

地震時における栈橋式岸壁と コンテナクレーンの動的相互作用

山本 俊介¹・江頭 隆喜²・菅野 高弘³・田邊 俊郎⁴・宮田 正史⁵

¹正会員 (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1-15-1)

²運輸省港湾技術研究所 機械作業システム研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造振動研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁴正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 設計技術研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁵正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 構造振動研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

コンテナ専用埠頭栈橋は、その重量や固有振動数が上載するコンテナクレーンの重量に近い大規模地震時には互いに大きく影響し合うと考えられる。しかし、岸壁の設計法では上載される港湾荷役機械との動的な相互作用を考慮した設計体系とはなっていないのが現状である。また、港湾荷役機械の設計体系についても同様である。そこで、本研究では栈橋式岸壁とコンテナクレーンの地震時挙動を把握するため、縮尺1/15の模型を使用した加振実験および3次元FEM非線形過渡応答解析を用い、栈橋上部工とクレーンを2質点として表現した簡易モデル計算と比較し、その検討手法の妥当性を検証する。

Key Words : pier type quay wall, container crane, interaction effect, shaking table test, two mass spring model

1. はじめに

兵庫県南部沖地震以降、コンテナ岸壁を含む港湾施設の耐震設計法の見直しが急速に進められており、耐震強化岸壁はレベル2地震動が採用され、条件によっては設計震度0.2を上回るようになった。さらに設計後の変形等の照査を行うこととなり、動的な解析手法が導入されている¹⁾。ここでレベル2地震動とは、供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を有する地震動で再現期間が数百年以上の地震動を指す²⁾。

さらに、コンテナクレーンは一律に重量の20%の水平力に対して強度評価するのが一般的で、地震時におけるクレーン脚の浮き上がりまで考慮する必要はないとされていたが、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に起因するものがみられ³⁾、動的設計と共に脚の浮き上がりを考慮するようになってきている⁴⁾。

このように、設計に動的解析手法が取り入れられるなかでは、コンテナクレーンと岸壁の両者を一体として検討・設計をする必要が生じる。すなわち、岸壁の設計及びクレーン設計には動的相互作用を無視することは出来ないものと考えられる。

栈橋式のコンテナ岸壁は、他の構造形式(重力式、矢板式等)の岸壁に比べ、上部工質量および固有周期が上載するコンテナクレーンのそれと同程度のために、地震時には顕著に互いに影響し合うと考えら

れる。そこで、本研究では直杭栈橋式岸壁とコンテナクレーンの地震時に於ける動的相互作用を評価・検討することを目的として、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、栈橋上部工およびコンテナクレーンを2質点系で表現したモデルによる地震応答解析、有限要素法による3次元非線形過渡応答解析を行い、各解析の妥当性を検証する。

2. 検討モデル

検討対象とする直杭式栈橋、コンテナクレーンを図-1、図-2に示す。また、実験モデルの概略寸法を図-3、相似則を表-1に示す。

(1) 直杭式栈橋モデル

検討の対象とするのは直杭式栈橋で、鋼管杭によって栈橋上部工が支えられている。鋼管杭と上部工は剛結されており、上部工重量は1ブロックあたりでは、約1,750tfである。一般的に栈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、栈橋全体の固有周期は実際に建設された栈橋を調べた結果、約0.4秒から0.7秒のことが多い⁵⁾。

