

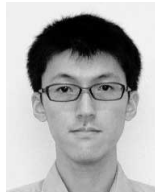
(解説)

## クレーン用キャブの強度・剛性・乗心地の評価技術

### Technology for Evaluating Strength, Stiffness, and Riding Comfort of Mobile Cranes



朽木聖綱\*1  
Kiyotsuna KUCHIKI



細井英彰\*1  
Hideaki HOSOI



川端将司\*2  
Masashi KAWABATA



森 辰宗\*2  
Yoshimune MORI

Evaluation technology based on simulation analyses of strength, stiffness and riding comfort in cabins, has been applied in the development, prior to production, of wheel and lattice boom crawler cranes. This front-loading evaluation technology was found to be precise and effective in reducing the amount of backtracking necessary to finalize the structure. The technology has been developed in association with the Mechanical Engineering Research Laboratory, Technical Development Group, Kobe Steel, Ltd.

まえがき＝昨今の厳しい経済環境の中、図1に示すようなコベルククレーン(株)の移動式クレーン(以下、クレーンという)においても従来以上に低価格・高品質な機械をタイムリーに開発することが重要となってきている。また、輸送規制や道交法規制順守もより厳しく求められてきており、さらなるコンパクト化・軽量化は必須である。

それら要件を達成するため、機械の要素ごとに厳しい性能達成要求が与えられており、キャブに対しても従来の軽量・高剛性化に加え、合理的な構造による材料費・加工費の削減や無駄のない効率的な設計による開発期間の短縮が求められている。

また、外観上の差別化としてデザイン性も重要アイテムとなってきているが、これは軽量・高剛性化と相反する面が多く、いかに高いレベルで両立できるかがポイントとなる。



図1 クローラクレーン  
Fig. 1 Latticed boom crawler crane

なお、本稿で扱うキャブとはオペレータが機械を操作するための運転席のことであり、クレーン本体に搭載されている。

キャブ開発の進め方としては、モックアップを作製しそれを改造しながら目標要件をクリアする方法と、数値解析を駆使して事前検討を厚くし、できる限り課題を解消した上で商品を製作して性能を確認する方法がある。

以前は、数値解析技術の稚拙さによる解析結果の信頼性の低さに加え、解析モデルの作成に膨大な時間がかかっていたことから、モックアップによる方法が進められることが多かった。一方、モックアップでの検討においても、改造では不十分な大きな構造変更が必要な際には作り直す必要があり、効率が悪くなる。さらに、改造のための期間や費用も膨大となり、そのことが十分に検討を尽くす上での制約となるなどの課題を抱えていた。

現在では、コンピュータ性能や解析技術の向上が図られたことによって解析精度や結果の信頼性が著しく向上している。また、プリプロセッサの性能や機能の充実により、解析モデル作成の手間やスピードも十分に実用的なレベルに達している。さらに、数値解析上での試行錯誤においては、大きな構造変更に対してもモックアップでの検討より容易に対応できる。試作機製作後の性能確認はまだ必要であるものの、開発トータルとしての検討期間・費用は大幅に削減できる。したがって、クレーン業界だけでなく全ての製造業界において、数値解析による事前検討の充実に重みが置かれるようになりつつある。

今回、ホイールクレーンおよび汎用クローラクレーン用の新キャブ開発にあたり、これまで(株)神戸製鋼所技術開発本部機械研究所と共同で培ってきた数値解析による事前評価技術を適用したので、その事例を紹介する。

\*1コベルククレーン(株) 開発本部 要素開発部 \*2技術開発本部 機械研究所

## 1. キャブに求められる性能

キャブに求められる性能としては、運転中や輸送中などに受ける外力に対する強度や、作業中にオペレータが感じる振動に関係する乗心地性がある。一方で、オペレータの視界性や居住性も非常に重要な性能である。キャブを構成するピラーを太くして窓も小さくした方が強度性能を高めるためには有利である反面、オペレータの操作性や快適性には悪影響を及ぼす。すなわち、強度性能・乗心地性と視界性・居住性は相反する要求性能となっている。

