

振動発電デバイスを用いたケーブル張力モニタリング

金沢大学 学生会員 ○木角 有希

金沢大学 非会員 田 雲峰

金沢大学 非会員 上野 敏幸

金沢大学 非会員 Ngo Le Hoang Minh

金沢大学 非会員 北 翔太

金沢大学 正会員 深田 宰史

1. はじめに

現在日本では建設後50年が経過する橋梁が増加している。ケーブル部材を持つ斜張橋など、引張部材を有する橋梁においても例外ではなく、維持管理が必要不可欠である。この種の橋梁は、適切な管理が行われなかった場合、引張部材の一部の損傷から全体の崩落に至る可能性がある^{1),2)}。さらに、人手や財源の不足している地方自治体では、橋梁の管理が十分に行えない可能性も懸念される。そこで本研究では、地方自治体の助けとなるように、現地に行かずとも複数の橋梁の管理が可能となる引張部材の張力モニタリングシステムの構築を目的とした。

2. 振動発電デバイスの概要

既設橋梁の張力を計測する場合、ケーブルの卓越振動数から張力を推定する振動法が簡便である。本研究ではその手法を利用することを考え、ケーブルの卓越振動数を計測し、そのデータを道路管理者に送信することにした。長期間、日常的にケーブルの卓越振動数を計測してデータを無線送信する場合、電源の確保が大きな課題となる。そこで本研究では、磁歪式振動発電デバイス(図-1 参照)³⁾を用いることにした。図-2 に発電原理を示す。振動によって錘が上下に振られると、磁歪材料である鉄ガリウム合金に引張や圧縮の力が働き、その力の変化に伴い磁場が変化する(逆磁歪効果)。その磁場の変化とコイルと磁石により交流を生み出す機構になっている。

本モニタリングシステムは、振動発電デバイス、加速度センサーおよび無線送信システムから構成されている。加速度センサーは、MEMS (ADXL355, $\pm 2g$) を用いた。計測におけるサンプリング周波数は125Hzで512データ(約4秒間)の振動計測を行い、取得した加速度データを周波数分析し、ピーク周波数の上位5つの卓越振動数をプライベート LoRa 通信により約1-2km内の大学まで無線送信した。

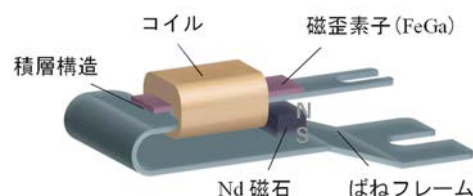


図-1 磁歪式振動発電デバイス

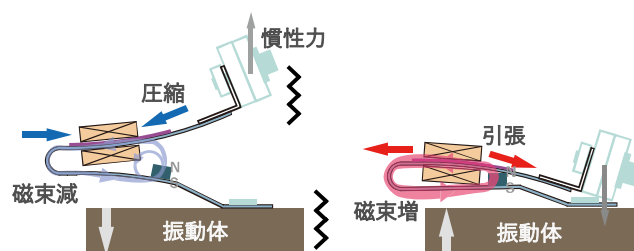


図-2 振動発電デバイスの原理

3. ケーブル張力モニタリングへの適用

3.1 対象橋梁

石川県金沢市にある朝霧大橋を対象として、振動実験と構造・振動解析を行った。朝霧大橋は2径間連続エクストラドーズド橋であり、支間長はそれぞれ80.2 m, 84.2 mである。振動計測を行った対象とした斜材ケーブルは、図-3 に示すようにA1側の7本のケーブル(C1, C2, ..., C7)とした。



図-3 対象橋梁と対象とした斜材ケーブル

3.2 ケーブルの振動特性

ケーブルの振動特性を把握するため、加速度計(707LF, TEAC製)を設置し、人力による加振試験を行い、C1~C7ケーブルの卓越振動数、減衰定数を

キーワード ケーブル張力, 振動発電, モニタリングシステム

連絡先 〒920-1192 石川県金沢市角間町 金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 TEL 076-234-4605

ERA（Eigensystem Realization Algorithm）によって算出した、各ケーブルの卓越振動数を表-1 にまとめた。

表-1 各ケーブルの卓越振動数

	振動数 [Hz]			
	1次	2次	3次	4次
C1	2.56	5.13	7.71	10.30
C2	2.78	5.55	8.35	11.16
C3	3.01	5.92	8.89	11.90
C4	3.22	6.49	9.73	13.02
C5	3.57	7.12	10.69	14.23
C6	4.04	8.07	12.20	16.36
C7	4.59	9.19	13.82	18.70

