

### 3. 実機建設用タワークレーンの振動特性\*

高梨成次\*\*, 坪田 章\*\*\*, 菊地公男\*\*\*

### 3. The Vibration Characteristics of the Tower Crane Used in the Construction Site

by Seiji TAKANASHI\*\*, Akira TUBOTA\*\*\* and Kimio KIKUCHI\*\*\*

**Abstract:** As for the tower crane, earthquake resistance has been taken into consideration and design has been done in the same way as for other structures. However, the dynamic behavior has been hardly examined so far. Therefore, in this study, a free vibration test was carried out to examine the dynamic characteristics such as natural frequencies, damping factors and the mode shapes of the tower crane. The experiment was conducted on a tower crane used in the construction site. The experiment was done two cases. The first was for the tower crane without stays standing by itself with a tower mast of 24m length. And the second was for the tower crane with a tower mast of 75m length, with stays installed in 2 steps in the height direction. For the latter case, the test was repeated for different plays of stays. A jack was set in a stay, as the mechanism to adjust length. If the initial stress was added to the jack, there was no play in the stay. If not so play was left in the stay.

The way of shaking the tower crane was shown in the following.

- 1) A revolving frame is turned first, and is stopped suddenly. Bending moment and torsionnal stress occur in the mast by this method. And, the shearing force and bending moment occur in the side direction of jib.
- 2) Another way is to drop the weight. Big shearing force and bending moment occur in the mast by this method.

The followings are the experiment results.

- 1) The results of the free vibration test on the without stays type tower crane showed that the natural frequency in the lateral direction of the jib was 0.27 Hz, and the torsionnal frequency of the mast was 1.4 Hz. The natural frequency in the horizontal direction of the tower crane was 0.44 Hz in the 1st mode, and 1.1 Hz in the 2nd mode.
- 2) In case of the with stays type tower crane, frequency in the horizontal direction of the tower crane was 0.48 Hz in the 1st mode, and 1.17 Hz in the 2nd mode.
- 3) The 1st mode damping factors were 1.2% in both cases with and without stays, and the damping factor was calculated by the logarithmic decrement method.
- 4) However, it was found to be 3.4% when there was play in stays in case of the with stays type tower crane. When a balance of the arrangement of the stays was bad, the tower crane vibrated in the direction where the power wasn't added to.

**Keywords;** Tower crane, Numerical simulation, Free vibration test

\* 平成 10 年 9 月日本建築学会大会（九州）学術講演会に一部発表した。

\*\* 建設安全研究部 Construction Safety Research Division

\*\*\* 株式会社 竹中工務店 Takenaka Corporation

### 1. はじめに

タワークレーンは、他の大型構造物と同様に耐震設計が行われている。しかしながら動的な応答性を考慮した耐震性能については殆ど検討されていないのが現状である。このことは、タワークレーンの動的な特性について未だに詳細な検討がなされていないことに起因する。そこで、タワークレーンの振動特性等について、実験を通して調査、検討を行った。調査対象とした項目は主にタワークレーンの固有周期、減衰特性、モード形状である。

### 2. マストの剛性評価

#### 2.1 実験概要

タワークレーンのマストは、常時には鉛直荷重を、地震時には水平荷重と鉛直荷重を負担するため、耐震性能上最も重要な部材である。又、マストの特性はタワークレーンの振動特性に及ぼす影響が大きいため、振動実験に先立ち、マスト部材の剛性を評価する目的で静的加力による実験を行った。実験に用いたマストは、石川島運搬機械(株)製C1タイプとした。

実験に用いたマストは、1ピースが6mであり、それを4本つなぎ全長24mに組み立てたものである。

#### 2.2 実験方法

全長24mのマストをFig. 1に示すように水平に設置して静的な曲げ実験を行った。荷重載荷は、マスト全長の中央部分に段階的に重錘を積載することによって行った。載荷履歴は、0t → 5t → 10t → 15t → 20t → 15t → 10t → 5t → 0tとした。重錘載荷時にマスト支持点から6m毎に鉛直変位をトランシットにて計測した。

マストの両端の支持位置は、部材の局部座屈防止のため、マストの横架材がある部分とした。支持機構は、

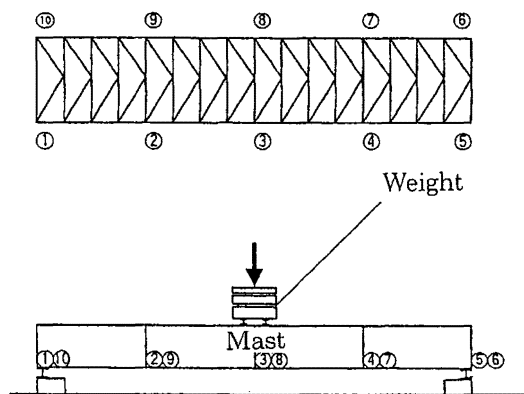


Fig. 1 The mast establishment condition.  
マスト設置状況

H型鋼の上に単純に乗せただけであり、厳密な意味でのピン支持にはなっていない。

マストへの載荷位置も部材の局部座屈防止のため、マストの横架材がある部分とした。そのため、二点載荷となっており、マストの中心から左右にそれぞれ約30cm離れた部分が載荷点となっている。実験で用いたマストは、互いに直交する面において、ブレースの取り付け方が異なるため、マストの向きによりマスト全体としての断面性能が若干異なる。そのため、同一のマストを90度回転させて二回に分けて実験を行った。マストの向きに対して、それぞれ便宜上マスト1、マスト2と称することにする。

