

独立行政法人港湾空港技術研究所

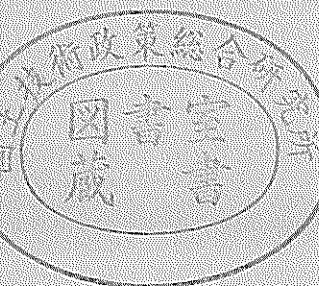
港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.42 NO.2 June 2003

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 42 卷 第 2 号 (Vol. 42, No. 2), 2003 年 6 月 (June 2003)

目 次 (CONTENTS)

1. グリーンベルトを用いた南太平洋地域の津波対策
..... 平石 哲也・原田 賢治 3
(Greenbelt Tsunami Prevention in South-Pacific Region
..... Tetsuya HIRAISHI, Kenji HARADA)
2. 時間発展型擬似段波モデルに基づく砕波モデルの開発
..... 平山 克也・原 信彦 27
(A Simple Wave Breaking Model with Quasi-Bore Model in Time Domain
..... Katsuya HIRAYAMA, Nobuhiko HARA)
3. SCP 改良地盤における水平抵抗特性
..... 北詰 昌樹・高橋 英紀・竹村 慎治 47
(Experimental and Analytical Studies on Horizontal Resistance of Sand Compaction Pile Improved Ground
..... Masaki KITAZUME, Hidenori TAKAHASHI, Shinji TAKEMURA)
4. 粘土地盤中の根入れ基礎の鉛直支持力に関する遠心載荷模型実験と解析
..... 中村 健・北詰 昌樹 73
(CENTRIFUGE MODEL TESTS AND STRESS CHARACTERISTICS ANALYSES ON VERTICAL BEARING
CAPACITY OF EMBEDDED SHALLOW FOUNDATION
..... Takeshi NAKAMURA, Masaki KITAZUME)
5. 斜め組杭式棧橋の地震時挙動に関する数値解析と耐震性能照査法の提案
横田 弘・濱田 純次・大熊 弘行・杉澤 政敏・芥川 博昭・津國 正一・佐藤 博 87
(Numerical Analysis on Dynamic Behavior of an Open Type Wharf on Coupled Raking Steel Piles During Earthquakes
... Hiroshi YOKOTA, Junji HAMADA, Hiroyuki OHKUMA, Masatoshi SUGISAWA, Hiroaki AKUTAGAWA,
Shouichi TSUKUNI, Hiroshi SATO)
6. ASR が発生したコンクリートの特性および内部鉄筋ひずみとコンクリート表面ひずみの関係
..... タレク ウディン モハメッド・濱田 秀則・山路 徹 133
(Concrete Properties and Relationship Between Surface Strain and Strain Over the Steel Bars of ASR Affected
Concrete Members
..... Tarek Uddin MOHAMMED, Hidenori HAMADA, Toru YAMAJI)

7. スラグセメントを用いたコンクリートの海洋環境下における長期耐久性
 …… タレク ウディン モハメッド・濱田 秀則・山路 徹 …… 155
 (Long-term Durability of Concrete Made with Slag Cements Under Marine Environment
 …… Tarek Uddin MOHAMMED, Hidenori HAMADA, Toru YAMAJI)
8. 久里浜湾における越波被災の要因と特性
 - ナウファスを用いた臨海部の越波災害予知法の構築 -
 …… 安田 誠宏・服部 昌樹・平石 哲也・平山 克也・永井 紀彦・小川 英明 …… 193
 (Damage Cause and Characteristics of Wave Overtopping in Kurihama Bay
 -Establishment of the Estimation Method for Wave Overtopping Damage Applying NOWPHAS-
 …… Tomohiro YASUDA, Masaki HATTORI, Tetsuya HIRAIISHI, Tosihiko NAGAI, Hideaki OGAWA)
9. 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 -
 …… 菅野 高弘・芝草 隆博・藤原 潔・徳永 耕一・榎本 洋二・藤木 友幸 …… 221
 (Study on the Seismic Performance of Container Crane
 -Development of the Container Crane with Isolation System-
 …… Takahiro SUGANO, Takahiro SHIBAKUSA, Kiyosi FUJIWARA, Koichi TOKUNAGA, Yoji MAKIMOTO,
 Tomoyuki FUJIKI)
10. 羽田空港の地震動特性に関する研究
 (第2報) スペクトルインバージョンによるサイト特性
 …… 野津 厚・佐藤 陽子・菅野 高弘 …… 251
 (Characteristics of Ground Motions Observed at Haneda Airport
 (Second Report) Site Amplification Factors
 …… Atsushi NOZU, Yoko SATO, Takahiro SUGANO)
11. 直立部に消波構造を用いた新しい高基混成堤の開発
 - 水理特性および耐波安定性に関する実験的研究 -
 …… 下迫 健一郎・高橋 重雄 …… 285
 (Development of a New Type High Mound Composite Breakwater
 -Experimental Study on Hydraulic Characteristics and Stability against Waves-
 …… Kenichiro SHIMOSAKO, Shigeo TAKAHASHI)

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—

菅野 高弘*1
芝草 隆博*2
藤原 潔*3
徳永 耕一*2
楨本 洋二*4
藤木 友幸*4

要 旨

1995年兵庫県南部地震では神戸港のコンテナクレーンに大きな被害が発生した。その教訓から、大地震が起こっても、損傷や脱輪がなく地震後すぐに荷役作業を行える免震コンテナクレーンを開発し、縮尺模型による実証試験を行った。

免震コンテナクレーンは免震装置をクレーン脚部と走行装置との間に組み込んでいる。免震装置は、クレーンの固有周期を長周期化させ、地震動の影響を低減する装置であり、橋梁や建築物で長年の使用実績がある積層ゴム免震アイソレータを採用している。免震装置の構成要素は積層ゴム免震アイソレータのほか、地震エネルギーを吸収し地震時応答を抑制するダンパ、アイソレータの回転変形を抑制するモーメント受けローラ、アイソレータの過度の水平変形を防止する平行リンク、荷役作業時免震装置を固定するシアピンから成っている。

今回の縮尺模型試験により、クレーン応答加速度の大幅な低減や脱輪防止などの免震装置による効果を確認できた。また、ロープで吊られた吊荷によるクレーンへの動的影響は小さいこと、一部の免震装置が作動しない場合は加速度応答および脚の浮き上がりに影響して免震効果が期待できないことも確認できた。動的シミュレーション解析については、応答加速度および脚の浮き上がりなどの解析結果が試験結果とよく一致しており、脚の浮き上がりなどを伴う非線形性の強い挙動に対しても解析法の実用性が確認できた。

キーワード：コンテナクレーン、免震装置、積層ゴム免震アイソレータ、縮尺模型試験、地震、非線形動的解析

-
- *1 独立行政法人 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造振動研究室室長
 - *2 三井造船(株) 鉄構・物流事業本部 鉄構運搬機工場設計部 平成12年度共同研究担当者
 - *3 三井造船(株) 鉄構・物流事業本部 技術部 平成12年度共同研究担当者
 - *4 三井造船(株) 技術本部 機械制御技術開発センター 平成12年度共同研究担当者

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
独立行政法人 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造振動研究室
電話：046-844-5058 Fax：046-844-0839 E-mail：sugano@pari.go.jp

Study on the Seismic Performance of Container Crane -Development of the Container Crane with Isolation System-

Takahiro SUGANO*¹
Takahiro SHIBAKUSA*²
Kiyosi FUJIWARA*³
Koichi TOKUNAGA*²
Yoji MAKIMOTO*⁴
Tomoyuki FUJIKI*⁴

Synopsis

The 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake caused extensive damage to the container handling cranes at the container terminals of Kobe Port. Consequently, the authors developed a seismic isolated container handling crane that could avoid damage and wheel derailment during a strong earthquake, and restart loading and unloading immediately after an earthquake. The authors made an experiment with a scale model in order to verify the isolation system effectiveness. The developed container uses the seismic isolation system installed between the gantry truck and the leg. The authors used the laminated-rubber seismic isolator as system to make the natural period of the crane longer and isolate earthquake energy. Laminated-rubber isolators have been widely installed on bridges, buildings and other structures for many years. The seismic isolation system consists of the laminated-rubber seismic isolator, besides the damper to absorb to earthquake energy, the moment support rollers to prevent the isolator rotation, the links to prevent the excessive isolator horizontal displacement, and the shear pin to fix the isolation system during operation (i.e. loading and unloading). This paper verifies the seismic isolation system effectiveness by a scale model test, such as the reduction of crane acceleration response and prevention of wheel derailment. Further, this paper shows that the container hung by the rope doesn't have influence on the dynamic behavior of the crane and what some of 4 seismic isolation system units doesn't operate has influence on crane acceleration response and the uplifting of the leg. The analytical data and the experimental data coincide as to the acceleration response and the uplifting of the leg. Nonlinear seismic response analysis is an effective method to simulate the dynamic behavior of the crane with/without isolation system during an earthquake.

Key Words: Container Crane, Seismic Isolation System, Laminated-Rubber Seismic Isolator, Scale Model Test, Earthquake, Nonlinear Response Analysis

-
- *1 Head, Structural Dynamics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department, Independent Administrative Institution, Port and Airport Research Institute
 - *2 Steel Structure & Material Handling Machinery Factory Design Department, Steel Structure & Logistic Systems Headquarters, Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. Joint research fellow
 - *3 Engineering Department, Steel Structure & Logistic Systems Headquarters, Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. Joint research fellow
 - *4 CAE Group Tamano Technology Center, Research & Development Headquarters, Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. Joint research fellow

3-1-1, Nagase, Yokosuka, 239-0826, JAPAN
Independent Administrative Institution Port and Airport Research Institute
Phone: +81-468-445058 Fax: +81-468-440839 E-mail: sugano@pari.go.jp

目 次

要 旨	221
1. まえがき	225
2. コンテナクレーン耐震性向上対策	225
3. 積層ゴム式免震装置	226
3.1 免震装置の基本特性	226
3.2 免震装置の構成要素	227
4. 試験模型	227
4.1 コンテナクレーン模型	227
4.2 吊荷模型	230
4.3 免震装置	230
5. 模型振動試験方法	231
5.1 加振方法	231
5.2 加振波形	231
5.3 試験ケース	232
5.4 計測項目および計測器取付位置	232
6. 模型の固有周期	233
7. 非免震クレーン模型の地震時挙動確認試験結果	234
8. 免震クレーン模型の振動試験結果	235
8.1 免震装置の効果検証試験結果	235
8.2 一部の免震装置が作動しない場合の検証試験結果	243
9. 吊荷との動的相互作用検証試験結果	245
10. 動的シミュレーション解析の実用性の検討	249
11. あとがき	250
謝 辞	250
参考文献	250

1. まえがき

1995年1月に発生した平成7年兵庫県南部地震では神戸港コンテナターミナルにおいて岸壁などの土木構造物およびコンテナクレーンに大きな被害を受け、神戸港の港湾機能が麻痺し、阪神地域のみならず国内外の経済社会活動に多大な影響をおよぼす結果となった^{1) 2)}。

この震災では陸上輸送がほぼ麻痺状態に陥ったため、復旧活動には海上輸送、ヘリコプターなどによる空路輸送、人力（徒歩、自転車）およびバイクによる輸送などの活用が多数報告されている²⁾。神戸港等においては、震災直後から、被災を免れた耐震強化岸壁や応急復旧された岸壁で、被災地からの避難者や被災地への緊急物資等の輸送が開始され、被災地の救援活動に大きな役割を果たした。さらに、復興が進むにつれ港湾緑地等が仮設住宅用地として利用される等、港湾は緊急物資輸送等の拠点として、また、復旧・復興の拠点としてその重要性があらためて認識された¹⁾。大地震に見舞われると陸上交通は重大な被害を受けることが想定されるのに対し、港湾施設は震災直後の海上交通の安定性を活かした緊急物資輸送等の実施及び避難場所の提供による市民の安全の確保に加え、震災後も被災地の復旧・復興の支援といった重要な役割を担うこととなる^{1) 3)}。

このように震災における港湾施設の役割は非常に重要であり、平成7年兵庫県南部地震を教訓に現在では社会性や経済性を考慮し、とくに重要な港湾施設は耐震強化施設と位置付け、レベル2地震動（再現期間数百年の地震動レベルで、供用期間中に発生する確率が低い大きな強度を持つ地震動）を対象とした耐震性能を考慮した設計が取り入れられている⁴⁾。

一方、従来コンテナクレーンの設計水平震度は0.2を用いており、岸壁の設計に当たりコンテナクレーンの輪荷重およびクレーン重量の設計震度相当分の水平荷重を考慮している。耐震強化岸壁として水平設計震度が0.2を超える場合には、岸壁の設計震度とクレーンの設計震度が異なる不整合が生じることになる。この様な不整合は、万一の地震時に耐震強化岸壁が無被災であってもコンテナクレーンが被災する可能性を有することになり、コンテナ船の接岸は可能であるが、コンテナの荷役が出来ないことが想定される。このため、耐震強化岸壁に設置されるコンテナクレーンについても、「耐震強化施設」としての全体的な耐震性を保持するため、岸壁と同等の耐震性能を備える必要がある⁵⁾。

コンテナクレーンはレール上を走行し、直接基礎に固定されていない構造物であるため、それらが受ける地震被害

は、脚の浮き上がりや脱輪などのクレーン特有の地震時挙動が密接に関係している⁶⁾。これらより、レベル2地震動に対しても、損傷や脱輪がなく、地震後すぐに荷役作業を行えるクレーンとして、積層ゴムを適用した免震コンテナクレーンを開発、実用化した。

本報では、非免震クレーン（免震装置がない従来のクレーン）模型の試験によるクレーンの地震時挙動の確認、免震クレーン模型の試験による免震装置の効果検証結果および動的シミュレーション解析の実用性を検討した結果について報告する。また、模型試験にて別途実施したロープで吊られた吊荷との動的相互作用検証試験結果、一部の免震装置が作動しない場合の検証試験結果についても報告する。

