

2015 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 170001

參展科別 地球與行星科學

作品名稱 地震與纜車的邂逅 Monitoring the Seismic
Reduction and Vibration Resistance of
Cable Car

得獎獎項 大會獎：二等獎

荷蘭 INESPO 正選代表：2015 年荷蘭國際
環境及永續發展競賽

就讀學校 苗栗縣立公館國民中學

指導教師 李笑薇、劉傳鐘

作者姓名 謝馥伊

關鍵字 地震、纜車、減震

作者簡介



我是謝馥伊，來自苗栗，是個喜歡自然科學的女孩。總是覺得許多奇妙的現象用科學解釋起來特別有趣，也因此接觸了科展。從研究的過程當中，讓我得到許多成長的機會，試著面對問題、解決問題。感謝一路上支持我、引領我的大家，讓我走得更平穩。希望未來的自己，還有機會從事科學研究，秉持著對自然的初衷和熱忱繼續走下去。

地震與纜車的邂逅

Monitoring the Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

摘要

本研究主要探討地震造成的纜車晃動，藉由自製的地震模擬器與纜車系統，探討各因素對纜車晃動之影響，設計纜車系統和車廂的減震裝置。研究結果顯示：一、地震時纜車斷電停駛位置愈靠近塔柱、相同長度纜繩上車廂個數較多、纜車重量較重、纜車臂較短，纜車晃動時間相對較短。二、所設計之減震裝置中，利用夾層中鋼珠轉動，使地震時只有外層纜車晃動而內層纜車輕微滑動的「雙層纜車」效果最佳。纜車系統塔柱則可參照建築物設置隔震元件，以減緩纜車晃動。本研究結果可望為未來應用之參考。

Abstract

In this study, self-made earthquake simulator and self-made cable car system simulator were made to investigate the variables which influenced the vibration of the cable car caused by earthquake. Devices are designed to reduce the vibration of the cable car. The observations of the study are as follows: Firstly, variables such as a shorter distance of the cable car to the stand tower, more number of the cable cars on unit length of cable, a heavier cable car, and a shorter arm of the cable car result in shorter vibration time of the cable car; Secondly, several devices that reduced vibration were designed. The results revealed the effect of the several steel balls rolling in between double-layer cable car was the best, the inner layer slid only slightly while the outer layer shook vigorously during earthquake. In the future, this model may be applied to the real cable car to reduce vibration during earthquakes. Also, reduce the vibration time by adding seismic isolation device to the stand tower may be a topic which worths further investigation.

壹、前言

2013 年台灣發生地震，導致日月潭纜車停駛，遊客受困高空多時、飽受驚嚇。看到這則新聞的我，回想起自己搭乘纜車的經驗，聯想到：地震發生的當下，除了纜車停駛之外，是否有減緩車廂晃動的措施呢？經過資料蒐集後發現，目前各國著重於災害後如何救援，對於地震當下減緩纜車晃動的裝置，未曾查詢到實際案例。又想到，影響纜車晃動的因素諸多，到底在哪些條件下纜車的晃動最少呢？因此，欲透過此研究達到以下目的：

- 一、藉由文獻了解纜車的運作情形和地震的基本概念，自製地震和纜車系統模擬器。
- 二、探討各種因素對纜車在地震時晃動的影響，找出晃動時間最短的情況。各個因素如下：
 1. 纜車在纜繩上的位置
 2. 相同長度之纜繩上，車廂個數的多寡
 3. 纜車車廂重量
 4. 纜車系統塔柱高度
 5. 纜繩上仰角度
 6. 地震主要震動方向
- 三、模擬纜車行駛當中遇到地震發生、斷電停駛，直到纜車停止晃動的情形。
- 四、設計減緩纜車在地震時晃動的方案與減震裝置。

貳、文獻探討

由於需自製纜車系統，蒐尋相關資料讓模擬之纜車與實際更為貼近。纜車系統依據纜索的循環方式，可分為對駛式與自動循環式，對駛式纜車系統只有兩部車廂，當一部纜車向前行駛時，另一部往反方向行駛；自動循環式纜車系統藉由纜索不斷循環使纜車行駛，纜繩上有多部車廂。而自動循環式纜車系統又可分為單線式與複線式。然而，複線式自單線式推出後，已無架設之案例，故不建議採用(孫文山，2000)。因此，所模擬之纜車系統為單線循環式。纜車系統行駛速率近年來經改良最高可達 7m/sec，然而目前多數系統仍以 5m/sec 運轉；地震時纜車系統則以 0.1m/sec 的速率行駛回纜車站，疏散遊客。為了模擬實際纜車比例，因此透過貓空纜車之客服信箱取得纜車系統與車廂實際尺寸(如表 1)，所模擬之行駛速率也配合縮放。另外，曾有研究探討纜車臂形式、纜車車廂重量、纜繩張力對纜車晃動之影響。而該研究指出，纜繩張力較大時纜車晃動時間較短，且曲臂纜車較直臂纜車之晃動時間短，並推論多數纜車臂設計為曲臂使纜車晃動為非單擺運動，減少晃動時間(黃冠樺、黃炳華、歐沛慈、胡雨勛，2010)。因而本研究所模擬之纜車臂為曲臂。

表 1 貓空纜車系統與車廂尺寸(單位:m)

塔柱高度	7.78~28.83
兩柱間距	1.86~429.1
纜車車廂長度	1.98
纜車車廂寬度	1.873
纜車車廂高度	2.41

現有探討纜車車廂系統受外力所產生之晃動是否能使用調諧質量阻尼器(Tuned Mass Damper ; TMD)抑制車廂振動之研究，以數學模型推導證實:在 El Centro 地表加速度作用下被動 TMD 效果不明顯，但主動 TMD 抑制效果良好(蕭順發，2008)。但是，是否只有 TMD 能有效減緩地震所造成的纜車晃動呢?現今建築物隔震技術進步，依裝置的種類與方法大約分為三類:延長震動週期、吸收地震能量以及與地基絕緣分隔(江照全，2007)，而目前最常使用的鉛心基層橡膠隔震屬於延長震動週期，在建築物下方設置變形量大的物質，改變震動的頻率，延長週期；而以日本蠶繭大廈為例，利用三面鋼架斜格結構包覆於大樓外牆，當大樓產生搖擺時，一個支點所承受的衝擊力會分散到上下左右的各個支點，有效減震(王朝網路，2014)，如圖 1。與地基絕緣分隔是目前認為最佳的隔震技術，在建築物下方設置可滑動或滾動之物體，使建築物在地震來臨時位移量減少。因此，想試著參考建築物的隔震技術，應用於纜車上。

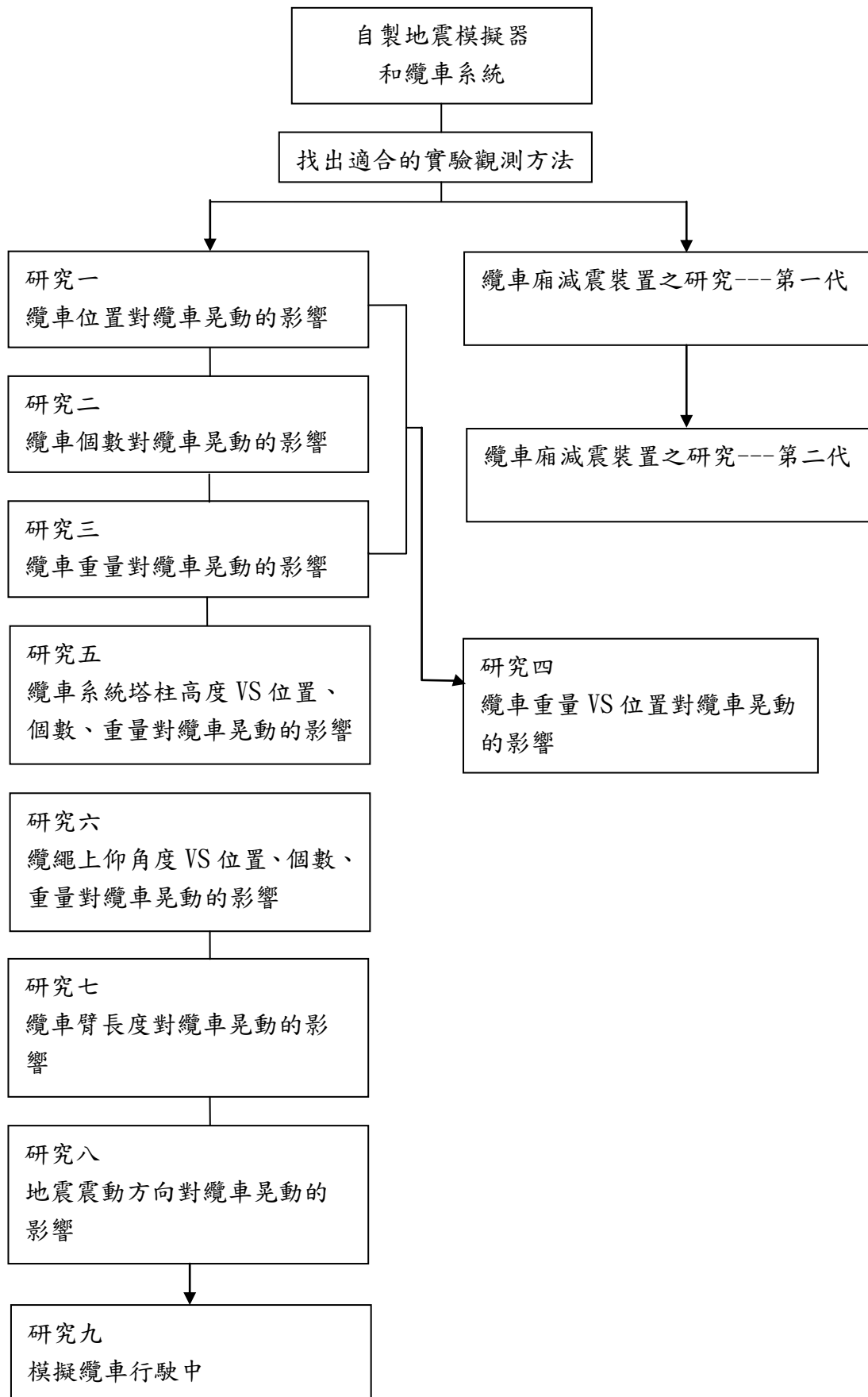


圖 1 蠶繭大廈

參、研究設備與器材

- 一、實驗場地：門窗密閉之實驗室。
- 二、自製地震模擬器：長型木板、彈簧、木片、小馬達、、熱熔膠組、電池盒、1.5V 電池。
- 三、自製纜車系統：木板、塑膠筒、砝碼、橡皮繩、鋼絲(0.5mm)、白色西卡紙、18 號鐵線、12 號鐵線、20 號鐵線、黏土、長尾夾、金屬棒、鉗子、竹筷子、魔鬼氈、馬達若干種、圖釘剪刀、泡棉膠、膠帶。
- 四、記錄工具：攝影機(附自製相機架)、電腦、文具。
- 五、測量工具：電子秤、轉速計、智慧型手機、Vibration Monitoring、Vibrometer(軟體)、尺。

肆、研究過程與方法



一、自製地震模擬器

(一)設計構想

一開始以撞擊方式產生震動，經測試後發覺震動並不持久，無法精確控制每次震動頻率與震動時間相同(如圖 2)。

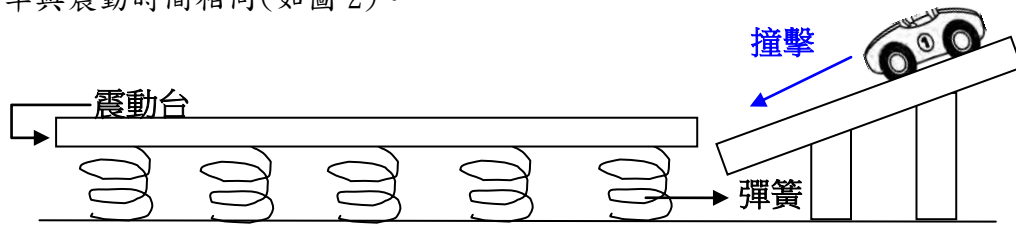


圖2 地震模擬器設計初始構想

後來，聯想到進行駐波實驗時，於馬達軸心接上熱熔膠條，使質心偏離轉軸，放大馬達本身震動，做為震盪箱。因而決定以此為震源，藉由馬達將震動傳遞至震動台上模擬地震，並設計開關控制震動時間(如圖3、4)。這樣的震動類似地震的表面波。當馬達旋轉方向與地面平行時，造成水平為主的震動(如圖5)；與地面垂直時造成垂直為主的震動(如圖6)。

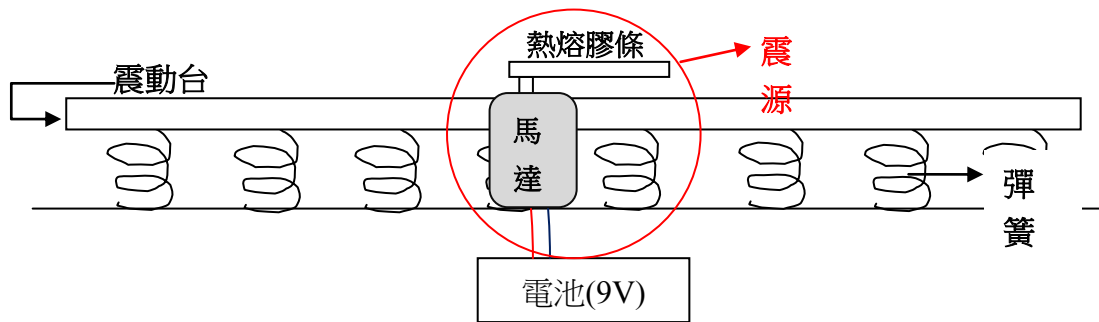


圖3 地震模擬器說明圖



圖4 地震模擬器



圖5 水平轉動



圖6 垂直轉動

(二)震源振動頻率測量

(1)利用市售的轉速計測量馬達轉速，重複測量五次並記錄，結果如表2。

(註：UP為轉速計測量所得之最大值，dn為最小值)。

(2)平均轉速約為1514RPM，換算得到震動頻率約為25.23Hz。

表2 震源振動頻率測量(單位:RPM)

測量次數	馬達轉速		
	UP	dn	平均
1	1544	1528	1536
2	1536	1515	1525.5
3	1523	1505	1514
4	1513	1495	1504
5	1501	1485	1493
平均	1523.4	1505.6	1514.5

(三)地震模擬器震度與加速度測量

(1)測量工具：智慧型手機

(2)測量方法：將手機平放於震動台中央，利用軟體測量震動10秒的震度、加速度。

(3)軟體：

測量項目	軟體名稱
地表加速度	Vibration Monitoring
麥加列震度	Vibrometer

(4)測量結果如下表。(Xvalue代表X軸方向加速度，Yvalue代表Y軸方向加速度。)

表3 加速度測量結果(cm/s^2)

Xvalue	Yvalue	time diff in ms
12.3872	5.2528	20
-24.0198	2.6264	19
22.5204	-1.1172	11
-5.9976	2.9988	19
-13.8866	-2.6264	10
52.5574	-27.0284	21
-14.259	-4.8706	10
-7.5068	-2.2442	20
21.3934	-14.259	19
-53.3022	9.0062	21

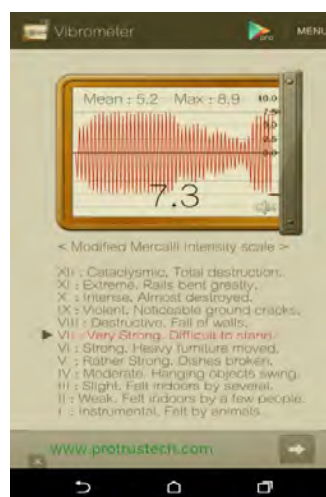


圖7 麥加烈震度測量結果

將Vibration Monitoring測得之地表加速度對照美國地質調查所公布之麥加利震度標準對照表(表4)，得知震度約為7~8度左右，符合軟體Vibrometer的測量結果(圖7)，可證明此地震模擬器震度就是7~8度。

表4 美國地質調查所麥加利震度與加速度對照表

PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Ligh	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violont	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Mod Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC. (%g)	<0.1	0.5	2.4	6.7	13	24	44	83	>156
PEAK VEL (cm/s ²)	<0.07	0.4	1.9	5.8	11	22	43	83	>160
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

二、自製纜車系統與纜車模型

起初使用紙筒模擬纜車系統塔柱，將纜繩固定於塔柱左端，右端以50公克砝碼控制纜繩張力，纜繩材質為棉繩。纜車簡化成黏土球代表質量，以珠針固定於纜繩上(圖8，圖9)。



圖8 第一代纜車系統



圖9 纜車

測試後發現此系統並不堅固，震動時塔柱和車廂易產生形變，故著手改進。

是以，纜車系統塔柱和車廂分別改成塑膠和西卡紙材質，車廂設計成邊長2cm的正六邊型。為使每個纜車模型盡量相同，使用電腦套印於西卡紙後製作，車廂模型中填入黏土，控制質量。纜車臂以鐵絲自製，再與纜車廂接合(黏膠量固定為0.20g)。研究之初，採用實驗變化量較大的紅色橡皮繩模擬纜繩，以利觀察，後來則使用鋼絲模擬纜繩，符合纜索之實際材質。纜繩張力以兩端懸掛砝碼控制(圖10~圖13)。

