

PVDF 加速度計を用いた損傷検出システムの検討

Study on damage detection system using polyvinylidene fluoride accelerometer

北見工業大学大学院 ○学生員 鈴木喬之 (Takayuki Suzuki)
 北見工業大学 正 員 三上修一 (Shuichi Mikami)
 北見工業大学 正 員 山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki)
 北見工業大学 正 員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori)

1. はじめに

現在、構造物の維持管理において目視による点検・調査・診断が行われている。この一連の流れを自動化し、維持管理の効率化を図ることを目的に、構造物が損傷を自己検知・診断する「構造ヘルスマニタリング」の研究が盛んに行われている。構造材料にセンサを取り付ける、あるいは埋め込むことにより構造物に加わったひずみ、振動、材料中に生じた損傷を検知・診断する構造ヘルスマニタリングの橋梁への適用も試みられている¹⁾。構造ヘルスマニタリングに使用されるセンサの選択肢は増え続けており、その中でも圧電型加速度センサや MEMS は振動や衝撃計測等で多く使われているセンサである。圧電型加速度センサの特徴として、高感度・小型かつ測定周波数範囲が広いことが挙げられる。

この圧電素子を用いて微小な損傷位置と損傷程度を、ある程度検出できることが報告されている²⁾。また、様々な圧電素子の中でも PVDF(ポリフッ化ビニリデン)は柔軟性に富み、形状の自由度が高いことから小型のセンサが開発されている。PVDF 加速度計は小型・軽量・安価という特徴がある。したがって、この加速度計で損傷検出を行えば、構造ヘルスマニタリングの橋梁への適用の際の汎用性が広がると期待される。

そこで本研究では、FRP 橋梁接合部の損傷位置の検出に適用することを想定し、複数の FRP 部材をガセットで接合したトラス模型供試体において、PVDF 加速度計を用いて実験的に接合部の損傷検出を行った。損傷検出におけるモニタリングの方法として、積層圧電アクチュエータを用いた SWEEP 加振によって、トラス模型の損傷状況を PVDF 加速度計の出力応答から損傷検出システムについて検討した。

2. データ収録部

トラス模型の損傷検出実験においてデータ収録部である加速度計を、PVDF 加速度計を用いることにより既往の研究²⁾で用いられた加速度計に比べて小型化・軽量化が図られている。また、PVDF 加速度計は安価なため振動測定システムもコストダウンできる。本研究で用いた PVDF 加速度計の外観を図-1、性能を表-1 にそれぞれ示す。

3. 供試体の概要とセンサ及び損傷の位置

3.1 FRP トラス模型供試体

実験に用いたトラス模型は、ものづくり大学 FRP トラ



図-1 PVDF 加速度計の外観

表-1 PVDF 加速度計の性能

センサ名	PF
寸法[mm]	13L×19W×6H
質量[g]	3
周波数範囲[Hz]	1~20000
値段[円/個]	5,000

ス橋の主構³⁾を参考に作製したものであり図-2 に示す 800×375mm (横×高さ) のトラス構造である。

トラス部材には FRP 製角パイプ (□50mm) を使用し、ガセットプレート (SUS304 製) と角パイプはブラインドリベットで接合されている。実験時におけるトラス模型の固定方法は、4 隅の節点をクランプで I 桁のフランジの先端と挟むことにより固定している。

3.2 センサおよび損傷の位置

加速度の計測は、中央ガセットで接合されている 4 本の FRP 部材に 1 個ずつ PVDF 加速度計を設置し、4 チャンネルで計測を行う。損傷位置および PVDF 加速度計の設置位置を図-2 に示す。

損傷としてリベット接合部での破壊を想定しているが、ここでは、リベットを外すことにより損傷を作製した。模型中央のガセットと FRP 部材を接合しているリベットを損傷導入位置とする。完全にリベットで接合した状態を健全状態 (D0)、損傷導入位置の表面のリベットを 4 本または 6 本脱落させた状態を損傷状態 (斜材左: D4-1、斜材右: D4-2、弦材左: D6-1、弦材右: D6-2)

