発電式振動抑制装置の開発*

藤井 遊介^{*1}, 和田 拓也^{*2}, 松岡 太一^{*3}

Dynamic Absorber that Generates Electric Power

Yusuke FUJII^{*1}, Takuya WADA and Taichi MATSUOKA

^{*1}Graduate School of Science and Technology, Meiji University
1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa, 214-8571 Japan

In this paper the authors propose a dynamic absorber for a pole structure, as like a traffic signal pole on an express highway, in order to not only dissipate vibration energy, and also obtain an electrical energy. To investigate dynamic property, a test dynamic absorber that consist of rare-earth magnet, solenoid coil and spring was manufactured. An electric power and a damping force are measured by a shaking table. Also magnetic flux density around the solenoid coil with the magnets is analyzed by using FEM, and output voltage is calculated. Vibration tests of the test absorber are carried out and the experimental results are compared with the calculated results. The dynamic absorber is installed on a 1/3 scales pole structure model of, and investigate frequency responses by the test dynamic absorber.

Key Words : Dynamic Absorber, Damping, Vibration Control, Electromagnetic Induction, Electrical Power, Pole Structure

1. 緒 言

高速道路の標識柱は、走行車や風の振動により標識柱の疲労破損が起こる現象が問題視されている。制振方法として固定面を用いた制振方法や支持的構造物による制振、また任意に取り付ける制振方法がある。固定面を用いた方法は制振力を簡単に発生させることはできるが固定面とする対象が少ないという点がある。また支持構造物を用いた制振方法は支持的構造物を必要とするため高速道路という限られたスペースでは設置が困難であり、また特別な補強等をするコスト面に問題が出てしまう。それに対して任意の場所に設置できる制振方法は現行物のままで制振を試みるのが可能で、簡易的でローコストであるという利点がある。

取り付ける制振装置の中で動吸振器が取り上げられる。動吸振器とは、加わる振動と逆の動きをさせることで振動エネルギーを吸収する構造をした装置である。動吸振器のメリットとして、比較的構造が簡易的で製造するのにローコストであり取り付けが容易だが、その反面動吸振器のパラメーターの調整が困難といったデメリットがある。建築分野では地震動に対するエネルギー吸収を目的とした能動型動吸振器や⁽¹⁾、機械分野では形状記憶合金を用いた動吸振器に関する研究⁽²⁾などがされている。

また、振動エネルギーを電気エネルギーに変換する研究も近年関心を寄せている。車のサスペンション⁽³⁾や塔上構造物の風による振動⁽⁴⁾、歩行発電⁽⁵⁾など様々な研究が進められている。振動エネルギーを電気エネルギーに変換し、外部に供給することで再生エネルギーとして使用できる。このコンセプトをもとに、動吸振器に非接触でダンピングを与えることができる磁気ダンパの構造を利用して、ローレンツ力による減衰だけではなく、コイルを利用した電磁誘導により誘導起電力を生じさせてエネルギーを消散させ、かつ発電できる装置を考案した。

そこで、本研究では、高速道路の標識柱の振動を制振しつつ、かつ振動エネルギーを熱エネルギーとして消散

* 原稿受付 2012年7月17日

^{*1} 学生員, 明治大学大学院理工学研究科 (〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区三田 1-1-1)

^{*2} 明治大学大学院理工学研究科

^{*3} 正員, 明治大学理工学部

E-mail: matsuoka@meiji.ac.jp

2・2 磁束密度変化

試作した装置内の磁束密度変化を有限要素法プログラム(ANSYS)によって調査した。有限要素法に用いたモデル図を図 2 に示す。モデルは希土類磁石と鉄製の側面板と空気、無限境界で構成されている。装置内の磁束密度線図を図 3 に示す。装置内の磁石の配置は前節や図 3 に示してすように S 極と N 極が交互になるように配置しているの磁束の方向は上と下で逆向きである。ここで図 2 のモデルの中心 BB' の磁束密度変化を図 4 に示す。装置の中心の磁束密度の最大値は 118 mT として得られた。また、実際に装置の磁束密度のピーク値をガウスメータにより測定したところ、装置の中心の磁束密度は 104 mT と測定された。これは有限要素法を二次元平面で行ったため奥行方向の磁束密度が低くなっていることが考えられる。装置の中心の磁束密度を求めるのはコイルが横切る磁束密度の最大値を決めるためである。

