

衝撃質量ダンパ (IMD) の衝撃力緩和に関する研究

Study for reducing impact force of Impact Mass Damper

小川 一志*

Kazushi Ogawa

*工博, 和歌山工業高等専門学校教授, 環境都市工学科 (〒644-0023 御坊市名田町野島 77)

An Impact Mass Damper (IMD) is a simple damping device which consists of a weight and a cushion attached on a tower. It utilizes energy dissipation due to collision between the weight and the cushion on the tower. Considering damping capacity of the IMD depends on the collision, the impact force caused by collision cannot be neglected and it may have a bad effect on habitability of the tower. This paper proposes the new IMD idea which has the lower impact force and the enough damping capacity to suppress the harmful vibration, by investigating the vibration characteristics of the cushion.

Key Words: Impact Mass Damper, impact force, cushion

キーワード: 衝撃質量ダンパ, 衝撃力, 緩衝材

1. はじめに

衝撃質量ダンパ (以下 IMD と記す) は吊材に支持された重錘と塔状構造物に付設された緩衝材から構成されており, 重錘と緩衝材との衝突によって塔状構造物の振動を減衰させる装置である^{1)~3)}. IMD に外観上よく似た装置として TMD があるが, TMD では重錘を塔状構造物と衝突させることなく共振させて, 重錘の運動エネルギーを緩衝材ではなく, ダンパ (油圧ダンパ, 高減衰材等) の作動によって熱エネルギーに散逸させる^{1)~2)}. 重錘の動きについてみると, TMD では重錘の慣性力に依存しているのに対し, IMD では重錘と緩衝材 (塔状構造物) との衝突によって重錘と塔状構造物との相対位置がコントロールされる. IMD の重錘は塔状構造物の不規則な動きにも追従することが容易となる. このように, IMD の付加減衰性能は重錘と緩衝材の衝突に拠っており, 衝撃力の存在は IMD にとって不可欠であるとともに, 使用性を制約する課題ともなっている^{2),4),5)}. 従来, IMD の衝撃力は衝突部の

緩衝材によって緩和されるものとして扱われている. 他方, IMD による付加減衰は, 重錘と塔状構造物との間の質量比, 振動数比および反発係数によって決定されるが, 反発係数の値は緩衝材の振動特性に依存している. すなわち, 緩衝材は IMD の衝撃力と付加減衰性能の両方に関与し, IMD の性能を左右する重要な働きをしている. 本稿では, 重錘が緩衝材と衝突するときの滞留時間と反発係数が各々緩衝材のバネ定数と減衰定数に対応することを明らかにし, 緩衝材のバネ定数と減衰定数の調整によって, 衝撃力緩和と付加減衰の確保を両立させることの可能性について検討を行う.

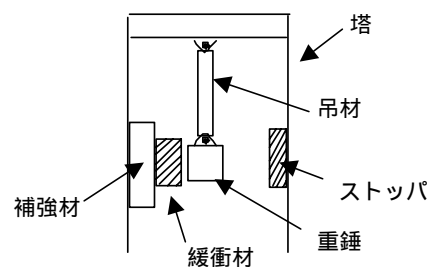


図-1 IMD の機構

2. IMD の振動解析

2.1 IMD 付き塔の振動解析

IMD を設置した塔状構造物を図-2 のようにモデル化するとき、塔状構造物と重錘 (IMD) の運動方程式は次式で与えられる⁶⁾。

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{m}{M}\right)\ddot{x} + 2h_s\omega_s\dot{x} + \omega_s^2x \\ + \frac{ml}{M}\ddot{\theta}\cos\theta - \frac{ml}{M}\dot{\theta}^2\sin\theta = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} + 2h_d\omega_d\dot{\theta} + \omega_d^2\sin\theta + \frac{\ddot{x}}{l}\cos\theta - \frac{\dot{x}\dot{\theta}}{l}\sin\theta = 0 \quad (2)$$

ここに、 M, m は塔と重錘の一般化質量、 h_s, h_d は塔と重錘の減衰定数、 ω_s, ω_d は塔と重錘の角振動数、 x は塔変位、 θ は重錘の角変位、 l は重錘の振り長である。

さらに、重錘と衝突する緩衝材を次のように評価する。

(評価法1) 緩衝材を剛体としてモデル化

剛体同士の衝突時における反発係数および運動量保存則の関係を適用する。すなわち、

$$\dot{x}' - \dot{y}' = -e(\dot{x} - \dot{y}) \quad (3)$$

$$M\dot{x}' + m\dot{y}' = M\dot{x} + m\dot{y} \quad (4)$$

ただし、

$$\dot{y} = l\dot{\theta} \quad (5)$$

ここに $\dot{x}, \dot{y}$ は衝突前の塔状構造物と重錘の速度、 $\dot{x}', \dot{y}'$ は衝突後の塔状構造物と重錘の速度、 M, m は塔状構造物と重錘の一般化質量、 e は反発係数を示す。

(評価法2) 緩衝材をバネとダッシュポットでモデル化

重錘と緩衝材との関係を図-3 のように考える。

a. 重錘が緩衝材から離れているとき ($y > x$)

重錘の減衰係数: c_p , 重錘のバネ定数: k_p (6)

b. 重錘が緩衝材と衝突し、めり込んでいるとき ($y \leq x$)

重錘の減衰係数: $c_p + c_c \approx c_c$ ($c_p \triangleleft c_c$ と仮定)

