

大林組技術研究所本館 テクノステーション スーパーアクティブ制震「ラピュタ2D」



山中 昌之
大林組



遠藤 文明
同



渡辺 哲巳
同



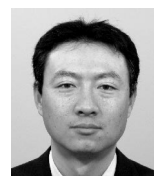
勝俣 英雄
同



蔭山 満
同



佐野 剛志
同



吉田 治
同

1 はじめに

東京都清瀬市にある大林組技術研究所内に、全研究員のための研究所を新築する計画であり、安全安心施設を実現するため、スーパーアクティブ制震「ラピュタ2D」を世界で初めて採用した。スーパーアクティブ制震「ラピュタ2D」は、免震建物にアクティブ制御力を加えることで、建物が空中に静止するかのような状態を実現する技術である。



写真1 建物全景

2 建築計画概要

2.1 建物概要

所在地：東京都清瀬市下清戸4-640
 建築主：株式会社大林組
 設計者：株式会社大林組一級建築士事務所
 監理者：株式会社大林組一級建築士事務所
 施工者：株式会社大林組東京本店
 建物用途：研究所
 階数：地上3階、塔屋1階
 建築面積：3,370.51m²
 延べ面積：5,535.38m²
 軒高さ：13.692m
 最高高さ：16.092m



写真2 ワークスペース

2.2 建築計画

本建物は、研究員が一堂に会し、互いに交流、刺激しあうことのできるワークスペースとしての新しい本館である。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。

3 構造計画概要

3.1 構造計画

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($F_c=160\text{N/mm}^2$)による超高度CFT造柱とした。免震

層直上の梁は、積層ゴムアイソレータおよびアクチュエータの反力を受けるためSRC造とした。図1に上部構造の構造フレームを示す。また、ワークスペース上部には、スリムクリート(高じん性高強度モルタル)を用いたスレンダーなブリッジを配している。

基礎は1FL-7.0m付近の武蔵野砂礫層を支持層とする直接基礎(独立基礎)とした。

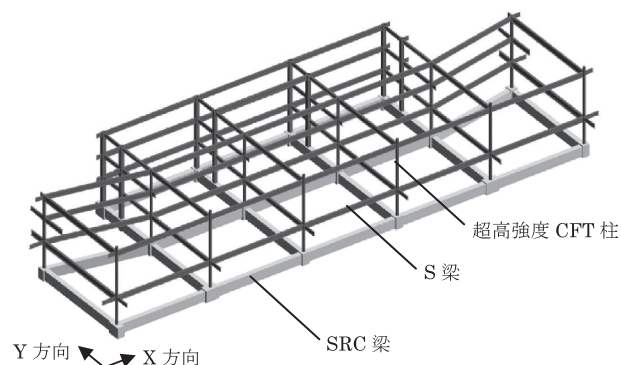


図1 上部構造の構造フレーム

3.2 免震層の構造計画

免震層は、天然ゴム系積層ゴムアイソレータ16台($\phi 800 \sim \phi 1100$ 、 $S_2=4.0 \sim 5.1$)、オイルダンパー8台(各方向4台)、アクティブ制御装置4台(各方向2台)をバランスよく配置した。図2に免震層のレイアウトを示す。

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ので、免震層の一次固有周期を約5.2秒とした。長周期化を実現するために、天然ゴム系積層ゴムアイソレータの長期許容面圧を座屈面圧の0.3倍以下と設定した。

また、等価減衰が20%程度となるようにオイルダンパーの性能を決定した。

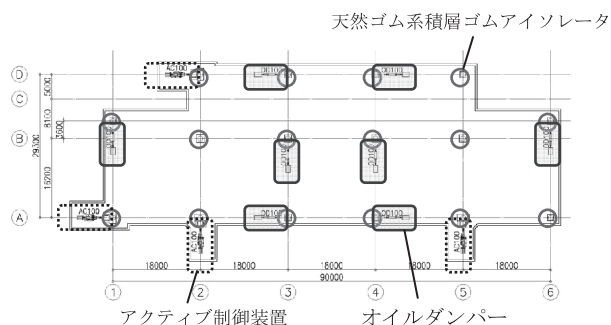


図2 免震層のレイアウト

4 スーパーアクティブ制震構造の概要

4.1 スーパーアクティブ制震構造の概要

スーパーアクティブ制震構造は、図3に示すように、天然ゴム系積層ゴムアイソレータとオイルダン

パーからなるパッシブ免震システムと、アクティブ制御装置で構成される。

地震が起こると、建物と地面に設置したセンサーが地震力を感知し、コンピューターに情報を伝える。コンピューターは最適な制御力を瞬時に求め、アクチュエータに指令を出す。アクチュエータは指令に基づき地盤が動いた分だけ、建物を反対方向へ動かす。その結果、建物は位置を変えることがなくなる。地面の揺れに影響されず、言わば建物が空中に静止するような状態を実現することができる。

