

転動型制振装置の自由振動における制振効果

The Effect in Reducing Free Vibration of Tuned Rotary-Mass Damper

尾畑 守夫*, 森尻 渉**, 島崎 洋治***

Morio OBATA, Wataru MORIJIRI, Yoji SHIMAZAKI

*工修, 日本コムシス株式会社, 技術研究開発センタ (〒279-0002 千葉県浦安市北栄 4-8-3)

**日本コムシス株式会社, 技術研究開発センタ (〒279-0002 千葉県浦安市北栄 4-8-3)

***工博, 東海大学教授, 工学部土木工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117)

We suggest a new mechanical vibration absorber, Tuned Rotary-Mass Damper (TRMD), which consists of the rolling mass (Rotary-Mass) and the container allowing the free movement of the mass along its inner arc. This TRMD has a simple construction and is applicable to the structure which may vibrates in higher frequency modes. The tuning of TRMD can be made by adjusting of the diameter of the Rotary-Mass and the curvature of inside the container. In this paper, the equation of reciprocal motion between TRMD and the structure is derived. Coulomb and viscous damping resulting from the movement of the Rotary-Mass are considered to describe the energy dissipation. Using a two-storied structural model, the effectiveness of TRMD is experimentally examined.

Key Words: tuned mass damper, nonlinear analysis, Coulomb damping, free vibration

1. はじめに

地震や風などによる自然の力や, 土木・建築工事や交通車両の走行などといった人間の社会活動に伴う力により, 構造物は振動する. このような動的外力による振動から構造物を守り, その安全性や居住空間の快適性を確保する有効な手段の1つとして, 制振がある. 制振手法には多くの種類があり, 分類の仕方も多様であるが, 大きく分けてパッシブ制御法とアクティブ制御法がある. また, これら2つの手法を組み合わせたハイブリッド制御法と呼ばれるものもある. パッシブ制御装置は, 構造物の揺れに応じて自然に稼動し, 振動を低減する. また, アクティブ制御装置は, 外部から供給するエネルギーを利用して振動を制御する装置で, このエネルギーの供給には電動式や油圧式などのアクチュエータを使用している.

パッシブ制御装置の代表例としては, 同調質量ダンパ (Tuned Mass Damper: 以下, TMD) があげられる. この装置は, 重り・ばね・ダンパからなる振動系で, 装置の振動数を構造物の固有振動数とほぼ等しく設定し, 構造物の振動を低減する. 重りの支持機構として積層ゴムやコイルばねを用いたもの, 振り子の原理を利用した吊り方式¹⁾, 円弧状のレールの上に重りを載せた方式²⁾, また流体を利用した液体同調ダンパ (Tuned Liquid damper: 以下, TLD)^{3)~5)}などの装置が提案され, 実構造物に適用されている.

従来のTMDは, ばねやダンパの組み合わせ機構が複雑であるため, 所定の制振性能を発揮するための保守点検が不可欠なことが多く, TLDは一般に広い設置面積を必要とする. また, これらの装置は, 主に構造物の1次固有振動の制振を目的としたものであり, 高次の振動に対処することは困難な場合が多い.

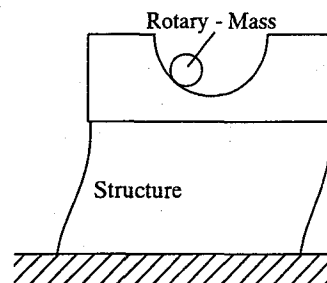


図-1 転動型制振装置と構造物

ここで提案する転動型制振装置 (Tuned Rotary-Mass Damper: 以下, TRMD)^{7)~11)}は, 転動する回転子 (転動子) と, それを受ける円弧の容器 (外殻) から構成される. 図-1 は, その概念図である. この装置には, 例えば次に示すような特長がある.

- (1) 転動子および外殻の径または曲率を変えることで, 広範囲な振動数帯域に対応できる.
- (2) 転動子が回転することで, 回転慣性質量も運動エネルギーに加えることができる.
- (3) 機械的機構を持たないシンプルな構造であり, 保守点検の作業が容易である.
- (4) 構造がシンプルのため, 装置の多分割化が容易に行える.

本研究では, TRMDの有効性を確認するため, 2層ラーメン構造模型を用いた自由振動実験および数値解析を行う. まず, TRMDの振動特性について考察し, 次に本装置を設置した2層ラーメン構造模型の自由振動応答について述べる. この振動応答については, TRMDを単独で設置した場合 (単独型) と, 多分割して設置した場合 (多分割型) とを考える. 制振効果をもたらす装置そのものの減衰機構については, TRMDのみで運動

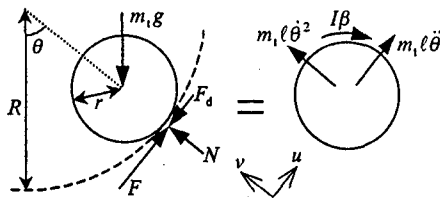


図-2 転動子の自由物体図

させた場合と、2層ラーメン構造模型に単独および多分割設置した場合のそれぞれについて、模型実験と数値解析により考察する。

2. TRMDの数値解析モデル

2.1 転動子の自由振動方程式

半径 r の転動子と、それを受ける半径 R の外殻より構成されるTRMDを考える。また、装置の減衰としては、転動子と外殻との接触面でのクーロン摩擦減衰および粘性減衰を考慮し、これらの減衰力の合力を F_d とする。このとき、転動子についての自由物体図を示すと、図-2 のようになる。

転動子はすべることなく回転し運動すると考えると、図より、 u および v 方向のつり合いの式は、次式のように表すことができる。

$$u \text{ 方向 : } m_i \ell \ddot{\theta} = F - F_d - m_i g \sin \theta \quad (1)$$

$$v \text{ 方向 : } m_i \ell \dot{\theta}^2 = N - m_i g \cos \theta \quad (2)$$

ただし、

$$F_d = \mu' N \operatorname{sgn} \dot{\theta} + C \ell \dot{\theta} \quad (3)$$

$$\operatorname{sgn} \dot{\theta} = \begin{cases} 1 & (\dot{\theta} > 0) \\ 0 & (\dot{\theta} = 0) \\ -1 & (\dot{\theta} < 0) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 m_i は転動子の質量、 $\ell = R - r$ は転動子重心の運動半径、 θ は転動子重心の振れ角、 F は外殻から受ける摩擦力、 N は垂直抗力、 g は重力加速度である。また、式(3)の右辺の第1項目はクーロン摩擦減衰項、第2項目は粘性減衰項で、 μ' はクーロン摩擦係数、 C は粘性減衰係数である。このときの回転運動の式は、次式となる。

$$-Fr = I\beta = \frac{1}{2} m_i r^2 \frac{\ell}{r} \ddot{\theta} \quad (5)$$

ただし、 $I = m_i r^2 / 2$ は円柱の慣性モーメント、 $\beta = \ell \ddot{\theta} / r$ は転動子の回転角加速度である。

