DI 値による地震性状推定と空圧式除振装置における制御切り替えの高速化

久保田 将行^{*1}, 涌井 伸二^{*2}

Accelerating of characteristic estimation of seismic motion and switching control for air type anti-vibration apparatus by using *DI* value

Masayuki KUBOTA^{*1} and Shinji WAKUI^{*2}^{*1, *2} Tokyo University of Agriculture and Technology

2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo 184-8588, Japan

Received: 25 July 2016; Revised: 18 October 2016; Accepted: 11 December 2016

Abstract

This paper shows estimation of earthquake using destructive intensity (*DI*) value and its application to switching control for air type anti-vibration apparatus (AVA). Air type AVAs are used for suppression of vibration in precision machining field like semiconductor manufacturing. Since even slight vibration is not excused, seismic motion which occurs in rare becomes a problem. Previous work switched control of the AVA by using spectrum intensity (*SI*) value when seismic motion occurs. However, the calculation of *SI* value has computational complexity and requires long computation time. In order to solve this problem, observation points were created in the distance from the AVA. Since this method leads to the increase of cost, it is difficult for an enterprise to use observation points. This paper proposes control system which estimates property of earthquake using only location of the AVA. In particular, to estimate earthquake uses *DI* value instead of *SI* value. This value has a characteristic which is that the computation time is short. This approach estimates characteristic of seismic motion by using both *DI* value and property of the AVA. Moreover, control of the AVA is switched. Simulation results demonstrated that *DI* value estimates property of seismic motion faster than the conventional method and proposal method could properly switch controller of AVA in the same way as the previous method. In addition, using *DI* value to detection way of seismic motion proves that this way can switch faster than the conventional method.

Key words : Pneumatic equipment, Seismic motion, Spectrum analysis, Spectrum intensity, Destructive intensity

1. 緒 言

空圧式除振装置（以下、除振装置と略記）は防振のため半導体露光装置（以下、露光装置と略記）に用いられている（Chang et al., 2010）（Chen and Shih, 2007）（Shin et al., 2010）. 同装置によって製造される IC の微細化が進み、微振動も許容できない状況になっている。抑制すべき振動は、装置が稼働したときの機械振動、人の歩行による床振動、そして稀に発生する地震動である。本論文では地震動に着目する。地震動が装置に作用したとき、除振装置の空気ばね剛性が弱いため、大きな揺れを引き起こし、機械衝突の恐れがある。そこで、空気ばね内の空気を抜き、除振台を着座させる対策がある（高橋他, 2010）。しかし、再稼働までに時間を要し、生産性が格段に低下する。また、除振装置の性能を向上させる床振動フィードフォワード（以下、FF と略記）の適用によって除振率が向上するものの、低周波領域で相対位置は悪化すると報告されている（涌井, 小笠原, 2011a, 2011b）。そこで、*SI* 値（Housner, 1961）を用いて地震動の性質を捉えて、制御を適切に切り替えて地震動をやり過ごす手法を提案した（涌井, 論手, 2013）。この *SI* 値は都市ガスなどに地震動を観測するシステムに使用される（清水他, 2003）。しかし、計算時間を要する *SI* 値を用いるため、性状を特定するまでの時間は除振台に伝わる振動を抑制できない。そこで、観測地点を設けて露光装置に伝達する前に地震性状を判定し、あらかじめ制御を切り替える手法を提案した（論手, 涌井, 2014）。しかし、地震動の到達よりも速く切り替えるため安全ではあるが、生

No.16-00330 [DOI:10.1299/transjsme.16-00330], J-STAGE Advance Publication date: 19 December, 2016

^{*1} 学生員, 東京農工大学大学院電気電子工学専攻(〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)

^{*2} 正員, 東京農工大学大学院工学研究院

E-mail of corresponding author: s159820v@st.go.tuat.ac.jp

産性の低下を招いた。そこで、地震性状の判定と地震動の到達を観測する二種類の地点を設ける手法を提案し、地震動の到達の直前まで除振装置を稼働させることで、生産性を向上させた（峰尾他，2014）。しかし、文献（論手，涌井，2014）（峰尾他，2015）の方法では全国に存在する地震動の観測ネットワークを用いることで実現できるものの、一企業が活用するにはコストの問題がある。そのため、広範囲に観測地点を設けず、除振装置のみで完結する制御切り替えシステムの方が都合がよい。そこで本論文では、従来の SI 値に代えて DI 値（Nakamura, 1998）を用いた制御切り替え方法を提案する。この DI 値は新幹線の P 波警報として使用される指標である（中村，2003）。

まず，2 章では，除振装置の制御モデルを示し，文献（涌井，論手，2013）（峰尾他，2014）（峰尾他，2015）の手法を簡潔に述べる。3 章では， DI 値による地震動の判定結果を用いた制御切り替え方法を述べる。4 章では，さらに DI 値を地震動の振幅検出に利用し制御切り替えが高速化したことを示す。そして，最後の 5 章では，結論をまとめる。

2. SI 値を用いた制御切り替え方式

文献（涌井，論手，2013）（峰尾他，2014）（峰尾他，2015）では，除振装置の稼働を停止させることなく制御を切り替えて対処する，いわば「やり過ごす」制御手法が報告された。具体的には観測地点を増やすことで地震動を事前に検知し，これをやり過ごすことが可能となった。本章ではこれら手法について簡潔に説明する。まず，文献（涌井，論手，2013）（峰尾他，2014）（峰尾他，2015）そして提案手法の位置づけについて 2・1 節に，除振装置の制御モデルを 2・2 節に， SI 値を用いた制御切り替え論理の概念を 2・3 節に，そして観測地点を設けない文献（涌井，論手，2013）の手法でシミュレーションした結果を 2・4 節に示す。なお，文献（峰尾他，2014）（峰尾他，2015）は概要を述べ，シミュレーション結果については割愛する。

2・1 従来手法と提案手法の位置づけ

従来手法と提案手法の位置付けを図 1 に示す。ここで，図 1(a)は除振装置の設置地点で観測される地震動の SI 値を計算する方法，(b)は除振装置の遠方に観測地点を設けて事前に SI 値を計算する方法，(c)は観測地点とは別に除振装置近傍に地震動の検出地点を設けて制御をその到来寸前で切り替える方法，そして(d)は本稿で提案する除振装置の設置地点での DI 値を計算して制御を切り替える方法である。まず，同図(a)は震源で発生した地震動は緑色の丸である除振装置へ直接伝達される。その除振装置上で SI 値を使って地震動の特徴を判定し，制御を切り替えて対処する。しかし，揺れを除振装置が検知してから SI 値を計算するため，制御が切り替えられるまでの時間は地震動の影響を直接受ける。そこで，同図(b)の遠方に観測地点を設ける手法を提案した。震源で発生した地震動は，まず除振装置の遠方に配置した青色の三角である観測地点に伝達される。そこで SI 値を使って地震動

Fig. 1 Concept for explaining previous and proposal methods. In the case (a), SI value is calculated at location of the AVA. In the case (b), this method detects the earthquake by multiple observation points set apart from the AVA. In the case (c), in addition to method (b), detection points are located. In the case (d), DI value is calculated at location of the AVA.

