

## 特集 「技術研究所再整備」

### スーパーアクティブ制震「ラピュタ2D」

吉田 治 蔭山 満 佐野 剛志  
 遠藤 文明 渡辺 哲巳 勝俣 英雄  
 (本社設計本部) (本社設計本部)

### Super Active Base Isolation System “Laputa 2D”

Osamu Yoshida Mitsuru Kageyama Takeshi Sano  
 Fumiaki Endo Tetsumi Watanabe Hideo Katsumata

#### Abstract

Super Active Base Isolation System ‘Laputa 2D’, which uses absolute vibration control technology, is to be applied to the real full scale building, Obayashi Corporation Technical Research Institute New Main Building. This building will be the first active base isolation building all over the world. The absolute vibration control is an active vibration control method for base isolated structures to stay in the absolute space and to have vibration free environment, by applying control forces through actuators during earthquakes. Four 1,100kN hydraulic actuators, two in each horizontal direction, are installed in the New Main Building to reduce the seismic response to 1/10 of the conventional passive base isolation system. When applying active control to a real full scale building, it is necessary to install fail safe mechanism in case that actuators are over-loaded by input ground motion of more than expected level or unstable control condition. As fail safe mechanism for this absolute vibration control, the trigger system using friction dampers is installed between actuators and reaction foundations.

#### 概 要

著者らは、地震時にも揺れない建物の実現を目指したスーパーアクティブ制震「ラピュタ2D」を開発し、技術研究所新本館に世界で初めて適用した。ラピュタ2Dに用いられている絶対制震技術とは、地盤上及び建物に設置されたセンサからの情報をもとにコンピュータで計算された最適な制御力を、アクチュエータによって免震建物に作用させて、地震時に建物を絶対空間上に静止させる技術である。新本館に適用したラピュタ2Dでは、1,100kNの油圧アクチュエータを水平各方向に2台ずつ設置し、通常の免震建物と比較して地震時の建物の揺れを1/10程度まで低減することができる設計となっている。このようなアクティブ制御の技術を実建物に適用するためには、想定した地震を超える大地震時や万が一アクティブ制御装置に不具合が生じた場合のフェールセーフ機構が重要となる。そこで、建物制震用のブレーキダンパーの技術を応用した摩擦によるトリガー機構をフェールセーフ機構として開発し適用した。

#### 1. はじめに

日本で初めて建設された免震事務所建物として、1986年に竣工した大林組技術研究所ハイテクR&Dセンターがある<sup>1)</sup>。この建物の竣工後間もなく、著者らは免震建物の基部免震層にアクティブ制御力を加えることで、免震建物を絶対空間に静止させ、加速度の低減を図ることを目的とする絶対制震理論の研究を行ってきた<sup>2)</sup>。これらの研究では、解析と振動台実験により、絶対制震理論の制震効果を実証されたものの、実建物への適用までには到らなかった。その理由としては、当時の積層ゴムの剛性が十分に柔らかくなく、必要なアクティブ装置の規模が実用可能な範囲内に設計できなかったこと、想定以上の大地震時や装置トラブル時に対応するフェールセーフ機構が確立されていなかったことなどがあげられる。

その後、約20年が経過し、今回世界で初めて絶対制震

理論によって地震時に揺れない建物の実現を目指したスーパーアクティブ制震「ラピュタ2D」を実建物へ適用した。本論文では、まずラピュタ2Dの概要として、絶対制震理論及び制御システムの概要を述べ、制震効果を実証するために行なった3階建て免震建物の縮小模型による振動台実験の結果について報告する。さらに、実建物のへの適用に不可欠なフェールセーフ機構であるトリガー機構について説明する。次に、本手法を適用した建物の概要とアクティブ制御装置の構成について紹介し、実建物の地震時応答解析の結果の報告を行なう。

#### 2. ラピュタ2D概要

##### 2.1 絶対制震理論概要

一般的に、多質点系の建物の地震外力に対する運動方程式は地盤に対する相対座標系を用いて、次のように

表すことができる。

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -M \begin{Bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{y} \quad (1)$$

ここで、 $X$  : 建物各層の地動に対する相対変位ベクトル、 $M$  : 質量マトリックス、 $C$  : 減衰マトリックス、 $K$  : 剛性マトリックス、 $\ddot{y}$  : 地動加速度である。

これを空中の仮想不動点を基準とした絶対座標系に変換すると、次式となる。

$$M(\ddot{X} + \ddot{y}) + C(\dot{X} + \dot{y}) + K(X + y) = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ k_1 \end{Bmatrix} y + \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ c_1 \end{Bmatrix} \dot{y} \quad (2)$$

ここで、 $k_1$  : 免震層の剛性、 $c_1$  : 免震層の減衰係数、 $y$  : 地動変位、 $\dot{y}$  : 地動速度である。

絶対制震の目的である建物の絶対応答 ( $X+y$ ) をゼロにして建物を絶対空間上に静止させるためには、次式で示すように式(2)の外力を打ち消すように最下層にのみ制御力  $F$  を与えればよい。

$$M(\ddot{X} + \ddot{y}) + C(\dot{X} + \dot{y}) + K(X + y) = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ k_1 \end{Bmatrix} y + \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ c_1 \end{Bmatrix} \dot{y} + \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ F \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$F = -k_1 y - c_1 \dot{y} \quad (4)$$

