

1. はじめに

平成18年5月の港湾法改正において、港湾の施設の技術上の基準の性能規定化が図られ、これを受けて『港湾の施設の技術上の基準を定める省令(平成19年3月26日国土交通省令第15号)』及び『港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示(平成19年3月28日国土交通省告示第395号)』の改正が行われ、平成19年4月1日より新しい技術基準(以下、技術基準と呼ぶ)が施行された¹⁾。この中で、臨海部における地震時の港湾機能の確保や防災拠点形成機能の強化等の観点から、技術基準の対象施設として、廃棄物埋立護岸、海浜、緑地及び広場及び荷さばき施設のうち石油荷役機械以外の機械が新たに追加された。

耐震強化施設に設置される荷役機械の要求性能については、省令及び告示において「レベル2地震動等の作用による損傷等が、軽微な修復による当該荷役機械の機能の回復に影響を及ぼさないこと。」及び「耐震強化施設に設置される荷役機械の性能規定にあつては、主たる作用がレベル2地震動である偶発状態に対して、作用による損傷の程度が限界値以下であることとする。」と規定され、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」²⁾の解説では、該当する施設を「特定(幹線貨物輸送対応)」と位置づけ、「レベル2地震動の作用後、短期間のうちに船舶の利用及び幹線貨物の荷役を行うことができる施設」として規定している。このように、耐震強化施設に設置される荷役機械については、レベル2地震動に対する具体的な対応策が求められることとなっている。なお、一般に耐震強化施設に設置される荷役機械は、橋形クレーンの一種で、コンテナ揚げ積み専用の特許つり具をもつ係留施設用クレーン(以下、コンテナクレーン)であり、本資料の検討対象はクレーン脚の海陸方向のスペンが30m程度の大型のコンテナクレーンとする。

以上に示したとおり、耐震強化施設のうち特定(幹線貨物輸送対応)の場合、係留施設の耐震性の確保とともにコンテナクレーンの耐震性も同時に確保することが必要とされる。また、基準改正にともない、設計入力地震動の考え方が変更となり、サイト特性等を考慮した長周期・長継続時間のレベル2地震動²⁾に対するコンテナクレーンの耐震性評価が必要となっている。

しかしながら、現状の設計実務では、以下に示すような課題が顕在化している。

- ①コンテナクレーンに関する各種の設計情報の不足
- ②新しいレベル2地震動に対してコンテナクレーンに

要求される耐震性能(性能規定)の明確化及び照査手法・項目等の標準化

本研究では、上記①②の課題のうち、課題①については、係留施設の設計初期段階においてクレーン側の基本諸元の仮設定を容易にできるように、コンテナクレーンの自重などの基本諸元の整理を行った(第3章)。また、課題②については、コンテナクレーンの耐震設計に関する課題や、係留施設とコンテナクレーンの双方の耐震性を確保するための標準的な耐震性能照査の在り方を検討した上で(第2章)、既に提示されているコンテナクレーンの重心位置の加速度応答を評価するための簡易手法(1質点モデル)の長周期・長継続時間の地震動に対する適用性について模型実験及び解析による検証を行った(第4章)。さらに、設計入力地震動の変更に伴う影響を把握するために、工学的基盤面におけるレベル2地震動を対象として、既往の代表的な設計入力地震動と全国の代表的な港湾で検討されている地震動を用いて、応答スペクトルによる評価を行い、免震装置等に求められる変形量がどの程度増加するかなどについて概略評価を行った(第5章)。本資料は、以上示した結果を(その1)として報告するものである。なお、残る課題(第7章)については別報にて引き続き報告する予定である。

2. レベル2地震動に対応したコンテナクレーンの耐震設計

2.1 用語説明

本節では、コンテナクレーンに関連する代表的な用語について、〔一般的事項〕、〔構造・形状・荷重等〕、〔設計法等〕、〔地震時挙動等〕、〔数値解析モデル〕、〔その他〕に分類し、説明する。また、図-2.1及び図-2.2に関連する図面を示す。

〔一般的事項〕

- コンテナクレーン：橋形クレーンの一種で、コンテナ揚げ積み専用の吊り具(スプレッド)を持つ、係留施設(岸壁)用クレーン。
- 耐震強化施設としてのコンテナクレーン：耐震強化岸壁に設置するために、耐震性を強化したコンテナクレーン。なお、コンテナクレーンの耐震性向上の手法としては、剛設計構造法(剛性補強型)、制振設計法(地震エネルギー吸収型)及び免震設計法(地震エネルギー遮断型)の3手法があげられるが、一般的には、免震設計法に基づく免震コンテナクレー

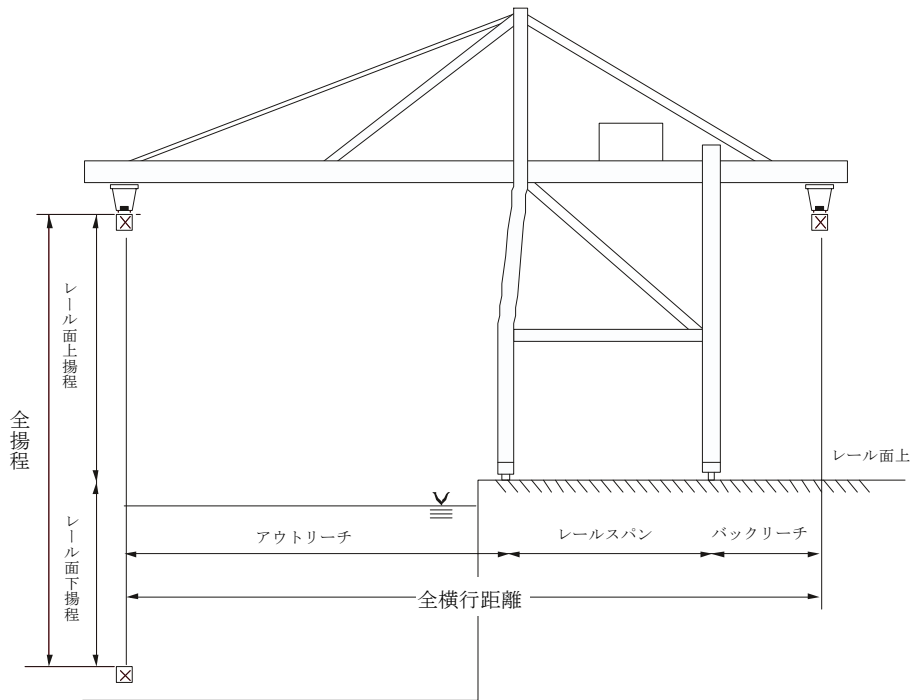


図-2.1 コンテナクレーンの主要諸元等

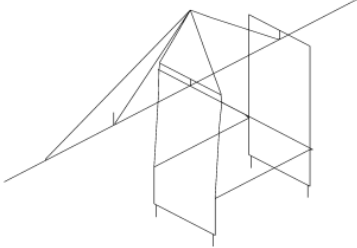
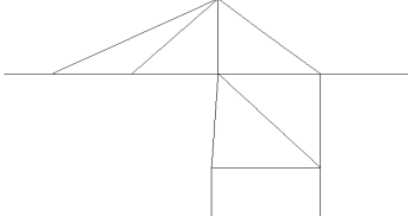
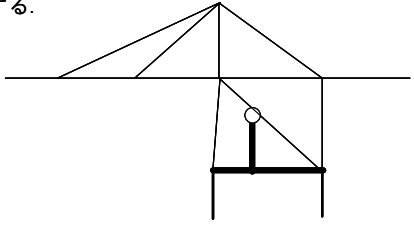
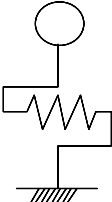
3次元骨組モデル	2次元骨組モデル
<ul style="list-style-type: none"> 各構造部材を3次元骨組でモデル化。 各梁要素は、各構造部材の断面諸元を反映。 重りは節点集中質量でモデル化。 	<ul style="list-style-type: none"> 3次元骨組モデルを2次元に置き換え。 ブームを支えるアッパーブームは水平・鉛直方向バネと回転バネに置換。 走行装置上部のシルブームは回転バネに置換。 
ラーメンモデル	1質点モデル
<ul style="list-style-type: none"> 重心位置に節点集中質量を配置。 脚部は無質量の弾性梁とし、剛性はクレーンの固有周期が一致するように設定。 水平梁と節点集中質量を結ぶ梁は無質量の剛梁とする。 	<ul style="list-style-type: none"> クレーン全体を1つの質点でモデル化。 バネ定数は、クレーンの固有周期から算定。 

図-2.2 コンテナクレーンの数値解析モデルの分類³⁾

- 免震コンテナクレーン：耐震性を強化するために、免震機構を付加したコンテナクレーン。

- 免震装置（機構）：一般的には、構造物と基礎の間に設置される積層ゴム、ボールベアリングなどの剛性の低い装置（機構）のことをいい、地震力を構造

物に伝えないようにする装置（機構）。これにより、クレーンの脱輪もしくは脚の浮き上がりの防止、クレーン構造部材に発生する断面力・応力の低減を図ることができる。

- 剛脚：クレーン脚の上部に位置する水平桁と強固に接続（剛結）された脚。海側・陸側の両脚が剛脚構造の場合、剛脚クレーンと呼ばれる。
- 揺脚：クレーン脚の上部に位置する水平桁と移動可能に接続（ピン接合等）された脚。海側・陸側のいずれかの脚が揺脚構造の場合、揺脚クレーンと呼ばれる。
- 走行装置：クレーン本体を移動させる装置。コンテナクレーンの場合、脚の基部に設置される。
- レールクランプ：走行レールの頭部を掴み、または押し付けて、その摩擦力でクレーンの移動を防止する装置をいい、作業中に突風等によりクレーンが動かされるのを防止する。
- 逸走防止装置：クレーンが走行方向に逸走するのを防ぐための装置をいう。コンテナクレーンの場合、暴風時の風荷重に対して、クレーンが逸走あるいは転倒しないように固定装置が備えられている。

〔構造・形状・荷重等〕

- 横行方向：トロリを移動させる方向であり、コンテナクレーンの場合、岸壁法線（クレーンレール）と直交する方向。
- 走行方向：クレーンを移動させる方向であり、コンテナクレーンの場合、岸壁法線（クレーンレール）と同じ方向。
- ガーダ：トロリ等を支持する構造物を指し、コンテナクレーンの場合、横行方向の水平桁。
- ブーム：一般に、コンテナクレーンのガーダの海側方向へのカンチレバー（片持ち梁）部分のことを指す。荷役時にはブームを水平に降ろした状態、休止時には上げた状態を取ることができるクレーンが多い。
- トロリ：一般には、荷を吊ってクレーンガーダ上を移動する台車をいい、巻上装置を持ち、荷を水平に移動（横行）させる装置。
- アウトリーチ：海側レール中心と吊り具及び荷を最も海側へ横行させたときの到達地点との水平距離。
- バックリーチ：陸側レール中心と最も陸（ヤード）側へ吊り具及び荷を横行させたときの到達地点との水平距離。
- 全横行距離：横行可能な距離（アウトリーチ、レール

ルspan及びバックリーチの和）。

- レール面上揚程：海側レール面上と吊り具及び荷を最も巻き上げた時の到達地点との鉛直距離。
- レール面下揚程：海側レール面上と吊り具及び荷を最も巻き下げた時の到達地点との鉛直距離。
- 全揚程：レール面上揚程とレール面下揚程との和。
- レールspan：海側レール中心と陸側レール中心との間の距離。
- ホイルベース：走行方向のクレーン脚の中心間の水平距離。
- 車輪数：海側もしくは陸側のクレーン脚に設置されている車輪の総数。
- 車輪間隔：隣り合う車輪の中心間の距離。
- 吊り上げ荷重：吊り上げることができる最大荷重
- 定格荷重：吊り上げ荷重から吊り具の重量を除いた荷重。
- クレーン自重：定格荷重を含まないクレーン構造本体の重量。
- クレーン重量：吊り上げ荷重を含むクレーン全体の重量。
- 海側輪荷重：海側車輪にかかる荷重であり、一般に、作業時（荷役時）、休止時（暴風時）及び地震時の荷重に分類される。
- 陸側輪荷重：陸側車輪にかかる荷重であり、一般に、作業時（荷役時）、休止時（暴風時）及び地震時の荷重に分類される。
- 重心位置：コンテナクレーンの重心位置。

〔設計法等〕

- 許容応力度法：部材に発生する応力が許容応力度を超過しないように設計する手法であり、クレーン構造規格の規定に基づく方法。
- 震度法：地震動の作用による荷重を静的に作用させる耐震設計法。
- 水平震度：クレーンの構造部材を震度法により設計する場合の水平方向に作用させる震度。
- 修正震度法：クレーンの弾性域の振動特性等を考慮して水平震度を設定し、これを震度法に適用する耐震設計法。
- 動的解析に基づく方法：コンテナクレーンの耐震性能について、時刻歴地震応答解析などの動的解析により照査を行い、耐震設計を行う方法。

〔地震時挙動等〕

- 脚の浮き上がり：地震動等の作用により、クレーン

脚がレール面から浮き上がる現象をいう（ロッキング）。

- 脱輪：地震動等の作用により、車輪がレールから逸脱する現象をいう。なお、脚の浮き上がりにより車輪がレール面から離れた場合においても、車輪が逸脱しない場合は、脱輪とは呼ばない。
- 浮き上がり限界荷重（加速度）：脚の浮き上がりが発生する水平荷重（加速度）であり、重心位置に作用する静的な水平荷重（加速度）として定義される。
- 連成振動（動的相互作用）：クレーンと栈橋構造など、二つ以上の振動系の要素が結合されることによって、お互いに影響し合う振動。
- 固有周期：一般には、クレーンが横行方向もしくは走行方向に自由振動する際の周期。
- 減衰定数：クレーンが自由振動する際の減衰定数。
- レースパンの拡大：地震動等の作用により、海側レールと陸側レールのスパンが拡大する現象をいう。特に、重力式岸壁などにおいては、一般的には海側と陸側のレールが異なる基礎（構造）に設置されるため、地震時の岸壁法線の海側への変位にともない、レールスパンが拡大する傾向にある。なお、レールスパンの拡大による変位は、クレーン脚を海陸方向（横行方向）に離す方向の強制変位（股裂き変位）として作用することになる。
- クレーン脚の弾性限界変位：レールスパンの拡大によるクレーン脚への強制変位に対して、クレーンの各構造部材が弾性限界以内に収まるような、クレーン車輪位置のレールスパン方向の相対変位をいう。この変位を超過すると、クレーンの構造部材に塑性化が発生することになる。

〔数値解析モデル³⁾〕

- 3次元骨組みモデル：有限要素法（FEM）により、クレーンの各構造部材を梁としてモデル化した立体モデル。
- 2次元骨組みモデル：3次元骨組みモデルを2次元平面に投影したモデルである。
- ラーメンモデル：2次元骨組みモデルをさらに簡略化したモデルであり、重心位置に集中質量（質点）を配置し、海側脚と陸側脚を無質量の弾性梁、水平桁及び水平桁と節点集中質量を結ぶ部材を無質量の剛梁でモデル化した平面モデル。
- 1質点モデル：コンテナクレーン全体を1つの質点に置き換え、クレーンの固有周期と減衰を再現するバネとダッシュポットなどにより構成される簡易モ

デルである。質点の応答加速度により、クレーン重心位置の応答加速度を簡易的に評価できる。

2.2 コンテナクレーンの構造設計に関する関連法規

荷役機械に対する主な関連法規、指針には次のものがある。

- (a)クレーン等安全規則（昭和47年労働省令第34号）
- (b)クレーン構造規格（平成7年労働省告示第134号）
- (c)移動式クレーン構造規格（平成7年労働省告示第135号）
- (d)デリック構造規格（昭和37年労働省告示第55号）
- (e)クレーン製作指針⁴⁾
- (f)電気設備技術基準（昭和40年通商産業省令第61号）
- (g)航空法（昭和27年法律231号）
- (h)大気汚染防止法（昭和43年法律97号）

なお、上記の関連法規の中で、特にコンテナクレーンの構造設計（耐震設計を含む）に関係し、必ず遵守する必要があるものは、(a)及び(b)である。(a)のクレーン等安全規則は労働安全衛生法に基づいて定められ、クレーン等の安全性を確保するため、製造から設置、使用に至るまでを一貫して規定しているものである⁵⁾。(b)のクレーン構造規格は、労働安全衛生法に基づき、クレーンの構造部分、機械部分、ワイヤーロープ等について安全上の基準を定めているものである⁶⁾。なお、港湾用荷役機械の基礎的な情報については、港湾荷役機械要覧⁷⁾を参考にされたい。

2.3 近年のコンテナクレーンの地震被害の特徴⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾

本節では、近年のコンテナクレーンの地震被害として、1995年兵庫県南部地震の際の神戸港を例として、被災の特徴及び復旧状況について簡単に述べる（写真-2.1、図-2.3）。

兵庫県南部地震においては、神戸港のコンテナターミナルは甚大な被害を受け、全てのコンテナクレーンに被害が発生した。神戸港のコンテナターミナルは、ケーソン式岸壁により構成されているものが多く、ケーソンが地震動の作用により、海側へ傾きながら数メートル移動した。このため、コンテナ船の接岸・係留は不可能となり、かつ、コンテナクレーンが被災したことから、完全に荷役機能が失われた。

この地震によるコンテナクレーンの典型的な被災は、以下のとおりである。

- ・ケーソンの海側への数メートルの移動によってレールスパンが海陸方向に拡大し、これに伴いクレーン

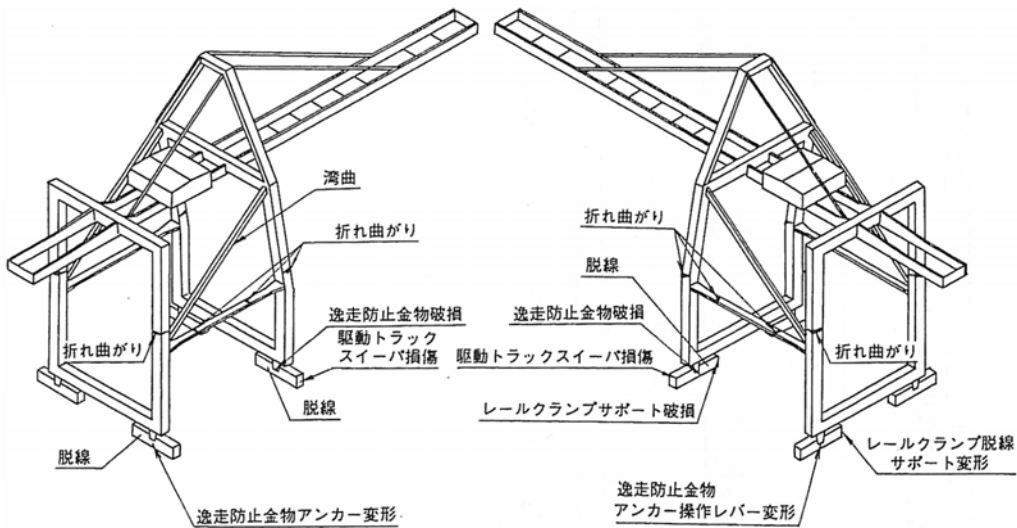


(a) 脚の折れ曲がり等の状況

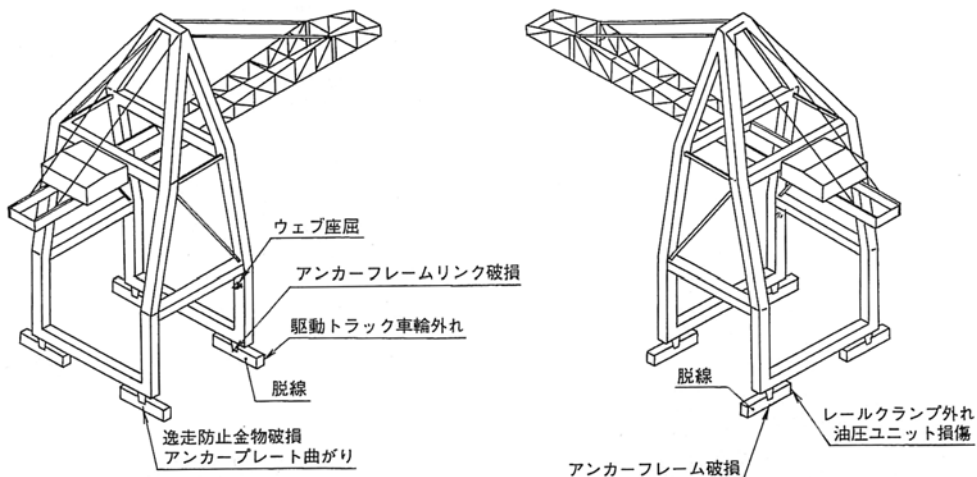


(b) レールの変形等の状況

写真-2.1 コンテナクレーンの被災状況



(a) クレーン状況図（脚の折れ曲がり）(RC4-1)



(b) クレーン状況図（脚の座屈）(RC3-2)

図-2.3 コンテナクレーンの被災状況の模式図⁸⁾

脚部が強制的に海陸方向に押し上げられ（股裂き状態），脚とポータル（海陸脚をつなぐ水平部材）に

折れ曲がりや座屈が発生し，損傷した．レールスペースの拡大量は，ケーソンの移動量と同程度であった．

- ・脚の股裂きと同時に、岸壁上部工のクレーン車輪の痕跡から、地震動によりコンテナクレーンはロッキング現象を起こし、脚が浮き上がり脱輪を起こしたと推定される。ロッキングの発生により、クレーン重心位置の海側への偏心のため陸側脚が大きく浮き上がり、それに伴い海側脚の荷重負担が顕著に増加して、海側脚が内側に折れ込むような脚の損傷も発生していたと推定される。
- ・一方、ガーダー部分より上の構造部材の損傷は少なく、ほとんどが脚部分に損傷が集中していた。
- ・走行装置については、ロッキングによるクレーン脚の浮き上がり・落下の衝撃やレールスパン拡大による強制変位により、部材の変形、モータの脱落等の損傷を受けた。なお、一部では、走行装置そのものが脚フレームから外れ、クレーンが大きく傾斜するような損傷も発生した。また、固定装置及びレールクランプについては、各々、強風時の逸走防止及び平常時のブレーキ装置であるため、地震動の作用によりほとんどが損傷を受けた。

