

天井クレーンのインチング、地切りおよび着地時における衝撃特性

寺村 彰 中川 恭次
渡辺 清治

Impacts of Overhead Cranes Caused by Inching, Taking off and Landing

Akira Teramura Kyoji Nakagawa
Seiji Watanabe

Abstract

The authors present a theoretical solution of the vertical components of impact accelerations and impact waves which arise from setting a crane in motion upward and downward (inching, etc.). As a result, impact acceleration can be calculated by the velocity of winding up and by the frequency of the weight suspended by the crane. Also, it has been indicated that impact waves can be clarified by the machine mechanism. Making investigations into impact accelerations of actual large-scale overhead travelling cranes and making dynamic analyses of factory structures will comprise an important research topic for economy and rationalization of structural design.

概 要

吊荷が上下方向に移動するインチング、地切り、着地操作において、クレーンガーダに生じる衝撃値の理論解を求め、衝撃波形の特徴を検討した。この結果、衝撃は吊荷の巻上げ、巻下げ速度とクレーン一吊荷に関する振動系の固有振動数により定まること、また、衝撃波はクレーンの巻上げ機構に関する機械的な面から明らかになることを示した。

本報は天井走行クレーンが工場建築に及ぼす衝撃荷重を実測値にもとずいて動的な衝撃波として把握し、経済的かつ合理的な設計に役立てるものである。

1. 序

大型の天井走行クレーンを有する工場建築の設計に当たっては、従来の静的衝撃係数法に加えて更に動的応答解析法による検討が有用である。しかし設計条件としての衝撃入力波に関する問題は建築分野と機械分野との中間に位置する問題であるために、両分野の要求を十分満足するための系統立てられた調査研究があまり行なわれていない。しかしこれらの問題点は少しでも浮きぼりにして解明の糸口を知る必要がある。

我々は今日まで幾つかの実天井走行クレーンで調査する一方、クレーン構造規格、機械学会などの研究報告の内容に関して建築分野への適用法を検討してきた結果、クレーンは走行、横行、巻上げおよび巻下げなどの動作に応じて性質の異なる衝撃を発生することが判明し、各動作に対応する衝撃特性を検討する必要性が必然的に生じた。

本報告では以上の各動作の中からまず、鉛直方向に衝

撃を発生する巻上げ、巻下げ動作に限定し、クレーンの操作上の区分名称からインチング、地切りおよび着地時に分けて述べるものである。尚インチングとは吊荷が床に近いところで少しづつ (by inches) 降下する状態を、地切りとは吊荷が床を離れる状態を、着地とは吊荷が床におりる状態をいう。

従来、天井クレーン建物の設計用衝撃値が、クレーンガーダに生じる値を使っていることに準じ、我々はクレーンガーダ自体に生じる鉛直方向の衝撃値を知ることを目的にする。

以上の様な観点から本報告はインチング、地切りおよび着地時に鉛直方向に生じるクレーンガーダの衝撃値と衝撃波に関して検討したものである。

2. 構成部材とその性状

鉛直方向の衝撃振動に関係する部材としては、クレーンガーダ、鋼索および台付ワイヤーなどがある。

2.1. 鋼索の性質

鋼索および台付ワイヤーは断面形状は図一1に示されるように複数の素線（鋼線）を寄り合わせた子づなを更に寄り合わせて作られる。伸びに関しては弾性範囲内で構造上の伸び（永久伸び）と弾性伸びとがある。

構造上の伸びは，使用の初期において，各素線が安定な位置に移動し，子づなも鋼索の心の方向へ進むために生じる構造上の変化に伴う伸びであり，重い荷重を繰り返し吊上げると初期の数日で伸びてしまうと言われる¹⁾。

弾性率は見かけ値 (E_r) として次式で定義されている。

$$見かけの弾性率(E_r) = \frac{(荷重) \times (使用長)}{(有効断面積) \times (伸び)}$$

例えば，天井走行クレーンでもしばしば用いられる鋼索構造 (JIS 13号, $6 \times Fi(1+7 \times 7 \times 14)$) の E_r は，真直な素線の弾性率を $1,900 \text{ t/cm}^2$ として計算¹⁾⁶⁾すると，子づなの弾性率は素線のねじれ角により低下して $1,200 \text{ t/cm}^2$ 程度になり，鋼索の E_r は更に低下して $700 \sim 1,000 \text{ t/cm}^2$ 程度になる。また，この見かけの弾性率 (E_r) は使用前と使用后とでは幾分異なるといわれ，実験例(1)によれば使用后 $5 \sim 10\%$ 増加する傾向である。