2. コンテナクレーン耐震性向上対策

日本港湾協会発行「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁴⁾には、レベル2地震動の耐震性能として「施設の被害が生じたとしても、それが軽微であり、地震後に速やかに機能の回復が行える状態を指すものとする。」とされている。この耐震性能を満足するため、クレーンには大地震が起こっても脱輪や損傷を回避でき、地震後すぐに荷役作業を行える性能が要求される。

耐震性を向上させる設計法として一般的に下記のような設計技術が挙げられる⁷⁾。

- ・剛構造設計法（剛性補強型）
- ・制振設計法（地震エネルギー吸収型）
- ・免震設計法（地震エネルギー遮断型）

剛構造設計法は構造物を補強する方法であり、各部材の地震時発生応力が、許容応力度内に収まるように剛性を上げたり、重心位置を下げて脚の浮き上がり等を防止するものである。このため、通常のコンテナクレーンの重量が9000～10000kN程度であるのに対して、設計震度を0.2とした場合には15000～16000kN程度の重量となることが試設計で確認されている。

制振設計法はダイナミックダンパのような質量効果を利用した制振装置を設けたり、粘性ダンパやアクチュエータなどの減衰機器を設け構造物の減衰機能を強化して、地震時の応答を抑制する方法である。質量効果を利用した場合には、10000kN程度のコンテナクレーンの応答を効果的に制御するためには制振機構の重量を付加することになり、クレーンの総重量の増加は免れない。

また、免震設計法は構造物と基礎の間にボールベアリング、テフロン支承、積層ゴムのような剛性の低い機構を介在させ、大きな地震力がそのまま構造物に伝わらないよう

にする方法である。

今回コンテナクレーンの耐震性向上対策として以下の観点から検討した。

- ・ 維持管理が容易であること
- ・ 岸壁への負荷が小さいこと
- ・ 万一、損傷が生じた場合に機能回復が容易であること

以上を総合的に勘案して、免震設計法を採用した。採用理由としては、想定する免震機械要素について土木・建築分野における長年の実績を有すること。さらに、平成7年兵庫県南部地震によって被災したコンテナクレーンの被災原因のひとつである、脚の浮き上がり免震化により抑制でき、脱輪防止が見込める。また、コンテナクレーンの重量増加が少ないことから地震時のクレーンの鉛直、水平反力が低減でき、岸壁への負荷が増大しないため岸壁建設コスト低減に寄与できることも期待できる。一方、地震時に入力されるエネルギーを変位で消費する免震機構であることから、クレーンの振動変位が大きくなるため、荷役作業時におけるクレーン操作性の悪化が懸念されるが、これについては免震装置の作動を地震時に限定し、荷役作業時は作動しないように固定することで対処することとした。

3. 積層ゴム式免震装置

3. 1 免震装置の基本特性

免震装置はクレーン脚部と走行装置の間に設置され、脚からの地震入力免震機構で遮断するものである。本機構によってクレーンの固有周期が長周期化することにより、地震動に対する加速度応答を低減させるものである。同時にダンパーによる減衰を並列に作用させることにより過度の変位を抑止するものである。本研究では、コンテナクレーンの維持管理の観点から、メンテナンスフリーに近い免震形式が合理的であるとの判断から、固有周期を長周期化させる装置として、橋梁や一般建築物の免震装置として多く採用され、長年の実績がある積層ゴムを採用した。積層ゴムはゴムと鋼板を交互に積層した構造で、クレーンの鉛直荷重に対しても十分安定した支持能力がある。積層ゴムの鉛直荷重と鉛直変位の関係を図-1に、積層ゴム水平ばね定数のひずみ依存性を図-2に示す。図-1に示すように鉛直加重に対しては、非常に強い剛性を有する。一方、図-2に示すように、積層ゴムの水平方向のばね定数は非常に小さく、面圧およびせん断ひずみにより異なる値を示すが、せん断ひずみの大きい範囲においてその影響が小さいことが分かる。また、本図では最大せん断ひずみ 250%まで示しているが、例えば高さ 1m の積層ゴムを使用した

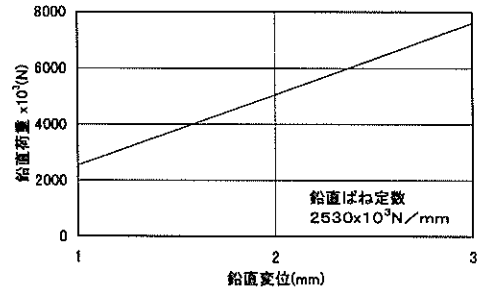


図-1 積層ゴムの鉛直荷重と鉛直変位の関係

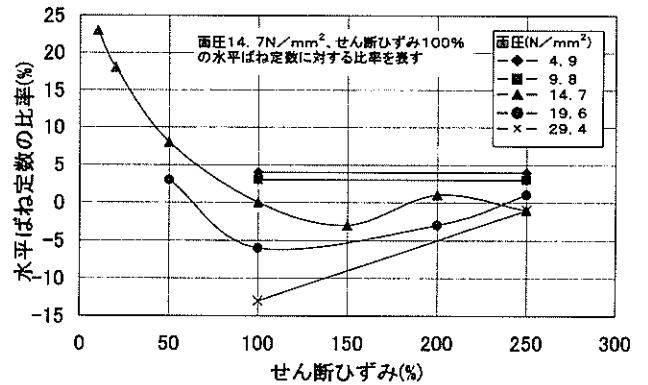


図-2 積層ゴム水平ばね定数のひずみ依存性

場合に 2.5m の水平変位に相当する。

一般的に地震動は、6 自由度 3 次元であるが、岸壁上に設置されたコンテナクレーンの場合には、岸壁およびコンテナクレーンの構造から、その振動特性に卓越方向が生じる。ここで 3 次元の座標系を、クレーン走行方向(X: 海側から見て右方向を正方向とする)、横行方向(Y: 陸側方向を正方向とする)、鉛直方向(Z: 上向きを正方向とする)とすると(図-4 参照)、クレーン走行方向においては、車輪が回転・滑動することによりクレーンへの入力地震力が軽減される。これは、有る意味で摩擦型の免震機構に相当する。また、鉛直方向は一般的に地震動の鉛直成分が水平方向の 1/2~1/3 程度であることが多いこと、さらに通常のクレーン構造では鉛直方向の強度が水平方向に対して十分大きく、強度的にも影響が小さい⁶⁾ことが知られている。それに対して横行方向地震動は脚の浮き上がりにおよぼす影響が顕著であり、また脚と水平材との門型部に高い応力が発生するなど強度的にも影響が大きい。これらの理由から、免震装置はクレーン横行方向に作動するよう配置した。

さらに、効果的に振動を減衰させるために積層ゴムアイソレータと並列に減衰装置を組み込むこととした。減衰装

置としては、機械分野で実績のあるオイルダンパーを用いることとした。オイルダンパーには磁性体をオイルに混入し、オリフィス部分にコイルを設置し電氣的に減衰特性を制御できる製品 (MR ダンパー) も開発されているが、大地震時に電力供給が遮断された場合にも設計時の減衰機能を維持できること、磁性体の長期特性 (沈降) による性能劣化等を考慮して、実績の有る通常タイプのオイルダンパーを採用した。

3. 2 免震装置の構成要素

免震装置は、地震時クレーンの横行方向固有周期を長周期化させ、地震エネルギーを低減させる積層ゴム式免震アイソレータ、地震エネルギーを吸収し地震時応答を抑制させるオイルダンパー、アイソレーターの回転変形を抑制するモーメント受けローラ、アイソレーターの過度の水平変形を防止する平行リンク、荷役作業時におけるクレーン操作性確保のための免震装置を固定するシアピンで構成されている。実機に設置した免震装置の構成図を図-3に示す。本機構の設計に当たっては、

- ・メンテナンスが容易であること
- ・万一の大地震時に交換が容易であること
- ・既存コンテナクレーンへの後付が可能なこと

などを考慮して、脚部車輪と鉛直部材の間にコンパクトに設置できる機構とした。常に免震機構が作動状態の場合には、固有周期が4秒~5秒程度となるため、コンテナの荷役に際して作業性低下やオペレーターの船酔いなどの悪影響があるため、地震時以外は免震機構が作動しないようにシアピンを用いて固定している。地震によって、シアピンに作用する荷重が設定されたせん断破壊強度に達した際にピンが破壊して免震機構が作動するようにしている。

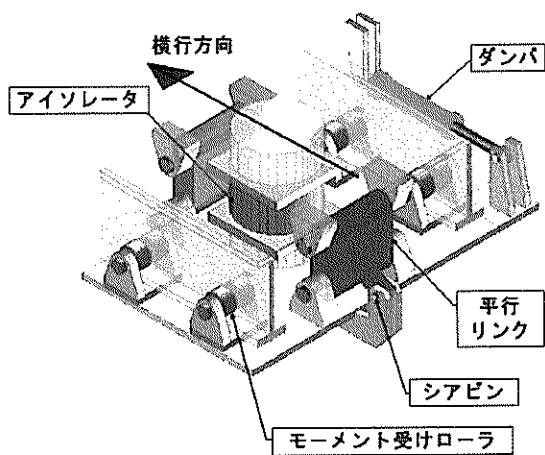


図-3 実機免震装置構成図

4. 試験模型

4. 1 コンテナクレーン模型

模型は実機スパン30m級、実機重量約11000kN、脚構造が剛脚構造の中折れブーム式コンテナクレーンを対象とした。クレーン状態はクレーンの脚が最も浮き上がりやすい作業時状態 (ブームダウン、トロリアウトリーチ位置) および休止時状態 (ブーム中折れアップ、トロリ係留位置) とした。

模型実験に際して、1G場において振動実験を実施すること、コンテナクレーンの振動挙動を再現することを主目的とすること、及び市販されている鋼材を使用することから1G場の相似則を構築した。

ここで、模型の幾何縮尺を λ_l とする。同様に他の物理量についても下付添字を用いて、密度の縮尺 λ_ρ 、時間の縮尺 λ_t 、ひずみの縮尺 λ_ϵ とおく。次元解析的に加速度、慣性力、曲げ剛性、質量、振動数、断面積、断面2次モーメントは以下のように示すことができる。

$$\text{加速度} \quad \lambda_a = \lambda_l / \lambda_t^2 \quad (3.1)$$

$$\text{慣性力} \quad \lambda_f = \lambda_\rho \cdot \lambda_l^3 \cdot \lambda_a = \lambda_\rho \cdot \lambda_l^3 \cdot \lambda_l / \lambda_t^2 = \lambda_\rho \cdot \lambda_l^4 / \lambda_t^2 \quad (3.2)$$

$$\text{曲げ剛性} \quad \lambda_{EI} = \lambda_\rho \cdot \lambda_l^4 (\lambda_\epsilon^2 \cdot \lambda_t) \quad (3.3)$$

$$\text{質量} \quad \lambda_m = \lambda_\rho \cdot \lambda_l^3 \quad (3.4)$$

$$\text{振動数} \quad \lambda_\omega = 1 / \lambda_t \quad (3.5)$$

$$\text{断面積} \quad \lambda_A = \lambda_l^2 \quad (3.6)$$

$$\text{断面2次モーメント} \quad \lambda_I = \lambda_l^4 \quad (3.7)$$

1G場の模型振動実験であることから、加速度の縮尺 $\lambda_a = \lambda_l / \lambda_t^2 = 1$ が与条件となる。このため、

$$\lambda_t = \sqrt{\lambda_l} \quad (3.8)$$

が成立する。また、幾何縮尺に対応して剛性を低下させる場合には、剛性の縮尺に合致した弾性係数を有する材料を使用する必要があるが、一般的に入手が不可能である。本研究で対象としているコンテナクレーン脚の浮上り現象は、脚の曲げ特性が支配的であること、さらに、振動特性が重要なファクターであることを考慮し、現象の支配方程式として、梁の曲げ振動の運動方程式を導入する。

$$E \cdot I \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \rho \cdot A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (3.9)$$

ここで、 $E \cdot I$: 曲げ剛性、 ρ : 密度、 A : 断面積、 u : 変位、 t : 時間 である。

模型(m)と実機(p)の物理量の関係として式(3.10)~式(3.15)を定義する。式(3.14)及び式(3.15)は微分演算子であるが、同様に模型と実機において縮尺が成立する。

$$(u)_p = \lambda_l \cdot (u)_m \quad (3.10)$$

$$(t)_p = \lambda_t \cdot (t)_m \quad (3.11)$$

$$(E \cdot I)_p = \lambda_{EI} \cdot (E \cdot I)_m \quad (3.12)$$

$$(\rho)_p = \lambda_p \cdot (\rho)_m \quad (3.13)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)_p = \frac{1}{\lambda_x} \left(\frac{\partial}{\partial x}\right)_m \quad (3.14)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)_p = \frac{1}{\lambda_t} \left(\frac{\partial}{\partial t}\right)_m \quad (3.15)$$

式(3.10)～式(3.15)を式(3.9)に代入して、

$$\lambda_{EI}(E \cdot I)_m \cdot \frac{1}{\lambda_x^4} \left(\frac{\partial^4}{\partial x^4}\right)_m \cdot \lambda_y (u)_m + \lambda_p \cdot (\rho)_m \cdot \lambda_x^2 \cdot (A)_m \cdot \frac{1}{\lambda_x} \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)_m \lambda_y \cdot (u)_m = 0 \quad (3.16)$$

模型においても梁の曲げ振動の運動方程式(3.9)が成立するためには、式(3.17)が成立することが条件となる。

$$\lambda_{EI} \cdot \lambda_x^{-3} = \lambda_p \cdot \lambda_x^2 \cdot \lambda_y^{-2} \quad (3.17)$$

