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 制御切替え方法の一考察*

論手 孝至^{*1}, 涌井 伸二^{*2}

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

Takashi RONTE and Shinji WAKUI^{*2}

^{*2} Tokyo Unive. of Agriculture and Technology Dept. of Electrical Engineering
Naka-cho 2-24-16, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan

Received 22 October 2013

Abstract

This paper presents the control method for the continuous operation of air type anti-vibration apparatus under earthquake ground motion. Air type anti-vibration apparatus is essential for semiconductor exposure machine. When earthquake ground motion strikes, the process of the stopping semiconductor exposure machine is often executed. It leads to low production throughput of semiconductor devices. In previous study, we show that there is a tradeoff between the acceleration of the table and the relative displacement. By switching control based on this tradeoff, the vibration of the acceleration of the table or the relative displacement can be suppressed under earthquake ground motion. However, this method cannot suppress immediately the acceleration of the table or the relative displacement when earthquake ground motion strikes. This paper extends method of this switching control. Concretely, observation area as far from air type anti-vibration apparatus is created. This observation area analyzes the priority of earthquake ground motion. The logic for analyzing the priority of earthquake ground motion explains. By utilizing the priority of earthquake ground motion, the faster switching control attempts. In this simulations, earthquake ground motion which occurred at past is used. Furthermore, we perform experiment with the switching control. This experiment shows that transient response does not occur when the control is switched under vibration.

Key Words : Seismic motion, Vibration isolation, Earthquake resistant, Spectrum analysis, Motion control

1. 緒 言

空圧式除振装置は、半導体露光装置の除振・制振のために必須のものとして組み込まれている(Chang, et al., 2010)(Shin, et al., 2010)(Chen and Shin, 2007). なぜなら、同露光装置で製造する集積回路は、微細化されており、制振なしには製造できないためである。この理由のため、空圧式除振装置は、様々な振動に対応することが要求される。この振動とは、人の歩行を含めた床振動、半導体露光装置から発生する機械振動、そして稀に発生する地震などである。本論文では、地震発生時に空圧式除振装置が受ける影響を抑制することに注目する。地震発生時には、空圧式除振装置のアクチュエータである空気ばねの剛性が弱いため、それに支えられる半導体露光装置の揺れが大きくなり、機械衝突を起こす。この衝突を回避するため、同除振装置の空気ばねから空気を排出する

* 論文 No.13-00766 [DOI:10.1299/transjsme.2014dr0047]

^{*1} 学生員, 東京農工大学電気電子工学専攻

^{*2} 正員, 東京農工大学大学院 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)

E-mail: wakui@cc.tuat.ac.jp

ことで除振台を着座させ、地震が収束するまで同露光装置を停止させている(高橋他, 2008). この手段は、機械衝突を避けることが可能だが、半導体露光装置の生産効率を低下させる. そこで、文献(涌井, 2013)では、地震発生時に、空圧式除振装置に投入される制御を適切に切替えることで、地震動の収束まで空圧式除振装置を停止させずに連続稼働させる手段を提案した. ここでは、地震動の加速度、変位、そして SI 値の 2 種類の差分信号を地震性状を捉える判定論理部に導く. 次に、この出力に基づき加速度フィードバック (以降, FB と略記) 制御のパラメータあるいは床振動フィードフォワード (以降, FF と略記) と積分信号正帰還を ON/OFF する切替えを行い、空圧式除振装置に加わる地震の影響を抑制する. さらに、地震収束時には、切替えた制御を定常状態に復帰させる判定も行う. これらの方法により、制御を切替えることで地震が空圧式除振装置に与える影響を抑制できるシミュレーション結果を示した.

しかし、文献(涌井, 2013)の方法では、地震発生直後から即座に除振台の揺れは抑えられない. 本論文では、対象地点よりも遠方の観測地点での地震性状の判定に基づき、地震到来前に予め空圧式除振装置のFB制御あるいはFF制御を切替えることの有効性を検討する. まず、2章では、文献(涌井, 2013)の内容を簡潔に述べる. そして、制御系の切替え論理の一部を実機検証した結果を示す. 切替えが問題なく動作することを示すことによって、文献(涌井, 2013)の提案が現実的であることを示す. 3章では、空圧式除振装置が設置されている場所に対して、距離が離れている観測地点での地震動分析に基づき、地震到来前に同除振装置の制御系を切り替える方法を示す. 最後の4章で、本論文の結論をまとめる.

