

(技術資料)

大型クローラクレーンたわみ評価技術の高度化

Bending Analysis and Simulation of Crane Booms for Crane Weight Reduction



市川靖生*1
Yasuo ICHIKAWA



前藤鉄平*1
Tepei MAEDO



山口拓則*2
Takunori YAMAGUCHI



小林 豊*3
Yutaka KOBAYASHI



村田朝彦*3
Tomohiko MURATA

The weight reduction of crawler cranes is one of the most important and urgent issues because of severe weight limitations on heavy vehicles; hence it is necessary to solve the apparently contradictory conditions of increasing the boom strength and decreasing the total crane weight. This paper describes the results of an investigation into the method of evaluating boom bending using lasers for three-dimensional measurements and the accurate prediction of boom bending using simulations. It also clarifies various factors that influence the accuracy of measurements. A simple but useful technique for evaluating the boom rigidity is also described.

まえがき＝ラチスブームクローラクレーン (Latticed Boom Crawler Crane, 以下LBCCという) は、建築工事から各種プラント、橋梁架設など様々な工事に用いられ、吊上げ能力50t程度から1,000tを超える機械が用途に合わせて使い分けられている。コベルコクレーン(株)はLBCCの生産台数で世界トップクラスのシェアを有しており、吊上げ能力300t未満の汎用LBCCのうち100t以下の機械を米国最大手のManitowoc社にOEM供給するなどグローバルに展開している。一方で、300t以上の大型機は、かつては建設需要が大きい日本国内向けをターゲットとした製品のためのラインナップであったが、近年では2007年にSL6000 (550t吊)、2009年にSL4500 (400t吊)と海外のクレーン規格に対応したグローバル機を上市し、ラインナップをそろえることでシェア拡大を図っている。

LBCCは、吊上げ能力が大きくなると機械本体の質量も大きくなる。例えばSL6000では、長さ24mの基本ブーム姿勢で230tのウェイトを含めると424tもの質量となる。この本体の輸送時は、世界各地の輸送規制に対応する大きさまでフレームを分割してトレーラやトラックに搭載する。機械が大型化するほど分割数は多くなり、組立・分解に時間がかかる。このため、本体フレームを極力軽量化し、分割数を減らすことは、商品力を強化することにつながる。

またアタッチメント部分、とくにラチスブームは、吊上げ能力を高めるためには相応の剛性と強度が必要となる。一方で、質量が重くなると吊上げ能力を減らす、あるいはバランス確保のため本体を大きくするなど、クレーンの性能に影響するうえに、輸送面で高さならびに幅の制約を受ける。すなわち、限られた空間に収めるといふ制約のなかでの高強度化と軽量化が求められる。この

ためLBCCは、本体フレームおよびアタッチメントともに、高張力鋼を活用するなどの軽量化にも重点をおいた開発が行われている。

ブームの長さは大型機になる程長くなり、100mを超えるようなブーム構成がある。そのような長尺ブームでは、強度面だけではなく剛性の確保、すなわちたわみ量の制御も重要となる。具体的には、ブームをブーム根元部分からの片持ちばりと仮定すると、たわみは長さの3乗に比例することから、長尺になるにつれてたわみは急激に大きくなる。また、たわみによって載荷点が移動し、作用するモーメントが大きくなってたわみがますます増加する非線形性が加わる。さらに、クレーンの各接続部分に存在するがたによってもたわみが増加する。

これまで、設計段階での精度の良いたわみ評価手法がなく、実機テストによる確認に頼っていたが、このたび、剛性評価技術の一つであるたわみ評価技術の高度化を試み、さらにたわみ評価を簡易化する手法を検討したので紹介する。

