

複数モード対応制振装置の開発

Development of Multiple Mode Structural Controlling Device

技術本部 平井 潤*¹ 成瀬 誠*¹
 川田 則幸*² 門前 唯明*³
 広島製作所 今田 健二*⁴

高層ビルの外形が意匠上複雑化する傾向の中で、風外乱によって従来の曲げ1次モードのみならずねじれ等の複数のモードが励起されるケースが増えた。従来のハイブリッドタイプの制振装置では1台で一つのモードしか対応できないため、本研究では、建物応答から卓越モードを検出し、それに対して自動的に作動周期が調整可能な振り子を設け、さらに振り子に対して新しく調整した振動系に基づき得られた制御コントローラを用いて駆動力を与えることで、振り子の慣性力により建物応答を低減する複数モード対応制振装置を開発した。本装置により建物応答の卓越周期が変化しても定常の制振効果をえられることが主に実験的に確認された。

A structural controlling device that reduces the response to strong winds of recent high-rise buildings with complex proportions has been developed. This device is effective not only for the usual 1st sway mode of the building but also for the other modes e. g. torsional mode. This device has a moving mass resonated to the vibration mode of the building and has a mass-driving mechanism which enhances the amplitude of the mass movement. The dominant mode of the building response is calculated from the response of the building which has been measured continuously. According to the change of the dominant mode resulting from the change of wind direction or velocity, the frequency of the mass movement and controller of the driving mechanism are again tuned to this mode so that the device works effectively every time.

1. 緒 言

既設の高層ビルの外形及び振動特性は単純なものが多く、したがってこれらの建物に対してこれまで適用された風応答制振装置はほとんどパッシブ、ハイブリッドタイプなど装置が一定の作動周期を持ち、対象外の振動数領域の応答に関してはその効果を期待されていないもので十分であった⁽¹⁾。

しかし近年、意匠を反映して構造上特異な性状を有し、風外乱に対して複雑な応答を示すケースが増えている。たとえば本研究の発端となったAビルは不定五角形の平面を有し、また、各フロアの重心、剛心の分布が一本の垂直線から各々ランダムにはずれているため特異な振動特性を有し、また、風洞実験の結果に関しては風向、風速の変化によりねじれ方向の応答がかなり大きくなるケースが存在することが確認され、風外乱の条件によっては建物応答を決定づける卓越モードが変化することが分かった。

このような建物の風応答を制振する場合、従来型のハイブリッドタイプの適用は卓越モードが制振装置の同調モードと外れた場合、効果が減少あるいは駆動力を過大に必要とし、好ましくない。

したがって本研究では建物の卓越モードに対して制振装置の状態を常に最適な状態に自動的に調整して作動する新しいハイブリッドタイプの制振装置を開発し、主に実験的にその効果を検証した。

2. 対象建物模型振動特性

まず複数モード対応制振装置の効果検証を縮小模型を用いて実験的に検証するために、装置模型の適用対象となる建物模型に与える振動特性について述べる。重要な点は風外乱のような低周波の外乱によって励起されるような振動モードを複数有する点である。本実験においては前述のAビルの持つ振動特性に関する検討を行うこととした。

表1 ビル振動特性の特異な例
 Example of unique vibration characteristic of practical building

次数	振動数 (Hz)	方向
1次	0.28	弱軸方向並進+ねじれ
2次	0.34	強軸方向並進+ねじれ
3次	0.36	ねじれ

表1に前述のAビルの振動特性を示す。特徴としては曲げのモードがねじれ方向の動きとカップリングしていること、曲げ1次モードとねじれ1次モードの振動数比が約1.3と比較的小さいことが挙げられる。

本実験においては建物模型を振動台上に搭載して、一方方向のみ模型基部を加振し、慣性力の形で建物模型全体に外力を与えることにした。したがって建物強軸方向の動きを省略して、建物模型の加振を弱軸方向のみに限った上で曲げ1次・ねじれ1次に関する上記のような振動特性を実現できるように、建物模型の頂部に重量の偏心を与えた。

