

積層ゴムによる重量機器の免震支持

(第1報 免震支持装置についての基礎研究—その1—)

An Aseismic Base Isolation System Using Laminated Rubber Bearings for Heavy Mechanical Equipment
(1st Report: Fundamental Study on Isolation Device—Part 1—)

藤田 隆史*・藤田 聡*・芳沢 利和*

Takafumi FUJITA, Satoshi FUJITA and Toshikazu YOSHIZAWA

1. ま え が き

変電機器などの重量機器の免震支持を実現するためには、大きな鉛直方向荷重を負担でき、かつ水平方向剛性の低い支持材が必要である。ゴム板と鉄板を交互に積層した積層ゴム(図1参照)はこの要求を満たし、設計によっては水平方向ばね定数の1,000倍程度の鉛直方向ばね定数を持たせることができる。本研究では、積層ゴムのこの優れた特性を利用した免震支持装置を開発、研究している。

積層ゴムは、特にヨーロッパにおいては、橋梁の支承として数十年の使用実績があり、規格化もなされて広く使用されている¹⁾。最近では、建物の免震用ラバーベアリングとして注目されており、フランスでは原子炉建屋²⁾、ニュージーランドでは一般建物³⁾の免震にすでに使用されている。

2. 免震支持装置の基本構造

図1のような積層ゴムを重量機器の支持に用いると系全体の水平方向固有振動数を低くすることができ、機器の地震応答加速度を低減(免震)することができる。しかし、その反面、応答変位は増加する。それゆえ、応答加速度の低減と応答変位の増加を適当に妥協させるためにエネルギー吸収装置が必要となるが、ここでは後述のような摩擦ダンパを採用している。

本免震支持装置の基本構造は、図2に示すように、積層ゴムを中心に摩擦ダンパの機能を持つ剛な二重(円筒)枠を周囲に配置した構造である。積層ゴムの上、下はそれぞれ機器のベースと基礎に定着されており、鉛直方向荷重の大部分を負担するとともに低い剛性でもって水平方向にせん断変形することができる。摩擦ダンパとしての二重枠については、外枠の中を上下方向にスライドし得る内枠の上面に摩擦材が取り付けられており、外枠の外側に取り付けられた押上用ばねによって内枠上面の摩擦材と機器ベース下面の摩擦板を押し付け、鉛直方向

荷重の一部を負担するとともに機器が基礎と相対変位を起こす際のトリガとして、そして、摩擦ダンパとして機能する。

このような本免震支持装置の特長を列挙すると以下のようになる。①周囲の剛枠だけでも機器を支持することができ、積層ゴム単独で支持する場合に比較して、より大きな応答変位を許容できる。また、万一、積層ゴムが破壊した場合にもバックアップ構造となっている。②積層ゴムだけでも機器を支持することができ、押上用ばねをゆるめて内枠を下げることにより、摩擦材の保守点検が可能である。また、地震後の残留変位も同様にして容易に除去することができる。③水平面内で作用する摩

