

Research Reports of the National Institute
of Industrial Safety, NIIS-RR-2001 (2002)
UDC 629.3.015.5:621.8.034:550:344:622.764.3:519.614

建築用タワークレーンの耐震性に関する研究

高梨成次*, 前田 豊**

Research of Earthquake Resistance of Tower Crane for Construction.

by Seiji TAKANASHI* and Yutaka MAEDA**

Abstract : A lot of tower cranes were severely damaged by the Hyogo-ken Nambu earthquake that had occurred on January 17, 1995. There were several major classifications of damage. The most extreme serious examples are the following three types. 1) Damage of mast part. 2) Damage of jib part. 3) Damage of base part. In this research, the damage of mast and the damage of the jib were examined. The purpose of this research is to propose measures to prevent such damage. However, the dynamic characteristics of the tower crane have not been examined enough. Therefore, at first, the free vibration test was done with the tower crane actually used on the construction site, and the dynamic vibration characteristics were examined. The lifting capacity of this tower crane is 200tm. The lifting capacity and the height of the crane were the same as the severely damaged tower crane. Next, the reduced-size model for the shaking table test was constructed based on those data. A reduced-size model (1/36 in length of the full scale) was utilized. The purposes of the shaking table tests were to confirm the damage situation of the crane and the effectiveness of the earthquake resistance measures, and to make an analytical model for a numeric simulation. The crane damaged at the mast was for the high rise building construction. This crane is connected to the building by stays. The damaged part was a part where the stay had been installed. The shaking table test was able to confirm that. Moreover, it has been understood that the vibration characteristic of connected buildings strongly influences the vibration characteristic of the tower crane. When thinking about the earthquake resistance of the crane, it is necessary to think about both the characteristic in the building and characteristics of the crane. It was confirmed that improvement in earthquake resistance performance could be achieved by installing oil dampers into the stays. The validity of an analytical model for a numeric simulation could be confirmed by these experiment results. The crane damaged at the jib was for the low rise building construction. This crane can stand by itself and comparatively small. As for the crane of this type, the numerical analysis simulation did the examination. The crane of 20tm, 40tm, 60tm and 100tm were chosen as an analytical model. The following has been understood from an analytical result. In the tower crane of 60tm, damage was little and negligible. It corresponds to the analytical result. It has been understood that the earthquake resistance performance is greatly different according to the up and down angles of the jib. To decrease the stress generated in the jib, the rotation restraint of the revolving frame was released. However, the stress has not become small. In static mechanics, this method is effective. However, it was not necessarily effective in dynamic mechanics. It was confirmed that the earthquake resistance performance improved by absorbing the rotation energy of the revolving frame. Moreover, the hook was used as TMD to decrease the stress of the jib. From the analytical results, it was understood that this method is not necessarily effective.

Keywords ; Vibration control, Vibration energy, Earthquake wave, Shaking table, Eigenvalue

* 建設安全研究グループ Construction Safety Research Group
** 研究企画調整部 Research Planning and Coordinating Division

1. はじめに

1995年1月17日、午前5時46分に阪神・淡路地区をおそった兵庫県南部地震によって、建築物のみならず様々な機械構造物に被害が発生した。本研究は、その内の一つである建築用タワークレーンの地震被害及び対策について検討したものである。

地震発生当時、設置届が提出されていたタワークレーン¹⁾は大阪府で71台あり、その内4台が被災し、兵庫県では64台あり、29台が被災したとの報告²⁾がある。各地域での被災発生率、被災規模は当該地域での地震動の大きさ³⁾に比例した。

最も深刻な被災例を Fig. 1 に示す。図中(A)は、マストが損傷を受けた例である。この被災形式は、吊上げ能力が200tm級のタワークレーンに多く発生した。タワークレーンがある程度以上の高さになると、風や作業荷重によって揺れやすくなるため、建設中の建物にステーで連結し、水平剛性を確保することが一般的に行われている。このような状態で設置されていたクレーンは、ステー取り付け部のマストに被災が集中した。同図のようにマスト部分が折損し、地上に落下したクレーンは1台であったが、落下過程において、建物に引っ掛かり落下を免れたクレーンや大きく残留変形を残したクレーンがあった。

