

振子と倒立振子を併用したTuned Mass Damper (TMD)の開発

奥田 浩文 蔭山 満
勝俣 英雄

Development of a Tuned Mass Damper for High-Rise Buildings with the Characteristics of a Pendulum and a Handstand Pendulum

Hirofumi Okuda Mitsuru Kageyama
Hideo Katsumata

Abstract

This paper describes the performance of a tuned mass damper (TMD) and a hybrid mass damper (HMD) comprising an active mass damper (AMD) and a TMD. The purpose of this experimental study was to confirm the basic performance of a TMD utilizing a pendulum and a handstand pendulum together. The following two technologies were developed to realize the TMD: 1) a simple method to synchronize the high-rise building period and the TMD period; 2) a method to reduce the frictional resistance of the TMD. The performance of the TMD as a practical solution for reducing structural vibrations was demonstrated using a shaking table test.

概要

超高層建物等の風揺れ抑制を目的としたTMD(チューンド・マス・ダンパー)には、設計段階では正確に把握できない建物周期と装置周期とを同調させる機能が必要となる。併せて、小さな振幅レベルから所定の性能を発揮させるために、TMD自体が有する摩擦抵抗等を極力排除することも必要となる。これらの課題を解決し且つ簡便な方法で周期調整を可能とする装置として、著者等は振子と倒立振子を併用するタイプの装置開発を行ってきた。本報では、開発した振子-倒立振子併用型装置の概要と、その基本性能を確認する目的で行った振動台実験の結果について報告する。

1. はじめに

強風時の建物居住性能を改善する目的で、多くの超高層建物等に建物頂部設置型制振装置(マス・ダンパー)が設置されている。一般に、再現期間1年期待値の風速に対して建物の揺れが目標とする居住性能¹⁾を満たさない場合に、マス・ダンパーは設置されることが多い。マス・ダンパーには種々の方式(Fig. 1参照)があり、パッシブ方式のTMD(チューンド・マス・ダンパー)、アクティブ方式のAMD(アクティブ・マス・ダンパー)、パッシブ方式とアクティブ方式を併用したハイブリッド方式のHMD(ハイブリッド・マス・ダンパー)が既に実用化されている。これら全ての方式に共通することは、建物に与える制振力(建物の揺れを抑制する力)をマス(錘)の慣性力によって発生させている点にある。このことは、慣性力発生装置であるこの種の装置において、マスが重ければ重い程、またマスの動き(ストローク)が大きければ大きい程、より高い制振効果を実現できることを意味している。

TMDはモータなどの動力装置に用いる外部からのエネルギーを必要としない点に、AMDは動力装置を用いるものの、それによって強制的にマスを駆動することが可能となるので、TMDと比較した場合、相対的に小さなマスでTMDと同等の効果が得られる点に、それぞれ特長が

ある。またHMDはTMDとAMDの長所を生かした方式で、TMDより小さなマス、AMDより少ないエネルギーによって、TMDと同等の効果が得られる点にその特長がある。なお、HMDには、動力装置によって発生するパッシブマスの慣性力を直接建物に伝達するタイプの並列型HMDと、TMDの上にAMDを搭載し、動力装置によってアクティブマスを駆動させ、その慣性力をパッシブマスに伝達するタイプの直列型HMDとがある。

実建物へのマス・ダンパー設置を計画する場合、設計者は、最初にTMD、次にAMD、最後にHMDの順序で検討するケースが多い。なぜなら、装置機能を維持するためのランニングコストを含めた装置コストは、一般に後者になる程高価となるためである。TMDの欠点は、大きな制振効果を必要とする場合、大きなマスが必要となる点にある。TMDに求められる性能とその設置必要スペースとの関係等からこのことが問題となる場合、次にAMDが検討される。AMDの欠点は、建物の揺れの抑制に必要な慣性力(制振力)の全てを動力装置が負担しなければならない点にある。この動力装置の出力規模が問題となる場合、動力装置に必要な力が相対的に小さくなるHMDが最終的な候補として検討されることになる。