式(1)、式(5)より、転動子の自由振動方程式として、次式が得られる。

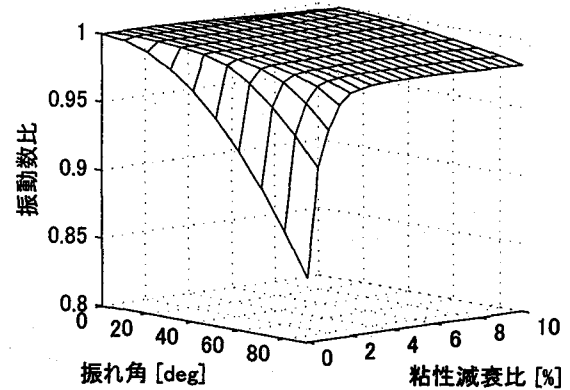


図-3 転動子の振動特性

$$\ddot{\theta} + \frac{2}{3} \mu' (\dot{\theta}^2 + \frac{g}{\ell} \cos \theta) \operatorname{sgn} \dot{\theta} + \frac{2C}{3m_i} \dot{\theta} + \frac{2g}{3\ell} \sin \theta = 0 \quad (6)$$

減衰を考慮しない場合、自由運動方程式は次式となる。

$$\ddot{\theta} + \frac{2g}{3\ell} \sin \theta = 0 \quad (7)$$

θ が微小で $\sin \theta \approx \theta$ と置けると、式(7)の固有周期 T_i (固有振動数 f_i) は、次式で与えられる。

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{3\ell}{2g}} \quad \left(f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{3\ell}} \right) \quad (8)$$

また、固有周期の厳密解 T_c は、次式となる。

$$T_c = 4 \sqrt{\frac{3\ell}{2g}} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(\theta_{\max}/2) \cdot \sin^2 \phi}} d\phi \quad (9)$$

ただし、 $\theta_{\max}$ は転動子の最大振れ角である。

転動子の自由振動時の振動特性について考察するため、初期振れ角(最大振れ角)および粘性減衰比に対する依存性を示すと、図-3 のようになる。ここで、振動数比は、各初期振れ角および粘性減衰比に対する自由振動時の振動数スペクルの最大値と固有振動数 f_i の比である。また、粘性減衰比 ξ は、次式で定義される。

$$\xi = \frac{C}{2m_i' \omega_i} \quad (10)$$

ただし、

$$m_i' = m_i + I/r^2 = \frac{3}{2} m_i \quad (11)$$

$$\omega_i = 2\pi f_i \quad (12)$$

図-3 より、減衰が存在しない ($\xi = 0$) 場合、初期振れ角の増加に伴い振動数比は低下し、初期振れ角が 90° で約0.85 となり、強い非線形性を示すことが確認できる。これに対し、減衰を考慮した場合、振動数は f_i より低くなるが、初期振れ角に対する依存性は弱まる傾向にある。

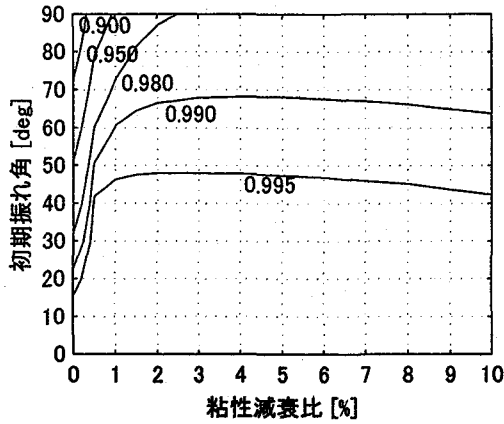


図-4 振動特性の等値線図

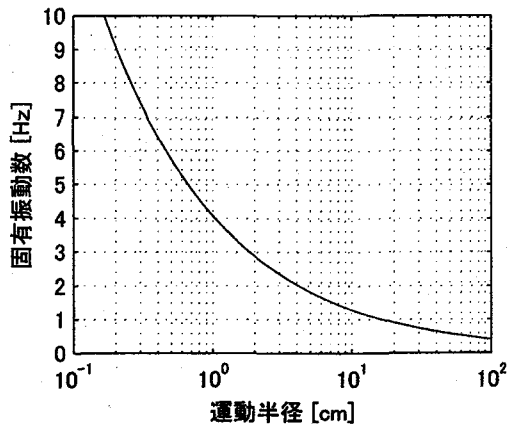


図-5 運動半径と振動数の関係

図-4 は、初期振れ角および粘性減衰比に対する振動比の等値線図である。図より、粘性減衰比が2.5%以上では、振動数比の低下率は0.02%以内に収まることがわかる。したがって、制振対象構造物との同調を考える場合の転動子の固有振動数としては、式(8)を適用すればよいものと考えられる。また、ここでの数値解析においては、装置の減衰として粘性減衰のみを考慮しているが、クーロン摩擦減衰定数の変化に対しても同様の依存性を示す。

図-5 は、運動半径 l と転動子の振動数 f_i の関係を示したものである。図より、外殻と転動子の径の組み合わせにより、広範な振動数に対応できることがわかる。

2.2 構造物とTRMDの一般化した連成運動方程式

図-6は、m層ラーメン構造物のm層部分にTRMDをn個設置した場合の数値解析モデルである。ここで、図中の M_i, c_i, k_i ($i=1 \sim m$) は、それぞれ i 層部分の質量、減衰係数、ばね定数である。また、 x_0 は地動変位、 x_i ($i=1 \sim m$) は i 層部分の変位で、右方向を正とする。 θ_j ($j=1 \sim n$) は j 番目の転動子重心の振れ角である。

図-7は、m層部分、 i ($i \neq m$) 層部分および j 番目転動子の自由物体図である。図-7(a), (b) より、m層部分および i 層部分についてのつり合いの式は、次式となる。

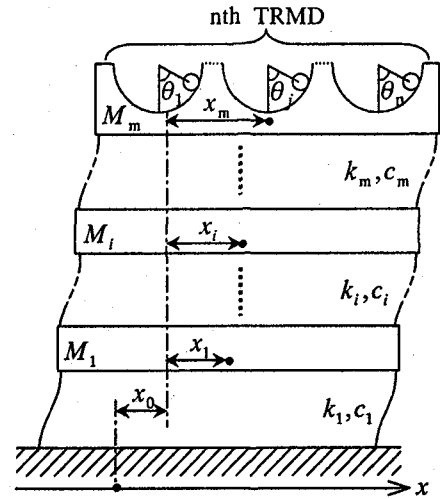


図-6 構造物とTRMDの数値解析モデル

$$c_m(\dot{x}_m - \dot{x}_{m-1}) + k_m(x_m - x_{m-1}) = M_m(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_m)$$

(a) m層部分の自由物体図

$$c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) + k_i(x_i - x_{i-1}) = M_i(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_i)$$

