建築資材の揚重における姿勢制御に関する基礎的研究

—吊荷の挙動解析—

BASIC STUDY ON DIRECTION CONTROL OF CONSTRUCTION MEMBER
ON LIFTING WORK

—Analysis on behavior of lifted member—

坂本 成*, 田中 淳夫**, 西村 正宏***

Shigeru SAKAMOTO, Atsuo TANAKA, Masahiro NISHIMURA

In the construction of a high-rise building, structural members can be rotated by the wind during lifting, making installation work difficult and reducing productivity. To alleviate such problems, we developed a new equipment consisting of two fans whose thrust prevents lifted members from rotating. The studies for development include basic experiments, analysis, production of a prototype and demonstration experiments, and also compares the theoretical conclusion with the results of experiments. This paper presents theoretical explanation on the behavior of flatly faced lifted member, and rotating around its vertical axis.

Keywords : *Lifting work, Lifting efficiency, Direction control of lifted members, Wind causes, Theorem of Kutta-Joukowski, Behavior simulation*

揚重, 揚重効率, 吊荷姿勢制御, 風, クッタ・ジウコフスキーの定理, 挙動シミュレーション

1. はじめに

近年の建築施工では、労務の節減あるいは工期の短縮を図るために部材をプレハブ化し、同時に従来よりも大型の部材を揚重・取付けする場面が多くなってきている。このような状況に対応して揚重用機械も年々大型化する傾向がみられる。しかし、このような状況の中で、これらの大型部材の位置決めや取付け作業は相変わらず人手作業に頼っているのが現状であるが、すでに部材の大きさは人力で位置決めを行える限界に近づいてきている。一方、工期短縮を目的として、気象条件による作業不能日を減らしたいという要求も強い。一般に超高層ビルの建設においては、その施工階数が高くなればなるほど、気象による作業不能日が多くなる。都庁第一本庁舎（軒高 241.8m）の施工記録によれば、気象による作業不能日率は、全工期に対し、降雨5.4%に対し強風8.8%となっている。

このような状況のもとで、吊荷の振れまわりの防止あるいは水平面内における姿勢の制御という問題に関して

の研究¹⁾は数が少なく、その対策の実施例²⁾も非常に少ない。大きな慣性力を持つ長大・大重量の吊下された部材を介錯ロープで引張り、又は手で押すことによって位置決めをしているのが現状である。特に外壁パネルなどのように重量に比して大きな受圧面積を有する吊荷は、風圧により鉛直軸まわりに回転しはじめることがよく見られ、このような状態では取付け作業が行えなくなるばかりではなく、無理をして作業を続けるときわめて危険である。

本研究はこれらの問題点を解決するべく、長大・大重量の吊荷の水平面内における姿勢を制御する方法(図1)に関して一連の検討・基礎実験・解析・実機の製作・実証実験を行ってきたものである。本報ではクレーンによって吊られている平板状の吊荷が風の影響によって鉛直軸まわりに回転する挙動に関し、理論に基づく解析結果と、実物大の装置を用いた実験結果とを、対比しながら得られた知見に関する報告を行なう。

* 大成建設(株)生産技術開発部 室長

** 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博

*** 大成建設(株)生産技術開発部 係長・工修

Manager, Dept. of Construction Technology Development, Taisei Corp.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

Assis. Manager, Dept. of Construction Technology Development, Taisei Corp., M. Eng.

V_x 、 V_y を重心の速度とし、風速 U_w に対して補正後の風速を U とすると、図4を参考として、下式で表示される。

$$U_x = U_w \cdot \cos \alpha_w + V_x \quad (6)$$

$$U_y = U_w \cdot \sin \alpha_w + V_y \quad (7)$$

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (8)$$

$$\text{ここで、} \tan \alpha = \frac{U_y}{U_x}$$

(5)回転力

揚力に伴う回転力を T とする。

$$T = 4\pi\rho U^2 a^2 b \cdot \sin(\theta - \alpha) \cos(\theta - \alpha) \quad (9)$$

