

機関番号：32601  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20560226  
 研究課題名(和文) 地震による大きな引抜力を受ける塔上構造物用セミアクティブ  
 免震装置の開発  
 研究課題名(英文) Development of Semi-active Isolation Device for Tall Structure  
 研究代表者  
 小林 信之(KOBAYASHI NOBUYUKI)  
 青山学院大学・理工学部機械創造工学科・教授  
 研究者番号：70276020

## 研究成果の概要(和文)：

本研究では、背が高くスレンダーな構造物の地震時安全性向上のためのセミアクティブ免震構造の開発を目的として、【1】大変形と大回転を伴う塔状構造物の高精度かつ低次元の運動方程式の構築、【2】平行リンク式パッシブ免震構造の免震性能の数値シミュレーションと実験による確認、【3】平行リンク式免震構造の復元力特性を地震応答が減じるように変化させるセミアクティブ免震制御器の設計を行った。

## 研究成果の概要(英文)：

This study was aimed at developing a semi-active seismic isolator which performs to reduce the seismic response of a tall and slender structure such as the tower crane and chimney construction. For this purpose, the followings were conducted. (1) Deriving the equation of motion of very flexible beam like structure which undergoes large rotation and large deformation based on the flexible multibody dynamics. (2) Examining the seismic isolation performance of the presented seismic isolator which is composed by the parallel link mechanism and springs by numerical simulations and scaled model experiments. (3) Designing a semi-active controller which switches the stiffness of isolator to reduce the seismic response of a tall and slender structure.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御、構造工学・地震工学、免震装置、塔状構造物、地震応答

## 1. 研究開始当初の背景

タワークレーンや鉄塔に代表される塔状比が大きな構造物(以下、塔状構造物)は重心が高いため、地震慣性力による転倒モーメントが大きくなるので、耐震設計上格段の注意が必要である。このような塔状構造物の地

震時の安全性向上策が強く望まれているが、構造部材等の剛性増加による耐震設計的な安全性向上は重量増加を招くなどの制約から難しい。そこで、免震構造の採用が考えられるが、従来建築物や土木構造物に広く用いられている積層ゴムやすべり支承を用いた

免震構造は転倒モーメントによる大きな引抜力に抵抗できないなどの問題があり、塔状構造物に適した免震構造として実現されていない。

研究代表者らは、塔状構造物用免震構造として平行リンクを用いたパッシブ免震装置を提案したが、本研究では、これをセミアクティブ化して免震性能の一層の向上を目指すための基礎研究を行う。

## 2. 研究の目的

地震時に大きな引抜力が作用する背の高いスレンダーな塔状構造物用のセミアクティブ免震構造を開発し、その機構の成立性と有効性を検討する。具体的には、

(1) 背の高いスレンダーな塔状構造物を柔軟マルチボディダイナミクスとして定式化することにより、低次元かつ精度の高い解析法を確立する。

(2) 平行リンクを用いたパッシブ免震装置の免震性能の実験的検証を行う。

(3) セミアクティブ免震構造を開発する。

(4) 提案するセミアクティブ免震構造の剛性切換えのための制御器を設計する。

(5) その性能を数値シミュレーション等により考察する。

## 3. 研究の方法

(1) 大変形と大回転を伴う塔状構造物の高精度かつ低次元運動方程式の構築

図1に示すような絶対座標系  $\{X, Y, Z\}$  上にある柔軟なコンポーネント  $k$  を構成する、長さ  $l$  なる3次元ベルヌーイ・オイラー梁要素  $j$  が図2のように変形するとき、梁の中立軸上の任意点  $P$  の位置ベクトル  $\mathbf{r}$  は式(1)のように与えられる。

$$\mathbf{r} = \mathbf{S}(x)\mathbf{e} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{e}$  は絶対座標系で表された節点の絶対変位と勾配からなる  $12 \times 1$  の一般化座標ベクトルであり、式(2)で与えられる。

$$\mathbf{e} = \left\{ \mathbf{e}_X^T \quad \mathbf{e}_Y^T \quad \mathbf{e}_Z^T \right\}^T \quad (2)$$

