負剛性リンク機構と空気浮揚機構を直列に用いた 3 次元免震装置の開発 (試作実験装置の概要と E-Defense 加震装置による実大 3 次元地震波加震実験の報告)

安田 正志^{*1}, 佐藤 栄児^{*2}, 山田 学^{*3}, 梶原 浩一^{*2}, 早津 昌樹^{*3}

Development of three-dimensional seismic isolation system using negative stiffness link mechanism and air levitation mechanism in series (Overview of prototype experimental device and report on full-scale 3-D seismic excitation experiment by E-Defense shaking table)

Masashi YASUDA^{*1}, Eiji SATO^{*2}, Manabu YAMADA^{*3}, Koichi KAJIWARA^{*2}
and Masaki HAYATSU^{*3}

^{*1} Setsunan Univ. Dept. of Mechanical and Engineering

17-8 Ikedanakamachi, Neyagawashi-shi, Osaka 572-8508, Japan

^{*2} National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

1501-21 Nishikameya, Mitsuta, Shijimicho, Miki-shi, Hyogo 673-0515, Japan

^{*3} Hitachi, Ltd.

537 Kami-Hongo Matsudo-shi, Chiba 271-0064, Japan

Received: 16 February 2017; Revised: 24 April 2017; Accepted: 11 June 2017

Abstract

Vibration tests of the prototype of the newly developed three-dimensional seismic isolation mechanism were carried out using several real-scale three-dimensional seismic waves with the world's largest E-defense shaking table. The developed 3-D seismic isolation mechanism has an air levitation mechanism that isolates horizontal vibration and a spring link mechanism that isolates vertical vibration, in series. The air levitation mechanism floats only 50 μm from the floor and is in contact with the floor with a slight air viscous force of a friction coefficient of 1/1000. Since there is no spring force in the horizontal direction in this mechanism, there is no periodic motion and there is no amplification of vibration. Also, since the floating height is very small, the vertical rigidity is very high even in the air, and the rocking motion is not performed. The spring link mechanism combines a negative stiffness link and a positive stiffness link to minimize the spring stiffness. While maintaining the horizontal attitude by the link, a vertical natural frequency of 0.25 Hz was realized. The prototype showed unprecedented high performance of about 20 dB of anti-vibration capability at 1 Hz both in the horizontal and vertical directions, and the effectiveness was verified in this experiment. The seismic waves used for the experiment are the Takatori seismic wave of the Great Hanshin-Awaji Earthquake of 1995 and the Sendai seismic wave of the Great East Japan Earthquake of 2011.

Key words : Earthquake, Three dimensional seismic isolation, Air levitation, Negative stiffness

1. 緒 言

これまで経験したことがないような巨大なエネルギーを有する地震や、震度 7 の強震を何度も繰り返すような地震の発生による大災害を目の当たりにして、地震対策の決め手と信じてきた最新の免震装置においても、上下振動には無防備であったり、伝達振動が大きかったりするなどの改善項目が目につくようになった。これまでの免震技術の弱点を克服してより高度な安心安全を手に入れるためにはどのような方法があるかと新たな 3 次元免震装置の検討を進めてきたが、その試作装置の性能を実験的に検証するまたとない機会が得られた。3 機関の共同研究を背景に、メンテナンス調整期間の装置有効活用の一環として、E-Defense という世界一の規模を有する加振

No.17-00057 [DOI:10.1299/transjsme.17-00057], J-STAGE Advance Publication date : 27 June, 2017

^{*1} 正員, 摂南大学理工学部機械工学科 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8)

^{*2} 正員, (独) 防災科学技術研究所 (〒673-0515 兵庫県三木市土染町三津田西亀屋 1501-21)

^{*3} 正員, (株) 日立製作所 (〒271-0064 千葉県松戸市上本郷 537)

E-mail of corresponding author: ma-yasud@mec.setsunan.ac.jp

装置で実測の3次元地震波を加えて性能を確認できたのである。開発としてはまだ途上であるが、現状で得られる最も現実に近い地震波を加えることで、その有効性の検証を含む多くの成果を得たことを報告する。

開発においては、これまでの免震装置それ自身が復元力を持つことによって地震力を伝達させているということに着目している。免震装置は遮断性能を高めるために固有振動数を十分に低い振動数としているが、それでも地震による増幅を避けることができず、その共振増幅を抑制するために減衰力を付加している。このことによって遮断性能は劣化して地震力の伝達を増大させているのである。地震後の位置の復元という強い制約を取り除き、復元ばねの剛性をなくせば原理的に振動を増幅しない免震機構を作ることができる。以上から復元ばね特性をもたない免震システムとして空気浮揚を構想するに至った。空気浮揚が水平の遮断性能に優れるであろうことは想定できるが、ただホバークラフトのように浮揚させると、水平方向はよくても鉛直方向には浮揚位置決めのため復元力が働くために、これまでの免震装置がもつ鉛直方向の弱さを克服できない。そこで新たに負剛性を組み入れたリンク機構を浮揚機構の上に直列に搭載して、鉛直方向にもわずかな復元力しか有さない3次元免震機構を開発した。負剛性機構は、あくまでもパッシブな機構であり、復元力を極小化したこれまでにはない振動遮断性能を発揮することができる。以下に本論に關係する先行技術について概観したのち、開発した3次元免震技術について次章以降に詳述する。

