タワークレーン用平行リンク型免震装置の開発*

小林 信之^{*1}, 袴田 和広^{*2}

Parallel Link Type Seismic Isolator for Tower Crane

Nobuyuki KOBAYASHI^{*3} and Kazuhiro HAKAMADA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Aoyama Gakuin University,
5-10-1 Fuchinobe, Sagami-hara-shi, Kanagawa, 229-8558 Japan

A new type seismic isolator system for the tower crane is presented. The isolator system is composed of two components. One is an isolator for the mast of the crane using a cubic four bar links, springs, dampers and stoppers. The other is the elastic stay, which connects a stay supported type tower crane to the structure under construction. The natural period and the damping coefficient of the tower crane can be turned by adjusting spring constant, damping coefficient of dampers and the stiffness of stays. Numerical simulations for a self-stand tower crane and a stay supported type tower crane with the presented seismic isolator system and these without seismic isolator are carried out. The shaking table exciting test for a self-stand tower crane model with the presented seismic isolator is also carried out. As the results, the simulation results and the experimental results demonstrate that the presented isolator system is effective to decrease seismic inertia force.

Key Words: Tower Crane, Seismic Isolation, Seismic Response, Seismic Motion, Base Shear

1. 結 言

タワークレーンは建築物等の建設に広く用いられているが、1995年の阪神・淡路大震災^(1,2)や2002年の台湾東部地震⁽³⁾において破損、倒壊、落下するなどの地震被害が報告されている。従って、市街地等で作業するタワークレーンの地震時安全性を向上することはきわめて重要である⁽⁴⁾。

図1に示すように、タワークレーンには自立する構造(以下、自立型クレーン)と建築物からステーにより水平支持される構造(以下、ステー支持型クレーン)がある。タワークレーンは細いマスト①の上に質量の大きな旋回部③と起伏するジブ②が設置されている構造であるため、柔軟な上に重心が高く、かつ、ジブの起伏角度により振動特性が変化する構造物である。

自立型クレーンは、地震時にその基礎部④が震動することにより励振されるが、ステー支持型クレーンは、その基礎部からのみならず、ステー⑥を介して建築物⑦からも励振されるので、特に最上段ステーより上部の応答が大きくなる。また、タワークレーンの慣性力

が反力として建築物に作用するので、建築物の補剛が必要になる場合も生じる。

以上のことから、タワークレーンの基本構造を大きく変えることなしに、地震時の安全性を向上するためには、免震化または制振化が望まれる。タワークレーンの免震化を行う場合、転倒モーメントによる引抜力が大きいこと、および垂直軸周りのねじりモーメントがジブの姿勢により生じることを考慮する必要がある⁽⁵⁾。

そこで、本研究では、コンパクトでシンプルな構造を特徴とする平行リンク型免震装置と軸方向のみに柔

(a) Self-stand type crane (b) Stay supported type crane

Fig.1 Typical tower crane

* 原稿受付 2007年4月12日。

^{*1} 正員、フェロー、青山学院大学理工学部(〒229-8558 相模原市瀬野辺5-10-1)。

^{*2} 青山学院大学理工学研究科。

E-mail: kobanobu@me.aoyama.ac.jp

性を持つ弾性スーから構成される免震機構を提案する。そしてタワークレーンの振動モードを考慮した免震機構の設置位置を提案し、その有効性の基本的な検討を数値シミュレーションおよび加振実験によって行った結果を報告する。

2. 免震機構

本研究で提案するタワークレーンの免震機構は、マストの免震装置および免震スーの2つから成る。

自立型クレーンは、図1(a)に示したようにマスト基礎部に免震装置⑧を設置することにより固有周期を長周期化することができ、地震時に大きく振動するマストとジブの慣性力を低減する。一方、スー支持型クレーンは、スーを介しての構造物からの励振も低減する必要があるので、図1(b)に示したように免震スー⑥と最上段スー直上に免震装置⑧を設置することにより、マスト上部とジブの慣性力を低減する。

