

# 平成26年度研究開発課題成果報告書 ダイジェスト版

コンテナクレーンの耐震化技術及び維持管理技術の  
向上による国際競争力強化の研究開発

平成27年3月

一般社団法人 港湾荷役機械システム協会

和文要約

研究成果報告要約

作成年月	平成 27 年 3 月
研究テーマ名	交通インフラにおける老朽化対策、事前防災・減災対策及び適確な維持管理・更新
研究課題名 (課題番号)	コンテナクレーンの耐震化技術及び維持管理技術の向上による国際競争力強化の研究開発
研究代表者名	(一社) 港湾荷役機械システム協会 増田勝人
研究期間	平成 26 年 5 月 30 日～平成 27 年 3 月 20 日
研究の目的	本業務は、既存コンテナクレーンの効率的な耐震化を推進するため、新たな免震機構を研究開発し、普及を図るものである。さらに、コンテナクレーンの維持管理費の低減に資する簡易に鋼構造物の腐食及び溜水を計測できる非破壊検査装置を研究開発し、普及を図るものである。
研究成果の要旨	<p>1. 免震機構の研究開発</p> <p>コンテナクレーンを対象とした新たな摩擦免震機構(幅広車輪による方法等)を考案した。本免震機構について、模型実験等及びシミュレーション解析を行い、本免震機構の有効性を検証した。模型振動実験では 1/15 模型クレーンにより神戸港波、東京港波等で行い、免震機構の有効性を確認した。また本免震機構に必要なレールと車輪との摩擦係数を得るため試験装置により実験を行った。さらに、本免震機構を利用するためのガイドライン(案)を作成した。</p> <p>2. 非破壊試験装置の研究開発</p> <p>磁場を用いた内部腐食検査の研究開発では、自動検査システム装置及び各種腐食供試体を作製し磁場確認実験を行うと共に実機クレーンで密閉部腐食状況について現地調査を行い、検査システムの評価を行った。さらに有限要素法を用いた磁場分布のシミュレーション解析によって実験結果と高い相関性を確認し、本装置を用いた鋼板裏面傷の検出方法の有効性を確認した。</p> <p>中性子水分計を用いた溜水検出の研究開発では、供試体による溜水試験、実機適用する走査条件の検討を行い、さらに供用中の橋梁での現地試験も実施して、本装置を用いた密閉部の溜水状況の検出方法の有効性を確認した。</p> <p>さらに、両試験装置をコンテナクレーン等の減肉や溜水状況確認のための現地検査に適用するためのガイドライン(案)を作成した。</p>
知的財産権 取得状況	<p>特許出願：4 件、クレーン免震機構に関する実用新案</p> <p>特許出願：(予定) 1 件、クレーン免震機構に関する実用新案</p> <p>著作権登録：なし</p>
研究成果発表実績	<p>論文発表：国内 0 件</p> <p>口頭発表：国内 3 件 (電気・情報関連学会、日本非破壊検査協会等)、海外 0 件</p> <p>その他：なし</p>