重錘のバネ定数: $k_p + k_c \approx k_c$ ($k_p \triangleleft k_c$ と仮定) (7)

ここに、 c_p, c_c は振子と緩衝材の減衰係数、 k_p, k_c は

振子と緩衝材の換算バネ定数、 y は重錘の変位である。

式(1)～式(5)、または、式(1),(2),(6),(7)に、Runge-Kutta の方法を適用し、時間きざみ Δt の前進積分を行って

$x_j, \dot{x}_j, \theta_j, \dot{\theta}_j$ から $x_{j+1}, \dot{x}_{j+1}, \theta_{j+1}, \dot{\theta}_{j+1}$

を順次求めていく⁶⁾。

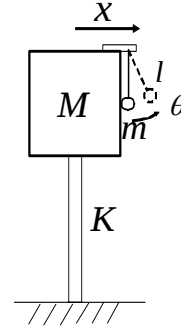
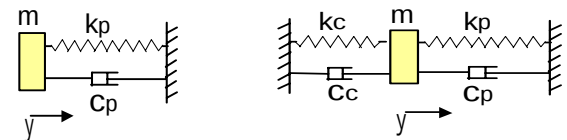


図-2 IMD 付き塔振動系のモデル化



$y > x$

$y \leq x$

図-3 重錘と緩衝材の振動モデル

2.2 緩衝材の振動特性に関する理論的検討

式(7)の関係から、緩衝材を図-4 に示すようなバネとダッシュポットの組合せでモデル化し、衝突時 ($y \leq x$) における重錘の変位を図-5 のように想定する。ただし、 m は重錘質量、 k_c は緩衝材のバネ定数、 c_c は緩衝材の減衰

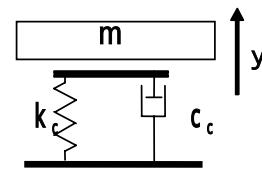


図-4 緩衝材のモデル化 ($y \leq x$)

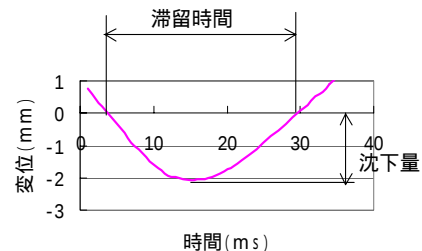


図-5 衝突時における重錘の変位 ($y \leq x$)

係数, ΔT は重錘が緩衝材にめり込んで一体となる時間 (滞留時間), ω は角振動数, A は重錘が緩衝材にめり込む深さ (沈下量) を示す. 重錘を支持する振子振動系のバネ定数と減衰係数は, 緩衝材のバネ定数と減衰係数と一体として計測されるが, その値は相対的に小さく無視することとする. また, 緩衝材可動部の質量は重錘の質量に比べて微小として無視することとする.

このとき,

$$2\Delta T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\omega_c \sqrt{1-h_c^2}} \approx 2\pi/\omega_c = 2\pi \sqrt{m/k_c} \quad (8)$$

すなわち,

$$k_c \approx m(\pi/\Delta T)^2 \quad (9)$$

また, 重錘が緩衝材に衝突し, 両者が一体となって変位するときの動きを

$$y = -A \sin \omega t \quad (10)$$

とすると, ダッシュポットによる 1/2 周期当りの仕事 (エネルギー損失) は次式ようになる.

$$\begin{aligned} \Delta W &= \frac{1}{2} \oint c_c \frac{dy}{dt} dy = \int_0^\pi c_c \frac{dy}{dt} \frac{dy}{dt} dt \\ &= \int_0^\pi c_c A^2 \omega^2 \cos^2 \omega t dt = \frac{1}{2} \pi c_c A^2 \omega \end{aligned} \quad (11)$$

他方, 衝突直前速度を V_1 , 衝突直後速度を V_2 とするとき, 衝突に伴うエネルギー損失は次式で与えられる.

$$\Delta W = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (12)$$

図-5 のように重錘が緩衝材にめり込んで一体となる滞留時間は重錘-バネ-ダッシュポット振動系の 1/2 周期に等しいとみなすとき, 衝突時のエネルギー損失に関する式 (11) と式 (12) より,

$$\frac{1}{2} \pi c_c A^2 \omega = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (13)$$

$$\text{反発係数 } e = V_2/V_1 \quad (14)$$

であるから,

$$c_c = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{\pi A^2 \omega} = \frac{mV_1^2(1-e^2)}{\pi A^2 \omega} \quad (15)$$

さらに, 関係式

$$A\omega \cong \frac{V_1 + V_2}{2} = V_1 \left(\frac{1+e}{2} \right) \quad (16)$$

$$\text{減衰定数 } h_c = \frac{c_c}{2m\omega_c} \approx \frac{c_c}{2m\omega} \quad (17)$$

を考慮すると,

$$h_c = \frac{1-e^2}{2\pi} \left(\frac{2}{1+e} \right)^2 \quad (18)$$

となる. このように, 緩衝材のバネ定数 k_c と減衰係数 c_c または減衰定数 h_c は, 式 (9), (15), (18) によって与えられる. すなわち, バネ定数 k_c は滞留時間 ΔT から, 減衰定数 h_c は反発係数 e から各々求められる.

