エレベータのロープ張力点検装置の開発*

山崎 芳昭^{*1}, 富沢 正雄^{*1}
板倉 弘樹^{*2}, 徳井 一雄^{*2}Developing a Device for Measuring and Regulating
the Rope Tension of ElevatorsYoshiaki YAMAZAKI, Masao TOMISAWA,
Hiroki ITAKURA and Kazuo TOKUI

We describes a tension measurement and regulation method for an elevator rope. The rope tension imbalance causes the rope life to be shortened and the sheave groove to become worn in the early stage, and the elevator car riding comfort is decreased. Usually, rope tension measurement is done manually and regulation is carried out by trial and error based on experience. These procedures require much manual labor and corresponding time. Thus, we have developed a rope tension estimation algorithm based on the reciprocating time of the rope acceleration wave generated by hand excitation. Second, we have formulated the relationship between the tension adjustment value and the rope vibration wave reciprocating time. The results of our experiments indicate that the proposed method is able to adjust the tension easily and the accuracy is sufficient for even super high-speed elevators. Lastly, we developed a device for measuring and regulating rope tension. The device is small enough to be carried by hand.

Key Words: Elevator, Vibration of Continuous System, Information Processing and Signal Analysis, Measurement and Control, Spectrum Analysis, Rope Tension

1. はじめに

エレベータでは、搭載荷重、昇降行程、速度などに応じて3～9本のワイヤロープが用いられるが、これらの張力にアンバランスがあると、ロープ素線の磨耗・破断、スランド切れあるいはより戻り等、ロープ寿命に悪影響を及ぼす。また、高速エレベータではシープ溝の早期磨耗による振動を抑制するためにも張力管理が重要である^{(1)～(3)}。

ロープの張力アンバランスを調整するため、定期的に張力を点検するが、現状の張力測定はすべて人手に頼っているため、試行錯誤による多大な労力と時間を要している。張力点検の効率化と高精度化を図るには、ロープ張力が容易に測定でき、調整量が求まる点検装置の開発が望まれている。

これまでに、振動を利用したつり橋のロープ張力の測定例はあるが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、エレベータのロープ張力測定と調整に関する検討はないようである。本研究では、ロープ打撃加振による張力測定法を検討するとともに張

力調整法を明らかにし、小形の点検装置を開発したので報告する。

2. ロープ振動波計測法の検討

2・1 ロープ打撃加振による従来の張力測定法

現在用いられているロープ張力測定法は、図1に示すようにロープを手で加振して振動を計測する手法である。ロープを手でつかみ適正な力を加え、手を離すことで振動波を発生させる。これにより生じた横波振動の伝わる往復時間をロープに手を添えてストップウォッチで計測する。

i 番めのロープを振動が往復する時間 t_i は、張力 T_i ($i=1, \dots, n$) がロープ位置によらず一定であることを前提とすれば、ロープ単位長さあたりの質量 σ 、長さ l から次式で求まる。

$$t_i = 2l \sqrt{\frac{\sigma}{T_i}}, \quad i=1, \dots, n \quad \dots\dots\dots (1)$$

n 本のロープの往復時間を測定し、この最大値と最小値から次式の α を求め、張力のばらつきの指標としていた。

$$\alpha = \frac{\text{最大往復時間} - \text{最小往復時間}}{\text{最小往復時間}} \times 100 \quad \% \quad \dots\dots\dots (2)$$

* 原稿受付 1996年12月27日。

^{*1} 正員、三菱電機(株)先端技術総合研究所(〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)。^{*2} 三菱電機ビルテクノサービス(株)サービス技術本部(〒116 東京都荒川区荒川7-19-1)。

Fig. 1 Configuration of rope tension test by hand excitation

なお、従来は α が既定値以下になるように図 1 の張力調整用のシャックルばね部を調整していた。張力調整する必要があるのは、かご側とカウンタウエイト側の両方のロープである。

