コンテナクレーン用ロッキング型免震装置の
模型実験と岸壁への影響*村野 健一^{*1}, 吉田 和夫^{*2}
塩崎 禎郎^{*3}, 菅野 高弘^{*4}Model Experiment and Influence on Quay for Rocking Type of
Vibration Isolation System of Container CraneKenichi MURANO^{*5}, Kazuo YOSHIDA,
Yoshio SHIOZAKI and Takahiro SUGANO^{*5} Graduate School of Science and Technology, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

The container crane of the harbor received the enormous damage in the Hyogo-ken Nanbu earthquake disaster. After that, the container crane with seismic vibration isolation system has been developed and operated in practical use. In this study, a rocking type of vibration isolation system (RVIS) was proposed for the container crane. And the experiment of the scale model was performed to verify the analytical model. From the results of the experiment and the analysis for the scale model, the validity of the model was demonstrated. The influence on the quay structure which is excited by the load of the container crane was made clear. The results of the RVIS showed better performance to reduce the load to the quay structure than the conventional container crane.

Key Words: Container Crane, Seismic Design, Seismic Vibration Isolation Method, Quay Design

1 緒 言

兵庫県南部地震による神戸港のコンテナクレーン等の被害により港湾構造物の耐震設計の見直しが行われてきた。特に岸壁が栈橋構造の場合、コンテナクレーンの重量が栈橋重量に対して無視できないため、岸壁設計の際に上戴荷重との連成解析を含めた検討が必要となることが明らかになっている⁽¹⁾。コンテナクレーンの基礎への影響は、コンテナクレーン自体に免震機能を持たせることで、岸壁側への影響が大幅に軽減されることが報告されており^{(2), (3)}、免震機能を有したコンテナクレーンも実用化段階にある。

実用化されているコンテナクレーンの免震機構は建物や橋梁などで実用化されている水平方向へスライドする基礎免震を応用したものである。一方、筆者らはロッキング型の免震機構を提案し、数値解析によりその有用性を確認してきた^{(4), (5)}。水平型に対して、免震機構部のモーメントの伝達が少なくすむことなどの優位性があり、クレーン全体がねじれる振動モードに対しても有効であることが報告されている。ただし、水平型が実験的にも基礎への影響を評価しているのに対して、ロッキング型の場合には十分な検討がなされていない。力学的に考察すると水平応答震度が下がれば、当然水平荷重も下がるので基礎への反力も下がるのが推測される。水平型は考察どおりの結果が得られており、ロッキング型もそのようになると考えられるが、ロッキング運動による鉛直荷重への影響に関しては別途評価する必要があると考えられる。

本論文では、ロッキング型免震システムを装備した

* 原稿受付 2003年4月18日。

^{*1} 正員、慶應義塾大学大学院理工学研究科(☎223-8522 横浜
市港北区日吉3-14-1)。^{*2} 正員、慶應義塾大学理工学部。^{*3} JFE技研(株)土木・建築研究部(☎210-0855 川崎市川崎区
南渡田町1-1)。^{*4} 独立行政法人港湾空港技術研究所構造振動研究室(☎239-
0826 横須賀市長瀬3-1-1)。

E-mail: murano@1983.jukuin.keio.ac.jp

Fig.1 Container Crane with Rocking Type of Vibration Isolation System

コンテナクレーンの動的挙動および基礎への影響を模型実験と数値解析とを比較することで明らかにし、ロッキング型免震システムに対しての基礎への影響評価手法を示すことを目的とする。

2 ロッキング型免震システム

図1にコンテナクレーンを走行方向から見た側面図を示す。図2に図1のA方向から見たロッキング型免震機構の例を示す。陸側レール上鉛直方向にクレーン陸脚を左右の走行装置上2箇所、ダンパーを配したばね機構で支える構造である。クレーン全体の運動は、横行方向の地震波入力に対して、海側レールを回転支点として回転するモード（ロッキングモード）が追加され、免震される。回転運動はダンパーにより減衰させ、地震エネルギーを吸収する。構造上、陸側レール上左右2基配置しているため、クレーン全体のねじれに対しても対抗することが可能となっている。

