

レベル 2 地震動に対する港湾荷役設備の免震化

Seismic Isolation Equipment of Cargo-Handling Machinery for Port Subjected to Level 2 Earthquake Motion

岩本浩祐	技術開発本部基盤技術研究所構造研究部 主査
佐藤祐二	技術開発本部基盤技術研究所構造研究部 課長
斉藤修	IHI 運搬機械株式会社 運搬・物流システム事業本部運搬・物流システム事業部 課長
酒井英聡	IHI 運搬機械株式会社 運搬・物流システム事業本部運搬・物流システム事業部
谷田宏次	株式会社 IHI テクノソリューションズ 技術開発センター シニアエンジニア 工学博士

重要港湾の荷役設備に対するレベル 2 地震動後の早期復旧の要求から、対応する免震装置の研究開発を進めてきた。これまでに、大変位を想定して基本構造を見直すことで、レベル 2 地震動に対応する装置設計の見通しを得た。平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震では、地震規模に反して荷役設備に被害が少なかった。この原因について検証した結果、地震動の卓越周期が短かったことが影響しており、卓越周期の長い東海、東南海、南海地震などの大地震対策として、荷役設備の免震化が必要であることが明らかになった。

Cargo-handling machinery in important Japanese ports are required to be capable of being restored quickly after level 2 earthquakes. Seismic isolation equipment for Cargo-handling machinery for level 2 earthquakes has been developed and its conceptual design has been completed through the redesign of the configuration of isolation equipment. The number of Cargo-handling machinery damaged by seismic motion during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake was not so large because the predominant periods of the seismic motion were short enough not to damage the Cargo-handling machinery. However, the periods of the forecast Tokai, Tonankai and Nankai earthquakes may be long enough to destroy Cargo-handling machinery. Seismic isolation equipment should be placed at Cargo-handling machinery to earthquake-proof them against level 2 earthquakes.

1. 緒言⁽¹⁾

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、短期間の内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」と規定しており、実質的にレベル 2 地震動（現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動）への対応が要求されている。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要求されている。

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 地震動を吸収する免震装置が必須となった。IHI グループでも荷役設備の免震装置を開発⁽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が、さらにレベル 2 地震動を想定し、より大きな地震動に対応する免震装置について開発を進めてきた。

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は、日本国内で観測史上最大の M9.0 の地震となった。津波を含めた地震による被害は東北地方から北関東まで極めて広範囲にわたり、東日本に甚大な被害を及ぼした。

一方で、津波や岸壁損傷に起因したケースを除けば、地震の規模に反して、港湾荷役設備の地震の揺れによる被害が比較的少なかったことも分かってきた。

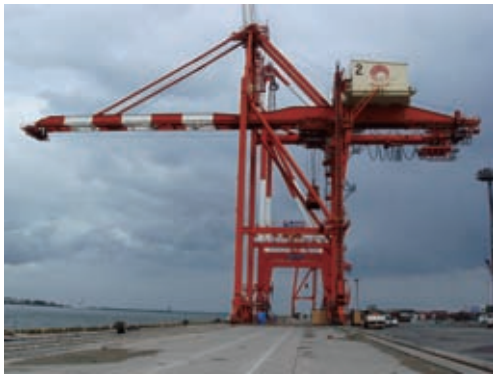
本稿では、レベル 2 地震動に対応する港湾荷役設備の免震装置の開発について示すとともに、東北地方太平洋沖地震の地震動の特性と港湾荷役設備の被災状況の関係から、今後の発生が予想される東海、東南海、南海地震における港湾荷役設備に必要な地震対策について検証した結果を示す。