図1に模型の構造の概観を示す。全体の構造は各層5000kgの5つの鋼製マスを鋼棒で層間に連結したもので全体を剛フレームから吊下げ、上下を逆転した構造としている。その最下層すなわち建物最上階相当マスに1000kg、300kgの各々重量の異なる偏心マスを図中X方向にそれぞれ張出すように設けている。

この模型を等価せん断型モデルで表現し解析的に求めたモード形を同時に示しているが、1次の曲げモードは計画どおりねじれとカップリングし、また純ねじれモードとの振動数比はほぼ1.3となっている。実験時には剛フレームごと振動台上に搭載し図中Y方向に加振し、慣性力を与えることで図に示すような振動特性が実現できる。

*1 広島研究所鉄構・土木研究室 *2 広島研究所制御システム研究室
 *3 広島研究所色彩・画像研究室長 *4 鉄構部鉄構設計課

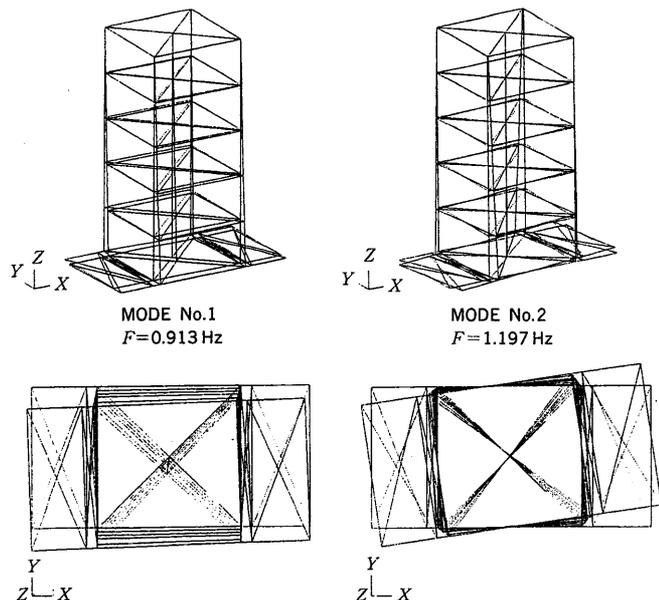


図1 建物模型の構造と振動特性 5層の実験用建物模型の振動特性解析結果、想定実機ビルの並進とねじれのカップリングした動き、並進とねじれの振動数比を良く表現している。
Vibration characteristic of building model

3. 装置模型

今回提案する複数モード対応制振装置は、原理的には建物の振動モードと同じ周期で振動する制振マスに対してその動きを助長するような力を与える、ハイブリッドタイプの制振装置である。制振マスの基本振動周期を生み出す振り子機構、建物応答の卓越周期を検出するロジック、卓越周期に振り子振動数を調整する機構、振り子に制御力を与える駆動部等に関する本装置の特徴を以下に記すとともにこれに基づいて設計した縮小装置模型についてその諸元を示す。

3.1 ギヤ式振り子

従来高層ビルの制振マスの支持方式としては、小さいスペースで長周期の振動を再現するために多段振り子方式などが用いられていた。本開発においてはこれに代わりギヤ式振り子を提案した。原理を図2に示す。図中ギヤボックスをマスとする倒立振り子と正振り子がギヤを介して連動する構造で、逆振り子が倒れの運動をするとき等しい角度分正振り子が同じ方向に強制的に振り出される運動をする。正振り子がある振動エネルギーを与えられ、これを位置エネルギーに変換すべく振れ始めると連動する逆振り子は反対に転倒運動により位置エネルギーを失おうとする。振動

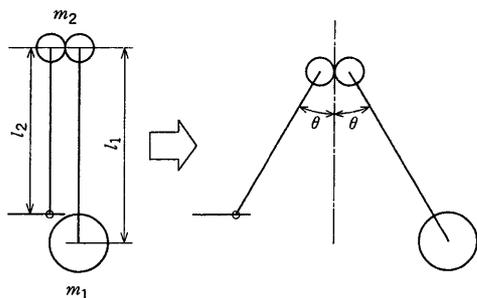


図2 ギヤ式振り子の原理図 正振り子の動きによる全体振動系の位置エネルギーの増分の一部が連動する逆振り子の動きによってキャンセルされることで長周期振動を生み出す。
Motion of gear-type vibration mechanism

