# T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

# 論文 / 著書情報 Article / Book Information

論題(和文)	アクティブ制御とパッシブ免震の併用による超高層免震の実現に向け た基礎的研究(その1:免震周期と上部構造の比率が応答性状に与える 影響の検討)			
Title(English)				
著者(和文)	林岑蔚, 佐藤大樹, 宮本皓			
Authors(English)	Tsenwei Lin, Daiki Sato, Kou Miyamoto			
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 433-436			
Citation(English)	, , , pp. 433-436			
 発行日 / Pub. date	2017, 3			

アクティブ制御とパッシブ免震の併用による超高層免震の実現に向けた基礎的研究

# (その1:免震周期と上部構造の比率が応答性状に与える影響の検討)

#### 構造-振動

免震構造,応答性状,固有周期,免震層周期,

正会員	〇林	岑蔚	*1	正会員	佐藤	大樹	*2
正会員	宮本	皓	*3				

#### 1. 初めに

近年では地震時に建物が倒壊することのみならず,建物 の損傷を最小限にし、地震直後からの活動再開を目的とし て免震構造を採用する建築物が増加しており、よりよい制 振性能をもつ免震構造を設計するための様々な方法が提 案されている。例えば笠井らは上部構造の1次固有周期と 免震周期(上部構造を剛と仮定した場合の1次固有周期)を 考慮した免震性能曲線を提案しており、上部構造周期が比 較的長い場合は、上部構造を高減衰化することで、免震層 や上部構造の変位を低減させることができることを明ら かにした<sup>1)</sup>。しかし、上部構造の固有周期と免震周期の比 率が建物の絶対加速度、せん断力、層間変形角に与える影 響に関しては明らかになっておらず、これを解明すること で、より適切な免震の設計が可能になる。

一方,免震構造を超高層建築物に適用すると,建物全体 の固有周期が非常に長くなり,大地震発生時に免震層の変 位が許容変位を超過することが危惧される。この問題に対 し,本研究では,アクティブ制御を免震層に設置し,免震 層の変位を許容変位以内に抑えることにより,超高層免震 を実現する振動制御方法の開発を目的とする。

近年でも,優れた制振性能を得るために,パッシブ免震 とアクティブ制御を融合させたハイブリッド制振の研究 が行われている<sup>例えば文献 2),3</sup>。しかし,これらの研究で,免 震層はアクティブ制御があることを前提として設計され ておらず,アクティブ制御の併用を考慮することにより, 併用の際に最適な免震層設計の実現が期待される。

本研究は、超高層免震の実現化のために、免震とアクティブ制御を融合した際によりよい制御性能を得るための 免震層の設計方法を提案することを目的とし、本報その1 ではアクティブ制御を併用する前段階として、免震周期と 上部構造周期の比率が地震の応答性状に与える影響を明 らかにする。その2では免震層にアクティブ制御を設置し、 アクティブ制御を併用する際の最適な免震周期について の検討を行う。

# 2. 解析に用いるモデルの諸元

# 2.1 建物・免震のモデル化

上部構造は10層のせん断型モデルを用いる。上部構造の1次固有周期は $T_u = 1.0$  s, 3.0 s, 5.0 sの3つを用いる。床面積はいずれのモデルでも40 m×40 mとし,建物全体の高さは $H = T_u / 0.02$  mにより与えられる。また,各層の高さは $h_i = H/10$  mにより与えられ,全層の高さは等しいとす