1・1 3次元免震技術の状況

先行する3次元免震の研究事例として原子力施設を対象とする免震機構の研究がある。2000~2004年の5年間をかけて日本原子力発電を事業主体とする高速増殖炉（FBR）等の新たな原子炉の実用化を推進するため「油圧機構を用いた3次元免震システム」、「ケーブル補強マッシュルーム型空気ばね3次元免震装置」、「ローリングシール型空気ばね方式3次元免震装置」などの開発、研究が進められた。「3次元免震システムの適用が可能となると地震荷重による設計の制限が大幅に緩和され、熱応力に優れた構造を設計することが可能となる」としている（須原他, 2006）。ローリングシール型空気ばね方式3次元免震装置では、周辺を油圧機構による装置で支持してロッキングに対する抑制効果を狙った免震装置となっている（島田, 2014）。

3次元免震の先行実施事例としては、阿佐ヶ谷プロジェクトという開発チームによって準備され、2011年に竣工した「知粹館」と呼ばれる集合住宅（Takahashi et al, 2008）がある。水平振動は免震ゴムで遮断して鉛直振動は空気ばねで遮断するという重層構造の免震機構で支持されている。1基の免震ゴムに対して3基の大型空気ばねがそれを支えて一体としたユニット8基で建物を支える構造になっている。これによって水平の地震動は1/8、鉛直は1/3にできるとしている。ここで工夫されているのが建物のロッキング振動を防ぐための油圧ダンパー機構である。4隅のダンパーを配管で結び、牽掛けに油圧を働かすことでロッキング抑止力を得ている。同様の油圧機構を用いた3次元免震装置の先行的研究が柏崎らによって報告されている（柏崎他, 1998）。

このように3次元免震への試みは多くなされているが、鉛直の免震機構として空気ばねを用いているものが多い。これらの鉛直方向の固有振動数は1Hz前後と報告されている。鉛直の支持剛性を柔らかくすることによって回転運動の問題が発生するためにその抑制に多くの力がそそがれ、結果としてロッキング防止機構からの振動伝達が無視できないものになっている。その解消が本開発の課題の一つである。

1・2 空気浮揚あるいは負剛性を用いた免震技術に関する状況

空気圧は先行事例のように大きな荷重を上下に柔らかく支える目的で使われてきたが、これとは異なって空気に対象を浮かすことで水平地震動を遮断しようという空気浮揚式の免震機構がいくつか提案され、試験的な運用も開始されている。空気浮揚はシンプルな機構で容易に大荷重を支持することができ、水平方向の地震動に対する振動遮断性能も高い。空気浮揚式の三誠 AIR 断震システム（<http://www.airdانشin.jp>）は2005年から試験的運用として販売されている。これらは木造の戸建てを対象としているが、東北地方太平洋沖地震においても建設済みの建物は正常に浮上して全く被害はなかったとしている。地震を感知するとリザーブタンクから空気を床下に送り込んで建物を一体として1~3cm浮揚させる方式であり、震度4~5で初めて作動する。空気浮揚の簡便性、コストの優位性がうたわれており、浮揚することにより基本的な免震性能が確保されて技術要素が簡便になっている。

空気浮揚免震の学術的なアプローチとしては、藤田聡らの2006年からの一連の研究が見られる。研究されたのは多孔質焼結層を用いたものやダイヤフラムを用いたものであり、免震効果の検証が行われていて、摩擦係数は0.0001~0.001と非常に小さいことからあらゆる地震に対する遮断性能に優れると報告している(荒井他, 2006)。またダイヤフラム型エアベアリングを用いた免震装置の研究のなかで、加振試験によって鉛直の固有振動数が6.05 Hzで15.7 dBの増幅があることを示し、さらに地震波による試験では、搭載物の共振を含む200%の増幅があるが、装置がない場合の増幅369%に比べて改善する(Minagawa et al., 2012)と述べている。ここでは浮揚体そのものの対策検討はなされていないが、搭載物の動的な影響が評価されている。

負剛性に関しては制御を含む分野での検討は比較的多いが、パッシブな利用はあまり見られない。パッシブな負剛性の免震への適用としては、橋桁固有周期の長周期化に負剛性ダンパーを用いる研究(家村他, 2007)が行われている。パッシブ型負剛性ダンパーを水平方向の滑り軌道を負に取ることによって実現している。ほかに著者の一人らが行った平行四辺形型リンクを用いた負剛性の3次元免震への適用研究(松久他, 2009)がある。美術品などを対象とした小型の3次元免震装置の開発で、負剛性を水平、鉛直に同時に作用させて低固有振動数を実現する提案を行っている。この時の鉛直の固有振動数は0.7Hz程度であり、これ以上の低固有振動を実現することは困難であった。そこで取り組んだのがリンク・クランク機構を用いた低固有振動鉛直免震装置の開発(辻内他, 2016)であり、今回の開発で採用した機構はその延長にある。

