

## 免震層と上部構造の両性能を向上させる複合ダンパーシステムの開発

正会員 ○合田圭吾\* 同 吉富信太\* 同 辻 聖晃\* 同 竹脇 出\*

## 2. 構造—2. 振動

## 免震建物, 制振, 居住性, 変位・加速度制限, 高硬度ゴムダンパー

## 1. 序

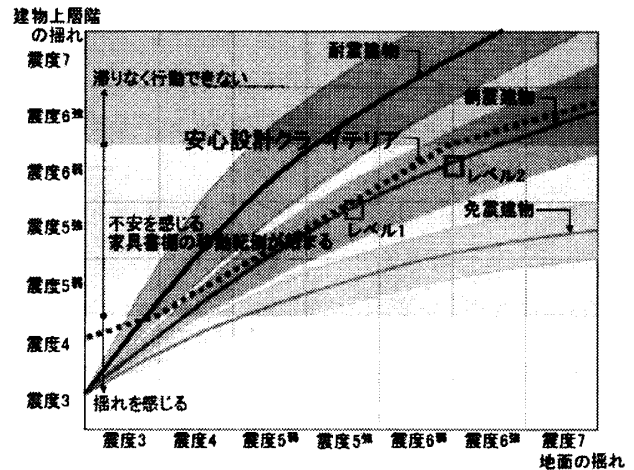
免震構造は、一般に中低層建物を対象として用いられてきたが、超高層建物に対してもその有用性が明らかにされつつあり、現在わが国では住宅から超高層ビルまで幅広い範囲で免震構造が実用化されている。免震建物を設計する場合、免震装置の変形限界の問題や大都市など建物が密集しているような場所ではクリアランスのための十分な空間を確保することができないという問題が存在する。その問題を克服するために免震層に通常より多くダンパーを配置するなどして免震装置の可動域を制限する対策が考えられている。しかしながら、過度なダンパー配置は上部構造の応答の増大につながるという問題が存在する<sup>1)</sup>。免震層にダンパーを過度に挿入し、上部構造の応答量が増大しても躯体にはあまり支障はない。しかしながら、建物内の人や物に大きな影響を与える場合がある。

図1は安心性能グレード図の一例であり、横軸は地面の揺れの度合いを、縦軸は建物上層階の揺れの程度を表す。図1<sup>2)</sup>から、耐震建物や制震建物に比べ免震建物は地面の揺れに対して、建物上層階の揺れを大きく低減する一方で、震度5を超える地震が発生した場合は建物内部で家具の移動や転倒が起こることがわかる。

本研究では、免震装置の変形を抑制し、同時に上部構造の居住性を向上させるシステムとして免震と制震を組み合わせたハイブリッドシステムを提案する。

本研究の目的は以下の2点である。

- 1) 免震層および上部構造に設置するダンパー量が、免震層の変位と頂部絶対加速度に及ぼす影響を明らかにすること
- 2) 上部構造に付加するダンパー種別による応答特性の違いとそのメカニズムを明らかにすること

図1 安心性能グレード図案<sup>2)</sup>

## 2. モデル設定と応答評価法

## 2.1 免震建物のモデル化

10層鉄骨造免震建物(基礎免震: 平面 20m×20m)をせん断型モデルにモデル化し解析を行う(図2)。免震層は天然ゴム系アイソレーターとオイルダンパーで構成されるものとする。上部構造各層の剛性、減衰係数は免震層を固定し、表1の諸元を用いて1次モードを直線形と仮定して算出する。また、免震層の剛性と減衰係数は上部を剛体と仮定し、表2の諸元により求める。

表1 上部構造諸元

上部各層の質量	$4.0 \times 10^5$ (kg)
1次固有周期	1.05(s)
減衰定数	0.02

表2 免震層諸元

免震層の質量	$1.2 \times 10^6$ (kg)
1次固有周期	4.0(s)
減衰定数	0.05

## 2.2 解析法について

頂部最大絶対加速度応答、免震層の最大変位応答を複素固有値解析を用いた応答スペクトル法(拡張CQC法)<sup>3)</sup>によって算出する。応答スペクトルとして安全限界スペクトルを用いる。

