

鋼索鉄道的高速化に伴うブレーキ性能評価試験

千島 美智男* 佐藤 久雄* 細川 成之*

Evaluation Test for Braking performance of high speed funicular railway

by

Michio CHISHIMA* Hisao SATO* Naruyuki HOSOKAWA*

Abstract

There are 26 funicular railway lines in our country. Most of them are old and were constructed before 1965.

A funicular railway rebuilt in July 2001, carried out the speedup by applying the new designed vehicle, and the specifications of vehicle, such as speed and stopping distance, departed from usual railway regulation. Therefore, braking tests were carried out in order to confirm the safety of the funicular railway system.

This paper describes results of braking tests and test method performed in this funicular railway system.

1. はじめに

我が国の鋼索鉄道は、一般にはケーブルカーと呼ばれており、平成13年3月末現在、全国で23事業者26路線¹⁾で運行されている。施設の多くは昭和40年以前に建設されており、最近では、施設の老朽化に伴い設備の更新が行われている。更新に際しては、車体、軌道等一部を対象に行われている場合が多いが、車両、軌道及び原動設備等を含めた施設全体のリニューアルを実施した例もある。

平成13年7月に施設の更新に際し、車両とロープの接続方法、台車構造、車体及びブレーキの構造等に新しい方式を採用した新型式の車両を導入し、速度向上を図った施設が建設された。この施設では、新型式の車両による速度向上に伴い、自動ブレーキが作動する速度及び停止距離が規則で規定された値を超えることとなった。このため、規則上の特別構造に該当することとなり、自動ブレーキの機能試験を行うことが運輸開始に際しての許可条件とされ、当所で試験を実施した。

本報では、この自動ブレーキ等の制動試験実施に際し検討を行った試験方法の考え方を中心に試験結果例を含めて報告する。

2. 試験実施施設の特徴的な事項

本施設は、運転速度の向上に際し、自動ブレーキ装置に従来より広く用いられてきた機械式のテオドルベル型から油圧開放型のバネ力を用いた新しい方式であるスプリングブレーキ型(Fig.1)に変更して

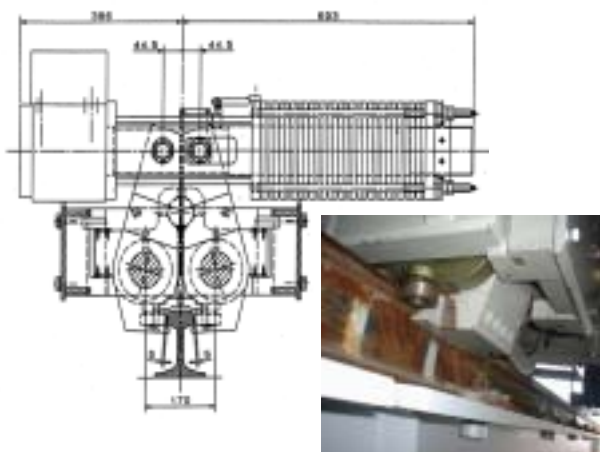


Fig.1 Rail brake equipment



Fig.2 Haul rope attachment device (Rope drum)

Table 1 Comparison between old and new systems.

Item		Old system	New system
Operating	Maximum speed	3.0 m/s	5.0 m/s
	Time of ride	6.85 min	4.5 min
	Capacity	920 persons/h	1300 persons/h
Line	Line length	1190.96 m	
	Difference of level	441.20 m	
	Gradient maximum	52.80%	
	Gradient minimum	20.60%	
	Rail type	37 kg	40 kgN
Gauge		1067 mm	
Wire rope	Construction symbol	6 × F [(2 × 3+3)+12+12]	6 × P · F (25)
	Rope diameter	38 mm	
Vehicles	Number of vehicles	2	
	Capacity of one vehicle	116 persons	112 persons
	Empty vehicle condition	9,800 kg	11,000 kg
	Length × width × Height	12000 × 2,750 × 3,840	12,450 × 2,740 × 3,425 mm
	Rigid wheel base	6,000 mm	6,400 mm
	Wheel diameter	550 mm	
	Rail brake	Theodore Bell	Spring brake
	Haul rope attachment	Socket	Rope drum
Drive	Power supply	Induction motor(147kW)	D.C.motor(340kW)