2. 従来方法による制御切替え

2・1 従来の切替え方式

文献(涌井, 2013)で提案した空圧式除振装置に投入される制御の切替え方法を述べる. まず、図 1 に空圧式除振装置の制御構成とFBあるいはFF制御を切替えるための論理構成を示す. ここで、同除振装置のパラメータは、 M : 除振台の質量[kg], D : 粘性摩擦係数[N・s/m], K : 機械ばね定数[N/m], A_0 : 受圧面積[m²], V_0 : 空気ばねの体積[m³], β_0 : 圧縮率[1/(N/m²)], c : 流量コンダクタンス[(m³/s)/(N/m²)], G_q : 流量ゲイン[m³/s・V], k_{pos} : 位置センサの感度[V/m], $k_{acc(i)}$: 除振台上の加速度センサの感度[V/m/s²], $k_{acc(f)}$: 床に設置した加速度センサの感度[V/m/s²], k_a' : 加速度FBのゲイン[V/V], k_{ann} : 相対加速度の積分信号正帰還ゲイン[V/V], T_i : 疑似積分器の時定数[s], k_{pr} : 圧力PI補償器のゲイン[V/V], T_p : 圧力PI補償器の時定数[s], k_{pre} : 圧力センサの感度[V/Pa], k_g' : 圧力FBのゲイン[V/V], k_{ar} : 加速度PI補償器のゲイン[V/V], T_a : 加速度PI補償器の時定数[s], k_s : 位置PI補償器のゲイン[V/V], v_{pos} : 目標値[V], e : 偏差[V], $k_f(s)$: 床振動FF補償器の伝達関数[V/V], T_{hp} : 直流カットフィルタの時定数[s], w : 供給空気量を増減するサーボバルブの操作量[V], x : 除振台の変位[m], そして x_0 : 床振動の変位[m], である.

図 1 の制御構成には、五つの制御が投入されている. 一つ目が空気ばねの固有周波数による共振を抑制する加速度FB, 二つ目が床振動を検出し除振台への伝達を抑制する床振動FF, 三つ目が除振台と床の相対加速度から空気ばねの体積変化を演算し、その変化をキャンセルする相対加速度の積分信号正帰還, 四つ目が除振台と床の相対変位をFBして平衡位置に定位させる位置FB, そして五つ目が空気ばねの内力をFBして内圧を一定に保つ圧力FB, である. 文献(涌井, 2013)では、これら制御のうち加速度FB, 床振動FF, そして相対加速度の積分信号正帰還の三つに注目し、この部分で切替えを実行する. そのためのスイッチを制御構成にそれぞれ挿入する. 制御構成に挿入したスイッチは三種類である. 一つ目が加速度FBのゲインの大きさを切替える「FB gain switch」、二つ目が床振動FFおよび相対加速度の積分信号正帰還のON/OFFを決定する「FF switch」、そして三つ目が制御の切替えでは対応できない地震の発生を検出し、空圧式除振装置を保護するために装置の停止を命令する「Apparatus stop switch」である. 上記FF switchおよびFB gain switchの二種類が地震の性状に従って適切に切替えられることで地震の収束まで装置を停止させることなく稼働させる.

次に、三種類のスイッチをそれぞれ切替えるための論理構成=Logic部分を説明する. Logicでは、地震の加速度を入力とし、同加速度を五つの信号へと変換する. 一つ目は地震の加速度 $\ddot{x}_0$ をそのまま観測する. 二つ目は地震の加速度を二重積分し地震の変位 x_0 へと変換する. 三～五つ目は三種類の SI 値へと変換する. SI 値とは、地震が建造物に与える影響を数値化したものであり、地震波工学で使用される(Housner, 1961)(涌井, 2011). 本論文

Fig. 1 Proposed diagram with switching. In “Logic”, x_0 , $\ddot{x}_0$ and the differences $SI_l - SI_n$ and $SI_h - SI_n$ are calculated for the switching. In “Judge 0/1”, 0 (1) denotes that x_0 , $\ddot{x}_0$, $SI_l - SI_n$ and $SI_h - SI_n$ less than (more than) thresholds. The thresholds are showed in Judge 0/1. The switching of controllers is determined by using truth table illustrated in “Switching logic”. FF switches, FB gain switch and Apparatus stop switch are switched based on truth table.

