

平成 21 年 6 月 12 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560241

研究課題名（和文） エアベアリングを用いた高知能浮上型免震システムの研究開発

研究課題名（英文） Research and Development of
Intelligent Floating Seismic Isolation System Using Air Bearings

研究代表者

藤田 聡 (FUJITA SATOSHI)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：40143531

研究成果の概要：本研究では、直下型から長周期地震まで対応可能な「高知能浮上型免震システム」を提案した。本システムは、空気により浮上することで地震動を受け流すものであり、稼働判断には緊急地震速報を用いる。まず、シミュレーションによりシステムの地震時挙動を検討し、その後、種々の試験によりシステムの特性を調査した。水平・上下地震動を同時入力する実験を行った結果、本システムは極めて高い免震性能を有することを確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：免震，構造工学・地震工学，地震，減災，防災

1. 研究開始当初の背景

我が国は環太平洋地震帯に属する，世界有数の地震国である。1995年に発生した阪神大震災は多くの犠牲者を出し，社会に大きなダメージを与えたことは記憶に新しい。そのような中，我が国では建物や機器を強震動から守る「免震技術」や，地震の短期的予知手法である「緊急地震速報」などの技術を，鋭意発達させてきた。

一方，近年の地震学的研究，地震被害調査やその科学的分析により，数秒から 10 秒程度の卓越周期を有するいわゆる「長周期地震動」の存在が明らかになった。2003 年の十勝

沖地震では長周期地震動を原因とする石油タンクの火災が発生しており，今後都市部でこのような長周期地震動が発生した場合，高層ビル等に共振を引き起こし，大きな被害を与えると危惧されている。

ここで，免震構造物も長周期地震動により共振を起こす危険性がある。しかしながら，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に対応をすることで，長周期地震動にも対応した免震構造の構築が可能になると考えられる。また，長周期地震動にも対応する免震構造実現のためには，免震構

造の固有周期のさらなる長周期化が課題となる。

2. 研究の目的

本研究では、空気浮上式の免震装置を提案することで、理論上は無敵大までの固有周期を実現しうるシステムを開発する。そして、緊急地震速報を基本情報として免震システムの起動判断制御を行う新たな総合的高知能免震システムを構築する事を目的とし、下記の技術的課題に対して具体化を図る。

- (1) エアベアリングを用いた空気浮上型免震装置の開発
- (2) 緊急地震速報を基本とする免震システム起動判断制御システムの構築
- (3) 地震応答シミュレーションプログラムの構築

3. 研究の方法

(1)シミュレーション解析

研究の第一段階として、シミュレーションプログラムを作成し、シミュレーションにより、提案するシステムの地震時挙動を検討した。シミュレーション解析では、免震システムの性能を多角的に検討するため、水平地震動のみが入力された場合、水平・上下地震動が同時に入力された場合に分けて行った。

(2)緊急地震速報のシステムへの組み込み

前述のシミュレーション解析により本免震システムの優れた免震性能が確認されたため、実験モデルを設計、製作した。

また、本システムの特徴として、システムの起動判断に気象庁の配信する「緊急地震速報」を用いる点が挙げられる。そこで、緊急地震速報受信の PC と連動するスイッチングシステムを構築し、製作した実験モデルへ組み込んだ。

(3)免震要素特性の検討

製作した実験モデルを用いて、免震要素（エアベアリング）の特性の検討を行った。本免震システムは水平方向の地震動に対応したものであるが、ここでは、水平方向のみならず、上下方向の特性も調査した。

(4)振動実験

本研究のまとめとして、前述の実験モデルを用いた振動実験により、本システムの免震性能を検討した。実験では、免震システムの性能を多角的に検討するため、水平地震動のみが入力された場合、上下地震動のみが入力された場合、水平・上下地震動が同時に入力された場合など、種々の条件により実験を行った。