いる。また、ロープ端末の車両への接続方法には、従来のソケット式ではなく、端末固定巻き取りドラム(Fig.2)に取り付けてクランプで固定する方式等いくつかの新しい技術を導入している。本施設の新旧比較をTable 1に示し、ブレーキシステムの概要をFig.3示す。

3. 鋼索鉄道の自動ブレーキに関する規則について

鋼索鉄道の自動ブレーキについては、作動する速度と停止距離に関する要件が規定されている(本施設の建設当時は「特殊鉄道構造規則」²⁾で定められており、現在では「鉄道の技術上の基準を定める省令等の解釈基準」(通達：平成14年3月8日国鉄技第157号)に定められている。

自動ブレーキは、索条が切断若しくは弛緩した時または運転速度が著しく高くなった時に自動的にレールに作用し、車両を停止させる重要な装置であることから、

車両の速度が4m/sを超えるまでに作用を開始するものであること。

積載状態の車両が、最も急なこう配の線路で3.5m以内で停止できること。

と規定されている。

しかしながら、本施設は、(1)最高運転速度が5m/sであり、(2)停止距離が15.26mとなっている。このように、自動ブレーキが作動する速度が4m/sを超えていること及び停止距離が3.5mを超えていることで特別構造となったものである。

このうち、停止距離が長くなった理由は、最高運転速度が従来の鋼索鉄道より高い5m/sであり、この制動初速度から3.5m以内で停止できる制動装置を設けた場合、車両の減速度がこれまでより大きくなり、乗客及び乗務員に危険を及ぼす可能性があることや自動ブレーキ動作時にレール及び締結装置に及ぼす影響が増大する可能性があるため、平均減速度を更新前の設備程度に設定したことによるものである。

4. 制動試験の概要

4.1 制動試験における検討事項

本施設は、自動ブレーキが特別構造の対象であるが、制動装置は重要な装置であるので他の制動モードについても自動ブレーキとあわせて機能の確認を行った。

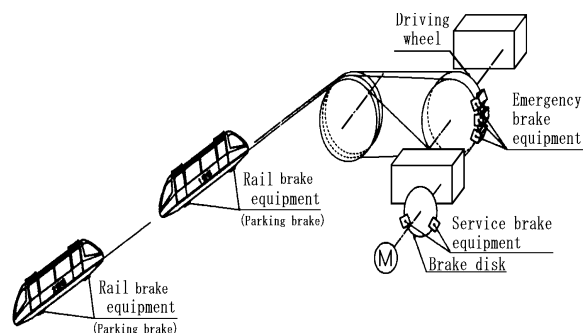


Fig.3 Braking system of funicular railway

今回の制動試験に関わる主な検討事項は以下のとおりである。

(1) 制動モード

制動モードは、通常運転時に原動所のロープ駆動モータ軸に作用する「自動運転停止」、「常用停止」及び非常時に原動滑車に作用させる「非常停止」のほか、ロープ切断時、速度超過時等の緊急時に車両とレール間に自動的に作用する「自動ブレーキ停止」、手動により作用させる「手動レバー停止」及び車両を留置するための「留置ブレーキ動作」の6種類がある。

このうち、自動運転停止は通常運行時における電気ブレーキを併用した停止モードであり、通常運転で確認できること、自動ブレーキ停止と手動レバー停止は自動と手動の違いがあるが、いずれも車両とレール間に作用するブレーキであること等から制動試験は非常停止、常用停止、自動ブレーキ停止及び留置ブレーキの4種類について試験を行った。

(2) ロープを接続した状態で試験を行った場合の停止距離等への影響

自動ブレーキ停止は、ロープ切断時等に作用する制動である。したがって、制動力の確認に際してはロープ張力の影響を排除するためにロープを車両から切り離れた状態で試験を行うことが望ましいと考えられる。しかしながら、この方法は危険等を伴うため、これまでの実施例でもロープを接続した状態で実施しているのが現状である。

ロープを接続した状態での試験では、制動開始直後においてロープ張力が停止距離等に影響を与えられようと考えられるため、影響の度合いを確認するためロープ張力を測定した。

