

新しい免震構造への取り組み

KAWAGUCHI, Mamoru / TATEMICHII, Ikuo / 立道, 郁生 / 川口, 衛

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Bulletin of the Faculty of Engineering, Hosei University / 法政大学工学部
研究集報

(巻 / Volume)

36

(開始ページ / Start Page)

19

(終了ページ / End Page)

24

(発行年 / Year)

2000-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00003787>

新しい免震構造への取り組み

川口 衛, 立道郁生

A New Approach to Seismic Isolation

Mamoru Kawaguchi, Ikuo Tatemichi

Abstract

Pendulum is one of the basic methods of seismic isolation. In this paper, full-scale tests using a floor isolated by a pendulum system, model tests of paddle isolators, and analytical studies on pendulum isolators applied in space structures were described. Isolating device with long period such as 4 second may be realized in a relatively simple way if pendulum isolators are used. Also clarified was that when pendulum isolators are adopted in space structures, they would reduce vertical response induced by input horizontal load quite efficiently.

§ 1 はじめに

構造物に対する地震被害を回避するための極めて有効な手段として免震構造がある。各国で免震構造に用いられているデバイスの主流は積層ゴムである。ゴムと鉄板が幾層にも重なり合った積層ゴムは、構造物を支持するための剛性と耐力が相当高く、水平方向には振動系の固有周期が長くなるように小さな剛性と限界はあるものの大きな変形能力を有している。

ところが積層ゴムの動特性は、面圧・変位・温度などに依存して変化する。特に固有周期は、建築物の重量に影響されることから、積層ゴムを用いた免震構造物の設計にはかなりの制約がある。さらに、固有周期が1~2秒程度である超高層建物への適用や、長周期成分が卓越した軟弱地盤への建設を考えると、現在普及している免震装置をより長周期化する必要がある。

本報告ではこれらの課題を解決すべく、著者らが実施している新しい免震構造システムへのいくつかの取り組み^{1) 2)}を紹介し、さらに、空間構造への適用の可能性について検討例を示す。

§ 2 振子原理を用いた免震構造に関する取り組み

2.1 振子免震の原理

振子是最も基本的な免震手法であるにもかかわらず、構造物の免震デバイスとしての実施例は極めて少ない³⁾。よく知られているように、吊り材の長さを L とする単振子の固有周期 T は次式で与えられる。ただし g は重力加速度である。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (1)$$

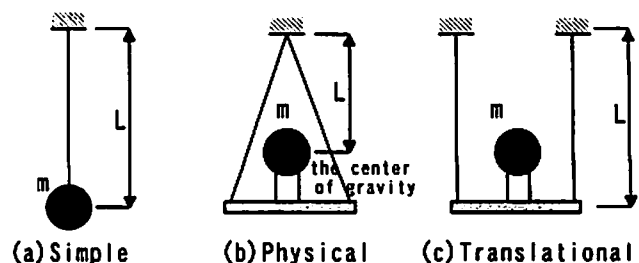


Figure 2.1 Various pendulum systems

振り免震の長所は固有周期に吊り材の長さ L 以外にパラメーターはなく、免震対象物の質量や、吊り材の張力によって固有周期が全く変化しない点である。従って、吊り長さを変化させることによって、容易に所定の周期を得ることができる。この点が、質量と剛性で周期が決まるような積層ゴム免震に対する最大の長所である。

振幅に関して言えば、振幅が大きくなると固有周期は長くなるが、その変化はわずかで実用上は常に(1)式が成り立つと考えてよい。この点も積層ゴムがもつ変形制限に対して大いに有効であろう。

振子の吊り材の選択はかなりの自由度を持っている。例えば鋼材を用いた場合、耐火被覆などの防火性能に関する技術的完成度は高い。また、引張力を受けた場合、吊り材は圧縮力を受け持つことになるが、鋼材の場合、座屈に対する配慮を十分に行えば対処は容易である。このように、免震装置として振り原理を用いることには大きなメリットがあると考えられる。

ところで、構造物として物を支える機能を考慮すると、Fig. 2.1(a)の単振子はいかにも使いにくい。また、(b)実体振子は支える物体の重心位置によって周期が変わる。そこで、単振子と同様、振子の長さだけで周期が決まる(c)並進振子の原理を免震デバイスとして用いることが妥当であろう。

