

高レベル地震動に対するクレーンの脱輪防止機構の開発

Development of a Mechanism for Preventing the Derailing of Cranes

岩本浩祐	技術開発本部基盤技術研究所構造研究部 課長
酒井英聡	IHI 運搬機械株式会社 運搬システム事業部生産統括部設計部 課長
佐藤祐二	技術開発本部管理部 課長
大豊晃祥	航空宇宙事業本部防衛システム事業部開発部
堀内宗典	西日本設計株式会社 設計1グループ 部長

平成7年(1995年)兵庫県南部地震では神戸港に設置されていた全55基のコンテナクレーンが、クレーンのロッキングや岸壁の変形によって損傷した。このため、走行クレーンの耐震性を高めるべく、高レベル地震動に対する免震装置が開発されてきた。現在では、港湾に設置されるすべてのクレーンに対して、レベル1地震動で脱輪しないことが要求されている。そこで、レベル1から中規模のレベル2地震動に対して、大規模な免震装置を必要とせず、クレーンの脱輪を防止する新たな脱輪防止機構を開発した。本機構は、既設クレーンに容易にレトロフィット可能な低コストの脱輪防止機構である。本稿では、開発した脱輪防止機構の基本構造について説明し、試作機を用いた荷重試験と実クレーンを対象とした数値解析の結果から装置の成立性について述べる。

All of the traveling cranes at the Port of Kobe were damaged by the strong ground motion that occurred during the Southern Hyogo Prefecture Earthquake in 1995. Seismic isolation systems for traveling cranes were developed to provide increased resistance to strong ground motions in the event of an earthquake. In general, the isolation systems used to help protect traveling cranes from strong ground motions are extremely large. Quays that have not been reinforced are at risk of being damaged by strong ground motions, and it is necessary to prevent traveling cranes from derailing during medium-strength ground motions because this could lead to the cranes collapsing. A mechanism for preventing the derailing of material handling equipment has been developed for medium-strength ground motions. This paper describes the configuration of this mechanism and presents the results of analyses and vibration tests conducted on it.

1. 緒 言

平成7年(1995年)兵庫県南部地震(以下、兵庫県南部地震)では、港湾荷役設備に多大な被害が発生した。神戸港では、設置されていた55基のすべてのコンテナクレーンに何らかの損傷が発生したことが報告されている⁽¹⁾。このうち、54基のコンテナクレーンで脱輪が発生し、荷役設備のロッキングや岸壁の変形による脚部への強制変位によって、約84%の荷役設備で脚部に变形や座屈が発生した。

兵庫県南部地震の後、港湾設備の高耐震化が進められてきた。2006年5月の港湾法の改正を受けて、「港湾の施設の技術上の基準を定める省令」および「港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示」が改正された。

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁽²⁾では、耐震強化施設に設置される荷役機械に対して、「レベル2地震動の作用後、短期間のうちに船舶の利用及び幹線貨物の荷役を行うことができる施設」と規定されており、実質的

に、国内の重要港湾に設置される荷役設備には、レベル2地震動発生後、早期に荷役機能を回復する耐震性能が要求されている。また、要求性能として修復性が規定されており、軽微な修復で荷役機能を回復できるレベルの損傷にとどめることが定められている。これらの改正を受け、耐震強化施設である重要港湾に設置される荷役設備には、レベル2地震動に対して設備の健全性を維持する免震装置が必須となった。IHIグループでも荷役設備向けの免震装置を開発⁽³⁾し、連続式アンローダやジブクレーンなどに適用してきた。国内のメーカ各社も独自の免震方式を開発^{(4)~(6)}し、実クレーンへの適用が進められてきた。また、現在では港湾に設置されるクレーンには、レベル1地震動に対して脱輪しないことが求められており、港湾クレーンに対する免震装置の必要性は一段と高まっている。

一方、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(以下、東北地方太平洋沖地震)では、マグニチュードが9.0であったにも関わらず、港湾クレーンに地震を直接の原因とした被害が比較的少なかった。仙台塩釜港高砂コン

テナターミナル（宮城県）に設置されていた4基のコンテナクレーンも、免震装置の有無に関わらず、脱輪や脚部の座屈など目立った損傷がなかったことが確認されている⁽⁷⁾。これは、港湾クレーンや岸壁の高耐震化が進んだことに加えて、東北地方太平洋沖地震の地震動が、クレーンのロッキングを励起する振動数域に高いエネルギーをもっていなかったことが一因と考えられている⁽⁸⁾。このため、南海トラフなどの巨大地震を想定した場合、平野部での地震動の長周期化によって、多くのクレーンが損傷する可能性があり、港湾クレーンに対する免震装置の高耐震化は今後も必要と考えられる。

