

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1289 September 2014

低頭型コンテナクレーンの大規模地震時挙動に関する
模型振動実験及び数値解析

小濱 英司
安藤 和彰
菅野 高弘
羽田 大作
佐藤 宗史

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 既存低頭型コンテナクレーンの振動特性.....	4
2.1 オークランド港における低頭型クレーン	4
2.2 振動観測	5
3. 模型振動実験	9
3.1 実験模型および実験条件	9
3.2 振動模型による固有値実験結果.....	15
3.3 地震動加振による実験結果.....	16
4. 数値解析および模型実験との比較.....	18
4.1 3次元フレームモデル	18
4.2 3次元フレームモデルによる固有値解析	20
4.3 地震応答解析と模型振動実験の比較.....	21
5. まとめ	25
参考文献	26
付録A	26

Model Shake Table Test and Numerical Analysis on Dynamic Behavior of Low-Profile Container Crane during Strong Earthquakes

Eiji KOHAMA*
Kazuaki ANDO**
Takahiro SUGANO***
Daisaku HANEDA**
Soshi SATO**

Synopsis

There are limited surfaces, such as a conical surface and the approach surface is in the area around airports, setting a limit to the height of buildings. If there is a container wharf in that area, a low-profile container crane shall be employed, which does not include A-frame supporting tension bars and does not raise a boom to be suspended. A low-profile container crane has not been introduced into Japanese ports and its seismic property during earthquakes, which is important to design structures in our country, is unclear; the dynamic response behavior during a level 2 earthquake in Japanese technical standards for port structures has not been clarified. Base isolation mechanisms have been introduced into container cranes in high earthquake-resistance facilities and, however, applicability of base isolation mechanism to a low-profile crane has not been investigated.

Vibration was observed in an actual low-profile container crane, to confirm the vibration characteristics in this research. It was confirmed that natural period of the low-profile crane is shorter than conventional container cranes. Preparing a 1/16 scale model of low-profile crane with reference to the information obtained in the vibration observation, dynamic behavior during large earthquakes and applicability of seismic isolation and boom slides mechanism were examined with model shake table tests. Numerical analysis with a three-dimensional frame model was examined to confirm reproducibility of experimental results such as response acceleration, leg load and seismic isolation displacement.

Key Words: Low-profile container crane, model shake table test, numerical analysis

* Group Reader, Earthquake and Structural Dynamics Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering Field
** Material Handling Machinery Factory, Machinery and Systems Headquarter, Mitsui Engineering and Shipbuilding Co., Ltd.
*** Director for Special Research
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5058 Fax : +81-46-844-0839 e-mail:kohama-e83ab@pari.go.jp

低頭型コンテナクレーンの大規模地震時挙動に関する 模型振動実験及び数値解析

小濱 英司*・安藤 和彰**・菅野 高弘***・羽田 大作**・佐藤 宗史**

要 旨

空港周辺の区域においては進入表面や円錐表面などの制限表面の設定があり，建物等の高さが制限される．コンテナ埠頭がこのような区域にある場合には，休業時にブームを起立させず，テンションバーやAフレームも有しない低頭型のコンテナクレーンを採用することが考えられる．しかし，低頭型コンテナクレーンは国内で導入された事例は無く，我が国の構造物設計において重要となる地震時の動的性質は不明である．現行の港湾基準で想定されるレベル2地震動のような大きな地震動に対する挙動や，近年耐震強化施設において標準的となっているコンテナクレーン免震装置の適用性については明らかにされていない．

本研究においては，低頭型コンテナクレーンの実機における振動観測を行い，その振動特性を確認し，通常のコンテナクレーンよりも固有周期が短い傾向であることを確認した．そこで得られた情報を参考にして1/16スケールの低頭型コンテナクレーン模型を作製し，模型振動実験によりレベル2地震動クラスの大規模地震時における動的挙動の把握と，免震装置やブームスライド機構の適用性について検討した．また，3次元フレームモデルを用いた数値解析を行い，応答加速度や脚荷重，免震装置部変位等の模型振動実験結果の再現性を確認した．

キーワード：低頭型コンテナクレーン，振動台模型実験，数値解析

* 地震防災研究領域 耐震構造研究チームリーダー

** 三井造船株式会社 機械・システム事業本部 運搬機工場

*** 特別研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5058 Fax：046-844-0839 e-mail:kohama-e83ab@pari.go.jp

1. まえがき

通常のコンテナクレーンは船舶の離岸・着岸時における支障とならないよう、荷役作業時以外の休業時はブームを直立に起立させる。しかし、港湾周辺に空港や航空基地が存在する場合、その進入表面や円錐表面等の制限表面によって建築物の高さが制限され、コンテナクレーンがそれに抵触する場合がある。国外のいくつかの港湾では、コンテナ埠頭がこのような区域にあり、休業時においてブームを起立させず、テンションバーを支えるAフレームも無い、低頭型のコンテナクレーンが採用されている。国内ではこれまで、高さ制限のある区域には、休業時にブームを直立させずに中間で折り曲げて高さを抑える中折れ式が用いられており、低頭型コンテナクレーンが導入された事例は無い。しかしながら、船の大型化に伴ってコンテナクレーンも近年大型化しており、今後は中折れ式コンテナクレーンでも対応が困難となることが考えられる。

コンテナクレーンは、1995年兵庫県南部地震で神戸港において甚大な被害を受けたことから、その地震時挙動に関する研究が精力的に行われてきた（江頭ら（1999）、中山ら（2001）、菅野ら（2003）など）。クレーンの設計においては、岸壁への載荷重の制約があるため、部材断面を大きくして耐震性を向上させる方法は望ましくないことから、重量の増加を伴わない免震装置を適用した耐震性向上の技術開発がなされた。この成果により、その後整備された耐震強化施設のコンテナ埠頭においては、免震装置が導入されたコンテナクレーンを設置することが一般的となっている。

港湾におけるコンテナクレーンは、もともと、厚生労働省が所管するクレーン構造規格（日本クレーン協会（1997））に基づき、震度法による耐震設計が行われてきた。しかし兵庫県南部地震での被害や今後の巨大地震発生への逼迫性を受け、岸壁だけでなく荷役機械等の付帯施設も含めた地震時の一体的な港湾機能の確保が必要となり、平成19年の港湾の施設の技術上の基準の改訂においてコンテナクレーンを含めた荷役機械が港湾技術基準の対象施設に加えられた（日本港湾協会（2007））。同改訂時においては、設計において想定する地震動の考え方も大きく変更され、これまでのような設計震度ではなく、構造物の設置される区域ごとに異なる地震の震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性を考慮した地震動波形が用いられることとなった。よって、コンテナクレーンの検討においてもこのような地震動を考慮する必要があり、さらに、クレーンレールが配置される岸壁の動的応答特

性が反映された地震動を用いることが求められる。耐震強化施設としてコンテナクレーンを設置する場合には、近年では、このような地震動を用いた3次元モデルによる地震応答解析が行われることが多い（宮田ら（2010））。

このような背景の下、国内においては、低頭型コンテナクレーンを導入する場合においても港湾基準で想定する地震動に対応した設計を行うことが必要であり、その地震時動的挙動を十分に把握しなければならない。低頭型クレーンについては、Takenobu et al.（2011）が走行方向および横行方向の基本的振動形態を検討している。耐震強化施設として設置する場合には、大規模地震時における振動特性の把握と、耐震性強化のための免震装置の適用性についても考慮する必要がある。本研究においては、低頭型コンテナクレーンの動的特性把握のため、米国オークランド港に設置されていた実機における振動観測を行い、その固有周期等を把握する。この結果を参考として、1/16スケールの低頭型コンテナクレーン模型を作製し、模型振動実験によりレベル2地震動クラスの大規模地震時における動的挙動の把握と免震装置の適用性を検討する。また、3次元モデルを用いた数値解析を行い、応答加速度や脚荷重、免震装置部変位等の模型振動実験結果の再現を検討する。

2. 既存低頭型コンテナクレーンの振動特性

低頭型コンテナクレーンは、アメリカのボストン港、オークランド港、マイアミ港、エバングレイズ港、イタリアのジェノバ港、カリアリ港等に存在する。これらの港湾の近傍には空港が存在し、高度制限の厳しい設置個所であることから、通常のコンテナクレーンではなく低頭型クレーンが用いられている。本章では、アメリカオークランド港での低頭型クレーンについて紹介し、その機上で観測された振動計データをもとに、その振動特性について考察する。

2.1 オークランド港における低頭型クレーン

オークランド港における低頭型コンテナクレーンは、Ben E. Nutter ターミナルに配置されていた（写真-2.1、図-2.1）。ここは、かつて Alameda 海軍航空基地が隣接しており、その高度制限から、コンテナクレーンとして二種類の低頭型が用いられていた（写真-2.2、2.3、表-2.1）。現在では海軍航空基地が閉鎖されたことから、これらはすでにオークランド港からは撤去されており、KOCKS 社製クレーンはボストン港に移設されている。

低頭型クレーンは、大きく分けて横行桁（ブーム）と走行部（ポータルフレーム）の二つの構造部からなる。荷役作業時にはブームを海側に押し出してその上をトロリーが横行することによりコンテナ荷役が行われ、休止時にはコンテナ船の離着岸の支障とならないようにブームが陸側に引き戻される。一般的な岸壁上のコンテナクレーンと異なり、ブームの位置によってアウトリーチ、バックリーチの大きさが変化する。荷役作業時にアウトリーチを最大となるようブームを海側に完全に出した場合にはバックリーチは無い状態となり、バックリーチを確保するには、ブームを海側に完全に出し切らない状態とする必要がある。これらの低頭型クレーンは震度法等による耐震検討はされていると考えられるが、免震構造等は導入されていない通常タイプのクレーンである。

PACECO 社製クレーンは 1960 年代に建造されたオークランド港での最初の低頭型クレーンであり、パナマックス対応の仕様となっている（図-2.2）。ブーム材はサポートトラックと車輪を含むハンガーシステムにより支えられており、常に車輪に乗った状態となっている。このクレーンにおいては、全ての機械、電気装置がブーム上に配置されている。これらは荷役作業時・休止時のブームの稼働とともに海側・陸側に移動するため全体の重心位置も移動し、陸側の輪荷重の増減が大きい傾向にある。

KOCKS 社製の低頭クレーンはオーバーパナマックス対応であり、1980 年代に建造された（図-2.3、写真 2.4～2.7）。重量は 1200tf 程度である。このクレーンでは、PACECO 社製とは異なり、機械装置をブーム上ではなく走行部（ポータルフレーム）側に設置しており、荷役作業時・休止時のブーム移動による輪荷重の増減が小さくなるように図られている。一般にパナマックス対応低頭型クレーンでの作業時・休止時のブームの動きは約 125 フィート（約 37.5m）であるが、オーバーパナマックス対応では約 170 フィート（約 51m）に達する。このため、オーバーパナマックス対応のブーム重量は輪荷重への影響が大きい。KOCKS 社製クレーンにおいては、メインホイストと電気装置を走行部側に設置することにより、ブーム重量を低減している。メインホイストのモータとギアボックスは、ブーム脇にある機械室（サドルバッグ）に収納されている。メインホイストのドラムは直接ブームに設置され、ロープはブームの頂上に沿って設置されている。ブーム材は PACECO 社製と同様にサポート部によって支えられている（写真-2.6）。表-2.2 に、エバングレイズ港に設置されている同タイプのオーバーパナマックス対応機との諸元の比較を示す。輪荷重は同タイプ機で荷役作業時 100tf/輪、暴風時 120tf/輪となっており、

オークランド港 KOCKS 社製低頭クレーンも同等であると考えられる。

2.2 振動観測

オークランド港における低頭型コンテナクレーンのうち KOCKS 社製クレーンについて、振動観測による固有振動数特性の検討を行った。KOCKS 社製クレーンは、調査実施当時において 3 機設置されており（X424, X425, X426）、そのうちの X424（荷役作業状態、ブーム海側）について調査を実施した。振動観測には白山工業製の震動計を用い、1 時間程度の観測を行った（写真-2.8）。震動計はコンテナクレーンの重心位置に近いと考えられるブーム上の通路に固定して観測を行った（写真-2.9、2.10）。

振動観測結果を図-2.4 に示す。図中の約 300s まではクレーンは稼働しておらず、ほとんど振動は見られない。その後、振動計測中のクレーンにおいて荷役作業が開始され、それに対応して大きいもので 100Gal を超える振動が観測された。この振動観測結果をフーリエ変換したものを図-2.5～2.7 に、各方向のピーク周波数、周期をまとめたものを表-2.3 に示す。図のように、走行方向のピーク周波数は 0.43Hz, 0.6～0.68Hz, 1.47Hz あたりにあり、鉛直方向では 1.11Hz あたりに見られる。横行方向の 1 次固有周期は 0.60Hz に見られた。これは固有周期で 1.67s であり、宮田ら（2009）が示したコンテナクレーン自重と横行方向固有周期の関係（図-2.8）に加筆すると、既往の通常クレーンと比較して重量がやや重く、通常クレーンの固有周期の平均約 2s よりも短い剛な構造であることが分かる。

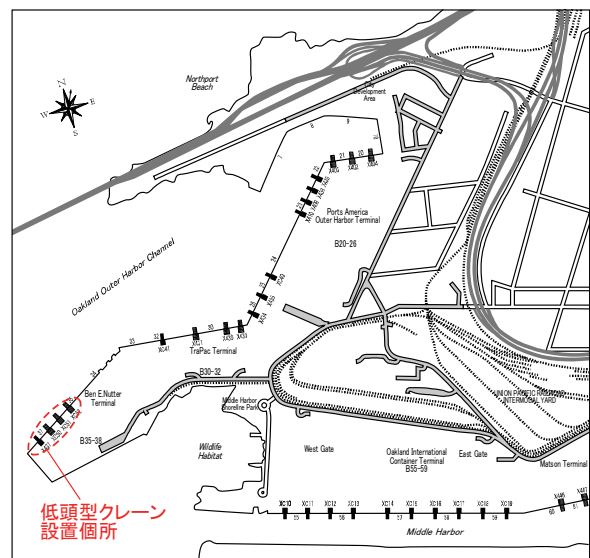


図-2.1 オークランド港 Ben E. Nutter ターミナル

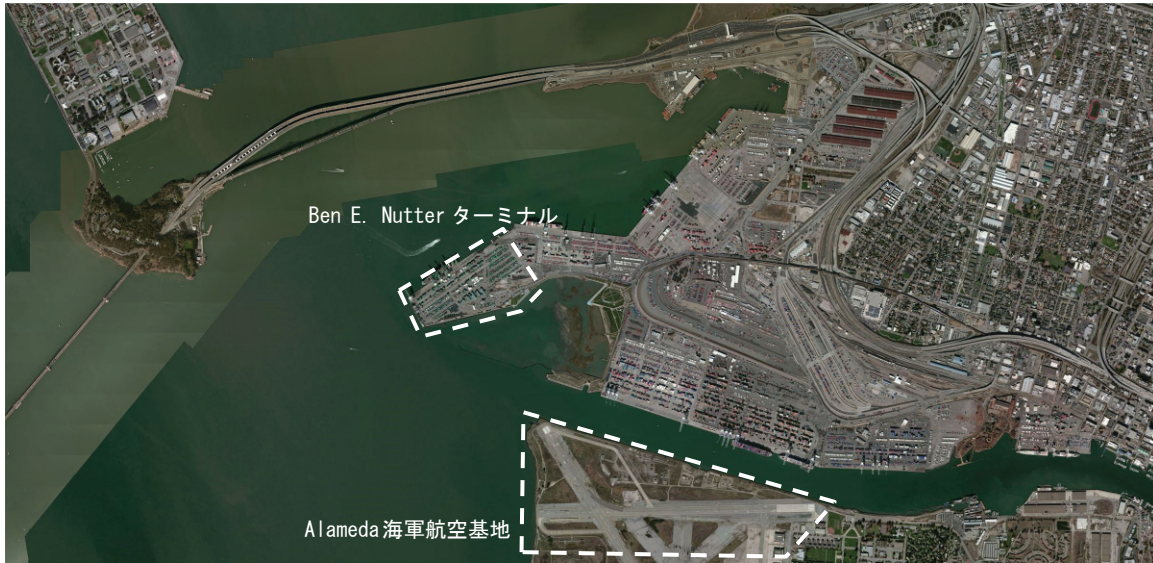


写真-2.1 オークランド港 Ben E. Nutter ターミナル周辺図

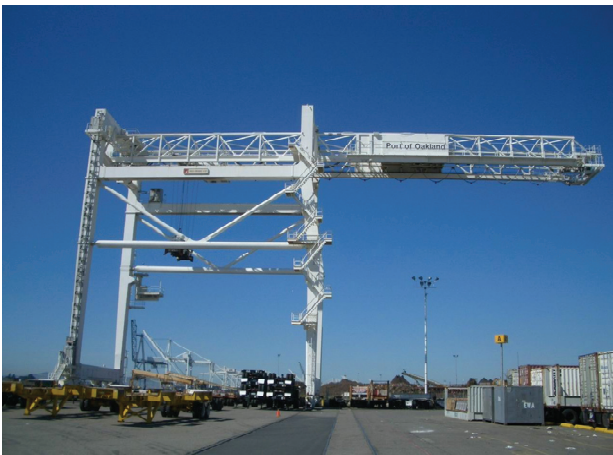


写真-2.2 PACECO 社製クレーン (Port of Oakland 提供)

