ISSN 1346-7328 国総研資料 第 540 号 平成 21 年 10 月

## 国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 540

October 2009

# 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2)

宫田正史·竹信正寬·野津厚·菅野高弘·小濱英司·久保哲也

## Study on the Seismic Performance-based Design Methods for Container Cranes (Part 2)

Masafumi MIYATA, Masahiro TAKENOBU, Atsushi NOZU, Takahiro SUGANO, Eiji KOHAMA, Tetsuya KUBO

## 国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan 国土技術政策総合研究所資料 No. 540 2009年10月 (YSK-N-190)

#### 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2)

#### 宮田正史\*・竹信正寛\*\*・野津厚\*\*\*・菅野高弘\*\*\*\*・小濱英司\*\*\*\*\*・久保哲也\*\*\*\*\*\*

#### 要 旨

『港湾の施設の技術上の基準を定める省令』及び『港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示』 の改正(2007.4)にともない、技術基準対象施設として荷さばき施設のうち石油荷役機械以外の機械 が追加され、さらに耐震強化施設に設置される荷役機械についてはレベル2地震動に対する要求性能 及び性能規定が明確に規定された.しかしながら、技術基準改正に対応した設計事例が存在しないこ となどから、耐震強化施設としての荷役機械を対象とした耐震性能照査手法の標準化及び照査項目等 の明確化が必要とされている.

このため、本研究では、上記への対応の一環として以下の検討を行った.

①全国調査に基づく,既存コンテナクレーンの固有周期や浮上がり限界加速度等の基本情報の整理
 ②実機コンテナクレーンを対象とした観測(強震観測,振動計測,常時微動)及び3次元FEMを用いた固有値解析に基づく,実機クレーン(調査対象のうち2基)の振動特性の把握

本資料は、以上に示した結果を(その2)として報告するものである.

キーワード:耐震強化施設、コンテナクレーン、振動特性、3次元FEM、耐震性能照査

<sup>\*</sup> 港湾研究部港湾施設研究室主任研究官

<sup>\*\* (</sup>独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 耐震構造研究チーム 研究官

<sup>\*\*\* (</sup>独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 耐震構造研究チーム 主任研究官

<sup>\*\*\*\* (</sup>独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 耐震構造研究チーム チームリーダー

<sup>\*\*\*\*\*</sup> 関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所設計室長

<sup>\*\*\*\*\*\*</sup> 関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所設計室建設管理官

<sup>〒239-0826</sup> 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所

電話:046-844-5029 Fax:046-844-5081 e-mail:miyata-m92y2@ysk.nilim.go.jp

Technical Note of NILIM No. 540 October 2009 (YSK-N-190)

## Study on the Seismic Performance-based Design Methods for Container Cranes (Part 2)

Masafumi MIYATA\* Masahiro TAKENOBU\*\* Atsushi NOZU\*\*\* Takahiro SUGANO\*\*\*\* Eiji KOHAMA\*\*\*\* Tetsuya KUBO\*\*\*\*\*

#### Synopsis

Technical Standards for Port and Harbour Facilities in Japan were just revised in 2007, which include new regulations upon cargo handling equipment such as container cranes. As is the case with a high seismic resistant quaywall (port structure), both a container crane and a quaywall shall be the structures that will sustain only slight damage during Level 2 (L2) earthquake motion and their functions can be quickly restored after the earthquake. In addition, the evaluation method for the L2 earthquake motions was also changed completely. Therefore a standard procedure for the performance-based seismic design, considering both seismic performances of a container crane and a quaywall against the L2 earthquake motions, is required in the actual design works.

From the above point of view, in this study we perform the following issues as a second step;

- 1) a nationwide investigation for existing container cranes into design information related to seismic-performance verification of a crane, which includes position of the center of mass, limit acceleration for up-lift of a crane's legs and natural frequency of crane, and
- 2) an examination on the vibration characteristic of two actual container cranes, based on on-site measurements (strong earthquake observation, vibration test and microtremor observation) and characteristic frequency analysis with using three-dimensional finite element method.
- Key Words : high seismic resistant quaywall, container crane, vibration characteristic, performance-based seismic design, three-dimensional finite element method
  - \* Senior Researcher of Port Facilities Division, Port and Harbor Department
  - \*\* Researcher, Earthquake and Structural Dynamics Group., Geotechnical and Structural Engineering Dep., Port and Airport Research Institute (PARI)
  - \*\*\* Senior Researcher, Earthquake and Structural Dynamics Group., Geotechnical and Structural Engineering Dep., PARI
  - \*\*\*\* Head, Earthquake and Structural Dynamics Group., Geotechnical and Structural Engineering Dep., PARI \*\*\*\*\* Head, Design Section, Yokohama Port and Airport Technology Investigation Office

Phone : +81-46-844-5029 Fax : +81-46-844-5081 e-mail: miyata-m92y2@ysk.nilim.go.jp

<sup>\*\*\*\*\*\*</sup> Subsection Chief, Design Section, Yokohama Port and Airport Technology Investigation Office 3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

### 目 次

1. はじめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
2. 既存コンテナクレーンの固有周期・重心位置・浮き上がり限界加速度に関する全国調査	1
2.1 概要 ·····	1
2.2 調査手法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
2.3 調査結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
3. 強震観測・振動計測・常時微動観測・3次元FEMに基づく既存コンテナクレーンの振動特性	7
3.1 概要 ·····	7
3.2 強震観測・振動計測・常時微動観測による検討	7
3.3 三次元有限要素法による検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
3.4 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	33
4. おわりに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	35
謝辞 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	35
参考文献 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	35
付録	

#### 1. はじめに

平成18年5月の港湾法改正において,港湾の施設の技 術上の基準の性能規定化が図られ,これを受けて『港湾 の施設の技術上の基準を定める省令(平成19年3月26日 国土交通省令第15号)』及び『港湾の施設の技術上の基 準の細目を定める告示(平成19年3月28日国土交通省告 示第395号)』の改正が行われ,平成19年4月1日より新 しい技術基準(以下,技術基準と呼ぶ)が施行された<sup>1)2)</sup>. この中で,臨海部における地震時の港湾機能の確保や防 災拠点形成機能の強化等の観点から,技術基準の対象施 設として,廃棄物埋立護岸,海浜,緑地,広場及び荷さ ばき施設のうち石油荷役機械以外の機械が新たに追加 された.

耐震強化施設に設置される荷役機械の要求性能につ いては、省令及び告示において「レベル二地震動等の作 用による損傷等が,軽微な修復による当該荷役機械の機 能の回復に影響を及ぼさないこと.」及び「耐震強化施 設に設置される荷役機械の性能規定にあっては, 主たる 作用がレベル二地震動である偶発状態に対して,作用に よる損傷の程度が限界値以下であることとする.」と規 定され、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>2)</sup>の解 説では,該当する施設を「特定(幹線貨物輸送対応)| と位置づけ、「レベル二地震動の作用後, 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」として規定している.このように、耐震強化施設 に設置される荷役機械については、レベル2地震動に対 する具体的な対応策が求められることとなっている. な お,一般に耐震強化施設に設置される荷役機械は,橋形 クレーンの一種で、コンテナ揚げ積み専用の特殊つり具 をもつ係留施設用クレーン(以下、コンテナクレーン) であり、本研究の検討対象はクレーン脚の海陸方向のス パンが30m程度の大型のコンテナクレーンとする.

以上に示したとおり,耐震強化施設のうち特定(幹線 貨物輸送対応)の場合,係留施設の耐震性の確保ととも にコンテナクレーンの耐震性も同時に確保することが 必要とされる.また,基準改正にともない,設計入力地 震動の考え方が変更となり,サイト特性等を考慮した長 周期・長継続時間のレベル2地震動<sup>20</sup>に対するコンテナク レーンの耐震性評価が必要となっている.

しかしながら,現状の設計実務では,以下に示すよう な課題が顕在化している.

①コンテナクレーンに関する各種の設計情報の不足②新しいレベル2地震動に対してコンテナクレーン

に要求される耐震性能(性能規定)の明確化及び 照査手法・項目等の標準化

上記①②の課題のうち,前報<sup>3)</sup>において,課題①につ いては、係留施設の設計初期段階においてクレーン側 の基本諸元の仮設定を容易にできるように、コンテナク レーン自重や輪荷重などの基本諸元の整理を行った.ま た,課題②については、コンテナクレーンの耐震設計に 関する課題の整理や、係留施設とコンテナクレーンの双 方の耐震性を確保するための標準的な耐震性能照査の 在り方を検討した上で,既に提示されているコンテナク レーンの重心位置の加速度応答を評価するための簡易 手法(1質点モデル)の長周期・長継続時間の地震動に対 する適用性について模型実験及び解析による検証を行 った. さらに, 設計入力地震動の変更に伴う影響を把握 するために、工学的基盤面におけるレベル2地震動を対 象として,既往の代表的な設計入力地震動と全国の代表 的な港湾で検討されている地震動を用いて,応答スペク トルによる評価を行い,免震装置等に求められる変形量 がどの程度増加するかなどについて概略評価を行った.

本研究では,課題①に関連する事項として,前報<sup>3)</sup>に 引き続き,以下に示す検討を行った.

〔課題①〕

- i)全国調査に基づく,既存コンテナクレーンの固有
   周期や浮上がり限界加速度等の基本情報の整理
   (第2章)
- ii)実機コンテナクレーンを対象とした観測(強震観 測,振動計測,常時微動)及び3次元FEMを用い た固有値解析に基づく,実機クレーン(調査対象 のうち2基)の振動特性の把握(第3章)

本資料は,以上に示した結果を(その2)として報告 するものである.なお,残る課題については別報にて引 き続き報告する予定である.

#### 既存コンテナクレーンの固有周期・重心位置・ 浮き上がり限界加速度に関する全国調査

#### 2.1 概要

本章では、レールスパン30m級の全国既存コンテナク レーンを対象とし、クレーンの重心位置、浮き上がり限 界加速度および後述する簡易手法に基づき固有周期の 算出を行い、そのデータを取りまとめ.係留施設側の設 計者がコンテナクレーンの耐震性能照査を行う場合の 基礎情報として整理した. 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2)/ 宮田正史・竹信正寛・野津厚・菅野高弘・小濱英司・久保哲也

#### 2.2 調査手法

#### (1)調査対象

レールスパン30m級の全国既存コンテナクレーンとし て、「日本におけるコンテナクレーン一覧表(平成18 年4月)」<sup>4)</sup>に掲載されている全146基のクレーンを対象 として調査を実施した.**表-2**.1に、調査対象クレーン の基数や有効回答数等の結果を一覧として示す.

なお、本調査は、当該コンテナクレーンが位置する地 方整備局を経由して、コンテナクレーンの設置者宛に設 計関連資料の提供を依頼して行われた.クレーンの構造 設計に係る資料として、クレーン重量、風荷重、重心、 安定度、最大輪荷重、引抜力、逸走力、ジャッキアップ 力、レールクランプ力およびクレーン構造部分の強度計 算(地震条件及び疲労計算等を含む)が記載されている 完成図書(又は承諾用図書)について、提供を依頼した.

(2)重心位置の算出

コンテナクレーンの重心位置は,提供を受けた設計資 料から読み取った結果として評価した.一般に,クレー ン等安全規則<sup>5)</sup>およびクレーン等構造規格<sup>6)</sup>に基づく構 造設計を行う際には,異なるクレーンの姿勢に対して, クレーンの転倒に対する安定度が確保されているかの 照査が実施される.その際,対象とするクレーン姿勢は, 作業時としてトロリがアウトリーチ先端(海側先端)に 位置する場合とトロリがバックリーチ先端(陸側先端) に位置する場合の2つの姿勢,および休止時としてブー ムを上方へ格納した姿勢,の合計3姿勢である(各々, 作業時アウトリーチ,作業時バックリーチおよび休止時 と呼ぶ).今回の重心位置の算出においても,上記の3 姿勢を対象として整理した.

今回の重心位置の算定では,作業時の場合には吊り荷 の重量(定格荷重分)も考慮している.これは、吊り荷 重量自体はクレーン全体重量と比較すると小さいもの の(1000t級クレーンの場合,全体重量の5%程度),ア ウトリーチ時はブームの先端(海側脚から45~50m程 度), バックリーチ時はガーターの先端(陸側脚から15 ~20m程度)に吊り荷が位置するため、吊り荷重量(定 格荷重分)を考慮しない場合、後述する海脚周りおよび 陸脚周りのクレーン全体の抵抗モーメントを過大に評 価(アウトリーチ時で抵抗モーメントを最大10%程度, 過大評価) することになるため, クレーンの浮き上がり 限界加速度の算出において安全側の評価となるように 配慮した結果である.ただし,上記の重心位置の評価は, アウトリーチ時の陸脚周り, バックリーチ時の海脚周り の抵抗モーメントを増加させることになるため,留意が 必要である.

