

## 大形クレーン吊荷のねじり振れ制振技術に関する研究\*

佐藤 勇一<sup>\*1</sup>, 辻岡 一明<sup>\*1</sup>  
大澤 雅和<sup>\*2</sup>, 片山 圭一<sup>\*3</sup>Torsional Vibration Suppression of a Suspended Body  
by Two Rotating ArmsYuichi SATO<sup>\*4</sup>, Kazuaki TSUJIOKA,  
Masakazu OHSAWA and Keiichi KATAYAMA<sup>\*4</sup> Saitama University, Dept. of Mechanical Engineering,  
255 Shimo-okubo Urawa, Saitama, 338-8570 Japan

This paper describes the feasibility study on vibration suppression by attaching two rotating arms to a torsionally vibrating body, which is suspended by cables. The effects of angular velocities and phase angles of rotating arms to the vibrating body on vibration suppression are examined. Accordingly, it is clarified experimentally and theoretically that torsional vibration is quickly suppressed by using the rotating arms.

**Key Words:** Vibrating Body, Vibration Suppression, Torsional Vibration, Rotating Arm, Suspended Body, Transfer Crane

## 1. ま え が き

コンテナ荷役用のクレーンは、船舶からのコンテナの積み下ろしなどコンテナについての荷さばきをできるだけ速やかに行うことが求められている。しかし、コンテナはワイヤロープによって横行トロリーから吊り下げられているため、荷役動作の過程でスウェイと呼ばれる平行振れ、およびスキューと呼ばれるねじれ振れが生ずることが多い。平行振れは横行トロリーの加減速を伴う移動の過程で必然的に生ずるものであり、ねじれ振れは風、コンテナ荷の偏心、コンテナの初期姿勢によって生ずる。これらの振れが大きいと許容範囲内の位置にコンテナを着地させることができず、振れが取まるまで待機するか、何らかの方法で積極的に制振することが必要である。近年荷役時間の短縮が強く求められるようになり、平行振れに関しては斜めワイヤロープ方式の他、振れ止め制御<sup>(1)-(5)</sup>が実施されるようになってきている。しかし、ねじれ振れ

については新たなアクチュエータが必要となるため実施例は少ない。

大形吊荷用コンテナクレーンでは、ねじり振れの振動周期が30秒程度と非常に長い。このため固有周期依存とはいえ、通常の制振手法で要する時間の1, 2周期は、絶対値としては小さいとはいえない。

そこで、本研究はこのようなコンテナクレーンの吊荷のねじれ振れをできるだけ速やかに制振することができる制振手法の検討を目的としたものである。ワイヤで吊り下げられた懸垂物の両端に回転することができる腕を取付け、この腕の回転の効果によりねじり振動の制振を行うものである。この方法を用いることにより、速やかな制振が可能であることを、実験的・解析的に明らかにしている。

## 2. 実 験 装 置

図1は港湾などで広く用いられているトランスファークレーン<sup>(6)</sup>である。このクレーンは、コンテナをワイヤで吊り下げ、トロリー部がレールの上を移動することにより、コンテナの搬送を行うものである。ただし、本研究では、ねじり振動を対象としているため、クレーンを簡略化したワイヤの長さが一定の実験装置を用いている。

\* 原稿受付 1999年3月31日。

<sup>\*1</sup> 正員, 埼玉大学工学部 (☎ 338-8570 浦和市下大久保 255)。<sup>\*2</sup> 埼玉大学大学院。<sup>\*3</sup> 正員, 三菱重工業(株)広島研究所 (☎ 733-8553 広島市西区観音新町 4-6-22)。