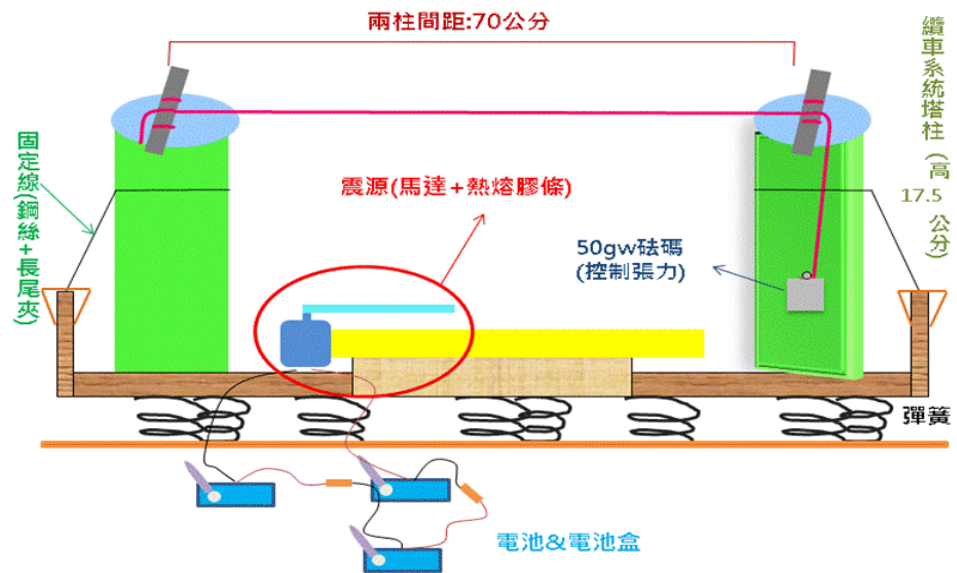


圖 10 第二代纜車系統說明圖

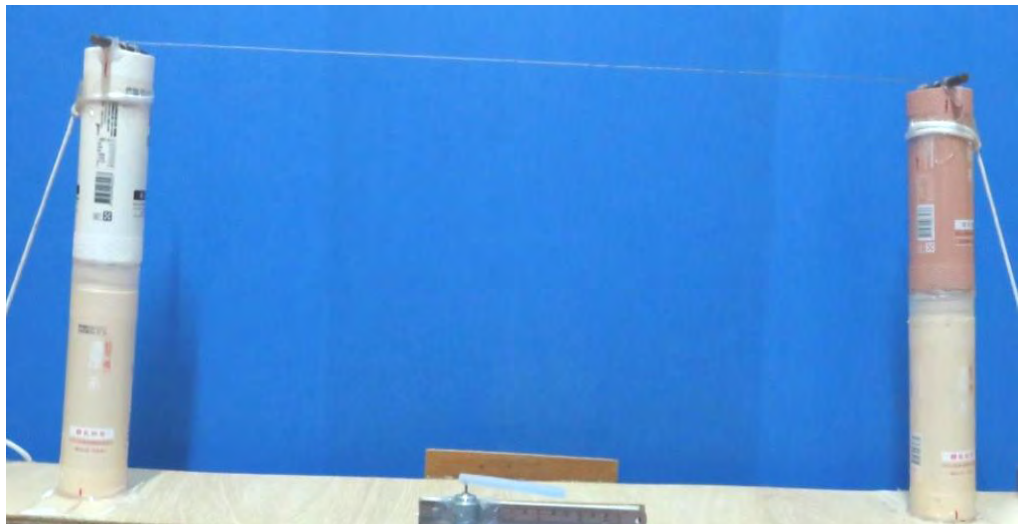


圖 11 第二代纜車系統

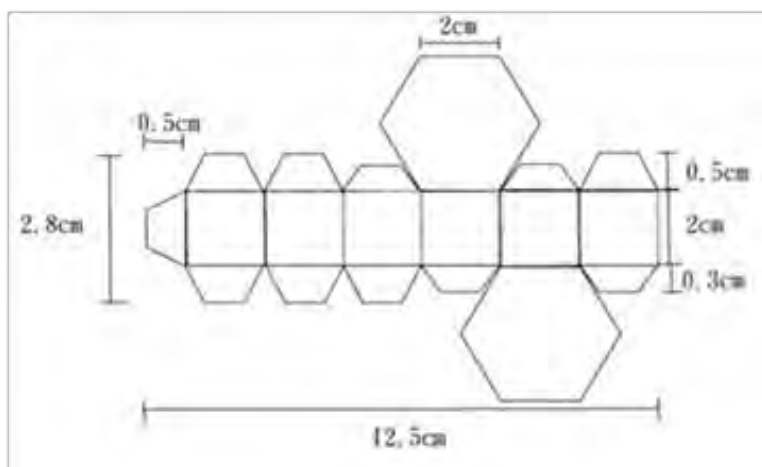


圖 12 纜車車廂模型電腦套印展開圖



圖 13 纜車車廂模型

三、實驗觀測方法

- (一) 全程錄影記錄纜車晃動情形。攝影機開始錄影時間點為模擬地震來臨之瞬間，直到纜車停止晃動，再藉由影片判斷纜車晃動時間與晃動頻率。以纜車的晃動時間表達其晃動情形。
- (二) 實驗中固定錄影角度，避免角度不同造成影片觀看上的誤差。
- (三) 影片以固定軟體 KMPlayer 播放，並將播放速度調整至 135%，判斷晃動時間；播放速率 50% 時，判斷纜車晃動頻率。播放速率的調整、螢幕尺和纜車廂上的十字記號有助於判斷其是否晃動，達到更精準的觀測。藉此觀察纜車從地震稍歇後，其晃動至停止的時間。



圖 14 纜車晃動情形影片分析截圖

四、探討各因素對纜車晃動時間的影響

(一) 實驗方法

待纜車完全靜止後，同時啟動地震模擬器和攝影器材(為避免攝影器材)晃動影響結果判讀，將其放在架子上固定)，利用攝影器材之計時功能，計時 10 秒後將地震模擬器的電源關閉，模擬地震稍停。持續錄影和觀察纜車晃動情形直至纜車停止晃動。重複十次。各變因控制方法如下：

1. 纜車位置

以纜車為中心，控制纜車至左右兩塔柱沿纜繩之直線距離成比例，為位置 1:1、1:2、1:3、1:4、1:5，比值越小表示纜車愈靠近塔柱(如圖 15)。

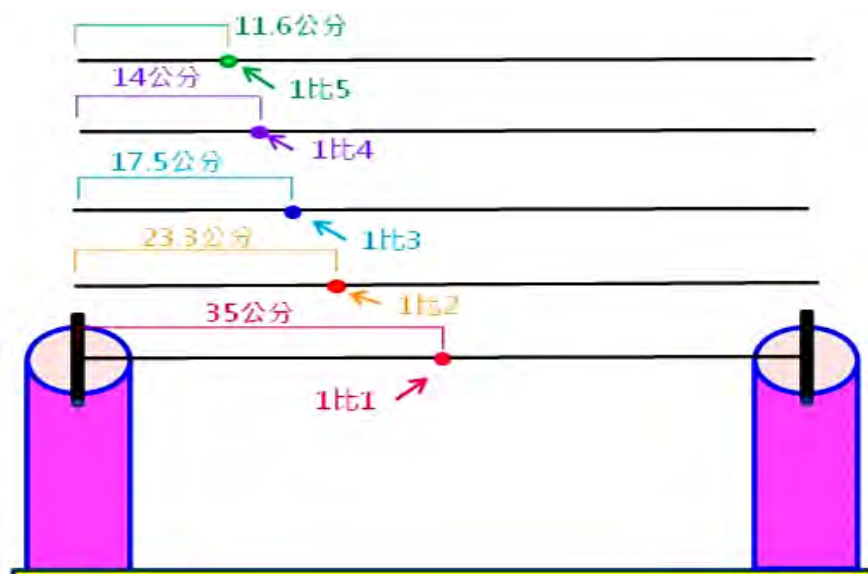


圖 15 纜車位置示意圖

2. 纜車個數

改變纜車在纜繩上的個數並調整間距，使塔柱、纜車和纜車間隔等距，分別實驗個數 1~5 個。

3. 纜車重量

藉由調整纜車廂中的黏土質量，分別製做 5、10、15、20、25 公克重的纜車廂，實驗時分別掛上，於位置 1:1~1:5 分別測試。

4. 纜車系統塔柱高度(兩柱等高)

以市面上所售之直筒狀飲料瓶為單位，一個瓶身稱為 1 層，分別為 1 層、1.5 層、2 層。首先將 1 層柱高固定於地震模擬器上，改變柱高時拆下柱子、取下纜繩，更換不同柱高。

5. 纜繩上仰角度

利用兩柱高度差控制纜繩仰角。塔柱高高度組合相對應之上仰角度如表 6。

表 5 柱高組合與纜繩上仰角度對應表

塔柱高度組合	1 層&1 層	1 層&1.5 層	1 層&2 層
纜繩上仰角度	約 0 度	約 7 度	約 14 度

6. 地震震動方向

藉由改變震源馬達旋轉方向達成，馬達位置和原來相同。當馬達旋轉方向與地面平行時，造成水平為主的震動；與地面垂直時造成垂直為主的震動。

7. 纜車臂長度

參考文獻，纜車臂設計為彎曲的，首先定義臂長，為圖 16 中線段 AB 所標示的直線距離。以符合比例的臂長(2.5cm)為基準，進行縮放 0.5~4 倍，如表 5。

表 6 纜車臂放大倍率與實際長度對照表(單位:cm)

纜車臂	縮放倍率				
	0.5	1	2	3	4
鐵絲總長	3.75	5.00	7.50	10.00	12.50
纜車臂長	1.25	2.50	5.00	7.50	10.00

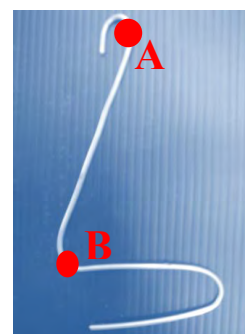


圖 16 纜車臂長

8. 模擬纜車行駛

為了更進一步探討纜車從行駛至地震開始、系統自動斷電、纜車停止晃動的情形，參考一些資料後，設計了一套纜車系統，模擬擬單線對駛式纜車行駛的情況（圖 17~20）。

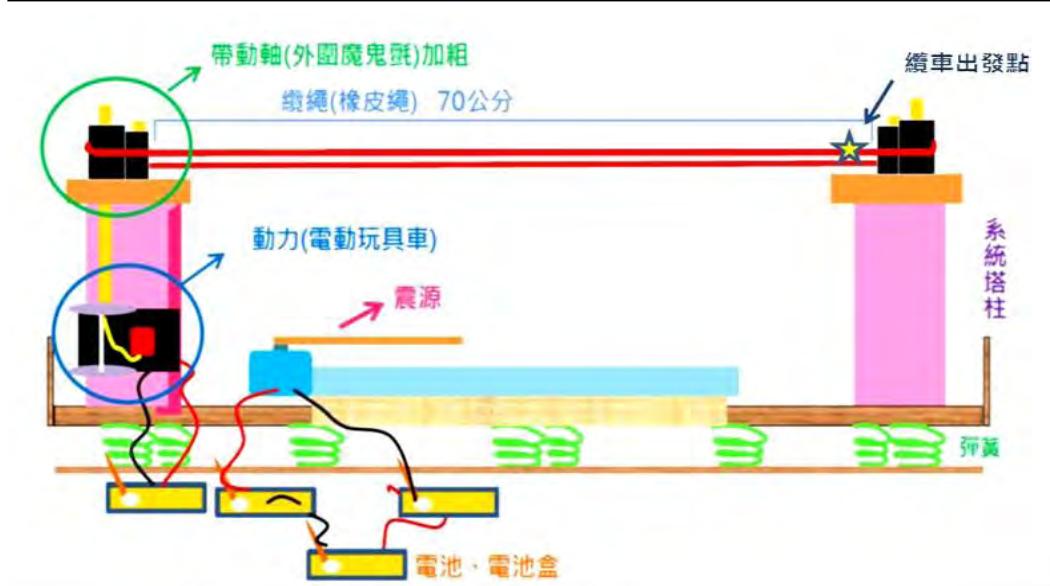


圖 17 模擬纜車行駛之系統說明圖

由於纜繩具有一定的摩擦力才能被帶動，初步測試系統發現繩子與轉軸（竹筷子）的摩擦力不夠大，因此思考在竹筷子上黏貼不同材質，增加摩擦力。分別測試了砂紙、不織布、魔鬼氈三種材質對纜繩移動速率的影響，最後選擇了魔鬼氈的平滑面作為帶動軸與纜繩接觸面的材質（如表 7）。

表 7 不同柱子材質下纜繩移動速度

材料	距離(cm)	時間	速率(cm/s)
砂紙	未移動		
魔鬼氈的粗糙面	未移動		
不織布	70	2" 17	0.51
魔鬼氈的平滑面	70	1" 25	0.82

實際的纜車行駛速率最快可達 7m/s，一般纜車行駛速率則是達到 5m/s(孫文山, 2012)。故加粗帶動軸，使每次被帶動的纜繩長度增加，也將行駛速率提高至平均每秒約 6 公分，纜車由柱子左端至右端的時間為 12 秒。



圖 18 模擬纜車行駛之系統實照



圖 19 帶動軸包覆魔鬼氈-1

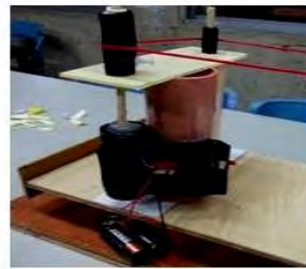


圖 20 帶動軸包覆魔鬼氈-2

實驗時，待纜車完全靜止後，同時啟動纜車系統、地震模擬器和攝影器材(為避免攝影器材晃動影響結果判讀，將其放在架子上固定。)利用攝影器材之計時功能，計時 10 秒後將纜車系統、地震模擬器之電源關閉，模擬纜車系統自動斷電停駛、地震稍停。持續錄影，並觀察纜車晃動情形直至纜車完全停止晃動。重複五次。

(二)各項研究變因

本研究之各項研究變因列於表8。其中纜車位置與重量，纜車系統塔柱高度與纜車位置/個數/重量，纜繩上仰角度與纜車位置/個數/重量做交叉變因之探討。

表8 研究變因一覽表

纜繩材質:1.橡皮繩 2.鋼絲			
纜車位置:	纜繩上仰角度	纜車重量	纜車臂長度
1比1	約0度(1層&1層)	5公克	1.25cm
1比2	約7度(1層&1.5層)	10公克	2.50cm
1比3	約14度(1層&2層)	15公克	5.00cm
1比4		20公克	7.50cm
1比5		25公克	10.00cm
纜車個數:	地震震動方向	纜車系統塔柱高度	模擬纜車行駛中
1個	水平	1層(15.00cm)	
2個	垂直	1.5層(24.50cm)	
3個		2層(33.00cm)	
4個			
5個			

五、設計減震裝置並探討其對於纜車晃動情形之影響

由於在現有的系統的比例下，纜車車廂過小，為方便減震措施加裝於纜車廂中，將纜車和纜車系統放大。

(一) 第一代減震裝置實驗用模型

把原本邊長 2 公分的正六邊形纜車放大，成為邊長 10 公分的正六邊型纜車，纜車臂也配合放大為全長 25 公分。並且在纜車上設計透明窗口，以便觀察各種減震措施在纜車內部的運作情形（圖 21~23）。

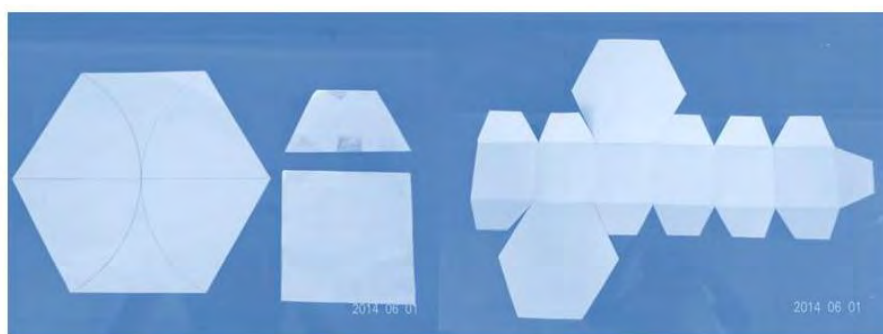


圖 21 放大版纜車廂模型手繪展開圖



圖 22 放大版纜車廂



圖 23 放大版纜車臂

(二) 第一代減震裝置實驗用系統

配合放大版纜車，將地震模擬器、纜車系統放大。以實驗桌桌角模擬纜車系統塔柱；選擇童軍繩(總長 314.80 公分)為纜繩；將震源為夾扇馬達軸心接上中空橡皮管，利用夾扇外殼邊緣與纜繩邊緣接觸，將馬達產生的震動傳遞至纜繩，如圖 24 與 25。

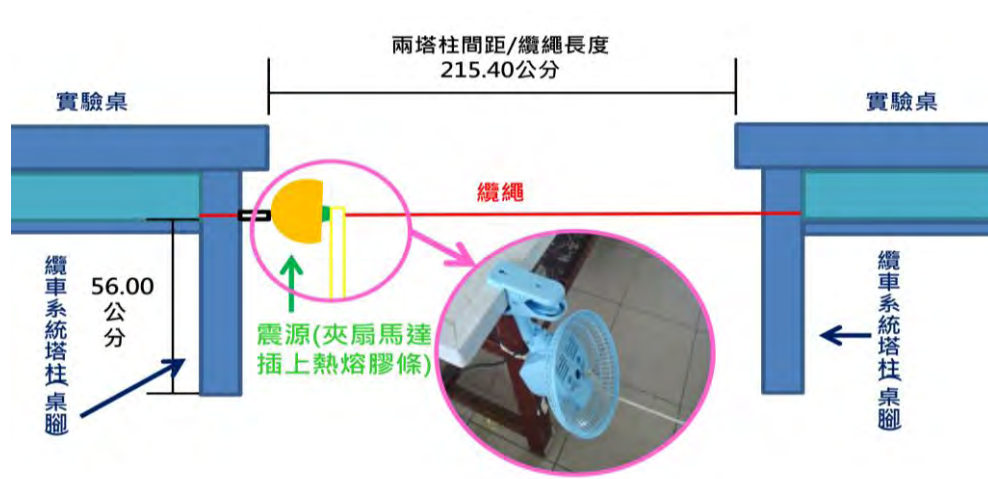


圖 24 放大版纜車系統與地震模擬器

(三) 第一代減震裝置

1. 阻尼器：

目前加裝於纜車車廂內部車頂。質量塊是以乒乓球剖半，黏土填滿製成。乒乓球外面以紗網包覆，並於紗網開口處以細鋼絲束緊開口，方便懸掛（圖 26）。球體質



圖 25 纜車車廂外觀



圖 26 球型阻尼器

量為 56 公克。

2. 吸震彈簧

彈簧是一種可吸震之物，故嘗試加裝彈簧於纜車車頂吸震，使震動在傳遞到車廂底部前被吸收。安裝方式如下：將 4 個直徑 2.5 公分的小彈簧以泡棉膠連接，再左右固定於車廂內壁頂端。彈簧與纜車車窗平行（圖 27）。



圖 27 橫向彈簧 X

(四) 第二代減震裝置實驗用系統和模型

為了模擬減震裝置在纜車行駛、斷電停駛的晃動情形，因此設計了一套尺寸較大，且可以模擬纜車行駛的系統和相對應的地震模擬器。

此纜車系統與地震模擬器是一體成型的，共可分為三層（圖 28）。

1. 第一層（基座）

此層為震模擬器震源馬達的放置盒，馬達安置於長條狀盒子正中間，與盒蓋相連。也收納電線、電路、變壓器等，並設置地震模擬器與纜車系統開關。

2. 第二層（振動層）

震源安裝於此層，藉由馬達轉軸接上彈簧和金屬輪子產生偏心效果，模擬震動。此層木板四角各豎起一軸，套上彈簧支撐第三層木板，將震動傳遞至第三層。

3. 第三層(地表與纜車系統)

此層模擬地表，架設纜車系統。纜車系統塔柱為金屬材質，左側塔柱下安裝馬達，使用輪胎作為轉盤，帶動整個纜車系統。轉盤與纜繩接觸面為橡膠材質，增加摩擦力。纜繩為 2 條細鋼索以壓模方式接合成環狀，全長約為 220 公分；為了讓纜車可以繞過柱子繼續行駛，以壓模方式固定了金屬棒，用以懸掛纜車臂，金屬棒之間相隔 22 公分，共 10 支。



圖 28 纜車系統與地震模擬器

為了改善紙模型吸收空氣中的水氣、或是因變形吸收震動，造成實驗結果上的誤差，因此將纜車車廂進行改版，以金屬製作，改為有弧度的車廂(長寬高 4.0cmX4.9cmX5.2cm)，如圖 29 與 30。



圖 29 鋁製纜車車廂模型展開圖



圖 30 鋁製纜車車廂模型

◎纜車系統行駛速率測量

由於系統設計成纜車行駛速率可調整，因此以開關上的刻度進行速率的測量。結果列於表 9。

表 9 纜車行駛速率一覽表(單位:cm/s)

開關刻度	測量次數					平均
	1	2	3	4	5	
2.0	8.76	7.26	7.17	6.96	7.14	7.46
2.5	11.46	11.46	11.40	11.46	11.40	11.43
3.0	13.66	13.75	13.84	13.66	13.66	13.72
3.5	19.82	19.82	19.64	19.82	20.18	19.86
4.0	25.58	25.88	25.88	25.58	25.88	25.76
4.5	35.48	34.38	34.92	35.48	34.92	35.04

