

振動減衰機構の開発研究

Development of Vibration Control System for Structures by Means of Mass Pumps

川股重也*・米田謙*・半谷裕彦*
Shigeya KAWAMATA, Mamoru YONEDA and Yasuhiko HANGAI

研究の目的と概要

- 地震に対して構造物の安全性を高めるためには、
- 1) 入力としての地盤振動に対する構造物の振動応答を低減すること
 - 2) 発生する構造各部の振動に対して十分な強度を与えること

の二つが必要である。

この研究の目的は、上記の1)の線に沿って振動減衰機構を開発することである。当初の目標として減衰効果の大きさことはもちろんであるが、さらに経済的に実用可能であって、しかも不時の地震に際して必ず作動する信頼性の高い装置の考案を意図した^{1),2)}。

この目的のもとに設計・試作した減衰装置は、構造物の振動とともに封入液体に高速の運動が発生する“質量ポンプ”なるものを構造物に組込んだものである。この質量ポンプのもつ質量効果と減衰効果のために、外部より構造体に伝えられる振動エネルギーの大半が質量ポンプに封入されている液体を運動させることに費やされことになり、結果として構造体自体の振動応答が大幅に低減することが理論的に証明された。また、試作した質量ポンプを一層の鉄骨フレームに組み込み、自由振動・起振機による強制振動・振動台による加振の各実験を行なったところ、所期の効果を発揮することが実証された。

以下に減衰機構の原理と実験結果の概要を述べる。詳細については既発表論文^{3)～6)}を参照されたい。

機構の原理

図1に示すように、ペローズ両端をダイヤフラムで閉じた一対の容器に液体を満たし、両方に設けた小さな円孔を管で連結する。両方の容器に交互に押し引きの力を作用させると、圧力差によって管中の液体は左右に振動