以下に、提案する平行リンク型免震装置と免震スーの構造と動作原理を示す。

2・1 平行リンク型免震装置 図2に、本研究で提案する平行リンク型免震装置の構造を示す。高さ方向に平行な2つの板状受台⑩の4隅および中間点を、両端に自在に回転可能な関節を持つ長さ l_i なる6本のリンク⑪により、それぞれ対応する点に接続して立体的な平行リンクを構成する。一方の板状受台中心部に棒状支柱⑫を垂直に設置し、その棒状支柱と他方の板状受台端部近傍との間をばねとダンパー⑬により接続し、2つの板状受台間に生じる相対変位と速度に比例した復元力と減衰力を与える。

本免震装置はトリガー機構を備えており、地震水平慣性力が所定の値以上になった時に、下部受台⑩と棒状支柱⑫の間に設けたシャープインを用いたトリガー機構が動作して免震装置が作動する。万一、地震慣性力が想定した値より大きくなり、免震装置の変位が大きくなる場合には、ストッパー機構⑬により過大な変形を防ぐことが可能である。

この平行リンク型免震装置はタワークレーンの下端または適切な位置に挿入することが可能であり、免震装置のばね k_g とダンパー c_g ⑬を適切な値になるように調整することによりタワークレーンの固有周期を変化させることができ、免震が可能となる。

免震装置の作動時に、平行リンクが傾くことにより生じる自重に比例した水平力をばね k_g が受け持つ。自重 M により不安定にならない条件は $k_g \geq Mg/l_i$ である。また、このばねにより免震装置の固有周期も決まるので、これらの制約から k_g を決定できる。

2・2 免震スー 図3に提案する免震スーの構造を示す。スー部材⑩を途中で分割し、ばねとダンパー⑬を直列に挿入する。両端部にストッパー⑬が設けられた軸力部材⑭をガイド⑮でスー部材と平行に固定する。この軸力部材は通常使用時の軸力を負担すると共に、作動時のスーの面外変形を拘束する役割もある。軸力部材にトリガー機構を設けることにより、地震水平慣性力が所定の値以上になった時にトリガー機構が動作してスーのばね定数 k_s を低下させる。

3. タワークレーンのモデル化

図4(a)に自立型クレーンの剛体リンクモデルを、(b)

Fig.2 Scheme of cubic parallel link type isolator

Fig.3 Scheme of isolation stay

(a) Self-stand type crane (b) Stay supported type crane

Fig.4 Tower crane model with presented isolators.

にタワークレーンがステーを介して建築物と連成した系の剛体リンクモデルを示す。ここでは免震機構の基本的特性を明らかにすることを目的にしているの、図4に示したジブを含む面内の応答について議論する。

タワークレーンを、旋回部を含むマスト部を n_m 個の剛体、ジブ部を n_j 個の剛体に分割し、それぞれの接続部にマスト部またはジブ部の曲げ剛性に相当する回転ばね k_i を設置した。質量 m_i 、長さ l_i からなる平行リンク型免震装置は自立型クレーンに関しては基礎部に設置し、ステー支持型クレーンに関しては最上段ステー接続部の直上である n_s 番目と n_{s+1} 番目の剛体の間に設置し、その剛性を k_g 、減衰を c_g としてモデル化した。

建築物は質量 m_b とせん断剛性を表すばね定数 k_b 、ダンパー c_b からなる1自由度系とする。建築物とクレーンをつなぐステーは水平ばね k_s 、ダンパー c_s を用いてモデル化した。

ただし、図中の記号は、以下の通りである。

m_i, J_i, l_i : i 番目剛体の質量、慣性モーメント及び長さ

k_i, c_i : i 番目回転ばねのばね定数及び減衰係数

θ_i : i 番目剛体の絶対角度

x_i, x_b : 免震装置および建築物の水平変位

タワークレーンモデルのマストおよびジブの重力ばね効果を含めた運動方程式は式(1)で与えられる。ただし、一般化座標 $\mathbf{q}$ は、自立型クレーンの場合は $\mathbf{q}_{self}$ 、ステー支持型クレーンの場合は $\mathbf{q}_{stay}$ である。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} + \mathbf{W}\ddot{\mathbf{u}}_g + \mathbf{G} = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\mathbf{q}_{self} = [x_i \quad \theta_1 \quad \cdots \quad \theta_{(n_m+n_j)}]^T$$

$$\mathbf{q}_{stay} = [x_b \quad x_i \quad \theta_1 \quad \cdots \quad \theta_{(n_m+n_j)}]^T$$

