

振動発電デバイスを用いた橋梁振動特性変化の検知に関する基礎的検討

京都大学	学生会員	○川端康平
京都大学	正会員	橋本勝文
京都大学	正会員	松本理佐
京都大学	正会員	服部篤史
京都大学	正会員	河野広隆
京都大学	正会員	塩谷智基

1. 研究

年間一兆個ものセンサを消費するトリリオンセンサ社会において、センサ端末には電池や配線による電力供給ではなく自立電源が必須となる。本研究は環境振動で発電する小型振動発電デバイスを構造物の健全性を評価するためのセンサとして用いた橋梁の維持管理モニタリングシステムの確立を目指す。これは、デバイスの発電量から構造物の振動数を算出し、その変化から健全性を評価するというものである。システム実現の一步として、本研究では小規模橋梁を対象にデバイスの適切な設置位置について検討する。

2. 振動発電デバイス

2. 1. 概要

小型振動発電デバイスを図1に示す。これは橋梁の固有振動のような低周波数帯の振動でも発電でき、その電力のみで発電量をセンシングすることで構造物の振動数を把握できるメンテナンスフリーの小型センサ端末として利用できる。また、既存の無線センサでは主に太陽光発電による給電が行われているが、悪天候や夜間の途絶、トンネル等では利用できないという課題があったが、振動発電デバイスによって、終日安定した稼働と設置場所の制約問題の解決が期待されている。

2. 2. 発電原理

本研究で想定した振動発電素子の模式図を図2に示す。櫛歯形状を有する可動部と固定部があり、突き出した電極部の間の静電容量が変化することで発電する。

発電量は静電アクチュエータの線形等価回路から変換効率を考慮した式(1)および式(2)で表される²⁾。

$$P = \frac{ma^2Q}{4\omega_0} \cdot \eta \quad (1)$$

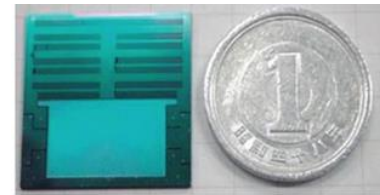


図1 小型振動発電デバイス

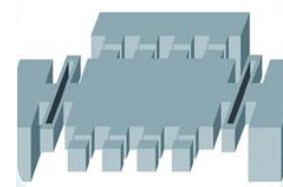


図2 振動発電素子の模式図



図3 橋梁の一例（京都府）

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{kC_0}{QA^2} \right)^2} \quad (2)$$

ここで、 $P[W]$ は発電量、 $m[kg]$ は質量、 $a[m/s^2]$ は加速度、 $Q[-]$ は品質係数、 $\omega_0[rad/s]$ は角周波数、 $\eta[-]$ は効率、 $k[N/m]$ はばね定数、 $C_0[F]$ は静電容量、 $A[C/m]$ は力係数である。式(1)から発電量は加速度に依存することが分かる。また、デバイスの構造上、発電量は1方向の振動のみに依存するため x , y , z それぞれの振動方向による発電量を算出した。

3. 解析

3. 1. 固有値解析

解析モデルは京都府にある A 橋で橋長は 13.4m、幅員は 3.6m である。図 3 に同じ構造形式の橋梁の一例を示す。実際の計測結果からこの橋梁の卓越周波数は 13.4Hz であり、2 次モードで卓越していたため、解析モデルにも同様に 2 次の固有振動数が 13.4Hz となるようにヤング率・ポアソン比・密度を設定した。また、劣化後の床版コンクリートは弾性波伝搬速度が半分になると仮定し、その時のヤング率が 4 分の 1 になることを利用した。

本研究の対象が小規模橋梁であり、低次の振動モードで卓越する傾向³⁾から、表 1 に庵垣内橋の劣化前後の 3 次モードまでの固有振動数を示す。また、3 次モードまでの振動解析の結果を図 4 に示す。

表 1 より、どのモードにおいても劣化後で固有振動数が低下している。これは、固有振動数は剛性を質量などで除した平方根で表現されるものであり、劣化前後で剛性を低下させたことで固有振動数も低下するためである。

3. 2. 発電量算出と設置位置の検討

解析結果を基に任意の 6 節点で発電量を算出した。基本的に発電量は劣化前より劣化後で低下していることが分かった。これは、劣化により固有振動数が低下し、加速度が減少したためと考えられる。一方で劣化後において発電量が増加する場合もみられたが、これは劣化により振幅が増加し加速度も大きくなったためと推察できる。

振動発電デバイスが劣化・損傷を検知する閾値を検出・設定しやすいことから、発電量が大きく、劣化前後での差が明瞭な位置がデバイスの設置位置として理想的である。そのため、各節点ごとで最も振幅が大きくなった振動モードのみで劣化前後の発電量を比較し、各節点の卓越周波数のみで劣化前後の発電量を比較した結果を図 5 に示す。ここでは、最も発電量が大となった設置箇所での発電量に対する比を示している。これより、図 6 に示す節点 3 および節点 4 付近に振動発電デバイスを設置した場合に劣化前と劣化後の発電量に明確な差が生じていることからセンサとして高い感度で劣化を検知することが可能であり、振動発電デバイスを有効に活用できると考えられる。

4. 結論

小規模橋梁をモデル化し、固有値解析の結果から振動発電デバイスの発電量を予測し、構造物の健全性を把握

表 1 固有振動数

	劣化前	劣化後
1次モード	7.14	5.96
2次モード	13.31	8.17
3次モード	27.43	22.13

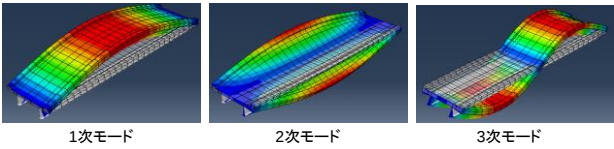


図 4 各振動モード

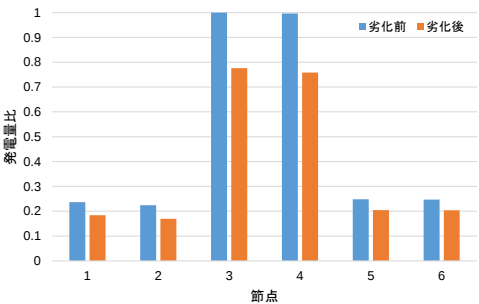


図 5 劣化前後の各節点における発電量比

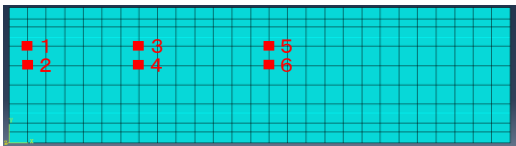


図 6 節点位置

するためのセンサとして用いるための設置位置を例示することができた。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものです。

参考文献

- 1) 神永晋, 金尾寛人: トリリオンセンサ社会の到来と今後の課題, pp.91-94, 2015
- 2) 古賀英明, 三屋裕幸, 藤田博之, 年吉洋, 杉山達彦, 橋口原: 実環境における高出力静電型エナジーハーベスタの充電特性, pp.3-4, 2017
- 3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 「エネルギー・環境新技術先導プログラム/トリリオンセンサ社会を支える高効率 MEMS 振動発電デバイスの研究」, pp.71-100, 2017