

⑰ ロープウェイ施設における風分析と搬器の突風応答シミュレーション

交通システム研究領域 ※佐藤 久雄 押立 貴志 森 裕貴 廣瀬 道雄

1. はじめに

ロープウェイ施設において、搬器が支柱に衝突する事故が発生し、事故原因の一つとして、突風の発生が指摘されている。

本報告では、まず、事故概要と主な調査概要について簡単に触れ、その後、本施設において事故後に測定された風向・風速の分析結果について述べる。

さらに、搬器に突風が作用した時の搬器の振れについて、シミュレーションにより検討を行った結果について述べるとともに、本シミュレーションにより、当該施設における突風に対する運転管理方法について検討を行った結果について述べる。

2. 事故概要

上り搬器（定員45名）は、平成27年1月、山麓停留場を出発し、運転速度3.6m/sで運転中、第2号支柱付近にさしかかった際、搬器が大きく後方に揺れ、搬器が第2号支柱のビームと衝突した。

上り搬器には乗客8名および乗務員1名が乗車し、下り搬器には乗客2名および乗務員1名が乗車していた。このうち上り搬器の椅子に腰掛けていた乗客1名が床面に滑り落ちて負傷（尾骨骨折）した。

事故発生は、当日15回目の運行であった。

3. 主な調査概要

これまで現地等において、現場調査、搬器調査、関係者からの聞き取り調査、走行試験調査、メーカーからの提供資料による調査等を実施した。

現場の状況調査等から、乗客は搬器の前側に偏って乗車していたこと、当該支柱における搬器と支柱構造物（ビーム）との接触限界角は22°であること（図1参照）等が明らかになった。

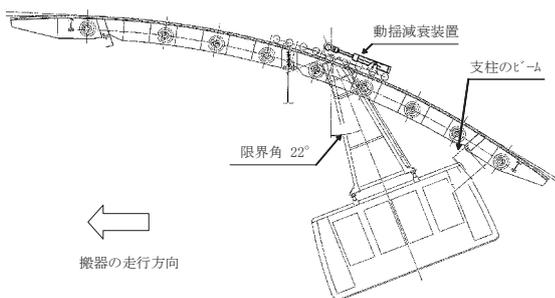


図1 搬器と支柱構造物との接触限界角

また、これまでの調査検討結果では、搬器の動揺減衰装置、緊張装置、原動装置、支索、搬器走行部、線路沿線等に異常は認められなかった。

一方、事故当時の気象状況については、近接した別区線においては、15m/s～18m/sの強風が記録されている状況であった。本施設の当該支柱には、事故当時、風速計は設置されていなかったため詳しい状況は不明であるが、一時的に強風が生じていた可能性も否定できない状況であったと考えられる。

4. 風分析

事故後に当該支柱に設置された風向風速計により測定された風向および風速について分析を実施した。今回の分析の対象は、事故後の風向・風速ではあるが、当該支柱における基本的な風の傾向については、概略を把握できるものと考えられる。

風の測定は、搬器が当該支柱を通過する際の風向・風速の指示値を読み取ることとし、1運行内にその指示値を超える値が他の場所で指示された場合は、その指示値を1運行内の代表値とした。分析の対象時期は、測定開始後、比較的風の強い時期を選んで実施した。

