

第2章 コンテナクレーン設計上の課題

第1節 コンテナクレーンの諸元

本研究では、兵庫県南部地震のようなレベル2地震動が発生した場合でも、地震発生後にコンテナターミナルの機能を維持していることを前提としている。国内における基幹的な国際コンテナターミナルは、現在耐震性を強化する対策が進められているが、これらのターミナルは外航の本船航路が寄港しており、対象船舶はオーバーパナマックス級が想定されている。これらのことから本研究で対象とするコンテナクレーンは、オーバーパナマックス級のコンテナ船を対象としたクレーンとすることとした。また、オーバーパナマックス級でもこれらの船舶の船型には若干のばらつきはあるが、「コンテナクレーン標準仕様解説書」¹⁾では、図-2.1.1のような船型を標準的な対象船型として定めている。

一方、現実に各コンテナターミナルに設置されているコンテナクレーンは、国内では大手メーカー各社が、各地のコンテナターミナルの利用対象船舶に対応して、それぞれの会社の独自の構造様式で設計している。

しかし、本来コンテナクレーンは、荷役の対象であるコンテナがISOにより規格化されている上、セカンドトロリー等全く異なる一部の特殊な形式を除けば、荷役の主たるメカニズムはほとんど同一であり、また構造物としても特段複雑な形状をしているわけでもないことから、対象となる船舶の船型が同一であれば、どのメーカーが設計しても、構造形式としては概略似たような形式となることが推測される。

現在実際に国内に設置されているコンテナクレーンは、(社)港湾荷役機械化協会により「日本におけるコンテナクレーン一覧表」²⁾にまとめられている。このデータから求めたコンテナクレーンの主たる諸元の分布を図-2.1.2~2.1.6に示す。

注) d_F : 満載吃水、 d_w : 荷役時吃水、 d_L : 軽荷吃水

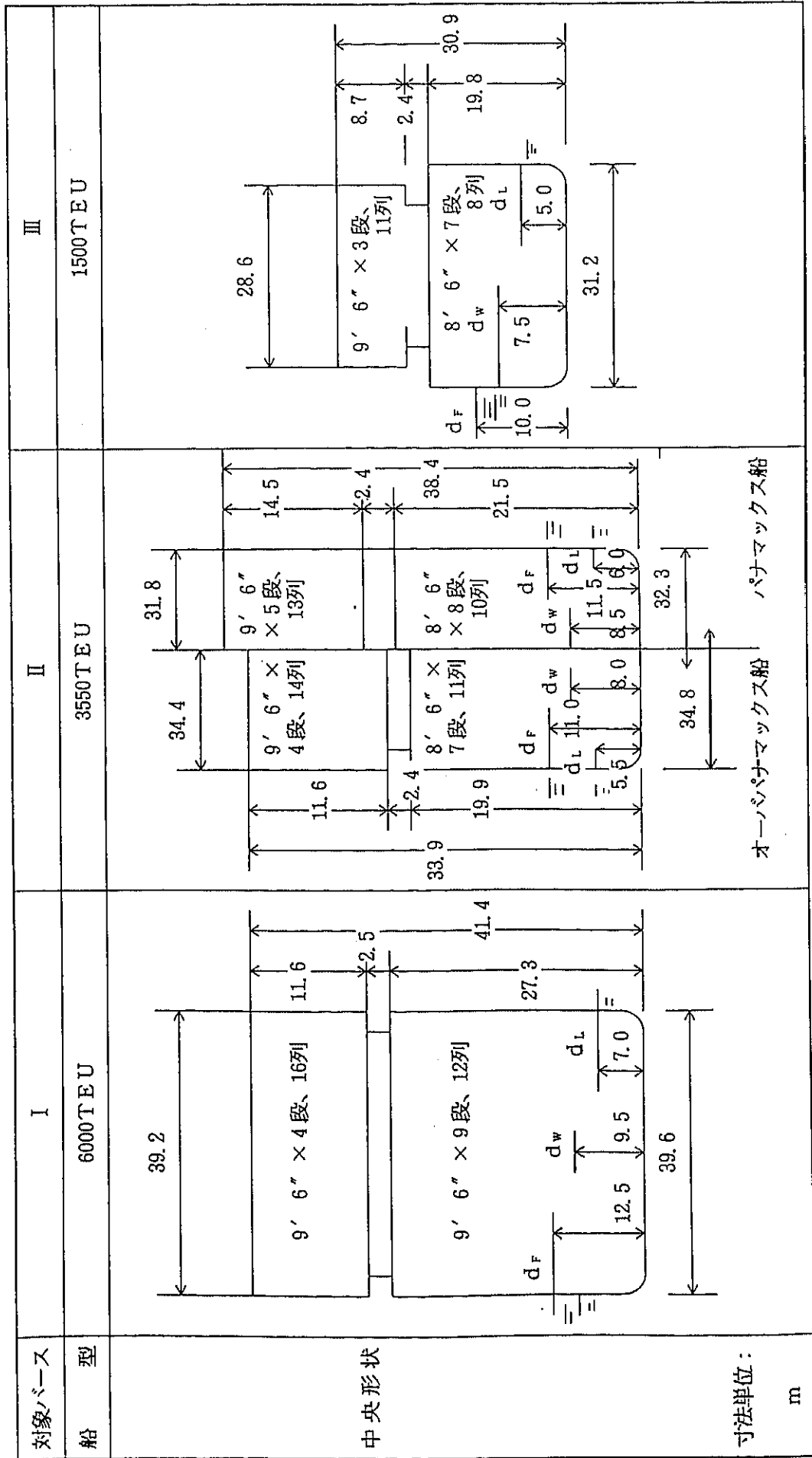


図-2.1.1 対象バース別最大船型

これまで各メーカーでは、レールスパン16 m級のクレーンと30 m級のクレーンとが主として製造されてきた。その傾向はこれらの図にも顕著に現れている。今回研究の対象とするようなオーバーパナマックス級の船舶を対象とするようなコンテナクレーンはスパン30 mのものであり、まず、レールスパンを約30 mと定めることとする。この図からは、スパン30 m級のコンテナクレーンでは、クレーンの重量は約600 t～1100 t、アウトリーチは約35 m～50 m、揚程は約35 m～53 m、吊上荷重は約45 t～60 tに分布していることがわかる。

本研究では、後述するように検討手法として模型実験と解析を用いることにしているが、このようにばらつきのあるコンテナクレーンの各諸元については、それぞれに一定の範囲を持つ変数として取り扱うためには、膨大な費用と労力を必要とする。そのため、全体としてこれらのコンテナクレーン群を代表し得るようなモデルクレーンを仮定し、検討を行うこととした。ただし、これらの諸元を持つコンテナクレーンが現実存在するかどうかを検証するという再度の作業を避けるため、本研究では現実に設置されている代表的なコンテナクレーンを選び出し、概ね代表的なコンテナクレーンの諸元であることを確認することにより、本研究におけるコンテナクレーンとした。

対象とするコンテナクレーンとしては、東京港青海埠頭第3バースに設置されているコンテナクレーンを選定した（写真-2.1.1参照）。その主要な諸元を表-2.1.1に、構造の概要を図-2.1.7に示す³⁾。

図-2.1.2～2.1.6の図中の「□」印は対象とした東京港青海埠頭に設置されているコンテナクレーンの諸元を示している。どの図でも、レールスパン30 m級のデータの中で、おおむね平均値以上の値となっている。コンテナ船は日々大型化を続けており、データ値で最大値をとり続けることは困難であることも考慮し、今回選定した青海埠頭のコンテナクレーンの諸元は、おおむね現在のコンテナクレーンの代表的な諸元であると言えることができると判断した。

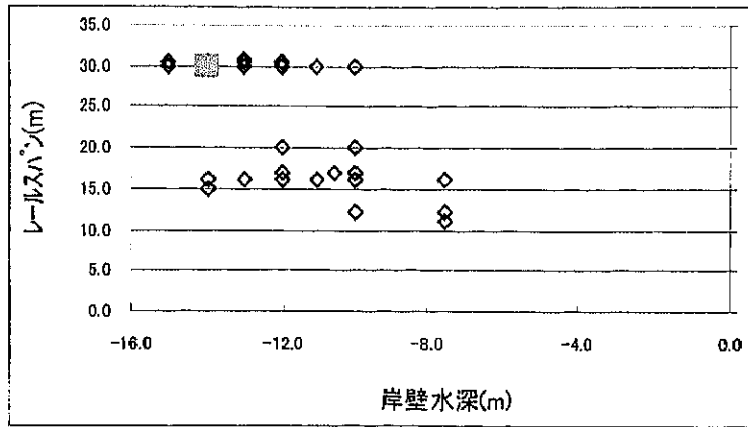


図-2. 1. 2 コンテナクレーンの諸元 (岸壁水深-レールスパン)