E-mail: ysato@mech.saitama-u.ac.jp

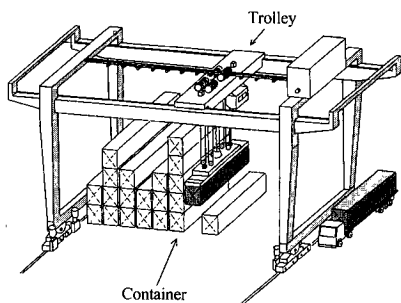


Fig. 1 Transfer crane

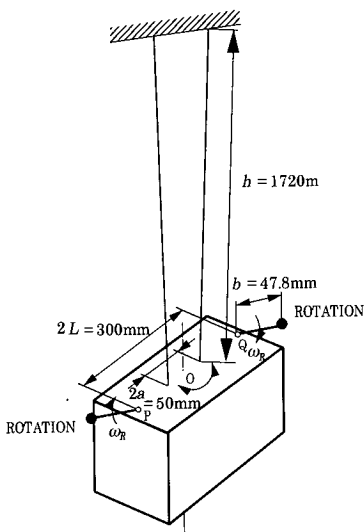


Fig. 2 Experimental apparatus

図2がその実験装置の概略図である。荷物に相当するアルミ製角柱の懸垂物が、2本のワイヤにより吊り下げられている。この物体の両端には同じ方向に回転する腕が取付けられている。この腕の駆動にはステッピングモータを用いている。また、懸垂物は水平面内でねじり振動し、その固有周期は13.4秒である。懸垂物およびモータの質量は  $M=845\text{g}$ 、点  $O$  の周りの慣性モーメントは  $I_c=1.0 \times 10^{-2}\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 、回転する腕の質量は  $m=41.2\text{g}$ 、点  $P$  あるいは点  $Q$  周りの慣性モーメントは  $J=1.26 \times 10^{-4}\text{kg}\cdot\text{m}^2$  である。解析および実験では懸垂物に初期角度を与え、ねじり振動を発生させる。そのとき、さまざまな条件で腕を回転させ、懸垂物のねじり振動に対する制振効果について検討している。

### 3. モデル化

実験装置を図3のようにモデル化する。並進運動は生じず、重心回りのねじり振動のみが生じると考える

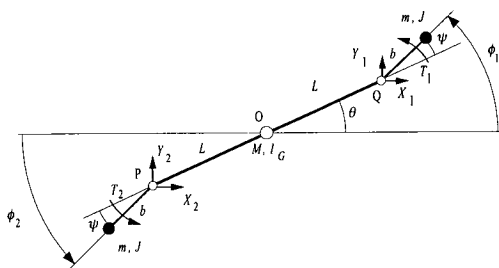


Fig. 3 Analytical model

と、運動方程式は次式のように表せる。

$$I_c \ddot{\theta} + 2(N/h)a^2 \sin \theta + c\dot{\theta} - T_1 - T_2 + (X_1 - X_2)L \sin \theta - (Y_1 - Y_2)L \cos \theta = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $I_c$  は懸垂物の重心回りの慣性モーメント、 $N$  はワイヤの張力、 $h$  はワイヤの長さ、 $2L$  は腕の回転中心の  $P$ 、 $Q$  間の距離、 $2a$  は2本のワイヤ間の距離、 $c$  は減衰である。また  $T_1$ 、 $T_2$  ( $T_1 = T_2$ ) は腕から懸垂物に作用するトルクである。ワイヤの張力  $N$  は、ねじり振動が微小なことから  $(m + M/2)g$  と考えられる。 $X_i$ 、 $Y_i$  ( $i=1, 2$ ) は腕から懸垂物に作用する力である。一方、腕の運動方程式は次式のように表せる。

$$m \begin{Bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{y}_i \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (i=1, 2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$J \ddot{\phi}_1 + T_1 + b(X_1 \sin \phi_1 - Y_1 \cos \phi_1) = 0 \quad \dots\dots\dots (3\cdot a)$$

$$J \ddot{\phi}_2 + T_2 - b(X_2 \sin \phi_2 - Y_2 \cos \phi_2) = 0 \quad \dots\dots\dots (3\cdot b)$$

ただし、 $J$  は腕の回転中心 ( $P$  または  $Q$ ) に関する慣性モーメントである。腕の重心位置の座標を  $x_i$ 、 $y_i$  ( $i=1, 2$ ) とし、それらは次式で表される。

$$\begin{cases} x_1 = L \cos \theta + b \cos \phi_1 \\ y_1 = L \sin \theta + b \sin \phi_1 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4\cdot a)$$

$$\begin{cases} x_2 = -L \cos \theta - b \cos \phi_2 \\ y_2 = -L \sin \theta - b \sin \phi_2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4\cdot b)$$