2. 免震構造

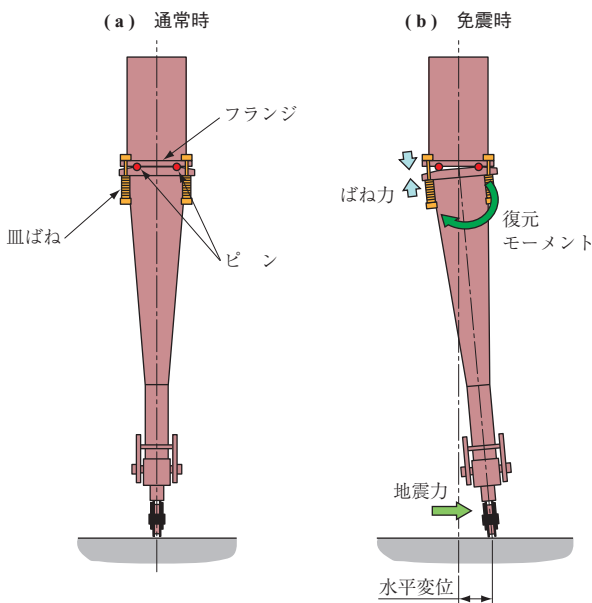
港湾荷役設備の例として、仙台塩釜港高砂コンテナターミナルに設置されているコンテナクレーンを第 1 図に示す。

IHI グループで開発を進めている免震装置の概要を第 2 図に示す。

免震装置は、荷役装置の脚部を上下に分ける 2 枚のフランジと、免震部の水平方向のずれを防止し、免震時に回



第 1 図 仙台塩釜港高砂コンテナターミナルのコンテナクレーン
 Fig. 1 Container crane at the Takasago container terminal in the Sendai-Shiogama Port



第 2 図 免震装置の基本構造
 Fig. 2 Configuration of seismic isolation equipment

転中心となる二つのピンと、復元モーメントを発生する皿ばねから構成されており、4本の各脚に設置される。

皿ばねには予圧縮力が負荷されている。予圧縮を超える荷重が荷役装置に加わらない限り、脚は剛な構造となるため、荷役運転時や風荷重に対するトリガ機能も実現する。

第 2 図に免震装置の基本構造を示す。地震力が加わると、第 2 図 - (b) に示すように、ピンを中心に回転するように脚が屈曲する。この脚の屈曲によって脚下端が水平方向に変位することで、地震力を吸収する。脚の屈曲によって、脚中心部の軸方向に設置した皿ばねが変形するため、復元モーメントが発生し、脚を直立状態に復帰させる。

レベル 2 地震動に対応するためには、荷役設備の加速度応答を低減することも重要であるが、大変位を吸収できる構造設計と、脚の浮き上がり対策が最も重要な技術課題となる。

本装置は、レベル 2 地震動に対応するために、脚が屈

曲する際の回転中心となるピンの間隔を広げることで、レベル 2 地震動によって大きな水平変位が発生した際の、脚の安定性を高めるとともに、免震装置に減衰機構を設置することで、地震時の応答変位をさらに抑制し、車輪の浮き上がりを防止する構造とした。

3. 数値解析による検証

開発している免震装置について、三次元クレーン解析モデルと、兵庫県南部地震・神戸海洋気象台観測波を用いた地震応答解析によって、レベル 2 地震動に対する成立性を検証した。

ここで、レベル 2 地震動を対象として荷役設備の免震化を検討する場合、車輪の浮き上がりが最もクリティカルな技術課題となる。

本章では、車輪の浮き上がり挙動として、車輪の浮き上がり変位と横行方向変位の 2 点から、免震装置の成立性について評価する。

3.1 クレーンモデル

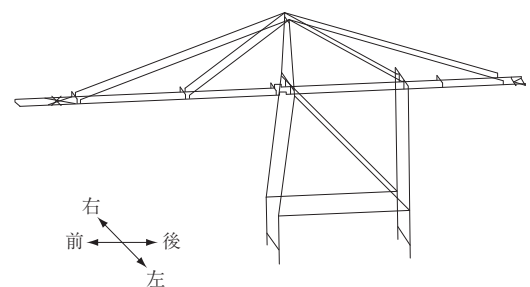
第 3 図に検討対象としたコンテナクレーンの解析用三次元モデルを示す。解析モデルはスパン 30 m 級の大型コンテナクレーンを想定して作成した。

