

## 2. 兵庫県南部地震におけるクレーンの被害調査

橋内良雄\*, 前田 豊\*\*

### 2. Survey of Damage of Cranes in the Southern Hyogo-prefecture Earthquake

by Yoshio KITSUNAI\* and Yutaka MAEDA\*\*

**Abstract:** On the early morning of 17th January 1995, a very severe earthquake hit around the southern portion of the Hyogo prefecture, particularly the city of Kobe. The earthquake caused catastrophic disaster, with more than 6,400 people dead, about 300,000 injured due to collapse of more than 100,000 buildings resulting from severe shaking and fire. All types of cranes, such as container cranes in Kobe harbor, unloaders, jib-cranes in shipbuilding yards, tower cranes in building lots, overhead travelling cranes in manufacturing works, etc. were broken or failed significantly.

The epicenter was near Awaji island and located at 34° 36.4' North latitude, 135° 2.6' East longitude. The Richter Magnitude of the earthquake was estimated to be 7.2. The focal depth was approximately 14.3 km. Peak ground accelerations at Kobe Ocean Meteorological Observatory were 818 gal in the north-south direction (NS), 617 gal in the east-west direction (EW), and 332 gal in the vertical direction (VD), and duration of strong shaking was less than 10 sec. The area, which suffered acceleration above 600 gal, extended from Takatori through Nishinomiya, and was a narrow band of approximately 20 km long and 1 km wide.

National Institute of Industrial Safety (NIIS) and Japan Crane Association (JCA) dispatched a reconnaissance team to Hanshin area to assess the damage of cranes. In addition, questionnaires were sent to heavy industry works, manufacturing factories, civil engineering works, and port facilities, etc. in Kansai area. 117 replies for the questionnaires were received. The number of damaged cranes identified by the questionnaire is corresponding to 56.6% of a total number of damage cranes of 207 cases.

The main results are follows;

- (1) The cranes with high height such as a tower crane and a jib crane suffered more damage compared with the crane with low height such as an overhead traveling crane.
- (2) Main damage cause of overhead traveling cranes was falling down of main girder and derailment from rail due to large plastic deformation of runway girder.
- (3) Damage of portal jib cranes was particularly concentrated around roller path. About a half of the portal jib cranes damaged due to buckling of the columns.
- (4) Plastic deformation and collapse of jib accounted for approximately 50% of whole damage causes of tower and climbing cranes.
- (5) The tower crane fixed with stay was severely damaged, while the tower crane without stay suffered relatively minor damage. The tower crane mounted on the rooftop of 17 stories building overturned and fell down due to brittle failure from bottom of the tower.
- (6) Container cranes and unloader installed along waterfront of reclaimed lands were severely dam-

---

\* (社) 日本クレーン協会 Japan Crane Association (前 産業安全研究所機械システム安全研究部)  
\*\* 機械システム安全研究部 Mechanical and System Safety Research Division

aged due to movement of foundation associated with soil liquefaction.

**Keywords**; Earthquake, Crane, Seismic damage, Brittle fracture, Plastic deformation, Buckling, Soil liquefaction

### 1. はじめに

平成7年1月17日未明に淡路島沖を震源として発生した地震は、兵庫県南部を中心として死者6,432人、負傷者43,792人、家屋の全壊104,906棟(181,799世帯)、半壊144,272棟(276,166世帯)、一部破損263,702棟等、未曾有の災害をもたらした。兵庫県南部は阪神工業地帯として、各種の重要な産業が集中していることから、港湾施設や企業の設備にも多大の損傷が発生し、我が国の経済活動を混乱におとしいれた。クレーンにおいても神戸港周辺に設置されていたコンテナクレーンをはじめとして、アンローダ、造船所のジブクレーン、建設工事現場のタワークレーン、各工場の天井クレーン等、あらゆる種類のクレーンに被害が発生した。

当所では地震直後にクレーンの被災状況の把握と対策に資するため、日本クレーン協会と合同で現地調査を実施した。本稿ではその調査報告書<sup>(1)</sup>を中心に、これまで公表されている幾つかの関連文献<sup>(2)~(8)</sup>を参照してクレーンの被災状況をまとめたものである。

### 2. 震度等の状況

震源地は北緯 34° 36.4′, 東経 135° 2.6′, 震源の深さ

14.3 km, 震度 7.2 であって、震源から 19.2 km 離れた神戸海洋気象台で観測された加速度記録<sup>(9)</sup>を Fig. 1 に示す。Fig. 2 に地震発生時に神戸港付近で観測された最大加速度を示す。Fig. 2 に見られるように、300 gal(cm/sec<sup>2</sup>) を越える強い揺れがかなり広範囲に観測され、特に神戸市や宝塚市等の陸側では横揺れ (NS, EW) が大きく最大 833 gal に達しており、ポートアイランドや六甲アイランド等の島側では縦揺れ (UD) が大きい傾向が認められた。なお、600 gal を越える強い地震動を受けた地域は、主に鷹取から西宮までの長さ 20 km 幅約 1 km の狭い帯状の部分に集中していた。Table 1 に地表面で観測された神戸海洋気象台および神戸市開発局のポートアイランドにおけるそれぞれの地震記録を示す。ポートアイランドにおいて、Fig. 2 と Table 1 の加速度の異なる原因は出典の相違によるものであるが、いずれにせよ横揺れの最大変位は 24 cm 以上に達しており、大きな変位が 0.35~0.7 秒の周期で作用していた。また、これらの結果から、比較的長周期 (1 秒以上) の成分がかなり含まれており、特に上下方向 (UD) で認められる。このように地震波の周期が長く、大きな地震力が長時間継続したことが本地震の特徴となっており、各種の構造物や建造物に大変