懸垂物に対する腕の回転角  $\psi$  は二つの腕とも同じで、懸垂物のねじれ角  $\theta$  とは次式の関係がある。

$$\phi_i = \theta + \psi \quad (i=1, 2) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$\psi$  は懸垂物に対する腕の相対回転角で、初期相対角を  $\psi_0$ 、腕の回転角速度を  $\omega_r$  として、次式に示す時間の既知関数である。

$$\psi = -\omega_r t + \psi_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(1)~(5)から内力  $X_i$ 、 $Y_i$  などを消去し、さらに次式に示すような変数の無次元化を行う。

$$\gamma = 2J/I_c, \rho = 2m/M, \bar{L} = L/\kappa, \bar{b} = b/\kappa \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、

$$I_c = M\kappa^2, J = m\bar{b}^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ねじれ角  $\theta$  について整理すると、式(9)を得る。

$$\begin{aligned} & \{1 + \gamma + \rho(\bar{L}^2 + \bar{b}^2) + 2\rho\bar{b}\bar{L} \cos \psi\} \theta^{(2)} + 2\xi\theta^{(1)} \\ & + \sin \theta + \{\gamma + \rho(\bar{b}^2 + \bar{b}\bar{L} \cos \psi)\} \phi^{(2)} \\ & - \rho\bar{b}\bar{L}\phi^{(1)}(2\theta^{(1)} + \psi^{(1)}) \sin \psi = 0 \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ここで、 $(n)$  は無次元時間

$$\tau = \omega_0 t \dots\dots\dots (10)$$

による  $n$  階微分を表している。 $\omega_0$  は懸垂物のみが微小ねじり振動しているときの固有角振動数であり、次式で与えられる。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2N\alpha^2}{hI_G}} \dots\dots\dots (11)$$

式(9)を数値積分して過渡応答を計算する。なお、諸元は、実験に用いた装置の値  $L=150$  mm,  $b=47.8$  mm, 減衰比  $\xi$  は実験装置の自由振動させて求めた値 0.012 を用いる。

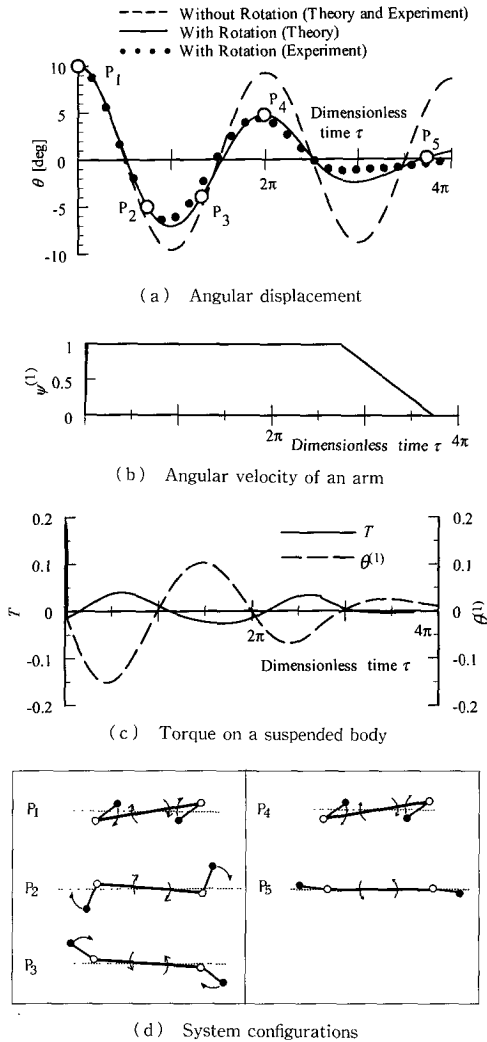


Fig. 4 Transient response ( $\omega_R/\omega_0=1$ )

4. 考 察

制振すべきねじり振動は高々数度程度である。懸垂物に初期角度  $10^\circ$  を与えたときの結果を図 4 に示す。初期角度  $10^\circ$  を与えた状態  $P_1$  から、腕を時計回りにねじり振動の固有振動数と同じ速さ  $\omega_R/\omega_0=1$  で回転させている。図 4 では、すべての図において横軸に無次元時間  $\tau$  とし、縦軸は上から、図 4(a)ねじり振動の角変位  $\theta$ 、(b)腕の回転速度変化  $\psi^{(1)} = \omega_R/\omega_0$ 、(c)懸垂物が受ける無次元化されたトルク  $T = T_1/(I_G\omega_0^2)$  の過渡応答を示している。さらに、図 4(d)は、角変位のグラフ(a)中の五つの時刻( $P_1 \sim P_5$ )における懸垂物と回転する腕の位置関係を示している。なお、角変位が、与えた初期角度の 10 分の 1 になったときに、制

