

ガントリークレーンの耐震性向上に関する研究

菅野高弘1·芝草隆博2·槇本洋二3

 ¹独立行政法人 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造振動研究室長 (〒239-0286 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
 E-mail:sugano@pari.go.jp
 ²三井造船株式会社 鉄構・運搬機事業本部 大分鉄構運搬機工場 設計部 課長補佐 (〒870-0395 大分市日吉原3)
 E-mail: shiba@mes.co.jp
 ³三井造船株式会社 技術本部 CAEセンター 主幹 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)
 E-mail: makimoto@mes.co.jp

コンテナターミナルは、コンテナ専用岸壁にガントリークレーンを設置し、コンテナヤードに各種荷役 機械を有する.クレーンは厚生労働省の「クレーン構造規格」(告示)によって設計され、岸壁・ヤード は国土交通省の「港湾の施設の技術上の基準」によって別個に設計されている.クレーン・岸壁の動的相 互作用を考慮することによる合理的な耐震設計のために、1/15縮尺模型による振動実験および数値解析を 実施した.さらに、耐震性向上のために免震機構をクレーンに設置した実験を実施し、その効果を確認し た.免震化により、クレーン構造体への地震荷重を軽減出来ることに加えて、岸壁への負荷も軽減できる ことが示された.

Key Words : gantry clane, quay-wall, container berth, seismic performance, base-isolation, dynamic interaction

1. はじめに

近年,輸出入貨物のコンテナ化が急速に進み,現 在ではその玄関口となるコンテナターミナルの担う 役割は大きく,我が国の経済活動の拠点としてその 重要度は極めて大きなものになっている.我が国の 港湾における取り扱い貨物量は,1970年代のコンテ ナの出現により急激に増加した.以降も増加の一途 をたどり,現在の取り扱い貨物量は1950年の30倍程 度まで膨れ上がっている¹⁾.ガントリークレーンは 厚生労働省のクレーン構造規格(告示)に基づき重 エメーカーが設計・製作している一方で,岸壁は土 木技術者が,国土交通省の「港湾の施設の技術上の 基準・同解説」²⁾を基に,設計・施工しているのが 現状である.

平成7年兵庫県南部地震においては、陸上輸送が ほぼ麻痺状態に陥ったため、復旧活動には海上輸送、 ヘリコプターなどによる空路輸送、人力(徒歩,自 転車)およびバイクによる輸送などの活用が、多数 報告されている³⁾.大地震に見舞われると陸上交 通は重大な被害を受けることが想定されるのに対し、 港湾施設は震災直後の海上交通の安定性を活かした 緊急物資輸送等の実施及び避難場所の提供による市 民の安全の確保に加え,震災後も被災地の復旧・復 興の支援といった重要な役割を担うこととなる.

このように震災における港湾施設の役割は非常に 重要であり、平成7年兵庫県南部地震を教訓に現在 では社会性や経済性を考慮し、とくに重要な港湾施 設は耐震強化施設と位置付け、レベル2地震動(再 現期間数百年の地震動レベルで、供用期間中に発生 する確率が低いが大きな強度を持つ地震動)を対象 とした耐震性能を考慮した設計が取り入れられてい る²⁾.

一方,一般的にガントリークレーンの設計水平震度 は0.2を用いており,岸壁の設計に当たりガントリ ークレーンの輪荷重およびクレーン重量の設計震度 相当分の水平荷重を考慮している.耐震強化岸壁と して水平設計震度が0.2を超える場合には,岸壁の 設計震度とクレーンの設計震度が異なる不整合が生 じることになる.この様な不整合は,万一の地震時 に耐震強化岸壁が無被災であってもガントリークレー ンが被災する可能性を有することになり,コンテナ 船の接岸は可能であるが,コンテナの荷役が出来な いことが想定される.このため,耐震強化岸壁に設



図-1 一般的な桟橋式岸壁断面図

置されるガントリークレーンについても、「耐震強化 施設」としての全体的な耐震性を保持するため、岸 壁と同等の耐震性能を備える必要がある.