2. 開発した免震要素技術

鉛直方向の免震を行うと必然的に支持剛性を下げることになり、そのことに起因して発生するロッキング運動の防止が必要とされ、免震対象が大きくなればなるだけ大きな抑止力が必要とされる。そこで用いられてきたのは油圧による姿勢制御技術である。この技術は先に挙げた集合住宅の3次元免震においても使われているが、前節でも述べたように振動の伝達経路にもなる。これまでロッキング抑止は必須とされてきたが、考えてみるとロッキング運動が発生するのは、免震機構が復元ばねや摩擦によって水平方向の地震動を伝達するからである。水平の地震動が伝達しなければロッキングは起きない。あるいは水平地震動の伝達が十分に小さければ、わずかな姿勢保持力でロッキングを抑止することができる。開発した3次元免震機構は、水平方向の振動遮断性能が高く、従来技術に対して優位性を持つ。以下にその中核となる空気浮揚技術と負剛性リンク機構について述べる。

2・1 免震のための空気浮揚技術

今回、我々が開発した空気浮揚ユニットは厚み方向の空気層を極小化したもので、摩擦係数も0.001~0.003と十分に小さい。空気層が薄いことから鉛直剛性は十分に高く、固有振動数を地震の強震帯域から外したうえで、大きな減衰を持たせている。モデル化して示すと図1のようになる。作動流体に対して理想気体と等温変化の仮定において、流入する質量流量 G_{in} と流出する質量流量 G_{out} からエネルギーの平衡式と連続の式を用い、浮揚体質量 m の鉛直方向の運動方程式と連立させて解くと

Fig.1 Configuration of horizontal seismic isolation mechanism by air levitation. Symbols in the figure are T: temperature, P: pressure (source, chamber, atmosphere), G: mass flow, V: volume, A_e : equivalent pressure-receiving area, h: flotation height and Z: displacement.

$$ms^2 Z(s) = -\frac{A^2}{\beta_a V s + G_{pq}} \left(\frac{G_q}{A} + s \right) (Z(s) - Z_0(s)) \quad (1)$$

が得られる．ここで s はラプラスの s で β_a は $1/\kappa P$ と比熱比 κ と圧力 P から得られる気体の圧縮率， A_e は有効受圧面積， G_q ， G_{pq} は流量ゲイン，圧力流量係数と呼ばれる流体系の特性を与える係数で体積流量に変換して用いている．ここから，剛性係数 $k = A_e^2 / \beta_a V$ ，粘性係数 $\eta = A_e^2 / G_{pq}$ ，遅れ周波数 $\gamma = G_{pq} / \beta_a V$ と置き，これ

らを用いて流体の剛性を直列動剛性 $K_\eta = \left(\frac{1}{\eta s} + \frac{1}{k} \right)^{-1}$ ，位置決め動剛性 $K_p = \frac{G_q A_e}{\beta_a V} \frac{1}{s + \gamma} = \frac{G_q}{A_e} \frac{k}{s + \gamma}$ のように定

義して与えると，浮揚系の鉛直アクセラランスは

$$\frac{\ddot{Z}(s)}{F(s)} = \frac{s^2}{ms^2 + K_\eta + K_p} \quad (2)$$

のように表されて，浮揚系がばね・粘性の直列要素を含む3要素で構成されることが分かった．剛性係数 k は空気層の厚みに逆比例することから今回開発した浮揚体は空気層を薄くすることによって十分に剛な鉛直支持機構となる．また粘性係数 η の与え方によって減衰の大きな支持装置が設計できることが分かる．

2・2 負剛性リンクを用いた鉛直支持機構

ここで負剛性と呼んでいるのは，荷重は負担しながら，ばね特性は通常の正ばねとは異なって圧縮するにつれてばね反力が減少するように働く支持機構である．先に述べたようにリンク・クランク鉛直免震機構として開発（辻内他, 2016）してきたものを負剛性側に拡張したものである．新たに開発した機構では，ばねの取り付け位置によって正ばねから負ばねまで段階的に調整が可能である．一般に 1Hz 以下の低い固有振動数に調整することは難しいことであるが，正ばねに調整したものと負ばねに調整したものを並列に組み合わせることで，この機構を用いれば比較的容易に低い鉛直方向の固有振動数を実現することができる．

図2に鉛直負剛性機構の概略図を示す．装置は斜めに張ったリンクアームを平行に並べて平行四辺形のリンク機構を構成している．またばねの伸縮量を小さくするために，リンクアームより短いクランクアームを，リンク

Fig.2 Configuration of vertical seismic isolation mechanism.

Fig.3 Characteristics of stiffness for vertical seismic isolation mechanism.