(b) i 層部分の自由物体図

$$m_j g \cos \theta_j + F_{tj} = m_j(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_m)$$

(c) j 番目の転動子の自由物体図

図-7 m層部分、 i 層部分と j 番目転動子の自由物体図

$$M_m(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_m) = -c_m(\dot{x}_m - \dot{x}_{m-1}) - k_m(x_m - x_{m-1}) + F_t \quad (13)$$

$$M_i(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_i) = -c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) - k_i(x_i - x_{i-1}) + c_{i+1}(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + k_{i+1}(x_{i+1} - x_i) \quad (14)$$

ただし、 F_t は n 個のTRMDより得られる制御力の合力で、 j 番目のTRMDの制御力を F_{tj} とすると、次式となる。

$$F_t = \sum_{j=1}^n F_{tj} \quad (15)$$

また、図-7(c)より、 j 番目の転動子の u および v 方向に関するつり合いの式および回転運動の式は、次式で与えられる。

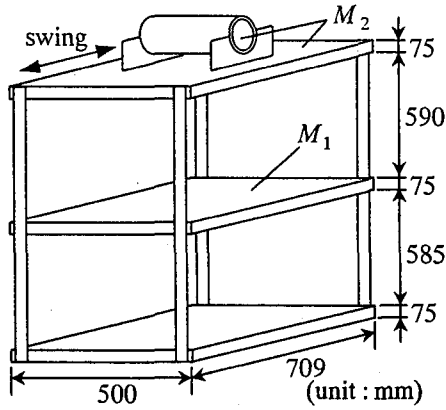


図-8 2層ラーメン構造模型概要図

$$u \text{ 方向: } m_y \ell_j \ddot{\theta}_j + m_y (\ddot{x}_0 + \ddot{x}_m) \cos \theta_j = F_j - F_{\phi_j} - m_y g \sin \theta_j \quad (16)$$

$$v \text{ 方向: } m_y \ell_j \dot{\theta}_j^2 - m_y (\ddot{x}_0 + \ddot{x}_m) \sin \theta_j = N_j - m_y g \cos \theta_j \quad (17)$$

$$-F_j r_j = I_j \beta_j = \frac{1}{2} m_y r_j^2 \frac{\ell}{r_j} \ddot{\theta} \quad (18)$$

このとき、式(16)、式(18)より、 j 番目転動子の運動方程式は、次式で与えられる。

$$\ddot{\theta}_j + \frac{2}{3} \cdot \frac{F_{\phi_j}}{m_y \ell_j} + \frac{2}{3} \cdot \frac{g}{\ell_j} \sin \theta_j + \frac{2}{3} \cdot \frac{\ddot{x}_0 + \ddot{x}_m}{\ell_j} \cos \theta_j = 0 \quad (19)$$

また、外殻から受ける摩擦力 F_j および垂直抗力 N_j は、それぞれ次式となる。

$$F_j = \frac{1}{3} \{ F_{\phi_j} + m_y g \sin \theta_j + m_y (\ddot{x}_0 + \ddot{x}_m) \cos \theta_j \} \quad (20)$$

$$N_j = m_y g \cos \theta_j + m_y \ell_j \dot{\theta}_j^2 - m_y (\ddot{x}_0 + \ddot{x}_m) \sin \theta_j \quad (21)$$

式(20)、式(21)を用いると、TRMDの制御力 F_{ϕ_j} は、次式のように表される。

$$F_{\phi_j} = -(F_j - F_{\phi_j}) \cos \theta_j + N_j \sin \theta_j \quad (22)$$

したがって、式(20)～(22)より、 F_{ϕ_j} は次式となる。

$$F_{\phi_j} = \sum_{j=1}^n \{ F_{\theta_j} - m_{\theta_j} (\ddot{x}_0 + \ddot{x}_m) \} \quad (23)$$

ただし、

$$F_{\theta_j} = (\sin \theta_j + \frac{2}{3} \mu'_j \operatorname{sgn} \dot{\theta}_j \cos \theta_j) N'_j + \frac{2}{3} C_j \ell_j \cos \theta_j \cdot \dot{\theta}_j - \frac{1}{3} m_y g \sin \theta_j \cos \theta_j \quad (24)$$

$$N'_j = m_y \ell_j \dot{\theta}_j^2 + m_y g \cos \theta_j \quad (25)$$

$$m_{\theta_j} = m_y \left(1 - \frac{2}{3} \cos^2 \theta_j + \frac{2}{3} \mu'_j \operatorname{sgn} \dot{\theta}_j \sin \theta_j \cos \theta_j \right) \quad (26)$$

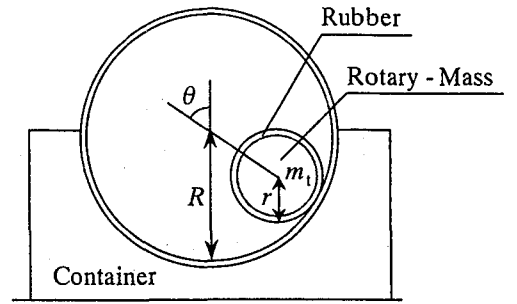


図-9 TRMD概要図

これらの式を整理すると、 m 層ラーメン構造物と n 個のTRMDの連成運動方程式として、次式が求まる。

$$\begin{cases} \ddot{x}_m = \frac{-1}{M'_m} \left\{ c_m (\dot{x}_m - \dot{x}_{m-1}) + k_m (x_m - x_{m-1}) - \sum_{j=1}^n F_{\theta_j} \right\} - \ddot{x}_0 \\ \vdots \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} \ddot{x}_i = \frac{-1}{M_i} \left\{ c_i (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) + k_i (x_i - x_{i-1}) - c_{i+1} (\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) - k_{i+1} (x_{i+1} - x_i) \right\} - \ddot{x}_0 \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_j = -\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{m_y \ell_j} (\mu'_j N'_j \operatorname{sgn} \dot{\theta}_j + C_j \ell_j \dot{\theta}_j) - \frac{2}{3} \cdot \frac{g}{\ell_j} \sin \theta_j \\ - \frac{2}{3} \cdot \frac{\cos \theta_j - \mu'_j \operatorname{sgn} \dot{\theta}_j \sin \theta_j}{\ell_j} (\ddot{x}_0 + \ddot{x}_m) \end{cases} \quad (29)$$

