

## 第1章 コンテナクレーンの耐震性に関する研究

### 第1節 研究の背景と目的

従来、外国貿易におけるコンテナ船の本船航路が寄港するような港湾で利用される、コンテナクレーン等の大型の港湾荷役機械の設計は、「クレーン構造規格（平成7年労働省告示第134号）」<sup>1)</sup>に基づいて行われており、その耐震設計は、水平震度0.2に相当する地震力を想定して行われてきた。しかし、一方で風荷重に対する検討は、暴風時の場合風速55 m/s相当の荷重に対して行われている。この場合各ケースによって異なるものの、風荷重を設計震度に換算すると一般的には0.2以上に相当すると言われており、通常これまでは地震時の検討で設計が決定されることはきわめて稀であった。また、(社)日本クレーン協会からは、「クレーン耐震設計指針((社)日本クレーン協会規格;平成元年5月)」<sup>2)</sup>により、耐震設計の案が提案されているが、強制規格ではないことなどから、従来はほとんど用いられてこなかった。このような状況から、コンテナクレーンの設計においては、これまで耐震設計があまり重要視されることはなかった。

一方、荷役機械の設置される港湾構造物(ケーソン、棧橋、矢板式等)の設計においては、荷役機械の取り扱い、輪荷重のみが設計条件として静的に与えられることとなっており、荷役機械の動的な特性は考慮されてこなかった。

平成7年1月の兵庫県南部地震では、神戸港の港湾構造物及び荷役機械は大きな被害を受け、コンテナ埠頭に設置されていた55基のコンテナクレーンは全て被災した<sup>3)</sup>。また、港湾施設も9割以上が大きな被害を受け、わが国の物流や国民生活に大きな影響を与えた。その後この被災を教訓として、大規模地震直後においてもターミナルが十分な機能を発揮する事を目的として、国内の基幹的な国際コンテナターミナルの耐震性を強化する計画が進められており、特に、係留施設の耐震性の強化、背後ヤードの液状化対策が重点的に進められている。今後耐

震化される港湾構造物（耐震強化施設）については、平成11年4月に改正された「港湾の施設の技術上の基準」<sup>4)</sup>により、土木学会のレベル2地震動を設計対象地震動として耐震性を検討することとなり、条件によっては従来のコンテナクレーンの設計震度0.2を上回る場合が多くなると想定される。なお、港湾施設の耐震設計におけるレベル1地震動とは、施設の供用期間中に発生する確率の高い地震動をいい、再現期間がおおむね75年の地震動とされている。また、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である。また、これまでは震度法により設計されてきたが、栈橋形式の場合には、基本設計は許容応力度法によるものの、その結果に対して変形等の照査を行うこととしており、動的な解析手法による検討が導入された<sup>5)</sup>。

このような港湾構造物の耐震設計法の変更に対して、地震直後においてもコンテナターミナル全体が機能を維持している必要があるという観点に立ち、コンテナクレーンにおいても港湾構造物と同水準の耐震性を確保しようとする、クレーンの設計においてもレベル2地震動に対する動的な検討が必要になる。兵庫県南部地震では、激しい地震動によって、クレーンの脚が浮き上がる、いわゆるロッキング現象が起こったことが指摘されており<sup>6)</sup>、レベル2地震動を設計対象地震動とする場合には、このような従来の設計法では想定していなかった挙動についても検討する必要が生じてきた。

以上のような背景から、本研究は、大規模地震時におけるコンテナクレーンの安定性について検討を行い、その設計法の確立に資することを目的とするものである。

## 第2節 過去の研究の概要

大型の港湾荷役機械の地震時の挙動について初めて取り扱ったのは、1973年の稲富らの研究<sup>7)</sup>である。稲富らは急速に建設が進みつつあったコンテナ専用埠頭において、栈橋の設計上の問題として、コンテナクレーンを上載荷重として捉え、その地震時の振動性状を明らかにする必要があると考え、栈橋の建設段階に応じて起震機を用いて加振実験を行うとともに、栈橋・コンテナクレーンの簡単なモデルを考案して地震応答解析を行った。その結果、クレーンと地盤や基礎となる栈橋との動的相互作用の検討が必要であること、及びコンテナクレーンの振動性状の解明が重要であると述べている。また、その中でコンテナクレーンを解析的に取り扱うことが可能であることを提言し、簡単な骨組構造のモデルを使用してクレーンの振動モードの検討等を行なった。しかし、部材に作用する力や加速度等は取り扱われず、また脚とレールの接点はピン構造で取り扱っており、脚の浮き上がり等の大規模地震を想定したものとはなっていなかった。