ただし、レベル2地震動を対象として免震装置を設計した場合、免震装置は大規模となる。また、耐震強化されていない一般の岸壁では、レベル2地震動によって岸壁自体が変形してクレーンが損傷する恐れがある。よって、レベル1地震動に対して、免震装置を用いることなくクレーンの脱輪を防止することができれば、多くのクレーンの高耐震化を図ることが可能になる。

そこで、レベル1から中規模のレベル2地震動に対してクレーンの脱輪を防止する新たな装置を開発した⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。この装置は、連続式アンローダ（第1図）およびジブクレーン（第2図）などのクレーンの機種によらず、中規模のレベル2地震動まで免震装置を用いることなくクレーンの脱輪を防止する。また、既設クレーンに対しても簡便にレトロフィットすることができる。

本稿では、開発した脱輪防止機構の概念、試作機を用い



第2図 ジブクレーン
Fig. 2 Jib crane

た荷重試験の結果および実クレーンを対象とした数値解析によって開発した装置の成立性を検証した結果について述べる。

2. 脱輪防止装置の基本構造

2.1 脱輪防止機構の動作原理

標準的なクレーンの中ロッカ周辺の構造と脱輪防止機構の動作原理を第3図に示す。標準的なクレーンでは、車輪を固定する複数の小ロッカが中ロッカに設置されており、中ロッカは連結ピンを介して大ロッカに固定されている（第3図-(a)）。このため、地震によってロッキングが励起され脚部が浮き上がると、車輪もレール面から浮き上がり、脱輪が発生する。

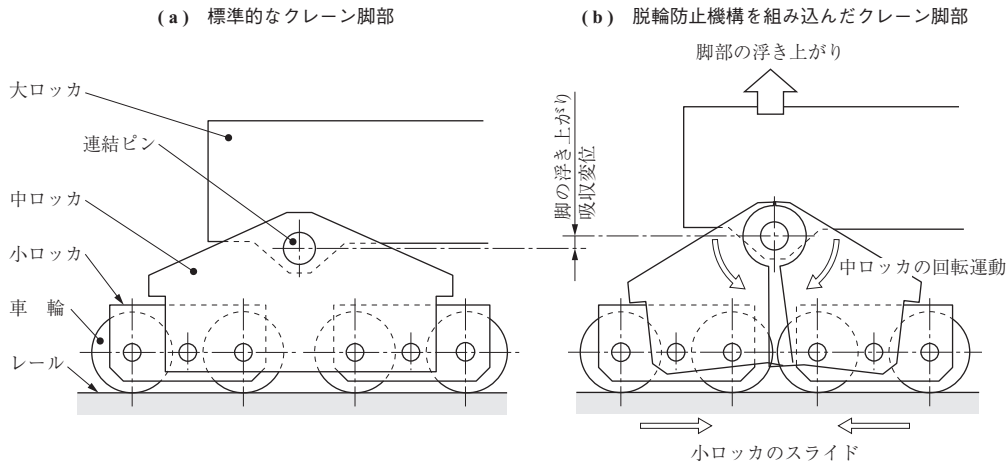
この脱輪を防止する構造として、中ロッカを左右に分割し、大ロッカとの連結ピンを中心に左右の中ロッカを回転させる構造を考案した（第3図-(b)）。地震時にクレーンがロッキングし、大ロッカが鉛直上方に浮き上がると、左右に分割された中ロッカが連結ピンを中心として回転する。この回転運動によって、車輪がレール面から離れることなく小ロッカが内側にスライドすることで、脚の浮き上がり変位を吸収する。

2.2 基本構造と構成品

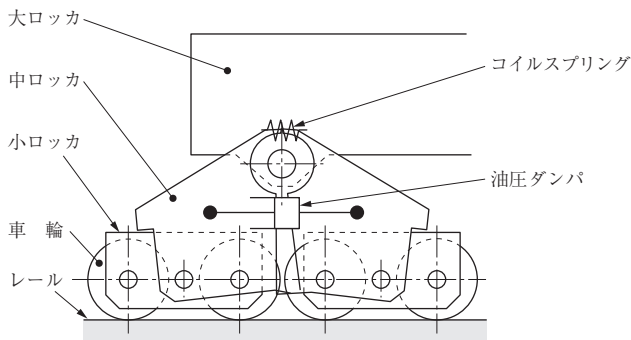
脱輪防止性能を高めると同時に、地震時に脚部に発生する荷重を低減することを目的として、脱輪防止機構にコイルスプリングと油圧ダンパを設置している。第4図に脱輪防止機構の基本構造を示す。



