

### 3. 天井クレーンの実働荷重測定

前田 豊\*, 橋内 良雄\*, 吉久 悦二\*

### 3. Monitoring of Service Loadings for Overhead Travelling Crane

by Yutaka MAEDA\* Yoshio KITSUNAI\* and Etsuji YOSHIHISA\*

**Abstract;** Cranes have been experienced loads or stresses of variable amplitude in random. In case of application of damage tolerance concepts for cranes, a reliable prediction must be made of number of load cycles that will propagate a crack from a certain starting size to the permissible size. The prediction of fatigue crack growth rate and growth time of a crane requires the input of relevant crack propagation data and stress history. In order to produce reliable fatigue life or crack growth data for cranes, stress spectra acting on the main girder in an overhead travelling crane was examined under service condition. The main girder of the crane used was composed of conventional pipe structure. The principal specifications of the crane were: the maximum hoisting load was 49kN, the span was 16.3 m, and the crab trolley wheel base was 3.25 m. The monitoring of the stresses was carried out using strain gauges glued on the selected components of the girder. The data obtained were recorded into a histogram recorder and a data recorder. Rain-flow method was used as a stress counting technique. The stresses acting on the girder are a function of the hoisting load, movement of the crane and frequency of operations. A 49 kN weight which corresponds to the safe working load was used during the stress measurement. A typical movement of the crane employed was as follows; the test weight was lifted by a crab trolley at an end of the girder, the trolley was traversed from the end to the opposite side of the girder, further the main girder with the crab trolley was traveled approximately 20 m on the runway girder, then turn back to the starting position tracing the original root, and the weight was lowered. A series of crane operation above mentioned was cycled 20 times during the stress measurement to make histogram of stress range acting on the selected components in the girder. As a result, the majority of the stresses monitored occupied by relatively low stress ranges below 20 MPa, which have a little influence on the fatigue damage of the girder. However, the girder was subjected relatively high stresses when the lifting or lowering was stopped abruptly by braking. Moreover, the stress of the component located in the middle of the girder reached approximately 30 MPa as the crab trolley traversed from one side to the opposite side on the main girder. The stress spectrum monitored for the main girder under service conditions was found to be expressed by the Weibull distribution.

**Keywords;** Overhead travelling crane, Stress monitoring, Rain-flow method, Service stress, Fatigue

#### 1. はじめに

天井クレーンは、高架ランウェイ（ランウェイガーダ）の上を走行する桁（ガーダ）にトロリを有するクレーンである。トロリはガーダ上を横行し、トロリに

置かれたウインチによって荷がつり上げられる。これによって荷は3次元的に空間を移動して運搬される。工場をはじめ多くの場所で使用されている天井クレーンは、重量物の運搬に不可欠の機械である。

クレーン、特に天井クレーンは比較的古い発達の歴史を有するため、これまで、その構造部分を対象とした応力計測<sup>1)2)</sup>や、発生応力の解析<sup>3)4)</sup>は少なからず行

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

われてきている。しかし、これらは計測手法・機器が未発達な時代のものであるため、最大応力の把握やその繰り返し回数の計測にとどまっておらず、実波形をもとに、それぞれの応力振幅をスペクトルの形式で与えることは、ほとんど行われていない。

また、クレーンの設計規格について見ると、疲労を考慮した国際規格案<sup>5)</sup>が提案されているが、そこでは応力のスペクトルをレインフロー法<sup>6)</sup>でカウントするとされている。現在のわが国の規格にはそのような詳細な規程はないが、今後はわが国においてもより厳密な疲労設計を行うことが要求されると予想される。

一方、応力スペクトルの把握は、新規にクレーンを設計・製造するために必要なだけでなく、経年劣化後に補修した部材の強度評価のためにも重要な過程である。

そこで、本研究では、クレーンの部材に生じる応力のスペクトルをレインフロー法を用いて決定することを目的として、実機の天井クレーンを対象とした応力スペクトルの実測を行い<sup>7)</sup>、それをモデル化、一般の機種に適用する方法について考察することとした。

## 2. 応力スペクトルの計測

### 2.1 計測方法

天井クレーンの作業には、荷の上げ下げのほか、横行、走行がある。これらの作業は単独で行われることもあるが、同時に2動作が行われることもある。一般に、荷重の大きさ、位置、回数の分布は、同一の機種であっても、クレーンが設置され、使用される場所ごとに異なり、応力スペクトルもそれに依りて異なることが予想される。そこでまず、基準とする作業を行った場合の応力スペクトルの計測を行い、その特徴をとらえることとした。

供試機は、当所内に設置の5tonf づり天井クレーンとした。当機はパイプ構造のガーダを有することが特徴の、1クラブ1フック、運転室付きの、小型天井クレーンである。供試機の主な仕様を **Table 1** に示す。

