超高層用エレベータにおけるロープ、キャブ系の横振動*

曄 道 佳 明^{*1}, 吉 沢 正 紹^{*2}
富 川 洋 二^{*3}, 辻 岡 康^{*2}

Lateral Oscillation of a Moving Elevator Rope and Cab
in High-Rise Building

Yoshiaki TERUMICHI, Masatsugu YOSHIZAWA,
Youji FUKAWA and Yasushi TSUJIOKA

In this paper, it is examined the lateral oscillation of the moving elevator rope and cab, using the method of characteristics. We consider forced oscillation of the system composed of a rope with time-varying length and a mass-spring system at a lower end. When the upper end of the rope is excited sinusoidally, the elevator in a high-rise building passes through plural resonance points. First, we show that the rate of the cab's guide spring influences the resonance amplitude. When the natural frequency of the lateral oscillation of a cab is equal to the frequency of excitation, the amplitude of the cab has a maximum value. Next, it is examined whether the sign of the moving velocity influences the amplitude of the lateral oscillation of the cab at a resonance point. Furthermore, it is examined its oscillation mode jumps many times in the going up or down process, because the natural frequency changes in a wide range. These are closely related to the transition of the natural frequency of the system.

Key Words: Oscillation of Continuous System, Transient Response, Coupled Oscillation, Mode Jumping, Nonstationary Lateral Oscillation of Rope, Passage through Resonance, Elevator

1. 結 論

従来より、エレベータの乗り心地の改善、建築物への振動伝ばの低減などを目的として、キャブの振動解析が行われてきた^{(1)~(3)}。しかし、近年の高性能が要求される超高層用エレベータ⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾においては、新たに昇降速度⁽⁶⁾、高揚程化の影響を考慮した解析が必要である。特にエレベータが高揚程化されると、ロープの自重が大きくなり、その下端のキャブが横方向に大きく揺さぶられるという指摘がなされている⁽²⁾。

そこで本研究では、ロープおよびキャブの横振動について、昇降時の過渡応答を考える。キャブの横振動に着目するとき、キャブの共振点通過時の振幅や、キャブを励振するロープの振動モードについての議論は興味深い。この系では、系の固有振動数が広範囲に変化するために、共振点通過現象が頻繁に発生し、また、モード・ジャンピング⁽⁷⁾も、過渡応答であることから固有振動成分の影響を受けることが予測され、定常応

答からの推察が困難となるからである。

これまでに、ロープとキャブから成る連成振動問題に対する数値シミュレーション⁽²⁾⁽³⁾、また、長さに変化する弦に関する解析的研究^{(8)~(10)}が報告されているが、共振点通過時のキャブの振幅、系の振動モードを支配する要因に対しての物理的な議論は、目下のところ十分には行われていない。

本報ではまず、解析的に求められたロープの長さに対する系の固有振動数変化について、その特徴を検討する。このとき、高揚程のためロープの自重の考慮も必要となる。

そして、共振点通過時のキャブの振幅を支配する要因として、主にキャブの横方向のばねこわさの設定や、昇降速度の正負を考え、これらをパラメータとして特性曲線法によるいくつかの過渡応答の数値例を示し、この結果を前述の系の固有振動数変化から物理的に考察する。