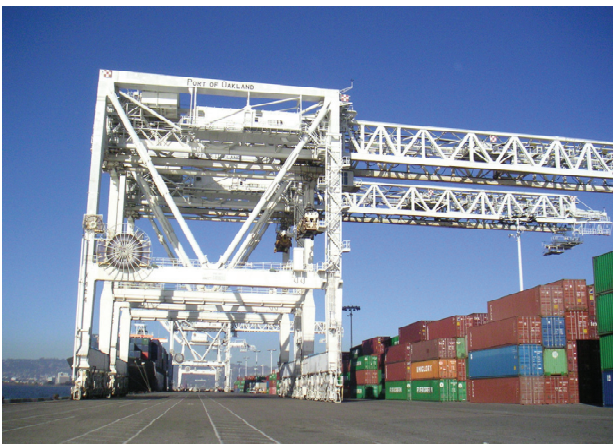


写真-2.3 KOCKS 社製クレーン (Port of Oakland 提供)

表-2.1 クレーンの仕様

Manufacturer	製造元	PACECO 社 (Ser.No. 395)	KOCKS 社 (Ser.No. 73228)
Year	建造年	1968 年	1988 年
Type	タイプ	低頭型	低頭型
Capacity	容量	約 40t	約 50t
Overall Width	幅(走行方向)	31.1m	26.4m
Max.Outreach	最大アウトリーチ	35.1m	45.8m
Back Reach	バックリーチ	26.2m	12.2m
Clear between Legs	走行方向のクレーン脚の間隔	15.1m	17.7m
Clear under P.Beam	レール面からポータルビームまでの高さ	19.5m	13.7m
Rail Gauge	レール幅	30.5m	29.3m
Power Supply	供給電源	交流 4160V 60Hz	交流 4160V 60Hz
Power Feeder Type	給電線	集電器	ケーブルリール
Lift over Dock	レール面からの揚程	31.4m	30.5m
Lift overall	全揚程	47.2m	59.8m
Overall Height to Top	クレーン高さ	39.0m	39.7m
Hoist Speed (50LT)	巻き上げ速度(50LT 時)	45.7m/min	48.8m/min
Hoist Speed (empty)	巻き上げ速度(コンテナなし)	73.2m/min	111.3m/min
Trolley Speed	トロリーの移動速度	125m/min	183m/min
Spreader	コンテナの吊り具	Ropco 20'-40'	Bromma 社
Drive Manufacture	ドライブ装置製造者	P&H 社	ABB 社

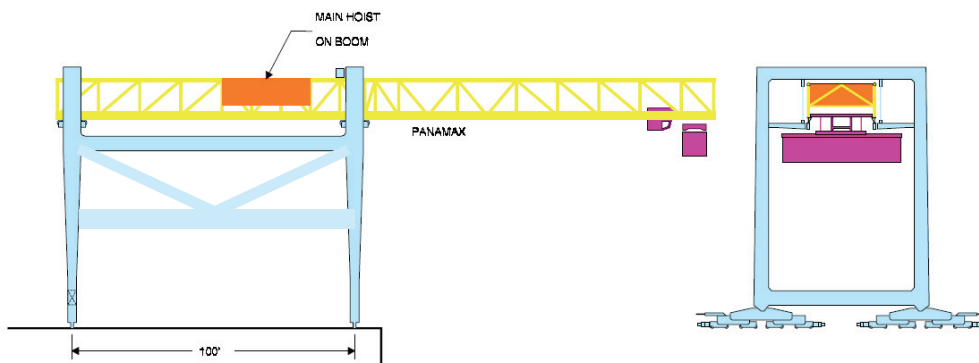


図-2.2 PACECO 社製クレーン模式図

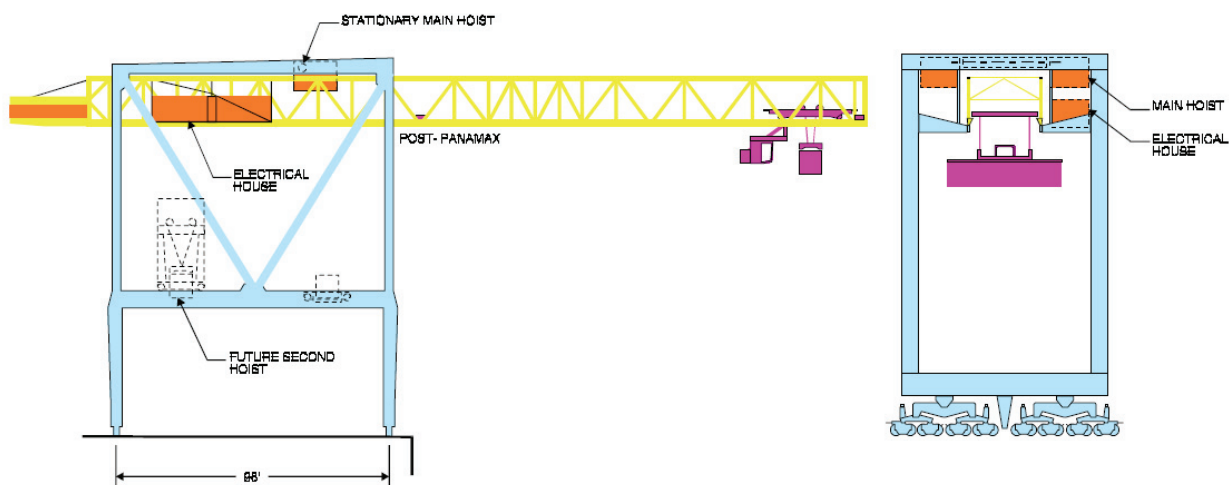


図-2.3 KOCKS 社製クレーン模式図

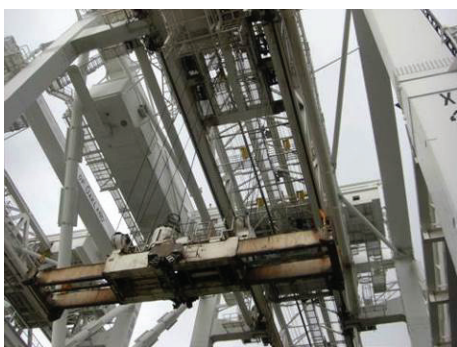


写真-2.4 吊金具 (KOCKS 社製クレーン, X425)

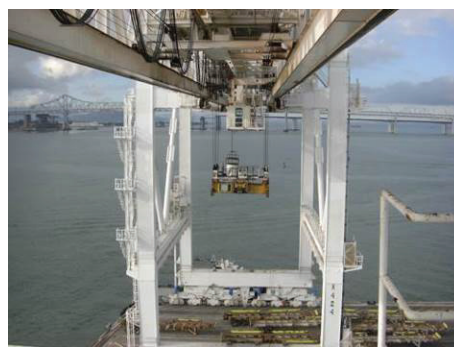


写真-2.5 ブーム陸側後端からの海側の状況 (KOCKS 社製クレーン, X424, 休止時)

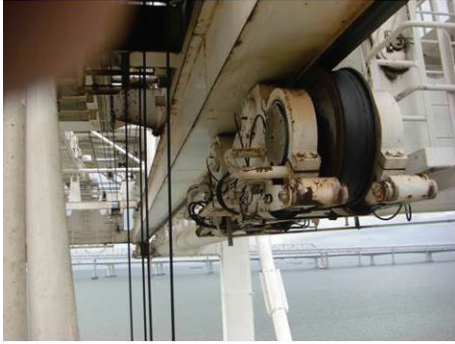


写真-2.6 ブームとサポート部の構造 (KOCKS 社製クレーン, X424)



写真-2.9 震動計のブーム上への設置状況



写真-2.7 ブームの構造 (KOCKS 社製クレーン, X424)



振動計測位置

写真-2.10 震動計の設置位置

表-2.2 同型低頭型クレーンとの仕様比較

	KOCKS 社製クレーン Port of Oakland	同タイプの低頭型クレーン Port Everglades
レールスパン	29.26m	30.48m
アウトリーチ	45.72m	44.4m
吊高さ	30.48m	32.3m
吊能力	50LT	40LT
全高さ	40.23m	46m
重量	約 1200tf	1270tf
輪荷重		荷役作業時: 陸側 61tf/輪 海側 111tf/輪 暴風時: 陸側 121tf/輪 海側 83tf/輪



写真-2.8 振動観測に用いた震動計

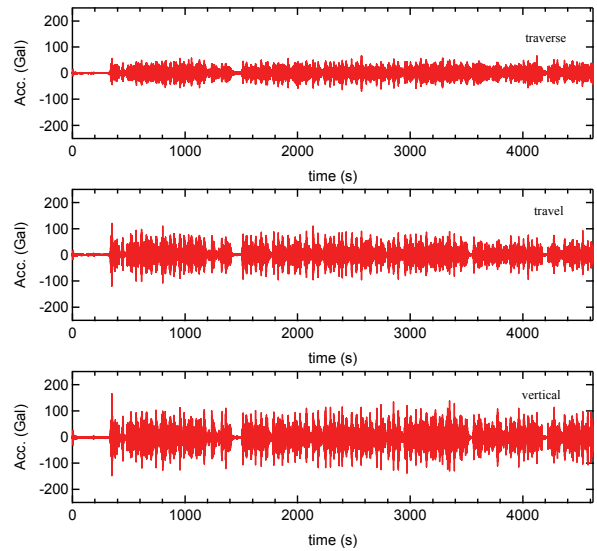


図-2.4 観測された振動波形

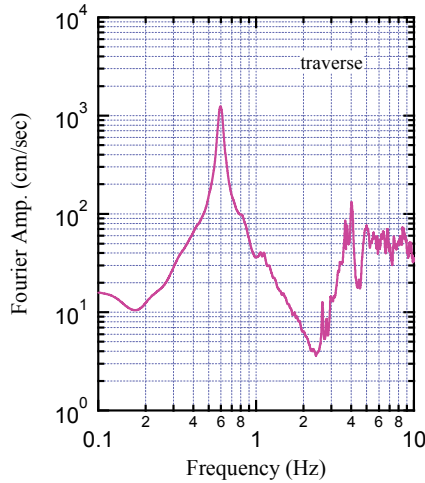


図-2.5 観測された振動のフーリエスペクトル
(横行方向)

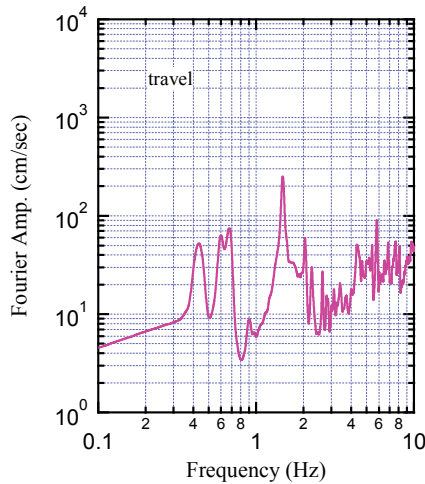


図-2.6 観測された振動のフーリエスペクトル
(走行方向)

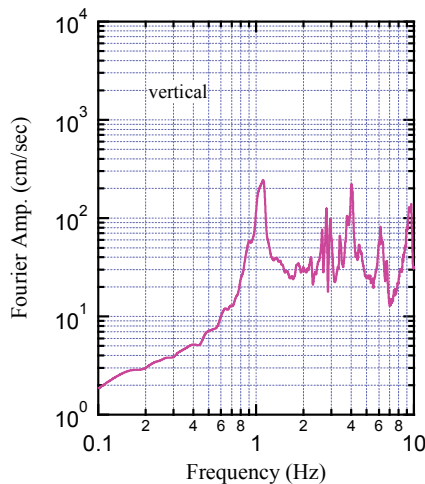


図-2.7 観測された振動のフーリエスペクトル
(鉛直方向)

表-2.3 振動観測結果

方向	周期	振動数
横行 (岸壁法線直交)	1.67s	0.60Hz
走行 (岸壁法線)	2.33s	0.43Hz
	1.67s	0.60Hz
	1.48s	0.68Hz
鉛直	0.68s	1.47Hz
鉛直	0.90s	1.11Hz

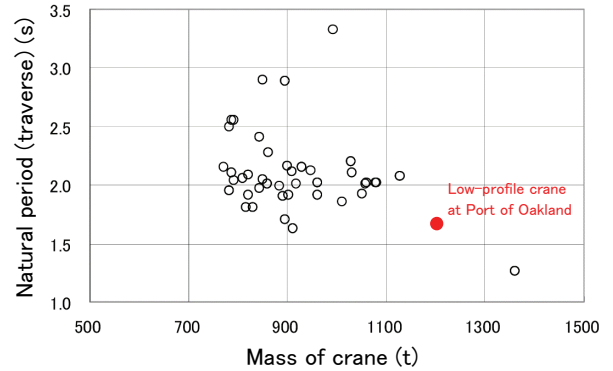


図-2.8 クレーン重量と横行方向固有周期の関係
(宮田ら (2009) に加筆)

3. 模型振動実験

3.1 実験模型および実験条件

模型作成においては、表-3.1に示されるような実物規模の低頭型クレーンを想定した。クレーン構造は、オークランド港での現地調査等で得られた低頭型コンテナクレーン実機の構造諸元を参考として、脚、ブーム、および走行装置から構成される形状とした(図-3.1)。脚はアッパービーム、海・陸側脚、斜材、ポータルビーム、シルビームで構成される。模型スケールは1/16とし、表-3.2に示される相似則を考慮して寸法等を決定した。模型の部材の材質は、普通鋼材(SS400)を用いている。模型構造図を図-3.2に示す。模型質量は表-3.3に示されるようであり、主構造と実機における機械装置等の付属物を模した錘を合わせて、520kgとなった。模型への錘配置位置を図-3.3に示す。トロリーはブームの最も海側に位置する状態を想定した。クレーンの脚浮上りや部材応力において吊荷重量も影響するが、本実験では低頭型クレーンの基本的な動的挙動の把握と免震機構の有効性確認を目的とし、ここでは考慮していない。

クレーン模型外観は写真-3.1、写真-3.2に示される通りであり、作業時および休業時の二種類の形体(姿勢)

