

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¹⁾²⁾。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2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2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」²⁾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許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ペンが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²⁾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³⁾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³⁾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き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。

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

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。

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）」⁴⁾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⁵⁾およびクレーン等構造規格⁶⁾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

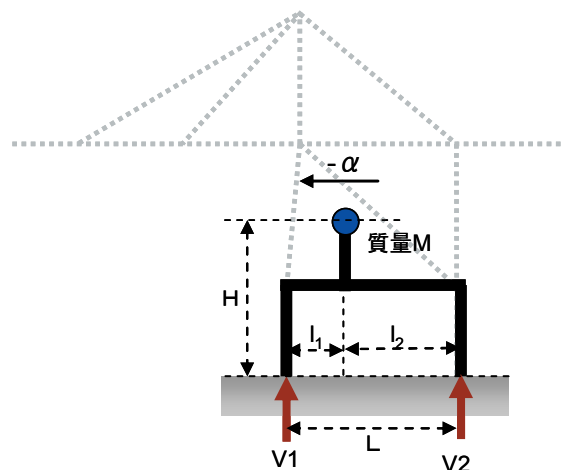


図-2.1 脚部浮き上がり加速度に関する説明図

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_1 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。

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

ここで、脚部が浮き上がる際には $V_2=0$ であるので、浮き上がり加速度は、(2.1)式で $V_2=0$ と置き、下式のとおり算定される。

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

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」⁷⁾及び「コンテナクレーン耐震設計のための手引き(案)」⁸⁾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)」⁸⁾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。

$$T_x = 2\pi \sqrt{m_c \cdot \alpha_x} \quad \dots \quad (2.3)$$

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

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/s²)
- a_x : 橋形クレーン横行方向1架構の水平たわみ係数(s²/kg)
- a_{zs} : 橋形クレーン走行方向海側架構の水平たわみ係数(s²/kg)
- a_{zl} : 橋形クレーン走行方向陸側架構の水平たわみ係数(s²/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。

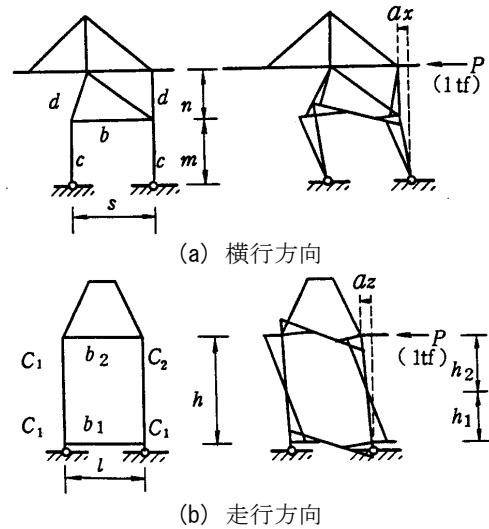


図-2.2 簡易手法における水平たわみ係数⁸⁾

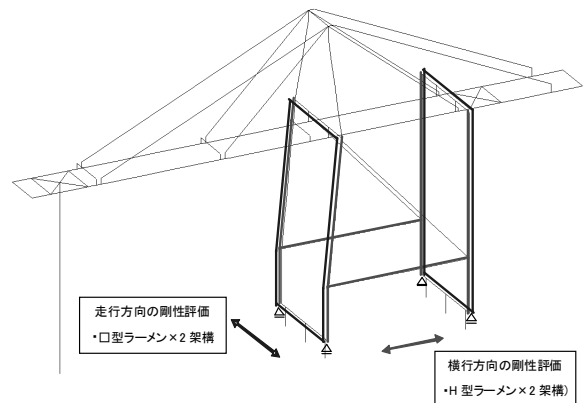


図-2.3 簡易手法による固有周期の算定に必要な部材

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。

$$a_x = \frac{m^3}{24E \cdot I_c} \left\{ 2 + \frac{3}{2} \times \frac{1}{(k_b + k_d)} \right\} + \frac{2m}{E \cdot A_c} \left(\frac{n}{s} \right)^2 \left(1 + \frac{A_c \cdot n}{A_d \cdot m} \right) \dots \quad (2.5)$$

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

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。

$$a_z = \frac{h_1^3}{12E \cdot I_{c1}} \left(2 + \frac{1}{k_{b1}} \frac{h}{h_1} \right) + \frac{h_2^3}{12E \cdot I_{c2}} \left(2 + \frac{k_{c2}}{k_{b2}} \frac{h}{h_2} \right) \quad \dots (2.6)$$

ここで、

$$h_1 = \frac{-\left(\frac{6}{k_{c2}} + \frac{1}{k_{b1}} + \frac{1}{k_{b2}} \right) h}{6 \left(1 - \frac{1}{k_{c2}} \right)} + \frac{\sqrt{\left(\frac{6}{k_{c2}} + \frac{1}{k_{b1}} + \frac{1}{k_{b2}} \right)^2 + 12 \left(1.0 - \frac{1}{k_{c2}} \right) \left(\frac{3}{k_{c2}} + \frac{1}{k_{b2}} \right)}}{6 \left(1 - \frac{1}{k_{c2}} \right)} h \quad \dots (2.7)$$

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

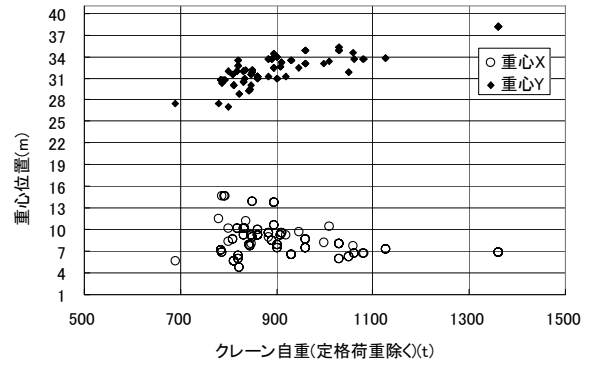


図-2.4 重心位置とクレーン自重の関係 (作業時アウトリーチ)

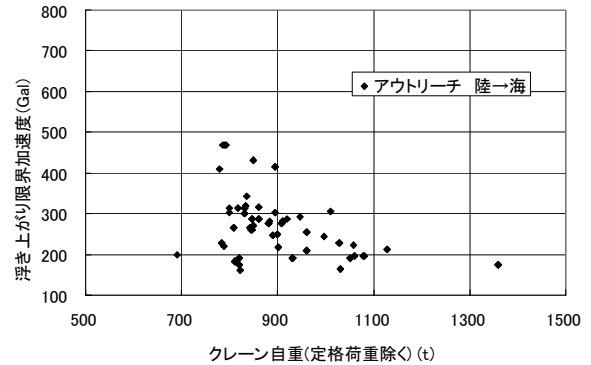


図-2.5 浮き上がり限界加速度とクレーン自重の関係 (作業時アウトリーチ)

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、図-2.5に作業時アウトリーチ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

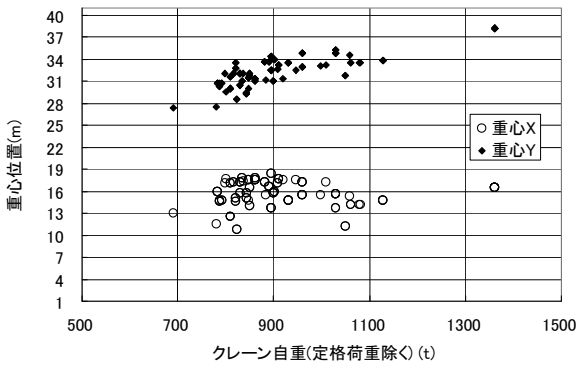


図-2.6 重心位置とクレーン自重の関係 (作業時バックリーチ)

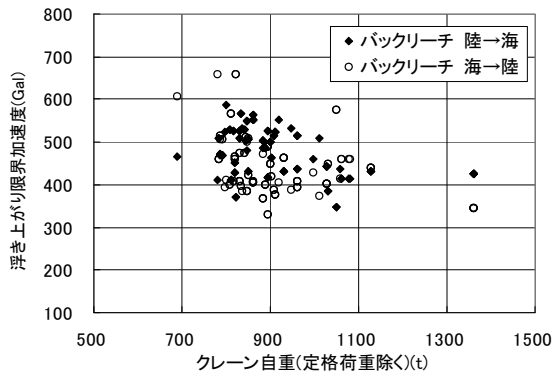


図-2.7 浮き上がり限界加速度とクレーン自重の関係 (作業時バックリーチ)

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方向への距離 (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

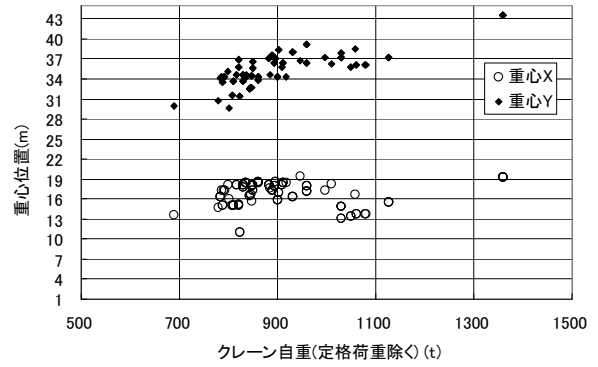


図-2.8 重心位置とクレーン自重の関係 (休止時)

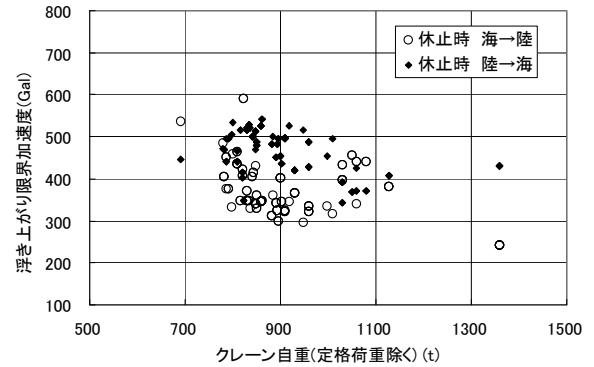


図-2.9 浮き上がり限界加速度とクレーン自重の関係 (休止時)

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ル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、アーム

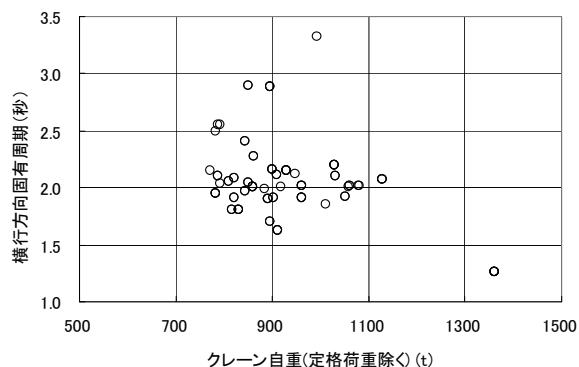


図-2.10 横行方向固有周期とクレーン自重の関係

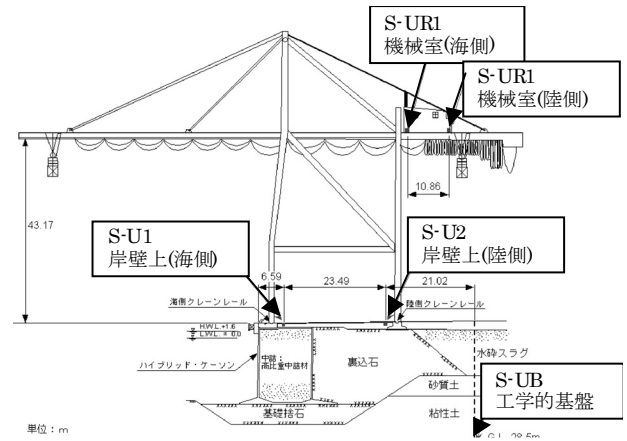
ム重量の増加に対して、クレーン脚の剛性も増加させる必要があり、クレーン脚部分の重量も増加する。また、船高（コンテナ位置）が高くなることに対しては、クレーンの脚部を伸ばす必要があり、それに対するフレーム構造全体の横行方向・走行方向およびねじれに対する剛性確保のため、主部材の剛性増加にともなう重量の増加が発生する。