系全体で言えば逆振り子の運動により位置エネルギーがキャンセルされる分だけ全体の位置エネルギーがある一定のレベルに達するまでの時間当たりの行程が長く、全体の運動周期が長くなる。この考え方から、ギヤ式振り子の基本振動数 f は次式で表わされる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_1(l_1 - l_2) - m_2 l_2}{m_1(l_1 + l_2)^2 + m_2 l_2^2} \cdot g}$$

g : 重力加速度

縮小装置模型においては、

$$m_1 g: 60 \text{ kg} \quad l_1: 90 \text{ cm}$$

$$m_2 g: 12 \text{ kg} \quad l_2: 50 \text{ cm}$$

とした。この状態での前式から得られる振り子振動数は 0.19 Hz であるが、 $l_1=90 \text{ cm}$ と等しい吊長さを持つ単振り子の振動数が 0.53 Hz であることからギヤ式振り子が低い装置高さで長周期振動を得るのに有効であることが分かる。

3.2 剛性変更ロジック

建物の応答のリアルタイムの観測結果から各時刻の建物応答の卓越モードを判別し、そのモードに対して制振装置マスの振動周期を調整し、また、マスに与える駆動力を決定する制御コントローラを適当なものに自動的に切替えるロジックを示す。

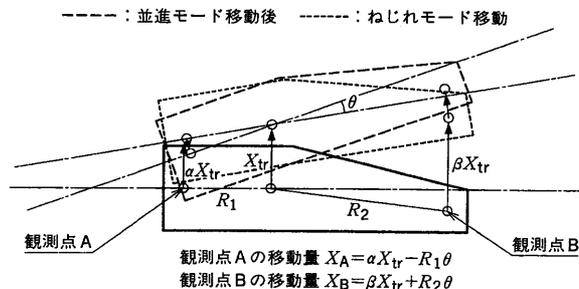


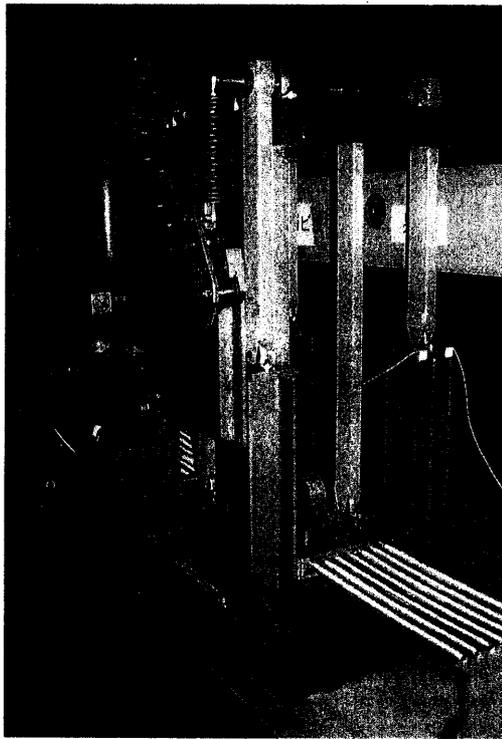
図3 モーダル応答量の算出 観測点A, Bの応答の観測結果から並進成分 X_{tr} 、ねじれ角 θ を算出する。
Calculation of modal response

図3に従って説明すると、まず考慮すべき曲げ1次モード、ねじれ1次（純ねじれ運動）の2つの各々のモードについて、振動数及び図中に示すねじれの回転中心位置、及び観測点における変位モード比が分かっていることを前提として、2つの観測点における変位応答、速度応答観測結果から回転中心位置における曲げ1次モードでの並進成分とねじれ1次モードでの回転角の2つのモード成分が得られる。これらは曲げ1次モードのモード比及びねじれ1次モードのアーム比を考慮して任意の参照点における曲げ1次モード成分の応答、ねじれ1次成分の応答に換算される。これらのモード成分の応答量を逐次型のローパスフィルタで処理をして大小比較を継続的に行い、その時々大きい方をそのときの卓越モードとする。

