

報文 ガントリークレーンの耐震性

菅野 高弘* 山本 俊介**

1. はじめに

近年、輸出入貨物のコンテナ化が急速に進み、現在ではその玄関口となるコンテナターミナルの担う役割は大きく、わが国の経済活動の拠点として、その重要度はきわめて大きなものになっている。わが国の港湾における取扱い貨物量は、1970年代のコンテナの出現により急激に増加した。以降も増加の一途をたどり、現在の取扱い貨物量は1950年の30倍程度まで膨れ上がっている¹⁾。

そうしたなか、平成7年兵庫県南部地震により、国際物流の中核である基幹的港湾が長期間に亘り機能停止に陥ってしまった²⁾。以降、耐震強化岸壁の整備が急務となっている。このため、技術基準に耐震性能の概念が導入され、コンテナ専用埠頭岸壁の場合には、上載するコンテナクレーンのような荷役機械も一体として検討する必要性が生じるようになった³⁾。しかしながらコンテナクレーンは、厚生労働省のクレーン構造規格(告示)に基づき重工メーカーが設計・製作している一方で、岸壁は土木技術者が、国土交通省の「港湾の施設の技術上の基準・同解説³⁾」を基に、設計・施工しているのが現状である。

本稿では、既往の研究成果を紹介するとともに、新たな研究成果として、近年におけるコンテナクレーンの耐震性向上に関する報告、並びに岸壁とコンテナクレーンの地震時相互作用を考慮した新しい設計法の提案を行う。

2. 実験による動的相互作用と脱輪現象の把握

コンテナ岸壁の構造形式には重力式・矢板式・栈橋式

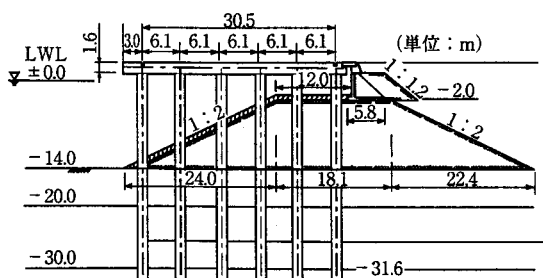


図-1 直杭式栈橋

などがあるが、中でも栈橋式岸壁は、コンテナクレーンの固有周期が栈橋のそれと同程度であるため、他の構造形式に比べて顕著な相互作用があるものと考えられる。

2.1 栈橋の概要

一般的な栈橋式岸壁の断面図を図-1に示す。複数本の鋼管杭によって栈橋上部工が支えられている構造である。主に上部工は鉄筋コンクリート製で、鋼管杭と上部工は剛結されている。標準的な上部工重量は、1ブロック当たり約17,500kNであり、固有周期は0.4秒から0.7秒のものが多い⁴⁾。

2.2 コンテナクレーンの概要

一般的なコンテナクレーンを図-2に示す。脚スパン30m程度のコンテナ専用船に対応するもので、一般的にスーパーガントリークレーンと呼ばれている。クレーンの重量は約10,000kNで、固有周期は2.0秒程度である⁵⁾。

2.3 模型振動実験について

前述したような一般的な栈橋とコンテナクレーンの動的相互作用の影響を検討するため、1/15模型を作製し、三次元振動台を使用した模型振動実験を行った。実験模型と振動台の全景を写真-1に示す。両者の動的相互作用を把握するために、主に次の3種類の実験を行った。

- ① 栈橋単体加振実験
- ② コンテナクレーン単体加振実験
- ③ 両者の連成実験

また、動的相互作用に関する実験と並行して、大地震時のコンテナクレーンの特徴的な被害形態である脱輪現象を把握する目的から、クレーン模型が脱輪するまで入

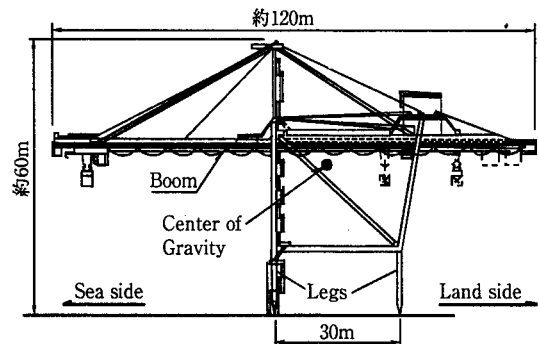


図-2 コンテナクレーン

*SUGANO Takahiro 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造振動研究室長, 博士(工学) | 横須賀市長瀬3-1-1
 **YAMAMOTO Syunsuke ㈱日本港湾コンサルタント 技術開発部, 博士(工学) | 東京都品川区西五反田8-3-6

