

精密機器除振床構造システムの開発

- 複数機器を対象とした除振床構造 -

Vibration Isolated Floor for Precise Manufacturing Machines

寺村 彰 Akira Teramura

中村 充 Mitsuru Nakamura

1. はじめに

某研究施設新築工事にあたっては、当該建物に振動を嫌う加工装置が設置予定である一方で、建設場所に隣接して道路及び高架鉄道があるため、鉄道及び道路からの振動による嫌振機械への影響が懸念された。そこで、嫌振機械が設置される部屋を主対象として構造的な除振対策を施すと同時に、嫌振機械である放電加工機7台を設置する床板全体を除振する新たな工法を採用した。

2. 除振性能目標の設定

2.1 嫌振機器の許容振動条件

除振対象となる嫌振機器は Table 1 の通りである。これらの機械は設置床の振動ならびに床水平度に関して、以下のような条件を要する。

- (1) 水平・上下とも 0~20Hz において 40dB (加速度 0.1 cm/sec²*) 以下
- (2) 床水平精度 0.02mm / m以内
 (*注：通常 dB 表記による場合は、振幅の二乗平均値 (Root Mean Square) を意味するが、ここでは、安全余裕をみて加速度の最大値 (Peak) を用いて検討を行なっている。)

Table 1 除振対象の嫌振機器

Precision Machines which Require Vibration Isolation

機器種別	重量	設置予定台数
ワイヤー放電加工機 (W-EDM)	2.3 ton	3 台
型彫放電加工機 (EDM)	5.0 ton	4 台

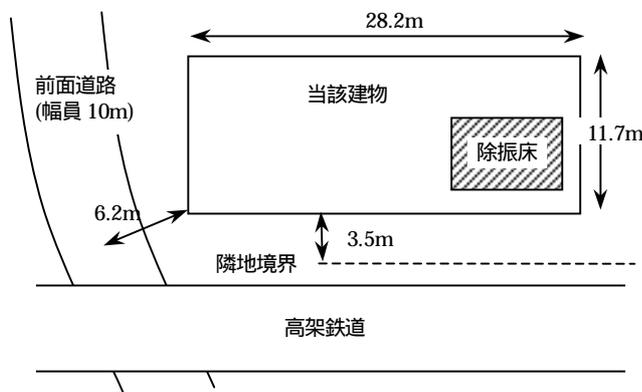


Fig. 1 建物概略配置図

Outline Plan of the Building

2.2 除振性能目標

上記機器が設置される建物は、Fig 1 に示すように、高架鉄道ならびに道路に隣接しており、周辺地盤からの交通振動の影響が計画段階から懸念された。建屋建設前に計画地にて実施された交通振動測定結果では、地盤上において、電車通過時に水平方向 3.5~4.0Hz で約 0.6 cm/sec²、自動車通過時に上下方向 5.0Hz 付近で約 0.8 cm/sec² という卓越した振動が観測された。

これらの振幅を機器の振動許容値(1)と比較し、除振性能目標値として、水平方向については 3.5Hz~4.0Hz において 1/6 (=0.167)、上下方向については 5.0Hz において 1/8 (=0.125) という値を設定した。

2.3 建物への入力損失

Table 2 に建物基礎ならびに地盤に関する諸元を示す。また、Fig. 2 に地盤柱状図を示す。これらの諸元に基づき、地盤から建屋への入力損失ならびに基礎杭による振動低減効果を検討した。(検討の詳細は省略)

その結果、上下方向の振動に関しては機器設置床における振動が振動許容値(1)を下回ることが予想された。すなわち、追加の除振対策を施さずとも(1)の許容値を満足すると予想された。上下方向に関しては、除振対象機器の水平度に関して(2)のような厳しい条件が課せられていることから、上下方向に関して何らかの除振装置を設けることは、過剰対策となることはあっても、水平度の点で新たな問題を生じる危険性の方が大きいと考えられる。したがって、上下方向については除振装置を設けず、建築構造的に剛な基礎構造を設けることで振動振幅の低減を図ることとした。