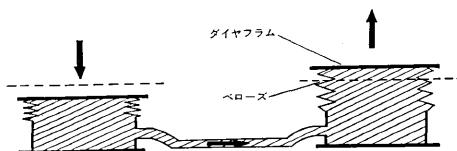


図1 質量ポンプ

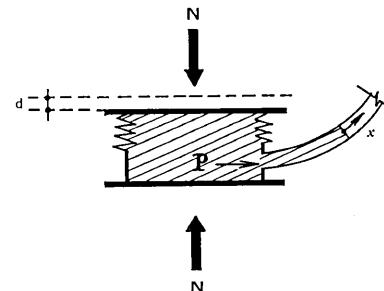


図2 ペローズの伸縮と液体の移動

する。この装置は以下に述べるような原理によって大きな“受動質量”を発生せしめるので、“質量ポンプ(mass pump)”と名づける。

まず、図2を参照して、管中の液体の運動速度 \dot{x} は、容積変化の関係からペローズ容器の変位速度 \dot{d} を β 倍したものとなる。すなわち

$$\dot{x} = \beta \dot{d} \quad (1)$$

ここで

$$\beta = A/a \quad (2)$$

A : ペローズの有効断面積

a : 円孔の面積=連結管の断面積

次に、管中の封入液体に作用して加速度を与える力 P と容器のダイヤフラムに作用する力 N の間には、受圧面積の関係から

$$N = \beta P \quad (3)$$

の関係が成立する。

今、図3に示すように、質量ポンプを一層のフレームに斜材で組み込むものとする。斜材の変形を無視すると、フレームの水平変位 X とペローズの伸びの間には

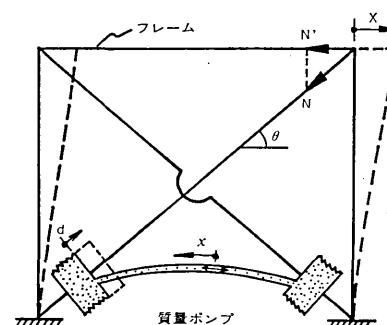


図3 一層フレームの振動減衰機構

* 東京大学生産技術研究所 第5部

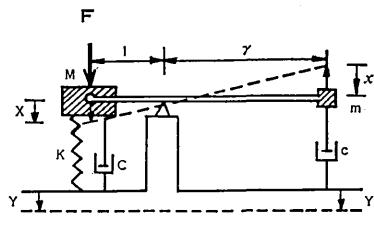


図4 振動モデル

$$d = \alpha X, \alpha = \cos \theta \quad (4)$$

の関係がある。

一方、フレームの斜材の軸力 N の水平成分は

$$N' = \alpha N \quad (5)$$

であり、釣合条件からこれがフレームのはりのレベルに水平力として作用することになる。

ベローズ容器をつなぐ連結管に封入されている液体の質量を m とする。上述の関係から、管中の液体は、フレーム上端の水平変位 X との間に

$$x = \beta d = \alpha \beta X = \gamma X \quad (6)$$

$$\gamma = \alpha \beta \quad (7)$$

の関係を保って運動し、また管中の液体の加速度とともに慣性力 $-m\ddot{x}$ は

$$N' = \alpha N = -\alpha \beta (m\ddot{x}) = -\gamma (m\ddot{x}) \quad (8)$$

として、フレーム上端に水平に加えられることがわかる。

このような変位の条件と釣合条件を満たす振動モデルとして図4が考えられる。ここで

M, K, C : フレームが本来もっている質量、ばね定数(ベローズのばねを含む)、減衰係数
 m, c : 管中の液体の質量、液体の運動とともに減衰係数

この振動モデルに正弦波の入力が作用する場合の応答を求める。

1) 外力に対する振動応答

フレーム上端に水平な外力 F が作用するときの振動方程式は、減衰力を速度に比例する粘性減衰と仮定すると、テコの支点でのモーメントの釣合から

$$(M + \gamma^2 m) \ddot{X} + (C + \gamma^2 c) \dot{X} + KX = F \quad (9)$$

となる。上式において

$$\bar{M} = M + \gamma^2 m, \bar{C} = C + \gamma^2 c \quad (10)$$

とおくと

$$\bar{M} \ddot{X} + \bar{C} \dot{X} + KX = F \quad (11)$$

が、フレーム上端で立てた振動方程式である。

(11)式で、 \bar{M}, \bar{C} が有効質量、有効減衰係数を表わしており、(10)式の $\gamma^2 m, \gamma^2 c$ が“質量ポンプ”の質量効果および減衰効果を表わしている。

(11)式から、系の非減衰固有振動数として

$$\bar{\omega}_0 = \sqrt{K/\bar{M}} \quad (12)$$

が得られるが、これは質量ポンプの質量効果によってフ

レーム本来の固有周期が延びることを意味する。

また、この系の有効減衰定数は

$$\bar{h} = \bar{C}/2\bar{M}\bar{\omega}_0 \quad (13)$$

となる。したがって、外力に対する応答は、有効質量 \bar{M} 、有効減衰定数 \bar{h} をもつ1質点系として計算すればよいことになる。

たとえば、起振モーメント $m_0 r$ 、振動数 ω なる起振機の正弦波出力に対する変位応答の振巾は

$$\bar{X}_d = \frac{m_0 r}{\bar{M}} \cdot \frac{\left(\frac{\omega}{\bar{\omega}_0}\right)^2}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\bar{\omega}_0}\right)^2\right\}^2 + 4\bar{h}^2 \left(\frac{\omega}{\bar{\omega}_0}\right)^2}} \quad (14)$$

となる。これを質量ポンプをもたないフレームのみの場合の応答

$$X_d = \frac{m_0 r}{M} \cdot \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right\}^2 + 4h^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (15)$$

と比較すると、

- 1) 共振々動数が ω_0 から $\bar{\omega}_0$ に低下する(質量効果)
- 2) 減衰定数が h から \bar{h} に高まることによって、共振倍率が低下する(減衰効果)
- 3) 応答振巾がすべての振動数領域にわたって M/\bar{M} 倍に低下する(質量効果)