2.4 コンテナクレーンの耐震設計の変遷

本節では、実務におけるコンテナクレーンの耐震設計の変遷を簡潔に整理する。なお、今回の検討対象とするコンテナクレーンは、耐震強化施設としてのコンテナクレーンであり、スパン30m級のクレーンとする。

(1) コンテナクレーンの耐震設計の変遷

a) 平成7年兵庫県南部地震の以前

コンテナクレーンの耐震設計については、前述した平成7年兵庫県南部地震の前後で、その基本的な考え方が大きく変わっている。

兵庫県南部地震以前は、コンテナクレーンの耐震設計は、一般的には「クレーン構造規格（平成7年労働省告示第134号）」のみにより行われていた。この規格の耐震設計法の基本は震度法であり、その設計震度は原則として一律0.2が用いられている。クレーン構造規格以外にも修正震度法を用いた設計法の提案¹¹⁾や「クレーン耐震設計指針（（社）日本クレーン協会）」¹²⁾による耐震設計の提案が為されてはいたが、実用的でないことや強制規格ではないことなどから、これらの提案については設計実務では採用されていなかった。このため、結果的には、兵庫県南部地震以前のコンテナクレーンの耐震設計は、クレーン構造規格のみによるものであった。

b) 平成7年兵庫県南部地震の以後

兵庫県南部地震以後は、前述したコンテナクレーンの

地震時の被災を受けて、耐震強化岸壁上のコンテナクレーンについては、レベル2地震動後においてもコンテナターミナルが十分な機能を発揮できるように、レベル2地震動に対する耐震性能照査を導入する方向になった。具体的には、「コンテナクレーンの耐震設計のための手引き」^{13) 14)}として（社）港湾荷役機械化協会から提案されたものであり、この手法の概要が「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（平成11年）の〔参考〕に記載され、標準的な手法として位置づけられた。本手法の耐震設計の基本方針及び耐震設計の手順は図-2.4に示すとおりである²⁾。

「コンテナクレーンの耐震設計のための手引き」によると、コンテナクレーンのレベル2地震動に対する耐震設計手法としては、a) 照査用地震荷重による静的設計、b) クレーン脚への時刻歴波形を用いた動的解析による設計、の2種類が存在し、照査規準としては「レベル2地震動に対しては、部材の発生応力が許容応力を超え、部材に損傷を生じることを許すが、クレーン運転手等の安全を保つようクレーン全体系の安定は確保する。また、地震時のクレーンの脚の浮き上りを許容する。」とされている。しかしながら、一般には、はじめに耐震強化岸壁の設計震度を用いて許容応力度法に基づく基本設計を行い、その基本断面に対して上述したb) 動的解析による性能照査を行い、クレーンの浮き上がりが発生しないこと及び各構造部材における発生応力が許容応力度以下であることを照査規準として耐震設計がなされてきたのが現状である。この照査規準を満足するためには、免震装置の導入が不可欠との判断から、免震クレーンの開発・導入が進んだと言える。以上に示すとおり、「コンテナクレーンの耐震設計のための手引き」においては、クレーン構造部材の塑性化等を許容する設計体系となっているが、実際には、免震装置の導入により、クレーン構造規格に対応した許容応力度以下となるような耐震設計がなされているのが現状である。なお、クレーンレールにおける入力地震動は、港湾施設の耐震設計において使用されていた代表的な波形（八戸波・大船渡波・ポートアイランド波）を工学的基盤面に入力して得られるクレーンレール面での時刻歴波形を対象としていた。

以上に示したとおり、兵庫県南部地震以降、レベル2地震動に対するコンテナクレーンの耐震設計は、時刻歴波形を用いた動的解析により、免震装置を導入したクレーンの耐震性能照査を行っている点において、大きく前進したといえる。なお、兵庫県南部地震のクレーン被災を受けて、コンテナクレーン模型を用いた振動台実験や数値解析モデルの検証が積極的に行われ（例えば、文献

＜耐震設計の基本方針＞

レベル2地震動に対しては、部材の発生応力が許容応力を超え、部材に損傷を生じることを許すが、クレーン運転手等の安全を保つようクレーン全体系の安定は確保する。また、地震時のクレーンの脚の浮き上りを許容する。

＜耐震設計の手順＞

- a) 岸壁の設計震度を用いて震度法で許容応力度設計による基本設計を行う。
- b) レベル2地震動に相当する照査用地震荷重を水平に静的に加重することにより部材耐力の照査を行う。
- c) クレーン全体系の安定を照査する。
- d) なお, b), c)を動的解析により行ってもよい。この際、重力式岸壁の場合は、岸壁のレベル2地震動に対する変形照査時に得られるクレーン軌道部分での地震動をクレーン脚部に入力する。栈橋式岸壁の場合は、クレーンを載せた状態で求められたクレーン軌道部分での地震動をクレーン脚部に入力する。

＜照査用地震荷重の求め方＞

- a) クレーンの片方の脚を浮き上がらせることができる最小の水平力に浮き上り影響係数を掛けて、照査用地震荷重とする。
- b) 浮き上り影響係数は、クレーンの脚を浮き上がらないようにした条件下でレベル2地震動により発生する荷重（脚固定時限界荷重）を基に定められ、0～1.2の値をとると考えられる。
- c) 脚固定時限界荷重は、重力式岸壁では岸壁のレベル2地震動に対する変形照査時に得られるクレーン軌道部分での最大水平加速度より求める。また、栈橋式岸壁では、クレーン、栈橋上部工をそれぞれ質点とする2質点系モデル等により、岸壁の変形照査に用いるレベル2地震動を入力して動的解析より求める。

図-2.4 レベル2地震動に対するコンテナクレーンの耐震設計の基本方針及び耐震設計の手順
（「港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成11年)」より）

3), 15)～27))、高度な数値解析モデルにおいてはクレーン脚の浮き上がりまで表現できるものもあり、また2.1節に示した各種の数値解析モデル（3次元骨組みモデル、2次元骨組みモデル、2次元ラーメンモデル、1質点モデル）の妥当性が検証されている状況にある。

(2)「港湾の施設の技術上の基準」の改正以後

1章の冒頭にて述べたとおり、平成19年4月の技術基準の改正に伴い、耐震強化施設に設置される荷役機械であるコンテナクレーンは技術基準対象施設として位置づけられ、レベル2地震動に対する具体的な対応策が求められることとなった。技術基準省令・告示では、荷役機械について図-2.5に示す要求性能・性能規定が規定されており、特に耐震強化施設に設置される荷役機械については、要求性能として修復性が規定されており、耐震強化施設（岸壁）のうち特定（幹線貨物対応）の場合、軽微な修復により荷役機械の機能が回復できるレベルの損傷にとどめることが要求される。なお、クレーン構造規格においては、レベル2地震動という概念が存在しないことから、耐震強化施設としてのコンテナクレーンの場合、永続作用及び変動作用（レベル1地震動等）に対してはクレーン構造規格の規定を満足していることが必要であるとともに、港湾基準に基づくレベル2地震動に対する修復性も確保されていることが必要となる。

このため、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」で

は、クレーン構造規格における規定を満足している荷役機械であることを前提とした上で、当該クレーンのレベル2地震動（偶発作用）に対する標準的な照査の考え方として、図-2.6に示す手法が参考として提示されている。ここに示された方法については、コンテナクレーンの動的解析を踏まえた耐震設計を可能な限り簡易的に行うという観点で示されたものであり、1質点モデルによるクレーンの耐震照査における具体的な照査項目として、脱輪の有無及び免震機構ストロークが示されている。また、クレーン構造本体の照査項目として、レールスパンの拡大に対するクレーン脚の股裂きへの照査が追加されている。ここに示されている手法は、基本的には兵庫県南部地震以後のコンテナクレーンの耐震設計手法と同様の方法であると位置づけられるが、技術基準改正にともない荷役機械は技術基準対象施設として明確に位置づけられたこと及び設計入力地震動の設定の考え方が大幅に変わったことが大きな変更点である。

2.5 レベル2地震動に対応したコンテナクレーンの耐震設計上の課題

前節で述べたとおり、技術基準改正以降も基本的にはレベル2地震動に対するコンテナクレーンの耐震設計の考え方は、従来と大きく変化していないと言えるが、技術基準改正に伴い、以下に示す事項が設計実務において課題となっている。

【省令】（荷役機械の要求性能）

第四十二条 固定式荷役機械及び軌道走行式荷役機械（以下「荷役機械」という。）の要求性能は、安全かつ円滑な貨物の荷役を図るものとして、貨物の安全かつ円滑な荷役が行えるものであるとともに、当該荷役機械が、船舶の係留及び離着岸の支障とならないよう、国土交通大臣が定める要件を満たしていることとする。

2 前項に規定するもののほか、次の各号に掲げる荷役機械の要求性能にあつては、それぞれ当該各号に定めるものとする。

一 石油荷役機械の要求性能 自重、レベル地震動、風、石油の重量及び圧力等の作用による損傷等が、当該石油荷役機械の機能を損なわず継続して使用することに影響を及ぼさないこと。

二 耐震強化施設に設置される荷役機械の要求性能 レベル地震動等の作用による損傷等が、軽微な修復による当該荷役機械の機能の回復に影響を及ぼさないこと。

【告示】（荷役機械の性能規定）

第八十一条 荷役機械の性能規定は、荷役機械の形式に応じて、次の各号に定めるものとする。

一 対象船舶、貨物の種類及び量、係留施設の構造及び荷役の状況に応じて、適切に配置され、かつ、所要の諸元を有すること。

二 当該施設周辺の環境保全のために、必要に応じて、粉じん、騒音等の防止ができるよう適切な機能を有すること。

2 前項に規定するもののほか、石油荷役機械の性能規定にあつては、次の各号に定めるものとする。

一 主たる作用が自重である永続状態に対して、部材の健全性を損なう危険性が限界値以下であること。

二 主たる作用がレベル地震動、風並びに石油の重量及び圧力である変動状態に対して、部材の健全性及び構造の安定性を損なう危険性が限界値以下であること。

3 第一項に規定するもののほか、耐震強化施設に設置される荷役機械の性能規定にあつては、主たる作用がレベル地震動である偶発状態に対して、作用による損傷の程度が限界値以下であることとする。

図-2.5 荷役機械の要求性能及び性能規定²⁾

<性能照査の基本>

- (1) 荷役機械と係留施設の地震時挙動及び耐震性能の設定
- 荷役機械が設置される係留施設に要求される地震時の性能を担保するために、荷役機械と係留施設の耐震性を総合的に照査する必要がある。このため、係留施設において設定された要求性能に応じた変状（レールスパンの拡大等）が発生することを考慮し、荷役機械の耐震性能を規定する。
- 一般的に、荷役機械と係留施設の設計時期が異なり、係留施設が先行することから、係留施設設計時に、設計・製作可能な荷役機械の諸元の範囲を用いた検討を実施する。(2)照査手順
- 荷役機械の耐震性能照査に際して、係留施設との相互作用を考慮し、以下の手順で照査する。
- ①レベル1、レベル2地震動の設定（工学的基盤）
 - ②クレーンレール位置における地震動時刻歴の算出
 - ・荷役機械と係留施設の動的相互作用を考慮する必要がある場合は、主に栈橋式が想定され、クレーンと栈橋の動的相互作用を考慮したレール位置の水平加速度時刻歴を算出する。免震クレーンを設置することが想定される場合は、想定される免震コンテナクレーンの固有周期を再現する剛性・減衰を与える。(図-2.2.1) この際、クレーン製造業者が製作可能な範囲の特性を設定する。
 - ・栈橋式以外の場合は、地盤の地震応答解析により地表面加速度時刻歴を算出し、クレーンレール位置の地震動とする。

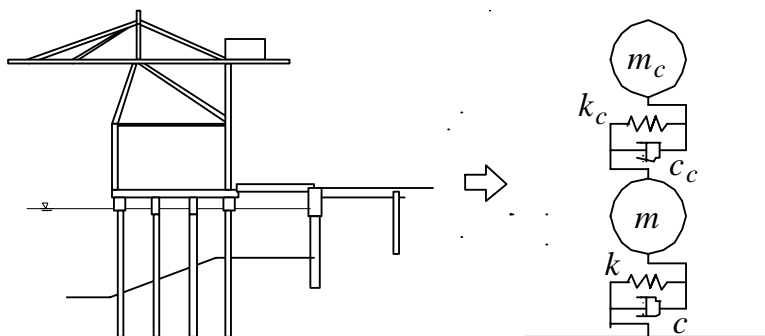


図-2.2.1 栈橋とクレーンのモデル化

- ③コンテナクレーンの脱輪の有無の検討
 - ・コンテナクレーンの最大応答加速度を重力加速度で除した値を震度の設計用値とし、レールスパンおよびクレーンの重心位置をモデル化し、震度法による転倒の検討（コンテナクレーンの脱輪の有無）を実施する。
 - ・転倒すると判定された場合は、免震機構部分の諸元を変更し、転倒（脱輪）しない条件になるまで再計算する。
- ④免震機構ストロークの検討
 - ・転倒しない事を確認後、変位応答時刻歴を求め、想定する免震機構の許容変位以内であることを判定する。
 - ・発生する変位が許容変位を超過する場合は、免震機構部分の諸元を変更し、③に戻る。
- ⑤栈橋上に設置する場合
 - ・②で用いた想定される免震クレーンの諸元と異なる場合には、再度②に戻り最終確認を実施する。
- ⑥レールスパン変位量とクレーン脚部変位量の比較検討
 - ・係留施設の地震応答解析結果から、レールスパンの変位量（最大値）を求め、クレーン脚部の弾性変形範囲と免震機構ストローク（片振幅）の変位量以下であることを確認する。(図-2.2.2)

図-2.6 レベル2地震動に対するコンテナクレーンの耐震設計の基本方針及び耐震設計の手順（1/2）²⁾

- (3) 荷役機械と係留施設の地震動作用時の動的相互作用を考慮する必要がある場合
 係留施設に上載される荷役機械については、規模が大きい場合に、地震動作用時の振動特性が係留施設に影響すること、あるいは荷役機械の地震時応答加速度が増幅することがあり、これをレベル1地震動に関する変動状態、レベル2地震動に関する偶発状態を問わず考慮しなければならない。
 港湾の施設としての荷役機械（クレーン等）の振動特性（海陸方向の固有周期）は、その規模や形式により異なるが、概ね0.5～3秒程度である。また、免震機構付きコンテナクレーンは、固有周期を4秒程度に長周期化することが多い。これらのクレーン等が栈橋（固有周期0.5～2.0秒程度）に設置される場合には、当該栈橋の地震動に関する性能照査において、連成挙動（動的相互作用）が生じる可能性があることに注意が必要である。また、係留施設の構造形式に関わらず、設置地点における地震動の卓越周期が長周期側（概ね1.5秒以上）である場合については、荷役機械の応答加速度が大きくなることが想定されるため、荷役機械の性能照査において、動的解析による検討を必要とする場合がある。いずれの場合にも、脱輪の防止や部材の健全性の確保等のために、免震機構や制震機構の適用等により荷役機械の応答加速度を小さくすることが望ましい。なお、性能照査の詳細については、本編の各施設の性能照査に関する記述及びコンテナクレーン耐震設計のための手引き³⁾を参照することができる。
- (4) 栈橋上に設置されるクレーンのモデル化
 栈橋上にクレーンが設置される場合の耐震性能照査は、栈橋1ブロック分の杭の等価剛性 k 、上部工質量 m 、減衰定数 c 、クレーンの等価剛性 k_c 、クレーン質量 m_c 、クレーンの減衰定数 c_c として、2質点系解析により行うことを基本とする。クレーンの振動特性については固有周期を実際のクレーンと合わせるものとし、減衰定数についてはクレーン製造者から減衰定数が提示されない場合には1～3%を用いることとする。なお、等価剛性については、栈橋の場合は1ブロックの杭本数・クレーンについては脚本数を図-2.2.1に示す質点系のパネに置き換えたものである。栈橋部分の質点モデルにおける等価剛性 k は、栈橋設計時に用いられた非線形応力ひずみ関係を有するものとしてモデル化する。
- (5) 栈橋以外の係留施設上に設置されるクレーンのモデル化
 栈橋以外の係留施設の場合には、その質量が荷役機械と比較して大きいことから動的相互作用の影響が小さい。このためクレーン単体の地震時応答を動的解析により検討することになる。図-2.2.1において、クレーン部分のみの1質点系に当該地点地表における地震動を入力するものとする。
- (6) レールスパンの変位量との関係
 地震時に、コンテナクレーン脚の浮き上がりを許容しないことを原則とする。このため地震時にレールスパンの拡大が発生した場合に、クレーン構造体に損傷を発生させない機構を有する必要がある。例えば、図-2.2.2に示すように、30.5mスパンのコンテナクレーンの場合、クレーンの脚の弾性変形範囲として700mm程度（参考値であり、個々のクレーンで異なる。）のスパン拡大に追従できる。この変位量（クレーン脚の弾性変形範囲）に免震機構部の変位ストローク300mm程度（片振幅）（参考値であり、個々のクレーンで異なる。）を加算することにより、最大1,000mm程度がクレーンスパンに関して許容される限界変位となる。このため、必要に応じて、係留施設の地震時解析結果から算出されたレールスパン変位量に応じた免震機構を設計する必要がある。

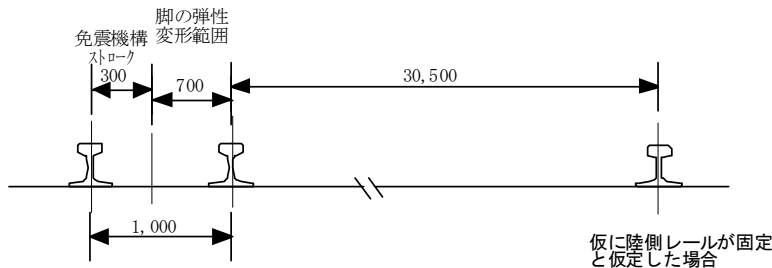


図-2.2.2 クレーン脚の変形とレールスパンの変位との関係

図-2.6 レベル2地震動に対するコンテナクレーンの耐震設計の基本方針及び耐震設計の手順 (2/2)²⁾

- ①コンテナクレーンに関する各種の設計情報の不足
- ②新しいレベル2地震動に対してクレーンに要求される耐震性能（性能規定）の明確化及び照査手法・項目等の標準化

上記①については、一般に、係留施設の設計段階においてはコンテナクレーン側の設計条件を仮定して設計を進めなければならないが、その際にクレーン総重量や輪荷重等の暫定的に決定された基本的な設計条件のみが与えられる場合が多く、さらにクレーンの固有周期などの振動特性に関する基本的な情報も不明である場合が多い。このため、係留施設の詳細設計が完了した段階で行われるコンテナクレーン側の構造設計において、クレーンの耐震性能を確実に確保することができるかについての見通しを得ることができないまま、係留施設側の設計・整

備を進めなければならないという問題が発生している。特に、栈橋式の係留施設の場合、コンテナクレーンとの栈橋との連成振動の影響を考慮した照査が必要となるが、係留施設の設計段階では、係留施設とコンテナクレーンの双方の耐震性能を満足することの確認ができないため、非常に大きな問題となっている。

次に、上記②に関しては、耐震強化施設に設置されるコンテナクレーンの耐震性の評価手法については、模型振動実験、詳細3次元FEM解析等による検証の結果、簡易な質点系モデルによる動的解析により実務上十分な精度を有した評価が可能となっている。しかしながら、既往の耐震性能照査手法は、既往の設計入力地震動（八戸波、ポートアイランド波等）を対象として構築されている。このため、長周期・長継続時間の地震動に対する同手法の適用性の検証が必要である。また、設計実務において

は、係留施設の予備検討段階や予算要求段階において、新しいレベル2地震動に対応したコンテナクレーンの耐震性能が確保されているかについての見通しを得ることができる簡易的な評価手法が必要となっている。さらに、レベル2地震動に対する係留施設とコンテナクレーンの双方に要求される耐震性能（性能規定）の明確化、耐震性能照査の手順・項目等についても、コンテナクレーンの関係法規（クレーン等安全規則、クレーン構造規格など）との関連性を考慮した上での標準化が求められている。特に、今回の技術基準改正に伴い、設計入力地震動の考え方が大幅に見直されているが、これのコンテナクレーン（係留施設も含めて）の耐震設計に及ぼす影響程度が現段階では不明であることも大きな問題となっている。

2.6 耐震強化施設としてのコンテナクレーンの標準的な耐震性能照査手法の在り方

耐震強化施設としてのコンテナクレーン及び係留施設の耐震設計については、クレーン及び係留施設の双方の耐震性能が同時に満足されるように、注意を払いながら設計を進める必要がある。そこで、図-2.7に、係留施設側及びコンテナクレーン側の両者の設計者の共通認識を図ることを目的として、耐震強化施設としてのコンテナクレーン及び係留施設の標準的な耐震性能照査の在り方をフロー図として示す。以下、このフロー図について説明するとともに、今後必要とされる検討項目や設計情報についても言及する。

本来、土木構造物である係留施設と機械製品であるコンテナクレーンを同時に設計することが望ましい。しかしながら、現在の制度上（事業制度・発注制度等）、係留施設とクレーンの構造検討について、同時に同精度の検討を実施することは困難である。すなわち、一般的には、係留施設側の設計・施工（整備）が先行し、数年後にコンテナクレーンの設計・製造・設置というタイムラグが避けられない。このため、係留施設側の設計者がコンテナクレーンを想定し、現状の技術水準において機械メーカーが製造可能なコンテナクレーンの諸元の範囲内であることを確認しながら、係留施設の設計を実施することが重要である。