実験模型と実物のスケール比は振動テーブルの制約から1/15とした。また、杭本数は実物で30本程度であるのに対し、実験模型では簡略化を行い4本

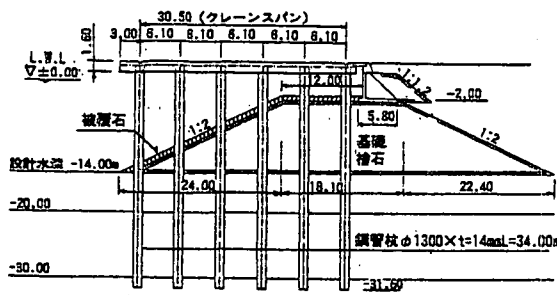


図-1 一般的な直杭栈橋

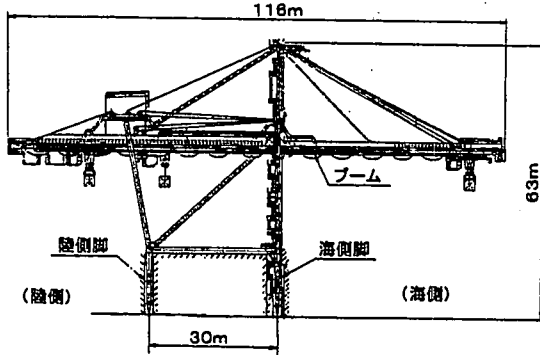


図-2 一般的なコンテナクレーン

に低減した。杭形状は上載するクレーンの横行方向以外に振動モードが生じない様にするため、長方形断面とした。また、模型の上部工重量は、約 510kgf である。

(2) コンテナクレーンモデル

検討の対象とするコンテナクレーンは、脚スパン 30m 程度の剛脚構造のもので一般的にその固有周期は 2.0s 程度である⁶⁾。クレーンの重量は約 1,000tf である。

模型と実機のスケール比は、栈橋モデルと同様に 1/15 とした。その際、クレーン脚の浮き上がり現象を表現するために加速度の相似則を 1 にする必要から、断面 2 次モーメントを相似則により決定したものからさらに 1/15 にする方法を用いた。車輪は、回転による摩擦抵抗が評価しにくい形状のみモデル化している。また車輪数は、実機では一脚に 8 輪であるが簡略化して 1 輪とした。モデル化の状態は、脚が浮き上がりやすいと考えられるブームダウン時（作業時）とした。計測から模型重量は、計測器を含めて約 316kgf で、その重心位置は図-3 に示す座標系で (725mm, 0mm, 2125mm) であり実機の相似則 (730mm, 0mm, 2070mm) を概ね満足している。

3. 実験の概要

(1) 実験設備

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。最大加速度は水平 X 方向± 2.0G、水平 Y 方向± 1.0G、上下 Z 方向± 1.5G であり、加振周波数は、DC～100Hz である。なお、本実

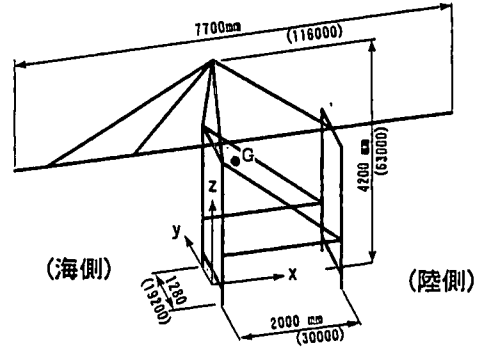


図-3 実験モデル

表-1 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	m ⁴	1	1/15 ³
Elastic modulus	N/m ²	1	1
Bending rigidity	Nm ²	1	1/15 ³

験は気中で行った。振動台と栈橋の水平方向の相対変位はインダクタンス式変位計、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て計測した。また、各点の加速度の計測には、主に歪型の加速度計を使用した。各部材の応力は歪みから測定した。

(2) 入力地震波

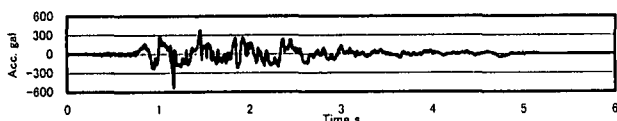
入力地震波は、港湾施設の設計で一般的な神戸ポートアイランド波 NS 成分、八戸波 NS 成分、大船渡波 E41S 成分を用いた。なお、時間軸を相似則にあわせて√1/15 に縮小している。また、最大加速度を実測値の倍数で変化させた。加振方向はクレーン横行方向の 1 方向である。その理由は、水平部材の配置上、横行方向の入力に対してクレーン脚の方持ち梁としてのスパンが長くなり、端部の負担が大きくなること、さらに、走行方向については車輪のつばの影響がなく、レールと車輪間の滑りにより地震動の入力が緩和されると考えられることがあげられる。図-4 に入力地震波を示す。