4. 研究成果

(1)シミュレーション解析

シミュレーション解析により、提案する免震システムの地震時挙動を検討した。図1に、後述の実験モデルと同等のシミュレーションモデルに JMA Kobe NS UD 実波(1995年, 兵庫県南部地震での観測波), JMA Tomakomai NS UD 実波(2003年, 十勝沖地震での観測波)を入力した際の結果を示す。図1には従来の免震構造による結果も併記した。図1より、本免震システムは直下型地震である Kobe 波, 長周期地震動である Tomakomai 波に対しても応答加速度を従来の免震構造よりさらに低減し, 対象物に働く地震力を抑制できていることが確認できる。また, Kobe 波の応答変位は従来の免震構造より抑制できているものの, 一方で, Tomakomai 波では大きくなっている。これは, 浮上免震の原理に起因し, 地震時の地面の振幅がほぼそのまま免震システムの応答変位になるためである。しかしながら, Tomakomai 波のような長周期地震動は一般に加速度が小さいため, 大きな変位が働く場合は接地するなどして対応可能である。

以上より, 本システムは優れた免震性能を有することを確認した。

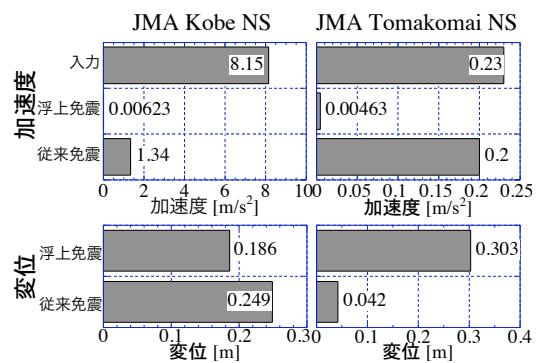


図1 シミュレーション結果

(2)実験モデルの製作とシステム構築

免震要素の特性やシステムの免震性能を検討するための実験モデルを製作し, システムを構築した。図2に製作した実験モデルを示す。実験モデルは免震対象, 免震フレーム, 緊急地震速報受信 PC, 圧縮空気関連機器(エアコンプレッサ, タンク等)からなる。免震フレーム下部には, 図3に示すように免震要素としてエアベアリングが設置されている。エアベアリングはコンプレッサにより生成された圧縮空気を大気中に放出し, 免震システムを浮上させるもので, ホバークラフトと同様の原理である。

