

機場捷運地下車站月臺門風壓量測

黃仲偉^{1*} 羅元隆² 廖振遠³ 魏光譽⁴ 王鉢元⁵ 傅仲麟⁶

^{1*}中原大學土木工程系 教授

²國立臺北科技大學土木工程系 教授

³桃園市政府捷運工程局 副局長

⁴桃園市政府捷運工程局 副總工程司

⁵桃園市政府捷運工程局 副總工程司

⁶祺昌工程科技有限公司 總經理

摘要

本研究針對機場捷運 A7 體育大學站，以實場監測方式獲得捷運地下車站全罩式月臺門的實際環境風壓值。透過足夠的樣本數量，探討直達車進站之時月臺門風壓的平均值與標準差。並根據極值分析與風壓統計值的特性建立 20 年迴歸期對應的目標風壓值。相較於機場捷運初始設計的數值模擬結果，本研究結果顯示：在月臺前端，模擬值正壓高於實測推估之正壓極值，但模擬值負壓低於實測推估極值；於月臺中央，模擬值之正壓與負壓皆低於實測推估極值；在月臺尾端，模擬值之正壓低於實測推估極值，但負壓高於實測推估極值。綜觀整個月臺，數值模擬與實場量測推估的正壓與負壓極值誤差分別為 19% 與 0.2%，顯示兩者具有一致性。

關鍵字：地下車站，實場監測，極值分析，風壓

Keywords: Underground station, Field monitoring, Extreme value analysis, Wind pressure

1. 前言

當高速運行之列車進入隧道，隧道內原為靜止之空氣，會因列車之快速運動衝擊而產生高壓波。該高壓波以遠大於列車行駛速度的音速傳播，因此當列車進入隧道產生之高壓波往下游傳遞，隧道空氣立即被加速，當壓力波抵達下游隧道口時產生反射波，反射波會往隧道上游傳遞，此時傳遞之隧道空氣將再一次被加速。當列車駛離月臺，會產生一股負壓波，也會對隧道內之空氣流速產生影響。另外，隧道的構造，亦可能造成波動的改變。這些因列車在隧道內行駛產生的各種波動，會再逐漸提高空氣流速，使空氣隨著列車行進產生類似汽缸內活塞壓縮氣體的現象，便稱之為隧道內之活塞效應(piston effect) (許書銘等，2009)。

此種因活塞效應表現出來的風壓可能危及月臺上的乘客及作業人員的安全，甚至造成月臺門爆裂或導致月臺內貨物被捲入軌道，危及列車運行安全。為保證乘客及列車運營安全，設置

月臺門等保護措施有其必要性。月臺門可將乘客等待區與車行軌道區域有效隔開，防止群眾因擁擠落軌或擅闖軌道的發生，從而減低傷亡事故與提高軌道交通的營運安全性，避免因軌道系統停運而產生的經濟損失。另外，月臺門也是環控系統氣流組織必要的物理屏障，它能有效地阻隔隧道與月臺的溫度傳遞及聲音干擾。顯著降低車站空調系統的能源消耗，同時區隔列車運行之噪音，阻擋因列車行駛的揚塵。

然而，列車活塞效應對於地下車站造成的風壓大小為何，迄今仍是個複雜的問題。國內、外設計規範對於地下車站的設計風壓(黃國倫，2006)，並無明確一致的規定。推估原因在於列車風壓與列車的營運速度、車型、長度和隧道尺寸、形狀都有關聯，因此難有通用的規範。國外曾針對此一課題，擬定壓力之安全及舒適度標準。對於無月臺門之車站，活塞效應產生的氣流及壓力，不應使月臺上候車旅客產生不適感；而對於有月臺門之車站，人員感受程度則與列車行進速度以及月臺門的密封性有關。

近年來，國內、外學者對月臺門的風壓特性進行了不少研究，主要可分為數值模擬和實驗研究兩類的方法。然而無論是採用何種方式，皆需要現地實驗的數據來校正風壓估算所需的參數。本文即是以桃園機場捷運 A7 體育大學站為實際風壓量測場域，進行捷運列車通過引致之風壓實測，俾利獲得風壓的大小及分佈規律。再進一步根據實際量測數據建立以超越機率為基準的風壓推估公式，並以實測結果推估的風壓極值比對 A7 站當初設計時 CFD 數值模擬所得之風壓極值，驗證本研究所推估之風壓極值的正確性，文末討論現行捷運月臺門與相關土建風壓設計值之合理性。

