

耐震コンテナクレーンの 地震時挙動に関する実験と解析

南部俊彦¹・菅野高弘²・佐藤栄治³・塩崎禎郎⁴・村野健一⁵

¹正会員 工修 NKK 基盤技術研究所都市工学研究部 (〒211-0855 川崎市川崎区南渡田 1-1)

²正会員 工博 独立行政法人 港湾空港技術研究所地盤・構造部 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

³独立行政法人 港湾空港技術研究所施工・制御技術部 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

⁴正会員 工修 NKK 基盤技術研究所都市工学研究部 (〒211-0855 川崎市川崎区南渡田 1-1)

⁵工修 NKK 重工センター重工部 (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町 2-1)

大規模地震時にコンテナクレーンの脚の浮き上がりによる損傷・脱輪を防止する手段の一つとして、クレーン脚部に免震機構を設け入力地震動を低減させる方法がある。岸壁およびその上に設置されるこの免震機構付きコンテナクレーン両者の連成振動を考慮した動的設計を検討する際に、免震装置付きクレーン単体の取り扱いを明確にする必要がある。そこで、免震クレーン単体の地震時の振動特性を把握するため、脚の浮き上がり現象が再現できる実機の 1/15 スケールのクレーン模型を用いて振動台加振実験を行った。また、実験に対する過渡応答解析を実施し、評価手法の検証を行った。

Key Words: container crane, base isolation device, shaking table test, seismic response analysis, finite element method

1. はじめに

耐震強化岸壁に設置されるコンテナクレーンの設計は、「コンテナクレーン耐震設計のための手引き」¹⁾に基づき、動的設計とともに脚の浮き上がりを考慮するようになってきている。特に、栈橋式岸壁に設置する場合には、栈橋との質量比および固有周期比によりクレーンと栈橋の動的相互作用の特性が異なるため、クレーンの最大応答加速度を算定する場合に、両者の相互作用を考慮した手法により直接算定することとなっている。

最近、コンテナクレーンの耐震設計に対しては、脚部の強度向上による耐震性能確保という手法から、免震装置を用いて本体固有周期を地震動の影響の小さい長周期帯へ移行してしまうことにより耐震性能を確保する手法が提案され、実用段階にある。

この免震機構付きクレーンと栈橋等の岸壁の連成振動を考慮した動的設計を検討する際に、免震機構付きクレーン単体の取り扱いを明確にしておく必要がある。そこで、本研究では、免震機構付きコンテナクレーン単体の動特性を把握することを目的に、脚の浮き上がり現象が再現できる実機の 1/15 スケールのクレーン模型を用い

て振動台加振実験を行った。また、実験に対して、免震機構およびクレーン脚の浮き上がりを考慮した3次元有限要素モデル、また、免震機構を考慮した1質点系の簡易モデルにより過渡応答解析を実施し、各解析手法の妥当性を検証した。

2. 振動実験の概要

(1) コンテナクレーン模型

実験に使用したコンテナクレーン模型の概要を図-1示す。走行レールスパンが30.5m、全高66.6m、重量が約10MNの剛脚構造のコンテナクレーンを対象とし、振動台設備等の制約から実機の1/15の模型を製作した。模型製作にあたっては、コンテナクレーンの浮き上がり・脱輪現象を再現するために、重力加速度の縮尺比を1とした表-1の相似則をもとに、模型本体には、曲げ剛性が相似則を満たすJIS規格品の鋼管および角形鋼管を使用した。また、固有周期、振動モードおよび重心位置を一致させるように模型各所に錘を設置した。車輪については、実機では一脚あたり8輪であるが、模型では簡略化のため

両端の2輪でモデル化している。また、水平ばね要素とダンパー要素から構成される免震装置を、海側および陸側のシルビームと各走行装置との間、計4箇所に設置した。実験では、免震装置上下の走行装置とシルビームの相対変位を拘束し免震装置を作動させないものを「通常クレーン」とし、相対変位を拘束しないで免震装置を作動させたものを「免震クレーン」として比較を行っている。模型重量は、ブームアップおよびブームダウンともに3.3kNであった。

