

第3章 模型実験

第1節 模型実験の概要

1-1 模型の相似則^{1), 2)}

本研究で取り扱うような、脚の浮き上がりなどの非線形挙動に対しては、実機での試験を実施するのが最も確実な方法であるが、対象とするコンテナクレーンは高さ 63 m、重量が 857 t と巨大である上、前章で述べたように比較的不安定な構造特性を有しており、実機での試験は事実上不可能である。従って、本研究では、模型実験によってその挙動を取り扱う事とした。今回の模型実験で用いた相似則の考え方を以下に述べる。

模型の幾何縮尺を N_l 、密度の縮尺を N_ρ 、時間の縮尺を N_t 、歪みの縮尺を N_ε とし、これらを基礎相似比にとり、以下 N は縮尺で添字は物理量を表す。実験に関係するそれぞれの物理量の縮尺は以下の通りとなる。

$$\text{加速度} : N_g = N_l \cdot N_t^{-2} \quad (3.1)$$

$$\text{慣性力} : N_f = N_\rho \cdot N_l^4 \cdot N_t^{-2} \quad (3.2)$$

$$\text{曲げ剛性} : N_{EI} = N_\rho \cdot N_g \cdot N_l^5 \cdot N_t^{-1} \quad (3.3)$$

$$\text{質量} : N_m = N_\rho \cdot N_l^3 \quad (3.4)$$

$$\text{振動数} : N_\omega = N_t^{-1} \quad (3.5)$$

$$\text{断面積} : N_A = N_l^2 \quad (3.6)$$

$$\text{断面2次モーメント} : N_I = N_l^4 \quad (3.7)$$

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、重力加速度は重要な意味を持つが、模型実験でこの値を縮尺と同様に操作することはこの場合不可能なため、制約条件として 1 G 場での実験条件を考慮すると、 $N_g = 1$ である。また、その結果時間の縮尺 N_t は、式 (3.1) より以下のようになる。

$$N_1 = N_1^{0.5} \quad (3.8)$$

また、幾何縮尺に対応して剛性を低減する場合には、実機と模型とで弾性係数が異なる材料を採用する方法があるが、現実には適切な弾性係数をもつ模型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。また、本研究では港湾構造物の設計における、コンテナクレーンの設計条件としての取り扱い法を検討することを一つの課題としており、コンテナクレーンの振動性状の再現を大きな目標としている。このことから本研究では曲げ変形に着目し、現象の支配方程式として式(3.9)に示す梁の曲げ振動の運動方程式³⁾を用いることとした。

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

ここに $E I$: 曲げ剛性

ρ : 密度

A : 断面積

u : 鉛直方向変位

t : 時刻

ここで模型(m)と実機(p)の物理量の間には式(3.10)～(3.13)の関係が成り立つ。また、式(3.9)の微分演算子については、同様に式(3.14)、(3.15)の関係が成り立つ⁴⁾。

$$(u)_p = N_l (u)_m \quad (3.10)$$

$$(t)_p = N_t (t)_m \quad (3.11)$$

$$(EI)_p = N_{EI} (EI)_m \quad (3.12)$$

$$(\rho)_p = N_\rho (\rho)_m \quad (3.13)$$

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

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

式 (3.10) ~ (3.15) を式 (3.9) に代入すると式 (3.16) を得る。式 (3.9) と同等の式が模型実験においても成立するためには、式 (3.17) が成立することが条件となる。

$$N_{EI}(EI)_m \cdot \frac{1}{N_l^4} \left(\frac{\partial^4}{\partial x^4} \right)_m \cdot N_l u_m + N_p \cdot \rho_m \cdot N_l^2 A_m \cdot \frac{1}{N_t^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} \right)_m N_l \cdot u_m = 0 \quad (3.16)$$

$$N_{EI} \cdot N_l^{-3} = N_p \cdot N_l^3 \cdot N_t^{-2} \quad (3.17)$$

今回の実験の条件から、 N_p 、 N_t は、式 (3.18) 及び式 (3.19) のようになる。式 (3.17) に式 (3.18) 及び式 (3.8) を代入すると、 N_{EI} は、式 (3.20) となり、これが今回の実験で式 (3.9) と同等の式が成立する条件である。

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

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

$$N_{EI} = N_l^5 \quad (3.20)$$

一方、式 (3.3) に式 (3.8) 及び式 (3.19) を代入した結果は、式 (3.20) を満足する。

また、材料の制約から材料は実機と模型とで同一のものを採用することとしたことから、弾性係数は模型と実機とで同一の値とする必要がある。従って、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のと同等の結果を得るよう、式 (3.7) で求めた断面 2 次モーメントをさらに $1/N_l$ とすることとした。模型ではこの断面 2 次モーメントを満足するよう脚部材の断面形状を決定した。

以上の結果より材料が同一な重力 (1G) 場での模型実験の相似則として、下

記のような相似則を用いた。

$$\text{幾何縮尺 : } N_l = \lambda \quad (3.20)$$

$$\text{密度 : } N_\rho = 1 \quad (3.21)$$

$$\text{時間 : } N_t = \lambda^{0.5} \quad (3.22)$$

$$\text{加速度 : } N_g = 1 \quad (3.23)$$

$$\text{慣性力 : } N_f = \lambda^3 \quad (3.24)$$

$$\text{曲げ剛性 : } N_{EI} = \lambda^5 \quad (3.25)$$

$$\text{質量 : } N_m = \lambda^3 \quad (3.26)$$

$$\text{振動数 : } N_\omega = \lambda^{-0.5} \quad (3.27)$$

$$\text{断面積 : } N_A = \lambda^2 \quad (3.28)$$

$$\text{断面 2 次モーメント : } N_I = \lambda^5 \quad (3.29)$$

なお、断面 2 次モーメントを低減した結果としての断面積の低減による質量の低減は、錘を付加することによって補った。錘は剛性として寄与しない箇所を選んで付加した。

また、相似則上は減衰率についても実機と同じ値を使用する必要があるが、材料の制約から同一とすることはできなかつた。しかし、今回の場合は脚の浮き上がりという振動性状に大きく依存する現象を再現することが最大の課題であること、また減衰率が実機より小さい場合には、応答加速度の観点からは設計上安全側に働くことから、模型の減衰率は材料により制限される値を実測して用いた。

その結果、減衰率の課題はあるものの近似的にはあるが今回の研究の実験に必要な相似則はおおむね満足するものと判断した。以上の考え方から選定した相似則を表-3.1.1に示す。実験設備の制約から $\lambda = 15$ とした。

表-3. 1. 1 1/15モデル相似則検討

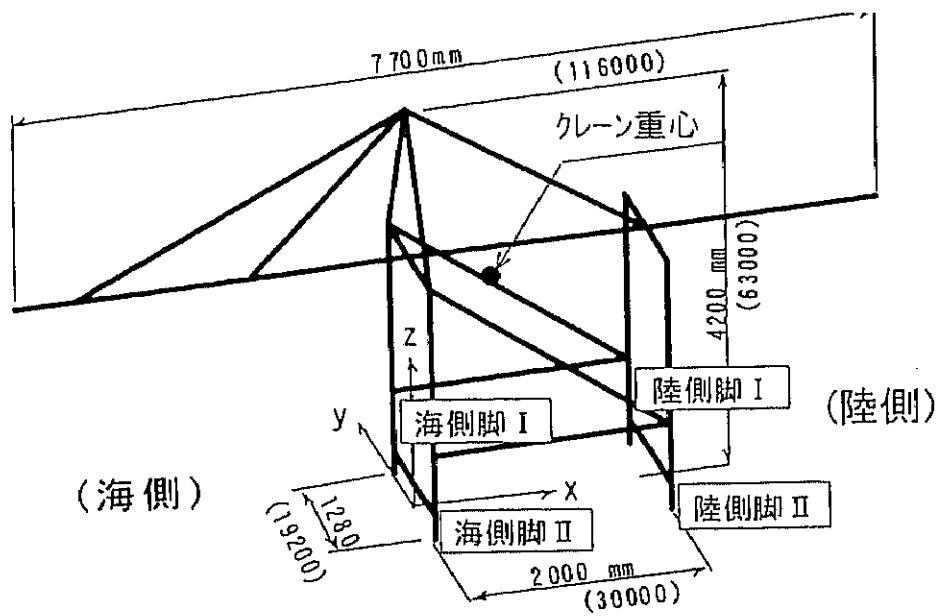
物理量		次元	実機/模型
幾何縮尺	λ		15
変位	δ	L	15
密度	ρ		1
時間	t	T	$\sqrt{15}$
加速度	a	LT ²	1
力	F	MLT ²	15 ³
断面2次moment	I	L ⁴	15 ⁵
曲げ剛性	EI	ML ²	15 ⁵
質量	kg	M	(*) 15 ³
弾性率	E		1

注) (*) 錘による重量調整で対応

1-2 模型の諸元⁵⁾

クレーン模型は、実験設備の制約から、対象としたスパン30 m級のコンテナクレーンの1/15の縮尺としている。その結果、脚スパンは2.0 m、ブームの延長は7.7 m、模型の高さは4.3 mとなった。模型の代表寸法を図-3. 1. 1に示す。

部材としては入手のしやすさから JIS 規格材（一般構造用角形鋼管及び一般構造用炭素鋼管）の使用を前提として、表-3. 1. 1の相似則に基づき、選択した主要部材の配置を図-3. 1. 2に示す。重量調整のための錘を含めてクレーン模型の重量は実測値で3100.7 Nとなった（計測器重量を含む。）。クレーン重心位置は実測の結果、図-3. 1. 1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；725 mm、0 mm、2125 mm）に位置していることが確認された。重心位置の確認は複数の支点から模型をつり下げる方法によった。FEM解析による模型の重心位置は同一の座標系で（635 mm、0 mm、1935 mm）である。また、実機の重心位置を相似則から換算した座標は（730 mm、0 mm、2070 mm）であり、計測から得られた模型の重心位置は相似則を概ね満足している。



※ () 内は実機寸法)

図-3. 1. 1 模型の代表寸法

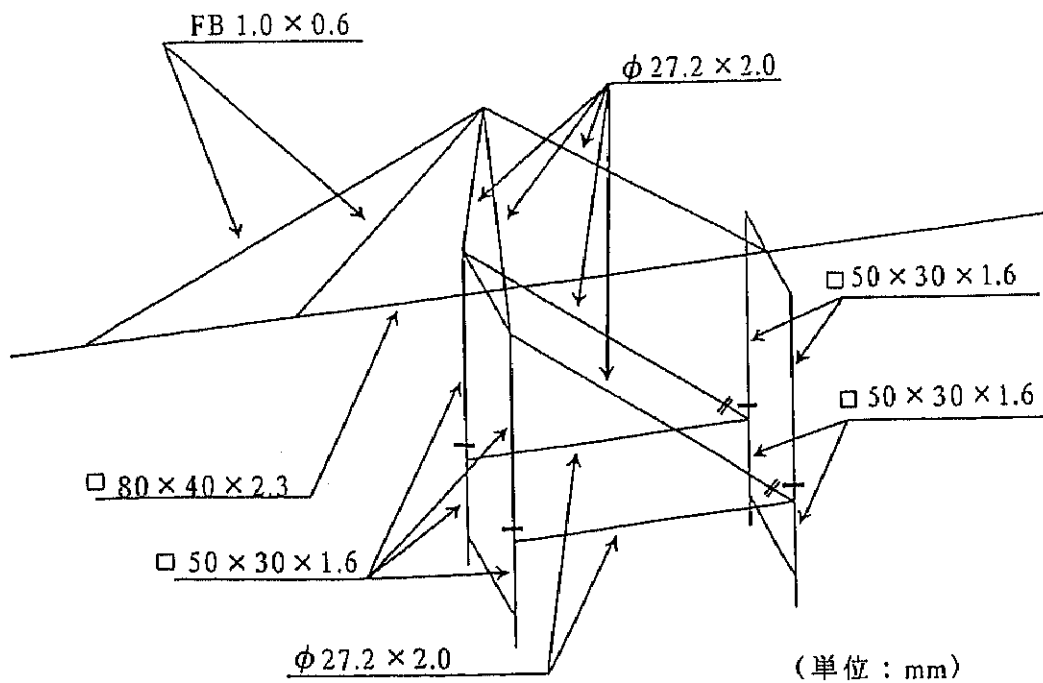


図-3. 1. 2 主要部材の諸元と配置

模型の車輪部は、回転をモデル化すると回転に対する摩擦抵抗が評価しにくく、車輪のがたつきによる挙動が生じることから、形状のみモデル化し、回転はしない構造とした⁶⁾。また、実機での車輪の数は、1脚あたり8輪であるが、簡略化して1輪としている。

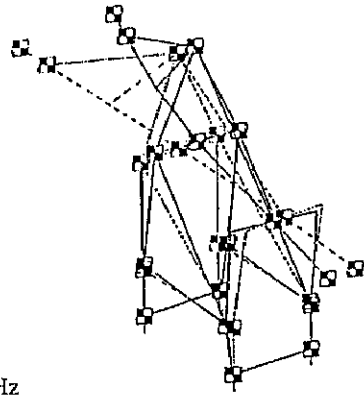
コンテナクレーンが岸壁に設置される際、図-3.1.1において左側が海側、右側が陸側となり、クレーンはY方向に走行する。以下、レール走行と直角となる方向はX方向、鉛直方向はZ方向とする。なお、図-3.1.1においてクレーン脚の区別がつきやすいように、海側にある脚を奥より海側脚Ⅰ、海側脚Ⅱ、陸側にある脚を奥より陸側脚Ⅰ、陸側脚Ⅱとした。

また、クレーン模型の固有振動数及び減衰定数を調べるため、自由振動試験を行った。測定は主にパルス波加振を行い、加振後の自由振動を測定した。その結果、クレーンの横行方向に対して、この模型の固有振動数は2.2 Hz、減衰定数は 3.22×10^{-3} （模型スケール）であった。なお、この固有周期は実機換算で1.76秒にあたり、相似則を概ね満足している。

模型の固有振動数を把握するために、汎用FEMコードMSC/NASTRANを用いて、固有値解析を行った。解析には修正Givens法を用いた。表-3.1.2に解析結果を示す。ここで β_x はクレーン横行方向、 β_y はクレーン走行方向、 β_z は上下方向の刺激係数を示している。

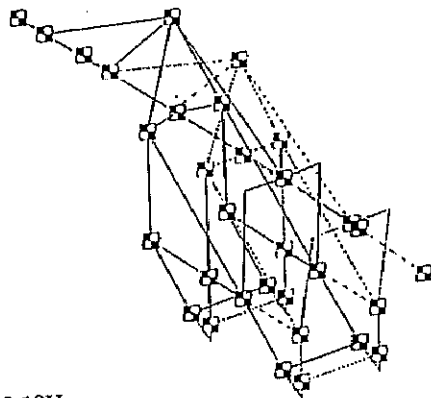
また、図-3.1.3にクレーンの1次から3次までの主要な固有モード図を示す。この結果からは、クレーンの1次のモードはクレーンの鉛直軸を中心にブームを振って捻れるモード、2次モードは横行方向に全体が変位するモード、3次のモードが走行方向に全体が変位するモードである。また、表-3.1.2には14次までの固有振動数と刺激係数を示す。さらに高次のモードも存在するが次第に計算誤差も大きくなるので14次までを記載している。この刺激係数から、地震時には横行方向の入力波に対してクレーンが最も顕著に応答するものと考えられる。

Z
Y
X



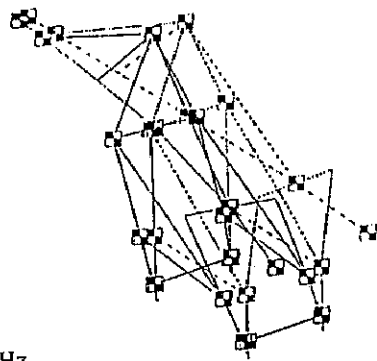
Mode 1 1.19 Hz

Z
Y
X



Mode 2 2.19Hz

Z
Y
X



Mode 3 2.44Hz

图-3. 1. 3 固有モード図

表-3. 1. 2 クレーン模型の固有振動数と刺激係数 (FEM解析)

モード (次)	固有振動数 f (Hz)	刺激係数		
		β_x	β_y	β_z
1	1.19	0.00	-5.93	0.00
2	2.19	15.23	0.00	-0.03
3	2.44	0.00	-12.09	0.00
4	4.77	0.00	2.63	0.00
5	6.86	-0.57	0.00	-1.22
6	8.35	0.61	0.00	-3.68
7	10.6	0.00	0.14	0.00
8	12.8	1.90	0.00	2.56
9	13.9	0.00	-1.04	0.00
10	16.5	0.00	5.05	0.00
11	18.0	0.43	0.00	-5.65
12	19.2	0.00	3.95	0.00
13	22.8	0.19	0.00	-2.80
14	24.0	0.04	0.00	0.96

(模型スケール)

1-3 計測器

クレーン模型には脚部、水平材 (ポータル梁)、斜材、シルビーム等に合計で64枚の歪ゲージを接着した。前章でも述べたとおり、水平材より上の部分はおおむねトラス構造と見なすことのできる剛な構造であり、これに比して水平材より下の脚の部分はより弾性的な挙動をすると考えられ、全体の構造の中で最も変形を受けやすい部位は脚上部 (脚と水平材の接合部) 周辺であると推測される。また事前に行った予備実験においても脚上部で最大の歪の値が出た。これらから今

回の実験においては歪ゲージを図-3. 1. 4に示すような（脚・水平材接合付近の）脚及び水平材部分に注目して貼付し、計測を行うこととした。各計測点においては、部材両面のゲージの値の差から曲げひずみを求め、和から軸ひずみを求めた。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）に歪み型の三方向加速度計を取り付け、クレーン応答加速度を測定した。また、脚の浮き上がりを観測するため、クレーン脚の垂直方向の変位はレーザー変位計を用いて計測した。

実験において使用した計測器を表-3. 1. 3に示す。

表-3. 1. 3 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℃)	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線式平行ビニール線付	5×1.4	脚, 水平材

(レーザー変位計)

型式名	名称	基準距離	測定範囲	光源	適用
LB-300	可視光レーザー変位センサー	300mm	±100mm	緑外線レーザー	脚, 振動台

1-4 静的載荷実験の方法

コンテナクレーンの耐震設計の体系が震度法であることから、脚の浮き上がりを生じるような荷重レベルを静的に表現しようという考え方がある。(社)港湾荷役機械化協会は、「コンテナクレーン耐震設計のための手引き」⁷⁾において、脚の浮き上がりを生じる瞬間の限界の水平荷重(浮き上がり限界荷重)は、海側及び陸側のそれぞれの方向について、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ることにより求められるとしている。すなわち「コンテナクレーン耐震設計のための手引き」では、下記のように浮き上がり限界荷重を定義している。図-3.1.5より、海側からの浮き上がり限界荷重 Ps_1 は、式(3.30)で表せる。

$$Ps_1 = b \times W / H \quad (\text{N}) \quad (3.30)$$

また陸側からの浮き上がり限界荷重 Ps_2 は、式(3.31)で表せる。

$$Ps_2 = a \times W / H \quad (\text{N}) \quad (3.31)$$

浮き上がり限界荷重 W_{cr} は、式(3.32)で表せる。

$$\begin{aligned} W_{cr} &= (Ps_1 + Ps_2) / 2 \\ &= (a + b) \times W / (2H) \\ &= L \times W / (2H) \quad (\text{N}) \quad (3.32) \end{aligned}$$

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)

W_{cr} ; 浮き上がり限界荷重 (N)

このように脚の浮き上がりが生じる荷重レベルを静的に表現することが可能であれば、設計法が簡略化され、設計実務上の大きなメリットをもたらす可能性がある。今回の実験では、動的な条件下と静的な条件下での浮き上がり限界荷重を実験的に比較することにより、浮き上がり限界荷重を静的に取り扱うことの妥当性を検証することとした。そのため、静的に载荷して浮き上がりを再現する実験を実施し、海側、陸側からのそれぞれの静的な条件下での浮き上がり限界荷重を求めた。また、その時の脚及び水平材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、あわせて検討を行った。

