

# ⑭ ロープウェイ搬器の支柱通過時シミュレーション

交通システム研究部

※佐藤 久雄

押立 貴志

森 裕貴

廣瀬 道雄

## 1. はじめに

ロープウェイ搬器（9名乗車）が上り方向に走行中、支柱通過時に大きく後方に振れ（状況を図1に示す）、搬器が支柱に衝突する事故が2015年に発生した。その際、乗客1名が負傷した。

突風が事故原因の一つとされ、当所において調査分析等を実施した。これまで、事故後に測定された風向・風速の分析結果、搬器に突風が作用した時の搬器の振れのシミュレーション結果、突風に対する運転管理方法の検討結果等について報告<sup>(1)</sup>した。

本ロープウェイ施設の搬器には、前後方向の搬器の振れを抑えるために動揺減衰装置が装着されている。現状では、本装置の減衰力は、停留所到着時の搬器の揺れ低減、支柱通過時の搬器の乗り心地向上等を目的として設定されている。一方、支柱通過時における突風に対する安全性向上を目的として設定された場合には、支柱通過時におけるより安全な運行が期待される。

支柱通過時における突風に対する安全性向上の検討に際しては、突風が作用しない場合の支柱通過時における搬器の振れを明確にする必要があることから、本報告では、無風状態の支柱通過時における上記搬器の振れについて、基本的な挙動の検討を行う。

まず、上記搬器が支柱を通過する際の前後方向振れについて、シミュレーションモデルの検討を行った結果について述べる。

さらに、支柱通過時において、動揺減衰装置の減衰力が搬器の振れに与える影響について、シミュレーションによる検討及び考察を行った結果について述べる。

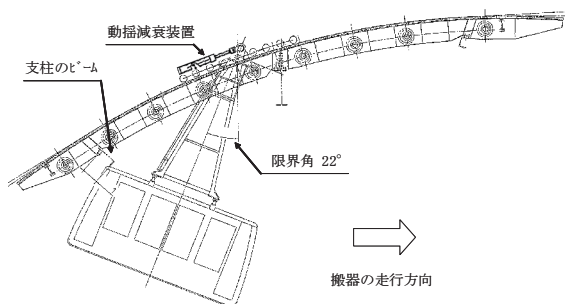


図1 搬器と支柱構造物



図2 実搬器試験状況

## 2. 実搬器試験

当該施設において、事故搬器と反対側の搬器を用いて、走行試験等を実施した。搬器の振れを測定するために、動揺測定装置（ジャイロ）を搭載した。その試験状況を図2に示す。

### 2. 1. 試験概要

当該支柱通過時における搬器の後方最大振れ角の測定、動揺減衰装置がフリー及び正規の状態における自由振動波形の測定等を実施した。

### 2. 2. 最大振れ角測定結果

搬器の当該支柱通過時における後方最大振れ角の測定結果を表1に示す。

### 2. 3. 等価振り子長さの導出

搬器の動揺減衰装置がフリーの状態において、自由振動データから周期を実測することにより、搬器の振れの等価振り子長さを算出した。その結果を表2に示す。

### 2. 4. 減衰比の導出

搬器の動揺減衰装置が正規の状態において、減衰自由振動データの隣り合う波形のピーク値を実測すること

表1 走行試験による搬器後方最大振れ角測定結果

No.	荷重条件	後方最大振れ角 (deg) ※	備考
1	9名乗車	7.5	・事故当時の前寄り乗車配置を再現 ・前寄り乗車による初期後方偏り角度 (3.0deg)
2	空車	4.2	

※ 第2号支柱通過時振れ角、運転速度：3.6m/s、走行方向：上り、動揺減衰装置：正規状態、

表2 等価振り子長さの導出

No.	荷重条件	平均周期 T (sec)	等価振り子長さ L (m) $L = T^2 g / (4\pi^2)$	備考
1	9名乗車	4.936	6.048	・動揺減衰装置：フリー状態 ・静止時自由振動データ
2	空車	4.404	4.815	・動揺減衰装置：フリー状態 ・走行時自由振動データ