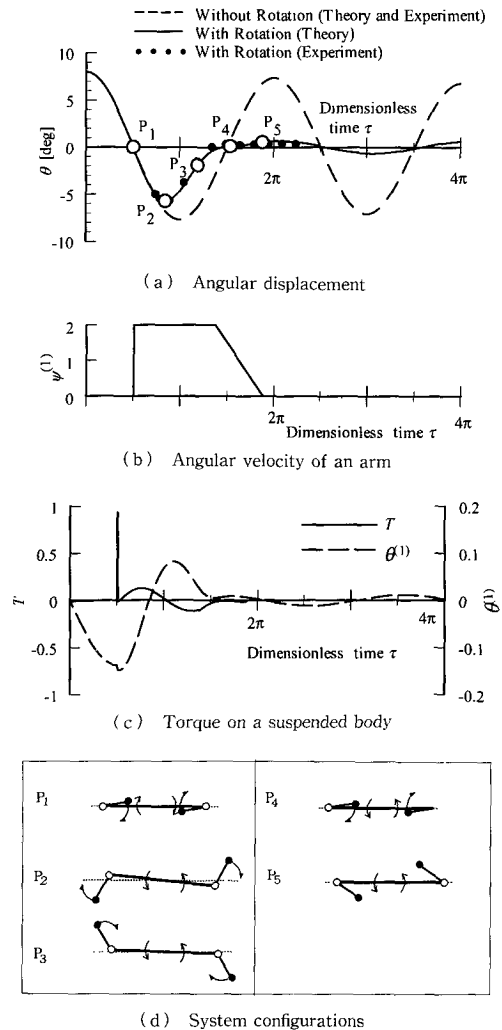


Fig. 5 Transient response ( $\omega_R/\omega_0=2$ )

振したと判断することにする。図4(a)より、腕を回転させることにより、ねじり振動は約1.9周期で制振していることがわかる。図4(b)に示すように腕の回転を、急加速し、一定速度で回転し、腕の回転周期の1/2の時間をかけて減速し回転を止めている。実験結果と計算結果はよく一致しているのがわかる。図4(c)からわかるように、ねじり振動する懸垂物は、角速度  $\theta^{(1)}$  とは逆向きにトルクを受け、徐々に制振されている。腕は、ねじり振動の開始と同時に回転させ始め、そのときの懸垂物と腕の初期相対角度  $\psi_0$  は図4(d)に示すように  $209^\circ$  である。

次に、懸垂物に初期角度  $8^\circ$  を与え、腕の回転速度を  $\omega_R/\omega_0=2$  とし、時計回りに回転させたときの結果を図5に示す。図5(a)より、制振時間は  $\omega_R/\omega_0=1$  のときの0.37の約0.7周期で制振していることがわかる。この際腕の回転は、図4の場合と同様に、一気に

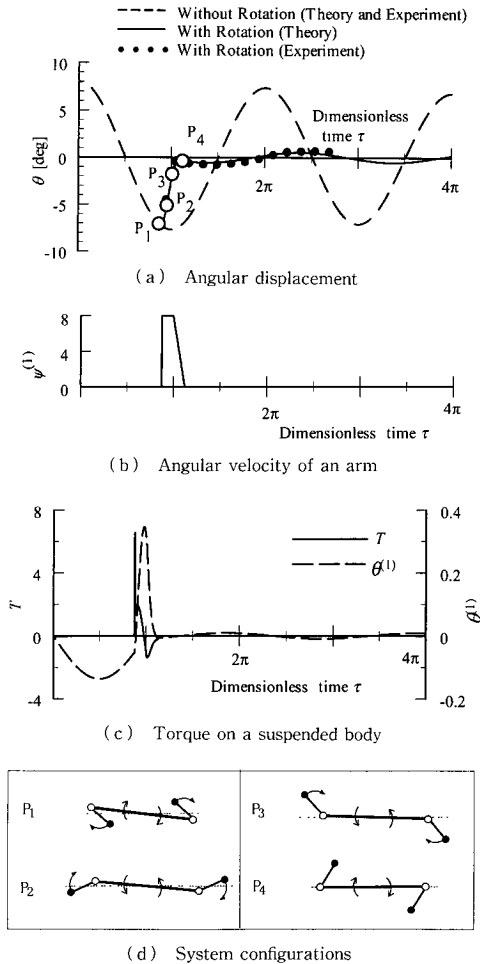


Fig. 6 Transient response ( $\omega_R/\omega_0=8$ )

加速し一定速度で回転した後、腕の回転周期の1/2の時間をかけて減速し停止させる。図5(c)に示す  $\theta^{(1)}$  と  $T$  を比較すると、懸垂物は腕の回転開始と同時に  $\theta^{(1)}$  とは逆向きの大きなトルクを受け、その後若干位相がずれているものの  $\theta^{(1)}$  と逆向きのトルクを受け制振している。図5(a)中の時刻  $P_1$  つまり  $\theta=0^\circ$  のときに腕の回転を開始し、そのときの懸垂物と腕の初期相対角度  $\psi_0$  は図5(d)に示すように  $190^\circ$  である。