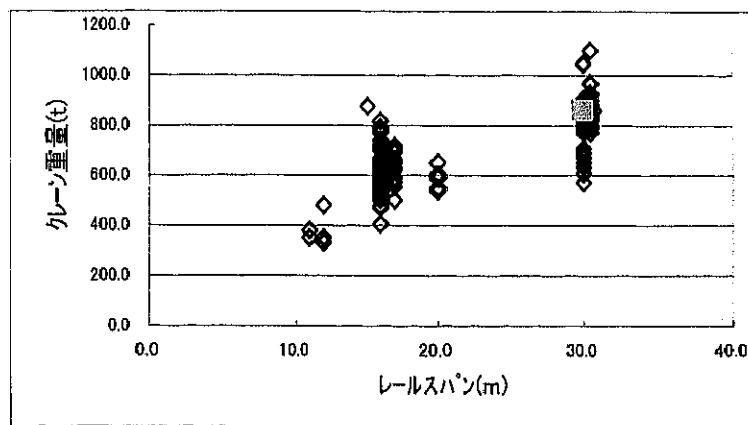


図-2. 1. 3 コンテナクレーンの諸元 (レールスパン-クレーン重量)

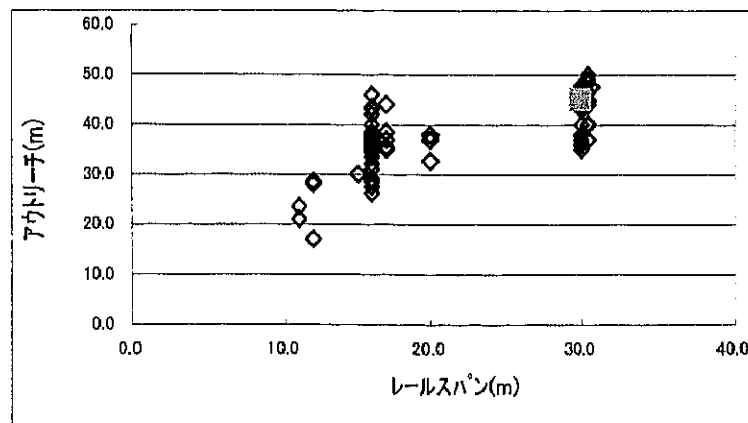


図-2. 1. 4 コンテナクレーンの諸元 (レールスパン-アウトリーチ)

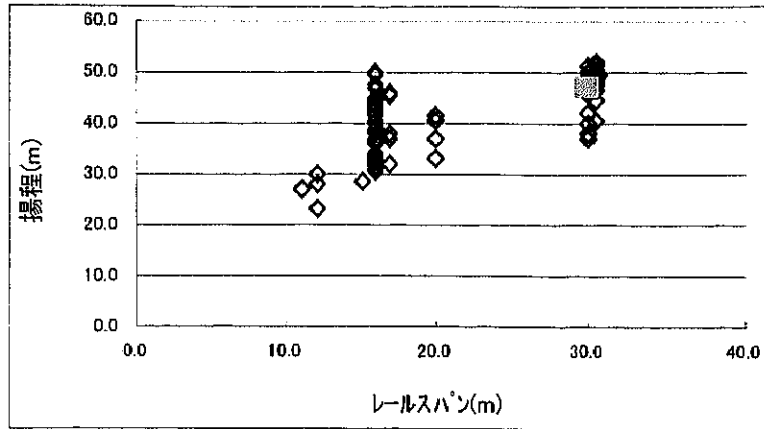


図-2.1.5 コンテナクレーンの諸元 (レールスパン-揚程)

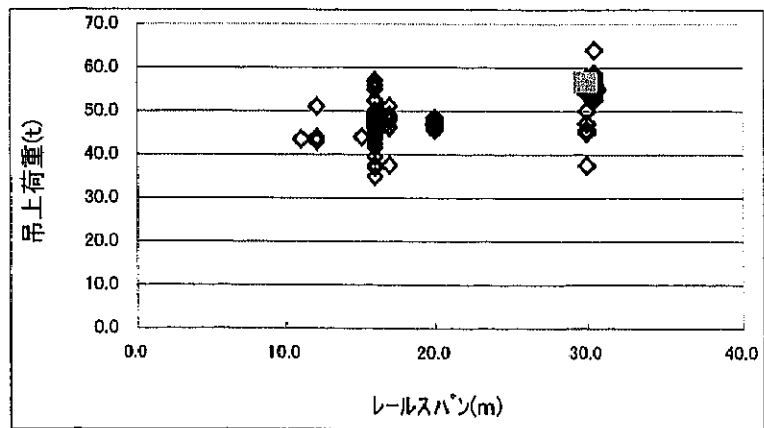


図-2.1.6 コンテナクレーンの諸元 (レールスパン-吊上荷重)



写真-2. 1. 1 コンテナクレーン全景

表-2. 1. 1 対象としたクレーンの主要な諸元³⁾

設置場所 岸壁水深 (m)	東京港青海埠頭No.3 パース (-14)
吊上荷重 (t)	56.4
車輪数 (海側・陸側)	16・16
輪荷重 (通常時 (t)) (暴風時 (t))	海側: 45.9 陸側: 32.9 海側: 64.9 陸側: 50.9
クレーン重量 (t)	857.0
レールスパン (m)	30.0
アウトリーチ (m)	45.0
バックリーチ (m)	14.0
全揚程 (m)	47.0

コンテナクレーン全体計画図

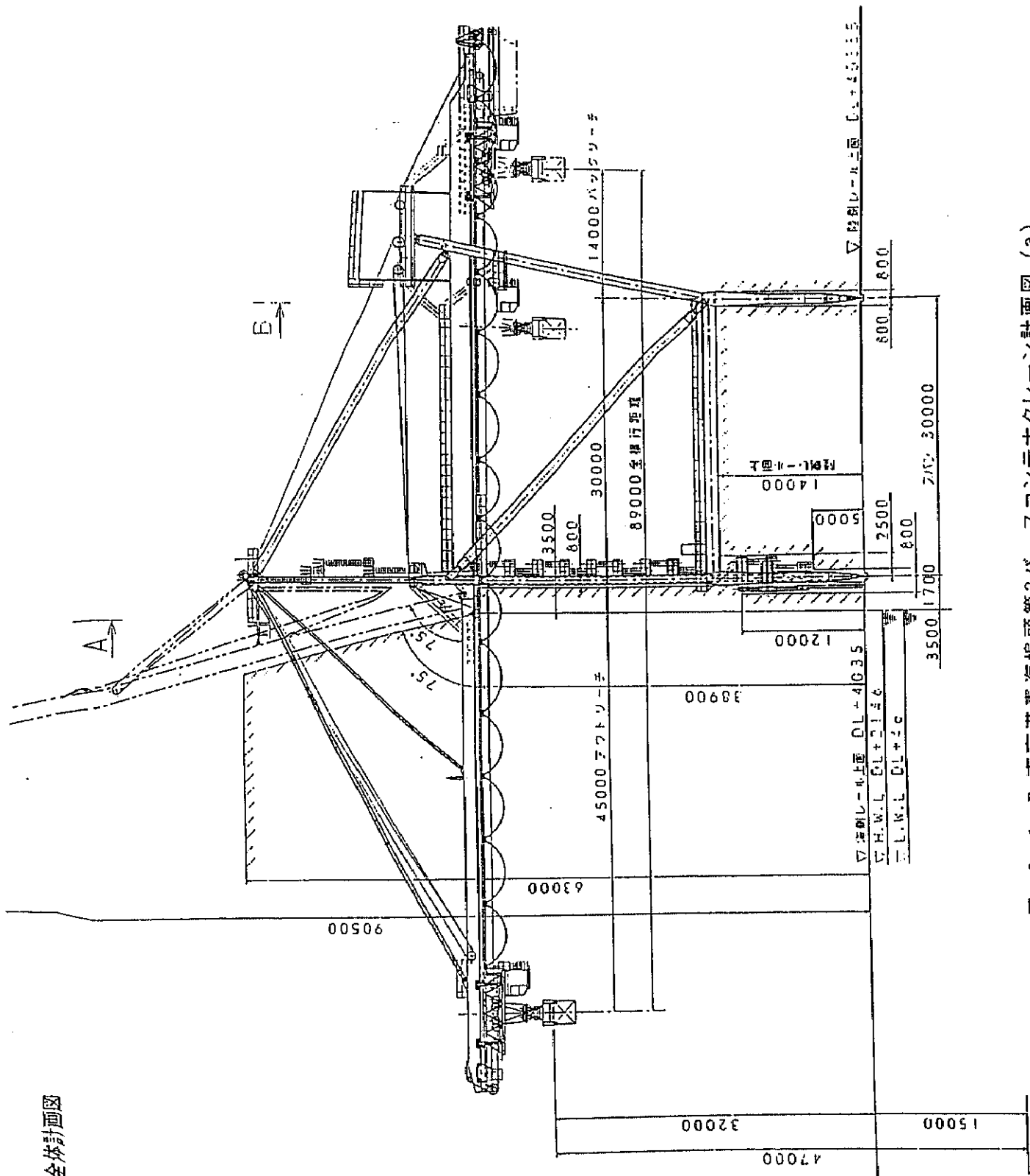


図-2. 1. 7 東京港青海埠頭第3バースコンテナクレーン計画図 (a)

