

台北捷運系統隧道聯絡通道減作 之旅客逃生風險機率分析

郭耀程

摘要

聯絡通道減作會使隧道內管線佈設及旅客逃生狀況改變，本文以蒙地卡羅法進行數值模擬，藉由評估台北捷運系統聯絡通道減作前後風險機率之變化，瞭解減作對旅客逃生之影響程度，其分析程序並可於相關工程規劃時應用參考。

The layout of service utilities and passenger evacuation will be affected by the criteria of crosspassage set up. Based on the Taipei MRT original planning, this paper utilizes the Monte Carlo simulation to assess the risk of the passenger evacuation with the number of crosspassages reduction in tunnels. The procedure of the analysis for the number of crosspassages reduction can also be used for the planing of related engineering fields.

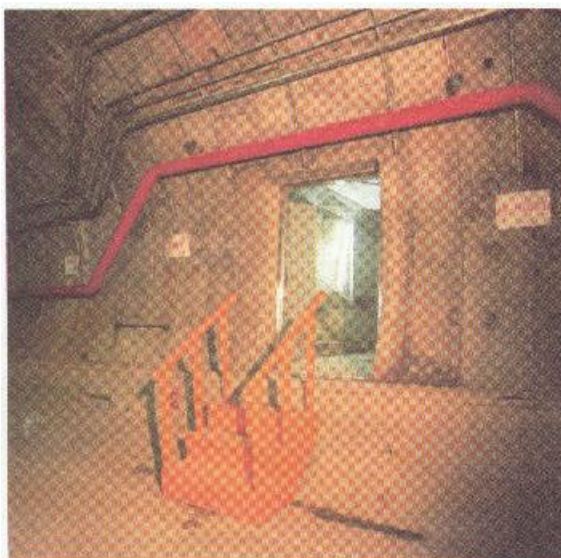
壹、緣起

台北捷運系統隧道聯絡通道設置之目的，平時除可供通訊線路及管線連繫、排水及維修外，主要尚兼具旅客緊急狀況疏散及逃生之用。因聯絡通道施工成本、工期及危險性均較一般主隧道高，所以台北捷運系統在權衡台北盆地地質條件不佳之情形下，經多方考量決定適當減少聯絡通道數量。由於聯絡通道減作會改變其原有功能，所以本文擬藉由對聯絡通道之數值模擬，分析通道減作前後風險機率之變化，以瞭解通道減作對旅客逃生之影響程度。

貳、台北捷運隧道聯絡通道現況

台北都會區大眾捷運系統初期路網中，列車行車路線規劃有高架、地面及地下段等三種型式，其中地下段總長度超過全路網總長度之半，而為使連接各地下站體間之上下行隧道能互相連通，隧道內於適當位置

多設有聯絡通道 (Crosspassage)。由於台北盆地位處西太平洋地震帶，地下水位高且地質條件不佳，聯絡通道施工因長度較短，在施工機具及成本考量下，施築須以人工開挖方式進行，所以使施工困難度及危險性倍增。



聯絡通道入口照片(CN 251 標)

根據資料顯示，台北捷運系統各線原設計共設置聯絡通道 45 處，其中有 19 處已完工，9 處尚施工中，12 處仍未施工，5 處已辦理減作（詳表一）。以板橋線及南港線西段各施工標為例，除有 5 處因施工危險性過高而辦理減作外，多處施作採壓氣工法及鋼環片替代等方式施工，使施工成本及人力增加，尤其在 13 處已施作之聯絡通道中，計有 5 處曾發生滲水事故，顯見聯絡通道施工危險性甚高(詳表二)。以工程造价而言，通道每處建造單價約介 3,080 109 萬元間，若以每公尺造價比較，明顯的大部份聯絡通道造價比潛盾主隧道每環（約 1m）造價（約 70 萬）高出甚多。

表一 台北捷運各線聯絡通道數量及狀況一覽表

線別	處數	單價(萬)	總價(萬)	已完工	施工中	尚未施工
中和	8	1,500 21,00	13,703	0	3	5
新店	9	111 2,933	9,788	6	2	1
南港	12	109 3,080	10,606	5	4	3
板橋	13(8)	412 1,482	11,245	8	0	5(0)
土城	3	728 2,194	4,000	0	0	3
小計	45(40)	109 3,080	49,324	19	9	17(12)

