

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

正会員 ○林 岑蔚 *1

正会員 佐藤 大樹 *2

正会員 宮本 皓 *3

免震構造, 応答性状, 固有周期, 免震層周期,

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¹⁾。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^(例えば文献 2), 3)。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 \times 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/m³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 $h_u = 0.02$ 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_i は文献4)より与えられ, 以下の式(1)で表される。

$$k_1 = \frac{{}_s\omega^2 \cdot m_1 \cdot {}_s\phi_1 + k_2({}_s\phi_2 - {}_s\phi_1)}{{}_s\phi_1} \quad (1a)$$

$$k_i = \frac{{}_s\omega^2 \cdot m_i \cdot {}_s\phi_i + k_{i+1}({}_s\phi_{i+1} - {}_s\phi_i)}{{}_s\phi_i - {}_s\phi_{i-1}} \quad \{i = (N-1) \sim 2\} \quad (1b)$$

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

ここで ${}_s\omega$ を s 次の固有振動角周波数, ${}_s\phi_i$ 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_i 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/m²と仮定し, 平面形状(40 m \times 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パネで, 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。

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

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

ここで, $\sum m_s$: 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。

表1. 上部構造と免震層の諸元

		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%		
	H [m]	50	150	250
	h_i [m]	5	15	25
	$\sum m_i$ [kg]	14000	42000	70000
免震層	T_f [s]	1, 2, 3, 4	3, 4, 5, 6	5, 6, 7, 8
	h_f	5.0%		
	m_f [kg]	4087600		

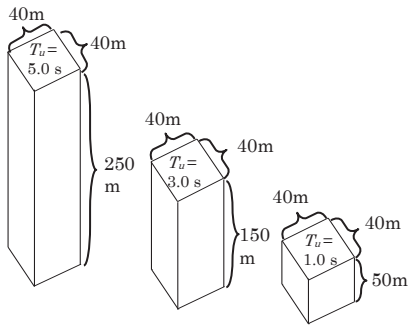


図1. 解析に用いる建物モデル

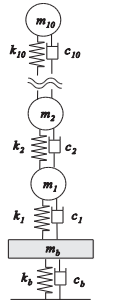


図2. 免震を有する11自由度系のモデル

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 pSv 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。

3. 免震周期の変化による応答性状への影響

図5に $T_u=1.0\text{ s}$, 3.0 s , 5.0 s モデルの解析の結果を示す。

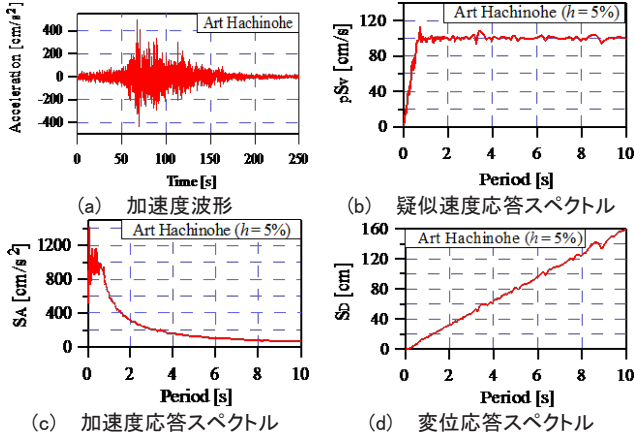


図3. Art Hachinoheの加速度波形(a)と速度応答スペクトル(b)

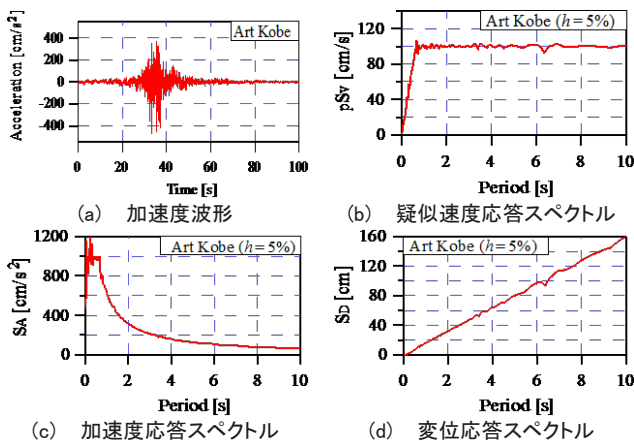


図4. Art Kobeの加速度波形(a)と速度応答スペクトル(b)