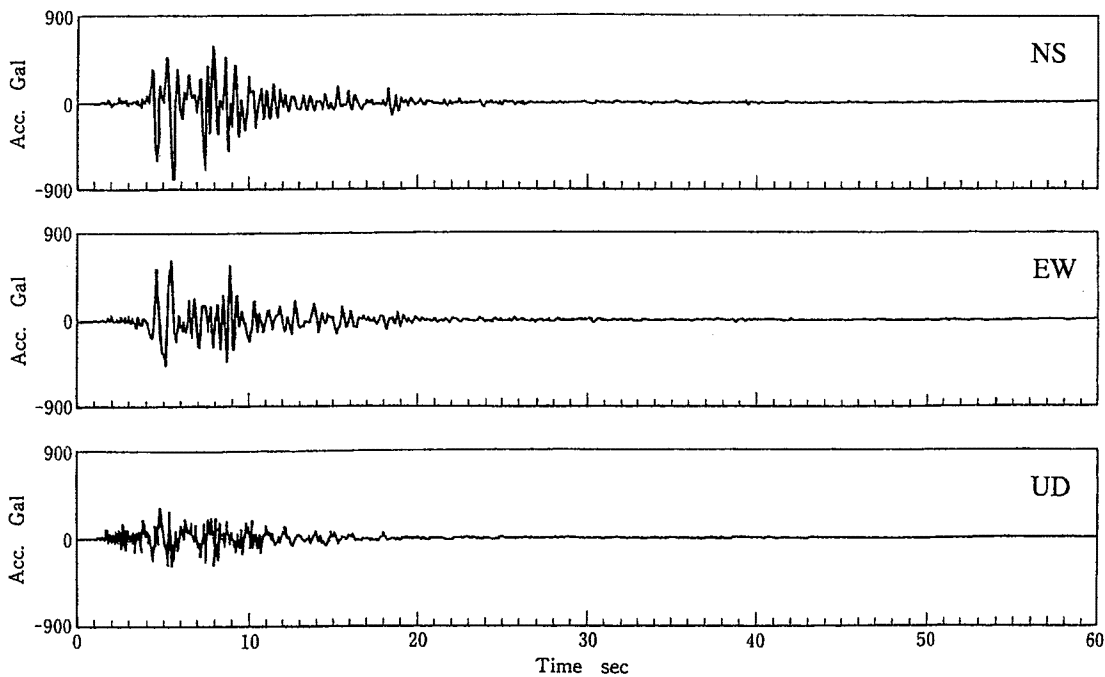


Fig. 1 Record of grand motion observed at Kobe Ocean Meteorological Observatory. 神戸海洋気象台で観測された加速度記録<sup>(9)</sup>

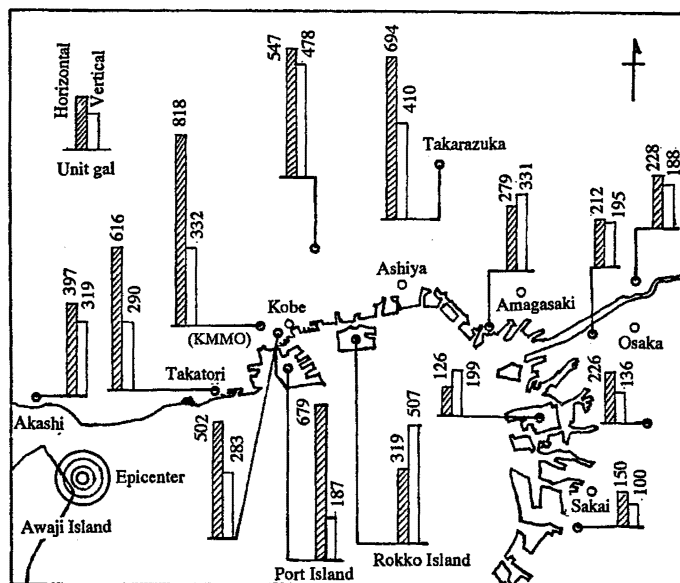


Fig. 2 Map of peak ground acceleration of Kobe port vicinity.  
神戸港付近の最大加速度

Table 1 Peak ground motion of Kobe Ocean meteorological Observatory (KOMO) and Port island.  
神戸海洋気象台およびポートアイランドにおける地震動

Location	North Latitude	East Longitude	Direction	Acceleration		Displacement	
				Max. (gal)	Predom. Freq. (Hz)	Max. (cm)	Predom. Freq. (Hz)
KOMO	34.67	153.18	NS	818.1	1.4	24.3	0.0
			EW	617.3	1.4	16.1	0.0
			UD	332.2	0.8	17.0	0.0
Port Island	34.67	135.21	NS	678.8	2.9	28.1	0.2
			EW	302.6	2.9	12.0	0.3
			UD	186.1	0.4	12.1	0.3

位による被害をもたらした主要因と考えられる。Fig. 1 に示した波形を用いて求めた応答スペクトルの特徴によれば<sup>(5)</sup>、①加速度波には周期が0.3~0.4秒付近と約1秒近傍の成分が卓越していること、②南北方向の地震動が東西方向に比べて大きく1.5秒付近の成分が卓越していて、これが速度や変位のピークを押し上げて大速度、大変位の地震動となったこと、③地震波の上下動にも1秒以上の長周期成分があったため、上下動も大速度、大変位を伴う地震であったこと等が明らかにされている<sup>(5)</sup>。

神戸海洋気象台では818 galを記録したが、その周辺での被害が最大というわけではなかった。また、前記した600 galを越える東西に帯状にのびる地帯においても、建物の被害が比較的小さい地域も見られた。一方、建物の被害や体感では、800 galを大きく越えるのでは

ないかとの感想も述べられている<sup>(10)</sup>。これは断層の断裂の進展速度とS波の進展速度が重なったドプラー効果と、局所の地盤増幅とが重なって高加速度が出現したと推定されている<sup>(11)</sup>。

### 3. クレーン被害の全般的な傾向

被災状況概要を把握するため、アンケートによる調査をユーザー10社、メーカー10社に対して実施した結果、回答のあったクレーンの被災件数は122件であったが、集計に用いることができる有効な回答は117件であった。一方、兵庫労働基準局の集計では、3 ton以上のクレーンが176件、3 ton未満が31件で被災総数は207件とのことであり、アンケート調査結果は被災総数の56.5%に相当している。

アンケート調査結果をクレーンの種類別に分類する

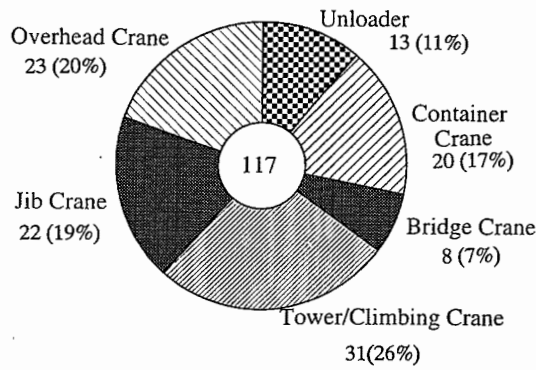


Fig. 3 Relationship between number of damaged cranes and type.  
 損傷したクレーンの数とタイプの関係

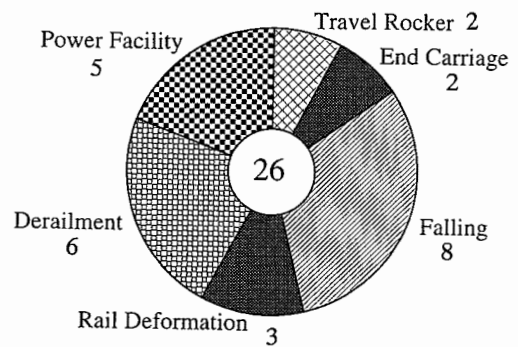


Fig. 4 Damage cause of overhead travelling crane.  
 天井クレーンの被害内容

と、Fig. 3 に示すようにタワークレーンが26.5% (31件) を占めていて最も多く、天井クレーンとジブクレーンがそれぞれ約19%となっている。クレーンの種類別の設置総件数を把握していないために、クレーンの種類と被災の割合は明かではないが、後述するクレーンの種類別の被災状況から判断すると、天井クレーンよりもタワークレーンやジブクレーンのように高さの高いクレーンに被災の割合が高い傾向が見られた。なお、地震が早朝に発生したために、数台のアンローダや製鋼所の一部の天井クレーンを除いて、多くのクレーンは休止状態で被災した。