Table 2 基礎構造、地盤の諸元

Outline of Foundation of the Building

建物1階形状	短辺方向 11.7m × 長辺方向 28.2m
床版・基礎構造	鉄筋コンクリート
除振対象エリア	8.4m × 7.3m
除振床部分 耐圧盤形状	7,800 × 8,900 × 厚さ 500mm、 耐圧盤底 GL-2,750 杭頭部厚さ 1,000mm、
表層地盤特性	N 値 = 約 3 (GL 0 ~ -9m)、せん断波速度 $V_s = 89.8 \times N^{0.341} = 130\text{m/sec}$
杭先端地盤特性	GL-16m、泥岩層、せん断波速度 $V_s = 89.8 \times N^{0.341} = 340\text{m/sec}$
杭 (除振床部分)	PHC 杭 500 B 種、中央部 1 本、許容耐力 800KN、杭先端深さ GL-16m PHC 杭 300 A 種、周囲 8 本、許容耐力 400KN、杭先端深さ GL-16m

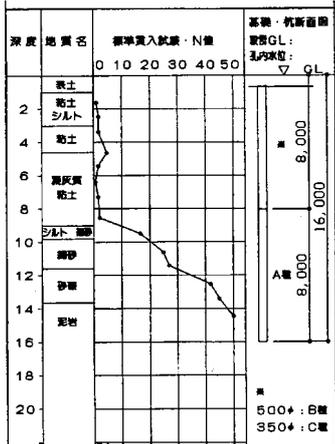


Fig. 2 地盤柱状図
Soil Profile

一方、水平方向に関しては、耐圧盤による地盤から建物への入力損失効果を考慮すると、水平方向に卓越する3.5Hzの地盤振動は、耐圧盤で約0.84倍になり、約16%の低減となることが予想された。この結果、2.2節に示した除振目標を達成するためには、何らかの除振装置により振動の低減を図る必要があることが判明した。この装置に要求される除振能力は、3.5Hz~4.0Hzにおいて0.20(=0.167/0.84)となる。

3. 除振構造の設計

3.1 除振設計の基本方針

前節での検討から、除振は水平方向のみを対象とし、積層ゴムと粘性ダンパーによる除振構造を採用することとした。さらに、除振対象となる7台の機械を個別に除振することはコスト的に不利であること、機器の搬入時期が同時ではなく将来的に順次設置される予定であるこ

となどを踏まえて、7台の機器が設置されるエリアの床全体を1台の除振装置として構成するという、新しい試みを採用することにした。除振床は鉄筋コンクリート構造とし、その重量により除振周期の長周期化を図ることとした。

なお、大地震時の対応については、装置レイアウト等の関係から除振床周辺に十分なクリアランスを設けることができなかったため、ある程度以上の大振幅については周辺に設けた緩衝材によってエネルギーを吸収することで対処することとした。

3.2 除振床構造概要

Fig.3に除振床構造の全体概要を示す。また、Table 3に除振床を構成する部材の諸元についてまとめて示す。

この除振床は通常の免震ビル等と比べると除振対象重量が小さいことから、一般的に用いられる規格品の積層ゴムを用いることはできない。しかしながら、この除振床用として特注品を製作することはコスト増の原因となる。そこで、ここでは積層ゴムの別置き試験体を用いられる小型の積層ゴムを転用することでコスト減を図ることとした。

Table 3に示された諸元から、除振床の水平固有振動数は、 $f=1.30$ Hz (全機器積載時) ~ 1.45 Hz (RC床板のみ)となる。ここで、RC床板のみの時の3.5Hzにおける除振床の伝達率(除振能力)を求めると、 $p=3.5$ Hz、 $h=0.1$ として

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{p}{f}\right)^2\right\}^2 + \left(2h\frac{p}{f}\right)^2}} = 0.206$$