と角度をずらして固定したうえでリンクと同期して回転させ、クランクの先端にばね作用点を作って、引張ばねでリンクベースから斜頸支持している。リンク機構は平行四辺形リンクを2段に背中合わせで組み合わせて水平を維持するとともに搭載物の水平位置座標が変化しないようにしている。2段の中間となるリンクベースのばね固定端を水平方向のねじを用いて位置調整することで付加荷重に応じた張力の調節が可能である。ばね端を固定するクランクアームとリンクアームが同期して回転角 θ で回転することで上下方向の支持力としてばね力が作用する構造となっている。

ばね力のトルクと負荷のトルクは平衡状態でバランスしているから、このときの力の伝達率を β とおき、トルクのバランスから β を求めると式 (3) が得られる。

$$\beta(\theta) = \frac{l_b \sin(\theta + \alpha - \theta_c)}{2l_a \cos \theta} = \frac{l_b \sin(\theta + \alpha - \sin^{-1}(\frac{l_b}{l_k} \sin(\theta + \alpha)))}{2l_a \cos \theta} \quad (3)$$

ここで θ_c はばねがリンクベースとなす傾き角を示す。また、ばねの撓み δ は、リンクの角度とリンクヒンジとばねの固定端との距離 l_c に依存してばね長さ l_k が変化することから、ばねの自由長を l_0 として

$$\delta(\theta) = l_k - l_0 = \sqrt{(l_c + l_b \cos \theta_b)^2 + (l_b \sin \theta_b)^2} - l_0 = \sqrt{(l_c + l_b \cos(\theta + \alpha))^2 + (l_b \sin(\theta + \alpha))^2} - l_0 \quad (4)$$

となる。これらからリンクのばね作用は、ばね定数を k として $\beta \delta k$ と与えることができる。図3にクランク固定角 α を 110 度、70 度、30 度と変化させた時の実ばね撓み δ [mm]、支持荷重 $\beta \delta k$ [kg]、リンク係数 $\beta \delta$ の演算結果を示す。ここで $\beta \delta$ の特性を見ると、固定角 α が 70 度付近ではほぼ平行になって、固定角 α がそれ以下の時には撓みの増加に対して係数が減少する傾向を示す。このことからクランクの固定角 α を小さな領域に設定するとばね力の伝達が逆転して負ばね特性を示すことが分かる。このように、硬いばねを用いても系の固有振動数を低くできるだけでなく、荷重特性がばね撓みの増加に対して逆転する負剛性の特性を利用することもできる。

改めてリンクのばね・減衰作用を鉛直方向の等価ばね定数 k_a 、等価減衰 c と置くと、鉛直支持機構は図4の力学モデルで表すことができる。ここで質量 M の相対変位を z とすると、地動変位を z_0 として絶対変位は $z_1 = z + z_0$ 、中間質量 m の絶対変位は $z_2 = z/2 + z_0$ となる。等価ばね定数 k_a と実ばね定数 k との関係は、実ばね撓み δ と免震装置の変位との比率を圧縮率 $\gamma = \delta/z$ として取り直して伝達率 β を用いると、

$$k_a = \beta(\theta) \delta(\theta) k / z = \beta(\theta) \gamma(\theta) k \quad (5)$$

のように与えられ、 $\beta \gamma$ が鉛直方向へのばね定数の変換を与える。

角度 θ を平衡角 θ_0 からの微小角変位 θ として記号を取り直して、 $x = (\cos(\theta_0 + \theta) - \cos \theta_0) l/2 \approx -z \tan \theta_0$ と近似すると、この系の持つ運動エネルギー T 、ポテンシャルエネルギー U 、散逸関数 F は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} M \dot{z}_1^2 + \frac{1}{2} m \dot{z}_2^2 + \frac{1}{2} m \dot{x}^2 = \frac{1}{2} M (\dot{z}_0 + \dot{z})^2 + \frac{1}{2} m \left(\dot{z}_0 + \frac{\dot{z}}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} m (-\dot{z} \tan \theta_0)^2 \\ U &= \frac{1}{2} k_a z^2 \\ F &= \frac{1}{2} c \dot{z}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Fig.4 Analytical model of the vertical seismic isolator.

Fig.5 Configuration of 3-D seismic isolation system.

式 (6) からラグランジアン $L = T - U$ として方程式 $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial L}{\partial z} + \frac{\partial F}{\partial \dot{z}} = 0$ に代入して運動方程式を導出する

と、次式のようになる。なおここで高次の微小項は省略している。

$$\left(M + \frac{m}{4} + m \tan^2 \theta_0 \right) \ddot{z} + c \dot{z} + k_a z = - \left(M + \frac{m}{2} \right) \ddot{z}_0 \quad (7)$$

これから鉛直方向の運動を絶対変位で表すと

$$\left(M + \frac{m}{4} + m \tan^2 \theta_0 \right) \ddot{z}_1 + c \dot{z}_1 + k_a z_1 = - \left(\frac{m}{2} - m \tan^2 \theta_0 \right) \ddot{z}_0 + c \dot{z}_0 + k_a z_0 \quad (8)$$

となる。中間質量 m を搭載荷重質量 M の比 μ で表したうえで両辺をラプラス変換して整理すると

$$\frac{Z_1(s)}{Z_0(s)} = \frac{-\mu \left(\frac{1}{2} - \tan^2 \theta_0 \right) s^2 + cs + k_a}{M \left(1 + \frac{\mu}{4} + \mu \tan^2 \theta_0 \right) s^2 + cs + k_a} \quad (9)$$

のように地動からの伝達特性を得る。式 (7) ~ (9) において $\tan^2 \theta_0$ の項はリンクの回転動作によって中間質量が水平に動く慣性効果を示す。