◎問題-纜車廂晃動情形不明顯

測試後發覺所配置的震源產生的震動由下往上傳遞效果不佳，因此考量改用夾扇馬達接上中空橡皮管靠在第三層上，發現第三層震動稍為明顯了一點（圖 31）。

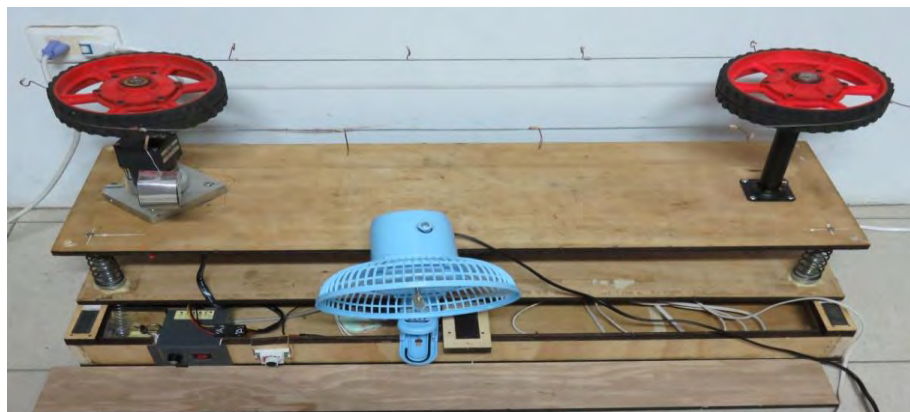


圖 31 以夾扇為震源

然而，不論是原來的震源還是後來所使用的夾扇，纜車掛上去之後晃動情形都不明顯，約在 60 秒內停止晃動。空纜車本身的晃動時間本來就不長，減震裝置加裝之後實驗效果可能會不明顯(由 Vibration Monitoring 軟體測量後截圖，兩種震源震動波形如圖 32、33，X 軸為時間，Y 軸為加速度)。

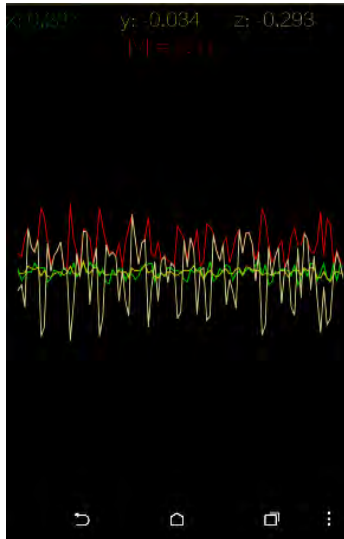


圖 32 原來的震源

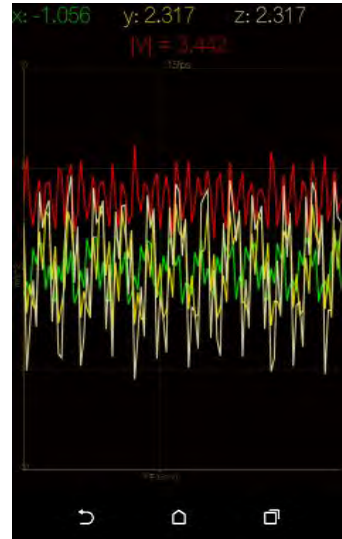


圖 33 夾扇馬達接上中空橡皮管

(五) 回歸原系統

由於第二代減震實驗用系統中，纜車晃動不明顯，因此回歸到最初的地震模擬器和纜車系統進行金屬纜車的減震裝置測試。為了配合纜車廂的比例，以二層柱高為基準（圖 34）。

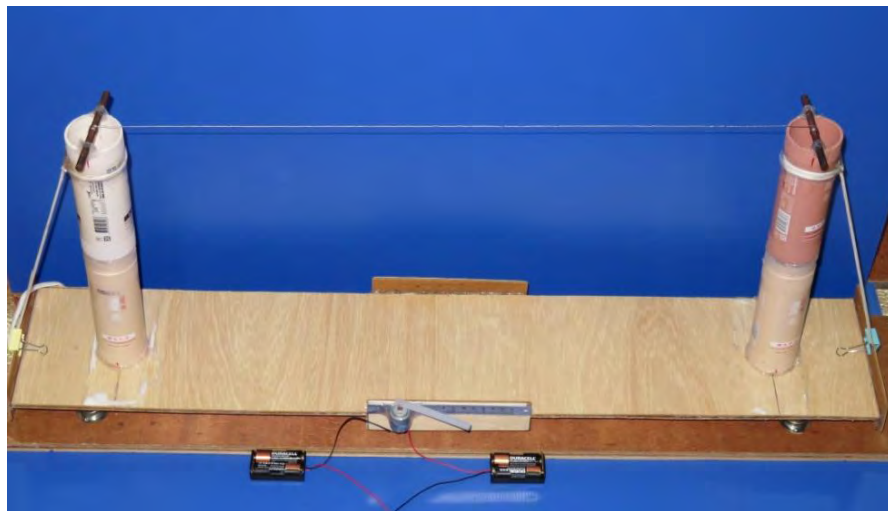


圖 34 纜車系統

(六) 第二代抗震裝置

1. 纜車臂彈簧

聯想到將纜車臂套上彈簧，與加裝於纜車廂內相較，或許能在能量傳遞至纜車廂前將其吸收，達成更直接的減震效果（圖 35 與圖 36）。

安裝方式 A: 彈簧上下兩端固定於纜車臂上（簡稱纜車臂彈簧 A）。

安裝方式 B: 此裝置是以纜車臂掛勾下端為中心點，向纜車車廂的四個角落扣住（簡稱纜車臂彈簧 B）。



圖 35 纜車臂
彈簧 A



圖 36 纜車臂
彈簧 B

2. 雙層纜車

文獻中提及蠶繭大樓的設計，因此聯想到將纜車設計為雙層，並在夾層中安裝減震裝置，以期達到外層吸收能量，而內層輕微滑動，使遊客乘坐較不受到地震干擾。雙層纜車於夾層底部置入鋼珠，地震時藉由鋼珠的轉動，使外層接收到地震力晃動時，內層減少晃動；於夾層兩側加入海綿墊，做為內外兩層間的緩衝。實驗之初直接將鋼珠散落至夾層底部，發現當鋼珠未鋪滿整層時，內層纜車可能因鋼珠集中滑動至一邊，導致其傾斜向另一邊，造成內層纜車受鋼珠阻擋無法順利滑動。因此，於夾層底部設計一方框，將鋼珠框住，使其在地震時原地轉動，同時支撐內層車廂保持水平（圖 37 與圖 38）。



圖 37 雙層纜車

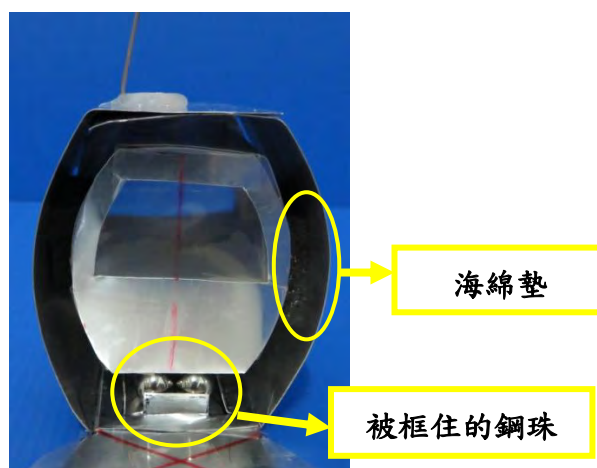


圖 38 纜車夾層

伍、研究結果與討論

一、纜繩-----橡皮繩

(一)纜車位置對晃動時間的影響

由表 10 可知纜車位置為 1 比 1，平均晃動時間最長(70.2 秒)；位置為 1 比 5，平均晃動時間最短(35.0 秒)，而由圖 39 可知，纜車位置距離塔柱越遠，晃動時間越長；距離塔柱越近，晃動時間越短。另外，實驗中由肉眼觀察發現，纜車越靠近塔柱晃動幅度越大。由上述結果推測，能量傳遞時依序傳遞至塔柱、纜繩、纜車，故距離柱子越近，能量耗損越少，導致纜車晃動幅度較大；纜車晃動幅度較大，每次晃動耗損的能量較多，當能量不再提供時，車廂晃動時間相對較短。

表 10 纜車位置對晃動時間的影響

(單位:秒)

次數	纜車位置				
	1 比 1	1 比 2	1 比 3	1 比 4	1 比 5
1	75.0	65.0	40.0	41.0	33.0
2	71.0	62.0	40.0	37.0	39.0
3	65.0	60.0	50.0	34.0	33.0
4	70.0	62.0	43.0	37.3	35.0
5	70.0	61.0	51.0	37.3	35.0
平均	70.2	62.0	44.8	37.3	35.0

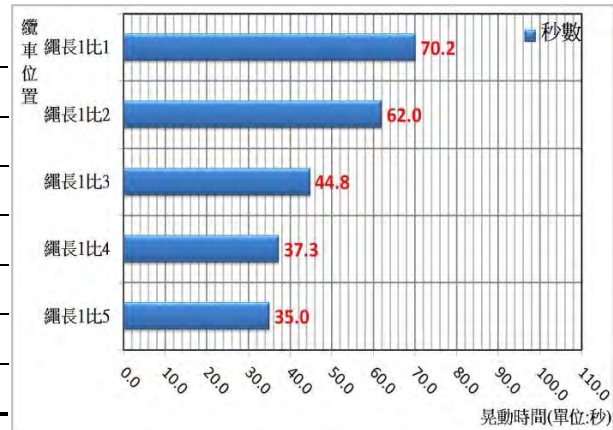


圖 39 纜車位置對晃動時間影響圖

(二)纜車個數對晃動時間的影響

纜車個數 1 個，平均晃動時間最長(70.2 秒)；纜車個數 4 個，平均晃動時間最短(28.4 秒)。纜車個數越多時，纜車晃動時間大致呈現縮短趨勢(如圖 40 及表 11)。推測纜車個數越多時，總重量越重，慣性質量較大，使晃動時間縮短。纜車個數為 5 個晃動時間稍微加長，推測是纜車總重量過重，導致纜繩並未呈現水平直線的狀態，使晃動時間增加；或是纜車間出現共振現象，導致晃動時間加長。

表 11 纜車個數對晃動時間影響表
(單位:秒)

次數	纜車個數				
	1 個	2 個	3 個	4 個	5 個
1	75.0	63.0	50.0	31.0	32.0
2	71.0	58.0	48.0	28.0	35.0
3	65.0	72.0	45.0	27.0	35.0
4	70.0	62.0	50.0	28.0	36.0
5	70.0	63.0	51.0	28.0	38.0
平均	70.2	63.6	48.8	28.4	35.2

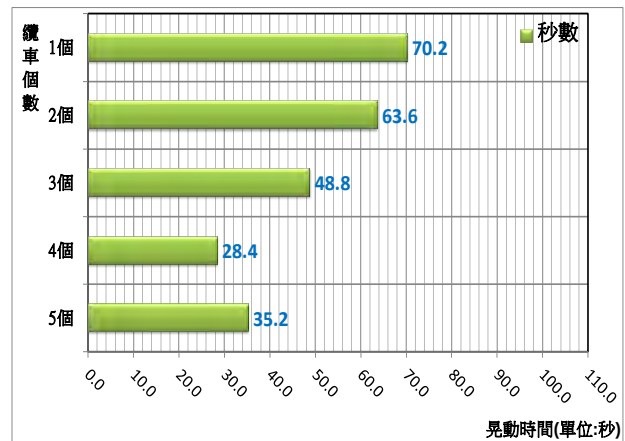


圖 40 纜車個數對晃動時間影響圖

(三) 纜車重量對晃動時間的影響

隨纜車重量增加，纜車晃動時間由短至長，再由長至短，纜車重量 10 公克時晃動時間最長(如圖 41、表 12)。纜車重量 2、5 公克部分，除了實驗數據呈現晃動時間較短外，實驗過程由肉眼觀察發現，其晃動幅度相較於其他重量的纜車明顯大出許多，根據慣性定律，重量較輕，慣性越小，因此晃動幅度較大，每次晃動耗損的能量較多，當能量不再提供時，車廂晃動時間相對較短。重量 15~25 公克的纜車呈現晃動時間漸長，根據慣性定律，重量較輕，慣量較小，越容易受到外力的改變，造成纜車晃動，消耗地震傳來的能量，減少晃動時間；至於重量 10 公克的部分，推測可能是因為頻率剛好和塔柱、纜繩或纜車系統其它結構產生共振，導致其晃動時間最長。

表 12 纜車重量對晃動時間的影響
(單位:秒)

次數	纜車重量					
	2g	5g	10g	15g	20g	25g
1	25.0	23.0	75.0	25.0	27.0	35.0
2	24.0	24.0	71.0	26.0	26.0	31.0
3	26.0	24.0	65.0	25.0	26.0	34.0
4	25.0	22.0	70.0	26.0	28.0	39.0
5	25.0	23.0	70.0	25.0	26.0	34.0
平均	25.0	23.2	70.2	25.4	26.6	34.6



圖 41 纜車重量對晃動時間的影響

(四) 纜車重量 VS 位置對晃動時間的影響

纜車重量 5 公克，不論纜車位置為何，皆是不同重量間平均晃動時間最短者(表 15 及圖 42)，推測纜車重量 5 公克，雖晃動時間較短，但是其晃動幅度由肉眼觀察發現，相較於其他重量的纜車明顯大出許多，導致能量在傳遞至纜車後消耗較快。由

實驗結果也可得知「重量較輕者，越近塔柱平均晃動時間越短；重量較重者，靠近塔柱平均晃動時間越長」推測纜車重量較輕時晃動時間較短，但近塔柱時又有晃動幅度大、時間短的特色，兩者相互作用後，導致晃動幅度加大，晃動時間減短。

表 15 纜車重量 VS 位置對晃動時間的影響(單位:秒)

纜車重量	次數	纜車位置				
		1 比 1	1 比 2	1 比 3	1 比 4	1 比 5
5g	1	23.0	18.0	15.0	15.0	17.0
	2	24.0	16.0	16.0	17.0	15.0
	3	24.0	18.0	16.0	15.0	16.0
	4	22.0	16.0	15.0	14.0	17.0
	5	23.0	17.0	17.0	17.0	15.0
	平均	23.2	17.0	15.8	15.6	16.0
10g	1	75.0	65.0	40.0	41.0	33.0
	2	71.0	62.0	40.0	37.0	39.0
	3	65.0	60.0	50.0	34.0	33.0
	4	70.0	62.0	43.0	37.0	35.0
	5	70.0	61.0	51.0	37.0	35.0
	平均	70.2	62.0	45.0	37.3	35.0
15g	1	25.0	35.0	27.0	20.0	21.0
	2	26.0	31.0	28.0	22.0	20.0
	3	25.0	34.0	30.0	23.0	22.0
	4	26.0	33.0	27.0	24.0	21.0
	5	25.0	34.0	27.0	26.0	22.0
	平均	25.4	33.4	27.8	23.0	21.2
20g	1	27.0	33.0	43.0	34.0	26.0
	2	26.0	34.0	45.0	31.0	30.0
	3	26.0	32.0	42.0	33.0	28.0
	4	28.0	31.0	44.0	34.0	27.0
	5	26.0	33.0	42.0	34.0	27.0
	平均	26.6	32.6	43.2	33.2	27.6
25g	1	35.0	54.0	51.0	37.0	40.0
	2	31.0	54.0	49.0	41.0	36.0
	3	34.0	55.0	47.0	40.0	33.0
	4	39.0	53.0	50.0	40.0	36.0
	5	34.0	55.0	48.0	40.0	39.0
	平均	34.6	54.2	49.0	39.6	36.8

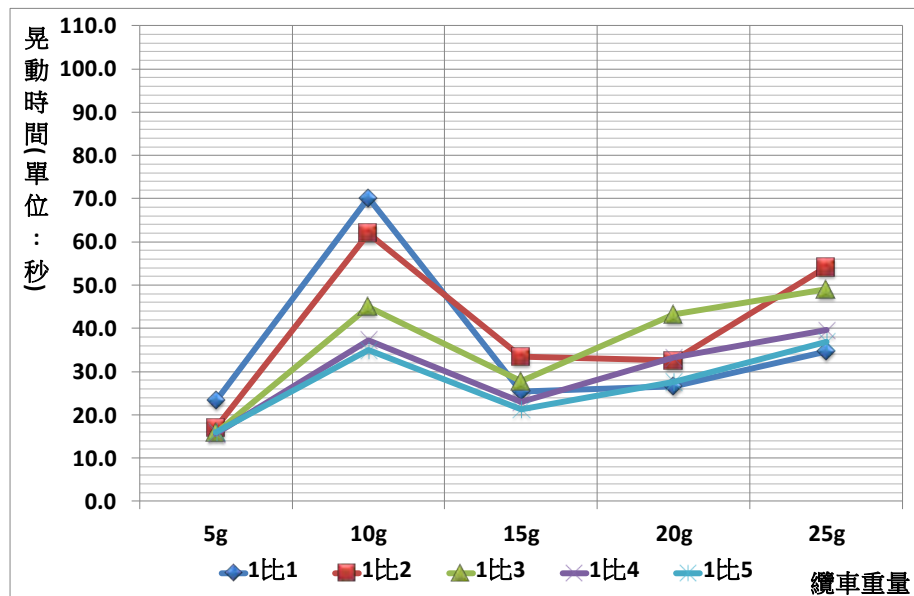


圖 42 纜車位置 VS 重量對晃動時間影響圖

(五) 纜車系統塔柱高度 VS 纜車位置/個數/重量

纜車系統塔柱高度與纜車位置、個數、重量交叉實驗之結果共同顯示，柱高為 1 層，晃動時間最長；柱高 1.5 層，晃動時間最短。推測影響的因素為重心和能量所傳遞的距離。柱高為 1 層時，雖然重心較低可能導致較穩定，但是因能量傳遞到纜車距離較短之故，所以傳到纜車的能源消耗較少，使纜車晃動時間較長；柱高為 2 層時雖然能源消耗較多，可能使晃動時間縮短，但是又因重心較高，使纜車晃動時間變長。在重心和能量所傳遞的距離相互作用下，導致最後的晃動時間最短為 1.5 層。各細項如下：

1. 纜車系統塔柱高度 VS 纜車位置

由圖 43、表 16 可知，柱高 1 層時，平均晃動時間皆為最長；柱高 1.5 層時晃動時間最短。不同纜車位置間距離塔柱越近，平均晃動時間有縮短的趨勢；距離塔柱越遠則反之。

表 16 柱高與纜車位置晃動時間比較表(單位:秒)

塔柱 高度	次數	纜車位置				
		1 比 1	1 比 2	1 比 3	1 比 4	1 比 5
1 層	1	75.0	65.0	40.0	41.0	33.0
	2	71.0	62.0	40.0	37.0	39.0
	3	65.0	60.0	50.0	34.0	33.0
	4	70.0	62.0	43.0	37.3	35.0
	5	70.0	61.0	51.0	37.3	35.0
	平均	70.2	62.0	44.8	37.3	35.0
1.5 層	1	24.0	25.0	24.0	19.0	26.0
	2	23.0	27.0	23.0	21.0	26.0
	3	33.0	27.0	26.0	23.0	23.0
	4	23.0	24.0	23.0	22.0	25.0
	5	25.0	24.0	25.0	21.0	25.0
	平均	25.6	25.4	24.2	21.2	25.0
2 層	1	48.0	39.0	24.0	25.0	23.0
	2	49.0	39.0	28.0	24.0	21.0
	3	49.0	38.0	28.0	24.0	22.0
	4	46.0	38.0	32.0	25.0	22.0
	5	46.0	39.0	31.0	25.0	24.0
	平均	47.6	38.6	28.6	24.6	22.4