1. たわみ評価技術の検討

移動式クレーンの規格は各国あるいは地域で異なり、日本の移動式クレーン構造規格、北米のASME規格、欧州の移動式クレーンEN規格などがある。日本の移動式クレーン構造規格¹⁾は強度面の規定が主であり、「構造部分は、壁面座屈、著しい変形等を生じないように剛性が保持されているものでなければならない」と、剛性に関しては詳細には規定されていない。一方、ASMEで適用されているSAE規格²⁾では剛性が規格化されており、ブーム先端に吊荷重の2%に相当する横荷重(図1に示したクレーン側面図の紙面に垂直な方向(Y))を作用さ

*1 コベルコクレーン(株) 開発本部 要素開発部 *2 技術開発本部 機械研究所 *3 コベルコクレーン(株) 開発本部 クレーン開発部

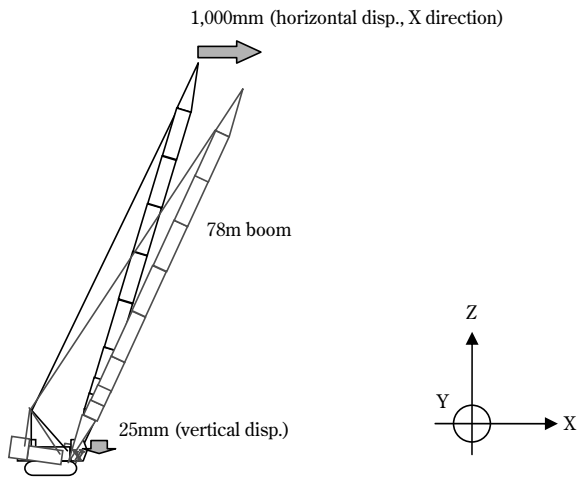


図1 本体たわみによるブーム先端のたわみ例

Fig. 1 Bending displacement of the boom top by upper and lower frame bending

せたときのブーム先端の横荷重方向たわみ量はブーム全長の2%以下と規定されている。

軽量でかつ剛性（たわみ）の規定を満たすブーム構成とするためには、計算によってたわみ量を把握しておく必要がある。しかしながら、ブームのたわみ量には、ブーム自体の剛性だけでなく、ブームを支える本体部分の剛性も寄与している。例えば、長さ78mのブームで荷を吊ることによってブームの根元部分（本体フレームの前方側）が回転中心を軸として25mm沈み込んだとしたとき（図1）、ブーム先端は約1m前方にたわむ。また、本体剛性のほかに、結合ピンや回転ベアリングといった各構成部品間に存在するがたによる変形も考慮する必要がある。

これまでのたわみ評価では、本体部分の剛性に対して過去の実機テスト結果を基にした値を設定し、ブームのたわみ量を数値解析で求める手法を採ってきていた。このため、実機テストによる最終確認・評価を行う必要があった。また、この手法では過去の実績に基づく仮定を使っていることから、構造を大幅に変更する場合、あるいはこれまでにない能力の機械を開発する場合、数値解析での評価が困難である。

そこで、最終目標として数値解析による事前評価が可能となることを目指し、(1) 実機計測手法の高精度化によるクレーンの各部位でのたわみの実態把握 (2) 解析によるたわみ解析精度に及ぼす誤差要因の分析、(3) 剛性評価の簡易化検討、の三つの観点から検討を行った。

2. たわみ予測精度向上に向けた取組

2.1 たわみ計測手法の高精度化と各部位のたわみ実態把握

SAE規格による横たわみを確認するにあたって、これまでは、ブームの根元部分にトランシットを設置して先端部分に直定規をブームに直角に立て、横荷重を作用させた際の直定規の数値を読取ることによってたわみ量を計測してきた。この方法では、計測の基準位置がブームの根元部分にあることから横荷重を作用させた際にこの基準位置自体も移動する。このため、ブーム単体のたわ

