

運輸省港湾技術研究所

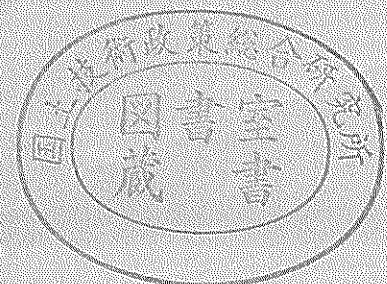
港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL.38 NO.2 June 1999

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第38巻 第2号 (Vol.38, No.2), 1999年6月 (June 1999)

目次 (CONTENTS)

1. 潮位変動および密度の非一様性を考慮した砂浜海岸地下水の非定常過程に関する数値解析
.....内山雄介..... 3
(Numerical Analysis on Groundwater Flow in Sandy Beaches Considering Tidal Fluctuation and Density Distribution
.....Yusuke UCHIYAMA)
2. 久里浜湾の流れ特性と生態系に関する研究
.....日比野忠史・豊田政史・西守男雄・細川恭史・鶴谷広一..... 29
(Current Field Characteristics and Ecosystem Investigations in Kurihama Bay
...Tadashi HIBINO, Masashi TOYOTA, Dan-o NISHIMORI, Yasushi HOSOKAWA and Hiroichi TSURUYA)
3. 海水交換型防波堤の透過量評価手法の提案
.....西守男雄・日比野忠史・豊田政史・細川恭史・石原弘一・森下正志・鶴谷広一..... 63
(Estimation of Water Mass Exchanged through Water Exchangeable Breakwater
.....Dan-o NISHIMORI, Tadashi HIBINO, Masashi TOYOTA, Yasushi HOSOKAWA,
Hirokazu ISHIHARA, Masashi MORISHITA and Hiroichi TSURUYA)
4. 粘性土のセメンテーションによる強度発現メカニズム
.....土田 孝・湯 怡新..... 99
(Strength Mobilization due to Cementation of Clay
..... Takashi TSUCHIDA and Yi Xin Tang)
5. 港湾空港事業における軽量混合処理土工法の開発と適用事例
.....土田 孝..... 131
(Development and Use of Foamed Treated Soil in Port and Airport Project
..... Takashi TSUCHIDA)
6. 海洋環境 (酒田港20年) に暴露したコンクリート梁の材料劣化が梁の力学性能に及ぼす影響
.....横田 弘・秋山哲治・濱田秀則・三上 晃・福手 勤..... 169
(Effect of Degradation of Concrete on Mechanical Properties of Reinforced Concrete Beams
Exposed to Marine Environment (for 20 years in Sakata)
.....Hiroshi YOKOTA, Tetsuji AKIYAMA, Hidenori HAMADA, Akira MIKAMI and Tsutomu FUKUTE)
7. 鋼直杭式棧橋の地震時保有耐力に関する実験および解析
.....横田 弘・川崎 進・菅原 亮・Hazem El-Bakry・川端規之..... 223
(Ultimate Structural Performance of Steel-Pile Supported Wharves
... Hiroshi YOKOTA, Susumu KAWASAKI, Ryo SUGAWARA, Hazem El-Bakry and Noriyuki KAWABATA)
8. 防波堤ケーソンの自動設置システムの開発 (第二報) - アンカーワイヤ方式の水力模型実験による検討 -
.....米山治男・白石 悟・名里健吾・高橋英俊..... 257
(Development of Automatic Installation System of Breakwater Caisson (2nd Report)
- Evaluation of Anchor Wire System by Hydraulic Model Experiments -
..... Haruo YONEYAMA, Satoru SHIRAIISHI, Kengo NAZATO and Hidetoshi TAKAHASHI)
9. RC港湾構造物の塩害に係わる環境要因の定量的評価に関する研究
.....濱田秀則..... 299
(Quantitative Evaluation of Environmental Factors Related to Chloride Attack of RC Harbor Structures
.....Hidenori HAMADA)

10. 破壊確率を考慮した防波堤のライフサイクルコストと許容破壊確率
.....長尾 毅・松渕 知..... 395
(Studies on Life-Cycle Cost and Allowable Failure Probability of Breakwaters
..... Takashi NAGAO and Satoru MATSUBUCHI)
11. 係留施設のライフサイクルコスト発生と維持管理意志決定支援システムの構築に関する基礎的研究
.....松渕 知・横田 弘..... 423
(Life-Cycle Cost Analysis of Berthing Facilities and Development of A Decision Support System
during their Maintenance Work
..... Satoru MATSUBUCHI and Hiroshi YOKOTA)
12. 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
.....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..... 475
(Experiment on Uplifting of Legs of Container Cranes under Strong Earthquakes
..... Takaki ETOU, Shunsuke YAMAMOTO, Toshiro TANABE, Susumu NAKASHIMA・
Takahiro SUGANO, Masafumi MIYATA, Akihiro KASHIWAZAKI and Tadafumi KANAYAMA)

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

江頭 隆喜^{*1}・山本 俊介^{*2}・田邊 俊郎^{*3}・中島 晋^{*4}
菅野 高弘^{*5}・宮田 正史^{*6}・柏崎 昭宏^{*7}・金山 維史^{*7}

要 旨

大地震時におけるコンテナクレーンの脚の浮き上がりといった動的挙動を再現するため、1/15スケールのコンテナクレーンの模型を製作し、振動台にて加振実験を行った。また、クレーンに静的な水平荷重をかけた時の脚浮上がりについても同様に測定を行った。その結果、クレーンの動的な挙動を把握することができ、また動的・静的な荷重に関わらず部材にかかる力は同じであることが分かった。

また、クレーンを1質点系として表現した簡易モデル及び3次元FEM非線形動的解析(詳細モデル)において、模型実験との検討を行った。簡易モデルにおいて、クレーン応答加速度は模型実験の結果と一致しており、設計時においてクレーンの応答を検討する目的であれば適用可能であるといえる。また、詳細モデルにおいては、応答加速度のレベル及びその波形が極めて一致しており、クレーン応答のみならず地震時の脚浮き上りを考慮に入れた検討が可能であるといえる。

今回の模型実験により、クレーンの地震時の浮き上がり時の挙動を把握することができ、クレーンと係留施設との動的相互作用を考慮した設計を行う際の、地震時のクレーンの応答を簡便に再現できる設計法、及び浮き上りを考慮した設計法確立への有効なデータをとる事ができた。

キーワード：コンテナクレーン、大規模地震、脚浮き上がり、静的・動的模型実験、
1質点系モデル、3次元FEM非線形動的解析

*1機械技術部 機械作業システム研究室

*2構造部 構造振動研究室 受託研修生 (株式会社日本港湾コンサルタント)

*3機械技術部 機械作業システム研究室長

*4機械技術部 主任研究官

*5構造部 構造振動研究室長

*6構造部 構造振動研究室

*7 石川島播磨重工業(株)技術研究所

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1

電話：0468-44-5040, Fax：0468-44-0575, E-mail：etoh@cc.phri.go.jp

Experiment on Uplifting of Legs of Container Cranes under Strong Earthquakes

Takaki ETOU*¹ · Shunsuke YAMAMOTO*² · Toshiro TANABE*³
Susumu NAKASHIMA*⁴ · Takahiro SUGANO*⁵ · Masafumi MIYATA*⁶
Akihiro KASHIWAZAKI*⁷ · Tadafumi KANAYAMA*⁷

Synopsis

We made an experiment using shaking table with container crane model which is 1/15 scale and can reappear dynamic behavior of crane such as uplifting of crane's leg. And we made an experiment with crane model loaded horizontal static force. And the result was that we could know the dynamic behavior of crane and appearing same level force on parts regardless of the load was dynamic or static.

Furthermore, we investigated the effect of two kind of numerical simulations (the single mass model analysis and the 3-D FEM nonlinear response analysis) with test results. The single decked mass-spring model analysis were conducted to simplify the behavior of the crane model. The 3-D FEM nonlinear response analysis is an effective method to simulate the uplifting behavior.

From the results described above, we had instructive data to design a container crane and quay wall considering , such as uplifting of leg, dynamic interaction at the earthquake using more simple method.

Key Words : Container Crane, Big Earthquakes, Uplifting of Legs,
Dynamic/Static Uplifting Tests, Single Mass Model Analysis,
3-D FEM Nonlinear Response Analysis

*1 Member of Machinery System Laboratory, Machinery Division

*2 Former Trainee of Structural Dynamics Laboratory, Structural Engineering Division (Japan Port Consultants, Ltd.)

*3 Chief of Machinery System Laboratory, Machinery Division

*4 Senior Research Engineer, Machinery Division

*5 Chief of Structural Dynamics Laboratory, Structural Engineering Division

*6 Member of Structural Dynamics Laboratory, Structural Engineering Division

*7 Reserch Institute, Ishikawajima-Harima Heavy Industries, Co., Ltd.

