434 空気浮上を利用した高知能免震システムの基礎的研究

Fundamental Research of High Intelligence Isolation System Using Air Bearing

○ 荒井 すぎ菜 (東京電機大・院)
正 宮崎 充 (オイレス工業)

正 藤田 聡 (東京電機大)
高橋 治 (構造計画研究所)

Sugina ARAI, Tokyo Denki University, 2-2, Kanda-Nisiki-chou, Chiyoda-ku, Tokyo
Satoshi FUJITA, Tokyo Denki University
Mitsuru MIYAZAKI, OILES CORPORATION
Osamu TAKAHASHI, STRUCTURAL ENGINEERING DEPT.

Recently, an isolation system has been required not only to be protect from structure but also to continue its functioning and we have to consider resonance of seismic isolation system in a seismic excitation having predominant frequency components. To solve this problem, we proposed the new isolation systems, which consist of air bearing and Earthquake Early Warning Information. This isolation system utilizes Earthquake Early Warning Information System that delivers some earthquake information to each receiving terminal before the S-wave reaches, which has low friction properties. The operation judgment of the air floatation is done based on Earthquake Early Warning Information. This paper describes the results obtained through response earthquake analysis.

Key Words : Isolation System, Air Bearing, Earthquake Early Warning Information, Long-period Earthquake Wave

日本は世界有数の地震大国であり、地震発生率や都市集中型の脆弱性、発達が目覚ましい情報通信機器への依存性の高さなどから、地震発生時の政治的・経済的な被害リスクが大きいと考えられている。また、2003年に発生した十勝沖地震では長周期地震動と呼ばれる地震波による被害が観測された。本研究で提案する免震装置の特色として、空気浮上装置を用いるため免震周期を持たず非常に低摩擦である点と、緊急地震速報とP波地震計を併用して地震到達前に地震情報を受け取り、免震装置の作動判断やその他二次災害防止の対応を行なう総合的な高知能浮上免震システムという事が挙げられる。主な免震対象を半導体工場の製造機器やコンピュータサーバとしており、空気浮上装置には図A1に示すようなスラスト荷重型のエアベアリングや、ダイヤフラム型のより重量に耐えられるエアベアリングを、用途や対象質量により使い分ける。緊急地震速報とP波地震計の情報を基に免震装置の作動を制御判断し、エアベアリングにコンプレッサから圧縮空気を送る。多孔質焼結層や微小孔から空気が噴出することにより免震対象物と地面の間に空気膜が生成し浮上する。免震対象には、空気摩擦のみが作用し、非常に低摩擦な免震装置としての利用が期待できる。本高知能浮上免震システムの概略を図A2に示す。

Fig.A1 Air bearing

本免震システム確立の前段階として、地震時における本免震系の有効性を確認するため、地震応答解析による基礎的検討を行った。本報では、地震応答解析結果を報告する。本免震装置の解析モデルは1質点系の剛体とした。解析に用いた摩擦係数は図A1に示したエアベアリングの使用を想定して0.0005とし、時刻歴応答解析を行った。また、免震対象の地震時の挙動を明らかにするため、床応答スペクトル解析を行った。免震装置の有効性の判断基準として、入力加速度に対する応答加速度の低減に着目した。解析では強震波と長周期成分を含んだ地震波で検討を行った。

地震応答解析結果より本免震装置は、地震波の性質に関わらず入力加速度に対する応答加速度を大幅に低減する事が可能であると確認できた。従って、本免震装置は長周期の成分を含む地震に対しても有効であり、今後発生が予想される様々な地震でその効果を発揮し、総合的な地震対策システムとして機能すると考えられる。

Fig.A2 Isolation system using air bearing

1. はじめに

近年相次ぐ大地震や、メディアからの地震情報により地震対策への関心が高まってきている。昨年 8 月に発生した宮城県沖地震では、地震到達の 16 秒前に地震の規模や到達時刻等の情報が仙台市に配信され、緊急地震速報が注目を集めた。日本は世界有数の地震大国であり、地震発生率や都市集中型の脆弱性、発達が目覚ましい情報通信機器への依存性の高さなどから、地震発生時の政治的・経済的な被害リスクが大きいと考えられている。2003 年の十勝沖地震では長周期地震動と呼ばれる地震波による被害も発生した。また、今後発生が予想されている東海地震・東南海地震では、関東平野を地震波が伝わることで関東地方付近では長周期地震動となり、首都圏には長い固有周期を持つ高層・巨大構造物が多いため、長周期地震動によって多大な被害となる可能性がある。しかし、長周期地震動は直下型の地震に比べ地震到達までに時間がかかることから、緊急地震速報を利用し早期対応をすることで、人的・経済的被害の大幅な軽減が可能になると期待されており、鉄道への緊急警報⁽¹⁾や半導体工場等で試験運用されている。