みを計測できる利点がある反面、1方向の変位しか計測できないうえに定規自体のたわみもあって精度も十分とはいえない。

そこで今回、レーザ計測器を用いることによる計測精度の向上を試みた。SL4500（400t吊）（図2）を対象に、ブーム長さ78m、作業半径11.1mの条件で無負荷（フックおよびロープの自重9tは载荷）から98.6tの荷重を吊った際のブームの前後方向たわみ、および本体フレームの鉛直方向たわみを計測した。前段では横たわみについて主に述べたが、ここでブームの前後方向、およびフレーム鉛直方向のたわみに着目したのは、ブームのたわみに及ぼす本体部分の剛性の影響、ならびに各部のがたの影響を検証するためである。

レーザを用いた3次元計測を導入することにより、計測精度を向上（計測距離100mで±2mm程度の誤差）させ、クレーンの前後（X）方向、横（Y）方向、鉛直（Z）方向それぞれのたわみを計測できる。また、ブームのみならず本体フレームの各部位を計測することにより、ブーム先端たわみに影響を及ぼす要因を分離することも試みた。図3に本体周りの計測位置例（図中の○部分）を示す。

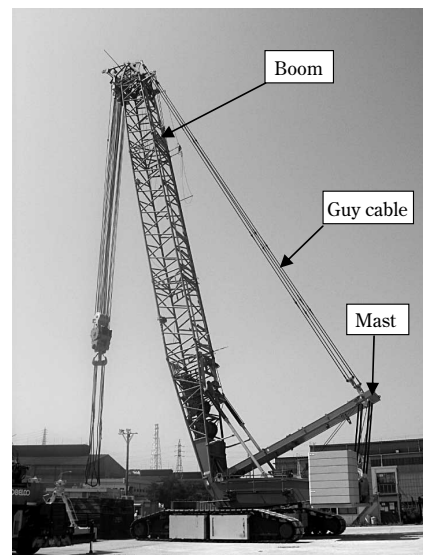


図2 検討の対象としたLBCC(SL4500)

Fig. 2 LBCC made into the object of examination

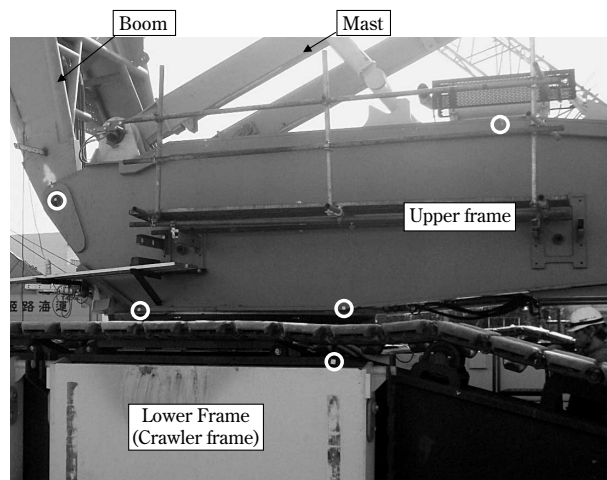


図3 レーザ計測位置例（○部分）

Fig. 3 Example of measured position

2.2 たわみ解析の精度に及ぼす要因分析

実測と解析との対比のため、実機計測に対応した有限要素法（以下、FEMという）による解析モデルを作成した（図4）。本体フレーム部分はシェル要素でモデル化した。上部フレームと下部フレームの間の旋回ベアリング部は、旋回ベアリングボルト相当の断面特性や物性をもたせたはり要素を用いて結合した。またアタッチメントは、ブーム、ガイケーブル、およびマスト部分にはり要素（一部はトラス要素）を用いた。このFEMモデルを対象に、クローラ下部に配置されたローラに相当する部分を拘束してブーム先端に荷重を作用させたときの幾何学的非線形（大変形）を考慮した弾性解析を行った。