また、模型実験装置を作製し、その実験結果より理論解析結果の妥当性を確認した。

2. 解析モデルと基礎方程式および解法

本報では、ロープとキャブの連成振動系として図1に示す解析モデルを考える。ロープおよびキャブの横

* 原稿受付 平成4年8月20日。

^{*1} 正員、慶応義塾大学大学院(〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

^{*2} 正員、慶応義塾大学理工学部。

^{*3} 日本オーチス・エレベータ(株)(〒213 川崎市高津区坂戸3-2-1)。

振動は同一平面内に限定されるものとし、静的平衡状態におけるロープ上端を原点とする直交座標系 XY 、ロープに沿った座標 s を考える。ロープは弦とみなせるものとし、線密度 ρ は全長にわたり一定で、粘性減衰係数を c_w とする。質量 m のキャブは横方向にばね定数 k_η 、粘性減衰係数 c_η のローラガイド部で支持され、ロープ下端とばね定数 k_ζ 、粘性減衰係数 c_ζ のばね系を介して上下方向に連結される。そしてエレベータ昇降時 [ロープの長さ $L(t)$ 、昇降速度 $V(t)$ 、加速区間の昇降加速度 $A(t) = A_m \{1 + \sin(\Lambda t - \pi/2)\}$] に、ロープ上端が周期的に振幅 a 、振動数 N で Y 軸方向に加振されるものとし、ロープの横たわみ $w(s, t)$ 、キャブの横方向変位 $w(l, t)$ 、キャブの上下方向変位 $\zeta(t)$ を求める。

このとき系の無次元化された基礎方程式は、ロープ上端の加振振幅 a とロープの最大長 $L_{\max}$ との比 $\alpha = a/L_{\max}$ を無次元の微小量として、 α^2 のオーダーを無視すれば以下のように表される。

$$\frac{D^2 w}{Dt^2} + 2\gamma_w \frac{Dw}{Dt} - \left(\mu - \frac{d^2 l}{dt^2} \right) \frac{\partial}{\partial s} \left[(l-s) \frac{\partial w}{\partial s} \right] - \left[1 - \frac{1}{\mu} \left\{ \frac{d^2 l}{dt^2} - \alpha \left(\omega_\zeta^2 \zeta + 2\gamma_\zeta \frac{d\zeta}{dt} \right) \right\} \right] \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{d^2 \zeta}{dt^2} + 2\gamma_\zeta \frac{d\zeta}{dt} + \omega_\zeta^2 \zeta = \frac{d^2}{dt^2} \left\{ -\frac{l}{\alpha} + \frac{\alpha}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial w}{\partial s} \right)^2 ds \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

境界条件

$$w(0, t) = \sin \nu t \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{D^2 w}{Dt^2}(l, t) + 2\gamma_\eta \frac{Dw}{Dt}(l, t) + \omega_\eta^2 w(l, t) \\ &= - \left[\mu - \frac{d^2 l}{dt^2} + \alpha \left(\omega_\zeta^2 \zeta + 2\gamma_\zeta \frac{d\zeta}{dt} \right) \right] \frac{\partial w}{\partial s}(l, t) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

図 1 解析モデル

初期条件

$$w(s, 0) = \frac{\partial w}{\partial t}(s, 0) = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\zeta(0) = \frac{d\zeta}{dt}(0) = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $l = l(t)$,

$$\text{また、} \frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial s}$$

ロープの長さ $l(t)$ は前述の加速度より与えられる。

ここで、時間の代表値としてロープの最大長 $L_{\max}$ における波の伝ば時間 T 、長さの代表値としてロープ上端の加振振幅 a およびロープの最大長を選び、時間 t は T 、ロープの横たわみ w 、キャブの上下方向変位 ζ は a 、ロープの長さ l および s は $L_{\max}$ でそれぞれ無次元化されている。無次元パラメータは、 $T = L_{\max} \sqrt{\rho/mg}$ として以下のとおりである。

$$\alpha = \frac{a}{L_{\max}}, \mu = \frac{\rho L_{\max}}{m}, \nu = NT$$

$$\omega_\eta^2 = \frac{k_\eta}{m} T^2, \omega_\zeta^2 = \frac{k_\zeta}{m} T^2, v = \frac{VT}{L_{\max}}$$

$$\gamma_w = \frac{c_w}{2\rho} T, \gamma_\eta = \frac{c_\eta}{2m} T, \gamma_\zeta = \frac{c_\zeta}{2m} T$$