このため、本手順では、係留施設側の予備検討段階という新たな段階を位置づけ、この段階で耐震強化施設としてのコンテナクレーンの成立性に関する概略評価を行い、成立することの確認をもって、係留施設の基本設計・詳細設計に移行するスキームとしている。ここで、係留施設の予備検討段階とは、具体的には、当該施設に対す

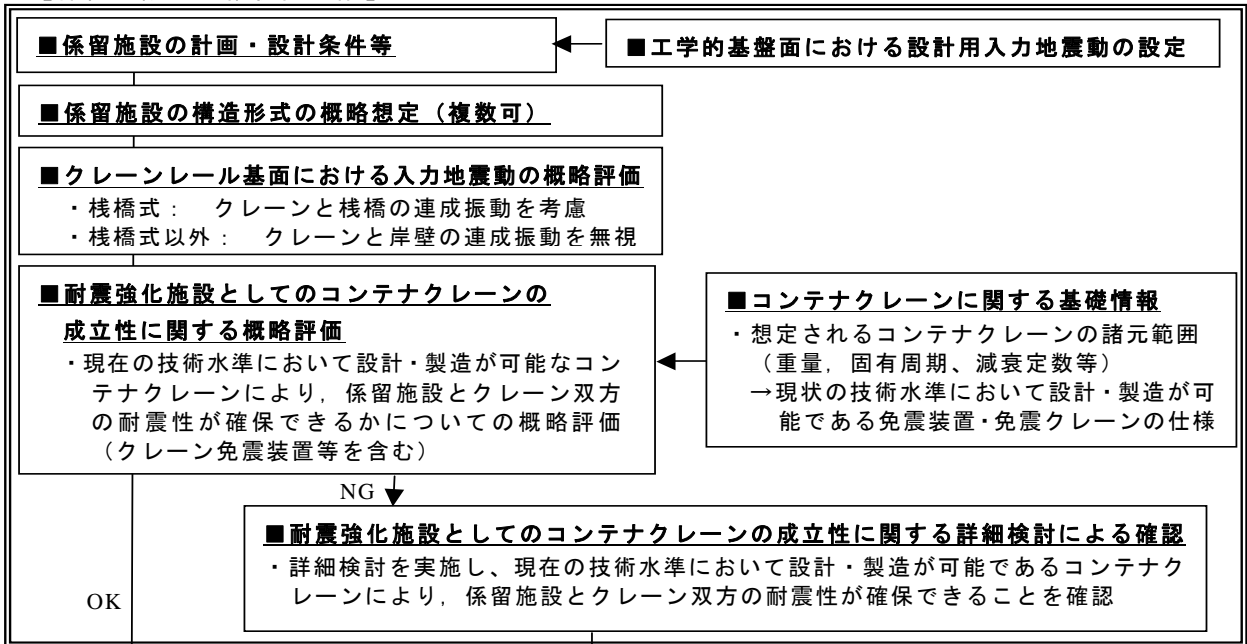
る港湾計画の策定段階や予算要求段階を想定している。この初期段階において、レベル2地震動に対するコンテナクレーンの成立性が確保される見通しを得ることができれば、係留施設の基本・詳細設計段階やクレーンの設計・製造段階において、設計上の大きな手戻りを避けることができることになる。

しかしながら、現状では、係留施設の構造形式等が確定していない段階（係留施設の予備検討段階）において、レベル2地震動に対するコンテナクレーンの成立性について簡易に評価できる手法は存在しない。特に、コンテナクレーンの動的応答は入力地震動の周波数特性等に大きく影響されるため、当該施設の設計入力地震動の特性を適切に考慮できる簡易評価手法が今後必要とされると考えられる。また、簡易評価をする上で、現状の技術水準において設計・製造が可能である免震装置・免震クレーン等の仕様が、どの程度の範囲であるかについての基礎情報が、クレーンの成立性の重要な判断基準となることから、そのような基礎情報を明確に整理しておく必要があると考えられる。

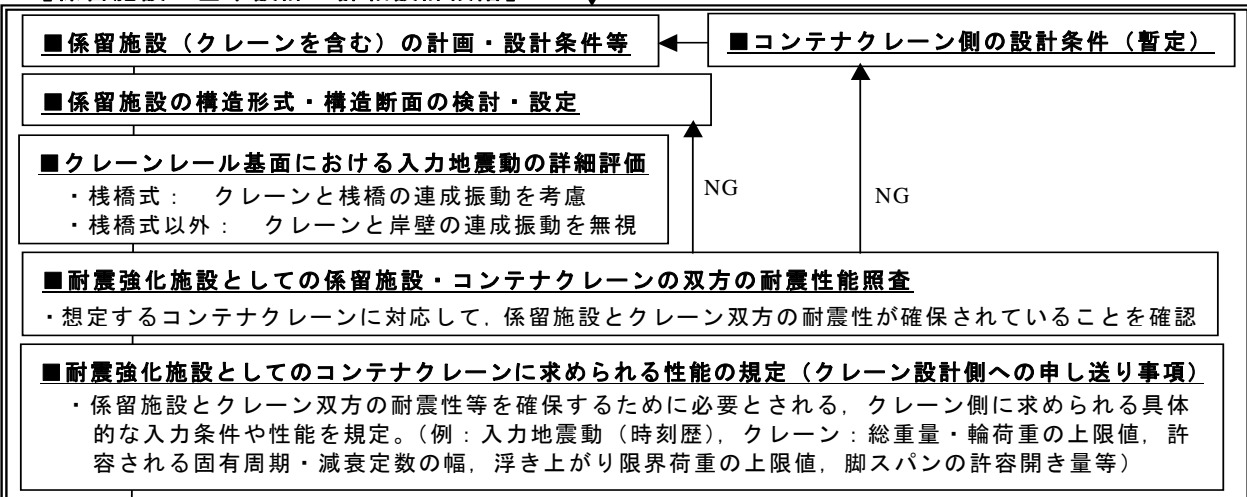
次に、係留施設の基本設計・詳細設計段階に移行するが、一般的には、この段階においても、クレーン側の設計条件は暫定条件として与えられることが多く、クレーンの設計諸元は、クレーンの設計・製造段階で大きく変更されることも多い。このため、この段階で重要な検討事項は、当該係留施設と想定されるコンテナクレーンの双方が所要の耐震性能を満足するための、コンテナクレーン側の構造設計における制約事項を明確に整理することであると言える。また、その制約事項について、現状の技術水準で十分に達成可能であるかについての確認を行った上で、コンテナクレーン側の構造設計に申し送り事項として引き渡し、設計・製造において確実に遵守されるようなスキームを構築することが重要である。なお、具体的な制約事項としては、例えば、入力地震動（時刻歴）、クレーンの総重量や輪荷重の上限値、許容される固有周期・減衰定数の幅、浮き上がり限界荷重の上限値、脚スパンの許容開き量等の項目が想定されるが、この内容については係留施設の構造形式、クレーン基礎の構造形式、クレーンの構造特性等によって変わるため、今後、詳細な検討を行い標準的な項目を整理する必要がある。

最後に、コンテナクレーンの設計・製造段階に移行するが、この段階では、繰り返しになるが、係留施設側で検討したコンテナクレーンの構造設計に対する制約事項を満足するような範囲でクレーンを設計することが原則になる。制約事項を遵守する範疇では、係留施設側も所要の耐震性能が確保されていることになる。しかしなが

■【係留施設の予備検討段階】



■【係留施設の基本設計・詳細設計段階】



■【コンテナクレーンの設計・製造段階】

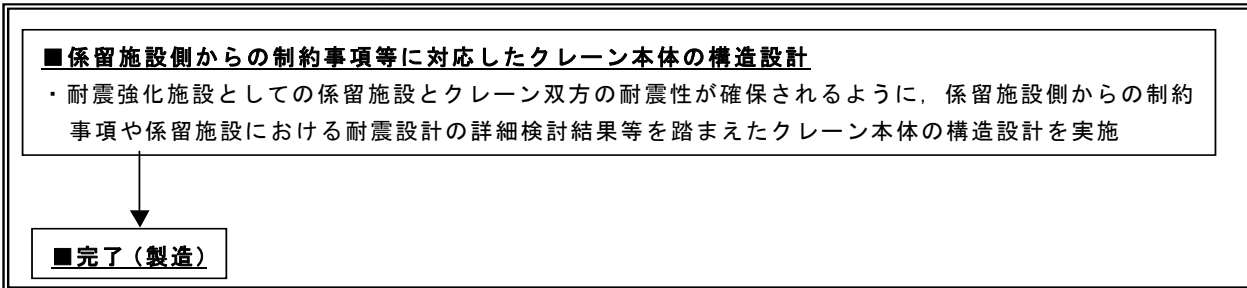


図-2.7 耐震強化施設としてのコンテナクレーン及び係留施設の標準的な耐震設計の流れ・手順（案）

ら、万が一、この段階で、制約事項の範囲におさまらないクレーンとなる場合には、既に設計もしくは施工が完了している係留施設とコンテナクレーンの双方における

所要の耐震性能が確保されているかについて、係留施設の基本・詳細設計段階に戻り、具体的な照査が必要となる。

3. コンテナクレーンの主要諸元

本章では、レールスパン 30m 級の大型のコンテナクレーンを対象として、係留施設側の設計に必要とされる輪荷重等の基本諸元の整理を行った。また、クレーン側の設計条件が未確定の場合を想定し、係留施設側の設計条件として必要なクレーン輪荷重等を簡便に設定する手法について検討した。なお、解析対象のコンテナクレーンの基本諸元は、(社)港湾荷役機械システム協会が発行している「日本コンテナクレーン一覧表」の平成 18 年 4 月現在版のデータを使用した²⁸⁾。

3.1 概説

図-3.1に、レールスパン30m級のコンテナクレーンの設置数の経年変化を示す。コンテナクレーンの設置数は、1985年以降、単調的に増加している傾向にあることが分かる。

図-3.2に、コンテナクレーン（30mスパン級）の代表諸元（全横行距離、全揚程、クレーン自重）の経年変化を示す。全横行距離については、1990年頃以降、クレーンの大型化に対応して90mを越えるクレーンが大半を占め、近年では100mを越えるクレーンも設置されるようになっている。全揚程についても、全横行距離と同様、1990年頃以降に顕著に増大傾向にあり、近年では50mを越えるクレーンが大半を占めている。クレーン自重については、全横行距離や全揚程の増加に対応して、1995年以前は8500kN以下のクレーンが大半を占めていたが、1995年以降はクレーンの大型化に伴い、10000kNを越えるクレーンの比率が増加してきた。

図-3.3に、コンテナクレーンが設置されている係留施設の水深の頻度分布を示す。図より、レールスパン30m級のコンテナクレーンについては、水深14～15mの係留施設に設置されているものが多い傾向にあることが分かる。

3.2 主要諸元の特性

(1) クレーン自重

図-3.4に、コンテナクレーンの自重の頻度分布を示す。図より、レールスパン30m級のコンテナクレーンについては、7500～9500kNの重量のものが多いことが分かる。一方で、10000kNを越えるクレーンも多数あり、今回対象としたクレーンの中では、13000kN程度の重量が最大であった。

図-3.5に、コンテナクレーンの自重と係留施設

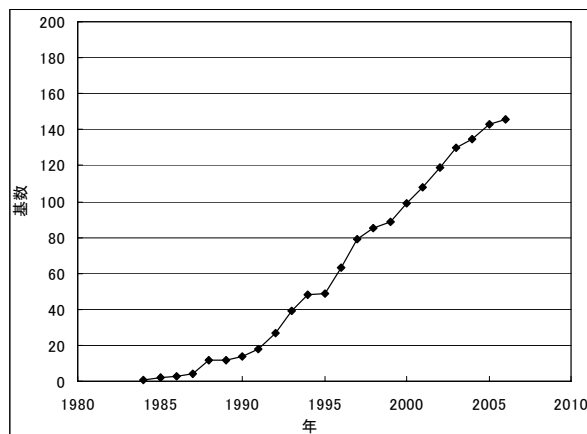
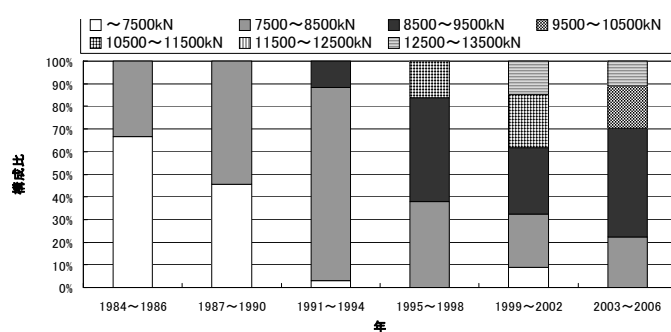
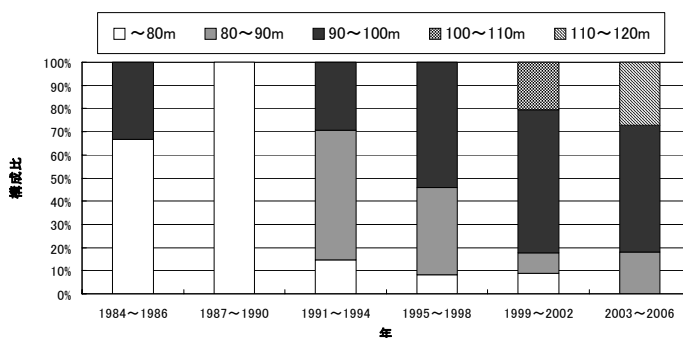


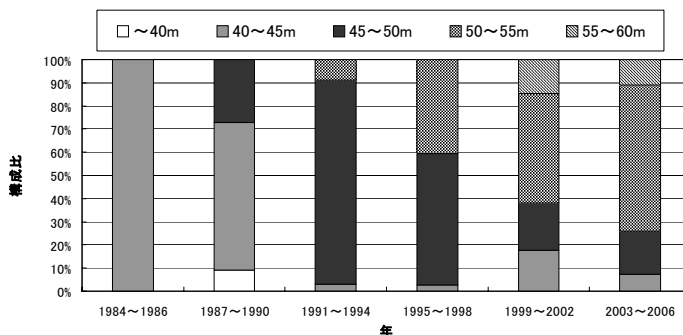
図-3.1 コンテナクレーン設置数の経年変化



(a) クレーン自重



(b) 全横行距離



(c) 全揚程の経年変化

図-3.2 コンテナクレーン（30mスパン級）の年代別設置基数における代表諸元の構成比率の経年変化

の水深の関係を示す。図より、係留施設の水深の増加にともない、各水深に設置されているクレーンにおける自重の最大値は、概ね水深に比例して増加する傾向にあることが分かる。

(2) 輪荷重

図-3.6~3.8に、コンテナクレーンの海側・陸側の最大輪荷重の頻度分布を、設計状態別（作業時・休止時・地震時）に示す。図より、作業時については、海側で300~600kN/輪程度、陸側で200~400kN/輪程度の輪荷重であることが多いことが分かる。休止時については、頻度分布の分布形状は、概ね作業時の場合と似ており、海側で500~800kN/輪程度、陸側で400~700kN/輪程度の輪荷重であることが多い傾向にある。地震時については、海側で700kN/輪程度以下、陸側で600kN/輪程度以下の輪荷重であることが多いことが分かる。

(3) 横行距離・揚程

図-3.9に、コンテナクレーンの全横行距離・アウトリーチ・バックリーチの頻度分布を示す。アウトリーチについては、概ね40~55mの範囲にあり、コンテナ船のコンテナ列数15~18に対応していると考えられる。なお、アウトリーチの最大ものは、63mであり、22列のコンテナ船に対応しているものもある。バックリーチについては、15~17.5m程度であるものが圧倒的に多く、クレーンによる相違は小さいことが分かる。全横行距離については、80~100m程度のものが比較的多い傾向にある。

図-3.10に、コンテナクレーンの全揚程・レール面上揚程・レール面下揚程の頻度分布を示す。全揚程については、概ね40~55mの範囲にあるが、その内訳を見ると、レール面下揚程は係留施設の水深と同程度の距離であるため、レール面上揚程のばらつきと対応している。

3.3 クレーン自重及び輪荷重等の簡易設定例

係留施設の予備検討段階や基本設計の初期段階においては、クレーン側の荷重条件が与えられない場合が多いため、本節ではクレーン自重や輪荷重等について、簡易に設定する手法について検討する。なお、以下、(1)簡易設定に必要な基本的な情報の整理、(2)簡易設定手法の例示、の順に説明する。

(1) 基本情報の整理

係留施設側の設計にあたっては、コンテナクレーンからの輪荷重が非常に重要な与条件となる。輪荷重を係留施設の水深やコンテナクレーンの諸元から推定すること

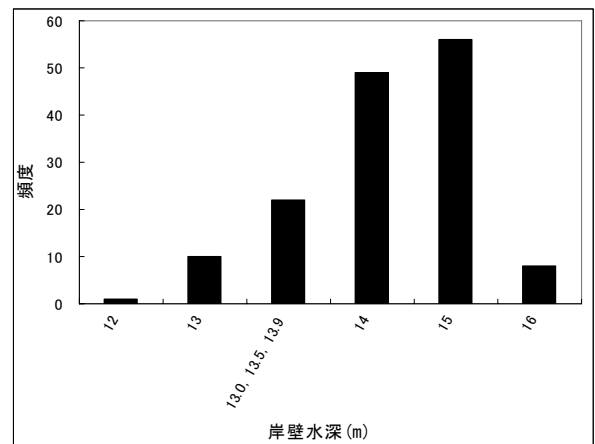


図-3.3 岸壁水深（クレーン設置）の頻度分布

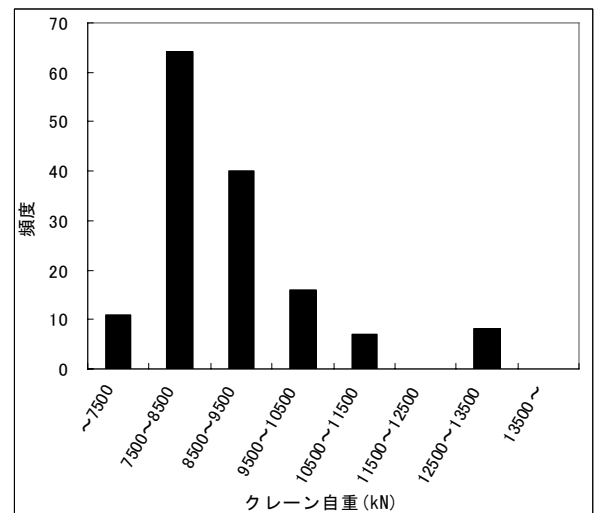


図-3.4 クレーン自重の頻度分布

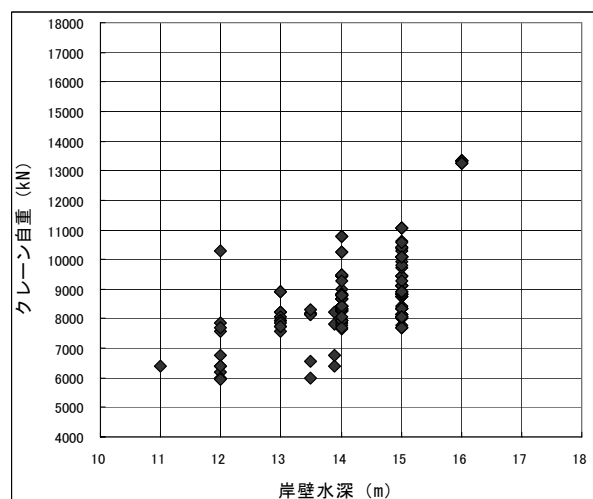
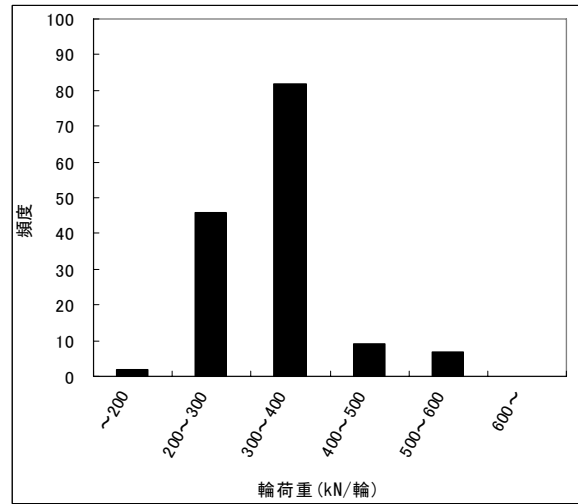
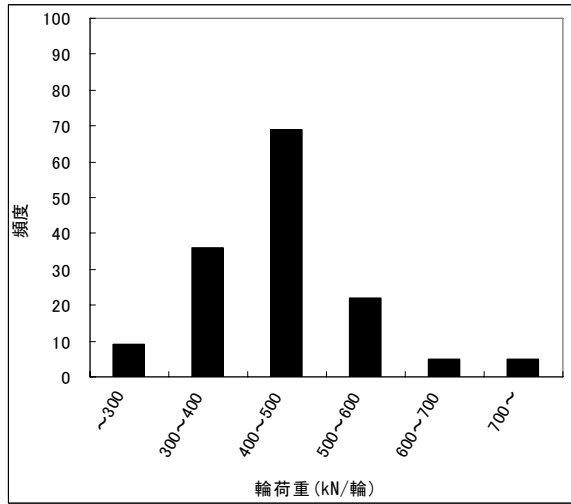