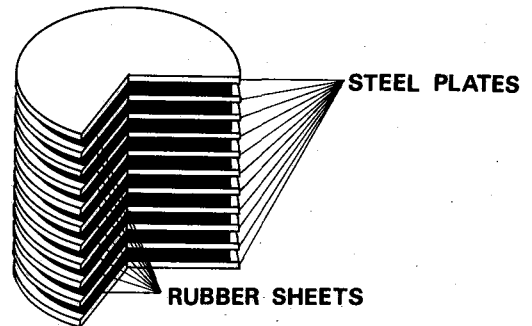


図1 積層ゴムの基本構造

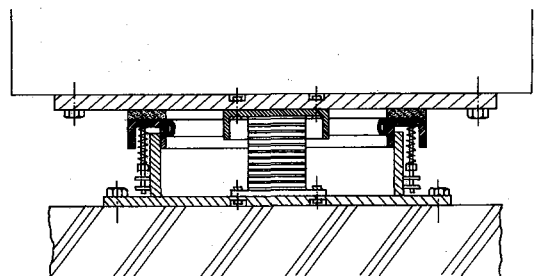


図2 免震支持装置の基本構造

*東京大学生産技術研究所 第2部

擦ダンパを使用しているため装置の高さを低くでき、さらに、円形のゴム板から成る積層ゴムを用いることにより方向性のない免震支持装置となる。また、弾塑性ダンパを用いる場合に比べて水平方向剛性を小さくすることができ、より高い免震性能が得られる。④ユニット化された積層ゴムと摩擦ダンパの諸元をユニットの定格荷重に対して最適化しておけば、大規模な構造物に適用する場合でも全体として最適な固有振動数と減衰が得られる。また、平面的な剛性分布についても重心と剛心の偏心量は自然に小さくなり、振り振動の発生を抑制することができる。

3. 予備的解析

3.1 免震性能について

本免震支持装置の免震性能を予備的に検討するため、機器を一質点系モデルとし、水平一方向の運動だけを考慮した解析を行う。その場合の解析モデルを以下に示す(図3参照)。

(i) 摩擦ダンパのすべりがない場合 — Phase I

$$m\ddot{x}_G + c\dot{x}_G + k(x_G - x_B) = -m\ddot{z}_H \quad (1)$$

$$x_B = \text{const.}, \quad \dot{x}_B = 0 \quad (2)$$

(ii) 摩擦ダンパのすべりがある場合 — Phase II

$$m\ddot{x}_G + c(\dot{x}_G - \dot{x}_B) + k(x_G - x_B) = -m\ddot{z}_H \quad (3)$$

$$c(\dot{x}_G - \dot{x}_B) + k(x_G - x_B) = C_H \dot{x}_B + F_K \text{sgn}(\dot{x}_B) + K_H x_B \quad (4)$$