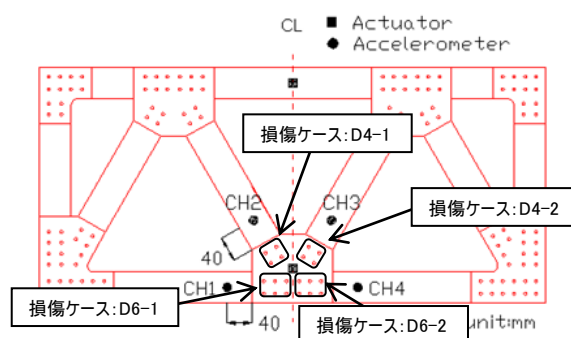


図-2 PVDF 加速度計設置および損傷位置

と定義する。

4. 接合部の損傷検出実験

4.1 損傷検出方法

損傷検出の手順を、以下に示す。

- ① アクチュエータの加振に対する PVDF 加速度計の出力応答を供試体の健全状態、損傷状態それぞれで取得する
- ② 損傷前後のパワースペクトルの差から、各加速度計が受ける損傷の影響度を数値化した損傷指数(DI 値)を算出する²⁾
- ③ DI 値の大きさを設置した加速度計同士で比較することで損傷位置を検出する

手順②では、測定時のノイズや測定誤差の影響を除く処理を施し DI 値を算出している。得られた DI 値が大きい加速度計の近傍に損傷があると判定する。

4.2 加振ケースおよび加振計測条件

加振ケースとして上弦材の中央を面外方向に加振する場合と、中央ガセットの中心を面外方向に加振する場合の2ケースで実験を行った。2 ケースにしたのはアクチュエータの設置する位置で、損傷検出にどのような影響を与えるか確認するためである。また、トラス模型の加振条件および計測条件を表-2 に示す。

表-2 加振・計測条件

加振条件		計測条件	
加振法	SWEEP 加振	計測方向	面外
加振周波数 [Hz]	1~700	サンプリング周波数 [Hz]	7000
加振時間[sec]	10	計測時間[sec]	12

4.3 実験結果

4.3.1 加振ケース 1 の結果

図-3 は加振ケース 1、損傷ケース D6-1 におけるパワースペクトルである。図-4 は、縦軸は DI 値、横軸は各測点のセンサ番号を示す。図-4 では、損傷近傍に設置した ch1 の DI 値が他のセンサよりも大きな値を示しており損傷位置の検出ができています。

次に、損傷ケース D4-1 の実験ケースで損傷検出を行った。パワースペクトルを図-5 に、DI 値の結果を図-6 に示す。損傷ケース D6-1 の場合 ch1 と ch4 の 250Hz のピークが損傷時に低くなったが、損傷ケース D4-1 の場合では 250Hz のピークの変化が見られず、それ以降の高い周波数において大きな変化が見られる。D4-1 の場合でも損傷近傍の ch2 の DI 値が一番大きくなることから、損傷位置の検出が出来た結果となった。

同様に、損傷ケース D4-2 と D6-2 についても損傷検出実験を行った。D4-2 におけるパワースペクトルは損傷近傍の加速度計である ch3 のみを図-7(a)、DI 値は図-7(b)にそれぞれ示し、D6-2 におけるパワースペクトルは ch4 のみを図-8(a)、DI 値を図-8(b)に示す。

トラス模型左側の D6-1・D4-1 の2 ケースと同様に、トラス模型右側の D4-2 と D6-2 でも損傷近傍の加速度計において DI 値が大きくなり損傷検出が可能であった。