2・3 3次元化のための直列結合

地面に平衡に配置した浮揚床板の 4 隅に空気浮揚ユニットを設けて荷重を支持し、その上に負剛性リンク機構を搭載する図 5 のようなモデルを考える。水平方向に浮揚ユニットが滑走することによって水平地震動を遮断して浮揚体に振動を伝えない。このとき浮揚ユニットの鉛直剛性は大きいので浮揚体の慣性モーメントによるロッキング振動を抑制することができる。さらに鉛直に作動する負剛性機構は十分に低い固有振動数を有しているために浮揚ユニットが浮揚床板に伝えた鉛直振動を効果的に遮断する。

3. 試作実験装置

3・1 仕様と構成

図 6-a の写真に示すのが試作実験装置である。浮揚体として大きさ約 1,000 mm × 奥行き約 1,000 mm で質量 250 kg の定盤型の天板 (免震テーブル) を有し、それを正と負に調整したリンク機構で浮揚面からテーブル上面までの高さ 367 mm で支持している。リンク機構の下面には同じ大きさの浮揚床板があって、その下に 280 × 280 × 20 mm に仕上げた 4 体の浮揚ユニットを流体系として独立するように配置することによって、ロッキングを抑制し

Fig.6 Configuration of 3-D seismic isolation system. (a) Out of view, (b) Free vibration response, (c) Link mechanism.

ながら浮揚する構造となっている。作動流体である空気の供給はユニット中央に設けたオリフィスを介して1点供給とし、浮揚ユニットに掛かる負荷の合計は560 kgであった。

装置が浮揚すると水平方向には拘束はなく、自由にスライド可能であり、復元力は全く作用しない。また鉛直のリンク機構は正と負の剛性バランスを調整した結果、固有振動数は0.25 Hzとなった(図6-b)。このときの上下の可動範囲は ± 100 mmであり、自由振動試験の結果から減衰は等価減衰比0.2であった。浮揚ユニットは圧縮空気の供給が必要であるが、0.1 MPa程度の供給圧で十分な浮揚が確認された。空気の供給はコンプレッサからウレタンホースを接続して行った。そのためわずかではあるが配管の剛性の影響が存在する。

図6-cに示すリンク機構のサイズは1体が507W $\times$ 317H $\times$ 193Dで負剛性のものを4体、正剛性のものを4体用いて直交配置としている。クランクアーム長は180 mmで、標準傾斜角は片側20度である。ばね端部を固定するクランク長は35 mmで圧縮比は0.19である。ばね定数は11 N/mmのものを上下2本ずつ4本用いている。写真(a)の下部ベースの黄色いフェンス以下は試験用の台であり加振実験には用いていない。

3・2 性能確認試験

試作装置の試験として、鉛直固有振動数試験、摩擦係数試験、空気浮揚鉛直剛性試験を行い、装置の確認と設計パラメータの同定を行った。

摩擦係数の観測試験は引張式のばね秤を用いて行っている。そのときの結果は図7の通りであるが、浮揚高さによって係数は異なる結果となった。ゲージ圧0.1~0.2 MPaを与え、浮揚高さを40~61 μ mにとると $\mu=0.003\sim0.001$ と良好な値を示した。

浮揚している装置の鉛直剛性試験は、鉛直のリンク機構をロックしたうえでインパルスハンマを用いて装置の天板中央とコーナを加振して行った。図8に示す加振点アクセラランスにおいて40 Hz強に1次の並進モードの共振周波数と思われるピークを観測した。30 Hz弱の反共振は装置のロッキングモードによるとも考えられるが、コーナ加振において大きくならず、特定できていない。また双方の加振によっても30 Hzより低い帯域の振動モードは確認できなかった。これらから浮揚ユニットの鉛直剛性は地震の強震帯域に対して十分に剛であるといえることができる。

Fig.7 Measurement result of horizontal friction coefficient.

Fig.8 Vertical acceleration of prototype experimental equipment.

4. 加振実験

4・1 加振装置と試験設定

E-Defense の加振装置を実験のセットアップとともに図 9 に示す. 加振装置は 1200 ton の負荷を搭載して, 水平加速度 900 cm/s^2 , 変位振幅 $\pm 100 \text{ cm}$, 鉛直加速度 1500 cm/s^2 , 変位振幅 $\pm 50 \text{ cm}$ という能力で実大地震波を加えることができる. もちろん我々の今回の試作システムにこの大きさの試験設備は必要がないが, 性能改善を狙っている低い周波数において地震波を 0.2 Hz から加振振幅に余裕をもって再現できることは他では実現できないスペックであり, この実験の重要さもそこにある. 加振はホワイトノイズ 500 cm/s^2 の 3 軸加振, 阪神淡路地震 (1995 年) における鷹取地震波, 東北地方太平洋沖地震 (2011 年) における仙台地震波を準備して行った.

図 9 に示すように試験体は加振台中央に 2200 mm 角の強化ガラスをおいてその上を浮揚して滑走する設定とした. 空気源は近傍に置くことができなかったために $\Phi 12 \text{ mm}$ の空圧ホースを 20 m ほど敷設して供給することとした. 振動の計測系はサーボ型加速度センサを X, Y, Z 方向 (NS, EW, UD) の 3 点を 1 セットとして, 加振台

Fig.9 Installation of prototype device on E-Defense shaking table.