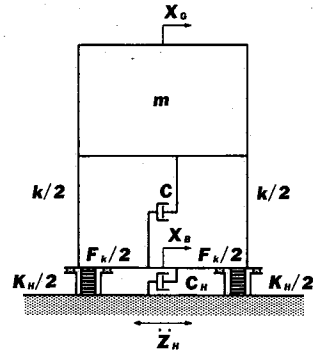


図3 解析モデル

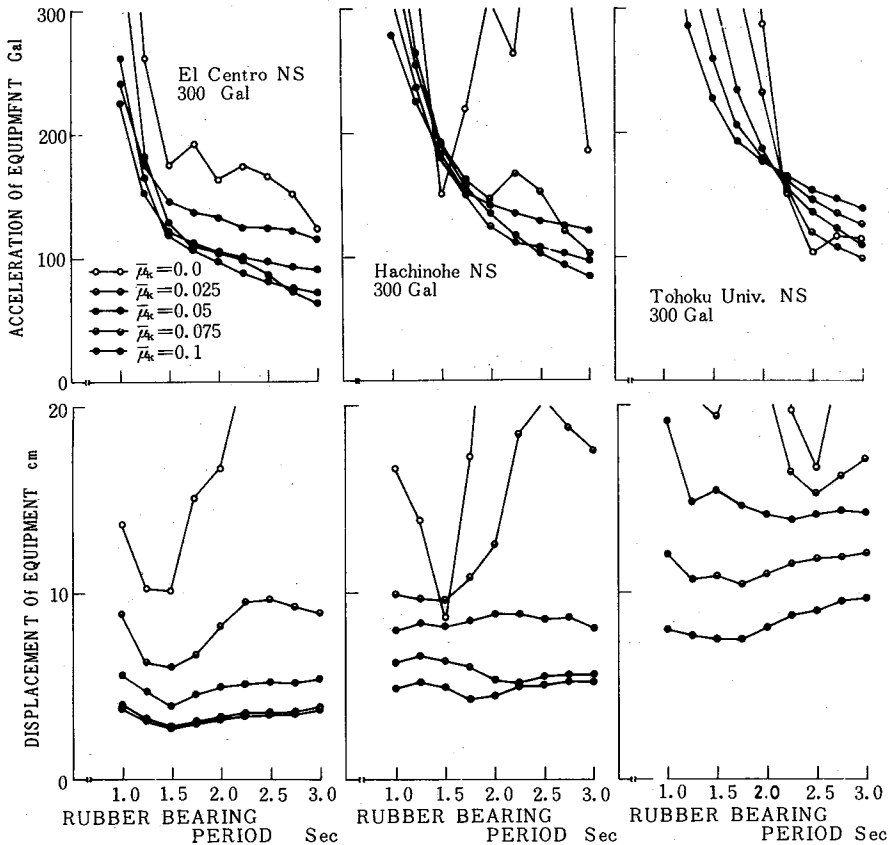


図4 機器の応答加速度と応答変位に及ぼす \$T_H\$ と \$\bar{\mu}_K\$ の影響
 (\$\omega_0/2\pi = 5 \text{ Hz}, \eta = \zeta_H = 0.03, \bar{\mu}_S = \bar{\mu}_K\$)

研究速報

(iii) Phase I と Phase II の切換条件

$$|c\dot{x}_C + k(x_C - x_B) - K_H x_B| > F_S \text{ のとき, } \quad (5)$$

Phase I → Phase II

$\dot{x}_B = 0$ かつ

$$|c\dot{x}_C + k(x_C - x_B) - K_H x_B| \leq F_S \text{ のとき, } \quad (6)$$

Phase II → Phase I

ここで, x_C, x_B はおのおの機器の重心, 機器のベースの地表面に対する相対変位, m, c, k はおのおの機器の質量, 減衰定数, ばね定数, K_H, C_H はおのおの積層ゴムの水平方向の総ばね定数, 総減衰定数, F_K, F_S はおのおの摩擦ダンパの動摩擦力, 静摩擦力の合力, \ddot{x}_H は地動の水平方向加速度である。また,

$$\omega_0 = \sqrt{k/m}, \quad 2\eta = c/\sqrt{mk},$$

$$\Omega_H = \sqrt{K_H/m}, \quad 2\zeta_H = C_H/\sqrt{mK_H}$$

ととき,

$$\bar{\mu}_S = F_S/(mg), \quad \bar{\mu}_K = F_K/(mg) \quad (7)$$

で定義されるみかけの静摩擦係数 $\bar{\mu}_S$ と動摩擦係数 $\bar{\mu}_K$ を導入する。

解析には, 地震波として, El Centro・NS・300 Gal, 八戸・NS・300 Gal, 東北大・NS・300 Galの3種類の実地震記録を用いる。このとき, $\omega_0 = 31.4 \text{ rad/s (5 Hz)}$, $\eta = \zeta_H = 0.03$ は一定とし, $\bar{\mu}_K (\bar{\mu}_S = \bar{\mu}_K \text{ とする})$ および $T_H (= 2\pi/\Omega_H)$ の値を変化させた場合の解析結果を図4に示す。図4の結果より, ここでは $T_H = 2.0\text{s}$, $\bar{\mu}_K = 0.08$ を採用する。図5は, この場合の八戸波に対する応答波形を示したものである。また, 図6は, $T_H = 2.0\text{s}$, $\bar{\mu}_K = 0.08$ なる免震支持装置を, 固有周期 T が 0.1s から 1s ま