表-2.1	調査対象ク	レーンの標準	本数
-------	-------	--------	----

データ種別	標本数
調査対象クレーンの基数	146
調査対象クレーンのタイプ数	75
有効回答クレーンの基数	108
 有効回答クレーンのタイプ数	47
重心・浮き上がり限界加速度の算出対象クレーンの基数	113
重心・浮き上がり限界加速度の算出対象クレーンのタイプ数	52
固有周期の算出対象クレーンの基数(剛脚クレーン)	89
固有周期の算出対象クレーンのタイプ数(剛脚クレーン)	36



図-2.1 脚部浮き上がり加速度に関する説明図

一方,休止時の重心位置の算定では,吊り荷の重量 (定格荷重分)は考慮していない.また,休止時にお けるトロリの位置はクレーンの機種によって異なるが, 今回の重心位置の算定ではこれを考慮している.

(3)浮き上がり限界加速度の算出

コンテナクレーンの浮き上がり限界加速度は、上述した重心位置とクレーン質量から以下のように算出できる.

図-2.1に示すとおり,海側へ慣性力が作用する際の 重心位置加速度を $-\alpha$ (浮き上がり限界加速度と定義), 海側および陸側クレーン脚部における反力を各々 $V_I$ お よび $V_2$ とすると,海側クレーン脚部まわりのモーメント の釣り合いより,下式が成立する.

$$L \cdot V_2 + H \cdot M \cdot (-\alpha) - l_1 \cdot M \cdot g = 0 \tag{2.1}$$

ここで,脚部が浮き上がる際には V<sub>2</sub>=0 であるので,浮き上がり加速度は,(2.1)式で V<sub>2</sub>=0 と置き,下式のとおり算定される.

$$(-\alpha) = \frac{l_1}{H}g \tag{2.2}$$

なお、本調査では、浮き上がり限界加速度の算定は、 作業時アウトリーチ時、作業時バックリーチ時、休止時 の3姿勢を対象とし、各々の姿勢について、海側方向お よび陸側方向に慣性力が作用する際の浮き上がり限界 加速度を算出した.

(4)簡易手法による固有周期の算出

a) 簡易手法による固有周期の算出方法

一般に、コンテナクレーンの固有周期は、対象とする クレーンと同型のクレーンの動的挙動を測定して求め るか、又は、有限要素法等による骨組構造の固有値解析 により求める.しかしながら、実機コンテナクレーンの 固有周期の測定事例は少なく、また複雑な骨組構造をモ デル化することも費用の面から現実的ではない.このた め、「クレーン耐震設計指針」<sup>1)</sup>及び「コンテナクレー ン耐震設計のための手引き(案)」<sup>8)</sup>から、クレーンの質 量、主要構造部材の配置および剛性等の情報から簡易的 に固有周期を算出する方法が提案されている.本検討で は、「コンテナクレーン耐震設計のための手引き(案)」 <sup>8)</sup>に記載されている固有周期の算定式について、工学単 位系からSI単位系に変換した式を用いた(簡易手法と呼 ぶ).以下、本手法の概要を示す.

本手法では,橋形クレーンの横行方向および走行方向 の固有周期を下式による算出する.

$$T_x = 2\pi \sqrt{m_c \cdot \alpha_x} \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (2.3)$$

$$T_z = 2\pi \sqrt{m_c \cdot \frac{\alpha_{zs} \cdot \alpha_{zl}}{\alpha_{zs} + \alpha_{zl}}} \quad \cdots \cdots \quad (2.4)$$

ここに,

- $T_x$ : 横行方向固有周期(s)
- $T_z$  : 走行方向固有周期(s)
- $m_c$ : クレーンの脚部を除く全質量(kg)
- g : 重力加速度(9.8m/s<sup>2</sup>)
- $a_x$ :橋形クレーン横行方向1架構の水平たわみ係数 (s<sup>2</sup>/kg)
- a<sub>zs</sub>:橋形クレーン走行方向海側架構の水平たわみ 係数(s<sup>2</sup>/kg)
- a<sub>zl</sub>:橋形クレーン走行方向陸側架構の水平たわみ 係数(s<sup>2</sup>/kg)

である.また、 $a_x$ 及び $a_{zs}$ 、 $a_{zl}$ は図-2.2に示す位

置に単位水平力P=1Nを与えた時のその点における水 平変位であり、図-2.3に示すコンテナクレーンの主要 部材のみにより構成されるラーメン構造を仮定するこ とにより算出することができる.



図-2.2 簡易手法における水平たわみ係数<sup>8)</sup>



図-2.3 簡易手法による固有周期の算定に必要な部材

横行方向の水平たわみ係数は,図-2.2に示す曲げモ ーメント図を参照して,下式のとおり定義される.

$$a_{x} = \frac{m^{3}}{24E \cdot I_{c}} \left\{ 2 + \frac{3}{2} \times \frac{1}{\left(k_{b} + k_{d}\right)} \right\}$$
$$+ \frac{2m}{E \cdot A_{c}} \left(\frac{n}{s}\right)^{2} \left(1 + \frac{A_{c} \cdot n}{A_{d} \cdot m}\right) \cdots (2.5)$$

ここで,

E:鋼材のヤング係数

$$k_b = \frac{I_b/s}{I_c/m}$$
  
 $k_d = \frac{I_d/n}{I_c/m}$   
 $A_c$ ,  $I_c$ :下部柱の断面積,断面二次モーメント  
 $A_d$ ,  $I_d$ :上部柱の断面積,断面二次モーメント

- 3 -

 $I_b$ :水平はりの断面二次モーメントである.

同様に,走行方向の水平たわみ係数は,図-2.2に示 す曲げモーメント図を参照して,下式のとおり定義され る.

$$a_{z} = \frac{h_{1}^{3}}{12E \cdot I_{c1}} \left( 2 + \frac{1}{k_{b1}} \frac{h}{h_{1}} \right) + \frac{h_{2}^{3}}{12E \cdot I_{c2}} \left( 2 + \frac{k_{c2}}{k_{b2}} \frac{h}{h_{2}} \right)$$

$$\cdots (2.6)$$

$$\Xi \subseteq \overline{C},$$

$$h_{1} = \frac{-\left(\frac{6}{k_{c2}} + \frac{1}{k_{b1}} + \frac{1}{k_{b2}}\right)}{6\left(1 - \frac{1}{k_{c2}}\right)} h$$

$$+ \frac{\sqrt{\left(\frac{6}{k_{c2}} + \frac{1}{k_{b1}} + \frac{1}{k_{b2}}\right)^{2} + 12\left(1.0 - \frac{1}{k_{c2}}\right)\left(\frac{3}{k_{c2}} + \frac{1}{k_{b2}}\right)}{6\left(1 - \frac{1}{k_{c2}}\right)} h$$

$$\cdots (2.7)$$

である. さらに,

$$h_{2} = h - h_{1}$$

$$h_{c2} = \frac{I_{c2}}{I_{c1}}$$

$$k_{b1} = \frac{I_{b1}/l}{I_{c1}/h}$$

$$k_{b2} = \frac{I_{b2}/l}{I_{c1}/h}$$

 $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$ :下部及び上部柱の断面二次モーメント  $I_{b1}$ ,  $I_{b2}$ :下部及び上部梁の断面二次モーメント である.

なお、3章で詳述するが、本手法は実機コンテナクレ ーンの横行方向 1 次固有周期の評価については高い適 用性が認められたが、走行方向については適用が困難で あることが分かっている.このため、本簡易手法は、コ ンテナクレーンの横行方向固有周期の評価にのみ使用 した.さらに、振動特性を表現するクレーン主要部材を ラーメン構造として仮定しているため、コンテナクレー ンのうち揺脚クレーンについては評価の対象外として いる.

b)実機クレーンの横行方向固有周期の算出の留意点

実機クレーンの脚部材や梁部材は、一般的にはスパン 途中で断面剛性等を変化させている場合が多いため、上 述した簡易算定式に適用する断面剛性の入力値につい ては一定のルール化が必要であった.また、クレーン質 量についても、実機クレーンではラーメン構造から外れ



図-2.5 浮き上がり限界加速度とクレーン自重の関係 (作業時アウトリーチ)

た下方に質量が比較的大きい走行装置が位置するなど, クレーン質量の入力値についても一定のルールが必要 であった.以上の観点から,今回の調査における簡易手 法による固有周期算定の留意事項を以下に示す.

- ・固有周期の算出対象は、剛脚式クレーンのみとする.
- ・固有周期算定の際の重量は、定格荷重および走行装置 の重量を除くクレーン本体重量を用いた.ただし、走 行装置重量が不明の場合においては、走行装置の重量 をクレーン本体重量の10%と仮定した.
- ・固有周期算定の際に用いる部材剛性は、各柱・水平材部材毎の断面剛性の平均値を用いた.但し、詳細な断面諸元の構成が不明の場合は、応力照査を実施している箇所(脚と水平部材の結合部周辺の部材)における断面剛性を用いた.

#### 2.3 調査結果

(1)重心位置および浮き上がり限界加速度 a)作業時アウトリーチ

図-2.4に作業時アウトリーチにおける重心位置とクレーン自重の関係を,図-2.5に作業時アウトリーチ時における浮き上がり限界加速度(海側への慣性力作用時)とクレーン自重の関係を示す.なお,図中の凡例「重



図ー2.7 浮き上かり限系加速度とクレーン目重の関係 (作業時バックリーチ)

心 X」は、水平方向の重心位置を示し、海側脚から陸側 方向への距離(m)を示す.同様に、凡例「重心 Y」は、 鉛直方向の重心位置を示し、クレーン脚下端から鉛直上 向への距離(m)を示す.

作業時アウトリーチの場合,クレーン自重が 1000t 以下程度であると,レールスパン中央まで重心位置が分 布する傾向にあるが,1000t以上になるとクレーンの大 型化にともない,重心位置がクレーン中心位置 (X=15m)から海側に移動し,概ね海側レールから7m 程度の位置(X=7m)に収束する傾向にあることが分か る.これは,クレーンの大型化によりアウトリーチが大 きくなる一方で,レールスパンは固定されているため, 重心位置が海側に移動してしまうためである.鉛直方向 については,クレーンの大型化にともないクレーン高さ も高くなるため,重心位置が上方へ移動する結果となっ ているが,1000t以上のクレーンでは概ね 35m 程度で 頭打ちになっている傾向にある.

浮き上がり限界加速度については、陸側から海側に作 用する慣性力によって陸側脚が浮き上がる限界加速と、 海側から陸側に作用する慣性力によって海側脚が浮き 上がる限界加速度の2種類がある.作業時アウトリーチ 時については、ブームを下げた状態で、かつ吊り荷が先



端に位置する状態であるため、重心位置が海側に寄っている.このため、前者の浮き上がり限界加速度のみが設計上問題となるため(小さな限界加速度),後者の浮き上がり限界加速度は図にプロットしていない.

浮き上がり限界加速度(陸側→海側)は、クレーン重 心位置のみによって算出されるため,重心位置の分布に 対応した結果となっている. すなわち, 1000t 以下程度 のクレーンでは、重心位置が低く、かつ水平方向の重心 位置がレーススパン中央付近に位置する比較的バラン スの良いクレーンも存在するため, 浮き上がり限界加速 度は 200Gal 付近から 500Gal 付近まで大きくばらつく 結果となっている.一方,1000tを越えるクレーンにつ いては,水平方向および鉛直方向の重心位置は一定値に 収束する傾向にある. これは, 現状のレールスパン 30m を前提条件とした場合に、アウトリーチを伸ばした状態 でのクレーンの安定限界に近づいていることを示唆し ている.このため、今後さらなるクレーンの大型化を図 る場合は、レールスパンを拡大する等の対応により、全 体の重量バランスを改善し,併せて耐震性能も向上させ るということが合理的である可能性がある.

b)作業時バックリーチ

図-2.6に作業時バックリーチ時における重心位置と

クレーン自重の関係を,図-2.7に作業時バックリーチ 時における浮き上がり限界加速度とクレーン自重の関 係を示す.作業時バックリーチの場合は,クレーン自重 の大小にかかわらず,概ねレールスパン中央付近に水平 方向の重心位置が位置する傾向にある.

作業時バックリーチの浮き上がり限界加速度につい ては、吊り具と機械室等の位置関係などによって、重心 位置がレールスパン中央より海側に位置するケースと 陸側に位置するクレーン機種が存在する.例えば、海側 に重心位置が寄っている場合は、陸側から海側に慣性力 が作用する方向における浮き上がり限界加速度が、より 小さな値となる.このため、図中には両方向における浮 き上がり限界加速度をプロットしている.この図より、 浮き上がり限界加速度の下限値は、クレーン自重や慣性 力の方向に関わらず、概ね 350Gal 程度であることが分 かる.また、クレーン自重が 1000t を越える範囲では、 概ね 350~450Gal 程度に収れんする傾向にあること が分かる.

c)休止時

図-2.8に休止時における重心位置とクレーン自重の 関係を、図-2.9に休止時における浮き上がり限界加速 度(陸側への慣性力作用時)とクレーン自重の関係を示 す.休止時の場合は、ブームを陸側に引き揚げるため、 作業時アウトリーチに比較して、重心位置が陸側および 上へ若干移動する.