第1図 連続式アンローダ
Fig. 1 Continuous ship unloader



第 3 図 脱輪防止機構の動作原理
 Fig. 3 Basic configuration of the wheels for a normal crane and the mechanism for preventing the derailing of cranes



第 4 図 脱輪防止機構の基本構造
 Fig. 4 Basic configuration of the mechanism for preventing the derailing of crane

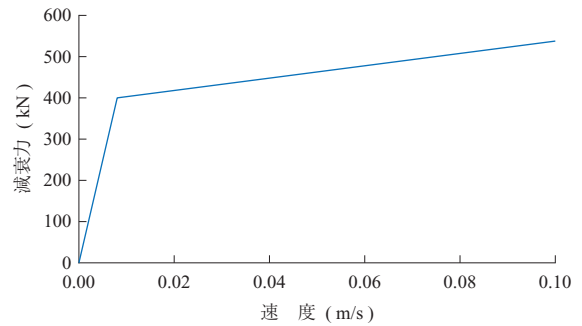
脱輪防止機構のしゅう動部が摩擦なく理想的に運動する場合、脚が浮き上がる挙動に追従して中ロッカが回転し、装置は脱輪を防止する。実際には、しゅう動部の摩擦が中ロッカの回転を妨げるため、装置の脱輪防止性能が低下する。そこで、本装置では、左右の中ロッカの間に予圧縮を負荷したコイルスプリングを組み込むことで、中ロッカが回転する方向に予荷重を与え、車輪とレールの接触力を高めている。

また、脚の浮き上がり吸収後の着地時に発生する荷重を低減することを目的として、左右の中ロッカをつなぐように油圧ダンパを設置した。この油圧ダンパは、浮き上がりを吸収する中ロッカの回転運動を妨げず、着地する際の中ロッカの回転方向にのみ減衰力を発生するように、圧縮・引張方向で異なる減衰特性の油圧ダンパとして開発した。油圧ダンパの外観を第 5 図に示す。

第 6 図に開発した油圧ダンパの減衰特性を示す。油圧ダンパは、浮き上がりを吸収する際の引張方向にのみ減衰力を発生する。また、約 0.008 m/s 以上の速度に対して、リリース弁によって過大な荷重の発生を防止する設計とし



第 5 図 油圧ダンパ
 Fig. 5 Hydraulic damper that generates a damping force only in the extending direction



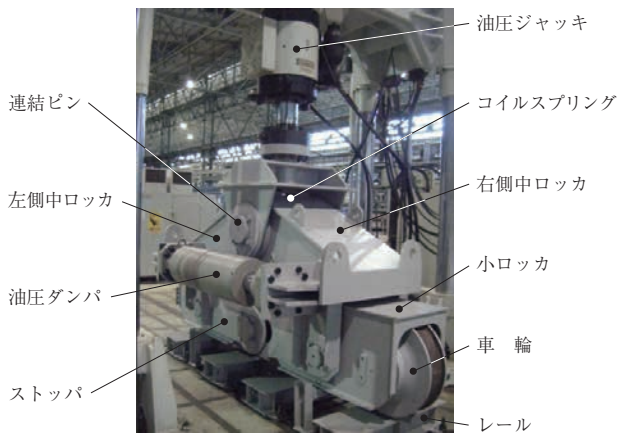
第 6 図 油圧ダンパの減衰特性
 Fig. 6 Damping characteristics of a hydraulic damper

ている。油圧ダンパの減衰特性は、ダンパ単体の要素試験によって、設計値に対する誤差が 10% 以内であることを確認した。

3. 試作機による特性検証

3.1 試作機による特性把握試験

設計した脱輪防止機構の特性を明らかにすることを目的として、脱輪防止機構の試作機を製作し、準静的荷重試験を実施した。試作機特性把握試験の試験セットアップを第 7 図に示す。試作機は、高さ約 2 m、幅約 3 m、質量約



第 7 図 試作機特性把握試験の試験セットアップ
Fig. 7 Configuration for the quasi-static loading tests

6 t の中ロッカであり、第 4 図に示すように、油圧ダンパとコイルスプリングが設置されている。脱輪防止機構は、ロードセルを介して疲労試験機の油圧ジャッキに結合されており、油圧ジャッキによって装置の連結ピンを上下させることで、脚の浮き上がりを吸収する中ロッカの回転運動を再現し、その際に装置が発生する荷重を計測することができる。

本試験では、装置の自重と慣性力の影響を除いて、装置が脚の浮き上がりを吸収する際の復元力や減衰力、しゅう動摩擦を計測するため、速度一定となる三角波によって装置を加振した。荷重試験条件を第 1 表に示す。

