

棧橋式岸壁と荷役機械の地震時挙動に関する模型振動実験

The Shaking Table Test of Dynamic Interaction Between Pier Type Wharf and Cargo Handling Equipment

山本俊介*, 江頭隆喜**, 菅野高弘***, 田邊俊郎****

Shunsuke YAMAMOTO, Takaki ETOH, Takahiro SUGANO and Toshiro TANABE

* (株)日本港湾コンサルタント, 技術開発部 (〒150-0022 東京都渋谷区恵比寿南 1 丁目 15 番 1 号)

** 運輸省港湾技術研究所, 機械技術部 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3 丁目 1 番 1 号)

*** 工博 運輸省港湾技術研究所, 構造部 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3 丁目 1 番 1 号)

**** 工修 運輸省港湾技術研究所, 設計基準部 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3 丁目 1 番 1 号)

The design of the container crane and the wharf do not take place at the same time. However, in design, it is necessary to consider the effect of dynamic interaction between them during large earthquake. The natural period ratio between a pier type wharf and a crane is rather close to 1.0. Also the weight ratio between a pier type wharf and a crane is around 0.5 or higher. The behavior of container crane and pier type wharf during earthquake is affected by the interaction each other. Therefore, we carried out an excitation test on a 1/15 reduced scale test model of a container crane and a pier type wharf.

Key Words: Pier type wharf, Container crane, Dynamic interaction effect, Shaking table test

キーワード: 棧橋式岸壁、コンテナクレーン、動的相互作用、振動実験

1. はじめに

コンテナ専用埠頭岸壁の構造形式として、重力式、矢板式、棧橋式などがあるが、その中でも大規模地震時に於いて、コンテナ専用埠頭棧橋は上載するコンテナクレーン等の港湾荷役機械と、固有周期や 1 ブロック当たりの上部工重量が同程度であるために互いに影響し合うものと考えられる。港湾施設の設計基準においても改訂後には、「直杭式棧橋の場合、コンテナクレーン等の荷役機械を設置する場合には、荷役機械と棧橋の質量比及び固有周期比により、棧橋の地震時応答特性が大きく変化することがあるので、荷役機械と棧橋の連成振動を考慮することが望ましい。」とされている¹⁾。また、コンテナクレーンについては、一律に重量の 20% について強度評価するのが一般的であったが、改訂後の港湾基準において、「クレーン等荷役機械の地震時の挙動は、それが設置されている地盤等の影響を受ける場合がある。通常、コンテナクレーン等はクレーン構造規格等に基づいて設計され、設置される構造物等との動的相互作用は考慮されていない。しかし、耐震強化岸壁のように設計対象として従来想定していなかった大規模な地震を想定する場合には、岸壁と岸壁上に設置されたクレーンとの地震時における動的相互作用の影響について、十分検討を行う必要がある。特に、棧橋式の場合には、条件によってはクレーンと棧橋の動的相互作用を受けるおそれがある。コンテナクレーンと棧橋の動的相互作用の影響は、コンテナ

クレーンと棧橋の質量比、コンテナクレーンの固有周期、棧橋の固有周期及び入力地震波により異なるため、コンテナクレーンの設計に当たっては、コンテナクレーンが載った状態での棧橋・コンテナクレーンの地震時応答解析又はコンテナクレーンと棧橋の動的相互作用を十分考慮できる適切な方法を用いてその影響を検討する必要がある。」²⁾とされ、動的相互作用を考慮しなければならないようになった。また、兵庫県南部地震の被害の中には、クレーン脚の浮き上がり及び脱輪に起因される被害が見られたため³⁾、動的設計と共に脚の浮き上がりを考慮するべきであると考えられる。このような背景のもとに、本研究では、1/15 縮小模型を製作し、振動台を用いて加振実験を行った。さらに、設計に対する検討方法として、棧橋上部工とクレーンを 2 質点系で表現した簡易計算を提案し、実験結果と比較・検討を行った。

2. 実験概要

2.1 モデル概要

(1) 直杭式棧橋

検討の対象となる直杭式棧橋は、岸壁法線方向に 5 列、直角方向に 6 列の鋼管杭により上部工が支持されている。上部工は、コンクリート製で鋼管杭と剛結されており、1 ブロック当たりの重量は約 1,750tf である。一般的に棧橋上部工の曲げ剛性は、鋼管杭に比べて非常に大きい。また、棧橋全体の固有周期は実際に建設された棧橋を調べ