#### 4. 各クレーンの被災状況

##### 4.1 天井クレーン

アンケートによる被災件数23件と現地調査3件の26件について、天井クレーンの設置個所と損傷件数の関係を調べた結果、半数の13件は神戸市内に集中しており、6件が伊丹市、他は1~2件であって各市に分散していた。また、26件中の被災内容はFig. 4に示すように、建屋の変形によるクレーンの落下が8件で最も多く、脱輪6件、給電線設備の変形5件の順となっている。

今回の地震ではPhoto 1に見られるように、建屋に大きな被害を受けたために、建屋の一部となっているランウエイガーダが大きく変形して、脱輪、クレーンの落下 (Photo 2)、サドルの損傷等が発生した。この場合、ランウエイガーダは海側に近いほど大きな損傷を受けていたが、幸い建屋の変形方向がクレーンの走行方向と一致していたために、天井クレーンの場合には使用台数に比べて落下や脱輪が少なかったものと推察される。もしも、変形方向がクレーンの横行方向 (スパン方向) と一致していた場合には、落下や脱輪は

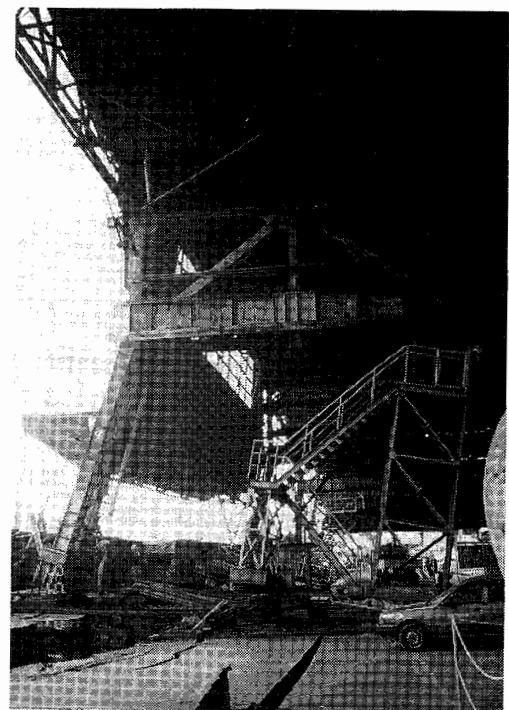


Photo 1 Damaged building.  
 被災した建屋

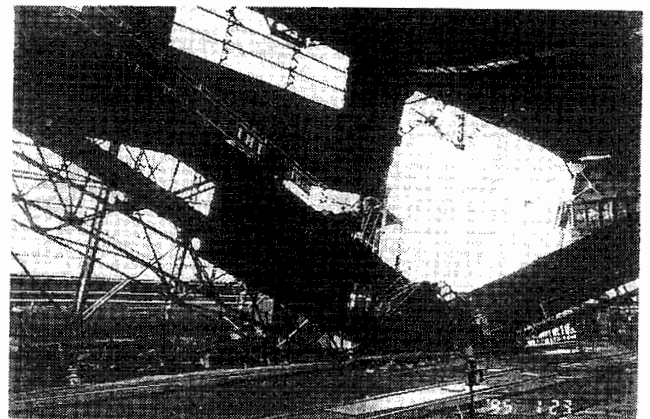


Photo 2 Falling of overhead travelling crane due to collapse of factory building.  
 建屋の損壊による天井クレーンの落下

さらに増加したものと思われる。脱輪した天井クレーンにはロッカービーム形式のものが多かったが、その中にはロッカービームの取付けピン（枕軸受型）が外れて、クレーン本体が落下した場合があった。運転室操作のクレーンにおいて、走行横行にブレーキのないものは地震時に大きく移動していた。特に、トロリではブレーキを装備していないことに加えてキャンバの影響によって移動し、車輪止めに激突して脱輪したものが多かった。

今回の地震で天井クレーン本体の被害は、後述のジブクレーンやタワークレーンに比べて少なかった。たとえば、製鉄所に設置されていた天井クレーン 89 台のうち、脱輪は 3 件であった。これは、天井クレーンではジブクレーンやタワークレーンに比較して、水平剛性の点で有利な構造になっているためと推測される。

機械学会による阪神・淡路大震災調査報告書、機械設備の被害<sup>(5)</sup>において、製鉄所の製鋼工場の天井クレーンに関する記述によれば、定格荷重 42 ton、質量約 80 ton の天井クレーンが吊り荷のない状態で激しく鉛直方向に振動し、片側の走行サドル部からガードが外れ、約 7m 下に落下したことが報告されている。また、圧延工場の天井クレーンについても、工場建屋が臨海地域の埋め立て地に建設されていたので、護岸のケーソンが地盤の側方流動で海側に移動し、それに伴い建屋基礎が移動してランウェイが大きく変形したため、3 機の天井クレーンが落下した<sup>(5)</sup>。

#### 4.2 ジブクレーン

調査したジブクレーンは主に造船所で使用されていたものが多く、定格荷重が 3~100 ton、最大作業半径が 25~70m であって、このうち定格荷重 10 ton、30.5 ton、100 ton のクレーンがそれぞれ 4 台ずつ含まれていた。これらのクレーンはいずれも何らかの損傷を受けており、特にセンターフレームに被害が集中していた。Fig. 5 はジブクレーンの被害の内容を示したもので、多くは幾つかの被害が重複していたので、Fig. 5 では主たる損傷別に分類した。Fig. 5 において、倒壊・全損した 4 件のジブクレーンはいずれもローラパスより上部（ジブや運転席）が落下したもの（Photo 3）で、落下時にローラパス下部のセンターフレーム部材が変形したことが多かった。なお、倒壊・全損した 4 台のクレーンの定格荷重は、3 ton、7.5 ton、10 ton、35 ton であって、倒壊と定格荷重の関係は認められなかった。ジブの折損（Photo 4）は 3 件見られたが、このうちの 1 件はジブが折損し、かつジブを含むローラパス上部構造体が落下したものであった。ジブクレーンの損傷の多くはローラパス近傍のセンターフレーム部