2. 2 床免震への適用

(1) 振り床免震の概念

Fig. 2.2 に示すように建物の梁から吊られた床を考えてみる。地震の際、建物は振動するが、吊り床の応答は極めて小さくなる。地震終了後の吊り床部の振動をなるべく早く静止させるためには、任意の場所の小さなダンパーを設けることで対処できる。

(2) 実大実験による効果の確認

ここでは、美術館の展示室等に吊り床免震を採用することを想定し実大実験を行なった。吊り材の長さを4.5mにすると(1)式から固有周期は4秒を超え、十分な免震効果が期待できる。

試験体をPhoto. 2.1 に示す。吊り材の長さは実長とした。吊り床の大きさは1.5m×2.5mである。

試験体を二次元振動台に載せ加振を行った。Fig. 2.3 に El Centro NS 波で水平に加振した場合の、振動台および吊り床部の水平加速度時刻歴を示す。並進振り子で吊られた床は十分な免震効果が得られることが分かる。

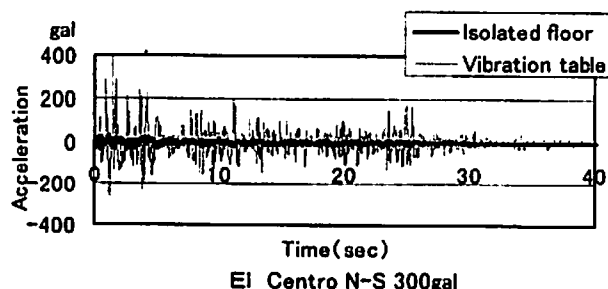


Figure 2.3 Time history diagrams of the floor with pendulum isolator

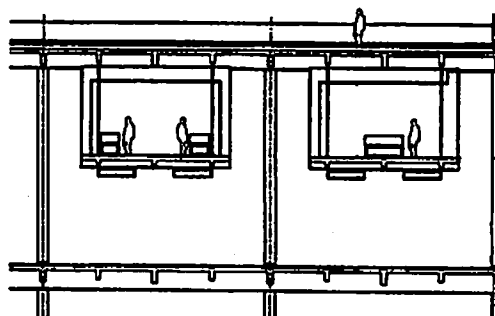
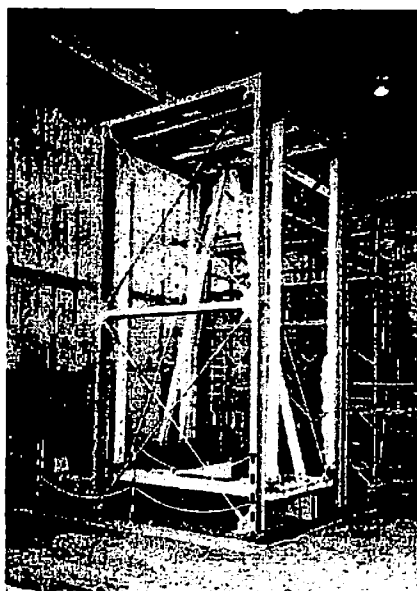


Figure 2.2 Concept of the floor with pendulum isolator



Photograph 2.1 Specimen for tests on the floor with pendulum isolator

Fig. 2.4 は、ホワイトノイズ波で振動台を水平加振した場合の、周波数応答関数を示したものである。入力動に対し免震床は振子周期の4秒付近で大きく共振しているが、入力地震の卓越周期がほぼ2.7秒より短いと、免震床は応答低減効果を発揮することが分かる。周期2秒で約半分、1秒以下では1割以下に入力加速度が低減される。

Fig. 2.4には同時に、「水平+鉛直」方向同時加振に対する増幅の様子を示す。免震床のパフォーマンスは鉛直入力の有無に関わらない。このように上下動と水平動を分離して設計できるのは、積層ゴムと異なり大きなメリットである。なお、鉛直入力の大きさは水平入力の半分とした。

次に、Fig. 2.5はダンパーの減衰を5%と10%と変えた場合について、El Centro NS波300gal水平入力の場合を比較したものである。地震の主成分である短周期部分の免震効果はほとんど変わらないことが分かる。振子免震床の基本理念として、アイソレーションに重点を置く考え方が自然である。ここでの結果は、減衰システムをかなり軽微にできることを示唆している。

2.3 パドル型免震の提案

(1) 原理

パドル型免震は、転動振子 (rocking pendulum) の一種である。転動振子の発想は古くからある。岡隆一により1932年に提案され、実施された「免震基礎」は下端が球面の免震柱であり、上端に球形ヒンジを設けて上部構造と接合するというものであった。この柱のロッキングにより、上部構造はトロコイド (trochoid) 曲線を書いて運動する。