#### 2.3 実験結果

実験より得られた各荷重ステップとマストの鉛直変位分布関係の一例をFig. 2に示す。

実験結果より、マスト材のヤング係数を2100 tf/cm<sup>2</sup>とし、簡単のためマストの支点間距離を24mのピン支持、加力点をマスト中央の集中荷重と仮定して、マストの等価な断面二次モーメントを算出した。等価な断面二次モーメントは、マスト1においては3.54 × 10<sup>6</sup> cm<sup>4</sup>、マスト2においては3.66 × 10<sup>6</sup> cm<sup>4</sup>となり、両者の断面性能の差は約3%となった。これに対して、マスト材の主要鉛直部材(4隅のL型鋼を組み合わせた柱)の断面性能から等価な断面二次モーメントを算出すると3.89 × 10<sup>6</sup> cm<sup>4</sup>となった。計算で得られた断面二次モーメントは、実験で得られた断面二次モーメントよりもマスト1において約10%、マスト2において約6%大きな値となった。実験結果からマストの等価な断面二次モーメントを算出する際に用いた仮定は、断面二次モーメントを大きめに評価するものであるにもかかわらず、実験結果が計算結果よりも小さな値を示した原因として、次のことが考えられる。各マスト間の接合部は、ボルトによって結合されており、ボルトの総断面積は主要鉛直部材の断面積よりも約20%小さ

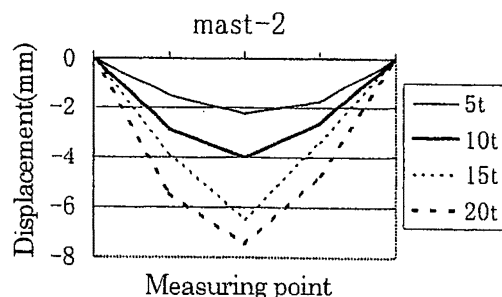


Fig. 2 Relationships between loads and deformations of each point.  
荷重—変形関係

く、剛心もマストの中央側に配置されている。このため引張側において、ボルト結合部分は断面積及び中立軸からの距離いずれも主要鉛直部材よりも小さくなり、変形がボルト結合部分に集中する（この様な挙動は実験中に観測された。）。このため、マスト全体としての剛性が小さくなった。その他の原因として、実験結果にはマスト材の曲げ変形だけでなくせん断変形が含まれている等の影響も考えられる。

### 3. 自立型タワークレーンの振動実験

#### 3.1 実験概要

振動の問題を扱う場合、最も基本となる緒元として固有周期、減衰定数、モード形状が挙げられる。これらの緒元を調べる目的で自由振動実験を行った。

タワークレーンは、JCC-200型クライミングクレーンを用いた。実験に用いたタワークレーンの外観図を Fig. 3 に示す。実験では、静的な実験と同様にマストを4段に組み立て、堅固な基礎で支持した自立型のタワークレーンを用いた。

#### 3.2 実験方法

振動実験での加振は、二種類の方法で行った。

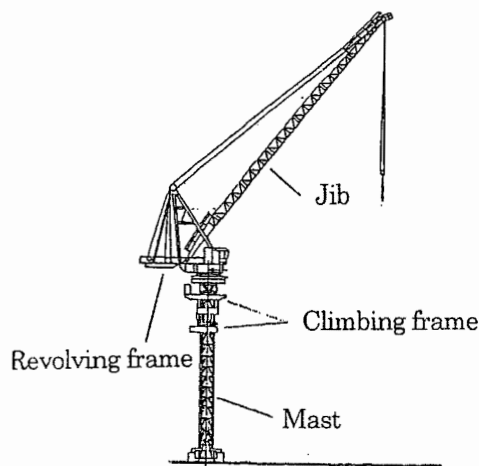


Fig. 3 Tower crane used in the experiments.  
タワークレーン外観図

Table 1 Test conditions.  
実験条件一覧

実験名称	加振方法	旋回角度	作業半径
2506	旋回	90度	35m
2701	切り離し	90度	15m
2703	切り離し	90度	35m

一つは、旋回体を所定の角度から旋回させて所定の角度に達した瞬間に旋回体を急停止させる。これにより、旋回体にねじれと水平方向の衝撃力を与えることによって自由振動をさせた。この実験方法では、マストに曲げ応力、せん断応力の他にねじり応力が発生する。又、ジブには横方向の応力が発生する。この実験方法は、ジブの横方向の振動特性とマストのねじりに対する振動特性を調べることを目的とした。

もう一つの加振方法は、吊り荷を吊り上げた状態で停止させ、ジブ及びマストに強制変位を与えておき、安定した後、吊り荷を切り離す。このようにして瞬間的に応力を解放させることによって自由振動をさせた。この実験方法では、マストに曲げ応力、せん断応力、軸力の変動が発生する。この実験に用いた変動因子は、タワークレーンの作業半径とした。タワークレーンの作業半径は、その大きさによりジブの仰角が異なり、その違いによる振動特性の影響を調べることを目的とした。計測部位は、ジブの先端、中央、根本及び旋回体の前後とし、それぞれの上成分、水平2成分の加速度を20 Hzのサンプリング周期で計測した。