1-1-3, Nagase, Yokosuka, 239-0826, JAPAN

Phone : 0468-44-5040, Fax : 0468-44-0575, E-mail : etoh@cc.phri.go.jp

目 次

要旨	475
1. まえがき	479
2. 模型概要	479
2.1 コンテナクレーン模型	479
2.2 計測器取付位置	480
3. 模型実験概要	481
3.1 静的浮き上がり実験	481
3.2 動的（加振）浮き上がり実験	482
4. 模型実験結果	483
4.1 静的浮き上がり実験結果	483
4.2 動的浮き上がり実験結果	487
5. 簡易モデルの検討	490
5.1 簡易モデルの概要	490
5.2 簡易モデルの検討結果	490
6. 詳細モデルの検討	491
6.1 クレーンのモデル化	491
6.2 詳細モデルの検討結果	491
7. 結論	491
8. あとがき	492
謝辞	492
参考文献	492

1. まえがき

平成7年1月17日に発生したM=7.2の直下地震により神戸港の港湾施設も大きな損傷を受け、この震災を契機に、耐震強化の施設の対象を拡大し、外国貿易上重要な施設であるコンテナターミナルの一部についてもレベル2地震動を対象とした¹⁾耐震性能を有することとなった。これにより、耐震強化岸壁に設置するコンテナクレーンも、耐震強化岸壁のレベル2地震動を対象とした耐震性能を満たさなければならない。しかし、実際兵庫県南部地震において摩耶埠頭やポートアイランドPC-8等でコンテナクレーン脚の浮き上がり（ロッキング）の痕跡²⁾が見られるように、レベル2地震動では脚の浮き上がりを起こす可能性がある。このことから、コンテナクレーンのレベル2地震動に対する耐震設計法を検討する必要がある。

またコンテナクレーンは、構造物である岸壁の上に設置されるため、地震時のコンテナクレーンと岸壁の動的相互作用についても検討する必要がある。コンテナクレーンを設置する岸壁の構造には、重力式、矢板式、栈橋式がある。重力式及び矢板式の場合、地盤も含めた岸壁質量がコンテナクレーン質量に比べて非常に大きいため、これらの形式の岸壁の地震時挙動はコンテナクレーンの影響をほとんど受けないものと考えられる。一方、栈橋式岸壁の場合、栈橋及びコンテナクレーンの質量及び固有周期が同程度であるため、栈橋とコンテナクレーンの動的相互作用の影響が顕著に現れる可能性が大きい。栈橋の現行設計法では、クレーンから輪荷重のみを考慮するにとどまっております、クレーンの設計法においては、設置する岸壁については全く考慮されていない³⁾。現段階ではコンテナクレーン、栈橋の設計において、地震時の動的相互作用は考慮されていない状況にある。

以上の背景により、本研究ではコンテナクレーンと栈橋モデルの連成振動実験を行い、動的相互作用や脚浮き上がりの挙動を解明し、その結果から動的応答解析の再現性の向上を図り、更にその上で、動的相互作用を簡便に再現できる設計法及び脚浮き上がりの設計法への反映方法を検討することにより、これらを考慮した栈橋の設計法を開発することを目的としている。

今回の報告は、コンテナクレーン単体で振動実験を行い、大地震時の脚の浮き上がりなど、コンテナクレーンの挙動を再現して動的特性等を解明し、設計における取り扱い方法を検討したものである。図-1に研究全体で本報告の占める部分を示す。



(*)本報告の占める部分

図-1 研究全体フロー図

2. 模型概要

2.1 コンテナクレーン模型

兵庫県南部地震では、クレーンは休止状態（ブームが起伏状態）であったため重心が陸側にあり、海側の脚が浮き上がりやすい状態であった。しかし実際浮き上がりが生じやすいのはブームダウン時で、この時重心は海側にあり、揺れによって陸側脚が浮きやすい状態となっている。実験モデルとしても、不利な条件であるブームダウン時を対象とした。

クレーン模型は、実験設備の制約から実機30m級のコンテナクレーン（図-2）の1/15とした。模型の代表寸法を図-3に示す。模型実験においては実機と模型の「長さ」の縮尺だけでなく、種々の物理量の縮尺を適切に設定する必要があり、これを相似則で規定する。

脚の浮き上がり現象は、重力に打ち勝つ力が上向きに作用する現象であるため、クレーンの模型の相似則において重力加速度を合わせる必要がある。それを実現するためには、相似則に基づいて設計された模型に対して、質量を付加する、剛性を低減するなどの修正を施した変形相似則を用いなければならない。

剛性を低減する場合、弾性係数が異なる材料とする

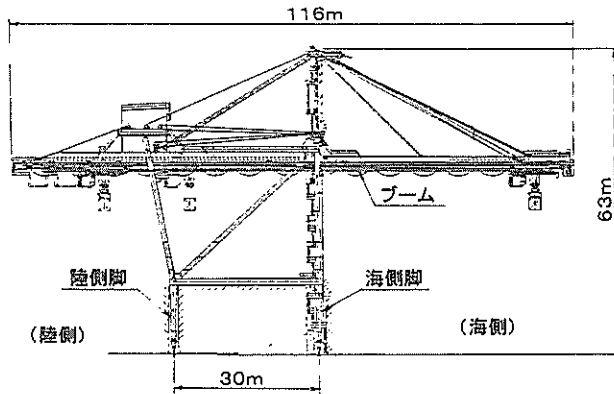


図-2 コンテナクレーンの断面図

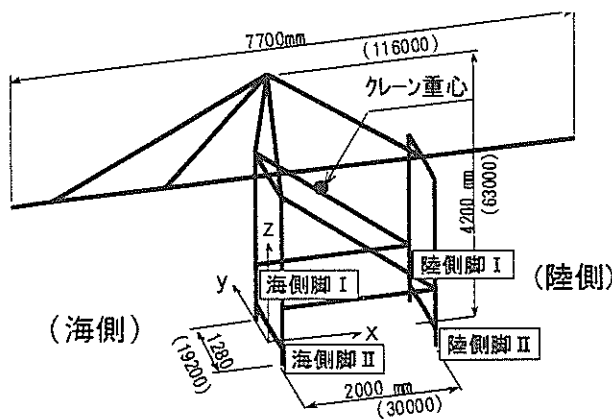


図-3 模型寸法 ()内は実機寸法

方法があるが、適切な弾性係数をもつ材料の入手は困難である。一方、コンテナクレーンの地震時の浮き上がり挙動は脚の曲げ変形が支配的である。そこで、曲げ変形のみに着目し、脚部材の断面形状を変化させることにより、材料の弾性係数を変えるのと同様の結果を得ることとした。また、これにより模型の振動特性（固有周期など）も再現できるものである。

以上の考えから選定した相似則を表-1にまとめる。この相似則に基づき、JIS規格材の使用を前提として、選択した主要部材（一般構造用角形鋼管及び一般構造用炭素鋼管）の配置を図-4に示す。さらに、重量を合わせるため、剛性として寄与しない箇所に質量を付加し、クレーン模型の重量は実測値で3100.7Nとなった。クレーン重心位置は図-3中の○印に示すように実機とほぼ同じ位置の、ブーム下の海側脚寄り（模型重心位置；725mm, 0mm, 2125mm）に位置している。

コンテナクレーンが岸壁に設置される際、図-3において左側が海側、右側が陸側となり、クレーンはY方向

表-1 1/15モデル相似則検討

物理量	次元	実機/模型
縮尺率	n	15.00
ヤング率	E	15.00
密度	ρ	1.00
変位	δ L	15.00
力	F MLT ⁻²	n ² Ep/Em
振動数	f T ⁻¹	(1/n)(Ep ρ m/Em ρ p) ^{0.5}
加速度	a LT ⁻²	Ep ρ m/(nEm ρ p)
応力	σ ML ⁻¹ T ⁻²	Ep/Em
断面積	A L ²	n ²
断面2次moment	I L ⁴	n ⁴
曲げ剛性		759375.00
重量	kgM	(n ³)(ρ p/ ρ m)
		3375.00

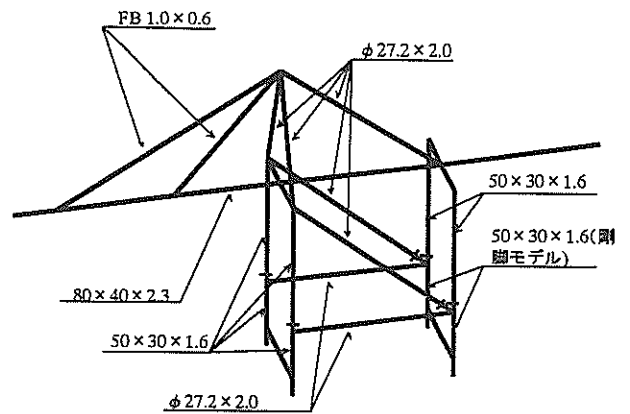


図-4 模型主要部材 (単位mm)

に走行する。以下、レール走行と直角となる方向はX方向、鉛直方向はZ方向とする。今回の実験において加振方向はX方向のみを対象とした。理由としてクレーン走行方向においては、車輪が回転・滑動する事によりクレーンへの入力地震力が軽減され、また鉛直方向は水平2方向の1/2~1/3程度の地震力である事が多く、通常のクレーン構造では鉛直方向の強度は水平方向に対して十分に大きく、応力的にも影響が小さいためである。なお、図-3においてクレーン脚の区別が付きやすいように、海側にある脚を奥より海側脚 I、海側脚 II、陸側にある脚を奥より陸側脚 I、陸側脚 IIとした。

2.2 計測器取付位置

クレーン模型には脚部、水平材、斜材、シルビーム等に合計で64枚の歪ゲージを接着した。水平材より上はトラス構造で剛な構造であり、水平材より下の脚は弾性材として考えられ、最も変形を受けるのは脚上部（脚と水平材の接合部）である。また事前に行った予備実験においても脚上部で最大の値が出た。よって今回歪ゲージは図-5に示すように、（脚・水平材接合付近の）脚及び

表-2 計測器一覧

(加速度計)				
型式名	名称	定格負荷	応答周波数範囲(23°C)	適用
AS-5TG	小型3軸加速度変換器	±5G	DC~100Hz 感度偏差±5%	クレーン重心
ASW-1A	防水型加速度変換器	±1G	DC~40Hz 感度偏差±5%	(振動台), (棧橋上部工)

(歪ゲージ)			
型式名	形状	ベース (長さ×幅)	適用
KGF-5-120-C1-11L15M3R	単軸3線式平行ビコ線付	5×1.4	脚, 水平材

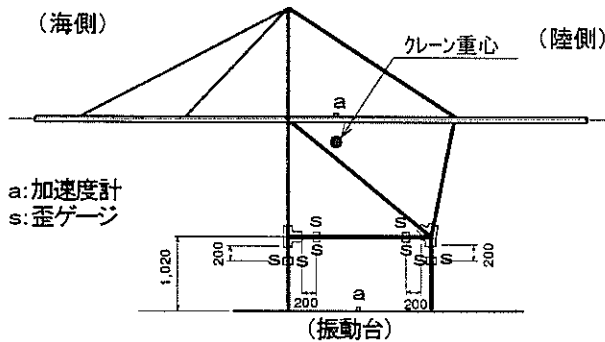


図-5 計測器取付位置 (単位mm)

