

TMD 型振動発電デバイスのコンクリート橋梁への適用に関する検討

東京工業大学 学生会員 ○MU MINGHUA, 正会員 竹谷 晃一, 正会員 佐々木 栄一
株式会社高速道路総合技術研究所 正会員 池谷 公一, 中日本高速道路株式会社 正会員 岩吹 啓史

1. はじめに

センサーを用いた橋梁のヘルスマニタリングシステムが近年注目されている一方、長期的な電源供給が課題となっている。その解決方法として、環境エネルギーを電力に変換するEnergy Harvesting (環境発電) が挙げられる。竹谷ら¹⁾は、制振目的で用いられる同調質量ダンパー (TMD) を応用し、粘性ダンパーをリニア発電機で置き換えて2質点系としたうえで、発電に特化したパラメータ設定によって、鋼橋梁においてワットオーダーの発電電力を実現した。しかしながら、鋼橋は固有振動数が比較的低い²⁾ため、エネルギーが大きい1次モードを発電対象とすることは困難であった。一方、コンクリート橋梁は低次モードの固有振動数が比較的に高い傾向があるため、コンクリート橋梁では1次モードのエネルギーを利用できる可能性が高いと考えられる。さらに、全国橋梁のうち半数以上がコンクリート橋梁であることから、振動発電のコンクリート橋梁への適用検討は重要である。しかし、コンクリート橋梁は減衰が高い³⁾ため、TMDの設置事例も少なく、振動発電には困難がともなうことが予想される。

本研究ではコンクリート橋梁を対象とし、TMD型振動発電デバイスの提案を目的として、振動計測をベースとした振動解析モデルの構築と発電に特化したパラメータの設定方法を検討し、発電シミュレーションを行った。

2. 対象橋梁の振動特性および交通情報の把握

(a) 対象橋梁および計測実験の条件

実橋梁の固有振動数、減衰および振動モードを把握するため、スパン長20mの自動車専用道のPC高架橋に対して、車両の通過によって加振された状態でたわみ量と振動加速度の計測実験を行った。三脚で固定したレーザー変位計の設置高さは地面から約3mであり、サンプリングレートは100Hzである。対象橋梁の模式図とレーザー変位計の設置位置の概要を図-1に示す。

(b) たわみ計測による固有振動数および減衰の同定

固有振動数は橋梁の常時微振動により調べられるが、たわみ計測データには車両通過による振動も入っている

ため、変位0.1mmより小さい常時微振動だけが残るように変位データの処理を行い、交通影響を取り除いたデータ (赤) で橋梁の固有振動数を調べる。図-2は高速フーリエ変換 (FFT) によって得られたパワースペクトル密度曲線であり、低周波数領域では4つのピークが見られる。本論文では半値法を用いて各ピークの減衰を求め、各ピークの周波数および減衰を表-1にまとめる。

パワースペクトルが最大値を取る周波数をターゲット振動数にすると、発電量が最大になるため、図-2を踏まえて7.44Hzをターゲット振動数にする。

(c) 振動加速度計測による振動モードの推定

振動モードを推定するため、加速度センサーを用いて対象橋梁にて振動加速度の計測実験を行った。前節で同定できたターゲット振動数7.44Hzでの振動モード形状を描くと図-3のようになり、鉛直一次モードである。これにより、

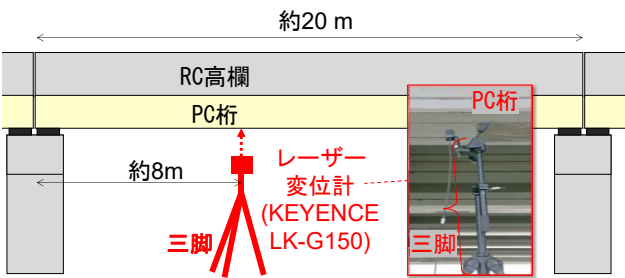


図-1 対象橋梁とレーザー変位計の設置位置

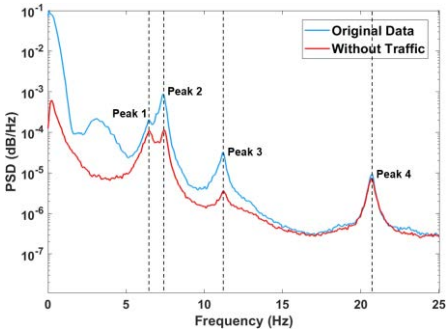


図-2 パワースペクトル密度曲線の比較

表-1 各ピークにおける周波数および減衰比

		Without Traffic	Original Data
Peak 1	周波数	6.475Hz	6.455Hz
	減衰比	5.066%	4.852%
Peak 2	周波数	7.441Hz	7.363Hz
	減衰比	2.994%	2.601%
Peak 3	周波数	11.230Hz	11.201Hz
	減衰比	4.048%	2.001%
Peak 4	周波数	20.713Hz	20.732Hz
	減衰比	1.056%	0.943%

橋桁の中央部が最大振幅点に相当し、より発電効果を得るため、この位置に発電装置を設置する。さらに、橋梁全重量365786[kg]および振動モード形状によって桁中央部での等価質量の推定ができ、174176[kg]となる。橋梁モデルのパラメータを表-2にまとめる。