では、この SI 値を地震の周波数成分を把握するために使用し、同 SI 値を「通常定義の SI 値」 $=SI_n$ と定義する。しかし、 SI_n が過敏に反応する周波数領域では定常微振動と地震の区別が困難である。このため、地震の低周波成分に該当する周期 1.0~10.0 s の振動に過敏に反応する「低周波向け SI 値」 $=SI_l$ を定義する。また、地震の高周波成分に該当する周期 0.1~1.0 s の振動に過敏に反応する「高周波向け SI 値」 $=SI_h$ も定義する。そして、三種類の SI 値を使って「 $SI_l - SI_n$ 」および「 $SI_h - SI_n$ 」を計算する。この意味は、 $SI_l - SI_n$ により導出される値が正のとき、低周波成分を多く含む地震と判断できるためである。同様に、 $SI_h - SI_n$ が正のとき、高周波成分が多い地震と判断する。

続いて、以上の四種類の信号である $\ddot{x}_0$, x_0 , $SI_l - SI_n$, そして $SI_h - SI_n$ の値は、図 1 の「Judge 0/1」に送信され、閾値判定により「0」あるいは「1」の信号に変換される。具体例として Judge 0/1 の $SI_l - SI_n$ に注目する。 $SI_l - SI_n$ では、「FF switch と FB gain switch に使用する閾値」および「Apparatus stop switch に使用する閾値」の二種類が存在する。前者では、+0.05 kine を超えないとき 0 を、超えるとき 1 を出力する。そして 1 を出力しているときのみ、+0.01 kine 以下が 12 s 連続で続くかを判断し、この条件を満たすとき 0→1 に切替えられた信号を 1→0 に切替えて元に戻す。地震収束後も制御を切替えたままでは、空圧式除振装置の連続稼働に悪影響を及ぼすためである。つまり、本論文では地震の収束を +0.01 kine 以下が 12 s 連続で続いたときと設定し、地震の収束判定を行う。なお、本論文では空圧式除振装置を連続稼働させる切替えのアイデアを検証することを主題としている。そのため、ここで設定した閾値は全ての同除振装置に適応できる汎用性のある値ではない。しかし、切替えで対応可能な数種類の地震を分析して、これらの地震から算出される $\ddot{x}_0$, x_0 , $SI_l - SI_n$, そして $SI_h - SI_n$ を参考にして閾値を決定した。後者では、+0.10 kine を超えるとき 1 を出力し、元に戻す切替えは行わない。Judge 0/1 の $SI_h - SI_n$, $\ddot{x}_0$, x_0 も同様の手順で 0/1 の出力を行う。

最後に、0/1 に変換された信号は図 1 の Switching logic に導かれ、真理値表を満たすとき、それぞれスイッチの ON/OFF を決定する。既公表の文献(涌井, 2013)より、低周波成分を多く含む地震では、FF 制御を OFF とし、FB ゲインを小さく切替えることで空圧式除振装置の性能指標である除振台と床の相対位置の大きさを改善できる。また、高周波成分を多く含む地震では、FB ゲインを大きく切替えることで同除振装置の性能指標である除振台上の加速度の大きさを改善できる(涌井, 2013)。上述したように、制御の切替えを実行するように真理値表は定められている。例えば、FF switch は図 1 の①にあたる $SI_l - SI_n$ が 1 および同図の②にあたる $SI_h - SI_n$ が 0 のとき、つまり低周波成分が多い地震のとき、FF 制御を OFF とする切替えを実行する。FB gain switch は、図 1 の①および②により地震の周波数成分を判断し、これに同図の③にあたる「FB gain switch のために使用する閾値の $\ddot{x}_0$ と x_0 の論理和」を使用し、地震の揺れの大きさも判断に加えることで FB ゲインの切替えを実行する。つまり、FB gain switch において、①が 1、かつ②が 0、かつ③が 1、のときは、低周波成分を多く含む揺れの大きな地震が伝達してきたと判断し、FB ゲインを小さく切替える。Apparatus stop switch では、同 switch に使用する閾値である I, II, そして III の真理値表を満たすとき、空圧式除振装置の停止信号を送信する。

2・2 切替え効果

図 1 の制御系構成に地震を入力し、シミュレーションを行う。供試の地震は、2013 年 4 月 13 日 5:34:01(日本標準時 JST)に三重県四日市市で観測したものである。地震波形は、K-NET よりダウンロードした(K-NET, accessed on 4 Sept., 2013)。同地震の切替えでは、まず低周波地震向けの切替えを行い、次にこの制御の切替えでは空圧式除振装置を保護できないと判断し停止の指令を送信する。シミュレーション結果を図 2 に示す。同図左側が除振台上の加速度 $\ddot{x}$, 右側が床と除振台の相対位置($x - x_0$)を表す。また、図 2 のステップ状の信号が、switch を切替えるタイミングを表す。つまり、1 のとき、制御が切替えられる。赤線が FF switch と FB gain switch の、青線が Apparatus stop switch の切替えタイミングである。まず、図 1 の Switching logic により 5:34:01 から 24.02 s 後の 5:34:25.02 に FF 制御を OFF とする切替えおよび FB ゲインを小さくする切替えが同時に行われる。これらの切替えにより、($x - x_0$)の揺れを抑制する。この様子は、5:34:21~5:34:51 の部分を拡大している図より確認できる。続いて、5:34:01 から 44.01 s 後である 5:34:45.01 に空圧式除振装置保護のため、装置を停止させる信号が Apparatus stop switch により送信される。なお、図 2 のシミュレーション結果である 5:34:45.01 以降は装置を停止させて、除振台を着座させるシミュレーションが望ましい。しかし、図 2 では、除振台を着座させるシミュレーションを行わず、5:34:45.01 以降も地震波により揺動する $\ddot{x}$ および($x - x_0$)を表す。つまり、今回は伝達してきた地震が巨大であることを判断して、Apparatus stop switch の起動時間のみを示すシミュレーションとした。以上の結果より、全スイッチが地震の性状を適切に判断し、切替えの効果を発揮する。