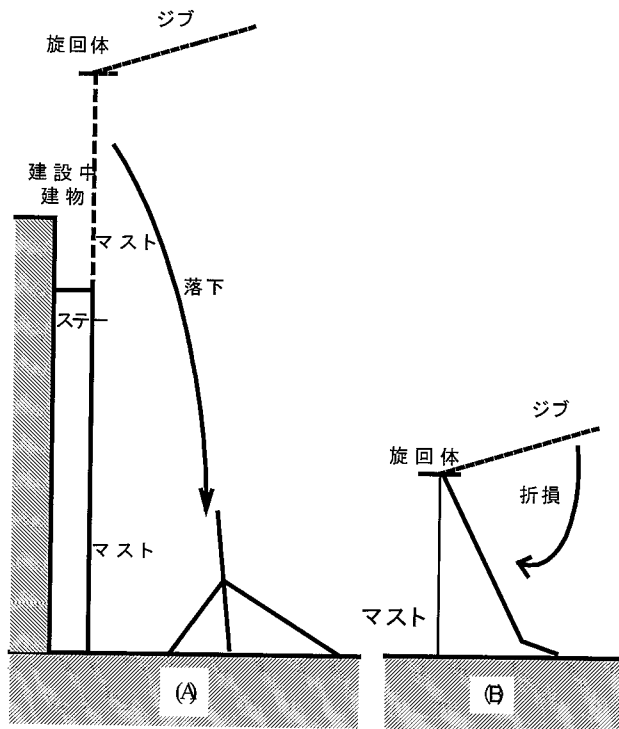


Fig. 1 Examples of damage 被災例

図中(B)はジブが損傷を受けた例である。この被災形式は、吊上げ能力100tm級以下のタワークレーンで多く発生した。これは、中低層建物を建設している状態にあり、自立に耐えられる。ジブの損傷は、水平方向の荷重及び、マストのねじれによって、紙面に対して直角方向に折損した後、自重を保持できなくなり、地上に落下した物と考えられる。

自立型の場合ジブが折損するという被災の他に、基礎部分が破壊され、クレーン全体が移動するという被災も多くあった。本災害の場合、地震が都市直下型地震ということもあり、地震の継続時間が短かったため、クレーンの転倒は免れたが、海洋型地震のように、比較的地震継続時間が長い場合には、転倒する可能性が高いと考えられる。しかしながら、このタイプの被害に対する対策は容易であると考えられるため、今回は検討項目から除外した。

本研究は、これらの被災原因を究明すること及び、これらの被災が再発することを防止するための対策を提案することを目的とする。

2. 実機タワークレーンの自由振動実験

タワークレーンの耐震性を検討するに当たり、その振動特性を十分に把握しておく必要がある。しかしながら、タワークレーンの振動特性は、今まで殆ど調べられていなかった。そのため、タワークレーンの振動特性を調べるために、実際に建設現場で使用されている状態でのタワークレーンを用いて、自由振動実験を実施⁴⁾した。

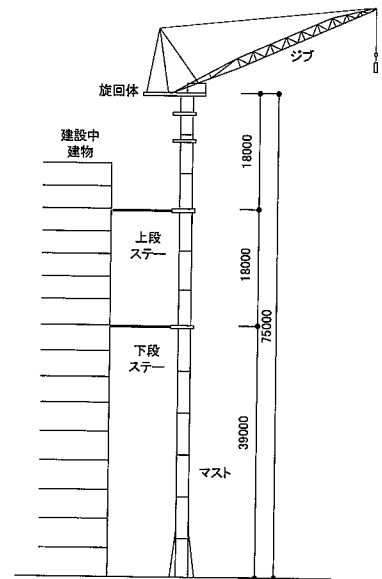


Fig. 2 The outline drawing of the full-scale tower crane. 実大タワークレーンの外観図

実験に使用したタワークレーンの外観図を Fig. 2 に示す。ここで使用したタワークレーンは、Fig. 1(A)で示したタワークレーンと吊上げ能力及び、ジブ長、全高、ステー設置高さ等がほぼ等しいタワークレーンを選定した。

自由振動実験の目的は、減衰定数、固有周期、モード形状等の基本的な振動特性を調べることである。それらのデータを基に、振動台実験用縮小モデルを製作した。

3. ステー付タワークレーンの耐震性

ステー付タワークレーンの耐震性については、縮小モデルを用いた振動台実験によって被災原因の確認、耐震安全性の向上について検討を行った。

3.1 振動台実験

振動台実験における加振方向は、振動台の性能上、水平一軸のみとした。入力した地震波は4種類とし、それぞれ原波形の諸元を Table 1 に示す。入力地震波は、後述する相似則に従い、時間軸を1/6に縮めた。入力レベルは最大入力速度が実大換算で0.5m/sとなるようにした。

3.2 振動台実験用縮小模型

振動台実験用縮小模型は、先に実施した実大タワークレーンの自由振動実験で得られたデータを基に製作したものである。想定したタワークレーンは吊上げ能力が200tm級とした。

