

実横断歩道橋の3次元固有振動特性同定と損傷位置検出の検討

3-dimensional modal properties and damage locating in pedestrian bridge

北見工業大学大学院 ○学生員 綿崎良祐(Ryosuke Watasaki)

(株)オリエンタルコンサルタンツ 正員 門田峰典(Takanori Kadota)

北見工業大学社会環境工学科 正員 宮森保紀(Yasunori Miyamori)

1. はじめに

我が国における社会基盤施設は高度経済成長期に整備され、近年それらの老朽化が問題となっている。また、国や都道府県などに比べて管理する橋梁数が多い市町村では点検を行う技術者や予算が不足しており、客観的かつ定量的な健全度評価方法の確立が求められている。このような背景から近年、センサーを用いて構造物の振動や変位などを測定し、健全度評価を行う「構造ヘルスマニタリング(Structural Health Monitoring, SHM)」に関する研究が行われている。振動を利用した SHM では構造物の振動特性を継続的に蓄積することで経年劣化を把握し、維持管理に活用することができる。しかし本手法における損傷同定は、局所的な損傷を把握するために密にセンサーを配置する必要があり、ケーブリングや増幅器が必要となる有線型のセンサーシステムを用いた場合、多くの費用が掛かる。そこで、データ処理機能と無線通信機能を備えたスマートセンサーが SHM において効率的に活用できると考えられている。

本研究では、損傷を有する実横断歩道橋において補修前後でスマートセンサーを用いた振動測定実験を行い、3次元での振動特性を同定し、固有振動特性の変化を確認した。また、損傷位置の特定を目的としてモード形状の変化に着目し、損傷位置の検出方法を検討した。

振動測定では跳躍加振による減衰自由振動を測定した。減衰自由振動データから補修前後の固有振動数、減衰定数、モード形状を求め、比較を行った。損傷位置の特定は補修前後のモード振幅の変化に着目し、振幅値の差分から損傷位置付近の振幅の変化を確認した。軸毎の振幅差の比較では損傷付近の測点を特定することができなかったが、3軸すべての振幅差を合計することで損傷位置を特定することができた。

2. Imote2 スマートセンサー

本研究で使用するセンサーは MEMSIC 社製の Imote2 システムである。本システムはデータ処理機能と無線通信機能を有するプロセッサボード、加速度計を搭載するセンサーボード、電力供給を行うバッテリーボードを組み合わせて使用する。センサーボードはイリノイ大学で開発された SHM-A¹⁾ および SHM-H²⁾ を使用した。SHM-A、SHM-H には3軸加速度計が搭載されている。SHM-A の最下位ビット(LSB)に対する加速度は 0.14gal である。SHM-H は z 軸方向に高感度な加

速度計が搭載されており、LSB に対する加速度は 0.0145gal で x, y 軸方向の加速度計の約 10 倍の感度である。

本研究では振動測定に JIP テクノサイエンス社製の橋梁モニタリングシステム BHELMO を使用した。振動測定時の通信において、加速度測定用の各ノードをリーフノード、PC と USB ケーブルで接続したものをゲートウェイノードと呼ぶ。ゲートウェイノードは USB ケーブルから給電され、リーフノードは既成の電源システムの容量不足から本研究室で作製した定電圧回路を用いて一定の電圧を供給する定電圧供給システムを使用した³⁾。

3. 実験概要

本実験は損傷による振動特性の変化を確認することを目的とし、スマートセンサーを用いた多点振動測定実験を行った。取得した振動データから3次元の振動特性を求める。実験は補修前の損傷した状態での測定を2014年7月に行った。同年8月に補修が行われ、健全の状態での測定を9月に行った。

3.1 対象橋梁

対象橋梁は図3に示す北海道北見市内に位置する横断歩道橋(橋長 20.16m, 支間長 18.48m, 幅員 1.5m)である。本橋は図4a)に示すように片側の主桁に亀裂および変形を生じていた。この損傷は車両の衝突により生じたものと推測されるが詳細については不明である。損傷の程度は主桁下フランジから亀裂が 200mm 程度、変形が最大 160mm 程度である。補修方法は損傷した部分を切り取り、同形の部材を溶接する方法で行われ、図4b)に示す状態に補修された。

3.2 実験方法

図5にセンサーの配置と加振位置を示す。支間に z 軸方向の感度が高い SHM-H、橋脚上に SHM-A を配置した。各測点にて3軸方向の加速度を測定する。センサーは鋼板に両面テープで固定し、床版上に設置した。

加振方法は人力加振であり、人間1人が跳躍し、着地時に発生する減衰自由振動を測定した。測定時のセンサーのサンプリング周波数は 280Hz、1 サンプル当りの測定時間は 60 秒間である。加振位置は複数のモードを励起させるために計 6 か所で行った。加振は測定開始から 5 秒後に 1 回、35 秒後に 1 回の計 2 回行った。これは跳躍加振による減衰自由振動が 30 秒で十分に減衰することから、測定効率の向上を目的に行った。データ取得後は 30 秒毎に分割してデータ処理を行った。