この方法は応答の発生原因を先回りして入力を打ち消す方法であるためフィードフォワード制御と呼ばれる。

しかしながら、この制御法のみで地震時の入力を完全にゼロにすることは出来ない。なぜなら、地動の絶対変位  $y$  と速度  $\dot{y}$  の観測誤差、および積層ゴムの剛性  $k_1$  と減衰定数  $c_1$  およびアクチュエータ自身の特性によって、

入力成分を完全に打ち消すことが出来ないためである。そこで、次式のように、上記フィードフォワード制御の誤差によって励起された建物の絶対応答速度成分を観測して、それを即座に吸収するフィードバック制御を行う。

$$F = -c_s (\dot{x}_1 + \dot{y}) \quad (5)$$

ここで、 $c_s$  : フィードバックに用いる粘性係数である。この制御は、一般的にスカイフック・ダンパーと呼ばれる。

ラピユタ2Dでは、スピルオーバーと呼ばれる建物の高次モードの発振による制御系の不安定現象を防ぐとともに、アクチュエータからの高次振動数成分が建物に伝わるのを防ぐ目的で、アクチュエータと建物間に「装置バネ」と呼ばれる柔らかいバネを設置している。つまり、アクチュエータからの制御力はこの装置バネを介して建物に作用される。装置バネの剛性を  $k_s$ 、アクチュエータのストローク変位を  $z$  とすると、建物に作用される制御力は次式で表すことができる。

$$F = k_s (z - x_1) \quad (6)$$

従って、フィードフォワード制御力(4)フィードバック制御力 (5) を併用した絶対制震を行なうための指令変位信号  $z_0$  は次式となる

$$z_0 = -\left(\frac{k_1 + k_s}{k_s}\right)y - \left(\frac{c_1}{k_s}\right)\dot{y} - \left(\frac{c_s}{k_s}\right)(\dot{x}_1 + \dot{y}) \quad (7)$$

## 2.2 制御システム概要

Fig. 1に制御システムの概要図を示す。制御システムとしては、地盤と建物に設置された加速度センサー及びアンプ、AD/DAと演算装置を備えたコントローラ、油圧サーボアクチュエータから成る。