今回の静的な浮き上がり実験では、想定された荷重の合力を重心位置に作用させることが必要である。しかし、現実には重心位置にはクレーン模型の部材は存在せず、また特別に治具を設置して直接载荷した場合には、治具の影響で本来の現象とは異なる挙動を作り出すことも懸念されるため、重力の方向を変える方法により実験を行うこととした。写真-3. 1. 1に示すように、クレーン模型を同時期に製作した栈橋上部工（2.6 m×2.6 m）のレールの上にレールと固定することなく設置し、その上で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上部工を傾斜させ、一旦静止させた後、その状態で静歪を測定した。これにより重力の分力を見かけの水平荷重として、その合力がクレーンの重心位置に荷重が作用する場合と同じ状態を再現した。このときクレーン脚がレールから離れる瞬間を海側（陸側）脚の浮き上がり限界とした。また、上部工の傾斜角は、上部工中央部に設置した加速度計の値から求めた。加速度計を用いたのは、傾斜角を正確に計測することが目的ではなく、後述のように重力の影響を補正する目的であったためである。

この実験方法では、模型が傾斜する影響の補正が必要であるため、浮き上がり限界荷重 P_s は以下のような補正を行って求めた。図-3. 1. 6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、 $W\cos\theta$ で表わすことができる。従って、水平な状態（ $\theta=0$ ）に補正した

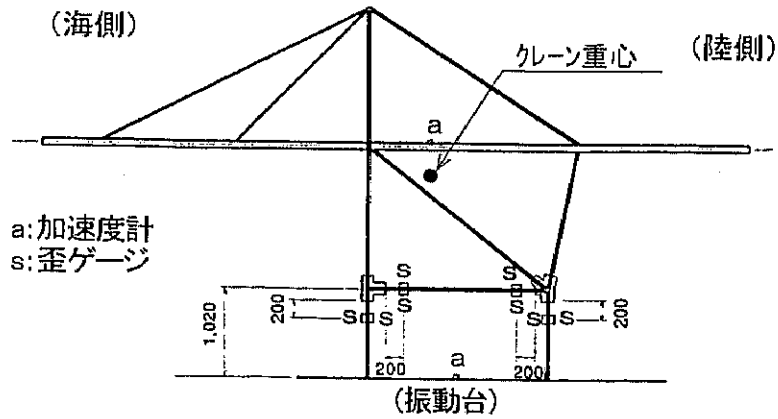


図-3. 1. 4 計測器設置位置図

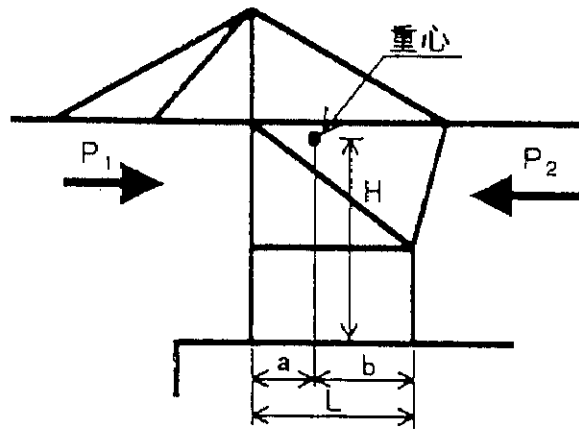


図-3. 1. 5 浮き上がり限界荷重の算定

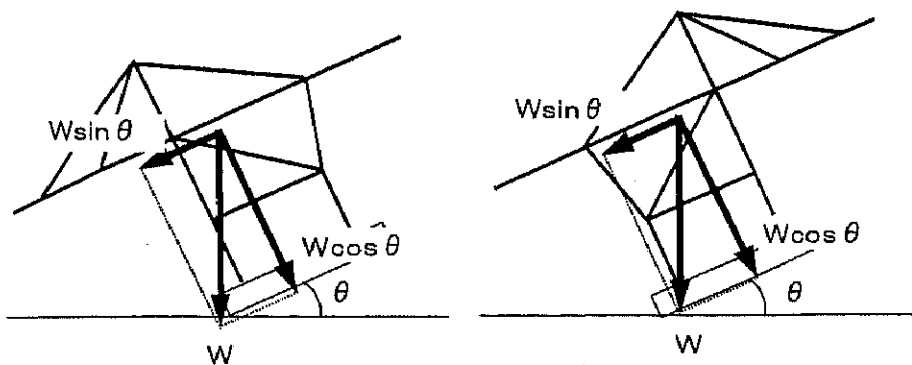


図-3. 1. 6 静的載荷実験の水平荷重の算定

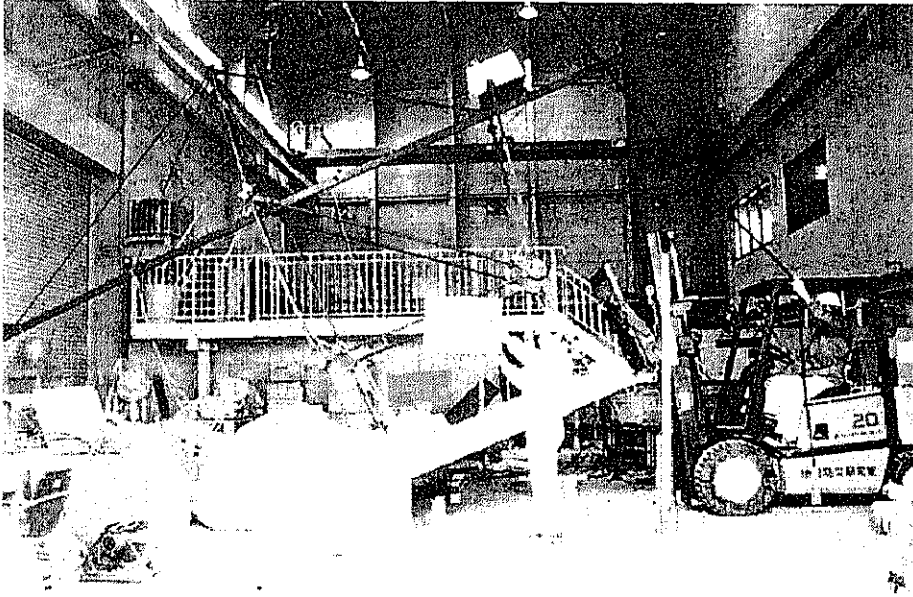


写真-3. 1. 1 静的載荷実験の概要

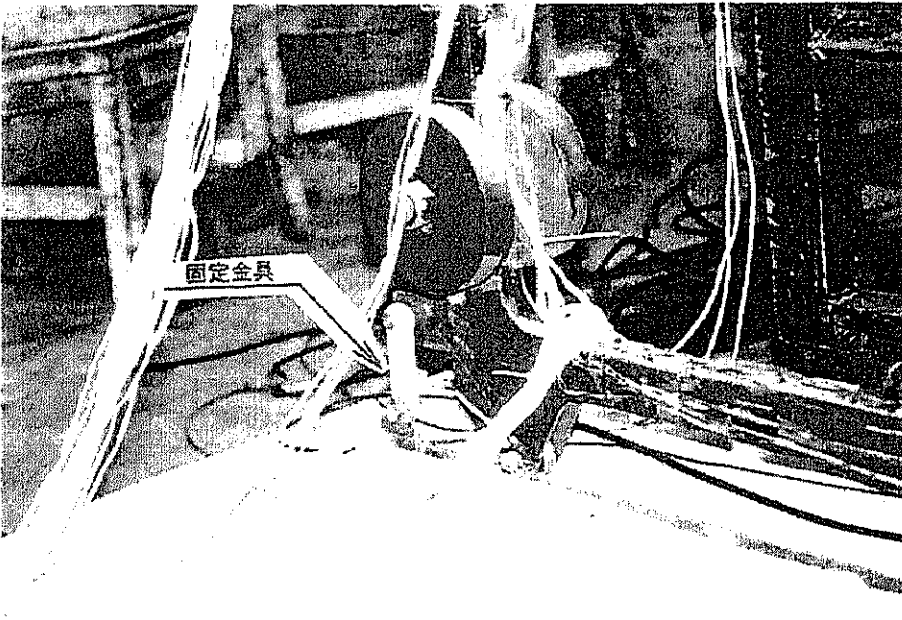


写真-3. 1. 2 脚固定金具

場合におけるクレーン重量 W に対する浮き上がり限界荷重 P_s は、式 (3. 33) で求められる。

$$P_s = W \sin \theta / \cos \theta = W \tan \theta \quad (3. 33)$$

またこれまで、種々の研究において脚がレールと連結された状態で検討が行われてきたことから、その結果との比較検討を行う意味で、浮き上がり限界荷重を越えて脚が浮き上がる場合と、強制的に脚が浮き上らない措置を講じた条件下でのクレーンの挙動を検討するため、陸側脚が浮き上がる実験において、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-3. 1. 2）での実験も併せて行うこととした。

1-5 実験施設⁸⁾

クレーンの動的加振実験は、港湾技術研究所の三次元水中振動台で行った。振動テーブルの寸法は ϕ 6.0 m の円形である。この振動台の加振能力は水平 X 方向 ± 2.0 G、水平 Y 方向 ± 1.0 G、上下方向 ± 1.5 G である。加振周波数は DC ~ 100 Hz である。兵庫県南部地震クラスの地震動を再現できるように設計されており、今回の実験で必要とされるレベル 2 地震動の作用下でのクレーンの挙動を検討するための能力を有している。振動台のシステムの概略を図-3. 1. 7に、主な仕様を表-3. 1. 4に示す。

また、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、本実験では注水の必要はないため、気中の条件下で実験を行った。

1-6 実験ケース及び地震波

今回の実験において加振方向は X 方向（水平：横行方向）のみを対象とした。固有値解析の結果横行方向のモードの刺激係数が大きいことから X 方向を選定した。また、クレーンの構造部材の構成から、横行方向に対して脚の片持ち梁としてのスパン長が長くなり、端部の負担が大きくなること、クレーン走行方向にお

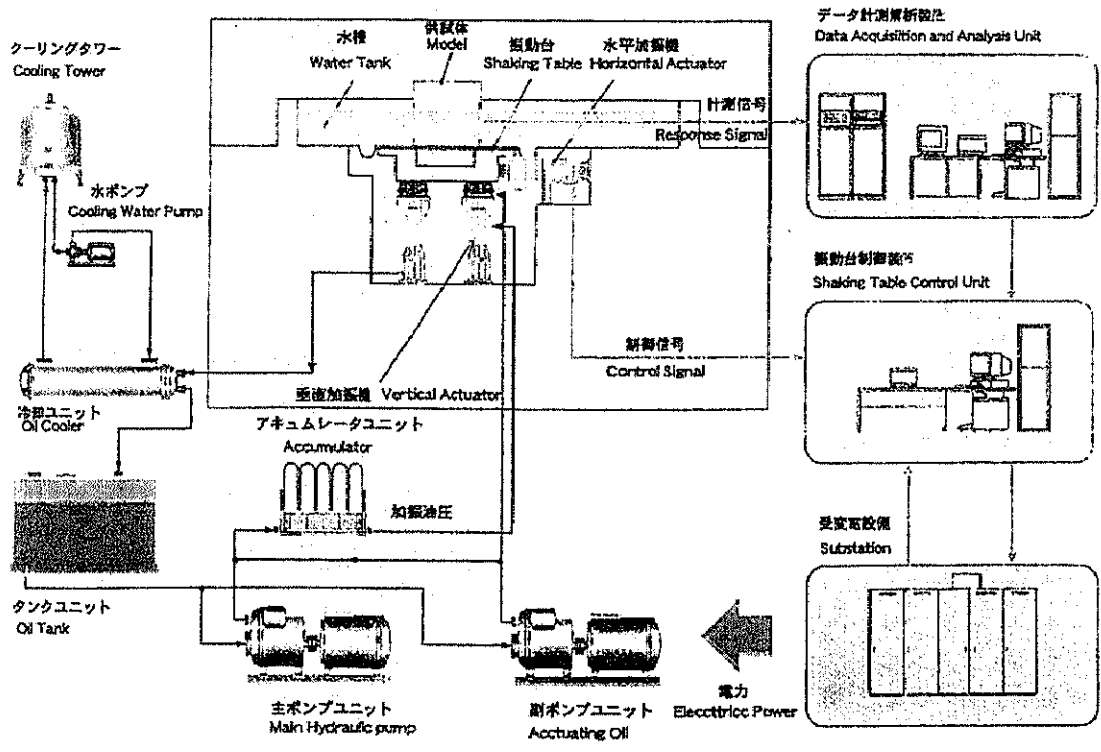
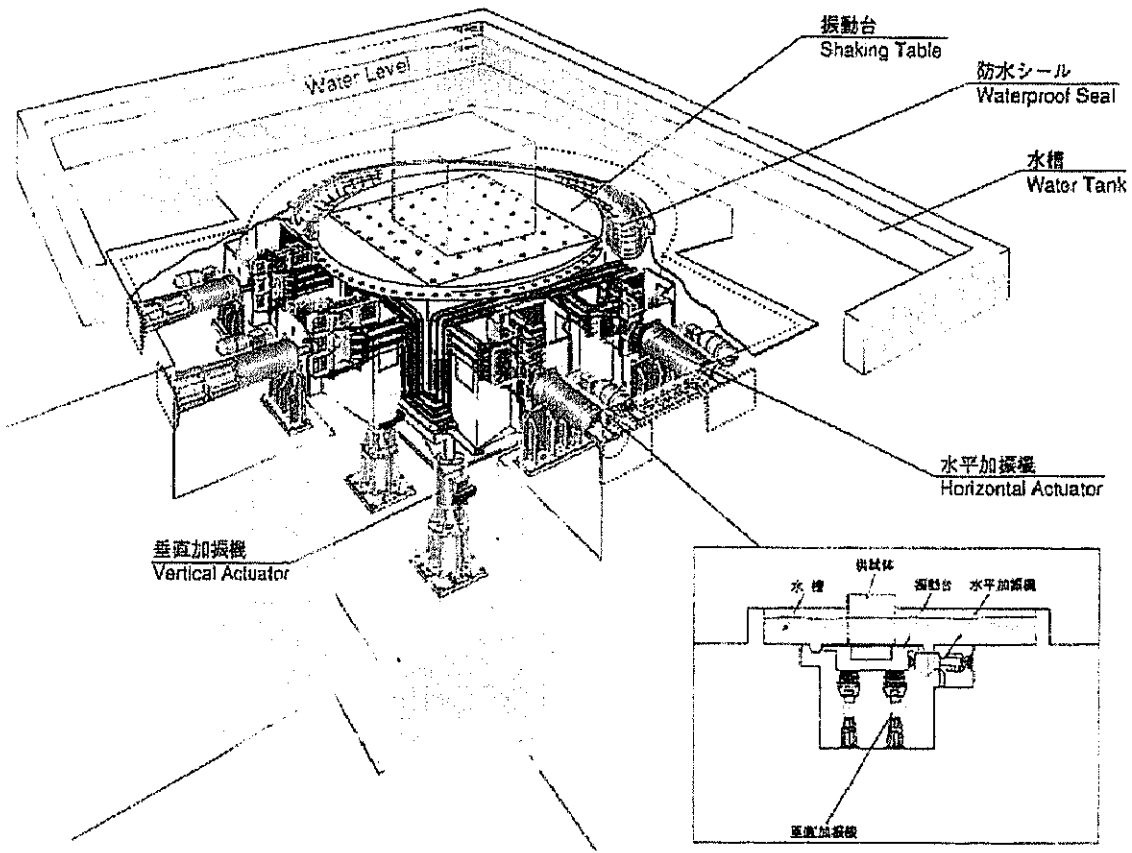


図-3. 1. 7 水中振動台システム図

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るこ

表-3. 1. 4 振動台の仕様

テーブル寸法	φ 6 m
加振方向	水平 2 軸 (X, Y)、上下 (Z) 回転 (θ_x , θ_y , θ_z)
駆動方式	電気・油圧サーボ式
搭載重量	定格 30 ton 最大 40 ton
最大変位	水平 (X) ± 200 mm 水平 (Y) ± 300 mm 上下 (Z) ± 100 mm
最大回転加振角度	X軸まわり θ_x ± 1° Y軸まわり θ_y ± 1° Z軸まわり θ_z ± 1°
最大速度	水平 (X) ± 75 cm/s 水平 (Y) ± 150 cm/s 上下 (Z) ± 50 cm/s
最大加速度	水平 (X) ± 2.0 G 水平 (Y) ± 1.0 G 上下 (Z) ± 1.5 G
加振周波数	DC ~ 100 Hz

と、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⁹⁾、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。さらに、設計実務上は地震力を水平荷重として取り扱うことが標準的であるため、これをも考慮した。

動的（加振）実験における入力波としては、正弦波及び地震波を用いた。正弦波は、クレーンの周波数応答特性を検討するために用いた。入力最大加速度を一定とし周波数を変化させてクレーン共振点近傍でロッキングを起こさせるケースと、周波数を一定とし、最大加速度を上げてロッキングを起こさせるケースを行った。

また入力地震波としては、係留施設の設計時に標準として用いられる地震波として、八戸波NS成分、大船渡波E41S成分、神戸ポートアイランド波NS成分を用いた。各入力地震波とそのフーリエスペクトルを図-3.1.8に示す¹⁰⁾。それぞれの地震波のフーリエスペクトルを見ると、八戸波が最も低周波成分が卓越しており、逆に大船渡波は高周波成分が卓越している。ポートアイランド波は、その中間の特徴を持つといえる。港湾構造物の耐震設計におけるレベル2地震動は、上記の3つの地震動の波形を設計地震動の波形として用い、設計地震動の最大振幅は、マグニチュードと距離との関係式から求めたものを用いている¹¹⁾。実験では入力最大加速度を低いレベルから徐々に上げて脚の浮き上がりが生じるまで増加させて実施した。なお入力地震波は時間軸を相似則により $1/\sqrt{15}$ に換算したものをを用いている。基本的な検討は八戸波を用い、大船渡波、神戸ポートアイランド波により地震波の特性の違いによる差異について検討した。八戸波を中心に検討を行った理由は、港湾構造物の設計において最も一般的に使用されていること、及びコンテナクレーンの固有周期が2～3秒であることに対して、各地震波の加速度応答スペクトルから八戸波の影響が最も大きいと判断したことによる。

実験ケース及び入力地震波の概要を表-3.1.5に示す。なお、加振実験においては加振直前の計測器の値を初期値0としてデータを整理した。従って、計測結果は加振実験による変動成分のみを示し、自重による静的な成分は含んでいない。

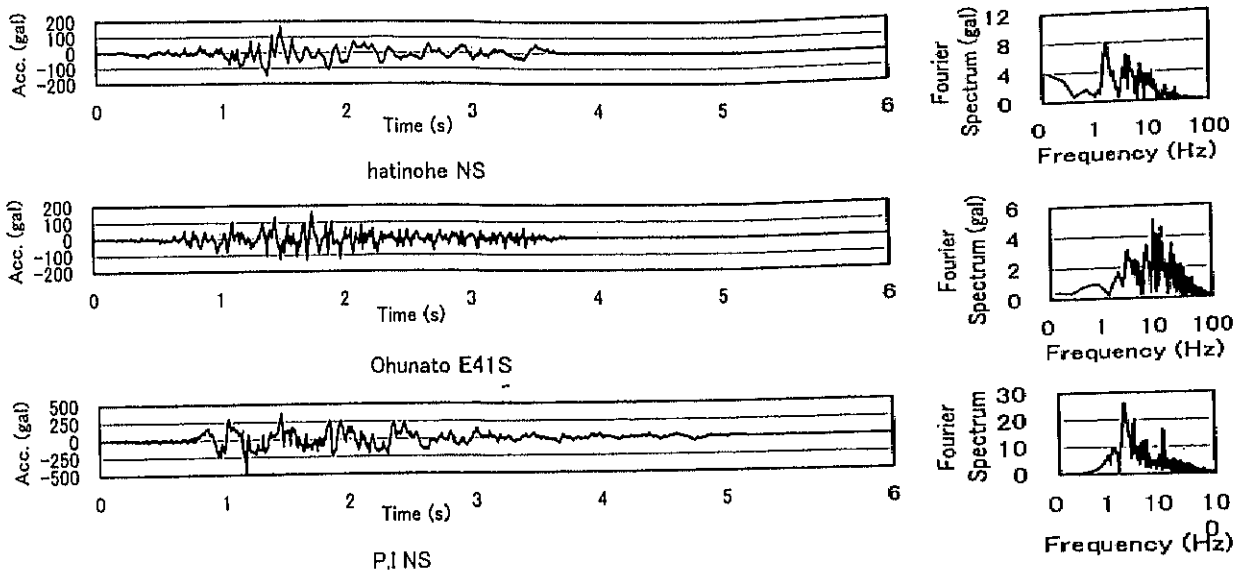


図-3. 1. 8 入力地震波とフーリエスペクトル(1/√15波形)

