

高雄捷運路網之脆弱度分析

Vulnerability Analysis of Kaohsiung MRT Network

劉瀚聰 Han-Tsung Liou¹

張顥瀚 Hao-Han Chang²

黃聖峻 Sheng-Jun Huang²

黃朋奕 Peng-Yi Huang²

吳東頤 Tung-Yi Wu²

周柏凱 Bo-Jai Chou²

摘要

隨著 2024 年高雄輕軌全面通車，高雄捷運路網日趨完善，日均運量已突破 21 萬人次。然而，隨運量的快速提升，在缺乏站體結構改變的前提下，容易降低捷運系統的適應韌性。近年國內頻發生大眾運輸隨機攻擊事件，暴露出各捷運轉乘站可能面臨突發干擾時的停擺風險。有鑑於過往對高雄捷運路網脆弱度的系統性研究較少，未來捷運站體擴增，捷運路網漸進複雜，故本研究旨在探討高雄捷運面臨突發事件時的敏感性與潛在衝擊，並納入周邊警消與醫療系統的應變能力，期能作為未來營運改善、資源配置及災害預防的基準參考。本研究採拓樸法與系統法互補之觀點，建立四大核心指標以進行路網脆弱度量化評估，其指標分為別 (1)節點脆弱度指標:以旅運人次為暴露度，結合站點連結數，評估節點分散人流的適應能力、(2)救災韌性評估指標:衡量捷運車站外部救援之應變強度(周邊警局、消防局、急診醫院)、(3)介中性指標:特定站點的被通過機率與(4)通勤流量中心性:評估單一節點失效時，每小時受影響的總通勤人數。初步量化指標結果明確指出，「高交通流量」與「高防災脆弱度」存在顯著正相關特性。本研究初步發現現有高雄捷運十字型路網過度依賴單一特定轉運樞紐站，如:左營站與巨蛋站。類似高運量捷運站點在面臨突發危機時，可能存在顯著的應變/救災資源不足。應優先針對高脆弱度捷運站點進行空間性資源補強，增強站體內部的自救能力以彌補外部救災空窗。同時，透過節點脆弱度指標與通勤流量中心性，可精準定義各捷運站點在特定時段的脆弱度概況，相關結果可供實務單位針對捷運路網系統補強之參考。

關鍵詞：捷運、脆弱度、拓樸法、救災韌性。

¹國立高雄科技大學土木工程系助理教授，高雄市三民區建工路415號，07-3814526分機15232，htliou@nkust.edu.tw。

²國立高雄科技大學土木工程系學生。

一、研究動機與目的

自高雄輕軌 2024 年 1 月 1 日全面通車後，高雄捷運路網的結構變得較以往因便捷且完善，同時帶動經濟和觀光之發展。並於 2024 年的日均運量中突破了二十一萬人次，此數據顯示了路網的發展和運量的提升有著密切關係。然而，在運量提升的同時，也間接挾帶著安全隱憂與疑慮。當乘客旅次密集性增加，而站體結構固定不變時，其捷運系統適應韌性也將隨之降低，使得系統易無法應對可能面臨的緊急或臨時狀況。基於此前提，路網的脆弱度分析和探討顯得不容忽視。2014 年「鄭捷隨機殺人案」，引發社會譁然，相關的事件於 2024 年的「中捷洪淨殺人案」、2025 年台北車站和中山商圈發生的隨機攻擊事件(如圖 1 所示)，皆造成了無可挽回的傷害。上述隨機攻擊事件通常難以預防且常以主要車站和重要轉運樞紐為下手目標，易造成整體系統的停擺和癱瘓。因此在應對類似事件時，乘客的安全意識抬頭和整體系統的疏散措施完善程度、站體可容納之最大運量和人口密度皆應列入安全性考量。根據 Cutter (1996) 所述，脆弱度是指個人或群體因暴露於危險受到不利影響的可能性。以捷運系統的層面來看，突發的狀況和意外皆可能使整體系統停擺，包括基礎設施老化、技術故障、恐怖襲擊和極端天氣事件等。通過辨別和評估這些潛在危險因素，從而確保在面對各種衝擊時仍能維持運作並提供關鍵服務(Nicholson and Du, 1994)。雖然高雄捷運路網結構較台北捷運單純，目前僅由紅線、橘線和環狀輕軌組成。但由於輕軌近年才完工，且過往的研究顯少著墨在高雄捷運路網之脆弱度分析。因此本研究將嘗試透過各站點的運量分析和探討緊急救災時的應變強度，評估各個捷運系統的脆弱度。進而使相關單位擬定改善方案時有相關依據作參考和核定。