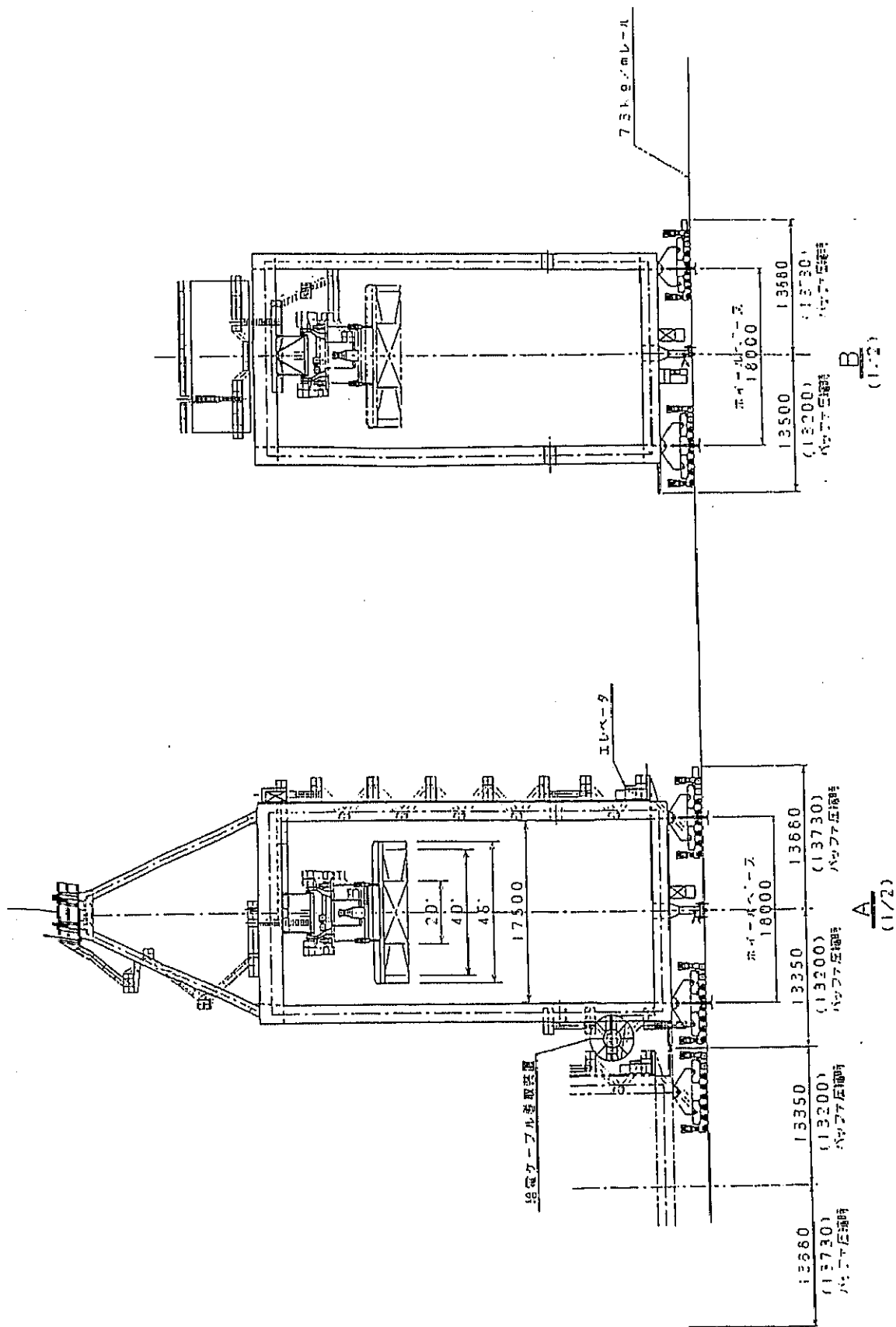


図-2. 1. 7 東京港青海埠頭第3バースコンテナクレーン計画図 (b)

第2節 コンテナクレーンの過去の地震被害

2-1 過去の港湾荷役機械（クレーン）の地震被害

前節までに述べたようなクレーン等の耐震設計に関する状況から、大型の港湾荷役機械の地震時の被害についてもこれまであまり注目されてこなかった。一方、わが国では、荷役機械の歴史がいまだ約120年であり、他の一般の構造物に比べてその歴史が非常に浅く、かつ、大地震の発生が地域によっても異なるため、荷役機械そのものが大地震に遭遇して大きな被害を受けた記録があまり多くない。過去にさかのぼって見ると、昭和10年頃、関東地方の強震の際に、造船所などで塔型クレーンが脱線事故を起こした記録⁴⁾がある。昭和40年代までの大きな被害の報告としては、昭和43年十勝沖地震の記録⁴⁾がある。同地震では、大型の橋型クレーン1台、スタッカー1台が大破、数台のアンローダーが、設置されていた基礎の変形により脱線した他、コンベヤガーダが破損して、十勝港の機能に大きな影響を与えた。また、昭和50年代になると海上での大量輸送時代の到来とともに、全国での連続式アンローダーの設置基数が急増し、コンテナクレーンの設置基数も50基を越えるなど、全国的にも大型の港湾荷役機械の普及が進み、地震時の大きな被害が報告されるようになってきた。

昭和53年宮城県沖地震では、塩釜港等において港湾構造物に大きな被害が発生した。港湾荷役機械については、200 t/h級ニューマチックアンローダーに走行架台脚部のひずみや亀裂の発生、ブーム部分の破損等が生じているが、いずれも小規模な被害⁵⁾を受けたにとどまっている。同じ宮城県沖地震では、石巻港においてもニューマチックアンローダーが被害⁵⁾を受け、クレーン陸側脚が海側へ脱輪し、海側揺脚が海側へ大きく傾斜した。また、震源地から遠く離れた東京港のコンテナクレーンに、極めて特徴的な挙動が観測⁵⁾されている。当時東京港大井コンテナ埠頭第8バースには、脚スパン16 m、定格荷重30.5 tの現在

ではやや小型のコンテナクレーン2基が設置されていた。地震発生時には荷役作業が行われており、現場にいた作業員の目撃情報として、次のような内容が報告⁵⁾されている。「コンテナクレーンは横行方向に著しく振動し、そのうちの1基には、車輪の浮き上がりがあった。地震動の継続時間中、かなり長い間、ガターン、ガターンという激しい衝撃音が発生していた。」これらの報告は地震時という異常事態の中でのことであるので、観察結果の信頼性については、十分に注意しなければならないが、地震時の状況を説明した4人の作業員が同様に記憶していること、クレーンの車輪の位置等の観察結果などから、当時の調査団は車輪が浮き上がった可能性は十分あると報告⁵⁾している。

昭和58年(1983年)日本海中部地震では、秋田港中島埠頭に設置されたアンローダーが、地盤の液状化により脱輪、傾斜し、使用不能な状態になった。また、岸壁上には地震時に車輪が上下した痕跡が残っていたと報告⁶⁾されている。中島埠頭では、基礎地盤の激しい液状化のために、レールが最大約2 m程度沈下したことが報告⁶⁾されており、最終的なアンローダーの変形形状としては、陸側の脚がエプロンに没入したため、アンローダー全体としては陸側に変形して傾斜している。しかし、地震発生当時の観測では、揺れにより接岸中の船舶に接触したことが報告⁶⁾されているほか、搭乗していた職員も脚が30 cm～50 cm程度浮き上がるのが見えたと報告⁶⁾している。このことから、実際には激しい地震動によりロッキングを起こし、陸側脚が海側に脱輪することによる被災と、地盤の液状化によるレールの変位による陸側脚のエプロンへの没入という2つの被災原因があったものと考えられる。

昭和58年(1983年)日本海中部地震以来、日本では大きな地震に見舞われなかったが、平成5年(1993年)には釧路沖地震、北海道南西沖地震、平成6年(1994年)には三陸はるか沖地震と立て続けに大規模な地震に見舞われ、大きな被害を受けてきた。その中で北海道南西沖地震では、港湾荷役機械の地震被害は全く報告されておらず、また、平成6年(1994年)の三陸はるか