しかし、球面の制作はかなりの技術と工数を要し、また、柱の形状が建築計画上の妨げになることもある。そこで、球面によるロッキング運動を平面座標における X, Y の直交成分に分解し、X, Y のそれぞれの機能を柱の上下端に分担させようというメカニズムを考案した。この形状がカヤックのパドルと似ていることからパドル型免震 (paddle isolator) と命名した。パドル型免震は Fig. 2.6 に示すように、垂直材の上下両端にそれぞれが直行するように曲率を有する「羽」を取り付けた柱である。

この柱はあらゆる水平方向からの力を2方向に分解することができ、免震層上部は水平方向に自由に動くことができる。転がり振子の固有周期は、Fig. 2.7 に示した記号によればパドル型柱の長さ L と

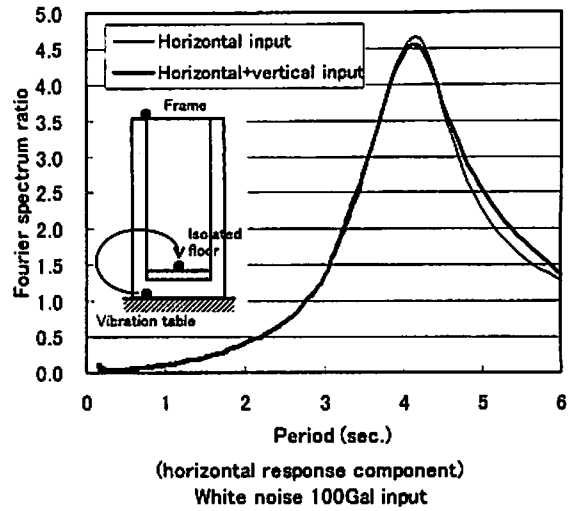


Figure 2.4 Frequency response function for the input white noise

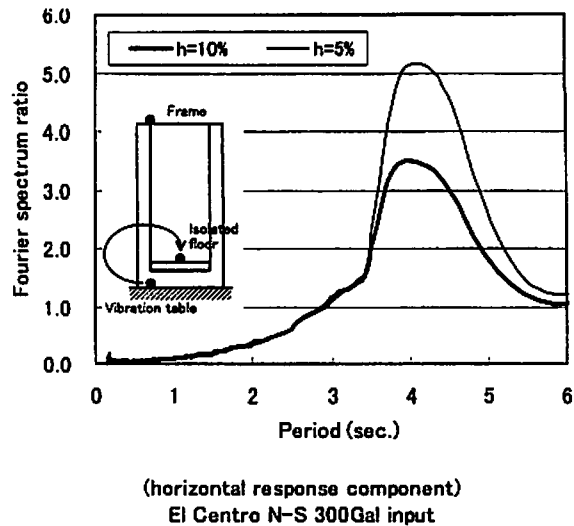


Figure 2.5 Effect of dampers (Comparison between the cases with h of 5% and 10%)

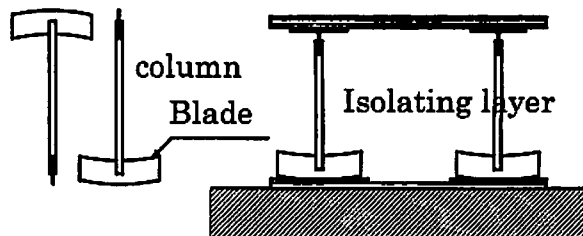


Figure 2.6 Paddle isolator

羽の曲率半径Rで決まり(2)式で表される。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L^3}{g(R-L)}} \quad (2)$$

転がり振子免震の特徴は、並進振子免震と同様、固有周期が支持する構造物の質量に依存しない点である。またパドル型柱の長さは並進振子と異なり自由に設定できるため、免震層を基礎の下に置くことはもちろん、1階部分を免震層とすることもでき、今まで実現が困難とされてきた超長周期免震も可能になる。

(2) 原理実験による効果の確認

パドル型免震の効果を確認するために、アクリル製の試験体 (Photo. 2.2, 床板の大きさは40×40cm) を制作し振動実験を行った。

実験結果によれば、パドル免震の固有周期は、振幅の大きさや免震層上部の質量に関わらずほぼ一定であり、また、免震層が支持する荷重を偏心させた時にも、振れは確認できなかった。