2.2 ロープ打撃加振測定実験によるデータ処理法の検討 加速度センサをロープに取付け、2チャンネルFFTでロープ打撃加振したときの振動波形を分析した。エレベータの昇降階数は60階、測定はその中間階のかご上で行った。加振点とほぼ同じかご側ロープの振動波形の一例を図2に示す。また、加速度をカットオフ時間 $T_1=0.16$ sの一次遅れ要素 $G(S)$ で積分した速度と変位の推定波形も併せて並記した。

$$G(S) = \frac{T_1}{T_1 S + 1} \quad \dots\dots\dots (3)$$

加振するとピークの鋭いインパルス的過渡振動が繰返し往復することがわかる。この様相は加速度波形を積分し、速度さらに変位波形を推定することでより明瞭になる。

加速度と変位波形の正側と負側のピーク値間隔を読みとりこれをまとめて図2(d)に示した。加速度、変位波形のピーク間隔はほぼ同じで、加振直後の1波と2波の時間が約2.58秒、3波以降は2.55秒に漸近する。振動波形でみると、加速度よりも変位のほうが明瞭であるが、3波以降のピーク値間隔の有意差は

Fig. 2 Example of rope vel. and disp. estimated by integration of field test acc. data and these peak period (Car side main rope vibration measured at 30th floor)

加速度と変位でないようである。

次にカウンタウエイト側の実験結果について述べる。かご上へ乗り、45階でカウンタウエイト側のロープを加振して得られた加振点近傍の加速度波形を図3に示す。ロープ端部を加振するかご上の場合と異なり、ロープの腹部を加振するため、図2とは異なった波形が得られている。加速度、変位ともに正側のピーク値間隔は読みとれないため、負側のピーク値間隔を図3(d)にまとめた。加速度では0.08秒程度の間隔のばらつきがあるが、加速度波形を積分して推定した変位波形の計測精度は高くなっている。

図2, 3の加速度波形のピーク値間隔を精度よく求めるには、自己相関関数⁽⁶⁾を求めるのが適切と考えられるので、この結果を図4に示す。

図4(a)の自己相関関数が正側に最大になる点は2.55 sである。図4(b)でも正側に最大をとる点が3.65 sであることがよくわかる。

推定精度と演算時間を取上げ、データ処理法のトレードオフ結果を表1に示す。

推定精度の面でいえば、変位波形あるいは自己相関を求めるのが適正と考えられる。しかし、ロープ張力点検装置はエレベータの上で利用するので、作業性の

Fig. 3 Example of rope vel. and disp. estimated by integration of field test acc. data and these peak period (CWT side main rope vibration measured at 45th floor)

Fig. 4 Example of auto correlation calculated by field test acc. data

ため軽量・コンパクトが要求される。このため、利用CPUとしては8086程度に限定され、CPUへの負荷が小さいことが必要である。この計算時間と推定精度の両者を考えると、加速度波形を基本とした検出アルゴリズムを採用するのが適正と判断できる。

2・3 ピーク値検出法のアルゴリズム 考案したアルゴリズムのフローチャートを図5に、この処理過程を図6に示す。まず、DC成分のオフセッ

Table 1 Comparison of analysis method of rope tension estimation

No.	Analysis method	Estimate accuracy	Calculation time	Total
1	Acc. + peak search	○	◎	◎
2	Estimated pos. + peak search	◎	△	○
3	Auto correlation	◎	×	△

Fig. 5 Flow chart of acceleration data peak search algorithm

トを除去する。最大値検索を行い、最大ピーク値の零クロス部分でのパルス幅 pkw を求める。最大ピークの発生後、 pkw の6倍以上の時間で最大ピークの振幅 $maxd$ の1/3以上の範囲に入る最初のポイントを検索する。このポイントと最大ピーク値の時間幅をおおよそのピーク間隔 $estm$ とする。最大ピーク時間から $estm$ の0.2~1.8倍の範囲の最大値を詳細に検索して2番めのピーク値を求める。次いで、3番めのピーク値を同じアルゴリズムで検索する。このピーク値の間隔 t_{p1} , t_{p2} の差が4%以内であれば平均値を周期 t_1 とする。

4%以上の差がある場合は最大値と反対側のデータについて同様に検索する。しかし、ピーク値の間隔の差が4%以内とならない場合は、ロープを2度加振したなどの不適切なデータと判断してこれを表示する。

このアルゴリズムを用いて、3機種のエレベータについて測定した40ケースのデータを、自己相関関数による推定値を真値と仮定し、加速度ピーク値検出に

Fig. 6 Summary of proposed peak search algorithm

Fig. 7 Histogram of estimated error by peak search method

よる値との誤差を求め、これを図7に示す。40 ケース中の37 ケースが誤差 $-1.5 \sim +1.5\%$ の範囲に収まっている。誤差 7.5% 以上の2 ケースは、加速度波形のピーク値間隔が不均等でロープ加振が不適切と判断できた。このため、再度加振し直すと良好な結果が得られた。