表-3. 1. 5 実験ケース及び入力波の概要

(a) 静的載荷実験

		クレーン傾斜角 (°)
静的載荷実験(脚自由)	陸側脚浮上方向	0.0 ~ 17.1
	海側脚浮上方向	0.0 ~ 26.5
静的載荷実験(脚固定)	陸側脚浮上方向	0.0 ~ 17.2

(b) 動的加振実験

入力波	加速度 (Gal)	周波数 (Hz)	加振波数	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 170 G		—	S-252NS Base
大船渡波	実測値 × (1.0 ~ 4.0 倍) 実測最大加速度 161 G		—	S-1210 E41S
神戸波	実測値 × (0.2 ~ 0.4 倍) 実測最大加速度 570 G		—	PI- NS

第2節 模型実験の結果

2-1 静的載荷実験（脚自由）の結果

静的載荷実験（脚自由）では、陸側脚からの浮き上がり実験と海側脚からの浮き上がり実験を実施した。ここでは陸側から海側方向に荷重をかける（L IまたはL II脚が浮き上がりを生じやすいケース）実験を陸側からの浮き上がり実験、海側から陸側方向に荷重をかける（S IまたはS II脚が浮き上がりを生じやすいケース）実験を海側からの浮き上がり実験と呼んでいる。

本実験では、クレーンの脚をレール等に固定せず、浮き上がりが可能な状態にし、フォークリフトで徐々にクレーンの傾斜角を増大させた。実験は脚が浮き上がり、脱輪した角度で終了させた。その結果、陸側脚からの浮き上がり実験では水平荷重954 N相当の角度で脚が浮き上がり、脱輪した。陸側からの浮き上がり限界荷重は、クレーンに作用する力の釣り合いから式（3.31）より計算上では1058 Nであったが、これよりやや小さい水平荷重の段階で脚が浮き上がっている。この時、陸側2脚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。

海側からの浮き上がり限界荷重は、同様に式（3.30）より計算上は水平荷重1860 Nと算定される。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1546 N相当）までしか傾けることができず、浮き上がりを生じさせることはできなかった。

以下に実験での計測結果について述べる。

2-1-1 陸側からの浮き上がり実験

(1) 部材の曲げモーメント

脚自由条件での陸側からの浮き上がり実験における部材の曲げモーメントの計

測結果を以下に示す。各脚上部の曲げモーメントを図-3. 2. 1~3. 2. 2に、水平材に作用する曲げモーメントの結果は図-3. 2. 3~3. 2. 4に示した。各図ともクレーンに作用する重力の水平方向相当成分の慣性力の値を水平荷重として横軸に取り、部材の測定位置での曲げモーメントの値を縦軸に取っている。図中で○で囲まれた点はレールから脱輪した状態で測定した結果を表す。

陸側脚の計測結果を表す図-3. 2. 1では、脱輪するまでは各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ほぼ比例して曲げモーメントが増加している。これは海側脚の計測結果を示す図-3. 2. 2においても同様の傾向が見られる。しかし脱輪後においては、海側2脚のみが車輪とレールが拘束された状態となり、図-3. 2. 1の○印の計測結果が示すように陸側脚では曲げモーメントはほとんど作用しない状態となった。一方、脱輪後陸側脚では作用する曲げモーメントは図-3. 2. 2の○印のように脱輪前の倍以上に増加している。これは、陸側脚で受けていた水平荷重分が海側脚のみで受けることとなったため、急激に曲げモーメントが増加したものと考えられる。この実験結果からは、脚の浮き上がりと脱輪によって、脚に作用する曲げモーメントは脱輪前の2倍以上となるため、「脚の浮き上がり」は部材の構造設計時において大きな影響を及ぼす可能性があることを示していると考えられる。

水平材の陸側脚接合部近傍に作用する曲げモーメントの計測結果は図-3. 2. 3に示している。この結果を見ると、水平材では陸側脚部ほど大きな絶対値の曲げモーメントは発生していないが、クレーン脚と同様に、水平荷重の増加にほぼ比例して曲げモーメントが増加する傾向が見られた。脚と水平材とで作用する曲げモーメントの値を比較すると、脚部の方が水平材の3~4倍の大きな値を示している。水平材の海側脚接合部近傍での計測結果は図-3. 2. 4に示す。陸側脚接合部近傍と同様の傾向が見られた。脱輪時には海側脚接合部近傍で曲げモーメントが急激に増加し、陸側脚接合部近傍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、水平材海側脚接

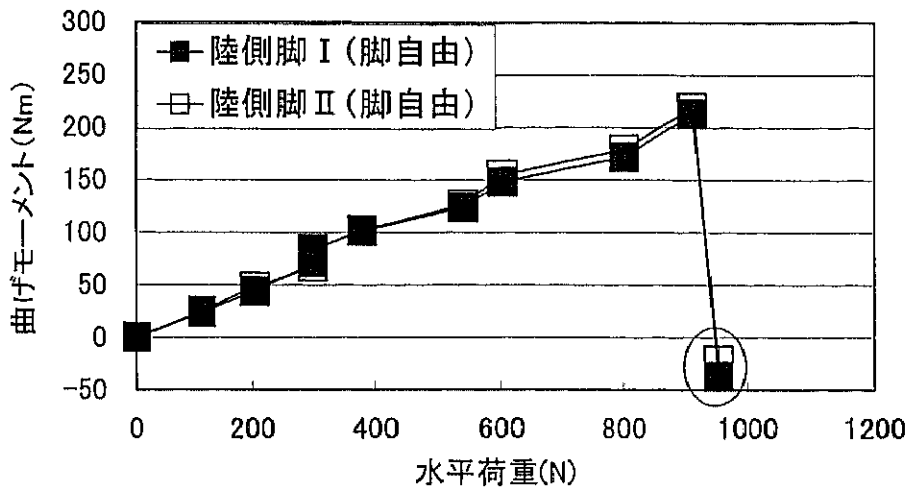


図-3. 2. 1 脚部材曲げモーメント(陸側脚)

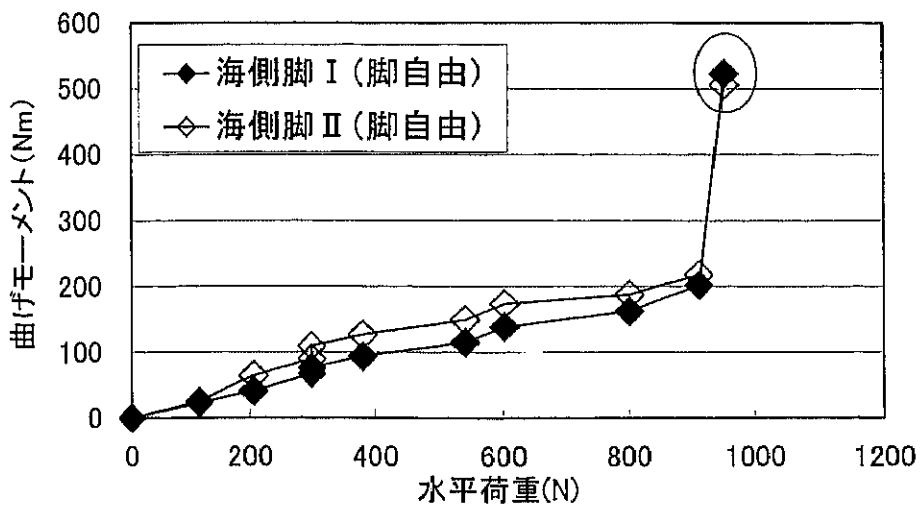


図-3. 2. 2 脚部材曲げモーメント(海側脚)

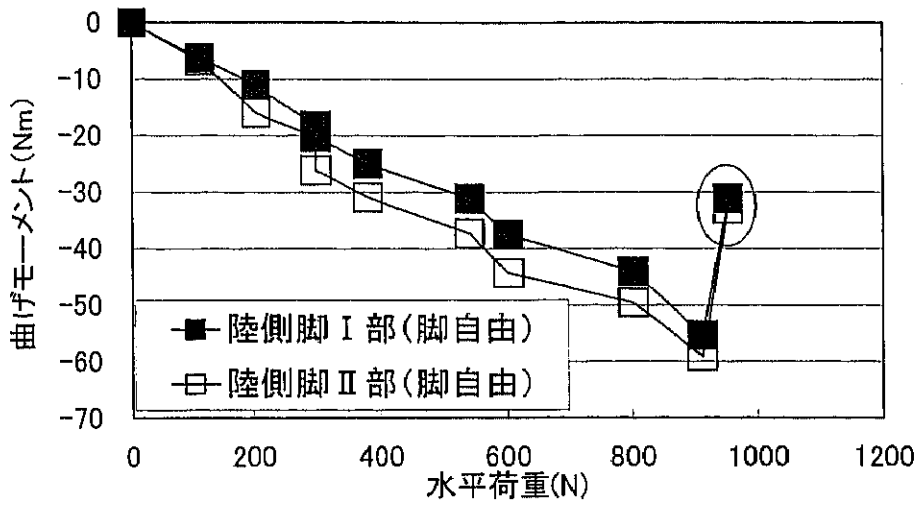


図-3. 2. 3 水平材曲げモーメント(陸側脚接合部近傍)

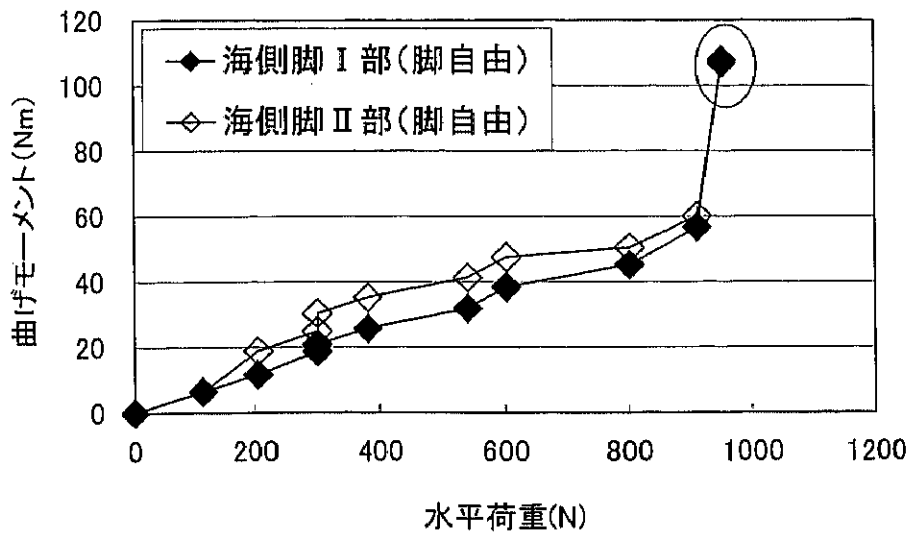


図-3. 2. 4 水平材曲げモーメント(海側脚接合部近傍)

合部近傍と陸側脚接合部近傍とでは曲げモーメントの向きが逆であることを示している。本論文では海側を左とした断面において時計回りを正值として表現している。

(2) 脚部材の軸力

図-3. 2. 5、図-3. 2. 6に水平荷重に対するクレーン脚部材の軸力を示す。図-3. 2. 5には陸側脚の軸力、図-3. 2. 6には海側脚の軸力を示している。

軸力についても水平荷重の増加にほぼ比例して増加している。しかし、脱輪後は陸側脚に作用する軸力は小さくなるが、海側脚の軸力は急激に大きくなり、軸力においても曲げモーメントと同様の傾向が見られた。また海側脚において海側脚Ⅱの1脚だけに大きな軸力が出ている。本来であれば両脚の条件は変わらないので、同程度の軸力が発生すべきであるが、これは脱輪した際にクレーン本体にねじれが発生し、海側脚Ⅰと海側脚Ⅱの荷重の分担が偏ったことによるものと考えられる。

(3) 変形モード

以上の陸側からの浮き上がり実験における曲げモーメントの計測結果から求めた浮き上がり前後でのコンテナクレーンの水平材から下の部分の変形の概略図を図-3. 2. 7及び図-3. 2. 8に示す。

2-1-2 海側からの浮き上がり実験

(1) 部材の曲げモーメント

海側からの浮き上がり実験における部材の曲げモーメントを図-3. 2. 9～図-3. 2. 12に示す。図-3. 2. 9は陸側脚に発生する曲げモーメントを、図-3. 2. 10には海側脚に発生する曲げモーメント、図-3. 2. 11には水平材陸側脚接合部近傍、図-3. 2. 12には水平材海側脚近傍に発生する曲げモーメントを示

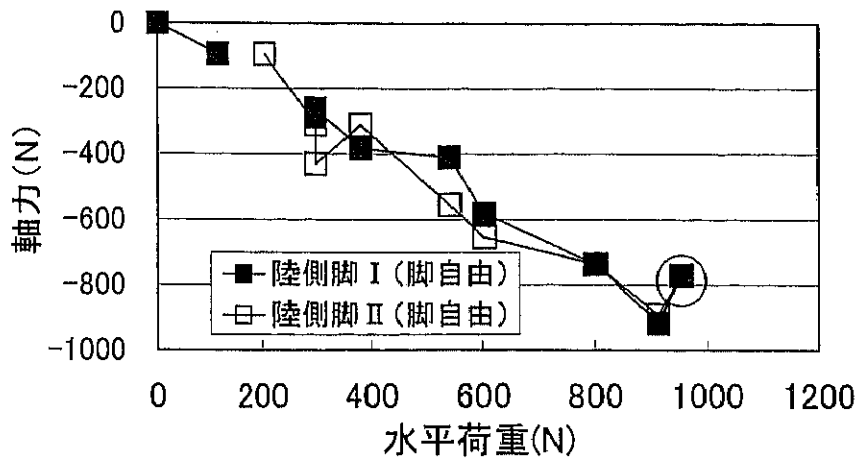


図-3. 2. 5 脚部材軸力(陸側脚)

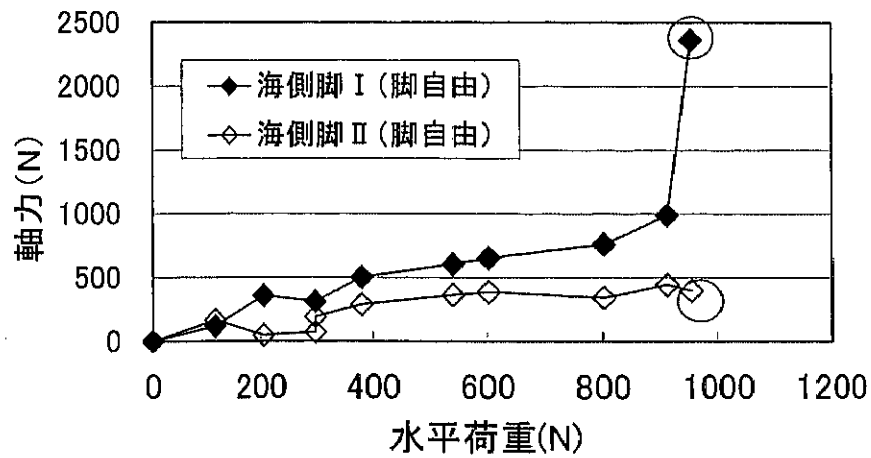


図-3. 2. 6 脚部材軸力(海側脚)

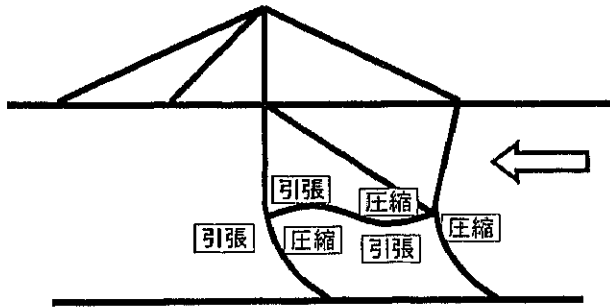


図-3. 2. 7 変形モード概略図(陸側より水平荷重作用時)

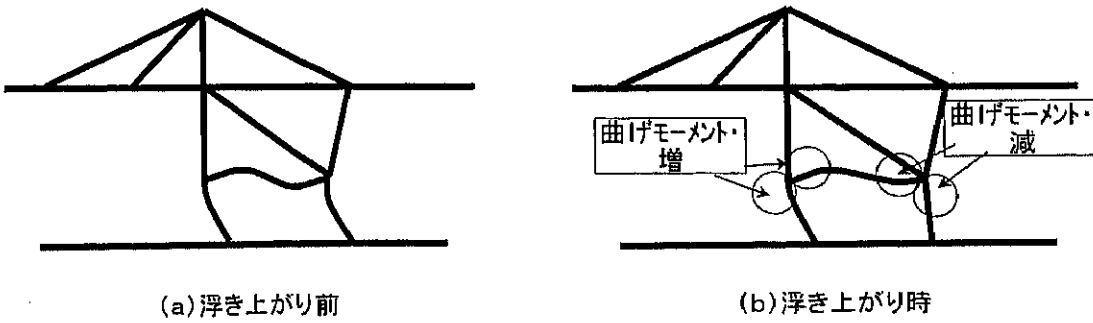


図-3. 2. 8 変形モード概略図(脚浮き上がり前後)

した。比較のため、陸側からの浮き上がり実験より得られた曲げモーメントの値について各図の中に示している。なお、実際に計測した曲げモーメントの符号は水平力の作用する方向に応じて変化するが、発生する曲げモーメントのレベルや増加の傾向等の比較のため図中では脱輪前の曲げモーメントの符号が一致するように修正して表示している。

図-3. 2. 9では、陸側脚に発生する曲げモーメントが、水平荷重の増加にほぼ比例して増加している。また、その値は陸側からの浮き上がり実験において発生した値と同レベルとなっている。しかし、陸側からの浮き上がり実験では浮き上がり限界荷重近傍で脱輪し、曲げモーメントが急激に変化しているが、海側からの実験ではその後もほぼ水平荷重に比例して曲げモーメントが増加している。

図-3. 2. 10に示した海側脚の計測結果においても同様の傾向が見られた。

図-3. 2. 11に示した水平材陸側脚接合部近傍での測定結果も曲げモーメントの結果と同様の傾向が見られた。図-3. 2. 12に示した水平材海側脚接合部近傍での測定結果では、海側からの浮き上がり実験の結果の方が陸側からの浮き上がり実験の結果より発生した曲げモーメントの値はやや小さかった。

またこれらの結果では、脱輪までは、同じ大きさの水平荷重に対して陸側、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発生していることがわかる。このことから今回のクレーンの形状では、水平材より上部の構造は脚と水平材に発生する部材力にはあまり影響しないことがわかる。

(2) 脚部材の軸力

図-3. 2. 13及び図-3. 2. 14に海側からの浮き上がり実験における脚部材の軸力を示す。図-3. 2. 13には海側脚の軸力を、図-3. 2. 14には陸側脚の軸力を示す。それぞれ比較のために陸側脚からの浮き上がり実験より得られた軸力の値を各図の中に示している。但し、海側からの浮き上がり実験と陸側からの浮き上がり実験では、それぞれ浮き上がり時の支点となる脚と、浮き上がりが生

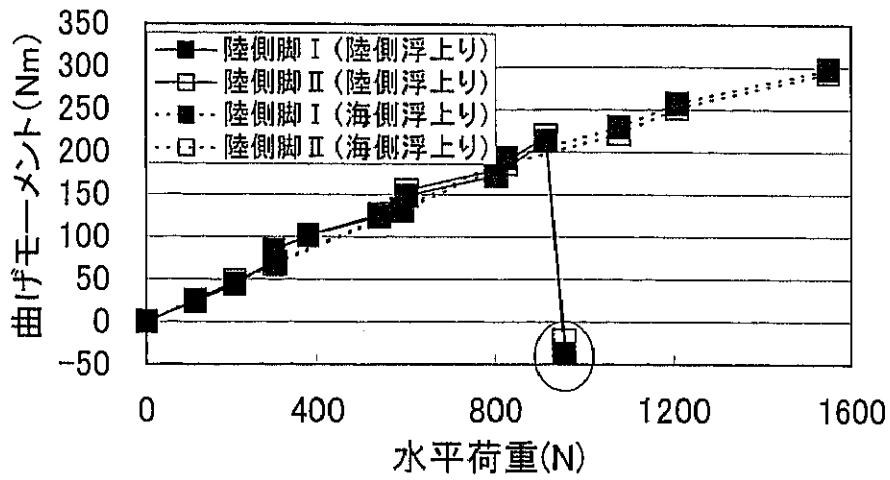


図-3. 2. 9 脚部材曲げモーメント(陸側脚)