水平材部分に注目して計測を行った。各部材において、部材両面のゲージの差から曲げひずみを求め、和から軸ひずみを計算している。

また、加振時のクレーンの動的挙動を見るため、クレーンブーム上(クレーン重心付近)に加速度計を取り付け、クレーン応答加速度の測定をした。実験において使用した計測器を表-2に示す。

3. 模型実験概要

3.1 静的浮き上がり実験

(社)港湾荷役機械化協会が提案しているコンテナクレーンの耐震設計の手引き⁴⁾による、浮き上がり限界荷重の算定は、海側及び陸側の両方向について、水平慣性力を重心位置にかけ、陸側または海側の脚基部の鉛直反力が零になる大きさを求めその平均とする、となっている。今回加振(動的)実験との浮き上がりの条件を比較するため、静的浮き上がり実験を実施し、海側、陸側からのそれぞれの浮き上がり限界荷重について求めた。またその時の、脚及び水平材にかかるにかかる曲げモーメント、軸力(脚部のみ)についても測定した。

図-6より、海側からの浮き上がり限界荷重 Ps_1 は、

$$\cdot Ps_1 = b \times W / H \quad (N) \quad (1)$$

陸側からの浮き上がり限界荷重 Ps_2 は、

$$\cdot Ps_2 = a \times W / H \quad (N) \quad (2)$$

で表わされ、浮き上がり限界荷重 Wcr は、

$$\begin{aligned} \cdot Wcr &= (Ps_1 + Ps_2) / 2 \\ &= (a + b) \times W / (2H) \\ &= L \times W / (2H) \quad (N) \quad (3) \end{aligned}$$

と表わされる。

ここに、

a ; 海側脚から重心位置までの水平距離 (m)

b ; 陸側脚から重心位置までの水平距離 (m)

H ; クレーン重心高さ (m)

L ; レールスパン (m)

Ps_1 ; 海側からの浮き上がり限界荷重 (N)

Ps_2 ; 陸側からの浮き上がり限界荷重 (N)

W ; クレーン重量 (N)

Wcr ; 浮き上がり限界荷重 (N)

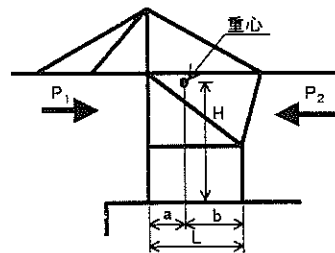


図-6 浮き上がり限界荷重の算定

今回、静的な浮き上がりを見るため、写真-1のようにクレーン模型を同時期に製作した棧橋上部工(2.6m×2.6m)のレールの上に載せた。上部工の片側を球座上に設置し、もう片側をフォークリフトで徐々に持ち上げて、一旦静止させ、その都度静ひずみを測定した。クレーン脚がレールから離れる瞬間を海側(陸側)脚の浮き上が

りとした。また、上部工の傾けた角度を測定するため上部工中央部に加速度計を取付けた。

以上、海側からの浮き上がり、陸側からの浮き上がりについて実験を行ったが、浮き上がり限界荷重を越えて脚が浮き上がる場合と浮き上らない場合のクレーン部材の状態を見るため、陸側浮き上がりについて4脚全てを固定金具によってレールに固定した状態(写真-2)で実験を行った。

3.2 動的(加振)浮き上がり実験

(1) 振動台

クレーンの加振実験には、三次元水中振動台を用いた。振動台システムの概略を図-7に、仕様を表-3に示す。この振動台は水槽の底面に埋め込まれており、水中振動実験が可能となっているが、本実験では水を入れてはいない。

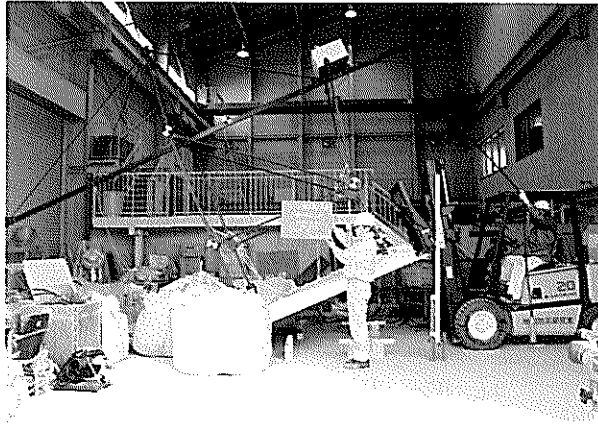


写真-1 静的浮き上がり実験

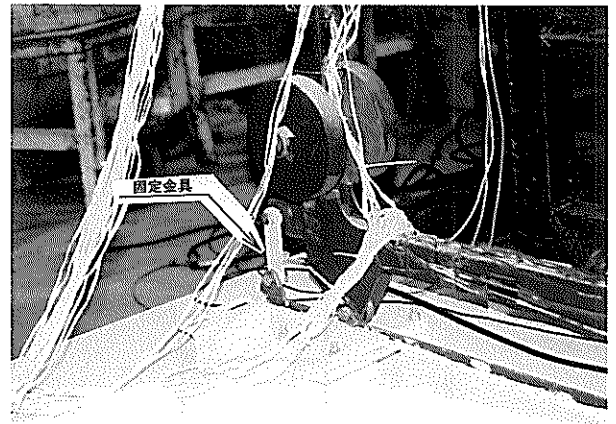


写真-2 固定金具による脚の固定

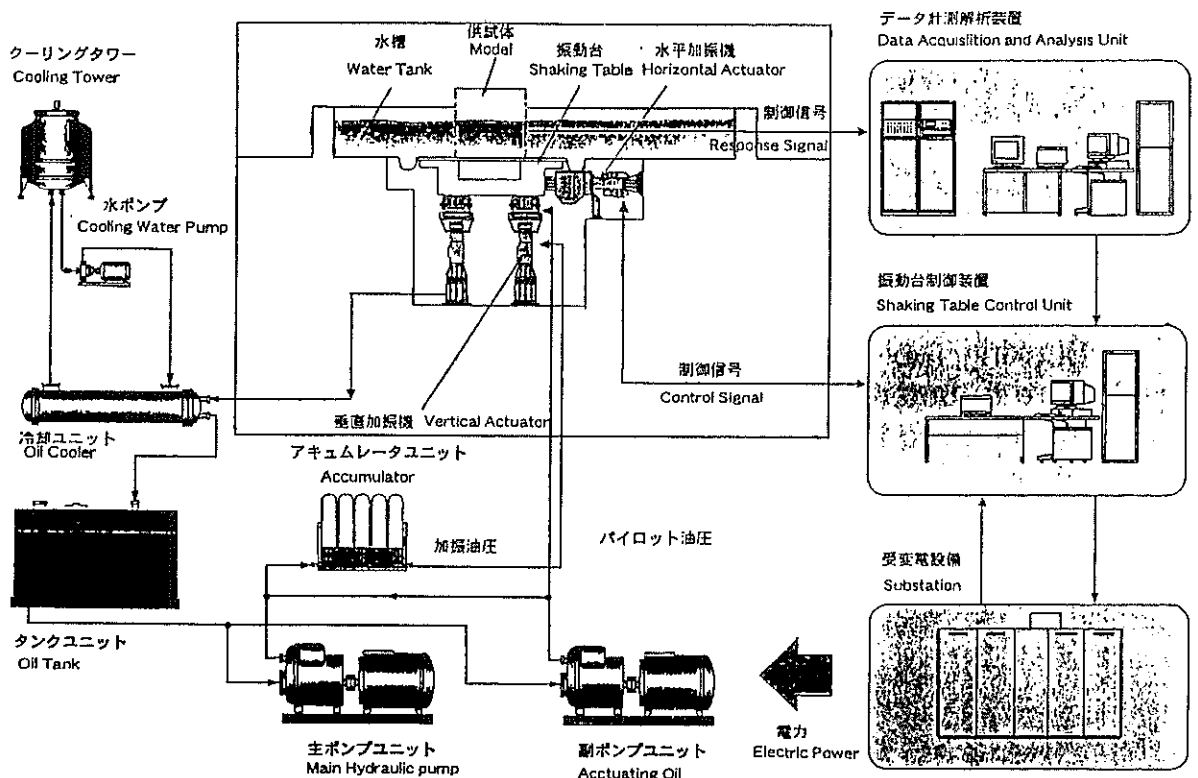


図-7 振動台システム

表-3 振動台仕様

テーブル寸法 Table Size	φ 6 m
加振方向 Shaking Direction	水平 Horizontal (X,Y) 上下 Vertical (Z) 回転 Rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)
搭載重量 Loading Capacity	定格 Rated 30 ton 最大 Max 40 ton
最大変位 Max Displacement	水平H(X) ±200mm 水平H(Y) ±300mm 上下V(Z) ±100mm
最大回転加振速度 Max Rotation	X軸まわり $\theta_x \pm 1^\circ$ Y軸まわり $\theta_y \pm 1^\circ$ Z軸まわり $\theta_z \pm 1^\circ$
最大速度 Max Velocity	水平H(X) ±75cm/s 水平H(Y) ±150cm/s 上下V(Z) ±50cm/s
最大加速度 Max Acceleration	水平H(X) ±2.0G 水平H(Y) ±1.0G 上下V(Z) ±1.5G
加振周波数 Exciting frequency	D C ~100Hz