各構成要素は図4のような流れで接続されている。圧縮空気を生成するコンプレッサと

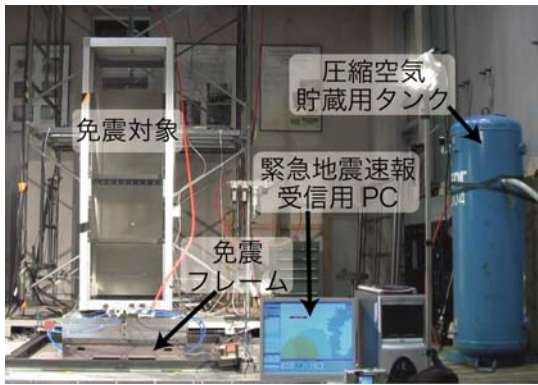


図2 実験モデル

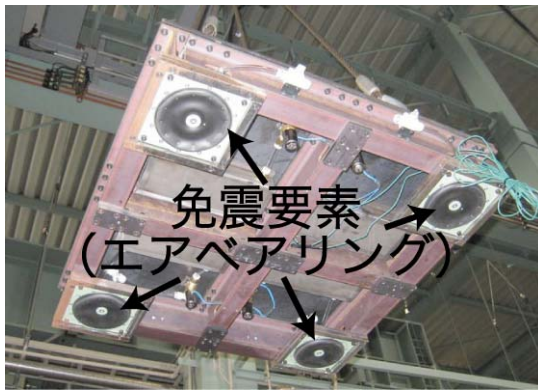


図3 免震要素

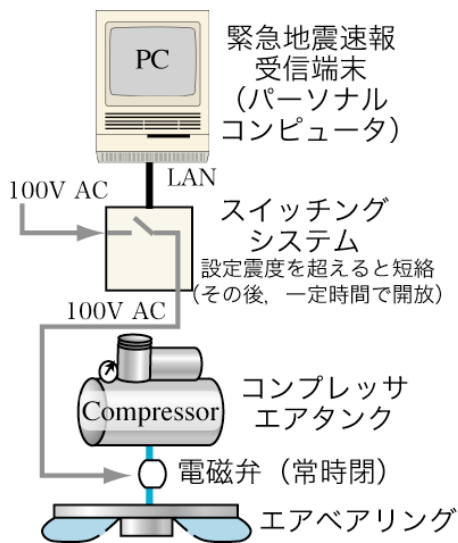


図4 システムの流れ

エアベアリングの間に電磁弁を設け、この電磁弁を緊急地震速報の信号を受けて開放することで、浮上をコントロールする。なお、実験時には緊急地震速報受信から浮上まで、1秒程度であった。

本システムの起動判断に使用した緊急地震速報は、2007年10月から一般市民向け利用が開始されたことにより、国民への認知度は高まってきている。次なる緊急地震速報の

課題として産業機械等への二次利用が挙げられるが、本システムは緊急地震速報を利用したシステムとして、緊急地震速報に関するシンポジウムにおいて国内外からも着目されている（「5. 主な発表論文等」, 「学会発表」, (1)）。

(3)免震要素特性の検討

本システムの動作、免震性能を評価するための第一段階として、製作した実験モデルを用い、免震要素（エアベアリング）の特性を検討した。なお、ここでは免震要素の特性として、エアベアリングの水平方向摩擦係数と鉛直方向の剛性、減衰を測定した。

まず、エアベアリングの水平方向摩擦係数を測定した。本システムは圧縮空気により浮上するが、エアベアリングにより生成される空気膜は薄く、圧縮空気の流速も速いため、微小ではあるが摩擦抵抗が働く。ここでは、実験モデルを浮上させた後、側面からばねばかりを介して水平方向に引張り、滑動に要する水平荷重と実験モデルの重量から、摩擦係数を算出した。実験の結果、摩擦係数は0.000467と極めて小さく、優れた免震性能を実現し得るものであった。

次に、上下方向の剛性、減衰比を測定した。本システムは水平地震動を対象としたものではあるが、エアベアリングは上下方向に空気ばねとして動作すると考えられる。測定は、免震フレームの上部中央に起振機を設置し、免震フレームを浮上させた状態で起振機により上下に振動させて行った。測定結果を基に、周波数応答を求めたところ、免震フレームは上下方向に固有振動数6.05[Hz]、減衰比9.58[%]を有することが確認された。本実験モデルの上下固有振動数は一般的な鉛直地震動の卓越振動数近傍に存在するものの、一方で優れた減衰性能を有する。そのため、鉛直地震動が入力されても、大きな応答が生じる危険性は低いと考えられる。

(4)振動実験による免震システム基本特性の検討

前述の免震要素特性試験により、本システムが上下地震動と同等の固有振動数を有することが確認された。そこで、ここでは免震対象を設置しない状態で、地震動を用いた振動実験を実施し、上下地震動が入力された際の本システムの挙動を確認するとともに、水平方向の免震性能に与える影響を検討した。

まず、水平方向の地震動のみを入力し、基本的な免震性能を検討した。実験結果の一例として、図5にJMA Kobe NS波、最大加速度4.42[m/s²]を入力した際の時刻歴波形を示す。図5より、本免震システムは応答加速度を大幅に低減することができ、極めて優れた免震性能を有することが確認できる。また、

浮上高さはほぼ一定であり、水平方向の挙動が鉛直方向に影響を与えていないことが確認できる。

次に、上下方向の地震動のみを入力し、その応答特性を検討した。実験結果の一例として、図6にJMA Kobe UD波、最大加速度2.16[m/s²]を入力した際の時刻歴波形を示す。図6より、上下地震動により本システムの応答がわずかに増幅されていることが確認できる。免震要素の検討でも確認されたように、上下地震動の卓越振動数近傍に固有振動数を持っているが、同時に高い減衰能力を有するため大きな共振には至らなかったものと考えられる。また、浮上高さは地震入力時に変動があるものの、直ちに変動は収まり、元の浮上高さに戻ることを確認できる。以上により、本システムは上下地震動が入力されると若干の応答を示すものの、安全性は維持されることが確認できた。