Fig. 2 Block diagram of control system for the air type AVA. Acceleration of the earthquake inputs to the "Logic" as an information. "Logic" determines the characteristic of earthquake. FF switch, FB gain switch, and Apparatus stop switch are changed by using judgement results.

の特徴をあらかじめ判定する。その後、緑色の丸である除振装置に地震動が伝わる前に観測地点から地震動の判定情報を送り、あらかじめ地震動到着前に余裕をもって制御を切り替える。そのため、わずかな時間ではあるが、露光装置の露光が停止させているこの間は生産性が低下する。そこで、同図(c)のように、観測地点とは別に除振装置近傍に地震動の検出地点を設ける手法を提案した。この方法は青色の三角である観測地点で地震動の特徴を判定する。判定情報は赤色の四角で示された検出地点に送られる。検出地点では地震動の到達判定を行い、検出したとき、緑色の丸で示す除振装置へ情報を送って制御を切り替える。しかし、遠方に加えてさらに近傍にも観測地点を設けるため、設備コストの問題が生じる。そこで、同図(d)に示すように、 SI 値に代えて DI 値を用いる。すなわち、(a)と同様に除振装置のみで完結した制御システムを提案する。なお、この提案手法の詳細は3章で後述する。

2・2 制御モデル

文献(涌井, 論手, 2013)で提案した除振装置の制御構成を図2に示す。ここで、記号の意味は、 $M[\text{kg}]$ は除振台の質量、 $D[\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}]$ は粘性比例係数、 $K[\text{N}/\text{m}]$ はばね定数、 $A_0[\text{m}^2]$ は受圧面積、 $\beta_0[\text{1}/\text{Pa}]$ は圧縮率、 $V_0[\text{m}^3]$ は空気ばねの体積、 $c[\text{m}^3/\text{s}/\text{Pa}]$ は流量コンダクタンス、 $G_q[\text{m}^3/\text{s}/\text{V}]$ は流量ゲイン、 $k_{pos}[\text{V}/\text{m}]$ は変位センサの感度、 $k_{pre}[\text{V}/\text{Pa}]$ は圧力センサの感度、 $k_{acc(i)}[\text{V}/(\text{m}/\text{s}^2)]$ は除振台上の加速度センサの感度、 $k_{acc(f)}[\text{V}/(\text{m}/\text{s}^2)]$ は床上の加速度センサの感度、 $k_{pr}[\text{V}/\text{V}]$ は圧力PI補償器のゲイン、 $k_{ar}[\text{V}/\text{V}]$ は加速度PI補償器のゲイン、 $k_s[\text{V}/\text{V}]$ は位置PI補償器のゲイン、 $k_g'[\text{V}/\text{V}]$ は圧力FBのゲイン、 $k_a'[\text{V}/\text{V}]$ は加速度FBのゲイン、 $k_{atun(opt)}[\text{V}/\text{V}]$ は相対加速度の積分信号正帰還ゲイン、 $k_{fv}(s)[\text{V}/\text{V}]$ は床振動FF補償器の伝達関数、 $T_p[\text{s}]$ は圧力PI補償器の時定数、 $T_a[\text{s}]$ は加速度PI補償器の時定数、 $T_i[\text{s}]$ は擬似積分器の時定数、 $T_{hp}[\text{s}]$ は直流カットフィルタの時定数、 $w[\text{V}]$ はサーボバルブの操作量、 $x[\text{m}]$ は除振台上の変位、そして $x_0[\text{m}]$ は床上の変位である。

図2の除振装置は五つの制御ループから構成される。一つ目は同図(1)に示す空気ばねの固有周波数での共振を抑制する加速度フィードバック(以下、FBと略記)、二つ目は(2)に示す床振動を検出し除振台上への振動伝達を抑制する床振動FF、三つ目は(3)に示す除振台と床の相対加速度から空気ばねの体積変化を計算し、変化分をキャンセルする相対加速度の積分信号正帰還、四つ目は(4)に示す除振台と床の相対位置をFBし除振台を平衡位置に定位させる位置FB、そして五つ目は(5)に示す空気ばね内の圧力を一定に保つ圧力FB、である。ここで、床振動FFと相対加速度の積分信号正帰還をFF制御、加速度FBをFB制御と呼ぶ。FF制御は除振率向上のために常

時適用するが、低周波領域において相対位置の特性が悪化する。また、FB 制御は FB ゲインを強めることで除振率を向上させるが、低周波領域において相対位置が悪化する。これら除振率と相対位置はトレードオフの関係にある。そのため、地震発生時には FF と FB 制御を適切に切り替える。そこで、三種類のスイッチを導入する。一つ目は床振動 FF と相対加速度の積分信号正帰還の ON/OFF を決定する「FF switch」、二つ目は加速度 FB のゲインの大きさを切り替える「FB gain switch」、そして三つ目は制御切り替えだけでは対処できない巨大地震を検知し、除振装置の稼働停止を命令する「Apparatus stop switch」である。次節に、これらスイッチを切り替えるための制御論理 (Logic) を説明する。

2・3 SI 値を用いた制御論理

文献 (涌井, 論手, 2013) の SI 値を用いた制御論理の概要を図 3 に示す。同図の Logic は地震動の加速度を入力として五つの信号に変換する。一つ目は地震動の加速度 $\ddot{x}_0$ そのものである。二つ目は地震動の加速度を 2 階積分した地震動の変位 x_0 である。三つから五つ目は三種類の SI 値である。ここで SI 値とは、地震動が建造物に与える影響を数値化したものである。導出方法は、時間窓を設定して地震動の加速度波形を測定する。この時間窓は低周波地震動の観測を目的とするため 11 s と設定している。11 s で観測した地震動の波形に対して速度応答スペクトル $S_v[\text{mkine}]$ を求め、このスペクトルの周期 $T[\text{s}](0.1\sim 2.5 \text{ s})$ を平均したものである。同指標は地震工学で使用されており、SI 値の定義式を式(1)に示す。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_v dT \quad (1)$$

判定に用いる三種類の SI 値のうち一つ目は通常定義の SI 値(=SI_n)、二つ目は地震動の低周波成分に該当する周期 1.0~10 s に変更した低周波向け SI 値(=SI_l)、そして三つ目は地震動の高周波成分に該当する周期 0.1~1 s に変更した高周波向け SI 値(=SI_h)である。変換された信号は「Judge 0/1」に入力され、閾値の判定を行う。具体的に、(SI_l-SI_n) が閾値を超えたとき低周波、(SI_h-SI_n) が超えたとき高周波地震動と判定する。「Judge 0/1」によって出力された信号は「Switching logic」へ送信される。そこで真理値表に基づき、信号を「FF switch」、「FB gain switch」、そして「Apparatus stop switch」へ送り、制御を切り替える。