実験条件を整理して Table 1 に示す。

#### 3.3 実験結果

実験 2506 で得られたジブ先端における加速度の時刻歴波形及びフーリエスペクトルを Fig. 4 に示す。

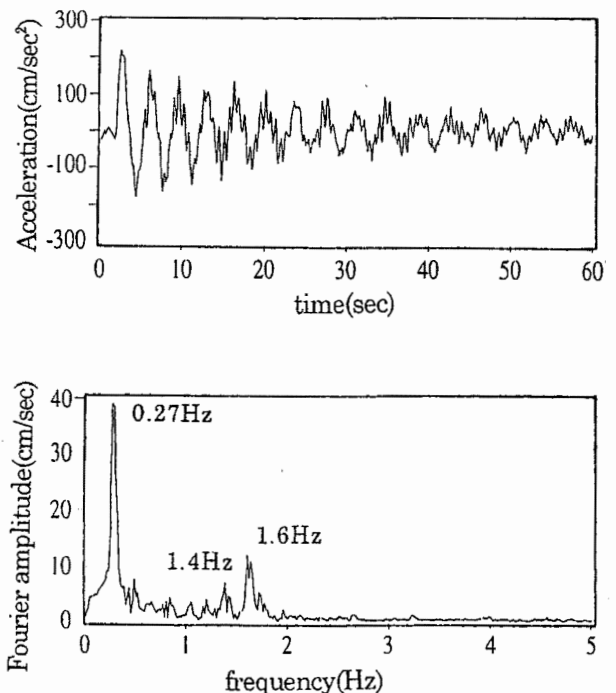


Fig. 4 Time history and Fourier spectrum of acceleration in the experiment 2506.  
時刻歴波形及びフーリエスペクトル (実験 2506)

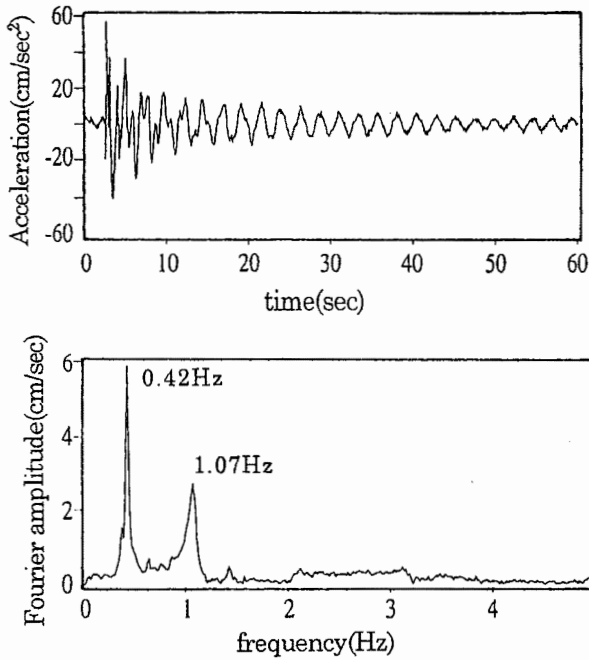


Fig. 5 Time history and Fourier spectrum of acceleration in the experiment 2701.  
時刻歴波形及びフーリエスペクトル (実験 2701)

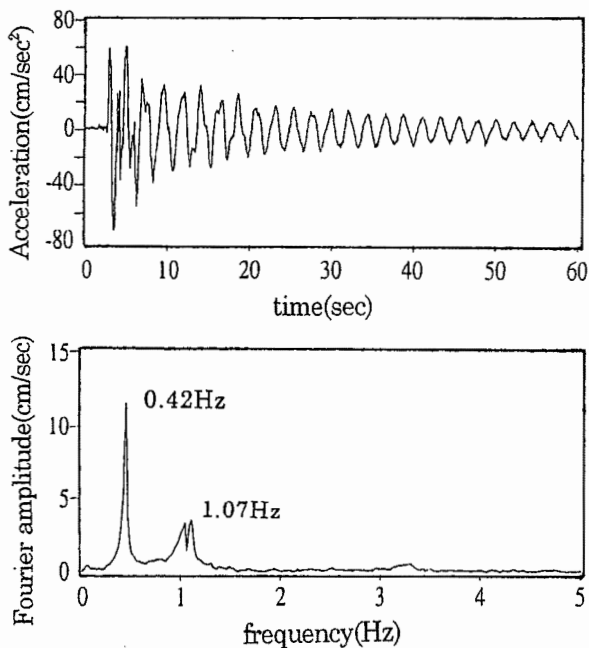


Fig. 6 Time history and Fourier spectrum of acceleration in the experiment 2703.  
時刻歴波形及びフーリエスペクトル (実験 2703)

この実験では、ジブの横方向及びマストのねじれに対する振動特性を調べることを目的とした。実験結果より、ジブの横方向に対する1次固有振動数が0.27 Hz, 2次固有振動数が1.6 Hz, マストのねじれに対する固有振動数が1.4 Hzであることが分かった。

実験 2701 及び 2703 で得られた旋回体における加速度の時刻歴波形及びフーリエスペクトルを Fig. 5, Fig.