2・3 発電と減衰力の理論式

ファラデーの法則より電圧の式は以下のようにして表される。本節では有限要素法によって示された磁束密度変化を距離 x の関数として同定する。

$$V(t)=B(x)v(t)L \quad (1)$$

ここで $B(t)$ は磁束密度変化、 L はコイルの長さである。コイルの変位を、 $x(t)$ 速度を $v(t)$ とすると

$$x(t)=a \sin (\omega t) \quad (2)$$

Fig. 2 Analytical model

Fig. 3 Magnet flux density

○ Experimental, — Apporoximation, ···· ANSYS
Fig. 4 Relation between displacement and magnetic flux density

$$v(t) = a\omega \cos(\omega t) \quad (3)$$

として表される． a は振幅である

磁束密度分布ではピークが2点存在するので磁束密度変化 $B(t)$ は2関数の合成で同定を行うと考える．図1内の磁束を切る部分をコイル①, コイル②としておく．コイル①, コイル②の磁束密度変化 $B(x)$ はロジスティックピーク関数より

$$B(x) = \sum_{i=2}^n \frac{4B_n \exp\left(-\frac{x_{bn}(t)-x_{cn}}{w}\right)}{\left\{1 + \exp\left(-\frac{x_{bn}(t)-x_{cn}}{w}\right)\right\}^2} \quad (4)$$

と仮定する． x_c はコイルの中心から磁石中心までの距離である． x_b は磁束を切るそれぞれのコイルの中心 ($x_0 = \pm 22$ mm)を初期位置として代入したものであり x_{b1} , x_{b2} は

$$x_{b1}(t) = -x_0 - x(t) \quad (5)$$

$$x_{b2}(t) = x_0 - x(t) \quad (6)$$

となる．図2における装置の中心BB'間の磁束密度変化と理論の磁束密度変化を同定させたグラフを図4に示す．図4からわかるように理論式は装置内の磁束密度変化と表現できる．電圧 $V(t)$ は式(1)~(6)より

$$V(t) = a\omega L \cos(\omega t) \sum_{i=2}^n \frac{4B_n \exp\left(-\frac{x_{bn}(t)-x_{cn}}{w}\right)}{\left\{1 + \exp\left(-\frac{x_{bn}(t)-x_{cn}}{w}\right)\right\}^2} \quad (7)$$

となる．このとき電圧値はコイル①, コイル②で正負が異なるが, 1つのコイルとしてみた際には電流は同じ方向となるので, 電圧値はコイル①とコイル②で発生した電圧の合計である．よって発電量 $P(t)$ は