鋼索は弾性材として以上の様な性質を有する。

2.2. 静的たわみ実験

動的解析に関係して，鋼索，ガーダ等部材の変形性状を調べるために次の様な実験を実施した。

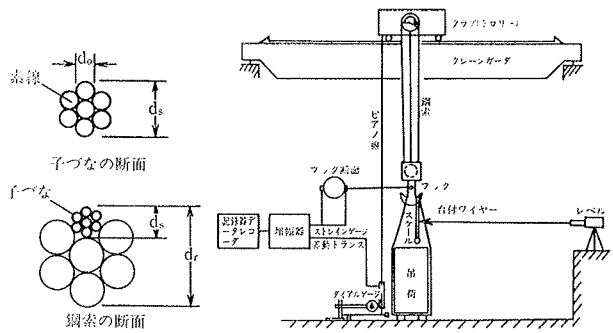
2.2.1. 実験法 150t クレーンの場合は図一2に実験要領を示すように巻込みドラムを少しづつ回転させて，また 20t クレーンの場合は数台のジャッキで吊荷を少しづつ下げて鋼索に張力を与え，その時々各部の移動量を測定した⁵⁾⁶⁾。クレーン機種の様子は表一1にまとめて示す。

2.2.2. 実験結果 図一3は 20t クレーンを用いて，ガーダ中央，フック，吊荷の3カ所の移動量（変位 δ ）を求め，鋼索張力 (P) との関係で整理した結果である。同図に示される様に台付ワイヤーの伸びが極めて大きいことが特徴である。150t クレーンの測定結果もほぼ同様に台付ワイヤーの伸びが大きく，ガーダのたわみの約4倍の伸びが観測された⁵⁾。また，上下振動の剛性を検討する上で，吊荷位置の荷重—変位関係が特に重要であろう。この調査結果は，図一4に示すように，鋼索レベルが異なっても除荷時の特性 ($dP/d\delta$) がほぼ等しい傾向を示す。

3. インテング衝撃

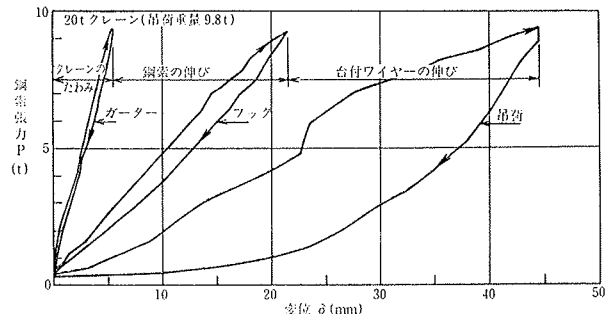
3.1. 実験結果

通常の巻下げ時の場合，吊荷は増速・定速・減速の過程を経るものである。一方，クレーンガーダなどの加速

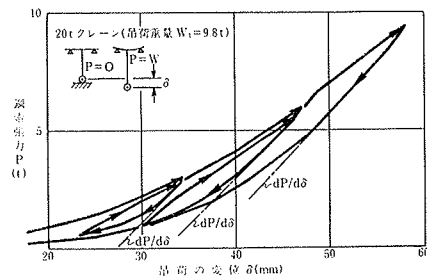


図一1 鋼索の断面形状図

図一2 静たわみ実験要領図



図一3 静たわみ実験結果



図一4 静たわみ実験結果(吊荷位置の荷重—変位関係)

仕様	クレーン機種			備	
	150tクレーン	20tクレーン	10tクレーン		
全長	33.00	17.65	8.38	1) 2x230tクレーン w ₁ = 450t	
主軸径	約20.00	18.49	12.00		
速度	主軸回転	0.2-5.6(5段階電速)	1.4	4.3	2) 255tクレーン w ₁ = 190t
	巻線回転	20.0	10.0	12.5	
	巻索回転	43.0	20.0	49.0	
クレーン構造	巻索巻取	2	2	2	
	最大巻取圧	t	54	6.6	
吊荷構造	巻索巻取	t	8	4	2
	最大巻取圧	t	55.0	9.2	
吊上装置	t			10.16	
断面2次モーメント	cm ⁴	1.25x10 ⁷	4.06x10 ⁷		
J I S 号		13	13	6	
径 (φ)	mm	31.5	16.0	17.5	
鋼種		6x F41(27)	6x F41(27)	6x F41(27)	
鋼本数		1本x16本	1本x8本	1本x4本	
断面積	mm ²	476	129	129	
J I S 号		4	6		
径 (φ)	mm	46	35		
鋼本数		6x24(27ノック)	6x37		
断面積	mm ²		129		
吊上装置	t	96.8(t)	9.8	0.9	