ことがわかる。

ここで注目しなければならないのは、運動する液体の見かけ上の質量が実際の質量 m に対して、フレーム変位速度と管中液体の変位速度の比率 γ 倍となるのではなく、 γ^2 倍となることである。たとえば、ベローズ有効断面積と連結管の断面積の比が

$$\beta = A/a = 100$$

であり、斜材の取付角度が 45° 、すなわち

$$\alpha = \cos 45^\circ = 0.707$$

であると仮定すると

$$\gamma^2 = (\alpha \beta)^2 = 70.7^2 \approx 5000$$

である。このとき連結管に 100 グラムの液体が封入されているとすると質量効果は

$$\gamma^2 m = 5000 \times 100 \text{ g} = 5 \times 10^5 \text{ g} = 500 \text{ kg} = 0.5 \text{ t}$$

となり、100 グラムの液体が、実に 0.5 トンの有効質量として振動系に作用するのである。

このような付加質量は、フレームが振動することにより受動的に発生する“受動質量”であり、地震時の地盤振動によってフレーム全体がゆるめられても、能動的な体力が発生してフレームに加わることがないことがもう一つの特徴である。このことは次の説明によって明らかとなる。

2) 地動に対する応答

図3のフレームを支える地盤が水平方向に Y だけ動いた場合、図4の振動モデルでは鉛直方向の地動変位 Y

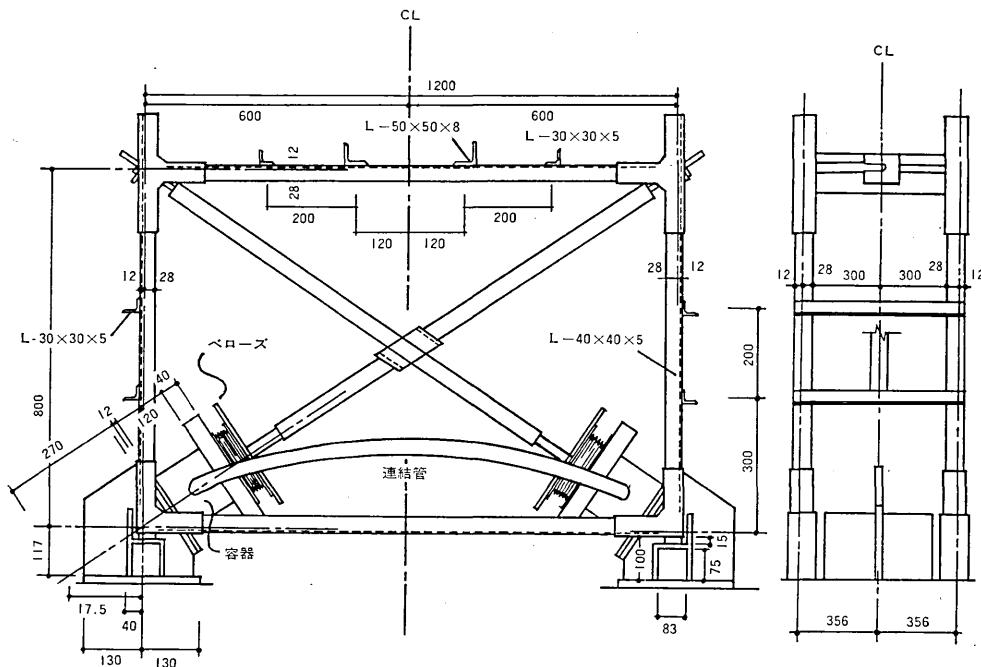


図5 試験体の形状と寸法

で表わされる。このとき

$$\left. \begin{array}{l} \text{フレーム上端の絶対変位: } X+Y \\ \text{管中の液体の絶対変位: } x+Y = -\gamma X+Y \end{array} \right\} \quad (16)$$

であるから、運動方程式は

$$(M+\gamma^2 m)\ddot{X} + (C+\gamma^2 m)\dot{X} + KX = -(M-\gamma m)\ddot{Y} \quad (17)$$