解析モデルは、ブームダウンの運転状態を模擬しており、アウトリーチに吊り荷を懸架しているため、海側に転倒しやすい特性となっている。また、免震装置部分は、皿ばねの予圧縮によるトリガ特性や上下フランジの開口や接触をモデル化している。

また、脚先端の車輪部分は浮き上がり挙動や走行方向へのすべりを再現できるモデルとなっており、実クレーンが地震を受けた際の応答を忠実に再現することができる。

3.2 地震応答解析

重要港湾における荷役設備の免震化を検討する場合、港湾ごとに、地盤や岸壁の特性などを考慮してレベル 2 地震動が作成されるが、ここでは、兵庫県南部地震で計測さ



第 3 図 解析用三次元クレーンモデル
 Fig. 3 3-D analysis model

れた神戸海洋気象台観測波を入力地震動として、免震装置の成立性を検証する。

解析条件の概要を以下に示す。

(1) 入力地震波

兵庫県南部地震・神戸海洋気象台観測波

(2) 入力方向

横行・走行・鉛直方向の3軸同時入力

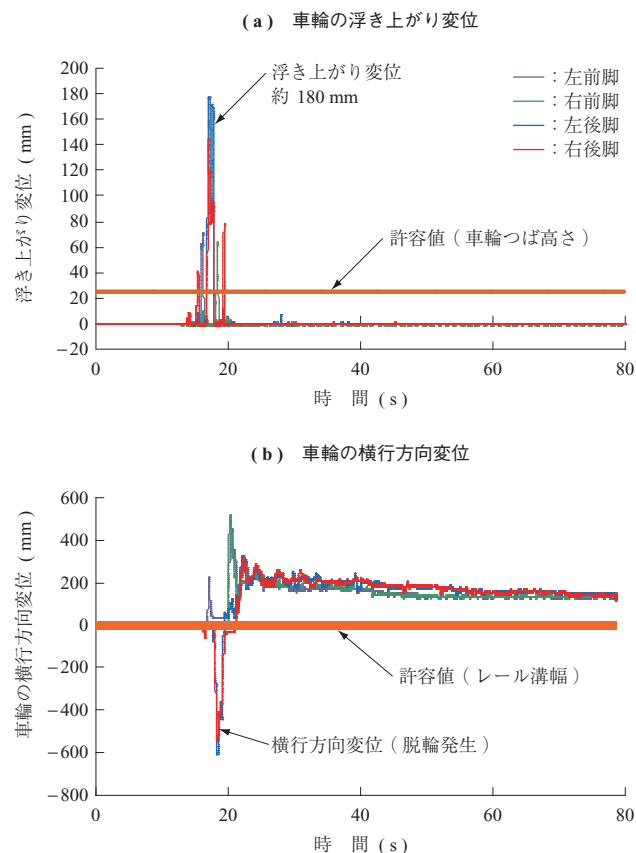
3方向に地震動を入力することによって、クレーンの海・陸方向への倒れ込み挙動だけでなく、走行方向の地震動入力によるねじり挙動も含めて、クレーンの応答を算出した。