に変更できるよう、ブーム位置を海側および陸側に移動できる構造とした。

低頭型クレーンへの免震装置の適用性を検討することを目的として、模型シルビームと走行装置の間に免震装置を適用することとした(図-3.4)。免震装置は主に、側方への変位を可能とするリニアガイドと復元力を発揮させるためのばねから構成される。ばねにはばね定数 3.707kN/m の圧縮コイルばねを用い、受圧版の両側に一つずつ配置しており、各走行装置部に配置した一つの免震装置あたりのばね定数 7.414kN/m とした。模型質量 520kg を考慮し、四つの免震装置のばね定数を合わせ、一自由度系としてこの免震装置稼働時の固有周期を求めると、実物スケールにおいて 3.3s 程度(模型スケール 0.83s)となる。この免震装置模型は固定が可能な構造としており、免震部が稼働しない非免震クレーンとして実験も行えるようにした。

また、通常低頭クレーンでは荷役作業時・休止時においてブームは固定されているが、本検討においては、ブームをクレーン振動を抑えるマスダンパーとして考慮し、地震中においてブームが移動できる状態での動的応答についても検討した(写真-3.3)。ブームスライド稼働部には、復元力として 0.49kN/m のコイルばねを適用した。

模型への計測器配置を図-3.5に示す。加速度計はブーム(先端、後端、作業時重心位置付近、休業時重心位置付近、等)、陸側脚と海側脚コーナー部のアップービーム、ポータルビーム、シルビーム部に配置する。変位計にはレーザー変位計を用い、脚浮上り時の鉛直変位、シルビーム下免震装置位置の変位、ブーム稼働時のブームの脚フレームとの相対変位を計測した。シルビーム下部においては、免震装置の上部・下部での変位を計測して免震装置位置での相対変位を計測できる配置とした(写真-3.4)。また、荷重計(ロードセル)をレール下部に配置し(各脚につき3点配置)、各脚部の鉛直方向と横行方向の荷重を計測した(写真-3.5)。また、各脚のポータルビームより上部にひずみゲージを貼付し、脚部材の変形を計測した。ひずみゲージは脚部材の海側と陸側に一枚ずつ貼り付け、それぞれに計測することで伸縮成分と曲げ成分を算定できるようにしている。

実験に用いた地震動の時刻歴およびフーリエスペクトルを図-3.6~図-3.11示す。これらは、震源、伝播経路、サイト増幅の特性を考慮して作成された工学基盤地震動により算出された地表(レール位置)でのレベル2地震規模の地震動である。地震波は3種類あり、それぞれ異なる震源が動いた時の地震動である。M6.5直下地震は、

マグニチュード 6.5 の断層がサイト直下で生じた場合を想定したものであり、シナリオ 1, 2 地震は他の断層が動いた場合を想定している。実験においては、時間の相似率 1/4(表-3.2 参照)を適用して時間軸を短縮して模型スケールに換算したものをを用いた。

実験ケースを表-3.4にまとめる。クレーン姿勢、シルビーム下免震装置、ブームスライド機構に応じて6ケースについて検討した。クレーン姿勢はブームの位置を示し、作業時ではブーム位置を海側とし、休業時では陸側としている。

表-3.1 想定するクレーン諸元

対象船舶	8000TEU クラス
コンテナ	18 列×6 段
クレーン総重量	約 2000t
レールスパン	43.5m
クレーン高さ	50m

表-3.2 適用相似則

物理量	実機/モデル	縮尺比
長さ		1/16
時間	1/2	4
加速度	1	1
重量	1/3	4096
曲げ剛性	1/5	1048576
ばね定数	1/2	256

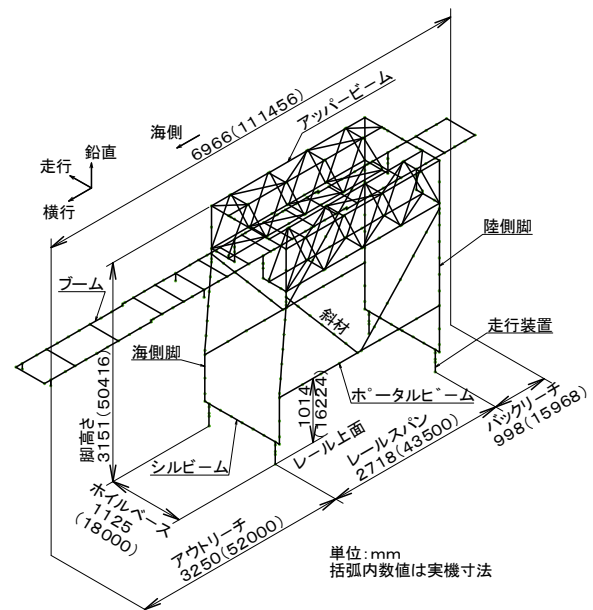


図-3.1 模型寸法および形状

表-3.3 模型質量

部位		数量 (個)	単位質量 (kg/個)	質量 (kg)	
構造物	ポータル	1	150	150	
	ブーム	1	90	90	
	計			240	
集中質量	電気室	ポータル	2	18.5	37
	機械室	ブーム	2	6	12
	走行装置	ポータル	4	8.75	35
	免震装置	ポータル	4	3.75	15
	トロリ	ブーム	2	2.5	5
	付加質量1	ポータル	4	20.75	83
	付加質量2	ブーム	2	32.5	65
	付加質量3	ポータル	4	7	28
計				280	
合計				520	

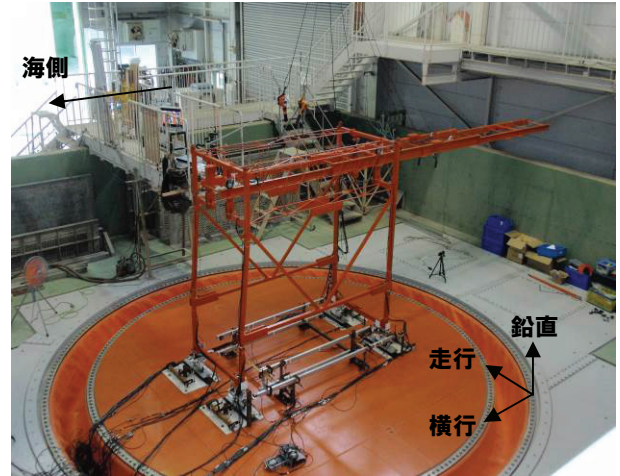


写真-3.2 クレーン模型 (休止時)

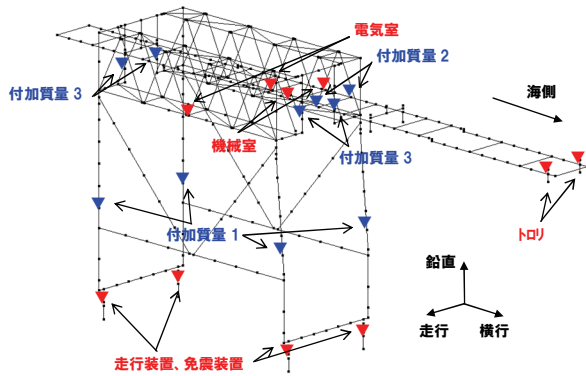


図-3.3 模型への錘の配置

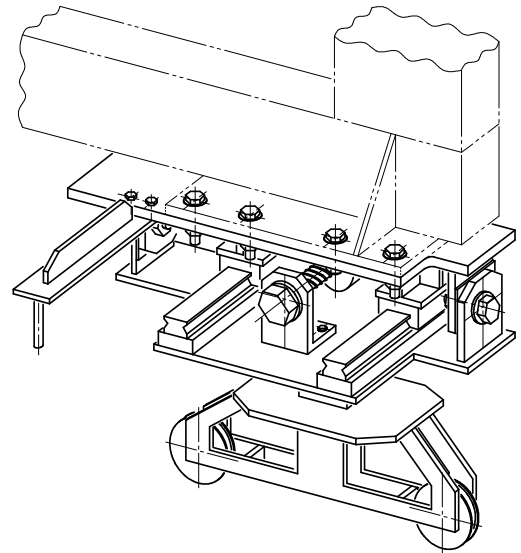


図-3.4 シルビーム下免震装置構造図

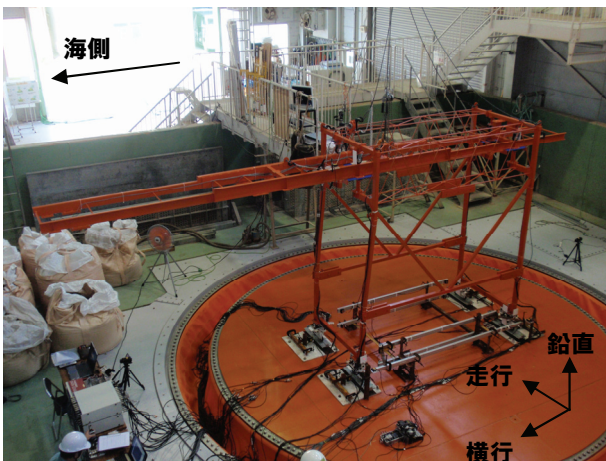


写真-3.1 クレーン模型 (作業時)

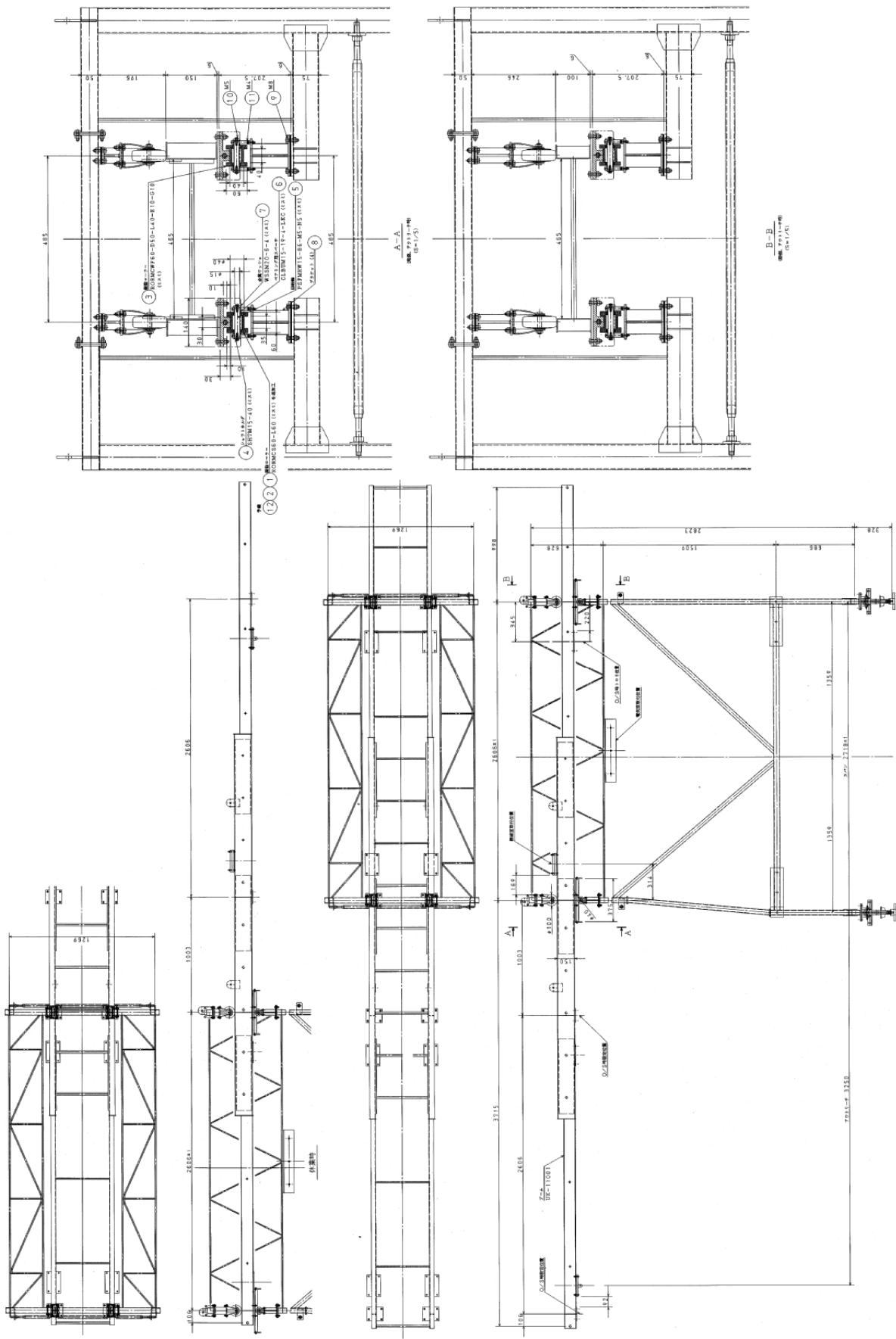


図-3.2 クレーン模型構造図



写真-3.3 ローラー支持によるブームの稼働



写真-3.4 レーザー変位計による免震装置上下での変位計測

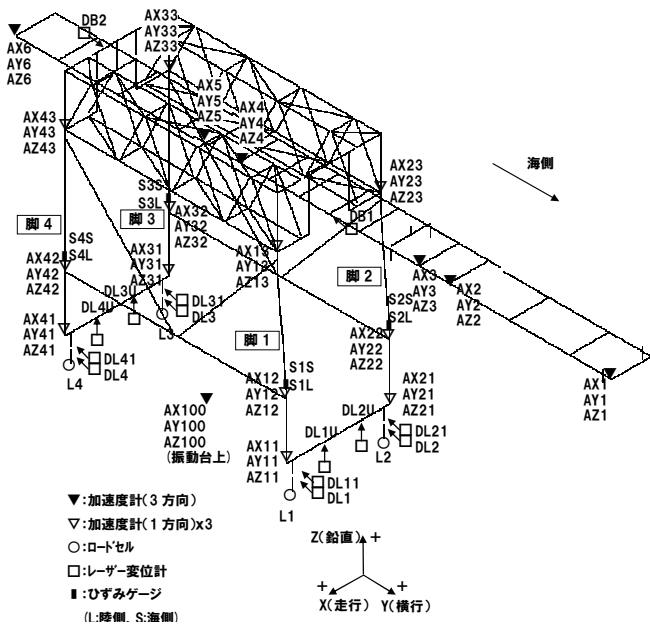


図-3.5 計測器配置



写真-3.5 レール下に設置したロードセル

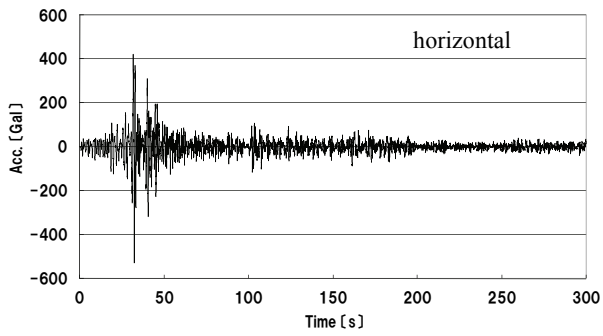


図-3.6 M6.5 直下地震

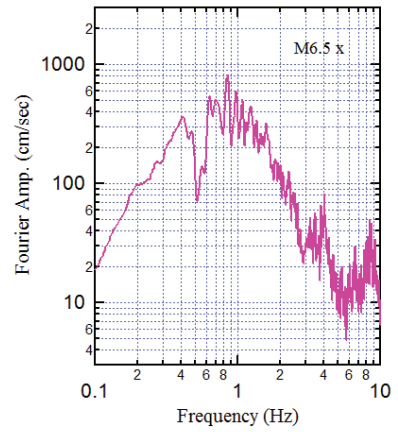


図-3.9 M6.5 直下地震

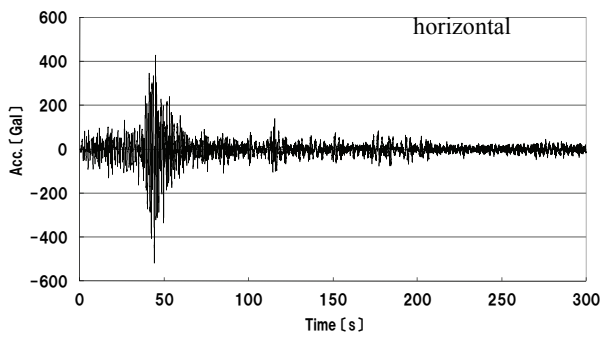


図-3.7 シナリオ 1 地震

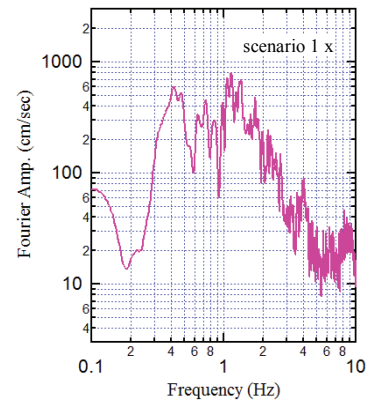


図-3.10 シナリオ 1 地震

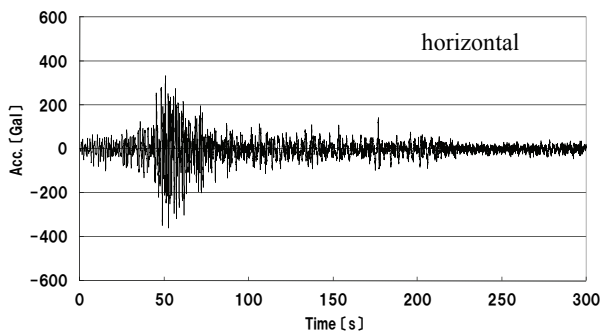


図-3.8 シナリオ 2 地震

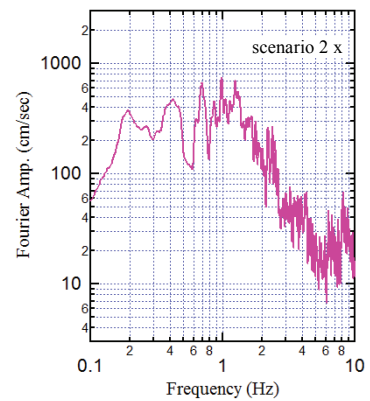


図-3.11 シナリオ 2 地震

表-3.4 実験ケース

ケース名称	クレーン姿勢	シルビーム下 免震装置	ブームスライド 機構
KSNN	作業時	なし	固定
KSAN	作業時	あり	固定
RSA1	作業時	あり	稼働
KKNN	休業時	なし	固定
KKAN	休業時	あり	固定
RKA1	休業時	あり	稼働