ガントリークレーンはレール上を走行し,直接基礎 に固定されていない構造物であるため,それらが受 ける地震被害は,脚の浮き上がりや脱輪などのクレ ーン特有の地震時挙動が密接に関係している⁴.こ れらより,レベル2地震動に対しても,損傷や脱輪 がなく,地震後すぐに荷役作業を行えるクレーンと して,免震ガントリークレーンを開発,実用化した.

ガントリークレーンの地震時挙動に関しては, 稲富 ら⁵⁾, 田中ら⁶⁾の2次元等価線形解析による桟橋とクレ ーンの動的相互作用に関する研究があるが, 数値解 析のみのアプローチであり, 脚の浮き上がり現象に ついては検討していない.また, 模型振動実験に関 しては柏崎ら⁷⁾, 金山ら⁸⁾が1/8模型による挙動解析 を実施し, 既存ガントリークレーンの地震時の脚の浮 き上がりについて検討しているが, 免震機構や岸壁 への影響については検討されていない.

この様な背景のもと、本研究では、非免震クレーン(免震装置がない従来のクレーン)模型の試験による地震時挙動の確認、免震クレーン模型の試験による免震装置の効果検証について述べる.また、ロープで吊られた吊荷との動的相互作用、一部の免震装置が作動しない場合の地震時挙動についても検討している.

2. コンテナ専用埠頭の概要

コンテナ岸壁の構造形式には重力式,矢板式,桟 橋式等があるが,中でも桟橋式岸壁は,ガントリー クレーンの固有周期が桟橋のそれと同程度であるた め,他の構造形式に比べて顕著な動的相互作用があ るものと考えられる.

一般的な桟橋式岸壁の断面図を図-1に示す. 複数 本の鋼管杭によって桟橋上部工が支えられている構 造である.主に上部工は鉄筋コンクリート製で,鋼 管杭と上部工は剛結されている.標準的な上部工重 量は,1ブロック当たり約17,500kNであり,固有周 期は0.4秒から0.7秒のものが多い⁹.

一般的なガントリークレーンを図-2に示す. 脚スパ



ン30m程度のコンテナ専用船に対応するもので,一般的にスーパーガントリークレーンと呼ばれている.ガントリークレーンの構造は,大型コンテナ船とコンテナトレーラー車間の荷役であるため,トレーラのアクセスのため4本の鉛直脚部分の剛性が低く,地上高15mから上の構造はトラス構造となっており比較的剛性が高い構造となっている.クレーンの重量は約10,000 kNで,固有周期は2秒程度である¹⁰.

3. ガントリークレーンの耐震性向上策

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」²⁾には, レベル2地震時の耐震性能として「施設の被害が生 じたとしても,それが軽微であり,地震後に速やか に機能の回復が行える状態を指すものとする.」と されている.この耐震性能を満足するため,クレー ンには大地震が起こっても脱輪や損傷を回避でき, 地震後すぐに荷役作業を行える性能が要求される.

耐震性を向上させる設計法として一般的に下記の ような設計技術が考えられる.

- · 剛構造設計法 (剛性補強型)
- ・制振設計法(地震エネルギ吸収型)
- 免震設計法(地震エネルギ遮断型)

剛構造設計法は構造物を補強する方法であり,各部材の地震時発生応力が,許容応力度内に収まるように剛性を上げたり,重心位置を下げて脚の浮き上がり等を防止するものである.このため,通常のガントリークレーンの重量が9,000kN~10,000kN程度であるのに対して,設計震度を0.27とした場合には15,000kN~16,000kN程度の重量となることが試設計で確認されている.

制振設計法はマス・ダンパのような質量効果を利 用した制振装置と粘性ダンパなどの減衰機器を設け 構造物の減衰機能を強化して、地震時の応答を抑制 する方法である.質量効果を利用した場合には、 10,000kN程度のガントリークレーンの応答を制御す るため制振機構の重量を付加することになる.