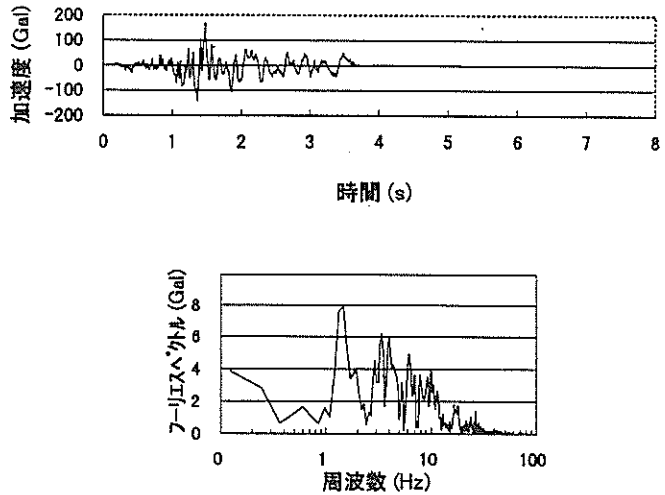


図-8 八戸波時刻歴及びフーリエスペクトル (実験スケール)

(2) 加振方法

まずクレーン模型の固有振動数を調べるため、X方向（クレーン横行方向）にパルス加振を行いフーリエスペクトルを描かせた結果、固有振動数は2.2Hz（模型スケール）であった。

動的（加振）実験する際の入力波として、正弦波及び地震波を用いて、X方向に加振した。正弦波は、入力加速度一定で周波数を変えていき、クレーン共振点近辺でロッキングさせる方法と、周波数一定で加速度を上げてロッキングさせる方法をとった。地震波に関しては、係船岸の設計時に用いられる八戸波、大船渡波、神戸Port Island波を用い、加速度を上げてロッキングさせる方法をとったが、今回地震波に関しては最も顕著な結果が現れた八戸波について記述する。以上、入力波に関してまとめたものを表-4に示す。また図-8に、八戸波（模型スケール）の時刻歴およびフーリエスペクトルを示す。

なお、加振実験においては加振直前の値を初期値0としてデータを整理した。従って計測結果は加振による変動性分のみを示し、自重による静的な成分は含んでいない。

表-4 加振実験ケース

入力波	加速度(Gal)	周波数(Hz)	加振波数(波)	備考
正弦波	20	1.6~2.6	20	(加速度一定)
	25~75	1.8	20	(周波数一定)
八戸波	実測値×(0.5~4.0倍) (実測…最大加速度170Gal)	—	—	—

4. 模型実験結果

4.1 静的浮き上がり実験結果

今回の模型で海側からの浮き上がり限界荷重 Ps_1 および陸側からの浮き上がり限界荷重 Ps_2 は、計算上では、3章の(1)、(2)式より、 $Ps_1=1860N$ 、 $Ps_2=1058N$ となる。

静的浮き上がり実験において、浮き上がり（水平）荷重 Ps は以下のようにして求めた。図-9より、 θ 傾けた時のクレーンの浮き上がり荷重 P は、この時の見かけのクレーン重量 $W \sin \theta$ に対して、 $W \cos \theta$ で表わされる。よって、水平な状態（ $\theta=0$ ）の時の、クレーン重量 W に対しての浮き上がり荷重 Ps は、 $Ps=W \cos \theta / \sin \theta = W \tan \theta$ となる。

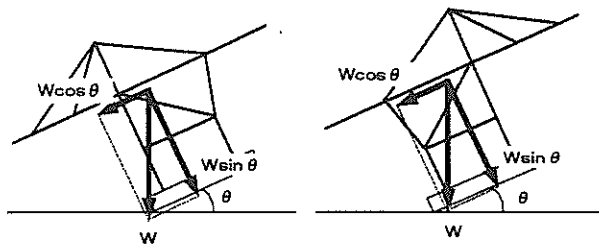


図-9 静的浮き上がり実験時の水平荷重の算定

(1) 陸側からの浮き上がり実験

模型による陸側脚からの浮き上がり実験では、水平荷重 $Ps=W \tan \theta=3100.7 \times \tan 17.1=954N$ で浮き上がりが発生し、レールより脱輪を起こした。この時、陸側2脚

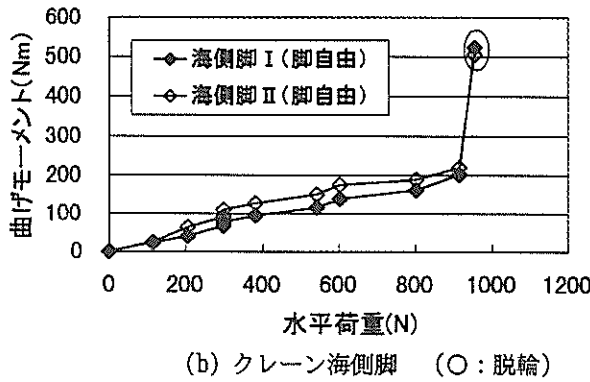
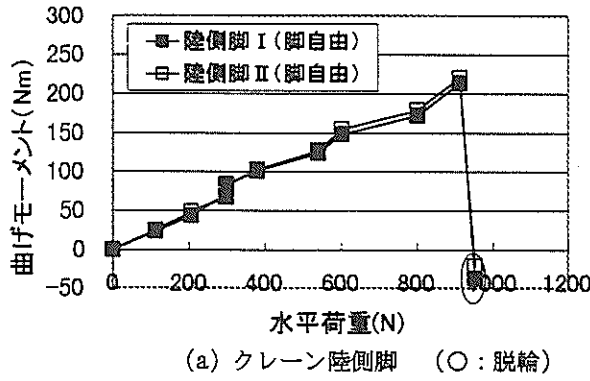


図-10 静的（陸側脚）浮き上がり時の脚部曲げモーメント

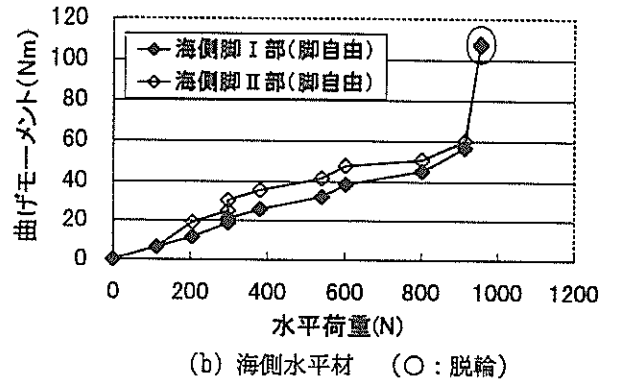
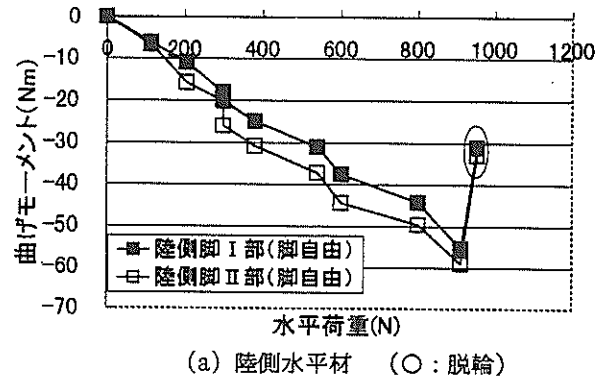


図-11 静的（陸側脚）浮き上がり時の水平材部曲げモーメント

はレールより内側に脱輪し、海側2脚はレール上に載ったままの状態であった。

図-10に水平荷重に対するクレーン脚上部の曲げモーメントを、図-11に水平材の曲げモーメントを示す。○で囲まれた点はレールから脱輪して落ちた状態で測定したものである。

図-10において、脱輪するまでは4脚とも同じ曲げモーメントが作用しており、水平荷重の増加に対して比例して曲げモーメントが増加している。しかし脱輪後においては、海側2脚のみ車輪とレールが拘束された状態で、陸側脚で受けていた水平荷重分を海側脚で受けることとなり、一気に曲げモーメントが増加している。陸側脚においてはモーメントが殆ど作用していない状態である。今回の実験結果によって、作用曲げモーメントが2倍以上となり、部材の構造設計時に「脚の浮き上がり」を考慮する必要があることを示している。

図-11の水平材に作用する曲げモーメントについて、脚部程曲げモーメントは出していないが、クレーン脚と同様な傾向が見られた。脱輪時には海側脚との接合部の方で、曲げモーメントが急激に増加し、陸側脚との接合部では曲げモーメントが減少している。曲げモーメント値

の正負はモーメントの方向の違いを示しており、海側の水平材の曲げモーメントの向きと逆であることを示している。本論文では時計廻りを正としている。

以上の結果より、陸側から水平荷重を受けた時の脚及び水平材の変形状態の概略図を図-12に示す。また、浮き上がり時の変形状態の概略図を図-13に示す。

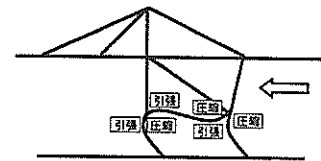


図-12 陸側より水平荷重を受けた時の変形概略図

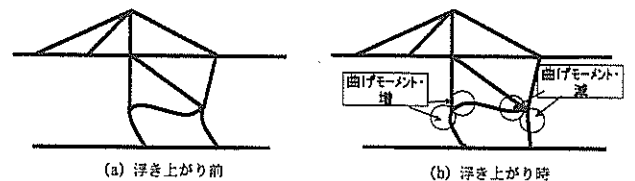
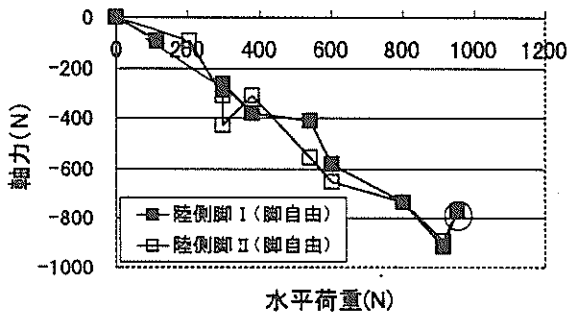
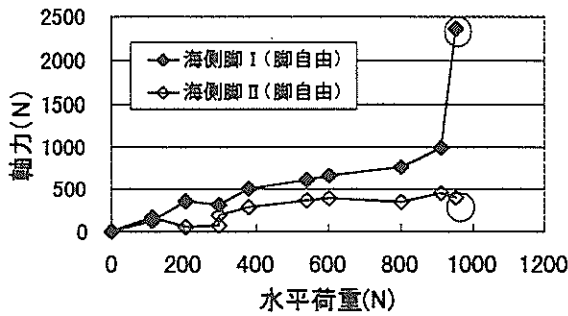