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。

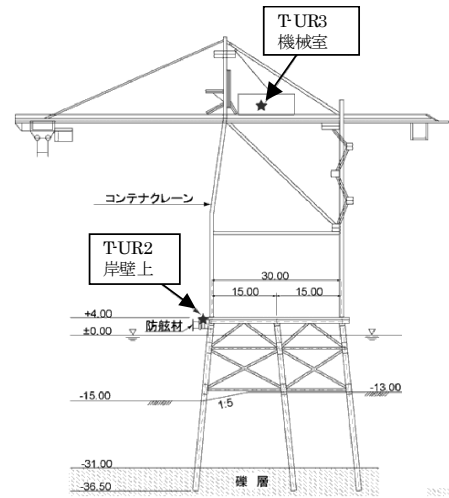
3. 強震観測・振動計測・常時微動観測・3次元FEMに基づく既存コンテナクレーンの振動特性

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。



(a) S港コンテナクレーン



(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-3.1 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

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)

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⁷⁾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。

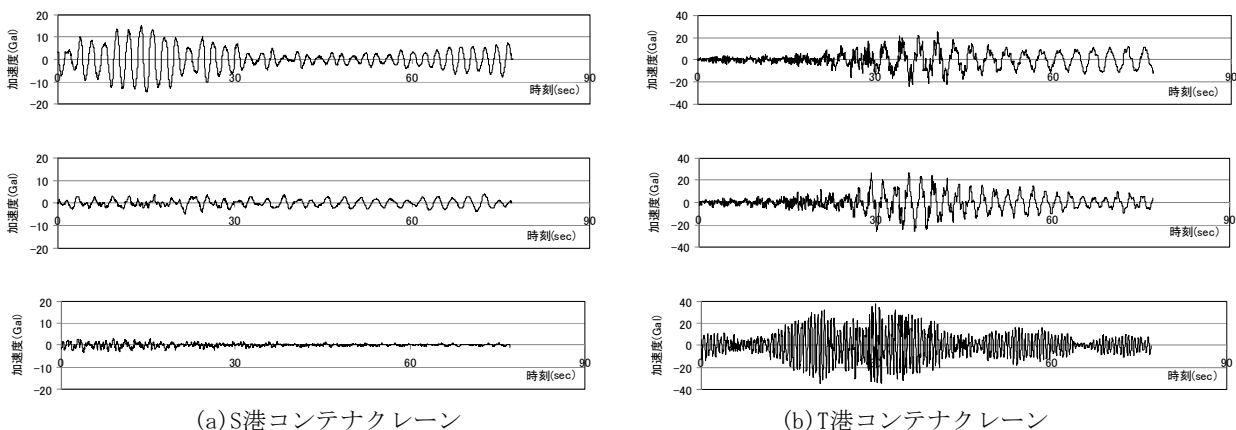


図-3.2 各クレーン上で得られた加速度時刻（ブームアップ時）（上から横行，走行，鉛直の各方向）

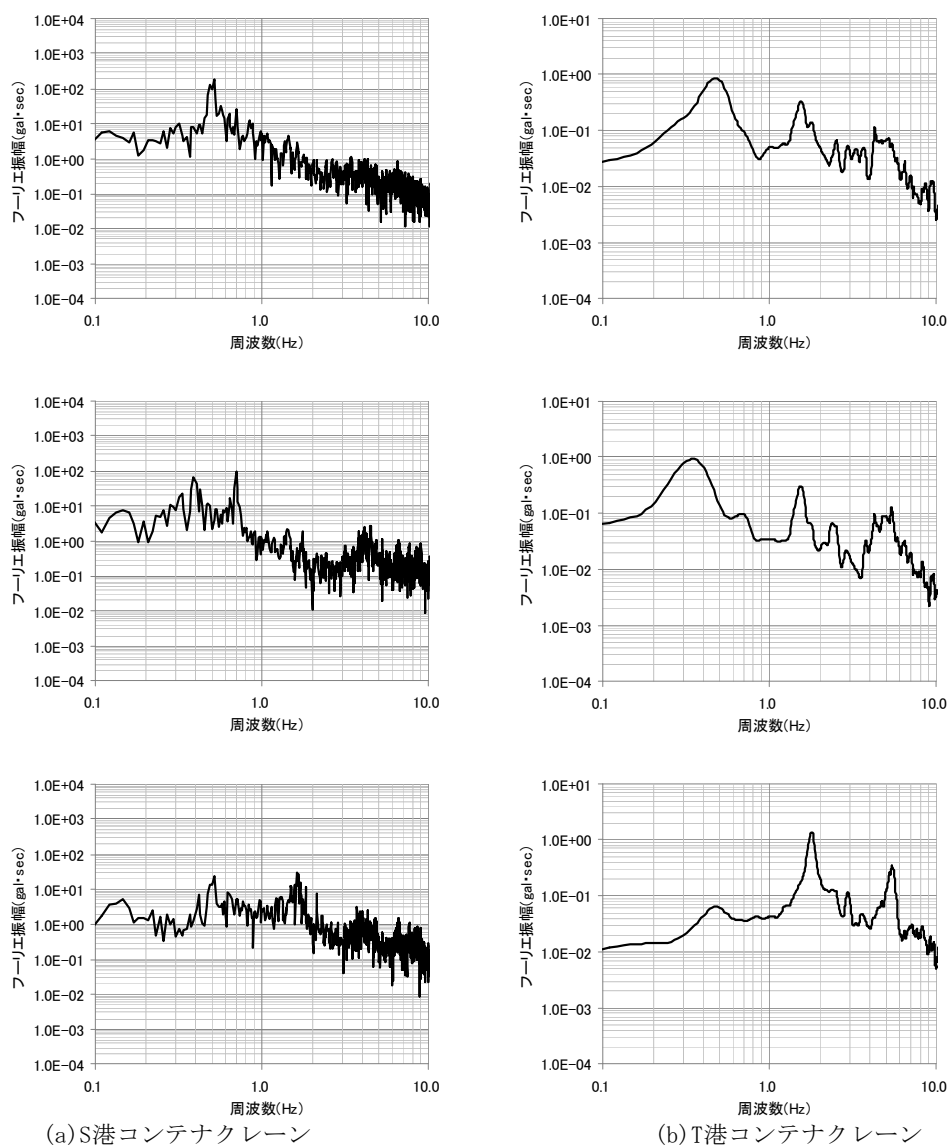


図-3.3 フーリエ振幅スペクトル（上から横行，走行，鉛直の各方向）

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であり、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

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

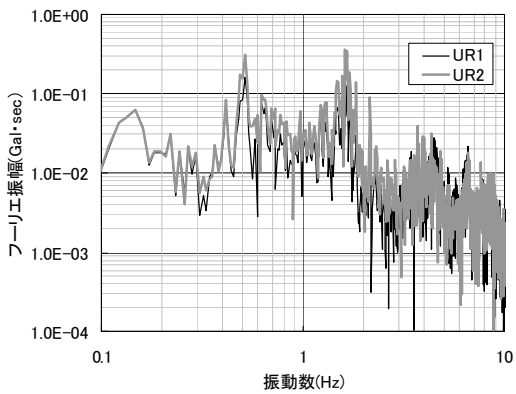
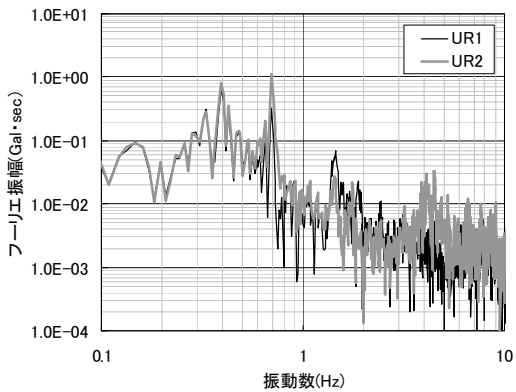
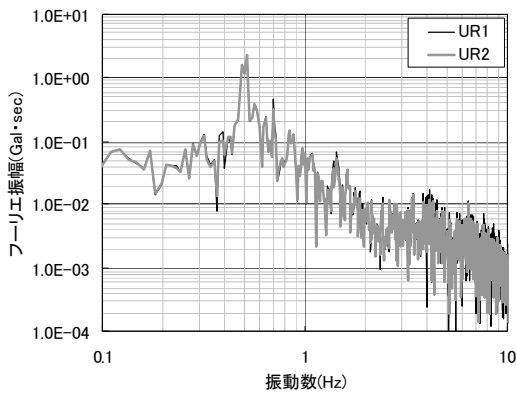


図-3.4 フーリエ振幅スペクトル (S港：UR1, UR2)
(上から横行, 走行, 鉛直の各方向)

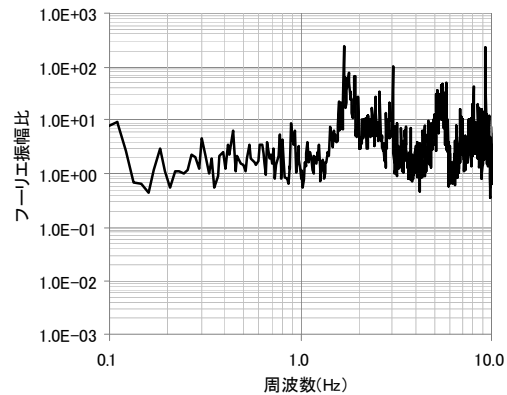
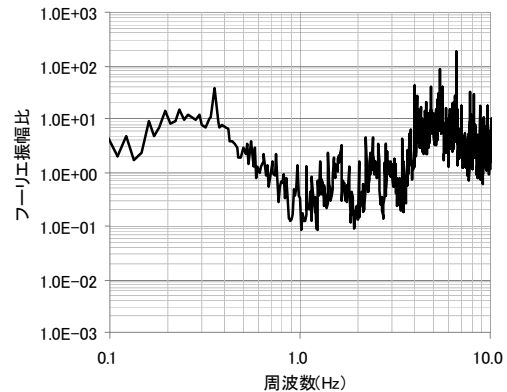
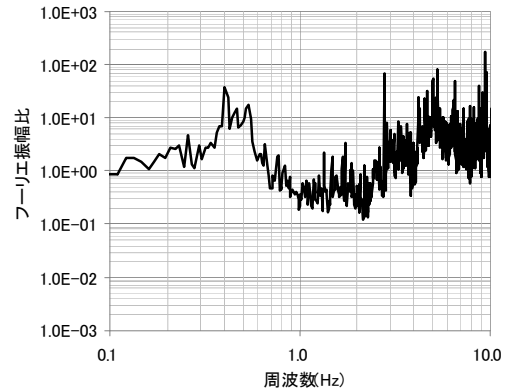


図-3.5 フーリエ振幅スペクトル比 (T港)
(上から横行, 走行, 鉛直の各方向)