Fig.10 Vibration transmissibility of specimen by 3-way white noise excitation.

上の3か所, 試験体浮揚床板の3か所, 天板の3か所に設置して, サンプルング 2000 Hz でデータの収録を行っている。

4・2 ホワイトノイズ加振

0.2~35 Hz の成分を有する 500 cm/s^2 のホワイトノイズを生成して, 図 10 に示す X, Y, Z 方向の加速度信号を計測することで加振台から免震装置上までの振動伝達特性を確認した。鉛直方向に対して水平の特性では十分なコヒーレンスが得られていない。通常の試験体ではもっと高いコヒーレンスが得られると思うが今回の試験体は復元特性がないために応答振動は十分に小さく, 計測ケーブルや空気供給系の配管の弱い拘束や X, Y の直交方向の干渉もあってコヒーレンスを下げたのではないかと考えている。その点, 鉛直方向は高いコヒーレンスが得られている。グラフの高周波数側の 10Hz 以上はノイズの影響を受けている。

いずれの振動伝達特性も 1 Hz で -20 dB ほどの遮断性能を得ている。これまでの免震装置では増幅帯域に近いために十分な遮断性能が得られなかった周波数領域で大きな遮断効果を示した。水平の遮断特性では共振による増幅域は全く見られず 0.2 Hz の近傍で -10dB の遮断性能を得ている。さらに注目すべきなのは位相特性がほぼ -90 度で推移していて, 作用しているのが速度比例成分だけになっていることが分かる。

Fig.11 Time history by half/full scale 3-D shaking of Great Hanshin-Awaji Earthquake (Takatori Wave) in 1995.

Fig.12 X-dir. and Z-dir. displacement responses of Great Hanshin-Awaji Earthquake (Takatori Wave) in 1995.

Fig.13 PSD and Wavelet chart by full Scale 3-D shaking of Great Hanshin-Awaji Earthquake (Takatori Wave) in 1995.

4・3 鷹取地震波実大加振

1995年の阪神淡路地震は直下型地震として代表的であり、いろいろな観測波が実験に用いられる。ここでは低周波成分の強い鷹取地震波を用い、加速度振幅の大きさを観測源波の50%圧縮波と100%源波の2段階のスケールに設定して3-Dでの再現実験をおこなっている。計測系のセットアップは先に述べた通りであるが、免震テーブル上に設置した9点(X,Y,Z×3か所)の加速度センサ信号から、テーブルの幾何学的中心に原点をとった6自由度の直交座標系の信号(並進と回転)に座標変換した時刻歴波形を求めて図11に示した。ローカルな3軸並進信号(X,Y,Z)から6自由度直交座標への変換行列は、センサの設置座標から得たマトリクスから疑似逆行列を求めて与えている。さらにこのとき信号のトレンド除去と35Hzのローパスフィルター処理(256タップのFIRフィルターによる)を行った。また回転座標の表示は並進信号との関係を分かりやすくするためにテーブル辺長の1/2である50cmを掛けてテーブル端部の回転による加速度成分(並進成分は含んでいない)として示した。鷹取地震波は2~3秒の周期をもった強い揺れが特徴であるが、50%スケールの実験では図11の上段(X,Y,Z)に示すように、青線の加振台加速度に対して緑線の免震台上の加速度は十分に小さく、3次元でよく遮断できている。特に水平成分の遮断は優れているといえる。さらに座標変換して求めた右列の回転成分($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)も十分に小さく、免震装置は回転連成もなく運動していることが分かる。

図11の下段には100%スケールの同等の実験結果を示す。結果は22~24秒の区間を除いて、50%スケールより優れた遮断比率を示している。ただ22~24秒付近において、特に鉛直方向に衝撃的な振動ノイズが観測されている。水平のデータには影響が小さいことから、鉛直方向のリンク機構がストロークエンド($\pm 10\text{cm}$)に達したと考えられる。加速度信号では動きを十分に把握できないことから、水平X方向と鉛直Z方向の加速度信号を積分して変位信号に変換した結果を図12示す。水平の変位は両振幅で69cmに達しているが、免震台上では非常にゆっくりとした動きで26cmほどの両振幅で収まっている。鉛直方向は地震波が $\pm 5\text{cm}$ 強の変位を示し、それが約2倍に増幅されて免震台を加振して、相対変位でみると -10cm 程度の揺れが3度ほど観測されている。加速度波形と合わせてみると、その中の22秒の揺れがストッパーに接触したと判断される。地震波の動きが15秒のマイ

ナスのピークから 20 秒のプラスのピークまで 5 秒ほどでプラス／マイナスが切り替わり，免震装置の固有振動 (0.25Hz) を励起したと考える。

さらに時間周波数分析を行えば接触の前後の様子が周波数帯域を含めて把握できるのではないかと Wavelet 変換 (小野測器 Oscopie を用いた) を行った結果を図 13 に示す。時間と周波数情報が同時に得られることから，地震のような一過的な挙動把握には向いている。図の上段は参考のためにフーリエスペクトル解析の結果を付した。