## 研究成果報告要約

### 1. 研究開発の目的と実施体制

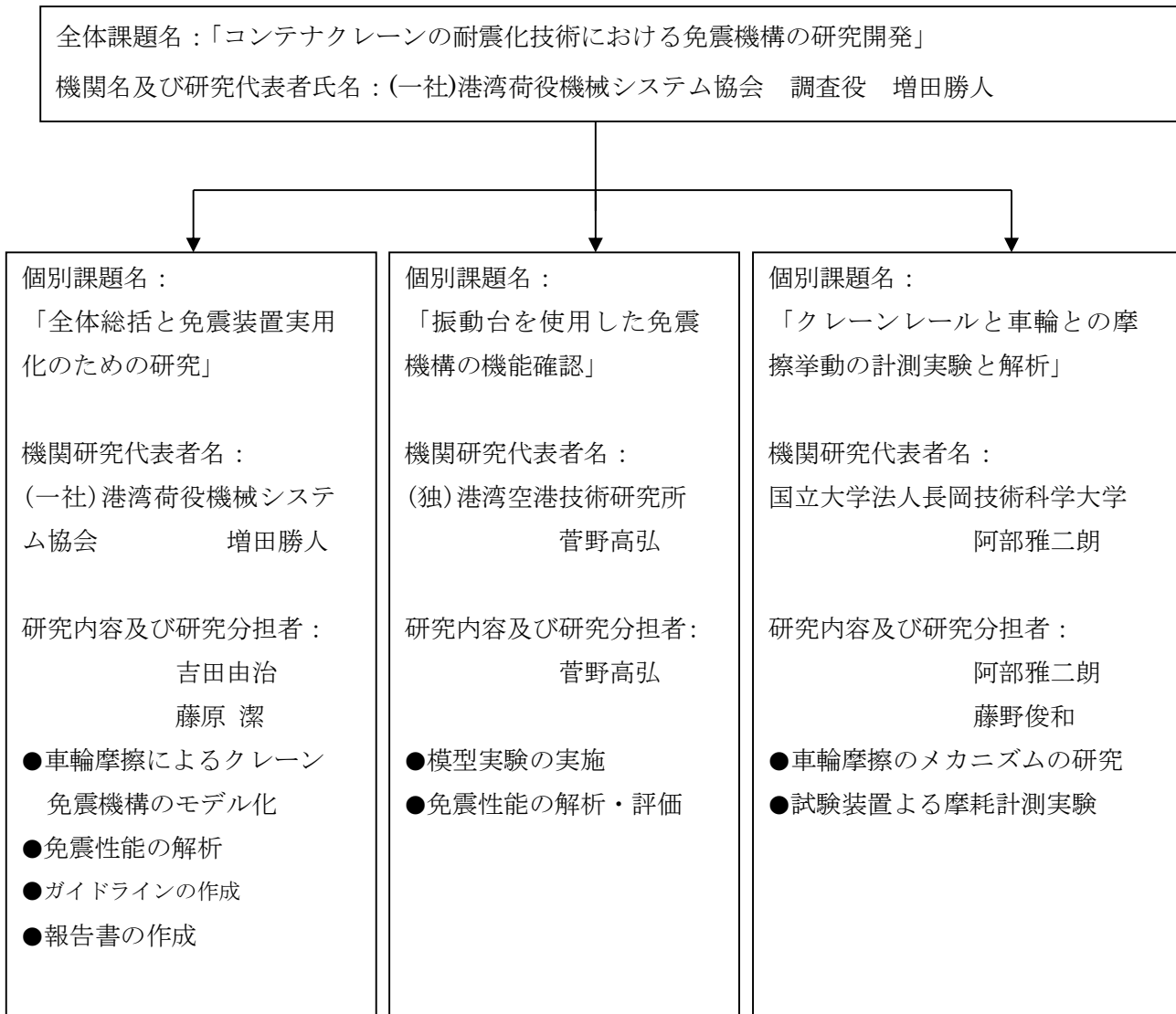
#### 1.1 研究開発の目的

本業務は、既存コンテナクレーンの効率的な耐震化を推進するため、新たな免震機構を研究開発し、普及を図るものである。さらに、コンテナクレーンの維持管理費の低減に資する簡易に鋼構造物の腐食及び溜水を計測できる非破壊検査装置を研究開発し、普及を図るものである。

#### 1.2 実施の体制

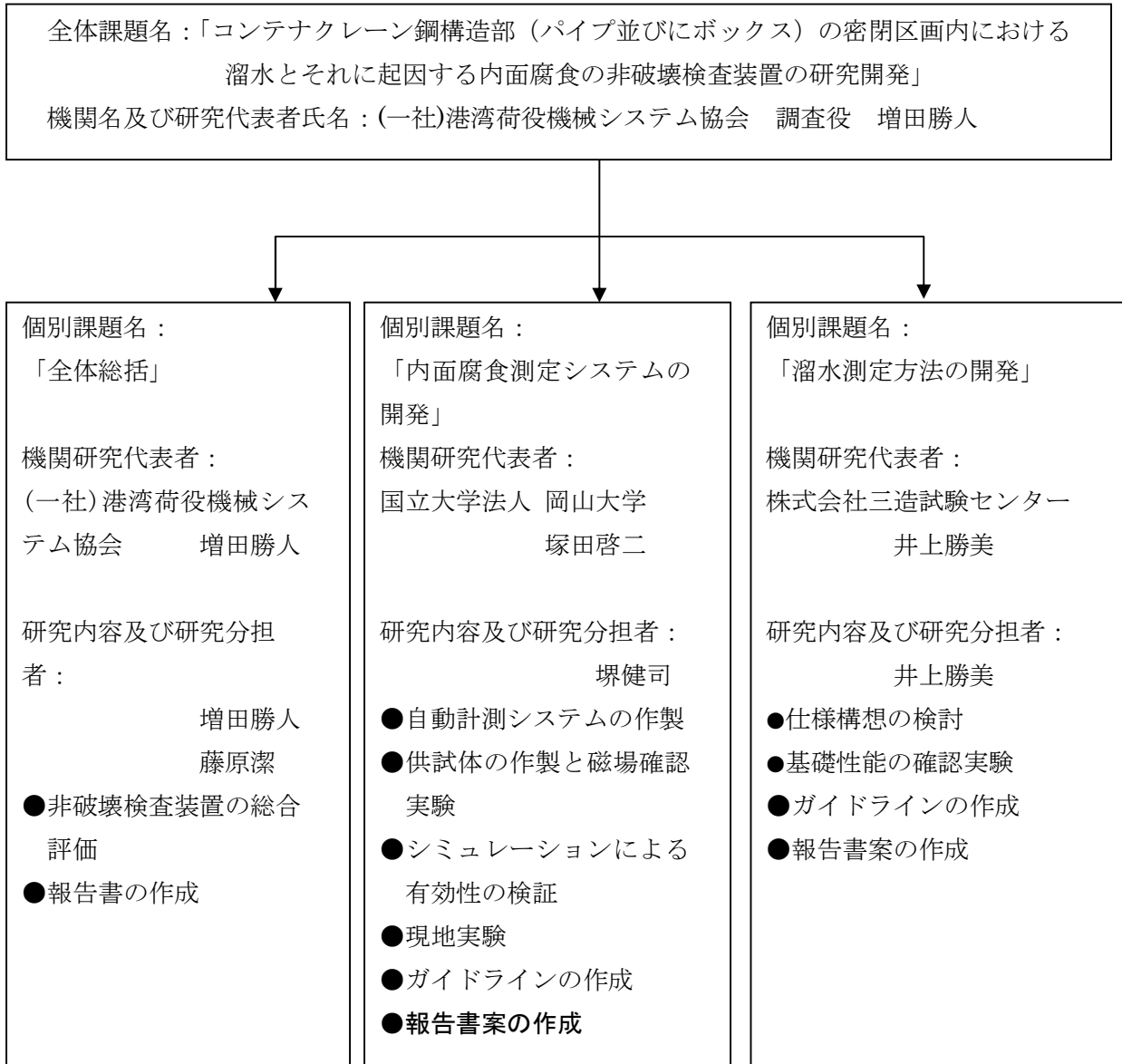
##### 1) 免震機構の研究開発

免震機構の研究開発には、(一社)港湾荷役機械システム協会、(独)港湾空港技術研究所、国立大学法人長岡技術科学大学と共同して実施した。担当機関の研究実施の流れを示すチャートは以下の通りである。



