

圧電フィルムによる R C 構造物の損傷検知に関する研究

○茨城大学工学部 正会員 田名部菊次郎 (株)東京鐵骨橋梁 曾根原宏一
 茨城大学工学部 フェロー 横山功一 茨城大学工学部 正会員 原田隆郎
 (独法)土木研究所 正会員 運上茂樹 (独法)土木研究所 正会員 小林寛

1. はじめに

我が国は、世界でも有数の地震大国であり、特に平成 7 年の兵庫県南部地震では都市インフラの被害は深刻であった。その被災状況の把握や復旧活動には多くの時間や費用が費やされた。地震時や供用時の R C 構造物の損傷発生と進行をモニタリング・評価するシステムの開発が求められている。高精度ひずみ計測が可能、専用計測器が不要なので低コストなどの長所を有するセンサーとして圧電フィルム(PVDF)に関心が高まっている。R C 橋脚の供用時の微細な損傷発生から亀裂への成長までの有効な損傷検知センサーを目指し、PVDFフィルムを貼った片持ち梁曲げ振動試験での動的特性と R C 橋脚モデル動的載荷試験によって微細ひび割れ発生挙動とクラック成長の検知が確認できたので報告する。

2. PVDFフィルムについて

PVDF(ポリフッ化ビニリデン)フィルムは、PVDF 両面に電極として Ag や Al が蒸着されている基本構造をもち、図1の様に PVDF フィルムに力やひずみを加えると比例する電圧を生じる圧電性を有する。この圧電性を力やひずみ計測に活用すれば、ひずみゲージによるひずみ計測に不可欠の専用計測器が不要となる。さらに、PVDF フィルムが他の圧電素子に対する大きな長所は柔軟性を有して軽量なことである。このことは様々な分野のセンサーとしての用途を拡大できる長所と認識されている。

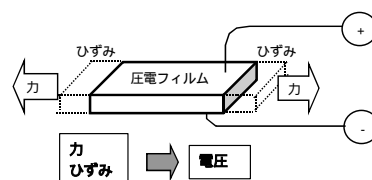


図1 PVDFと圧電効果

3. PVDFの基本特性

1) ひずみとPVDF 出力電圧との関係

PVDF フィルムの圧延方向と圧延方向に直角方向では、ひずみに対する出力電圧の感度が異なる。いま、荷重軸に対する PVDF の座表系を図2、測定対象物の x、y 軸を図3に設定し、x 軸ひずみを ε_x 、y 軸ひずみを ε_y 、せん断ひずみを γ_{xy} とすると、x 軸からの角度(θ)に貼り付けた PVDF フィルムの出力電圧 $V(\theta)$ は次式で表される。^{1), 2)}

$$V(\theta) = \frac{A}{C(1+k_t^2)} \{f_1(\theta)\varepsilon_x + f_2(\theta)\varepsilon_y + f_6(\theta)\gamma_{xy}\} \quad (1)$$

ここで、特に $\theta=0^\circ$ と 90° の場合の ε_x と ε_y は次式で求められる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{F_1 \cdot V_1 - F_2 \cdot V_2}{F_1^2 - F_2^2} & (2) & \quad F_1 = \frac{k_x + \nu k_y}{1 - \nu^2} \\ \varepsilon_y &= \frac{F_1 \cdot V_2 - F_2 \cdot V_1}{F_1^2 - F_2^2} & (3) & \quad F_2 = \frac{k_y + \nu k_x}{1 - \nu^2} \end{aligned}$$

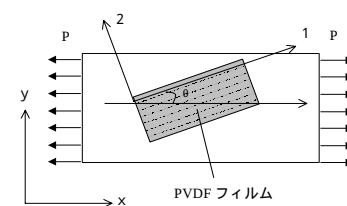


図2 PVDFの座標系

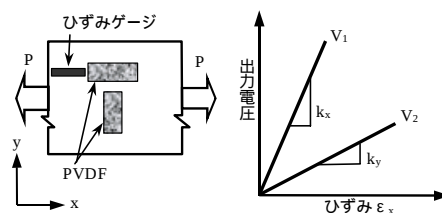


図3 ひずみ - 出力電圧

予め $\theta=0^\circ$ と 90° の場合の予備実験を図3に示す方法で行い、荷重 P 方向ひずみ ε_x と PVDF フィルムの出力電圧 V_1 と V_2 から「ひずみ - 出力電圧」グラフを書き、その傾き k_x 、 k_y より(3)式によって係数 F_1 、 F_2 を求める。この F_1 、 F_2 を(2)式に代入して ε_x と ε_y が求められる。(ここで、 ν は測定物のポアソン比)