沖地震でも、非常に軽微な被害しか報告されていない。

しかし平成5年（1993年）釧路沖地震の際には穀物アンローダーが被害⁷⁾を受け、使用不能となった。この被災は、釧路港背後の酪農地帯への穀物輸送を一時的に途絶えさせ、酪農業や物流に大きな影響を及ぼした⁷⁾。当時釧路港には4基の大型荷役機械があり、いずれも軌道走行式アンローダーであった。当時の港湾技術研究所の調査団の報告⁷⁾によれば、このうち400 t/h級の穀物アンローダーの2号機、3号機が大きな被害を受けている。2号機は海側、陸側とも脚がレールスパン内に変形して脱輪（写真-2.2.1参照）しており、脚の上部が塑性変形を起こしていた。また、3号機は上部水平ブームの座屈変形に伴うバランスウェイト部の破壊が著しいが、海側レールにロッキングを起こしたと見られる痕跡があったと報告⁷⁾されている。

一方、海外では、同じように過去に1985年のチリ地震、1989年のロマ・プリエータ地震や、1999年のトルコ・コジャエリ地震でも大型荷役機械の脱輪、転倒などの被害（写真-2.2.2参照）が出ている。

以上が近年の大型港湾荷役機械の地震時の被害の概要である。被害の状況は様々であるが、特徴的なことは次の点であると考えられる。

（1）基礎地盤の液状化等に起因するレールの変位に伴い、脚部分を中心とした被害が見られる。

（2）激しい地震動によって、脚が浮き上がるロッキング現象が現実起こっていたと推測できる。

以上の点は、コンテナクレーン等の大型港湾荷役機械の耐震性を考える上で、重要なポイントであると考えられる。

近年の主な地震の概要及び地震による港湾荷役機械（クレーン）の被害状況は表-2.2.1⁸⁾に示すとおりである。

また平成7年（1995年）兵庫県南部地震では神戸港の港湾施設の9割以上

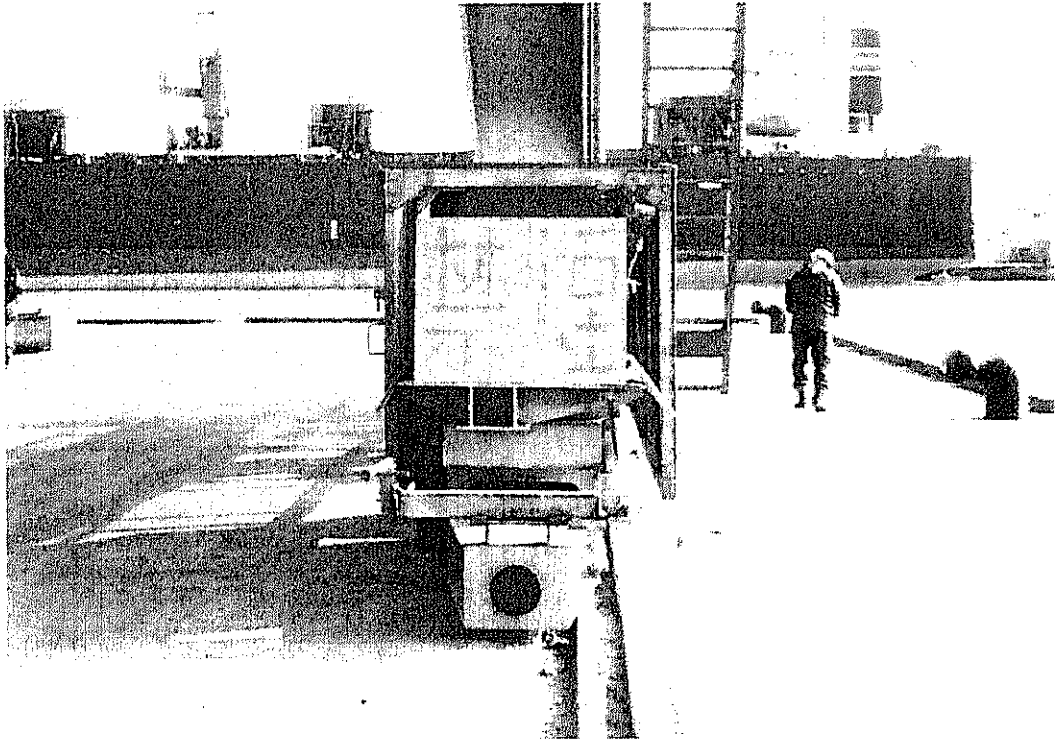


写真-2. 2. 1 釧路港アンローダー2号機の脱輪状況⁷⁾

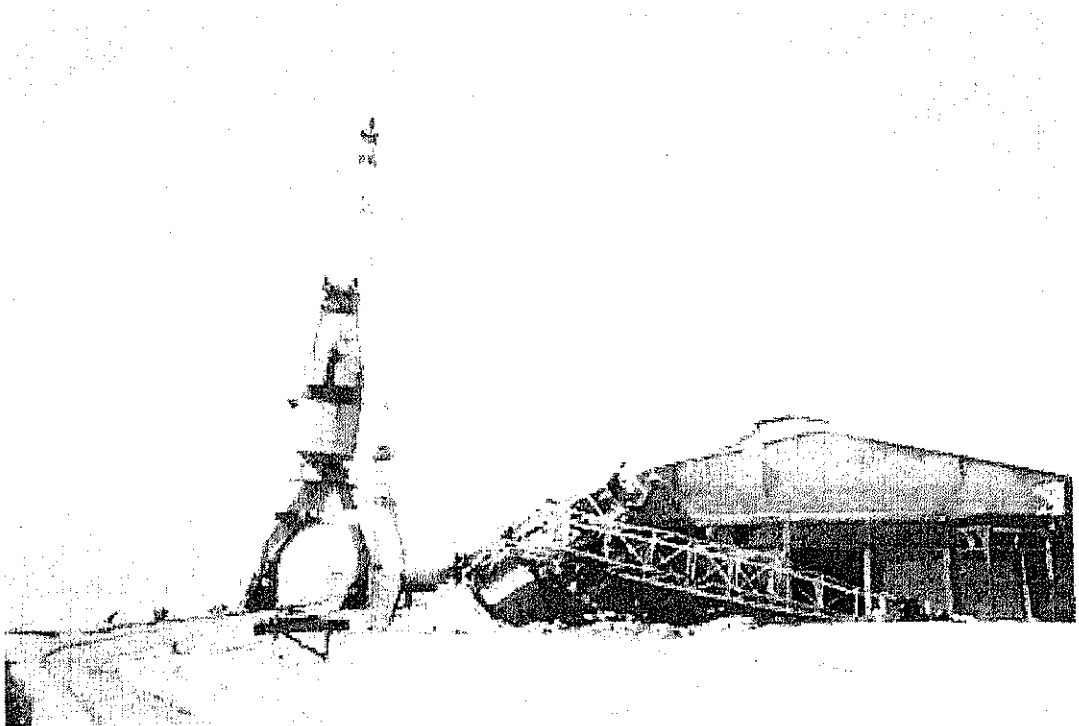


写真-2. 2. 2 トルコ・コジャエリ地震のクレーンの被害

表-2.2.1 最近の地震による主な港湾・川の被害状況

地震名	1995年兵庫県南部地震	1993年釧路沖地震	1989年ロマ・プリアエタ地震	1985年チリ地震	1983年日本海中部地震	1978年宮城県沖地震
発震年月日	1995年1月17日	1993年1月15日20時6分	1989年10月17日	1985年3月3日19時45分	1983年5月26日11時55分	1978年6月12日17時14分
震源地名	淡路島北部	釧路沖	米岡	チリ国・バルパライソ沖	秋田県沖	宮城県沖
震源深さ	15km	107km	17.6km	15km	14km	40km
マグニチュード	7.2	7.8	7.1	7.7	7.7	7.4
港湾被害地区の最大震度	神戸港 (震央距離 km) 震度 VI NS 818 Gal (神戸海洋気象台) EW 617 Gal (神戸海洋気象台) UD 332 Gal (神戸海洋気象台)	釧路 (震央距離 16km) 震度 VI NS 459 Gal (地震) EW 344 Gal (地震) UD 382 Gal (地震)	オークランド港 (震央距離約 90 km) 鉄橋背後地震 0.29 G	バルパライソ B1 270 Gal (地表) B2 190 Gal (地震)	秋田港 (震央距離 107km) 震度 V NS 190 Gal (地震) EW 205 Gal (地震) UD 41 Gal (地震)	塩釜港 (震央距離 100km) 震度 V NS 270 Gal (地震) EW 280 Gal (地震) UD 169 Gal (地震)
主な港湾・川の被害	船震強化岸壁以外の下記①②③ 岸壁とも、岸壁本体の前面への滑動、傾斜、それに伴うアボウトの陥没が生じた。 ①ボートドック (ウツ式岸壁) ・脚部傾倒 11基 ・脚部小変形 11基 ②六甲ドック (ウツ式岸壁) ・全壊 1基 ・脚部傾倒 10基 ③岸壁傾倒 (ウツ式岸壁) ・ボートドック 1基 ・脚部傾倒 1基 ・脚部小変形 6基 ・土圧の脚部損傷は、そのほとんどが脚の陥没変形を伴っている。 ・大半のクルンが脱輪し、ロボガを起こした装置のあるクルンもある。	①釧路港西港第2,3号頭 (ウツ式岸壁) ・親物用1号V/L石炭V/Lは比較的に親物用1号V/Lに比べて比較的に親物用1号V/Lは上部の塑性変形による上部構造の破壊、親物3号石炭V/Lは脱輪、親物3号石炭V/Lの基礎あり ②エバエ取組V/L沈下による損傷 ③釧路港港頭地区 大きな被害ない。	①オウガワガワ港45,48,95号頭 (折式鉄橋) ・鉄橋本体には被害が生じなかったが直立地震が沈下、45号頭のオウガワガワ港7番ストリートミナ (折式鉄橋) ・オウガワガワ港の陸側レールは折支持さされておらず、基礎に上にあつたため約30cm沈下した。その結果クルンは傾いた。クルン自体には損傷はなし、脱輪はあつた。	①バルパライソ (1~3, 5, 6, 8~10V・スコウリトアボウト式、4:コリコリ柱式鉄橋、1:ボートドック) ・第1, 2, 3, 5, 6, 8~10Vの親物用レールを除いて、他のクルンは、脚部の傾倒、片脚レールの脱輪、親物の脱輪、及び脚部足付が破損した。 ・基本的な原因はすべてクルンが広がる方向の歪みが生じたことによるため、脱輪あるいは脚部傾倒に至るまでの水平力による脚部曲げモーメントによる圧縮傾倒部分の歪みが生じている。 ・地震に対する設計条件がはつきりしていないが、基本的にはレールの基礎の歪み、変形がなければクルンとしては特に問題ないものと思われる。	①秋田港外港一13号岸壁 (ウツ式岸壁) 海側レール基礎が変位、アボウト沈下 ②秋田港中島2,3号岸壁 (折式岸壁) ・アンローダ (3機の肉付機)が地震の液状化により脱輪、傾斜し使用不能 ・地震時車輪が10数回上下した後輪が残っている。	①塩釜港中野ふ頭1号岸壁 (本体：鋼管矢板 控え工：U型矢板) ・荷役機械の基礎と鋼管コンクリートの間に最大約10cmの段差が生じた程度 ②石巻港、日和田頭 (矢板式岸壁) ・岸壁クレーンの陸側車輪の海側への脱輪とそれに伴うクレーン海側ヒンジ脚の傾斜