前節で述べた絶対制震理論を実現するためには、地動の変位・速度と建物の絶対速度を計測する必要がある。しかしながら、地動変位を直接計測することは現実的に

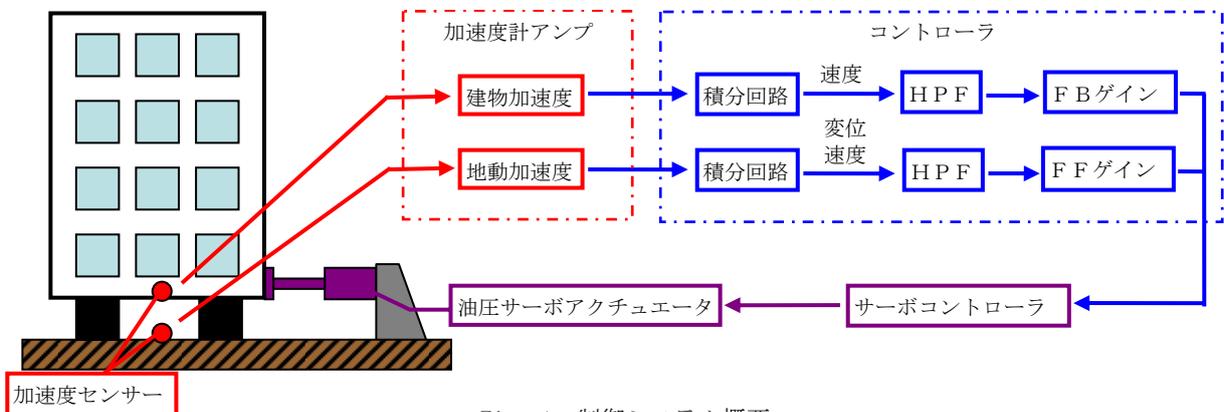


Fig. 1 制御システム概要  
Block Diagram of Control System

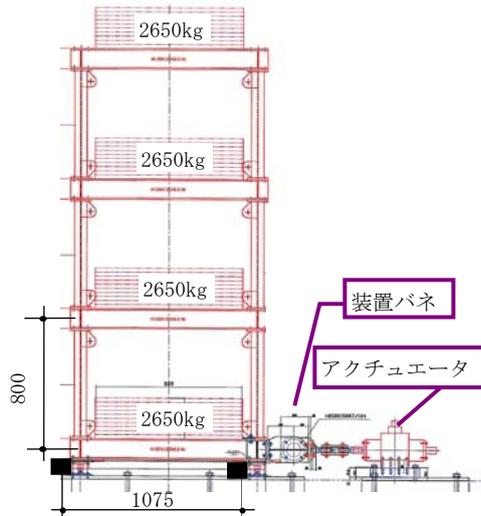


Fig. 2 試験体概要  
Schematic of Test Structure

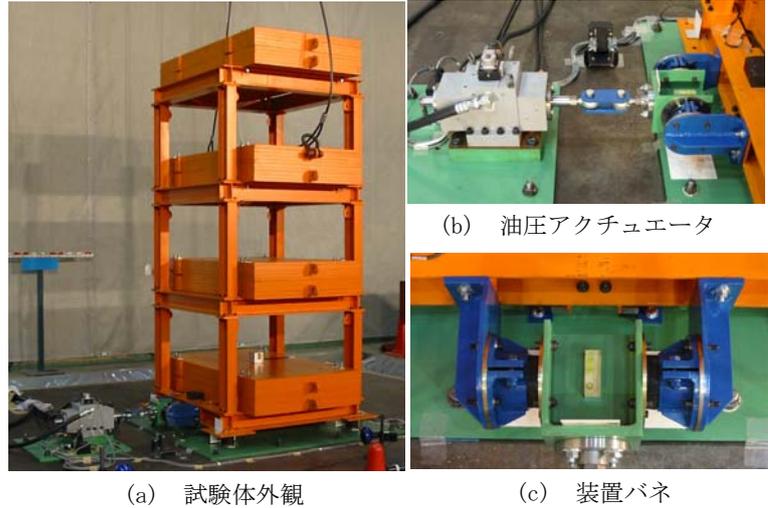


Photo 1 試験体  
Test Structure

不可能なので、本システムでは、地盤に設置した加速度センサから得られる加速度信号をコントローラ内で積分することにより、速度・変位に変換する手法を用いる。建物の絶対速度についても同様に建物に設置した加速度センサから得られる加速度信号を積分して速度に変換する。

加速度センサーからの加速度信号を積分して速度、変位信号に変換する場合、通常の数値積分による方法だと積分誤差の集積により、得られた速度や変位信号にドリフトが生じてしまい制御が発散してしまう。この問題を解決するために、本システムでは新たに考案したハイパスフィルタ型の状態方程式による積分手法を採用している。その状態方程式を次式に示す。

$$\begin{cases} \dot{y} \\ \ddot{y} \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_f^2 & -2h_f\omega_f \end{bmatrix} \begin{cases} y \\ \dot{y} \end{cases} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{y}_0 \quad (8)$$

ただし、 $\ddot{y}_0$  : 加速度センサからの加速度信号、 $y, \dot{y}$  : 積分して得られる変位・速度、 $\omega_f, h_f$  : ハイパスフィルタの遮断円振動数、減衰比である。

このようにして得られた地盤の変位・速度及び建物の絶対速度に式(7)で示した絶対制震理論に基づく係数であるフィードフォワードゲイン (FFゲイン) 及びフィードバックゲイン (FBゲイン) を乗じて加算することにより、アクチュエータへの変位指令信号を作成してアクチュエータのサーボコントローラへ入力する。