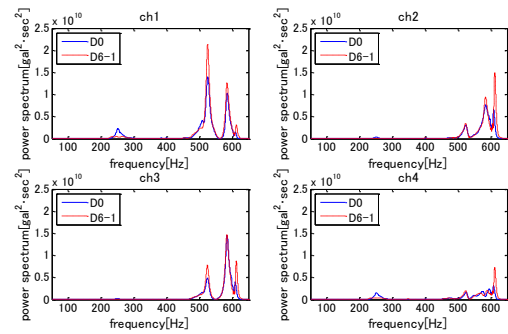


図-3 損傷ケース D6-1 のパワースペクトル

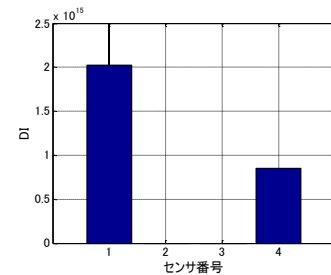


図-4 損傷ケース D6-1 における DI 値

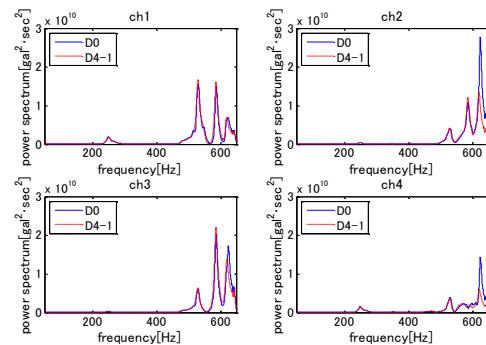


図-5 損傷ケース D4-1 のパワースペクトル

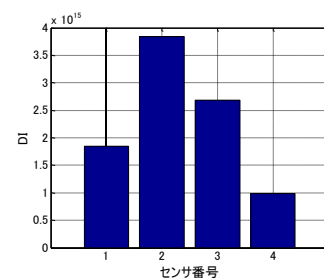


図-6 損傷ケース D4-1 における DI 値

また、図-7(a)、図-8(a)のパワースペクトルを比較すると、斜材に損傷を与えた D4-2 では 250Hz のピークの変化がなく、弦材の D6-2 では変化が見られた。4 つの損傷ケースで実験を行ったが、トラス模型の左右で同様な傾向があると確認できた。また、パワースペクトルに違いが見られたが損傷位置の検出に影響は無いと考えられる。

追着らの研究²⁾で圧電素子を用いた圧電型加速度計でトラス模型の損傷検出を行っていたが、全損傷ケースで ch4 の DI 値が大きくなり損傷位置の判定が困難であった。この要因として、FRP 部材に対して加速度計の質量が影響していると考えられる。このことから、軽量で

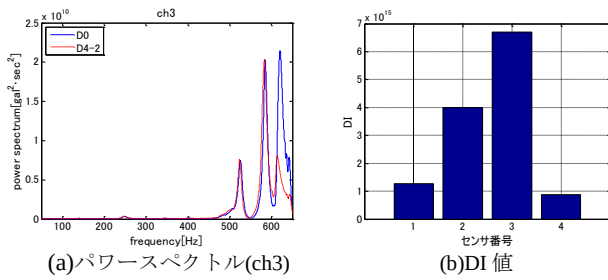


図-7 損傷ケース D4-2 の結果

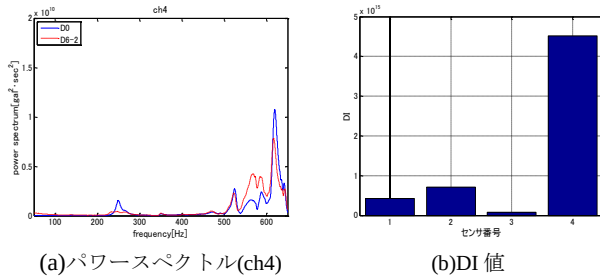


図-8 損傷ケース D6-2 の結果

ある PVDF 加速度計を用いた場合 ch4 の DI 値が損傷検出の妨げになることはなく、全ケースにおいて損傷位置の検出が可能であることが確認できた。

4.3.2 加振ケース 2 の結果

加振ケース 2 における損傷検出実験を行った。図-9 は損傷ケース D6-1 におけるパワースペクトルとなっており、図-10 に算出した DI 値をそれぞれ示す。図-9 を見ると加振ケース 1 では、200Hz 以下のパワースペクトルは小さいが加振ケース 2 では大きい。また、得られた DI 値は損傷近傍の ch1 が小さく、ch2 の斜材部分の DI 値が大きいことから損傷位置の検出が難しい。図-9 に示すパワースペクトルを比較すると、ch2 と ch3 の 200Hz 以下においてパワースペクトルが ch1 と ch4 に比べると大きいことから、弦材の損傷検出の妨げになると考えられる。