Fig. 2 Time responses via switching logic against earthquake observed at Yokkaichi-shi. This figure shows the time response of the table acceleration $\ddot{x}$ and the relative displacement $x-x_0$ under earthquake. In this figure, red and blue lines denote the time chart of switching for FF switches and FB gain switch, and Apparatus stop switch. In addition, 1 (0) denotes that FF switch and FB gain switch, and Apparatus stop switch are on (off).

2・3 実験結果

図1の制御系構成が動作することを検証する実験は、地震を再現する大型振動試験装置を使わなければ困難である。ここでは、少なくともFBの切替えに起因した過渡現象が生じることなく、切替え後の除振台の振動は抑制され、そして地震収束後には制御系のパラメータが復帰できることを実機により示す。

地震動は、実験者の跳躍により供試の1軸空圧式除振装置付近で発生させた振動である。この振動の様子を図3上段 $\ddot{x}_0$ に示す。第1波、第2波の振動に続いて第3波のときに大きな床振動を除振台に与えた。その際、床の加速度 $\ddot{x}_0$ とSI値を観測し、どちらか一方が閾値を超えるとき加速度FBのパラメータを切替える。 $\ddot{x}_0$ の閾値は $\pm 10\text{ V}$ 、SI値の閾値は $+0.4\text{ V}$ と設定している。また、加速度FBゲイン k_a' の初期値は $+0.05$ とし、切替え後は $+0.50$ にする。上述の条件で実験をした結果を図3に示す。同図左側が k_a' 切替えなしの、右側が切替えありの場合である。後者のときのみ $\ddot{x}$ に制御の切替えタイミングをステップ状の信号で示し、1のとき k_a' が $+0.50$ 、0のとき k_a' が $+0.05$ であることを表す。図3上段が $\ddot{x}_0$ 、中段が $\ddot{x}_0$ から導出されるSI値、そして下段が $\ddot{x}_0$ によって揺動する $\ddot{x}$ である。同図右側の $\ddot{x}_0$ とSI値に着目すると、SI値が2.732sに閾値を超え、同時に制御を切替える。これにより、図3左側で発生する空気ばねの共振2.0 Hzを抑制する様子が確認できる。跳躍のため同図上段左右の $\ddot{x}_0$ に再現性はないものの、切替えなしの $\ddot{x}$ と比べて切替え効果は明瞭である。切替え動作そのものに起因する過渡現象が、除振台上の加速度および相対位置に悪影響を及ぼすことはない、と言える。最後に床振動が収束したことを判定して、 k_a' を通常稼働状態のものへ復帰させる。ここでの復帰条件は、 $\ddot{x}_0$ が $\pm 1.0\text{ V}$ 以下になり3s以上その状態が続いたときおよびSI値が $+0.2\text{ V}$ 以下になり3s以上その状態が続いたときである。

3. 地震到来前の制御切替え

3・1 地震伝達時に実際に行われる対策

連続稼働が望まれる空圧式除振装置を停止させることなく運用するために、文献(涌井, 2013)の方法を拡張する。具体的に、装置設置場所から離れたところに観測地点を設け、ここでの地震性状の判定に基づき空圧式除振装置の制御系のパラメータを切替えて地震収束まで装置を連続稼働する方法である。

Fig. 3 Experimental results on time response in the case with and without switching. The vibration to the air type anti-vibration apparatus is generated by human jumping on the floor. The upper, middle and lower sides denote $\ddot{x}_0$, SI value and $\ddot{x}$. In the lower side, blue line denotes the time chart of switching for FB gain. In addition, 1 (0) denotes that FB gain is +0.50 (+0.05).