となる。この値は、前述の要求除振能力0.20とほぼ等しく、機器設置による重量増加に伴う長周期化、さらに計算過程の各種安全余裕を見込めば要求性能を満たすこと

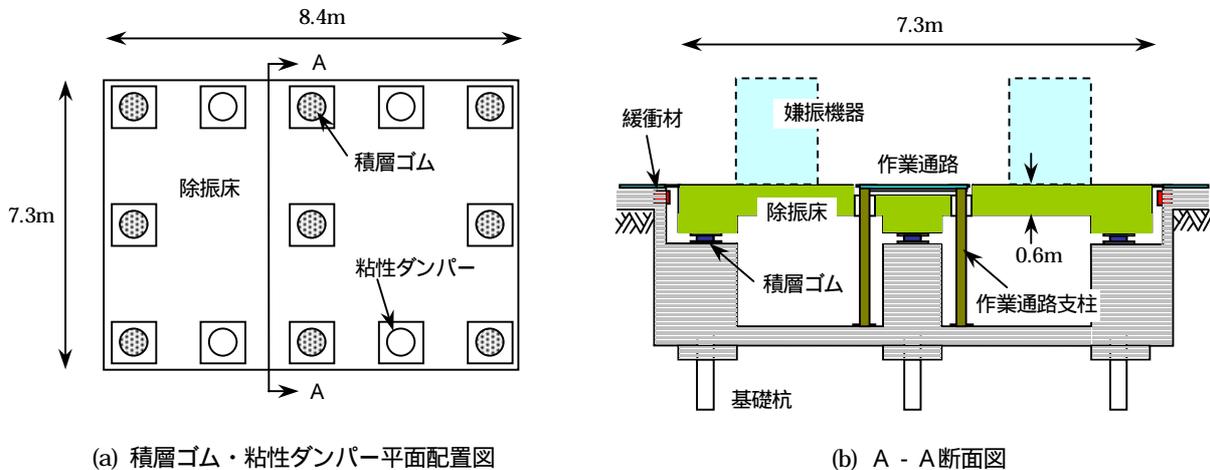


Fig. 3 除振床構造概要図
Plan and Section View of the Vibration Isolated Floor

Table 3
Specifications of Vibration Isolated Floor Components

除振床	
構造	鉄筋コンクリート造
寸法	7.3 m × 8.4m × 平均厚さ 600mm
重量	91.0 ton
積載機器重量 (加工物・架台を含む)	7 台合計 23.5 ton
積層ゴム	
種別	天然ゴム系
寸法	直径 304mm×高さ 140.6mm
ゴムせん断弾性係数	$G=34.3 \text{ N/cm}^2$ (3.5 kgf/cm ²)
単体水平剛性	$K_h=440 \text{ kN/m}$ (449 kgf/cm)
単体水平剛性 (微動時*)	$K_h=880 \text{ kN/m}$ (898 kgf/cm)
単体鉛直剛性	$K_v = 1,120 \times 10^3 \text{ kN/m}$ (1,140 × 10 ³ kgf/cm)
単体鉛直剛性 (微動時*)	$K_v = 2,240 \times 10^3 \text{ kN/m}$ (2,280 × 10 ³ kgf/cm)
個数	9 個
*微小歪時の剛性に対する歪依存率を約 100%(2 倍)増と想定して求めた値	
粘性ダンパー	
粘性材料	ブタン系化合物 (SA-P)
単体減衰係数	$C=343 \sim 686 \text{ N} \cdot \text{s/cm}$ (35 ~ 70kgf · s/cm)
個数	4 個
緩衝部材	
種別	高減衰 HD タイプ KJ-100
許容荷重	6.3 ton
吸収エネルギー	980 J (100kgf · m)
個数	各辺 14 個、計 56 個

が十分可能と考えられる。

なお、除振床水平度に対する要求条件、および大振幅時における緩衝材のエネルギー吸収能力に関しても、Table 3 の諸元により満足できることを確認している。

4 除振性能の確認測定結果

Photo 1 ~ Photo 2 に完成した除振床の外観ならびに構成部材の写真を示す。

Photo 1 の点線で囲った部分が除振床部分である。中央に見えるのは作業用の通路部分であるが、Fig.3 にも示すように、この部分は除振床からは分離して設置されており、通路上の歩行振動が除振装置に影響を与えないように考慮されている。Photo 2 には、基礎柱上に設置した積層ゴムと粘性ダンパーが見られる。