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ことにより、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、 $T_u=5.0\text{ s}$ モデルの10層目の絶対加速度の応答値は $T_u=1.0\text{ s}$ 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 $T_u=1.0\text{ s}$, $T_f=1.0\text{ s}$ 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。

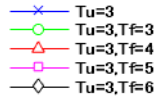
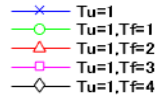
3.4 最大せん断力

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。

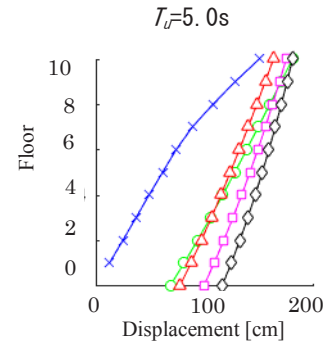
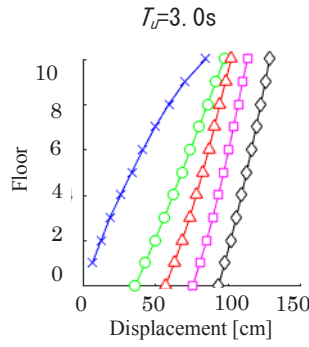
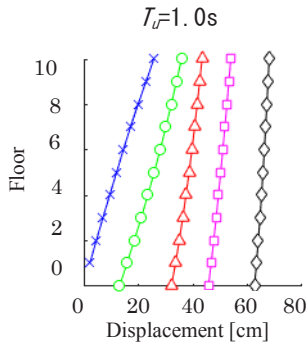
4. 非免震モデルと免震モデルの応答比較

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。

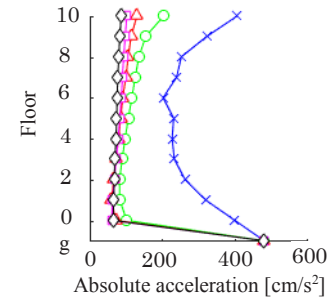
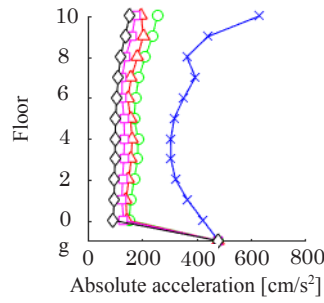
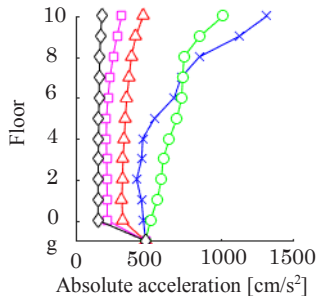
凡例



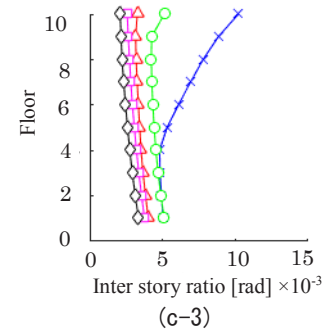
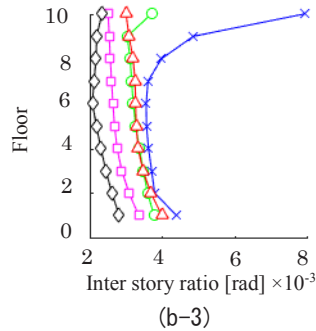
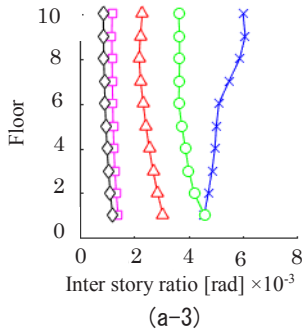
最大相対変位



最大絶対加速度



最大層間変形角



最大せん断力

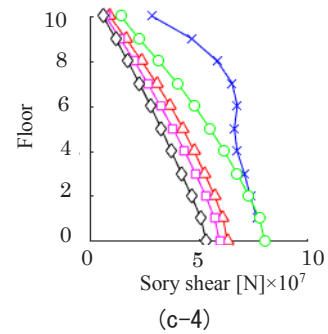
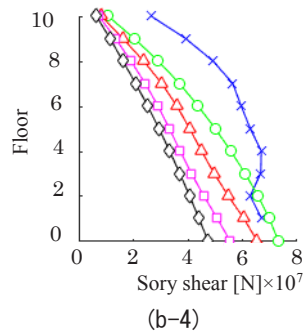
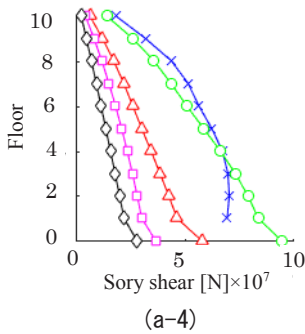