資料來源: BBC news。

圖 1. 北捷車站隨機攻擊事件

在本研究中，將利用各種評估指標來衡量高雄捷運各個站點的脆弱度，進而辨識出對整體路網影響性較大的關鍵節點。之後再依照其脆弱程度的不同來分析當該站點遭受突發事件時，對捷運系統或乘客通行所造成的衝擊。藉由探討站點失能時所造成的影響，可以作為對營運改善或未來發生突發事件的重要參考依據。因應高雄捷運目前並無較完善的脆弱度調查，故藉由文獻回顧找出符合此研究的脆弱度定義，再訂定可行的脆弱度指標，來進一步分析出各站的脆弱度。同時，本研究將捷運站點附近的警消與醫療系統也納入考量，藉此衡量各站點在災害發生時的應變、救援量與恢復能力。此研究不僅補足了現有的數據缺失，更提供精確的脆弱度熱點分析，同時也能作為後續災害配套措施與資源配置的考量。鑑於高雄捷運黃線目前已陸續動工，於未來通車後其運量和轉運站數量將都會有顯著增加。就目前高雄市政府捷運工程局的轉乘規劃來看，紅線三多商圈、橘線衛武營、紅線前鎮高中、橘線信義國小將成轉運站點。於此前提下，本研究著重分析目前各站的脆弱度及運量，方能在未來黃線完工時讓關鍵轉運站點有個基準參考，以達到預防之目的。

二、文獻回顧

2.1 脆弱度之定義

關於脆弱度，目前尚未有一個普遍公認的定義，且因各領域和專家對脆弱度之定義不盡相同。Blaikie et al. (2014)將風險(R)定義為危害(H)與脆弱度(V)的乘積。而後 Wisner et al. (2012)將上述公式修改為「災害風險(DR)=危害(H)×脆弱度(V)」，強調研究面向應專注於災害風險，並填補過去多以物理觀點出發或相關政策討論的研究缺口。此定義與公式至今於工程、防災等多個領域中被廣泛運用。危害和脆弱度是環環相扣，當事件發生時，脆弱度之大小也會影響到風險的高低，故脆弱度之評估與分析是預防災害風險之有效辦法。Cutter (1996)將脆弱度定義為指個人或群體因暴露於危險受到不利影響的可能性，它涉及地點的危險(風險與緩解措施)與社區之間的社會概況。脆弱度不僅攸關於災害，且與社會和空間有著交互的影響，故提升社區的調適與減緩災害的能力才重要。Pijawka et al. (1985)將其定義為危險物質對特定人口的威脅(風險)的程度以及社區減少危險物質釋放風險或不利後果的能力。由上述可知，關於脆弱度的定義有許多種解釋，然而，其中 Berdica (2002)所提出的定義較常被引用，且具備代表性：「道路運輸系統的脆弱度，是指對於那些能導致道路路網服務能力顯著降低的事件之敏感性」。該定義強調了三個因素：(1)存在一個初始的干擾事件、(2)運輸系統的基本功能(運輸服務能力)受損與(3)其造成的不利後果是顯著的。脆弱度為一種負面指標，當脆弱度較高時，系統對於干擾事件的抵抗力就會降低，發生災害時可能會導致嚴重的後果。