### 2.3 縮小模型実験による制震効果の検証

絶対制震理論による免震建物のアクティブ制御の制震効果を検証するために、三次元振動台を用いた制御実験を行った。

**2.3.1 試験体概要** 試験体の概要図及び写真をFig. 2, Photo 1に示す。試験体は3層の鉄骨フレームモデルを用いた。各層の質量は2,650kgで、1層を含めた全質量は

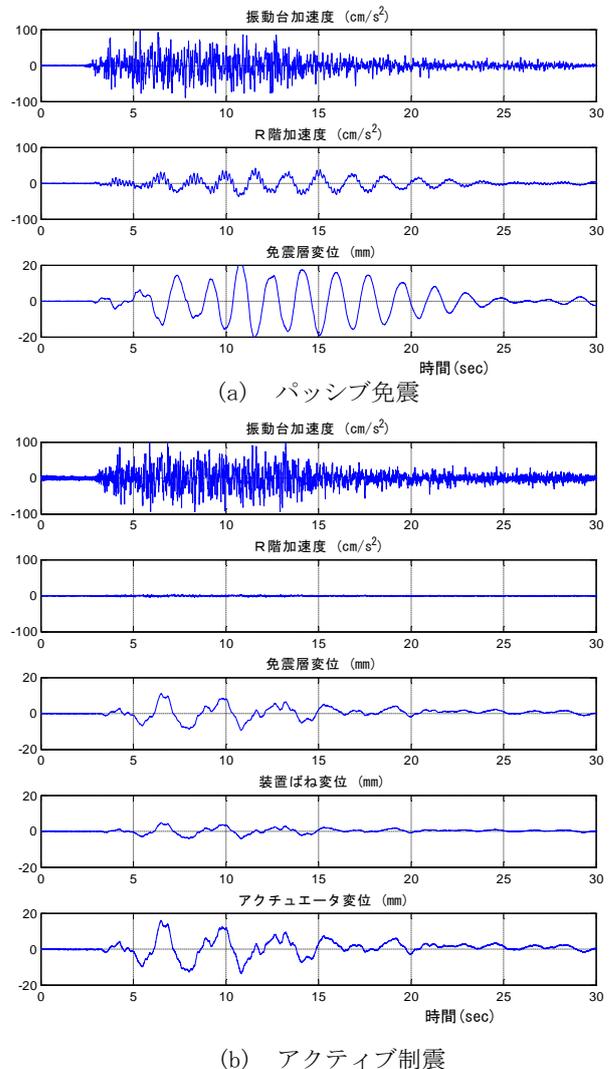


Fig. 3 振動台実験結果  
Results of Shaking Table Tests

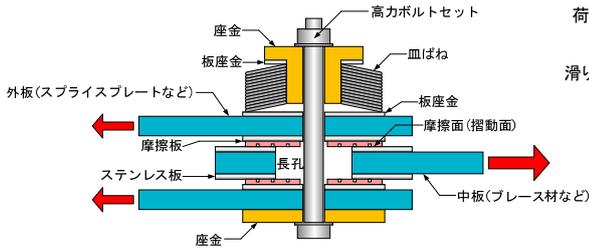


Fig. 4 ブレーキダンパーの構成  
Schematic of Friction Damper



Photo 2 実大規模トリガー機構の検証試験体  
Test of Full Scale Trigger System

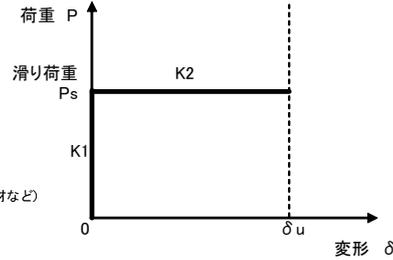
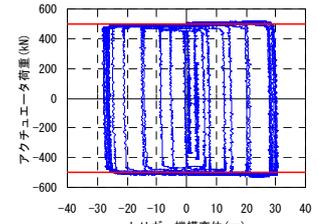
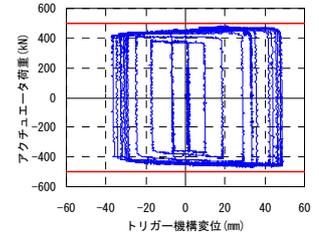


Fig. 5 ブレーキダンパーの特性  
Characteristic of Friction Damper



(a) 1軸方向加振



(b) 2軸方向加振

Fig. 6 トリガー機構の荷重-変位関係  
Hysteresis of Trigger System

10,600kgである。この試験体は4個の積層ゴムで支持された免震建物モデルとなっており、免震周期は1.6秒である。アクティブ制御用のアクチュエータとしては、24kNの油圧サーボアクチュエータを設置した。また、免震建物と同じ積層ゴムを用い、その一部を拘束して剛性を調整し、装置バネとして用いた。

**2.3.2 実験結果** 振動台に地震波入力を行ったときの実験結果をFig. 3に示す。入力波は実建物が建設される東京都清瀬市の告示波(乱数位相)で、実建物の免震周期5.2秒と試験体の免震周期1.6秒の比を考慮して、時間軸を1/3に短縮して実験を行った。

この結果より、アクチュエータを試験体から切り離して行なったパッシブ免震の結果では、建物頂部の加速度は地動入力加速度に対して1/2以下に低減されているものの、免震周期1.6秒で大きく振動しており、免震層変位も約20mm程度生じている。これと比較して、アクチュエータを試験体に接続しアクティブ制御を行なったアクティブ制震では、建物頂部の加速度がパッシブ免震の約1/10程度まで低減されており、建物が絶対空間上にほぼ静止している状態が実現されている。免震層変位も地動変位の10mm程度におさまっていることがわかる。

## 2.4 トリガー機構概要

ラピユタ2Dを実建物へ適用するのの際に、フェールセーフ機構としてのトリガー機構を開発した。トリガー機構は、建物への過大入力を防ぐためアクチュエータと直列に設置し、摩擦機構によりすべり耐力以上の荷重が加わるとすべり始める。この機構により、アクチュエータの制御可能な範囲を超えた地震動が作用した場合や、万一アクチュエータの制御が不能になりアクチュエータが暴走した場合でもすべり耐力以上の荷重が建物に作用することはない。同時に、アクチュエータに過度の荷重

が作用するのを防ぎ、アクチュエータを損傷から保護する。

開発したトリガー機構は、制振用摩擦ダンパー(ブレーキダンパー)を応用しており基本構成をFig. 4に示す。スプライスプレートとの間に一定の摩擦係数が得られるようステンレス板とブレーキ材で摩擦面を形成し、摩擦面の圧力を一定に保つため適度にたわませた皿ばねを介してボルトで締結することで、一定のすべり耐力を確保する構造となっている。<sup>3)</sup>