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歴波形を基に、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、観測された時刻歴波形において、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。

$$h = (1.0 / (2.0 \times \pi)) \times \ln(\text{平均振幅比})$$

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○印は測定項目を示し、－印は測定不能（強震観測に



写真-3.1 微動計の設置状況

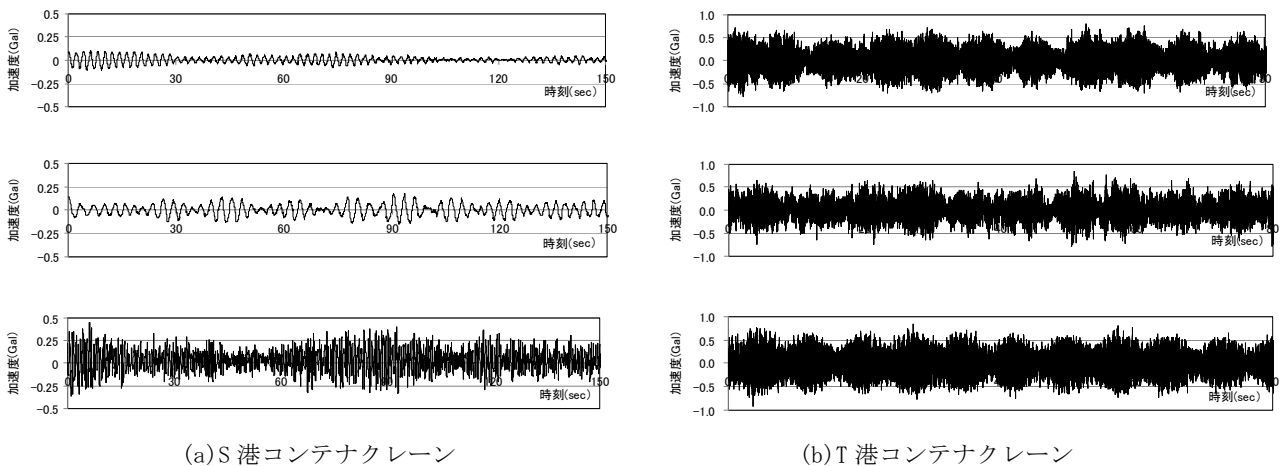
表-3.3 コンテナクレーンにおける計測ケース一覧

(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	○	—	△	○	○	○	△	—
走行方向	○	—	○	○	○	△	○	—
鉛直方向	○	—	△	○	○	△	△	—

(b) T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	○	—	△	○	×	○	△	—
走行方向	○	—	○	○	×	△	○	—
鉛直方向	○	—	△	○	×	△	△	—



(a)S 港コンテナクレーン

(b)T 港コンテナクレーン

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)

に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いためである。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

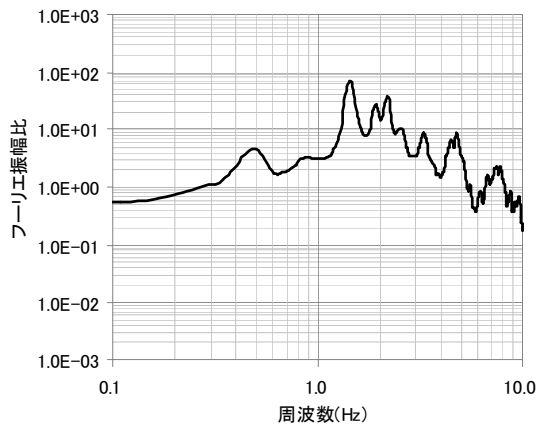
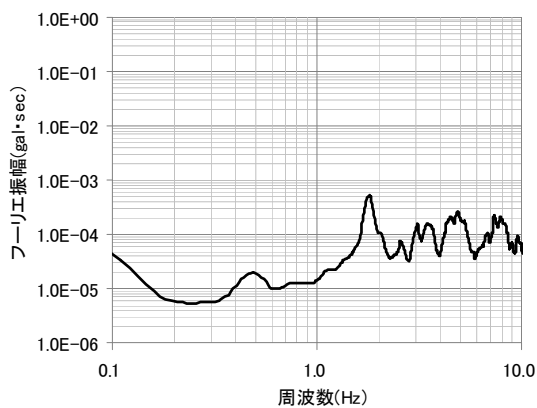
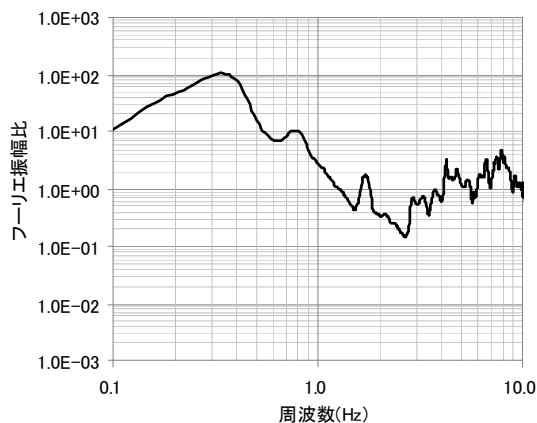
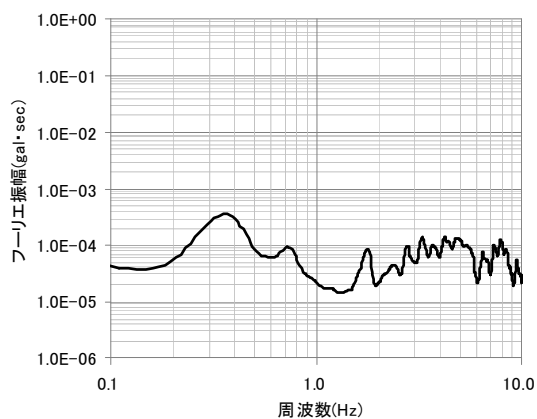
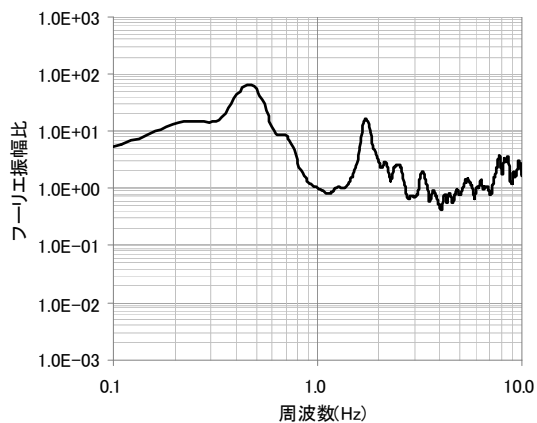
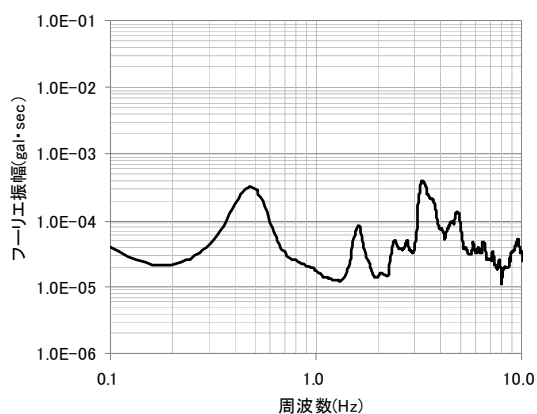


図-3.8 フーリエ振幅スペクトル（常時微動）

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

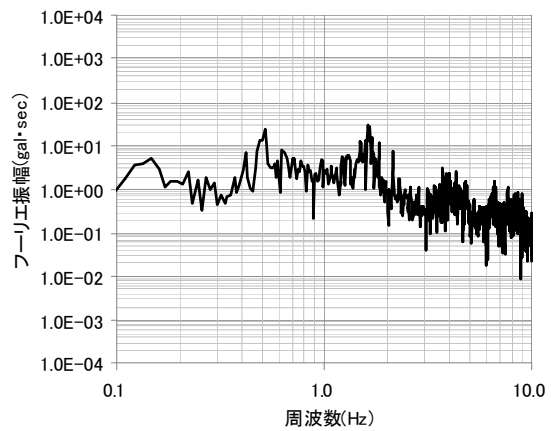
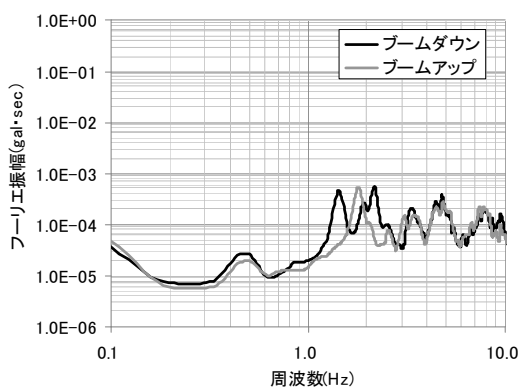
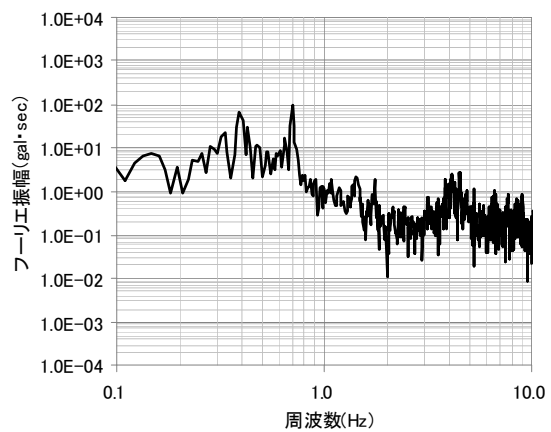
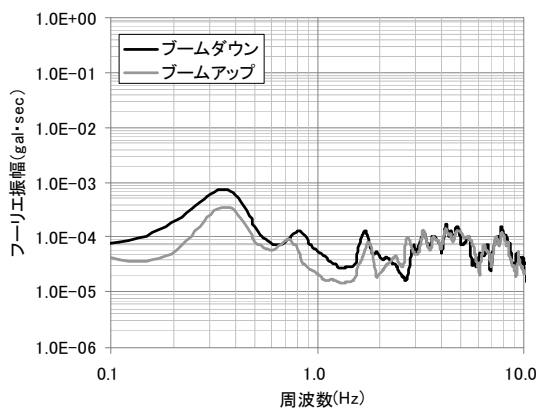
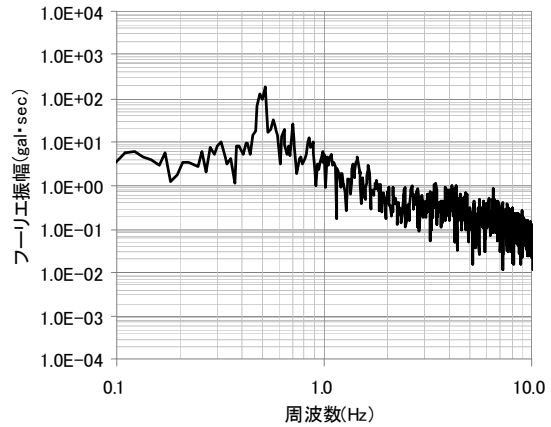
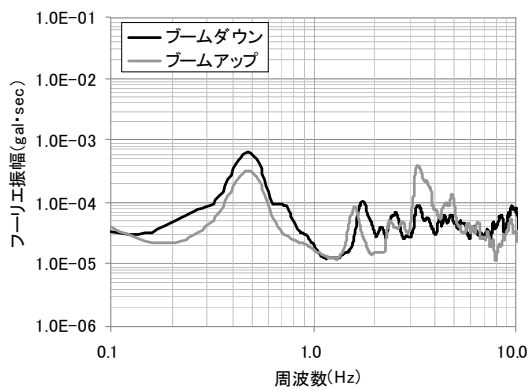
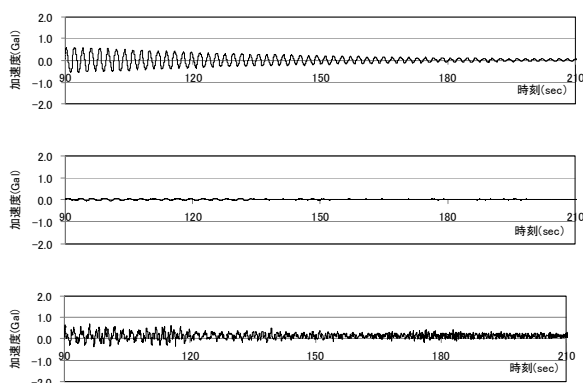
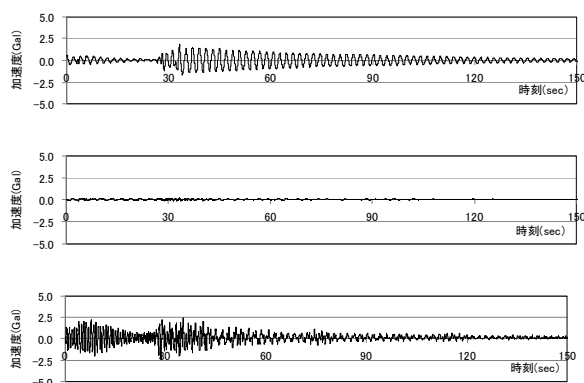