図-13 陸側脚浮き上がり時の変形概略図



(a) クレーン陸側脚 (○:脱輪)



(b) クレーン海側脚 (○:脱輪)

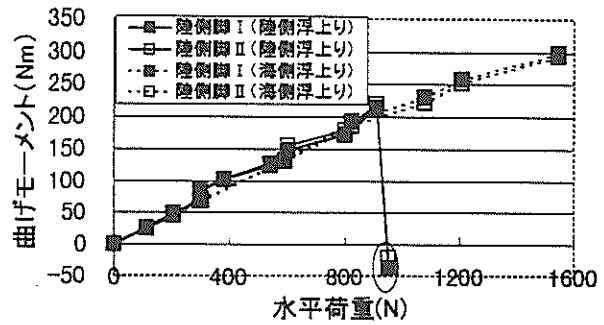
図-14 静的(陸側脚)浮き上がり時の脚部軸力

図-14に水平荷重に対するクレーン脚の軸力を示す。陸側脚浮き上がりの場合、陸側脚の軸力は小さくなり、海側脚の軸力は大きくなる。また海側脚において1脚だけ大きな軸力が出ているのは、脱輪した際、クレーン本体にねじれが生じたことに起因しているものと考えられる。

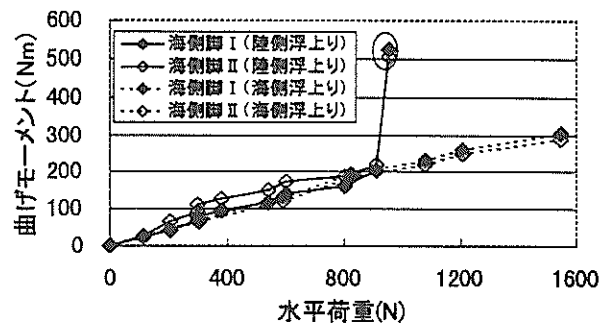
(2) 海側からの浮き上がり実験

海側からの浮き上がり実験では、(1)式から水平荷重1860Nで海側脚の浮き上がりが発生する。この時、クレーンは水平な状態から31°傾ける必要があるが、フォークリフトの性能及び安全性の面から26.5°(水平荷重に換算して $P_s = W \tan \theta = 3100.7 \times \tan 26.5 = 1546\text{N}$)までしか傾けることができず、浮き上がりを生じるまで至らなかった。

海側からの浮き上がり実験及び陸側からの浮き上がり実験より得られた脚の曲げモーメントについて比較したものを図-15に、水平材の曲げモーメントを比較したものを図-16に示す。海側からの浮き上がり、陸側からの浮き上がりにおいて曲げモーメントの向きは全く逆になるが、今回曲げモーメントのレベル、傾向を比較するため、向きを同一に合わせた。この図より、同じレベルの水平荷重をかければ、陸側、海側の方向に関係なく、脚及び水平材には同程度の曲げモーメントがかかることが分かる。

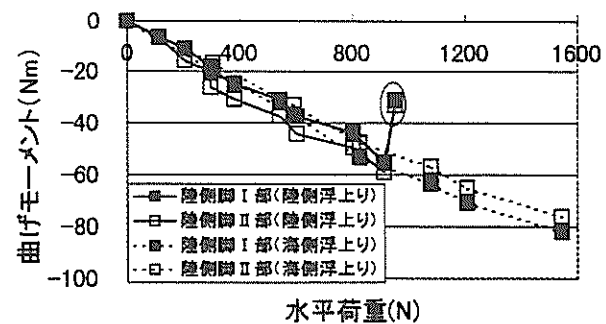


(a) クレーン陸側脚 (○:脱輪)

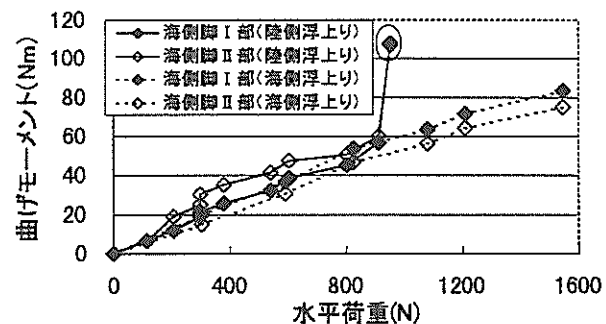


(b) クレーン海側脚 (○:脱輪)

図-15 静的(陸・海側脚)浮き上がり時の脚部曲げモーメント比較



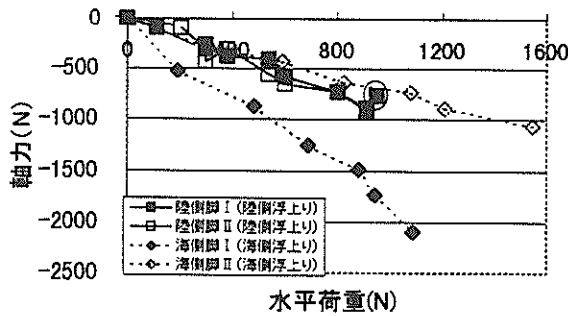
(a) 陸側水平材 (○:脱輪)



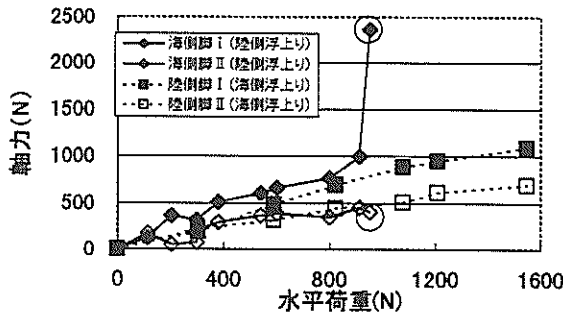
(b) 海側水平材 (○:脱輪)

図-16 静的(陸・海側脚)浮き上がり時の水平材部曲げモーメント比較

図-17に、海側からの浮き上がり実験及び陸側からの浮き上がり実験より得られたクレーン脚の軸力を示す。軸力については、海側からの浮き上がり実験及び陸側からの浮き上がり実験より浮き上がりが生じる脚、浮き上がり時の支点となる脚に分けて比較を行った。この図より、海側脚Ⅱを除いては、同じレベルの水平荷重をかければ、陸側、海側の方向に関係なく、脚には同じ軸力がかかることが分かる。海側脚Ⅱについては上記に述べたように、クレーン本体にねじれが生じたためと考えられる。陸側から水平荷重を受けた時の脚及び水平材の変形状態の概略図を図-18に示す。



(a) 浮き上がり脚 (○: 脱輪)



(b) 浮き上がりと反対脚 (○: 脱輪)

図-17 静的（陸・海側脚）浮き上がり時の脚部軸力比較

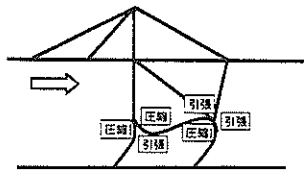
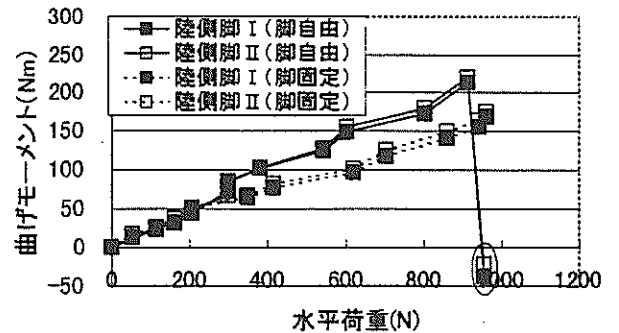


図-18 海側より水平荷重を受けた時の変形概略図

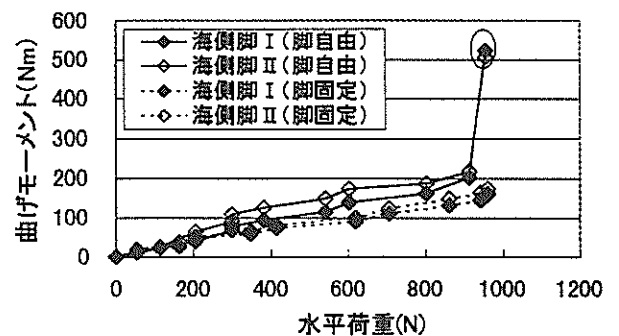
(3)脚固定時の陸側脚からの浮き上がり実験

陸側からの浮き上がり実験において、脚が浮き上がらないよう固定した場合と、自由な場合との脚の曲げモーメントについて比較したものを図-19に、水平材の曲げモーメントについて比較したものを図-20に示す。図より、クレーン脚、水平材とも脱輪を起こす前までは、脚が固定されていても、脚が自由な時とほぼ同じ曲げモーメントが作用している。脚及び水平材で、脚を固定した時の曲げモーメントが自由な時のものより若干小さく出ているのは、クレーンをレールに固定する際、写真-2に示したようにシルビーム上に延ばしたアームの先とレールとを固定金具により固定したため、この固定金具にも水平荷重がかかり、クレーンにかかる水平荷重が減少したためだと考えられる。