3.2 振動模型による固有値実験結果

低頭型クレーン模型の振動特性を確認するため、パルス加振または周波数掃引加振による固有周期の検討を行った。

パルス加振においては、100Gal程度のパルス波で加振を各方向に行い、それによるクレーン模型のブーム上重心付近（加速度センサーAX4, AY4, AZ4）での自由振動応答から各方向の固有周期を算定した（図-3.12, 図-3.13）。クレーン応答の減衰が大きいシルビーム下免震装置稼働時（KSAN, KKAN）やブームスライド機構稼働時（RSA1, RKA1）の横行方向のケースにおいては、低振動数から徐々に振動数を増やしていく周波数掃引加振を用い、振動数と加速度応答倍率の関係から固有周期を求めた（図-3.14, 図-3.15）。

検討結果は表-3.5にまとめられる。非免震状態において模型クレーンの横行方向の固有周期は0.31sであり（作業時）、これは実物スケールで1.24sに相当する。実物規模において想定しているクレーンの大きさが異なるが、前章で述べたオークランド港での実物低頭型クレーンの固有周期に近く、やや短い値となった。シルビーム下免震装置を稼働させたケースでは横行方向の固有周期は0.925sであり、実スケールにおいて3.7sに相当する。前節にあるように、模型作成時において免震稼働時のクレーン固有周期を3.3s程度と想定しており、それよりも長い周期となった。この要因はいくつか考えられるが、模型検討時においてクレーン模型そのものの剛性を考慮していないことや、計測センサーや転倒防止用吊ワイヤー等の質量、模型やばね剛性が実際には小さいことなどが考えられる。

パルス波加振のケースにおいては、クレーン応答の自由振動時刻歴における波数に伴う振幅の減少から対数減衰率を求めることができる。図-3.12の免震無のケース（KSNN）について対数減衰率を求めると2.39%となり、通常のクレーン設計において用いられている2.5%とほぼ同等であることを確認した。

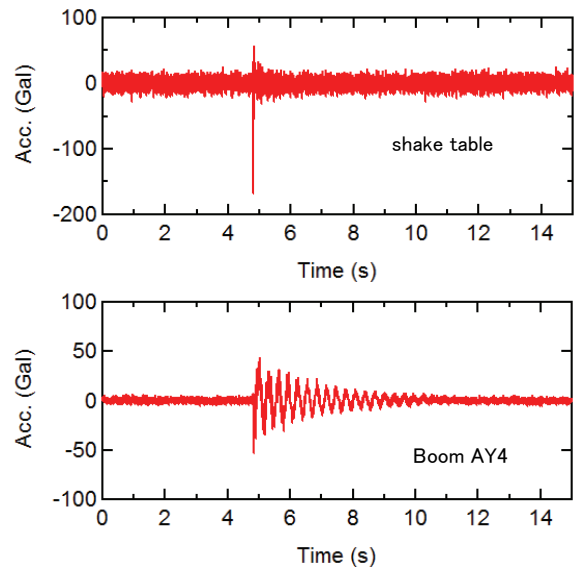


図-3.12 パルス波加振による加速度時刻歴
（ケース KSNN（免震無）横行方向加振）

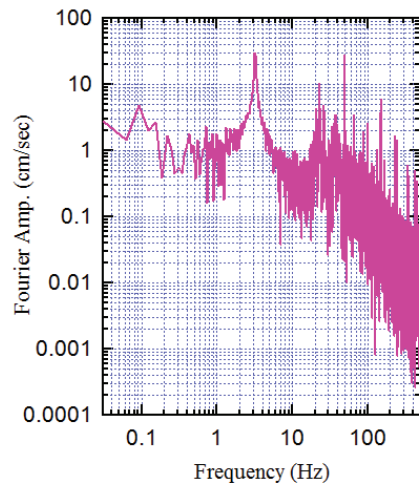


図-3.13 パルス波加振によるクレーン重心付近応答加速度のフーリエスペクトル
（ケース KSNN（免震無）横行方向加振）

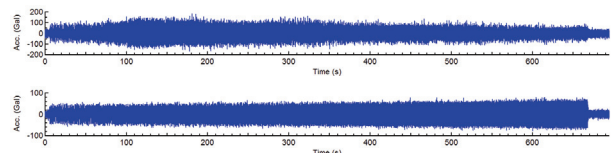


図-3.14 周波数掃引加振による加速度時刻歴
（ケース KSAN（シルビーム下免震）横行方向加振）

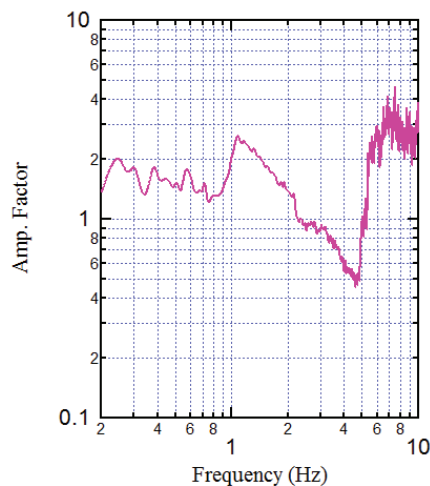


図-3.15 周波数掃引加振による重心付近加速度増幅と振動数の関係
(ケース KSAN (シルビーム下免震装置稼働) 横行方向加振)

表-3.5 固有値実験結果

ケース名称	ブームスライド機構	クレーン姿勢	シルビーム下免震装置	加振方向	ハルス加振掃引加振	固有周期 [s]
KSNN	固定	作業時	なし	横行	ハルス加振	0.310
KSNN	固定	作業時	なし	走行	ハルス加振	0.429
KSNN	固定	作業時	なし	鉛直	ハルス加振	0.158
KSAN	固定	作業時	あり	横行	掃引加振	0.925
KSAN	固定	作業時	あり	走行	ハルス加振	0.429
KSAN	固定	作業時	あり	鉛直	ハルス加振	0.157
RSA1	稼働	作業時	あり	横行	掃引加振	2.941
RSA1	稼働	作業時	あり	走行	ハルス加振	0.507
RSA1	稼働	作業時	あり	鉛直	ハルス加振	0.171
KKNN	固定	休業時	なし	横行	ハルス加振	0.318
KKNN	固定	休業時	なし	走行	ハルス加振	0.557
KKNN	固定	休業時	なし	鉛直	ハルス加振	0.226
KKAN	固定	休業時	あり	横行	掃引加振	0.833
KKAN	固定	休業時	あり	走行	ハルス加振	0.553
KKAN	固定	休業時	あり	鉛直	ハルス加振	0.223
RKA1	稼働	休業時	あり	横行	掃引加振	2.941
RKA1	稼働	休業時	あり	走行	ハルス加振	0.646
RKA1	稼働	休業時	あり	鉛直	ハルス加振	0.242

3.3 地震動加振による実験結果

M6.5 直下地震における各ケースの時刻歴応答を図-3.16～図-3.18 示す。

免震装置が稼働しない非免震クレーンとしたケース (KSNN, 作業時, 横行方向加振) では, M6.5 直下地震動をそのまま入力すると模型クレーンを大きく損傷させてしまう可能性があったことから, 加速度振幅を 0.5 倍として加振を行った。図-3.16 に見られるように, 重心位置付近ブーム上の加速度振幅は最大で 1000Gal 近い値となり, 0.5 倍入力の最大加速度約 264Gal から大きく増幅している。この大きな応答加速度に応じて, 陸側脚に

おいては浮上りも見られた。

シルビーム下免震装置が稼働するケースにおいては (KSAN, 作業時, 横行方向加振, 図-3.17), 重心付近加速度の最大値は 240Gal 程度であり, 振動台入力の最大加速度約 500Gal を大きく低減している。これに伴い脚の浮上りも生じていない。脚の曲げひずみも, 入力加速度が半分の大きさである非免震クレーンのケースと比較しても, かなり小さく抑えられている。免震装置部での変位振幅の最大値は約 24mm であり, 実スケールにおいて約 39cm となる。

シルビーム下免震装置に加えてブームスライド機構が稼働するケースにおいては (RSA1, 作業時, 横行方向加振, 図-3.18), ブームでの重心位置付近の加速度は計測ノイズが含まれるだけで, ほとんど変動が無い状態となった。一方, ブームスライド機構によってブームとは異なる変動を示す脚のアップービーム部では, 最大で 300Gal 程度の加速度振幅が見られた。脚の浮上りは見られておらず, 非免震クレーンと比較してシルビーム下免震装置とブームスライド機構が有効に機能していることが分かる。脚曲げひずみも, シルビーム下免震装置のみのケースと同様に, 入力加速度が半分の大きさである非免震クレーンのケースと比較しても, その応答値がかなり低減している。免震装置部での変位振幅の最大値は約 28mm であり, 実スケールにおいて約 45cm となる。ブームスライド部の変位は最大で約 22mm となり, 実スケールにおいて約 36cm に相当する値となった。

表-3.6～表-3.8 に, それぞれ M6.5 直下地震, シナリオ 1 地震, シナリオ 2 地震での非免震 (KSNN), シルビーム下免震 (KSAN), ブームスライド機構 (RSA1) の結果を整理する。シナリオ 1 地震とシナリオ 2 地震においても, 非免震のケースにおいて模型クレーンを損傷させる恐れがあったことから, それらの加速度振幅を 0.5 倍とした加振を行った。どの地震波形においても, シルビーム下免震装置稼働時やブームスライド稼働時のケースでは非免震のケースと同等の振幅 0.5 倍加振時だけでなく, 振幅 1.0 倍加振においてもブーム上重心付近加速度は非免震時と比べて小さくなっている。これに伴って, 脚の浮上りや部材の曲げ変形も抑えられ, これらの機構が有効であることが確認できる。ブームスライド機構を導入することで, ブーム上重心位置付近の加速度は大きく低減しており, ブーム上のトロリに接続されるクレーン運転者が搭乗する運転室の振動を抑制できることは特に効果的であると考えられる。一方で, ブームスライド機構導入時においてシルビーム下免震装置部の変位量が大きくなる場合もあり, 想定する地震動に応じて免震部

やブームスライド部の復元力特性，減衰特性の設定等に注意が必要であると考えられる。

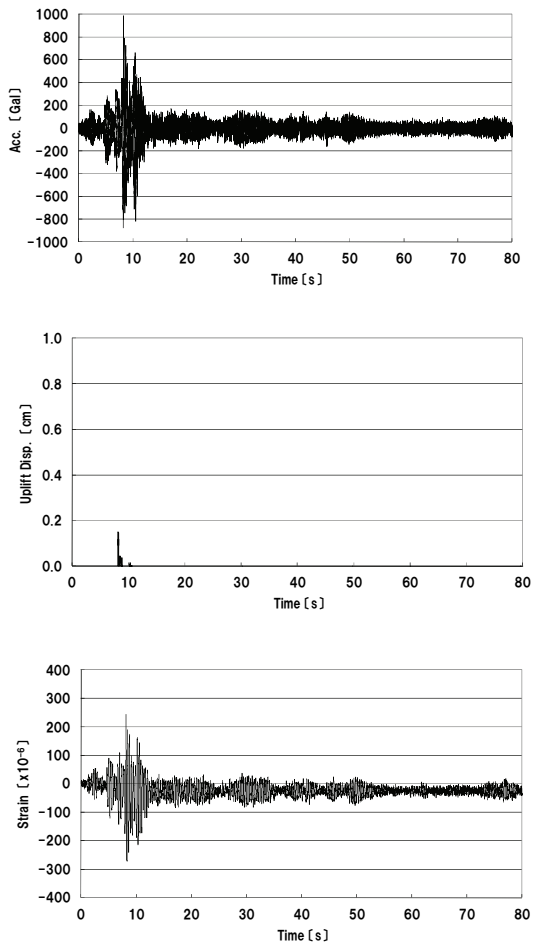


図-3.16 M6.5 直下地震動 (0.5 倍加振) での時刻歴応答 (KSNN, 横行方向)
重心付近加速度, 脚浮上り(脚 3), 曲げひずみ (脚 3))