試験体支持部を実地震波で振動させた場合の免震層上部の加速度応答倍率を Fig. 2.8 に示す。図に示すように免震層上部の応答は十分低減されていることが分かる。なお、この効果は入力地震方向に影響されないことが確認されている。

§ 3 空間構造への振子免震の適用

3. 1 検討方針および解析モデル

兵庫県南部地震では体育館、ホールなどの空間構造の多くが地域の避難場所として使われていたことから、空間構造の耐震安全性の確保は以前にも増して重要な問題となっている。空間構造に免震システムを取り入れることの有効性は予想できるものの、現在これに関する研究は多くない^{4) 5)}など。

ドームなどの空間構造物は一般に下部構造と屋根構造からなっている。したがって、地震応答の低減を考えたとき、低減デバイスを考慮する場所は fig. 3.1 に示したような位置が考えられる。

ここでは、空間構造の地震応答を低減しようとする試みの一つとして、免震装置として振り子システムを支持構造と屋根構造の間に設置した場合を想定し検討を行った。検討対象として、直径100mのドームを取り上げた。解析モデル概念図を Fig. 3.2 に示す。地震時の慣性力と

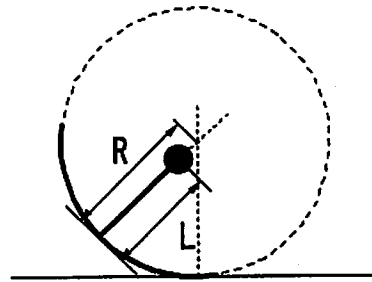
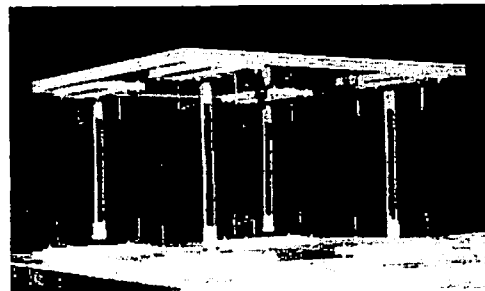


Figure 2.7 Dimension of the column of paddle isolator



Photograph 2.2 Specimen for the tests on paddle isolator

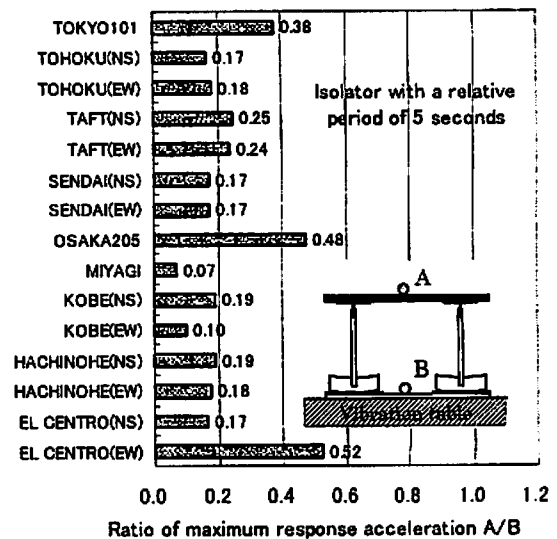


Figure 2.8 Isolation effects of the maximum response acceleration based on actual

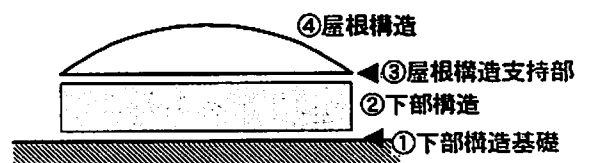


Figure 3.1 Locations of the reduction devices of earthquake response on space structures

して考慮するドーム総質量は1640tonである。

下部構造については一質点系に置換し、その固有周期をパラメータ(0.25秒および0.5秒)とする。また、実際の構造物の下重量比を参考に、下部構造の有効質量として5,000tonを与えた。免震周期としては、1秒、2秒および4秒をパラメータとした。

減衰については、全体構造減衰として2%を与えている。振り子免震の付加ダンパーは本検討ではないものとしている。下部構造の剛性もここでは塑性化を考慮せず線形としている。

3.2 固有値解析結果

下部構造が剛な場合の屋根部の固有モードをFig. 3.3に示す。これに対し免震モデルの1,2次は振り子の並進周期で剛体モードとなっており上下動の励起は極めて小さい(Fig. 3.4)。

