

橋梁振動エネルギーを利用した発電装置のパラメータ設計方法と実橋梁での検証実験

山梨大学 正会員 ○竹谷 晃一
東京工業大学 正会員 佐々木 栄一

1. はじめに

近年、橋梁構造物の効率的維持管理を目指して、センサ等を用いた継続的なモニタリングシステムの導入が試みられているが、その実現には電源確保が大きな課題となっている。本研究では、その解決策のひとつとして、車両通行により常時発生する橋梁振動エネルギーに着目し、それを利用した環境振動発電デバイスを創出し、長期運用可能な発電・蓄電システムを開発した。橋梁振動は卓越振動数が数Hzオーダーと小さく、かつ卓越振動数が交通環境や気温等に影響されるため、これまでエネルギーハーベスティング（環境発電）は困難とされていたが、本研究では、二質点系同調質量システムの採用および振動力学と電磁気学のマルチフィジックス数値解析によるパラメータ設計手法の構築を図ることで、橋梁構造物の非定常な振動特性に対応した高効率な発電を実現した。その上で実橋梁において提案デバイスの検証実験を実施し、発電性能を検証するとともに、モニタリングシステムへの電源供給を試みた。

2. 発電装置の電磁気・機械システムの特性評価

低い卓越振動数が特徴である橋梁構造物の振動エネルギーから効率的に発電するため、参考文献[1]より最適な構造形式として二質点系同調質量システムに着目した。本研究で開発する同調質量発電デバイス（Tuned-Mass Generator: TMG）の発電装置部の特徴として、外部抵抗 R [Ω]を変化させるだけで発電による減衰係数 $c_e = k_{emf}^2(r + R)^{-1}$ [Ns/m]が容易に調整可能であることを発電装置の等価回路（図-1）を用いて示した。

3. 振動発電を目的とした発電装置の効率化の検討

橋梁の振動環境に適応しTMGの性能を最大限に引き出す発電装置の構造形式を有限要素解析を用いて検討した。有限要素解析ソフトウェアはCOMSOL v5.2を用いた。その結果、様々な交通荷重に起因する大振動振幅に対する発電性能の安定性と、微小振動に対する発電性能の向上を同時に実現するための発電装置の構造形式を提案した（図-2）。その上で、発電装置の発電および機械的特性の非線形性を積極的に利用するため、開発した発電装置の特性を図-3に示すように加振装置を用いて検証した。実験で得られた発電装置の可動子速度に対する発電電圧を示す起電力係数[V/m]の非線形特性を図-4に示す。発電装置の特性をTMGの数値解析モデル（図-5）に組み込み、参考文献[2]に示すパラメータ設計方法を用いて発電特性の安定性（ロバスト性）を考慮し、効率的に発電が可能なパラメータを検討した。数値解析ソフトウェアはMATLAB 2015aのSimulinkを用いた。TMGの性能を十分に発揮して最小のデバイス質量で目的の発電を実現するため、参考文献[3]を用いて対象橋梁への適用方法の提案とパラメータ設計方法による効率的な発電を目指し、一般的な同調質量ダンパーより1オーダー以上小さいマス比0.05%（主マスの質量が約100 kg）のTMGを開発した。

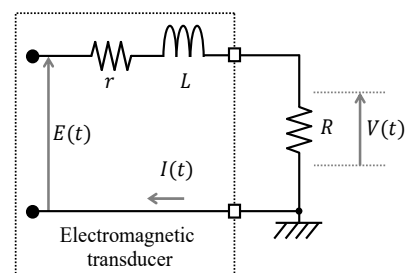


図-1 発電装置の電気回路モデル

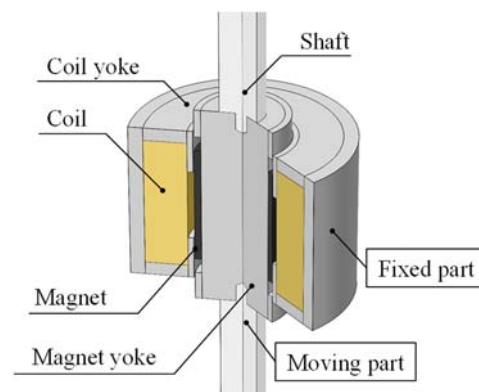


図-2 発電装置のモデル

キーワード 橋梁振動, 環境発電, エネルギーハーベスティング, 二質点系同調質量システム.