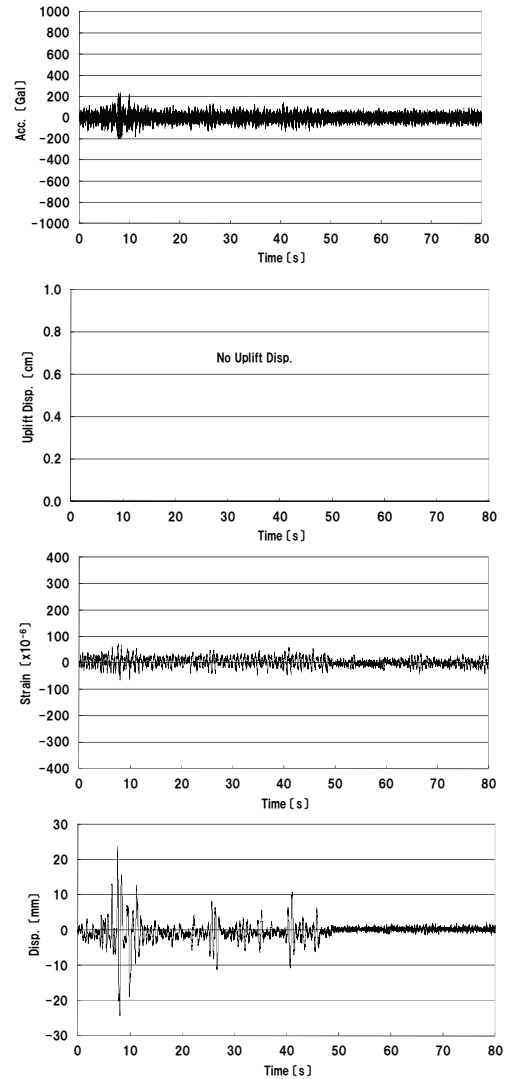


図-3.17 M6.5 直下地震動での時刻歴応答 (KSAN, 横行方向)
重心付近加速度, 脚浮上り(脚 3), 曲げひずみ (脚 3), 免震部変位

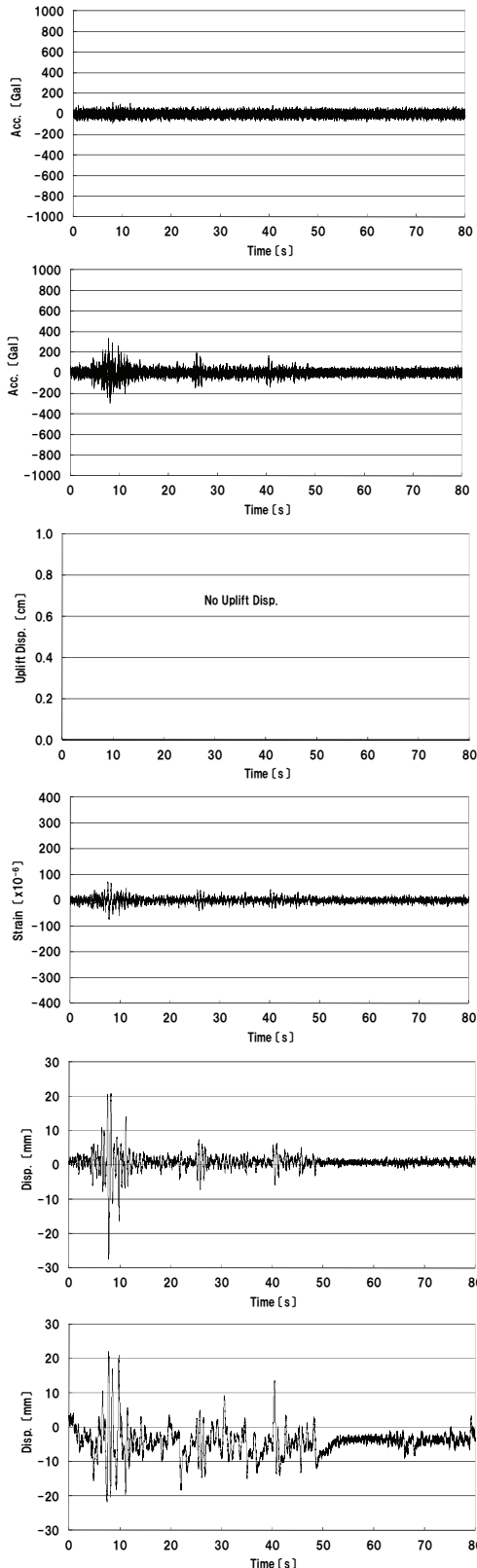


図-3.18 M6.5直下地震動での時刻歴応答 (RSA1, 横行方向)
 重心付近加速度, アッパービーム部加速度, 脚浮上り(脚 3), 曲げひずみ(脚 3), 免震部変位, ブームスライド変位

表-3.6 実験結果 (M6.5直下)

ケース	KSNN	KSAN	RSA1	
ブームスライド機構	固定	固定	稼働	
シルビーム下免震装置	なし	あり	あり	
加振倍率	0.5倍	0.5倍	1.0倍	0.5倍 1.0倍
重心付近最大加速度	987.1 Gal	188.8 Gal	238.5 Gal	89.6 Gal 114.4 Gal
シルビーム下免震変位量	-	14.0 mm	24.2 mm	16.3 mm 28.4 mm
ブーム変位量	-	-	-	13.9 mm 22.2 mm
浮上り量	0.2 cm	-	-	-

表-3.7 実験結果 (シナリオ1)

ケース	KSNN	KSAN	RSA1	
ブームスライド機構	固定	固定	稼働	
シルビーム下免震装置	なし	あり	あり	
加振倍率	0.5倍	0.5倍	1.0倍	0.5倍 1.0倍
重心付近最大加速度	722.3 Gal	201.4 Gal	286.8 Gal	84.7 Gal 116.7 Gal
シルビーム下免震変位量	-	13.4 mm	25.6 mm	12.1 mm 27.2 mm
ブーム変位量	-	-	-	27.1 mm 45.0 mm
浮上り量	0.3 cm	-	-	-

表-3.8 実験結果 (シナリオ2)

ケース	KSNN	KSAN	RSA1	
ブームスライド機構	固定	固定	稼働	
シルビーム下免震装置	なし	あり	あり	
加振倍率	0.5倍	0.5倍	1.0倍	0.7倍 1.0倍
重心付近最大加速度	616.9 Gal	220.8 Gal	383.1 Gal	80.7 Gal 103.6 Gal
シルビーム下免震変位量	-	14.8 mm	33.9 mm	21.7mm 29.9 mm
ブーム変位量	-	-	-	44.0 mm 57.0 mm
浮上り量	0.2 cm	-	-	-

4. 数値解析および模型実験との比較

4.1 3次元フレームモデル

3次元フレーム解析を用いて, 前章で行った 1/16 低頭型模型振動実験結果についての再現を行う. 解析ソフトには ABAQUS (version 6.10.3, SIMULIA) を用い, 直接時間積分法を用いた時刻歴応答解析を行った. コンテナクレーンの時刻歴応答解析においては, 用いる解析プログラムの仕様によりコンテナクレーン下に非常に大きな質点を置いて入力波としてその加速度変動を設定する「大質量法(ラージマス法)」が用いられる場合があるが, 本解析においては, 解析モデル下端境界(レール表面に相当)に地震波を直接入力する「直接加振法」を用いた. 解析時の時間間隔は, 模型振動実験での計測のサンプリング周波数 500 Hz に等しい 0.002s とした.

解析モデルを図-4.1に, 部材の断面性能を表-4.1に示す. また, 実験モデルに用いた錘に合わせて, 表-3.2に対応した節点集中質量を用いた. 解析モデル下端の支持条件および免震装置と走行装置周りのモデル詳細を図-4.2と図-4.3に示す. 走行装置下部には GAP 要素を

適用しており、クレーン応答加速度が大きい場合の車輪の浮上りが表現できるものとした。ブーム周りのモデル詳細は図-4.4 に示すとおりであり、ブームの支持点において横行方向の並進のみ自由としている。

免震装置が稼働しない非免震クレーンのケースにおいては、横行一次の減衰定数が 2.5% となるよう剛性比例型減衰を設定した（構造減衰 0.00274）。また、シルビーム下免震装置の稼働するケースにおいては、一つの免震装置あたりの線形ばね要素のばね定数を 6.08N/mm、ダンパー要素の減衰係数を 0.408Ns/mm とした。これにより、横行一次モードでの減衰率は 20% であった。ブームスライド機構を稼働させたケースにおいては、その復元力特性として線形ばね要素を適用し、模型で用いたばね定数 0.49 N/mm に対して、模型とモデルの固有周期を合わせるために、ばね定数を 0.84 N/mm、ダンパー要素の減衰係数を 0.0220 Ns/mm を用いた。

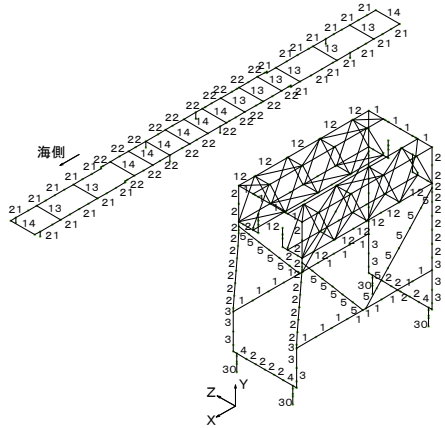


図-4.1 解析モデル（部材配置）

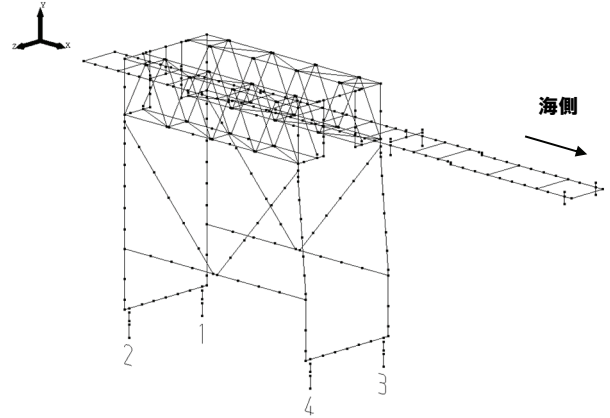
表-4.1 部材の断面性能一覧

部材番号	断面形状	断面積		断面 2 次モーメント		極 2 次モーメント		せん断断面積		備考
		A mm ²	I ₁ mm ⁴	I ₂ mm ⁴	I _b mm ⁴	A _{s1} mm ²	A _{s2} mm ²			
1	BOX 50*50*1.6	310	121071	121071	184842	138	138	ポータル		
2	BOX 75*45*1.6	374	292689	132541	281966	109	221	ポータル		
3	BOX 75*45*2.3	531	407355	182688	392611	155	316	ポータル		
4	BOX 75*45*3.2	727	543598	240752	522756	214	437	ポータル		
5	BOX 40*40*1.6	246	60503	60503	92668	110	110	ポータル		
11	Round.Bar φ 10	79	491	491	981	70	70	ポータル		
12	Round.Bar φ 12	113	1018	1018	2034	100	100	ポータル		
13	Round.Bar φ 13	133	1402	1402	2802	118	118	ブーム		
14	Pipe φ 21.7*12	124	6067	6067	12130	67	67	ブーム		
21	C100*40*3.2	556	818587	81120	1947	163	277	ブーム		
22	C150*50*3.2	780	2513938	170349	2702	192	429	ブーム		
30		1.0E+04	1.0E+08	1.0E+08	1.0E+08	-	-	ポータル		

※鋼材の材料定数設定

ヤング率: E = 2.06 × 10⁵ N/mm²

せん断弾性係数: G = 7.94 × 10⁴ N/mm²



JOINT	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	1	1	1	1	1	0
2	1	1	1	1	1	0
3	1	1	1	1	1	0
4	1	1	1	1	1	0

0: FREE, 1: RESTRAINT
X: 横行, Y: 鉛直, Z: 走行

図-4.2 脚下端（レール接地部）の支持条件

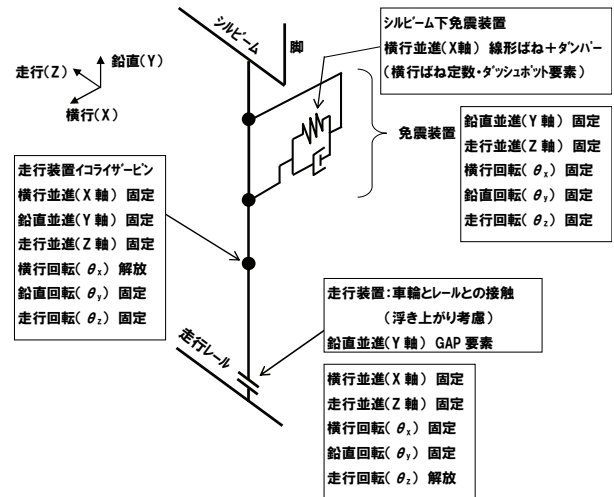


図-4.3 免震装置・走行装置周りのモデル詳細

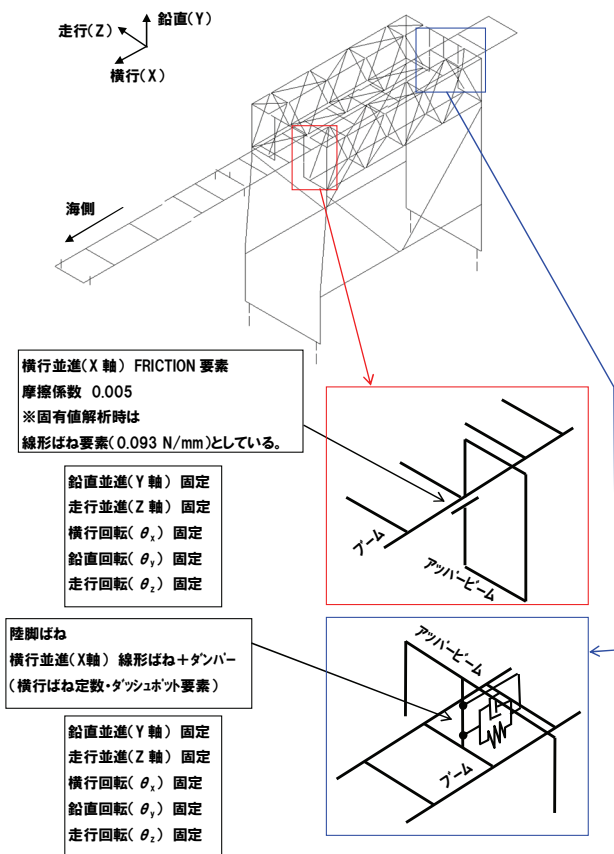


図-4.4 ブームスライド機構部のモデル詳細

4.2 3次元フレームモデルによる固有値解析

前節における解析モデルを用いて固有値解析を行い、前章の模型実験における固有周期検討結果との比較検討を行った。各ケースにおける固有値解析結果と主要振動モードについては付録を参照されたい。

非免震状態のクレーンについて(ケース KSNN)、模型実験と固有値解析での横行方向一次の固有周期を比較したものを表-4.2 に示す。固有値解析における固有周期は0.286s となり、実験による0.310s よりも短い結果となった(表中のモデル1)。結果が異なる要因としては、実験時の模型転倒防止用の吊ワイヤー等実験付属物の質量、模型材料の形状等の誤差、部材結合部剛性の過大評価、走行部の簡略化したモデル化の影響などが考えられる。しかし、このような複数の要因を総合的に正確に明らかにすることは容易ではない。そこで、脚下部の走行方向軸周りの断面2次モーメントの影響は大きいことから、ここでは、解析モデルの脚部剛性を落とすことで模型固有周期を表現することを検討した。部材剛性を検討する箇所を図-4.5 に示す。下部脚における走行方向軸回りの断面2次モーメントについては、当初の75%とすること

で実験での固有周期とほぼ整合する結果となった(表-4.2, モデル2)。

表-4.3 に各ケースでの横行方向の一次固有周期の実験と解析の比較を示す。ここではすべてのケースにおいて上述の下部脚の剛性の低減を行っている。また、シルビーム下免震稼働時のケースについては、実験に用いたばねの定数7.41N/mm では固有周期が実験値よりも短く、6.08N/mm とすることにより、ブームスライド機構稼働のケースも含めて実験値とよく整合した。

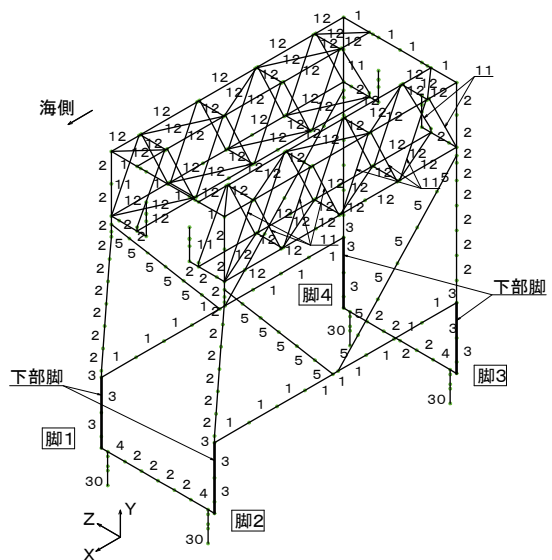


図-4.5 下部脚の部材剛性の検討

表-4.2 算定された固有値の比較

(ケース KSNN, 横行方向一次固有周期)

モデル	ブームスライド機構	クレーン姿勢	シルビーム下免震装置	ばね定数 [N/mm]	下部脚曲げ剛性 [%]	固有周期		
						実験結果 [s]	解析結果 [s]	誤差 [%]
モデル1	固定	作業時	なし	なし	100	0.310	0.286	7.74
モデル2	固定	作業時	なし	なし	75	0.310	0.309	0.32