変位の顕著な、(A) ブーム先端部分の前後たわみ、(B) ブーム根元部分の鉛直たわみ、および(C) 上部フレーム後端における鉛直方向変位量の計測結果と解析結果をそれぞれ比較した結果（図5）、解析値は実測値の65～78%であった。この30%前後の差が生じた原因としては、実機での本体フレーム部分、とくに旋回ベアリングのがたがまず考えられる。旋回ベアリングのがたによって、図6に示したように上部フレームと下部フレームとは鉛直方向変位量に差が生じる。表1にその変位量をまとめた。実機では荷重によって上部フレームは0.55度、下部フレームは0.36度傾斜し、0.19度の角度差が生

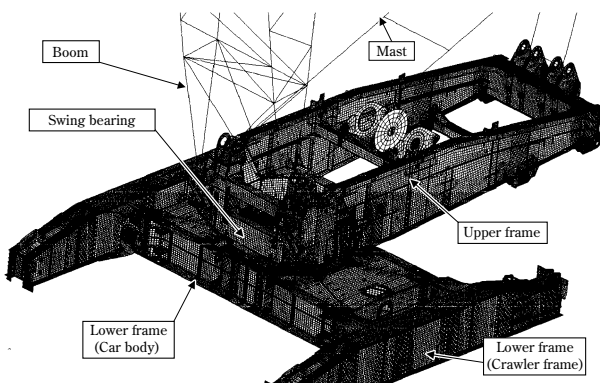


図4 解析モデル（本体フレーム周り抜粋）
Fig. 4 Analysis model (extract of a main frame)

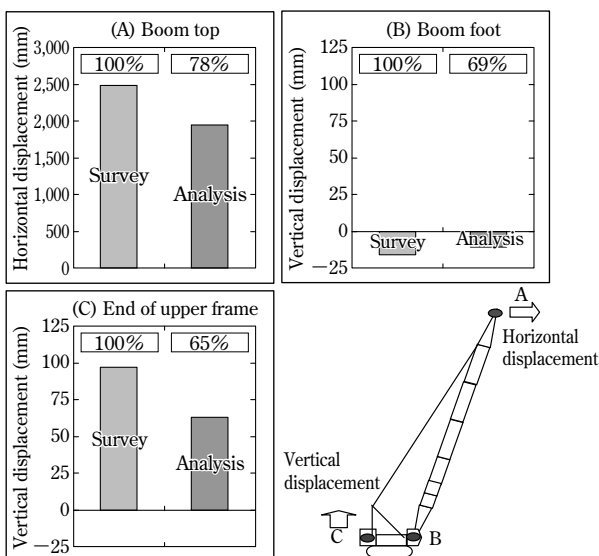


図5 実測と解析のたわみ量比較
Fig. 5 Comparison of displacement between survey and analysis

じていた。一方、解析では上下部フレームの傾斜角度差が0.1度であり、がたが主要因と思われる差が生じていた。このため、数値解析で旋回ベアリング部分に0.09度相当のがたを導入して再評価を行った。その結果を図7に示す。ベアリング部分のがたを考慮することにより、実測値との差は15%以内となった。

残りの差を検証するため、ブーム先端変位量を、ブーム自体の変形（たわみ）によるもの、上部フレームの回転によるもの、および下部フレームの回転によるものに分離した（図8）。この図から、解析では下部フレームの変形が実測より小さいことが分かる。これは、地面と接するクローラの一部が荷重によって浮き上がる現象、

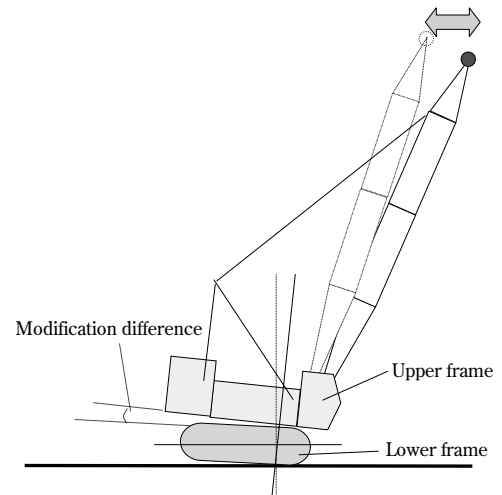


図6 旋回ベアリング部ガタの概念図
Fig. 6 Schematic drawing of swing bearing part modification difference between upper and lower frame

表1 旋回ベアリング部のガタ影響検証
Table 1 Influence verification of swing bearing part modification difference between upper and lower frame (unit : deg.)