本研究では、空気浮上装置の低摩擦特性を免震装置に利用する。緊急地震速報によって得られたデータを基に免震装置の判断制御を行う総合的な免震システムを提案する。本報では、高知能浮上免震システムの概要と、本免震装置の免震効果に関して地震応答解析により基礎的検討を行った結果を報告する。

2. 空気浮上を利用した高知能免震システム

2.1 浮上免震の提案 本研究では、空気浮上を利用した高知能免震システムを提案する。免震対象を浮上させることで構造物基礎と免震対象を絶縁すると、免震対象には空気摩擦が作用する。空気摩擦は転がり支承やすべり支承の摩擦と比較しても非常に小さい⁽²⁾。使用する空気浮上装置には、スラスト荷重型空気軸受エアベアリングと重量物移動などに用いられているダイヤフラム型エアベアリングの 2 種類を検討した。本免震システムの免震対象は半導体工場等の電子デバイス製造機器やコンピュータサーバ等とし、免震対象の質量や用途によって使用型を選定する。小型軽量向けとして空気軸受型エアベアリングを、大型重量向けとしてダイヤフラム型エアベアリングを用い、表 1、2 にそれぞれの摩擦係数と浮上高さを示す。

浮上原理はエアベアリングに空気供給口から圧縮空気を送り、多孔質焼結層や微小孔から空気が噴出することにより免震対象物と地面の間に空気膜が生成し浮上する。このとき空気膜の摩擦は 0.0005～0.001 と非常に小さい。免震装置に適用した場合、免震対象にはこの極わずかな摩擦力のみが作用するため、地震波の周期成分に左右されず様々な種類の地震波に対して応答加速度を低減すると考えられる。しかしながら、安全性の面や経済的な事を考慮すると常時浮上しているのは困難であるが、空気浮上装置が免震装置としての効果を得るためには地震時に浮上していなければならない。このため空気浮上装置作動を判断するための地震に関する情報が必要となる。そこで本研究では、免震装置の浮上判断に緊急地震速報と P 波地震計を併用する。図 1 に浮上免震システムの概略を示す。

2.2 高知能浮上免震システム 緊急地震速報は、全国各地の観測点で P 波を受信するとインターネット回線や専用線を介して緊急地震速報が発信され、受信端末では S 波到達前に地震の規模・地震到達時刻などの情報を得ることができるシステム⁽³⁾である。

Table1 Air bearing for lightweight

Coefficient of friction	Floatation gap
0.0005	5[μ m]

Table2 Air bearing for weight

Coefficient of friction	Floatation gap
0.001	0.1[mm]

Fig.1 Isolation system using air bearing

本研究では、緊急地震速報を受信し地震情報をもとに制御判断を行い、免震装置を作動する高知能免震システムの確立を目指す。本高知能浮上免震システムの特徴を以下の(1)～(5)に示す。

- (1) 本免震システムは緊急地震速報の情報端末で受信した地震情報に加え、免震システムに設置した P 波地震計の情報を複合し、地震の規模や S 波到達までの時間の大小により、システム作動判断を行う。
- (2) 地震時に使用可能な電力を貯えておく機構を免震システムに設けることで、地震時にも情報端末や免震システム作動の確実性を保証し、停電時にも電力が使用でき、地震直後にも通常の生活が可能で、早期復旧にも役立つと考えられる。
- (3) 緊急地震速報受信端末で受信した地震規模や地震到達時刻の情報をもとに、システム制御判断装置が免震装置起動判断・ライフライン機器制御や緊急警報を発し、地震被害の軽減を図る。
- (4) 免震装置には空気浮上装置を用いる。空気浮上を利用すると摩擦係数の非常に小さい免震装置として用いることが可能となる。システム作動判断装置において浮上免震が必要と判断された場合、空気浮上装置を起動し、浮上免震により免震対象と基礎を絶縁し、免震効果を得る。
- (5) 免震支承底部には滑り材(テフロン等)を取り付け、平常時には上部構造物を支柱で支持し、緊急地震速報受信よりも早く S 波が到達してしまうような直下型地震や近距離で発生した地震には P 波地震計の情報と滑り材で初期対応する。また、遠距離で発生した地震に対しては、緊急地震速報や免震システムに設置した P 波地震計の情報をもとに装置作動の判断を行い、免震装置に圧縮空気を供給し免震対象を浮上させ、被害の軽減を図る。