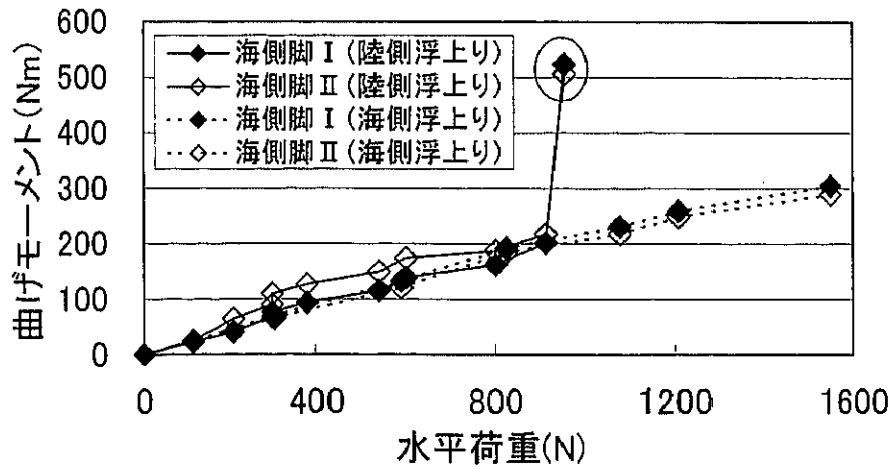


図-3. 2. 10 脚部材曲げモーメント(海側脚)

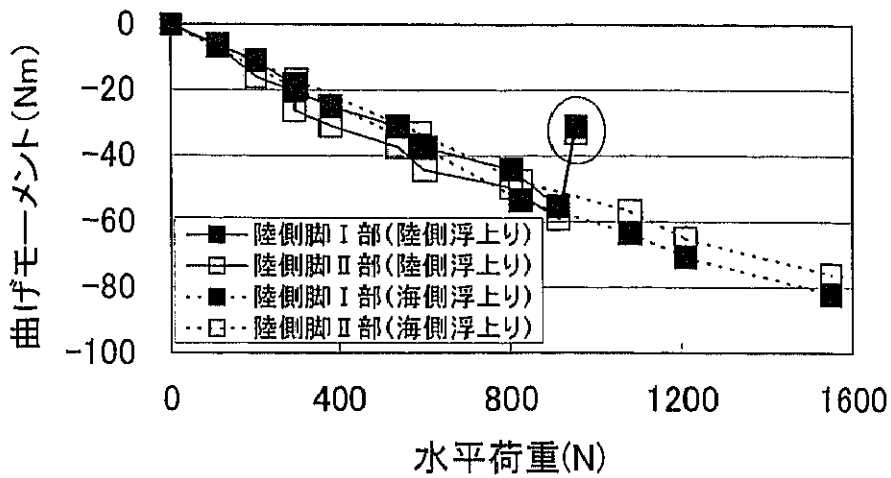


図-3. 2. 11 水平材曲げモーメント(陸側脚接合部近傍)

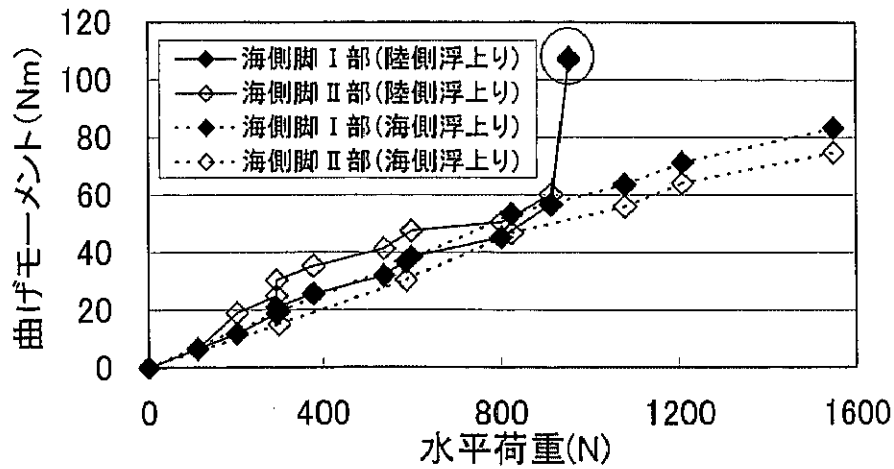


図-3. 2. 12 水平材曲げモーメント(海側脚接合部近傍)

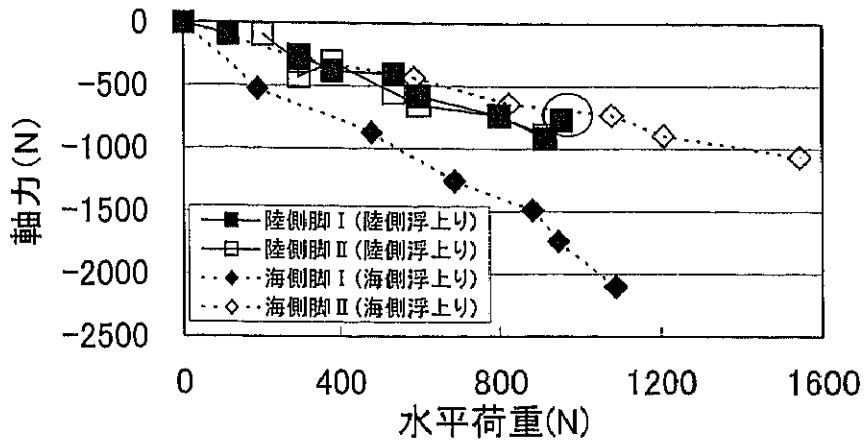


図-3. 2. 13 脚部材軸力(陸側脚)

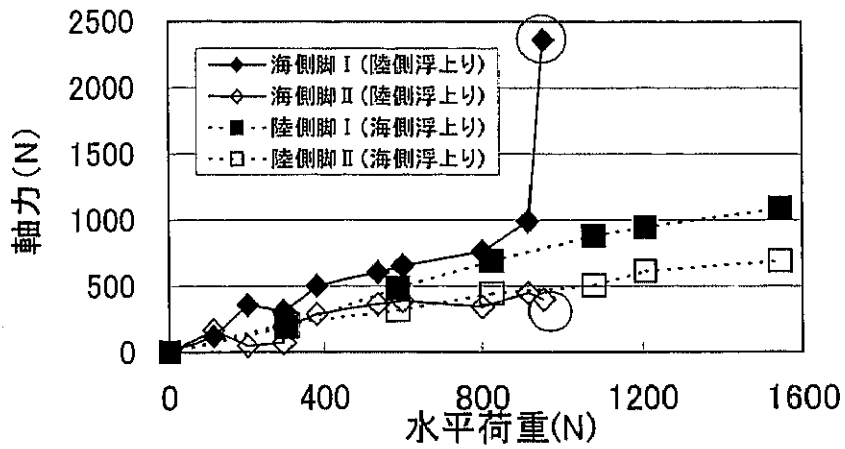


図-3. 2. 14 脚部材軸力(海側脚)

じる脚とが異なるため、比較とする脚は、浮き上がり時の支点になる脚どうし、浮き上がりを生じる脚どうしとした。

図-3. 2. 13より、海側からの浮き上がり実験においても、水平力の増加にほぼ比例して脚部材の軸力も増加している。但し、このケースでは同一水平力のレベルで、海側脚Ⅰと海側脚Ⅱに発生した軸力の値が明確に異なり、実験時点でクレーンの模型が偏心していたのではないかと考えられる。

図-3. 2. 14には陸側脚の軸力を示している。陸側脚も水平力にほぼ比例して軸力が増加している。陸側脚の場合には海側脚のような大きな差は生じていない。また、陸側からの浮き上がり実験と比較しても脱輪まではほぼ同じレベルの軸力が発生している。

(3) 変形モード

海側からの浮き上がり実験における曲げモーメントの測定結果から、海側から水平荷重が作用した場合の脚及び水平材の変形状態の概略図を図-3. 2. 15に示す。

2-2 静的載荷実験（脚固定）の結果

これまでの研究や設計上では、多くの場合脚が何らかの形でレールに固定されていると仮定した支持条件で解析が実施されていた。しかし、レベル2地震動に対して脚が浮き上がる場合は、脚を固定した支持条件ではその挙動を再現できないことから、写真-3. 1. 2に示すように脚を固定した実験を行い、静的な条件下での支持条件の違いによるクレーンの挙動を検討することとした。

また、静的載荷実験（脚自由）の結果では、特に曲げモーメントについては水平力の作用方向の違いがあまり見られなかったこと、また脚の支持条件による差異にのみ着目したことから、実験（脚固定）では、陸側からの浮き上がり実験のみ実施した。

水平荷重は静的載荷実験（脚自由）において脚が脱輪したレベルまで増加させ、その時点で実験を停止した。

2-2-1 部材の曲げモーメント

脚固定条件での陸側からの浮き上がり実験における曲げモーメントの計測結果を図-3. 2. 16～図3. 2. 19に示す。図-3. 2. 16は陸側脚の曲げモーメント、図-3. 2. 17は海側脚、図-3. 2. 18が水平材陸側脚接合部近傍、図-3. 2. 19が水平材海側脚接合部近傍での値を示している。

比較のため、それぞれの図には脚が自由な場合の脚の曲げモーメントについても示している。

図-3. 2. 16より、脱輪を起こす前までは、脚の固定条件に係わらず、水平力の増加にほぼ比例して曲げモーメントの値も増加している。静的載荷実験（脚自由）において脚が脱輪し、曲げモーメントが急変したレベルでも、脚固定の場合には水平力にほぼ比例したレベルの曲げモーメントの値を示した。両ケースとも作用する曲げモーメントの値はほぼ同じ大きさのレベルであるが、脚を固定した状態での曲げモーメントの値が自由な条件での値よりやや小さい。以上の傾向は多少ばらつきが見られるものの、全ての図において同様にみられる。

2-2-2 脚部材の軸力

図-3. 2. 20～図-3. 2. 21に静的載荷実験（脚固定）の軸力の計測結果を示す。図-3. 2. 20には陸側脚の計測結果を、図3. 2. 21には海側脚の結果を示す。曲げモーメントの結果と同様、比較のため、静的載荷実験（脚自由）の結果を併せて示している。

図-3. 2. 20では、脚固定条件での実験結果がかなりばらついているが、全体としては水平荷重の増加に伴い、軸力も増加している。軸力の値も脚自由の場合に比較してやや小さな値が出ている。また、図-3. 2. 21でもほぼ同様の結

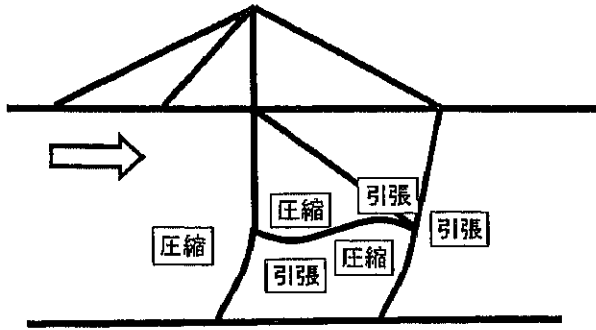


図-3. 2. 15 変形モード概略図(海側より水平荷重作用時)

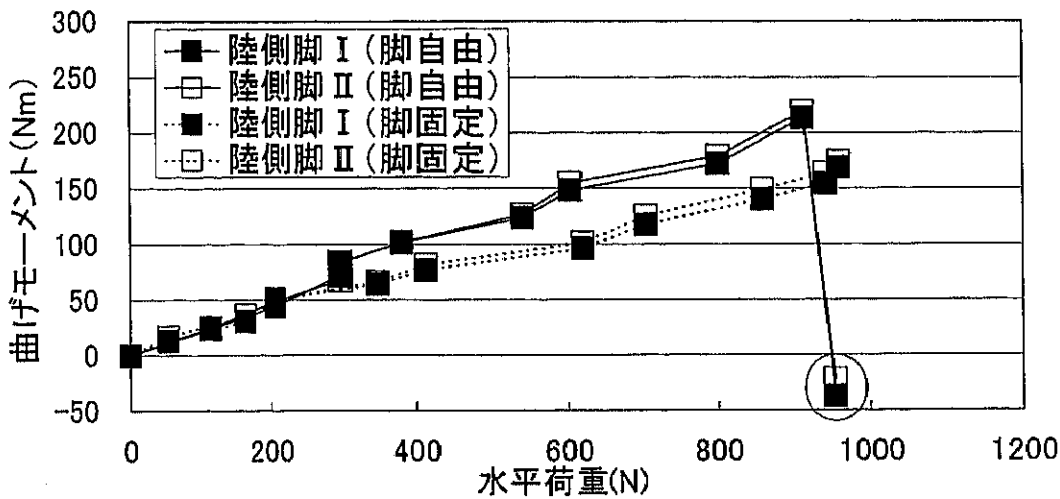


図-3. 2. 16 脚部材曲げモーメント(陸側脚)

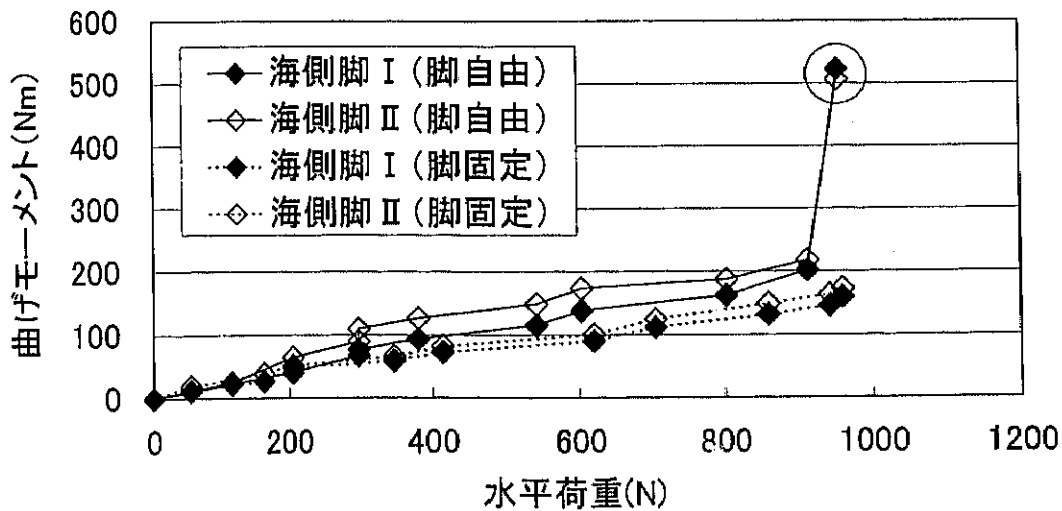


図-3. 2. 17 脚部材曲げモーメント(海側脚)

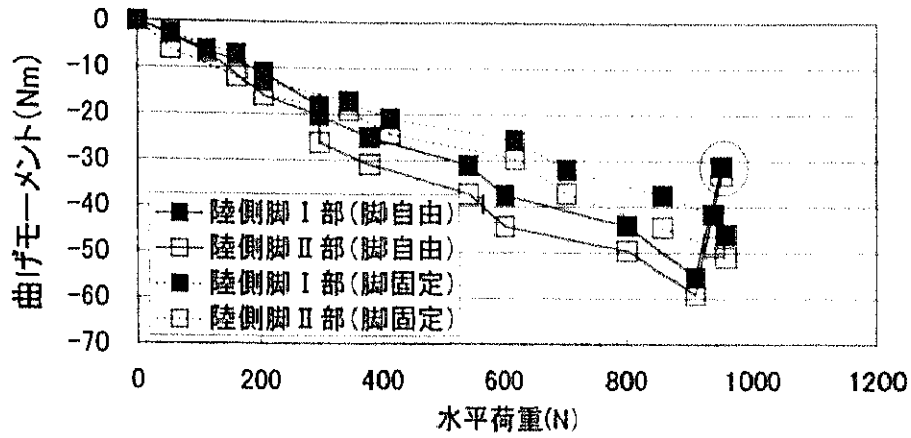


図-3. 2. 18 水平材曲げモーメント(陸側脚接合部近傍)

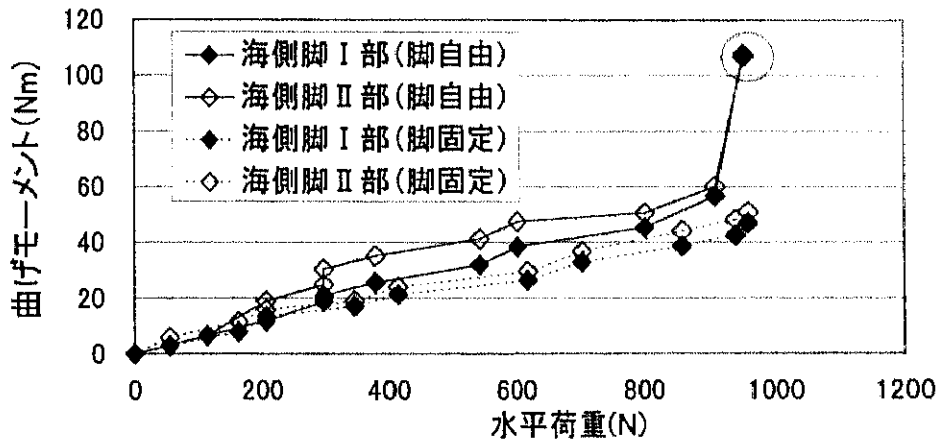


図-3. 2. 19 水平材曲げモーメント(海側脚接合部近傍)

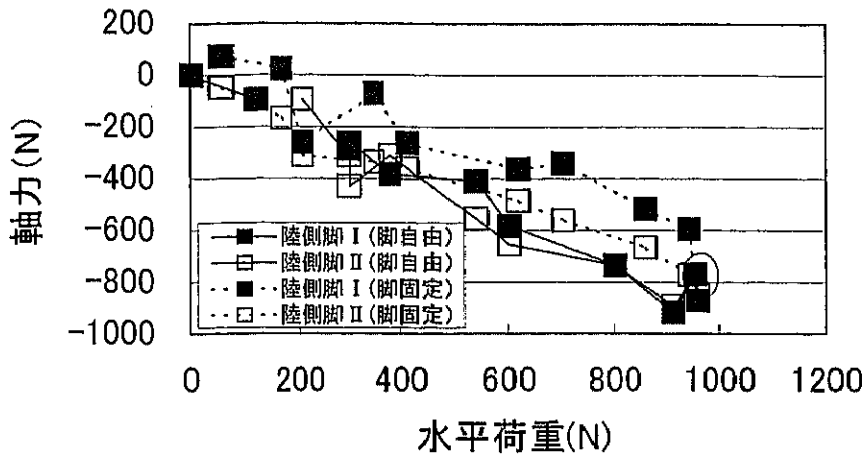


図-3. 2. 20 脚部材軸力(陸側脚)

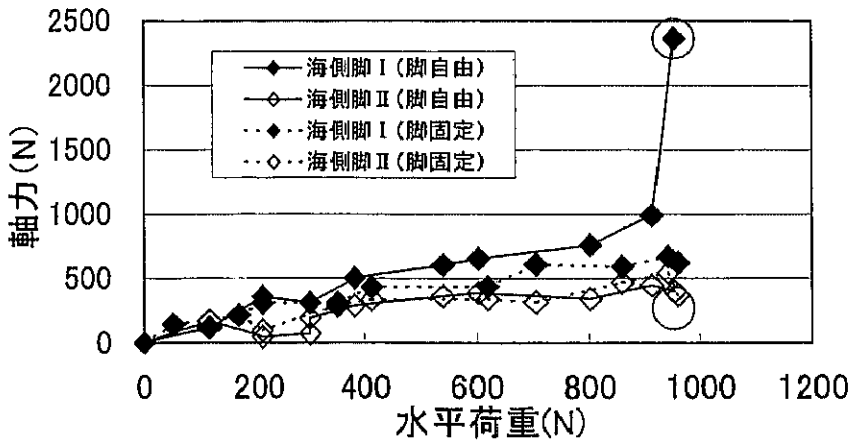


図-3. 2. 21 脚部材軸力(海側脚)