また,免震設計法は構造物と基礎の間にボールベ アリング,テフロン支承,積層ゴムのような剛性の 低い機構を介在させ,大きな地震力がそのまま構造 物に伝わらないようにする方法である.

ガントリークレーンの耐震性向上対策として、海域 環境下であること、軟弱な沿岸域の岸壁に設置され るなどの条件を考慮し、以下の観点から検討した.

- 維持管理が容易であること
- ・岸壁への負荷が小さいこと
- ・万一,損傷が生じた場合に機能回復が容易であ ること.

以上を総合的に勘案して,免震設計法を採用した. 採用理由としては、想定する免震機械要素について 土木・建築分野における長年の実績を有すること. さらに、平成7年兵庫県南部地震によって被災した ガントリークレーンの被災原因のひとつである。脚 の浮き上がりが免震化により抑制でき、脱輪防止が 見込める.また、ガントリーレーンの重量増加が少 ないことから地震時のクレーンの鉛直、水平反力が 低減でき、岸壁への負荷が増大しないため岸壁建設 コスト低減に寄与できることも期待できる.一方, 地震時に入力されるエネルギーを変位で消費する免 震機構であることから、クレーンの振動変位が大き くなるため、荷役作業時におけるクレーン操作性の 悪化やクレーンオペレータの船酔いが懸念されるが, これについては免震装置の作動を地震時に限定し, 荷役作業時は作動しないように固定することで対処 することとした. 固定方法として, 油圧ブレーキ・ 電磁ブレーキ等の装置やシヤピンのような材料物性 を活用したものが挙げられるが、本研究では、停電 時や休止時にも確実に作動すること・メンテナンス が容易であることを考慮してシヤピンによる固定を 採用し、地震時に作用する水平慣性力によってシャ ピンが破断,免震機構が作動するように設定した.

4. 模型振動実験によるガントリークレーンの 地震時挙動把握

(1) 模型の相似則

模型実験に際して、1G場において振動実験を実 施すること、ガントリークレーンの振動挙動を再現 することを主目的とすること,及び市販されている 鋼材を使用することから 1G 場の相似則を構築した. ここで、模型の幾何縮尺をんとする. 同様に他

の物理量についても下付添字を用いて, 密度の縮尺 λ_o ,時間の縮尺 λ_i ,ひずみの縮尺 λ_i とおく.加速 度,慣性力,曲げ剛性,質量,振動数,断面積,断 面2次モーメントは以下のように示すことができる. 2/22

加坯皮		$\lambda_{\alpha} = \lambda_l / \lambda_t$	(1)
慣性力	$\lambda_f = \lambda_\rho \cdot \lambda_l^3 \cdot $	$\lambda_{lpha} = \lambda_{ ho} \cdot \lambda_l^{3} \cdot \lambda / \lambda_t^{2} = \lambda_{ ho} \cdot \lambda_l^{2}$	$\lambda_l^4 / \lambda_t^2$
			(2)
曲げ剛	生	$\lambda_{_{EI}} = \lambda_{_{ ho}} \cdot \lambda_{_{g}} / (\lambda_{_{l}}^{_{5}} \cdot \lambda_{_{arepsilon}})$	(3)
質量		$\lambda_m = \lambda_ ho \cdot \lambda_l^3$	(4)
振動数		$\lambda_{\omega} = 1 / \lambda_t$	(5)
断面積		$\lambda_A = \lambda_L^2$	(6)

断面 2 次モーメント
$$\lambda_I = \lambda_I^4$$
 (7)

1G 場の模型振動実験であることから、加速度の縮

$$\lambda_t = \sqrt{\lambda_l} \tag{8}$$

が成立する.また,幾何縮尺に対応して剛性を低下 させる場合には、剛性の縮尺に合致した弾性係数を 有する材料を使用する必要があるが、一般的に入手 が不可能である.本研究で対象としているガントリ ークレーン脚の浮上り現象は、脚の曲げ特性が支配 的であること, さらに, 振動特性が重要なファクタ ーであることを考慮し,現象の支配方程式として, 梁の曲げ振動の運動方程式を導入する.

$$EI\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \rho A\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$
(9)

ここで、EI:曲げ剛性、 ρ :密度、A:断面積、 *u*:変位,*t*:時間 である.

