を通過する 2 つめのピーク時の桁のたわみと、前輪が橋桁を通過する時点の桁のたわみを比較しても、車両重心位置を同定することは出来ない。ただし、この場合には、車両後輪が桁中央を通過する時点でのたわみと 1 つめのピーク時のたわみを比較することで、車両重心位置を同定することが可能である。橋長よりホイールベースが十分長い場合 (図-3(c) 参照) には、前述のような桁中央のたわみ測定による車両重心位置特定は困難であることが分かり、ホイールベースを a 、橋長を b とすると、前述のような桁中央のたわみ測定による車両重心位置特定ならびに橋梁健全度の同時評価は、下記の条件を満足する橋においてのみ可能であることが分かった。

$$0 < b \leq 2a$$

4. 主桁のモデル化の違いが橋桁のたわみの推定値に及ぼす影響

幅員の違いによって、移動走行荷重による載荷試験結果に基づくヘルスマニタリングの適用性がどのように変化するかについて検討を行った。モデル化する際に幅員を考えない 2 次元モデルでは車輪数が 2 輪なのに対し、実際 (幅員のある場合) では 4 輪であることから、たわみに差が生じる。1 点載荷の場合のたわみ δ_1 と 2 点載荷の場合のたわみ δ_2 を FEM によって解析した結果を図-4 に示す。これより、換算係数 $\delta_2/\delta_1 = 0.30/0.38 = 0.785$ と算出した。この値を理論値として解析を行っていく。次に、図-5 のように前場橋を 3 主桁モデルで、横梁を用いて格子桁としモデル化した。橋の特性は前場橋の実際の値を用いており、ねじり定数は $bh^3/3$ から算出した。実際の橋梁では、中央に載荷すると中央の主桁が大きくたわみ、外桁の 2 本は少ししかたわまないと考えられる。よって橋梁モデルをばん桁とすると実際の橋梁に近づくと考え、主桁のねじり定数を $J = 10^{-10}$ 、横梁のねじり定数を $J = 0.001$ とした。以上の値を用いて解析した結果を表-1 に示す。横梁の剛性を 1.285 倍させると理論値になるということが分かった。次に、幅員の影響を考えるために特性は変えずに、5 主桁モデルとした。結果を表-1 に示す。換算係数は 0.777 となり幅員の影響は明らかであることが分かった。よって前場橋のような小規模橋梁では、格子桁の 3 次元モデルの横梁の剛性を 1.2~1.3 倍することで FEM 解析とほぼ同程度の解析を行えることがわかった。次に、中規模橋梁である栄橋で解析した。5 主桁・格子桁モデルとし、橋梁の断面積などの特性は、実際のデータを用いた。主桁のねじり定数はばん桁となるように $J = 10^{-10}$ とし、横梁のねじり定数は $bh^3/3 = 0.0143$ と算出した。解析結果を表-2 に示す。換算係数は 0.931 であり、剛性を 1.285 倍しても大きな差はないため、幅員の影響はあまりないといえる。以上のことから、剛性が大きくなったことも 1 つの要因であるといえるが、バスの車輪間隔に対して幅員が相対的に広がったことが影響していることから、1 点載荷でも 2 点載荷でも変位の差は見られない。よって栄橋のような中規模橋梁では、2 次元、3 次元モデルの両方とも同様の解析を得ることができる。3 次元でモデル化する必要がないことから、解析の簡易化につながるが、予め FEM 解析を行い、たわみ挙動を把握しておくといよい。

5. まとめ

- 1) 橋長がホイールベースの 2 倍より短い場合は、前後輪のみが桁中央に載荷した際の、桁のたわみ応答の 2 つのピークから比率を求めることができ、よって車両の重心位置の同定が可能となる。
- 2) 橋長がホイールベースの 2 倍より長い場合は、前後輪の片方が桁中央に載荷した際に、車両全体が桁内に載荷しているため、桁のたわみ応答の 2 つのピークからは比率を求めることができず、車両の重心位置の同定は不可能である。
- 3) 小規模橋梁では、3 次元・格子桁モデルの横梁剛性を 1.2~1.3 倍することで FEM 解析とほぼ同程度の解析を行うことができる。
- 4) 中規模橋梁では、3 次元でモデル化する必要がないことから、解析を簡易化できるが、予め FEM 解析を行い、たわみ挙動を把握しておくといよい。

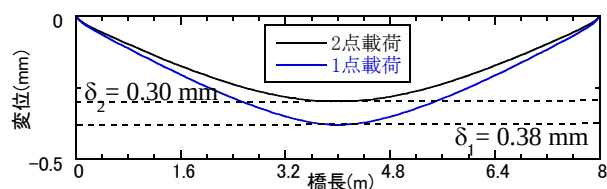


図-4 1 点載荷、2 点載荷の変位

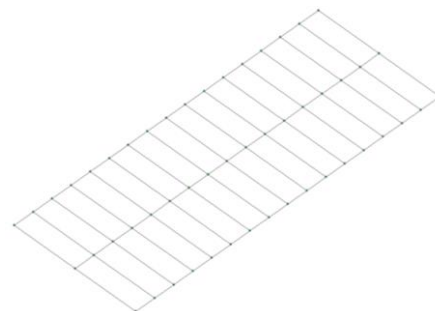


図-5 3 主桁モデル

表-1 主桁のねじり定数 $J = 10^{-10}$ とした

3 主桁、5 主桁モデルでのたわみおよび換算係数

主桁本数	倍率	ヤング係数 (N/m ²)	横せん断係数 (N/m ²)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	換算係数
3	1.285	1.76E+10	7.34E+9	-2.10E-1	-1.65E-1	0.785
	1	1.37E+10	5.71E+9	-2.21E-1	-1.66E-1	0.750
5	1.285	1.76E+10	7.34E+9	-2.01E-1	-1.56E-1	0.777

表-2 栄橋 5 主桁モデルでのたわみおよび換算係数

倍率	ヤング係数 (N/m ²)	横せん断係数 (N/m ²)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	換算係数
1.285	1.85E+10	7.41E+9	-4.84E-1	-4.51E-1	0.931
1	1.44E+10	5.77E+9	-6.22E-1	-5.80E-1	0.931