(3) 制動初速度

自動ブレーキ停止は、ロープ切断時のほか、運転

速度が最高運転速度の120%を超えた場合にも動作することから、制動初速度6m/sでの試験についても行う必要がある。

そこで、本施設での6m/s運転の可能性等について検討を行った。その結果、原動設備の容量等から6m/s運転を行うまでの余裕がないため、制動初速度6m/sの場合の停止距離については、制動初速度5m/sの試験で得られた平均減速度から算出した。

(4) 各制動モードでの試験実施位置

試験実施場所については、自動ブレーキに関する規則から最急こう配部での試験を基本とした。さらに、車両同士の接触の可能性があるとともに車両の片側のみに装着されている自動ブレーキが曲線中で作動した場合の車両の挙動を確認するため、線路中の最小半径である分岐曲線部 (Fig.4) において試験を実施した。この他、山麓ホーム手前では、車止め等への衝突の可能性があることから、最緩こう配での試験も行った。なお、非常ブレーキについても同様に3カ所において試験を行った。

留置ブレーキについては最急こう配部である山上駅ホーム内とした。

(5) 荷重条件

荷重条件は、最急こう配、分岐部及び最緩こう配のいずれにおいても制動装置に不利となる条件を基本とすることが望ましいと考えられる。そこで、原動滑車停止に必要なトルク等からいずれの試験実施位置においても制動装置に不利となる荷重条件の検

討を行った。その結果、下り満車、上り空車が不利な条件となることからこの荷重条件を基本とし、制動モードによっては他の荷重条件での試験も実施した。

4.2 試験方法及び試験条件

各制動試験は、留置ブレーキを除き制動初速度5m/sで行い、ロープは接続した状態である。測定項目及び制動モード等をTable 2に示す。なお、試験実施時のレール面は雨によりかなりの湿潤状態となっており、滑りやすい状態にあった。

(1) 非常停止

非常停止は、最急こう配、分岐部及び最緩こう配



Fig.4 Crossing curve spot

Table 2 Brake mode and measurement item

Brake mode	Load condition	Travel direction of test vehicle	Measurement item	Test location
Service brake	Measurement vehicle: fully loaded Other vehicle: empty } (100-0)	Downward	Travel speed Acceleration (X, Y, Z) Swing angle (Roll, Pitch, Yaw) Stopping distance	Maximum gradient spot
Emergency brake	Measurement vehicle: empty Other vehicle: empty } (0-0)	Upward Downward	Travel speed Acceleration (X, Y, Z) Swing angle (Roll, Pitch, Yaw) Stopping distance	Maximum gradient spot Crossing curve spot Minimum gradient spot
	Measurement vehicle: fully loaded Other vehicle: empty } (100-0)			
	Measurement vehicle: empty Other vehicle: fully loaded } (0-100)			
Rail brake	Measurement vehicle: fully loaded Other vehicle: empty } (100-0)	Downward	Travel speed Acceleration (X, Y, Z) Swing angle (Roll, Pitch, Yaw) Stopping distance Rope tension	Maximum gradient spot Crossing curve spot Minimum gradient spot
Parking brake	Measurement vehicle fully loaded	-	Behavior of vehicle	Maximum gradient spot

において行った。荷重条件は3カ所ともに

- 1) 測定車両空車、対向車両空車 (0-0)
- 2) 測定車両満車、対向車両空車 (100-0)
- 3) 測定車両空車、対向車両満車 (0-100)

であり、測定車両の進行方向は上り方向と下り方向である。

(2) 常用停止

常用停止は、電気制動により所定の減速度となるように制御されているため、線路のこう配、荷重条件に依存しないと考えられる。このため、最急こう配における測定車両空車、対向車両空車 (0-0) での試験のみを行った。

(3) 留置ブレーキ動作

留置ブレーキ動作試験は、最急こう配である山上駅ホーム内で行った。試験方法は、留置ブレーキを動作させた後、予備原動機を用いて試験車両側のロープを弛緩させる方向で微速度運転を行いロープ張力をゼロとした状態で車両の挙動を観察した。なお、測定車両の荷重条件は満車状態とした。

(4) 自動ブレーキ停止

自動ブレーキ停止は、最急こう配、分岐部及び最緩こう配の3カ所において行った。荷重条件に対する検討結果から、一番厳しい条件である測定車両満車、対向車両空車で下り方向で行った。