図-3.10 フーリエ振幅スペクトル (常時微動観測)
(T港クレーン, 上から横行, 走行, 鉛直の各方向)

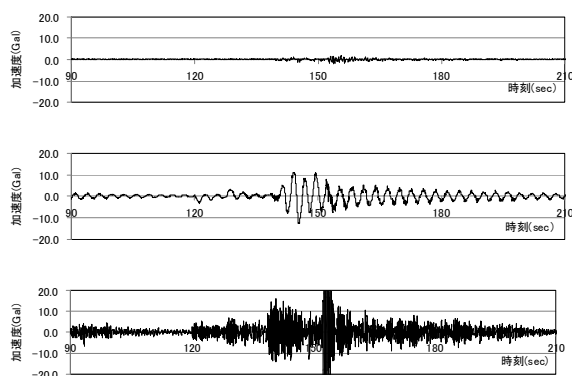
図-3.11 フーリエ振幅スペクトル比 (常時微動)
(S港クレーン, 上から横行, 走行, 鉛直の各方向)



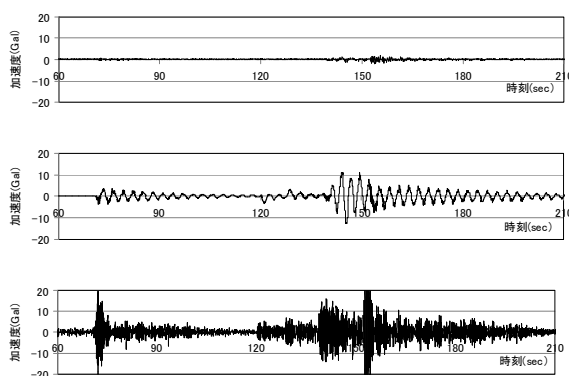
(a) S港クレーン（ブームダウン・横行方向加振時）



(b) T港クレーン（ブームダウン・横行方向加振時）



(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。

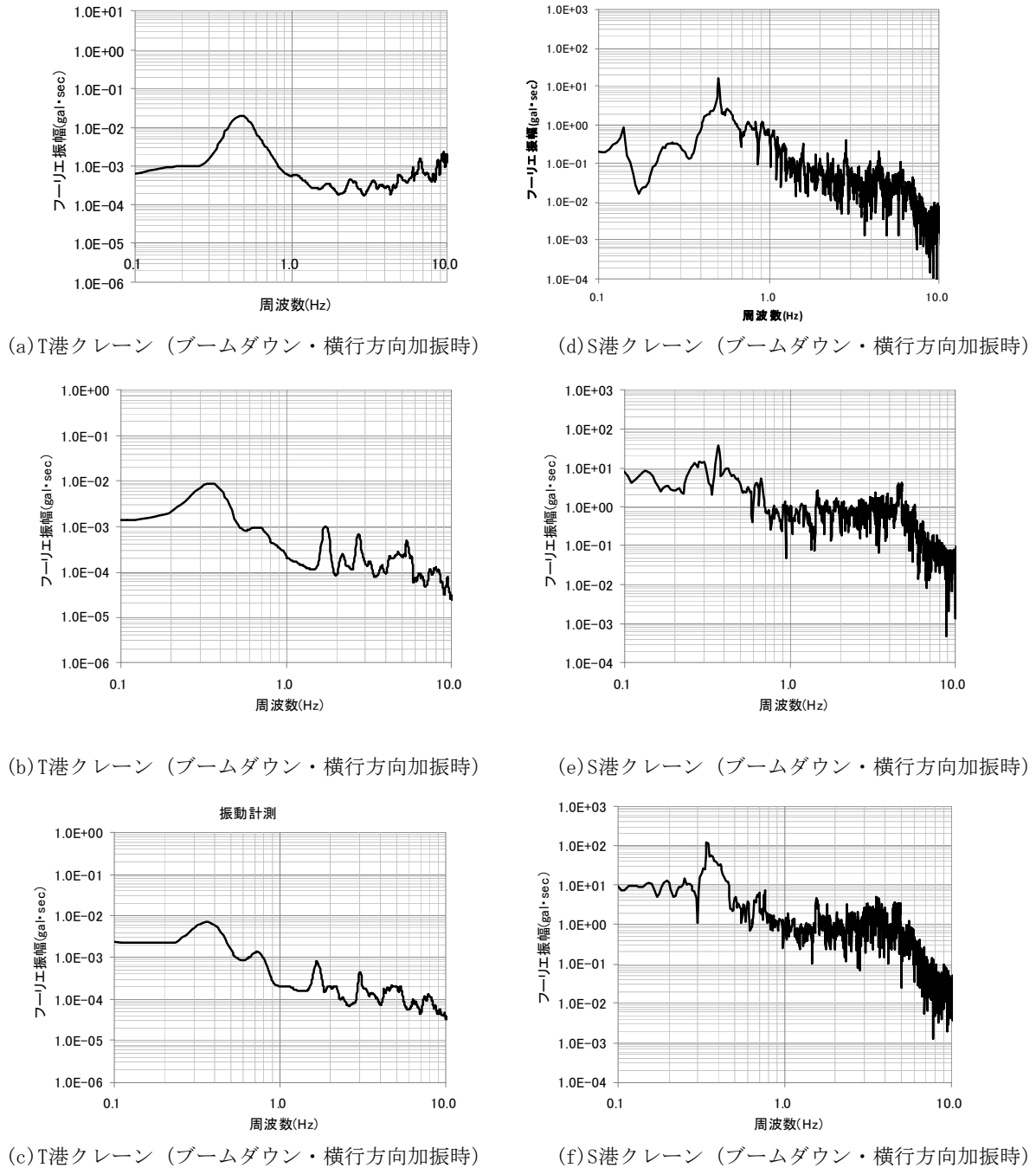


図-3.13 振動計測から算出したフーリエ振幅スペクトル (各項目ごとに上から横行, 走行, 鉛直の各方向)

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にそれらと比較して示す。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

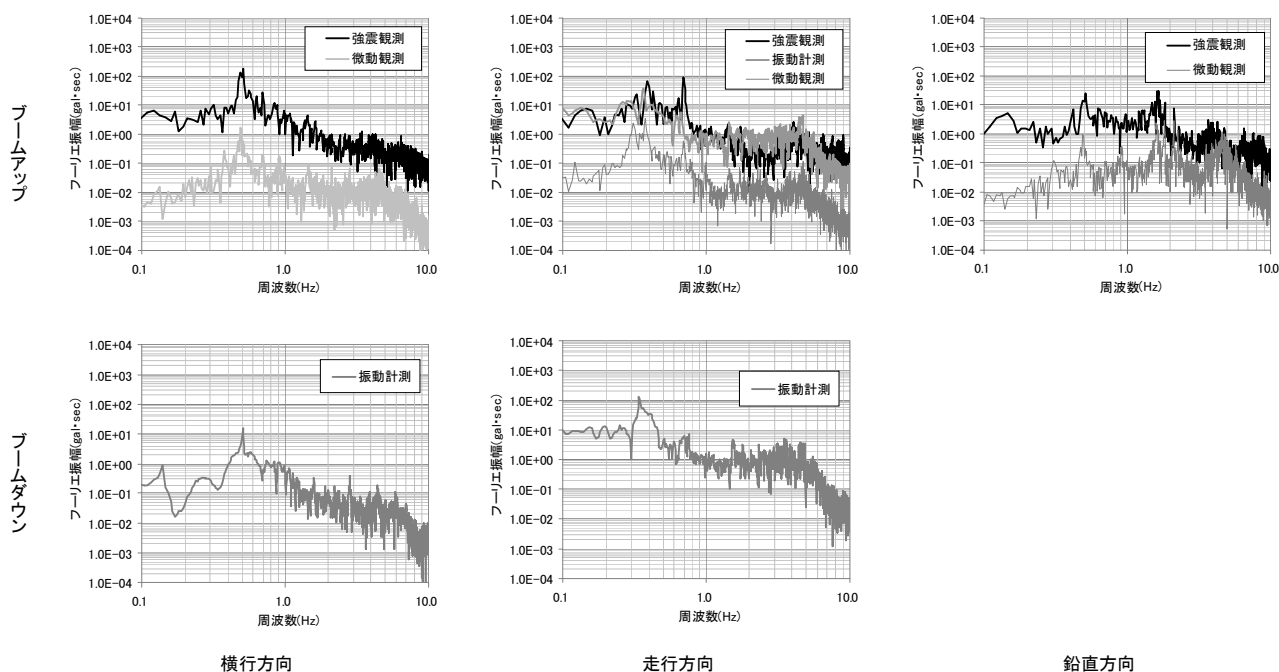


図-3.15 各種計測方法によるフーリエ振幅スペクトルの比較（S港クレーン）

表-3.4 計測結果の一覧

(a) T港クレーン（ブームアップ（休止時））					(b) T港クレーン（ブームダウン（作業時））				
	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	0.48Hz (2.08sec)	-	-	0.46Hz (2.17sec)	0.48Hz (2.08sec)	0.45Hz (2.22sec)	-	-	
走行方向	0.35Hz (2.86sec)	-	0.34Hz (2.94sec)	0.34Hz (2.94sec)	0.35Hz (2.86sec)	-	0.34Hz (2.94sec)	-	
鉛直方向	0.49Hz (2.04sec)	-	-	0.48Hz (2.08sec)	0.48Hz (2.08sec)	-	-	-	

(c) S港クレーン（ブームアップ（休止時））					(d) S港クレーン（ブームダウン（作業時））				
	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	0.49Hz (2.04sec)	-	-	0.51Hz (1.96sec)	-	0.51Hz (1.96sec)	-	-	
走行方向	0.38Hz (2.63sec)	-	0.37Hz (2.70sec)	0.39Hz (2.56sec)	-	-	0.34Hz (2.94sec)	-	
鉛直方向	0.51Hz (1.96sec)	-	-	0.51Hz (1.96sec)	-	-	-	-	

