

## 地震入力 of 遮断を迫及した免震構造

### Seismic Isolation Systems Improving Isolation Performance from Earthquake Input

丹羽直幹 引田真規子  
高岡栄治<sup>1)</sup> 鈴木芳隆<sup>2)</sup>

#### 要 約

大地震に対する安全性を確保するだけでなく、安心感も提供できる地震入力の遮断を追求した免震システムを提案した。システムは、弾性ゴム、すべり支承または転がり支承、直列ばね付きオイルダンパから構成される。システムの基本特性を把握するため6質点の振動モデルを用いた地震応答解析を実施し、大地震に対して免震層に過大な変形を生ずることなく上部建物の加速度を50cm/s<sup>2</sup>程度に抑制できる各部の設定条件を見出した。次に、提案システムによる実建物を想定した15層モデルを用いた応答解析を実施し、地震時の応答低減効果の確認、及び風に対する居住性の評価を行った。これより、実建物においても大地震時の加速度が50~90cm/s<sup>2</sup>に低減されることを確認した。また、再現期間1年の風に対する居住性も基礎固定時とほぼ同等であることを明らかにした。

#### 目 次

- I. はじめに
- II. 目標性能及びシステム概要
- III. 振動特性の設定
- IV. 地震応答解析
- V. 風荷重に対する評価
- VI. おわりに

#### I. はじめに

我が国で免震構造が実用化されて約30年が経過した。この間、いくつかの大地震に対する優れた応答低減効果が示されており、免震構造に対する信頼性は益々高まってきている<sup>1)</sup>。地震時において免震構造に期待される主な効果としては、建物の安全性向上や建物機能の維持などが挙げられるが、これらはいずれも上部構造の加速度低減によってもたらされる。現状の免震構造では、極めて稀に発生する地震動入力に対して上部構造の加速度は150~200cm/s<sup>2</sup>程度に低減される<sup>2)</sup>。この程度の加速度は、建物の安全性や機能を確保する上では十分と考えられるが、建物使用者の不安感や恐怖感を拭い去るには十分とは言えない。一方、アクティブ制御により建物を絶対空間に静止させる免震構造も実現されている<sup>3)</sup>が、大きなエネルギーを必要とする難点を有し、また、極めてまれに発生する地震に対してはパッシブ機能で対応しているのが現状である。

そこで、本研究では、既往の免震装置を基本構成として、大地震に対して安全性を高めるのみならず安心感をも提供できる、地震入力の遮断を迫及した免震システムを提案する。まず、提案するシス

テムの概要を示すとともに、システムを構成する各種要素が振動性に与える影響について報告する。次に、実建物を想定した建物モデルを用いて、提案システムの応答特性を把握するために実施した地震応答解析結果、及び風応答解析結果を報告する<sup>4),5)</sup>。

#### II. 目標性能及びシステム概要

##### 1. 目標性能

本システムでは、上部構造の加速度を極めてまれに発生する地震動に対して50cm/s<sup>2</sup>程度に抑えることを目標とする。加速度50cm/s<sup>2</sup>は震度4の揺れに相当することから<sup>6)</sup>、大地震時にも安心感を提供できることが期待される。次に、免震層水平変形は通常免震構造と同程度の45cm以下とする。免震装置やエキスパンションジョイントなどには、免震層変位70cm程度まで対応できる技術が確立されているが、ここでは近年取り沙汰されている長周期地震動への対応を考慮し、70cmに対して1.5倍の余裕を持たせてクライテリアを設定した。また、免震部材は可能な限り一般免震構造に用いられている部材と同じものを使用する。

##### 2. システム概要

加速度を大きく低減する入力遮断のためには、構造物の長周期化を図る必要がある。ここでは、固有周期で10秒程度までを範疇とするため、建物の全鉛直荷重を摩擦係数の小さいすべり支承または転がり支承(以下、すべり・転がり支承)により支持し、弾性ばねとして鉛直荷重を支持しない別置き弾性ゴムを併用するシステムを採用した。また、すべり・転がり支承には、直列のばね要素(以降、弾性体)を考慮する。すべり支承には弾性すべり支承として一

1) 建築管理本部 Building Construction Management Division

2) 小堀鐸二研究所 Kobori Research Complex Inc.

**キーワード:** 入力遮断, 免震構造, 安心, すべり支承, オイルダンパ, マックスウエルモデル

**Keywords:** seismic isolation, base isolation system, peace of mind, sliding bearing, oil damper, maxwell model

一般的な製品があるが、転がり支承については今のところ実製品は存在しない。次に、入力を遮断しつつ免震層変位を効率的に抑制するため、減衰装置としてオイルダンパを選定する。オイルダンパは、弾塑性系のダンパのように入力の大きさに依存する特性変化がなく、また大きな減衰定数が比較的容易に実現できる。ただし、ダンパの減衰力が増大すると、上部構造の加速度が大きくなり長周期化の効果が十分に得られないことが懸念されるため、ダンパに弾性ばねを直列に設置し、必要な減衰力を確保しつつ衝撃的な力を緩和する構成を考案して採用する。(Fig.1)