また、 $\mathbf{S}(x)$  は絶対座標系上で定義された3次の形状関数行列であり、式(3)に示すように各座標系に関する節点座標をそれぞれ独立に内挿するように定義する。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_X & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_Y & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{S}_Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

$\rho$ ,  $V$ ,  $E$ ,  $A$ ,  $I$ ,  $\varepsilon_l$  および  $\kappa$  を梁の密度、体積、ヤング率、断面積、断面二次モーメント、梁要素内の軸ひずみおよび曲率とすれば、梁要素の運動エネルギー  $T$  と歪エネルギーは式(4)および(5)で与えられる。

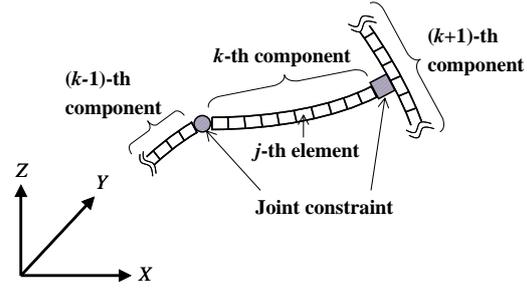


図1 3次元柔軟マルチボディシステム

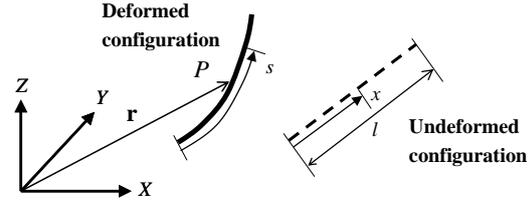


図2 梁の変形

$$T = \frac{1}{2} \int_V \rho \dot{\mathbf{x}}^T \dot{\mathbf{x}} dV = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{e}}^T \int_V \rho \mathbf{S}^T \mathbf{S} dV \dot{\mathbf{e}} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{e}} \quad (4)$$

$$U = U_l + U_t = \frac{1}{2} \int_0^l (EA\varepsilon_l^2 + EI\kappa^2) dx \quad (5)$$

これらから、質量行列  $\mathbf{M}$  は一定値となり、弾性力  $\mathbf{Q}$  は次式のように導かれ、曲げ剛性  $\mathbf{K}_l$  は一定値となる。

$$\mathbf{Q}_k = \mathbf{K}_e \mathbf{e} = \mathbf{K}_l \mathbf{e} + \mathbf{K}_t \mathbf{e} \quad (6)$$

従って、運動方程式を

$$\hat{\mathbf{M}} \ddot{\mathbf{e}} + \hat{\mathbf{K}}_l \dot{\mathbf{e}} = \hat{\mathbf{Q}}_e - \hat{\mathbf{K}}_t \dot{\mathbf{e}} \equiv \hat{\mathbf{Q}} \quad (7)$$

と置き、Craig-Bampton法を適用すれば、大変形と大回転を考慮したモード合成法表記の運動方程式(8)を導出できる。

$$\bar{\mathbf{M}} \ddot{\mathbf{q}} + \bar{\mathbf{K}}_l \mathbf{q} = \bar{\mathbf{Q}} \quad (8)$$

ここで、

$$\bar{\mathbf{M}} \equiv \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{M}}_{bb} & \bar{\mathbf{M}}_{b\xi} \\ \text{sym.} & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{K}}_l \equiv \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{K}}_{lbb} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\Omega}_n^2 \end{bmatrix}, \mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_b \\ \boldsymbol{\xi} \end{bmatrix} \quad (9)$$

であり、考慮すべきノーマルモードの固有値  $\boldsymbol{\Omega}_n^2$  の数まで自由度を縮約できる。

式(8)で提案した定式化の妥当性を検証するために行った計算例の内、一端に質点が付いた梁が重力加速度  $g=9.81 \text{ m/s}^2$  による重力を受けながら、他端において半径  $a=0.15 \text{ m}$  の円軌道上で絶対座標系の  $Z$  軸周りに回転駆動を受ける際の動的挙動(図3)を示す。