地震応答解析の結果として、レベル2地震動を入力した場合の脚先端の車輪の浮き上がり挙動について、免震装置を設置した場合と免震装置を設置しない場合を比較する。

車輪のつば高さ（許容値）とレールの溝の幅（許容値）を以下に示す。この値を超える応答変位が発生すると脱輪が発生する。

- ・ つば高さ（浮き上がり変位の許容値） 25 mm
- ・ レール溝幅（横行方向変位の許容値） ±12.5 mm

第4図に免震装置を設置しないクレーンの応答として、各脚車輪部の浮き上がり変位と横行方向の変位を示す。



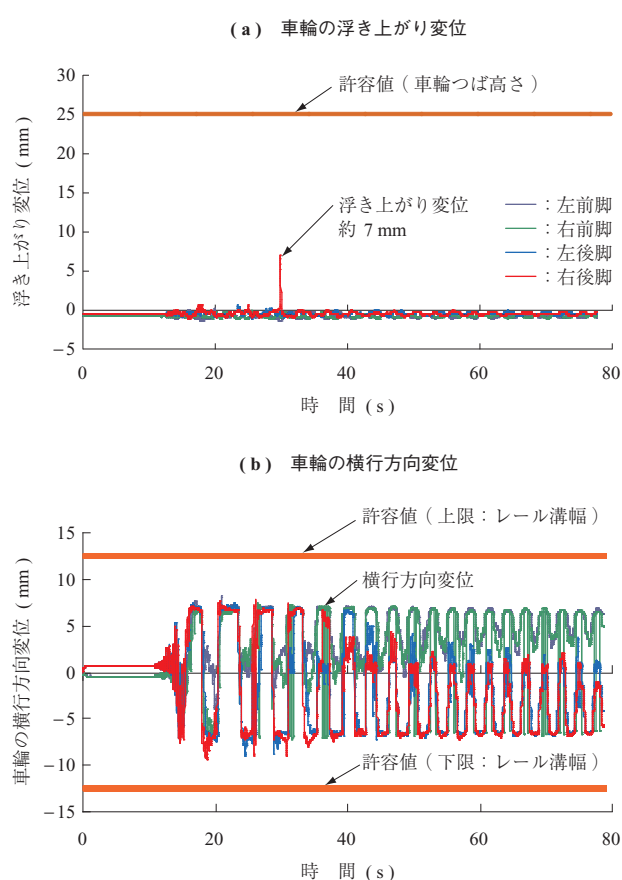
第4図 免震装置を設置しないクレーンの車輪部の応答変位
Fig. 4 Displacements of the wheels of a crane without seismic isolation equipment fitted in (a) the vertical direction and (b) perpendicular to the rails

免震装置を設置しない場合、地震動によって車輪はレール面から約180mmと大きく浮き上がり（第4図-(a)）、4脚とも脱輪する。脱輪によって、車輪の横行方向の拘束がなくなり、車輪は大きく横行方向に滑った後に、片側にドリフトしていく挙動が確認される（第4図-(b)）。

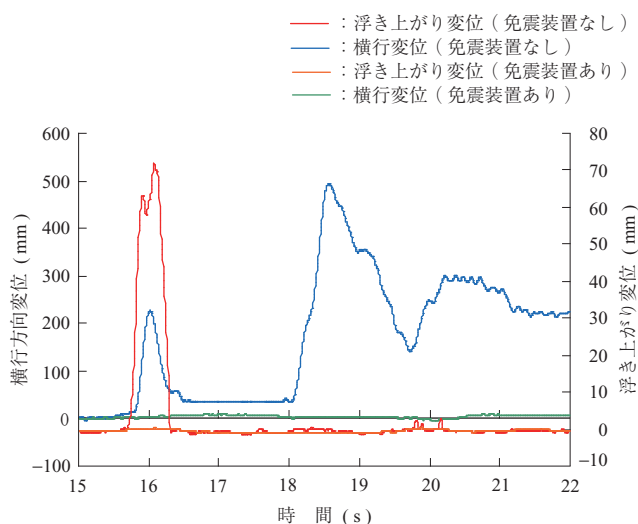
第5図に免震装置を設置したクレーンの応答を示す。車輪の浮き上がり変位は約7mmに大幅に低減され、車輪の横行方向の応答もレールの溝の幅±12.5mmに収まっており、免震化によってクレーンの脱輪を抑制していることが確認できる。ここで、第4図、第5図において、左右の脚で浮き上がりの変位が異なるのは、走行方向にも地震動を受けたクレーンにねじり挙動が発生し、このねじり挙動も含めて浮き上がり変位を評価しているためである。