2) PVDFフィルム貼り付け角度とひずみ

ひずみゲージと同様の平面ひずみ計測可能性およびひずみ速度依存性を検討するために、鋼板に PVDF フィルムの角度を変えて貼り付けた状態の引張試験を行った。荷重は 15 kN まで変位速度(各 2、5、10、15、20 mm/min)一定で加え、ひずみゲージの計測値と PVDF フィルムの出力電圧を求めた。計測値より前出の方法で ε_x 、 ε_y を求める。さらに、貼り付け角度(θ)のひずみ ε_θ は、圧電定数 $e_\theta = e_{31}\cos^2\theta + e_{32}\sin^2\theta$ の関係より、PVDF フィルムの出力電圧に比例するひずみ ε_θ を、計測値 ε_x 、 ε_y から(4)式で求められる。PVDF フィルムのひずみと同位置のひずみゲージ計測値の比較は図4に

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_x \cos^2\theta + \varepsilon_y \sin^2\theta \quad (4)$$

キーワード：圧電フィルム、ひずみ波形計測、R C 橋脚、ひび割れ発生検知、クラック成長

連絡先：〒316-0023 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 TEL 0294-38-5247 FAX 0294-38-5268

示す様によく一致した。このことから本方法は構造物の平面ひずみ計測にも、ひずみゲージと同様に利用出来ることが確認できた。

3) 片持ち梁曲げ振動試験

PVDFフィルムの動特性を検討する振動試験を、片持ち梁の表裏にPVDFフィルムとひずみゲージを貼付けて、既報³⁾よりも最高加振周波数の高い周波数：2、5、10、15、20、50Hz、ひずみ：50、100、200、300、400 μ で実施した。ここで、ひずみ振幅を増すために加振周波数に片持ち梁の固有振動数を合わせる方法とした。PVDF出力電圧はOPアンプ式のチャージアンプを介し、電圧計測用センサインターフェイスとパソコンに内蔵の制御ソフトウェアで計測した。図5は振動試験概要、図6は周波数 - 出力電圧グラフを示す。ひずみ400 μ までのPVDFフィルムの出力電圧は、20(Hz)まで周波数依存性を示さないことを確認した。この基本的動特性は以降の動的载荷試験のひずみ計測にも有効であると考える。