## 2) 非破壊検査装置の研究開発

免震機構の研究開発には、(一社)港湾荷役機械システム協会、国立大学法人岡山大学、(株)三造試験センターと共同して実施した。担当機関の研究実施の流れを示すチャートは以下の通りである。



## 研究開発成果

### 1. 免震機構の研究開発

#### 1.1 序論

本免震機構は通常の走行車輪を幅広車輪または走行車輪及び支持構造部分とする機構に替えることにより、地震時に走行車輪構成部分がクレーンレール上を滑る機構により免震を図るものである。

提案する免震機構（摩擦免震と呼ぶ）の特性を把握し、有効性を確認するため、①免震機構のモデルの検討、②動的シミュレーションによる評価、③振動台を用いた模型試験の実施、④シミュレーションの境界条件を得るためクレーンレールと走行車輪等との摩擦係数計測実験を行った。

#### 1.2 摩擦免震機構について

① 摩擦免震モデルにおいて正弦波を入力したシミュレーション解析を平成 25 年度に行った結果、

地震動によるクレーン重心位置の最大加速度は、図-1.1 に示すように摩擦免震モデルは従来型(非免震)に比べて 52.5%に低減され、従来型（免震）とほぼ同等の性能であることが分かった。また脚部の浮上がり量も従来型（非免震）の 1.4%に低減され、従来型（免震）と同程度の性能であった。摩擦免震モデルについて本シミュレーションにより得られたことは、①周波数依存性が小さく、地震動の特性によらず、免震効果が得られる。②摺動部の変位振幅を大きく設定でき、ダンパー設置により変位振幅を変えられること。などの優れた免震効果があることが分かった。平成 26 年度はシミュレーションモデルを改良し、シミュレーション結果と模型実験結果との比較を行い、検針機能を確認した。

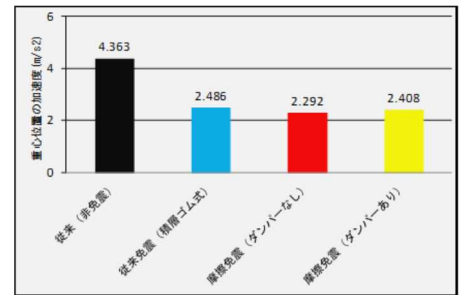


図-1.1 クレーン重心位置の最大加速

② 幅広車輪を用いた摩擦免震機構

図-1.2 に示す車輪に幅広車輪を用いることで地震時にクレーンがレール上を滑る免震効果が期待できる。摺動部の変位には制限がある。

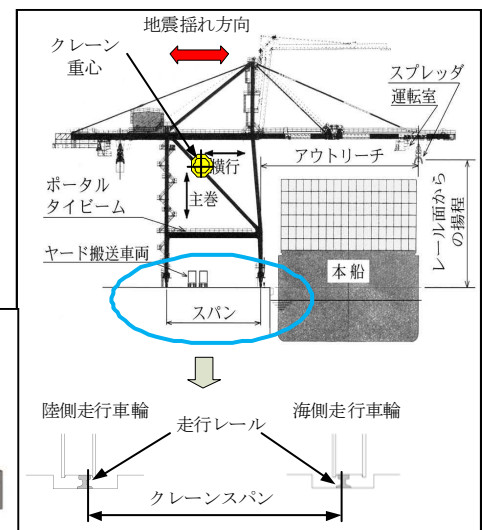
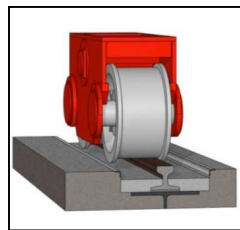


図-1.2 幅広車輪を使用した摩擦免震機構の車輪配置

③ 摺動部材を用いた摩擦免震機構

地震発生時の車輪の横ずれを許容するため、つばなし車輪と摺動部材を備えた機構とする。図-1.3 に示すように、地震時にクレーンは摺動部材の働きによりレール上を“滑る”状態となり、摺動部での摩擦力のみがクレーン上部構造に伝わるため免震効果が生まれる。摩擦係数のさらなる低下を目的として摺動面に潤滑油を供給する方法も考案した。

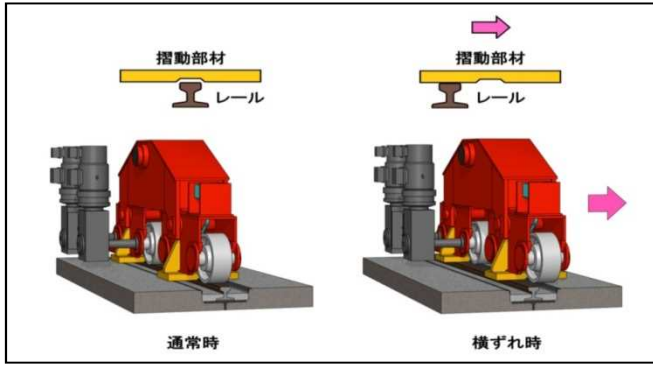


図-1.3 揺動部材を使用した摩擦免震機構



図-1.4 振動模型実験装置の外観

### 1.3 実施状況

年度	免震機構の研究開発
平成25年度	① 免震モデル機構等の検討 ② 解析ソフトの開発とシミュレーションの実施 ③ 模型クレーンの製作 ④ 模型実験方案の作成 ⑤ 摩擦計数計測試験装置の整備(製作)
平成26年度	① 1/15模型クレーンによる振動実験及び解析 ② 解析モデル・ソフトの改良及びシミュレーションの実施 ③ シミュレーションと実験結果との比較 ④ 摩擦係数試験の実施及び解析 ⑤ ガイドライン案の作成