備考	神戸港工事事務所 (地表) E43N 502Gal S43E 205Gal UD 233Gal ポートアイランド (地表) NS 341Gal EW 284Gal UD 556Gal					東浜港大井ふ頭 (鋼管アボウト) ・鋼管アボウトを用いた直付式機械橋 (橋脚橋上の最大水平加速度 (参考値) 80Gal (NS), 87Gal (EW)) ・クルンの最大加速度 (参考値) 約100Gal (NS), 約200Gal (EW) ・コンクリートが写像が0.7ガを起こした可能性大

注：参考文献(8)より作成

が大きな被害を受け、コンテナクレーンも多くの被害を受けているが、この被害の特徴については、次項で述べる。

2-2 兵庫県南部地震におけるコンテナクレーンの被害事例⁹⁾

コンテナクレーンの耐震性について、特に大きな注目が集まったのは、平成7年（1995年）兵庫県南部地震においてである。

神戸港の荷役機能は兵庫県南部地震によってほぼ100%壊滅といってよいほどの被害を受けた。地域社会・経済への影響を生じた被害としては、前述の釧路沖地震による穀物アンローダー等の被害の例が過去にあるが、コンテナクレーンが相当数設置されていた国際物流の中核である基幹的港湾が長期間の機能停止に至ったのは世界的にも初めてのことである。

当時神戸港には神戸市及び（社）神戸港埠頭公社の所有するコンテナクレーンが55基あった。これらは、諸元から大別してパナマックス船用の脚スパン16～20 m級のもの29基、オーバーパナマックス船用の30 m級のもの26基があった。これらは、摩耶埠頭、ポートアイランド、六甲アイランドに設置されており、岸壁の構造は摩耶埠頭の2岸壁以外はケーソン式で、海側レールの基礎はケーソンに設置され、陸側脚のレールは鋼管杭基礎（31基）と振動締め固めによる地盤改良基礎（24基）に置かれていた。

被害の状況は表-2.2.2～2.2.5に示す。コンテナクレーンの部位別に被害を見ると、ポータル梁から上の上部構造には被害が少ないが、ポータル梁より下の脚部分は造り替えが必要なものが過半数に上るなど被害が大きかった。また、レールに接触する走行装置の部分はほとんどのクレーンに被害を生じていた。特徴的な被害のパターンとして以下のものが報告されている。

（1）崩壊・・・六甲アイランドRC3-4クレーンは、脚部が完全に折れ曲がり、岸壁上に座り込むような形で全面的に崩壊した（写真-2.2.3参照）。

表-2. 2. 2 神戸港コンテナクレーン被害状況 (摩耶埠頭) 9)

地区名	岸壁名	番号	水深	延長	所有者	本体	構造	規格	クレーン	設置	岸壁		レール		被災時の状態				被害状況								
											年月	構造	基礎	構造	方向	フレーム	フレーム	脱輪		レール間		変形		その他			
											年月	構造	海側	陸側	方向	フレーム	海側	陸側	海側	陸側	海側	陸側	上部		走行		
											年月	構造	鋼管杭	鋼管杭	鋼管杭	鋼管杭	鋼管杭	鋼管杭	鋼管杭	鋼管杭	鋼管杭	鋼管杭	鋼管杭		鋼管杭	鋼管杭	
摩耶埠頭	ORS	No.4	10.0	600	神戸市	H	クレーン	30.5	552	62.01	鋼管杭	鋼管杭	NS	垂直	係留		無	無	無	無	無	無	×	△	△	△	
"	"	No.3	"	"	"	"	クレーン	30.5	527	52.07	"	"	"	"	"	"	陸破	無	無	無	無	無	○	○	△	△	
"	"	No.2	12.0	"	"	"	クレーン	30.5	552	57.09	"	"	"	"	"	"	陸小	無	無	無	無	無	○	○	△	△	
"	OP	No.8	12.0	575	"	"	クレーン	30.5	597	2.12	クレーン	クレーン	EW	"	"	"	陸大	無	無	無	無	○	○	△	△	△	
"	"	No.9	"	"	"	"	"	30.5	597	3.12	"	"	"	"	"	"	陸大	無	無	無	無	無	○	○	△	△	
"	"	No.7	"	"	"	"	"	30.5	597	2.12	"	"	"	"	"	"	陸中	無	無	無	無	無	○	○	△	△	△
"	K	No.5	12.0	220	"	"	"	30.5	540	62.12	鋼管杭	鋼管杭	"	"	"	"	陸小	陸中	陸大	陸小	陸大	陸中	○	○	△	△	△
"	"	No.6	"	"	"	"	"	30.5	534	62.12	"	"	"	"	"	"	陸小	陸小	陸小	陸小	陸小	陸小	○	○	△	△	△

- 1、構造
 ①フレーム
 クレーン本体の基礎構造でAフレームを「A」、その他を「H」とする。
 ②ボータル
 海脚と陸脚を下部で結合するボータルの脚との接合方法を「トラス」、溶接接合を「ラーム」とする。
 2、被害状況
 ①脱輪
 ・「左、右」は液に向かっての右脚、左脚のこと。
 ・「無」は全車輪が脱輪していないもの。
 ・「陸、海」はレールに対して陸側、海側に脱輪しているの意。
 ・「大」は1m以上、「小」は30cm程度まで、「中」はその中間。
 ・「破」は脚フレームから走行装置が外れたもの。
 ・「浮」は宙づり状態のもの。
 ②変形
 被災直後に外観目視で判断したもの。
 ・上部 ○：地上から見て変形なし
 △：部分的変形あり
 ××：崩壊
 ・脚部 ○：地上から見て変形なし
 △：局部変形あり（部分補修可）
 ××：変形大、折れ曲がりあり
 ××：崩壊
 ・走行装置 △：損傷あり（大半は部分補修可であるが、部品取替の必要なものもある）
 ××：脚部
 ××：崩壊
- 3、調査時点は平成7年2月21日である。

表-2. 2. 3 神戸港コンテナクレーン被害状況 (ポーターアイランド)