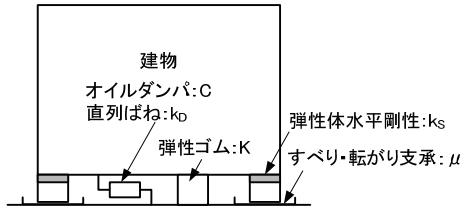


Fig.1 システム概要 (System Outline)

III. 振動特性の設定

1. 検討振動モデル諸元

目標性能を達成するため本システムの振動特性を設定する。ここでは、Fig.2 に示す質点を縮約した 6 質点モデルを用いて地震応答解析による解析的研究を行う。解析モデルは、上部構造の各階を適宜集約した 6 質点系モデルとし、弾性ゴムを線形ばね、すべり・転がり支承を完全弾塑性モデル、直列ばね付きオイルダンパをマックスウェルモデル（ダッシュポットとバネが直列接合）でそれぞれモデル化した。上部構造は、免震層上部の質点（1F）を 490t、2～6 層（2F～6F）の各質点を 980t とし、上部構造の復元力特性は線形とし、基礎固定時 1 次周期に対して 2%の内部粘性減衰を考慮した。解析パラメータとして、弾性ゴム水平剛性 K により決まる免震層の固有周期  $T_m$  を 5, 7, 9 秒の 3 種類、オイルダンパにより決まる減衰定数  $h$  を 10, 20, 30, 40%の 4 種類、基礎固定時の上部構造の 1 次周期  $T$  を 1, 3, 5 秒の 3 種類、すべり・転がり支承の摩擦係数  $\mu$  を 0.005, 0.01 の 2 種類とした。摩擦係数 0.005 は転がり支承を、0.01 はすべり支承を免震部材として想定している。すべり・転がり支承の弾性体水平剛性  $k_s$  は、 $T_m=9$  秒の弾性ゴム水平剛性  $K$  の 100 倍を標準値（周期 0.9s 相当）とし、その 1.0, 0.5, 0.2, 0.1 倍の 4 種類とした。オイルダンパにおけるマックスウェルモデルの設定では、直列ばね剛性  $k_D$ 、及び減衰係数  $C$  を文献

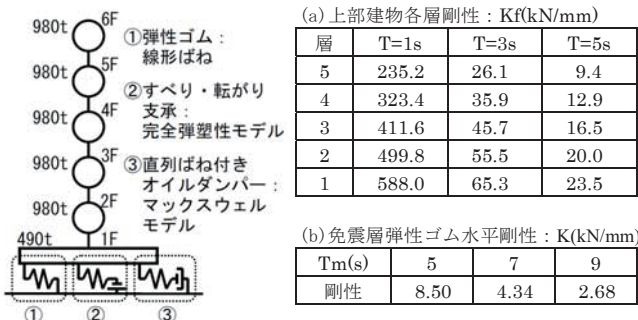


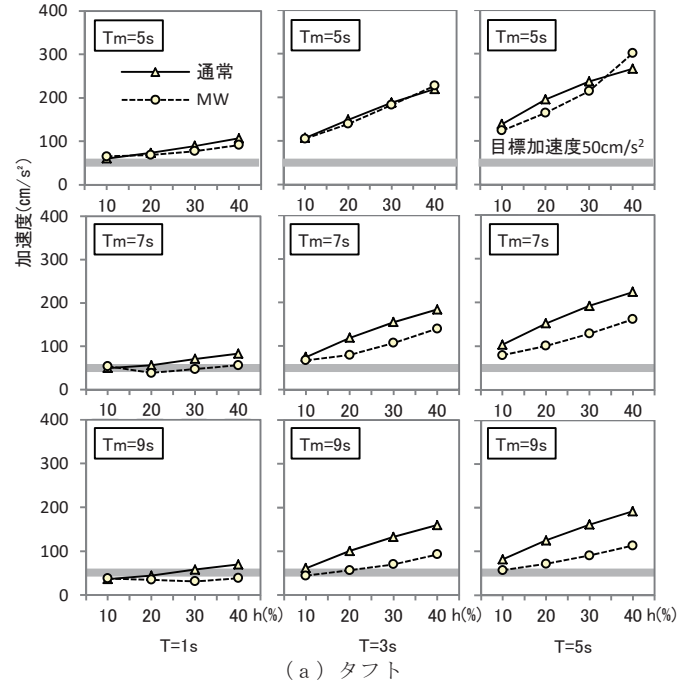
Fig.2 解析モデル, 及び解析パラメータ一覧 (Analytical Model and Parameters)

7)に基づき、所定の減衰定数を確保できる極力小さな値となる剛性比  $k_D/K$  から設定（以降、マックスウェルモデル）し、通常のオイルダンパ単体のケース（以降、通常モデル）も考慮した。解析パラメータの一覧を Fig.2 に示す。入力地震動は、既往波の代表として最大速度を 50cm/s に規準化したタフト EW 波、及び模擬地震動の代表として告示波ランダム位相を選定した。