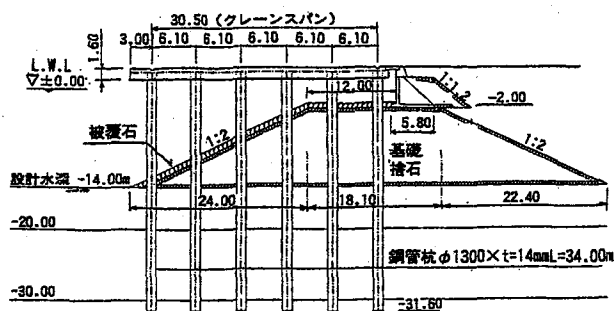


図-1 一般的な直杭式栈橋

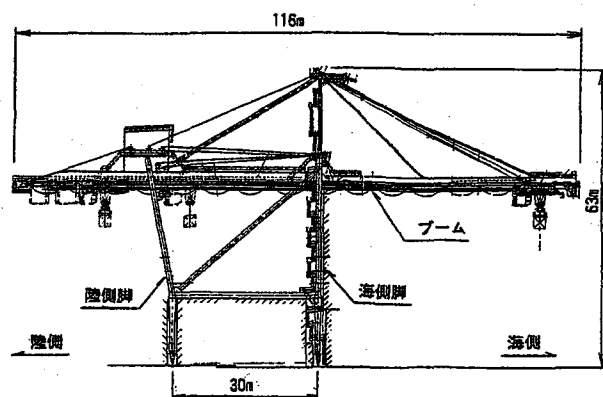


図-2 一般的なコンテナクレーン

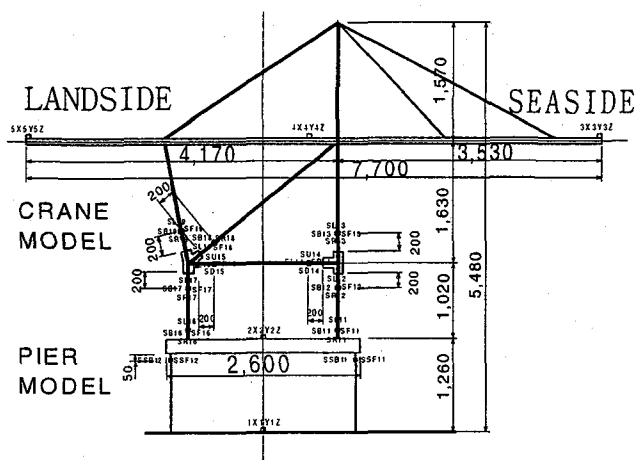


図-3 模型概略寸法

た結果、約 0.4 秒から 0.7 秒のことが多い⁷⁾。モデル化に伴い、上部工の形状はクレーンモデルを onboard するのに適当な大きさとした。模型の上部工重量は計測から約 510kgf であり相似則をほぼ満足している。模型と実物のスケール比は 1/15 である。杭本数は、実物で 30 本程度であるが、模型は、単純化のために 4 本に軽減している。また、杭形状は法線方向に振動モードが生じないように、長方形断面とした。さらに、栈橋の固有周期を変化させる（実物相当で、0.3s、1.5s、2.0s）ために断面形状の異なる 3 種類の杭を用意し交換が可能である。また、1.5s 栈橋、2.0s 栈橋模型には、強制的に減衰を 10%程度もたせるためにオイルダンパーを設置した。図-1 に一般的な直杭式栈橋の断面図を示す。

(2) コンテナクレーン

図-2 に一般的なコンテナクレーンを示す。レールスパンは 30m でコンテナ専用船に対応するものでその重量は、約 1000tf である。クレーン脚の構造形式には両側（海側と陸側）が剛脚構造と揺脚構造のものがある。本研究の対象とする剛脚構造のコンテナクレーンの固有周期は実機を計測した結果、約 2.0s である⁵⁾。

模型と実機のスケール比は、栈橋模型と同様に 1/15 とした。模型の重量は 316kgf であり相似則をほぼ満足して

表-1 模型の主な相似則

Measured Quantity	Dimensions	Prototype	Model
Length	m	1	1/15
Time	s	1	1/√15
Acceleration	m/s ²	1	1
Mass	kg	1	1/15 ³
Moment of inertia	Kgm	1	1/15 ⁵
Elastic modulus	Kg/m ²	1	1
Bending rigidity	Kg/m ²	1	1/15 ⁵

いる。また、クレーン脚の浮き上がり現象を確認するために加速度の相似則を 1 とする必要から、断面 2 次モーメントを相似則により決定したものをさらに 1/15 する方法を用いた。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⁹⁾。また、車輪の数は実機では、一脚あたり 8 輪であるが、簡略化して一輪とした。コンテナクレーンは、ブームのアップダウンで重心位置が異なり動的特性が変化するが、浮き上がりが生じやすいと考えられるブームダウン時（作業時）をモデル化した。図-3 に模型の概略寸法を示す。また、表-1 に相似則を示す⁷⁾。

2.2 実験設備及び計測機器

加振実験は、運輸省港湾技術研究所の三次元水中振動台を使用して実施した。振動テーブルの寸法は φ6.0m の円形である。加振能力は水平 X 方向 ±2.0G、水平 Y 方向 ±1.0G、上下方向 ±1.5G である。加振周波数は、DC～100Hz である。

振動台と栈橋の水平方向の相対変位はインダクタンس式変位計、栈橋とクレーン脚の垂直方向の相対変位はレーザー変位計を用い計測した。また、各点の加速度の計測には、主に歪み型の加速度計を使用した。各部材の応力は歪みゲージにより計測した。

