

桁端近傍センサ配置による局部加振法を用いた 橋梁部材損傷検出方法の検討

Investigation of bridge member damage detection method using a local excitation method by arranging sensor near the girder end

北見工業大学大学院	○学生員	橋爪志奈 (Yukina Hashizume)
北見工業大学工学部	正 員	三上修一 (Shuichi Mikami)
北見工業大学工学部	正 員	山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki)
北見工業大学工学部	正 員	宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
北見工業大学名誉教授	名誉員	大島俊之 (Toshiyuki Oshima)

1. はじめに

日本の高度経済成長期に架設された多くの橋梁は供用開始から約 50 年を経過しており、性能の良い橋梁を新造するよりも現在供用中の橋梁の長寿命化を目指すことが課題となっている。長寿命化のためには供用中の構造物に対して適切な維持管理をすることが求められ、適切な維持管理には構造物の性能を正確に把握し評価することが重要である。現在は定期的な橋梁点検として近接目視が義務付けられているが、技術者不足などの課題があることから、構造物ヘルスマニタリングによる損傷検出技術の開発が盛んに行われている¹⁾。

これまで筆者らは、橋梁の損傷検出手法のひとつとして、圧電アクチュエータを用いた局部加振により、橋梁主桁を対象に損傷位置の検出を行ってきた。本研究では、実橋梁構造において設置が容易であると考えられる桁端周辺にセンサ類を集中させ、橋梁構造の各所に損傷を設定した実験を行い、損傷位置の評価を行った。また損傷評価の指標のひとつとして、測定結果から基準値を設定し評価への効果を検討した。今回の実験では再現性を高めるため、実際の損傷ではなく損傷位置におもりを設置し質量を付加することで損傷を模擬し、損傷位置の評価を行った²⁾。

2. 損傷検出手法の概要

本研究で用いる損傷検出手法では、損傷検出を行う橋梁構造に対し加速度計と加振器を設置し、加振器により Sweep 加振を行い、各加速度計で損傷前後の応答加速度を測定する。測定した応答加速度データを以下のように処理し、損傷位置の評価を行う。

測点毎に得られた損傷前後のデータをパワースペクトル密度 (以下 PSD とする) に変換し、損傷前の PSD を G_{ij} 、損傷後の PSD を G_{ij}^* とし、 G_{ij} を基準とした変化率 D_{ij} を算出する (式(1))。これを測点番号 i 、解析周波数番号 j で並べ、マトリクス $[D]$ とする。次に $[D]$ に対する重み付けとして、同一周波数帯の最大値 $D_{\max j}$ で各測定点要素を基準化し (式(2))、これを $[D]$ と同様に測点番号 i 、解析周波数番号 j で並べ、マトリクス $[C]$ とする。 $[D]$ 、 $[C]$ を測点番号 i 方向に合計したベクトルをそれぞれ TC (Total Change)、DD (Damage Detection) とし (式(3)、(4))、測点番号毎に掛け合わせた数値を損傷評価指数

DI (Damage Index) として損傷評価に用いる (式(5))。算出された DI 値が大きい測点は損傷の影響を受けており、その測点近傍に損傷が存在すると考える。

$$D_{ij} = \frac{|G_{ij} - G_{ij}^*|}{G_{ij}} \quad \dots (1)$$

$$C_{ij} = \frac{D_{ij}}{D_{\max j}} \quad \dots (2)$$

$$TC = [\sum D_{1j} \quad \sum D_{2j} \quad \dots \quad \sum D_{ij}] \quad \dots (3)$$

$$DD = [\sum C_{1j} \quad \sum C_{2j} \quad \dots \quad \sum C_{ij}] \quad \dots (4)$$

$$DI = TC \times DD \quad \dots (5)$$

3. 実験概要

本研究では、実橋梁において設置が容易であると考えられる桁端部の近傍にセンサを配置し、センサ周辺に損傷がある場合と、センサから離れた箇所に損傷がある場合をそれぞれ設定し、損傷評価を試みた。