図-3.5 岸壁水深とクレーン自重の関係

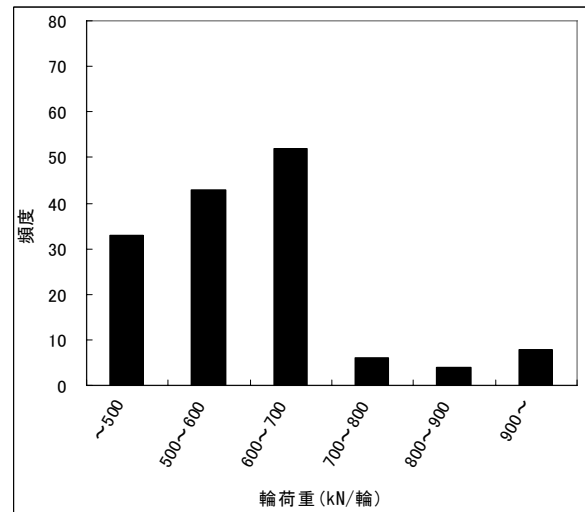
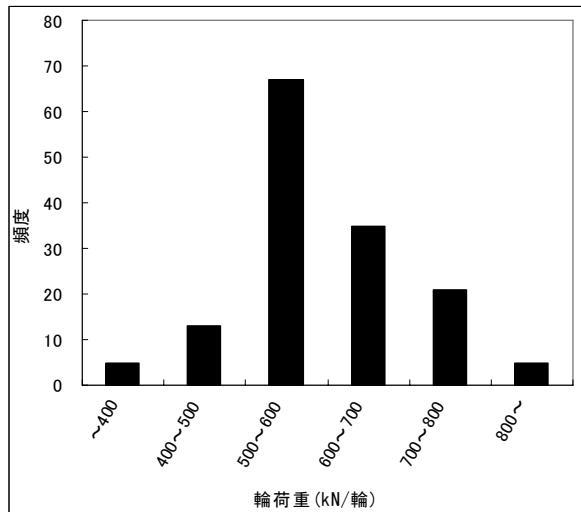
ができるかという観点で、以下、図面を列举する。



(a) 海側

(b) 陸側

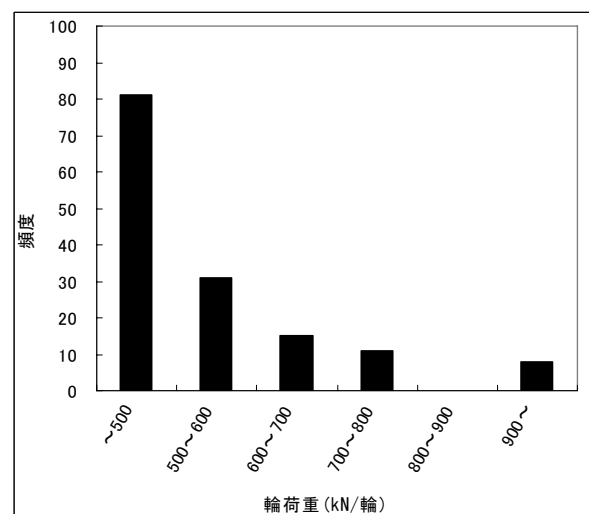
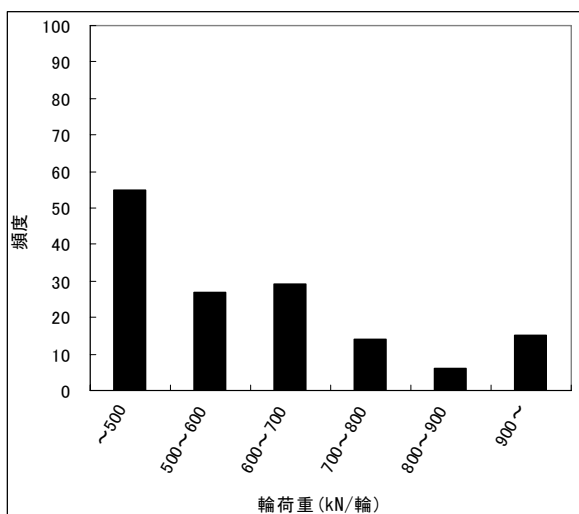
図-3.6 作業時のクレーン輪荷重の頻度分布



(a) 海側

(b) 陸側

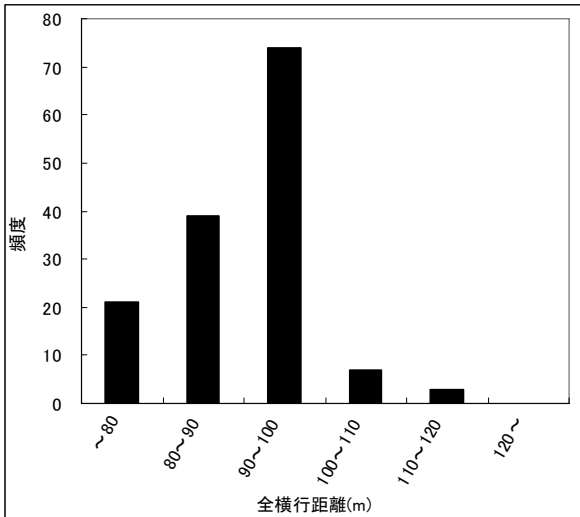
図-3.7 休止時のクレーン輪荷重の頻度分布



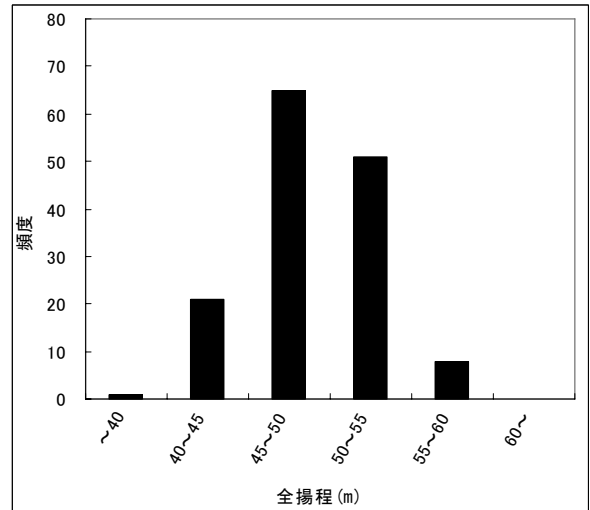
(a) 海側

(b) 陸側

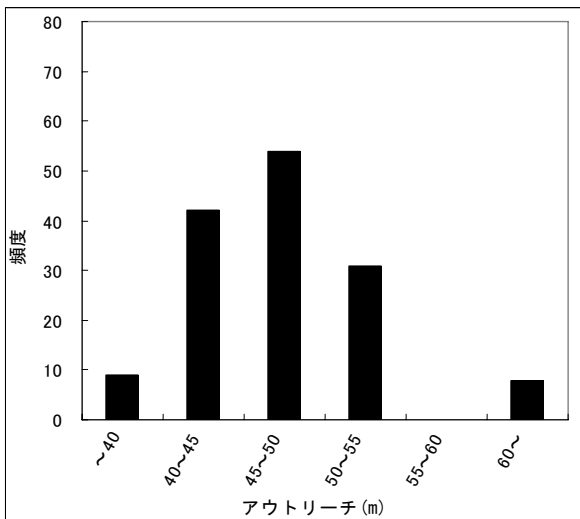
図-3.8 地震時のクレーン輪荷重の頻度分布



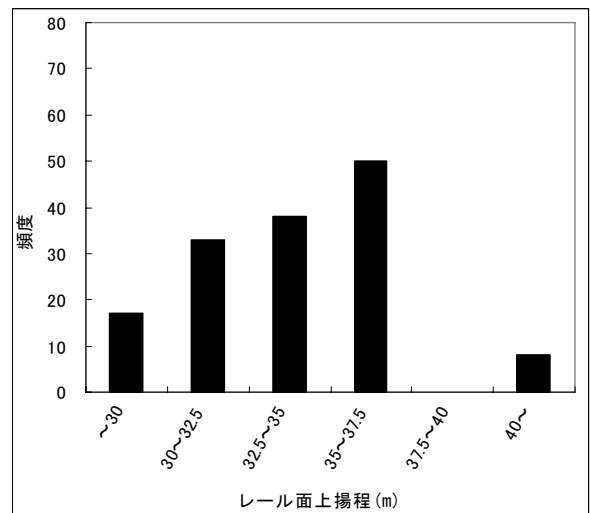
(a) 全横行距離



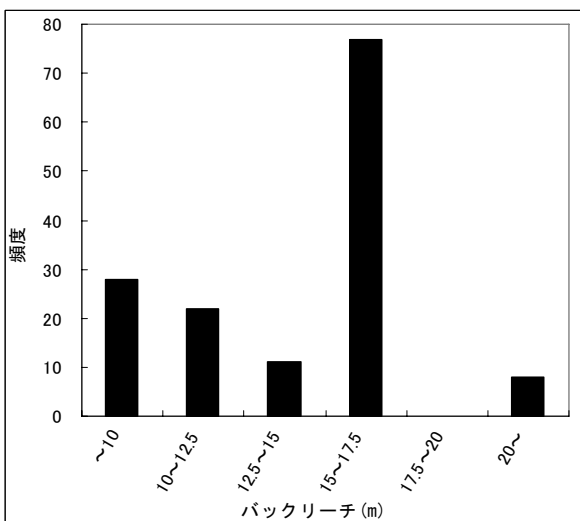
(a) 全揚程



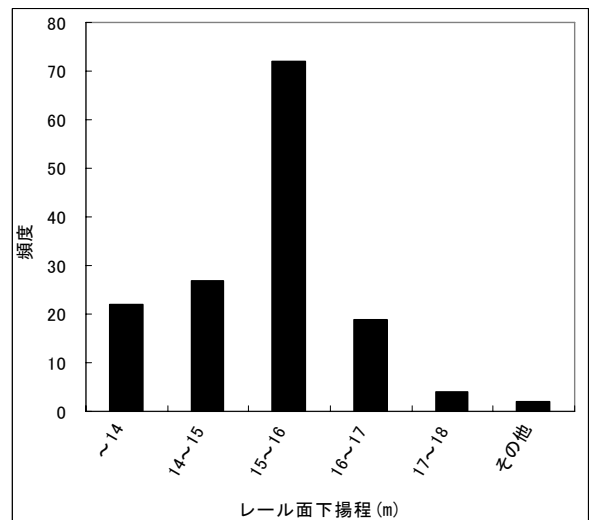
(b) アウトリーチ



(b) レール面上揚程



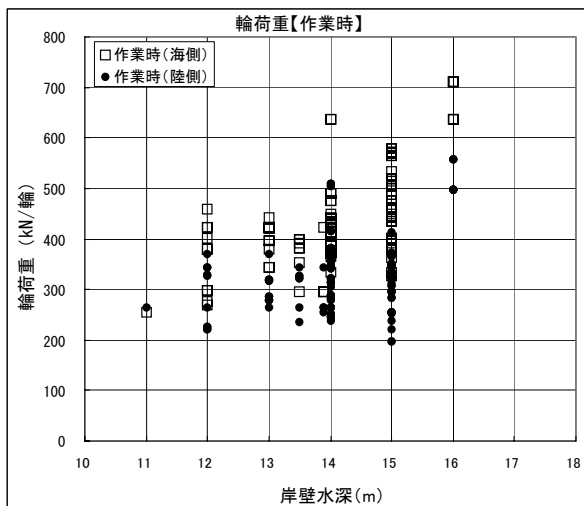
(c) バックリーチ



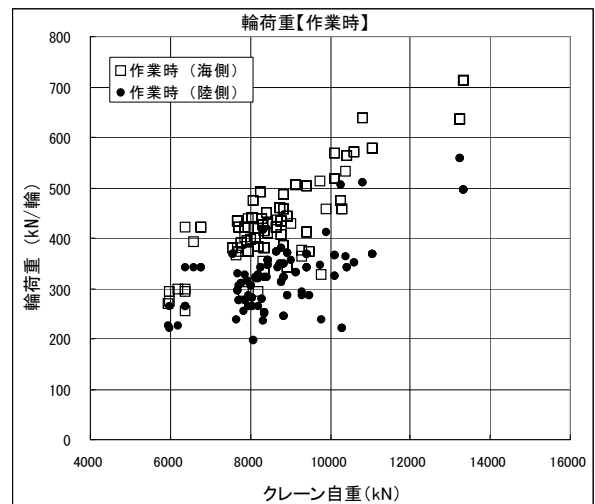
(c) レール面下揚程

図-3.9 横行距離の頻度分布

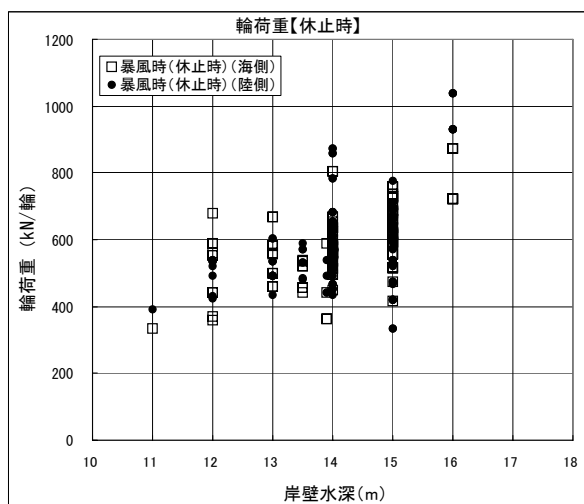
図-3.10 揚程の頻度分布



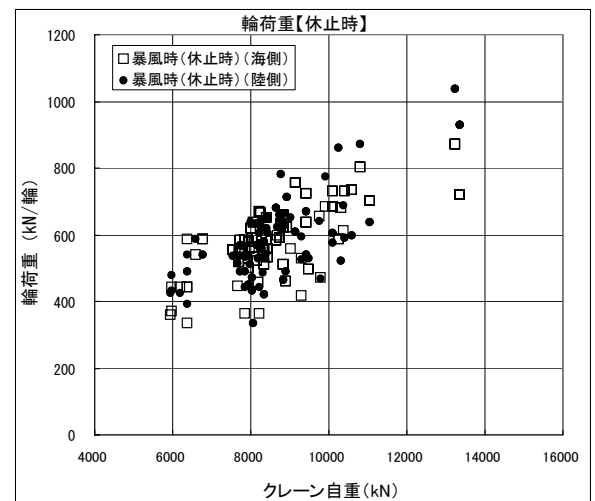
(a) 作業時



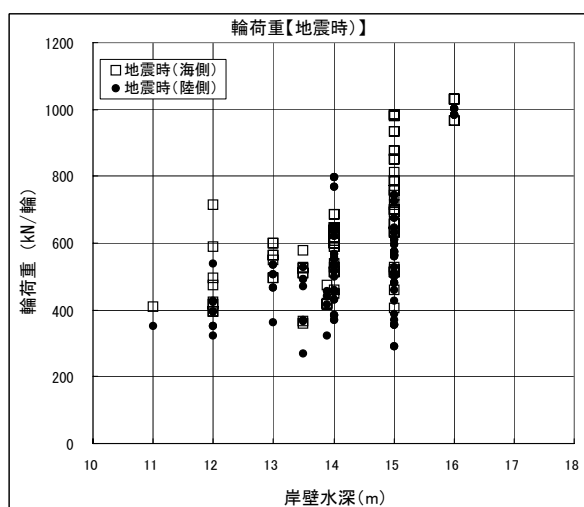
(a) 作業時



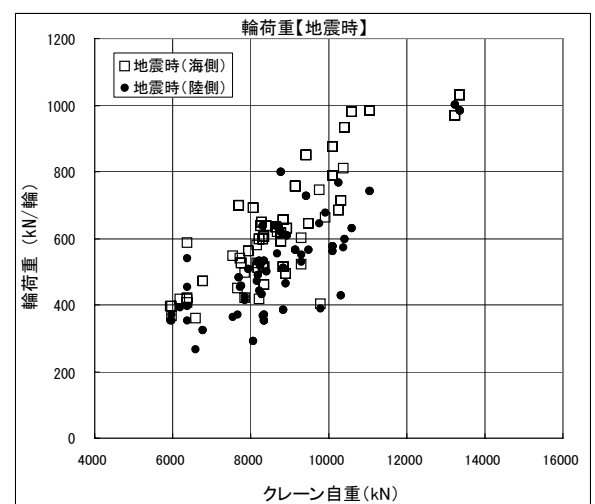
(b) 休止時 (暴風時)



(b) 休止時 (暴風時)



(c) 地震時



(c) 地震時

図-3.11 岸壁水深とクレーン輪荷重の関係

図-3.12 クレーン自重とクレーン輪荷重の関係

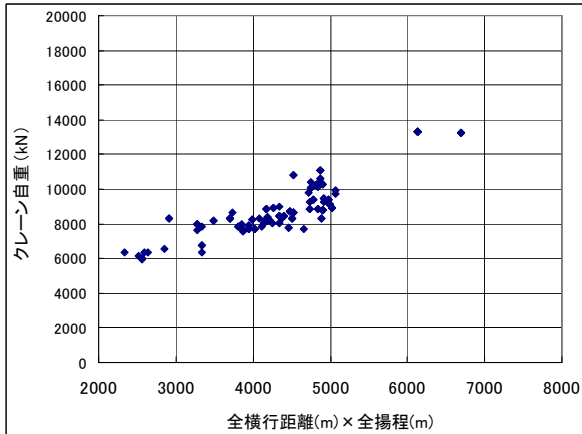
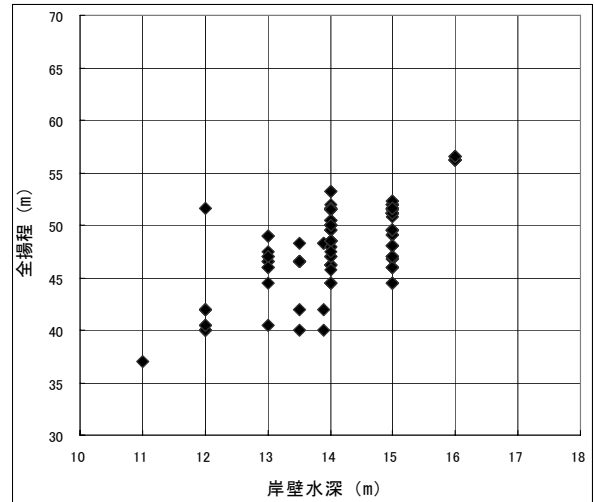


図-3.13 クレーン自重と〔全揚程×全横行距離〕の関係



(a) 全揚程と岸壁水深の関係

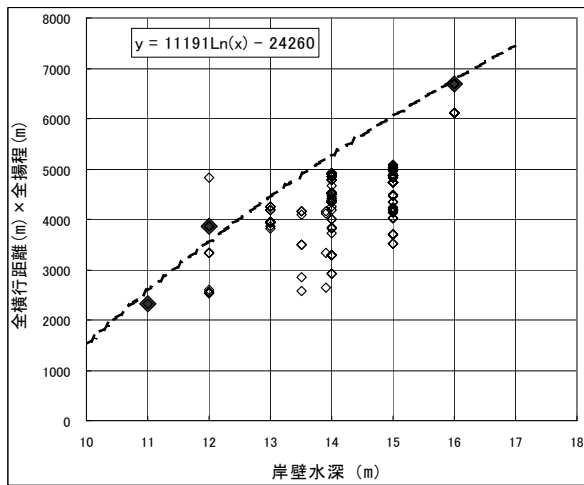
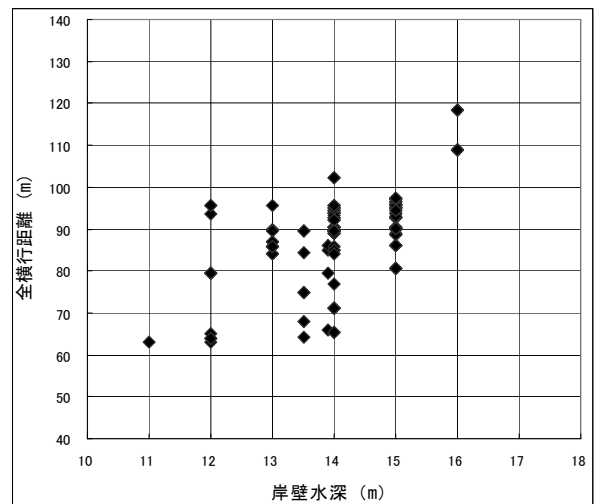


図-3.15 〔全横行距離×全揚程〕と岸壁水深の関係



(b) 全横行距離と岸壁水深の関係

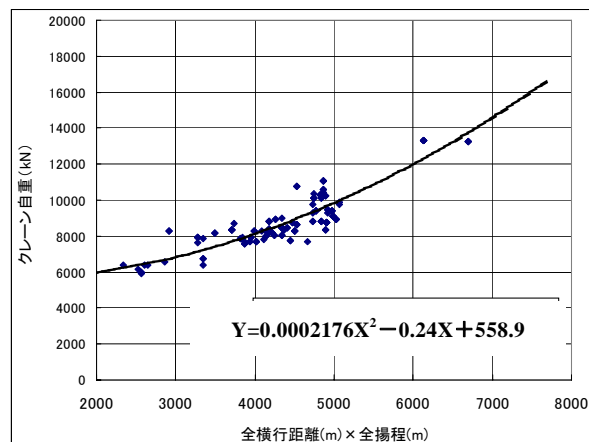
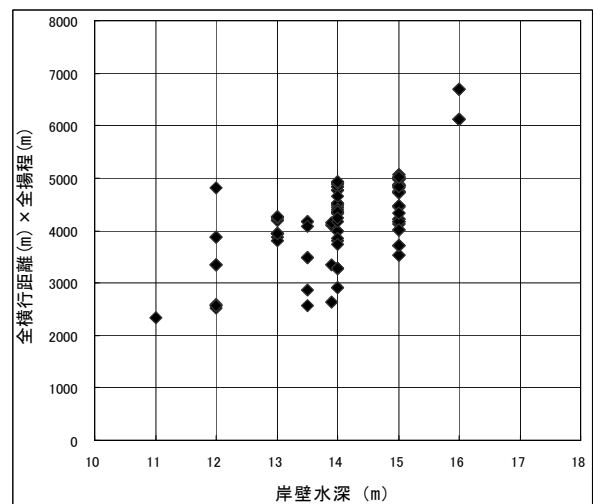
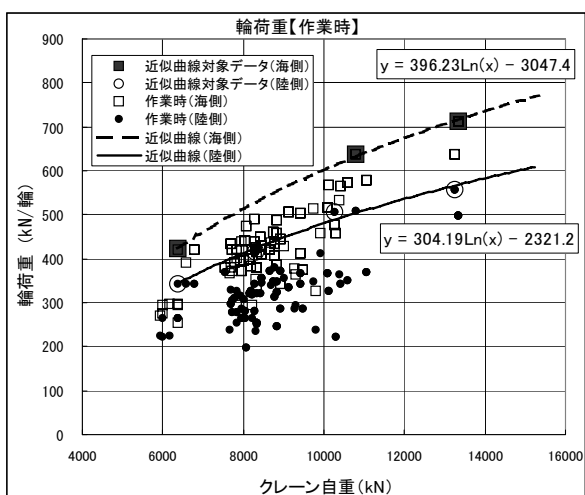