本研究における模型製作では、市販の鋼材を用いることから模型と実機のヤング率が同一となることから、

$$\lambda_p = 1 \quad (3.18)$$

$$\lambda_y = 1 \quad (3.19)$$

これらを、式(3.17)に代入することにより、

$$\lambda_{EI} = \lambda_x^5 \quad (3.20)$$

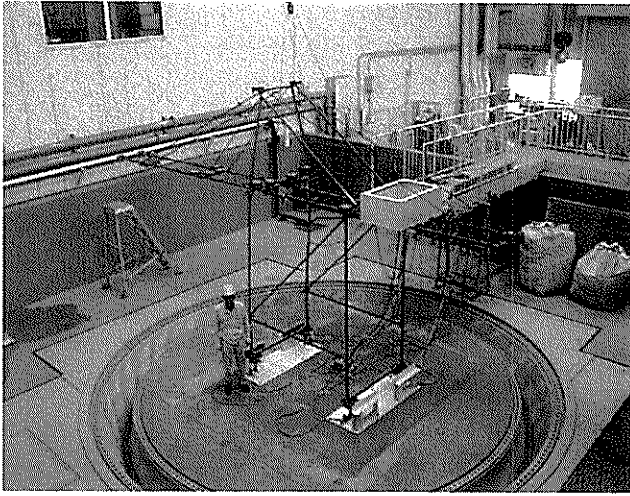
式(3.20)を満足するためには、曲げ変形において材料の弾性係数を変えることと等価になるよう、断面2次モーメントをさらに $1/\lambda_x$ とする必要があり、模型の設計においては断面形状を変えて対応した。以上から、本研究で用いる相似則として表-1を得る。

模型は実機の1/15スケールで、相似則(表-1)に基づいて設計し、質量の付加、剛性の低減などの修正を施している。模型設計に当たって、クレーン部材の破壊現象を再現することを目的とした場合には、構成材料の材料特性(例えば、応力-ひずみ関係、降伏特性等)を実機と模型の間で整合性を持たせる必要があるが、忠実に再現する材料を得ることが困難であることから、部材の断面形状を変えて剛性を低減させる方法を採用した。すなわち対象とする現象が振動であることから実機のモード解析から得られる低次のモードを模型において再現することを目標とした。これにより模型全体の振動特性(固有周期等)を再現している。ただし、高次モードで顕著になる各部材の振動特性については、相似則を全て満足していないため、実機と異なる箇所がある。模型の外観を写真-1、代表寸法を図-4に示す。図-4において四つのクレーン脚を区別するため、海側脚をL1, L2, 陸側脚をL3, L4とした。写真-1において、ガーダー端部などに設置されたオレンジ色の四面体は、補正用の質量である。模型重量は実測値でブームダウン 3349N, ブーム中折れアップ 3295N, 模型重心位置の実測値は図-4に示す座標系でブームダウン($X=0\text{mm}$, $Y=494\text{mm}$, $Z=2407\text{mm}$), ブーム中折れアップ($X=0\text{mm}$, $Y=1060\text{mm}$, $Z=2716\text{mm}$)である。一方、実機の重量および重

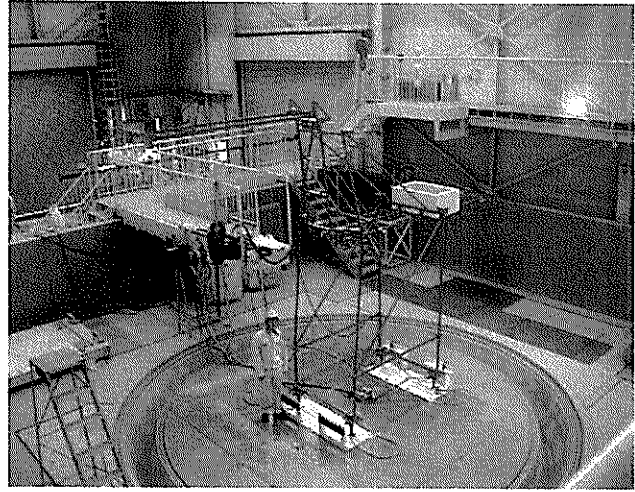
心位置(計算値)を相似則に合わせたものは、ブームダウン 3193N, ($X=4\text{mm}$, $Y=477\text{mm}$, $Z=2426\text{mm}$), ブーム中折れアップ 3094N, ($X=4\text{mm}$, $Y=1053\text{mm}$, $Z=2676\text{mm}$)であり、計測から得られた模型の重心位置は実機と同位置となった。

表-1 1/15 模型相似則

物理量		次元	相似則	実機/模型
縮尺率	λ			15
弾性係数	E	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$	1	1
長さ	l	L	λ	15
加速度	α	LT^{-2}	1	1
時間	t	T	$\sqrt{\lambda}$	3.873
振動数	F	T^{-1}	$1/\sqrt{\lambda}$	0.258
変位	δ	L	λ	15
質量	m	MLT^{-2}	λ^3	3375
力	P	MLT^{-2}	λ^3	3375
バネ定数	k	MT^{-2}	λ^2	225
密度	ρ	ML^{-3}	1	1



《ブームダウン》



《ブーム中折れアップ》

写真-1 クレーン模型

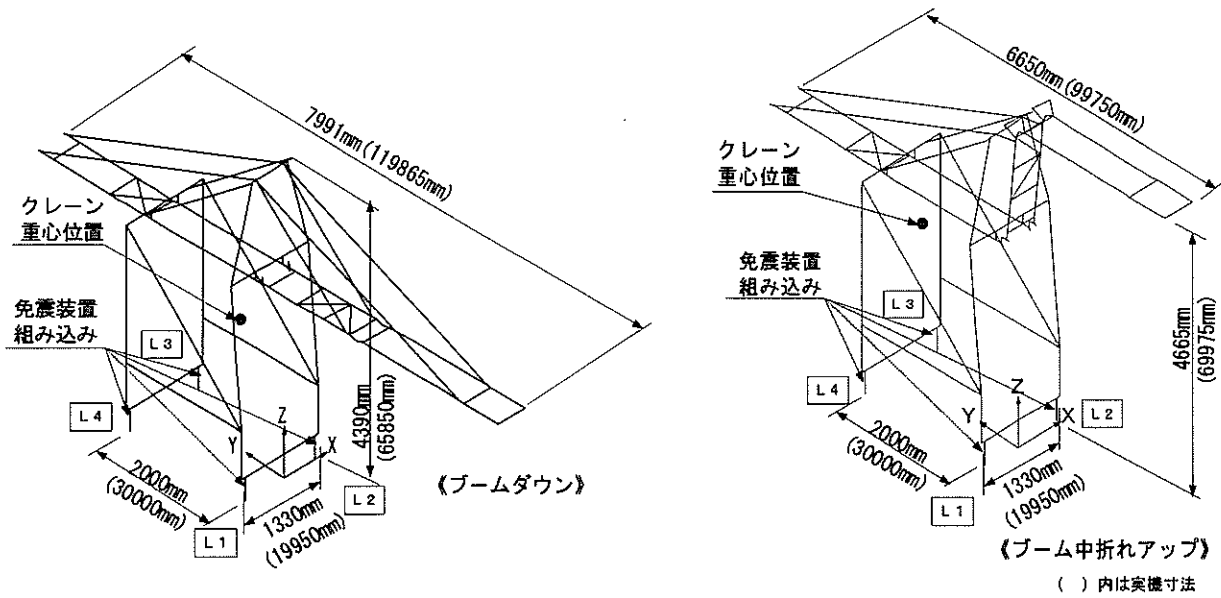
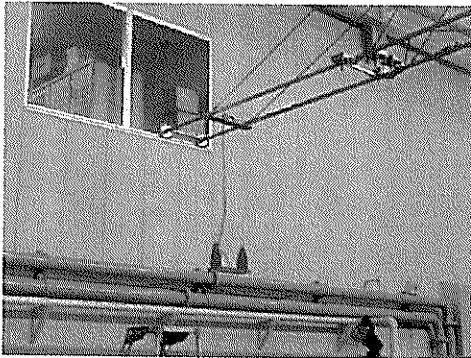


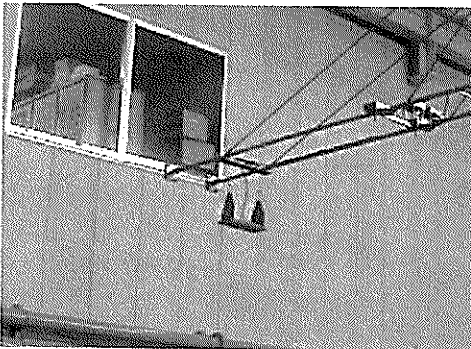
図-4 模型代表寸法

4. 2 吊荷模型

吊荷模型は、ブームダウン状態において、トロリよりロープで吊り下げた吊具とコンテナ（実機重量：約550kN）に相似則を適用した1/15縮尺模型である。模型重量は163N、ロープ長さはコンテナ船ホールド内荷役時を想定した1.2m（実機：18m）と巻き上げ上限位置を想定した0.3m（実機：4.5m）の2種類とした。吊荷模型の固有周期は、ロープ長さ1.2mでは2.2s（実機：8.5s）、ロープ長さ0.3mでは1.1s（実機：4.3s）である。ロープ長さ0.3mの吊荷の固有周期は、クレーンの横行方向固有周期と最も近い値になるが、クレーンと比べて2倍程度離れている。模型の外観を写真-2に示す。



《ロープ長さ1.2m》



《ロープ長さ0.3m》

写真-2 吊荷模型

4. 3 免震装置模型

免震装置模型は相似則を適用した1/15縮尺模型で、積層ゴム免震アイソレータ、ダンパ、平行リンク、モーメント受けローラによって構成されている。免震装置を固定するシアピンは模型製作が困難であることから免震装置作動および非作動状況を再現することとした。アイソレータ模型水平ばね定数およびダンパ模型減衰係数は以下のように設定した。

- ・アイソレータ模型水平ばね定数：0.506N/m
- ・ダンパ模型減衰係数：0.059N・s/m

写真-3に示す灰色のオイルダンパーは、実機と比較すると体積が大きいですが、所期の減衰特性を有している。さらに脚部に曲げひずみ計測用のひずみゲージを貼り付けている。

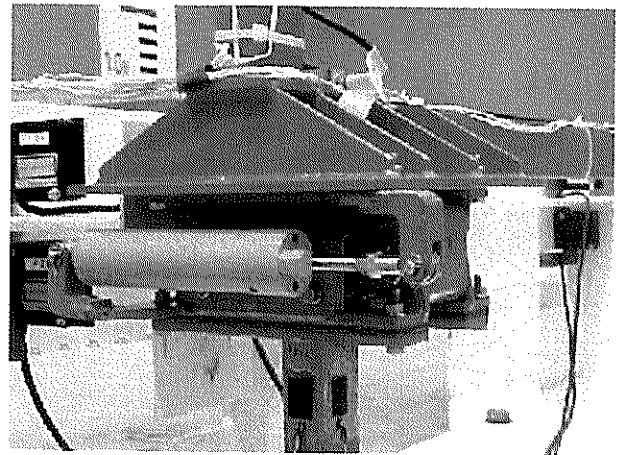


写真-3 免震装置模型

5. 模型振動試験方法

加振実験に先立ち、製作した模型の重心位置計測を実施し、実機と同様の重心位置にあることを確認した。さらに、モード解析結果との照査を実施し模型の妥当性を確認した。

5. 1 加振方法

試験は振動台上に走行レール模型を直接設置し、その上にクレーン模型を載せて、振動台を加振した。振動台は独立行政法人港湾空港技術研究所の三次元水中振動台を使用した。その振動台のテーブルは直径 6m の円形である。加振能力はクレーン横行方向±2.0G、走行方向±1.0G、上下方向±1.5G である。加振周波数は DC~100Hz である。

加振方向はクレーン横行方向を対象とした。まずクレーン模型の固有周期を調べるためパルス加振を行い、次に地震波を入力して加振した。

5. 2 加振波形

振動試験に使用した地震波は八戸波 NS 成分 (1968 年十勝沖地震, 八戸港で観測した地表面波), 大船渡波 E41S 成分 (1978 年宮城県沖地震, 大船渡港で観測した地表面波), 神戸ポートアイランド波 (PI 波) NS 成分 (1995 年兵庫県南部地震, 神戸ポートアイランドで観測した地表面波) を相似則に基づいて、時間軸を $1/\sqrt{15}$ にしたものである。

図-5 にこれらの波形を示す。試験は図-5 に示す地震波形の最大加速度レベルを変化させた入力波にて加振した。表-2 に入力波の最大レベルの範囲を示す。

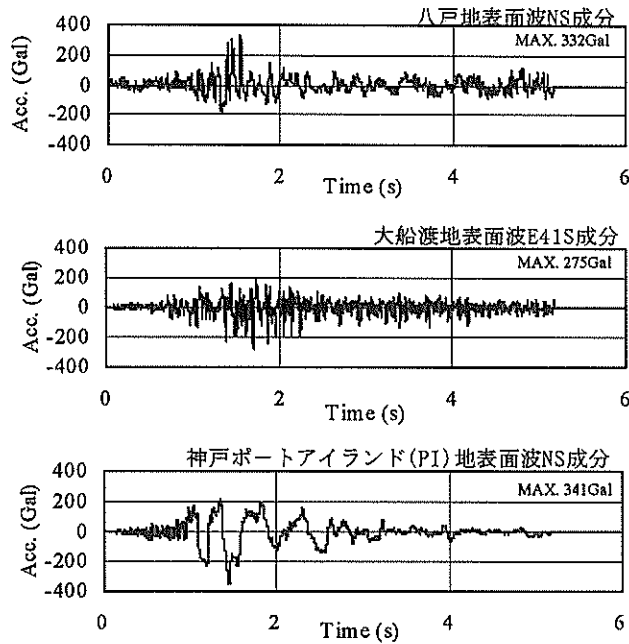


図-5 入力地震波形(時間軸 $1/\sqrt{15}$)

表-2 入力波最大加速度

入力地震波形	最大加速度(Gal)
八戸波	100~480
大船渡波	100~480
神戸ポートアイランド波	100~410

5. 3 試験ケース

表-3 に試験ケースを示す。クレーンの地震時挙動の確認用としてケースⅠ，ロープで吊られた吊荷との動的相互作用検証用としてケースⅡ，免震装置の効果検証用としてケースⅢ，一部の免震装置が作動しない場合の影響検証用としてケースⅣを行った。