2.3 バネ定数と衝撃力の算出法

IMD の重錘が緩衝材と衝突するときに生じる衝撃力は次のように算出される.

(計算法 1) 滞留時間と沈下量の関係

滞留時間から求めた緩衝材のバネ定数 k_c (式 (9)) と計測した沈下量 A を用いて,

$$\text{衝撃力 } F = k_c A \quad (19)$$

として算出される.

(計算法 2) エネルギー保存則の関係

重錘が緩衝材に衝突する直前の運動エネルギーは, 衝突後の緩衝材のひずみエネルギーと減衰エネルギーに変換され, ひずみエネルギーが最大 (変位が最大) のとき運動エネルギーは 0 となる. すなわち,

$$\begin{aligned} (1/2)mV_1^2 &= (1/2)k_c A^2 + (1/4)c_c V_1^2 \cdot \Delta T \\ &\approx (1/2)k_c A^2 \quad (\Delta T \ll 1 \text{ と仮定}) \end{aligned}$$

$$\therefore k_c = m(V_1/A)^2 \quad (20)$$

$$\text{衝撃力 } F = k_c A = m(V_1/A)^2 \cdot A \quad (21)$$

として算出される.

ここで, m は重錘質量, V_1 は衝突直前速度, A は衝突時の重錘沈下量, ΔT は滞留時間, c_c は緩衝材の減衰係数, k_c は緩衝材のバネ定数である.

(計算法3) 運動量変化と力積の関係

重錘の運動量変化はその間に重錘に作用した力積に等しい。すなわち、

$$F_0 \Delta T = mV_2 - mV_1 \quad (22)$$

衝撃力を上式では一定としているが、実際には図-5に示すように滞留時間 ΔT の間に正弦波状に変化していると考えられる。衝突時の力積面積 $F_0 \Delta T$ に等しくなる正弦波の振幅値は $(\pi/2)F_0$ であることから、

$$\text{衝撃力 } F = (\pi/2) \cdot (mV_2 - mV_1) / \Delta T \quad (23)$$

として算出される。

3. IMD の振動実験

3.1 IMD 付き塔模型の振動実験⁷⁾

振動実験に使用した供試体は、図-6に示すように高さ1.6mの塔模型と振子に支持された重錘の組合せからなる。塔模型の重錘との衝突部には緩衝用ゴムを貼り付けた。緩衝用ゴムとして、1.ゴムS(軟質ゴム)、2.ゴムH(硬質ゴム)、3.スポンジ、4.ポロンスポンジの4種類を使用した。また、塔模型の構造減衰(IMDが非作動時の塔の対数減衰率)は0.011であった。

塔模型頂部の鉄板枚数によって塔の質量および振動数を調整し、振子重錘部の鉄板枚数によって重錘の質量を調整した。重錘の振動数($1/(2\pi\sqrt{l/g})$)は振子の長さ l から設定した。

振動実験では、塔模型に初期変位を与えた後、開放して減衰自由振動させ、重錘と塔模型の変位を2台のレーザー変位計(キーエンス社製 LB-01, LK-085)で計測し、

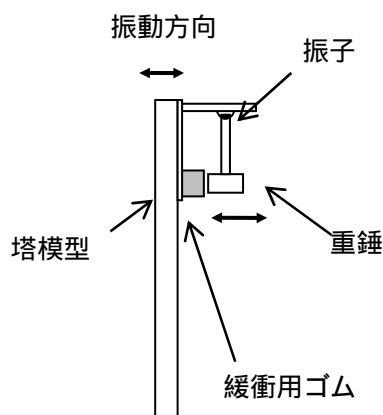


図-6 IMD 付き塔模型の構成

サンプリング周期は0.001sとした。データの記録にはデータ収集システム(キーエンス社製 NR2000)とパソコンの組合せで対応した。

3.2 緩衝材の振動特性実験⁷⁾

図-7に示すように、コンクリート壁(塔状構造物の壁を想定)に緩衝材を設置した状態で、振子型の鉄製重錘を緩衝材に衝突させ、そのときの重錘変位から、緩衝材に対する重錘の反発係数、さらに沈下量と滞留時間を計測した。ここで、重錘の振子長は122mm、重錘質量は194g(重錘本体のみ)、496g(重錘本体+付加重錘2枚)、793g(重錘本体+付加重錘4枚)の3種類とした。実験に供した緩衝材は、ゴムS、ゴムH、スポンジ、ポロンスポンジの4種類とし、緩衝材のサイズは幅20mm×長さ40mm×厚さ10mmとした。ただし、ゴムHは材料寸法の関係で、重錘衝突側4mmをゴムH、壁側6mmをゴムSにして貼り合せ、厚さ10mmに調整した。

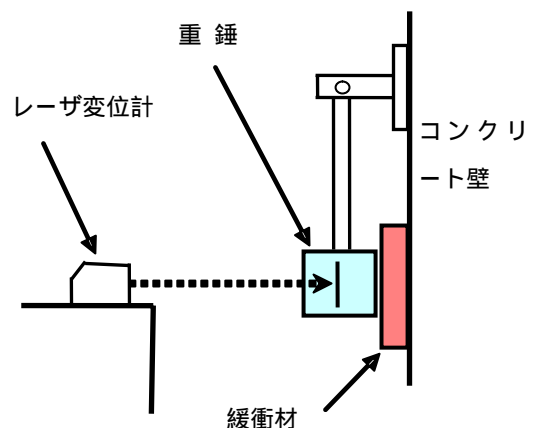


図-7 緩衝材の材料特性実験

4. 緩衝材の振動特性

4.1 緩衝材の実験的検討⁷⁾

重錘が減衰自由振動するときの重錘と緩衝材間の反発係数の計測結果を図-8に示す。また、衝突1~6回目間の反発係数の平均値を表-1に示す。反発係数の値はポロンスポンジが最も高く、スポンジとゴムSが重なってつづき、ゴムHの反発係数が最も低い値となっている。ゴムHの反発係数が小さいことは、緩衝材としての減衰定数が高いことを意味している。重錘質量の増加に伴