当機の場合、運転は運転席で行うほか無線による遠隔操縦によることも可能である。しかし、無線操縦装置による運転では、コントロールレバーが2段階にしか動かせず、作動速度も制限されているため、変動応力が通常の作業より小さく出る可能性がある。このことを考慮して、実験中の操作はすべて運転室において行うこととした。

計測にあたっては、まず、供試機の応力集中の影響がないと思われる位置を選んでひずみゲージを貼りつけた。応力集中のない部分を選択したのは、最大応力

Table 1 Specifications of the overhead travelling crane used for test  
計測に用いた天井クレーンの主な仕様

Maximum lifting load	5,000 kgf(49KN)
Type of girder	Pipe
Span	16.236 m
Lift	11.05 m
Rated lifting speed	12 m/min
Rated traversing speed	40 m/min
Rated travelling speed	100 m/min
Traversing range	13.936 m
Travelling range	49.6 m
Motor	3 phase induction motor
Brake for control of load lowering speed	Hydraulic lift electric brake
Brake for load holding	Magnetic brake
Brake for traversing	Magnetic brake
Brake for travelling	Foot operated hydraulic disk brake/thruster brake

の発生位置を求めることが本研究の目的ではなく、応力変動のスペクトルを求めることを目的としていることによる。ひずみゲージの貼りつけ位置を **Fig.1** に示す。

次に、クレーンにより一連の動作を行わせ、その間のひずみのスペクトルと波形を連続的に記録した。スペクトルの演算は(株)東京測器研究所製のヒストグラムレコーダシステム (HR808A および HR821B) を用い、スペクトルの演算はレインフロー法によった。応力スペクトルは得られたひずみスペクトルから換算した。なお、レインフロー法では1回のカウントはそれぞれ波形の立ち上がり又は立ち下がりに対応する。一定振幅の波の場合には、振動回数の2倍がカウント数に、レインフロー振幅は peak to peak の全振幅に一致する。

また、応力波形の記録のため、スペクトルの演算と同時にモニターユニット (HR871) により波形データを出力させ、これをデータレコーダに記録し、後にこれを再生・A/D変換して、電算機による波形の図化を行った。計測器の接続と処理の流れを **Fig.2** に示す。

計測に際しては、あらかじめ荷重を負荷しない状態のひずみをゼロ値とするのが本来の方法である。しかし、本計測の場合、実機のクレーンを使用しているため、機体(トロリとガーダ)の自重による荷重が常に負荷されており、無負荷の状態をとることができない。このため、ゼロ値は荷をつらずにトロリをガーダの中央に置いた状態におけるひずみ値とした。したがって、計測された応力(ひずみ)は絶対値ではなく、荷をつけることによる変動(荷重の大きさの変化)にトロリの横行による変動(荷重位置の変化)を加味したものになる。

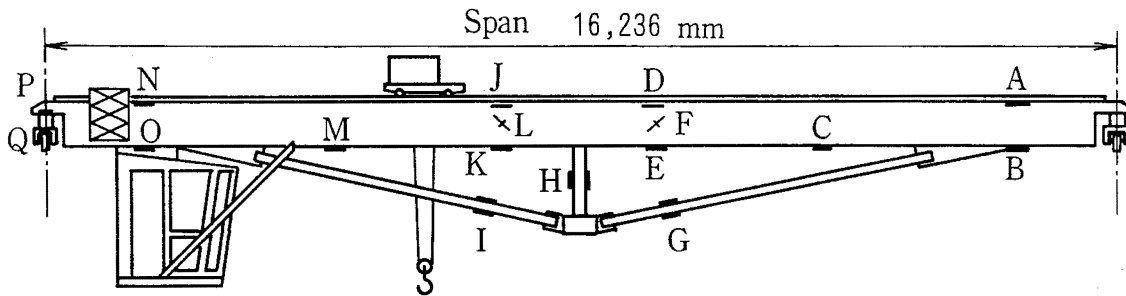


Fig.1 Location of strain gauges.  
ひずみゲージの貼りつけ位置

自重による応力は条件により異なるが、メーカーの設計計算書によれば、下側ロッド (Fig.1 の G の位置) において応力が最大になるときの応力の値は、ガーダ自重によるものが 23.3MPa、トロリ自重によるものが 4.9MPa である。また、定格荷重に等しい荷重による応力の設計値は 25.8MPa である。

応力スペクトルと応力波形の記録は、クレーンの動作を次の 7 通りに分解し、それぞれについて行った。また、これらを複合させた動作として、動作(8)を行い、同様にスペクトルと波形を記録した。