3.3 張力推定

得られた卓越振動数を用いて張力の推定を行った。推定はケーブルの曲げ剛性やサグの影響を無視して、次に示す弦理論式⁴⁾を用いて行った。

$$T = \frac{4wl^2}{n^2g} \cdot (f_n)^2$$

(1)

ここで、 T ：張力、 w ：単位重量、 l ：ケーブル弦長、 g ：重力加速度、 f_n ： n 次の固有振動数である。なお、本研究では1次の卓越振動数を用いて推定した。

推定張力と死荷重時の設計張力を比較したものを図-4 に示す。これより、簡易式により十分な精度で算定できることを確認した。

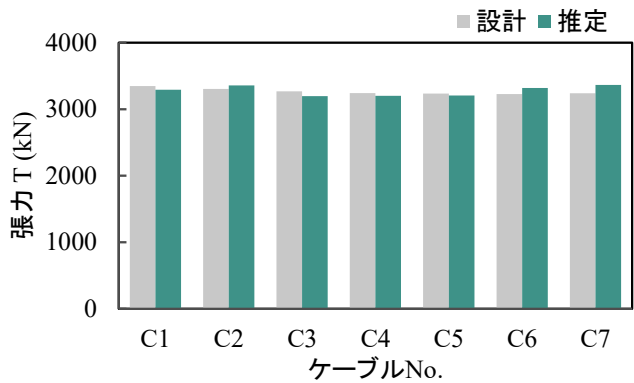


図-4 推定張力と設計張力の比較

3.4 振動発電デバイスによる発電状況

振動発電デバイスは、C5、C7 ケーブルの 14Hz 付近の振動数に同調するように調整した。普通車の走行ではケーブルがほとんど揺れないため、大型ダンブやバスを対象とした。大型ダンブが通過した時の発電量は平均 19μW（30sec 合計 0.57mJ）あり、バス

が通過した時の発電量は平均 44μW（20sec 合計 0.88mJ）であった。振動計測とプライベート LoRa 通信に必要なエネルギーは、振動計測方法（計測時間、FFT 条件）と無線送信設定（電波強度、送信間隔など）に依存し、約 5~20mJ/回であるため、交通量に合わせてこれらの設定を調整する必要がある。

3.5 しきい値の設定

斜材ケーブルの張力をモニタリングする上でのしきい値を検討した。当該橋梁の設計荷重として活荷重、温度荷重、雪荷重、死荷重が考慮されている。このうち死荷重が 75%程度を占めていることから、死荷重時の張力の変動を監視することが有効であると考えられる。そこで本研究では、死荷重時の 95%、90%、85%の張力をそれぞれ段階的なしきい値として設定することにした。

4. まとめ

本研究により得られた知見は次の通りである。

- (1) エクストラードード橋の斜材ケーブルを対象とした引張部材の張力モニタリングシステムとして、振動発電デバイスとプライベート LoRa 通信を用いたモニタリングシステムを構築した。
- (2) MEMS 加速度センサーを用いて計測した斜材ケーブルの卓越振動数と簡易式により、概ねケーブル張力を推定できることを確認した。
- (3) 交通量と発電量を考慮した振動計測方法、無線送信設定の検討が必要である。
- (4) 斜材ケーブルの張力をモニタリングする上でのしきい値を検討し、死荷重時の 95%、90%、85%の張力をそれぞれ段階的なしきい値として設定した。

謝辞

本研究は日本学術振興会、科学研究費助成事業（課題番号 22K04284）の助成を受けて研究を行ったものである。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) <https://www.bbc.com/news/world-europe-45183624>.
- 2) <https://www.taiwannews.com.tw/en/news/3788140/>.
- 3) 上野敏幸：電池フリーIoT の実現に向けた磁歪式振動発電デバイスの量産構造の提案, 日本 AEM 学会誌, Vol.26, pp.185-190, 2018.
- 4) 新家徹, 広中邦汎, 頭井洋, 西村春久：振動法によるケーブル張力の実用算定式について, 土木学会論文報告集, 第 294 号, pp.25-32, 1980.