ゴンドラの揺れを止める

Stop the Swing of Gondola

執筆者プロフィール

松久 寛
Hiroshi MATSUHISA

■1970 年京都大学工学部機械工学科卒業, 1976 年京都大学大学院工学研究科博士課程修了
■主として行っている業務・研究
・振動工学
■所属学会および主な活動
日本機械学会
■勤務先
正員 (フェロー), 京都大学教授 大学院工学研究科
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail : matsuhisa@me.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

毎年冬になるとスキー場のリフトやゴンドラなど搬器の事故が発生する。人身事故に至らなくても、乗客が缶詰めになったりする。ロープウェイは便利のいいものであるが、いくつかの基本的な欠陥をもっている。まず、プーリの上をロープが走るので、ロープが外れて搬器が下に落ちることである。つぎに、風に弱いことである。搬器はロープを握っているが、ロープはねじれるので抵抗にならず、横風が吹くと、搬器はベアリングで支持された振り子のように簡単に揺れるのである。搬器が揺れて鉄塔にぶつかると、その衝撃

(a) 一本腕の振り子

(b) 二本腕の振り子

図1 円軌道型動吸振器の付いた2種類の振り子

でロープがプーリから外れる。これらは、ロープウェイの宿命であり、さらに、空中にあるので、休止したとき乗客の脱出が難しいことが、地上の交通手段との違いである。

いっぽう、ロープウェイは多くの長所をもっている。すなわち、鉄道に比べて建設コストが安い、高低差が問題にならない、川など長スパンをまたげるなどである。現に、ニューヨークではマンハッタン島とルーズベルト島の交通に用いられている。そこで、日本でもかつて都市交通に使えないかと検討されたこともあった。しかし、風による揺れが問題となった。スキー場や観光地で強風のために運休といってもたいした問題とはならないが、通勤に使われると、そうたびたび運休するわけにはいかない。これまでは、風速15m/s ぐらいで運休しているが、これを20m/s まで運行できるようにしたいというのが、実用上の要望であ

る。

そこで、1990 年ごろから運輸省や日本索道工業会で揺れ対策を検討することとなった。制振手法としては、動吸振器とジャイロが考えられた。ジャイロについては、ロープウェイには電線がひけないこととコスト高なので実用化は難しかった。そこで、私たちも、動吸振器について、検討することにした。余談であるが、ロープウェイ搬器に電気を供給する方法があれば、大発明になると思う。

動吸振器とは質量とばねからなる1自由度振動系を振動している対象物(主系)に取り付けて、共振させることによって、動吸振器の質量が大きく振動し、ばねを介して主系に制振力を与えるものである。したがって、動吸振器は振幅の大きいところにつけるのが常識である。日本の多くの高層ビルには動吸振器やその動きを外部動力で補強したアクティブマスダンパ

(a) 札幌のテイネハイランドスキー場のリフト

(b) 榛名山のゴンドラ

図2 動吸振器の付いた搬器

(AMD) が最上階に設置されている。本来、重いものを建物の上階に設置することは、柱への負担が大きくなるので避けたいものである。できれば、下階に設置したいというのが、建築家の願望である。しかし、動吸振器の制振効率は主系振幅の2乗に比例するので、上階に設置せざるを得ない。1階で建物を押しても揺れないのは子供でもわかる。そのために、ゴンドラ用の動吸振器を研究してきた人たちは、動吸振器を振幅の大きいゴンドラの下方に設置したが、ほとんど効かなかった。それで、ゴンドラには動吸振器は効かないものとされていた。

2. 取付位置の理論⁽¹⁾

図1に円軌道型の動吸振器が付いた2種類の振り子を示す。(a)の場合は、動吸振器は効かないが、(b)は効く。(a)では振り子が傾くので、動吸振器の錘には、振り子の動きによる慣性力と傾きによる重力の軌道方向成分が働く。動吸振器を振り子の重心につけると、この二つが釣り合って、動吸振器は振り子の上に固定され、相対変位を持たない。これは、水を入れ

たバケツを手持って振り回しても水はこぼれないのと同じである。しかし、バケツを平行移動させると水はこぼれるし、回転させても水はこぼれる。細線図のように動吸振器の位置を上に出ると、傾き角は同じであるので重力の軌道方向成分は同じであるが、振り子の腕の長さが短くなるので慣性力が小さくなり、相殺しなくなり、動吸振器の錘は動くようになる。さらに、動吸振器を支点より上に取り付けると、慣性力と重力は同方向に働き、錘はよりいっそう動くようになる。なお、動吸振器は共振を利用するので、振り子と動吸振器は同じ固有振動数を持つように設定している。

つぎに、動吸振器が主系に及ぼす力であるが、ここでは、主系が振り子であるので、モーメントを考える。動吸振器の錘は軌道を垂直に押す。そのときのモーメントを与える腕の長さは、軌道の垂線と振り子の回転中心の距離である。動吸振器を振動の中心(搬器は剛体振り子なので、等価な振り子の腕の長さを与える点を振動の中心と呼ぶ。物理的な重心よりもわずかに下方になる)に取り付けると、円軌道の曲率中心と振り子の中心は一致する。そ

うすると、モーメントの腕の長さは零となり、たとえ動吸振器の錘が動いても、振り子にはモーメントは与えられない。そして、動吸振器の位置が振動の中心から上下に移動するに従って、モーメントは大きくなる。