風揺れ対策、居住性能改善としてのこの種の装置に対する社会的ニーズは非常に高く、超高層建物等の建設計

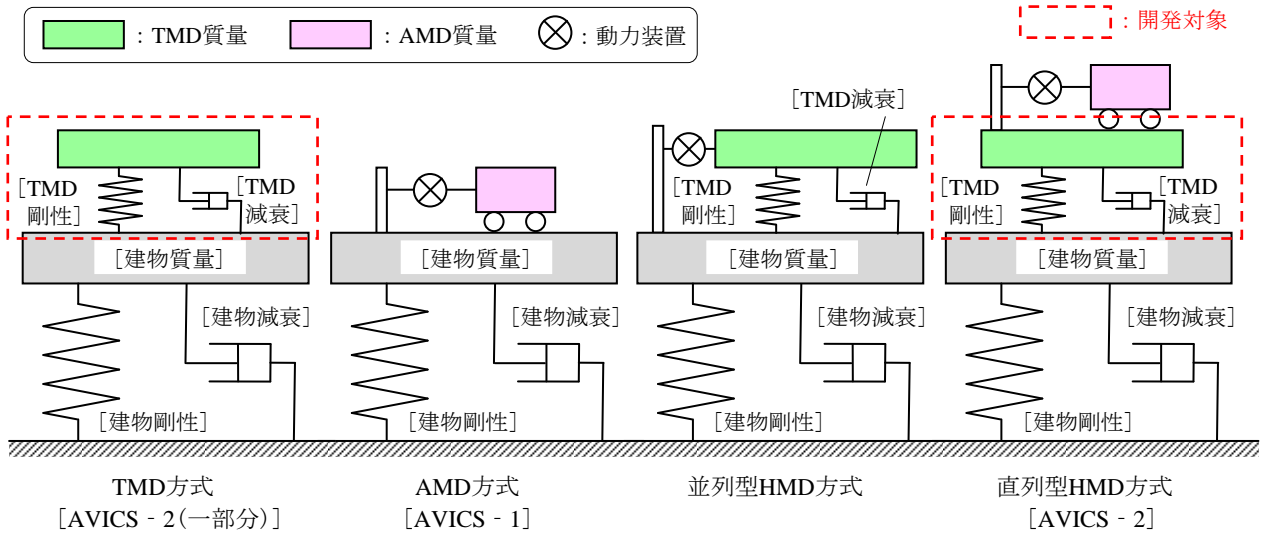


Fig. 1 マス・ダンパー方式
Control System of Mass Damper

画では、多くの場合で装置の適用検討が行われている。著者等は、これまでにACサーボモータとボールねじで駆動するAMD方式の「AVICS[®] - 1」^{2) ~ 4)}、および鋼製マスを多段積層ゴムで支持したTMDの上に、前述のAMDを搭載する形で構成される直列型HMD (TMD単体としての使用も可能)方式の「AVICS[®] - 2」^{5)・6)}をそれぞれ開発し、計7物件に適用してきた。しかし、この種の装置の更なる競争力強化、適用拡大を考えると、現地における装置調整の省力化、すなわち装置調整方法の簡便化、装置調整期間の短縮化を達成する必要がある、これに対するニーズは高い。この課題を解決するために、「AVICS - 2」のTMD部分 (Fig. 1の赤破線部)に着目した装置開発を行った。本報では、新しく開発したTMDの概要と、その基本性能を確認する目的で行った振動台実験の結果について報告する。

2. 提案装置の概念と理論式の誘導

2.1 TMDの設計法と既存装置 (TMD部) の改良点

風揺れ抑制、居住性能改善を目的としたTMDが所定の性能を発揮するためには、建物特性にTMD特性を同調させること、すなわちDen Hartog等による概略のTMD理論式⁷⁾を用いて最適な固有振動数比 (固有周期比)、最適減衰比を求め、実機でそれを再現することが必須となる。