最後に、初期角度  $8^\circ$  を与え、腕の回転速度をさらに高速の  $\omega_R/\omega_0=8$  とし、時計回りに回転させたときの結果を図6に示す。制振時間は約0.13周期で  $\omega_R/\omega_0=1$  のときの0.068,  $\omega_R/\omega_0=2$  のときの0.18である。腕は図4と同様に、加速後一定速度で回転し、1/2周期かけて減速させる。実験結果と計算結果はよく一致しているのがわかる。図6(c)より、懸垂物は腕の回転開始と同時に  $\theta^{(1)}$  とは逆向きの大きなトルクを受け、さらに  $\theta^{(1)}$  と同じ向きのトルクを受け加振され  $\theta=0^\circ$  付近まで近づき、その後  $\theta^{(1)}$  と逆のトルクを受けることで、急速に制振している。図6(a)に示すように腕の回転開始時刻は  $P_1$  のねじり振動を開始した後、変位角  $\theta$  が最大となる直前である。図6(d)に示すように懸垂物と腕の初期相対角度  $\psi_0$  は  $145^\circ$  である。

図7に腕を回転させない場合と腕の回転角速度を  $\omega_R/\omega_0=1, 2, 3, 10$  で回転させた場合、それぞれの懸垂物のねじり角度  $\theta$  の過渡応答の計算結果を示す。この図より、腕の回転角度が速くなるにつれ、回転開始時刻が遅くなるが、素早く  $\theta=0^\circ$  に漸近し制振できていることがわかる。このことより、腕の回転速度が速くなるほど、制振効果が大きくなると考えられる。

次に、制振可能な腕の回転開始時刻の範囲の計算結果を図8に示す。例えば、二つの×印に間にはさまれた実線の区間は、腕の回転速度を  $\omega_R/\omega_0=1$  としたときの制振が可能な腕の回転開始時刻の範囲を示してお

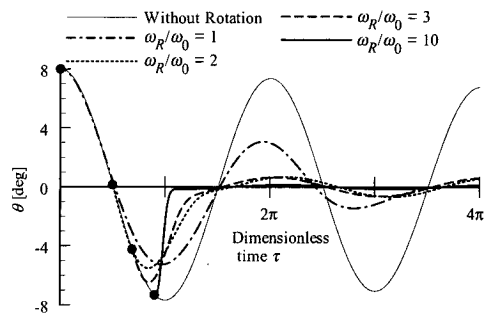


Fig. 7 Effects of rotational speed of arms on transient response

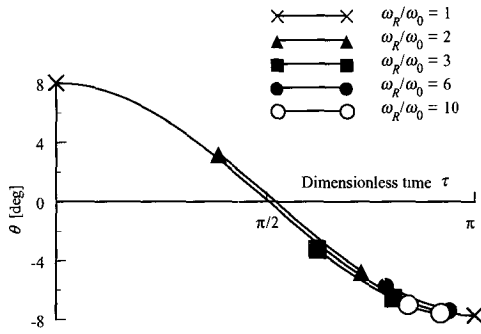


Fig. 8 Range of start time of rotating arms for suppression

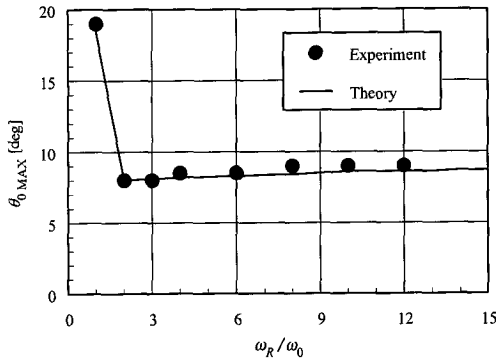
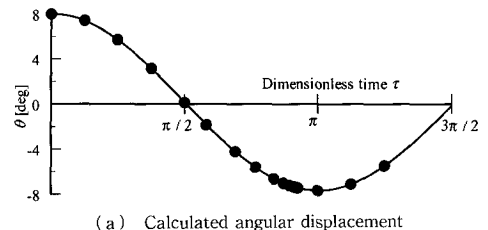