荷重試験で計測した脱輪防止機構試作機の荷重-変位特性を第 8 図に示す。図において、クレーンが着地した状態が変位 0 の (A) 初期状態であり、変位は鉛直上方を正の値として計測した。

脚が着地した初期状態から、脚が上方に変位して浮き上がりを吸収する場合、荷重-変位曲線は、初期状態の (A) から (B) を経由し (C) に到達する履歴を描く。この際、油圧ダンパは減衰力を最小化するように設計されているため、加振速度によらず同じ荷重-変位履歴を描いている。

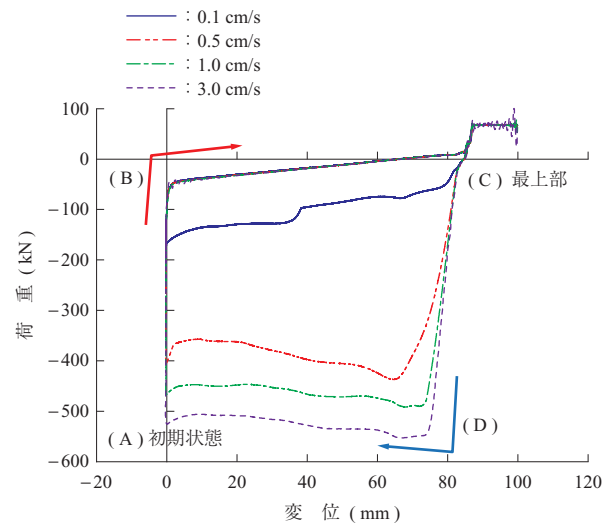
一方、浮き上がりを吸収した後、着地する方向に動く場合、油圧ダンパは減衰力を発生するため、加振速度によって (D) から (A) に戻る際の荷重履歴が大きくなる。

疲労試験機を用いた準静的荷重試験の結果、脚の上下運

第 1 表 荷重試験条件

Table 1 Test conditions for the quasi-static load tests

項目	単位	加振条件
加振振幅	mm	100
加振速度	cm/s	0.1, 0.5, 1.0, 3.0

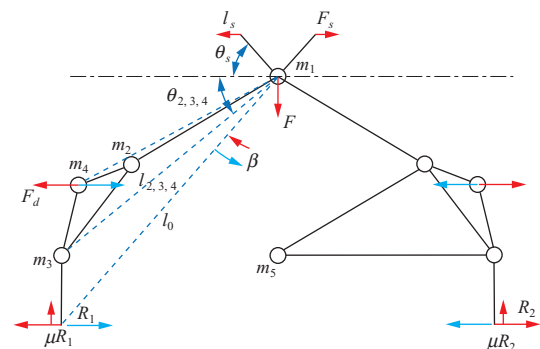


第 8 図 脱輪防止機構試作機の荷重-変位特性
Fig. 8 Load-displacement curves obtained by load tests conducted at 0.1, 0.5, 1.0, and 3.0 cm/s

動に追従して中ロッカが正常に回転し、着地時の荷重を低減する減衰力を発生することを確認した。

3.2 数学モデルによる特性検証

荷重試験で計測した荷重-変位特性の妥当性を検証することを目的として、脱輪防止機構の簡易数学モデルを作成し、荷重試験の再現解析を行った。第 9 図に中ロッカの簡易数学モデルを示す。連結ピンまわりのモーメントのつり合いから、脚の上下運動する際に連結ピンに作用する力を算出すると、連結ピンの移動方向によって異なり以下の (1) 式と (2) 式で表すことができる。



- (注) m_1 : 連結ピン質量
 m_2 : 分割した中ロッカ質量
 m_3 : 小ロッカと車輪質量
 m_4 : 油圧ダンパ質量の 1/2
 m_5 : ストッパまわり質量
 μ : 動摩擦係数
 F_s : コイルスプリング復元力
 F_d : 油圧ダンパ減衰力
 F : ロッカ鉛直荷重
 β : 中ロッカ回転角度
 R_1 : 左側レール反力
 R_2 : 右側レール反力
 θ_s : コイルスプリング取付角
 $\theta_{2,3,4}$: 中ロッカ, 小ロッカ, 油圧ダンパの取付角
 l_0 : レール接地点の連結ピンからの距離
 l_s : コイルスプリング設置点の連結ピンからの距離
 $l_{2,3,4}$: 中ロッカ, 小ロッカ, 油圧ダンパの連結ピンからの距離

第 9 図 中ロッカの簡易数学モデル

Fig. 9 Numerical model of a rocker equipped with a mechanism for preventing derailing

浮き上がりを吸収する場合

$$F = -2\{F_d l_4 \sin(\theta_4 + \beta) - F_s l_s \sin(\theta_s - \beta)\} / [l_0 \{\cos(\theta_0 + \beta) + \mu \cdot \sin(\theta_0 + \beta)\}] \quad \dots (1)$$