- (1) トロリをガーダ中央に置いて、荷の地切り (荷を地上からわずかに浮かすまでつり上げること) から、巻き上げ、停止、巻き下げて着地までを行う。
- (2) トロリをガーダ北側 (運転室と反対側) の端から約 30cm の位置に置いて、(1) と同様の動作を行う。
- (3) トロリをガーダ南側 (運転室側) の端から約 30cm の位置に置いて、(1) と同様の動作を行う。

- (4) 荷をつった状態でトロリを横行させる。
- (5) トロリをガーダ中央に置いて、荷をつった状態でガーダを走行させる。
- (6) トロリをガーダ北側の端から約 30cm の位置に置いて、荷をつった状態でガーダを走行させる。
- (7) トロリをガーダ南側の端から約 30cm の位置に置いて、荷をつった状態でガーダを走行させる。
- (8) ガーダ北側の端から約 2m の位置で荷を地切り、巻き上げてから南側に約 10m 横行し、西側に約 20m 走

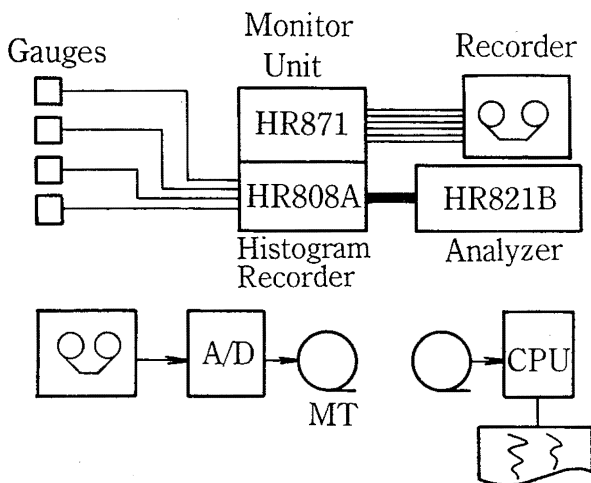


Fig.2 Measuring instruments and flow of data processing.  
計測器の接続と処理の流れ

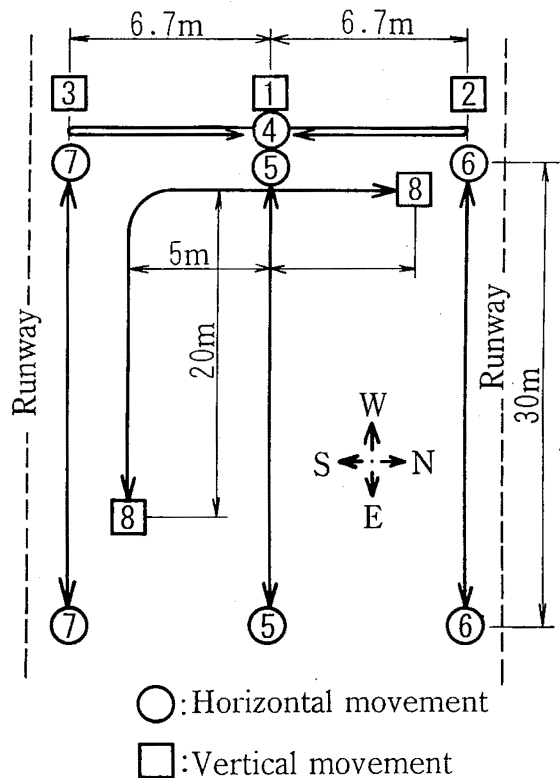


Fig.3 Movement of crane when stress spectrum was measured.  
スペクトル計測時のクレーンの動き

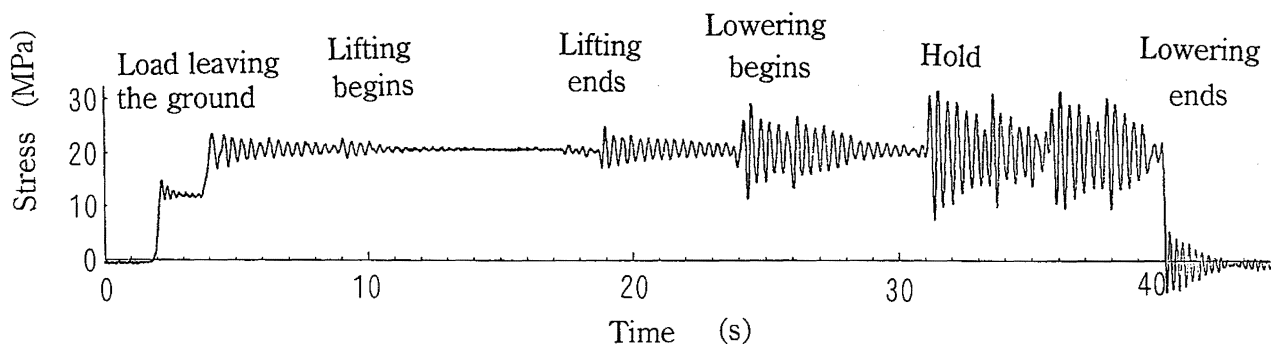


Fig.4 A stress-time history of gauge G, when load was lifted and lowered.  
巻き上げ・下げのとき下側ロッド（ひずみゲージG）に生じた応力波形の例