いま、質量比 (建物質量に対するTMD質量の比率) μ を、

$$\mu = \frac{m_D}{m_S} \quad (1)$$

と定義する。ここで m_S は建物質量を、 m_D はTMD質量をそれぞれ表す。

建物に対するTMDの最適固有振動数比 (最適固有周期比は逆数となる) λ_{OPT} は、式(1)を用いて、

$$\lambda_{OPT} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (2)$$

によって、また最適減衰比 ξ_{OPT} は、同じく式(1)を用いて、

$$\xi_{OPT} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \quad (3)$$

によってそれぞれ決定される。式(2)および式(3)の関係から、TMDばね剛性 k_D およびTMD減衰係数 c_D は、それぞれ、

$$k_D = (\lambda_{OPT} \cdot \omega_D)^2 \cdot m_D \quad (4)$$

$$c_D = 2 \cdot m_D \cdot \omega_S \cdot \xi_{OPT} \quad (5)$$

として表される。ここで、 ω_S は建物固有円振動数を、 ω_D はTMD固有円振動数をそれぞれ表す。 ω_S および ω_D は、それぞれ、

$$\omega_S = \sqrt{\frac{k_S}{m_S}} \quad (6)$$

$$\omega_D = \sqrt{\frac{k_D}{m_D}} \quad (7)$$

として表される。ここで k_S は建物ばね剛性を表す。

式(4)および式(5)の関係から、装置がTMDとして機能するために必要となる、最適固有振動数比 (最適固有周期比) や最適減衰比を用いたTMD諸定数は、TMDが設置される建物の固有振動数 (固有周期)、減衰定数および質量も考慮して決定されることが分かる。このことは、TMDの設計には建物特性が必要となること、換言すれば、設計段階でTMDが設置される建物特性を把握しておく必要があることを意味しているが、竣工後の建物特性を設計段階で把握することは、非構造部材等の影響により非

常に困難である。建物特性を正確に把握する方法のひとつとして、竣工直前(引き渡し前の装置調整時)に直接建物を加振する方法があるが、この方法によっても、建物特性の正確な把握は設計段階以後のこととなる。

以上のことから、TMDが所定の性能を発揮するためには、TMD理論に基づく建物との同調作業(装置調整作業)が重要であることが分かる。併せて、設計段階では正確に把握できない建物特性に応じて、現地でTMD特性を調整可能とする機能をTMDは事前に保持しておかなければならないことも分かる。このTMDの同調作業(装置調整作業)をどのような方法で構築するか、現地で如何に簡便に且つ短時間で実施できるかが、この種の装置の更なる競争力強化、適用拡大を図る上で重要な要因となる。

鋼製マスと多段積層ゴムとで構成されている従来型のTMD(以下、従来型TMDと称す)では、この同調作業(装置調整作業)を、多段積層ゴムの段数調整と倒立ばね機構の諸定数調整^{5)・6)}とを併用する方法で行っていた。この方法は、TMDが所定の制振効果を発揮するために必須となる、現地における正確な周期調整は可能となるものの、当該作業には重量物移動用機材の使用が必須となること、その実施には相応の時間を要すること、といった課題を有していた。この課題を解決し簡便な方法で装置周期の調整を可能とするTMDの構築を目指して、振子と倒立振子を併用するタイプのTMD開発を行った。

2.2 提案TMDの概要とその特長

本節では、振子と倒立振子とから構成されるTMD(以下、提案TMDと称す)の概要とその特長について述べる。このタイプのTMD構成の基本原理解⁸⁾は既に構築されているが、本報ではこの基本原理解を2方向TMDとして拡張させるなど、より実機で求められる性能に近い形に発展させている。

提案TMDの概念をFig. 2に示す。同図(a)が提案TMD静止時の、同図(b)が作動時の状況をそれぞれ表している。提案TMDは、質量 m_1 、吊り長さ L の振子部と、質量 m_2 、倒立高さ L の倒立振子部とを上下ガイド機構で連結した、水平2方向に駆動可能な装置として構成されている。同図中に示す上下ガイド機構は、振子部、倒立振子部双方の質量間の水平方向の動きは拘束しつつ、上下方向には駆動可能とするための機構である。この上下ガイド機構によって、振子部質量(m_1)と倒立振子部質量(m_2)は適切且つ一体(水平方向)として挙動することになる。