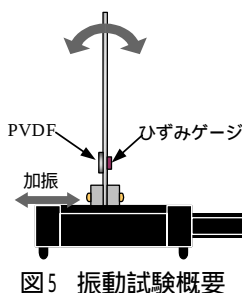


図5 振動試験概要

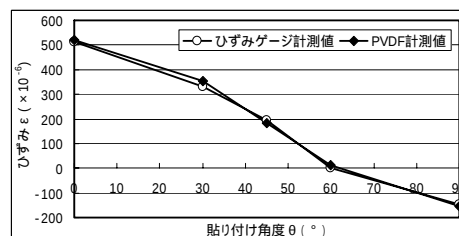


図4 PVDFとひずみゲージ計測値

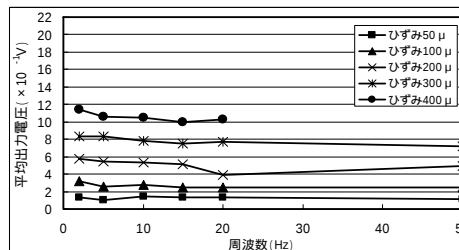


図6 PVDFの周波数 - 出力電圧

4. RC橋脚モデルの動的载荷試験

人工地震を与えたRC橋脚表面のPVDFによるひずみ計測例があるが⁴⁾、本研究はRC構造物表面に貼り付けたPVDFフィルムのひび割れ発生検知およびクラック成長計測の可能性を検討した。土木研究所で実施された3次元大型振動台によりRC橋脚モデルの動的载荷試験により、加振入力地震波は、兵庫県南部地震時にJR鷹取駅で観測された加速度波形(鷹取地震波)の時間軸を50%、振幅を15、90、50%に調整した。PVDFフィルムはRC橋脚モデル基部より上方50cm位置の4面に貼付けた。また、同位置にひずみゲージを貼り付けて同時計測した。写真1に用いた橋脚モデルを示す。



写真1 RC橋脚モデル

低加速度域の加振1回目(振幅調整15%)では、PVDFフィルムとひずみゲージのひ

ずみ波形は一致し、加振開始から約2秒迄は引張・圧縮の両ひずみ状態が、その後は圧縮のみのひずみ状態となって被りコンクリート部の微小ひび割れ発生を検知できた(図7)。ひび割れ発生後の加振2回目(振幅調整90%)では、顕著に圧縮側のみのひずみ波形となってひび割れがクラックに成長した事が検知できた(図8)。加振中の被りコンクリートの剥離と加振後の詳細なクラック観測と合致した。この挙動はPVDFフィルムと同位置のコンクリート内引張鉄筋に貼り付けたひずみゲージ計測値との比較によって裏付けられた(図9)。

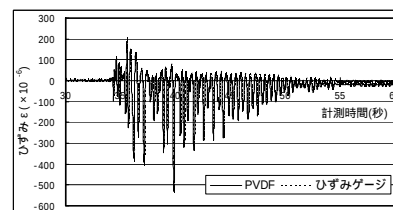


図7 加振1回目：ひずみ波形比較(P面左端)

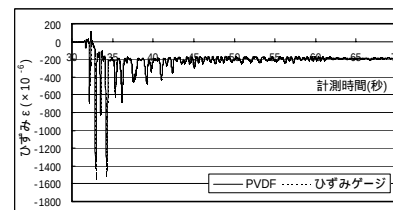


図8 加振2回目：ひずみ波形比較(P面左端)

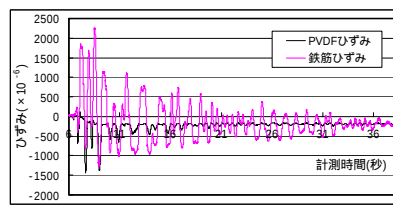


図9 加振2回目：ひずみ波形比較(P面左端)

5. まとめ

- ・RCのコンクリート表面ひずみを加振前より加振中まで継続的に計測モニタリングする事によって、ひび割れ発生さらにクラック成長によってPVDFフィルムひずみ波形が圧縮のみとなる特徴の計測から、コンクリート表面の損傷進行が確認できた。
- ・PVDFフィルムはひずみゲージと同等の能力を有し、静的から動的までの計測能力をもつ専用計測器不要の低コスト損傷モニタリング技術の可能性を確認できた。
- ・PVDFフィルムはコンデンサと同様の電気的性質をもつので、PVDFフィルムとチャージアンプに静電容量ノイズ対策を施すことが必要であるのが明らかとなった。

謝辞：本研究は平成16年度文科省科学研究費補助金(基盤研究(A)(1))を受けて、土木研究所と共同研究で実施した。ここに、御協力頂いた関係者に謝意を表します。

参考文献 1)勝見圭介：高分子圧電フィルムを用いた静的ひずみ分布の測定、日本機械学会論文集(A編)、pp.215-220、1998、1、2)黒崎茂：圧電フィルムを用いたひずみ測定、金属、PP.325-328、2002、4、3)石丸和宏：ピエゾひずみセンサーの特性に関する一考察、土木学会第59回年次学術講演会、pp1493-1494、2004、9、4)園田恵一郎：圧電フィルムを用いたひずみセンサーの地震応力計への適応性、構造工学論文集、pp1479-1484、2002、3、