休止時の浮き上がり限界加速度は、海側から陸側に慣 性力が作用する方向の加速度が小さな値となる傾向に あり、一部データを除いて、概ね 300Gal 程度が下限値 となっている.

(2)簡易手法による横行方向固有周期

図-2.10 に簡易手法により算出した剛脚クレーンの 横行方向の固有周期とクレーン自重との関係を示す.

この結果から、クレーン自重が 900t 程度以下のクレ ーン (90 年代半ば以前の製作が多い)では概ね 1.6~2.9 秒程度,900t 程度以上のクレーン (90 年代半ば以後の 製作が多い)では概ね 1.8~2.2 秒程度の固有周期である ことが分かる.

なお、クレーン大型化にともない、固有周期は2秒程 度に集中する傾向にある.これは以下のような理由であ ると推定される.より大きな船型の船舶に対応するため には、まずクレーンのアーム部分の海側への延伸が必要 となる.また、アームの延長にともない、アーム部に作 用する断面力が増加し、アーム先端部のたわみの抑制お よび疲労荷重の増加等のため、アーム部の剛性を増加さ せる必要があり、アーム重量は増加する.さらに、アー



図-2.10 横行方向固有周期とクレーン自重の関係

ム重量の増加に対して、クレーン脚の剛性も増加させる 必要があり、クレーン脚部分の重量も増加する.また、 船高(コンテナ位置)が高くなることに対しては、クレ ーンの脚部を伸ばす必要があり、それに対するフレーム 構造全体の横行方向・走行方向およびねじれに対する剛 性確保のため、主部材の剛性増加にともなう重量の増加 が発生する.

以上のとおり,船型の大型化にともなってクレーンの 各部材の剛性を増加させる必要があり,その結果,クレ ーン自重も増加することが考えられる.クレーンの固有 周期は,剛性と自重との増加程度のバランスで規定され るが,1100t程度のクレーンでは,各メーカーの最適設 計の結果が約2秒程度に集中したと考えられる.

#### 3. 強震観測・振動計測・常時微動観測・3 次元 FEM に基づく既存コンテナクレーンの振動特性

#### 3.1 概要

本章では、実機クレーン2基を対象として、強震観測、 振動計測、常時微動観測および3次元 FEM 解析(固有 値解析)の結果から振動特性を評価した結果を示す.ま た、先述した簡易手法による固有周期の精度について、 観測記録との比較により確認した.実機クレーンの固有 周期や減衰定数の評価手法の概略を表-3.1 に示す.

表-3.1 コンテナクレーンの振動特性の評価手法

手法	概要
強震観測	クレーン上の強震観測記録(加速度)の結果か ら、卓越周期(スペクトル)と減衰定数を算出
振動計測	起震機等を用いてクレーンを強制的に振動させ た状態で実施した振動計測(クレーン上)の結果 から、卓越周期と減衰定数を算出.なお、今回の 計測では、クレーン運転手により吊り具を移動さ せて強制的に振動(自由振動)を発生させた.
微動観測	静止状態におけるクレーン上の常時微動観測の結 果から、卓越周期を算出.
3次元 FEM 解析	実機クレーンの部材諸元をベースに骨組モデル化 し,固有値解析より固有周期を算出.
簡易手法	クレーンの主部材を単純なラーメン構造として評価し、ラーメン構造に単位水平力を作用させた際のラーメン構造の応答水平変位との関係から固有 周期を算出

#### 3.2 強震観測・振動計測・常時微動観測による検討

#### (1) 強震観測

a)対象コンテナクレーンおよび強震計の設置位置

本節における各種観測対象クレーンは、S港コンテナ クレーンおよびT港コンテナクレーンの2機であり、そ れぞれのコンテナクレーン上ならびに地表面上には強 震計が設置されている.強震計の設置箇所およびコンテ ナクレーン断面図を図-3.1にそれぞれ示す.

b) 強震観測によって得られる固有周期・減衰定数

上記コンテナクレーン上の強震記録を用いて、コンテ ナクレーンの振動特性を把握することを試みた.その際, S 港クレーンについては 2007 年 7 月の中越沖地震

(M6.8)の際の強震計記録, T港クレーンについては 2008年5月の茨城県沖で発生した地震(M7.0)の際に 観測された強震計記録<sup>7)</sup>を用いた.強震記録が得られ た時刻におけるコンテナクレーンの姿勢は, T港クレー



(b) T港コンテナクレーン

図-3.1 クレーン断面図および強震観測計の設置位置

表-3.2 強震観測による実機クレーンの固有周期

	S 港クレーン	T港クレーン
横行方向	1.96 秒(0.51Hz )	2.17 秒(0.46Hz)
走行方向	2.56 秒(0.39Hz )	2.94 秒(0.34Hz)
鉛直方向	1.96 秒(0.51Hz )	2.08 秒(0.48Hz )

ンおよび S 港クレーンのいずれにおいてもブームアップ(休止中)の状態であることがわかっている.

各地震により得られた,コンテナクレーン上における 観測波形ならびにフーリエ振幅スペクトルを図-3.2 お よび図-3.3 にそれぞれ示す.図-3.2 より,T港コンテ ナクレーンでは最大加速度振幅は 20-40Gal 程度,S港 クレーンでは最大加速度振幅は 5-15Gal 程度である. また,図-3.3 より得られる各成分の一次ピークを当該 成分の固有周期(固有振動数)と判断すれば,それぞれ のコンテナクレーンの固有周期は表-3.2 のように整理 される.



S港クレーンにおいては, 強震計がコンテナクレーン 上の2点(図-3.1参照)に設置してあるため, 図-3.4

中にそれぞれの観測記録を用いて得られたフーリエ振 幅スペクトルを示した.図より判断すれば,横行方向に

おけるフーリエ振幅スペクトルはほとんど一致してい る.

一方,走行方向と鉛直方向については,両者ともに UR2の方がUR1よりも若干フーリエ振幅が大きくなっ ていることが図から読み取れる.これは,UR2の設置 箇所がUR1の箇所と比較してコンテナクレーンの陸側 に位置し,重心位置に対してより遠い箇所にあり,ねじ り振動モードに対する影響を受けやすいと考えられる ことから,走行方向に対する振動の状態がUR1よりも

1.0E+01

1.0E+00

1.0E-01

1.0E-02

1.0E-03

1.0E-04

1.0E+01

1.0E+00

1.0E-01

1.0E-02

1.0E-03

1.0E-04

1.0E+00

() 1.0E-01 戦略 1.0E-02 ビーフ 1.0E-03

1.0E-04

0.1

0.1

フーリエ振幅(Gal·sec)

0.1

1

振動数(Hz)

1 振動数(Hz) - UR1 - UR2

10

フーリエ振幅(Gal·sec)

大きく,また鉛直方向については,横行方向の振動に起 因するビームの上下動の影響を受けたためとそれぞれ 推測することができる.ただし,スペクトルの低次にお けるピーク振動数は,UR1,UR2ともほとんど変化がな く,低次モードの振動特性を把握する際の,強震計設置 箇所による影響は今回のケースではほとんどないと考 えられる.

上記フーリエ振幅スペクトルに関しては、計器の影響

ないしフーリエ変換する際のソースの影響が含まれて

1.0E+03 + 0.0E+02 + 0.0E







1

振動数(Hz)

図-3.5 フーリエ振幅スペクトル比(T港) (上から横行,走行,鉛直の各方向)

## 1.0E UR1 UR2 1.0E 業 1.0E

10

いる可能性があり、その影響を取り除いて振動特性を評価するため、T港クレーンにおける観測結果である図-3.3のフーリエ振幅スペクトルを、地表面で観測された 地震動に関するフーリエ振幅スペクトルで除した伝達 関数として評価したものを図-3.5に示す.図から判断 できるように、図-3.3におけるピーク振動数と、図-3.5におけるピーク振動数はほぼ一致しており、今回の 測定ケースにおいては、コンテナクレーン上に設置した 観測記録を用いたフーリエ振幅スペクトルを用いても、 コンテナクレーン本体の固有周期は把握できることが わかった.ただし、コンテナクレーンが設置されている 岸壁の構造形式、使用する計器の種類によってその評価 が変わる可能性があるため、可能であれば振幅比(伝達 関数)を用いてコンテナクレーンの振動特性を評価する ことが望ましい.

また,強震観測結果より得られた時刻暦波形を基に, コンテナクレーンの減衰定数の算定を行った.減衰定数 を算定する場合には得られた観測波形の自由振動部と 考えられる箇所を抽出し,対数減衰則を用いて算定する ことが一般的であるが,強震観測により得られた地震波 形には該当する箇所が存在していなかったため,観測さ れた時刻暦波形において,地震動の主要動が終わったと 判断される部分の波形を対象に対数減衰則を適用する こととした.なお,適用する際は観測波形に対して平滑 化処理を行い,さらに平均的な減衰定数を求めるため, n波分の振幅比をとり,その値を(1/n)乗することで平均 振幅比を算出し,次式により減衰定数 hを算定した.

h=(1.0 / (2.0×π))×ln(平均振幅比)

それぞれのコンテナクレーンにおける減衰定数 h は, T港コンテナクレーンで 3.45%, S 港コンテナクレーン で 3.0%となった. FEM を用いた地震応答解析の際に用 いられる減衰定数に関する確定的な決定方法はないた め,一般的に 2.5%程度の値が用いられるケースが多い が,上記の結果はこの値よりやや大きめの値となった.

#### (2)常時微動観測および振動計測

a)観測に用いた機器および計測方法

計測対象クレーンは前項同様に、S港クレーンおよび T港クレーンである.常時微動観測ならびに振動計測は、 両者とも同一のポータブル地震計を用いて実施し、計測 対象のコンテナクレーンの機械室内部に設置した.設置 状況を写真-3.1に示す.地震計設置の際は、クレーン の機械類による高周波振動の影響を極力防ぐため、機械 室内部におけるコンテナクレーンのビーム上付近に設 置することとした.各コンテナクレーンにおいて実施し た観測ケースを強震観測も含めて表-3.3に示す.表中 の〇印は測定項目を示し、一印は測定不能(強震観測に



#### 写真-3.1 微動計の設置状況

表 — 3.3	コンテナク	レーンにおけ	る計測ケー	ス一覧

(a) S港クレーン

ブームアップ(休止時)			ブームダウン(作業時)					
	微動観測	振動計測 (横行方向)	振動計測 (走行方向)	強震観測	微動観測	振動計測 (横行方向)	振動計測 (走行方向)	強震観測
横行方向	0	-	Δ	0	0	0	Δ	—
走行方向	0		0	0	0	$\Delta$	0	—
鉛直方向	0	_	Δ	0	0	$\Delta$	$\Delta$	—

(h)	T油ケ	1	`
$(\mathbf{u})$	「伧ク	$\nu -$	~

	ブームアップ(休止時)			ブームダウン(作業時)				
	微動観測	振動計測 (横行方向)	振動計測 (走行方向)	強震観測	微動観測	振動計測 (横行方向)	振動計測 (走行方向)	強震観測
横行方向	0	_	Δ	0	×	0	Δ	—
走行方向	0		0	0	×	$\Delta$	0	—
鉛直方向	0	-	Δ	0	×	Δ	Δ	—



図-3.7 各コンテナクレーンにおける常時微動観測結果より得られた加速度波形 (上から横行,走行,鉛直の各方向)

ついてはブームアップ時の記録であるため, ブームダウ ン時のものは存在しない)のもの,×印は作業工程の都 合上省略したものである.また,△印に関しては,波形 自体はデータとして収集可能であるが,その計測目的を 勘案して,下記の考察対象からは除外した.(横行振動 を行った際の走行方向の振動成分等.)

#### i)常時微動観測

常時微動観測では,クレーンのブームダウン時(作業 時),ブームアップ時(休止時)それぞれのクレーン姿 勢における微動観測を行った.観測方向は,クレーン横 行方向,クレーン走行方向,鉛直方向の3方向である. 観測を行う際は振動が適切に計測できるよう,地震計の 内部のアンプを適切に調整し,観測箇所に10分前後静 置させた.

なお,S港クレーンにおける作業時の常時微動観測は, 現地観測における作業工程の都合上,計測していない.

#### ii) 振動計測

コンテナクレーンを強制的に加振させた際の振動特性 を把握するため、コンテナクレーン横行方向(岸壁法線 直角方向)および走行方向(岸壁法線方向)それぞれに 対してコンテナクレーンを強制加振し、振動計測を行っ た.