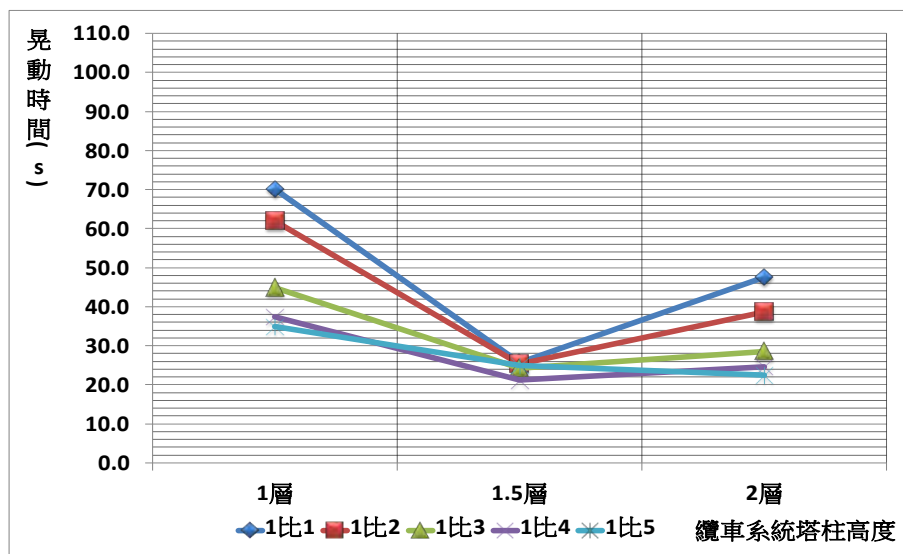


圖 43 纜車系統塔柱高度與纜車位置對晃動時間影響圖

2. 纜車系統塔柱高度 VS 纜車個數

由圖 44、表 17 可知，纜車個數相同，柱高為 1 層時，晃動時間最長；柱高為 1.5 層時，晃動時間最短。不同纜車個數間晃動時間大致呈現隨個數增加而遞減的趨勢。

表 17 柱高與纜車個數晃動時間表(單位:秒)

塔柱高度	次數	纜車個數				
		1 個	2 個	3 個	4 個	5 個
1 層	1	75.0	63.0	50.0	31.0	32.0
	2	71.0	58.0	48.0	28.0	35.0
	3	65.0	72.0	45.0	27.0	35.0
	4	70.0	62.0	50.0	28.0	36.0
	5	70.0	63.0	51.0	28.0	38.0
	平均	70.2	63.6	48.8	28.4	35.2
1.5 層	1	24.0	30.0	26.0	22.0	28.0
	2	23.0	31.0	26.0	23.0	27.0
	3	33.0	32.0	28.0	23.0	29.0
	4	23.0	31.0	26.0	22.0	27.0
	5	25.0	31.0	25.0	25.0	30.0
	平均	25.6	31.0	26.2	23.0	28.2
2 層	1	48.0	33.0	47.0	31.0	31.0
	2	49.0	35.0	46.0	33.0	30.0
	3	49.0	32.0	45.0	32.0	30.0
	4	46.0	33.0	44.0	34.0	29.0
	5	46.0	32.0	46.0	32.0	31.0
	平均	47.6	33.0	45.6	32.4	30.2

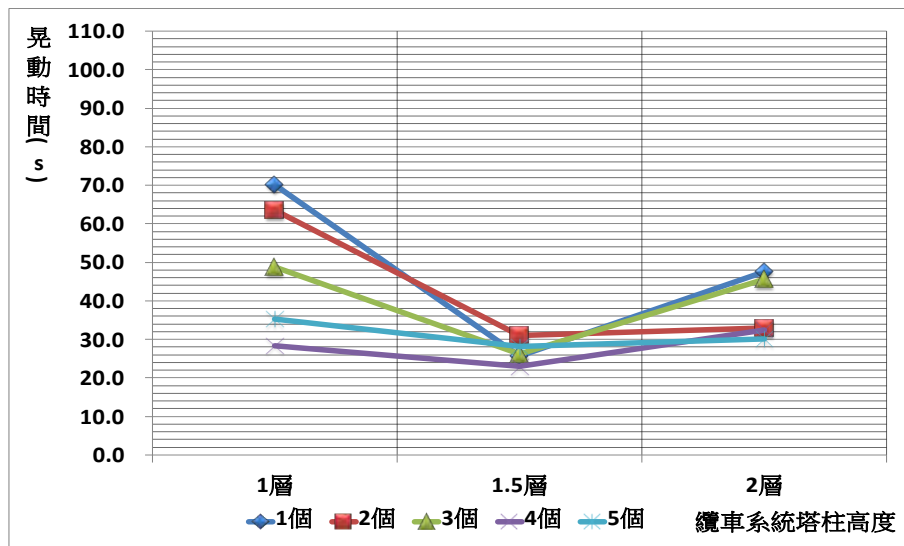


圖 44 纜車系統塔柱高度與纜車個數對晃動時間關係圖

3. 纜車系統塔柱高度 VS 纜車重量

由圖 45、表 18 可知，柱高相同，不同纜車重量間有峰值出現。柱高 1 層時，峰值出現於纜車重量 10 公克(70.2 秒)；柱高 1.5 層和 2 層時，峰值皆出現於重量 25 公克(66.4 秒、56.0 秒)。纜車重量 5 公克平均晃動時間在不同柱高間無明顯變化，皆落在 23.0 秒左右。纜車重量相同，不同柱高間，重量 10 公克於柱高 1 層平均晃動時間最長，柱高 1.5 層最短；重量 15、20 公克，於柱高 2 層平均晃動時間最長，柱高 1 層最短；重量 25 公克於柱高 1.5 層平均晃動時間最長，柱高 1 層最短，恰與重量 10 公克相反。

表 18 柱高與纜車重量晃動時間表(單位:秒)

塔柱高度	次數	纜車重量				
		5 公克	10 公克	15 公克	20 公克	25 公克
1 層	1	23.0	75.0	25.0	27.0	43.0
	2	24.0	71.0	26.0	26.0	31.0
	3	24.0	65.0	25.0	24.0	34.0
	4	22.0	70.0	26.0	28.0	39.0
	5	23.0	70.0	25.0	27.0	36.0
	平均	23.2	70.2	25.4	26.4	36.6
1.5 層	1	25.0	24.0	37.0	31.0	65.0
	2	23.0	23.0	42.0	32.0	69.0
	3	25.0	33.0	36.0	31.0	70.0
	4	22.0	23.0	34.0	34.0	65.0
	5	20.0	25.0	36.0	32.0	63.0
	平均	23.0	25.6	37.0	32.0	66.4

2 層	1	31.0	48.0	50.0	45.0	56.0
	2	36.0	49.0	53.0	44.0	59.0
	3	32.0	49.0	50.0	48.0	57.0
	4	35.0	46.0	46.0	45.0	55.0
	5	35.0	46.0	46.0	45.0	53.0
	平均	33.8	47.6	49.0	45.4	56.0

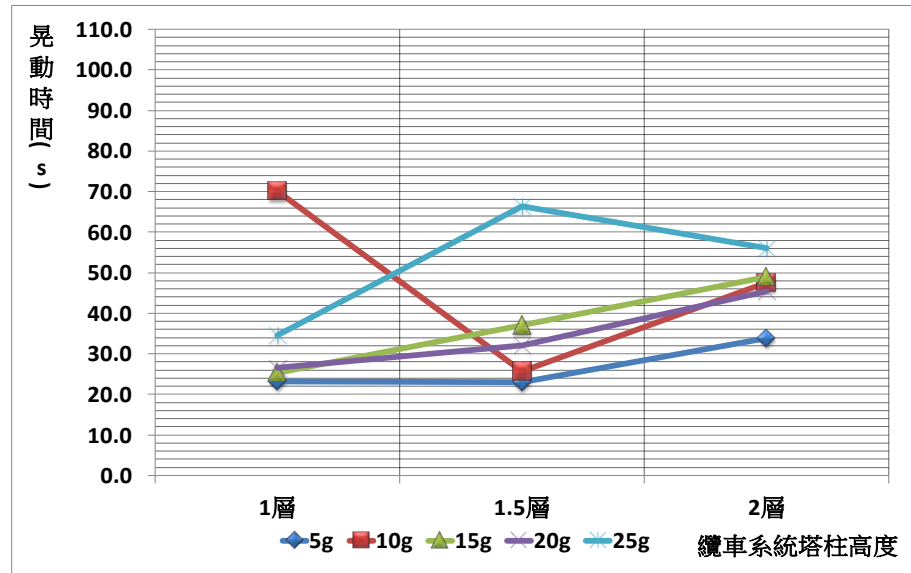


圖 45 纜車系統塔柱高度與纜車重量對晃動時間的影響

(六) 纜繩上仰角度 VS 纜車位置/個數/重量

由圖 46、表 19 可知，纜繩上仰角度與纜車位置、個數、重量交叉實驗之共同結果顯示，纜繩上揚角度為 0 度，晃動時間最長；上揚角度為 7 度，晃動時間最短。推測上揚角度愈大，纜繩於兩柱間的長度愈長(直角三角形斜邊)，能量在傳遞時耗損較多，因此上揚角度 0 度的晃動時間較上揚角度 7 度來的長。又因為重心之故，上揚角度 14 度時重心較高，雖有能量耗損，但是受重心影響，使晃動時間較上揚角度 7 度長。各細項如下：

1. 纜繩上仰角度 VS 纜車位置

由圖 50、表 19 可知，纜繩上仰角度為 0 度時，不論纜車位置在何，晃動時間皆最長。纜車位置 1 比 2、1 比 3 平均晃動時間最短出現於角度 7 度-矮短。纜車位置 1 比 1、1 比 4 和 1 比 5 平均晃動時間最短者出現於 7 度-高短。根據實驗結果，**纜繩上揚角度為 0 度，晃動時間最長；纜繩上揚角度為 7 度時，晃動時間最短。**

表 19 纜繩上揚角度與纜車位置晃動時間表(單位:秒)

纜繩上仰角度	次數	纜車位置				
		1 比 1	1 比 2	1 比 3	1 比 4	1 比 5
0 度	1	75.0	65.0	40.0	41.0	33.0
	2	71.0	62.0	40.0	37.0	39.0
	3	65.0	60.0	50.0	34.0	33.0
	4	70.0	62.0	43.0	37.3	35.0
	5	70.0	61.0	51.0	37.3	35.0
	平均	70.2	62.0	44.8	37.3	35.0
7 度-高短	1	19.0	21.0	13.0	12.0	11.0
	2	18.0	21.0	12.0	11.0	11.0
	3	20.0	23.0	14.0	11.0	12.0
	4	18.0	18.0	14.0	11.0	11.0
	5	19.0	21.0	14.0	12.0	10.0
	平均	18.8	20.8	13.4	11.4	11.0
7 度-矮短	1	19.0	18.0	10.0	14.0	14.0
	2	18.0	17.0	10.0	13.0	13.0
	3	20.0	19.0	11.0	11.0	13.0
	4	18.0	18.0	10.0	13.0	15.0
	5	19.0	18.0	9.0	11.0	13.0
	平均	18.8	18.0	10.0	12.4	13.6
14 度-高短	1	30.0	19.0	19.0	23.0	27.0
	2	29.0	22.0	18.0	27.0	27.0
	3	30.0	20.0	16.0	26.0	26.0
	4	31.0	21.0	16.0	26.0	26.0
	5	30.0	23.0	17.0	27.0	26.0
	平均	30.0	21.0	17.2	25.8	26.4
14 度-矮短	1	30.0	15.0	14.0	14.0	19.0
	2	29.0	16.0	13.0	15.0	18.0
	3	30.0	15.0	13.0	15.0	18.0
	4	31.0	30.0	13.0	13.0	20.0
	5	30.0	18.0	14.0	15.0	19.0
	平均	30.0	18.8	13.4	14.4	18.8

註:纜繩角度上揚時,繩子一端高,一端低,與纜車位置交叉探討
時,由高端為基準測量比例者,稱為「高短」,「矮短」則與之相反。

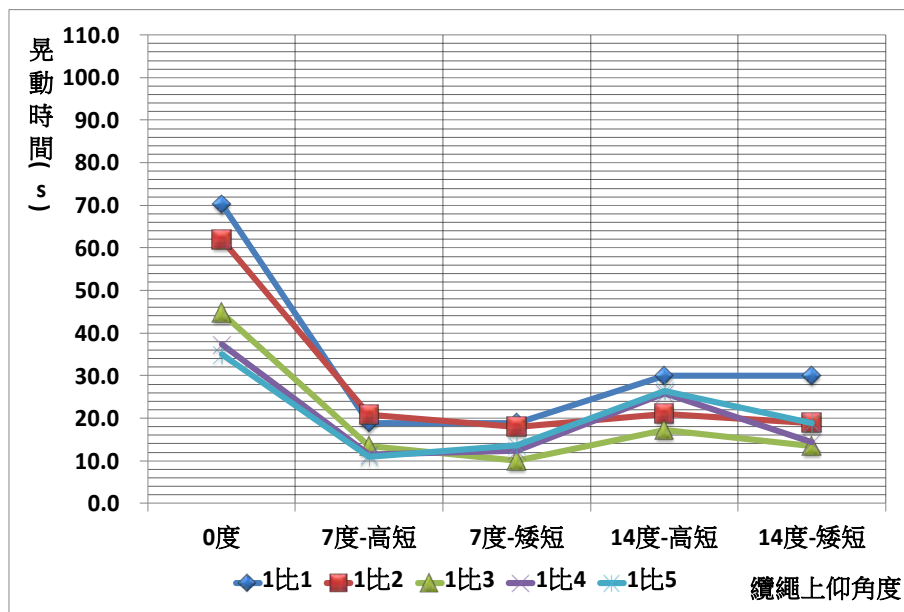


圖 46 纜繩上揚角度與纜車位置晃動時間關係圖

2. 纜繩上揚角度 VS 個數

由實驗結果可知，纜車個數 1 個和 2 個時，纜繩上揚角度較大，晃動時間較短；纜車個數 3 個、4 個和 5 個在不同角度之間，則呈現由長至短，再由短至長的趨勢，其晃動時間最短在纜繩上揚角度為 7 度時(如表 20、圖 47)。

表 20 纜繩上揚角度與車個數晃動時間表(單位:秒)

纜繩上仰角度	次數	纜車個數				
		1 個	2 個	3 個	4 個	5 個
0 度	1	75.0	63.0	50.0	31.0	32.0
	2	71.0	58.0	48.0	28.0	35.0
	3	65.0	72.0	45.0	27.0	35.0
	4	70.0	62.0	50.0	28.0	36.0
	5	70.0	63.0	51.0	28.0	38.0
	平均	70.2	63.6	48.8	28.4	35.2
7 度	1	19.0	36.0	30.0	24.0	23.0
	2	18.0	41.0	30.0	24.0	21.0
	3	20.0	31.0	34.0	27.0	21.0
	4	18.0	42.0	29.0	24.0	21.0
	5	19.0	33.0	29.0	21.0	21.0
	平均	18.8	36.6	30.4	24.0	21.4
14 度	1	30.0	22.0	32.0	34.0	35.0
	2	29.0	23.0	31.0	31.0	36.0
	3	30.0	22.0	32.0	36.0	33.0
	4	31.0	23.0	31.0	33.0	36.0
	5	30.0	20.0	30.0	34.0	36.0
	平均	30.0	22.0	31.2	33.6	35.2

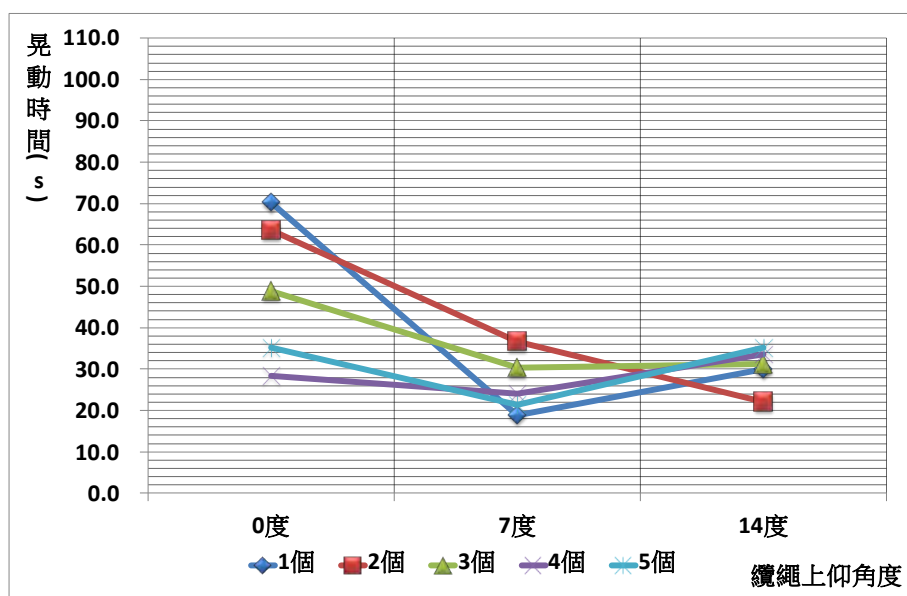


圖 47 纜繩上仰角與纜車個數對晃動時間關係圖

3. 纜繩上揚角度 VS 重量

當纜繩上揚角度為 0 度時，不論重量為何，晃動時間皆為最長。當纜繩上揚角度為 7 度時，除了重量 25 公克外，晃動時間皆為最短。除纜車重量 25 公克呈現角度愈小，平均晃動時間愈長；其他重量於不同角度之間皆以角度 7 度平均晃動時間最短。根據實驗結果，除了纜車重量 25 公克呈現角度愈小，平均晃動時間愈長外，其它重量於不同角度之間皆以角度 7 度平均晃動時間最短，顯示出纜繩上揚角度對纜車晃動時間影響大於纜車重量對晃動時間的影響。

表 21 纜繩上揚角度與纜車重量晃動時間表(單位:秒)

纜繩上仰角度	次數	纜車重量				
		5 公克	10 公克	15 公克	20 公克	25 公克
0 度	1	23.0	75.0	25.0	27.0	35.0
	2	24.0	71.0	26.0	26.0	31.0
	3	24.0	65.0	25.0	26.0	34.0
	4	22.0	70.0	26.0	28.0	39.0
	5	23.0	70.0	25.0	26.0	34.0
	平均	23.2	70.2	25.4	26.6	34.6
7 度	1	15.0	14.0	25.0	22.0	39.0
	2	13.0	14.0	25.0	20.0	31.0
	3	15.0	13.0	24.0	23.0	28.0
	4	15.0	12.0	26.0	22.0	31.0
	5	14.0	12.0	23.0	21.0	30.0
	平均	14.4	13.0	24.6	21.6	31.8
14 度	1	18.0	18.0	28.0	24.0	20.0
	2	19.0	19.0	28.0	26.0	19.0
	3	17.0	17.0	29.0	24.0	18.0
	4	20.0	20.0	29.0	26.0	22.0
	5	20.0	20.0	26.0	26.0	19.0
	平均	18.8	18.8	25.0	25.2	19.6