	Survey	Analysis
1 Upper frame	0.55	0.37
2 Lower frame	0.36	0.27
Modification difference between 1 and 2	0.19	0.10

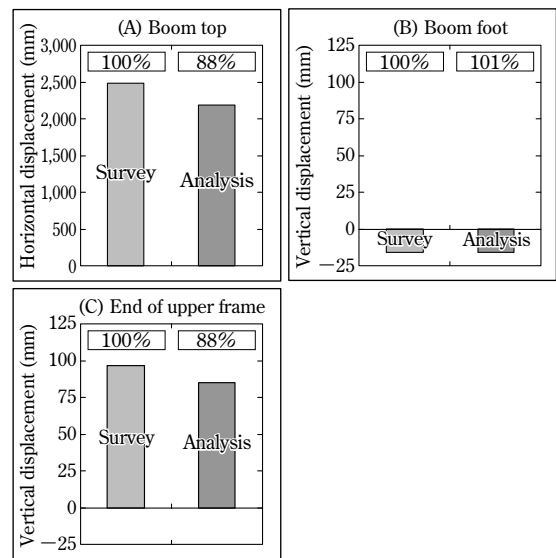


図7 実測と解析のたわみ量比較（解析値ベアリングガタ考慮）
Fig. 7 Comparison of displacement between survey and analysis (Crevice between swing bearing parts is reflected in analysis)

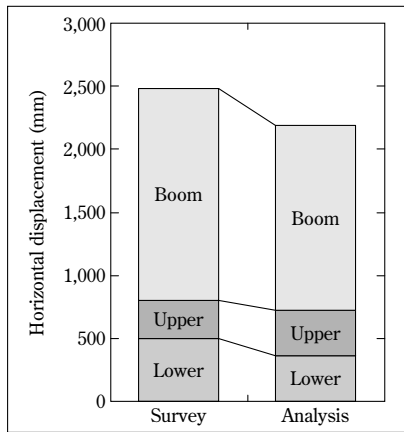


図8 ブームたわみの要因内訳
Fig. 8 Factor analysis of boom bending

あるいは地盤の変形などの影響が考えられる。すなわち、たわみの評価にあたっては、がたや接地条件の変化を考慮していないことによって実測より過小評価していることが分かった。また、がたや接地条件変化を考慮してたわみ計算を行う一方で、考慮する値の定量化を今後の機種開発の中で行っていく必要が判明した。

3. 剛性評価の簡易化に向けた取組

前章において、たわみ解析の精度向上に向けた取組について述べたように、とくに本体部分は、精細で膨大な数のシェル要素を用いたFEMモデルを作成することによって実測値と同程度の評価ができる。しかしながらこの手法は、本体構造が固まるまではFEMモデルが作成できず、たわみ量の評価ができないという欠点がある。