要するに、動吸振器を搬器の振動の中心に付けると動吸振器の錘は動かないし、仮に動いても振り子に及ぼすモーメントは零である。理論的には、制振効果は動吸振器と振動の中心間の距離の2乗、および動吸振器の質量に比例する。したがって、動吸振器はできるだけ上方または下方に取り付ける必要がある。なお、図1は円軌道型の動吸振器であるが、直線軌道上を動くばね・質量型の動吸振器などすべての動吸振器にこの取り付け位置の理論は適用される。

いっぽう、右図では、動吸振器は水平を保っているので重力は変動せず、慣性力だけが働く。したがって、動吸振器は動き、制振効果を発揮する。動吸振器を上方に付けると、慣性力は小さくなり、動吸振器は動かなくなる。これは、ビルの場合と同じで、ビルはマッチ箱をつぶしたときのように床面の水平を保って揺れるので、揺れの大

図3 ブランコの立ち乗りでの上下運動

図4 遠心力とコリオリの力を利用した制振

図5 コリオリ動吸振器の付けたゴンドラ

きい最上階に取り付けるとよく効くのである。

この位置の理論は、当時の常識、すなわち、動吸振器は振幅の大きいところに取り付けることに反したものであり、多くの人は実験のビデオ映像を見せないと信じなかった。

3. 実用化

この位置理論を用いて、動吸振器を

実用化したのが、図2のリフトとゴンドラである。(a)は1995年に世界で初めての動吸振器のついた札幌のスキー場のリフトである。(b)は1996年にできた榛名山のゴンドラである。リフトは円形のアルミニウム製のパイプの中に、4輪の付いた12kgの錘が入っている。ゴンドラでは軌道として角型のアルミニウムのパイプを用い、その中に4輪の付いた16kgの錘が入っている。減衰は錘の

底面に永久磁石を取り付けてあり、それが、アルミニウムの上を移動することによって、アルミニウム内に渦電流を発生させて、減衰力を得ている。したがって、これは非接触の速度比例ダンパである。すなわち、搬送機の運動エネルギーを動吸振器の錘の運動エネルギーに変えて、さらに、それをアルミニウム内の渦電流によるジュール熱で消散させているのである。

図6 コリオリ動吸振器の有無による自由応答の差

4. コリオリの力を利用した動吸振器の開発⁽²⁾

図2を見るとわかるが、動吸振器は比較的下方に設置してある。もう1m上方に付けると、制振効果は飛躍的に増大する。しかし、そうすると鉄塔や駅舎構造物に衝突するということで、これが限界であった。逆に、ゴンドラの側面などに取り付けてもよい制振装置の開発が求められた。

そこで、コリオリの力を利用した動吸振器を考案した。これは、ブランコの立ち乗りの原理を使ったものである。立ち乗りは図3に示すように、下に来たときに立ち上がり、上で沈み込む動きによって、ブランコにエネルギーを注入する。すなわち、下では遠心力が働いているので、重力と遠心力に抗して体を持ち上げるという仕事をする。いっぽう、上では体を沈み込めるが、角速度は零で、遠心力は働かないし、傾いているので重力の成分も小さくなり、沈み込むことによる負の仕事は小さい。結局、体の上下運動で仕事をしていることになる。以上が仕事からみた説明である。いっぽう、力については、次のように説明できる。下で重心を持ち上げるということは、回転運動の半径が減少するので、運動量が減少することになる。その運動量の

変化量だけ、体は後方に力を受けるが、作用反作用の関係で、その分だけブランコを前方に押す力が働く。これがコリオリの力であり、質量とブランコの角速度と上下運動の速度に比例する。

ブランコの立ち乗りと逆の運動をすれば、振り子の揺れを抑えることができる。図4のように、上下に動く錘をばねとダンパで支える。その固有振動数を振り子の振動数の2倍とする。振り子が揺れると、錘に働く遠心力と重力が変動するので、上下に動く。固有振動数が一致していると共振で錘は大きく動く。そうすると、振り子の揺れを抑えるコリオリの力が発生する。この制振では、遠心力とコリオリの力を利用するが、前者は角速度の2乗に比例し、後者は角速度と錘の速度に比例する。したがって、非線形であり、ブランコの揺れの大きいときはよく制振されるが、揺れが小さくなるとほとんど制振効果はなくなる。

2006年にプロトタイプの装置を製作し、実際のゴンドラに取り付けたのが図5である。制振装置は質量をばねで上からつったもので、減衰は非接触の磁気ダンパを用いている。ゴンドラの質量は790kg、固有振動数は0.267Hzである。制振装置は2機取り付けしたが、1機あたりの総質量は150kgで、そのうち振動マスは

80kgで固有振動数は0.51Hz、減衰比は5.5%である。自由応答を図6に示す。揺れが大きいときには、制振効果を発揮したが、揺れが小さくなると効かなくなった。これは、理論どおりである。なお、ゴンドラが15度ぐらい揺れると鉄塔などに接触するので、風速20m/sでも10度以下の揺れにしたいというのが実用上の要求であるが、この装置でその要求を満たすようである。

5. おわりに

ゴンドラの制振装置の開発について述べてきたが、すべては、物理学の基礎を応用しただけのことである。バケツの水やブランコの立ち乗りなど、説明されるとなんだそんなことかと思うが、なかなか思いつかないものである。創造性を育てるには、好奇心と野次馬根性で、失敗を重ねながら、生きていくしかないように思う。

文 献

- (1) 松久 寛・ほか、索道搬器の動吸振器による制振、日本機械学会論文集, 59-562, C (1993), 1717-1722.
- (2) 松久 寛・ほか、コリオリ力を用いた動吸振器による索動搬器の制振、日本機械学会論文集, 72-722, C (2006), 3170-3176.