ここで、 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ はそれぞれ質量、減衰、剛性行列であり、 $\mathbf{W}\ddot{\mathbf{u}}_g$ は地表面加速度 $\ddot{\mathbf{u}}_g$ による慣性力、 $\mathbf{G}$ はジブの姿勢に依存する重力加速度による慣性力である。

クレーンに作用する地震慣性力の指標としてクレーン全体の層せん断力係数 C_h 、および、ステー支持型クレーンにおけるステー接続部より上部の層せん断力係数 C_{hu} をそれぞれ以下のように定義する。

$$C_h = \frac{m_i \ddot{x}_i + \sum_{i=1}^{nm+nj} m_i \ddot{x}_i}{\left(m_i + \sum_{i=1}^{nm+nj} m_i \right) g} \quad (2)$$

$$C_{hu} = \frac{m_i \ddot{x}_i + \sum_{i=ns+1}^{nm+nj} m_i \ddot{x}_i}{\left(m_i + \sum_{i=ns+1}^{nm+nj} m_i \right) g} \quad (3)$$

ここで、 $\ddot{x}_i$ は i 番目剛体の重心位置における絶対水平加速度である。

4. 実験

平行リンク型免震装置の基本的な動特性を調べるため、自立型クレーンの模型を設計・製作し、加振実験を行った。マスト部には高さ1.3m、断面30x40mm、板厚2mm、質量0.9kgのアルミ角柱を、旋回部およびジブ部は質量3.85kgの鋼製ブロックを用いた。免震装置は、平行リンク部に長さ118mm、直径10mmの丸棒、上下受台に156mm角、板厚15mmの鋼板を用いた。図5に設計・製作した免震クレーン模型の構成を示す。

式(1)から求める、非免震クレーン模型の1次固有振動数は4.4Hzであり、免震クレーン模型の1次固有振動数は2.0Hz、2次固有振動数は5.9Hzであった。表2に示す加振条件により、クレーン模型の一定変位正弦波スイープ加振実験を行った。

図6に振動台加速度に対するマスト頂部加速度の伝達関数を示す。これらの実験結果から、非免震クレーン模型の1次固有振動数は4.3Hz、減衰比は2.0%、免震クレーン模型の1次固有振動数と減衰比は2.0Hz、12%であり、2次固有振動数と減衰比は5.8Hz、2.0%となった。

固有振動数は解析結果と良く一致しており、平行リンク型免震装置によりクレーン模型の1次固有振動数

Table 1 Sweep test condition

Sweep range	0.5 – 8.5
Sweep rate	0.05Hz/s
Sweep time	160s
Exciting amplitude	0.4mm

Fig.5 Experimental setup

Fig.6 Frequency response of the top of the mast

を低くできることが確認された。また、非免震クレーン模型の固有振動数である 4.3Hz 付近では振幅倍率が小さくなり、この振動数領域において免震装置の効果があることを示すことができた。

しかしながら、ジブ直交方向に加振したケースでは、若干のねじれがみられた。リンクのがた等が原因と考えられるが、今後検討する必要がある。

5. 実機サイズタワークレーンの地震応答解析

5・1 解析条件 提案する免震機構の免震効果を調べるために、実機サイズの自立支持型クレーンとステータ支持型クレーンについて、以下に示す条件により地震応答解析を実施した。

対象とするタワークレーンはマスト高さおよび質量を 65.5m と 76.5×10³kg、旋回部の質量を 65×10³kg、ジブの質量を 7.4×10³kg、長さが 40m、ジブの姿勢角を $\pi/6$ rad とした。平行リンク型免震装置は高さが $l_i=2.0$ m、質量が $m_i=3.0 \times 10^3$ kg とした。タワークレーン本体 1 次振動モードの減衰比 ζ_g を 2.5% になるようにマストとジブの減衰係数を定めた。また、免震装置を取り付けた場合はタワークレーン 1 次振動モードの固有振動数が 4s 程度に、また、減衰比 ζ_g が 10% になるように k_g と c_g を設定した。