### 1.4 コンテナクレーンの振動模型実験

本免震機構の免震効果をビジュアルな形で把握する必要があるため水中振動台を利用して振動実験を行った。通常車輪及び幅広車輪を取り付けた模型クレーンに正弦波と実地震動を作用させて本免震機構の免震効果について調査した。実験装置を図-1.4に、計測機器の配置を図-1.5に示す。実験内容は以下の通り。

#### (1) 加振実験

走行レールに対し直角方向の地震動成分が作用した場合の免震効果を調査するため、通常車輪及び幅広車輪を取付けた模型に正弦波と地震動を作用させて模型クレーンの揺れを比較検討した。

##### 1) 正弦波加振実験

通常車輪及び幅広車輪を取り付けた各々の場合について模型クレーンの固有周期に近い周期 0.68 秒 (1.48 Hz) の正弦波を、加速度を 5 gal、10 gal、20 gal、50 gal として 10 波作用させた。

##### 2) 地震動加振実験

通常車輪及び幅広車輪を取り付けた各々の場合について、既存の免震装置では対応が難しい新潟

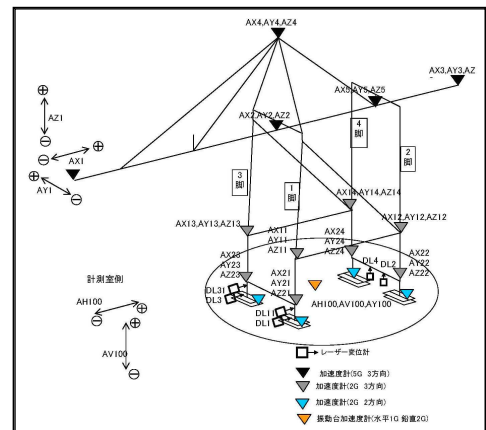
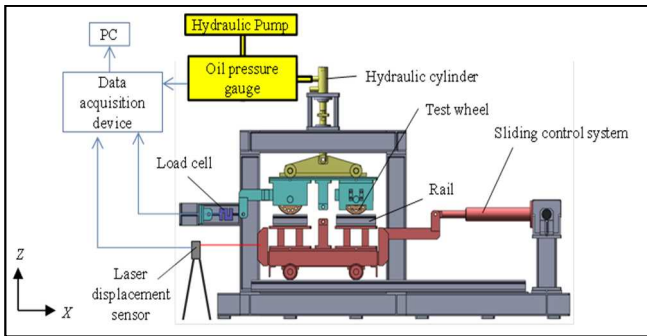


図-1.5 計測機器の設置位置

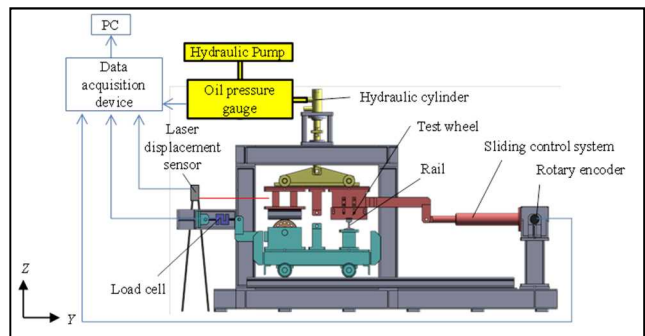
港のレベル 2 地震動、長周期で強い地震動として東北地方太平洋沖地震での東京港のレベル 2 地震動、短周期で強い地震動を示した兵庫県南部地震での神戸港の地震動を作用させた。

### 1.5 車輪とレール間の摩擦係数計測実験

図-1.6 に示す実験装置を用いて車輪及び摺動部材とレール間の摩擦特性を把握した。実験は、図-1.7 に示す駆動システムと計測システムにより、レール長手方向及び長手直角方向に摺動した場合の摩擦特性を計測した。



(a) レール長手方向摺動実験時



(b) レール長手直交方向摺動実験時

図-1.7 各実験時における駆動システムと計測システム

### 1.5 シミュレーションによる動的解析及び免震性能の評価

本免震機構の免震機構を確認するため、本免震機構を用いたクレーン用シミュレーション解析モデルを開発し、その解析モデルによるシミュレーションを実施して、振動模型実験結果との比較により解析モデルの妥当性の検証を行った。

#### (1) 解析ソフト

解析ソフトは、MSC Nastran と ABAQUS Version 6.10-2 のいずれが利用に適しているかを調査するため解析モデルに入力地震動として正弦波を作用させ、その応答性について ABAQUS Version 6.10-2 が良いという結果が得られていたことから、ABAQUS Version 6.10-2 を解析ソフトとして使用した。なお、車輪とレールとの接触モデルとしてギャップ要素を適用した。ギャップ要素のモデル概念図を図-1.8 に示す。ギャップ要素特性のうち静摩擦係数、動摩擦係数については摩擦特性試験から得られた値として、それぞれ 0.231、0.175 を適用した。また、クレーンの減衰については、自由振動試験結果から算定した減衰比 0.00906 を使用した。