$$\text{ここで、} |\theta - \alpha| \leq \frac{\pi}{2}$$

(6)総合した運動方程式

以上に述べた吊荷に作用する力を総合した運動方程式は下記ようになる。

$$M\ddot{x} = |\vec{L}| \cdot \cos \beta - |\vec{D}| \cdot \cos \alpha + f_x \quad (10)$$

$$M\ddot{y} = |\vec{L}| \cdot \sin \beta - |\vec{D}| \cdot \sin \alpha + f_y \quad (11)$$

$$I\ddot{\theta} = T - \text{SGN}(\dot{\theta}) \cdot T_{fr} \quad (12)$$

ここで I は吊荷の慣性モーメント、 T_{fr} はクレーンフック回転部のクーロン摩擦抵抗とする。

2.2 挙動の解析

前節で導出した理論式を用いて、クレーンによって吊られている吊荷が風を受けたときの挙動に関するシミュレーションを行なった。シミュレーションにあたって吊荷のモデルには図5に示すものを想定し、計算に用いる数値(定数)を図5式のように定めた。

(a)実際の状況

(b)シミュレーションモデル

図5 吊荷のモデル化

$$\left. \begin{aligned} 4a &= 4.5 \text{ (m)} & b &= 2.5 \text{ (m)} \\ M &= 10,000 \text{ (kg)} & I &= 29,610 \text{ (kg} \cdot \text{m}^2) \\ \ell &= 100 \text{ (m)} & \rho &= 1.16 \text{ (kg/m}^3) \\ T_{fr} &= 0.010, 0.005 \times Mg \text{ (N} \cdot \text{m)} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

シミュレーションにあたっては、風がパネルの挙動に及ぼす影響の傾向を定性的に把握することを目的として、モデル化した風を用いた。シミュレーションに使用した風速プロファイル及び風向(初期値)を図6に示す。

(a)一定定常風

(b)パルス付き定常風

(c)風向(初期値)

図6 風のモデル

図6(b)に示す風のモデルは、10秒経過以降の一定風速の150%に相当する突風を初期条件として与えたものであり、一般の自然風の中に見られる風の強弱(息付き)と似た条件になり得ると考えている。

シミュレーションを実施するに当たっては、図5(b)に示す系に対する外乱入力である風速を0.05秒毎の入力データとして与えて計算を行なった。吊荷の挙動を0.01秒間隔で積分して求め、それを5回蓄積して0.05秒毎の挙動データとした。シミュレーションは静止状態から200秒間の挙動を計算し、グラフ上にプロットしている。

尚、風向は地表に対して常に一定としたが、風向に対するパネルの初期偏位角は図6(c)に示すように風向に対して $\pi/3$ (rad)とし、パネルの初速度は零として計算を行なった。

(1) シミュレーション結果—その1

〔一定定常風を用いたシミュレーション〕

シミュレーションの結果を図7～図10に示す。各図の上段に示されているのが、吊荷の鉛直軸まわりの偏向角であり、縦軸に角度（フルスケール 2π rad）をとっている。尚、角度は上方から見て反時計まわりを正とし、風向を 0 rad としている。また、各図の下段に示してあるのが、その時の吊荷の鉛直軸まわりの角速度であり、縦軸に角速度（フルスケール ± 2 rad/sec）、横軸に時間（フルスケール 200 sec）をとっている。

図7の上段に示される偏向角のグラフを見ると、パネルは 0 rad (2π rad) を中心に揺動をくり返していることが読み取れる。また、下段の角速度のグラフを見ると、ほとんど 0 rad/sec 近傍で正負の値を交互に示している。

図7及び図8に示される風速が小さい場合では、パネルは回転運動をするには到らず、 0 rad を中心に揺動をくり返しているだけであるが、図9及び図10に示されるように、風速が大きくなってくると揺動をくり返した後、回転運動が生じることが示されている。

図7と図8とを比較すると風速が大きい図8のケースの方が揺動の周期が短いことが読みとれる。また、図9と図10との比較からは風速の大きい図10のケースの方が、揺動運動から回転運動へ移行する時期が早いこと、及び回転運動に移行した後の角速度が大きいことが読み取れる。