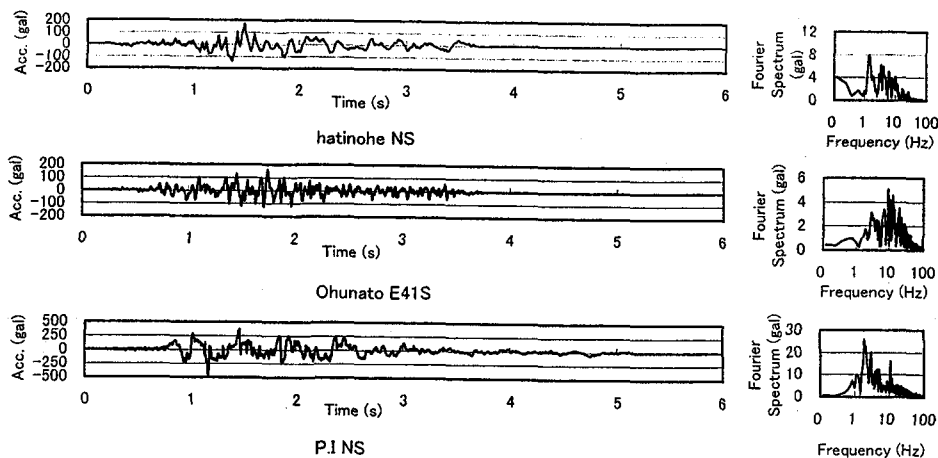


図-4 入力地震波とフーリエスペクトル

3. 試験体の固有値

3.1 重量及びクレーン重心位置

計測から、栈橋上部工の重量は 509.75kgf、クレーン重量は 316.405kgf であり（それぞれ、計測器重量を含む）、試験体は実機の質量比を概ね満足している。クレーンの重心位置は、図-5 に示す座標系で(725mm, 0mm, 2125mm)であった。なお、重心位置の測定方法は、複数の支点から試験体をつり下げる方法を用いた。

FEM 解析によるクレーン模型の重心位置は図-5 に示す座標系で(635mm, 0mm, 1935mm)である。また、実機の重心位置を相似則に合わせたものは(730mm, 0mm, 2070mm)であり、計測から得られた重心位置は相似則を概ね満足している。

3.2 固有値解析

縮小模型実験に使用する試験体の固有振動数を把握するために、汎用 FEM コード MSC/NASTRAN を用いて次の 3 ケースについて固有値解析を行った。解析には修正 Givens 法を用いた。

- ・栈橋単体モデル（3 種類の固有周期）
- ・クレーン単体モデル（剛脚）
- ・クレーン・栈橋連成モデル（3 種類の栈橋モデル）

栈橋単体モデルには、杭形状の異なる 3 種類の固有周期モデルがある。それぞれ、実物スケールで 0.3s、1.5s、2.0s を目標に設計した。以下これらのモデルを、0.3s 栈橋、1.5s 栈橋、2.0s 栈橋と呼ぶものとする。表-2 に解析結果を示す。なお、 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表している。

栈橋単体の 1 次モードは岸壁法線直角方向に全体が変位するモード、2 次のモードは法線平行方向に全体が変位するモードである。クレーン単体およびクレーン栈橋連成モデルの固有モードは、1 次のモードが垂直軸を中心に振れるモード、2 次のモードは横行方向に全体が変位するモード、そして 3 次のモードは走行方向に全体が変位するモードである。表-2 の刺激係数から、栈橋とクレーンを一体として考えたモデルでは、横行方向入力波に対して最も顕著に応答するものと考えられる。図-6 に

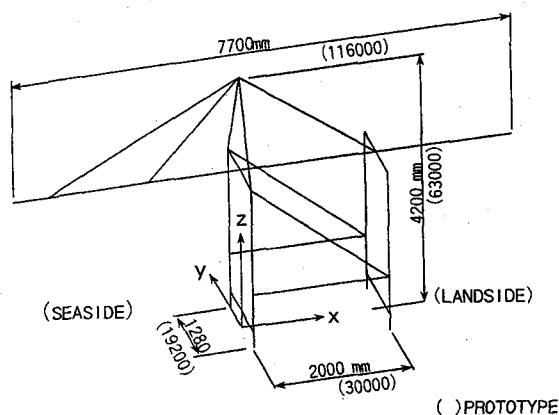


図-5 模型の座標系

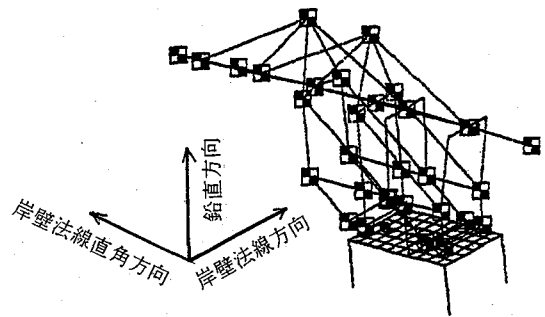
2.3 入力波

入力地震波は、港湾施設の設計で一般的な八戸波 NS 成分（1968 年十勝沖地震、八戸港で観測）、大船渡波 E41S 成分（1978 年宮城県沖地震、大船渡港で観測）、神戸ポートアイランド波 NS 成分（1995 年兵庫県南部沖地震、神戸ポートアイランドで観測）さらに栈橋およびクレーンの周波数応答特性を調べるために正弦波を用いた。そのため正弦波は、入力加速度を一定にし、周波数を変化させていった。また、地震波については最大加速度をクレーン脚が浮き上がるまで倍数で増加させた。なお、入力地震波は、相似則により時間軸を $\sqrt{1/15}$ にしている。図-4 に入力地震波及びフーリエスペクトルを示す。