2.2 路網之脆弱度分析

Mattsson and Jenelius (2015)由運輸脆弱度研究文獻中，歸納出了兩個截然不同的分析方法：(1)拓樸理論的脆弱度分析與(2)以系統為導向的脆弱度分析。兩者理論之間可以互補，以不同的角度來分析路網的脆弱度。

Latora and Marchiori (2001)使用拓樸法的概念計算了波士頓地鐵路網的全域與局部效率指標。對於波士頓地鐵路網(以車站為節點，車站間的連接為路段，距離

等於歐幾里得距離)，其全域效率非常高(0.63)，但局部效率卻相當低(0.03)。之後 Latora and Marchiori (2005)又使用效率指標 $E(G)$ 來評估路網中單一組件的重要性，發現移除波士頓地鐵路網中最重要的路段，將會使效率降低 27.5%。

Rodríguez-Núñez and García-Palomares (2014)則使用系統方式特徵化地鐵系統中路段的重要性。假設路段旅行時起訖點(Origin-Destination, O-D)旅運需求矩陣為已知，且旅客會選擇網絡中最快的路徑到達目的地。應用於馬德里地鐵系統的研究顯示，若封閉將網絡分隔成兩交通區域之最重要路段，將導致正常週間日內有 116,000 個旅次(佔總需求 4.7%)無法滿足。若封閉最重要的非切割路段(即路網未斷開)，總旅行時間將增加 7.2%。

黃傳楷 and 王聖鐸 (2017)以 3 個面向，暴露度、敏感度、調適能力作為影響脆弱度指標。同時也使用了 Newman and Girvan (2004)提出的路網分群方法，發現捷運站點位置安排容易造成市中心的轉乘站負荷過重。並以捷運站旅運人次數據為外部暴露度指標，再利用介中性計算捷運站敏感度，最後統計捷運站周邊公車與公共自行車架數量作為該站失能時之調適能力。推估捷運系統於營運時間內小時尺度之脆弱度影響人數，以影響人數呈現脆弱度數值。分析結果發現就時間維度而言，捷運系統最為脆弱的時間為傍晚 17-19 點，人潮從市中心少數站點大量湧入站點；以路線而言，最為脆弱的路線為板南線(藍線)，有 9 個高脆弱度的站點。

過去台灣也有使用脆弱度來分析路網的案例，謝承憲 et al. (2015)分別計算了台灣西部的節點脆弱度、路段脆弱度跟區域脆弱度，用以衡量台灣西部整體運輸路網的脆弱度。研究發現商業發展的區域會因人口聚集而旅次需求較多，正向影響了車流量。這展示了運輸路網的脆弱度與許多因素相關聯，若想提升台灣預防災害的能力，需掌握台灣各地的產業發展方向。脆弱度除了能做為單一指標使用，同時也能與其他指標合併使用。張瓊文 et al. (2016)利用脆弱度與危害度製作風險矩陣進行風險等級劃分，之後在分析資料繪製了風險地圖，來找出哪些地區在未來容易因為氣候變遷造成的極端降雨導致淹水風險增加並提供給鐵公路主管機關參考。

由過去文獻可知，脆弱度並不是只有單一的定義，而是會隨著不同的領域和目的會有所差異，不同脆弱度所涵蓋的危害與調適能力皆不同。整體而言，脆弱度是一種可以反映出系統在面對干擾時所承受的衝擊和恢復能力的綜合性指標，也是評估與降低災害風險的重要基礎。

三、研究方法

3.1 節點脆弱度指標

本研究參考了謝承憲 et al. (2015)「節點脆弱度」(公式 1)作為分析站點分散旅運需求能力的指標。此指標以該站點的旅運人次作為暴露度，並考量該站與鄰近前後站點的連結程度，用以表示該站點將旅運人次擴散到鄰接站點的能力。若節點脆弱度較高，代表站點分散旅運需求的能力較差，災害發生時可能造成人流難以疏散而導致嚴重的生命財產損失。因此，節點脆弱度可作為站點防災時的重要依據，可依此加強防護措施，使危害降到最低。

$$V_m = \frac{E_m}{\sum_n a_{mn}} \quad \text{公式(1)}$$

V_m ：站點 m 的脆弱度；

E_m ：站點 m 的暴露度，年運次數(人次)；

$$a_{mn} = \begin{cases} 1, & \text{站點}m\text{與站點}n\text{可連結} \\ 0, & \text{站點}m\text{與站點}n\text{無連結} \end{cases}。$$