着地する場合

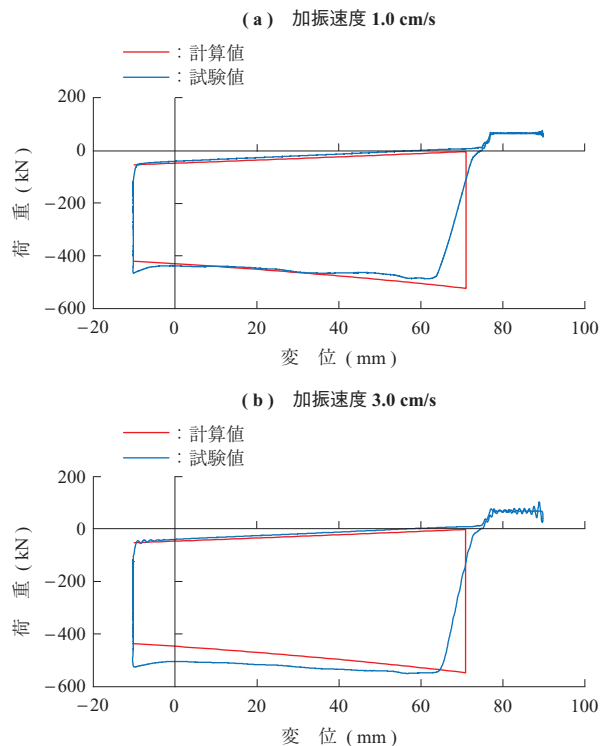
$$F = 2\{F_d l_4 \sin(\theta_4 + \beta) + F_s l_s \sin(\theta_s - \beta)\} / [l_0 \{\cos(\theta_0 + \beta) - \mu \cdot \sin(\theta_0 + \beta)\}] \quad \dots (2)$$

- F : ロッカ鉛直荷重
- F_d : 油圧ダンパ減衰力
- F_s : コイルスプリング復元力
- l_4 : 油圧ダンパ連結ピンからの距離
- l_s : コイルスプリング設置点の連結ピンからの距離
- l_0 : レール接地点の連結ピンからの距離
- θ_4 : 油圧ダンパ取付角
- θ_s : コイルスプリング取付角
- θ_0 : レール接地点角度
- β : 中ロッカ回転角度
- μ : 動摩擦係数

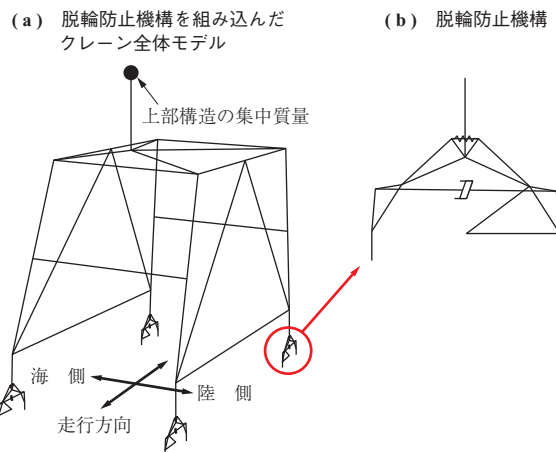
上記(1), (2)式を用いて, 加振速度を変化させて実施した荷重試験を再現し, 荷重-変位特性を比較した. コイルスプリングのばね定数, 油圧ダンパの減衰係数は設計値を用い, 動摩擦係数は0.1とした. 加振速度が高い2ケースについて, 荷重-変位特性の試験値と計算値を比較した結果を第10図に示す. 加振速度1.0 cm/s (第10図-(a)), 加振速度3.0 cm/s (- (b))ともに, 計算式に基づく荷重-変位特性は, 試験で計測された特性に精度良く一致しており, 製作した脱輪防止機構の試作機が設計どおりの特性をもっていることを確認した.

4. 数値解析による検証

装置の特性を反映した脱輪防止機構を実クレーンに組み込んだクレーンモデルを作成し, 地震応答解析を行うことで, 実クレーンに適用した際の脱輪防止性能を検証した. 脱輪防止機構を組み込んだクレーン解析モデルを第11図に, 適用対象としたニューマチックアンローダの概要を第2表に示す. 解析対象としたニューマチックアンローダは, レールスパンに比べて重心位置が高く, アームを下した運転時を想定しているため重心が海側に偏心しており, 水平荷重に対してロッキングを発生し, 車輪が浮き上がりやすい状態を模擬している. クレーンモデルは弾性梁と集中質量によってモデル化しており, 脚には第9図に示した脱輪防止機構の簡易数学モデルを組み込んでいる. 脚先