実験には橋長 6.450[m]、主桁間隔 1.677[m]、桁高 0.775[m] の 2 主桁鉄道橋を使用した。実験橋梁の写真を図-1 に示す。加速度計の配置は、図-2 に示すように、橋軸方向に 5 点、鉛直方向に 3 点の計 15 点を設定し、各測点について橋軸方向を 1~5、鉛直方向を上から u,l,f として、1u,1l,1f,...5u,5l,5f と呼称する。測定方向は腹板面外方向とした。加振器として圧電アクチュエータを内蔵した加振装置 1 個を図-2 に示すように桁端付近に設置し、応答加速度の測定を行った。加振は 20 秒間に 1~800Hz を連続変化させた Sweep 波を腹板面外方向に行い、測定のサンプリング周波数は 10000Hz とした。検出する損傷は、総重量 5.11kg となる鋼材とクランプで質量を付加し模擬した。損傷の位置は下フランジに



図-1 実験橋梁写真(G1 桁側)

F1~8 の 8 箇所、横構中心付近に L1,2 の 2 箇所、対傾構中心付近に S1~3 の 3 箇所、垂直補剛材中心付近に V1~4 の 4 箇所、ガセットプレートに P1,2 の 2 箇所、計 19 か所を図-3 のように設定した。それぞれの質量付加の状態を図-4 に示す。これらの損傷ケースのうち、測点付近に損傷があるケース（センサ配置点）は、F1(1f)、F2(3f)、V1(2u,2l)、V2(4u,4l) の 4 ケースである。

4. 健全状態のデータを使用した基準 DI 値の設定

これまで DI 値による損傷の判定は、設置したセンサ近傍に損傷があるように設定して実験を行い、各測点の DI 値を相対的に評価し損傷位置の特定の精度を検討してきた。測定される加速度波形は、測定を行うごとにばらつきが発生しており、同じ構造物に対して同じ状態、同じ条件で測定を行った 2 つのデータを用いて DI 値を算出した場合においても、測点毎に異なる DI 値が得られた。この測定毎のばらつきを損傷評価に考慮するために、擬似損傷としての質量付加の無い状態を健全状態であるとして、健全状態の測定データから算出した DI 値を用いて基準 DI 値を設けた。基準 DI 値以下は測定誤差の範囲であるとして、算出された DI 値が基準 DI 値より小さい場合は、その測点付近に損傷の影響はないと考える。

本実験では健全状態での測定を 17 回行い、うち連続した 2 データを用いて、2 章で述べた算出方法で 16 組の健全 DI 値をそれぞれ求めた。損傷前後の区別がないため、先に測定したデータを式(1)の分母として計算した。得られた 16 組の健全 DI 値の平均値と標準偏差を算出し、平均値に標準偏差の 2 倍を加えたものを DI_{s2} とし、平均値に標準偏差の 3 倍を加えたものを DI_{s3} とし、基準 DI 値に使用し、損傷評価における効果を検討する。算出した健全 DI 値の範囲と平均値及び基準 DI 値 DI_{s2} と DI_{s3} を図-5 に示す。

5. 実験結果

5.1 基準 DI 値の検討

実験結果の例として損傷ケース F2、F3、F6、F7 と、算出した 2 つの基準 DI 値を図-6 に示す。F6 は DI 値がどちらの基準 DI 値においても下回ったため、センサを設置した付近には損傷の影響がないと判定できる。F2 は 3u,3l,3f で DI 値が基準値を大きく上回った。F2 は擬似損傷を 3f 付近に設置しており、ピークが同点にあつて 5u,5l にあるピークが基準 DI 値以下のため棄却されることから、基準 DI 値は有効であるといえる。F7 は DI_{s2} を上回る DI 値が 3f、5u など複数の点で得られたが、DI_{s3} を上回る DI 値は 3f で得られた。F3 はどちらの基準 DI 値においても 3f で大きく上回った。これまでの実験から、センサ付近に損傷がなく、センサ位置と損傷位置が構造上対称の位置にある場合、DI 値が大きく得られることが多くあった。F7 の損傷は平面図から 3f の対角の位置にあり、F3 の損傷は支間中心に対して 3f と対称の位置にあるため、基準値に対して DI 値が大きく得られたと考えられる。F7 では 5u に損傷の影響ではないと考えられる DI 値のピークがあり、DI_{s2} を基準