Fig. 9 Maximum suppressible angle  $\theta_{0MAX}$

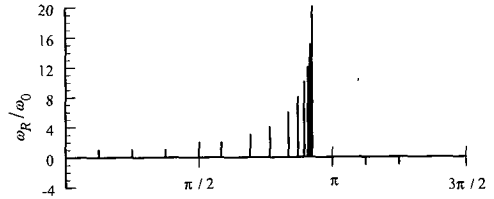
り、腕の回転速度が  $\omega_R/\omega_0=1$  の場合は、どの時刻で腕を回転させ始めても  $\psi_0$  が適切であれば制振できることがわかる。しかし、回転速度が速くなるのに伴い、制振が可能な腕の回転開始時刻が遅くなり範囲が狭くなることわかる。 $\omega_R$  が大きいほど、 $\theta$  が最大となる直前から腕を回転させ始めることになる。

腕の回転速度に対する制振可能な懸垂物の角変位  $\theta_{0MAX}$  の実験結果および計算結果を図9に示す。この図より腕の回転速度が  $\omega_R/\omega_0=1$  のときに、最も  $\theta_{0MAX}$  が大きいことがわかる。また、 $\omega_R/\omega_0$  が1より大きい場合は、 $\theta_{0MAX}$  はおよそ  $8^\circ$  である。

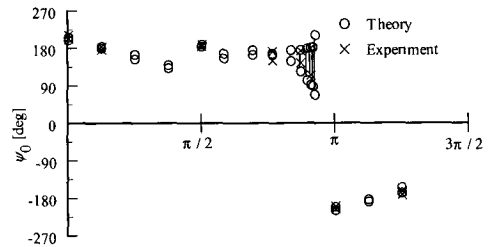
懸垂物のねじり振動を制振させるための最も効果的な腕の回転条件を図10に示す。この図では、すべての横軸は無次元時間  $\tau$  とし、図10(a)は腕を回転させ始める時刻とそのときの懸垂物の角度を黒丸で示し、図10(b)は(a)で示されている時刻から腕を回転させ始めたときに、最も効果的に制振させることができる腕の回転速度  $\omega_R/\omega_0$  とその向き、図10(c)はそのときの懸垂物に対する腕の初期相対角  $\psi_0$  の許容範囲、図10(d)は腕を回転させていた時間、つまり、制振に要した時間を示している。懸垂物の初期角度はす



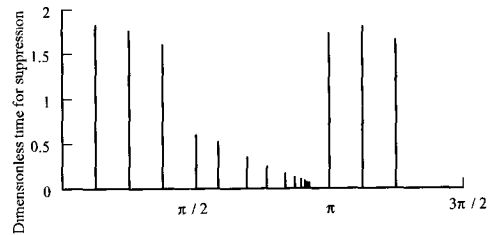
(a) Calculated angular displacement



(b) Calculated angular velocity of an arm



(c) Initial phase angle



(d) Calculated suppression time

Fig. 10 Optimal conditions for vibration suppression

べて  $8^\circ$  とした。制振するには  $\tau=0\sim\pi$  の間では、腕の回転方向はすべて時計回り  $\tau=\pi\sim 2\pi$  では反時計回りとなっている。また、 $\tau$  が  $\pi/2$  より小さい範囲では、回転速度は  $\omega_R/\omega_0=1$  のみ制振できるが、腕の回転が低速なため、制振に要する時間は長い。 $\tau=\pi/2\sim\pi$  の範囲では、腕の回転開始時刻が遅くなるにつれて、その回転速度は速くなり、制振時間が短くなっている。さらに、腕の初期相対角  $\psi_0$  の許容範囲は、腕の回転速度が速くなるにつれて、広がることわかる。 $\tau=\pi$  以降では、腕の回転方向が反時計回りになり、懸垂物に対する腕の初期相対角  $\psi_0$  は符号が反転する。しかし、腕の回転速度、腕が回転している時間および腕の初期相対角は同じ傾向を示す。