3.2 救災韌性評估指標

救災韌性指標是在反映各捷運站如果發生突發意外事件，捷運車站周圍警消以及急診醫院可以提供車站救災支援的因應能力。本研究利用警消醫療中心與車站最短行駛距離，去劃分出五個等級，衡量警消系統能抵消多少車站本身的脆弱性。

3.3 介中性指標

透過分析捷運車站路網 A 車站要到達 B 車之最短路徑，經過站點 i 的機率，藉以評估各車站的介中性(公式 2)。並依所計算數據進行等級的劃分，檢視在每個等級中，哪些車站脆弱度是相對較高，並進行分析找出整體捷運路網中核心樞紐車站。

$$B_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \frac{m_{ijk}}{m_{jk}} \quad \text{公式(2)}$$

B_i ：站點 i 的介中性；

m_{ijk} ：站點 j 與站點 k 透過站點 i 中介的最短路徑數；

m_{jk} ：站點 j 與站點 k 間最短路徑數。

3.4 通勤流量中心性

本研究參考 Cheng et al. (2015)提出的「通勤流量中心性」(公式3)作為衡量交通網絡節點重要性的指標。其指標納入流量數據做為基礎，並假設該站點失能後，評估所造成的影響。其核心邏輯在於：一個節點的價值，應等同於當該站點失效(Failure)時，每小時受影響的總通勤人數，主要用於評估交通網絡中某個站點(如捷運站或轉運站)發生故障時對通勤者的影響。

$$C_f(i) = \sum_{j \in V'} h_{ij} + \sum_{j \in V'} h_{ji} + \sum_{j \in V', j \neq i, j \neq k} h_{jk}(i) \quad \text{公式(2)}$$

$C_f(i)$: 站點*i*的中心性;

h_{ij} : 每小時從站點*i*前往站點*j*的通勤人數;

$h_{jk}(i)$: 每小時從站點*j*前往站點*k*且經由站點*i*的通勤人數。

當站點 *i* 發生失效時，每小時受影響的通勤人數。可分為三類：

- (1) 從站點 *i* 出發前往其他站點的通勤者;
- (2) 從其他站點前往站點 *i* 的通勤者;
- (3) 經過站點 *i* 的通勤者。

四、分析結果

4.1 節點脆弱度指標

本研究著重於捷運路網節點的脆弱度分析，其選用高雄捷運南北向紅線及東西向橘線，並計算節點脆弱度。旅運人次數據則選用2025年1月到12月之區間，分析結果如表2所示。在計算連結數(對應之車站)部分，小港站、岡山車站、西子灣站及大寮站四個車站，位置都於路網的末端，故連結數設定為一。若連結數為一，並無法有效分散人群(即脆弱度密集)，故在計算節點脆弱度時，旅運人次與其脆弱度高低有著直接關聯。整體結果，捷運路網中美麗島站的連結數是最高的，由於此站位於兩條線路之轉乘點，故有四個連結點。而美麗島站屬轉運站，其旅運人次較多，因連結數多，故能有效分散人群。因此即使人流較高，脆弱度仍呈現較低之數值。其它結數為二的車站，都是連結前後的車站。左營站及高雄車站因為是交通樞紐處，連接高鐵站及火車站，人流龐大，旅運人次較高進而導致脆弱度值較高；巨蛋站及三多商圈因周邊是百貨公司的聚集處，會有許多人來往，因此脆弱度很高；橋頭糖廠站則因為位置較為偏僻，離住宅區較遠，旅運人次較少，故其節點脆弱度較低。