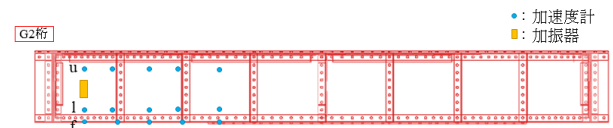


図-2 橋梁側面図及び加速度計配置図

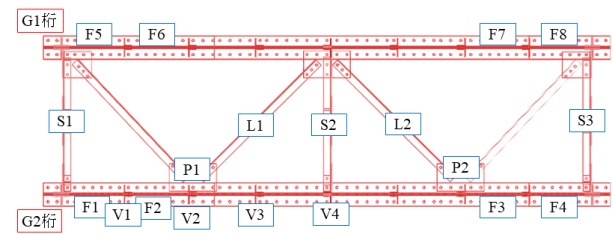


図-3 橋梁平面図及び損傷位置図



図-4 損傷付加の状態

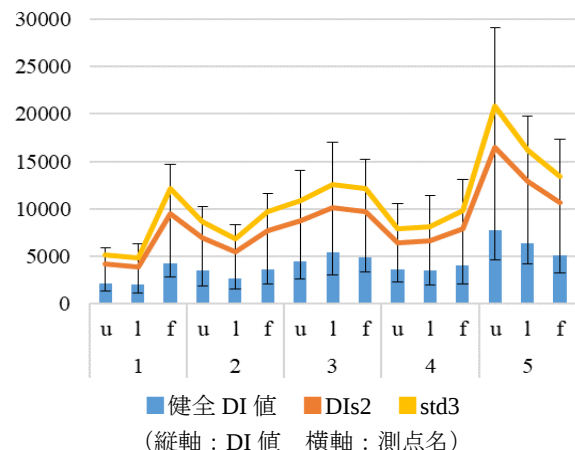


図-5 健全 DI の範囲と平均値及び基準 DI 値

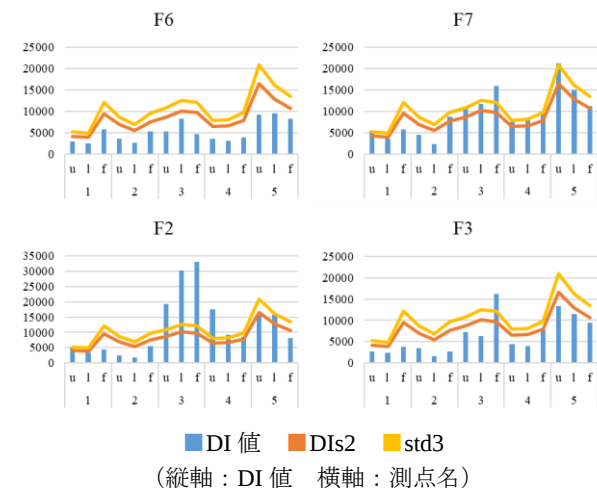


図-6 DI 値と基準 DI 値

DI 値とした場合は 3f に次いで大きく上回っており、DI_{s3} を基準 DI 値とした場合は基準 DI 値以下となることから、基準 DI 値としては DI_{s3} が有効であると考えられる。

5.2 各損傷ケースの評価

基準 DI 値を DI_{s3} として各損傷ケースの DI 値を評価するにあたって、基準 DI 値以下となる DI 値を除くため、各損傷ケースの DI 値から DI_{s3} を引いた値を評価 DI 値として用いて損傷位置の評価を行う。算出した評価 DI 値を図-7 に示す。損傷ケースのうち、F6、F8、L2、S2、S3 は全測点で評価 DI 値が 0 以下となったため図示していない。また評価 DI 値が極端に小さい値であった F5、V4 は省略した。

図示した評価 DI 値のうち、測点付近に損傷があるケースは F1、F2、V1、V2 であり、それぞれ対応する測点は 1f、3f、2u・2l、4u・4l である。F1 は 1u と 3l、F2 は 3f、V1 は 3l、V2 は 5l にそれぞれピークがあり、F2 は損傷位置とピークの位置が同じく損傷検出ができているといえる。F1 においては 1u と 1l を損傷位置付近とすればピークは一致していると考えられる。V1、V2 においては損傷に最も近い測点となる 2u・2l と 4u・4l ではなく、3l と 5l でそれぞれピークが得られた。これは本実験で使用した橋梁の垂直補剛材が山形鋼であり、桁中央側にリベット接合されていることや、補剛材付近より補剛材間中央部の腹板のほうが振動の影響が強く現れることが考えられ、2l、4l より桁中央部に近い 3l、5l の DI 値が大きくなったと考えられる。