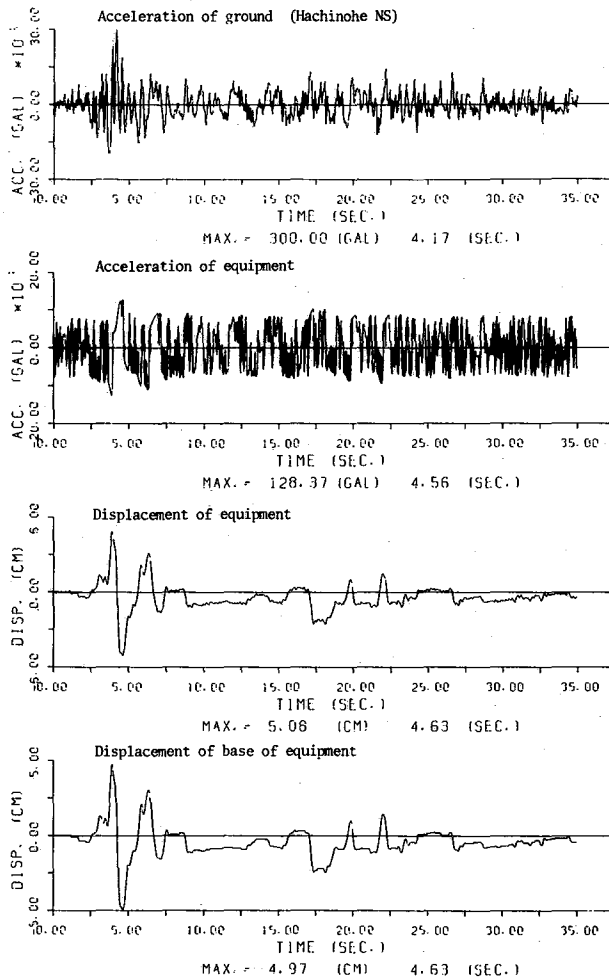


図5 八戸・NS・300 Gal に対する応答波形 ($T_H = 2.0\text{s}$, $\bar{\mu}_K = \bar{\mu}_S = 0.08$, $\omega_0/2\pi = 5 \text{ Hz}$, $\eta = \zeta_H = 0.03$)

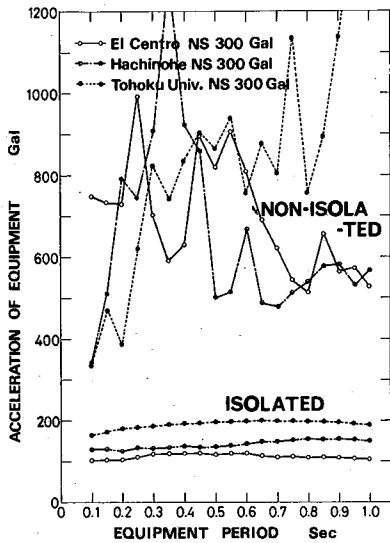


図6 免震性能($T_H=2.0s$, $\bar{\mu}_K=\bar{\mu}_S=0.08$, $\eta=\zeta_H=0.03$)

での範囲にある機器に取り付けた場合の応答加速度を、免震されない場合の機器の応答加速度と比較したものである。

3.2 積層ゴムについて

(i) 積層ゴムの縦ばね定数：両面に鉄板を接着したゴム板のみかけの縦弾性係数 E_{ap} は真の縦弾性係数 E_0 に比べて相当に大きな値となり、両者の関係は次式で表される。

$$E_{ap} = E_0(1 + 2\kappa S^2) \tag{8}$$

ここで、 κ はゴムの硬度によって決まる定数、 S は形状率と呼ばれ、厚さ t_R 、直径 d_R 、受圧面積 $A_R (= \pi d_R^2/4)$ の円形ゴムシートの場合、次式で与えられる。

$$S = A_R / (\pi d_R t_R) = d_R / (4t_R) \tag{9}$$

したがって、 n 層から成る積層ゴムの縦ばね定数 K_{V0} は次のようになる。

$$K_{V0} = A_R E_{ap} / (n t_R) \tag{10}$$

(ii) 積層ゴムの横ばね定数：積層ゴムの最下部鉄板を固定し最上部鉄板を水平方向に変位(回転は拘束)させるときのばね定数 K_{H0} は、積層ゴムのせん断変形と曲げ変形を考慮して、次式で与えられる。

$$K_{H0} = \left(\frac{n t_R}{A_R G} + \frac{n^3 t_R^3}{12 E I} \right)^{-1} \tag{11}$$