綜上所述，美麗島站雖為中樞轉運站點，連結紅線與橘線，但因其連結數較多，能有效消化人群，故總體呈現較低的數值(節點脆弱度:0.186)。而左營站於整體站點的脆弱度呈現最高的數值，可得知其站點負荷量過高，於尖峰時段發生危難時並無法有效消化人流。且捷運站點連結左營高鐵終點站，故承受較高旅客量之趨勢。由表 1 結果可得出旅運人次、連結數與其地理位置有著密切關係。當旅運人次較高時，脆弱度的高低則直接取決於連結數之多寡，倘若連結數少而無法有效消化人潮時，在危害發生時將因無法負荷而導致脆弱度被放大；而車站位置會間接影響旅運人次，尤以市區和郊區的差距最為明顯，因此精華地區之捷運車站通常處於高脆弱度特性。

表 1. 各站節點脆弱度之數值

節點名稱	全年進站旅遊人次	連結數	標準化
美麗島	1,123,547	4	0.186
左營	2,444,057	2	1
高雄車站	1,718,725	2	0.728
巨蛋	1,672,053	2	0.645
三多商圈	1,226,013	2	0.497
世運	263,148	2	0.079
中央公園	1,103,432	2	0.411
橋頭糖廠	114,964	2	0
哈瑪星	527,868	1	0.393
小港	889,824	1	0.7
大寮	401,556	1	0.286

4.2 救災韌性評估指標

本研究以各捷運車站作為劃分的依據，路線包含高雄車站紅線以及黃線沿線車站周圍的警察局、消防局以及醫院。利用距離來做劃分等級(如表2所示)，接著依照劃分出的等級做0到1的歸類，其中數值越接近1代表站點脆弱度越高。此研究以0.4、0.6、1.0數值為界定基準，0.4以下之數值為低脆弱度；0.6為中脆弱度(標準值)；1.0以上之數值為高脆弱度。依表3分析顯示，警察局的評估指標中，高雄市區內大部分的捷運站脆弱度都可以控制在0.4以內，除了少數車站會大於0.4，例如巨蛋雖然是在市中心，但車站鄰近警察局距離偏遠，因此等級會被畫分在0.6這個等級。由於郊區的部分，推測因人口密度較低之因素，警察局的分佈沒有市區那麼密集，因此大部分會落在0.6級距。其中，僅有岡山高醫車站有到0.8，剩餘的車站還是可以在意外事件發生時快速反應。而消防局評估指標中，整體的路網只有11個車站數值有在0.4以內，其餘27個車站數值在0.6以上。此數值顯示出大部分站點附近消防局的分布沒有警察局那麼密集，未來有可能因意外發生時導致救災時間被拉長，需增強捷運站體內自救的能力。而醫院評估指標主要依據是以有無急診作為標準，而急診醫院的分布並無如同警察局以及消防局那麼多，因此級距與警消相比明顯較大，其中有11座車站劃分指數都達到0.8以上。可知大多車站鄰近並無急診醫療單位。如遇緊急情況需要送醫時需要花費較多時間才能到達醫院。由以上可得知由於救災機構在城市的設立較廣，因此接近市區的站點比起郊區的站點通常脆弱度會較低。而在警察局、消防局以及醫院三個部分數值的差異可看出警察局因為分佈較密集，因此救災的靈活性比其他兩者較高，能夠在站點發生意外時快速調度反應。

表 2. 救災韌性評估指標之等級劃分

距離(公里)	標準化等級
0-0.5	0.2
0.5-1	0.4
1-2	0.6
2-3	0.8
>3	1

表 3. 各站節點脆弱度之數值

車站	警局	消防局	醫院
美麗島	0.2	0.4	0.4
左營	0.2	0.6	0.8
高雄車站	0.2	0.6	0.6
巨蛋	0.6	0.8	0.8
三多商圈	0.2	0.8	0.6
世運	0.8	0.6	0.8
中央公園	0.2	0.6	0.4
橋頭糖廠	0.4	0.8	1
哈瑪星	0.2	0.2	1
小港	0.4	0.6	0.6
大寮	0.6	0.6	0.4
岡山高醫	0.8	0.8	0.2