解析対象の柔軟梁は、初期長さ  $1.0 \text{ m}$ 、断面積  $4.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 、断面二次モーメント  $1.3 \times 10^{-8} \text{ m}^4$ 、密度  $1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、ヤング率  $1.0 \text{ MPa}$  であり、集中質量は  $1.3 \text{ kg}$  である。重力による静止釣

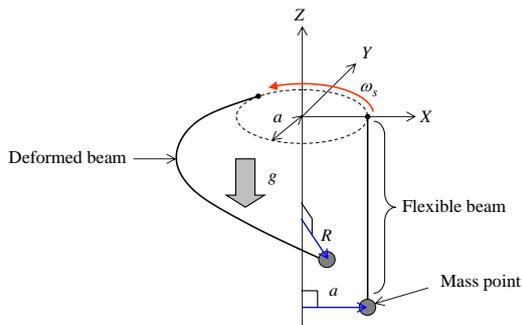


図3 柔軟梁の回転運動

合状態から、梁の上端をZ軸周りに1sまでは時間に比例して角速度が増加、1s後は一定の角速度40.0 rad/sになるように駆動した。

図4に解析結果のうち、柔軟梁の変形の時間変化を示す。角速度の増加につれて柔軟梁が大きく撓みながら回転し、それにつれて集中質量が上昇して行くことがシミュレーションで来ている。従来の方法の1/20程度の計算時間でほぼ同程度の精度の結果が得られている。このことから、十分な低次元化が図れることが分かった。

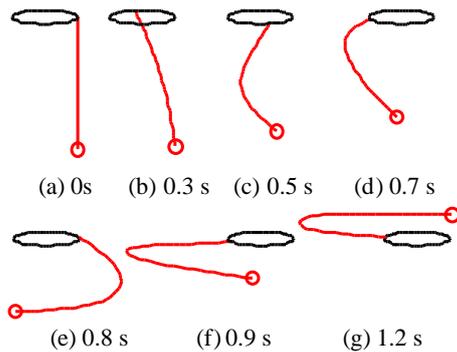


図4 柔軟梁の回転運動

(2) 平行リンク型パッシブ免震装置の免震性能の実験的検証

図5に示すような建築物からステーにより支持されたタワークレーンを塔状構造物の代表例として考える。タワークレーンのマストを建物へ支持するステーの直ぐ上のマストに図6に示す平行リンク型免震装置を取り付けることを考える。

本免震装置は垂直軸方向に平行な2つの板状受台に回転関節を有する6本のリンクを接続して平行リンクを構成する。このときリンクを6本にしているため運動学的に垂直軸まわりの回転は拘束されるので、水平方向の相対変位に比例する復元力と相対速度に比例する減衰力をばねとダンパーにより与え、固有周期と減衰比を適切に調節できる。