ブレーキダンパーの復元力特性は、初期剛性が非常に大きく二次剛性が非常に小さい剛塑性型バイリニアモデルで表現できる。復元力特性をFig. 5に示す。

振動台を1軸方向(トリガー機構の動作方向)および2軸方向(トリガー機構の動作方向と直交方向)に正弦波および地震波で加振し、振動台上の加速度から算出した振動台変位より一定の割合で大きく追従作動するようにアクチュエータを制御することでトリガー機構を強制的にすべらせる方法で、トリガー機構のすべり耐力および動作性を確認した。実大規模トリガー機構の検証試験体とブレーキダンパー部分の拡大の写真をPhoto 2に示す。試験体は6つのブレーキダンパーユニットで構成し、すべり耐力は500kNに設定した。振動台を1軸方向および2軸方向に正弦波で加振した場合のトリガー機構の荷重-変位関係をFig. 6に示す。すべり耐力450~550kNで滑らかに作動し、アクティブ制御装置に過大な荷重が作用しないことを確認した。また、地震波加振の場合でも良好な履歴ループを確認した。

## 3. 技術研究所新本館への適用

ラピユタ2Dを適用した建物は、東京都清瀬市にある大林組技術研究所に建設する新本館で、技術研究所の中



Fig. 7 外観パース  
Schematic View of the Building

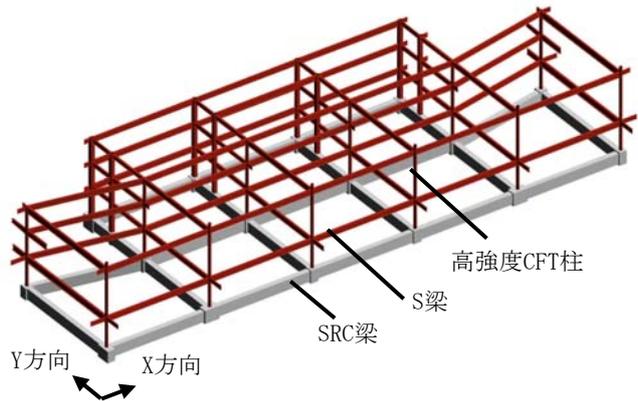


Fig. 8 上部構造の構造フレーム  
Structural Framing of the Upper Structure

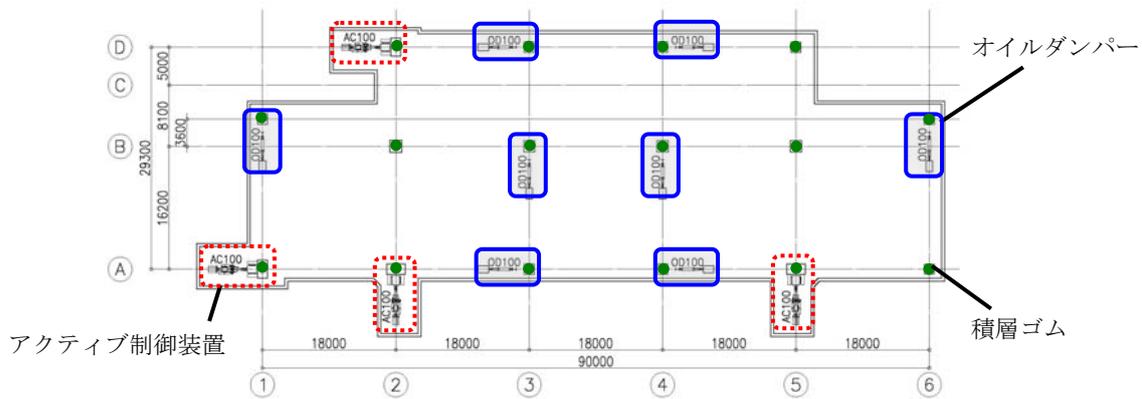


Fig. 9 免震装置レイアウト  
Layout of Devices on Isolation Floor

心的建物となる。建築規模は地上3階、高さ16.1mである。1階はエントランスホールや講堂、2階は200名程度を収容できるワークスペース（研究員の執務室）を配置し、3階はワークスペース上部が吹抜となっている。東西方向（X方向）96.85m、南北方向（Y方向）33.5mの整形な平面形状である。Fig. 7に外観パースを示す。

### 3.1 構造計画概要

上部構造はS造ラーメン構造とし、東西方向18.0m×5スパン、南北方向19.8m～16.2m+8.1m+5.0mの3スパン、階高は1階5.5m、2～3階4.0mである。ワークスペース部では18.0m×16.2mのロングスパン架構を実現するため、梁はS造、柱は超高強度鋼材（ $F_u=780\text{N/mm}^2$ ）と超高強度コンクリート（ $F_c=160\text{N/mm}^2$ ）によるCFT（鋼管コンクリート：Concrete Filled Steel Tube）造柱とした。免震層直上の梁は、積層ゴムの反力を受けるためSRC造とした。Fig. 8に上部構造の構造フレームを示す。

免震層は、天然ゴム系積層ゴム16台（ $\phi 800\sim\phi 1100$ ）、オイルダンパー8台（X、Y方向各4台）、アクティブ制御装置4台（X、Y方向各2台）をバランスよく配置した。免震層の長周期化がアクティブ制御力の低減に有効である