加振方向は、栈橋法線直角方向（クレーン横行方向）の 1 方向である。その理由として、水平部材の配置上、横行方向の入力に対してクレーン脚の片持ち梁としてのスパンが長くなり、端部の負担が大きくなること、さらに、走行方向については車輪のフランジ（つば）の影響がなく、レールと車輪間の滑りにより地震動の入力が緩和されること、また、固有値解析を行った結果、クレーン横行方向のモード（2 次モード）の刺激係数が高いことがあげられる。

表-2 モデルの固有振動数と刺激係数

モデル	モード (次)	固有振動数 f (Hz)	刺激係数		
			β_x	β_y	β_z
0.3s 栈橋単体	1	13.12	23.27	0.00	0.00
	2	22.08	0.00	23.23	0.00
1.5s 栈橋単体	1	2.54	23.40	0.00	0.00
	2	19.59	0.00	-23.39	0.00
2.0s 栈橋単体	1	1.92	-23.16	0.00	0.00
	2	8.58	0.00	-23.16	0.00
クレーン単体	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
0.3s 栈橋 クレーン連成	1	1.19	0.00	-5.62	0.00
	2	2.12	-16.00	0.00	0.04
	3	2.31	0.00	12.80	0.00
1.5s 栈橋 クレーン連成	1	1.19	0.00	5.62	0.00
	2	1.69	25.37	0.00	-0.02
	3	2.30	0.00	-12.84	0.00
2.0s 栈橋 クレーン連成	1	1.17	0.00	-5.69	0.00
	2	1.41	27.25	0.00	-0.01
	3	2.28	0.00	13.75	0.00



Mode 2 2.124237 Hz

図-6 固有モード図 (連成モデル)

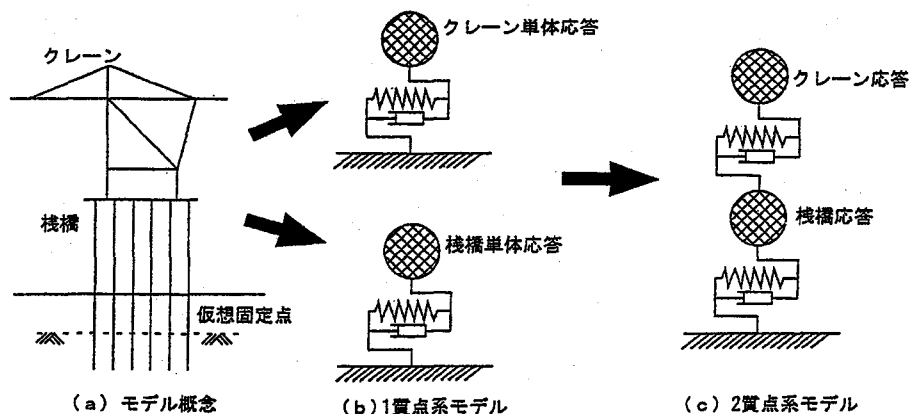


図-7 2 質点系バネモデル概念図

4. 実験と解析の比較

4.1 2 質点系簡易計算モデル

コンテナクレーン及び栈橋上部工をそれぞれ質点に置き換え、各質点の地震波に対する応答を計算する。各質点同士はバネとダッシュポットにより結合されている。モデルに入力するバネ定数及び減衰定数は、試験体の自由振動試験より得られた値を使用している。又、質点に与える質量も計測値を使用した。栈橋モデルについては上部工質量、クレーンモデルについてはクレーン全体の質量を各質点に与えている。よって、コンテナクレーンの応答は、重心位置の応答を求めていることとなり、栈橋の応答は上部工の応答を求めていることとなる。加振方向は水平 1 方向で地震波は杭下端の仮想固定点に入力する。栈橋杭下端の仮想固定点は、港湾の栈橋の設計に用いられる修正震度法において、1 質点モデルによる検討をするときに仮想固定点を用いると、栈橋上部工の応答がよく表現出きするという事例から、本解析でも杭下端に仮想固定点を設けた。よって、栈橋の減衰定数は地盤も含めたものとなる。また、クレーン脚の浮き上がり、脱輪、滑動は考慮していない。図-7 に 2 質点系バネモデル (以下、簡易モデル) の概念図を示す。

連成モデルの 2 次モードを示す。

3.3 自由振動試験

各モデルの振動性状を把握するために自由振動試験を行い、固有周期と減衰定数を測定した。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。表-3 にクレーン横行方向に対する計測結果を示す。各モデルとも相似則を概ね満足している。

表-3 試験体の固有周期と減衰率

モデル	試験値	
	固有周期(s)	減衰率
0.3s 栈橋単体	0.0925 (0.35)	0.022
1.5s 栈橋単体	0.40 (1.55)	0.1
2.0s 栈橋単体	0.67 (2.58)	0.1
クレーン単体	0.455 (1.76)	0.00322