横行方向についてはコンテナクレーンの吊り具を横 行方向に移動させる方法により,また走行方向について は,オペレーターに走行方向への運転を依頼し,コンテ ナクレーン本体を急制動させる方法により強制振動を 生じさせる方法により,それぞれ加振中および加振終了 後における振動継続中のコンテナクレーンの振動を観 測した.横行方向については,ブーム上の吊り具の移動 により振動を発生させるため,ブームアップ時の横行方 向への強制加振は実施していない.

それぞれの振動計測において,観測方向は常時微動と 同様に横行,走行,鉛直方向の各方向である.

#### 2) 観測結果

#### i)常時微動観測

各計測方向に関する常時微動観測により得られた加速度時刻歴を図-3.7に示す.T港クレーンにおける加速 度時刻歴は、S港クレーンのものと比較して高周波成分 が多い印象を与えるが、これは常時微動観測を実施する 際に、機械内部でのフィルター処理を行っていなかった ためである.常時微動観測を実施する際は、後の波形処 理について誤処理を行わないためにも、適切な内部フィ ルターをかけておくことが望ましいと考えられる. (S 港クレーンの例では 5Hz のハイカットフィルターを設 定した.)

振動特性を把握する際は、上記加速度時刻歴に関して フーリエ振幅スペクトルを描かせればよいが、図に示す ように、常時微動観測で得られる加速度振幅は 0.5Gal 以下程度と非常に小さく、計測中の風や振動といった外 部要因により、波形に乱れが生じることが多い.

そこで、常時微動観測の結果よりフーリエ振幅スペク トルを描く際は、観測記録から得られた時刻歴波形を、 1分半程度ごとに分割した時刻歴波形を3つ用意し、そ れぞれの時刻歴波形に対してフーリエ振幅スペクトル を描き、それぞれのグラフを重ね合わせる.このとき、 それぞれのスペクトルの形状がほぼ一致していること を確認し、これらを平均したものを、常時微動観測で得られたフーリエ振幅スペクトルとした.なお、それぞれのフーリエ振幅スペクトルが一致していなければ、加速 度波形に異常値が含まれていると判断できるため、この 場合は他の地点で分割した時刻歴波形を選択、または計 測を再度実施する等の工夫が必要である. 上記の方法で得られた T 港クレーンに関するフーリ エ振幅スペクトルを図-3.8 に示す. 図のように, スペ クトル波形には明瞭なピークが出現していることがわ かる.

ただし,前項で述べたように,計測器や波形の処理方 法による影響によってスペクトル波形のピークが出現



図-3.8 フーリエ振幅スペクトル(常時微動) 図-3.9 フーリエ振幅スペクトル比(常時微動) (T港クレーン,上から横行,走行,鉛直の各方向)

する可能性もあるため、T港クレーンにおける観測の際 に地表面上において同時に常時微動観測を行った際の 記録を用いて、コンテナクレーン上のフーリエ振幅スペ クトルを地表面上でのフーリエ振幅スペクトルで除し た振幅比(伝達関数)を算定したものを図-3.9に示す. 図から判断できるように振幅比のスペクトルピーク出 現位置は、コンテナクレーン上のフーリエ振幅スペクト ルの出現位置とほぼ完全に一致していることがわかる. コンテナクレーン本体の振動特性を把握する際は、前 述のように伝達関数として整理すべきであるが、S港ク レーンにおける観測においては、地表面上での微動観測 を実施していなかったため、以下の整理においては比較



図-3.10 フーリエ振幅スペクトル(常時微動観測) (T港クレーン,上から横行,走行,鉛直の各方向)

図-3.11 フーリエ振幅スペクトル比(常時微動) (S港クレーン,上から横行,走行,鉛直の各方向)



(c)S港クレーン(ブームダウン・走行方向加振時) (d)T港クレーン(ブームダウン・走行方向加振時) 図-3.12振動計測時における各コンテナクレーン上の加速度時刻(各項目ごとに上から横行,走行,鉛直の各方向)

のためにフーリエ振幅スペクトルとして整理を行った 結果を用いて議論する.

図-3.10は、T港クレーンのブームダウン時、ブーム アップ時のそれぞれについて常時微動観測を実施した 際の、フーリエ振幅スペクトルを算定したものである. 図のように走行方向のフーリエ振幅スペクトルは、クレ ーンの姿勢によらずほぼ同一であり、また横行方向につ いても高周波側でブームアップの場合に若干振幅が大 きくなる傾向があるものの、その他の地点においては特 筆すべき変化は見られない.ただし鉛直方向については、 1-3Hzの間で両者のピークの出現位置が異なっており、 クレーンの姿勢により鉛直方向の振動特性が異なる可 能性がある.また、水平2方向と比較して、鉛直方向は 高周波側にスペクトルのピークが出現している傾向が ある.

**図-3.11** は S 港クレーンにおける常時微動観測結果 (クレーン休止時) である. 各計測方向においてスペク トルのピークが得られており,また鉛直方向のスペクト ルピークは比較的高周波側に存在するといった特徴が T港における計測結果と一致していることがわかる.

なお,常時微動観測ではコンテナクレーン本体の減衰 定数を算定することは困難である.

#### ii) 振動計測

振動計測によって得られた加速度時刻歴波形の一例 を図-3.12に、常時微動観測と同様な波形処理を行った 際のフーリエ振幅スペクトルを図-3.13にそれぞれ示す. 図-3.13中には、強制振動を行った方向に対する観測記 録のみを示した.振動計測によって得られる加速度振幅 は横行加振の場合 1.5Gal 程度、走行加振の場合 10Gal 程度である.なお、加振方向に対する観測成分の加速度 レベルが大きく、それに直交する平面成分の加速度レベ ルが小さいことは自明であるが、加振方向と同レベルの 鉛直方向の振動が発生する傾向にあることは興味深い.



(c)T港クレーン(ブームダウン・横行方向加振時)

図-3.13 振動計測から算出したフーリエ振幅スペクトル(各項目ごとに上から横行,走行,鉛直の各方向)

図-3.13より、各振動方向に対する固有振動数と見ら れるスペクトルピークは常時微動観測と同様に比較的 明瞭に見られることがわかる.

走行方向の振動計測に対しては、両港のコンテナクレ ーンにおいてクレーン作業時 (ブームダウン時),休止 時 (ブームアップ時) それぞれに対して計測を行ってい るため, 図-3.14 にそれらを比較して示す. 双方のコン

テナクレーンにおいても、S港クレーンの休止時におけ る結果は若干ピークが見えづらいが, 作業時および休止 時の間のフーリエ振幅スペクトルに大きな差はなく、こ の図で判断する限り,クレーンの姿勢が走行方向の振動 特性に及ぼす影響は小さいと考えられる.

また,振動計測により得られた観測波形を用いて,波 形の自由振動部と考えられる箇所の波形を用いて,前項 に示した方法を参考に減衰定数を算定した.この結果, T港クレーンでは0.9%,S港クレーンでは1.0%と減衰 定数が算定された.上述の強震観測結果より得られる減 衰定数とは異なる結果であるが,減衰定数は構造物が振 動した際の振幅や速度依存性があることが知られてお り,今回の観測結果においても,それらの効果が大きく 影響しているものと考えられる.

#### (3) 各種計測結果の比較

図-3.15に各計測対象のコンテナクレーンにおける強 震観測,振動計測ならびに常時微動観測それぞれの方法 で得られた,各振動成分のフーリエ振幅スペクトルを比 較して示した.表-3.4には図-3.15より得られるスペク トルの一次ピーク周波数をまとめて整理した.図-3.15 中におけるデータの有無は,表-3.3のデータの有無に 対応している.コンテナクレーンのブームダウン時にお



図-3.15 各種計測方法によるフーリエ振幅スペクトルの比較(S港クレーン)

(a)T港クレーン(ブームアップ(休止時))					
		ブームアップ	プ(休止時)		
	微動観測	振動計測 (横行方向)	振動計測 (走行方向)	強震観測	
楼行士向	0.48Hz		_	0.46Hz	
1(現1)ノノ [19]	(2.08sec)	_		(2.17sec)	
土仁十百	0.35Hz		0.34Hz	0.34Hz	
定行方问	(2.86sec)	_	(2.94sec)	(2.94sec)	
创造士白	0.49Hz			0.48Hz	
如直力问	(2.04sec)	_	-	(2.08sec)	

(c) S港クレーン (ブームアップ(休止時))

	ブームアップ(休止時)				
	微動観測	振動計測 (横行方向)	振動計測 (走行方向)	強震観測	
横行方向	0.49Hz			0.51Hz	
	(2.04sec)	_	-	(1.96sec)	
主行士向	0.38Hz	_	0.37Hz	0.39Hz	
定17万问	(2.63sec)		(2.70sec)	(2.56sec)	
公古七向	0.51Hz	_	_	0.51Hz	
<b>亚但</b> 刀问	(1.96sec)	_	_	(1.96sec)	

表-3.4 計測結果の一覧

(b)1港クレーン(フームタワン(作業時))						
		ブームダウン(作業時)				
	微動観測	振動計測 (横行方向)	振動計測 (走行方向)	強震観測		
横行方向	0.48Hz (2.08sec)	0.45Hz (2.22sec)	-	—		
走行方向	0.35Hz (2.86sec)	-	0.34Hz (2.94sec)	_		
鉛直方向	0.48Hz	_	_	_		

(d)S港クレーン(ブームダウン(作業時))

(2.08sec)

		ブームダウン(作業時)						
	微動観測	振動計測 (横行方向)	加計測 振動計測 行方向)(走行方向) 強震観測					
横行方向	_	0.51Hz (1.96sec)	-	_				
走行方向	Ι	-	0.34Hz (2.94sec)	-				
鉛直方向	_	-	-	_				



けるデータについては、比較対象が存在しないものもあ るが、参考までに掲載した.

各計測方法により得られる加速度振幅が異なるため, フーリエ振幅は計測方法ごとに違いがあるが,スペクト ルの傾向はいずれの計測方法でもほぼ一致しており,各 計測方法において得られる一次ピークは,計測方法によ らずほぼ一定であることがわかる.データ数が少ないた め,今後検討を進めるためには各種クレーンの実測値が 必要ではあるが,強震観測で得られる固有振動数を正と 仮定すれば,各種観測方法で得られる固有振動数はそれ と完全に一致,またはずれがあっても 0.02Hz 程度の誤 差に収まっている.

実機コンテナクレーンの固有振動数(固有周期)は, クレーンの横行方向,走行方向それぞれの強震記録に対 してフーリエ振幅スペクトル,またはそれを地表面上の フーリエ振幅スペクトルで除したフーリエ振幅比を用 いて算定することが最も容易である.一方で,強震記録 が得られていない,もしくは強震計が設置されていない コンテナクレーンにおいても,上記の結果より,コンテ ナクレーン上における常時微動計測または振動計測を 実施することにより,固有振動数を十分な精度で把握で きることが期待できる.

減衰定数については、上述したように、その決定方法 に対して現時点では決定的なものはなく、各種要因(部 材の接合方法やその状況)が複雑に関連しているものと 想定されるため、一定値にはならない. 一方,今回の強震観測結果より得られた減衰定数の値 は,各種鋼構造物の動的解析で用いられる値とさほど大 きな違いは見られなかったため,コンテナクレーンに対 して動的解析を行う際にh=2.5%程度の値を採用する点 に関して,大きな問題点は生じないと考えられる.

#### 3.3 三次元有限要素法による検討

#### (1) 概要

レベル2地震動に対するコンテナクレーンの耐震性 能照査は、3次元 FEM 解析を用いた照査が基本となるこ とが想定される.これは、平成7年兵庫県南部地震以降、 免震コンテナクレーンが導入されたが、その導入段階に あたっては、3次元有限要素法、振動台を用いたコンテ ナクレーン模型の加振試験、免震装置部分(減衰ダンパ 一等)の性能確認試験などが実施され、3次元有限要素 法で十分な精度の再現解析が可能であることが既に確 認されているためである.