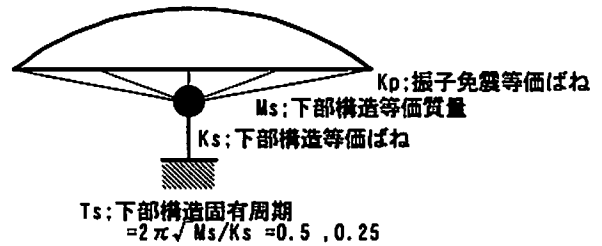


Figure 3.2 Analysis model

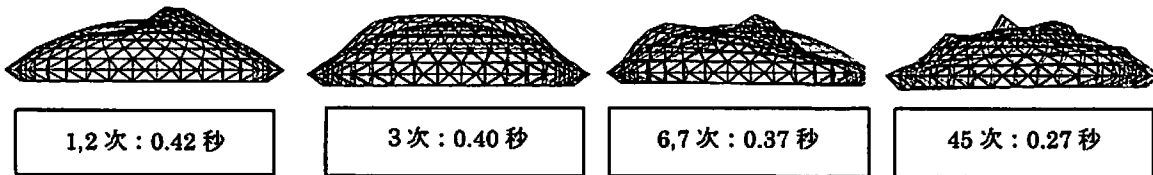


Figure 3.3 Normal modes of without isolator model (the roof model)

3.3 応答解析結果

入力水平方向とし、El Centro NS波 500galとした。500galの地動は我が国では概ね大地震(レベル2)と想定されている。解析手法は、時刻歴モーダルアナリシスとし、採用次数は300次である。減衰は、各次2%一定とした。地震波継続時間は20秒、解析時間刻みは0.005秒である。

Fig. 3.5に屋根面の最大応答加速度分布を示す。非免震の場合、下部構造の剛性(0.25秒および0.50秒)によって、応答加速度の増幅の様子が異なるが、水平、上下動とも大きな応答が発生する。免震支承の周期が長くなるにつれ、屋根面の応答は著しく小さくなっていく。また、応答は一樣で下部構造の剛性にあまり影響を受けない。特に免震ドームでは水平地震力による大きな鉛直応答成分の発生を回避できることが分かった。

これは、振り子免震による並進剛体モードが卓越し鉛直動が励起されないためである。

屋根支持部の下部構造との相対振幅は4秒免震、2秒免震とも最大30cm程度である。大地震時の相対変位30cmは100m規模のドームの場合、支承部でのディテールにより解決可能であろう。

Fig.3.6には下部構造の応答加速度波形を応答スペクトルとして計算して示した。免震屋根の応答スペクトルは免震周期に関わらずほぼ等しいためFig.3.6には4秒免震の場合を代表して示している。さらに入力波形自身の応答スペクトルも同図に示す。また、同図には本解析で得られた屋根部の最大応答加速度、変位を○印で示した。