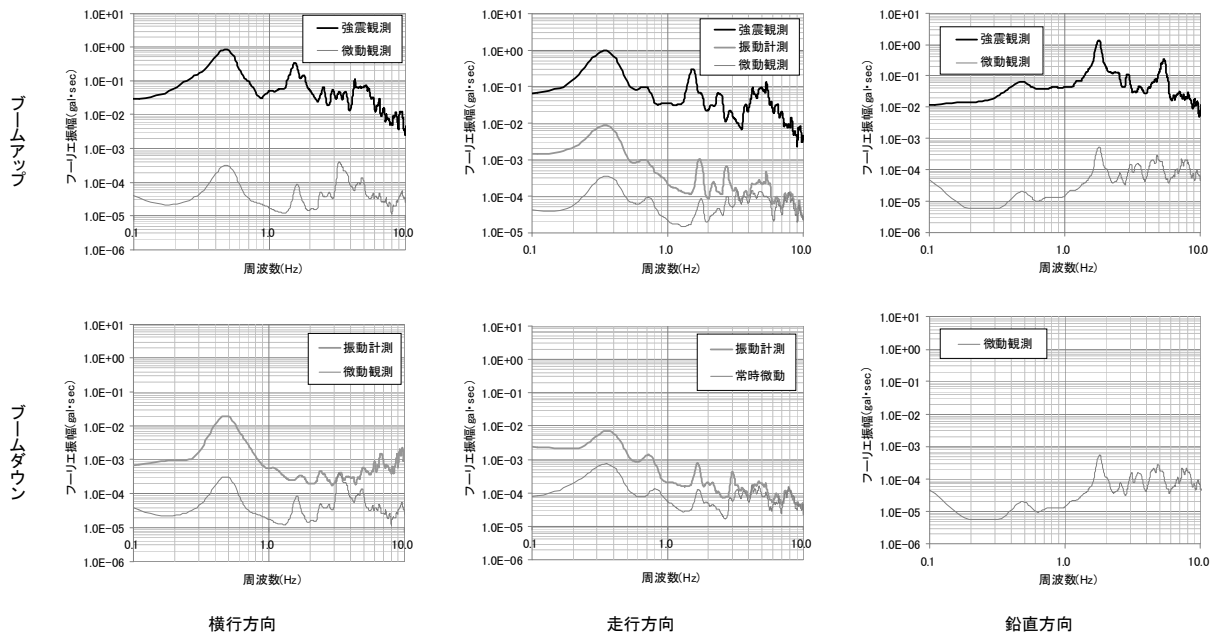


図-3.16 各種計測方法によるフーリエ振幅スペクトルの比較 (T 港クレーン)

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ではなく、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(減衰ダンパー等)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施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

一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。」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・ガーダ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紹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において、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

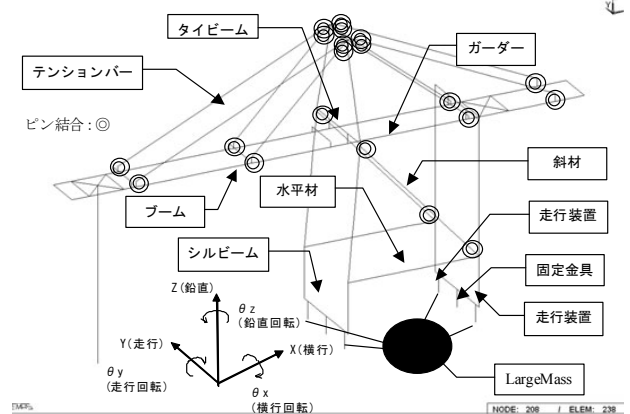


図-3.17 コンテナクレーンの部材名称とモデル図

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、シルベ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、各々レールを挟んで一箇所ずつ、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

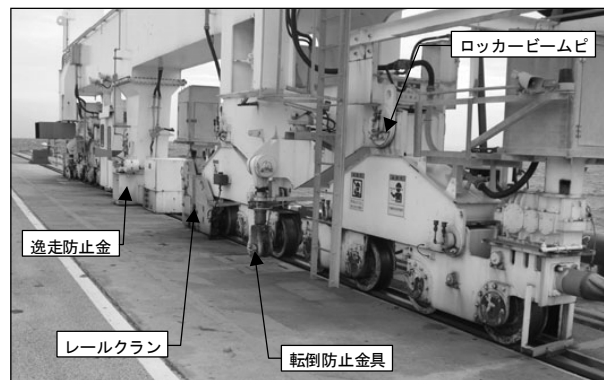


写真-3.2 走行装置周辺の構造要素

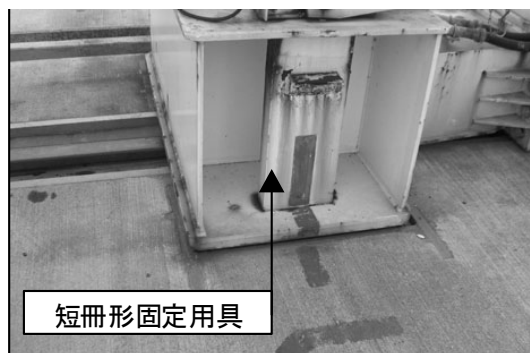


写真-3.3 逸走防止装置の例

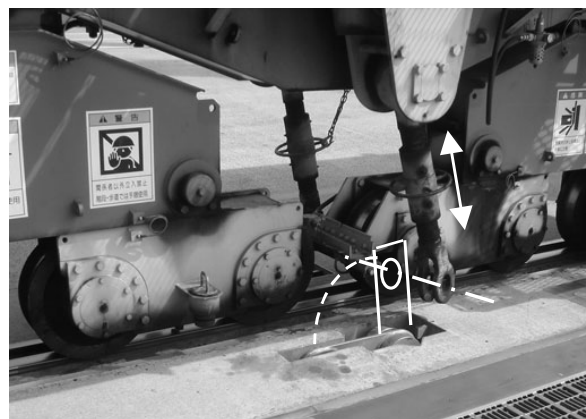


写真-3.4 転倒防止装置の例

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、クレーンメーカーへのヒアリングに基づく、

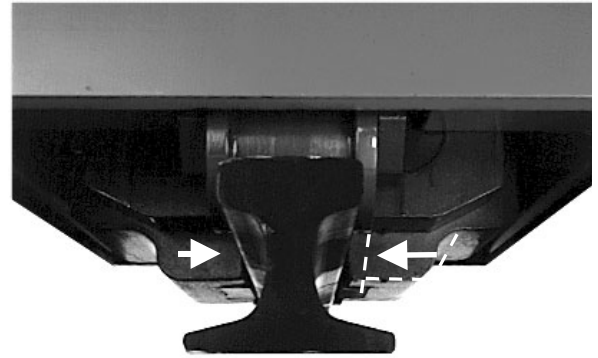


写真-3.5 車輪部及びレールクランプの例

表-3.5 作業時および休止時における装置作動状況

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 時	レール 走行時	×	×	×	×
	吊上げ時	○	○	×	×
	休憩時	○	○	×	×
休止時 (作業中止時 を含む)		○	○	○ (走行方向への 移動防止)	○ (走行方向・横 行方向への転 倒防止)

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。

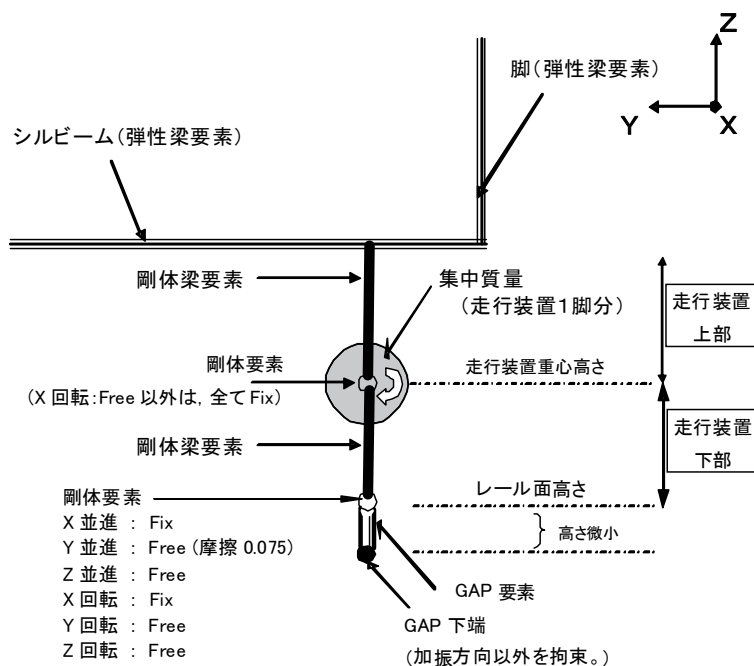


図-3.18 走行装置周辺のモデル化

〔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		固有値解析		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 (摩擦 $\mu=0.075$)	同左
	Z(鉛直)	固定	同左	浮き上がり 考慮(GAP要素)	同左 *2
回転	θ_x (X軸廻り)	フリー(ロッカービーム位置)	同左	フリー(ロッカービーム位置)	同左
	θ_y (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		固有値解析		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 (70mm遊間有り)	フリー	固定*1 (70mm遊間有り)
	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
	θ_y (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。

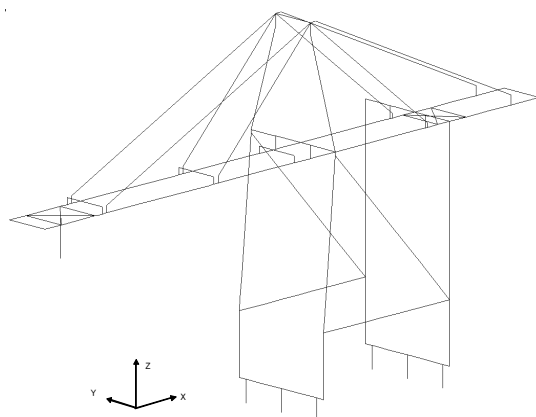
地震応答解析は、地震動の影響によるクレーン脚の浮き上がりを含めた挙動を再現することが目的である。このため、走行装置部は、X方向(横行方向)は車輪のつばとレールとのかみ合わせにより固定、Y方向(走行方向)は車輪接地面とレール面との摩擦分を考慮するが基本的にはフリー、Z方向(鉛直方向)は上向き力に対してバネ値がごく小さく、下向き力に対してバネ値が大きい非線形バネ要素であるGAP要素にて脚の浮き上がりを表現できる拘束とした。軸回転の自由度は固有値解析条件と同様である。また、逸走防止装置の作動状況も固有値解析の条件と同様である。