地震発生時に、これが到来する前に走行中の新幹線を停止させる早期地震検知警報システム (UrEDAS, FREQL) が稼働している(渡辺他, accessed on Sept. 4, 2013). 地震動の初期微動 P 波を検知し、ここから得られる情報に基づき警報を発令するシステムとしてひろく知られている。また、宮城沖電気 (株) では、地震を検知して半導体製造ラインを緊急停止できるリアルタイム地震防災システムを開発した(Honma, et al., 2007). 本研究とこれら論文との大きな差異は、従来手法では装置を停止させて地震に対応していたものを、地震発生時に装置を停止させることなく連続稼働させることにある。この方法により、装置停止時に発生する生産効率の低下を回避することができる。

3・2 観測地点における地震の性状判定の方法

地震の伝達を事前に検知することを目的に、観測地点を設ける。観測地点の役割は、地震を検知したときに、その地震を分析して性状を判断し、空圧式除振装置が設置される場所に制御の切替えを促す信号を送信することである。本論文では、二種類の地震を使用して、観測地点を設けた制御の切替えが文献(涌井, 2013)より優位性を持つことを示す。

観測地点で使用する論理図を図 4 に示す。同図の入力は、地震の加速度 $\ddot{x}_0$ を使用する。そして、入力された $\ddot{x}_0$ は、図 1 と同様に五つの信号に変換される。三種類の SI 値は、差分を計算するために引き算される。こうして変換された四種類の信号に閾値をそれぞれ定める。閾値を超えたとき「1」を、閾値を超えないとき「0」を出力する。続いて、 $SI_l - SI_n$ と $SI_h - SI_n$ の論理和と、 $\ddot{x}_0$ と x_0 の論理和との論理積をとる。この論理積が「1」を出力するとき観測地点に地震が伝達したことを判断するフラグ=Flag : Magnitude of earthquake を立てる。このフラグが立つとき、地震の性状判定を開始する。具体的には、Magnitude of earthquake と $SI_l - SI_n$ の論理積をとる。この論理

Fig. 4 This figure shows proposed logic diagram which is used at observation area. The newly point is that proposed logic diagram discriminates whether long-period or short-period earthquake. This discrimination is determined by x_0 , $\ddot{x}_0$, $SI_l - SI_n$ and $SI_h - SI_n$.

積が条件を満たすとき「1」を出力する。ここで1を出力するとき、地震に低周波成分が多く含まれると判断される。また、Magnitude of earthquake と $SI_h - SI_n$ の論理積もとる。この論理積が条件を満たすとき「2」を出力する。ここで2を出力するとき、地震に高周波成分が多く含まれると判断したことになる。最後に、これらの論理積から出力される数字を足し算して地震の性状を決定する。足し算の結果より、1のとき低周波成分を多く含む地震、2のとき高周波成分を多く含む地震、そして3のとき制御の切替えでは対応できない巨大地震と判断する。これら1～3の数値を空圧式除振装置に送信することで、同装置に地震が伝達する前に制御を適切に切替えることを可能にする。

3・3 観測地点を用いた除振装置の制御切替え

図4の機能を持つ観測地点を設置し、そこで観測された地震情報を使い空圧式除振装置の切替えを行う。まず、同除振装置の設置場所を三重県四日市市と設定する。この周辺に観測地点を設置することで、地震の伝達を事前に検知することを試みる。シミュレーションに供した地震は下記(A), (B)である。地震波形はK-NET からダウンロードした(K-NET, accessed on Sept. 4, 2013)。

(A) 2011年3月11日14:46:18(JST)に三陸沖で発生した東北地方太平洋沖地震

観測地点の東京都小金井市には14:47:48に、空圧式除振装置が設置されている三重県四日市市には14:49:01に地震が到達する。

(B) 2004年4月1日07:59:40(JST)に愛知県知多市近郊で発生した地震

観測地点の愛知県知多市には07:59:55に、空圧式除振装置が設置される四日市市には07:59:57に地震が到着する。

(A)の地震の伝達を検知して空圧式除振装置の制御を切替える場合を考察する。地震の震源、観測地点である小金井市、そして空圧式除振装置の設置場所である四日市市の位置関係を図5に示す。同図より、地震は小金井市を経由して、四日市市に伝達する。そのため、小金井市で地震の性状を分析し、その情報を四日市市に地震が伝達する以前に送信することでより迅速な制御の切替えを可能とする。まず、小金井市において、図4を用いて地震の性状判定を行った結果を図6(a)に示す。図4の入力として使用した地震は、震源から小金井市に伝達した波

Fig. 5 Relationship of seismic center, Koganei-shi and Yokkaichi-shi

Fig. 6 Timing for switching control based on property of earthquake. The left (right) side shows timing for switching by utilizing Fig. 4 (Fig. 1). From the left side, the earthquake is long-period earthquake. The timing for switching is at 14:48:14.01. In the right side, red, green and blue lines denote the time chart of switching for FF switches, FB gain switch, and Apparatus stop switch.