4. 解析の概要

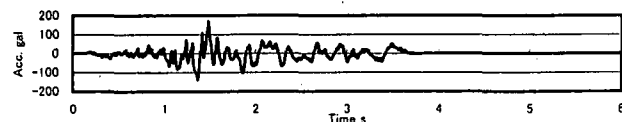
(1) 2 質点系応答解析

コンテナクレーンおよび栈橋上部工を質点に置き換えて各質点（栈橋上部工、クレーン重心位置）の地震時の応答を計算する。図-5 に 2 質点モデルの概念図を示す。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。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地域

(a) 八戸波 NS 成分



(b) ポートアイランド波 NS 成分



(c) 大船渡波 E41S 成分

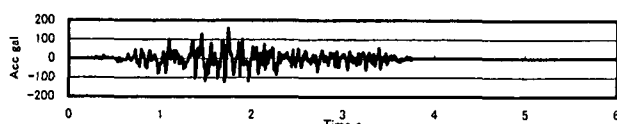


図-4 入力地震波

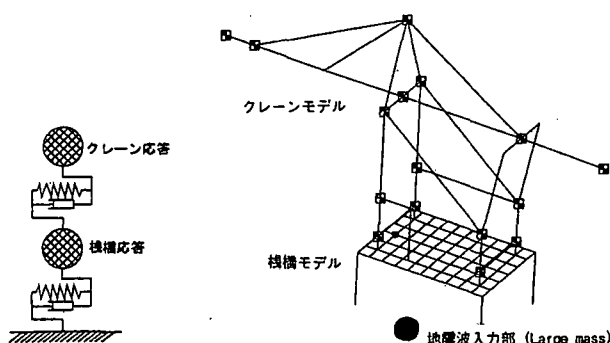


図-5 2 質点

バネモデル概念図

図-6 Nastran 解析モデル

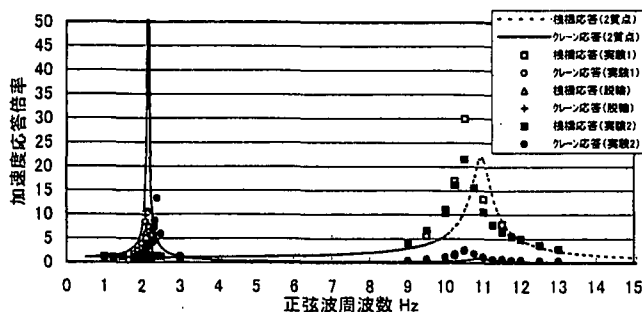


図-7 加速度応答倍率と正弦波周波数

の橋樑を設計する際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、橋樑上部工の応答がよく表現できるという事例⁵⁾から本解析でも杭下端に仮想固定点を設けた。よって、橋樑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、滑動等は考慮していない。

(2) 三次元非線形過渡応答解析

地震時におけるコンテナクレーンの脚の滑り、浮き上がり、脱輪という挙動をシミュレートするため、FEM による非線形過渡応答解析を行った。解析には、汎用 FEM コード MSC/NASTRAN を使用し、クレーンおよび橋樑の杭は主に梁要素を用いモデル化した。クレーン脚の浮き上がりや滑りを表現するために脚下

