

# 港湾荷役機械の免震化に関する 模型振動実験

山本 俊介<sup>1</sup>・佐藤 栄治<sup>2</sup>・中山 義紀<sup>3</sup>・菅野 高弘<sup>4</sup>・田邊 俊郎<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 (株)日本港湾コンサルタント 技術開発部 (〒141-0031 東京都品川区西五反田8-3-6)

<sup>2</sup>運輸省港湾技術研究所 計測施工研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 電源開発(株) 茅ヶ崎研究センター (〒253-0041 茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

<sup>4</sup>正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造振動研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>5</sup>正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 設計技術研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

コンテナ埠頭岸壁等に設置されるコンテナクレーンの地震時の挙動として、脱輪現象が兵庫県南部地震等で確認されている。コンテナクレーンは構造形式により脱輪を起こすと転倒することも確認されている。また、脱輪を起こさない場合でも脚部の変形・座屈により使用不能となった例が多い。一方、クレーンを有する岸壁基礎に対しても地震時にクレーン荷重の与える影響は大きいものと推測され、さらに、クレーンが脱輪する場合はその衝撃荷重が作用するものと考えられる。そこで、本研究では1/15縮小模型による振動台実験を行い、地震時のクレーン脱輪現象等の影響を確認したうえでコンテナクレーンの免震化を提案し、クレーン本体、クレーン基礎に対する耐震性能の向上を確認した。

*Key Words : container crane, shaking table test, response controlled,*

## 1. はじめに

兵庫県南部地震では、神戸市のポートアイランドや六甲アイランドでは、コンテナ岸壁やコンテナクレーンの被害が著しく、重力式のコンテナ岸壁が海側へ大きく変位し、クレーンの脚が両開き状態となり被害が生じた<sup>1), 2), 3)</sup>。また、クレーン脚の浮き上がりに起因すると推定される被害もみられた<sup>4)</sup>。この地震以降、コンテナ岸壁を含む港湾施設の耐震設計法の見直しが急速に進められており、耐震強化岸壁はレベル2地震動が採用され、設計震度0.2を上回るようになった。さらに設計後の変形等の照査を行うこととしており、動的な解析手法が導入されている<sup>5)</sup>。ここでレベル2地震動とは、供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を有する地震動で再現期間が数百年以上の地震動を指す<sup>6)</sup>。コンテナ埠頭岸壁のように、社会的、経済的に重要な意味を持つものは、耐震強化岸壁とし、レベル2地震動による設計が採用されるようになったが、そこに設置される荷役機械については基本的には従来通りの許容応力度法により基本設計がなされている。しかし、コンテナ埠頭施設全体を耐震強化施設と考えた場合、コンテナクレーンの脱輪による影響は地

震後の即時復旧という観点から好ましくなく、経済的、社会的なダメージを与える原因となる。実際、兵庫県南部地震により被災を受けたコンテナ埠頭施設は、完全復旧に早くとも2ヶ月強の時間を要し、復旧後の貨物取り扱い率も震災前に比べ減少している<sup>7)</sup>。このような背景から、コンテナクレーン等の港湾荷役機械についても何らかの耐震化の必要性があり、そのことは岸壁の耐震設計に対しても重要なファクターになるものと考えられる。

そこで、本研究では地震時のコンテナクレーンの特徴的な挙動である脚の浮き上がりに着目し、クレーン自体に及ぼす影響、また岸壁側の基礎に及ぼす影響を考慮した上で、コンテナクレーンの免震化を提案し、1/15縮小模型を製作し大規模振動台による加振実験によりその有効性を検討した。

## 2. 免震コンテナクレーンの概要

### (1) 検討対象の概要

検討の対象となるコンテナクレーンを図-1に示す。脚スパン30m級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

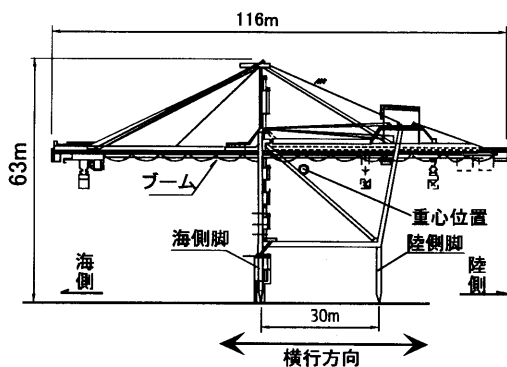


図-1 一般的なコンテナクレーン

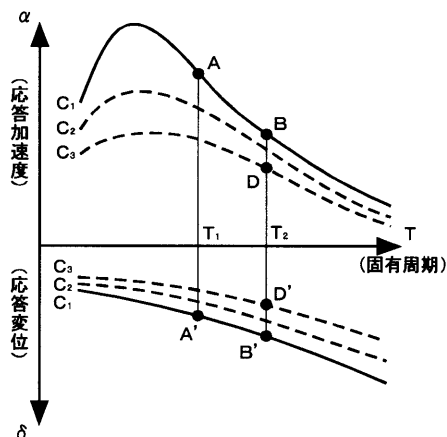


図-2 免震機構の考え方

れている。クレーンの重量は約 10,000kN である。クレーン脚の構造形式には海側、陸側の両脚上端部が水平部材と剛結合されている構造のもと、海側または陸側の片側脚が水平部材とピン結合されているものがある。一般的には、前者を剛脚式クレーン、後者を揺脚式クレーンと呼ぶ。剛脚式クレーンの固有周期は、実機を対象として常時微動観測により微動波形を計測し、スペクトル解析処理した結果と FEM による固有値解析の結果との比較から約 2.0s であるとされている<sup>8)</sup>。それに対して揺脚式クレーンの固有周期を実機計測した例はないが、固有値解析等から一般的には剛脚式より長い約 2.0～3.0s 程度と考えられている。また、揺脚式クレーンは地震時に、脚が浮き上がり脱輪すると脚端部のヒンジ部が折れ曲がり転倒する危険性がある。兵庫県南部地震の被害の中にも転倒に至ったケースが確認されている<sup>9)</sup>。

## (2) 免震機構の概要

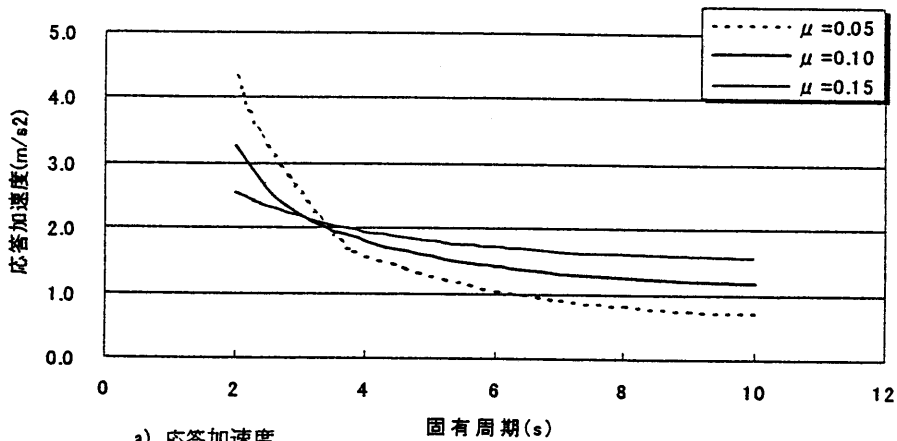
免震設計は大規模地震時における被害を低減させる一手法として、これまで建築工学分野において実現化されており、その開発も進んでいる。これらに応用したコンテナクレーンの免震対策についても様々な形式が提案されているが実例はない。また、岸壁等の基礎側での対策はその構造物の規模が大きかったり、基礎が既設構造物であったりするケースがあることからその対策を施すには経済的に大きな課題がある。そこで本研究では、クレーン本体側に免震機構を導入することでコンテナクレーンに伝達される地震による力が低減される構造とした免震対策をクレーン脚部に設置する構造とした。