振動台の加振能力と寸法から長さの相似比(縮小模型/実大タワークレーン)を1/36とした。その他、加速度の相似比を1/1とした。実大のタワークレーンの材質は、鋼を使用しているが、加工の簡便さから、しんちゅうを主材料とし、曲げ剛性が相似比に適合するようにマスト、ジブの断面性能を定めた。

建設中の建物の縮小モデルは、3層モデルとした。周期特性は2種類を用意した。周期調整は各層の質量を調整することにより行い、柱の剛性は両モデル共同とした。又、比較のため、建物モデルを剛体とした場合の実験も合わせて実施した。以降、周期が短い建物モデルを建物-1、周期が長い建物モデルを建物-2、剛体とした建物モデルを建物-3と称する。実験状況の写真を Photo 1 に、建物モデル各層の質量を Table 2 に示す。

タワークレーンと建物を連結するステーは、高さ方向、2段に設置した。タワークレーンの耐震性能を向上させる目的でオイルダンパ⁵⁾をステーに組み込んだ

Table 1 Specifications of earthquake wave.
入力地震波の諸元

地震名	発生年月日	観測地	最大加速度 (m/s ²)	最大速度 (m/s)
Imperial valley	1940/5/18	El Centro	3.41	0.335
十勝沖地震	1968/5/16	八戸港湾	2.25	0.341
兵庫県南部地震(EW)	1995/1/17	神戸海洋気象台	6.17	0.721
兵庫県南部地震(NS)	1995/1/17	神戸海洋気象台	8.18	0.826

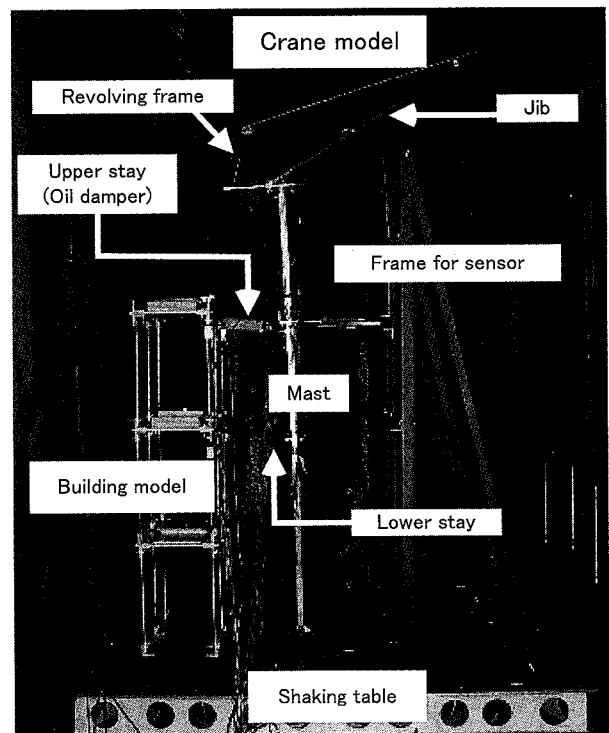


Photo 1 Reduced-size model for shaking table test.
振動台実験用縮小モデル

Table 2 Mass distribution of building models.
建物モデルの質量分布

建物モデル呼称	建物-1	建物-2
4 F(kg)	40.95	70.63
3 F(kg)	41.30	70.98
2 F(kg)	41.30	41.30
合計(kg)	123.55	182.91

実験も行った。この実験において、オイルダンパは上段のステーにのみ組み込んだ。ただし、建物を剛体とした実験(建物-3)においては、オイルダンパを組み

込んだ実験を省略した。一般的にステーは1カ所につき3本又は4本のH型钢が設置されるが、本実験においては、2本のステーをそれぞれ約45度の角度に設置して「ハの字」型となるように設置した。

3.3 振動台実験結果

タワークレーンモデルと建物モデルをステーで連成させた実験の他に、建物モデル単体での実験を行った。建物モデル単体での諸元を Table 3 に、モード形状を Fig. 3 に示す。

Table 3 より、実建物に換算すれば、建物-1 は高さ約 60m、建物-2 は高さ約 80m の鉄骨造建物に相当する⁶⁾。ただし、それぞれの有効質量は、実大の建築物に換算すれば、比較的小さい床面積の建物を想定していることになる。比較のため、建物-2 と同じ周期特性で質量を 100 倍としたモデルを解析のみで検討した。このモデルを建物-2B と称する。