提案TMDの最大の特長は、TMD寸法(振子部吊り長さ L と倒立振子部倒立高さ L)やTMD全体質量($m_1 + m_2$)を変更することなく、振子部質量(m_1)と倒立振子部質量(m_2)の配分を変更することのみによって、TMD自体の周期調整(長周期化・短周期化)を可能とする点にある。すなわち、振子部質量(m_1)の一部を倒立振子部質量(m_2)に移すことのみによってTMD全体としての長周期化が、逆に倒立振子部質量(m_2)の一部を振子部質量(m_1)に移すことのみによってTMD全体としての短周

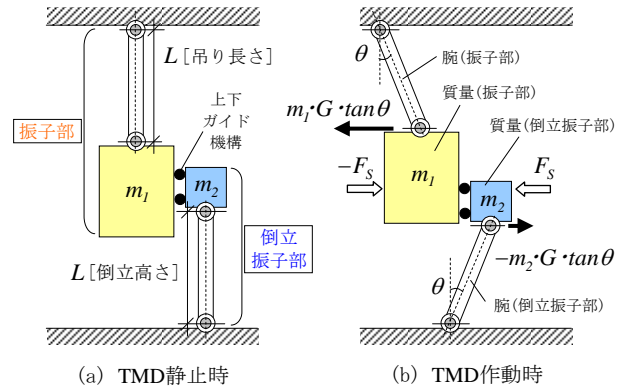


Fig. 2 提案機構の概念
Concept of Proposed TMD

期化が、それぞれ達成できることになる。振子部-倒立振子部間を移動させる質量を予め移動しやすい大きさ、重さに分割しておけば、人力あるいは軽微な器具の使用のみで、簡便にTMDの周期調整が可能となる。この方法によって、現地における周期調整等に要する時間も、従来型TMDのそれと比較して格段に短縮可能となる。

この種の装置では、小さな振幅レベルから所定の性能を発揮させることも重要である。そのためには、TMD自体が有する摩擦抵抗等を極力排除することが必要となる。装置可動部の多くをリンク機構で構成することにより相対的に摩擦抵抗等が小さくなる装置構成となっている点も、提案TMDの特長のひとつである。

2.3 理論式の誘導

振子部の質量 m_1 に作用する水平力 F_1 、および倒立振子部の質量 m_2 に作用する水平力 F_2 は、それぞれ、

$$F_1 = m_1 \cdot G \cdot \tan \theta - F_s \quad (8)$$

$$F_2 = -m_2 \cdot G \cdot \tan \theta + F_s \quad (9)$$

として表される。ここで、 F_s は上下ガイド機構を介して質量 m_1 、 m_2 を一体とした時にこれら相互の系に作用する水平力を、 G は重力加速度をそれぞれ表す。振子部、倒立振子部を一体とした系に作用する復元力 F は、

$$F = F_1 + F_2 = G \cdot \tan \theta \cdot (m_1 - m_2) \quad (10)$$

となる。式(8)および式(9)は振子部、倒立振子部にそれぞれ単独に作用する復元力であり、式(10)はそれらを一体とした場合の復元力である。これらは全て同じ動き、すなわち、慣性力に対する復元力の比率が同じである必要がある。その条件は、

$$\frac{F}{m_1 + m_2} = \frac{F_1}{m_1} = \frac{F_2}{m_2} \quad (11)$$

として表される。未知数 F_s に対して、式(11)いずれの等式を用いてもその解は、

$$F_s = \frac{2 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot G \cdot \tan \theta}{m_1 + m_2} \quad (12)$$

として表される。

次に系の周期を考える。各質量の水平方向変位 x は、

$$x = L \cdot \sin\theta \quad (13)$$

となり、系の周期を T とすると、その加速度 \ddot{x} は、

$$\ddot{x} = (2\pi/T)^2 x = (2\pi/T)^2 \cdot L \cdot \sin\theta \quad (14)$$

となる。

式(14)に系の全体質量である $(m_1 + m_2)$ を乗じた慣性力が式(10)の復元力と釣り合う条件により、Fig. 2に示す系の周期 T は、

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{G} \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 - m_2} \right) \cdot \cos\theta} \quad (15)$$