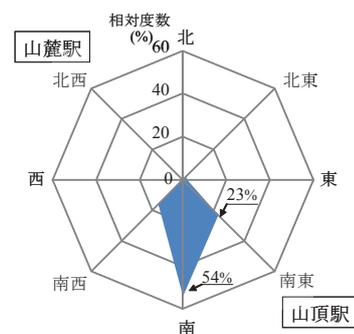


図2 2号支柱における風向分布

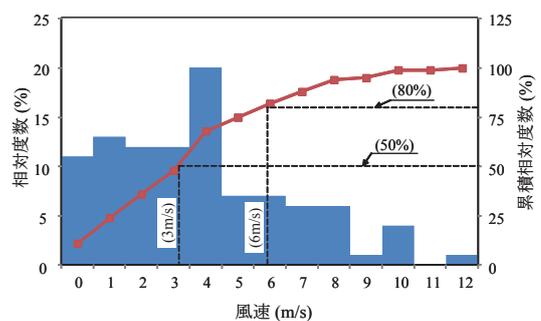


図3 2号支柱における風速分布

4. 1. 風向分析

2号支柱における風向分析結果を図2に示す。南風が54%、南東の風が23%であり、2号支柱においては、「ほぼ山頂駅から山麓駅方向の風」が支配的であった。

4. 2. 風速分析

2号支柱における風速分析結果を図3に示す。測定時期における最大風速は12m/sであり、測定時期の80%は6m/s以下、50%は3m/s以下であった。

5. 突風応答シミュレーション

静止した搬器に、正面から突風が作用した時の搬器の振れについて、シミュレーションにより検討を実施した。

5. 1. シミュレーションモデル

当該搬器のシミュレーションモデルを図4に示す。搬器を1自由度の振り子とし、角変位を θ 、搬器の質量を M 、支点からの等価振り子長さを L 、支点から動揺減衰装置までの距離を d 、動揺減衰装置取付位置での減衰係数を C_d 、等価振り子長さ位置での減衰係数を C 、風外力を F とし、等価振り子長さ位置に作用するとする。この時、運動方程式は、次のように求められる。

$$\ddot{\theta} + 2\zeta\omega\dot{\theta} + \omega^2\theta = F/(ML) \quad (1)$$

但し、 $\omega = \sqrt{g/L}$: 固有角振動数、

$$\zeta = C/(2M\omega) : \text{減衰比}, C = C_d(d/L)^2 \quad (2)$$

また、風外力は、次式により与えることとした。

$$F = (1/2)\rho C_0 A U^2 \quad (3)$$

但し、 ρ : 空気密度、 C_0 : 搬器の空力抵抗係数(前後方向)、 A : 搬器の風圧面積(前後方向)、 U : 風速である。

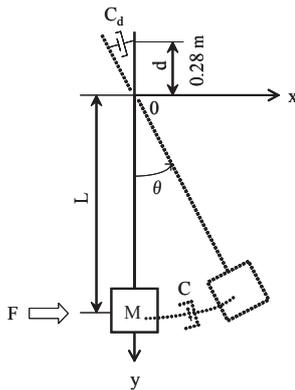


図4 シミュレーションモデル

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
2	空車	4.2	
3	満車	4.7	

※ 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
3	満車	5.173	6.643	・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

5. 2. 実搬器試験

ジャイロを用いての実搬器試験により、搬器の当該支柱通過時における後方最大振れ角(表1に示す)、動揺減衰装置がフリーの状態における自由振動波形等の測定を実施した。

5. 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、等価振り子長さを算出した。その結果を表2に示す。

5. 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により、減衰比を算出した。その結果を表3に示す。

5. 5. シミュレーションの検証

シミュレーションの妥当性を検証するために、初期変位に対する時間応答を比較した。シミュレーションで用いた数値を

表4 初期変位応答シミュレーションに用いた数値

項目	数値	備考
搬器質量 [9名乗車時] M (kg)	2665	・メーカー値
搬器の等価振り子長さ L (m)	6.0	・自由振動データからの測定計算値
減衰比 ζ	0.052	・減衰自由振動データからの測定計算値

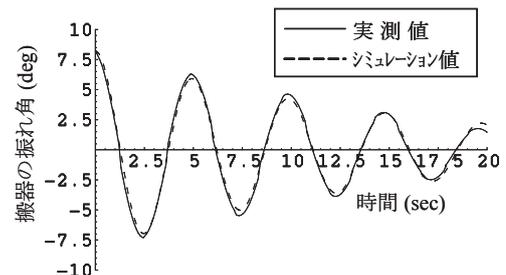


図5 初期変位応答比較(実測値とシミュレーション値)