となる。(10)式を用いて書き換えると

$$\ddot{X} + \frac{C}{M}\dot{X} + \frac{K}{M}X = -\frac{M-\gamma m}{M+\gamma^2 m}\ddot{Y} > -\frac{M}{M}\ddot{Y} \quad (18)$$

を得る。これをフレームのみの場合の運動方程式

$$\ddot{X} + \frac{C}{M}\dot{X} + \frac{K}{M}X = -\frac{M-\gamma m}{M+\gamma^2 m}\ddot{Y} \quad (19)$$

と比べると、右辺の入力の絶対値が M/\bar{M} 倍以下になっていることがわかる。すなわち、質量ポンプの質量効果のために、地盤振動に対する応答も M/\bar{M} 倍以下に低下することを表わしている。減衰効果については、強制外力の場合と同様である。

実験結果

上述のような、理論的に導かれた減衰機構の効果を確かめるために行った一連の実験の中から、ここでは一層フレームの強制振動実験の結果を示す。

試験体は図5に示すような形状寸法をもつ鉄骨フレームで、1質点系になおしたときの重量は、起振機を載せた状態で 53 kg である。斜材の先端に取付けた液体容器は、図6に示すような断面をもち、用いたベローズはステンレス製で外径 105 mm、内径 135 mm、自由長 25 mm、有数断面積 113 cm²、山数 12、バネ定数 3.6 kg/mm であった。

強制振動実験は、フレームのはりの上に偏心質量を回転させる方式の起振機をのせて正弦波の水平力を加える起振実験と；振動台上にフレームをのせて正弦波の水平変位を加える振動台実験の2種類を行った。写真1は起振実験中の試験体を示す。

試験は、先ず斜材を外した状態について行って、フレームのみの振動応答を観測し、次いで減衰機構の効果を見るために、容器に水または油を封入し、径と長さの異なる管で連結した数種の場合について振動応答を観測し

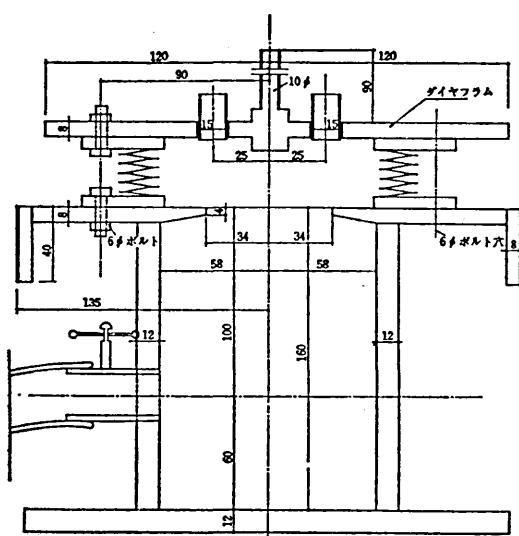


図6 質量ポンプ容器の断面

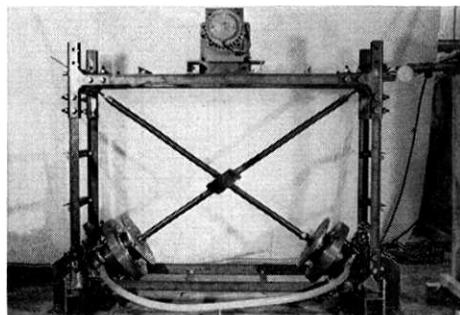


写真1 起振実験中の試験体

た。

図7は起振実験の結果で、外力の振動数に対してフレーム上端の水平変位の振巾をプロットしたものである。図中曲線①はフレームのみの応答を、②、③、④は質量ポンプに水を封入した場合、②は油を用いた場合の応答を表わす。フレームのみの場合の共振々動数 17 Hz が、質量ポンプを組み込むことにより、4.5~10 Hz に低下すること、また質量ポンプを用いることにより振巾が著しく減少することがわかる。振巾の減少は、質量ポンプの質量効果と減衰効果が総合的に表われた結果であると考えてよい。