3. 免震システムの基礎的検討

3.1 地震応答解析 これまでに述べた高知能浮上免震システムを確立する前段階として、空気浮上による免震装置の有効性の確認を目的とし、摩擦係数の低い本免震装置の低摩擦領域での挙動を明らかにするため、時刻歴応答解析、及び床応答スペクトル解析を行った。免震効果の判断基準として、入力加速度に対する応答加速度低減に着目した。解析に使用した直下型強震波形の JMA Kobe NS 波の原波、及び長周期成分を含む JMA Tomakomai NS 波の原波の最大入力加速度と入力速度を表 3 に示す。また、JMA Kobe NS 波、JMA Tomakomai NS 波の応答加速度、応答速度、応答変位のスペクトルを図 2 に示す。なお、減衰比は 0.01, 0.03, 0.05, 0.10, 0.20 とし、固有周期 0.01~30[s]での解析を行った。

Table3 Input earthquake

Input Wave	Max.Input Acc.	Input Vel.
JMA Kobe NS Original	8.18 [m/s ²]	0.88 [m/s]
JMA Tomakomai NS Original	0.23 [m/s ²]	0.16 [m/s]

図 2 から JMA Kobe NS 波は、固有周期 0.1~1[s]付近で卓越成分を有しており、減衰比 0.01 時では卓越時の最大応答加速度が 40[m/s²]を越す非常に強い地震波であることが確認できる。JMA Tomakomai NS 波は、10[s]付近でも大きな加速度を持っており、長周期成分を含んだ地震波である事が確認できる。これらの波を解析に用いることで、性質の異なる地震波での免震装置の挙動を明らかにする。

Fig.2 Max. Response spectrum

3.2 解析モデル 本免震装置の地震時における挙動を検討するため、表 3 に示した地震波の特性の異なる波を用い時刻歴応答解析を行なった。本免震装置の解析モデル (With Device) は図 3 に示すように 1 質点系の剛体モデルとした。

Fig.3 Analysis model

Fig.4 Air bearing

解析に用いた摩擦係数は図 4 に示したエアベアリングの使用を想定し 0.0005 とした。また、解析に使用した運動方程式と文字記号を、式(1)~(4)と表 4 に示す。運動方程式は静止状態を Phase1, 運動状態を Phase2 として検討を行った。

Phase1 : 静止状態

$$\dot{x} = 0, \quad x = \text{const} \quad (1)$$

Phase2 : 運動状態

$$m\ddot{x} + \mu mg \cdot \text{sgn}(\dot{x}) = -m\ddot{z}_H \quad (2)$$

$$\ddot{x} + \mu g \cdot \text{sgn}(\dot{x}) = -\ddot{z}_H$$

切り替え条件

Phase1 から Phase2 : 静止状態から運動状態への移行

$$|m\ddot{z}_H| > \mu mg \quad (3)$$

Phase2 から Phase1 : 運動状態から静止状態への移行

$$\dot{x} = 0 \quad \text{かつ} \quad |m(\ddot{x} + \ddot{z}_H)| \leq \mu mg \quad (4)$$

Table5 Character symbol of motion equation

m	[kg]	Mass
g	[m/s ²]	Gravity Acc.
μ		Coefficient of friction
$\ddot{x}$	[m/s ²]	Response Acc.
$\dot{x}$	[m/s]	Response Vel.
$\ddot{z}_H$	[m/s ²]	Input Acc.