地区名	岸壁名	番号	深	延尺	所有者	本体構造	定格荷重	クレーン幅	クレーン重量	設置年月	岸壁構造	レベル基礎		被毀時の状況	被害状況		変形	その他	
												海側	陸側		海側	陸側			左側
ポーターアイランド	PC-1	1-1	12.0	300	東頭公社	H	17t	30.5	617	60.09	テ-リ	テ-リ	NS	垂直	保留	無	無	○	△
		1-2	"	"	"	"	"	30.5	617	60.09	"	"	"	"	"	無	無	○	△
		2-1	"	300	"	"	テ-リ	40.0	830	4.12	"	"	"	"	"	無	無	○	△
		2-2	"	"	"	"	"	40.0	830	4.12	"	"	"	"	"	無	無	○	△
		3-1	"	300	"	"	A	30.5	577	46.11	"	"	"	"	"	無	無	○	△
		3-2	"	"	"	"	"	30.5	577	46.11	"	"	"	"	"	無	無	○	△
		4-1	"	300	"	"	"	30.5	577	47.11	"	"	"	"	"	無	無	○	△
		4-2	"	"	"	"	"	30.5	577	48.04	"	"	"	"	"	無	無	○	△
		5-1	"	250	"	"	H	40.0	830	62.12	"	"	"	"	"	無	無	○	△
		5-2	"	"	"	"	"	40.0	830	63.01	"	"	"	"	"	無	無	○	△
		5-3	"	"	"	"	"	40.0	830	63.02	"	"	"	"	"	無	無	○	△
		7-1	"	300	"	"	"	40.0	829	5.06	"	"	"	EW	"	無	無	○	△
	8-2	"	300	"	"	A	30.5	614	49.03	"	"	"	"	"	無	無	○	△	
	9-1	"	300	"	"	"	30.5	614	50.05	"	"	"	"	"	無	無	○	△	
	9-2	"	"	"	"	"	30.5	614	50.07	"	"	"	"	"	無	無	○	△	
	10-1	"	300	神戸市	H	17t	30.5	584	56.11	"	"	"	"	"	無	無	○	△	
	10-2	"	"	"	"	"	30.5	584	56.11	"	"	"	"	"	無	無	○	△	
	11-1	"	350	東頭公社	"	テ-リ	30.5	623	57.02	"	"	"	"	"	無	無	○	△	
	11-2	"	"	"	"	"	30.5	623	57.02	"	"	"	"	"	無	無	○	△	
	12-1	"	350	"	"	17t	30.5	572	57.02	"	"	"	"	"	無	無	○	△	
	12-2	"	"	"	"	"	30.5	572	57.02	"	"	"	"	"	無	無	○	△	

* : 16.0m の位置に旧クレーンの杭はあるが、30.5m の位置にはない。

表-2. 2. 4 神戸港コンテナクレーン被害状況 (六甲アイランド)

地区名	岸壁名	番号	深	延尺	所有者	本体構造	定格荷重	クレーン幅	クレーン重量	設置年月	岸壁構造	レベル基礎		被毀時の状況	被害状況		変形	その他		
												海側	陸側		海側	陸側			左側	右側
六甲アイランド	E-1	No.1	10.0	925	神戸市	H	17t	30.5	537	54.12	テ-リ	テ-リ	EW	垂直	保留	無	無	○	△	
		No.2	"	"	"	"	"	30.5	537	55.10	"	"	"	"	"	無	無	○	△	
		KLM	No.3	10.0	300	"	A	テ-リ	30.5	530	43.10	"	"	"	"	無	無	○	△	
		WXYZ	No.4	12.0	960	"	H	17t	30.5	548	62.11	"	"	地盤改良	"	"	無	無	○	△
		"	No.5	"	"	"	"	30.5	550	62.11	"	"	"	"	"	無	無	○	△	
		"	No.6	"	"	"	"	30.5	550	63.07	"	"	"	"	"	無	無	○	△	
		L-1	No.7	13.0	300	"	H	テ-リ	40.0	820	5.12	"	"	NS	"	"	無	無	○	△
		No.8	"	"	"	"	"	40.0	820	5.12	"	"	"	"	"	無	無	○	△	
		RC-1	1-1	13.0	350	東頭公社	H	17t	40.0	770	59.12	"	"	"	"	無	無	○	△	
		1-2	"	"	"	"	"	40.0	770	59.12	"	"	"	"	"	無	無	○	△	
		2-1	"	350	"	"	"	40.0	770	59.12	"	"	"	"	"	無	無	○	△	
		2-2	"	"	"	"	"	40.0	770	59.12	"	"	"	"	"	無	無	○	△	
	RC-3	3-1	14.0	350	"	"	"	40.0	770	60.03	"	"	"	"	無	無	○	△		
	3-2	"	"	"	"	"	40.0	770	62.03	"	"	"	"	"	無	無	○	△		
	3-3	"	"	"	"	"	40.0	770	67.03	"	"	"	"	"	無	無	○	△		
	3-4	"	"	"	"	"	40.0	770	60.03	"	"	"	"	"	無	無	○	△		
	RC-4	4-1	"	350	"	"	テ-リ	40.0	800	63.02	"	"	"	"	無	無	○	△		
	4-2	"	"	"	"	"	40.0	800	63.02	"	"	"	"	"	無	無	○	△		
	"	4-3	"	"	"	"	40.0	800	63.02	"	"	"	"	"	無	無	○	△		
	RC-5	5-1	"	350	"	"	40.0	800	63.02	"	"	"	"	"	無	無	○	△		
	RC-6	6-1	"	350	"	"	40.0	870	5.12	"	"	"	"	"	無	無	○	△		
	6-2	"	"	"	"	"	40.0	870	5.12	"	"	"	"	"	無	無	○	△		
	6-3	"	"	"	"	"	40.0	870	5.12	"	"	"	"	"	無	無	○	△		
	RC-7	7-1	"	350	"	"	40.0	870	5.12	"	"	"	"	"	無	無	○	△		
	7-2	"	"	"	"	"	40.0	870	5.12	"	"	"	"	"	無	無	○	△		

表-2.2.5 荷役機械の被害状況一覧表(1)

種別	項目	被災状況	ポートアイランド		六甲アイランド		摩耶埠頭		兵庫突堤		小計	
			○	△	×	○	△	×	○	△	×	○
コンテナクレーン			22基		25基		8基		-		55基	
海側	有		16			24	7					47
	無		6			1	1					8
陸側	有		14			21	1					36
	無		8			4	7					19
上部			22	0	0	20	3	2	6	1	1	48
			3	8	11	0	10	3	3	2	2	6
脚			0	22	0	0	20	5	0	8	0	50
												5
走行装置			2基		2基		-		2基		6基	
ジブクレーン	基礎		0	2	0	0	2	0	0	0	0	6
	本体		2	0	0	2	0	0	2	0	0	0
	旋回装置		2	0	0	2	0	0	1	1	0	1
合計			24基		27基		8基		2基		61基	

[凡例] ○：ほとんど損傷なし △：補修、補強が必要なもの ×：進り替えが必要なもの

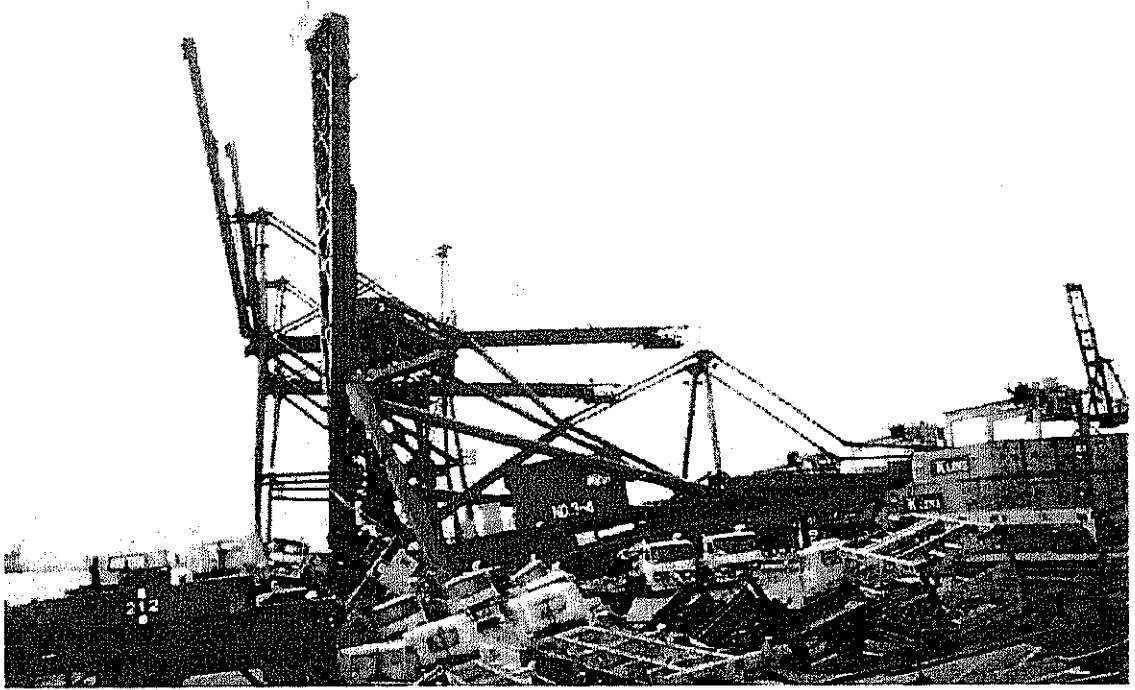


写真-2. 2. 3 六甲アイランドのクレーンの崩壊

(2) 脚の折れ曲がり・・・六甲アイランド南側岸壁に設置されていたクレーンは、基礎のレール間隔が約2.5 m以上開き、陸側脚と海側脚が股裂き状態に強制変位を受け、脚とポータル梁の接合部分に折れ曲がりを生じていた。ポータル梁と脚部との接続方法が、溶接構造とピン接続とで変形形状が異なり、溶接接続の場合は接続部から2～3 m離れた3点が変形し、ピン接続の場合には変形が接続点に集中していた。