形である。なお、波形データは付録 B の(A)上段に示す。図 6(a)より、FF switch および FB gain switch が 14:46:18 から 116.01 s 後の 14:48:14.01 に 0 から 1 という信号に切替わる。これは、小金井市に伝達してきた地震が低周波成分を多く含む地震ということを表す。この信号をリアルタイムで四日市市に送信することで、四日市市に地震が伝達する以前に低周波向けの制御切替えを行う。具体的に、低周波向けの制御切替えとは FF switch は FF 制御を ON から OFF に、FB gain switch は FB ゲインを 37 から 10 へと切替えることである。続いて、比較のために観測地点を使用せずに四日市市で地震を検知すると何秒に各々のスイッチが起動するかを確認する。ここで使用する論理構成は図 1 である。この結果を図 6(b)に示す。同図(b)を導出するために図 1 に入力した地震は、震源から四日市市に伝達した波形である。なお、波形データは、付録 B の(A)下段に示す。図 6(b)より、FF switch および FB gain switch が 14:46:18 から 307.02 s 後の 14:51:25.02 に低周波成分が多い地震向けの切替えを行い、14:46:18 から 376.43 s 後の 14:52:34.43 および 389.01 s 後の 14:52:47.01 に地震の収束判定により切替えた制御を元に戻すことを確認できる。図 6(a)および(b)の結果から、観測地点を使用することで同図(a)は(b)より 191.01 s 事前に制御の切替えを行うことが可能となる。

図 6(a)および(b)の結果をそれぞれ使用して制御を切替えた場合の $\ddot{x}$ および $(x-x_0)$ の時間応答をシミュレーションし、その結果を図 7 に示す。同図左側が $\ddot{x}$ 、右側が $(x-x_0)$ の時間応答である。図 7 上段が四日市市で地震を検知し制御の切替えを行わない場合 (=切替えなしの場合)、中段が観測地点を使用せずに四日市市で地震を検知し制御を切替えた場合 (=図 6(b)の結果で切替えた場合)、そして下段が観測地点を使用して四日市市で制御を切替えた場合 (=図 6(a)の結果で切替えた場合) をそれぞれ表す。図 7 上段の切替えなしと中段の図 6(b)の結果で切替えた場合を比較すると、 $(x-x_0)$ の揺れを 14:51:25.02~14:52:47.01 の間で抑制できる。しかし、図 6(b)の結果で

Fig. 7 This figure shows time responses against Tohoku region pacific coast earthquake. The left (right) side shows time response of the table acceleration $\ddot{x}$ (the relative displacement $x-x_0$) under earthquake. The upper side shows time response in the case without switching. The middle side shows time response in the case with switching by Fig. 1. The lower side shows time response in the case with switching by Fig. 4. In this figure, red, green and blue lines denote the time chart of switching for FF switches, FB gain switch, and Apparatus stop switch. $x-x_0$ is suppressed by these switching.

切替えた場合は、14:49:01～14:51:25.02 の間で $(x-x_0)$ の揺れを抑制できない。続いて、図 6(b)の結果で切替えた場合と図 6(a)の結果で切替えた場合を比較する。図 6(a)の結果で切替えた場合は、図示していない 14:48:14.01 から制御の切替えを行うため、四日市市に地震が伝達する 14:49:01 から $(x-x_0)$ の揺れを抑制できる。上記の結果より、観測地点を設けることで、地震の到来を事前に検知できる。なお、図 7 の地震が四日市市に初めて伝達する 14:49:01 と震源で地震が発生する 14:46:18 の間は、地震が発生してから四日市市に伝達してくるまでの時間であるため、波形を割愛している。