図-3.16 クレーン自重と〔全横行距離×全揚程〕の関係

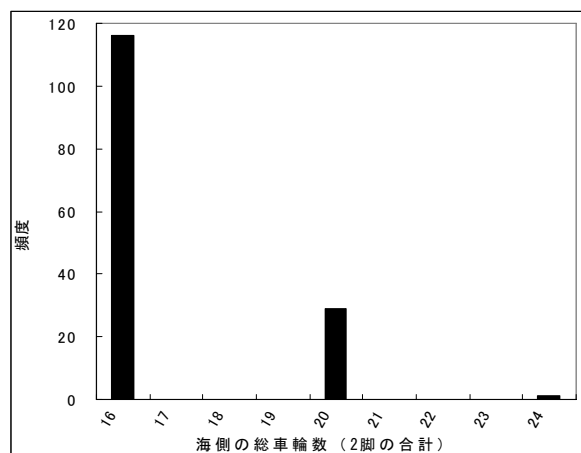


(c) 〔全揚程×全横行距離〕と岸壁水深の関係

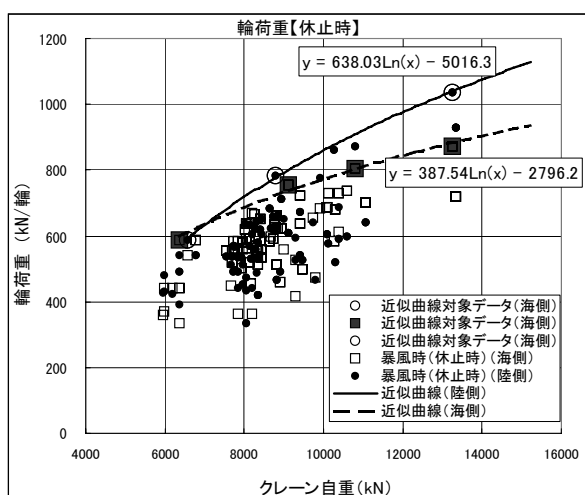
図-3.14 全揚程・全横行距離と岸壁水深の関係



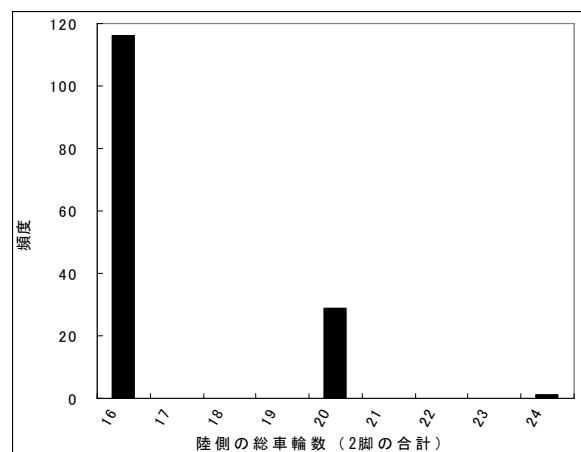
(a) 作業時



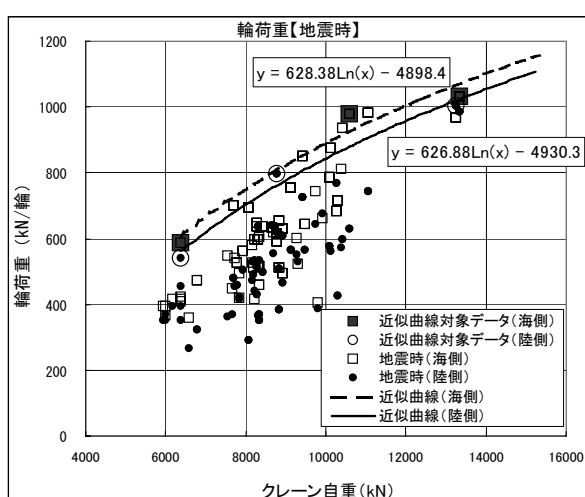
(a) 海側2脚の総車輪数 (2脚の合計)



(b) 休止時



(b) 陸側の総車輪数 (2脚の合計)



(c) 地震時

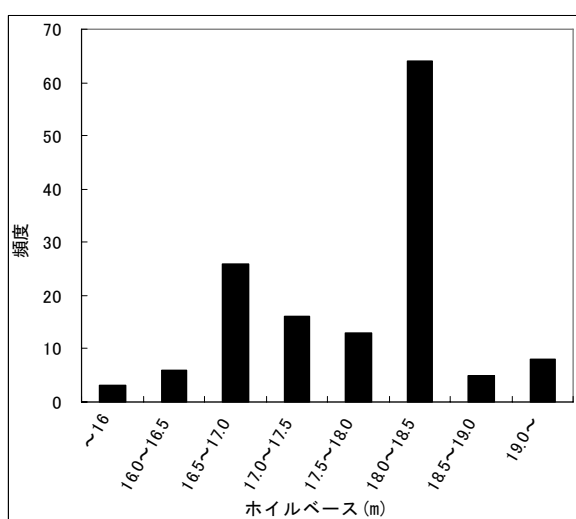


図-3.19 ホイールベースの頻度分布

図-3.17 輪荷重とクレーン自重の関係

図-3.11に、輪荷重と係留施設の水深との関係を示す。係留施設の水深の増加に伴い、輪荷重も大きくなる傾向にあるが、必ずしも水深とコンテナクレーンの規模が対応しているとは限らないため、ばらつきは大きい結果となっている。

クレーンの輪荷重は、基本的にはクレーン自重に対応した量であるため、次に、輪荷重とクレーン自重との関係を示す(図-3.12)。図より、輪荷重とクレーン自重との相関は、比較的良いことが分かる。従って、クレーン自重を推定することができれば、輪荷重はある程度の精度で推定することが可能と考えられる。

クレーン自重については、既往の研究成果²⁹⁾により、クレーンの全横行距離と全揚程を掛け合わせた量との相関が比較的高いことが既に示されている。これを、今回のデータに適用したものを図-3.13に示す。この図より、最近のデータを追加した場合においても、クレーン自重と[全横行距離×全揚程]との相関は高いことが分かる。従って、係留施設の水深、想定されるコンテナ船及びコンテナヤード計画等から、クレーンの全横行距離及び全揚程を設定することができれば、クレーン自重は比較的精度良く推定することができると考えられる。以上の観点から、図-3.14に、[全横行距離×全揚程]と係留施設の水深との関係を示す。図より、全横行距離・全揚程・[全横行距離×全揚程]については、概ね係留施設の水深の増加に対応して、大きくなる傾向にあること分かる。従って、係留施設の水深のみの情報しか与えられていない場合においても、ある程度の精度で[全横行距離×全揚程]を設定することができ、その結果を図-3.13及び図-3.12に照らし合わせることでクレーン自重及び輪荷重を設定することができる。と

関係を設定する。この関係式に基づけば、任意の係留施設の水深に対応した[全横行距離×全揚程]が設定できることになる。

次に、クレーン自重と[全横行距離×全揚程]との関係より、クレーン自重を設定することができる(図-3.16)。ここでは、図中に示すとおり、最小二乗法により設定した2次曲線を設定した。

さらに、輪荷重とクレーン自重との関係より、輪荷重を設定することができる。ここでは、図-3.17に示すとおり、安全側の評価の例として、概ね全てのデータを包絡するような輪荷重とクレーン自重の関係を設定している。この関係式に基づけば、任意の係留施設の水深に対応した輪荷重をクレーン自重を介して設定できることになる。

最後に、係留施設側のクレーン基礎の設計においては、輪配置や車輪数、ホイールベース等が必要となるが、これらの諸量については、図-3.18~19などに示すとおり、概ね一定値であると見なせるため、既往の設計事例の諸元をそのまま適用することができる。

以上の考え方にに基づき、係留施設の水深を17mとして仮定した場合のクレーン側の設計条件の設定例及びその考え方を参考情報として表-3.1に示す。この場合、クレーンの自重は15900kN程度と推定することができる。

なお、以上に示した関係式等は、安全側の評価となるように設定した参考例であり、実際の設計においては、各設計者の判断により関係式の評価・設定等を行い、当該施設の設計に関する制約事項や周辺状況等を十分検討・考慮の上、これらの評価を行う必要があることに留意されたい。

表-3.1 クレーン自重と輪荷重等の設定例(岸壁水深17mの場合)

項目		設定値の例	設定の考え方
荷役性能	全横行距離	【①の場合:水深17m】 [全揚程×全横行距離] =7446(m・m)	①設定された岸壁水深を用いて、[全揚程×全横行距離]と岸壁水深の関係(図-3.15)から、[全揚程×全横行距離]を設定 ②岸壁水深及び想定船舶等から、全横行距離及び全揚程を個別に設定
	全揚程		
クレーン自重(kN)		15868	・想定クレーンの[全揚程×全横行距離]とクレーン自重の関係(図-3.16)から、クレーン自重を設定
輪荷重(kN)	作業時	海側	・上記で設定したクレーン自重を用いて、クレーン自重と輪荷重の関係から、輪荷重を設定(図-3.17(a))
		陸側	
	休止時	海側	・上記で設定したクレーン自重を用いて、クレーン自重と輪荷重の関係から、輪荷重を設定(図-3.17(b))
		陸側	
地震時	海側	・上記で設定したクレーン自重を用いて、クレーン自重と輪荷重の関係から、輪荷重を設定(図-3.17(c))	
	陸側		
輪配置	レースパン	30m	・既存クレーンのスパンより設定
	ホイールベース(海側・陸側共)	18m	・ホイールベースの頻度分布から設定(図-3.19)
	車輪数(海側・陸側共)	16輪/2脚	・海側・陸側の車輪数の頻度分布から設定(図-3.18)
	車輪間隔	1.1m	・既存クレーンの車輪間隔より設定

(2) 横行距離・揚程
以上(1)に示した考え方に基づいたクレーン自重及び輪荷重等を簡易に設定した例を以下に示す。
まず初めに、係留施設の水深から[全横行距離×全揚程]を設定する。ここでは、図-3.15に示すとおり、安全側の評価の例として、概ね全てのデータを包絡するような[全横行距離×全揚程]と係留施設の水深の

4. 長周期・長継続時間の地震動に対する簡易手法（1質点モデル）の適用性の検証

4.1 概要

既に述べたとおり、ガントリークレーンの耐震設計は、一般的に係留施設の設計もしくは整備後に実施されることが多い。しかしこのような手順を踏んだ場合、クレーンの設計段階に移行して、初めてクレーン本体もしくは係留施設の耐震性能を確保できないということが明らかになる場合も想定される。このような現状を踏まえ、係留施設の設計時に土木設計者サイドで簡易的にクレーンの耐震性評価を実施し、事前に係留施設に搭載可能であるクレーンの重量・固有周期・減衰定数等の範囲を決定しておくことは非常に効率的であると考えられる。

一般に、免震クレーンを設計する段階では3次元FEMを用いた時刻歴応答計算により耐震性能の照査が行われる。クレーンの地震時挙動を把握する上では、3次元FEM解析を実施することにより、最も正解に近い値を得ることができるものと考えられるが、この解析に係留施設の設計段階で実施することは極めて困難である。このため、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」では、既に述べた1質点モデルによる照査が例示されている。

過去にクレーン模型に対する1質点モデルの適用性に関して検討を行った結果によると、クレーンの重心応答加速度等の動的特性の把握には1質点系モデルで十分に対応できることが示されている³⁾。しかしながら、過去の検証は、継続時間が短く、かつ長周期成分もそれほど卓越していない地震動を対象としたものである。

以上のことから、1質点モデルが長周期・長継続時間の入力地震動の場合にも適用可能かどうかについて検討することを目的として、実スケールの1/30のクレーン模型に入力した振動台実験、ならびにクレーン模型の1質点モデルの作成を行い、実験で得られた重心位置加速度応答等の結果が1質点系モデルにより再現計算可能であるか否かについて検証することとした。また、重心位置の最大加速度に基づくクレーンの浮き上がりの照査の妥当性についても評価した。

なお、近年では免震装置付きのコンテナクレーンが設置されるケースも増加傾向にあるため、免震装置がクレーン脚部に設置されているケースについても上記検討を実施することとした。

4.2 模型振動実験

(1) 実験概要

実際のクレーンの動的挙動を把握するためには、実機

表-4.1 適用相似則

物理量	実機/模型	縮尺比
長さ	λ	15.00
時間	$\lambda^{1/2}$	3.87
加速度	1	1.00
重量	λ^3	3375
曲げ剛性	λ^5	759375



写真-4.1 クレーン模型および振動台全景

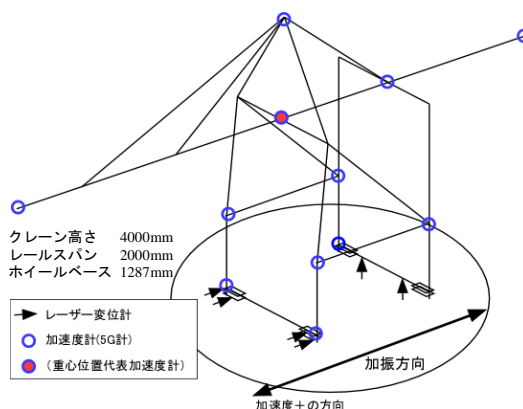


図-4.1 各種計測器取り付け位置および代表スペック

を用いて実験を実施することが最も確実ではあるが、実験対象となるクレーンは一般的に規模が大きいものであり、実機を用いた実験は事実上不可能である。本検討における実験模型は、実機におけるコンテナクレーンの1/15縮尺としたものを用いた。適用される相似則⁴⁾は表-4.1に示すものを用いた。実スケールにおける挙動を実験値より推測する際は、理論上実験で得られた値を表-4.1に示した縮尺比倍すればよいものとされる。本実験で対象としたガントリークレーンは、レールスパン30m、重量約10000kN相当のものである。

写真-4.1に実験に用いた模型および振動台の全景を、図-4.1に実験に用いた模型の概略図ならびに各種計測器の取り付け位置を示す。なお、本実験時に用いた免震装置は、写真-4.2に示すような、クレーン横行方向の

スライド機構と積層ゴムを有する水平型免震装置を用いた。

本実験では、クレーンの浮き上がり加速度の評価を実施することについても実験目的の一つとし、以下のような手順により実験を行った。

- ① 免震装置を脚部に装着しない状態（以下、「免震装置なし」と表記）で 50-100Gal 程度ごとのステップ加振を実施。
- ② 各ステップにおける加振終了後、クレーンの脱輪が認められた場合には、クレーンをレール位置に戻し、一度加振レベルを下げた(25Gal程度)加振を実施する。
この場合、脱輪しなければ再び加振レベルを最初に脱輪した加速度に戻してクレーンが脱輪するか否かについて調べ、当該入力地震動においてクレーンが脱輪する入力加速度最大値を確認する。
- ③ 免震装置をクレーン脚部に装着し、上記と同様な加振レベルの波形入力を行い、データを回収する。波形入力の際には、免震装置なしの場合に入力した加速度よりも大きな加速度レベルでの加振も実施した。

(2)入力地震動

実験に用いた入力地震動は T 港、Y 港、O 港、H 港の各港において検討されているレベル 2 地震動である。各種波形の時刻歴を図-4.2 に、フーリエスペクトルを図-4.3 にそれぞれ示す。なお、それぞれのグラフの時間軸は実スケールのものであるため、実験では表-1 の相似則を適用し、図-4.2 の時間軸を $1/15^{(1/2)} \approx 1/3.87$ 倍に縮めた波形を振動台に入力した。

(3)実験結果

a)クレーン重心位置における応答加速度に関する検討
クレーンの地震時挙動を簡易的に把握するため、本検討においてはクレーン重心位置の加速度について重点的に整理することとした。

図-4.4 中に本実験に用いたクレーン模型の重心位置を星印により示した。図のように、重心位置はクレーン模型の構造部材が位置する点ではなく、構造部材から離れた位置に存在しており、正確な重心位置に加速度計を設置することはできない。このため、以下では同図中に黒丸に示した地点に設置した加速度記録を、便宜的に「重心位置加速度」として評価する。

図-4.5 に免震装置なしのパターンにおける、T 港波を最大加速度 300Gal に調整した波形をクレーン模型に入力した場合の重心位置加速度時刻歴の一例を示す。クレーンの重心位置加速度の最大値は、入力地震動（図-

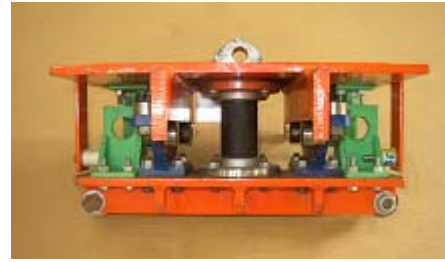


写真-4.2 実験に使用したクレーン脚部免震装置

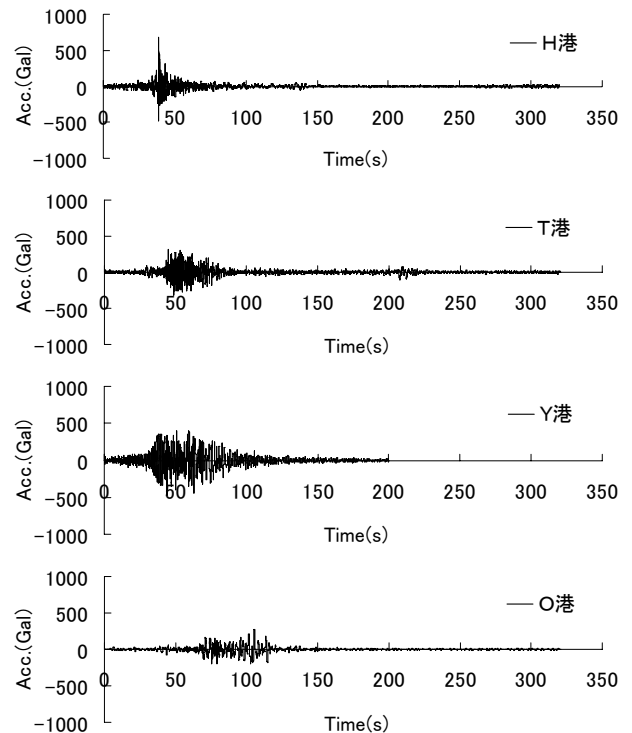


図-4.2 入力波形の加速度時刻歴

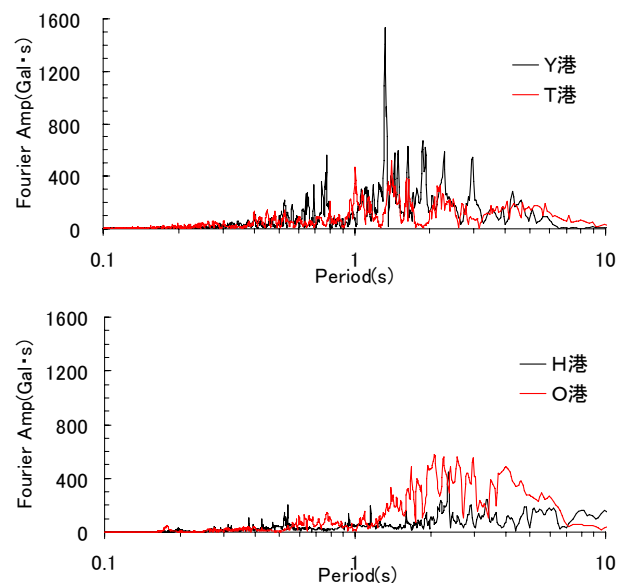


図-4.3 入力波形のフーリエスペクトル

4.2) の振幅レベルが大きい主要動付近 (50 秒付近) ではなく、主要動以降の振幅レベルが小さくなりつつある時間帯 (70 秒付近) で発生しており、この時間帯にクレーンが共振していると考えられる。

図-4.6 はクレーン重心位置での加速度応答のフーリエスペクトルを、図-4.7 は T 港波における入力地震動の主要動付近(15-25 秒付近)および 65-75 秒付近に対するフーリエスペクトルをそれぞれ比較したものであるが、図に示すように入力波 65-75 秒付近におけるスペクトルピーク周期(0.54 秒)は、重心位置加速度応答のスペクトルピーク周期 (0.61 秒) に近いことが分かる。これは、この時間帯の入力波形においてクレーンの固有振動数に近い振動数成分が卓越しており、その結果としてクレーンが共振し、応答加速度が大きくなったと解釈できる。

