長周期地震動を受ける超高層免震建物における衝突緩衝材による応答低減効果に関する検討

A STUDY ON EFFECT OF CUSHIONS INSTALLED IN A SEISMICALLY ISOLATED HIGH-RISE STRUCTURE UNDER LONG-PERIOD GROUND MOTIONS

嶺脇重雄 — * 1 濱口弘樹 — * 2
木下貴博 — * 3 西村 章 — * 4
二木秀也 — * 5 竹内貞光 — * 6

Shigeo MINEWAKI — * 1 Hiroki HAMAGUCHI — * 2
Takahiro KINOSHITA — * 3 Akira NISHIMURA — * 4
Shuya FUTATSUGI — * 5 Sadamitsu TAKEUCHI — * 6

キーワード：
超高層免震建物, 衝突緩衝材, 長周期地震動, 過大入力対策

Keywords:
Seismically isolated high-rise structure, Cushion, Long-period ground motion, Provision for excessive input

As a provision for excessive inputs, effect of cushions installed in a seismically isolated high-rise structure was studied. Results were as follows; 1) Though optimum parameters for various types of cushions were different on their restoring characteristics, effects of them were similar. 2) Common appropriate parameters against 3 kinds of inputs considered can be found. 3) Required force of cushions was not more than 5 % of the building weight. 4) Energy absorption of cushions was slightly effective. 5) The effect of cushions could be seen as increasing of 7-8 or 10-odd% of damping factor of seismic isolation layer.

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震以降、建物の耐震性検討において、設計用地震動（L2地震動）を上回る入力（以下、過大入力）に対しても何らかの考慮を行っておく必要性が徐々に認識されつつある。

免震建物では、計画上・機能上の配慮から免震層の水平変位量に物理的な限界（クリアランス限界への到達）を設けることが一般的であるため、同限界到達までの余裕度確保や何らかの方策によってこの余裕度を拡張することが重要な関心事となり、方策の提案や実施も進みつつある^{1), 2), 3)}など。

また、クリアランス限界への到達後には、擁壁等への衝突現象が生じると考えられることから、近年数値検討を中心に検討が多く行われ、擁壁等が剛強な力学特性を持つ場合には、上部構造の加速度、層間変位などの応答が著しく増大する可能性があるとの知見も得られている^{4), 5), 6)}など多数。

超高層免震建物を検討対象とした場合には、上部構造の応答増大に付随して免震支承の鉛直方向応力の変動も増大すると考えられるので、中低層の免震建物に増して、過大入力に対する検討が望まれることとなる。

筆者らは、船舶用防舷材を免震建物の過大入力対策に応用することを考え、復元力特性の調査を進めてきた。文献⁷⁾はその一部である。その成果として、対象を既往製品に限ったとしても、衝突緩衝材として多様な復元力特性を選択できる可能性が認識できた。

本報告では、超高層免震建物を対象として、衝突緩衝材の設置が

過大入力対策となりえるかどうかを、緩衝材の復元力特性タイプを類型化したものをパラメータとして検討する。また、L2地震動を上回る入力を検討対象とするため、設計時のクライテリア（L2クライテリア）を超えた領域に、過大入力に対する許容限界値（以降、LXクライテリア）が設定可能であることを前提とする。

2. 検討条件

2.1 建物モデル

仮定の超高層免震建物を対象とする。実設計例を参考に作成したものであるが、超高層免震建物としての特徴を強調する意図で、大きめのアスペクト比（ $H/B=5.2$ ）とし、免震1次モードにおける連成応答が過小にならないように免震層固定時の上部構造1次周期と免震周期（上部構造固定）との比率を0.6程度とした。免震層の減衰（水平方向）は等価減衰定数で表現し、基準振動数0.143Hz（7秒）に対し、超高層免震建物における下限値と考えられる20%を検討用の基本水準とした。解析用数値モデルは等価せん断モデルとした。各積層ゴム支承の初期面圧（平均軸圧縮応力度）は一樣とし、免震層上端は面外剛な床によって連結されているものとした。上部構造各質点には、水平方向に加え鉛直方向の自由度を定義し、免震層のロッキング挙動が非線形領域に入ることにより回転中心が移動することで各質点に生じる鉛直応答を考慮した。鉛直剛性の高さ方向分布は、水平方向初期剛性の分布形を踏襲した。建物モデル概念図および免震層配置図を図1、2に、各部復元力の説明図を図3に、上部構

¹⁾ ㈱竹中工務店技術研究所振動制御グループ 主任研究員・博士（工学）
〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1

²⁾ ㈱竹中工務店技術研究所振動制御グループ グループ長

³⁾ ㈱竹中工務店技術研究所振動制御グループ

⁴⁾ ㈱竹中工務店九州支店設計部構造1グループ グループ長

⁵⁾ ㈱竹中工務店九州支店設計部構造1グループ

⁶⁾ ㈱ブリヂストンインフラ資材事業企画部

¹⁾ Chief Researcher, Structural Dynamics Group, Research & Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.