力加速度を段階的に大きくする加振実験も行った。各実験に対する入力地震波には、港湾施設の設計で一般的に使用される1968年十勝沖地震の八戸波、1978年宮城県沖地震の大船渡波、1995年兵庫県南部地震のポートアイランド地表波(PI波)の時間軸を、相似則に合わせ $\sqrt{1/15}$ に短縮した波形を使用した。

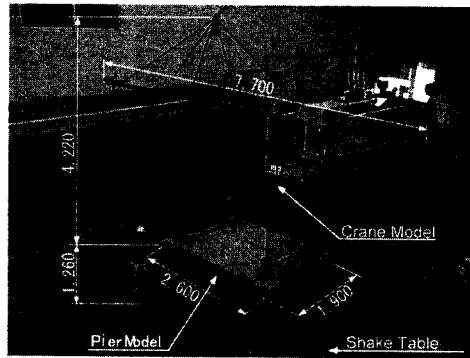


写真-1 実験模型と振動台の全景 (単位: mm)

2.4 実験により明らかになったこと

栈橋・クレーン連成模型の実験は、各単体模型の実験で用いたものと同じ入力地震波を用いて、栈橋上部工の応答加速度、応答変位、杭頭の発生曲げモーメント、クレーン重心位置の応答加速度、脚部の発生曲げモーメントを計測した。また、得られた結果と各単体模型の結果の比較・検討を行った。その結果、連成模型における栈橋応答およびクレーン応答は、ほとんどのケースにおいて単体模型の応答とは異なることが判明した。これらの単体模型と連成模型の応答の差異は、単体模型と連成模型における固有周期の違いに起因している。地震時には、栈橋とクレーンの間に動的相互作用があり、共振点に変化することにより応答が変化するものと考えられる。

また、実験からコンテナクレーンは、おおむね図-3に示すようなプロセスを経て脱輪することがわかった。まず、(a)海側方向に働く加速度により栈橋上部工とクレーンの上部構造が海側に変位する。(b)変位が最大になると陸側脚が浮上がり海側に傾く。(c)海側脚は荷重負担が大きくなり脚に曲げ変形が発生する。(d)陸側脚はレールから海側に離れた位置に着地・脱輪する。

3. 数値シミュレーション解析

コンテナクレーンと栈橋の動的相互作用や、コンテナクレーンの地震時における脚の浮上がり現象などに対する検討を行う場合、今回行ったような模型振動実験は非常に有効な手段である。しかしながら、実際に設計・検討を行う際、そのつど実験を行うことは経済的・時間的に困難である。そのため、設計では数値解析を行うことが一般的であり、実現象をよくシミュレートできる解析モデル・手法が必要となる。そのため、合理的な数値解析手法を提案し、実験結果との比較検討から解析の妥当性を検証した。簡便な方法として、①栈橋式岸壁およびコンテナクレーンをバネと質点で表現して質点の地震時応答を検討する方法(簡易モデル解析)、コンテナクレーンの脚の浮上がり現象を伴う場合の解析方法として、②3次元有限要素モデルによる非線形過渡応答解析(詳細モデル解析)の提案を行った。