このように、クレーン重心位置の加速度応答は、入力波形の周波数特性とクレーンの固有周期との関係に依るところが大きいことから、クレーンの耐震設計を行う上で、当該クレーンに入力すべき地震動の設定とその地震動に対応したクレーン固有周期の設定が、非常に重要な項目であると言える。しかしながら、クレーンの固有周期は、一般には自由に変化させることが困難なパラメータであるため、これを踏まえての事前検討が重要な意味を持つことになる。

b) 免震装置の設置効果

次に、免震装置を装着した場合 (以下「免震あり」と記載) の代表的な重心位置加速度応答時刻歴を「免震なし」のケースと比較したものを図-4.8 に示す。このように、同じ加速度レベルの入力地震動に対し、「免震あり」の場合の重心位置加速度応答は「免震なし」のそれに対して非常に小さくなり、免震装置をクレーン脚部に装着することにより、クレーンの応答加速度を低減させる効果が発揮されることが確認された。なお、「免震なし」のケースにおいてクレーン脱輪が起こった加速度レベルと同程度の地震動入力に対しても、「免震あり」の場合は、脱輪現象は観察されなかった。

一方で、図-4.9 はクレーン脚部における水平変位時刻歴を、「免震あり」・「免震なし」のケースでそれぞれ比較したものであるが、加振時に免振装置における水平変位が大きく発生しており、実際のクレーンに免震装置を装着する際には、装置のストローク許容範囲に関する制約条件について考慮しなければならない。

また、「免震なし」・「免震あり」のクレーン重心位置における加速度波形のフーリエスペクトルを比較したものを図-4.10 に示す。図のように、免震装置を装着す

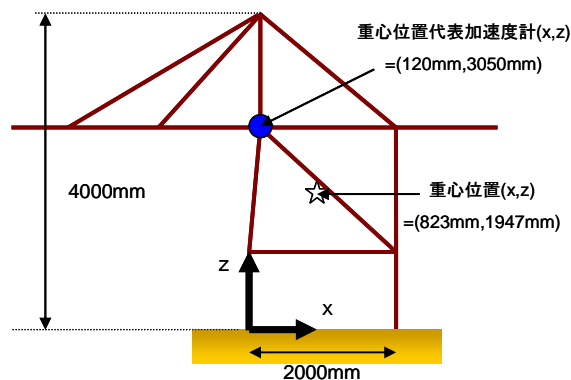


図-4.4 実験に用いたクレーン模型の重心位置

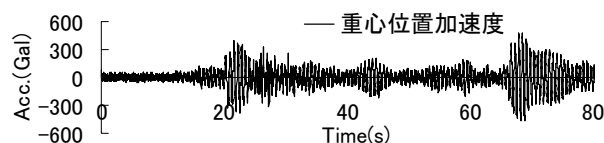


図-4.5 重心位置加速度時刻歴 (Y 港波形入力時)

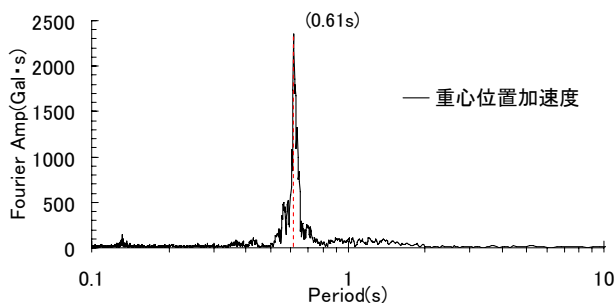
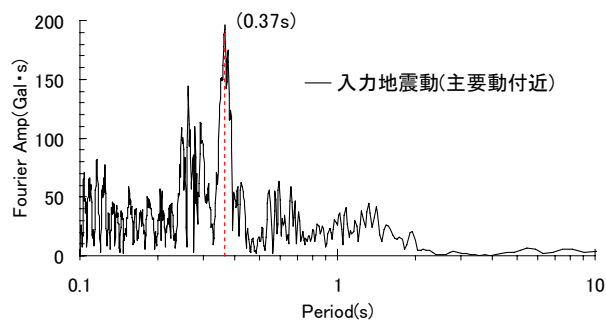
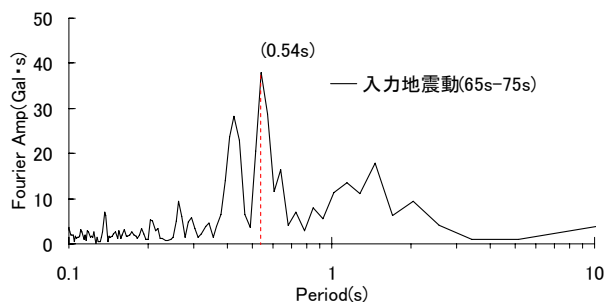


図-4.6 重心位置における加速度フーリエスペクトル



(a) 主要動付近におけるフーリエスペクトル



(b) 入力 65-75sec 付近におけるフーリエスペクトル

図-4.7 T 港波形におけるスペクトルの比較

ることにより、クレーン固有周期が長周期側へ変化する。このため、免震装置を導入したクレーンであっても、長周期型の地震動に対して共振を起こす可能性もあるため、免震クレーンに対しても、係留施設の設計時にその応答特性を把握しておく必要があると言える。

c)クレーン浮き上がり限界加速度に関する検討

さて、2.3 節に示したように、阪神大震災の際の被災事例によると、ガントリークレーンの脚部崩壊の要因としては、

- ①岸壁の強制変位に起因するレールスパン拡大によるクレーン脚の股裂
 - ②脚部の浮き上がりによる片脚への偏荷重作用によるクレーンの転倒あるいは座屈
- 等であると推定されている。

特に上記②によるクレーンの被災を防止するためには、クレーン脚部の浮き上がり開始する、浮き上がり限界加速度について、設計対象となる係留施設上に設置するクレーンの諸元決定時の判断材料として事前に検討しておく必要がある。

図-4.11 はクレーン車輪の脱輪の有無について、振動台への入力最大加速度とクレーン重心位置加速度の関係として、実験全ケースの結果について一つのグラフに整理したものである。

図中の脱輪判定基準に関しては以下のような判定基準を用いた。

- ×：クレーン脚部の脱輪が明らかに目視によって観察できる
- △：クレーンの脱輪は生じていないが、クレーン脚部に取り付けた鉛直変位計の時刻歴より、クレーン脚部の浮き上がりが生じているものと判断できる
- ：目視および変位計時刻歴からもクレーンは安定しているものと判断できる

図-4.11 に示すように、入力地震動の加速度レベルの大小問わず、クレーン重心位置加速度が、ある一定の加速度を超過した場合にクレーンの脱輪現象ないし脚部の浮き上がりが起こると判断してよいと考えられる。

ここで、仮に海側へ慣性力が作用する際の重心位置加速度を $-\alpha$ (浮き上がり限界加速度と定義する) とした場合の、クレーン脱輪現象については以下の図-4.12 を用いて次のように説明することができる。

陸側クレーン脚部における反力を V_2 とすると、海側クレーン脚部まわりのモーメントの釣り合いより、下式が

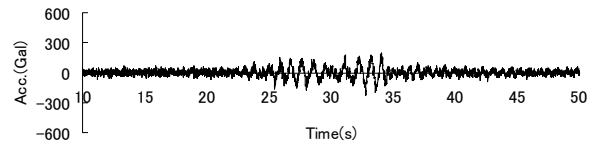
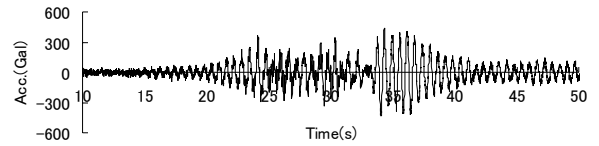


図-4.8 免震装置の有無による加速度波形の違い (上：免震なし、下：免震あり、入力=Y 港 175Gal)

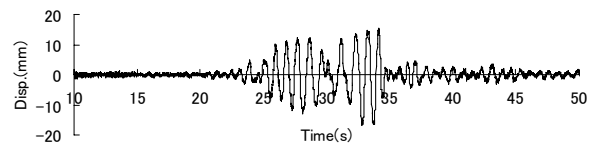
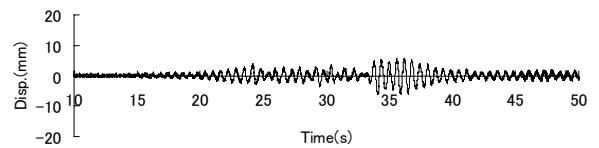


図-4.9 免震装置の有無による脚部変位波形の違い (上：免震なし、下：免震あり、入力=Y 港 175Gal)

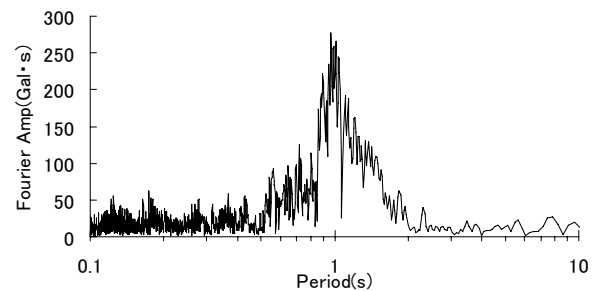
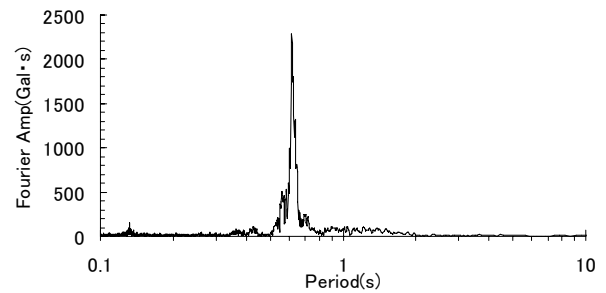


図-4.10 免震装置の有無によるフーリエスペクトルの変化 (上：免震なし 下：免震あり)

成立する。

$$L \cdot V_2 + H \cdot M \cdot (-\alpha) - l_1 \cdot M \cdot g = 0 \quad (4.1)$$

ここで、脚部が浮き上がる際には $V_2=0$ であるので、浮き上がり加速度は、(1)式で $V_2=0$ と置き、

$$(-\alpha) = \frac{l_1}{H} g \quad (4.2)$$

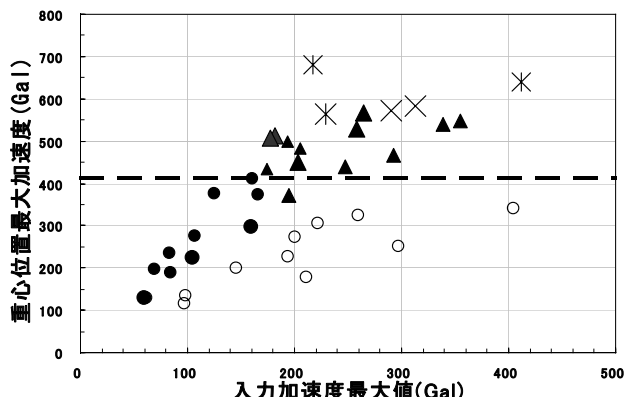


図-4.11 1質点モデルにより算定したクレーン重心位置
加速度によるクレーン脚の浮き上がりの評価

と表現される。従って、上述した静的なモーメントの釣り合いに基づく浮き上がり加速度は、クレーン重心位置の脚部からの高さおよび海側クレーンからの水平距離のみによって決定されることになる。ただし、式の導出にあたり、通常コンテナクレーンの場合、重心位置は海側へ偏心している場合が多いと考え、クレーン浮き上がりの際は陸側クレーン脚部が先に浮き上がると仮定している。

図-4.11 上には式-4.2 で求められる浮き上がり限界加速度についても記載しているが、図に示すように、概ねこの限界加速度を境界線として脚部浮き上がりの有無が明瞭に分かれている。このことから、長周期・長継続時間の入力地震動に対しても、1質点モデルで算定した最大応答加速度と簡易な静的な釣り合い方程式を解くことにより求めた浮き上がり限界加速度を比較することにより、精度良くクレーンの浮き上がりの照査ができることを確認することができた。

4.3 1質点モデルによる模型振動実験結果の再現解析及びその評価

(1) 質点系モデルの概要

本節では、係留施設的设计初期段階において、コンテナクレーン等の基本諸元の簡易設定を実施するためのステップとして、脚部免震装置の有無を問わず、コンテナクレーンの重心位置の加速度・変位等の動的特性が1質点モデル(図-4.13に示すモデル図)を用いて再現できるか否かについて、前節の実験結果を基に検証することとした。

地震動によって強制変位を与えられた場合の1質点減衰系に関する微分方程式は、一般的に次の式で与えられる。

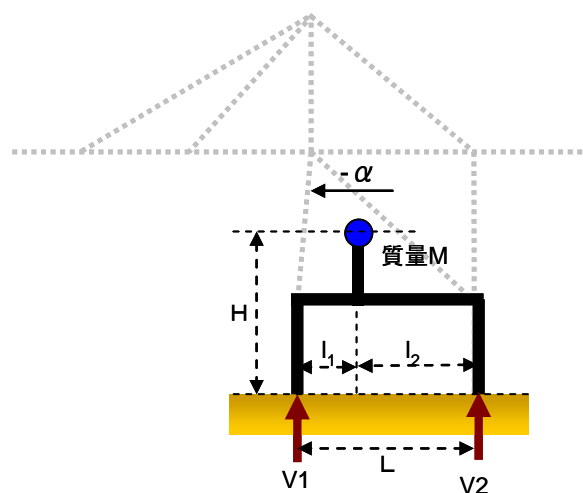


図-4.12 脚部浮き上がり加速度に関する説明図

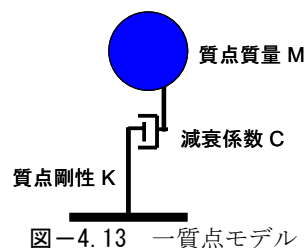


図-4.13 一質点モデル

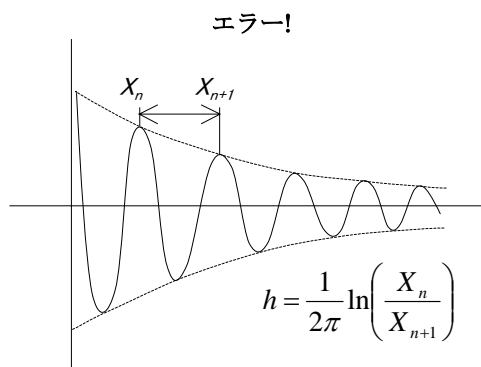


図-4.14 対数減衰の説明図

表-4.2 1質点系解析に用いた各値

	クレーン重量 (N)	クレーン剛性 (N/cm)	減衰定数 (%)	固有周期 (s)
免震装置なし	3087	322.7	1.6	0.62
免震装置あり		150.0	7.0	0.91

$$M(\ddot{x} + \ddot{y}) + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (4.3)$$

ここに、 M : 質点質量($N \cdot s^2/cm$) C : 減衰係数($N \cdot s/cm$) K : 質点剛性(N/cm) x : 質点の地表面に対する相対変位(cm) y : 地震動による地表面の変位(cm), である。

なお、減衰係数 C に関しては、減衰定数 h および固有

円振動数 $\omega(=\sqrt{KM})^{(1/2)}$ される物理量)を用いると、

$$M(\ddot{x} + \ddot{y}) + 2h\omega\dot{x} + Kx = 0 \quad (4.4)$$

と表すことができるため、上式を時間に関して離散化して直接積分法を用いることにより、質点質量 M ・質点剛性 K ・減衰定数 h の3つのパラメーターを与えるのみで質点解析の実行が可能である。パラメーター決定にあたり、実験時に測定可能であった M 以外のものについては、前節の実験結果を参考として、下記のように決定した。

a) コンテナクレーンの剛性

コンテナクレーンの系全体の剛性 K に関しては、クレーンに使用されている各部材の剛性等より求めることも可能であるが、ここでは前章に掲げた実験結果より、重心位置加速度における加速度応答スペクトルからクレーン固有周期を読み取り (図-4.6 参照), その値を用いてコンテナクレーンの剛性 K を算出する方法を用いた。

なお、固有周期と質点剛性の関係は次の式で表すことができる。

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{W/g}{K}} \quad (4.5)$$

ただし、 T : クレーン固有周期(s), W : クレーン重量(N), K : クレーン質点剛性(N/cm), g : 重力加速度(Gal), である。

b) 減衰定数

減衰定数 h については、クレーン模型を振動台に設置し、静止状態からクレーン模型本体を押し、強制変位を与えて自由振動させた際の、クレーン重心位置の加速度記録を基に図-4.14 に示す対数減衰則を用いて算定した。算定に当たっては、時刻歴波形のピークごとに求められる減衰定数を平均したものをを用いた。

なお、表-4.2 に解析に用いたパラメーターをまとめて示す。

(2) 1 質点系モデル・解析結果

a) 「免震なし」の場合における解析結果

図-4.15 は Y 港波 (175Gal) を入力した場合の、重心位置加速度に関する、1 質点モデルを用いた解析結果と実験結果を比較したものである。図のように、高周波成分はカットされているが、実験結果と解析結果はほぼ同一の加速度波形として表現されている。

また、図-4.16 は変位時刻歴を同様に図示したもので

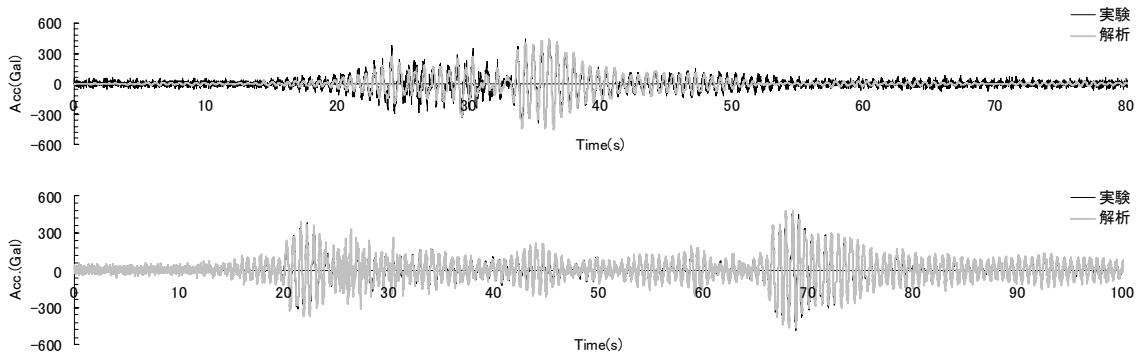


図-4.15 「免震なし」の場合における クレーン重心位置 加速度の実験・解析結果の比較
 <上図: Y 港波 175Gal 入力時 下図: K 港波 300Gal 入力時>

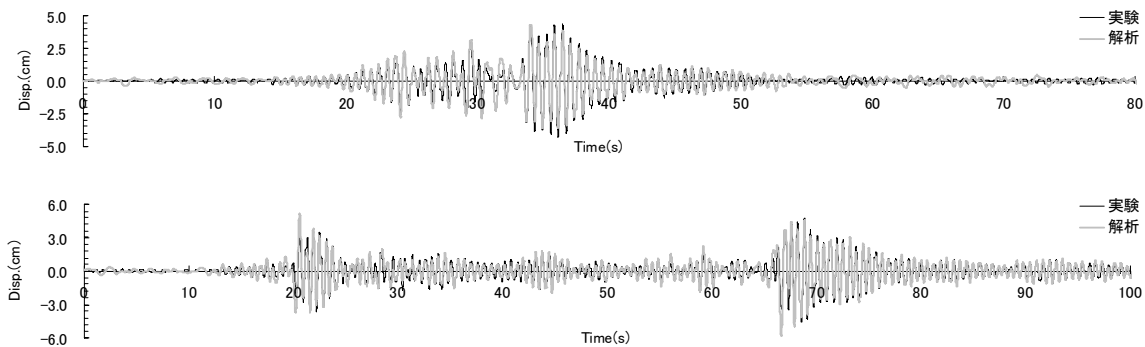


図-4.16 「免震なし」の場合における クレーン重心位置 相対変位の実験・解析結果の比較
 <上図: Y 港波 175Gal 入力時 下図: K 港波 300Gal 入力時>

あるが、図のように、変位に関しても加速度波形に関する解析と同様に、ほぼ実験値と整合性がとれていることがわかる。

なお、重心位置の相対変位は直接的には計測できないため、実験で得られた重心位置加速度波形を周波数領域で積分したものを「重心位置相対変位」とした。（後の解析結果との比較のため、便宜上この値を変位に関する「実験値」とした。）加速度の積分に際しては、加振終了後のクレーン重心位置変位がほぼ 0 となるような 0.3・30Hz のバンドパスフィルターを用いた。

b) 「免震あり」の場合における解析結果

クレーン脚部に免震装置を設置したケースにおいても同様に、1 質点系解析でクレーンの動的挙動が追跡できるか否かについても a) と同様の検討を行った。

ここで、「免震あり」の場合におけるモデル化については、脚部免震装置を含めて 1 質点系でモデル化を行っているため、解析により求められる解、特に変位に関する結果については、免震装置部分の変位に関する算出結果ではなく、あくまでクレーン重心位置の変位であることに留意しておく必要がある。（表-4.2 に示すように、「免震あり」の場合の質点系モデルにおける等価な質点剛性は免震装置なしの場合の半分になっており、免震装置を設置したことにより、クレーンが柔な構造に置き換

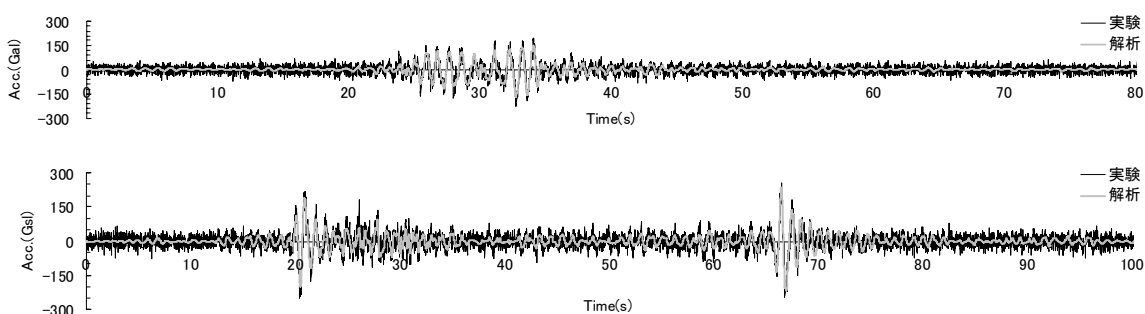


図-4.17 「免震あり」の場合における クレーン重心位置 加速度の実験・解析結果の比較
 <上図：Y 港波 175Gal 入力時 下図：K 港波 300Gal 入力時>