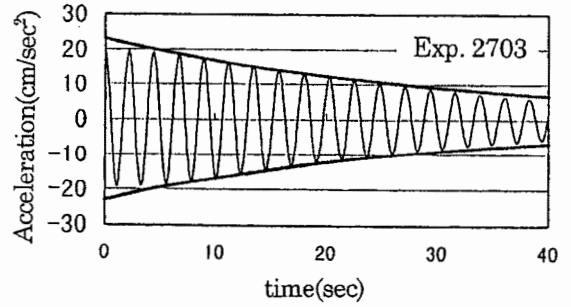


Fig. 7 Logarithmic decrement.  
対数減衰率

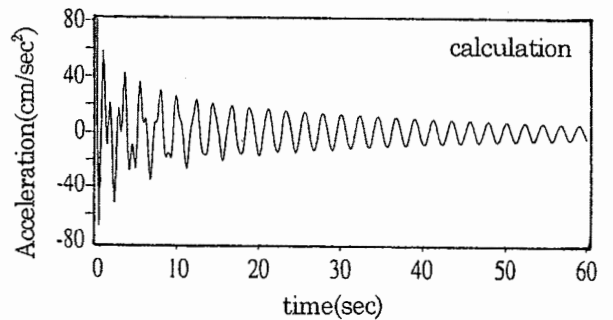
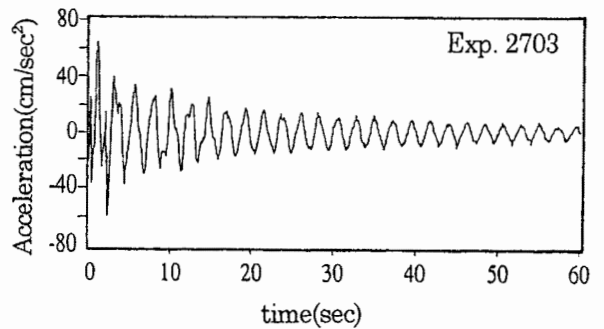


Fig. 8 Comparison between result of experiment and calculation.  
実験結果と解析結果の比較

6 に示す。

これらの実験は作業半径（ジブ仰角）の違いが振動特性に与える影響を検討するために行った。両実験結果より、地震時の主たる振動モードである1次, 2次モードの周期特性に顕著な差は無く、1次モードで約0.42 Hz, 2次モードで約1.07 Hzとなった。また、減衰特性においても両者に顕著な差は認められなかった。

Fig. 6 に示した旋回体における加速度の時刻歴波形データをフィルター処理した後、対数減衰率によって1次モードの減衰定数を算出した結果を Fig. 7 に示す。解析結果より、タワークレーンの減衰定数は1.2%となり、鉄骨造の建築物と同等の減衰定数を有することが分かった。

実験 2703 と同条件でのシミュレーション解析結果を実験結果と比較して Fig. 8 に示す。解析結果は振動継

続時間中、実験結果を良く模擬しており、解析モデルの妥当性が確認できた。ここでの解析で、減衰定数は1次モードに対しては、対数減衰率から求めた減衰定数を用い、2次モード以上の高次モードに対しては、剛性比例型の減衰定数を用いた。

#### 4. ステー付きタワークレーンの振動実験

##### 4.1 実験概要

これまでに、建築物の低層部分の工事に用いられる

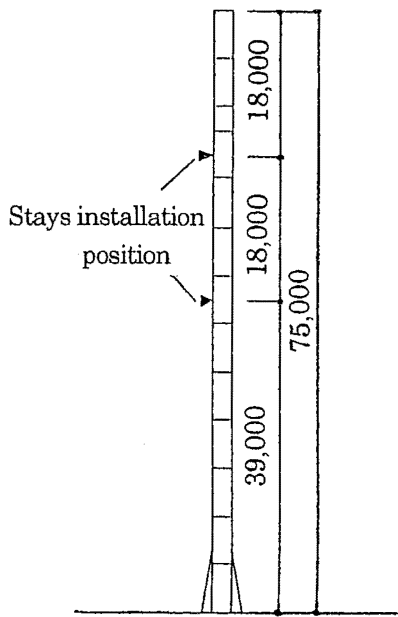


Fig. 9 The schematic of the tower crane.  
タワークレーン概念図

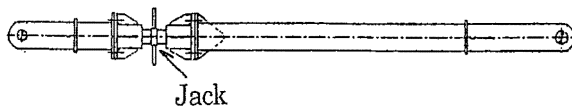
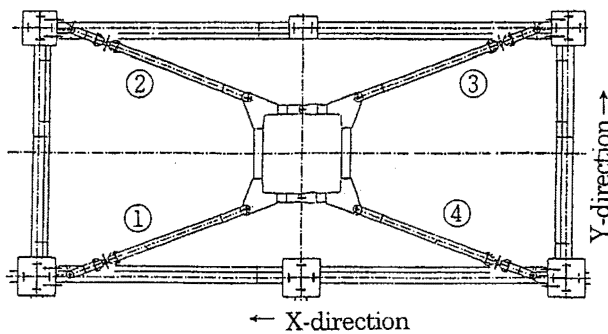


Fig. 10 Stay used in the experiments.  
ステー材外観図



○: stay number

Fig. 11 The establishment conditions of stays.  
ステー取付状況

自立型タワークレーンの振動特性が把握できた。しかしながら、建築物の高層部分を工事するためのタワークレーンにはステー（建物とクレーンを結ぶ、つなぎ材）が設置されるのが一般的である。そこで、ステーがタワークレーンの振動特性に及ぼす影響を検討する目的で自由振動実験を行った。タワークレーンは、自立型クレーンで実験を行ったものと同機種の JCC-200 型クライミングクレーンを用い、ステーは高さ方向に2段にわたり設置した。実験に用いたタワークレーンの概念図を Fig. 9 に示す。