として表される。

式(15)から、装置全体質量 $(m_1 + m_2)$ に占める倒立振子部質量 (m_2) の比率が大きいく程、全体系周期の長期化が可能となることが分かる。

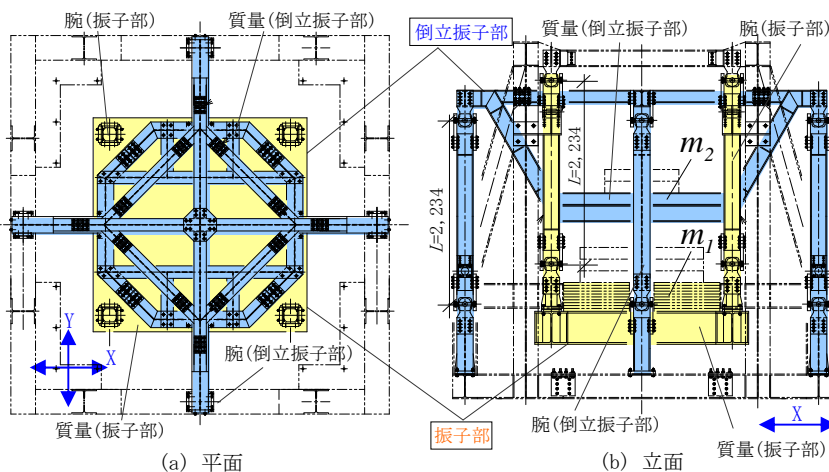


Fig. 3 試験体形状 (振動台実験)
Shape of Specimens (Shaking Table Test)

3. 基本性能の確認

3.1 振動台実験の概要

提案TMDの基本性能、とりわけ周期調整機能を確認する目的で、振動台を用いた自由振動実験を行った。試験体の形状をFig. 3に、実験状況をFig. 4およびFig. 5にそれぞれ示す。実験に用いた提案TMDは、質量(振子部)を4本の腕(振子部)によって支持した振子部と、質量(倒立振子部)を4本の腕(倒立振子部)によって支持した倒立振子部とから構成されており、両振子部は、作動時に双方が接触することがない様に、互いの腕を90度回転させた形でセットされている。なお、質量(振子部)と質量(倒立振子部)とを上下ガイド機構によって連結することで、両振子部間の水平方向の動きを拘束している。

実験は、振子部吊り長さ L と倒立振子部倒立高さ L を 223.4cmに、またTMD全体質量 $(m_1 + m_2)$ を 22.4×10^3 kg にそれぞれ固定し、振子部と倒立振子部の質量配分のみを変更して行った。

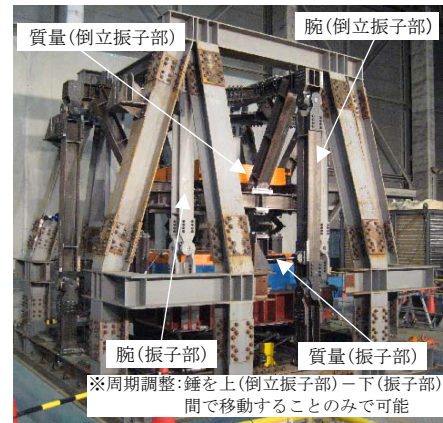
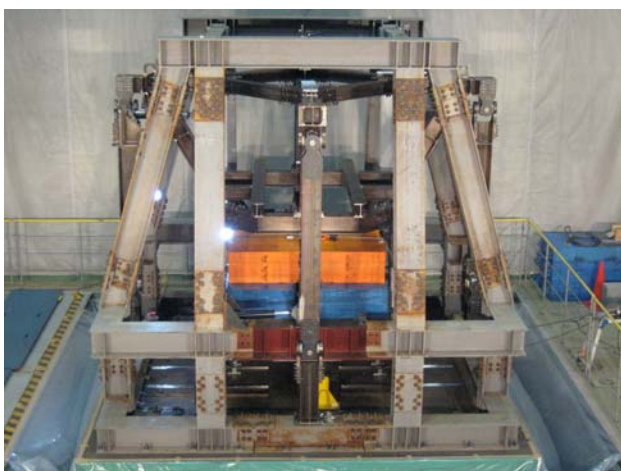