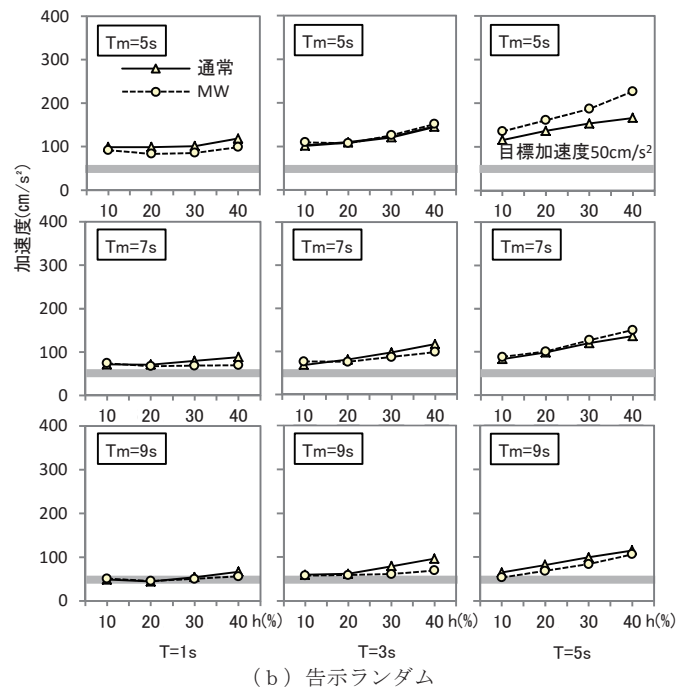
2. 解析結果

(1) オイルダンパモデルの設定

直列バネ付きオイルダンパの特性・効果を確認するため、すべり・転がり支承の抵抗を無視（摩擦係数  $\mu=0$ ）し、免震層の固有周期  $T_m$



(a) タフト



(b) 告示ランダム

Fig.3 免震層上加速度 (Acceleration on the Isolation)

を 5, 7, 9 秒の 3 種類, オイルダンパにより決まる減衰定数  $h$  を 10, 20, 30, 40% の 4 種類, 基礎固定時の上部建物の 1 次周期  $T$  を 1, 3, 5 秒の 3 種類として地震応答解析を行った。Fig.3, 及び Fig.4 に, 免震層上加速度, 及び免震層変位を示す。ここでは, マックスウェルモデルの結果 (凡例: MW) と比較するため, 通常モデルでの結果 (凡例: 通常) も示している。Fig.3 の免震層上加速度は, 免震層周期  $T_m$  が長いほど, 上部建物周期  $T$  が短いほど, 減衰定数  $h$  が小さなほど, 小さい傾向にある。また, これとは逆に Fig.4 に示す免震層変位は, 免震層周期  $T_m$  が短いほど, 上部建物周期  $T$  が長いほど, 減衰定数  $h$  が大きなほど, 小さい傾向にある。

マックスウェルモデルでは, 減衰定数 30%における免震層周期  $T_m=9$  秒の上部建物周期  $T=1, 3$  秒と免震層周期  $T_m=7$  秒の上部建物周期  $T=1$  秒のケースで, 2 地震波とも免震層上加速度  $50\text{cm/s}^2$  程度, 免震層変位  $45\text{cm}$  以下を達成している。これに対し, 通常モデルでは, 特にタフトにおいて, 免震層周期  $T_m$  が長く, 減衰定数  $h$  が大きな状態でマックスウェルモデルと比較して免震層上加速度が大きくなる。これは, 免震層の剛性を低下させて長周期化することで入力遮断の効果が発揮されるが, 減衰定数  $h$  が大きな場合には, 減衰要素からの地震入力が増すことに起因する。告示ランダムよりタフトにおいてその傾向が顕著な理由として, 告示ランダムよりタ