基礎方程式 (1) の左辺第 3 項はロープの自重により、ロープ各点に作用する張力、第 4 項の係数部分はキャブの質量、昇降加速度、キャブの上下振動によりロープ下端に作用する張力を示している。また、式 (2) 右辺は、それぞれ昇降加速度、ロープの横振動によりキャブの上下方向に作用する外力を示している。

基礎方程式 (1) ~ (6) はロープの長さが変化することを考慮するとき、解析的に解くことが困難となる。そこで、双曲型の偏微分方程式の解法としてよく知られている特性曲線法を用いた数値解析を行う。

なお、ロープの長さ変化を考慮するために、 $\xi = s/l(t)$ 、 $\tau = t$ を導入し⁽¹⁾、以後これを用いる。

このとき、 $p = \partial w / \partial \xi$ 、 $q = \partial w / \partial \tau$ として、特性曲線の微分方程式および、特性曲線に沿った方程式が、以下のように求められる (複号同順)。

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{v(1-\xi) \pm C}{l(\tau)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{aligned} & dq + \frac{v(1-\xi) \mp C}{l(\tau)} dp + \left\{ 2\gamma_w q \right. \\ & \quad + \frac{1}{l(\tau)} \left[2v \left(\gamma_w - \frac{v}{l(\tau)} \right) (1-\xi) \right. \\ & \quad \left. \left. - \frac{d^2 l}{d\tau^2} \xi + \mu \right] p \right\} d\tau = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、

$$C = \left[1 - \frac{1}{\mu} \left\{ \frac{d^2 l}{d\tau^2} - \alpha \left(\omega_\zeta^2 \zeta + 2\gamma_\zeta \frac{d\zeta}{d\tau} \right) \right\} \right]$$

$$+ l(\tau) \left(\mu - \frac{d^2 l}{d\tau^2} \right) (1 - \xi) \Big]^{1/2}$$

である。

3. 固有振動

以下3, 4章では, ロープ, キャブの横振動の連成振動問題を定性的に議論するためにキャブの上下振動を無視した場合を考える。

揚程 250 m 程度の超高層用エレベータでは, 最大長におけるロープの自重が, キャブの質量と同程度にまでなる。したがってロープの横振動を議論する際, ロープの自重が固有振動数, 振動モードに与える影響は無視できない。そこで, 本章では式(1)左辺第3項に示されるように, ロープの各点に張力として作用するロープの自重を考慮に入れ, ロープとキャブからなる系の固有振動について検討を行う。このとき系の固有振動数は, 複素固有関数をロープの両端 $\xi=0, 1$ の近傍で, ξ のべき級数に展開し, 境界条件を考慮することによって得られる複素固有方程式

$$f(\omega_r, \omega_i; l, \omega_\eta, \mu, \gamma_w, \gamma_\eta) = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (9)$$

より, ニュートン法を用いて数値的に求められる⁽¹²⁾。ここで, 系の複素固有振動数 ω を $\omega = \omega_r + i\omega_i$ とした。なお ω_r は系の各モードの固有振動数, ω_i は同じく減衰率であり, 以後は系の固有振動数を $\omega_n (n=1, 2, \cdots)$ で表す。

図 2 系の固有振動数変化 (a) ω_1 (b) ω_2

図 3 ロープの長さに対する系の固有振動数変化

まず, ロープの長さ l , キャブの固有振動数 ω_η に対する系の固有振動数 ω_n の値の変化を図 2 に示す。ここで, 低次のものから $\omega_1 \cdots \omega_n$ とする。系の固有振動数変化の特徴は, キャブの固有振動数 ω_η と一致する前後で変化が小さくなることにある。また, あるロープの長さで系の固有振動数の変化率は大きく変化する。