表3 減衰比の導出

No.	(+側) ピーク振れ角 (deg) ※	$a_n/a_{n+m}$ (n=1, m=3の場合)	対数減衰率 $\delta = \frac{1}{m} \cdot \ln \frac{a_n}{a_{n+m}}$ (n=1, m=3の場合)	減衰比 $\zeta = \delta / (2\pi)$
第1P ( $a_1$ )	8.199	2.658	0.3258	0.0519
第2P ( $a_2$ )	6.298			
第3P ( $a_3$ )	4.628			
第4P ( $a_4$ )	3.085			

※ 荷重条件：9名乗車時、動揺減衰装置：正規状態、使用データ：静止時減衰自由振動データ

により、搬器の振れの減衰比を算出した。その結果を表3に示す。

### 3. 支柱通過時におけるシミュレーションモデル

搬器が支柱通過時における前後方向の振れについて、シミュレーションモデルの検討を行った。

#### 3. 1. シミュレーションモデル

支柱通過時におけるシミュレーションモデルを図3に示す。搬器を1自由度の振り子とし、座標系は、振り子の支点固定座標系とする。支柱通過時における搬器の振れは、振り子の支点が支索軌道上を速度  $V$  で移動する時の挙動として考える。

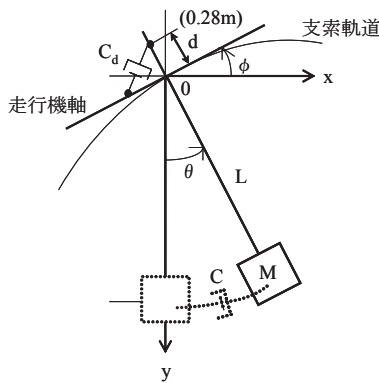


図3 シミュレーションモデル

この時、搬器に働く力は、「求心加速度に見合う慣性力（以後、「慣性力」という）」、重力、及び「軌道勾配変化に伴い減衰装置から搬器に働く力（以後、「減衰装置からの力」という）」である。

ここで、振り子の角変位を  $\theta$ 、軌道勾配を  $\phi$ 、搬器の質量を  $M$ 、支点からの等価振り子長さを  $L$ 、搬器の振れの固有角振動数を  $\omega$ 、等価振り子長さ位置での減衰係数を  $C$ 、搬器の振れの減衰比を  $\zeta$ 、運転速度を  $V$ 、支索受け部の曲率半径を  $R$  とする。この時、支柱通過時の搬器の運動方程式は、次のように求められる。

$$ML\ddot{\theta} = M \frac{V^2}{R} \cos \phi \sin \theta - M \frac{V^2}{R} \sin \phi \cos \theta - Mg \sin \theta - CL\dot{\chi} \quad (1)$$

但し、 $\chi = \theta - \phi$ 、 $\omega = \sqrt{g/L}$ 、 $C = 2M\omega\zeta$  (2)

ここに、(1)式右辺の第1項が「慣性力」のy方向成分の寄与分、第2項が「慣性力」のx方向成分の寄与分、第3項が重力の寄与分、第4項が「減衰装置からの力」の寄与分である。

#### 3. 2. 支索軌道の式の検討

搬器が支柱通過時における支索軌道の検討図を図4に示す。進入勾配(deg)を  $\phi_1(t=t_1)$ 、退出勾配(deg)を

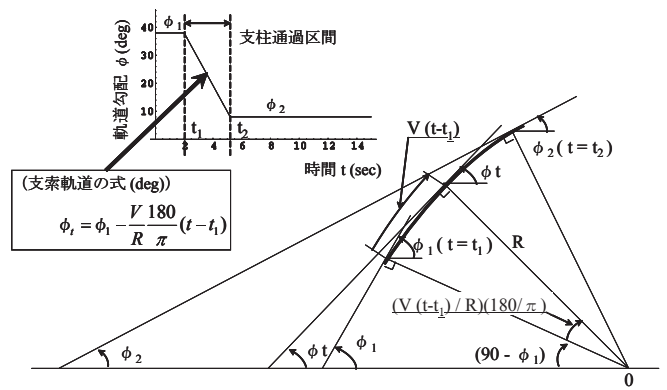


図4 支索軌道図

$\phi_2(t=t_2)$ 、時間  $t$  における軌道勾配(deg)を  $\phi_t$  とすると、支索軌道の関係式は、次のように求められる。

$$\phi_t = \phi_1 - \frac{V}{R} \frac{180}{\pi} (t - t_1) \quad (3)$$

$$\dot{\phi}_t = -\frac{V}{R} \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