Fig. 4 実験状況
(振動台実験 No.3)
General View of Experiment
(Shaking Table Test No.3)



(a) TMD静止時



(b) TMD作動時

Fig. 5 実験状況 (振動台実験 No.1)
General View of Experiment (Shaking Table Test No.1)

実験ケースをTable 1に示す。実験No.1からNo.3にかけて、TMD全体質量に占める倒立振子部質量の割合が大きくなる様に設定している。実験No.1~3における、TMD全体質量に占める倒立振子部質量の割合は、それぞれ11.2%、22.8%、34.4%である。なお、実験時の加振レベルは振動台に対する振子部(あるいは倒立振子部)の相対変位が30~45cm程度となる様に調整した。併せて、TMDが有する摩擦抵抗等を把握する目的で、実験No.3を対象に、定常波加振実験(振動台加速度を1.0Gal相当とする変位制御加振)も行った。

3.2 振動台実験の結果

実験No.1~3の自由振動波形(振子部変位)、および同波形のピーク値(図中、○印)から計算した周期-変位関係をFig. 6に一括して示す。図中、左側の列はFig. 3に示すX方向加振時の、右側の列はY方向加振時の結果である。各周期-変位関係図中の●印は自由振動波形から得られた振幅毎の実験周期を、実線は式(13)と式(15)

を用いて計算した振幅毎の理論周期をそれぞれ表している。これらの各図中には、参考として(理論周期±1%)の値を破線で併記している。一般に質量比(建物1次有効質量に対するTMD質量の比率)が1%程度の場合、TMD周期が(理論周期±2%)の範囲内であれば、TMD周期が理論周期の場合と比較して、得られる制振効果は同等となることが知れている。Fig. 6に示す結果のうち、振子部変位を約30cmとした場合の実験と理論の周期比較をFig. 7に示す。同図(a)は実験ケース毎の振子周期を、同図(b)は理論周期に対する実験周期の比率をそれぞれ表している。Fig. 6と同様に、同図左側がX方向加振時の結果を、右側がY方向加振時のそれをそれぞれ表している。

Table 1 実験ケース
Test Cases

実験ケース	振子部		倒立振子部	
	質量(m_1)	吊り長さ(L)	質量(m_2)	倒立高さ(L)
No. 1	$19.9 \times 10^3 \text{kg}$	223.4cm	$2.5 \times 10^3 \text{kg}$	223.4cm
No. 2	$17.3 \times 10^3 \text{kg}$		$5.1 \times 10^3 \text{kg}$	
No. 3	$14.7 \times 10^3 \text{kg}$		$7.7 \times 10^3 \text{kg}$	