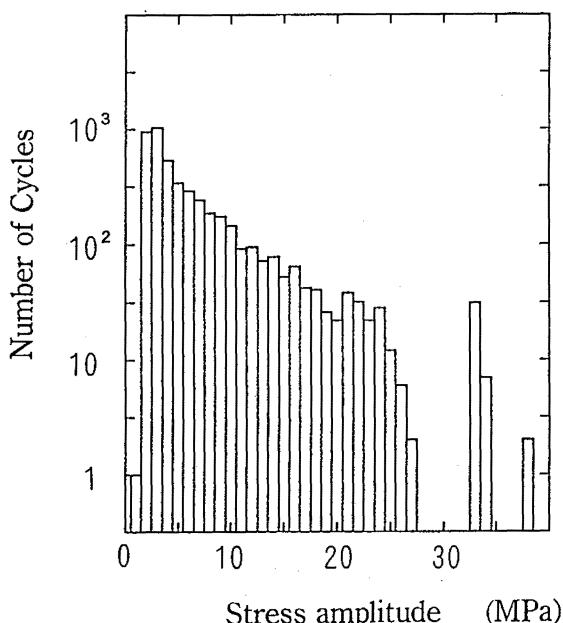


Fig.5 A stress spectrum of load lifting and lowering at gauge G.  
巻き上げ・下げにおける下側ロッド位置（ひずみゲージG）のスペクトル

行して巻き下げ、着地した後、逆の経路で元に戻る。

Fig.3にこれらの動作の間の経路を示す。

### 2.2 荷の巻き上げ・下げによるスペクトル

クラブ位置（すなわち荷のつり上げ位置）をガーダ中央、あるいはガーダ両端付近として、地切りから、巻き上げ、巻き下げ、着地までを連続して20回繰り返し行い、その間のスペクトルを記録した。つり荷は定格荷重に等しい5tonのウエイトとした。

計測中のクレーンに特に極端な動作を行わせることはせず、通常の作業と同様の作業を行わせることとした。すなわち、荷のつり上げにおいては、たるんでいたワイヤロープが緊張した状態でいったん巻き上げを

停止し、その後に地切って再び停止、その後地上約2mまで巻き上げるとい動作を行う。同様に、着地においては、着地の前に減速、一旦停止してから、その後ゆっくりと地上に下ろし、荷の状態を見てからワイヤロープが緩むまで巻き下げる、という動作とした。

これは、計測の目的が、最悪の条件において生じる最大応力を求めることにはなく、応力変動を求めることにあるためであるが、逆に運転操作が毎回必ずしも同一でなく、計測条件が一定せずに変動するということになる。今回は、この変動部分をそのまま計測に取り入れる意味で、同一の動作を連続して20回繰り返す、その間のデータをそのまま記録することにした。

ガーダ中央で荷をつった場合について、1回のつり上げ動作の応力波形の例を Fig.4 に、全20回の動作を通じた応力のスペクトルを Fig.5 に示す。巻き上げの後、振動が収まった状態での最大応力は下側ロッド位置(G)に生じ、その値は21MPaであった。これはつり荷のみの静荷重に対応する。

また、一般に衝撃荷重（動荷重）が最大となるのはつり上げの時であるとされているが、この計測では、巻き下げ後の一時停止の衝撃による振動が最も大きく、同じ場所で静荷重との比は、 $\psi=1.52$ であった。

ガーダ上の位置（上面がD、下面がE）における応力波形はほぼ対称であるが、下面側の圧縮応力は上面側の引張り応力の約70パーセントの大きさであった。

Fig.5を見ると、下側ロッド位置(G)のスペクトルは2つの部分に分かれている。応力振幅が大きい側(30MPa以上)の部分は、それぞれの回数を合計するとちょうど40になる。この間のつり上げ下げの動作は20回であることから、1回のつり上げ下げが2回分のカウントに相当していることが分かる。ただし、後述するように、それぞれの振幅は1回のつり上げ動作中における最大応力と着地時の最小応力との差をそのまま示すものではない。