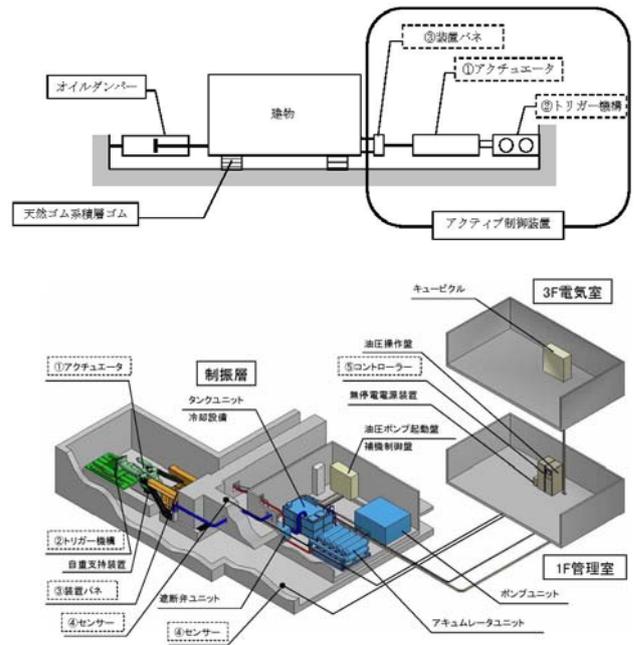


Fig. 10 アクティブ制御装置の構成  
Configuration of Active Control System



Photo 3 油圧アクチュエータ写真  
Hydraulic Actuator

Table 1 油圧アクチュエータ仕様  
Specification of Hydraulic Actuator

基 数	4基
形状・寸法(mm)	長さ4200mm ロッド径φ300mm 外シリンダ外径φ650mm
最大制御力(kN)	1100
保証荷重(kN)	1264
限界荷重(kN)	1895
最大制御変位(mm)	200
限界変形(mm)	220

ので、免震層の一次固有周期を約5.2秒とした。Fig. 9に免震装置のレイアウトを示す。

### 3.2 アクティブ制御装置の構成

Fig. 10に示すように、アクティブ制御装置は、装置バネをアクチュエータの建物側に、トリガー機構をアクチュエータの地盤側に直列に配置する構成とした。アクティブ制御装置の各構成要素の機能を以下に示す。

**3.2.1 アクチュエータ** ここで用いているアクチュエータは油圧アクチュエータである。油圧アクチュエータはオイルタンク、油圧ポンプなどの油圧源装置、油圧を蓄圧しておくアキュムレータと合わせて油圧回路を形成し、アクチュエータの駆動にサーボバルブを組み込むことにより油圧サーボメカニズムとして機能する。加速度センサーからの入力信号をもとに計算された変位指令値によって制御され、建物を絶対空間上に静止させるようにアクティブ制御力を建物に作用させる。アクチュエータ1台あたりの最大発生力は1,100kN、最大制御変位は200mmである。アクチュエータ実機の写真(Photo 3)に示し、仕様をTable 1にまとめる。

**3.2.2 トリガー機構** トリガー機構は1基あたり10セットの皿ばねボルトセットから構成され、トリガー機構の設計滑り耐力は、アクチュエータの最大制御力1,100kNを考慮して、1,000kNに設定した。限界変形は、免震装置の限界変形500mmとアクチュエータの最大制



Photo 4 トリガー機構写真  
Trigger System

Table 2 トリガー機構仕様  
Specification of Trigger System

基 数	4基
ボルトセット数	10ボルトセット/基
皿ばね形状(mm)	外径130 内径65 厚さ3.6 高さ7.8
皿ばね枚数	130 (13/1ボルトセット)
軸力導入ボルト	M27
軸力導入ボルト本数	10
摩擦材形状(mm)	縦150 横150 厚み4.3
摩擦材枚数	20 (2/1ボルトセット)
ステンレス板形状	長さ2300 幅150 厚み2
ステンレス板枚数	4
設計滑り耐力(kN)	1000
限界変形(mm)	750

御変位200mmを考慮して750mmとした。トリガー機構実機の写真(Photo 4)に示し、仕様をTable 2にまとめる。

**3.2.3 装置バネ** 装置バネとしては、弾性滑り支承用の積層ゴムを使用した。アクティブ制御装置1箇所あたり2基、合計8基用いている。その写真をPhoto 5に示し、仕様をTable 3にまとめる。

**3.2.4 加速度センサー** 地動用の加速度センサーは建物基礎中央部に設置した。建物用の加速度センサーは免震層直上の各アクチュエータの先端付近に設置し、建物のねじれ応答に対しても制御できるようにした。

**3.2.5 コントローラー** システムの制御を行なうコントローラは、建物1階の管理室に設置し、サンプリング周波数5kHzで制御を行なう。

### 3.3 アクティブ制御装置の地震時の挙動

アクティブ制御装置の地震時の挙動は以下の4ケースを想定し構造設計を行い、全てのケースについて免震装置及び上部構造物を健全に保つことができることを確認している。

**3.3.1 Case1 アクティブ制御装置が正常に作用する場合** アクチュエータは正常に制御できるが、トリガー

機構にすべり耐力以上の荷重が作用した場合にはトリガー機構がすべり、建物に過大な入力が生じない。

**3.3.2 Case2 アクティブ制御装置に異常があるが制御可能な場合** アクチュエータは位置を保持する制御もしくは強制的に可動しない制御とする。アクティブ制御装置は、装置バネの剛性を初期剛性、トリガー機構のすべり耐力を降伏荷重とする履歴ダンパーとして作用する。