自動ブレーキ停止による停止距離の測定は、インクをしみこませたローラを制動開始と同時にレール面に落下させることでレール面に制動開始位置を記録できるスタンプ装置を用いた。試験車両をFig.5に示す。



Fig.5 Test vehicle

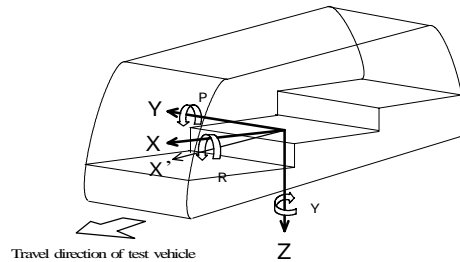


Fig.6 Coordinate axes

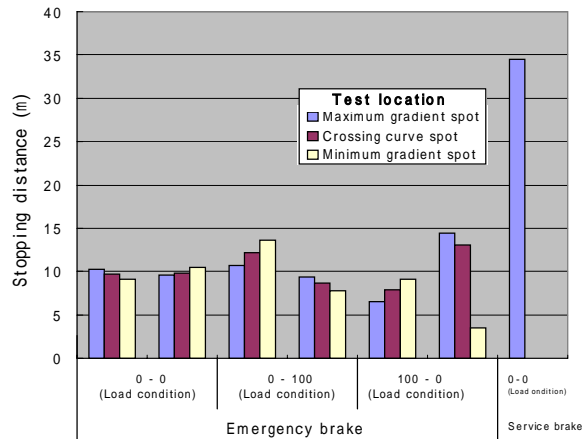


Fig.7 Stopping distance of emergency brake and service brake

5. 試験結果

本施設の制動試験の結果は以下のとおりである。なお、各測定値は、測定波形の片振幅の最大値であり、表中の値の正負の記号はFig.6に示す座標系とした。

(1) 非常停止

非常停止における停止距離をFig.7に示す。また、減速度及び平均減速度をFig.8及びFig.9に示す。なお、Fig.7は停止距離を荷重条件ごとに測定車両の走行方向(上り、下り)別に示し、Fig.8、Fig.9は、減速度及び平均減速度を荷重条件ごとに測定場所(最急こう配、分岐部及び最緩こう配)別に示す。

各条件での停止距離の最大の値は14.45mで

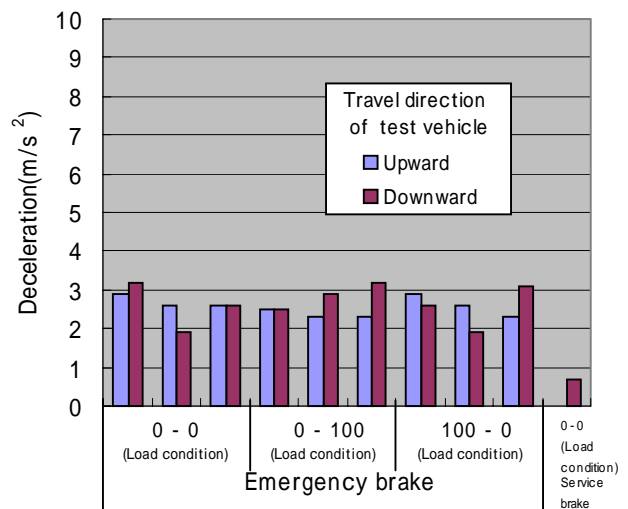


Fig.8 Deceleration of emergency brake and service brake.

あり、設計値（25.00 m）以内であった。

各条件での減速度の最大の値は 3.2m/s^2 であり、荷重条件が「測定車両、対向車両ともに空車」及び「測定車両空車、対向車両満車」の測定車両下り方向の最緩こう配での値であった。また、平均減速度についても、一部で設計値（ 1.50m/s^2 ）を超えるものもあるが、これを除けば平均減速度は $0.50\text{m/s}^2 \sim 1.50\text{m/s}^2$ の範囲にあった。