4.3 介中性指標

針對高雄捷運之紅、橘兩線路網進行介中性分析，旨在評估各站點在系統連通性中的結構重要性。於此研究發現，美麗島站(R10/O5)的介中性數值最高(約 0.703)，呈現顯著的「單一核心樞紐」特徵。由於該站為紅橘兩線唯一轉乘點，所有跨線最短路徑皆須經此做轉運，使其成為路網中最為需要的中繼站。而在結果顯示，車站重要性由中心向末端呈放射狀遞減(依圖 2 所示)。緊鄰核心的高雄車站(R11)與中央公園(R9)因承載大量南北向通過性路徑，數值緊隨其後；而位於路網端點的岡山車站、小港、哈瑪星及大寮站，因不具備路徑中介功能，故介中性皆為零。此研究證實了十字型路網結構太過依賴單一中心。倘若美麗島站出狀況，整體捷運系統便會瞬間癱瘓。這也是後續為何要蓋環狀輕軌，就是為了多製造幾個轉乘站點來分散壓力，使捷運路網變得更有彈性、同時減輕站點負擔。

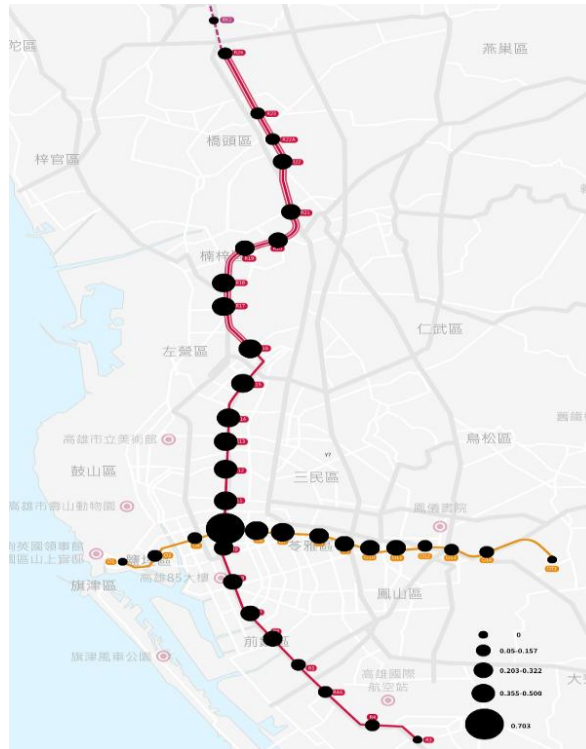


圖 2. 介中性數值之分佈圖

4.4 通勤流量中心性

通勤流量中心性之資料來源為高雄捷運於 2025 年 1 月 1 日至 1 月 31 日期間，因一整年的月份相比差異不大，本研究取一月數據作為分析。分析結果顯示如圖 3 所示，圖 3 x 軸為時段標記，每三小時為一時段；y 軸為通勤流量的級距，2000 人次為一個級距；z 軸為平均車站數量。以單位通勤流量中心性計算結果來看，0 時至 6 時因無營運班次，人流量處於全日最低水平。自 6 時起至 8 時，隨著通勤需求增加，人流量顯著上升，形成早晨通勤高峰。隨後於 8 時至 9 時之間，人流量略為下降，惟自 9 時起再度呈現穩定成長趨勢，並延續至 13 時之午間時段。13 時後，人流量逐步下降，至 16 時達相對低點。其後，自 16 時至 18 時因應下班通勤需求，人流量再度攀升並達全日最高峰。18 時過後，人流量逐漸遞減至 22 時。值得注意的是，22 時之後因末班車發車時段影響，人流量出現小幅回升，並持續至 24 時。上述所示，高雄捷運的運量變化主要受通勤需求驅動，即 6 時至 8 時、16 時至 18 時為主要高峰，在非通勤時段德人流變化則相對平緩，整體呈現規律且具預測性的時間分布特徵。在站點的部分則顯示高雄車站和美麗島的數值為最高，鑑於此兩站為重要之交通轉運點，故人流量和路線都非常的重要。而特別於假日時，左營站因跟高鐵為轉運站關係，所以數據相比於鄰近的站點會呈現較高之數值。假如以上站點發生失能之情形，便會造成交通路網的癱瘓，因此必須建立更完善的尖峰時段接駁與應變機制，方能降低單一節點失效造成的全網衝擊。