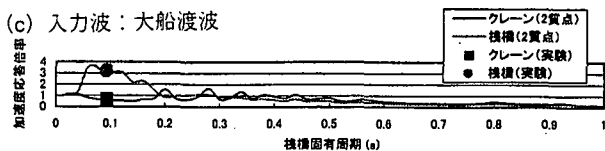
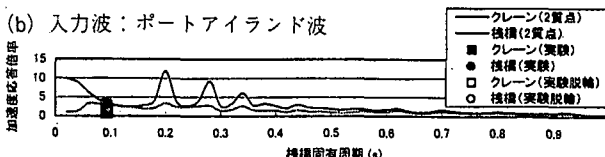
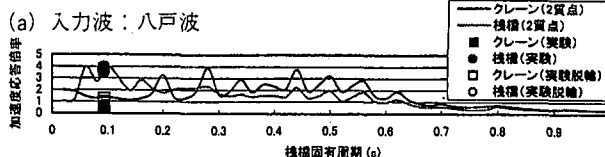
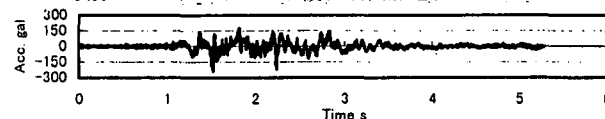
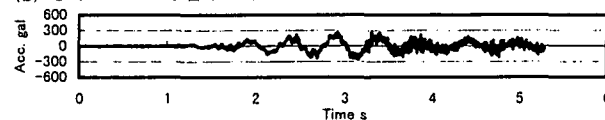


図-8 地震波による応答加速度と橋樑固有周期

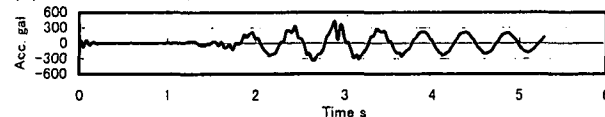
(a) 入力波 (ポートアイランド波、最大加速度約 0.4 倍)



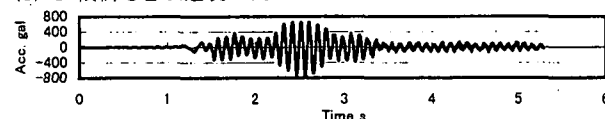
(b)-1 クレーン応答加速度 (実験)



(b)-2 クレーン応答加速度 (解析)



(c)-1 橋樑応答加速度 (実験)



(c)-2 橋樑応答加速度 (解析)

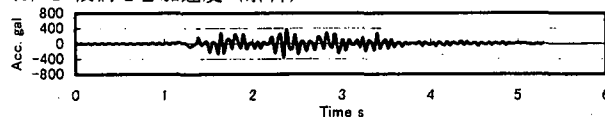


図-9 入力地震波と応答加速度の時刻歴

端部に gap 要素を設けた⁷⁾。NASTRAN の gap 要素は車輪とレールとの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。地震波は橋樑杭下方に設けた Large mass に入力した⁴⁾。図-6 に解析モデルを示す。

表-2 試験体の固有周期と減衰率

モデル	計測値	
	固有周期(s)	減衰率
橋樑単体	0.0925(0.35)	0.022
クレーン単体	0.455 (1.76)	0.00322

()内は実機換算

5. 加振実験と解析の比較

(1) 正弦波加振

図-7に2質点系バネモデル計算による共振曲線と、実験結果をプロットして示す。なお、2質点系の計算に用いたバネ定数および減衰定数は表-2に示す自由振動試験から得られた値を用いている。曲線の1次の共振点は約2.17Hzでクレーンと栈橋が同位相で振動するモード、2次は約10.8Hzで逆位相で振動するモードである。実験2は、脚下端と栈橋上部工を固定したケース、それに対して実験1はフリーにして脚の浮き上がりが可能な条件である。図中の△印、+印はクレーンが脱輪したケースの栈橋応答およびクレーン応答であり、その時の入力波の周波数は2.1Hzで入力加速度は40galである。この場合、クレーン重心位置の加速度応答倍率は9.8倍である。実験1と2から、脚を固定したものは1次の共振点が短周期側に変化しているが、これは固定器具の取り付け位置の影響と考えられる。特筆すべきは、共振点付近の最大応答倍率は脚固定のケースは脚フリーのケースよりクレーンの応答は大きくなり、栈橋の応答は小さくなっていることである。クレーンの応答は、レールと車輪のすべり、さらに浮き上がりによって入力地震動が緩和されると考えられる。入力周波数が栈橋固有周波数に近い場合は、単体加振実験での最大応答倍率(約25倍)に比べても応答が小さくなっていることから、クレーンが上載し、かつ逸走防止装置が働いている時は、栈橋応答を軽減させる効果があると考えられる。これらのことから、耐震設計において動的相互作用による応答加速度の変化には十分留意しなければならないことがわかる。