(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、

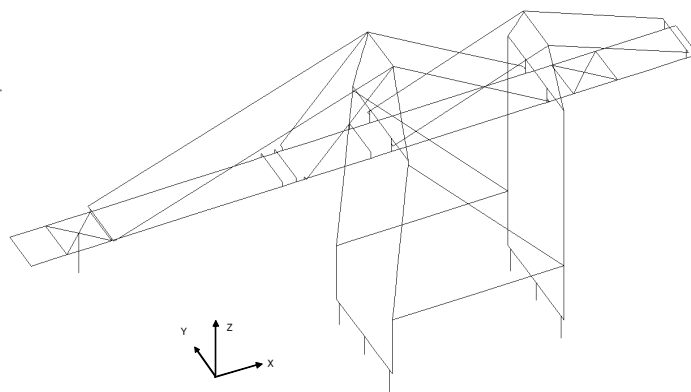


(a) S港クレーン

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

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

表-3.8 コンテナクレーン3次元解析・条件設定例一覧

解析対象クレーン		S 港クレーン (岸壁構造形式：重力式)	T 港クレーン (岸壁構造形式：栈橋式)
クレーン本体 部材	材料の力学特性	線形モデル	同 左
	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合とし、その他はすべて剛結合とした。	同 左
	クレーンの構造減衰	減衰定数：3.0%(強震観測より)	減衰定数：3.45%(強震観測より)
	クレーンの数値減衰	数値減衰：0.01 (NASTRAN デフォルト値)	同 左
付属設備重量	機械室、走行装置、トロリー荷重	機械室：1,333kN 走行装置：877kN トロリー：196kN 重量物+吊り具：549kN それぞれの重心位置に集中荷重として与える。	機械室：1,264kN 走行装置：1,325kN トロリー：280kN 重量物+吊り具：549kN それぞれの重心位置に集中荷重として与える。
車輪部	部材モデル	GAP 要素 (点接触要素) 車輪の浮き上がりを評価できるバネ要素。	同 左
	つばの高さ	25mm(25mm 以上の浮き上がりで脱輪の可能性ありと判断する)	同 左
	垂直反力に伴う摩擦力	摩擦係数 横行方向：1.0(固定) 走行方向：0.075(レール摩擦)	同 左
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。	同 左
境界条件	脚下端の拘束条件	別表参照	同 左
重量・重心位置 調整方法	実機の諸元(吊り荷含む・最大輪荷重計算書より)	クレーン総重量：9,896kN 重心位置(アウトリーチ時) X(海側脚より)=7.44m Z(レール面より)=34.8m	クレーン総重量：10,877kN 重心位置(アウトリーチ時) X(海側脚より)=6.70m Z(レール面より)=33.60m
	モデル上の重量調整	鋼材単位質量 $\gamma=7.85t/m^3$ →増加 脚、水平材、斜材： $\gamma=8.44t/m^3$ ガーター： $\gamma=12.20t/m^3$ ブーム、ワイヤ： $\gamma=10.35t/m^3$ テンションバー： $\gamma=12.85t/m^3$ 上部支柱： $\gamma=15.75t/m^3$ その他部材： $\gamma=7.85t/m^3$ (調整なし)	鋼材単位質量 $\gamma=7.85t/m^3$ →増加 脚、水平材、斜材： $\gamma=8.62\sim 20.80t/m^3$ ガーター： $\gamma=11.04t/m^3$ ブーム： $\gamma=12.94\sim 19.15t/m^3$ テンションバー： $\gamma=15.38\sim 24.00t/m^3$ 上部支柱： $\gamma=8.62\sim 21.14t/m^3$ その他部材： $\gamma=7.85t/m^3$ (調整なし)
	調整後の重量及び重心位置	クレーン総重量：9,896kN(誤差 0%) 重心位置(アウトリーチ時) X(海側脚より)=7.89m(誤差 6%) Z(レール面より)=33.1m(誤差 5%)	クレーン総重量：10,877kN(誤差 0%) 重心位置(アウトリーチ時) X(海側脚より)=6.50m(誤差 3%) Z(レール面より)=32.60m(誤差 3%)

(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において、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には振動次数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・有効質量比の数值は異なるものの、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れるため、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ととえられる。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栈橋であり、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、栈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次元解析モデルは、前述S港モデルと同様、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。栈橋上での鉛直方向加速度計測値が4gal程度であることを考えれば、解析値の6gal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。