一方、水平型は、積層ゴムあるいは旋回ベアリングと復元機構、減衰機構により水平方向にスライドさせる機構が走行装置とクレーンの脚との間に合計4箇所装備される。建物や橋梁などと同じように、基礎から構造体を水平方向に絶縁する方法であるが、クレーンは基礎と車輪にて接触しているため、走行装置の上に水平方向の免震機構を設置する必要があり、重心位置が高く、レールスパンの制約があるため、水平スライド機構には相応のモーメント荷重が作用する。したがって、水平スライド機構はモーメントの伝達をしながらスライドする設計となる。

Fig.2 View A~ Rocking Type of Vibration Isolation System

Fig.3 Overview of Shaking Table and Scale Model

3 模型実験

3・1 模型仕様 図3に振動台上の模型の外観を示す。対象の実大クレーンとして重量約900t、重心位置はブームを下ろした状態で高さ34m、海側レールから11m（レールスパン30.5m）のサイズのものとした。振動台の制約から長さを1/15スケールとし、相似則を表1に示すよう設定した。また、重力と材料のヤング率は同一とし、質量スケールを1/3375として相似比を合わせたため、時間スケールは $1/\sqrt{15}$ となる。振動モードは市販の鋼材を利用するため、重りを配置することにより実大クレーン振動モードに合わせた。

図4に模型のロッキング型免震機構部を示す。図2に示した実機の例題の位置に相当する。中央にばねとばね座を設け、その左右に鉛直方向のガイドを配する機構とした。ばね定数は、市販のばねから選定したため1/225に近い値のもので30.4N/mmとした。なお、粘性ダンパーは模型スケールでは製作が困難であること、模型スケールではクーロン摩擦による減衰が支配的になるため、本実験では用いていない。レールと車輪は実機の場合、図2に示すように8輪程度に荷重を分散さ

Fig. 4 RVIS Mechanism of 1/15 Scale Model

Table 1 Scale Factors of the Experimental Model

Measured Quantity	Unit	Real	Model
Length	m	1	1/15
Time	sec	1	1/15 ^{1/2}
Acceleration	m/s ²	1	1
Mass	kg	1	1/15 ³
Elastic modulus	N/m ²	1	1

せて支持する構造であるが、模型では2輪で支持することとした。また、海側の車輪は同じように2輪で支持する構造とし、ロッキング運動は実機と同様に海側レール面上を支点として回転する。

3・2 模型実験 実験は旧運輸省港湾技術研究所構造振動研究室水中振動台にて、旧日本鋼管株式会社との共同研究にて実施した。加振はクレーンの横行方向に行い、使用した地震波は図7、8に示す十勝沖地震八戸波(NS:332gal, 以下八戸波)と兵庫県南部地震神戸ポートアイランド観測波(NS:341gal, 以下神戸PI波)を時間スケールを変え、最大加速度を基準に加速度倍率を変化させた地震波を与えた。

模型には、加速度計をガータ部、ブーム先端、ガータ後端、振動台上に設置した。脚部の変位(脱輪の監視)とロッキング型の免震機構の変位を計測するためにレーザ変位計を海側脚下部2箇所と陸側に2箇所(図4を参照)、ロッキング型免震部に2箇所設置した。

また、ロッキング型免震システムの実験以外に水平型免震の実験も本模型で実施しており、その場合、本体の構造はそのまま、図4のロッキング型免震機構を水平型免震機構に交換して実施している。

3・3 実験結果 代表的な実験ケースでの入力地

震波とその最大入力加速度と最大応答加速度(ガータ部加速度)および脱輪の有無を表2に示す。表中FL, FRは海側脚の浮き上がり位置を示し, RL, RRは陸側脚のそれを示す。免震が作動しない場合、八戸波では2.35倍で脱輪した。神戸PI波では0.65倍で脱輪している。それに対してロッキング型免震では八戸波3倍でも脱輪せず、八戸波ではこれ以上の加振が出来ないため、こ