図9に示したケース（仮に中程度の風速域と表現する）では、一旦発生した回転運動が、何らかの原因によって止められ、逆方向の回転運動に変わっていることが示されている。このケースに関しては、後で考察を加えることとする。

図7 シミュレーション結果 I-(1)

図8 シミュレーション結果 I-(2)

図9 シミュレーション結果 I-(3)

図10 シミュレーション結果 I-(4)

(2) シミュレーション結果—その2

[パルス付定常風を用いたシミュレーション]

ここで示す結果は図6(b)に示す風速プロファイルを使用したものである。シミュレーションの結果を図11～図14に示す。

図11を見るとパネルは揺動運動を示すにとどまっており、回転挙動を起こすには到っていない。また、2.2(1)の図9に示した一定定常風を使用したものと較べると、揺動の角度振幅及び、その際の角速度が多少大きくなっているのみで、大きな差は見られない。

図12に示すケースではシミュレーションの後半で回転運動に移行しており、2.2(1)に示した同じ定常風速(3 m/sec)を用いたケース(図10)とは異なった挙動を示している。これは、風速プロファイルの初期に付加したパルス部の影響と考えられる。つまり、小さい風速であっても、風速の変化が存在すると吊荷の回転運動が発生しやすくなるということが言える。

図13及び図14を見ると、定性的には、風速が大きくなると数回の揺動運動をくり返した後、回転運動に移行するという、2.2(1)の一定定常風を使用した場合と同様の挙動を示している。しかし、図11及び図12に較べて、揺動運動から回転運動へ移行する時期が早いこと、及び回転運動に移行した後の回転角速度が大きいことが特徴として読みとれる。この特徴も、風速プロファイルの初期にパルス的な風を付加した影響によるものと考えられる。

図11 シミュレーション結果Ⅱ-(1)

図12 シミュレーション結果Ⅱ-(2)

図13 シミュレーション結果Ⅱ-(3)

図14 シミュレーション結果Ⅰ-(4)

(3) その他のシミュレーション結果

吊荷が回転運動を起こす際に、揚力が最も大きな作用力として働いていることは2.1で示した理論式の形から明らかである。そこで、2.1(1)で示した重力項、(3)に示した摩擦項を省き、それに伴ない(4)に示した風速補正を行わずに、シミュレーションを行った。その結果を図15及び図16に示す。用いた風の条件は図中に示す。

図15 シミュレーション結果Ⅲ-1)

図16 シミュレーション結果Ⅲ-2)

図15及び図16に示された結果を見ると、パネルは風向を中心とする揺動運動をくり返すばかりで、回転運動へ移行する気配は見うけられない。つまり、揺動運動から回転運動へ運動形態が移行するためには、クレーンのブームトップを支点とする吊荷の振り子運動が不可欠であり、この振り子運動と、鉛直軸まわりの揺動運動とが、組み合わせられないと回転運動は発現しないと言える。

2.3 シミュレーション結果の整理

2.2で行なったシミュレーションによって得られた知見(定性的な傾向)を以下に整理する。

(1) 回転運動の発現について

- ・クレーンによって吊られている吊荷が回転運動を行なうか否かは、基本的には風速の大きさに依存し、風速が大きい方が、回転運動を起こしやすい。
- ・クレーンのブームトップを支点とする吊荷の振り子運動が、回転運動の発現に大きく寄与している。
- ・回転運動は、数回の揺動運動をくり返した後、発現する。
- ・一定常風よりも、パルス付定常風の方が、小さな風速でも回転運動を起こしやすい。