表一1 調査対象クレーンに関する仕様一覧表

度測定では図一5の 150t クレーンの測定例の様に(1)始動時の衝撃波，(2)制動時の衝撃波，(3)制動直後の自由振動波が観測され，特に(3)の自由振動波が顕著に表われる性質がある。

インテングは巻下げ時に比べて、吊荷の降下距離が更に短い場合であり、150t クレーンの例では図-6 の様になる。この波形を見ると、定速部分が省かれているだけで巻下げ時の波形に類似していることが判る。

以上の衝撃加速度測定波形は他のクレーンによる調査結果⁶⁾でもほぼ同様の傾向がある。他のクレーンの測定結果も含めて衝撃の特徴は次のようにまとめられる。

- (1) 衝撃加速度最大値は、制動時あるいは制動直後の自由振動波の初期に生じる。
- (2) 始動時直後に自由振動波形があらわれない。
- (3) インテングは通常繰り返えられるので衝撃値は、自由振動値に加算されて更に大きくなる場合が多い。

最大衝撃加速度の測定結果は150t, 20t クレーンに関して表-2に示す。吊荷位置はスパン中央である。

3.2. 衝撃値

表-2に示す衝撃加速度測定値を制御時に着目して解析すると次の通りである。インテング時の制動直前の速度をVとすると、吊荷の加速度(\ddot{Y}_1)とクレーンガーダの加速度(\ddot{Y}_2)とは次式で表わされる。

$$\ddot{Y}_1 = v \cdot \omega_1 \quad \dots\dots(1)$$

$$\ddot{Y}_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \ddot{Y}_1 = v \cdot \omega_1 \cdot \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 ω_1 は吊荷の固有円振動数、 m_1 は吊荷質量、 m_2 はガーダとクラブ(トロリー)を1質点系に置きかえたときの等価質量である。計算は速度vを巻き下げ速度として求め表-2に示すように測定値に対応している。

3.3. 衝撃波形

インテング時の衝撃は、鋼索巻込みドラムの駆動機構と密接に関係するはずである。そこで新たに、ドラムの起動に伴う発生機構からの衝撃波について検討を試みる。

クレーン		150t	20t
測定値	吊荷	5~14cm/s ²	15~30cm/s ²
	クレーンガーダ	3~5cm/s ²	7~20cm/s ²
計算値	吊荷	7.3 cm/s ²	56.0 cm/s ²
	クレーンガーダ	3.5 cm/s ²	21.0 cm/s ²

表-2 インテング時の衝撃加速度

図-7は巻下げ時の速度変化を示すもので、起動後仕様速度(v)に達するまでに、×印で示されるように数段階の速度制御が自動的に作動する状態を、また制動時の同様の状態を表わしている。同図の下段はこの速度変化を微分した加速度変化を示すものである。このような速度変化を想定すると、インテング時の速度・加速度変化は図-8の様になる。図-7、図-8は筆者らが実験結果などから類推し、仮定した模式図であるが、更に、建物の入力波として、図-9のように簡略化したものを設