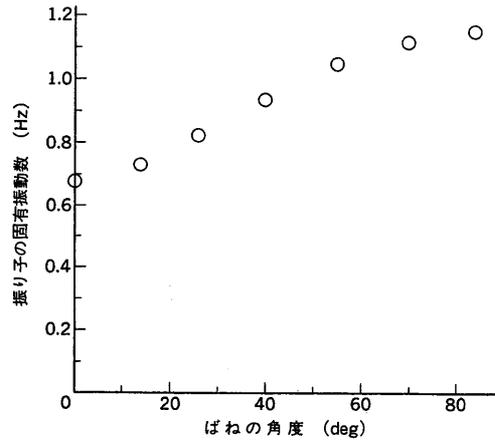
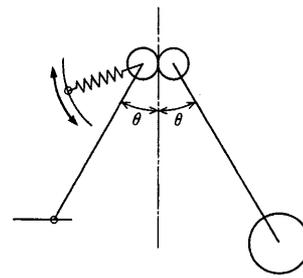
制振装置振動数は2種類のモードに対して同調可能な機構とし、また制御用コントローラは、並進・ねじれの2自由度の建物モデルに対して、対象モードに各々調整後の制振装置モデルを連成させたモデルに関して状態方程式を立てた上で、曲げ1次に調整時には建物並進速度の項に、ねじれ1次に調整時には建物回転速度量に重み付けを行って得られたLQコントローラを2種類用意しておき、装置状態切替への対象とした。

3.3 剛性変更機構

建物の卓越モードの振動数に対して上記の振り子振動数を変更



(a) 概観



(b) 特性

図4 剛性変更機構の概観と特性 ばね取付け角を変化させることでギヤ式振り子の振動数が任意に調整できる。
Over-view of frequency adjusting system and its effect

する機構を示す。これは振り子支持部から制振マスにばねをとり、その取付け角をばね支持部の位置を円弧上で移動させることで変更し、ばね反力のマス振動方向の変分を変化させることで振り子全体の振動数を変化させるものである。図4にギヤ式振り子模型にこの剛性変更機構を適用した場合の概観と、ばね位置を任意に変更した際の各々のケースの装置作動振動数の実測値を示した。

3.4 リニアモータ駆動機構

本装置は制振装置マスを駆動する機構として、動電型リニアモータを用いている。励磁コイルを制振対象に固定し、磁気回路部及びこれと一体となった駆動コイルを振り子の形態でサポートすることによって駆動部の重量分を制振マスとして兼用することができ、コンパクトな構造となっている。また従来のボールねじ+サーボモータと比較して機械効率の損失が少ない、低騒音であるなどの特長がある。実験モデルの設計最大出力は20 kgfとした。

4. 制振実験

4.1 実験装置、方法

前述の制振装置模型2台を建物模型の偏心部分に設置し、模擬風外乱に対する制振効果を検証した。実験システムの構成を図5に示す。制御系の状態量としては外部フレームから計った建物模型頂部階の両張り出し端位置の変位及び同位置における建物模型加速度から建物模型基部の加速度を引いて積分した相対速度値を用いた。これらのシステムは外フレームごと振動台上に搭載され図中矢印方向に加振された。加振波形は前述Aビルに関して風洞実験による風応答の事前検討時に得られた建物モデルの弱軸方向における風外乱の時系列の信号を模型固有値に従って時間スケールを合わせたもの300sに対してねじれ振動数相当の正弦波上の信号を漸増して加えて行ったものである。