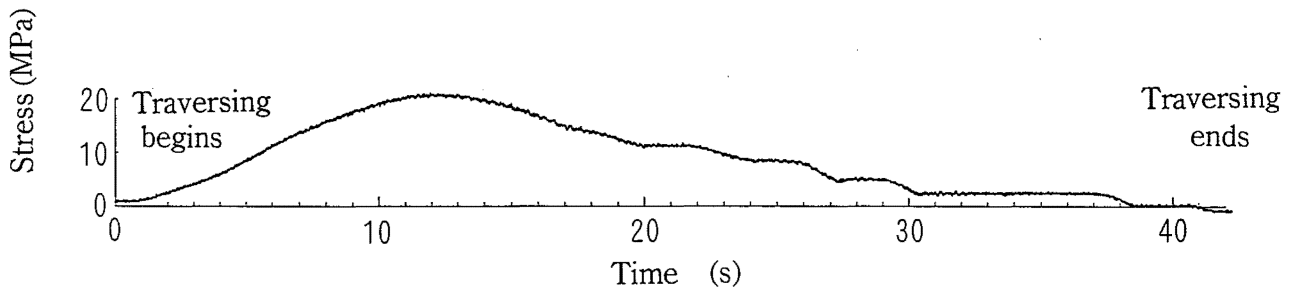


Fig.6 A stress-time history of gauge G, when the crane traversed.  
横行のとき下側ロッド(ひずみゲージG)に生じた応力波形の例

これに対し、応力振幅が小さい側 (30MPa 以下) の部分は、つり上げ動作の回数に比べてはるかに多いカウントを示していることと、振幅が小さくなるにつれて回数が多くなることから、荷の上げ下げ中に生じる減衰振動に対応することが分かる。

ひずみゲージ位置が異なる D, E におけるデータでは、応力振幅が大きい部分と小さい部分にはっきり分離されておらず、この両者のスペクトルは重なりあっている。

### 2.3 横行によるスペクトル

荷をつり上げたまま、ガーダ上をトロリが 20 往復する間のスペクトルを記録した。なお、横行レールには、ガーダ中央に 1 箇所継ぎ目がある。

横行を行ったときの下側ロッドに生じた応力波形の例 (片道分) を Fig.6 に、スペクトルを Fig.7 に示す。横行中、ごく細かな振動は生じているが、スペクトル上には現れていない。また、レールの継目を通るときの衝撃による振動も認められなかった。

横行のスペクトルは 21 から 25MPa の間に分布しているが、その回数を合計すると 80 になることから、1 往復の間に 4 回カウントされていることが分かる。同じ横行動作を繰り返したにもかかわらず、スペクトルに多少の分布の広がりが見られるのは、ガーダ端のトロリ停止位置に若干の変動があり、応力の最大値に変動が生じたためと思われる。

### 2.4 走行によるスペクトル

荷をつり上げたトロリをガーダ中央、あるいはガーダ両端付近においたまま、約 30m の長さを往復走行する間のスペクトルを記録した。なお、走行レールには、30m の間に 3 箇所継ぎ目がある。

走行を行ったときの下側ロッドに生じた応力波形の例 (片道分) を Fig.8 に、スペクトルを Fig.9 に示す。

走行中、小さな振動が生じているのみで、大きな応力変動は存在せず、レールの継ぎ目を通過する際の衝撃応力も認められなかった。スペクトル上でも最大の振幅がせいぜい 6MPa 程度であるので、強度評価に対しては走行の影響を無視してよいと思われる。

### 2.5 組み合わせ動作によるスペクトル

Fig.3 に示すように、荷重の地切り・巻き上げと水平移動、着地を組み合わせ動作を 20 往復分行い、その間のスペクトルを計測した。このときの下側ロッドに生じた応力波形の例を Fig.10 に、スペクトルを Fig.11 に示す。

応力波形を見ると、下側ロッドにおいてはトロリがガーダ中央付近に来たときが最も大きな応力が発生するときであるが、その位置での荷の巻き上げ・下げを

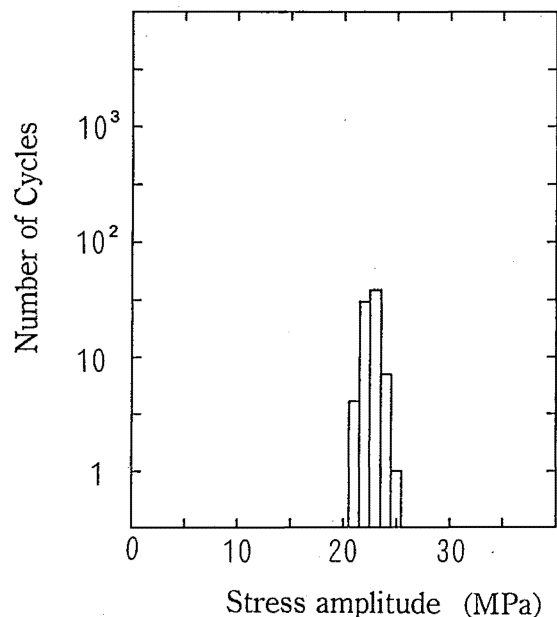


Fig.7 A stress spectrum of crane traversing at gauge G.  
横行における下側ロッド位置(ひずみゲージG)のスペクトル