果となっている。

脚自由の条件での曲げモーメントと軸力の値がやや小さいのは、脚の固定のために取り付けられた固定金具でも水平荷重を受け持ち、クレーンにかかる水平荷重が減少したこと、また固定位置がレール面でなく、やや離れた位置であったことによりモーメントのアーム長が短くなったことによると考えられる。

以上の結果から脚が浮き上がるまでの曲げモーメントや軸力の値は、脚の固定条件により大きな差はないという結果が得られた。しかし、脚の浮き上がり後は、発生する曲げモーメント等の値が脚の固定条件によって大きく異なることから、設計においては脚の浮き上がりを考慮する必要があるものと考えられる。

2-3 動的加振実験の結果

動的加振実験は、クレーンの模型を振動台上のレールに設置し、表-3. 1. 5の地震動波形を入力することにより実施した。クレーン脚とレールとは全てのケースで連結しない状態で行った。

静的載荷実験においては、曲げモーメント及び軸力を水平荷重がかかった状態の静ひずみから算出したが、動的加振実験においては、実験測定中の歪みゲージの値から求めた曲げモーメントおよび軸力の時刻歴の最大値をとった。また水平荷重は、クレーンブーム上に設置した加速度計により計測したクレーンの最大応答加速度から式(3. 34)により算出した。なお、本研究では静的水平荷重との混同を避けるため、(D)を付して表示する。

$$P_D = m \times \alpha \quad (3. 34)$$

ここに、

P_D ; 水平荷重(N)

m ; クレーン質量(kg)

α ; 重心位置におけるクレーン最大応答加速度(m/s^2)

2-3-1 部材の曲げモーメント

正弦波及び八戸波による曲げモーメントの最大値と水平荷重との関係を図-3. 2. 22～図-3. 2. 29に示す。図-3. 2. 22～図-3. 2. 25には脚毎の脚部材の曲げモーメント、図-3. 2. 26～図-3. 2. 29には近傍の脚毎の水平部材の曲げモーメントを示す。それぞれ比較のために静的な陸側からの浮き上がり実験の結果を併せて表示している。陸側からの浮き上がり実験を比較対照としたのは、事前の予備実験で、脚の浮き上がりプロセスが、ほとんどの場合陸側脚からの浮き上がりにより開始されることが観察されたことによる。図中で○で囲まれた点は脱輪したケースを示している。

図-3. 2. 22～図-3. 2. 25を見ると、脚が浮き上がる前までは、いずれのケース（脚）でも水平荷重の増加にほぼ比例して曲げモーメントの値も増加している。各脚毎の曲げモーメントの値には大きな違いは見られなかった。また、静的な条件でも動的な条件（正弦波、八戸波）でも同じ水平荷重に対して発生する曲げモーメントのレベルは、動的な条件での結果が静的な条件での発生モーメントをやや上回っているが、ほぼ一致している。また、入力波の違いについて見ると、正弦波による発生モーメントと八戸波による発生モーメントでは、大きな違いは見られなかった。

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、この模型のケースでは静的・動的加振実験とも同レベルの水平荷重約1000 N（加速度レベルで約 3.2m/s^2 （320Gal））程度で脚の浮き上がりが生じている。動的な実験においては、脱輪したケースでも曲げモーメントの激しい変化は生じていない。概ね脱輪しない最大の水平荷重のケースのレベルにとどまっている。なお、陸側脚で脱輪したケースにおいて、静的・動的な実験で大きな差が出ているのは、静的載荷実験で脱輪したケースは脱輪している状態（脱輪後）での曲げモーメントの値で、動的加振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ためと

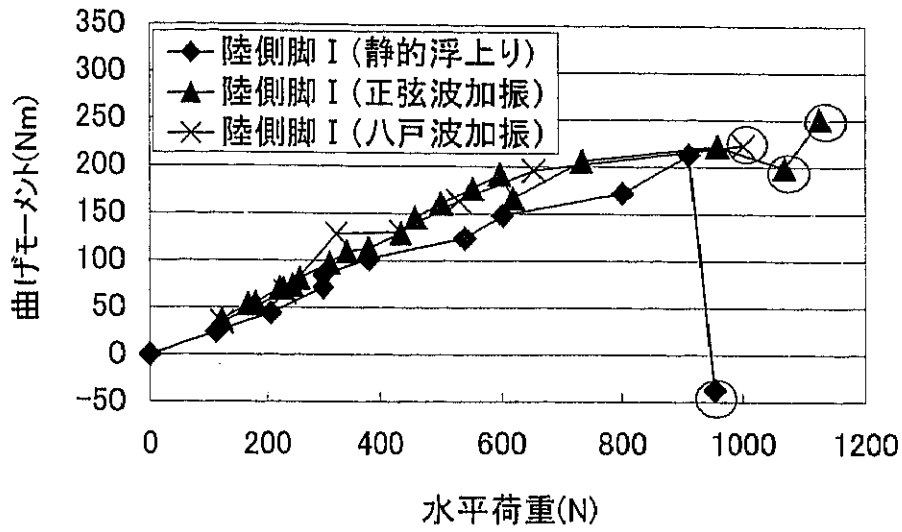


図-3. 2. 22 脚部材曲げモーメント(陸側脚 I)

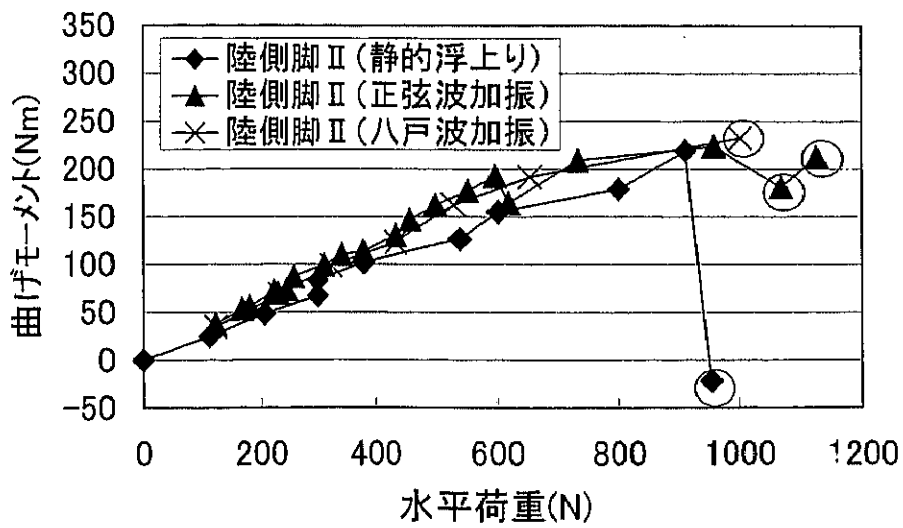


図-3. 2. 23 脚部材曲げモーメント(陸側脚 II)

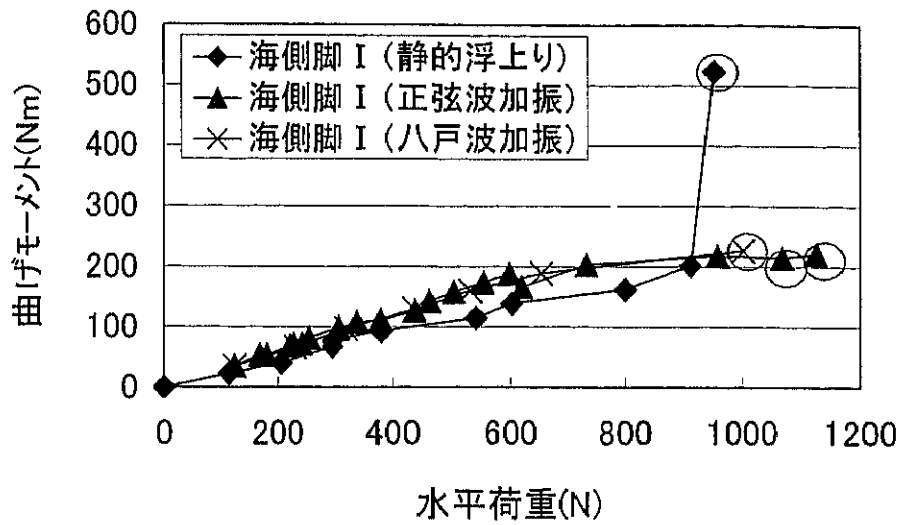


図-3. 2. 24 脚部材曲げモーメント(海側脚 I)

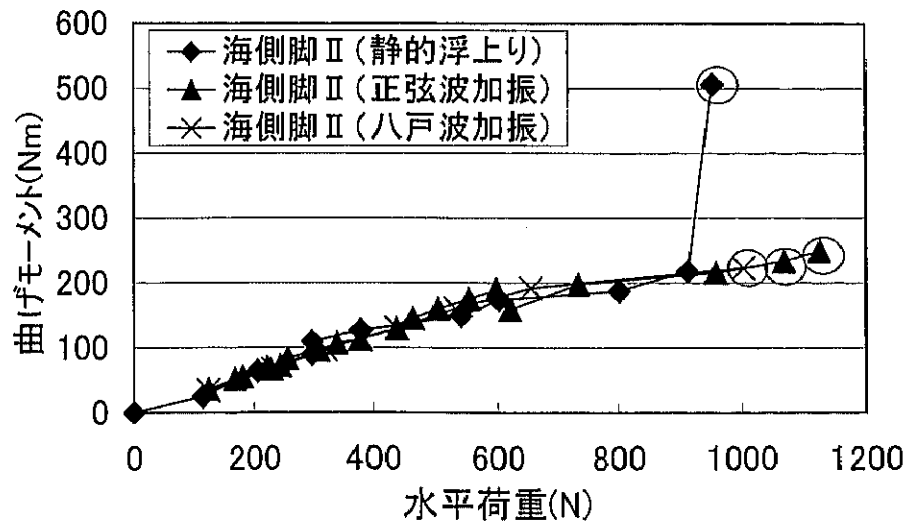


図-3. 2. 25 脚部材曲げモーメント(海側脚 II)

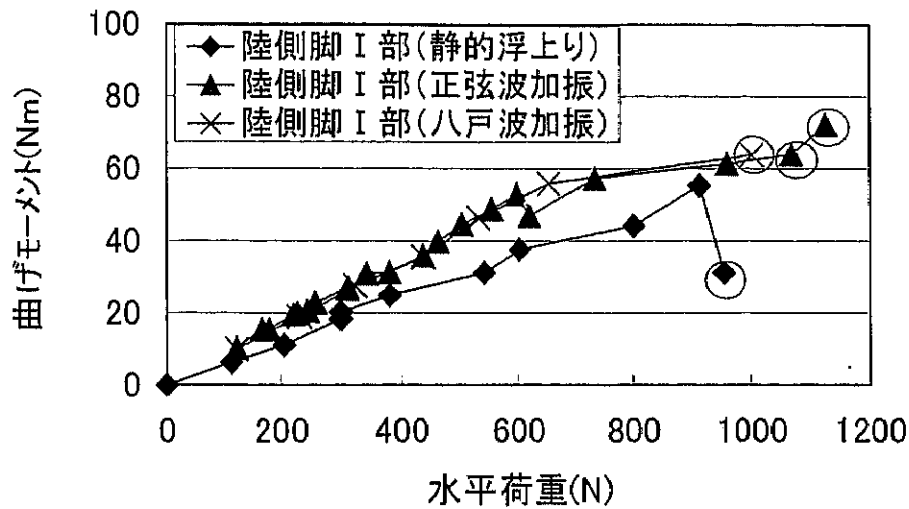


図-3. 2. 26 水平材曲げモーメント(陸側脚 I 接合部近傍)

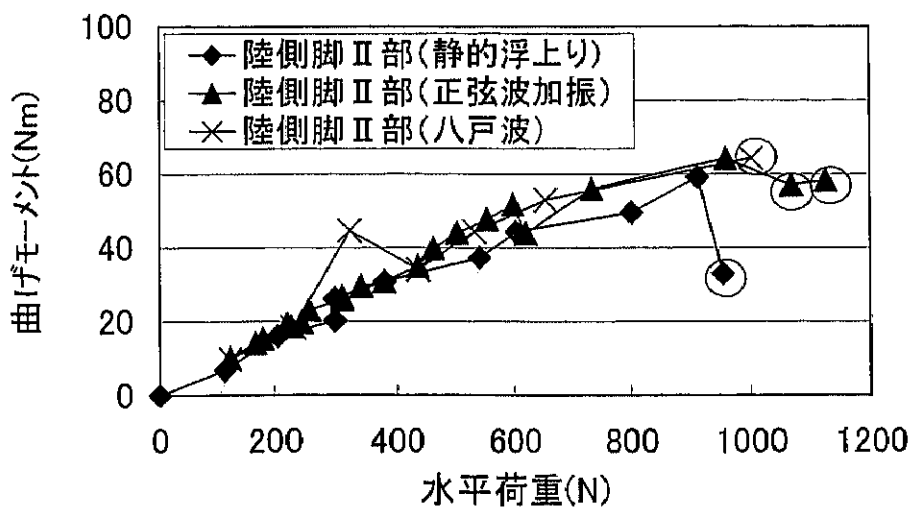


図-3. 2. 27 水平材曲げモーメント(陸側脚 II 接合部近傍)

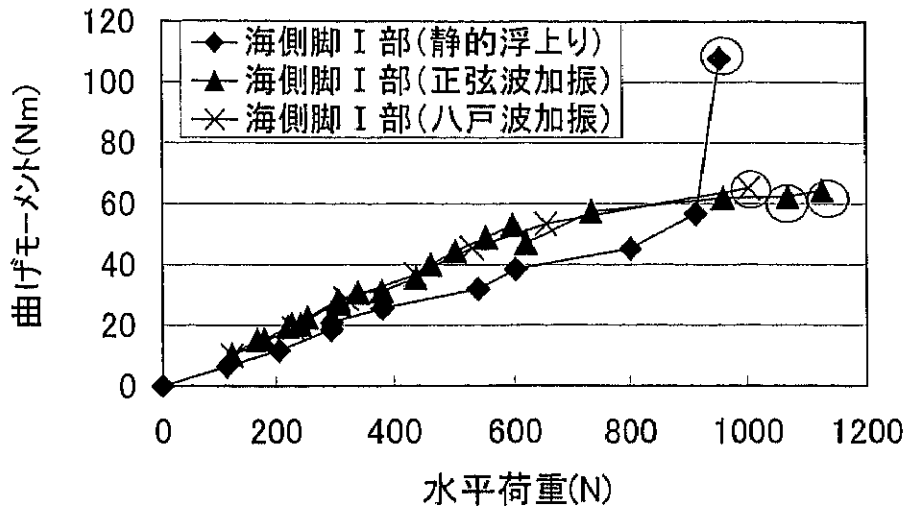


図-3. 2. 28 水平材曲げモーメント(海側脚 I 接合部近傍)

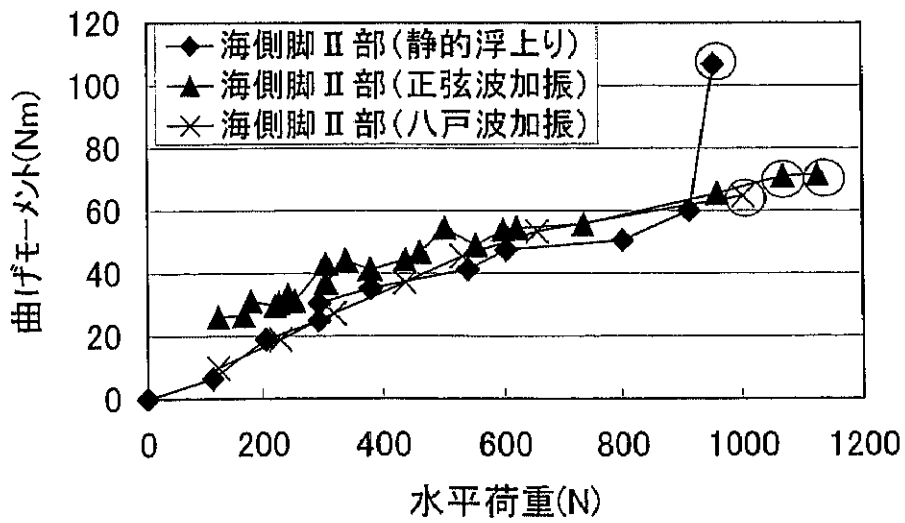


図-3. 2. 29 水平材曲げモーメント(海側脚 II 接合部近傍)

考えられる。

図-3. 2. 26～図-3. 2. 29には水平材に発生する曲げモーメントを示している。水平材についても、全体の傾向としては脚部材の曲げモーメントの結果と同様の結果が得られた。曲げモーメントは、同レベルの水平荷重に対して、脚に作用する曲げモーメントに比較して $1/3 \sim 1/4$ 程度の値となっている。

2-3-2 脚部材の軸力

正弦波加振及び八戸波により加振した結果を、図-3. 2. 30～図-3. 2. 33に示す。それぞれの図には比較のため、陸側からの浮き上がり実験の結果を合わせて表示してある。図中で○で囲まれた点は脱輪したケースを示している。

値に多少ばらつきがあるが、全てのケースにおいて水平荷重の増加にほぼ比例して軸力も増加している。陸側からの浮き上がり実験で脱輪を起こしたケースにおける海側脚Ⅰを除けば、動的加振実験での軸力が静的な浮き上がり実験での軸力よりも上回っている。また、水平荷重が増えるにつれ、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と考えられる。また、八戸波の加振実験の結果中、脱輪後の海側脚のⅠ脚とⅡ脚の値が大きく異なるが、これは、脱輪時の衝撃で模型の脚部に捻れが発生したのではないかと考えられる。

以上の静的な実験と動的な実験との比較より、脚の浮き上がり前までの脚部材の曲げモーメント及び軸力の発生については、おおむね同様の傾向を示していることから、静的な検討により脱輪までの地震時のクレーンの挙動を推定することが可能であると考えられる。

2-3-3 応答加速度

正弦波及び八戸波を入力した場合のクレーン模型の応答加速度の時刻歴を図-3. 2. 34～図-3. 2. 37に示す。それぞれに入力地震動の波形を合わせて表示

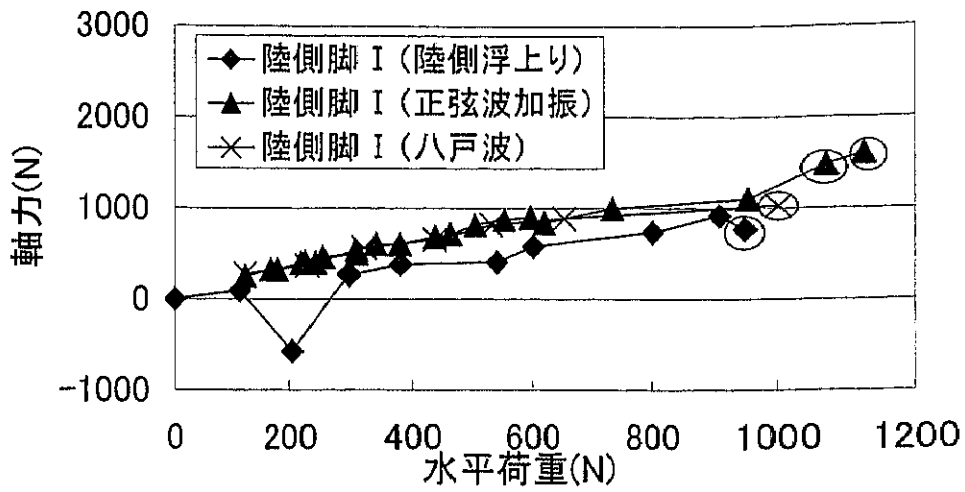


図-3. 2. 30 脚部材軸力(陸側脚 I)