New Combined Damper System for Higher Performances of Both Base-isolation Story and Building Story

GODA Keigo, YOSHITOMI Shinta, TSUJI Masaaki and TAKEWAKI Izuru

### 2.3 制振ダンパーについて

本研究では免震層にはオイルダンパーを付加し、上部構造にはオイルダンパーまたは高硬度ゴムダンパー<sup>4)</sup>を付加する。オイルダンパーは付加した層の減衰係数だけを增加させ、剛性は増加させないとする。また、リリース機構は作動させず、減衰力は相対変位速度に比例するものとする。

高硬度ゴムダンパーは粘弾性ダンパーの一種であり、ゴムの変形量によって剛性や減衰係数が変化するひずみ依存性を有する。しかしながら、通常の粘弾性体よりもかなり小さな温度・振動数依存性を有している。以下に等価剛性  $k_{eq}$  (N/mm) と等価減衰係数  $c_{eq}$  (Ns/mm) を求める式を示す<sup>4)</sup>。

$$k_{eq} = \frac{S}{d} \left( \frac{0.32 + 0.11\varepsilon^{0.38}}{1 + \varepsilon} \bar{\gamma}_{max}^{-0.62} + \frac{0.32\varepsilon - 0.11\varepsilon^{0.38}}{1 + \varepsilon} \frac{\bar{\gamma}_{max}^{0.38}}{\gamma_{max}} \right) + \frac{S}{d} 0.10\gamma_{max}^{-0.66} \quad (1)$$

$$c_{eq} = \frac{S}{d} \frac{0.64\varepsilon - 0.22\varepsilon^{0.38}}{\pi\omega} \frac{\bar{\gamma}_{max}^{0.38}}{\gamma_{max}} + \frac{S}{d} \frac{0.306}{2\pi^2} \left( \frac{\omega}{2\pi} \right)^{-0.75} \gamma_{max}^{-0.75} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{0.94|\gamma_u|^{0.73}}{|\gamma_u|^{0.73} + 0.01} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{\gamma}_{max}$  は過去に経験した最大ひずみ、 $\gamma_{max}$  は現在のループの最大ひずみ、 $\gamma_u$  は除荷時のひずみである。本研究では簡単のためすべて  $\gamma_{max}$  とする。

## 3. 上部構造に粘性ダンパーを付加する場合の解析

### 3.1 特性解析の方針

上部構造に付加するダンパー量の程度を表す指標として  $h_s$  を用いる。 $h_s$  は免震層固定時の上部構造の1次減衰定数を表す。本論文では上部構造各層の減衰係数が剛性比例型になるようにダンパー量を増加させる。また、免震層のダンパー量の程度をあらわす指標として  $h_l$  を用いる。 $h_l$  は上部を剛体とし、1質点モデルに仮定したときの減衰定数である。

### 3.2 ダンパー量と頂部最大絶対加速度の関係

図2(a)は  $h_l$  を 0.05, 0.125, 0.2 とし、それぞれの場合で  $h_s$  を 0.02 から 0.08 まで変化させたときの頂部最

大絶対加速度を表す。図2(b)は  $h_s$  を 0.02, 0.05, 0.08 とし、それぞれの場合で  $h_l$  を 0.05 から 0.2 まで変化させたときの頂部最大絶対加速度を表す。

図2(a)より、上部構造に挿入するダンパー量を増やすほど頂部最大絶対加速度は減少することがわかる。また、図2(b)より、グラフに極小値が存在することがわかり、上部構造のダンパー量と免震層のダンパー量には最も頂部加速度応答を低減する最適な組み合わせが存在することがわかる。