脱輪が発生するタイミングについて、左前脚に注目し、時間を拡大した結果を第6図に示す。

免震装置なしの場合、約16秒のタイミングで車輪が約70mm浮き上がり、この浮き上がりと同時に、横行方向にレール幅を大きく超えて約200mm変位するため脱輪



第5図 免震装置を設置したクレーン車輪部の横行方向変位
Fig. 5 (a) Vertical motions and (b) motions perpendicular to the rails of the wheels of a crane fitted with seismic isolation equipment



第 6 図 脱輪発生時の左前脚の挙動

Fig. 6 Motions perpendicular to the rails of the front-left side wheel

が発生した。脱輪後は、車輪の横行方向への拘束がなくなるため、クレーンの応答によって車輪が滑り、ドリフトしていく挙動が示されている。

一方、免震装置ありの場合、第 5 図からも分かる通り、免震装置なしに比べて大幅に応答が低減され、脱輪することなくクレーンは安定した姿勢を維持できることが分かる。

3.3 検証結果

三次元のクレーンモデルに兵庫県南部地震の神戸海洋気象台観測波を横行、走行、鉛直の 3 方向同時に入力した地震応答解析によって、開発した免震装置のレベル 2 地震動に対する成立性を検証した。

この結果、免震装置は、レベル 2 地震動を対象とした際に最もクリティカルな技術課題となる車輪の脱輪を防止できることを確認した。

以上の結果、開発した免震装置のレベル 2 地震動に対する有効性を確認した。

4. 東北地方太平洋沖地震における荷役設備の被災状況と地震動の特性の関係

兵庫県南部地震では港湾の荷役設備に多大な被害を受けた。岸壁の損傷が原因となったケースもあるが、荷役設備が海陸方向に倒れ込むように揺れるロッキングによって脚が浮き上がり、脱輪や脚部の座屈によって損傷したケースも多く確認された⁽⁴⁾。

東北地方太平洋沖地震では、地震規模が M9.0 と極めて大きかったにもかかわらず、津波や岸壁の損傷に起因したケースを除き、荷役設備の損傷は比較的小さいことが分

かってきた。これは、岸壁や荷役設備の耐震強化の取組みの成果でもあるが、地震動の特性の違いが大きく影響していると考えられている。

本章では、東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の地震動の特性を比較することで、東北地方太平洋沖地震において荷役設備の被災が比較的小なかった原因と、今後発生が予想される東海、東南海、南海地震などの大規模地震において港湾荷役設備に必要となる地震対策について検証した結果を示す。

4.1 港湾荷役設備の被災状況

仙台塩釜港高砂コンテナターミナルの岸壁被災状況を第 7 図に示す。同ターミナルは津波によってコンテナが流されるなど、大きな被害を受けた。ただし、岸壁は耐震強化岸壁であったため、レール間が沈み込む損傷を受けたものの、クレーンが走行するレール面については、崩壊や大きな沈み込みなどの損傷は免れた。

同ターミナルには免震機能をもつコンテナクレーン 2 基と免震装置をもたないコンテナクレーン 2 基が設置されている。被災調査の結果、免震機能をもたないクレーンも含めて、4 基のコンテナクレーンには、脱輪も発生しなかったことが確認されている。

4.2 地震波の特徴

東北地方太平洋沖地震における荷役設備の被害と地震動の関係性を明らかにするため、東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の地震動の特性を比較した。

地震波の比較対象として、港湾に近い以下二つの地震波を選定した。

(1) 東北地方太平洋沖地震

仙台観測波（国土交通省港湾局「港湾地域強震観測」データ）⁽⁵⁾

(2) 兵庫県南部地震

神戸海洋気象台観測波



第 7 図 仙台塩釜港高砂コンテナターミナルの岸壁被災状況
Fig. 7 Damage to the quay at the Takasago container terminal in the Sendai-Shiogama Port

第8図に示すとおり、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台観測波は、1秒以上の周期において強い地震力をもっているのに対し、東北地方太平洋沖地震の仙台観測波は、短周期側に強い地震力を持ち、周期1秒以上では兵庫県南部地震に比べて非常に小さい値となっている。