2・4 従来方法のシミュレーション結果

SI 値を用いた地震動に対する制御切り替えのシミュレーションを示す。試供の地震動は新潟中越沖地震 (2007 年 07 月 16 日 10:13:00 に発生) であり、除振装置は三重県四日市市に設置されているとした。なお、地震動の波形は K-NET よりダウンロードした (K-NET, 2015)。文献 (涌井, 論手, 2013) に基づき、地震動が入力されたときの除振台上の加速度 $\ddot{x}$ と相対位置 $(x - x_0)$ のシミュレーション結果を図 4 に示す。ただし、試供の地震動をそのまま用いると、除振装置の可動限界を超える。そのため、床上の加速度 $\ddot{x}_0$ を 0.29 倍してスケールリングした。また、シミュレーション開始から時刻 10 s 後に地震動を入力した。図 4 の各図面右側縦軸の Control logic の 0 は制

Fig. 3 Detail of logic block using SI values. In this “Logic”. Floor pos., Floor acc., and differences $SI_h - SI_n$ and $SI_l - SI_n$ are calculated by using floor vibration. “Judging logic0/1” judges on the base of threshold. Moreover, “Switching logic” sends a signal of switching control to FF, FB gain, and Apparatus stop switches on the base of truth table.

Fig. 4 Switching result by using previous work (Wakui S., 2013). This figure shows time responses of table acceleration and relative displacement under earthquake. In this figure, red and black lines denote results of w/ and w/o switching control.

Fig. 5 Position of vibration isolator, observation points, and seismic center. (Mineo et al., 2014)

Fig. 6 Position of vibration isolator, observation points, switches, and seismic center. (Mineo et al., 2015)

御切り替え無し，1は低周波向け切り替え，2は高周波向け切り替え，そして3は装置停止を示す。

図4の結果は，56.02 sにControl logicが1となり，低周波向けの切り替えを行っている．そのため，同図左側に示す除振台上の加速度 a ($\ddot{x}$ [m/s²])の単位をgalに変換は悪化する．一方で右側のように相対位置 $(x-x_0)$ が抑制できた．これは，既述した理由で， a と $(x-x_0)$ がトレードオフの関係となるためである．したがって， $(x-x_0)$ が大きいこの地震動では，制御切り替えは有効である．しかし，地震動を除振装置が検知してからSI値を計算するため，地震動の入力時刻10 sから切り替える時刻56.02 sまでの時間は地震動の影響を直接受けている．そこで，図5のように除振装置の遠方に青色の三角で示された観測地点をあらかじめ三箇所設けた．観測地点は徳島県鳴門市，静岡県焼津市，そして福井県福井市である．除振装置がある四日市市からの直線距離はそれぞれ，鳴門市が124 km，焼津市が153 km，そして福井市が173 kmであり，通常は地震動の発生箇所がわからないため除振装置を囲むように設定した．なお，実用にあたっては，地震動が露光装置へ与える被害を調査し分析を行い，数ある既存の観測所からのデータのすべて，あるいは一部を選択することになる．

震源で発生した地震動はまず福井市に到着し，そこで地震動の特徴を判定する．その判定結果を隣り合う鳴門市と焼津市に送り，情報が送られた地点で地震動の伝搬を確認したのち，判定情報をもとに制御切り替えを行う．なお，震源と除振装置を結ぶ距離よりも遠くに設置され，地震動が同装置よりも後に伝達される鳴門市の情報は考慮しない論理である．図示していないが，この地震動において結果は，地震動が除振装置へ伝達する11.19 s前に余裕をもって制御を切り替えられた．しかし，事前に露光装置の露光動作を停止して制御を切り替えるため，あらかじめ停止させた時間はICの生産性が低下する．そこで，観測地点とは別に，図6に示すように除振装置の近傍に赤色の四角で示した検出地点をあらかじめ三箇所設けた．検出地点は三重県いなべ市藤原，愛知県知多市，そして三重県津市の三箇所であり，除振装置を囲むように設定した．なお，四日市市からの直線距離は藤原が26 km，知多が20 km，そして津が31 kmである．まず，震源で発生した地震動は福井市に到着し，そこで特徴を判定する．判定結果を隣り合う観測地点に送り，その地点でも特徴を判定する．二つの結果をもとに判定した地震

動の性質を、同図赤色の四角に示す地震動の検出地点に送信する。検出地点で地震動が観測したとき、除振装置に制御信号を送信して制御を切り替える。なお、震源と除振装置間の距離よりも遠く、地震動が除振装置よりも後に伝達される観測地点である鳴門市と検出地点である津市の情報は考慮しない。あらためてシミュレーションした結果、観測地点や検出地点を用いない手法に比べて約 40 s 速く制御を切り替えられた。しかし、遠方の観測地点に加えてさらに近傍に検出地点を設けるため、設備コストの増大を招く問題が生じる。そこで、次の 3 章では、 DI 値を用いて除振装置のみで完結した制御システムを提案する。

3. DI 値を用いた除振装置の制御切り替え

2 章で用いた SI 値の使用には二つの問題がある。11 s という時間窓で観測した地震動に対して計算するため観測時間が必要なこと、そして微分方程式を数値解析により解くため計算負荷が重いことである。そこで SI 値に代えて、本章では DI 値を用いる方法を提案する。まず従来方法で用いた SI 値に代えて、新たに導入する DI 値の定義を 3・1 節に、 DI 値を用いた地震動の周波数成分の判定方法を 3・2 節に、周波数成分の判定結果をもとにした除振装置の FF, FB 制御の切り替え論理を 3・3 節に、従来の SI 値と提案する DI 値を用いた場合のシミュレーションの比較を 3・4 節に、そしてこの結果を踏まえ、特殊な性状を有する地震動に対して考察した結果を 3・5 節に示す。

3・1 DI 値の採用

SI 値の代わりに用いる DI 値とは、文献 (Nakamura, 1998) で提案された地震動による加害指標であり、新幹線の P 波警報として使用されている (中村, 2003)。この値は単位質量当たり仕事率と定義され、次式である。

$$DI = \log_{10} |\mathbf{a} \cdot \mathbf{v}| \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{a}[\text{gal}]$ と $\mathbf{v}[\text{mkine}]$ は東西・南北・上下の加速度ベクトルと速度ベクトルである。この DI 値から 0.6 引いた値であるリアルタイム震度 (RI 値) は計測震度に相当する (中村, 2007)。なお、本稿で扱う除振装置は鉛直方向一軸のみ可動するため、この方向だけを考慮した式(3)を新たに DI 値と定義する。

$$DI = \log_{10} |a_z \times v_z| \quad (3)$$

上式の $a_z[\text{gal}]$ は鉛直方向の加速度、 $v_z[\text{mkine}]$ は鉛直方向の速度である。ただし、加速度または速度が 0 になるとき式(3)は負に発散し実用上扱いにくい。そのため、 DI 値の包絡線をとって使用する。 DI 値の有効性を確認するため、四つの地震動に対するシミュレーションを行う。地震動の波形は K-NET よりダウンロードした (K-NET, 2015)。地震動はシミュレーション開始から 10 s 後に入力される。