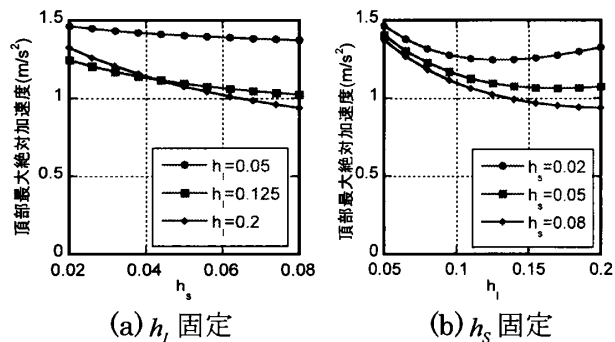


図2 ダンパー量と頂部最大絶対加速度の関係

### 3.3 ダンパー量と免震層の最大変位の関係

図3は図2と同様の操作による免震層の最大変位についてのグラフである。図3(a), (b)から、免震層の最大変位はほぼ免震層のダンパー量のみで決まると言える。

図4(a)は縦軸に  $h_s$ 、横軸に  $h_l$  をとり、頂部最大絶対加速度について描いた等高線図である。図4(b)は縦軸に  $h_s$ 、横軸に  $h_l$  をとり、免震層の最大変位について描いた等高線図である。等高線図を組み合わせることで、頂部加速度と免震層の変位の要求を同時に満たすダンパー量をどの程度にすれば良いかが視覚的に理解できるといえる。また、加速度については最適な免震層ダンパー量が存在することがわかる。

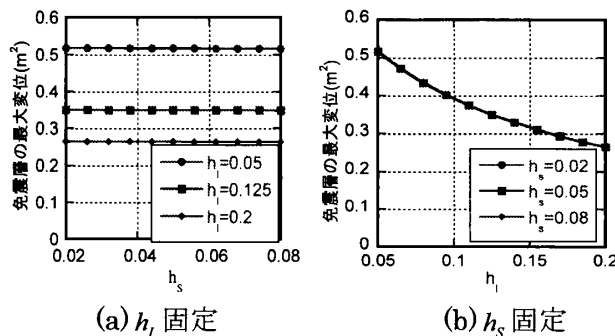
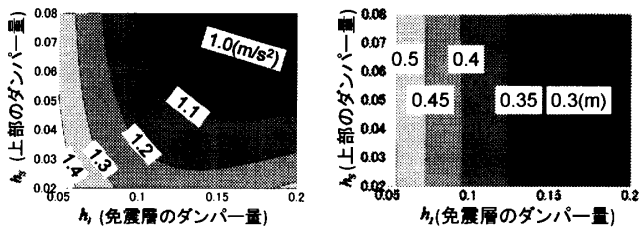


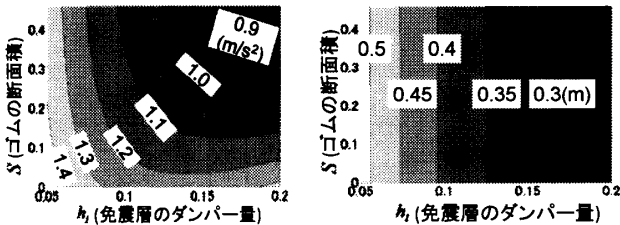
図3 ダンパー量と免震層の最大変位の関係



(a) 頂部最大絶対加速度 (b) 免震層の最大変位  
図 4 等高線図(粘性ダンパー)

#### 4. 上部構造に高硬度ゴムダンパーを付加する場合の解析

高硬度ゴムダンパー量をあらわす指標としてゴムの断面積  $S$  を用いる (厚さは 15mm)。ただし、付加する高硬度ゴムダンパーのゴムの断面積は上部構造の全層で同じとする。免震層のダンパーを表す指標としては 3 節と同様に、 $h_1$  を用いる。図 5(a) は縦軸にゴムの断面積を、横軸に  $h_1$  をとり、頂部最大絶対加速度について描いた等高線図である。図 5(b) は免震層の最大変位についての等高線図である。粘性ダンパーと同様に、加速度については最適な免震層ダンパー量が存在することがわかる。



(a) 頂部最大絶対加速度 (b) 免震層の最大変位  
図 5 等高線図(高硬度ゴムダンパー)

#### 5. 上部構造に付加するダンパー種別が頂部加速度応答に及ぼす影響

ここでは、上部構造に粘性ダンパーを付加した場合と高硬度ゴムダンパーを付加した場合の比較を行う。 $h_1=0.2$ 、上部構造の全層に  $S=0.46(m^2)$  の高硬度ゴムダンパーを一樣配置した時の各層の減衰係数の分布を基準とする。減衰係数がこの分布に比例し、減衰定数が一致するように上部各層に粘性ダンパーを配置したモデルを作成して比較を行う。図 6 に各モデルの減衰係数と剛性の分布を示す。