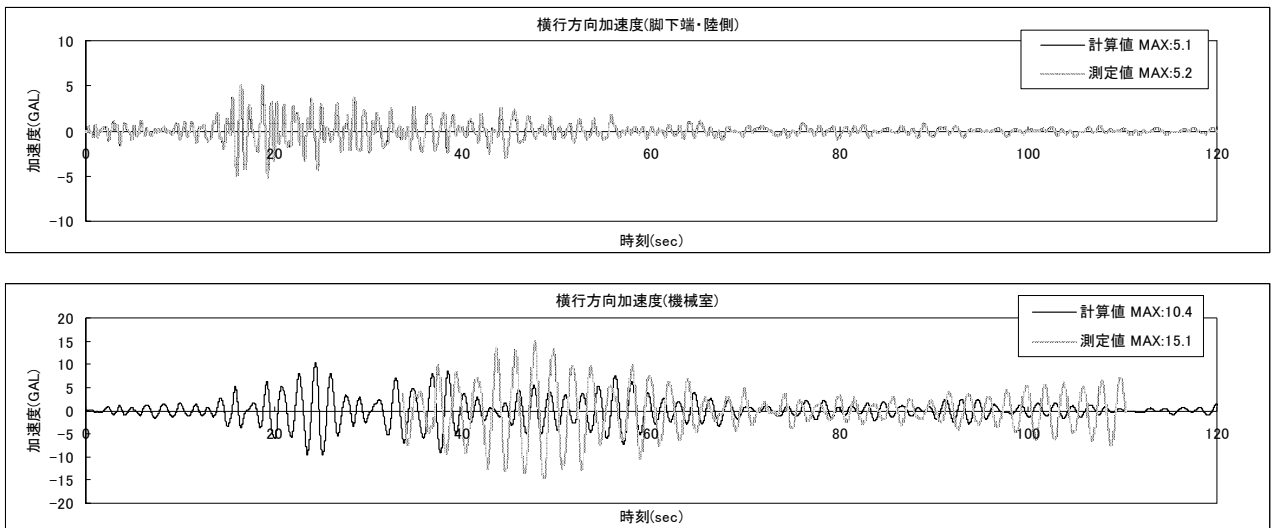


図-3.20 S港クレーン(休止時)応答加速度(横行方向)の比較

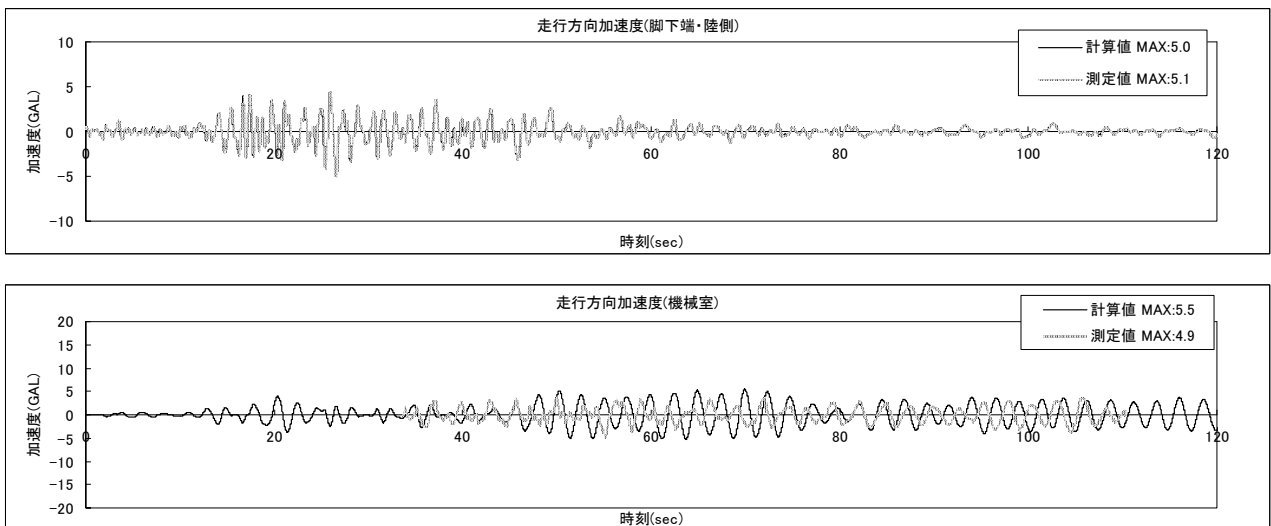


図-3.21 S港クレーン(休止時)応答加速度(走行方向)の比較

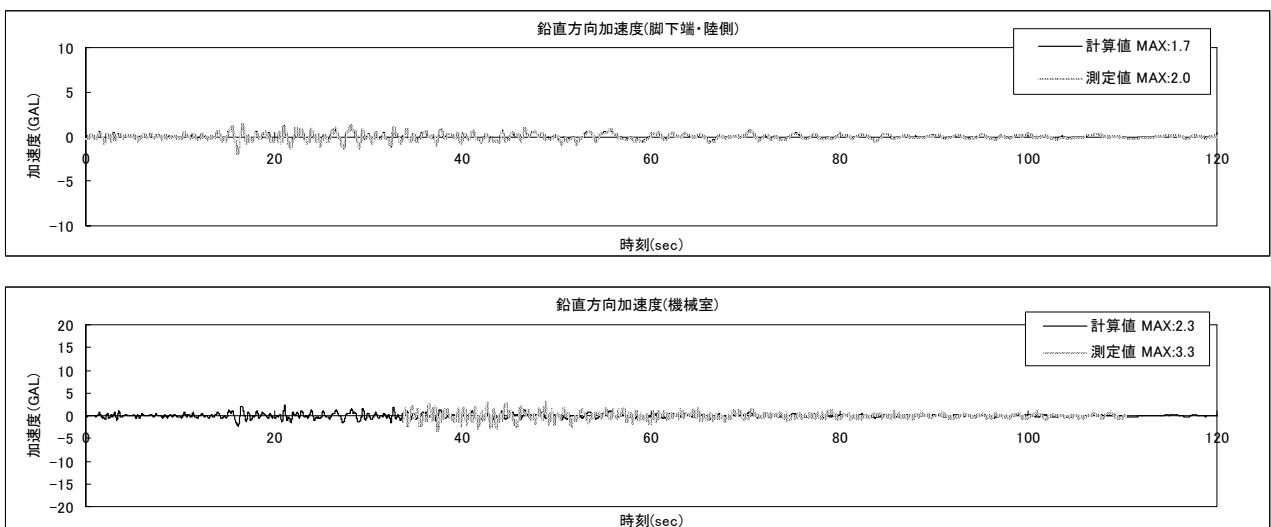


図-3.22 S港クレーン(休止時)応答加速度(鉛直方向)の比較

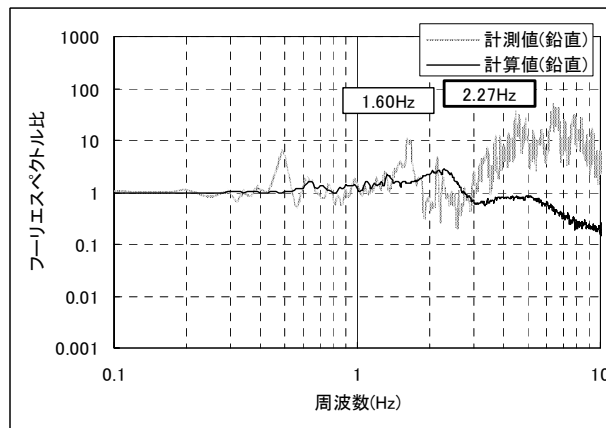
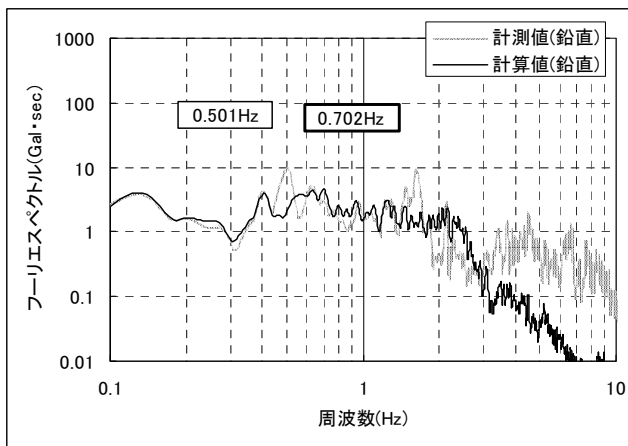
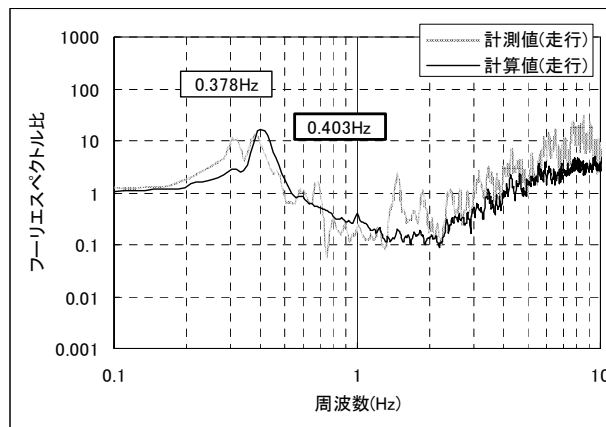
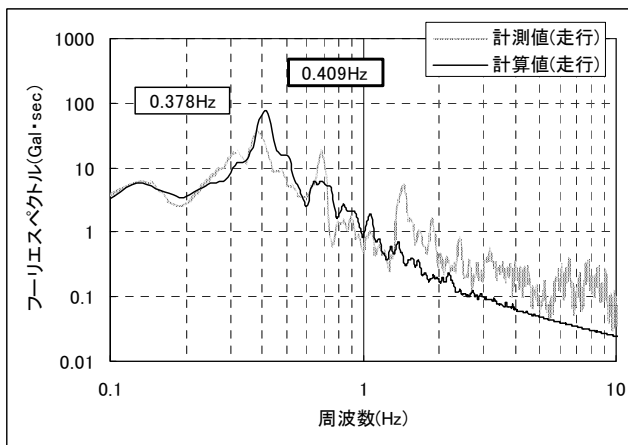
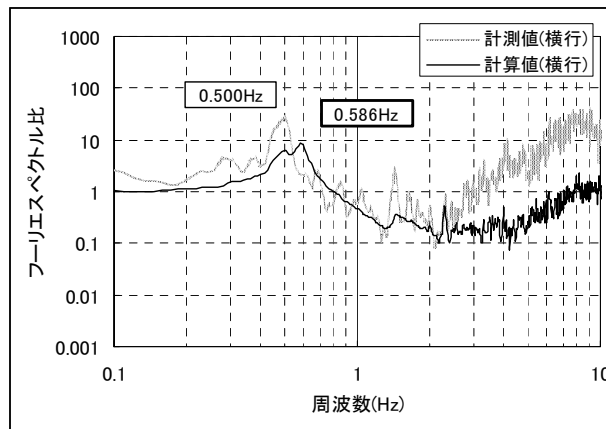
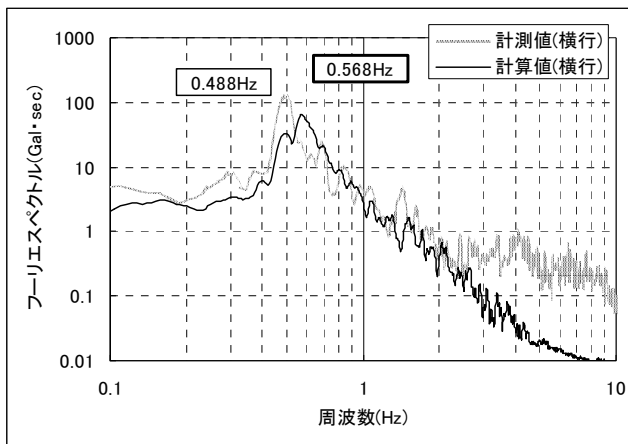


図-3.23 S港クレーンフーリエスペクトルの比較
 (クレーンモデル：休止時)

図-3.24 S港クレーン伝達関数の比較
 (クレーンモデル：休止時)