って反発係数が増加する傾向がゴムSやスポンジで認められるが、全体的には重錘質量の大きさが反発係数に与える影響は実験のばらつきレベルとなっている。

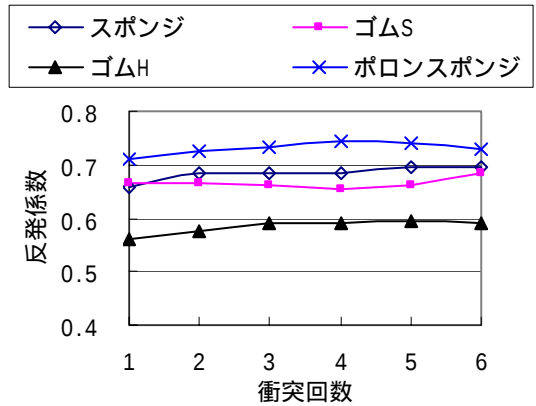


図- 8 (a) 各種緩衝材と重錘との反発係数
(重錘質量 194g)

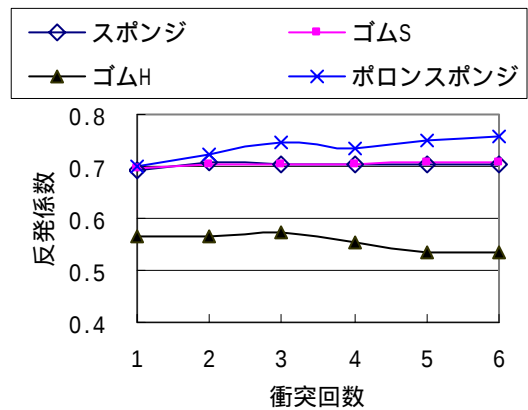


図- 8 (b) 各種緩衝材と重錘との反発係数
(重錘質量 496g)

表- 1 緩衝材の反発係数

緩衝材	重錘質量	重錘質量	重錘質量
	194 g	496 g	793g
ゴム S	0.666	0.704	0.709
ゴム H	0.584	0.555	0.589
スポンジ	0.684	0.703	0.715
ポロンスポンジ	0.730	0.735	0.734

次に、強制変位させた後、減衰自由振動させた重錘（振子）が緩衝材と衝突するときの沈下量（めり込む深さ）と滞留時間（重錘が緩衝材にめり込んでいる時間）について述べる。例として、質量 496g の重錘が緩衝材（スポンジ）と衝突する時の状況を図- 9 に示す。衝突回数が増すにつれて（衝突直前の重錘速度が小さくなるにつれて）、沈下量は小さくなるが、滞留時間は逆に大きくなる傾向にある。これは、緩衝材のバネ剛性が線形ではなく、緩衝材の変位が小さいとき剛性も小さくなる非線形な特性を有していることによるものと推定される。すなわち、沈下量が小さいときほどバネ定数は小さいために滞留時間が長くなる。重錘と緩衝材との衝突 1 回目のときの沈下量と滞留時間を表- 2 にまとめて示す。表中、衝突直前速度とは衝突直前 0.005s 間の平均速度のことである。スポン

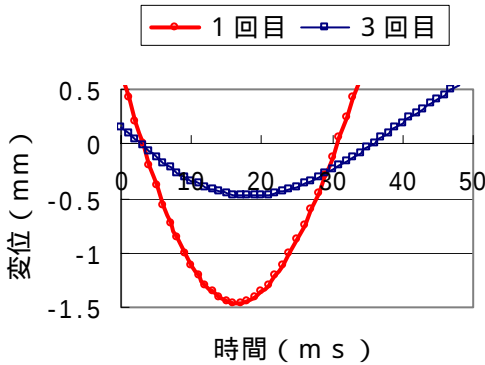


図- 9 重錘と緩衝材との衝突

表- 2 重錘衝突時の沈下量と滞留時間

	重錘質量	沈下量	滞留時間	衝突直前
	m (kg)	A (cm)	T (s)	速度 V1 (cm/s)
ゴム S	0.194	0.056	0.004	35.8
	0.496	0.071	0.006	31.4
	0.793	0.070	0.008	25.4
ゴム H	0.194	0.021	0.003	27.4
	0.496	0.036	0.003	33.8
	0.793	0.051	0.004	28.6
スポンジ	0.194	0.154	0.016	32.0
	0.496	0.237	0.025	32.8
	0.793	0.178	0.033	19.0
ポロンスポンジ	0.194	0.132	0.014	31.6
	0.496	0.171	0.023	24.8
	0.793	0.266	0.028	31.4

ジとポロンスポンジのときの滞留時間は、ゴムSとゴムHのときに比べて約3～5倍となっている。スポンジとゴムSはほぼ同じ反発係数ではあるが、滞留時間についてみるとスポンジのときはゴムSのときに比べて大幅に大きくなっている。