図 5. Art Kobe の結果

表 2. 新しい免震層の諸元

免震層	T_u [s]	1.0	3.0	5.0
	T_f [s]	2.0, 3.0, 4.0	3.0, 6.0, 9.0, 12.0	5.0, 10.0, 15.0, 20.0
	h_f	5.0%, 10.0%		

4.1 相対変位, 絶対加速度, 層間変位角, せん断力

$h_f=5\%$ 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。

$$\beta_X = \frac{(X_f)_{\max}}{(X_{non})_{\max}}, \beta_A = \frac{(A_f)_{\max}}{(A_{non})_{\max}}, \beta_R = \frac{(R_f)_{\max}}{(R_{non})_{\max}}, \beta_Q = \frac{(Q_f)_{\max}}{(Q_{non})_{\max}} \quad (4\sim7)$$

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。 $T_u=3.0$ s と 4.0 s のモデルでは, T_f/T_u が大きくなるに従い, β_X が大きくなるが, $T_u=5.0$ s モデルでは $T_f/T_u=3$ の時に β_X が最小

となった。図 6(b)に β_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 β_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、 β_R が小さくなる。図 6(d)に β_Q を示した。 T_f/T_u が大きくなるにしたがって、 β_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場合、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。

$$\int [\dot{x}_0][c_f][\dot{x}_0]dt + \int [\dot{x}_1 \cdots \dot{x}_{10}][C_u][\dot{x}_1 \cdots \dot{x}_{10}]^T dt = -\int \{\dot{x}\}^T [M] \{1\} \ddot{x}_g dt \quad (8)$$

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}_0 : 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

$$W_f + W_u = E \quad (9)$$

ここで、 W_f : 免震層吸収エネルギー、 W_u : 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_f と上部構造周期 T_u の比率 T_f/T_u が 2 以

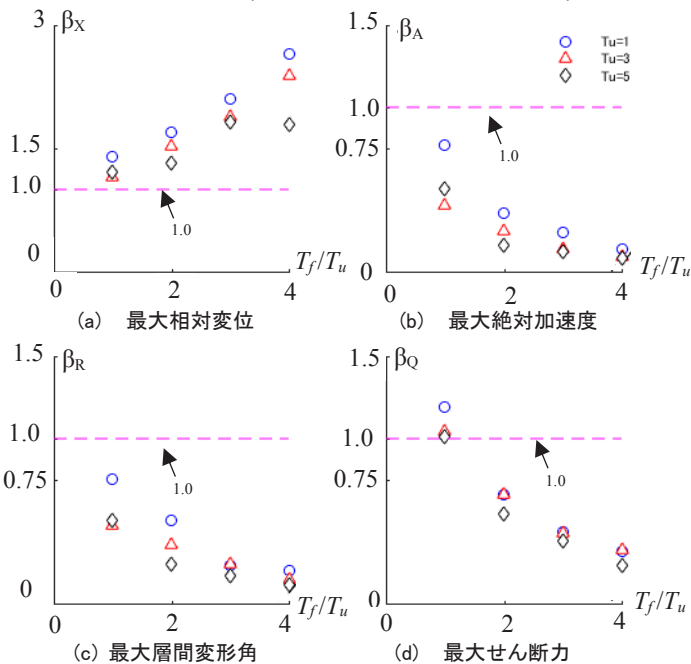


図 6. $h_f=0.05$ の β の比較

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 が小さくなるのがわかる。

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。

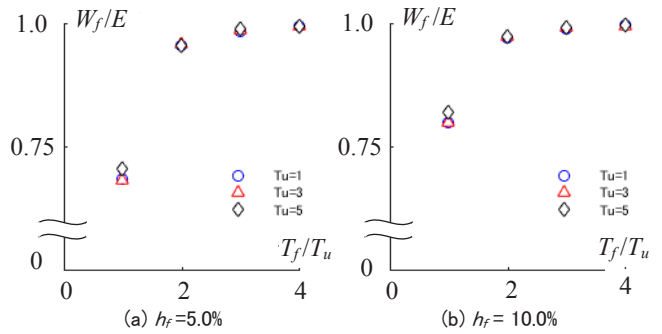


図 7. 免震層吸収と地震波エネルギーの比率

6. まとめ

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_f/T_u 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_f/T_u 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_f/T_u 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。