免震機構には様々な形式があるが、本研究では摩擦型の免震機構を採用するものとする。採用の主な

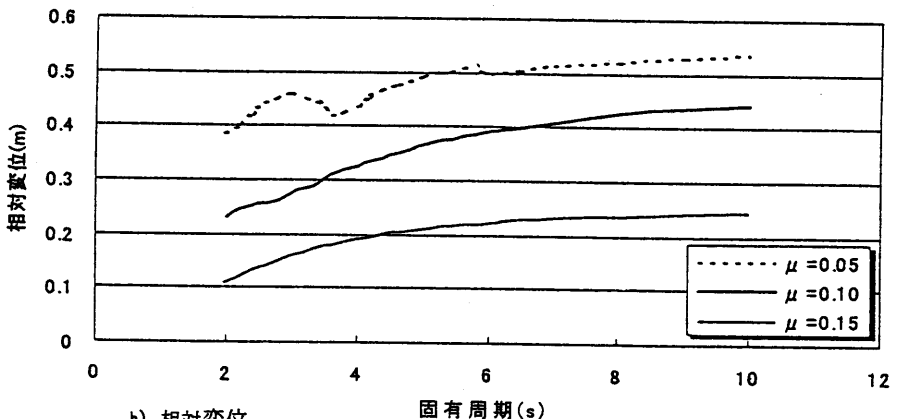
理由は、荷役機械のように常時（多くの時間）荷役作業により動作している構造物において、ビル等の陸上構造物に一般的な積層ゴム等による長周期化のみによる免震機構を採用すると、

- ① 常時長周期の揺れによりオペレータのスペッダー操作（コンテナの積み卸し操作）に影響を与える恐れがあること。
- ② オペレーターが作業中に酔うといった荷役作業上の問題の発生が考えられること。

から、コンテナクレーンのような荷役機械の免震には、地震時に入力地震動が過大に伝達されないようにするだけではなく、通常時において荷役作業に影響を与えない機構が必要であり、この制約条件に対して有効な形式と考えられるためである。コンテナクレーンにおける免震機構の基本的考え方を図-2に示す。免震機構はその固有周期を長周期化することによりクレーンの応答加速度を低減させることができるが（図中A→B）、その一方で応答変位は増大する（A'→B'）。そこで減衰機能を向上させることにより、応答変位を低減させる（B'→D'）が必要になる。この結果、常時においても過大な変位量を抑制され、クレーンの使用状態に適した特性（A-A'）を有することで、大規模地震時において免震機構の効果により過大な応答加速度と応答変位を低減することが可能となる。こうした特性を有するものとして、積層ゴム等を採用した場合には前述した荷役作業上の理由から通常時には、免震が作動しないようにする電氣的または機械的なスイッチ（シアピン等）が必要になる。しかし、地震時にスイッチが予定通り作動しない可能性や、クレーンの通常作業（走行やスペッダーの横行作業）において免震が作動してしまう可能性や、さらに適時に作動



a) 応答加速度



b) 相対変位

図-4 摩擦免震機構系の応答スペクトル

したとしても作動後にスイッチの交換等のメンテナンスが必要になるものと考えられる。一方、摩擦型の場合は構造的に単純なことから、適当な摩擦係数を与えれば通常時の荷役作業に影響を与えることなく、過大な地震力が作用した場合のみ免震が作動するようにでき、さらにスイッチ等の交換といった地震後のメンテナンス作業も少ないことから荷役システムの早期復旧という面からも荷役機械の免震機構として適していると考えられる。次に摩擦型の免震機構について考え方の概略を示す。まずクレーンを剛体と仮定し、免震機構部の1自由度だけを考えたモデル（摩擦1自由度系モデル）に関する運動方程式は以下のとおりとなる。

《非すべり時》  $m(\ddot{x} + \ddot{\phi}) < \mu mg$  の時

$$x = 0 \quad (2-1)$$

《すべり発生時》  $m(\ddot{x} + \ddot{\phi}) \geq \mu mg$  の時

$$m(\ddot{x} + \ddot{\phi}) + c\dot{x} + kx + \text{sgn}(x)\mu mg = 0 \quad (2-2)$$

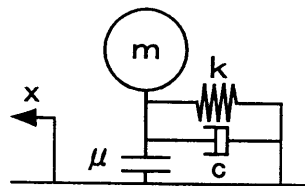


図-3 1質点摩擦型免震モデル

ここで、  
 $x$  : 免震床の基盤面に対する相対変位  
 $\phi$  : 基盤面の絶対変位  
 $m$  : 質量  
 $k$  : 復元ばね定数  
 $c$  : 粘性抵抗  
 $\mu$  : 摩擦係数

上記のような解析には、図-3に示す摩擦を考慮した非線形解析モデルを用いる。これは、免震装置に作用する地震時慣性力が摩擦力に達したときすべりが生じると仮定したものである。この摩擦については、

静摩擦係数と動摩擦係数が等しく摩擦係数の大きさが速度に依存しないCoulomb摩擦と仮定するのが一般的である。

ここで、図-3に示したモデルをクレーンモデルの脚部に採用すると構成部材との関係は次のようになる。

- m : クレーン質量 (脚部負担質量)
- k : 免震機構の復元ばね定数
- c : 免震装置が作動した時のクレーン横行方向 (海陸方向) に対する減衰定数
- $\mu$  : 摩擦型免震機構による摩擦係数
- x : 免震装置が作動した時のクレーン横行方向 (海陸方向) の基盤に対する相対変位

となる。ここで、解析モデルではクレーンを剛体と見なしているが、実際には前述したとおり、クレーンは固有周期が2s程度の柔な構造物である。従って剛体と見なすことは正確ではない。しかし、免震装置のばね定数をクレーン固有周期より算定されるばね定数より小さくすれば (モデルの長周期化)、発生する応答加速度や相対変位はクレーンを剛とした条件から見積もることが出来るものと考えた。

摩擦免震機構系の応答スペクトルを図-4に示す。

ここで、計算に使用した地震波は1995年兵庫県南部地震の神戸ポートアイランドで観測されたNS成分波 (以降、PI波とする) を使用した。また、摩擦型一質点系モデルには厳密には固有周期が存在しない為、グラフの横軸には、摩擦係数が0の時、すなわち摩擦機構が存在しないモデルの固有周期を便宜上用いている。図-4 a)より、摩擦係数が小さい場合、応答スペクトルは線形に近い特性 (摩擦係数を持たない一質点系モデルのような特性) を示している。すなわち、系は短周期での応答加速度が大きく、長周期の応答加速度は小さいという固有周期に依存する特性を持っていることがわかる。一方、摩擦係数が大きい場合には、小さい場合に比較して固有周期に殆ど依存しないという特性を有している。また、事前に行ったノーマルクレーンモデル (免震機構を持たない通常のコンテナクレーンモデル) に対する振動実験では、重心位置の応答加速度が $3.0\text{m/s}^2$ 程度で脚の浮き上がりが発生することが確認されているので<sup>10)</sup>、応答加速度として $2.5\text{m/s}^2$ 以下程度を目標値とすると、免震機構の固有周期としては図-4 a)から約3.0s程度を目安とすれば良いものと判断出来る。一方、変位については、図-4 b)から摩擦が大きいほど小さくなる事がわかるが、当然のごとく摩擦を大きくすると地震時には免震の効果がなくなり、また、地震後の残留変位も大きくなると推測される。従って、実機における免震機構の諸元や通常時の固定機構の解除レベルを考慮すると、摩擦係

数については0.1程度を目標とすることが適当であると判断した。さらに、コンテナクレーンは突風時において、一般的に設計震度0.08程度で設計されていることから、作業中の突風では免震装置が作動しないレベルとして、摩擦係数を0.1程度にすることは適当であると判断できる。