²⁾ Group Leader, Structural Dynamics Group, Research & Development Institute, Takenaka Corporation

³⁾ Researcher, Structural Dynamics Group, Research & Development Institute, Takenaka Corporation

⁴⁾ Group Leader, Structural Design Group 1, Building Design Dept., Kyushu Branch Office, Takenaka Corporation

⁵⁾ Structural Design Group 1, Building Design Dept., Kyushu Branch Office, Takenaka Corporation

⁶⁾ Infrastructure Products Business Development Dept., Bridgestone Corporation

図1 建物モデル概念図

図2 免震層配置図

造各層の折点変形角、折点せん断力 (上部建物総重量で除した値) の鉛直分布を図4に示す。図3bの積層ゴム引張特性は、既往の多くの研究^{8), 9), 10)}などに示されたせん断ひずみ200%程度における知見を参考に、本検討のために定めたものである。

2.2 入力地震動

平成27年12月18日付け国土交通省パブリックコメント募集¹¹⁾に例示された長周期地震動 (以下、パブコメ波) のうちOS1、CH1、KA1の3波を検討用入力として用いる。図5に加速度時刻歴および変位応答スペクトルを示す。上記パブコメ波は地域ごとに検討すべき地震動として提示されたものであるが、ここでは特定の立地条件を想定せず、上記3波を検討建物モデルに襲来する可能性のある地震動として扱う。表層地盤における増幅は考慮しない。検討においては、上記3波の1.0倍をL2相当と扱い、過大入力として単純に倍率を乗じる。入力方向は水平1方向とする。

なお、検討建物モデルの周期特性との関係から、上記3波のうちOS1が相対的に大きな応答を与える結果となったので、本報告ではOS1を入力波としたケースを中心に記述する。

2.3 緩衝材タイプおよび設置パラメータ

本検討では、図6に示す5種類の緩衝材タイプを検討対象とする。筆者らが実施した防眩材製品の静的加力試験では、ある変形を超えると荷重の増分が低下するバイリニア型特性をもつもの⁷⁾と、逆に剛性が増大するハードニング型特性を有するものが見られた。

図3 各部復元力特性説明図

図4 上部構造折点変形角、折点せん断力の鉛直分布

図5 検討用入力地震動

図6 検討対象とする緩衝材復元力タイプ

両者とも原点近くにまで復する除荷特性を示した。両者の中間としてリニア型を本検討の対象に加えた。変形性能については400mm程度までは十分可能性がある。エネルギー吸収特性はバイリニア型において比較的顕著にみられたが、本検討では、エネルギー吸収が無いもの（非線形弾性）を基本検討水準とし、エネルギー吸収の有無による差異は別途検討する。

緩衝材の設置パラメータとして、建物との衝突が生じる免震層変位（以下、ギャップ δ_0 ）と最大反力を考える。緩衝材は免震層の変位限界 δ_t まで変形可能であると考え、最大反力は変形 $\delta_t - \delta_0$ において生じる値とする。これを、上部建物の総重量で除したせん断力係数 α_F として表示する。各解析ケースの緩衝材特性は、 α_F と $\delta_t - \delta_0$ が与えられることで図6の各図に従い値が定まるものとする。以上の緩衝材特性は取付部材の変形を含んだ特性であるとする。

2.4 LX クライテリア

実際の設計検討においてはより多くの評価項目を対象とする必要があるが、本報告においては表示の煩雑さを避けるため、上部構造の応答を代表する指標として、層塑性率（図3cの第二折点変形角 γ_{s2} を1とする値）、免震支承に生じる軸力変動を代表する指標として、積層ゴムの平均引張ひずみ（図3bの横軸；以下単に、積層ゴム引張）を選び、免震層変位を加えた三者を評価項目として扱う。本報告で設定したL2クライテリアおよびLXクライテリアを表1に示す。