4.2 応答シミュレーション

実験結果の精度を検証するために、建物固有値を解析的に求め

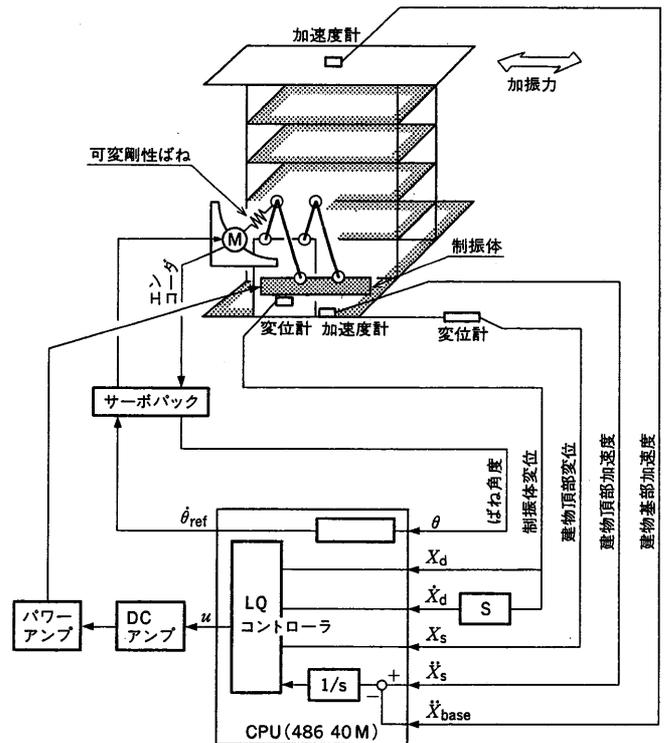


図5 実験装置構成 制振実験時の計測信号、制御信号の流れを示す。
Experimental set-up

際に用いた前述の建物モデルに対し、実験時において建物模型基部すなわち外部フレーム頂部において計測した加速度波形を入力してモーダル法による時系列応答解析を行った。結果を後述の実験結果と併記して示す。