図8は同じ変位振巾を、共振点で起振機がひき起す外力をフレームに静的に加えた場合の変位量に対する倍数として表わしたものである。この変位倍率の低下は質量ポンプの減衰効果を表わしている。共振点の変位倍率から系の振衰定数を逆算すると、フレームのみの場合の $h=0.025$ に対して、水を封入した場合には $h=0.1$ 程度に、また油を用いた場合には $h=0.2\sim0.6$ 程度に増

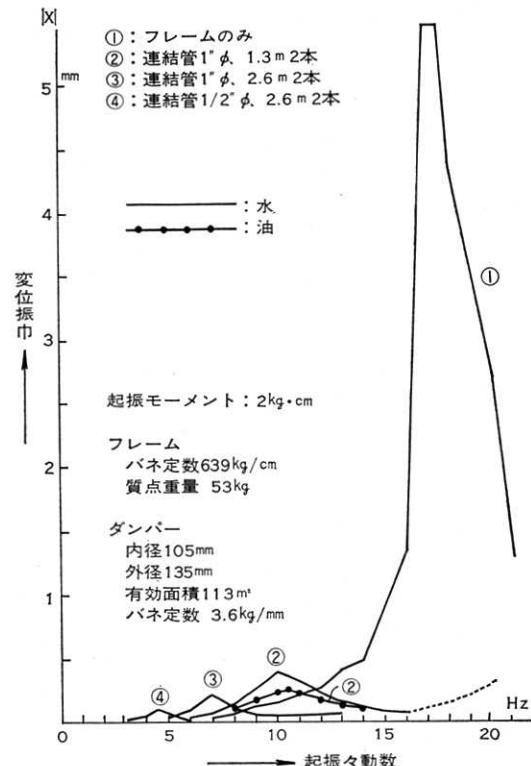


図8 起振実験によるフレームの振巾

加したことになる。

図9は、振動台を振巾 ± 0.2 mm の正弦波で振動させ、振動数を除々に増加させた場合の変位応答倍率(フレーム上端の振巾と振動台の振巾の比)をプロットしたものである。図中の曲線①はフレームのみの場合の応