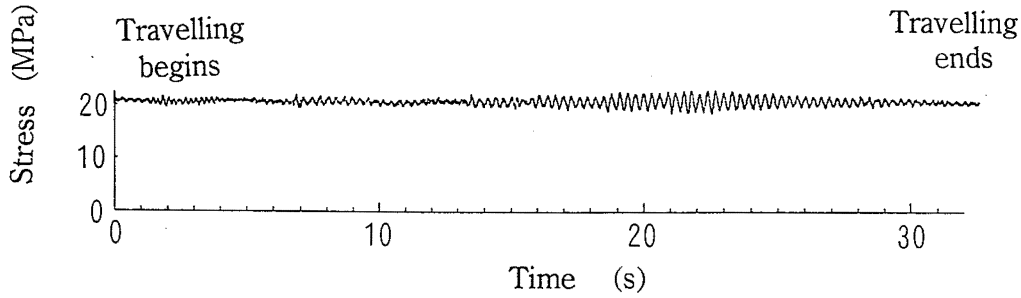


Fig.8 A stress-time history of gauge G, when the crane travelled.  
走行のとき下側ロッド (ひずみゲージ G) に生じた応力波形の例

行っていないため、衝撃荷重の発生と最大静荷重の発生がずれて、応力の値そのものは単純な巻き上げ・下げのときよりも小さくなっている。

また、この場合もスペクトルは大きな変動と細かな振動部分に分離されている。

### 3. 応力スペクトルのモデル化

#### 3.1 荷重巻き上げ・巻き下げ

Fig.4 から明らかなように、荷重巻き上げ・下げ時の応力の変化は、つり荷の重量が加わることによる静的なレベルの変動に、特定の動作終了後の減衰振動が重畳されたものとみなすことができる。前者による応力振幅の分布は、つり荷の位置あるいは大きさの分布から導き出されるべきものであるが、後者については減

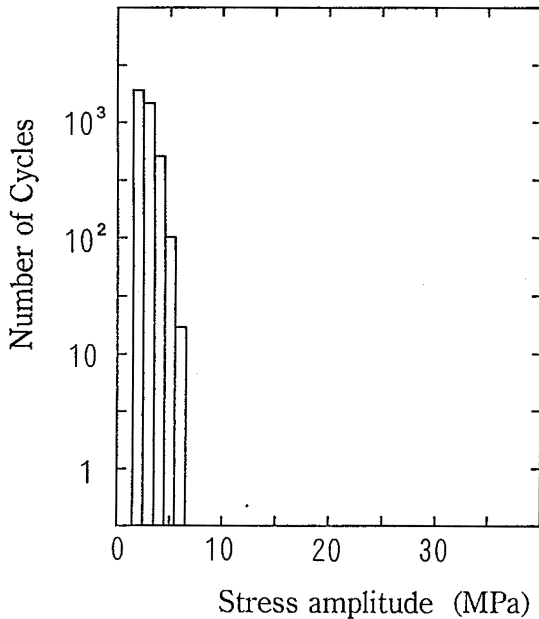


Fig.9 A stress spectrum of crane travelling at gauge G.  
走行における下側ロッド位置 (ひずみゲージ G) のスペクトル

衰振動をモデル化することにより解析が可能である。

このため、ガーダ系を単純化し、ガーダやトロリ自体をも含めた総合的な系を Fig.12 に示す 1 組のバネと粘性抵抗で代表させたモデルを考える。なお、バネ定数などの各係数はクレーンの動きにともない変化するはずであるが、その幅は小さく、一定とみなせるものと仮定する。

以下において巻き上げ・下げ動作後の減衰振動による応力のスペクトルの形状を検討する。

まず、クレーン・つり荷系を単純な振動モデルで表す。すなわち、ガーダ上の応力を検出する位置を  $x_G$ 、つり荷の位置を  $x_L$  とし、ロープの張力を  $F$ 、トロリの質量を  $m_T$  とする。 $x_G$  における応力  $\sigma_G$  は、ガーダへの荷重  $F + m_T g$  に比例し、かつ関数  $f(x_G, x_L)$  にも比例するものと仮定する。このとき、

$$\sigma_G = f(x_G, x_L) \cdot (F + m_T g) \tag{1}$$

となる。また、

$$F = ky + c(dy/dt)$$

$$m(d^2y/dt^2) = mg - F$$

から

$$m(d^2y/dt^2) + c(dy/dt) + ky = mg \tag{2}$$

となるのでこれを解いて式(1)に代入し整理すると、振動の発生する条件である  $c < 2\sqrt{km}$  の場合、 $A$  と  $\alpha$  を任意定数として、

$$\sigma_G = f(x_G, x_L) \cdot (mg + m_T g)$$

$$- f(x_G, x_L) \cdot kA \exp\left(-\frac{c}{2m} t\right) \cos\left(\sqrt{\frac{4km - c^2}{2m}} t + \alpha\right)$$