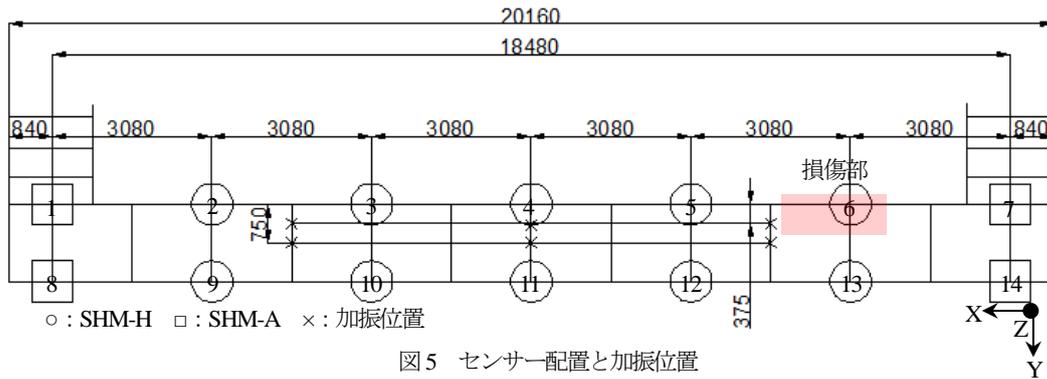


図5 センサー配置と加振位置

3.3 解析方法

振動データから固有振動特性を算出するために減衰自由振動波形に対してフーリエ解析を行った。

フーリエ解析では、加速度データをフーリエ変換してパワースペクトルを算出し、パワースペクトルのピーク値を固有振動数とした。次にピーク周辺の帯域を通過させるバンドパスフィルタによるフィルタリング処理を行い、各センサーにおける処理後の波形の最大変位を求め、最大値を1としたモード形状を算出した。減衰定数はフィルタリング後の波形の対数減衰率から求めた。



図3 対象橋梁

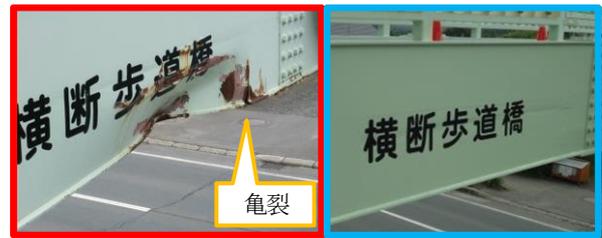
4. 実験結果

減衰自由振動波形の解析結果を述べる。表1に固有振動数、減衰定数、モード形状を示す。モード図中の赤線が健全時(9月)のモード形状、青破線が損傷時(7月)のモード形状である。図中のプロットは各測点を示し、右手前から1~7、右奥から8~14である。損傷に最も近い測点は6となる。モード形状は3軸すべての振幅の最大値を1として基準化している。各モードにおける主な卓越方向は、1次モードが橋軸方向、3次モードが橋軸直角方向、2, 4, 5, 6次モードが鉛直方向である。以下に各モードについて述べる。

1次モードは橋軸方向に卓越したモードであり、鉛直方向にも振幅を有する。橋軸方向に対する鉛直方向の振幅は5~6割である。これは鉛直方向に加振したことが影響したと考えられる。固有振動数は損傷時が健全時より高い。一般的に損傷により剛性が低下すると鉛直方向に対する振動数は低下するが、橋軸方向においては今回の損傷が剛性にどのような影響を与えるかを検討する必要がある。モード形状を健全時と損傷時で比較すると橋軸直角方向において損傷付近である測点6で変化が生じている。鉛直方向においては全体的に損傷時の振幅が大きい。振幅の卓越した橋軸方向においてはほぼ一致している。

2次モードは鉛直方向に卓越したモードであり、他の軸の振幅は微小である。固有振動数は健全時と損傷時において変化はなく、減衰定数は健全時が損傷時より大きい。モード形状を健全時と損傷時で比較すると、ほぼ一致している。

3次モードは橋軸直角方向に卓越したモードであり、鉛直方向にも振幅を有する。健全時と損傷時を比較すると固有振動数は損傷時に低下しており、減衰定数は他のモードと同様に損傷時が低い。モード形状は橋軸方向においてはほぼ一致し



a) 損傷時 b) 補修後

図4 補修前後の状態

ており、鉛直方向においては損傷時の振幅が若干大きい。

4次モードは鉛直方向に卓越しており、橋軸直角方向にも振幅を有するモードである。橋軸直角方向のモード形状が左右対称でない。これは本橋の階段の構造が左右で異なることが原因と考えられる。固有振動数に変化はなく、減衰定数は健全時が大きい。モード形状は鉛直方向ではほぼ一致しており、橋軸直角方向では測点3, 12において若干変化が見られる。