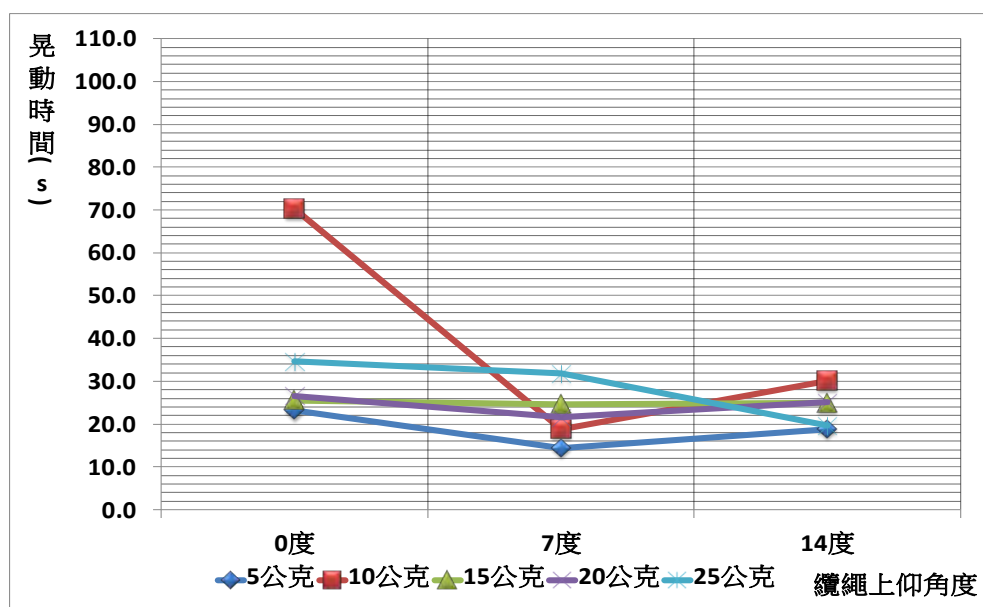


圖 48 纜繩上揚角度與重量對於晃動時間的影響

(七)地震震動方向 VS 纜車重量

由實驗結果表 22 與圖 49 可知，除重量 10 公克外，纜車於水平震動之平均晃動時間較垂直震動之晃動時間短。推測是因為垂直震動時，垂直分量較大，導致能量可較完全的傳遞到纜車；水平震動時則反之。而不同重量之間，無論是水平震動或是垂直震動，在不同重量間皆有峰值出現的情形。水平震動時峰值出現於 10 公克，垂直震動時峰值延後出現於 20 公克。

表 22 地震震動方向對纜車晃動時間的影響(單位:秒)

震動方向	次數	纜車重量				
		5 公克	10 公克	15 公克	20 公克	25 公克
水平震動	1	23.0	75.0	25.0	27.0	35.0
	2	24.0	71.0	26.0	26.0	31.0
	3	24.0	65.0	25.0	26.0	34.0
	4	22.0	70.0	26.0	28.0	39.0
	5	23.0	70.0	25.0	26.0	34.0
	平均	23.2	70.2	25.4	26.6	34.6
垂直震動	1	31.0	59.0	67.0	105.0	95.0
	2	28.0	55.0	68.0	108.0	91.0
	3	29.0	57.0	67.0	107.0	93.0
	4	30.0	59.0	66.0	106.0	92.0
	5	30.0	56.0	66.0	107.0	93.0
	平均	29.6	57.2	66.8	106.6	92.8

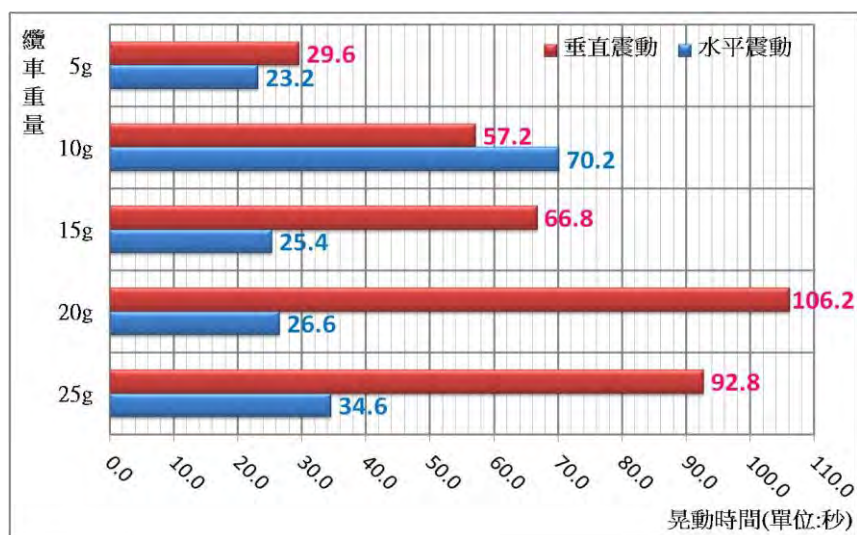


圖 49 地震震動方向對纜車晃動時間的影響

(八) 纜車行駛中

由表 23、圖 50 可知，不同重量間以 20 公克纜車平均晃動時間最短，10 公克纜車平均晃動時間最長。綜合前述實驗，與重量相關之結果幾乎皆以 10 公克的纜車晃動時間最長。推測 10 公克的纜車為一臨界值。此實驗中，纜車重量 20 公克平均晃動時間最短，由此推論，當纜車在纜繩能承受的情況下，重量較重能有效縮短纜車晃動時間。

表 23 纜車行駛中之晃動時間(單位:秒)

次數	纜車重量		
	5g	10g	20g
1	15.0	32.0	14.0
2	16.0	33.0	12.0
3	14.0	35.0	13.0
4	14.0	32.0	14.0
5	14.0	33.0	12.0
平均	14.6	33.0	13.0



圖 50 纜車行駛中晃動時間

二、纜繩-----鋼絲

(一) 纜車位置對晃動時間的影響

由表 24、圖 51 可知，纜車於位置 1 比 1，晃動時間最長；位置 1 比 3，晃動時間最短。並且由肉眼觀察發現，纜車在不同位置並不曾出現特大幅度的晃動。推測可能是因為纜車位置位於 1 比 1 時，纜繩左右兩側的水平分力為互相抵消，呈現較穩定的上

下、左右晃動，使得晃動時間增加；纜車位置於 1 比 3 時則反之。

表 24 纜車位置對晃動時間的影響

(單位:秒)

次數	纜車位置				
	1 比 1	1 比 2	1 比 3	1 比 4	1 比 5
1	489.0	334.0	81.0	198.0	286.0
2	564.0	327.0	81.0	171.0	407.0
3	502.0	404.0	86.0	187.0	311.0
4	580.0	264.0	98.0	264.0	309.0
5	578.0	366.0	98.0	165.0	321.0
6	580.0	425.0	92.0	282.0	329.0
7	577.0	359.0	82.0	169.0	276.0
8	580.0	313.0	99.0	278.0	273.0
9	550.0	308.0	101.0	246.0	300.0
10	508.0	141.0	118.0	190.0	305.0
平均	550.8	324.1	93.6	215.0	311.7

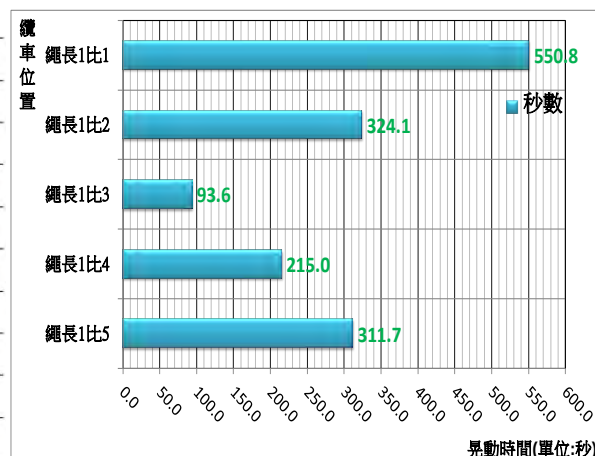


圖 51 纜車位置對晃動時間的影響

(二)纜車個數對晃動時間的影響

由表 25、圖 52 可知，纜車個數為 1 個時，晃動時間最長；個數為 3 個，晃動時間最短，大致上是個數越多晃動時間越短的趨勢。推測是個數越多，總重量越重，慣性質量越大，使晃動時間縮短。

表 25 纜車個數對晃動時間影響表

(單位:秒)

次數	纜車個數				
	1 個	2 個	3 個	4 個	5 個
1	489.0	401.0	390.0	303.0	267.0
2	564.0	446.0	229.0	414.0	274.0
3	502.0	492.0	191.0	329.0	300.0
4	580.0	434.0	231.0	298.0	312.0
5	578.0	521.0	239.0	299.0	286.0
6	580.0	434.0	225.0	284.0	285.0
7	577.0	431.0	259.0	343.0	345.0
8	580.0	430.0	232.0	315.0	344.0
9	550.0	490.0	253.0	381.0	336.0
10	508.0	414.0	279.0	340.0	266.0
平均	550.8	449.3	252.8	330.6	301.5

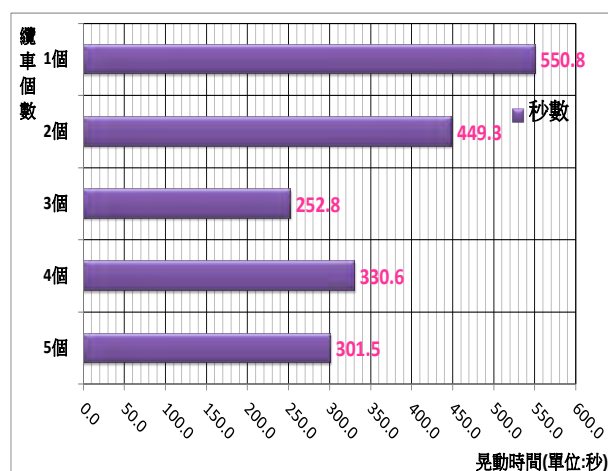


圖 52 纜車個數對晃動時間影響

(三)纜車重量對晃動時間的影響

由表 26、圖 53 可知，纜車重量為 10 公克，晃動時間最長；重量為 15 公克，晃動時間最短。

表 26 纜車重量對晃動時間影響
(單位:秒)

次數	纜車重量				
	5g	10g	15g	20g	25g
1	248.0	489.0	141.0	407.0	227.0
2	350.0	564.0	248.0	421.0	282.0
3	171.0	502.0	254.0	464.0	226.0
4	178.0	580.0	220.0	458.0	379.0
5	252.0	578.0	188.0	413.0	371.0
6	232.0	580.0	258.0	447.0	306.0
7	205.0	577.0	178.0	429.0	294.0
8	221.0	580.0	196.0	406.0	340.0
9	304.0	550.0	182.0	485.0	413.0
10	273.0	508.0	217.0	374.0	233.0
平均	243.4	550.8	208.2	430.4	307.1



圖 53 纜車重量對晃動時間影響

(四) 纜車臂長度對晃動頻率的影響

由表 27~28 及圖 54~55 之實驗結果可知，纜車臂長度較長，晃動頻率較低；纜車臂長度較短，晃動頻率較高，纜車臂長度的平方根和頻率成負相關。且纜車重量對晃動頻率並無明顯影響。單擺週期和擺長平方根成正比，即擺長平方根和頻率成反比與實驗結果類似，推測纜車晃動為一近似單擺的運動。由此實驗結果亦可知，當纜繩為鋼絲，重量 10 公克(頻率約 1.7Hz)晃動時間有明顯峰值出現並非與地震震源(約 25Hz)產生共振。

表 27 纜車臂長度對晃動頻率的影響-重量 10 公克(單位:Hz)

纜車臂長度 次數	1.25cm	2.50cm	5.00cm	7.50cm	10.00cm
1	2.100	1.767	1.700	1.600	1.367
2	2.100	1.800	1.700	1.533	1.367
3	2.100	1.767	1.700	1.500	1.367
4	2.067	1.767	1.667	1.533	1.367
5	2.100	1.733	1.667	1.533	1.367
6	2.067	1.767	1.700	1.533	1.333
7	2.133	1.767	1.700	1.500	1.367
8	2.067	1.800	1.700	1.433	1.367
9	2.100	1.767	1.700	1.500	1.367
10	2.067	1.767	1.700	1.533	1.367
平均	2.090	1.770	1.693	1.520	1.363

表 28 纜車臂長度 vs 重量對晃動頻率的影響(單位:Hz)

次數	纜車臂長度 纜車重量	1.25cm			10.00cm		
		5g	10g	20g	5g	10g	20g
1		2.233	2.100	2.133	1.367	1.367	1.367
2		2.233	2.100	2.033	1.400	1.367	1.433
3		2.233	2.100	2.067	1.367	1.367	1.400
4		2.233	2.133	2.267	1.367	1.367	1.267
5		2.200	2.100	1.867	1.400	1.367	1.267
平均		2.227	2.107	2.073	1.380	1.367	1.347

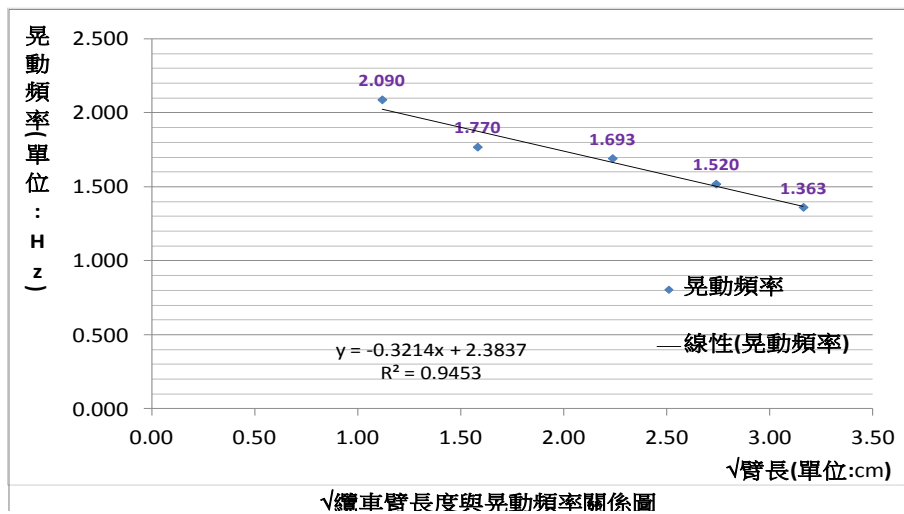


圖 54 纜車臂長度對晃動頻率影響圖

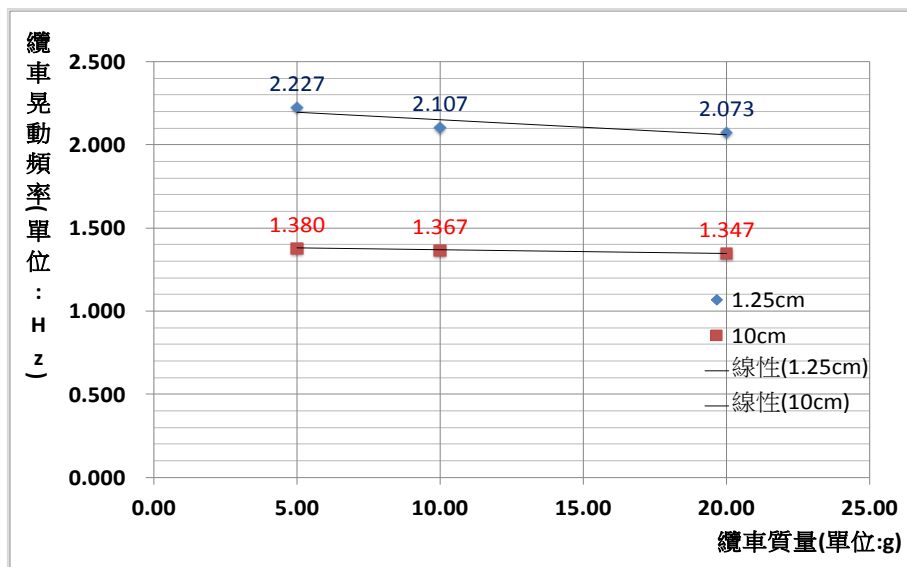


圖 55 纜車臂長度與重量對晃動頻率影響折線圖

(五)纜車臂長度 VS 纜車廂重量對晃動時間的影響

由實驗結果表 29、30 及圖 56、57 可知，纜車重量較重，且臂長較短時，晃動時間較短；纜車重量較輕，且臂長較長，晃動時間較短。意即重量較輕時，晃動時間受纜車臂長度的影響較小；重量較重時，晃動時間受纜車臂長度影響越大。推測重量較重，晃動時間較長，因此受纜車臂長度影響後改變量較大，重量較輕則反之。

表 29 纜車臂長度-10 公克對晃動時間之影響

次數	纜車臂長度(cm)				
	1.25	2.50	5.00	7.50	10.00
1	441.0	880.0	695.0	811.0	1045.0
2	468.0	852.0	646.0	831.0	965.0
3	452.0	790.0	700.0	713.0	1020.0
4	494.0	765.0	700.0	845.0	1042.0
5	464.0	818.0	716.0	758.0	1202.0
6	483.0	804.0	779.0	765.0	1033.0
7	561.0	860.0	741.0	780.0	1045.0
8	493.0	830.0	605.0	607.0	1046.0
9	543.0	846.0	616.0	602.0	1043.0
10	543.0	884.0	704.0	778.0	1023.0
平均	494.2	832.9	690.2	749.0	1046.4

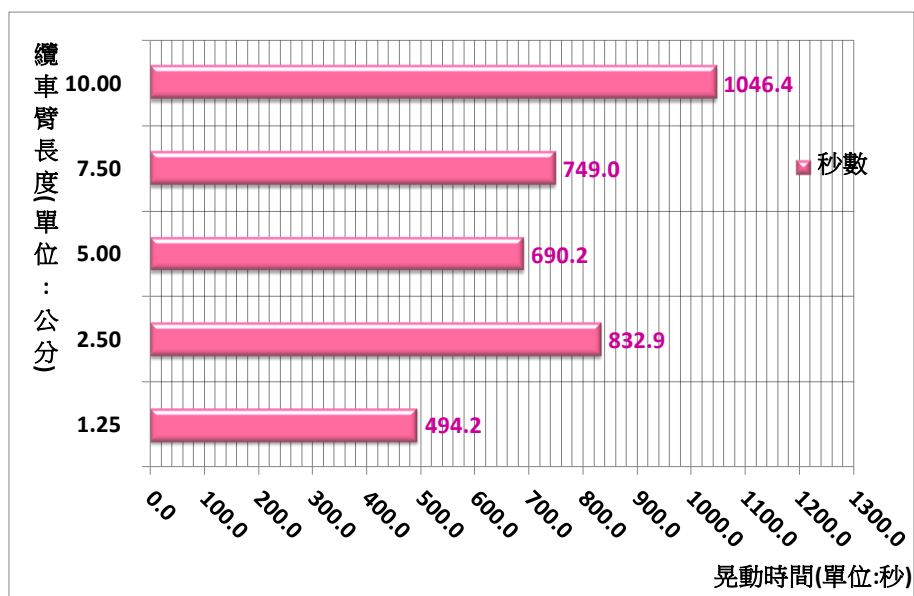


圖 56 纜車臂長度-10 公克對晃動時間之影響

表 30 纜車臂長度對晃動時間影響(單位:秒)

纜車臂長度(cm)	1.25cm			10.00cm		
	纜車重量(gw)			纜車重量(gw)		
	5.00	10.00	20.00	5.00	10.00	20.00
次數						
1	544	771	123	504	1052	1408
2	532	814	115	520	1055	1393
3	533	870	111	463	1056	1190
4	565	840	116	590	1053	1364
5	559	856	123	574	1055	1299
平均	546.6	830.2	117.6	530.2	1054.2	1330.8