る。建物の密度は全てのモデルで密度は175 kg/m<sup>3</sup>で、全層の質量は等しいとする。

上部構造の減衰は1次固有周期に対して*h*<sub>u</sub>=0.02となる 剛性比例型とする。なお,*N*層のせん断型モデルの各層の 剛性kは文献4)より与えられ,以下の式(1)で表される。

$$k_{1} = \frac{{}_{s}\omega^{2} \cdot m_{1} \cdot {}_{s}\phi_{1} + k_{2}({}_{s}\phi_{2} - {}_{s}\phi_{1})}{{}_{s}\phi_{1}}$$
(1a)

$$k_{i} = \frac{{}_{s}\omega^{2} \cdot m_{i} \cdot {}_{s}\phi_{i} + k_{i+1}({}_{s}\phi_{i+1} - {}_{s}\phi_{i})}{{}_{s}\phi_{i} - {}_{s}\phi_{i-1}} \quad \{i = (N-1) \sim 2\} \quad (1b)$$

$$k_N = \frac{{}_s \omega^2 \cdot m_N \cdot {}_s \phi_N}{{}_s \phi_N - {}_s \phi_{N-1}}$$
(1c)

ここで<sub>s</sub>ωをs次の固有振動角周波数, <sub>s</sub>¢ を第i層のs次の 固有モード, Nを上部構造の質点数(=10), *m*<sub>i</sub>を第i番目の 質量とする。

上記の10質点の上部構造モデルの下に免震層を設置 し、11質点のモデルとして免震モデルの解析を行う。免 震層の質量は2551 kg/m<sup>2</sup>と仮定し、平面形状(40 m×40 m) から免震層の質量 $m_f$ を計算する。本報の免震層は天然ゴ ム系積層ゴムと粘性系ダンパーによる免震層を想定す る。天然ゴム系積層ゴムは線形のバネで、粘性系ダンパ ーは線形のダッシュポットによりモデル化する。免震周 期に対する減衰率は $h_f$ =0.05とし、免震層の剛性 $k_b$ と粘性 係数 $c_f$ は免震周期 $T_f$ を用いて式(2),(3) により算出する。

$$k_f = T_f^2 / 4\pi^2 \left( \sum m_s + m_f \right)$$
 (2)

$$c_f = 2h_f \sqrt{\left(\sum m_s + m_f\right)k_f} \tag{3}$$

ここで、 $\Sigma m_s$ :上部構造の全質量、 $m_f$ :免震層の質量をあらわす。表1に上部構造と免震層の諸元を示す。

		モデル1	モデル2	モデル3		
上部構造	$T_u$ [s]	1.0	3.0	5.0		
	$h_u$	2.0%				
	<i>H</i> [m]	50	150	250		
	<i>h</i> <sub><i>i</i></sub> [m]	5	15	25		
	$\Sigma m_i$ [kg]	14000	42000	70000		
免	$T_f[\mathbf{s}]$	1, 2, 3, 4	3, 4, 5, 6	5, 6, 7, 8		
震	$h_f$	5.0%				
層	<i>m<sub>f</sub></i> [kg]	4087600				

表 1. 上部構造と免震層の諸元



# 2.2 地震波の概要

本報では、固有周期の違いが応答へ与える影響を除外す るため、コーナー周期が0.64 s以降で減衰定数h = 5.0%で 疑似速度応答スペクトル<sub>p</sub>S<sub>v</sub>が100 cm/sとなる模擬地震動 波形Art Hachinohe波(位相特性、1968Hachinohe EW)とArt Kobe波(位相特性、JMS KobeNS)の2波を用いる。それぞ れの地震の加速度波形と疑似速度応答スペクトル、加速 度応答スペクトル、変位応答スペクトルを図3、4に示 す。なお、その1ではART Kobe波の結果のみを示し、そ の2ではART Kobe波、Hachinohe波両方の解析結果を示 す。



ここで,免震が無い10自由度系のモデルを非免震モデル と呼ぶ。解析では最大相対変位,最大絶対加速度,最大 層間変形角,せん断力の比較を行った。なお,図中の縦 軸において,0は免震層を表し,gは地面を表す。