()内は実機換算

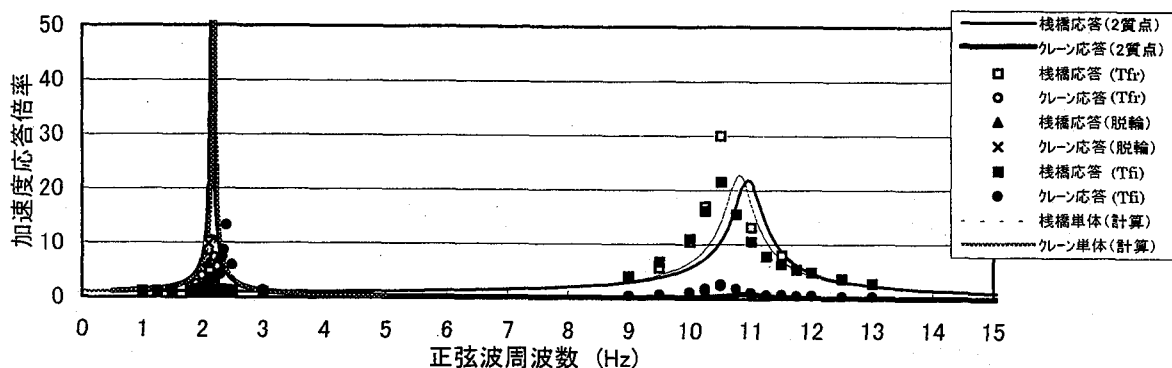


図-8 正弦波周波数と加速度応答倍率 (Case 0.3s 栈橋)

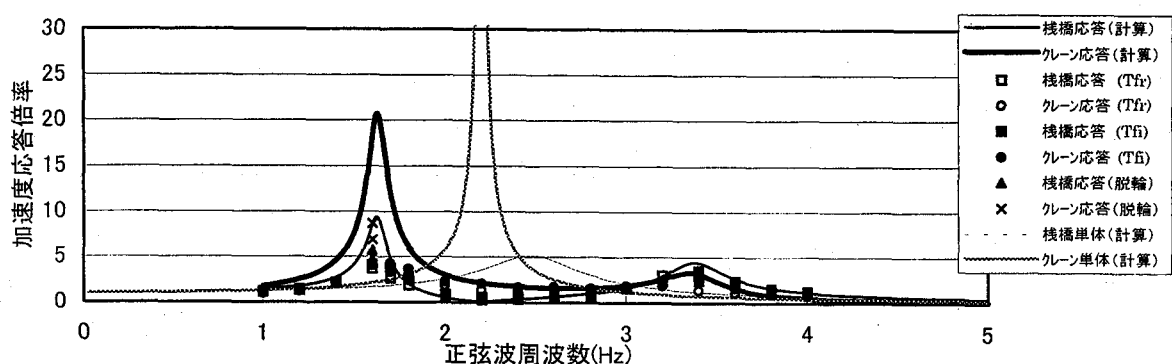


図-9 正弦波周波数と加速度応答倍率 (Case 1.5s 栈橋)

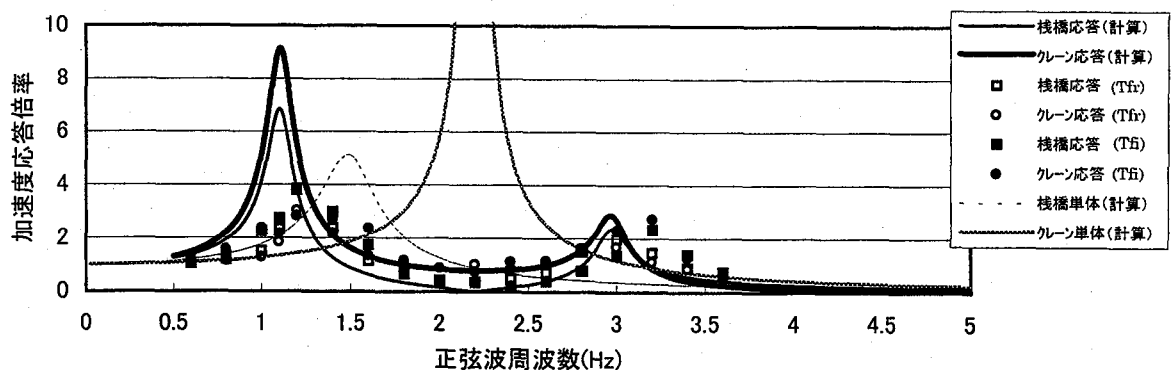


図-10 正弦波周波数と加速度応答倍率 (Case 2.0s 栈橋)

4.2 正弦波加振

簡易モデル計算により、モデルに対する共振曲線を求め、その曲線をトレースするように正弦波の入力周波数を変化させて加振実験を行った。計算に用いたバネ定数、減衰定数、重量は計測から得られた値を用いた。図-8～図-10 に 0.3 栈橋・クレーン連成、1.5s 栈橋・クレーン連成、2.0s 栈橋・クレーン連成モデル計算の結果と実験結果をプロットして示す。また、図中にそれぞれ栈橋単体

とクレーン単体の 1 質点モデルによる計算結果を合わせて示している。図中の Tfi は、脚下端と栈橋上部工を固定したケースであり、Tfr はフリーにして脚の浮き上がり可能なケースである。

一般的な栈橋の固有周期と考えられる 0.3s 栈橋のケース (図-8) では、Tfr と Tfi を比較すると共振点付近の加速度応答倍率は、クレーンの応答は Tfi の方が Tfr より大