以上の結果をもとに、腕の回転速度と制振に要する

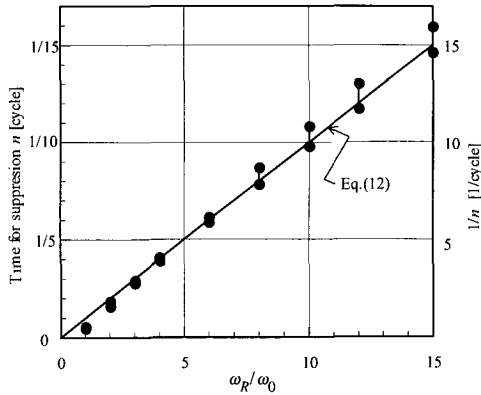


Fig. 11 Effect of rotational speed of an arm on time for suppression

時間  $T_s$  との関係について考察する。図 11 は  $T_s$  を懸垂物の固有周期 ( $2\pi/\omega_0$ ) で割った値  $n$  と腕の回転速度との関係を示す。 $n$  は制振に要する周期数であり、図 11 より  $1/n$  は  $\omega_R/\omega_0$  にほぼ比例していることがわかる。すなわち、 $T_s = 2\pi n/\omega_0$ 、 $1/n \approx \omega_R/\omega_0$  という関係から  $T_s$  は次式のように表すことができる。

$$T_s = \frac{2\pi}{\omega_0} n \approx \frac{2\pi}{\omega_R} \dots\dots\dots (12)$$

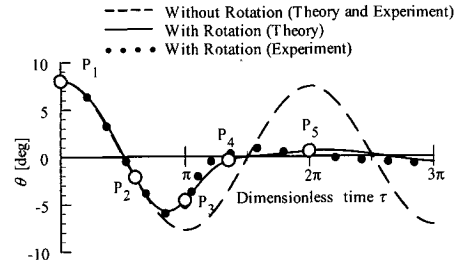
制振時間は腕の回転速度  $\omega_R$  に逆比例して短くなっている。

これまで、腕の回転は急加速して、一定の角速度にし、腕の回転周期 ( $2\pi/\omega_R$ ) の 1/2 の時間をかけて減速していた。しかし図 11 より式 (12) の関係があり、腕の加減速をより滑らかにした方が、より大きな制振効果が得られると考え、腕の回転速度を次式に示す関係で加減速する。

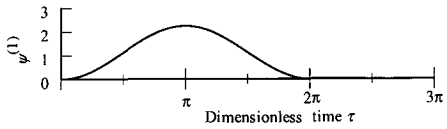
$$\psi^{(1)} = A\{1 - \cos(\omega_R/\omega_0 \cdot \tau)\} \dots\dots\dots (13)$$

ただし、 $A$  は腕の回転速度の最大値で、与えられた  $\omega_R/\omega_0$  に対して制振効果を高めるように選ぶことができるパラメータである。

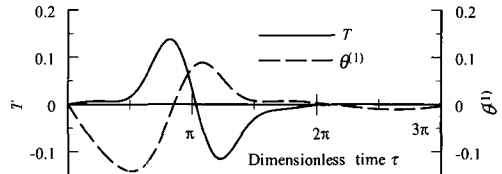
まず、 $\omega_R/\omega_0 = 1$ 、 $A = 1.14$  として時計回りに腕を回転させた場合の実験および計算結果を図 12 に示す。図 12 は、横軸には無次元時間  $\tau$  をとり、図 12 (a) は懸垂物の角度の過渡応答、図 12 (b) は腕の角速度、図 12 (c) は懸垂物が受けるトルク、図 12 (d) は懸垂物と腕の位置関係を表している。初期角度  $8^\circ$  を与え図 12 (a) の  $P_1$  の位置から腕を回転させ始めている。この場合、腕を動かしている時間は、ねじり振動の固有周期と等しい。図 4 と比較すると、与えた初期角度は違うものの、明らかに腕の回転方法を滑らかにしたほうが制振の効果が大きいことがわかる。



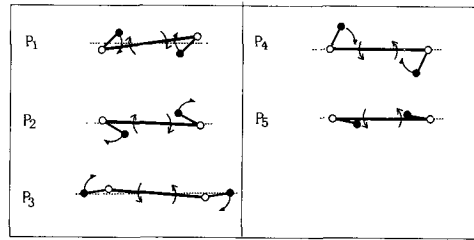
(a) Angular displacement



(b) Angular velocity of an arm



(c) Torque on a suspended body



(d) System configuration

Fig. 12 Transient response ( $\omega_R/\omega_0 = 1$ )

さらに、初期角度  $8^\circ$  を与え  $A = 4.95$ 、 $\omega_R/\omega_0 = 6$  として、時計回りに腕を回転させ制振させた場合の実験および計算結果を図 13 に示す。ただし、腕は図 13 (a) 中の  $P_1$  の位置から回転を開始し、そのときの腕と懸垂物の初期相対角度は図 13 (d) に示すとおりである。図 12 に示す  $\omega_R/\omega_0 = 1$  の場合に比べ、制振効果がさらに大きくなり、制振するまでの時間が短くなっていることがわかる。