### 3. 模型および実験概要

#### (1) 模型の概要

図-5に模型および実験振動台の全景を示す。

##### a) 適用相似則

本実験に対する適用相似則の考え方として、幾何縮尺を $N_l$ 、密度の縮尺を $N_\rho$ 、歪みの縮尺を $N_\varepsilon$ を基礎相似比とすると、実験に対する主な物理量は次のようになる。

$$\text{加速度} : N_g = N_l \cdot N_l^{-2} \quad (3-1)$$

$$\text{慣性力} : N_f = N_\rho \cdot N_l^4 \cdot N_l^{-2} \quad (3-2)$$

$$\text{曲げ剛性} : N_{EI} = N_\rho \cdot N_g \cdot N_l^5 \cdot N_\varepsilon^{-1} \quad (3-3)$$

$$\text{質量} : N_m = N_\rho \cdot N_l^3 \quad (3-4)$$

$$\text{振動数} : N_\omega = N_l^{-1} \quad (3-5)$$

$$\text{断面積} : N_A = N_l^2 \quad (3-6)$$

$$\text{断面2次モーメント} : N_I = N_l^4 \quad (3-7)$$

コンテナクレーンの地震時挙動の一つとして脚部の浮き上がり現象がある。特に、この現象を実験で再現するには重力加速度が重要な意味合いを持つこととなる。制約条件として、1G場での実験条件を考慮すると $N_g=1$ になる。また、時間縮尺は式(3-1)から $N_l=N_g^{0.5}$ となる。また、振動実験では部材の曲げ剛性が支配的となるが、その際、幾何縮尺に対応した弾性係数を持つ模型材料を採用する方法が考えられるが、適当な材料の入手は困難である。そこで、実機と同様の材料を使用するものとする。コンテナクレーンの振動現象は主に脚部の曲げ剛性が支配的であることから、式(3-8)に示す梁の曲げ振動の運動方程式を用い現象の支配方程式とする。

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (3-8)$$

ここで、

$EI$  : 曲げ剛性

$\rho$  : 密度

$A$  : 断面積

$u$  : 鉛直方向変位

$t$  : 時間

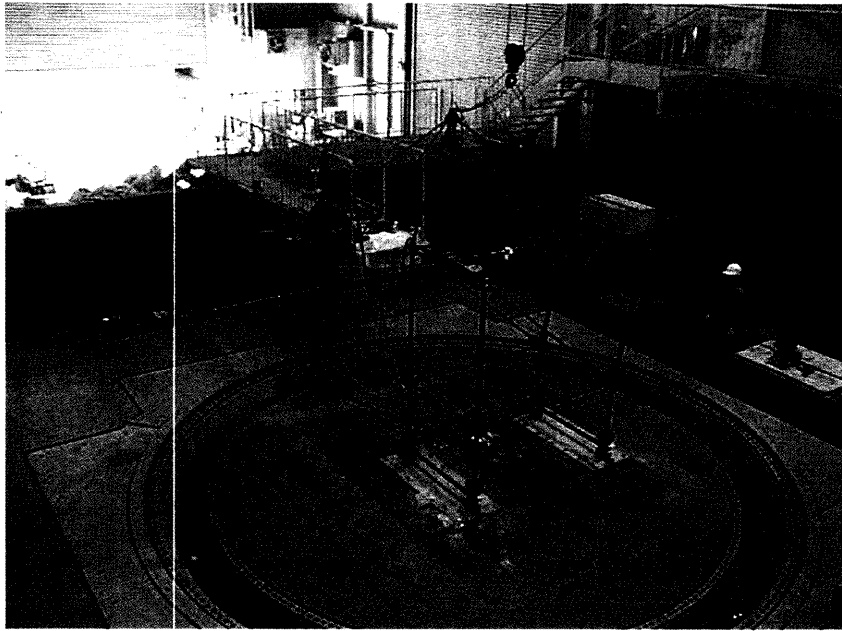


図-5 実験模型と振動台の全景

実機と模型の物理量の間には、次の関係式が成り立つ。ここで、添え字  $p$  は実機、 $m$  は模型を示している。

$$(u)p = N_l(u)m \quad (3-9)$$

$$(t)p = N_t(t)m \quad (3-10)$$

$$(EI)p = N_{EI}(EI)m \quad (3-11)$$

$$(\rho)p = N_\rho(\rho)m \quad (3-12)$$

また、微分演算子については、次の式が成り立つ。

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)_p = \frac{1}{N_l} \left(\frac{\partial}{\partial x}\right)_m \quad (3-13)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)_p = \frac{1}{N_t} \left(\frac{\partial}{\partial t}\right)_m \quad (3-14)$$

上式(3-9~3-14)を式(3-8)に代入した結果(式省略)を模型スケールで満足するためには式(3-15)が成立する必要がある。

$$N_{EI} \cdot N_l^{-3} = N_\rho \cdot N_t^3 \cdot N_l^{-2} \quad (3-15)$$

表-1 1/15試験体の相似則

物理量		次元	実機/模型
幾何縮尺	$\lambda$		15
変位	$\delta$	L	15
密度	$\rho$		1
時間	$t$	T	$\sqrt{15}$
加速度	$a$	$LT^{-2}$	1
力	$F$	$MLT^{-2}$	$15^3$
断面2次モーメント	$I$	$L^4$	$15^5$
曲げ剛性	$EI$	$ML^2$	$15^5$
質量	$N$	M	$15^3$
弾性係数	$E$		1

ここで、模型材料の制約から  $N_\rho=1, N_\epsilon=1$  となり、式(3-15)に代入すると式(3-16)が得られる。

$$N_{EI} = N_l^5 \quad (3-16)$$

一方、模型材料は実機と同様のものを使用するという制約から、式(3-16)を満足するためには材料の弾性係数を変えるのと同様の結果を得るように、決定した断面2次モーメントをさらに  $1/N_l$  することにより対応するものとしている。幾何縮尺は振動台の制約から 1/15 とした。よって、本実験の適用相似則は表-1 のようになる。