(2) 地震波加振

図-8に実験で入力を行った地震波(八戸波、ポートアイランド波、大船渡波)を2質点系バネモデルに入力した際の栈橋の固有周期に対する各モデルの加速度応答倍率比を示す。横軸に栈橋の固有周期を示し、縦軸に各地震波に対するクレーン応答倍率、栈橋応答倍率を示している。実験値をプロットして示しているが、●印は栈橋の応答、■印はクレーンの応答である。また、○印はクレーンが脱輪したケースでの栈橋応答であり、□印は脱輪したクレーンの応答である。なお、大船渡波では、脱輪したケースはない。大船渡波の結果から、2質点系計算の結果は実験結果と良く一致している。八戸波、ポートアイランド波の結果については、栈橋応答に限ると良く一致しているが、クレーン応答については、どのケースも実験結果が計算結果より小さい値となっている。このことは、クレーンは脚が浮き上がる、または脱輪することによりレールとの拘束がなくなるために入力時振動が緩和されたものと考えられる。さらに、2質点系計算では、クレーン脚の浮き上がりや脱輪が表現できない為に、クレーンの応答は実験結果より大きな値となっていると考えられる。

図-9に、入力地震波、過渡応答解析結果および実験結果の時刻歴を示す。解析結果と実験結果で応答加速度の絶対値に差があるものの、波形は概ね一致している。解析では、ロッキングはしているが脱輪していないために、正弦波加振の場合と同じ理由から栈橋応答は小さくなり、クレーン応答は大きくなっていると考えられる。

6. まとめ

加振実験、FEM非線形過渡応答解析および、2質点系モデル計算から、次の知見が得られた。

- ①入力地震波の卓越周期、栈橋の固有周期によっては、上載するクレーンによって、栈橋の応答加速度を軽減することがある。
- ②クレーンおよび栈橋を2質点系モデルで表現した簡易計算法を使用して、地震時の栈橋の応答、さらにクレーンについても、耐震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や脱輪現象を伴わない場合であれば、クレーンの地震応答を表現することが十分可能である。
- ③クレーンの脱輪現象を伴う場合でも、今回行ったような脚下端にGAP要素を設けた過渡応答解析により表現可能である。

謝辞：実験の際に協力を得た、科学技術振興事業団重点研究支援協力員の田中剛氏、巽祐一郎氏に感謝し、ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 田邊俊郎，中島晋，菅野高弘，阿比留久徳，江頭隆喜：動的相互作用を考慮した港湾荷役機会と栈橋の耐震設計法，日本機械学会，第7回交通・物流部内大会講演論文集，pp. 293-296，1998。
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版)，1997。
- 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，日本機会学会論文集，pp. 100-106，1998。
- 4) 浮き上がり特性を考慮した過大地震時のコンテナクレーン挙動解析：柏崎昭宏，金山維史，機会力学・計測制御講演論文集，Vol. B，pp. 17-20，1996。
- 5) 横田弘，竹鼻直人，南兼一郎，川端規之：鋼管杭式横栈橋の耐震設計法に関する考察，構造工学論文集，Vol. 44A，1998。
- 6) 山本俊介，江頭隆喜，宮田正史，高原裕一，井福周介：栈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)
- 7) Sang H. Lee：MSC/NASTRAN Handbook for Nonlinear Analysis，MSC，1992。