また、建築物からの地震入力に対しても免震するために、建築物から支持されるステーを図7に示すような回転リンク、ばねとダンパーからなる免震ステーとすることを提案

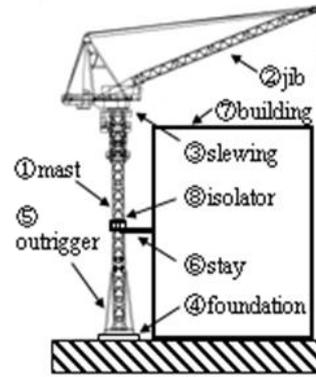


図5 塔状構造物と免震装置

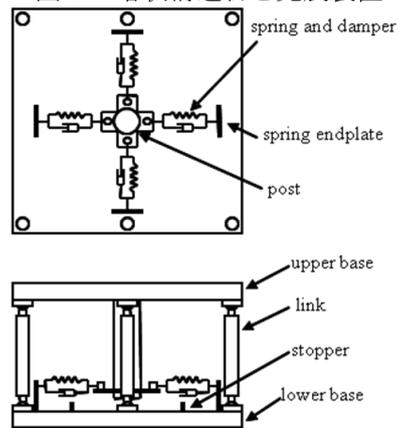


図6 平行リンク型免震装置

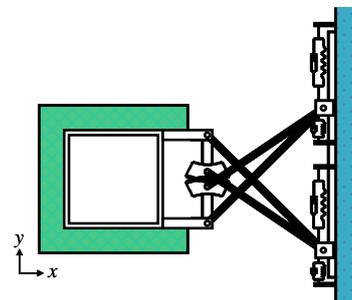


図7 免震ステー

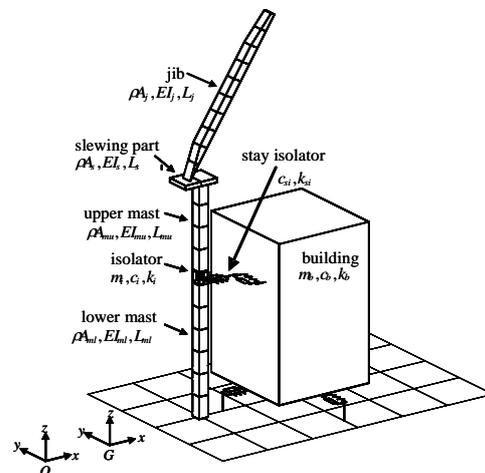


図8 解析モデル

した。

平行リンク型免震装置と免震ステーを組み合わせた免震機構の免震性能を調べるために、図 8 に示すような解析モデルから運動方程式を導出しシミュレーションプログラムを開発した。さらに高さ 1.5m の実験用小型模型クレーンを作成し、解析と振動台加振実験を行い考察した。

実験により得られた結果の内、地震入力に対するタワークレーン旋回部の応答加速度の伝達関数を図 9 に示す。建築物固有振動数が 17.5Hz の場合を上図、2.1Hz の場合を下図に示す。なおタワークレーン単体の固有振動数は 8.5Hz である。

これらの図から、非免震時には建物主体の振動数 19.5Hz と 4.5Hz、およびマスト主体の振動数 12.5Hz と 15.2Hz で応答が大きくなっていることがわかる。マストを免震してステーを免震しない場合には平行リンク型免震装置主体の振動数 2.5Hz のピークがかなり小さく抑えられているが、建物主体の振動数 19.5Hz と 5.0Hz、マスト主体の振動数 16.0Hz と 15.2Hz で応答が大きくなっている。マストとステーを免震した場合には、平行リンク型免震装置主体の振動数 2.5Hz のピーク以外は大幅に応答が抑えられていることがわかる。

また、図 10 に建築物の固有振動数が 2.1Hz の場合における神戸ポートアイランド NS 波（兵庫県南部地震 1995）による非免震時と免震時の時刻歴応答の比較を示す。上図がタワ

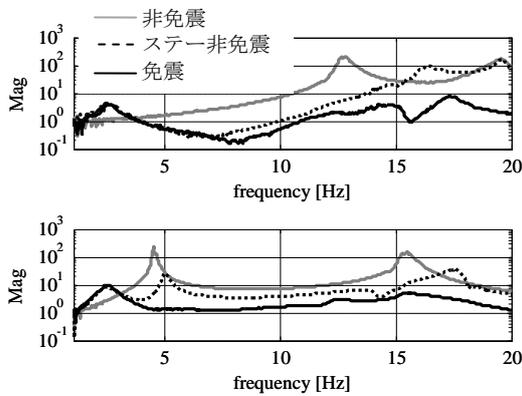


図 9 伝達関数

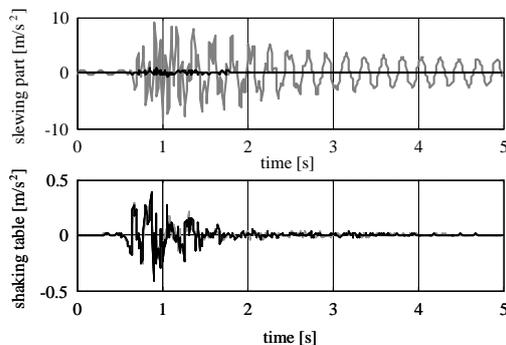


図 10 旋回部の地震応答

ークレーン旋回部の応答加速度，下図が地表水平方向地震加速度の時刻歴波形である。図中黒色実線で示した免震時の最大応答加速度が図中灰色実線で示した非免震時のその 1/10 程度に低減されていることがわかる。また、建築物の固有振動数が 17.5Hz の場合も免震することによってタワークレーン旋回部の応答加速度が大幅に低減していることを確認した。