(d) 対象橋梁における交通情報の把握

たわみ計測実験を昼間1.69時間にわたって行い、橋梁の鉛直変位が1mm以上の大型車は計73台通過している。各車両の時刻歴波形についてウェーブレット変換を行うと、卓越振動数が7.4Hz付近のものが多い。さらに大型車の変位平均は2.68mmであるため、この2つの条件で数値シミュレーションにあたっての着目車両を絞ると、変位2.63mmかつ卓越振動数7.4Hzの車両を発電シミュレーションで用いるの着目車両とする。

着目車両による橋梁の変位応答を用いて算出した等価加振力²⁾を図-4に示す。ただし電気エネルギーの累積を調べるために、時間軸を8sまで伸ばして設定し、5~8sの加振力を0kNとして加振力の波形を作っている。この加振力波形をもとに発電シミュレーションを行うこととした。

3. 発電シミュレーションおよび発電量の推定

図-5に示している橋梁と二質点のTMD型発電デバイスからなる振動系モデルを用いて発電量が最大となる2つのマスの振動数 f_1 、 f_2 および回路抵抗 R の最適解を探索して数値シミュレーションを行い、発電エネルギーを推定する。また、マス質量が大きいくほど発電に有利になる³⁾ため、ここではマス質量 m_1 、 m_2 を固定値とする。シミュレーションの初期値およびチューニングによる最適解を表-3にまとめる。

これらのパラメータにより発電シミュレーションを行い、発電電力および発電エネルギーを図-6に示す。このシミュレーション結果により、着目車両による発電エネルギーは2.314J (=0.64mWh) と求められる。一方、平成27年度の道路交通センサスにおける交通量から対象橋梁の1日の大型車交通量は約2400台前後と推計できる。着目車両通過時における発電量が大型車交通の平均値とみなせる場合、対象橋梁の桁中央部に発電デバイスを1個設置すると1日の振動発電エネルギーは約1543mWhとなると推定される。

4. 結論

本研究では、PC橋梁を対象として、TMD型振動発電デバイスによる発電技術の適用可能性に関する検討を行った。その結果、橋梁振動による発電エネルギーは交通量に大きく依存するが、対象橋梁の桁中央部に二質点TMD発電デバイスを1個設置した場合、振動発電量のオーダーとして1日約 10^{-1} [Wh]の発電エネ

表-2 橋梁モデルのパラメータ

Vibration Mode	1 st Mode
Natural Frequency	7.44Hz
Damping Ratio	2.994%
Installation Location	The Midpoint of the Bridge
Equivalent Mass	174176 kg

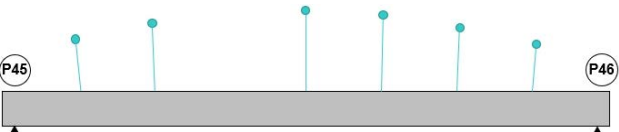


図-3 7.44Hzにおける振動モード形状

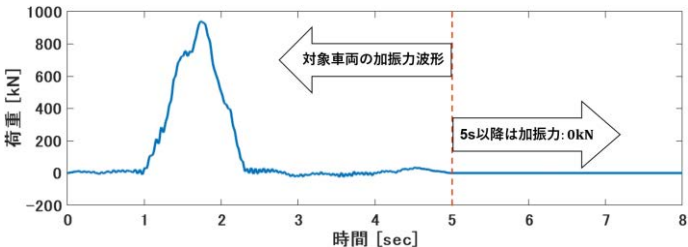


図-4 ターゲット車両による加振力の波形

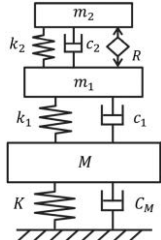


図-5 橋梁－二質点 TMD 型発電デバイスの解析モデル

表-3 発電シミュレーションにおけるパラメータ諸量

Initial Parameter Values of Numerical Simulations			
	Frequency [Hz]	Mass [kg] (fixed)	Viscous Damping
Main Mass	17	100	94.25
Second Mass	20	25	0
Electric Resistance [Ω]		20	
Optimization Parameter Values			
f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	R [Ω]	
8.57	13.22	47.24	

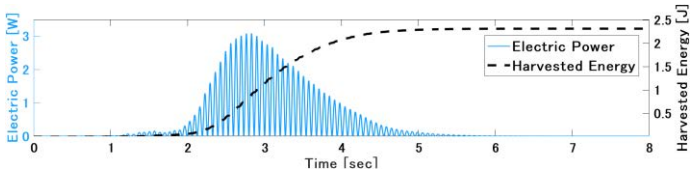


図-6 ターゲット車両の通過による発電電力および発電エネルギーの累積

ルギーが得られる。これにより、理論上コンクリート橋梁の振動による発電量は各種のセンサーの必要電力への供給が可能であり、橋梁の振動発電の適用範囲をコンクリート橋梁へ広げられる可能性を示した。

【参考文献】

[1] 竹谷晃一, 佐々木栄一, 岩吹啓史, 長船寿一, 洞宏一, 名児耶武: 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, pp.290-301, 2016.

[2] 田口典生, 花里利一, 池田能夫, 石田理永: 道路交通振動の加振力特性 地盤環境振動の予測手法に関する研究 その2, 日本建築学会環境系論文集, 73 巻, 633 号, pp.1241-1247, 2008