(2) 揺動運動から回転運動への移行時期について

- ・風速が大きい方が、早い時点で回転運動へ移行する。
- ・一定常風よりもパルス付定常風の方が、早い時点で回転運動へ移行する。

(3) 回転運動中の角速度について

- ・風速が大きい方が、回転運動へ移行した後の回転角速度が大きい。
- ・一定常風よりもパルス付定常風の場合の方が、回転運動へ移行した後の回転角速度が大きい。

(4) 図9に示される挙動について

図9に示したシミュレーションでは、一旦回転運動に移行したパネルの挙動が、なんらかの理由で逆方向の回転運動に変化している。この現象に関する考察を以下に記す。

揺動運動をしている吊荷が回転運動へ移行するきっかけには、クレーンのブームトップを支点とする吊荷の振り子運動が大きく寄与していることを2.2(3)で述べたが、図9に示されるケースは、この効果が逆に作用したものと考えられる。つまり、シミュレーション後半で一旦は回転運動に移行したが、回転運動への移行後も、このケースのような中程度の風速域では、その回転角速度が十分に増加することなく、振り子運動の周期が回転挙動に関するマイナス成分として吊荷の鉛直軸まわりの運動に作用し、回転運動を止めたものと考えられる。

この件に関して詳細な因果関係を把握するためには、さらにパラメータを変化させながらシミュレーションを行なう必要があり、本研究で行なっている挙動全般についての知見を得るという方針から枝分かれした研究となるため、この件に関する検討はここでとどめることとする。

3. 実験

吊荷姿勢制御の実用機の開発プロジェクトでは、前述した理論解析及び数値シミュレーションの結果を踏まえ、装置の諸元を想定した。この装置によって得られる制御項を理論式シミュレーションに付加し、風を受けつつ制御を行なった時の吊荷の挙動シミュレーションを行ないながら設計諸元（アクチュエータ容量、各種の制御パラメータなど）を確定していった。このような手順を踏んで開発した実用機を用い、実物大のパネルを用いた挙動の測定実験を行なった。

3.1 実験方法

図17に示す装置とプレキャストコンクリートパネル（PC版）を用いて挙動の測定実験を行なった。実験に際しての計測項目は、①吊荷の方位角、②方位角速度、③風向、④風速、ならびに装置の運転状況を表わす種々の数値であり、方位角の計測にはジャイロコンパス、方位角速度の計測にはレートジャイロ、風の計測には、風向・風速計を用いた。測定値の記録にはデータレコーダを用い、0.5秒毎の時系列データとして記録した。

図17 実験装置

写真1 実験状況

3.2 実験結果

実験は、1994年1月中に、風の状況を判断しつつ、実施した。この間、前述した各種データを延べ4.7時間にわたって計測した。1月21日には、最大8.4m/secの風が、一定方向から吹き続けるという好条件に恵まれたので、装置サイドの制御を全て停止させ、風による吊荷の挙動を把握するための実験を実施した（写真1）。この実験で得られた吊荷の挙動に関するデータの一部を図18から図21に示す。

図18 吊荷の偏向角 その1

図19 吊荷の偏向角 その2

図20 吊荷の偏向角 その3

図21 吊荷の偏向角 その4

尚、図中の縦軸に示される角度は北を0 (rad) としている。また、横軸に付した () 内の数字は記録ファイル内のデータ番号を表わす。

図18は吊荷であるパネルが揺動運動を繰り返しており、回転運動にはまだ移行していない状況を示しているグラフである。尚、このデータ範囲における風向・風速は図22に示すものであった。

図22 風向・風速データ その1

図19は揺動運動をしていたパネルが回転運動に移行する部分を示したものである。この時の風向・風速は図23に示すものであった。

図23 風向・風速データ その2

図20は回転運動をしていたパネルが何らかの理由により、その回転運動を停止し、逆向きに揺動しはじめた状況をとらえた部分である。この時の風向・風速は図24に示すものであった。

図24 風向・風速データ その3

図21は揺動しているパネルを吊っている装置に自動制御運転（方位角の静定）をかけた状況のものであり、自動制御中には、その方位角はほとんど変化せず、実用上十分な範囲内 ($\pm 3^\circ$) で制御されていることが確認できる。この時の風向・風速を図25に、また、自動制御中の方位角の拡大グラフを図26に示す。