続いて、(B)の地震の伝達を検知して空圧式除振装置の制御を切替える場合を考察する。地震の震源、観測地点である知多市、そして空圧式除振装置の設置場所である四日市市の位置関係を図 8 に示す。同図より、愛知県知多市近郊で発生した地震は、まず知多市に伝達する。そして、その 2 s 後に四日市市に到達する。上記より、知多市で地震の性状判定を行い、その信号を四日市市に送信することで制御の事前切替えを行う。まず、知多市に伝達してくる地震に図 4 を使用して性状判定を行い、四日市市に送信する信号を作成する。なお、同図に使用する地震は、付録 B の(B)上段に示す。その結果を図 9(a)に示す。同図(a)より、FB gain switch が 07:59:40 から 29.01 s 後の 08:00:09.01 に 0 から 2 という信号に切替わる。これは、知多市に伝達してきた地震が高周波成分を多く含む地震であることを表す。この信号を(A)の地震と同様にリアルタイムで四日市市に送信し、高周波向けの制御切替えを行う。具体的に高周波向けの制御切替えとは、FB gain switch により FB ゲインを 37 から 90 に切替えることである。続いて、比較のために観測地点を使用せずに四日市市で地震を検知すると何秒にスイッチが起動するかを確認する。ここで使用する論理構成は図 1 である。同図では震源から四日市市に伝達する地震を使用する。なお、波形データは付録 B の(B)下段に示す。この結果を図 9(b)に示す。同図(b)より、FB gain switch が 07:59:40 から 32.02 s 後の 08:00:12.02 に高周波成分が多い地震向けの切替えを行い、地震の収束判定により 48.09 s 後の 08:

Fig. 8 Relationship of seismic center, Tita-shi and Yokkaichi-shi

Fig. 9 Timing for switching control based on property of earthquake. The left (right) side shows timing for switching by utilizing Fig. 4 (Fig. 1). From the left side, the earthquake is short-period earthquake. The timing for switching is at 08:00:09.01. In the right side, green and blue lines denote the time chart of switching for FB gain switch and Apparatus stop switch.

00:28.09 に切替えた制御を元に戻すことを確認できる. 図 9(a)および(b)の結果から, 観測地点を使用することで同図(a)は(b)より 3.01 s 事前に制御の切替えを行うことが可能となる.

地震(A)と同様に, 図 9(a)および(b)の結果をそれぞれ使用して制御を切替えた場合の $\ddot{x}$ および $(x-x_0)$ の時間応答をシミュレーションし, その結果を図 10 に示す. 同図左側が $\ddot{x}$, 右側が $(x-x_0)$ の時間応答である. 図 10 上段が四日市市で地震を検知し制御の切替えを一切行わない場合 (=切替えなしの場合), 中段が観測地点を使用せずに四日市市で地震を検知し制御を切替えた場合 (=図 9(b)の結果で切替えた場合), そして下段が観測地点を使用して四日市市で制御を切替えた場合 (=図 9(a)の結果で切替えた場合) をそれぞれ表す. 切替えなしと図 9(b)の結果で切替えた場合を比較すると, $\ddot{x}$ の揺れを 08:00:12.02~08:00:28.09 の間で抑制できる. さらに, 図 9(b)と図 9(a)の結果で切替えた場合を比較すると, $\ddot{x}$ の揺れを 08:00:09.01 s~08:00:28.09 の間でより早く抑制できる. なお, 地震(A)と同様に, 図 10 の地震が四日市市に初めて伝達する 07:59:57 と震源で地震が発生する 07:59:40 の間は, 地震が発生してから四日市市に伝達するまでの時間であるため, 波形を割愛している.

なお, 本論文では, 観測地点から空圧式除振装置に送信する信号の通信遅延は考慮していないが, 日本国内の有線による往復遅延時間 (RTT : Round Trip Time) は, 100 ms 以下が普通である. そのため, 観測地点からの送信信号に通信遅延を考慮しても十分に制御を切替え可能である. よって, 上記のシミュレーション結果より, 観測地点を設置して空圧式除振装置の制御を切替えることは, 観測地点を使用せずに切替えるより事前に地震に対応できることを証明した.

Fig. 10 This figure shows time responses against earthquake which strikes at Aichi. The left (right) side shows time response of the table acceleration $\ddot{x}$ (the relative displacement $x-x_0$) under earthquake. The upper side shows time response in the case without switching. The middle side shows time response in the case with switching by Fig.1. The lower side shows time response in the case with switching by Fig.4. In this figure, red, green and blue lines denote the time chart of switching for FF switches, FB gain switch, and Apparatus stop switch. $\ddot{x}$ is suppressed by these switching.

4. 結 語

本論文の結論は以下の通りである。

- (1) 加速度 $\ddot{x}_0$, 変位 x_0 , および SI 値の差分である $SI_h - SI_n$, $SI_l - SI_n$ の合計 4 信号を使って地震動の性状を捉え、これを踏まえて適宜に床振動 FF と FB パラメータの切替えを行なうことにより地震動が除振台に及ぼす影響を緩和できること既に提案していた。この動作の一部を実機で検証した。
- (2) 地震動が収束したとき、床振動 FF と FB パラメータの切替え起動を定常状態に復帰させるアルゴリズムは既にシミュレーションにおいて提案済みであるが、この動作も実機で確認できた。
- (3) 上記(1)の方法では、地震到来直後の除振台の揺れを抑制することができない。そこで、観測地点という地震を検知し、その性状を分析して空圧式除振装置に制御を切替える指令を送信する場所を設置した。そして、観測地点で地震の性状判定を行うプログラムの論理構成およびシミュレーション結果を示した。シミュレーション結果より、地震の性状判定が正常に動作することを確認した。
- (4) 観測地点を使用して空圧式除振装置の制御を切替えた場合の $\ddot{x}$ および $(x-x_0)$ の時間応答をシミュレーションした。その結果を文献(涌井, 2013)でシミュレーションした結果と比較し、観測地点を使用する優位性を検証した。