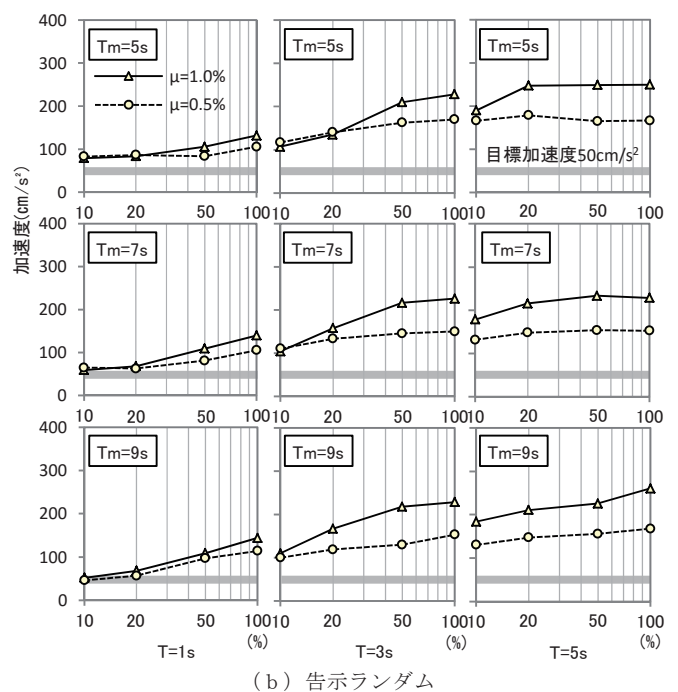
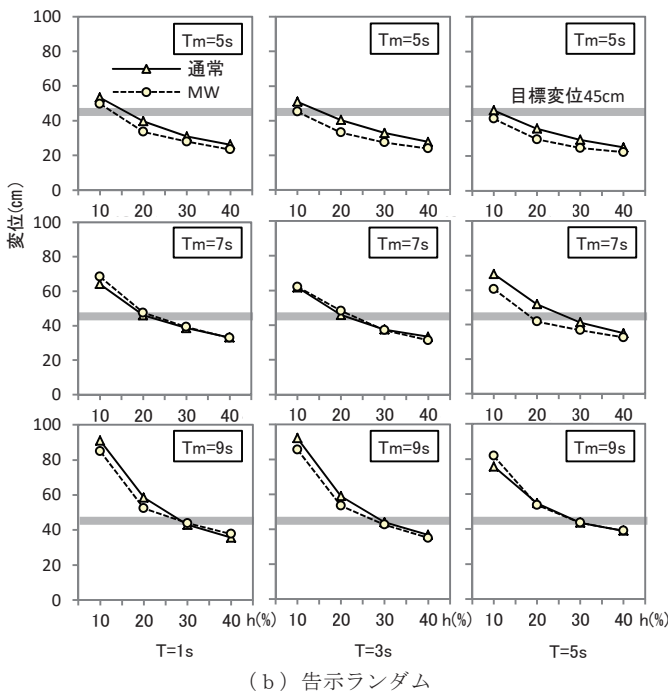
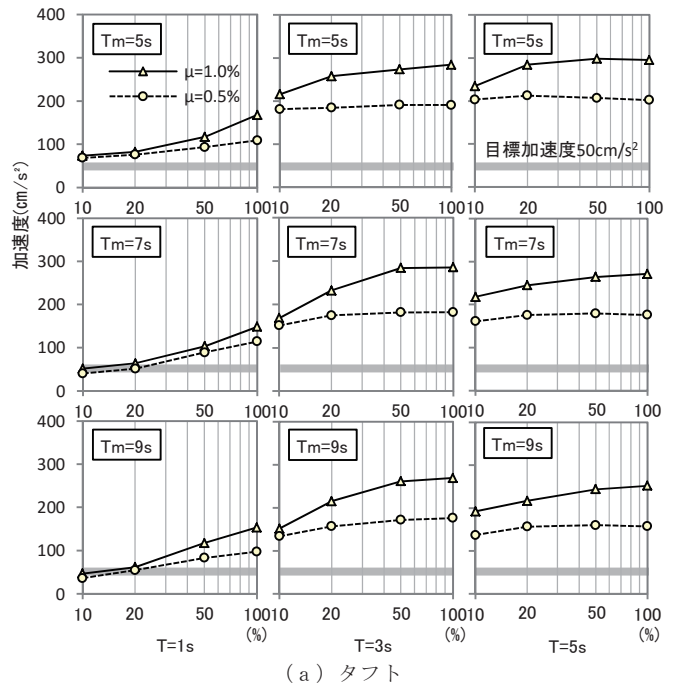
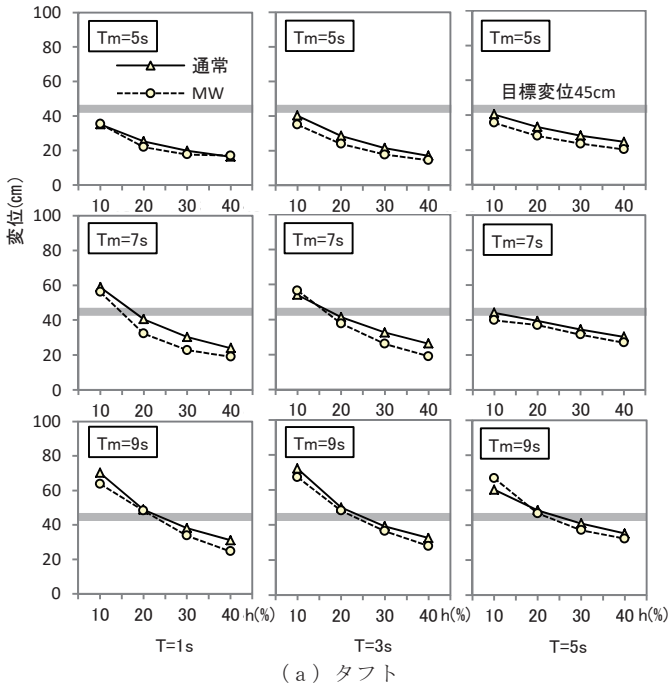