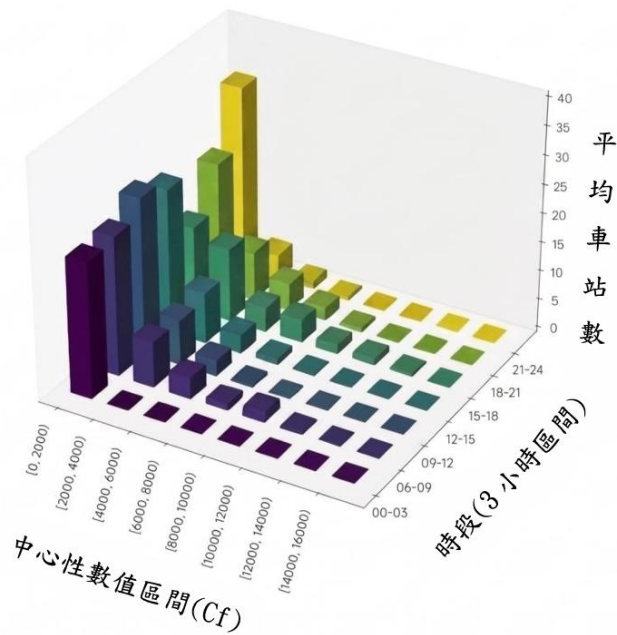


圖 3. 通勤流量中心性 3D 圖

4.5 綜合評比

本研究將上述指標各別作標準化後作加總，藉此量化指標評估高雄捷運站點的脆弱度，如表 4 所示。結果明確顯示「高交通流量」與「高防災脆弱度」之間呈現顯著的正相關。巨蛋與左營等關鍵樞紐節點，其脆弱度數值位居首位，反映出這些站點在承載龐大運量的同時，周邊緊急救護的支援配置存在顯著缺口，相較之下，大東站展現出較佳的風險抵禦能力。整體而言，高雄捷運系統應優先針對高脆弱度節點進行「空間性資源補強」與「應急配套優化」，以縮短災害發生時的救援反應時間，進而提升系統整體的網絡韌性與結構安全性。

表4. 綜合評比

車站	節點脆弱度	救災韌性			介中性	通勤流量中心性	加總
		警局	消防局	醫院			
巨蛋	0.65	0.6	0.8	0.8	0.46	0.74	4.05
左營	1.00	0.2	0.6	0.8	0.41	0.60	3.61
高雄車站	0.73	0.2	0.6	0.6	0.5	0.82	3.45
美麗島	0.19	0.2	0.4	0.4	0.7	1	2.89
大東	0.05	0.4	0.2	0.2	0.11	0.04	0.99

五、結論與建議

本研究以四個脆弱度指標針對高雄捷運路網進行脆弱度分析，指出捷運系統存在顯著的「單一核心樞紐」危機。研究發現，美麗島站雖然連結數多有利於分散人群，但其結構介中性極高，一旦失效將導致十字型路網全面癱瘓。數據顯示，相較於高雄車站，巨蛋站因救災韌性分數評相對較高，因而拉高整體的脆弱度評比；而左營站因承載高鐵轉乘龐大人潮且救災資源支援存在缺口，成為全路網中脆弱度次高的節點；路網末端車站如小港站，則受限於連結數單一且救災韌性較高，導致風險被放大。在救災韌性方面，雖然警察局分布密集具備初步管制能力，但消防與醫療資源在空間分布上較為分散，多數車站面臨救援時間可能拉長的隱憂。總結而言，高雄捷運應針對左營、巨蛋等高脆弱度節點進行空間資源補強，並透過環狀路網（如輕軌）增加轉乘節點，以分散流量衝擊並提升系統整體的網絡韌性。