模型(m)と実機(p)の物理量の関係として式(10)~ 式(15)を定義する.式(14)及び式(15)は微分演算子で あるが、同様に模型と実機において縮尺が成立する ものとする.

a)

$$(u)_p = \lambda_l \cdot (u)_m \tag{10}$$

$$(t)_p = \lambda_t \cdot (t)_m \tag{11}$$

$$(E \cdot I)_p = \lambda_{EI} \cdot (E \cdot I)_m \tag{12}$$

$$(\rho)_{p} = \lambda_{\rho} \cdot (\rho)_{m}$$

$$(13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{p} = \frac{1}{\lambda_{l}} \left(\frac{\partial}{\partial x} \right)_{m}$$
(14)
$$\left(\frac{\partial}{\partial x} \right)_{m} = \frac{1}{\lambda_{l}} \left(\frac{\partial}{\partial x} \right)_{m}$$

$$(OI)_p ~ \lambda_i (OI)_m$$
 (15)
式(10)~式(15)を式(9)に代入して,

$$\lambda_{EI}(EI)_{m} \cdot \frac{1}{\lambda_{l}^{4}} \left(\frac{\partial^{4}}{\partial x^{4}} \right)_{m} \lambda_{l}(u)_{m} + \lambda_{\rho}(\rho)_{m} \lambda_{l}^{2}(A)_{m} \frac{1}{\lambda_{l}} \left(\frac{\partial^{2}}{\partial t^{2}} \right)_{m} \lambda_{l}(u)_{m} = 0 \quad (16)$$

模型においても梁の曲げ振動の運動方程式(9)が成 立するためには、式(17)が成立することが条件とな る.

$$\lambda_{EI} \cdot \lambda_{I}^{-3} = \lambda_{o} \cdot \lambda_{I}^{3} \cdot \lambda_{t}^{-2} \tag{17}$$

本研究における模型製作では, 市販の鋼材を用いる ことから模型と実機のヤング率が同一となる.

$$\lambda_{\rho} = 1 \tag{18}$$

$$\lambda_{\varepsilon} = 1 \tag{19}$$

これらを,式(17)に代入することにより,
$$\lambda_{EI} = \lambda_{I}^{5}$$
 (20)

式(20)を満足するためには、曲げ変形において材料 の弾性係数を変えることと等価になるよう、断面2 次モーメントをさらに1/λ とする必要があり、模型 の設計においては断面形状を変えて対応した.以上 から、本研究で用いる相似則として表-1に模型縮尺 1/15の場合を例として示す.

物理量		次元	相似則	実機/模型
幾何縮尺	λ_l			15
弾性係数	E	$ML^{-1}T^{-2}$	1	1
長さ	1	L	λ_l	15
加速度	α	LT^{-2}	1	1
時間	t	Т	$\sqrt{\lambda_l}$	3.873
振動数	ω	T^{-1}	$1/\sqrt{\lambda_l}$	0.258
変位	U	L	λ_{l}	15
質量	т	MLT^{-2}	λ_l^3	3375
力	f	MLT^{-2}	λ_l^3	3375
バネ定数	k	MT^{-2}	λ_l^2	225
密度	ρ	ML^{-3}	1	1

表-1 1/15 模型の相似則

(2) ガントリークレーン模型概要

模型は実機スパン30m級,実機重量約11000kN, 脚構造が剛脚構造の中折れブーム式ガントリークレ ーンを対象とした.クレーン状態はクレーンの脚が 最も浮き上がりやすい作業時状態(ブームダウン, トロリアウトリーチ位置)および休止時状態(ブー ム中折れアップ,トロリ係留位置)とした.