第10図 荷重-変位特性の試験値と計算値の比較
Fig. 10 Comparison of load-displacement curves obtained by numerical calculation and by load tests



第11図 脱輪防止機構を組み込んだクレーン解析モデル
Fig. 11 Analysis model simulating a pneumatic unloader

第2表 ニューマチックアンローダの概要
Table 2 Parameters of pneumatic unloader

項目	単位	仕様
総質量	t	296
重心高さ	m	13.0
重心の海側への偏心	m	1.3
レールスパン	m	7.0
固有振動数	Hz	1.5

端と基礎の間には接触要素を定義しており, クレーンのロッキングによる脚の浮き上がり挙動を再現する.

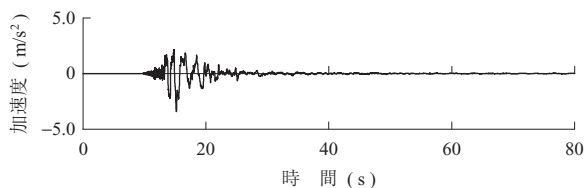
数値解析では, 脱輪防止装置のない標準的なクレーン

と、脱輪防止機構を組み込んだクレーンの応答を比較することで装置の脱輪防止性能を検証した。クレーンに入力する地震波は、第12図に示す兵庫県南部地震ポートアイランド観測波（NS波）を使用した。

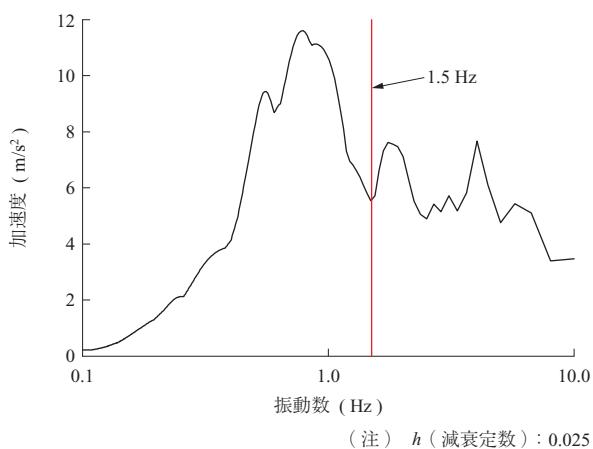
第13図に兵庫県南部地震ポートアイランド観測波（NS波）の応答加速度スペクトルを示す。クレーンの固有振動数は1.5 Hzであるため、ポートアイランド観測波（NS波）によって、クレーンの応答加速度は約5.5 m/s²に達する。クレーンの重心は海側に1.3 m 偏心しているため、重心位置の海側レールに対するアスペクト比は約0.17 となり、クレーンに1.7 m/s² を超える応答加速度が発生すれば、陸側車輪はレールから浮き上がる。同様に陸側レールへのアスペクト比は約0.37 であることから、地震動による応答が5.5 m/s² に達する標準的なクレーンを想定したモデルでは、海側・陸側の車輪に浮き上がりが発生する。