$$t_2 = t_1 + (\phi_1 - \phi_2) \frac{R}{V} \frac{\pi}{180} \quad (5)$$

支柱通過時における搬器の振れは、式(3) (4) (5)の条件で、式(1)を解くことにより求められる。本報では、式(1)は非線形式として、シミュレーションを実施した。

#### 3. 3. シミュレーションモデルの妥当性の検討

シミュレーションの妥当性を検証するために、シミュレーション値と実測値を比較した。シミュレーションに用いた数値を表4に、上り走行時における比較結果を図5に、下り走行時における比較結果を図6に示す。

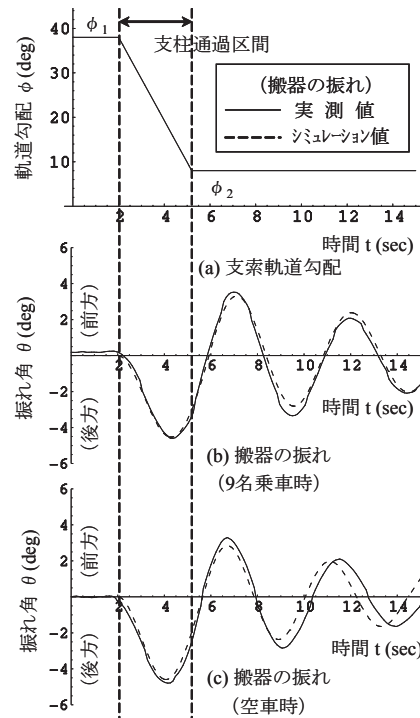


図5 シミュレーションの妥当性の検討（上り走行時）

表4 シミュレーションに用いた数値

項目	9名乗車	空車	備考
搬器質量 M (kg)	2665	2125	・ノーカー値
搬器の等価振り子長さ L (m)	6.0	4.8	・自由振動ゲートからの測定計算値
減衰比 $\zeta$	0.052	0.058	・ $\zeta$ (9名乗車時) は、減衰自由振動ゲートからの測定計算値 ・ $\zeta$ (空車) は、 $\zeta=C/(2m\omega)$ より算出
運転速度 V (m/s)	3.6	3.6	・事故時運転速度 (本施設搬器の最高運転速度)
支索受け部の曲率半径 R (m)	22	22	・設計値(設計図面より)
上り走行時 軌道勾配	進入勾配 $\phi_1$ (deg)	38	・推定値(設計図面より)
	退出勾配 $\phi_2$ (deg)	8	
下り走行時 軌道勾配	進入勾配 $\phi_1$ (deg)	6	・推定値(設計図面より)
	退出勾配 $\phi_2$ (deg)	-36	

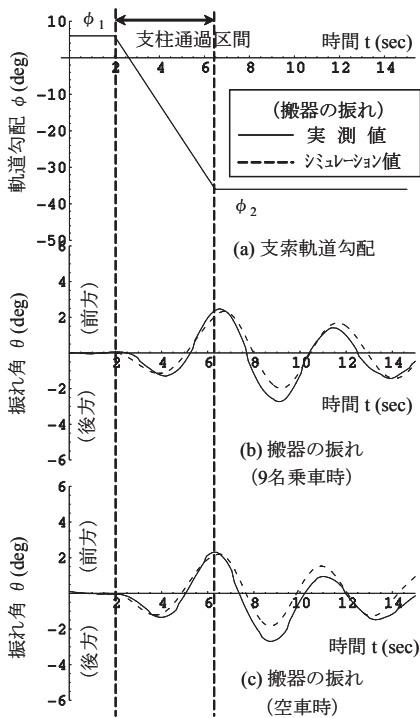


図6 シミュレーションの妥当性の検討(下り走行時)