表4に、検証結果を図5に示す。シミュレーション値は、実測値と良く合っていることがわかる。

5. 6. 突風に対する搬器の応答

まず、搬器の最大振れ角に対する突風の継続時間 Δt の影響について、シミュレーションを実施した。シミュレーションに用いた数値を表5に、シミュレーション結果を図6-1 (9名乗車時)、図6-2 (空車時) および図6-3 (満車時) に示す。

表5 突風応答シミュレーションに用いた数値

項目	9名乗車	空車	満車	備考
搬器質量 M (kg)	2665	2125	4825	・メーカー値
搬器の等価振り子長さ L (m)	6.0	4.8	6.6	・自由振動データからの測定計算値
搬器の風圧中心位置 Lw (m)	↑	↑	↑	・「風圧中心位置=等価振り子長さ」とした
風圧面積 [前後方向] A (m ²)	6.92	6.92	6.92	・メーカー値
空力抵抗係数 [前後方向] C ₀	2.0	2.0	2.0	・メーカー値、角柱相当
空気密度 ρ (kg/m ³)	1.23	1.23	1.23	・1気圧、15° C
減衰比 ζ	0.052	0.058	0.030	・ ζ (9名乗車時) は、減衰自由振動データからの測定計算値 ・ ζ (空車、満車) は、 $\zeta=C/(2m\omega)$ より算出

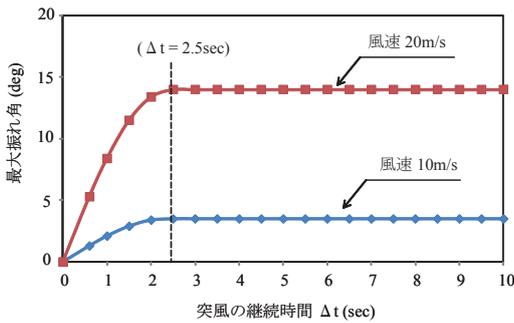


図6-1 突風の継続時間 Δt の影響 (9名乗車時)

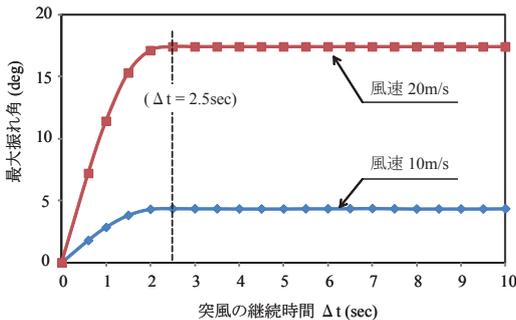


図6-2 突風の継続時間 Δt の影響 (空車時)

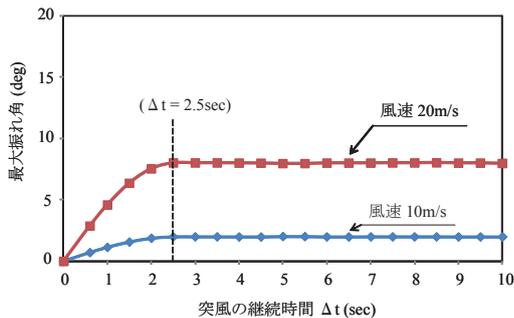


図6-3 突風の継続時間 Δt の影響 (満車時)

本施設の搬器については、荷重条件によらず、 $\Delta t = 2.5\text{sec}$ を超えると搬器の最大振れ角は一定になることがわかる。シミュレーションの波形例を図7-1 ($\Delta t = 2.5\text{sec}$ の場合) および図7-2 ($\Delta t = 10\text{sec}$ の場合) に示す。

また、搬器の最大振れ角に対する突風の風速の影響 ($\Delta t = 2.5\text{sec}$ の場合) をシミュレーションした結果を、図8-1 (9名乗車時)、図8-2 (空車時) および図8-3 (満車時) に示す。さらに、この結果を用いて、搬器が支柱と接触するまでの許容振れ角に対する突風の風速を求めた結果を表6に示す。