その後、しばらくの間コンテナクレーンの耐震性に関する研究は発表されていないが、1978年宮城県沖地震や1983年日本海中部地震を受けて、各クレーンメーカーの協力の下に（社）港湾荷役機械化協会がコンテナクレーンの耐震性に関する調査研究を進め、1986年にその成果の一部が公表されている<sup>8)</sup>。この中で坂井らは、スパン30 m級の神戸港のコンテナクレーンを対象として地震応答解析を実施した。また坂井らは、コンテナクレーンを3次元梁要素とトラス要素で構成したモデル（図-1.2.1参照）を用いて、コンテナクレーン単体での解析と、二次元平面要素による基礎・地盤との連成解析を実施した。入力地震波としてはEl Centro NS波及び八戸NS波を用い、基盤における最大加速度を65 Galと設定して解析に用いた。その結果、坂井らはコンテナクレーンの部材の最大応答値はいずれも水平震度0.2に対する静的応力解析の結果と較べて1/4～1/2となり、また、脚部の反力も引張力とならないことから、クレーン

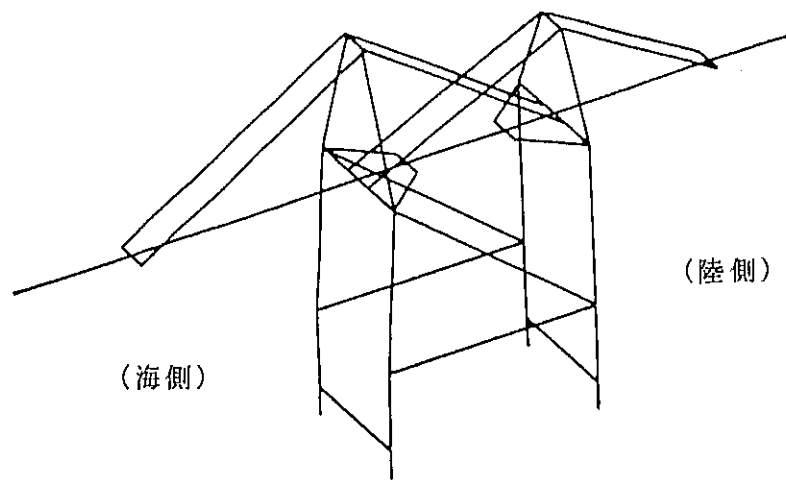


図-1. 2. 1 坂井らのコンテナクレーン解析モデル<sup>8)</sup>

の脚の浮き上がりを生じることはないと結論づけた。

また田中・稲富ら<sup>9), 10)</sup>は、平成7年(1995年)兵庫県南部地震の発生後、現地調査を行い、岸壁とコンテナクレーンの連成に着目し、ケーソン式岸壁とコンテナクレーンを一体化したモデルで2次元 FEM 連成振動解析プログラム (FLUSH) を用いて解析を行っている。田中・稲富らの解析では、入力地震動として実際に現地での観測波を用い、地盤とケーソン岸壁、コンテナクレーンをモデル化し、コンテナクレーンの脚とケーソン岸壁は、ヒンジ結合される条件を設定した。この研究では、ケーソン岸壁の変状に伴うコンテナクレーンの脚部の強制変位の影響が考慮できる利点がある。一方、ロッキングについては、脚の浮き上がりという現象は直接再現できないが、田中・稲富らはクレーン脚基部における引張軸力時刻歴とクレーン自重による圧縮反力を検討することにより、ロッキングを開始する時刻やその時刻までのクレーンの応答を検討した。また、岸壁上にコンテナクレーンが設置されている場合と、岸壁のみの場合の岸壁の応答加速度波形を比較することにより、連成の影響を検討し、設定したようなケーソン岸壁の場合には、両者の剛性や重量の差異により影響は少ないと結論づけている。

3次元 FEM を用いてロッキング現象を初めて本格的に取り扱ったのは、柏崎・金山<sup>11), 12)</sup>である。また、同時に 1/8 スケールの模型実験も実施している。その中で、柏崎・金山は、脚部の変位及び各部の応答加速度を検討することにより、脚下端部に gap 要素という特殊な要素を用いれば、脚の浮き上がりのような大規模地震時の挙動についても非線形過渡応答有限要素解析により定量的に解析することができるという研究成果を示した。また、脚が浮き上がる場合のクレーンの破壊モードを検討し、大規模地震時には脚部の変形が破損の1形態であることを明らかにした。この研究は、脚の浮き上がりという大規模地震時特有の現象を始めて取り扱ったという意味で大きな意義を持つ研究であったと言える。しかし、現象の再現に止まっており、コンテナクレーンの部材の挙動やモデル化までは至っていない。

