揺れを止める, 揺らさない技術

Technology for Antivibrating and Stilling

執筆者プロフィール

安田 正志
Masashi YASUDA

■1973 年岡山大学理学部物理学科卒業, 1998 年工学博士 (大阪大学)
■主として行っている業務・研究
・精密機器の制振, 除振性能向上のための制御技術開発
■所属学会および主な活動
日本機械学会, 精密工学会
■勤務先
正員, 特許機器 (株) 専務取締役
(〒660-0833 兵庫県尼崎市南初島町 10-133/
E-mail : yasuda@tokkyokiki.co.jp)

1. はじめに

揺れを止める, 揺らさないためにはどうするか, 機械や構造物には避けられない課題である。普段は気にとめないし感じないことが多いが, すべてのものがいろいろな外乱によって揺れている。しかも構造物によって揺れが大きくなったり, あるいは小さくなったり, 法則もないように見えるが, 構造物としてはその質量と剛性で決まる固有な揺れ=モードを有している。いろいろな外乱との間で, 共振や過渡応答などを含む振動現象を引き起こしている。このような揺れを止める基本は振動の遮断と抑制である。遮断の代表は防振, 除振, 免震であり, 抑制の代表は制振と耐震である。いろいろな呼び名でいわれているが遮断と抑制が振動を止める技術の二つの入り口で

あり, 複雑な問題もその組み合わせで解決される。

2. 抑制の代表, 動吸振器

動吸振器の技術は, ^{おもり} 錘を揺れているところに付けることで振動を抑制する。直感的でわかりやすく効果も高い。技術そのものは古くから知られ, 振動工学の教科書には必ず記述がある。しかし正確に理解することは意外に難しい。技術の可能性はまだあつて, われわれもいまだに研究を進めている。

振動する対象 (主系) を記述するのに, 振動する質量体を M_1 としてそれを支える支持体の剛性を K_1 , 減衰を C_1 とすると, C_1 と K_1 は質量体をいすれかに定置するための位置のフィードバック要素としてブロック図 (図 1) で表現できる。ばねを位置決めフィードバック要素と見ることが振動制御の視点を与えている。このときばねの支点の振動 X_0 から質量体の応答 X_1 までの関係は振動の遮断特性であり, 質量体に入力される外乱 f_1 から質量体の応答 X_1 までの関係は構造物の振動抑制の特性を示すコンプライアンスである。この質量体の上に同じようなばね質量要素 M_2, C_2, K_2 を積んだのが動吸振器のモデルであり, 付加する M_2, C_2, K_2 のパラメータを構造体に対して最適に選択するのが動

吸振器の技術といえる。最近ではビルの床や道路の床板などの振動抑制にも多く使われている。動吸振器を組み入れることで, 意匠に重みを付けた設計 (図 2) も可能になるし, 床板厚みを薄くして階高を増やすこともできる。

3. スカيفックダンパと二重動吸振器

動吸振器が主系に与える減衰力は付加した質量体と主系質量体間で作用している。これはアクティブ制御が絶対慣性系の制御力を与えるスカيفックダンパと同じ作用を付加質量体によって得ていることになる。主系の相対速度ではなく絶対速度に比例する減衰を与えるのである。このスカيفックの効果を利用した技術に, 実用の拡大を進めている二重動吸振器 (図 3) という技術⁽¹⁾がある。これは主系と付加質量体の間には減衰を取らず, 付加質量体の減衰をさらに動吸振器で与えてスカيفックダンパにしたものである。従来型と比べて制振効果が高く, 二重動吸振器のトータルな付加質量を 40% 減にしても従来型と同じ性能を得ることができる。また 2 個の付加質量体があることから設計の自由度が広く, 主系の固有振動数に変動しても制振効果が変わらないロバストな減衰効果⁽²⁾を得ることもできる。付加する質量に制約があるスレンダーなビルの風

図 1 動吸振器のブロック表現

図 2 柱のない開放的な空間を実現

(a) モデルとコンプライアンス特性

図3 直列二重動吸振器による高性能化

C1の減衰を極力小さくして減衰は第二動吸振器で与えると効率の高い制振作用が得られる。従来と同じ重量なら60%性能が向上し、同じ性能でよいなら40%軽くできる。

(b) 立断面図

(a) 非制振 R 階加速度波形

(b) 制振 R 階加速度波形

(c) 二重動吸振器の外観

(d) 対象建物
地下1階，地上8階
5.4m(間口)×15m(奥行)×30m(高さ)

図4 直列二重動吸振器の実例

重量物の搭載が難しい場合でも，動吸振器を直列に二台組み合わせることによって，合計質量を小さくしても効率的に振動を抑制することができる。ビルの減衰を4%強に高めて風にも強い建物にできる。

(a) パッシブマウント

空気ばねユニットに機械式の精密給排気弁を付加してレベル制御をしている。圧縮空気はレギュレータを介して供給。

(b) アクティブマウント

空気圧制御アクチュエータが2〜3軸組み入れられたマウントに一体化。荷重バランスで配置してデジタル6自由度制御。

図5 微振動環境を作り出す除振マウント

揺れ制振(図4)などに実用されている。

4. 遮断の代表，除振装置とアクティブ制御⁽³⁾

振動の遮断性能を限界まで求めているのが精密機器のための除振装置(図5)である。遮断の基本は柔らかい支持体で機器を振動体(床)と切り離して支持することであり，この柔らかい支持体の代表は空気ばねである。除振装置は空気ばねの形状や容積を制御して遮断に有利な特性を得，また内圧を制御して正確な位置決めを実現している。メカニカルな精密給排気弁でも10μm程度の位置決めは可能で，負荷変動のある機械の除振にも広く使われている。精密な機械では1mGal以下の振動環境の要請も多い。通常のばね，ダンパの物理要素の組み合わせではいろいろと原理的な制約があって要

請を満たすことは難しく，アクティブ制御を加えて要請に応えるケースも多い。制御力を付加することによってパッシブな要素には作れないいろいろな機能を付加することも可能だ。アクチュエータには空気ばね以外にもリニアモータやピエゾ素子なども用いられるが，それぞれにメリット・デメリットがある。最先端の加工や観察には振動外乱のない環境がますます必要といわれ，われわれも努力が続いている。

5. おわりに

除振，免震は遮断の技術であり，制振，耐震は抑制の技術である。これらを使うことによって揺れない，揺れにくい構造物，機械を作ることができる。さらに振動制御技術を用いることによって構造物の設計の自由度は格段に大きくなる。500mを超える超高層

ビル，40mの無柱空間，1mGal以下の微振動環境，いずれも新たに可能となってきた領域であろう。パッシブな振動制御にとどまらず，アクティブな制御も多用されると思うし，スマート構造など新技術もすぐそばにある。しかし振動は現象の多様さには事欠かない。いろいろな問題にであうときに振動の基本的な構図に立ち返ることが何かと救いになるように思う。

文献

- (1) 安田正志・潘 公宇，直列二重動吸振器の最適設計と制振効果，日本機械学会論文集，69-688，C(2003)，3175-3182。
- (2) 安田正志・潘 公宇，多重動吸振器のロバスト最適設計法，日本機械学会論文集，71-712，C(2005)，3430-3436。
- (3) 安田正志，環境振動と精密機器，精密工学会誌，74-5(2008)，451-454。