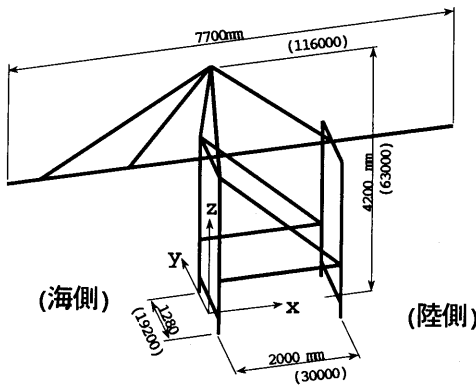


図-6 模型の概略寸法

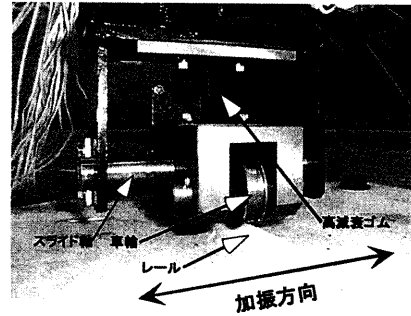


図-8 免震機構の拡大図

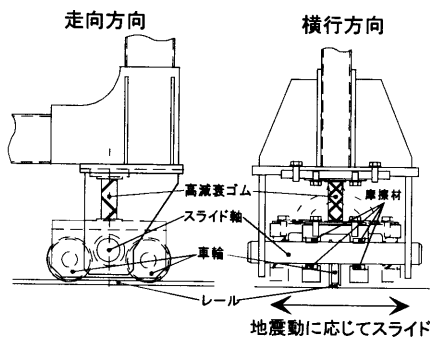


図-7 摩擦型免震機構

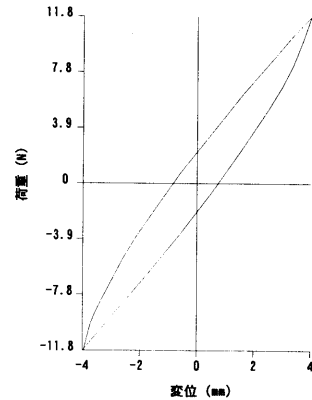


図-9 高減衰ゴムの荷重-変位曲線

### b) コンテナクレーン模型

モデル対象は30m級のコンテナクレーンとし、模型と実機のスケール比は1/15とした。実機と同様の材料を模型に使用する為、前述したように材料の弾性係数を変化させた場合と同等の結果を得るように、断面二次モーメントをさらに1/15している。よって、質量の不足が生じることになるが、これには振動モードに影響がない箇所に錘を付加することにより対応した。材料はJIS規格の材料を主に使用し、継手は出来る限り溶接とし、必要に応じてボルト等を使用している。車輪は、回転をモデル化すると回転に対する摩擦抵抗が評価しにくく、車輪のたつきによる挙動が生じるので、形状のみモデル化し、回転はしない。車輪の数は実機では一脚あたり8輪であるが、簡略化して2輪とした。また、コンテナクレーンはブームのアップダウンで動的特性が変化するが浮き上がりが生じやすいブームダウン時(作業時)をモデル化した。計測器を含めたモデル重量は、約3,290Nで概ね相似則を満足していることを計測により確認した。図-6に模型の主要寸法を示す。

### c) 免震機構のモデル化

上記のコンテナクレーンモデルの各脚下端部(走行装置)に図-7のように摩擦型免震機構を取り付けることにより免震コンテナクレーンモデルを作成した。摩擦型免震機構のモデル化に際し、前章での検討結果に対応した軸受け(図中、スライド軸)を選定した。また、摩擦減衰機構に市販品を適用する事を条件としたため、主要な部品としては、固体潤滑剤埋込型軸受を採用している。模型ではこの軸受けと車軸(脚本体と車輪)との間において、地震力による横行方向(海陸方向)の強制変位(相対変位)に対して摩擦が働くように設置している。また、軸受け部分の摩擦係数が予測よりも小さく、減衰が小さい場合には、変位が過大になることにより免震機構が十分効果を発揮しない恐れがあり、さらに車輪部分を破壊する恐れがあることから高減衰ゴムを併用することとした。免震機構を設置した車輪部分を図-8に示す。また、高減衰ゴムの荷重-変位曲線を図-9に示す。

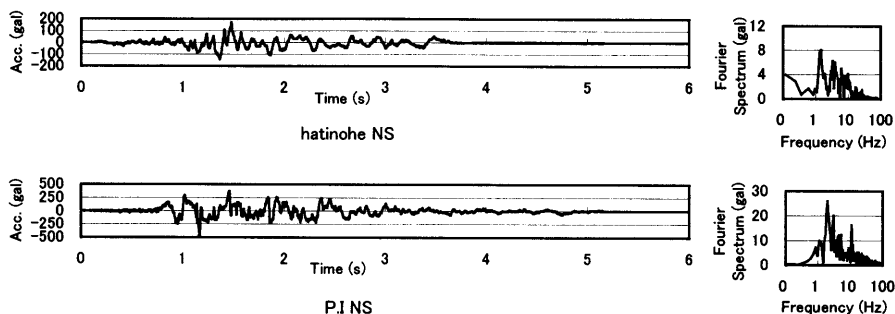


図-11 入力地震波とフーリエスペクトル

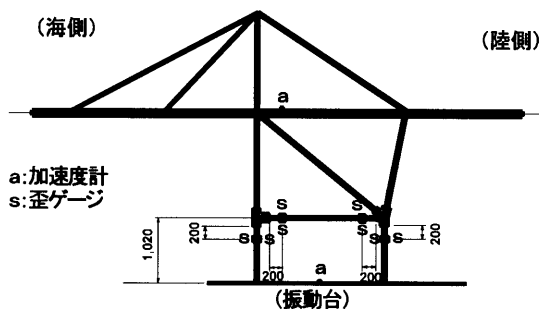


図-10 計測器取付位置

## (2) 実験の概要

### a) 実験設備

実験は、運輸省港湾技術研究所の三次元水中振動台を使用して実施した。振動テーブルは円形をしており、その寸法はφ6.0mである。加振能力として最大加速度は水平X方向±2.0G、水平Y方向±1.0G、上下Z方向±1.5Gであり、加振周波数は、DC～100Hzである。なお、本実験は気中で行った。

クレーン脚の垂直方向の相対変位はレーザー変位計を用いて計測した。また、各点の加速度の計測には、主にひずみ型の加速度計を使用した。各部材の応力はひずみゲージにより測定した。図-10に計測器の取り付け位置を示す。

### b) 入力地震波（動的加振実験に対する）

入力地震波は、港湾施設の設計で一般的に使用される1968年の十勝沖地震で八戸港で観測されたNS成分波（以降、八戸波と呼ぶ）、1995年兵庫県南部地震で神戸ポートアイランドで観測されたNS成分波（以降、PI波と呼ぶ）を時間軸を相似則に合わせ $\sqrt{T_1/T_2}$ にした波形を使用した。図-11に各入力地震波の時刻歴とフーリエスペクトルを示す。

また、クレーンの応答特性を把握するために正弦

波の入力も行っている。入力波の方向はクレーン横行方向（岸壁法線直角方向）の1方向である。その理由を以下に示す。

- ① 水平部材の配置上横行方向の入力に対してクレーン脚の片持ち梁としてのスパンが長くなり、端部の負担が大きくなる方向である。
- ② 走行方向については車輪のつばの影響がなく、レールと車輪間の滑りにより地震動の入力が緩和される。
- ③ 実験の事前検討として、3次元FEM解析によるモデルの固有値解析を行った結果、横行方向に振動するモード（2次モード）に対する刺激係数が大きく、地震時には顕著に応答するモードである。

### c) 静的脚浮き上がり実験（免震部摩擦試験）

静的な計算によるクレーン脚の浮き上がり限界荷重の算定方法はコンテナクレーン耐震設計の手引きに記載されており、クレーン重心位置に水平慣性力を与え、陸側または海側の脚基部の鉛直反力が零になる大きさとしている<sup>11)</sup>。今回モデル化したクレーン形状では、重心位置が海側に変位していることから、地震時には陸側脚が浮き上がり脱輪を起すことになる。そこで、陸側から静的に脚の浮き上がりが生じるまで荷重を与え、浮き上がりの限界荷重を計測することを目的として静的実験を行った。また、脚部等に設置したひずみゲージから曲げモーメントおよび軸力についての計測も行っている。実験に対する制約条件からクレーン重心位置に水平に直接荷重を与えることが困難であるために、クレーン模型を台座に載せ、台座を傾斜させることにより実験を行った。よって、水平荷重の算定には傾けた台座の角度によるクレーン模型の自重の分力から算定する事になる。この際、傾斜角の算定は台座上に設置した加速度計の測定値より算出している。