ただし、

$$M'_m = M_m + \sum_{j=1}^n m_{\theta_j} \quad (30)$$

数値解析においては、式(27)～(29)で示した連成運動方程式に対し、4次のルンゲ・クッタ法¹²⁾を適用して解析を行った。

3. 模型実験

3.1 2層ラーメン構造模型

図-8に、実験で使用した2層ラーメン構造模型の概要図を示す。この模型は、支柱材としてPL-60×4.5の鋼材を使用しており、一方向にのみせん断型の振動をする。

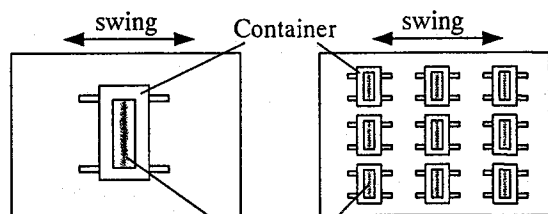
装置外殻質量を構造模型質量として考慮した場合、2層部分および1層部分の質量は、それぞれ $M_2 = 33.03 \text{ kg}$ 、 $M_1 = 38.35 \text{ kg}$ である。また、FFTアナライザで測定した構造模型の1次および2次の固有振動数は、それぞれ $f_1 = 2.435 \text{ Hz}$ 、 $f_2 = 6.295 \text{ Hz}$ となった。

3.2 TRMD

実験で用いたTRMDの概要図を図-9に示す。実験では、転動子外周をゴム素材（ブチルゴム、厚さ1mm）で被覆し、ゴムの粘弾性減衰を装置減衰として利用してある。

表-1 TRMDの諸元

	r [cm]	m_i [kg]	R [cm]	f_i [Hz]	μ	γ
単独型	2.08	0.722	5.00	2.428	0.0144	0.997
多分割型	1.30	0.081	4.14	2.498	0.0144	1.026



(a) 単独型 Rotary-Mass (b) 多分割型

図-10 TRMDの設置状態

また、複数個の装置を設置した多分割型TRMDの制振効果についても検証するため、図-10に示すように9個のTRMDを設置した場合についても実験を行う。このとき、多分割型の装置外殻の総質量は、単独型の外殻質量と等しいものとした。

単独型および多分割型TRMDの諸元を表-1に示す。本装置は、構造模型の1次固有振動モードを制振対象としている。ここで、 μ は構造模型の1次固有振動モードの有効質量に対する転動子の質量（多分割型は転動子9個の合計質量）の比で、0.0144となっている。また、 γ は制振対象振動数に対する転動子の固有振動数の比で、ここでは構造模型の1次固有振動数とほぼ等しくなるように設定している。ただし、転動子の軌道安定化のため、転動子に溝（幅3mm、深さ10mm）を入れ、外殻側には溝に合わせたレールを設けている。これにより、前章での転動子の自由振動方程式の導出において、式(5)における慣性モーメントの値が変わるため、表中の f_i の値は、溝による慣性モーメントの補正を考慮したものとなっている。

パッシブ型の制振装置の場合、装置を適用することで得られる付加減衰効果は μ の大きさに依存し、最大の制振効果を得るには、 γ および ξ を最適に設計する必要がある。

3.3 測定方法

実験では、構造模型の並進運動および転動子の外殻内での回転運動を測定した。測定方法として、図-11に示すように、外殻上の点A（■印）、転動子の重心B（○印）および転動子側面上の点C（●印）につけたマーカーの動きをCCDカメラで撮影し（サンプリング時間：1/30 sec）、画像処理により各マーカーの座標を算出した。これらの座標値をもとに、構造模型の2層部分の変位 x_2 、転動子の重心の振れ角 θ および回転角 φ を得ることができる。ここで、多分割型を設置した場合は、図-10(b)において3×3の格子状に設置した装置のうち、最下段中央に設置されているものについてのみ測定を行った。

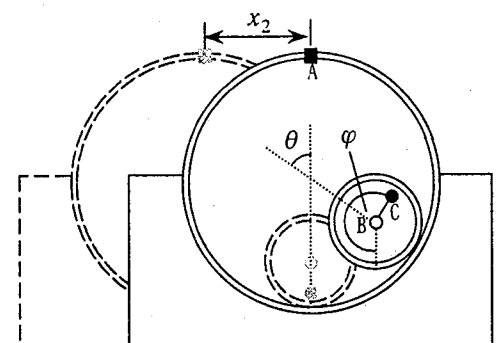
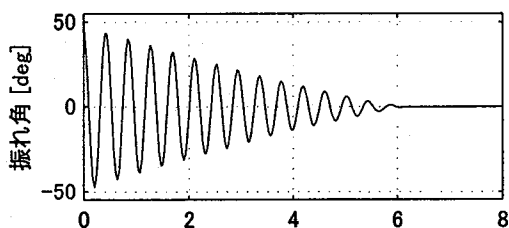
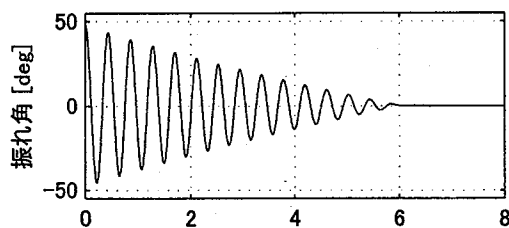


図-11 測定点および測定物理量

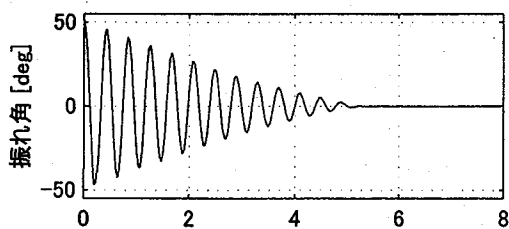


(a) 実験結果

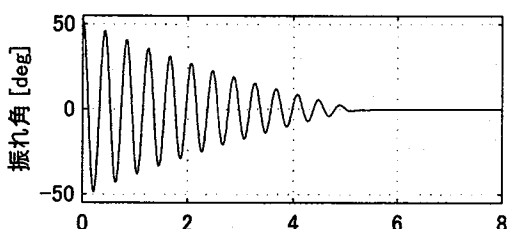


(b) 数値解析結果

図-12 単独型転動子の自由振動

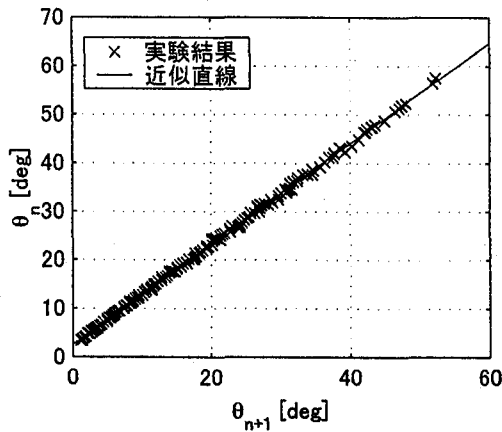


(a) 実験結果

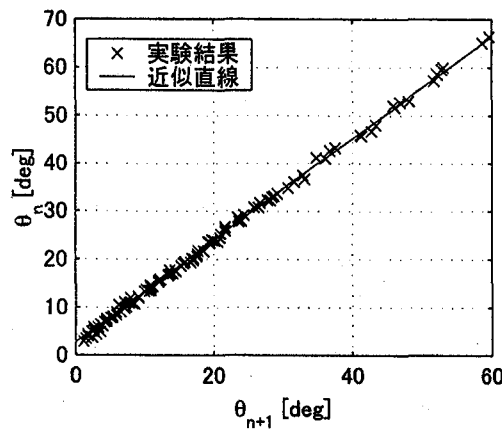


(b) 数値解析結果

図-13 多分割型転動子の自由振動



(a) 単独型



(b) 多分割型

図-14 転動子振れ角のピーク値のプロット

4. 転動子の自由振動実験と数値解析

4.1 実験方法

装置外殻は安定したところに固定し、転動子を外殻内面に沿って適当な角度まで持ち上げ、初期の振れ角を与えた。その状態から転動子を開放し自由振動をさせ、そのときの振れ角の時間変化を測定した。