(3) 脚の座屈・曲がり・・・クレーン脚の股裂きの変位の程度の少ないもので、脚を構成する4面の鋼板の1～3面に座屈が生じたものであり、この地震で最も多い被害のパターンだった。座屈の発生部位はポータル梁との接合部から2～3 m上のものが多かった。

(4) 走行装置の脱落・・・六甲アイランドの神戸市No.1、No.2クレーンは、脚と走行装置が海側に折れてはずれ、陸側脚の落ち込んだ場所が沈下していたため、クレーン全体が大きく傾斜した。

(5) ブームの外れ・・・摩耶埠頭のNo.4クレーンでは、ブームのフックが外れ、ブームが降りてきた衝撃で頂部の支持部が破損し、ブームが水平よりもさらに角度がついた位置まで外れた。

以上が地震後のクレーンの状態を観察した結果得られた報告である。また、摩耶埠頭の東西方向の岸壁に位置するNo.7～No.9クレーンでは、岸壁表面に海側脚の車輪の痕跡が間欠的に見られた。その距離は海側レールから1個目の痕跡までが50 cm程度で、順次間隔が狭まり2～3個目からは引きずったような線状の痕跡になっている。これと同じ痕跡はポートアイランドの東西方向の岸壁の一部にも観察された。「クレーンが踊っているように見えた。」という、六甲アイランドRC1近傍に地震発生時にいた人の話（伝聞）とあわせて、少なくとも海側脚は地面を2～3回離れたと思われる。

藤本ら当時の調査団は以上のような報告をしている。これらからは、コンテナクレーンが地震時に被害を受けるまでの原因と挙動については、次のような特徴

があるのではないかと考えられる。

(1) 地震動により基礎となる港湾構造物に変状をきたし、レール間隔の増大や沈下等による強制的な変位によって走行装置を含む脚部分が集中して被害を受けた。

(2) 激しい地震動で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ていたと推察される。

これらのコンテナクレーンの復旧は最も早かったものでも被災後2ヶ月強経過していた。これはクレーン本体の修復と合わせて、レール基礎の整備とレールの付け替え、給電設備等の復旧が必要であったため、それらに要した時間も含まれているためである。座屈変形したクレーン本体の復旧は現地作業で2週間程度であった。穀物輸入や外貿コンテナ等の荷役については、専用の荷役機械が機能しなければターミナルの機能も発揮されないこととなり、大規模地震による被害に対しては、今後岸壁などの修復とあわせて荷役機械についても大地震で被害を受けない、あるいは速やかに修復できるような対策を講ずることが必要と考えられる。

なお、神戸港においては、地震の発生が早朝であったため、コンテナクレーンは全て休止中でオペレーターが乗務していなかったため、人的被害が報告されていないが、稼働中であったならば人的被害を発生させた可能性が高いと考えられる。

第3節 コンテナクレーンの構造特性

本研究では、具体的な目標として大規模地震時の挙動の解明と設計上でのモデル化をあげている。そのため、まずコンテナクレーンの構造上の特性について検討する。コンテナクレーンは、メーカー各社ごとに独自の構造形式で設計しているが、それぞれの構造にはコンテナクレーンとしての共通の特性が明確に見受けられる。

(1) 重心が高く横行方向の振動に敏感な構造である。

コンテナクレーンは当然ながら岸壁上に設置されている。一方、オーバーパナマックス級の船舶は船幅が約39m程度もあり、また、コンテナ船に載貨されている状態での最上段のコンテナの高さは、船舶の荷役時の喫水から約32m程度ある¹⁰⁾。そのため、もっとも海側の列の最上段のコンテナを取るためには、クレーンのブームは40m以上の延長を持ち、30m以上のクリアランスを持つ必要がある。この条件下でコンテナとトロリーの重量を支えつつ転倒しない安全性を有する必要があるため、クレーンはブーム上に機械室を含むカウンターウェイトを有しており、結果として重心が非常に高く、かつガーダーが前後に大きく張り出す特異な外観を呈している。従って、コンテナクレーンはその横行方向（図-2.3.1参照）の振動に対して極めて敏感な構造になっていると言える。この特性も脚の浮き上がりを生じやすい一因となっていると推測される。

(2) 主構造がほぼトラスとラーメンで構成されていると見なせる。

コンテナクレーンは岸壁の水際線に設置されているため、ヤードに蔵置されているコンテナをクレーンが取り扱うために、クレーン直下にトレーラーシャーシ等の車両が走行方向（図-2.3.1参照）に進入してくる必要がある。その走行路を確保するため、クレーンのポータル梁より下部の構造は法線方向から見て必然的にラーメン構造になっている。また、ポータル梁より上部の構造はコンテナとそれを移動させるためのトロリー等の重量や、その走行のための荷重を支え、

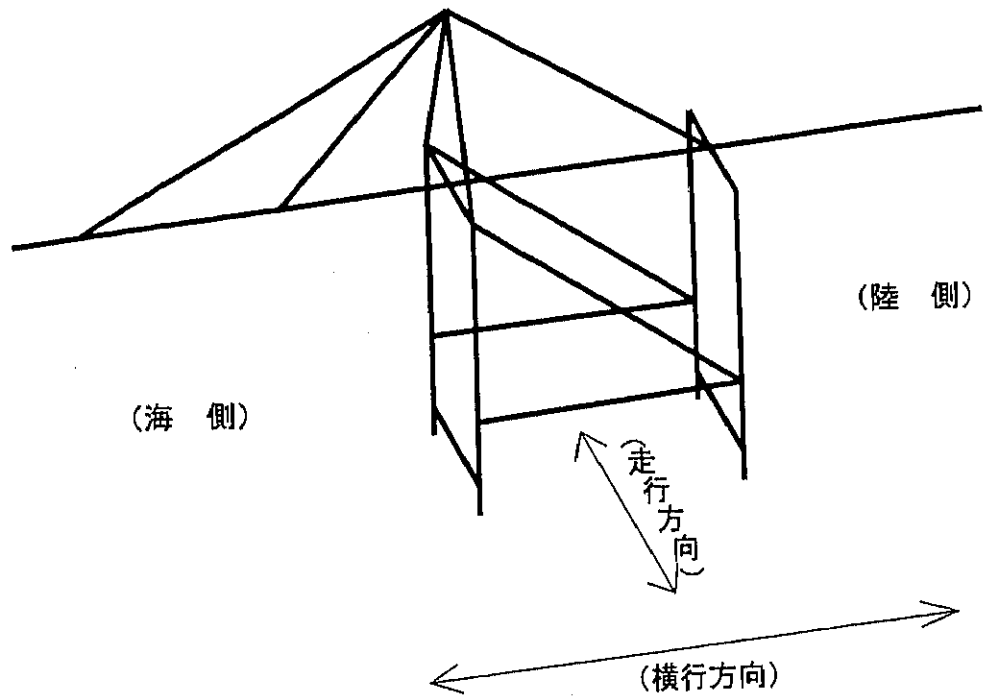


図-2. 3. 1 コンテナクレーンの向き

かつ部材の重量や風荷重を軽減するため、トラス構造となっている。従って、ポータル梁から上部と下部とで考えると、下部は比較的柔な構造となっており、前述したような基礎地盤の変位に伴うレールスパンの拡大に対して、弱点となりこの部分に被害が集中したものと考えられている。さらに脚の浮き上がりを生じた場合にも被害を受けやすいのは下部であると考えられる。また、上部については、比較的剛な構造となり、下部に比べて一体として挙動する事が推測される。