4.2 緩衝材のパネ定数と減衰定数

緩衝材のパネ定数 k_c は、式(9)に重錘質量 m と滞留時間 ΔT を代入して求められる(2.3節で述べた計算法1)。また、パネ定数 k_c は、衝突時の運動エネルギーとひずみエネルギーの関係からも求めることができる(2.3節で述べた計算法2)。緩衝材の減衰定数 h_c は、式(18)を用いて、反発係数 e から求められる。例として、重錘(質量194g)が各種緩衝材と衝突する時のパネ定数 k_c と減衰定数 h_c を図-10と図-11に示す。ここで、緩衝材の種類1はゴム

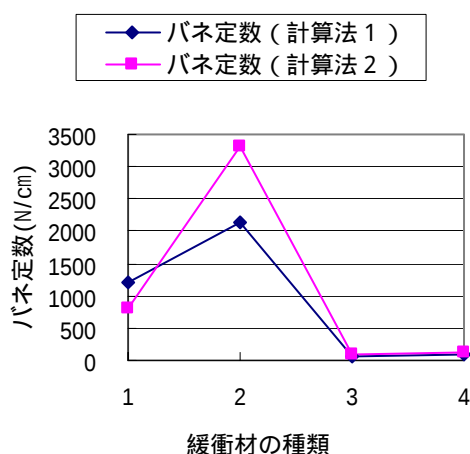


図-10 緩衝材のパネ定数

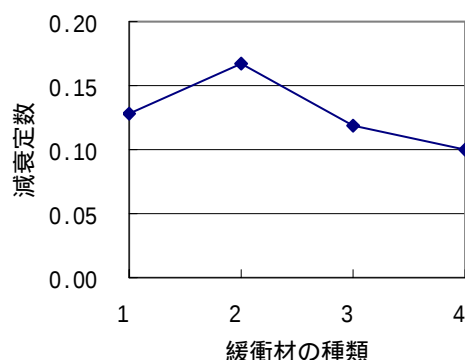


図-11 緩衝材の減衰定数

S, 種類2はゴムH, 種類3はスポンジ, 種類4はポロンスポンジを表す。

4.3 IMDの衝撃力

緩衝材の実験より得られたパネ定数 k_c と沈下量 A から、衝撃力 $F (= k_c A)$ を計算した結果を図-12に示す。図中、計算法1と計算法2とは別に、計算法3とあるが、この計算法では2.3節の式(22)と式(23)に示すように、衝突時における重錘の運動量変化を滞留時間 ΔT で除した値を平均衝撃力 F_0 とし、その値に正弦波と矩形波の間の補正係数 $(\pi/2)$ を乗じたものを衝撃力 F としている。

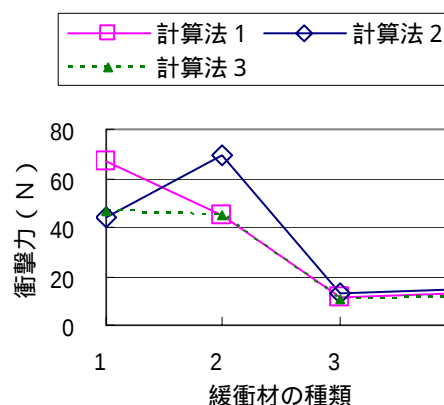


図-12 各種緩衝材における衝撃力

いずれの算出法によっても、緩衝材に滞留時間の長いスポンジ(種類3)またはポロンスポンジ(種類4)を用いることによって、滞留時間の短いゴムS(種類1)またはゴムH(種類2)のときに比べて、衝撃力は大幅に低減される。また、計算法3の計算結果が他の計算結果とほぼ一致して、衝撃力は滞留時間に逆比例の関係にあることが確認される。なお、ゴムS(種類1)とゴムH(種類2)のとき、計算法による数値のばらつきがあるが、これは計測のサンプリング周期0.001に比べて滞留時間が0.003～0.008と短いことによる計測誤差に起因したものと考えられる。

5. IMDによる付加減衰

IMDを塔構造物に付設することによって塔構造物に付

加される減衰率 (IMD による付加減衰) は、一般的な条件の下では、重錘と塔の振動数比、一般化質量比、反発係数から決定される^{1),2)}。しかしながら、緩衝材がスポンジやポロンスポンジのときのように、重錘と緩衝材との衝突にともなう滞留時間が重錘の振動周期（実験では、 $T=1/1.45=0.690$ s）に比べて無視できない程度に大きい場合には、その影響についての検討が必要になるものと考えられる。例として、緩衝材がスポンジのときの塔と重錘の減衰自由振動応答を図-13 に示す。振動条件としては、塔の一般化質量（塔頂換算）11.6 kg、重錘の一般化質量 0.136 kg（重錘質量 0.194kg）、塔振動数 2.68 Hz、重錘振動数 1.45 Hz、緩衝材（スポンジ）の反発係数 0.7 とし、緩衝材のモデル化は評価法 1 によった。初期条件は時間 $t = 0$ のとき、重錘と塔が同じ速度 91 mm/s で放出とした。図-13 における塔の振幅を時間の経過とともにプロットしたのが図-14 である。図-13, 14 においては緩衝材を剛体として扱って重錘の衝突に伴う滞留時間（スポンジの場合 0.016s）を無視して解析したが（評価法 1）、その結果は実験結果と比較してかなりずれている。その原因の一つとして衝突時の滞留時間分だけ重錘の振動周期が延びて、重錘と塔との衝突のタイミングが滞留時間分ずれたことが考えられる。そこで、2.1 節で述べた緩衝材のモデル「評価法 1」において、重錘の滞留時間 ΔT を考慮して重錘の振動周期 T' と角振動数 ω'_d を次のように補正した。

$$\begin{aligned} T'/2 &= T/2 + \Delta T \\ N' &= 1/T' = 1/(T + 2\Delta T) \\ \omega'_d &= 2\pi N' = \omega_d \cdot T/(T + 2\Delta T) \end{aligned} \quad (24)$$