図 14 には、 $\omega_R/\omega_0 = 1, 3, 10$  とした場合、懸垂物の角変位の過渡応答の計算結果を示す。図 7 の結果と比較すると、 $\omega_R/\omega_0$  が大きくなるほど腕の回転開始時刻は遅くなるが、制振の効果が大きくなり素早く  $0^\circ$  に漸近するなど、同じ傾向を示している。しかし、 $\omega_R$  が低速な場合、式 (13) の速度パターンのほうが図 7 に

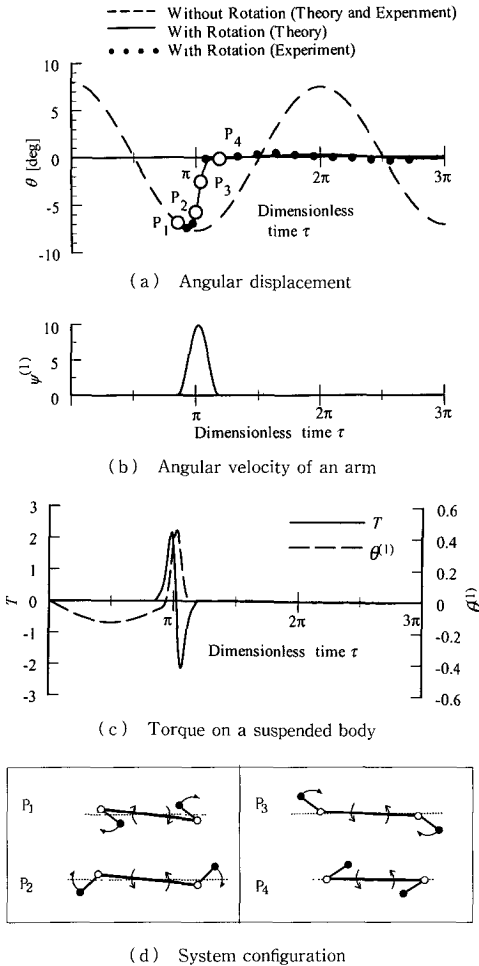


Fig. 13 Transient response ( $\omega_R/\omega_0=6$ )

示された結果より速やかに制振できることがわかる。以上の結果より、式(13)で与えられた腕の加減速により、効果的に制振できることが確認できた。

5. 結 論

(1) ワイヤで吊られた懸垂物のねじり振動を、懸

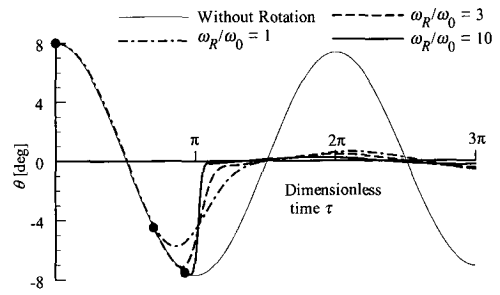


Fig. 14 Effects of rotational speed of arms on transient response

垂物の両端に取付けた二つの腕を回転させることで速やかに制振できる。

(2) 制振させるためには、腕の回転速度  $\omega_R$ 、腕を動かし始める懸垂物の角度、懸垂物と腕との初期相対角度  $\psi_0$  を適切に設定する必要がある。

(3) ねじり振動の制振時間  $T_s$  は腕の回転速度  $\omega_R$  とほぼ逆比例の関係があり、腕の回転速度が速いほど、制振時間は短い。

今後実機へ適用するために、パラメータ値についてさらに検討を行う予定である。

文 献

- (1) 佐久本政和・林 亨, ファジィ制御のコンテナクレーン振れ止めシステムへの適用, 機論, 58-550, C(1992), 1792-1797.
- (2) 白井潤二・ほか7名, コンテナクレーンの振れ止め制御技術の実用化, 機論, 59-561, C(1993), 1443-1447.
- (3) 大久保孝一・ほか3名, クレーン用制振装置の開発, 機講論, No. 940-26(I)B (1994), 154-157.
- (4) 村田五雄・ほか3名, 横行クレーンのサーボ形ふれ止め制御, 機論, 61-582, C(1995), 513-518.
- (5) 小池裕二・ほか4名, コンテナクレーン吊り荷用制振装置に関する研究, 機講論, No. 97-10 A(1997), 339-342.
- (6) 小幡寛治, コンテナ用クレーンのスタッキングガイド, 日本機械学会講習会教材, No. 98-78(1999), 9-15.