Fig.4 免震層変位

Fig.5 免震層上加速度

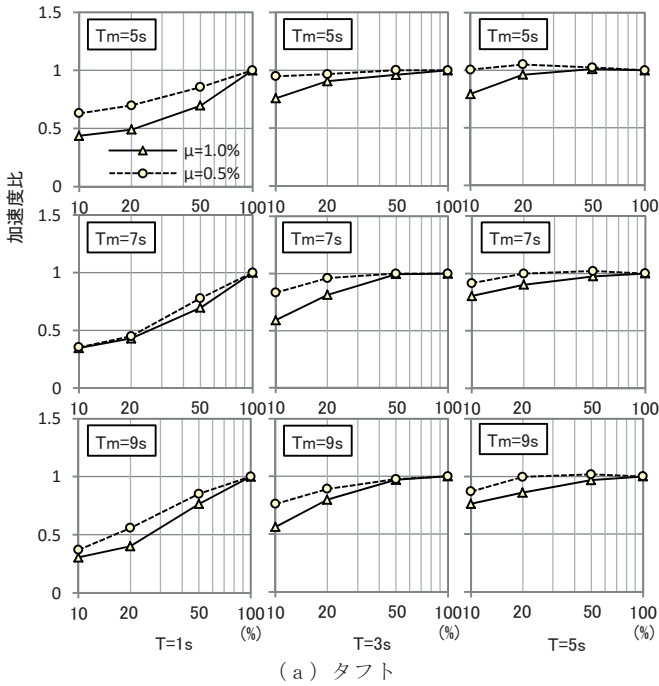
(Displacement of the Isolation)

(Acceleration on the Isolation)

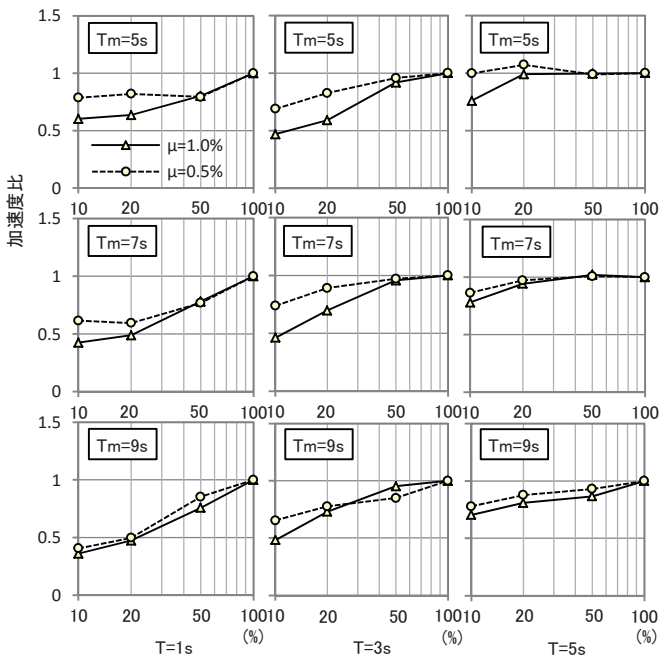
フトの方が、短周期において応答スペクトルが卓越する周期帯が存在し、その影響により過渡応答が大きくなったことが推察される。

(2) すべり・転がり支承剛性の設定

次に、すべり・転がり支承の弾性体水平剛性  $k_s$  の影響を把握するため、弾性体水平剛性  $k_s$  をパラメータとした地震応答解析を行った。 $k_s$  は前述の4種類、免震層の固有周期  $T_m$  を5, 7, 9秒の3種類、オイルダンパにより付加される減衰定数  $h$  をマックスウェルモデルと通常モデル間での応答の差がほとんどない10%、基礎固定時の上部建物の1次周期  $T$  を1, 3, 5秒の3種類とした。ここでは、Fig.5に、横軸に水平剛性  $k_s$  の標準値を100%として対数で取



(a) タフト



(b) 告示ランダム

Fig.6 標準値での応答に対する免震層上加速度比

(Ratio of the Acceleration Value at  $k_s$  vs one at  $k_s=100\%$ )

り、縦軸に各地震波による免震層上加速度を示す。なお、事前に、弾性体水平剛性  $k_s$  による免震層上加速度が、免震層の減衰定数  $h$  にほとんど依存しないことを確認している。これより、上部建物周期  $T=1$  秒で免震層周期  $T_m=7, 9$  秒のケースでは、弾性体水平剛性  $k_s$  を0.1~0.2倍とすることで、免震層上加速度が50cm/s<sup>2</sup>程度とすることができ、摩擦係数の違いによる差も少ない。一方、上部建物周期が3秒以上では100cm/s<sup>2</sup>程度までの低減にとどまっている。Fig.6に水平剛性が標準値100% ( $k_{s1}$ 1.0倍)の時の加速度で除した各水平剛性における加速度の比を示す。総じて、上部建物周期  $T=1$  秒ではすべり支承水平剛性  $k_s$  を小さくすることで免震層上加速度が小さくなり、0.1倍で概ね50%程度まで低減されている。これに対し、上部建物周期  $T$  が長いほどすべり支承水平剛性  $k_s$  の低下に伴う免震層上加速度の減少が緩慢になっている。