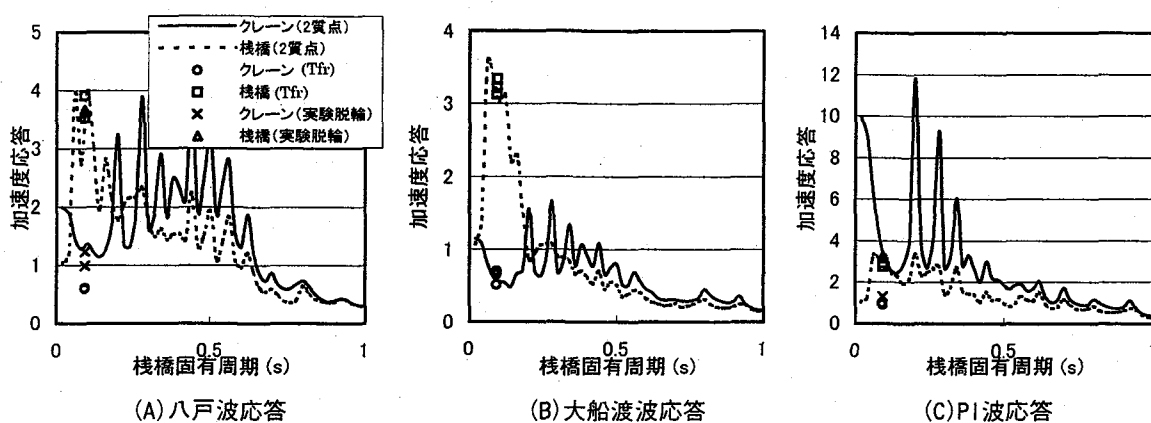


図-11 栈橋固有周期と加速度応答 (0.3s栈橋)

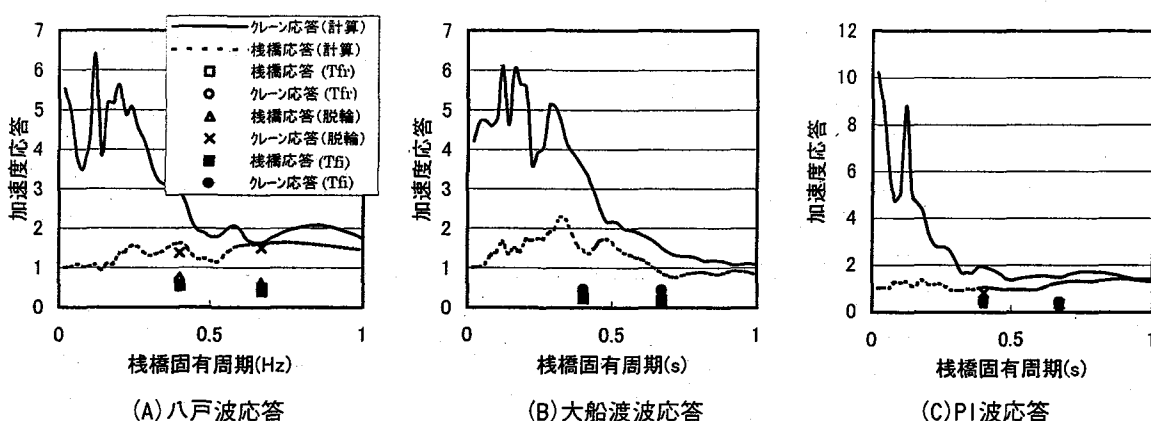


図-12 栈橋固有周期と加速度応答 (1.5s, 2.0s栈橋)

きいが、栈橋応答は Tfr が大きいことがわかる。クレーン応答は、車輪の滑り、さらに浮き上がり、脱輪によって入力地震動が緩和されるものと考えられる。実験値と簡易モデル計算を比較すると脱輪を伴わないケースでは、共振点を除き良い一致がみられるが、脚の浮き上がり、脱輪が生じたケースは非線形領域に入るため、簡易モデルによる線形計算との良好な一致はみられない。栈橋の応答 (2 次の共振点付近) は、栈橋単体の応答より小さい値となっており、クレーンが上載し、かつクレーン脚を栈橋上部工に逸走防止装置等で固定することにより、地震時応答を軽減する効果があると考えられる。1.5s 栈橋、2.0s 栈橋のケースでは、それぞれ単体での応答に比べ、連成モデル (2 質点系モデル) の応答値が小さくなっている。特に、クレーン応答は、単体では 150 倍であった応答値が 1.5s 栈橋のケースでは約 20 倍、2.0s 栈橋のケースでは約 10 倍にまで軽減されている。2.0s 栈橋の応答については、2 次の共振点付近では、半分程度まで軽減されている。また、共振点の変化に注目すると、応答倍率が大きい 1 次の共振点については、クレーンは、単体の場合に比べ長周期側に变化し、栈橋応答も長周期側に変

化している。しかし、0.3s 栈橋の場合栈橋応答が大きいのは、2 次の共振点であり、一般的な栈橋の応答はクレーンを上載することにより、栈橋応答は短周期側に变化するものと考えられる。実験値と計算値を比較すると、栈橋応答については、概ね計算値と一致しているが、クレーン応答について 1 次の共振点付近では、計算値がかなり大きな値となっている。その原因として、簡易モデル計算ではクレーン車輪とレールの滑り、脚の浮き上がり等が表現できないこと、簡易計算では、入力された地震波のエネルギーすべてが 1 方向に作用するのに対して、実験ではクレーン横行方向以外にも走行方向や、上下方向に分散されることが考えられる。