ここで、 T は補正前の実際の重錘振動周期、 T' は補正後の重錘振動周期、 ΔT は滞留時間、 N' は補正後の重錘振動数、 ω_d は補正前の実際の重錘角振動数、 ω'_d は補正後の見かけ上の重錘角振動数である。式(24)における $T'/2$ と $T/2$ および ΔT の関係を概念的に図-15 に示す。

重錘の角振動数を ω_d から ω'_d に補正して、式(1)～(5)を用いて IMD 付き塔の減衰自由振動解析をした結果を、経過時間と塔振幅の関係にして図-16 に示すが、振動数補正後の解析結果は実験結果とかなり一致している。

一方、緩衝材を図-4 のようにモデル化してバネとダッシュボットの組合せとしたときの「評価法 2」による応答振幅の解析結果を図-17 に示す。式(9)と式(18)に示すよ

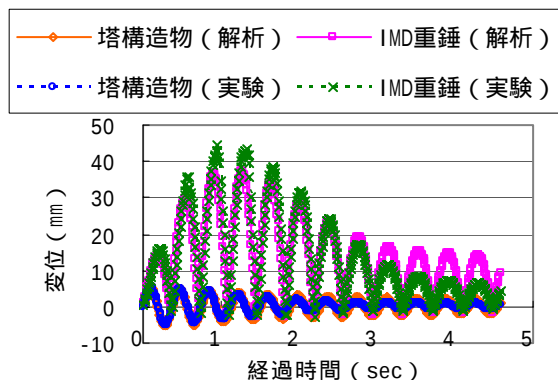


図-13 塔と重錘の応答（緩衝材：スポンジ）

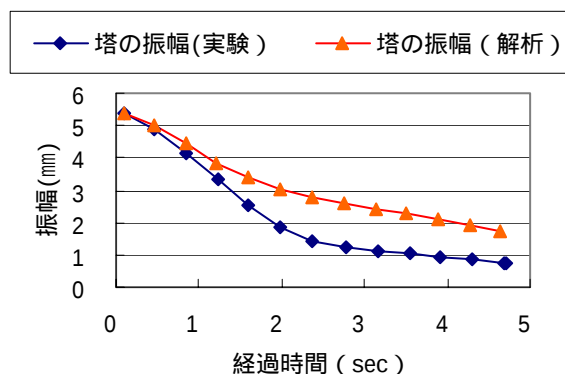


図-14 塔の振幅（緩衝材：スポンジ＝剛体）

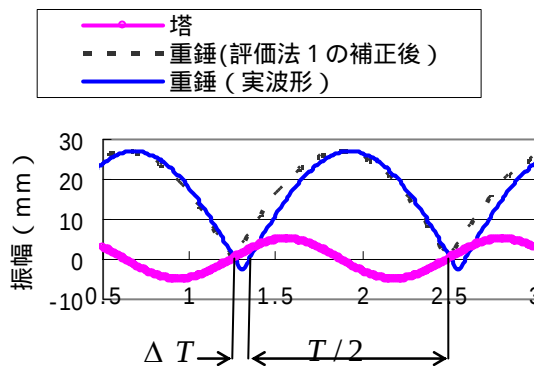


図-15 重錘の振動周期（概念図）

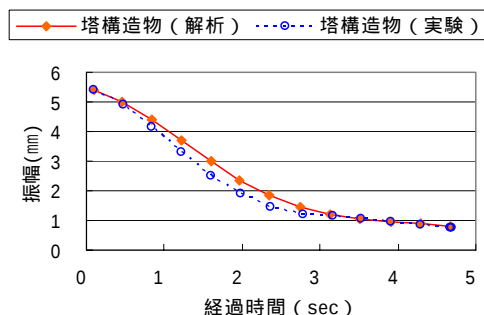


図-16 塔の振幅（緩衝材＝剛体＋振動周期補正）

うに、緩衝材のパネ定数と減衰定数は滞留時間 ΔT と反発係数 e から各々定められるが、ここでは、緩衝材（スポンジ）のパネ定数 75N/cm、減衰定数 0.11 とした。この場合、緩衝材モデル「評価法 1」で滞留時間分だけ重錘の振動周期を補正した方法（図-16）は、緩衝材モデル「評価法 2」で緩衝材をバネとダッシュボットの組合せとした方法（図-17）と同様の応答解析結果を得ることができ、「評価法 1」で振動周期を補正する方法の妥当性が認められる。