表-4.3 各ケースでの固有周期の比較(横行方向)

ケース名称	ブームスライド機構	クレーン姿勢	シルビーム下免震装置	ばね定数 [N/mm]	固有周期		
					実験結果 [s]	解析結果 [s]	誤差 [%]
KSNN	固定	作業時	なし	なし	0.310	0.309	0.32
KSAN	固定	作業時	あり	なし	0.925	0.926	0.11
RSA1	稼働	作業時	あり	0.49	2.941	2.940	0.03
KKNN	固定	休業時	なし	なし	0.308	0.309	0.32
KKAN	固定	休業時	あり	なし	0.833	0.833	0.00
RKA1	稼働	休業時	あり	0.49	2.941	2.943	0.07

4.3 地震応答解析と模型振動実験の比較

(1) 非免震クレーン（ケースKSNN）

非免震クレーン（作業時）について、M6.5直下地震が横行方向に作用した際における対するブーム上重心付近加速度を図-4.6に示す。解析においては、模型実験において振動台で計測された加速度時刻歴を入力波として用いており、非免震クレーンのケースでは、M6.5直下地震動の加速度振幅を0.5倍したものである。

実験結果においては、計測ノイズ等の高周波成分が含まれており、加速度最大値だけで解析結果との整合を確認することは難しい。しかし、重心付近加速度の解析結果はその波形や振幅の傾向においてよい一致を見せており、実験結果における高振動数成分が有意なものであるかどうか判断できない現状においては、解析結果と実験結果はよく整合していると判断できる。

なお、ここでは、解析結果と実験結果の整合度を上げるため、脚下部の剛性を固有値解析でのモデルよりもさらに低減して70.5%としている。これは、解析では線形の剛性を用いているが、実際には、固有値実験のためのパルス波加振よりもエネルギーの大きい地震波加振においては模型クレーンの変形も大きくなる。このことによりパルス波加振では動かず、解析モデルにおいても変形を考慮していない箇所（例えば走行装置部の軸受け部など）が微細に動作・変形し、それに伴って模型クレーン全体の見た目の剛性が低下したことが影響していると考えられる。

海側および陸側の脚反力（脚1および脚3）の比較をそれぞれ図-4.7と図-4.8に示す。脚には、クレーン模型自重分の圧縮力（負側）がかかっているため、これが正側となった時に浮き上がりが発生することになる。図-4.7より、海側脚では1800N程度の圧縮力を中心に脚反力が増減しているが、常に脚反力が負側となっており浮上りは発生していない。これは解析結果でも同様であり、実験結果にはノイズと思われる高振動数成分が含まれるが、両者はよく一致している。一方、陸脚側では（図-4.8）、900N程度の圧縮力を中心に脚反力が増減し、8.0s付近から脚反力が正となっている時間があり、浮上りが発生している。これは解析結果も同様で、実験結果とよく整合している。

浮上り（脚1：海側脚、脚3：陸側脚）について、実験結果と解析結果を比較したものを図-4.9と図-4.10に示す。海側脚では浮上りが発生せず、陸側脚では浮上りが同時刻付近で発生していることが確認された。解析による浮上りが大きくなっており、これは実験結果に対して

安全側のもとなっている。前述のように、解析においては振動台で計測された加速度時刻歴を入力波形としているが、この時刻歴にも計測等のノイズが含まれ、脚の浮上りを表現するGAP要素の伸張に影響していることも考えられる。

海側・陸側脚（脚1：海側脚、脚3：陸側脚）の曲げひずみについて、実験結果と解析結果を比較したものを図-4.11、図-4.12に示す。解析においては、海側脚と陸側脚をつなぐポータルビーム接合部すぐ上の要素の曲げひずみを出力している。また、実験結果においては計測されたひずみ値にノイズが多く含まれていたため、30Hz以上の成分をカットするローパスフィルターを適用している。図より、脚の浮上りや脚荷重が大きくなるのと同時刻にひずみも大きくなっており、解析値は実験値と波形・位相ともによく整合しているが、海側脚での振幅がやや小さい。これは、解析においては脚下部の剛性を低減して模型クレーンの固有周期に整合させており、そのことによってここで検討している脚上部での変形が相対的に小さめに評価されている可能性が考えられる。

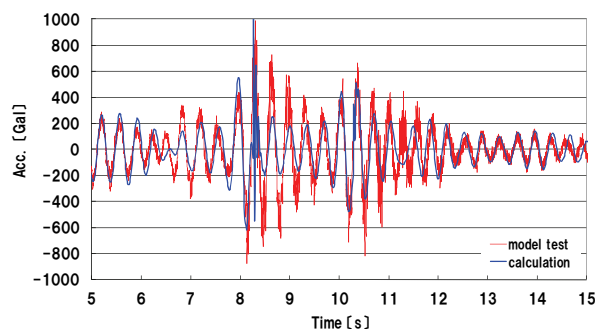


図-4.6 ブーム上重心付近加速度の比較
(ケース KSNN, 横行方向, M6.5 直下地震)

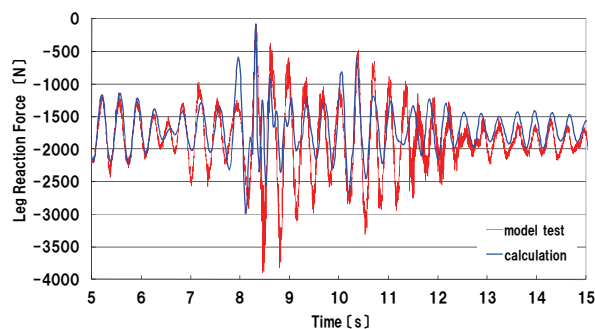


図-4.7 海側脚（脚1）での鉛直荷重の比較
(ケース KSNN, 横行方向, M6.5 直下地震)

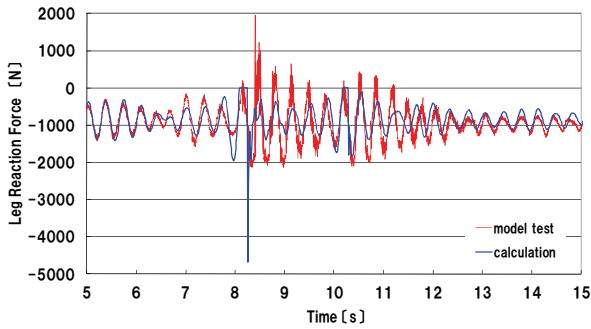


図-4.8 陸側脚（脚3）での鉛直荷重の比較
（ケースKSNN，横行方向，M6.5直下地震）

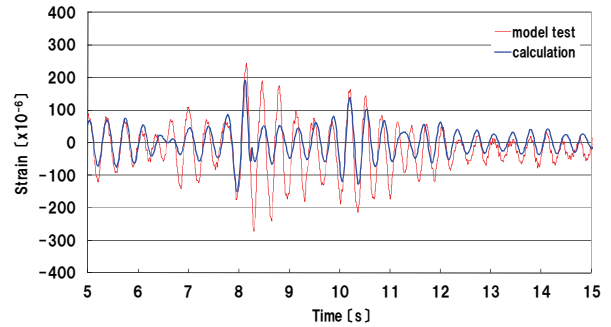


図-4.12 陸側脚（脚3）での曲げひずみの比較
（ケースKSNN，横行方向，M6.5直下地震）

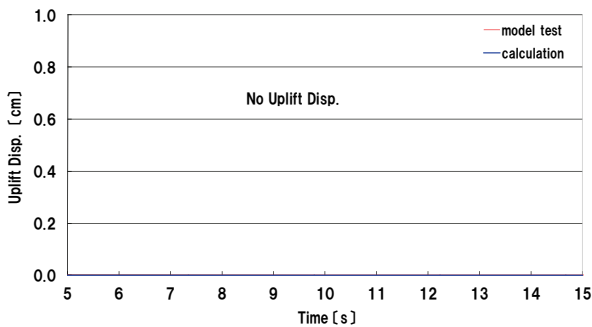


図-4.9 海側脚（脚1）での鉛直浮上りの比較
（ケースKSNN，横行方向，M6.5直下地震）

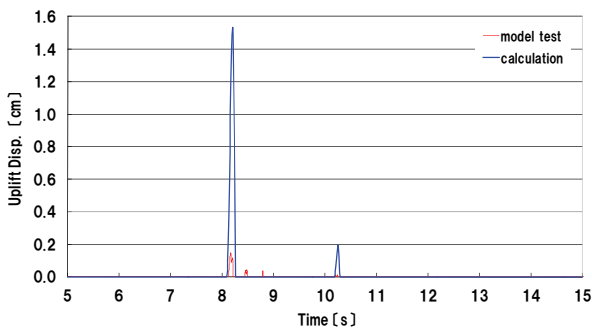


図-4.10 陸側脚（脚3）での鉛直浮上りの比較

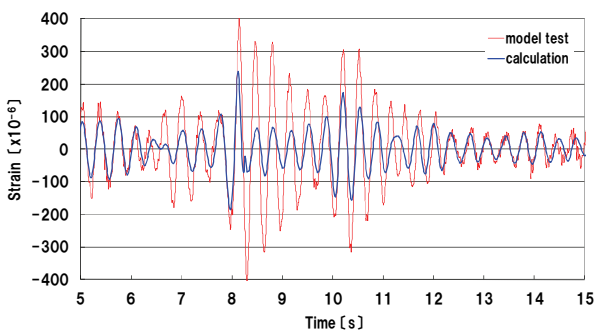


図-4.11 海側脚（脚1）での曲げひずみの比較
（ケースKSNN，横行方向，M6.5直下地震）

(2) シルビーム下免震装置稼働時（ケースKSAN）およびブームスライド機構稼働時（ケースRSA1）

図-4.13～図-4.16に、シルビーム下免震装置稼働時におけるブーム上重心付近加速度，陸側脚部鉛直荷重，陸側脚曲げひずみを示す。脚の浮上りは生じていないため，図は省略している。ここでは，前述した非免震クレーンの際に検討した脚下部の剛性の低減をそのまま用いている。

免震装置の効果によってブーム上重心位置付近の加速度が非免震クレーンと比較して大きく低減されており，値が小さくなったことによって実験値での高振動数のノイズがより強調されているが，その高周波成分を除くと解析結果とよく整合している。また，免震装置変位や脚荷重も同様に解析値は実験値とよく一致している。脚曲げひずみは非免震クレーンと同様に解析値は実験値よりも小さめの傾向を示しており，非免震クレーンの場合と同様の要因が考えられる。また，図中には解析における減衰を前述の剛性比例型の構造減衰ではなく，Rayleigh減衰とした結果も併せて示しているが，両者に差はほとんどない。

図-4.17～図-4.22に，シルビーム下免震装置に加えてブームスライド機構稼働時の実験と解析の比較を示す。このケースにおいても脚の浮上りは生じていないため，図は表示していない。解析値は，ブームスライド部変位や脚上端加速度も含め，他ケースと同様に実験値とよく整合している。解析において脚の曲げひずみが小さめの値となっているのも他のケースと同様の傾向である。ブーム上重心付近加速度はほとんど変動がなく，その傾向が解析値でも表されている。

(3) 質点系モデルによる検討

コンテナクレーンの地震時応答加速度算定においては、簡易な位置質点モデルを用いた検討がよく行われ、一質点振動系で検討された加速度はクレーン重心位置応答加速度によく一致するとの報告がある(江頭ら(1999), 江頭ら(2000), 宮田ら(2008))。本研究においては、シルビーム下免震装置の稼働時(ケース KSAN)について一質点系の適用を検討し、ブームスライド機構稼働時(ケース RSA1)については二質点振動系の適用を検討する。

一質点系, 二質点系は図-4.23 に示されるようであり, それぞれの支配方程式は以下のように示される。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -mj\dot{y} \quad (1)$$

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1x_1 + k_2(x_1 - x_2) = -m_1\ddot{y} \\ m_2\ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) = -m_2\ddot{y} \end{cases}$$

$$(2)$$

図-4.24 に, M6.5 直下地震でのシルビーム下免震装置稼働時(ケース KSAN)のブーム上重心付近応答加速度の模型実験と解析の比較を示す。ここで, 一質点系解析では, 模型クレーンの固有値実験で得られた固有周期 0.925s と, 減衰率 20%を用いて計算している。一質点系による結果は, 詳細な 3 次元モデルによる解析とも比較的良好に一致している。図-4.25 はこれらの各方法での応答加速度のフーリエスペクトルを示している。スペクトルにおいても重心付近加速度だけの簡易な検討であれば十分な精度を有していることを示している。

ブームスライド機構稼働時(ケース RSA1)の M6.5 直下地震でのブーム上重心付近と脚上端(アッパービーム部)での応答加速度を図-4.26 に示す。二質点振動系においては, 脚とブームの質量をそれぞれの質点に用いた。ばね定数および減衰については, 一質点系で用いたばね定数および減衰をそのまま下質点側に用い, 一時モードの周期が模型実験の固有値実験で得られた横行方向固有周期と合うように上質点側の調整した。二質点系の結果は脚, ブームともに 3 次元モデル解析の結果ともよく合っており, 一定の精度があることを確認できる。図-4.27 は脚上端(アッパービーム部)での応答加速度のフーリエスペクトルであり, 周波数成分においてもよい一致が見られる。

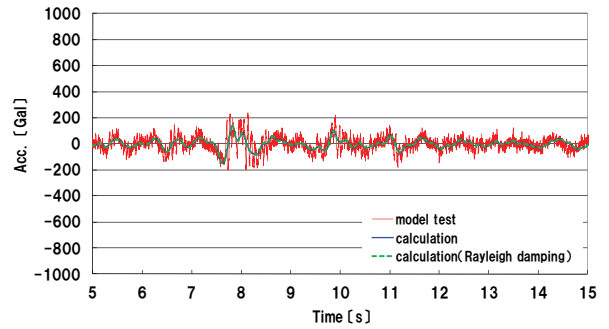


図-4.13 ブーム上重心付近加速度の比較
(ケース KSAN, 横行方向, M6.5 直下地震)

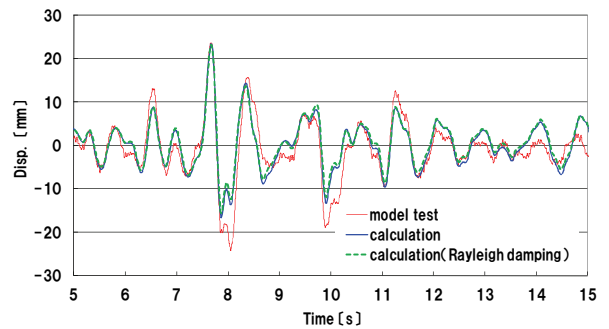


図-4.14 シルビーム下免震変位(脚3)の比較
(ケース KSAN, 横行方向, M6.5 直下地震)

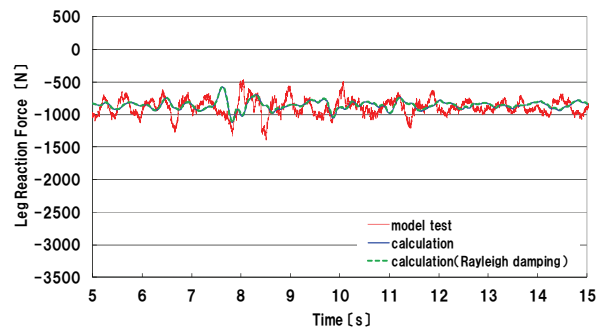


図-4.15 陸側脚(脚3)での鉛直荷重の比較
(ケース KSAN, 横行方向, M6.5 直下地震)