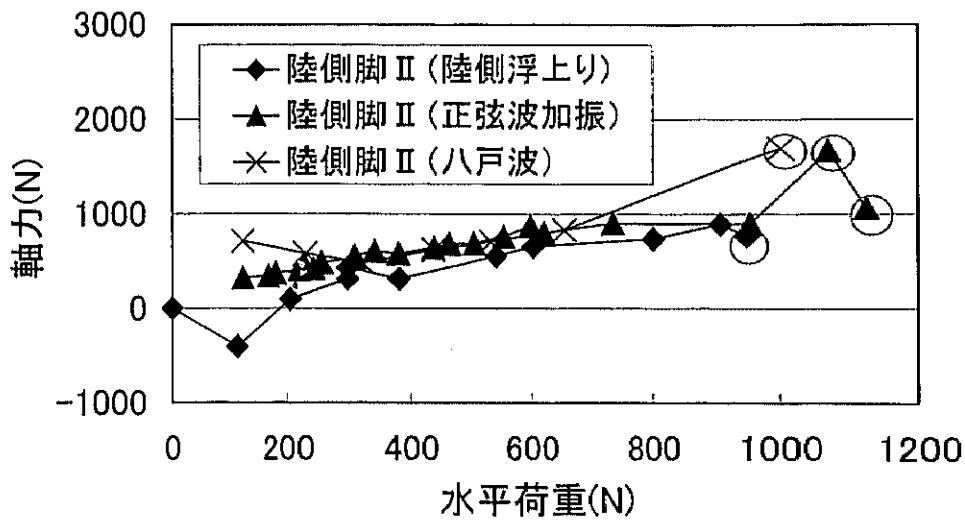


図-3. 2. 31 脚部材軸力(陸側脚 II)

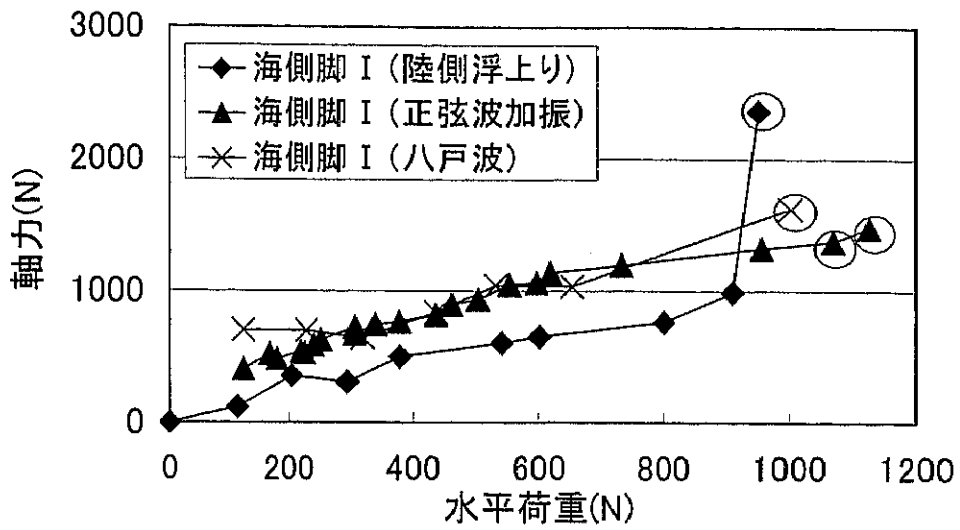


図-3. 2. 32 脚部材軸力(海側脚 I)

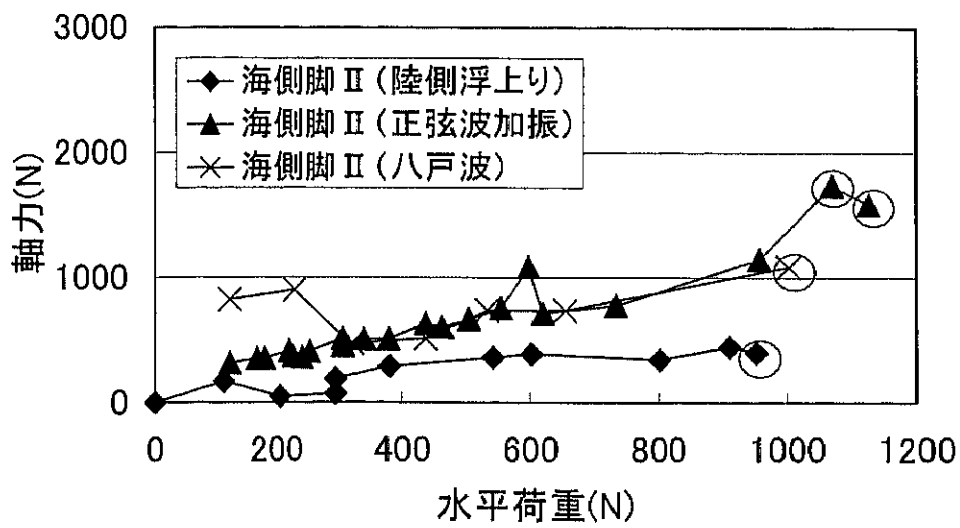


図-3. 2. 33 脚部材軸力(海側脚 II)

してある。図-3. 2. 34は、正弦波（最大加速度 20 Gal、周波数 2.25 Hz）による結果、図-3. 2. 35は八戸波、図-3. 2. 36は八戸波の最大加速度を2倍した波（八戸2倍波）を入力した場合、図-3. 2. 37は八戸波の最大加速度を3.5倍した波（八戸3.5倍波）を入力した場合の応答加速度を示している。表示した加速度は、模型の重心に近いブーム上の加速度計の値である。今回の研究では前述のようにこの加速度計の値を、クレーン重心の加速度と見なしている。

図-3. 2. 34には正弦波入力時の入力波と応答加速度を示している。正弦波の入力後、クレーンは2次のモードの固有周期（2.19 Hz）で振動している。これはクレーンが全体として横行方向（岸壁法線直角方向）に振動するモードである。応答加速度の振幅は時間の経過に伴って次第に大きくなり、5秒程度経過した時点で瞬時的に大きな応答値を記録した後、高周波の激しい振動が起こっている。このケース（最大加速度 20 Gal、周波数 2.25 Hz）では、実験中に脚の浮き上がりが発生しており、この時点で4脚のうちのいずれかの脚が浮き上がったものと考えられる。また、浮き上がり直後以外は極端に大きな加速度は発生していない。

図-3. 2. 35に八戸波に対する応答加速度を示しているが、実験結果は比較的低周波の主たる波に、高周波成分が加わった波形を表している。比較的低周波の成分は、正弦波の結果と同様にクレーンの固有モードのうちの刺激係数の最も大きい2次モードによる波形と考えられる。高周波成分は、それ以外の比較的高次のモードによるもの等と考えられる。図-3. 2. 36は、入力最大加速度を約2倍とした場合の応答加速度を示している。応答加速度は1倍波と同様な傾向を示しているが、応答の最大値が大きくなっている。図-3. 2. 37は、入力最大加速度が3.5倍であり、経過時間6秒前後までは、図-3. 2. 35及び図-3. 2. 36と同様の傾向を示しているが、その後は高周波の激しい振動が発生している。このケースも正弦波の結果と同様に、実験中に脚の浮き上がりが起こっており、その影響によるものと考えられる。

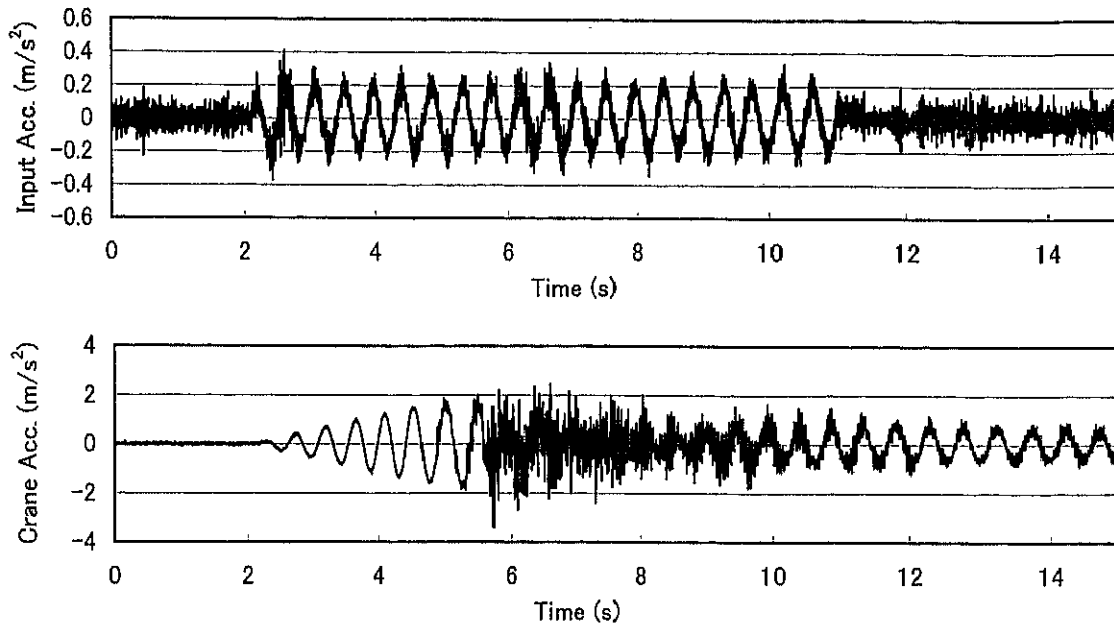


图-3. 2. 34 应答加速度(正弦波)

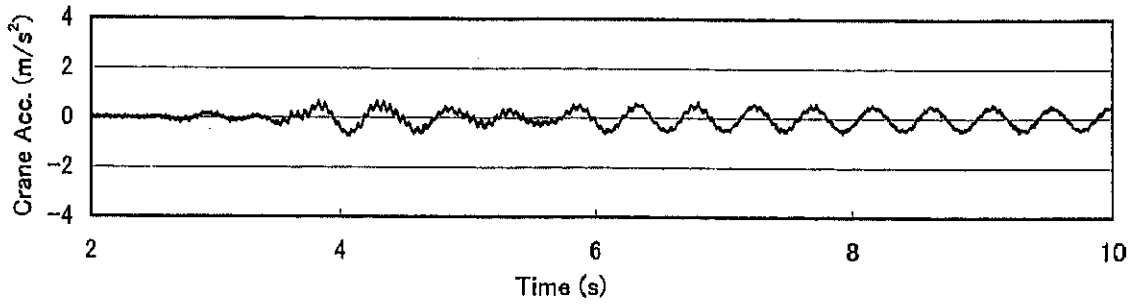
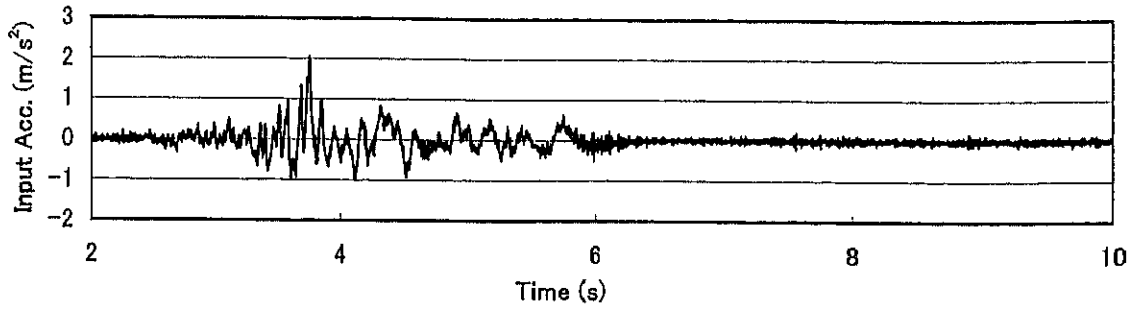


图-3. 2. 35 応答加速度(八戸波)

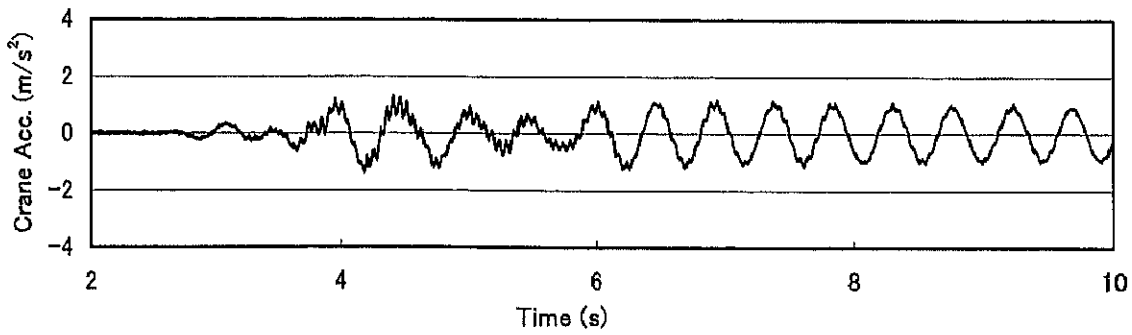


图-3. 2. 36 応答加速度(八戸2倍波)

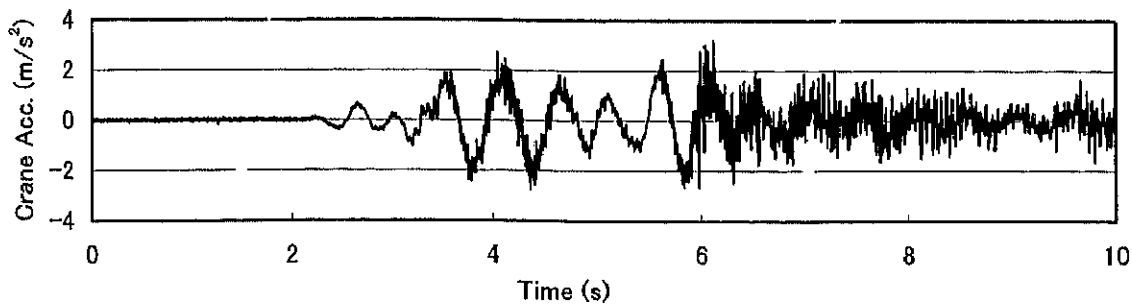


图-3. 2. 37 応答加速度(八戸3. 5倍波)

2-3-4 地震波による比較

前項までは、入力地震動として設計実務上最も一般的である八戸波及び正弦波を対象としてきたが、港湾構造物の耐震設計で比較的多く用いられる大船渡波及びポートアイランド波（P I 波）入力時のコンテナクレーンの挙動について、比較検討する。

(1) 曲げモーメント及び軸力の比較

図-3. 2. 38にはこれまで提示してきた八戸波の実験結果の各脚の曲げモーメントの値を示す。図-3. 2. 39には大船渡波による結果を、図-3. 2. 40にはP I 波による結果を、図-3. 2. 41には各地震波の結果をまとめて全て表示してある。

これらの結果を見ると、地震波によらず、各脚とも水平荷重の増加に比例して曲げモーメントが増加し、同じ水平荷重にはほぼ同一のレベルの曲げモーメントが発生している。また、脱輪する水平荷重のレベルも八戸波（1003 N ; 3.17 m/s²）とP I 波（968 N ; 3.06 m/s²）ではほぼ同一である。

但し、大船渡波については、そのレベルを越える水平荷重（1066 N ; 3.37 m/s²）が作用しても脱輪せず、異なった挙動を示している。

図-3. 2. 42～図-3. 2. 45には同様に水平部材の曲げモーメントを示している。水平部材の曲げモーメントも、脚部材の曲げモーメントと同様の傾向を示している。

図-3. 2. 46～図3. 2. 49には同様に脚部材の軸力を示している。脚部材の軸力も曲げモーメントとほぼ同様の傾向を示している。

(2) 応答加速度

大船渡波及びP I 波を入力地震動とした場合の応答加速度を図-3. 2. 50～図-3. 2. 55に示す。図-3. 2. 50は、大船渡波による応答加速度の時刻歴を、

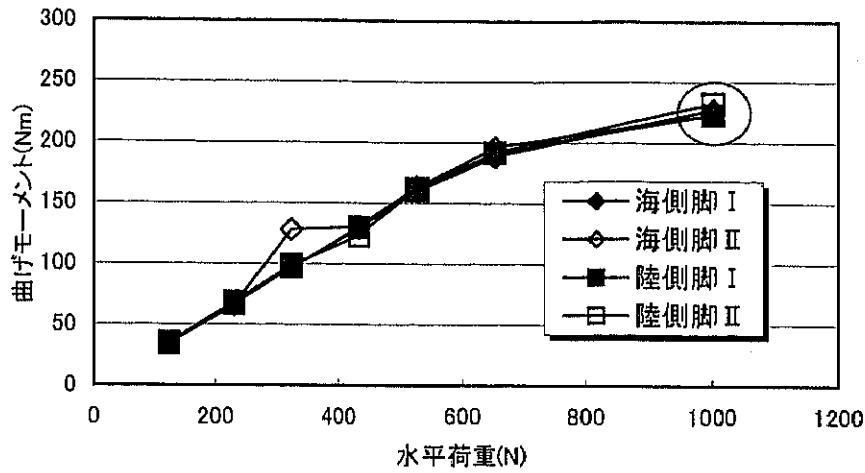


図-3. 2. 38 脚部曲げモーメント(八戸波)

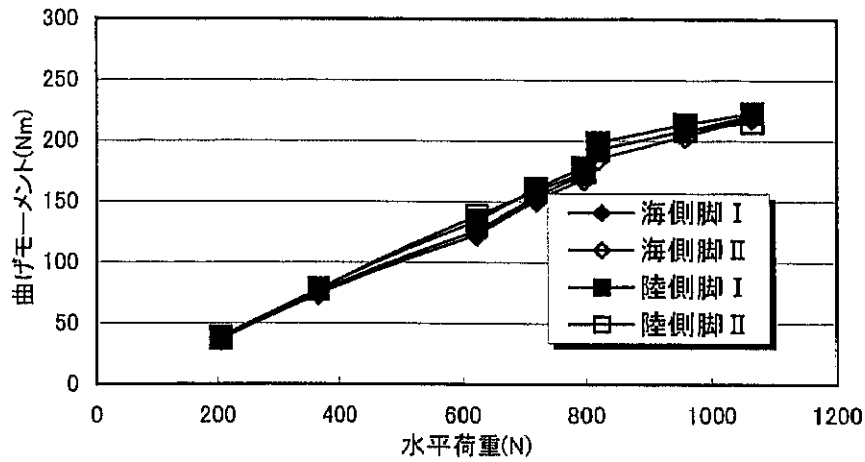


図-3. 2. 39 脚部曲げモーメント(大船渡波)

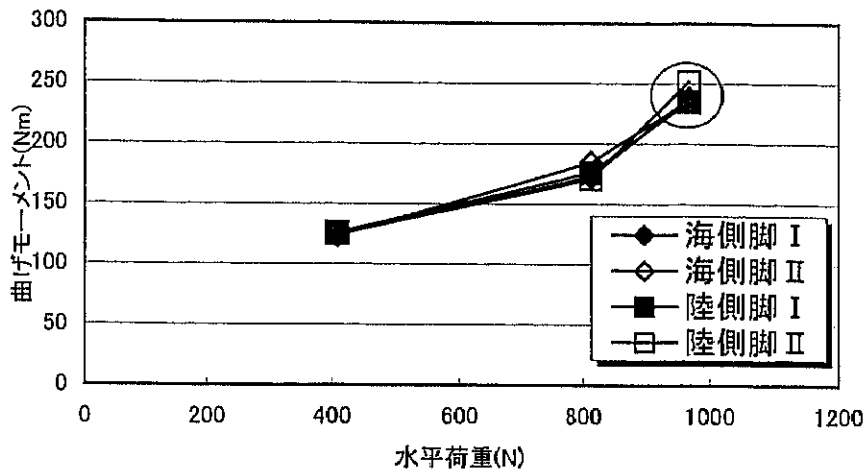


図-3. 2. 40 脚部曲げモーメント(PI波)