(a)小坂地震：岐阜県下呂市小坂町で 2011 年 3 月 16 日 (3:33:29) に観測。

(b)熊本地震：熊本県熊本市東町で 2010 年 8 月 29 日 (21:31:45) に観測。

(c)宮城地震：三重県四日市市で 2011 年 4 月 7 日 (23:35:38) に観測。

(d)四川省地震：中国四川省を震源とする四川省地震を大分県大分市碩田町で 2008 年 5 月 12 日 (15:33:27) に観測。

図 7(a)から(d)は、地震動に対する SI 値と DI 値の立ち上がりの比較である。いずれの DI 値も時刻 10 s の時点で立ち上がりが見られるのに対して、 SI 値の場合には、 DI 値に比べて遅い。文献 (Y. Nakamura, 1998) では、 DI 値の特徴として、(i)リアルタイム性に優れること、および(ii)地震動の早期検出が可能なこと、を挙げている。(i)の特徴は、 DI 値の定義式である式(2)あるいは(3)から明らかである。定量的な計算量の比較を示すため、表 1 に図 7 のシミュレーション時間を示す。なお、地震動(a), (c), そして(d)の継続時間は 70 s, (b)のそれは 96 s であり、ステップ幅 0.01 s である。地震動(a)で DI 値を用いた場合の計算時間は SI 値のときの 1/600, (b)では 1/584, (c)では 1/530, そして(d)では 1/503 倍だけ短い。このことから計算負荷が小さいため、 SI 値よりも DI 値の方がリアルタイム性に優れる。なお、この計算時間は計算機の性能に依存するため普遍的な値ではない。

Fig. 7 Comparison of SI value with DI value against various earthquakes. In this figure, red and green lines denote results of SI and DI values.

Table 1 Comparison of the simulation time of SI_n and DI_{floor} .

	Simulation time [s]			
	(a) Osaka quake	(b) Miyagi quake	(c) Kumamoto quake	(d) Sichuan quake
SI_n	38.52	54.98	38.12	38.24
DI_{floor}	0.064	0.094	0.072	0.076

一方、なぜ地震動を速い立ち上がりで検出できるのかについては文献 (Nakamura, 1998) では明確に述べられていない。そこで、立ち上がりの鋭さについて考察する。はじめに、式(3)で $w=|a_z \times v_z|$ とおき、以下の式を得る。

$$DI = \log_{10} w \quad (4)$$

ここで、 w について微分し、以下の式を得る。

$$DI' = \frac{1}{\ln 10} \frac{1}{w} \quad (5)$$

w の値が小さい微振動のとき、式(5)は大きな値をとる。以上の理由から DI 値は地震動の立ち上がりをよく検出できる。

3・2 DI 値を用いた地震動の周波数成分の判定

DI 値を用いた地震動の周波数成分の判定方法の概念を図 8 に示す。同図(a)に低周波成分、(b)に高周波成分が支配的な地震動が発生したときの床と除振台上の加速度と DI 値の概略を、右側に除振装置の除振率の周波数特性を示す。この除振率は(a)と(b)において、それぞれ太線箇所の特性で床上の振動が除振台上へ伝達される。つまり、除振装置の固有周波数より低い周波数領域では低周波成分が卓越する地震動が、また、高い周波数領域では高周波成分が卓越する地震動が、それぞれ支配的となる。はじめに、図中(a)と(b)ともに式(3)を用いて床上の加速度 $\ddot{x}_0$ と速度 $\dot{x}_0$ 、除振台上の加速度 $\ddot{x}$ と速度 $\dot{x}$ からそれぞれの DI 値を計算する。このとき、床上および除振台上の DI 値を DI_{floor} 、 DI_{table} とそれぞれ定義する。同図(a)の低周波地震動が発生したとき、除振装置の除振率はほぼ 0 dB のため、床上に生じる地震動の加速度は減衰せず除振台上に伝達される。そのため、 DI_{floor} と DI_{table} はほぼ同一の値をとる。一方、同図(b)の高周波地震動が発生したとき、床上の振動は減衰して除振台上に伝達されるため、 DI_{table} は DI_{floor} より小さい値をとる。以上のことから DI_{table} と DI_{floor} の差分が大きいとき高周波地震動、小さいとき低周波地震動が発生したと判定できる。

DI 値を用いる有効性を示すため、図 9 に 3・1 節で既述の地震(a)を用いた DI 値の差分 DI_{diff} と、床上と除振台上の加速度応答振幅比(a_0/a and a/a_0)のシミュレーションを示す。なお、それぞれは実用上から包絡線をとっており、制御を切り替えない通常状態の除振装置を用いた比較である。同図中央や右側に示す加速度応答振幅比を用いた場合、値の大きさや極性の特徴を使った閾値による判定が難しい。そのため、提案した DI 値を用いた方が

Fig. 8 Concept for estimating a frequency spectrum with DI value. In this figure, waves drawing on the left side show conceptual diagram of table and floor DI values. Gain characteristics drawing on the right side shows conceptual diagrams of the transmissibility.

Fig. 9 Comparison of DI value (DI_{diff}) with acceleration response ratio (a_0/a and a/a_0).

効果的である。

3・3 DI 値を用いた制御論理

図 10 に「FB gain switch」, 「FF switch」, そして「Apparatus stop switch」を切り替えるための制御論理を示す。この論理では入力として地震動の加速度 $\ddot{x}_0$ を用いる。入力された信号は四つの信号に変換する。一つ目は地震動の加速度 $\ddot{x}_0$, 二つ目は加速度を二階積分した地震動の変位 x_0 , 三つと四つ目は 3・2 節で述べた床上と除振台上の DI 値の DI_{floor} , DI_{table} である。この二種類の DI 値を用いて「 $DI_{floor}-DI_{table}=DI_{diff}$ 」を計算する。 DI_{diff} はカットオフ周波数 0.5 Hz に設定した LPF を介して出力し、演算した波形の概略をとりだしている。

続いて $\ddot{x}_0$, x_0 , そして DI_{diff} の値は同図の「Judging logic 0/1」に伝達され、閾値判定により「0」あるいは「1」の信号に変換される。 $\ddot{x}_0$ と x_0 を二種類の閾値と照らし合わせて使用する。一つ目は FF switch と FB gain switch に用いる閾値, そして二つ目は Apparatus stop に用いる閾値である。 $\ddot{x}_0$ は 30 gal を x_0 は 400 μm 超えたとき、地震動が到達したとしてそれぞれ 1 を出力する。 $\ddot{x}_0$ と x_0 の論理和をとり、Switching logic へ送信する。また、70 gal, 600 μm を超えたとき、可動限界に達して機械衝突の危険性があるため、それぞれ 1 を出力し、論理和をとり、Switching logic へ送信する。