資料來源：台北市捷運局，調查時間至 86.11 止，()內代表減作後聯絡通道數量。

參、各國聯絡通道設置狀況及規定

各國隧道(含捷運、地鐵及高速鐵路等)聯絡通道之設置狀況，本文彙整如表三所示。美國、韓國、加拿大及新加坡等國隧道設有聯絡通道，其設置主要係依據美國國家防火協會第 130 篇 (NFPA 130 篇) 規定；日本、英國、香港及土耳其等國隧道則未設有聯絡通道，顯見聯絡通道是否設置各國看法不一，須視地質狀況、施工危險性、成本及設置目的等條件而定。

由於大部份國家聯絡通道設置之規定乃以 NFPA 130 篇為主，故本文特將其隧道內緊急出口樓梯 (Emergency exit stairway) 及聯絡通道位置之主要設置規定，列舉說明如下：

(一) 隧道內通往緊急出口樓梯之距離不得超過 381m。(NFPA 130 3-2.4.2)

(二) 聯絡通道與聯絡通道之間距不得超過 244m。(NFPA 130 3-2.4.3(a))

由上述規定知，若隧道內不規劃設置聯絡通道，則自隧道中點至兩端緊急出口樓梯之距離不得超過 381m，亦即隧道長度若大於 762m，即需規劃設置聯絡通道。

表二 南港線西段及板橋線各施工標聯絡通道一覽表

標別	長度(m)	每處造價	每米造價	滲水事故	備註
CN251	12.16	30,835,135 元	2,535,784 元	有	上行橫坑開挖滲水
CN253A	9.131	2,907,155元	318,383元	尚未施作	有集水井
CN253B	2.6	1,097,260元	422,023元	無	
CN254	9.737	13,118,671 元	1,347,301 元	有	自來水管接頭漏水導致滲水
	9.737	13,118,671 元	1,347,301 元	無	
	9.737	13,434,584 元	1,379,746 元	有	開挖滲水
CP261	7.9	9,632,419元	1,219,294 元	未施作	變更取消
	6.2	8,459,250元	1,364,395 元	無	鋼環片+壓氣工法開挖
	14.2	14,828,250 元	1,044,243 元	無	鋼環片+壓氣工法開挖
	9.303	12,650,582 元	1,359,839 元	未施作	兩端入口有高差(變更取消)
CP262	13.848	8,672,762元	626,283元	未施作	變更取消
	13.323	8,672,762元	650,962元	無	採壓氣工法輔助開挖
	13.384	8,672,762元	647,995元	未施作	變更取消
	13.384	8,672,762元	647,995元	尚未施作	採壓氣工法輔助開挖
	13.406	8,672,762元	646,931元	未施作	變更取消
CP263	7.56	4,126,786元	545,871元	無	
CP264	7.4	6,155,209元	831,785元	有	開挖滲水
	7.32	6,269,308元	856,463元	有	開挖滲水
	7.29	6,963,580元	955,224元	無	有集水井

資料來源：台北市捷運局，調查時間至 86.11 止。

目前國內對聯絡通道設置之規定，除交通部正研擬規定聯絡通道間距不得超過 400m 外，台北捷運系統因係政府斥資千億之重大交通工程，未來將成為大眾最主要的交通工具，尤其尚肩負改善都會區交通之重責大任，所以在考量旅客安全前提下接受總顧問之建議，以每隔 300m 設置 1 處聯絡通道為原則作為規劃基準。此規定雖較交通部擬採行者嚴格，惟較 NFPA 130 3-2.4.3(a)之規定寬鬆。