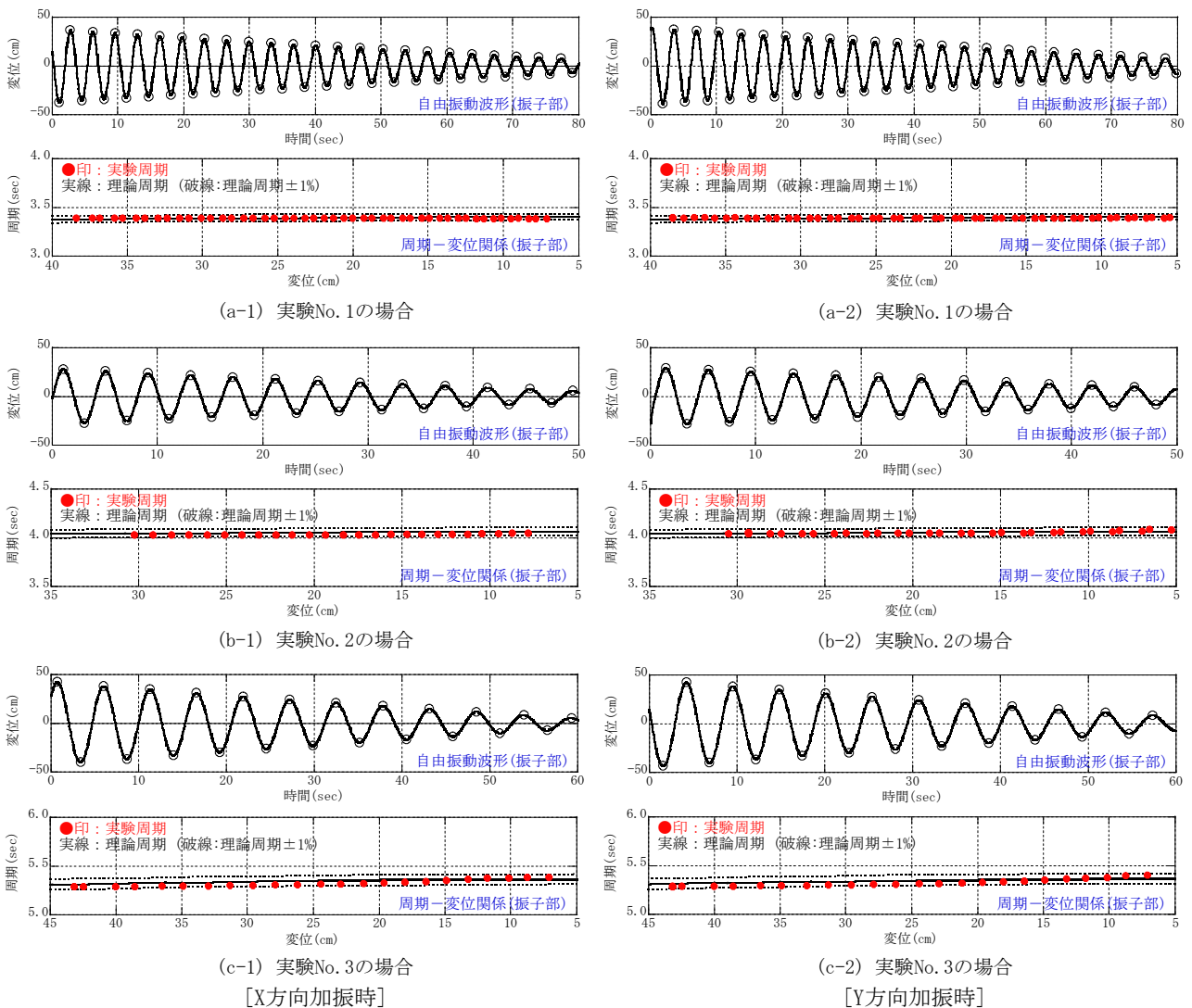


Fig. 6 自由振動実験結果(時刻歴応答波形)
Result of Free Vibration Test (Time History Response Wave)

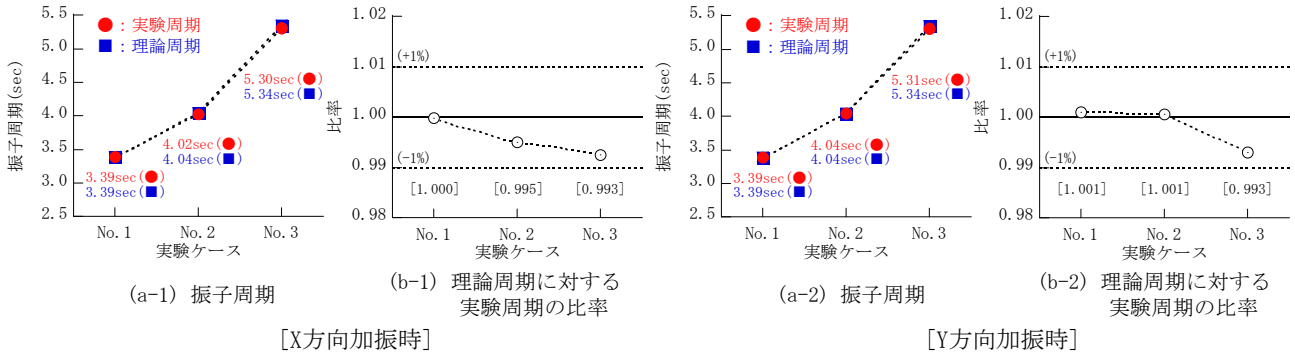


Fig. 7 実験と理論の周期比較 (振子変位が約30cmの場合)