因目前通勤流量中心性主要描述在單一時間的脆弱度。未來可將此指標與節點脆弱度進行交叉比對，分析各站在不同時段之脆弱性。若其失能影響人數遠高於其他站點，可定義該站是否為特定時段的最脆弱站點。未來針對「隨機攻擊事件」，可加入「科技防衛」的概念，結合 AI 影像辨識人潮異常擁擠或異常行為，在脆弱度高的節點（如左營、高雄車站）先行預警，以彌補警消抵達前救災的空窗期。同時，因跨系統轉乘量已反映於進出站人次，本研究暫未納入其他大眾運輸轉乘系統人流因素。後續如若納入台鐵與輕軌或其他大眾運輸工具時，可揭露轉乘人流對捷運站體脆弱度衝擊，以訂定更完善分析指標。

參考文獻

- 張瓊文，蕭為元，張益城，謝奇良，李家齊(2016)，鐵公路系統氣候變遷脆弱度及風險地圖之研究，45(4)，頁 251-276。
- 黃傳楷，王聖鐸(2017)，臺北捷運路網結構之脆弱度分析，(66)，頁 1-16。
- 謝承憲，馮正民，賴怡心(2015)，臺灣西部城際旅客運輸路網脆弱度之評估模式，42(4)，頁 367-388
- Berdica, K. (2002). An Introduction to Road Vulnerability: What Has Been Done, Is Done and Should Be Done. *Transport Policy*, 9(2), 117-127.
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., and Wisner, B., 2014. *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*. Taylor & Francis.
- Cheng, Y.-Y., Lee, R.K.-W., Lim, E.-P., and Zhu, F., 2015. Measuring Centralities for Transportation Networks Beyond Structures, in: Kazienko, P., Chawla, N. (Eds.), *Applications of Social Media and Social Network Analysis*. Springer International Publishing, Cham, pp. 23-39.
- Cutter, S.L. (1996). Vulnerability to Environmental Hazards. 20(4), 529-539.
- Latora, V., and Marchiori, M. (2001). Efficient Behavior of Small-World Networks. *Physical Review Letters*, 87(19), 198701.

- Latora, V., and Marchiori, M. (2005). Vulnerability and Protection of Infrastructure Networks. *Physical Review E*, 71(1), 015103.
- Mattsson, L.-G., and Jenelius, E. (2015). Vulnerability and Resilience of Transport Systems – a Discussion of Recent Research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 81, 16-34.
- Newman, M.E.J., and Girvan, M. (2004). Finding and Evaluating Community Structure in Networks. *Physical Review E*, 69(2), 026113.
- Nicholson, A.J., and Du, Z.P.(1994). Improving Transportation System Reliability: A Framework. Australian Road Research Board Ltd ARRB, Vermont South, Victoria, Australia.
- Pijawka, K.D., Foote, S., and Soesilo, A. (1985). Risk Assessment of Transporting Hazardous Material: Route Analysis and Hazard Management. *Transportation Research Record*(1020), 1-6.
- Rodríguez-Núñez, E., and García-Palomares, J.C. (2014). Measuring the Vulnerability of Public Transport Networks. *Journal of Transport Geography*, 35, 50-63.
- Wisner, B., Gaillard, J.C., and Kelman, I., 2012. Framing Disaster: Theories and Stories Seeking to Understand Hazards, Vulnerability and Risk, in: Wisner, B., Gaillard, J.C., Kelman, I. (Eds.), *The Routledge Handbook of Hazards and Disaster Risk Reduction*. Routledge, London, pp. 18-34.