$$P(t) = \frac{V(t)^2}{R_{int} + R_{ext}} \quad (8)$$

となる．ここで R_{int} はコイルによる内部抵抗, R_{ext} は外部抵抗である．オームの法則からコイルに流れる電流を $I(t)$ とすると

$$I(t) = \frac{V(t)}{R_{int} + R_{ext}} \quad (9)$$

となる．したがってよってコイルにかかる減衰力 F はローレンツの式から

$$F = B(x)I(t)L = \frac{\{B(x)L\}^2}{R_{int} + R_{ext}} v(t) \quad (10)$$

となり, 減衰係数は

$$c(x) = \frac{\{B(x)L\}^2}{R_{int} + R_{ext}} \quad (11)$$

として表される。以上のことから本装置では減衰係数はコイルの位置 $x(t)$ に依存することがわかる。

3. 発電・抵抗力実験

本装置の減衰力と発電量を前節で述べた理論値と比較するために強制振動実験を行った。実験の概要図を図 5 に示す。本装置の片側は荷重計を介して地面に固定された柱に固定し、もう一方はロッドエンドを用いて振動台に固定するように設置した。発電と抵抗力を同時に測定してしまうと、計器による外部抵抗が大きいため抵抗が下がってしまうので、発電と抵抗力の測定は別々で行う。電圧の測定時は周波数 3.0 Hz、振幅 10 mm で測定した。電磁誘導を起こしているコイルの電圧を測定し、式(7)の理論と比較する。減衰力の発生を確かめるために、短絡回路と開放回路のコイルの抵抗が 0 と ∞ の場合で行った。なお開放回路では摩擦力と慣性力で抵抗力が構成され、短絡回路でも同様に摩擦力と慣性力がかかっている。抵抗力の測定についてはコイルを短絡回路または開放回路に変えて、周波数 0.5～3.0 Hz、振幅 10 mm で振動させた時の荷重と変位を測定し、抵抗力特性を求めた。

Fig. 5 Vibration test setup

Fig. 6 Resisting force characteristics

Fig. 7 Relation between displacement and damping coefficient

Fig. 8 Relation between velocity and resisting force

Fig. 9 Terminal voltage in case of short circuit

抵抗力実験の結果を式(10)から得られる理論値と合わせた抵抗力特性を図6に示す。実線が短絡回路の実測値、破線が短絡回路の理論値、点線が開放回路の実測値である。開放回路では振幅の端点で抵抗力が強く出ているが、これはリニアブッシュによる影響である。この抵抗力特性より摩擦力は0.4 Nとして計測された。短絡回路では抵抗力特性はほぼ理論通りであるのがわかる。短絡回路では速度が大きくなるにつれて減衰力も比例的に大きくなる。3.0 Hzの時の減衰係数と変位の関係を図7に、短絡時の抵抗力の最大値と速度の関係を図8に示す。図7では抵抗力から摩擦力と慣性力を除いた値を速度で割ることで求めた。図7より変位によって減衰係数は変化しており、実測値も似たように変化した。図8ではリニアブッシュによる影響を除くために振幅が0 mm付近における抵抗力の最大値として計算した。図8から本装置の最大の減衰係数は5.962 Ns/mとして算出され、式(11)を用いて求めた理論値の減衰係数は6.487 Ns/mとなった。

発電実験から得られた波形に10 Hzのローパスフィルターを介した値を用いて式(7)の理論式と同等させた結果を図9に示す。実線が実測値、破線が理論値である。図9より理論値と実測値で位相差が生じているのがわかる。これはコイルのインピーダンスによるものであるが、インピーダンスの位相差によって総発電量が変化することはない。また位相差はあるが理論と実測の波形の傾向は一致した。電圧ピーク値については、理論が3.8 V、実測が約3.0 V強となった。理論と実測の電圧ピーク値のわずかな差は、コイル中心と装置の中心がずれておりコイルが横切る磁束量がわずかに少ないのが原因と考えられる。

4. 周波数応答実験

試作した本装置の制振性能を調べるために標識柱に取り付けて、周波数応答実験を行った。実験に用いた標識柱は全高7.5 mのF型標識柱を1/3スケールにしたもので、実験モデル図を図10に、その諸元を表2に示す。標

識柱の固有値 f は主系の質量を m_1 とすると

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_1}} \quad (12)$$

として求められる。この固有値に合わせ、標識板の先端に試作した本装置を動吸振器として設計をする。標識柱との質量比 μ 、動吸振器の剛性 k_2 、減衰係数 c_2 は質量体の質量は

$$m = \frac{m_2}{m_1} \quad (13)$$

$$k_2 = \frac{k_1 \mu}{(1+\mu)^2} \quad (14)$$

$$c_2 = 2\sqrt{m_2 k_2} \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \quad (15)$$