付録A パラメータ

Parameter	Symbol	Value	Unit	Parameter	Symbol	Value	Unit
Mass	M	120.33	Kg	Pressure PI parameter	k_{pr}	2	-
Viscous damping coefficient	D	479	N・s/m		T_p	8.928	s
Spring constant	K	5122	N/m	Acceleration PI parameter	k_{ar}	1	-
Flow gain	G_q	1.5981E-5	m ³ /s/V		T_a	0.300	s
Compressibility	β_0	2.7367E-6	1/Pa	Position PI parameter	k_s	0.02	-
Flow conductance	c	4.5976E-10	m ³ /s/Pa	Pressure feedback gain	k_g'	30	-
Air spring volume	V_0	0.0015	m ³	Acceleration feedback gain	k_a'	37.5	-
Received area	A_0	7.80E-3	m ²	Relative acceleration gain	k_{atun}	2106	-
High pass filter	T_{hp}	2.2	s	Floor vibration transfer function	$k_{fs}(s)$	3.094+ 2835/(1+ $T_f s$)	-
Pseudo integrator	T_i	2.2	s				
Pressure sensor sensitivity	k_{pre}	(10/7)E-5	V/Pa	Displacement of isolated table	x	-	m
Accelerometer sensitivity	$k_{acc(i),acc(f)}$	0.5099	V/(m/s ²)	Floor vibration	x_0	-	m
Position sensor sensitivity	k_{pos}	(2/3)E4	V/m				

付録B 加速度波形

3・3節でシミュレーションに供した地震動の加速度波形を時系列順に並べる。なお、破線は地震発生時の時刻を示す。(A)の地震は低周波成分を多く含む、一方(B)の地震は高周波成分を多く含むという特徴を持つ。しかし、そのままの加速度の大きさにシミュレーションを行うと(A)では Apparatus stop switch が起動し、(B)では制御を切替えるための閾値を超えないため、制御の切替えが行われない。そこで、本論文では制御の切替えの有効性を示すため、(A)である三重県四日市市で観測された地震の加速度に 0.02 を乗算した。図では、乗算後の加速度・変位波形を示している。また、同様の理由により、(B)では愛知県知多市および三重県四日市で観測された地震の加速度を 6.0 倍し、知多市は数値処理後の加速度を、四日市市は数値処理後の加速度・変位波形を示す。これらの地震波形をシミュレーションに使用した。

謝 辞

地震波形は K-NET(K-NET, accessed on 4 September, 2013)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, 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, C.M.Harris and C.E.Crede (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 2013 年 9 月 4 日).
- 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 (2011), pp. 4111-4124.
- 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.
- 渡辺篤, 本間芳則, 大庭健太郎, 奥富剛史, 新幹線地震防災システムの開発, 三菱スペース・ソフトウェア技術情報, Vol.19, pp.12-16, (online), available from <<http://www.mss.co.jp/technology/pdf/19-02.pdf>>, (参照日 2013 年 9 月 4 日).

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, 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, C.M.Harris and C.E.Crede (Eds.), Shock and Vibration Handbook (1961), McGraw-Hill.
- K-NET (online), available from<<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net>>, (accessed on 4 September, 2013).
- 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 (2008) pp.214-219 (in Japanese).
- Wakui, S. and Ogasahara, T., Improvement of an air type anti-vibration apparatus for long period earthquake ground motion, Transactions of the JSME, Vol.77, No.783 (2011), pp. 4111-4124 (in Japanese).
- Wakui, S. and Ronte, T., A countermeasure of earthquake ground motion for an air type anti-vibration apparatus, Transactions of the JSME, Vol.79, No.798 (2013), pp.276-288 (in Japanese).
- Watanabe, A. Honma, Y. Oba, K. and Okutomi, T., The development of the early earthquake detection and alarm system for bullet-train (Shinkansen), MITSUBISHI SPACE SOFTWARE technology Information, Vol.19, pp.12-16, (online), available from <<http://www.mss.co.jp/technology/pdf/19-02.pdf>> (accessed on 4 September, 2013).