4.3 実験結果

図6(a)に加速度応答に関する結果を示す。

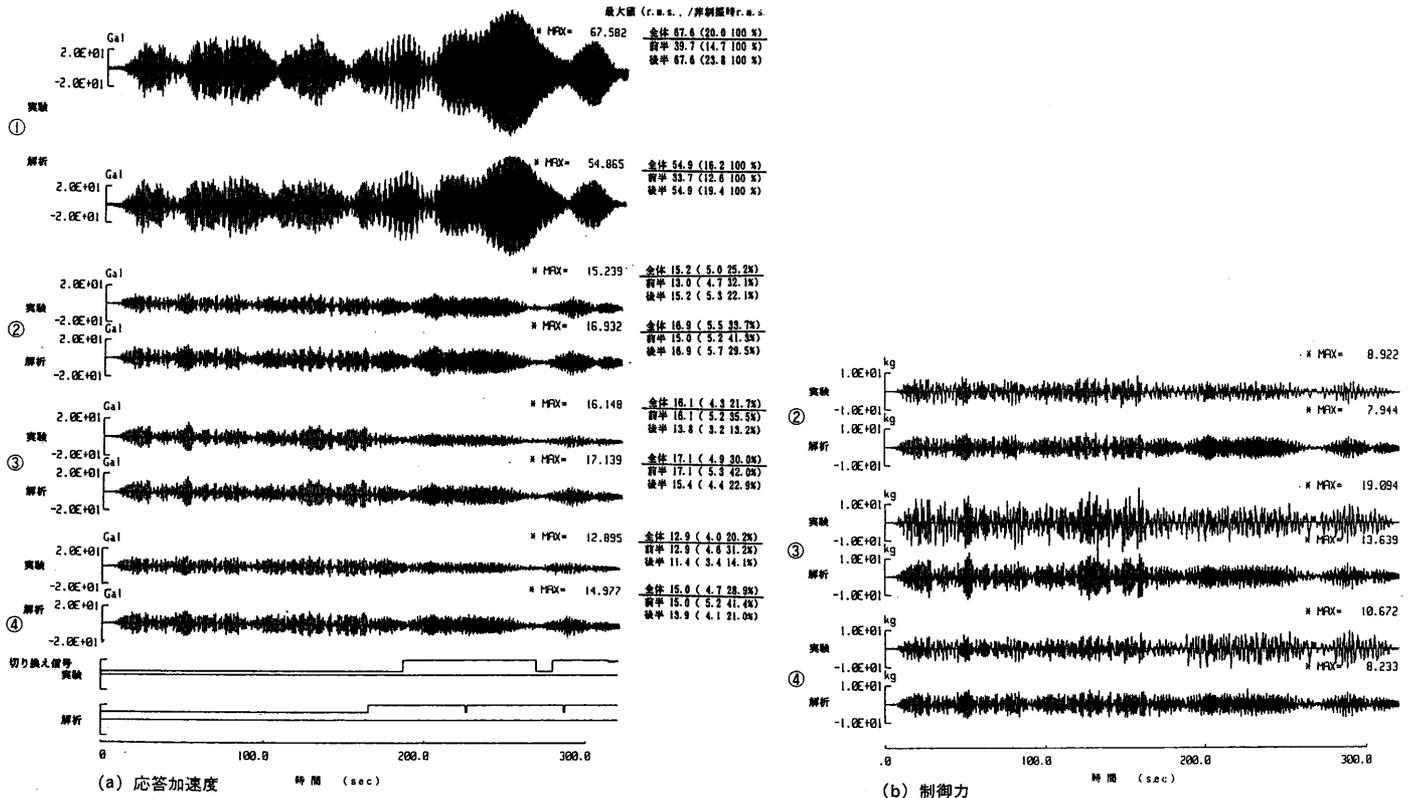


図6 実験結果 建物模型の応答加速度に関して、制御対象モードを時刻歴応答の後半当たりから切替えることで、全体的に小さな制御力で定常的な制振効果が得られている。
Experimental result (Acceleration of building model and controlling force)

波形は各々建物模型頂部の偏心部の一端(1000 kg 側)に関して、それぞれ、① 非制振状態、② 卓越モードを無視して常に曲げ1次モード対象の装置状態で制振した状態、③ 同様に常にねじれモードを対象に制振した場合、④ 剛性変更ロジックを適用して制振した場合である。非制振時においては加振波形のねじれ成分の増加に従い、建物応答値が大きくまた波形間隔が密になり卓越モードがねじれに移行していることを示す。②、③のケースは各々の装置調整状態の対象モードが卓越している範囲で有効に応答を低減し、それ以外のモード卓越時には応答の低減度は若干低い。④においては時系列応答の後半から装置の適用対象モードが切替わり時刻歴応答全体で応答を良く低減していることが分かる。

また、それぞれのケースの解析結果は実測結果と良好な対応を示しており実験の精度が確認できた。

次に図6 (b)に②、③、④に関してそれぞれのケースの制振マス駆動の制御力を示す。

剛性変更を行わない②、③の場合には装置状態が対応していない卓越モードでの応答を制振する際に制御力が増大している。剛性変更を行うことで小さい制御力で制振効果をえられることが分かる。

5. 結 言

複数モード対応制振装置の開発を目的として、装置縮小模型、建物模型を用いて性能検証を行った結果、以下の知見を得た。

- ギヤ式振り子機構を用いて小さい装置高さで長周期の振り子運動を実現できる原理が実験的に確認された。
- 動電型リニアモータの制振装置の駆動部への適用性について力特性、制御性の両面において可能であることが実験的に確認された。
- 剛性変更ロジック及び剛性変更機構を用いることで、建物の風応答の卓越モードが変化した場合でも省力的にかつ有効な制振が可能であることが分かった。

以上の成果に関しては、基本特許を既に申請しており、今後は本研究の成果を取入れて実機装置の試設計を進めていく予定である。

参 考 文 献

(1) Yamazaki, S., Tamari, M., Abiru, H., Full-scale Investigation of Performance of Tuned Active Dampers Installed in Landmark Tower in Yokohama, 9 ICWE (1995) p.1631