(3) 固有周期が2秒前後である。

一方、コンテナクレーンの固有周期は、脚の構造によっても違いがあるが、今回の研究で対象とするようなクレーンでは、横行方向の固有周期は一般的には2秒前後であるといわれている。上記(1)で述べたように重心が高く、また(2)のように脚部分がほぼラーメン構造で柔な構造となっているため、岸壁等の構造物に比較して長い周期を持っている。実際に値を求めた例としては、過去いくつかの文献で計測や固有値解析から求められている。「港湾用クレーン耐震設計指針(案)」((社)港湾荷役機械化協会)¹¹⁾では、実測値として走行方向が0.91～2.27 s、横行方向が0.94～1.96 sの値が示されている。また、橋形アンローダの固有周期の実測値として、走行方向0.77 s、横行方向2.74 sという値が掲載されている。しかし、計測したクレーン等の構造や形状が明確でなく、データ取得の時期が古いことから、規模が小さいクレーンを対象としたことも想定される。また、同じ(社)港湾荷役機械化協会が実施した「平成9年度コンテナクレーンの耐震設計調査報告書」¹²⁾では、固有値解析から走行方向が2.20 s、横行方向が1.91 sという結果を示している。また、実物のコンテナクレーンの固有周期を取り扱った最近の研究としては、山本らの研究¹³⁾がある。山本らは、博多港に設置されているコンテナクレーンの常時微動を観測することにより、その結果から固有周期を算出している。この結果によれば、走行方向の周期が3.13 s、横行方向が2.13 sであった。これらの結果から、オーバーパナマックス級のコンテナ船を対象とするようなコンテナクレーンでは、横行方向の固有周期を、おおむね2

秒前後の値で代表させることが可能であると考えられる。

(4) 脚が基礎と連結されていない。

コンテナクレーンは軌条走行式荷役機械として分類され、岸壁上に設置された300 m以上のレールの上を岸壁法線方向に移動してコンテナの荷役に対応している。そのため、脚とレールとは結合されておらず、これが、脚の浮き上がりを生じる要因となっている。暴風時には脚がアンカーで固定されることになっているが、休止中や荷役中は差込式の固定装置やクランプでレールを挟み込むような簡易な機構が整備されているのみである。実際に1978年宮城県沖地震時の東京港や昭和58年(1983年)日本海中部地震時の秋田港のアンローダーでは、荷役状態下でのロッキングが報告されており、本研究では、荷役時には脚とレールとは連結されていないと想定して検討を行うこととしている。

(5) 構造特性としては個体差が少ない。

前節でも述べたように、コンテナクレーンはメーカーごとに独自に構造を決めているが、コンテナ船に積載されたコンテナをスプレッダーでつかみ、岸壁上の搬送台車に積み替えるという、基本的な荷役のメカニズムはほぼ同一であり、構造上の大きな差異がないのが現状である。近年、荷役のサイクルタイムを低減させるために、ポータル梁の位置に2台目のトロリーを設置したセカンドトロリー方式が考案されたが、一部に設置されるにとどまっている。これらの状況からみれば、現実にはモデル化に大きな影響を与えるほどの個体による構造特性の差は少ないと考えられる。

以上のようなコンテナクレーンに特有の構造特性を考慮しつつ、以下の検討を実施することとする。

なお、コンテナクレーンのブームは、船舶の接岸に対応するため、非荷役時には折り曲げてクレーン頭上に吊り上げる状態にすることができる。一方荷役時にはこのブームをダウンさせてコンテナを積み降ろしており、本来はコンテナクレーン

ーンの状態としてこの2種類を考える必要がある。しかし、オペレーターの人的被害を考慮すると、最低限、人命を失うことがないように、オペレーターが搭乗している荷役時（ブームダウン時）を検討の対象とする事とした。

第4節 設計上の課題

4-1 コンテナクレーン設計上の課題

現在のコンテナクレーンの耐震設計法は、前述したように「クレーン構造規格（平成7年労働省告示第134号）」¹⁴⁾により行われている。この規格の耐震設計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。これ以外にも修正震度法を用いた設計法の提案はなされている¹⁵⁾が、実用的でないことなどから、一般には上記のクレーン構造規格が採用されている。

一方、第2節で示したこれまでの地震で被災したコンテナクレーン等の例を見ると、コンテナクレーンの地震時の被災原因は、主に下記の2点によるものと考えられる。

- (1) クレーン基礎における変状に伴う、レールスパンの拡大及びレール面の不等沈下
- (2) 激しい地震動に伴う脚の浮き上がり（ロッキング）とその後の挙動

このうち、(1)の課題については、少なくとも耐震強化された国内の基幹的なコンテナターミナルにおいては、係留施設側において基礎地盤の液状化対策や海側レールと陸側レールの連結及び同一構造物への設置などの対策が進められつつある¹⁶⁾。従って、コンテナクレーンの本体の設計上の最も大きな課題は、激しい地震動に伴う脚の浮き上がりに対して、安全な設計法を確立することにある。

4-2 コンテナクレーンを設置した係留施設の耐震設計上の課題

現在の係留施設の一般的な設計においては、コンテナクレーンは外力として捉えられ、作業時、暴風時、地震時のそれぞれについて、それぞれ静的な条件で算

定された陸側と海側の輪荷重（N/輪）として与えられている^{17)、18)}。

しかし、平成11年4月の「港湾の施設の技術上の基準」¹⁹⁾の改正により、設計対象地震動としてレベル2地震動が採用され、一部に動的解析による耐震性能の照査が求められることになった。また、最近のコンテナ船の大型化に伴い、コンテナクレーンの大型化が進んだことから、係留施設の構造形式によっては、コンテナクレーンとの動的相互作用の影響が無視できなくなってきた。これらの状況の変化により、コンテナクレーンについても、これまでのように一律の設計外力として捉えるのではなく、動的な影響を考慮することが必要となってきた。特にレベル2地震動下では脚の浮き上がりが生じることが予想され、その影響をどのように取り扱うかが、問題となってきた。しかし、これまでの研究では、脚がレールに連結された条件での解析等が行われており、脚の浮き上がりを直接評価することはできていない。従って、係留施設の耐震設計上の課題としては、主に次の2点が挙げられる。

- (1) 係留施設とコンテナクレーンの動的相互作用を考慮した設計法
- (2) ロッキングを伴うコンテナクレーンに対する設計法

このうち、本研究では、(2)を確立することが(1)に取り組むための前提条件になると考え、(2)について対象とすることとした。また、(2)のロッキングを伴うコンテナクレーンに対する設計法に関しては、これまでの研究の動向等を考慮すると、特に従来のFEM解析（脚とレールが固定された条件での解析）でロッキング現象を取り扱うことの妥当性、及びその手法に変わるべき手法の検討が課題として挙げられる。また、FEMによる非線形過渡応答解析は従来の設計手法とは費用も労力も格段に大きくなることから、それに変わる簡易な検証方法の検討も重要な課題である。

従って、本研究では、レベル2地震動に伴う脚の浮き上がり現象の把握とコン

テナクレーンの安定性に関する検討を行い、係留施設の設計時における解析的手法の妥当性の検証と提案、簡易的な脚の浮き上がりの判定手法の提案及び脚の浮き上がりを考慮した設計法を提案し、さらには脚の浮き上がり対策についても検討を行うものである。

【第2章：参考文献】

- 1) (社) 港湾荷役機械化協会コンテナ荷役施設調査研究委員会：コンテナクレーン標準仕様解説書、平成3年3月
- 2) (社) 港湾荷役機械化協会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覽表、平成10年3月
- 3) (財) 東京港埠頭公社：東京港青海埠頭第3バースコンテナクレーン製作工事特記仕様書、平成4年10月
- 4) (社) 港湾荷役機械化協会大型荷役機械研究委員会：港湾用クレーン耐震設計指針（案）について、港湾荷役、昭和53年7月
- 5) 土田 肇他：1978年宮城県沖地震港湾被害報告、港湾技研資料 No.325、1979.9
- 6) 土田 肇他：1983年日本海中部地震港湾被害報告、港湾技研資料、No.511、1985.3
- 7) 上田 茂他：1993年釧路沖地震港湾被害報告、港湾技研資料、No.766、1993.12
- 8) 鈴木雄三：地震と港湾荷役機械、平成9年度港湾専門技術者研修（機械コース）資料、1997.10
- 9) 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.913、1995.9
- 10) 参考文献1)
- 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) 港湾荷役機械化協会：平成9年度コンテナクレーンの耐震設計調査報告書、平成10年2月
- 13) 山本俊介他：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会講演集第VI部、平成11年9月
- 14) (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

15) 参考文献11)

16) 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

17) (社) 港湾荷役機械化協会：コンテナ荷役施設調査研究委員会報告書－車輪荷重算出に考慮すべき外力条件－、平成5年5月

18) 参考文献16)

19) 参考文献16)