ここで、 G はゴムの横弾性係数、 $I (= \pi d_R^4/64)$ は断面二次モーメントである。ただし、式(11)の E の値は真の縦弾性係数 E_0 とみかけの縦弾性係数 E_{ap} の間にあると考えると、次の不等式により K_{H0} の値を評価する。

$$\left(\frac{n t_R}{A_R G} + \frac{n^3 t_R^3}{12 E_0 I} \right)^{-1} < K_{H0} < \left(\frac{n t_R}{A_R G} + \frac{n^3 t_R^3}{12 E_{ap} I} \right)^{-1} \tag{12}$$

(iii) 積層ゴムの設計条件：与えられた免震支持装置1個当たりの定格搭載質量 m_0 と最大許容変位量 d_a に対して、鉛直、水平方向の固有振動数と歪量についての以下の条件、すなわち、

$$f_{V0} = \sqrt{K_{V0}/m_0} / (2\pi) \geq 15 \text{ Hz} \tag{13}$$

$$f_{H0} = \sqrt{K_{H0}/m_0} / (2\pi) = 0.5 \text{ Hz} \tag{14}$$

$$\epsilon_t \equiv d_a / (n t_R) + 6 S m_0 g / (E_{ap} A_R) \leq \epsilon_B / 2 \tag{15}$$

ただし、

$$A_B = \{ d_R^2 \sin^{-1}(\sqrt{d_R^2 - d_a^2} / d_R) - d_a \sqrt{d_R^2 - d_a^2} \} / 2$$

を満たすように積層ゴムを設計する。ここで、 A_B は最大許容変位時の真の受圧面積、 ϵ_B はゴムの引張破断歪である。式(15)は、最大許容変位時の公称せん断歪と鉛直荷重による局所せん断歪の和である総せん断歪が引張破断歪の1/2以下であることを要求するもので、イギリスなどでの橋梁の支承用ラバーベアリングの規格を参考にしたものである。¹⁾

本研究では、 $m_0 = 10,000 \text{ kg}$ 、 $d_a = 12 \text{ cm}$ の免震支持装置を試作する。ゴムシートには天然ゴム系のゴムを使用しており、その諸定数は次のとおりである。

$$G = 0.50 \text{ MPa} (5.1 \text{ kgf/cm}^2),$$

$$E_0 = 0.98 \text{ MPa} (10.0 \text{ kgf/cm}^2)$$

$$\text{硬度(IRHD)} = 40, \quad \kappa = 0.85, \quad \epsilon_B = 7.1$$

試作した積層ゴムの諸元は以下のとおりである。

$$t_R = 0.25 \text{ cm}, \quad d_R = 19.5 \text{ cm}, \quad n = 53$$

この場合の K_{V0} 、 K_{H0} は式(10)、(12)より次のようになる。

$$K_{V0} = 1.4 \times 10^5 \text{ kN/m} (1.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2)$$

$$86 \text{ kN/m} (87 \text{ kgf/cm}) < K_{H0} < 110 \text{ kN/m} (110 \text{ kgf/cm})$$

したがって、式(13)~(15)の条件は次のようになる。

$$f_{V0} = 19 \text{ Hz} > 15 \text{ Hz}, \quad 0.47 \text{ Hz} < f_{H0} < 0.53 \text{ Hz},$$

$$\epsilon_t = 3.2 < 3.6$$

4. あとがき

試作した免震支持装置による基礎実験については次報で報告する予定である。

(1981年11月24日受理)

参考文献

- 1) Freakley, P. K. and Payne, A. R., Theory and Practice of Engineering with Rubber, Applied Science Publishers (1978).
- 2) Jolivet, F. and Richli, M. H., Proc. 4th SMiRT Paper K 9/2(1977.8).
- 3) Megget, L. M., Bull. N. Z. Nat. Soc. for Earthquake Engineering, Vol. 11, No 4 (1978.12).