これらの共振曲線から、栈橋がクレーンを上載した状態で耐震検討を行う必要性があり、共振点や応答加速度の変化という動的相互作用に十分留意しなければならない。

4.3 地震波加振

図-11、図-12 に栈橋・クレーン連成モデルに対する加振実験結果と簡易モデル計算結果を示す。横軸に栈橋固

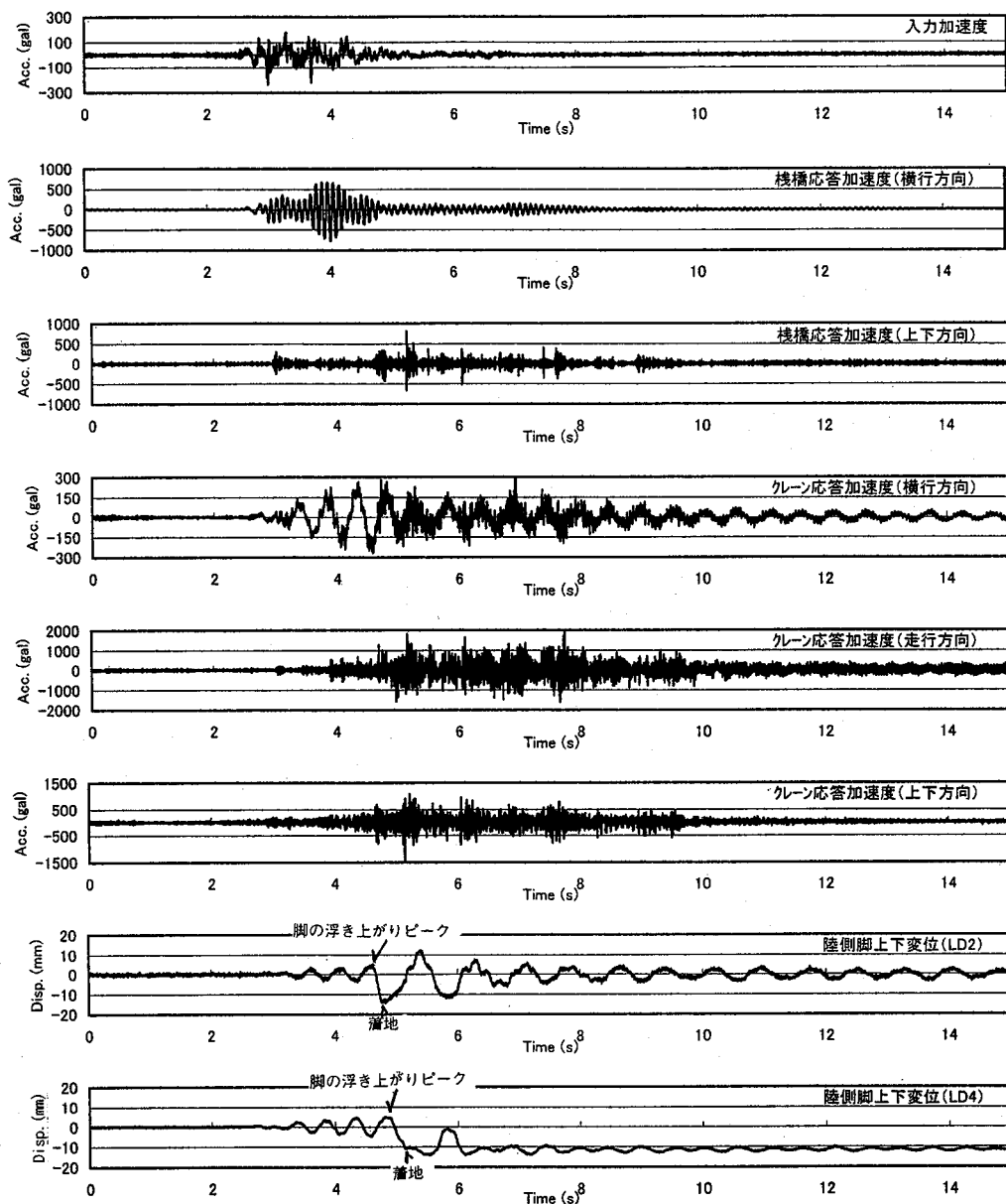


図-13 主な実験結果の時刻歴

有周期を表し、縦軸は加速度の応答倍率である。但し、0.3s 栈橋モデルと 1.5s、2.0s 栈橋モデルでは減衰定数が異なるため、図-11 は 0.3s 栈橋モデルのみグラフ化している。

0.3s モデルのケースでは実験結果と計算結果がよく一致している。特に、大船渡波の場合、実験では簡易モデル計算では表現できない脚の浮き上がり、脱輪現象が起きなかったことから、計算値と実験値の良い一致が見られる。それに対して、1.5s 栈橋、2.0s 栈橋モデルではどの地震波のケースにおいても計算結果よりも実験結果が小さい値となっている。特にクレーンの応答倍率に、計算値と実験値の差が大きく、計算ではかなり安全側評価していることになる。正弦波加振の場合と同様に、クレーン応答は 3 次元で検討する必要がある、非線形領域の脚の浮き上がりや車輪のすべりが重要なファクターになると考えられる。これらのことから、栈橋固有周期がクレーン固有周期と同程度の場合、簡易計算では過大評価

しており、また脚の浮き上りを考慮した検討には不向きであると思われる。しかし、一般的な栈橋（固有周期=0.3s~0.7s 程度）を検討する場合には、脚の浮き上がり等を考慮しない場合には有効であるといえる。