コンテナクレーンを想定し、周期約2秒の応答スペクトルに着目すると、コンテナクレーンを加振する地震力が小さかったことが分かる。

地震動のスペクトルは地域の地盤特性によって大きく影響を受けるが、東北地方太平洋沖地震は、比較的短周期側が卓越していることが報告されており、この地震動の特性が港湾荷役設備の地震の揺れによる被害が少なかった主要因の一つであると考えられる。

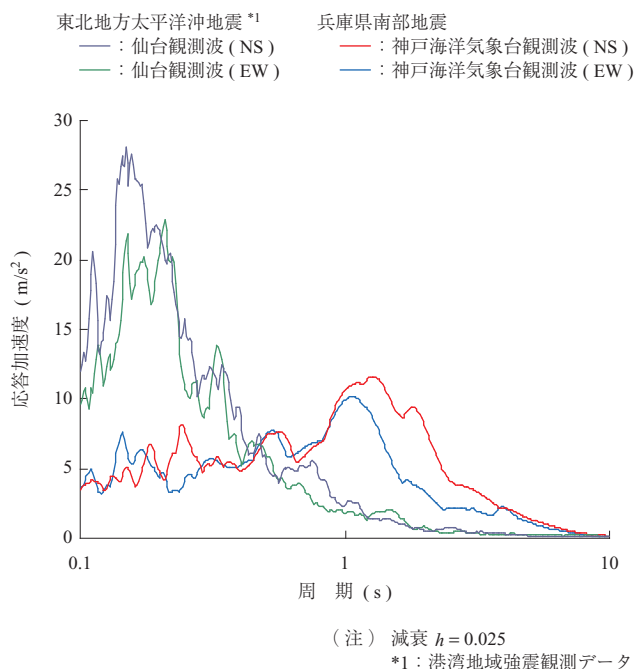
4.3 地震応答解析による検証

東北地方太平洋沖地震において、① 荷役設備の被害が少なかったこと ② 仙台塩釜港高砂コンテナターミナルで4基のコンテナクレーンに脱輪など顕著な被害が発生しなかったこと、について、仙台観測波を用いた地震応答解析によってさらに検証する。

解析概要は以下のとおりである。

(1) クレーンモデル

三次元クレーンモデル（免震なし、第2図参照）



第8図 東北地方太平洋沖地震（仙台観測波）と兵庫県南部地震（神戸海洋気象台観測波）の加速度応答スペクトルの比較

Fig. 8 Acceleration response spectrums of accelerations during (a) the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Measured near the port of Sendai) and, (b) the South Hyogo prefecture Earthquake in 1995 (Measured at the Kobe Marine Observatory)

(2) 東北地方太平洋沖地震

仙台観測波（国土交通省港湾局「港湾地域強震観測」データ）

3章で示した兵庫県南部地震に対するクレーンの応答と比較するため、車輪の浮き上がり変位を第9図に示す。

第9図に示すとおり、免震装置を設置していないコンテナクレーンでも、東北地方太平洋沖地震の仙台観測波に対して、車輪の浮き上がり変位は極めて小さく、脱輪を発生するような挙動発生しないことが分かる。

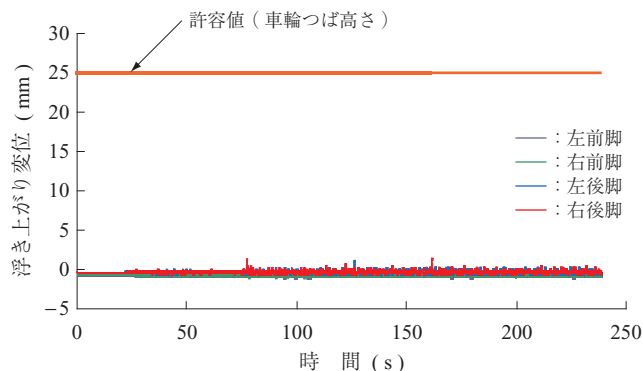
解析で使用したモデルは、高砂コンテナターミナルに設置されたコンテナクレーンとは異なるが、地震時のクレーンの挙動の傾向は同様になると考えられる。