なお、数値シミュレーション結果については紙幅の関係から省略したが、実験結果と良好な一致が示されており、構築した運動方程式に基づく数値シミュレーション結果の妥当性は確認されている。これらの実験的および解析の結果から、平行リンク型免震装置と免震ステーを組み合わせたパッシブ免震機構が良好な免震性能を有することが分かった。

### (3) セミアクティブ免震構造と剛性切換えのための制御系設計

(2) で示したようにパッシブ免震機構は良好な免震性能を有するが、免震機構の固有振動数の存在する低振動数領域での応答を一層低減する必要がある。そのために図 11 に示すような平行リンク型免震装置の剛性を切換える可変剛性型セミアクティブ免震機構を提案する。

平行リンク型免震装置の復元力を生じさせるばねにブレーキを取り付けることにより、クレーンマストの応答に応じて剛性を切換えを行うが、その剛性切換え制御則として以下に示す 2 通りを考えた。第一は評価関数として全エネルギーを用いる方法（以下、制御則 A）、第二は評価関数としてリヤプノフ関数を用いる方法（以下、制御則 B）である。

制御則の基本的特性を調べるために行った小型模型クレーンに対するインパルスの結果を図 12 および 13 に示す。

上図はタワークレーン旋回部の応答加速度，下図は同位置の応答変位である。これらの図から、制御則 A、B 共にパッシブ免震より最大応答変位が、また非免震時より最大加

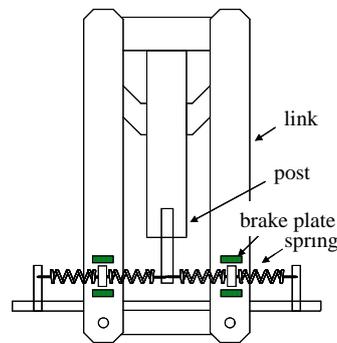


図 11 セミアクティブ用剛性切換機構

速度が抑制されていることが分かる。しかしながら、制御則 A, B 共に剛性を増加する側に切替えるときに、パッシブ免震より最大加速度が大きくなっていることが分かる。これは、応答加速度の時刻歴波形に示されるように、剛性切替時に生じる急速な加速度変化に起因しており、特に制御則 B においてより大きく生じている。今後剛性切替を緩やかに行うなど、剛性切替に伴い生じる急速な加速度変化を低減する制御則の検討が課題である。一方で、可変剛性型セミアクティブ免震機構を用いることにより、整定時間は短くなり見かけ上の減衰が大きくなっているため、このような免震機構は有効であると考えられる。