Table 2 Results of Experiment on Shaking Table

Input wave	Input Acc. (gal)	Max. Acc. Resp.	Isolation	Derailment
Hachinohe	332 (x1)	283.8 (321)	Off	No
"	664 (x2)	566.5	Off	No
"	780 (x2.35)	829.1	Off	Yes RL
KobePI	205 (x0.6)	545.3	Off	No
"	222 (x0.65)	704.6	Off	Yes RL,RR
Hachinohe	332 (x1)	272.0 (112)	On	No
"	664 (x2)	470.1	On	No
"	996 (x3)	787.1	On	No
KobePI	205 (x0.6)	198.7	On	No
"	222 (x0.65)	212.7	On	No
"	324 (x0.95)	462.3	On	Yes* FR

FL:Front Leg Left, FR:Front Leg Right, RL:Rear Leg Left, RR:Rear Leg Right, *: Isolator stroke reached to its limit

で打ち切った。一方、神戸PI波では0.95倍で脱輪した。ただし、この時の免震装置のストロークが最大限まで変位しており、その影響で脱輪したと考えられる。

参考のため、水平型免震での最大加速度応答を表2中の八戸波1倍入力に対して括弧内に示した。4章で示す図9で説明するように表2のデータは、雑音成分があると考えられるため、ロッキング型も水平型に比べて遜色のない結果であると考えられる。

4 解析と実験結果の比較

4・1 解析モデル 図5に有限要素モデルを示す。節点数143、要素数196で構造部は梁要素(NASTRANコードでBAR要素)でモデル化した。脚のタイプは剛接タイプとし、ブームは水平の状態である。

Fig.5 FEM Model of Scale Model

Fig.6 Vibration Mode (Rocking Isolation Mode)

車輪とレールとの接点には非線形要素であるGAP要素を用いてモデル化した。圧縮側と引っ張り側での剛性値を変えることができるばね要素であり、接触時と浮き上がり時を表現できる。また、GAP要素の軸方向に直交した2つの軸に対して、軸力に対する摩擦によるせん断力を与え、レール走行方向およびレール直角方向の摩擦によるレールからクレーンへの伝達力を表現した。なおレール直角方向の摩擦係数は1とし、レール走行方向を0.05とした。免震機構は、ロッキング型免震の機構をばね要素およびダンパー要素を与えることで表現した。免震機構の上下の要素間は、免震ばね要素の構成節点を拘束方程式により拘束し、ばねの剛性を上下方向のみに与え、その他の自由度を拘束した。したがって、免震装置の上下でのモーメントは伝達される。解析は、大質量法により地震波加速度入力を与え、重力加速度荷重による変形を考慮し、加速度過渡応答解析を行った。粘性ダンパーは実大モデル設定に対応した1.83Nsec/mmで解析を行った。

図6に模型の振動モード解析によるロッキング免震モードを示す。実験時の計測によるロッキング免震モード振動数は1.18Hzに対して解析では1.20Hzとなり、ほぼ一致した。また、免震なしの場合の自由振動計測から、横行方向の1次の振動モードに対する減衰比は0.0032となった。

Fig.7 Hachinohe Excitation

Fig.8 Kobe Port Island Excitation

Fig.9 Acceleration Response of Experimental and Analysis for Hachinohe Excitation(332gal)

Fig.10 Time History of Isolator Stroke for Hachinohe Excitation(332gal)

4・2 解析結果と実験との比較 図9に重心付近の節点位置（ガータ部）の加速度応答の実験デー

Fig.11 Acceleration Response of Non Isolation and RVIS by KobePI Excitation (Experimental 222gal)

(a) Gap Displacement (NASTRAN)

(b) Vertical Displacement (Experimental)

Fig.12 Time History of Uplifting for KobePI Excitation(222gal)