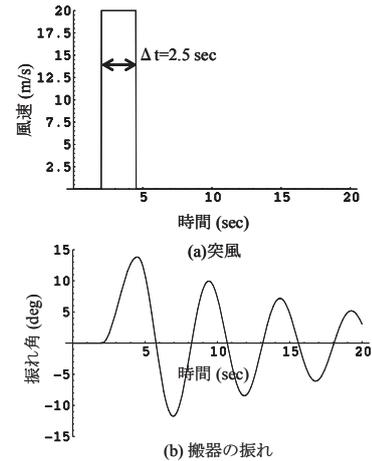


図7-1 シミュレーション波形例 ($\Delta t = 2.5\text{sec}$ 、風速 20m/s、9名乗車時)

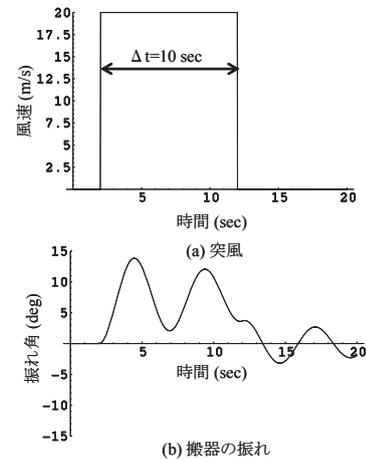


図7-2 シミュレーション波形例 ($\Delta t = 10\text{sec}$ 、風速 20m/s、9名乗車時)

表6 搬器の許容振れ角と許容風速

No.	荷重条件	搬器と支柱との限界角 (deg)	後方最大振れ角 ※ (deg)	搬器の許容振れ角 (deg)	許容振れ角時の風速 (m/s)	(参考) 最大振れ角 (y: deg) ~ 風速 (x: m/s) の近似式
1	9名乗車	22	7.5	14.5	20.3	$y = 0.035x^2$
2	空車	22	4.2	17.8	20.2	$y = 0.044x^2$
3	満車	22	4.7	17.3	29.4	$y = 0.02x^2$

※ 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

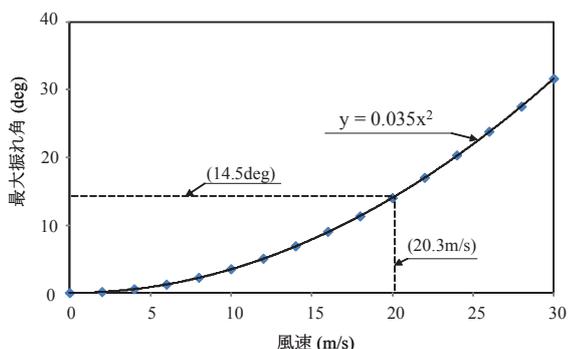


図 8-1 最大振れ角 (9名乗車時、 $\Delta t=2.5\text{sec}$)

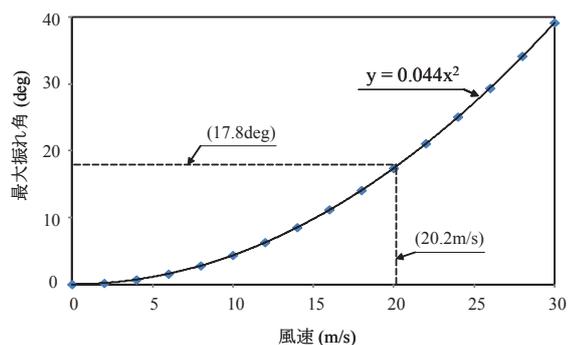


図 8-2 最大振れ角 (空車時、 $\Delta t=2.5\text{sec}$)

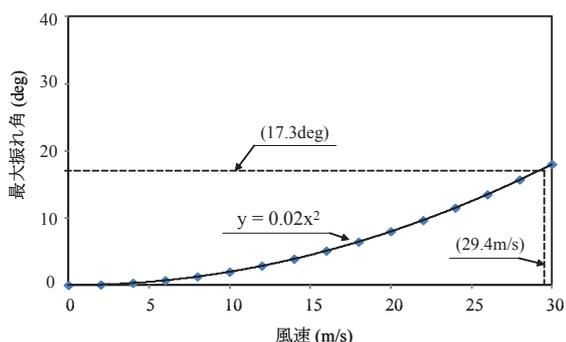


図 8-3 最大振れ角 (満車時、 $\Delta t=2.5\text{sec}$)