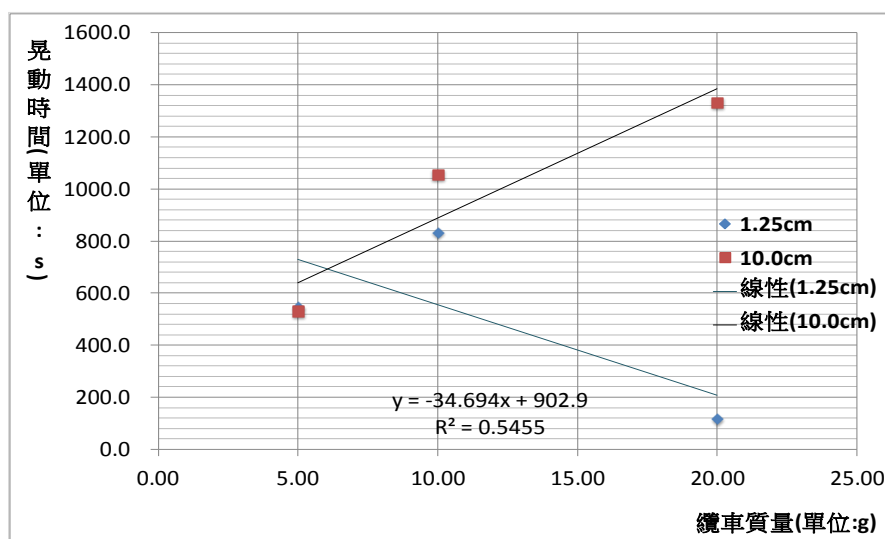


圖 57 重量與纜車臂長度對晃動時間影響圖

三、減震裝置

(一)第一代減震裝置(紙製纜車廂)

由表 31 與圖 58 之實驗結果可知，在纜車上加裝吸震彈簧，平均晃動時間最短，推測是因彈簧具彈性，可將傳來之能量轉換成彈力位能，位能與動能之間互相轉換時，能量消耗，以致於傳遞到纜車車廂的能量較少，使晃動時間縮短。實驗之初加裝阻尼器時不僅無抗震的效用，還使晃動時間加長，推測可能是阻尼器的擺錘不夠長，導致無法有效阻尼，讓阻尼器跟著纜車晃動，使晃動時間較長。改良後的阻尼器，即加長擺錘後的阻尼晃動時間較未加裝減震裝置短，有減震的效果。

表 31 第一代減震裝置對晃動時間的影響

次數	第一代減震裝置		
	未安裝減震裝置	橫向彈簧 X	球型阻尼器
1	657.0	381.0	447.0
2	499.0	432.0	486.0
3	576.0	443.0	365.0
4	577.0	383.0	425.0
5	532.0	429.0	381.0
平均	568.2	413.6	420.8

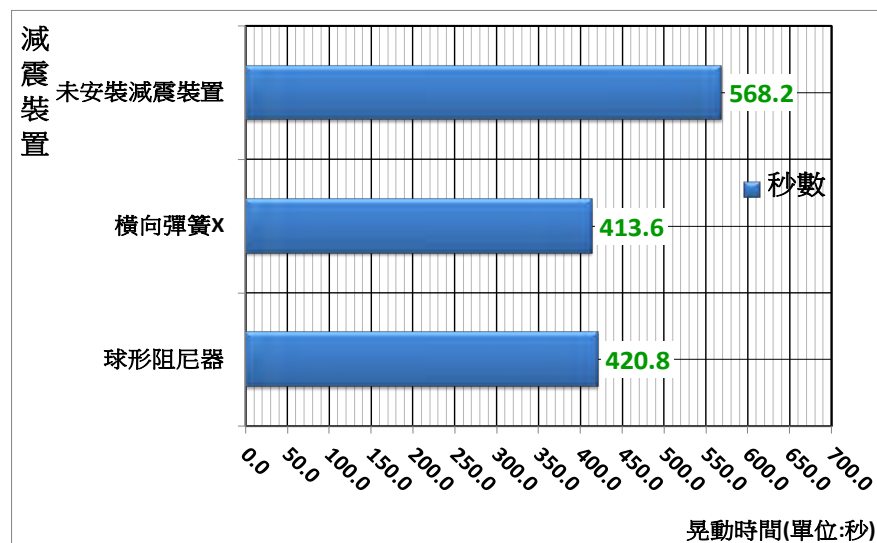


圖 58 第一代減震裝置對晃動時間影響圖

(二) 第二代減震裝置(鋁製纜車廂)

由實驗結果表 32 及圖 59 可知，雙層纜車抗震效果較佳，與未加裝減震裝置的纜車廂較，縮短了 72% 的晃動時間。推測是夾層中的滾珠使內層纜車之位移量減少，而外層纜車造成的晃動於鋼珠滾動時，部分能量轉換，使整體晃動時間縮短。而抗震效果次之者為纜車臂彈簧 b，起初推測為彈簧在能量轉換過程中使傳遞至纜車能量減少所致，後來仔細端詳模型後，認為固定於兩端點的四條彈簧在震動過程中可能無法產生形變儲存能量，近似於 4 根非彈性體，晃動時間縮短可能單純為分散外力的結果。至於橫向彈簧 X，於金屬模型中減震效果大幅減落，推測其在紙纜車中顯現出之減震效果是由於紙車廂和彈簧同時變形，使彈簧將地震力釋放、轉換成動能時一起振動，能量大幅消耗導致；而金屬纜車廂為非彈性體，較不能產生形變，因此減震效果不明顯。

表 32 第二代減震裝置對晃動時間影響表

次數	第二代減震裝置				
	無減震裝置	橫向彈簧 X	纜車臂彈簧 A	纜車臂彈簧 B	雙層纜車
1	216.0	194.0	201.0	148.0	84.0
2	247.0	211.0	180.0	142.0	85.0
3	224.0	208.0	178.0	120.0	81.0
4	206.0	188.0	184.0	120.0	103.0
5	202.0	183.0	189.0	126.0	83.0
6	222.0	215.0	185.0	120.0	84.0
7	242.0	225.0	184.0	115.0	83.0
8	245.0	219.0	179.0	115.0	85.0
9	228.0	222.0	173.0	113.0	94.0
10	206.0	228.0	179.0	112.0	86.0
平均	223.8	209.3	183.2	123.1	86.8

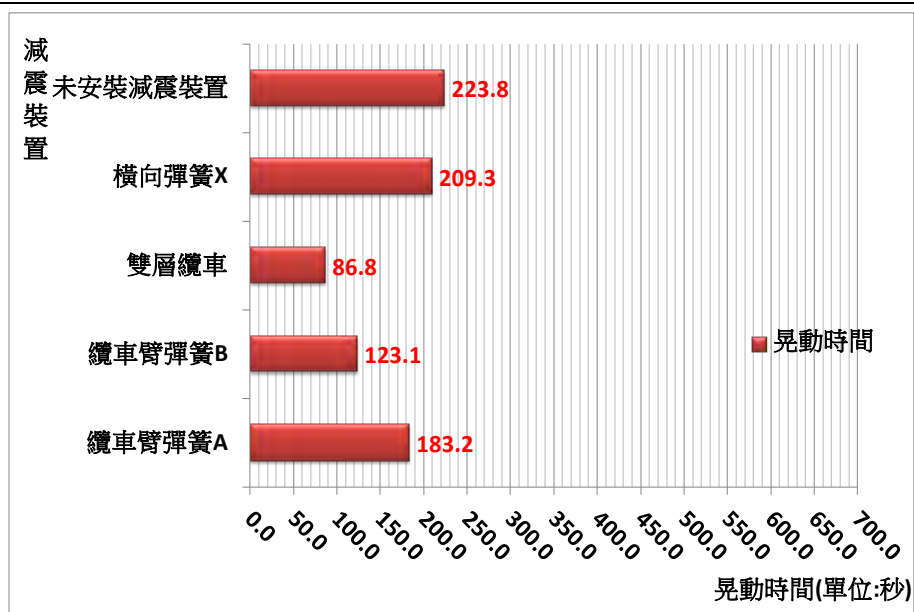


圖 59 第二代減震裝置對晃動時間影響圖

陸、應用與未來展望

一、纜車晃動時間較短的條件

綜合”纜車在各因素下對晃動情形的影響”研究結果，可知纜車：

1. 重量較輕，越近塔柱平均晃動時間越短；重量較重，靠近塔柱平均晃動時間越長。
2. 相同長度的纜繩上，纜車廂個數越多，晃動時間越短。
3. 柱高過高或過低接會導致纜車晃動時間較長，需要在重心和能量消耗間取得平衡。
4. 纜繩些許上仰時纜車晃動時間較短。
5. 纜車臂較長，重量較輕，晃動時間較短；纜車臂較短，且重量較重，晃動時間越短。

因此建議纜車盡量坐滿乘客，增加重量，同時將纜車臂長縮短，增加相同長度內纜車廂個數(纜繩可負荷安全範圍)，可使地震來臨時纜車晃動時間相對較短。至於纜車系統塔柱與纜繩仰角，受地形限制較多，在高度或角度調整中所得到的減震效果較不明顯，宜另尋他法。

二、纜車系統塔柱避震措施

纜車在第二代減震裝置實驗用系統中晃動極為不明顯，因此未使用此系統實驗。曾嘗試將地震模擬器震源震度加大，使第三層(模擬地表與纜車系統所在處)的震度達到麥加利震度約 7 級，第二層(震動層)震度達到約 9 級，但是纜車晃動依然不明顯，因此推測能量由第二層傳遞至第三層，以及第三層傳遞至纜車廂，過程中有吸震物體將能量吸收，減震效果良好，導致於纜車廂晃動不明顯。目前認為是第二層和第三層間的彈簧，與纜車系統塔柱轉盤所圍繞的橡膠吸收能量。原設計目的是藉彈簧牽引第三層的位移，避免木板直接受力而斷裂；纜車系統塔柱轉盤圍繞橡膠則是增加轉盤和纜繩間摩擦力，讓纜繩順利運轉；卻意外發現此為減震效果極佳的系統。若實際的纜車系統，於塔柱下方地層加裝類似建築物所設置之隔震元件，或許有減緩纜車晃動之效(圖 60)。

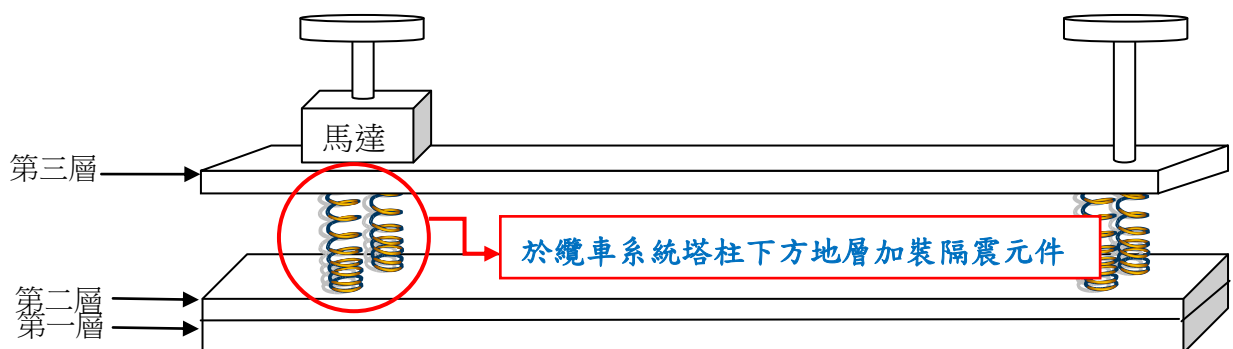


圖 60 纜車系統避震裝置

三、纜車廂減震裝置之應用

由研究結果可知，減震裝置效果最佳者為「雙層纜車」。考慮到實際上纜車廂為纜車廂模型放大許多倍，夾層中應以彈簧取代海綿墊方能負荷內層纜車滑動撞擊外層的力道；夾層底部之鋼珠不僅需承受內層重量，亦應順利轉動。纜車系統多用於高山運輸，纜繩仰角常大於0度，此時纜車廂些微傾斜，位於較高處的鋼珠壓住較低處的鋼珠而無法轉動，且內層纜車有騰空之虞，恐造成減震裝置效果降低。因此，可考慮一顆鋼珠一個框框，避免鋼珠間相互擠壓而無法轉動；方框固定於夾層底部，纜車傾斜時，方框也隨之傾斜，解決內層纜車騰空問題。另考慮製造成本，可將外層設計為上半部只留下各邊的框架，下半部保持原狀，減少材料成本，降低對遊客欣賞風景的影響。

柒、結論

- 一、纜車重量較輕者，越靠近塔柱晃動時間越短；重量較重者，越靠近塔柱晃動時間越長。
- 二、纜車個數越多時，晃動時間有縮短趨勢。建議在纜繩可負荷範圍及安全距離內縮短纜車間距，以利地震時達到減緩晃動的效果。
- 三、纜繩須維持適當角度，以減少纜車於地震時晃動時間。
- 四、塔柱較高，晃動時間較長。建議現實生活中的纜車架設高度不宜過高。
- 五、不同重量間在水平震動和垂直震動時，晃動時間皆有峰值出現。
- 六、減震裝置中以雙層纜車的減震效果最佳，未來可持續探討以作為實際應用的參考。

捌、參考資料

- 一、黃冠樺、黃炳華、歐沛慈、胡雨勛，2010。曲直分明——為何纜車的握臂是彎的。第50屆中小學科學展覽會，國小組，物理科。
(<http://science.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?cat=64&a=6821&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=20&sid=5597>)
- 二、孫文山，2012。空中纜車系統介紹及概要說明。中華技術期刊，第51期。
- 三、王朝網路，2014。(http://tc.wangchao.net.cn/junshi/detail_51847.html)
- 四、蕭順發，2008。纜車採用主動與被動調諧質量阻尼器之最佳與模糊振動控制。高雄市：國立高雄應用科技大學碩士論文(未出版)。
- 五、江照全，2007。隔震構造在建築計畫設計準則之研究。台北市：國立台北科技大學碩士論文(未出版)。
- 六、康軒版文教主編，2014。自然與生活科技課本第三冊，第三章波。新北市：康軒。
- 七、康軒版文教主編，2014。自然與生活科技課本第五冊，第二章慣性。新北市：康軒。
- 八、康軒版文教主編，2014。自然與生活科技課本第六冊，第四章地震。新北市：康軒。

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

Abstract

Cable car system is a useful transportation. However, it could be damaged by earthquake, and resources have to be used to repair. In this project, self-made earthquake simulator and cable car system were used to investigate the variables which influenced the vibration of the cable car. Damping devices were designed to reduce the vibration.

The results are as follows: Firstly, a shorter arm of cable car, even number of the cable cars on the cable, and a heavier cable car result in shorter duration time of vibration. Secondly, several damping devices reduced vibration obviously. The results revealed the effects of the cable car whose arm with four springs set up, and several steel balls rolling in between double-layer cabin reduce the vibration. The duration time was reduced by over 75%. In the future, the model can be applied to improve the stability of cable car. We protect the cable car system, cut down the resources to repair and ensure the safety of passengers. Furthermore, the cable car be able to use in a sustainable way!

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

Introduction

Nowadays, cable car system is a useful transportation (Sun, 2001). In 2004, Medellín, Colombia's second largest city, implemented the world's first modern urban aerial cable-car public transport system. By using the cable car system, the emissions of carbon dioxide is reduced year by year (Dávila and Daste, 2011). However, many countries are located on the seismic zones, including our country. The earthquake will make the cable car vibrate obviously even damage the system. Also, the safety of the passengers will be threatened. Viewing from the point of sustainable use of the cable car, it's important to study the vibration of cable car and how to reduce it. We improve the stability of cable car, protect the cable car system, minimize the resources to repair, then the cable car can be used in a sustainable way and the safety of passengers can be ensured.

Objectives

1. Simulate cable car's vibration during an earthquake by self-made models.
2. Investigate the influence on the vibration of the cable car caused by different variables.
3. Design damping devices to reduce the vibration of the cable car, protect the system and passengers' lives.

Equipment

In fact, we have tested a lot of simulator and system which were made of different material, but they were fail. Finally, we decided to use the following system.

1. Self-made earthquake simulator

Connect a heat melting adhesive tape on the shaft of the motor to increase the vibration, and the device acts as the earthquake source (Fig. 1a and Fig. 1b). Then, the vibration will convey to the vibration table and cable car system to simulate an earthquake. In addition, the shaking direction of the simulator can be changed and make different vibration. The Fig. 2a shows the horizontal direction, and the Fig. 2b shows the vertical direction.

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

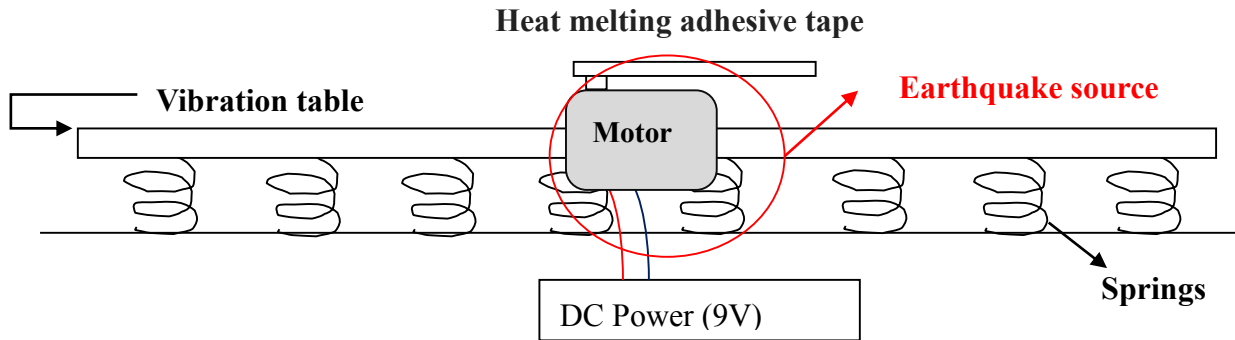


Fig. 1a Earthquake simulator (lateral view)

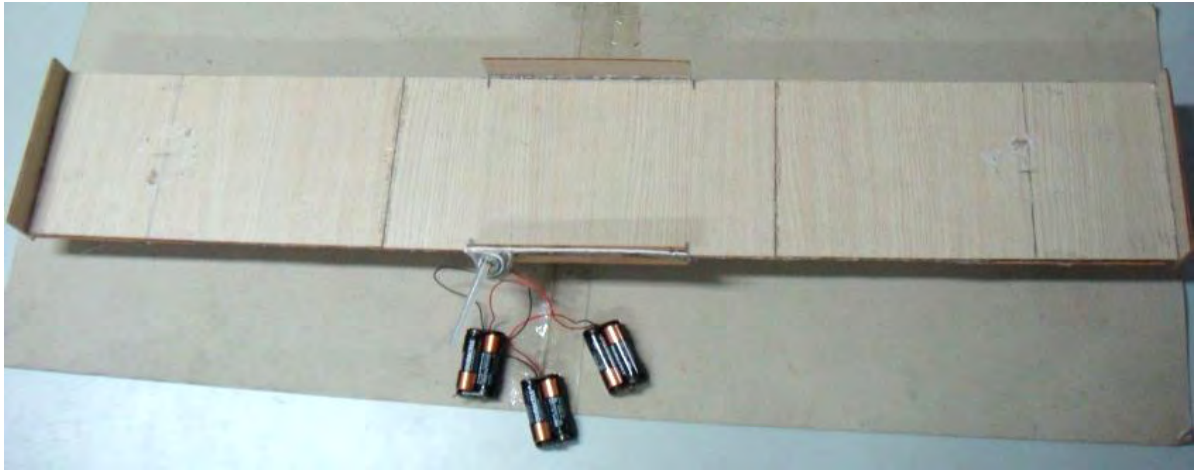


Fig. 1b Earthquake simulator (top view)

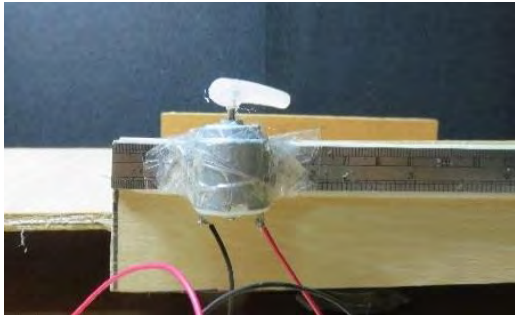


Fig. 2a Horizontal vibration source

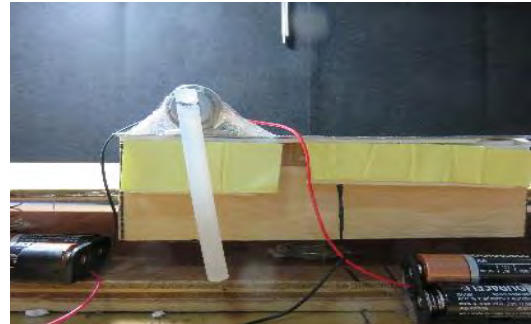


Fig. 2b Vertical vibration source

2. Self-made cable car system and cabins

The system can simulate the situation from the time when an earthquake occurs and the cable car system is out of electricity supply (to insure the safety) to the time when the vibration of the cable car cannot be observed by naked eyes (Fig. 3). The material of the cabin is aluminum, and the shape of cabins is designed with curve sides (Fig. 4). Clay is put into the cabins to control the weight. The cable car's arms are made of steel wire. Furthermore, the size of this system is scaling from the actual cable car system in Taipei (Table 1).