3.1 簡易モデル解析

図-4に簡易モデルの概念図を示す。図に示すとおり

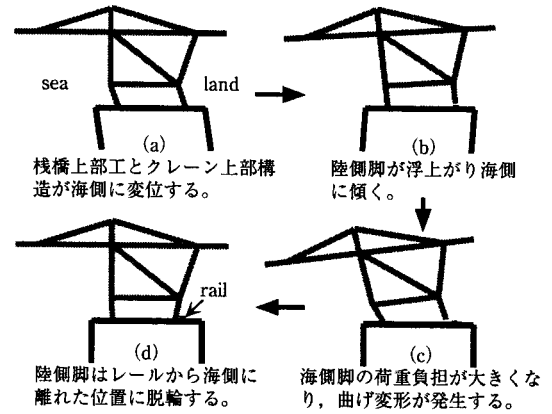


図-3 クレーン脱輪のプロセス

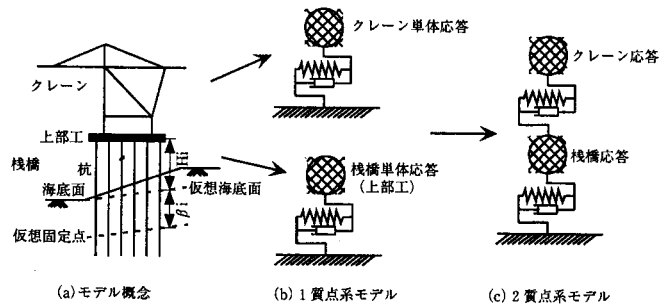


図-4 簡易モデルの概念図

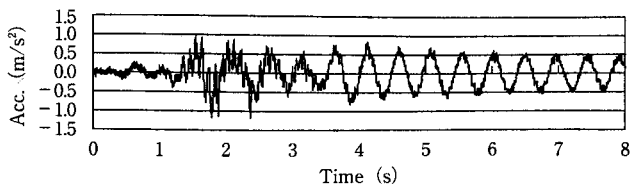
コンテナクレーンおよび栈橋式岸壁を、それぞれバネ、ダッシュポット、質点で簡便に表現する解析モデルである。入力地震波は、栈橋モデル下端に設けた仮想固定点に入力する。ここで仮想固定点とは、港湾の栈橋式岸壁の設計に一般に用いられる修正震度法において、1質点系のモデル検討を行うときに使用されるもので⁶⁾、栈橋応答を比較的精度よく表現できる。また、地震波の入力方向は、水平方向1方向である。したがって、実験値との比較を行う場合には、振動台上で計測されたクレーン横行方向の加速度(水平成分)を入力することとした。

簡易モデル解析では質点同士は剛結されているため、クレーン脚の浮上がりや滑りを表現することはできない。しかしながら、徐々にクレーンを傾ける静的実験において、クレーンが脱輪したときの重力加速度(水平成分)と簡易モデル計算による応答加速度を比較することにより、脱輪の有無を検討することが可能となる。連成模型の加振実験における(入力:八戸波)クレーンの応答加速度を、簡易モデル解析結果と比較したものを図-5に示す。同図より、実験結果の高周波成分を除けば、両者ともよく一致していることがわかる。

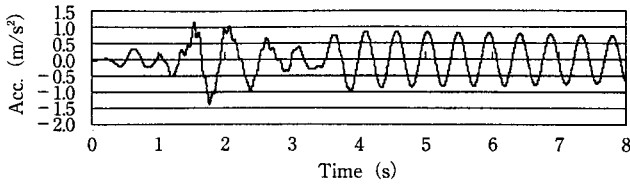
各モデルの実験結果と簡易モデル解析の比較から、簡易モデル解析は、栈橋上のコンテナクレーンの応答をおおむね説明することができ、設計等の実務に対して動的相互作用を考慮した概略検討に使用できるものと考えられる。

3.2 詳細モデル解析

簡易モデル計算では、脚とレールの滑りや脚の浮上がりといった非線形現象をシミュレートすることはできない。そこで、コンテナクレーンの脚の浮上がり現象を表



(a) 連成模型における実験結果



(b) 2質点系モデルによる解析結果

図-5 クレーン応答加速度波形の比較 (八戸波入力)

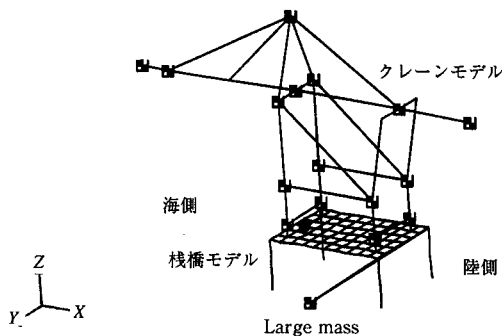


図-6 FEM解析モデル

現すべく、3次元の有限要素法モデルを用いた非線形過渡応答解析(図-6)を実施した。

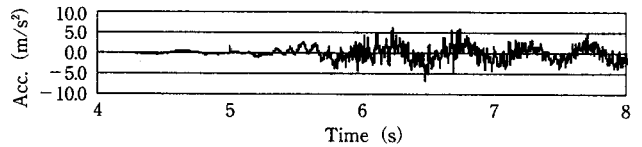
解析モデルは主に梁要素によりモデル化を行い、付加的な質量は集中質量要素によりモデル化した。脚の浮上がりや滑りといった現象を表現するために、脚下端部にGAP要素⁷⁾を使用した。