3. ロープ張力調整法の検討

3.1 シャックルばね部調整法の検討 n 本すべてのロープの張力調整を行えば、すべてのロープ張力 T_i を均一にできることは明らかである。しかし、調整作業はかなりの手間と時間を要するため、より少ない本数で調整する手法を検討する。

n 本のロープにつられたかごモデルを図8(a)、張力調整機構部を図8(b)に示す。この記号を用いて力の釣合い式を導く。

ばね定数 k はロープのヤング率 E 、断面積 A 、長さ l およびシャックルばね定数 k_s から次のようになる。

$$k = \frac{k_r k_s}{k_r + k_s}, \quad k_r = \frac{EA}{l} \quad \dots \dots \dots (4)$$

各ロープの長さのばらつきを x_i ($i=1, \dots, n$) とし、かご等の自重によるかごの変位量を x_0 とする。また、 n 本のロープ張力の和はかご質量 m_c の自重に等しい。各ロープの張力 T_i とこれらの値の関係は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= k(x_0 - x_1) \\ &\vdots \\ T_n &= k(x_0 - x_n) \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots (5)$$

Fig. 8 Configuration model of shackle spring regulation value and rope tension

$$\sum_{i=1}^n T_i = mcg$$

上式だけではかご位置 x_0 が定まらないので, x_i の和を零として x_0 を求めると次のようになる.

$$\sum_{i=1}^n x_i = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$x_0 = \frac{mcg}{nk} = \frac{1}{k} \bar{T} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで, $\bar{T}$ はロープの平均張力値である. 式(7)を式(5)に代入し, 式(1)の T_i と振動波往復時間 t_i の関係を用いると x_i は次のようになる.

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{1}{k} (\bar{T} - T_i) \\ &= \frac{(2l)^2 \sigma}{k} \left\{ \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{t_j^2} \right) - \frac{1}{t_i^2} \right\}, \quad i=1, \dots, n \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

l, σ, k の定数値を与え, n 本すべての t_i を測定することで x_i が求まる.

図8(b)に示したシャックルばね部のナットを Δx_i 動かしてロープ張力を調整する. Δx_i と張力調整後の張力 T'_i の関係は次のようになる.

$$\begin{aligned} T'_i &= k(x'_0 - x_i + \Delta x_i) \\ &\vdots \\ T'_n &= k(x'_0 - x_n + \Delta x_n) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\sum_{i=1}^n T'_i = mcg$$

上式より x'_0 を消去して T'_i と $x_i, \Delta x_i$ の関係を求めると次のようになる.

$$\begin{aligned} T'_i &= \bar{T} - k(x_i - \Delta x_i) + \frac{k}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \Delta x_j), \\ i &= 1, \dots, n \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10)$$

すべての Δx_i を式(8)の x_i に等しくすれば, すべてのロープ張力 T'_i を平均張力値 $\bar{T}$ にできることが式(10)よりわかる.

次に, $(n-p)$ 本で張力調整を行うときの調整手順

は次のようにする.

(1) $|x_i|$ が小さい順に p 本のロープ調整量を零とする. ここで, i は $|x_i|$ が小さい順番とする.

$$\Delta x_i = 0, \quad i=1, \dots, p \quad \dots\dots\dots (11)$$

(2) 上記以外の $(n-p)$ 本のロープ調整量を次のように与える.

$$\Delta x_i = x_i - \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p x_j, \quad i=p+1, \dots, n \quad \dots\dots\dots (12)$$

以上の調整量を与えることで, 調整後の張力は次のようになる.

$$\begin{aligned} T'_i &= \bar{T} - k \left(x_i - \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p x_j \right), \quad i=1, \dots, p \\ &= \bar{T}, \quad i=p+1, \dots, n \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (13)$$

上式より, 調整したロープは平均張力値 $\bar{T}$ となることがわかる.

上述の調整法の妥当性を t_i の実測値を用いて検討する. エレベータの定数値を与えて式(8)より x_i を求める. さらに調整本数をパラメータとして式(2.)の α との関係を計算して図9に示す. 図中の No.1 はロープ本数9本のエレベータのかご側ロープ, No.2とNo.3はロープ本数8本のエレベータのかご側とCWT側の振動波往復時間のデータを用いている.