Fig.3.から、屋根構造に振り子による長周期免震を採用した場合、屋根の応答は下部構造の剛性に関わらず、地表入力波形の応答スペクトルで計算できることが分かる。

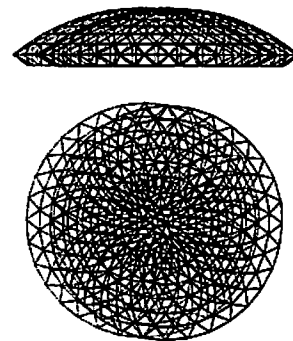
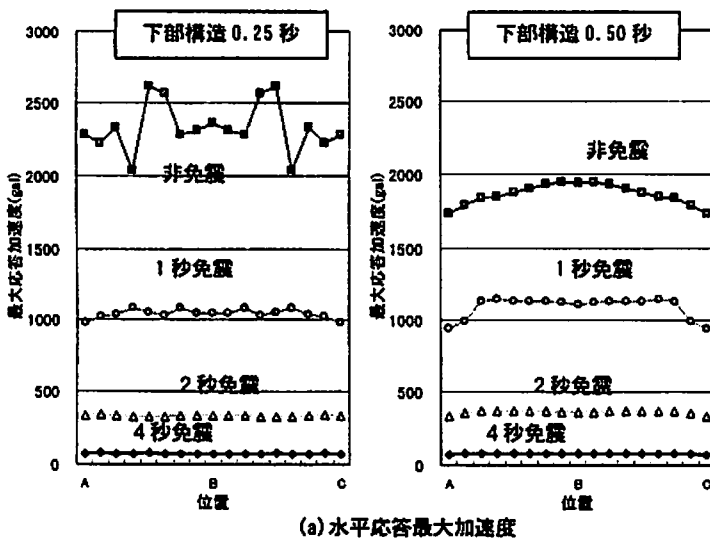
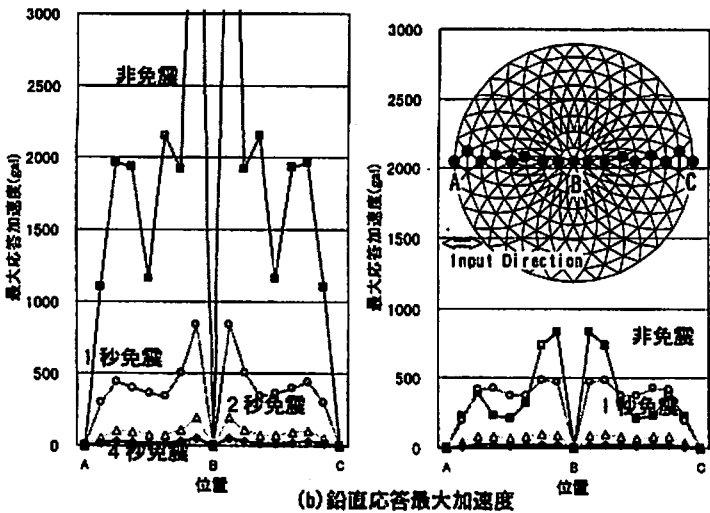


Figure 3.4 Primary mode for the isolator model with a period of 4 sec.



(a) 水平応答最大加速度



(b) 鉛直応答最大加速度

Figure 3.5 Distribution of the maximum response acceleration (El Centro 1940 N-S, 500 gal)

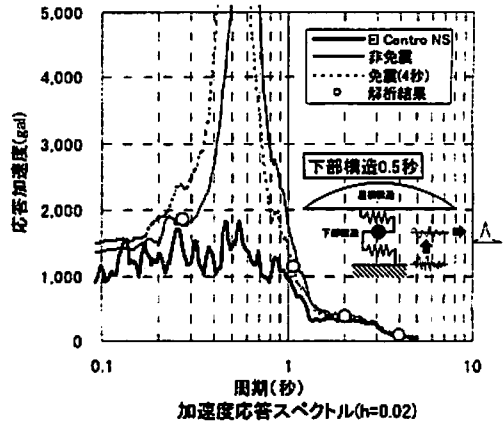


Figure 3.6 Response spectra of supporting structure motions and analysis results for this study

§ 4. おわりに

並進振子免震, パドル型免震を建築構造物に適用することは, 従来の積層ゴム支承の免震機構に比べ多くのメリットを有すると考えられる。特に免震周期の軸力依存性がなく実用範囲では線形のばねに置換することが可能である。すなわち, 不確定な要素を排除した単純な原理に基づいており信頼性が高い。

本検討では振子システムによる免震床の実大実験, パドル型免震の原理模型実験, 空間構造への振子型免震の適用に関する解析的検討について報告した。

参考文献

- 1) 川口 衛, 「空間構造の耐震・免震—経験と前進」, 平成 10 年度京都大学防災研究所共同研究集会 (空間構造の耐震性能・評価をどう進めるか?) 論文集, pp. 241-268, 1998.10
- 2) 川口 衛, 立道郁生; 「新しい免震構造への取り組み—空間構造への適用の可能性—」, 平成 11 年度京都大学防災研究所共同研究集会 (シェル・空間構造の耐震, 耐風, 耐雪, 耐火を考えた性能設計と解析) 論文集, pp. 177-188, 1998.10
- 3) Garza Tamez et al., "Test Results and Implementation of Seismic Base Isolation System Based on Pendular Action," Proceedings, vol. 1, Second International Conference on Motion and Vibration Control, Aug. 30-Sep. 3, 1994, pp. 1-6.
- 4) 加藤史郎, 中澤祥二, 打越瑞昌, 大杉文哉, 向山洋一; 「入力低減型支持機構を有する大スパンドーム構造物の地震応答性状 免震層の降伏せん断力係数の影響について」, 日本建築学会構造系論文集 No. 518, pp. 57, 1999 年 4 月
- 5) 楠達明, 藤松湧, 山田大彦, 「TMD による単層ラチスドームの振動制御」 構造工学論文集, Vol. 41.B, pp17-22, 1995 年 3 月