4.2 実験結果および数値解析

図-12に、単独型転動子の自由振動の測定波形および数値解析結果を示す。同様に、図-13に、多分割型転動子の自由振動の測定波形および数値解析結果を示す。

数値解析においては、ゴムの粘弾性減衰をクーロン摩擦減衰および粘性減衰の合力に等価的に置き換えて取り扱っている。数値解析で用いた単独型および多分割型のTRMDのパラメータを表-2に示す。単独型および多分割型ともに、数値解析結果と実験結果は良い一致を示していることがわかる。

図-14は、自由振動波形の正の値のピーク値に対し、 $(\theta_{n+1}, \theta_n), (\theta_{n+2}, \theta_{n+1}), \dots$ のように隣接するピーク値のデータの組をプロットしたものである。図に示すように、

表-2 TRMDの自由振動の数値解析パラメータ

単独型TRMD	多分割型TRMD
$m_1 = 0.722\text{kg}$	$m_1 = 0.081\text{kg}$
$R = 5.00\text{cm}, r = 2.08\text{cm}$	$R = 4.14\text{cm}, r = 1.30\text{cm}$
$\mu' = 0.0118$	$\mu' = 0.0129$
$C = 0.0776\text{kg/sec}$	$C = 0.0175\text{kg/sec}$
$\xi = 0.002443$	$\xi = 0.004953$
$\theta_0 = 47.95\text{deg}$	$\theta_0 = 51.70\text{deg}$
$\dot{\theta}_0 = 0.41\text{deg/sec}$	$\dot{\theta}_0 = 6.47\text{deg/sec}$

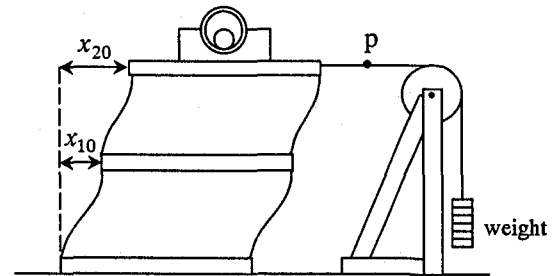


図-15 自由振動実験概要図

クーロン摩擦減衰と粘性減衰が複合して作用する場合には、隣接するピーク値の組は直線で近似でき、この直線の切片および傾きから、クーロン摩擦減衰係数 μ' と粘性減衰比 ξ が推定できる¹³⁾。近似直線の切片を a 、傾きを b とした場合、これらの関係は次式ようになる。

$$\mu' = \frac{a}{4} \cdot \frac{\pi}{180} \quad (31)$$

$$\xi = \frac{\log_e b}{2\pi} \quad (32)$$

表-2に示した減衰パラメータは、上式を用いて近似直線から評価した値である。

ここで、多分割型のほうが単独型に比べ、 μ' と ξ がともに大きくなっている。これは、転動子が運動する際のゴムの粘弾性特性が、単独型と多分割型とで異なっていることが主な原因と考えられる。

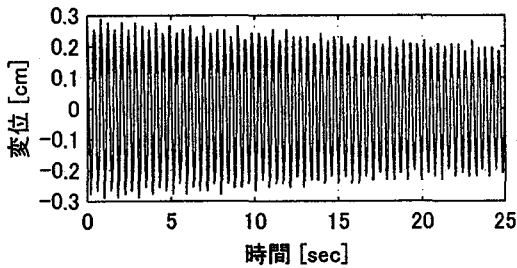
5. 構造模型の自由振動実験および数値解析

5.1 実験方法

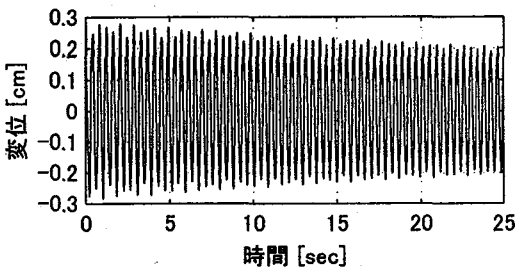
図-15に示すように、構造模型を床面に固定し、2層部分に初期変位を与え、p点を切断することで自由振動させた。このときの構造模型2層部分の変位および転動子の振れ角の時間変化を測定した。本装置は非線形性を有しており、初期変位に応じて転動子の応答も変化することが予想される。このため、約1kgの重錘の载荷個数を3～12個まで変えて初期変位を与えている。単独型と多分割型を設置した構造模型に対し、载荷した重錘個数と各層の初期変位の関係を表-3に示す。

表-3 重錘個数と各層の初期変位の関係

重錘個数	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
x_{10} [cm]	0.14	0.19	0.23	0.27	0.31	0.37	0.42	0.46	0.51	0.58
x_{20} [cm] (単独型)	0.29	0.39	0.48	0.56	0.65	0.74	0.85	0.88	1.00	1.04
x_{20} [cm] (多分割型)	0.30	0.38	0.48	0.56	0.66	0.77	0.86	0.94	1.05	1.15



(a) 実験結果



(b) 数値解析結果

図-16 構造模型の自由振動

表-4 構造模型の自由振動の数値解析パラメータ

$M_1 = 38.35\text{kg}$	$M_2 = 33.03\text{kg}$
$k_1 = 2.0813 \times 10^4 \text{ kg/sec}^2$	$k_2 = 2.2281 \times 10^4 \text{ kg/sec}^2$
$c_1 = 2.6086 \text{ kg/sec}$	$c_2 = 0.6782 \text{ kg/sec}$
$x_{10} = 0.14 \text{ cm}$	$\dot{x}_{10} = 0.00 \text{ cm/sec}$
$x_{20} = 0.29 \text{ cm}$	$\dot{x}_{20} = 0.00 \text{ cm/sec}$