従来のパッシブ免震システムでは、概ね地面の揺れの1/3から1/5までに建物の揺れを低減することが可能であるが、スーパーアクティブ制震構造では、1/30から1/50まで低減することが可能となる。

4.2 アクティブ制御装置の構成

図3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要素の機能を以下に示す。

①アクチュエータ(写真3)

オイルタンク・油圧源装置・アキュムレータと合わせて油圧回路を形成し、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。

②トリガー機構(写真4)

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に、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。

本建物におけるトリガー機構のすべり耐力は各方向2,000kNとし、ベースシアー換算で0.02程度である。

③装置バネ(写真5)

装置バネを介してアクチュエータを建物に取り付けることにより、加速度センサーの過剰反応の元となるアクチュエータによる高振動数成分の力が建物

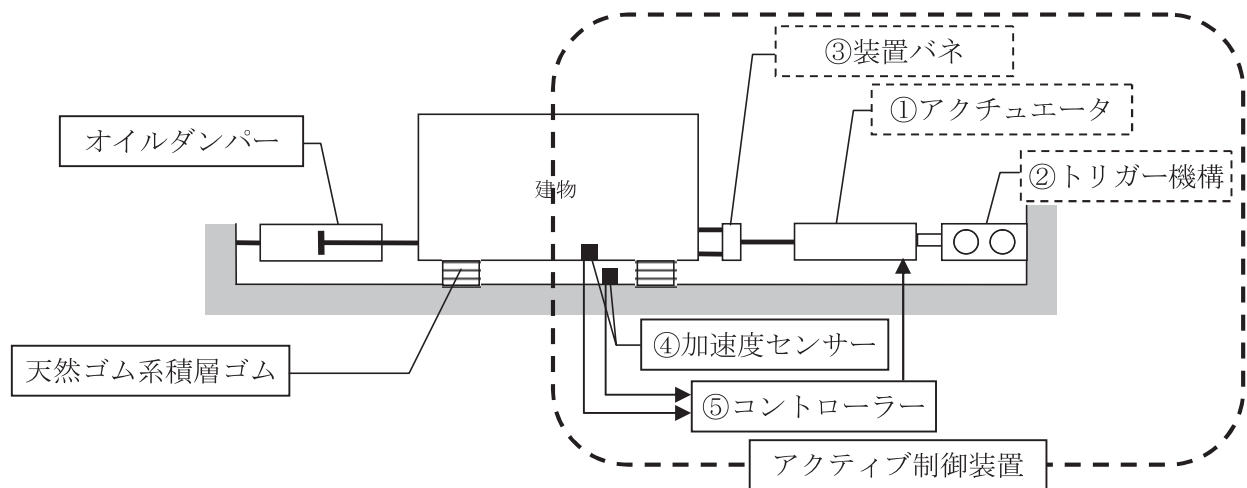


図3 スーパーアクティブ制震構造の構成



写真3 アクチュエータ

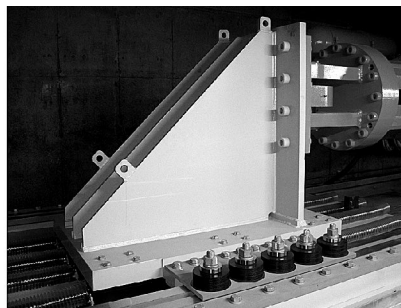


写真4 トリガー機構



写真5 装置バネ

に加わるのを防ぐ。これにより安定した制御が可能になる。

④加速度センサー

建物基礎上および建物免震層直上に設置し、制御のもとになる地動入力加速度および建物応答加速度を計測する。

⑤コントローラー

加速度センサーから伝達された地動入力加速度および建物応答加速度をもとに、アクティブ制御理論により、制御すべきアクチュエータの変位量を計算し、アクチュエータに変位指令を送る。