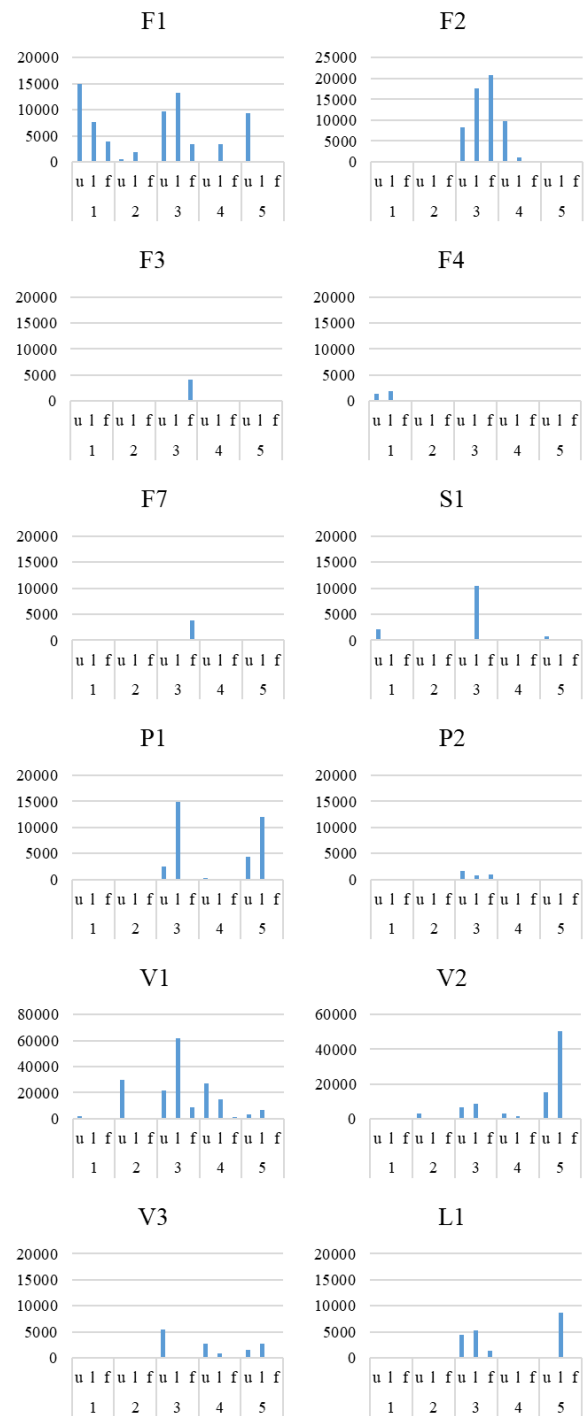
センサ付近でない損傷ケースについては、F3、F4、F7 では、損傷位置と対称の測点で小さい DI 値が得られており、前述したような損傷の影響が表れていると考えられる。P1、L1 のピークは 3l、5l にあり、部材の接合部付近の測点で、より測定値が大きくなると考えられる測点にピークが表れているといえる。P2 は P1 と同様の傾向がごく小さい値で発生していると考えられる。

6. まとめ

本研究ではセンサを桁端に集中させ、損傷位置を橋梁構造の各所に設定し、損傷評価の基準値を設け、損傷の有無の判定を行った。

測定される加速度のばらつきから基準 DI 値を設定し、算出した DI 値と比較し検討した結果、基準 DI 値により DI 値のピークを限定でき、損傷位置の判定がより明確になることが確認できた。基準 DI 値は同一条件下での測定値から求められるため、同一の構造であれば転用できる可能性がある。

センサの設置範囲内に損傷がある場合は DI 値から損傷位置が判定可能であり、範囲外にあつて対称の構造、対称の位置に損傷がある場合は相当する測点の DI 値が基準 DI 値をわずかに上回ることが確認できた。また、センサ設置範囲内に接合された 2 次部材に損傷がある場合には接合部付近の測点の DI 値が基準 DI 値を上回ることが確認できた。上記のどちらでもなくセンサ設置範囲外に損傷がある場合は基準 DI 値を満たす測点はなく、



(縦軸: DI 値 横軸: 測点名)
図-7 各損傷ケースの評価 DI 値

損傷の影響は得られないことが確認できた。

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会橋梁振動モニタリングとその標準化委員会：モニタリングによる橋梁の性能評価指針（案）、構造工学シリーズ；16、土木学会、2006
- 2) 柳原、三上、山崎、宮森、大島、日向：局部加振法を用いた質量付加による損傷検出評価方法の検討、土木学会北海道支部論文報告集、第 72 号、A-55、2016