5次モードは鉛直方向に卓越し、橋軸直角方向にも振幅を持つモードである。固有振動数、減衰定数ともに健全時のものが高い。モード形状は、鉛直方向において損傷付近である測点6に振幅差が見られる。また、橋軸直角方向では測点12に変化が見られる。

6次モードは鉛直方向に卓越しており、橋軸直角方向にも振幅を有するモードである。固有振動数に変化はなく、減衰定数は健全時が高い。モード形状は、鉛直方向では測点2に変化が見られ、橋軸直角方向では橋脚上の測点1, 7, 8, 14に変化が見られる。

モード全体において、固有振動数に大きな変化はない。本橋の損傷は主桁の変形および亀裂であり、構造全体の剛性を低下させるものではないため固有振動数の変化が見られなかったと考えられる。減衰定数は低次モードに健全時と損傷時

を比較した場合、健全時が高い。モード形状は橋軸直角方向において振幅の変化が多く見られた。振幅差が見られた測点は損傷付近である測点6や損傷から離れた測点3, 12などであり、モード形状を比較しただけでは損傷位置を特定することは困難である。よって、モード振幅の変化を定量的に把握するため、振幅差を用いた損傷検出を行う。

の検討を行った。

5.1 振幅差の計算方法

振幅差の計算方法を以下に示す。フーリエ解析から求めた各軸のモード振幅の各測点における差分を計算する。次にモード毎に算出した差分を測点毎に加算する。各測点における全モードの差分の合計は式(1)で表される。

$$\Delta\Phi = \sum_{i=1}^N |\Phi_{Di} - \Phi_{Di}| \quad (1)$$

ここで健全時のi次モードの振幅を Φ_{Di} 、損傷時のi次モード

5. 損傷位置検出の検討

本研究では、モード振幅の変化から損傷を発見するために、健全時と損傷時のモード振幅の差分を算出して損傷位置検出

表1 実験結果

		モード形状			
		鳥瞰図	x-y	x-z	y-z
1次					
		固有振動数 健全：4.2Hz 損傷：4.3Hz		減衰定数 健全：0.011 損傷：0.008	
2次					
		固有振動数 健全：4.9Hz 損傷：4.9Hz		減衰定数 健全：0.015 損傷：0.009	
3次					
		固有振動数 健全：8.1Hz 損傷：7.9Hz		減衰定数 健全：0.017 損傷：0.013	
4次					
		固有振動数 健全：9.8Hz 損傷：9.8Hz		減衰定数 健全：0.011 損傷：0.009	
5次					
		固有振動数 健全：15.7Hz 損傷：15.6Hz		減衰定数 健全：0.007 損傷：0.005	
6次					
		固有振動数 健全：20.9Hz 損傷：20.9Hz		減衰定数 健全：0.014 損傷：0.011	

の振幅を ϕ_{Di} とし、Nは同定されたモード数である6とする。

5.2 差分による算出結果

差分によるモード振幅の算出結果を方向毎に整理して図6a)~c)に示す。縦軸が振幅差、横軸が測点であり、丸印が損傷付近の測点を示す。

橋軸方向では、振幅差の最大値が比較的小さい。特に振幅差が現れた測点は1, 3, 6, 9, 14である。損傷付近である測点6に差が現れたが最も大きく変化した測点は橋脚上の測点1であり、損傷位置の特定は困難である。

橋軸直角方向では、損傷付近である測点6と前章でモード形状の変化が見られた測点12で大きく差が現れた。橋軸直角方向に卓越したモードは3次モードのみであるが、多くのモードが鉛直方向と橋軸直角方向に振幅を有するため、損傷位置の特定において重要な着目点になると考えられる。

鉛直方向では、測点2, 4, 6, 10において振幅差が大きい。最も振幅差が大きい測点は損傷した主桁の支間中央であり、損傷の影響が最も現れやすいと思われる測点である。このように、損傷の影響が損傷付近以外に現れる場合、損傷位置の特定は困難となる。

以上のことから、本橋においては一般的に行われる鉛直方向のみの振動測定では損傷位置を特定することは困難である。そこで3軸すべての振幅を用いることで損傷位置の特定が可能であるか検討を行った。

3軸の振幅差を各測点で合計した結果を図7に示す。方向毎の振幅差では損傷付近の測点6は最大にならなかったが、3軸を足し合わせることで測点6が最大となった。測点4, 12も振幅差が大きく、正確な損傷位置の特定には至らないが、3次元での振動特性同定により構造全体のモード形状の変化を捉えることができたと考えられる。今回の結果は卓越するモードが多い鉛直方向と同程度の値で橋軸直角方向のモード振幅の変化が確認できた。これは本橋の損傷が橋軸直角方向に大きく影響を与えていることが考えられる。