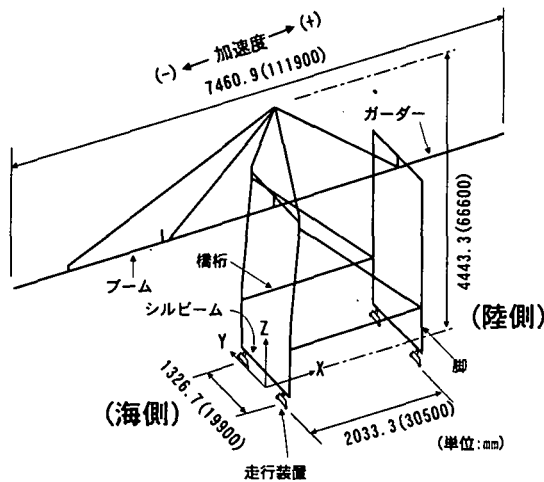


図-1 クレーン模型概要（ブームダウン時）

表-1 適用相似則

物理量	実機/模型	縮尺比
長さ	λ	15
時間	$\lambda^{1/2}$	3.87
加速度	1	1
重量	λ^3	3375
曲げ剛性	λ^5	759375

計測器の配置を図-2に示す。模型は1/15にモデル化された鋼製レールを介して振動台に設置した。加振時の模型本体の動的挙動（重心位置加速度）は、重心位置直上のガーダー部の加速度計により計測した。また、4本

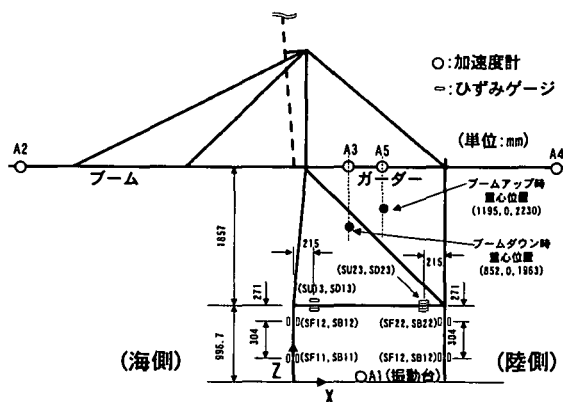


図-2 計測器位置

のクレーン脚および左右両方の橋桁に発生する軸力・曲げモーメントは、各部材の両面に設置したひずみゲージにより計測した。

(2) 入力地震波

入力地震波には神戸ポートアイランド表面波（最大加速度341gal）、八戸表面波（最大加速度332gal）を相似則に従い時間軸を圧縮した波形を用い、最大加速度をクレーンが浮き上がるまで倍数で増加させた。加振方向は海陸方向の1方向入力とした。なお、実験設備は港湾空港技術研究所所有の三次元水中振動台を使用した。

(3) 自由振動試験

表-2にパルス波加振後の自由振動試験により計測された各モデルの海陸方向の固有周期と減衰比の結果を示す。ブームダウンおよびアップともに、実機で約2sの固有周期が免震化によって約4s程度に長周期化されていることがわかる。

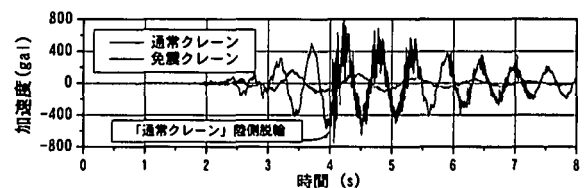
表-2 模型の固有周期と減衰

ブーム状態	免震状態	試験値	
		固有周期(s)	減衰比
ブームダウン	通常クレーン	0.54 (2.08)	0.006
	免震クレーン	0.97 (3.76)	0.052
ブームアップ	通常クレーン	0.56 (2.18)	0.011
	免震クレーン	1.00 (3.87)	0.065