6. 突風に対する運転管理方法の検討

本施設における運転管理のために、当該支柱を通過する際の許容振れ角に対する突風の風速および突風の継続時間 Δt に関する突風管理図をシミュレーションにより求めた。その結果を図 9-1 (9名乗車時)、図 9-2 (空車時) および図 9-3 (満車時) に示す。

安全な突風風速は、空車条件の時に最も低くなっており、この時の風速が運転管理のための重要な指標になると考えられる。また、搬器にカバを搭載することにより、安全な領域が広がることが裏付けられたと考えられる。

7. まとめ

ロープウェイ施設において、突風の発生が事故原因の一つとされる搬器衝突事故について、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。

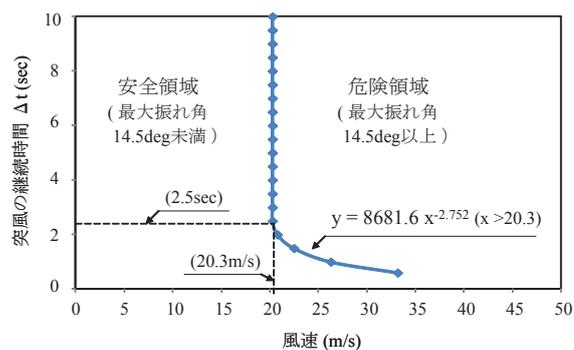


図 9-1 突風管理図 (9名乗車時、許容振れ角=14.5deg)

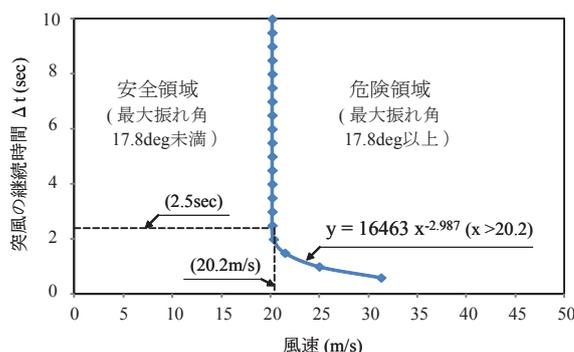


図 9-2 突風管理図 (空車、許容振れ角=17.8deg)

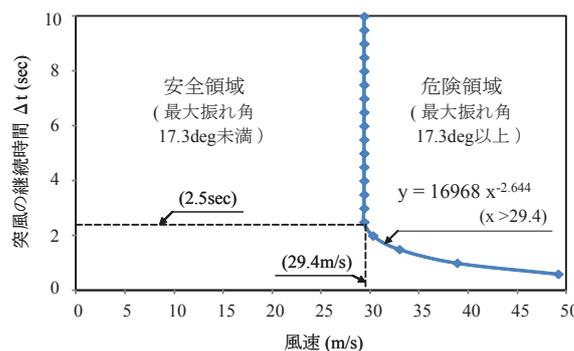


図 9-3 突風管理図 (満車、許容振れ角=17.3deg)

- (1) 当該支柱における風向分析を実施し、「ほぼ山頂駅から山麓駅方向の風」が支配的(77%)と認められた。
- (2) 突風応答シミュレーションを実施し、搬器の振れ角に対する突風の風速および継続時間の影響を把握した。
- (3) 当該施設における突風管理の 1 例を図で示した。

なお、本報告における突風の風速は、「搬器速度に対する突風の相対速度による風速」を示している。例えば、3.6m/sの速度で搬器が走行している場合に、正面から10m/sの突風が作用した時には、この搬器に対する突風の相対速度は13.6m/sとなり、この速度の突風に対する搬器振れ角が発生することになる。

今後の検討課題としては、突風が連続的に搬器に作用した場合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。