5. 4 計測項目および計測器取付位置

加振時のクレーンの動的応答を計測するため，クレーン模型には加速度計，ひずみゲージ，レーザ変位計の計測器を取り付けた。計測項目および計測器を表-4 に，計測器取付位置を図-6 に示す。

加速度計は図-6 の計測位置⑨⑩⑫⑬⑭⑯は 5G 計（横行，走行，上下方向），①③⑪⑬⑭⑯は 2G 計（横行方向），②③④⑤⑥⑦は 1G 計（横行方向）を使用した。加速度計⑯はロープで吊られた吊荷模型に取り付けている。また，脚下部およびポータルタイビームのモーメントと車輪部鉛直反力を求めるため，ひずみゲージを貼り付けた。モーメントは部材両面のひずみゲージの差から曲げひずみを算出した。車輪部鉛直反力は，車輪軸に貼り付けたひずみゲージの曲げひずみと鉛直反力の校正値より算出した。計測時のサンプリング周波数は 512Hz とした。

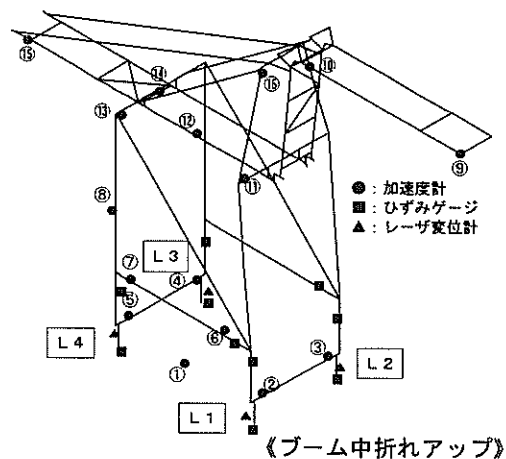
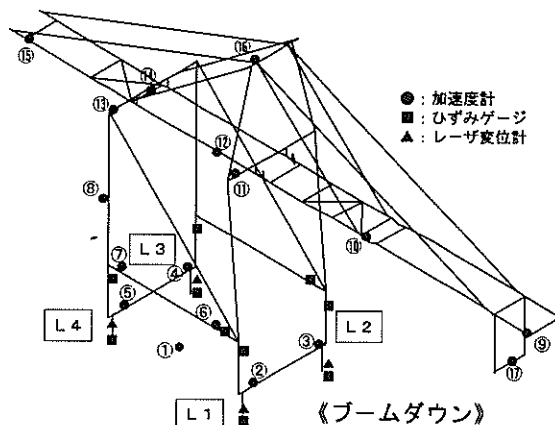


表-3 試験ケース

非免震クレーン 模型	(Ⅰ) 固定した吊荷の場合 (吊荷を質量としてブームに付加)	
	(Ⅱ) ロープで吊られた吊荷の場合	
免震クレーン 模型 (吊荷固定)	(Ⅲ) 4つのクレーン脚すべてに 免震装置がある場合	
	(Ⅳ) 一部の脚 に免震装置が ない場合	L3 に免震装置なし L1, L2, L3 に免震 装置なし

図-6 計測器取付位置

表-4 計測項目および計測器

計測項目	計測器
クレーン応答加速度	加速度計
振動台上加速度	加速度計
脚下部およびポータルタイビームの モーメント	ひずみゲージ
車輪部鉛直反力	ひずみゲージ
脚浮き上がり量	レーザ変位計
免震装置水平変形量	レーザ変位計

6. 模型の固有周期

模型のクレーン横行方向固有周期を表-5に示す。非免震クレーン模型の場合は、パルス加振にて計測した値および解析値を表示している。免震クレーン模型の場合は、パルス加振程度の入力レベルでは免震装置が作動しないため、模型の固有周期を計測することができなかったことから、解析値のみを表示している。参考までに、模型の固有周期から実機に換算した値も表示している。対象とする非免震クレーンの実機が製作されていないことから、解析値による比較にとどまるが、既往のコンテナクレーンにおいて解析値と実機の固有周期の整合性が確認されている。本模型では、ブームダウン時の模型の実機換算1次固有周期が1.941秒に対して解析値が2.05秒となっており5%未満の誤差であった。このことから製作した模型は所期の特性を満足しているものと判断した。また、ブームダウン状態の非免震クレーンおよび免震クレーン模型について、横行方向に変位する固有モード（解析値）を図-7に示す。非免震クレーンの実機換算値は、同規模のコンテナクレーンの固有周期とよく合っている。

表-5 クレーン横行方向固有周期

		ブーム ダウン	ブーム 中折れ アップ
非免震 クレーン (吊荷固定)	模型 (計測値)	0.50s	0.48s
	(実機換算値)	(1.94s)	(1.86s)
	模型 (解析値)	0.53s	0.51s
	(実機換算値)	(2.05s)	(1.98s)
免震 クレーン (吊荷固定)	模型 (解析値)	0.95s	0.91s
	(実機換算値)	(3.68s)	(3.52s)

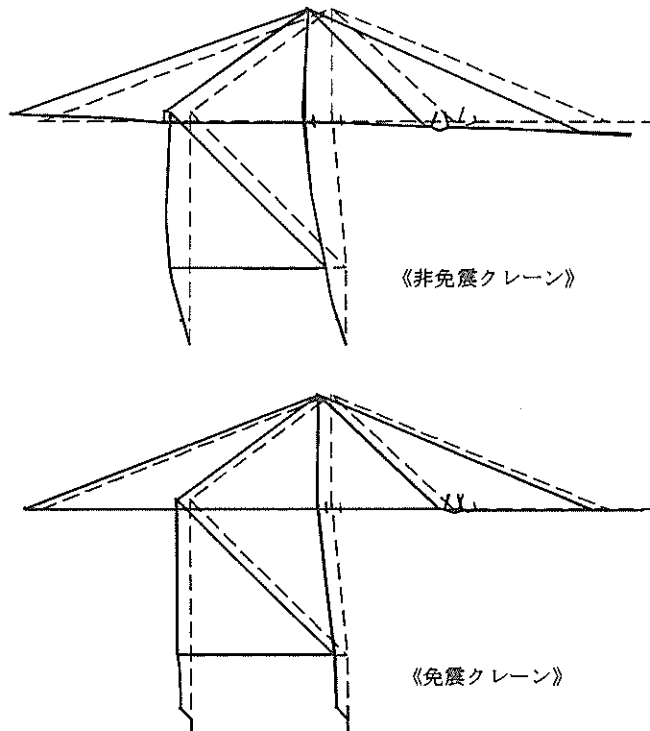


図-7 模型の固有モード図 (解析値)

7. 非免震クレーン模型の地震時挙動確認試験結果

模型試験により、非免震クレーン（免震装置がない従来のクレーン）について以下の知見が得られた。（表-6、7 試験結果および図-8~15 試験結果時刻歴参照。）

なお、試験においては加振直前の値を初期値0としており、試験結果は加振による変動成分のみで、フィルター処理せず計測値をそのまま示している。応答加速度、免震装置水平変形量およびモーメントの正負は方向の違いを示している。応答加速度は図-4 に示す座標系で+Y 方向を正、-Y 方向を負で示している。免震装置水平変形量は図-4 に示す座標系で+Y 方向を負、-Y 方向を正で示している。脚のモーメントは図-4 に示す座標系で+X 軸廻り（時計廻り）を負、-X 軸廻り（反時計廻り）を正とし、ポ-

ータルタイビームのモーメントは、+X 軸廻り（時計廻り）を正、-X 軸廻り（反時計廻り）を負で示している。また、図-8~15 には表-6、7 の最大値の位置を△で示している。

- (1)非免震クレーンは、大地震時脚の浮き上がりや脱輪といった非線形挙動を伴う場合がある。
- (2)脱輪が起こる場合は、ブームダウンでは陸側脚が浮き上がって海側に、ブーム中折れアップでは海側脚が浮き上がって陸側に向けて生じた。脱輪は走行レールの内側に向かって生じる。
- (3)短周期成分の卓越した大船渡波では、非免震クレーンの最大応答加速度はブームダウンで 104Gal、ブーム中折れアップで 152Gal となり、非免震クレーンでも脚の浮き上がりや脱輪は発生しなかった。

表-6 ブームダウン免震試験結果

入力波		八戸地表面波		大船渡地表面波		PI 地表面波			
入力波最大加速度(Gal)		480		480		120		410	
クレーン模型		非免震 クレーン	免震 クレーン	非免震 クレーン	免震 クレーン	非免震 クレーン	免震 クレーン	免震 クレーン	
横行方向 最大 応答 加速度 (Gal)	①振動台	812	808	-909	-925	-128	-119	-414	
	⑥ボ-カク化-ム(L1)	-979	-616	-552	449	913	164	878	
	⑦ボ-カク化-ム(L4)	-723	468	-461	359	745	-147	873	
	⑧脚中央部(L4)	-3925	-1815	2025	-1275	4394	502	-3126	
	⑨ブーム先端	430	-120	118	-90	288	-55	307	
	⑩ブーム中折れ部	286	141	-130	115	356	-69	345	
	⑪脚ク化-ム海側端部	1229	492	-532	561	-1262	-157	-677	
	⑫重心位置(カ-ク-レハ-ル)	227	-102	-104	-80	294	-53	264	
	⑬脚ク化-ム陸側端部	-1736	639	-956	-697	-1491	215	-1132	
	⑭脚ク化-ム陸側中央部	733	-312	392	306	892	118	716	
	⑮カ-ク-後端	381	-109	142	-144	422	-58	274	
⑯頂部ク-ク化-ム	1490	415	-739	-545	1485	155	-938		
脚最大浮き上がり量 (mm)	L1	0	0	0	0	0	0	0	
	L2	0	0	0	0	0	0	0	
	L3	2.2(脱輪)	0	0	0	1.6(脱輪)	0	1.1	
	L4	2(脱輪)	0	0	0	1.7(脱輪)	0	-	
免震装置水平変形量 (mm)	L3	-	-7.3	-	2.7	-	-6.2	-18.5	
	L4	-	-7.4	-	2.1	-	-6.5	-15.7	
車輪部 最大鉛直反力 (N)	L1	910	364	282	198	801	145	695	
	L2	977	397	367	204	932	139	504	
	L3	1403	314	436	191	1247	165	534	
	L4	1191	602	466	363	627	241	702	
最大 モーメント (N・m)	脚	L1	-231	-90	-74	-47	-192	79	238
		L2	-257	-90	-76	-49	-192	73	258
		L3	229	-81	-71	-55	208	-67	223
		L4	222	-77	-56	-50	213	67	243
	ボ-カク化-ム	L1	264	102	83	60	232	-88	-289
		L2	307	103	95	63	236	-81	-314

表-7 ブーム中折れアップ免震試験結果

入力波		八戸地表面波		大船渡地表面波		PI 地表面波			
入力波最大加速度(Gal)		480		480		120		410	
クレーン模型		非免震 クレーン	免震 クレーン	非免震 クレーン	免震 クレーン	非免震 クレーン	免震 クレーン	免震 クレーン	
横行方向 最大 応答 加速度 (Gal)	①振動台	741	804	-825	-924	-129	-122	-425	
	⑥ボ-クルク化-ム(L1)	1691	634	-683	733	-1252	-175	836	
	⑦ボ-クルク化-ム(L4)	1237	545	558	526	-1049	-162	729	
	⑧脚中央部(L4)	-4374	1418	-2339	-1468	4160	-630	-2693	
	⑨ブ-ム先端	-522	149	169	-137	-332	-70	300	
	⑩ブ-ム中折れ部	-945	-131	-278	199	-636	75	367	
	⑪脚ク化-ム海側端部	2556	410	-647	500	1818	-215	976	
	⑫重心位置(カ-グレベル)	600	136	152	96	357	-68	284	
	⑬脚ク化-ム陸側端部	-3366	856	-1089	1028	-1955	261	1208	
	⑭脚ク化-ム陸側中央部	-1095	371	418	280	-611	-134	621	
	⑮カ-グ後端	-662	-117	214	-131	-548	68	299	
⑯頂部クスタ化-ム	-3479	561	-561	-713	-1796	-170	1118		
脚最大浮き上がり量 (mm)	L1	1.2	0	0	0	1	0	0	
	L2	1.7(脱輪)	0	0	0	1.2	0	0	
	L3	0	0	0	0	1.1	0	0	
	L4	0	0	0	0	0	0	0	
免震装置水平変形量 (mm)	L3	-	8.3	-	2	-	-6.1	-22.7	
	L4	-	7.3	-	2.1	-	-5.7	-24.5	
車輪部 最大鉛直反力 (N)	L1	1632	254	408	170	748	176	619	
	L2	1350	350	490	231	1050	173	618	
	L3	1086	254	390	296	837	122	409	
	L4	1311	365	586	353	1252	223	735	
最大 モーメント (N・m)	脚	L1	240	-80	-93	-47	253	71	246
		L2	-251	-77	-103	-46	259	69	248
		L3	264	-106	103	-53	278	76	221
		L4	236	-98	95	-53	-255	76	220
	ボ-クルク化-ム	L1	-299	99	112	61	-315	-83	-304
		L2	315	99	125	60	-325	-81	-308

8. 免震クレーン模型の振動試験結果

8. 1 免震装置の効果検証試験結果

ブ-ムダウン、ブ-ム中折れアップの非免震クレーンおよび免震クレーン(ともに吊荷はブ-ムに固定)の試験結果を表-6, 7, 試験結果時刻歴を図-8~15に示す。

表-6, 7および図-8~15によれば、クレーン重心位置の応答加速度は免震装置を取り付けることにより大幅に低減している。八戸波ではブ-ムダウンで55%、ブ-ム中折れアップで77%低減し、大船渡波ではブ-ムダウンで23%、ブ-ム中折れアップで37%低減している。神戸ポートアイランド波(PI波)120Gal加振ではブ-ムダウンで72%、ブ-ム中折れアップで71%低減している。また、PI波ではブ-ムダウン、ブ-ム中折れアップとも、410Gal加振時の免震クレーンの重心位置応答加速度は、120Gal加振時の非免