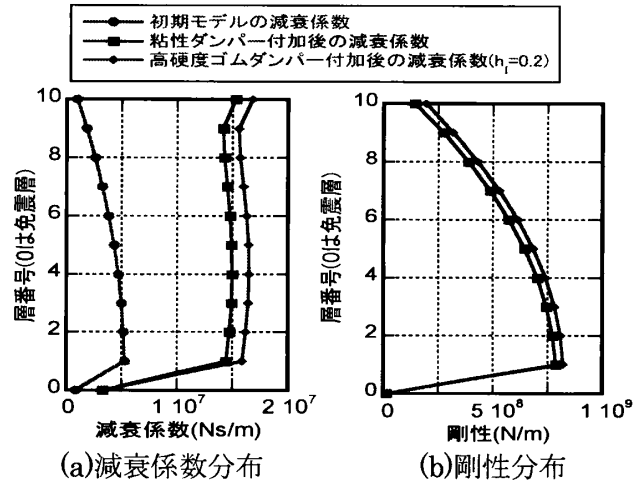
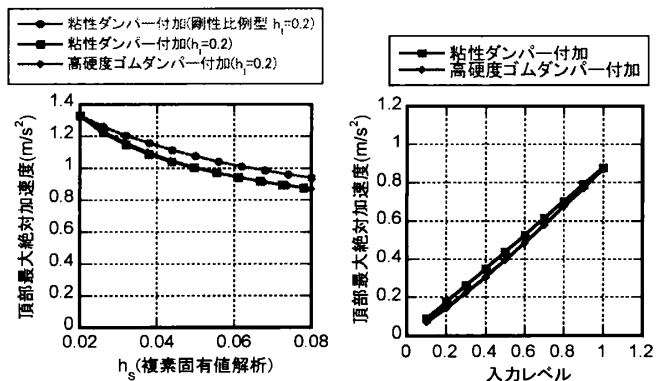


図 6 減衰係数分布と剛性分布

図 7(a) は免震層のダンパー量  $h_1$  を 0.2 に固定し、各モデルの上部構造のダンパー量を変化させたときの頂部最大絶対加速度を表す。減衰係数分布が比例するように粘性ダンパーの量を増やしたモデルのグラフは高硬度ゴムダンパーを付加した場合のグラフとほぼ一致している。また、図 7(b) は設定した 2 つのモデルに対して、入力レベルを徐々に小さくしたときの頂部最大絶対加速度を示した図である。入力レベル 1 が安全限界を表している。入力レベルを小さくしていくと高硬度ゴムダンパーを付加したモデルの方が加速度をより効果的に低減していることがわかる。入力レベルが小さくなることで、高硬度ゴムの変形が抑えられ、(1)-(3)式で示したひずみ依存性により付加減衰・剛性が大きくなったことが両者の差にあらわれたと考えられる。



(a) 上部構造のダンパー量 (b) 入力レベルと頂部最大絶対加速度  
図 7 粘性ダンパーと高硬度ゴムダンパーの比較

## 6. ダンパー付加による頂部加速度応答低減メカニズムの解明

### 6.1 剛性の影響について

ここでは高硬度ゴムダンパーを挿入したとき、付加される剛性が頂部加速度に与える影響について解明する。図 8(a)は上部にダンパーを付加していない状態で、各層の剛性を初期の状態の 3 倍になるまで増加させたときの頂部最大絶対加速度のグラフである。剛性の増加に伴って加速度が小さくなっている。また、図 8(b)はそのときの減衰定数の変化を表す。1 次の減衰定数が増加傾向にあることが免震建物の大きな特徴といえる。図 8(c)は固有周期と加速度応答スペクトルの変化を示した図であり、矢印の終点が剛性を 3 倍にした状態を表している。2 次、3 次の応答スペクトルが大きく増加しているのがわかる。一方、図 8(d)は最上層の刺激関数を表した図である。特に 2 次の刺激関数が大きく減少しており、これが図 8(a)の加速度低減の原因であると考えられる。