本章では,既存の一般コンテナクレーン(免震コンテ ナクレーンは対象外)を3次元有限要素法でモデル化す る際の具体的な方法や留意点を示す.さらに,3.2に示 すS港およびT港のコンテナクレーンをモデル化して実 施した固有値解析および検証解析の結果を示す.なお, 検証解析は,S港およびT港のコンテナクレーンで実測 された強震観測記録との比較を行うものである. (2) 実機コンテナクレーンのモデル化

本節では,既存の一般コンテナクレーンを3次元 FEM でモデル化の詳細について述べる.モデル化は,解析手 法の選定,クレーン姿勢の設定,クレーンの主構造部材 のモデル化,地震動の入力方法の設定,走行装置周辺の モデル化,境界条件の設定について説明する.

a)解析手法の選定

コンテナクレーンの設計では、三次元FEMモデルを 用いて性能照査が実施されることが一般的である. こ れは、コンテナクレーンは特殊なフレーム配置構造で あり, それに対応した複雑な振動モードを発生するた めであり、これに対応するためには、三次元FEMでモ デル化するのが現実的であるとの判断に基づいている. 例えば、コンテナクレーンは横行方向と走行方向によ り下部架構の形状が異なる.横行方向架構は、クレー ン走行時においてエプロン上の貨物を避けるために所 定の高さまで門型のラーメンとなっている. 走行方向 は、岸壁から直角に突き出したブームに沿って、コン テナを吊りながらトロリーが横行するため下からブー ム下端までの広い開口が必要で、機械室等の重量が大 きいためほぼブームのレベルに近く、かつ長いブーム のため平面内の回転慣性が大きい. このような形状の 特徴からクレーンの振動特性は、横行方向でせん断形 の水平振動、走行方向で海側と陸側に回転中心が分か れる2つのねじり振動が顕著に現れる.以上のことから、 コンテナクレーンの設計では、三次元FEMモデルを用 いての性能照査が標準的であると考えられる.

さらに、地震応答解析を行う際に、非線形解析か線 形解析かの選択があるが、レベル2地震動に対応した性 能照査では、非線形解析が一般的であると考えられる. これは、レベル2地震動作用時では、コンテナクレーン 脚の浮き上がりや免震機構の作動といった非線形性の 強い現象の発生が想定され、これらの現象は、一般的 な線形応答解析では再現できないことが既往の研究で 明らかになっているためである.

以上を踏まえると、レベル2地震動に対するコンテナ クレーンの耐震性能照査は、大がかりな振動模型実験 を除外すると、構造全体の挙動が確認できる3次元の非 線形応答解析手法を用いて行うことが最適と判断され る.

以下では、三次元FEM解析を前提としたコンテナク レーンのモデル化について詳細に説明する.

b) 解析対象とするクレーン姿勢の設定

ー般的なコンテナクレーンの設計では、三種類のク レーン姿勢(作業時アウトリーチ,作業時バックリー チ,休止時)について、部材の強度計算及びクレーン 全体の安定度について照査される.これは、クレーン 構造規格において、強度計算に対して、「応力の値は、 荷重の組合せにおいて、当該構造部分の強度に関し最 も不利になる場合におけるそれぞれの荷重によって計 算するものとする.」と規定されていること.また、 クレーン全体の安定度(転倒の照査)の規定として、 「安定度に影響がある質量は、クレーンの安定に関し 最も不利な状態にあるものとすること.」と規定され ていることに対応している.

以上に対応する姿勢として,以下の3つの姿勢を一般 的には適用している.

① 〔作業時アウトリーチ〕

荷役作業時は、ブーム(一般に、コンテナクレー ンのガーダの海側方向へのカンチレバー(片持ち 梁)部分)を下げた状態で行う.作業時アウトリー チの状態は、トロリ(一般には、荷を吊ってクレー ンガーダ上を移動する台車をいい、巻上装置を持ち、 荷を水平に移動(横行)させる装置)が最も海側に 位置する状態である.ブームを下げた状態で、かつ 海側先端にトロリ等が位置するため、最も海側に重 心位置が寄る姿勢である.

② [作業時バックリーチ]

作業時バックリーチの状態は、作業時アウトリー チの状態からトロリ位置を陸側のバックリーチ(海 側レール中心と吊り具及び荷を最も陸側へ横行させ たときの到達地点との水平距離)が最も陸側に位置 する状態である.

③〔休止時〕

荷役作業を行わない場合は休止時と呼ばれ,ブー ムは上げた状態で固定等を施したクレーン姿勢とな る.トロリは、クレーンオペレータが乗降する位置 に応じて、クレーン固有の位置が決まることになる.

クレーン構造規格では、強度計算に係る荷重の組合 せ(垂直動荷重,垂直静荷重,水平動荷重,熱荷重, 風荷重,地震荷重,衝突荷重)の規定があり、また各 荷重の組合せに対する許容応力・許容応力の割り増し 係数が規定されている.このため、クレーン構造規格 に基づく強度計算や安定度の照査には、設計上の余裕 代が含まれていると考えられる.このため、レベル2地 震動という偶発的な荷重に対するクレーン姿勢として、 上記に示すような作業時アウトリーチの姿勢を対象と することは、過度に安全側の照査を課すことになる可 能性が高い.このため、レベル2地震動に対する照査の 際に、どのようなクレーン姿勢を対象とすべきかにつ いては、別報にてあらためて検討結果を紹介する.

今回の解析で対象とするクレーン姿勢は、3章に示す 観測結果との比較を行うために、休止時と作業時アウ トリーチの2姿勢を対象とした.

c) クレーンの主構造部材のモデル化

図-3.17にクレーンの解析モデル図の例及び主要部 材の名称を示す. 各構造部材は, 弾性梁要素でモデル化 している. 各部材の剛性は、計算書におけるヤング率、 断面二次モーメントおよび断面積から算出した値を入 力している. 部材重量については, 重量計算書から各部 材の重量に対応する密度として入力している.次に、部 材同士の接続点は、接点構造により剛結またはピン構造 としている.本モデルの場合は、上部支柱とブーム・ガ ータを結ぶテンションバー(引張り部材)の接点につい て、ピン構造としてモデル化している.また、斜材の両 端部はガセットプレートを介して脚支柱のフランジ面 に接合されており、クレーンの構造計算書においてもピ ン構造(軸力のみ伝達するトラス部材)としてモデル化 されているため、斜材の両端部もピン構造としてモデル 化した。ピン構造の位置については、図-3.17に示すと おりである. 減衰については、レーリー型の減衰定数と して,各要素に対して減衰定数が作用するようにしてい る. 減衰定数は、先述した強震観測から得られた減衰定 数(T港クレーン: 3.45%, S港クレーン: 3.0%)を採 用した.なお、解析の安定性を向上させるために、クレ ーン全体の数値減衰として1.0%を与えている.

各部材の要素分割については、クレーンの動的応答 おいて、何次モードまでが大きな影響を及ぼすかによ って設定することが基本である。一般的には、クレー ンの地震時応答に大きな影響を及ぼすのは1次~3次程 度のモードであると考えられることから、今回解析で は、3次モードまで表現するために、一つの部材を4分 割することを基本とした。

主構造部材以外の付属設備として,機械室,走行装置,トロリー,吊り具及び吊り荷(コンテナや重量物など)を重量として考慮する必要がある.これらの, 重量を適切に与えないと,実機クレーンの振動モード 等を再現できない可能性もあるため注意を有する.こ れらの重量のうち,機械室,走行装置及びトロリの重 量については,各々の重心位置に集中荷重としてモデ



図-3.17 コンテナクレーンの部材名称とモデル図

ル上与えている,なお,吊り具及び吊り荷については, トロリーからワイヤーで吊り下げられている状態であ り,これらについてもモデル化している.

d) 地震動の入力方法の設定

地震力の入力は大質量法による. すなわち, 図-3.17 に示すクレーン下方に位置するLarge mass部分に, ク レーンレール面での加速度時刻歴を入力することによ りクレーン全体に地震力を作用させる. Large massに 入力された地震動は, Large massとクレーン脚下端の 節点とを剛体要素により連結することにより, 系全体 に入力される.

e)走行装置周辺のモデル化

i) 走行装置周辺の全体構造

**写真-3.2**に走行装置周辺の主要な構造要素を示す. 以下,通常クレーンにおける走行装置周辺の全体構造 及び各構造要素について概説する.

図から分かるように、走行装置は、クレーン法線方 向に向かって位置する主構造部材であるシルビームの 下方に設置される.一般的には、シルビームから鉛直 下方に剛結された部材に対して、走行装置連結部材が ピン結合される.さらに、その下方において、車輪部 を有する走行装置本体部分がピン結合される.これら のピン結合は、法線方向の鉛直面内のみである程度の 回転が可能である.ピン構造とすることにより、レー ルの法線方向の勾配変化があっても、各車輪に均等に 荷重が伝達される. ii) 走行装置周辺の各構造要素の機能等

走行装置周辺の各構造要素の機能及び構造概要を以下に示す(写真-3.2).

#### 〔逸走防止装置〕

逸走防止装置は、コンテナクレーンの休止時に風荷 重(暴風時)が作用した際に、クレーンの走行方向へ の逸走を防止するための施設である.クレーン構造規 格では、屋外に設置されるクレーンの停止時について、 風荷重が作用した場合における転倒に関する照査が規 定されているが、その照査の前提として、逸走防止装 置により逸走を防止するための措置が講じられた状態 にあることも同時に規定されている.このため、今回 対象としている港湾荷役のためのコンテナクレーンで は、逸走防止装置は必ず設置されるものである.上記 の設置目的のとおり、逸走防止装置は、クレーン休止 時に使用されるものである.

逸走防止装置は、一般的には、シルビームから剛結 された鉛直部材の内部に短冊状の金具を配置し、金具 を係留施設側に設けられた箱抜き部分に落とし込むこ とにより、クレーンの走行方向の移動を制限する(写 真-3.3).係留施設側の箱抜き部分には、コンクリー トに埋め込んだ基礎金物が設置され、金具同士が法線 方向に接触する構造となっている.1000t級クレーンの 場合、一般的には海側と陸側の2箇所に、各々レールを 挟んで一箇所づつ、合計4個の逸走防止装置が設置され る.設計外力としては、暴風時(60m/s)に対応した水 平力として、2000~5000kN程度(S港クレーンの場合) の水平荷重が設定される.また、短冊状金物と基礎金 物との水平離隔としては、走行方向に約70mm程度が設 定される(S港クレーンの場合).

#### 〔転倒防止装置〕

転倒防止装置は、コンテナクレーンの休止時に風荷 重(暴風時)が作用した際に、クレーンの横行方向及 び走行方向への転倒を防止するための施設である(**写 真**-3.4). 先述したとおり、クレーン構造規格では、 屋外に設置されるクレーンの停止時について、風荷重 が作用した場合における転倒に関する照査が規定され ている. この照査では、クレーンの転倒支点における 安定モーメントの値が転倒モーメントの値以上である ことの照査が規定されている. 転倒防止装置の構造設 計では、休止時の風荷重(55m/s)に対してクレーンが安 定するために必要な引抜力を対象として照査を行って いる. 一般的には、転倒防止装置による反力を考慮し



写真-3.2 走行装置周辺の構造要素



写真-3.3 逸走防止装置の例



写真-3.4 転倒防止装置の例

ないと休止時の風荷重に対する転倒の安全性は確保で きないことから、今回対象としているコンテナクレー ンでは、転倒防止装置は必ず設置されている.

転倒防止装置の構造は、各コーナーの走行装置のレー ルを挟んで両面2箇所、合計8箇所に取り付けられる装 置であり、走行装置固定側と岸壁係留金物側のリングジ ョイントおよびターンバックルにて構成される部材で ある.岸壁側に埋め込まれ固定されたリングジョイント とアンカーピンを差し込むことで接続され、ターンバッ クルを回転するとロッド内挿部分のネジが回転し、軸方 向に部材長を調整できる構造となっている.転倒防止装 置に作用する上揚力は、クレーンの規模・部材配置によ るが、例えばS港クレーンの場合、約2,000~5,000kN/ コーナーと非常に大きい反力を設計上考慮する.

なお,近年では,逸走防止装置と転倒防止装置の兼用 型の構造も導入されている.

#### 〔車輪部周辺〕

車輪部分は、レールに直接接地している車輪部, 走行 ブレーキおよびレールクランプ装置などにより構成さ れている(写真-3.5)、車輪は、レールの上面に接地 しクレーン反力を伝達する水平面部分,その両脇には横 行方向への車輪軸線のずれと脱輪を抑制するためのつ ばがあり、若干の隙間をとってレール両側を挟み込む形 となっている. 走行ブレーキは荷役作業中のクレーンの 揺れや走行方向への滑りを抑制するため、ディスクブレ ーキの要領で車輪の回転を止める機能を有している.ブ レーキ力は、約100kN/コーナー程度である.また、海 側脚及び陸側脚に1箇所,計2箇所にレールクランプ装 置が設置されている. レールクランプは, 作業時の突風 (35m/s)による逸走を抑制するための安全装置であり、 油圧ジャッキ等の機構により爪部材が万力のようにレ ールの頭を挟んで強制的に締め付け, 摩擦抵抗により所 定の逸走抵抗力を得るものである.逸走抵抗力は、約 400~500kN/レール程度である. クレーンを走行方向へ 移動する際は, 締め付け力を解放するために爪部材をア ンロック状態とする.

iii)実機クレーンにおける走行ブレーキ等の作動状況 上述したとおり、3次元FEMによる地震応答解析におけるコンテナクレーンの姿勢は、休止時と作業時に大きく分類される.コンテナクレーンの走行装置周辺の境界条件の設定は、クレーンの地震応答に大きく影響するため、適切に設定する必要がある.