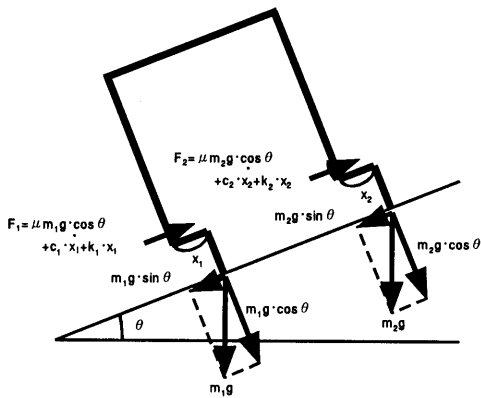


図-12 静的摩擦試験の概念

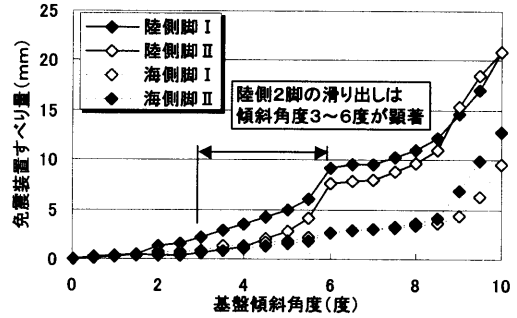


図-13 静的摩擦試験結果

静的脚浮き上がり実験に合わせ、免震機構の摩擦係数の計測も行った。先述のとおり免震式クレーン模型は、免震装置の摩擦材により通常は固定されているものの、地震時慣性力が発生して限界摩擦力を超えるとスライドしてバネ等により抵抗する構造となっている。免震式コンテナクレーンにおいて注目すべき点として、通常のコンテナクレーンのような浮き上がり限界を把握する前段階として免震機構が作動する摩擦限界を把握することが挙げられる。そこで今回の静的実験から、免震装置が作動し始める瞬間の台座の傾きから摩擦係数を推定する。

図-12に静的摩擦試験の概念を示す。また、以下に理論的な評価法を示す。まず、海側脚および陸側脚を支持点とした場合の力の釣り合いから、

$$\mu_1 m_1 g \cos \theta + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = m_1 g \sin \theta \quad (3-17)$$

$$\mu_2 m_2 g \cos \theta + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 = m_2 g \sin \theta \quad (3-18)$$

が得られる。すべり始める瞬間は、 $\dot{x}_1$ 、 $\dot{x}_2$  および  $x_1$ 、 $x_2$  はゼロであることから  $m_1$ 、 $m_2$  に依存することなく、摩擦係数  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  は、

$$\mu_1 = \tan \theta_1 \quad (3-19)$$

$$\mu_2 = \tan \theta_2 \quad (3-20)$$

から求めることができる。ここで、 $x_1$ 、 $x_2$  は免震部のスライド量（図の左向きが正）、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$  はすべり始めの台座傾斜角度である。

## 4. 実験結果

### (1) 静的摩擦試験結果

免震装置が作動し始める摩擦抵抗力が限界の状態から摩擦係数を推定するため、台座上に載せたクレーンモデルを静的に傾斜させていき、その傾斜角と免震装置の変位量を測定した。図-13に台座斜角と免震装置の変位量の測定結果を示す。横軸が基盤傾斜角で、縦軸がすべり量である。図から傾斜角の増加に伴いはじめに陸側脚の免震が作動し始めていることがわかる。これは、重心位置が海側に移動することにより陸側脚の自重負担分が減少し、摩擦抵抗力も減少したものと考えられる。その後、さらに傾斜が増大すると重心位置の移動、荷重（自重）負担の再構築（傾斜角の変化（増加）に伴う海・陸脚が負担する荷重の変化・更新）が行われ海側脚が作動する結果となっている。このときの滑り出しの台座傾斜角は3度から6度であり、この結果を前述の式(3-19)、(3-20)に代入すると、推定される摩擦係数が約0.05~0.10となり、当初の目標値を概ね満足している結果を得ている。

### (2) 静的脚浮き上がり実験結果

静的摩擦試験と同様に、クレーンモデルを台座に載せ、台座を傾斜することにより静的載荷実験を行った。実験では、まず免震無しモデルの測定を行い、その場合台座をクレーンがレールから脱輪するまで傾斜させており、静的脱輪荷重を測定している。また、そのとき脚部に作用するモーメント及び軸力の測定も行った。次に免震有りモデルについて、免震無しモデルと同様に台座を傾斜させていき脚部モーメントと軸力の測定を行った。ただし、免震モデルについては、傾斜角の限界から脱輪するまで実験は



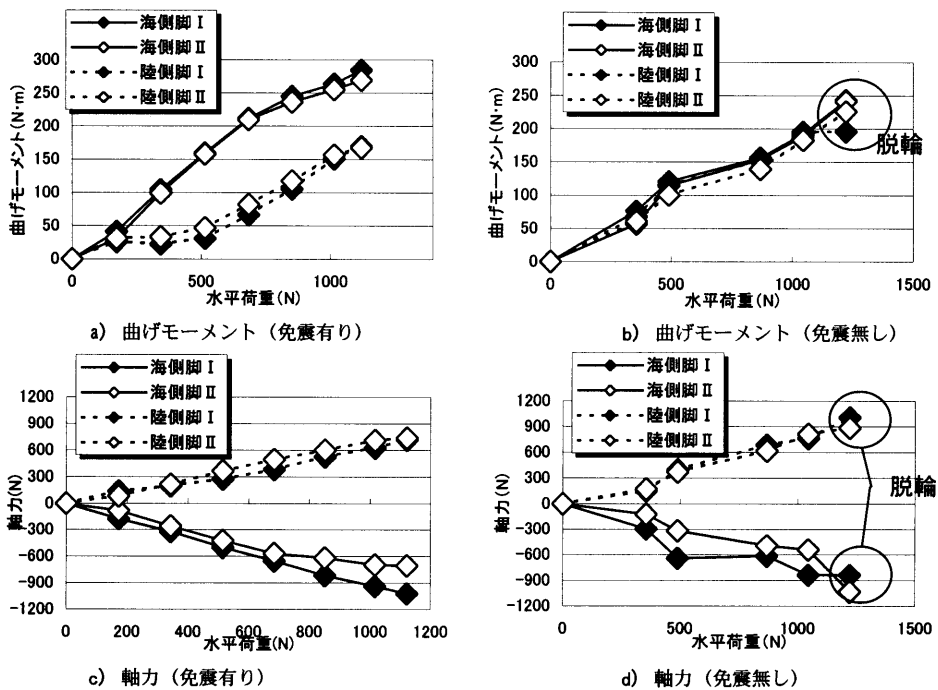


図-14 静的載荷実験による部材の断面力

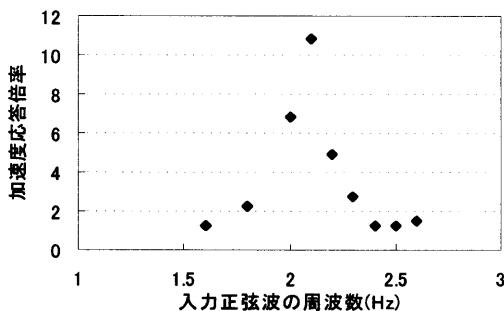


図-15 モデルの周波数応答特性

行っていない。

図-14 に静的載荷実験による免震有りと同無しのモデルの脚部に作用する断面力を示す。それぞれ横軸が台座の傾斜角から算定した水平荷重で、縦軸は曲げモーメント及び軸力である。曲げモーメントについて（図中 a）、免震無しの場合（図 b）、脱輪を起こす前までは海側と陸側に発生するモーメントがほぼ同レベルで増加していることがわかる。それに対して免震有りの場合には、前述した理由により、まず陸側脚の免震が作動することから水平荷重 175N 付近で陸側脚に発生するモーメントが低減している。しかし、同荷重レベルで免震無しの海側

脚に発生するモーメントと比較すると 50%程度免震有りの場合が大きい。免震クレーンは荷重負担の再構築が行われたと推測される。また、免震クレーン陸側脚について、免震が作動した後に発生するモーメントの増加率は海側脚とほぼ同レベルであることがわかる。免震無しクレーンは、水平荷重の最大値(1221.9N)で脱輪を起こしている。この場合、脱輪した脚は図中の海側脚 I のみであった。それ故、脱輪した時点でレールと車輪フランジ部の拘束が失われ、発生する曲げモーメントも低下しているものと考えられる。

