

1. 緒 論

前田 豊*, 橘内良雄**

1. Introduction

by Yutaka MAEDA* and Yoshio KITSUNAI**

Abstract: The Southern Hyogo-prefecture earthquake hit around the Kobe City in the early morning of 17th January 1995, and caused a great deal of damage to many cranes. Through on-the-spot investigation and questionnaire, main feature of damage to cranes by this earthquake was found that (1) tower cranes and jib cranes suffered more damage compared with overhead travelling cranes and bridge cranes including container cranes. (2) main damage of overhead travelling cranes was falling down or derailment from the runway girder due to large deformation of building, and container cranes and unloaders were damaged due to movement of foundation associated with soil liquefaction, and (3) tower cranes fixed to buildings with stays were more severely damaged than ones standing by themselves, and the stays seemed to pay the important part of damping or amplification of seismic vibration.

In Japan two kinds of standards of crane for proof against earthquake exist; one is the construction code of crane, and another is the Japan Crane Association standard. The construction code of crane has the legal force and all the cranes are to have the uniform value 0.2 of the lateral seismic factor. The Japan Crane Association standard decides the corrected seismic coefficient to overhead travelling crane and bridge crane, but not to jib crane nor tower crane. Considering these circumstances, the vibrating characteristics of tower crane with or without stays were selected for the main subject of this study.

The chapter 2 presents the survey on the damage of cranes in the Southern Hyogo-prefecture Earthquake. And the results of examination to obtain the dynamic characteristics about the tower crane are dealt in the chapter 3. The chapter 4 and 5 deal the vibration test on model of a tower crane and the buckling strength of stays respectively. Concluding remarks are dealt in the chapter 6.

Keywords; Southern Hyogo-prefecture earthquake, Crane, Tower crane, Earthquake-resistant design

1. はじめに

1995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6,400人を超える死者、10万棟を超える家屋の全壊、40万棟以上の家屋損壊を生じ、これら家屋の倒壊・火災の発生をは

じめとして、未曾有の被害をもたらした。地震発生時には、300 galを超える強い揺れが広範囲に観測されており、特に神戸海洋気象台においては800 galを超える振動も観測されている。

この地震によりクレーンについても、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、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、工場の天井クレーンなど、多くの被害が発生した。それ以前に地震によるクレーンの被災が無かつ

* 機械システム安全研究部 Mechanical and System Safety Research Division

** (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)

た訳ではないが、今回の地震が契機となってクレーンに対する耐震性及びそれに付随する安全性が注目されることとなった。

本研究は、以上のことから、兵庫県南部地震によるクレーンの被害調査を実施し、そこで特に検討の余地が残されていることが明らかになったタワークレーンを中心に、その振動特性の把握など、地震に対するクレーンの安全対策について検討を行ったものである。

2. 地震によるクレーンの被害

兵庫県南部地震におけるクレーンの被害状況について、その詳細は第2章に述べるが、全体的にまとめると次のようになる。

- (1) 天井クレーンについては、建屋に大きな被害を受けたため建屋の一部であるランウェイガードが大きく変形したための脱輪、クレーンの落下等を除くと、それほど大きな被害はなく、地震による被害は、他のクレーンに比べると少なかったことが判明した。これは、天井クレーンが他のクレーンに比べて水平剛性の点で有利な構造になっているためと推定される。
- (2) 橋形クレーン、アンローダ、コンテナクレーンについては、岸壁の崩壊や移動によってレールの湾曲や切断等が生じたり、レールの基礎の移動によりレールスパンが開き、いわゆる股裂きの状態となって脚部の座屈や変形、脱輪を生じたものが着目された。これらを初め多くは基礎の変動に起因しており、基礎となる地盤強度についての検討が必要となる。
- (3) ジブクレーンでは、センターフレーム付近の被害が大きく、ローラパス部より上部のジブや旋回フレームの落下、センターフレーム部材の座屈やき裂の発生などが見られた。また地盤の隆起や沈下から走行レールが曲げられている例が多く見られた。
- (4) タワークレーンでは、被災したものの半数はジブの破損、変形によるものであった。クレーンが自立方式の場合は軽微な損傷が多いのに対し、クレーンを建物と結合させるためのステーを取り付けた場合には重大な損傷が生じていた。これはクレーンを安定させるステーが逆に建物の揺れをクレーンに伝達することになってクレーンあるいはステーに大きな力が作用したためと考えられる。

また、同じ建物の両側に設置されていた同じ仕様の2台のタワークレーンにおいて、ステーの取り付け方が異なったため、片側のクレーンはステーを取り付けた部分でマストが折れ、反対側のクレーンはステーのジャッキが脆性破壊した例があった。

このことは、ステーの取り付けがタワークレーンの耐震性能に大きな影響を与えることを示している。

以上、各種のクレーンの被災状況から、天井クレーンでは建屋自体の被災による被害が、コンテナクレーンやアンローダ、またジブクレーンにおいても岸壁の移動や地盤の崩壊による被害が多かったことが明らかになった。すなわち、これらのクレーンでは、クレーン自体の特性の問題もあるが、その設置環境による影響が大であった。