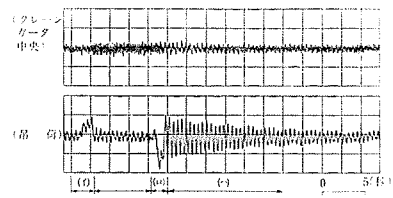


図-5 巻下げ時の衝撃加速度測定波形

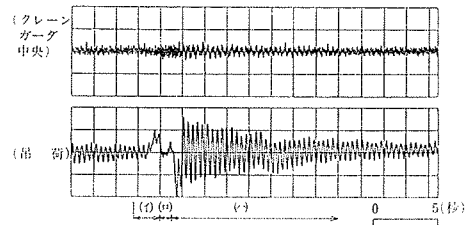


図-6 インテング時の衝撃加速度測定波形

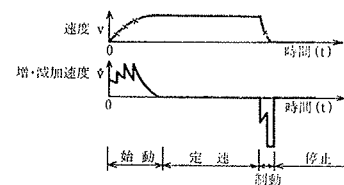


図-7 巻下げ時の速度・加速度変化

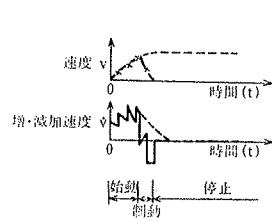


図-8 インテング時のドラムの速度・加速度変化

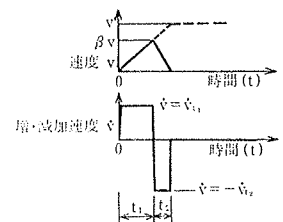


図-9 三角波及び矩形波で近似するインテング衝撃波

定することが可能であろう。

図-9に関しては、 t_1 は始動時の増速時間を、 t_2 は制動時の減速時間を表わし、最大到達速度を仕様速度(v)に達しない場合も含めて $\beta \cdot v$ ($\beta \leq 1.0$)で、また始動時の加速度を \dot{v}_{t1} で、減速時の加速度を $-\dot{v}_{t2}$ で表わしている。

実験結果から $t_1, t_2, \dot{v}_{t1}, \dot{v}_{t2}$ についてまとめると次の様な傾向がある。調査を実施した10t, 20t, 150t各クレーンでは、 t_1 は0.05秒から1.5秒の範囲で、 t_2 は0.1秒から0.8秒の範囲であり、 t_1 と t_2 とはおおよそ $t_1 \approx 2t_2$ の関係がある。また、 \dot{v}_{t1} は5cm/sec²から15cm/sec²の範囲であり、 \dot{v}_{t2} は20cm/sec²から30cm/sec²の範囲であり、 \dot{v}_{t1} と \dot{v}_{t2} とはおおよそ $\dot{v}_{t1} = -1/2 \dot{v}_{t2}$ の関係が見られる。以上の加速度値は吊荷位置の値であるが、他の研究論文³⁾の値(v_{t2} の最大値が50. cm/sec²程度)と比較しても、ほぼ納得できる範囲である。

3.4. 自由振動の固有周期

次に自由振動波形の周期について述べる。

台付ワイヤー、鋼索、クレーンガーダのばね定数を各々 k_D, k_s, k_2 とし、吊荷の質量、クレーンの等価質量を各々 m_1, m_2 とする。台付ワイヤーと鋼索とは質量の小さなフックを介して直列に結ばれているので、両者の平均ばね定数を k_1 として(3)式で表わしておく。

$$k_1 = \frac{k_D \times k_s}{k_D + k_s} \dots\dots\dots(3)$$

計算法 1. 厳密解を得るには吊荷 (m_1) とクレーン (m_2) に関する 2 質点系振動モデルの運動方程式から振動数方程式(4)式を導き、固有円振動数 (ω_1, ω_2) に関して解く。尚、実験値では 1 次 (ω_1) が卓越している。

$$\begin{vmatrix} -m_2\omega^2 + k_1 + k_2 & -k_1 \\ -k_1 & -m_1\omega^2 + k_1 \end{vmatrix} = 0. \dots\dots\dots(4)$$

計算法 2. 2.2. で示した各部の静的変位の測定結果では、台付ワイヤーの伸びが相対的に大きかった。この事柄は固有周期に関しても同様に台付ワイヤーのばね定数が支配的であることを示すものである。そこで固有周期 (T) は、吊荷重量を w_1 と(3)式の k_1 を用いて(5)式から近似解を得ることが出来る。

$$T = 0.2\sqrt{d_1} = 0.2\sqrt{\frac{w_1}{k_1}} \dots\dots\dots(5)$$

(5)式の計算値と測定値とを比較すると計算値の方が 5%~10%程度短周期側になる傾向があるが、十分、実用的である。

計算法 3. 我々が固有周期を実際に求めようとするとき、クレーン及び鋼索に関しては仕様が判るが、台付ワイヤーは設計初期に仕様が判らず、ばね定数 (k_D) が決まらないために、上記の計算法 1, 2 が使えない場合が生じる。更に、台付ワイヤーは一般に玉掛管理者が吊荷重に応じて使い分けるので k_D が定まりにくい。

このような場合、次の(6)式での鋼索長さ(L)にクレーンの仕様書に示される「揚程」を用いれば、台付ワイヤーを含んだ伸び量に近いことが結果的に示され、かつ実情とよく合致する。

$$d_1 = \frac{W_1 \cdot L}{A \cdot E_r} \dots\dots\dots(6)$$

$$d_2 = \frac{(W_2 + W_1)}{48EI_x} \cdot l^3 \cdot \left(\frac{3x}{l} - \frac{4x^3}{l^3} \right) \dots\dots\dots(7)$$