連絡先 〒400-8510 山梨県甲府市武田 4-3-11 山梨大学 TEL 055-220-8519

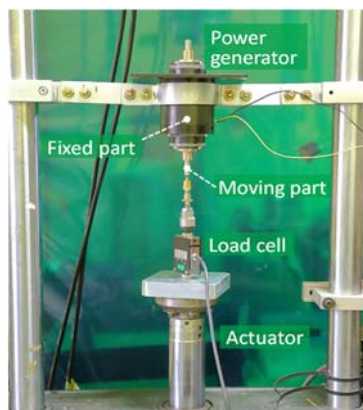


図-3 加振装置を用いた発電装置の特性評価実験の様子

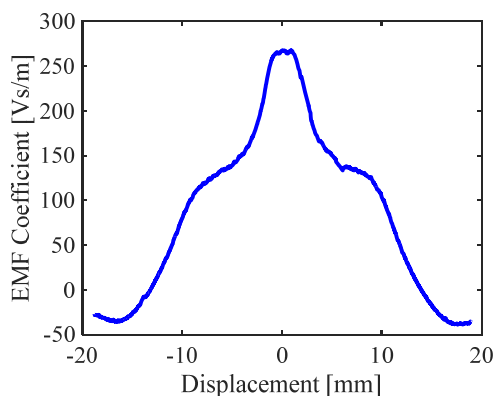


図-4 発電装置の起電力係数・変位の特性

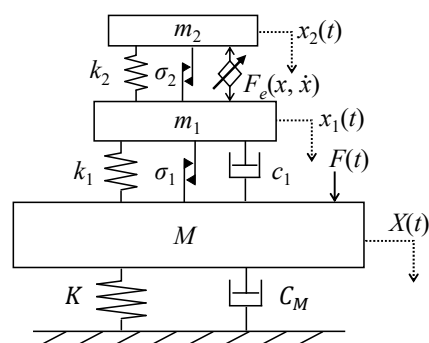


図-5 TMGの数値解析モデル

4. 実橋梁での検証実験

道路橋の固有振動数は一般的に 1～15 Hz 程度であり、交通量と卓越振動数を考慮して代表的な橋梁を選定した。実験対象の橋梁は高速道路にかかる全長 216 m の三径間連続の上路トラス橋である。図-6 に示すように TMG を対象橋梁の縦桁下フランジに設置し、橋梁の低周波振動および非定常振動下におけるエネルギーハーベスティングを試みた。実験より、発電対象の卓越振動数を 6 Hz 付近とした TMG が実橋梁に発生するランダムな振動環境下において瞬間最大で約 3 W を発電し、1 時間毎の平均発電エネルギーで約 2 mWh を達成し(図-7)、振動センサ等を用いた橋梁のモニタリングシステムに必要なエネルギーが発電可能であることを示した。次に、TMG による発電を利用したモニタリングシステムのプロトタイプを実橋梁に設置した結果、4 日間の実験期間においてモニタリングシステムの連続的な運用を実現した。橋梁構造物の振動データを定期的に取得するなどの実用的なモニタリングを想定し、システムの運用に必要な電力が継続的に供給できることを実験結果の分析から示した。さらに、TMG の非線形数値解析と交通量データを用いて発電シミュレーションを行うことにより、長期間の交通環境の変動による影響を考慮した TMG の発電を示し、橋梁構造物のモニタリングに必要な電力を長期的に発電できる可能性を示した。



図-6 実橋梁の縦桁下フランジに設置した TMG

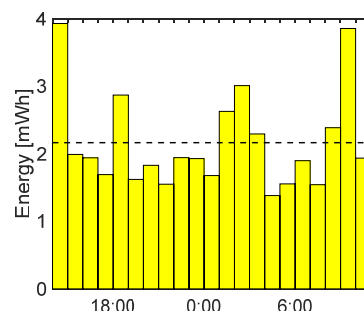


図-7 実橋梁に適用した TMG の時間毎の発電エネルギー

5. まとめ

本研究は継続的なモニタリングシステムの重要課題である電源確保を解決するため、橋梁の振動エネルギーに着目した振動発電装置を考え、数値解析および実験結果から橋梁振動に対して高効率の発電システムのプロトタイプを開発した。実橋梁での検証の結果、橋梁振動から発電したエネルギーによって振動センサを用いたモニタリングシステムの運用が可能であることを示した。TMG がより低い振動数で発電を可能とすることで発電効率の向上による発電装置の小型化と適用可能な構造範囲が広がることが期待できる。

参考文献

- [1] 竹谷晃一, 佐々木栄一: 橋梁振動を対象とした同調質量系発電デバイスの構造形式と設計に関する検討, 土木学会論文集 A1, Vol. 71, No. 2, pp. 267-276, 2015.
- [2] Kouichi Takeya, Eiichi Sasaki, Yusuke Kobayashi: Design and parametric study on energy harvesting from bridge vibration using tuned dual-mass damper systems, Journal of Sound and Vibration, Vol. 361, pp. 50-65, 2016.
- [3] 竹谷晃一, 佐々木栄一, 岩吹啓史, 長船寿一, 洞宏一, 名見耶武: 橋梁振動を対象とした同調質量系発電デバイスの開発と実橋梁への適用, 土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 2, pp. 290-301, 2016.