本解析では、クレーンの分割数を $n_m=4$, $n_f=2$, $n_s=2$ とした。地震応答解析に用いたタワークレーンに関する主要な仕様を表 2 に、平行リンク型免震装置に関する主要な仕様を表 3 に示す。

ステータ支持型クレーンにおいては、従来型ステータの軸剛性を $k_b=1.0 \times 10^9$ N/m、免震ステータの軸剛性を $k_b=1.0 \times 10^6$ N/m とし、免震ステータの減衰係数 c_g は免震機構を取り付けたクレーンの 1 次振動モードの減衰比 ζ_g が 10% になるように設定した。また、建築物は 22 階建ての建物を想定し、高さ 70m、質量 $m_b=1.4 \times 10^7$ kg、減衰比 $\zeta_b=2.5\%$ とした。建築物の影響を調べるために、

Table 2 Specification of tower crane

i	m_i (kg)	J_i (kgm ²)	l_i (m)	k_i (Nm/rad)
1	4.00×10 ⁴	1.20×10 ⁷	30.0	3.20×10 ¹⁰
2	1.25×10 ⁴	1.16×10 ⁶	11.5	6.17×10 ⁹
3	2.40×10 ⁴	5.20×10 ⁶	24.0	6.61×10 ⁹
4	6.50×10 ⁴	1.35×10 ⁵	2.5	1.15×10 ¹⁰
5	3.70×10 ³	4.93×10 ⁵	20.0	3.80×10 ⁸
6	3.70×10 ³	4.93×10 ⁵	20.0	6.00×10 ⁸

Table 3 Specification of isolator

Symbol	Self-stand crane	Stay supported crane
m_i kg	3.00×10 ³	
l_i m	2.0	
k_g N/m	1.14×10 ⁶	7.53×10 ⁵
c_g Ns/m	2.49×10 ⁵	2.16×10 ⁵

建築物の剛性 k_b をパラメータとして変化させ、固有周期 T_b を 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0s になるようにした。

自立型クレーンに関しては、現行のタワークレーンを想定した非免震クレーン(Case1)と基礎部に免震装置を設置した免震クレーン(Case2)に対して地震応答解析を行った。一方、ステータ支持型クレーンに関しては、現行のタワークレーンを想定した非免震クレーン(Case3)、マストのみを免震したクレーン(Case4)、および、マストとステータを免震したクレーン(Case5)に対して地震応答解析を行った。

地震応答解析は、短周期が卓越するものから長周期が卓越するものまで幾つかの入力地震波を用いることとし、1995 年の阪神大震災における神戸ポートアイランド NS 波および神戸海洋気象台 NS 波、1968 年の十勝沖地震における八戸 NS 波、1940 年のインペリアルヴァレー地震におけるエルセントロ観測地震 NS 波(以下、神戸 PI-NS 波、神戸気象台 NS 波、八戸 NS 波、エルセントロ NS 波と略称する)を選定した。

5・2 応答解析結果

5・2・1 固有振動数と振動モード 解析から得られた自立型クレーンの 1 次固有周期は、非免震(Case1)の場合は 1.34s、平行リンク型免震装置を設置した(Case2)場合は 4.07s であった。図 7 に、自立型クレーンの振動モードを示す。非免震の場合、マスト全体が大きく曲げ振動しているが、マスト基部に平行リンク型免震装置を設置することにより、免震部分が変位してマストの曲げ振動が大きく低減していることが分かる。

建築物の固有周期 T_b を0.5sとした場合のステー支持型クレーンの1次固有周期は、非免震(Case3)の場合は0.79s、ステー直上に平行リンク型免震装置を設置した場合(Case4)は3.90s、そして平行リンク型免震装置と免震ステーを設置した場合(Case5)は4.06sであった。

図8に、ステー支持型クレーンの1次振動モードを示す。ステー支持型クレーンにおいては、非免震の場合マストのステーより上部が大きく振動しているが、ステー直上に平行リンク型免震装置を設置した場合および平行リンク型免震装置と免震ステーを設置した場合、マストの曲げ振動が大きく低減していることが分かる。

