

圧電素子センサを用いた疲労き裂検知の基礎的研究

東京都市大学 学生会員 ○森近 翔伍 東京都市大学 正会員 関屋 英彦
 東京都市大学 正会員 丸山 収 首都高速道路 正会員 平野 秀一
 東京都市大学 フェロー会員 三木 千壽

1. はじめに

鋼橋で発生する疲労損傷に対して効率的かつ適切な維持管理を実現するためには、構造物の安全性や経済的な観点から、疲労損傷の早期発見が望まれる。近年では、疲労損傷の早期発見の試みとして、センサを活用した損傷検知が活発である。そこで、本研究では疲労き裂の新たな検知手法の開発として、圧電素子センサを用いた疲労き裂検知を試みる。ここでは、圧電素子センサに関する基礎的な検討として、圧電素子センサの周波数依存性について報告する。

2. 圧電素子センサに関する基礎的な理論

圧電素子センサは、応力を電気に変換するセンサであり、感度が良く一枚あたり数十円程度と安価である。また、センサ自身の動作には電源を必要としないため省電力である。このような利点から、本研究では圧電素子センサによる損傷検知を試みることにした。

圧電素子センサは、力を受けることでイオンが偏り、その偏りに応じて、電圧を生み出す。この時に生じる電束密度 D [C/m^2]は、圧電体に加わる応力の変化率 T [N/m^2]と圧電体が置かれている空間での単位電界 E [V/m]を用いて、式(1)で表すことができる¹⁾。

$$D = dT + \varepsilon E \quad (1)$$

ここで、電気密度 D [C/m^2]は、単位面積あたりの電気力線の本数であり、電界の強さを表すものである。 d [C/N]は圧電ひずみ定数、 ε [C/Vm]は誘電率である。圧電ひずみ定数 d [C/N]は、単位応力あたりに生じる電気量を、誘電率 ε [C/Vm]はイオンの偏りやすさを表している。

X 軸、Y 軸を圧電体面内方向、Z 軸を圧電体面外方向とすると応力成分は、X 軸、Y 軸、Z 軸に生じる軸応力の変化率 T_1 , T_2 , T_3 と X 軸面、Y 軸面、Z 軸面に生じるせん断応力の変化率 T_4 , T_5 , T_6 の計 6 つの成分となる。この時、圧電体の周辺に生じている電界 E が $0 V/m$ と仮定すると、X 軸、Y 軸、Z 軸のそれぞれの方向に生じる電束密度 D_1 , D_2 , D_3 は、式(1)から式(2)で表される。

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 d_{ij} は圧電ひずみ定数であり、 i 成分は電気分極の方向、 j 成分は応力成分の方向を示している。また、圧電体はイオンの移動方向が固定されているため、特定の方向にしか電気分極が発生しない。そのため、式(2)のように表される。このとき、極板間に蓄えられる電気量 $Q[C]$ は、式(3)となる。

$$Q = \iint [D_1 \ D_2 \ D_3] \begin{bmatrix} dA_1 \\ dA_2 \\ dA_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $A_1[m^2]$ は Y 軸・Z 軸で構成される電極面積、 $A_2[m^2]$ は X 軸・Z 軸で構成される電極面積、 $A_3[m^2]$ は X 軸・Y 軸で構成される電極面積である。センサが出力する電圧 $V[V]$ は、静電容量 $C[F]$ と電気量 $Q[C]$ の関係から式(4)で表される。

$$V = Q/C \quad (4)$$

電界の変化が生じない空間において、式(2)から式(4)の関係より出力電圧と応力の変化率が線形の関係を持していることがわかる。この関係から、圧電素子センサの出力電圧のモニタリングにより、疲労き裂による応力変化を捉えることができると考えられる。

3. センサの周波数特性に関する検討

本試験では、センサの周波数特性の影響を検討した。試験で用いた試験片を図-1 に、諸元値を表-1 に示す。引張試験片は、全長 600 mm、平行部 160 mm、平行部の幅 50 mm、厚さは 9 mm である。試験方法は、載荷速度と載荷荷重をそれぞれ変更し、圧電素子センサが出力した電圧全振幅について検討する。試験は、載荷荷重を 1.1MPa から 111.1MPa、載荷速度を 0.1Hz から 5.0Hz までパラメトリックに変化をさせて実施した。また、セ

キーワード 疲労損傷, 損傷検知, 橋梁モニタリング, 圧電素子センサ

連絡先 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学 TEL.03-5707-0104(代表) E-mail:g1891608@tcu.ac.jp

センサの設置位置を図-2 に示す。圧電素子センサは、試験片中央からセンサ中心が 15mm の位置に、3 軸ひずみゲージは試験片中央から 5mm の位置に設置し、ともにサンプリング周波数を 100Hz として計測を実施した。

載荷速度 0.1Hz, 載荷荷重 11.1MPa–111.1MPa における圧電素子センサの出力電圧と載荷方向のひずみ時系列結果を図-3 に示す。出力電圧と載荷方向のひずみとの間には、位相差を確認できる。次に、電圧全振幅と載荷速度との関係について図-4 に示す。図-4 より、載荷速度が増加すると、同一載荷荷重においても電圧全振幅が上昇しており、載荷速度に依存していることが確認できる。これは、2 章で述べたように、発生電圧がひずみ応答の変化率に依存しているためである。