また、比較対象用に固有周期 3[s]、減衰比 0.20 である免震装置（Without Device）の時刻歴応答結果を併記した。本免震装置と比較対象用の免震装置のパラメータを表 4 に示す。時刻歴応答解析結果として、図 5 には応答加速度、応答変位の最大応答値を示し、図 6 には時刻歴応答を示す。

Fig.5 Max. Response of time history

Table4 Parameter of device		
With Device	Without Device	
Coefficient of friction	Natural period	Damping ratio
0.0005	3 [s]	0.20

図 5 より、本免震装置は JMA Kobe NS 波及び、JMA Tomakomai NS 波の両波において、入力加速度に対する応答加速度の大幅な低減が確認できた。JMA Kobe NS 波に関して、本免震装置は比較対象用免震装置より応答加速度を低減できたが、比較対象用免震装置で殆ど低減が確認できなかった長周期成分を含む JMA Tomakomai NS 波においても、JMA Kobe NS 波と同様の値まで応答加速度の最大応答値を低減できた。よって、本免震装置は地震波の性質に関わらず、入力加速度に対する応答加速度の大幅な低減が期待できる。また、比較対象用免震装置では、入力加速度に対する応答加速度が、JMA Kobe NS 波に比べ、JMA Tomakomai NS 波では殆ど低減できていなかったが、これは比較対象用免震装置のような固有周期を有する免震装置が JMA Tomakomai NS 波の長周期成分に影響されたと考えられる。これに対し、本免震装置の挙動は式(1)～(4)からもわかるように摩擦係数のみに依存するため地震波の周期成分に影響されず、応答加速度は摩擦係数に依存した一定の応答値になる。そのため、本免震装置は直下型の強震波や長周期成分を含む地震波にも対応でき、地震波の性質に依らず免震効果を発揮すると考えられる。

Fig.6 Time history (Coefficient of friction 0.0005)

3.3 床応答スペクトル解析 次に、時刻歴応答解析で得られた結果を用いて、床応答スペクトル解析による検討を行った。入力地震波には図 6 に示した JMA Kobe NS 波と JMA Tomakomai NS 波の時刻歴応答加速度結果を用い、減衰比は 0.01, 0.03, 0.05 とし、固有周期を 0.02～20[s]として計算を行った。各波の床応答解析の加速度スペクトル結果を図 7 に示す。

図 7 の床応答加速度スペクトル結果をみると、JMA Kobe NS 波と JMA Tomakomai NS 波の両波において、固有周期 0.02～20[s]に対する応答加速度は過大な応答値を示さなかった。よって、本免震装置は支配的な免震周期を有していないことがわかる。床応答スペクトル結果からも、本免震装置の低摩擦特性下では地震波の周期成分に関わらず免震対象の応答加速度を同程度の応答値に低減できることが確認できた。以上より本免震装置は固有周期の短い対象物から長い対象物に対しても適用可能であると考えられる。本解析では、免震性能の判断基準として応答加速度の低減に着目して解析を行ったが、低摩擦特性を有する本免震装置($\mu=0.0005$)は、地震波の振動数特性に依存することなく、幅広い振動数領域で良好な免震効果を発揮すると考えられる。

Fig.7 Floor response spectrum (Max. Response Acc.)

5. まとめ

本報では、空気浮上装置と緊急地震速報を連動させる高知能浮上免震システムを提案した。また、浮上免震の有効性を確認するため低摩擦領域における地震応答解析による基礎的検討を行った。地震応答解析結果より本免震装置は、地震波の周期成分に関わらず免震対象物の入力加速度に対する応答加速度を低減する事が可能であると確認できた。従って、本免震装置は長周期の成分を含む地震に対しても有効であると考えられ、今後発生が予想される様々な地震で免震効果を発揮する総合的地震対策システムとして期待できる。

6. 今後の展望

本報で報告した地震応答解析結果を踏まえ、試験装置を作製し、実際の地震時の挙動を確認するため振動試験を行う。試験装置モデルは、上部荷重 30[kg]に対し図 4 に示したエアベアリング 5 個を配置する。また、浮上免震は浮上高さが極わずかであるため、上下方向地震動が及ぼす影響の確認を行う。製作中の実験装置で振動試験を行なった上で、地震発生から終了までの時間軸に沿ったシミュレーションにより、一連の免震システムの効果を確認する。緊急地震速報を利用した様々な地震波に対応可能な総合的な高知能浮上免震システムとしての確立を目指す。

文献

- (1)K.Ashiya, Earthquake Alarm Systems in Japan Railways, Journal of JAEE, Vol.4,No.3,112-117
- (2)岩藤 任善・吉本 成香, 円板形多孔質静圧気体スラスト軸受に関する研究, 機論 62-593C1996 276-283
- (3)浅原 裕・大角 恒雄・藤縄 幸雄, 防災情報として活用するための緊急地震速報の精度評価, リアルタイム災害情報検知とその利用に関するシンポジウム論文集 2004 19-24