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

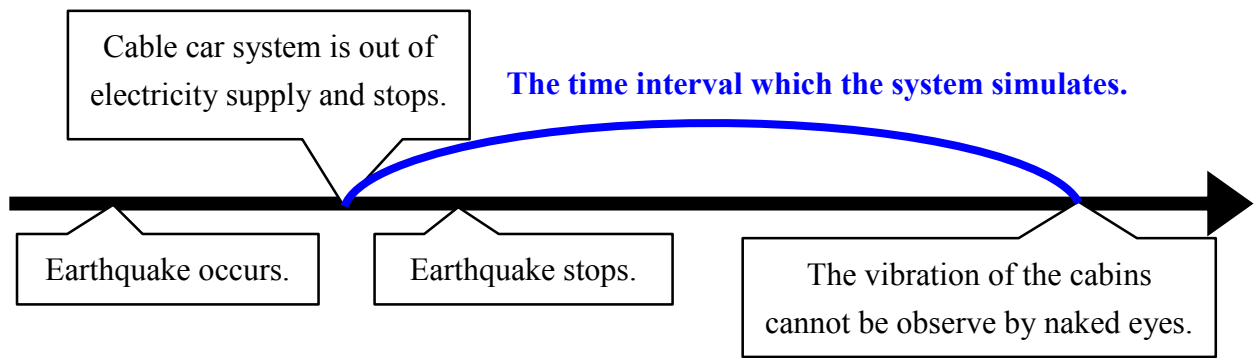


Fig. 3 The scope of simulation

Table 1 Size of the Maokong Gondola

Height of the stand tower	7.78 m~28.83 m
Distance between the stand tower	1.86 m~429.1 m
Cabin (L)	1.98 m
Cabin (W)	1.873 m
Cabin (H)	2.41 m

(Provided by engineering part of Taipei Rapid Transit Corporation)

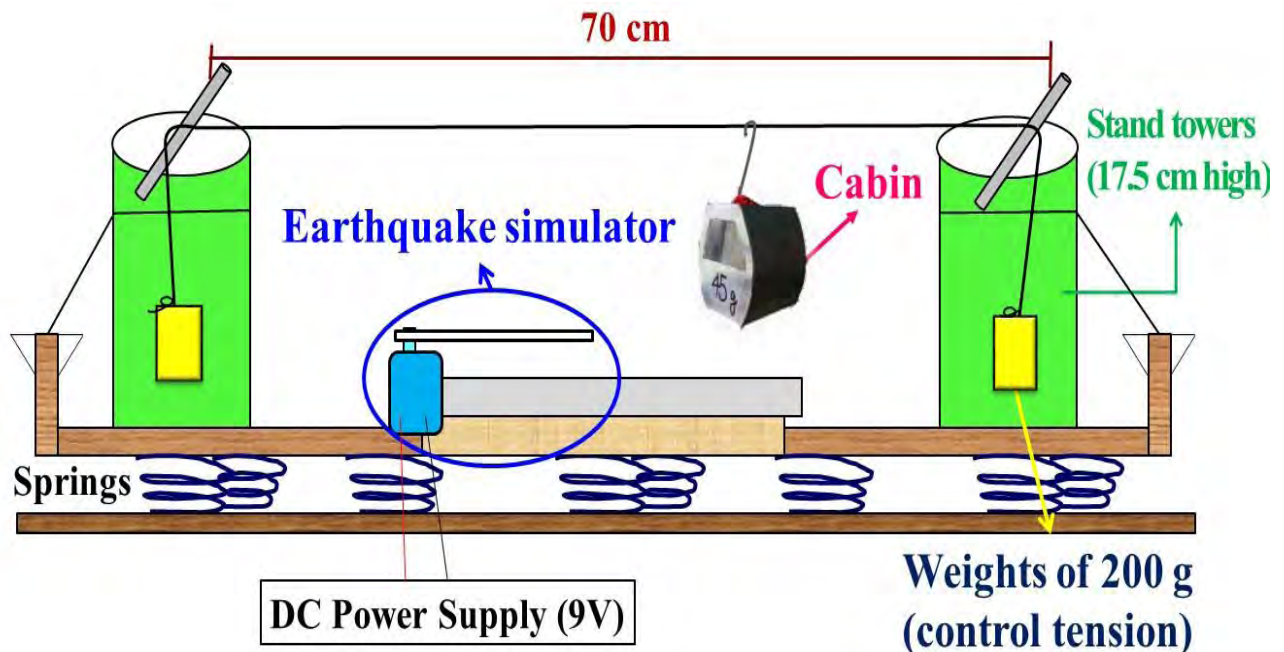


Fig. 4a Self-made cable car system

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

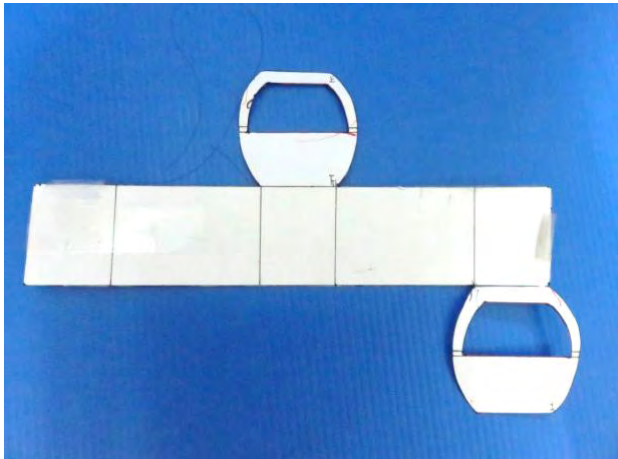


Fig. 4b Expanded view of the cabin



Fig. 4c Cabin

(L=4.0cm W=4.9cm H=5.2cm)

Process and Methods

Part 1: Insure the earthquake simulator's efficacy

1. Measure the vibration acceleration and intensity of the vibration table

In order to insure that the vibration intensity produced by the self-made earthquake simulator is good enough to compare with the actual situation, the vibration acceleration and intensity on the vibration table were measured by the APPs (Vibration Monitoring and Vibrometer) on the smart phone. The smart phone was put on the middle of vibration table, and the earthquake simulator would be turned on for 10 seconds. Example of the acceleration and Modified Mercalli Intensity Scale (MMI Scale) record are shown in Fig. 5. According to the MMI standard (Fig. 6), the acceleration and the vibration intensity of the earthquake simulator which were measured by the APPs correspond to the standard of the MMI Scale VII. So we can know that the vibration intensity can be simulated to the actual earthquake motion.

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

Xvalue	Yvalue	time diff in ms
12.3872	5.2528	20
-24.0198	2.6264	19
22.5204	-1.1172	11
-5.9976	2.9988	19
-13.8866	-2.6264	10
52.5574	-27.0284	21
-14.259	-4.8706	10
-7.5068	-2.2442	20
21.3934	-14.259	19
-53.3022	9.0062	21

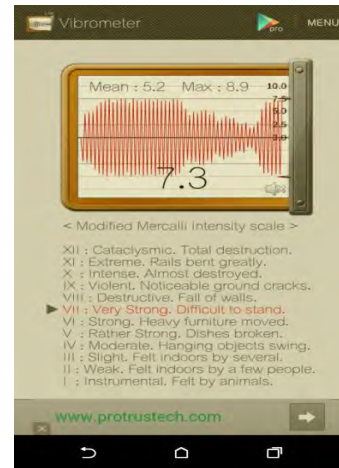


Fig. 5a Example of the acceleration record (cm/s^2)
(X value and Y value are the acceleration
whose direction are parallel and
perpendicular to the cable, respectively.)

Fig. 5b Example of MMI Scale

PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Ligh	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violont	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Mod Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC. (%g)	<0.1	0.5	2.4	6.7	13	24	44	83	>156
PEAK VEL (cm/s^2)	<0.07	0.4	1.9	5.8	11	22	43	83	>160
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Fig. 6 Earthquake motion acceleration contrast with the MMI Scale (From: U.S. Geological Survey <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=intensity>).

2. Measure the vibration frequency of earthquake source

Use the tachometer to measure the speed of the motor (earthquake source). Repeat 5 times and record the results. The average rotation speed is about 1514 RPM (Table. 2). It means that the motor turns 1514 rounds in one minute. It stands for the vibration frequency of the source. So we could know the frequency of the earthquake source is about 25.23 Hz ◦

Table.2 Rotation speed of the motor (RPM)

NO	Rotation speed		
	MAX	MIN	AVE
1	1544	1528	1536
2	1536	1515	1525.5
3	1523	1505	1514
4	1513	1495	1504
5	1501	1485	1493
AVE	1523.4	1505.6	1514.5

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

Part 2: Experimental methods

All the experiments were done in a windless environment to avoid the disturbance of the motion of the cable car. After the cable car is quiescent, turn on the earthquake simulator and camera, which is also a timer, at the same time. The earthquake source will be turned off in 10 seconds, it means the earthquake stops. The camera will record the whole vibration period from the top view (Fig. 7).



Fig. 7 Camera on the top of cable car system

In this project, we consider the influence caused by many variables on duration time, and the variables are as follows:

1. Shaking direction

By changing the shaking direction of simulator, different vibration directions are provided. When the rotation direction of the motor is parallel to the vibration table, the horizontal vibration is offered. When it is perpendicular to the vibration table, the vertical vibration is produced.

2. Cable car's position

The cable car's position is described with a fraction which is defined as the distance of cable car to the nearer stand tower divided by the total length of the cable. A smaller value of the fraction means that the cable car is closer to the stand tower. The position $1/2$, $1/3$, $1/4$, $1/5$, and $1/6$ were tested.

3. Cable car's number

The number of the cable car on the fixed length of cable is changed, and the distance between every cabin is adjusted to fixed length (the intervals between cabins are equal). The Fig. 8 shows that there are four cabins.

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

4. Cable car's weight

The total weight of the cabin is controlled by adding clay. The weights used in this project were 45g, 55g, 65g, 75g, and 85g.

5. Length of cable car's arm

The length of the cable car's arm is defined as the distance of line AB. The length is scaling from the real system, and the length of the arm for experiment includes 2.25 cm (0.5 times of scale), 5.5 cm (1 times of scale), 8.25 cm (1.5 times of scale), 10.1 cm (2 times of scale), 13.75 cm (2.5 times of scale).



Fig. 8 Four cabins on the cable



Fig.9 Arm of the cable car

The video is analyzed after doing experiments. The duration time of cable car's vibration was used to display the extent of vibration. The duration time is defined from the time when the earthquake stopped to the time when the cumulated energy is 95% of the total energy. The steps are as follows:

1. Use "Tracker", a software, to analyze the video. Set up a point of the cabin as the particle which stands for the cable car's position. "Tracker" will track the particle motion.
2. The amplitude of the cable car's vibration can be calculated after getting the cable car's position at corresponding time (Fig. 10).
3. The amplitude square is cumulated from the source stopped time (11th second) to the 80th second time interval. The final value represented the total energy of the vibration. The formula for calculation is shown in Fig. 11.
4. The duration time of the cable car's vibration is defined as the time beginning from the source stopped to the time when the cumulated energy is 95% of E_T (Fig. 12).

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

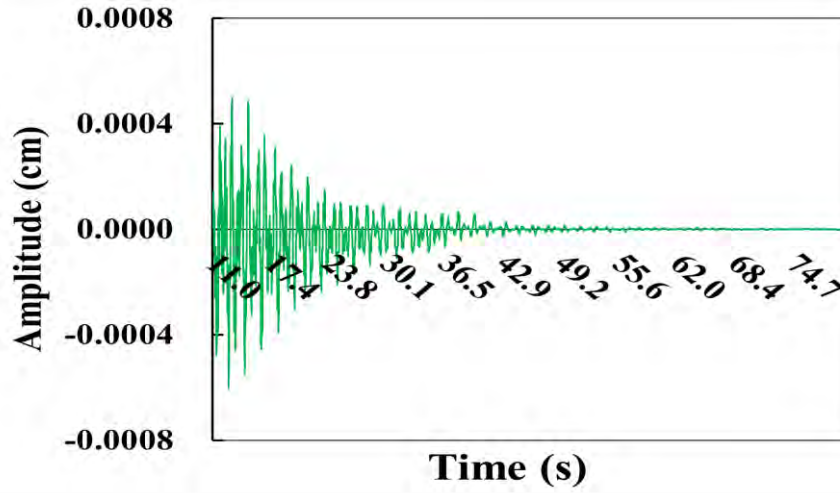


Fig. 10 Example of the amplitude at corresponding time

$$E_T = \int_{11}^{80} a(t)^2 dt$$

$$t = \text{time (s)} \quad a = \text{amplitude (cm)}$$

E_T = Represent the total energy ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

Fig. 11 Formula of calculating the value which represent the total energy

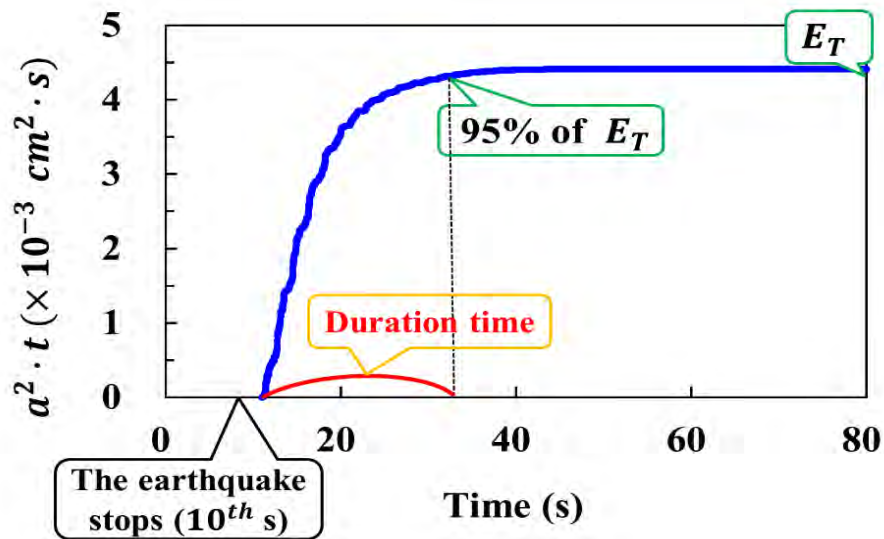


Fig. 12 Definition of duration time of cable car's vibration

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

Part 3: Damping devices

To reduce the vibration of the cable cars more directly, several damping devices were designed.

1. Spring added to the arm of the cable car

The first damping device is designed by adding springs to the cable car's arm. There are two different ways as shown in Fig. 13 and Fig. 14. The cable car whose arm is covered by only one spring is called "Spring A". "Spring B" is the cable car's arm with four springs. One of the end of every spring is fixed on the top of the arm, and the other is connected to the four corners of the top of the cabin separately.



Fig. 13 Spring A



Fig. 14 Spring B

2. Double-layer cabin

The second type is double-layer cabin. Design the cabin with two layers and put some steel balls into the bottom of inter-layers. To prevent the steel balls roll around and collide the cabin, there is a frame to limit the scope of their motion. The rolling of steel balls can reduce the vibration of inner cabin since the outer one suffers from the vibration caused by earthquake force. Set up sponge in the inter-layers to mitigate the collision between the inner and outer layers (Fig. 15 and Fig. 16).

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car



Fig. 15 Appearance of double-layer cabin

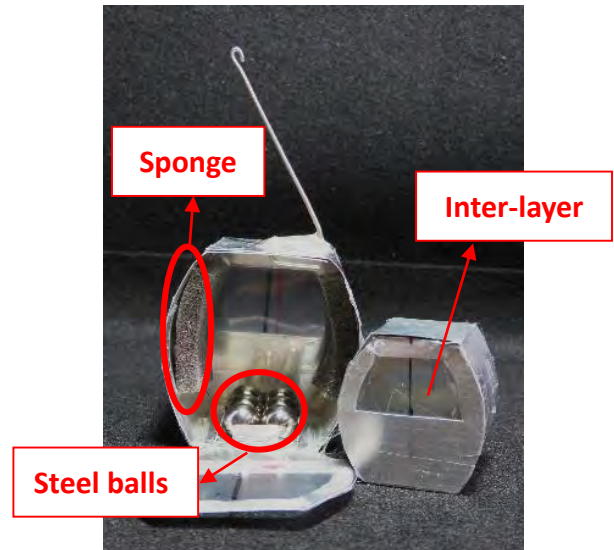


Fig. 16 Internal structure of double-layer cabin

Results and Discussion

In this project, several variables were tested. The followings are the effects of different variables on duration time, and the efficacy of the damping devices. We find out that in some situations, the duration time is shorter.

1. Shaking direction and cable car's weight

The duration time is longer when the vibration is in the horizontal direction than that in vertical direction (Table 3). It is similar to the real situation-----the vibration caused by Primary wave is perpendicular to the ground, and it lasts for a shorter duration time owing to faster energy loss. The decreasing trend of cable car's weight shows up in both shaking directions (Fig. 17). Speculate that the heavier the cable car is, the greater the inertia and the stability of cable car.

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

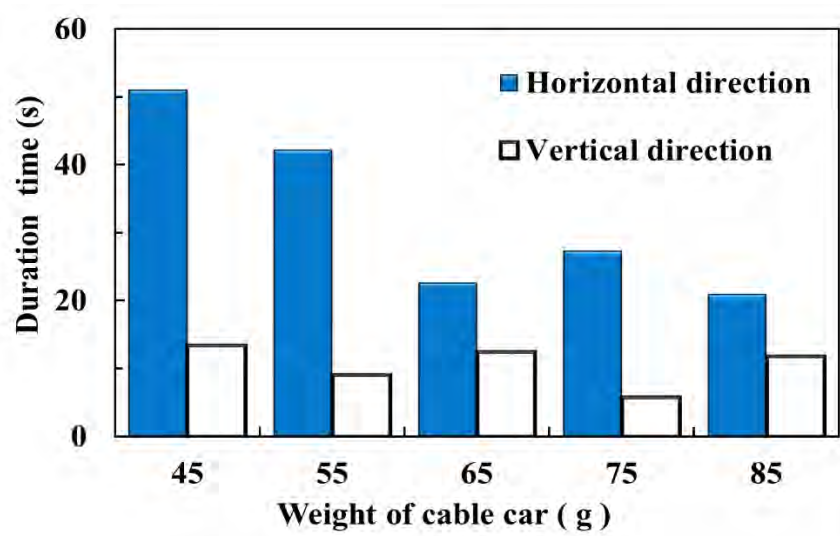


Fig. 17 The duration time in different shaking directions

2. Cable car's position and weight

The trend of the cable car's position to the duration time is not obvious. But we could still find out that there is a decreasing trend when the value of the fraction is smaller, which means the cable car is closer to the stand tower. When the fraction is $1/6$ and the cable car's weight is 85 g, the duration time is the shortest (Table. 4). When the cable car is further from the stand tower, the cable is droopier and make the duration time longer. But the energy lost more when transferring a longer distance from the earthquake source to the cable car. In this situation, the amplitude of cable car's vibration will be smaller, so is the value of duration time. Speculate that due to the two major factors, the duration time is affected and lengthened.