4.3 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起こり得る地震時の挙動として4ケースを想定し、地震時の挙動と耐震安全性に対する検証を行った。

Case1 アクチュエータが正常に作動する場合

アクティブ制御装置は正常な制御を行う。地震動が大きくなりトリガー機構にすべり耐力以上の荷重が作用した場合は、トリガー機構がすべり始め、アクティブ制御が働かなくなる。やがて地震動が小さくなりトリガー機構のすべりが止まると再び正常なアクティブ制御となる。

Case2 アクチュエータに異常があり制御可能な場合

アクチュエータに何らかの異常が発生しても、位置を保持する制御もしくは強制的に固定する制御が可能な場合は、アクティブ制御装置は装置バネの剛性を初期剛性とし、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。

Case3 アクチュエータに異常があり制御不可能な場合

アクチュエータが制御不能になり暴走した場合にも、トリガー機構にすべり耐力以上の荷重が建物には加わらない。

Case4 アクチュエータを取り外している場合

メンテナンス等でアクチュエータを取り外している場合は、アクティブ制御装置がないため、天然ゴム系積層ゴムアイソレータとオイルダンパーによるパッシブ免震システムとなる。

4.4 アクティブ制御装置の常時・風荷重時の挙動

常時及び風荷重時は、アクチュエータを固定し、建物が揺れるのを防止する。

表1 耐震設計の設計クライテリア

		稀に発生する地震動 (レベル 1 地震動)	極めて稀に発生する地震動 (レベル 2 地震動)	
地震応答解析における 対象解析モデル		基本振動系モデル Case1 Case2	基本振動系モデル Case1 Case2	諸検討モデル Case3 Case4
上部構造	断面設計	—	短期許容応力度以下	短期許容応力度以下
	層間変形角	—	1/200 以下	1/200 以下
	応答加速度	—	300cm/s ² 以下	500cm/s ² 以下
天然ゴム系 積層ゴム	変形		安定変形以内 ($\gamma \leq 125\%$)	性能保証変形以内 ($\gamma \leq 250\%$)
	面圧	圧縮	短期許容面圧以下	短期許容面圧以下
		引張	引張りを生じない	引張りを生じない
基礎構造	断面設計	—	短期許容応力度以下	短期許容応力度以下
	接地圧	—	短期許容支持力度以下	短期許容支持力度以下

表2 耐風設計の設計クライテリア

		稀に発生する暴風 (レベル 1 風圧力)	極めて稀に発生する暴風 (レベル 2 風圧力)
再現期間		100 年	500 年
上部構造	断面設計	—	短期許容応力度以下
	層間変形角	—	1/200 以下
アクティブ制御装置 (トリガー機構)		トリガー機構のすべり耐力以下	トリガー機構のすべり耐力を 超えることを許容

4.5 設計クライテリア

耐震設計の設計クライテリアを表1に、耐風設計の設計クライテリアを表2に示す。

耐震設計では、各ケース(Case1～Case4)の発生確率を考慮して、2段階のクライテリアを設定した。設計クリアランスは500mmとした。

耐風設計では、稀に発生する暴風に対してトリガー機構がすべり耐力以下、極めて稀に発生する暴風に対してはトリガー機構がすべることを許容し、免震層の変形量が十分小さいことを確認する。

5 アクティブ制御理論

アクティブ制御の方法は、以下に示す2つの制御の組合せにより行う。

- ・地動からの入力を打ち消す
→FF(フィードフォワード)制御
- ・建物の応答を低減させる
→FB(フィードバック)制御

5.1 FF制御

スーパーアクティブ制震構造の運動方程式を一般的な地盤に対する相対座標系で表すと、

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -ME\ddot{y} \quad \dots\dots\dots (1)$$

M : 建物質量マトリックス
 C : 建物減衰マトリックス
 K : 建物剛性マトリックス
 X : 建物相対変位応答
 $\ddot{y}$: 地動入力加速度
 $E^T = \{1 \quad \dots \quad 1\}$

と記されるが、これを絶対座標系で建物底部に制御力 F を加えた形で、絶対応答成分を用いた表記で表すと、

$$M(\ddot{X} + \ddot{y}) + C(\dot{X} + \dot{y}) + K(X + y) = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ k_0 \end{Bmatrix} y + \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ c_0 \end{Bmatrix} \dot{y} + \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ F \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。