##### 4.2 ステー材の概要

実験で用いたステーを Fig. 10 に示す。ステーにはジャッキが付けられており、ステーの全長を調整できるものを用いた。

ステーの両端はピン支持としており、ピンの部分はピン孔の内径とピンの外径に約 1 cm の差がある。ステー設置後、ジャッキにより初期応力を与えておくことによりステーをマスト材に対して緊結された状態（以降、ガタ無しと称す。）にすることができる。また、初期応力を与えなければ、ピンの部分に最大 1 cm のガタを残した状態（以降、ガタ有り）にしておくことができる。

ステーの取付状況を Fig. 11 に示す。一般に、ステーの設置高さは、マストの座屈長さにより決定されており、振動モードの形状については特に考慮されていない。

##### 4.3 実験方法

振動実験での加振方法は、自立型タワークレーンでの実験と同じとした。

計測部位は、ジブの先端、中央、根本及び旋回体の前後とし、それぞれの上下成分、水平2成分の加速度とした。その他にステーの軸方向の変位及びひずみ、建物を不動点と考えて、ステー位置におけるマストの建物に対する相対変位も計測した。これらを 100 Hz のサンプリング周期で計測した。

実験に用いた変動因子は、ステーのピン部分の状態として3種類の実験を実施した。実験条件を整理して

Table 2 Test conditions.  
実験条件一覧

実験名称	ステーの状況		加振方向
	上段ステー	下段ステー	
RR	ガタ無し	ガタ無し	Y 方向
LL	ガタ有り	ガタ有り	Y 方向
RL	ガタ無し	ガタ有り	X 方向

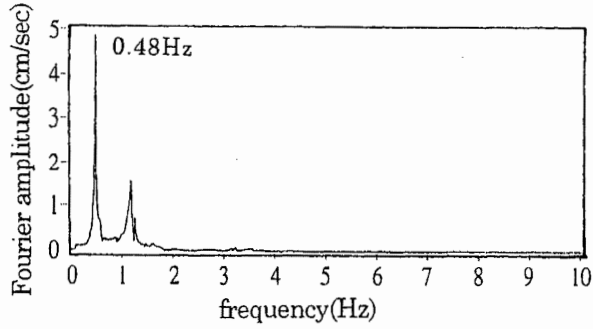
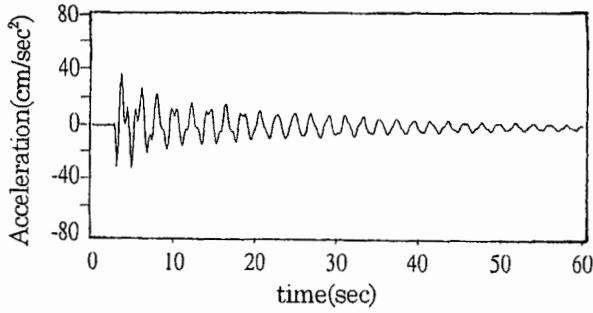


Fig. 12 Time history and Fourier spectrum of acceleration in the experiment RR.  
実験 RR の時刻歴波形及びフーリエスペクトル

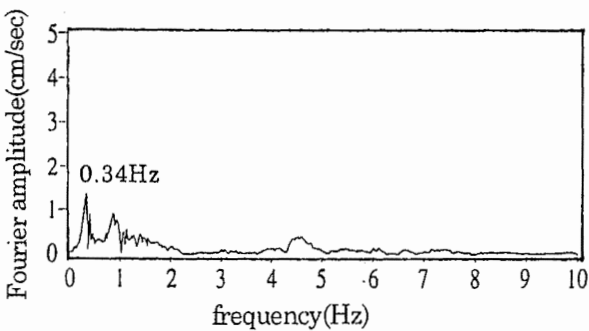
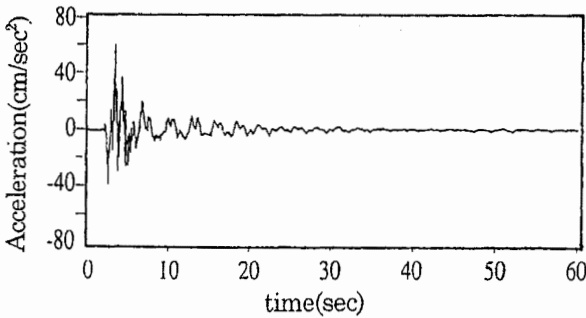


Fig. 13 Time history and Fourier spectrum of acceleration in the experiment LL.  
実験 LL の時刻歴波形及びフーリエスペクトル

Table 2 に示す。

#### 4.4 実験結果

実験 RR 及び実験 LL で得られた旋回体における加速度の時刻歴波形及びフーリエスペクトルを Fig. 12,

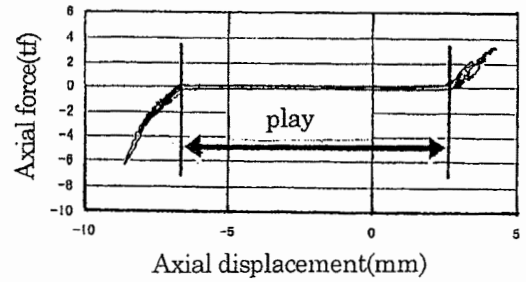


Fig. 14 Relationship between axial force and deformation of the stay.  
ステアの軸力-軸変位関係