肆、台北捷運系統安全疏散理論

台北捷運系統隧道聯絡通道設置之目的，主要係供旅客安全疏散之用，其疏散程序分為一般與緊急狀況。

一、一般疏散程序

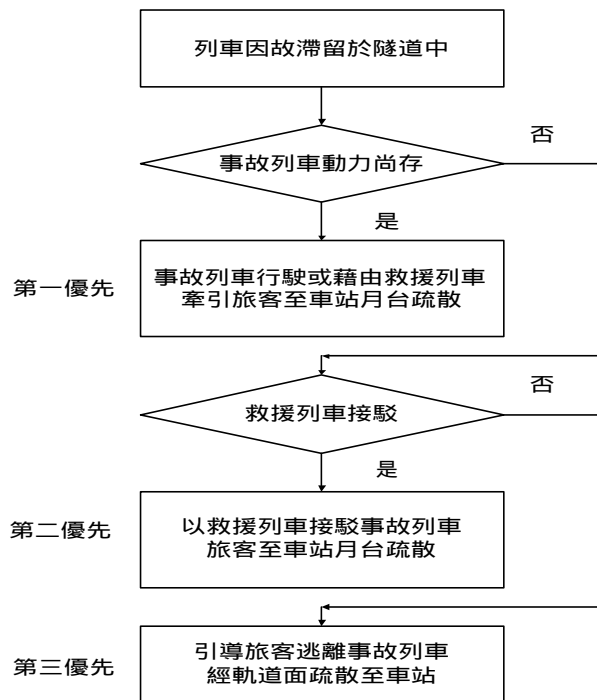
一般開放式道路（如公路、鐵路）與隧道旅客疏散方式不同，主要係隧道可用以疏散旅客之空間有限，尤其許多突發狀況發生時，疏散速度過慢將直接危及旅客安全，故逃生空間、路線及方式之事先規劃相形重要。以台北捷運系統為例，隧道內一般狀況旅客疏散優先程序如圖一所示。

表三 各國聯絡通道設置及規定一覽表

國名	工程(系統)名稱	有/無	設置規定	備註
美國	洛杉磯	有	NFPA 130	地質良好，設置間距約300。
	華盛頓	無		地質不良，具危險性，且施工成本過高。
德國	捷運系統	有	350m	地質良好，沒有施工技術問題。
加拿大	多倫多	有	NFPA 130	
新加坡	捷運系統	有	NFPA 130	1.安全逃生樓梯間距762m。 2.聯絡通道間距244m。
日本	東京都地下鐵	無		第12號線環狀及幅射部
	都營地下鐵	無		第10號線
	營團地下鐵	無		第7號線
	橫濱高速鐵道	無		第3號線
	名古屋高速鐵道	無		第3號線
	京都高速鐵道	無		東西線
	大阪高速電氣軌道	無		第7號線
英國	倫敦地鐵	無		車站間距小於1km，若設置通道其避難機能效果有限，且施工成本過高。
英、法	海峽隧道	有	1,200m	
土耳其	安卡拉	無		車站間距約500m。
瑞典	高速鐵路	有	600m	
香港	地下鐵	無		經判斷認為不必要，且已於車站作管線迴路。
埃及	開羅	無		已於車站作管線迴路。
印度	加爾各達	無		經判斷認為不必要，且已於車站作管線迴路。
韓國	漢城地下鐵	有	NFPA 130	
希臘	雅典	無		單孔雙軌隧道
中華民國	交通部	有	400m	仍研議中。
	台北大眾捷運系統	有	300m	規劃手冊規定(參考NFPA 130)

基本上，當列車發生突發狀況而必須疏散旅客時，應儘可能將列車行駛至下一車站，使旅客直接於月台上疏散，惟必要時可安排該列車逆向行駛或由支援列車協助，將旅客運送至下一車站。如果列車動力喪失，則可考慮利用救援列車接駁旅客至車站。最後於無法利用以上方法