タとの比較を示す。入力地震波（八戸波）の周波数特性は10Hz以上の高周波成分が小さいため、実験データをカットオフ周波数10Hzのローパスフィルタにより加工した。図9はロック型免震を作動させた場合で、実験データと解析結果は最大加速度を除き、良く一致している。加振後（時刻6秒以降）の自由振動時の減衰が実験と解析とは一致しておらず、解析の減衰が高いことがわかる。実験では粘性ダンパーは用いず、減衰は機構のクーロン摩擦によるものである。模型での摩擦発生機構と実機でのそれとは異なり、模型での減衰の評価は相似則が複雑になるため実機設計には直接反映

できないと考え、減衰を解析にて実験に合わせることはしていない。実験の最大加速度は10Hz以下の振動モードが模型のガタなどの影響により生じていると考えられる。

図10に図9で示したロック型免震機構のストロークの解析結果と実験値の比較を示す。解析の免震部の粘性減衰が、実験のクーロン摩擦による減衰より大きいと考えられ、解析のストロークが小さく出ている。しかしながら、図9に示した加速度応答では模型上部の加速度計測であるために模型のガタなどの影響が出ているのに対して模型下部の機構であることから、解析と実験は良く一致していると考えられ、解析モデルが妥当であると判断できる。

図11に実験データによる神戸PI波の加速度倍率0.65倍入力(222 gal)の重心付近加速度応答の免震有無による比較を示す。免震無しの場合には脱輪を時刻4秒で生じており加速度波形の乱れがある。図12に図11で示した応答の、免震が無い場合の脱輪したケースにおける実験脚部鉛直方向変位データと解析によるGAP要素鉛直方向変位の比較を示す。図12(a)の初期の沈み込みは、自重成分(3212.6 N)によるもので、後脚側の値(実線)と前脚側の値(破線)の差は、重心位置が前側にあることを示している。解析の重心位置は前脚中心（レール芯）から813.9mm、高さ2093.9mmと、模型の重心位置(852mm, 2021mm)にほぼ一致させた。図12(b)の実験で脱輪した時刻とほぼ同じ時刻で解析のGAP要素は浮き上がりを生じており、解析はロック型による浮き上がり脱輪現象を良く表現していることがわかる。

5 岸壁への影響

兵庫県南部地震以降、重要港湾には耐震強化岸壁の設置が進められており、上載のコンテナクレーンには

Fig.13 Time History of Vertical Force for Hachinohe Excitation (332gal)

(a) Land Side Shear Force

(a) Sea Side Shear Force

Fig.14 Time History of Horizontal (Shear) Force for Hachinohe Excitation (332gal)

耐震クレーンであることが求められている。ただし、耐震クレーンではクレーン自身の強度を高めるための重量増となり、大地震時の岸壁への影響は悪化する。したがってクレーンの特性と岸壁の設計は綿密な調整が必要となる。一方、免震クレーンを採用した場合、水平型免震での岸壁法線直角方向(クレーン走行レールと直角方向;横行方向)の水平荷重は、免震がない場合と比較して30%程度に低減され、鉛直荷重も動的成分の最大値が30から40%程度に下がることが模型実験で確認されている。また、岸壁の構造が耐震強化で無い場合でも免震クレーンであればクレーンからの岸壁構造への反力が小さいため、地震時には通常クレーンに比べて耐震性が向上する利点がある。

筆者らが提案しているロッキング型免震での岸壁への影響を模型FEM解析から検討する。図13に八戸1倍入力に対する免震有無の陸側脚左側の鉛直方向レールへの反力を示す。鉛直力の最大値は20%程度に下がっており、鉛直力はロッキング免震機構でも水平型と同様な結果となった。

一方、図14(a)に八戸波1倍の水平横行方向の陸側ロッキング免震装置下のGAP要素のせん断力を示す。同じく図14(b)に海側のそれを示す。水平力はロッキング免震の場合、最大値の比較で50%程度下がっており、水

Fig.15 Conventional Model

Fig.16 Time History of Acceleration by FEM and Conventional Model for Hachinohe Excitation (332gal)

Fig.17 Time History of Horizontal (Shear) Force by FEM and Conventional Model for Hachinohe Excitation