次に、損傷ケース D4-1 で損傷検出実験を行った。図-11 にパワースペクトル、図-12 に算出した DI 値を示す。D4-1 でも D6-1 と同様に 200Hz 以下のパワースペクトルが大きい、500Hz 以上の高い周波数で健全時との差が大きかったため損傷近傍の ch2 の DI 値が大きくなり、損傷位置の検出が可能であった。

また、D4-2・D6-2 の損傷ケースも同様に損傷検出実験を行ったが、D4-1・D6-1 と同様な結果となった。どの損傷ケースの場合も 200Hz 以下のパワースペクトルが大きくなり、中央ガセットの中心で加振した影響と考えられる。

5. 斜材位置加振による損傷検出実験

これまで行った損傷検出実験では加振ケース 2 の中央ガセットで加振した場合、弦材の損傷を検出することが難しいことから加振位置を変更して実験を行った。また、中央ガセットで加振した場合に発生する 200Hz 以下のパワースペクトルが、斜材を加振位置にする場合にも大

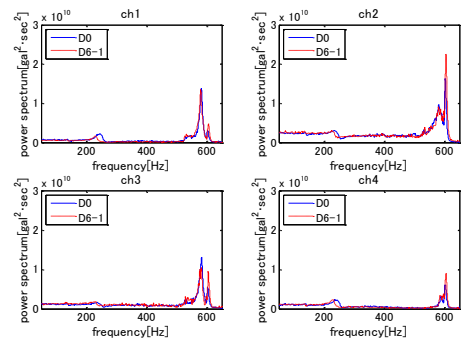


図-9 損傷ケース D6-1 のパワースペクトル

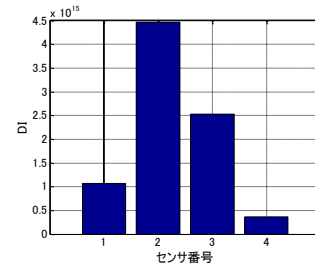


図-10 損傷ケース D6-1 における DI 値

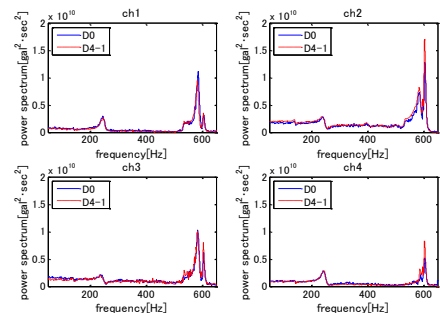


図-11 損傷ケース D4-1 のパワースペクトル

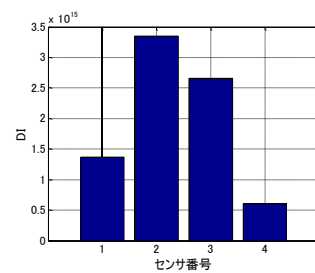


図-12 損傷ケース D4-1 における DI 値

きくなるか確認した。加振ケース 3 として斜材左端の中心を加振する場合と、加振ケース 4 の斜材右端を加振する場合の 2 つを加振位置として加えた。アクチュエータの設置位置は図-13 に示すように左側斜材と右側斜材に設置しており、損傷ケースは ch1 の近傍である D6-1 に設定した。また、加振・計測条件は表-2 と同条件としている。

図-14 に加振ケース 3 のパワースペクトル、図-15 に

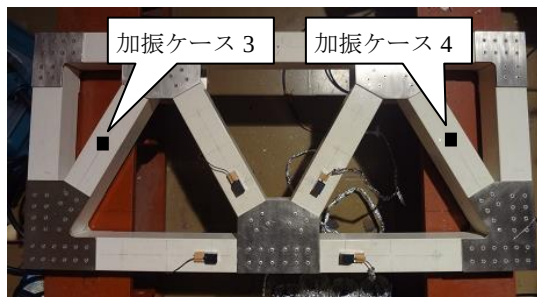


図-13 変更した加振位置

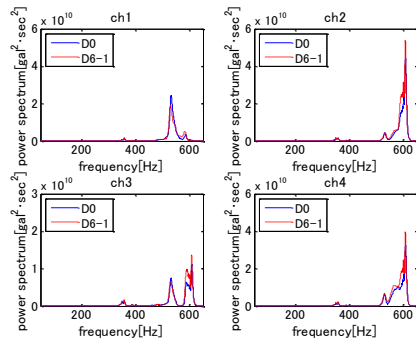


図-14 加振ケース 3 のパワースペクトル(D6-1)