一方、国外での関連する研究はほとんど見うけられず、1997年に Dinevski and Oblak<sup>13)</sup>が、風荷重とコンテナの荷役に伴うコンテナクレーンの部材の挙動について発表した例があるが、耐震性について、特に脚の浮き上がりを伴うような大規模地震に対する研究成果は見あたらない。これは、もともとコンテナクレーンの設計が風荷重を中心になされてきたこと、及び大規模地震の被害を受ける国々が限られること、さらには地震の発生によりコンテナクレーンが大きな被害を受けたことにより、社会生活や国際物流にまで影響を及ぼしたのは、平成7年(1995年)兵庫県南部地震が唯一最初の例であったこと等に起因するものと推察される。従って、脚の浮き上がり等大規模地震時のコンテナクレーンの挙動についての研究は、日本国内においてのみ進められているのが現状である。

### 第3節 本論文の概要

現在、コンテナクレーンの地震時の安定性に関する耐震設計は、一律に設計水平震度0.2を用いて行われている。また、阪神大震災以前には、コンテナクレーンが設置される係留施設の設計においては、コンテナクレーンは設計条件としてその水平震度より求めた地震時の一定値の輪荷重として取り扱われてきた。どちらの設計においても、その動的な影響や、非線形性の強い挙動については考慮されてこなかった。しかし、過去の大規模地震時における、コンテナクレーン等の軌条走行式荷役機械の現実の被災例を見ると、激しい地震動に伴う脚の浮き上がりや、基礎地盤の液状化に伴う基礎とレールの変位に伴う被災等これまでの設計では対応できない現象が生じている。また、近年では阪神淡路大震災を契機として、係留施設の耐震設計においてもレベル2地震動の採用や動的解析による照査法の導入など、大きな変化が生じている。コンテナクレーンの耐震設計や係留施設の耐震設計上におけるその取り扱いにおいても、このような変化に対応することが求められている。このような状況に鑑みると、コンテナクレーン等の耐震設計においても、脚の浮き上がりを中心にした大規模地震時の挙動を解明し、レベル2地震動に対応した設計法の検討が必要であると考えられる。

本研究の基本的な考え方は、大規模地震時の脚の浮き上がり後は、浮き上がり前と異なり、コンテナクレーンの挙動が強い非線形性を示すことに着目し、その脚の浮き上がり現象をコンテナクレーンにある一定以上の大きな加速度が生じた際に発生する現象であると捉え、その判定を行うことにより、新しい耐震設計法を検討しようとするものである。そのためにまず、コンテナクレーンの地震時の挙動を把握する目的で静的な方法と動的な方法とで模型実験を行っている。その結果、同一の条件下では脚の浮き上がりがある一定の加速度の作用下で発生することを示し、またその加速度レベルは、コンテナクレーンの静的な安定条件から算定されることも確認した。また、脚が浮き上がる前の挙動は、脚の固定条件に

よらずほぼ同一であることを示した。

一方、模型実験の結果を踏まえ、脚の浮き上がりの判定方法として1質点系モデルによる簡易モデルを提案し、この解析手法が設計上有効な評価手法となることを示した。また、FEMによる非線形過渡応答解析も良好な再現性を有していることを確認した。これらの結果から、コンテナクレーンの耐震設計においては、まず静的な安定条件から浮き上がり時の最大加速度を求め、設計対象地震動に対して、コンテナクレーンの脚の浮き上がりを生じるか否かを、簡易モデルで1次判定する。浮き上がりを生じる可能性が低い場合には通常の設計を実施し、浮き上がる可能性が高い場合にはFEMによってさらに詳細な検討を行うこととする設計手順を提案した。また、検討の結果、対象とするコンテナクレーン及び設計地震動では脚の浮き上がる可能性が高いと判定された場合には、脚の浮き上がりを防止する対策としての免震装置を提案し、その効果を検証した。

本論文は、以下の7章で構成されている。

第1章 「コンテナクレーンの耐震性に関する研究」 では、阪神淡路大震災を契機とした港湾構造物の耐震設計等の状況の変化に対して、現在までのコンテナクレーンの耐震性に関する問題点等に触れ、これまで取り組まれてきた過去の研究の成果を紹介した。その上で本研究の背景と目的について述べ、本論文の概要を示している。