2. 現地量測

本研究以桃園機場捷運 A7 體育大學站作為實際風壓量測場域，該站月臺屬於側式月臺。側式月臺是指軌道在中央，而月臺就在左右兩側的設計。其中車站月台區設有月臺門，月臺門側軌道區其斷面尺寸為 6.2 m(高) × 3.9 m(寬)；明挖覆蓋隧道區(非月台區)之斷面尺寸為 4.8 m(高) × 4.9 m(寬)。實測時間為機場捷運一日運行時間，亦即自上午 06:00 首班車開始至隔日上午 01:00 收車結束。

風壓量測儀器主要由壓力量測、無線傳輸、資料擷取和 DVC 電壓表等功能部件所構成，其中壓力量測構件包含了：Validyne 壓差計、自製壓力貼片與聚氨酯管；無線傳輸構件包含了：Arduino 控制板(Arduino UNO R4 WiFi)與無線傳輸(4G LTE Shield)模組；資料擷取構件包含了：Arduino 控制板(Arduino UNO WiFi REV2)與 SD card Shield 含 RTC 模組。各功能部件的組成與相關實體照片如圖 2 所示。為方便現地安裝與施作，本團隊客製化開發機箱以容納各功能部件，並區分為 1 台主機箱和 4 台子機箱。每台子機箱內含 3 台壓差計，1 個電壓表，1 個發訊用 Arduino WiFi 主板，1 個 SD & RTC 擴充模組，1 張 2 GB SD 卡，主機箱除上述部件外，另加 1 個收訊用 Arduino WiFi 主板，及 4G 傳輸擴充模組，1 張 4G SIM 卡。

風壓量測點位分佈於捷運站第一月臺不同位置之玻璃帷幕，如圖 1 中紅點所示。整個月臺計有 12 片月臺門，分為固定門、滑動門和緊急應變門。本研究在整個月臺範圍內等間距佈置四個量測點位，編號為 B、C、D、E。分別位於列車進站(1-1 號月臺門左側固定式玻璃帷幕，亦即月臺起點)、2-2 號月臺門右側固定式玻璃帷幕、3-2 號月臺門左側固定式玻璃帷幕，和列車離

站(4-3 號月臺門右側固定式玻璃帷幕，亦即月臺終點)位置。此外，測點 A 則位於月臺通往維修通道(區間隧道)之端牆門處。測點 A 與測點 B 因位於列車進站最早接觸月臺之處，對列車而言也是隧道剖面面積驟減之處，理論上會在列車進站時產生最大正壓；測點 E 為列車離站，對列車而言也是隧道剖面面積驟增之處，理論上在列車離站時會產生最大負壓；而測點 C 與測點 D 則是典型月臺上的量測位置。

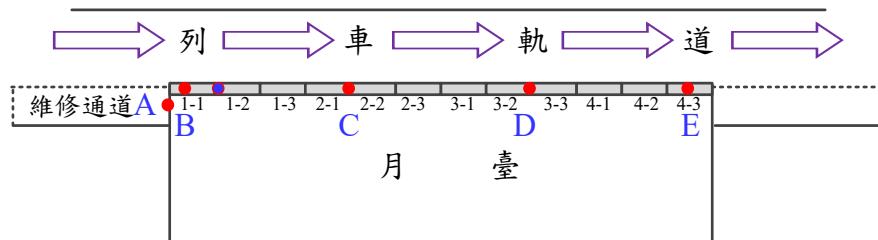


圖 1 捷運月臺風壓量測點位示意圖

現地量測風壓時會在每個測點安置一個機箱，為避免影響乘客行進動線與維持月臺淨空，測點 A、B、C、D 機箱安置於月臺門上方蓋板之內，測點 A、B、E 機箱放置於月臺端牆門附近空櫃之內。每個機箱連接三個壓力貼片，施工時將壓力貼片安裝於月臺門玻璃帷幕外側(軌道區)，壓力貼片透過聚氨酯管將風壓傳至機箱內的壓差計，再將風壓訊號轉為電壓訊號輸出，最後透過無線傳輸模組將各組資料傳到電腦之中，再透過校正曲線將電壓訊號轉回實際的風壓值。每個測點的壓力貼片安裝於離月臺地面的垂直距離約為 0.5 m、1.0 m 與 1.8 m 處之月臺門玻璃帷幕，五個測點總計安裝 15 個壓力貼片。值得一提的是：測點 D 中央(距月臺地面 1.0 m 處)的壓力貼片是貼在月臺門玻璃帷幕內側(候車區)，用以量測月臺靜壓。