さらに、緩衝材の材質がゴム S、ゴム H、ポロンスポンジの場合についても、スポンジの場合と同様に緩衝材を剛体としてモデル化して（評価法 1）、重錘の振動数補正を行う前後の解析結果を図-18～図-20 に示す。各材質における滞留時間は表-2 による。図中、縦軸の塔振幅比は、塔と重錘を同じ速度で放出した後の第 1 回目の塔振幅に対する各回目の塔振幅の比を表す⁸⁾。重錘の振動数補正によって解析結果は実験結果とよく一致している。

図-16、図-18～図-20 における塔振幅の解析結果をまとめたのが図-21 である。図-21 から IMD 付き塔の対数減衰率を計算した結果を図-22 に示す。塔モデルの構造減衰（対数減衰率）は 0.011 であるから、図-22 の対数減衰率の値から 0.011 を差し引いた値が IMD による付加減衰とみなすことができる。スポンジとゴム S がほぼ同じ反発係数（表-1）でありながら、付加減衰（対数減衰率）に差異が認められるのは滞留時間に伴う重錘振動数のずれによる。この場合、重錘と塔モデルの振動数比は $1.45/2.68=1/1.85$ のように、最適の振動数比 $1/2$ から少しずれているが、滞留時間の影響で重錘の振動周期が、見かけ上、長くなって（振動数が低くなって）、最適の振動数比 $1/2$ に近づいたこと

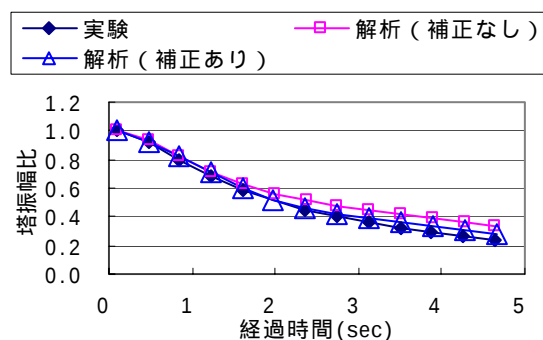


図-18 塔の振幅（緩衝材：ゴム S）

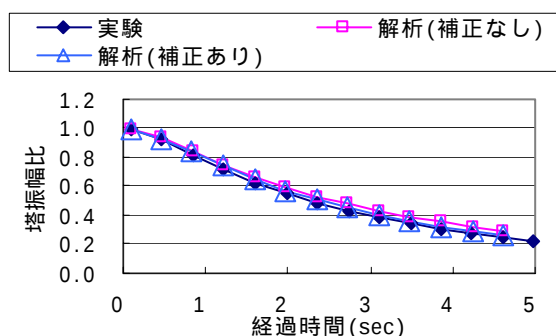


図-19 塔の振幅（緩衝材：ゴム H）

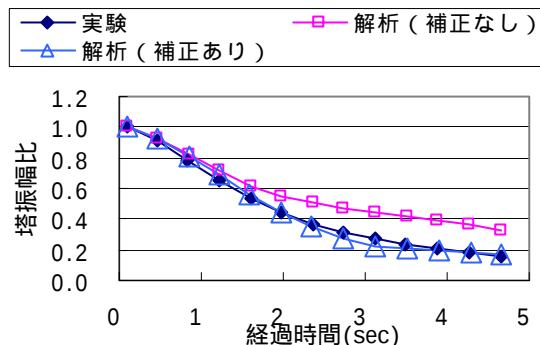


図-20 塔の振幅（緩衝材：ポロンスポンジ）

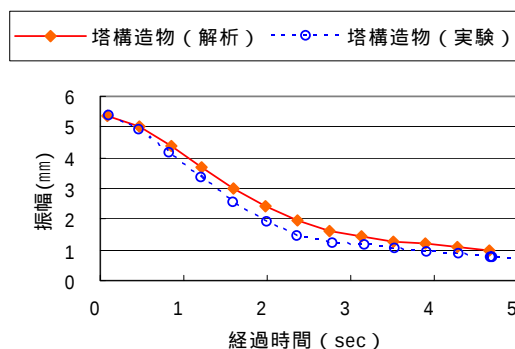


図-17 塔の振幅（緩衝材＝バネ＋ダッシュボット）

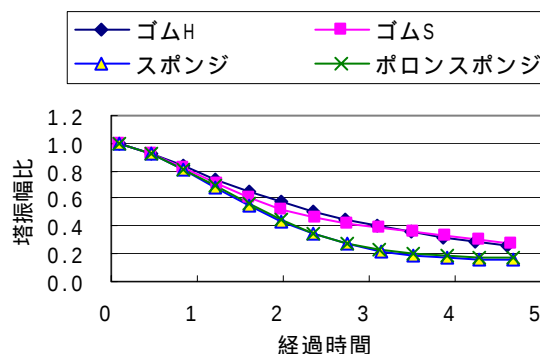


図-21 各種緩衝材における塔の振幅

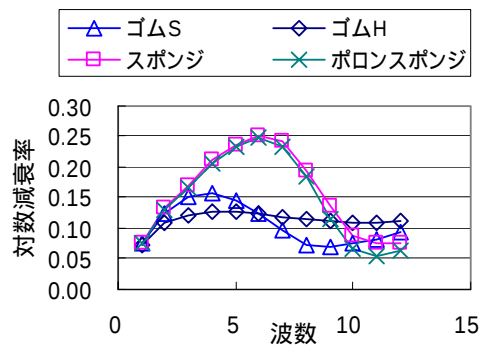


図-22 IMD による塔の付加減衰

が、スポンジの付加減衰（対数減衰率）を増やしたと考えられる。

以上の解析において、緩衝材の材質特性は、緩衝材の反発係数（緩衝材の減衰定数）と滞留時間（緩衝材のバネ定数）のみによって把握し、「評価法 1」において滞留時間は重錘の振動数補正という形で考慮した。