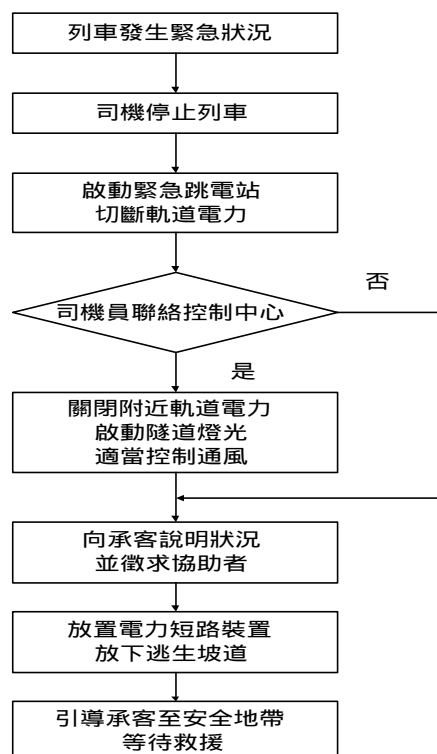
處置時，始能安排旅客由軌道面疏散。



二、緊急疏散程序

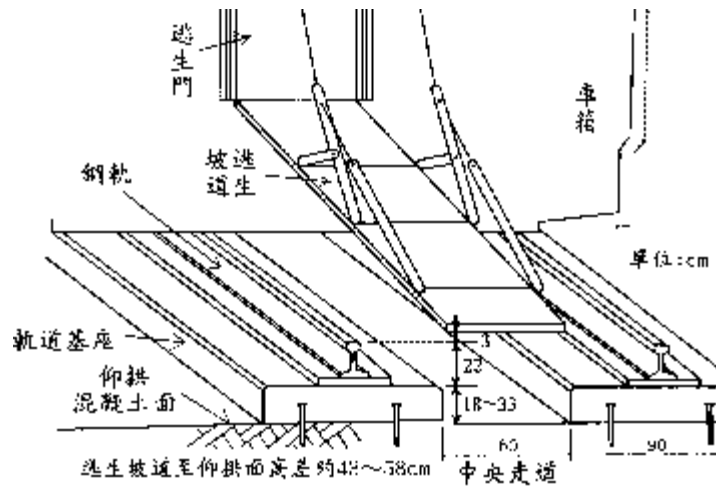
圖一 隧道中旅客疏散（一般狀況）優先處置程序

當緊急狀況發生使列車動力喪失，且救援列車因故無法抵達或旅客有立即性危險時，則必須將旅客立刻向軌道面疏散。以台北大眾捷運系統為例，當隧道內有緊急狀況（如失火、毒氣）時，列車司機員可採取緊急疏散措施以疏散車箱中旅客，其疏散程序詳圖二。



圖二 台北捷運系統緊急狀況旅客疏散程序

由於緊急狀況具迫切性，逃生（疏散）時間成為影響旅客安全主要關鍵，所以於隧道規劃及列車選購時，應儘可能考量具有縮短逃生時間之各項功能。當旅客於隧道內緊急疏散時，台北捷運系統於列車前後車箱設有緊急疏散坡道，可將旅客自車箱緊急疏散至軌道面，此設計曾以車箱進行實體模擬，結果顯示疏散成效良好，車箱緊急疏散坡道詳見圖三。本文欲進行隧道內旅客疏散之模擬，對行車事故狀況之考量，係指會直接令旅客安全受影響者，故模擬過程將遵循圖二之程序操作。



圖三 台北捷運車箱緊急疏散坡道示意圖

伍、蒙地卡羅模擬技術

對系統進行模擬時，由於資料、數學方程式（模式）及參數隱含不確定性（Uncertainty），以致採定量方法（Deterministic method）模擬與估算系統行為會產生偏差，造成系統規劃與設計之風險（Risk）。以機率方法推衍系統行為可將不確定性因素予以考量，除提高設計之可靠性（Reliability）外，更有效節省工程成本及確保施工安全性。在工程應用上，模擬系統行為之機率方法有多種，蒙地卡羅模擬法因理論簡單，參數資料需求較少，故曾被廣泛應用於各種領域。

一、基本理論

就統計觀念而言，因系統參數實為一隨機變數（Random variable），而系統行為（輸出）又受相關參數影響，所以其行為會隨機變化。蒙地卡羅法藉由

隨機產生參數樣本之方式，將隨機樣本輸入系統進行模擬，因隨機樣本之統計特性（如平均值、標準偏差及機率分佈等）係由參數資料分析而得，所以足以反應出參數之變化特性，故模擬結果可預知系統之各種隨機行為，使系統規劃與設計更具可信度。

蒙地卡羅法可藉由亂數產生器（Random number generator）產生足夠數量之亂數，並配合參數統計特性之輸入，轉換產生合理之參數隨機樣本供模擬之用。本文採用之亂數產生器係以自行撰寫電腦程式構成，其可產生介 0 1 間之均勻亂數，此亂數通常以 $U(0,1)$ （平均值為 0，標準偏差為 1）表示，亂數產生之方程式如下：

$$X_{i+1} = aX_i + c - mU_i \quad (1)$$

其中， a 為常係數， c 、 m 分別為增量及除數， n 為擬產生之亂數個數。本文於亂數產生時，先給定 X_0 初值（任意值）求得 X_1 ，再以 X_1 作為 X_i 輸入(1)式求得 X_2 （即 X_{i+1} ），重覆疊代上式便可得一系列均勻亂數 $U_i(0,1)$ 。