**3.3.3 Case3 アクティブ制御装置に異常があり制御不可能な場合** アクチュエータは暴走するが、トリガー機構にすべり耐力以上の荷重が作用した場合にはトリガー機構がすべり、建物に過大な入力が生じない。

**3.3.4 Case4 アクティブ制御装置をはずしている場合（パッシブ免震となる場合）** アクチュエータをメンテナンス等で取り外している場合などのように、アクティブ制御装置がない場合は、天然ゴム系積層ゴムとオイルダンパーによるパッシブ免震システムとなる。

**3.4 地震応答解析結果**

ラピュタ2Dが適用される実建物を対象として時刻歴応答解析を行い、その効果を検証する。ラピュタ2Dを適用した場合と通常のパッシブ免震の場合の比較を行なうために、ここで紹介する解析ケースは以下の2ケースとした。

- Case1 アクティブ制御装置が正常に作用する場合
- Case4 アクティブ制御装置をはずしている場合（パッシブ免震となる場合）

解析モデルは5質点の等価せん断型モデルとした。復元力特性は、上部構造は線形弾性、免震層は天然ゴム系積層ゴムを線形弾性、オイルダンパーの減衰係数を速度比例のバイリニア型とした。アクティブ制御装置は、Case1では正常作動とし、Case4では除外した。解析モデルをFig. 11に、解析諸元をTable 4～6に示す。

入力地震動は、告示波として稀に発生する地震動および極めて稀に発生する地震動の2つのレベルを設定し、それぞれ3波（乱数、八戸NS, 神戸NS位相）とした。

**3.4.1 稀に発生する地震動に対する応答** 告示波（乱数位相）入力地震動最大加速度と最大応答加速度の関係をFig. 12に示す。また、稀に発生する地震動に対する時刻歴応答解析による最大応答加速度および最大応答変位をFig. 13に示す。

応答変位はCase1, Case4ともに80mm程度と大きな差はなく、最大応答加速度はCase1で1.9cm/s<sup>2</sup>、Case4で17.8cm/s<sup>2</sup>であり、アクティブ制震の応答はパッシブ免震と比較し1/10程度となった。これはアクチュエータの制御力（最大1,219kN）がトリガー機構のすべり耐力を下回ったため、アクティブ制御が高い効果を発揮したことによる。

**3.4.2 極めて稀に発生する地震動に対する応答** 極めて稀に発生する地震動に対する時刻歴応答解析による最大応答加速度および最大応答変位をFig. 14に示す。

Fig. 12およびFig. 14から、免震層の最大応答変位は

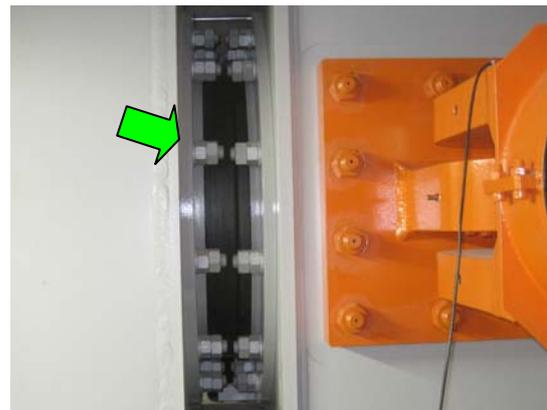


Photo 5 装置バネ Connecting Spring

Table 3 装置バネ仕様

Specification of Connecting Spring	
基数	8基
形状・有効ゴム径(mm)	φ800
ゴムの一層厚さ(mm)	6.0
ゴム層数	4
ゴム総厚(mm)	24.0
ゴムのせん断弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )	0.78
1次形状係数	32.5
2次形状係数	33.3
一次剛性(kN/m)	16300
限界ひずみ(%)	241
限界変形(mm)	58.0

Case1で265.4mm、Case4で378.4mm、最大応答加速度はCase1で81.1cm/s<sup>2</sup>、Case4で92.3cm/s<sup>2</sup>であり、アクティブ制震の応答はパッシブ免震と比較し小さくなった。これは、アクチュエータの制御力がトリガー機構のすべり耐力に達しても、アクティブ制御の効果があることを示している。

また、Fig. 12から、入力地震動最大加速度が200cm/s<sup>2</sup>程度までは、アクティブ制御の効果が大いことがわかる。

**4. まとめ**

地震時にも揺れない建物の実現を目指したスーパーアクティブ制震「ラピュタ2D」を開発し、世界で初めて実建物に適用した。

本システムでは、絶対制震理論に基づいて計算された最適な制御力をアクチュエータによって建物に作用させ、パッシブ免震建物と比較して加速度応答を1/10程度まで低減することができる。その制震効果を縮小模型による振動台実験で検証した。また、実建物適用に際して、想定した地震を超える大地震時や万が一アクティブ制御装