震クレーンと比べて、入力加速度が3.4倍以上になっているにもかかわらず、非免震クレーンの応答加速度より小さくなっている。

また、免震装置により脚の浮き上がりが抑制され、脱輪が防止されている。車輪部鉛直反力は、免震装置により八戸波では50%以上、大船渡波では22%以上、PI波では62%以上低減している。脚のモーメントについても、免震装置により八戸波では60%以上、大船渡波では11%以上、PI波では59%以上低減している。応答加速度の減衰についても、非免震クレーンではほとんど減衰していないのに対し、免震クレーンでは減衰要素として免震装置にダンパを設けていることから、非常に高い減衰を示している。

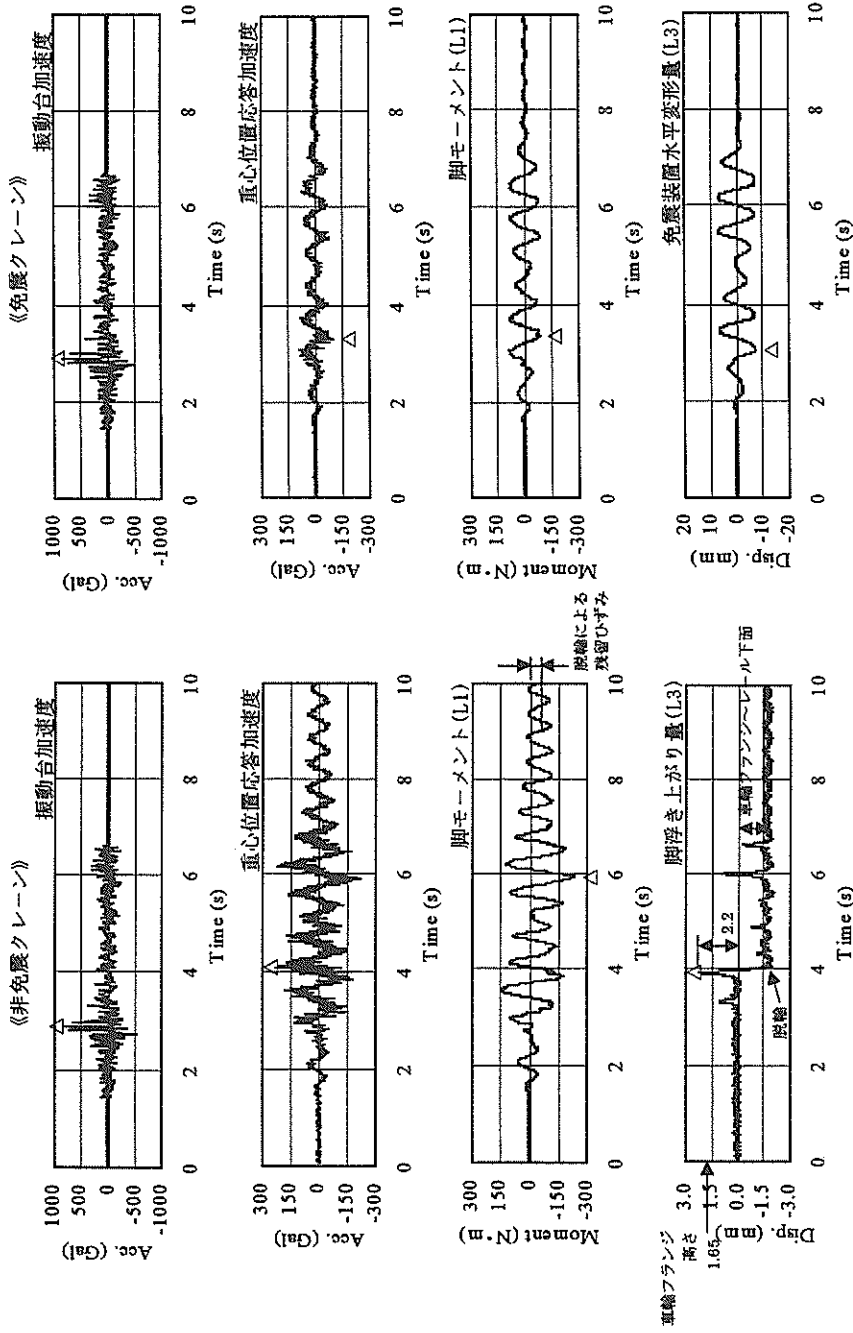


図-8 ブームダウン免震試験結果時刻歴 (八戸地表面波 480Gal 加振)

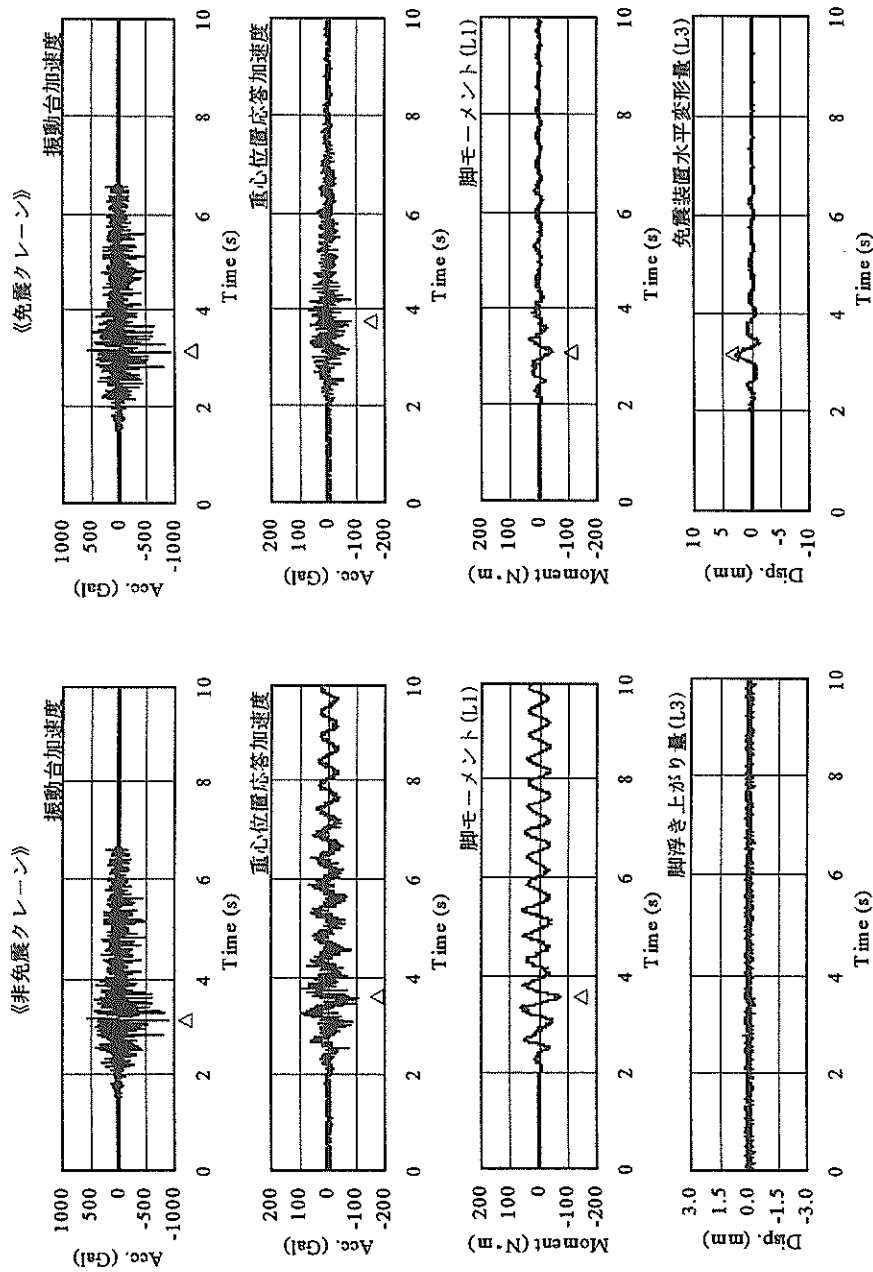


図-9 ブームダウン免震試験結果時刻歴 (大船渡地表面波 480Gal加振)

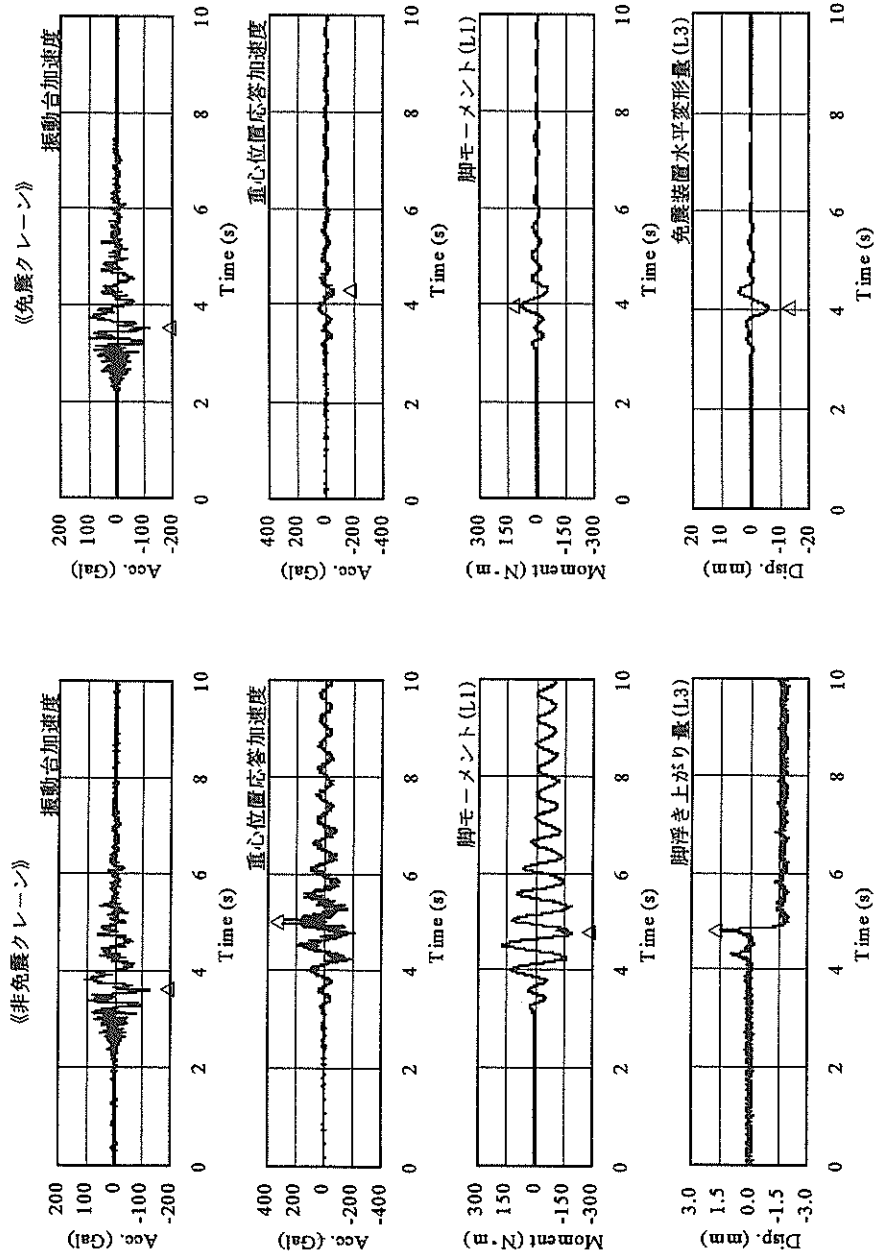


図-10 ブームダウン免震試験結果時刻歴 (PI 地表面波 120Gal 加振)

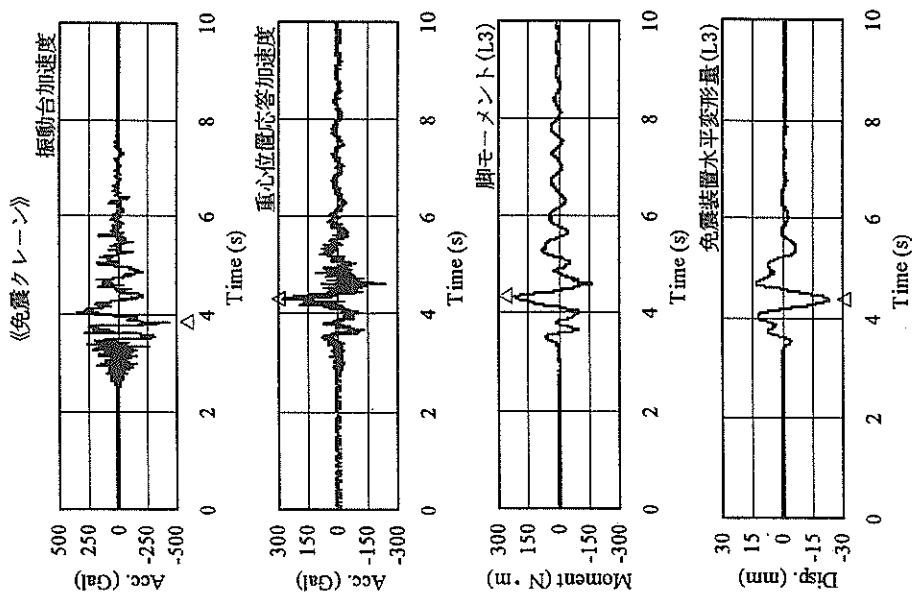


図-12 ブーム中折れアープ免震試験結果時刻歴 (PI 地表面波 410Gal 加振)