脚部に発生する軸力（図中 c）、d）は免震有り無しとも、陸側脚は引張側、海側脚は圧縮側に荷重が増加することがわかる。増加率についてもほぼ同様の傾向を示しており、免震有り無しでの違いは殆ど見受けられない結果となった。陸側にクレーン重心位置が変位していることから、陸側から海側に水平荷重が作用した場合、海側脚の荷重負担が増大するものと考えられる。

### (3) 加振実験結果

#### a) 正弦波加振実験結果

免震無しモデルについて、入力加速度を一定(0.2m/s<sup>2</sup>)にして、周波数のみ変化させモデルの応答特性を調べた。図-15 に計測結果を示す。横軸が、

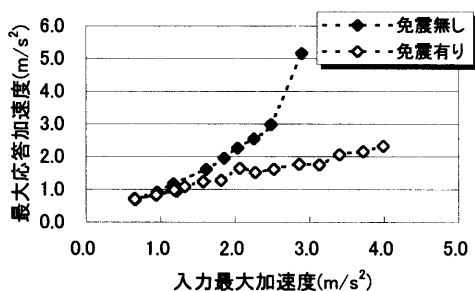
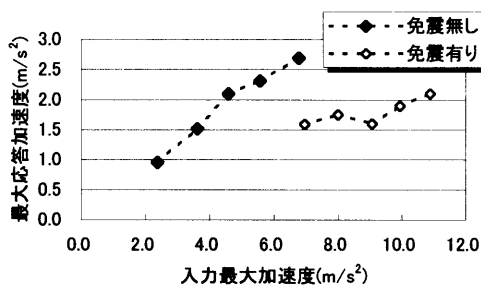
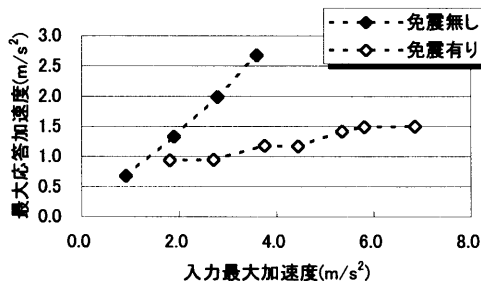


図-16 正弦波入力に対する重心位置加速度応答



a) 八戸波応答



b) PI 波応答

図-17 地震波に対する重心位置応答加速度

入力正弦波の周波数、縦軸がクレーン重心位置の応答加速度を入力加速度で正規化した加速度応答倍率である。図からクレーンモデルの共振周波数は約 2.1Hz (実機換算: 約 0.54Hz) であることがわかる。またその時の応答倍率は約 11 倍である。この結果から比較的長周期の地震波が作用した場合、顕著に応答するものと考えられる。

次に免震無しクレーンの応答倍率が 1 倍程度で、クレーン固有周期との影響が少ないと思われる周波数 (3.0Hz) を用い、加速度レベルを段階的に上げてステップ加振を行った。入力波はクレーン脚が浮き上がる時点を最大値としている。また、免震有りク

レーンモデルについても同様の加振を行い、免震無しとの比較を行うものとした。図-16 に実験結果を示す。横軸が入力波の最大加速度、縦軸がクレーン重心位置の応答加速度を示す。まず、免震無しの場合に、応答加速度が約 3.0m/s<sup>2</sup> のときにクレーン脚の浮き上がりが生じている。また、入力波に対してリニアに応答加速度が増大していることがわかる。これに対して、免震有りクレーンの場合は入力加速度が約 1.0m/s<sup>2</sup> までは免震無しと同様の値を示しているが、それ以降は応答加速度が増加しているものの増加率は小さい。入力加速度が 1.0m/s<sup>2</sup> 程度までは摩擦抵抗により免震が作動していないものと考えられ、当初の目標値である摩擦係数が 0.1 程度であることが確認できる。また、免震クレーンについては入力加速度が 4.0m/s<sup>2</sup> に対しても重心位置の応答は 2.5m/s<sup>2</sup> 以下に押さえられ、脱輪する加速度レベルには達していないことがわかる。免震無しクレーンの脱輪応答レベルに対して、免震有りクレーンの応答値は約 50% となっており、正弦波加振の応答加速度レベルについて、その効果を発揮していることがわかる。

#### b) 地震波加振結果

次に地震波の最大加速度を変化させたステップ加振結果を図-17 に示す。入力波は八戸波および神戸 PI 波である。横軸が入力波の最大加速度、縦軸がクレーン重心位置の最大応答加速度を示している。八戸波について (図中 a) )、免震無しの場合には入力最大加速度が約 7.0m/s<sup>2</sup> のときにクレーン脚が浮き上がり脱輪現象を起こしている。このときの応答加速度は約 2.7m/s<sup>2</sup> であった。この場合も正弦波入力と同様に応答加速度が線形増加していることがわかる。免震有りクレーンについては、免震無しクレーンが脱輪した加速度レベルの入力に対しても 60% 程度の応答しか示さず入力加速度をさらに増加させても脱輪する加速度レベルには達していない。さらに、八戸波入力の場合には最大入力加速度が振動台の限界である 1.0G を越えた場合にも、応答は 2.0m/s<sup>2</sup> 程度であり脱輪には至っていないことがわかる。ここで、免震部のスライド変位について、このような過大な加速度を入力した場合に過大な水平変位によりスライド軸端部に接触する恐れがあるが、免震部の実験 VTR より確認したところ振動台の限界能力の入力波においてもスライド軸端部からの余裕長の確保を確認できた。一方、神戸 PI 波入力に対しても (図中 b) ) 免震有りと免震無しの応答加速度の傾向は同様で、免震機構の効果が地震波に対しても有効であるといえる。地震波加振に対する断面力について、図-18 に八戸波加振に対する曲げモー

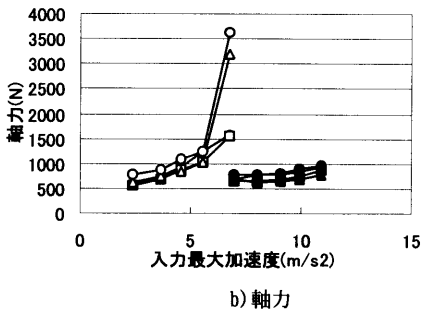
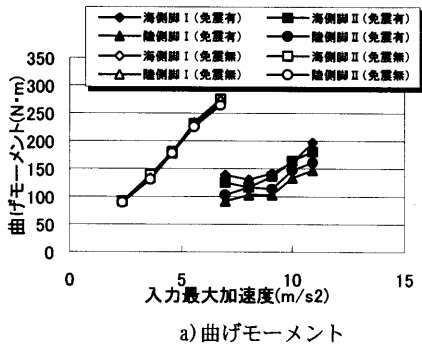


図-18 八戸波入力に対する脚部材断面力

メントと軸力の結果を示す。それぞれ横軸が入力最大加速度、縦軸が曲げモーメントまたは軸力である。曲げモーメント、軸力とも応答加速度に対する結果と同様に当然のごとく免震有りが小さい値となっている。ただし、脚の浮き上がり及び脱輪が発生した入力加速度が約  $7.0\text{m/s}^2$  の時の軸力について注目すると、脱輪した陸側脚に  $3,000\text{N}$  以上の過大な軸力が作用していることがわかる。これは、浮き上がった脚が脱輪し、振動台上に着地したときに生じた衝撃によるものと推測される。このような衝撃力は、クレーンのみならず岸壁基礎にも大きな影響を及ぼすものと考えられる。これに対して、免震有りの場合、入力加速度を増加させても軸力の増加傾向は少なく、ほぼ一定値を保っている。よって、免震化により応答加速度、断面力を軽減するのみならず、脱輪等による衝撃荷重といった二次的な影響因子も無くすることが出来るものと思われる。