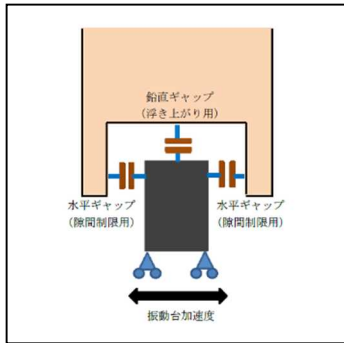


図-1.8 ギャップ要素モデル概念

## 1.6 結論

### (1) コンテナクレーンの振動模型実験

#### 1) 車輪の滑動と脱輪

- ① 車輪が滑動すると応答加速度に跳躍値が発生する。一定以上の加振力によって車輪が滑動している。通常車輪でも滑動が発生するが、幅広車輪では滑動量が大きいためはっきりしている。
- ② 脱輪は全て陸側車輪で発生している。加振によって模型クレーンに一定以上の加速度が作用すると、海側車輪を支点として転倒モーメントが作用し陸側車輪が浮き上がり、レールの内側に脱輪する。これはクレーンの重心が海側レールに近いことによる。
- ③ 脱輪は通常車輪の場合が多く、本免震機構が備える幅広端部が最も優れている。
- ④ 車輪の滑動し易さは免震効果とも関係し、通常車輪の場合は少ししか滑動しないので免震効果あまり働かない。幅広車輪の場合は幅広端部の方が滑動し易く、免震効果が高い。

#### 2) 免震性能

- ① 本免震機構（幅広端部）は、クレーンの揺れをある一定の割合で減衰させるものであるが、既存の免震装置が共振点をずらして免震効果を発現するのとは異なる。
- ② 本免震機構の特性から判断すると、特別強い地震動よりもそれを下回るような地震動に対して使用するのが適当と考える。その際、クレーン重心の加速度については、本免震機構を使用した場合でも  $0.25G$  程度以下に抑えることを目標とすることが望ましい。
- ③ 幅広車輪には幅広中央、幅広端部とも免震効果が認められるが、幅広端部が優れている。
- ④ 跳躍値も含めた幅広端部の減衰率は概ね  $20\sim 40\%$  程度である。但し、比較の対象として採用している最大加速度の多くが高周波の跳躍値であって、これを除去すると  $20\sim 40\%$  程度より改善されると考えられる。
- ⑤ 実験では加振波の加速度を高め正弦波  $20gal$  設定で初めて車輪の滑動と免震効果が認められ、通常車輪での模型クレーンの重心加速度が  $312gal$ ）に対し幅広車輪では  $167gal$  であった。
- ⑥ 車輪の滑動開始は、加振波の加速度やクレーンの減衰率と関係する他、レールと車輪との摩擦係数も大きい。実験では、静摩擦係数が  $0.38$  以下として求められたが、実際の車輪とレールにおいては高い接触圧となるため静摩擦係数として  $0.25\sim 0.15$  程度が想定される。こうした摩擦係数になるとクレーンの車輪の滑動がより小さな地震動でも起きる。

### (2) 車輪とレール間の摩擦計測実験

- ① 車輪・レール間および摺動部材・レール間のレール長手直交方向の摩擦実験より、動摩擦係数は  $0.166$  と推定できた。
- ② 解析実験ではレール製造時に表面に形成された酸化膜（黒皮）を除去せず実験に使用し、輪重、摺動特性等による摩擦特性の変化傾向を酸化膜のすべり損傷と関連付けて検討した。しかし、実際のレール表面はクレーンが走行することにより平滑になっており、本実験で使用したレールとは表面の粗さや化学的組成等が異なる可能性がある。
- ③ 今後、酸化膜の除去等の処理により港湾で使用されているレールの表面状態を模擬した実験解析を実施すれば、実際の港湾環境により近い条件における車輪等との間摩擦特性が得られると考えられる。

### (3) シミュレーションによる検証



- ① シミュレーションを実施し、解析モデルの再現性について解析を行った結果、脚の動きを表すことについては、再現性があるとは言えないが、時刻歴応答加速度については、再現性を確認できた。従って、この解析モデルによって実機クレーンへの検討等を行うことができる。
- ② 一般的に実機クレーンに免震装置を設備する場合、主たる検討課題は地震を受けることによるクレーンの時刻歴応答加速度、即ち加速度と振動の振れ幅である。これについては解析モデルが有効である。
- ③ 但し、浮き上がりについては、応答加速度と振動の周期、振れ幅等をもとに別途検討を行い補完する必要がある。

#### (4) ガイドラインの作成

免震機構の特性、免震解析ソフトの利用方法、免震機構の設置等についてのガイドライン案を作成した。

#### 1.7 知的財産権取得状況

特許出願：登録4件（実用新案）、出願1件（実用新案）

表-1 摩擦免震機構に関する出願特許一覧表

No	発明の名称	登録番号	出願日	権者/考案者
<input type="checkbox"/>	走行クレーン用免震機構	3186516	H25年7月30日	港荷協
<input type="checkbox"/>	走行クレーン用免震機構	3186517	H25年7月30日	港荷協
<input type="checkbox"/>	アンカー機構を有するクレーン	3189278	H25年12月12日	港荷協
<input type="checkbox"/>	クレーンにおける滑り免震機構の潤滑装置	3189279	H25年12月12日	港荷協
<input type="checkbox"/>	ガイド車輪機構	実願 2014-001371	H26年3月18日	港荷協

#### 1.8 研究成果発表実績

- 1) 論文発表； 国内 0件、海外 0件
- 2) 口頭発表； 国内 1件、海外 0件
- 3) その他（研究内容報告書、機関誌発表、プレス発表等）  
なし

#### 1.9 参考文献

- [1] T. Ohyama, Tribological studies on adhesion phenomena between wheel and rail at high speed, Wear Vol. 144 (1991), pp. 263-275.
- [2] H. Chen, T. Ban, M. Ishida, T. Nakahara, Adhesion between rail/wheel under water lubricated contact, Wear Vol. 253 (2002), pp. 75-81.
- [3] H. Chen, M. Ishida, T. Nakahara, Analysis of adhesion under wet conditions for three-dimensional contact considering surface roughness, Wear Vol. 258 (2005), 1209-1216.
- [4] K. S. Baek, K. Kyogoku, T. Nakahara, An experimental investigation of transient traction characteristics in rolling-sliding wheel/rail contacts under dry-wet conditions, Wear Vol. 263 (2007), pp. 169-179.
- [5] Y. Zhu, U. Olofsson, K. Persson, Investigation of factors influencing wheel-rail adhesion using a mini traction machine, Wear Vol. 292-293 (2012), pp. 218-231.
- [6] H. Harisson, T. McCanney, J. Cotter, Recent developments in coefficient of friction measurements at the rail/wheel interface, Wear Vol.253 (2002), pp. 114-123.