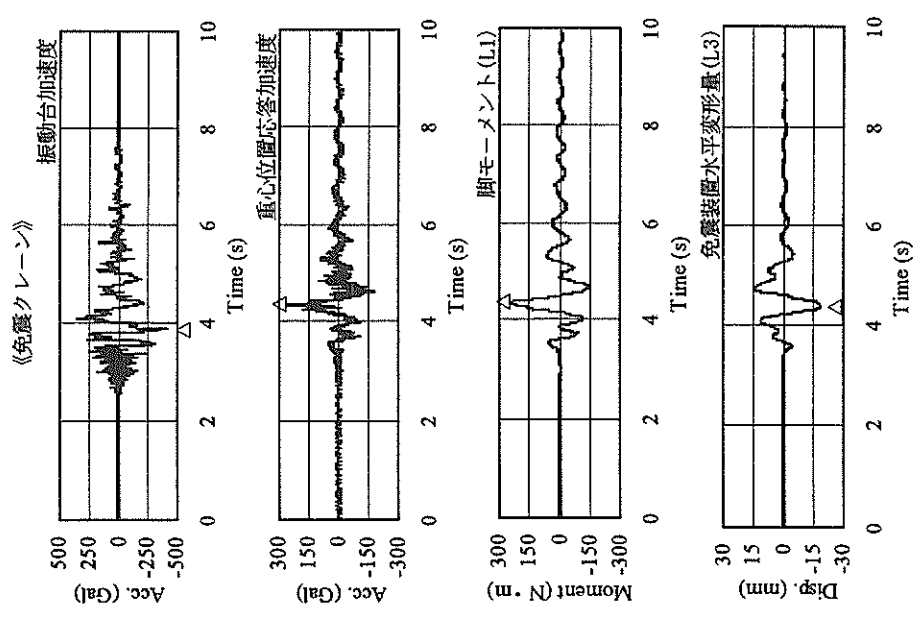


図-11 ブームダウン免震試験結果時刻歴 (PI 地表面波 410Gal 加振)

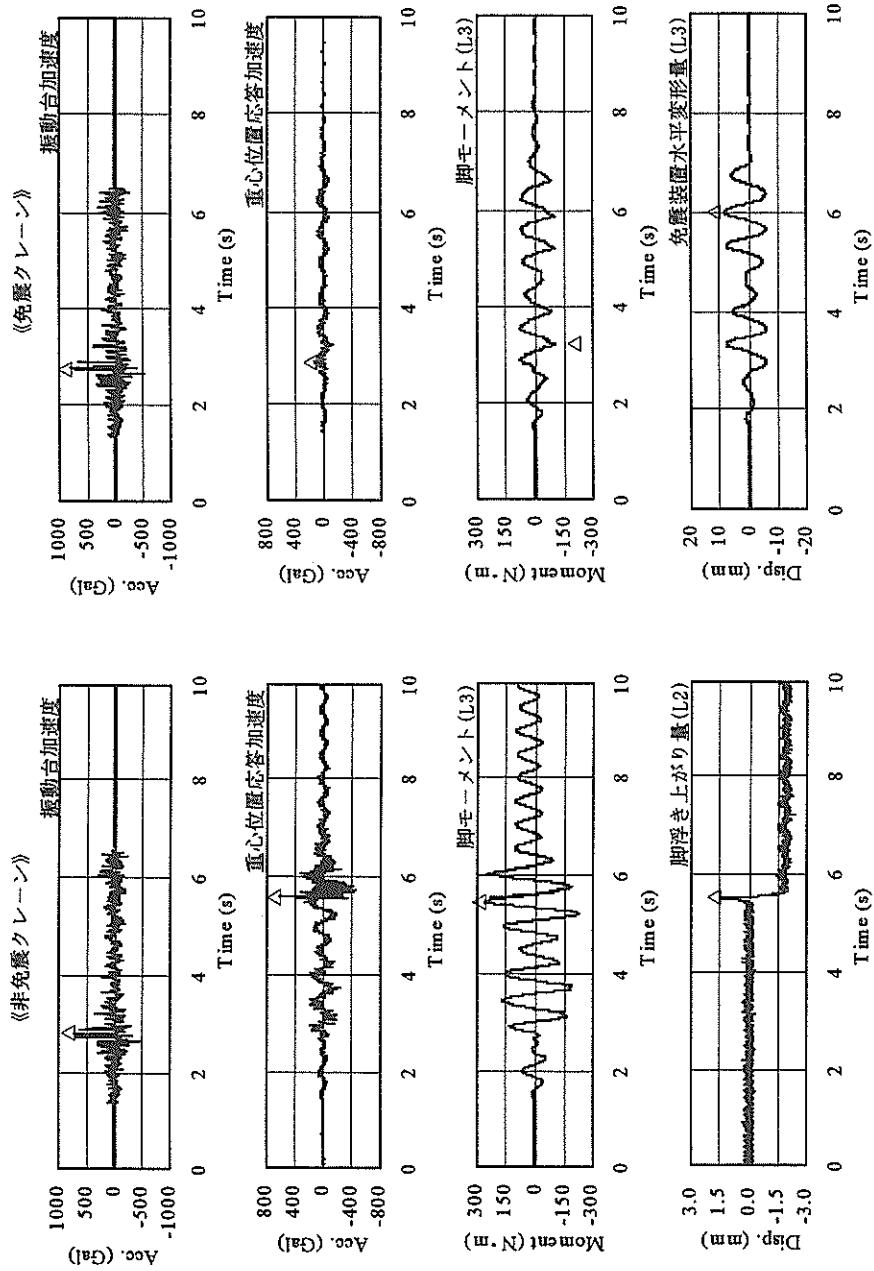


図-13 ブーム中折れアップ免震試験結果時刻歴 (八戸地表面波 480Gal加振)

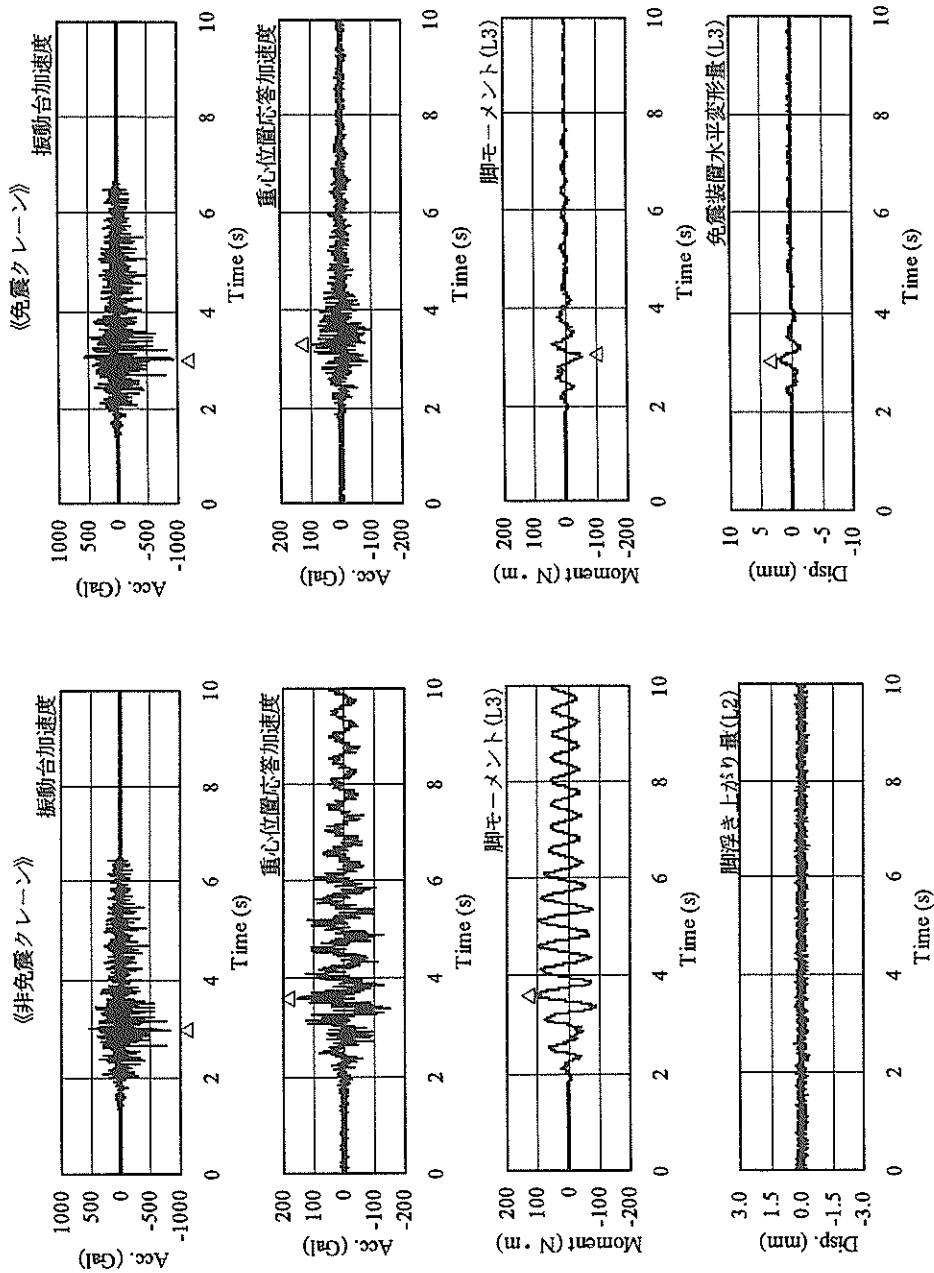


図-14 ブーム中折れアープ免震試験結果時刻歴 (大船渡地表面波 480Gal 加振)

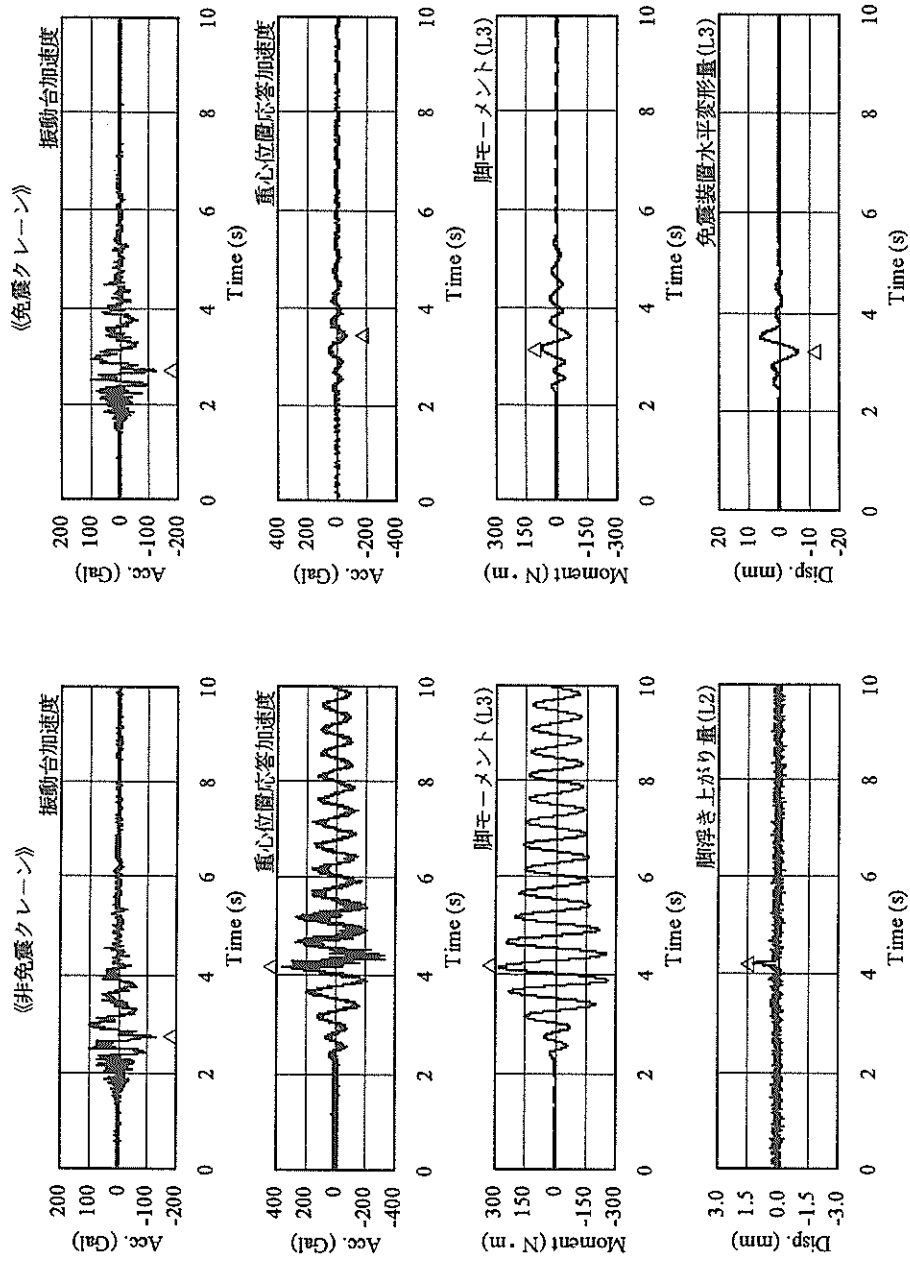


図-15 ブーム中折れアップ免震試験結果時刻歴 (PI 地表面波 120Gal 加振)

8.2 一部の免震装置が作動しない場合の検証試験結果

四つの各クレーン脚に取り付ける免震装置のうち、一部の免震装置が作動しないことによる影響を調べるため、一部の脚のみ免震装置を作動させる試験を行った。本試験はブームダウン状態において、表-8に示す試験ケースを行った。免震装置がない場合（非免震クレーン）と一部の免震装置がない試験結果の比較を表-9、試験ケースAにおける八戸波 480Gal 加振での試験結果時刻歴を図-16に示す。図-16には表-9の最大値の位置を△で示している。

表-9より八戸波 300, 400 および 480Gal 加振と PI 波 120Gal 加振について、免震装置がない場合と一部の免震装置がない場合（試験ケース A, B）とも脚の浮き上がりや脱輪が発生している。免震装置がない場合では二つの陸側脚(L3, L4)が共に脱輪しているのに対し、一部の免震装置がない場合（試験ケース A, B）では陸側脚の片方のみ(L3)が脱輪している。また、L3に免震装置がない場合（試験ケース A）、L2とL4の免震装置水平変形量の差が大きい。