Table 3 Specifications of building model.
建物モデルの諸元

	建物-1	建物-2
1次周期	0.30 秒	0.38 秒
2次周期	0.11 秒	0.13 秒
1次モード有効質量	113kg	170kg

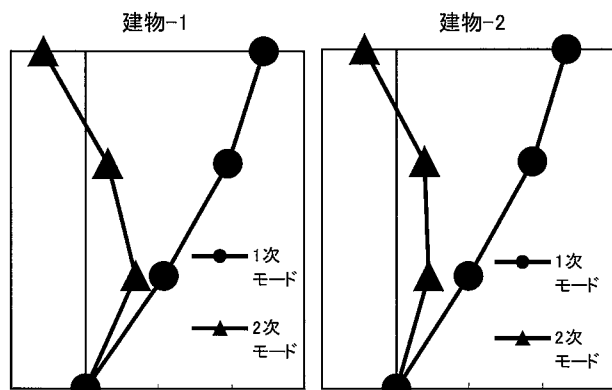


Fig. 3 Mode shapes of building models.
建物モデル単体のモード形状

これらの諸元は正弦波スイープ試験及び、固有値解析から求めたものである。建物モデル単体において、建物-1 と建物-2 では、固有周期、有効質量は大きく異なるものの、モード形状においては殆ど差がないことが分かる。

Table 4 Natural periods of interaction models.
タワークレーンと建物モデル連成系の固有周期

単位：秒

	建物-1	建物-2	建物-3	建物-2B
1次モード	0.42 (0.45)	0.44 (0.45)	0.27	0.38
2次モード	0.24 (0.23)	0.27 (0.26)	0.18	0.28
3次モード	0.18	0.19	0.05	0.18
4次モード	0.09	0.10	0.04	0.12

()内の数値は、オイルダンパを組み込んだ場合の実験結果より測定

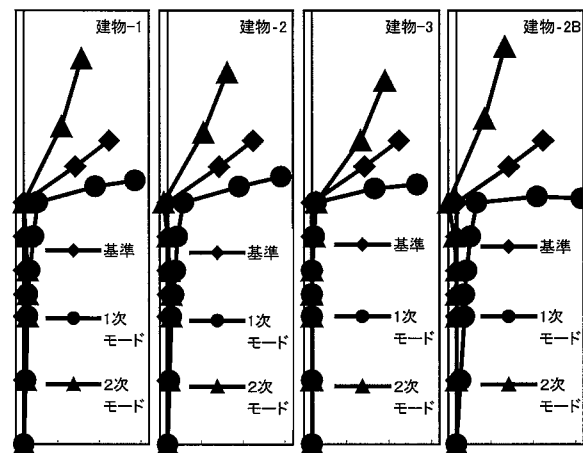


Fig. 4 Mode shapes of tower crane.
タワークレーン部分のモード形状

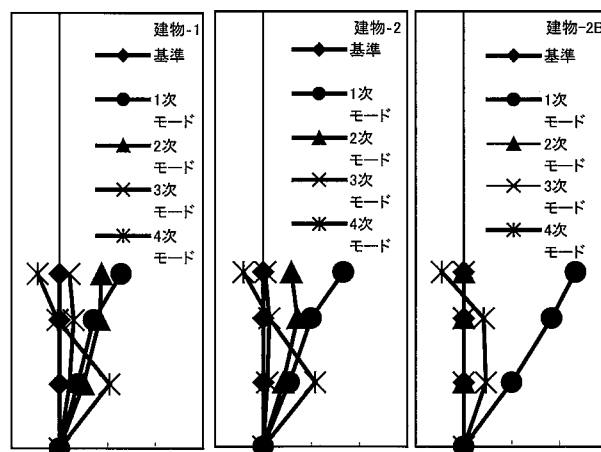


Fig. 5 Mode shapes of building.
建物モデル部分のモード形状

タワークレーンと建物モデルを連成⁷⁾した場合の固有周期を Table 4 に示す。タワークレーンの部分のみを取り出したモード形状を Fig. 4 に、建物モデル部分のみを取り出したモード形状を Fig. 5 に示す。

タワークレーンと建物を連成させた場合の固有周期

は、建物を剛体と仮定した場合のそれとは、大きく異なりました。特にタワークレーンの質量に対して、建物の質量が十分に大きくなると、連成系の周期は建物の周期に依存する。一般的には、タワークレーンより建物が十分に重くなるので、タワークレーン単体としての周期特性が問題になることは少なくなり、連結される建物の周期を配慮した設計が必要になる。本例においては、連成系の4次モードが、建物モデルの2次モードに相当した。

Fig. 4 より、クレーン部分のモード形状は、建物の影響を受け難いといえる。クレーン部分のモード形状は、建物の特性によって、大きさ（刺激関数）に若干の差が認められるが、全体的な特性には大差が認められない。

実験結果から得られた振動台の加速度記録より計算した応答スペクトルを Fig. 6 に示す。この応答スペクトルから、今回検討した地震波は0.3~0.6秒（実大換算で1.8~3.6秒）程度に卓越周期があり、連成系の1次モードに対する影響が大きく、2次モード以上の高次モードに対する影響が小さいことが分かる。