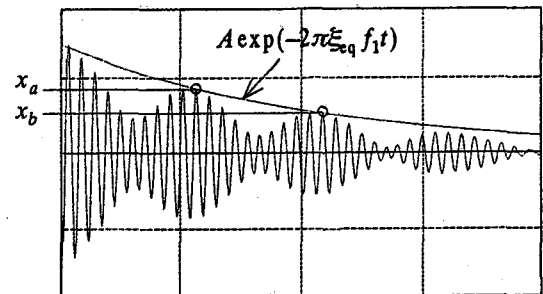


図-18 制振効果の評価方法

5.2 実験結果および数値解析

(1) 非制振時の自由振動

まず、構造模型自体の振動特性を把握するため、転動子を付加しない非制振状態での自由振動実験を行った。図-16に、単独型装置外殻のみを設置し、3個の重錘を載荷して初期変位を与えたときの構造模型変位の測定波形および数値解析結果を示す。

実験で得られた構造模型の自由振動波形より評価した対数減衰率は0.49%であり、構造模型自体の減衰は非常に小さいことがわかる。

図-16(b)は、数値解析の結果である。このとき用いたパラメータおよび初期条件は、表-4に示すとおりである。数値解析結果は、実験結果と良い一致を示している。他の初期変位を与えた場合においても同様の結果が得られた。したがって、以下の解析においても、構造模型のパラメータとしては同じ値を採用する。

(2) 制振時の自由振動の実験結果

構造模型に設置した装置に転動子を付加して、自由振動実験を行った。この際に、重錘を載荷して構造模型に初期変位を与えた後、転動子が装置外殻底部で静止した状態から自由振動をさせている。構造模型の初期変位を変えて自由振動させたときの2層部分の変位および転動子の振れ角の測定波形を図-17に示す。

測定波形は、単独型と多分割型ともにうなりを伴った減衰振動となっている。これについて考察すると、単独

型TRMDを設置したときの振動モデルは、2自由度系の構造模型と1自由度系のTRMDの連成系となる。この連成系の固有振動モードは3つ存在し、そのうち2つの固有振動モードは近接した固有振動数となっている。ここで、TRMDの減衰が大きいときは、この2つの振動モードは強い1自由度系的特性を持ったモードとして振舞うが、実験で使用したTRMDは減衰が小さかったため、振動波形に大きなうなりが生じたものと考えられる。多分割型TRMDにおいても、各装置のパラメータは等しく設定しており、基本的には同様の理由でうなりが生じているものと考えられる。

制振効果の評価としては、測定波形の減衰を1自由度系における等価減衰比として評価し、これを対数減衰率で表す。このため、図-18に示すように、隣接するうなりの腹付近のピークを用いて等価的な減衰比 ξ_{eq} を評価し、両ピークの間変位 x_{ab} での対数減衰率を次式により定義した。

$$\delta(x_{ab}) = 2\pi\xi_{eq} \times 100 [\%] \quad (33)$$

図-19は、対数減衰率の変位特性を示したものである。単独型および多分割型ともに、構造模型変位が約0.5cmより大きい領域で対数減衰率が急激に増加している。これは初期変位が0.65cm以上の場合に得られた対数減衰率で、初期発生加速度が大きいため、転動子の最大振れ角付近ですべりが生じ、更なるエネルギーの散逸が起こった