したがって、それら全ての要求性能を満足させるためには、構造的に高いレベルでの両立を図る必要が出てくる。

## 2. キャブの検討手順

キャブ開発時における強度・剛性・乗心地の評価手順を図2に示す。

従来開発ではベンチ試験や実機試験での作り込みが主であったが、今回の開発では評価のフロントローディング化を図り、シミュレーション解析評価を充実させた。

以下に各開発工程での評価方法に関して解説していく。

### 2.1 キャブ単体評価

#### 2.1.1 簡易解析

簡易解析では、キャブ全体系の動剛性を評価する。機械デザイン決定後にその動剛性を盛り込んだ設計に入るが、詳細設計に入る前の外形寸法が決まった段階で、ビーム要素と集中質量、およびシェル要素による簡易解析モデルによってキャブ全体系の固有値解析を実施する。この解析により、目標動剛性を達成するための主要構造部材の構成と必要断面性能の目安をつけ、解析結果を基にして詳細設計を行っていく。解析ツールは、汎用の有限要素解析コードMSC/NASTRANを使用している。

解析モデルおよび固有値解析結果をそれぞれ図3、図4に示す。

#### 2.1.2 詳細解析

詳細解析では、キャブ全体系の動剛性、パネル動剛性、および疲労強度を評価する。

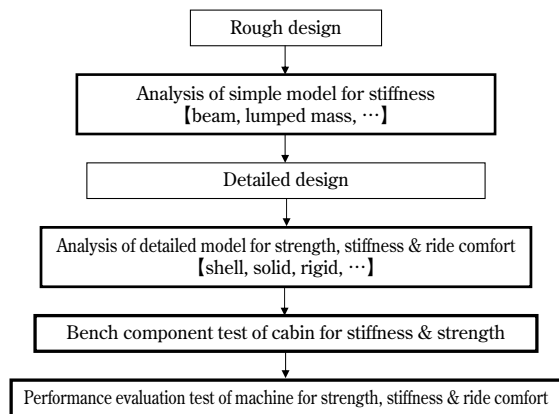


図2 キャブ剛性・強度・乗心地評価フロー

Fig. 2 Evaluation flow chart for cabin's strength, stiffness & ride comfort

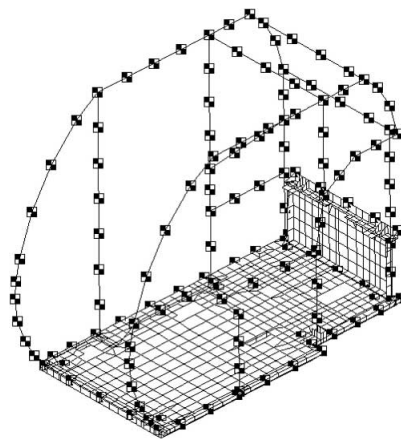


図3 簡易解析モデル  
Fig. 3 Simple analytical model

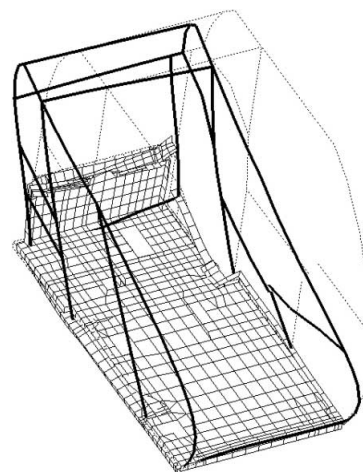


図4 固有値解析結果  
Fig. 4 Mode shape of cabin

コベルコクレーン(株)では3D-CADを導入し、3Dモデルによる詳細設計を行っている。その3Dモデルを活用してワイヤフレームモデルを作成することにより、解析用データの作成時間短縮を図っている。3D-CADシステムは、付加機能の一つとしてFEM解析機能を備えており、その機能を使用することによってさらなる時間短縮が可能である。しかし、利用可能な要素が少なく、キャブのような薄板構造物に対しては満足な解析精度が得られる要素が備わっていない。このため、現時点では解析ツールとしてMSC/NASTRANを使用している。

解析モデルの作成にあたっては、図5のように、シェル要素、ソリッド要素、リジッド要素などを使用している。さらに、ボルト結合部や板合わせ部分などの非線形性が強くモデル化が困難な部分にはばね要素を用い、従来の解析実績に基づく等価ばね定数を与えている。

詳細解析ではまず、キャブ全体系の固有値解析によって対象モードの固有振動数が目標以上にあるかを確認し、主要構造の妥当性を評価する(図6)。これにより、通常は主要構造物の公称強度も達成される。また、併せて振動乗心地に影響を与えるフロアプレート部の動剛性、およびキャブ内騒音に影響を与えるキャブ側板・背板の動剛性も確認する(図7)。