## 2. 非破壊検査の研究開発

### 2.1 序論

クレーン構造部分の健全度調査では、特にパイプ並びにボックスの密閉区画内の裏面腐食・減肉の検出が重要であり、これらの検査を広域、迅速かつ効率的に行う手段の開発が待たれる。このため、①検出器接触子と探傷面の間が非接触であること、②検出器接触子を走査できること、③裏面の腐食・減肉状態のマッピング表示、④水分検出が可能である、等の機能が要求される。

上記①②③を満足するためには漏洩磁束を利用し探傷法が有効であり、④は中性子水分計が入手可能な検査手段である。

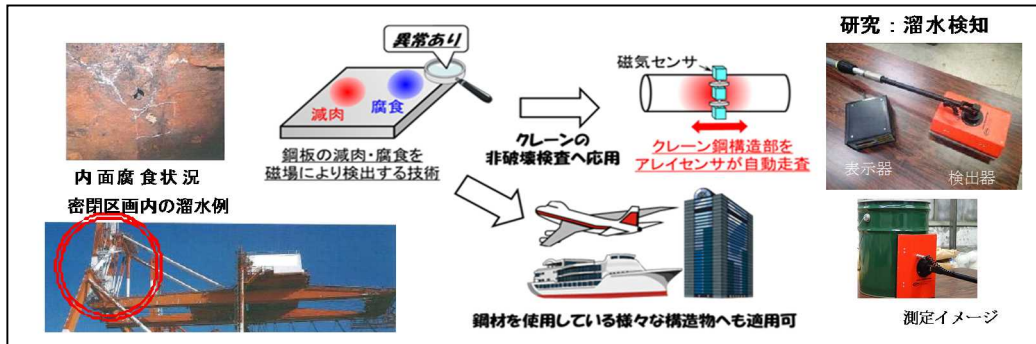


図-2.1 クレーン構造部分の健全度調査のイメージ図

### 2.2 実施状況

研究項目 年度	磁気による非破壊検査装置の開発	中性子による非破壊検査装置の開発
平成25年度	① 計測システムの開発 ② 磁気確認実験の実施及び解析 ③ 有限要素法によるシミュレーションによる検証	① 中性子水分計の選定 ② 基礎性能確認実験 ③ 走査方法に関する検討
平成26年度	① 自動検査システム的设计・製作 ② 各種減肉・腐食試験体の製作 ③ 供試体を用いた自動検査システム実験及び評価 ④ 実験結果とシミュレーション解析結果の評価 ⑤ 実機適用に向けたガイドライン案の作成	① 関連技術資料の収集・整理 ② 供試体の製作 ③ 供試体を用いた適正検証試験 ④ 供用橋梁における適用性確認実験 ⑤ 実機適用に向けたガイドライン案の作成

### 2.3 非破壊検査の研究開発の内容

#### 1) 磁場を利用した非破壊検査の研究開発

本研究開発は非破壊でかつ安全にコンテナクレーン鋼構造部の密閉区画内における“内面腐食”の検出をする装置の開発・実用化を目指すものである。

強磁性体に磁場を印加すると磁性体内部に磁束が発生する。磁束の流れの途中で割れ目や傷が存在した場合、磁束が流れにくくなり欠陥付近では空間に磁束が漏洩する。この漏洩磁束を測定することで欠陥の位置、深さ、大きさを検出する方式が本検査装置である。

#### ①自動検査装置システムの実験及び評価

平成25年度の成果を受けて、図-2.2に自動検査装置を製作し、供試体による性能実験を行うと共に、実機コンテナクレーンのタイビームの計測実験を行った。

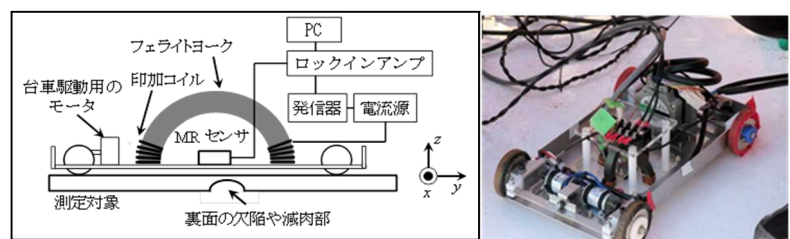


図-2.2 自動検査装置の構成と外観

図-2.3 に非貫通穴の深さが異なる供試体(5~8 mm)に対し周波数を変化させた場合の磁場分布マッピングを示す。

y 方向に印加し、y 方向の磁場を検出した。印加磁場の周波数は 10、50、100 Hz の 3 種類である。印加周波数が小さいほど欠陥深さが小さくなくても欠陥の状況が確認できた。

図-2.4 に減肉割合(2.5~80%)が異なる供試体の漏洩磁場の 3 方向の分布を示す。磁場の印加方向は y 方向である。

y 方向の減肉厚 50% の分布がよくわかる。x 方向の 80% 減肉の磁場分布は試料四隅に相当する部分で強度が極大もしくは極小となっている。z 方向の分布を見ると、欠陥のエッジ部分で磁場が最大値もしくは最小値を取っており、欠陥のエッジで漏洩する磁場を示していることが分かる。