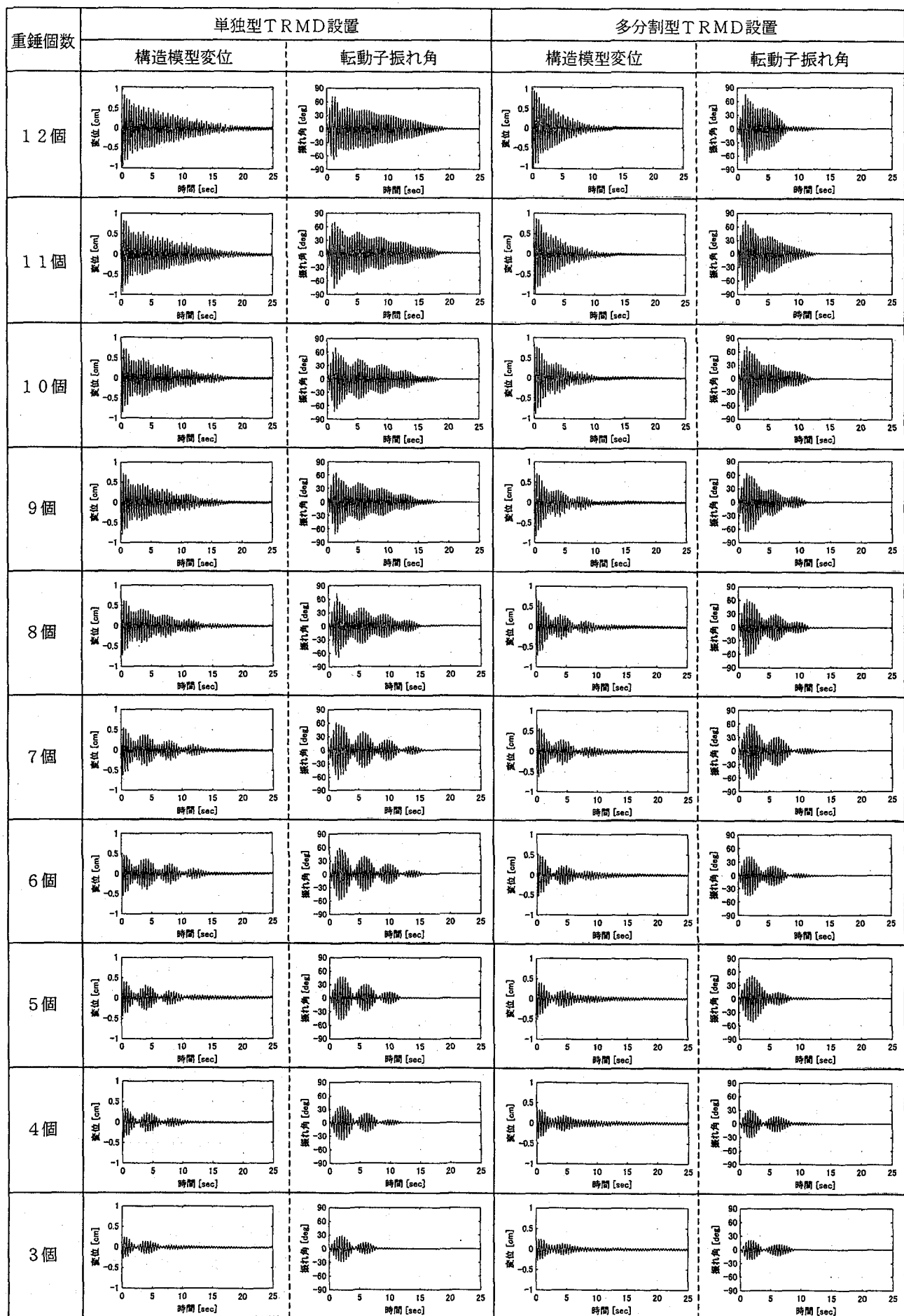


図-17 構造模型の自由振動の測定波形

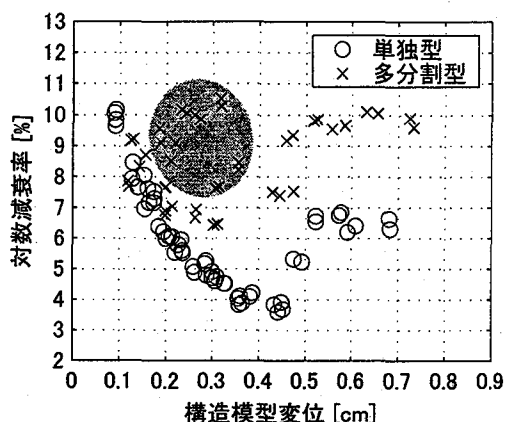


図-19 対数減衰率の変位特性

表-5 TRMD設置時の構造模型自由振動の数値解析パラメータ

単独型 TRMD	多分割型 TRMD
$\mu' = 0.0089$	$\mu' = 0.0105$
$C = 0.0726 \text{ kg/sec}$	$C = 0.0284 \text{ kg/sec}$
$\xi = 0.002284$	$\xi = 0.008012$

ものと考えられる。これを測定した転動子の振れ角の波形に着目してみると、初期変位が0.56cm以下のときは転動子の応答も滑らかであるのに対し、これ以上のときでは最初のうなりのピーク付近での振れ角の変化が急激であることがわかる。また、初期変位に対する転動子の最大振れ角をプロットすると図-20のようになり、最大振れ角の増加が、初期変位が0.65cmのあたりから穏やかになっている様子が見える。以上のことから、初期発生加速度が大きいときには、転動子にすべりが生じていることが確認できる。

変位が約0.5cm以下の領域において、単独型では対数減衰率に強い変位依存性があることが確認できる。これに対し、多分割型を設置した場合は、値にばらつきが見られる。ここで、図中の●部にプロットされている点は、初期変位が0.66cm以上の自由振動波形から評価した点で、この領域においてもすべりによる影響があることが予想される。変位が約0.3cm以下ですべりがなかったときの自由振動波形から評価した対数減衰率においては、多分割型でも変位に対する依存性が見られる。また、変位が約0.2cm以上の領域においては、単独型に比べ高い対数減衰率が得られている。図-17においても、同じ载荷個数での測定波形を比較した場合、多分割型のほうがはやく揺れが抑制されていることがわかる。

対数減衰率の最大値は、単独型で10.17%となっている。また、多分割型を設置した場合は、最大で10.54%が得られている。ただし、すべりがなかったときの最大値は、9.23%となる。非制振時の構造模型の対数減衰率は0.49%であり、

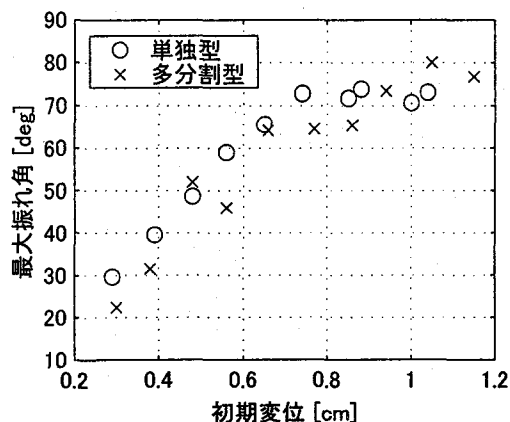


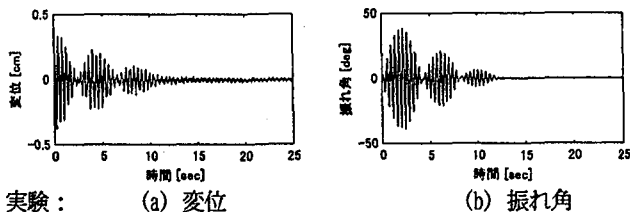
図-20 構造模型初期変位と転動子最大振れ角の関係

単独型および多分割型ともに本装置による制振効果が確認できる。

(3) 制振時の自由振動の数値解析結果

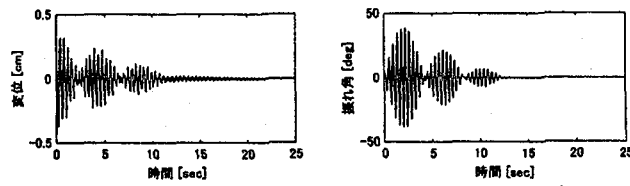
2.2 で導出した構造模型とTRMDの連成運動方程式においては、転動子のすべりの影響を考慮していないため、ここでは载荷重錘が6個以下での自由振動についてのみ数値解析を行った。単独型および多分割型TRMDを設置し、重錘を4個および6個载荷した場合について、構造模型の変位および転動子の振れ角に対する実験結果と数値解析の結果を図-21～24に示す。数値解析におけるTRMDのクーロン摩擦係数および粘性減衰係数としては、表-5に示すパラメータを使用した。構造模型およびTRMDに関するその他のパラメータは、前出した数値解析と同じ値を用いており、構造模型の初期変位についても、表-3に示した値を使用している。また、多分割型については、各装置のパラメータはすべて等しいものと仮定して解析した。

表-5に示したパラメータは、数値解析実験により求めたものであり、単独型および多分割型ともに、表-2に示したTRMDの自由振動波形より評価した値と異なっている。本解析においては、ゴムの粘弾性減衰をクーロン摩擦減衰と粘性減衰の合力として取り扱っている。しかし、実際には、ゴムの粘弾性減衰の動的性質は外殻との接触部分におけるゴムのたわみ量やその振動数に依存し変化するものであり、転動子のみの自由振動実験時と構造模型に設置したときの自由振動実験時とは、転動子に作用する外力や回転速度が異なっているため、減衰パラメータに違いが生じたものである。ゴムの粘弾性減衰を正確に取り扱うには、ゴム素材の粘弾性特性試験も含めて評価する必要がある。理論的には、例えば分数階微分フォークトモデル¹³⁾などで記述する方法がある。ただし、図からもわかるように、適切な減衰パラメータの選択により、実験結果と数値解析結果との整合性は得られており、導出した理論式の妥当性は示されているものと考えられる。