表-3.5に、クレーンメーカへのヒアリングに基づく、



写真-3.5 車輪部及びレールクランプの例

#### 表-3.5 作業時および休止時における装置作動状況

大 態	装置	走行 ブレーキ	レール クランプ	逸走防止 装置	転倒防止 装置
作業	レール 走行時	×	×	×	×
時	吊上げ時	0	0	×	×
	休憩時	0	0	×	×
、 (作 を	休止時 =業中止時 :含む)	0	0	○ (走行方向への 移動防止)	<ul> <li>○</li> <li>(走行方向・横</li> <li>行方向への転</li> <li>倒防止)</li> </ul>

実機におけるコンテナクレーンの走行装置部の各構造 要素の作動状態を示す.休止時においては,逸走防止 装置と転倒防止装置という固定装置のみならず,走行 ブレーキとレールクランプも作動している状態にある. 作業時については,固定装置(逸走防止装置と転倒防 止装置)は解除されている状態にある.走行ブレーキ とレールクランプは,クレーンが走行しない場合,す なわち荷役作業の大方の時間を費やす荷役作業時及び 休憩時において常に作動している状態にある.

iv) 地震応答解析における走行装置周辺のモデル化

以上を踏まえて、3次元FEMによる地震応答解析にお けるコンテナクレーンの各姿勢(休止時および作業 時)に対して、走行装置周りを構成する各構造要素の モデル化の対象を設定する.以下、上述した各構造要 素に対して、地震応答解析時におけるモデル化の考え 方を示す.



図-3.18 走行装置周辺のモデル化

〔走行装置(上部)〕:剛梁要素にてモデル化 走行装置部分は、その上部に搭載される構造主要部材 に比べて十分剛性が高い構造となっており、走行装置直 上の部材であるシルビームに発生する応力を安全側に 見込む上でも、剛梁要素(剛域部材)としてモデル化する. なお、走行装置のうち車輪部との接続部には一般にピン 部材(横行方向軸周り回転)が内蔵されており、上部構造 部材の重量バランスに対してレール面に平行を保つた めの機能を有する.このため、走行装置中央付近にはピ ンを設け、走行装置上部と走行装置下部とを分割した.

〔走行装置(下部)〕:剛梁要素にてモデル化

前述の走行装置の下部部分に相当する.車輪部はレー ル面に対して常に平行を保とうとするため、ピン部材よ り下部の剛梁は横行方向軸廻り回転に対しては常に鉛 直を保つようにモデル化する.なお、車輪部分とレール 面との接触は、圧縮側・引張側各々に異なる剛性を与え られる非線形バネ要素である GAP 要素を用いて、脚の 浮き上がりを表現できる境界条件とする.

なお,走行ブレーキおよびレールクランプは厳密なモ デル化はしない.走行方向については,走行ブレーキと レールクランプによるレール拘束力を,車輪とレールと の間における摩擦力の一部として作用するものとして, 車輪とレールの摩擦係数の形でモデル上再現する.走行 方向の摩擦係数は,既往の検討結果より0.075を標準として設定した.

〔逸走防止装置〕:休止時の解析においてモデル化

休止状態のクレーンにおいては、逸走防止装置を機能 させている場合が大半であると考えられる.このため、 休止時の解析においては剛梁要素としてモデル化し、走 行並進方向の拘束効果を見込む.逸走防止装置は、風速 60m/sの暴風時荷重により決定される相応の耐力を有 したせん断キー部材である.このため、レベル2地震動 等を対象とした解析の場合には、逸走防止装置に生じる 走行方向反力に対して所定の部材耐力を有しているか を確認する必要がある.なお、実際の逸走防止装置は、 クレーン側落とし込み部材と基礎受け側金物部材との 間に約70mm程度の遊間が設けてあるが、解析上は遊 間のモデル化はしない.これは、クレーンは地震時にレ ールに沿って走行方向に変位しやすく、すぐに遊間距離 分が埋まるため、モデル上は便宜上完全に固定されてい るものとして差し支えないと判断したためである.

#### 表-3.6 コンテナクレーン3次元解析・脚下端の拘束条件の設定

(a)走行装置

考慮する向き		固有值解	释析	過渡応答	解析
		作業時	休止時	作業時	休止時
並進	X(横行)	固定	同左	固定	同左
	Y(走行)	固定	同左	フリー	同左
				(摩擦µ=0.075)	
	Z(鉛直)	固定	同左	浮き上がり	同左
				考慮(GAP 要素)	*2
回転	θ x(X 軸廻り)	フリー(ロッカービ	同左	フリー(ロッカービ	同左
		ーム位置)		ーム位置)	
	θy(Y軸廻り)	フリー	同左	フリー	同左
	θ z(Z 軸廻り)	フリー	同左	フリー	同左

#### (b)逸走防止金具

考慮する向き		固有値角	释析	過渡応答解析		
		作業時	休止時	作業時	休止時	
並進	X(横行)	フリー	フリー	フリー	フリー	
	Y(走行)	フリー	固定*1	フリー	固定*1	
			(70mm 遊間		(70mm 遊間	
			有り)		有り)	
	Z(鉛直)	フリー	フリー	フリー	フリー	
回転	θ x(X 軸廻り)	フリー	同左	フリー	同左	
	θy(Y 軸廻り)	フリー	同左	フリー	同左	
	θ z(Z 軸廻り)	フリー	同左	フリー	同左	

\*1 逸走防止金具は 70mm の遊間があり、70mm 以上クレーンが走行方向に移動してはじめて拘束が期待できるが、解析上はモデル化 せず当初より拘束としている(作業時の走行方向変位量が 30cm 程度と大きいことが確認できていたため)。

\*2 休止時のモデルにおいて転倒防止装置による脚部の拘束を期待する場合は Z(鉛直)方向固定の条件を考慮することが可能である。

〔転倒防止装置〕:本検討ではモデル化しない.

休止状態のクレーンにおいては、逸走防止装置と同時 に転倒防止装置を作用させる場合が大半であると考え られる.この拘束条件がクレーン全体の地震時応答に大 きく影響する可能性はある.しかしながら、転倒防止装 置が確実に作動するためには、クレーン脚が浮き上がる ような状態であり、今回の検討では後述するように非常 に小さい地震動レベルを対象とした解析のみを実施し たため、転倒防止装置についてはモデル化の対象外とし た.なお、レベル2地震動に対する解析の場合は、転倒 防止装置のモデル化が必要となる場合もあると考えら れるが、その点については別報にて検討結果を報告する.

v)脚部下端の拘束条件(境界条件)

表-3.6にコンテナクレーン3次元解析の固有値解析 および地震応答解析における脚下端の拘束条件の設定 内容を示す.以下,各解析における拘束条件について簡 単に説明する.

固有値解析は、クレーン本体の構造系の固有値を算出 することが目的である. クレーンの各脚がレールと接す る走行装置部の拘束は,作業時・休業時とも並進3方向 は固定,回転3方向はフリーとした.X軸周り(横行方 向軸廻り)については,車輪部がレール面と平行を保つ よう走行装置内にロッカービームピンが設けられてい るため,これを表現し,ピン位置で回転フリーとした. また,逸走防止装置は,作業状態では作動させていない ため,全方向フリーとした.休止状態で作動させている 場合は,Y方向(走行方向)を固定とした.

地震応答解析は、地震動の影響によるクレーン脚の浮 き上がりを含めた挙動を再現することが目的である.こ のため、走行装置部は、X方向(横行方向)は車輪のつば とレールとのかみ合わせにより固定、Y方向(走行方向) は車輪接地面とレール面との摩擦分を考慮するが基本 的にはフリー、Z方向(鉛直方向)は上向き力に対してバ ネ値がごく小さく、下向き力に対してバネ値が大きい非 線形バネ要素である GAP 要素にて脚の浮き上がりを表 現できる拘束とした.軸回転の自由度は固有値解析条件 と同様である.また、逸走防止装置の作動状況も固有値 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2)/ 宮田正史・竹信正寛・野津厚・菅野高弘・小濱英司・久保哲也

(3) 解析対象コンテナクレーンのモデル化

実機コンテナクレーンのモデル化の対象は,T港とS 港に既に設置されているコンテナクレーンである.以 下,両クレーンのモデル化の内容について概説する.

a)S港コンテナクレーン

図-3.19(a)に対象クレーンのモデル図を示す.また,

(a) S港クレーン

表-3.7および表-3.8に,FEM解析に関する諸条件やパ ラメータの設定内容などを一覧として示す.

b)T港コンテナクレーン

図—3.19(b)に対象クレーンのモデル図を示す.また, 表-3.7および表—3.8に,FEM解析に関する諸条件やパ ラメータの設定内容などを一覧として示す.



(b)T港クレーン

図-3.19 FEM解析モデル

表3.7 コンテナクレーン3次元解析基本条件一覧

解析対象	泉クレーン	S 港クレーン	T 港クレーン
		(岸壁構造形式:重力式)	(岸壁構造形式:桟橋式)
座標系の定義		横行方向:X 走行方向:Y	同左
		鉛直方向: <b>Z</b>	
		横行方向軸廻り回転 : θ x	
		走行方向軸廻り回転 : θ y	
		鉛直方向軸廻り回転 : $\theta z$	
クレーンの仕様		総重量(本体部): 9,415kN(960tf)	総重量(本体部):10,595kN(1080tf)
		コンテナ : 398kN(40.6tf)	コンテナ : 398kN(40.6tf)
		重量物:491kN(50.0tf)	重量物:491kN(50.0tf)
		全高:66.762m	全高:60.660m
		レールスパン:30.0m	レールスパン:30.0m
		ホイールベース:16.8m	ホイールベース:16.8m
		全横行距離:115.65m	全横行距離 : 95.0m
		脚のタイプ:剛脚タイプ	脚のタイプ:剛脚タイプ
モデル規模		総節点数:222 総要素数:261	総節点数:222 総要素数:270
		総自由度数:184	総自由度数:248
構造部材の	要素の剛性	クレーン構造計算書より各部材のE、	同左
モデル化方針		I 、Aから設定	
	要素間の節点拘	テンションバー、斜材の両端はピン結	同左
	束条件	合とし. その他はすべて剛結合とした.	
	要素の分割数	3 次程度のモードが再現できる分割数	同左
		とし,最小4分割以上とした.断面剛	
		性変化点でも節点を設ける.	
解析手法	解析コード	MSC-NASTRAN	同左
	固有值解析手法	モーダル解析	同左
	過渡応答解析手	大質量法(脚下端の節点と大質量点を	同左
	法	剛梁要素にて接続)	
	入力地震動	海陸各々の大質量点へ時刻歴加速度を	海陸共通の大質量点へ時刻歴加速度を
		強制入力.	強制入力.