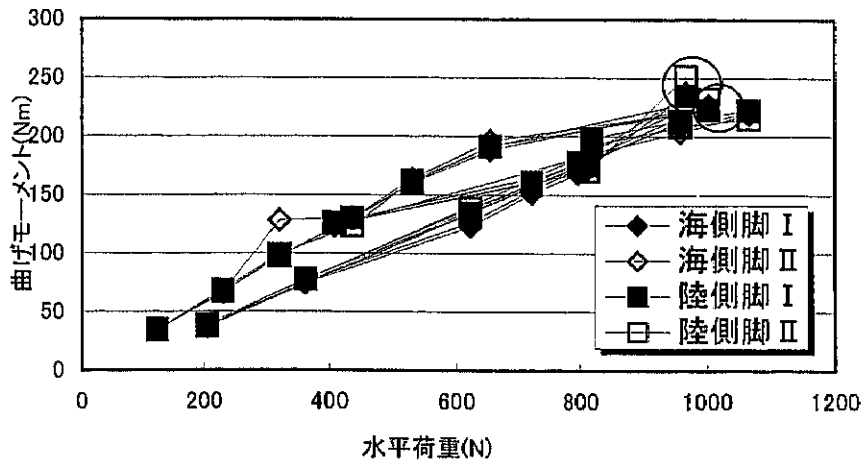


図-3. 2. 41 脚部曲げモーメント(各波)

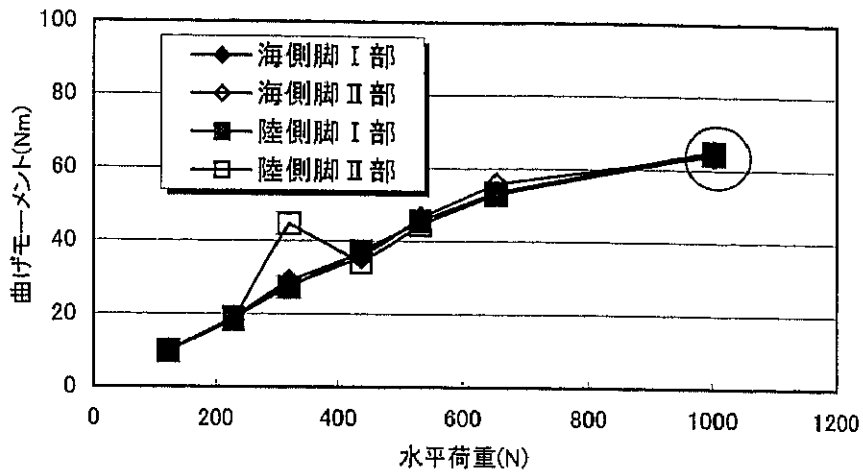


図-3. 2. 42 水平材曲げモーメント(八戸波)

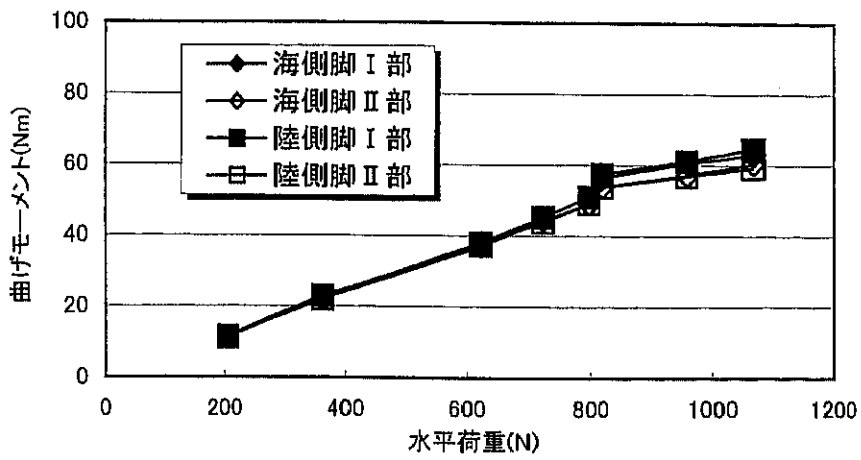


図-3. 2. 43 水平材曲げモーメント(大船渡波)

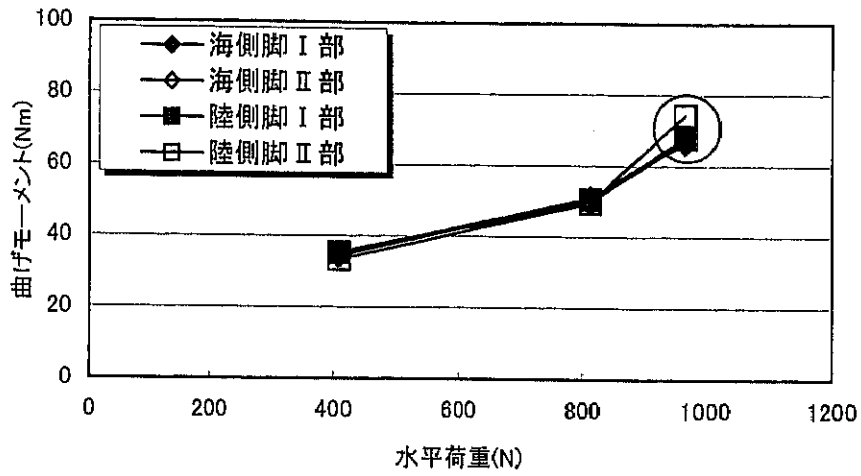


図-3. 2. 44 水平材曲げモーメント(PI波)

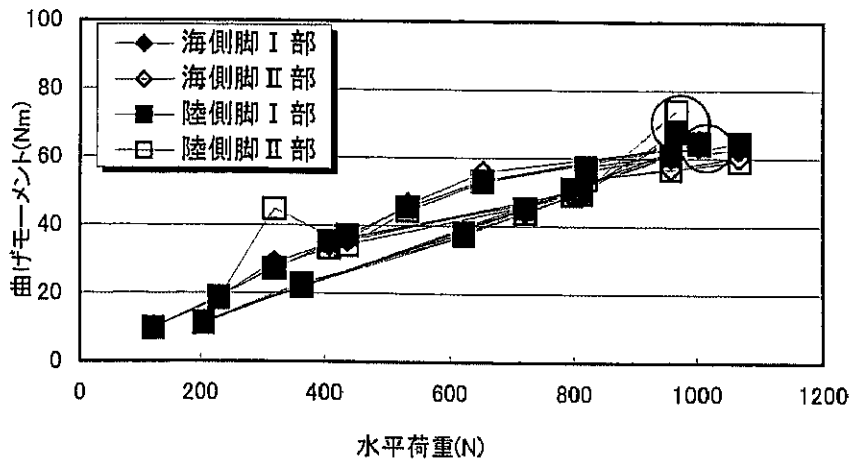
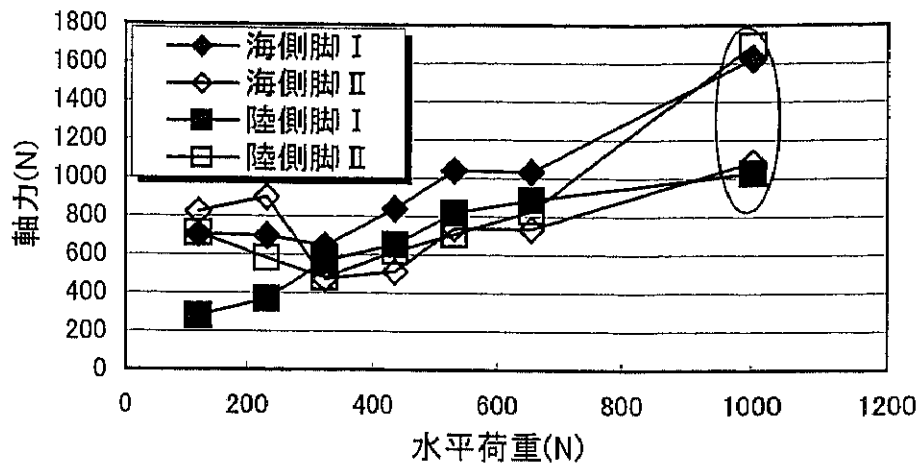
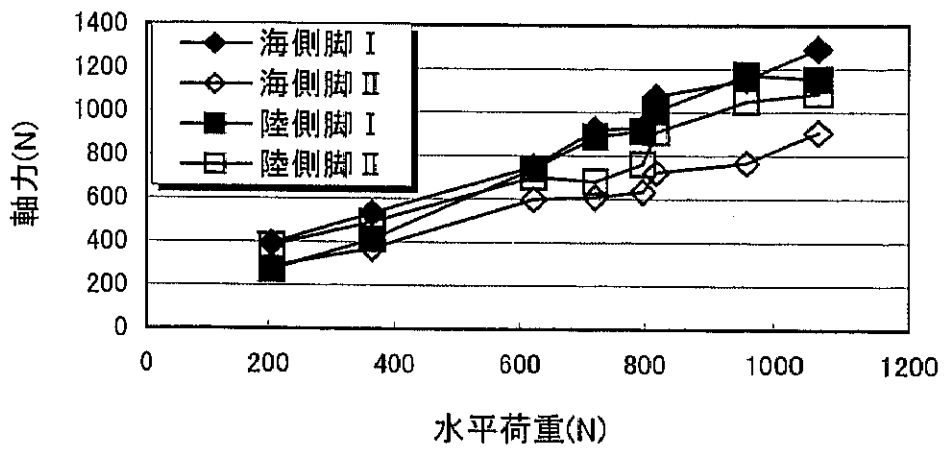


図-3. 2. 45 水平材曲げモーメント(各波)



図一3. 2. 46 脚部軸力(八戸波)



図一3. 2. 47 脚部軸力(大船渡波)

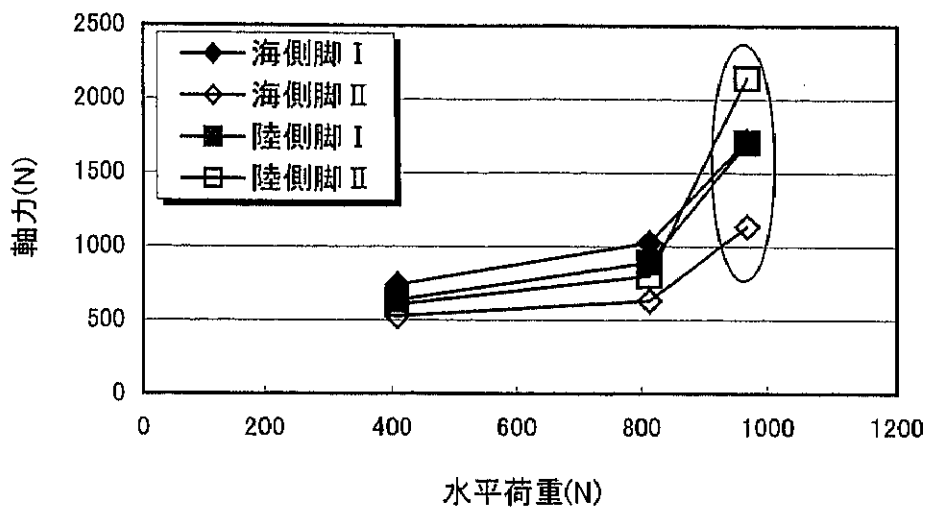


図-3. 2. 48 脚部軸力(PI波)

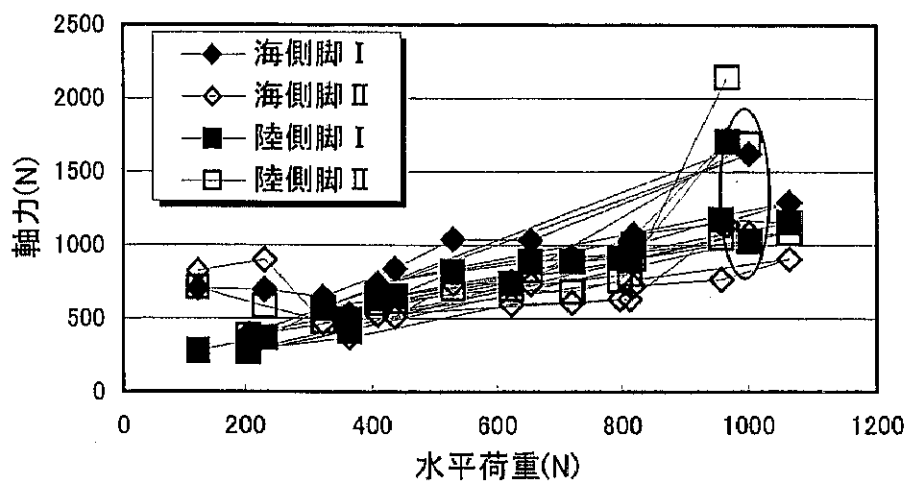


図-3. 2. 49 脚部軸力(各波)

図-3. 2. 51は大船渡波の最大加速度を2. 0倍した地震動（大船渡2倍波）を、図-3. 2. 52は同じく4. 0倍した地震動（大船渡波4倍波）、図-3. 2. 53は同様にP I 0. 2倍波、図-3. 2. 54はP I 0. 3倍波、図-3. 2. 55はP I 0. 4倍波による応答加速度の時刻歴を示す。

大船渡波の場合、図-3. 2. 50では比較的low周波（2 Hz程度）の主要な振動成分にやや高周波の振動成分が重畳している。主な振動成分の周期は概ねクレーンの固有周期（2.19 Hz）と一致する。図-3. 2. 51及び図-3. 2. 52もほぼ同様の傾向を示している。ここまでのケースでは脚の浮き上がりは発生していなかった。また、八戸波の結果と比較すると高周波成分の振動の影響が強く出ていることが特徴と言える。

P I波の結果を見ると、図-3. 2. 53ではクレーンの2次モードに対応すると思われる振動が卓越しており、比較的高周波成分の影響はあまり見られない。図-3. 2. 54では5秒前後経過した頃から高周波成分の振動が現れるが、八戸波で脚が浮き上がったケースのような不規則な波形とはなっていない。このケースでは実験中に脚の浮き上がりは発生しておらず、この高周波成分は脚の浮き上がりによるものとは別のものである。図-3. 2. 55では、実験中に脚の浮き上がりが発生しており、5秒前後から次第に高周波の不規則な波形が見られている。

また、脚の浮き上がり前後の応答加速度の変化を比較するため、脚が浮き上がったケースについて、陸側脚の鉛直変位を併せて示す。鉛直変位は陸側脚に取り付けたレーザー変位計の値である。また図中のLD 1～LD 4は、それぞれクレーンの4本の脚の変位を示している（図-3. 2. 56参照）。図-3. 2. 57は正弦波のケースを、図-3. 2. 58は八戸3. 5倍波、図-3. 2. 59はP I 0. 4倍波の計測結果を示す。今回の実験中、大船渡波では脚の浮き上がりは観測されなかったため、大船渡波の結果は記載していない。

図-3. 2. 58の八戸3. 5倍波の結果を見ると、時間経過が6秒後前後の重心の加速度が不規則な波形になった時点から、各脚の変位も大きく変動しており、

特にLD 2及びLD 3の脚を見ると、脱輪していることがわかる。これは図-3.

2. 57及び図-3. 2. 59でもほぼ同様のことが言える。

2-3-5 脱輪プロセス

今回の動的加振実験において観察された地震時のクレーン脱輪プロセスは、図-3. 2. 60に示すとおりである。まず、レールによる陸側脚の横行方向の拘束が浮き上がりによって失われる((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それまでよりも大きく曲げ変形が生じる((c))。浮き上がった陸側脚はレールから離れた位置(レールスパン内側)に着地し、脱輪することになる((d))。この脱輪プロセスについては、いくつかの例外は見られたものの、同一条件での複数の実験ケースにおいて、ほぼ同様の結果となることを確認している。また、入力波の種類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、動的加振実験の結果については、陸側からの静的載荷実験の結果と比較検討することとした。

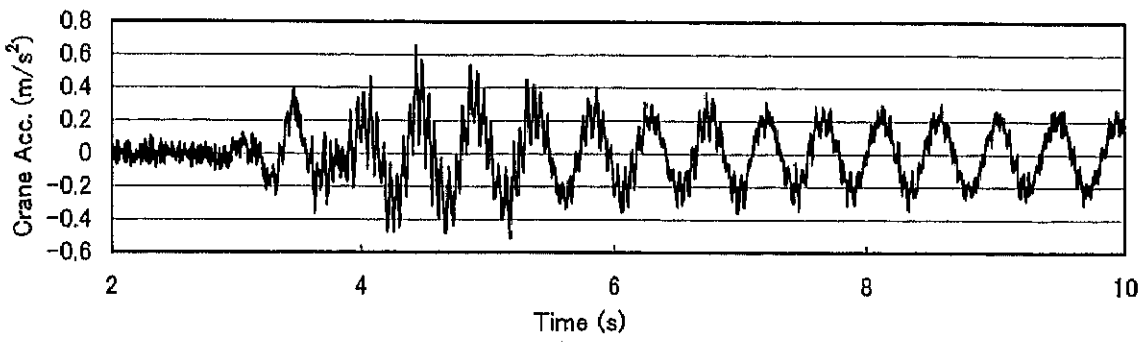
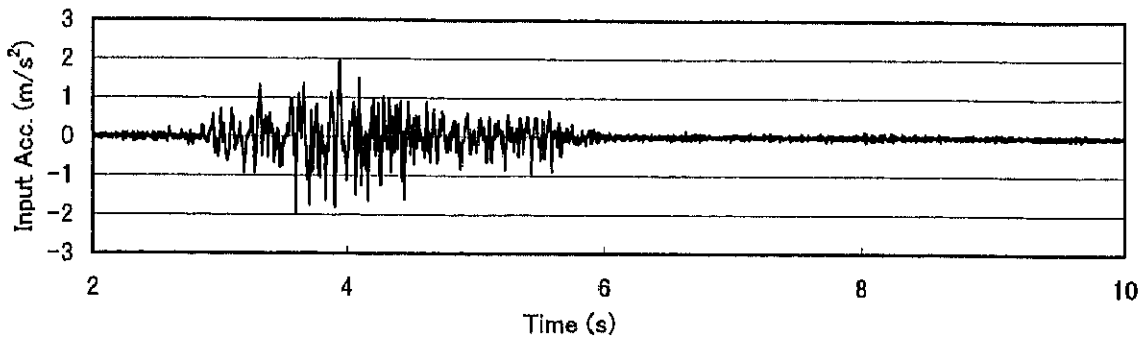


图-3. 2. 50 应答加速度(大船渡波)

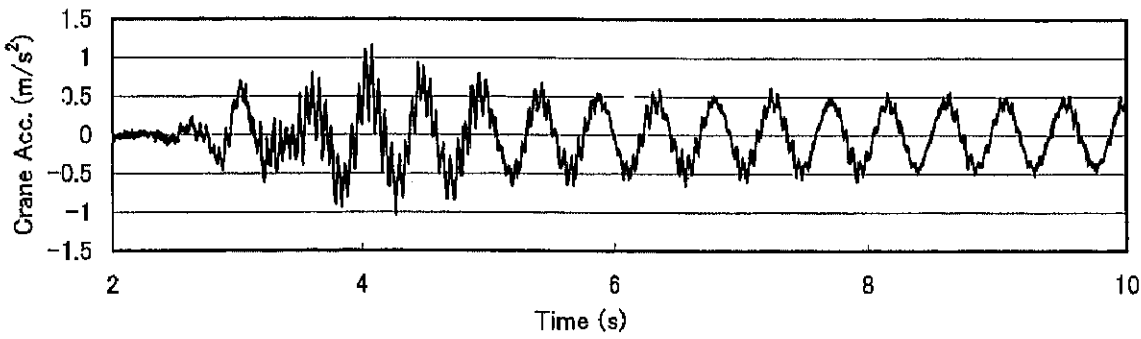


图-3. 2. 51 应答加速度(大船渡2倍波)