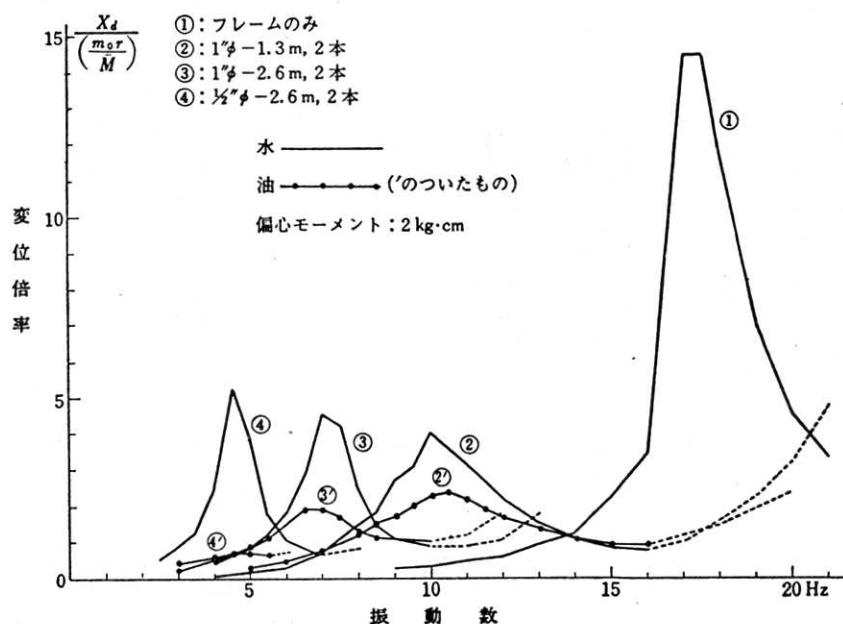


図8 起振実験によるフレームの変位倍率

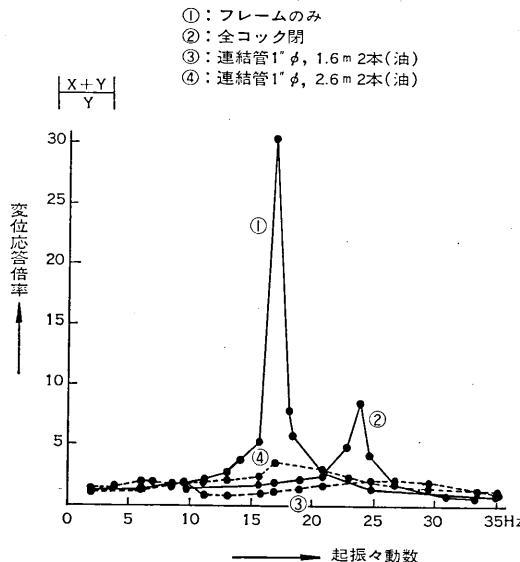


図9 振動台試験(1)による変位応答倍率

答、曲線2は質量ポンプのコックを閉じて液体の流れを止めた場合の応答を表わす。曲線3、4はいずれも封入液体として油を用いた場合である。質量ポンプの効果によって変位応答が低下したことがわかる。フレームのみの場合の共振点の応答倍率30に対して、曲線3では加振々動数の全域にわたり倍率が2以下におさまっている。

もう一つの振動台実験の結果を図10に示す。この実験では、構造体の重量が大きい場合の制振効果を見るために、1.0m×0.8mの鉄骨フレームに鋼材を載せ、質点重量を193kgとした上で、振動台による正弦波加振を行った。図は、質量ポンプのペローズ断面積が113cm²の場合の変位応答率を表わしている。

フレームのみの場合、共振点の振巾は大き過ぎて測定不可能であったが、自由振動記録から得られた減衰定数0.0065から共振点の応答倍率を計算すると76.4となる。これに対して、質量ポンプを作動させた場合、最も応答の低いのが曲線④の場合で、応答倍率は2.3以下におさえられている。

これまでの成果と今後の課題

開発中の、質量ポンプを用いた振動減衰機構は、質量ポンプのもつ質量効果と減衰効果とにより

- 1) 構造物の固有振動数の調節
- 2) 構造物の外力に対する応答振巾の絶対値を周波数帯の全域にわたって低下させる
- 3) 外力との共振点における構造物の応答倍率の値を低下させる