中段が加振台上の Wavelet で，低周波に地震の強震域があることが明瞭に見て取れるが，10Hz を超えると地震のパワーは急速に低下していることも同時に分かる。カーソルを置いたのは最も振動の強かった点で，周波数は 0.9 Hz 付近である。さらに低い周波数でも長い時間にわたり強い加振が続いている。下段では，加振台のデータと比べて全般に黒色や青色が多く，良く遮断できていると見える。また 22 秒付近で衝撃があったことは分かるが，接触の影響は比較的高い周波数に限定されていることが示されている。その時の免震台上の振動は特に低いところで長く応答していると見えるが，時間の分解能が下がることから衝撃のポイントを知ることはできない。

4・4 仙台地震波実大加振

2011 年 3 月 11 日に今までにない地震動が短時間に繰り返した東北地方太平洋沖地震はマグニチュード Mw9.0 という超巨大地震であった。図 14 はその地震動を 0.2 Hz から 3-D で再現して行った加振実験の結果である。50% 加振と 100% の波の前半部は順調な性能を示したが，2 波目の途中で鉛直の支持機構の設計ストロークを超える応答となって免震装置のストッパーに当たる衝撃が数度にわたって記録された。80 秒以降の 2 波目の地震波の周波数特性には 1 Hz 以下の成分が多く，鷹取地震波の場合と同じことが起きたと考えられる。ここでも Wavelet 変換

Fig.14 Time history by half/full scale 3-D shaking of Great East Japan Earthquake (K-Net Sendai Wave) in 2011.

Fig.15 Wavelet chart by full scale 3-D shaking of Great East Japan Earthquake (K-Net Sendai Wave) in 2011.

を用いて解析を試みる。図 15 の上段が加振台であり下段が免震装置上の応答である。鷹取の場合より明確に衝撃が記録されており、低周波数の領域まで振動の発生が確認される。地震波としては 1 Hz 強に主成分があつて鷹取より高域であるが、接触のあつた時間に鉛直の揺れも大きくなっている。40~50 秒の第 1 波の強震に対しては免震台上では黒色が主体でほとんど振動が伝わっていない。

4・5 加振実験の評価と課題

遮断性能については、図 10 に示すホワイトノイズ試験による振動伝達特性が装置の基本性能を示すものと考えられる。水平では共振増幅の無い特性が観測され、鉛直では 0.2Hz 付近にわずかな盛り上がりを見るが、1Hz の入力対してはいずれの方向も 20dB 近い遮断能力を示している。

鷹取地震波の実験と仙台地震波による実験でも、少なくとも 50%スケールの実験においてはホワイトノイズ試験で得た特性と同等の性能を示したものとする。100%スケールにおいても鉛直のストロークエンドへの衝突の問題を除けば振動遮断性能それ自体は、免震機構の設計意図を満たす性能を発揮したと、図 11, 13, 14, 15 から判断できる。加振台上と免震台上の加速度 (cm/s^2) の最大値だけを比較すると、鷹取地震波 50%加振の場合が水平で 57/367, 鉛直で 71/168 であり、100%加振の 20 秒までを取り出すと水平が 56/813, 鉛直が 132/368 であった。仙台地震波 100%加振の場合の 80 秒までを取り出すと水平が 53/1126, 鉛直が 113/343 であった。あくまでも時間に関係なくピーク値だけを取り出して比較したものであり、また 100%加振の場合は接触があつた時間帯を除いたものなので参考でしかないが、評価によく用いられている手法なので一つの指標とする。

課題として明らかになったのが、鉛直方向のストロークの問題である。従来は鉛直方向では $\pm 10\text{cm}$ も許容変位があればよいと考えてきたが、低周波の成分の強い地震波に対応するためにはもっと安全なストロークの確保や衝突緩和の措置などが必要であることが分かった。さらにモデルの精度を高めることで予測の正確さも高めることができると考えており、未知の地震波に対してもより安心な技術とする必要がある。

5. 結 言

新たに開発した空気浮揚 3-D 免震機構の試作機に対して、0.2Hz から実大 3-D 加振実験が可能な E-Defense によって、その性能を検証することができた。今回構想した免震機構は、課題も明らかとなったが、基礎的に良好な能力を有するものであるという計測結果を得たものであった。今回の実験で得られたことをあらためて箇条書きに記すと

- ・ 開発した空気浮揚技術を用いた無共振の特性を持つ水平遮断機構は非常に周期の長い地震動に対しても有効に働くことが確認できた、
- ・ 負剛性と正剛性を組み合わせた鉛直荷重を支持する新しい試みの鉛直免震機構も、0.25 Hz というこれまでにない超低周波数の固有振動を示し、鉛直の地震動にも優れた性能を見せた、
- ・ これらを上下直列に組み合わせた 3 次元免震機構はロッキング成分も非常に少なく、回転運動のない安定した挙動を示し、遮断性能も優れたものであることが分かった、
- ・ 装置の鉛直作動範囲は今回設計の $\pm 10\text{cm}$ では不足であり、固有振動数、減衰比、入力振幅とストロークの関係を見直す必要がある、