由於系統參數之大小有一定區間，且機率型態並非全屬均勻分佈，所以必須適當轉換以符合實際參數特性。Box and Muller 曾發表將均勻分佈亂數轉換成常態分佈隨機變數 $N(m,s)$ 之方法，其方程式如下：

$$\begin{aligned} x_1 &= m + s\sqrt{-2\ln u_1} \cos(2\pi u_2) \\ x_2 &= m + s\sqrt{-2\ln u_1} \sin(2\pi u_2) \end{aligned} \quad (2)$$

其中， u_1 及 u_2 為均勻分佈亂數（亦即前述 U_i 值）； m 及 s 為參數平均值及標準偏差，利用此二者可由(2)式求得常態分佈隨機變數 x_1 及 x_2 ，此變數即所求之參數隨機樣本，其後便可藉此進行系統模擬。

二、機率計算

若系統強度（Resistance）為 R ，系統負荷（Loading）為 L ，通常系統風險機率 P_f 可定義為「系統負荷大於系統強度之機率」，可利用(3)式表示：

$$Risk = P_f = P_r(L > R) = \frac{n_f}{n} \quad (3)$$

其中， n 為模擬次數，亦即前述隨機產生之樣本數目； n_f 為模擬結果出現系統負荷大於系統強度之次數。以本文而言，系統強度可定義為「旅客可自隧道中安全逃生時間」，其可由聯絡通道設置規定（逃生距離）、人員緊急疏散方式及逃生速度等計算得到；系統負荷則指在相同狀況下，輸入參數隨機樣本所求

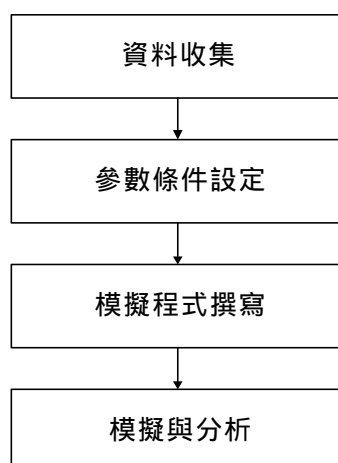
得之旅客逃生時間。由於每個參數之隨機樣本有 n 個，故模擬結果 L 共得 n 個值，此 n 個 L 值與 R 值比較，若產生 $L > R$ 之情況有 n_f 次，則利用(3)式即可求得 P_f 值。

由(3)式可知，以蒙地卡羅法計算系統風險機率，樣本數目之多寡將直接影響風險機率值。模擬次數太少，模擬結果可能無法完全反應出系統行為特性；模擬次數太多，工作效率低且耗費電腦用容量，所以適當模擬次數為本次模擬首要解決之問題。Brown et al.曾研究指出，當模擬次數超過 2,000 次時，蒙地卡羅法之模擬結果可維持一定精度，故本文產生之參數隨機樣本數目以 2,000 個為基準。

陸、模擬與分析

一、模擬流程

採用蒙地卡羅法進行系統模擬，為使模擬結果能與實際狀況契合，乃先擬定模擬架構以確立正確研究方向，建立之模擬架構詳圖四所示。本次模擬首要工作為資料收集，目的係使參數條件之設定合理化，收集之資料包括通道設置相關規定、緊急狀況處置方式、營運狀況及逃生時間等。參數條件設定乃為使模擬系統能符合實際狀況，例如列車旅客數目會隨機變化，設定適當統計值（平均值、標準偏差及分佈型態）才能正確反應實際狀況。模擬程式除依蒙地卡羅法理論撰寫外，尚須配合通道設置規定及緊急處置方式，以構成合理之模擬系統。最後，本文針對列舉之施工標聯絡通道設置狀況進行模擬，以分析聯絡通道減作前後之風險機率，了解通道減作前後對隧道內旅客逃生之影響。



圖四 隧道內聯絡通道設置模擬之流程

二、系統參數條件之設定

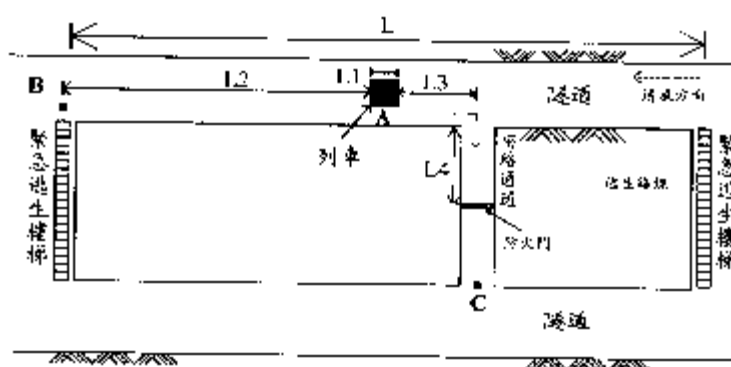
因系統參數乃控制系統行為之變數，所以對系統模擬結果之影響甚大，故參數條件之設定十分重要。本文對隧道旅客緊急逃生之模擬，設定之系統參數包括以下數項：

(一) 旅客最大所需逃生時間之推求

以旅客安全觀點而言，逃生距離越長其逃生時間亦較長，對旅客安全影響越大。根據 NFPA 130 3-2.4.2 條規定知，隧道內通往緊急出口樓梯之距離不得超過 381m，亦即在不設置聯絡通道之情況下，隧道長度最大不得超過 762m。而若再考量捷運隧道逆風逃生之原則，則扣除列車 141m 長度，旅客最大逃生距離可推得為 621m。因此，本文乃利用此數值並輸入相關參數資料，以推得推估旅客最大所需逃生時間。

(二) 列車故障地點之設定

由於缺乏相關資料顯示隧道內有那些地點較易發生列車故障，所以本文於考量列車故障地點時，假設隧道內任何地點之列車故障機率均相等，亦即設定列車發生故障之地點屬均勻分佈機率型態。圖五為隧道內旅客緊急逃生路線模擬示意圖，其中隧道及列車長度分別為 L 及 L_1 ，若列車於隧道內 A 點發生緊急狀況，因 A 點在 L 內為隨機發生，所以會影響 L_2 及 L_3 之距離，繼而影響



圖五 隧道內旅客緊急逃生路線模擬示意圖

逃生時間。

(三) 旅客逃生時間之設定

基於旅客安全考量，本文以全部旅客順利自事故地點疏散至聯絡通道防火

門或緊急逃生樓梯才算符合安全要求，所以逃生時間計算除旅客自列車內向外疏散之時間外，應再包括隧道內逃生（L2 或 L3）及到達聯絡通道防火門（L4）之時間。關於 L4 長度之決定，若依表二資料計算可得聯絡通道平均長度為 9.88m，而雖現行防火門位置係於通道兩端各設 1 座，惟實務考量認為應設 1 座於通道中央較為妥善，所以本文將 L4 長度訂為 5m 進行模擬演算。

由於對緊急狀況之旅客安全處置，台北捷運系統有向逆風處疏散之規定，所以模擬時對隧道內逃生距離之決定，乃視事故地點隧道之通風方向而定。以圖五為例，若通風方向為自 A 至 B 點，則逃生距離即為 L3+L4；若通風方向為自 B 至 A 點，則逃生距離即為 L2。至於事故地點之通風方向，因任何地點發生事故之機率相同，所以本文假設通風方向屬均勻隨機分佈。

台北捷運系統曾於民國八十年五月間對列車緊急狀況進行實體模擬，根據實體模擬結果顯示，旅客於隧道內疏散平均速度約 1m/sec，此數值可供計算旅客逃生時間參考。旅客緊急逃生速度受乘員數目、體型、年齡層分佈及現場狀況影響，故若以定值計算旅客逃生時間，其結果明顯會有誤差產生。由於實體模擬時，參與者係以步行方式疏散，此與緊急狀況旅客疏散速度顯有差異，本文為求模擬與實際狀況能相符合，假設旅客緊急逃生速度平均值為 1.5m/sec，最高及最低值分別為 2.0m/sec 與 0.5m/sec，機率型態屬常態分佈。模擬時可先由隨機產生之事故地點與通風方向決定逃生距離，其後配合隨機產生之逃生速度，即可求得隧道內旅客逃生時間。

(四) 旅客人數及疏散時間之設定

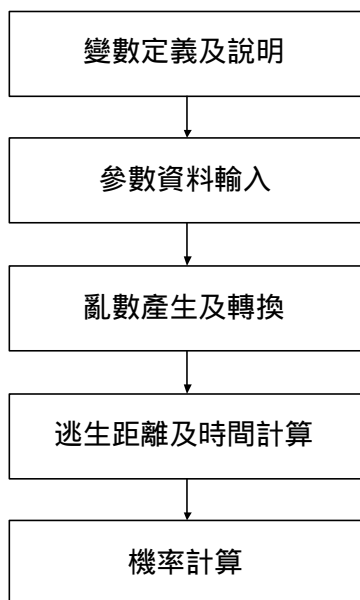
因旅客自列車內向外疏散時間與旅客人數成正比，故本文利用此一關係求算旅客自列車內向外疏散之時間。根據台北捷運高運量系統電聯車之承載量設計，每列車最高可承載 1,936 人，本文假設每列車平均承載人數為最高承載人數之 60%（約 1,200 人），且承載人數屬常態分佈機率型態，以求得每次模擬之隨機旅客人數。

關於旅客疏散時間之計算，因緊急事故發生後，旅客將配合列車控制人員之指揮，自列車前方或後方疏散坡道向軌道面逃生，故所有旅客疏散至車外所需之時間，可用列車內旅客人數除以每分鐘通過車門人數推得。當旅客通過車門時，因門寬限制會有推擠現象發生，本文假設每分鐘自疏散坡道門通過之旅客人數為 60 人，相對於隧道內旅客緊急逃生平均速度 1.5m/sec，此假設應尚

稱合理。

三、模擬與分析

模擬程式以蒙地卡羅法為理論基礎，配合台北捷運系統安全疏散理論之規定，採用 FORTRAN 程式語言撰寫，並以本文設定之參數輸入進行模擬，模擬程式之架構詳圖六。



圖六 模擬程式架構

本文首要目的在了解聯絡通道減作對旅客逃生安全之影響，在此選擇台北捷運板橋線各施工標聯絡通道資料輸入模式進行模擬，模擬結果見表四。由表四中知，聯絡通道原設計數量或適量減作後，風險機率模擬值均為 0，顯見不論聯絡通道原設計或數量適當減作後，台北捷運系統之聯絡通道規劃數量安全性甚高，行車緊急狀況之發生機率甚低。

圖七為隧道內不設置聯絡通道時之模擬結果，由該曲線可了解隧道長度與旅客逃生風險機率之變化關係。在不設置聯絡通道之隧道中，欲滿足 NFPA 130 3-2.4.2 條之規定，則隧道長度不得超過 762m，而自圖七對照隧道長度 762m 之風險機率 P_f 為 0.004，此值代表滿足 NFPA 130 篇規定之最大容許機率值。因此，本文將以其作為後續模擬比較之基準，藉以了解聯絡通道減作後之風險機率變化。