平加速度に対する荷重は回転運動に変換され、免震されていることがわかる。水平型免震の場合、水平方向の反力は、水平方向に配した復元力を与えるばね要素に比例するのに対して、ロッキング免震の場合は水平荷重は水平型の復元力から単純に求めることができない。しかしながら解析の重心付近の横行方向加速度応答では、免震無しの場合が最大219galに対して免震作動では114galとなっており、重心位置の水平方向加速度応答に比例した低減率となることがわかる。したがって、ロッキング型でも重心の加速度応答を求めることで、本体の構造体への影響と共に、岸壁への影響を評価できること

がわかる。設計検討にあたっては、水平型と同様に簡易モデル⁽⁴⁾などの応答計算により、岸壁への影響が検討できると考えられる。図15にロッキング型免震の簡易モデルを示す。次式にてこのモデルは表され、基礎への水平力は式(1)の F_x にて評価できる。

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + k_1(x - h\theta - u) + c_1(\dot{x} - h\dot{\theta} - \dot{u}) &= 0 \\ I\ddot{\theta} + (k_2L^2 + k_1h^2)\theta + (c_2L^2 + c_1h^2)\dot{\theta} \\ - k_1h(x - u) - c_1h(\dot{x} - \dot{u}) &= 0 \\ F_x = -k_1(x - h\theta - u) - c_1(\dot{x} - h\dot{\theta} - \dot{u}) &\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここで I は0点まわりの慣性モーメントを表し、 h は重心高さ、 L はレールスパンを表す。

模型実験に対応した上記簡易モデルと有限要素法モデルの加速度応答結果の比較を図16に示す。さらに簡易モデルで求めた岸壁への水平力 F_x と有限要素法モデルとの比較を図17に示す。簡易モデルの水平力はレール接点4箇所全部の力となるため図17の値は F_x の4分の1の値を表し、有限要素法の後脚の1箇所の値と比較した。加速度応答および岸壁への水平力共に両者は良く一致しており、設計初期段階での簡易モデルによる検討が可能であることがわかった。

6 結 言

本論文ではロッキング型免震機構を有するコンテナクレーンの挙動を実験的に明らかにして、その解析手法の妥当性を検証し、さらに岸壁基礎への影響を検討した。

その結果、汎用有限要素法解析にて十分精度良く解析できることがわかった。岸壁への影響は、免震がない

場合と比較して鉛直方向には水平型と同様に20%程度低減され、水平方向は最大で50%程度の低減となり、岸壁構造に対して影響が少ない免震システムであることがわかった。また、簡易モデルなどにより重心位置の加速度応答を求めることで岸壁への影響を検討できることがわかった。

謝 辞

本模型実験は、旧運輸省港湾技術研究所構造振動研究室と旧日本鋼管株式会社との平成12年度共同研究「耐震コンテナクレーンと耐震強化岸壁（栈橋式）の地震時相互作用に関する共同研究」の一実験ケースとして実施された。実験にあたり、独立行政法人港湾空港技術研究所計測研究室 佐藤栄二研究員およびJFEエンジニアリング株式会社 南部俊彦統括スタッフに協力をいただいた。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 宮田、菅野、濱田、田邊、中島、田中、直杭栈橋とコンテナクレーンの地震時相互作用に関する研究、第10回地震工学シンポジウム、(1998)、2409-2414
- (2) 塩崎、菅野、山本、佐藤、南部、村野、コンテナクレーンの地震時輪荷重に関する実験的研究、第26回地震工学研究発表会講演論文集、(2001)、957-960
- (3) 菅野、塩崎、池上、前方斜杭式栈橋（土留め一体構造）と免震コンテナクレーンの地震時挙動に関する模型振動実験、土と基礎、51-3、(2003)、22-24
- (4) 村野、吉田、コンテナクレーン用ロッキング型免震装置の提案、機論、68-665、C(2002)、90-95
- (5) 村野、吉田、実大コンテナクレーン用ロッキング型免震装置の動的最適設計と耐震性能、機論、69-667、C(2003)、26-33