通常のステーを用いた（オイルダンパを組み込まない）実験より得られた、マスト各部に生じた最大曲げモーメントの一例を Fig. 7 に示す。上段ステーの取り付け部の応力が他の部位に比較して著しく大きくなっていることが確認できる。これは、被災例に一致する結果といえる。

建物-3 では、マストに生ずる応力が建物-1、建物-2 に比べ著しく小さくなっている。これは、タワークレーンと建物の連成系としての周期特性、モード形状等の要因によるものであり、一概に評価することは困難である。しかしながら、この結果からも、タワークレーンの設計時には、連成する建物の影響を十分に考慮する必要があるといえる。

タワークレーンの上段ステー取り付け部に生じた最大曲げモーメントをオイルダンパの有無を比較して Fig. 8 に示す。オイルダンパをステーに組み込むことによって、マストに生ずる最大曲げモーメントを20%~30%低減できることが確認できた。

Table 4 より、オイルダンパを組み込むことによって、全体系の周期は1次モードにおいて若干、長くなり、2次モードにおいてはほとんど変化がないことが確認されている。このことは、今回検討した全ての地震波中、神戸(EW)を除く全ての地震波に対して、応答が大きくなる方向への周期変化であることが、Fig. 6 の応答スペクトルから分かる。よって、応力が低減された原因としては、オイルダンパが振動エネルギーを吸収したこ

と及び、タワークレーンに対する建物からの入力エネルギーを低減したことが考えられる。

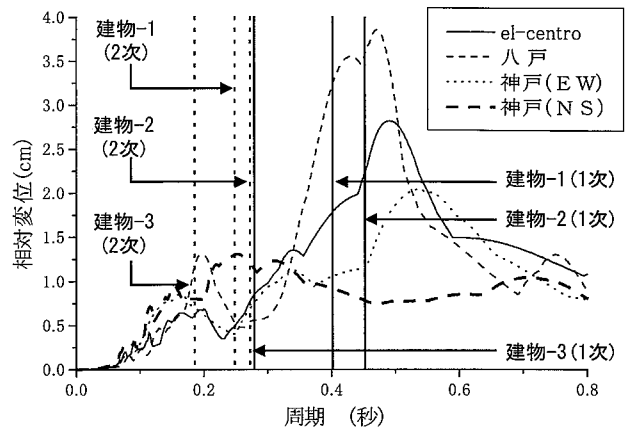


Fig. 6 Response spectrum. 応答スペクトル

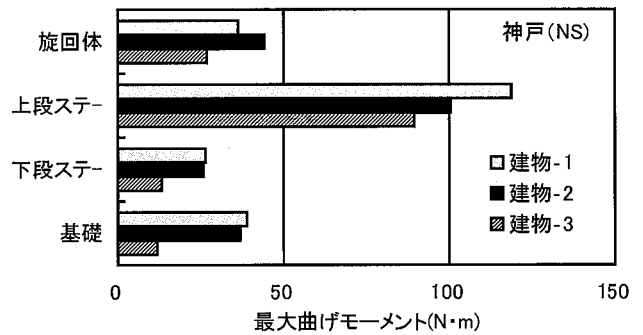


Fig. 7 Maximum bending moment on mast. 最大曲げモーメント

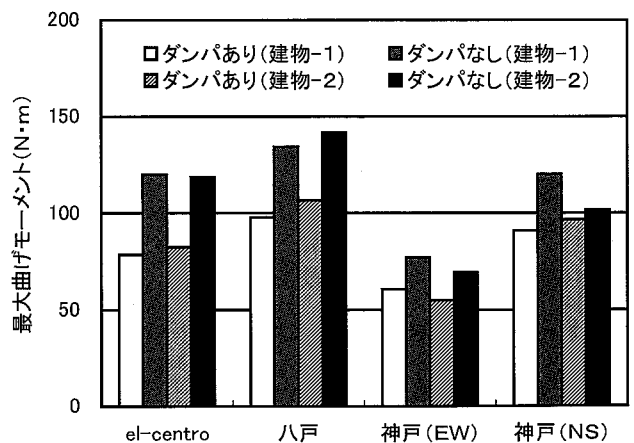


Fig. 8 Maximum bending moment. 最大曲げモーメント

4. 自立型タワークレーンの耐震性

自立型タワークレーンについては、数値解析シミュレーションによって、被災原因の確認及び、耐震安全性の向上について検討を行った。数値解析シミュレーションに用いた解析用数学モデルは、振動台実験から得られたデータを基に作成されたものである。