図25 風向・風速データ その4

図26 自動制御中の方位角

3.3 実験結果に対する考察

図22から図24に示した風向・風速データには、大きな差は見られないにもかかわらず、それぞれの測定区間における吊荷の挙動には様々な変化が見られる。

測定初期部分のデータである図18では風向を中心とする揺動運動がくり返されている事が示されている。またその次の区間データである図19には揺動運動をしていたパネルが、回転運動に移行する状況が示されており、先に2.3で述べたシミュレーションから得られた知見と定性的な面における一致を見ることができる。

さらに図20に示されるように回転運動をしていたパネル（角速度はさほど大きくない）が、何らかの理由によりその回転運動を中断するケースも、今回の実験で観測することができ、これは2.3 (4)に示した理由に起因する現象と考えることができる。

以上に述べたように、2節で得られた理論シミュレーションの結果に対し、実験によって得られた挙動は定性的にきわめて一致した状況を示している。

4. 理論式との対比

3.2 で示した実験結果の中から、パネルが回転挙動を始める部分のデータを抜き出し、これを用いて理論式によるシミュレーションを行ない、実験結果との比較を行った結果を以下に示す。

比較対象範囲としたデータは図19中に矢印で示した部分から 650個分のデータ範囲(325秒に相当)である。この矢印の位置は揺動しているパネルが角速度を0にし、反転する瞬間であり、初期条件の整えやすい時点として選定した。

図27に実験によって得られたパネルの方位角グラフを、図28に理論シミュレーションによって得られた結果を示す。

図27 方位角グラフ (実験値)

シミュレーション条件

$4a = 4.5 \text{ (m)}$	$b = 2.5 \text{ (m)}$
$M = 8,600 \text{ (kg)}$	$I = 22,570 \text{ (kg} \cdot \text{m}^2)$
$\ell = 30 \text{ (m)}$	$\rho = 1.16 \text{ (kg/m}^3)$
$Tfr = 0.010 \times Mg \text{ (N} \cdot \text{m)}$	
初期角速度 = 0 (rad/sec)	
風向と風速は実測値による	

図28 方位角グラフ (理論値)

両図を見較べると、多少の傾斜、及び時間軸上の差はあるものの、全体的なプロファイルはほぼ一致しており、理論式が吊荷の挙動に関する特徴を良く表現できているものと判断される。

5. 結論

本報では、風的作用を受ける吊荷の挙動を理論式によるシミュレーション及び、実物大の吊荷を用いた実験を行ない、関連する要因の影響を解明してきた。

3.3 及び 4 節に示した結果より、2 節で組み立てた理論式は、吊荷の挙動を定性的な範囲において良く表現していると言える。さらに、この理論式を用いたシミュレ

ーションによって、2.3 に示す吊荷の挙動特性に関する新しい知見を得ることが出来た。

これらの結果を改めて実用上の観点で捉えたと、冒頭に述べた施工現場における吊荷の危険性等の問題を解決するための吊荷の姿勢制御の実用機の開発に際しては、理論式で示される吊荷の挙動が設計条件として充分有効であること、及び本研究で得た挙動特性に関する新しい知見は、機械の機能設定の判断材料として今後とも活用し得るものであることが判った。これらの事はその後開発され、実施工に適用された実用機によって確認されている。

写真2 に本報に述べた研究を踏まえて製作した実用機の稼働状況を示す。

〔拡大写真〕

写真2 実用機の稼働状況

謝辞

本研究の計算結果の作成に御協力いただいた(株)トキメックエンジニアリングの伊東公四郎、山下重之両氏に厚く感謝の意を表します。

(参考文献)

- 1) 土屋輝雄、伊藤公嗣、「旋回クレーンの荷物の振れ止め制御」、計測と制御、Vol.13、NO.1、1974.10.
- 2) 清水建設、福島製作所、「高速ファン内蔵の旋回つり具“ノンクル”」、日刊建設工業新聞、1991.9.13.
- 3) 今井功、「流体力学」、P.85、岩波全書.
- 4) 文献3)のP.81.
- 5) 小林正二、吉田正邦、宇佐美滋、「PC板をつった場合の風荷重によるクレーンへの影響」、鹿島建設技術研究所年報 第18号、(1993年11月5日原稿受理、1994年8月25日採用決定)