このため、本体部分を簡易なはり要素を用いてモデル化することによってたわみを評価することを試みた。具体的には、従来「シェルモデル」を作成していた本体側

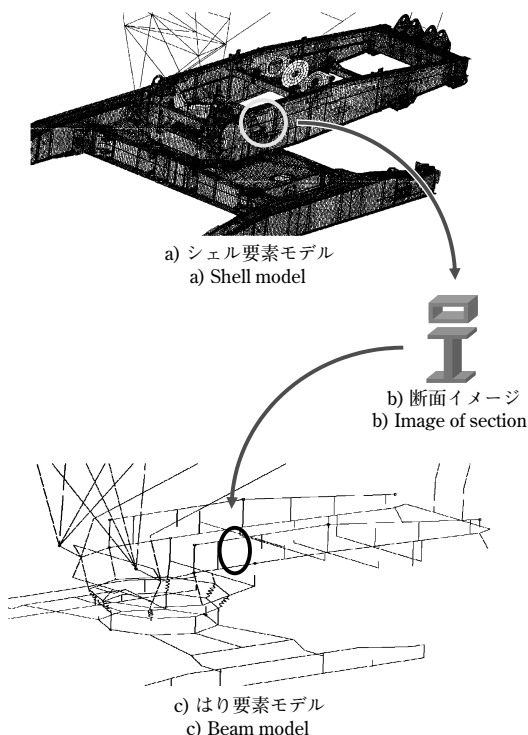


図9 はり要素を使ったモデル化手法
Fig. 9 Modeling method using beam elements

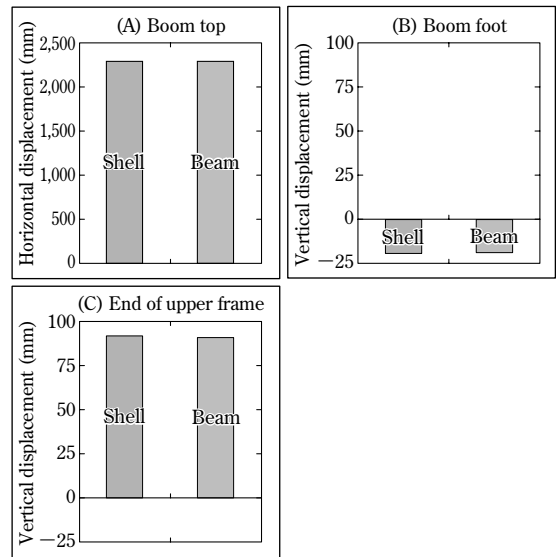


図10 シェルモデルとはりモデルによる解析結果比較
Fig.10 Comparison of analysis results between shell and beam elements

板部分(図9(a))に対しては、断面形状が異なる2本のはりが上下に接合された構造と考え(図9(b))、「シェルモデル」と等価な剛性を持った「はりモデル」(図9(c))を作成する。他の部分も同様にして本体フレーム全体の「はりモデル」を作成する。この手法は本体構造が固まっていない段階でも、仮の面げ剛性を設定してたわみ計算を行うことができ、本体構造の必要な面げ剛性を決めることが可能である。

作成した「はりモデル」と「シェルモデル」との比較結果を図10に示す。解析モデルの違いによる差は5%程度であり、「はりモデル」を使った手法でもたわみ評価が可能であることを確認した。モデル化が容易な「はりモデル」を作成することによってたわみの評価が可能となったことから、今後は評価作業を簡易化することができるとともに、本体構造が固まる前の開発初期段階での評価が可能となる。

むすび=本稿では、実機クレーンのたわみに影響を及ぼす要因の分析、たわみの数値解析を行うにあたって考慮するポイント、およびたわみ評価の簡易化手法についてまとめた。

これまでの設計では、ブームのたわみ予測精度が十分ではなかったために、実機テストによる確認に頼ってきたが、がたなどを考慮することによって数値解析による十分な精度での事前予測を可能にした。

数値解析のみでたわみを評価するには、がたや接地条件の変化量の定量化、あるいは簡易手法においても様々な構造があるなかでどのように簡易化するかなど課題は多い。今後の開発の中でこれらを明確にし、精度と使い勝手の良さを備えたクローラクレーンのたわみ評価技術を確立していく所存である。

参考文献

- 1) 労働省告示第135号, 移動式クレーン構造規格, 第1章構造部分等, 平成7年(1995)
- 2) SAE J1093 Revised MAR94, Society of Automotive Engineers.