積層ゴム引張に対するLXクライテリアは、図3bにおいて引張剛性が極度に小さくなるひずみ値（5%）をやや下回る点であり、断面積当たりの平均引張荷重ではほぼ 1MN/m^2 に相当する。また、免震層変位がLXクライテリア（すなわち δ_t ）を超えることは、擁壁等への衝突が生じることを意味するが、本検討では擁壁衝突を模擬せず、LXクライテリアからの超過程度を数値として求めるために、図3aの免震層復元力が継続するものとして応答値を求める。

2.5 応答指数、総合指数

さまざまな検討ケースにおけるLXクライテリアへの到達程度を直感的に捉えるため、「応答指数」による表示を導入する。応答指数は、各評価項目ごとにL2クライテリアに相当する応答値に0、LXクライテリアに相当する応答値に1を割当て、その間の応答値に0-1の線形補間による数値を与えるものである。L2クライテリア未達、LXクライテリア超の応答値についても単純に外挿する。また、後述する、最適な検討ケースを導くための指標として、三つの評価項目の応答指数のうち最大の数値を「総合指数」と定義する。

2.6 検討パラメータ

本報告で述べる検討パラメータの種類と水準を表2に示す。解析ケースの表記方法も併せて示す。

3. 検討結果

3.1 検討結果の表示方法

検討結果の一例として、L緩衝材にOS1×1.5を与えたときの応答値を図7に示す。底面 α_F 軸における「なし」は緩衝材を設けない場合である。

免震層変位は、緩衝材を設けない場合にはLXクライテリアとした800mmを上回り、 α_F が大きいほど、かつ δ_0 が小さいほど値が小さくなること、層塑性率は逆に、 α_F が大きいほど、かつ δ_0 が小さいほど大きくなること、積層ゴム引張は、 $\delta_0=400\sim 600\text{mm}$ 間では層塑

表1 本検討におけるクライテリアの設定

評価項目	L2 クライテリア	LX クライテリア
免震層変位	667mm	800mm (= δ_t)
層塑性率	1	2
積層ゴム引張	0	3.5%

表2 検討パラメータの種類と水準

種類	水準
入力地震動	OS1, CH1, KA1 ($\times 1.0$ 以上の倍率を乗じたもの)
緩衝材タイプ	Bi15, Bi3, L, HD3, HD15 No Bump (緩衝材なし)
エネルギー吸収の有無	なし (基本水準), あり (Bi3E: 図15 参照)
設置パラメータ ギャップ δ_0	400mm, 500mm, 600mm, 700mm* (*: 一部のケース)
緩衝材最大反力 α_F (せん断力係数換算)	0.02, 0.035, 0.05
免震層減衰定数	20% (基本水準) 25%, 30% (No Bump のみ)
設置パラメータの記号表記: δ_0 (mm) の百位と α_F の小数点以下を続けて表記 例: $\delta_0=600\text{mm}$, $\alpha_F=0.05 \rightarrow 6.05$ 解析ケースの表示方法: (入力波) (倍率) (緩衝材タイプ) (設置パラメータ) の順に記号を並べて表示 (不要な項目は省略)。 例: OS1×1.5_Bi15_6.05, CH1_L_6.035, HD3_5.035 など

図7 L緩衝材 OS1×1.5 入力 応答値分布

性率と似た大小関係を示すが、 $\delta_0=700\text{mm}$ では大きな値となること、総合指数には、 $\delta_0=500\sim 600\text{mm}$ を中心として相対的に小さな値となる領域があること、などが把握できる。但し、上記のような傾向を読み取るのに、図7のような表現はやや煩瑣であるので、図8のようなコンター表示¹²⁾を試みた。層塑性率および積層ゴム引張は応答指数を示した。LXクライテリアを上回る領域は網掛けした。上記の傾向が直感的に理解できる。以下、緩衝材の設置パラメータに関する検討結果は、コンター表示による。コンター表示は、離散的な12点（検討条件によっては9点）の応答値により描くものであり、相応の誤差を含むことには注意が必要である。総合指数コンター図中の破線については次節で説明する。

図 8 L 緩衝材 OS1×1.5 入力 コンター図

3.2 緩衝材タイプによる比較

OS1×1.5 入力に対する Bi15、Bi3、HD3、HD15 緩衝材の免震層変位コンター図を図 9 に、総合指数コンター図を図 10 に示す。L 緩衝材については、図 8a、8d を参照されたい。Bi15、Bi3 緩衝材の δ_0 は 400、500、600mm の 3 水準とした。