非常停止においては、制動後に車両が揺れ戻される現象が認められた。特に最緩こう配において顕著であり、減速度の最大値に比較して最大で170%程度の値であった。また、揺れ戻しの際にはロープが軌道と接触する現象も確認された。この現象は非常停止が原動滑車に作用する制動であるため、原動機停止後も車両は慣性力によって動き続け、ロープの張力等と釣り合ったところで一旦停止した後、ロープの弾性による復元力で車両が逆方向に揺れ戻されたものと考えられる。また、本施設では、駆動用ロープに張力を負荷し車両を平衡させるための緊張設備を持たないことからこの現象が顕著になったものと考えられる。揺れ戻しが顕著であった測定波形例をFig.10に示す。

車体の振れ角については、ピッチング角 0.5 度、ローリング角 0.8 度であり、接触限界角度 6.0 度以内であった。

(2) 常用停止

常用停止における停止距離は 34.53m であり、減速度は 0.7m/s^2 であった。また、平均減速度は 0.36m/s^2 であり、目標減速度である 0.5m/s^2 に近い値であった。常用停止における停止距離をFig.7に、減速度及び平均減速度をFig.8、Fig.9に示す。

(3) 留置ブレーキ動作

留置ブレーキの試験では車輪の転動は認められなかった。

(4) 自動ブレーキ停止

自動ブレーキ停止における停止距離をFig.11に、減速度および平均減速度をFig.12、Fig.13に示す。また、制動初速度 5m/s の平均減速度から算出した制動初速度 6m/s の場合の停止距離をFig.14に示す。

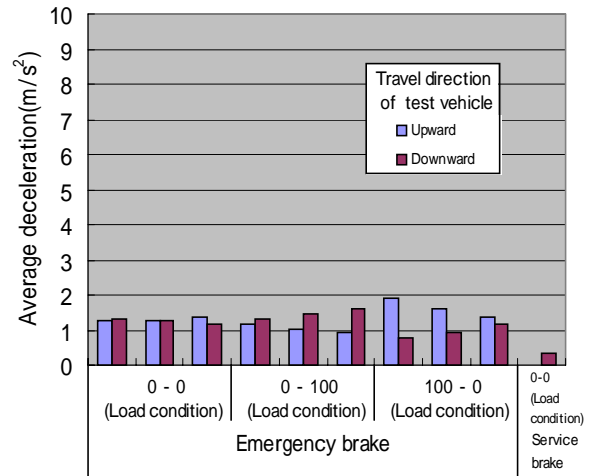


Fig.9 Average deceleration of emergency brake and service brake.

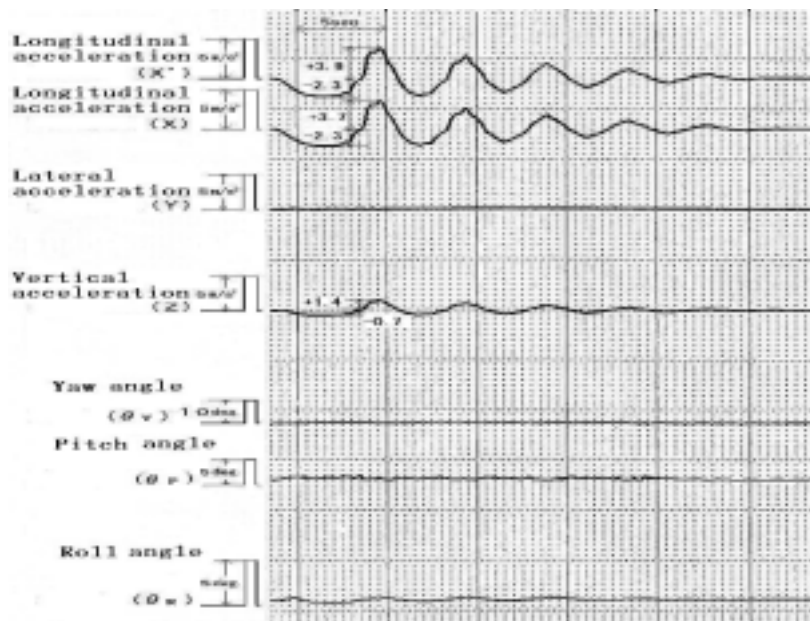


Fig.10 Measured wave forms (Emergency brake, 100-0, Upward)