陸側からの浮き上がり実験において、脚が浮き上がらないよう固定した場合と、自由な場合との脚の軸力について比較したものを図-21に示す。軸力について、多少データにばらつきがあるものの、曲げモーメントと同じような傾向が見られ、脚固定した場合の軸力が脚自由な場合よりも若干小さいものとなっている。

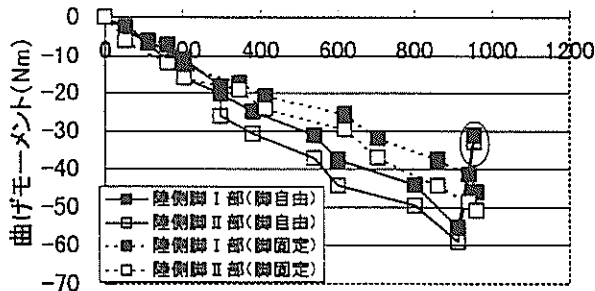


(a) クレーン陸側脚 (○: 脱輪)

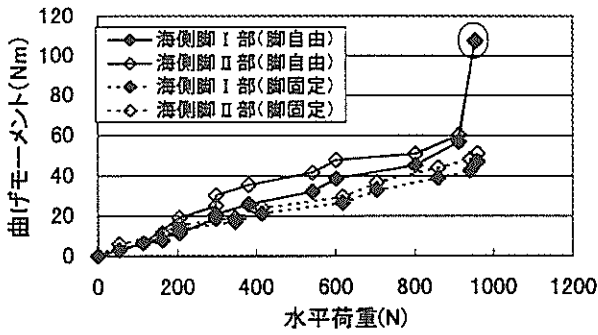


(b) クレーン海側脚 (○: 脱輪)

図-19 静的（脚固定・自由）実験の脚部曲げモーメント比較

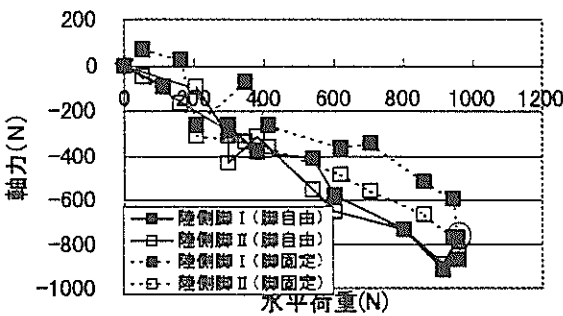


(a) 陸側水平材 (○:脱輪)

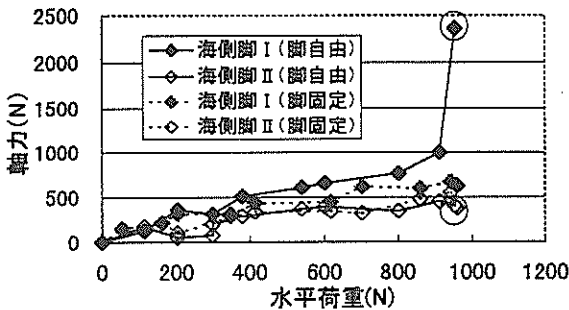


(b) 海側水平材 (○:脱輪)

図-20 静的(脚固定・自由)実験の水平材部曲げモーメント比較



(a) クレーン陸側脚 (○:脱輪)



(b) クレーン海側脚 (○:脱輪)

図-21 静的(脚固定・自由)実験の脚部軸力比較

4.2 動的浮き上がり実験結果

(1) 地震時のクレーン脱輪プロセス⁵⁾

地震時のクレーン脱輪プロセスは、図-22に示すとおりである。まず、陸側脚の拘束が浮き上がりによって失われる(図-22(a)→(b))。浮き上がった陸側脚の荷重負担が失われるため、海側脚に負担がかかり曲げ変形が生じる(図-22(c))。浮き上がった陸側脚はレールから離れた位置に着地し、大きく脱輪することになる(図-22(d))。

模型加振実験においても、脱輪を起こしたケースでは、変形を生じることにはなかったが、入力波の種類(正弦波、地震波)に関係なく上記の過程で脱輪を起こすことが確認された。

以上の結果より、動的な(加振)浮き上がり実験について、静的な陸側からの浮き上がり実験と比較することとする。

(2) 加振実験測定結果

静的浮き上がり実験において、曲げモーメント及び軸力はある水平荷重がかかった状態の静ひずみから算出したが、加振実験においては、実験測定中の曲げモーメント、軸力の最大値をとった。また水平荷重は、クレーンの最大応答加速度をとり、以下の式より算出した。

$$P_D = W \times \alpha / g \quad (\text{N}) \quad (4)$$

ここに、

g ; 重力加速度 (cm/s²)

P_D ; 水平荷重 (N)

W ; クレーン重量 (N)

α ; クレーン最大応答加速度 (Gal)

これにより、静的な陸側からの浮き上がり実験、正弦波加振及び八戸波加振の脚の曲げモーメントのついて比較したものを図-23に、水平材の曲げモーメントについて比較したものを図-24に示す。○で囲まれた点は脱輪した実験ケースを示したものである。脱輪をしたケースを見てみると、静的な陸側からの浮き上がり実験では954 N、正弦波加振では1069 N、八戸波加振では1003 Nの水平荷重で脱輪しており、静的・動的実験とも同レベルの水平荷重約1000 N(加速度レベルで約320 Gal)程度で浮き上がりが生じているといえる。また、浮き上がり前までは静的な条件でも動的な条件でも水平荷重、曲げモーメントのレベルともほぼ一致している。なお、陸側脚で脱輪したケースを見てみると、静的・動的な実験で大きな差が出ているのは、静的実験で脱輪したケースは脱輪している状態での曲げモーメントの値で、動的実験では実験中の曲げモーメントの最大値をとっているからである。

図-25に、静的な陸側からの浮き上がり実験、正弦波加振及び八戸波加振のクレーン脚の軸力を比較したものを示す。軸力についても多少ばらつきがあるが、陸側の浮き上がりの脱輪を起こしたケースでの海側脚 I を除けば、動的浮き上がりの軸力が静的な浮き上がりの軸力よ

りも上回っていることが分かる。また、水平荷重 (=クレーン応答加速度)が増えるにつれ、その差は大きくなっており、加振による動的な影響が大きくなっていることを示している。