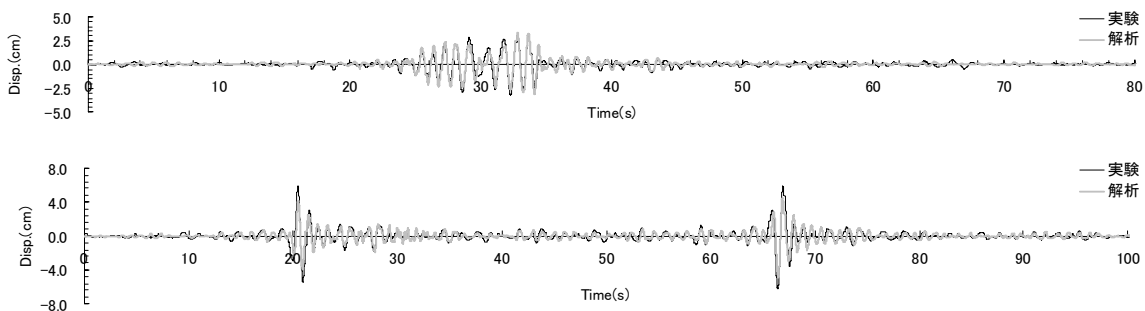


図-4.18 「免震あり」の場合における クレーン重心位置 相対変位の実験・解析結果の比較
 <上図：Y 港波 175Gal 入力時 下図：K 港波 300Gal 入力時>

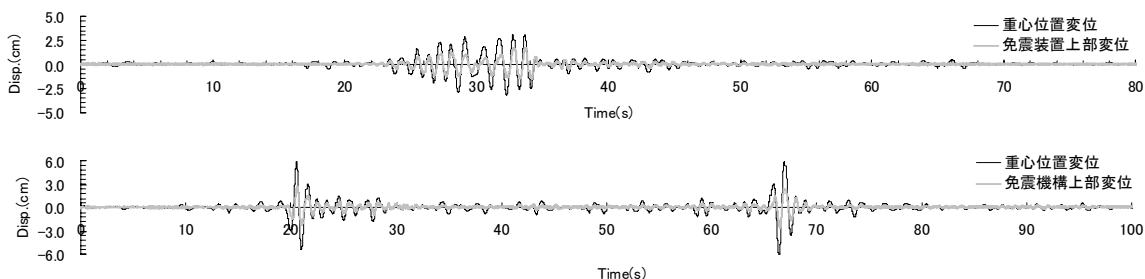


図-4.19 「免震あり」の場合における クレーン重心位置および免振機構上部相対変位の時刻歴比較
 <上図：Y 港波 175Gal 入力時 下図：K 港波 300Gal 入力時>

わったというイメージである。)

図-4.17, 18にそれぞれ代表的な実験ケースにおけるクレーン重心位置での加速度・変位波形に関する実験結果とモデル解析結果の比較を行ったものを示す。図のように、「免震なし」のケースに対して実施した解析結果と同様に、加速度波形、変位波形共に実験結果を良好に再現できていることがわかる。

次に、脚部変位に関する整理を以下に示す。図-4.19は、クレーン重心位置および免振機構上部の相対変位時刻歴を示したものである。図より、免震機構部の変位最大値は、クレーン重心位置の変位最大値の40-50%程度であった。このように、免震クレーンを想定した場合、1質点モデルによるクレーンの重心位置の変位は、免震装置で発生する変位とクレーンの弾性変形によって発生する変位の合計として評価されるため、実際に免震装置で発生する変位とは異なることに注意が必要である。また、両者の変位の寄与率は、入力地震動、免震機構及び重心位置の最大加速度レベル等によって変化すると考えられるため、注意が必要である。但し、少なくとも、本実験で用いた免震装置に類する免震クレーンの場合は、1質点モデルによる変位は、免震装置で発生する変位より大きく評価されるため、安全側の評価となると考えられる。

以上に示したことから、クレーンの浮き上がり加速度・重心位置の最大変位等の応答特性を簡易的に把握する場合においては、長周期・長継続地震動に対しても、1質点モデルを用いた解析手法を用いることで、十分に対応できるものと考えられる。

5. 設計入力地震動の変更がコンテナクレーンの地震時応答に及ぼす影響

前章の検討により、コンテナクレーンの重心位置の加速度応答を評価するための簡易手法(1質点モデル)の長周期・長継続時間の地震動に対する適用性が確認された。そこで、本章では、応答スペクトル(1質点系モデル)により、設計入力地震動の変更に伴う影響を把握するために、工学的基盤面におけるレベル2地震動を対象として、既往の代表的な設計入力地震動と全国の代表的な港湾で検討されているレベル2地震動を用いて、クレーン重心位置で発生する最大加速度応答や免震装置に求められる変形量がどの程度変化するかについての概略評価を行った。なお、ここで概略評価としているのは、実際のクレーンの耐震性能は、工学的基盤面からの地震応答増幅や栈橋構造等との連成振動の影響などを反映したクレーンレベル面における時刻歴波形に基づき評価されるべきである

が、今回の検討では、便宜的に工学的基盤面における地震動で評価しているためである。また、前章で述べたとおり、1質点モデルで算出したクレーン重心位置の変位は、必ずしも免震装置で発生する変位そのものではない。このため、今回の結果については、あくまでも速報的なものであり、その結果の取扱等については、十分に注意されたい。また、入力地震動についても、各地方整備局等で検討中のものであり、実際に設計で使用される波形とは異なる場合もあるため、その点についても注意されたい。

5.1 入力地震動

図-5.1及び図-5.2に、今回の検討で使用したレベル2地震動の時刻歴波形及びフーリエ振幅スペクトルを示す。従来設計波としては、関東地方の港湾における代表的な波形として、八戸波(基盤最大加速度 480cm/s^2 (Gal))を設定した。また、改正港湾基準に対応したレベル2地震動としては、全国の主要な港湾において検討されている工学的基盤面で設定される9波形を使用した。なお、9波形については、水平2成分の加速度時刻歴を合成し、合成された最大加速度の最大値を与える方向に変換したものを使用している。

これらの図より、新しいレベル2地震動は、従来設計波に比較して、継続時間が非常に長いことが分かる。また、各港ごとにサイト特性が反映されており、港によっては、数秒を超える長周期側の成分が卓越するものも見受けられる。なお、港湾施設の設計入力地震動の設定方法の詳細については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」²⁾などを参照されたい。

5.2 既存コンテナクレーンの振動特性

本節では、次節の概略評価の際の目安となる、コンテナクレーンの固有周期、減衰定数及び浮き上がり限界加速度等の設定概要について、一般クレーンと免震クレーンに分類して示す。

(1)一般的なクレーン(免震装置なし)

今回の検討対象であるスパン30m級のコンテナクレーンの固有周期(横行方向)については、一般的には、剛脚構造の場合は2秒程度³⁰⁾、揺脚構造の場合は3秒程度、減衰定数については概ね0.5~3.0%程度であると言われている。

クレーン脚の浮き上がり限界については、4章に示したとおり、クレーン重心位置で定義される浮き上がり限界加速度(式(4.2))を指標とすることが適切である。さ

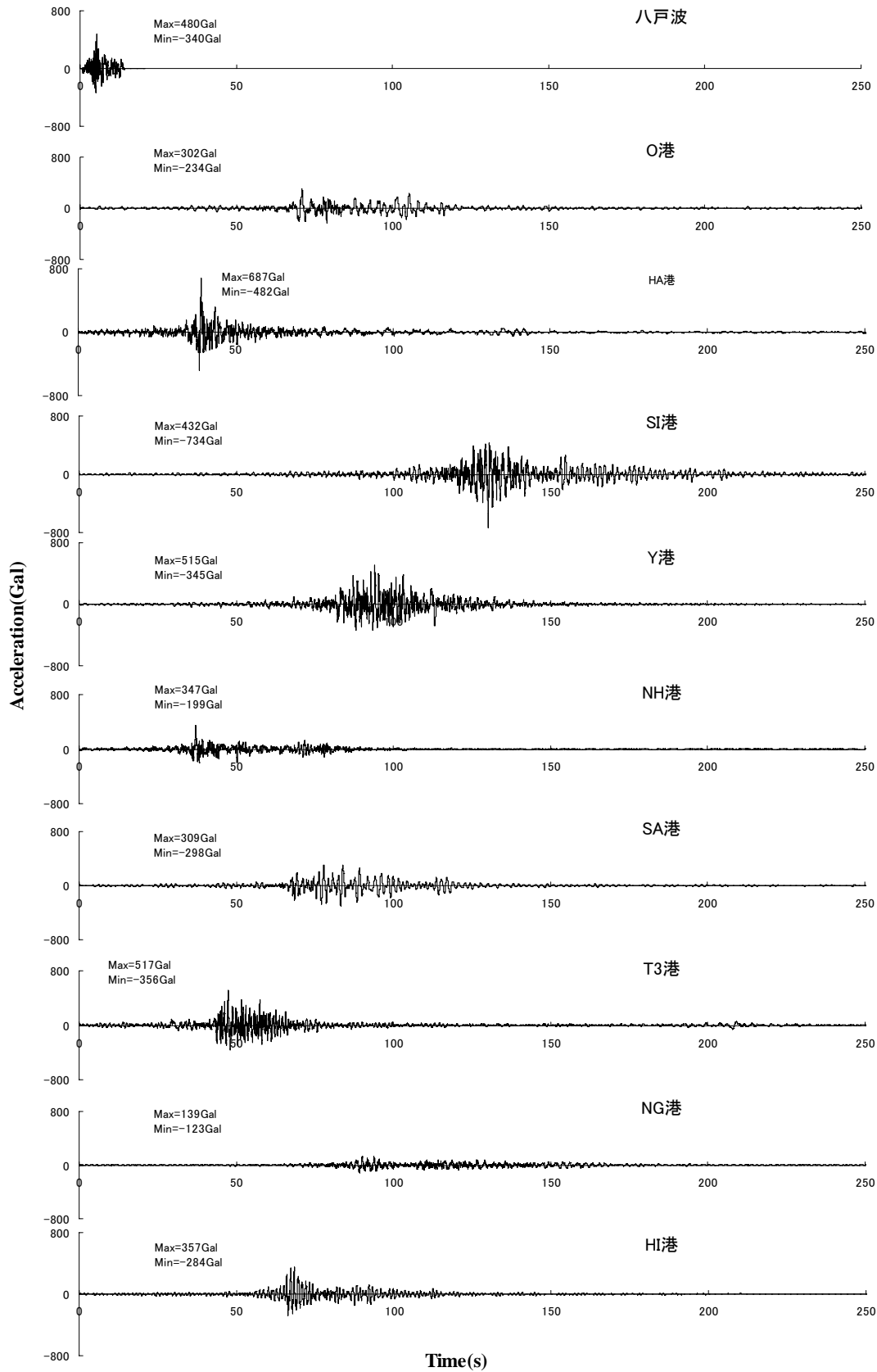


図-5.1 検討対象のレベル2地震動の時刻歴波形

らに、一般的なクレーンの場合、重心位置は海側へ偏心している場合が多いため、陸側から海側方向に作用する

水平慣性力によって、陸側脚が浮き上がりはじめる荷重に相当する重心位置の水平加速度を浮き上がり限界加速

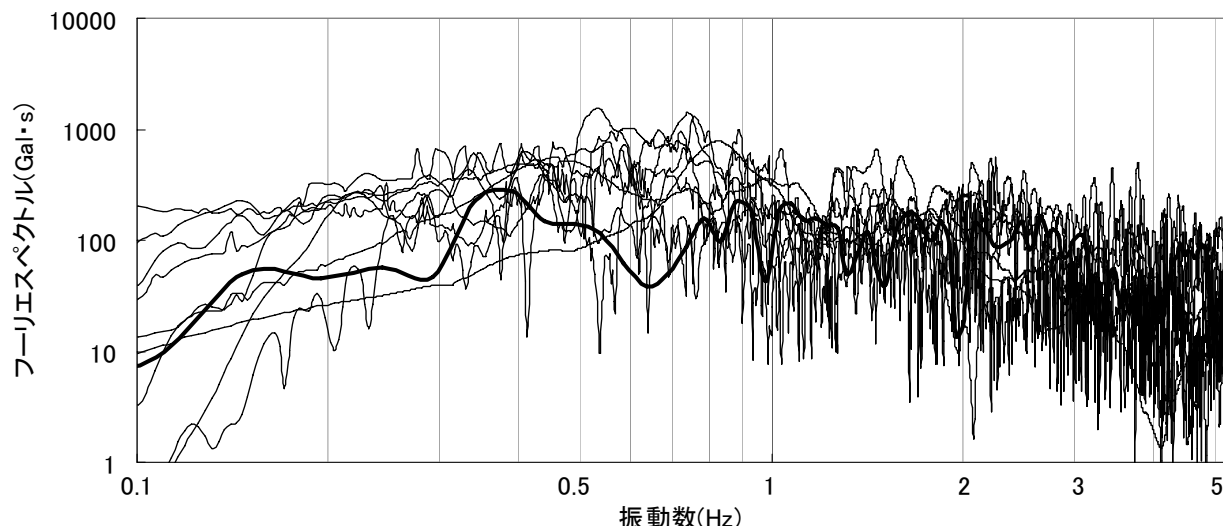


図-5.2 フーリエスペクトル (太線：八戸波，細線：新レベル2地震動)

度とする。浮き上がり限界加速度については、個別のクレーンの形状や重量バランスにより異なると考えられるが、著者が調べた範囲では、ブーム下げの状態で概ね250～400(cm/s^2)程度であった。なお、「コンテナクレーンの耐震設計の手引き」¹³⁾によると、浮き上がり限界荷重は、海側及び陸側の両方向について、水平慣性力を重心位置に作用させ、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、その平均として算定するとされており、定義が異なるので注意されたい。

(2) 免震クレーン (免震装置有り)

現存するコンテナクレーンの免震機構の概要及び主な仕様について、既往の製品カタログ、技術資料及び免震クレーンの製造メーカーへのヒアリングに基づき整理した結果を以下に示す(図-5.3)。なお、以下に記載する内容・数値等については、著者が調べた範囲のみの結果であること、またクレーン製造メーカーへの口頭ヒアリングに基づく数値も含まれているため、その数値の取り扱い等については十分注意されたい。

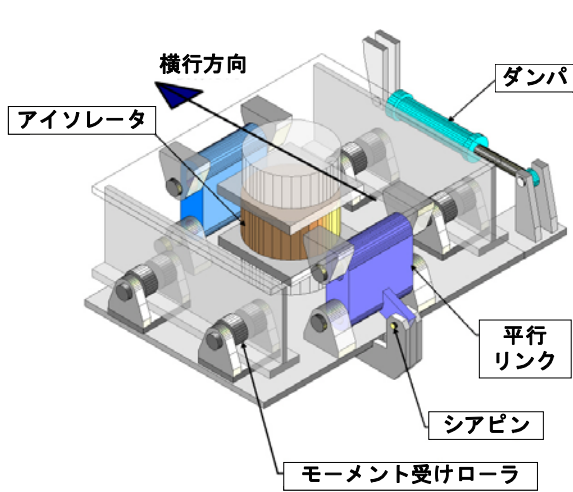
a) 免震装置A

免震装置A(例えば、文献31)32)参照)の主要減衰機構は、積層ゴム及びダンパにより構成されている。すなわち、積層ゴムにより、鉛直荷重を支持するとともにクレーン横行方向の固有周期の長周期化を図り、ダンパにより地震エネルギーを吸収するものである。なお、通常時においては、免震機構によって機構は異なるが、シアピン(地震時に破断)もしくは油圧シリンダ等により積層ゴムには水平変位が発生しない構造となっている。地

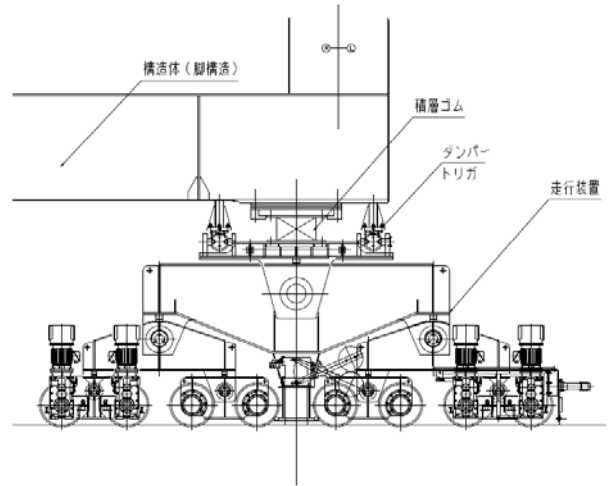
震時には、積層ゴムとダンパが作動する機構となっている。また、地震時における積層ゴム部分の過度の水平変形を抑制するための機構が組み込まれており、地震時に発生する免震装置部分の水平変形量がこの許容値を超えないように設計する必要がある。この免震機構を導入したクレーンの設置実績としては東京港大井ふ頭等があり、製造メーカーへのヒアリング結果によると、本免震機構を採用したクレーンの横行方向の固有周期は4.0秒程度、減衰定数は15～20%程度、免震装置の許容変形量は±30cm程度である。

b) 免震装置B

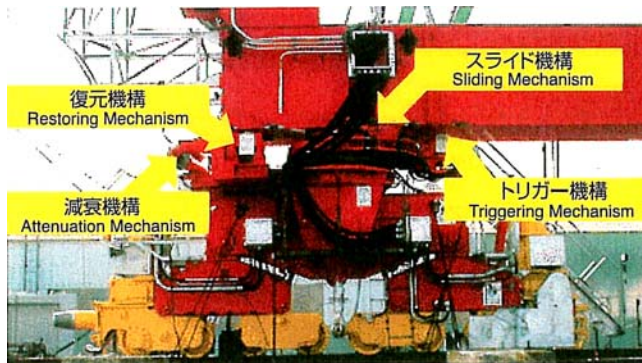
免震装置B(例えば、文献33)参照)の主要減衰機構は、変位機構、ばね(復元機構)及びダンパ(減衰機構)により構成されている。免震装置Aとの相違点は、変位機構がベアリング等を利用した機械的な構造により構成されている点にある。また、復元機構によりクレーン横行方向の固有周期の長周期化を図り、復元機構及び減衰機構の組合せにより地震エネルギーを吸収するものである。なお、変位機構部分の過度の水平変形を抑制するための機構が組み込まれており、地震時に発生する免震装置部分の水平変形量が許容値を超えないように設計する必要がある。この免震機構を導入したクレーンの設置実績としては東京港大井ふ頭等がある。文献調査の結果によると、本免震機構を採用したクレーンの横行方向の固有周期は4.0秒程度、免震装置の許容変形量は±30cm程度である。



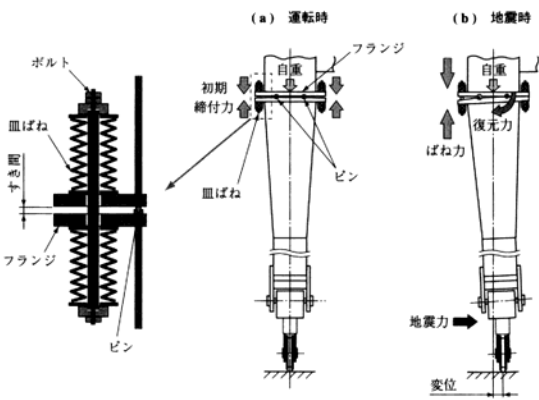
(a1) 免震装置Aの事例 (その1) ³¹⁾



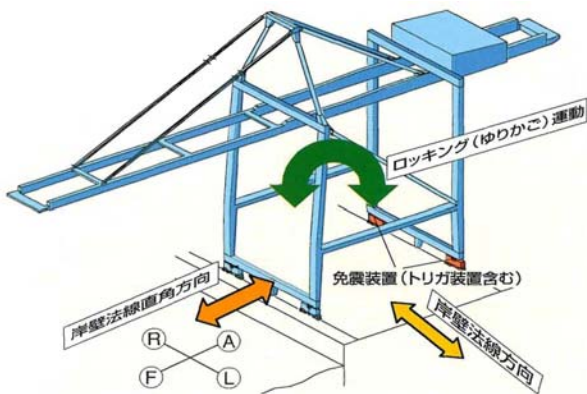
(a2) 免震装置Aの事例 (その2) ³²⁾



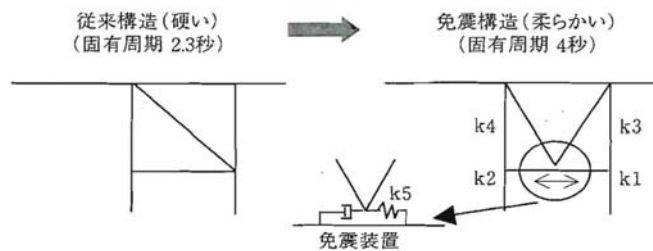
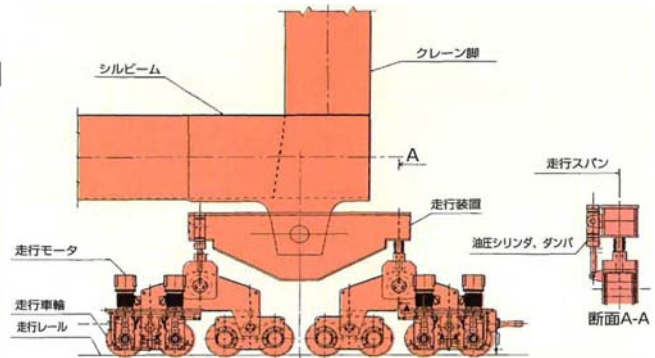
(b1) 免震装置Bの事例 (その1) ³³⁾