この固有振動数の変化の特徴について, さらに物理的考察を容易にするために, 実機エレベータにおけるパラメータの一例として $\omega_\eta = 21.0$ について考え, 主に系の固有振動数 ω_1, ω_2 のロープの長さに対する変化の様子を示すと図 3 のようになる。これより, 系の固有振動数 ω_n は, キャブの固有振動数と一致する前後で, 広範囲にわたりキャブの固有振動数に近い値を維持する。また, ロープの固有振動数 p_n とキャブの固有振動数 ω_η との交点付近で変化率が大きく変わり, このとき ω_n と ω_{n+1} が接近することがわかる。このときの系の固有振動数の変化は, ロープの固有振動数とキャブの固有振動数との交角が大きくなる低次のものほど大きい。

ロープが長くなる場合の系の 1 次の固有振動数 ω_1 の変化を考えると, まずキャブの固有振動数 ω_η と一致し, 次いでロープの 1 次の固有振動数 p_1 に近づく。 ω_2 からわかるように, 高次モードの固有振動数 ω_n は, $p_n \rightarrow \omega_\eta \rightarrow p_{n+1}$ なる変化をする。一方, ロープが短くなる場合を考えると, ω_1 は, ロープが十分短い範囲で高くなる。これは, 以下に示すロープの自重, 減衰を無視した場合に導かれる系の振動数方程式⁽¹³⁾より説明される。

$$\tan l\omega_n = \frac{\mu\omega_n}{\omega_n^2 - \omega_\eta^2} \quad \cdots \cdots \cdots (10)$$

上式より, ロープの長さが短い範囲 ($l \ll 1$) では, 系の固有振動数 ω_m は近い似的に,

$$\omega_n^2 \sim \frac{\mu}{l} + \omega_\eta^2 \quad \cdots \cdots \cdots (11)$$

と表される。すなわち考えている系は, 下端に固有振動数 ω_η のばね質量系が取付けられた振り子に対応しており, ロープが短くなるに従いその固有振動数は高くなる。

さらに, ロープ自重の固有振動数に対する影響に着目する。系の固有振動数は, ロープ自重を無視した場合と比較して, ロープが長くなるほど高くなり, 例えば, ロープの最大長 (250 m) においては各モードにおいてそれぞれ 2 割程度の差が生じる。直感的にはロープ自重が大きくなると, ロープの慣性力が大きくなり固有振動数が低下することが予測されるが, ロープに

作用する張力が高くなることにより、結果的に固有振動数が高くなったものと解釈される。

4. エレベータ昇降時の共振点通過現象

本章では、物理的考察のためエレベータが等速走行する場合 ($l=l_0+v\tau$, $v=\text{const.}$) を考え、主に1次、2次モードの共振点通過時のキャブの横振動について検討を行う。このとき実機エレベータに基づく無次元パラメータを以下のとおり与えた。

$$\alpha=1.0\times 10^{-5}, \mu=1.045, \nu=20.0$$

$$\omega_\eta=20.0, 21.0, \omega_\xi=97.18$$

$$\gamma_w=0.165, \gamma_\eta=0.33, \gamma_\xi=6.14,$$

$$v=\pm 0.04, \xi=0.15, 1.0, l=0.05\sim 0.9$$

まず簡単のために、ロープの自重および減衰を無視した場合に解析的に得られる、式(1)～(6)に対する定常解 ($l=\text{const.}$) を以下に示す。

$$w(1, \tau) = \frac{\mu\nu}{\cos \nu l \cdot (\omega_\eta^2 - \nu^2) \left(\tan \nu l - \frac{\mu\nu}{\nu^2 - \omega_\eta^2} \right)} \sin \nu \tau \quad \dots\dots\dots (12)$$

これより、式(10)に示される系の固有振動数が加振振動数と一致するとき共振し、振幅が大きくなることが予測される。そして、本報で考えているような系の定常応答では、2自由度の連成振動問題および式(12)からも予測されるように、キャブの固有振動数 ω_η 、ロープの長さ l 、加振振動数 ν の関係が、キャブの振幅を決める主たる要因となる。

しかし過渡応答においては、後に検討するように、エレベータ昇降時における系の固有振動数の変化もキャブの振幅に影響を及ぼす。本章では、特にキャブの固有振動数が加振振動数に近いときに生じる、過渡応答における特徴的な現象について検討を行う。以後に示す解析結果では、キャブの横振動を $w(1, \tau)$ 、ロープの横振動を $w(0.15, \tau)$ で示す。