模型は実機の1/15スケールで、相似則(表-1)に 基づいて設計し,質量の付加,剛性の低減などの修 正を施している.模型設計に当たって、クレーン部 材の破壊現象を再現することを目的とした場合には, 構成材料の材料特性(例えば,応力-ひずみ関係, 降伏特性等)を実機と模型の間で整合性を持たせる 必要があるが, 忠実に再現する材料を得ることが困 難であることから、部材の断面形状を変えて剛性を 低減させる方法を採用した. すなわち対象とする現 象が振動であることから実機のモード解析から得ら れる低次のモードを模型において再現することを目 標とした.これにより模型全体の振動特性(固有周 期等)を再現している.ただし、高次モードで顕著 になる各部材の振動特性については、相似則を全て 満足していないため、実機と異なる箇所がある.模 型の代表寸法を図-3に示す. 図-3において四つのク レーン脚を区別するため、海側脚をL1、L2、陸側 脚をL3, L4とした. 模型重量は実測値でブームダ ウン時3349N,ブーム中折れアップ時3295N,模型 重心位置の実測値は図-3に示す座標系でブームダウ ン(X=0mm, Y=494mm, Z=2407mm), ブーム中折 れアップ (X=0mm, Y=1060mm, Z=2716mm) であ る.一方,実機の重量および重心位置(計算値)を 相似則に合わせたものは、ブームダウン3193N, (X=4mm, Y=477mm, Z=2426mm), ブーム中折れ アップ3094N, (X=4mm, Y=1053 mm, Z=2676mm) であり,計測から得られた模型の重心位置は実機と 同位置となった.

本模型では、ブームダウン時の非免震クレーン模型の実機換算1次固有周期が1.94sに対して解析値が2.05sとなっており5%未満の誤差であった.こ





のことから製作した模型は所期の特性を満足しているものと判断した.減衰特性については模型では h=0.01 程度となり、実機の h=0.05(設計値)と比較すると小さいが、安全側の評価となる.



図-5 ブームダウン免震試験結果時刻歴(八戸地表面波 480Gal 加振)

(3)免震機構模型

免震装置模型は相似則を適用した1/15縮尺模型で、 積層ゴム免震アイソレータ、ダンパ、平行リンク、 モーメント受けローラによって構成されている.免 震装置を固定するシアピンは模型製作が困難である ことから免震装置作動および非作動状況を再現する こととした.アイソレータ模型水平ばね定数および ダンパ模型減衰係数は下記とした.

・アイソレータ模型水平ばね定数:0.506N/m
 ・ダンパ模型減衰係数:0.059N・s/m

模型の機構を図-4に示す.

これにより固有周期が実機換算3.7s, 減衰特性は h=1程度となった. 模型レベルではダンパーの変位 が小さいことから大きな減衰定数となっている.

(4) 模型振動実験

振動実験に使用した地震波は、港湾施設の設計で 用いられることの多い、八戸波NS成分(1968年十 勝沖地震、八戸港で観測した地表面波、卓越周期は 2.7秒)、大船渡波E41S成分(1978年宮城県沖地震、 大船渡港で観測した地表面波、卓越周期は0.8秒)、 神戸ポートアイランド波(PI波)NS成分(1995年 兵庫県南部地震、神戸ポートアイランドで観測した 地表面波、卓越周期は1.9秒)を相似則に基づいて、 時間軸を $1/\sqrt{15}$ にしたものである.加振は、最大加 速度を100Galから480Galまでの範囲でステップ加振 として実施した.本検討では,免震機構の有無とク レーンの地震被災程度を明らかにするため入力地震 波の卓越周期とクレーンの固有周期に着目している. しかし,実機の設計においては,設置位置の地盤-岸壁-クレーンの動的相互作用となり,複雑な挙動 を示すものと考えられ,これらの連成を考慮する必 要がある.