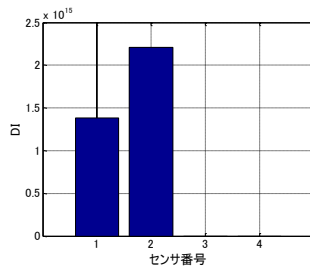


図-15 加振ケース 3 の DI 値(D6-1)

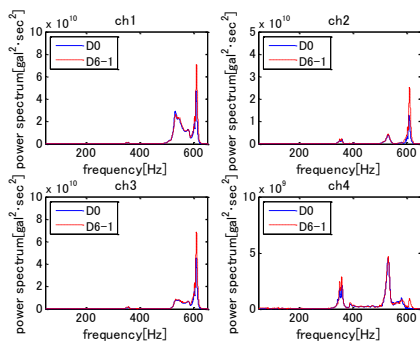


図-16 加振ケース 4 のパワースペクトル(D6-1)

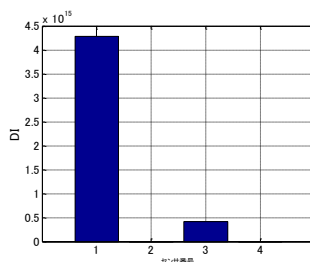


図-17 図-14 加振ケース 4 の DI 値(D6-1)

DI 値の算出結果をそれぞれ示す。加振ケース 2 のような 200Hz 以下でパワースペクトルが大きくなる現象は見られなかった。次に、DI 値の算出結果を見ると、損傷近傍の ch1 より ch2 の DI 値が大きい。これは、アクチュエータと ch1 との間に支点があり、ch1 に振動が伝わりづらいため DI 値が一番大きくならなかったと考えられる。しかし、損傷近傍の ch1 の DI 値も 6 割程度出ていることがわかる。

図-16 に加振ケース 4 におけるパワースペクトル、図-17 に DI 値の算出結果を示す。加振ケース 4 では加振点近くの ch3 と ch4 よりも、損傷近傍にある ch1 の DI 値が一番大きくなっていることから損傷検出が出来た。加振ケース 3・4 の結果を見ると、200Hz 以下のパワースペクトルが大きくなる現象が現れないことから、斜材の FRP 部材を加振することで良好な結果が得られた。

以上より、1 点のみの加振から DI 値を出すのではなく加振位置の影響を考慮するため、FRP 部材を加振した場合の DI 値の平均を図-4、図-15、図-17 から算出し、図-18 に結果を示す。DI 値を平均した場合でも損傷近傍の CH1 の DI 値が大きくなることから、加振位置を複数考慮することによって損傷位置の検出精度が向上する。

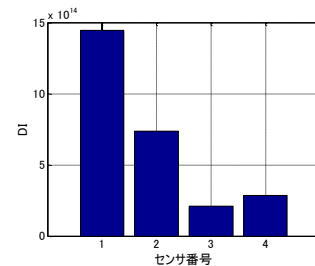


図-18 平均をとった場合の DI 値

6. まとめ

本研究では、PVDF 加速度計を用いて実験的に FRP トラス模型接合部の損傷検出を行った。損傷位置の検出はある程度できたが、加振位置によって検出が難しいケースもあった。ただし、単点加振を複数か所に行いそれぞれで求めた DI 値を平均化することにより、加振位置の影響を考慮した場合の損傷検出を行えることも確認した。PVDF 加速度計で損傷位置の検出ができることから、本研究で用いた損傷検出システムは構造ヘルスモニタリングへの適用が可能であると考えられる。

【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研究小委員会：橋梁振動モニタリングのガイドライン, 土木学会, 2000.
- 2) 迫着昂志, 三上修一, 大島俊之, 宮森保紀, 山崎智之：FRP トラス構造の接合部損傷検出のための振動特性の検討, 土木学会北海道支部 論文報告集 第 67 号, A-26, 2011.
- 3) 増淵文男：大学の授業における GERP トラス橋の建設, 強化プラスチック, Vo.54 No1 pp.29-34, 2008.