一方、ジブクレーンではこれと異なりクレーン自身の特性により破壊している。特にタワークレーンでは、クレーン自身の振動による問題に加え、ステーの影響が新たに着目された。すなわち、ステーの有無や取り付け方等により耐震性能に差が出ていることが推定された。

3. クレーンの耐震設計基準の現状

クレーンの耐震設計基準はISO規格にも無い。我が国には、強制規格としてクレーン構造規格（かつての機械学会基準に起源を求められるJIS規格もほぼ同じ内容）が、また任意規格として日本クレーン協会規格がある。

3.1 初期の設計基準における規定

我が国で初めに作成された公式的なクレーンの設計基準は1962年のクレーンはがね構造部分計算基準¹⁾である。

それまでは統一されたクレーンの設計基準が存在せず、各メーカーでは海外の規格を参考にして個々に計算基準を作成して使用していた。このため各社の基準がばらばらで統一がとれず、ドイツやイギリスと競争する際に不利なことが多いことから、日本機械学会にクレーン計算基準分科会が設けられて検討を重ね、上記の計算基準が作られた。

この基準において地震荷重については、「走行するクレーンに対しては特に考慮を要しないが、固定したものに対しては垂直荷重の20%の水平力を考慮する。」とされた。また、地震荷重は「休業時」の荷重の組み合わせで考慮され、「(静荷重) + (垂直動荷重) + (休業時風荷重または地震荷重) + (熱による荷重)」を負荷させた時の応力が、許容応力（通常に比べて30%割増して計算する）を超えないこととされている。

この基準の解説部分には「地震荷重は従来15%をとって考えていたが、鋼鉄道橋（水平震度0.2、鉛直0.1と定められている。）を参考として20%に改めた。鉛直は特に考慮しない。」との記述があり、建設省告示の水平震度が参考に示されている。

3.2 JIS規格「クレーン鋼構造計算基準」

日本工業規格²⁾は、上記の日本機械学会基準の改訂基準をもとに作成されたもので、現在までSI単位系の採用以外の変更はなされていない。ここでは地震荷重について、「走行式、固定式にかかわらず自重の20%の水平荷重を考慮する。ただし、ロープによりつられたつり荷による水平荷重は考慮しない。なお、地震に対し構造物の振動解析を行ったものについてはこの限りではない。」とされている。

地震荷重は“負荷状態C”の荷重の組み合わせにおいて考慮され、「(巻上荷重) + (自重) + (地震荷重) + (熱による荷重)」を負荷させた時の応力と許容応力が比較される。

許容応力は機械学会基準と異なり安全率方式で与えられ、通常のつり上げ作業を示す負荷状態“A”では使用する鋼材の降伏点あるいは耐力に対して1.5、引張り強さに対して1.8の安全率で割った値の小さい方の値をもって基本許容応力とする。地震荷重を考慮する負荷状態“C”では安全率をそれぞれ1.15と1.4にするので、負荷状態Aに対し前者では30%、後者では29%、それぞれ許容応力を割り増すことになる。

3.3 クレーン構造規格

クレーン構造規格³⁾は、法的な強制規格であり最低限の安全基準が決められている。JISの設計基準規格と整合をとり、JIS規格作成と同じ1976年にクレーン

構造規格も全面改正された。その後の改正では、耐震設計に関する本質的な部分に変更されていない。ただし、1995年の改訂で「ただし、労働省労働基準局長が認めた場合には、この限りではない。」との条項が追加されている。

クレーン構造規格では、地震荷重に関しては、第10条に「地震荷重の値は、垂直静荷重の20パーセントに相当する荷重がクレーンに対し水平方向に作用するものとして計算した値とする。」と定められている。ここで、垂直静荷重とは機体の自重による荷重をいう。つり荷はワイヤロープでつり下げられているので、水平の地震動はつり荷に伝達しないと考えられるため、つり荷に対する地震力は考慮しない。

次に、強度計算に係る荷重の組み合わせは、第11条に「3 垂直動荷重、垂直静荷重、熱荷重及び地震荷重の組み合わせ」において、構造部分を構成する部材の断面に生じる応力の値が、許容応力を超えないこととされている。ここで、垂直動荷重とはつり荷の重量(及びつり具、巻き上げ用ワイヤロープの重量)をいう。

また、このときの許容応力は、第7条により30パーセント増しとすることができる。通常の許容応力は、引張りに対しては降伏点又は耐力の1/1.5と引張強さの1/1.8のうちの小さい方の値、圧縮に対してはその1/1.15である。