最後に、水平・上下方向の地震動を同時に入力し、それぞれの挙動が与える影響を検討した。実験結果の一例として、図7にJMA Kobe NS波、最大加速度4.38[m/s²]及びUD波、最大加速度2.21[m/s²]を同時入力した際の時刻歴波形を示す。図7の水平方向の応答加速度に着目すると、図5の水平方向のみの入力時に比べ、応答が増幅していることが確認できる。これは、上下方向の地震動が入力されたことでロッキング振動が発生し、その振動が水平成分に現れたものと言える。しかしながら、水平方向の応答加速度は入力加速度と比較して十分に小さく、優れた免震性能を維持していることが確認できる。一方、上下方向の応答は、図6の上下方向のみの結果と大きな違いが無く、水平方向の挙動は上下方向の挙動に影響を与えないことが確認できた。

(5)振動実験による免震性能の検討

本システムを実際の機器に適用した場合の免震性能を検討するため、免震対象として図2に示したコンピュータサーバーラックを用い、三次元振動実験を実施した。

実験結果の一例として、図8にJMA Kobe NS, EW, UD波（非免震時2.93, 2.41, 1.21[m/s²]、免震時3.05, 2.29, 1.28[m/s²]）を入力した際の、本システムを用いなかった場合（非免震）と用いた場合（免震）の最大加速度の違いを示す。なお、「フレーム」は免震フレーム頂部、「対象」は免震対象頂部にて計測された加速度である。図8より、本システムを用いない場合、免震対象は共振し、応答加速度が大きくなっていることが確認できる。一方、本システムを用いた場合は、水平方向（NS, EW）において、免震対象の応答加速度は入力加速度に比べて小さくなっており、免震効果が現れていることが確認