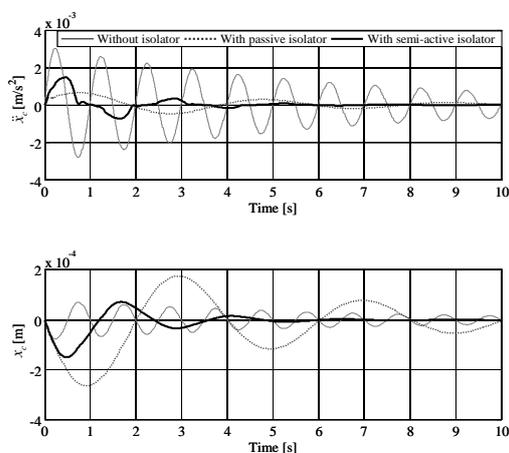


図 1 2 剛性切替アルゴリズム A

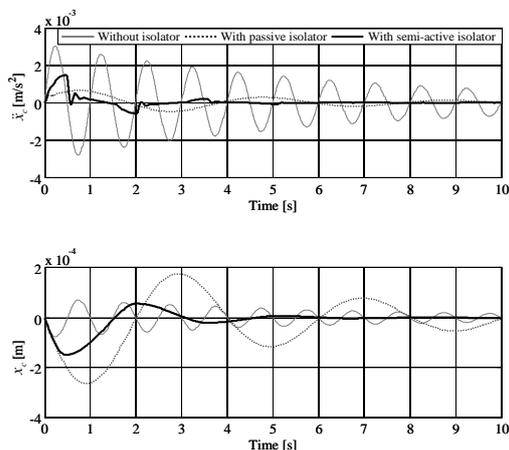


図 1 3 剛性切替アルゴリズム B

#### 4. 研究成果

(1) 極めて柔軟で大回転と大変形を伴いながら複雑な動的挙動を行う 3 次元梁構造の動的応答解析を高精度かつ高速で実行可能な柔軟マルチボディダイナミクスに基づく定式化手法を開発した。従来提案されてきた

柔軟マルチボディダイナミクスに基づく定式化においては計算精度を向上しようとする一般化座標の数が大きくなるため計算性が悪くなる問題点があったが、提案手法では非線形運動方程式の線形部分を利用した一般化座標の縮退方法を開発することにより計算性の大幅な向上を実現した。その有効性を数値シミュレーションにより確認し、塔状構造物の 3 次元挙動の非線形性を考慮した動的応答解析を可能にした。

(2) クレーンと建物との間を繋ぐステアの免震機構を開発し、マストを免震する平行リンク型免震構造と協調的にステア支持型クレーンを免震するパッシブ免震構造を提案した。この免震構造の運動方程式から数値シミュレーションプログラムを作成し、免震性能を調べた。さらに建物と免震構造を有する高さ 1.5m 程度の実験用ステア支持型クレーン模型の振動台加振実験を行った。その結果、開発したステアの免震機構と平行リンク型免震構造が良好な免震性能を有することを分かった。

(3) パッシブ免震構造の免震性能をさらに向上するために、平行リンク型免震構造の復元力を担うばね機構の剛性を切り換えるセミアクティブ免震を提案し、2つの評価関数に基づく制御器の設計を行った。その応答の抑制効果を数値シミュレーションにより検討した。その結果、設計した制御器は一定の振動抑制効果があるものの、ばね機構の剛性を高い側に切り換える時に加速度が大きくなる場合があり制御器の設計法について更に検討・改良を行う必要がある。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 和後翼, 小林信之, 菅原佳城, モード合成法による ANCF 3 次元梁の自由度の低次元化, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, 77-776, 2011, pp. 1321-1330
- ② 和後翼, 小林信之, 菅原佳城, モード合成法を用いた ANCF 2 次元梁のシステム行列の縮小, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, 76-767, 2010, pp. 1708-1715
- ③ Kobayashi, N., Wago, T., Sugawara, Y., Reduction of System Matrices of Planar Beam in ANCF by Component Mode Synthesis Method, Multibody System Dynamics, in press, 査読有

〔学会発表〕（計2件）

① Kobayashi, N., Kitada, K., Sugawara, Y.,  
Parametric Instability in Metallic Bellows  
subjected to Seismic Excitation, International  
Design Engineering Technical Conference,  
American Society of Mechanical  
Engineers, 2010.8.18, Montreal, Canada

② 小林信之, 今井友也, 五十嵐俊介, 菅原佳城,  
タワークレーン用免震ステーの開発,  
日本機械学会, 機械力学・計測制御部門講  
演会, 2010.9.14, 京都

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 信之 (KOBAYASHI NOBUYUKI)  
青山学院大学・理工学部・教授  
研究者番号：70276020

### (2) 研究分担者

菅原 佳城 (SUGAWARA YOSHIKI)  
青山学院大学・理工学部・助教  
研究者番号：10422320