5. クレーン脱輪のメカニズム

0.3s 栈橋・クレーン連成モデルを神戸ポートアイランド NS 成分波を用いて加振実験を行い、クレーンが脱輪したケース（最大加速度約 0.4 倍）を用い、クレーンの脱輪課程について述べる。

図-13 に入力加速度波形、栈橋応答加速度波形、クレーン重心位置の応答加速度波形および脚の上下変位の時刻歴を示す。なお、時間軸は相似則に従い $\sqrt{1/15}$ にしている。また、加振方向はクレーン横行方向の 1 方向で最大加速度は-240gal である。このケースで脱輪した脚は陸

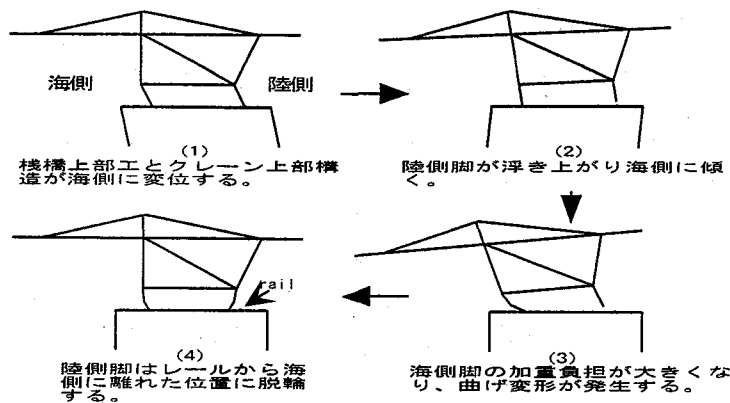


図-14 クレーン脱輪課程の模式図

側の 2 脚である。LD2、LD4 が陸側脚を示している。上下変位の時刻歴に示すように、約 4.8s に脚が浮き上がり、約 5s に橋橋上部工に着地していることがわかる。LD2 の着地時間と LD4 の着地時間に若干の差が見られるが、これは、クレーンが捻れながら着地したことを表している。脚が浮き上がる前の橋橋の最大応答加速度はクレーン横行方向で-785gal、クレーンは-270gal であった。最大の浮き上がり量は、LD2、LD4 とともに約 4.7mm であった。クレーン模型の車輪のつばの高さが 2mm であることから、4.7mm では完全に車輪のつばによるレールとの拘束が失われ、脱輪したものと考えられる。また、クレーン走行方向の浮き上がり時クレーン応答加速度は 1,260gal であり、脚の浮き上がり時にはブームをスウィングするような捻れが大きく作用していることがわかる。さらに、クレーンの上下方向の応答加速度最大値は、脚が着地した時に現れており、-1,447gal であった。橋橋の上下方向の最大応答加速度は 807gal で、クレーンが着地したときに現れており、クレーン脱輪による衝撃力が作用したものと考えられる。

加振実験による脱輪課程を模式的に表すと図-14 のようになる。

- ①海側方向に働く加速度により、橋橋上部工とクレーンの上部構造が海側に変位する。
- ②①の変位が最大になると、陸側脚が浮き上がり海側に傾く
- ③海側脚は加重負担が大きくなり、脚に曲げ変形が発生する。
- ④陸側脚はレールから海側に離れた位置に、脱輪後、着地する。

6. まとめ

橋橋式岸壁とコンテナクレーンの連成モデルによる実験と質点モデルによる簡易モデル計算から、次の知見が得られた。

- (1)簡易モデル計算から、橋橋にクレーンが上載した状態では単体の場合に比べ共振点・最大加速度の変化があり、

地震時のコンテナヤード等の検討を行う際には、これら動的相互作用を考慮する必要がある。

- (2)横行方向 1 方向の加振に対してもコンテナクレーンの地震時の挙動は、ブームをスウィングするような捻れが発生し、クレーン脚の浮き上がりに対して影響は大きい。
- (3)またクレーンが脱輪し、着地したときの橋橋に対する加重等の影響も考慮する必要がある。
- (4)簡易モデル計算で、一般的な橋橋とコンテナクレーンの地震時挙動は、設計を行う際の基本検討として、クレーン脚の浮き上がり現象、脱輪や滑りを伴わない場合であれば表現することが可能である。但し、橋橋の固有周期がクレーンと同程度 (2.0s 程度) の場合、クレーンの応答を過大評価する恐れがある。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準 (下), p.731, 1999.
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準 (下), p.923, 1999
- 3) 金山維史、柏崎昭宏：大地震時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, pp.100-106, 1998
- 4) 横田弘、竹鼻直人、南兼一郎、川端規之：鋼管杭式横橋の耐震設計法に関する考察, 構造工学論文集, Vol.44A, 1998
- 5) 山本俊介、江頭隆喜、宮田正史、高原裕一、井福周介：橋橋式岸壁上のコンテナクレーン常時微動観測, 第 54 回年次学術講演論文 (投稿中)
- 6) Shunsuke YAMAMOTO, Takahiro SUGANO, Toshiro TANABE, Susumu NAKASHIMA, Masafumi MIYATA, Tsuyoshi TANAKA and Yuichiro TATSUMI: A Study of The Interaction Between The Pier Type Wharf and Container Crane During Earthquakes, Proceeding of the 12th World Conference on Earthquake Engineering (contributing now)

(1999 年 9 月 17 日受付)