IV. 地震応答解析

1. 解析条件

解析対象は15階建ての鉄骨造で、1辺が6.4m×5 スパン=32mの正方形の平面形状を有する高さ60mの基礎免震構造建物である(Fig.7)。前章での検討結果から、十分な入力変断効果が発揮される上部建物周期として、1秒から3秒の間で極力1秒に近い固有周期1.55秒の構造物を選定した。解析モデルはフレームモデルとし、柱梁はビーム要素でモデル化した。各要素の弾塑性モデルとして、

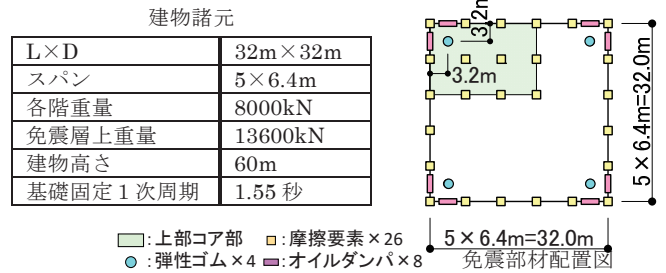


Fig.7 建物モデル諸元

(Specification of the Target Building)

Table 1 提案システムの免震部材諸元 (1台あたり)  
(Isolation's Specification of Proposed System)

弾性ゴムによる固有周期	10秒
弾性ゴム剛性 K	1346 kN/m
弾性ゴム総厚 H	700mm
弾性体剛性 $k_s$ (標準)	20000 kN/m
ダンパー減衰係数 C(減衰30%相当)	21 kN・s/cm
マックスウェルばね	2854 kN/m

Table 2 解析ケース  
(Case of Analyses)

	摩擦係数 $\mu$	弾性体剛性 $k_s$ (kN/m)	マックスウェルばね	
Case1 (LRB)	—	—	—	
Case2	0.01	20000 (1.0倍)	あり	
Case3		2000 (0.1倍)		
Case4	0.005	20000 (1.0倍)		
Case5		2000 (0.1倍)		
Case6		なし		
Case7	—	2000 (0.1倍)		なし

柱は MN 相関を考慮した降伏曲面モデル、梁は分割梁モデルを用いた。減衰は内部粘性型を仮定し、上部建物の 1 次固有振動数に対し 2% の減衰定数を与えた。免震層は弾性ゴム、弾性体と組み合わせたすべり支承または転がり支承（以下、摩擦要素）及び直列ばね付きオイルダンパで構成し、弾性ゴムは線形ばね、摩擦要素は完全弾塑性モデル、直列ばね付きオイルダンパはマックスウェルモデルでモデル化した。Fig.7 に提案システムによる建物諸元、及び免震部材配置図を示す。

Table 1, Table 2 に提案システムの免震部材諸元及び解析ケースを示す。前章で示した性能範囲を満足する振動特性に従い、文献 7) に基づき等価免震周期 8.1 秒、等価減衰定数 30% に設定し、弾性ゴム剛性 K、及びダンパ減衰係数 C を求めた。解析パラメータとその設定値は前章での結果を参照して以下のとおりとする。パラメータは、摩擦要素の摩擦係数  $\mu$  及びこれに直列に組み合わせる弾性体の剛性 ks、オイルダンパの直列ばね（以下、マックスウェルばね）の有無とした。 $\mu$  は 0.01 及び 0.005 の 2 水準、ks は周期 1 秒程度に相当する 20000kN/m を標準値とし、標準値の 1 倍と 0.1 倍の 2 水準とした。なお、 $\mu=0.01$  はすべり支承を、0.005 は転がり支承を想定したが、転がり支承には弾性体が組み合わせられた実製品が存在しないため、弾性体がないケースを追加した。また、提案システムと従来の免震構造の応答を比較するため、鉛プラグ入り積層ゴム（以下、LRB）による免震構造の解析を実施した。LRB によるモデルの免震周期は 4 秒、降伏せん断力係数は 0.023 とし、復元力特性は修正バイリニアモデル<sup>8)</sup>とした。入力地震波は、通常の設計で用いる告示 3 波（ランダム位相、八戸 EW 位相、JMA 神戸 NS 位相）、及び最大速度を 50cm/s に基準化した既往 3 波（エルセントロ NS 波、タフト EW 波、八戸 NS 波）の合計 6 波とした。