4.1 キャブのばねこわさの設定が与える影響

まず、キャブの固有振動数 ω_η と加振振動数 ν の関係が (a) $\omega_\eta=\nu$, (b) $\omega_\eta=\nu(1+\delta)$, $|\delta|\ll 1$ の場合を考える。ここで、それぞれの1次の共振点における定常応答の時刻歴を図4に示す。このとき、 $\delta=0.05$ である。

定常応答では、キャブの振幅を比較すると、(b)に示す関係にキャブのばねこわさを設定したほうが大きくなり、またこの設定のとき最も大きくなる。なお、ロープの自重を無視した場合、共振時の定常応答振幅 A_{Res} は略近的に、 $A_{\text{Res}} \sim \sqrt{1+(2\nu\delta/\mu)^2}/\epsilon^2$ ($\epsilon=\gamma_\eta/\mu$) と表される⁽¹⁴⁾。

そこでこの2通りのキャブの固有振動数において、

下降時の共振点通過現象の様子を示すと図5(a), (b)のようになる。これより、過渡応答における1次の共振点通過時 ($l\sim 0.18$) には、キャブの固有振動数 ω_η と加振振動数 ν が一致している場合、すなわち (a) $\omega_\eta=\nu$ の場合のほうがキャブの振幅は大きくなり、

図4 定常応答 [(a) $\omega_\eta=20.0$ (b) $\omega_\eta=21.0$]

図5 過渡応答 [$v>0$, (a) $\omega_\eta=20.0$ (b) $\omega_\eta=21.0$]

図6 過渡応答 ($v<0$, $\omega_\eta=21.0$)

また、この設定のとき最も大きい。

このキャブのばねこわさの設定による共振時の振幅の大小が、定常応答と過渡応答で逆転する理由は、ロープの長さに対する系の固有振動数変化と、過渡応答では振幅が共振点を通過後に最大となること⁽⁶⁾から、次のように考えられる。

例えば1次モードの場合、図3に示した系の固有振動数 ω_1 は、キャブの固有振動数 ω_η と一致する前後でほぼ一定の値を保つ。したがって、図5(a)のようにキャブの固有振動数 ω_η が加振振動数 ν と一致している場合は、共振点通過後に共振に近い状態が持続され、最大振幅となるまでに振幅が十分成長する。

一方、これと比較して図5(b)に示したような場合では、図3で相対的に加振振動数 ν がわずかにキャブの固有振動数 ω_η より低い場合を考えると、共振点通過後に系の固有振動数と加振振動数の値の差が大きくなるため、振幅が成長する時間が短くなり最大振幅の大きさが小さくなる。

4.2 エレベータ上昇時、下降時の共振点通過現象の差異 本節では、同じキャブのばねこわさの設定においても、エレベータの上昇時、下降時で共振点通過時のキャブの振幅の大きさが異なる例を示し、その要因について検討を行う。図3から明らかなように、 $\omega_\eta=21.0$ の場合の系の固有振動数 ω_1 は、ロープの固有振動数とキャブの固有振動数との交点($p_1=\omega_\eta$, $l\sim 0.16$)付近で、その変化が大きくなる。そこで図6に、図5(b)に対応する、すなわち加振振動数がわずかにキャブの固有振動数より低い場合の、上昇時($\nu<0$)におけるロープ、キャブの横振動を示す。

これより、キャブの横振動は上昇時の場合のほうが顕著に大きくなり、また成長した振幅の持続時間が長いことがわかる。

この要因についても、やはり前節での議論が適用される。すなわち、図3の固有振動数変化において、加振振動数 $\nu=20$ を考えると、下降時には、共振点通過後に系の固有振動数と加振振動数との差が大きくなるが、上昇時には、共振点通過後に両者の差は大きくならない。したがって、振幅が十分成長し、その振幅が維持されたものと考えられる。