DI_{diff} は 1 を超えたとき、高周波成分を多く含む地震動と推定して 1 を送信する。そして、1 が出力されているときに 0.4 未満が 1 s 間続くかを判定し、この判定結果を満たすとき 1 から 0 に切り替え、低周波成分を多く含む地震動と判定する。最後に Switching logic に送信され、真理値表の条件を満たすとき、FF, FB gain, Apparatus stop の制御を切り替える。

具体的に、FB gain switch の詳細は Judging logic 0/1 で FF switch と FB gain switch の閾値を満たした $\ddot{x}_0$ と x_0 の論理和から出力された信号が 1, かつ DI_{diff} から出力された信号が 0 のとき低周波地震動と推測し FB gain を「37 から 10」に、1 のとき高周波地震動と推測し同 gain を「37 から 90」へ切り替える。FF switch は低周波地震動と推

Fig. 10 Detail of logic block with DI value. In this “Logic”. Floor pos., Floor acc., and difference $DI_{floor} - DI_{table}$ are calculated by using floor vibration. “Judging logic 0/1” judges on the base of threshold. Moreover, “Switching logic” sends a signal of switching control to FF, FB gain, and Apparatus stop switches on the base of truth table.

測したとき、FF制御をOFFにする。2・2節と同様に Apparatus stop switch は Apparatus stop の閾値を満たした $\ddot{x}_0$ と x_0 の論理和から出力された信号が1のとき、装置停止命令を除振装置へ送信する。なお、それぞれのFFやFBの制御切り替えの効果を検証するために定めた床上の変位と加速度の閾値は、露光装置内にある光学機器への影響や、除振装置の可動範囲を考慮しており、数値のオーダーに関しては妥当である。しかし、産業に実装するときには露光装置の光学機器群に許容される加速度レベル、および周辺機器のクリアランスなどを考慮して総合的に決める必要がある。

3・4 従来と提案手法のシミュレーション比較

文献（涌井，論手，2013）と DI 値を用いた判定方法のシミュレーションを比較する。 SI 値に代えてリアルタイムに算出可能でかつ計算負荷の軽い DI 値を用いたとき、 SI 値を使用する場合と同様な制御切り替えが可能であることを示す。なお、本節で使用する地震動の波形は3・1節で既述の(a)から(d)の四種類である。

3・4・1 小坂地震のシミュレーション比較

図11は3・1節で示した地震動(a)を入力したときのシミュレーション結果の比較である。左側に従来方法である SI 値を、右側に提案手法である DI 値を用いた結果を示す。上段にそれぞれの周波数成分の判定結果、中段に除振台上の加速度 a 、そして下段に相対位置 $(x - x_0)$ を示す。上段左側の SI 値を用いた論理は0が地震動の未到達、

Fig. 11 Switching result using SI and DI values against Osaka earthquake. In the case of upper side, each judgement results of frequency component are shown. In the case of middle side, table accelerations are shown by using w/ and w/o switching controls. In the case of lower side, relative displacements are shown by using w/ and w/o switching controls.

1 が地震動の到達を示す。一方、右側の DI 値を用いた論理は、0 は低周波地震動、1 は高周波地震動が到達したと判定する。中段、および下段の論理の数値は 0 が制御切り替えなし、1 は低周波向けの切り替え、2 は高周波向けの切り替え、そして 3 は装置停止を示す。

まず、図 11 左側の上段に示す地震動の判定に SI 値を用いた場合、 SI_h が増加し(SI_h-SI_n)が時刻 27.00 s に閾値 0.05 を超え、高周波地震動を示す論理出力 $Logic_h$ が 1 となる。また、図示していないが床上の加速度 $\ddot{x}_0$ または変位 x_0 が閾値を超えている。そのため、高周波地震動向けの制御切り替えを直近の時刻 27.01 s に行った。結果、同図左側下段に示す相対位置($x-x_0$)がトレードオフの関係で悪化した。しかし、中段に示す除振台上の加速度 a は抑制できた。一方で右側上段に示す DI 値を用いた場合、 DI_{diff} が地震動の到達とともに増加し、閾値 1 を超えたため、高周波地震動を示す論理出力 $Logic$ が 1 となる。また、床上の加速度 a_0 または変位 x_0 が閾値を超えている。高周波地震動向けの制御切り替えを時刻 26.56 s に行った。そのため、 SI 値を用いたときと同様に、同図右側下段に示す相対位置($x-x_0$)が悪化した。しかし、中段に示す除振台上の加速度 a は抑制できた。地震動(a)において SI 値を用いた場合より約 17 s(27.00-10.01)速く高周波地震動と判定できた。また、シミュレーション時間も DI 値を用いたときは 83.8 から 0.32 s と高速化し、計算負荷の軽減を確認できた。加えて、除振台上の加速度が抑制されたことにより、露光装置に搭載された光学機器への地震動が与える影響を緩和できることが可能となった。この地震動において DI 値を用いた周波数成分の判定は効果的である。

3・4・2 宮城地震のシミュレーション比較

図 12 は 3・1 節で示した地震(b)を入力した結果の比較である。本地震では観測された加速度データをそのまま用いると除振装置の可動限界を超えるため、床上の加速度を 0.3 倍にスケールした。同図左側の上段に示す SI 値を用いた場合、 SI_f が増加し(SI_f-SI_n)が時刻 17.01 s に閾値 0.05 を超えたため、低周波地震動を示す論理出力 $Logic_l$ が 1 となる。3・4・1 項と同様に床上の加速度 $\ddot{x}_0$ または変位 x_0 が閾値を超え、低周波地震動向けの制御切り替えを時刻 33.92 s に行った。そのため、同図中段に示す除振台上の加速度 a が悪化した。しかし、下段に示す相対位置($x-x_0$)は抑制できた。一方、同図右側上段に示す DI 値を用いた場合、 DI_{diff} が地震動の到達とともに増加し、閾値 1 を超え、高周波地震動を示す論理出力 $Logic$ が 1 となる。しかし、すぐ減少して 1 s 間 0.4 を下回り、低周波地震動を示す論理出力 $Logic$ が 0 となった。床上の加速度 $\ddot{x}_0$ または変位 x_0 が閾値を超えたため、低周波地震動向けの制御切り替えを時刻 33.92 s に行った。そのため、 SI 値を用いたときと同様に、同図中段に示す除振台上の加速度 a が悪化した。しかし、下段に示す相対位置($x-x_0$)は抑制できた。 $(x-x_0)$ が抑制され始める時刻の

Fig. 12 Switching result using SI and DI values against Miyagi earthquake. In the case of upper side, each judgement results of frequency component are shown. In the case of upper side, each judgement results of frequency component are shown. In the case of middle side, table accelerations are shown by using w/ and w/o switching controls. In the case of lower side, relative displacements are shown by using w/ and w/o switching controls.