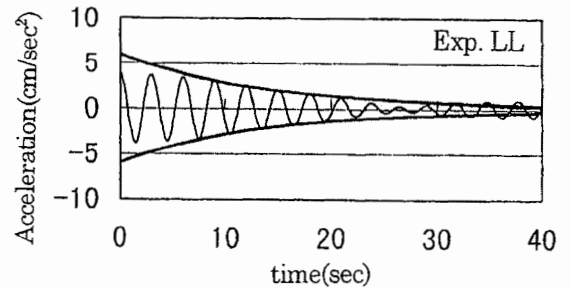
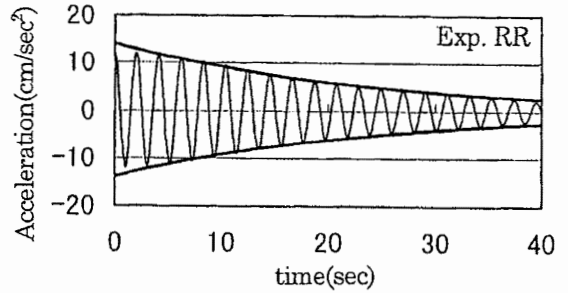


Fig. 15 Logarithmic decrement.  
対数減衰率

Fig. 13 に示す。固有振動数は実験 RR で 0.48 Hz であるのに対し、実験 LL では 0.34 Hz となり、固有周期が約 28%伸びていることが分かる。

実験 LL で得られたステアの軸力と軸変位の関係の一例を Fig. 14 に示す。実験 LL では、実験 RR では確認出来なかったステア材の非線形挙動が確認された。

Fig. 12, Fig. 13 に示した加速度の時刻歴波形を比較すると、実験 LL では、実験 RR に比べ最大応答加速度は大きい、振動が早期に収束している。又、両実験結果のフーリエスペクトルを比較すると、1次、2次モードにおいて、実験 LL では実験 RR に比べフーリエ振幅が小さくなっている。実験 LL では 4.5 Hz 近傍においてフーリエ振幅が大きくなっている。この振動数成分の加速度は、ステア部のガタの影響によるものであり、時刻歴波形における最大応答加速度を増加させている原因である。通常、地震時には構造物の低次の振動モードほど励起されやすことから、実験 LL の設定におけるクレーンは実験 RR の設定におけるクレーン

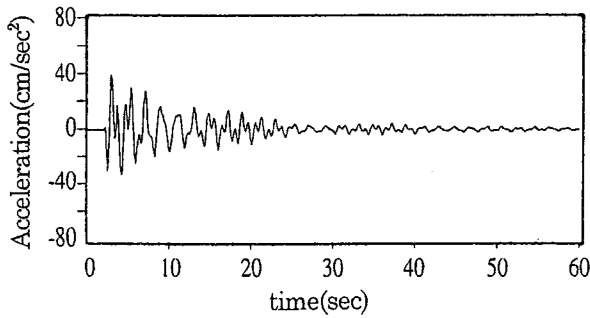


Fig. 16 Time history of acceleration in the experiment RL.  
加速度的時刻歴波形 (実験 RL)

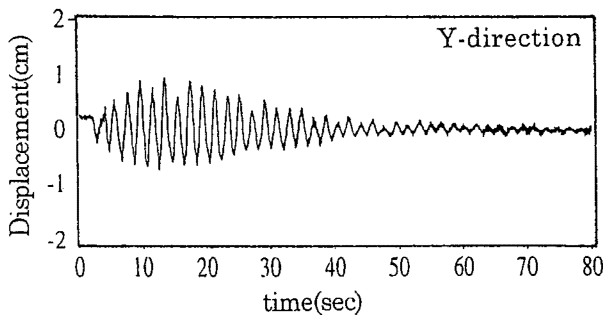
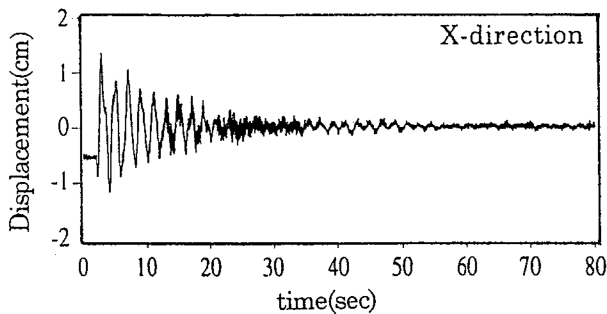


Fig. 17 Time histories of displacement.  
マスト変位の時刻歴波形

に比べ耐震的に有利であると考えられる。

Fig. 12, Fig. 13 で示した加速度的時刻歴波形データをフィルタ処理した後、対数減衰率によって1次モードの減衰定数を算出した結果を Fig. 15 に示す。

Fig. 15 より、1次モードの減衰定数は実験 RR では1.2%であり、自立型のタワークレーンとほぼ同等の減衰性能を示した。これに対し、実験 LL では3.5%と著しく大きくなっている。この原因は、Fig. 14 に示したステー材の非線形挙動の影響により、振動エネルギーが吸収されたため、見かけの減衰が増加したものと考えられる。