また、加振振動数がわずかにキャブの固有振動数より高い場合の ω_2 との共振では、前述の説明を図3に適用して理解されるように、共振点通過時のキャブの振幅は、上昇時に比べ下降時のほうが大きくなる。

4.3 エレベータ昇降時のモード・ジャンピング 昇降時の系の振動モードは、着目する時点以前の振動モードの影響を受けることが推察される。

ここでは、この過渡応答における振動モードという観点から、主に上昇時と下降時における振動モードの違いについて、その要因を検討する。前節で示した図5の場合のキャブのばねこわさの設定($\omega_\eta=21.0$)で、1次および2次の共振点の間でのロープの長さ($l=0.1, 0.2, 0.3$)におけるエレベータの下降時、および上昇時の系の振動モードは、図7(a), (b)に示すようになる。なお、ロープの各長さにおいて、一周期のうちそれぞれ対応する振動モードを3通りずつ示した。

下降時には、まず下端のキャブのみが振動するモードとなり($l=0.1$)、次いで1次モードの共振点通過後($l=0.2$)では、1次モードから2次モードへの過渡期となる。そして $l=0.3$ では、加振振動数は系の2次の固有振動数に近い関係となり、振動モードは2次の成分が支配的となる。

一方上昇時には、2次モードの共振点を通過した後も $l=0.3$ では、3次モードの形態での振動が顕著とな

図7 過渡応答における振動モード
[$\omega_\eta=21.0$, (a) $\nu>0$ (b) $\nu<0$]

図8 過渡応答における振動モード
($\gamma_w=0$, $\omega_\eta=21.0$, $\nu<0$)

る。その後1次モードの共振点に近づくが、 $l=0.2$ では、2次モードの影響が残る振動モードとなる。この影響はさらに $l=0.1$ においても見られる。

佐々木ら⁽²⁾はエレベータの昇降速度の、ロープの横波の伝ば速度の代表値に対する大小によって、振動モードに違いが生じることを特性曲線法による数値シミュレーションにより指摘している。

これに対して本報では、上昇時、下降時の着目するロープの長さでの振動モードの差異が、それ以前の固有振動成分の成長と減衰に依存することを示す。これを明確にするために、図7(b)の上昇時のロープの減衰 γ_w を無視した場合の振動モードを図8に示す。これより、減衰を無視した場合には減衰を考慮した場合に比べ、より高次の振動モードの影響が強くなることわかる。これは、各モードの共振点を通していく過程で、減衰を考慮した場合には成長したモードの成分が減衰し、次の振動モードが成長し始めるのに対し、減衰を無視した場合にはそれ以前の振動モードの成分が残存するからである。

したがって、上述した昇降速度の正負(下降時、上昇時)による違いに加え、さらに昇降速度の大小により、振動モードはまた異なる。この理由は、前述の減衰の有無の比較から明らかなように、共振点通過時に励振された固有振動成分の成長および減衰時間が異なるためである。

5. キャブの上下振動、昇降加速度がロープ、キャブ系の横振動に与える影響

系を支配する基礎方程式(1)~(6)より、ロープ、

図9 キャブの上下振動の影響 ($v>0$, $\omega_\eta=21.0$)

キャブの横振動にキャブの上下振動およびエレベータの加速度が影響を及ぼすことが考えられる。

キャブの上下振動を考慮するとき、共振時に加振振動数 ν 、上下方向のキャブの固有振動数 ω_ζ に特別な関係、すなわち $\nu=\omega_\zeta/2$ なる関係が成り立つ場合、式(1)、(2)においてロープの横振動 w とキャブの上下振動 z は係数励振型の内部共振を起こし、キャブの上下振動も顕著となる⁽³⁾⁽⁶⁾。さらに、エレベータが加速運転および同様の形で減速後停止する場合(A , λ の無次元値 $a=(A/L_{\max})T^2=0.086$, $\lambda=\lambda T=0.556$)を考える。