これらのことから、一部の免震装置が作動しない場合は免震装置がない場合と脚の浮き上がりや脱輪の発生する加振加速度は大差ないと考えられる。また、一部の免震装置が作動しない場合は脚の浮き上がりにはクレーン走行方向へのねじれが影響していることがわかる。図-17にねじれのモード図を示す。

表-8 一部の免震装置がない試験ケース

		免震装置取り付け脚 No.
A	三つの脚に 免震装置取り付け	L1, L2, L4 (L3は免震装置なし)
	一つの脚に 免震装置取り付け	L4 (L1, L2, L3は免震装置なし)

表-9 一部の免震装置がない試験結果（ブームダウン）

入力波		八戸地表面波				大船渡地表面波			PI地表面波		
入力波最大加速度(Gal)		100	300	400	480	100	300	480	100	120	
重心位置 横行方向最大 応答加速度 (Gal)	免震装置なし	-56	-151	-222	227	37	-80	-104	211	294	
	(A)L3 免震装置なし	35	112	176	186	-25	-55	-86	-81	—	
脚最大 浮き上がり量 (mm)	免震装置なし	L1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		L2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		L3	0	0.6	2.1(脱輪)	2.2(脱輪)	0	0	0	0.8	1.6(脱輪)
		L4	0	0.5	2.3(脱輪)	2(脱輪)	0	0	0	0.9	1.7(脱輪)
	(A)L3 免震装置なし ^{注1)}	L1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		L2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		L3	0	0.7	1.9(脱輪)	2.1(脱輪)	0	0	0	0	—
		L4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	(B)L1, L2, L3 免震装置なし ^{注1)}	L1	0	0	0	—	0	0	0	0	0
		L2	0	0	0	—	0	0	0	0	0
		L3	0	0.6	2(脱輪)	—	0	0	0	0	0.8
		L4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	L2とL4の免震 装置最大水平 変形差 (mm)	(A)L3 免震装置なし	1.9	4.2	4.9	5.3	1.2	1.8	2.5	4	—

注1) : L3 免震装置なしおよび L1, L2, L3 免震装置なしの試験では L4 の浮き上がり量の計測は行っていないが、脱輪は発生していない。

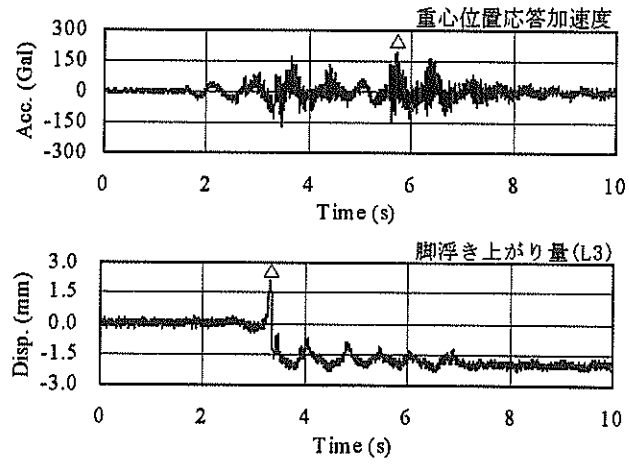


図-16 一部の免震装置がない試験（ケースA）結果時刻歴（八戸地表面波 480Gal 加振）

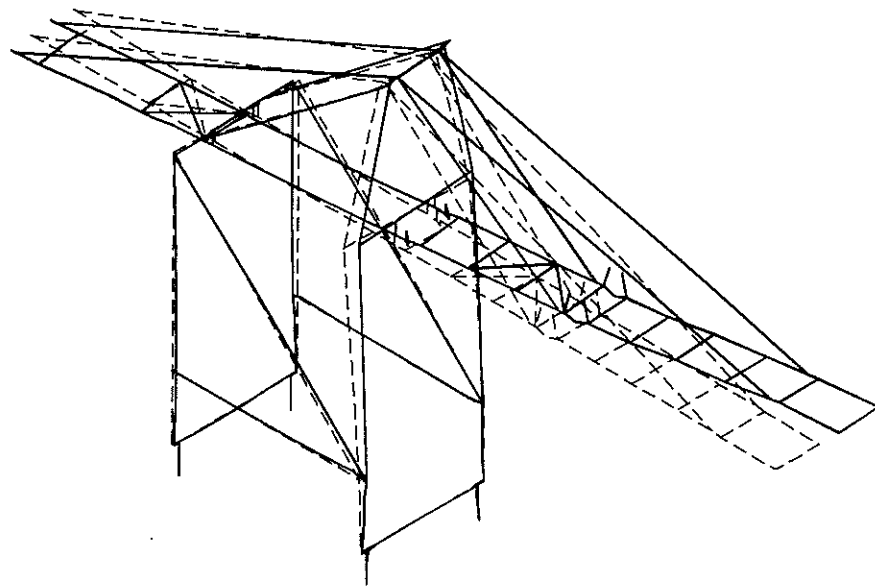


図-17 ねじれモード図

9. 吊荷との動的相互作用検証試験結果

ロープで吊られた吊荷によるクレーンへの動的影響を調べるため、非免震クレーン模型にロープで吊られた吊荷模型を取り付け、吊荷との連成振動試験を行った。非免震クレーン模型と吊荷模型の質量比は 19:1 である。本試験では、振動台上に設置した栈橋模型にクレーン模型を載せて、振動台を加振している。栈橋模型は上部工重量約 8500N、固有周期（実測値）0.17s、減衰率（計算値）0.028 である。本試験のみ、加振は図-18 に示した基盤での地震波形の最大加速度レベルを変化させた入力波で行っている。なお、試験は最大加速度を 100Gal から上げていき、脱輪や脚の浮き上がりが発生した時点で終了した。脱輪や脚の浮き上がりが発生した最大加速度は、吊荷を固定した場合もロープで吊した場合も同じであり、それは表-10 に示す加速度であった。

ブームダウン状態で、吊荷を固定した場合（吊荷を質量としてブームに付加）およびロープで吊した場合の試験結

果について、脱輪した場合を表-10、脱輪しなかった場合を表-11 に示す。脱輪した場合での、吊荷固定および吊荷ロープ長さ 0.3m の試験結果時刻歴を図-19~21 に示す。図-19~21 には表-10 の最大値の位置を△で示している。

表-10、11 および図-19~21 によれば、クレーン重心位置の応答加速度は、脱輪した場合には固定およびロープ吊りの三つのケースのばらつきが大きい。これは脱輪の状態によって衝撃力が違っているためによるものと考えられる。脱輪しなかった場合には、ロープ吊りは固定に比べて 1.0~1.1 倍となっている。また、ロープで吊られた吊荷の応答加速度は重心位置と比べてかなり小さい。これらのことから、応答加速度について、ロープで吊られた吊荷によるクレーンへの影響は小さいと言える。脚の浮き上がりについても、固定とロープ吊りの場合とも表-10 に示す同じ加振加速度で脚の浮き上がりや脱輪が発生しており、ロープで吊られた吊荷による脚の浮き上がりへの影響は小さいと言える。

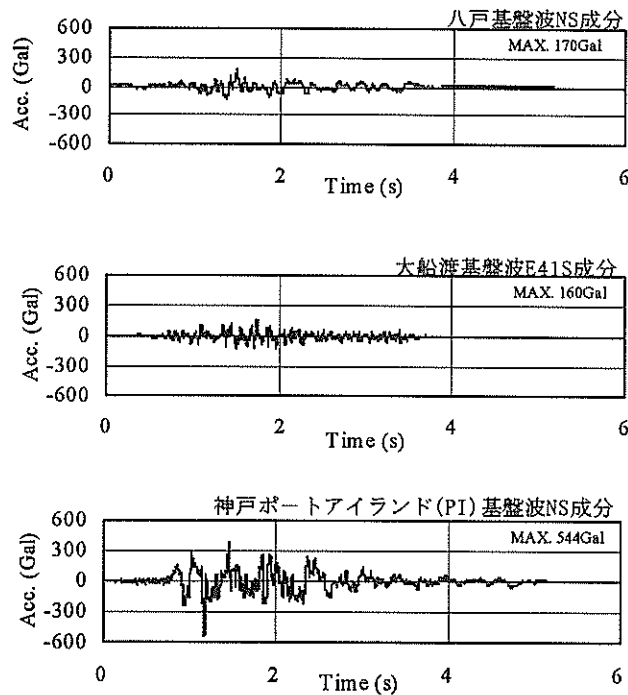


図-18 吊荷試験時入力地震波形（時間軸 $1/\sqrt{15}$ ）

表-10 ブームダウン吊荷試験結果(脱輪した場合)

入力波		八戸基盤波			大船渡基盤波			PI基盤波			
入力波最大加速度(Gal)		200			320			150			
吊荷		固定	ロープ 吊り	ロープ 吊り	固定	ロープ 吊り	ロープ 吊り	固定	ロープ 吊り	ロープ 吊り	
ロープ長さ		—	1.2m	0.3m	—	1.2m	0.3m	—	1.2m	0.3m	
横行方向 最大 応答 加速度 (Gal)	①振動台	286	291	292	-609	-609	-603	-251	-245	-249	
	②棧橋上面	-333	-334	-327	-376	-395	-374	-222	-211	-213	
	③ボーム中央部(L1)	976	-1380	685	-1103	1508	1197	2464	-2467	984	
	④ボーム中央部(L4)	678	-1006	504	858	1100	896	-2618	-2205	759	
	⑤脚中央部(L4)	2559	-4372	-1961	-4267	3259	3174	4388	4395	3448	
	⑥ブーム先端	335	446	312	-206	-298	329	697	477	367	
	⑦ブーム中折れ部	329	470	254	348	266	321	631	453	383	
	⑧脚クレーン海側端部	956	1974	800	1270	1240	1137	3493	3062	946	
	⑨重心位置(カッターバル)	205	335	179	193	258	235	410	367	233	
	⑩脚クレーン陸側端部	-1540	-2030	1076	2177	2600	2631	-4826	-4979	1489	
	⑪脚クレーン陸側中央部	807	962	600	537	-533	658	1550	1513	629	
	⑫カッター後端	290	558	312	252	427	332	680	512	311	
	⑬頂部クレーン	1052	2017	912	1221	1806	1087	2263	2151	1562	
⑭吊荷	—	-15	-36	—	-18	-25	—	15	35		
脚最大浮き上がり量 (mm)	L1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	L2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	L3	1.9 (脱輪)	1.9	1.7 (脱輪)	1.8 (脱輪)	1.7 (脱輪)	1.7 (脱輪)	2.1 (脱輪)	1.9 (脱輪)	1.7 (脱輪)	
	L4	0.7	0	0	0	0	0	1.9	1.8	0.5	
車輪部 最大鉛直反力 (N)	L1	790	626	662	456	576	570	799	765	831	
	L2	454	438	386	416	444	376	490	636	471	
	L3	1137	2047	1201	594	740	948	647	667	890	
	L4	1038	1264	1037	1304	1268	1290	3188	4547	1255	
最大 モーメント (N・m)	脚	L1	-186	-180	-171	-148	-139	-143	176	-177	-177
		L2	-184	-163	-166	-129	-128	-128	-181	-198	-209
		L3	187	-149	175	128	151	151	191	211	225
		L4	162	-152	-159	-118	-124	-122	174	166	186
	ボーム	L1	226	213	208	180	167	177	-228	220	216
		L2	217	199	193	156	155	157	221	233	245

表-11 ブームダウン吊荷試験結果 (脱輪しなかった場合)

入力波		八戸基盤波			大船渡基盤波			PI 基盤波			
入力波最大加速度(Gal)		100			100			100			
吊荷		固定	ロープ吊り	ロープ吊り	固定	ロープ吊り	ロープ吊り	固定	ロープ吊り	ロープ吊り	
ロープ長さ		-	1.2m	0.3m	-	1.2m	0.3m	-	1.2m	0.3m	
横行方向 最大 応答 加速度 (Gal)	①振動台	151	155	159	-209	-204	-205	-173	-175	-167	
	②栈橋上面	-181	-179	-180	-128	-119	-124	-139	-149	147	
	③ボーム中央部(L1)	373	364	380	352	337	315	-462	-473	-531	
	④ボーム中央部(L4)	269	263	279	235	237	221	359	-326	313	
	⑤脚中央部(L4)	688	656	-729	773	-814	-821	-2518	-1428	-2132	
	⑥ボーム先端	85	-93	-101	-87	-90	-125	148	140	187	
	⑦ボーム中折れ部	-83	-90	-91	-92	69	76	192	146	187	
	⑧脚外側部	288	-328	311	497	431	424	-509	-516	-519	
	⑨重心位置(カマクラ)	-84	-85	-91	66	69	-74	-124	-134	131	
	⑩脚外側部	581	581	571	619	677	645	-1166	-651	-1001	
	⑪脚外側部中央部	-193	-230	-257	-206	-153	-167	-408	335	-386	
	⑫カマクラ後部	-82	92	-101	98	99	-95	134	-151	165	
	⑬頂部クロスボーム	273	331	409	391	466	354	795	-568	-631	
	⑭吊荷	-	-13	-19	-	11	13	-	-13	25	
脚最大浮き上がり量 (mm)	L1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	L2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	L3	0	0	0	0	0	0	0.6	0	0	
	L4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
車輪部 最大鉛直反力 (N)	L1	223	168	242	184	181	178	306	303	342	
	L2	193	248	264	200	184	175	327	311	290	
	L3	321	362	320	199	197	193	345	420	413	
	L4	321	446	312	241	186	187	617	740	620	
最大 モーメント (N・m)	脚	L1	-91	-96	-92	-48	-48	-47	-134	-140	-143
		L2	-95	-89	-94	-47	-45	-46	-121	-131	-127
		L3	92	-85	-89	-48	-45	-44	118	121	124
		L4	92	91	91	-47	-46	-46	135	140	136
	ボーム中央部	L1	111	111	107	58	54	55	162	171	173
		L2	115	105	110	57	54	56	147	151	149