### 6.2 免震層の減衰の影響について

6.1 節と同様に免震層の減衰の増加が加速度応答スペクトル(図 9(a))と刺激関数(図 9(b))にどのような影響を与えるかを検討する。図 9(a)より 1, 2 次の加速度応答スペクトルが減少傾向にある。一方、図 9(b)より特に 2 次の刺激関数が増加傾向にある。頂部最大絶対加速度のグラフが極小値をもつのは、初めは加速度応答スペクトルの減少の影響が大きい、免震層の減衰が大きくなるにつれて、刺激関数の増加の影響が大きくなるのが原因であることがわかる。

## 7. 結論

免震構造と制振構造のハイブリッドシステムを提案し、その特性解析を行った。また、粘性ダンパーと高硬度ゴムダンパーをある入力レベルで同じ性能を持つように設計したとき(減衰定数が同程度になり、減衰係数の分布が同じ形になるように設計した場合)、それより低いレベルの地震動に対しては高硬度ゴムダンパーを用いた方が頂部加速度の低減効果が大きいことを明らかにした。さらに、加速度応答スペク

トルと刺激関数を用いて、上部構造の剛性の増加や免震層の減衰の増加による頂部加速度の変化のメカニズムを解明した。

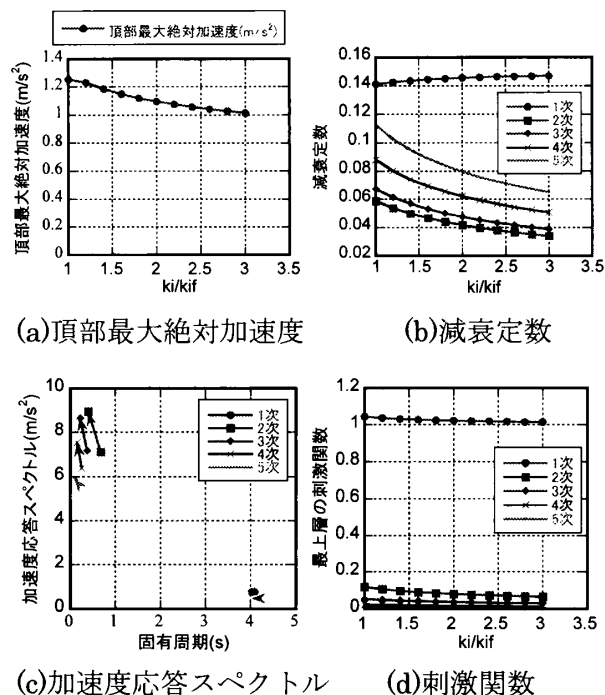


図 8 上部構造の剛性の増加による影響

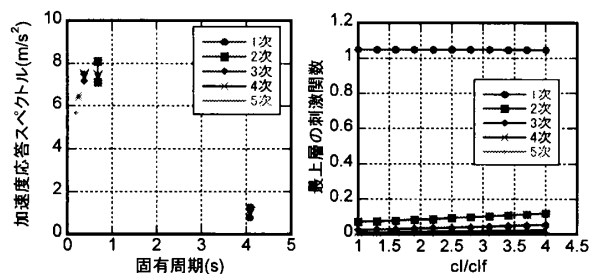


図 9 免震層の減衰の増加による影響

謝辞 西村勝尚氏(大林組)より貴重な情報の提供を受けた。ここに記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) J.M. KELLY, THE ROLE OF DAMPING IN SEISMIC ISOLATION, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 28, 3-20(1999).
- 2) 濱口弘樹他, 人の心理・感覚を考慮した耐震性能評価法の提案, 日本建築学会東日本大震災シンポジウム論文集, 2012.3.2.
- 3) 辻聖晃, 応答スペクトル法, 「空間構造の動的挙動と耐震設計」4.3節, 日本建築学会, 2006.
- 4) 谷 翼他, 高硬度ゴム粘弾性体の力学モデルの構築(その1), 学会構造系論文集, 第 629 号, pp1079-1086, 2000.