## 5. 基礎に与える影響について

前章まではコンテナクレーンの地震時挙動と免震化による応答の軽減について、主に荷役機械側について論じた。そこで、本章ではクレーンが地震時に

表-2 各脚の自重分担

部位	荷重(N)
海側脚 I	1108.45
海側脚 II	883.13
陸側脚 I	542.88
陸側脚 II	689.63

上載する基礎部分に与える影響と免震化による効果について述べるものとする。

### (1) 基礎反力の測定の概要

実験により基礎に作用する反力の測定を試みた。そのため、まずレール部分について新たに測定治具を作成するものとした。レール反力については、クレーン横行方向（海陸方向）の水平反力、および鉛直反力を測定することを目的とする。また、定量的に脱輪による衝撃荷重を測定する試みも行い、そのための測定治具を作成した。反力の測定について、車輪が上載するレール部分の形状を片持ち梁にし、梁端部に貼付したひずみゲージの値と距離の関係から荷重を測定するいわゆるカンチレバー型のレール荷重計を作成した。

ここで、レール形状について模型の相似則に合わせ、レール幅と車輪との関係（車輪幅、フランジとの関係）を忠実に再現している。また、脱輪による衝撃荷重の測定についても片持ち梁によるカンチレバー型の脱輪受け軸を作成し、ひずみゲージの値と脱輪箇所の測定により、荷重を計測することとした。図-19にカンチレバー型測定器の概略図を示す。

### (2) 測定結果

前述した、地震波（八戸波、神戸 PI 波）を使用した加振試験結果について述べる。地震波は最大加速度を変化させるステップ加振入力を行い、クレーンが脱輪する時点で終了とした。クレーンモデルは免震無しと免震有りの両モデルを対象として計測を行っている。

#### a) モデル脚に作用する初期荷重（自重分担）

加振試験を行う前に、コンテナクレーンモデルを反力レールに設置した状態で静ひずみを測定した。その結果、各脚（各レール）の自重分担は表-2 のように得られた。

海側、陸側で比較すると重心位置が海側に偏心していることから、海側分担/陸側分担は 1.6 程度となっている。また、脚 I、II について比較すると、海側については脚 I が大きく、陸側については II が大きいことから、初期状態においてモデルが捻れて

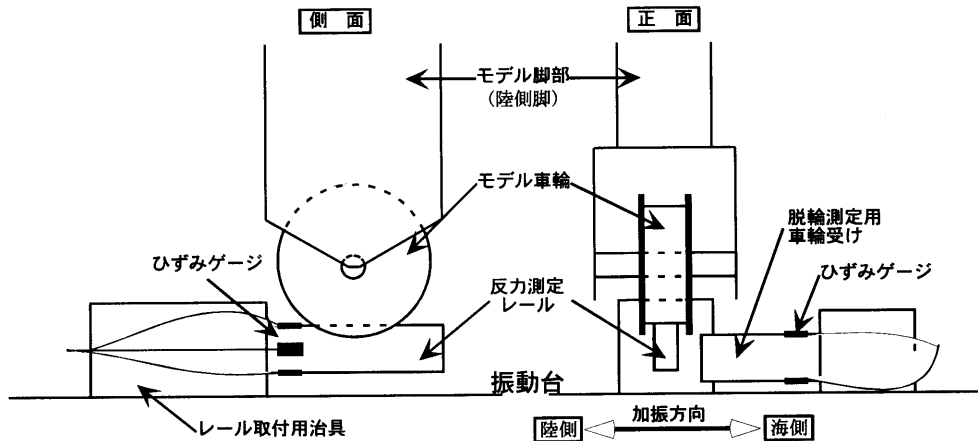


図-19 反力測定装置の概略図

設置されていることが判明した。模型作成及び設置の際には、捻れ等を考慮して細心の注意を払っているが、このように走行方向に対しても荷重の偏心が存在する事は実機レベルについても考えられることである。加振実験の脱輪が確認されたケースの中には陸側の片側脚のみが脱輪しているものがあり、このことも模型設置段階における左右の荷重偏心が影響しているものと考えられる。

#### b) 加振実験結果

図-20 に地震波加振に対するレールの鉛直反力及び水平反力の最大値を示す。なお、鉛直反力の測定についてはモデルをレールに設置した状態を初期状態とし零補正を行っている。よって、最大値は発生した反力のみのもので、自重負担分は差し引いていることになる。図の横軸は入力波の最大加速度、縦軸はそれぞれ鉛直反力と水平反力である。鉛直反力について(図中 a), b), 免震無しの場合には八戸波入力および PI 波入力に対して線形増加の傾向があり、1 脚当たり最大で 1,000N 程度の荷重がレールに作用していることがわかる。なお、この時点でクレーンは脱輪を起こしている。表-2 の自重負担と比較するとその最大値と同等かそれ以上の荷重がレールに作用することとなり、脱輪を伴うような過大地震時には、自重の 2 倍程度の荷重がレール鉛直方向に作用するものと推測される。一方、免震有りの場合には、八戸波入力に対しては、同様な入力最大加速度に対して免震無しの 50%程度であり、PI 波に対しては 30~40%程度に押さえられている。また、PI 波入力の鉛直反力は入力最大加速度に対してほぼ一定値を保っていることも特徴的である。

水平反力については(図中 c), d), 免震無しの場合に最大で 400N~900N 程度の値を示している。

表-3 脱輪による衝撃荷重(八戸波入力)

部 位	予想される車輪位置の荷重(N)		
	レール海寄り	レール中央	レール陸寄り
陸側脚 I	3298.70	4058.37	5272.64
陸側脚 II	3276.58	3588.22	4003.69

ここで、最大値に幅がある理由として、車輪とレールの滑りや車輪フランジ部とレールの接触といったことが不特定の脚に作用していることが挙げられる。一方、免震有りの場合には最大でも 300N 程度の値しか示していない。同じ入力加速度に対して、免震有りの場合 30~50%水平反力が軽減されていることがわかる。

免震無しクレーンは、八戸波の最大加速度が約  $7.0\text{m/s}^2$  の時に脚が浮き上がり脱輪を生じている。この場合、陸側の 2 脚が脱輪し、その脱輪荷重の計測を行った。荷重は、車輪が測定治具に落ちた箇所とひずみゲージの値から算定している。そのため脱輪直前の車輪位置により、荷重算定の際の誤差が生じることをまず明記する。脱輪直前の車輪位置はレール海寄り、レール中央、レール陸寄りの 3 パターンが考えられる。よって、考えられる 3 パターンの車輪位置に対して荷重を算定した。その結果を表-3 に示す。

予想される初期段階のレール位置により、最大で 2,000N 程度の差が生じている。また、左右の脚によっても最大値(レール陸寄りの時)で 1,000N 以上の差がある。その理由として、左右のクレーン脚の脱輪程度の違い(車輪着地点の差)が考えられる。一方、先述したように脱輪・着地時にクレーン脚に生じる軸力は 3,000N~3,500N の荷重であった。