地震応答解析によるクレーン挙動の比較を第14図に示し、主要動近傍の10～40 sの応答波形を示す。また、地震応答解析結果を第3表に示す。

第14図 - (a)、-(b)に、クレーンの重心近傍の横行

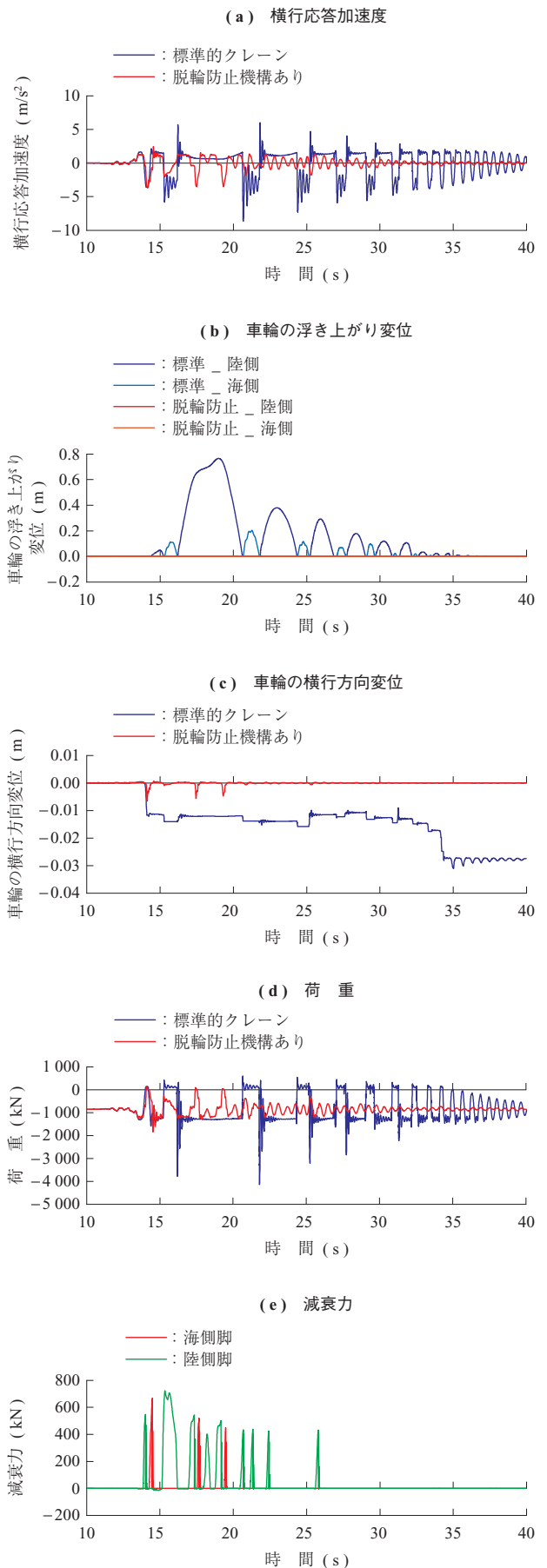


第12図 兵庫県南部地震ポートアイランド観測波（NS波）
Fig. 12 Seismic acceleration observed on Port Island in the N-S direction during the Southern Hyogo Prefecture Earthquake in 1995



第13図 兵庫県南部地震ポートアイランド観測波（NS波）の応答加速度スペクトル

Fig. 13 Response acceleration spectrum for the seismic acceleration observed on Port Island in the N-S direction during the Southern Hyogo Prefecture Earthquake in 1995



第14図 地震応答解析によるクレーン挙動の比較
Fig. 14 Results of the seismic response analysis

第3表 地震応答解析結果
Table 3 Results of seismic response analysis

項 目	単 位	標準的なクレーン	脱輪防止機構を組み込んだクレーン
重心近傍応答加速度（横行方向）	m/s ²	8.6	3.7
車輪の浮き上がり変位	cm	77.0	0.5
車輪の横行方向変位	cm	4.7	0.7
脚の鉛直軸力	kN	4 160	1 862

方向の応答加速度と車輪の浮き上がり変位を示す。クレーンの応答加速度が低い約 15 s までは、標準的なクレーンと脱輪防止機構を組み込んだクレーンの重心近傍の応答加速度はほぼ一致する。標準的なクレーンは、約 15 s から連続的に車輪が浮き上がり、車輪が着地する際の荷重によって応答加速度が大幅に増大する。標準的なクレーンでは、陸側脚で 77.0 cm の浮き上がりが発生するが、脱輪防止機構を組み込んだクレーンでは、約 0.5 cm に抑制されている。車輪のつば高さは約 2.5 cm であることから、装置が脱輪を防止することが分かる。

第14図 - (c) に海側脚の車輪の横行方向変位を示す。標準的なクレーンでは、車輪は浮き上がりと着地を繰り返し、4.7 cm 横行方向に変位している。車輪のレールの溝幅を考えた場合、4.7 cm の横行変位は脱輪状態と判断できる。第14図 - (a) に示すように、クレーンのロッキングによって車輪に浮き上がりが発生すると、応答加速度が矩形となる。これは、車輪の浮き上がりによってクレーンの固有周期が長周期化し、地震動の入力に対して応答が励起されないため、クレーンが浮き上がる加速度を上限とした矩形となる。

第14図 - (d) にクレーン海側脚に発生した軸荷重を示す。標準的なクレーンでは車輪浮き上がり後の着地時に、座屈など脚損傷の原因となる過大な荷重が負荷されている。脱輪防止機構を組み込んだ場合、脚に発生する荷重を大幅に低減することが確認できる。

第14図 - (e) に脱輪防止機構の油圧ダンパが発生した減衰力を示す。同図から、14 ~ 26 s に掛けて車輪の浮き上がりを吸収するため脱輪防止機構が作動していることが分かる。また、油圧ダンパは、着地時に大きな減衰力を発生することから、着地荷重を低減するだけでなく、クレーン本体の横行方向の応答加速度も低減する。

以上の結果、クレーン脚部に脱輪防止機構を組み込むことで、車輪の浮き上がりを防止するとともに、脚に発生する荷重を大幅に低減することを確認した。また、重心近傍の応答加速度も大幅に低減しており、クレーン本体を設計