2. 解析結果

Fig.8 に各ケースの最大応答値分布を示す。ここでは入力地震動 6 波による応答の最大値を包絡した値を示している。Fig.8(a)より、LRB 免震 (Case1) に対して提案システム (Case2~7) は加速度が小さくなっていることがわかる。特に、 $\mu=0.005$  のケースでは加速度が 50~90cm/s<sup>2</sup> 程度に低減されている。一方、免震層変位は Case2~7 が Case1 よりも大きくなる傾向が見られるが、45cm 以内におさまっている。前章と同様に、マックスウェルばねありのケースにおいて、 $\mu$  及び ks が小さくなるほど低加速度・変形大となる傾向が強いが、摩擦係数  $\mu$  が 0.01 の場合、ks によって上部構造の応答値に差があるのに対し、 $\mu$  が 0.005 の場合は、ks の変動による応答差が小さいことがわかる。Fig.9 に免震層上加速度の時刻歴波形、

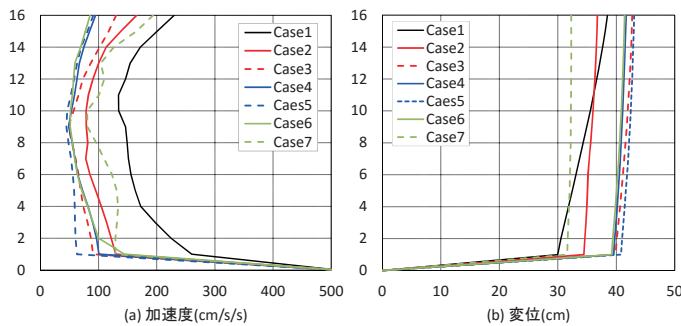


Fig.8 応答最大値分布 (Maximum Response Value)

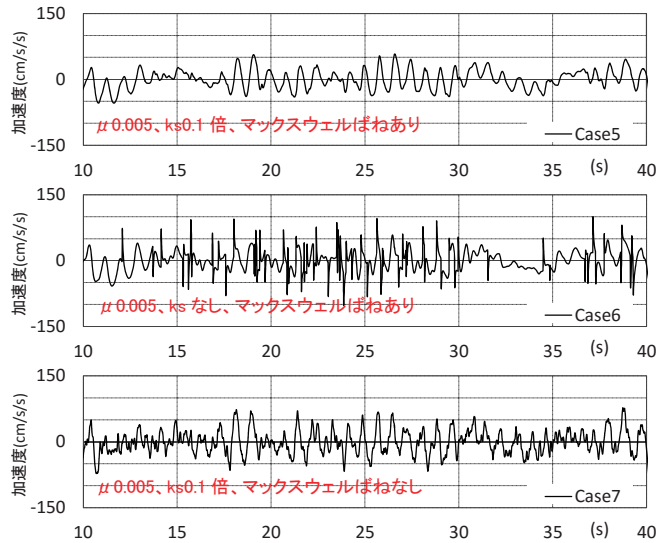


Fig.9 免震層上加速度

(Acceleration on the Isolation)

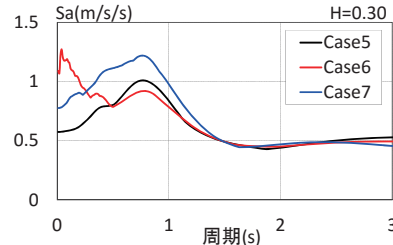


Fig.10 免震層上加速度の応答スペクトル

(Response Spectrum of Acceleration on the Isolation)

Fig.10 にその応答スペクトルを示す。弾性体がない Case6 では、変形の向きが反転する際にパルス的な応答が顕著に現れ、最大加速度が大きくなっている。また、Case5 と 7 の比較より、マックスウェルばねの付加により波形が滑らかになることがわかる。さらに、応答スペクトルより、Case6 では顕著に現れている短周期成分が弾性体の付加により低減され、マックスウェルばねの付加によりピーク周期付近の応答値がさらに小さくなることが確認できる。これより、弾性体によるパルス性応答の緩和効果及びマックスウェルばねによる加速度低減効果が認められる。

以上の解析結果より、 $\mu=0.005$ 、ks0.1 倍、マックスウェルばね (Case5) によって、6 入力地震動に対し最大加速度が 50~90cm/s<sup>2</sup> に低減され、免震層変位も 45cm 以内におさまることが確認された。

V. 風荷重に対する評価

提案した免震システムについて、再現期間 1 年の風<sup>9)</sup> (以下、L0 風) に対する居住性の評価を行った。地震応答解析と同様のモデルで、東京 23 区内に建設されるものと想定し、地表面粗度区分は III に設定した。Table 2 の Case5 の条件に対し風荷重応答解析を実施した。

Fig.11 に L0 風荷重に対する最上階床応答スペクトルを示す。本図より、L0 レベルの風荷重では最上階の床応答が 2.5 秒 (0.4Hz) でピークを示すことがわかる。また、Fig.12 に、Fig.11 より得た最上階床の固有振動数 0.4Hz と風荷重応答解析による最大加速度