比較データは、 $t_1 = 2\text{sec}$  として、支柱進入2秒前からの15秒間とした。シミュレーションに際しては、支柱進入前は $\phi_1$ 一定、支柱退出後も $\phi_2$ 一定と仮定している。

支柱通過時のシミュレーション値は、実測値と比較的良好合っていることがわかる。支柱通過後に少し差が出ているが、これは、支柱通過後の軌道勾配が、実際は変化していることによると考えられる。

#### 4. 減衰比の搬器振れへの影響

支柱通過時における「減衰比の搬器振れへの影響」について、シミュレーションにより検討を実施した。

##### 4. 1. 上り走行時における検討

上り・9名乗車時における「減衰比の搬器振れへの

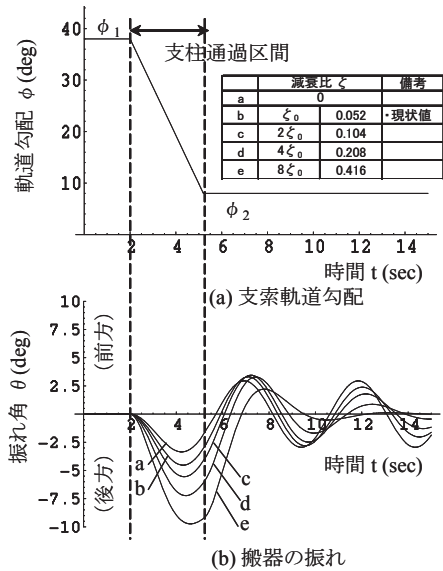


図7 減衰比の搬器振れへの影響(上り、9名乗車時)

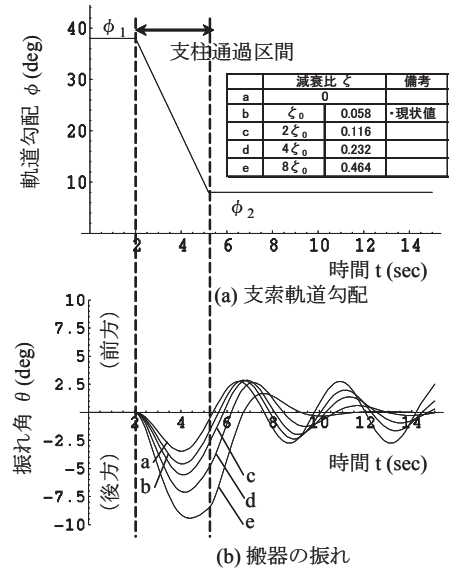


図8 減衰比の搬器振れへの影響(上り、空車時)

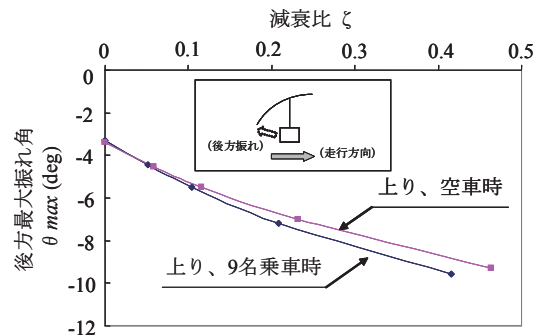


図9 減衰比 vs 支柱通過時後方最大振れ角(上り、9名乗車時 & 空車)

影響」の検討結果を図7に、上り・空車時における結果を図8に示す。また、減衰比と支柱通過時後方最大振れ角の関係を図9に示す。

上り方向に支柱通過する際には、搬器は後方へ振れるとともに、減衰比の増大とともに、搬器の後方への振れが増大することがわかる。

これは、上り方向に支柱通過する際には、「慣性力」により搬器は後方へ振れ、さらに、減衰比の増大とともに「減衰装置からの力」が増大し、搬器の後方への振れが増大すると考えられる。

#### 4. 2. 下り走行時における検討

下り・9名乗車時における「減衰比の搬器振れへの影響」の検討結果を図10に、下り・空車時における結果を図11に示す。また、減衰比と支柱通過時前方最大振れ角の関係を図12に示す。