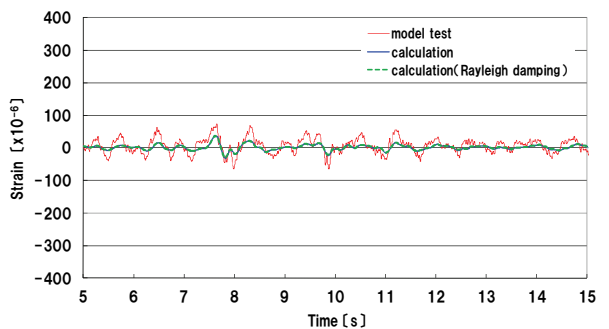


図-4.16 陸側脚(脚3)での曲げひずみの比較
(ケース KSAN, 横行方向, M6.5 直下地震)

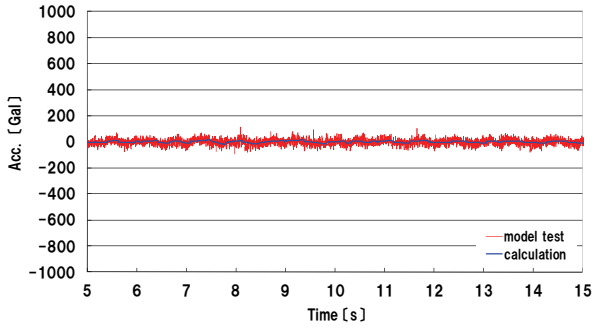


図-4.17 ブーム上重心付近加速度の比較
(ケース RSA1, 横行方向, M6.5 直下地震)

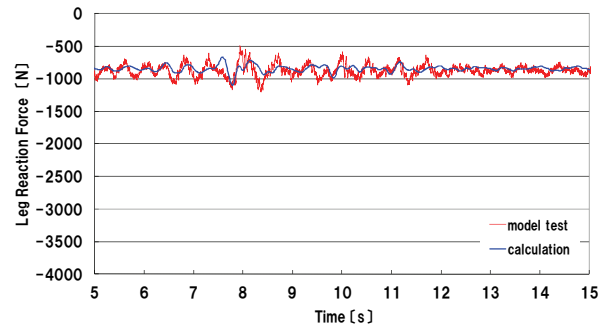


図-4.21 陸側脚 (脚 3) での鉛直荷重の比較
(ケース RSA1, 横行方向, M6.5 直下地震)

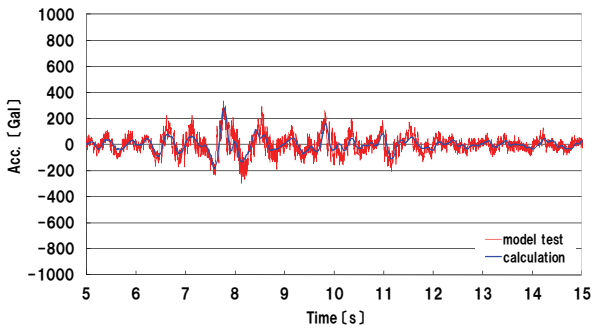


図-4.18 脚上端 (アッパービーム部) (脚 3) 加速度の比較
(ケース RSA1, 横行方向, M6.5 直下地震)

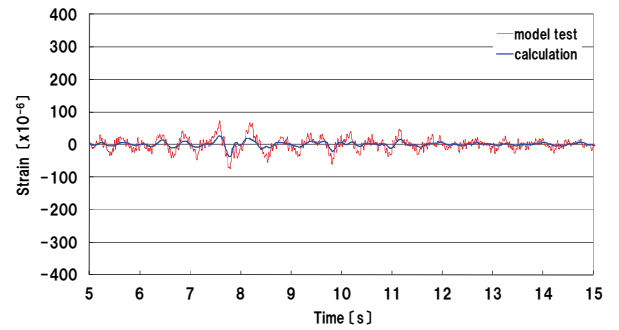


図-4.22 陸側脚 (脚 3) での曲げひずみの比較
(ケース RSA1, 横行方向, M6.5 直下地震)

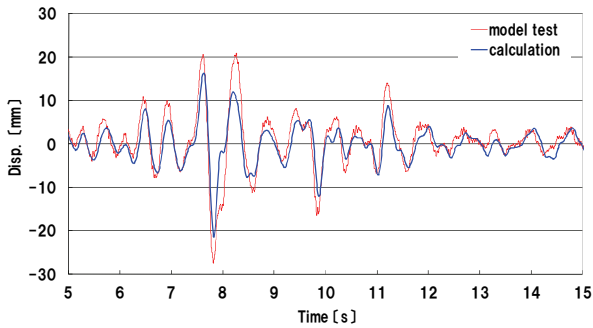


図-4.19 シルビーム下免震変位 (脚 3) の比較
(ケース RSA1, 横行方向, M6.5 直下地震)

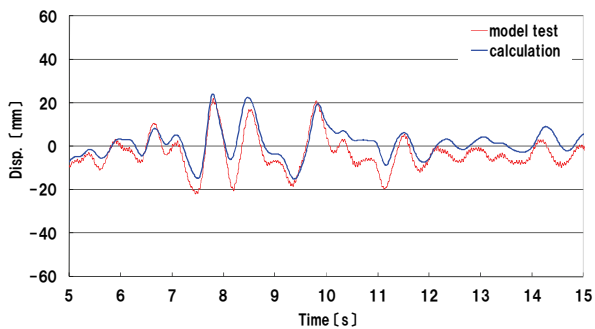


図-4.20 ブームスライド部変位の比較
(ケース RSA1, 横行方向, M6.5 直下地震)

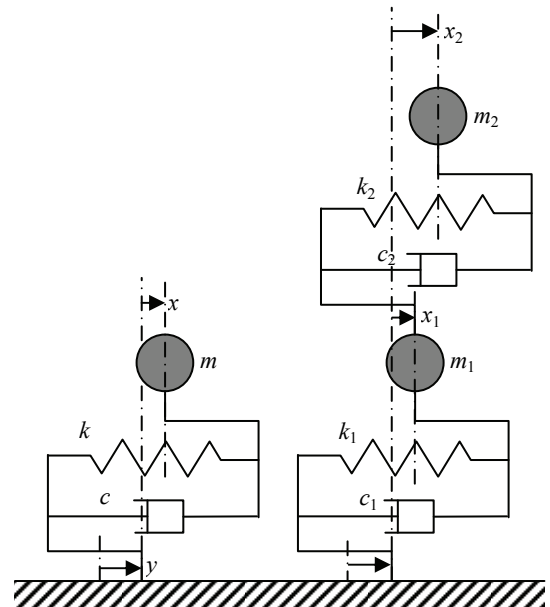


図-4.23 一質点系, 二質点系モデル

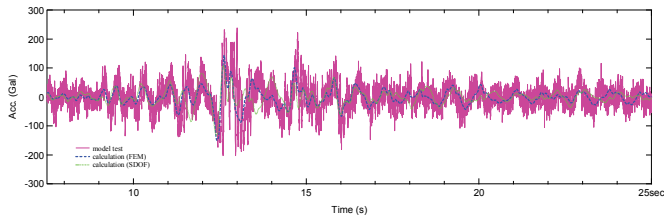


図-4.24 ブーム上重心付近応答加速度の比較
(ケース KSAN, 横行方向, M6.5 直下地震)

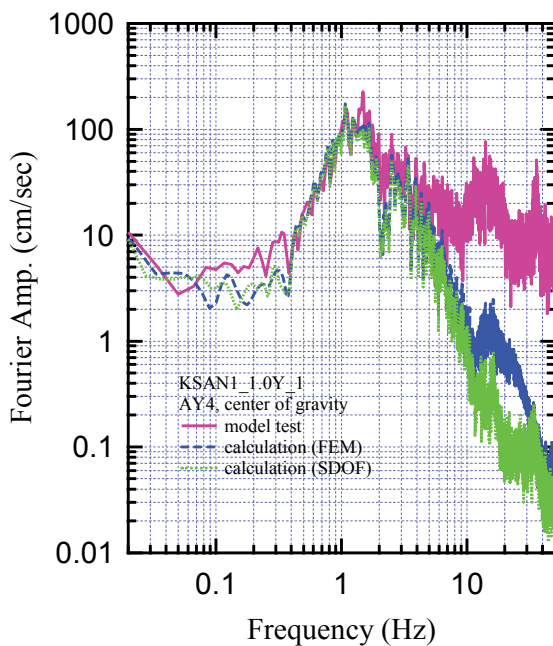


図-4.25 ブーム上重心付近応答加速度のフーリエスペクトル
(ケース KSAN, 横行方向, M6.5 直下地震)

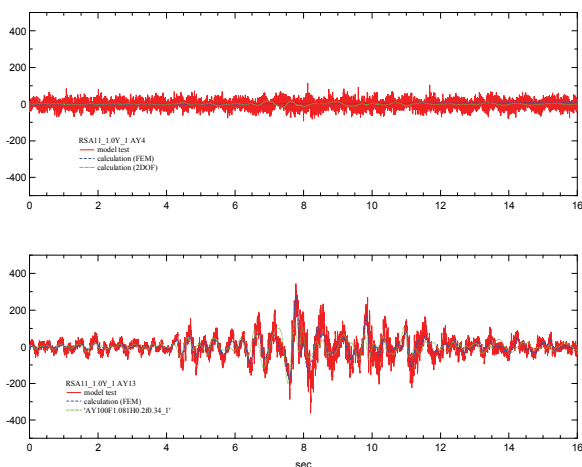


図-4.26 ブーム上重心付近と脚上端（アッパービーム部）の応答加速度の比較
(ケース RSA1, 横行方向, M6.5 直下地震)

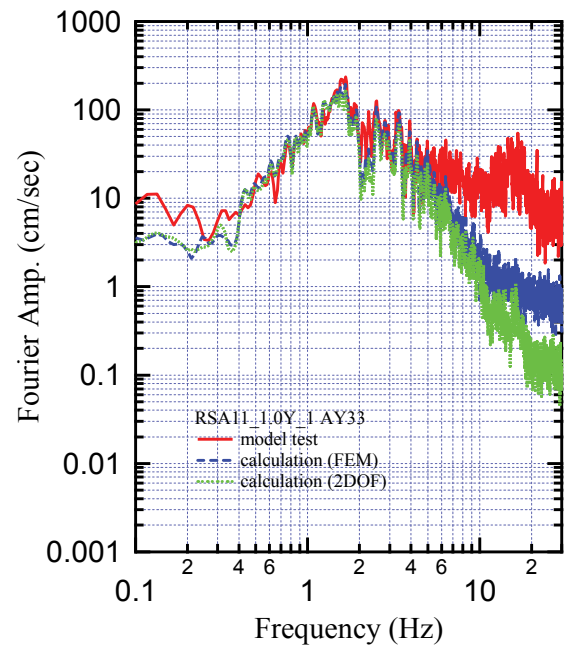


図-4.27 脚上端（アッパービーム部）応答加速度のフーリエスペクトル
(ケース RSA1, 横行方向, M6.5 直下地震)

5. まとめ

本研究においては、建築物の高さ制限のある地域に用いられる低頭型コンテナクレーンの大規模地震時の挙動解明と、現行港湾基準に適合した免震装置の適用性検討を目的として研究を行った。低頭型クレーンの実機における振動特性の調査を行い、また、模型振動実験や数値解析によって地震時の動的挙動について検討を行った。実験及び解析においては、低頭型クレーンへの免震装置の適用性についても検討を行い、耐震強化施設などのレベル2地震対応施設に低頭型コンテナクレーンを導入する際に参考とできるような基礎的情報を得ることができた。本研究における成果は以下のようにまとめられる。

- ・ オークランド港の低頭型コンテナクレーンにおいて荷役作業中の振動観測等の調査を行った。その結果、固有周期が通常のコンテナクレーンよりも短い1.67sであることを確認し、通常と同規模のコンテナクレーンよりも質量が大きいものの、さらに剛性が高いことが影響していることが考えられた。
- ・ 18列6段対応を想定して1/16の低頭型コンテナクレーン模型を作製し、模型振動実験を行った。免震

無の場合において0.31s(実物スケール1.24s),減衰2.4%を確認し,一般にコンテナクレーンの動的検討で考慮される2.5%とほぼ同等であることを確認した。模型免震クレーン(固有周期0.925s,実スケール3.7s)において,非免震クレーンよりも重心位置加速度を大幅に低減し,部材変形,脚浮上り等を抑制できることを確認した。免震部変位は実物スケールで40cm程度であり,コンテナクレーンに現状において用いられる免震装置で対応可能であることを確認した。ブームスライド機構によってブーム応答加速度をほぼ0にすることができ,ブームに接続されるクレーン運転者が搭乗する運転台の振動を抑制できることは特に効果的であることを確認した。

- ・3次元フレームモデルを用いた数値解析⁹による模型振動実験結果の再現を行った。固有値解析によって低頭型クレーン模型の固有周期を評価した。地震応答解析においては,模型振動実験において固有値実験結果よりも模型応答が軟化していることを確認し,それを考慮することで,非免震時,シルビーム下免震装置稼働時,ブームスライド機構稼働時の重心位置応答加速度を精度よく再現することができた。それぞれのケースにおける脚荷重,浮上り,脚曲げ変形,免震装置変位等も実験結果とよく合致した。簡易な質点系モデルによる検討も行い,シルビーム下免震装置稼働時も含め,クレーンの加速度応答を表現することができた。

(2014年 月 日受付)

参考文献

江頭隆喜,山本俊介,田邊俊郎,中島晋,菅野高弘,宮田正史,柏崎昭宏,金山維史(1999):大規模地震時におけるコンテナクレーンの脚の浮き上がりに関する模型実験,港湾空港技術研究所報告,Vol.38, No.2, pp.475-492.

江頭隆喜,山本俊介,田邊俊郎,菅野高弘,柏崎昭宏,田中剛,巽裕一郎(2000):揺脚式コンテナクレーンの大規模地震時の挙動に関する模型実験,港湾技術研究所資料, No.959.

菅野高弘,芝草隆博,藤原潔,徳永耕一,楨本洋二,藤木友幸(2003),コンテナクレーンの耐震性向上に関する研究—免震コンテナクレーンの開発—,港湾空港技術研究所報告, Vol.42, No.2, pp.221-250.

Takenobu, M., Sugano, T., And Kohama, E. (2011): An Experimental Study On Vibration Characteristic of Low Profile Container Crane, Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2011, Leuven, Belgium.

中山義紀,菅野高弘,田辺俊郎,佐藤栄治,山本俊介,田中剛(2001):免震式コンテナクレーンの大規模地震時の挙動に関する模型実験,港湾技術研究所資料, No.981.

日本クレーン協会(1997):クレーン等構造規格の解説(改訂3版).

日本港湾協会(2007):港湾の施設の技術上の基準・同解説.

宮田正史,竹信正寛,菅野高弘,長尾毅,小濱英司,渡部昌治(2008):耐震強化施設としてのコンテナクレーンの耐震性能照査手法に関する研究(その1),国土技術政策総合研究所資料, No.455.

宮田正史,竹信正寛,野津厚,菅野高弘,小濱英司,久保哲也(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),国土技術政策総合研究所資料, No.540.

宮田正史,吉川慎一,竹信正寛,菅野高弘,小濱英司,久保哲也(2010):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3),国土技術政策総合研究所資料, No.563.