柒、結論

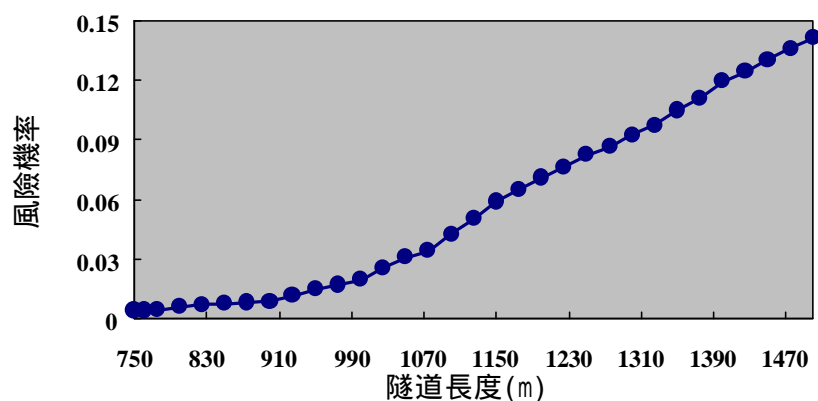
經程式模擬後，本文由聯絡通道減作前後風險機率之模擬結果知，

聯絡通道數量減作並不會對旅客逃生造成影響，顯示隧道內聯絡通道減作後規劃數量仍滿足 NFPA 第 130 篇之相關規定，所以台北捷運系統安全性設計要求甚高。

表四 台北捷運板橋線各標聯絡通道風險機率模擬結果

標別	隧道長度 (m)	風險機率		備註
		原設計數量	適量減作後	
板橋線 CP261標	991	0	0	減作1處(2)
	965	0	0	減作1處(2)
	754	0	0	減作1處(2)
	756	0	0	減作1處(2)
板橋線 CP262標	930	0	0	減作1處(2)
	943	0	0	減作1處(2)
	1065	0	0	減作2處(3)
	1067	0	0	減作2處(3)
板橋線 CP263標	597	0	0	未減作(1)
	600	0	0	未減作(1)
板橋線 CP264標	1008	0	0	未減作(3)
	1006	0	0	未減作(3)

註：以上風險機率乃相應於 NFPA 130 篇之規定，備註欄()內數字代表隧道內聯絡通道原設計設置數量。



圖七 隧道內不設置聯絡通道模擬之風險機率

本文定義之“風險機率”係指列車於隧道內發生緊急狀況後，依隧道中聯絡通道條件模擬，旅客逃生時間超過現行規定（NFPA 130 篇）時間之機率。因旅客搭乘捷運系統於隧道內發生危險之機率，應為列車於隧道內發生緊急狀況機率乘以本文風險機率，由於本文求得之風險機率已甚小，故實際危險機率將更低，所以搭乘台北捷運系統之安全性應不用置疑。

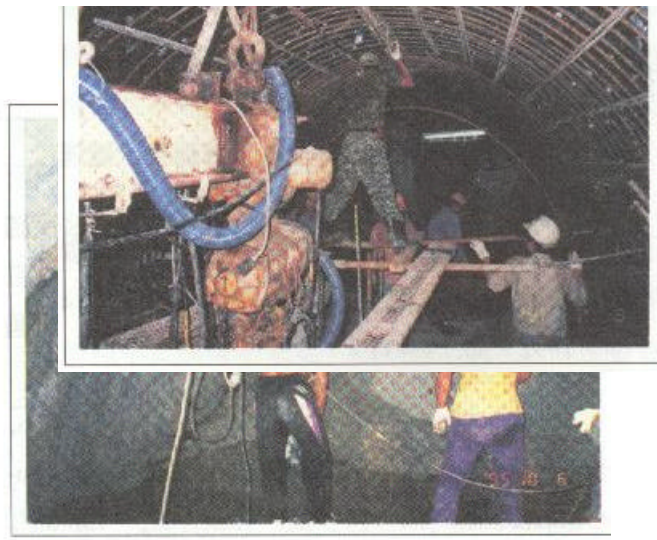
捌、參考文獻

- 1.張思，“台北捷運系統安全疏散概論”，捷運技術，第8期，民國82年2月23日。
- 2.顏本琦、徐享崑、郭振泰，“水資源風險與可靠度分析簡介”，台灣水利季刊，第40卷，第4期，1992，pp. 1-11。
- 3.林鈺，“水質模擬之不確定性分析”，碩士論文，台大土木工程研究所，民國85年6月。
- 4.Wang, Y. M., M. C. Wu, and J. T. Kuo, “Assessment and Uncertainty Analysis of Eutrophication for Te-Chi Reservoir, Taiwan”, Proceedings, IAWQ 17th Biennial International Conference, Budapest, Hungary, 1994.
- 5.Box, G. E. P., and M. E. Muller, “A Note on the Generation of Random Normal Deviates”, Annals of Mathematical Statistics, 1958, pp. 610-611.
- 6.Brown, L. C., and T. O. Barnwell, “The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual”, U. S. Environmental Agency Technical Report EPA-600/3-87/007, Athens, Georgia,



1987.

聯絡通道開挖出土照片(CP263 標)



聯絡通道施工照片(CP263 標)



聯絡通道土壤開挖施工照片(CP 261 標)



聯絡通道鋼環片支撐系統組立完成照片(CP 261 標)



聯絡通道襯砌系統施工照片(CP 261 標)