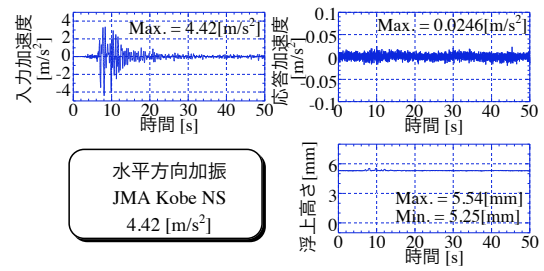


図5 水平方向のみに加振した場合

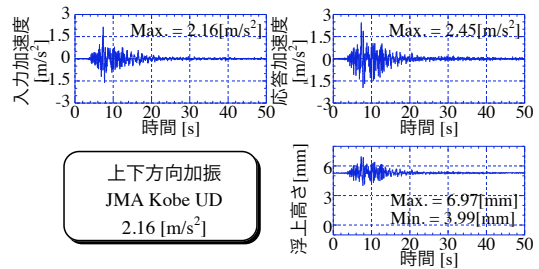


図6 上下方向のみに加振した場合

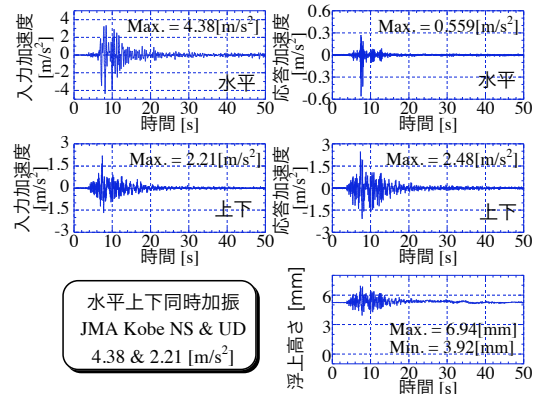


図7 水平・上下同時加振の場合

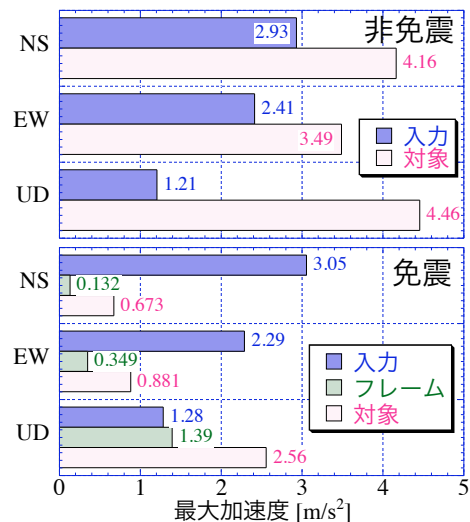


図8 免震性能

できる。また、上下方向（UD）において、免震対象の応答加速度が入力加速度を上回っているが、その値は本システムを用いない場合に比べ小さく、本システムにより免震対象の上下方向の応答も低減することが出来たと言える。なお、水平、上下方向ともに免震フレームの応答加速度に比べ免震対象の加速度が大きくなっているが、これはロッキング振動の影響だと言える。

(6)総合評価

以上、本研究では「高知能浮上型免震システム」を提案し、システムの構築や免震性能の調査・検討を行った。得られた知見を総合的に評価すると、下記の通りまとめられる。

- ・空気浮上を利用した本システムは、優れた免震性能を持つ。構成要素は通常の免震構造に比べて多いものの、より高機能な免震システムとして、例えば企業内の防災拠点や、重要な情報を取り扱うコンピューターーム等への適用は極めて有益なものである。
- ・これまで、緊急地震速報は主に家庭や企業内で人間に対する地震案内用に用いられてきた。本研究では、緊急地震速報を実際に免震システムの中に組み込み、装置の起動判断に使用したことで、緊急地震速報の利用モデルを提案することが出来た。

上記の総合評価を受け、今後の課題及び展望を下記に示す。

- ・水平方向の過大な変位の抑制
- ・上下方向の地震時応答の低減
- ・地震終了後のシステムの検査とメンテナンス方法の検討
- ・緊急地震速報を機器に適用する際の評価点、問題点の抽出と、緊急地震速報開発サイドへのフィードバック

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- (1) 藤田聡, 皆川佳祐, 緊急地震速報の産業機器制御への利用について, 査読無, 地震工学会誌, No. 7, 2008年, pp. 12 - 15

[学会発表] (計 4 件)

- (1) 藤田聡, 皆川佳祐, 長田修一, 田中剛, Intelligent Seismic Isolation System Using EEW, The 2nd International Workshop on Earthquake Early Warning, 2009年4月22日, 京都大学宇治キャンパス
- (2) 細野幸平, 藤田聡, 皆川佳祐, 宮崎充, 田中剛, 高橋治, 緊急地震速報と空気浮上ベアリングを利用した高知能免震構造に

関する研究, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2008, 2008年9月2日, 慶応大学日吉キャンパス

- (3) 藤田聡, 皆川佳祐, 宮崎充, 田中剛, 高橋治, Research and Development of Intelligent Seismic Isolation System Using Air Bearing, 米国機械学会 Pressure Vessels and Piping Division Conference 2008, 2008年7月31日, Chicago, Illinois, USA
- (4) 細野幸平, 藤田聡, 皆川佳祐, 宮崎充, 田中剛, 空気浮上ベアリングを用いた高知能免震システム構築に関する研究, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2007, 2007年9月25日, 広島大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤田 聡 (FUJITA SATOSHI)
東京電機大学・工学部・教授
研究者番号: 40143531

(2)研究分担者

小見 俊夫 (OMI TOSHIO)
東京電機大学・工学部・講師
研究者番号: 30408645
皆川 佳祐 (MINAGAWA KEISUKE)
東京電機大学・工学部・助教
研究者番号: 30453799

(3)連携研究者 なし