などである。

設計の見直しに関しては、負剛性リンク機構の減衰やストロークを増やすという修正は容易に可能であるが、設計精度を高めて未知の地震波に対しても安全を担保することが必要であり、熊本地震のような長時間の繰り返しによる応答なども含めた確認や技術の改善に努めたい。何より実用には大型化が必要であり、今回の実験はそのための開発の課題や方向を与えてくれたものである。

謝 辞

今回用いた鉛直方向の負剛性支持機構は、これまでリンク・クランク機構として同志社大学辻内・小泉研究室と進めてきた低周波鉛直免震機構の研究をベースに負剛性の範囲に拡張して開発したものである。さらに今回の

試作にかかわる鉛直支持機構の試作試験において同研究室の協力によって加振台設備を用いた実験を行った。同研究室の皆様は厚く感謝を申し上げる。

文 献

- エア一断震システム, (株)三誠エア一断震システムとは, available from <<http://www.airdanshin.jp>> (参照日2017年1月22日).
- 荒井 すぎ菜, 藤田 聡, 宮崎 充, 高橋 治, 空気浮上を利用した高知能免震システムの基礎的研究, 日本機械学会, D&D Conference (2006), pp. “434-1” - “434-4”.
- 家村 浩和, 河内山 修, 豊岡 亮洋, 下田 郁夫, 徳岡 真司, 森本 慎二, パッシブ型負剛性摩擦デバイスの開発と振動台実験による免震性能の検証, 土木学会地震工学論文集, Vol.29 (2007), pp.1254-1259.
- 柏崎 昭宏, 三田 倫也, 榎本 孝雄, 秋元 将男, 圧機構を用いた3次元免震装置の研究, 日本機械学会, 機械力学・計測制御講演論文集 (1998), pp.2768-2778.
- 松久 寛, 松村 拓樹, 宇津野 秀夫, 山田 啓介, 澤田 勝利, 安田 正志, 負剛性リンク機構を備えた三次元免震台, 地震工学会年次大会 (2009).
- Minagawa, K., Fujita, S., Tanaka, G. and Shimosaka, H., Floating type isolation system using earthquake early warning, The 15th WCEE, Lisboa (2012).
- 島田 貴弘, 油圧機構による三次元免震装置に関する研究, 横浜国立大学大学院, 25年度学位論文(2014).
- 須原 淳二, 松本 良一郎, 大谷 章仁, 島田 貴弘, 高橋 健司, 井上 和彦, 生玉 真也, 森下 正樹, 藤田 隆史, 発電用新型炉へ適用する3次元免震システムの研究, 日本建築学会, 構造工学論文集, Vol.52B (2006).
- Takahashi, O., Aida, H., Tsuyuki, Y. and Fujita, T., Construction of civil building using three dimensional seismic isolation system, The 14th WCEE (2008).
- 辻内 伸好, 安田 正志, 南 燦峰, 伊藤 彰人, 関谷 嘉文, リンクとクランク機構を用いた低床低固有値鉛直免震装置の開発, 日本機械学会関西支部定時総会講演会, No.161-1 (2016).

References

- Air-danshin System, available from <<http://www.airdanshin.jp>> (accessed on 22 January, 2017).
- Arai, S., Fujita, S., Miyazaki, M. and Takahashi, O., Fundamental research on high intelligent isolation system using air levitation, JSME D & D Conference (2006), pp. “434-1” - “434-4” (in Japanese).
- Iemura, H., Kouchiyama, O., Toyooka, A., Shimoda, I., Tokuoaka, M. and Morimoto, S., Development of the passive negative stiffness friction device and its verification tests through shaking table, Transactions of the Japan Society of Civil Engineers, Vol.29 (2007), pp.1254-1259 (in Japanese).
- Kashiwazaki, A., Mita, R., Enomoto, T. and Akimoto, T., 3-dimensional base isolation system using hydraulic unit, JSME D&D Conference (1998), pp.2768-2778 (in Japanese).
- Matsuhisa, H., Matsumura, T., Utsuno, H., Yamada, K., Sawada, K. and Yasuda, M., 3-D seismic isolation table with negative stiffness link mechanism, Japan Association for Earthquake Engineering, Annual Meeting (2009) (in Japanese).
- Minagawa, K., Fujita, S., Tanaka, G. and Shimosaka, H., Floating type isolation system using earthquake early warning, The 15th WCEE, Lisboa (2012).
- Shimada, T., A study on three-dimensional seismic isolation system with hydraulic mechanism, Yokohama National University, <http://hdl.handle.net/10131/8591> (2014) (in Japanese).
- Suhara, J., Matsumoto, R., Otani, S., Shimada, T., Takahashi, K., Inoue, K., Ikutama, S., Morishita, M. and Fujita, T., Study on three-dimensional seismic isolation system applied to advanced nuclear power plant, Architectural institute of Japan, Vol.52B (2006) (in Japanese).
- Takahashi, O., Aida, H., Tsuyuki, Y. and Fujita, T., Construction of civil building using three dimensional seismic isolation system, The 14th WCEE (2008).
- Tsujiuchi, N., Yasuda, M., Nan, C., Ito, A. and Sekiya, Y., Research of vertical seismic isolator with low floor and low eigenvalue using link and crank mechanism, JASME Kansai, No.161-1 (2016) (in Japanese).