となる。

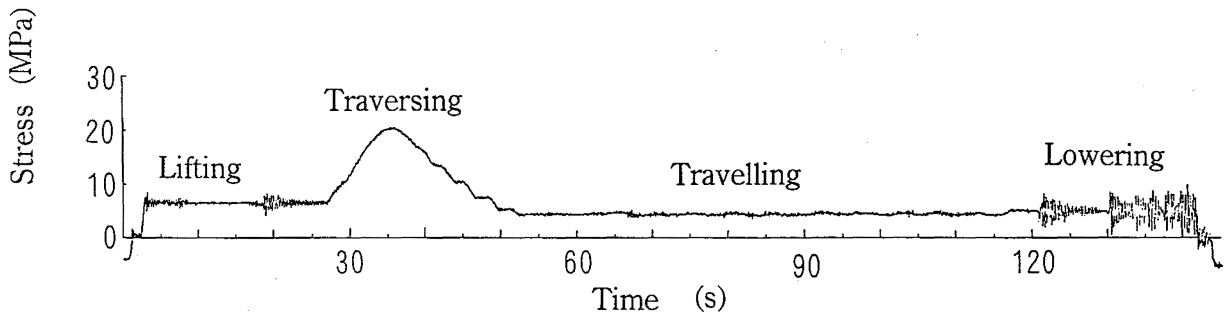


Fig.10 A stress-time history of gauge G, when the crane moved a complex cycle.  
組み合わせ動作のとき下側ロッド (ひずみゲージ G) に生じた応力波形の例

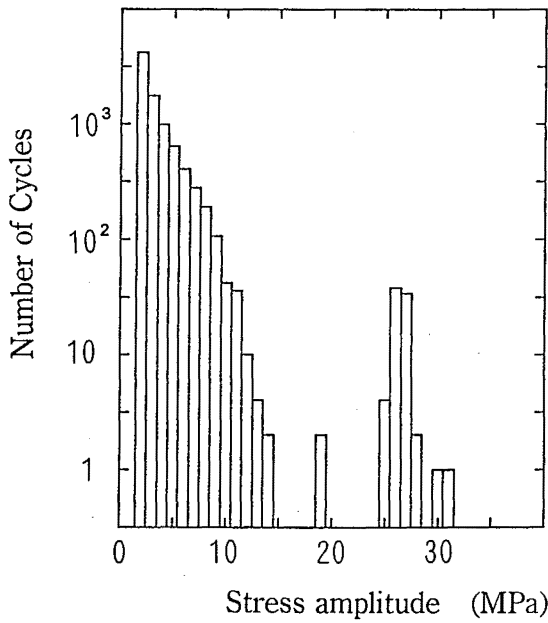


Fig.11 A stress spectrum of complex movements at gauge G.  
組み合わせ動作におけるスペクトル

この場合振動の周期  $T$  と、半周期における減衰率  $R$  は、

$$T = 4\pi m / \sqrt{4km - c^2}$$

$$R = \exp(\pi c / \sqrt{4km - c^2}) \quad (4)$$

である。

このような単調な減衰振動の時には、大きい方から  $i$  番目の振幅  $A_i$  は、

$$A_i = A_0(1+R)R^{i-1}$$

であり、これから

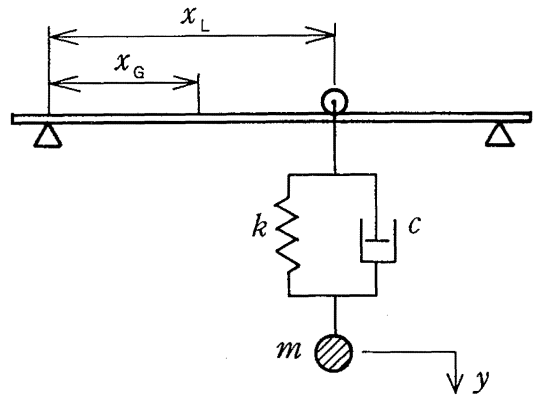


Fig.12 A model of the system composed of girder, trolley, rope and load.  
ガーダ、トロリ、ロープ、つり荷からなる系のモデル