作用をもつことが明らかとなった。この3項目の効果を総合することにより、各種の構造物の振動性状を耐震(対地震)および防振(機械振動の防止)の観点から最

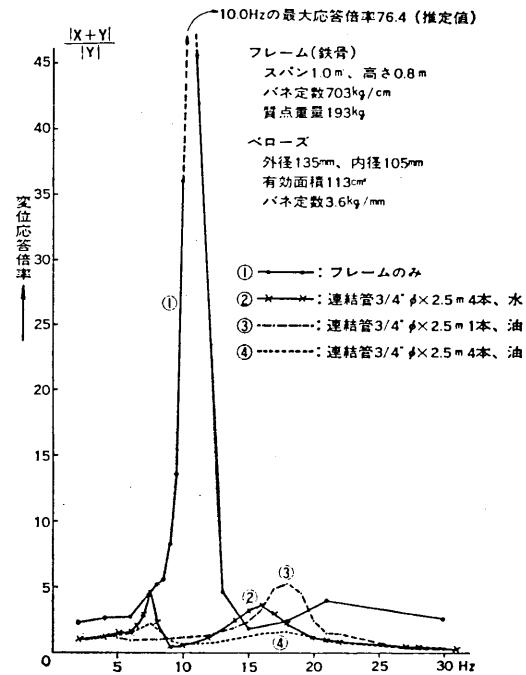


図10 振動台試験(2)による変位応答倍率

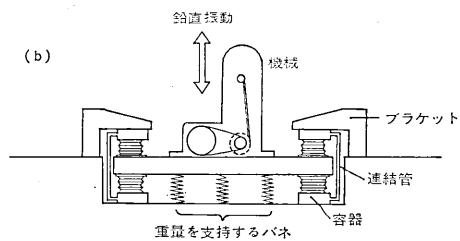
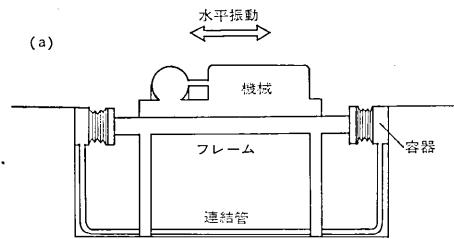


図11 防振機構の例

適に制御することが可能になると考えられる。起振実験の結果は防振機構の可能性を、振動台実験の結果は耐震機構の可能性を示している。

また、質量ポンプはきわめて簡単な構造であり、ピストンなどの滑動部分がないことと相まって、当初の目標であった経済性と信頼性の条件は十分に満足されよう。

図11は防振機構としての適用例で、(a)が水平振動を生じる機械の、(b)は鉛直振動を起す機械のための防振基礎を表わしている。図12は、多層ビルに適用した

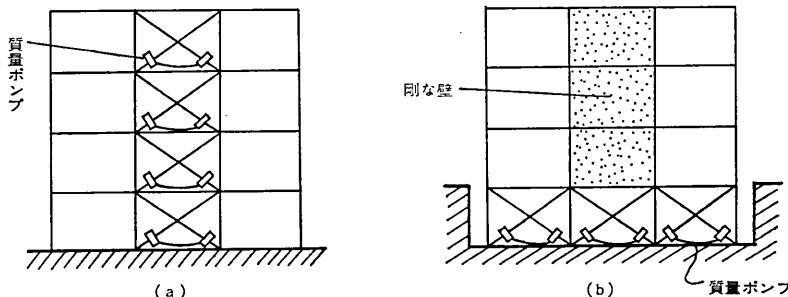


図 12 建物の耐震機構の例

耐震機構の例で（a）は質量ポンプを各層に設ける場合を、（b）は上層部を剛な壁で固め、質量ポンプは地階に集中して設ける場合を示す。

今後の課題は、与えられた構造物と予想される振動入力に対して質量ポンプの最適設計を行う方法を確立することである。具体的には

- 1) 質量ポンプの液体の運動とともに減衰力特性
 - 2) 地震波などのランダム加振に対する機構の応答特性
 - 3) 多質点系に対する減衰機構の構成法
- などを明らかにすることが要求される。

(1974年9月4日受理)

引用文献

- 1) 久保慶三郎・岡田恒男・川股重也：都市構造物の耐震強度の調査研究，生産研究，24巻3号，pp. 8-7，昭47年3月
- 2) 川股重也：免震構造は可能か，臨時事業委員会報告，都市における災害・公害の防除に関する研究，東大生研，1-5，昭47年3月
- 3) 川股重也・米田謙・半谷裕彦：耐震ダンパーに関する研究，第1報 自由振動試験および起振実験，生産研究第25巻第3号，pp. 34-39，昭48年3月
- 4) 川股重也・米田謙・半谷裕彦・金沢京子：耐震ダンパーに関する研究，第2報 起振実験および振動台実験，生産研究，第25巻第11号，pp. 21-25，昭48年11月
- 5) 川股重也・米田謙・半谷裕彦・金沢京子：耐震ダンパーに関する研究，臨時事業委員会報告，都市における災害・公害の防除に関する研究，1-9，東大生研，昭48年4月
- 6) 川股重也・半谷裕彦・米田謙・金沢京子：制振機構に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭48年10月，pp. 857-862