3. 分析方法

本研究以甘保法探討極值氣動力參數，甘保分布(Gumbel distribution)經常被用來擬合極值風壓係數分布趨勢，甘保曲線可以下式表現：

$$F_{X_{pk}}(x; t) = \text{Exp} \left\{ -\text{Exp} \left[-\alpha_t (x - U_t) \right] \right\} \quad (1)$$

上式中 α_t 及 U_t 為甘保曲線的兩項參數，由觀察到的極值序列經擬合後決定； x 為風壓係數值； t 為觀察單一極值所對應到的時間區段長度。利用數種參數識別方法(例如 BLUE、Maximum Likelihood Method、Method of moments、Least-square fit method 等)，擬合 N 個觀察值後決定 α_t 及 U_t 。此方法需要足夠的觀察值(總時間區段長度為 $t_{total} = N \times t$)，且所決定之累積機率分布函數(CDF)對應時間區段長度為 t 。舉例來說，若以實場尺度十分鐘($t = 10$)為時間區段的累積機率分布函數為對象，欲計算對應超越機率(probability of exceedance，簡記為 POE)為 20% 的極值風壓係數(此處的 20% 僅為說明用，實際超越機率應視研究對象做進一步討論方決定)，其步驟為：

- (1) 將風壓實場量測的總時間長度(t_{total})分鐘區分為 N 個十分鐘區段，觀察此 N 個時間區段的最大值。

- (2) 並利用此 N 個極值作為擬合甘保曲線兩參數的資料點。
- (3) 對應此擬合曲線的超越機率 20%處，即為所欲了解的極值風壓。

若設計風載重以平均一小時設計風力為主(與我國建築物耐風設計規範相同)，則需要進行作用時間的轉換(Durst Curve 轉換)。Cook 和 Mayne(1980)提出針對擬合甘保曲線兩參數時，不同時間區段長度的轉換關係式，如此一來，少數的觀察資料即可以代表較長時間區段的極值觀察。如下式所示，若有兩不同時間區段長度 t 和 T ，且 $t < T$ ，則轉換式可寫為：

$$\alpha_T = \alpha_t \quad (2)$$

$$U_T = U_t + \frac{1}{\alpha_t} \ln\left(\frac{T}{t}\right) \quad (3)$$

本研究在甘保法的建立上，將以甘保曲線及韋伯曲線作為擬合對象，並以資料庫中多筆時間區段驗證方程式(2)及(3)的可行性。

4. 實驗結果

我們可在直達車進站、離站時觀察到風壓歷時曲線上明顯的峰值。故本研究取壓力最高點到最低點的中點作為基準，往前取 5000 筆資料，往後取 7000 筆資料，共 12000 筆資料(因擷取頻率為 100 Hz，故歷時為兩分鐘)來定義單次紀錄事件的長度。原因在於當風壓從平時穩態的風壓衝上最大正壓與最大負壓回覆至平時穩態的風壓之時間相比較下，最大負壓回覆至平時穩態的風壓之時間較長，故前後的截取長度不一。基本分析內容針對每一個列車進站的「事件」，以風壓歷時圖、風壓頻譜圖、機率密度函數圖、累積機率密度函數分佈圖，共四種來表示每段數據的特性。風壓歷時圖可清楚呈現列車通過的風壓瞬間反應，比較風壓瞬間升高、降低的趨勢與平常無車輛通過的風壓即可看出差異。風壓頻譜圖則需先計算風壓歷時的自相關函數，再透過快速傅立葉轉換(FFT)轉成頻譜內涵，如此一來可視為將時間平均化，單純觀看每段記錄的頻率能量變化，也可以了解到量測中是否有觀察到結構反應頻率或噪音頻率。另外，機率密度函數以及累積機率密度函數則是顯示出每段數據是否為常態分佈，或其他特別的機率分佈型態，有利於後續進行極值分析模擬使用。