材の座屈やき裂の発生であって、10 件に達していた。この中には、上部構造体が落下する際に、フックが大きい

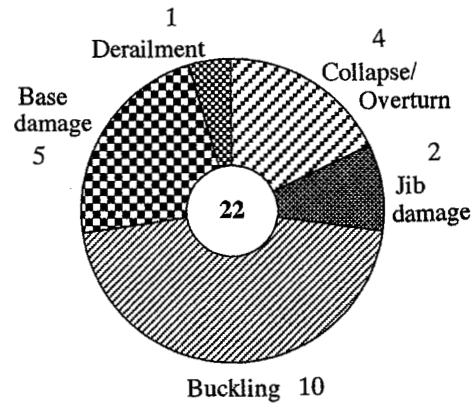


Fig. 5 Damage cause of portal jib cranes. ジブクレーンの被災内容

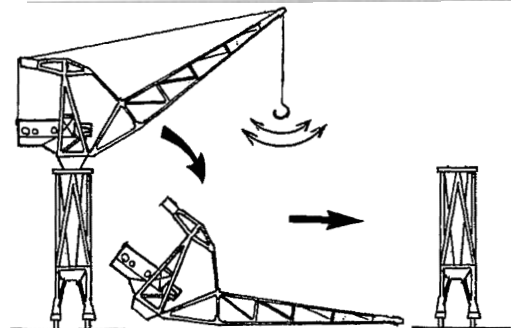
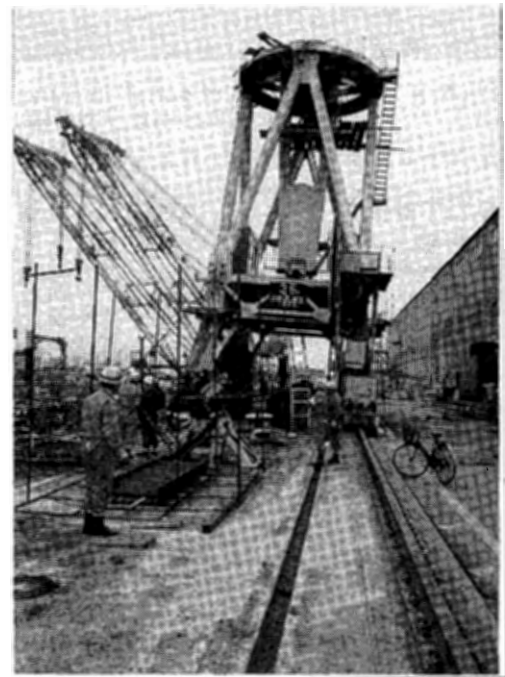


Photo 3 Falling of upper structure (operating room, counterweight, jib and derricking mechanism) from frame of portal jib crane and schematic illustration of falling behavior. 上部旋回体が落下した高脚ジブクレーンと落下挙動の図示

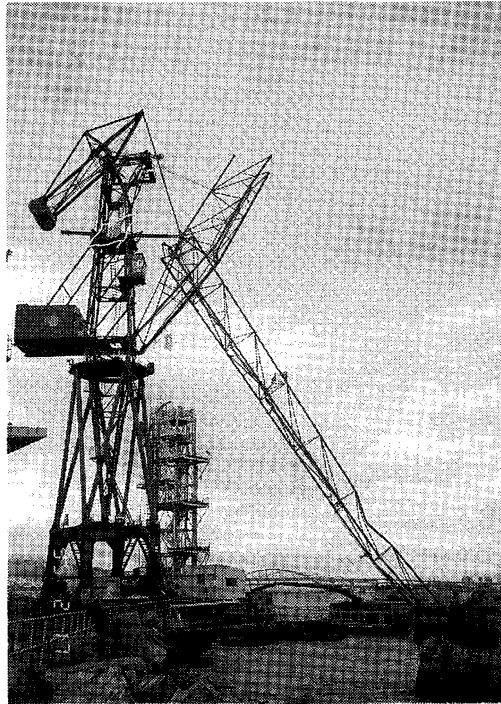


Photo 4 Failure of jib of portal jib crane.  
高脚ジブクレーンのジブの折損

く飛び跳ねて隣接ジブクレーンの運転席を直撃し、運転席を大破させた場合や、フックの衝突による部材の損傷等も含まれており、地震時のフックの固定方法についても、今後何らかの検討が必要となっている。地震時においていずれのジブクレーンも休止状態にあって、ジブの方位はおおむね北北東に向いている場合が多かった。一方、地震力の方向は北東であって、ジブの方位に近いことから、ジブの揺れは地震波によって強められた可能性がある。以上の被害の他に、液状化現象と関連して地盤の隆起や沈下からレールが曲げられている場合が多く、また、転倒防止を兼ねた逸走防止装置が、地震時のクレーンの揺れにより損傷を受けている例も認められた。

日本クレーン協会のクレーン耐震性委員会では、被害を受けた高脚ジブクレーンの1機（総質量約1140 ton 最大高さ約85m）について、固有振動解析<sup>(12)</sup>と地震波に対する応答解析<sup>(12)</sup>を行っている。固有振動解析結果では、まず、振動数が0.16~0.17 Hzの範囲にフックが振動するモード（1次~4次）が現れ、次に0.5~1.8 Hzの範囲に主構造体が振動するモード（5次~9次）が現れたが、これらの振動数は非常に接近しているのが特徴である。この解析では構造体の2次の固有振動数が、地震波の卓越振動数に近かったことが確認された。また、地震応答解析の結果でも、構造体の2次振動数が卓越して現れ、最も応力の高かった部材が、実際に最も損傷を受けた部材であった。