つぎに、単位加速度を作用させた静的応力解析、および実機計測によって把握したキャブ作用力を外力とした

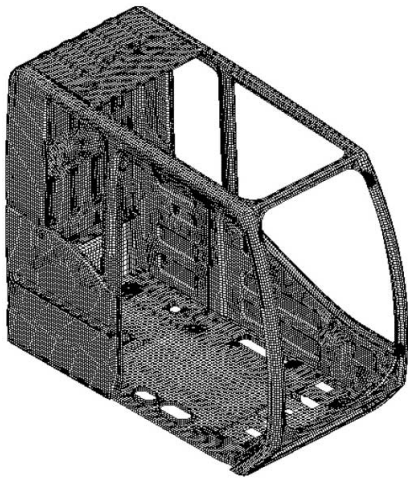


図5 有限要素モデル  
Fig. 5 Finite element model

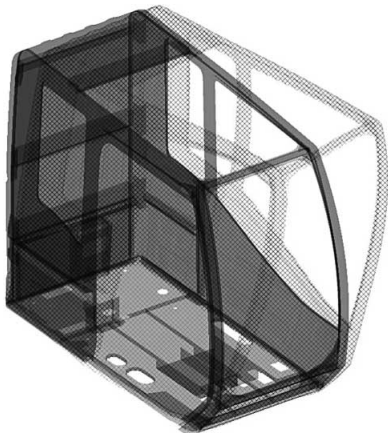


図6 キャブ全体系の変形モード  
Fig. 6 Mode shape of cabin



図7 背板の変形モード  
Fig. 7 Mode shapes of rear panel

周波数応答解析を実施することにより疲労強度評価を行う。評価精度を高めるため、S-N曲線による応力の絶対値評価と併せて実績のある従来キャブとの応力比較も行う<sup>1)</sup>。

本解析結果に基づいて詳細部分の形状までを決定する。

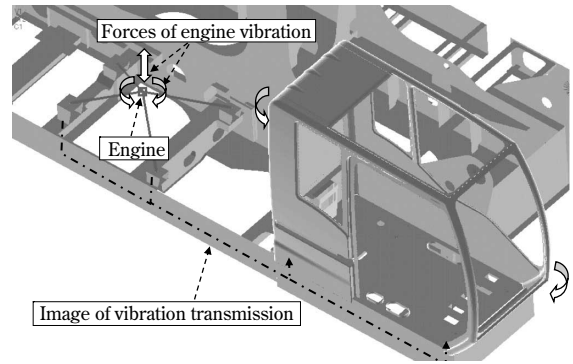


図8 周波数応答解析イメージ  
Fig. 8 Image of frequency response analysis

## 2.2 機械全体系での動剛性解析

エンジンの爆発や回転に起因する振動をはじめ、ポンプや油圧機器によって生ずる脈動など、さまざまな機器を加振源とした広範囲な周波数域の振動がキャブに伝達される。これらの振動がオペレータシートやフロアプレートを通じてオペレータに伝わり、クレーン操作レバーやモニター、パネル類が振動することによってオペレータに不快感を与える。そうした不快感を和らげる目的から、キャブは防振用のマウントを介してクレーン本体に取付けられている。

キャブに伝達する振動を低減するためには、そのマウントの防振性能を十分に発揮させる必要がある。キャブ全体系剛性の目標値はそれを考慮して設定している。しかし、防振性能を発揮させるためには、キャブ本体の剛性だけでなく、それを支えるクレーン本体のフレーム剛性も重要な要素となってくる。

これまで、クレーン本体側の剛性に関しては静剛性評価を行っていたが、軽量化などの要求からより精度の高い評価が必要となってきており、動剛性評価にも取り組んでいる<sup>2)</sup>。

動剛性評価においては、エンジンなどの加振源位置に加振外力を与えた時(図8)のキャブの応答加速度を求める周波数応答解析を実施しており、解析モデルはキャブやマウントを含めたクレーン全体系を対象とする。

この解析評価の場合、

- ・機械上に存在する構成要素のモデル化範囲
- ・がたやマウントの非線形特性の取扱い
- ・振動に対するオペレータ官能評価の定量化

など、解析精度や評価手法に関する課題も非常に多い。現在、それらの課題解消に向けた検討を進めている。

## 3. 試験評価

### 3.1 試作キャブを用いた剛性・強度評価

クレーン本体試作機を組立てる前に、まず試作キャブを製作し、ベンチ試験にて動剛性や疲労強度の達成度を評価する。動剛性に関しては、図9に示すようなインパクトハンマ打撃によるモーダル計測を行い、試作キャブの固有振動数と固有モードを把握することによって目標動剛性の達成度を確認する。