なお、 k_0 と c_0 は免震層の剛性と減衰係数であり、 F はアクティブ制御力を示す。

ここでアクティブ制御力は、装置バネの剛性 k_s を用いて、

$$F = k_s(z - x_1) \quad \dots\dots\dots (3)$$

として表されるため、式(2)は、

$$M(\ddot{X}+\ddot{y})+C(\dot{X}+\dot{y})+K_z(X+y)=\begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ k_0+k_s \end{Bmatrix}y+\begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ c_0 \end{Bmatrix}\dot{y}+\begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ k_s \end{Bmatrix}z \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{ただし、} K_z = K + \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & k_s \end{bmatrix}$$

の形で表されることになる。この式(4)の右辺の外力項をゼロとするアクチュエータ変位は、

$$z = -\frac{k_0+k_s}{k_s}y - \frac{c_0}{k_s}\dot{y} \quad \dots\dots\dots (5)$$

として導かれる。

このように地動の変位 y と速度 $\dot{y}$ を観測して、建物に地動外力が入る前にそれを打ち消すようにアクチュエータ変位 z を制御することによって、建物に対する絶対座標系での入力はなくなり、絶対空間上に静止していることになる。

なお、本システムでは地動の変位 y と速度 $\dot{y}$ は、建物基礎上に設置された加速度センサーから得られる地動の加速度 $\ddot{y}$ を積分して求めている。

5.2 FB制御

5.1のFF制御を完全に行うことができれば、建物は絶対空間上に静止し、加速度応答は0となる。しかしながら、地動の絶対変位 y と速度 $\dot{y}$ の観測誤差、および免震層の剛性 k_0 と減衰定数 c_0 および装置バネの剛性 k_s の誤差、アクチュエータの特性によって、実際には入力成分を完全に打ち消すことは出来ない。

したがって、スーパーアクティブ制震構造では、制御効果をよりよくするために、5.1のFF制御の誤差によって励起された絶対速度成分を観測して、絶対速度に比例した制御力をアクチュエータによって建物に作用させることで、建物の減衰を大きくする制御を行う。

通常の地盤と建物との間に設置されたパッシブタイプのダンパーでは、建物の相対速度 $\dot{X}$ に比例した力が建物に作用するが、この絶対速度 $(\dot{X}+\dot{y})$ をFB制御に用いる方式では、空中の絶対空間に設置されたダンパーによる効果と同じであるため、一般的にスカイフック・ダンパーと呼ばれる。

入力遮断を目指す式(5)のFF制御に、スカイフック・ダンパーの効果を期待するFB制御を併用する場合のアクチュエータへの指令は以下とする。

$$z = -\left(\frac{k_0+k_s}{k_s}y + \frac{c_0}{k_s}\dot{y}\right) - \frac{c_s}{k_s}(\dot{X}+\dot{y}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

c_s : スカイフック・ダンパーの減衰係数

なお、本システムでは建物の絶対速度 $(\dot{X}+\dot{y})$ は、建物免震層直上に設置された加速度センサーから得られる建物の加速度 $(\ddot{X}+\ddot{y})$ を積分して求めている。

6 地震応答解析概要

Case1～Case4で地震応答解析を実施し、設計クライテリアを満足していることを確認した。

6.1 入力地震動

設計用入力地震動は、表3に示す告示波3波、及び観測波3波とした。

6.2 解析モデル

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。解析モデルを図4に、解析諸元を表4～表6に示す。

6.3 地震応答解析結果

解析結果のうち、Case1(スーパーアクティブ制震)とCase4(パッシブ免震)の告示波に対する地震応答

表3 設計用入力地震動

地震波	稀に発生する地震動 (レベル1)		極めて稀に発生する地震動 (レベル2)	
	最大 加速度 (cm/s ²)	最大 速度 (cm/s)	最大 加速度 (cm/s ²)	最大 速度 (cm/s)
告示波 (乱数位相)	92.0	9.75	417.2	47.9
告示波 (八戸NS位相)	111.7	10.8	444.0	57.2
告示波 (神戸NS位相)	86.0	12.1	396.4	61.7
EL-CENTRO NS	255.4	25.0	510.8	50.0
TAFT EW	248.4	25.0	496.8	50.0
HACHINOHE NS	166.9	25.0	333.8	50.0