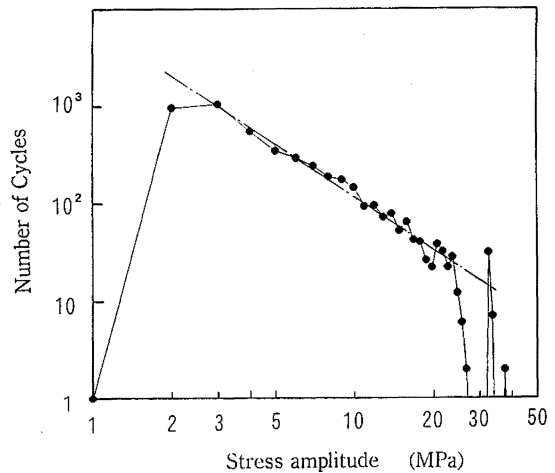


Fig.13 A stress spectrum of load lifting and lowering at gauge G.  
両対数グラフ上に表した、巻き上げ・下げのスペクトル

$$i = [\log A_i - \log A_0 - \log(1+R)] / \log R + 1$$

となる。これを、大きさが  $A_i$  以上の振幅の数を表すと解釈すると、振幅が  $A_n$  から  $A_n + \Delta A$  の範囲の振幅の個数  $C_n$  は

$$C_n = [\log(A_n + \Delta A) - \log A_n] / \log R \\ = \log(1 + \Delta A / A_n) / \log R$$

となる。 $\Delta A$  は  $A_n$  に比べて十分に小さいと考えられるので、上式は

$$C_n \doteq (\Delta A / A_n) / \log R \quad (5)$$

したがって、 $A_n$  と  $C_n$  をともに両対数グラフ上に表示すると、スペクトルは直線に乗る。

Fig.13 は、Fig.7 のデータを両対数目盛りのグラフで表示しなおしたものであるが、結果はよく直線上に乗っている。

このことから、荷重の巻き上げ・巻き下げによるスペクトルは、両対数目盛り上の直線分布で表現される振動の減衰部分と、最小応力と最大応力の差に相当する1組とを組み合わせたもので近似できることが分かる。荷重の大きさが異なる場合は、これらを荷重に比例した振幅とする。

### 3.2 横 行

横行においては、減衰振動はほとんど現れず、ガーダ上をトロリが移動することによる荷重点の変化に起因する応力変動が認められるのみである。したがって、横行による応力の変動は、影響線をもとに準静的な挙動だけをもとに推定できる。ただし、荷の振れを止めるためなどの理由により、目的とする位置を超えた範囲まで横行しから戻るといふことがありえるので、それによる応力の変動範囲の増加を見込まなくてはならない。

### 3.3 走 行

走行では、一部で細かな振動が見られる程度であり、応力変動はほとんど認められない。振動のレベルも小さいので、強度評価上は走行動作を無視してよい。

### 3.4 組合せ動作

組合せ動作の場合、荷の重量と、ガーダに対するつり上げ位置とつりおろし位置が与えられると、上記により、巻き上げ下げと横行だけを組み合わせると最大および最小応力が求められる。

なお、フックのみの空荷でトロリを移動する場合も、荷の重量をゼロとすれば同様に求めることができる。

## 4. 結 論

5tonf ぶりの天井クレーンを用いて応力とそのヒストグラムを測定した結果、各種の動作時に発生する応力の変動状況を明らかにすることができた。すなわち、(1) 荷重の巻き上げ・巻き下げでは、スペクトルが2つの部分に分かれ、応力振幅の大きい部分は1回ごとのつり上げに、応力振幅の小さい部分は荷の上げ下げ後の減衰振動に対応する。

(2) 横行動作ではヒストグラム中に減衰振動によるものはほとんどみられない。トロリ(荷)の移動による応力変動のみが出現する。

(3) 走行動作による発生応力は小さく、通常解析では無視してよい。

(4) 荷重の巻き上げよりも、巻き下げ後の停止時に、大きな衝撃応力が発生する。

また、単純な減衰振動が生じている場合には、応力スペクトルを両対数目盛りで表示すると、直線状に分布することが分かった。

### 参 考 文 献

- 1) 種田他：日立評論 50 周年論文集, p.32 (1968)
- 2) 種田他：機講論, No700-3, p.97 (1970)
- 3) 会田他：機械学会関西支部第 40 期総会講演前刷り, p.49 (1965)
- 4) 寺村他：大林組技術研究所所報 No.18 p34 (1979)
- 5) ISO/TC96/SC1 N299 General principles for fatigue assessment, Part 1: General (1991)
- 6) たとえば遠藤他：レインフロウ法の考え方とその応用, 日本造船学会誌 第 706 号 p.204 (1988)
- 7) 前田他：第 2 回機械・構造物の強度設計, 安全性評価シンポジウム前刷り, p.7 (1989)

(平成 8 年 3 月 20 日受理)