図10は試作キャブ打撃試験による応答結果の一例であり、そのときのピーク周波数における振動モードでの変形図を図11に示す。この結果は、詳細モデルでの解析



図9 キャブ打撃試験  
Fig. 9 Impact hammer testing of cabin



図12 加振試験  
Fig.12 Shaker testing of cabin

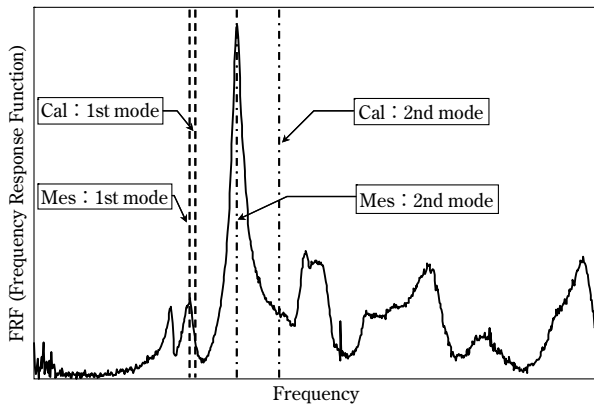


図10 打撃試験結果  
Fig.10 Result of impact hammer testing

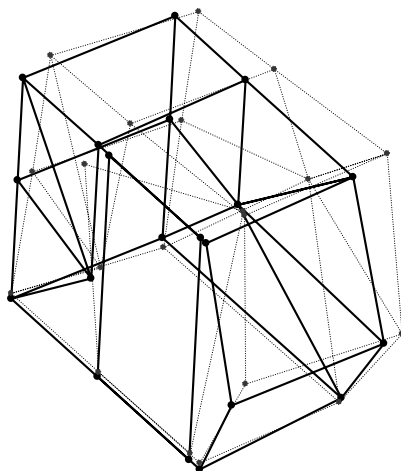


図11 キャブの変形モード  
Fig.11 Mode shapes of cabin

結果(図6)と周波数、変形モードともよく一致することが確認されている。また、背板などのパネル剛性も事前解析と整合する結果が得られた。

つぎに、加振機を用いたベンチ加振試験(図12)によって試作キャブの強度評価を行う。このとき、試験時間を短縮する目的から、実機振動計測データに基づき生涯被害量が等価となるように加振条件(時間・加振力)を設定した加速試験を行っている。クラック発生の確認はカラーチェックにて行うが、さらに事前FEM解析によって判明している強度的に懸念される箇所には、ひずみゲージによる応力測定を行い、FEM解析結果との整合性

も検証している。

今回の開発では、事前FEM解析を充実させた効果により、試作機による加振耐久評価を手戻りなく、1回でクリアさせることができた。

### 3.2 実機性能確認試験評価

実機性能確認試験では、主にモーダル計測による動剛性(固有振動数と振動モード)確認、および実稼働時のキャブ振動計測とオペレータ官能による乗心地評価を行う。強度面の評価は原則、ベンチ試験で完了する。一部機種ではラフロード耐久試験によるキャブ強度評価も実施しているが、徐々にベンチ試験での評価に置換えつつある。

今回の開発では、強度・剛性評価のフロントローディング化を図ったこともあり、実機性能確認試験時において、キャブの強度・乗心地不具合は発生しなかった。また、パネル動剛性の事前評価によってキャブ内騒音も開発目標を手戻りなく達成し、開発期間の短縮化に貢献できた。

むすび=新型キャブの開発において、シミュレーション解析技術の向上により、設計段階での精度の高い動剛性・疲労強度評価が可能となった。これにより、試作以降での手戻りが削減され、トータルとしての開発期間の短縮が図られた。

フロントローディングを充実させることにより解析評価期間は長くなったものの、それも3D設計とのリンクを図ることによって短縮化が図られてきている。

世の中では、全体挙動から搭載物の寿命まで数値解析によって評価するバーチャル試作構築が普及してきており、試作機による評価をなくした「試作レス」を実現する方向に向いている。コベルコクレーン(株)としても、さらなる解析精度の向上や対象範囲の拡大を図ることにより事前解析評価技術を高めていき、少しでも「試作レス」に近づけていきたいと考えている。

### 参考文献

- 1) 川端将司ほか、R&D 神戸製鋼技報、2007、Vol.57、No.1、p.58-61.
- 2) 今西悦二郎ほか、R&D 神戸製鋼技報、2001、Vol.51、No.3、p.50-57.