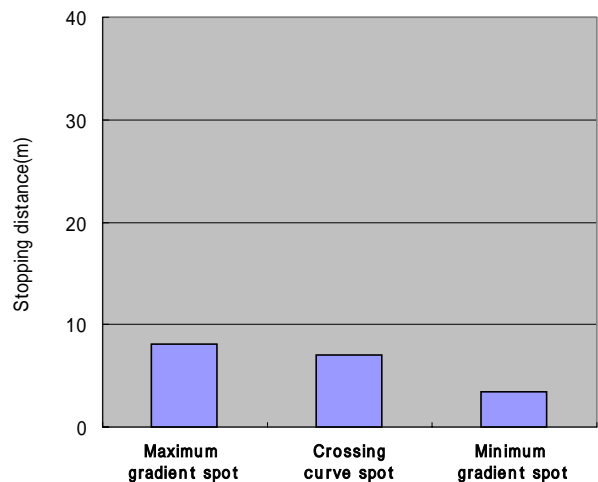


Fig.11 Stopping distance of rail brake

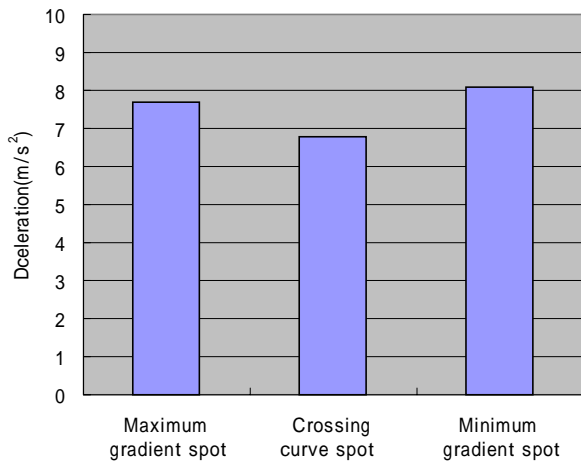


Fig.12 Deceleration of rail brake

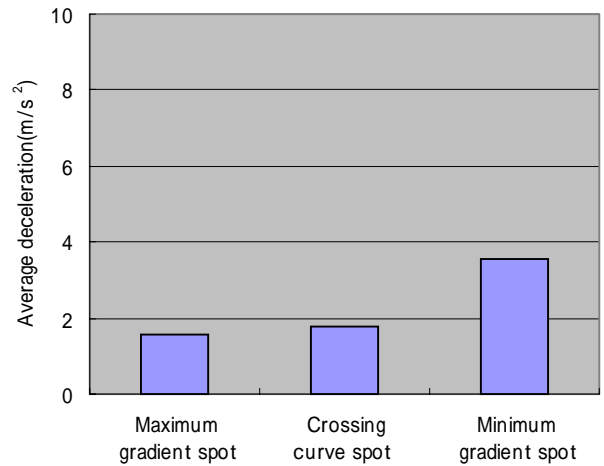


Fig.13 Average deceleration of rail brake

す。

各条件での停止距離の最大の値は8.04 mであった。また、減速度については、各条件での最大の値は8.1m/s²であり、平均減速度については、各条件での最大の値は3.57m/s²、最小の値は1.55m/s²であった。この時の平均減速度を用いて算出した最急こう配での制動初速度6m/sの場合の停止距離は11.61 mとなり、申請時の停止距離(15.26m)以内であった。自動ブレーキは、車両を短い距離で停止させるためのブレーキであり、制動時の車両に大きな減速度が発生しているとともに、測定波形が尖塔形状となっていることが他の制動モードと相違している。最急こう配での測定波形をFig.15に示す。

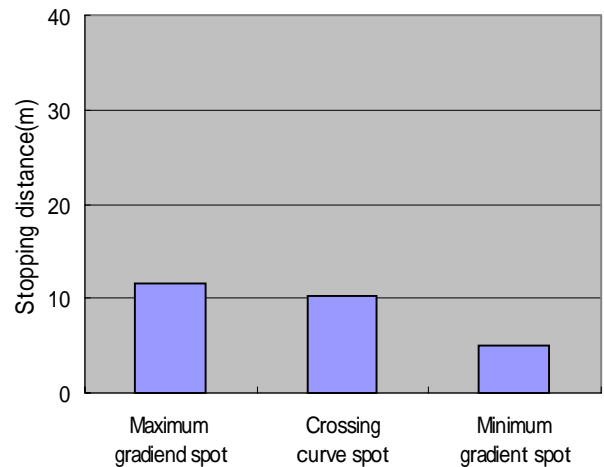


Fig.14. Calculated stopping distance of rail brake at initial braking speed of 6m/s