6. 衝撃力の緩和と付加減衰性能の保持

今回の実験では、緩衝材にバネ定数の小さいスポンジ、またはポロンスポンジを用いることで、ゴム S またはゴム H を用いるときに比べて、衝撃力を $1/3 \sim 1/5$ に緩和できたが（図-12）、それとともに緩衝材の反発係数の値を確保することで、IMD の付加減衰性能を保持することができることを実証した（図-22）。

すでに「2 章 IMD の振動解析、式(22)、式(8)」で述べたように、衝撃力は滞留時間に逆比例し、滞留時間は緩衝材のバネ定数から算出される。したがって、弱いバネ定数の緩衝材を使用することによって、滞留時間を長くして衝撃力の緩和を図ることができる。他方、IMD の付加減衰性能に多大の影響を及ぼす反発係数は、式(18)に示すように緩衝材の減衰定数と 1 : 1 の関係で決定される。また、緩衝材の理論的検討で明らかのように、緩衝材のバネ定数は緩衝材の反発係数には関与しない。直感的に説明すると、減衰定数 0 の緩衝材に重錘が衝突することを想定するとき、緩衝材のバネ定数に関わらず衝突前の重錘速度はそのまま衝突後の重錘速度として跳ね返り、反発係数は 1.0 となる。

以上のことから、衝撃力を緩和した IMD の設計手順は

次のように整理することができる。

IMD として必要な付加減衰と許容できる衝撃力の設定（IMD の設計条件）

必要な付加減衰を発揮できる IMD の質量比

m/M ，振動数比 ω_d/ω_s ，反発係数 e の設定

（IMD の基本諸元）^{1),2)}

許容できる衝撃力に対応した滞留時間 ΔT の算定
所要の反発係数と滞留時間に対応した緩衝材のバネ定数と減衰定数の算定（緩衝材の振動特性）

の振動特性を有する緩衝材（緩衝振動系）の検討

7. まとめ

本研究の結果をまとめると次のようになる。

- (1) IMD の重錘が緩衝材と衝突するときの滞留時間と反発係数は各々に緩衝材のバネ定数と減衰係数によって決定される。滞留時間と反発係数は相互に独立した値として扱われる。
- (2) IMD の衝撃力は重錘の滞留時間（緩衝材のバネ定数）に逆比例し、滞留時間が長いと衝撃力は小さくなる。
- (3) 重錘の滞留時間が IMD の付加減衰に及ぼすことの影響は、重錘振動周期を滞留時間分だけ延ばして振動解析することで近似的に評価できる。
- (4) IMD の付加減衰は重錘と緩衝材との間の反発係数と滞留時間によって影響されるが、滞留時間については重錘振動周期の補正（振子長の調整）によってその影響を吸収できる。したがって、所要の付加減衰に対する緩衝材の検討に際しては、滞留時間の影響を考慮せずに、付加減衰に関して反発係数が所要値となるように緩衝材の材質を選定することができる。
- (5) 長い滞留時間（小さいバネ定数）と付加減衰に関する所要の反発係数（所要の減衰定数）といった振動特性を有する緩衝材（緩衝振動系）を IMD に採用することで、小さい衝撃力で所要の付加減衰を有する IMD を実現することができる。

謝辞： 本研究の実験に際しては、和歌山工業高等専門学校環境都市工学科 5 年（研究当時）の北東宏郎氏の協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 小川一志,坂井藤一,斎藤敏雄:衝撃質量ダンパ(IMD)の耐風制振装置への適用,振動制御コロキウム PART B 講演論文集, pp.145-151, 1991.
- 2) 小川一志,井手俊也,斎藤敏雄:衝撃質量ダンパ(IMD)の斜張橋主塔への適用,構造工学論文集, Vol.39A, pp.713-722, 1993.
- 3) 小川一志,尾立圭巳:高い付加減衰性能を有する衝撃質量ダンパ(IMD)の検討,鋼構造年次論文報告集,第11巻, PP.77-82, 2003.
- 4) W.H.Reed : Hanging-Chain Impact Damper: A Simple Method for Damping Tall Flexible Structures, Wind Effects on Building and Structures, Vol. , PP.283-321, 1967.
- 5) 飯田毅,立石一真,河野健二,波多野保史,多田仁志:走行荷重による高架橋上照明柱の振動計測とチェーンダンパの制振効果,土木学会年次学術講演会,2002.
- 6) 小川一志,山下浩伸:衝撃質量ダンパ(IMD)の制振性能に関する検討,鋼構造年次論文報告集,第12巻, PP.69-74, 2004.
- 7) 小川一志,北東宏郎:衝撃質量ダンパ(IMD)における重錘の衝撃力と付加減衰性能,鋼構造年次論文報告集,第14巻, pp.143-150, 2006.
- 8) 小川一志,山下浩伸:振幅制限を受けた衝撃質量ダンパ(IMD)の制振性能,鋼構造年次論文報告集,第13巻, pp.33-40, 2005.

(2006年9月11日受付)