実験： (a) 変位

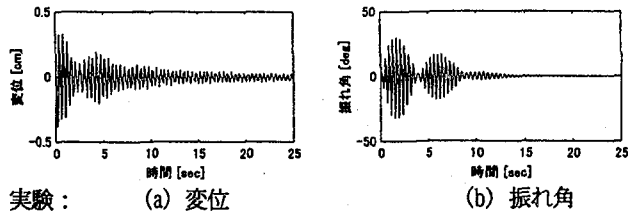
(b) 振れ角



数値解析： (a) 変位

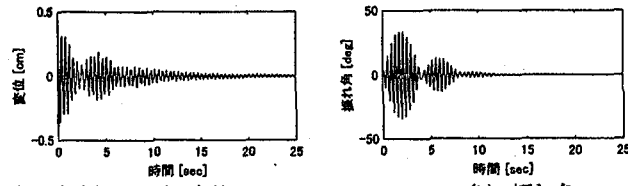
(b) 振れ角

図-21 単独型設置、重錘4個載加時の自由振動



実験： (a) 変位

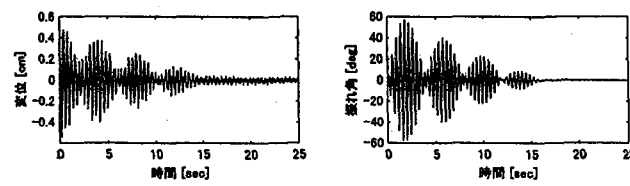
(b) 振れ角



数値解析： (a) 変位

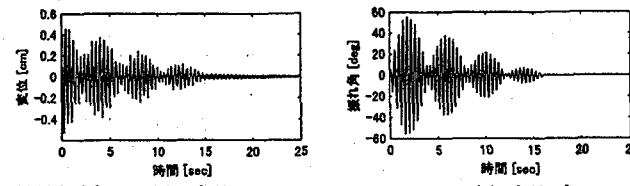
(b) 振れ角

図-23 多分割型設置、重錘4個載加時の自由振動



実験： (a) 変位

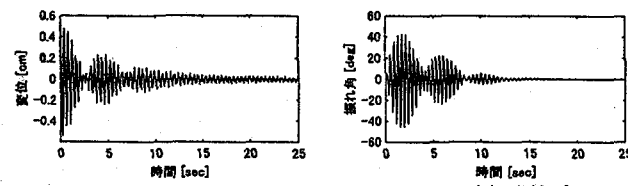
(b) 振れ角



数値解析： (a) 変位

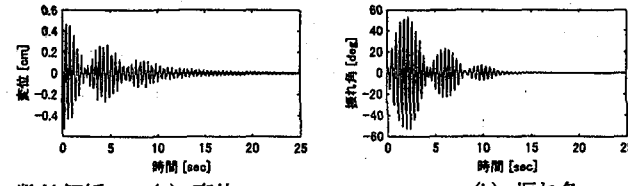
(b) 振れ角

図-22 単独型設置、重錘6個載加時の自由振動



実験： (a) 変位

(b) 振れ角



数値解析： (a) 変位

(b) 振れ角

図-24 多分割型設置、重錘6個載加時の自由振動

6. まとめ

提案した転動型制振装置 (TRMD) の基本的な制振効果を確認するため、2層ラーメン構造模型を用いた自由振動実験を行った。TRMDは、単独で設置した場合 (単独型) と、9個の装置を多分割設置した場合 (多分割型) について検証した。また、構造物とTRMDの非線形連成運動方程式を導出し、実験結果との比較を行った。

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 自由振動実験においては、単独型設置時の構造模型の対数減衰率に、強い変位依存性が見られた。
- (2) 初期変位が大きいときには、単独型および多分割型ともに転動子にすべりが発生し、このすべりによる振動エネルギーの散逸によって、TRMDの制振効果が増加する傾向が見られた。
- (3) 実験を通じて、単独型および多分割型ともに、非制振時よりも大きな対数減衰率が得られており、本装置の制振効果を確認した。

(4) 多分割型TRMDについては、単独型よりも高い制振効果が得られており、制振性能の向上や、微小振幅に対する応答性の向上などが期待できるものと考えられる。

(5) 模型実験で転動子にすべりが生じない初期変位における数値解析を行い、単独型および多分割型ともに実験結果との良い整合性を確認した。これより、導出した連成運動方程式とその数値解析プログラムの作成により、有効な制振効果を持つ装置の設計が可能であることを示した。

本装置は、従来のパッシブ型制振装置 TMD とは異なり、装置自体が非線形性を有している。したがって、本装置を構造物に適用する場合、その非線形特性を十分に把握し、設計に反映させる必要がある。今回の実験は、本装置の基本的な制振効果の確認と、理論式の妥当性の検証を主目的としたものであり、装置の質量比、同調比および粘性減衰比のパラメータが制振効果に及ぼす影響や最適設計についての検討は、調和外力振動の場合も含め、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 寺元博昭, 佐野信一郎, 長井正嗣, 奥井義昭: 花岬大橋(斜張橋)主塔のTMDによる制振対策, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.36A, pp.1129-1140, 1990.
- 2) 成瀬輝男, 木本公平, 平島寛, 樋上琇一: 主塔制御装置の開発, 石川島播磨重工技報 25, 6, pp.393-398, 昭和60年.
- 3) Fujino, Y., Pacheco, B. M., Chaiseri, P. and Sun, L. M. : Parametric Studies on Tuned Liquid Damper (TLD) Using Circular Tanks by Free-oscillation Experiments, *Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE.*, No.398, pp.177-187, Oct, 1988.
- 4) Sun, L. M., Fujino, Y., Pacheco, B. M., and Isobe, M. : Nonlinear Waves and Dynamic Pressures in Rectangular Tuned Liquid Damper (TLD) -Simulation and Experimental Verification-, *Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE.*, No.410, pp.251-262, Oct, 1989.
- 5) Chaiseri, P., Fujino, Y., Pacheco, B. M. and Sun, L. M. : Interaction of Tuned Liquid Damper (TLD) and Structure -Theory, Experimental Verification and Application-, *Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE.*, No.410, pp.273-282, Oct, 1989.
- 6) Fujino, Y., Sun, L. M., Pacheco, B. M. and Chaiseri, P. : Tuned Liquid Damper (TLD) for Suppressing Horizontal Motion of Structure, *Journal of Engineering Mechanics.*, ASCE., Vol.118, No.10, Oct, 1992.
- 7) 近藤隆行, 佐伯秀, 島崎洋治: 転動型制震装置に関する基礎的研究, 土木学会第25回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.146-147, 1998.
- 8) 佐伯秀, 森尻渉, 島崎洋治: 強制振動に対する転動型制震装置の有効性に関する研究, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, pp.930-931, 1998.
- 9) 佐伯秀, 尾畑守夫, 島崎洋治: 1自由度系せん断型ラーメン構造模型に対する転動型制震装置の数値シミュレーション, 土木学会第26回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.102-103, 1999.
- 10) 尾畑守夫, 佐伯秀, 島崎洋治: 転動型制震装置の非線形性を考慮した理論およびシミュレーション, 土木学会第26回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.104-105, 1999.
- 11) 尾畑守夫, 森尻渉, 佐伯秀, 島崎洋治: 複数個設置した転動型制震装置の制振効果, 土木学会第27回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.26-27, 2000.
- 12) Inman, D. J. : *Engineering Vibration*, Prentice Hall International Editions, 1996.
- 13) 社団法人日本機械学会編: 振動のダンピング技術, 養賢堂発行株式会社, 1998.

(2000年9月14日受付)