When the cable car's weight is heavier, there is a decreasing trend of duration time (Fig. 18). According to the law of inertia, when the inertia is greater, the state of object's motion is more stable. The result is conform to the law of inertia. So we infer that a heavier cable car help to shorten the duration time.

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

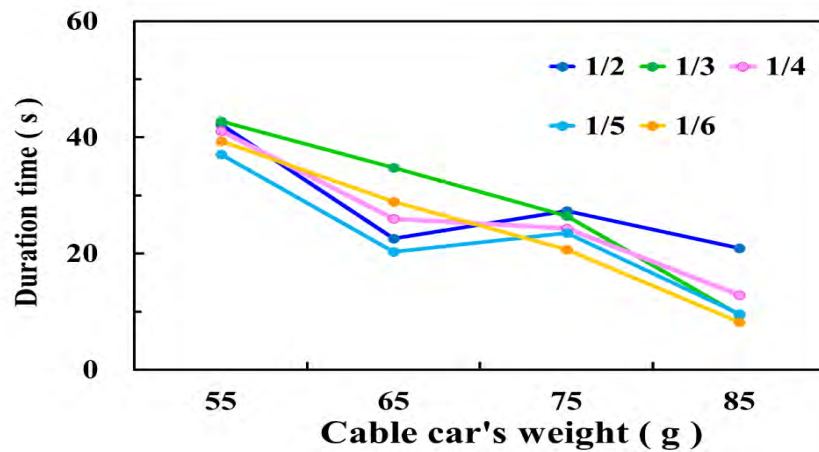


Fig. 18 Duration time with different cable car's position and weight

3. Cable car's number

When car's number is four, the duration time is the shortest. The longest duration time shows up when the number of the cable car is three (Fig. 19). We conjecture that when cable car's quantity is even number, the duration time will be shorter than that in odd number. When there are odd number of the cable car, there is always a cable car situated at the middle of the cable (position 1/2). So the cable is droopier, and easier to vibrate obviously.

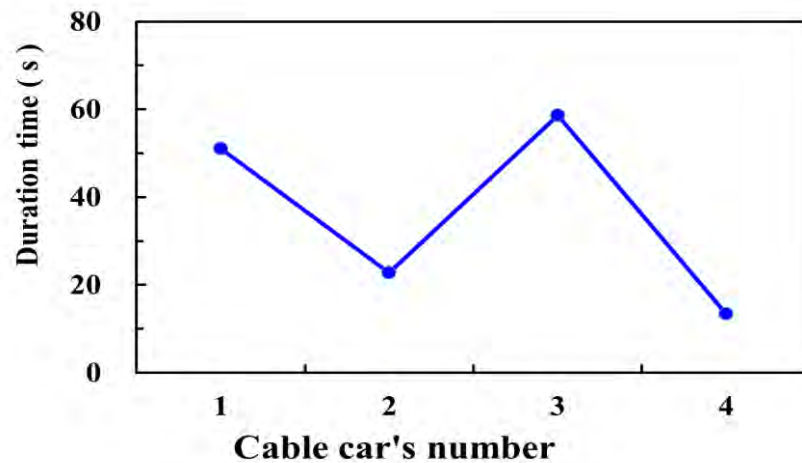


Fig. 19 Duration time with different cable car's number

4. Length of the cable car's arm

The trend of the duration time is increased when the length of the cable car's arm is longer (Table 6 and Fig. 20). We speculated that the property of cable car's motion period is similar to the simple pendulum oscillation. The period of the oscillation is direct proportion to the length of the pendulum, just like the length of the cable car's arm.

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

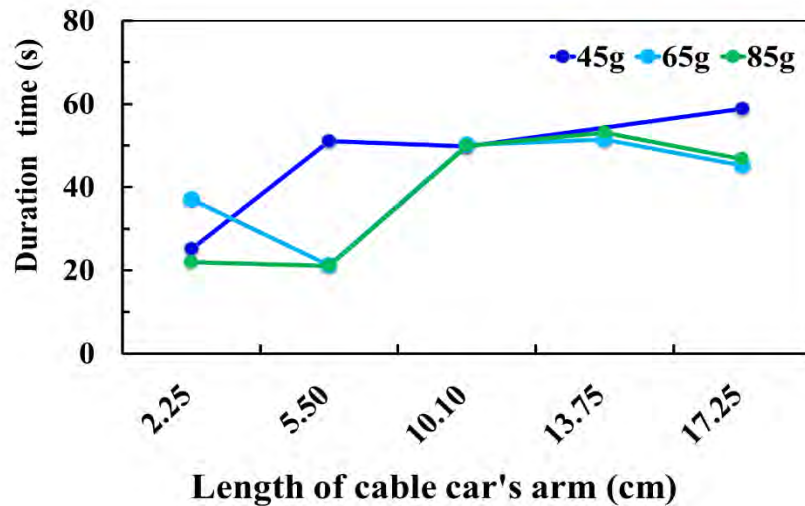


Fig.20 Effects of length of cable car's arm on duration time

5. Efficiency of the damping devices

The damping effect of “Spring B” is the best, the duration time is reduced by 86% in comparison with that without any damping device (Fig. 21). Observe the springs vibrating during the experiments. Speculate that the energy is lost during the conversion between elastic potential energy and kinetic energy, so the duration time of cable car's vibration is shortened. The double-layer cabin ranks the second, the duration time is reduced by 76% (Table 7). The outer cabin started vibrating and the partial energy which was offered by earthquake source is converted to the kinetic energy of the steel ball's rolling. Therefore the inter cabin vibrated slightly. Also, the sponges between the two layers make the energy propagation is not continuous, and this is another reason for reducing the vibration.

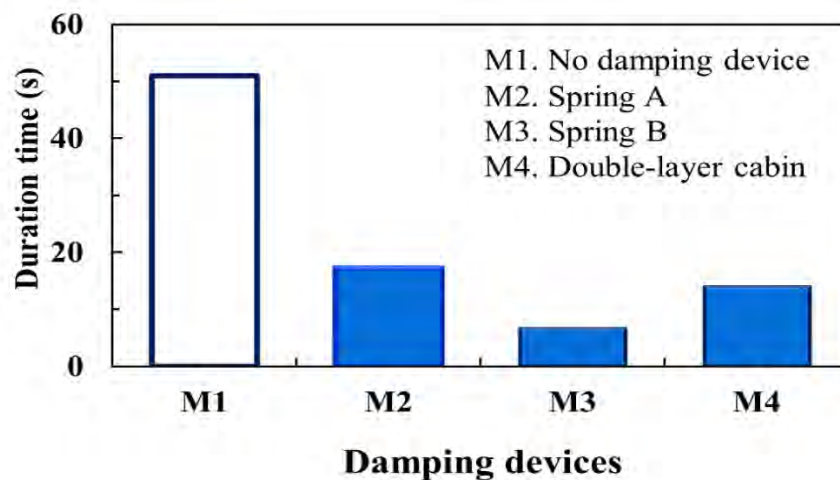


Fig. 21 Efficiency of the damping devices

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

Conclusions

Some properties of the cable car's vibration and some ways to reduce the vibration are discovered in this project. A heavier cable car, even number of the cable car, shorter length of the cable car's arm, and shaking in the vertical vibration results in a shorter duration time. By setting up the two efficient damping devices, Spring B and Double-layer cabin, the duration time can be reduced by over 75%. The energy loss during conversion and not continuous energy propagation are helpful to resist the vibration of cable car. In the future, the model can be applied to the actual situation.

Applications

According to our results, the duration time is shorter when the following conditions are satisfied: A heavier cable car, even number of the cable car, shorter length of the cable car's arm, and shaking in the vertical vibration. If we design the cable car system with the specific conditions, the duration time of cable car's vibration can be shortened! To reduce cable car's vibration more directly, the efficient damping devices, Spring B and Double layer cabin can be applied. We have some suggestions about conforming the conditions:

1. The number of passengers can be increased in the cabin with a safe range.
2. Maybe the cable car's number can be controlled in even by adjusting the speed of the system.
3. The length of the cable car's arm can be shortened. In this way, the material for manufacturing the cable car's arm can be cut down.

We also have some suggestions for applying the damping devices:

1. The springs which are added to the cable car's arm can be changed into a strong type. It's helpful to distribute the force across the cabin and reduce vibration. It improves the efficiency.
2. If the sponges between the two layers can be replaced by springs, the mitigation of the collision will be expected, so is the efficacy of vibration reduction.

By using the above two ways to reduce cable car's vibration, the stability of the system can be improved, the resources to repair the system are minimized. And the interference to the around environment when cable car is driven past is cut down.

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

Besides, the safety of passengers is ensured. Furthermore, the system can be used in a sustainable way and help the cable car company achieve the standard of sustainable development.

Future Study

Maybe installing something like the seismic isolation devices under the stand tower is a new way to reduce the vibration. The idea comes from the model which was failed to simulate the earthquake. I had tried to simulate the situation when cable car is driving. So I designed a system. There were 3 stories, and each story was made of the recycling timber. The vibration source was set up at the bottom one. Some springs were set up at the middle to support the top story, which the cable car system was built (Fig. 22).



Fig. 22 The cable car system and earthquake simulator

But the cable car's vibration wasn't obvious enough to be observed even though the measuring of MMI Scale of the bottom story is 9. That's strange. To find out the reason, I measured the MMI Scale of the top story, which the cable car system was set up. The record showed the MMI Scale is 7 only. Therefore I speculated that there might be something which reduce the vibration intensity during the energy propagation from the source (the bottom story) to the cable car system. In this system,

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

there were only springs set up on the middle story. I thought the springs play a part which is like the seismic isolation in the building and reduce the vibration. I would like to investigate how to reduce the vibration from the stand towers.

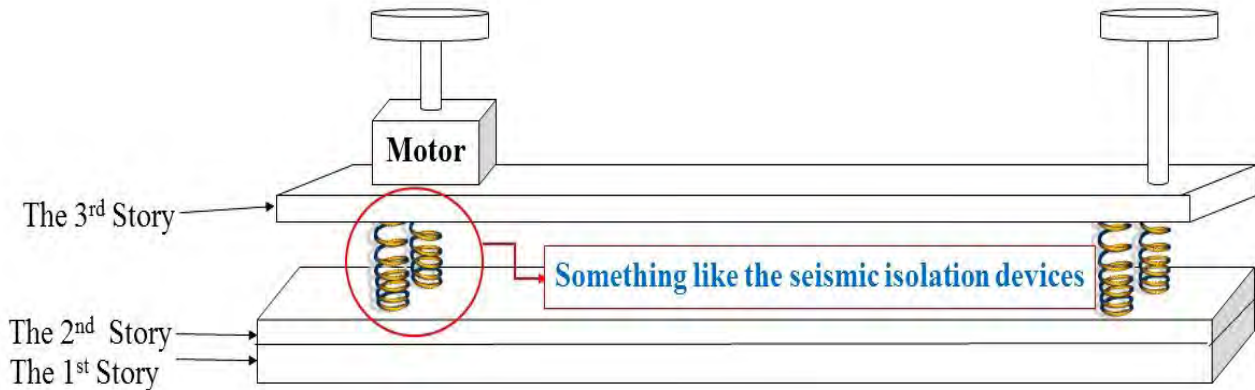


Fig.23 Schematic diagram of the 3 stories system

References

1. Dávila, J. D. and Daste, D. (2011) 'Medellín's aerial cable-cars: social inclusion and reduced emissions' (case study), in Cities, Decoupling and Urban Infrastructure, UNEP - IPSRM Cities Report (forthcoming)
2. Hsiao, S.F., 2008. Optimal and Fuzzy Vibration Control of Cable Cars Using Active and Passive Tuned Mass Dampers. Master's Thesis, National Kaohsiung University of Applied Sciences, Kaohsiung, Taiwan.
3. Sun, W.S., 2001. Introduction and General Illustration of Skyway Cable Car. CECI Engineering Technology, 51.
4. U.S. Geological Survey (USGS), 2014. Modified Mercalli Intensity Scale (<http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=intensity>).

Expect table 1 and Fig.6, the other photos and schematic diagrams by authors.

Except Table 1 and Fig.6, the other photos and schematic diagrams are made by author.

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

Appendix-----Raw data of the experiments

Table 3 Influence caused by shaking direction on duration time (s)

Shaking direction	NO	Cable car's weight (g)				
		45	55	65	75	85
Horizontal direction	1	53.2	43.3	20.6	26.8	21.5
	2	48.1	42.2	22.2	26.8	27.6
	3	49.0	42.9	21.2	29.8	26.5
	4	50.7	43.4	35.0	30.8	23.5
	5	50.9	39.1	17.9	25.2	25.2
	6	54.7	41.4	22.9	27.7s	16.9
	7	49.5	40.2	23.3	28.3	17.4
	8	50.2	40.2	23.4	25.9	17.5
	9	54.5	40.5	18.0	26.6	16.0
	10	49.6	48.5	21.0	25.6	18.8
	AVE	51.0	42.2	22.6	27.3	21.1
Vertical direction	1	12.6	10.2	14.2	5.6	13.0
	2	11.0	8.9	10.4	6.3	9.0
	3	12.0	8.9	12.9	5.6	7.0
	4	11.7	8.8	12.0	5.7	12.0
	5	14.9	9.1	11.0	5.2	12.0
	6	14.8	8.7	10.8	6.3	11.1
	7	13.2	8.3	11.9	5.5	16.9
	8	12.2	8.5	9.0	8.7	5.6
	9	15.0	12.0	13.0	5.4	7.6
	10	12.0	11.1	13.1	5.1	10.4
	AVE	12.9	9.5	11.8	5.9	10.5

Table 4 Duration time with different cable car's position and weight (s)

Cable car's weight (g)	NO	Cable car's position				
		1/2	1/3	1/4	1/5	1/6
55	1	43.3	45.7	41.9	39.7	36.6
	2	42.2	41.0	43.6	37.2	41.2
	3	42.9	40.0	36.8	35.5	40.2
	4	43.4	42.1	34.9	33.4	37.3

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

	5	39.1	43.7	37.1	39.0	40.9
	6	41.4	45.7	45.0	39.6	39.4
	7	40.2	43.2	45.2	37.6	42.1
	8	40.2	44.5	37.8	34.4	40.4
	9	40.5	41.0	46.8	38.1	36.3
	10	48.5	41.0	42.1	36.5	45.9
	AVE	42.2	42.8	41.1	37.1	40.0
65	1	20.6	37.4	19.6	21.0	36.8
	2	22.2	36.8	20.2	18.6	36.8
	3	21.2	36.4	22.0	21.5	19.8
	4	35.0	39.7	23.1	21.8	38.5
	5	17.9	35.4	29.2	19.7	20.6
	6	22.9	34.9	29.0	21.2	36.6
	7	23.3	20.5	31.0	21.3	36.4
	8	23.4	35.6	28.0	20.7	21.0
	9	18.0	35.8	29.1	18.4	21.2
	10	21.0	35.2	28.3	18.6	21.2
	AVE	22.6	34.8	26.0	20.3	28.9
75	1	26.8	28.7	24.3	25.1	24.5
	2	26.8	25.8	24.3	25.2	18.5
	3	29.8	26.3	23.0	21.0	19.0
	4	30.8	27.5	24.0	22.3	20.1
	5	25.2	25.6	24.9	24.0	21.7
	6	27.7s	24.7	25.5	28.0	21.8
	7	28.3	28.7	38.5	22.6	23.1
	8	25.9	26.0	38.0	22.0	20.5
	9	26.6	27.7	36.0	25.0	21.7
	10	25.6	25.7	25.9	25.0	21.9
	AVE	27.3	26.7	28.4	24.0	21.3
85	1	21.5	9.5	11.3	8.7	6.6
	2	27.6	11.3	11.9	14.7	10.4

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

3	26.5	10.0	10.2	8.4	7.3
4	23.5	9.7	12.2	7.9	8.2
5	25.2	10.7	11.1	9.8	7.4
6	16.9	9.5	10.2	13.4	8.1
7	17.4	8.2	15.4	9.3	9.6
8	17.5	8.9	15.4	7.6	6.2
9	16.0	8.0	16.1	8.2	8.4
10	18.8	8.6	15.0	7.8	9.5
AVE	21.1	9.4	12.9	9.6	8.2

Table 5 Duration time with different cable car's number (s)

Cable car's number				
NO	1	2	3	4
1	54.5	23.5	60.2	14.1
2	50.2	23.3	58.6	14.7
3	49	22.4	62.8	12.2
4	50.7	22.8	56.2	13
5	50.9	22.1	55.6	13.1
AVE	51.06	22.82	58.68	13.42

Table 6 Duration time with different length of the cable car's arm

Cable car's weight (g)	NO	Length of cable car's arm (cm)				
		2.25	5.50	10.10	13.75	17.25
45	1	29.6	53.2	47.3	23.1	59.8
	2	23.9	48.1	51.0	23.1	58.3
	3	21.9	49.0	49.5	27.3	60.5
	4	29.0	50.7	49.9	25.9	55.3
	5	24.0	50.9	49.4	26.0	60.8
	6	23.0	54.7	51.4	27.4	57.5
	AVE	25.2	51.1	49.8	25.5	58.7
65	1	39.2	20.6	49.6	53.0	45.7
	2	36.7	17.9	50.7	51.4	44.5

Seismic Reduction and Vibration Resistance of Cable Car

85	3	36.8	22.9	49.0	49.8	48.5
	4	35.5	23.3	51.0	51.5	44.2
	5	45.0	18.0	49.8	53.7	44.3
	6	26.9	21.0	49.2	53.0	43.9
	AVE	37.1	21.2	50.2	51.5	45.2
	1	21.1	21.5	50.5	55.2	46.1
	2	21.9	27.6	50.1	55.2	46.2
	3	21.2	26.5	49.4	51.9	50.1
	4	22.3	23.5	49.4	53.1	46.5
	5	22.1	25.2	49.3	53.1	46.3
	6	23.1	16.9	50.3	55.0	47.2
	7	22.1	17.4	49.5	53.9	45.3
	8	22.3	17.5	50.8	54.8	46.3
	9	21.7	16.0	50.4	49.6	47.0
	10	22.2	18.8		49.6	46.8
	AVE	22.0	21.1	50.0	53.1	46.8

Table 7 Duration time with different damping devices (s)

NO	Damping device			
	No-damping device	Spring A	Spring B	Double-layer cabin
1	53.2	19.3	6.5	13.8
2	48.1	15.5	6.4	14.1
3	49.0	14.9	6.3	13.0
4	50.7	15.1	6.6	13.8
5	50.9	14.3	6.3	13.7
6	54.7	14.8	6.2	14.3
7	49.5	19.3	7.5	13.3
8	50.2	18.0	6.1	13.5
9	54.5	19.6	6.7	14.6
10	49.6	21.0	7.3	14.5
AVE	51.0	17.2	6.6	13.9

【評語】 170001

本作品相當完整，對纜車模型與受地震影響之各種因子，如纜車材質纜線材質纜車吊繩，纜車重量等都進行實驗探討，唯問題較為傳統創新性稍嫌不足，而且研究主題較偏應用科學之範疇，地球與行星科學之元素稍弱。