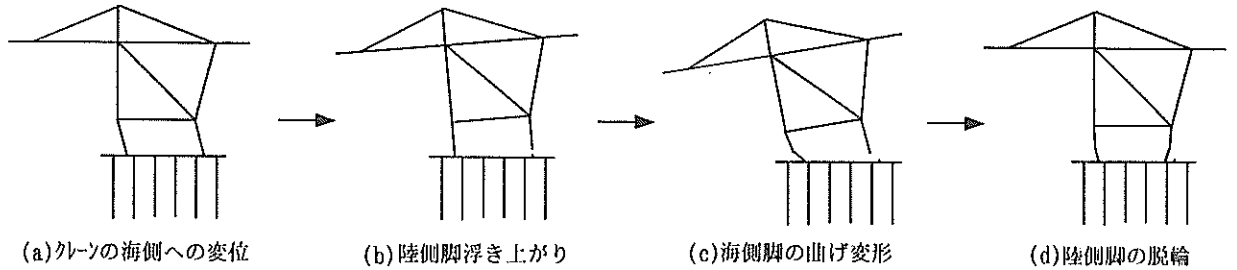


図-22 地震時のクレーン脱輪のプロセス

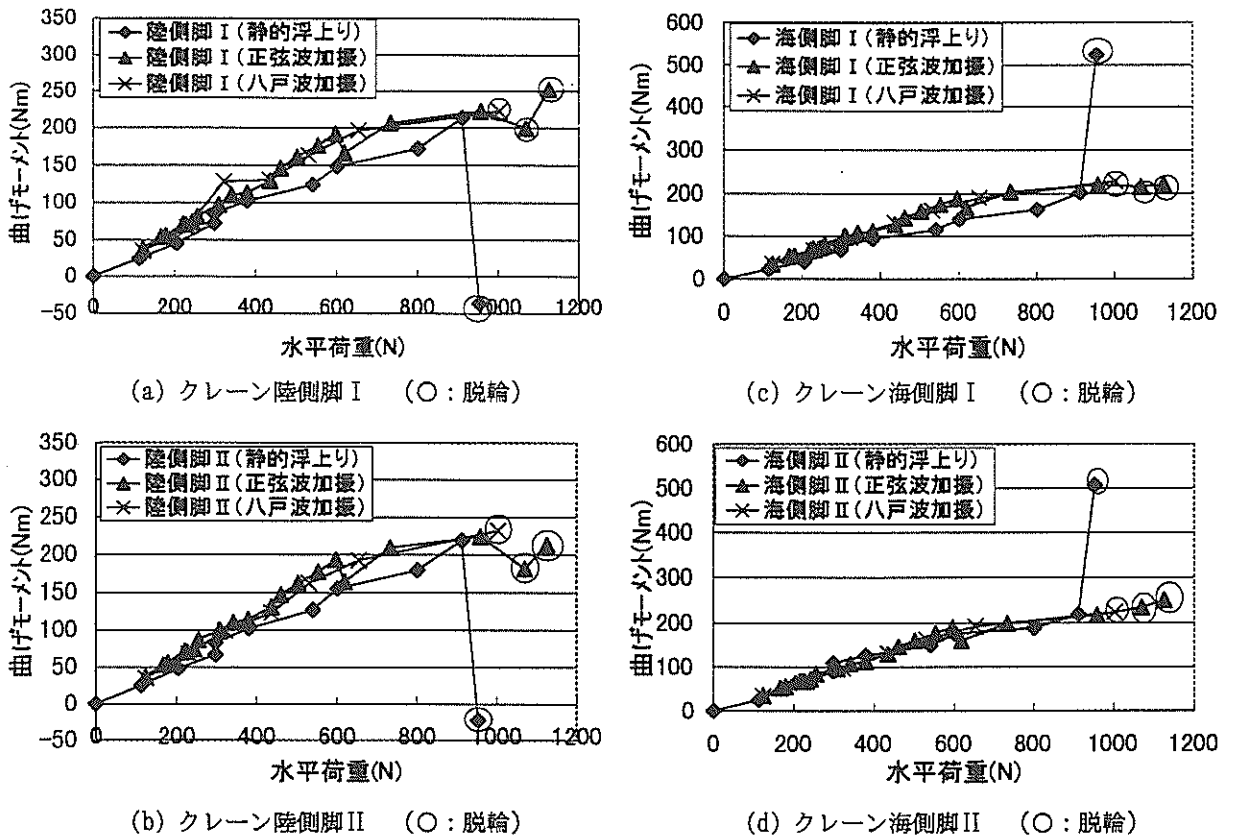


図-23 動的・静的実験の脚部曲げモーメント比較

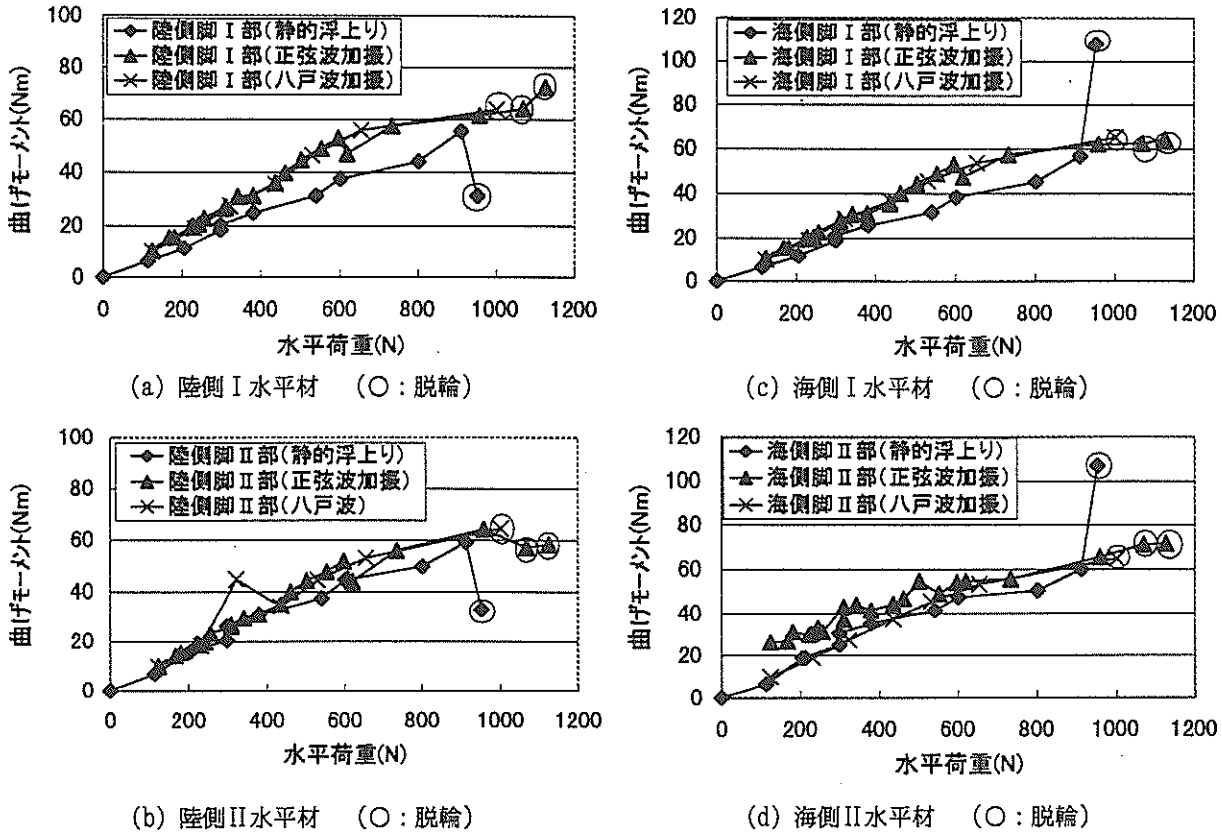


図-24 動的・静的実験の水平材部曲げモーメント比較

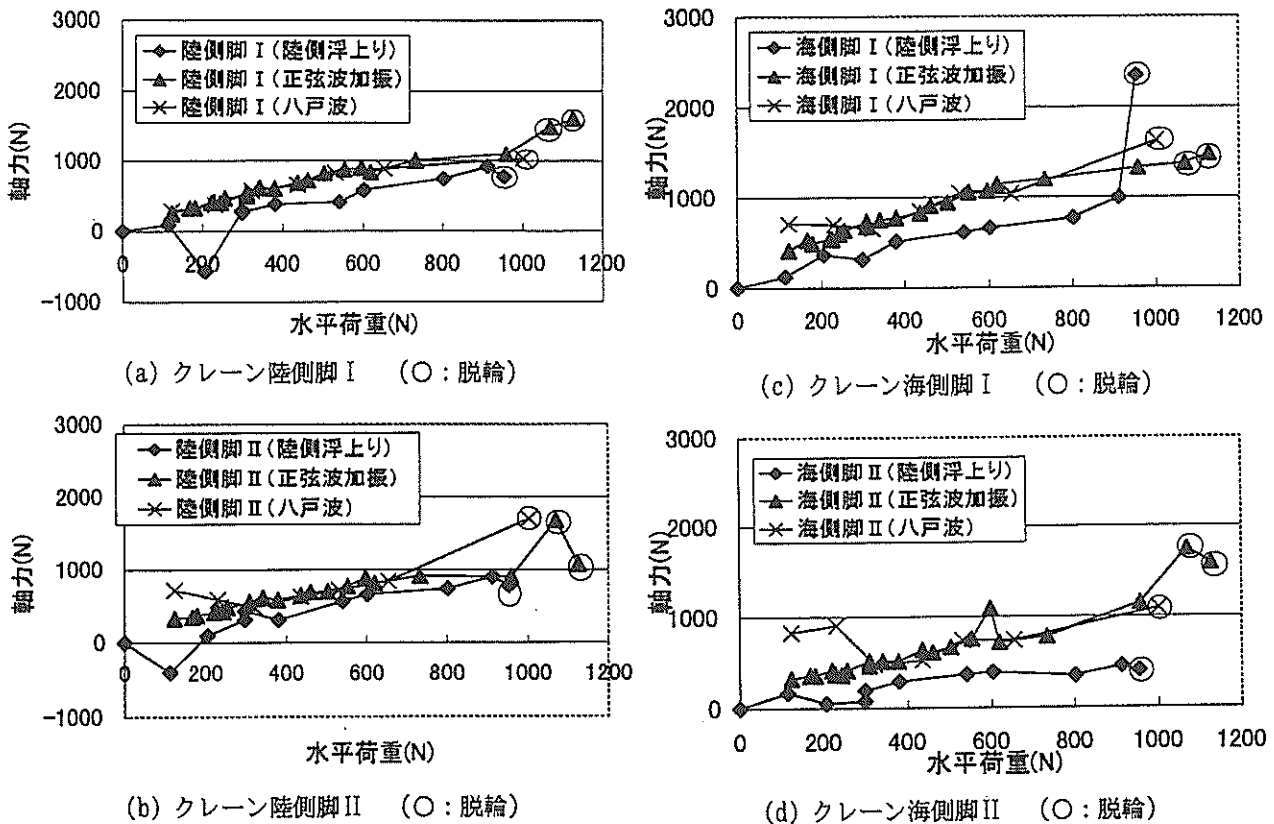


図-25 動的・静的実験の脚部軸力比較

5. 簡易モデルの検討

耐震強化岸壁に設置する、耐震性を強化するコンテナクレーンの設計指針として、(社)港湾荷役機械化協会が提案している手引書⁴⁾がある。この設計指針では、レベル2地震動に対してクレーン部材の発生応力が許容応力度を超えても、その影響を局所的な塑性変形に止めることにより、クレーン全体系の安定度が確保されるように設計することとしている。従って、対象となる設計地震動はレベル2になるものの、基本設計は従来通り許容応力度法によっている。次に、基本設計で求めた構造でのクレーンの損傷の程度を確認するため、動的解析によって耐力等の照査を行う。栈橋式岸壁の場合は栈橋も含めた動的解析を行い、部分的に塑性化してもクレーン全体系の安定度が十分確保されることを確認するとなっており、3次元FEM解析を行うことになるが、全ての場合において行うのは実用的ではないため、簡易的な手法によることも許容している。

以上の設計法の中で、栈橋とクレーンの連成振動による相互作用の分析については、宮田ら⁵⁾の解析的手法による研究によって、簡易モデル(2質点系モデル)は十分適用可能であることが明らかとなっている。

しかしながら、2質点系モデル及びこのモデルを検証した3次元FEM非線形動的解析について、実際に加振実験を行って再現性を検証したことはなく、現在、再現性を検証するために栈橋及びクレーンの模型の動的相互作用の実験・解析を行っている状態である。

今回クレーン単体ではあるが、加振実験により模型実験のデータを得ることができたため、クレーン模型を簡1質点系モデルとみなし、簡易モデルの再現性を検証した。

5.1 簡易モデルの概要

図-26に、1質点系モデルの概念図を示す。クレーンは水平一方向にのみに振動し、質点はクレーンの重量を与えてバネとダッシュポットで結合しており、クレーン重心位置の振動を求めている。また、このモデルにおいてクレーンの浮き上がりや滑動等は考慮していない。バネ定数及び減衰定数はクレーン模型の実測値(固有周期0.45s, 減衰定数0.32)から与えた。