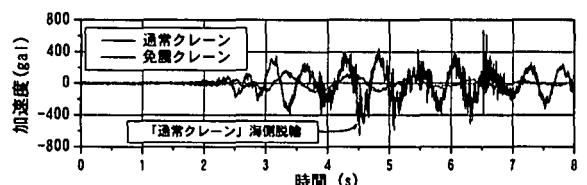
() 内は実機換算

(4) 地震波加振試験

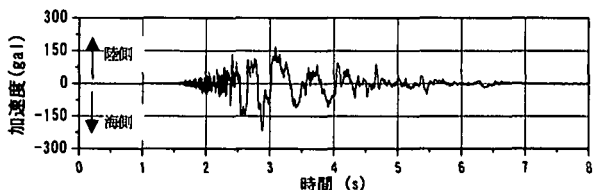
免震クレーンの実験結果例として、神戸PI表面波の最大加速度0.65倍の地震波を入力した時の、ブームダウン時およびブームアップ時のクレーン本体の応答加速度



(a) ブームダウン時



(b) ブームアップ時



(c) 振動台の加速度（神戸PI表面波0.65倍）

図-3 クレーン本体の応答加速度の比較

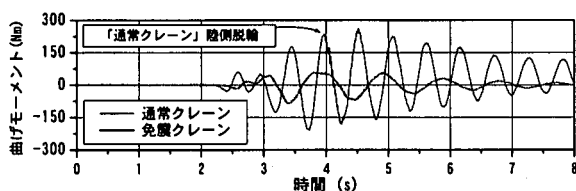


図-4 海側脚上部の曲げモーメントの比較（ブームダウン時）

（図-2の加速度計A3またはA5）の波形を図-3に、またブームダウン時の海側脚上部位置（ひずみゲージSF12, SB12の位置）に発生する曲げモーメントの波形を図-4に、同じ入力地震波での通常クレーンの結果と比較して示す。通常クレーンのケースは、ブームダウン時には陸側の、ブームアップ時には海側の車輪が脱輪を起こしたケースである。これらの図から免震クレーンの最大応答加速度および脚部に発生する最大曲げモーメントは通常クレーンに比較し、1/3程度になっていることがわかる。また、八戸表面波入力の場合についても、2章に示す図-6(a)の通常クレーンの応答加速度の実験値と図-7(a)の免震クレーンの実験値の比較から、同様の傾向を示していることがわかる。

2. 3次元過渡応答解析概要

(1) 3次元解析モデル

解析は、汎用の構造解析プログラム NASTRAN を用い、ラージマスによる3次元の過渡応答解析とした。図-5に解析モデルを示す。クレーン本体は、線形の梁要素とし、車輪とレールの接点は、ロッキング現象を再現するために、圧縮と引張で剛性を変えることのできる非線形のGAP要素を用いクレーン脚の浮き上がりを表現できるものとした。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りレールからクレーンへの伝達力を表現した。免震機構は、ばね要素およびダンパー要素でモデル化し、免震機構の上下節点間の海陸方向のみにばね剛性を与え、その他の自由度は拘束した。解析は、重力加速度を与えた後に、ラージマスに地震波を入力した。

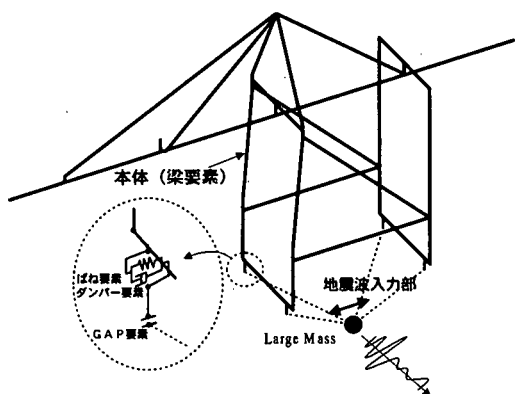
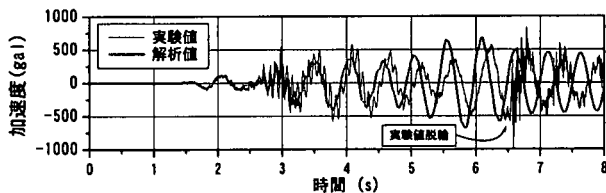