Fig. 13 Switching result using SI and DI values against Kumamoto earthquake. In the case of upper side, each judgement results of frequency component are shown. In the case of upper side, each judgement results of frequency component are shown. In the case of middle side, table accelerations are shown by using w/ and w/o switching controls. In the case of lower side, relative displacements are shown by using w/ and w/o switching controls.

違いは、 SI 値と DI 値を用いた場合で FF 制御を適用する論理が異なるためである。また、 DI 値を用いたときに現れる 33.92 s の除振台上の加速度の増加は、過渡応答である。この解消が今後の課題となる。しかし、シミュレーション時間が 119.8 から 0.390 s と高速化し、計算負荷の軽減を確認できた。加えて、相対変位が抑制されたことにより、機械衝突の危険性が緩和されたということで、安全サイドの稼働が可能となった。この地震動においても周波数成分の判定が同様になったため、 SI 値に代えて計算負荷の軽い DI 値を用いられることが確認できた。

3・4・3 熊本地震のシミュレーション比較

図 13 は 3・1 節で示した地震(c)を入力した結果の比較である。同図左側上段に示す SI 値を用いた場合、時刻 26.00 s に顕著に SI_h が増加し、高周波地震動が到達したと判定できるが、 (SI_h-SI_n) が閾値 0.05 を超えないため、高

Fig. 14 Switching result using SI and DI values against Sichuan earthquake. In the case of upper side, each judgement results of frequency component are shown. In the case of upper side, each judgement results of frequency component are shown. In the case of middle side, table accelerations are shown by using w/ and w/o switching controls. In the case of lower side, relative displacements are shown by using w/ and w/o switching controls.

周波地震を示す論理出力 $Logic_h$ が 1 とならない。また、床上の加速度 $\ddot{x}_0$ と変位 x_0 も閾値を超えず、制御切り替えを行わないで地震動がやり過ごせると判断した。一方、右上段に示す DI 値を用いた場合、 DI_{diff} が地震動の到達とともに増加し、閾値 1 を超え、高周波地震動を示す論理出力 $Logic$ が 1 となる。しかし、床上の加速度 $\ddot{x}_0$ と変位 x_0 が閾値を超えないため、制御切り替えを行わず地震動をやり過ごせると判断した。地震(c)において SI 値を用いた場合より 16 s(26.00-10.01)速く高周波地震動と判定できた。また、シミュレーション時間が 83.5 から 0.39 s と高速化した。結果としては、制御切り替えを行っていない。しかし、いつ地震動の揺れが大きくなるか不明である。そのため、あらかじめ速く判定できる点において、 DI 値を用いた周波数成分の判定は有効である。

3・4・4 四川省地震のシミュレーション比較

図 14 は 3・1 節で示した地震(d)を入力した結果の比較である。同図左側上段に示す SI 値を用いた場合、 SI_l が増加し($SI_l - SI_h$)が時刻 39.01 s に閾値 0.05 を超えたため、低周波地震動を示す論理出力 $Logic_l$ が 1 となる。ほぼ同時に床上の加速度 $\ddot{x}_0$ または変位 x_0 が閾値を超え、低周波地震動向けの制御切り替えを時刻 39.02 s に行った。そのため、中段に示す除振台上の加速度 a が悪化した。しかし、下段に示す相対位置($x - x_0$)は抑制できた。一方、同図右側上段に示す DI 値を用いた場合、 DI_{diff} が地震動の到達とともに増加して閾値 1 を超え、高周波地震動を示す論理出力 $Logic$ が 1 となった。床上の加速度 $\ddot{x}_0$ または変位 x_0 が閾値を超えたため、高周波地震動向けの制御切り替えを時刻 38.01 s に行った。そのため、下段に示す相対位置($x - x_0$)が悪化した。しかし、中段に示す除振台上の加速度 a は抑制できた。その後、時刻 40.36 s に低周波地震動と判定して、低周波向けに切り替える。そのため、同図左側に示す除振台上の加速度 a は多少悪化した、右側に示す相対位置($x - x_0$)は良化した。また、シミュレーション時間が 83.9 から 0.32 s と高速化し、 SI 値を用いた場合と同様な切り替えができる。しかし、 SI と DI 値では異なる周波数成分の判定結果となった。このことを次節で考察する。

3・5 四川省地震のスペクトラム

3・4・4 項で SI と DI 値を用いた場合、異なる周波数成分の判定結果となった。四川省地震の特徴を考察するため、加速度スペクトラムの分析を行った。図 15 に四川省地震の地震動の波形を、図 16 に同地震を時間ごと分割した分析結果を示す。図 16(a)は 0 から 29.99 s、(b)は 30 から 59.99 s、そして(c)は 40 から 69.99 s までのスペクトラムである。同図から四川省地震は(a)の区間において 10 Hz 近傍に大きなスペクトラムがあり、高周波地震動と推定できる。しかし、(b)と(c)の区間では 10 Hz 近傍の成分は低下して、0.6 Hz 近傍が増加した。よって、低周波地震動と推定できる。このことから、一般的には長周期地震動と知られていた四川省地震を時間ごとに分析し

Fig. 15 Acceleration of Sichuan earthquake.

Fig. 16 Frequency spectra which are split by time. The case (a) is acceleration spectrum from about 0 to 30 seconds. The case (b) is acceleration spectrum from about 30 to 60 seconds. The case (b) is acceleration spectrum from about 40 to 70 seconds.

た結果、高周波から低周波地震動へと変化する地震動であることを確認した。そのため、 DI 値を用いた地震動の性状判定が適切なことを確認した。

4. 地震動の検出論理を変更した除振装置の制御切り替え

3章で検証した DI 値を用いた地震動の性状判定は従来手法に比べ高速化したが、地震動の検出論理が同一であったため、除振装置の制御切り替えのタイミングはほぼ変わらない問題があった。そこで、地震動を検出する論理を変えて、制御切り替えの高速化を図る。具体的には、地震動の性状判定に用いた DI_{floor} を揺れの大きさ検出にも用いる。まず、除振装置の制御を切り替えるための地震動の検出論理を 4・1 節に、変更した論理を用いた場合のシミュレーション結果を 4・2 節に示す。