図9はキャブの上下振動を考慮した場合($\zeta \neq 0$)と無視した場合($\zeta=0$)との比較で、キャブの上下振動は、加速度が大きくなるとロープの横振動に影響を及ぼすが、キャブの横振動に与える影響は小さいことがわかる。通常のエレベータでは、内部共振の条件を満たすことは特殊な場合であり、ロープの横振動へのキャブの上下振動の影響は、加速度のみを考えればよ

図10 加速度の影響 ($v>0$, $\omega_\eta=21.0$)

図11 実験装置概略図

い。

また、図 10 は加速走行した場合と同区間を平均速度で等速走行した場合 ($v=0.096$) とのキャブの横振動の比較である。両者の比較では、特に加速走行において低速時に共振点を通過する場合に、キャブの振幅が顕著となる ($\tau \sim 2$) が、その他の区間では、キャブの振幅の大きさに対する影響はわずかである。

6. 実 験

ロープ、キャブからなる系について、主に 3 章および 4 章での議論を定性的に確認するために、図 11 に示す模型実験装置を作製し、実験を行った。振動方向を平面内とするためにロープとして弦とみなし得る平たい鋼線 (材質 SK5, 線密度 0.03 kg/m , 幅 20 mm , 厚さ 0.2 mm) を用い、その下端にキャブに相当するばね・質量系 (質量 1.75 kg , ばね定数 1234.8 N/m) を取付けた。鋼線は、シーブを介してモータの回転によりその長さが一定の速度で変化し質量を昇降させる。モ

ータは加振台に搭載され、動電式加振器により水平方向に加振され鋼線上端に強制変位を与える。また、昇降行程は 2.5 m , 加振振幅は 0.2 mm とし、昇降速度は任意に与えることができる。そして、加振振幅、鋼線の横方向変位、質量の横方向変位をそれぞれ非接触変位センサ (センサ技研製 LS-1500, エミック製 NP-250, NP-100) で測定した。なお、実験装置の制約上、以下の無次元パラメータのもとで実験を行い、また加振振動数を変化させることにより、加振振動数 ν とキャブの固有振動数 ω_η との関係を、理論解析に対応させた。

$$\alpha = 5.0 \times 10^{-4}, \quad \mu = 0.046, \quad \nu = 5.0, 5.54$$

$$\omega_\eta = 5.0, \quad \gamma_w = 0.019, \quad \gamma_\eta = 0.011$$

$$v = \pm 0.012, \quad s = 0.18, 1.0, \quad l = 0.4 \sim 1.0$$

まず、ロープの長さに対する系の固有振動数の実験結果を図 12 に示す。これより解析的に得られた結果と同様に、系の固有振動数は、キャブの固有振動数と一致する前後で変化が小さくなるという特徴がとらえられた。また、鋼線の固有振動数とキャブの固有振動数

図 12 ロープの長さに対する固有振動数変化 (実験結果)

図 13 定常応答 [実験結果; (a) $\nu=5.0$ (b) $\nu=5.54$]

図 14 過渡応答 [実験結果; $\nu < 0$, (a) $\nu=5.0$ (b) $\nu=5.54$]

図 15 過渡応答 (実験結果; $\nu > 0, \nu=5.54$)

との交点付近で変化率が大きく変化することが確認された。

次に、数値解析で検討したように、キャブの固有振動数 ω_η と加振振動数 ν の関係を (a) $\omega_\eta = \nu$, (b) $\omega_\eta = \nu(1+\delta)$, $\delta = -0.1$ とし、このときの定常応答の結果を図 13 に示す。この結果より、定常応答では、キャブの固有振動数が $\omega_\eta = \nu(1+\delta)$ で与えられた場合のほうが、キャブの振幅が大きくなる。