分岐部における平均減速度(1.76m/s²)を用いて算出した制動初速度6m/sの場合の停止距離は10.23 mであった。また、最急こう配での平均減速度(1.55m/s²)を用いて算出した停止距離は11.61 mとなり、いずれの場合も分岐部での設計上の停止距離である16.19 m以内であった。また、ローリング角は0.5度未満の微小な値であり、車両の接触限界角度(6度)以内であった。ローリング角が微小であったのは、シングルホイールサスペンションと呼ばれる左右方向の剛性が高い台車構造を採用しているためと考えられる。

最緩こう配についても分岐部と同様に、最緩こう配での平

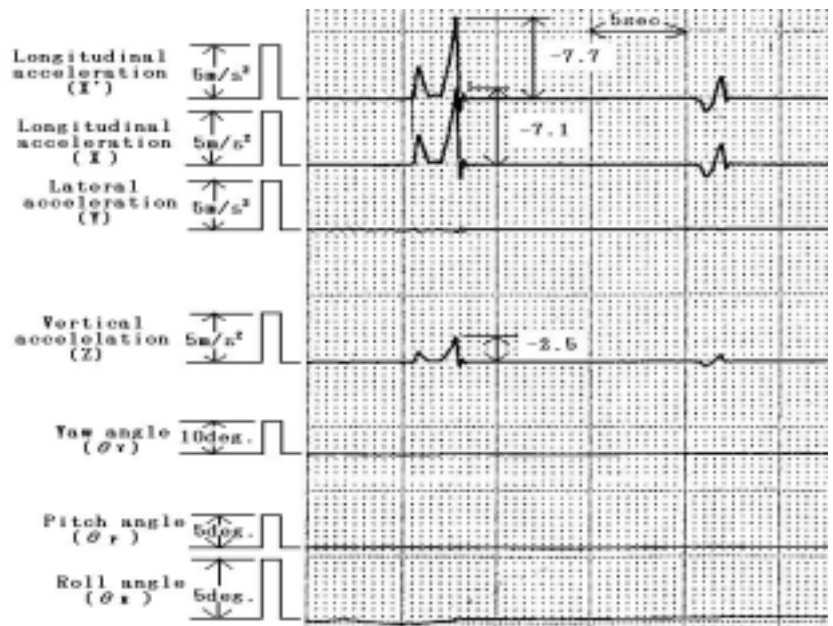


Fig.15 Measured wave formes of rail brake test at maximum gradient spot

均減速度(3.57m/s²)及び最急こう配での平均減速度(1.55m/s²)を用いて算出した制動初速度6m/sにおける停止距離は、それぞれ5.04mと11.61mであり、いずれの場合においても過速度検出位置から車止までの距離(41.63m)以内であった。最緩こう配における測定波形をFig.16に示す。