4・1 床上の DI 値を用いた地震動の検出論理

新たに地震動の検出論理を加えた制御論理を図 17 に示す。ここで、図 10 から 17 にした変更点は床上の DI 値である DI_{floor} を加えたことである。具体的には DI_{floor} が 1.6 を超えたとき地震動が到達したと判定して 1 を出力する。一方、 DI_{floor} が 12 s の間下回ったとき地震動が収束したと判定し、0 を出力する。それぞれ出力された $\ddot{x}_0$, x_0 , そして DI_{floor} の論理和をとり「Switching logic」へ信号を送信する。 DI_{diff} と論理和をとり出力された 2 つの信号を入力とした表 2 に示す真理値表によって「FB gain switch」, 「FF switch」, そして「Apparatus stop switch」の制御信号を送信する。なお、新たに加えたこの論理の閾値について以下のように設定している。鉛直方向の DI 値が 1.6 を超えたとき、つまり計測震度 1 程度を観測したときに地震動が到達し、一方で 0.6 未満のとき、つまり計測震度 0 程度のときに地震動が収束、または地震動が発生していないという論理である。また、この閾値の場合、供試の地震に対しては妥当であるが、実用にあたっては地震動のデータや露光装置への過去の被害を分析し、合理的な閾値を求めることが必要である。

4・2 地震動の検出論理を変更したシミュレーション結果

4・1 節で変更した論理を用いてシミュレーションする。 DI_{floor} を用いたとき、高周波地震動ではより素早く地震動が検出可能なことを示す。なお、試供の地震動の波形は、3・1 節と同様の(a)から(d)の四種類である。また、

Fig. 17 Detail of logic block changing detection way for earthquake. In the “Judging logic 0/1”, DI_{floor} is added.Table 2 Detail of truth table added DI_{floor} .

DI_{diff}	a_0 or x_0 or DI_{floor}	FF switch	FB gain switch
0	0	0	0
0	1	1	1 ⁽²⁾
1	0	0	0
1	1	0	1 ⁽¹⁾

FB gain switch (1) FB gain 37→90 (2) FB gain 37→10

Fig. 18 Switching results against Osaka earthquake when detection method of seismic motion is changed. This figure shows time responses of table acceleration and relative displacement under earthquake. In this figure, red and black lines denote results of w/ and w/o switching control.

各地震動に対して、性状判定の結果は3・4節と類似するため割愛する。

4・2・1 小坂地震のシミュレーション結果

図18は3・1節で示した地震(a)を入力したときのシミュレーション結果である。同図左側に除振台上の加速度 a 、そして右側に相対位置 $(x-x_0)$ を示す。それぞれの図において、右側縦軸に示す“Control logic”の各値の意味は3・4節と同様である。図示していないが床上の DI 値である DI_{floor} 、加速度 $\ddot{x}_0$ 、または変位 x_0 が時刻25.77sに閾値を超えている。そのため、高周波地震動向けの制御切り替えを行った。結果、同図右側に示す相対位置 $(x-x_0)$ はトレードオフの関係から悪化した。しかし、同図左側に示す除振台上の加速度 a は良化した。地震(a)において、地震動の検出論理を変更した結果、図11で示した26.56から25.77sとわずかに速く地震動を検出し、制御の切り替えができた。この地震動において DI 値を用いた地震動の検出は効果的である。

4・2・2 宮城地震のシミュレーション結果

図19は地震(b)を入力したときのシミュレーション結果である。なお、3・4・2項と同様に床上の加速度 a_0 は0.3倍にスケールした。床上の DI 値である DI_{floor} が小さいため、地震動を検出する時間は図12と同様であった。そのため、制御切り替えも同様である。このような DI 値が小さくなりやすい低周波地震動では高速化できないことを確認した。低周波地震動でも切り替えを高速化することが今後の課題となる。

Fig. 19 Switching results against Miyagi earthquake when detection method of seismic motion is changed. This figure shows time responses of table acceleration and relative displacement under earthquake. In this figure, red and black lines denote results of w/ and w/o switching control.

Fig. 20 Switching results against Kumamoto earthquake when detection method of seismic motion is changed. This figure shows time responses of table acceleration and relative displacement under earthquake. In this figure, red and black lines denote results of w/ and w/o switching control.

Fig. 21 Switching results against Sichuan earthquake when detection method of seismic motion is changed. This figure shows time responses of table acceleration and relative displacement under earthquake. In this figure, red and black lines denote results of w/ and w/o switching control.

4・2・3 熊本地震のシミュレーション結果

図 20 は地震(c)を入力したときのシミュレーション結果である。床上の DI 値である DI_{floor} 、加速度 $\ddot{x}_0$ 、または変位 x_0 は時刻 25.12 s で閾値を超えている。そのため、高周波地震動向けの制御切り替えを行った。結果、同図右側に示す相対位置 $(x - x_0)$ は悪化した。しかし、同図左側に示す除振台上の加速度 a は良化した。3・4・3 項では地震動を捉えて周波数成分の判定はできた。しかし、揺れの大きさが小さいため制御を変更できなかった。そこで、検出論理を変更した結果、揺れを検出して制御を切り替えられた。この地震動でも検出論理は効果的である。

4・2・4 四川省地震のシミュレーション結果

図 21 は地震(d)を入力したときのシミュレーション結果である。床上の DI 値である DI_{floor} 、加速度 $\ddot{x}_0$ 、または変位 x_0 が時刻 20.96 s に閾値を超えている。そのため、まず高周波地震動向けの制御切り替えを行った。結果、同図右側に示す相対位置 $(x - x_0)$ は悪化した。しかし、同図左側に示す除振台上の加速度 a は良化した。その後、時刻 40.47 s に低周波地震動と判定して、低周波地震動向けの切り替えを行った。結果、同図左側に示す除振台上の加速度 a が悪化した。一方、同図右側に示す相対位置 $(x - x_0)$ は良化した。地震(d)において、検出論理を変更した結果、図 14 に比べて地震動を 17 s(38.01-20.96)速く検出し、制御の切り替えができた。この地震動でも効果

的である。

以上の結果を踏まえて、検出論理を変更したことにより地震動の到達を速く検出し、安全に除振装置の制御を切り替えできた。

5. 結 論

本稿の結論は以下の通りである。

- (1) 遠方に設けた観測地点での加速度、変位、そして SI 値を算出し、地震動の性状を推定し、あらかじめ除振装置の制御を切り替えて地震動をやり過ごす手法が既に提案された。しかし、この手法ではコスト上の問題から現実的ではない。そこで、 SI 値に代えて、リアルタイムに算出可能な DI 値を導入し、観測地点を用いず、除振装置のみで完結する制御システムを提案した。
- (2) 床上と除振台上の DI 値の差を利用し、地震動の性状を推定した。その結果、 SI 値を使った場合よりも速く判定が行われ、かつ同様な制御の切り替えの効果を確認した。
- (3) 地震動の検出にも DI 値を用いて、制御切り替えの高速化を確認できた。以上より、 DI 値を用いる優位性を検証した。

謝 辞

本研究は、基盤研究 C(26420170)の助成を受けた。また、地震動の波形は K-NET(K-NET, accessed on 6 April, 2015)から入手し、これを活用させていただいた。記して感謝する。