(5) 非免震/免震クレーンの地震時挙動

a) 八戸波による加振実験

図-5に加振実験の時刻歴の一例(八戸波480Gal) を示す.ブームダウン時の非免震クレーン(左側), 免震クレーン(右側)である.免震機構の作動/非 作動の違いによって、クレーン重心位置における応 答加速度(横行方向)に大きな違いが読みとれる. すなわち、非免震クレーンで227Galに対して免震ク レーンが102Galとほぼ50%以下となる. 同様に脚に 発生するモーメントも免震クレーンのほうが小さい. 土木・建築分野と異なる点としては、非免震クレー ンの陸側脚の浮き上がり挙動が挙げられる. 図の陸 側脚の鉛直変位時刻歴において、3.2秒付近で脚の 浮上が生じるが、フランジ高さまでは至らず、脱輪 は生じない. さらに, 4秒付近で脚が浮き上がり, 車輪のフランジ高さ(1.65mm)を越え2.2mmまで浮 き上がりが生じている.これにより脱輪,走行レー ル内側(海側)のレール面から10mm下の地表に落



図-6 ブーム中折れアップ免震試験結果時刻歴(八戸地表面波 480Gal 加振)

下している. その後, 4.8秒, 6秒, 6.8秒まで脚の 浮上りが生じている.

これに対して,免震クレーンでは脚の浮上りは発 生せず,脱輪も生じていない.

ブーム中折れアップ時も同様であるが、応答加速 度は非免震クレーンで600Gal,免震クレーンで136Gal とブームダウン時と比較すると最大応答加速度は大 きくなる.よって部材に発生するモーメントも大き くなっている.

脚の浮き上がり現象としては、浮き上がる脚が海 側となり、脱輪後に脚は走行レールの内側(陸側) に着地しており、浮き上がり時刻は5.5秒付近で一 回のみである.

この様に、脚が浮き上がる現象は強い非線形性を 有しており、クレーンの状態によっても異なる.よ って、ガントリークレーンの耐震性を確保するため には、脚の浮き上がりが生じないように設計された 免震機構が有効であると考えられる.

b) 大船渡波, ポートアイランド波による加振実験

ブームダウン時の地震時挙動として、大船渡波 (480Gal)では、免震/非免震クレーンともに、脚の 浮き上がりや脱輪は生じなかった.最大応答加速度 は非免震クレーン104Gal、免震クレーン80Galとな っている. ー方,ポートアイランド波(120Gal)において脱輪が 生じた.このため非免震クレーンの実験は模型の損 傷が予想されるため中止している.非免震クレーン の場合は410Galまで入力加速度を上げたが,最大応 答加速度が264Galで陸側脚(L3)が1.1mm浮き上が った.

ブーム中折れアップ時(図-6)の場合,大船渡波 (480Gal)まで免震/非免震クレーンともに,浮き上 がりは発生していない.最大応答加速度は非免震ク レーンで152Gal,免震クレーンで96Galとなってい る.

ポートアイランド波(120Gal)では、非免震クレーン のL2、L3脚が1.1mm程度浮き上がっており、免震ク レーンの場合は410Galにおいても浮き上がりは発生 しなかった.

(6) 一部の免震装置が作動しない場合の加振実験

免震ガントリークレーンの効果が実験的に確かめら れたが、ブームダウン/ブーム中折れアップというク レーンの状態の違いに加えて、万一、4脚に設置さ れた免震機構の一部が作動しない場合を想定した実 験を実施した.

L1, L2, L4脚の免震機構が作動し,L3脚が作動し ない場合および,L4脚の免震機構が作動する場合





地震時に、4脚に配置した免震機構が同一入力レベルで同時に作動しなければ効果が期待できないことを示すものである.これはガントリークレーンの構造から、地震時のねじれモード(図-8)が卓越しているために発生するものと考えられる.