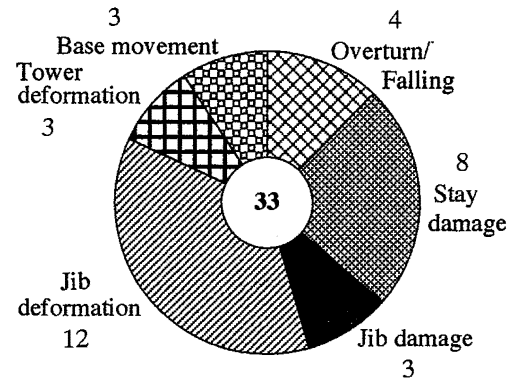


Fig. 6 Damage cause of tower and climbing cranes.  
タワークレーンとクライミングクレーンの被災内容

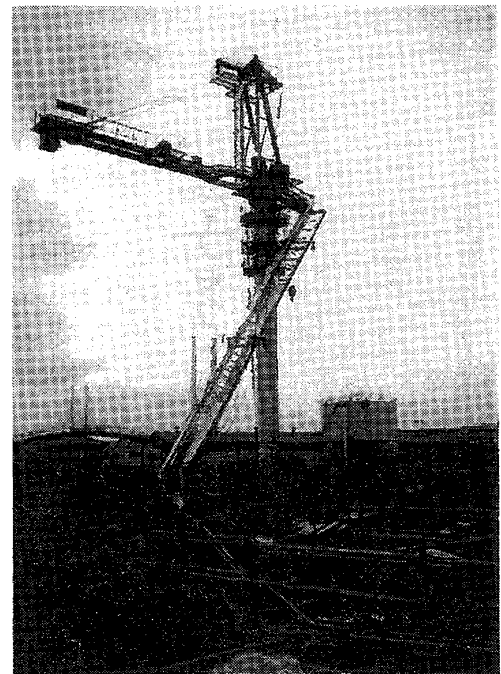


Photo 5 Failure of jib of tower crane.  
タワークレーンのジブの折損

#### 4.3 タワークレーン（クライミングクレーン）

阪神地区では地震当時かなりの建設工事が行われており、そこで使用されていたタワークレーンは約100機程度であって、そのうちの約1/4は神戸市内に設置されていたと推定されている。これらのクレーンは定格荷重が8~450 ton・m、マスト高さ10~102m、ジブ長さ10~45mであった。Fig. 6はアンケートおよび現地調査結果を合わせた33件のタワークレーンの被災原因を示したもので、倒壊・落下が4件起こっていたほか、ジブの破損が3件、ジブの変形が12件あり、ジブの損傷と変形が全体の約1/2を占めていた。ただし、ジブの損傷は部位によって異なり、ジブ先端近傍で損



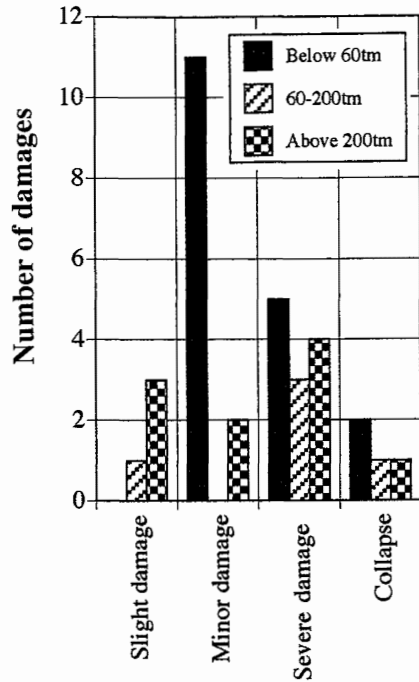


Fig. 7 Hoisting load and damage of tower and climbing cranes.  
クレーンのつり上げ荷重と被災の程度

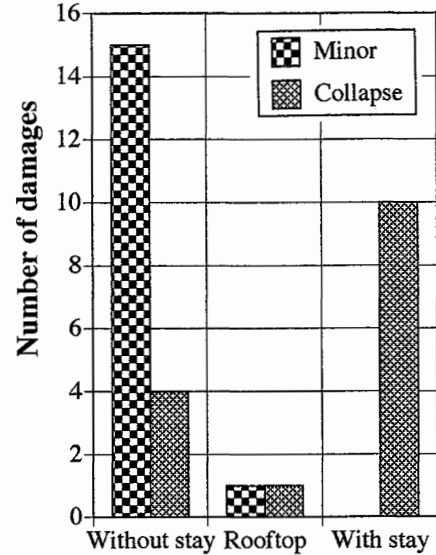


Fig. 9 Installation condition and damage of tower and climbing cranes.  
クレーンの設置条件と被災の状況

Fig. 7の結果は被災割合がかなり高くなっているが、幾つかの建設会社が自社のクレーンについて被災状況を調査した結果によれば、被害が軽微でそのまま使用可能なクレーンは約80%、倒壊あるいは大幅な修理が必要なクレーンは20%となっている。Fig. 8は幾つかの建設会社が阪神地区に設置していたタワークレーンの場所と被災状況を示したもので、おおむね震度と対応した被災状況となっている。しかし、大阪市内においては比較的狭い範囲で倒壊した場合と軽微な損傷しか受けなかったクレーンとがあり、かなり複雑な被災状況となっている。この原因は、クレーンの仕様、自立方法、地震波とジブの関係等が影響していると推察される。

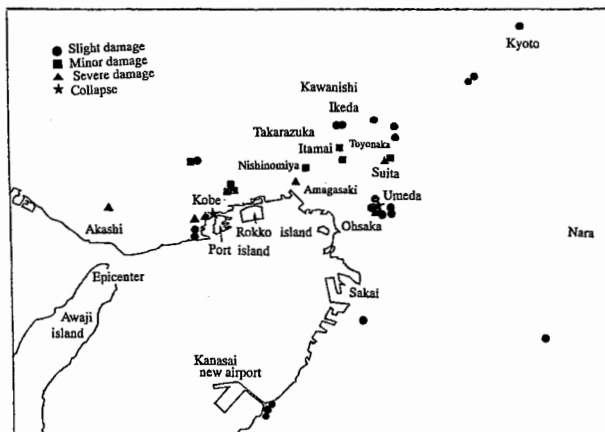


Fig. 8 Installation location of tower cranes in Hanshin area and damage.  
タワークレーンの設置場所と被災状況

傷が発生した場合には殆どが軽微であって、逆にジブの根元が損傷した場合 (Photo 5) には落下を含め重大な損傷を受けている場合が多かった。Fig. 7は被災の程度とクレーンの能力を示したもので、明確な傾向は認められないが、全体として60 ton-m以下のクレーンの方が被災の割合が高いようである。Fig. 7において、使用可能な極軽微あるいは軽微な損傷を受けたクレーンの合計は17件、倒壊あるいは損傷部位を交換しなければ使用できない重大な損傷を受けたクレーンは16件であって、両者の割合がほぼ等しくなっている。

Fig. 9はクレーンの自立方法と損傷の度合いを示したもので、自立式の場合は軽微な損傷が多く、ステーを取り付けた場合には重大な損傷が発生している。これはステーを取り付けることによってクレーンの揺れが剛性の高い建物の揺れに支配され、クレーンの揺れを拘束してしまうためにクレーン本体あるいはステーに大きな力が作用し、それらに重大な損傷をもたらしたと考えられる。また、建物からの地震力との共振の可能性もあり、タワークレーンの固有周期について今後検討が必要である。ステーの取り付け角度や寸法も被災に影響する。すなわち、同じ建物の表と裏側に設置されていた能力200 ton-m、高さ60mの同じ仕様の2台のタワークレーンにおいて、表側のクレーンは、ステーを取り付けた地上40mの箇所から倒壊し、クレーン本体と共に20mのマストが落下した (Photo 6)。一方、裏側のクレーンは直径90mmのステーのジャック

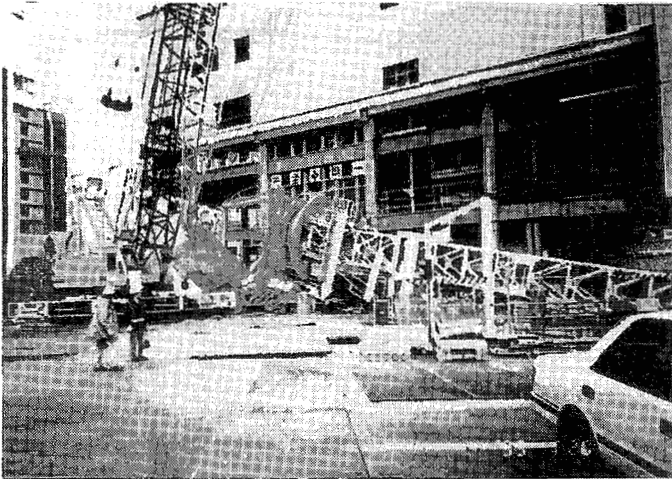


Photo 6 Falling down of a part of tower located above the fixed stay of tower crane.  
ステー上部から落下したタワーのタワーの一部

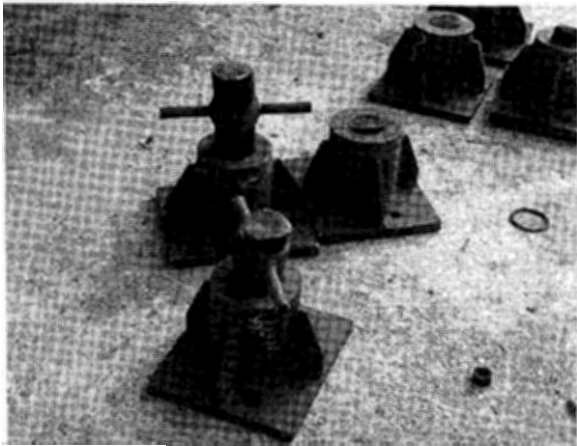


Photo 7 Brittle failure of jack used stay.  
脆性破壊したステーのジャッキ

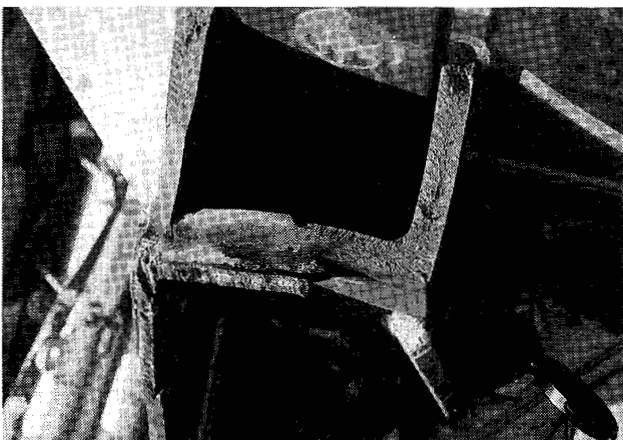


Photo 8 Brittle failure initiated from welds of tower crane.  
タワーの溶接部から発生した脆性破壊

キが脆性破壊 (Photo 7) したが、倒壊は免れた。両クレーンの差異は、ステーの角度とステー設置幅の相違であって、ステーの角度が小さく、かつ設置幅の小さい裏側のステーには大きな力が作用したためステーが破壊し、クレーンの倒壊を免れた。これまでステーは強度だけを要求してきたが、この例から明らかなように、地震時においてはステーは大変位を吸収できる柔軟な構造とする必要がある。同様な被災現象や対策は、高圧ガス設備の配管系でも指摘されている<sup>(13)(14)</sup>。17階の屋上に設置した高さ12mの120 ton-mのジブクレーンでは、マスト部材 (L150×150×19t) がマスト底部から脆性破壊して倒壊したが、脆性破壊の起点はマスト材にリブを溶接した箇所付近 (Photo 8) であった。このため、溶接止端の仕上げを丹念に行い、できるだけ応力集中軽減する措置が必要である。

脆性破壊は温度が低く、変形速度が高く、部材寸法や構造不連続の存在による塑性拘束 (3軸応力) の程度が強くなるほど起こりやすい<sup>(14)</sup>。今回の地震では速度が100 kine (cm/s) に近く、応答周波数としては150 kine 以上になったと推定されている<sup>(11)</sup>。このため、各種の機械系や建築関係の鋼構造物において脆性破壊が発生しており、その多くは溶接止端や裏当て金溶接部等の高応力集中箇所であった<sup>(14)(15)</sup>。

#### 4.4 コンテナクレーン

コンテナクレーンは重心が高く、脚のスペンが非常に大きい特徴を有しており、さらに、脚の構造は一方の側が脚の根元でヒンジになっていて脚のスペンが微調整できるもの (揺脚構造と呼ばれる) と、ヒンジを有しない構造のもの (剛脚構造と呼ばれる) が存在する。コンテナクレーンは六甲アイランド、ポートアイランド、摩耶埠頭等の岸壁に設置されていたが、これらの地域は埋立地である場合が多く、液状化が広い範囲で発生して護岸が海側に大きく移動すると同時に沈下した。このため、地盤流動が起こった地域に設置されていたコンテナクレーンや各種の構造物は、基礎が移動したり曲げられたりしたため甚大な被害を被った。コンテナクレーンのユーザは公共企業体である場合が多く、本被災調査がメーカーと企業ユーザを対象としていたため、現地調査以外は調査が十分行えなかった。そこで、本稿では現地調査以外は、港湾荷役機械設備の被害報告<sup>(6)(7)</sup>や実験結果を参照してコンテナクレーンの被災状況について検討した。

Fig. 10 は六甲アイランド、ポートアイランドおよび摩耶埠頭に設置されていたコンテナクレーンの被災状況を示したもので、55台のコンテナクレーンのすべてが脱輪しており、また、何らかの損傷を受けていた。こ



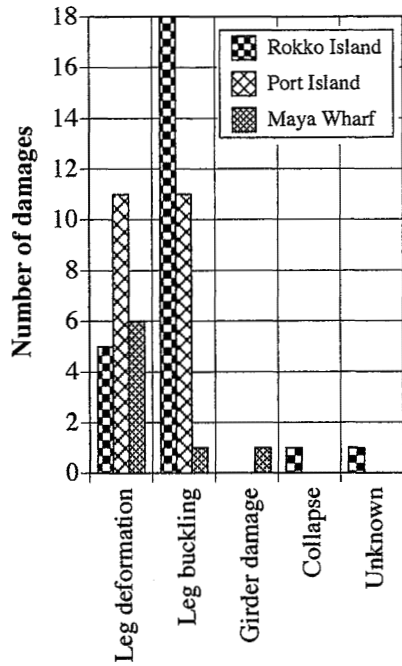


Fig. 10 Installation location and damage of container cranes.  
コンテナクレーンの設置場所と損傷件数