以上をまとめると、地震に対する設計応力は(1)式により計算される。

鉛直方向 : 垂直動荷重 + 垂直静荷重 水平方向 : 地震荷重 = 0.2 × 垂直静荷重 その他 : 熱荷重	\rightarrow 応力 \leq	$\begin{cases} \min\{\text{降伏点}/1.15, \text{引張強さ}/1.38\} & (\text{引張応力}) \\ \min\{\text{降伏点}/1.00, \text{引張強さ}/1.20\} & (\text{圧縮応力}) \end{cases} \quad (1)$
--	-------------------------	--

3.4 クレーン耐震設計指針

日本クレーン協会規格のクレーン耐震設計指針⁴⁾には、一般天井クレーンと橋形クレーンを対象に、原則として修正震度法、一定の設置条件を満たす場合は震度法による設計法が規定されている。修正震度法では、次の(2)式により設計水平震度 K_s を求めることとされている。

$$K_s = K_0 \beta_1 \beta_2 \beta_4 \beta_5 \quad (2)$$

ここで、

K_0 は基本水平震度で、0.2とする。

β_1 は地域別補正係数で、地震発生の頻度及びその大きさ並びに被害の程度などを総合的に考慮して、地域別に0.8, 0.9, 1.0に分けられている。

β_2 は地盤種別補正係数で、地震動が基盤から地表面

に達する間に増幅される程度の違いにより、0.6, 0.8, 1.0に分けられている。

β_4 はすべり補正係数で、車輪とレールの間のすべりを考慮した係数である。車輪がフランジやクレーンアムカにより拘束される場合は1.0、拘束のない場合は

$$\beta_4 = 0.65 \times (\text{制動車輪数} / \text{総車輪数}) \quad (3)$$

(ただし 0.01 以上)

である。

β_5 は加速度応答倍率で、クレーンが地盤上に直接設置されるときは、地盤の種別とクレーンの固有周期から減衰定数が2.5%のときの値 $\beta_5(2.5)$ を図から求め、これに減衰係数に応じた補正係数 η を乗じて計算される。固有周期はクレーンの形状により簡便な計算式が与えられている。

$\beta_5(2.5)$ はクレーンの固有周期が短いときに大きく最大は 3.75, η は減衰が少ないときに大きく最大は 1.43 であるので, β_5 は 5 を超える値となることもあり得る。

また, 栈橋や建屋内などの構造物の上にクレーンが設置される場合の β_5 は, 上記により求められた値に次の λ を乗じる。

$$\lambda = 0.7 \times \sqrt{(1 + \gamma) / (0.925\gamma + 0.075)} \quad (4)$$

ここで,

鉛直方向 : 垂直動荷重 + 垂直静荷重	}	→ 応力 ≤	{	min{降伏点/1.00, 引張強さ/1.40} (引張応力)	(5)
水平方向 : 水平震度 × クレーン自重				min{降伏点/0.87, 引張強さ/1.22} (圧縮応力)	

この設計指針は天井クレーンと橋形クレーンを対象に規定されているもので, タワークレーンを含めてジブクレーンには適用できない。

ジブクレーンの形状は様々であり, 特性が明らかになっていないことから, 固有周期を求める簡易式も存在しない。特にタワークレーンにおいては建家とステーによる結合が大きな問題となることが想像された。このため, 以下においてタワークレーンを対象に振動特性の把握を行い, 耐震安全性についての基礎資料を得ることとした。

4. 本報告の構成

本報告は, 全 6 章から構成される。本第 1 章においては, 研究の動機, 兵庫県南部地震の被害状況と耐震設計基準の現状等について述べ, タワークレーンを対象として取り上げた経過について述べた。

第 2 章においては, 兵庫県南部地震におけるクレーンの被害状況について述べる。クレーンの被害は全機種にわたるが, 特にタワークレーンが建物とステーにより結合されている場合の問題が未解決であることが

$\gamma = (\text{クレーンの重量}) / (\text{支持構造物の重量})$ である。

以上により求められた設計水平震度 K_0 をクレーンの自重に乗じて水平力を求め, これに鉛直方向の荷重を同時に負荷して各部材の応力を求める。

許容応力はクレーン構造規格より小さく, 引張りに対して降伏点と引張強さの 1/1.4 のうちの小さい方の値, 圧縮に対してはその 1/1.15 の値である。

以上をまとめると, 地震に対する設計応力は (5) 式により計算される。

推定された。

第 3 章では, 実機のタワークレーンを用いてその振動特性を計測した実験とその結果について述べる。また, ステーが振動に与える影響についても考察する。

第 4 章では, タワークレーンの模型を使用した振動実験と解析について述べる。

第 5 章では, タワークレーンのステーの強度について, 座屈実験を行った結果について述べる。ステーの設計基準は明確でなく, その強度について検討した。

第 6 章は以上の結論をまとめた結言である。

参考文献

- 1) 日本機械学会 クレーンをはがね構造部分計算基準 (1962).
- 2) JIS B 8821 クレーン鋼構造部分の計算基準 (1976).
- 3) 労働省告示, クレーン構造規格 (1995).
- 4) クレーン耐震設計指針, クレーン, Vol. 28, No. 3 (1990).

(平成 12 年 1 月 11 日受理)