#### 3.1 最大相対変位

非免震モデルでは、上部構造の固有周期が長くなるごと により、上部構造の上層の応答が下層に比べて大きくなる 傾向にある。免震モデルでも、上部構造や免震周期が長く なるに従って、全層において最大相対変位が大きくなる傾 向にあり、これは文献1)の結果と一致し、これらの結果は 変位応答スペクトルの結果と一致する。両モデルを比較す ると、免震モデルの方がいずれのモデルでも相対変位が大 きくなる結果になった。

#### 3.2 最大絶対加速度

非免震モデルでは、上部構造の固有周期が長くなるに従い、建物全体の絶対加速度応答が小さくなり、 $T_u$ =5.0 s モデルの 10 層目の絶対加速度の応答値は  $T_u$ =1.0 s モデルの 10 層目の応答値の半分未満になっていることがわかる。 免震モデルでは、免震周期が長くなるに従って、最大絶対加速度は小さくなり、加速度応答スペクトルの結果と一致していることが確認される。また、免震周期が長くなるに従い、上層と下層の応答値の差が小さくなる傾向にある。これは免震周期を伸ばすことにより、免震層に対して上部構造の剛性が十分に高くなり、上部構造が一体となって動いているためである。両モデルを比較すると  $T_u$ =1.0 s,  $T_f$ =1.0 s モデル以外では、全層で免震モデルの方が応答は小さくなっている。

#### 3.3 最大層間変形角

非免震モデルではいずれの上部構造の固有周期モデル でも特に上層部の応答が大きくなる傾向にある。一方で、 免震モデルでは、免震周期が長くなるに従って、全層での 最大層間変形角が小さくなるだけでなく、最大絶対加速度 の応答と同様に、上層と下層部の応答の差が無くなり、特 に10 質点目の応答を低減できる。両モデルを比較すると、 免震モデルでは非免震モデルに比べて特に上層部での応 答を低減できている。

#### 3.4 最大せん断力

非免震モデルでは、上部構造の固有周期が長くなるに従い、最大せん断力の応答値が大きくなる。非免震モデルでも同様に、上部構造の固有周期が長くなるに従って、最大 せん断力の値が大きくなる傾向になるが、免震周期の長さ を長くすることにより最大せん断力の応答を低減できて いるだけでなく、上層部と比較し、下層部の応答を抑える ことができている。

# 4. 非免震モデルと免震モデルの応答比較

免震周期  $T_f$ , 上部構造周期  $T_u$ の比率  $T_f / T_u$ と, 免震周期に対する減衰率  $h_f$ が最大応答値に与える影響を明らかにするために, 表 2 に示す免震周期と減衰率を用いて解析を行い, これらの変化による影響を検討する。



相対変位、絶対加速度、層間変位角、せん断力

h<sub>f</sub>=5%の非免震モデルに対する免震モデルの最大相対変 位,最大絶対加速度,最大層間変位角,せん断力の比率を, βを用いて式(4~7)のように表す。

免 震

層

4.1

 $h_{f}$ 

ここで,X:相対変位,A:絶対加速度,R:層間変形角, Q: せん断力であり、添え字の max は各応答の最大値を表 し、fは免震モデルを、nonは非免震モデルを表す。

図 6(a) に、最大相対変位の解析結果を示す。Tu=3.0sと 4.0 s のモデルでは、 $T_f/T_u$ が大きくなるに従い、 $\beta_X$ が大き くなるが、 $T_u = 5.0 \text{ s}$ モデルでは $T_f / T_u = 3$ の時に $\beta_X$ が最小 となった。図 6(b)に  $\beta_A を示す$ 。 $T_f/T_u$ が 1 より大きくなる にしたがって,免震モデルの  $\beta_A$ が小さくなる。図 6(c)に, 最大層間変形角の解析結果を示す。 $T_f/T_u$ は 1 より大きく なるにしたがって,  $\beta_R$ が小さくなる。図 6(d)に  $\beta_Q$ を示し た。 $T_f/T_u$ が大きくなるにしたがって,  $\beta_Q$ が小さくなる傾 向であることが分かる。以上の結果より,相対変位は  $T_f/T_u$ が大きくなるに従い,最大値は増加しているものの,そ の他の応答は  $T_f/T_u$ の値が大きくなるほど,減少している ため,相対変位とその他の応答ではトレードオフになって いることが分かる。また,相対変位は大きくなっても層間 変位の値は少なくなっている。これは,免震周期が長くな ることにより,免震層に変位が集中し,建物全体の相対変 位は大きくなるが,上部構造の剛性が免震周期の剛性に対 して十分大きいため,層間変位が少なくなるからである。