付録A 3次元フレームモデルによる固有値解析結果

※グレー網掛けは,横行方向一次モードを示す。

表-A.1 固有周期と刺激係数(ケース KSN,免震なし,作業時)

モード 次数	周波数 [Hz]	周期 [s]	刺激係数		
			X	Y	Z
1	2.354	0.425	0.0000	0.0000	2.3602
2	3.238	0.309	1.0837	0.0008	0.0000
3	3.937	0.254	0.0000	0.0000	-1.4740
4	6.853	0.146	-0.0273	1.7944	0.0000
5	7.665	0.130	0.0000	0.0000	-0.3443
6	8.502	0.118	0.0000	0.0000	0.0470
7	10.085	0.099	0.0000	0.0000	0.0902
8	16.753	0.060	0.0000	0.0000	0.5286
9	17.158	0.058	0.0197	0.8417	0.0000
10	21.887	0.046	0.0000	0.0000	-0.1900

表-A.2 固有周期と刺激係数 (ケース KSAN, シルビーム下免震稼働時, 作業時)

モード 次数	周波数 [Hz]	周期 [s]	刺激係数		
			X	Y	Z
1	1.080	0.926	1.0094	0.0001	0.0000
2	2.354	0.425	0.0000	0.0000	2.3602
3	3.937	0.254	0.0000	0.0000	-1.4739
4	6.853	0.146	-0.0026	1.7943	0.0000
5	7.665	0.130	0.0000	0.0000	-0.3443
6	8.501	0.118	0.0000	0.0000	0.0468
7	10.084	0.099	0.0000	0.0000	0.0903
8	16.753	0.060	0.0000	0.0000	0.5284
9	17.153	0.058	0.0030	0.8396	0.0000
10	21.878	0.046	0.0000	0.0000	-0.1901

表-A.3 固有周期と刺激係数 (ケース RSA1, シルビーム下免震装置稼働, ブームスライド機構稼働時, 作業時)

モード 次数	周波数 [Hz]	周期 [s]	刺激係数		
			X	Y	Z
1	0.340	2.940	1.0608	-0.0001	0.0000
2	1.424	0.702	0.9692	0.0000	0.0000
3	2.771	0.361	0.0000	0.0000	2.4492
4	4.812	0.208	0.0000	0.0000	-1.7159
5	7.135	0.140	0.0014	1.8214	0.0000
6	8.104	0.123	0.0000	0.0000	0.4328
7	8.839	0.113	0.0000	0.0000	0.2511
8	18.224	0.055	0.0000	0.0000	0.3273
9	18.449	0.054	0.0009	0.8941	0.0000
10	21.354	0.047	0.0000	0.0000	0.1590

表-A.4 固有周期と刺激係数 (ケース KKNN, 免震なし, 休業時)

モード 次数	周波数 [Hz]	周期 [s]	刺激係数		
			X	Y	Z
1	2.178	0.459	0.0000	0.0000	2.3880
2	3.240	0.309	1.0811	0.0198	0.0000
3	3.832	0.261	0.0000	0.0000	-1.4849
4	4.683	0.214	-0.2359	2.0192	0.0000
5	6.174	0.162	0.0000	0.0000	0.4900
6	8.285	0.121	0.0000	0.0000	0.0817
7	15.352	0.065	0.0000	0.0000	-0.3551
8	16.690	0.060	0.0016	-1.3125	0.0000
9	17.292	0.058	0.0000	0.0000	0.4778
10	19.956	0.050	0.0398	-0.2872	0.0000

表-A.5 固有周期と刺激係数 (ケース KKAN, シルビーム下免震装置稼働時, 休業時)

モード 次数	周波数 [Hz]	周期 [s]	刺激係数		
			X	Y	Z
1	1.200	0.833	1.0116	0.0015	0.0000
2	2.178	0.459	0.0000	0.0000	2.3879
3	3.832	0.261	0.0000	0.0000	-1.4849
4	4.678	0.214	-0.0184	2.0230	0.0000
5	6.175	0.162	0.0000	0.0000	0.4901
6	8.284	0.121	0.0000	0.0000	0.0817
7	15.351	0.065	0.0000	0.0000	0.3544
8	16.692	0.060	0.0002	-1.3130	0.0000
9	17.291	0.058	0.0000	0.0000	0.4783
10	19.938	0.050	0.0106	-0.2868	0.0000

表-A.6 固有周期と刺激係数 (ケース KKAN, シルビーム下免震装置稼働時, ブームスライド機構稼働時, 休業時)

モード 次数	周波数 [Hz]	周期 [s]	刺激係数		
			X	Y	Z
1	0.340	2.943	1.0486	-0.0001	0.0000
2	1.582	0.632	0.9808	0.0003	0.0000
3	2.504	0.399	0.0000	0.0000	2.2657
4	4.556	0.219	0.0000	0.0000	-1.4395
5	5.056	0.198	-0.0013	1.9945	0.0000
6	6.619	0.151	0.0000	0.0000	-0.1945
7	9.114	0.110	0.0000	0.0000	0.0853
8	17.150	0.058	0.0000	0.0000	0.1826
9	19.497	0.051	0.0004	-1.3534	0.0000
10	22.317	0.045	0.0023	-0.3117	0.0000

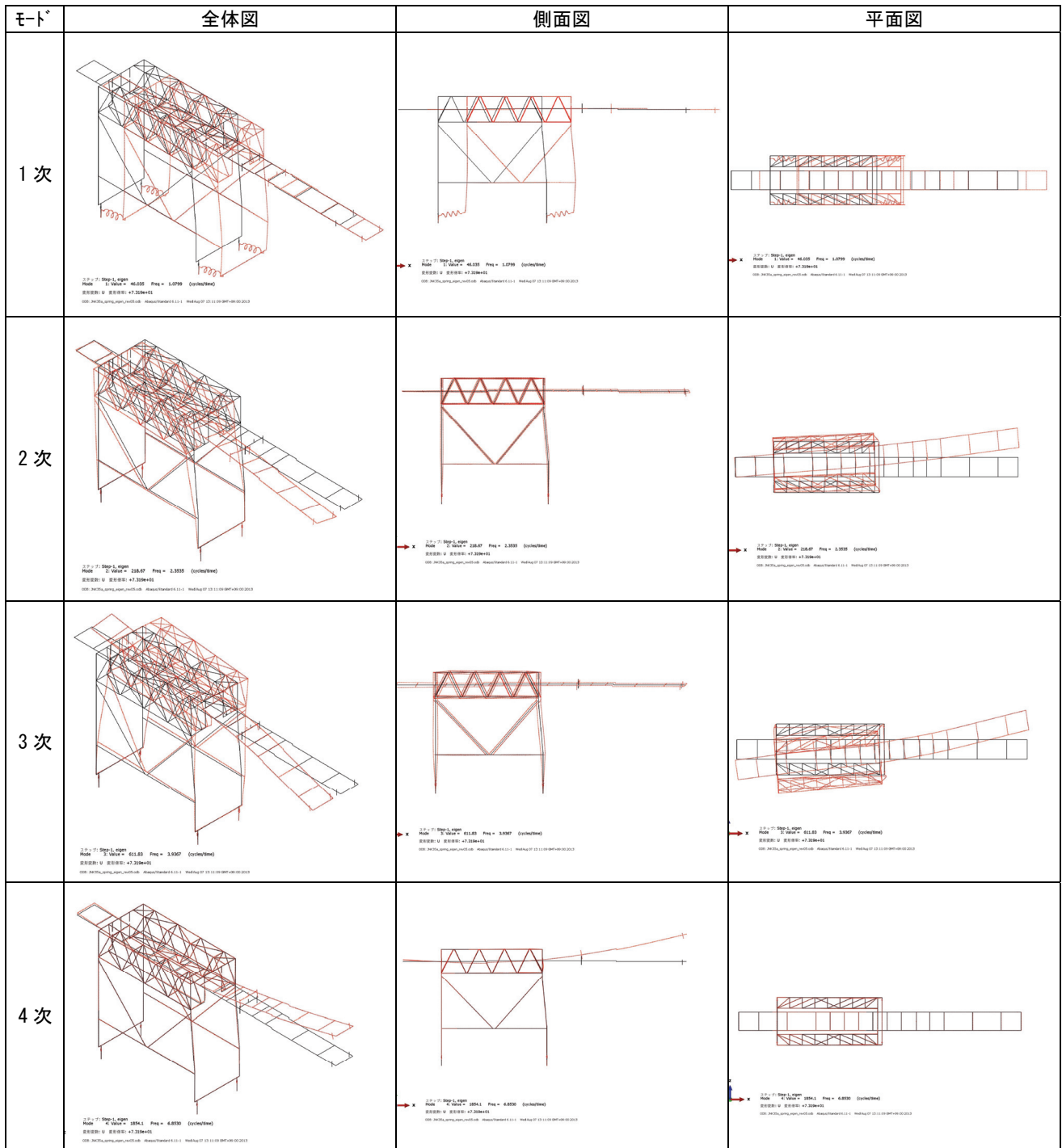


図-A.2 主要モード図 (ケース KSAN, ブーム下免震装置稼働時, 作業時)

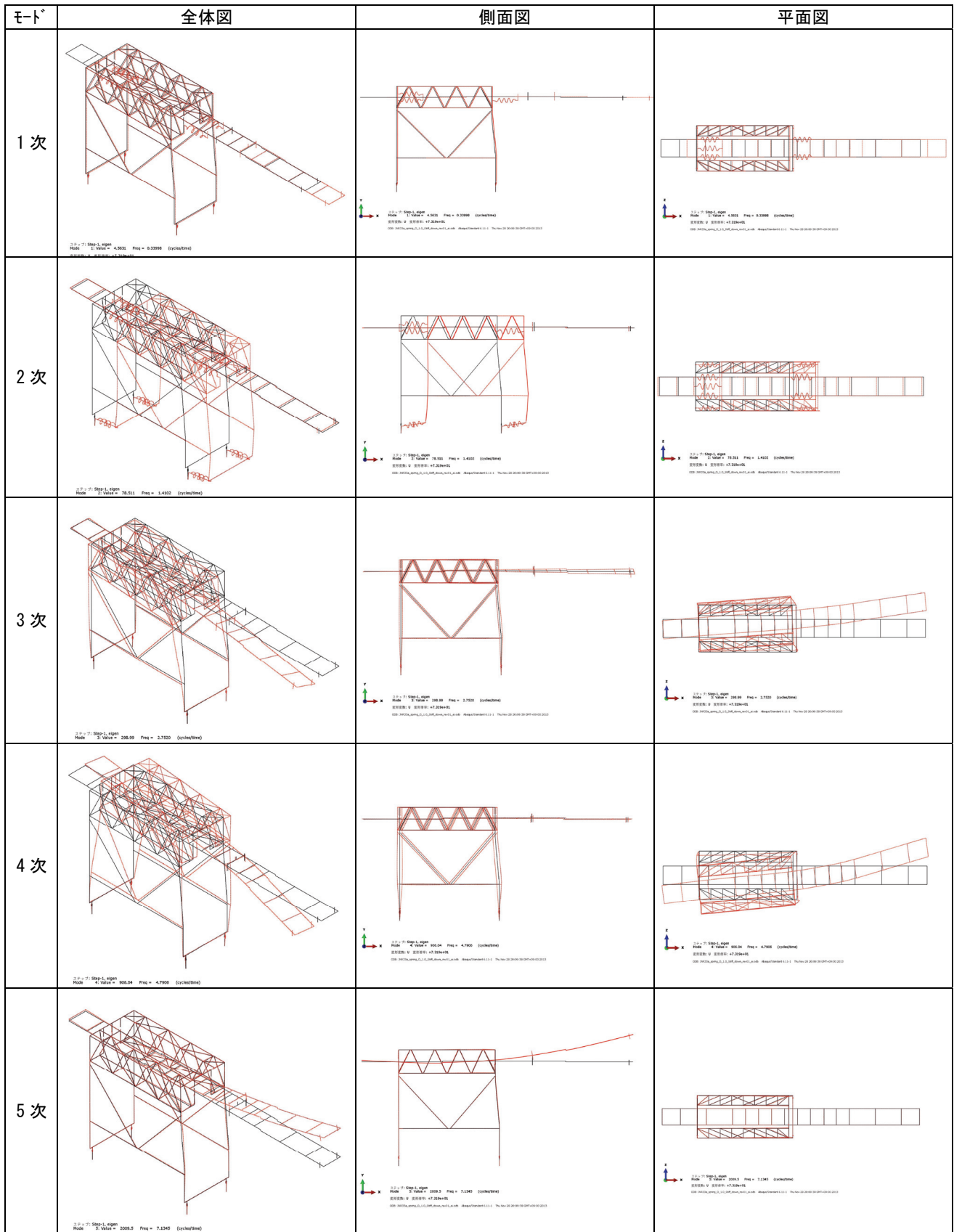


図-A.3 主要モード図 (ケース RSA1, ブーム下免震装置稼働時, ブームスライド機構稼働時, 作業時)

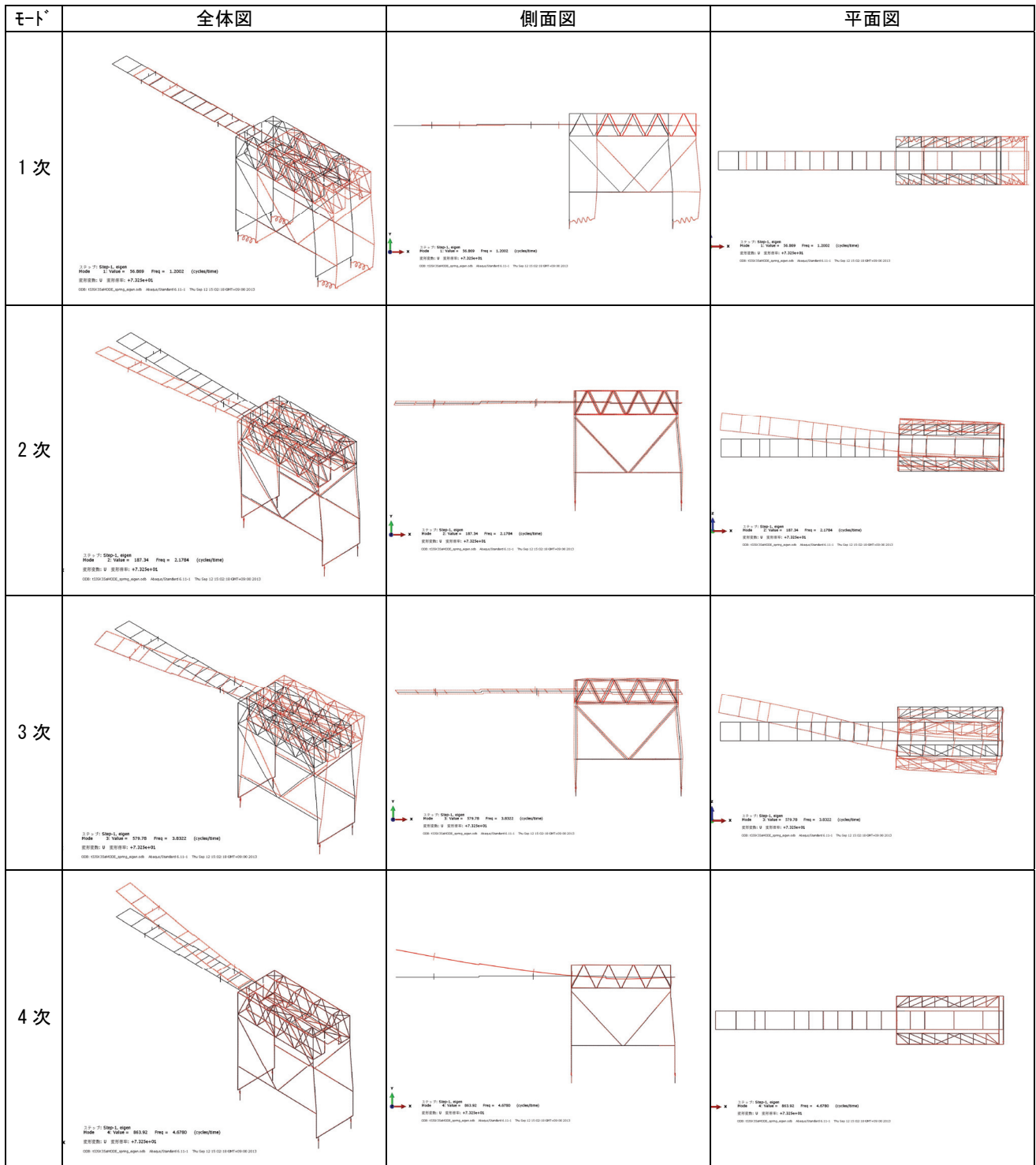


図-A.5 主要モード図 (ケース KKAN, ブーム下免震装置稼働時, 休業時)

港湾空港技術研究所資料 No.1289

2014.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2014) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています