

103-98-1346
MOTC-IOT-102-PBA031

輕軌運輸系統容量系列研究 之先期探討



交通部運輸研究所

中華民國 103 年 8 月

103-98-1346
MOTC-IOT-102-PBA031

輕軌運輸系統容量系列研究 之先期探討

著者：劉昭榮

交通部運輸研究所

中華民國 103 年 8 月

輕軌運輸系統容量系列研究之先期探討

著 者：劉昭榮

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.iot.gov.tw (中文版>圖書服務>本所出版品)

電 話：(02)23496789

出版年月：中華民國 103 年 8 月

印 刷 者：承亞興企業有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 5 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價： 40 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組・電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號・電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號・電話：(04)22260330

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：輕軌運輸系統容量系列研究之先期探討			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN	政府出版品統一編號 (平裝)	運輸研究所出版品編號 103-98-1346	計畫編號 102-PBA031
主辦單位：運輸計畫組 主管：蘇振維 計畫主持人：劉昭榮 研究人員：劉昭榮 聯絡電話：(02)23496809 傳真號碼：(02)25450428			研究期間 自 102 年 1 月 至 102 年 12 月
關鍵詞：輕軌系統容量、路權型態、關鍵影響因素 摘要： <p>輕軌系統通常具有街走、路面平交車流及單向軌道運行之特性，故導致其路線容量需細究其細部設計型態，而輕軌系統之路線容量主要由瓶頸路段(weakest link)決定，其區位及瓶頸因子亦是影響整體路線容量之關鍵。然決定輕軌系統路線容量之方法甚為複雜，需綜合考慮其佈設路權型態、單向軌道路段及街廓長度等限制輕軌路線容量因素。</p> <p>輕軌系統之佈設因需考量系統技術、列車尺寸及其技術應用，故特別像是列車停等時間、號誌控制系統等因子皆會影響單位小時路段營運列車數，進而影響輕軌系統之整體路線容量。此外，每列車掛載之車廂數及車廂中乘客之乘載型態及數量亦會間接影響輕軌系統之容量。輕軌系統之佈設路權型式可區分為完全隔離、半隔離及非隔離等路權型式，各種路權型態皆決定出不同之輕軌系統路線容量。本研究主要回顧日本及美國相關之輕軌容量文獻及資料，並歸納出上述各項影響輕軌路線容量之因素，期能提供作為後續相關研究繼續深入分析之參考。</p> <p>本研究除初步釐清輕軌容量關鍵影響因素外，亦摘述臺北捷運安坑線規劃之國內輕軌容量分析案例，其考量基本運能、號誌行車控制系統及列車運轉模擬及列車服務規劃進行整體路線之容量分析後，顯示於滿足最大尖峰小時運能6,100人次/小時之下，建議K6～K9站路段以3分鐘為設計班距，而K1～K6站則為6分鐘班距，車載容量需為305乘位/列車。離峰時段，建議採用一車到底的服務，以10分鐘為設計班距。</p>			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
103 年 8 月	52	40	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： <input type="checkbox"/> 密 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密 （解密條件： <input type="checkbox"/> 年 <input type="checkbox"/> 月 <input type="checkbox"/> 日解密， <input type="checkbox"/> 公布後解密， <input type="checkbox"/> 附件抽存後解密， <input type="checkbox"/> 工作完成或會議終了時解密， <input type="checkbox"/> 另行檢討後辦理解密） <input checked="" type="checkbox"/> 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: A Preliminary Study on Capacity of Light Rail Transit Systems			
ISBN(OR ISSN) ISBN	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER 103-98-1346	PROJECT NUMBER 102-PBA031
DIVISION: Planning Division DIVISION CHIEF: Cheng-Wei Su PRINCIPAL INVESTIGATOR: Jau-Rong Liu PROJECT STAFF: Jau-Rong Liu PHONE: 886-2-23496809 FAX: 886-2-25450428			PROJECT PERIOD FROM January 2013 TO December 2013
KEY WORDS: Capacity of Light Rail Transit Systems, Types of Rights of Way, Key Influence Factors			
ABSTRACT: <p>Light rail transit (LRT) lines often have characteristics such as street running, grade crossings and single track. The detailed design characteristics are important in capacity determination. The key to determining the capacity of an LRT line is to find the weakest link – its location or factor that limits the capacity of the entire line. The method of determining the capacity of light rail transit lines is complicated by types of rights of way. Other limitations on LRT capacity (supply) can be imposed by single-track sections and length of street blocks.</p> <p>LRT systems encompass a variety of technologies, vehicle sizes, and applications. Despite these variations, a few basic factors—in particular, dwell time and the train signal control system—typically control the number of trains that can be operated along a section of a line during an hour. The number of cars per train and the diversity of passenger demand control how many people those trains can carry. LRT operates in a variety of rights of way, each of which has its specific capacity. LRT alignments may be classified as exclusive, semi-exclusive, or non-exclusive. After reviewing related literature and information on LRT capacity in Japan and USA, it is concluded that all the issues mentioned above are the main topics of the analysis conducted in this research. It is expected that the preliminary analysis results can provide a reference for subsequent research on LRT capacity.</p> <p>In order to identify the complicated nature of the key factors affecting LRT capacity, this study selected the Ankeng LRT line of Taipei MRT network as study site and collected the data of its basic transportation capability, signal control system, train operation simulation, and timetable scheduling for detailed analysis. The main findings of the case study are as follows: (1) the maximum peak hour volume of the Ankeng line is 6,100 passengers/hour if the designed headway is 3 minutes in K6-K9 section, 6 minutes in K1-K6 section, and the maximum loading per car is 305 passengers; (2) regarding the service reliability, this line can provide homogeneous operation from the first station to the end in off-peak period, and the headway is 10 minutes.</p>			
DATE OF PUBLICATION August 2014	NUMBER OF PAGES 52	PRICE 40	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

目 錄	III
圖 目 錄	IV
表 目 錄	V
第一章 緒論	1
1.1 研究緣起	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究範圍與對象	2
1.4 研究內容及流程	3
第二章 文獻回顧與輕軌營運現況評析	5
2.1 大眾運輸系統車站容量之模擬	5
2.2 公車捷運系統之容量推估	8
2.3 日本平面輕軌容量特性分析	11
2.4 綜合評析	16
第三章 國外輕軌容量分析作法比較	17
3.1 日本輕軌容量分析作法	17
3.2 美國輕軌容量分析作法	19
第四章 案例分析	22
4.1 安坑線規劃路線說明	22
4.2 安坑線之基本運能分析	23
4.3 安坑線之號誌行車控制系統	28
4.4 安坑線規劃之容量分析	30
第五章 結論與建議	39
5.1 結論	39
5.2 建議	41
參考文獻	43

圖目錄

圖 1-1 研究流程圖	4
圖 2-1 PASSION version 5.0b 模式之使用者介面	6
圖 2-2 公車 3 種服務型態	7
圖 2-3 各情境最佳服務路線之集合	8
圖 2-4 Metrobus 系統之路線圖	10
圖 2-5 平常日每小時乘載量	11
圖 2-6 日本路面輕軌電車系統之發展歷程	12
圖 2-7 日本全國輕軌系統分佈及營運機構	12
圖 2-8 札幌市目前營運之輕軌路線圖	14
圖 2-9 札幌一條線 3305 型輕軌車輛	14
圖 2-10 函館市目前營運之輕軌路線圖	15
圖 2-11 函館本線 8001 型輕軌車輛	16
圖 4-1 捷運安坑線路線規劃圖	23
圖 4-2 輕軌車輛模組化編組示意圖（三模組式）	25
圖 4-3 輕軌車輛模組化編組示意圖（兩模組式）	26
圖 4-4 輕軌列車長度、寬度與車載容量關係圖	27
圖 4-5 輕軌專用號誌的顯示相位及意義	29
圖 4-6 捷運安坑線運量預測結果	33
圖 4-7 捷運安坑線一車到底列車營運模式	33
圖 4-8 安坑線一車到底營運模式下之使用容量與剩餘容量關係圖	34
圖 4-9 安坑線捷運區間列車營運模式	34
圖 4-10 安坑線區間列車 1:1 營運模式下使用容量與剩餘容量關係圖	35
圖 4-11 安坑線區間列車 1:2 營運模式下使用容量與剩餘容量關係圖	36
圖 4-12 捷運安坑線營運班距、服務頻率與車載容量	37

表 目 錄

表 2.1 BRT 系統中不同號誌化路口之容量估算.....	9
表 2.2 日本輕軌系統現況及特性.....	13
表 3.1 提升輕軌系統之表定營運速度之策略及效果.....	18
表 3.2 輕軌系統佈設型式之優缺點比較.....	19
表 4.1 捷運安坑線站間運轉時間.....	32
表 4.2 捷運安坑線列車運轉時間與平均運轉速度.....	32
表 4.3 捷運安坑線之列車服務計畫（民國 130 年）.....	38

第一章 緒論

1.1 研究緣起

過去國內對於交通建設之投資主要以公路系統為主，但由於土地資源有限，且軌道系統具有高效率、低污染、對環境衝擊較小之特性，故臺灣地區確有發展軌道系統之必要性。有鑑於此，近年來政府致力於規劃推動各項軌道系統相關建設，包括各都會區捷運系統、高速鐵路系統、臺鐵系統改善工程(鐵路立體化、臺鐵捷運化、東部鐵路改善…)及地區輕軌建設等，期能均衡各種運輸系統使用，達到整體運輸系統之發展。

軌道系統建設成本甚鉅，無論規劃、設計或營運階段均需以容量分析結果為基礎，若過度設計會造成浪費，設計不足則易發生壅塞延滯。整體軌道容量分析之泛用架構一般皆以供給面作為主要的考慮範疇，而依據過去本所「軌道運輸系統容量分析暨應用研究」系列研究結果顯示，影響軌道容量的因素可歸納成路線條件、交通條件及控制條件三大類，交互影響可謂錯綜複雜，亟需研議釐清。

經檢視供給容量部分，過去本所軌道容量系列研究已發展傳統區域鐵統(臺鐵系統)及都會捷運系統的軌道軌道容量分析模式與軟體，並就該 2 系統之容量研究編訂臺灣軌道容量手冊，故除部分後續容量議題可再補強外(如末端站、維修機廠、號誌系統提升…等對容量之影響)，若能充分提供系統之路線條件(包括站場配置)、交通條件(包括列車性能及車種組成)及控制條件(號誌系統)等資料，由已開發之軌道容量模式皆能有效掌握臺鐵系統及都會捷運系統之供給容量，並深入分析影響其容量之關鍵要素及容量提升作法。惟依據軌道系統架構，目前國內仍有「高鐵及機場捷運系統」與「輕軌運輸系統」等 2 部分尚未進行軌道容量分析研究，其中高鐵系統因屬民營性質且系統容量、路線利用率皆尚無虞，故應無容量不足而亟需進行研究之急迫性問題。

至於輕軌系統之容量分析研究部分，在都會軌道發展政策上，行政院毛副院長於任職交通部長時即已公開宣示國內僅臺北都會區具推動捷運系統條件，其他地區應朝輕軌或公車等大眾運輸系統發展，故就輕軌系統之容量而言，為落實毛前部長針對國內都會區朝推動輕軌大眾運輸系統之發展政策方向，及因應目前國內各都會區之輕軌規劃計畫，尤其「淡水捷運延伸線」(淡海輕軌)及「高雄都會區輕軌運輸系統高雄環狀輕軌捷運建設計畫」近來已奉行政院核定正式推動之，為利後續規劃及推動中之輕軌系統皆能有效掌握其供給容量，提供最務實之系統型式選擇及軟硬體設施規劃配置決策參考，實應儘速進行輕軌運輸系統之容量分析，以提供後續輕軌系統於規劃、興建及營運階段之應用。

1.2 研究目的

- (一)針對輕軌容量研究所需探討分析之系統基本要素亦如同傳統區域鐵路所需項目，包括：運轉條件(路線、交通、控制條件)、時間單位(小時、日、尖、離峰)、空間參考點(路段、路線、車站、折返點)及客體單位(乘客、乘位)等，進一步釐清相關研究議題。
- (二)另為因應輕軌系統之平面佈設路權型態差異性，需就路權型態繁雜特性對輕軌容量之影響予以釐清，俾作為後續研究及模式、軟體研發作業之參考依據。

1.3 研究範圍與對象

有關輕軌系統容量系列研究之範圍複雜廣泛，其各類型容量探討分析之基本要素亦如同傳統區域鐵路，主要包括：運轉條件(路線、交通、控制條件)、時間單位(小時、日、尖、離峰)、空間參考點(路段、路線、車站、折返點)及客體單位(乘客、乘位)等，而輕軌系統因常佈設於平面，故其最大差異處係路線容量將隨路線所在路權型態而有不同之影響因素，相關容量之評估分析將更為繁雜。後續本系列研究辦理時將以國內輕軌系統為研究對象，分別就供給面（軌道容量分

析)與需求面(列車服務可靠度)之課題進行研析。預期未來之工作重點亦需結合本所過去之軌道容量研究並延伸考慮以下項目:(1)連續路段下之輕軌軌道容量分析;(2)連續路段下其他平面車流之干擾分析;(3)旅客觀點下的輕軌列車可靠度(服務水準)分析。

1.4 研究內容及流程

為能有效釐清輕軌系統容量複雜之研究議題,以提供後續系列研究辦理之參考,本年先期探討主要研究內容臚列如下。

一、回顧相關文獻與各國輕軌運輸發展現況

為利了解不同輕軌系統技術型式對其路線容量之影響,本研究除需蒐集國內外輕軌運輸系統技術之發展趨勢資料,亦探究國外各類輕軌運輸系統功能及其於都會區設置之技術特性。

二、蒐集及檢討連續路段輕軌容量分析模式之建構內容及特性資料

- (一)探討分析輕軌系統容量解析模式之方法論及發展。
- (二)探討分析影響輕軌系統容量之各項特性因素,如路線條件包括軌道數目(單股或多股)以及運轉方式(單線、複線或多線運轉)、站距長短、路權型態(依路權隔離程度分為 A、B、C 型路權);列車條件包括列車的速​​度、方向分佈、列車服務計畫、停站方式等、列車運轉的​​行車控制條件及閉塞制度。
- (三)分析 B、C 型路權平面車流對整體路線容量之干擾行為及程度。
- (四)分析 B、C 型路權時軌道及道路之行車號誌設置及其車流控制方式,以作為整體路線容量分析之基礎。

三、蒐集檢討分析連續路段輕軌容量分析軟體之所需元件資料

為利後續「連續路段輕軌容量解析模式」之開發,擬於本研究中蒐尋國外相關輕軌容量分析軟體,並瞭解軟體之建構元件、所需資料及理論架構,以作為我國後續發展本土化「連續路段輕軌容量解析模式」暨軟體之參考依據。

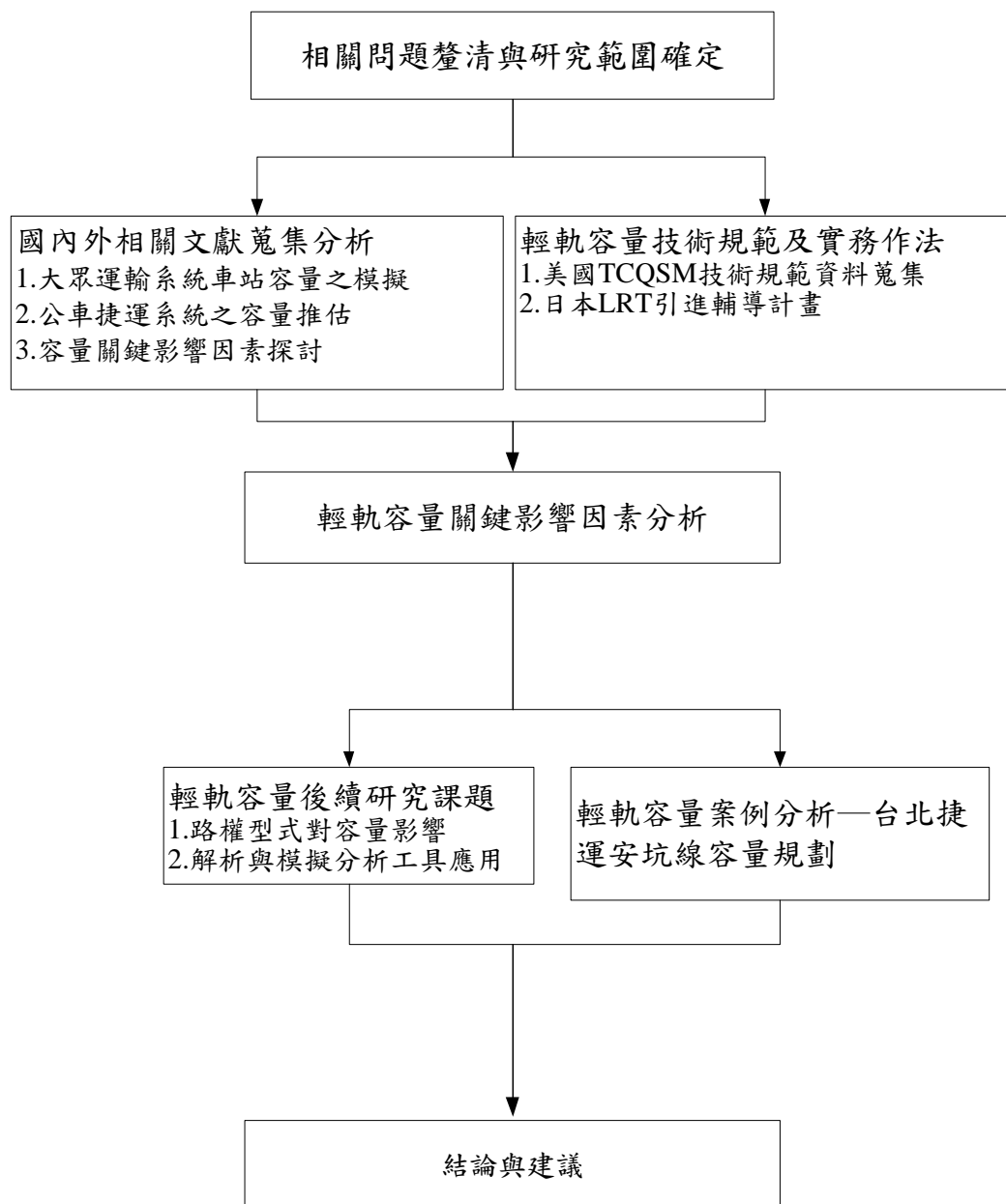


圖 1-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧與輕軌營運現況評析

為利了解不同輕軌系統技術型式對其路線容量之影響，本研究除需蒐集國內外各國輕軌運輸系統技術之發展趨勢資料，亦探究國外各類輕軌運輸系統功能及其於都會區設置之技術特性。因國內尚未有輕軌系統之實績，故本研究先就國外之輕軌系統(尤其平面 B、C 型路權輕軌系統)容量相關文獻進行回顧，鑑於搜尋相關文獻並未見國外有直接分析平面輕軌系統整體容量之文獻，故本研究謹就與輕軌容量較相近，且較多研究文獻之大眾運輸系統車站及公車捷運系統容量等 2 領域之文獻進行比較分析，茲分述如下：

2.1 大眾運輸系統車站容量之模擬

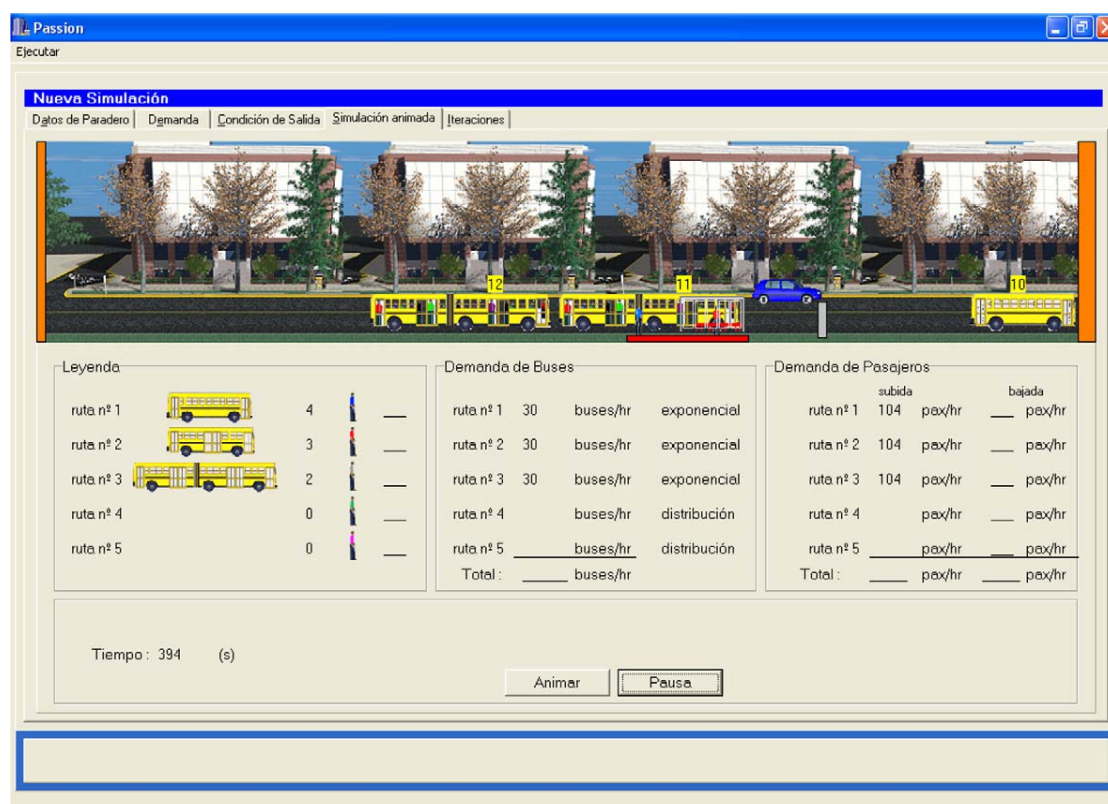
(一) 大眾運輸系統之車站容量估算研究

Fernandez, R. (2010)曾以智利首都 Santiago 之大眾運輸系統為案例，主要著重在公車及輕軌系統之車站，建立微觀模擬模式進行車站容量之估算。該研究首先強調大眾運輸系統之車站係扮演都市交通之最重要樞紐機能，故藉此研究檢視大眾運輸系統車站之容量並了解車站容量係為大眾運輸系統整體容量之最重要關鍵，並於分析車站容量之過程，應用廣為使用之美國 HCM 解析公式，分析影響車站容量之因素並與其進行比較。

其次以一個微觀模擬模式 PASSION (PARallel Stop SimulatIOn) 為工具，計算大眾運輸系統車站之容量並分析其影響因素為何，並藉由校估及驗證之程序證實該模式為一實用有效之容量推估模式。最後，本模式亦應用在 2 個實務之案例上，其中一個應用在輕軌電街車(具連接車廂)之車站容量推估；另一個則應用在不同停站方式之公車站容量推估，研究成果證實可成功上述系統之車站容量，尤其可處理特殊狀況之不同停站時間(dwell times)之車站容量估算。

圖 2-1 即呈現該研究所使用應用於 2 個實務案例車站容量估算之 PASSION version 5.0b 模式之使用者介面，本模式之另一項優點即是使用者可取得不同車站停站狀況之停站時間(dwell times)，再將這些

時間輸入廣域目標(general-purpose)交通狀況模擬器中進行整體之模擬，如此即可不需假設停站時間之全域數值(global value)而可應用每一個車站之停站時間進行車站容量之推估。



資料來源：Fernandez, R. (2010)

圖 2-1 PASSION version 5.0b 模式之使用者介面

(二) 容量限制下公車路廊之停站數最佳服務研究

在都會區中有限停站服務之公車系統常能為使用人及營運者帶來效益，例如哥倫比亞首都 Bogota 的 Transmilenio 系統及智利首都 Santiago 的 Transantiago 系統皆蒙其利。Leiva, C. *et al.* (2010) 就曾以以上述 2 都市之公車系統路線為案例，從等車時間、車上旅行時間及營運成本等觀點進行其成本最小化之研究。該研究運用公車路廊營運特性之最佳化模式及起迄旅次矩陣服務集合之觀念，建構數個最佳化模式，模式最後將能決定以何種行駛頻率及何種車型提供服務。

該研究亦以智利首都 Santiago 之現實公車路廊為案例進行分

析，最終應用在 2 種不同需求情境分別求解何種服務型態是最佳方案，並提供作為先期關鍵參數檢視之參考依據。

研究案例依旅次需求起迄矩陣，將公車服務型態分為正常服務(normal service)、直達服務(express services)及跳蛙式服務(limited-stop services)等 3 種不同類型(如圖 2-2)進行分析，並將各種時間換算成本進行成本最小化運算，最後決定出各情境最佳服務路線之集合供營運單位參考(如圖 2-3)。

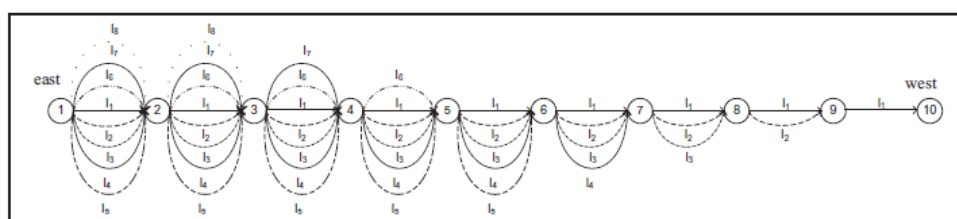


Fig. 1. Normal services.

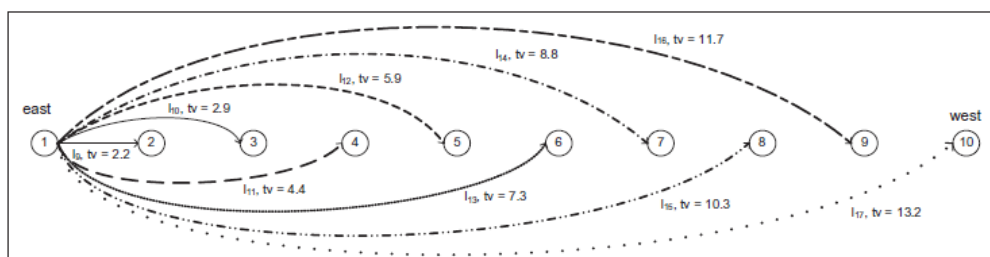


Fig. 2. Express services.

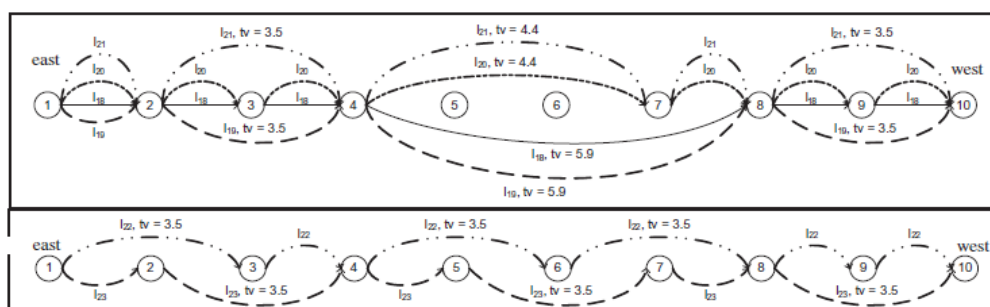


Fig. 3. Limited-stop services.

資料來源：Leiva, C. et al. (2010)

圖 2-2 公車 3 種服務型態

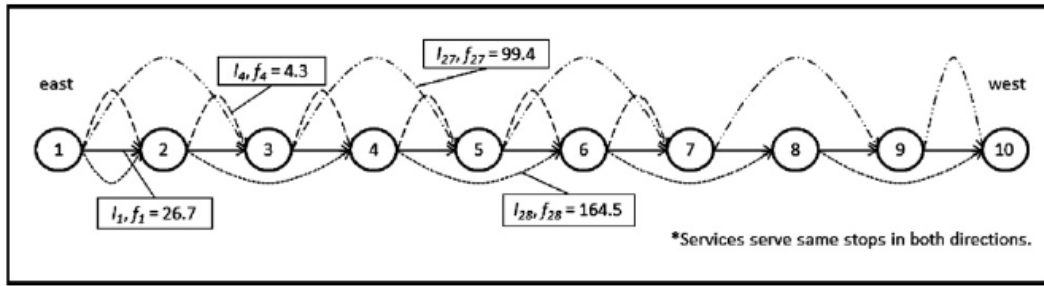


Fig. 10. Set of optimal lines for Scenario 1.

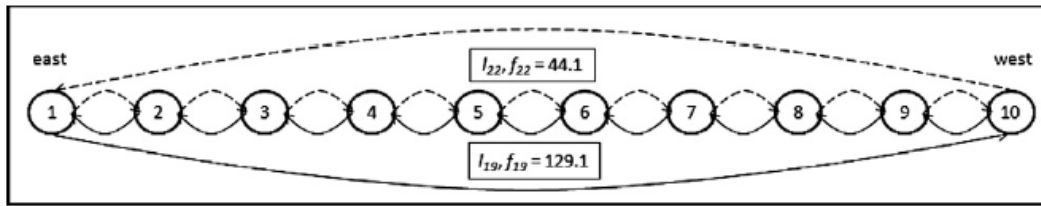


Fig. 11. Set of optimal lines for Scenario 2.

資料來源：Leiva, C. et al. (2010)

圖 2-3 各情境最佳服務路線之集合

該研究係以等車時間、車上旅行時間及營運成本最小化建立最佳化模式，除證實本模式可決定最佳服務型態及公車行駛頻率外，其亦可作為在容量限制下設計都市公車路廊之有限停站數最佳服務。最主要之研究成果發現路廊之平均旅次長度是決定有限停站數服務潛在效益之最關鍵要素，結果建議旅次長度愈長、效益愈大；另外需求 O-D 矩陣之變異程度愈大，執行有限停站數最佳服務之效益亦會愈明顯。而經由研究案例發現提供有限停站服務之成本節省是顯著的，在提供最佳服務頻率之有些情形下，較每站皆停之服務形態其營運成本可有效降低超過 10%。

2.2 公車捷運系統之容量推估

(一) 公車捷運(BRT)系統之旅客容量推估

大眾運輸的教科書及交通工程手冊通常都指出公車捷運系統

(BRT)單方向每小時的運能不會超過 20,000 人，但在哥倫比亞首都 Bogotá 所實行之 TransMilenio BRT 系統，透過多月臺車站、超車道、與車廂底板平行之月臺、車外付款、多車門大型公車、直達及站站停服務、瓶頸路口號誌工程改善等措施，大幅提高 BRT 系統之運量。經實際測試每部聯結公車之平均承載量為 150 人時，單方向每小時之運量則高達 43,000 人，商業運轉速度則達 22~24 km/hr。

另依據 Hidalgo, D. *et al.* (2013)之研究，為分析高容量 BRT 路廊所發展之運算公式，特殊 TransMilenio 關鍵路段在現有設施狀況下，一樣平均承載量為 150 人時單方向每小時之運量最高可達 48,000 人，但若平均承載量為 110 人時單方向每小時之運量最高可達 35,000 人，所以該研究之啟發即是，透過像額外的月臺、較高容量之列車、瓶頸路口之平面交叉設施等改善，即能增加整體系統之容量、速度、可靠度及服務品質。

該研究計算公車捷運(BRT)系統之旅客容量推估，主要係透過公車道(Bus lanes)容量、號誌化路口容量(如表 2.1)、車站理論容量(Theoretical capacity)及車站實際容量(Practical capacity)等步驟進行估算。除此之外，實務上之容量仍可透過許多措施增加，例如增加車站之次停靠站、月臺數及停等容量等，藉由營運可靠度改善、加強控制策略、資訊科技、較佳號誌時制，以提高飽和流率水準，並使用較大的公車車廂(如雙連結式公車)。

表 2.1 BRT 系統中不同號誌化路口之容量估算

Table 1
Selected intersections capacity.

Intersections	g/c ratio for the TransMilenio leg	Number of effective lanes	Saturation flow	Capacity [buses/hour/direction]	Capacity [pax/hour/direction]
Caracas × Calle 76	60/120	1.5	664	498	74,700
Caracas × Villavicencio	60/120	1.5	664	498	74,700
Autopista Norte × Calle 82	40/120	1.5	664	332	49,800
Caracas × Jiménez (direct)	45/120	1.5	664	374	56,100
Jiménez × Caracas (direct SN)	25/120	1.5	664	208	31,200
Jiménez × Caracas (Direct NS)	25/120	1.0	664	138	20,700
Caracas × Jiménez (turns)	20/120	1.0	542	90	13,500
Calle 8 sur × NQS	55/120	1.5	664	457	68,550
Calle 13 × Puente Aranda	75/120	1.5	664	623	93,450
Suba × Calle 100	25/120	1.5	664	208	31,200
Calle 80 Terminal Access	20/120	1.5	542	136	20,400
Av. Cali × Av. Cepeda Vargas	20/120	1.0	664	110	16,500

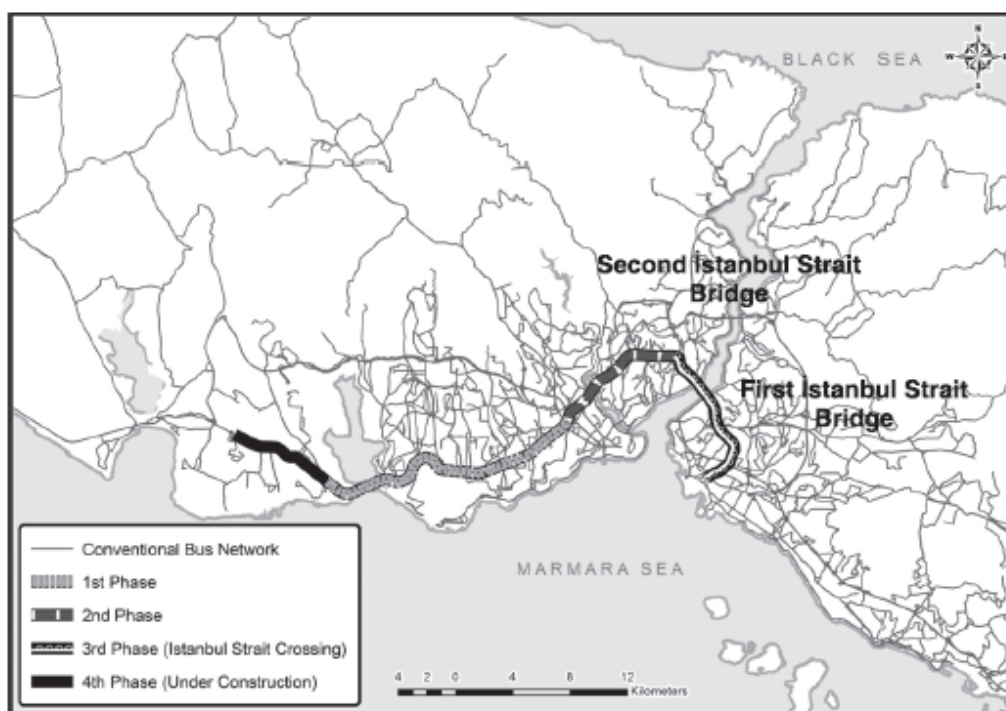
Source: Adapted from SDG, 2007.

資料來源：Hidalgo, D. *et al.* (2013)

(二)跨區域 BRT 之交通服務水準研究

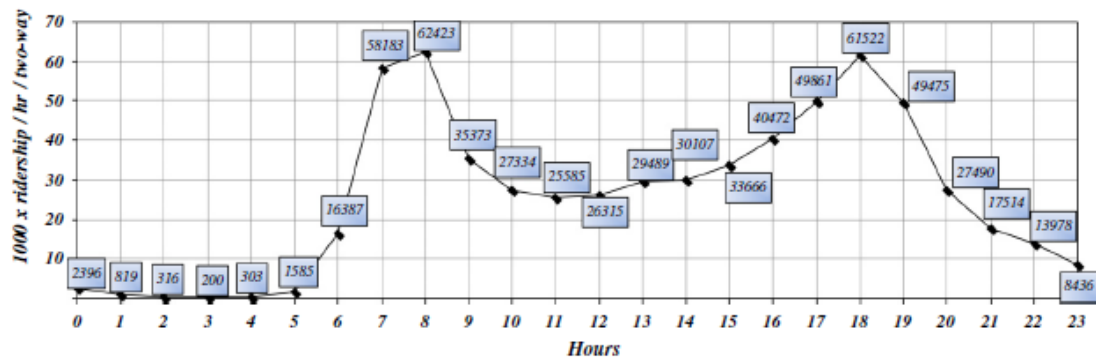
現今以公車為基礎的大眾運輸系統與鐵路系統之技術論戰一直持續著，但公車捷運系統所擁有的相對低成本、運送能力、易行性等優勢，則廣被承認與肯定。土耳其 Istanbul 最近構建完成跨區域之 BRT(Metrobus)系統路網，共計 3 段總長 42km(如圖 2-4)，第 1 段開始建於 2007 年 2008 年完成，從歐洲端通過高需求地區，但飽受鐵路系統方案之挑戰與批評。而該研究主要之第 3 段 BRT 系統跨越 2 個 Istanbul 海峽連接歐亞大陸，而 BRT(Metrobus)系統則是唯一跨越這巨大水障而銜接 2 大陸之大眾運通工具。

在 Alpkokin, P. *et al.* (2012)的研究中即針對本路段在甫開通後，其運量即高達 24,000 人/小時/方向、620,000 人/日(如圖 2-5)，而此旅客量是從既有公車使用者(70%)，及伴隨之其他公共運輸系統使用者(9%)及小汽車使用者(9%)所吸引轉移而來，而該研究亦即從規劃及營運觀點呈現出 BRT 之特點，並從政策引導之角度，評估 Metrobus 系統是否能對 Istanbul 之永續發展及易行性，提供更有效之改善。



資料來源：Alpkokin, P. *et al.* (2012)

圖 2-4 Metrobus 系統之路線圖



資料來源：Alpkokin, P. et al. (2012)

圖 2-5 平常日每小時乘載量

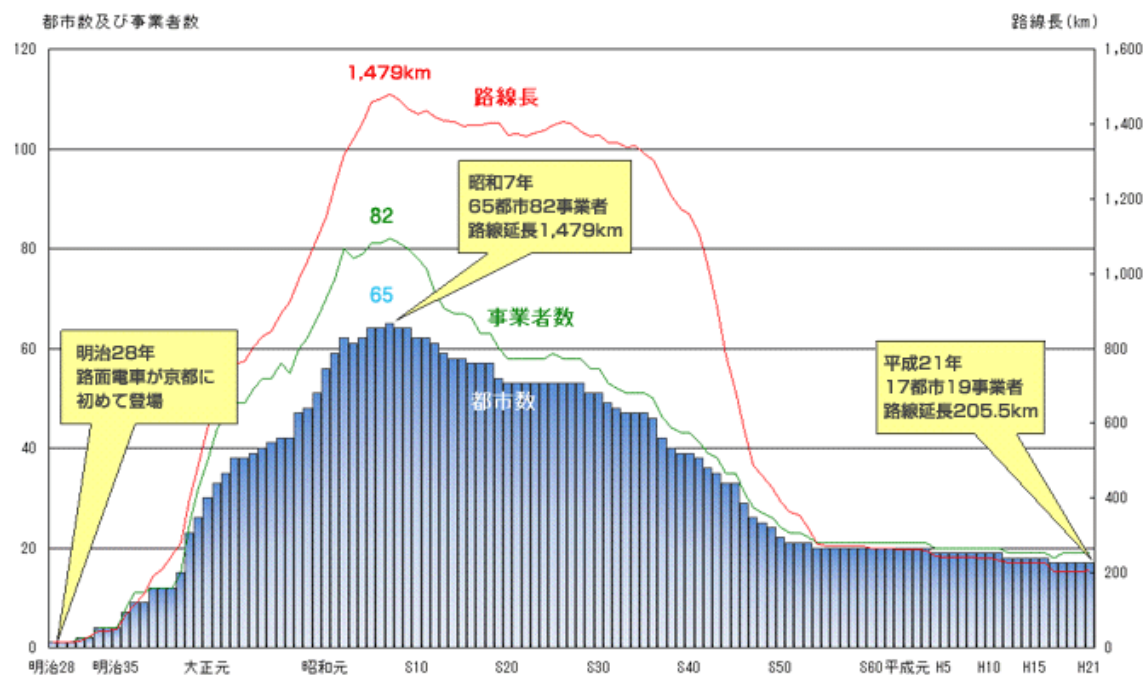
2.3 日本平面輕軌容量特性分析

為利進一步了解平面輕軌容量之特性，本研究另蒐集北海道之札幌及函館等都市最具規模及歷史背景之平面輕軌電車系統營運相關資料，彙整平面輕軌 B、C 型路權之營運及容量相關議題進行分析，以作為後續辦理輕軌容量研究之參考。

一、日本整體輕軌系統概況

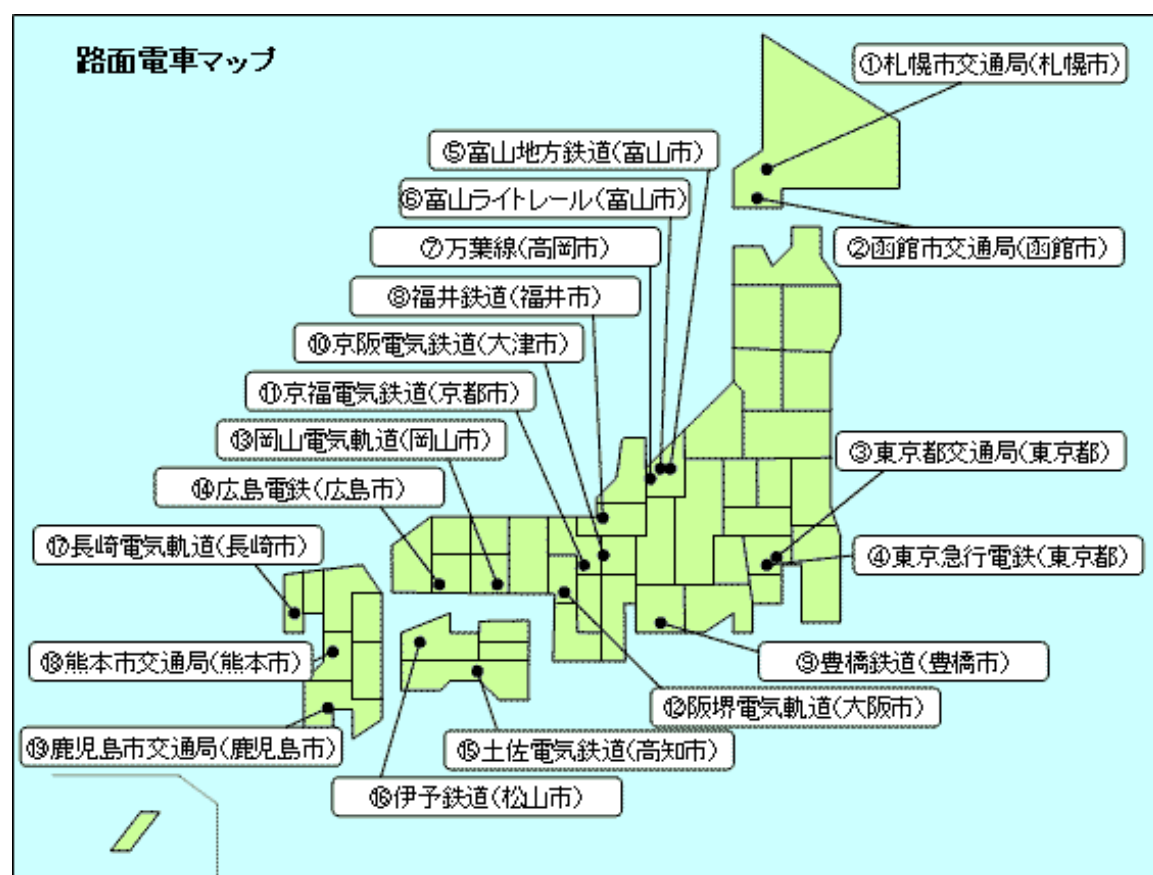
依據日本國土交通省之資料顯示，日本整體輕軌系統於昭和 7 年(1932 年)發展達到最高峰，全國輕軌總長度達 1,479 公里，後於昭和 40 年(1965 年)即逐漸廢除路面電車改採巴士及地鐵系統，故至平成年間(約 1988 年~2009 年)輕軌系統發展大致趨於穩定，平成 21 年(2009 年)全日本共有 17 個都市建置輕軌系統，由 19 家業者負責經營，輕軌路線總長度約為 206 公里(如圖 2-6)。

由各地區之輕軌系統分佈觀之，輕軌系統大多建置於中大型都市，如北海道之札幌、函館，本州之東京、大阪、京都，九州之鹿兒島、熊本、長崎…等(如圖 2-7)。另若就各地區輕軌系統之特性，整體而言因各地區之輕軌系統多為平面電車型式，故其平均車速約為 10~30 km/hr；至於系統之軌距則有 1,067 mm、1,372 mm、1,435 mm 等 3 種，整體年載客人數高達 194,389 千人，其中以廣島市內線輕軌、長崎市輕軌及東京都荒川線輕軌之載客量最大(如表 2.2)。



資料來源：http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/lrt/lrt_index.html

圖 2-6 日本路面輕軌電車系統之發展歷程



資料來源：http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/lrt/lrt_index.html

圖 2-7 日本全國輕軌系統分佈及營運機構

表 2.2 日本輕軌系統現況及特性

事業者	線 名	人口(人)	軌間 (mm)	路線延長 (km)	停留 所数	車両数(両)		輸送人員 千人/年	輸送密度 (人km/km 日)	營業 収支	平均乗車 時間(km)	表定速度 (km/h)
						客車数	車両数					
札幌市交通局	軌道線	1822368	1067	8.5	23	30	35	8373	6831	110	2.4	11.9
函館市交通局		287637	1372	10.9	26	35	40	7011	5287	119	3	12.8
東京都交通局	荒川線	12064101	1372	12.2	30	41	41	20687	10685	97	2.6	14.6
東京急行電鉄(株)	世田谷線		1372	5	10	20	20	18333	24104	131	2.4	18.0
豊橋鉄道(株)	東田本線	364856	1067	5.4	13	15	15	2806	3709	114	2.6	15.4
富山地方鉄道(株)	富山軌道線	325700	1067	6.4	20	17	18	3983	4555	91	2.7	14.2
万葉線(株)		172184	1067	12.8	25	11	11	988	1154	133	5.5	18.5
福井鉄道(株)	福武線	252274	1067	3.3	6	25	28	1116	1873	111	10	13.0
京阪電気鉄道(株)	京津・石山坂本線	288240	1435	21.6	27	62	62	15318	9265	247	4.7	29.2
京福電気鉄道(株)	嵐山本線 北野線	1467785	1435	11	20	28	29	6893	7587	115	4.5	20.5
阪堺電気軌道(株)		792018	1435	18.7	41	39	39	9587	4987	118	3.6	18.5
岡山電気軌道(株)		626642	1067	4.7	16	22	22	3717	3693	85	1.7	11.3
広島電鉄(株)	(市内線)	1126239	1435	18.8	56	264	267	39857	15599	92	2.7	11.5
伊予鉄道(株)	市内線	473379	1067	9.6	27	38	45	7400	4188	105	2	12.8
土佐電気鉄道(株)		330654	1067	25.3	77	71	72	6742	3217	108	4	15.2
長崎電気軌道(株)		423167	1435	11.5	39	75	77	21150	16173	100	3.2	13.4
熊本市交通局		662012	1435	12.1	35	52	54	10366	8074	127	3.3	14.2
鹿児島市交通局		552098	1435	13.1	37	52	54	10062	7576	91	3.4	13.0
				210.9	528	897	929	194389				

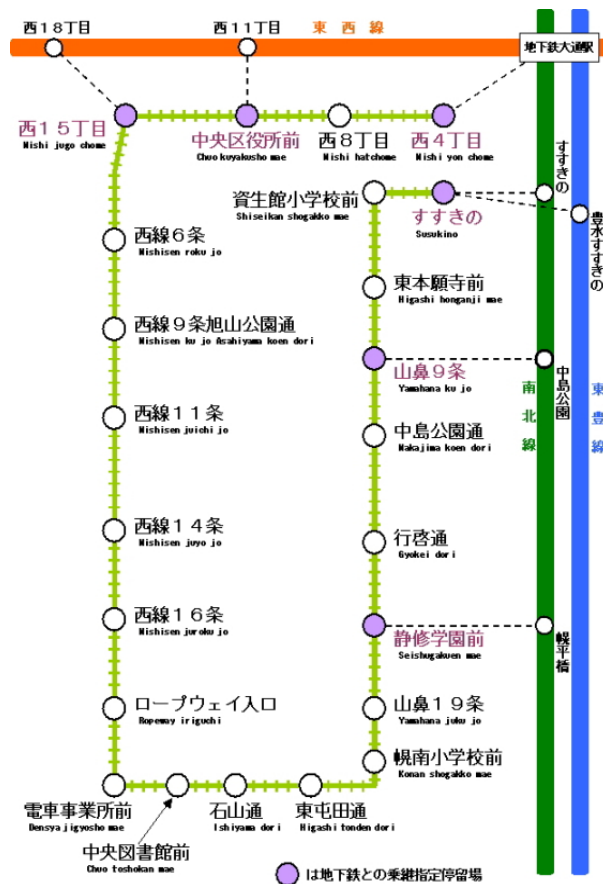
※路線長 車両数は平成15年3月末、輸送人員 輸送密度は平成13年3月、人口は平成12年国勢調査による。全国路面軌道連絡協議会等の資料を元に、最新の数字に筆者が補足

資料來源：http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/lrt/lrt_index.html

二、札幌市輕軌系統

札幌市的平面輕軌電車於2001 年與函館市輕軌電車一同被選為北海道遺產。不過2002 年由於業務再次出現赤字，加上車輛老化的問題，以及未來乘客量不足等因素，因此出現不少的改善提議，如：環境保護及都市活化、延長路線、輕鐵化等，以避免再次關閉的危機。

該市目前營運路線共有三條，包括：一條線（西 4 丁目站—西 15 丁目站）、山鼻西線（西 15 丁目站—中央圖書館前站）、山鼻線（中央圖書館前站—薄野站），總長度共 8.41 公里、23 個車站，目前營運之路線如圖 2-8 所示，圖 2-9 則為行駛於平面 B 型路權之一條線 3305 型輕軌車輛，其單節車廂可載 71 人。



資料來源：維基百科，<http://zh.wikipedia.org/wiki/>。

圖 2-8 札幌市目前營運之輕軌路線圖



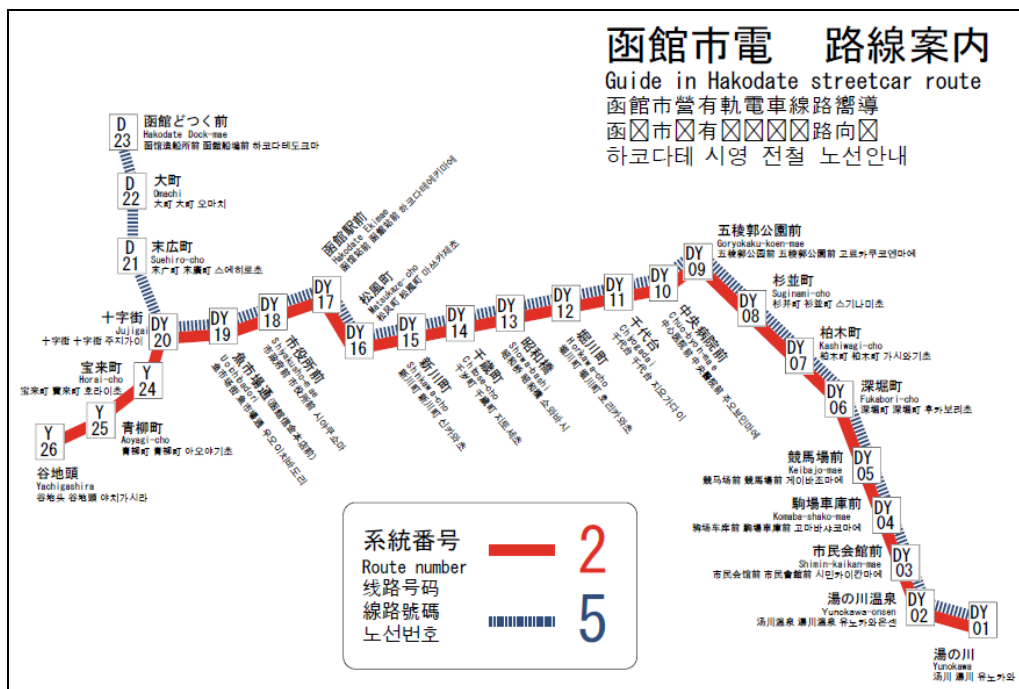
資料來源：本研究拍攝。

圖 2-9 札幌一條線 3305 型輕軌車輛

三、函館市輕軌系統

函館市於輕軌系統全盛時期時共有 6 條路線（12 個系統）、總長度為 17.9 公里。但由於乘客數量下降及經營環境困難，分別在 1978 年（昭和 53 年）、1992 年（平成 4 年）及 1993 年（平成 5 年）取消部份路線，現在尚營運路線計有 4 條（2 個系統）、總長度 10.9 公里。此外，目前正規劃是否需要延伸五稜郭公園前—富岡—美原、湯之川—函館機場之路線。

目前尚營運之輕軌路線包括：函館船塢前—函館站前（2.9 公里）之本線、松風町—湯之川（6.1 公里）之湯之川線、十字街—谷地頭（1.4 公里）之寶來・谷地頭線、函館站前—松風町（0.5 公里）之大森線，目前營運之路線如圖 2-10 所示，圖 2-11 則為行駛於平面 B 型路權之本線 8001 型輕軌車輛，其單節車廂可載 80 人。



資料來源：維基百科，<http://zh.wikipedia.org/wiki/>。

圖 2-10 函館市目前營運之輕軌路線圖



資料來源：本研究拍攝。

圖 2-11 函館本線 8001 型輕軌車輛

2.4 綜合評析

目前學術相關文獻甚少針對整體輕軌路線容量所進行之研究，尤其針對平面 B、C 型路權輕軌系統容量之相關文獻，僅有針對輕軌或 BRT 系統個別車站之容量分析，或整體系統改善後服務水準提升之相關文獻，及個別容量參數議題之研究分析，顯見完整平面 B、C 型路權輕軌系統容量分析之複雜程度及困難性。故對照日本及美國之輕軌容量分析研究作法，其皆散見於相關實務作法(如日本之「城市建設融合之 LRT 引進輔導計劃」)及技術手冊(如美國之「大眾運輸系統容量及服務品質手冊」—Transit Capacity and Quality of Service Manual, TCQSM) (Kittelsohn & Associates, Inc., 2003)，可得印證，爰值得後續針對各項輕軌容量複雜議題辦理輕軌系統容量之系列研究，以作為國內後續推動輕軌系統之參考依據。

第三章 國外輕軌容量分析作法比較

本章主要就日本與美國之輕軌容量分析作法進行比較，另把握參訪日本鐵道綜合技術研究所(RTRI)之難得機會，與該研究所相關研究人員深度研討，確認日本平面輕軌 B、C 型路權之容量分析作法，以作為我國輕軌系統推動及後續辦理輕軌容量研究之參考。

經與 RTRI 研究人員討論得知，可能是日本軌道大眾運輸系統較為發達，都市地區之私人運具使用率較低，故日本之輕軌系統推動較不考慮輕軌系統及道路之容量，而主要仍著重輕軌系統的營運技術及運轉調度排班問題，惟 RTRI 研究人員仍提供日本國土交通省於平成 17 年(2005 年) 10 月出版之「まちづくりと一体となった LRT 導入計画ガイドンス」供參，其書名中譯即為「城市建設融合之 LRT 引進輔導計劃」，其中部分篇章亦針對影響輕軌系統容量之關鍵因素及相關因素之容量效能提升作法進行介紹，而為利比較各國之容量分析作法，茲分就日本及美國之輕軌容量分析作法，摘要比較說明如下。

3.1 日本輕軌容量分析作法

日本目前並未有針對輕軌容量之進行專業研究及明確之分析作法，經與 RTRI 研究人員討論得知，日本國土交通省於平成 17 年(2005 年) 10 月頒訂的「城市建設融合之 LRT 引進輔導計劃」，其中第 3 章「輕軌引進的對象與適用之領域」中有部分內容與輕軌容量之提升較相關，主要述及影響輕軌容量之關鍵要素，茲分述如下：

一、提升輕軌系統之表定營運速度

提升輕軌系統之表定營運速度作法，主要包括：(1)列車運行時間之縮短(加減速性能提升、最高速限放寬)；(2)軌道配置型式之改善(專用化、立體化)；(3)優先號誌之引進；(4)上下車時間之縮短(車票收取方式之改變)；(5)停站設施配置方式；(6)平均站距考量(平均站距 500m 以下，表定速度約為 15~16 km/hr)。至於有關提升輕軌系統之

表定營運速度之策略及效果彙整如表 3.1 所示。

表 3.1 提升輕軌系統之表定營運速度之策略及效果

①走行時間の短縮	2km/h 程度向上
○加減速性能の向上	0.7km/h 向上（他調査での検討事例 ^{※1} ）
○最高速度の規制緩和	1.2km/h 向上（他調査での検討事例 ^{※2} ） ※併設軌道上での試算
②軌道形態の工夫	2km/h 以上向上
○平面軌道のままでの専用化	2～12km/h 向上（ケルン ^{※3} ）
○軌道の交差点立体化（地下化）	1 交差点当り 60～118 秒程度の時間短縮（試算結果 ^{※4} ）
○軌道の連続立体化（地下化）	2km/h 向上（試算結果 ^{※4} ）、13→22km/h（ケルン ^{※5} ）
○郊外部での鉄道乗り入れ	全線平均で 10km/h 向上（広島電鉄宮島線 ^{※6} ）
③優先信号（PTPS）の導入	0.9～2km/h 程度向上
	1.5～2.0km/h 向上（海外事例 ^{※7} ）
	0.9km/h 向上（他調査での検討事例 ^{※8} ）
	（ごくわずか（広島電鉄ヒアリング））
④乗降時間の短縮	
○運賃収受の簡素化（車外運賃収受）	0.6 秒/人/2 扉程度短縮（広島電鉄資料）
○ICカード	（所要時間は現在と同程度 ^{※9} ）

資料來源：日本国土交通省網站(2005)，「まちづくりと一体となった L R T 導入計画ガイダンス」。

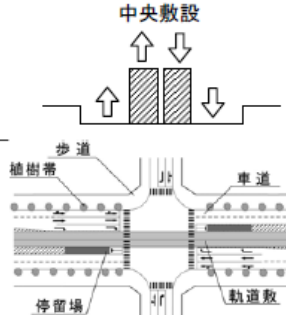
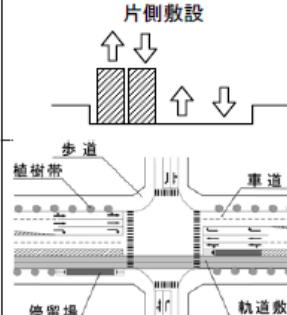
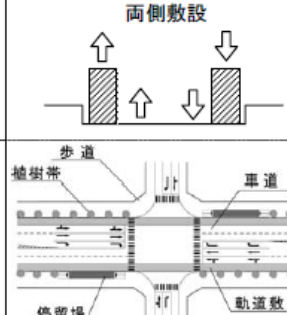
二、改善輕軌系統之引進佈設空間

有關輕軌系統引進佈設空間之改善作法，主要係包括輕軌佈設道路之路幅、軌道鋪設位置、道路橫斷面組成等，表 3.2 即為輕軌佈設位置、佈設方式之特徵、優缺點比較、日本國內及國外之案例數比較等資料。

三、改善輕軌系統之停站設施及配置

另外改善輕軌系統之路幅、軌道鋪設位置、道路橫斷面組成等，都可有效改善車流及行人流動線之干擾程度，進而提升輕軌系統之營運速度而增加其容量。例如表 3.2 所示，輕軌佈設於道路中央是目前最為普遍之方式，因其與車流之衝突點相對較少，故輕軌系統之運行較為方便，但仍需視當地之車流、行人流動線及需求量而定。

表 3.2 輕軌系統佈設型式之優缺點比較

軌道敷設位置		中央敷設	片側敷設	両側敷設
				
特徴	道路交通への影響や、沿道へ影響を小さくしやすい		中央敷設と両側敷設の中間的特性	
メリット	<ul style="list-style-type: none">・軌道の右左折時にも交差点処理との調和が比較的容易・沿道に与える影響が少ない		<ul style="list-style-type: none">・植樹帯などの空間を有効活用して停留場空間を確保することができる・一方の停留場で、利用者のアクセス性が良い	
デメリット	<ul style="list-style-type: none">・停留場へのアクセスに道路横断が伴う		<ul style="list-style-type: none">・軌道の右左折部での軌道曲線半径の確保等のため、交差点が大きくなる（又は歩道の角切等を要する）・沿道の荷さばき、駐車などの調整が必要・軌道と車道が対面通行・相方向運行時に、車道側の停留場へのアクセスには道路横断を伴う	
事例	日本	多数	高知などの一部区間	岡山（センターボール化工事期間中のみ）
	海外	多数	ナント、ルーアン、ストラスブール、ザールブリュッケン	ウィーン、トリノ

資料來源：日本国土交通省網站(2005)，「まちづくりと一体となったLRT導入計画ガイダンス」。

3.2 美國輕軌容量分析作法

美國之輕軌容量分析作法主要彙集於運輸學會（TRB）所出版之「大眾運輸系統容量及服務品質手冊」（Transit Capacity and Quality

of Service Manual, TCQSM) 其 Part 5 RAIL TRANSIT CAPACITY 相關內容中。具體作法主要分為完全立體隔離路權(即 A 型路權)與非完全立體隔離路權(即 B、C 型路權)，而有不同之分析方法，茲分述如下：

一、 完全立體隔離(Grade-separated)路權之輕軌容量分析作法

完全立體隔離路權之輕軌首先需檢視容量瓶頸限制是否在交叉點(Junctions)或折返點(Turnbacks)上，意謂該 2 處通常為其容量瓶頸點，因此其路線容量限制常取決於最大承載量車站 (maximum load point station)之進站時間(close-in)、停站時間(dwell)及運轉寬裕時間(operating margin time)，故容量決定程序需計算下列數值：

- 最大承載量車站之列車進站時間
- 最大承載量車站之列車停站時間
- 適宜之運轉寬裕時間
- 尖峰 15 分鐘之列車乘客乘載狀況
- 藉由尖峰小時乘載係數之轉換，計算載客容量值

二、 非完全立體隔離(Not grade-separated)路權之輕軌容量分析作法

實務上，輕軌路線通常佈設於隔離路權(private right-of-way)及共用路權(on-street operation)之混合路權上，其容量主要取決於容量瓶頸路段(the weakest link)之容量值。另外單線路段(single-track sections)及街道路段長度(street block lengths)常為影響容量瓶頸路段之關鍵要素。而由於非完全立體隔離之輕軌系統通常需通過號誌化路口，故容量瓶頸路段通常為號誌化路口之最長交通號誌時相(long phase length)路段，亦即為號誌化路段之最小班距(minimum headway)路段。

決定容量瓶頸路段後，下一步即是估算通過瓶頸路段之列車數(Train throughput)及掌握其限制因素，限制因素亦即尋找何處為最長交通號誌時相之路線、單線軌道之路段、號誌化路口之街廓長度。其

容量估算步驟及計算式如下：

- 檢視超過 1,600 ft (500 m)單線路段之班距
- 檢視該班距是否大於該路口最長號誌週期 2 倍
- 轉換班距為小時單位，再換算為小時載客容量值

$$h_{lr} = \max \begin{cases} h_{st} \\ h_{gs} \\ h_{os} \end{cases}$$

where:

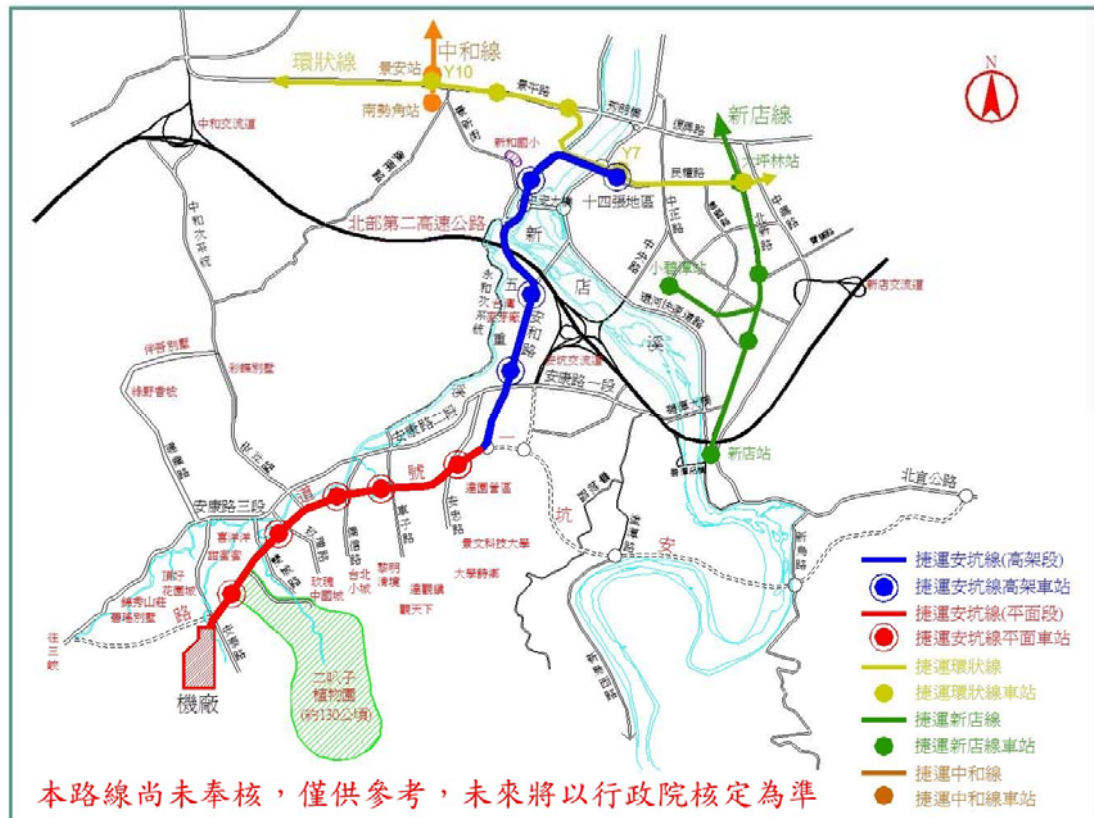
- h_{lr} = minimum light rail headway (s);
- h_{st} = minimum single-track headway (s), from Equation 5-13;
- h_{gs} = minimum grade-separated headway (s), from Equation 5-10; and
- h_{os} = minimum on-street headway (s), from Equation 5-15.

第四章 案例分析

有鑑於台灣地區目前尚未有輕軌系統之營運實績，故為利分析輕軌系統平面 B、C 型路權之各項容量議題，本研究引用摘述臺北市政府捷運工程局辦理完成之「捷運安坑線路線規劃及沿線周邊土地整體開發計畫可行性研究」報告(臺北市政府捷運工程局，2012 年)，就輕軌容量相關議題進行案例分析，茲就相關規劃內容說明如下。

4.1 安坑線規劃路線說明

為服務新店安坑地區民眾行的便利，解決新店安坑地區長期交通擁擠問題，台北市政府捷運工程局規劃捷運安坑線以疏運新店安坑地區交通運輸需求。其經與新北市政府及新店區公所等相關單位協商綜合評估後，建議路線方案自二叭子植物園安泰路口起，由西向東以平面方式沿安坑一號道路經安祥路支線段路口（第二期工程）至安忠路口（第一期工程）佈設，經達園營區後改以高架方式沿安坑一號道路安和路支線段佈設（第二期工程），續向北沿安和路一段、二段，並跨越北二高高架路段上方，於新和國小東南側折轉跨越新店溪及兩側環河快速道路至十四張地區與環狀線交會轉乘，路線總長約 7.8 公里，全線採輕軌捷運系統，並於安坑一號道路、安泰路口西南側設置 1 座平面機廠，以供營運調度使用，規劃路線如圖 4-1 所示。



資料來源：臺北市政府捷運工程局 (2012)。

圖 4-1 捷運安坑線路線規劃圖

4.2 安坑線之基本運能分析

為利分析捷運安坑線輕軌系統規劃型式之路線容量，茲就該系統之軌道系統及路權型態、車輛性能、列車編組、車載容量、車輛尺寸等要素進行說明如下：

一、軌道系統及路權型態

軌道系統包括軌距及軌道型式兩個部分，在軌距方面根據交通部 100 年 12 月部頒的輕軌規範，未來國內輕軌系統的軌距建議採用標準軌距，因此捷運安坑線亦以標準軌距來規劃。而與輕軌容量較相關之軌道系統元素主要是軌道型式，軌道型式可分為直立式軌道以及嵌埋式凹槽軌道 (Grooved Track) 兩大類，直立式軌道的抽換及更新作

業比較快速，利用夜間施工隔日通常可以開放運轉，但無法與其他運具共用路權。而凹槽式軌道因為必須等到道床混凝土乾涸之後才能開放通行，因此軌道抽換的作業比較複雜，且容易影響列車的運轉，但其優點則是可與其他公路運具共用路權。

傳統鐵路或鋼輪鋼軌的捷運系統，通常採用直立式軌道，但路面電車及輕軌系統在 C 型路權區段因必須與其他公路運具共用路權，則必須採用嵌埋式凹槽軌道（Grooved Track）；在 B 型路權區段可採用直立式軌道或嵌埋式軌道，並可配合景觀以植披區隔一般道路，至於 A 型路權區段有時亦會採用直立式軌道，此時可採用道碴道床或無碴道床。但當採用嵌埋式軌道時，轉轍器必須完全置於路面下，以免其他公路車輛通過時產生撞擊。綜合前述分析，捷運安坑線的軌道型式建議如下：

(一)K1~K5 大部分為平面 B 型平面路段，採用嵌埋式軌道，由於輕軌系統行駛於安坑一號道路的中央分隔島，因此建議道床植草以美化景觀並與一般道路區隔。

(二)K5~K9 為 A 型專用路權，為便於軌道抽換更新作業，建議採用傳統直立式軌道以及無碴道床。

二、車輛性能

參考交通部頒的輕軌規範，規劃安坑線的車輛性能如下：

(一)最大車速：K1 ~ K5 平面 B 型路權最高速度為 50 km/h，K5 ~ K9 A 型專用路權的最高速度為 80 km/h。

(二)最大加速度：在 W3 載重下（座位滿座加上立位 7 prs/m²，每人 60 kg），最大服務加速度為 1.3 m/s²。

(三)最大減速度：在 W3 載重下，最大服務減速度為 1.3 m/s²。

(四)緊急減速度：由於輕軌列車並沒有專用路權，為確保行車安全，故須安裝電磁軌道煞車（Track Brake），在緊急情況下，列車的減速度可達 2.7 m/s²。

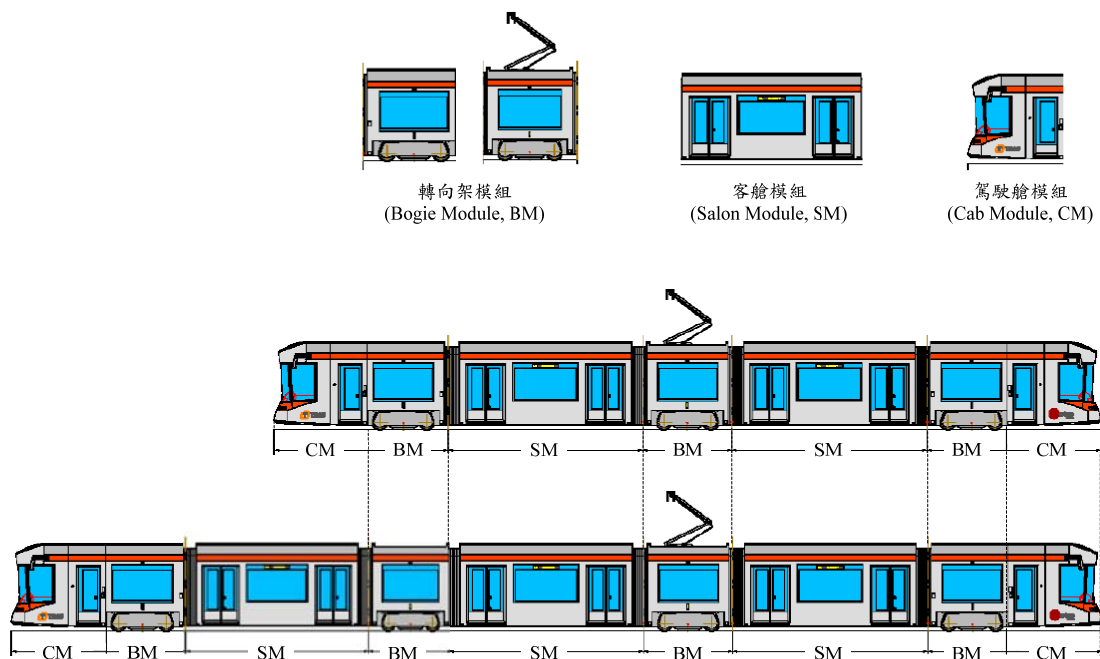
(五)急衝度（Jerk）：小於 1.3 m/s³。

(六)最大坡度：6%。

(七)最小半徑：25 m。

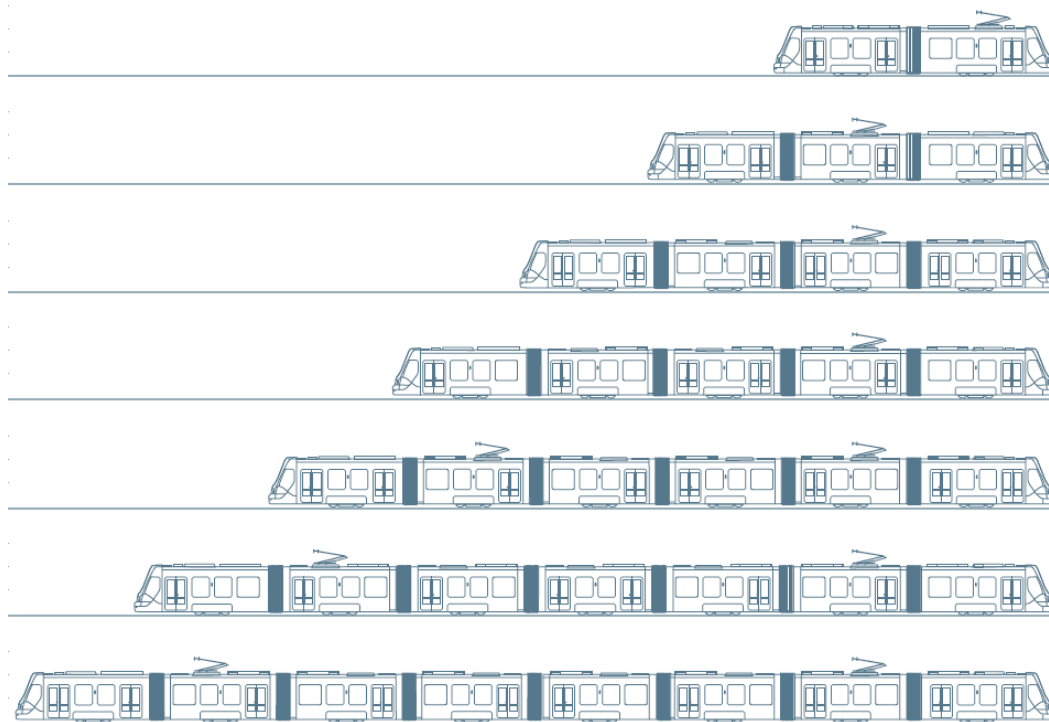
三、列車編組

為了滿足不同的需求特性，並使車輛構造標準化，目前國際輕軌車輛製造廠商大多採用模組化（Modular）編組構造，再視需要編組成列車，列車的編組量數通常為奇數，例如 3 車編組、5 車編組或 7 車編組，如圖 4-2。另外，有些廠商則是將整列車分成駕駛艙模組以及客艙模組，每個模組均有轉向架，在此種編組方式下，列車的編組量數可以是奇數，也可以是偶數，如圖 4-3 所示。未來捷運安坑線的列車編組方式建議採用模組化編組，至於是採用三模組式編組或是兩模組式編組，則開放給得標的車輛廠商提出設計構想。



資料來源：臺北市政府捷運工程局 (2012)。

圖 4-2 輕軌車輛模組化編組示意圖（三模組式）



資料來源：臺北市政府捷運工程局（2012）。

圖 4-3 輕軌車輛模組化編組示意圖（兩模組式）

四、車載容量

目前國內對於捷運系統立位的計算標準為 5 人/平方公尺，但國際上對於輕軌列車的立位計算標準則多採 4 人/平方公尺，主要原因在於輕軌列車的寬度較窄，且多採低底盤設計，立位空間尚需容留旅客通行的空間，因此無法像高運量系統容忍較高的立位密度；另外，旅客也不可能完全平均分散在列車內，故需考慮乘載變異的情形，因此安坑線規劃計畫中建議採用國際標準，以 4 人/平方公尺來計算車載容量。

車載容量除了與車輛尺寸及立位密度有關之外，主要還是要考慮系統運能的需求以及營運班距的限制，營運班距過長或過短皆不適宜，一般尖峰班距以 3～6 分鐘為原則。未來捷運安坑線的尖峰運量約為 6,100 人次/小時，若尖峰班距為 3 分鐘（每小時 20 列次），則每列車的車載容量約為 305 個乘位。

五、車輛尺寸

（一）車身寬度

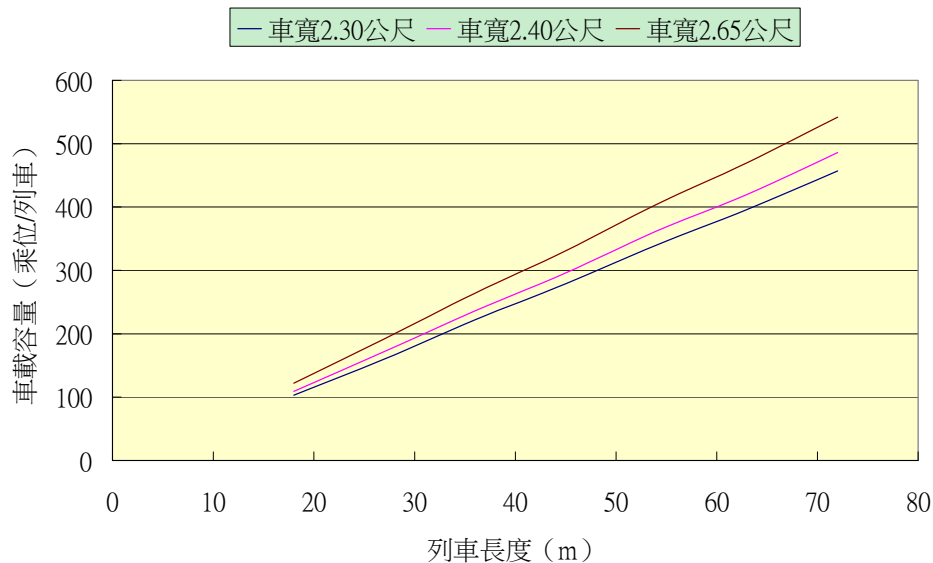
輕軌車輛的寬度通常介於 2.3 公尺~2.8 公尺之間，但以 2.4 公尺及 2.65 公尺較常見。初步規劃安坑線輕軌列車的車身寬度為 2.65 公尺。

(二)車身長度

輕軌的車身長度主要視運輸需求量而定，許多國家對於輕軌列車的最大長度都有明確的規範，例如德國規定輕軌車輛的長度不得超過 75 公尺，以免列車低速通過路口時清道時間過長而造成路面交通過大的衝擊。車身長度除了與需求量有關之外，也會受到營運班距的影響。在一定的運能之下，班距愈大，發車頻率愈低，故每列車的長度較長；反之，班距愈小，發車頻率愈高，故每列車的長度可以縮短。圖 4-4 為車身寬度、長度與車載容量的關係圖，以寬度 2.65 公尺的輕軌車輛為例，若每列車欲提供 305 個乘位，則列車長度約 41 公尺；如採用 2.40 公尺或 2.30 公尺寬的輕軌車輛，列車長度則分別為 45 公尺以及 48 公尺。安坑線計畫建議車寬為 2.65 公尺，為保留彈性，建議列車長度為 45 公尺。

(三)車輛高度

根據交通部頒的輕軌規範，安坑線輕軌列車的高度建議採用 3.8 公尺（集電弓降弓情況下）。



資料來源：臺北市政府捷運工程局 (2012)。

圖 4-4 輕軌列車長度、寬度與車載容量關係圖

4.3 安坑線之號誌行車控制系統

有鑑於輕軌系統之行車控制系統亦會影響其容量，故茲就安坑線所規劃之列車操控方式及輕軌專用號誌 2 部分之技術內容分析如下：

一、列車操控方式

由於輕軌系統實務營運上在許多路段皆會行駛在 B 型或 C 型路權上，無法完全隔離外界的人、車，因此無法採用自動列車運轉。故通常輕軌列車須配備司機員，列車的操控類似於公車，由司機員依照道路交通狀況來操控列車的運轉，故沒有中運量或重運量捷運系統等先進的列車控制系統。

二、輕軌專用號誌

輕軌列車雖然採用司機員目視駕駛，但在重要的地點轉轍區或平交路口仍需配備號誌以指示列車的運轉條件，其設置地點必須考慮司機員操控列車的安全視距，讓司機員有足夠的時間反應，同時不得有障礙物遮蔽號誌，以免發生危險。另外，為了便於區隔一般道路交通號誌與輕軌的號誌，輕軌系統一般是採用類似二位式臂木式號誌的顯示方式，有行進（Proceed）及停止（Stop）兩種顯示相位。當號誌顯示「|」代表允許列車通行，顯示「—」則表示列車必須停止，如圖 4-5 所示。

為了提高輕軌列車的運轉效率，列車通過橫交路口時可採用優先號誌，優先號誌的控制設備包括列車接近偵測器（Check in Point，用以偵測列車接近路口）、優先通行要求產生器（Priority Request Generator 用以發出優先通行要求）、號誌控制器（Traffic Signal Controller，用以控制號誌時相的轉換），以及列車離開偵測器（Check out Point，用以偵測列車離開路口），各項設備必須互相聯鎖整合作動，而就優先號誌的運作邏輯而言，則有絕對優先號誌（Preemption Signal）以及相對優先號誌（Priority Signal）兩種。



允許列車通行（法國巴黎 T3 線）



禁止列車通行（法國蘭斯輕軌）

資料來源：臺北市政府捷運工程局（2012）。

圖 4-5 輕軌專用號誌的顯示相位及意義

（一）絕對優先號誌

絕對優先號誌是指輕軌列車通過平交路口時，有絕對優先通行權，亦即當路口通行權為橫交道路的方向時，一旦偵測到輕軌列車接近路口並啟動優先號誌，則立即終止橫交路口的綠燈時間，並將路口的通行權開放給輕軌列車；輕軌列車通過之後，再將橫交道路的號誌切換為綠燈，恢復車流的通行，其運作邏輯類似於鐵路平交道，只是沒有裝設遮斷桿及警報器。

在絕對優先號誌的運作邏輯下，輕軌列車可以快速通過路口無需等待，故可提高輕軌列車的運轉速度，但會對橫交道路交通造成干擾，故適合用在橫交道路交通量較小的路口。

（二）相對優先號誌

相對優先號誌係指輕軌列車接近路口時，並沒有絕對優先的通行權，而是視號誌運作的當下狀況適當進行調整，讓輕軌列車儘快取得通行權。相對優先號誌有許多不同的運作策略，大致上可分為延長輕軌的通行時間或縮短橫交路口綠燈時間兩種。前者係指路口號誌開通輕軌列車運行方向時，當輕軌列車接近時，延長輕軌列車運行方向的綠燈時間讓輕軌列車通過；而後者則是指路口號誌開通橫交道路時，縮短其綠燈時間，但須滿足最小綠燈時間的限制，再將路口通行權開放給輕軌列車。

在相對優先號誌的運作邏輯下，輕軌列車在路口可能會遇到

險阻號誌而煞車或減速，因此輕軌列車的營運速度不如絕對優先號誌，但可以降低對橫交道路車流的衝擊，適合用在橫交道路交通量大的路口。

捷運安坑線經過的橫交路口有車子路（約 20 m 寬）、安祥路（約 30 m 寬），以及僑信路（約 20 m 寬），相較於安坑線沿線的安坑一號道路，這些道路的車流量並不高，故目前規劃採用絕對優先號誌，以提升捷運安坑線的營運速度。若以路寬最寬的安祥路為例，假設輕軌列車通過路口的速度為 30 km/h，則列車通過路口的時間約 9 秒，若輕軌列車發出優先通行的要求時，安祥路號誌轉換前有 2 秒的清道時段，輕軌列車通過路口後，另外有 2 秒的緩衝時間，則輕軌列車通過安祥路約佔用 13 秒的時間。由於安坑一號道路的車流量遠高於安祥路，假設其綠燈時間含黃燈清道時間為安祥路的 2 倍，且一個號誌週期內有一列輕軌列車隨機通過路口，則平均而言，在整個號誌週期中，安祥路的綠燈時間約有 1/3 的機會被輕軌列車中斷掉，影響的時間範圍介於 0~13 秒之間。若能將輕軌列車的排班與道路交通號誌事先整合設計，則可將輕軌列車對橫交路口的交通衝擊降至最低。

4.4 安坑線規劃之容量分析

輕軌運輸系統為最適合安坑線的系統型式，為利分析其各項規劃條件之容量，本節將根據輕軌的車輛特性、路線條件及運行方式，摘述可行性研究報告中模擬列車的運轉時間並評估其運轉速度等相關資料及容量評結果。

4.4.1 列車運轉模擬

安坑線可行性研究中模擬時採用的工具，係由規劃顧問公司中興工程顧問社所開發的 TrainSim 列車運轉模擬軟體進行模擬，其模擬的條件如下：

- 一、由於 K1 ~ K5 之間為 B 型路權，輕軌列車係行駛於平面道路上，因此輕軌車輛的營運速度不宜過高，以免列車在路口煞車不及，故最高營運速度設定為 50 km/h。

- 二、為了確保輕軌的服務效能，假設 K1 ~ K5 之平交路口設置輕軌絕對優先號誌，輕軌列車享有絕對優先通行權。由於此段的橫交路口均非幹道，故應不至於對路面交通造成太大的衝擊。
- 三、為避免輕軌列車與地面車輛、行人及旅客發生碰撞意外，輕軌列車行經橫交路口或行人穿越道時，限速 30 km/h。
- 四、K5 ~ K9 之間無平交路口，輕軌車輛擁有專用路權，故最高速度可提高至 80 km/h。
- 五、根據該可行性研究所規範的列車性能進行列車運轉模擬，為了預留運轉寬裕時間，列車是以第二級效能位階(Performance Level 2) 搭配滑行 (Coasting) 來運轉，亦即列車的最大的營運速度為限速的 90%，並於適當時機使用慣性無動力運轉。
- 六、考慮旅客上下車的需求，假設每站停靠 25 秒。

其模擬結果彙整如表 4.1 及表 4.2。從表 4.1 可知，K5~K6 和 K7~K8 的站間距離較長，運轉時間均超過 3 分鐘，而其餘區間大多在 1~2 分鐘左右。表 4.2 顯示，往新店方向，列車的營運速度在平面路權段（K1~K5）約為 23 km/h，專用路權段（K5~K9）同樣約為 24 km/h；而往安坑方向，列車的營運速度在平面路段（K5~K1）及專用路段（K9~K5）均為 24 km/h。

從模擬的結果可發現，安坑線捷運的平均運轉速度與國際上輕軌列車的運轉速度相仿，但遠低於目前臺北捷運列車的運轉速度 33 km/h ~ 34 km/h，主要原因在於輕軌列車於平面路權的最高營運速度僅 50 km/h，而台北捷運專用路權的列車最高營運速度則高達 80 km/h。即便如此，安坑線捷運的平均運轉速度仍高於台北市公車專用道的平均速度（15 km/h ~16 km/h），亦即安坑線捷運的服務效能介於專用路權的捷運與公車專用道之間。

表 4.1 捷運安坑線站間運轉時間

站名	區間公里 (km)	運轉時間 (min)	
		安坑往新店	新店往安坑
K1	0.707	1.30	1.35
K2			
K3	0.690	1.50	1.34
K4	0.500	1.15	0.97
K5	0.660	1.40	1.44
K6	1.400	3.22	3.21
K7	0.790	1.33	1.27
K8	1.480	3.39	3.43
K9	1.050	2.69	2.75

資料來源：臺北市政府捷運工程局 (2012)。

表 4.2 捷運安坑線列車運轉時間與平均運轉速度

範圍 項目	安坑往新店		新店往安坑	
	K1→K5 平面段	K5→K9 高架段	K5→K1 平面段	K9→K5 高架段
運轉距離 (km)	2.557	4.720	2.557	4.720
運轉時間 (min)	6.60	11.88	6.35	11.78
運轉速度 (km/h)	23	24	24	24

資料來源：臺北市政府捷運工程局 (2012)。

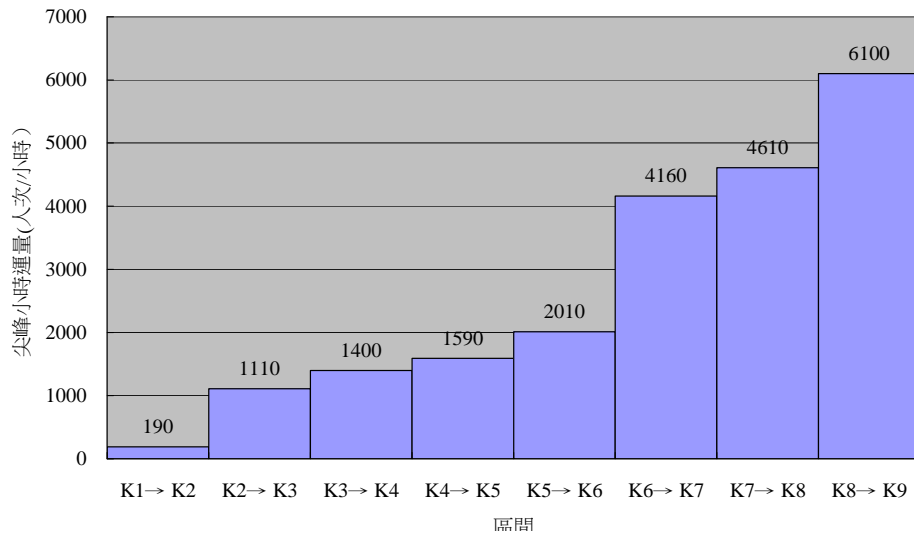
4.4.2 列車服務規劃

列車服務規劃的內容係輕軌容量分析內容之核心，其包括列車運轉的起迄範圍、營運班距，以及服務頻率等項目，茲分別說明如下：

一、 列車運轉模式

圖 4-6 為捷運安坑線運輸需求分析與預測之結果，從結果可知，晨峰小時站間運量由安坑往新店方向遞增，最大站間運量為 6,100 人次/小時，發生在 K8 與 K9 之間。由於 K1 至 K9 的路線長度僅 7.2 公

里，故可合理假設列車是採用一車到底的服務，惟捷運安坑線的站間運量差距甚大，採用一車到底的服務可能造成運能的浪費，故以下就呈現一車到底以及區間營運兩種模式之分析結果。

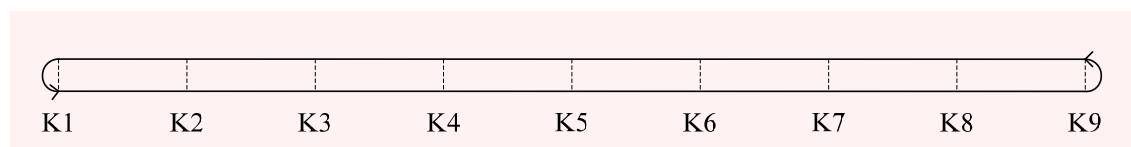


資料來源：臺北市政府捷運工程局 (2012)。

圖 4-6 捷運安坑線運量預測結果

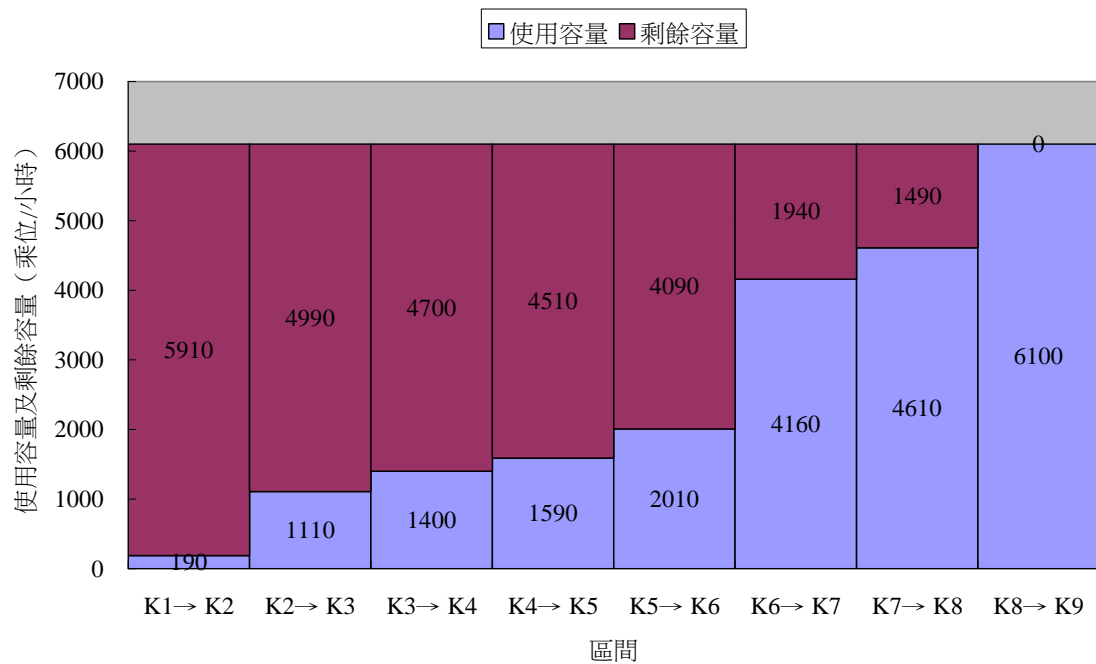
(一)一車到底模式

若採一車到底的營運模式，營運區間為 K1 ~ K9，如圖 4-7 所示。若系統的運能必須夠滿足最大站間運量的需求，則此時將會導致其他區間運能的浪費。圖 4-8 為一車到底營運模式下，路線運能、使用容量以及剩餘容量的關係圖，從該圖可知，在 K6 以西路段，有一半以上的運能浪費掉，在 K1 ~ K2 甚至有高達 5,910 乘位/小時的剩餘容量，如以延人公里計算，在此種運轉模式下，尖峰小時所浪費掉的運能將達 22,412 延人公里/小時，顯示此種營運模式的效率不高。



資料來源：臺北市政府捷運工程局 (2012)。

圖 4-7 捷運安坑線一車到底列車營運模式

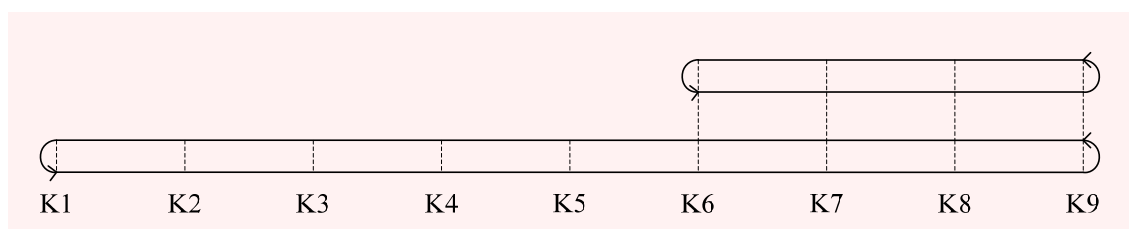


資料來源：臺北市政府捷運工程局 (2012)。

圖 4-8 安坑線一車到底營運模式下之使用容量與剩餘容量關係圖

(二)區間營運模式

若採區間營運模式，比較可行的分區地點是在 K6，主要原因在於 K6 ~ K9 為 A 型專用路權且運量較大，而 K6 以西運量有明顯的下降且多為平面路權，故 K6 為最適合的區間營運分段點，而營運列車則有 K1 ~ K9 以及 K6 ~ K9 兩種，如圖 4-9 所示，至於其發車的頻率，可採用 1:1 交替運轉以及 1:2 兩種運轉模式。



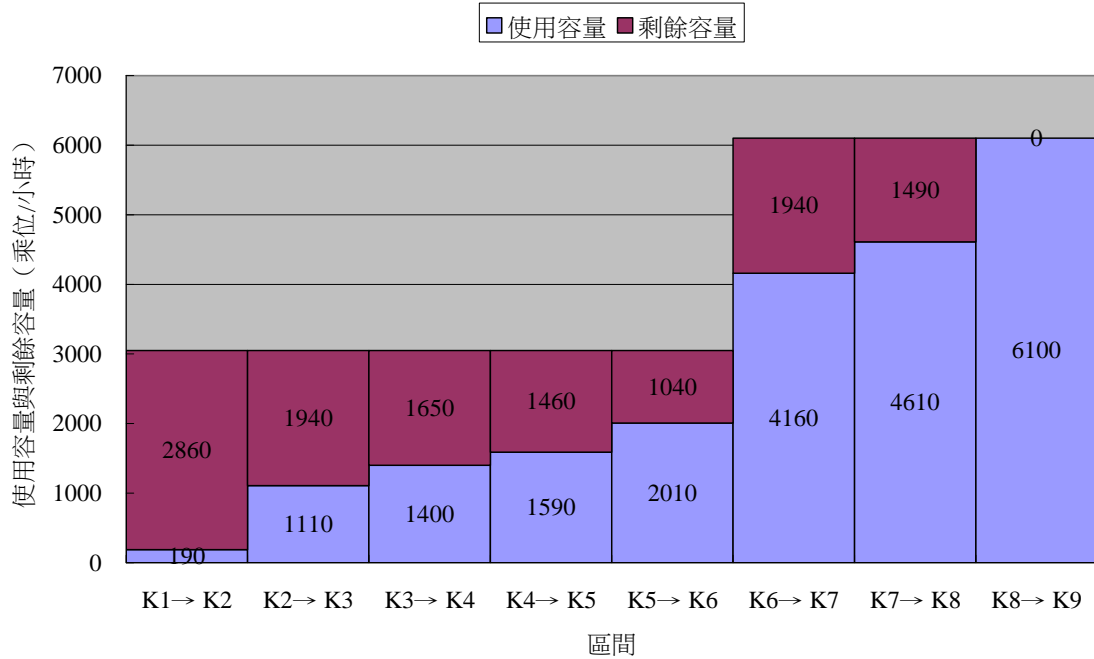
資料來源：臺北市政府捷運工程局 (2012)。

圖 4-9 安坑線捷運區間列車營運模式

1. 1:1 運轉模式

當 K1~K9 與 K6~K9 兩種列車的發車頻率為 1:1 的情況下，路線運能、使用容量以及剩餘容量的關係如圖 4-10，從該圖可

知，K6 以西路段浪費的運能以大幅減少，如以延人公里計算，則尖峰小時所浪費掉的運能將縮小為 10,343 延人公里/小時，顯示區間營運模式的效率較高，且運轉調度上較為單純。

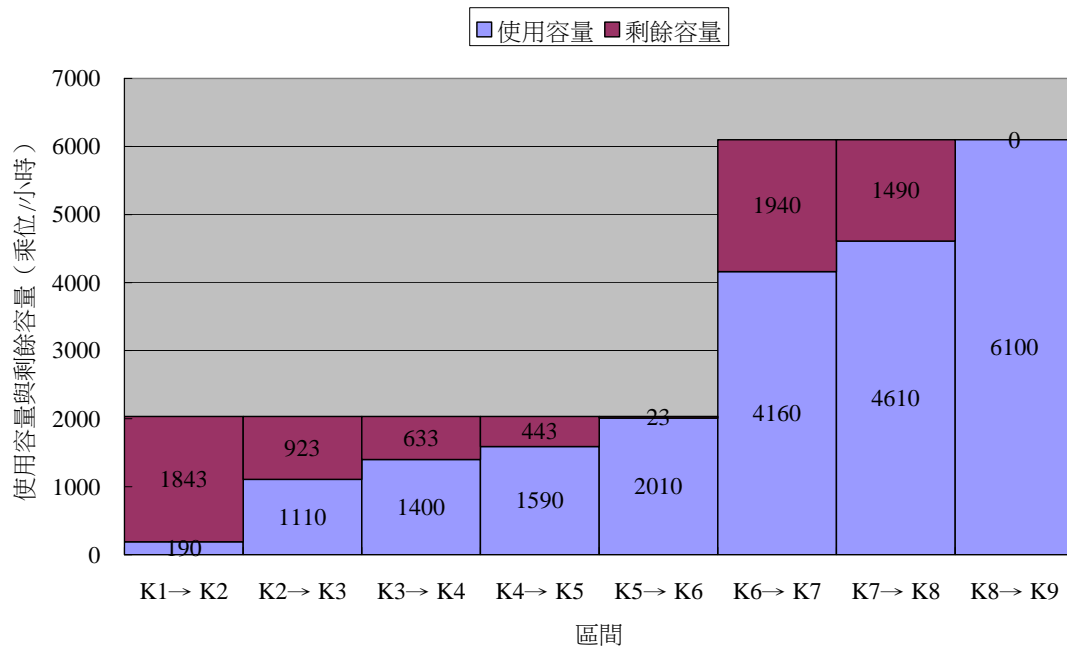


資料來源：臺北市政府捷運工程局 (2012)。

圖 4-10 安坑線區間列車 1:1 營運模式下使用容量與剩餘容量關係圖

2. 1:2 運轉模式

若 K1 ~ K9 與 K6 ~ K9 兩種列車的發車頻率為 1:2，其路線運能、使用容量以及剩餘容量的關係如圖 4-11。此種發車模式可進一步將 K6 以西浪費掉的運能縮小至 6,320 延人公里/小時，但在運轉調度上較為複雜，而且將會造成 K1 ~ K6 的營運班距與 K6 ~ K9 的差異過大。若 K6 ~ K9 的營運班距為 3 分鐘，則 K1 ~ K6 的營運班距將增長為 9 分鐘，如此大的班距不適用於尖峰時段；若將 K1 ~ K6 的營運班距減少至 6 分鐘，則 K6 ~ K9 的營運班距縮短為 2 分鐘，K6 站便必需佈設更多軌道以利列車折返，除了增加造價之外，也會讓列車的運轉調度複雜化，因此不建議採用此種模式來運轉。



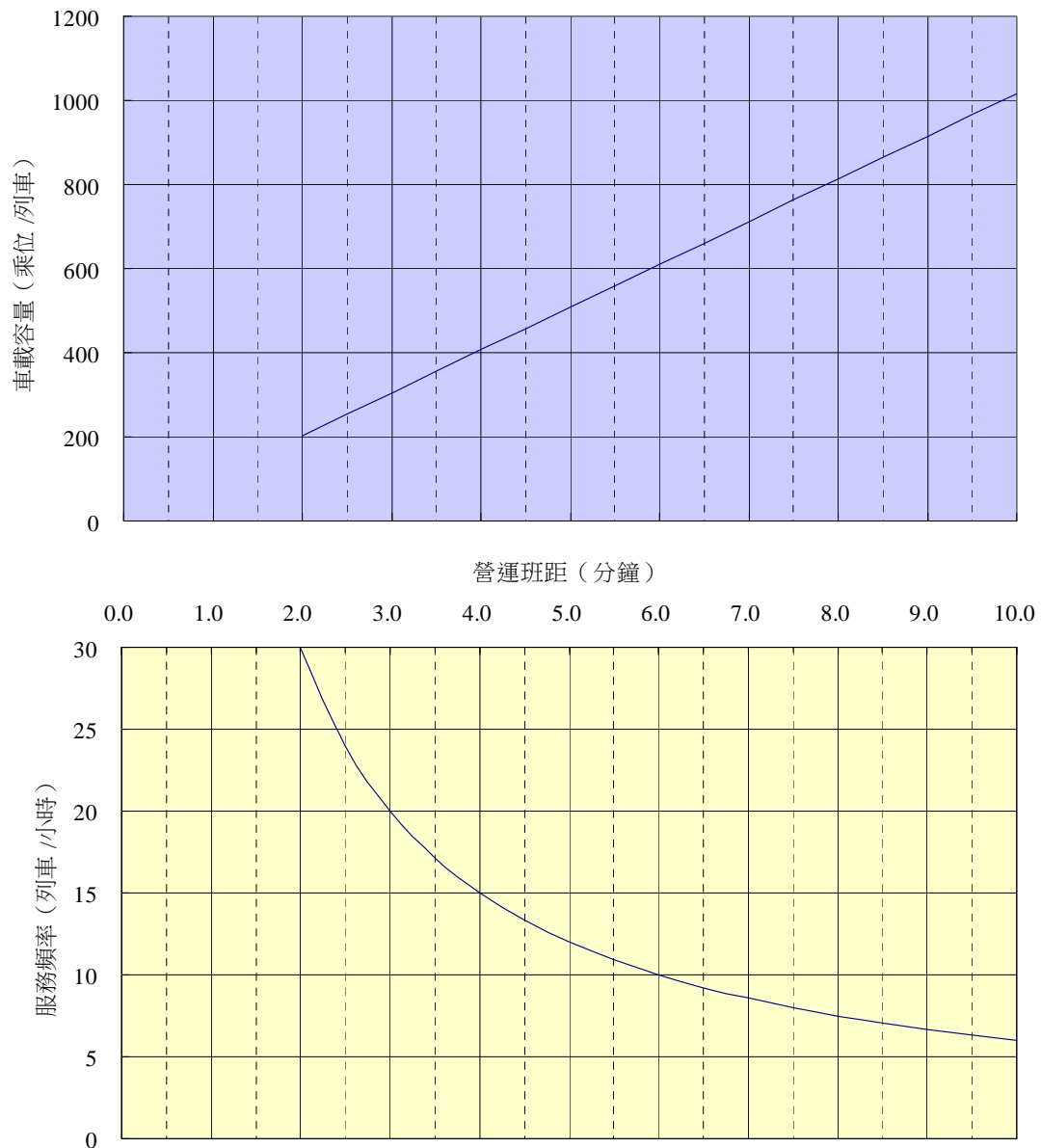
資料來源：臺北市政府捷運工程局 (2012)。

圖 4-11 安坑線區間列車 1:2 營運模式下使用容量與剩餘容量關係圖

二、營運班距與發車頻率

從前述的分析可知，比較經濟可行的列車運轉模式為 1:1 的區間營運模式，在此種營運模式之下，K1 ~ K6 的營運班距為 K6 ~ K9 的兩倍，發車頻率則是減半。由於 K6 以西路段為平面 B 型路權，即使有路口優先號誌，以一般道路號誌週期 120 秒~180 秒計算，考慮上、下行列車運轉需求，每一週期內允許一列車通過路口，則最小營運班距約在 4~6 分鐘之間，若營運班距低於 4 分鐘將導致路面交通過大的衝擊。

圖 4-12 為安坑線捷運在滿足最大尖峰小時運能 6,100 人次/小時之下，營運班距、服務頻率與車載容量的關係圖，從該圖可知，如 K6 ~ K9 的營運班距為 2 分鐘，則每小時開行 30 列次，車載容量（含座立位）約為 200 乘位/列車；若營運班距增加為 10 分鐘，則每小時需開行 6 列次，車載容量需提昇至約 1,000 乘位/列車。一般而言，輕軌車輛的車載容量大約介於 100 ~ 500 乘位/列車之間，因此 K6 ~ K9 的營運班距，宜控制在 500 乘位/列車以下，亦即班距小於或等於 5 分鐘。



資料來源：臺北市政府捷運工程局 (2012)。

圖 4-12 捷運安坑線營運班距、服務頻率與車載容量

綜合前述分析，建議 K6 ~ K9 路段以 3 分鐘為設計班距，而 K1 ~ K6 則為 6 分鐘班距，車載容量需為 305 乘位/列車。至於離峰時段，由於運量很低，列車服務規劃不以滿足需求為最主要目標，而是以確保最低的服務水準為原則，故建議採用一車到底的服務，以 10 分鐘為設計班距。有關民國 130 年，捷運安坑線的列車服務計畫彙整如表 4.3。

表 4.3 捷運安坑線之列車服務計畫（民國 130 年）

營運模式	營運距離 (km)	尖峰時段		離峰時段	
		營運班距 (min)	發車頻率 (TU/h)	營運班距 (min)	發車頻率 (TU/h)
K1 ↔ K9	7.277	6	10	10	6
K6 ↔ K9	3.320	6	10	—	—

資料來源：臺北市政府捷運工程局 (2012)。

第五章 結論與建議

輕軌系統容量系列研究之範圍複雜廣泛，尤其平面 B、C 型路權之輕軌系統，因有輕軌車輛以外之人、車動線影響因素，故其容量更為複雜而不易釐清；然其各類型輕軌容量探討分析之基本要素亦如同傳統區域鐵路，主要包括：運轉條件(路線、交通、控制條件)、時間單位(小時、日、尖、離峰)、空間參考點(路段、路線、車站、折返點)及客體單位(乘客、乘位)等，而如前述輕軌系統因常佈設於平面，故其最大差異處係路線容量將隨路線所在路權型態而有不同之影響因素，相關容量之評估分析將更為繁雜。而本研究係屬後續輕軌容量系列研究之先期探討研究，為利有效釐清輕軌系統容量複雜之研究議題，本研究主要針對相關文獻回顧與日本、美國在輕軌容量理論與實務之作法進行初步探討，相關研究結論及建議茲彙整如下。

5.1 結論

1.輕軌容量之理論或實務經驗值之彙整：影響輕軌系統容量之特性因素眾多，然不外乎路線條件包括軌道數目(單股或多股)以及運轉方式(單線、複線或多線運轉)、站距長短、路權型態(依路權隔離程度分為 A、B、C 型路權)；列車條件包括列車的速​​度、方向分佈、列車服務計畫、停站方式等、列車運轉的​​行車控制條件及閉塞制度，另 B、C 型路權之平面車流對整體路線容量之干擾行為及程度更為關鍵，然前述各項因素個別影響原已複雜，若多項因素共同組合影響將使輕軌容量之估算更為複雜。以日本、美國之相關研究為例，對於輕軌容量雖已有理論原則性之探討，但於實務案例應用時，仍需就其佈設各項條件之影響進行評估，惟若能針對其理論或實務經驗值進行彙整，仍能對後續之容量評估有所助益。

2.輕軌容量關鍵影響因素釐清：

(1)依所蒐集之相關資料顯示，目前日本針對輕軌容量未見有明確之理論分析評估作法，惟其於日本國土交通省頒訂之「城市建設融

合之 LRT 引進輔導計劃」中，即有針對如何提升輕軌系統之表定營運速度、如何改善輕軌系統之引進佈設空間、如何改善輕軌系統之停站設施及配置等方面，提出其改善因應作法及容量相關改善經驗值，整體而言，其各項改善措施皆與前述各項影響因素息息相關。

- (2)至於美國之輕軌容量分析作法主要彙集於運輸學會（TRB）所出版之「大眾運輸系統容量及服務品質手冊」（Transit Capacity and Quality of Service Manual, TCQSM）其 Part 5 RAIL TRANSIT CAPACITY 相關內容中。其具體作法主要分為完全立體隔離路權（即 A 型路權）與非完全立體隔離路權（即 B、C 型路權），而有不同之分析方法，其決定之關鍵要素主要包括瓶頸路段（weakest link）之決定、混合路權型式（B 或 C 型路權）、路口號誌控制型式（有無優先號誌、相對或絕對優先號誌）、號誌化路口週期長度、列車停站時間、折返站（Turnbacks）及路線交叉點（Junctions）、街廓長度&列車長度、軌道電路佈設型式、其他因素等，考量之要素已十分複雜。
- 3.輕軌容量影響因素之容量折減程度估算：前述各項關鍵影響因素之釐清係為本研究之主要研究成果，惟其影響程度為何？實有賴進一步之分析。美國 TCQSM 雖已有輕軌容量之解析式分析公式，惟其相關參數皆為美國交通特性資料，而國內之輕軌容量估算若欲直接採用其解析公式，各項參數資料仍有待國內資料完成校估，尤其國內都會區複雜交通車流量及機車車流特性，皆應確實納入評估。至於各項因素之影響程度，將俟後續研究評估發展解析模式或模擬模式進行分析。
- 4.國內輕軌容量分析案例：臺北市政府捷運工程局辦理完成之「捷運安坑線路線規劃及沿線周邊土地整體開發計畫可行性研究」報告，已針對安坑線規劃內容進行初步之容量分析，其從軌道系統及路權型態、車輛性能、列車編組、車載容量、車輛尺寸等基本運能，到列車操控方式及輕軌專用號誌（絕對或相對優先號誌）之號誌行車控制系統進行整體分析，最後再針對列車運轉模擬及列車服務規劃進

行整體路線之容量分析。其容量分析結果，列車運轉模式建議採區間營運模式之 1:1 運轉模式；營運班距與發車頻率於 K1 ~ K6 站的營運班距為 K6 ~ K9 站的 2 倍，發車頻率則是減半，而以一般道路號誌週期 120 秒~180 秒計算，考慮上、下行列車運轉需求，每一週期內允許一列車通過路口，則最小營運班距約在 4~6 分鐘之間。至於滿足最大尖峰小時運能 6,100 人次/小時之下，建議 K6 ~ K9 站路段以 3 分鐘為設計班距，而 K1 ~ K6 站則為 6 分鐘班距，車載容量需為 305 乘位/列車。離峰時段，列車服務規劃不以滿足需求為最主要目標，而是以確保最低的服務水準為原則，故建議採用一車到底的服務，以 10 分鐘為設計班距。

5.2 建議

1.輕軌容量分析方法選定：有關軌道容量之分析方法，通常包括有解析模式、最佳化模式及模擬模式等 3 種，經參考美國 TCQSM 之軌道容量分析內容，建議後續可依輕軌推動階段特性，採用解析模式或模擬模式進行輕軌容量分析。

(1)解析模式(TCQSM)—有鑑於 TCQSM 之輕軌容量分析主要仍發展解析模式進行求解，其採用之參數資料亦無需十分精確，故建議可適用於規劃階段之容量推估。

(2)模擬模式軟體—有鑑於營運階段，各項影響輕軌容量之參數資料皆需精確，故建議發展較為精確之模擬模式軟體，納入已知軟硬體設施條件(如車隊)及影響因素之容量估算。

2.輕軌容量及整體都市交通系統容量估算：輕軌系統係整體都市交通系統之一環，故其容量之變化將與整體都市交通系統容量息息相關。以往國內都市並無輕軌系統營運案例，惟將來都市引進輕軌系統後將會對整體都市交通系統產生結構性之影響，故建議應及早掌握其二者之間之容量估算及影響關係。

(1)輕軌容量估算—建議先以 TCQSM 之解析模式進行輕軌案例試

算，並嘗試釐清各種輕軌型式之容量估算原則及容量影響因素之折減程度。

- (2) 整體交通系統容量估算—建議於有效掌握輕軌容量估算方法及原則後，以公路容量手冊(HCM)之角度，納入輕軌系統重新估算整體道路系統之容量，並建議於後續 HCM 之研究中納入辦理。

參考文獻

- 日本國土交通省網站，日本的路面電車現狀，
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/lrt/lrt_index.html
- 日本國土交通省網站(2005)，「まちづくりと一体となったLRT導入計画ガイドンス」。
- 臺北市政府捷運工程局 (2012)，「捷運安坑線路線規劃及沿線周邊土地整體開發計畫可行性研究」，臺北市政府捷運工程局委託研究。
- 交通部 (2011)，「輕軌系統建設及車輛技術標準規範」，交通部。
- 鍾志成 (2005)，軌道容量研究—臺鐵系統容量模式之建構分析 (一)，交通部運輸研究所委託研究。
- 鍾志成 (2008)，運輸系統容量分析暨應用研究—軌道系統 (2/4)，交通部運輸研究所委託研究。
- 鍾志成 (2011)，軌道系統容量與可靠度分析研究 (1/3)，交通部運輸研究所委託研究。
- Kittelson & Associates, Inc. (2003), *Transit Capacity and Quality of Service Manual 2nd Edition (TCRP Report 100)*, Transportation Research Council, U.S.A.
- Alpkokin, P. and Ergun, M. (2012), “Istanbul Metrobus: first intercontinental bus rapid transit,” *Journal of Transport Geography*, Vol. 24, pp. 58-66.
- Fernandez, R. (2010), “Modelling Public Transport Stops by Microscopic Simulation,” *Transportation Research Part C*, Vol. 18, pp. 856-868.
- Hidalgo, D. *et al.* (2013), “Methodology for calculating passenger capacity in bus rapid transit systems: Application to the TransMiolenio system in Bogotá, Colombia,” *Research in Transportation Economics*, Vol. 39, pp. 139-142.

Leiva, C. *et al.* (2010), “Design of Limited-Stop Services for an Urban Bus Corridor with Capacity Constraints,” *Transportation Research Part B*, Vol. 44, pp. 1186-1201.