Photo 9 Derailed from rail and buckling of leg of container crane.  
脱輪および脚部が変形したコンテナクレーン

これらのコンテナクレーンのすべては剛脚構造であった。被災原因は、横揺れによるケーソンの海側への移動、液状化による基礎支持力の低下、地盤の沈下や割れ、並びに縦揺れによって車輪の浮上がり等のためと推察される。損傷の内容を見ると、脚部の座屈が約55%を占めており、脚部の変形と合わせると脚部の損傷が98%に達している。このように脚部に損傷が集中した原因は、護岸の地盤が側方流動によって海側に移動し、さらに沈下したために、海側と陸側のレールに相対変位が発生し、脚部が強制的に開脚させられて座屈したことに

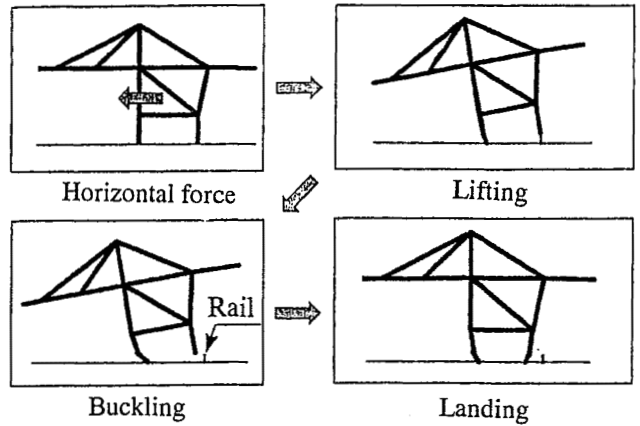


Fig. 11 Lift up and damage behavior of leg of container crane.

コンテナクレーンの脚の浮き上がりと損傷現象<sup>(16)</sup>

よると考えられる。これらのコンテナクレーンは休止姿勢をとっている場合が多く、ブームが起伏状態にあった。このため、重心が陸側にあり、海側にある脚は上下の揺れに対して浮き上がりやすい状態となっていた。脱輪および脚部が変形したコンテナクレーンを Photo 9 に示す。

柏崎と金山<sup>(16)</sup>はポートアイランドの地震波をコンテナクレーンに入力して非線形地震応答解析を行い、Fig. 11に見られるように、クレーンの安定限界を超える水平力が作用したことにより、陸側脚に変形を伴う浮き上がりが発生し、変形が回復しないまま脱輪後、海側の脚が大変形を起こして脱輪するために、脚が内側に向けて塑性変形を起こしたことを示している。

以上の損傷のほかに、後部ガーダーの座屈、起伏ロープの切断、ブームの落下等が発生した。設置場所と損傷の関係を見ると、六甲アイランドのコンテナクレーンの損傷がひどく、全壊を含め脚部の座屈が最も多く発生していた。

#### 4.5 アンローダ

アンローダもコンテナクレーンと同様岸壁に設置されていたが、加古川市では岸壁が約600mにわたり、最大14.6m海側に移動し、岸壁背面の地盤が完全に水没したため、レール基礎の崩壊やアンローダの水没や倒壊等多大の被害が発生した。

調査したアンローダは17台であり、主な内訳は橋形アンローダ4台、ニューマチックアンローダ6台、引き込み式アンローダ3台、その他各一台となっており、運搬能力は330 ton/hから1500 ton/hの範囲のものが多かった。設置場所は加古川5台、神戸11台、尼崎1台である。被災したアンローダはいずれも岸壁に設置されていたため、岸壁の崩壊や移動によってレールの

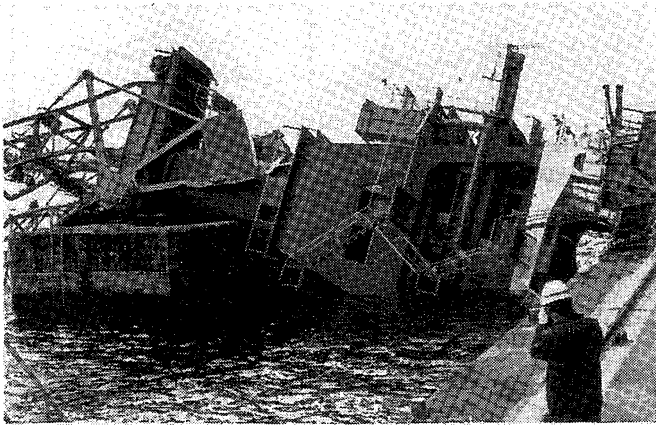


Photo 10 Collapse of unloader.  
倒壊したアンローダ

湾曲や切断等が生じていた。また、17台のうち、倒壊を免れた9台は脚部の座屈や変形が主体となっていたが、これはコンテナクレーンの場合と同様、レール基礎の移動によりレールスパンが変化し、脚のスパンが強制的に開いた状態となったためである。なお、レール基礎の移動が少ない場合は、脚の変形や脱輪が起こっていた。これらのアンローダはいずれも陸側が揺脚となっていた。他の8台はケーソンが海側に移動したため基礎が陥没し、レール上のアンローダも下部が海に水没すると同時にブーム等の上部構造体が船体や他の港湾設備と衝突して崩壊した (Photo 10)。

何台かのアンローダは被災時に稼働しており、転倒崩壊したアンローダの中には運転席がつぶされてオペレータが死傷する災害も発生した。しかし、転覆したにもかかわらず被災を免れたオペレータも少なくなく、今後、運転席の位置や強度、緊急脱出設備等の検討が必要である。転倒したアンローダはいずれも基礎が大きく変動したためであって、十勝沖地震<sup>(17)</sup>においても類似の損壊が認められた。アンローダの耐震対策には構造と同時に、基礎となる地盤強度について、十分な検討が必要である。

## 5. 調査結果に基づく耐震性の課題

### (1) クレーンの耐震基準の検討

クレーンに対する耐震設計基準として、クレーンの種類によらず水平方向地震荷重 ( $0.2 \times$  クレーン自重) が採用されている<sup>(18)</sup>。今回の地震では、地域によって横揺れよりも縦揺れの加速度が大きい場合があることから、縦揺れによる負荷をどの程度水平荷重に見込む必要があるかを含め、耐震設計について総合的に検討する必要がある。また、ジブクレーンやタワークレーンで被災率が高いことから、クレーンの種類によらず一律に地震係数を定めることの妥当性についても、検