4.1 シミュレーション解析条件

解析モデルは、Fig. 8 に示すような、ばね-質点系とした。各質点の自由度は、X、Y、Z軸に対する並進運動及び回転運動を考慮して、3軸6自由度でモデル化⁸⁾⁹⁾を行った。特に、旋回体部分については、X、Z軸に対する回転慣性モーメント及び、重心位置が応答に大きく影響を与えるため、正確にモデル化して質量マトリックスを作成した。又、旋回体に対してジブとマストの取り付け位置の隔たりも応答に大きく影響を及ぼすため、剛性マトリックス作成時に、正確なモデル化が必要であった。

ジブの構造は、ラチス材により構成されており、大きく分けて、根元、中間、先端によって、その組み方、寸法等が異なるため、その種類毎にモデル化を行った。

解析に用いたタワークレーンは、吊上げ能力 20tm, 45tm, 60tm, 100tm の4種類とした。各モデルの諸元を Table 5 に示す。各クレーンのジブ長とマスト高さの関係は、比較的多い組み合わせを選択した。

クレーンが被害を受けた時のジブの起伏角度は、不明であるが、12度と45度の2種類で検討を行った。通常的设计時には、これらの起伏角度で検討が行われている。ここで、ジブが地面に対して水平な状態をジブの起伏角度が0度である定義する。

減衰定数は、全てのモードに対して1%と仮定した。入力地震波は、Table 2 に示した地震波を水平Y軸方向に入力し、最大入力速度が0.5m/sとなるように基準化した。X軸方向に対する入力は、ジブに発生する応力に対して、影響が小さかったため、評価を簡便にする目的で省略した。

4.2 被災状況の検討

解析結果の一例を Fig. 9, Fig. 10 に示す。解析結果は、入力地震波によって大きく異なった。これらの解析結果は両極端なケースである。Fig. 9 の八戸波を入力した場合においては、ジブに発生する応力は小さく、いずれのケースにおいても十分な余力があった。これに対して、Fig. 10 に示した神戸(NS)波を入力した場合には、20tm, 45tm クレーンにおいてジブの起伏角度