簡易モデルにおいて、クレーンの応答を調べるために入力波として正弦波を用い、周期を変えて検討を行った。

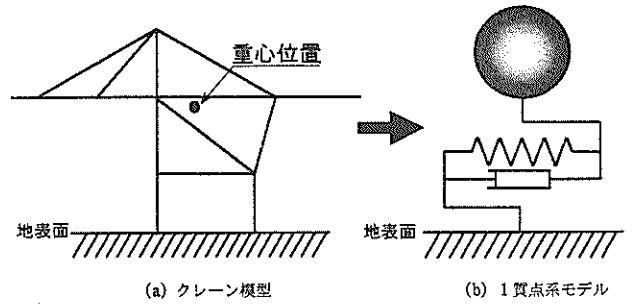


図-26 簡易モデル概念図

5.2 簡易モデルの検討結果

図-27.1に、模型実験及び簡易モデルから得られた、クレーンの正弦波入力に対する最大加速度応答倍率を示す。図-27.2は、比較しやすいように図-27.1の実験データ付近について拡大したものである。図中の実線は簡易モデルの計算結果を、プロットした点は実験結果を示している。簡易モデルの計算結果は全ての実験値より高い加速度応答倍率となり、若干過大評価になるとも考えられるが、入力波に対するクレーン最大加速度応答の傾向及び倍率はほぼ一致しているといえる。従って、クレーン単体ではあるが、クレーンの最大加速度応答を検討する目的であれば、1質点系による簡易モデルは十分適用可能であるといえる。

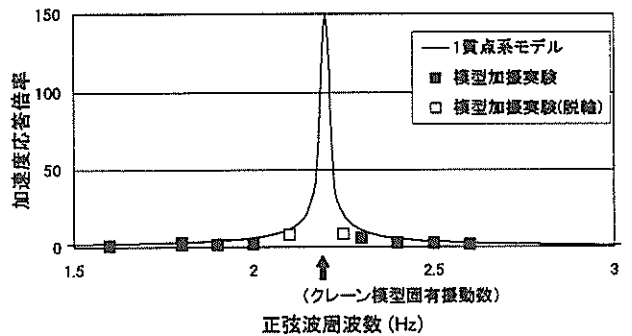


図-27.1 1質点系モデルと正弦波加振実験比較

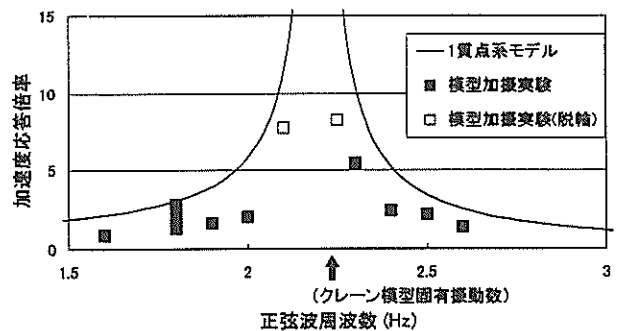


図-27.2 1質点系モデルと正弦波加振実験比較 (拡大図)

6. 詳細モデルの検討

6.1 クレーンのモデル化⁷⁾

5章で示した、有限要素法（汎用FEMコードMSC/NASTRAN）による非線形過渡応答解析について、今回クレーン単体であるが、加振実験を行って得られたデータにより再現性を検証した。

図-28に、FEMモデルを示す。この詳細モデルは模型実験で用いたクレーンを対象とし、主に梁要素を用いて3次元のクレーンをモデル化した。本モデルでは、クレーン脚の浮き上がり、滑動、及び車輪のつばによる拘束を表現できるよう、脚下端部にgap要素を使用している。gap要素（NASTRAN）は、接触時と非接触時で大きく異なる軸方向バネ定数を表現でき、さらに接触時の摩擦についても表現できる。

入力波は、模型加振実験において脱輪を起こした八戸4.0倍波（八戸波の実測波の最大加速度を4.0倍したもの）を用いた。加振方向も模型実験と同様にX方向（クレーン横行方向）のみとした。

6.2 詳細モデルの検討結果

図-29に、入力加速度及び実験結果と解析結果のクレーン重心位置の応答加速度の時刻歴（模型スケール）を示す。図より実験結果と解析結果と比較すると、加速度レベルは若干解析結果が大きく出ているものの、実験結果の高周波成分を除けば応答波形は実験結果と解析結果

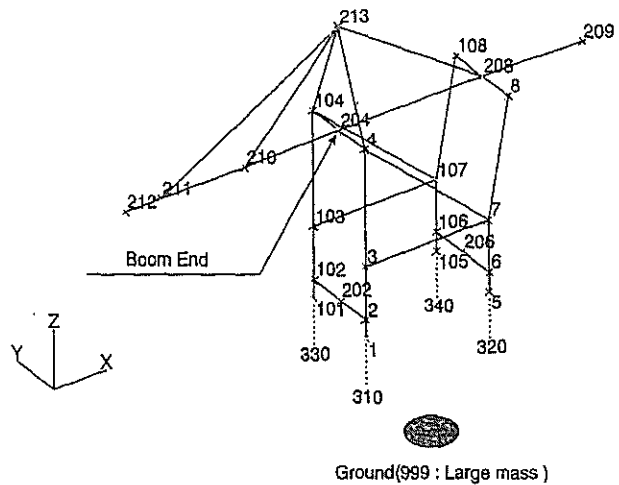


図-28 FEMモデル

でよく一致している。今回クレーン重心位置の応答加速度についてのみ、検討を行ったが、今後脚の浮き上がり等についても検討する必要がある。

7. 結論

コンテナクレーンの模型を用いて、静的・動的な浮き上がり実験を行い、更に模型実験により得られたデータを用いて、クレーン簡易モデル及び詳細モデルの再現性の検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- ①静的、動的実験ともほぼ同じ水平荷重レベルでク

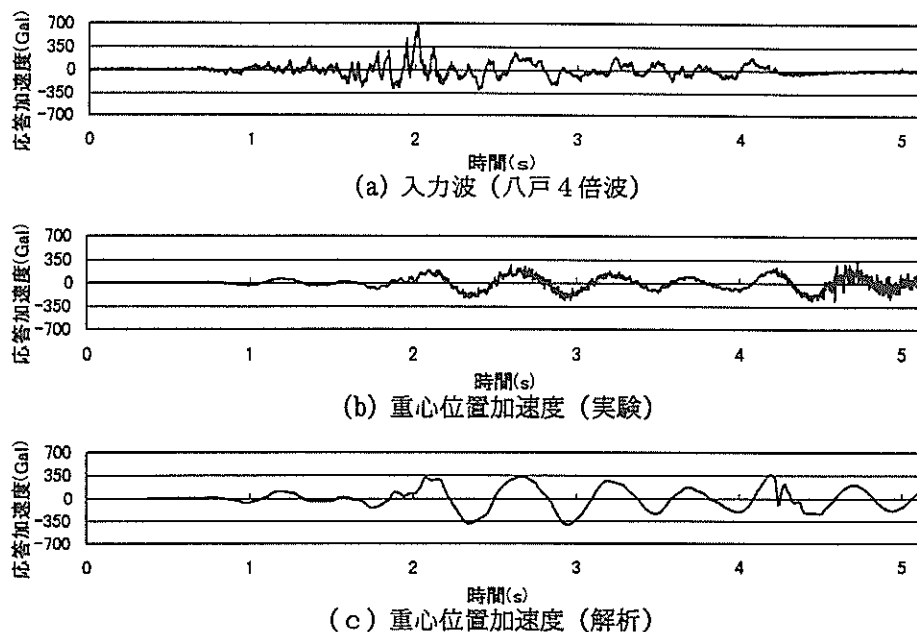


図-29 入力地震波とクレーン重心位置加速度の時刻歴

レーン脚の浮き上がりが生じた（今回の模型では約1000N，加速度レベルで約320Gal）。

②脚が浮き上がるまでは，静的な条件でも動的な条件でも水平荷重，曲げモーメントレベルともほぼ一致する。

③静的な実験では，浮き上がり前までは脚自由な条件と脚固定の条件では，曲げモーメントのレベルが変わらない。

④脚の浮き上がりが生じると，片側脚の曲げモーメントのレベルが急激に大きくなる。

⑤浮き上がり前までは，クレーンの挙動は1質点系の簡易モデルで再現できる。

⑥クレーン脚の浮き上がりなどを伴う動的挙動が，3次元非線形動的解析で再現できる。

以上のことから，今後検討を進めていく動的相互作用を考慮した設計法におけるコンテナクレーンの適切な取り扱い方法が確認され，また，有効なデータを得ることができた。

8. あとがき

今回クレーン模型を用いて脚の浮き上がりといった動的挙動を再現し，簡易モデル及び詳細モデルについて検討を行なった結果，クレーン単体においてはその有効性をある程度確認することができた。

今後は，クレーンと棧橋との相互の影響を簡便に検討できるように，2質点系とした簡易モデルおよび数値解析の有効性を確認したい。

(1999年3月31日受付)

謝辞

クレーン模型実験の実施及びデータ整理において，構造部構造振動研究室の森田年一氏，科学技術振興事業団の田中剛氏，巽裕一郎氏には多大な助言・協力を得ており，ここで深く感謝致します。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局：港湾の施設の耐震設計に係る当面の措置（耐震強化施設の設計について），1997.8
- 2) 藤本：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察（その2）被害状況－港湾荷役施設－，港湾技研資料，No.813，1995.9

3) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1989.3

4) (社)港湾荷役機械化協会：コンテナクレーン耐震設計の手引き，1998.2

5) 金山，柏崎：大地震におけるコンテナクレーンの脚の浮き上がり挙動評価，日本機械学会論文集（C編），64巻618号，1998.2

6) 宮田，菅野，濱田，田邊，中島，田中：直杭式棧橋とコンテナクレーンの地震時相互作用に関する研究，第10回地震工学シンポジウム，1998.11

7) 田邊，中島，菅野，阿比留，江頭：動的相互作用を考慮した港湾荷役機械と棧橋の耐震設計法，第7回機械学会交通・物流部門大会，1998.12