実験 RL で得られた旋回体における加速度的時刻歴波形を Fig. 16 に示す。実験 RL は、上段のステーは緊結された状態にあり、下段のステーには、Fig. 11 に示したステー1、ステー4のみが緊結され、ステー

2、ステー3は、ガタの範囲に収まる状態での実験である。実験 RL では Fig. 13 に示した実験 RR に比べ見かけの減衰は増加しているように見える。しかしながら、Fig. 17 に示したマスト変位の時刻歴波形から分かるように、振動はX方向（加振方向）のみならずY方向（加振の直交方向）にも発生している。これは、X方向の振動エネルギーが、Y方向の振動エネルギーに取って代わられたことに起因しており、X方向の減衰が増加したということにはならない。

ステーの軸力の時刻歴波形を Fig. 18 に示す。ステー1、ステー4においては、下段のステーは、上段のステーとは逆位相で軸力を負担していることが分かる。この時、上段では下段の約3倍の軸力を負担していた。ステー2、ステー3においては、下段では計画通り軸力を殆ど負担していないことが確認できた。また、上段においてステー3はステー1の約56%しか軸力を負担していない。その差はそれぞれの直下のステーとの相互作用の差によるものと考えられる。

これらのことより、ステーがバランス悪く配置されていると、地震のように加振方向が不規則な外乱に対しては、タワークレーンの振動方向がある一定の方向に集中することが考えられる。そのことによってタワークレーン全体としての耐震性能を低下させる危険性があることが確認できた。

実験 RR と同条件でのシミュレーション解析結果を実験結果と比較して Fig. 19 に示す。解析結果は振動継続時間中、実験結果を良く模擬しており、解析モデルの妥当性が確認できた。解析モデルを Fig. 20 に示す。ここでの解析で、減衰定数は1次モードに対しては、対数減衰率から求めた減衰定数を用い、2次モード以上の高次モードに対しては、剛性比例型の減衰定数を用いた。

## 5. まとめ

建設現場で使用されているタワークレーンの振動特性を調査、検討する目的で静的載荷実験、自由振動実験を行った。これらの実験を通して以下のことが分かった。

- 1) マストの静的載荷実験を行った結果、実験で得られたマストの剛性は、計算で得られたマストの剛性よりも6%~10%小さめに評価される。
- 2) 自立型タワークレーンの自由振動実験を行った結果、ジブの横方向に対する固有振動数は0.27 Hzであり、マストのねじれに対する固有振動数は1.4 Hzである。1次モードに対する減衰定数は1.2%である。
- 3) ステー付きタワークレーンの自由振動実験を行った結果、1次モードの固有振動数は、ステーが緊

結された状態では0.48 Hzであり、ステーにガタがある状態では0.34 Hzとなる。

- 4) ステーが緊結されていれば1次モードの減衰定数は自立型のタワークレーンと等しい1.2%となる。ステーにガタがあると、減衰定数は著しく増大し、3.4%となる。
- 5) ステーに、ガタがあることによってタワークレー

ンの見かけの減衰が増し、耐震性能の向上に寄与できる可能性がある。

- 6) ステーの設置に関しては、バランス良く配置しないと、耐震性能の低下につながる可能性がある。
- 7) 自立型、ステー付きどちらの型式のタワークレーンに対しても解析モデルの妥当性が、確認できた。