(c) 免震装置Cの事例 ³⁴⁾



(d) 免震装置Dの事例 ³⁵⁾



(e) 免震装置Eの事例 ³⁶⁾

図-5.3 免震装置の機構イメージ

c) 免震装置C

免震装置C（例えば、文献34）参照）はヒンジ式免震装置と呼ばれ、脚の途中にヒンジ部を設け、クレーンの横行方向固有周期の長周期化を図ることにより免震化するものである。ヒンジ部は、脚を挟むように皿ばねを2箇所設置するとともに、上下フランジの接触部に2箇所のピンを設置することによって（上下フランジの間に空隙を設ける）、ヒンジ部分に復元力（復元モーメント）を発生させる機構となっている。なお、通常時においては、自重及びばねによってフランジ面に作用する圧縮力を超過するモーメントが作用するまで免震機構は変形を起こさないことから、これを通常時のトリガー機構としている。また、復元力の勾配特性により、クレーンの応答加速度の低減を図ることができる。この免震機構を導入したクレーンの設置実績としては、釧路港（レールスパン16m級の連続アンローダ）がある。なお、製造メーカーへのヒアリングによると、本免震機構を30mスパン級のコンテナクレーンに導入した場合、クレーンの横行方向の固有周期は3.5秒程度（水平変位50cmでの等価固有周期）、減衰定数は最大20%程度（水平変位50cmでの等価減衰定数）、免震装置の設計上の許容値としては、クレーンの応答加速度 $250(\text{cm}/\text{s}^2)$ が想定されるという結果が得ている。

d) 免震装置D

免震装置D（例えば、文献35）参照）の主要減衰機構は免震装置Bと同様であり、ばね（復元機構）及びダンパ（減衰機構）により構成されているが、免震装置Bでは水平方向の変位に対して減衰機構・復元機構が作用することにより免震効果が発揮されたが、装置Dでは鉛直方向の変位に対して免震装置が作動する点に相違がある。免震装置は、陸側のクレーン脚の基部のみに設置され、これにより海側レールを中心としたロッキングを発生させることにより、陸側脚基部の免震装置部分で地震エネルギーを吸収するとともに、クレーン横行方向の固有周期の長周期化を図るものである。なお、過度の鉛直変位を抑制するための機構が組み込まれており、地震時に発生する免震装置部分の鉛直変位量が許容値を超えないように設計する必要がある。この免震機構を導入したクレーンの設置実績としては、苫小牧港（レールスパン16m級のコンテナクレーン）がある。なお、製造メーカーへのヒアリングによると、本免震機構を30mスパン級のコンテナクレーンに導入した場合、クレーンの横行方向の固有周期は3.5秒程度（ロッキングが発生するモードに対応）、減衰定数は20%程度、免震装置部分の鉛直方向の許容変位量は $\pm 15\text{cm}$ 程度が想定されるという結果を得ている。

e) 免震装置E

免震装置E（例えば、文献36）参照）は、クレーンのトラス構造部分に減衰装置を設置することにより、免震化するものである。通常、コンテナクレーンの斜材は1本であるが、本構造では、トラスをV字型として水平桁との接合部分に減衰装置を設置し、地震時に免震装置が前後に摺動することによりクレーン全体の剛性が小さく（柔らかく）なることにより固有周期を長周期化し、かつ減衰要素により揺れの振幅を抑制する機構である。免震装置に用いるバネ要素と減衰要素は、高減衰積層ゴムが使用されている。この免震機構を導入したクレーンの設置実績としては横浜港があり、文献調査の結果によると、本免震機構を採用したクレーンの横行方向の固有周期は4.0秒程度であった。

免震クレーン脚の浮き上がり限界加速度については、一般クレーン（免震装置なし）と同程度であると考えられる。これは、免震装置部分以外のクレーン構造部材の基本的な重量バランスは概ね同じであるためである。

5.3 検討結果

(1) 概略評価の前提条件

応答スペクトルを用いた概略評価では、剛脚のコンテナクレーンを対象とし、一般クレーンの場合は固有周期2.0秒・減衰定数2.5%、免震クレーンの場合は固有周期4.0秒・減衰定数20%として評価した。なお、免震機構については、模型振動実験（4章）で試行した免震装置を想定し、その許容変形量の目安を30cmとして評価することとした。また、浮き上がり限界加速度については、 $300(\text{cm}/\text{s}^2)$ を目安として評価した。

(2) 検討結果

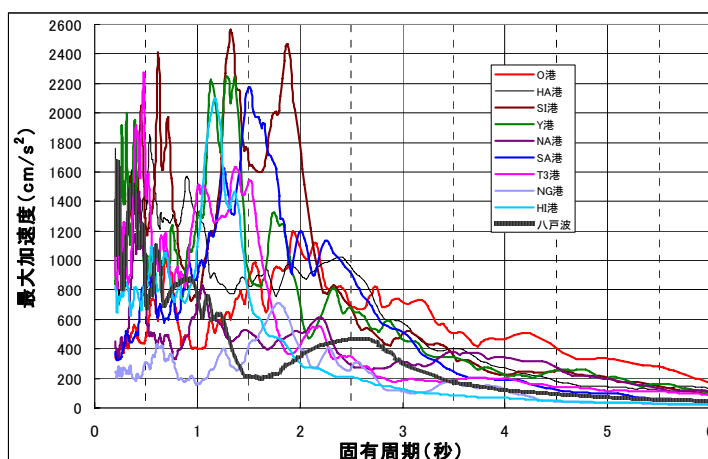
前述した従来設計波（八戸波）及び主要港湾で検討されているレベル2地震動に対する、絶対加速度応答スペクトル及び相対変位応答スペクトルを図-5.4に示す。

図-5.4(a)は、減衰定数2.5%の最大加速度応答を示しており、一般クレーンに対応している。この図より、免震装置が設置されない一般的なクレーンの場合（固有周期2秒）、新たに設定されたレベル2地震動に対する最大加速度応答は、いずれも浮き上がり限界加速度の目安（ $300\text{cm}/\text{s}^2$ ）を超過するケースがほとんどであり、免震装置を導入する必要性が高いことを示唆する結果となった。

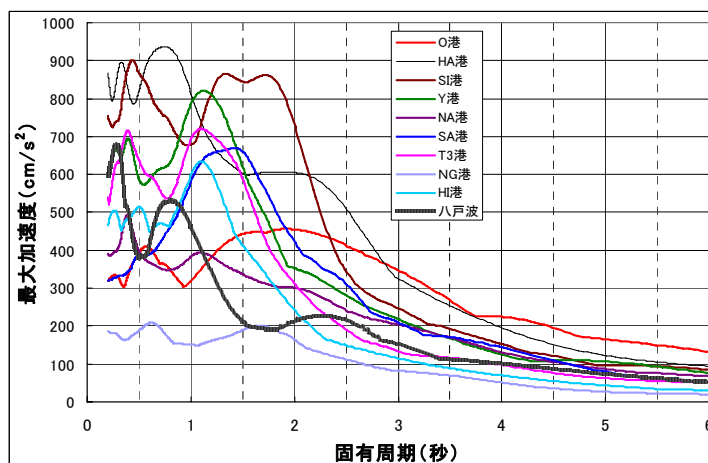
一方、免震装置を導入したクレーンの場合（固有周期

4秒, 減衰定数 20%) (図-5.4(b)), いずれのケースも最大加速度は 250 cm/s^2 以下であり, 既往の免震装置により, クレーンの浮き上がりについては概ね回避できるものと考えられる. また, 固有周期 4秒に対する最大変位について見ると(図-5.4(c)), O港波及びHA港波で 50cm を上回る大きな変位が発生しており, 現状の免震装置では対応できない可能性があるという結果になった. 但し, 応答スペクトルによる最大変位は, 必ずしも免震装置部分の変位を表している訳ではないこと, 及び免震機構により, 最大変位に占める免震部分の寄与率等は変わるため, 以上に示した検討結果は, あくまでも目安であることに注意されたい. なお, このような課題があるため, 免震クレーンの最大変位応答に着目し, 主要港湾の新レベル2地震動と従来設計波(八戸波, 最大加速度 480cm/s^2) との比較により, 新L2地震動において, 従来設計波で発生する免震装置の変位量からの増加程度の相対評価した結果を示す. すなわち, 図中に示す線は, (各港の新レベル2地震動における最大応答変位)を(従来設計波における最大応答変位)で除した値であり, 従来設計波と比較して, クレーン応答変位の増加割合を示している(図-5.5). この結果より, 新レベル2地震動においては, 従来設計波と比較して, 概ね 0.5~2.4倍程度のクレーン応答変位が発生すると見込まれ, 免震装置の変位量についても, 同程度のスペックアップが必要となる可能性がある. 但し, 増加程度は, O港波及びHA港波において極端に大きく, それらを除けば, 概ね従来ストロークの1.5倍程度で済むと推定される.

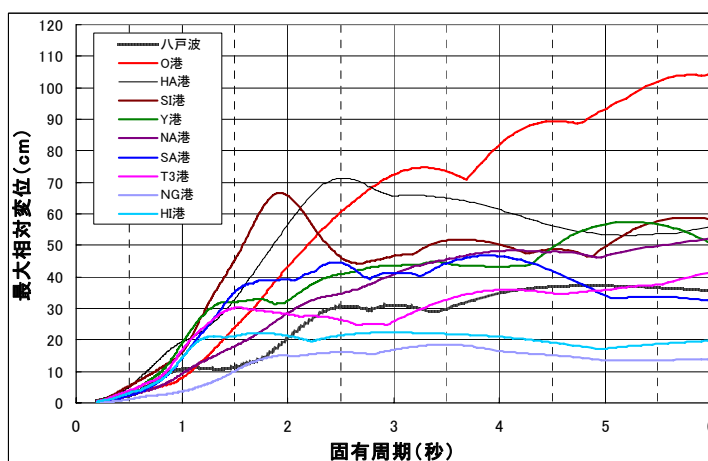
以上のとおり, 既存の一般的なスペックの免震装置を導入することにより, レベル2地震動に対して浮き上がりを発生させないようにすることは十分可能であると推定されるが, 免震装置で発生するストローク量については, 免震装置の機構に依存するが, 今後, 注意して検討を進める必要があることが明らかになった. なお, 再掲するが, 以上の検討は, 工学的基盤で設定されている入力地震動を使用した検討であり, 実際の地盤応答や栈橋等の係留施設の影響を無視しており, 最大応答変位については, 免震装置自体に求められる変位量そのものではないこと, 実機の免震クレーンの固有周期や減衰定数については幅があることなどのため, 厳密な評価ではなく, あくまでも概略評価であることに留意されたい.



(a) 最大加速度(減衰定数2.5%)



(b) 最大加速度(減衰定数20%)



(c) 最大変位(減衰定数20%)

図-5.4 応答スペクトル

6. まとめ

本研究では、『港湾の施設の技術上の基準を定める省令』及び『港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示』の改正（2007, 4）にともない技術基準対象施設として追加された荷役機械のうち、耐震強化施設としてのコンテナクレーン（レールスパン30m級）を対象として、以下の検討を行った。本研究で得られた結論を以下に示す。

- a) コンテナクレーンの耐震設計に関する課題の整理を行い、係留施設とコンテナクレーンの双方の耐震性を確保するための標準的な耐震性能照査の在り方について、基本的な考え方を提案した。
- b) コンテナクレーンの重心位置の加速度応答を評価するための簡易手法（1質点モデル）の長周期・長継続時間の地震動に対する適用性について、模型振動実験及び数値解析により確認した。
- c) 応答スペクトルにより、技術基準改正にともなう設計入力地震動（レベル2地震動）の変更が、コンテナクレーンの最大応答加速度や免震装置に求められるストローク量に対してどの程度の影響を及ぼすかについての概略評価を行った。その結果、既存の一般的な免震装置を導入することにより、当該レベル2地震動に対して浮き上がりが発生させないようにすることは十分可能であると推定されるが、免震装置で発生するストローク量については、免震装置の機構にも依存するが、既存のストローク量を大幅に上回る可能性があり、今後注意すべき点であることが明らかになった。
- d) コンテナクレーン側の基本的な設計条件が不足しているため、30mスパン級のコンテナクレーンの基本諸元の整理を行い、係留施設の水深からクレーン自重及び輪荷重等の係留施設側の設計に最低限必要な条件を簡易的に設定できる手法を参考提示した。

7. 今後の課題

今回の報告では、冒頭に示した下記に示す課題①②のうち、一部の検討結果を速報として報告した。

- ① コンテナクレーンに関する各種の設計情報の不足
- ② 新しいレベル2地震動に対してコンテナクレーンに要求される耐震性能（性能規定）の明確化及び照査手法・項目等の標準化

しかしながら、今後、上記①②について、以下に示す検

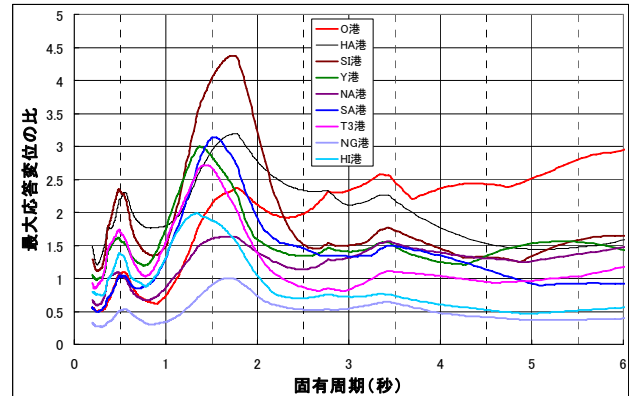


図-5.5 クレーン最大応答変位の比
(各港の新レベル2地震動／従来設計波)

討がさらに必要あると考えている。

課題①については、コンテナクレーンの振動特性や照査規準に係る諸量（許容値）についての設計情報を収集・整理し、係留施設側の検討・設計段階における耐震強化施設としてのコンテナクレーンの成立性の評価の精度・信頼性を、さらに向上させる必要がある。具体的には、固有周期、免震装置機構・仕様に対応した減衰定数や許容ストローク量、重心位置、クレーン脚の海陸方向の拡大の際の脚の弾性限界値、浮き上がり（もしくは脱輪）限界加速度などである。また、既存コンテナクレーンの耐震照査の実施に向けて、既存コンテナクレーンの固有周期や減衰定数を簡易にかつ一定の精度で算定する標準的な手法についての検討・整備が必要であると考えられる。

課題②については、今回の報告では、係留施設とコンテナクレーンの双方の耐震性を確保するための標準的な耐震性能照査の在り方を提案したが、これは基本的な考え方のみであり、係留施設やクレーン基礎の構造形式や免震装置の機構・仕様等の各種の組合せにおいて、さらに詳細な検討を行い、その組合せにおけるレベル2地震動に対するコンテナクレーンに要求される耐震性能（性能規定）の明確化及び照査手法・項目等の標準化が必要とされる。特に、免震コンテナクレーンの構造設計は、一般的に3次元有限要素法を用いた動的解析により行われるが、その照査において、照査すべきクレーンの作業状態（ブームの上げ／下げの状態やトロリー位置等）、レベル2地震動の入力方法の詳細（加振方向等）及び要求性能としての修復性を確保するための構造部材等の具体的な照査項目や許容値の設定の考え方など、耐震強化施設としてのコンテナクレーンの港湾基準への適合性確認の観点からの包括的な整理・検討が必要である。また、レ

レベル2地震動に対するコンテナクレーンの成立性については、係留施設側の設計の早い段階で見極めることが重要であるが、工学的基盤における時刻歴波形が与えられた中で、その評価の精度を向上するとともに、今回提示したような応答スペクトルなどによる簡易的な手法を設計実務で提供する必要がある。

以上に示した課題については、別報にて引き続き報告する予定である。

(2008年2月14日受付)

謝辞

最後に本研究の遂行にあたっては、(社)港湾荷役システム協会(吉田由治氏、中村武男氏、平形忠之氏、コンテナ施設調査調査研究委員会メンバー各位)より、各種データの提供及び貴重なご意見を頂いた。また、コンテナクレーンの数値解析モデルについては、JFE技研(株)の塩崎禎郎氏より、既往の検討事例等の詳細について大変貴重なご意見を頂いた。レベル2設計入力地震動については、各地方整備局の担当部局(港湾空港技術調査事務所等)よりデータのご提供を頂いた。柳原啓二氏(港湾施設研究室研究員)及び小林陽子氏には、各種のデータ整理及び図面作成を担当して頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局: <http://www.mlit.go.jp/kowan/>
- 2) 国土交通省港湾局: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会, 平成19年7月.
- 3) 菅野高弘・塩崎禎郎: コンテナクレーンの地震時挙動に関する数値解析法の検討, 土木学会地震工学論文集, Vol. 29, 2007.
- 4) 日本機械学会: クレーン製作指針, 1975.
- 5) (社)日本クレーン協会: クレーン等安全規則の解説(改正5版), 平成18年6月.
- 6) 厚生労働省労働基準局安全衛生部安全課編: クレーン等構造規格の解説(改訂3版), (社)日本クレーン協会, 平成9年6月.
- 7) (社)港湾荷役機械化協会: 港湾荷役機械要覧, 1996.
- 8) 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) 稲富隆昌ほか: 1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告, 港湾技研資料, No. 857, 1997.
- 10) 佐原光一・菅野高弘: 物資輸送確保のための港湾施設の耐震対策, 港湾荷役, 第51巻, 第5号, 平成18年9月.
- 11) (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.
- 12) (社)日本クレーン協会: クレーン耐震設計指針(日本クレーン協会: JCAS1101-1989), 1989.
- 13) (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.
- 14) 中園嘉治: コンテナクレーン耐震設計のための手引について, 港湾荷役, 第43巻, 第6号, 1998.
- 15) 江頭隆喜・山本俊介・田邊俊朗・中島晋・菅野高弘・宮田正史・柏崎 昭宏・金山 維史: 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, 港湾技研報告, 第38巻, 第2号, 1999.
- 16) 宮田正史・菅野高弘・濱田純次・田邊俊郎・中島晋: 直杭棧橋とコンテナクレーンの地震時相互作用に関する研究, 第10回日本地震工学シンポジウム, 1998.
- 17) 山本俊介・江頭隆喜・菅野高弘・田邊俊郎・宮田正史: 地震時における棧橋式岸壁とコンテナクレーンの動的相互作用, 地震工学研究発表会講演論文集, 25-2巻, 1999.
- 18) 山本 俊介・江頭 隆喜・菅野 高弘・田邊 俊郎: 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, 構造工学論文集, Vol. 46A, 2000.
- 19) 田邊俊郎・江頭隆喜・山本俊介・菅野高弘・宮田正史・柏崎 昭宏: コンテナクレーンの地震時の挙動に関する模型実験, 日本機械学会論文集(C編), 66巻, 646号, 2000.
- 20) 江頭隆喜・山本俊介・田邊俊郎・菅野高弘・柏崎昭宏・田中剛・巽裕一郎: 揺脚式コンテナクレーンの大規模地震時の挙動に関する模型実験, 港湾技研資料, No. 959, 2000.
- 21) 村野健一・菅野高弘・佐藤栄治・南部俊彦・塩崎禎郎・長井裕幸: コンテナクレーンの地震時脱輪現象の解析と実験, 日本機械学会講演論文集, No. 00-34, 2001.
- 22) 中山義紀・菅野高弘・田邊俊郎・佐藤栄治・山本俊介・田中剛: 免震式コンテナクレーンの大規模地震時の挙動に関する模型実験, 港湾技研資料, No. 981, 2001.
- 23) 南部俊彦・菅野高弘・佐藤栄治・塩崎禎郎・村野健一: 耐震コンテナクレーンの地震時挙動に関する実験と解析, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, 2001.
- 24) 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, 2001.
- 25) 山本俊介・菅野高弘・田邊俊郎: 棧橋式岸壁とコンテナクレーンの地震時相互作用に関する模型振動実験, 日本機械学会論文集(C編), 68巻, 675号, 2002.

- 26) 菅野高弘・芝草隆博・藤原潔・徳永耕一・楨本洋二・藤木友幸：コンテナクレーンの耐震性向上に関する研究～免震コンテナクレーンの開発～，港湾技研報告，第42巻，第2号，2003.
- 27) 菅野高弘・芝草隆博・楨本洋二：ガントリークレーンの耐震性向上に関する研究，土木学会地震工学論文集，Vol. 27，2003.
- 28) 港湾荷役技術情報センター：日本におけるコンテナクレーン一覧表，(社)港湾荷役機械システム協会，平成18年4月.
- 29) 高橋康弘・須田国男・藤本健幸：コンテナクレーンの諸元解析，港湾技研資料，No. 826，1996.
- 30) 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回土木学会年次学術講演会講演概要集，第6部，1999.
- 31) 永松健一郎・小柳誠一：免震装置付コンテナクレーン，港湾荷役，第47巻，1号，2002.
- 32) 塩崎禎郎・菅野高弘・山本俊介・佐藤栄治・南部俊彦・村野健一：コンテナクレーンの地震時輪荷重に関する模型振動実験，第56回土木学会年次学術講演会講演概要集，第6部，2001.
- 33) 大久保欣昭・阿比留久徳・原田秀秋・池田博・大貫行眞：免震コンテナクレーン，日本機会学会第9回交通・物流部門大会講演論文集，No. 00-50，2000.
- 34) 辻直人・島田貴弘・柏崎昭宏・信太雅人・近藤晃司：コンテナクレーン用ヒンジ式免震装置の開発，石川島播磨技報，Vol. 43，No. 6，2003.
- 35) 村野健一・吉田和夫・塩崎禎郎・菅野高弘：コンテナクレーン用ロッキング型免振装置の模型実験と岸壁への影響，日本機械学会論文集（C編），Vol. 70，No. 689，2004.
- 36) 三木敦・玉木利裕：免震コンテナクレーン，川崎重工技報，157号，2005.