2.1cm/s<sup>2</sup>を、風による水平振動に関する性能評価曲線<sup>10</sup>上にプロットした。図には比較として基礎固定時解析結果も記載する。これより提案システムのL0風荷重に対する知覚確率<sup>10</sup>Hは10~30%以内におさまっており、基礎固定時と概ね同等の性能となることを確認した。

風荷重による残留変形について検討した。残留変形は弾性ゴム剛性Kと摩擦係数 $\mu=0.005$ から12.3cmとなる。これを弾性ゴム(厚さ700mm)のせん断ひずみに換算すると、17.6%となり、当該ゴムが鉛直力を負担しないことを考慮すると建物免震性能に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、減衰機構はオイルダンパであるため、風の繰り返しによるクリープの影響も少ない。

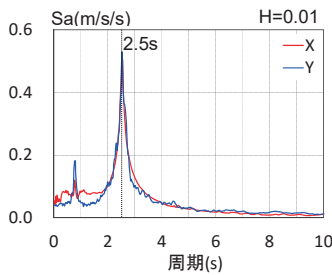


Fig.11 L0風荷重における建物最上階床応答スペクトル (Top Floor Spectrum on L0 Wind Condition)

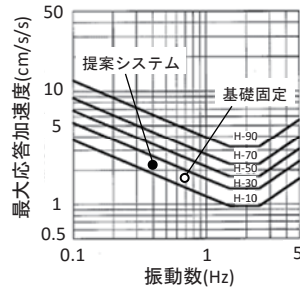


Fig.12 風による水平振動に関する性能評価曲線<sup>6)</sup> (Performance Evaluation about Horizontal Vibration by the Wind Condition)

## VI. おわりに

大地震に対する安全性を確保するだけでなく、安心感も提供できる高性能な免震システムを提案した。システムは、弾性ゴム、すべり支承または転がり支承、直列ばね付きオイルダンパから構成される。システムの基本特性を把握するため6質点の振動モデルを用い、免震層周期・減衰定数、上部建物周期、すべり支承剛性をパラメータとした地震応答解析を実施した。その結果、免震層に過大な変形を生ずることなく上部建物の加速度を50cm/s<sup>2</sup>程度に抑制できる各部の設定条

件を見出した。次に、提案システムによる実建物を想定した15層モデルを設定して地震応答解析を実施し、応答低減効果の確認及び風に対する居住性の評価を行った。これより、実建物においても加速度が50~90cm/s<sup>2</sup>程度に低減されることを確認した。また、再現期間1年の風に対する居住性も基礎固定時とほぼ同等であることが明らかになった。今後は実適用に向けた詳細検討を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 高山峯夫：免震技術の東日本大震災前後の様相，日本建築学会大会，構造部門(振動)，パネルディスカッション資料，2013.8，pp.4-14.
- 2) 大宮幸他：免震建物の調査研究—公表されたデータに基づく免震建物の傾向把握—，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2，2006.9，pp.513-514.
- 3) 吉田 治，蔭山 満，佐野剛志，勝俣英雄，遠藤文明，渡辺哲巳，山中昌之，「絶対制震理論によるアクティブ制震手法の実建物への適用」，日本機械学会論文集(C編)，78巻789号，2012.5，pp.1632-1643.
- 4) 高岡栄治，他：地震入力への遮断を追求した免震構造(その1)提案システムの概要，日本建築学会大会講演梗概集，2016.8.
- 5) 引田真規子，他：地震入力への遮断を追求した免震構造(その2)提案システムの応答特性，日本建築学会大会講演梗概集，2016.8.
- 6) 気象庁ホームページ：<http://www.jma.go.jp/>
- 7) 丹羽直幹：構造物に設置されたオイルダンパの必要減衰力に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第545号，2001.7，pp.43-50.
- 8) 日本免震構造協会編：免震構造入門，オーム社，1995.9，p.79.
- 9) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015.
- 10) 日本建築学会：建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説—日本建築学会環境基準 SIJES-V001-2004，2004.

## Seismic Isolation Systems Improving Performance of Isolation from Earthquake Input

Naoki Niwa, Makiko Hikita, Eiji Takaoka<sup>1)</sup> and Yoshitaka Suzuki<sup>2)</sup>

The authors propose a system of seismic isolation which improves the performance of isolation from earthquake input, not only guaranteeing safety but also providing a sense of security during large earthquakes. The system consists of elastic rubber, a sliding bearing or a cross linear bearing, and an oil damper with a series spring. To determine the basic characteristics of the system, earthquake response analyses using a 6-unit vibration model were performed. The results showed that for large earthquakes no excessive displacement of the base isolation system occurred and showed the setting condition of each element that can limit the acceleration of the building to about 50 cm/s<sup>2</sup>. The authors then performed response analyses using a 15-floor model that was assumed by the system to be an actual building, which enabled them to confirm the earthquake response reduction effect and to estimate the habitability in strong winds. Accordingly, they confirmed that the acceleration for large earthquakes was reduced to 50~90 cm/s<sup>2</sup> in an actual building. They showed that habitability during strong winds for a one-year return interval was about the same as that of a fixed-foundation building.