以上のことから、3次元の固有振動特性同定によるモード振幅の変化から損傷付近の測点を捉えることができ、損傷位置検出は可能であると考えられる。

6. おわりに

本研究では損傷を有する実横断歩道橋において補修前後で3次元の固有振動特性同定を行い、モード振幅の変化を確認した。また、モード振幅の差から損傷位置の特定を検討した。

固有振動特性同定では、スマートセンサーを用いた3軸加速度測定により複数方向に卓越した6つのモードを同定できた。補修前後における振動特性の比較では、固有振動数はほぼ変化がなく、減衰定数は健全時が高い結果となった。いくつかのモードで損傷付近や損傷から離れた測点でモード振幅の変化が見られた。振幅の変化は鉛直方向だけでなく橋軸直角方向にも確認できた。

損傷位置検出の検討では、補修前後におけるモード振幅の差を算出して比較した。各軸を個別に比較した場合の振幅差からは損傷位置を特定できなかったが、3軸を足し合わせるこ

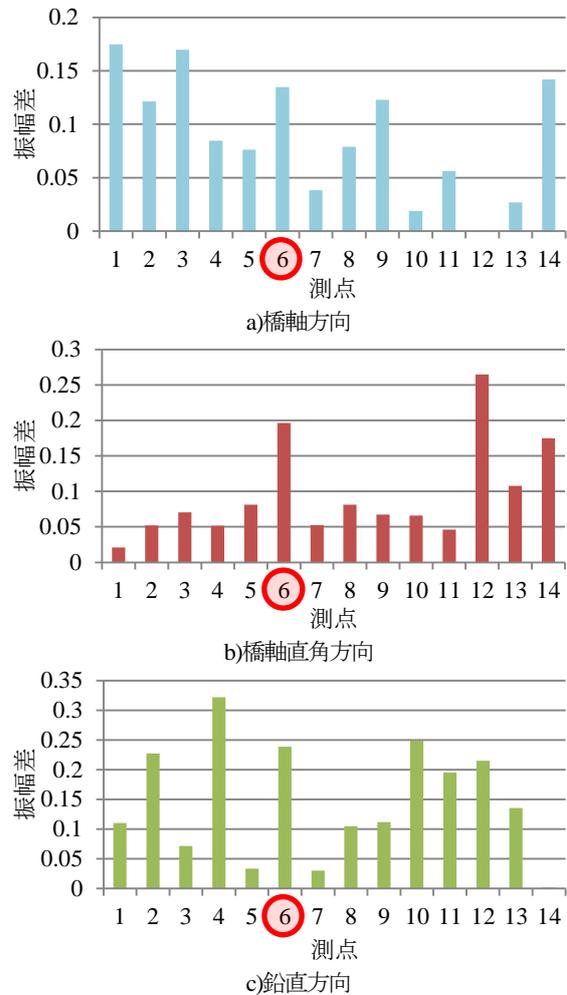


図6 各軸のモード振幅の差

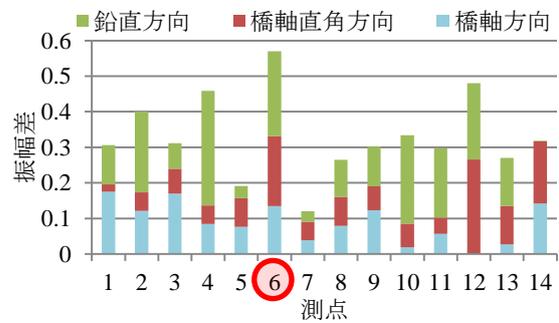


図7 3軸の振幅差の合計

とで損傷付近の測点6が最大となったことから、損傷位置検出は可能であることがわかった。

今後の課題として、4章表1における4次モードや5次モードで損傷付近から離れた測点のモード形状が変化したことから、損傷以外の要因がモード形状の変化に影響を与えている可能性がある。この要因の一つとして部材の温度差が挙げられるため、構造物全体の温度を把握し、温度差による振動特性の変化の影響を取り除くことで、より正確な損傷位置検出が可能になると考えられる。

【参考文献】

- 1) ISHMP: SHM-A Sensor Board Advanced User's Guide, <http://shm.cs.uiuc.edu>, 2010.
- 2) ISHMP: SHM-H Board High-Sensitivity Accelerometer Sensor Board Datasheet and User's Guide, <http://shm.cs.uiuc.edu>, 2010.
- 3) 綿崎良祐, 岡本寛人, 潘凱凱, 宮森保紀, 三上修一, 山崎智之: 橋梁振動計測のための Imote2 スマートセンサーシステムにおける電源システムの改良, 土木学会第68回年次学術講演会, CS6-008, 2013.