図-5 解析モデル概要

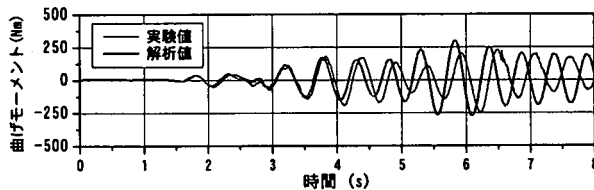
(2) 解析結果

a) 通常クレーンの解析結果

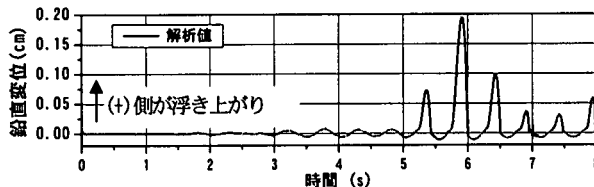
通常クレーン・ブームダウン時の解析結果の一例として、八戸表面波の最大加速度を2.0倍にして入力した時のクレーン本体の海陸方向加速度を図-6(a)に、海側脚上部の曲げモーメントを図-6(b)に、実験値と比較して示す。また、陸側車輪下端のGAP要素の軸方向変位を図-6(c)に示す。八戸表面波2.0倍入力の場合は計測開始から6.5s後に陸側車輪が脱輪したケースである。図-6(a)および図-6(b)から、入力地震波の後半でやや実験値との周期のずれが見られるものの、地震波の開始から脱輪するまでは、解析結果と実験はよく一致していることがわかる。今回の解析においては、部材の断面を公称値で評価しており、固有値解析の結果では海陸方向の周期は0.50sであった。入力地震波の加振後半での周期のずれは、この影響が現れている。理由としては、模型の実際の断面係数が公称値よりも寸法許容差範囲内で小さくなっていることが考えられる。図-6(c)は、クレーン脚の浮き上がりを示すものであり、計測開始から6s前後で脚が浮き上がっている様子がわかる。実験時の脱輪より少しだけ早く浮き上がりを評価しているが、これは、6s前後で解析値のほうが実験値よりも水平加速度をやや大きく評価しているからであり、概ねGAP要素による浮き上がりの現象は表現できていると考えられる。



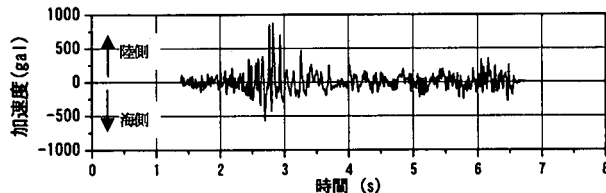
(a) 応答加速度の比較



(b) 海側脚の橋桁側位置での曲げモーメントの比較



(c) 陸側GAP要素の軸方向変位



(d) 解析に用いた入力地震波（八戸表面波2.0倍）

図-6 通常クレーンの解析結果

b) 免震クレーンの解析結果

免震クレーンの応答加速度、海側脚上部の曲げモーメントおよび免震装置の海陸方向の相対変位量を図-7(a)～(c)に実験値と比較して示す。これらの図から、通常クレーンの解析と同様に強制振動が終了する付近から、多少周期のずれはみられるが、解析結果と実験値はよく一致しており、ばね要素とダンパー要素による免震機構のモデル化は有効であるものと考えられる。