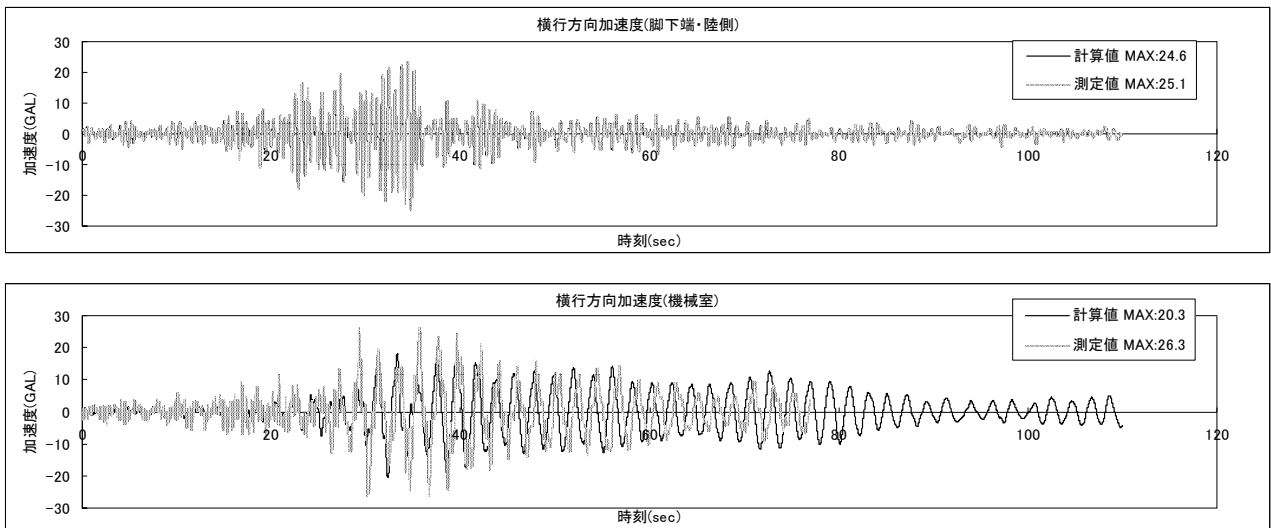


図-3.25 T港クレーン(休止時)応答加速度(横行方向)の比較

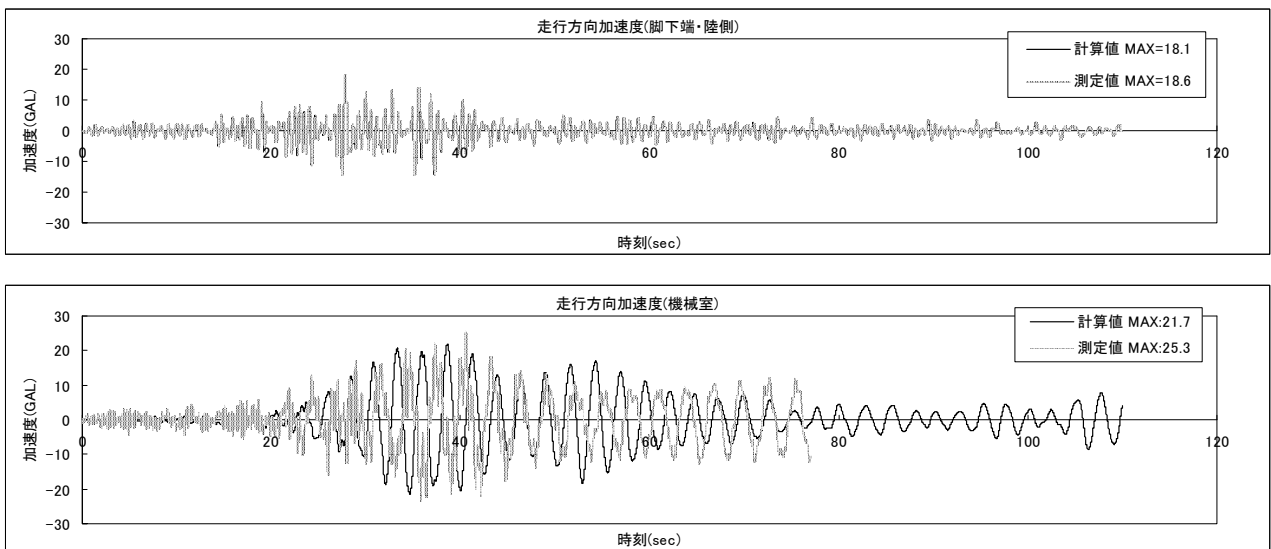


図-3.26 T港クレーン(休止時)応答加速度(走行方向)の比較

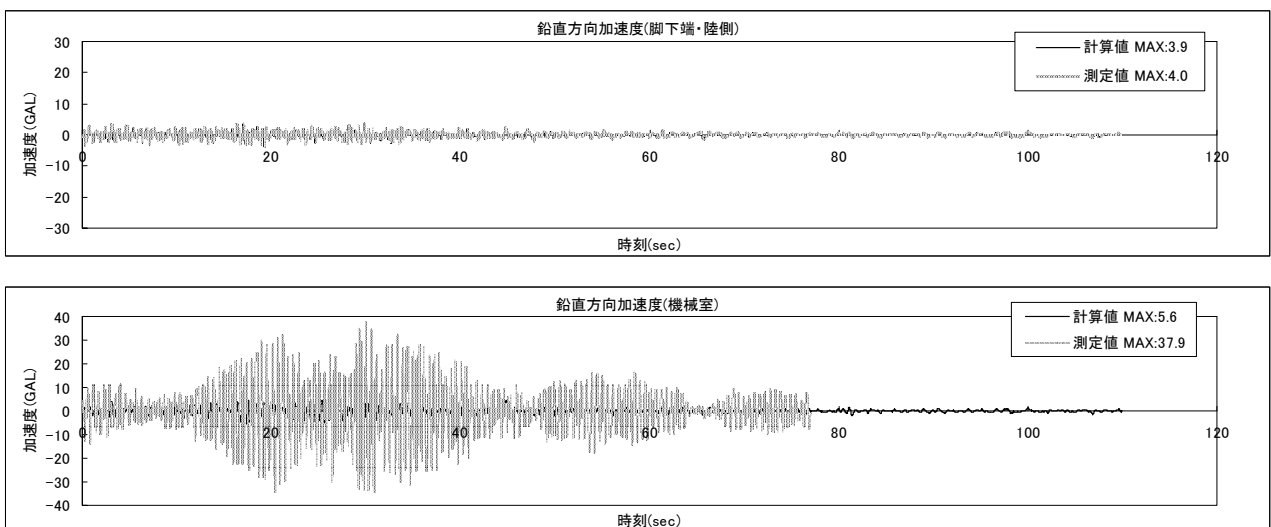


図-3.27 T港クレーン(休止時)応答加速度(鉛直方向)の比較

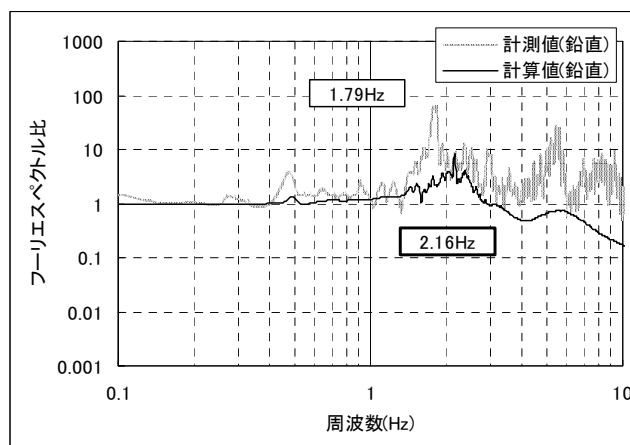
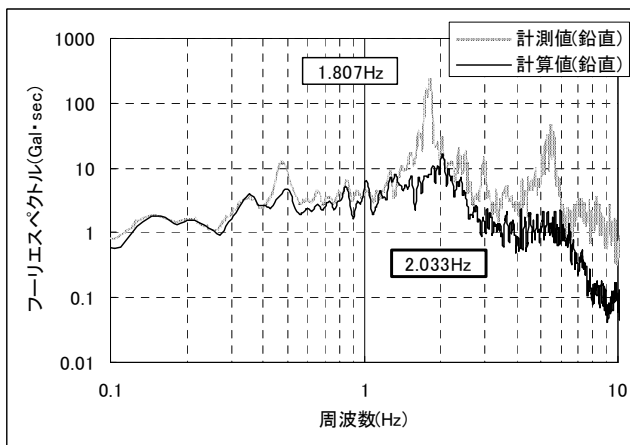
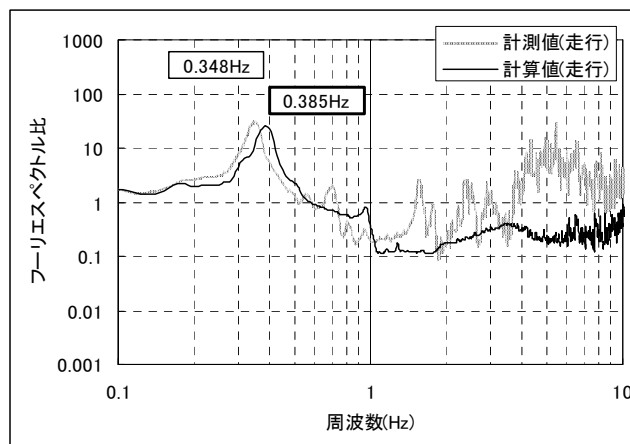
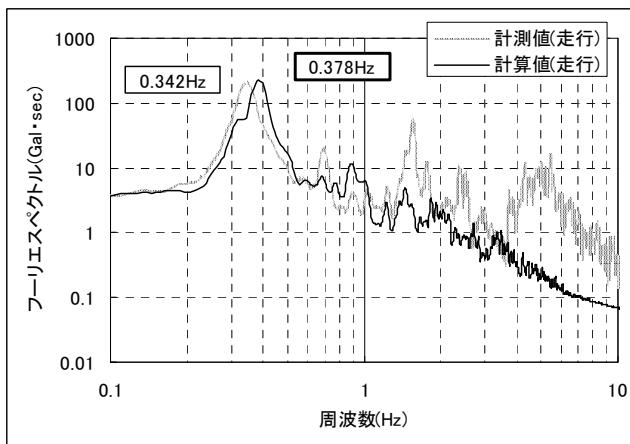
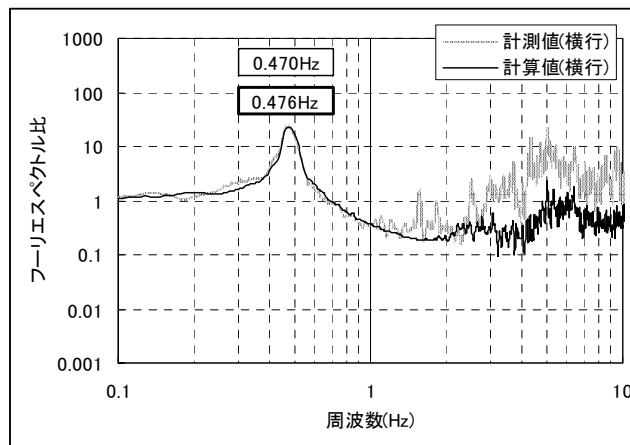
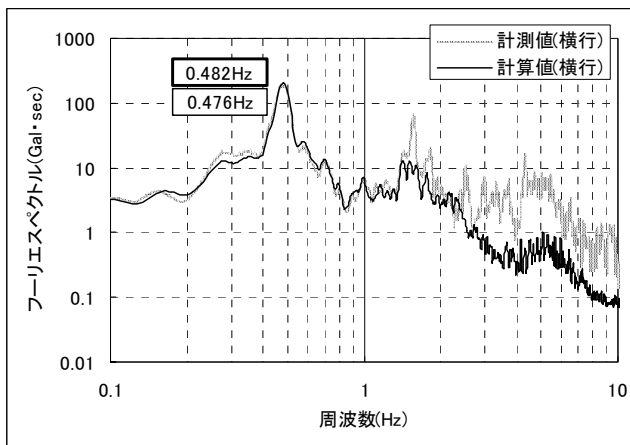


図-3.28 T港クレーンフーリエスペクトルの比較
 (クレーンモデル：休止時)

図-3.29 T港クレーン伝達関数の比較
 (クレーンモデル：休止時)

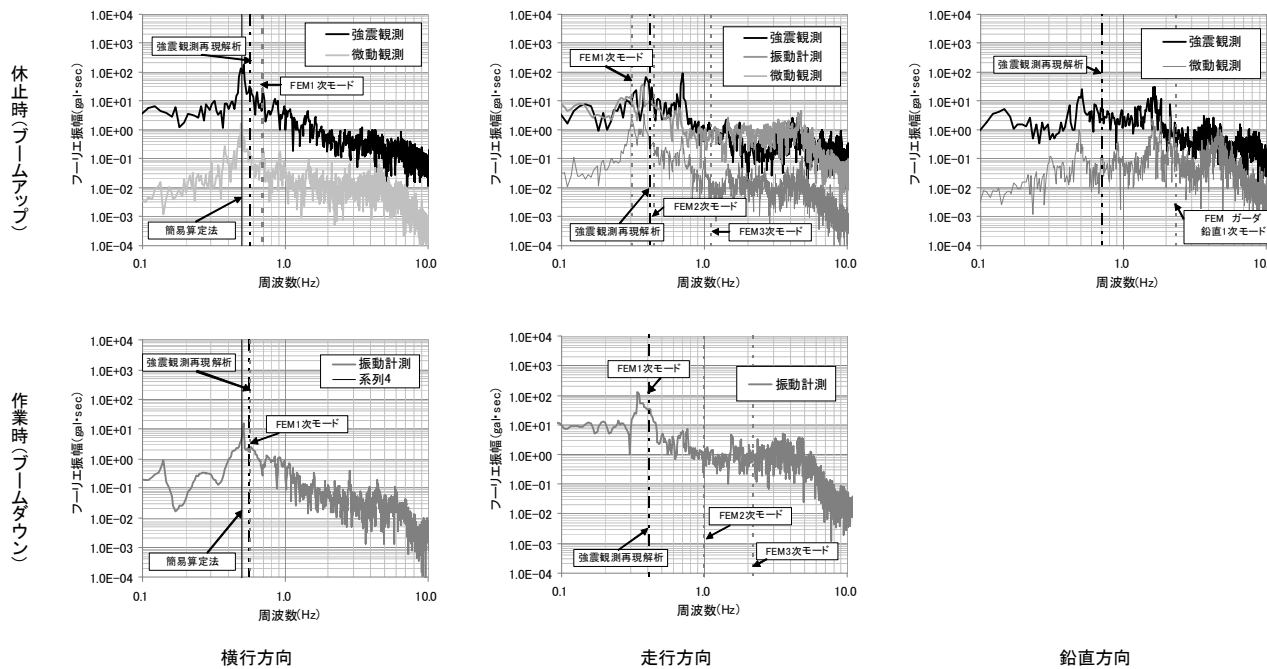
3.4. まとめ

(1)実機コンテナクレーンの固有周期・減衰定数の評価

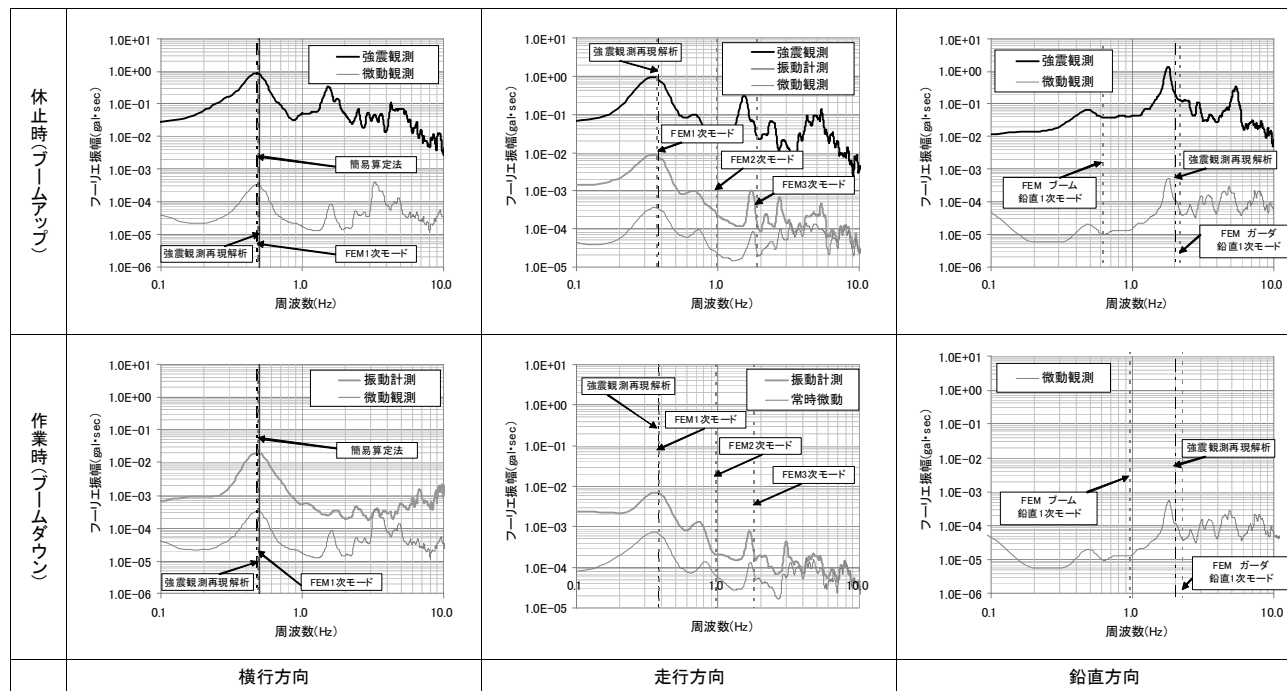
a)固有周期 (固有振動数)

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.



(a) S港クレーン



(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

	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	0.48Hz (2.08sec)	-	-	0.46Hz (2.17sec)	0.49Hz (2.04sec)	0.48Hz (2.08sec)	0.49Hz (2.04sec)
走行方向	0.35Hz (2.86sec)	-	0.34Hz (2.94sec)	0.34Hz (2.94sec)	0.37Hz (2.94sec)	0.38Hz (2.68sec)	6.67Hz (0.15sec)
鉛直方向	0.49Hz (2.04sec)	-	-	0.48Hz (2.08sec)	0.62Hz (1.61sec)	0.62Hz (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