3ケースとも調整本数を増すと次第に α が小さくなり, 全ロープ本数より1本少ない調整本数で α が零となる. また, この図の関係から, 目標値の α を与えることで調整本数がわかる.

目標値の α を与えると, 各ロープの調整量 Δx_i は式(11), (12)で与えられる.

3.2 実験による検証 69階用の高揚程エレベータを用いて張力調整実験を行った. 最下階でかご側ロープ9本の t_i を測定して α および x_i を求めた. 次

Fig. 9 Example of α value regulated by rope number

Table 2 Example of rope tension regulating simulation and field test result

Rope No.	Before regulation wave time t_i s	Rope regulation length mm		After regulation wave time t'_i s	
		x_i	Δx_i	Analysis	Experiment
#1	4.121	-12.0	0.0	4.197	4.288
#2	4.551	41.6	52.2	4.207	4.306
#3	4.521	38.4	49.0	4.207	4.234
#4	3.853	-54.9	-44.3	4.207	4.268
#5	4.058	-21.4	0.0	4.130	4.200
#6	4.429	27.9	38.5	4.207	4.218
#7	4.058	-21.4	0.0	4.130	4.102
#8	4.155	-7.1	0.0	4.233	4.214
#9	4.272	8.7	0.0	4.357	4.268
α %	18.1	-	(Cond. $\alpha \leq 6.0$)	5.5	5.0

Fig. 10 Example of rope tension regulating field test

に、 $\alpha \leq 6.0\%$ の調整目標を設定し、調整本数と調整量 Δx_i を求めて、かごのシャックルばね部の張力調整を行った。調整後の振動波往復時間 t_i を測定し、計算値と比較した結果を表2に示す。

張力調整前後の振動波往復時間の関係を図10に示す。なお、張力調整したロープには矢印をつけている。

表2より、張力調整前の $\alpha=18.1\%$ の状態が4本の調整で5.5%にできること、図10より、ロープ番号2, 3, 4, 6の調整により張力のばらつきが全体的に均一化できることがわかる。また、実験値と解析値はよく一致している。他のエレベータでも同様の実験を行い、 $\pm 2\%$ 以内の誤差まで調整できることを確認した。

以上の検討結果を基に開発したロープ張力調整装置と測定状況を図11に示す。エレベータの制御盤の点検作業時に携行するメンテナンスコンピュータをホストコンピュータに用いた。ロープに取付けた加速度センサ信号をロープ張力調整インタフェースを通してメンテナンスコンピュータに取込み、振動波往復時間 t_i を計算する。調整目標値 α を入力しシャックルばね部の調整量 Δx_i をミリ単位でメンテナンスコンピュータに表示する。

メンテナンスコンピュータの寸法は204×108×30 mm、重量は550 g、ロープ張力調整インタフェース部

Fig. 11 Example of rope tension measuring field test

は85×140×40 mm、360 gと小形軽量である。

4. ま と め

エレベータのロープ張力測定法と張力調整法を検討し、以下の結論を得た。

(1) ロープ加振により生じる加速度波形を基本とした振動波の往復時間検出アルゴリズムを開発し、判定誤差 $\pm 1.5\%$ 以内で測定できることを実験で確認した。

(2) 測定したロープの振動波往復時間から、シャックルばね部調整量を求める方法を明らかにするとともに、実験で高い張力調整精度が得られることを確認した。

(3) 小形のロープ張力点検装置を開発し、十分実用化できることを確認した。

文 献

- (1) 渡辺英紀・ほか4名, 三菱電機技報, **67-7** (1993), 689-693.
- (2) 重田政之・ほか3名, 日立評論, **75-7** (1993), 437-442.
- (3) 本田武信・ほか3名, 三菱電機技報, **61-11** (1987), 869-872.
- (4) Takahashi, M., ほか4名, *IHI Eng. Rev. (English Edition)*, **16-1** (1983), 1-6.
- (5) Shinke, T., ほか2名, *Proc. Jpn. Soc. Civil Eng.*, **294**-Feb. (1980), 25-32.
- (6) 日野幹雄, スペクトル解析, (1981), 25-39, 朝倉書店.