解析対象	泉クレーン	S 港クレーン	T 港クレーン
741 017 4 5		(岸壁構造形式:重力式)	(岸壁構造形式:桟橋式)
クレーン本体	材料の力学特性	線形モデル	同 左
部材	部材モデル	梁要素 (弾性梁)	同左
	節点条件	テンションバー、斜材の両端はピン結	同左
		合とし、その他はすべて剛結合とした。	
	クレーンの構造	減衰定数: 3.0%(強震観測より)	減衰定数: 3.45%(強震観測より)
	減衰		
	クレーンの数値	数值減衰:0.01	同左
	減衰	(NASTRAN デフォルト値)	
付属設備重量	機械室、走行装	機 械 室:1,333kN	機 械 室:1,264kN
	置、トロリー荷重	走行装置: 877kN	走行装置:1,325kN
		トロリー: 196kN	トロリー: 280kN
		重量物+吊り具: 549kN	重量物+吊り具:549kN
		それぞれの重心位置に集中荷重として	それぞれの重心位置に集中荷重として
		与える.	与える.
車輪部	部材モデル	GAP 要素(点接触要素)	同左
		単輪の浮き上かりを評価できるバネ要	
	っぱっ古と		
	うはの向さ	25mm(25mm 以上の存さ上かりで脱	问 左
	垂直反力に伴う	1110月11日のりと刊例 りつ) 廃塩区粉	
	室直及 方に 円 方		
		走行方向:0075(レール摩擦)	
走行装置部	部材モデル	車輪部とシルビームとを接続する剛梁	同左
		要素とし、中間位置にロッカービーム	
		ピン(θxフリー)をモデル化.	
		ピン~車輪はθx周りの回転を拘束.	
境界条件	脚下端の拘束条	別表参照	同左
	件		
重量・重心位置	実機の諸元(吊り	クレーン総重量:9,896kN	クレーン総重量:10,877kN
調整方法	荷含む・最大輪荷	重心位置(アウトリーチ時)	重心位置(アウトリーチ時)
	重計算書より)	X(海側脚より)=7.44m	X(海側脚より)=6.70m
	-	Z(レール面より)=34.8m	Z(レール面より)=33.60m
	モデル上の重量	鋼材単位質量γ=7.85t/m <sup>3</sup> →増加	鋼材単位質量γ=7.85t/m <sup>3</sup> →増加
	調整	脚、水平材、斜材: γ=8.44t/m <sup>3</sup>	脚、水平材、斜材: $\gamma = 8.62 \sim 20.80 \text{ t/m}^3$
		$\mathcal{J} - \mathcal{P} - : \gamma = 12.20 \text{t/m}^3$	$\mathcal{I} - \mathcal{I} - \mathcal{I} = 11.04 \text{ t/m}^3$
		$7 - \Delta, V + \tau : \gamma = 10.35 t/m^3$	$7 - \Delta$ : $\gamma = 12.94 \sim 19.15 t/m^3$
		フ ノンヨンハー: $\gamma = 12.85t/m^{\circ}$ ト如素材:15 75+/3	フ ノンヨンハー: $\gamma = 15.38 \sim 24.00 \text{t/m}^3$ 上如支持: $\gamma = 8.69 = 91.14 \text{t/m}^3$
		上 印 × 1 ± $\gamma$ - 10. ( 0 U/M° その 仙 如 材 ・ $\eta$ - 7 9 ξ + ( $m_3$ (調敷 $\beta_3$ )	上 印 × 1 ± $\gamma$ = 0.02 ~ 21.14U/M° その 4 如 は + $\eta$ = 7.95+/m <sup>3</sup> (調敷 か)
	調敷谷の香島及	$\gamma = 1.000 \text{III}^{\circ}$ (調整なし) カレーン総重量・0.806 N(調主 002)	- C ッT凹印約 · γ = 1.090/III° (調整なし) カレーン総重畳・10.877ŀN(調差 00/)
	「「一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	/ / / / 総里里 · 3,030KIN(訳左 0%) 重心位置(アウトリーチ哇)	/ / / / 総里里 · 10,0//KIN(袂左 0%) 重心位署(アウトリーチ哇)
	□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□	■10回回(ワンコン フ町) X(海側脚上り)=7 89m(誤美 6%)	単心に回してフロクロクロクロクロクロクロクロクロクロクロクロクロクロクロクロクロクロクロク
		Z(レール面より)=33 1m(誤差 5%)	Z(レール面より)=32 60m(誤差 3%)
	1	2、 / m 5 / -00.1m(际庄 0/0)	2、····································

表-3.8 コンテナクレーン3次元解析・条件設定例一覧

(4) 固有値解析の結果

a) S港クレーン

S港クレーンの固有値解析の結果として、付表-1に 振動次数別の固有振動数や刺激係数・有効質量比を、 クレーン姿勢別に一覧として整理したものを示す.また、付図-1~付図-3には、振動モードのうち地震時 のクレーン応答変位や部材応力に大きく影響すると考 えられる振動次数におけるモード図を、各姿勢別に一 覧として整理したものを示す.

まずクレーンの振動特性を把握するために、作業時 アウトリーチの場合を対象に、各振動次数別のクレー ンの振動モードについて説明する.振動次数が1及び2 については、ブーム先端の吊り荷のみが走行方向及び 横行方向に揺れるモードである. 刺激係数は大きいも のの,有効質量比が比較的小さいため,クレーン全体 の挙動には大きく影響しないものと考えられるモード である. 振動次数3 (ブーム走行方向1次) については, 海側のブーム先端が走行方向に揺れるモードである (固有周期3.26秒). このモードも刺激係数は大きい ものの、有効質量比が比較的小さいため、次に示す走 行方向1次及び横行方向1次に比べると、クレーン全体 の挙動への寄与は小さいモードである. 振動次数4(走 行方向1次)は、海側ブーム先端を中心としてブーム及 びクレーン全体が走行方向に回転するモードである (固有周期2.48秒).刺激係数と有効質量比がともに 大きいため、 クレーンの挙動に大きく影響するモード である. 但し, 固有値解析の場合は脚下端の走行方向 を固定条件としているが、実機クレーンの場合は車輪 がクレーンレール上(走行方向)を動くため、このモ ードのクレーン全体の地震時挙動への影響程度は固有 値解析の結果とは異なることに注意が必要である.振 動次数5(横行方向1次)は、クレーン全体が横行方向 に揺れるモードである(固有周期1.76秒). このモー ドは、刺激係数と有効質量比がともに大きいためクレ ーンの挙動に大きく影響するモードであるとともに, 走行方向の場合と異なり、車輪がレールから外れない 限りは地震中であっても,脚下端は横行方向に固定さ れた条件に比較的近いと考えられ、地震時における最 も支配的なモードであると言える.このため,既往の 免震コンテナクレーンの基本設計思想は、この振動モ ードを調整してクレーンの地震時応答を低減するもの である.これ以上の振動次数については、刺激係数と 有効質量比が極端に小さくなるため、クレーン全体の 地震応答に対する影響は比較的小さいと考えられる.

次に, 作業時バックリーチであるが, 振動特性は作

業時アウトリーチの場合とほとんど同じである.同じ 振動次数で固有周期を比較すると、以下のとおりであ り、トロリ位置の相違による振動モードに対する影響 は軽微であることが分かる.但し、両者において重心 位置が海陸方向に異なるため、地震時における脚の浮 き上がり限界加速度が異なるなど、地震応答解析の結 果では差違が顕在化する可能性があることに注意が必 要である.

・作業時アウトリーチの固有周期

3次:3.26秒,4次:2.48秒,5次:1.76秒

・作業時バックリーチの固有周期

3次:3.25秒,4次:2.54秒,5次:1.76秒

最後に休止時の振動特性であるが,休止時はブーム を上方へ格納するため,作業時と振動特性が異なるこ とが分かる.支配的な振動モードを低次から順に並べ ると,振動次数1,振動次数5となる.振動次数1(走行 方向1次)については,上方に位置するブームが走行 方向に振動するとともに,クレーン脚上部のフレーム 全体も走行方向に振動する(固有周期3.22秒).振動 次数5(横行方向1次)は,クレーン全体が横行方向に 振動するモードであり(固有周期1.47秒),作業時に 比較すると若干固有周期が小さくなる傾向にあった.

鉛直方向については、作業時アウトリーチおよび作 業時バックリーチの場合には、振動次数7おいて、ブー ムとガーダが相互に異なる方向に鉛直振動するモード が現れる(各姿勢に対する固有周期は,0.98秒および 0.74秒). さらに高次におけるブーム・ガーダの鉛直 振動モードは、ブームとガーダが同じ方向(鉛直)に 同時に撓むモードであり, 作業時アウトリーチの場合 は振動次数10(固有周期0.46秒)において、作業時バ ックリーチの場合には振動次数9(固有周期0.48秒)に おいて発生している.休止時については、振動次数7~ 10において、上方に格納したブームが横行方向に振動 するモード,ブーム先端がねじれる1次モード,ブーム 先端がねじれる2次モードおよびブーム先端がねじれ る3次モードとガーダ鉛直1次モードが同時に発生する モードなど、格納したブームを中心とした振動モード が続いていることに特徴がある.

b) T港クレーン

T港クレーンの固有値解析の結果として,S港と同様 の結果を,**付表-2**および**付図-4**~**付図-6**に示す.な お,本クレーンは空港の制限表面の制約上,ブームの 格納方法が異なり,ブーム途中で折り畳むように格納 するタイプである(低頭型クレーンと呼ばれる).

この結果から,作業時(アウトリーチ,バックリー チ)の振動特性については,概ねS港クレーンと同じ傾 向にあることが分かる.すなわち,固有周期や刺激係 数・有効質量比の数値は異なるものの,ブーム走行方 向1次,走行方向1次及び横行方向1次の次数の順序や振 動モードは同様である.

休止時については、ブームの格納方式が異なること の影響を受け、S港クレーンの結果とは異なる傾向にあ った.S港クレーンの場合は、ブームが上方高くに格納 さるため、作業時と休止時において振動次数の順序が 入れ替わったり、横行方向1次の固有周期の値が変化し た.一方、T港クレーンの場合は、作業時と休止時でブ ーム位置が大きく変わらないため、振動次数の順序も 低次モードでは変化せず、かつ固有周期の変化も小さ い結果となった(横行方向1次の場合、0.02秒の差).

T港クレーンの鉛直方向の振動モードについては,S 港クレーンで見受けられたようなブームとガーダが一 体となって,各々の先端が逆位相で鉛直方向に振動す るモードは低次モードでは発生していないことが分か る.これは,T港クレーンはブームの格納方法が異なり ブーム途中(2箇所)でブームが折れ曲がる構造となっ ているため,ブームとガーダとの一体性が低いためと 考えられる.また,S港クレーンに比較すると,T港ク レーンの作業時と休止時とのクレーン姿勢の相違は小 さいため,振動次数6次以降のモードにおいても,概ね 3つのクレーン姿勢で同様の順位で各振動モードが発 生する傾向にある.

(5)検証解析の結果

コンテナクレーンの3次元解析モデルの妥当性検証 として,以下の手法により検討した.

港湾地域強震観測による岸壁上で得られた既往の観 測記録を用いて、コンテナクレーンモデルの入力波形 とし、解析出力波形とコンテナクレーン機械室内での 観測記録波形とを比較し、実機の応答特性とモデルの 応答特性とを比較した.入力地震波の最大加速度は10 ~30galのオーダーであり、免震装置が作動せず脚に浮 き上がりが生じない比較的小さい地震動レベルに対す る検証となる.

#### a)S港クレーン

S港岸壁の構造形式は重力式岸壁であり、クレーン基礎は海側と陸側とが別個の構造である.従って、クレーン3次元解析においても、海側及び陸側各々の観測

記録を入力波形として用いて,機械室における観測記録との比較を行った.観測記録は,新潟県中越沖地震 (2007年7月16日)の際に得られたものである.なお, 強震観測機器の配置位置は図-3.1(a)に示すとおりで ある.

検証解析は、岸壁上で得られた横行、走行及び鉛直 の3方向の加速度時刻歴をモデル加振点へ入力し、クレ ーンの地震時挙動を再現するものである. クレーン上 の観測記録と解析結果を比較することにより、モデル 化の妥当性を確認する.なお、強震観測時点でのクレ ーン姿勢は休止時であったため,検証解析も休止時の クレーン姿勢を対象とした.なお、S港クレーンの強震 観測結果より得られたクレーン横行方向の減衰定数 3.0%より、3次元解析モデルの減衰定数も3.0%に調整し た. なお、3次元解析モデルは、脚下端のレール面との 接触に浮き上がりを考慮できるGAP要素を導入したモ デルと、GAP要素を用いず脚下端をレール面と固定とし たモデルの2種類を検討した.その結果,脚の浮き上が りが生じない小さい加速度レベルでの応答であり、両 者で応答の違いは得られなかったため、ここではGAP要 素を用いていない解析結果を代表として示す.

クレーン脚下端及びクレーン機械室の加速度時刻歴 の観測記録と3次元解析(休止時)の出力結果との比較 を図-3.20~図-3.22に示す.機械室における観測記 録と解析結果(休止時)とのフーリエスペクトルの比較 を図-3.23に示す.また,岸壁構造の振動特性の影響 を除外し,クレーン本体の応答特性としての比較を確 認するため,クレーン機械室での応答値をクレーン脚 部地盤上での応答で除した伝達関数による比較を図-3.24に示す.

加速度時刻歴の結果を見ると、走行方向および鉛直 方向については解析結果と観測記録は概ね一致してい るが、横行方向については最大加速度に差異がある. ここで、横行方向の伝達関数におけるピーク振動数に 着目すると、解析結果の方がやや振動数が高く、解析 モデルが実機クレーンより全体的に剛性が大きめに評 価されていることがわかる.以上のことから、解析モ デルと実機の全体剛性が合っていないことが、加速度 最大値が合致しない要因であると考えられる.ただし、 機械室のスペクトル形状を比較すると、おおむね2Hz程 度以下のクレーン全体系の性能照査として問題となる 低次オーダーではいずれもほぼ一致しており、モデル 化としては、概ね問題のない範囲であると考えられる. また、フーリエ振幅スペクトルと伝達関数による比較 においては、両者によるピーク周波数は概ね一致する 傾向にあった.

b) T港クレーン

T港の構造形式はジャケット式桟橋であり,クレーン 基礎は海側と陸側とで同一の上部工である.従って, クレーン3次元解析において,海陸共通の観測記録を入 力波形として用いて,機械室における観測記録との比 較を行った.観測記録は,茨城県沖地震(2008年5月8 日)の際に得られたものである.なお,強震観測機器 の配置位置は図-3.1(b)に示すとおりである.