この結果からも、東北地方太平洋沖地震では、港湾荷役設備を損傷させるような周期の成分が小さく、地震の揺れによる被害が少なかったことが分かる。

4.4 東北地方太平洋沖地震における港湾荷役設備の被害と今後の地震対策

東北地方太平洋沖地震における港湾荷役設備の被災状況について、地震動の特性から検証を行った。この結果を以下にまとめる。

- (1) 東北地方太平洋沖地震では、地震の規模 M9.0 に反して地震の揺れによる荷役設備の被害が少なかった。
- (2) 荷役設備に揺れによる被害が少なかったのは、東北地方太平洋沖地震における揺れの周期が短く、コンテナクレーンなどの港湾荷役設備を損傷させる周期の地震力が小さかったことが大きく影響している。
- (3) ただし、今後発生が予想される東海・東南海・南海地震などの大規模地震では、地盤の特性から、関



第9図 車輪の浮き上がり変位（東北地方太平洋沖地震 仙台観測波）

Fig. 9 Vertical motions of the wheels of a container crane subjected to the seismic motion of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Measured near the port of Sendai)

東平野，濃尾平野，大阪平野などで周期が長くなる。荷役設備に対して厳しい周期の地震動が加わることが予想されるため，港湾荷役設備の地震対策として免震化を進める必要がある。

5. 結 言

レベル 2 地震動に対応する港湾荷役設備の免震装置を開発し，地震応答解析によって成立性を確認するとともに，東北地方太平洋沖地震の地震動と被災状況の関係から，東海，東南海，南海地震など今後予想される大地震に対して，港湾荷役設備に必要な地震対策について検討を行った。

検討の結果を以下にまとめる。

- (1) 免震装置のピン間隔を広げて地震時の安定性を高めると同時に，皿ばねの配置変更や減衰装置の設置によって，大きな水平変位を吸収し，浮き上がりを抑制できる免震構造を実現した。
- (2) 開発した免震構造の有効性を検証するため，兵庫県南部地震における神戸海洋気象台観測波を用いた地震応答解析を行った。この結果，脱輪や脚座屈の原因となる車輪の浮き上がりを大幅に抑制できることを確認した。
- (3) 開発を進めてきた免震構造のレベル 2 地震動に対する有効性を確認した。
- (4) 東北地方太平洋沖地震の仙台観測波（国土交通省港湾局「港湾地域強震観測」データ）と兵庫県南部地震の神戸海洋気象台観測波の応答スペクトルを比較した。仙台観測波は，周期 1 秒以上の領域で応答スペクトルが低く，荷役設備を損傷させる周期の地

震力が大きくなかったことが，港湾荷役設備の被害が比較的少なくなった原因の一つである。

- (5) 東海，東南海，南海地震など今後予想される大地震においては，関東平野，濃尾平野，大阪平野などで周期が長くなり，荷役設備にとって厳しい地震動となる可能性が高い。東北地方太平洋沖地震において荷役設備に被害が少なかったことは地震特性によるものであり，今後の地震対策としては，港湾荷役設備の免震化を進める必要がある。

— 謝 辞 —

本稿を作成するに当たり，宮城県仙台塩釜港湾事務所のご協力をいただき現地調査を実施するとともに，写真を掲載させていただきました。ここに記し，深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 宮田正史，竹信正寛，菅野高弘，長尾 毅，小濱英司，渡部昌治：耐震強化施設としてのコンテナクレーンの耐震性能照査手法に関する研究（その 1）国土技術政策総合研究所資料 No. 455 2008 年 3 月
- (2) 国土交通省港湾局：港湾の施設の技術上の基準・同解説
- (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) 日本機械学会：阪神・淡路大震災調査報告 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会 1996 年 12 月
- (5) 国土交通省港湾局：港湾地域強震観測