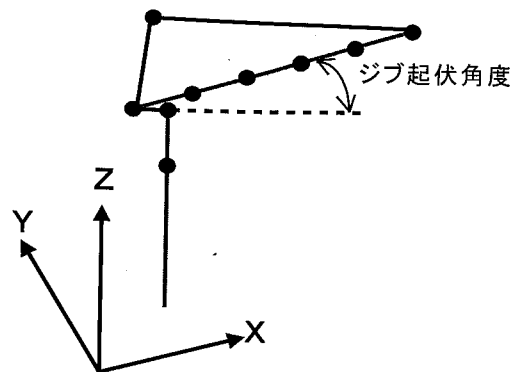


Fig. 8 Numerical analysis model
解析用数学モデルの概念図

Table 5 Specifications of tower cranes.
解析用タワークレーンの諸元

	20tm	45tm	60tm	100tm
ジブ長(m)	20	20	40	40
マスト高さ(m)	18	22	22	18

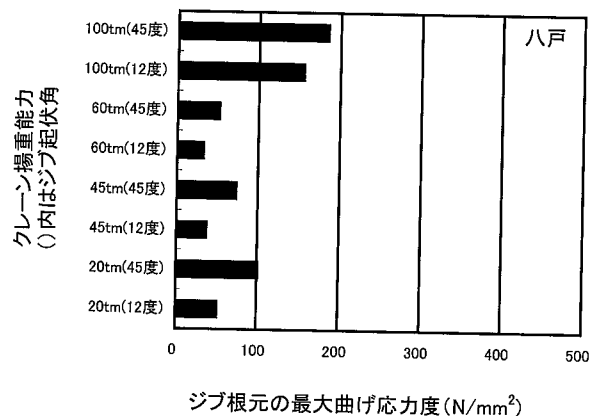


Fig. 9 Maximum stresses. -Hachinohe
最大応力度—八戸入力

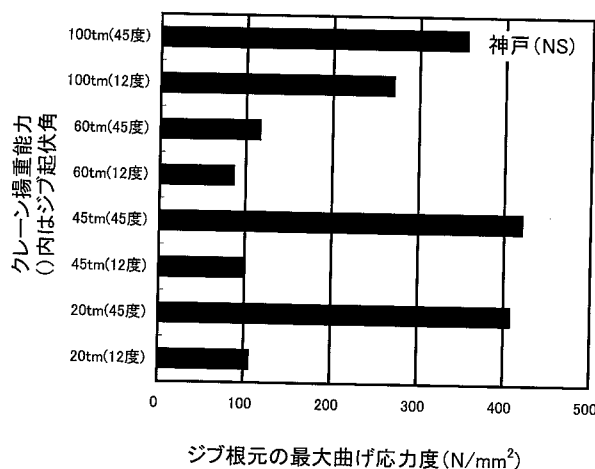


Fig. 10 Maximum stresses. -Kobe(NS)
最大応力度—神戸(NS)入力

が45度の場合、降伏応力以上の応力がジブに発生した。これらの結果より、被災したクレーンがどのような状態で設置されていたのかを概ね推測することができた。

60tm クレーンについては、ジブ起伏角度に関わらず、小さな応力レベルになり、十分な余力があることが分かる。このことは、60tm クレーンにおいては、被害が少なく、被害程度も軽微であった事実と一致する結果となった。

100tm クレーンではジブの起伏角度に関わらず降伏応力以上の応力が発生していたことが分かる。

これらの解析結果より、全てのクレーンにおいてジブの起伏角度を12度とした場合より、45度にした場合の方が応力が大きくなった。この原因は、マストのZ軸に関する回転より、X軸に関する回転が、ジブの曲げモーメントに及ぼす影響が大きいためと考えられる。この他に、ジブの起伏角度を12度から45度にするによって固有周期が3~5%程度長くなることが確認されているが、このことによるジブ応力への影響が大きくなるということも確認されている。

以上の結果から、待機中は条件が許す限り、ジブの起伏角度を小さくしておくことにより、地震発生時の被害を小さくできるものと考えられる。

4.3 耐震対策の検討

耐震性の向上を図るために Table 6 に示すモデルを仮定して検討を行った。

標準型は、耐震対策を施していない通常の状態である。

回転型は、ジブに加わる曲げモーメントを解放する目的で、旋回体のZ軸に対する回転を自由にするという対策である。技術的に簡便で経済的な負担が小さいという特徴である。

ダンパ型は、回転型同様に旋回体のZ軸に対する回転を自由にして、回転速度に比例した減衰力を発生するダンパを組み込むという対策法である。ジブの応力を低減させるために、ダンパが振動エネルギーを吸収するという考えに基づいている。技術的には解決すべき問題があり、コスト的な負担も少なくないという特徴がある。

TMD¹⁰⁾型は、旋回体部分のZ軸に対する回転を拘束して、吊具をTMDとして利用するという対策である。技術的には繁雑となる面があるものの、経済的な負担は軽微であるという特徴がある。吊具の質量は、20tm, 45tm クレーンで 250kg, 60tm, 100tm クレーンでは 400kg とした。

これらの耐震対策の違いが、ジブの最大曲げモーメ

ントに及ぼす影響を Fig. 11 に示す。

回転型は、吊上げ能力が 45tm 以下のクレーンで、ジブの起伏角度が 45 度の場合にのみ、耐震性を向上させる効果が確認された。しかし、吊上げ能力が 60tm, 100tm のクレーンでは、ジブの起伏角度に関わらず、ジブの応力が著しく増大した。この原因は、ジブに加わる慣性力と旋回体部分の回転慣性力が互いに逆位相で作用したためである。このような、静力学的発想に基づく対策では、限られたケースにのみ有効であることが確認できた。

Table 6 Earthquake resistance measures. タワークレーンの耐震対策

呼称	特徴
標準型	通常のタワークレーンの状態
回転型	旋回体部分のZ軸に対する回転を拘束しない。
ダンパ型	回転型と同一条件で、ダンパを旋回体部分に付加する。
TMD型	吊具をTMDとして、利用する。

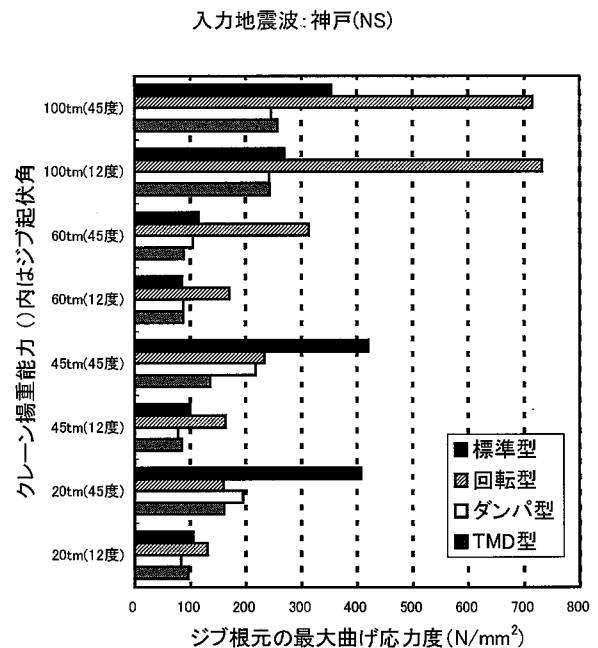


Fig. 11 The maximum bending moment. -Kobe(NS) 最大曲げモーメント—神戸(NS)