紙幅の関係から結果は省略するが、建築物の固有周期 T_b を変化させても、Case4およびCase5では、マストの曲げ振動が低減していることがわかった。すなわち、ステー支持型クレーンにおいては、ステー直上に平行リンク型免震装置を設置することがマストの曲げ振動を低減するのに有効である。

5・2・2 自立型クレーンの地震応答 図9に神戸PI-NS波に対する時刻歴応答解析結果を示す。図9(a)

にマスト頂部に位置する旋回部の水平加速度 $\ddot{x}_4$ を、(b)に層せん断力係数 C_h を、(c)に平行リンク型免震装置上部受台の水平変位 x_f を、(d)に入力として用いた神戸PI-NS波の加速度記録 $\ddot{u}_g$ ⁶⁾を示す。

図から、クレーン旋回部の加速度 $\ddot{x}_4$ 、層せん断力係数 C_h の最大値は共に、免震装置を設置することにより大幅に低減されていることがわかる。一方、平行リンク型免震装置の水平変位 x_f の最大値は0.6mと若干大きな値になっている。詳細は省略するが、他の3つの地震波に対するクレーン旋回部の加速度、層せん断力係数、免震装置の水平変位共に、その最大値は神戸PI-NS波以下である。

なお、全ての地震波に対して、免震機構を取り付けることにより、せん断力係数 C_h の最大値が、現行のクレーン構造規格⁷⁾における震度0.2を下回る結果となった。

5・2・3 ステー支持型クレーンの地震応答 図10に、建築物の固有周期 $T_b=2.0$ sの場合の神戸PI-NS

Fig.7 Vibration mode shapes of Self-stand type crane

Fig.8 Vibration mode shapes of stay-support type crane ($T_b=0.5$ s)

(d) Seismic acceleration of Kobe PI-NS

Fig.9 Seismic response of self-stand type crane

波に対する時刻歴応答解析結果を示す。図 10 (a)に建築物の水平加速度 $\ddot{x}_b$ を、(b)に旋回部の水平加速度 $\ddot{x}_4$ を、(c)および(d)に層せん断係数 C_{bu} および C_h を、(e)に平行リンク型免震装置上部受台の水平変位 x_i を、(f)に神戸 PI-NS 波の地震加速度記録 $\ddot{u}_g$ ⁽⁶⁾を示す。

これらの結果から、以下のことが分かる。非免震クレーンでは、マスト基部からの地震入力に加えて建

(f) Seismic acceleration of Kobe PI-NS
Fig.10 Seismic response of stay supported type crane

物からの入力があるために、層せん断力が自立型クレーンよりかなり大きくなる。クレーン旋回部の最大加速度は、平行リンク型免震装置を設置することにより非免震時より小さくなるが、ステアを免震化することによりさらに低減されている。層せん断力係数 C_{bu} 、 C_h および平行リンク型免震装置上部受台の水平変位 x_i についても同様に低減する傾向が見られる。これは、Case4 と Case5 の振動モードが以ていても、Case4 の場合はクレーン基礎部からの地震入力に加え、建築物からの励振力によってマストが加振されるためにクレーンの応答が充分小さくならないためである。すなわち、マストのみを免震するよりも、ステアも免震化のほうが地震慣性力を低減する効果が大きいことが分かる。なお、建築物の質量はクレーンの質量の約 100 倍あるので、クレーンの免震装置の有無による建築物の応答加速度への影響はほとんど見られない。

6. 考 察

図 11 に、ステア接続部より上部の層せん断力係数 C_{bu} の最大値に対する建築物の固有周期の影響を示した。図中、各地震波の応答スペクトルを重力加速度で除したものを Spect. として参考を示した。これにより、各地震波の卓越周期成分がわかる。図 11 (a)は神戸 PI-NS 波、(b)は神戸気象台 NS 波、(c)は八戸 NS 波、(d)はエルセントロ NS 波に対する結果をそれぞれ示している。

非免震、すなわち、Case3 における C_{bu} の最大値は、建築物の固有周期が 1s 付近において大きくなって

(c) Hachinohe-NS (d) El-Centro-NS
Fig.11 Effect of natural period of the building on C_{bu}