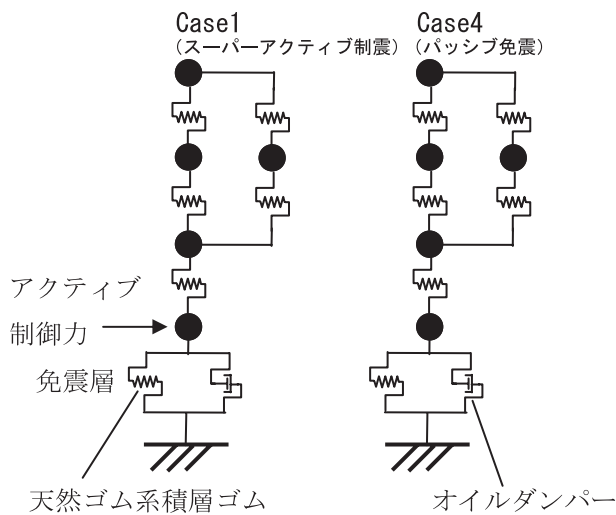


図4 解析モデル図

表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	55.9	408	47.0
3F	3F・a	771	170	316	63.0	371	51.9
2F		2101	—	426	—	514	—
1F		4466	—	14.2	—	14.2	—

表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

表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

解析結果を取り上げ、スーパーアクティブ制震構造の効果を検証する。

(1) 入力地震動最大加速度と最大応答加速度

告示波(乱數位相)入力地震動最大加速度と最大応答加速度の関係を図5に示す。入力地震動最大加速度が200cm/s²程度までは、アクティブ制御の効果が大きいことがわかる。これは、アクティブ制御装置の最大荷重を2,000kNに設定しているためで、アクティブ制御装置の最大荷重を変動させることで、アクティブ制御できる地震動の大きさを調整することができる。理論的にはいかなる大きさの地震動に対しても制御可能である。

(2) 稀に発生する地震動に対する地震応答結果

稀に発生する地震動に対する地震応答解析による最大応答加速度および最大応答変位を図6に示す。免震層の最大応答変位は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

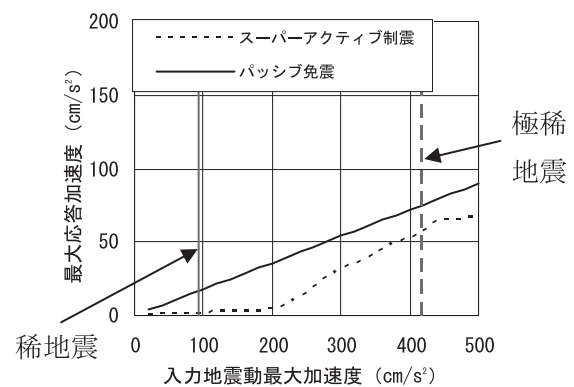


図5 入力地震動最大加速度と最大応答加速度(告示波(乱數位相))

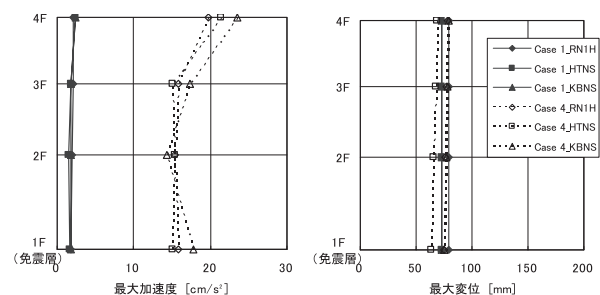


図6 稀に発生する地震動に対する最大応答

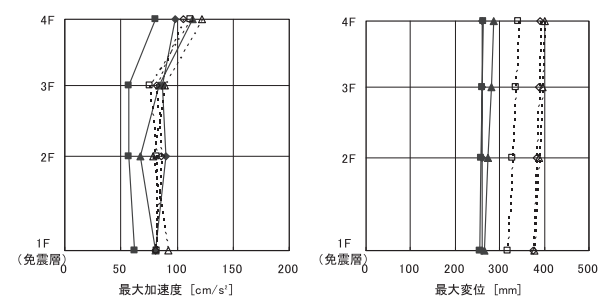


図7 極めて稀に発生する地震動に対する最大応答

1.9cm/s²、Case4で17.8cm/s²であり、スーパー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(2,000kN)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) 極めて稀に発生する地震動に対する応答結果