# 5. 免震層の吸収エネルギー率の比較

免震層と上部構造が吸収するエネルギーの比率につい ての検討を行う。免震層が吸収するエネルギーは式(8)のよ うに表すことができる。

 $\int [\dot{x}_0] [c_f] [\dot{x}_0] dt + \int [\dot{x}_1 \quad \cdots \quad \dot{x}_{10}] [C_u] [\dot{x}_1 \quad \cdots \quad \dot{x}_{10}]^{\mathrm{T}} dt$  $= -\int {\dot{x}_1^{\mathrm{T}} [M] {1} \ddot{x}_g dt }$ 

ここで, $c_f$ : 免震層の粘性要素, $C_u$ : 上部構造の粘性要素, $\dot{x}_i$ : 免震層の相対速度, $\dot{x}_i$ : 上部構造 i 層目の相対速度を表す。

さらに、(8)式を(9)式のように表す

 $W_f + W_u = E$ 

ここで, W<sub>f</sub>:免震層吸収エネルギー, W<sub>u</sub>:上部構造吸収 エネルギー E:地震入力エネルギーを表す。

図 6 は、免震周期  $T_f$ と上部構造周期  $T_u$ の比率  $T_f/T_u$ と地震の入力エネルギーEに対する、免震層吸収エネルギー  $W_f$ の割合の比率との関係を表したものである。

図 7 より,免震周期 *T<sub>f</sub>*と上部構造周期 *T<sub>u</sub>*の比率 *T<sub>f</sub>*/*T<sub>u</sub>*が 2 以 3,βx 1.5 г.β.



以上になると、免震減衰率 $h_f$ の大きさによる影響は少なく、 上部構造に対する固有周期が長くなるに従って、 $W_f/E$ が 小さくなることがわかる。

以上のことから、免震周期を長くすることにより免震層 での吸収エネルギーの割合が大きくなるため、上部構造の 負担するエネルギーが少なくなる。これは免震周期を長く することにより、免震層の変位が大きくなり、それにより 入力エネルギーが消費されるからであると考えられる。



# 6. まとめ

(8)

(9)

本報では、告示波を用いて、免震層と上部構造の固有 周期を変化させ、それらの値や比率が地震の応答性状に 与える影響について分析した。解析結果から得られた知 見を示す。

- (1) 免震周期が長くなるに従い、最大相対変位は大きくなり、最大絶対加速度、層間変形角、せん断力は小さくなる。最大絶対加速度では特に上層部と下層部の最大値の差が小さくなり、最大層間変形角では上層部の応答を特に抑えることが可能になり、最大せん断力については下層部の応答が小さくなる。
- (2) 非免震モデルに対する免震モデルの最大応答比率の 解析結果より、相対変位は T<sub>f</sub> / T<sub>u</sub>が大きくなる場合 は、最大値は増加するが、最大絶対加速度、最大層 間変形角、最大せん断力の応答は T<sub>f</sub> / T<sub>u</sub>の値が大き くなるほど、減少することから、相対変位とその他 の応答ではトレードオフの関係になっている。
- (3) 免震周期と上部構造の比率 *T<sub>f</sub>* / *T<sub>u</sub>* が大きくなるほど,免震層の相対変位は大きくなるが,免震層が負担をするエネルギーの割合が大きくなる。

参考文献はその2に示す。