各種の実験により脱輪現象を起こしたケースについて詳細解析と比較を行った結果、モデルの応答をよく表現できていることがわかった。栈橋上のコンテナクレーン重心位置付近の加速度応答について、解析結果と実験結果を比較したものを図-7に示す。脱輪現象を発生させるため、入力波は八戸波の加速度絶対値を3倍に拡大した波形を使用している。波形形状・応答値ともよい一致が見られ、(c)に示した解析による脚の浮上がりもよく表現できていることがわかる。このように、クレーンの脱輪現象を伴う場合でも、今回行ったような詳細解析を用いて検討することにより、シミュレートすることができる。

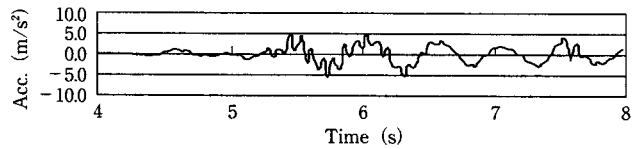
4. コンテナクレーンの耐震性向上

コンテナ埠頭施設全体を耐震強化施設と考えた場合、コンテナクレーンの脱輪による影響は、地震後の即時復旧という観点から好ましくなく、経済的・社会的なダメージを与える原因となる。コンテナクレーンの耐震性向上の手法として以下の3手法があげられる。

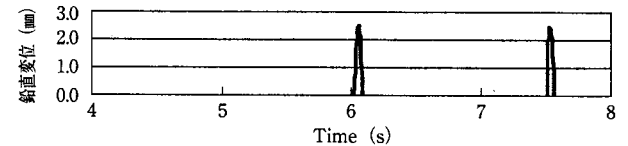
- ①剛構造設計法 (剛性補強型)
- ②制振設計法 (地震エネルギー吸収型)
- ③免震設計法 (地震エネルギー遮断型)



(a) 実験結果



(b) 解析結果



(c) 陸側のクレーン脚における鉛直変位 (解析結果)

図-7 クレーンの時刻歴応答比較 (加速度, 脚変位)

また、耐震性向上と合わせて、維持管理が容易であること、岸壁への負荷が小さいこと、極大地震時に損傷が生じた場合に機能回復が容易であることが求められる。

①の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、クレーン下部に重量を付加することにより重心位置を下げて、脚の浮上がりなどを防止したりするものである。このため、通常のコンテナクレーンの重量が9,000~10,000kN程度であるのに対して、設計震度を0.27とした場合には15,000~16,000kN程度の重量となることが、試設計で確認されている。

②の制振設計法は、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たりして、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、10,000kN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、相当量の重量を付加する必要がある。クレーン重量の増加は免れない。また、粘性ダンパやアクチュエータなどの減衰機器は、頻繁な維持・管理が不可欠である。

③の免震設計法は、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。この手法は、①②の手法と異なり、クレーン重量の増加も少なく、維持管理も容易である。したがって、免震設計法が最も合理的であると判断した。

そこで、免震効果を検証するために、コンテナクレーン(1/15模型)の各脚下端部に摩擦型免震装置(高減衰ゴム)を取付けた免震コンテナクレーンを作製し、加振実験を行った。また、得られた結果を免震装置が作動していない場合の結果と比較した。免震装置を設置した車輪部を写真-2に示す。

免震非作動と免震作動状態の模型に対して、正弦波を

用いた実験ケースの結果を図-8に示す。免震非作動のクレーンの実験は、クレーン脚が浮上がる時点で終了した。免震非作動の場合には、入力加速度の最大値が3.0 m/s²のときにクレーン脚の浮上がりが生じている。これに対して免震作動のクレーンの実験では、クレーンの脱輪は確認されなかった。さらに応答加速度は、免震非作動のクレーンに対して免震作動クレーンの応答は約50%となっており、免震装置がその効果を発揮していることが実証された。また、コンテナクレーンの免震化に関する一連の実験から、免震装置によりレールに作用する鉛直力や水平力が、最大で約50%軽減されることが確認されている⁸⁾。

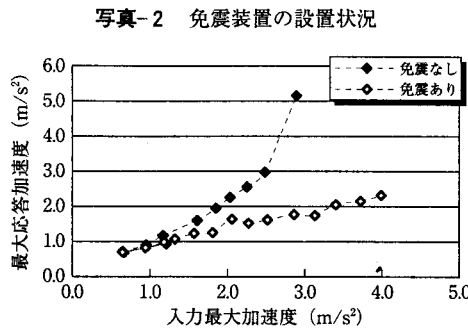
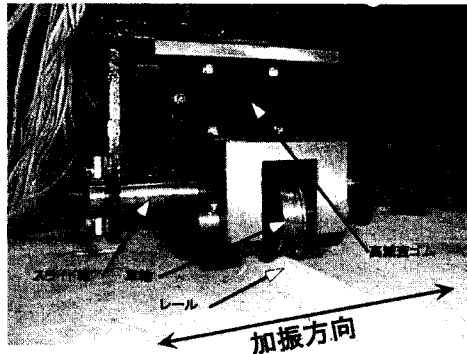