るが、これは非免震タワークレーンの固有周期と合致したため、増幅率が大きくなったことによる。マストのみ免震した Case4 では、極めて短い周期成分が卓越する神戸海洋気象台 NS 波以外は、建築物の固有周期と地震波の卓越周期が近い周期領域で C_{hu} が大きくなっている。一方、マストとステアーを免震した Case5 では、建築物の固有周期に関わらず C_{hu} の最大値は常に 0.2 以下になっている。このことは、ステアーを免震化することにより、建築物からの励振を絶縁する効果が大いことを示している。すなわち、マストのみならずステアーも免震化することがステアー支持型クレーンの免震機構として有効であることがわかる。

やや長周期成分が卓越する神戸 PI-NS 波に対する平行リンク型免震装置の応答変位が大きくなったが、免震装置の減衰係数を大きくすることにより低減できると考えられる。図 12 に、減衰係数から求めるタワークレーンの 1 次モードの減衰比 ζ_g を変化した場合の相対変位 x_t と層せん断力係数 C_h の関係を示す。

図から、減衰比 ζ_g を増加すると共に、 x_t は減少し C_h は増加する傾向が分かる。 ζ_g を 0.3 程度まで増加した場合、層せん断力の増加は僅かであるが、相対変位は 25-30% 程度小さくなっている。 ζ_g は平行リンク型免震装置のダンパーにより調整できるので、設計上許容できる層せん断力と相対変位の兼ね合いで決めることができる。また、相対変位が大きくなる場合には、ストッパーにより変位を拘束することも可能である。

タワークレーンの作業中ジブの姿勢角は常に変化するが、非免震の場合の姿勢角変動に伴う固有周期変化は、高々 10% 程度である。従って、免震化して、固有周期を長周期化すれば、姿勢角変動による 1 次固有周期への影響はほとんど無くなる。

Fig.12 Effect of damping ratio on x_t and C_h

7. 結 言

- (1) 立体的な平行リンク機構を用いた水平 2 次元免震装置と軸剛性を可変にした免震ステーで構成されるタワークレーンに代表される塔状構造物用の免震機構を提案した。
- (2) 平行リンク型免震装置の模型実験から、免震装置として動作することを確認した。
- (3) 自立型クレーンに平行リンク型免震装置を設置することにより、クレーンマストおよび旋回体の応答加速度を大幅に低減することが可能であることを地震応答解析により示した。
- (4) ステアー支持型クレーンは、ステアーを介しての建築物からの入力が大きいため、ステアーも免震する必要がある。
- (5) ステアー支持型クレーンに平行リンク型免震装置と免震ステーを設置することにより、自立型クレーンの場合と同様に、クレーンマストおよび旋回体の応答加速度を大幅に低減することが可能であることを地震応答解析により示した。

文 献

- (1) The committee for earthquake resistant investigation of crane, *The report on the affection of Hanshin Awaji Earthquake for crane structure*, The Japan Crane Association, (1996), pp.1-66 (in Japanese)
- (2) The special investigation committee on Great Hanshin Awaji Earthquake damage, *The Machines and Industrial Equipments Damage due to the Southern Hyogo prefecture Earthquake*, JSME, Maruzen, (1996), pp.161-162 (in Japanese)
- (3) Editorial Committee, Falling accident due to the earthquake and its countermeasure for tower crane, *Journal of the Japan Crane Association*, Vol.40, No.11, (2002), pp.41-45 (in Japanese).
- (4) Miyamori, K., Matsunaga, S. and Tohdou, M., Dynamic behavior during earthquake and countermeasures of tower crane under construction of high-rise building, *Proceedings of Architectural Institute of Japan*, (2004), pp.667- 668 (in Japanese).
- (5) Takanashi S., A study on the seismic resistance of tower crane for construction use, *Crane*, Vol.1, No.1 (2003) pp.14-30 (in Japanese).
- (6) K-net <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- (7) Ministry of Health, Labour and Welfare, Standard for Crane Structure, *Japan Crane Association*, (2002), p.27 (in Japanese).