検証解析は、桟橋上で得られた横行、走行及び鉛直 の3方向の加速度時刻歴をモデル加振点へ入力し、クレ ーンの地震時挙動を再現するものである.クレーン上 の観測記録と解析結果を比較することにより、モデル 化の妥当性を確認する.なお、強震観測時点でのクレ ーン姿勢は休止時であったため、検証解析は休止時の クレーン姿勢を対象とした.なお、T港クレーンの強震 観測結果より得られたクレーン横行方向の減衰定数 3.45%より、3次元解析モデルの減衰定数も3.45%に調整 した.なお、3次元解析モデルと、GAP要素を用いず脚 下端をレール面と固定としたモデルの2種類について 実施したが、両者で応答の違いは得られなかったため、 ここではGAP要素を用いていない解析結果のみを示す.

クレーン脚下端及びクレーン機械室の時刻歴加速度 の観測記録と3次元解析(休止時モデル)との比較を図 -3.25~図-3.27に示す.機械室における観測記録と 解析結果(休止時)とのフーリエスペクトルの比較を図 -3.28に示す.また,岸壁構造の振動特性の影響を除 外し,クレーン本体の応答特性としての比較を確認す るため,クレーン機械室での応答値をクレーン脚部地 盤上での応答で除した伝達関数による比較を図-3.29 に示す.

横行方向および走行方向については,解析結果と観 測記録の加速度時刻歴は概ね一致しており,またピー ク振動数も両者において概ね同じ位置にあることわか る.一方,鉛直方向については最大加速度に大きな相 違がある.これは,機械室内の計測器の設置状況によ り,2次的なクレーン部材の振動の影響などにより,実 際よりも大きい加速度を計測した可能性が考えられる. 桟橋上での鉛直方向加速度計測値が4ga1程度であるこ とを考えれば,解析値の6ga1は一般的には妥当な範囲 であると考えられるため,クレーンのモデル化として 問題ないと判断した.

また、フーリエ振幅スペクトルと伝達関数による比 較結果はS港クレーンと同様であり、横行・走行方向で は両者によるピーク周波数は概ね一致するが,鉛直方 向はピーク位置のずれが見られた.鉛直方向のピーク は2箇所見られ,各々ほぼ同程度の値であるため,低次 周波数側は岸壁構造に依存するピーク値であると推定 される.次に,機械室のフーリエ振幅スペクトル形状 を比較すると,S港クレーンと同様,おおむね2Hz程度 以下のクレーン全体系の性能照査として問題となる低 次オーダーではいずれもほぼ一致しており,モデル化 として問題のない範囲であると考えられる.また,フ ーリエ振幅スペクトルと伝達関数による比較において は,両者によるピーク周波数は概ね一致する傾向にあ った.

c)検証解析のまとめ

S港およびT港のコンテナクレーンについて,3次元 FEM解析によるモデル化を行い,強震記録を用いて検証 解析を行った.その結果,観測結果と解析結果は整合 的であり,今回のモデル化は概ね妥当であると考えら れる.ただし,さらに解析精度を向上させるためには, 実機コンテナクレーンの固有振動数や振動モードをで きるだけ一致させたモデル化が必要であると考えられ る.



図-3.20 S港クレーン(休止時)応答加速度(横行方向)の比較











図-3.22 S港クレーン(休止時)応答加速度(鉛直方向)の比較





図-3.25 T港クレーン(休止時)応答加速度(横行方向)の比較





図-3.26 T港クレーン(休止時)応答加速度(走行方向)の比較





図-3.27 T港クレーン(休止時)応答加速度(鉛直方向)の比較



3.4. まとめ

(1)実機コンテナクレーンの固有周期・減衰定数の評価a)固有周期(固有振動数)

図-3.30に、①強震観測・振動計測・微動観測の計 測波形から算出したフーリエ振幅スペクトル、②3次元 FEM の再現解析波形から算出した振幅スペクトル、③3 次元 FEM 解析(固有値解析,地震応答解析)から算出 した固有振動数,および④簡易固有周期算定法から計算 した固有振動数,を全てプロットした図をクレーン機種 別・クレーン姿勢別・方向別の結果として示す.また, これらの結果から固有振動数(固有周期)を読み取った 結果を一覧表として,**表-3.9**に示す.



(b) T港クレーン

図-3.30 フーリエ振幅スペクトル・固有振動数の比較

(強震観測・振動計測・微動観測・FEM地震応答解析・FEM固有値解析・簡易固有周期算定法)

以上の結果より、以下のことがわかる.

- ・計測値(強震観測,振動計測および微動計測)による 低次側のピーク振動数は、クレーン機種・クレーン姿 勢・観測方向の相違に関わらず、ほぼ一致する傾向に ある.
- ・横行方向については、計測値による低次側のピーク振動数と簡易算定法による固有振動数は、概ね一致する傾向にある.FEMによる固有振動数は、モデル化の精度により、計測値と概ね合致するケース(T港クレーン)と合致しないケース(S港クレーン)がある.
- ・走行方向については、計測値による低次側のピーク振動数と簡易算定法による固有振動数は、いずれのケースも全く一致しなかった.これは、簡易手法で仮定している走行方向の最も低次の振動モード(海側と陸側の両方のラーメン構造が走行方向に同時に振動するモード)は、実機コンテナクレーンの低次振動モードとは対応していないためである.従って、簡易算定手法は、コンテナクレーンの走行方向固有周期の算定には適用できない.

なお,走行方向における計測値による低次側のピー ク振動数と FEM 解析による1次モードによる固有振 動数は,モデル化の精度により,計測値と概ね合致す るケース(T港クレーン)と合致しないケース(S港 クレーン)があった.S港については,横行方向と走 行方向の両者について1次モードの固有振動数が合 致していないため,今後,モデルの調整が必要である. なお,T港クレーンの場合でも,2次以降のピーク振 動数は合致しなかった.

・鉛直方向については、計測値による低次側のピーク振動数と FEM 解析による固有振動数は、一致しなかった。

最後に, 簡易算定手法による横行方向固有周期の算定 精度を確認するために, 強震観測または振動計測の結 果による固有周期を基準とした場合のその他手法によ る固有周期の比を表-3.10に示す.この結果より,強震 観測および振動計測から評価した固有周期に対して, 簡 易算定式による固有周期は±10%の範囲に入っており, 横行方向の1 次固有周期に限れば簡易算定法の精度は 比較的高いものであることがわかった.

## 表-3.9 固有振動数(固有周期)の比較一覧

(a) S港クレーン

		ブームアップ(休止時)							
	微動観測	振動計測 (横行方向)	振動計測 (走行方向)	強震観測	3D-FEM	強震観測 再現解析	簡易算定法		
横行方向	0.49Hz (2.04sec)	-	-	0.51Hz (1.96sec)	0.68Hz (1.47sec)	0.57Hz (1.57sec)	0.49Hz (2.04sec)		
走行方向	0.38Hz (2.68sec)	-	0.37Hz (2.94sec)	0.39Hz (2.56sec)	0.31Hz (3.23sec)	0.41Hz (2.44sec)	6.25Hz (0.16sec)		
鉛直方向	0.51Hz (1.96sec)	-	-	0.51Hz (1.96sec)	2.34Hz (0.43sec)	0.70Hz (1.43sec)	-		

		ブームダウン(作業時)								
	微動観測	振動計測 (横行方向)	振動計測 (走行方向)	強震観測	3D-FEM	強震観測 再現解析	簡易算定法			
横行方向	-	0.51Hz (1.96sec)	-	-	0.57Hz (1.57sec)	0.56Hz (1.79sec)	0.49Hz (2.04sec)			
走行方向	-	-	0.34Hz (2.94sec)	-	0.40Hz (2.50sec)	0.40Hz (2.50sec)	6.25Hz (0.16sec)			
鉛直方向	-	-	-	-	1.02Hz (0.98sec)	0.56Hz (1.79sec)	-			

(b) T港クレーン

		フームアップ(休止時)							
	微動観測	振動計測 (横行方向)	振動計測 (走行方向)	強震観測	3D-FEM	強震観測 再現解析	簡易算定法		
楼怎士向	0.48Hz			0.46Hz	0.49Hz	0.48Hz	0.49Hz		
1與1〕/〕[1]	(2.08sec)	_	_	(2.17sec)	(2.04sec)	(2.08sec)	(2.04sec)		
土に土向	0.35Hz		0.34Hz	0.34Hz	0.37Hz	0.38Hz	6.67Hz		
走1]万间	(2.86sec)	_	(2.94sec)	(2.94sec)	(2.94sec)	(2.68sec)	(0.15sec)		
公本士白	0.49Hz			0.48Hz	0.62Hz	2.03Hz			
距世方问	(2.04sec)		-	(2.08sec)	(1.61sec)	(0.49sec)	-		

		ブームダウン(作業時)							
	微動観測	振動計測 (横行方向)	振動計測 (走行方向)	強震観測	3D-FEM	強震観測 再現解析	簡易算定法		
横行方向	0.48Hz (2.08sec)	0.45Hz (2.22sec)	-	-	0.49Hz (2.04sec)	0.48Hz (2.08sec)	0.49Hz (2.04sec)		
走行方向	0.35Hz (2.86sec)	-	0.34Hz (2.94sec)	-	0.38Hz (2.68sec)	0.38Hz (2.68sec)	6.67Hz (0.15sec)		
鉛直方向	0.48Hz (2.08sec)	-	-	-	0.95Hz (1.05sec)	2.02Hz (0.46sec)	-		

表-3.10 強震観測又は振動計測から得られた固有周期を 基準とした場合のその他手法による固有周期の比

(a) S港クレーン

	強震観測	振動計測	微動計測	簡易算定法	FEM 固有値解析
ブームアップ(休止時)	1.00	-	1.04	1.04	0.75
ブームダウン(作業時)	-	1.00	-	1.04	0.80

(b) T港クレーン

	強震観測	振動計測	微動計測	簡易算定法	FEM 固有値解析
ブームアップ(休止時)	1.00	-	0.96	0.94	0.94
ブームダウン(作業時)	-	1.00	-	0.92	0.92

b)減衰定数

強震観測結果の時刻歴波形から減衰定数を評価した. この結果,今回の強震記録から求めた減衰定数は約3.0 ~3.45%であった.一般的に、コンテナクレーンの減衰 定数は2~3%程度と言われているが,今回の計測結果は それらの数値と整合的であった.今後の実機コンテナク レーンの FEM 解析では,減衰定数を3.0%としても差 し支えないと考えられる.

#### 4.おわりに

本研究では、全国調査に基づき、既存コンテナクレー ンの固有周期や浮上がり限界加速度等の基本情報の整 理を行った.また、実機コンテナクレーンを対象とした 観測(強震観測,振動計測,常時微動)及び3次元FEM を用いた解析(固有値解析,地震応答解析)に基づき、 実機クレーン(調査対象のうち2基)の振動特性を把握 した.

(2008年6月1日受付)

#### 謝辞

本研究の遂行にあたっては,(社)港湾荷役システム 協会(吉田由治氏,中村武男氏,平形忠之氏,コンテナ 施設調査調査研究委員会メンバー各位)より,各種デー タの提供及び貴重なご意見を頂いた.また,コンテナク レーンの設計資料の収集にあたっては,港湾局技術企画 課技術監理室,各地方整備局担当部局および全国のコン テナクレーンの設置者(港湾管理者等)にご協力頂いた. 実機コンテナクレーンの振動計測および常時微動観測 については,横浜技術調査設計事務所,名古屋技術調査 設計事務所,東京港埠頭(株),静岡県および関係機関 のご協力を頂いた.最後に,3次元FEMを用いたコンテナ クレーンの数値解析は,(株)ニュージェック港湾・ 海岸グループにより実施された.以上のご協力について, ここに深く感謝の意を表します.

#### 参考文献

1)国土交通省港湾局:http://www.mlit.go.jp/kowan/
 2)国土交通省港湾局:港湾の施設の技術上の基準・同解

- 説,(社)日本港湾協会,平成19年7月.
- 3)宮田正史ほか: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),国総研資料, No.455, 2008.3.
- 4)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,(社)港湾荷役機械システム協会,平成 18年4月.
- 5)(社)日本クレーン協会: クレーン等安全規則の解説 (改正5版), 平成18年6月.
- 6)厚生労働省労働基準局安全衛生部安全課編:クレーン 等構造規格の解説(改訂3版),(社)日本クレーン協 会,平成9年6月.
- 7)(社)日本クレーン協会: クレーン耐震設計指針(日本

クレーン協会:JCAS1101-1989), 1989.

- 8)(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,平成10年2月.
- 9)港湾地域強震観測,

http://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm

国土技術政策総合研究所資料 TECHNICAL NOTE of NILIM No. 540 October 2009 編集·発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは <sup>〒239-0826</sup> 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019