となる。

Fig. 10 Frequency response test setup

Table 2 Specification of the test device

Beam L	1130 mm
Clamp H	2300 mm
Neutral frequency f	3.57 Hz
Pole Weight m_1	10.5 kg
Pole Stiffness k_1	4.28×10^3 N/m
Ratio of mass μ	0.76×10^{-1}
Device Weight m_2	0.80 kg
Stiffness k_2	282 N/m
Damping coefficient c_2	5.69 Ns/m

Fig. 11 Frequency responses

加速度計を標識板先端と振動台に取り付けた。標識柱を上下方向に加振させ、標識板と振動台の加速度を積分し、変位による応答倍率を算出した。取り付けた本装置を設置した場合としない場合で、応答倍率を算出し、理論値を同定し比較考察を行った。標識柱のみを揺らした場合と動吸振器を取り付けた場合を、理論値と合わせて図 10 に示す。標識柱だけでは約 45 倍の応答があるが、試作した動吸振器を取り付けたことで応答が約 4 倍にまで低減した。二つの山の高さが一致しないのは標識柱の構造減衰が原因である。また本装置は減衰係数が一定ではないために、質量体の振幅による減衰係数の変化の影響も原因である。しかし減衰係数が一定でなくても広帯域で高い制振性能を持つことがわかる。

5. 結言

発電式振動抑制装置を試作し、磁束密度変化を非線形の関数として仮定し、発電と減衰の理論式を求め、発電・抵抗力実験、1/3 スケールの標識柱を用いた周波数応答実験を行い本装置の有用性について検証した。そのまとめについて以下に述べる。

- (1) 試作した装置ではコイルが横切る磁束量が増えるため、電磁誘導による電圧はコイルの初期位置に依存する。振幅、コイルの長さ、周波数、装置の中心磁束密度を増加させるとピーク電圧は増加する。
- (2) 装置全体は RL 回路をなしており、コイルのインピーダンスによる位相差が生じる。しかし位相差が生じるだけで、総発電量には影響は生じない。
- (3) 抵抗力は短絡回路において摩擦力、慣性力、減衰力で構成されている。装置の中心磁束密度、コイルの長さ、コイルの速度を増加させると減衰力は増えるが、コイルを含めた全電気抵抗を大きくすると減衰力は減少する。抵抗が大きくなると発電量もまた減少する。
- (4) 減衰係数はコイルの位置によって変化する。そのためコイルの初期位置と装置の初期位置との中心にずれが生じる場合、減衰力も変化し、抵抗力の履歴曲線は楕円ではなく多少歪な形になる。
- (5) 減衰係数が一定でない動吸振器を標識柱に取り付けた場合でも広帯域の周波数にて高い制振効果が得られる。

参考文献

- (1) 西村功, “非定常不規則外乱下における能動型動吸振器のエネルギー吸収応答”, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 69, No.575(2004), pp. 57-64.
- (2) 日野順市, 稲井新, 高木均, 芳村敏夫, “形状記憶合金を用いた動吸振器に関する研究”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 71, No. 710(2005), pp. 2863-2869.
- (3) Lei Z., Brian, S., Jurgens, S. and Yu, Z., “Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions”, *Smart Materials and Structures*, Vol.19, No. 4(2010), pp. 1-10.
- (4) Yu, Y., Atsuo, S., Masanori, Y., Yasusi, S., Tetsuji, O., “Quenching of vortex-induced vibrations of towering structure and generation of electricity using Hula-Hoops”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 272, Issues 1-2(2004), pp21-38.
- (5) 中野公彦, 黒瀬智広, 中山敦志, 斉藤俊, “歩行時に人体に発生する加速度の計測と携帯型発電機の発電量推定”, IIP 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, Vol. 13, No.2(2002), pp149-152