する際の加速度条件の低減が可能であることが分かる。

5. 結 言

レベル1地震動から中規模のレベル2地震動に対して免震装置を用いることなくクレーンの脱輪を防止する、新たな脱輪防止機構を開発した。試作機を用いた荷重試験と実クレーンモデルを用いた地震応答解析を行うことで、装置の基本特性を確認するとともに、実際のクレーンに適用した際の脱輪防止性能を検証した。

- (1) 左右に分割した中ロッカが大ロッカとの連結ピンを中心として回転する新たな構造によって、地震時の車輪の浮き上がりを吸収する脱輪防止装置を開発した。コイルスプリングと油圧ダンパを用いることで、車輪の浮き上がり吸収性能を高め、地震時に脚部に発生する荷重を低減する。
- (2) 実サイズの試作機を製作し、疲労試験機を用いた荷重試験を行うことで装置が作動する際の基本特性を確認した。装置は所定の復元・減衰特性をもっており、浮き上がりを吸収する際の脚の上下動に対して、中ロッカが設計どおりに作動することを確認した。
- (3) 実クレーンに脱輪防止機構を組み込んだ解析モデルを作成し、地震応答解析を実施した。中規模のレベル2地震動を想定した兵庫県南部地震観測波によって、車輪に約 80 cm の浮き上がりが発生するクレーンに脱輪防止機構を設置することで、クレーンの脱輪を防止することを確認した。この際、座屈など脚の損傷の原因となるクレーン脚部に発生する荷重を大幅に低減することを確認した。

開発した脱輪防止機構は、免震装置を用いることなく、兵庫県南部地震で観測された地震波による車輪の浮き上がりを防止し、高い脱輪防止性能をもっていることを確認した。耐震補強されていない岸壁では、レベル2地震動によって岸壁自体が損傷しクレーンが脱輪する恐れがあり、大規模な免震装置によるクレーンの高耐震化は適さない。

一方で、レベル1地震動に対してはすべてのクレーンが脱輪を防止することが求められている。

本装置は、中ロッカを改修した簡便な装置であり、既設クレーンへのレトロフィットも容易であることから、このような岸壁に設置されるクレーンの脱輪防止に適している。試作機では鉛直方向のストロークが約80mmであるが、中ロッカの規模や回転角度の調整によって、さらに大きな浮き上がり変位を吸収することも可能である。また、免震装置と併用することで、レベル2地震動に対する脱輪防止性能を高めることも可能である。本装置は、試作機を用いた荷重試験と実クレーンを想定した地震応答解析によって、実クレーンの脱輪防止に対する成立性を確認した。

参 考 文 献

- (1) 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） 機械設備の被害 1998年8月 pp. 223 - 232
- (2) 国土交通省港湾局：港湾の施設の技術上の基準・同解説 2007年9月 pp. 31 - 38
- (3) 辻 直人, 島田貴弘, 柏崎昭宏, 信太雅人, 近藤晃司：コンテナクレーン用ヒンジ式免震装置の開発 石川島播磨技報 第43巻第6号 2003年11月 pp. 231 - 235
- (4) 村野健一, 吉田和夫, 塩崎禎郎, 菅野高弘：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 日本機械学会論文集 C 編 第70巻第689号 2004年 pp. 23 - 29
- (5) 菅野高弘, 芝草隆博, 藤原 潔, 徳永耕一, 榎本洋二, 藤木友幸：コンテナクレーンの耐震性向上に関する研究 - 免震コンテナクレーンの開発 - 港湾空港技術研究所報告 第42巻第2号 2003年6月 pp. 221 - 250
- (6) 余村俊輔：コンテナクレーンにおけるレベル2地震動対策 クレーン 第50巻第8号 2012年8月 pp. 29 - 32
- (7) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会：東日本大震災合同調査報告 機械編 2013年8月 pp. 64 - 70
- (8) 岩本浩祐, 佐藤祐二, 大豊晃祥, 斎藤 修, 酒井英聡：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震における荷役設備の被災と地震動の特性の関係 クレーン 第50巻第8号 2012年8月 pp. 21 - 24
- (9) 岩本浩祐, 佐藤祐二, 大豊晃祥, 堀内宗典, 酒井英聡：大地震に対する荷役設備の脱輪防止機構の開発 Design and Dynamics Conference : D&D 2014 No. 432 2014年8月
- (10) K. Iwamoto, Y. Sato, T. Otoyo, M. Horiuchi, H. Sakai and H. Arai : Development of Mechanism for Preventing Derailing of Material Handling Equipment Proceeding of the ASME 2016 Pressure Vessels & Piping Conference 2016