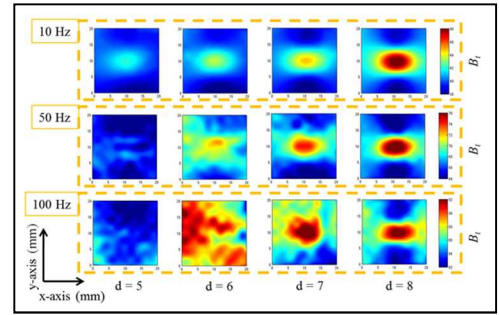


図-2.3 欠陥深さと印加磁場周波数の関係

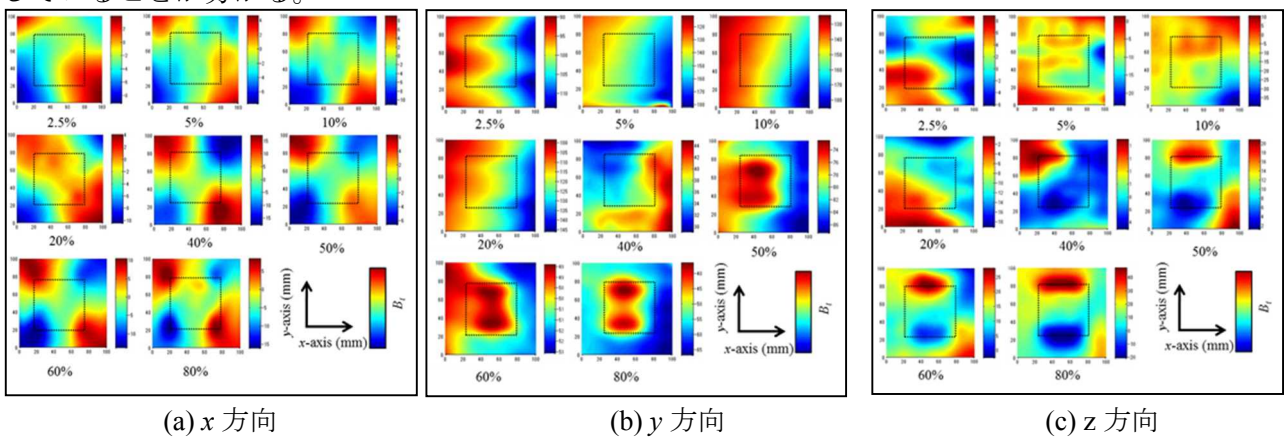


図-2.4 減肉割合が異なる 8 つの試験体の磁場分布

## ② 腐食モデルのシミュレーション解析と実験結果との比較

有限要素法を用いたシミュレーション結果を図-2.5 に示す。図-2.4 の実験結果を良く再現している。

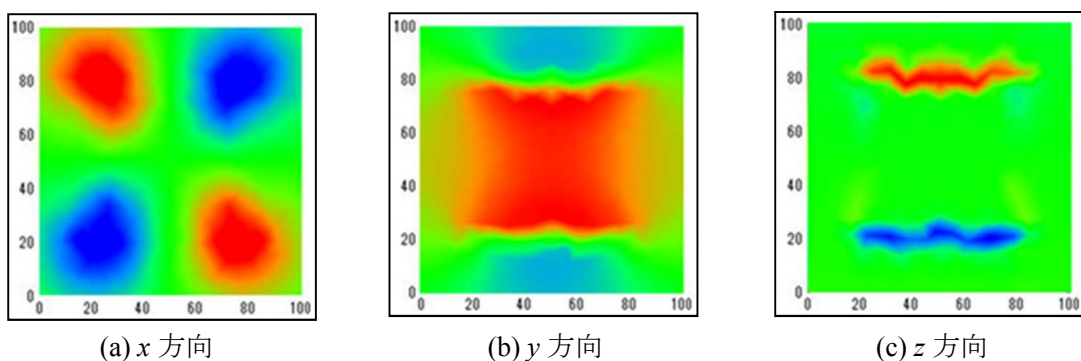


図-2.5 腐食減肉体の磁場分布シミュレーション

## 2) 中性子水分計を利用した非破壊検査の研究開発

密閉部の内部の溜水状態を確認する非破壊検査装置として、中性子水分計を適用する場合の①検知限界の測定試験を行い、②現地に適用する実用化について検討し、コンテナクレーン鋼構造物の溜水の有無を確認するための③ガイドラインを作成し、溜水検

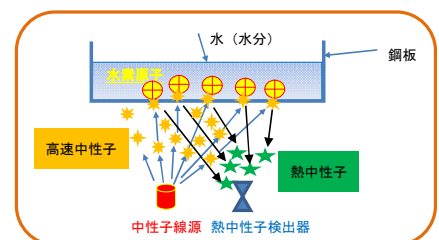


図-2.6 中性子水分計の計測原理

知の測定方法の計測システムを構築した。中性子水分計の中性子線源としてカリフォルニウム 252 ( $^{252}\text{Cf}$ 、半減期 2.65 年) を使用しており、図-2.6 に計測原理の模式図を示す。放射された高速中性子は水分中の水素原子に反応し熱中性子に代わり、これを計量することにより検知する方式である。図-2.7 に本研究で使用した水分計を示す。

### 1) 仕様構想の検討

平成 25 年度に実施した基礎性能確認試験の結果より、実機に適用する場合の必要条件、課題および対策(案)について検討した。

まず、①測定値の安定性については、基礎試験では測定時間を 10 秒間に設定していたが、これを 20~120 秒間等に延長することで、ばらつき範囲の改善具合を測定比較試験より確認した。