Comparison of Experiment Period and Theoretical Period (Displacement of Pendulum : Approximately 30cm)

Fig. 6およびFig. 7に示す自由振動実験の結果から、1) 提案TMDは、振子部質量と倒立振子部質量の配分の変更のみで、設計者が意図するTMD周期調整(長周期化・短周期化)が可能となること、2) 全ての実験ケースにおいて、全変位振幅レベルにわたり実験周期と理論周期とはよく一致していることから、実験結果は理論式(2.3節)によって再現できること、3) TMDのXおよびY方向の特性に大きな変化はないこと、を確認した。なお、紙面の都合上割愛したが、上下ガイド機構が有効に機能することで、Table 1に示す全ての実験ケースにおいて、倒立振子部の変位量は振子部のそれと同等であったことも確認した。

TMDが設置される建物水平2方向の周期が異なる場合、建物とTMDとを水平2方向とも同調させるために、TMDには水平2方向で異なる周期に設定可能とする機能が必要となる。これに対しては、例えばTMD剛性を硬く設定したい方向のみにコイルばね等の剛性付与機構を追加すること等で対応すればよい。

定常波加振実験の結果(1.0Gal入力時)をFig. 8に示す。この結果から、提案TMDは約1.0Gal入力時でも滑らかに作動していることが確認できる。併せて本実験の結果から、TMD全体系の摩擦係数は概ね1/1000程度であったことを確認している。

4. まとめ

超高層建物等の風揺れ抑制, 居住性改善を目的として、振子と倒立振子を併用するタイプのTMDの開発を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 振動台実験によって、提案TMDの周期調整機能の妥当性、実験値と理論値の整合性を確認した。
- 2) 提案TMDは装置可動部の多くをリンク機構で構成されているため、建物加速度が約1.0Galという小さな振幅レベルでもTMDとして作動可能であることを、振動台実験によって確認した。
- 3) 提案TMDの周期調整機能は、調整方法の簡便化、調整期間の短縮化の観点から、従来型TMDと比較して格段に優れているといえる。

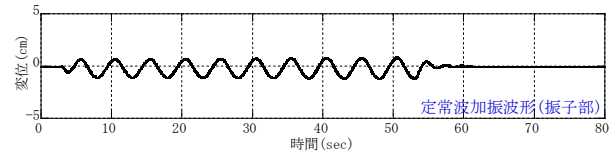


Fig. 8 定常波加振実験結果
Result of Steady-State Vibration Test

- 4) これらのことから、提案TMDを用いた「AVICS」の更なる適用拡大、普及が期待できる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説，(2004)
- 2) 鈴木哲夫，蔭山満，他：中高層建物のアクティブ制振システム(その15)～(その17)，日本建築学会講演梗概集，pp.899～904，(1994)
- 3) 蔭山満，奥田浩文，他：可変ゲインを用いたAMDストローク・サチュレーション制御の研究(その1)～(その2)，日本建築学会学術講演梗概集，pp.773～776，(1997)
- 4) 奥田浩文，蔭山満：スピルオーバーの防止とAMDストローク制約下における可変ゲインの設定を考慮した最適制御手法に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第532号，pp.87～94，(2000)
- 5) 蔭山満，奥田浩文，他：ハイブリッド動吸振器の開発とその実機適用に関する研究(その1)～(その4)，日本建築学会学術講演梗概集，pp.811～818，(2000)
- 6) 奥田浩文，蔭山満，他：Hybrid Mass Driver(HMD)の実用化に関する研究(その3)，鳥取県西部地震における「AVICS-2」の制振効果とビル揺れアンケート調査結果，大林組技術研究所報，No.63，(2001)
- 7) J.P. Den Hartog：Mechanical Vibrations，4th edition，McGraw-Hill，(1956)
- 8) 江原栄次，石丸辰治，他：安定・不安定結合型振子を利用した制振装置の開発に関する研究(その1)，日本建築学会学術講演梗概集，pp.711～712，(1995)