図 9 および図 8a によれば、いずれの緩衝材タイプでも α_F が大きいほど、かつ δ_0 が小さいほど免震層変位は小さくなる。免震層変位を抑制するという観点では、Bi15 緩衝材が相対的に優れる。

図 10 および図 8d を概観すると、いずれの緩衝材タイプでも、総合指数が 1 を下回る領域は比較的コンター間隔が広い盆地形状となっている。総合指数の最小値はいずれも 0.8 前後であり、緩衝材タイプによる大きな違いは無い。盆地状領域の位置は、パイリニア型→リニア型→ハードニング型の順に δ_0 が小さい方向へ、かつやや α_F が大きな方向へシフトする。ハードニング型緩衝材で小さな総合指数を与える条件を選べば、L2 未満の入力に対しても緩衝材への衝突を考慮しなければならない可能性が高くなる。

図中の破線は、その右側 (α_F が大きい側) では、層塑性率または積層ゴム引張の応答指数が免震層変位の応答指数を上回り、左側 (α_F が小さい側) ではその逆となる境界を求めたもの（以下、モード境界線）である。概念的には総合指数の最小値を与える必要条件と考えられる。

最適な緩衝材設置効果に対するひとつの考え方として、「いずれかの評価項目の応答値が LX クライテリアに達する（総合指数が 1 となる）ときの入力の大きさ（倍率）が最大になること」を採用すると、近似的には、総合指数が 1 前後の値となるようなある大きさの入力に対して、ほぼ最小の総合指数を示す緩衝材設置パラメータの領域にあり、かつ、上記モード境界線に近接するものをほぼ最適な設置条件として選択できると考えられる。

そこで、各緩衝材タイプのそれぞれについて、OS1×1.5 に対する検討ケースのうち上記のほぼ最適な条件として選択した設置パラメータ（図 10 および図 8d 中の○印）について、OS1×1.0 から徐々に倍率を増大させ、総合指数が 1 となるまでの免震層変位および総合

図 9 OS1×1.5 入力 免震層変位コンター図

図 10 OS1×1.5 入力 総合指数コンター図

図 11 入力の増大に伴う免震層変位、総合指数の変化

指数の変化を求めた。結果を図 11 に示す。比較対象として緩衝材を設けない場合（No Bump）についても示した。

各設置パラメータとも No Bump に比べ、免震層変位も総合指数も低減される。総合指数が 1 となる入力の倍率は、No Bump が 1.4 程度であるのに対し、1.55 ないし 1.6 程度に増大する。緩衝材タイプによる差異は小さい。HD3_5.035、HD15_4.05 の両条件では、OS1×1.0 で緩衝材への衝突が生じたが、この時の総合指数は 0 未満であり、

応答値が L2 クライテリアを下回ったことを意味している。

図 12 には入力の増大に伴う各応答指数の変化を Bi15_6.02 と L_6.035 を例として示す。いずれの設置パラメータもほぼ最適な条件として選択されたものであることを反映し、各応答指数は近接した軌跡を描く。総合指数 1 を与える応答評価項目が免震層変位か否かは、それぞれの設置パラメータが図 10 または図 8d におけるモード境界線の左ないし右に位置していることと概念的に対応している。

3.3 入力地震動による差異

L 緩衝材を対象に、OS1×1.2、CH1×2.0、KA1×2.0 を与えたときの総合指数コンター図を図 13 に、設置パラメータ L_6.035 に対し OS1、CH1、KA1 の倍率を増大させたことに伴う総合指数の変化を図 14 に示す。図 13 の 3 図とも、図 8d に示した OS1×1.5 に比べ総合指数が小さいので、相対的に値が小さくコンター間隔の広い、盆地状領域となっていると見なせる部分を白抜きで表示した。

盆地状領域の位置は入力波によって異なり、OS1×1.2 に比べ、CH1×2.0 では α_F がやや小さな方向へ、KA1×2.0 では α_F が大きな方向へシフトしている。しかしながら、それらはなだらかな広がりを持つため、少なくともこの 3 波に対しては、小さめの総合指数を与える共通の緩衝材設置パラメータを見出せると期待できる。また、OS1×1.2 と OS1×1.5 における盆地状領域の位置の変動は小さいことから、検討対象の建物に対する支配的な入力が入地条件等により特定され、かつ、大きさの変動に伴う特性の変動が限定的であるとすれば、適切な緩衝材設置パラメータをある程度精度良く確定できるものと考えられる。