続いて②走査要領および測定条件を確定するため、被測定面を走査する方法および一定の測定時間その位置に静止する方法について、検出器に車輪を取付ける工夫を行った。また鋼板に中性子水分計を簡単に押し当てることにより、裏面に溜水が存在する場合と健全な場合で測定値に有意な差異が得られる手法について検討を行った。

### 2) 適用検証・確認試験

図-2.8 の模擬試験体に水量を変化させた溜水を設け、溜水量の変化と測定値の相関を求める実験を行い、中性子水分計の検知特性の確認およびその評価を行った。また、実機に適用する上で必要な注意事項を明らかにした。

### 3) 橋梁での現地測定

岡山県の国道 30 号に架かる伊達橋(ゲルバー鋼ランガーアーチ橋)において溜水調査を行った。その結果、一部の RC 床版及びパイプトラス部で溜水を確認した。検出器は磁石車輪治具付であり、検査装置の有効性を確認した。計測状況を図-2.9 に示す。

## 2.3 結論

### (1) 磁場を利用した非破壊検査装置

- ① コンテナクレーン等の内面腐食を非破壊検査する自動検査システムの構築を行い、内面欠陥検出能力の評価と実機クレーンのタイビームでの現地検査を行った。
- ② 印加磁場周波数と検出できる内面欠陥の深さとの関係では、印加磁場の周波数が低くなると内面の欠陥に起因する磁場分布が取得でき、本装置では 10Hz の磁場を印加が効果的であった。
- ③ 印加磁場と平行な成分の磁場を検出すると、欠陥の形状と相関性の高い磁場分布が取得できる。
- ④ シミュレーション結果と測定した磁場分布と定性的に一致することがわかり、開発した検査装置が鋼板内面の欠陥による漏洩磁場を検出できていることがわかった。
- ⑤ 周波数 10Hz で 1A の電流を流した条件下では、鋼板厚さの 50% 程度の減肉が検出可能である。
- ⑥ 磁気検査プローブと自動走行可能な台車を組み合わせた自動検査システムを構築した。基礎特性評価として、腐食減肉体の上を自動走行し磁場応答を測定した結果、欠陥部で磁場の変化が確認でき、自動走行しながら鋼板内面の検査ができる。



図-2.7 中性子水分計  
(MCM-2 型 Hydotecto)



図-2.8 試験体の外観



図-2.9 現地計測状況

## (2) 中性子水分計を用いた非破壊検査装置

- ① 実用化に必要な走査機構の条件である「一定時間(10秒)以上を容易に保持できる、次の測定位置まで簡単に動かすことのできる」機能を確保するため、磁石車輪治具を考案製作した。
  - ② 現地実験の結果、走査機構としては良好な結果を得た。
  - ③ 測定時間による測定値への影響は、測定時間が短いほど測定値のバラツキは大きい。しかし、10秒間計測でも溜水確認については、十分信頼できる計測である。
  - ④ 検知器を対象物から離して計測する場合は、50mm程度まで直線的に減少し、50mmを超えると指数関数的に減少する。また、溜水の影響を感知しない距離は500mm程度である。従って、磁石車輪(隔離距離45mm)での測定は有効である。
  - ⑤ 対象物がパイプ形状の場合、パイプ径が小さいほど感度が良い。
  - ⑥ 対象物が腐食鋼板の場合と腐食のない鋼板の場合測定値に有意な差異はなかった。
  - ⑦ 橋梁の現地測定により、RC床版及びパイプトラスの溜水を確認し、装置の有効性を確認した。
- (3) 両検査装置について、ガントリークレーンに適用する場合のガイドライン(案)を作成した。

## 2.4 知的財産権取得状況

特許出願：登録0件、出願0件

## 2.5 研究成果発表実績

- 1) 論文発表：国内 5件、海外 5件
- 2) 口答発表：国内 1件、海外 0件

## 2.6 参考文献

- [1] G. Dobmann, H. WalleG, P. Holler, “Magnetic leakage flux testing with probes: physical principles and restrictions for application”, NDT&E International, 20, pp. 101-4 (1987)
- [2] M. Katoh, K. Nishio, T. Yamaguchi, “FEM study on the influence of air gap and specimen thickness on the detectability off laws in the yoke method”, NDT&E International, 33, pp. 333-339 (2000)
- [3] Ramirez Romero, Mason John SD Alicia, Neil Pearson, “Experimental study to differentiate between top and bottom defects for MFL tank floor inspections”, NDT&E International, 42, pp. 16-21 (2009)
- [4] K, Tsukada, M. Yoshioka, Y. Kawasaki, T. Kiwa, “Detection of back-side pit on a ferrous plate by magnetic flux leakage method with analyzing magnetic field vector”, NDT&E International 43 pp. 323-328 (2010)
- [5] N. Kasaia, S. Matsuzaki, T. Sakamoto, “Experimental and analytical study for detectability of the back-side flaws of flat ferromagnetic plates by RFECT”, NDT&E International, 44, pp. 703-707 (2011)
- [6] J. Wang, N. Yusa, HL. Pan, T. Takagi, H. Hashizume, “Evaluation of Sensitivity of Remote Field Eddy Current Testing and Low-Frequency Eddy Current Testing for Inspecting Grooves of Metal Plate”, Materials Transactions, 54, 1 pp.90-95 (2013)
- [7] H. Takada, Y. Tomura, M. Aratani, T. Yamasaki, T. Sasaki, “On-Line Detection System for Internal Flaws in As-Hot-Rolled Steel Strip Using Ultrasonic Probe Array”, Journal of the Japan Institute of Metals, 76, 9, pp. 546-554 (2012)