20tm, 45tm のクレーンでは、ジブの起伏角度が 12 度の場合に、応力が増大する結果となった。しかし、標準型において応力レベルが小さいため、降伏応力を超える応力には達しなかった。

ダンパ型では、今回検討した殆どのケースにおいて、ジブの応力を低減する効果が確認できた。ダンパの減

衰性能は、ジブの起伏角度が45度の時に最適となるように設定した。そのため、ジブの起伏角度が12度の場合においては、応力低減効果が小さくなった。しかしながら、効果を発揮できなかったケースでは、標準型における応力レベルが低い場合に限定されたため、今回検討した全てのケースにおいて、降伏応力に達したケースはなかった。

TMD型は、吊具をTMDとして利用するものである。周期の調整は、振り子の長さで調整したため、ジブの起伏角度が12度の場合と45度の場合で振り子の長さを変える必要がある。減衰定数の調整は、実現が困難であると考えられるため、本解析においては省略した。この対策は、技術的な負担は小さく、経済的負担は軽微であるというのが特徴である。解析結果より、効果はダンパ型と同様であると言える。ただし、この対策は作業中に荷を吊っている場合には適応できないという欠点を有している。しかしながら、タワークレーンは、実際に荷を吊っている時間より、夜間や休日を含め待機している時間のほうが長いので、有効な対策の一つであると考えられる。

ここで検討した、耐震対策は、全てのクレーンに対して、あらゆる条件下で有効に作用するわけではないことが分かった。又、今回検討したタワークレーンは比較的一般的なものを選択したが、現実的にはマスト高さ、ジブ長さ、それぞれの部材断面や、質量分布等も異なるので、個別に検討を行う必要がある。

5. まとめ

- 1) 1995年に発生した兵庫県南部地震によって、多くのタワークレーンが被害を受けた。被害部位は、マストとジブに大別できる。
- 2) 実機タワークレーンを用いた自由振動実験を行い、そのデータを基に振動台実験用の縮小モデルを作成した。
- 3) タワークレーンと建物の縮小モデルを用いた振動台実験を実施し、タワークレーンの地震時の挙動には、建物の応答が大きく影響することが分かった。
- 4) 建物とタワークレーンを連結するステーにオイルダンパを組み込むことによって、地震時にタワークレーンに生じる応力を低減できることが確認できた。
- 5) ジブの耐震性能は、ジブの起伏角度に大きく依存することが分かった。
- 6) ジブに発生する応力を低減する目的で、旋回体部分の回転を自由にして検討を行ったが、回転慣性等の影響により、耐震安全性に対して効果がある場合と、効果がない場合が明確に分かれることが分かった。
- 7) 旋回体部分の回転を自由にし、さらにダンパを組み込むことによって、今回検討した全ケースにおいて、耐震安全性に対して有効に作用することが分かった。
- 8) 吊具をTMDとして利用することによって、タワークレーンの応答低減を図った。旋回体部分にダンパを組み込んだ対策と同様に、耐震安全性に有効に作用することが分かった。

参考文献

- 1) 社団法人 日本クレーン協会 クレーン年鑑, 平成7年版
- 2) 橋内, 兵庫県南部地震によるクレーンの被害状況, クレーン 35-3(1997)
- 3) 日本建築学会, 1995年兵庫県南部地震強震記録資料集, 1996
- 4) 高梨成次, 坪田章, 菊地公男; 地震に対するクレーンの安全対策に関する特別研究, 産業安全研究所特別研究報告, 実機建設用タワークレーンの振動特性, pp17-26(2000)
- 5) 露木保男, 古川邦雄, 石田豊, 岡部富雄, 奥菌敏文, 高橋治, オイルダンパを用いた制震構造の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp933-938(1998)
- 6) 日本建築センター, 構造計算指針・同解説, 1988年度版
- 7) 森小航, 安達守弘, 鈴木清友, 福沢栄治, 連結された隣接2棟建物の耐震設計法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp73-76(1998)
- 8) Timoshenko, S., "Strength of Materials, Part I, Elementary Theory and Problems, "Third Edition, D.Van Nostrand, 1955.
- 9) Timoshenko, S.P. and Young, D.H., "Theory of Structures, "Second Edition. McGraw-Hill, New York, 1965, pp-330-331.
- 10) 武田寿一, 構造物の免震・防振・制振, 技報堂出版(1988)

(平成13年12月28日受理)