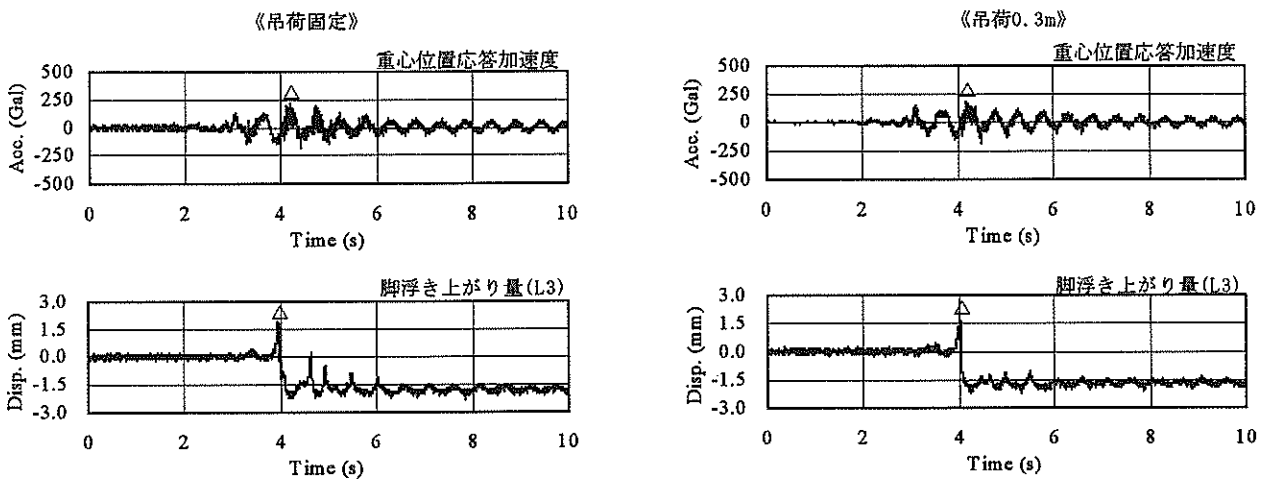


図-19 ブームダウン吊荷試験結果時刻歴 (八戸基盤波 200Gal 加振)

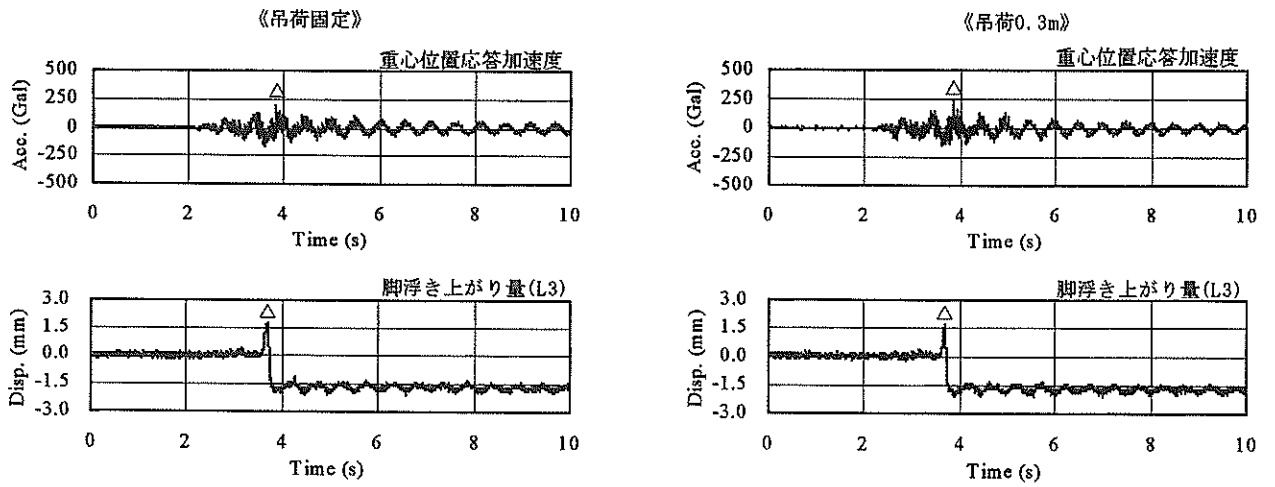


図-20 ブームダウン吊荷試験結果時刻歴 (大船渡基盤波 320Gal 加振)

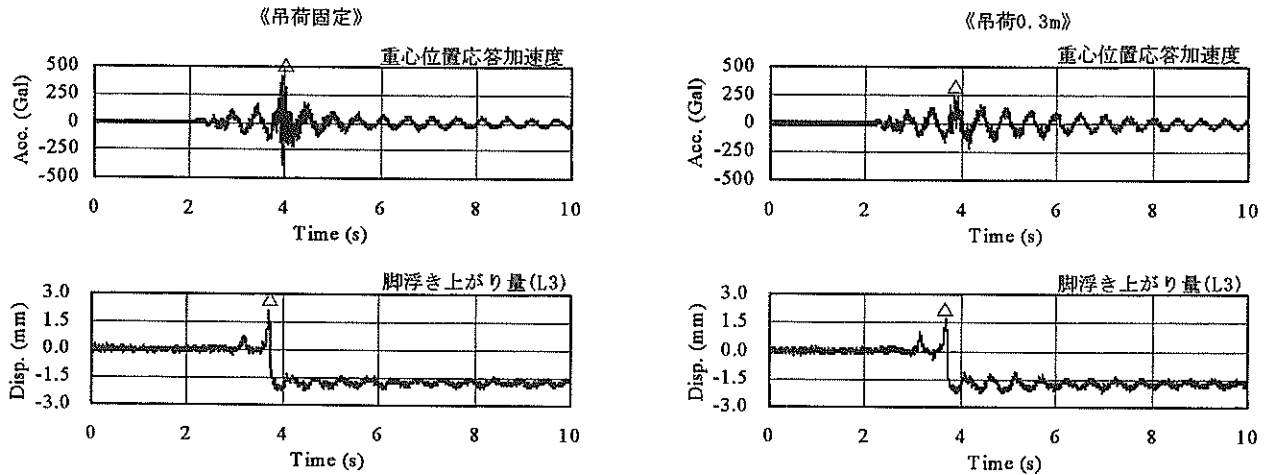


図-21 ブームダウン吊荷試験結果時刻歴 (PI 基盤波 150Gal 加振)

10. 動的シミュレーション解析の実用性の検討

対象とする現象が脚の浮上や免震機構の作動といった非線形性が強いことから、一般的な線形応答解析では現象を再現できないことが既往の研究で明らかになっている⁶⁾。本研究では模型試験にて得られたデータより、幾何学的非線形性を考慮した動的シミュレーション解析の実用性を検討した。

シミュレーション解析は汎用構造解析プログラム ABAQUS Ver. 5.8-1 を用いて行った。クレーンモデルは模型試験で用いたブームダウン模型を対象とした。梁要素により立体骨組構造としてモデル化している。クレーン脚下端部には、脚の浮き上がりや車輪の滑動を表現するために GAP 要素を適用している。免震装置の積層ゴムは線形の水平ばね要素、ダンパは減衰要素としてモデル化している。

八戸地表面波 480Gal 加振でのクレーン重心位置応答加速度（ガーダレベル）の解析結果時刻歴について、非免震クレーンの場合を図-22、免震クレーンの場合を図-23 に示す。図-8 の試験結果と比較すると、クレーン重心位置の応答加速度については、加速度レベルは若干解析結果が大きく出ているものの、解析結果と試験結果の波形はよ

く一致している。脚の浮き上がりや免震装置の水平変形についても、解析結果と試験結果はよく一致している。言い換えれば、本研究において構築した数値シミュレーションモデルは、模型実験結果を再現できることが示されたことになる。模型振動実験は実機との間の縮尺に起因する相似則の問題が有ることは否めないが、少なくとも模型振動実験における強い非線形性を有する現象を再現できる。また、実機による検証を実施し実験結果・動的シミュレーション結果との整合性が確認されている。これらのことから、シミュレーション解析により脚の浮き上がりなどを伴う非線形性の強い地震時のクレーン挙動に対しても再現できることが確認できた。これにより実機設計においても解析シミュレーションを用いることが可能である。但し、実機設計に用いることのできる解析モデル・入力パラメタおよび解析プログラムは、模型実験や実機振動実験による精度確認がなされている必要がある。

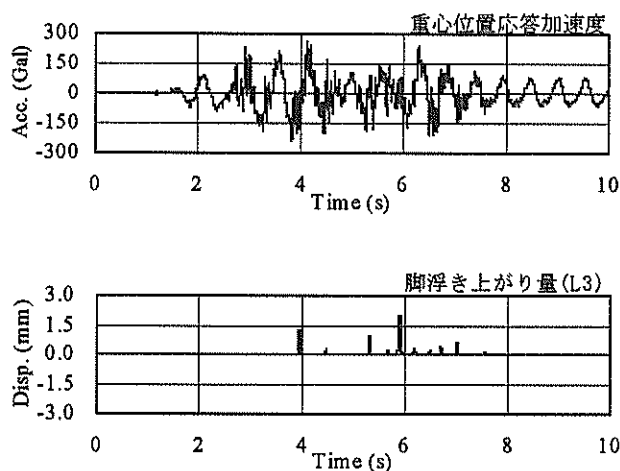


図-22 ブームダウン非免震クレーン解析結果時刻歴（八戸地表面波 480Gal 加振）

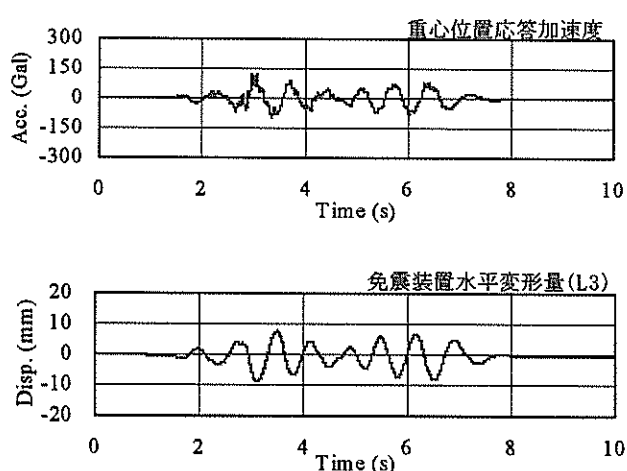


図-23 ブームダウン免震クレーン解析結果時刻歴（八戸地表面波 480Gal 加振）

11. あとがき

縮尺模型振動試験により、積層ゴム式免震装置がコンテナクレーンの耐震対策として有効であることが確認できた。

以下に本研究にて得られた結果を要約する。

- (1) 非免震クレーン（免震装置がない従来のクレーン）は、大地震では脚の浮き上がりや脱輪といった非線形挙動を伴う場合がある。
- (2) 脱輪が起こる場合は走行レールの内側に向かって生じる傾向である。
- (3) 短周期成分の卓越する大船渡波では、非免震クレーンでも脚の浮き上がりや脱輪は発生しなかった。
- (4) クレーンの応答加速度、脚のモーメントおよび車輪部鉛直反力は免震装置により大幅に低減される。
- (5) 非免震クレーンで発生する脚の浮き上がりおよび脱輪は免震装置により防止できる。
- (6) 一部のクレーン脚に免震装置がない場合は、免震装置がない非免震クレーンの場合と脚の浮き上がりや脱輪の発生する加振加速度に大きな違いはない。
- (7) 一部のクレーン脚に免震装置がない場合は、脚の浮き上がりにはクレーン走行方向へのねじれが影響している。
- (8) 吊荷をロープで吊した場合とブームに固定した場合は、クレーンの応答加速度はあまり差がない。
- (9) ロープで吊られた吊荷によるクレーン脚の浮き上がりへの影響は小さい。
- (10) 模型試験にて得られたデータより、脚の浮き上がりなどを伴う非線形性の強い挙動に対しても、本研究で提案したモデルによる動的シミュレーション解析は十分有効であり、実機設計への実用性が確認できた。これにより、設計法としてシミュレーション解析を用いることが可能となる。但し、実機設計に用いることのできる解析モデル・入力パラメータおよび解析プログラムは、本研究で実施したような模型実験や実機振動実験による精度確認がなされている必要がある。

今回開発・実用化した免震コンテナクレーンは東京港埠頭公社大井埠頭耐震第4バースに3台設置され、2001年10月供用を開始した。この実機クレーンについては、三井造船株式会社玉野事業所工場内にて加振試験を行い、実機においても免震装置によりクレーンの固有周期が期待どおり長周期化することを確認している⁸⁾。

免震コンテナクレーンは、万一大地震が発生しても損傷

したり、脱輪したりせず、地震後すぐに荷役作業を行え、地震直後の緊急物資輸送などの復旧活動や国内外の経済活動を支える物流機能の維持といった重要な役割を担うものと期待できる。さらに、免震コンテナクレーン基礎部である岸壁構造への負荷が軽減されることから、コンテナバース建設コストを縮減できるものと期待される。

(2003年2月14日受付)

備考

本研究は平成12年度「耐震強化岸壁上に設置するコンテナクレーンの地震時挙動に関する共同研究」と題して、港湾空港技術研究所・三井造船(株)により実施されたものである。

謝辞

クレーン模型振動試験の実施及び試験データ整理において多くの方々に多大な助言・協力を得ており、ここで深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 菊池：地震に強い港湾をめざして、港湾荷役，Vol. 41，No. 5，(1996)，p. 508
- 2) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告—機械編 機械設備の被害，(1996)，p. 223—232
- 3) 佐原：耐震強化岸壁，港湾荷役，Vol. 39，No. 6，(1994)，p. 644
- 4) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻)，(1999)，p. 258
- 5) 菅野：岸壁の耐震設計について，港湾荷役，Vol. 45，No. 6，(2000)，p. 609
- 6) 江頭，山本，田邊，中島，菅野，宮田，柏崎，金山：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，(1999)，p. 475—492
- 7) 社団法人日本機械学会：耐震設計と構造力学，(1985)，p. 244
- 8) 永松，小柳：栈橋式耐震強化岸壁に設置した免震装置付コンテナクレーン，港湾荷役，Vol. 47，No. 1，(2002)，p. 128—129