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図7に示す。免震層の最大応答変位はCase1で265.4mm、Case4で378.4mm、最大応答加速度はCase1で81.1cm/s²、Case4で92.3cm/s²であり、スーパー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。

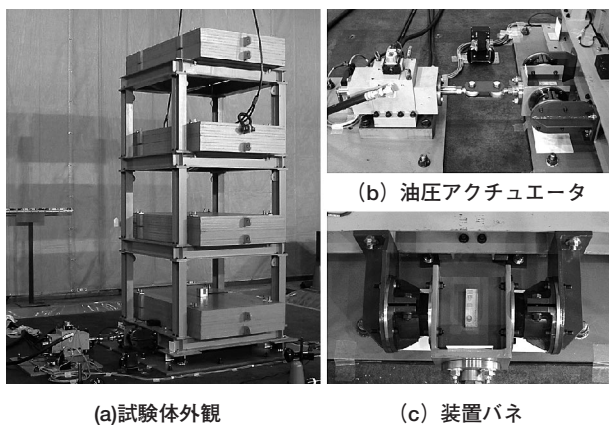


写真6 試験体写真

7 縮小模型実験

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。

7.1 試験体概要

試験体写真を写真6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10,600kgである。この試験体は4個の積層ゴムで支持されており、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、積層ゴムの剛性を調整して装置バネとして用いた。免震層の剛性に対する装置バネの剛性比は約2.5である。

7.2 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図8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スーパー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。

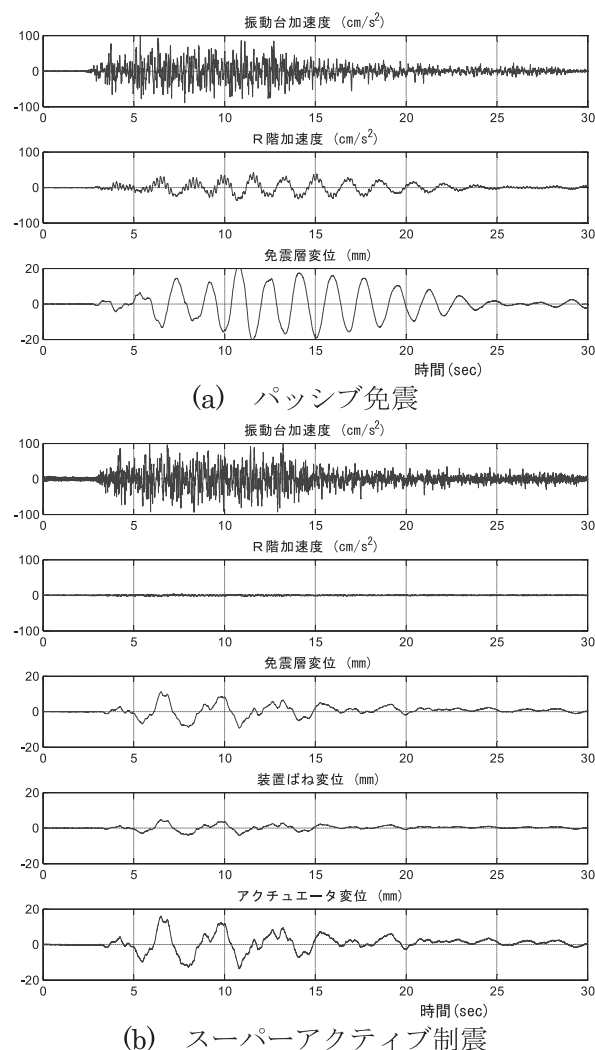


図8 振動台実験結果

8 おわりに

平成22年9月に竣工した大林組技術研究所本館 テクノステーションについて、スーパーアクティブ制震構造を中心に紹介した。スーパーアクティブ制震構造は、パッシブ免震システムに比べて応答加速度を1/10程度に低減することができることを、解析・実験により確認した。

今後、地震時に事業継続が求められる精密生産施設、地震時に機能維持が求められる病院や災害復旧拠点、貴重品が保管される美術館・博物館、絶対的な安全が求められる原子力関連施設などへスーパーアクティブ制震『ラピュタ2D』の採用を図ってきたい。