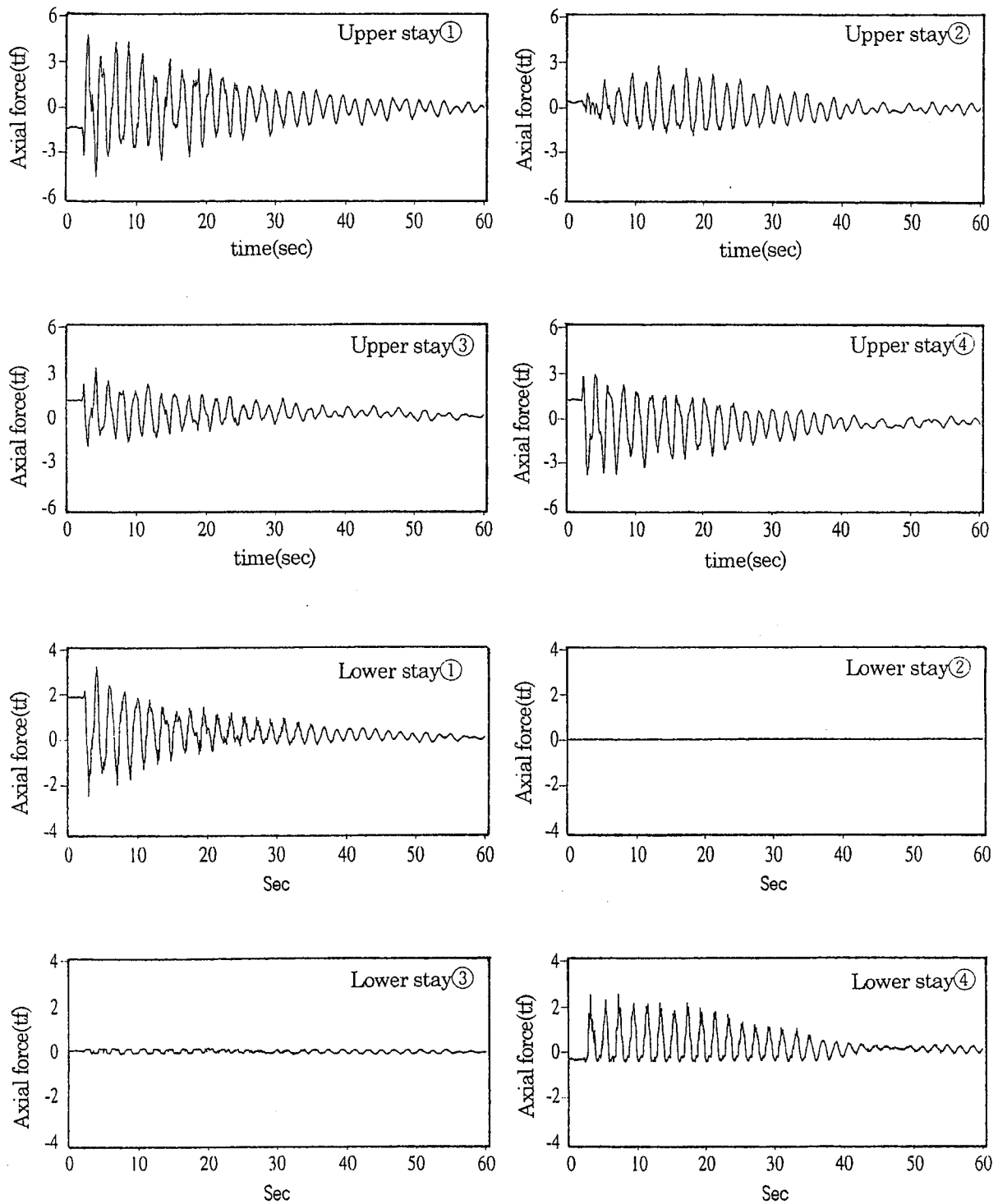


Fig. 18 Time histories of axial force of stay.  
ステー軸力の時刻歴波形



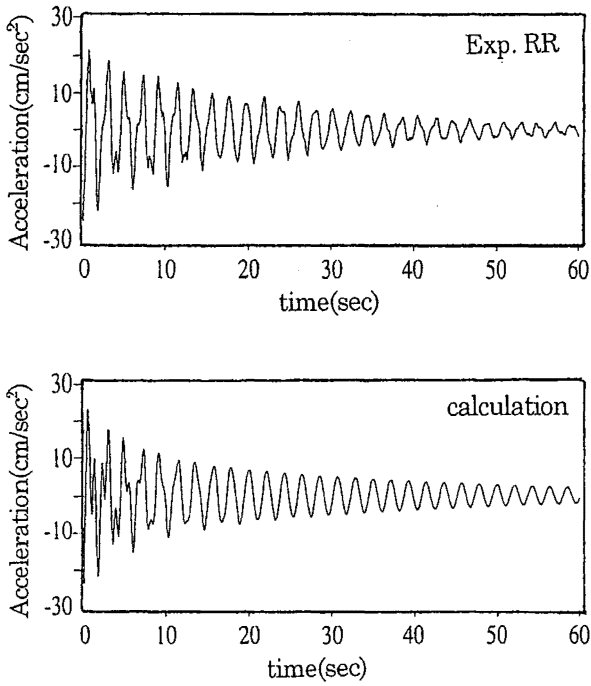


Fig. 19 Comparison between results of experiment and calculation.  
実験結果と解析結果の比較

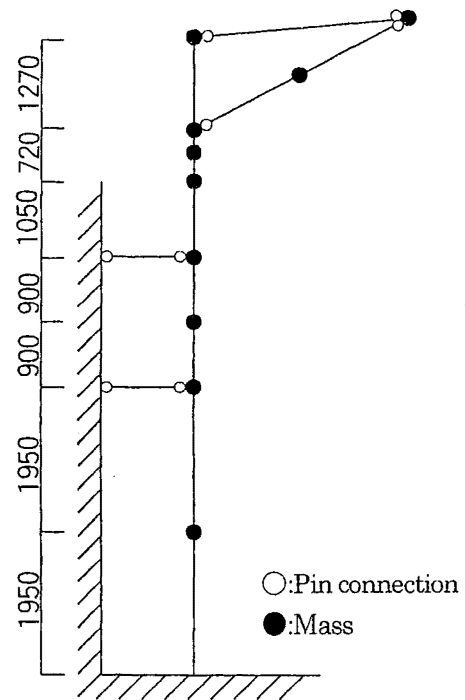


Fig. 20 Calculation model.  
解析モデル

参考文献

- 1) 橋内良雄, 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), pp. 7-14.
- 2) 高梨成次, 菊池公男, 河尻義正, 建築用タワークレーンの耐震性に関する研究 (その1 自由振動実験概要および予備実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 1998年9月 (B2), pp. 1015-1016.
- 3) 菊池公男, 高梨成次, 河尻義正, 建築用タワークレーンの耐震性に関する研究 (その2 自由振動実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 1998年9月 (B2), pp. 1017-1018.
- 4) 前田豊, 高梨成次, 坪田章, タワークレーンの耐震性解析のための振動特性計測, 日本機械学会第76期全国大会講演論文集 (IV) 1998年10月, pp. 97-98.
- 5) 大幢勝利, 河尻義正, 坪田章, 建設工事用タワークレーンの自由振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 1997年9月 (B2), pp. 701-702.

(平成 12 年 1 月 8 日受理)