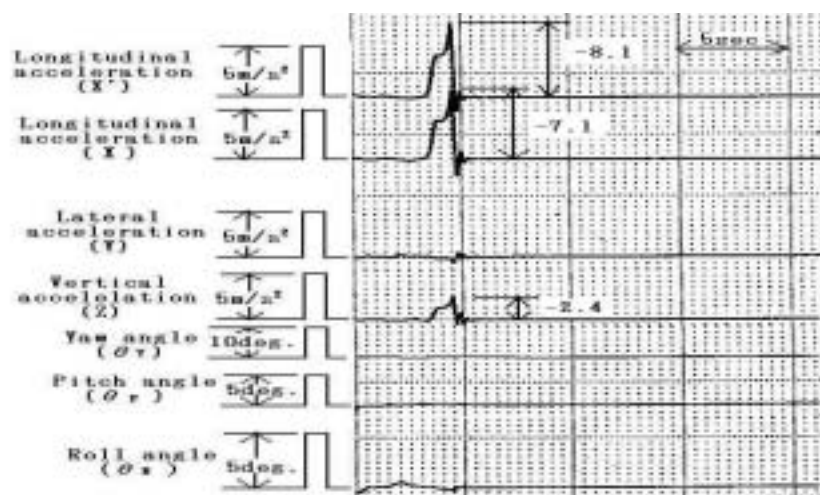


Fig.16 Measured wave formes of rail brake test at minimum gradient spot

自動ブレーキ停止はロープを接続した状態で実施した。このため、ロープ張力の影響を把握する事を目的として、ロープにひずみゲージを貼付して張力の測定を試みたが、制動時のロープの振動等によりゲージが剥離して所定の結果が得られなかった。そこで、ロープ支持装置にひずみゲージを貼付して張力の測定を行った。しかしながら、この方法も測定結果をみると支持装置とロープの接触状態によっては精度の良い測定が行えないことが分かった。したがって正確な推定はできないが、比較的信頼できるとされる測定波形でみると、減速度に対して平均で3割程度の影響はあるものと考えられ、平均減速度1.55m/s²での制動初速度が6m/sの時の停止距離を算出すると16.51mとなる。この値は、申請時の停止距離15.26mを超えるが、分岐部における車両同士の接触及び山麓ホームでの車止間での距離に対しては余裕のある値であった。ロープ張力の測定波形例をFig.17に示す。

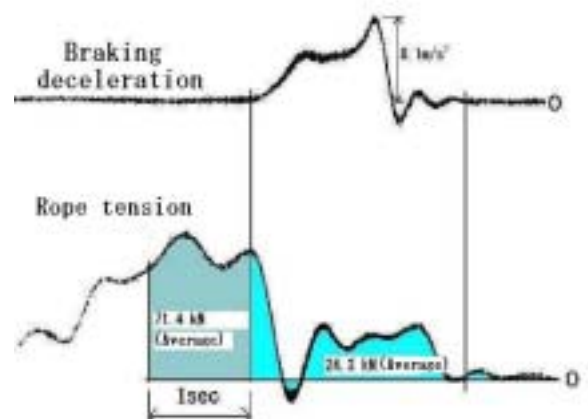


Fig.17 Wave formes of braking deceleration and rope tension (100-0, Downward, Rail brake)

なお、自動ブレーキ停止の試験ではロープが軌道に敷設された導車から外れる現象が各条件で確認された。特に、最緩こう配での試験において顕著であった。この時の状況をFig.18に示す。

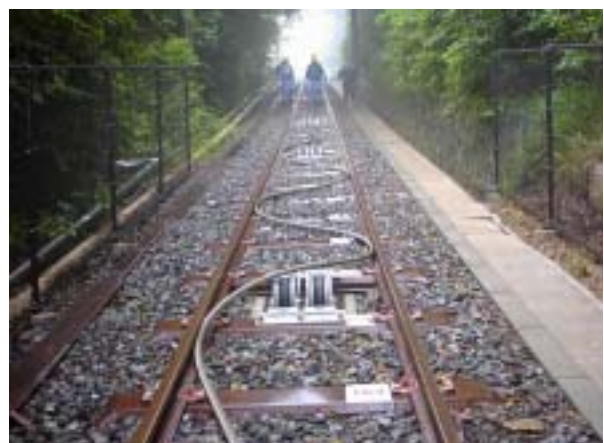


Fig.18 Deropement which occurred in rail brake test

6. 終わりに

今回、施設の更新に際し、新型式の車両を用いて速度向上を行った鋼索鉄道の制動試験方法ならびに試験結果について報告した。前にも述べたように多くの施設が更新の時期にきており、今後、このような新しい技術を導入した施設が建設される可能性がある。これまでの規則では、制動装置の性能を停止距離で規定していたが、停止時の減速度が大きい場合には乗客等へ危険を及ぼす可能性がある。したがって、今後は停止距離以外の評価方法について

も検討していく必要があると考えられる。また、試験方法、ロープ張力の測定方法等残された課題も多く、更なる検討が必要であると考えらる。

参考文献

- 1) 平成13年度鉄道要覧 国土交通省鉄道局監修
- 2) 注解 鉄道六法平成10年度版 運輸省鉄道局監修 第一法規