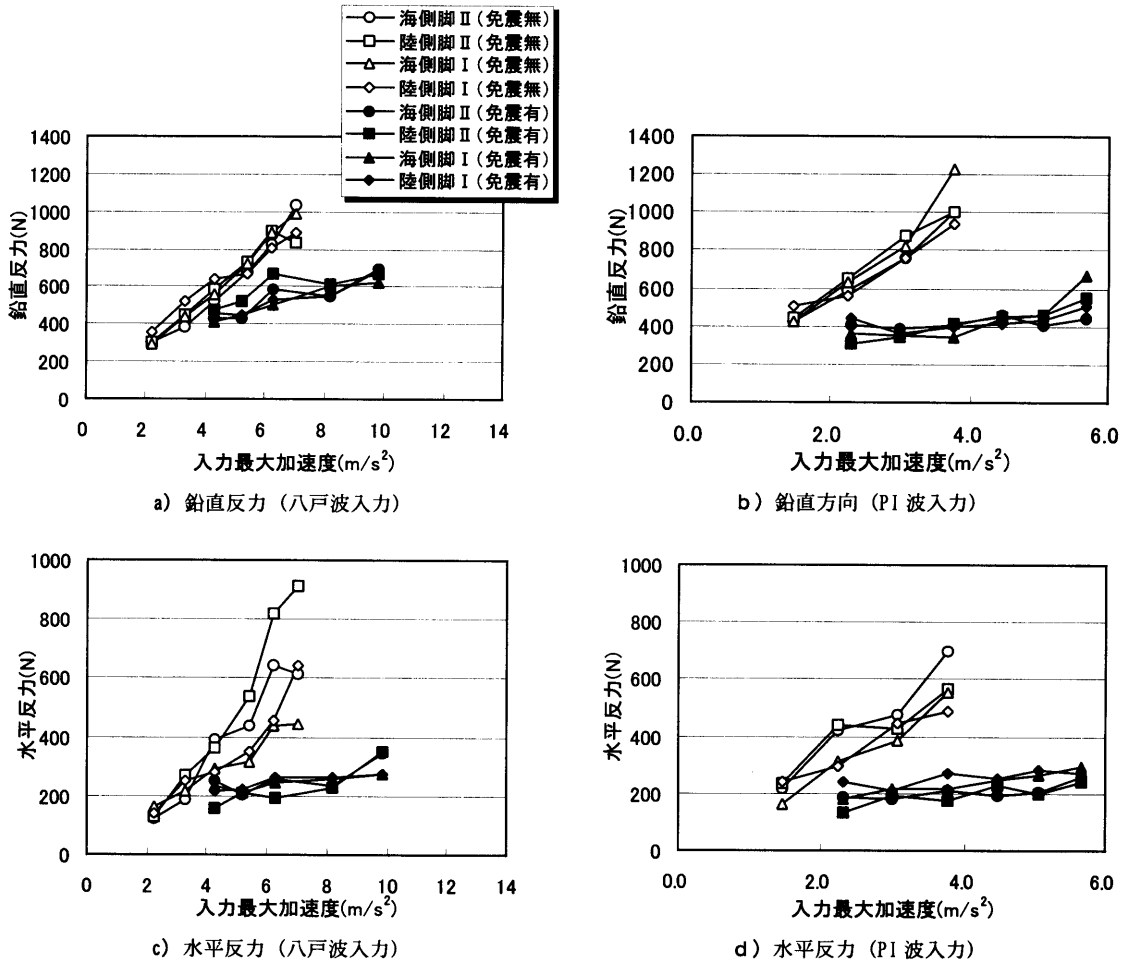


図-20 地震波加振に対する基礎（レール）の反力

このことから、脱輪の衝撃力について考察すると、脚の浮き上がり高さや脱輪・着地距離により幅があるものの、脱輪による衝撃力は、1脚あたり、クレーン全体自重以上（模型レベルで 3,000N 以上）の荷重が作用するものと推測される。その値として、今回の計測からは車輪位置による最大値で約 3,200N~5,200N となっており、クレーン重量で正規化すると 1~1.6 程度になる。よって、実験から、1脚あたりの脱輪時最大衝撃荷重はクレーン自重の約 1.6 倍という結果になる。

脱輪による衝撃荷重は、基礎構造に多大な影響を与えるものと考えられる。その対策として、岸壁側の免震等を考えるとコンテナヤードの場合にはそのバース延長等から多大な費用が必要となるものと考えられる。よって、荷役機械側による脱輪対策は、基礎側（岸壁側）の耐震対策としても経済的になる

ものと予想される。

## 6. まとめ

実験によりコンテナクレーンの地震時挙動を把握し、その対策の一例として摩擦型免震機構を開発した。その結果、コンテナクレーン応答加速度をクレーン脚が脱輪するレベル以下に押さえることが出来た。また、クレーンに発生する断面力についても最大でも50%程度の軽減を行うことが可能である。港湾荷役機械の耐震対策としての有効性を確認することが出来た。

荷役機械が上載する基礎側に与える荷重を定量的に把握することにより、地震時発生する荷役機械による荷重は大きく、基礎に対して影響を及ぼすものと

推測される。また、脱輪による衝撃力の測定から、その荷重は一脚当たりでもクレーン自重分かそれ以上が作用することとなり、耐震強化岸壁の設計に対して注意が必要になるものと考えられる。コンテナクレーンの免震化による基礎に作用する反力の軽減、およびの脱輪の回避が実験より確認でき、このことから、コンテナクレーン免震化は基礎側の耐震化に対しても有効であると考えられ、港湾荷役施設全体の耐震強化に役立つものと考えられる。

**謝辞：**試験体および計測器の設置、さらに実験の際にも連日深夜にまで協力を頂いた、科学技術振興事業団重点研究支援協力員の田中剛氏、海老原健介氏およびクレーン模型製作に当たり多大な協力頂いたIHI機械・プラント開発センターの柏崎昭宏氏に感謝し、ここに謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 稲富隆昌, 善功企, 外山進一, 上部達生, 井合進, 菅野高弘, 寺内潔, 横田弘, 藤本健幸, 田中祐人, 山崎浩之, 小泉哲也, 長尾毅, 野津厚, 宮田正史, 一井康二, 森田年一, 南兼一郎, 及川研, 松永康男, 石井正樹, 杉山盛行, 高崎伸彦, 小林延行, 岡下勝彦: 1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告, 港湾技研資料, No. 857, 1997.
- 2) 田中祐人, 阿比留久徳, 渡邊英一, 長井正嗣, 松井五郎, 倉石謙司, 丸山繁久, 近江宗作: 兵庫県南部地震によるコンテナクレーンの被災状況と地震時の応答について, 阪神大震災に関する学術講演会論文集, pp. 413-416, 土木学会, 1995.
- 3) 宮田正史, 菅野高弘, 浜田純次, 田邊俊郎, 中島晋, 田中剛: 直杭棧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回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 2409-2414, 1998.
- 4) 金山維史, 柏崎昭宏: 大地震時におけるコンテナクレーンの脚の浮き上がり挙動評価, 日本機械学会論文集, pp. 100-106, 1998.
- 5) 田邊俊郎, 中島晋, 菅野高弘, 阿比留久徳, 江頭隆喜: 動的相互作用を考慮した港湾荷役機械と棧橋の耐震設計法, 第7回交通・物流部内大会講演論文集, pp. 293-296, 機械学会, 1998.
- 6) (財) 沿岸開発技術研究センター: 埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版), 1997.
- 7) 神戸市港湾整備局: 神戸港大観 平成9年港湾統計, 1997.
- 8) 山本俊介, 江頭隆喜, 宮田正史, 高原裕一, 井福周介: 棧橋式岸壁上のコンテナクレーン常時微動観測, 第54回年次学術講演論文集, pp. 466-467, 土木学会, 1999.
- 9) 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, 機械力学・計測制御講演論文集, Vol. B, pp. 17-20, 機械学会, 1996.
- 10) 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, 1999.
- 11) (社) 港湾荷役機械化協会: コンテナクレーン耐震設計のための手引き, 1998年2月

(2000. 11. 14受付)

## THE SHAKING TABLE TEST OF THE RESPONSE CONTROLLED CONTAINER CRANE

Shunsuke YAMAMOTO, Eiji SATOH, Yoshinori NAKAYAMA, Takahiro SUGANO  
and Toshiro TANABE

The motion of the container cranes were accompanied by uplifting of their legs during the 1995 Hyogoken-nambu Earthquake. Another from of damage was overturning, followed by derailment and tilting of the structure, which particularly affected the hinged-leg structures. The other side, it seems that quay walls are also damaged due to crane's loading and uplifting phenomena. Therefore, in this paper, to investigate the dynamic behavior of response controlled container crane, we carried out an excitation test on a 1/15 reduced scale model. From the test results, it became evident that the response of crane and reaction force of the crane's rail are reduced and the uplifting phenomenon of crane's legs is evaded.