圖 2 為典型直達車在測點 A 所對應之風壓歷時圖、風壓頻譜圖、機率密度函數圖與累積機率密度圖。值得注意的是圖 2 的累積機率密度圖為單一次紀錄事件的母分佈累積機率密度，並非式(1)的極值分佈曲線，而一般極值分佈曲線多以極值樣本的累積機率密度分佈來繪製。在繪製極值分佈曲線時，首先需要從每一次紀錄事件的風壓歷時中，提取出最大值(或最小值)，當累積了多組紀錄事件的極值樣本後，就可以採用方程式(1)來迴歸其趨勢，並採用回歸期概念來抓取適合表示年破壞機率的設計值。

從風壓歷時圖中可發現：直達車的風壓歷時曲線可以觀察到明顯的峰值，且在同一測點不同高程中，以月臺門玻璃帷幕正中央(距月臺地面 1.0 m 處)具有最大風壓。其次，從風壓頻譜圖中可發現：普通車進站引致的風壓，其頻率內涵主要集中在 1 Hz 之內。換言之，若某風壓歷時主要的頻率內涵都超過 1 Hz，代表該風壓歷時可能包含較多的雜訊。再者，不同風壓歷時的機

率密度函數分佈圖主要都為鐘形曲線。若鐘形曲線偏右，代表該風壓歷時含有較大範圍的負壓(此處係將壓力方向從月臺往軌道方向施加視為負壓，反之為正壓)；若鐘形曲線偏左，代表該風壓歷時含有較大範圍的正壓。

此外，位於測點A月台門上方的分佈出現雙峰形狀且其鐘形偏向右，故可歸內為非高斯分佈且負壓絕對值大於正壓絕對值的趨勢。測點A月台門越往下方(越接近地面)，則非高斯現象逐漸減少且越接近高斯左右對稱的趨勢。至於風壓歷時是正壓或負壓控制，可進一步從累積機率密度分佈圖中 50 % 累積機率密度所對應的風壓來判斷。最後，若鐘形曲線相當細長，趨向於脈衝曲線，代表風壓大小均於定值(平均值)；若鐘形曲線橫向涵蓋廣泛，顯示風壓振幅變化激烈，在該歷時曲線中包含不同大小的風壓。從圖 2 可以看出：測點 A 在機率密度函數分佈圖的鐘形曲線偏右，符合吾人對測點 A 產生最大正壓的預期。