(7) 吊荷の影響

コンテナを吊った状態を再現するため吊荷模型は、 ブームダウン状態において、トロリよりロープで吊 り下げた吊具とコンテナ(実機重量:約550kN)に 相似則を適用した1/15縮尺模型を製作した.模型重 量は163N,ロープ長さはコンテナ船ホールド内荷 役時を想定した1.2m(実機:18m)と巻き上げ上限 位置を想定した0.3m(実機:4.5m)の2種類とした. 吊荷模型の固有周期は、ロープ長さ1.2mでは2.2s (実機:8.5s)、ロープ長さ0.3mでは1.1s(実機:

4.3s) である.

遭遇確率は低いものと考えられるが、今後24時間 の荷役体制になった場合も考慮し、実験を実施した が、結果としては、非免震クレーン模型と吊荷模型 の質量比は19:1であることや、吊荷模型がロープで 吊されていることから影響は小さいことが分かった.

5. 実験結果の考察

ブームダウン,ブーム中折れアップの非免震クレ ーンおよび免震クレーンの加振実験から,クレーン 重心位置の応答加速度は免震装置を取り付けること



により大幅に低減している. 八戸波ではブームダウ ンで55%, ブーム中折れアップで77%低減し, 大船 渡波ではブームダウンで23%, ブーム中折れアップで 37%低減している. 神戸ポートアイランド波(PI 波) 120Gal加振ではブームダウンで72%, ブーム中折 れアップで71%低減している. また, PI波ではブー ムダウン, ブーム中折れアップとも, 410Gal加振時の 免震クレーンの重心位置応答加速度は, 120Gal加振 時の非免震クレーンと比べて, 入力加速度が3.4倍以 上になっているにもかかわらず, 非免震クレーンの 応答加速度より小さくなっている.

また,免震装置により脚の浮き上がりが抑制され, 脱輪が防止されている.車輪部鉛直反力は,免震装 置により八戸波では50%以上,大船渡波では22%以 上,ポートアイランド波では62%以上低減している.

これは、桟橋に作用する鉛直荷重が小さくなるこ とを意味しており、桟橋の耐震設計へも反映させる ことが可能と考えられる.

脚のモーメントについても、免震装置により八戸 波では60%以上、大船渡波では11%以上、ポートアイ ランド波では59%以上低減している.

以下に本研究にて得られた結果を要約する.

- (1)非免震クレーン(免震装置がない従来のクレ ーン)は、大地震では脚の浮き上がりや脱輪 といった非線形挙動を伴う場合がある.
- (2) 脱輪が起こる場合は走行レールの内側に向かって生じる傾向がある.
- (3) 短周期成分の卓越する大船渡波では、非免震 クレーンでも脚の浮き上がりや脱輪は発生し なかった.
- (4) クレーンの応答加速度,脚のモーメントおよ び車輪部鉛直反力は免震装置により大幅に低 減される.
- (5) 非免震クレーンで発生する脚の浮き上がりお よび脱輪は免震装置により防止することが可 能である.
- (6) 一部のクレーン脚の免震装置が作動しない場

合は,免震装置がない非免震クレーンの場合 と脚の浮き上がりや脱輪の発生する入力加速 度レベルに大きな違いはない.

- (7)一部のクレーン脚の免震装置が作動しない場合の脚の浮き上がりにはクレーン走行方向へのねじれが影響している.
- (8) 吊荷をロープで吊した場合とブームに固定した場合などの実験から、クレーンの振動・脱輪特性に及ぼす吊荷の影響は小さい.

今後の課題

八戸波と大船渡波といった卓越周期の異なる入力 地震動におけるクレーンの地震時挙動からも分かる ように、地震動の卓越周期および岸壁の卓越周期と 免震ガントリークレーンの固有周期の関係について、 過去の地震記録、地盤特性、震源特性を十分検討し、 免震時の固有周期を設定する必要がある。

今回開発・実用化した免震ガントリークレーンは東 京港埠頭公社大井埠頭耐震第4バースに3台設置さ れ,2001年10月供用を開始した.この実機クレーンに ついては、製作工場内にて加振試験を行い、実機に おいても免震装置によりクレーンの固有周期が期待 どおり長周期化することを確認した¹¹⁾.