文 献

- Chang, P. H., Han, D. K., Shin, Y. H. and Kim, K.-J., Effective suppression of pneumatic vibration isolators by using input-output linearization and time delay control, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.329, No.10 (2010), pp.1636-1652.
- Chen, P. C. and Shih, M. C., Modeling and robust active control of a pneumatic vibration isolator, *Journal of Vibration and Control*, Vol.13 (2007), pp.1553-1571.
- Honma, F., Hosoya, M. and Yoshioka, K., Development and practical implementation of disaster prevention system with application of emergency earthquake bulletin, *Okai Technical Review*, Issue 209 Vol.74, No. 1 (2007), pp.10-13.
- Housner, G. W., *Vibration of structures induced by seismic waves part I. earthquakes*, Harris, C.M. and Crede, C.E. (Eds.), *Shock and Vibration Handbook* (1961), McGraw-Hill.
- K-NET (online), available from<<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net>>, (参照日2015年4月6日)。
- 峰尾浩一，論手孝至，涌井伸二，中村幸紀，地震発生時における空圧式除振装置の制御切り替え方法に関する研究，第 57 回自動制御連合講演会 (2014)，pp. 628-633.
- 峰尾浩一，涌井伸二，中村幸紀，地震発生時における複数の観測地点を用いた空圧式除振装置の制御切り替え方法に関する研究，電気学会制御研究会 (2015)，pp.51-56.
- Nakamura, Y., A new concept for the earthquake vulnerability estimation and its application to the early warning system, in *Proceedings Early Warning Conference 98* (1998), pp. 693-699.
- 中村豊，地震動指標間および被害との関係，*日本地震工学会論文集*，Vol.7, No.2 (2007)，pp.235-249.
- 中村豊，合理的な地震動強度指標値の検討— DI 値を中心にした地震動指標値間の関係—，*土木学会地震工学論文集*，Vol.27 (2003)，pp.1-4.
- 論手孝至，涌井伸二，空圧式除振装置遠方に設置した観測地点での地震性状の分析に基づく制御切り替え方法の一考察，*日本機械学会論文集*，Vol.80, No.811 (2014)，DOI:10.1299/transjsme.2014dr0047.
- 清水善久，石田栄介，磯山龍二，山崎文雄，小金丸健一，中山渉，都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システム構築及び広域地盤情報の整備と分析・活用，*土木学会論文集*，No.738, I-64 (2003)，pp.283-296.
- Shin, Y. H., Kim, K. J., Chang, P. H. and Han, D. K., Three degrees of freedom active control of pneumatic vibration

isolation table by pneumatic and time delay control technique, Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of ASME, Vol.132, No. 5 (2010), pp.1-12.

高橋正人, 牧野内進, 涌井伸二, 露光装置の地震対策 (ソフトランディングによる装置保護), 精密工学会誌, Vol.76, No.2 (2010), pp.214-219.

涌井伸二, 小笠原孝仁, 長周期地震に対する空圧式除振装置の応答改善, 日本機械学会論文集C 編, Vol. 77, No. 783 (2011a), pp. 4111-4124.

涌井伸二, 小笠原孝仁, 空圧式除振装置に対する床振動フィードフォワードの一考察, 日本機械学会論文集C 編, Vol.77, No.773 (2011b), pp.51-63.

涌井伸二, 論手孝至, 空圧式除振装置に対する一地震動対策, 日本機械学会論文集C 編, Vol.79, No.798 (2013), pp.276-288.

References

Chang, P. H., Han, D. K., Shin, Y. H. and Kim, K. J., Effective suppression of pneumatic vibration isolators by using input-output linearization and time delay control, Journal of Sound and Vibration, Vol.329, No.10 (2010), pp.1636-1652.

Chen, P. C. and Shih, M. C., Modeling and robust active control of a pneumatic vibration isolator, Journal of Vibration and Control, Vol.13 (2007), pp.1553-1571.

Honma, F., Hosoya, M. and Yoshioka, K., Development and practical implementation of disaster prevention system with application of emergency earthquake bulletin, Oki Technical Review, Issue 209 Vol.74, No. 1 (2007), pp.10-13.

Housner, G. W., Vibration of structures induced by seismic waves part I. earthquakes, Harris, C.M. and Crede, C.E. (Eds.), Shock and Vibration Handbook (1961), McGraw-Hill.

K-NET (online), available from<<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net>>, (accessed on 6 April, 2015).

Mineo, H., Ronte, T., Wakui, S. and Nakamura, Y., Study of switching control for air type anti-vibration apparatus under the condition where earthquake occurs, in Proceedings the 57th Japan Joint Automatic Control Conference (2014), pp. 628-633 (in Japanese).

Mineo, H., Wakui, S. and Nakamura, Y., Study of switching control for air type anti-vibration apparatus with some observation points under the condition where earthquake occurs, in Proceedings IEEJ Control Technical Meeting (2015), pp. 51-56 (in Japanese).

Nakamura, Y., A new concept for the earthquake vulnerability estimation and its application to the early warning system, in Proceedings Early Warning Conference 98 (1998), pp. 693-699.

Nakamura, Y., Comparison of various earthquake motion indices, Transactions of the Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.7, No.2 (2007), pp.235-249.

Nakamura, Y., Examination of a rational strong motion index – relationship between the DI value and the other strong motion indices –, Japan Society of Civil Engineers Earthquake Engineering Symposium, Vol.27 (2003), pp.1-4.

Ronte, T. and Wakui, S., A consideration of switching control based on priority of earthquake which is analyzed in observation area as far from an air type anti-vibration apparatus, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.80, No.811 (2014), DOI:10.1299/transjsme.2014dr0047.

Shimizu, Y., Ishida, E., Isoyama, R., Yamazaki, F., Koganemaru, K. and Nakayama, W., Development of real-time earthquake disaster mitigation system for city gas network and utilization of regional geological information, Journal of The Japan Society of Civil Engineers, No.738, I-64 (2003), pp.283-296 (in Japanese).

Shin, Y. H., Kim, K. J., Chang, P. H. and Han, D. K., Three degrees of freedom active control of pneumatic vibration isolation table by pneumatic and time delay control technique, Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of ASME, Vol.132, No. 5 (2010), pp.1-12.

Takahashi, M., Makinouchi, S. and Wakui, S., Countermeasure of exposure machine for earthquake:-protection of exposure machine by means of soft landing, the Japan society for precision engineering, Vol.76, No.2 (2010) pp.214-219 (in

Japanese).

Wakui, S. and Ogasawara, T., Improvement of an air type anti-vibration apparatus for long period earthquake ground motion, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.77, No.783 (2011a), pp. 4111-4124 (in Japanese).

Wakui, S. and Ogasawara, T., A consideration of floor vibration feedforward for an air type anti-vibration apparatus, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.77, No.773 (2011b), pp. 51-63 (in Japanese).

Wakui, S. and Ronte, T., A countermeasure of earthquake ground motion for an air type anti-vibration apparatus, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.79, No.798 (2013), pp.276-288 (in Japanese).