図 14 によれば、CH1、KA1 入力の各倍率に対する総合指数は No Bump に比べ全般に低下しており、OS1 に対するほぼ最適な条件として選択された設置パラメータ L_6.035 は CH1、KA1 入力に対しても効果的であったと言える。ただし、総合指数が 1 となる入力の倍率は、KA1 に対しては No Bump の 2.2 程度から 2.4 程度に増大するものの、CH1 に対しては 2.1 をやや超える程度で No Bump とほとんど差がない結果となった。CH1 入力を重視するのであれば、設置パラメータを、図 13 b からほぼ最適な条件として読み取れる L_5.02 と、L_6.035 との、 α_F - δ_0 平面上における中間的なものとして考えることができる。

3.4 緩衝材のエネルギー吸収による差異

エネルギー吸収を伴う緩衝材タイプ Bi3E として図 15 の特性を設定した。OS1×1.5_Bi3E の総合指数コンター図を図 16 に示す。緩衝材のエネルギー吸収が最大応答値に与える効果については、第 1 回目の衝突によって最大値が決まるような場合には効果がみられないとの報告がある¹³⁾。本検討で実施した OS1×1.5_Bi3_6.035 を例にとると、衝突回数は正側 8 回、負側 5 回であり、正負それぞれの最大変位は正側 2 回目、負側 4 回目に発生した。エネルギー吸収を考慮した OS1×1.5_Bi3_E_6.035 においても、衝突回数、最大値発生のタイミングは同様であった。

図 16 を図 10 b と比較すると、緩衝材のエネルギー吸収により総合指数は全体的に低下しているが、その程度はごく僅かである。

エネルギー吸収による効果が顕著であれば、高減衰材料を用いて性能を高度化することも考えられるが、一般には、高減衰性と変位の復元性とはトレードオフの関係となるので、本検討で対象としたような超高層免震建物に対する長周期地震動の過大入力に対しては、速やかに変位が復元し複数回の衝突に対応可能となるような特

図 12 入力の増大に伴う各応答指数の変化

図 13 入力地震動による総合指数コンター図の差異 (L 緩衝材)

図 14 3 地震動の入力の増大に伴う総合指数の変化

図 15 エネルギー吸収を伴う緩衝材タイプ特性 Bi3E

図 16 OS1×1.5_Bi3E による総合指数

性を重視することが、望ましいと考えられる。

3.5 免震層減衰を増加させた場合との比較

過大入力に対する本質的対策の一つとして免震層減衰を増加させることが考えられるので、緩衝材による効果を、減衰定数の増加分を尺度として、表現することを試みる。

設置パラメータ $L_{6.035}$ 、 $Bi15_{6.05}$ と、緩衝材を設けず (No Bump) 免震層減衰定数 (h_{iso}) を基本水準の 20%に加え、25%、30%とした場合との比較を図 17 に示す。OS1 の倍率を増大させ免震層変位と総合指数の変化を調べた。なお、 $Bi15_{6.05}$ は、 $OS1 \times 1.5$ に対し各応答値が LX クライテリアを下回り、かつ免震層変位が最小となるケースとして掲げた。検討対象の入力を特定し (この場合 $OS1 \times 1.5$)、かつ免震層変位の抑制に重みをおく場合には、最適な緩衝材設置効果の第 2 の考え方と言えるものである。

図 17b より、設置パラメータ $L_{6.035}$ で総合指数が 1 となる入力の倍率は、No Bump $h_{iso}=25\%$ と 30% の中間となり、7~8% の減衰定数増加に相当する。図 17a より、 $OS1 \times 1.5$ における $Bi15_{6.05}$ の免震層変位は No Bump $h_{iso}=30\%$ を下回る。10%以上減衰定数を増加させた効果に相当する。また、両図とも、入力の倍率が増大するほど減衰定数換算で効果が大きくなるという特徴を示している。

なお、 $OS1 \times 1.5$ $Bi15_{6.05}$ では、下層階数層で水平応答加速度が著しく増大する傾向が現れた。最大値は $5.0m/s^2$ 程度であった。本検討では評価対象としなかったが、水平応答加速度を LX クライテリアとして考慮するのであれば、この傾向に留意が必要となる。

4. まとめ

仮想の超高層免震建物モデルを対象として、衝突緩衝材の設置が過大入力対策となりえるかどうかを検討した。検討用入力は国交省長周期地震動パブコメ波のうちの 3 波に倍率を乗じたものとした。