次に、出力電圧を一階積分することによって、ひずみ応答の変化率に対応する電圧値から、ひずみ応答に対応した電圧値を算出する。なお、現波形の基線ずれの除去は、平均値を差し引くことで行った。電圧一階積分値の全振幅と載荷速度との関係を図-5 に示す。図-5 より、同一載荷荷重における電圧の一階積分値は、周波数 1.0Hz までは、ほぼ一定の値を示すことが確認できた。

4. まとめ

本研究では、圧電素子センサによる疲労き裂の検知を試みるために、圧電素子センサの周波数依存性に対する基礎的な検討を実施した。出力電圧は、ひずみの変化率に依存しており、電圧の一階積分値は、周波数約 1.0Hz 以下において、ほぼ一定の値を示した。

5. 今後の方針

本研究では、センサの周波数依存性に関して検討を行ったが、今後は引張試験片による疲労試験を通して、圧電素子センサによる疲労き裂の検知を試みる。また、疲労き裂の大きさと圧電素子センサの出力変化との関係についても検討する予定である。

謝辞：本研究は東京都市大学と首都高速道路株式会社、首都高技術株式会社、一般財団法人首都高速道路技術センターとの共同研究「都市基盤施設の再生工学首都高における点検・診断技術の開発・高度化」の一環として実施したものである。首都高速道路株式会社、首都高技術株式会社、一般財団法人首都高速道路技術センターの関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 岡崎清：第 3 版セラミック誘電工学，学献社，319-323，1983。

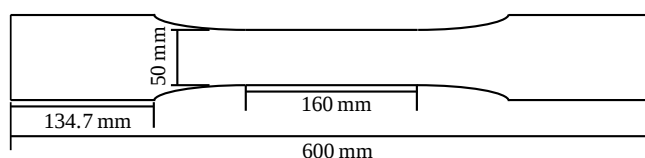


図-1 引張試験片の寸法

表-1 引張試験片の諸元値

材質名	SM490Y	
降伏強度	355	N/mm ²
引張強度	490	N/mm ²
弾性係数	205000	N/mm ²
ポアソン比	0.3	-

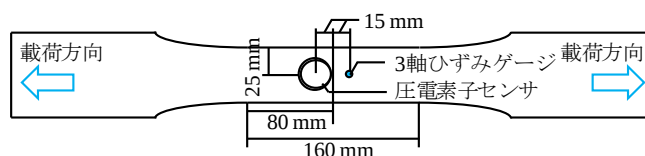


図-2 センサの設置位置

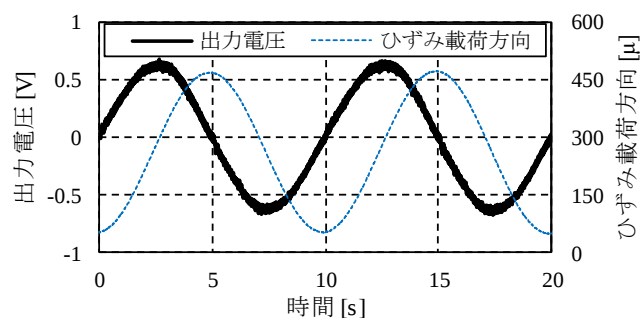


図-3 出力電圧とひずみ載荷方向の時系列結果

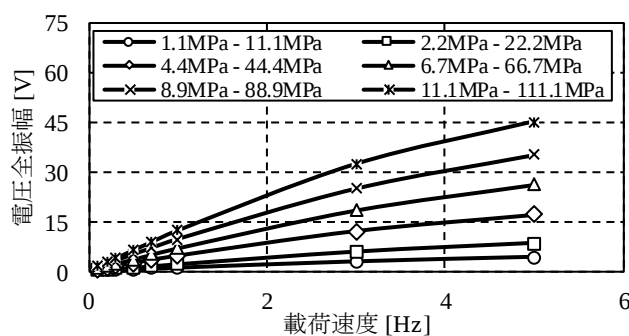


図-4 載荷速度と電圧全振幅との関係

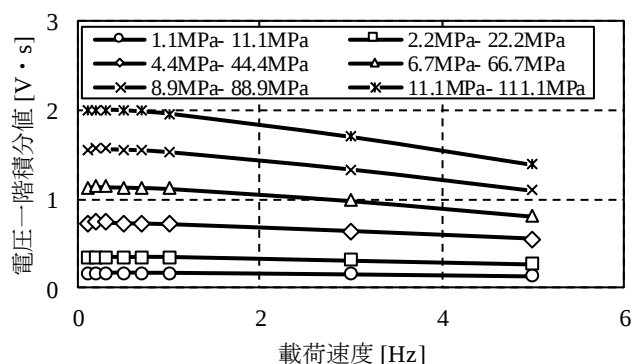


図-5 載荷速度と電圧一階積分値との関係