として固有周期(T)は(8)式から得る。

$$T = 0.2 \times \sqrt{d_1 + d_2} \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 d_1 は鋼索の伸び、 E_r は鋼索の見かけの弾性率、 A は有効断面積、 w_1 は吊荷重量、 L はクレーン仕様

に示される揚程とする。また d_2 はクレーンの鉛直たわみ、 w_2 はクレーンの等価重量、 l はスパン、 x はスパンに対する荷重点の座標である。 d_2 に関しては材料力学の公式に基づいて計算されるものとする。

例として吊荷がスパン中央かつ床に十分近い位置にあるという条件下で実験・測定した値と、(8)式による計算値との比較を表-3 に示す。

クレーン機種		460t	150t	20t
測定値	ガーダたわみ	15mm	9mm	2mm
	鋼索 + 台付伸び	33mm	42mm	16mm
	周期	0.43sec	0.43sec	0.28sec
計算値	ガーダたわみ(d_2)	20mm	14mm	6mm
	鋼索伸び(d_1)	31mm	38mm	16mm
	周期(T)	0.45sec	0.46sec	0.30sec

表-3 固有周期等に関する測定値と計算値 ((8)式) との比較例

以上の自由振動は図-9 に示す衝撃波の直後に生じるものであり、設計上、建物と共振する可能性を検討する場合とか、インテングが数秒の時間間隔で繰り返えされて自由振動と衝撃波とが重なり合ってくる際の衝撃加速度の大きさを検討する場合などに考慮されるものである。尚、この自由振動波の対数減衰定数 ($h=C/C_c$) は数%以下で極めて小さい。

4. 地切り衝撃

鋼索が完全に緩んだ状態から定速(v)で巻上げていくと、図-10に示すように鋼索の伸びは順次増加し、鋼索張力が吊荷に等しくなる時刻 ($t=t_1$) に吊荷は地切りする。地切り後、鋼索は静的伸びを中立軸にして、また、吊荷は $v(t-t_1)$ を中立軸にして振動が始まる。吊荷の衝撃は、吊荷が時刻 $t=t_1$ で初速(v)を受けると仮定する

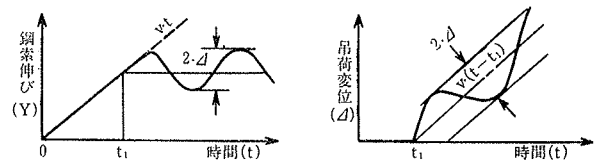


図-10 地切り時の鋼索の伸びと吊荷の変位

と、吊荷の固有円振動数 (ω_1) より動的変位 (Y_1) が v/ω_1 であらわされる。この吊荷の変位 (Y_1) は、ばね定数 (k_1) の鋼索に張力変化 ($T=k_1 \cdot Y_1$) を与える。一方、クレーンガーダには、この鋼索の張力変化 (T) を外力にして動的変位 ($Y_2=T/k_2$) が生じる。

以上より、従来の衝撃値 (γ) がガーダの静たわみ (w_1/k_2) 及びこれに対応する動たわみ (Y_2) をもとにして(9)式で示される。

$$r = \frac{Y_2}{(w_1/k_2)} = \frac{v}{w_1 \cdot \omega_1} \quad \dots\dots(9)$$

またガーダに生じる衝撃加速度 (\ddot{Y}_2) は動の変位に固有振動数(ω_2)を掛けて(10)式として示される。

$$\ddot{Y}_2 = \omega^2 Y_2 = \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{\omega^2}{\omega_1} \cdot v \quad \dots\dots(10)$$

表-4に150tクレーンの地切り実験に関する測定値と計算値とを示す⁶⁾。

	$v=0.3\text{m/min}$		$v=5.0\text{m/min}$	
	吊荷	クレーン	吊荷	クレーン
測定値	15~35	10~15	130	32
計算値	11	3	183	49

表-4 150tクレーンの地切り衝撃加速度(cm/sec²)

5. 着地衝撃

吊荷が床上の盤木(尺角等のクッション材)に着地する場合、クレーンはその巻下げ速度により大きな衝撃を受けることがある。ここでは吊荷の着地時の状態を図-11の様に吊荷が盤木に接してのち、盤木のばね定数(k_3)により振動を始める、と仮定してクレーンの衝撃値を求める方法について述べる。

鋼索の動的な伸び変化($Y(t)$)は時間の原点を着地時として図-12より次式で表わす。

$$t=0 \text{にて, } Y(t) = w_1/k_1$$

$$t=t_1 \text{にて, } Y(t) = Y(t_0) - \{v \cdot t - d_1 e^{-h_3 \omega_3 t} \sin(\omega_3 t)\}$$