検討においては、L2 クライテリアを超えた領域に、過大入力に対する許容限界値 (LX クライテリア) が設定可能であることを前提とした。免震層変位、上部構造層塑性率、積層ゴム支承の平均引張ひずみ (積層ゴム引張) の三者を代表的な評価項目として選び、L2 クライテリアを上回り LX クライテリアへ到達する程度を 0~1 の数値で表現する応答指数、総合指数を定義して評価に用いた。緩衝材の復元力タイプおよび設置条件 (緩衝材最大荷重 (免震層せん断力係数換算) α_F 、衝突までのギャップ δ_0) を検討パラメータとした。検討結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 緩衝材の設置によって、LX クライテリアへ到達するまでの入力の大きさ (倍率) を増大させること、または、ある入力の大きさに対する総合指数を低下させることは可能である。
- 2) 総合指数を低下させるための最適な設置条件は緩衝材タイプによって異なるが、総合指数の値や、LX クライテリアへ到達する入力の倍率に大きな差は見られない。
- 3) 上記最適な設置条件は本検討の範囲とした $\alpha_F \leq 0.05$ において見いだすことができた。
- 4) 入力波によって、総合指数が相対的に小さな値となる設置パラメータの領域は変動するが、同領域は比較的なだらかな広がりを持っているので、少なくとも、本検討のような長周期地震動を対象とする場合には、適切な共通の設置条件を見出せる可能性がある。また、入力の倍率の変化に伴う同領域の変動は小さい。
- 5) 緩衝材によるエネルギー吸収により最大応答値は低下すると言えるが、その程度はごく僅かである。
- 6) ほぼ最適な設置条件による緩衝材の効果は、免震層の減衰定数 (h_{iso}) を検討基本水準の 20%から 7~8%増加させたことに相当した。また、免震層変位の抑制に重みをおいた設置条件では、10%を上回

図 17 免震層減衰を増加させた場合との比較

る h_{iso} 増加に相当する結果となった。

本検討では LX クライテリアの設定を前提としたが、限界値の意味づけや評価項目間の整合性については更なる知見の蓄積が必要と思われる。ただし、免震構造では通常の耐震構造に比べ余裕を持った L2 クライテリアが設定されることが一般的であるので、その余裕度が過大入力に対する応答代としてどうふるまうかを捉えるためにも、本報告のような検討を行う意義があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 安田, 伊藤, 池田ほか: 免震ダンパー接続型付加減衰機構の開発 (その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 II, pp.431-432, 2013
- 2) 欄木, 長島, 新居ほか: 巨大地震に対応する高性能免震技術の開発 (その 1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 II, pp.509-514, 2015
- 3) 飯野, 浅野, 葛壁ほか: 免震建物におけるオイルダンパー組込み型衝突緩和装置の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 II, pp.553-554, 2016
- 4) 柏, 中安, 中島: 過大地震動下における免震建物の応答と損傷特性, 構造工學論文集 51B, pp. 237-246, 2005
- 5) 中澤, 吉敷, 和田ほか: 安全余裕度の確保を目的とした免震構造物のクリアランスの設定方法, 日本建築学会構造系論文集 677 号, pp.1159-1165, 2012
- 6) 藤井, 鈴木, 前野ほか: 上町断層帯地震に対する設計用地震動ならびに設計法に関する研究 (その 24~25), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 II, pp.519-522, 2016
- 7) 清水, 竹内, 西村ほか: 衝突緩衝材を適用した免震建築物の応答に関する研究 (その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 II, pp.497-498, 2015
- 8) 濱口, 東野, 鈴木ほか: 大口径天然ゴム系積層ゴムの引張特性実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.493-494, 2002
- 9) 高山, 森田, 和田ほか: 免震構造用積層ゴムの引張特性に関する実験研究 (その 1~2), 日本建築学会九州支部研究報告 40 号, pp.233-240, 2001
- 10) 鈴木, 菊地, 藤田ほか: 超高層免震建物に適用する天然ゴム系積層ゴムに関する研究 (その 1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.639-642, 2000
- 11) 「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策案について」に関するご意見募集について, <http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000601.html>, (2016-1-4 参照)
- 12) MathWorks ドキュメンテーション <<https://jp.mathworks.com/help/matlab/ref/contour.html>>, (2016-10-7 参照)
- 13) 二木, 西村, 濱口ほか: 衝突緩衝材を適用した免震建築物の応答に関する研究 (その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 II, pp.557-558, 2016

[2017 年 1 月 12 日原稿受理 2017 年 3 月 22 日採用決定]