Table 4 解析諸元 (上部構造・免震層)

階		質量 (ton)		初期剛性 (kN/mm)			
				X方向		Y方向	
RF		2237	—	317.3	55.9	407.6	47.0
3F	3F-a	771	170	316.1	63.0	371.4	51.9
2F		2101	—	425.7	—	513.9	—
1F		4466	—	14.2	—	14.2	—

Table 5 解析諸元 (オイルダンパー)

	$C_1$ (MN·s/m)	$C_2$ (MN·s/m)	$F_r$ (kN)	$F_{max}$ (kN)
X・Y方向	5.08	0.772	3532	3920

Table 6 解析諸元 (アクティブ制御装置)

	装置バネ初期剛性 (kN/mm)	トリガー機構すべり耐力 (kN)
X・Y方向	68.6	2000

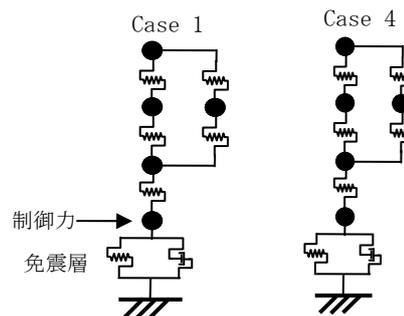


Fig. 11 解析モデル  
Analysis Models

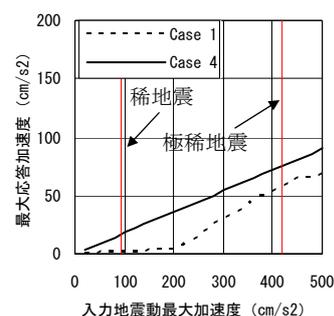


Fig. 12 入力地震動と応答加速度 (乱数位相)  
Acceleration Responses Due to Input Level

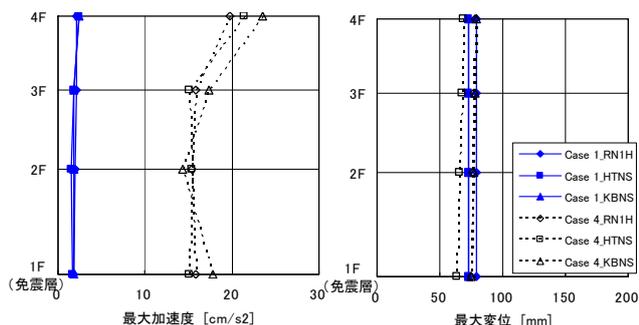


Fig. 13 稀に発生する地震動に対する最大応答 (X方向)  
Maximum Responses for Level 1 Input Ground Motion (X-dir.)

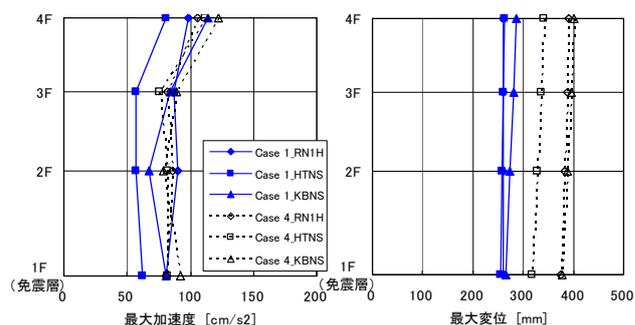


Fig. 14 極めて稀に発生する地震動に対する最大応答 (X方向)  
Maximum Responses for Level 2 Input Ground Motion (X-dir.)

置に不具合が生じた場合のフェールセーフ機構として、摩擦によるトリガー機構を開発した。

本システムが適用された技術研究所新本館では、水平2方向に1,100kNの油圧アクチュエータを2台ずつ配置し、震度5強程度の200cm/s<sup>2</sup>の入力地震動までは、アクティブ制御により建物がほとんど揺れず、それより大きくトリガー機構のすべり耐力に達する入力地震動に対してもパッシブ免震と比較して加速度低減効果があることを解析により確認した。

本報で紹介したラピュタ2Dは、地震時に事業継続が必要な半導体工場などの精密生産施設、地震時に機能維持が求められる病院や災害の復旧拠点、貴重品が保管さ

れる美術館や博物館、絶対的な安全が求められる原子力関連施設へ適用するのに適していると考えられる。

参考文献

- 1) 武田寿一編：構造物の免震・防振・制振，1988
- 2) 蔭山 他：構造物の制振に関する研究（その1）～（その8），日本建築学会大会学術講演梗概集（昭和63年，1989年，1990年，1992年）
- 3) 高橋 他：高力ボルト摩擦接合滑りダンパーの開発（その1）～（その10），日本建築学会大会学術講演梗概集（2000年，2001年，2005年，2006年）