図-8 免震装置による免震効果

さらに、1/30の前方斜杭式棧橋（土留め一体型）模型による免震・非免震クレーンの振動実験結果からも、杭へ作用する軸力および曲げモーメントが50%以下になることが確認⁹⁾されている。したがって、コンテナクレーンの免震化は、コンテナクレーン自体に作用する応答加速度・断面力などを軽減するだけでなく、クレーンが上載する岸壁に作用する荷重の軽減を可能にし、施設全体の耐震性の向上に役立つものと考えられる。

5. 新しい設計検討フロー

本稿で先に紹介した、棧橋とコンテナクレーンの動的相互作用を考慮した検討方法、コンテナクレーンの免震化等を加味した設計検討をフローに示すと、図-9のようになる。このような検討を行うことにより、コンテナクレーンの動的相互作用を考慮した合理的な設計が可能になるものと考えられる。

6. おわりに

機械技術者と土木技術者、あるいは厚生労働省と国土交通省といった異なった設計体系という障壁はあるが、極大地震時の港湾の果たす役割が大きいことから、これらの障壁は徐々に取払われつつある。本稿で紹介したように、棧橋とコンテナクレーンの動的相互作用を考慮した検討方法や、コンテナクレーンの免震化技術による設計プロセスが確立されつつあり、近年では実用化に至っているケースもある。東京港大井埠頭では、現在6機の免震コンテナクレーンが稼働している。コンテナクレーンの免震化による岸壁構造への荷重低減についても、実設計に積極的に生かすべく鋭意検討中である。

【参考文献】

- 1) 社日本港湾協会：数字でみる港湾 1999年版, pp.13~15, 1999.
- 2) 稲富隆昌他：1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報

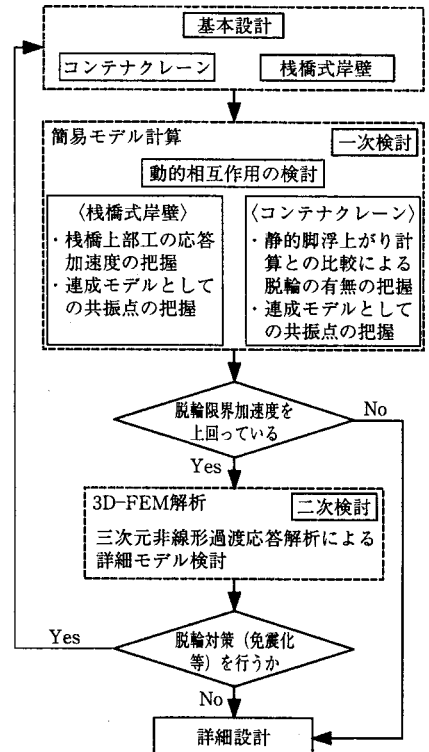


図-9 設計検討フロー



写真-3 免震式コンテナクレーン

- 告, 港湾技研資料, No857, pp.1618~1629, 1997.
- 3) 社日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 平成11年4月.
- 4) 横田弘, 竹鼻直人, 南兼一郎, 川端規之：鋼管杭式横棧橋の耐震設計法に関する考察, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 1613~1622, 1996.
- 5) 山本俊介, 江頭隆喜, 宮田正史, 高原裕一, 井福周介：棧橋式岸壁上のコンテナクレーン常時微動観測, 第54回土木学会年次学術講演論文集, pp. 466~467, 1999. 9.
- 6) 社日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 738~750, 平成11年4月.
- 7) 日本エムエスシー(株)：MSC/NASTRAN ユーザーガイド 基礎動解析 V68, pp. 6-2~6-3, 1994.
- 8) 山本俊介, 佐藤栄治, 中山義紀, 菅野高弘, 田邊俊郎：港湾荷役機械の免震化に関する模型振動実験, 土木学会論文集, No 693, VI-53, pp. 131~144, 2001.12.
- 9) 菅野高弘, 塩崎禎郎, 池上正春：前方斜杭式棧橋（土留め一体構造）と免震コンテナクレーンの地震時挙動に関する模型振動実験, 土と基礎, Vol. 51, No 3, Ser542, pp. 22~24, 地盤工学会, 2003.