下り方向に支柱通過する際には、支柱との接触角度の余裕の関係から、搬器の前方への振れの検討が

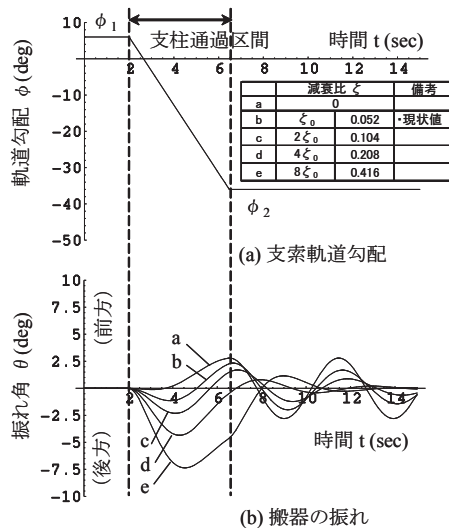


図10 減衰比の搬器振れへの影響 (下り、9名乗車時)

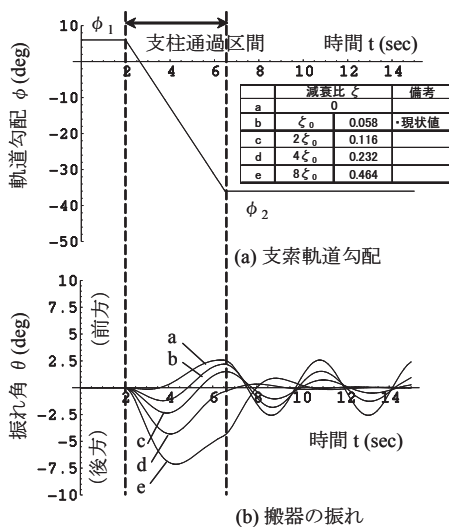


図11 減衰比の搬器振れへの影響 (下り、空車時)

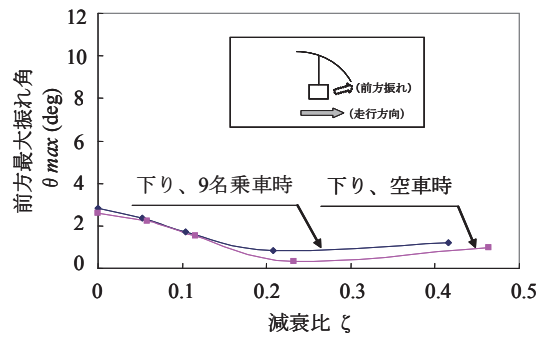


図12 減衰比 vs 支柱通過時前方最大振れ角 (下り、9名乗車時 & 空車)

重要となる。

下り方向に支柱通過する際には、搬器は前方へ振れるとともに、減衰比の増大とともに、搬器の前方への振れが減少することがわかる。

これは、下り方向に支柱通過する際には、「慣性力」により搬器は前方へ振れ、減衰比の増大とともに、「減衰装置からの力」が搬器の後方への振れ方向に働き増大するため、搬器の前方への振れが減少すると考えられる。

#### 5. まとめ

ロープウェイ搬器が支柱を通過する際の搬器の振れについて、シミュレーション等により検討を実施した。主な結果は、次のとおりである。

- (1) 搬器が支柱を通過する際の前後方向振れについて、シミュレーションモデルの検討を行った。支柱通過時のシミュレーション値は、実測値と良く合っていることを確認した。
- (2) 上り方向に支柱通過する際には、搬器は後方へ振れるとともに、減衰比の増大とともに、搬器の後方への振れも増大する。
- (3) 下り方向に支柱通過する際には、搬器は前方へ振れるとともに、減衰比の増大とともに、搬器の前方への振れは減少する。

今後の検討課題としては、「支柱通過時に突風が搬器に作用した場合における、減衰比と搬器振れとの関係の検討」等が上げられる。

事故の再発防止のために、一層の安全対策を講じることが期待される。

#### (参考文献)

- (1) 佐藤ほか3名、平成27年度 交通研フォーラム2015、2015-11、129-132
- (2) 塚田ほか4名、資源・素材2001(秋季大会)、2001-9、303-306