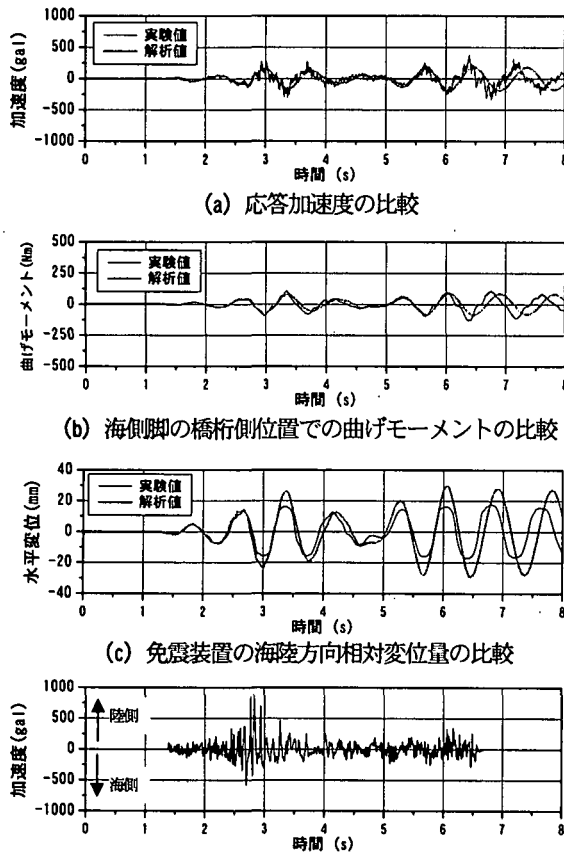


図-7 免震クレーンの固定時の解析結果

3. 簡易モデルによる解析

通常クレーンと栈橋等との連成解析を実施する際に、クレーン脚の浮き上がり・脱輪現象を伴わない場合には、クレーンおよび栈橋の2質点系モデルのより地震時の応答特性を表現することが十分可能であることは、山本²⁾らによって報告されている。ここでは、栈橋等との連成解析に用いる免震機構を持つクレーン単体の1質点モデルについての検討を行った。図-8に簡易モデルの概要を示す。通常クレーンモデルはクレーン重量を質点に与え、本体の剛性および減衰を表すばねとダッシュポットで結合されている。免震クレーンは、さらに、免震機構のばね剛性と減衰を表すばねとダッシュポットを結合し、クレーン重心位置の応答を求めるモデルとした。図-9(a)(b)に入力地震波として最大加速度1.0倍の八戸表面波を入力したときのブームダウン時の通常クレーンおよび免震クレーンの応答加速度の波形を示す。八戸表面波1.0倍は、通常クレーンにおいて脱輪が生じなかったケースである。本体剛性は模型固有周期と模型重量から

算出し、減衰比は計測値を与えた。図から質点モデルの計算結果は、実験結果をよく捉えており、通常クレーンのモデルに免震ばねを設けることにより免震クレーンの応答を表現できることがわかる。

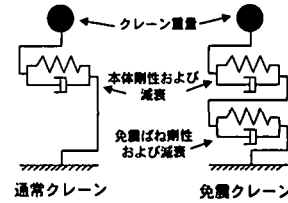


図-8 簡易モデル概念図

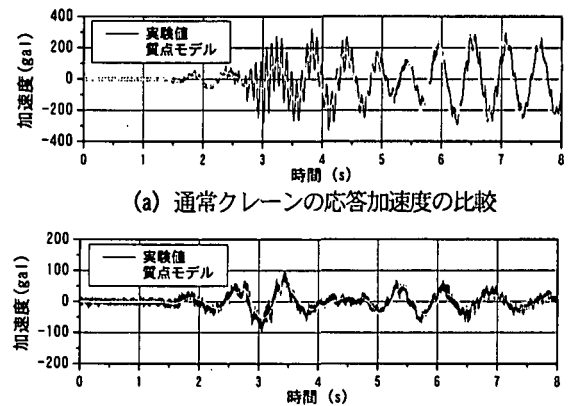


図-9 計算結果の比較

4. まとめ

振動加振実験、3次元FEMモデルによる過渡応答解析および簡易モデルの計算より以下の知見が得られた。

- (1) クレーン本体と走行装置の間に免震装置設けることにより、固有周期を長周期化（実機換算で2.0sを4.0s）でき、クレーン本体の応答加速度および脚に発生する曲げモーメントを低減することができる。
- (2) 免震機構を取り入れた3次元FEMモデルにより、免震クレーンの地震時挙動は表現できる。
- (3) 免震機構を取り入れた1質点モデルにより、クレーン重心位置の応答加速度の算定は可能である。

なお、本研究は運輸省（当時）港湾技術研究所とNKK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」の中で実施したことをここに記す。

謝辞：本研究にあたっては、科学技術振興財団の田中剛氏、海老原健介氏の多大な協力を得ている。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) (社)港湾荷役機械化協会：コンテナクレーン耐震設計の手引き，1999.2
- 2) 山本ら：栈橋式岸壁と荷役機会の地震時挙動に関する模型振動実験，構造工学論文集，Vol. 46A，2000.3

(2001.5.25 受付)