さらに、図 13(a), (b) それぞれの場合の過渡応答(上昇時)の結果を図 14 に示す。これより、共振点通過時の振幅の大きさは、数値解析結果と同様に $\omega_\eta = \nu$ の場合のほうが大きくなることが確認された。

さらに、図 14(b) に対応する場合 ($\nu = 5.54$) の下降時の実験結果を図 15 に示す。これより、4・2 節に示した、下降時には、上昇時に比べ成長した横振動の持続時間が長く、最大振幅が大きくなるという共振点通過現象の差異が、実験パラメータによる実験結果においても確認された。

7. 結 論

超高層用エレベータをモデルとした、ロープおよびキャブからなる系の昇降時の横振動について、主に以下の結論を得た。

まず、ロープの長さに対する系の固有振動数について、

(1) ロープ自重を考慮することにより、基礎方程式は空間についての変数係数を持つ形式となり、これより系の固有振動数を解析的に求めた。このときロープの長さが 250 m 程度の系の固有振動数は、ロープ自重を無視した場合に比べ 2 割程度高くなる。ロープの長さに対する系の固有振動数は、キャブの固有振動数と一致する前後においてその変化が小さくなるという特徴を持つ。

また、一定の加振振動数に対する共振点通過時のキャブの振幅に着目し、特性曲線法による数値解析を行い、

(2) キャブのばねこわさの設定に対する共振時のキャブの振幅は、定常応答では、キャブの固有振動数が加振振動数からわずかに離れている系で最大となるのに対して、過渡応答では両者が一致している系で最

大となる。

(3) 上昇時、下降時におけるキャブの振幅を比較するとき、キャブの固有振動数が加振振動数よりわずかに高い場合には上昇時に、低い場合には下降時に、最大振幅が大きく、また成長した振幅の持続時間が長くなる。

(2), (3) の結果は、(1) で述べたロープの長さに対する系の固有振動数の変化が、キャブの固有振動数と一致する前後で小さくなり、この状態において共振点を通過する場合、共振に近い状態が持続され、振幅が十分成長することから物理的に説明される。また、(2), (3) の結果は模型実験装置による実験結果においても確認された。

さらに、エレベータ昇降時のロープの振動モードの変化を数値解析結果より調べ、

(4) 昇降時のロープの振動モードは、着目するロープの長さに至る以前の振動モードの成長および減衰時間の影響を受けるため、昇降速度の正負だけでなく、昇降速度の大きさにも依存する。

なお一般的には、エレベータ・キャブの横振動に対するキャブの上下振動、昇降加速度の影響が考えられるが、数値シミュレーションの結果、これらの影響は通常無視し得ることがわかった。

最後に、本研究に御協力頂いた、慶応義塾大学理工学部大学院生、能見公博、竹中憲郎、学部生、大塚元彦君に厚く御礼申し上げる。

文 献

- (1) 光井, 日立評論, 52-12(1970), 17.
- (2) 佐々木・ほか 2 名, 機講論, No. 730-14(1973-10), 165.
- (3) 重田・藤沢, 機講論, No. 750-3(1975-4), 129.
- (4) 棚橋, 三菱電機技報, 64-10(1990), 27.
- (5) 渡辺, 電学論, 109-9(1989), 613.
- (6) 曄道・ほか 3 名, 機論, 58-545, C(1992), 17.
- (7) Pippard, A. B., 自然の応答と安定性, (1985), 77. 共立出版.
- (8) 山本・ほか 2 名, 機論, 44-380, C(1978), 1175.
- (9) 小寺, 機論, 54-507, C(1988), 2597.
- (10) 橋本, 機論, 57-541, C(1991), 2785.
- (11) Kotera, T., *Theo. and App. Mech.*, 22(1974), 245.
- (12) 二見・ほか 4 名, 機講論, No. 910-17(1991-3), 4.
- (13) Ram, Y. M. and Blech, J. J., *J. Sound. Vib.*, 150-3(1991), 357.
- (14) 松平, 基礎振動学, (1973), 54, 現代工学社.