完成した除振床において、除振性能確認のため交通振動測定を行なった。測定を行なった段階では機器は設置されておらず、結果は除振床のみの状態におけるものである。Fig.4 に建屋内各所において測定した代表的な加速度記録のピークホールド周波数分析結果を示す。Fig. 4 (a) は電車走行時における水平方向 (建屋短辺方向) の結

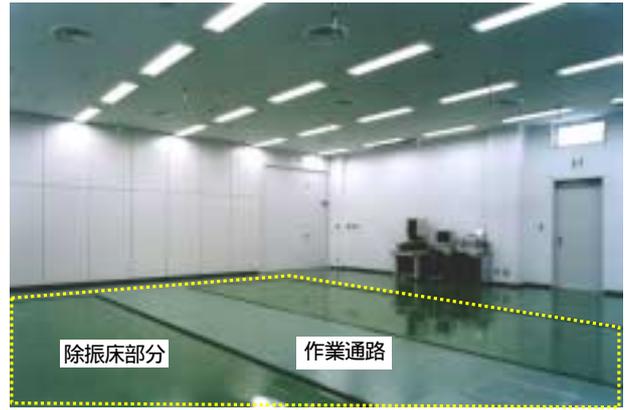


Photo 1 除振床全体外観
Vibration Isolated Floor



Photo 2 積層ゴムと粘性ダンパー
Laminated Rubber Bearing and Viscous Damper

果であり、(b) は前面道路自動車走行時における水平方向 (建屋短辺方向) の、(c) は同じく上下方向の結果である。それぞれ、点線が地盤上、鎖線が建屋内 1 階床上、破線が除振床直下の耐圧盤上、実線が除振床上の結果を示している。図中には嫌振機器の振動許容値(1)を併記して示してある。

測定結果からは以下のようなことが確認された。

- 電車・前面道路通過自動車による振動について、除振床上の各測点の水平・上下各方向の振幅は、振動許容値(1)以下に収まっている。
- 防振基礎上の水平方向では、2Hz 弱の振動数において基礎の固有振動によると思われるピークが見られる。
- 電車走行時の、水平方向 3 ~ 4Hz 付近における振幅を見ると、地盤に対して防振基礎上の振幅は約 1/5 ~ 1/6 程度となっており、設計時の予想とほぼ同程度となっている。
- 自動車通過時の、上下方向 5Hz 付近における振幅を見ると、地盤に対して耐圧盤の振幅は約 1/10 に低減しており、設計時に予想した約 1/8 という値よりさらに低減している。