討する必要がある。

### (2) 各種クレーンの固有振動数の検討

クレーンには多くの種類があり、機能や構造も多岐にわたっている。代表的なクレーンについて固有振動数の測定や解析を行い、地震波と対比してクレーン耐震設計基準に資する必要がある。特に、タワークレーンでは建設途上の建造物の上に設置される場合があり、クレーンの単独の振動のみならず建造物との連成を考慮した振動特性の把握が必要である。星井ら<sup>(19)</sup>はクライミングクレーンの固有振動数の実測を行い、これまでに提案されているクレーン耐震設計指針<sup>(20)</sup>を用いて算定した結果と比較して、固有振動数と振動モードが実測と計算結果で一致することを示している。同時に、応答スペクトルの補正係数や設置高を考慮した応答倍率の導入の必要性を要望している。

### (3) クレーンの支持方法の検討

タワークレーンにおいて、ステーを取った場合の方が被災率が高く、また、ステーの取り方によって被災の程度が異なっていた。これは建物の剛性とクレーンの剛性とが異なることに起因している。ステーはクレーンの座屈や風荷重対策として重要であるが、今後は耐震性も考慮したステーの剛性や強度を検討する必要がある。

### (4) フックの飛び跳ね現象および荷の揺れの解明

ジブクレーンではフックが構造部材に当たり損傷を与えた。今回の地震ではクレーンが休止状態にあったため吊り荷の揺れは見られなかったが、地震時のフックや荷の振動特性を把握しておく必要がある。

### (5) 天井クレーンの落下対策

天井クレーンの中には走行ロッカーの軸受けが破損して脱輪し、落下した例が見られた。走行ロッカービームの軸受けの強度について検討が必要と思われる。天井クレーンの落下はランウェイガーダの損壊と関係している場合が多く、落下によって被害が近隣に拡大する危険性のある場合は、部分的に耐振性を増したランウェイガーダを設ける等何らかの対策が必要であろう。

### (6) アンローダ運転席の構造

倒壊したアンローダの中にはオペレータが脱出できず、船体や他の物体との間に挟まれて死傷する例が見られた。このため、運転席の位置や強度について検討すると共に、緊急脱出口を設ける等の対策が望まれる。

### (7) ジブクレーンローラパス部の強度

ジブクレーンの多くはローラパス部付近に被害が集中していた。ジブの方向を変えるローラパスは構造が複雑であって、強度的裕度が取りにくい場合が多いが、何らかの耐震対策の検討が必要と思われる。

### (8) 地盤の強度

コンテナクレーンやアンローダでは地盤の崩壊によって、倒壊を含む大きな損傷を受けた場合が多く認められた。十勝沖地震においても類似の損壊が発生しているので、地盤を含む基礎の強度について見直す必要がある。

## 6. むすび

兵庫県南部地震では、非常に強い破壊力が短時間に起きたことが地震動の大きな特徴となっている。このため、これまでに経験したことのない甚大な被害が発生した。クレーンの地震被害について主要因ごとに大別すると、①慣性力によるもの、②相対変位によるもの③地盤液状化および流動によるもの等に分類できる。このうち①に属する場合は、ジブクレーン等におけるジブや上部旋体の落下、並びにクレーンの座屈や倒壊、②によるものとしては、天井クレーンの落下、およびジブクレーンの壁つなぎ部材（ステー）の破断、③に代表されるものとしてはコンテナクレーンの脱輪や脚部の座屈、およびアンローダの倒壊等があげられる。

今回の調査を通してクレーンの耐震性に対する課題が浮き彫りとなった。これらの課題をクレーン耐震設計基準にどのように反映させるか早急に検討する必要がある。

## 謝 辞

現地調査に際して被災直後にもかかわらず関係各位には多大のご協力をいただき、さらに貴重な資料のご提供をいただいた。また、平成7年度クレーン協会耐震性検討委員会委員長の東京都立大学鈴木浩平教授、並びに平成8年度クレーン協会耐震性検討委員会委員長の上智大学曾我部潔教授には現地調査にご同行いただき、さらにその後も種々ご指導いただいた。ここに、記して感謝の意を表します。また、合同調査の事務局を担当されたクレーン協会関係者にも感謝致します。

## 参考文献

- (1) 日本クレーン協会，阪神・淡路大震災地震のクレーン等への影響に関する調査研究，(1997-2)。
- (2) 橋内良雄，兵庫県南部地震によるクレーンの被災状況，クレーン，Vol. 35, No. 3, (1997), pp. 7-14.
- (3) 曾我部 潔，クレーンの振動解析による耐震性の検討状況，クレーン，Vol. 35, No. 3, (1997), pp. 15-33.
- (4) 鈴木浩平，産業施設の地震被害と耐震技術 —兵庫県南

- 部地震の教訓から—，総合都市研究，第61号，(1996)，pp. 101-110.
- (5) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会，阪神・淡路大震災調査報告，日本機械学会，機械編，(1998.8).
- (6) 港湾荷役機械設備耐震設計調査委員会，荷役機械，Vol. 40, No.2, (1995-3), pp. 203-208.
- (7) 岡山義邦，兵庫県南部地震によるコンテナクレーンなどの被害の現状，安全工学，Vol. 35, No. 1, (1996)，pp. 68-80.
- (8) Y. Kitsunai, K. Sogabe, Damage and failure of cranes due to Hanshin-Awaji earthquake, Case histories on integrity and failures in industry, Milan, (1999), pp. 653-662.
- (9) 建築研究所編；平成7年兵庫県南部地震被害調査報告（速報），(1995.2), p. 243.
- (10) 白木万博，阪神・淡路大震災の個人体験記，日本機械学会誌，Vol. 99, No. 935, (1996), pp. 819-823.
- (11) 柴田 碧，兵庫県南部地震に学ぶ，日本機械学会誌，Vol.99, No. 935, (1996), pp. 824-831.
- (12) 日本クレーン協会，地震に関するクレーンの点検基準等の調査研究，(1997-2)。
- (13) 鈴木浩平，阪神・淡路大震災における機械系構造物の被害について ボイラ以外の諸施設の被害，ボイラの研究，No. 272, (1995), pp. 12-17.
- (14) 小林英男，災害防止技術から災害制御技術へ，日本機械学会誌，Vol. 99, No. 935, (1996), pp. 842-845.
- (15) 鈴木浩平，機械系構造物の耐震性能について—兵庫県南部地震の被害調査から—，日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集，Vol. B, (1996), pp. 545-548.
- (16) 柏崎昭宏，金山維史，クレーン，Vol. 37, No. 6, (1999)，pp. 2-8.
- (17) 土木学会耐震工学委員会，1993年釧路沖地震震害調査報告書，(1994)，pp. 262-265.
- (18) 労働省告示，クレーン構造規格（平成7年労働省告示第134号）。
- (19) 星井 勤，川西詠二，岡野 茂，山口雄二，クレーン，Vol. 25, No. 5, (1987), pp. 2-7.
- (20) 日本クレーン協会委員会報告，クレーン耐震設計指針（案），クレーン，Vol. 23, No. 3, (1985), pp. 6692-6700.

(平成12年1月11日受理)