免震ガントリークレーンは、万一大地震が発生して も損傷したり、脱輪したりせず、地震後すぐに荷役 作業を行え、地震直後の緊急物資輸送などの復旧活 動や国内外の経済活動を支える物流機能の維持とい った重要な役割を担うものと期待できる.さらに、 免震ガントリークレーン基礎部である岸壁構造への負 荷が軽減されることから、コンテナバース建設コスト を縮減できるものと期待される.

なお,本研究は(独)港湾空港技術研究所・三井 造船(株)の共同研究として実施したものである.

参考文献

- (社)日本港湾協会:数字で見る港湾1999年版, pp.13-15,1999.
- (社)日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解 説,1999.
- 3) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会:阪神・淡路大震 災調査報告-機械編 機会設備の被害,(社)日本機会 学会, pp.223-232,1996.
- 4) 江頭隆喜、山本俊介、田邊俊郎、中島晋、菅野高弘、 宮田正史、柏崎昭宏、金山維史:大規模地震時におけ るコンテナクレーンの脚の浮き上がりに関する模型実 験、港湾技術研究所報告、第38巻、第2号、pp.475-492,1999.
- 5) 稲富隆昌,林聡,山下生比彦:大型荷役機械を上載す る桟橋の振動性状,港湾技術研究所報告,第12巻,第2 号,pp.7-32,1973.
- 6) 田中祐人,稲富隆昌,飯塚栄寿:兵庫県南部地震によるコンテナ岸壁とガントリークレーンの地震応答特性に関する基礎的研究,構造工学論文集, Vol.42A,pp.413-416,1996.
- 7) 柏崎昭宏,金山維史:浮き上がり特性を考慮した過大 地震時のコンテナクレーン挙動解析,日本機械学会機 械力学・計測制御講演論文集,Vol.B,pp.17-20,1996.
- 8) 金山維史,柏崎昭宏:浮き上がり特性を考慮した過大 地震時のコンテナクレーン挙動解析(第2報),日本機 械学会 機械力学・計測制御講演論文集,Vol.A,pp.292-295,1997.
- 2) 老平武弘,塩見雅樹:直杭式横桟橋の構造諸元の統計 的分析,港湾技研資料,No.749,pp.5-6,1993.
- 10)(社)日本港湾荷役機械化協会港湾荷役技術情報セン ター:日本におけるコンテナクレーン一覧表, 1998.
- 松永、小柳: 桟橋式耐震強化岸壁に設置した免震装置 付コンテナクレーン、港湾荷役、港湾荷役機械化協会、 Vol.47, No.1, pp.128-129,2002.

(2003. 6. 30 受付)

STUDY ON THE SEISMIC PERFORMANCE IMPROVEMENT OF CONTAINER CRANE

Takahiro SUGANO, Takahiro SHIBAKUSA, Yoji MAKIMOTO

The 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake caused extensive damage to the container handling cranes at the container terminals of Kobe Port. Consequently, the authors developed a seismic isolated container handling crane that could avoid damage and wheel derailment in a strong earthquake, and restart loading and unloading immediately after an earthquake. The authors made an experiment with a scale model in order to verify the isolation system effectiveness. The developed container craine uses the seismic isolation system installed between the gantry truck and the leg. The authors used the laminated-rubber seismic isolator as system to make the natural period of the crane longer and isolate earthquake energy. Laminated-rubber isolators have been widely installed on bridges, buildings and other structures for many years. This paper verifies the seismic isolation system effectiveness by a scale model test, such as the reduction of crane acceleration response and prevention of wheel derailment. Further, this paper shows that the container hung by the rope doesn't have influence on the dynamic behavior of the crane and what some of 4 seismic isolation system units doesn't operate has influence on crane acceleration response and the uplifting of the leg.