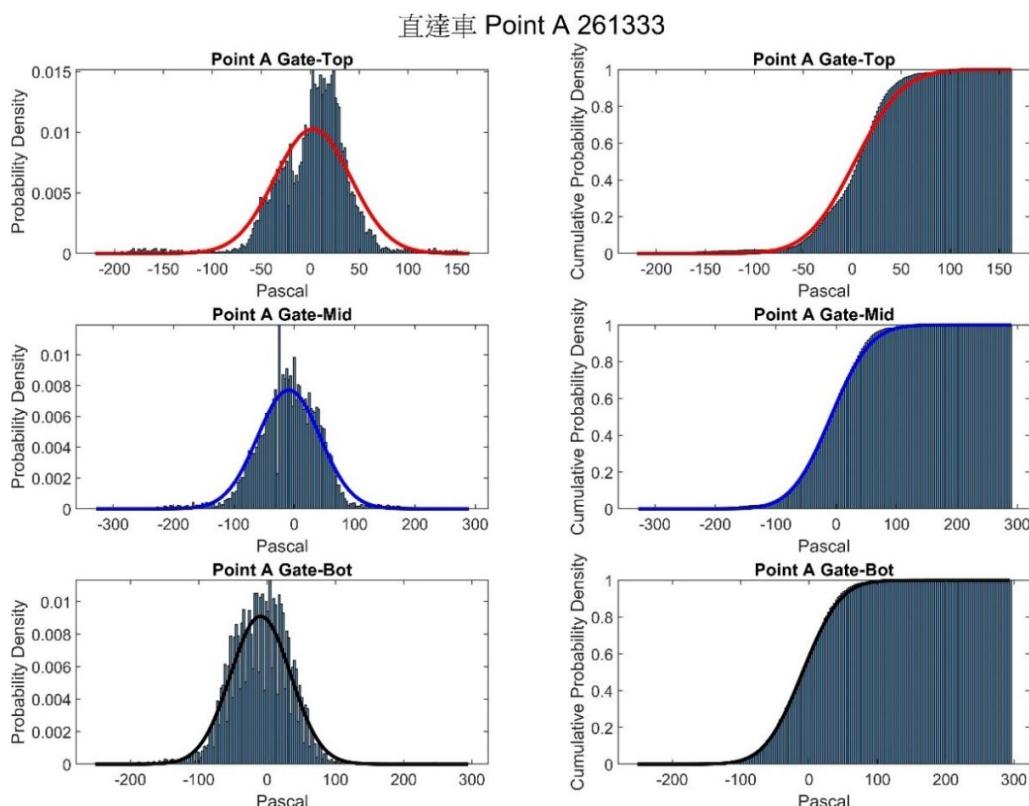


圖 2 測點 A 典型直達車通過之風壓歷時圖、頻譜圖、振幅機率密度圖與累積機率密度分佈圖

5. 討論

本研究在擷取每個事件的極值(最大值、最小值)時，將每個事件數據以 200 組組距方式，繪製機率密度分佈以及累積機率密度分佈，因此可以說每組的機率分佈代表著 0.5% 的機率範圍。每個事件分別採用這 200 組組距對應累積機率密度為 0.5% 與 99.5% 者為該事件最大值與最小值，代表約莫為實場 0.1 秒至 0.2 秒平均時間陣風。在進行極值分析時，必須先定義目標結構的破壞機率。本文認為第一類結構物用來描述月臺門的破壞機率最適合，其使用年限期間內所規定的破壞機率是 0.2。由於月臺門的使用年限為 20 年，因此可以估算月臺門的年破壞機率為 1/90。決定年破壞機率後，即可利用前述的方法進行極值分析。此外，在極值分析評估過程中，

以隧道側風壓減去月臺側風壓的作法，比較能顯示出真正作用於月臺門的淨壓力大小；惟受限於實場量測時的儀器數量，研究團隊僅用一個風壓試片的數據代表整體月臺側的壓力變化，可能造成小程度的誤差。

表 1 為根據風壓試片歷時紀錄進行極值分析後所得的極值目標風壓，其中量測點位 1、2 與 3 分別代表「月臺門玻璃帷幕上方」、「月臺門玻璃帷幕中央」與「月臺門玻璃帷幕下方」。從表 1 中可發現：直達車的「極值目標風壓」的正壓為 420.47 Pa，發生在測點 A 的月臺門玻璃帷幕中央(A-2)；「極值目標風壓」的負壓為-422.74 Pa，同樣發生在測點 A 的月臺門玻璃帷幕中央(A-2)。列車進站時，各測點上、中、下方三處的壓力不盡相同。位於下方的壓力點受到接近軌道複雜的地形及電線等設備影響甚巨，故壓力相互平衡下，最接近高斯分佈(中央極限理論)。位於上方的壓力點因為最接近列車上方所預留的空間，導致空氣受到擠壓後可流動至上方空間因而釋放了壓力點的極值，形成明顯的高斯分佈。位於中間的壓力點所受到的空氣擠壓最為單純，故此其極值評估的結果最大。

表1 極值分析所得之極值目標風壓(單位：Pa)

量測點位	極值目標風壓(正壓)	極值目標風壓(負壓)
A-1	204.25	-250.76
A-2	420.47	-422.74
A-3	410.18	-322.04

6. 結論

本研究主要針對機場捷運 A7 體育大學站，在直達車通過時月臺門的風壓進行了實地量測。透過實地量測的風壓數據可利用極值分析方法，在想定目標結構的破壞機率下推估風壓極值。本研究假設月臺門在使用年限(20 年)內的破壞機率是 20%，將極值分析法所推估之極值風壓與 CFD 數值模擬的結果進行比較，發現：就整個月臺而言，實場量測所推估的極值風壓與數值模擬所得之風壓極值，在正壓與負壓極值分別誤差 19% 與 0.2%，呼應本研究現地量測和文中提出極值分析法具相當的正確性。

7. 參考文獻

- [1] 許書銘、陳建華、丁俊智，列車活塞效應對於地下車站的設計風壓評估，*中興工程*，2009，103 卷，35-41。
- [2] 黃國倫，長隧道內列車過站不停對壓力及通風影響之探討，*中興工程*，2006，92 卷，21-30。
- [3] Cook, N. J., Mayne, J. R., “A refined working approach to the assessment of wind loads for equivalent static design,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, 1980, 6(1-2), 125-137.