ここに $\omega_3 = \sqrt{k_3 \cdot g/w_1}$, $d_1 = v/\omega_3$, v は着地速度, h_3 は盤木の減衰定数で、実験的に得るかあるいは、吊荷と盤木の反撥係数より d_1, d_2, \dots を求め、近似的に振幅減少率 ($e^{-h_3 \omega_3 t}$) に置き変えて得ることも出来る。クレーンに作用する衝撃はこの鋼索の伸び変化($Y(t)$)に伴う張力変化 ($T = k_1 \cdot Y(t)$) であり、クレーンに発生する衝撃加速度 (\ddot{Y}_2) はクレーンを1質点系振動モデルに置き変えて鋼索張力変化(T)を外力とする(11)式の方程式を解いて得られる。

150tクレーンの実験結果では、巻下げ速度(v)が0.3m/minの場合4.~6. cm/sec²(計算値6.0cm/sec²)5.0m/minの場合、30.~50. cm/sec²(同計算値61. cm/sec²)であった⁵⁾。

この着地時の衝撃値に関する特徴は巻下げ速度が遅い場合に鋼索張力が零になる以前に最大値を生じ、巻下げ速度が速い場合に鋼索張力が零になってのちに最大値が生じるという時間的相異がある点である。また盤木はクッション材として衝撃値を若干低下させる効果がある。

$$\ddot{Y}_2 + 2h_2 \omega_2 \dot{Y}_2 + \omega_2^2 Y_2 = -a(t) \quad \dots\dots(11)$$

ここに $a(t) = \frac{1}{m_2} \cdot T(t) = \frac{k_1}{m_2} \cdot Y(t)$

$$\omega_2^2 = k_2/m_2$$

k_2, m_2, h_2 はクレーンガーダに関する定数である。

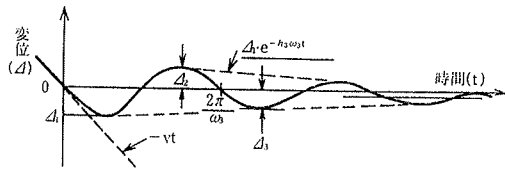


図-11 着地時の吊荷の変位

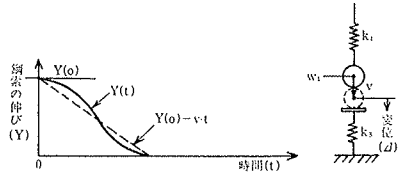


図-12 着地時の鋼索の伸び変化

6. まとめ

インテング、地切り及び着地は、建物が鉛直衝撃を受ける代表的なクレーンの動作である。本報告では、この3種の動作に伴ない発生するクレーンガーダの衝撃加速度について実測値と対比しながら解析法を述べた。この衝撃加速度は天井クレーンを有する工場建築の動的解析法を検討する資料になり、また、従来の静的衝撃係数を見直すための資料にもなる。尚、静的衝撃係数(r)と加速度(\ddot{Y})との間にはおおよそ $r = \ddot{Y}/980$ の関係がある。

最後に本研究の遂行に際し、本店設計第三部樋口元一部長、横井元昭次長、竹内美智雄課長、小管与三課長橋本健職員、本店建築営業部西村司次長を始め多くの方方から御指導を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 西岡多三郎: 鋼索の製造, 誠文堂新光社
- 2) 松川, 他: クレーン設計の進歩, 日本機械学会誌, Vol. 76, No. 649, (昭和48.1)
- 3) 木原: ふ頭クレーンの巻上げ運動時の衝撃値, 日本機械学会誌, Vol. 65, No. 518, (昭和37.3)
- 4) 大西: ダブルリンク型水平引込クレーンの衝撃値, 日本機械学会誌, Vol. 58, No. 437, (昭和30.6)
- 5) 渡辺, 寺村: 150t/40t 天井走行クレーンの振動実験, 大林組技術研究所報告書, (昭和53.4)
- 6) 渡辺, 寺村: インテング時にクレーンに生じる衝撃力について, 大林組技術研究所報告書, (昭和53.7)
- 7) 中川, 渡辺, 寺村, 金子: 大型クレーンの衝撃加速度とレスポンススペクトラムについて, 大林組技術研究所報, No. 12, (1976)
- 8) 渡辺, 寺村: 大型工場建築建家の振動解析, 大林組技術研究所報, No. 6, (1972)