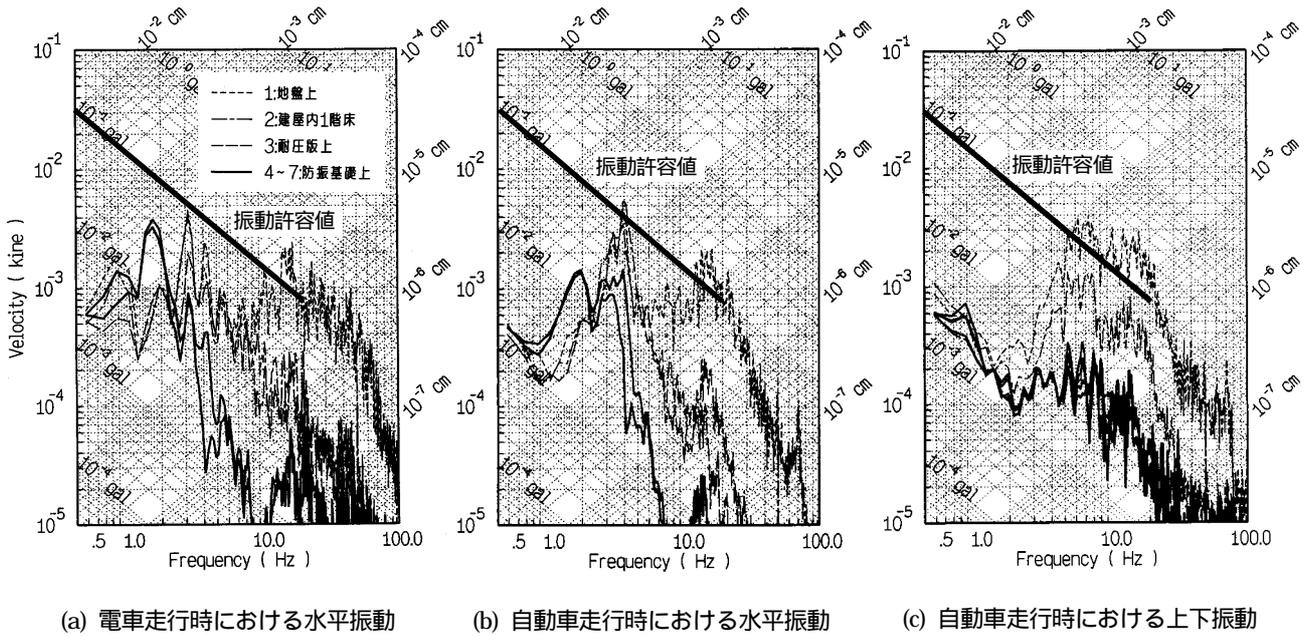


Fig. 4 振動測定のスเปクトル分析結果
Observed Spectra of Traffic Induced Vibration

- ・ 地盤から建屋内への伝搬における振幅低減の様子を見ると、水平方向に関して、10Hz 以上の高い振動数の振幅は地盤から建屋に入る段階で低減しているのに対して、それ以下の振動数における振動は耐圧盤においてもあまり減衰していない。2.5Hz 以上の振動は、防振基礎上で大きく減衰している。一方、上下方向の振動に関しては、地盤と比較して耐圧盤の振幅が大きく減少している。防振基礎上でも耐圧盤と同程度の振幅となっている。

Fig.5 には、測定結果から求めた耐圧盤に対する除振装置の伝達関数を示す。図に示されるように、水平方向の1次固有振動数は 1.7Hz であり、除振床のみの設計値 1.45Hz に比べて約 16%高めとなっている。これは設計で考慮していなかった、粘性ダンパーの微小振幅時における剛性の影響によるものと考えられる。特に、測定時における建屋内気温が摂氏 5 程度と低かったことによる影響が大きいと思われる。一方、伝達関数から求めた減衰定数は約 8%となっている。

上下方向に関しては、30Hz~50Hz にかけてなかなか増幅が見られるが、20Hz 以下においてはほとんど増幅は見られず、設計で想定した除振性能に悪影響を与えていないことが確認された。

なお、図中、1Hz,2Hz 付近に見られるピークは、測定器アンプのノイズに起因するものであり、現実の現象ではない。

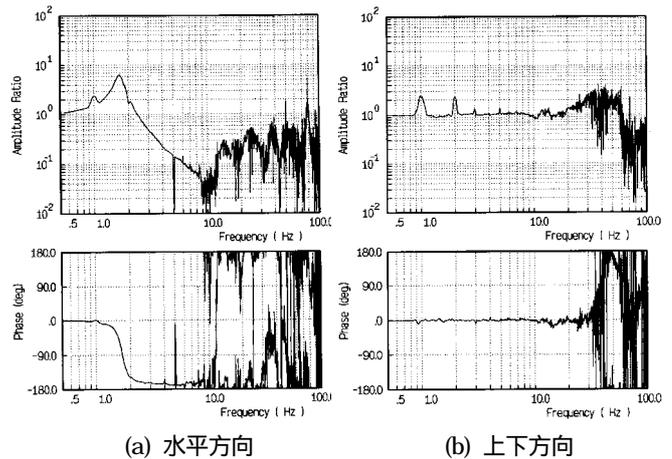


Fig. 5 除振床の伝達関数
Transfer Function of the Vibration Isolated Floor

5 まとめ

道路および高架鉄道に隣接して建設された研究施設に設置される嫌振加工機器を対象として、複数の機器を一つの床上に設置して床全体を除振構造とする新たな工法を採用した。完成した除振床において振動測定を行ない、除振性能確認を実施した結果、除振床は設計で想定された性能を発揮しており、嫌振機器の振動許容値を満足することが確認された。

この工法は、低コストで大きな除振空間を実現できる方法として、複数の嫌振機器を対象とした場合以外にも広く応用が可能であると考えられる。