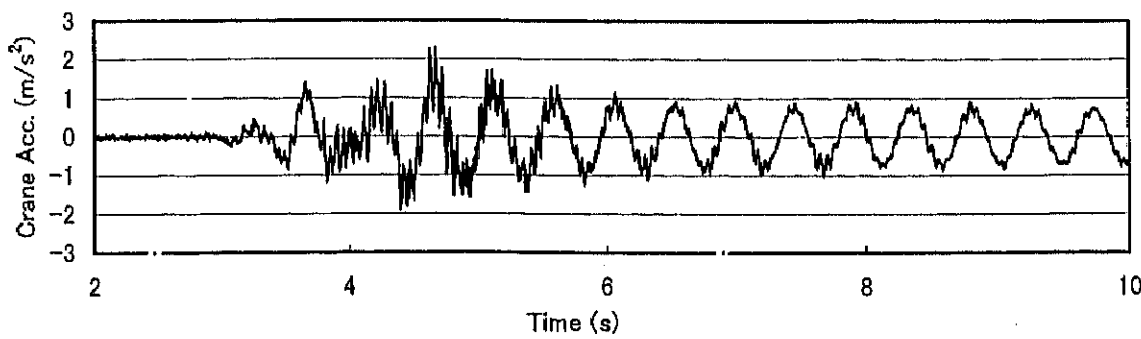


图-3. 2. 52 应答加速度(大船渡4倍波)

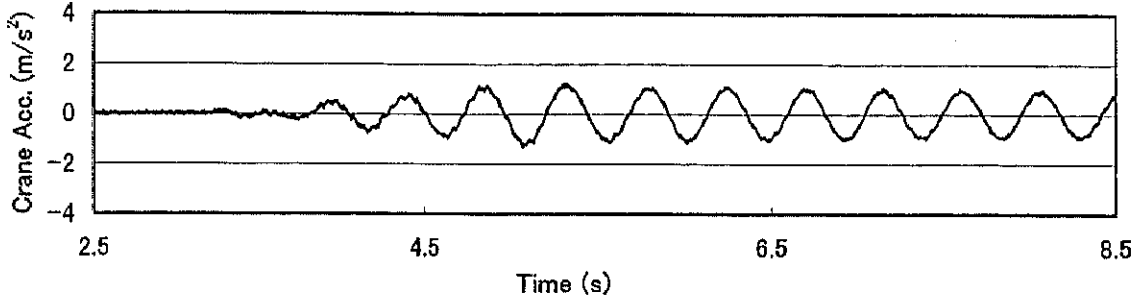
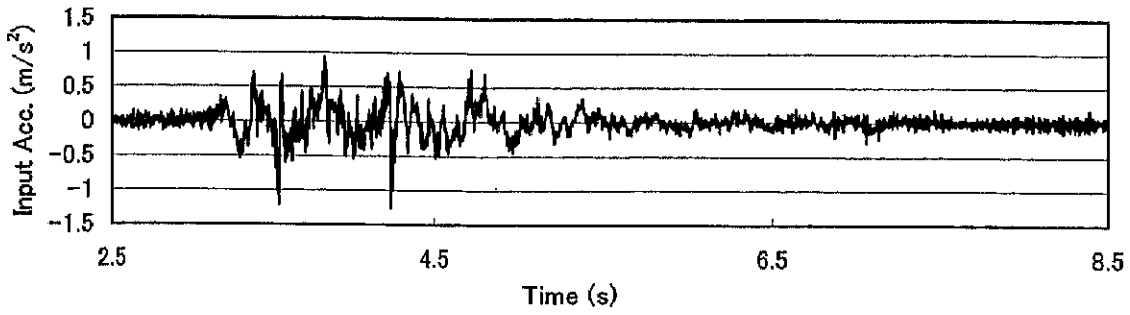


图-3. 2. 53 应答加速度(P10. 2倍波)

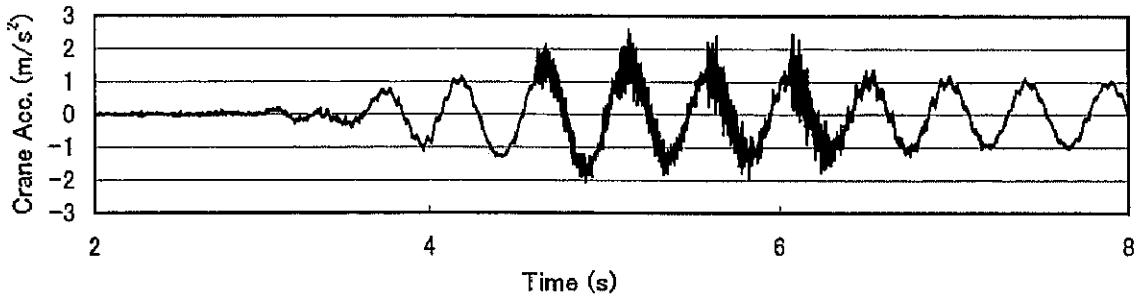


图-3. 2. 54 应答加速度(P10. 3倍波)

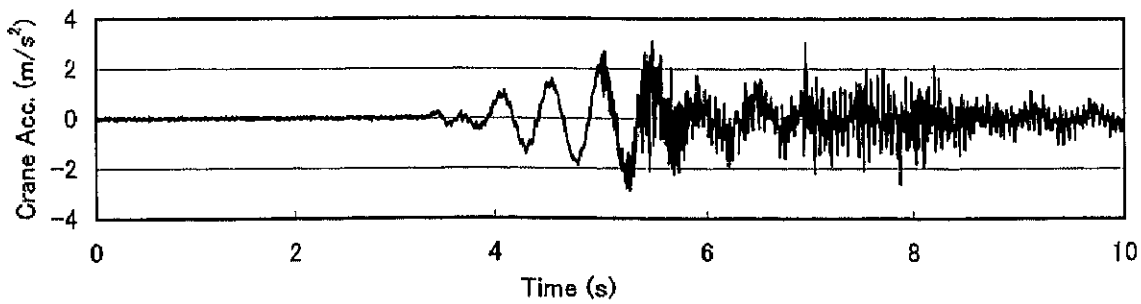


图-3. 2. 55 应答加速度(P10. 4倍波)

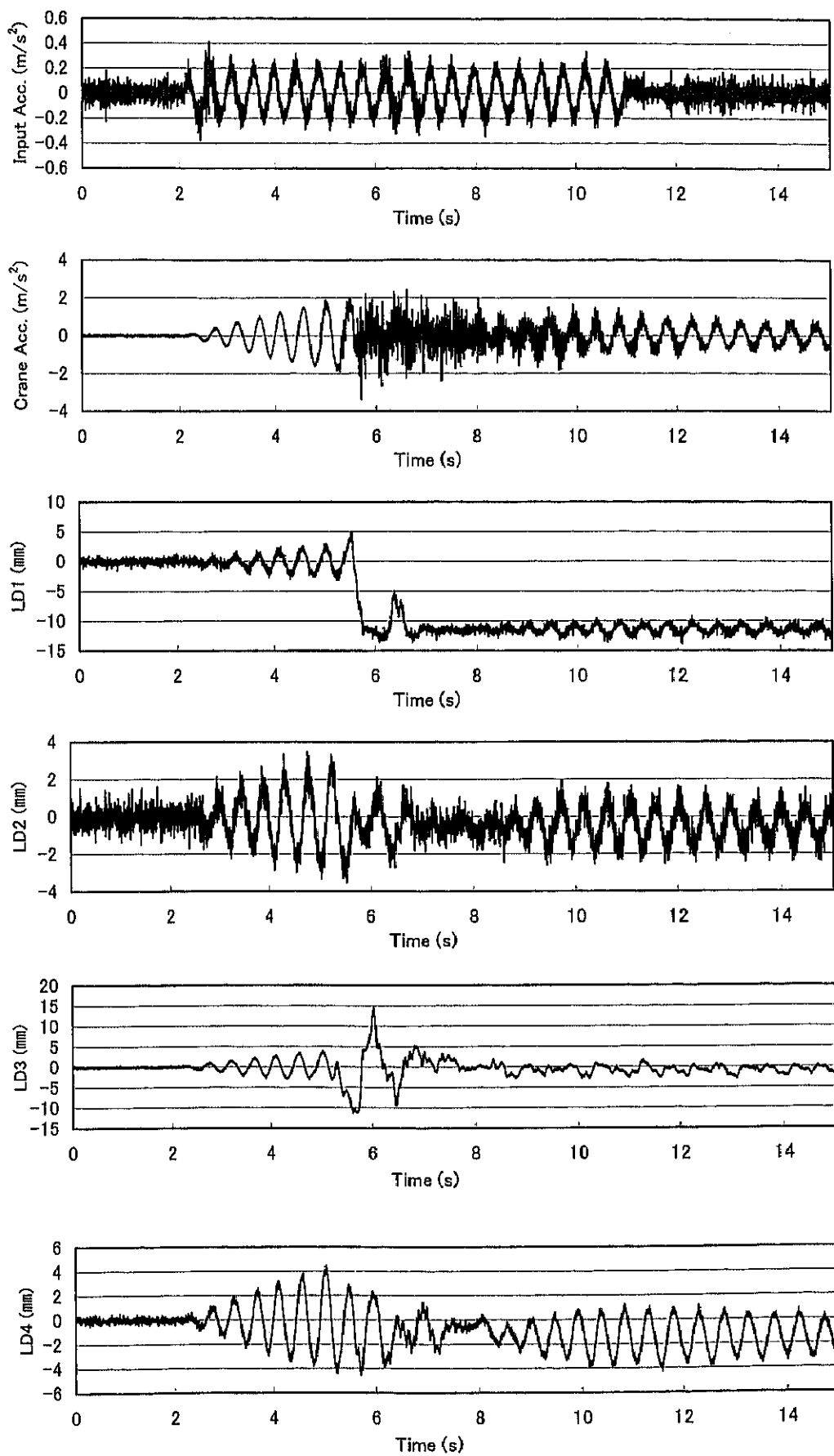


図-3. 2. 57 応答加速度及び脚の鉛直変位(正弦波)

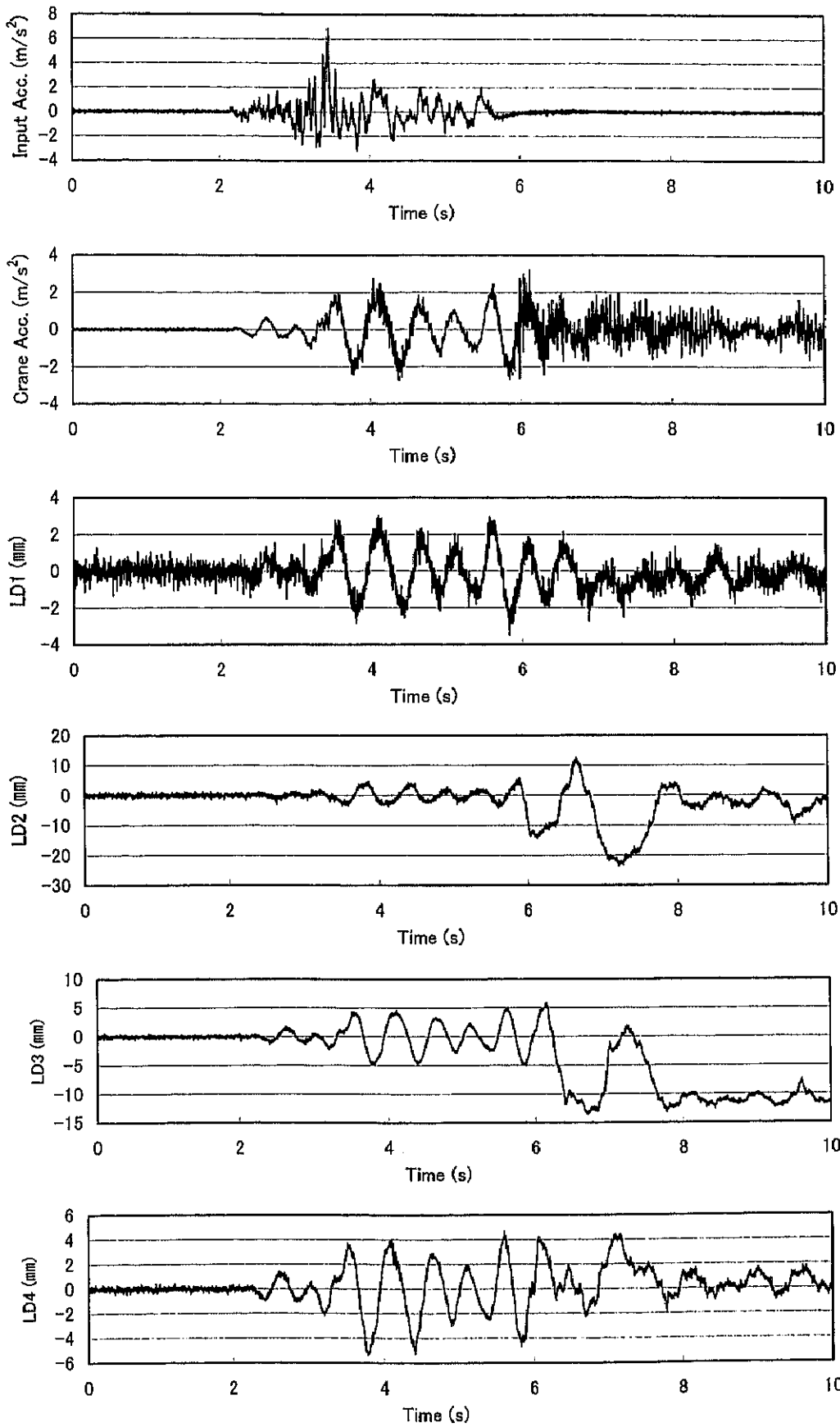


図-3. 2. 58 応答加速度及び脚の鉛直変位(八戸3, 5倍波)

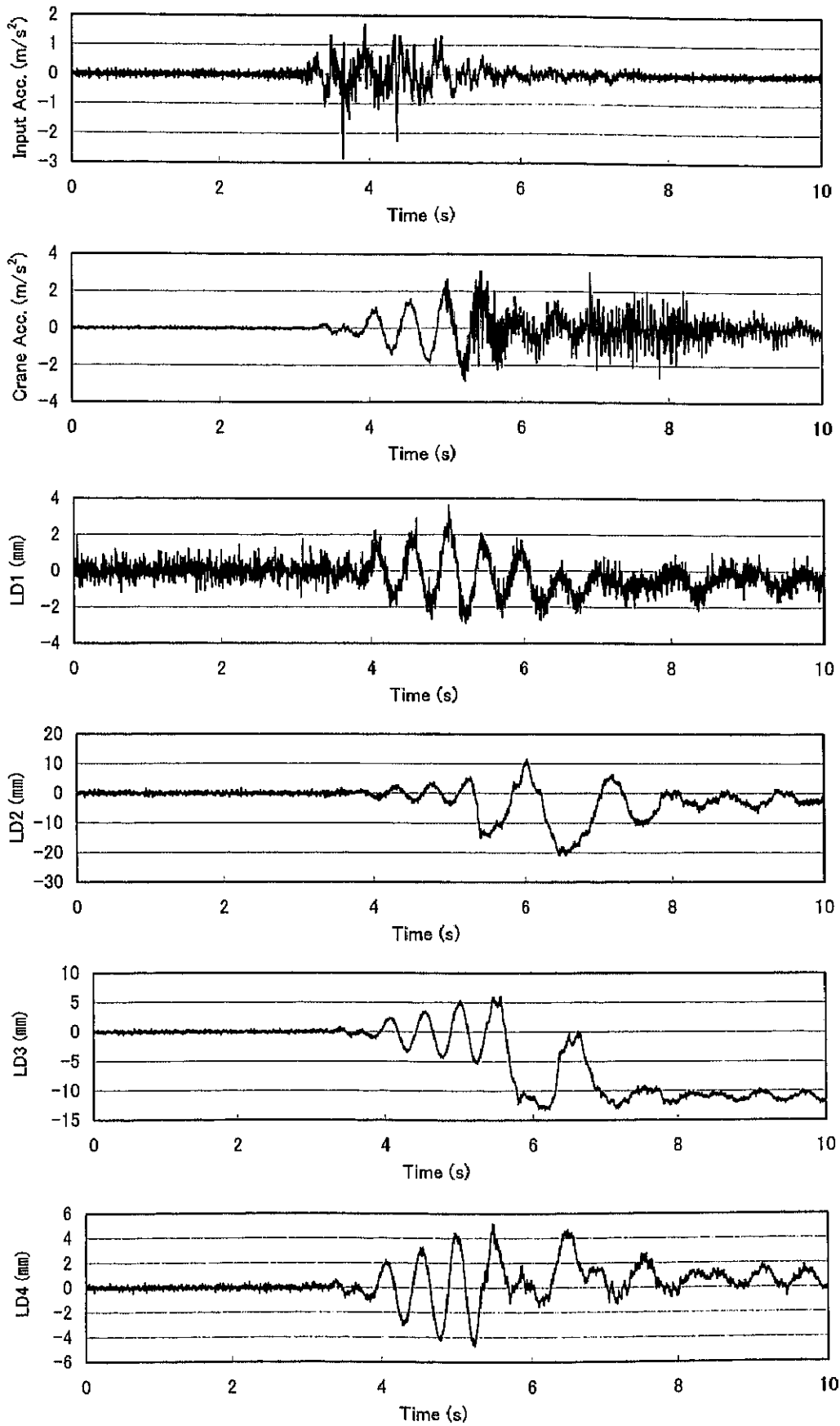


図-3. 2. 59 応答加速度及び脚の鉛直変位(PI 0.4倍波)

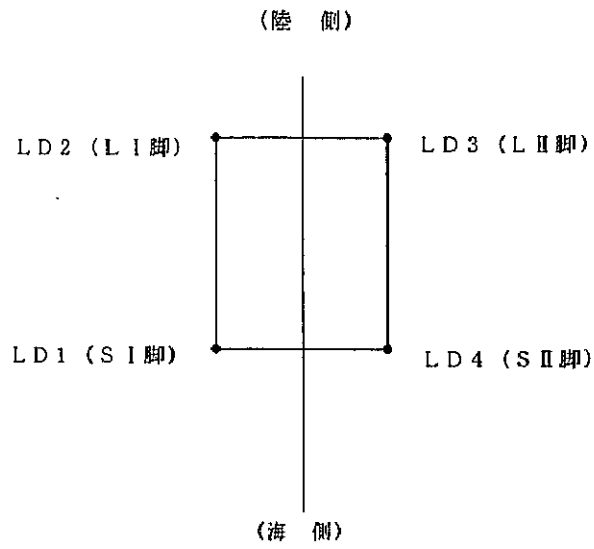


図-3. 2. 56 変位計位置図

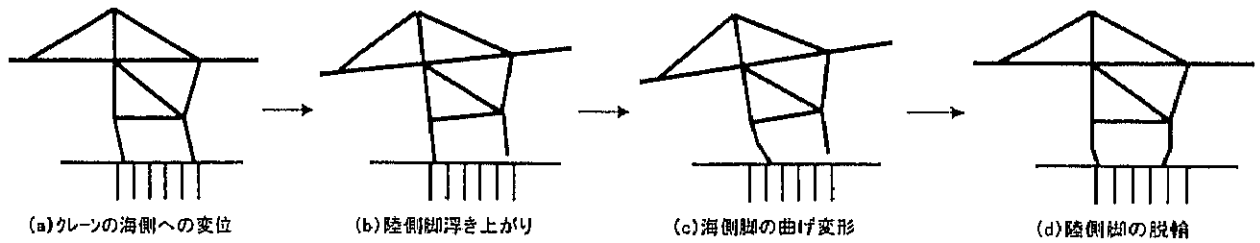


図-3. 2. 60 コンテナクレーンの脱輪までのプロセス

【第3章：参考文献】

- 1) 江頭隆喜他：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、港湾技術研究所報告 Vol.38 No.2、1999.6
- 2) 江守一郎：模型実験の理論と応用、技報堂出版、1994年6月
- 3) 安田仁彦：モード解析と動的設計、コロナ社、1993年11月
- 4) 風間基樹：土圧を受ける重力式港湾構造物の地震時安定性に関する研究、港湾技研資料 No.752、June 1993
- 5) 参考文献1)
- 6) Shunsuke YAMAMOTO 他：A Study of the Interaction between the Pier Type Wharf and Container Crane during Earthquakes ,Proceedings of the 12 th World Conference on Earthquake Engineering,2000.1
- 7) (社) 港湾荷役機械化協会：コンテナクレーン耐震設計のための手引き、平成10年2月
- 8) 上部達生：海底の地震動を再現する三次元水中振動台、土木学会誌 Vol.83 June 1998
- 9) (社) 港湾荷役機械化協会：港湾用クレーン耐震設計指針（案）、昭和53年3月
- 10) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、平成11年4月
- 11) 参考文献10)