第2章 「コンテナクレーン設計上の課題」 では、コンテナクレーンの諸元について統計的に概説し、現在主流となっているコンテナクレーンの概観について述べた後、過去の地震におけるコンテナクレーンや軌条走行式荷役機械の被災状況をとりまとめた。その上で、コンテナクレーンの持つ独特の構造上の特徴について考察し、コンテナクレーン及び係留施設の耐震設計における課題について明らかにし、その結果、本論文で対象とするのは大規模地震時の脚の浮き上がりに伴う挙動を解明すること、及びそれに対する耐震設計法の提案であるとした。



第3章 「模型実験」では、本論文の中でのコンテナクレーンの地震時の挙動を解明する上で、主たる手法として模型実験を選択し、その方法等について述べた。実験では、これまでの主要な解析手法であった脚を固定した条件での解析手法は、脚の浮き上がりを再現することは不可能であるが、脚の浮き上がりまでは脚が自由な条件での結果とほぼ一致することを明らかにした。また、静的な実験と動的な実験との比較検討により、脚の浮き上がりに必要な水平荷重は静的に評価することが可能であることを示した。また、一連の動的な実験から、大規模地震時のコンテナクレーンの挙動を明らかにしている。

第4章 「数値解析による検討」では、設計対象地震動に対してコンテナクレーンが脚の浮き上がりを生じるかどうかの判定手法として、コンテナクレーンを1質点系モデルでモデル化し、その妥当性について検証した。検証の結果、設計実務上1質点系モデルにより、脚の浮き上がりがある程度判定できることを示し、FEM解析等の複雑な解析を用いなくても1次的な判定ができることを示した。また、構造解析で頻繁に用いられるMSC/NASTRANを取り上げ、地震時のコンテナクレーンの挙動の再現性について、検証した。その結果、適切なパラメータを選定すればコンテナクレーンの挙動の解析に十分有効であることを確認した。

第5章 「コンテナクレーンの新耐震設計法について」では、第3章及び第4章の模型実験、簡易モデル及びFEMモデルによる解析の結果を踏まえ、考察を加えた。設計対象地震動に対して、脚の浮き上がりの発生の有無は静的な判定条件から推定しうることを、その際コンテナクレーンに作用する最大加速度は、通常FEMによる非線形過渡応答解析により算定が可能であることを述べた。但し、FEMによる解析は設計者にとって負担が大きいことから、1質点系のモデルによる解析が実務上有効で簡易的な手法であることも明らかにした。さらに、これらのモデルを用いて、脚の浮き上がりを考慮したコンテナクレーンの設計手順を提案している。

第6章 「免震コンテナクレーンの効果」では、レベル2地震動に対する脚の

浮き上がりやその後の挙動については、クレーン本体や基礎に大きな影響を及ぼす可能性がありながら、依然として未解明な部分も多いことから、脚の浮き上がりそのものを防止する手法としての免震機構を備えた耐震コンテナクレーンを提案し、その有効性について確認した。

最後に、第7章 「結論」 では、本研究において得られた成果を総括し、さらに、今後に残された課題や将来への展望について言及している。

## 【第1章：参考文献】

- 1) (社) 日本クレーン協会：新クレーン構造規格・新移動式クレーン構造規格の解説、平成8年2月
- 1) (社) 日本クレーン協会：クレーン耐震設計指針、「クレーン」第28巻3号、1990.3
- 2) 港湾施設被害検討委員会編：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察、港湾技研資料 No.813、1995.9
- 3) 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) 参考文献4)
- 5) 参考文献3)
- 7) 稲富隆昌、林聡、山下生比古：大型荷役機械を上載する栈橋の振動性状、港湾技術研究所報告、Vol.12 No.2、1973.6
- 8) 坂井藤一、桑田文夫、玉木利祐：神戸港六甲アイランドコンテナクレーンの地震応答解析と実働荷重計測、港湾荷役 Vol.31 No.1、1986.1
- 9) 田中祐人、稲富隆昌、飯塚栄寿：兵庫県南部地震によるコンテナ岸壁とガントリークレーンの地震応答特性に関する基礎的研究、構造工学論文集 Vol.42A、1996.3
- 10) 田中祐人、稲富隆昌、飯塚栄寿：兵庫県南部地震によるコンテナ岸壁とガントリークレーンの地震応答解析、第23回地震工学研究発表会講演概要集、1995.7
- 11) 柏崎昭宏、金山維史；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、日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集 (Vol.B)、1996.8
- 12) 金山維史、柏崎昭宏：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(第2報)、日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集 (Vol.A)、1997.7

1 3 ) Dejan Dinevski, Maks Oblak : Experimental and Numerical Dynamic Analysis of a Container Crane Structure, Stahlbau, 1997.2